台灣各港區土壤動態特性與改良研究

執行單位　　：大地工程組
群計畫召集人　：李延恭 研究員兼組長
第一子計畫主持人：李豐博　研究員
第二子計畫主持人：賴聖耀　副研究員
第三子計畫主持人：陳圭璋　副研究員
第四子計畫主持人：謝明志　副研究員

Research on the Dynamic Properties of Soil and Ground Improvement Methods for The Coastal Regions of Taiwan

Geotechnical Engineering Division
Institute of Harbor & Marine Technology
Wuchi, Taichung District, Taiwan

摘　要

台灣位於環太平洋地震帶上，每年大小地震頻繁，因此工程設計時必須考慮地震因素，並設法克服其所造成的威脅。地震引起的災害損失程度往往隨著社會、經濟的成長而擴大加劇，社會愈進步，可能造成之生命財產損失也愈大。

近年來政府正積極推動六年國建計劃，各項重大工程陸續展開，沿海地區積極開發利用，於各項工程進行規劃、設計之際，針對地震所造成的危害程度之考量、評估，應為不可輕忽的重要環節，而在地震災害中，地層因地震所引起之土壤液化現象，亦可能造成相當嚴重的災害損失，如房屋、港灣結構設施、地下管線等發生沉陷，側傾與破壞等便是極明顯的例子。

台灣西部沿海地區之地層，多屬疏鬆之砂性土壤，為近期沖積形成或人工回填而成，其所具有之液化潛能頗高。因此，地震時各區土壤液化潛能之分析、評估，以及必要時，所宜採行之防治措施，應為重大工程設計工作必須考慮的重要因素。

本研究計畫預計二年完成，本（85）年度為期末報告，本計畫共分成四個子計畫進行，分別是：

(一)第一子計畫"海岸土層液化特性與改良方法研究"

本子研究計畫由李豐博研究員負責，進行一系列之室內動力試驗與現地土壤試驗，探討台灣西海岸砂土層之液化特性，建立室內試驗與現地試驗結果之相關性，並選擇適當地點埋設孔隙水壓計，進行現地孔隙水壓地震反應之量測分析，建立預測模式，以供液化分析，同時對砂土層液化改良方法亦進行探討。

(二)第二子計畫"台灣各港區地震引致土層之沉陷研究"

本子研究計畫由賴聖耀副研究員負責，主要以現地標準貫入試驗N值初步評估台中港區之沉陷特性，建立台中港區不同地震規模引致區域性之沉陷圖，期能對台中港區港灣工程提供規劃設計之參考，於後續計劃中再對台灣其他港區之沉陷特性進行研究。

(三)第三子計畫"液化潛能區調查"

本子研究計畫由陳圭璋副研究員負責，利用現地震測錐試驗，研判土層之液化潛能，將台灣西海岸重要港區或具經濟開發潛能地區其基礎土層具有高液化潛能之分佈資料建檔，做為重大工程投資規劃之參考。

(四)第四子計畫"台灣各港區土層分佈資料微電腦建檔及土壤動態性質分析研究"

本子研究計畫由謝明志副研究員負責，本研究廣泛的搜集台灣各港區土壤鑽探資料及相關試驗報告，利用 MapInfo 公司所開發的地理資訊系統 MapInfo 3.05 版及 MapBasic 使用者發展語言環境加以儲存建檔，並可展繪土層剖面，另外本研究也針對台灣西部海岸地區土壤動態性質加以整理分析，分別求出台灣西部代表性地區土壤動態性質，研究結果可供初步工程規劃之參考。

Research on the Dynamic Properties of Soil and Ground Improvement Methods for The Coastal Regions of Taiwan

Abstract

Since Taiwan is located on the Pacific ocean seismic zone, many earthquakes occur in this area each year. It is therefore very important for engineers to design and build structures more resistant to earthquakes and associated phenomena.

In recently years, Taiwan has conducted many civil constructions, and many coastal regions are under development. As we know some earthquakes have occurred around the world which have caused severe damages to buildings and facilities.Liquefaction is one of major problem caused by an earthquake.Liquefaction induced by earthquake ground motion in sandy or silty deposits may cause settlement, tilt, and or collapse of harbor structures and other utilities. Therefore an evaluation of structures damage from earthquake is needed during design in civil construction.

The soil stratum in the west coastal area of Taiwan is formated by recently deposited soil or by losely filled hydraulic materials, so that the liquefaction potential is very high. As a result, the evaluation of the liquefaction potential and the development of the anti-liquefaction methods for a saturated sand deposit under earthquake loading must be considered for planning and design of foundation systems for harbor structures.

This research is divided into four main aspects, all limited to the West Coastal region of Taiwan;

(1)Research on the liquefaction potential and anti-liquefaction methods.

(2)Earthquake induce settlement for the harbours of Taiwan.

(3)The investigation of the high liquefaction potential zones.

(4)Establish the strata databuse and analyze the soil dynamic properties for the harbours of Taiwan.

台灣各港區砂土層液化特性與改良方法研究

執行單位：大地工程組
計畫主持人：李豐博　研究員
協同主持人：賴聖耀　副研究員
參與人員：蘇吉立　助理
陳志芳　助理
陳義松　技術員
張阿平　技術員
李春榮　技術員

摘　要

台灣西海岸各港區之地質多屬沖積砂土層，新開發之海埔新生地亦多爲細砂與沉泥質細砂所組成，土層之地質年代短，密度不高，在强烈地震作用下，極有發生液化而造成海岸與港灣設施、房屋、地下管線等發生沉陷、傾側與破壞等災害之虞，因此對於沖積砂土層與海埔新生地液化特性之研究與評估，甚爲重要，藉以研擬地質改良方法，確保沿岸土地與海埔新生地之開發與工程安全。

在地震作用下砂土之孔隙水壓反應是評估液化特性重要資料，利用試驗室動力試驗結果，雖可建立分析模式以推估孔隙水壓之變化，惟極需實地之量測資料以資佐證。

本研究計畫進行一系列之室內動力試驗與現地試驗（包括SCPT法），探討台灣西海岸各港區砂土層之液化特性，建立室內試驗與現地試驗結果之相關性。並選擇適當地點埋設孔隙水壓計，進行現地孔隙水壓地震反應之量測分析，建立預測模式，以供液化分析。另配合砂土層之液化特性，研提適當之地質改良方法，作爲擬訂砂土液化問題防治對策之依據。

ABSTRACT

A series of laboratory dynamic tests and in-situ tests including CPT and SCPT are conducted in this study to evaluate the liquefaction characteristics of sandy soils in western coastal area of Taiwan. Correlations are established for the evaluation of liquefaction potential of soils based on the CPT and SCPT data. A set of piezometers have been embedded in sand deposits at Taichung Harbor area to monitor in-situ pore water pressures during earthquake which will be compared with the laboratory dynamic test data. Methods of improvement of potentially liquefiable sand deposits are summarized and analysed.

台灣各港區砂土層液化特性與改良方法研究

目　　錄

中文摘要 …… I
英文摘要 …… II
目錄 …… III
表目錄 …… IV
圖目錄 …… V
壹、前言 …… 1
貳、相關文獻研討 …… 2
　一、土壤液化與評估方法 …… 2
　二、現地動態孔隙水壓之前人研究 …… 5
參、動態孔隙水壓量測 …… 16
　一、概說 …… 16
　二、量測站之地質狀況 …… 16
　三、水壓計與地震計之配置及安裝 …… 19
　四、孔隙水壓自動量測系統 …… 24
　五、孔隙水壓之量測 …… 27
肆、液化特性評估 …… 32
　一、液化特性試驗 …… 32
　二、試驗結果與分析 …… 37
　三、液化強度與CPT－q_c值之相關性 …… 52
　四、討論 …… 54
伍、地質改良 …… 58
　一、概說 …… 58
　二、地質改良方法 …… 58
　三、改良方法之評估與選擇 …… 63
陸、結論與建議 …… 65
參考文獻 …… 66

表目錄

表2-1 土壤液化特性評估方法摘要 ····· 4
表3-1 量測站地震及孔隙水壓紀錄摘要 ····· 27
表4-1 動力三軸試驗結果表 ····· 39～43
表4-2 各港區砂土之液化强度 ····· 45
表4-3 不同地震規模之作用次數及規模修正係數(Seed, et al., 1975) ····· 49
表4-4 各港區砂土之地震規模修正係數資料 ····· 50
表5-1 防治液化之地質改良方法及相關特性比較 ····· 59

圖目錄

圖2-1 反復荷重作用下之孔隙水壓上升機制 …… 3
圖2-2 1980年9月25日地震於Owi島所量測之加速度及水壓歷時 …… 6
圖2-3 1985年10月4日地震於Owi島所量測之加速度及水壓歷時 …… 7
圖2-4 1987年10月17日地震於Sunamachi測站所量測之加速度及水壓歷時 …… 8
圖2-5 1987年11月24日地震於帝王谷測站所量測之孔隙水壓 …… 9
圖2-6 羅東模型基地1986年7月31日地震FA2-2測站之加速度及速度歷時曲線 …… 11
圖2-7 羅東模型基地1986年7月31日地震PN3-1水壓計之水壓變化 …… 12
圖2-8 羅東模型基地1986年11月15日地震FA2-2測站之加速度及速度歷時曲線 …… 13
圖2-9 羅東模型基地1986年11月15日地震PN3-1水壓計之水壓變化 …… 14
圖2-10 羅東模型基地1986年7月地震FA2-2測站地震速度及PN3-1孔隙水壓歷時曲線在-1至4秒間之比較 …… 15
圖2-11 羅東模型基地1986年11月地震FA2-2測站地震速度及PN3-1孔隙水壓歷時曲線在4至14秒間之比較 …… 15
圖3-1 量測站位置示意圖 …… 17
圖3-2 量測站之土層狀況 …… 18
圖3-3 量測站水壓計與地震計埋設配置圖 …… 20
圖3-4 地震計埋設安裝圖 …… 22
圖3-5 水壓計裝設圖 …… 23
圖3-6 孔隙水壓自動監測系統示意圖 …… 25
圖3-7 孔隙水壓計內部構造圖 …… 26
圖3-8 量測站1995年2月23日地震之加速度歷時 …… 28
圖3-9 量測站1995年6月25日地震之加速度歷時 …… 29
圖3-10 量測站1995年2月23日量測之孔隙水壓 …… 30
圖3-11 量測站1995年6月25日量測之孔隙水壓 …… 31
圖4-1 地震作用下之理想化現地應力狀況 …… 34

圖4-2 動力三軸試驗之實際操作應力狀況 ····· 34
圖4-3 自動三軸試驗系統示意圖 ····· 35
圖4-4 代表性動力三軸試驗軸向應變、孔隙水壓與有效圍壓變化 ····· 38
圖4-5 代表性液化特性曲線 ····· 44
圖4-6 台中港區砂土液化曲線 ····· 46
圖4-7 高雄港區砂土液化曲線 ····· 47
圖4-8 安平港區砂土液化曲線 ····· 48
圖4-9 Seed建議之代表性正規化液化曲線 ····· 51
圖4-10 各港區規模修正係數與地震規模之關係 ····· 51
圖4-11 液化所需剪應力與修正錐頭阻抗之關係 ····· 53
圖4-12 各港區砂土液化強度$(SR)_{M=7.5}$與CPT－q_{c1}值之關係 ····· 55
圖4-13 修正係數C_N ····· 56
圖5-1 壓實砂樁改良示意圖 ····· 61
圖5-2 振動揚實法 ····· 61
圖5-3 深層攪拌法 ····· 64

壹、前言

近年來由於台灣經濟建設蓬勃發展，沿海地區積極開發利用，有如港灣之擴建與新建、臨海工業區之開發、以及其他重大工程設施之規劃與興建等，積極展開進行。

台灣西海岸各港區之地質多屬沖積砂土層，新開發之海埔新生地亦多爲砂性土壤所構成，土層之地質年代短，密度不高；而台灣恰處於世界最大且最活躍之太平洋地震帶西環，每年大小地震相當頻繁。在强烈地震作用下，沖積砂土層與海埔新生地極有可能發生液化現象，造成海岸與港灣設施、房屋、地下管線等發生沉陷、傾側與破壞等災害之虞。

最近（1995年1月）同處太平洋地震帶西環之日本發生阪神大地震，造成神戶港之碼頭、岸壁等港灣設施嚴重毀損，港灣機能全面癱瘓，即是港區新生地發生液化所造成之災害。因此進行沿岸土地與海埔新生地之開發建設，顧及工程安全，對於土層液化特性之研究與評估，甚爲重要。

土層之液化特性可進行室內動力試驗與現地試驗研究之。室內試驗可利用動力三軸試驗或動力單剪試驗來模擬地震力作用下之土壤液化現象。現地試驗方面，除利用SPT-N值外，亦可利用CPT-q_c值評估土層液化特性，近年來Robertson(1986)另發展震測圓錐試驗(SCPT)，結合CPT並作震測試驗，以剪力波速作爲評估土壤液化特性之指標。後兩者皆爲新穎可行之方法，國內有待積極研究與發展。

因此本研究計畫進行一系列室內動力三軸試驗與現地CPT試驗（包括SCPT），探討台灣西海岸各港區砂土層之液化特性，並建立室內試驗與現地試驗結果之相關性，提供液化評估之依據。

土壤在地震作用下之孔隙水壓反應是評估液化特性重要資料，利用試驗室動力試驗結果，雖可建立分析模式以推估孔隙水壓之變化，惟極需實地之量測資料以資佐證。因此本研究計畫並選擇適當地點埋設孔隙水壓計，進行現地孔隙水壓地震反應之量測與分析。

本研究計畫並配合砂土層之液化特性，研提適當之地質改良方法，提供擬訂砂土液化問題防治對策之依據。

貳、相關文獻研討

一、土壤液化與評估方法

(一)液化現象

自1964年日本新潟地震以及同年美國阿拉斯加地震之後，吾人對於地震所引致之土壤液化現象、液化災害以及液化潛能之分析與評估方法等，有了相當之認識與了解。及至今日，液化問題仍是工程界與學術界相當關切與持續研究之課題。

飽和砂性土壤在地震等反復荷重作用下，土壤顆粒有緊密化之傾向，由於孔隙水不能及時排出，導致超額孔隙水壓逐漸上升，土壤有效應力相對地逐漸減低，孔隙水壓上升機制如圖2-1所示。當超額孔隙水壓之上升累積至與土壤之垂直壓力相等時，土壤之有效應力爲零，即稱土壤達到初始液化狀態(Initial liquefaction)，開始產生較大明顯之應變。在後續之反復荷重作用下，隨著土壤密度狀態不同，可能產生兩種不同之變形反應。對於密度低之疏鬆砂土，其後續之變形量快速增大，僅具有微弱甚或不具有應變抵抗，這種現象即爲液化(Liquefaction)；對於中等密度以上（孔隙比在臨界狀態下）之砂土，其在後續反復荷重作用下之膨脹特性(Dilatancy)，使其變形量僅作有限之增大，是爲反復流動現象(Cyclic Mobility)。土層發生液化現象或反復流動現象皆可能引致不同程度之沉陷、側向位移或砂潰等現象，使其上承之構造物、建築設施、基礎、地下管線等發生不同之沉陷或上浮、傾側甚至毀損等災害。廣義之土壤液化現象即包含上述兩種現象。

(二)液化特性評估方法

土層在地震時主要受到向上傳播之剪力波應力作用，因此土層在地震荷重作用下之反復特性可以反復應力比(Cyclic stress ratio)，$\tau / \overline{\sigma}_o$，表示之，其中$\tau$＝地震荷重在土層內所引致之反復剪應力，$\overline{\sigma}_o$＝該土層之初始有效垂直應力。上項參數包含了土層之深度、地下水位深度以及地震强度等因素之考慮。地震荷重在土層內所引致之剪應力可依據Seed & Idriss(1971)所提議

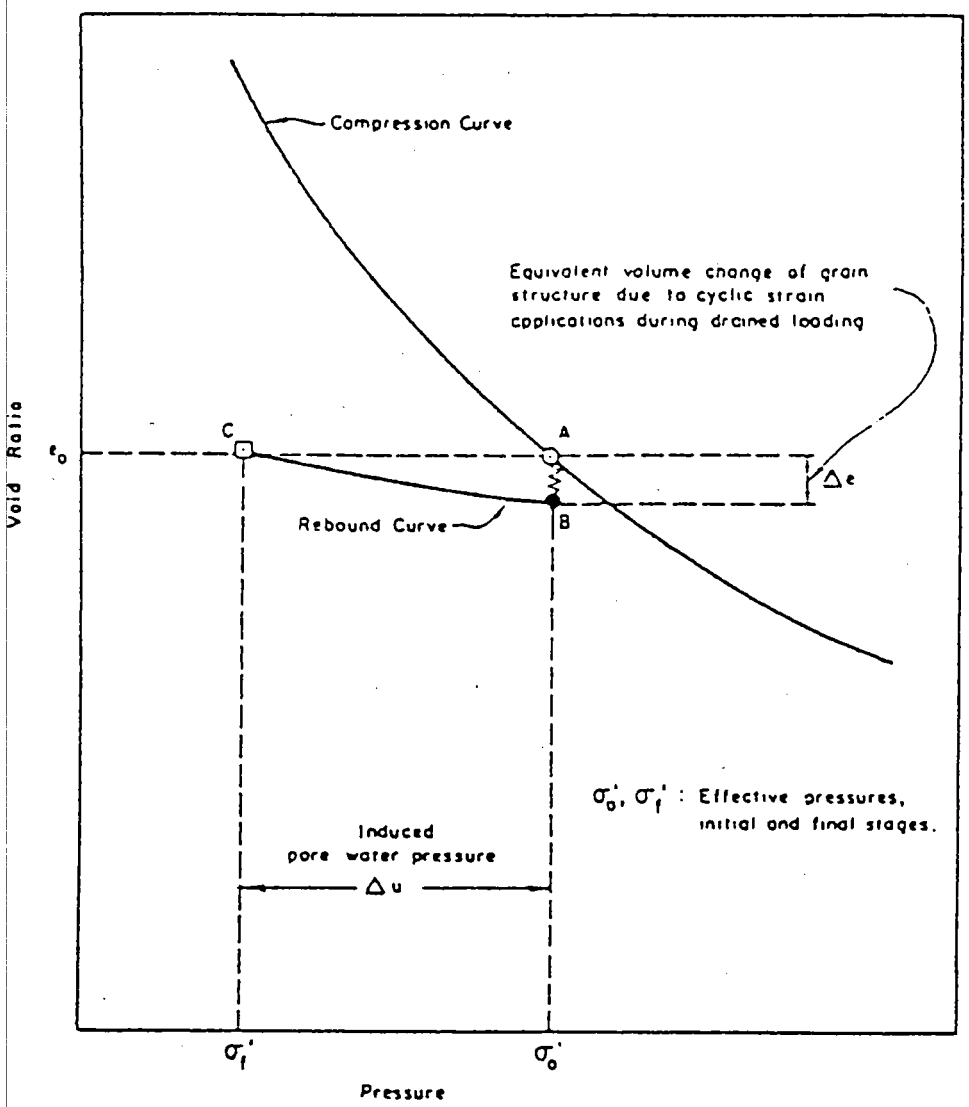


圖2-1　反復荷重作用下之孔隙水壓上升機制

之簡易法計算，或嚴謹地進行土層反應分析，利用單向度相當線性動力反應程式如SHAKE II，或非線性動力反應分析程式計算。

將地震在土層內所引致之平均剪應力比，$\tau_h / \overline{\sigma}_o$，與引致土層液化所需之平均剪應力比，$\tau_l / \overline{\sigma}_o$比較之，可據以評估土層之液化潛能。一般評估液化潛能方法多考慮土層受地震荷重期間不及排水情況，忽略孔隙水壓消散之影響。

土層液化所需之剪應力比，即土層液化特性之評估方法可歸爲兩類：(1)根據試驗室之試驗結果評估，及(2)利用現地試驗結果評估。表2-1摘列土層液化特性之評估方法及其優劣比較。

本計畫擬分別進行試驗室試驗與現地試驗探討砂土層之液化特性，其中試驗室試驗爲動力三軸試驗，現地試驗爲荷式錐貫入試驗(CPTU)及震測圓錐試驗(SCPT)，同時建立各項試驗結果之相關性，提供砂土液化潛能分析之依據。

表2-1　土壤液化特性評估方法摘要

評估方法	優　點	缺　點
1. 試驗室試驗		
動力三軸試驗	不擾動土樣可受模擬之設計地震荷重作用	土樣擾動影響不易評估
動力單剪試驗		
動力扭剪試驗		
2. 現地試驗		
標準貫入試驗(SPT)	大量之歷史資料	設備不一，試驗能量變化大
圓錐貫入試驗(CPT)	設備與試驗標準化、連續、快速	歷史資料不多，土樣取得不易
剪力波速測定	可用於其他方法不易施行者	缺乏歷史資料，不能取得土樣
自鑽式側壓試驗(SBPT)	不擾動土壤之現地試驗	缺乏歷史資料，試驗資料不易闡釋
平鈑膨脹儀試驗(DMT)	試驗標準化、近乎連續性、經濟	缺乏歷史資料
導電度測定	不擾動土壤之現地試驗	缺乏歷史資料

二、現地動態孔隙水壓之前人研究

基於土壤力學有效應力原理，土壤中之孔隙水壓變化爲研究土層在地震作用下之動態反應與液化行爲相當重要之資料，因此，孔隙水壓之動態反應爲近代土壤動力學中重要之研究領域。目前在試驗室試驗方面已有很多的試驗資料與研究成果發表；相對地，在實際地震作用下現地孔隙水壓之變化情形則甚少量測資料可供參考。此乃由於地震反應試驗站之設置不多，除了昂貴之經費與良好之技術外，還需要有地震活動頻繁、液化潛能高之地區加以配合。茲簡述現有之現地量測與分析資料如下：

(1)日本東京灣之現地孔隙水壓資料(Ishihara et al., 1981, 1987,1989)

在東京市政府的資助下，Ishihara於1977年開始在東京灣Owi No.1人造島上進行現地孔隙水壓量測計畫，直到1980年9月25日發生之Mid-Chiba地震與1985年10月4日發生之Chiba-Ibaragi地震，各量測到二組地震時之孔隙水壓變化資料，分別如圖2-2及2-3所示。另外，1986年Ishihara又在東京灣之Sunamachi裝設量測儀器，於1987年12月17日發生之Chiba-Toho-Oki地震時量測到四組孔隙水壓變化資料，如圖2-4所示。

(2)美國加州帝王谷之現地孔隙水壓資料(Holzer et al., 1988)

1984年美國在加州帝王谷(Imperial valley)進行現地孔隙水壓量測計畫，在試驗區內設有表面與沉埋式地震儀各一部以及水壓計六支，其中五支水壓計埋置於深度2.9m至6.2m的沉泥質砂土層，另外一支則埋置於深度12m之1m厚緊密沉泥層，地下水位約在地表下1.8m。本試驗區於1987年11月24日Superstition Hills 地震(M＝6.6)時，量測到世界上第一組土壤液化過程之現地孔隙水壓變化資料，如圖2-5所示。地震時之地表及深度7 m之最大水平加速度分別爲0.21g及0.16g。地震過後，試驗區到處都有砂湧與地裂的現象。

(3)台灣東部羅東地區之現地孔隙水壓資料（陳正興，1989）

配合羅東核電廠模型地震試驗計畫，1986年台灣大學與美國加州大學戴維斯分校合作進行現地孔隙水壓量測計畫，總共在模型基地內埋置27支水壓

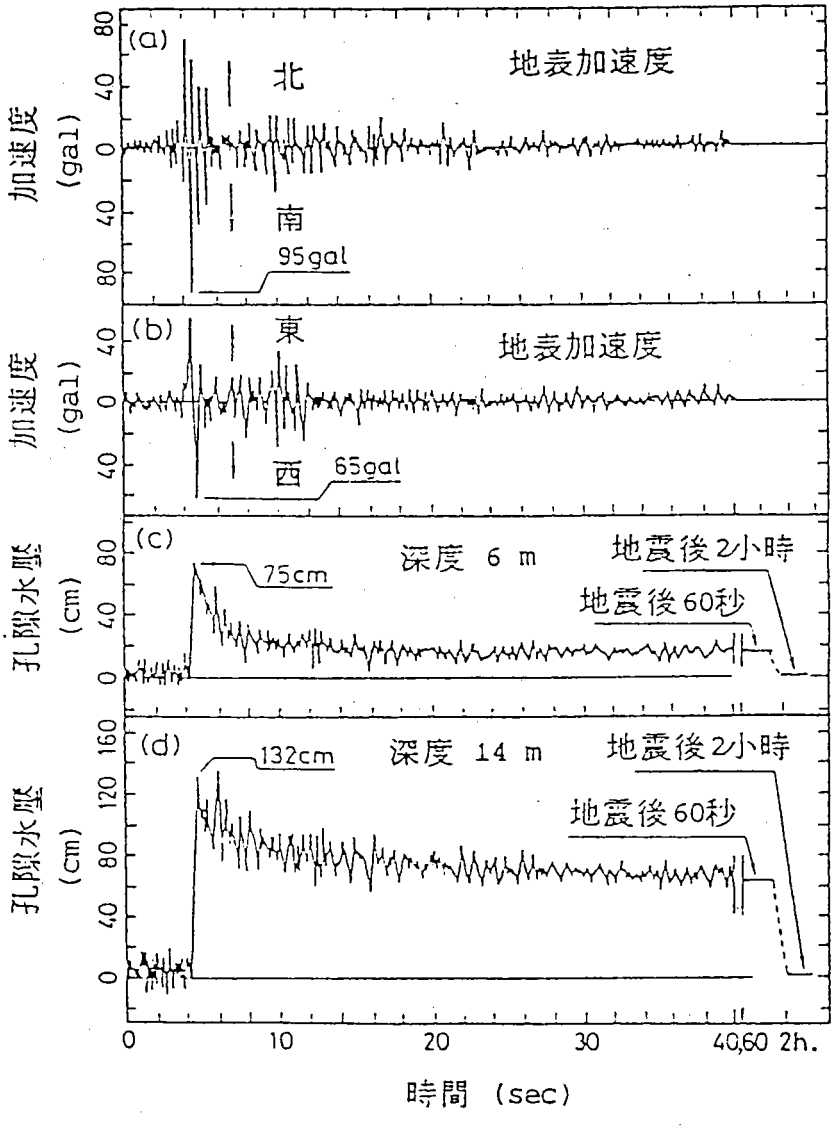


圖2-2　1980年9月25日地震於Owi島所量測之加速度及水壓歷時 (Ishihara et al.,1981)

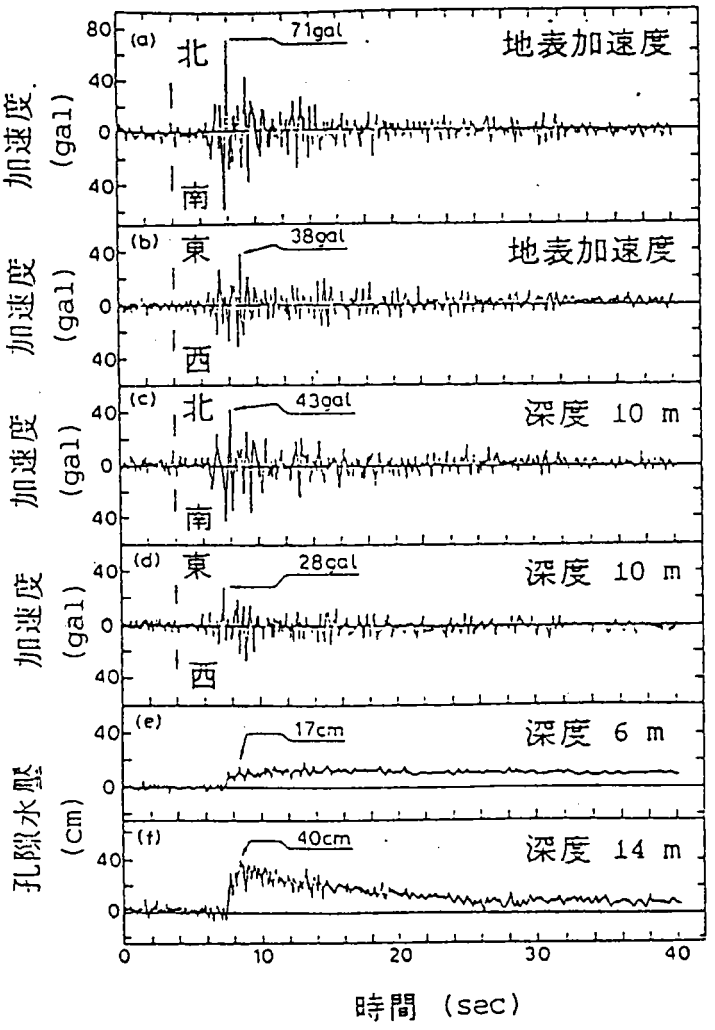


圖2-3 1985年10月4日地震於Owi島所量測之加速度及水壓歷時 (Ishihara et al.,1987)

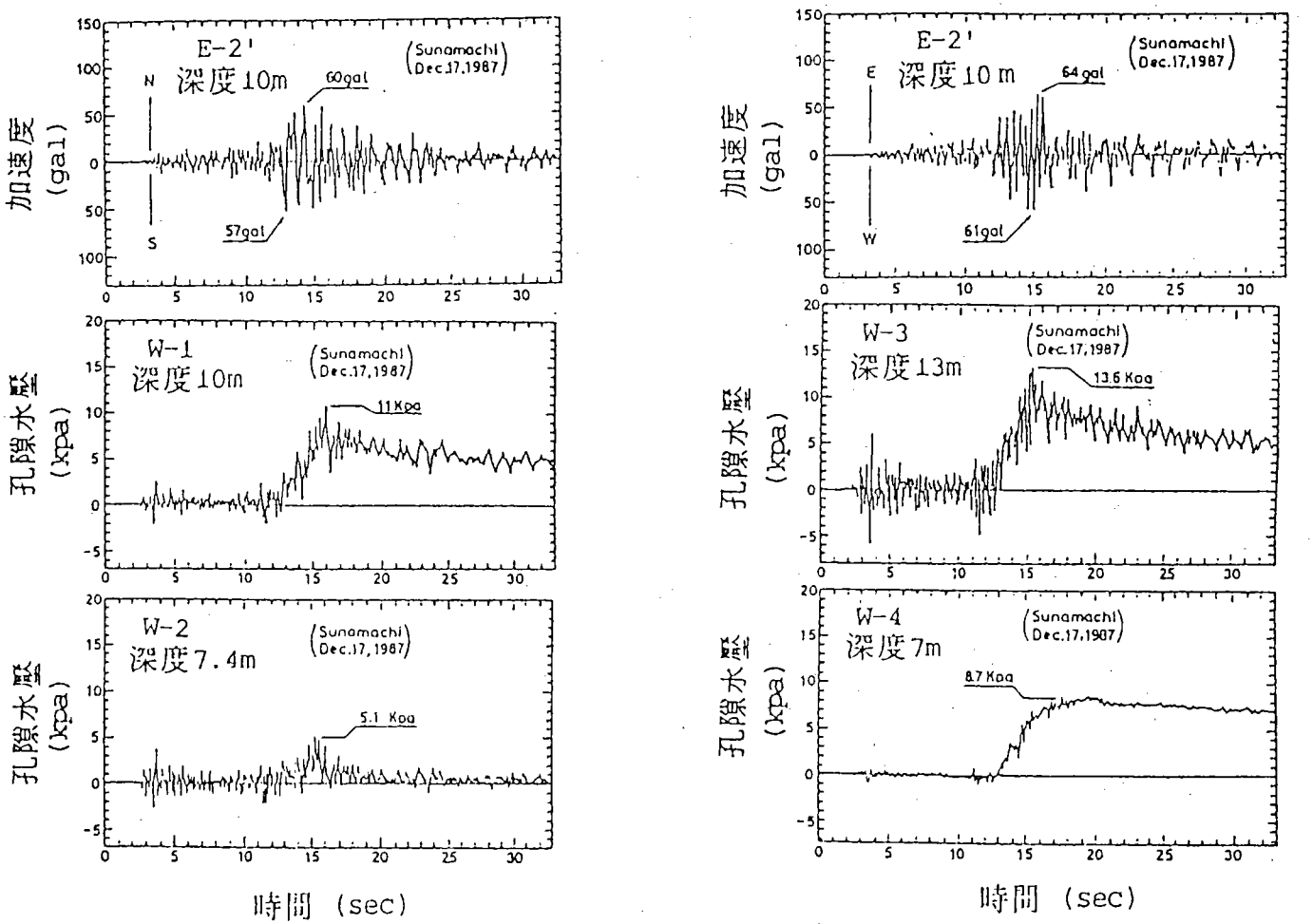
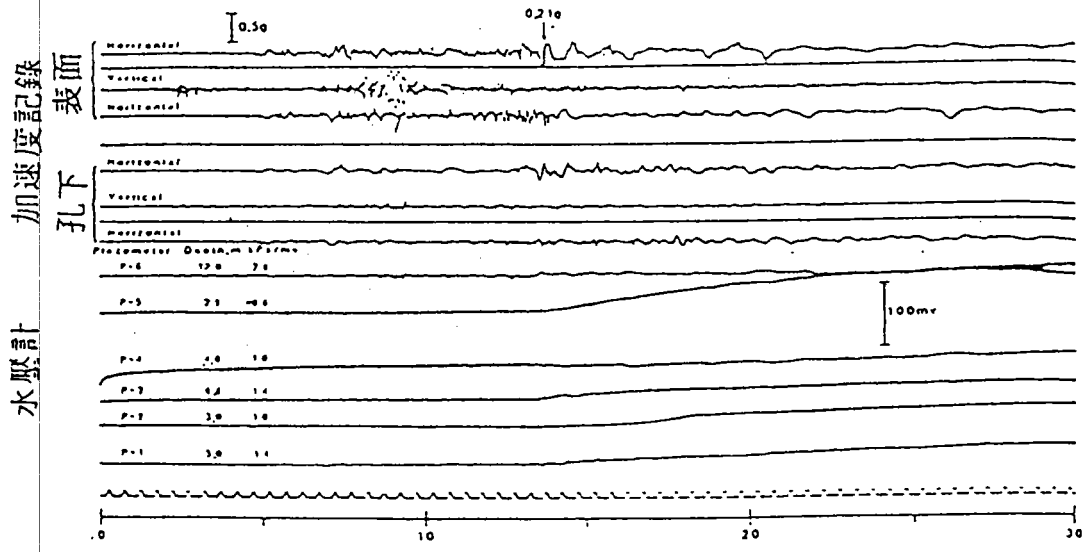
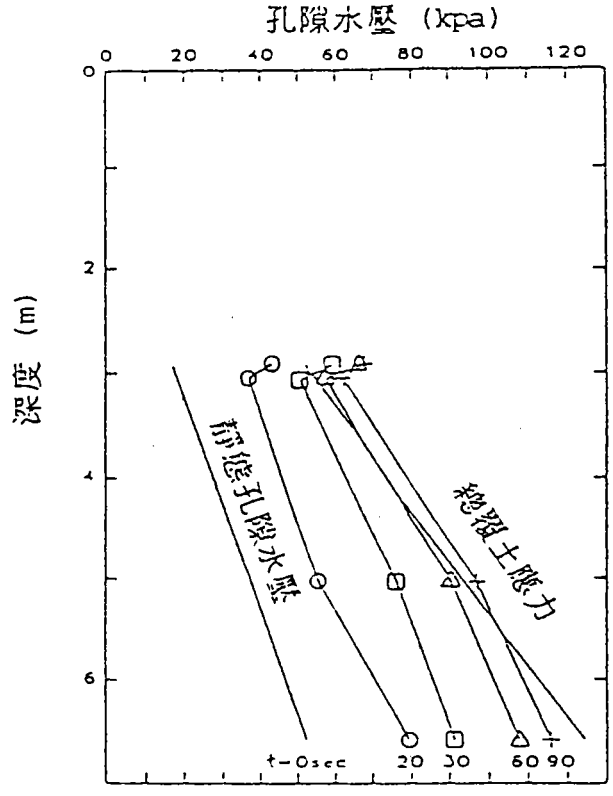


圖2-4　1987年10月17日地震於Sunamachi測站所量測之加速度及水壓歷時
(Ishihara et al.,1989)



(a) 加速度及水壓歷時



(b) 孔隙水壓隨深度及時間的變化

圖2-5 1987年11月24日地震於帝王谷測站所量測之孔隙水壓 (Hozer et al.,1988)

計，埋設工作於1986年6月底完成。在裝設後，即有部分水壓計因防水處理不盡理想而失效，幸在1986年7月31日發生規模6.2之地震，其震央距圍阻體模型5.2公里，量測系統被地震啓動後，共記錄得11組孔隙水壓變化資料；同年11月15日又發生規模7.0之地震，震央距圍阻體模型77. 9公里，共記錄有16組水壓資料。兩次地震之歷時曲線及代表性之孔隙水壓歷時曲線（PN3-1水壓計），如圖2-6至2-9所示，分析結果顯示孔隙水壓變化與地震引致之地盤垂直速度有相當好之相關性，如圖2-10與2-11所示。

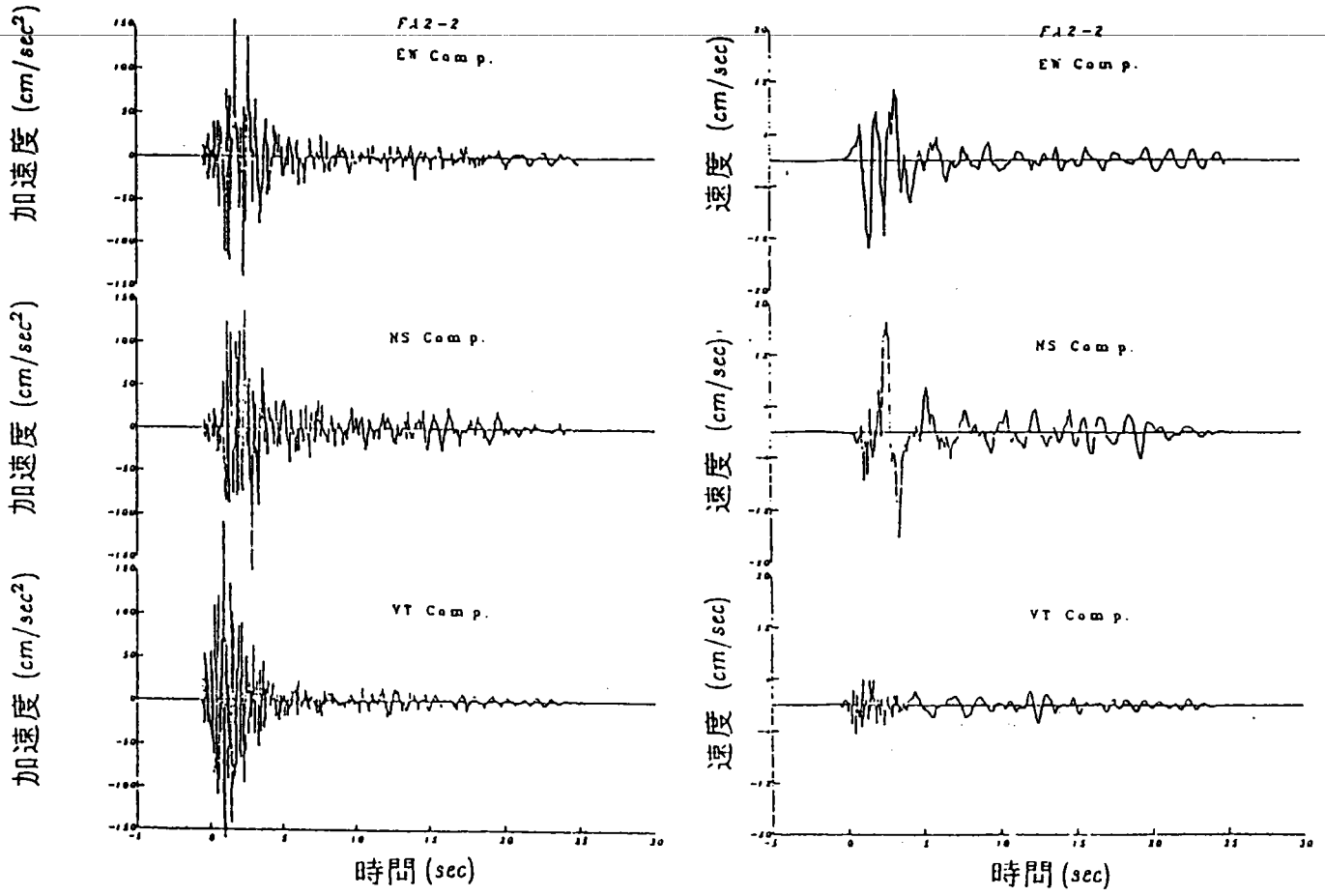


圖2-6　羅東模型基地1986年7月31日地震FA2-2測站之加速度及速度歷時曲線

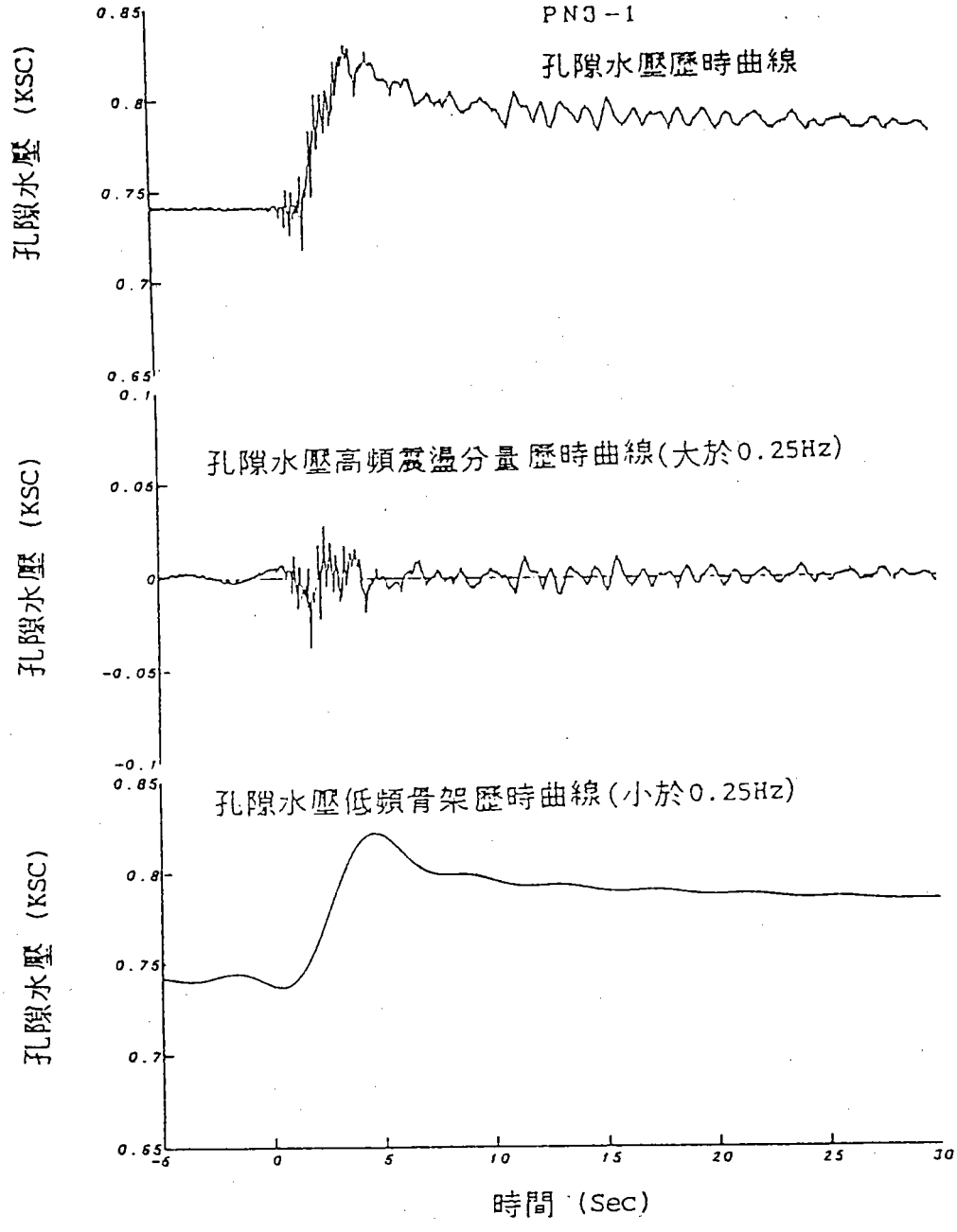
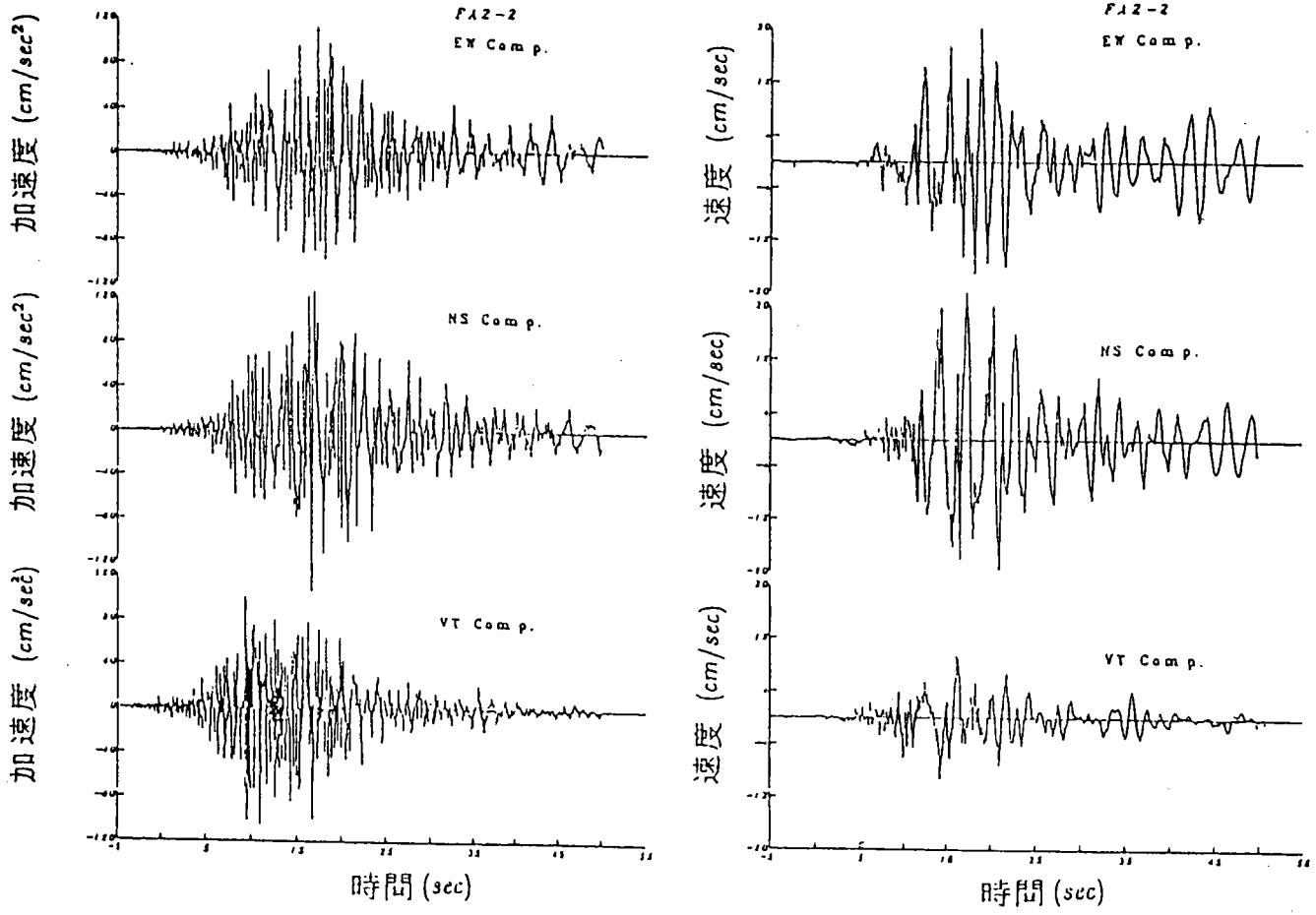


圖2-7　羅東模型基地1986年7月31日地震PN3-1水壓計之水壓變化



(a) 加速度歷時曲線　　(b) 速度歷時曲線

圖2-8　羅東模型基地1986年11月15日地震FA2-2測站之加速度及速度歷時曲線

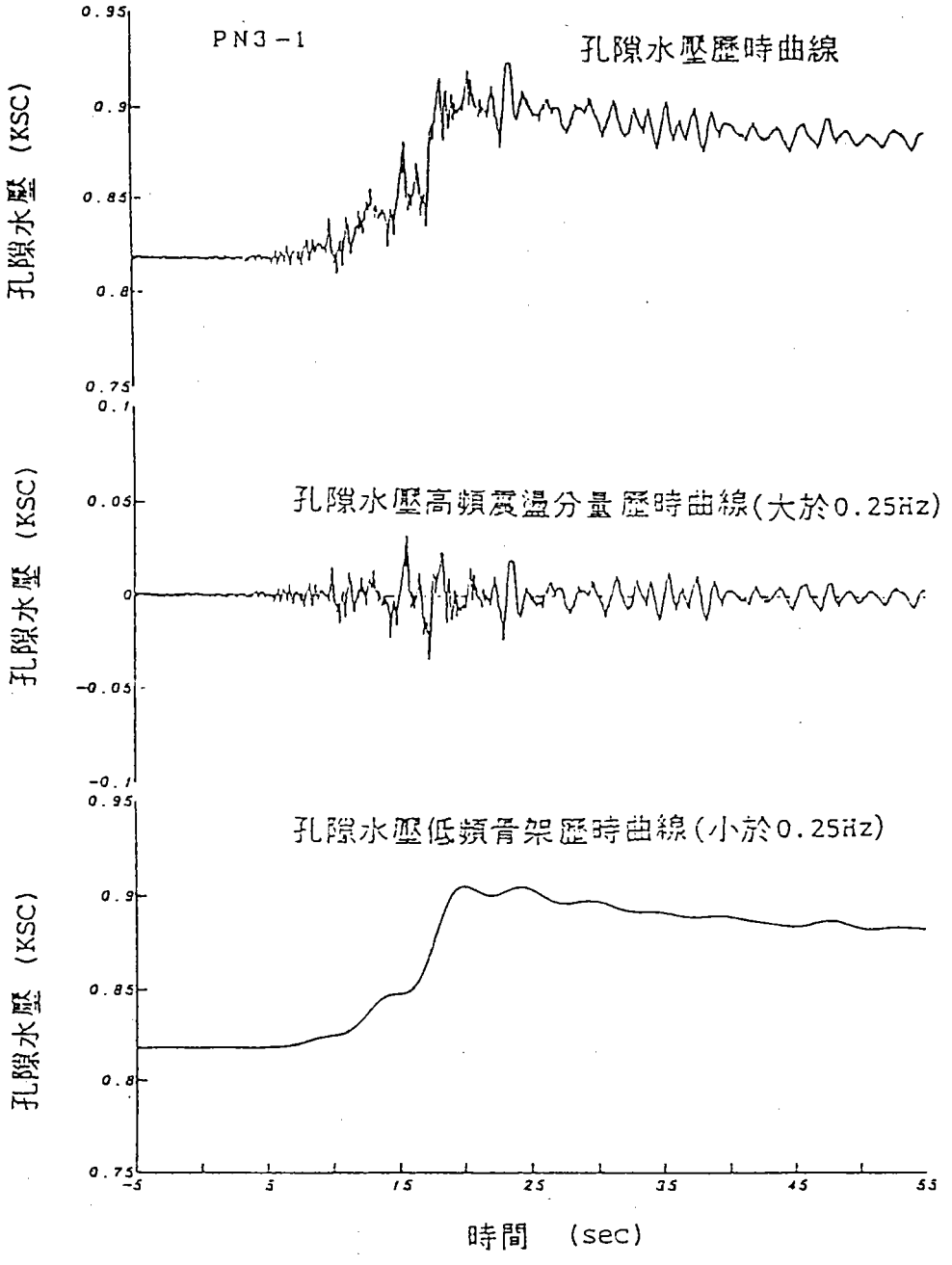


圖2-9　羅東模型基地1986年11月15日地震PN3-1水壓計之水壓變化

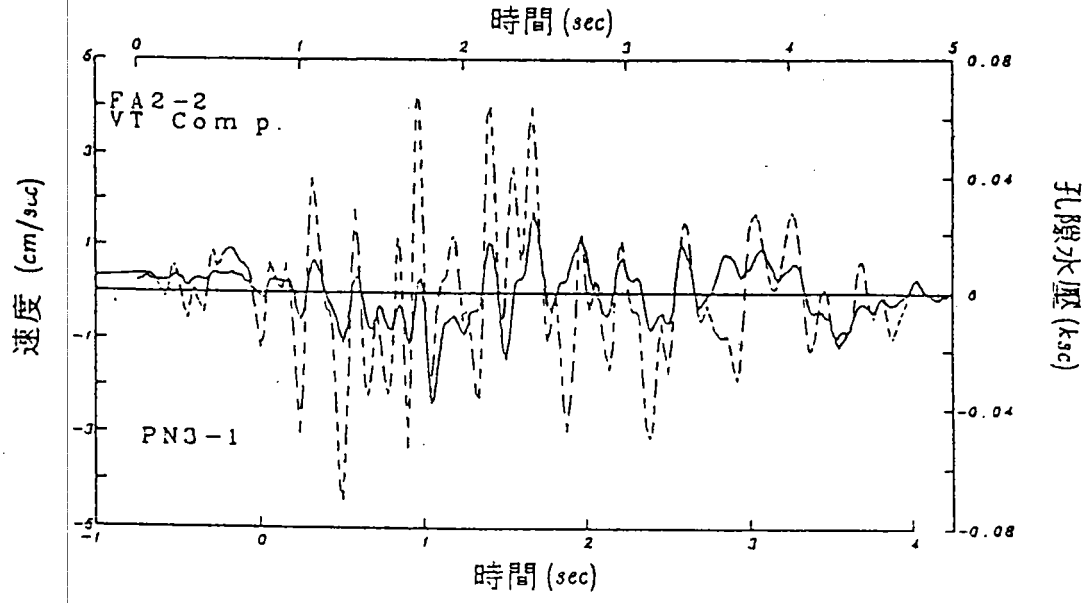


圖2-10 羅東模型基地1986年7月地震FA2-2測站地震速度及PN3-1孔隙水壓歷時曲線在-1至4秒間之比較

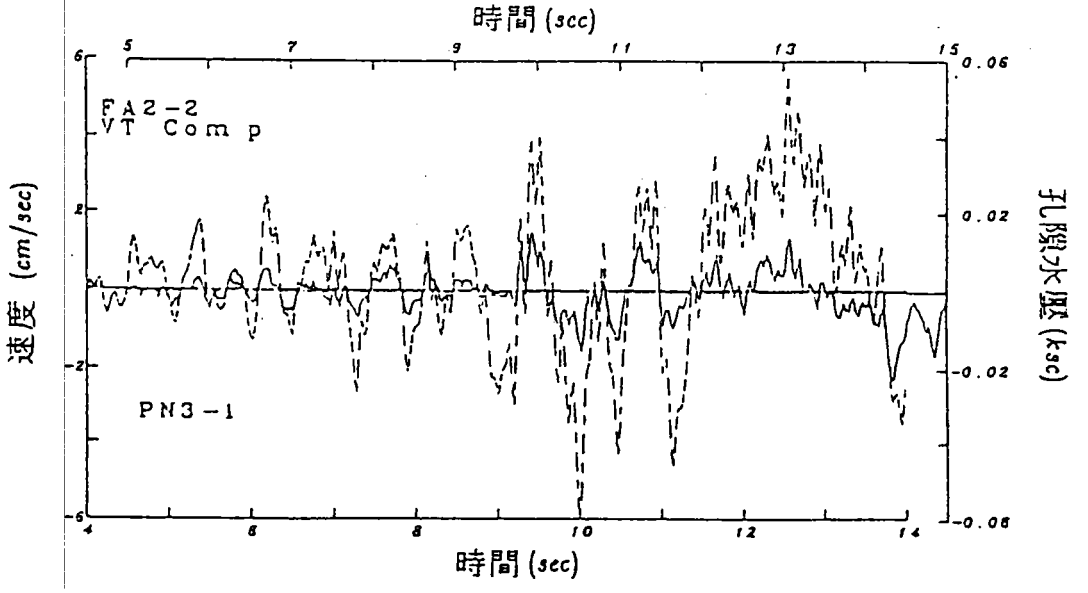


圖2-11 羅東模型基地1986年11月地震FA2-2測站地震速度及PN3-1孔隙水壓歷時曲線在4至14秒間之比較

參、動態孔隙水壓量測

一、概說

動態孔隙水壓之變化是研究土層在地震作用下之動態反應及液化行爲之重要資料，目前其在理論、試驗室試驗或經驗分析方面已有許多研究成果，但極需實際量測之數據，驗證現有之土壤動力學理論，以及驗證試驗室模擬方法及經驗分析之正確性。

目前國內研究地震引致土層內孔隙水壓之變化，大多依試驗室動力試驗分析或經驗預測，現場孔隙水壓之量測方面，僅有在本省東部之羅東模型地震試驗及宜蘭農工模型試驗兩試驗區，配合進行較大規模之現地孔隙水壓量測計畫，而西部地區則尚付之闕如。因此本計畫選擇本省西部台中港地區設立孔隙水壓量測站，建立一套現場孔隙水壓自動量測系統進行動態孔隙水壓之長期量測。

台中港位於台灣西部地震帶之中央區域，大小地震頻仍，1935年港區附近曾發生一次規模達7.1之強烈地震，造成嚴重災害。且台中港區地質屬於河川沖積層，主要土層爲深厚之沉泥質砂土，在強震作用下，易激發動態孔隙水壓而可能造成液化災害，是現場動態孔隙水壓量測較理想地點。本計畫利用將來實際量測之現地孔隙水壓之地震反應資料，並配合試驗室動力三軸試驗之動態孔隙水壓分析，期能建立地震時土層內孔隙水壓之預測模式，提供土層動態分析、液化行爲研究或結構物耐震設計之參改。

二、量測站之地質狀況

本計畫動態孔隙水壓量測站設置在港研所內，即位在台中港區中二路與中橫十一路交叉口附近，其位置示意圖如圖3-1所示。根據現場之鑽探資料，量測站之土層狀況如圖3-2所示。大致而言，量測站在地表下深度30m以內土層，屬於中等緊密之砂土層間夾砂質沉泥及薄層粘土，其SPT-N值在8至30間，CPT-q_c值在30kg／cm^{2}至110kg／cm^{2}間，地下水位深度約爲2.8m，除表層0.6m回填層外，約可細分爲七個層次（圖3-2），分別簡述如下：

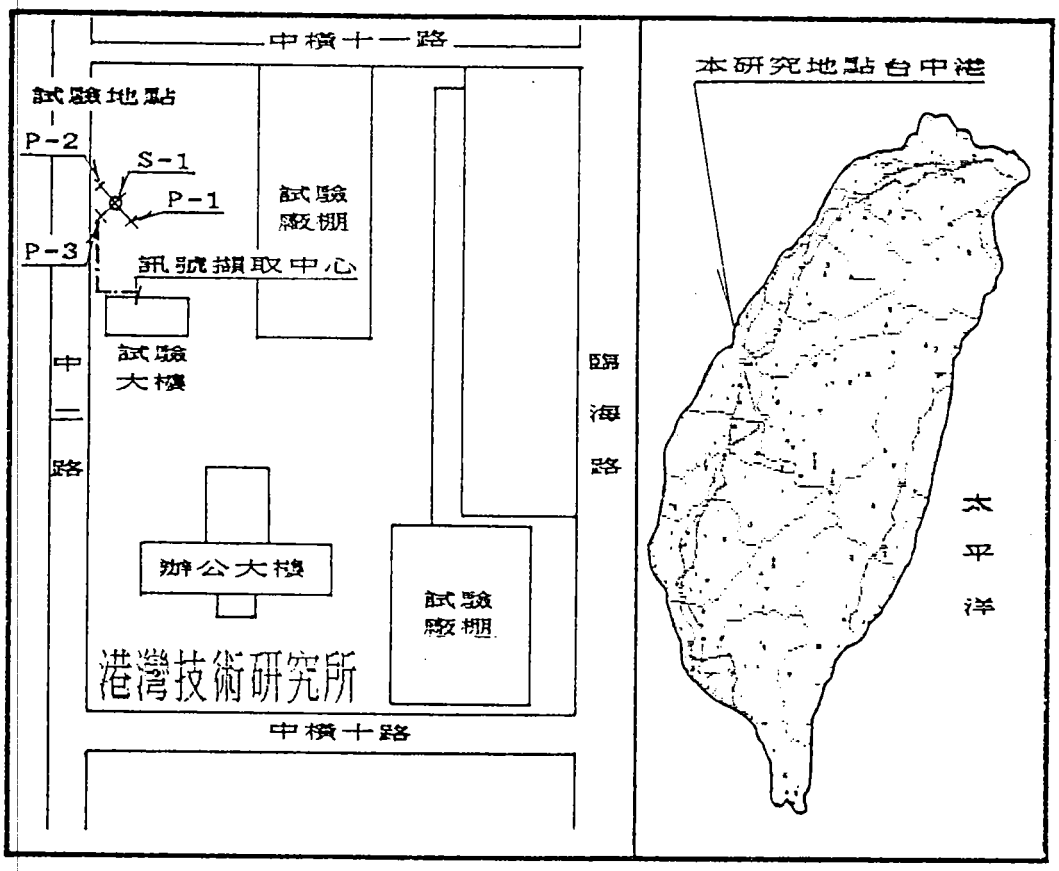


圖3-1　量測站位置示意圖

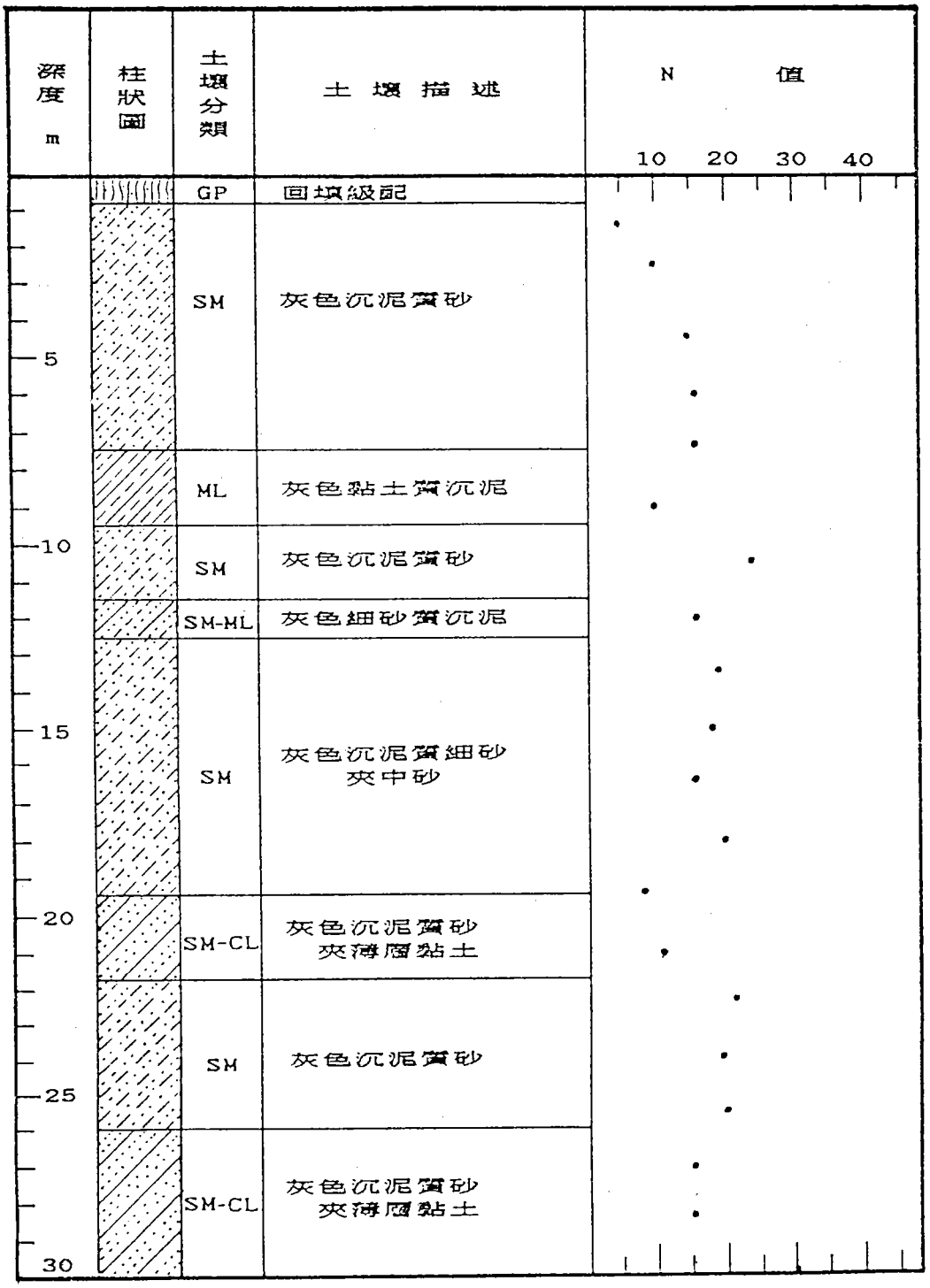


圖3-2　量測站之土層狀況

1.灰色沉泥質砂(SM)：約分佈於地表下深度0.6-7.6m，其中0.6-3.8m爲沉泥質細砂，SPT-N值平均約8左右，3.8-7.6m爲沉泥質中細砂，SPT-N值平均約16左右，本層之排水性良好。

2.灰色粘土質沉泥(ML)：約分佈於地表下深度7.6-9.5m左右，主要爲粘土質沉泥夾細砂質沉泥，透水性較低而壓縮性較大，其中SPT-N值約爲10左右。

3.灰色沉泥質砂(SM)：約分佈於地表下深度9.5-11.4m，其中9.5-10.2m爲沉泥質細砂，SPT-N值約爲18左右，10.2-11.4m爲沉泥質中細砂，SPT-N值約爲24左右。本層上下均有沉泥層，致排水性較差，略有受壓水層現象。

4.灰色細砂質沉泥(ML)：約分佈於11.4-12.7m左右，其SPT-N值約爲16左右，透水性較低而壓縮性較大。

5.灰色沉泥質砂(SM)：約分佈於12.7-19.5m，其SPT-N值約爲18左右，排水性良好，亦略有受壓水層現象。

6.灰色沉泥細砂夾薄粘上：約分佈於19.5-23.1m，SPT-N值約爲10左右。

7.灰色沉泥質砂(SM)：約分佈於23.1-30m，SPT-N值平均約爲19左右。

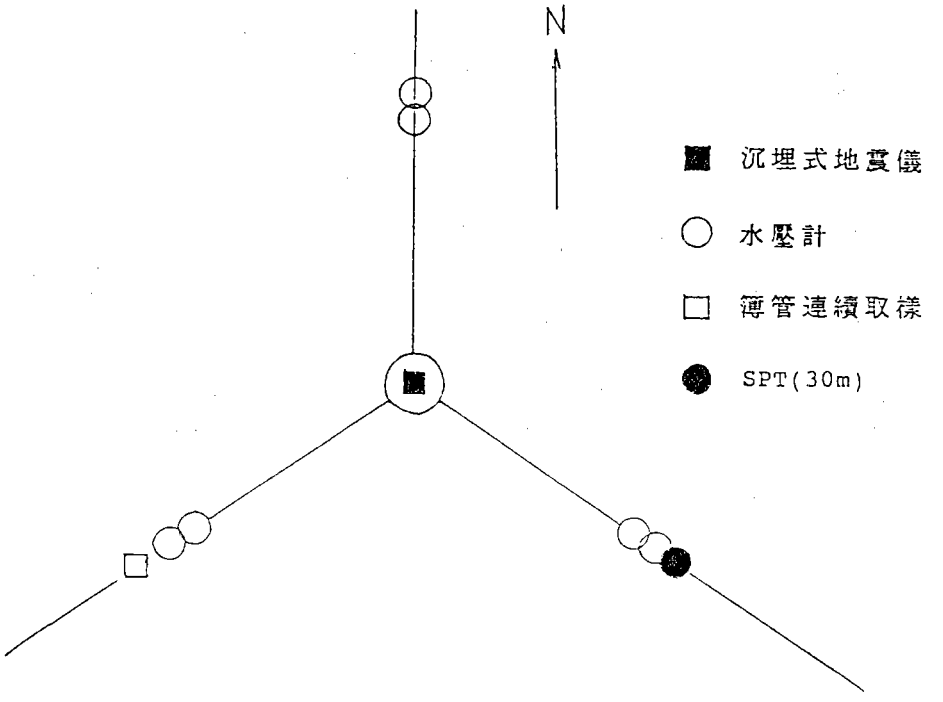
三、水壓計與地震計之配置及安裝

(一)位置與深度

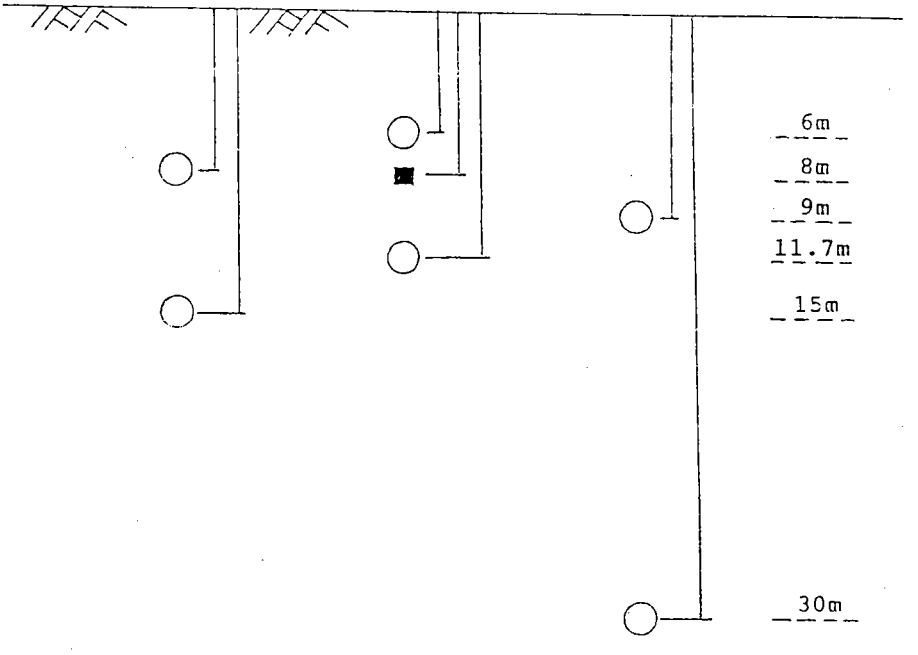
水壓計及地震計之埋設配置如圖3-3所示，其中地震計埋設於深度8m處，而水壓計分埋設於深度6、8、9、11.7、15及30m處。水壓計之埋設，除了考慮埋設於6～15m間之較易液化砂土層外，並考慮埋設於不同土層，以便量測各種土層之動態孔隙水壓特性。6m之水壓計位於第1層之沉泥質中細砂處，8m之水壓計位於第2層之粘土質沉泥處，9m水壓計原計劃埋設於第3層10m處略有受壓水層現象之沉泥質細砂，但因埋設過程孔壁坍陷，而改埋於第2層9m處，11.7m水壓計位於第4層之細砂質沉泥處，15m之水壓計位於第5層亦略有受壓水層現象之沉泥質砂處。至於30m之水壓計是爲了量測較深層之動態水壓特性。

(二)安裝方法

1.地震計埋設步驟



(a) 平面配置



(b) 深度配置

圖3-3　量測站水壓計與地震計埋設配置圖

(1)地震計在埋設前先做安裝前測試檢查，以便確認地震計是否正常。

(2)鑽孔至埋設地震計的深度，隨即於鑽孔內安裝4"ϕPVC套管，以備地震計之安裝。

(3)地震計接上不銹鋼索。

(4)地震計依預定的深度連接延長電纜線。

(5)地震計上方插入連桿，接上第一支連桿後再接上地下方位檢知器。

(6)將地震計裝入套管內，手持不銹鋼索將其緩慢放下，並將連桿一支支接上，一直放到裝設的位置。

(7)調整地震計的方向，利用地下及地上方位計，調整確認方向。

(8)孔內填入細砂至與地震計同高（約50cm），利用連桿調整垂直度，依輸出波形，檢測其垂直情形。

(9)檢測垂直性良好後，在最下端1m以下之孔內緩慢填入細砂，使地震計固定。

(10)地震計固定後，再次檢查及測試。

(11)將連桿一支支拔出，至全部拔出爲止。

(12)再將孔內全部填入細砂至地面上。（孔內裝有套管時，不需全部回填）。

(13)地震計埋設完成後，電纜線穿入PVC管埋置地下，延長接到觀測室。

(14)考慮將來地震計的維修保養，孔內宜加設塑膠套管，同時細砂回填只需至地震計上方1m。地面上裝設保護措施。

(15)地震計安裝詳圖，如圖3-4所示。

2.水壓計安裝步驟

(1)水壓計在埋設前先做安裝前測試檢查，以便確認水壓計是否正常。

(2)鑽孔至預定深度，判定地質是否爲最佳位置。

(3)確定位置後，水壓計放入孔內至預定位置。

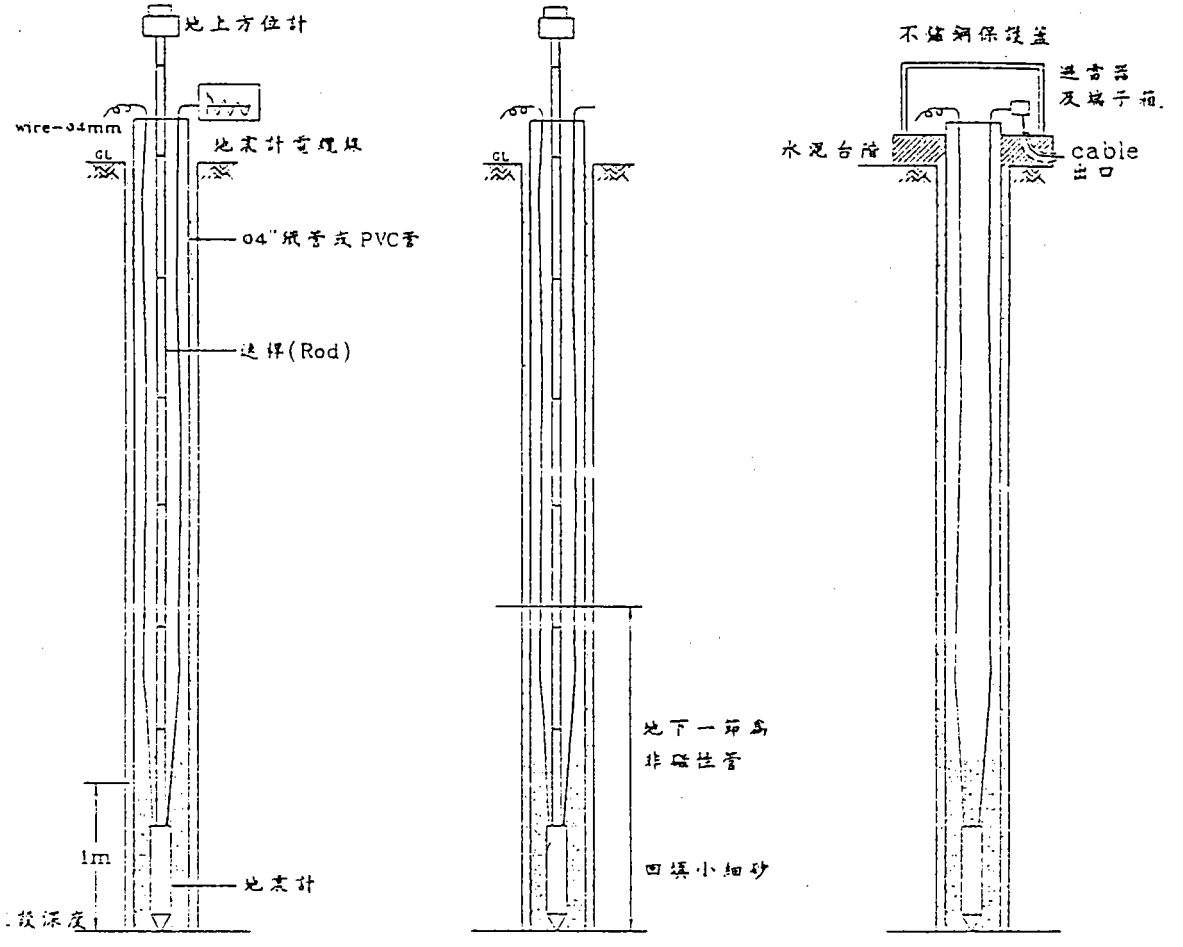
(4)水壓計安裝後，逐段回填，並拔出套管。

(5)地表並做好保護措施。

(6)電纜線穿入PVC管，延長至觀測室端子箱內。

(7)安裝完成後，須測試靜水壓力。

(8)水壓計安裝詳圖，如圖3-5所示。



第一圖　　第二圖　　第三圖

圖3-4　地震計埋設安裝圖

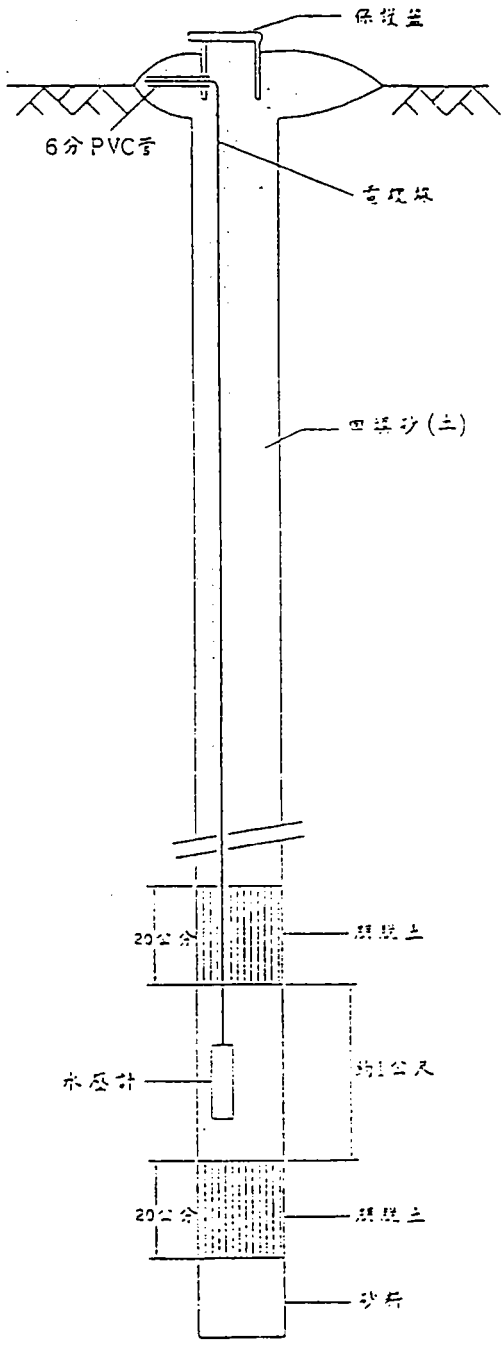


圖3-5　水壓計裝設圖

四、孔隙水壓自動量測系統

一般要量測動態水壓反應的資料擷取及記錄系統，必須具備有某些功能，才可快速及正確地量取資料，這些功能包括足夠的量測頻道數、快速的資料擷取速率、足夠的記憶容量、高穩定性及高程式設計能力等。

本計畫使用之孔隙水壓量測系統是日本Tokyo Sokashin公司所發展之自動監測系統，其示意圖如圖3-6所示，主要設備包括：數位資料記錄器、高感度應力放大器、水壓計、地震計及程式軟體，茲分別簡述其功能如下：

1. **數位資料記錄器**：用以擷取儲存地震及水壓變化資料，所有資料皆以數位處理記錄。其中包括A／D轉換器、延遲用的24K byte 記憶體、水晶時鐘（附有自動修正功能）、起動回路、磁帶裝置等重要功能。共有8個頻道，資料擷取頻率之設定可從20Hz至1000Hz，惟若8個頻道同時擷取資料，其最大擷取頻率爲200Hz。自動起動可依地震信號大小設定起動值，起動後，若地震信號低於設定值時，記錄持續約1000秒後自動停止。
2. **高感度應力放大器**：用以測定孔隙水壓之放大器，可作感度校正，亦可選擇作動態或靜態測定。
3. **水壓計**：以薄膜半導體製成，其構造如圖3-7所示。水壓計埋設前須先經飽和作用而充滿水，水壓可經由前端透水濾石直接傳遞至壓力感應器，再由感應器內之惠斯登電橋反應孔隙水壓之變化，其輸出之電壓經由電纜線及放大器送至資料擷取系統，其中電纜線接頭部分，須作多層防水保護，以防止雨水或地下水侵入。
4. **地震計**：爲可埋入土層中之沉埋式地震計，可監測E-W、N-S兩方向震動。
5. **程式軟體**：可分爲兩部分：
   (1)電子可程式唯讀記憶(EPROM)：此部分程式寫於記錄器之ROM，主要在控制整個系統之即時操作程序如計時、多頻道記錄之擷取、資料儲存、啓動、控制等等。
   (2)電腦磁片程式：主要在透過微電腦對整體系統做裝機前檢查、資料讀取及繪圖等工作。

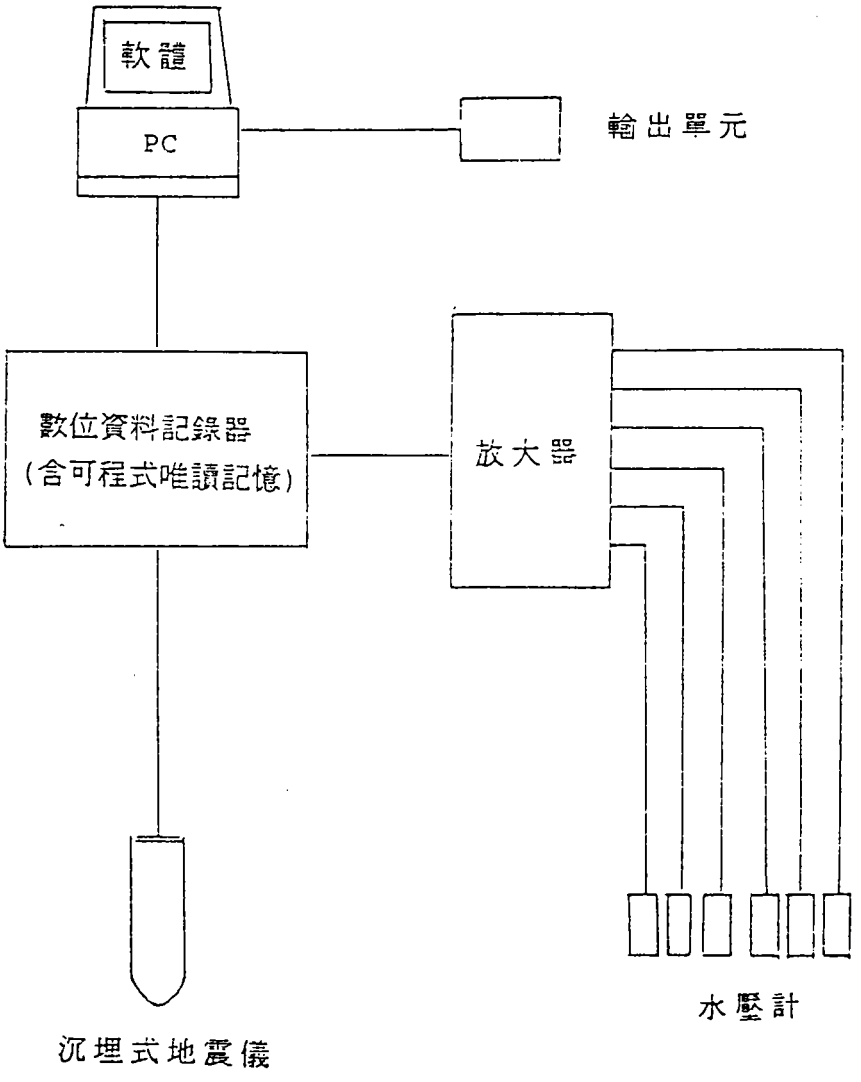


圖3-6　孔隙水壓自動監測系統示意圖

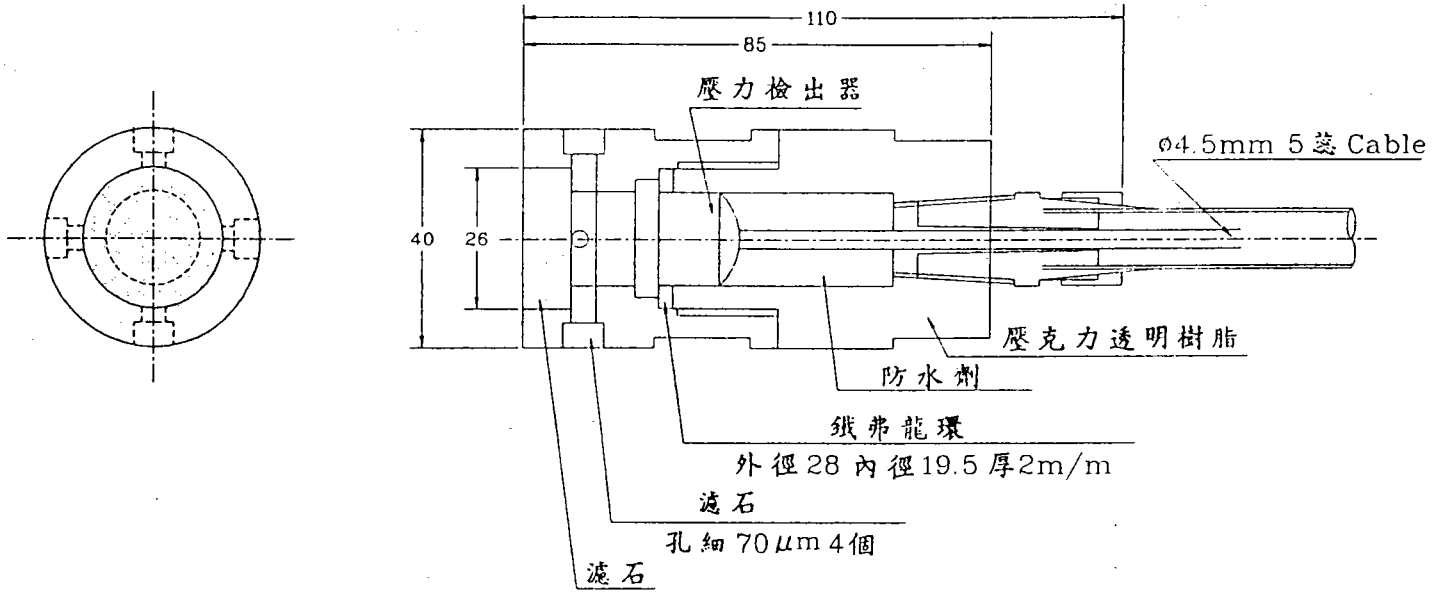


圖3-7　孔隙水壓計內部構造圖

五、動態孔隙水壓之量測

動態孔隙水壓需進行長期之量測工作，至目前爲止，本計畫量測站僅測知數個小地震，其所激發之土層內動態孔隙水壓皆甚小。

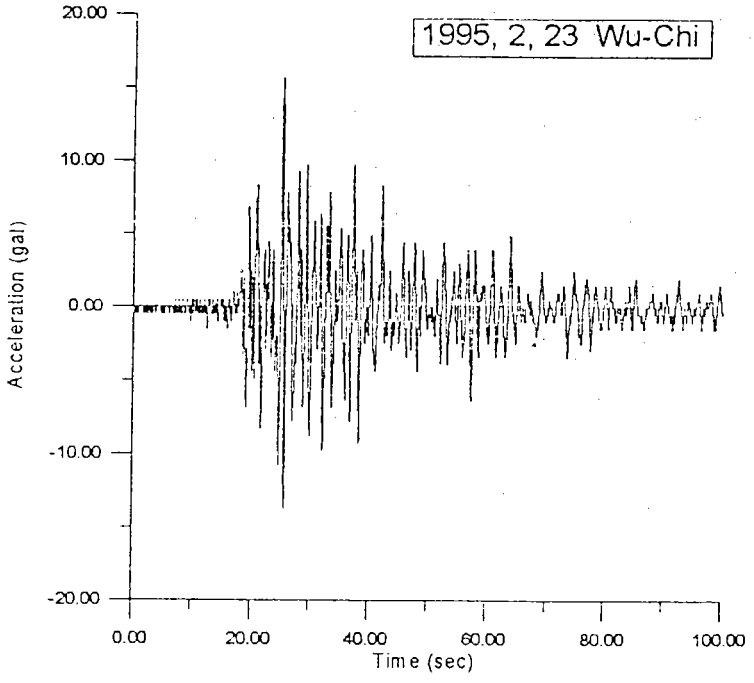
圖3-8及圖3-10所示爲分別於1995年2月23日及1995年6月25日測得之其中兩個較大地震，其所激發之動態孔隙水壓分別如圖3-9及圖3-11所示（僅取深度6m及15m水壓計紀錄表示）。該兩次地震及孔隙水壓紀錄摘要如表3-1所示。

表3-1　量測站地震及孔隙水壓紀錄摘要

時　　間	最大加速度	引致之孔隙水壓	
	gal	6m深度	15m深度
1995／2／23	16	0.115 σ_o'	0.085 σ_o'
1995／6／25	9	0.069 σ_o'	0.042 σ_o'

（表中 σ_o'＝孔隙水壓量測深度之有效覆土壓力）

由表3-1所示，地震引致之孔隙水壓與其最大加速度大致成正比，另由圖3-8及圖3-10所示，最大孔隙水壓皆在地震最大加速度直後產生，但其後孔隙水壓僅隨地震動振盪，並未產生漸進性升高。



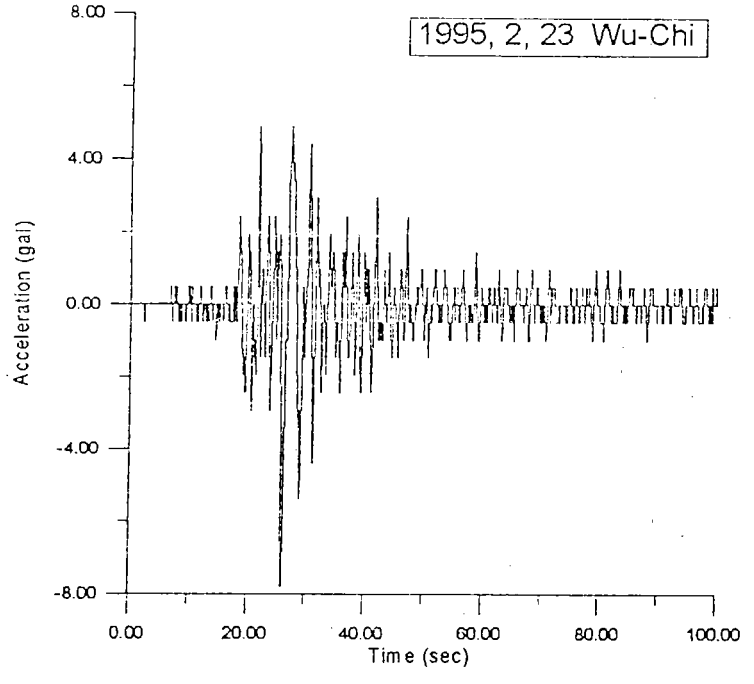
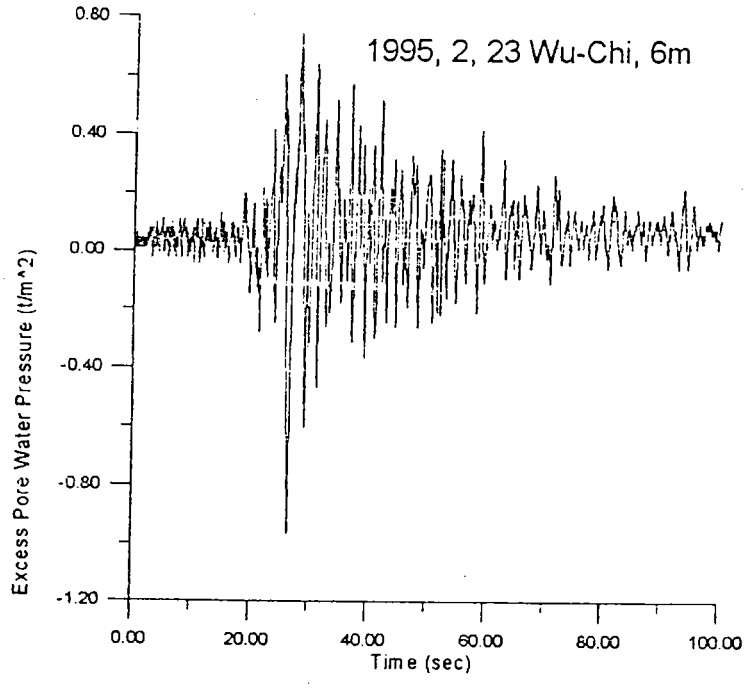


圖3-8　量測站1995年2月23日地震之加速度歷時



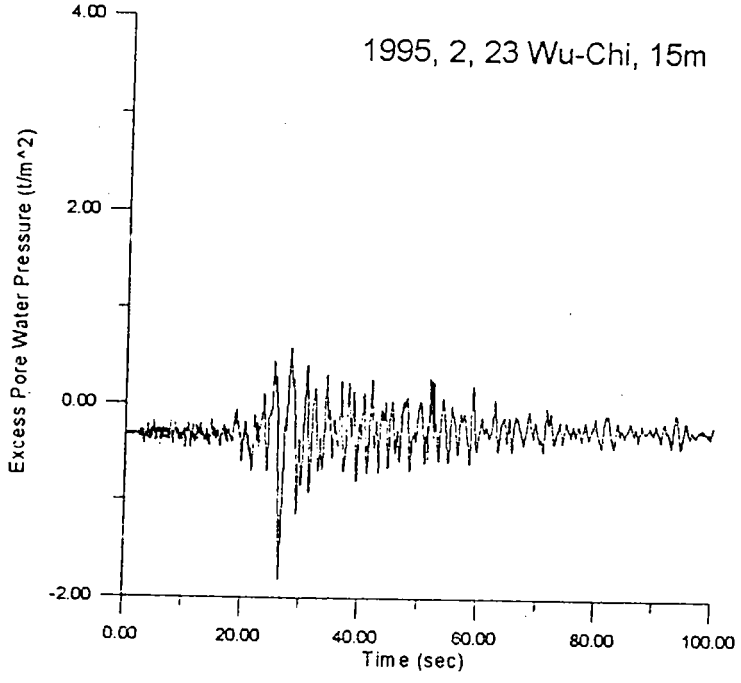
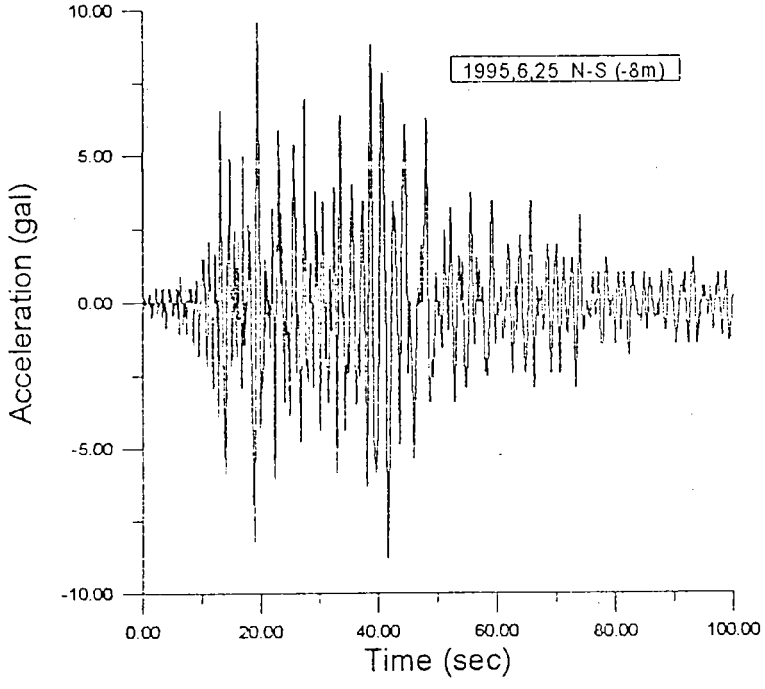


圖3-9　量測站1995年6月25日地震之加速度歷時



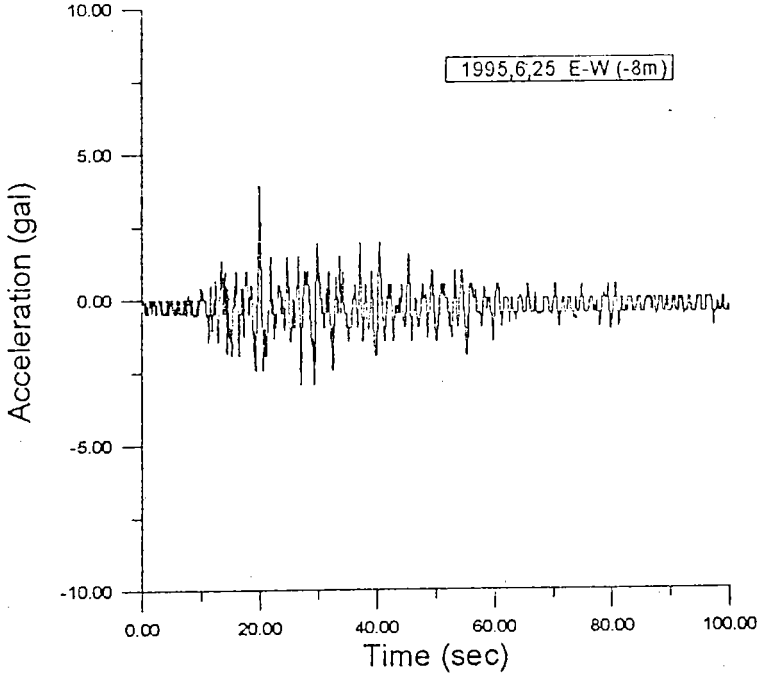
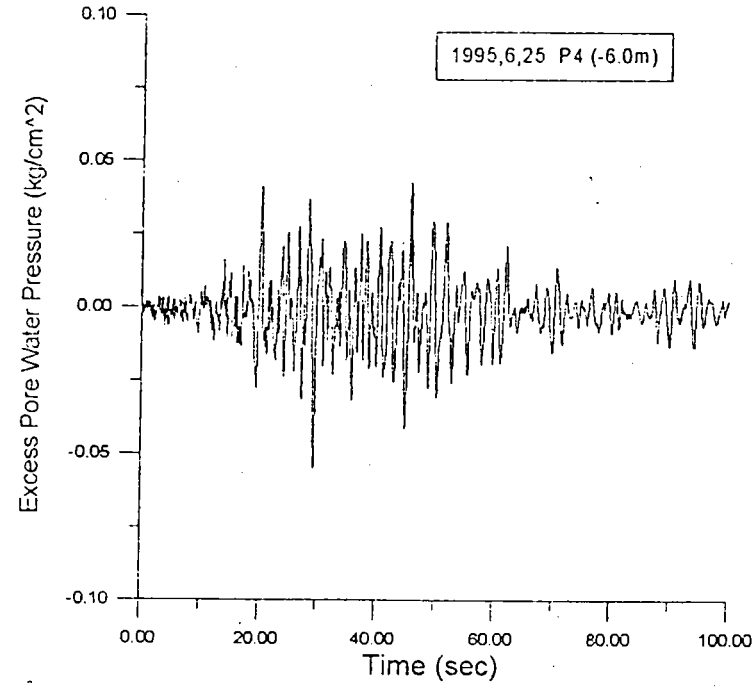


圖3-10 量測站1995年2月23日量測之孔隙水壓



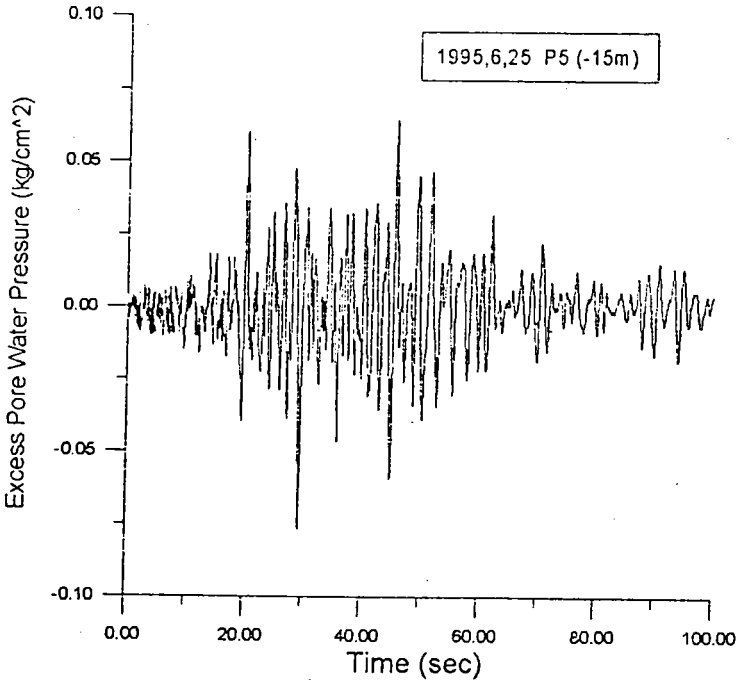


圖3-11 量測站1995年6月25日量測之孔隙水壓

肆、液化特性評估

一、液化特性試驗

本計畫進行試驗室動力三軸試驗及現地荷式錐試驗(CPT)與震測圓錐試驗(SCPT)等試驗方法，探討砂土之液化特性。動力三軸試驗是目前國內外最常用以評估土壤液化特性之室內試驗方法，CPT近年來在國內已日漸採行，可利用CPT-q_c值評估土壤之液化特性，進行CPT同時兼作震測試驗，亦可利用SCPT-Vs值作爲評估液化特性之指標，但尚需進一步研究發展。各項試驗結果之相關性有待建立，俾供液化分析之依據。略述各項試驗執行概況如下。

(一)現地試驗與取樣

本計畫分別在台中港區港研所內及第16～18號碼頭預定地、高雄港第五貨櫃中心第80～82號碼頭預定地及安平港第8～10號碼頭預定地等地區，選定適當地點進行CPT及SCPT試驗及取樣工作。

CPT及SCPT試驗係配合第三子計畫「台灣各港區土壤液化潛能調查研究」進行，各區選取其中代表性孔位4～5孔另採取3英吋薄管不擾動砂性土樣，以供進行室內動力三軸試驗。每孔取樣深度爲30公尺，分別在台中、高雄及安平港區各採取薄管土樣42、90及60支。

薄管不擾動土樣係使用Denison取樣器連續採取，於現地密封後小心運回試驗室，再放置於冷凍櫃內（溫度－10℃）保存備用。

(二)動力三軸試驗

由現地取得之不擾動土樣進行室內動力三軸試驗，探討其在均勻反復荷重作用下發生液化所需之剪應力比關係，建立土壤之液化特性曲線，藉以評估該土壤在不同地震力作用下之液化强度。茲簡述本計畫進行之動力三軸試驗如下。

1.現地應力狀況之模擬

動力三軸試驗可模擬土層承受反復剪應力作用之現地應力狀況，略作說

明如下。在水平土層內靜止狀態下之土壤元素，其最大主應力爲垂直有效覆土壓力$\overline{\sigma}_v$，水平有效應力爲ko／$\overline{\sigma}_v$，其中ko＝靜止土壓力係數，應力狀況如圖4-1(a)所示。在地震作用下，該土層承受由岩盤向上傳遞之剪力波所產生之剪應力作用，土壤元素應力狀況如圖4-1(b)所示。實際上地震引致之剪應力極不規則，但本質上仍是反復性的。

一般動力三軸試驗之應力狀況如圖4-2所示，土壤試體首先承受均向圍壓σ_3之作用，然後在側向應力保持不變下，軸向應力依次增加及減少σ_d。圖4-2顯示，在試體45°傾斜面上有最大剪應力$\pm 1/2\,\sigma_d$，大致模擬了水平土層承受地震剪應力作用。在45°傾斜面上之正向應力雖有$\pm 1/2\,\sigma_d$之變化量，惟實際上試體受剪應力時係在飽和不排水情況下，這變化量由孔隙水壓承受，不致使有效應力發生變化，因此土壤之動力行爲不受影響。

2.試驗使用設備

本研究所採用之動力三軸設備爲電腦控制式自動三軸試驗系統(Automated Triaxial Testing System)，由美國加州大學柏克萊分校C.K.Chan和J.P.Mulilis所設計並經多次改良者，可進行靜力及動力三軸試驗，並兼具有應力控制式、應變控制式及應力路徑控制式之功能。本系統主要設備包括：

(1)荷重控制器(Controller)：電空控制式，具有兩個閉環回授控制頻道，可獨立或同步控制軸向荷重與側壓。

(2)界面處理器(Process interface)：電腦數位訊號與感應器類比訊號之界面轉換。

(3)加載器(Load actuator)：複動式，活塞桿以雙轉鐶接頭與三軸室加壓桿連接。

(4)三軸室(Triaxial cell)：最大室壓350psi，可容納2.8"ϕ試體。

(5)訊號調整器(signal conditioning unit)：感應器訊號之調整放大。

(6)體積變化儀(Volume change device)：以溼式差壓感應器測定。

(7)感應器(Transducers)：包含衡盒、差壓感應器及LVDT。

本系統之組合示意圖如圖4-3所示。

3.試驗步驟

本研究之動力三軸試驗採用應力控制式，試驗由電腦自動控制，其試驗

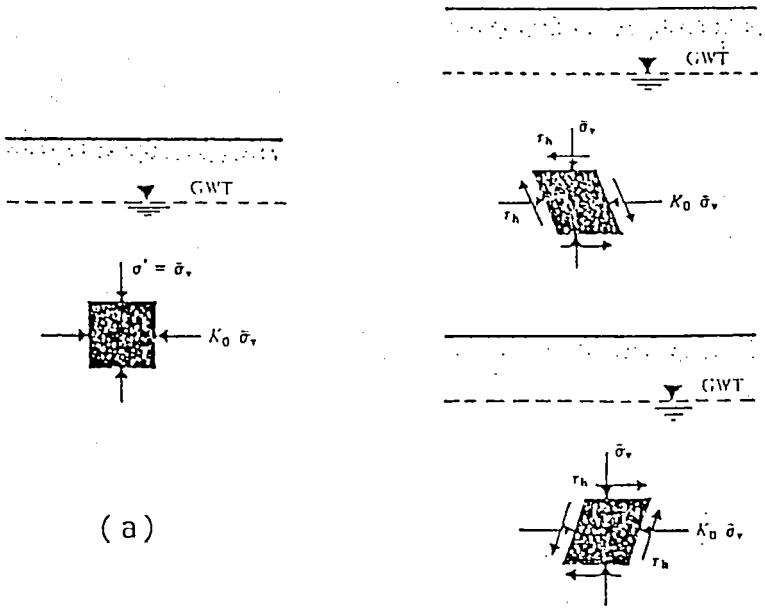


圖4-1　地震作用下之理想化現地應力狀況

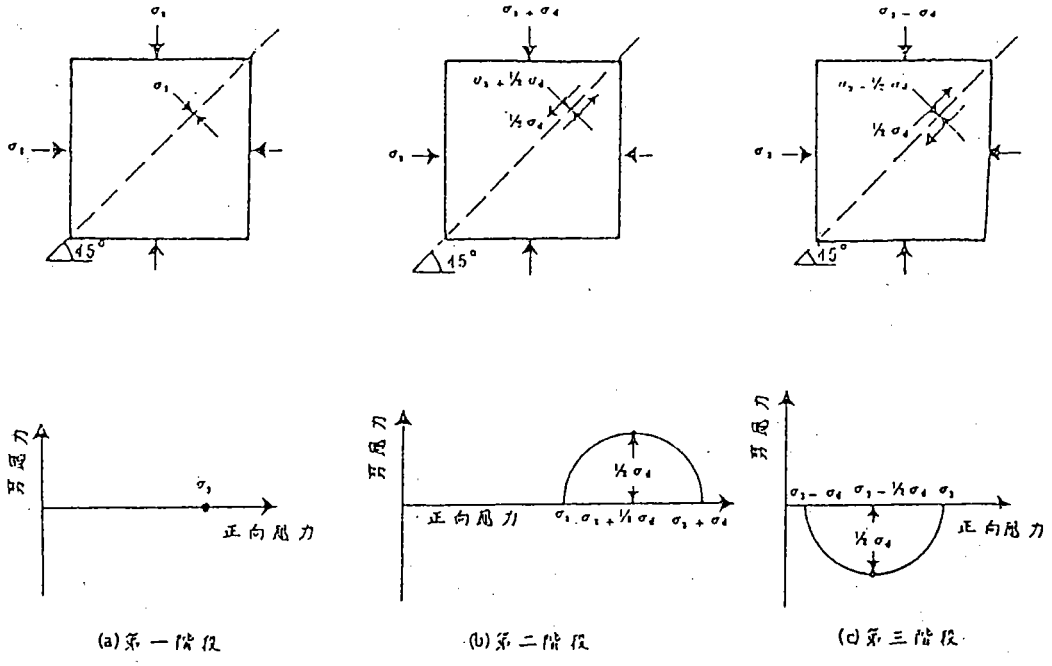


圖4-2　動力三軸試驗之實際操作應力狀況

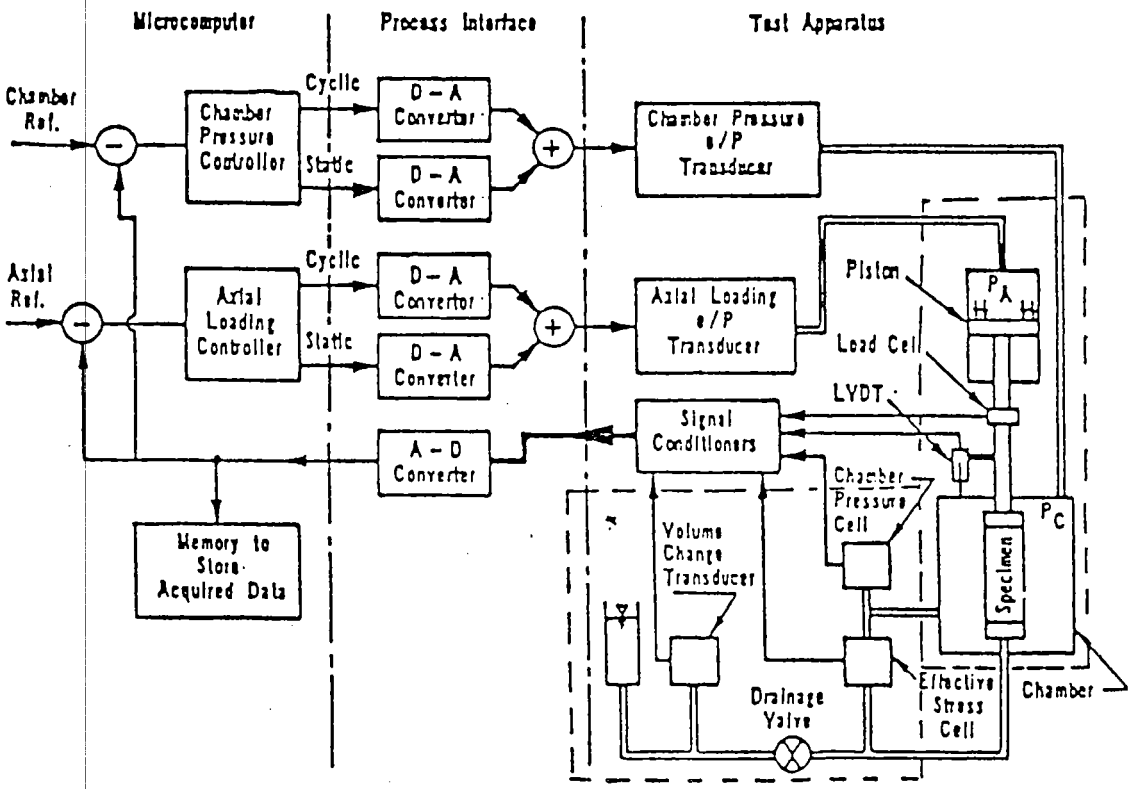


圖4-3　自動三軸試驗系統示意圖

步驟如下所述：

⑴試體準備

自冷凍櫃取出原狀土樣薄管（冷凍溫度約-10℃），裁切成長約15cm短管，再頂出其中土樣並修裁之，試體直徑約7.1cm，高約15cm。

⑵三軸室安裝與試體飽和

①將冷凍試體移至三軸室底座上，其上下均置放濾紙及透水石，再套上橡皮膜並用油圈封束於底座上。

②將與加壓桿相連接之試體頂鈑，套入橡皮膜內至輕觸試體頂部，並用油圈將橡皮膜封束在頂鈑上，再連接頂鈑上之排水（氣）管。

③套上三軸室透明壓克力外罩，小心安裝位移感應計，並將衡盒對準載重桿以防偏心。打開底部進水閥門，將水通入三軸室內，部分注滿之，然後施加室壓至0.05kg／cm^2，冷凍試體在此接觸壓力下解凍約1-2小時。

④自試體底部緩緩通入除氣水，直至上排水（氣）管不再出現氣泡，然後同時等量逐次增加室壓與反水壓，使試體在2kg／cm^2之反水壓下飽和。

⑤檢核試體之飽和度，當孔隙水壓參數B值高於0.95，則視試體已飽和。

⑶試體壓密

試體飽和後，提高室壓至預定壓密壓力，略高於該試體之現地有效覆土壓力，進行等向壓密，並測量其體積變化量，直至體積不再變化爲止。

⑷施加反復荷重

關閉排水閥，施加頻率1.0Hz之正弦波形軸向反復荷重，直至試體產生液化現象或預定變形量爲止。

(三)CPT及SCPT試驗

現地CPT及SCPT試驗係同時進行，試驗使用之貫入圓錐爲其內增設剪力波接收器之水壓錐(Piezocone)，即稱之爲震測錐(Seismic cone)。試驗時，將震測錐貫入土層中，先進行一般CPT試驗，取得土層之錐頭阻抗、摩擦阻抗以及孔隙水壓之連續量則紀錄，俟每貫入1公尺暫停之，另進行SCPT試驗，由震測錐接收自地表下傳之人造剪力波，據以計算該深度土層之剪力波速。

評細試驗設備、試驗程序以及試驗結果參見第三子計畫「台灣各港區土

壤液化潛能調查研究」之研究報告。

二、試驗結果與分析

(一)動力三軸試驗結果

圖4-4所示爲代表性動力三軸向試驗之軸向應變、孔隙水壓以及有效圍壓之時間歷程變化。該圖顯示，在一定之反復荷重作用下，試體內之孔隙水壓逐漸上升，達到初始圍壓時（有效圍壓爲零），即發生初始液化；軸向應變在液化後顯著增加。該圖亦顯示，伸張應變量與壓縮應變量並不對稱，伸張應變量較大，表示伸張應變模數低於壓縮模數。

取自台中、高雄及安平等港區之土樣所進行之動力三軸試驗結果，分別彙列如表4-1所示。每一土樣（同一樣號）多在三個不同應力比(Stress ratio, SR)之反復荷重作用下，分別探求產生初始液比、5%及10%雙振幅應變量(Double amplitude strain)所需之反復荷重作用次數，Ni、$N_{5\%}$及$N_{10\%}$。由各表顯示，產生初始液化與5%雙振幅應變所需之反復次數大致相當。本研究採取產生初始液化所需之反復次數作爲液化評估之數據。

每一土樣之動力三軸試驗之試驗結果均繪製達到液化所需之荷重反復次數，N，與反復應力比，SR，之關係曲線（SR-N曲線），即液化强度特性曲線，其中反復應力比以下式表示：

$$SR = \frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_3'}$$

式中，σ_{dc}＝反復軸差應力，σ_3'＝初始有效圍壓。由液化强度特性曲線可獲得不同土壤在特定次數之反復荷重作用下發生液化之剪應力比，即液化强度，作爲評估其液化潛能之依據。

圖4-5所示爲代表性之液化特性曲線，各港區各土樣之液化特性曲線如附錄一。

(二)各港區砂土之液化特性

除前述之各港區各土樣之液化曲線外，另分別綜合各港區砂土之動力三

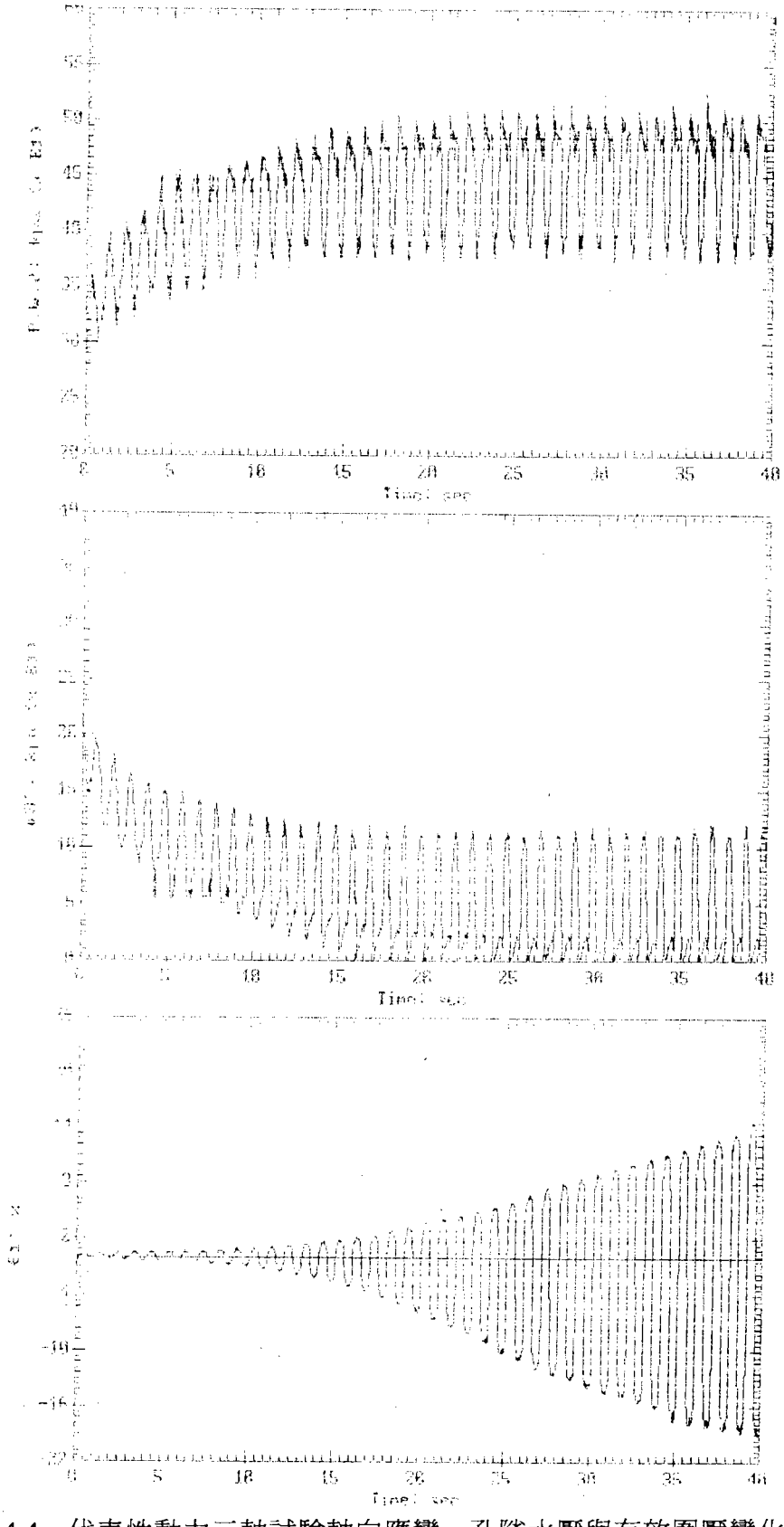


圖4-4　代表性動力三軸試驗軸向應變、孔隙水壓與有效圍壓變化

表4-1　動力三軸試驗結果表

動力三軸試驗結果表

取樣地點:港研所　　孔號:HP3　　地下水位: GL-2.8M

樣號	試驗編號	深度 m	含水率 %	乾密度 g/cm3	比重 Gs	粒徑分佈 D10 mm	D30 mm	D50 mm	D60 mm	Cu	Cc	FC %	土層分類	Sigma3' kg/cm2	SR	Number of Cycles N1	N5%	N10%	Qc kg/cm2	Vs m/sec
T2	HP3T23	6.10	28	1.528	2.68	0.050	0.120	0.150	0.175	3.5	1.6	15	SM	1.00	0.35	11	9	13	75	143
T4	HP3T43	9.07	37	1.470	2.71	0.017	0.060	0.071	0.094	5.5	2.3	45	SM	1.00	0.30	18	19	33	50	199
T4	HP3T44	9.22	31	1.474	2.70	0.022	0.080	0.110	0.120	5.5	2.4	27	SM	1.00	0.25	56	63	78	50	199
T5	HP3T52	10.39	30	1.490	2.72	0.040	0.110	0.160	0.175	4.4	1.7	18	SM	1.00	0.30	15	15	22	55	96
T5	HP3T53	10.54	32	1.490	2.71	0.072	0.120	0.160	0.175	2.4	1.1	12	SP-SM	1.00	0.20	142	147	160	55	96
T5	HP3T54	10.69	25	1.594	2.72	0.040	0.120	0.150	0.175	4.4	2.1	18	SM	1.00	0.40	6	4	11	55	96
T6	HP3T61	11.77	29	1.481	2.69	0.004	0.017	0.035	0.045	12.9	1.8	78	ML	1.00	0.25	30	24	30	85	203
T6	HP3T62	11.92	26	1.580	2.70	0.100	0.175	0.225	0.260	2.6	1.2	7	SP-SM	1.00	0.35	10	11	21	85	203
T6	HP3T63	12.07	30	1.550	2.69	0.035	0.130	0.175	0.200	5.7	2.4	14	SM	1.00	0.30	18	17	37	85	203
T7	HP3T71	13.26	24	1.505	2.68	0.020	0.070	0.115	0.130	6.5	1.9	35	SM	2.00	0.20	45	32	38	65	197
T7	HP3T72	13.40	29	1.547	2.68	0.060	0.125	0.175	0.200	3.3	1.3	14	SM	2.00	0.40	6	4	7	65	197
T7	HP3T73	13.54	27	1.475	2.69	0.020	0.068	0.100	0.120	6.0	1.9	30	SM	2.00	0.30	9	5	9	65	197
T8	HP3T82	14.95	29	1.525	2.69	0.035	0.095	0.140	0.165	4.7	1.6	22	SM	2.00	0.30	12	8	13	90	233
T8	HP3T83	15.09	30	1.490	2.68	0.055	0.110	0.150	0.170	3.1	1.3	17	SM	2.00	0.25	10	4	7	90	223
T8	HP3T84	15.23	26	1.552	2.71	0.120	0.640	0.100	0.120	1.0	28.4	35	SM	2.00	0.20	60	38	45	90	223
T9	HP3T91	16.20	29	1.461	2.70	0.025	0.090	0.021	0.028	1.1	11.6	92	ML	2.00	0.25	30	19	24	70	235
T9	HP3T92	16.34	29	1.476	2.69	0.003	0.013	0.035	0.054	18.0	1.0	72	ML	2.00	0.20	99	95	102	70	235
T9	HP3T93	16.48	30	1.498	2.70	0.020	0.065	0.095	0.110	5.5	1.9	35	SM	2.00	0.30	8	4	8	70	235
T9	HP3T95	16.76	27	1.540	2.69	0.002	0.009	0.021	0.031	13.5	1.1	85	ML	2.00	0.35	5	1	2	70	235
T10	HP3T102	17.81	27	1.545	2.70	0.008	0.050	0.090	0.110	13.8	2.8	42	SM	2.00	0.25	22	15	17	65	217

表4-1 動力三軸試驗結果表(續1)

取樣地點:台中港16-18號碼頭　　孔號:TH1　　地下水位:GL-2.8M

樣號	試驗編號	深度 m	含水率 %	乾密度 g/cm3	比重 Gs	粒徑分佈 D10 mm	D30 mm	D50 mm	D60 mm	Cu	Cc	FC %	土層分類	Sigma3' kg/cm2	SR	Number of Cycles Ni	N5%	N10%	Qc kg/cm2	Vs m/sec
T2	TH1T21	6.15	24	1.631	2.70	0.015	0.230	0.320	0.400	26.7	8.82	16	SM	1.00	0.25	35	33	37	65	175
T2	TH1T22	6.27	24	1.607	2.70	0.025	0.120	0.170	0.200	8.0	2.88	18	SM	1.00	0.30	8	8	13	65	175
T2	TH1T23	6.43	24	1.611	2.70	0.018	0.100	0.170	0.200	11.1	2.78	25	SM	1.00	0.20	114	113	122	65	175
T3	TH1T32	10.95	33	1.390	2.68	0.025	0.070	0.090	0.100	4.0	1.96	35	SM	1.00	0.30	10	3	5	55	200
T3	TH1T33	11.07	31	1.430	2.68	0.020	0.060	0.080	0.090	4.5	2	42	SM	1.00	0.25	35	37	42	55	200
T3	TH1T34	11.23	29	1.429	2.68	0.025	0.069	0.090	0.110	4.4	1.73	35	SM	1.00	0.20	165	130	155	55	200
T4	TH1T41	11.53	28	1.558	2.68	0.004	0.021	0.042	0.055	13.8	2	75	ML	1.00	0.35	24	18	26	30	205
T4	TH1T42	11.67	32	1.419	2.68	0.005	0.032	0.073	0.085	17.0	2.41	52	ML	1.00	0.40	5	5	11	30	205
T4	TH1T44	11.95	30	1.479	2.68	0.004	0.015	0.030	0.040	11.4	1.61	85	ML	1.00	0.30	65	48	66	30	205
T5	TH1T52	16.06	29	1.483	2.68	0.075	0.150	0.200	0.230	3.1	1.3	10	SP-SM	2.00	0.20	34	31	32	80	300
T5	TH1T53	16.23	27	1.548	2.68	0.027	0.085	0.115	0.135	5.0	2.0	25	SM	2.00	0.25	24	23	26	80	300
T5	TH1T54	16.38	28	1.511	2.68	0.013	0.070	0.100	0.115	8.8	3.28	35	SM	2.00	0.30	9	5	8	80	300
T6	TH1T61	16.85	26	1.528	2.68	0.030	0.110	0.160	0.210	7.0	1.92	20	SM	2.00	0.20	213	80	201	65	225
T6	TH1T62	16.99	29	1.481	2.68	0.030	0.115	0.160	0.190	6.3	2.32	18	SM	2.00	0.25	18	16	21	65	225
T6	TH1T63	17.13	29	1.519	2.68	0.017	0.070	0.095	0.110	6.5	2.62	35	SM	2.00	0.30	5	3	4	65	225
T6	TH1T64	17.27	28	1.509	2.68	0.007	0.046	0.075	0.090	13.8	3.62	48	SM	2.00	0.35	5	2	5	65	225
T8	TH1T83	22.51	27	1.568	2.69	0.015	0.073	0.125	0.130	8.7	2.7	30	SM	2.00	0.25	19	13	21	90	230

表4-1 動力三軸試驗結果表（續2）

取樣地點：台中港16-18號碼頭　　孔號:TH3　　地下水位：　GL-2.8M

樣號	試驗編號	深度 m	含水率 %	乾密度 g/cm3	比重 Gs	粒徑分佈 D10 mm	D30 mm	D50 mm	D60 mm	Cu	Cc	FC %	土層分類	Sigma3' kg/cm2	SR	Number of Cycles Ni	N5%	N10%	Qc kg/cm2	Vs m/sec
T1	TH3T11	5.31	24.0	1.614	2.68	0.070	0.150	0.210	0.250	3.6	1.3	11	SP-SM	1.00	0.30	60	58	68	85	205
T1	TH3T12	5.45	19.0	1.766	2.68	0.100	0.360	0.700	0.700	7.0	1.9	8	SW-SM	1.00	0.35	12	18	35	85	205
T1	TH3T13	5.57	22.0	1.622	2.68	0.050	0.150	0.210	0.220	4.4	2.0	12	SP-SM	1.00	0.40	4	1	4	85	205
T2	TH3T22	6.25	25.0	1.590	2.67	0.040	0.130	0.170	0.190	4.8	2.2	15	SM	1.00	0.30	9	7	12	50	220
T2	TH3T23	6.39	25.0	1.557	2.67	0.040	0.130	0.170	0.190	4.8	2.2	15	SM	1.00	0.25	12	11	16	50	220
T2	TH3T24	6.53	23.0	1.551	2.67	0.030	0.110	0.170	0.220	7.3	1.8	19	SM	1.00	0.20	15	15	21	50	220
T3	TH3T31	10.95	27.0	1.519	2.68	0.006	0.026	0.054	0.070	12.7	1.8	65	ML	1.00	0.20	212	90	205	60	220
T3	TH3T32	11.09	27.0	1.515	2.68	0.009	0.040	0.065	0.077	8.6	2.3	58	ML	1.00	0.25	32	40	46	60	220
T3	TH3T33	11.23	28.0	1.483	2.67	0.006	0.026	0.048	0.057	10.4	2.2	75	ML	1.00	0.30	7	7	14	60	220
T4	TH3T40	11.49	33.0	1.405	2.68	0.015	0.041	0.060	0.070	4.7	1.6	65	ML	1.00	0.25	96	105	115	35	220
T4	TH3T43	11.91	32.0	1.419	2.69	0.035	0.072	0.090	0.102	2.9	1.5	33	SM	1.00	0.30	31	41	59	35	220
T4	TH3T44	12.05	31.0	1.451	2.68	0.017	0.062	0.082	0.090	5.3	2.5	45	SM	1.00	0.35	10	16	19	35	220
T5	TH3T51	16.42	32.0	1.444	2.69	0.015	0.045	0.065	0.075	5.0	1.8	60	ML	2.00	0.25	24	17	23	45	230
T5	TH3T52	16.54	30.0	1.487	2.70	0.010	0.040	0.055	0.062	6.2	2.6	70	ML	2.00	0.20	80	76	84	45	230
T5	TH3T53	16.68	32.0	1.456	2.69	0.010	0.040	0.055	0.062	6.2	2.6	70	ML	2.00	0.30	6	3	6	45	230
T6	TH3T60	17.08	27.6	1.524	2.69	0.015	0.050	0.075	0.085	5.7	2.0	48	SM	2.00	0.23	35	37	48	40	220
T6	TH3T62	17.36	30.0	1.488	2.70	0.015	0.070	0.090	0.100	6.7	3.3	38	SM	2.00	0.25	13	9	13	40	220
T6	TH3T63	17.50	29.6	1.496	2.69	0.042	0.081	0.105	0.120	2.9	1.3	25	SM	2.00	0.20	197	198	204	40	220

表4-1 動力三軸試驗結果表（續3）

取樣地點:高雄港 80-82# 碼頭 孔號:KS2 地下水位 GL-1.2m

樣號	試驗編號	深度 m	含水率 %	乾密度 g/cm3	比重 Gs	粒徑分佈 D10 mm	D30 mm	D50 mm	D60 mm	Cu	Cc	FC %	土層分類	Sigma3' kg/cm2	SR	Number of Cycles Ni	N5%	N10%	Qc kg/cm2	Vs m/sec
T2	KS2T23	7.53	25.1	1.566	2.69	0.020	0.150	0.265	0.310	15.5	3.6	18	SM	1.00	0.30	8	7	11	60	180
T2	KS2T24	7.67	24.3	1.509	2.70	0.040	0.175	0.275	0.360	9.0	2.1	12	SW-SM	1.00	0.35	4	3	9	60	180
T3	KS2T31	8.45	26.5	1.512	2.69	0.022	0.130	0.200	0.230	10.5	3.3	18	SM	1.00	0.22	53	54	58	50	205
T3	KS2T33	8.73	23.7	1.566	2.70	0.013	0.110	0.200	0.220	16.9	4.2	24	SM	1.00	0.30	6	4	6	50	205
T4	KS2T42	9.46	28.0	1.479	2.69	0.025	0.165	0.250	0.300	12.0	3.6	17	SM	1.00	0.23	217	218	221	50	205
T4	KS2T43	9.59	24.7	1.560	2.68	0.024	0.130	0.220	0.250	10.4	2.8	19	SM	1.00	0.25	27	28	32	50	205
T4	KS2T44	9.73	23.3	1.560	2.70	0.020	0.120	0.220	0.250	12.5	2.9	21	SM	1.00	0.30	5	4	7	50	205
T7	KS2T71	13.33	26.7	1.547	2.69	0.018	0.175	0.270	0.330	18.9	5.3	14	SM	2.00	0.25	18	12	17	42	215
T7	KS2T72	13.45	25.6	1.573	2.69	0.015	0.125	0.200	0.230	15.3	4.5	21	SM	2.00	0.28	6	4	7	42	215
T7	KS2T73	13.59	24.5	1.596	2.69	0.030	0.150	0.220	0.250	8.3	3.0	22	SM	2.00	0.30	4	2	3	42	215
T7	KS2T74	13.73	23.6	1.595	2.69	0.012	0.085	0.150	0.175	14.6	3.4	28	SM	2.00	0.33	3	1	2	42	215
T8	KS2T81	14.45	26.9	1.536	2.68	0.022	0.140	0.260	0.340	15.5	2.6	20	SM	2.00	0.30	6	3	6	40	218
T8	KS2T82	14.59	25.7	1.558	2.70	0.013	0.080	0.140	0.160	12.3	3.1	28	SM	2.00	0.20	52	47	52	40	218
T8	KS2T83	14.73	25.0	1.579	2.70	0.012	0.060	0.120	0.145	12.1	2.1	32	SM	2.00	0.23	14	11	14	40	218
T11	KS2T111	17.35	27.7	1.509	2.70	0.012	0.070	0.100	0.120	10.0	3.4	32	SM	2.00	0.20	47	43	48	65	245
T11	KS2T112	17.49	25.9	1.562	2.69	0.012	0.070	0.110	0.130	10.8	3.1	32	SM	2.00	0.25	8	5	8	65	245
T11	KS2T113	17.63	23.0	1.597	2.68	0.012	0.070	0.120	0.150	12.5	2.7	31	SM	2.00	0.30	4	1	4	65	245
T13	KS2T131	17.95	33.3	1.521	2.69	0.015	0.070	0.110	0.125	8.3	2.6	32	SM	2.00	0.22	15	14	17	65	230
T13	KS2T132	20.54	25.1	1.557	2.69	0.015	0.070	0.110	0.125	8.3	2.6	32	SM	2.00	0.25	8	5	8	70	230
T14	KS2T142	21.39	26.8	1.567	2.68	0.027	0.130	0.200	0.250	9.3	2.5	18	SM	2.00	0.25	13	10	13	70	245
T14	KS2T143	21.53	23.9	1.600	2.67	0.015	0.110	0.190	0.250	16.7	3.2	23	SM	2.00	0.20	150	153	162	70	245
T14	KS2T144	21.67	22.9	1.584	2.67	0.015	0.100	0.160	0.190	12.7	3.5	23	SM	2.00	0.30	4	3	7	70	245
T15	KS2T151	23.39	26.2	1.563	2.67	0.015	0.085	0.130	0.150	10.0	3.2	27	SM	2.00	0.30	5	2	4	115	230
T15	KS2T152	23.53	25.5	1.592	2.68	0.015	0.085	0.130	0.150	10.0	3.2	27	SM	2.00	0.25	16	10	16	115	230
T15	KS2T153	23.67	25.9	1.563	2.68	0.015	0.085	0.130	0.150	10.0	3.2	27	SM	2.00	0.20	24	20	23	115	230

表4-1 動三軸試驗結果表（續4）

取樣地點：安平港8-10號碼頭　孔號：AS2　地下水位：GL-2.8M

樣號	試驗編號	深度 m	含水率 %	乾密度 g/cm3	比重 Gs	粒徑分佈 D10 mm	D30 mm	D50 mm	D60 mm	Cu	Cc	FC %	土層描述	Sigma3' kg/cm2	SR	Number of Cycles Ni	N5%	N10%	Qc kg/cm2
T1	AS2T11	7.21	26.8	1.542	2.68	0.050	0.160	0.280	0.360	7.2	1.4	14	SM	1.00	0.225	408	407	411	73
T1	AS2T13	7.47	21.9	1.686	2.68	0.022	0.067	0.120	0.140	6.4	1.5	33	SM	1.00	0.300	8	4	7	73
T2	AS2T21	9.09	24.2	1.601	2.67	0.012	0.032	0.055	0.070	5.8	1.2	63	ML	1.00	0.275	19	20	33	45
T2	AS2T22	9.23	24.8	1.588	2.68	0.016	0.045	0.076	0.095	5.9	1.3	45	SM	1.00	0.250	13	15	21	45
T2	AS2T23	9.37	24.7	1.593	2.68	0.016	0.045	0.076	0.095	5.9	1.3	45	SM	1.00	0.350	4	6	12	45
T2	AS2T24	9.51	24.2	1.605	2.68	0.016	0.045	0.076	0.095	5.9	1.3	45	SM	1.00	0.210	128	140	150	45
T4	AS2T40	14.81	28.0	1.501	2.69	0.052	0.150	0.300	0.420	8.1	1.0	15	SM	2.00	0.250	19	18	20	75
T4	AS2T41	14.95	28.3	1.507	2.69	0.040	0.120	0.200	0.300	7.5	1.2	20	SM	2.00	0.300	12	12	20	75
T4	AS2T42	15.09	19.6	1.767	2.68	0.022	0.065	0.120	0.140	6.4	1.4	33	SM	2.00	0.350	4	4	6	75
T4	TH3T43	15.23	15.7	1.902	2.68	0.024	0.120	0.200	0.300	12.5	2.0	21	SM	2.00	0.250	12	10	13	75
T5	AS2T51	16.01	24.0	1.611	2.68	0.022	0.063	0.110	0.135	6.1	1.3	35	SM	2.00	0.220	66	70	90	133
T5	AS2T52	16.15	19.3	1.767	2.69	0.022	0.063	0.110	0.135	6.1	1.3	35	SM	2.00	0.300	5	5	9	133
T5	AS2T53	16.29	16.6	1.786	2.70	0.022	0.063	0.110	0.135	6.1	1.3	35	SM	2.00	0.260	5	4	6	133
T6	AS2T61	17.03	22.3	1.674	2.69	0.020	0.050	0.090	0.120	6.0	1.0	42	SM	2.00	0.200	53	52	56	62
T6	AS2T62	17.15	22.1	1.696	2.69	0.022	0.055	0.100	0.135	6.7	3.3	39	SM	2.00	0.190	75	76	82	62
T6	AS2T63	17.29	21.8	1.665	2.69	0.032	0.100	0.175	0.250	7.8	1.3	22	SM	2.00	0.250	16	14	18	62
T6	AS2T64	17.43	26.6	1.592	2.68	0.080	0.235	0.400	0.500	6.3	1.4	9	SW-SM	2.00	0.300	3	1	3	62
T9	AS2T91	22.39	25.1	1.627	2.67	0.020	0.055	0.090	0.140	7.0	1.1	42	SM	2.00	0.200	67	65	76	125
T9	AS2T92	22.55	21.5	1.703	2.67	0.015	0.050	0.085	0.110	7.3	1.5	45	SM	2.00	0.250	8	9	15	125
T9	AS2T93	22.69	21.7	1.685	2.67	0.013	0.035	0.060	0.080	6.4	1.2	58	ML	2.00	0.300	6	7	14	125
T11	AS2T111	24.63	27.7	1.534	2.68	0.020	0.055	0.095	0.125	6.3	1.2	41	SM	2.00	0.200	228	228	234	136
T11	AS2T112	24.77	26.2	1.554	2.68	0.020	0.055	0.095	0.125	6.3	1.2	41	SM	2.00	0.250	20	21	32	136
T11	AS2T113	24.91	22.8	1.615	2.68	0.020	0.055	0.095	0.125	6.7	3.3	41	SM	2.00	0.300	5	4	9	136
T12	AS2T121	25.31	25.0	1.650	2.68	0.010	0.027	0.045	0.072	7.2	1.0	72	ML	2.00	0.200	38	39	44	130
T12	AS2T122	25.43	27.6	1.542	2.68	0.014	0.039	0.065	0.110	7.9	1.0	54	SM	2.00	0.250	8	4	7	130
T12	AS2T123	25.57	27.1	1.564	2.68	0.010	0.027	0.045	0.072	7.2	1.0	72	ML	2.00	0.150	183	178	183	130

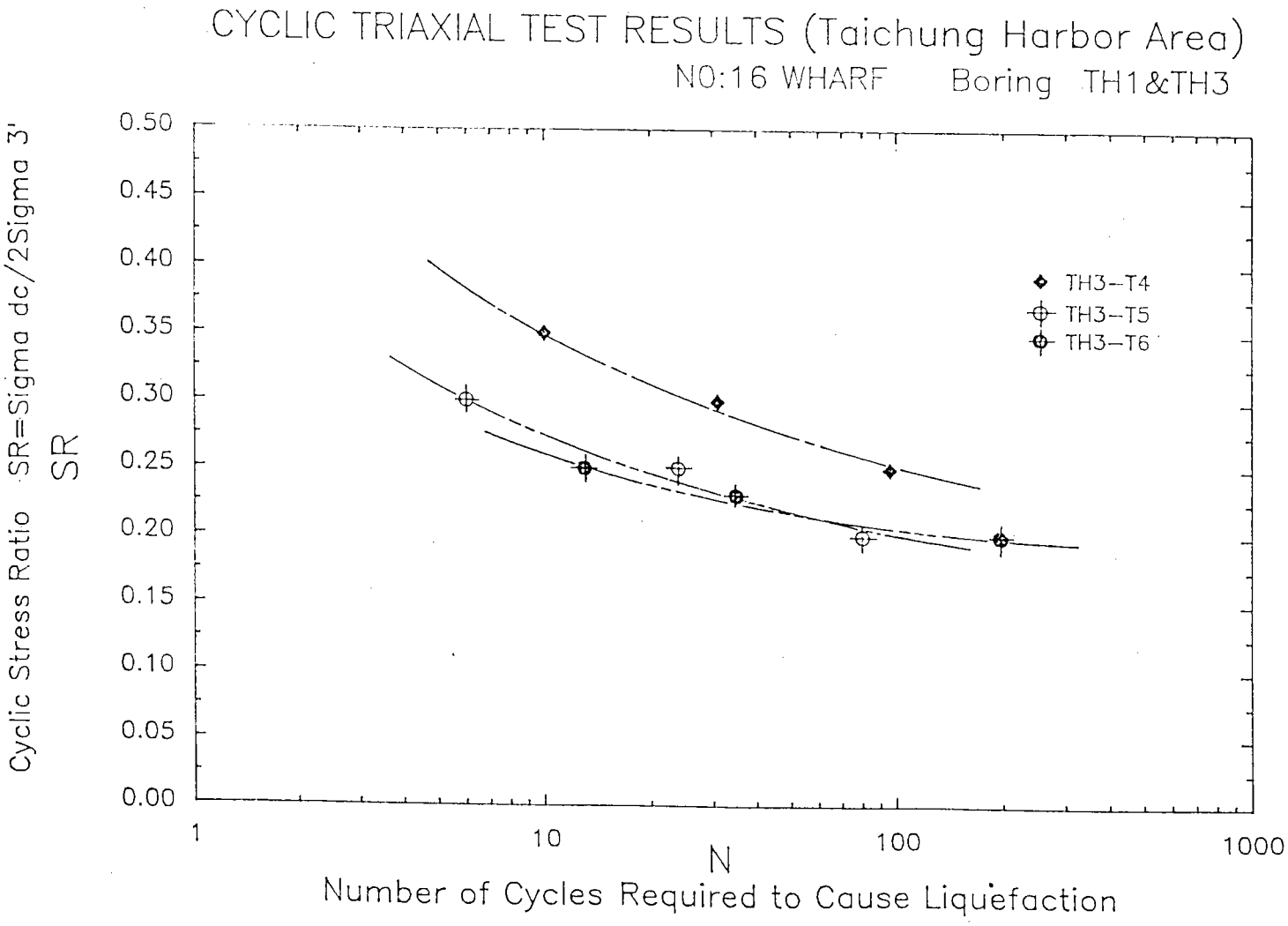


圖4-5 代表性液化特性曲線

軸試驗結果，可顯示各港區砂土之一般液化特性，如圖4-6至圖4-8所示，由諸圖中可得各港區砂土之一般液化特性曲線。

由各港區砂土之液化特性曲線可分別求得其在特定次數，即不同地震規模，反復荷重作用下發生液化所需之剪應力比，即液化强度，作爲一般液化潛能評估之依據。砂土之液化强度一般以其在地震規模M＝7.5，即相當反復次數Neq＝15之地震作用下發生液化所需之剪應比，SR，表示之。由圖4-6至圖4-8分別可得各港區砂土之液化强度，列如表4-2所示。

表4-2　各港區砂土之液化强度

	含水率 %	乾密度 g／cm³	粒徑分佈		土壤 分類	液化强度 SR
			D_{50} mm	FC %		
台中港區	27.4±3.0	1.52±0.07	0.14±0.06	26±12	SM	0.277±0.043
高雄港區	25.6±2.1	1.56±0.03	0.18±0.06	24±6	SM	0.241±0.014
安平港區	24.7±2.4	1.61±0.07	0.14±0.09	33±12	SM	0.248±0.013

根據統計得知，地震規模愈大，其所引致之震動延時愈長，亦即震動反復次數愈多。表4-3所示係Seed et al.(1975)利用强震紀錄及Miner(1945)所提金屬疲勞損害觀念，以統計方法求得之不同地震規模所對應之相當反復作用次數Neq。該表中亦表示Seed et al.(1975)利用代表性液化曲線（如圖4-9所示）計算而得之不同地震規模對應於M＝7.5之液化强度修正係數Cm。因此，砂土在不同地震規模作用下之液化强度，即可以下式計算：

$$(SR)_{M=M} = Cm(SR)_{M=7.5} \tag{4.1}$$

式中，$(SR)_{M=M}$及$(SR)_{M=7.5}$分別表示在地震規模M＝M及M＝7.5作用下之液化强度。

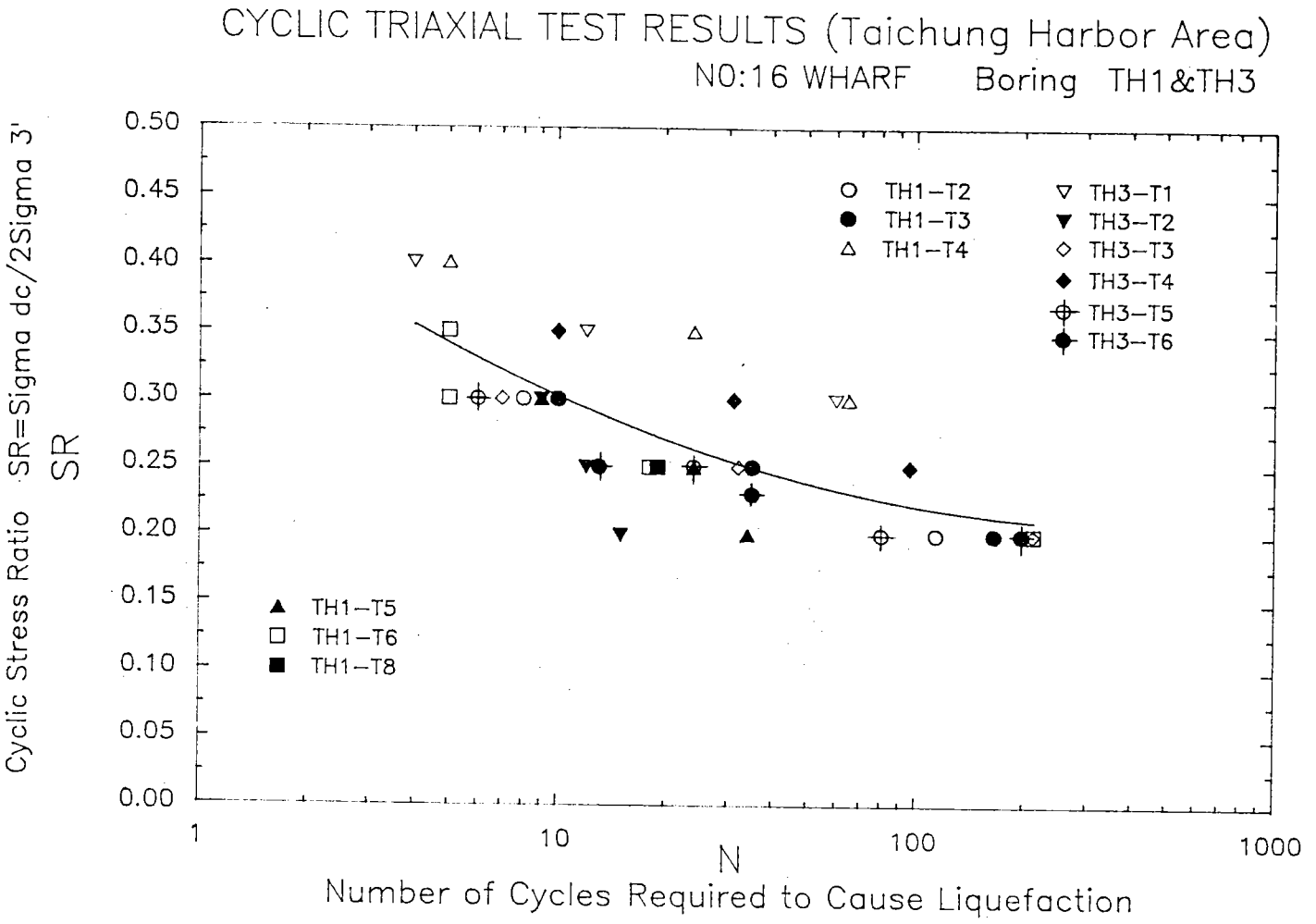


圖4-6 台中港區砂土液化曲線

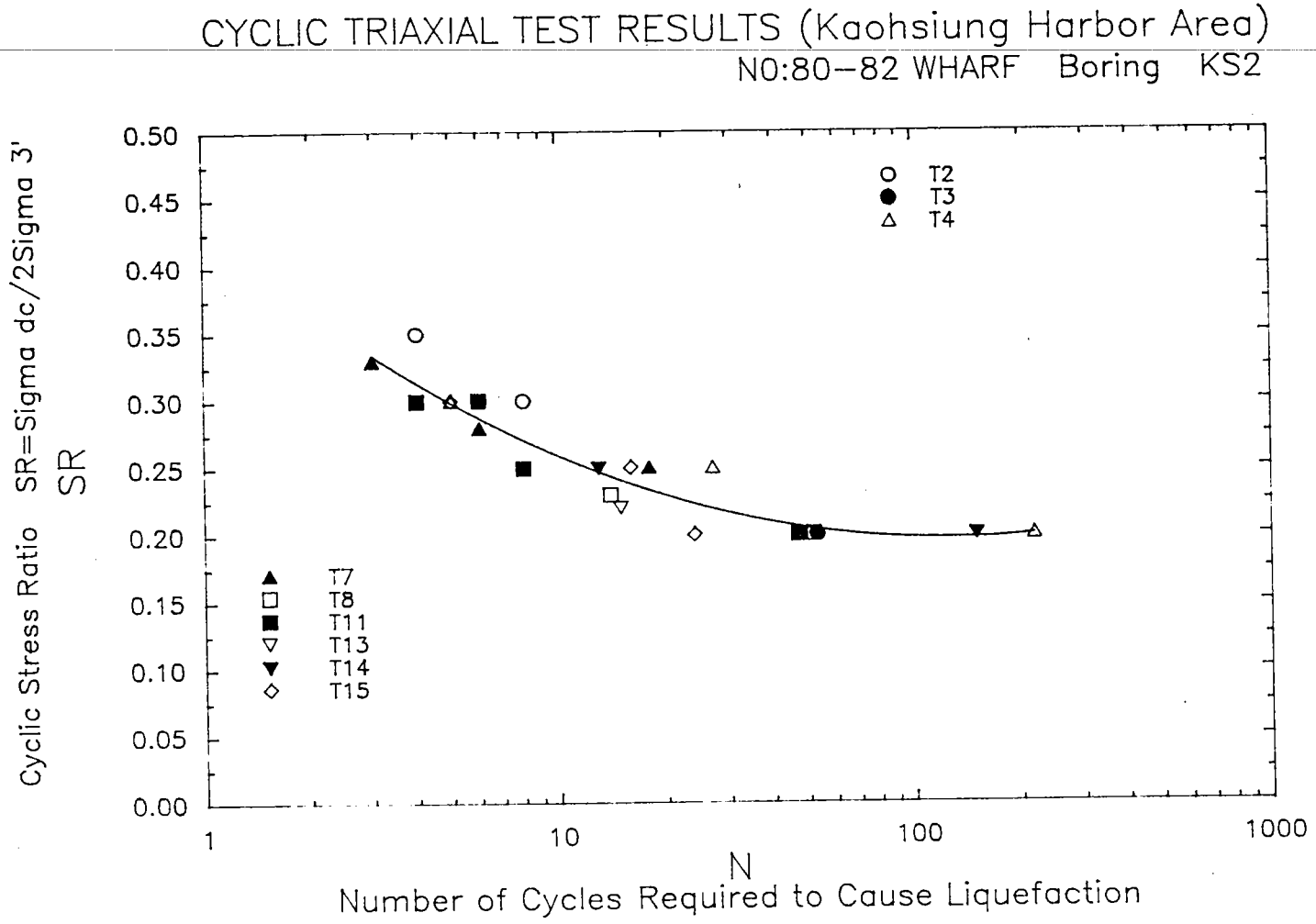


圖4-7 高雄港區砂土液化曲線

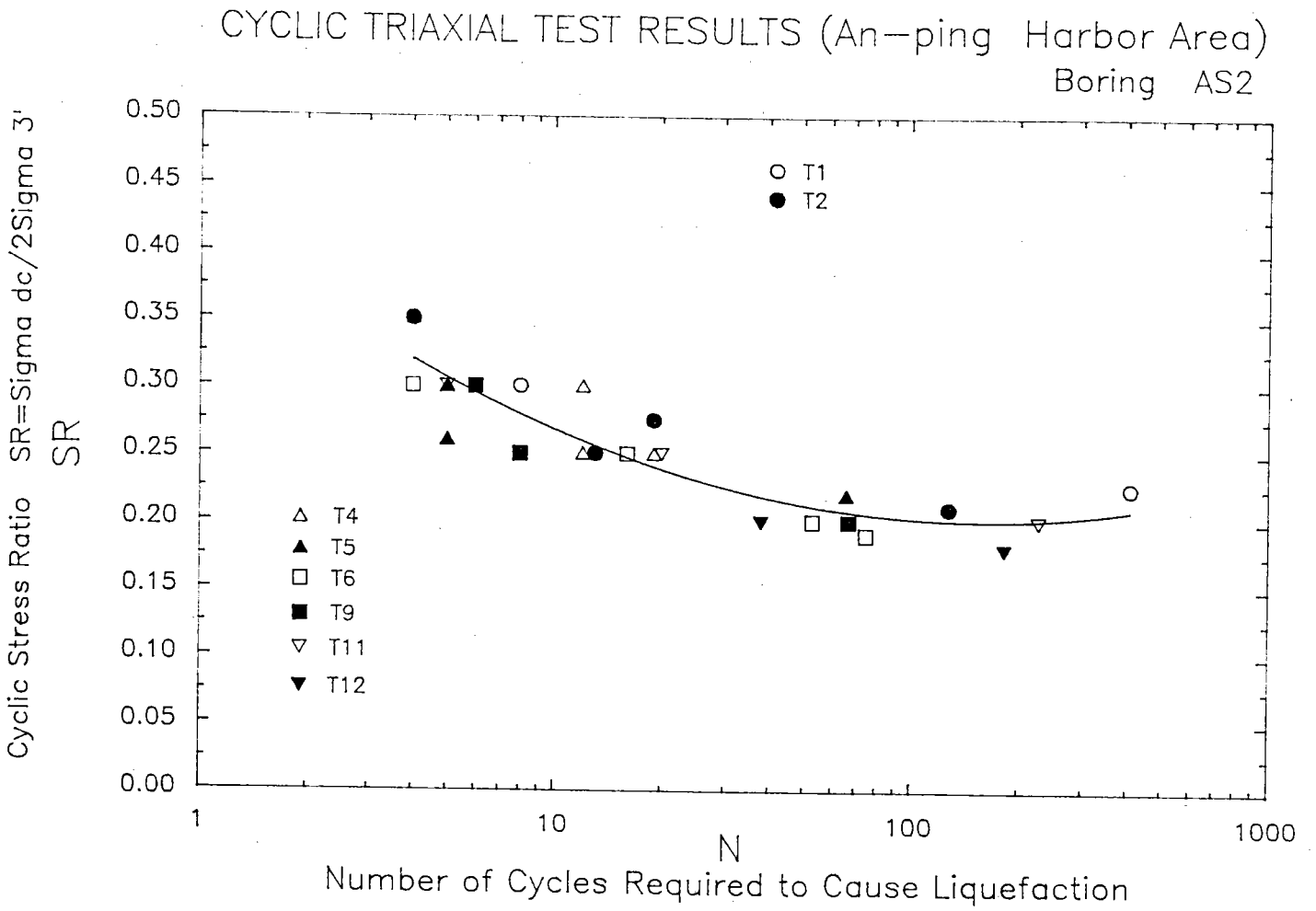


圖4-8　安平港區砂土液化曲線

表4-3　不同地震規模之作用次數及規模修正係數(Seed et al., 1975)

地震規模 M	相當反復剪應力0.65 τ_{max} 之作用次數，Neq	規模修正係數 Cm
8½	26	0.80
7½	15	1.00
6¾	10	1.13
6	5～6	1.32
5¼	2～3	1.50

本研究根據前述各港區各土樣之液化曲線亦算得地震規模修正係數，詳如表4-4所示，經迴歸分析，該修正係數可以下式表示：

$$Cm = \left(\frac{7.5}{M}\right)^{0.88} \qquad (4.2)$$

與前述之Seed等人建議值相比較，如圖4-10所示，顯示本研究所得之規模修正係數值略低(M＜7.5)。其中差異反映了各港區粉質砂土之液化曲線與Seed等人所建議之純淨砂土液化曲線之不同所致。

(三)CPT及SCPT試驗結果

本計畫之CPT及SCPT試驗結果詳見第三子計畫研究報告，與本計畫進行之薄管取樣孔號相對應之CPT及SCPT孔號如下對照表。

表4-4 各港區砂土之地震規模修正係數資料

各港區	M=5¼ Neq=3		M=6 Neq=5		M=6¾ Neq=10		M=7½ Neq=15		M=8½ Neq=26	
樣 號	SR	Cm	SR	Cm	SR	Cm	SR	Cm	SR	Cm
台中港區										
HP- 3										
T- 2	-		-		0.350	1.111	0.315	1.0	-	
T- 4	-		-		0.364	1.148	0.317	1.0	0.279	0.880
T- 5	-		0.425	1.441	0.328	1.112	0.295	1.0	0.262	0.888
T- 6	-		-		0.350	1.144	0.306	1.0	0.266	0.869
T- 7	-		0.405	1.489	0.309	1.136	0.272	1.0	0.235	0.864
T- 8	-		-		0.304	1.118	0.272	1.0	0.239	0.879
T-10	-		0.333	1.252	0.286	1.075	0.266	1.0	0.241	0.906
TH- 1										
T- 2	-		0.325	1.222	0.286	1.075	0.266	1.0	0.245	0.921
T- 3	-		0.344	1.233	0.300	1.075	0.279	1.0	0.258	0.925
T- 5	-		0.354	1.351	0.290	1.107	0.262	1.0	0.232	0.885
T- 6	-		0.322	1.229	0.279	1.065	0.262	1.0	0.241	0.920
TH- 3										
T- 1	0.419	1.225	0.390	1.140	0.358	1.047	0.342	1.0	0.323	0.944
T- 2	-		-		0.274	1.324	0.207	1.0	-	
T- 4	-		0.397	1.214	0.347	1.061	0.327	1.0	0.302	0.924
T- 6	-		0.291	1.183	0.259	1.053	0.246	1.0	0.230	0.935
高雄港區										
KS- 2										
T- 2	0.375	1.389	0.330	1.222	0.288	1.067	0.270	1.0	0.249	0.922
T- 3	0.357	1.434	0.313	1.257	0.270	1.084	0.249	1.0	0.226	0.908
T- 4	0.340	1.344	0.304	1.202	0.270	1.067	0.253	1.0	0.236	0.932
T- 7	0.329	1.360	0.295	1.219	0.258	1.066	0.242	1.0	0.226	0.934
T- 8	0.346	1.460	0.300	1.266	0.255	1.076	0.237	1.0	0.219	0.924
T-11	0.316	1.362	0.279	1.203	0.246	1.060	0.232	1.0	0.215	0.927
T-13	0.314	1.414	0.277	1.248	0.239	1.077	0.222	1.0	0.200	0.901
T-14	0.323	1.324	0.291	1.193	0.259	1.061	0.244	1.0	0.228	0.934
T-15	0.346	1.472	0.300	1.277	0.254	1.081	0.235	1.0	0.215	0.915
安平港區										
AS- 2										
T- 1	-		0.335	1.223	0.292	1.066	0.274	1.0	0.255	0.931
T- 2	-		0.327	1.248	0.281	1.073	0.262	1.0	0.241	0.920
T- 4	0.379	1.463	0.325	1.255	0.278	1.073	0.259	1.0	0.240	0.927
T- 5	0.302	1.238	0.279	1.143	0.258	1.057	0.244	1.0	0.232	0.951
T- 6	0.320	1.350	0.287	1.211	0.258	1.089	0.237	1.0	0.219	0.924
T- 9	0.338	1.402	0.295	1.224	0.257	1.066	0.241	1.0	0.223	0.925
T-11	0.338	1.320	0.304	1.188	0.270	1.055	0.256	1.0	0.240	0.938
平均值		1.370		1.244		1.089		1.0		0.915

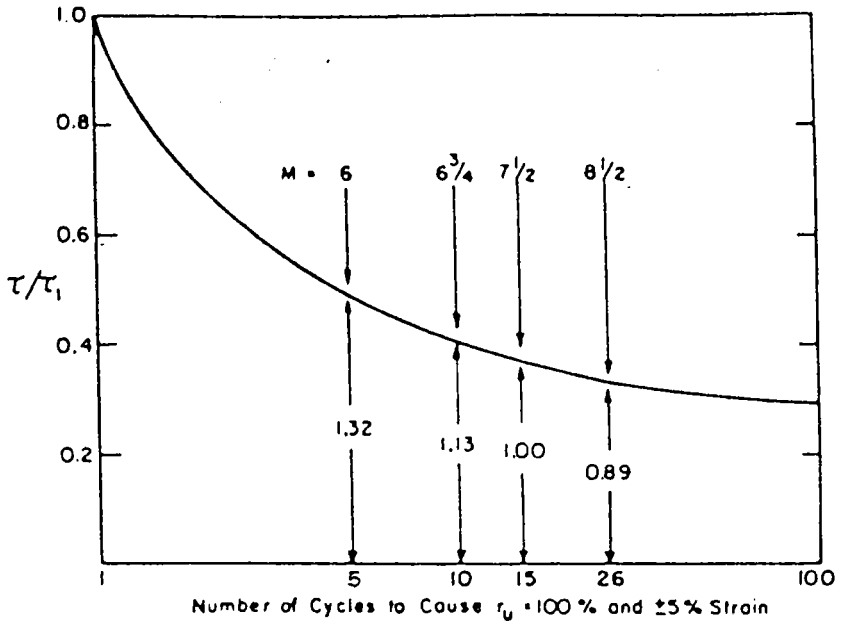


圖4-9　Seed建議之代表性正規化液化曲線

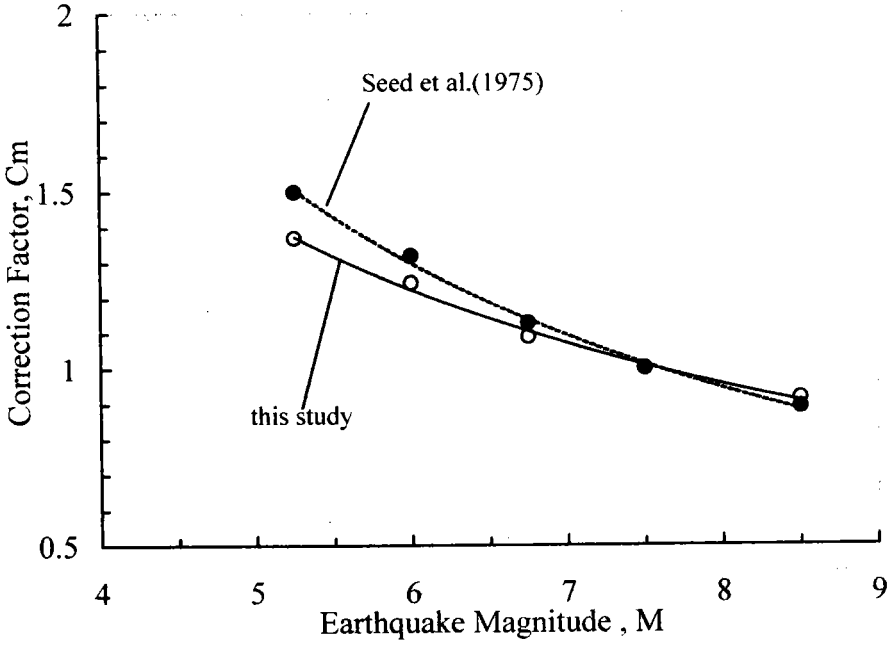


圖4-10 各港區規模修正係數與地震規模之關係

試驗地區	取樣孔號	CPT及SCPT孔號
台中港區	HP-3	
	TH-1	CPT-P1
	TH-3	CPT-P3
高雄港區	KS-1	KH-H6
	KS-2	KH-H4
	KS-3	KH-H9
	KS-4	KH-H3
	KS-5	KH-H2
安平港區	AS-1	AP-H3
	AS-2	AP-H5
	AS-3	AP-H12
	AS-4	AP-H15

自CPT連續量測紀錄可取得對應於薄管取樣深度之CPT-q_c值。SCPT－Vs值紀錄爲非連續，其間距爲1公尺，對應於取樣深度之SCPT－Vs值多以內插法求得。各港區各對應於取樣深度之CPT-q_c值及SCPT－Vs值分別列如表4-1。

三、液化強度與CPT-q_c值之相關性

利用CPT-q_c值評估砂土液化特性之方法大致有二：(1)經驗相關法及(2)試驗相關法。

(1)經驗相關法

根據以往各地區地震時現地液化或不液化之反應以及現地CPT-q_c值等土壤特性資料，經歸納統計分析所建立之砂土液化之剪應力比與CPT-q_c值之關係，如圖4-11所示。建立這項關係需有充分之資料庫。圖4-11所示係分別由Robertson et al.(1985)、Seed et al.(1986)及Shibata et al.(1988)所建立之關係，其間由於引用資料互異或不足，而存有相當差異。

(2)試驗相關法

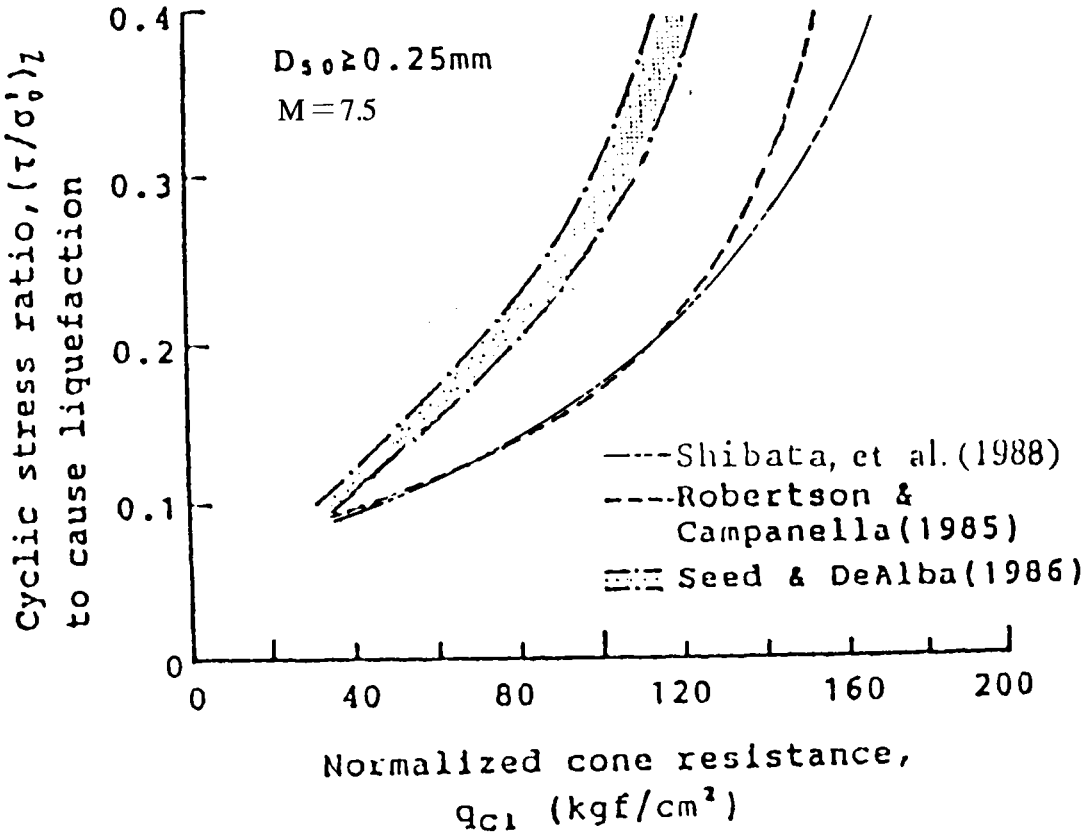


圖4-11 液化所需剪應力與修正錐頭阻抗之關係

由現地採取不擾動土樣在試驗室進行液化試驗，建立土壤液化强度與CPT-q_c值之關係。

由於本計畫進行一系列之動力三軸試驗，得以直接建立各港區砂土液化與CPT-q_c值之關係。這個關係如圖4-12所示，圖中SR爲在地震規模M＝7.5作用下砂土液化所需之剪應力比，q_{c1}爲修正之錐頭阻抗，係考慮有效覆土壓力之影響，將實測q_c值以式4-3修正至有效覆土壓力σ_o'＝1kg／cm^2。

$$q_{c1}=C_N q_c \tag{4.3}$$

上式中，C_N＝修正係數，可由圖4-13(Seed et al., 1983)或式4-4(Shibata et al., 1988)求得

$$C_N=\frac{1.7}{\sigma_o'+0.7} \qquad (\sigma_o'\text{單位爲kg／cm}^2) \tag{4.4}$$

由圖4-12顯示，各港區粉質砂土之液化强度SR與CPT－q_{c1}值之關係大致爲線性，其關係式爲

$$SR=\frac{q_{c1}}{830}+0.19 \tag{4.5}$$

上式中之q_{c1}值介於20～100kg／cm^{2}間。

利用式4-5，得以CPT-q_c值評估各港區砂土之液化特性，以供其液化潛能之評估分析，其在時間及經費上均是相當經濟可行的。

四、討論

各港區砂土大部分屬於粉質砂土(SM)，其細料含量（通過200號篩之百分比，FC）多在12～45%間。砂土中之細料含量對其液化强度之影響，在本研究中由於資料尚不充分，並未細分探討，將來需進一步補充分析。

本研究中之砂土液化强度係以在動力三軸試驗之應力狀況下引致液化之剪應力比，SR＝$\sigma_{dc}/2\sigma_3'$表示，應用在實際之液化潛能評估分析時，另需將其轉換至現地應力狀況下發生液化之剪應力比，SR＝τ_h/σ_o'，如下式所示(Seed，1979)：

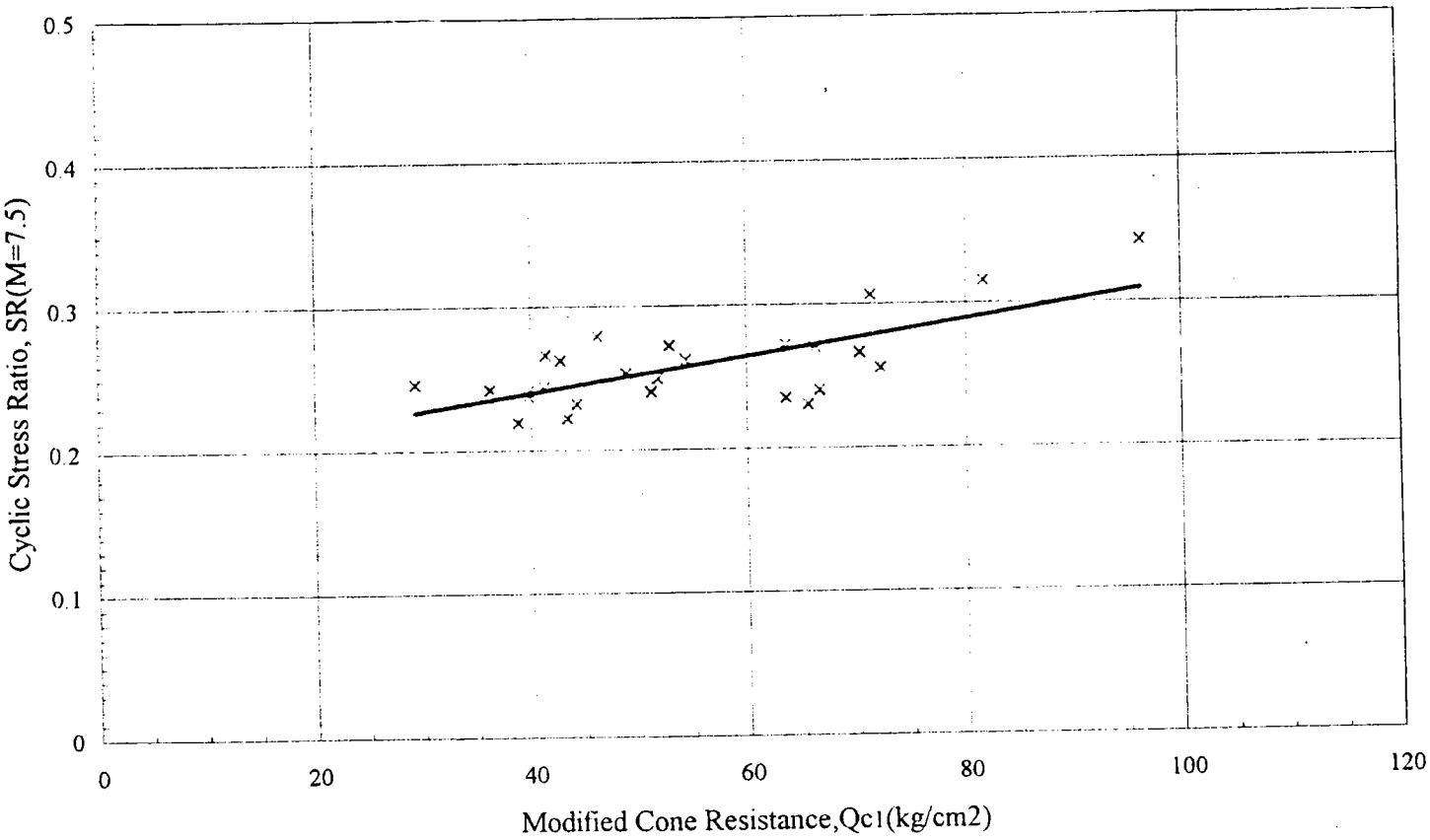


圖4-12 各港區砂土液化強度$(SR)_{M=7.5}$與CPT－q_{c1}值之關係

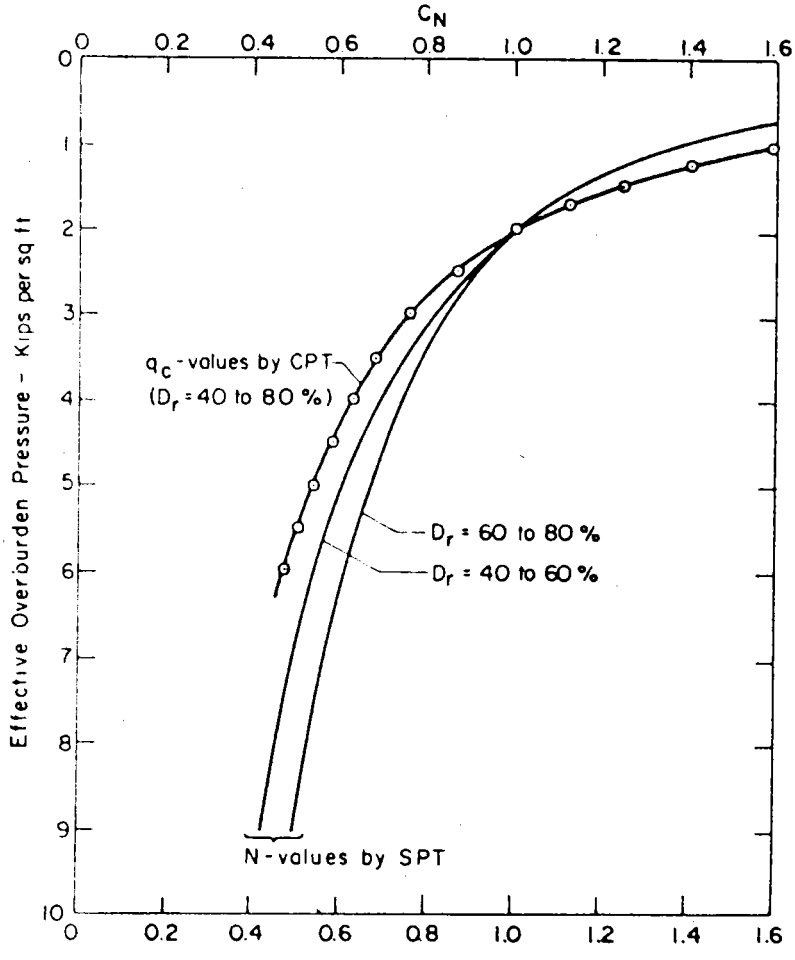

C_N
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
Effective Overburden Pressure - Kips per sq ft
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
q_c - values by CPT
(D_r = 40 to 80 %)
D_r = 60 to 80 %
D_r = 40 to 60 %
N - values by SPT

圖4-13 修正係數C_N

$$\left(\frac{\tau_h}{\sigma_o'}\right)_{l\text{-field}} = Cr\left(\frac{\sigma_{dc}}{2\sigma_3'}\right)_{l\text{-triaxial}} \qquad (4.6)$$

上式中，τ_h＝地震引致之現地平均剪應力

σ_o'＝有效覆土壓力

σ_{dc}＝動力三軸反復軸差應力

σ_3'＝有效圍壓

Cr＝修正係數，與靜止土壓力係數Ko有關

＝0.57(Ko＝0.4)，0.9～1.0(Ko＝1)

伍、地質改良

一、概說

砂性土層經液化分析評估，具有液化潛能者，需進行地質改良(Soil improvement)，改善其動態特性、增强其承載力以及對液化之抵抗能力，以防治液化之發生。砂土層液化防治之地質改良方法很多，其目標不外增加砂土層之密度、有效應力、或微結構之穩定性，從而增强其液化抵抗能力，因此改良方法大致可歸爲三類方式，即

(1)夯實法：提高土層之密度

(2)排水法：提高土層之密度與有效應力

(3)化學固結法：增加砂土顆粒間之膠結穩定

此三類之各種常用改良方法及其相關特性摘列如表5-1所示，可供方法選擇之參考。各種改良方法於下節詳述。

二、地質改良方法

(一)夯實法

此類方法係利用衝擊或振動作用，使砂土顆粒之配列趨於密實與穩定，增强砂土强度之方式。

1.壓實砂樁法(compaction sand pile method)

本法係利用振動或高壓空氣將鋼套管壓入砂土層中，鋼管內投入砂料，再藉鋼管反復提拔及振動作用，將砂料擠壓並夯實成密實樁體，同時也使樁體周圍土壤擠壓與震實。圖5-1爲壓實砂樁改良示意圖。

壓實砂樁法結合夯實與排水之地質改良機制，藉由砂樁對周圍土壤擠壓及機械夯實作用，使原有土層密度與强度增加，而砂樁本身具有相當之强度，地震引致之超額孔隙水壓亦可迅速消散，達到防治液化之目的。

本法爲常用之砂土層地質改良方法之一，但由於本法採用衝擊與振動方式，施工時產生之噪音與震動對周圍環境有不利影響，樁體四周之隆起現象，

亦需預先考慮處理對策。

表5-1　防治液化之地質改良方法及相關特性比較

原　理	改良方法	最大改良深度	適用土壤範圍	特　　點	相對費用
排水	降低地下水位法	可視需要增加	淨砂或沉泥質砂	造成過壓密效果	因工程而異
	礫石柱法	約30m	一般沖積土	透水率高，兼具夯實與排水作用	中等
夯實	壓實砂樁法	25m	鬆砂或黏性土	施工容易，惟對緊密層效果有限	中等
	動力壓密法	30m	鬆砂或黏性土	操作簡易迅速，震動大，適用於大區域	低等
	振動揚實法	33m	鬆砂	低噪音震動，改良深度大	中等
	震爆法	大於30m	淨砂或沉泥	施工迅速，對環境影響大	最低
化學固結	深層攪拌法	大於20m	軟弱黏土或鬆砂	低噪音震動，使用原地土壤拌合	中至高
	生石灰樁法	大於20m	軟弱黏土或鬆砂	低噪音震動，吸水發生膨脹擠壓作用	中至高

2.振動揚實法(Vibroflotation method)

本法係利用揚實錐(Vibroflot)之水平振動與噴水作用，使原有土層與回填料之顆粒級配重新調整，並由於振動夯實，使回填樁體兼具强度與排水功能。本法施工示意圖如圖5-2所示。

本法回填料可使用細砂、粗砂、礫石或碎石等，打設間隔一般在1.2～2.2m間，成正方形或正三角形配列。根據施工經驗，本法對砂土層之細料含量低於15%者改良效果良好，惟若細料含量超過40%，則很難達到改良效果。

本法之震動及噪音公害低。

3.動力壓密法(dynamic consolidation method)

本法係利用特殊吊車懸吊重量10～40t之重錘，自5～40m高處自由落下，反復對土層施加衝擊力，利用重錘之衝擊能量使土層產生壓縮與壓密作用，而致夯實土層，改良其工程特性。

本法係於1970年由法國Louis Menard發展出來，原應用於碎石填方或砂礫土層之改良，稱爲重錘搗實法(Heavy tamping method)或動力夯實法(Dynamic compacton method)，其後經研發改良，逐漸推廣引用於飽和粘土層或沖積土層之地質改良，易名爲動力壓密法(Dynamic consolidation method)。

本法改良機制在於重錘之衝擊作用在土層內產生强大應力波，其蓄含之巨大能量壓縮土層，未飽和土層經壓縮後達到更緊密之效果；對飽和土層則造成孔隙水壓之急劇上升，砂土層會導致局部液化，而將孔隙水迅速排出，對粘土層會在衝擊點周圍產生剪力破裂面，使孔隙水得以順利排出，如此導致土壤之組織結構重新排列而趨於緊密，達到壓實土層之作用。

本法之改良效果與錘擊能量之關係已累積不少經驗，其改良深度一般以Menard公式（如下式）初步概算：

$$D = \alpha (W \cdot H)^{1/2}$$

式中

D＝改良深度(m)

W＝錘重(t)

α＝土壤係數(砂質土壤α＝0.4～0.6)

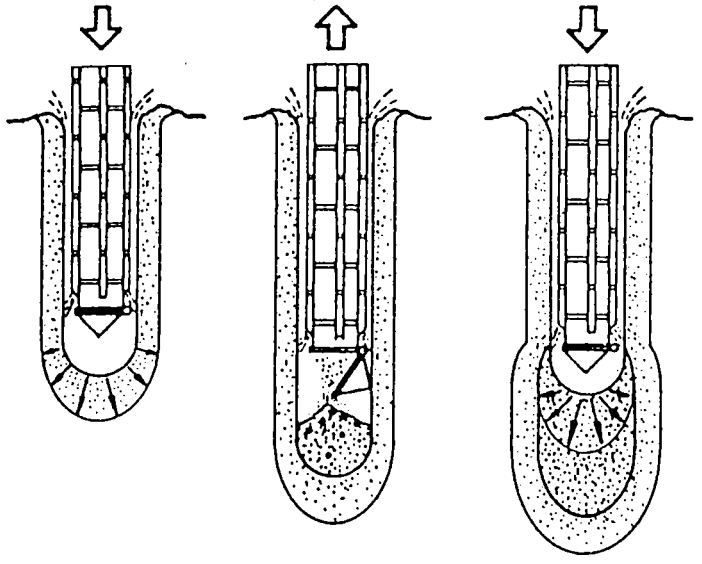


圖5-1　壓實砂樁改良示意圖

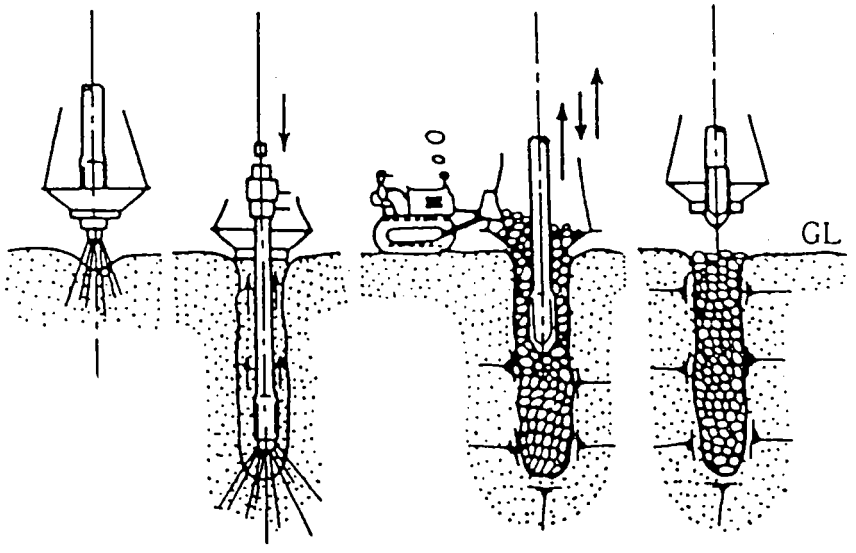


圖5-2　振動揚實法

本法施工簡易迅速，尤適用於大區域之地質改良，惟應考慮施工造成之震動對附近之影響。

4.震爆法(Blasting method)

本法係利用炸藥引爆產生高壓震波，迅速傳遞至土層深處，震波能量在土層內產生超額孔隙水壓，導致飽和砂土層液化，孔隙水迅速排出後，土壤顆粒重新排列而趨於緊密，因而達到地質改良效果。

本法費用低，惟其改良效果不均，對深層緊密土層可能造成反效果，並且爆炸產生震動、噪音與安全問題。

(二)排水法

此類方法或利用排水降低砂土層地下水位，增加土層之有效應力；或提高土層之透水性，使地震引致之超額孔隙水壓能迅速排除，以增强土層之抗液化能力。

1.降低地下水位法

利用排水降低地下水位，可使原有土層之有效應力增加，並使其地下水位以上之飽和度降低，其液化抵抗能力因而提高。降低地下水位亦略使土層產生壓密作用，惟其效果當遠不如動態夯實作用。

暫時性之地下水位降低，可造成土層之過壓密效果，有助其對液化之抵抗力。

2.礫石柱法(Graval drain method)

本法係以振動方式將套管打入砂土層中，再以礫石回填震實，使形成礫石柱體。施工過程之振動作用，使砂土層趨於緊密，而礫石柱體具有良好之排水功能。本法係結合排水與夯實兩種方法之地質改良方法，防治液化效果較之壓實砂樁法爲佳。

(三)化學固結法

此類方法係在土壤內添加固結材料，使土壤與固結材料發生固結化學反應，或在土層內填注硬化性材料固化土壤，以改善土層之工程特性。

1.深層攪拌法(Deep mixing pile method)

本法係將粉末或漿液狀之改良材料與原有土層之土壤攪拌混合，藉由化學固結作用而改良土層。本法依混合作業方式不同，可分爲以化學安定液或粉狀安定劑爲主之攪拌混合法，及以高壓噴射爲主之噴射混合法，如圖5-3所示。

本法於施工中不產生噪音或振動，惟其費用高，且需考慮改良材料對周圍環境污染之影響。

2.生石灰樁法(Lime pile method)

本法係將特殊生石灰或生石灰與砂土混含料，打入地下水位以下之砂土層中，形成石灰樁體。樁體吸水後之膨脹反應產生膨脹壓力，將樁體間之土層壓實，而樁體本身亦由凝結作用產生相當之強度。本法以靜態方式改良土層，施工時不產生振動與噪音，對地下水之污染問題，則需預作評估與防治。

三、改良方法之評估與選擇

防治砂土層液化所可採行之地質改良方法很多，已如上節所述。各種改良方法分別具有不同之特性、限制與優劣條件，其優劣之評估與選擇並不能單憑處理改良效果加以評斷，尙需考量許多因素。如何選擇適當之方法，以較低之經費，在合理之工期內達到較佳之改良效果，必需就下列諸因素審慎評估比較：

(1)原有土層之土質狀況

(2)計劃改良之區域範圍與深度

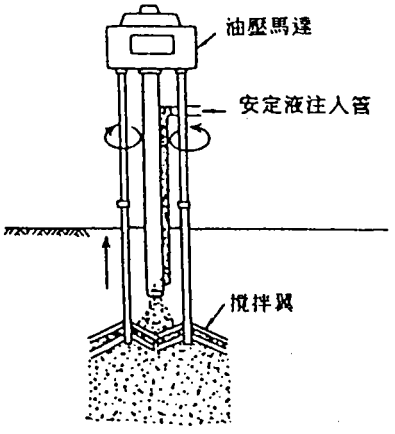
(3)所需之改良程度及檢核方法

(4)廠商之施工能力及以往之工程施工經驗

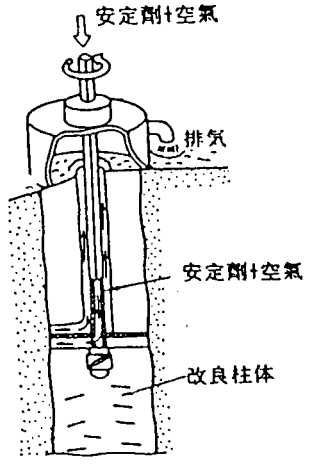
(5)環境限制因素之考量

(6)工期之配合與經費。

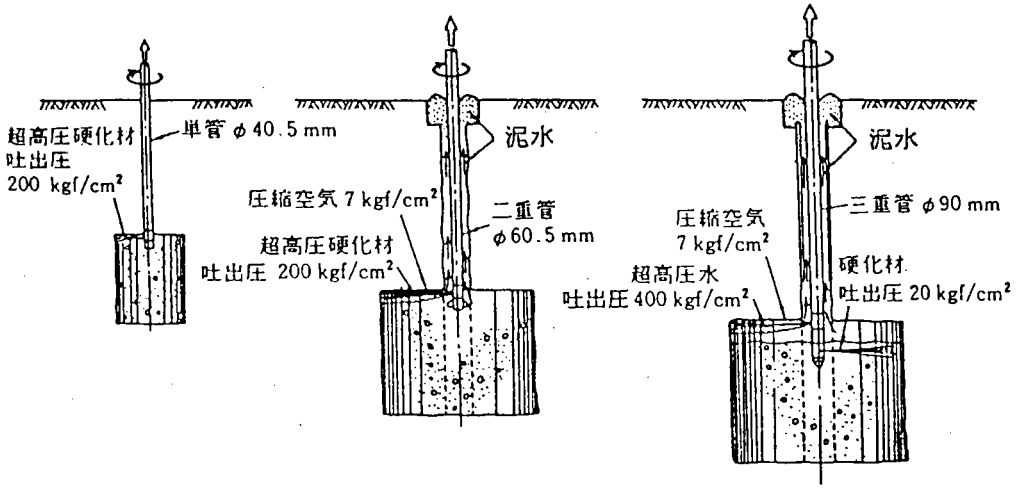
近年來，國內對於大面積砂質回填土層爲防治液化之地質改良方法仍以夯實法之壓實砂樁法及動力壓密法爲主。舉其大者，如中油永安液化天然氣接收站、高雄港第五貨櫃中心等使用壓實砂樁法；動力壓密法則在民國82～83年間始引進國內，大規模使用於台塑六輕抽砂回填地之地質改良。



安定液之混合處理



安定粉劑之混合處理



單管硬化劑噴射　　二重管硬化劑噴射　　三重管硬化劑噴射

圖5-3　深層攪拌法

陸、結論與建議

本研究計畫進行一系列室內動力三軸試驗與現地CPT試驗，探討台灣西海岸台中、高雄及安平等主要港區砂土層之液化特性，並建立室內試驗與現地試驗結果之相關性，以供液化評估之依據；另在台中港區埋設孔隙水壓計，進行長期之孔隙水壓地震反應之量測分析；爲防治砂土層之液化，並研提適當之地質改良方法。下列爲獲致之結論與建議：

1.台中、高雄及安平等港區粉質砂土之液化特性分別如圖4-6至圖4-8所示。在地震規模M＝7.5作用下之液化強度均值分別約爲SR＝0.277（台中港），0.241（高雄港），及0.248（安平港）。

2.利用各港區粉質砂土之液化曲線特性，求得地震規模修正係數，$Cm=(7.5/M)^{0.88}$，可據以計算各港區砂土在不同地震規模作用下之液化強度，$(SR)_{M=M}=Cm(SR)_{M=7.5}$。

3.各港區粉質砂土之液化強度與CPT－q_{c1}有線性關係（式4-5，q_{c1}＝20～100kg／cm^2），利用（式4-5）得以現地CPT試驗結果快速、經濟而合理地評估其液化特性。

4.各港區粉質砂土中之細料含量對其液化強度之影響，由於資料尚不充分而未予細分探討，有待將來進一步補充分析。

5.就目前僅測得之小地震而言，其所引致之最大孔隙水壓大致在出現最大加速度直後產生，並大致與最大加速度成正比，其後孔隙水壓僅隨地震動振盪，並未產生漸進性升高。這項動態孔隙水壓之地震反應需進行長期之量測工作。

6.防治砂土液化之地質改良方法有夯實法、排水法及化學固結法三類，而以夯實法中之壓實砂樁法及動力壓密法適合大面積之地質改良。國內以採用該兩法爲主要地質改良方法。

參考文獻

(1)江志俊，「超額孔隙水壓與地盤運動之相關性研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，台北(1989)。

(2)陳正興、吳偉特、蔣繼忠、黃俊鴻、陳立言、江志俊，「羅東核能廠模型基地土壤地震反應之量測(一)」，國科會防災科技研究報告77-61號，台北(1989)。

(3)陳正興、吳偉特、蔣繼忠、黃俊鴻、陳立言、江志俊，「羅東核能廠模型基地土壤地震反應之量測(二)」，國科會防災科技研究報告78-28號，台北(1989)。

(4)Ishihara,k., Shimizu,k., and Yamada,Y., "Pore Water Pressure Measured in Sand Deposits During an Earthquake," Soils and Foundations, Vol. 21, No.4 (1981).

(5)Ishihara,k., Anazawa,Y., and Kuwano, J.,"Pore Water Pressure and Ground Motions Monitored During the 1985 Chiba-Ibaragi Earthguaske," Soils and Foundations, Vol.27, No.3(1987).

(6)Ishihara,k., "Measurement of Insitu Pore Water Pressure During Earthquakes, " Proc. Intl. Conf. on Recent Advances in Earthquake Engineering and Soil Dynamics,Missouri, Vol. No.1(1981).

(7)Shen,C.K.et. al.,"Insitu Pore Pressure Measurements During Earthquakes," The Second Int. Sym. of Field Measurements in Geomechanics, Kobe, Japan (1987a).

(8)Shen, C.K.et. al.,"Insitu Pore Pressure Measuremets at Lotung site, "Work-shop on Validation of Seismic Soil-structure Interaction Analyses Techniques Using Lotung Experiment Data, Paloalto, California, U.S.A.(1987b).

(9)Seed,H.B., and Lee,K.L., "Liquefaction of Saurated Sands During Cyclic Loading," JSMFD, ASCE, Vol. 92, SM 6(1966).

(10)Seed,H.B., "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes," ASCE, Journal of Geotechnical Engineeing

Division, Vol.105, No.GT2(1979).

(11) Arulmoli,K., and Arulanadan,K.,"New Method for Evaluating Liquefaction Potential", ASCE,Journal of Geotechnical Egineering, Vol.111, No.1(1985).

(12) Robertson,P.K., Woeller,D,J., and Finn,W.D.L., "Seismic CPT for Evaluating Liquefaction Potential Under Cyclic Loading," Canadian Geotechnical Journal, August(1992).

(13) Robertson,P.K., and Campanella,R.G., 'Liquefaction Potential of Sands Using the CPT", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.111, No.3, March (1985).

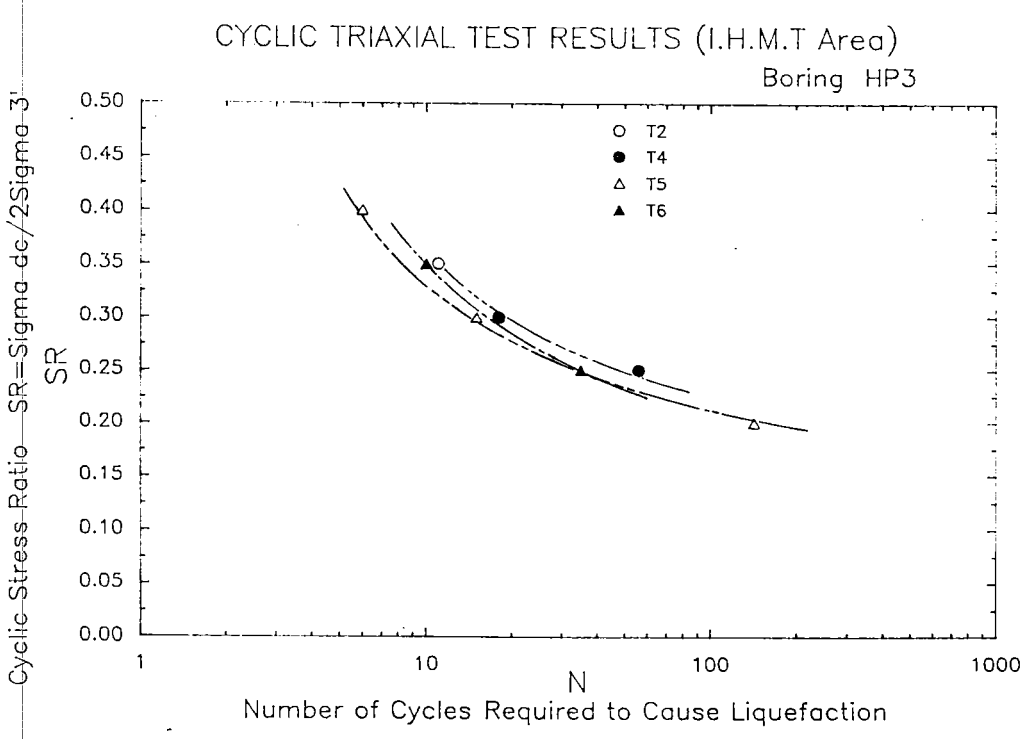
(14) Shibata,T., and Teparaksa,W., "Evaluation of Liquefaction Potential of Soils Using Cone Penetration Tests", Soils and Foundations, Vol.28, No.2, June (1988).

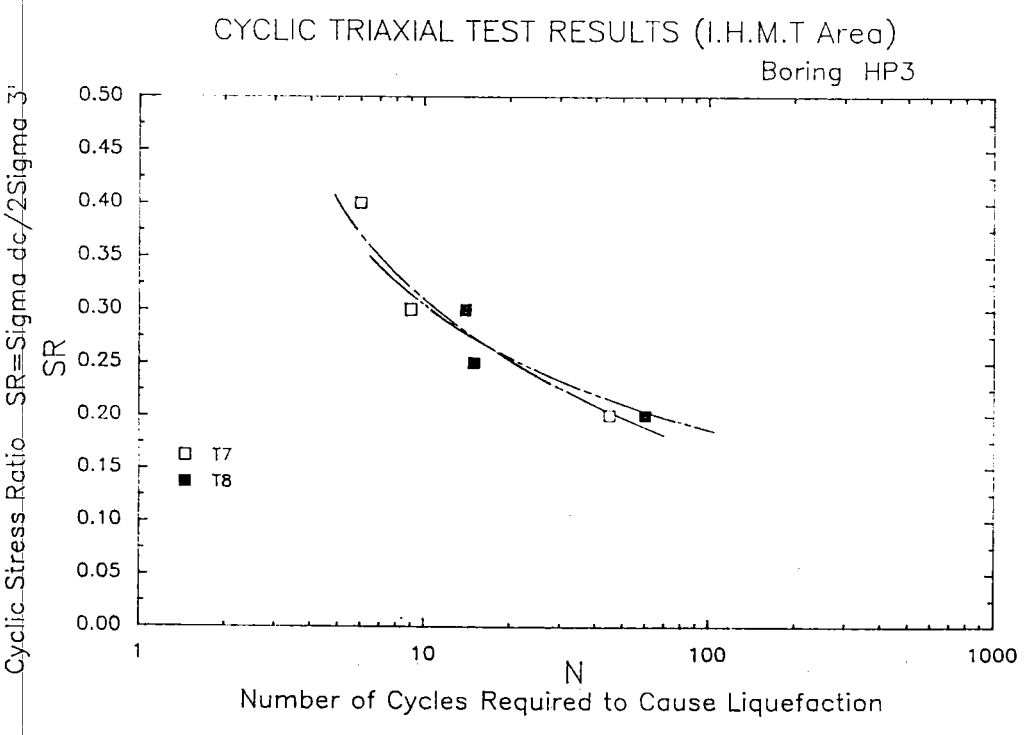
(15) Seed,H.B., Idriss,I.M., and Arango,I., "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No.3, March(1983).

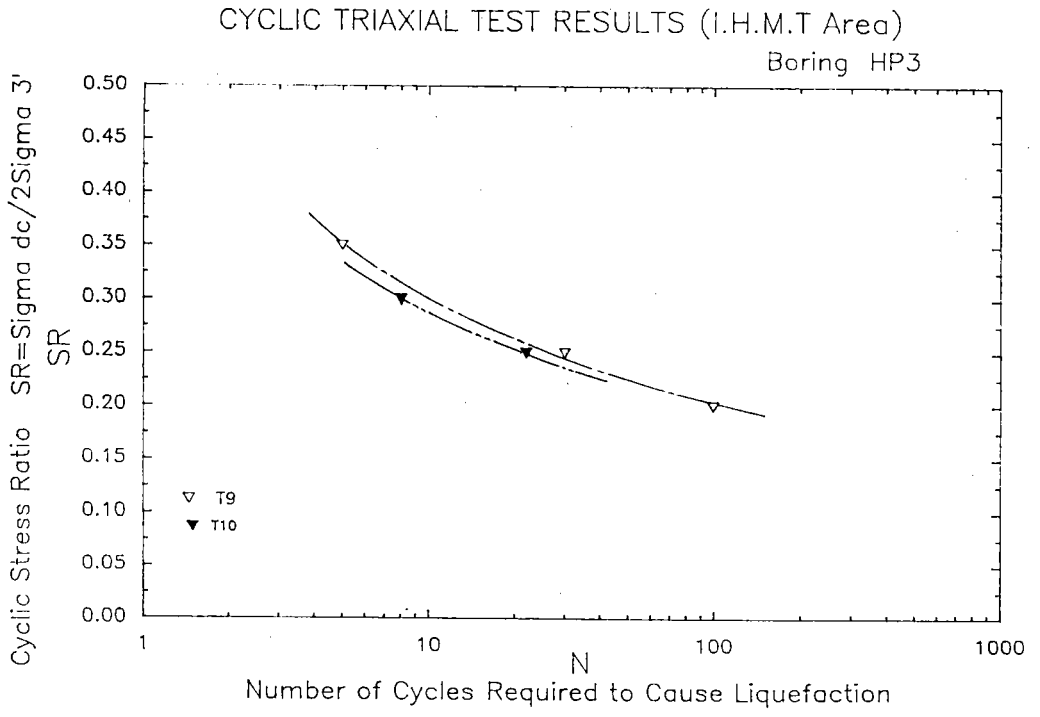
(16) Seed,H.B., Idriss, I.M., Makdisi,F., and Banerjee,N., "Representation of Irregular Stress Time History by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses," Report No. EERC 75-29, EERC, U.C. Berkeley, California (1975).

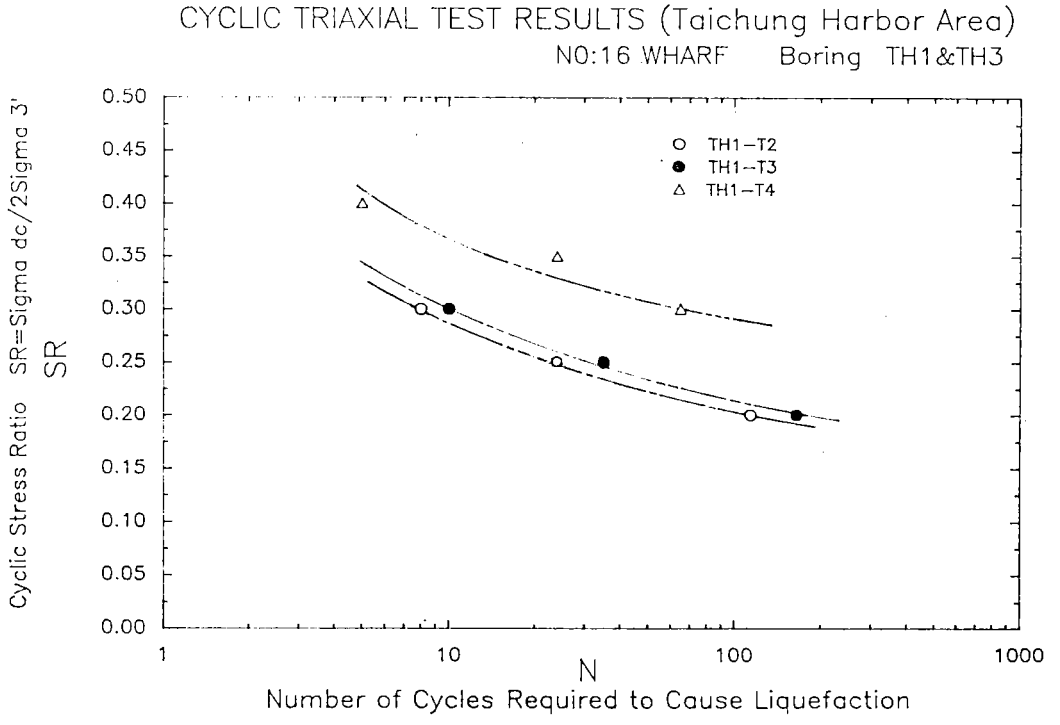
(17) Miner,M,A., "Cumulative Damage in Fatigue," Transactions, ASME, Vol.67 (1945).

附錄一　各港區土樣之液化曲線


CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (I.H.M.T Area)
Boring HP3
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
T2
T4
T5
T6
1
10
100
1000
N
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction

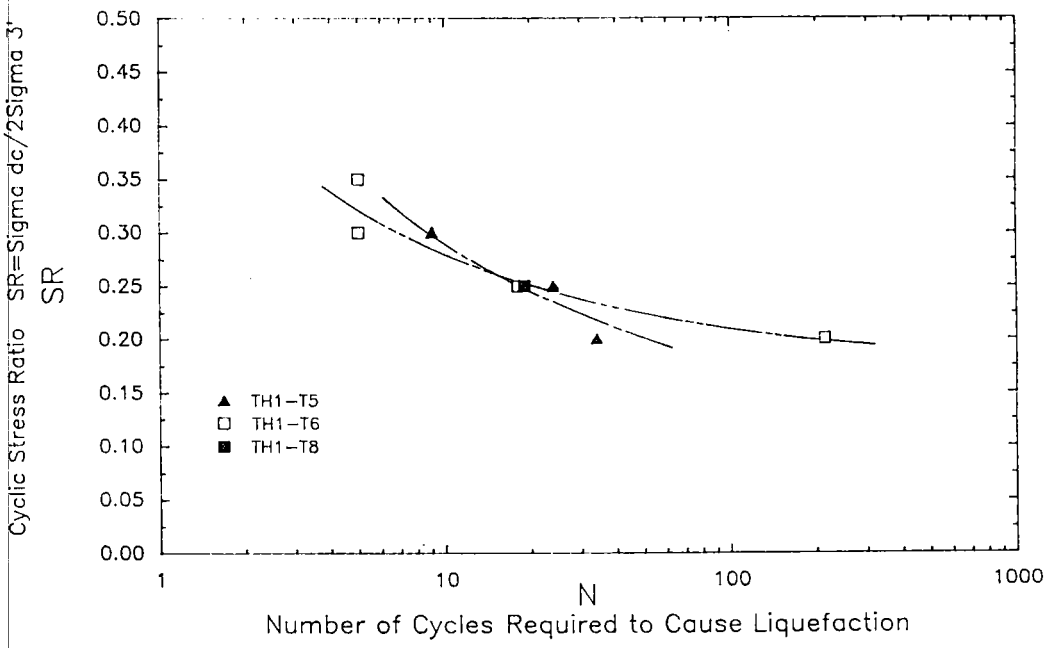

CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (I.H.M.T Area)
Boring HP3
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
T7
T8
1
10
100
1000
N
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction


CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (I.H.M.T Area)
Boring HP3
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
T9
T10
1
10
100
1000
N
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction


CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Taichung Harbor Area)
NO:16 WHARF Boring TH1&TH3
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
TH1-T2
TH1-T3
TH1-T4
1
10
100
1000
N
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction

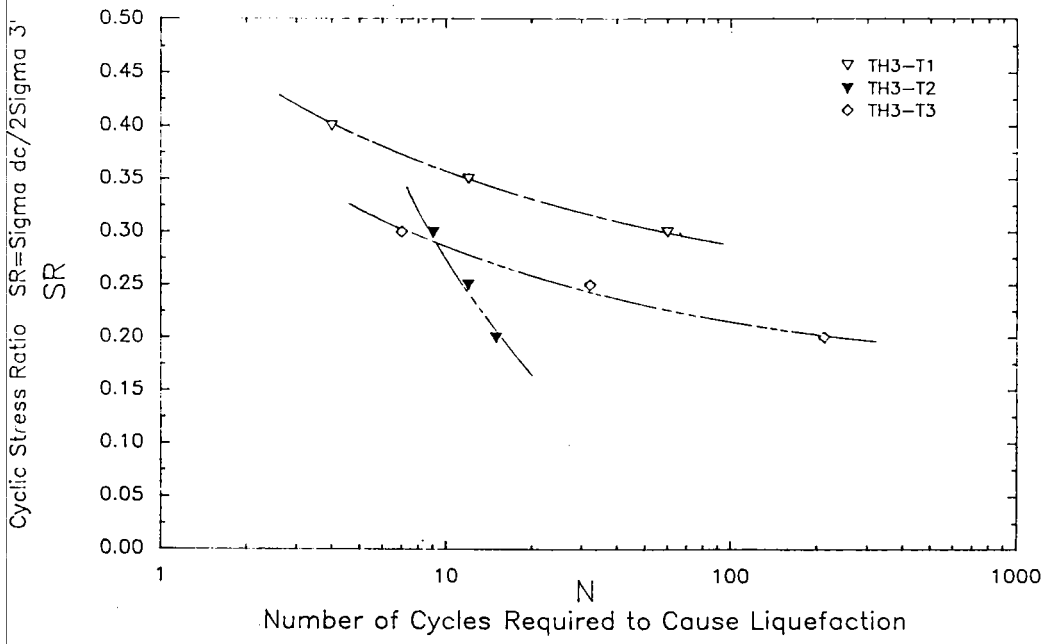
CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Taichung Harbor Area)

NO:16 WHARF Boring TH1&TH3



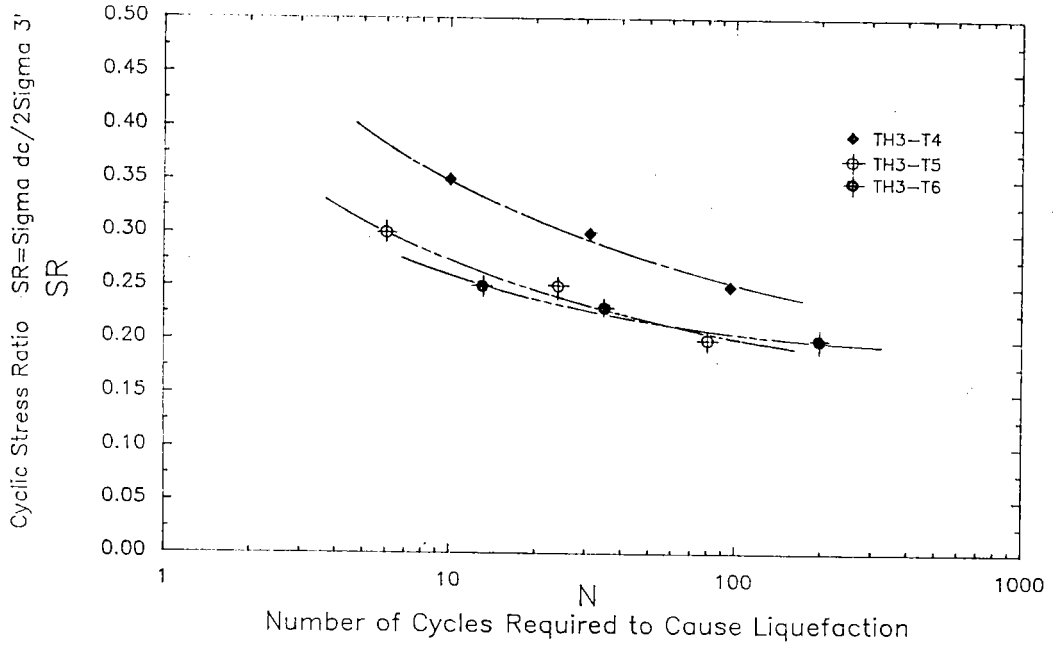
CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Taichung Harbor Area)

NO:16 WHARF Boring TH1&TH3



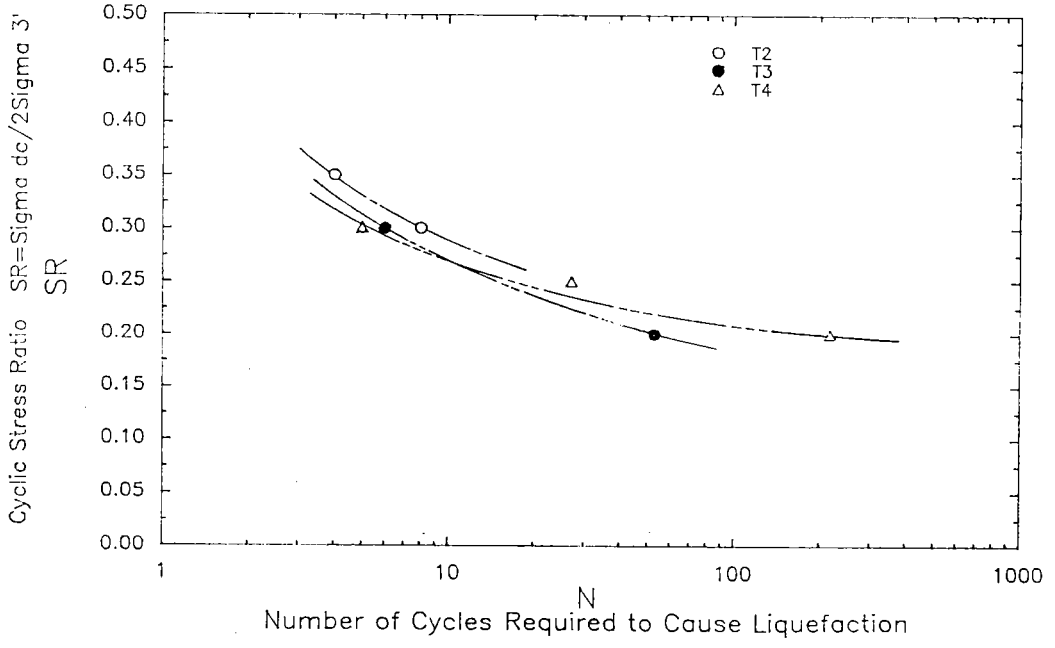
CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Taichung Harbor Area)

NO:16 WHARF Boring TH1&TH3



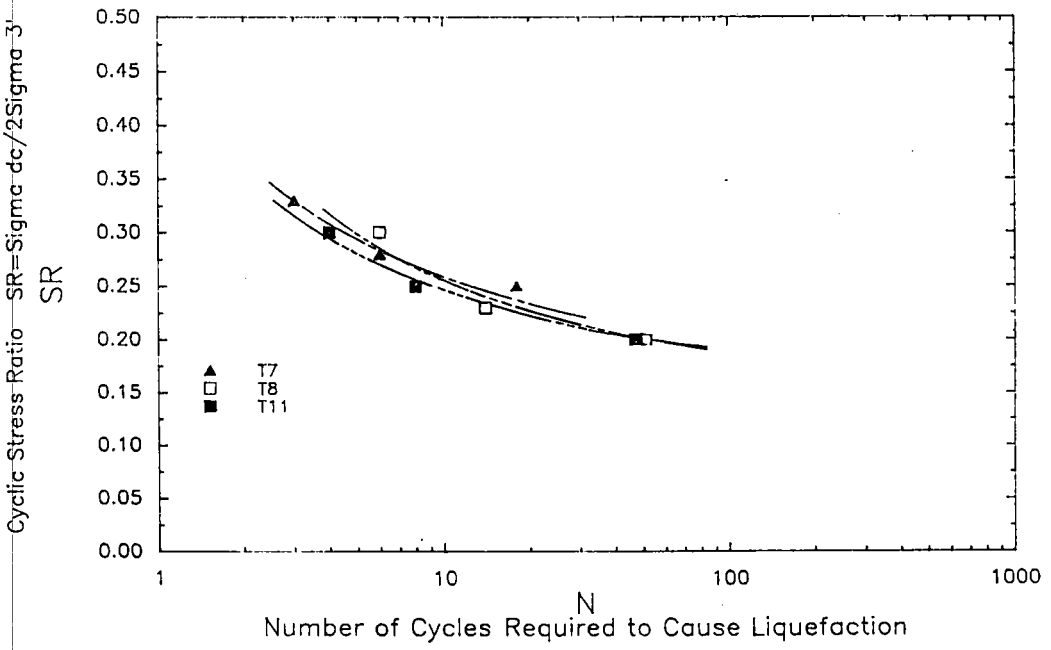
CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Kaohsiung Harbor Area)

NO:80-82 WHARF Boring KS2



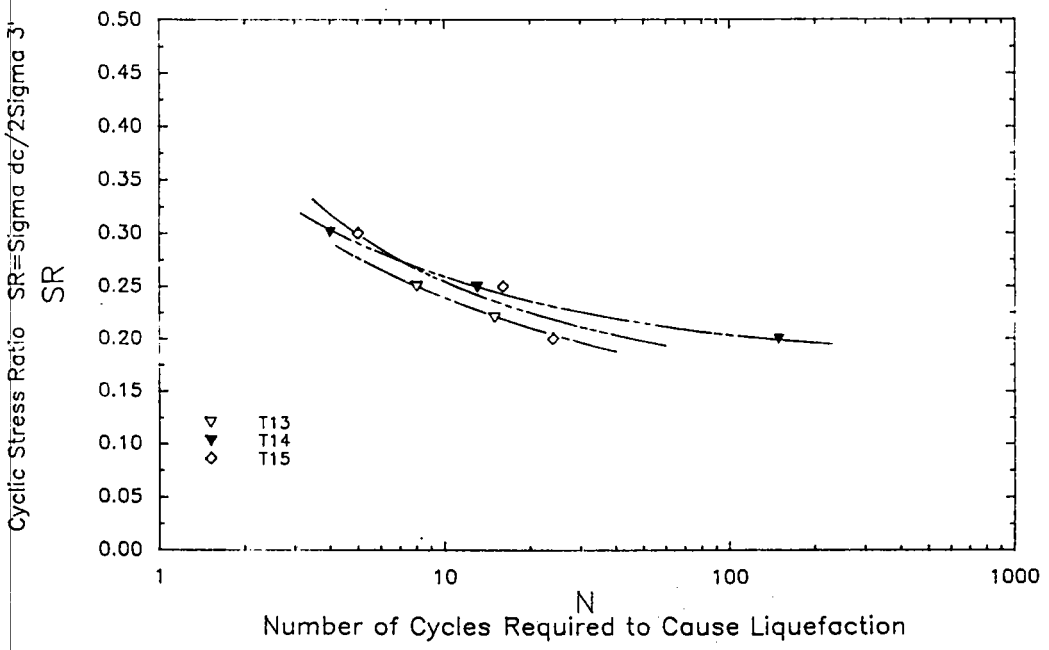
CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Kaohsiung Harbor Area)

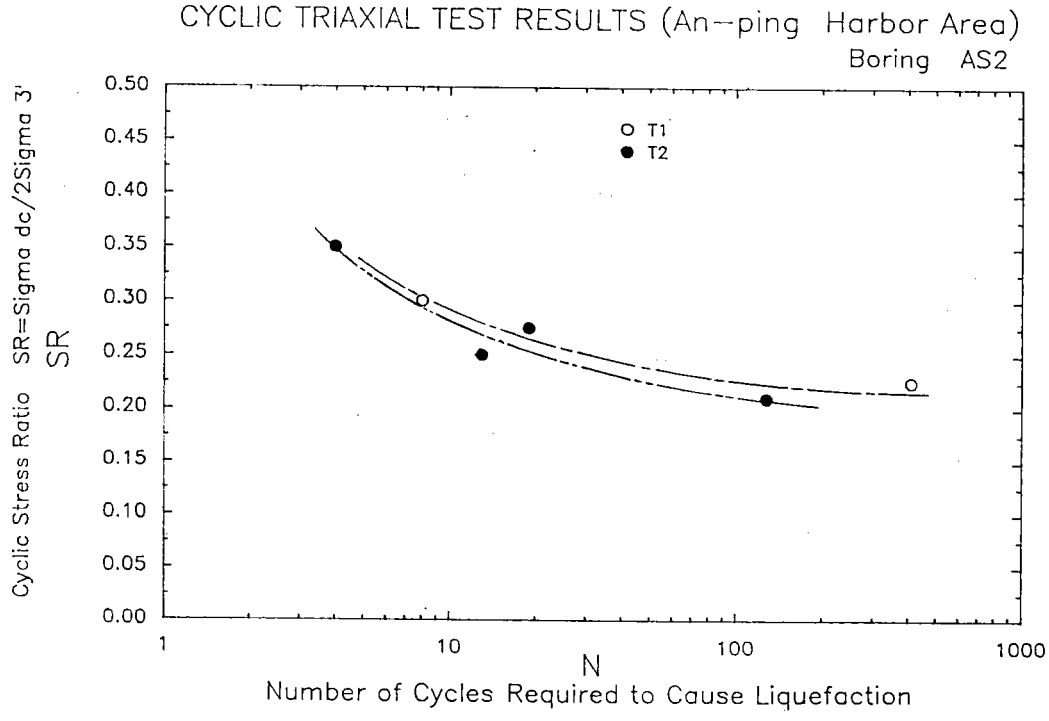
NO:80–82 WHARF Boring KS2

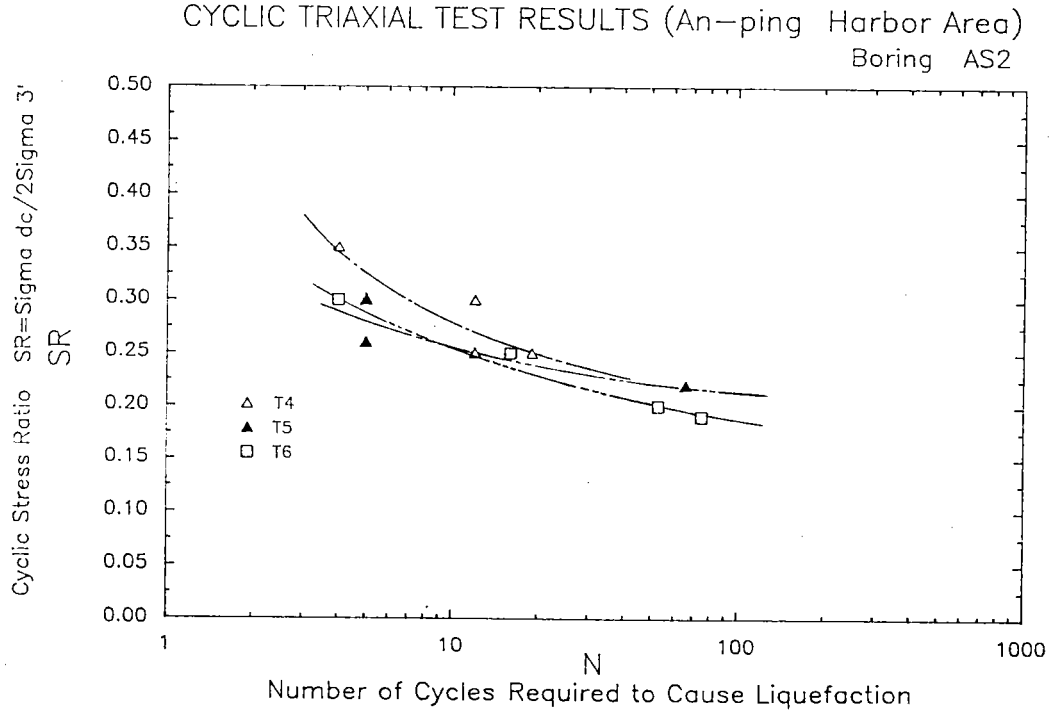


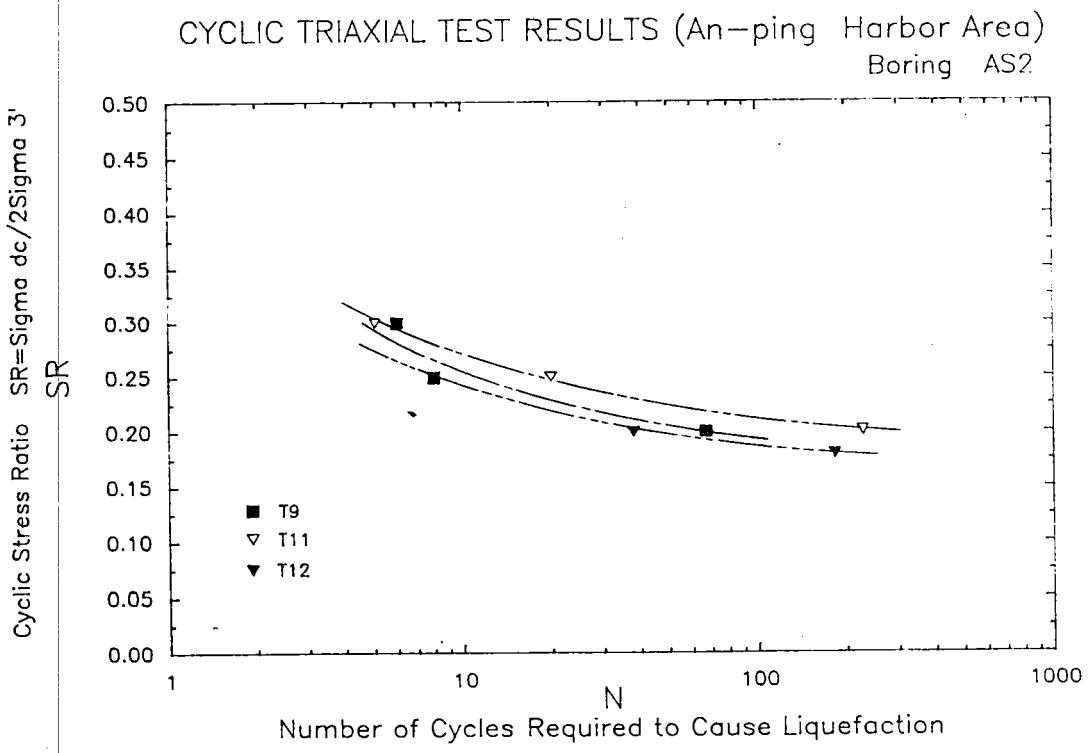
CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (Kaohsiung Harbor Area)

NO:80–82 WHARF Boring KS2




CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (An-ping Harbor Area)
Boring AS2
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
T1
T2
1
10
100
1000
N
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction


CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (An-ping Harbor Area)
Boring AS2
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
T4
T5
T6
1
10
100
1000
N
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction


CYCLIC TRIAXIAL TEST RESULTS (An-ping Harbor Area)
Boring AS2
Cyclic Stress Ratio SR=Sigma dc/2Sigma 3'
SR
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
1
10
100
1000
N
T9
T11
T12
Number of Cycles Required to Cause Liquefaction

台灣各港區地震引致土層之沉陷研究

執行單位：大地工程組

執行期間：民國八十四年七月一日至
民國八十五年六月卅日

計劃主持人：賴聖耀　副研究員

協同主持人：謝明志　副研究員

參與人員：蘇吉立　助　理
陳志芳　助　理
陳義松　技術員
李春榮　技術員
張阿平　技術員
張惠華　技術員

台灣各港區地震引致土層之沉陷研究

摘　要

台灣恰處於世界最大且最活躍之太平洋地震帶西環，每年大小地震頻繁，地震時基礎構造物之不穩定，常常造成結構物損壞或喪失其使用功能，因此在港灣基礎構造物之設計時，均須考慮地震之影響。

由於基礎底面以下之土壤，在受到地震之動態作用力時，將使土壤產生體積壓縮，引致基腳沉陷，而往往又因土層分佈及特性之差異，使基礎產生可觀之差異沉陷，造成結構物損壞或喪失使用功能，故在地震區內，對差異沉陷較敏感及較重要之港灣基礎構造物，均應對其地震引致基礎土壤之沉陷問題加以重視。

本計劃爲一年之短期計劃，僅以現地標準貫入試驗SPT-N值初步評估台中港區之沉陷特性，建立台中港區不同地震規模引致區域性之沉陷圖，期能對台中港區港灣工程提供規劃設計之參考。於後續計劃中再對台灣其他港區之沉陷特性進行研究。

目　錄

摘要 I
目錄 II
表目錄 III
圖目錄 IV
照片目錄 V
一、前言 1
二、相關文獻之探討 2
　2.1　液化與沉陷相關性之探討 2
　2.2　地震引致土層沈陷之行爲 5
三、地震引致沉陷之分析方法 9
四、台中港區之沈陷分析 14
　4.1　分析參數 14
　4.2　台中港區地震與斷層資料分析 16
　4.3　台中港區土層分佈情況 22
　4.4　台中港區沉陷分析結果與討論 24
五、結論與建議 36
參考文獻 37

表目錄

表4-1　台中港附近地區歷年災害地震資料 ····· 17
表4-2　台中港區各種設計地震引致土層之平均沉陷量 ····· 35

圖目錄

圖2-1 體積應變與土壤抗液化安全係數之關係 …… 3
圖2-2 日本Port Island液化後地表沉陷之統計圖 …… 3
圖2-3 碼頭岸壁後之地表差異沉陷 …… 5
圖2-4 地震引致粘土層之長期沉陷 …… 8
圖3-1 地震引致沉陷分析方法之基本流程 …… 10
圖3-2 體積應變與反復應力比及N值之關係 …… 11
圖3-3 美國麻州地區地震引致砂土層垂直應變關係圖 …… 12
圖3-4 殘留沉陷累積示意圖 …… 13
圖4-1 台中港區地震規模與回復週期之關係 …… 18
圖4-2 台中港區最大地表加速度與回復週期之關係 …… 19
圖4-3 台中港區地震規模與加速度之關係 …… 20
圖4-4 台中港區附近斷層位置示意圖 …… 21
圖4-5 台中港區87孔鑽探資料位置圖 …… 26
圖4-6 台中港區地震引致沉陷等值線 （M＝5，Amax＝0.03g） …… 27
圖4-7 台中港區地震引致沉陷等值線 （M＝5.5，Amax＝0.05g） …… 28
圖4-8 台中港區地震引致沉陷等值線 （M＝6，Amax＝0.075g） …… 29
圖4-9 台中港區地震引致沉陷等值線 （M＝6.5，Amax＝0.1g） …… 30
圖4-10 台中港區地震引致沉陷等值線 （M＝7，Amax＝0.15g） …… 31
圖4-11 台中港區地震引致沉陷等值線 （M＝7.5，Amax＝0.25g） …… 32
圖4-12 台中港區地震引致沉陷等值線 （1935年新竹，台中烈震） …… 33
圖4-13 台中港區地震引致沉陷等值線 （1995年日本阪神烈震） …… 34

照片目錄

照片一　1995年日本阪神烈震Boat Island南碼頭岸肩沉陷1公尺左右‧‧‧‧‧‧‧ 4
照片二　1995年日本阪神烈震東神戶港渡船碼頭岸肩沉陷3～4公尺左右‧‧‧‧4

一、前言

台灣恰處於世界最大且最活躍之太平洋地震帶西環，每年大小地震頻繁，地震時基礎構造物之不穩定，常常造成結構物損壞或喪失其使用功能，因此在港灣基礎構造物之設計時，均須考慮地震之影響。

由於基礎底面以下之土壤，在受到地震之動態作用力時，將使土壤產生體積壓縮，引致基腳沉陷，一般砂土層於承受震動時，均有趨於緊密之現象，對於乾燥或低飽和度之砂土，因孔隙中空氣迅速被壓縮及擠出，而立即產生體積壓縮現象，對於飽和之砂土，則因孔隙水無法立即排出，逐有孔隙水壓累積增大現象，俟震動過後，則隨著超額孔隙水壓之消散，有再壓密現象而產生體積壓縮，此外飽和之粘土，在受到震動時，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象發生，唯其孔隙水壓消散較慢，乃發生長期沉陷，且其沉陷量較砂土層爲大。

地震引致之沉陷，往往又因土層分佈及特性之差異，使基礎產生可觀之差異沉陷，造成結構物損壞，尤其港區貨櫃碼頭之貨櫃裝卸及堆置漸朝自動化設計，（如荷蘭鹿特丹港貨櫃碼頭之無人電動導引車（AGV）自動系統），碼頭地面少許之差異沉陷，皆易使碼頭自動化之機械設備損壞或喪失使用功能，故在地震區內，對差異沉陷較敏感及較重要之港灣基礎構造物或自動化之機械設備，均應對其地震引致基礎土壤之沉陷問題加以重視。

地震引致土壤之沉陷特性，可進行室內動力試驗與現地試驗研究之。室內試驗可利用動力三軸試驗或動力單剪試驗來模擬地震力作用下之土壤壓縮現象。現地試驗方面，可利用SPT-N值或CPT-q_c值評估土層沉陷特性，本計劃爲一年之短期計劃，僅以現地標準貫入試驗SPT-N值初步評估台中港區之沉陷特性，建立台中港區不同地震規模引致區域性之沉陷圖，期能對台中港區港灣工程提供規劃設計之參考，於後續計劃再對台灣其他港區 沉陷特性進行研究。

二、相關文獻之探討

2.1 液化與沈陷相關性之探討

現地土壤承受反覆荷重作用所產生的壓密和液化問題，對大地工程師而言是一項重要而值得研究的問題。

土壤液化後，在其孔隙水壓消散過程將使得土壤產生壓密現象，而使基礎構造產生超額之差異沈陷，致使結構物發生破壞或傾斜現象。一般設計者可能會較爲注意淺層土壤之液化問題，其實較深層土壤液化時，雖不致直接影響基礎之支承力，但因超額孔隙水壓消散引致之沉陷，則可能影響結構物之安全，對於沉陷較爲敏感及重要之結構物於設計時應作適度之考慮。

根據Lee & Albaisa(1974)整理多位學者之研究及實地觀測資料，發現不論飽和或不飽和之砂土層在强震或人造反覆前應力作用時，均會產生沉陷現象；對於未發生液化之砂土層沉陷應變量均小於1%，而發生液化後產生之沉陷應變量將可達2%至5%，Ishihara et al.(1991,1996)亦提出抗液化安全係數與沉陷應變量之相關經驗圖如圖2-1所示。如圖2-1可明白液化程度與沉陷應變量之關係，或未液化情況（Fl＞1.0）之沉陷應變量。EERI(1986)提到在一些大地震中曾觀測得沉陷量達一公尺以上者，如1906年之舊金山及1964年之阿拉斯加大地震，而發生5公分至30公分之沈陷者則十分普遍。

而1995年1月17日之阪神大地震，造成神戶港區新生地(Port Island)液化後之沉陷，在無基礎構造物之廣闊地區平均液化後之沉陷爲50公分，最大者爲90公分如圖2-2之統計圖所示；但在港區沉箱式碼頭背填土液化後之沉陷高達3-4公尺，如照片1、2所示；Port Island 碼頭岸壁後150公尺以內，其基礎土壤液化造成地表之差異沉陷如圖2-3所示，由圖2-3顯示，沉陷量由岸壁向碼頭後線遞減。

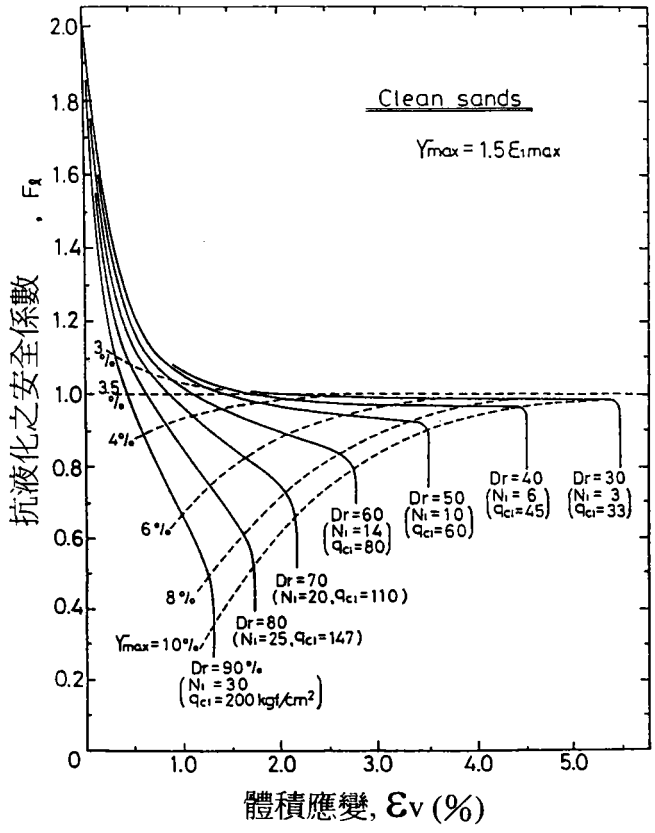


圖2-1 體積應變與土壤抗液化安全係數之關係

（Ishihara et al.1991,1996）

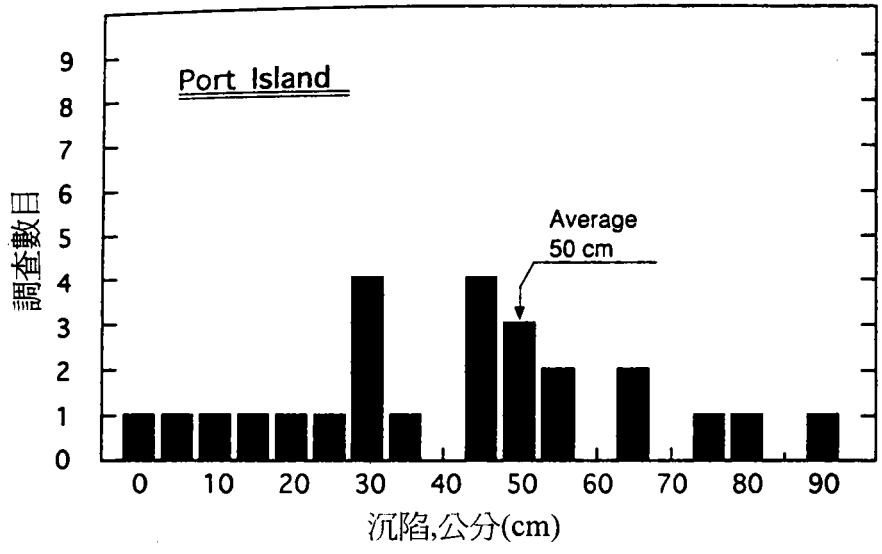
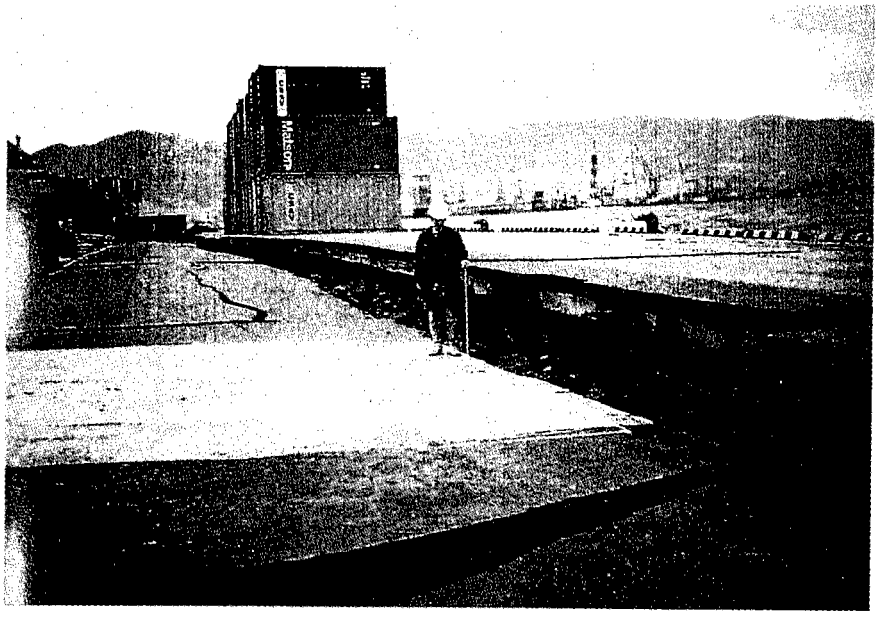


圖2-2 日本Port Island液化後地表沉陷之統計圖

（Ishihara et al. 1996）



照片1　1995年日本阪神烈震，Boat Island南碼頭沈箱式碼頭之背填土之砂液化流失，岸肩沉陷很嚴重（約1m左右）

照片2　1995年日本阪神烈震，東神戶港渡船碼頭沉箱式碼頭背填土之砂液化流失，岸肩沉陷極嚴重（約3-4m左右）

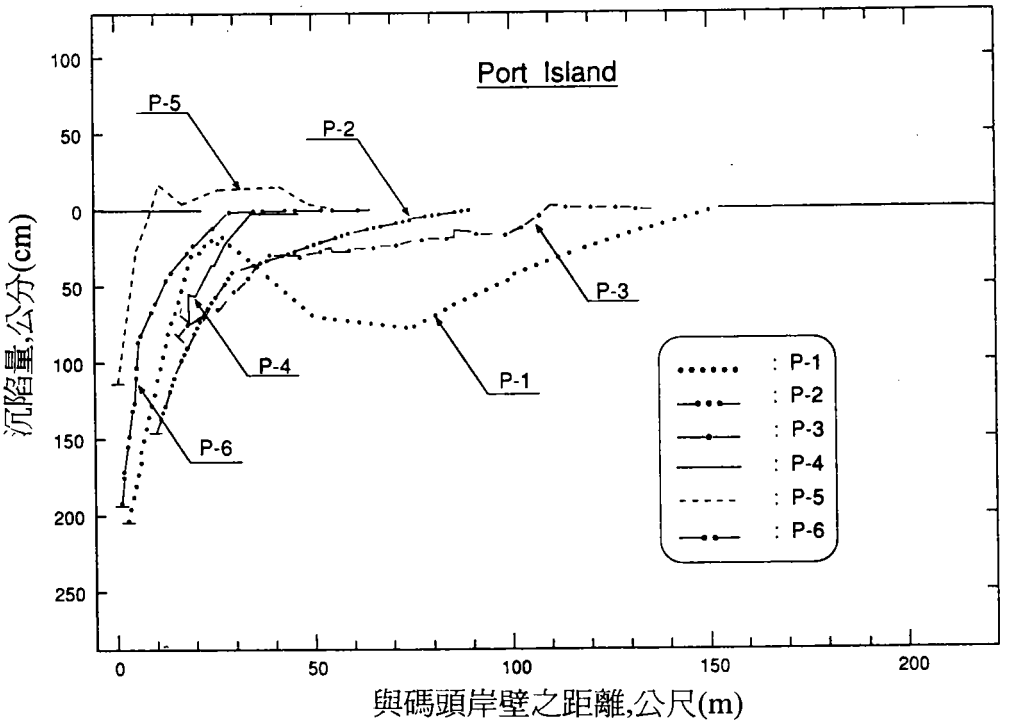


圖2-3　碼頭岸壁後之地表差異沉陷

（Ishihara et al. 1996）

2.2 地震引致土層沉陷之行爲

現地土壤受到地震之振動作用，產生沉陷的來源有四方面：(1)乾燥或飽和但能充分排水的砂土，因振動作用而有壓實的產生；(2)若砂土爲飽和而且未能排水，則在振動作用期間所產生的殘留變形；(3)在振動停止後，超額孔隙水壓消散使砂土再壓密造成沉陷。(4)飽和粘土在承受反復剪力載重後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，而發生長期沉陷。

(1)壓實作用所造成的沉陷

Silver & Seed 1971以反覆單剪儀器對乾燥砂土施以0.01%至0.5%之反覆剪應變，藉以探討乾砂因壓實作用而導致的體積應變。其結論認爲體積改變量受垂直應力的影響並不顯著，而主要是與試體所受的剪應變振幅有關。尤其是在剪應變大於0.05%之後。反覆剪應變可使土壤顆粒移動至較緊密狀態，因而可將之當作決定體積應變的基本參數。同時亦發現當垂直應力增加，則

達到某一壓實程度所需的反覆剪應力亦增加。

由Silver & Seed的結論乃是以單一方向受剪爲依據，而在實際的地震力作用情況，土壤乃是受到多方向剪力的作用，因此Pyke et al.以振動桌對乾砂施加多方向振動研究其沉陷行爲。其結果發現，多方向水平聯合振動所造成的沉陷，大約等於單方向振動所造成沉陷之和。同時亦指出，若是垂直方向單獨作用的加速度小於1g，則並不會引起沉陷。但是若垂直方向與水平方向同時作用，則將引起明顯增加的沉陷量。

Youd對飽和渥太華砂以單應儀器施以反覆剪應變，並使試體能充分排水。其結論亦認爲剪應變是砂性土壤引起壓實作用的主要因素，同時反覆剪應變頻率範圍在10cycles/min與150 cycles/min之間，對試體的壓實行爲沒有明顯的影響。乾砂與飽和而完全排水砂的試體，亦沒有明顯的行爲差異。Bhatia et al.用相同的材料與試驗設備，但施加不同的反覆剪應力及靜態剪應力，藉以探討靜態剪應力對反覆體積變化行爲的影響。其試驗結果顯示：(A)累積剪應變和體積應變均會隨著反覆應力比和靜剪應力的增加而加大；(B)主要的體積應變發生於最先的10個振動週期內，超過30個振動週期後，由於緊密化或硬化的現象，產生的體積應變很小；(C)在第一個振動週期過後，體積應變的大小與所施加的靜剪應力大小無關；(D)在任一靜剪應力比下，累積體積應變和剪應變間存在有線性關係。

(2) 殘留壓縮應變所造成的沉陷

非均向壓密的試體在受到反覆振動作用期間所產生的不排水殘留變形，亦是造成沉陷的原因之一。Chang認爲殘留變形量的大小受初始應力狀態、反覆荷重所產生的超額孔隙水壓、及土壤性質所影響。並且從“殘留變形量主要是在反覆軸差應力作用下有效圍壓之降低所引起”的假設中，提出一含有五個參數的半經驗模式加以預測：

$$\frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta_u}=\frac{R_f\left[\frac{\sigma_d'}{\sigma_{ult}'-\sigma_d'}\right]^2\left[\frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right]}{Kp_a\left[\frac{\sigma_3'}{p_a}\right]^n}+\frac{n\left[\frac{\sigma_d'}{\sigma_{ult}'-\sigma_d'}\right]\left[\frac{\sigma_{ult}'}{\sigma_a'}\right]}{KP_a\left[\frac{\sigma_3'}{P_a}\right]^n} \qquad (2\text{-}1)$$

上式中K，n，Rf爲土壤參數，ϕ'爲內摩擦角，Pa爲大氣壓力。

(3) 砂土再壓密作用所造成的沉陷

Lee 和 Albaisa 1974以均向壓密動力三軸試驗研究水平地表下砂土受到反覆荷重後由於超額孔隙水壓消散所導致的沉陷。其結論指出，在尚未液化的情況，再壓密之體積應變量將隨著下列各項因素而增加：土壤顆粒尺寸的增加、相對密度的減小、和超額孔隙水壓力的增加。體積應變幾乎是與孔隙水壓的產生方式無關，且通常小於1%。

Yoshimi 和 Tokimatsu 將實際的結構模型置於飽和砂土上，以振動桌試驗研究結構物附近的砂土，其孔隙水壓發展情形及影響沉陷的因素。其結論指出：(1)在模型結構物正中心下方所產生的超額孔隙水壓較其他地方爲小；(2)當結構物的重量增加，則其正下方的超額孔隙水壓比將降低；(3)當結構物底下的孔隙水壓達到一臨界值，其沉陷量將較顯著增加；和(4)結構物的寬度增加，則會降低沈陷量。

(4) 粘土層再壓密所造成的沉陷

Ohara & Matsuda(1988)亦發現，飽和粘土在承受反復剪力載重後，亦如飽和砂土一樣有再壓密現象，產生可觀之長期沉陷。Ohara & Matsuda (1988)提出一個計算粘土層受震後之壓密沉陷量：

$$\varepsilon_v = \frac{Cdyn}{1+e_o} \times log\left(\frac{1}{1-Udyn/\sigma'_{vo}}\right) \qquad (2\text{-}2)$$

式中，ε_v爲粘土沉陷應變量，e_o爲粘土初始孔隙比，Cdyn爲反復荷重引致壓縮之指數，其介於壓縮指數C_c與回脹指數C_s之間，即$C_s < Cdyn < C_c$，由Ohara & Matsuda(1988)之個案研究$Cdyn \fallingdotseq 1/3 C_c$；Udyn／$\sigma'_{vo}$爲正規化之動態孔隙水壓比，其與地震作用力及土壤性質相關。圖2-4爲墨西哥市一座落於粘土層上之大型建築物於1957年大地震後產生大量長期之沉陷觀測結果（Zeevaevt,1973）。

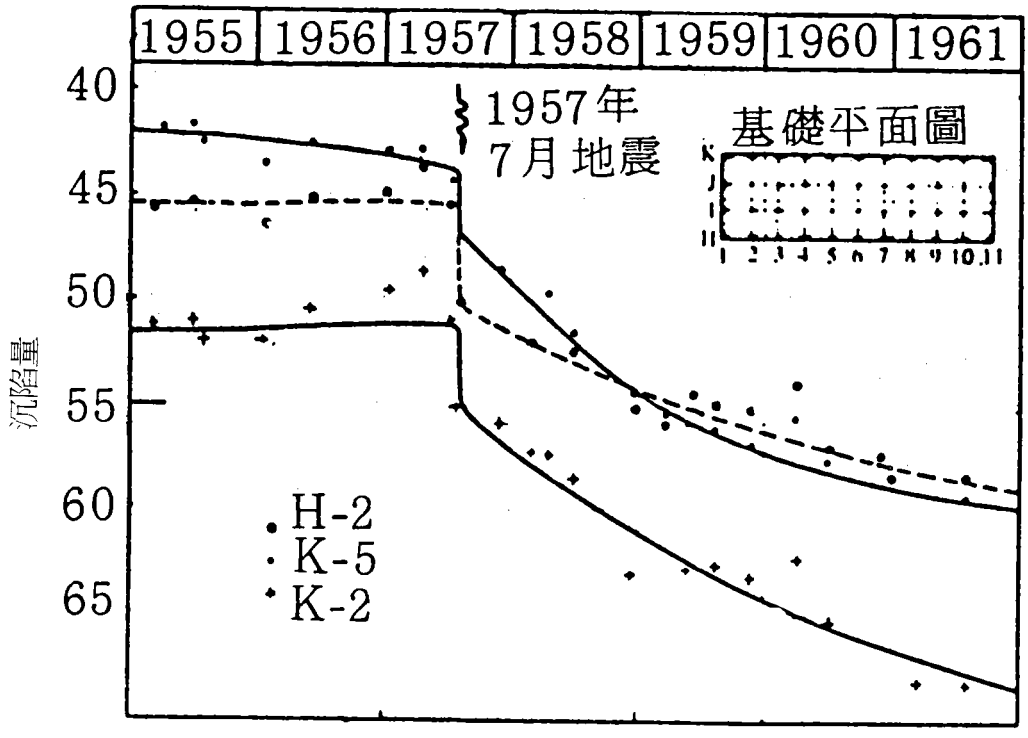


圖2-4、地震引致粘土層之長期沈陷（Zeevaert,1973）

三、地震引致沉陷之分析方法

由於基礎底面以下之土壤受震時將同時承受由岩盤往上傳遞之地震力及基礎土壤間互制行爲產生之動態作用力，此二者複合而成之動態作用力將使土壤產生體積壓縮而引致基腳之沉陷，故若欲推估基礎構造受震引致之沉陷，必須先行推求此複合動態作用力。惟由於此複合動態作用力與地震、地層及結構物之特性均有密切之關係，其行爲甚爲複雜，目前尚無實用之分析方法，故於進行地震引致之沉陷時，均將此二種動態作用力之影響分開討論。

(1)由岩盤往上傳遞之地震力引致之沉陷對於較爲深厚且疏鬆之沖積土層，尤其是抗液化安全係數小於1.6之土層(Tokimatsu & Seed, 1987)，應對此項沉陷之影響作審慎之考慮。對於此項沉陷之研究，一般均如同液化潛能分析一樣，將其邊界條件簡化爲水平地盤且無結構物荷重影響之情況，而於此情況下，土體將呈現單向度壓縮行爲，亦即其垂直應變量等於其體應變量，圖3-1爲其分析之基本程序。Tokimatsu & Seed (1987)曾綜合許多飽和砂土之試驗結果，建議一反覆剪應力比(τ_{av}/σ'_o)，N值及體積應變之關係，如圖3-2所示；而圖3-3則爲Soydemir & Le Count(1984)推估之美國麻州(Masachusetts)地區N值與沉陷之關係；圖2-1爲Ishihara et al.(1991,1996)建議之N值、q_c值、抗液化安全係數及體積應變之經驗關係，以上均可作爲沉陷推估之參考。

(2)基礎土壤間互制行爲產生之沉陷對於較高且重之結構物，受震時將因其較大慣性力之作用，致使基礎產生可觀之額外沉陷。此沉陷之發生一般可分爲兩個階段，第一階段之沉陷爲隨著振動逐漸累積而成之殘留沉陷(Residual Settlement)，如圖3-4所示其主要係由於土壤孔隙之迅速壓縮及剪力變形所產生；第二階段之沉陷則發生於振動停止後，由於土體內受震引致之超額孔隙水壓消散產生再壓密現象所累積而成。有效應力變化歷程分析法爲預估此沉陷量較嚴謹及有效之方法，惟其必須先建立土壤之動態應力一應變一孔隙水壓變化模式，其行爲甚爲複雜，所需參數不易取得且分析相當繁複，應用時尚有待進一步研究。

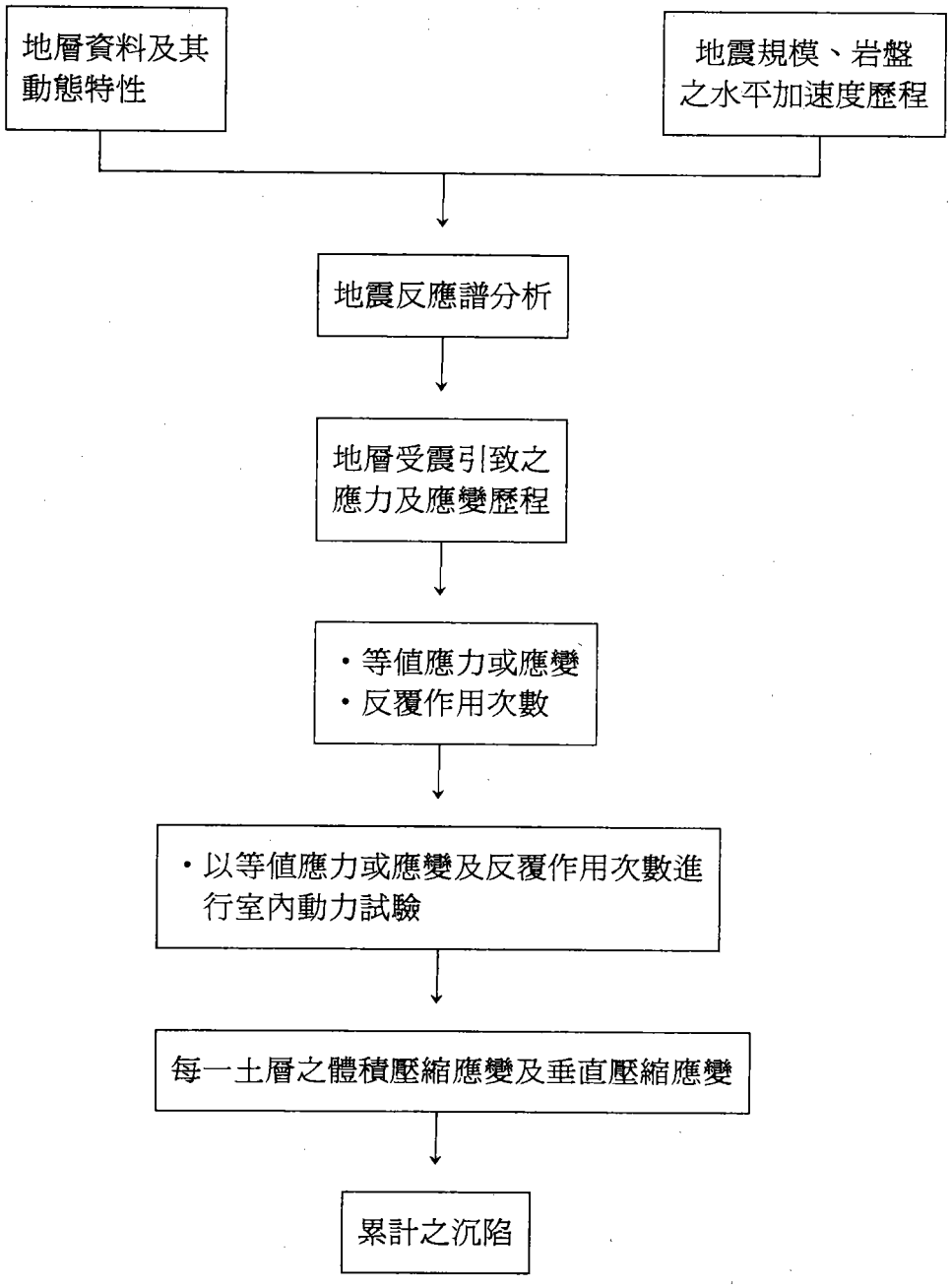


圖3-1　地震引致沈陷分析方法之基本流程

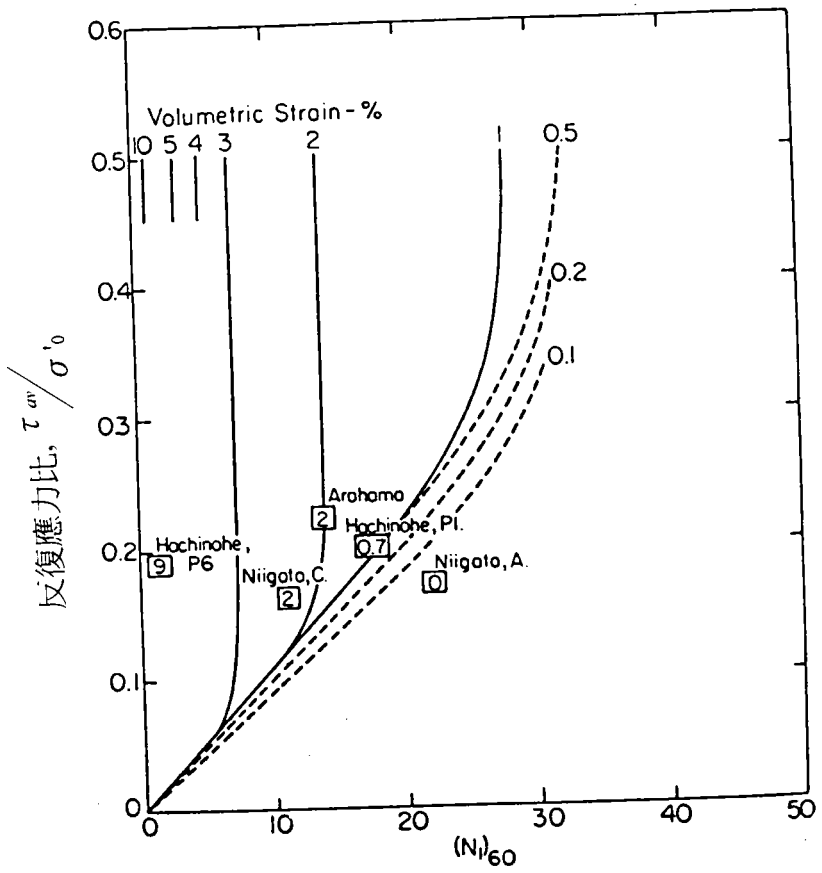


圖3-2　體積應變與反復應力比及N值之關係

（Tokimatsu & Seed,1987）

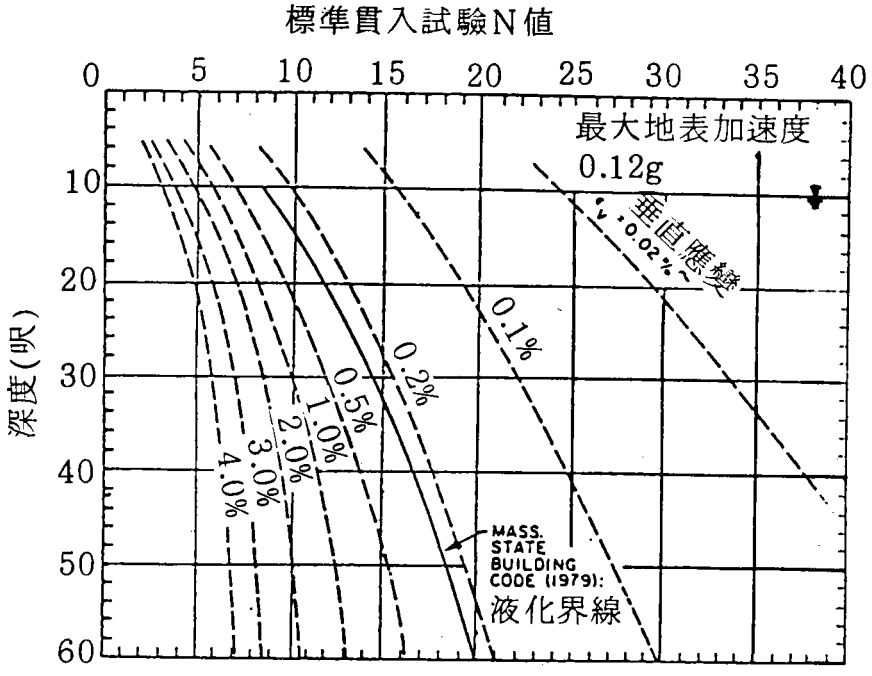


圖3-3　美國麻州地區地震引致砂土層垂直應變關係圖

（Soydemir & Le Count,1984）

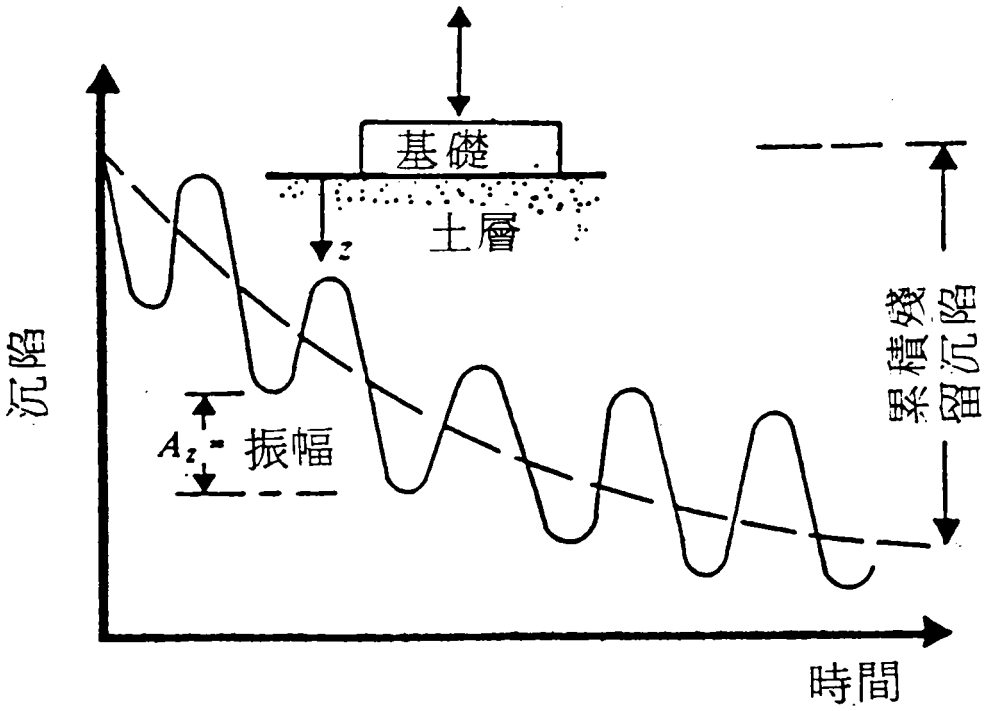


圖3-4　殘留沈陷累積示意圖

四、台中港區之沉陷分析

台中港位於台灣西部地震帶之中央區域，大小地震頻仍，1935年港區附近發生一次規模達7.1級之強烈地震，造成嚴重災害。港區地質屬於河川沖積層，爲一深厚之沈泥質細砂（SM）與薄層不良級配細砂（SP）或細砂質沉泥（ML）相間之沉積土層，新開發之海埔新生地亦多爲細砂與沉泥質細砂所組成，在強烈地震地用下，沖積土層與海埔新生地極易發生液化及沉陷而造成碼頭、防波堤等港灣工程破壞，因此對於港區土層液化及沉陷之分析，甚屬需要。

目前對土層沉陷之評估方法基本上與液化潛能評估法類似可歸爲兩種：(1)相關經驗法，即根據現地土層在過去地震作用下之沉陷行爲反應與現地進行調查資料（如SPT-N值，CPT-qc值等）之關係，(2)試驗分析法，係採取現地土樣於實驗室中進行動力試驗（如動力三軸試驗、動力單剪試驗或震動桌試驗）以瞭解土壤之體積壓縮行爲。

本文以Tokimatsu & Seed(1987)所建議之圖3-2體積應變與反復剪應力比及N值之相關經驗圖爲沉陷分析依據。茲分別對本分析方法之(1)分析參數，(2)台中港區之地震與斷層分析，(3)台中港區地層分析，及(4)台中港區沉陷分析結果，分述如下：

4.1 分析參數

地震引致土層的作用強度參數，以無因次之反復應力比 τ_{av}/σ'_o 表示，根據Seed et al.(1985)方法，反復應力比爲飽和砂土層因地震作用引起的平均剪應力 τ，與砂土之有效覆土壓力 σ'_o 之比值，以SR表示，其計算式如下所示：

$$SR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_o} = 0.65 \cdot \frac{r_d}{r_m} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma'_o} \qquad (4\text{-}1)$$

其中，

τ_{av} ：地震引致土層之平均剪應力，kg／cm^2。

a_{max} ：地表最大水平加速度m／sec^2。

g：重力加速度， m／sec^2 。

σ_o：最初垂直覆土壓力，kg／cm^2。

σ'_o ：有效覆土壓力，kg／cm^2。

r_d ：應力折減因數。

r_m ：地震規模影響因素。

而土壤抗剪力强度參數以SPT-N值表示，不過由於SPT-N值 ，在鑽探時，易受有效應力之影響。因此以現場資料和SPT-N值評估土壤液化及沉陷之前，均需將N值加以修正，以求得抗剪力强度之相關經驗式，本文以Liao et al. (1986)方法修正如下表示：

$$N_1 = C_n \cdot N = \sqrt{1/\sigma'_o} \cdot N \qquad (4\text{-}2a)$$

其中，

N_1：修正至有效覆土壓力爲1kg／cm^{2}之正規化貫入N值。

C_n：有效覆土壓力之修正係數。

N：標準貫入試驗值。

σ'_o ：有效覆土壓力，kg／cm^2。

由於目前世界各國之標準貫入試驗並無統一規範，所得SPT-N得值實際上是使用不同擊錘，以不同效率和不同施放能量系統，不同鑽孔穩定液和不同取樣器所量測而得。因此爲了使評估土壤抗剪力强度所需之標準貫入值能夠一致，Seed et al.(1985)建議使用一個新的標準化參數$(N_1)_{60}$值，其爲進行標準貫入試驗時，施加於鑽桿之能量，爲理論自由落錘能量之60％所量測的貫入值，根據此提議，$(N_1)_{60}$值應爲：

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot N_1 = N_m \cdot C_n \cdot N \qquad (4\text{-}2b)$$

其中，

$(N_1)_{60}$：修正至落錘能量爲60％之正規化貫入值。

N_m：落錘能量之修正係數。

4.2 台中港區地震與斷層資料分析

(1)台中港區地震分析

台中港區位屬於台灣西部地震帶之中央區域，根據過去地震紀錄，於1897至今，地震規模大於7.0以上之震央，有三處落在西部地震帶上，其中台灣有史以來地震災害最大一次，距台中港約35公里。

台中港區之地震－地殼構造特性十分複雜，地震亦十分頻繁，根據本所李延恭組長之搜集分析本地區較大的地震發生在1916年11月15日，震央在台中東南方，地震規模6.0造成1人死亡，20人受傷及一千多棟房屋受損。1935年4月21日台灣中部地區發生芮氏7.1級大地震，其震央位於台中市北北東約30公里大安溪中游；關刀山東南南約3公里處，距台中港約35公里，同年發生一連串的地震包括1935年4月21日獅潭附近，地震規模6.2。1935年5月5日及30日發生於苗栗南方及台中東方，地震規模分別爲6.2及5.9。同年6月7日及7月17日發生於大肚溪河口及後龍溪河口，地震規模6. 0及6.4，該年地震造成台灣地區三千多人死亡，一萬餘人受傷，房屋受損高達二萬戶，爲台灣本世紀來最大之地震災變，並產生三條所謂“1935年地裂”。其中之－屯子腳地震斷層即位於台中港東北側沙鹿附近沿北偏東約60°方向向上延伸至台鐵泰山火車站附近。斷層因地震開裂了12公里。自1935年震災後，新竹－台中地區雖未再有災害性的地震發生，然而歷年來台灣地區之地震分佈及其他研究均顯示該斷層區仍相當顯著的地震活動。台中港附近地區歷來災害地震記錄資料如表4-1所示。

表4-1　台中港附近地區歷年災害地震資料

發震時間	震央		深度	地震規模	災害				地殼變動
年月日時分	地名	北緯　東經	(公里)	(M)	死	傷	房屋全倒	房屋損害	
1905 8 28 0 22	清水東南方(海)	24-12.00 121-42.00		5.9				9	
1915 11 15 6 31	台中東南方	24-2.00 120-48.00		6.0	1	20	97	972	
1935 4 21 6 2	卓蘭附近	24-18.00 120-48.00	5	7.1	3276	12053	17907	36781	斷層、山崩地裂
1935 4 21 6 26	鯉潭附近	24-42.00 120-54.00	淺層	6.2					
1935 5 5 7 2	苗栗南方	24-30.00 120-48.00	淺層	6.2		38	28	571	
1935 5 30 3 43	台中東方	24- 6.00 120-48.00	淺層	5.9			2	24	
1935 6 7 10 51	大肚溪河口	24-12.00 120-30.00	淺層	6.0		2	5	190	
1935 7 17 0 10	後龍溪河口	24-36.00 120-42.00	30	6.4	44	391	1734	5887	
1939 11 7 11 53	三義附近	24-24.00 120-48.00	淺層	6.1			4	20	

根據地震資料蔡義本（1977）之分析統計，台中港區50年回復週期之地震規模（M）爲7.0，如圖4-1所示，50年回復週期可能發生之最大地表加速度爲0.15g，如圖4-2所示，而台中港區地震規模與加速度之關係，經筆者分析統計，如圖4-3所示。

(2) 台中港附近地區斷層分析

台中港及其鄰近地區斷層分析，根據本所李延恭組長之搜集分析共有三條斷層，包括屯子腳地震斷層位於台中港東北測沙鹿附近沿北偏東約60°方向向上延伸公理至台鐵泰山火車站附近，據調查顯示，本斷層目前仍有持續之活動，亦即屬活動斷層，是台灣少數曾經引起災情慘重的地震斷層。

台中港以東約4公里存在－北偏東約30°走向之彰化斷層（中國石油公司，台灣西立身地質圖，1971），亦屬可能之活動斷層。而台中港以東20公里外之車籠斷層距離本基地甚遠，影響不明顯。台中港附近地區之斷層分佈情形，

如圖4-4所示。

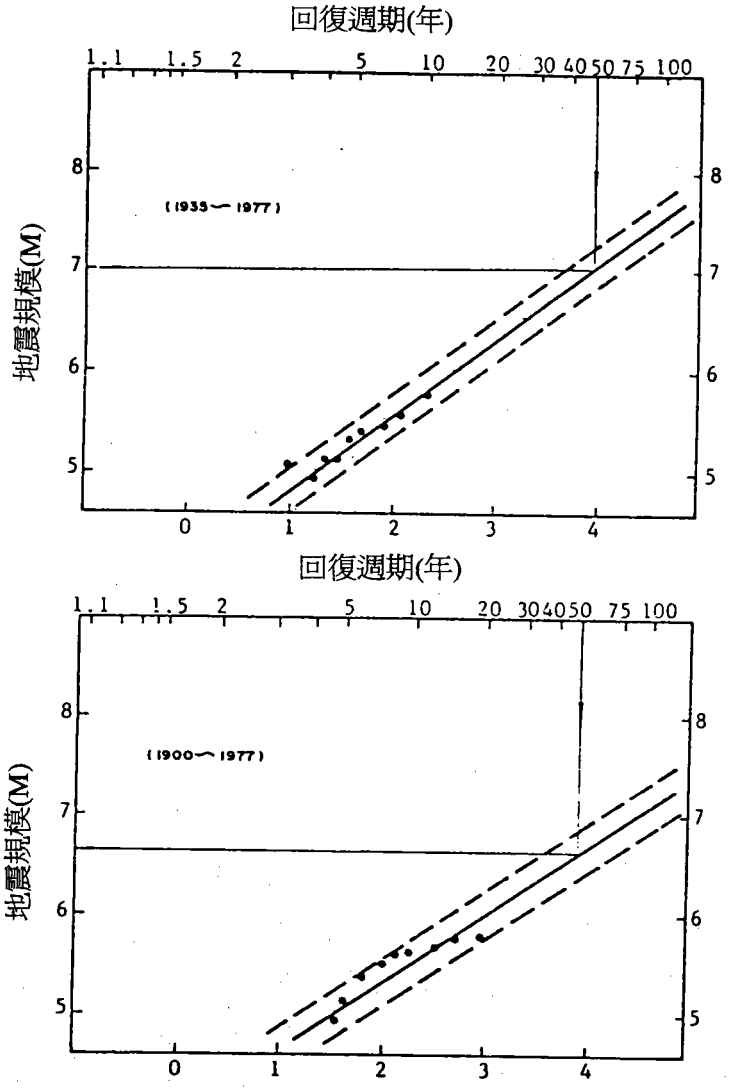


圖4-1　台中港區地震規模與回復週期之關係

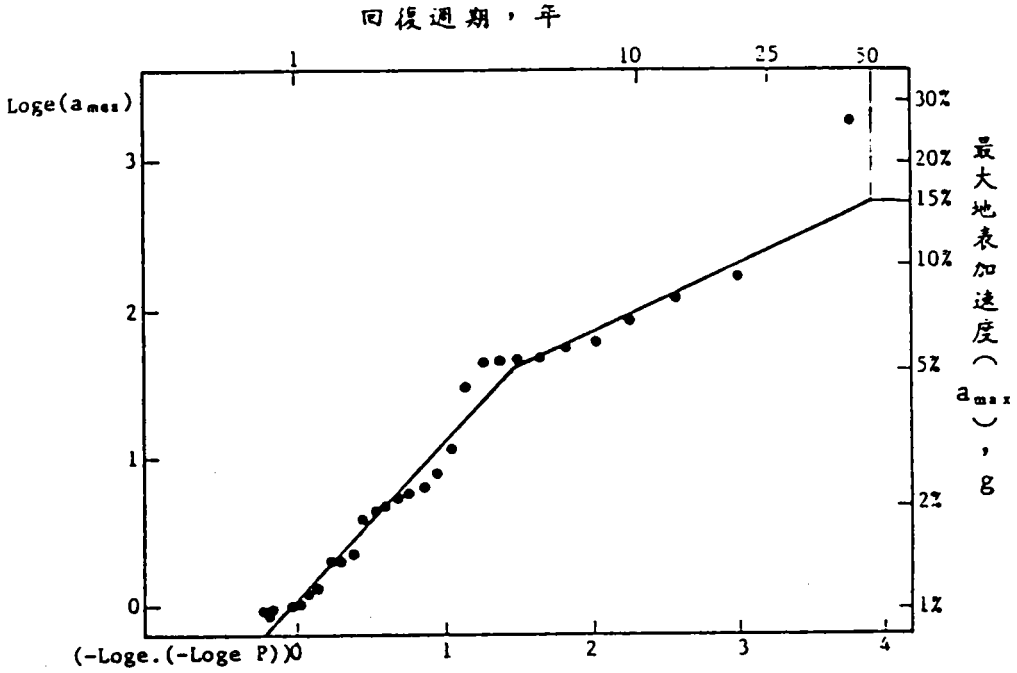


圖4-2　台中港區最大地震加速度與回復週期之關係

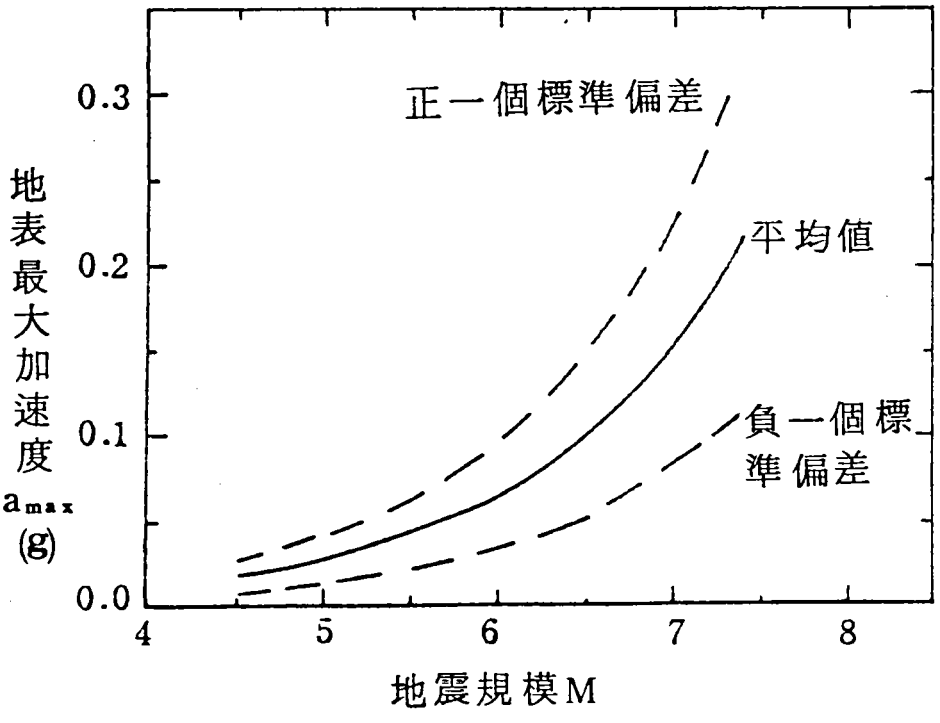
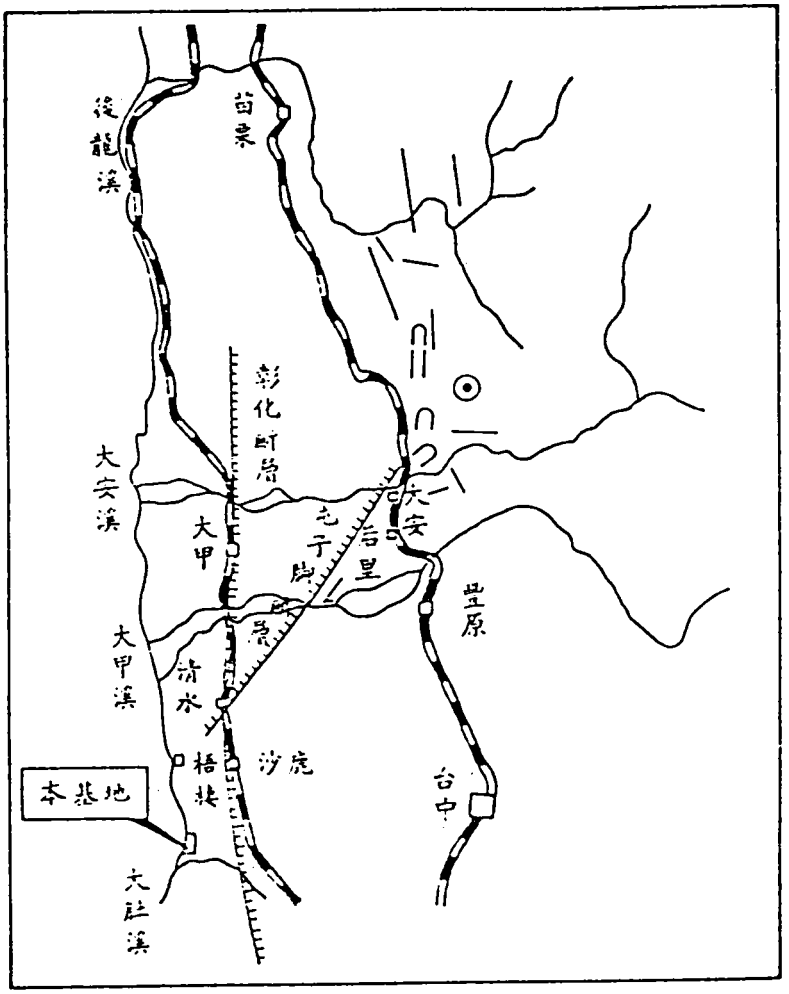


圖4-3　台中港區地震規模與加速度之關係



圖例：

⊙ 震央(1935,4,21)

斷路

斷層

圖4-4　台中港附近斷層位置示意圖

4.3 台中港區土層分佈情況

台中港區地表地層爲由河川沖積及海洋沖積雙重作用所形成之巨厚現代沖積層所覆蓋，主要爲沉泥質砂，砂質沉泥，粘土質沉泥及沈泥質粘土等互相交雜而成。有關於沉積土層之厚度，根據台中港務局在台中港區內進行的鑽探資料顯示，鑽探深度至60公尺時仍爲沉積砂土層，而根據台灣電力公司在台中火力電廠的地質調查資料顯示，鑽探深度在150公尺時，僅在深度115公尺處發現0.6公尺厚之卵礫石層，在深度147公尺至150公尺間，偶含礫石，礫石粒徑在6公分以下，故現代沖積層爲厚層砂土層，其詳細厚度未知，惟根據鑽探資料可確定沖積層厚度應在150公尺以上。

根據本所李延恭組長由搜集之鑽探資料研判，台中港地區之土層層次變化在深度150公尺範圍內，大致可分爲六個次層，茲自上而下說明如下：

(1) 細中砂、沉泥質砂（SP、SM）

自地表至高程－10公尺之間爲灰色細中砂或沉泥質細砂，尤其靠近地表處大都屬不良級配中細砂，平均厚度約爲3公尺，而自地表3公尺以下至高程－10尺間爲沉泥質細砂偶夾砂質沉泥或粘土質沉泥薄層，惟數量不多。

根據現地標準貫入試驗結果，本層次標準貫入試驗N值變化甚大，在5至30間，屬疏鬆至中等緊密程度，土壤平均含水量23％至30％，土壤單位重在1.90至2.0 t／m^3間。

(2) 沉泥質細砂夾粘土質沉泥或沉泥質粘土薄層（SM、ML、CL）

本層次呈灰色，其分佈範圍在高程-10m至-22m之間爲沉泥質細砂含粘土質沉泥或沉泥質粘土薄層，薄層厚約2公尺，大約分佈在高程-12m至-16 m間，此層並非均勻分佈，大致斷斷續續出現，從一號碼頭到台中火力發電廠均有發現。

根據現地標準貫入試驗結果，本層砂性土壤N值變化平均在15至40之間，屬疏鬆至中等緊密程度，土壤單位重及含水量平均約爲1.91±0.05 t／m^3及28±3％，沉泥質粘土薄層N值約在7至15間。土壤單位重1.90±0.07t／m^3，自然含水量及液性限度分別爲28±5％及30±4％。

(3) 沉泥質粘土及沉泥質細砂層（CL、SM）

高程-22m至-40m之間爲灰色沉泥質粘土層及沉泥質細砂層，在台中港現有碼頭區此兩層次交互出現，平均厚度約在2至5公尺之間，而在火力發電廠區則幾乎全爲厚層沉泥質粘土，僅在厚層粘土間夾一層厚1至3m之沈泥細砂次層。

本層次砂性土壤標準貫入試驗N值在20至45間屬中等緊密至緊密程度，粘性土壤N值在6至32間屬中等堅實至極堅硬稠度，土壤一般物理性質試驗結果砂性土壤，土壤單位大量1.97±0.05t／m^3，自然含水量25±5%，粘性土壤、土壤單位量1.91±0.04t／m^3，自然含水量29±4%，液性限度29±4%。

(4) 沉泥質砂層含砂質沉泥或沉泥質粘土薄層（SM，CL）

本層次呈灰色分佈高程約在-40m至-80m間，以沉泥質砂土層爲主，夾有許多沉泥質粘土或粘土質沉泥薄層，薄層厚度約1m至2m，本層次特色爲砂層標準貫入試驗N值平均在50至80間，屬極緊密程度，粘性土壤薄層N值，則顯著降低，約在8至30之間。

一般物理性質試驗結果，砂性土壤土壤單位重2.04±0.05t／m^3，自然含水量19±4%，粘土薄層土壤單位重1.99±0.04t／m^3，自然水量及液性限度分別爲24±5%及24±1%。

(5) 沉泥質粘土（CL）

高程-80m至-100m間爲灰色沉泥質粘土層，此層以厚層沉泥質粘土爲主，間夾沈泥質細砂薄層，偶含有機質，標準貫入試驗N值變化範圍亦甚大，在19至100間，屬極堅硬稠度，平均自然含水量及土壤單位重分別爲27±4%及1.98±0.03t／m^3。

(6) 沉泥質細砂夾沉泥質粘土薄層（SM、CL）

本層次大致分佈於高程-100m至-150m之間，呈灰色，並於高程-105m至-105.6m及-137m至-140m間偶夾卵礫石，最大粒徑約在4至6cm之間，本層次標準貫入試驗N值，大部份均大於100，屬極緊密程度之砂土層，其自然含水量及土壤單位重約爲19±3%及2.03±0.03t／m^3。

本層次在鑽探過程發現含有大量沉泥質粘土薄層，其厚度約在1m至6m之間，標準貫入試驗N值在30至100以上，屬極堅硬稠度，土壤自然含水量及單位重平均約爲26±3%及1.96±0.03t／m^3。

總結台中港區地層分佈以沉泥質砂土層爲主，間夾有許多沉泥質粘土薄層或厚層，但常不延續而間斷出現，頗爲複雜，鑽探資料顯示標準貫入試驗N值，在同一深度中分佈甚爲散亂，可見本區土層有交錯沉積之現象，一般而言，地震引致土層液化或沉陷之土層深度爲地表至地下-20m，即台中港區第一、二層較易受地震而引致壓縮或壓密沉陷。

4.4 台中港區沉陷分析結果與討論

本文搜集台中港區現有鑽探資料87孔，共約900筆N值資料，其相關位置如圖4-5所示，分別以各種設計地震規模M及其可能發生之地表最大加速度Amax，利用Tokimatsu & Seed(1987)所建議之體積應變與反復剪應力比及N值之相關經驗圖，即圖3-2，分析各孔20m內各個深度之體積應變 ε_v，再經由下列公式，計算各孔之沿陷量Sd:

$$S_d = \int_0^{20} \varepsilon_v \cdot dz \qquad (4\text{-}3)$$

本文分析各種地震規模引致台中港區之區域沉陷圖分別如圖4-6至圖4-13所示，其中圖4-6至圖4-11，是以統計方法即圖4-1～4-3，推估台中港區各個回復週期可能發生之地震規模及地表最大加速度，其所引致之沉陷等值圖。由圖4-6顯示：M＝5，A_{max}＝0.03g時，其引致港區之最大沉陷量爲21公分，平均沉陷量爲2.37公分，由圖4-7顯示：M＝5.5，A_{max}＝0.05g時，其引致最大沉陷量爲22公分，平均沉陷量爲3.25公分；由圖4-8顯示：M＝6.0，A_{max}＝0.075g時，其引致最大沉陷量爲24公分，平均沉陷量爲4.67公分；由圖4-9顯示：M＝6.5，A_{max}＝0.1g時，其引致最大沉陷量爲26公分，平均沉陷爲6.76公分，由圖4-10顯示：M＝7，A_{max}＝0.15g時，其引致最大沉陷量爲34公分，平均沉陷爲12.52公分；由圖4- 11顯示：M＝7.5，A_{max}＝0.25g時，其引致最大沉陷量爲55公分，平均沉陷爲28.68公分。

圖4-12，是以1935年台中港區附近曾發生歷年來之最大地震規模M＝7.1，港區最大地表加速度A_{max}＝0.15g爲設計考慮之地震，其所可能引致港區之沉陷等值圖，由圖4-12顯示，其最大沉陷量爲34公分，平均沉陷量爲12.83公分。

圖4-13，是以1995年日本阪神烈震M＝7.2，其於神戶港區之最大地表加

速度A_{max}＝0.55g爲台中港之設計地震，該次地震造成神戶港80％的碼頭全壞及半壞，其150座公用碼頭中，僅有3座耐震碼頭未受到災害，使整個神戶港遭受到毀滅性之打擊，若如此災害性之地震於台中港發生，則其可能引致港區之沉陷等值圖，如圖4-13所示，由圖4-13顯示，最大沉陷量爲85公分，平均之沉陷量爲57.52公分，此沉陷分析結果與神戶港之沉陷災害調查結果（即圖2-2）相當。

茲將以上各種設計地震可能引致台中港區之平均沉陷整理如表4-2所示。

綜合圖4-6至圖4-13沉陷等值圖整體觀之，台中港區有四處土質較爲鬆軟，極易因地震而造成較大之沉陷災害，其分別位於(1)北突堤之第8、9、10號碼頭，即第1貨櫃中心，(2)西碼頭區之W10、W11、W12號碼頭，(3)臨港工業專業區(II)近安良港大排附近(4)南突堤之貨櫃基地。

圖4-6至圖4-13之分析結果，皆以港區爲廣闊無碼頭岸壁等港灣構造爲分析依據，據神戶港災害調查，於碼頭岸壁附近，於强烈地震下，因碼頭岸壁之側傾，背填土因液化而流失，將造成更大之沉陷，如圖2-3及照片1、2所示。

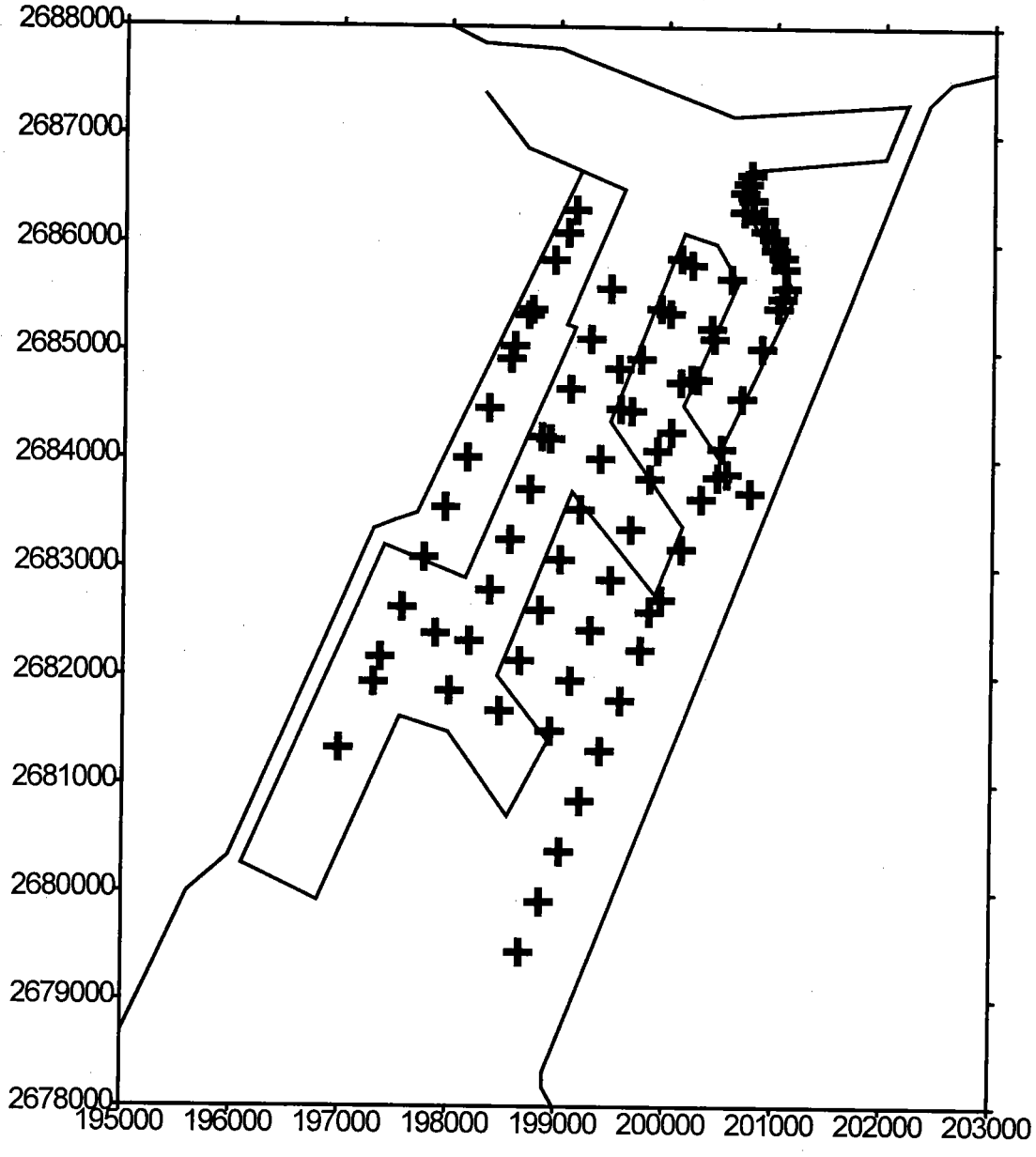


圖4-5　台中港區87孔鑽探資料位置圖

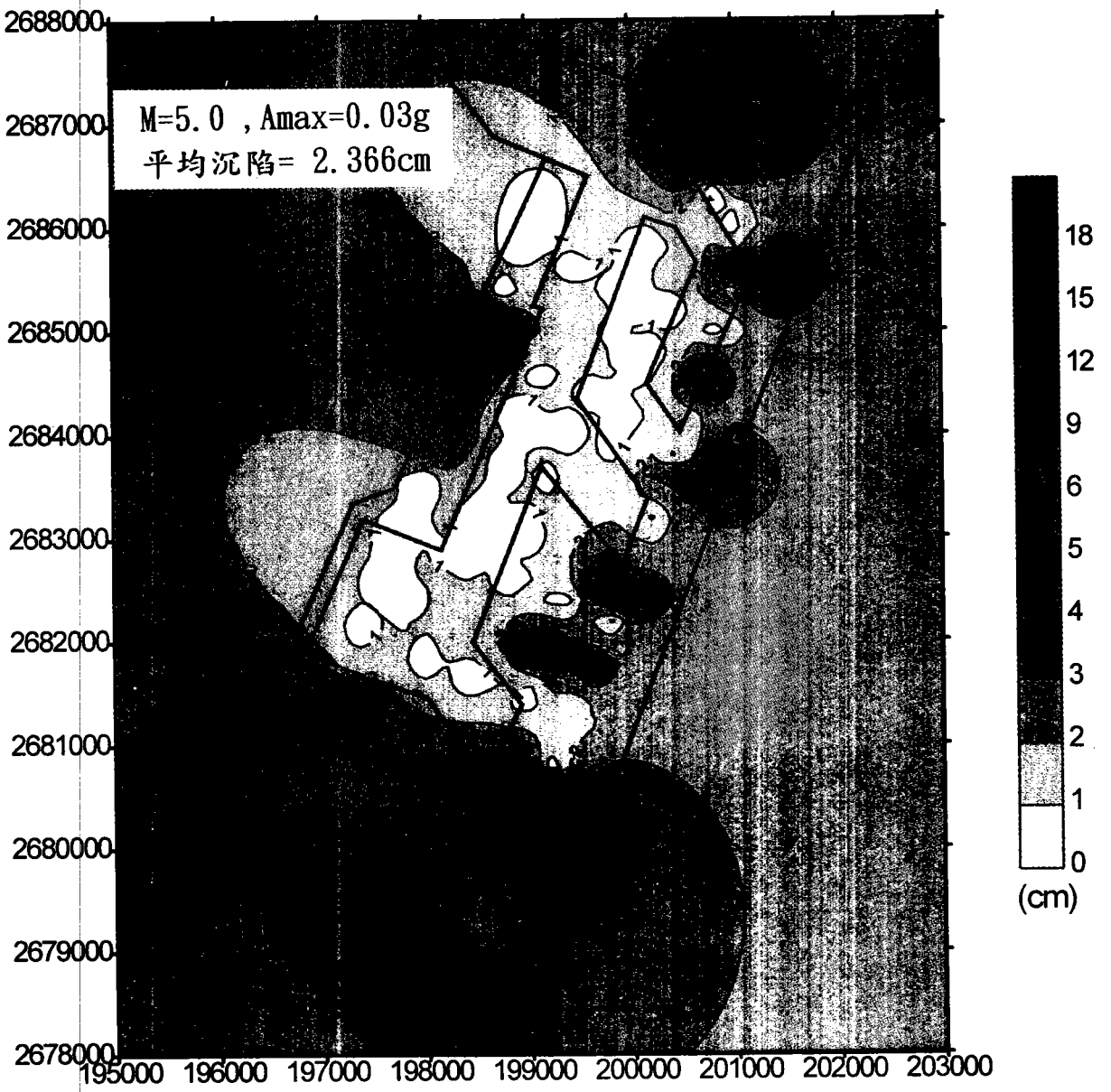


圖4-6　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝5，Amax＝0.03g）

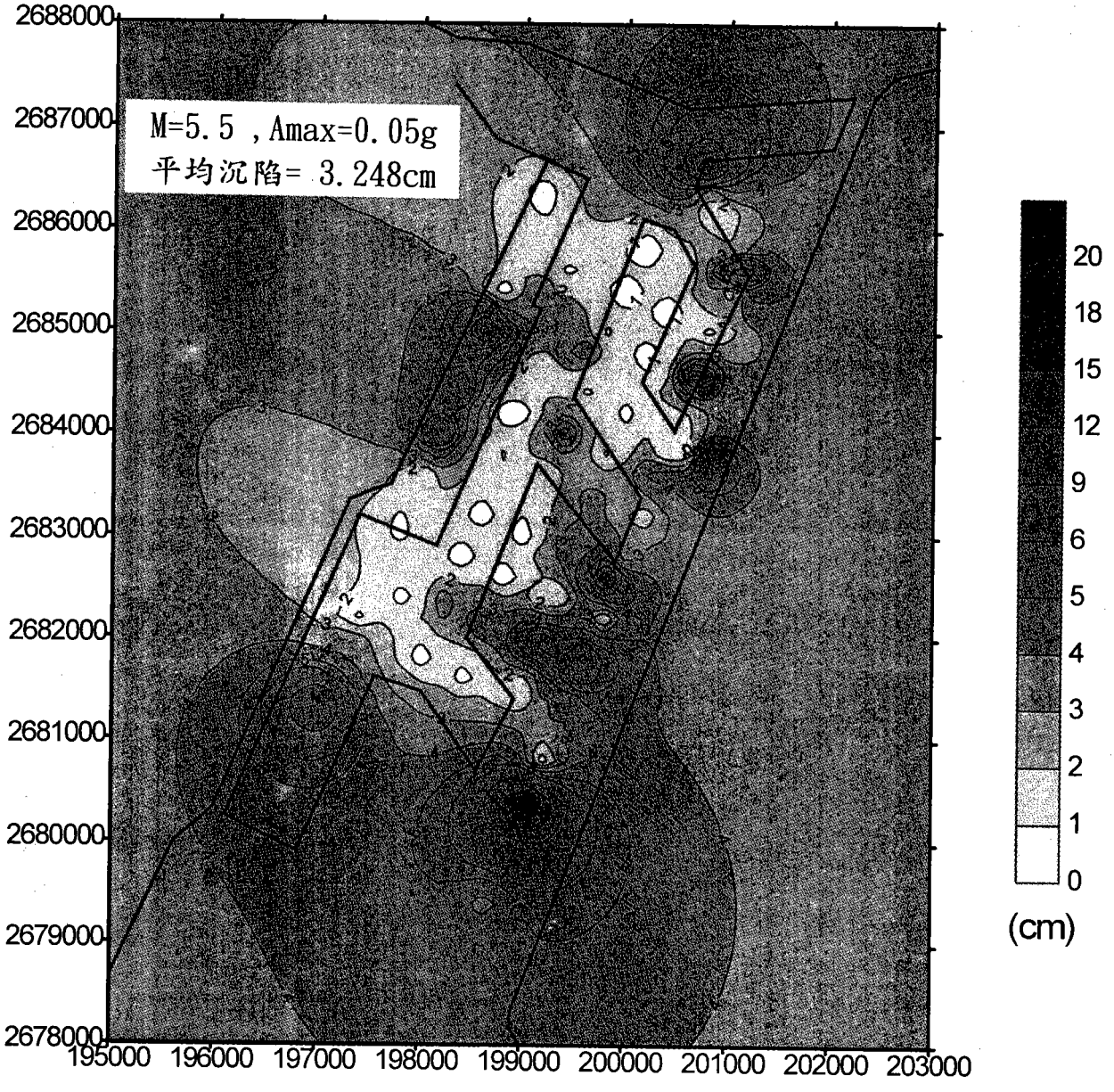


圖4-7　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝5.5，Amax＝0.05g）

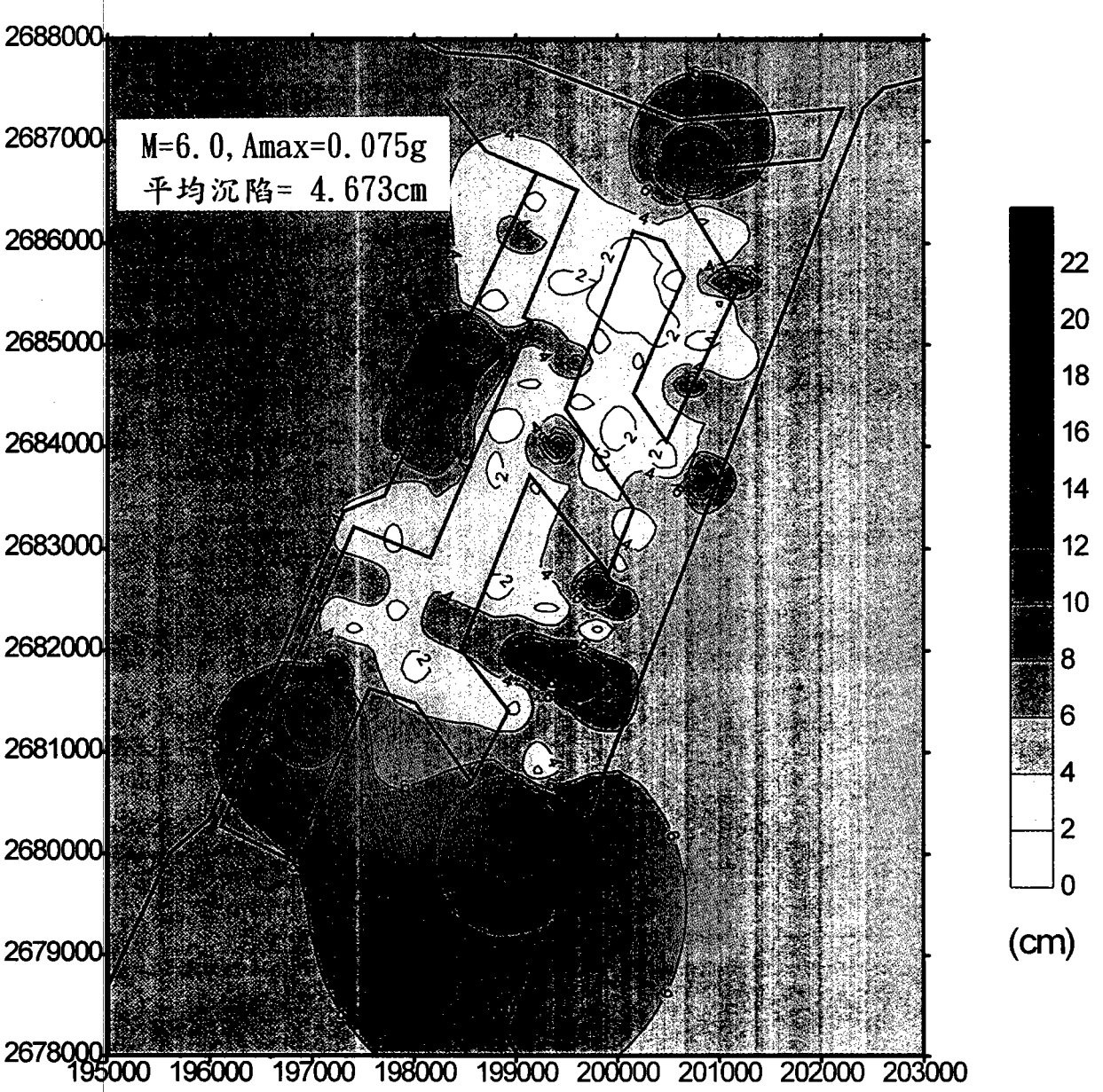


圖4-8　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝6，Amax＝0.075g）

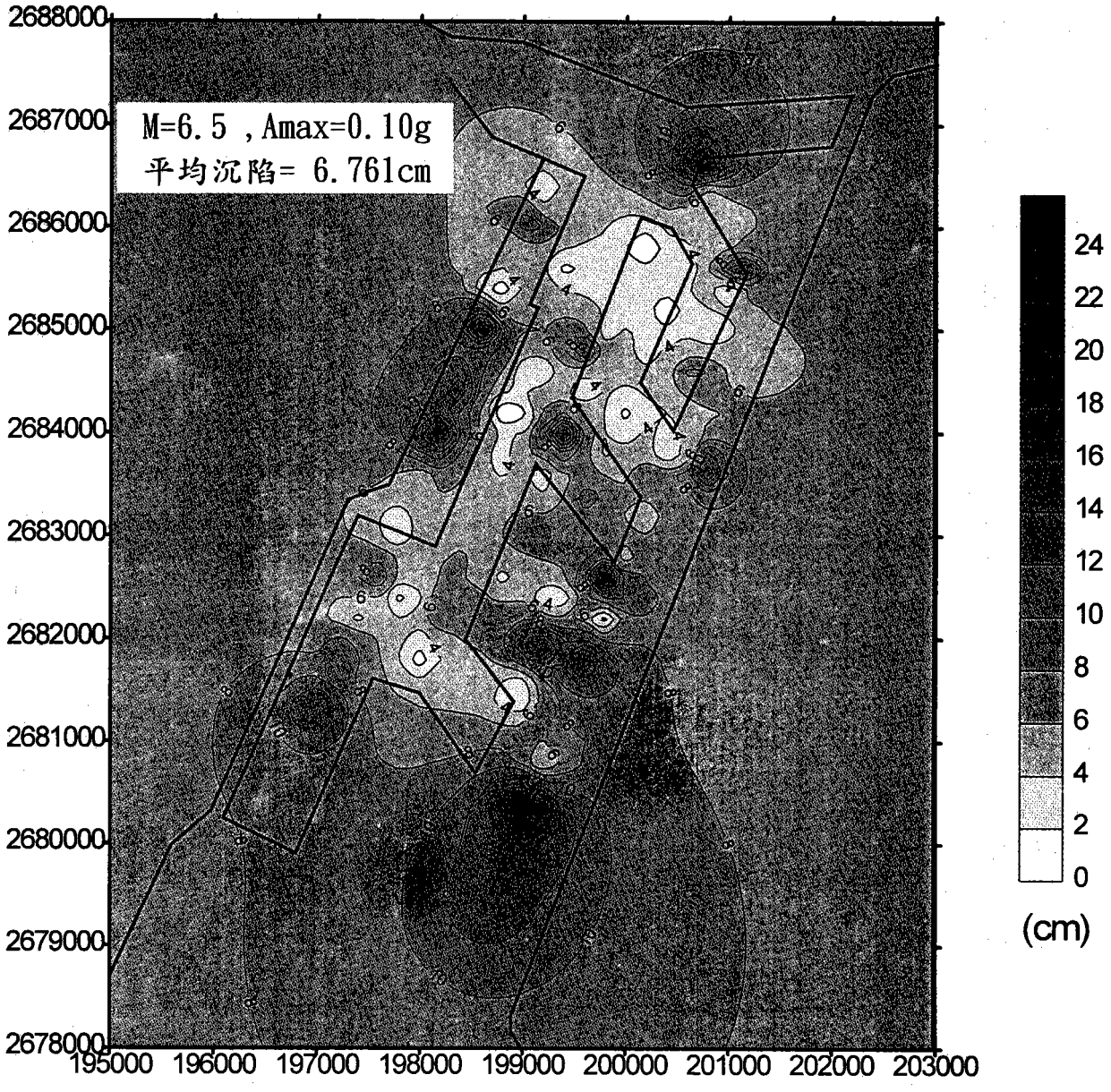


圖4-9　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝6.5，Amax＝0.1g）

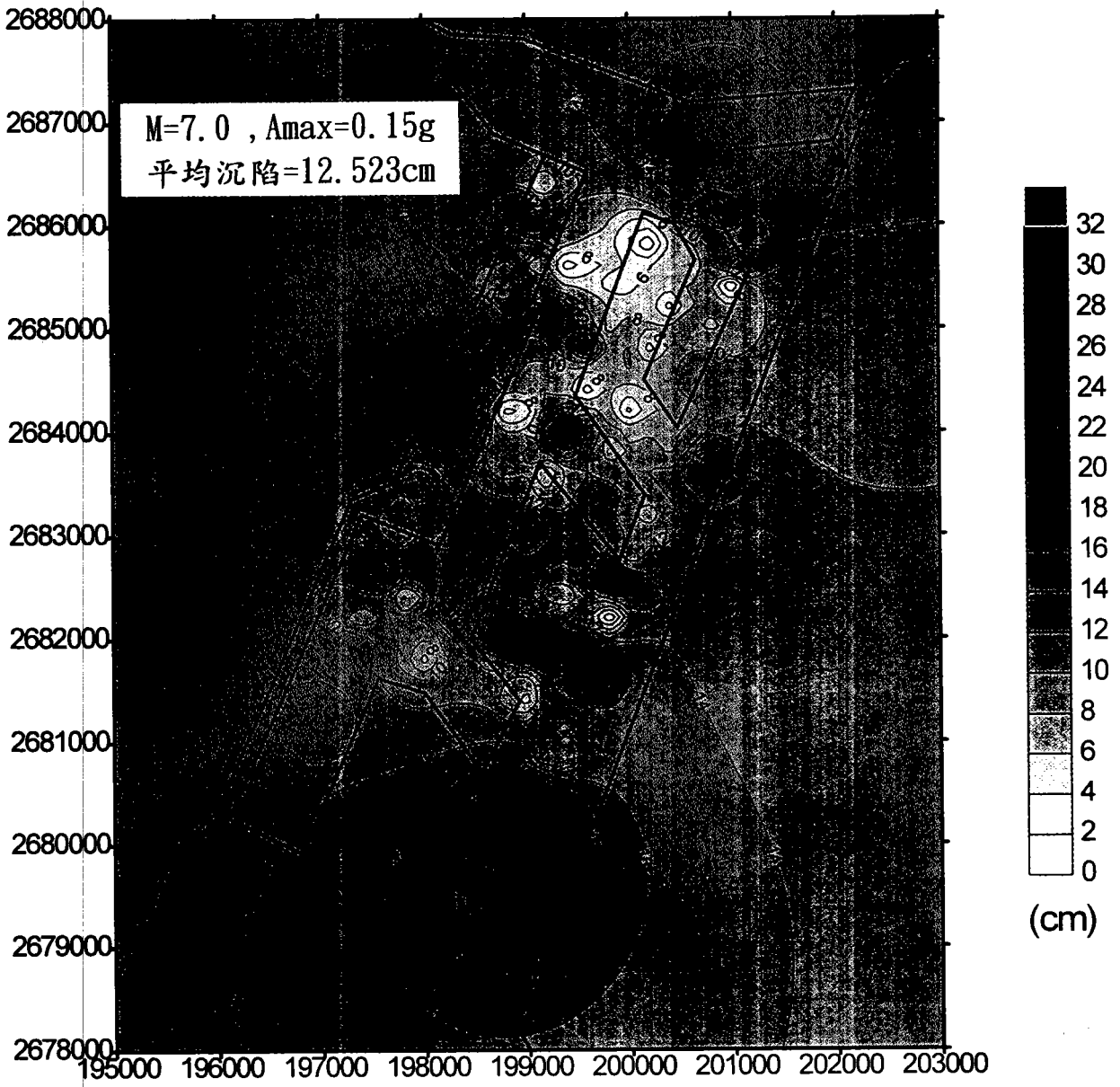


圖4-10　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝7，Amax＝0.15g）

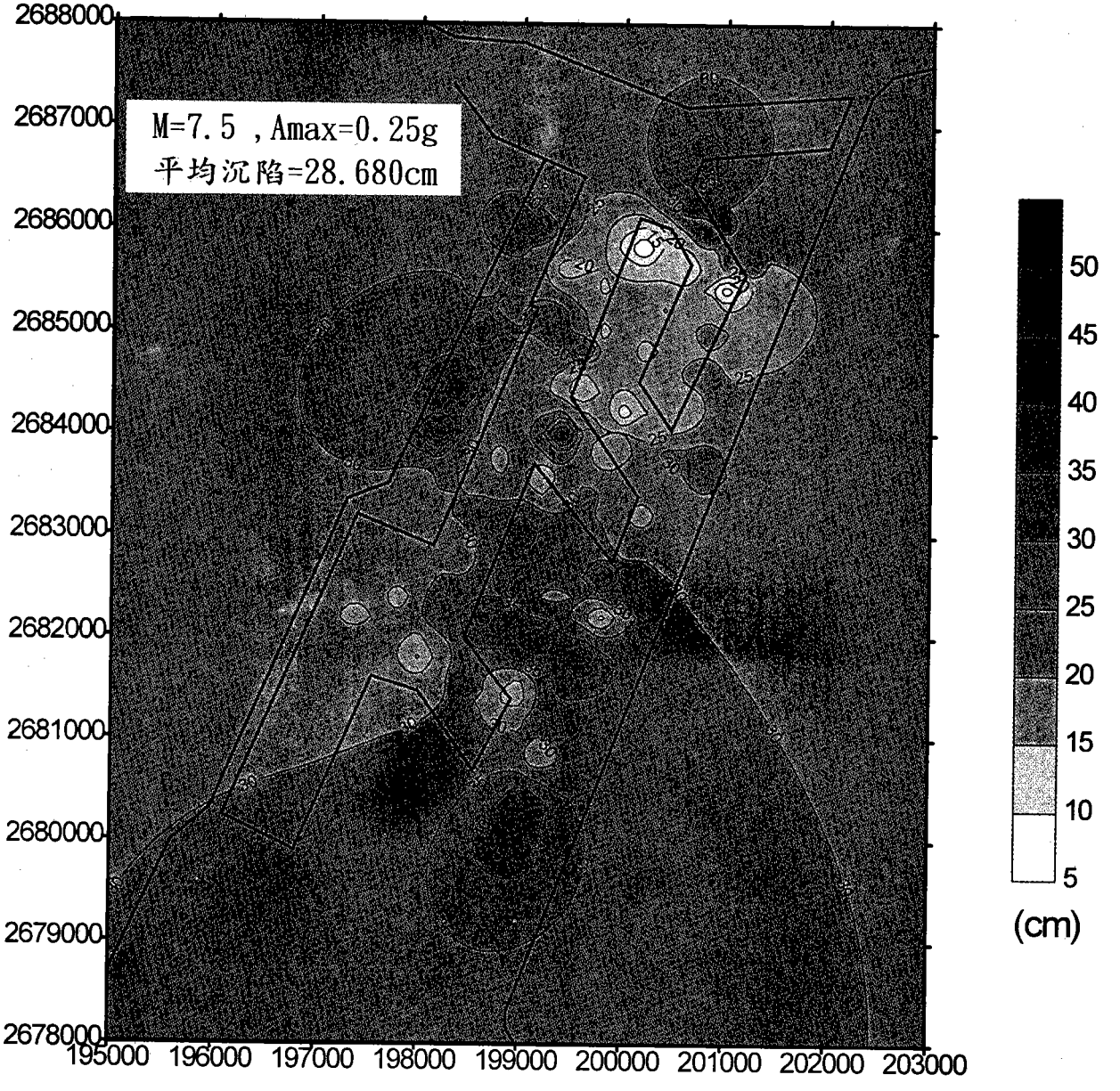


圖4-11　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝7.5，Amax＝0.25g）

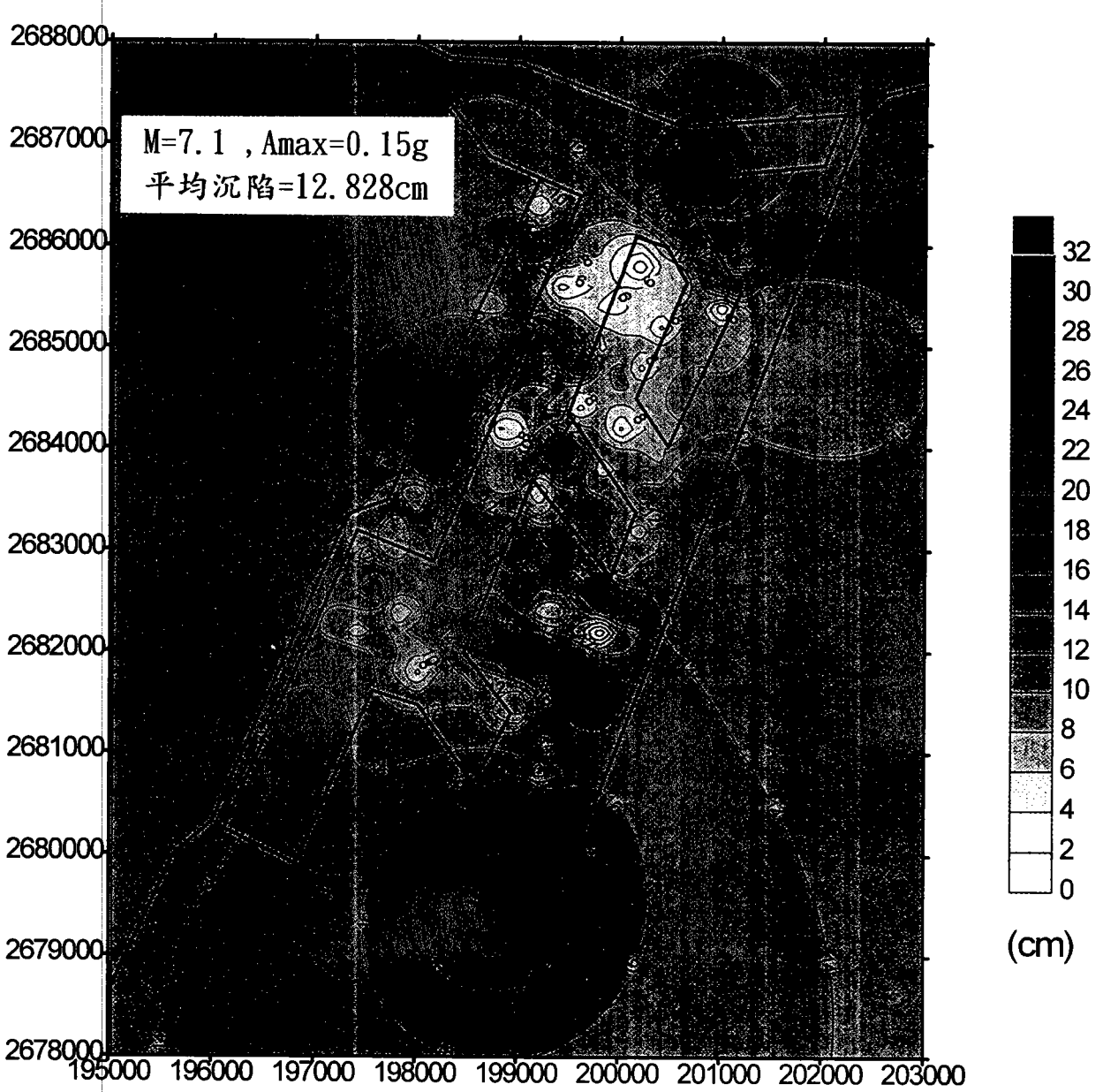


圖4-12　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝7.1，Amax＝0.15g）
（1935年新竹、台中烈震之台中港區震度）

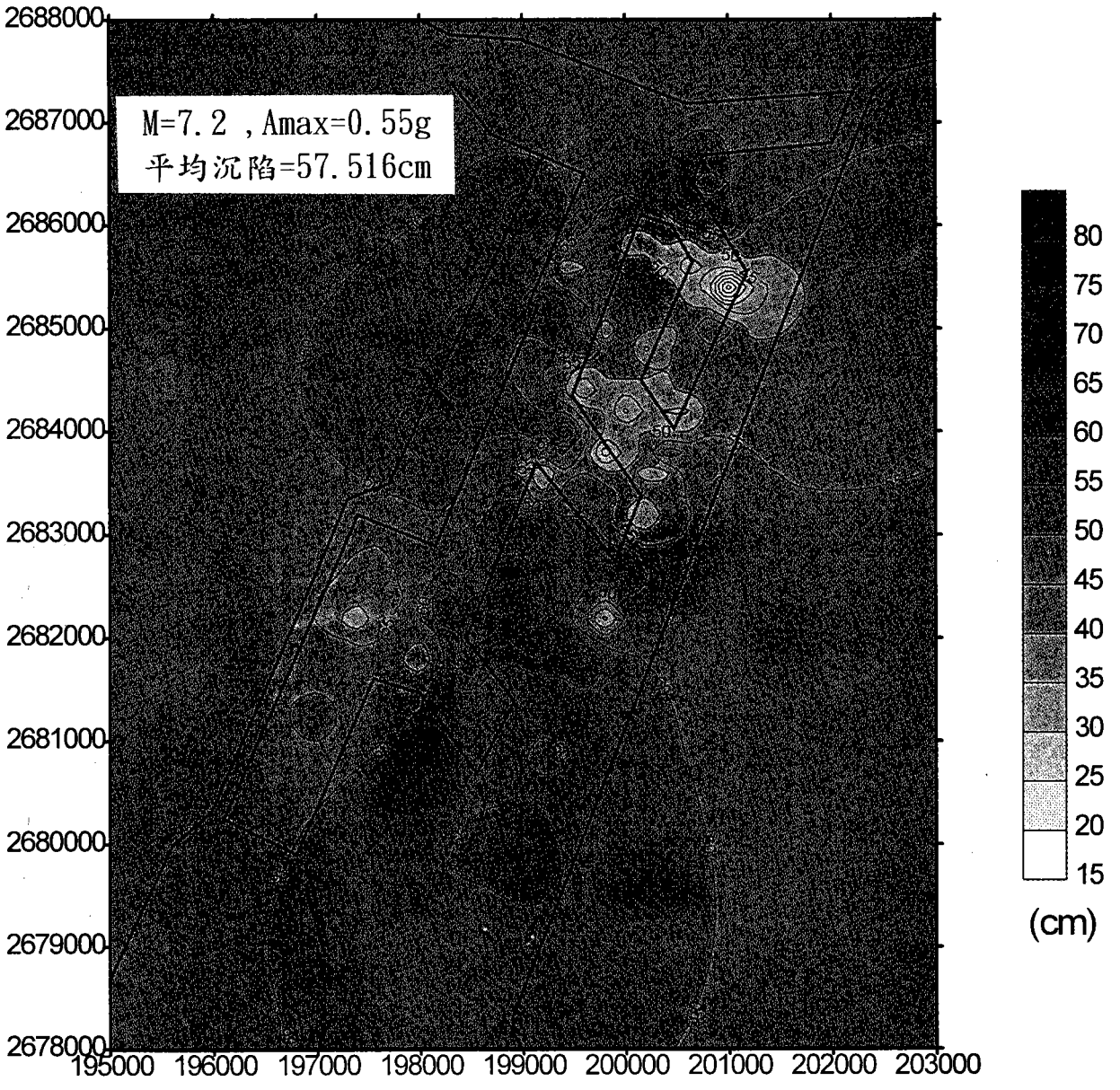


圖4-13　台中港區地震引致沉陷等值線（M＝7.2，Amax＝0.55g）

（1995年阪神烈震引致神戶港區之震度）

表4-2　台中港區各種設計地震引致土層之平均沉陷量

地震規模(M)	地表最大加速度(a max)	回復週期（年）	平均沉陷(cm)
5.0	0.03	3.5	2.366
5.5	0.05	7	3.248
6.0	0.075	15	4.673
6.5	0.10	30	6.761
7.0	0.15	50	12.523
7.5	0.25	100	28.680
7.1	0.15	※	12.828
7.2	0.55	※※	57.516

※1935年新竹－台中烈震之台中港區震度

※※1995年日本阪神烈震之神戶港區震度

五、結論與建議

1. 由本文台中港區域性之沉陷分析結果顯示，台中港有四處之土質較爲疏鬆，極易因地震而造成較大之沉陷災害，其分別位於(1)北突堤第8、9 、 10 號碼頭(2)西碼頭區之W10、W11、W12號碼頭(3)近安良港大排之臨港工業專業區（ II ）(4)南突堤之貨櫃基地規劃區。
2. 台中港區附近若再發生1935年之烈震（ M＝7.1， a_{max}＝0.15g ），港區最大沉陷量爲34公分，平均沉陷量爲12.83公分。
3. 台中港區若發生1995年日本阪神烈震（ M＝7.2， a_{max}＝0.55g ），港區之最大沉陷量達85公分，平均沉陷量達57.52公分，此結果與1995年神戶港之沉陷災害調查結果相當。
4. 本文另以各種地震規模M＝5、5.5、6、6.5、7、7.5及其可能發生之地表最大加速度 a_{max}＝0.03g、0.05g、0.75g、0.1g、0.15g、0.25g分析台中港區域性之沉陷，其平均沉陷分別爲2.37公分、3.25公分、4.67公分、6.76公分、12.52公分、28.68公分。
5. 本文之SPT-N值資料，大多集中於已興建之碼頭，今後宜補充地質調查未興建之碼頭區，使區域性之沉陷分析更加完善。
6. 本文僅建立台中港區各種設計地震引致區域性之沈陷等值圖，於後續計劃宜對台灣其他港區之沉陷特性進行研究。

參考文獻

1.台中港務局（1982）「台中港區地質調查與土壤液化研究」。

2.李延恭，謝明志（1994）「台灣各港區地質調查分析及資料建檔研究」港灣研究所，83-研（九）

3.張慶龍（1988）「非均向壓密飽和砂土承受反覆荷重後體積應變特性」成功大學土木系碩士論文。

4.賴聖耀，謝明志（1996）「台中港區土壤液化危險度分析與應用」八十五年度港灣大地工程研討會PP.7-1～7-18

5.賴聖耀（1990）「以標準貫入試驗值建立土壤液化潛能判別模式」中國土木水利工程學刊，第二卷，第四期，PP.301-311。

6.謝百鍾、柯鎮洋（1989）「基礎耐震設計新擬規範之精義」地工技術雜誌第26期，第23-38頁。

7.顏宗瓊（1992）「反覆荷重下飽和砂土之累積應變比之探討」成功大學土木系碩士論文。

8.Ishihara, K., and Yoshimine, M., (1991), "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes", Soils and foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188.

9.Ishihara,K., Yasuda,S., and Nagase,H., (1996), "Soil characteristics and ground damage", Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118

10.Lee, K., and Albaisa, A., (1974), "Earthquake induced settlements in saturated sands," Journal of ASCE, Vol.100, GT 4, pp.387-405

11.Nagase,H., (1984), "Strength and deformation characteristics of sand subjected to irregular loading in multiple directions, " PhD dissertation to the University of Tokyo, (in Japanese).

12.Nagase, H., and Ishihara, K., (1988), "Liquefaction-induced compation and settlement of sand during earthquakes, "Soils and Foundations, Vol.28, No. 1, pp.66-76.

13.Ohara,S., and Matsuda,H., (1988), "Study on the Settlement of Saturated Clay Layer Induced by Cyclic Shear", Soils and Foundations, Vol.28, No.3.

14.Seed,H.B., and Silver,M.L., (1971), "Volume Changes in Sands During cyclic Loading", Jnl. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, SM9.

15.Seed,H.B., and Silver,M.L., (1972), "Settle ment of Dry sands During Earthquakes", Jnl. Soil Mechanics and foundations, ASCE, Vol.98, SM4.

16.Soydemir,C., and Lecount,P.L., (1984), "Foundation design for potential liquefaction: A Case Study", Proc.8th World Conf. Earthquake Engg, San Francisco, California.

17.Tatsuoka,F., Sasaki,T., and Yamada,S., (1984), "Settlement in saturated sand induced by cyclic undrained simple shear, "Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, Vol.III, pp.95-102.

18.Tokimatsu, K. and Seed,H.B. (1987), "Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, "Journal of ASCE, Vol.113, GT8, pp.861-878.

19.Zeevaert,L. (1973), Foundation Engineering in Difficult Subsoil Condition, Van Nostrand-Reinhold Company, New York.

85-研(五)-3

台灣各港區土壤液化潛能調查研究

計劃主持人：陳圭璋
參與人員：蘇吉立
陳志芳
技術員：陳義松
張阿平
李春榮

目　錄

一、緒論

二、土壤液化潛能之決定

三、以震測錐試驗評估土壤液化潛能

四、地震資料分析

五、現地震測錐試驗

六、試驗結果分析與討論

七、結論與建議

八、參考文獻

九、附錄

一、緒論

台灣位於環太平洋地震帶之西環，大小地震頻繁，地震引致之動態性荷重，對飽和鬆砂性基礎土層，可能引致土壤液化現象，土壤發生液化現象時，地盤承載力頓時減小，其所承載之結構物，可能產生沉陷、傾斜或破壞，地下結構物可能因水壓太高而浮出地面，地底下之砂水混合物可能往上噴出地面，引致地盤下陷，產生裂縫或側移，穿過土壤液化區之管線常因此遭受破壞。每當強烈地震發生時，地下水較高之沖積砂土層極可能發生液化現象，尤其靠近海邊之地區，該現象更是可能發生。去年初日本阪神大地震，亦造成人工填築海埔地發生土壤液化現象，使神户商港嚴重受創。

台灣歷年來之地震亦曾有土壤液化之報導，惟均屬局部液化，並未造成大災害，但我們不能因此輕視地震引致土壤液化災害之嚴重性。台灣過去亦曾發生類似阪神地震規模之地震，在1906年之嘉義烈震及1935年新竹台中烈震其規模均超過7級以上，因此我們相信台灣發生大地震之可能性很大，地震災害之預防我們須加以重視。

為避免地震造成重大工程設施之破壞，惟有於工程規畫階段，對工程地址作詳細之調查探測工作，以了解工程地址其基礎發生液化之可能性，而避免將工程結構設於高液化潛能地區，或者將該等土層改良，設法降低其液化潛能，以減少地震時發生土壤液化災害之產生。

目前國內為促進經濟發展，提高國民生活水準，正積極進行六年國家建設計畫，其中多項計畫如西部濱海公路，港灣工程及大型工業區之開發等，均位於台灣西部海岸地區，因此該等地區將成為政府從事重大經濟建設之處，台灣西海岸地區大都屬於沖積砂土層，很多開發區甚至是位於以水力回填築成之海埔新生地上，該等地區地震時發生土壤液化之可能性通常較大。對於海岸地區基礎土層若能有較詳盡之液化潛能資料，對各工程計畫在決定興建地址或評估工程經費將有甚大的助益。

二、土壤液化潛能之決定

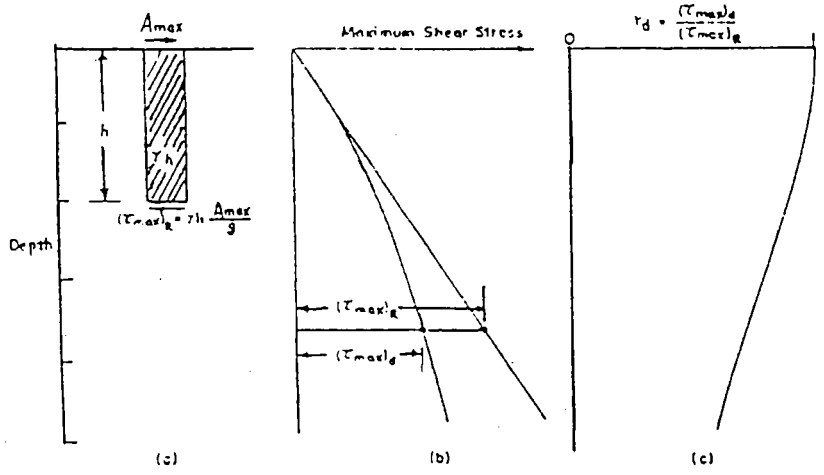
2.1 土壤液化

地震作用時，地盤中之疏鬆砂土層因振動而有體積減小之趨勢，引致其內孔隙水壓力上升，當孔隙水壓上升至與土壤之有效覆土壓力相等，此時土壤顆粒好像浮在水中一樣，稱為土壤液化。

飽和低密度砂土層遭受強大地震，在地震-開始瞬間無任何顯著變形，稍後當其內孔隙水壓上升至與有效覆土壓力相等而稱為初始液化時，將驟然發生巨大變形，在後續地震作用下此種變形無限制增加迄地震停止為止。飽和中至高密度砂土層地震作用達到初始液化時產生變形，其變形量雖隨後續剪應力作有限增加，但其本身之膨脹特性將對後續剪應力具變形抵抗力，因之變形最後趨於一穩定值。

2.2 地震剪應力

地震時，各土層所受反復性剪應力，主要係由於岩盤振動時產生之剪應力波向上傳播所引致，各土層之土壤性質若不同，其引致之剪應力亦不相同，目前常用以分析地震引致之剪應力，有簡易手算法及電子計算機分析法兩種，後者分析時須有各地區土層之各種特性係數及強震紀錄作為輸入資料，惟該等資料不易取得，因之本研究將僅以簡易手算法分析各土層之地震剪應力。



· DETERMINATION OF MAXIMUM SHMAR STRESS

圖2-1 最大剪應力之決定

Seed & Idriss 1971年對地震引致之剪應力提出如下之簡易分析步驟，首先假設柱狀土壤(深度為H)為一剛性體，如圖2-1 所示，其地表之最大加速度若為 A_{max}，則地震時所產生之最大剪應力為 $(\tau_{max})_R = \gamma H/g \cdot A_{max}$，式中$\gamma$為土壤單位重，但實際上土壤並非一純剛性體，而為一柔性體，因此土層內所產生之剪應力較$(\tau_{max})_R$為小，眞實剪應力$(\tau_{max})_D$須由剛體剪應力修正而得，通常係以應力折減係數r_d來修正它，即 $(\tau_{max})_D = (\tau_{max})_R \cdot r_d$，應力折減係數$r_d$在地表面時其值為 1，隨深度之增加而變小，但其變化趨勢且因土層性質之不同而有差異，深度愈大時，r_d值愈分散(如圖2-2) 惟土層深度在12公尺以內r_d值變化不大，可取其平均值計算，因此土層內所引致之眞實剪應力 $(\tau_{max}) = \gamma H/g \cdot A_{max} \cdot r_d$ 。地震時實際所產生之剪應力時間歷程(Time History) 為一不規則性(如圖2-3)所示，因此必須決定等量均勻之平均剪應力(Equivalent uniform average shear strss)，根據實驗室獲得之試驗數據顯示，等量均勻之平均剪應力，約為最大剪應力之65%。

$$\tau_{av} = 0.65 \cdot \frac{\gamma H}{g} A_{max} \cdot r_d$$

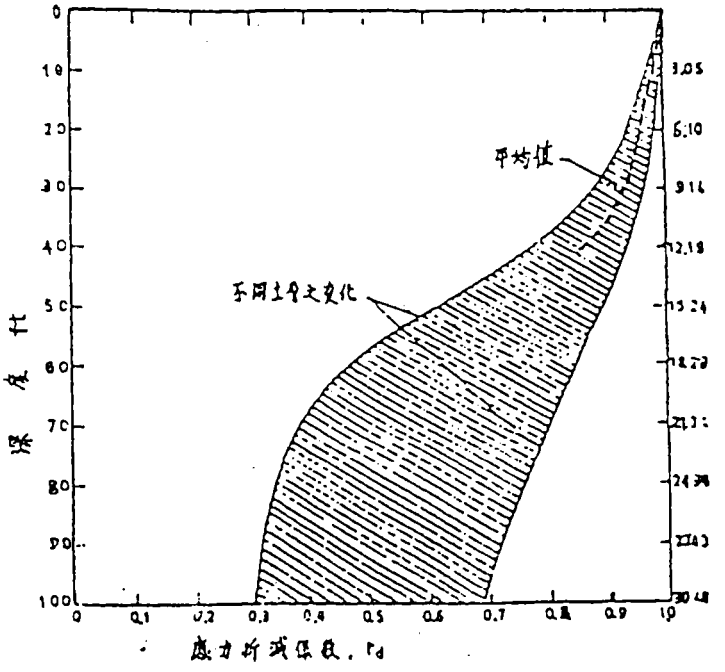


圖2-2 應力折減係數r_d與深度之關係(取自Seed & Idriss, 1971)

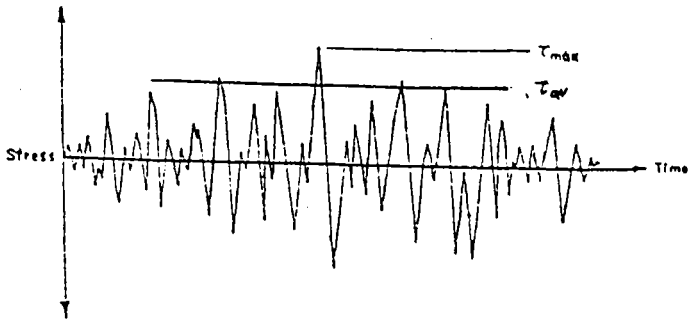


圖2-3 地震剪應力之時間歷程

2.3 土壤液化強度

在設計地震之反復荷重下發生液化所需之平均反復應力比 τ / σ_{vo}' ，通常稱之為土壤之液化強度，欲決定各土層之土壤液化強度，目前常用之方法有二種，(1)相關經驗法(2)試驗分析法，前者根據現地土層在過去地震作用下之液化行為反應與現地試驗資料(如SPT，CPT）之關係圖來加以求取， 圖2－4為SPT－N值與液化強度之關係圖。試驗分析法則須採取現地不受擾動之土樣送至試驗室進行試驗分析，該方法受現地狀況模擬之眞實性，試驗設備系統之可靠性，均勻剪應力之施加不易，不擾動試樣之難以獲取及試驗誤差等多種因素之影響，本研究是採用相關經驗法來決定土壤液化強度。

2.4 土壤液化潛能

根據前述之地震剪應力 τ_{av} 與土壤液化強度 τ ，則可計算土層發生液化之安全因素SF。

$$SF = \frac{\text{土層之液化強度 } \tau}{\text{地震引致之土層剪應力 } \tau_{av}}$$

當安全因素SF小於1時，表示該土層在設計地震作用下具有液化潛能，SF愈小則土層之液化潛能愈大。

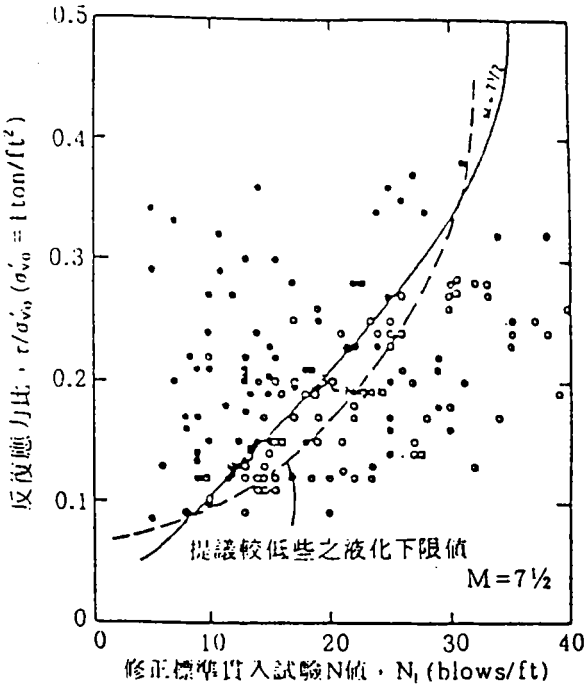


圖2-4 SPT-N值與液化強度關係(取自Robertson & Campanella, 1985)

三、以震測錐試驗評估土壤液化潛能

本研究採用相關經驗法分析土壤之液化潛能，該法所使用之現地試驗，過去最常用者是標準貫入試驗SPT－N值，雖然建立有很多經驗法則，而且其應用情形也不錯，惟該試驗在設備及人員操作上甚難有一致之標準，因之有時造成試驗結果之未具代表性，進而影響液化潛能之評估結果。

荷式錐貫入試驗CPT 在過去數十年經學者專家之研究發展與改進，使CPT由最初僅能量測錐頭阻力(Cone resistance)，而逐漸演變成能同時量測錐頭阻力、摩擦阻力(Local friction)、孔隙水壓、垂直度及溫度等之水壓錐(Piezocone)， 利用水壓錐試驗結果詮釋評估土壤液化潛能之方法近年亦逐漸發展成熟，加上CPT 試驗大都由機械操作，且其設備與試驗過程都有標準規範，因之可將人為之錯誤減至最低，目前有逐漸取代SPT之趨勢。Robertson等學者為改進水壓錐評估固結性(Cemented)砂土或過壓密粘土工程性質之能力，於水壓錐內部增設量測土層剪力波速之波動接收器(Geophone)

，該貫入錐頭我們稱之為震測錐(Seismic cone)圖3-1為其結構示意圖，而剪力波速亦為一種評估土壤液化潛能之重要參數。

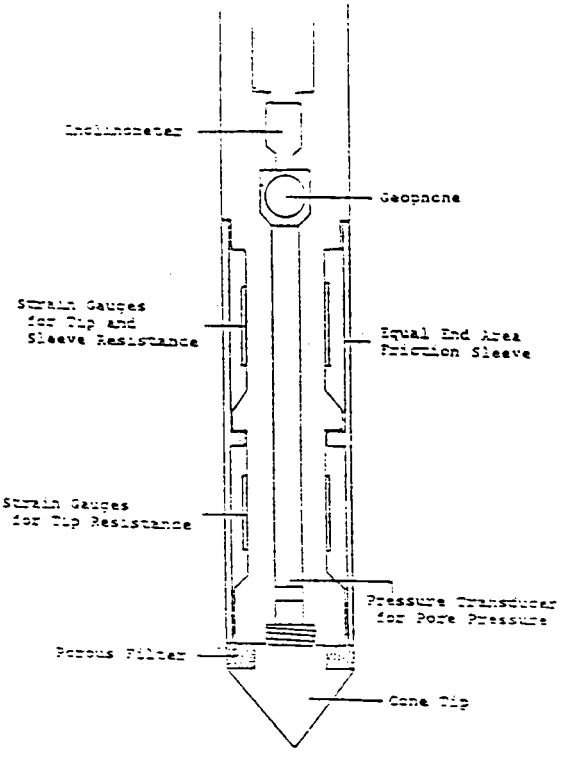


圖3-1 震測錐結構示意圖

3.1 根據錐頭阻力評估土壤液化潛能

Seed等多位學者曾建立由SPT－N值評估土壤液化潛能之方法，該方法是根據觀察地震前後現地土壤反應行為所訂出N值與臨界反復應力比(CSR) τ_{av}/σ_o' 之關係圖如圖3－2所示，圖中$(N_1)_{60}$為現地量測N值經正規化成60%自由落錘能力之修正值，該圖為根據淨砂土(Clean sand)之行為所建立之關係。Seed研究土壤液化問題時，發現飽和疏鬆砂土承受反復荷重後，孔隙水壓將逐漸增加，當孔隙水壓等於土壤之總應力而達到液化時，會產生無限量之變形，但隨砂土緊密程度之增加，其液化時之應變量將逐漸變小，亦即僅會

引致有限量之變形，在工程規畫階段，若以基礎土層其液化潛能如何來選定結構物地址時，便須視結構物能忍受之變形量而定，只要液化時土層之應變量不超過結構物能忍受之程度，該土層便可視為合適之施設地址。Seed為便於工程上之應用，於圖3-2 內更建立一組曲線供研判土層承受反復荷重產生液化時應變量之大小，該圖顯示當淨砂土(D_{50} =0.25mm)且$(N_1)_{60}$ 小於10～15時，土壤液化將產生有限之變形量，通常其應變量將小於20%。

Douglas, Seed, Robertson等學者於從事研究錐頭阻力q_c與SPT－N值之關係時，發現各種土壤其$q_{c1}/(N_1)_{60}$比值雖然不同，但同種類之土壤其比值常為定值，且比值是隨土壤顆粒平均粒徑之增大而逐漸增加，其比值之分佈情形如圖3-3 所示，為工程應用安全之見，Robertson 建議淨砂土其$q_{c1}/(N_1)_{60}$比值選用5，q_{c1}為錐頭阻力經有效覆土壓力正規化之數值，$q_{c1} = q_c \cdot (\sigma_o')^{-0.5}$，Robertson根據$q_{c1}/(N_1)_{60}$之比值，將圖3-2內之橫軸由$(N_1)_{60}$，轉換成$q_{c1}$，因之該圖亦能顯示修正錐頭阻力與臨界反復應力比(CSR)之關係，Robertson認為圖3-2僅適於有效覆土壓力小於1.5kg/cm^{2}時發生之液化現象，若該土層有效覆土液壓力大於1.5kg/cm^2 時，於評估土層之液化潛能，須將該關係圖之剪應力比作適量之減小。圖3-2為根據地震規模M=7.5及土壤為乾淨砂土所建立評估土壤液化潛能之關係圖，若地震規模不是7.5 或砂土含有細料，則該關係圖須加以修正才能適用。

(1)地震規模之修正

Seed認為從液化觀點而言，若考慮地震之作用力為0.65τ_{max} 時，不同規模之地震其主要不同在於其所產生反復剪應力之作用次數，根據Seed統計分析結果顯示不同地震規模其對應之作用次數如表1 所示，若以地震規模M=7.5 之作用次數選定為參考標準，則不同地震規模其將產生液化現象之作用次數與反復應力比之比值τ/τ_1之關係圖如圖3-4所示，欲將圖3-2地震規模為7.5 之關係圖修正成

CORRELATION FOR "CLEAN SANDS"

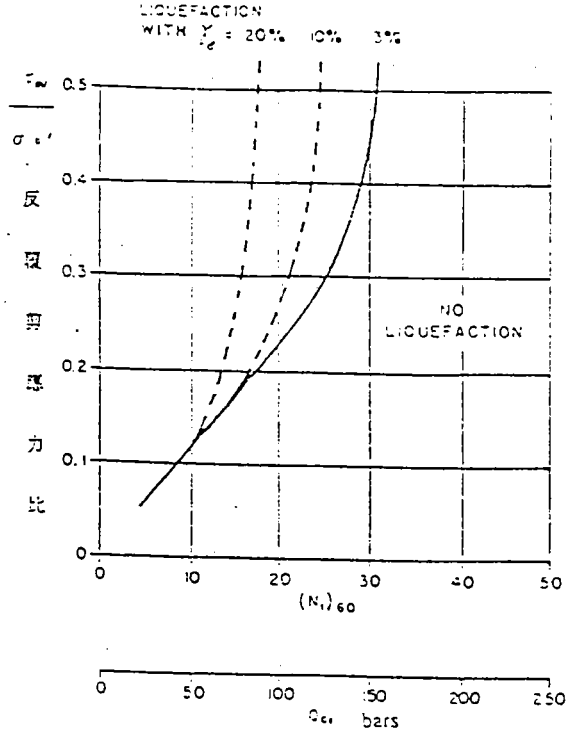


圖3-2 以SPT-N值或錐頭阻力Q_{c1}評估淨砂土之液化潛能

BASED ON ENERGY RATIO OF 60%(N_{60})

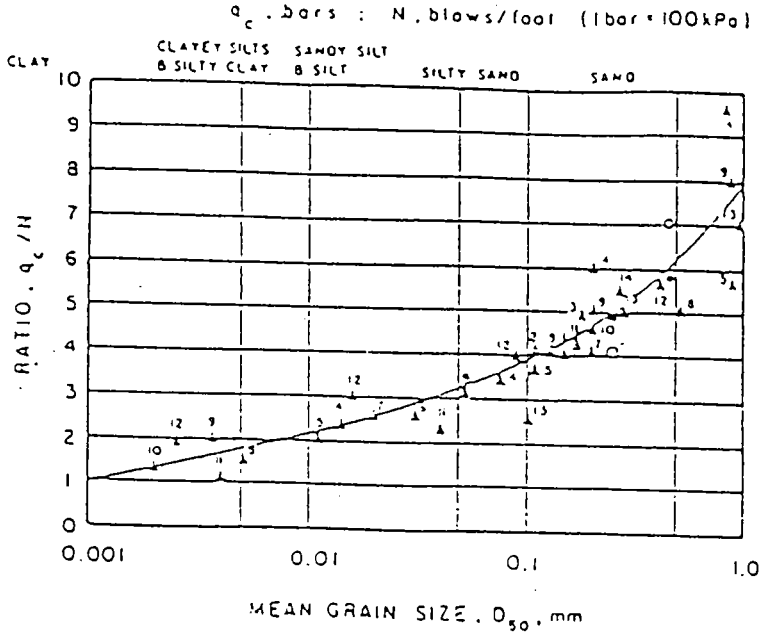


圖3-3 $Q_{C/N}$隨顆粒平均粒徑變化圖

適用於各種不同地震規模，則須利用圖3-4 內所顯示各種地震規模所對應之縱座標與圖3-2內之縱作標(反復應力以τ_{av}/σ_o')相乘而得新反復應力比，因此可獲得各種不同地震規模之錐頭阻力q_{cl}與臨界反復應力比τ_{av}/σ_o'之關係圖。

表一　不同地震規模反復應力作用次數

地震規模	地震作用力為0.65 τ_{max}之代表作用次數
8½	26
7½	15
6¾	10
6	5-6
5¼	2-3

(2)細料含量之修正

細料含量(Fines content)FC之定義是通過# 200篩(0.075mm)之重量百分比，某種砂土其細料含量若增加，則其壓縮性(Compressibility)將增加，在產生大應變(Large strains) 時該現象特別明顯，錐頭阻力為一種大應變情形下之量測結果，因此當土壤之細料含量增加時，將使得土壤之壓縮性改變，也使量測之錐頭阻力有減低之情形，Kuerbins認為砂土所含細料若為非塑性(Non-plastic)則對液化之阻抗(Liquefaction resistance)將維持不變。

Robertson根據Seed之資料建議錐頭阻力q_{cl}因細料含量之修正量$\triangle q_{cl}$，圖3-5為各種q_{cl}值在不同細料含量FC狀況下之修正量$\triangle q_{cl}$之變化圖形，該圖形顯示在FC＜40%時修正量$\triangle q_{cl}$隨FC之增加而增加，但該圖形顯示在FC＞40% 以上時，因土壤之排水性質完全改變，亦即貫入試驗過程將因細料含量之增加而由排水狀況逐漸變為不排水狀況，因此對高細料含量之砂土，其錐頭阻力不再適合用來評估不排水反復荷重作用下之液化阻抗。

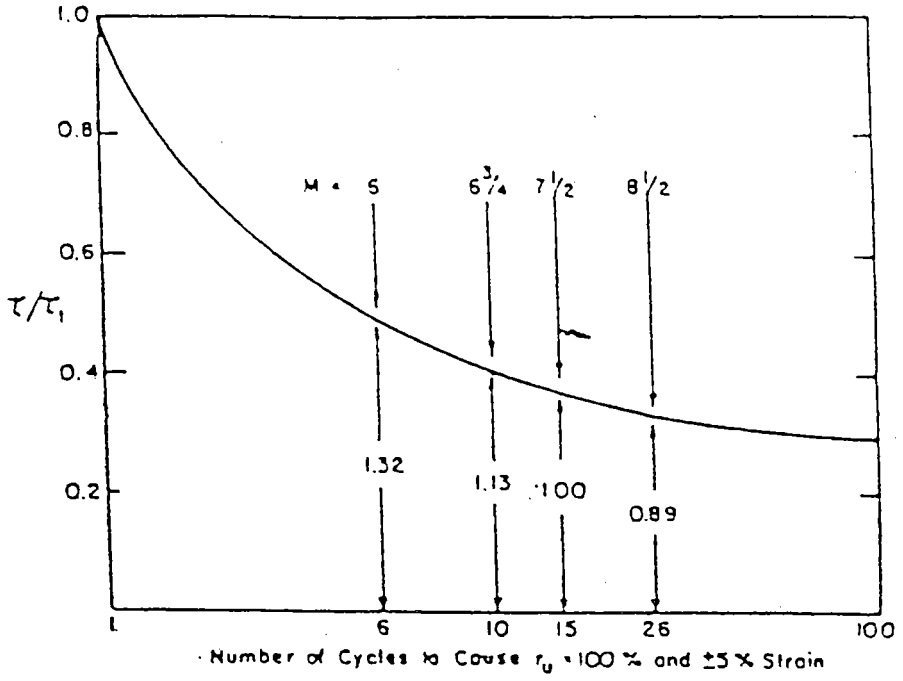


圖 3-4 各種地震規模產生液化時應力比值與作用次數之關係

$$Q_{c1} = q_{c1} + \Delta q_{c1}$$

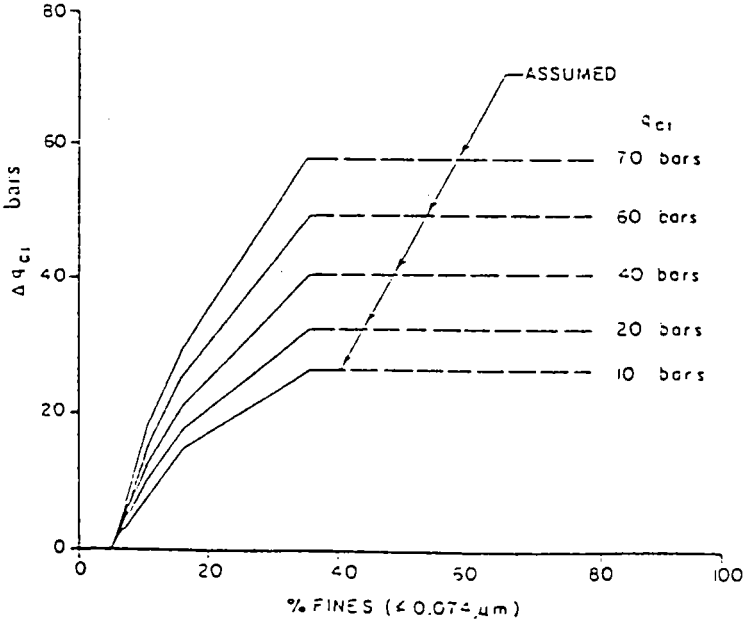


圖 3-5 不同細料含量之錐頭阻力修正量

決定土壤之細料含量，除採取試樣分析外，由CPT 量測結果來估量亦是一種可行之方法，圖3-6為根據CPT試驗結果研判土壤分類之圖表，於第6區通常是淨砂或含小量細料之沉泥質砂，若在第5區則為沉泥而其細料含量均大於15%，隨著區數之減少而細料含量是逐漸增加。

Woeller根據CPT之現場試驗資料指出細料含量與CPT 試驗時超額孔隙水壓消散50%之時間有良好關係存在如圖3-7所示，該圖通常僅適用於消散50%時間T_{50}＞50秒且細料含量大於40%之情況下， 當T_{50}介於10秒與50秒時，則因錐頭之貫入過程是屬於部份排水狀況，細料含量與T_{50}之間將不再有良好關係存在。

前面所述細料含量之修正僅涉及錐頭阻力之修正量$\triangle q_{c1}$，分析時仍然使用淨砂土情況之反復應力比與錐頭阻力間之關係圖。Seed根據現地土壤反應情形，建議一組不同細料含量之τ_{max}/σ_o'與q_{c1}之關係圖如圖3-8所示。日本學者Shibata等研究細料含量之影響時，是依土壤不同之顆粒平均粒徑而建議一組關係曲線如圖3-9， 以供分析土壤之液化潛能，圖內$(q_{c1})_{cr}$ 為錐頭阻力 經有效覆土壓力及顆粒平均粒徑正規化之數值。

$$(q_{c1})_{cr} = C_1 \cdot C_2 \cdot q_c$$

式中

C_1：因有效覆土壓力之修正係數 $C_1 = \dfrac{1.7}{\sigma_o' + 0.7}$

σ_o'：垂直有效應力

C_2：平均粒徑修正係數，$C_2 = \dfrac{D_{50}}{0.25}$

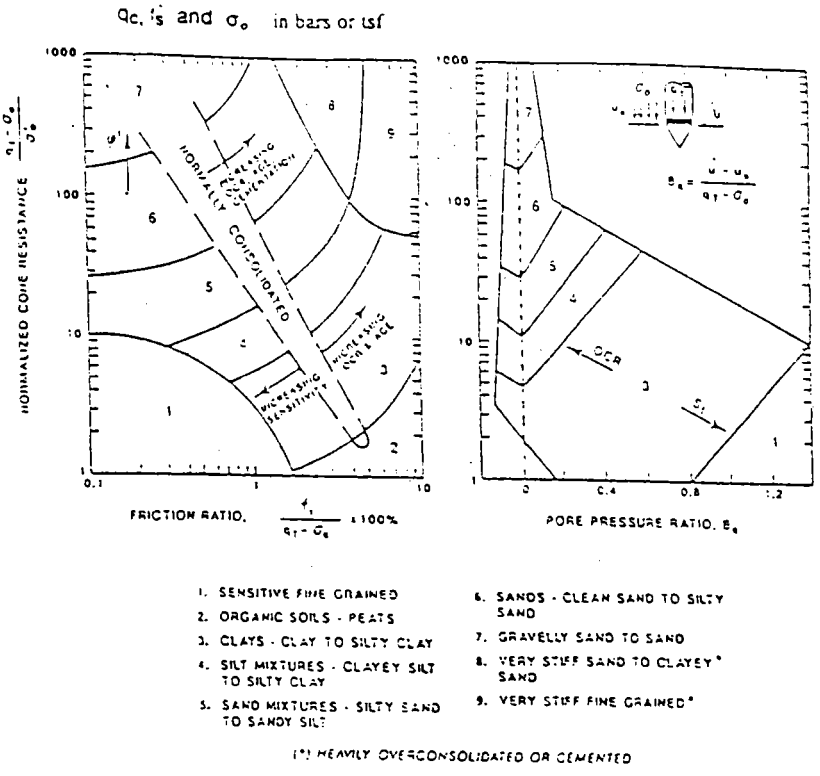


圖3-6　依C　P　T試驗結果之土壤分類圖

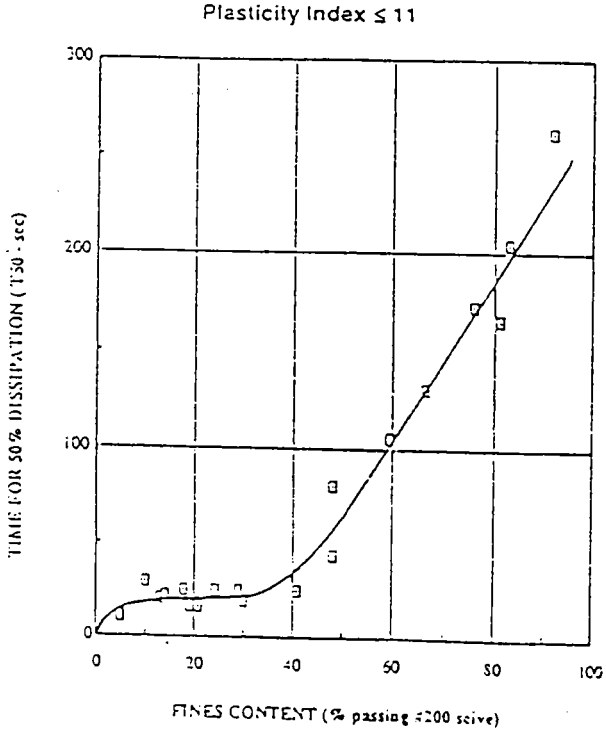


圖3-7　細料含量與50%消散時間關係圖

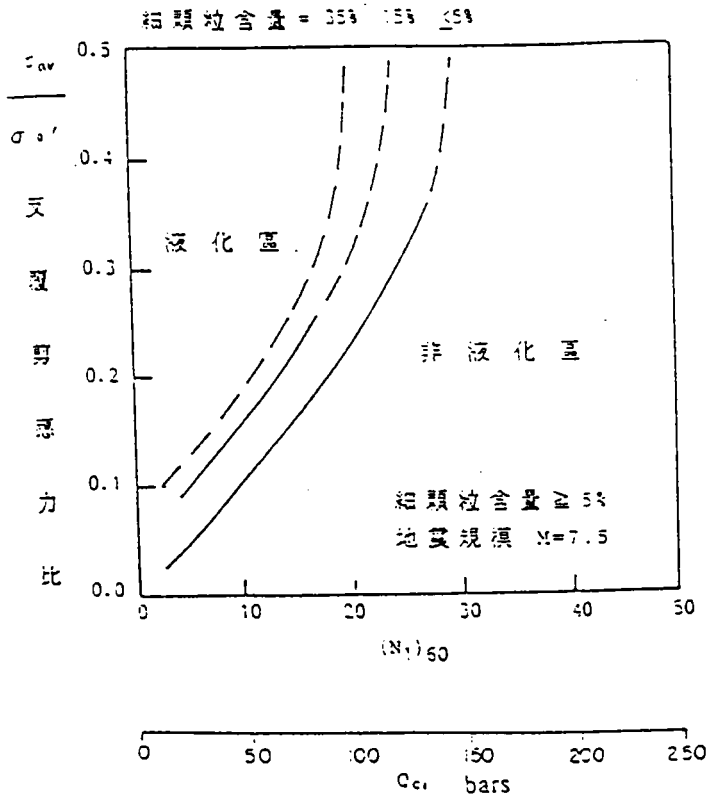


圖 3-8 不同細料含量情況之液化潛能評估

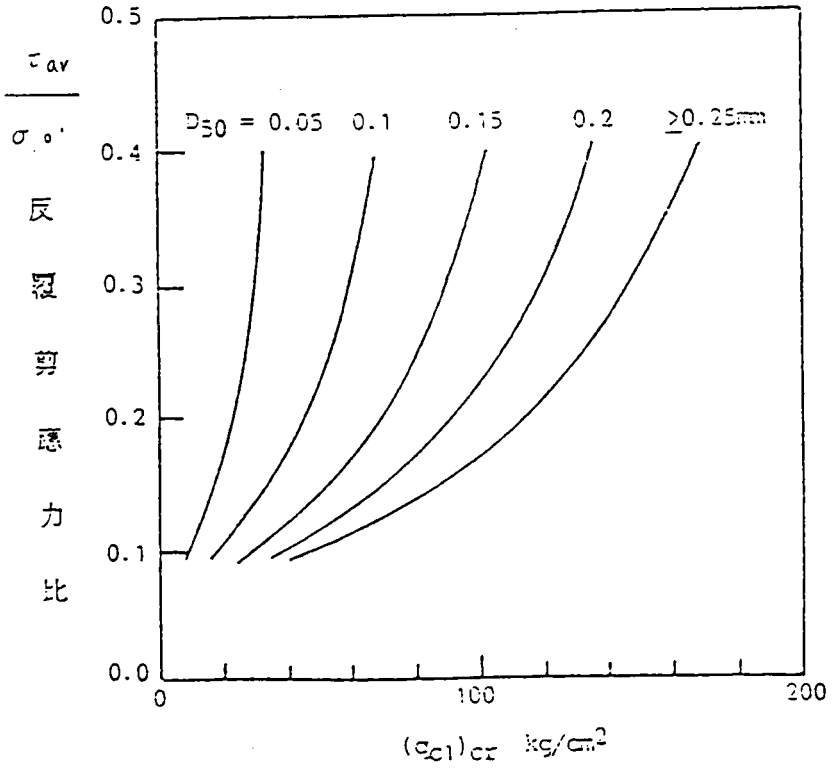


圖 3-9 不同土壤顆粒平均粒徑之液化潛能評估

3.2 根據剪力波速研判土壤液化潛能

針對一定強度(Intensity)及延期(Duration) 之震動欲給剪力波速一界限值以判別某地區是否液化，通常須根據現地之量測資料，到目前為止，雖然有關之量測數據仍然十分有限，但很多事實均清楚顯示剪力波速能作為研判液化潛能之有效指數。

2　Robertson根據加州Imperial Valley地區之現地資料，曾建議剪力波速之界限值為140m/sec以判別液化及非液化區，剪力波速是孔隙比(Void ratio)與有效圍壓之函數，對某一定孔隙比之砂土（2即固定密度），其剪力波速將隨深度而增加，因之欲訂出剪力波速Vs與臨界應力比CSR 之關係圖以研判土層之液化潛能，其剪力波速須先經有效覆土壓力正規化再進行相關性分析。Hardin及Drnevich曾明白指出剪力波速為有效覆土壓力之函數，通常正規化之剪力波速可以下式求取。

$$V_{s1} = V_s\left(\frac{1}{\sigma_0'}\right)^{0.25}$$

式中　V_s ：剪力波速

　　V_{s1} ：正規化剪力波速

　　σ_0'：有效覆土壓力

圖3－10為Robertson所建議用以研判土壤液化潛能之正規化剪力波速與臨界應力比關係圖，Robertson 研究發現細料含量對正規化剪力波速與臨界應力比CSR 僅有些微影響，甚至無影響，此點為以剪力波速來分析液化潛能較以SPT－N值或錐頭阻力q_c來分析為佳之處。

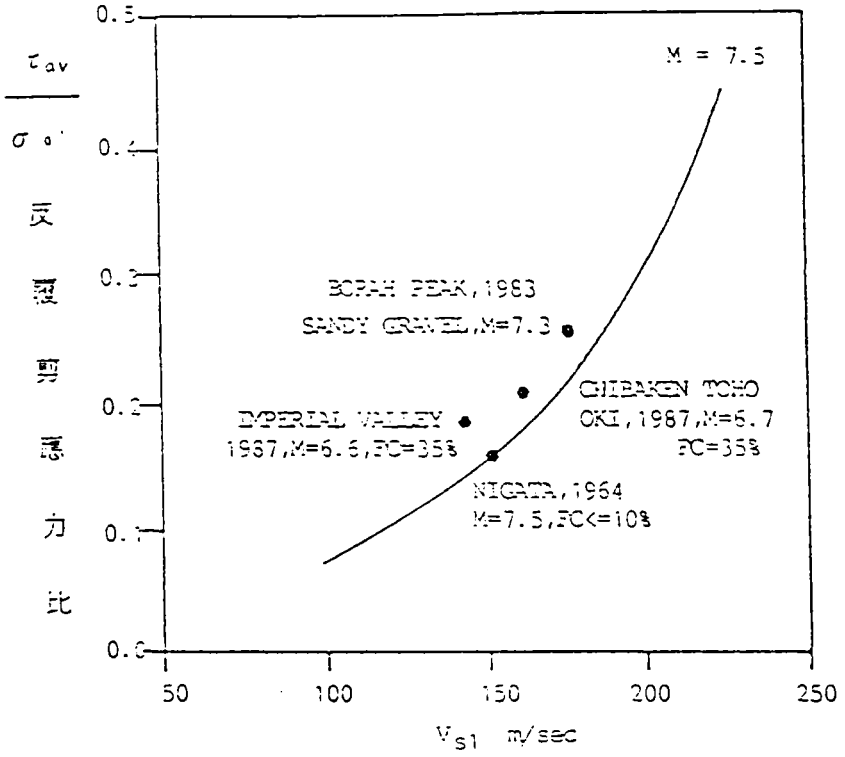


圖3-10　剪力波速與臨界反復剪應力關係圖

四、地震資料分析

台灣位於太平洋地震帶西側中部附近，經常發生地震，其中多次是破壞性大地震，生命財產受重大損失，從台灣各地方誌中可發現17世紀中葉以後大地震震災之記錄，自1897年中央氣象局各測候所安裝地震儀開始辦理地震觀測迄今90餘年，隨著測站與儀器設備之增設與改進，地震紀錄逐漸充實。地震是由於震源附近斷層運動所引起，工程上有興趣的地震為引起災害之破壞性地震，通常是指地震規模M大於5.5級的地震。

為探討分析各工址土層之液化潛能，首先須有各地區之地震資料如地震規模及震度等，因此收集各地過去曾發生地震之大小及次數，加以分析決定設計基準地震，也就是決定在結構物經濟壽命內預期將發生一次之最大地震之再現週期，根據該等資料再據以分析土層之液化潛能。

根據蔡義本等人(1977年)之研究，可將台灣分成三個地震帶，即西部地震帶(WSZ)，東部地震帶(ESZ)及東北部地震帶(NESZ)，西部地震帶為從台北向西南延伸至台南附近，寬約80公里，台灣西南部為比較寧靜無地震地區。本研究選定調查土壤液化潛能之四個港區分別為台中港區、布袋港區、安平港區及高雄港區均位在西部地震帶，如圖4-1所示。

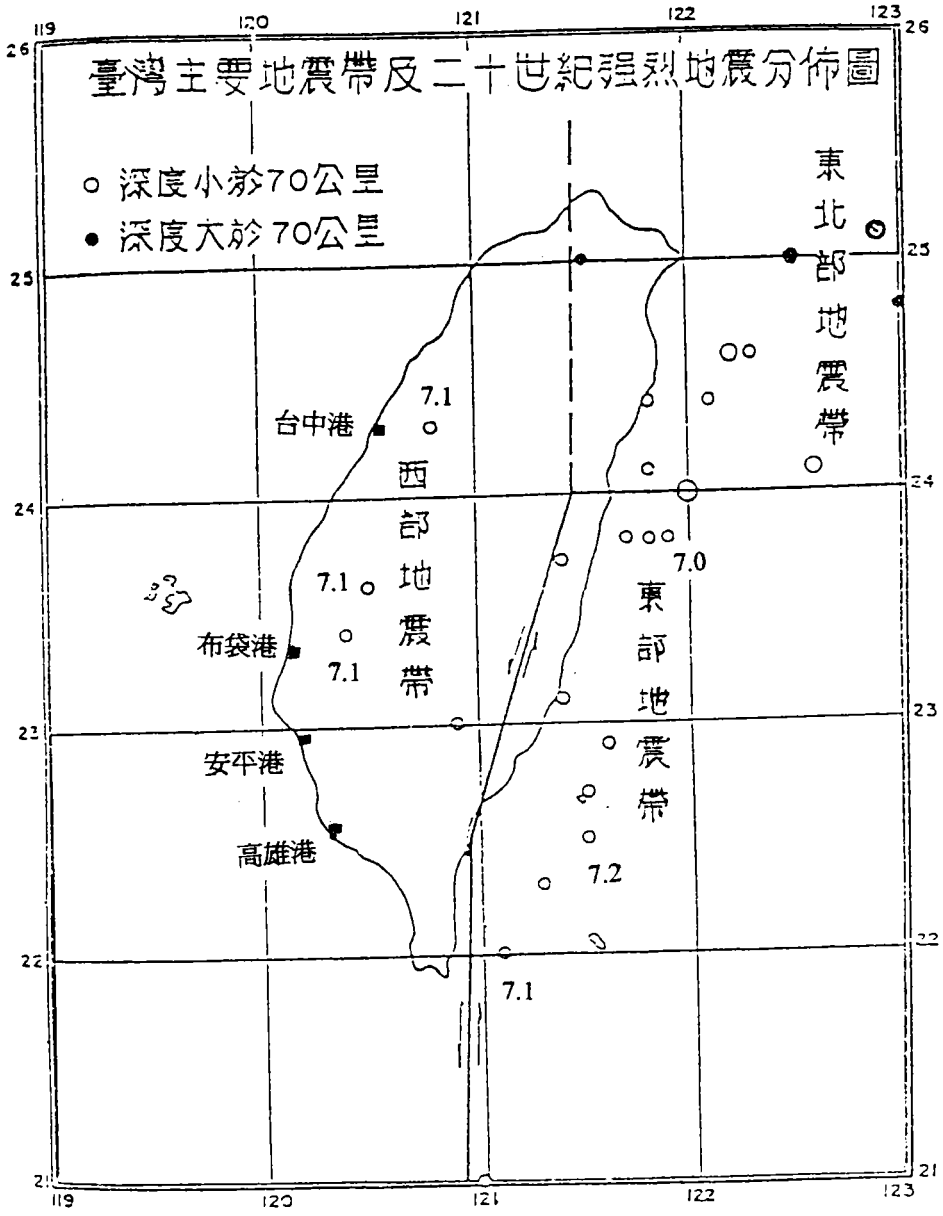


圖4-1　台灣主要地震帶及二十世紀強烈地震震央分布情況。

4-1 台中港區地震分析

台中港位於西部地震帶之中央區域，該地區在地震儀觀測以前未有大地震之紀錄，但在1897年有地震觀測至今，曾有多次災害地震之紀錄，其中於1935年曾發生多次大地震，最大一次是1935年4月21日發生在大安溪中游關刀山一帶，震央位於今卓蘭地區附近，距台中港約35公里，其表面斷層線由后里附近經屯子腳直到清水街之大突寮，該次地震造成三千多人死亡，一萬餘人受傷，房屋受損及倒塌達5萬多幢，為台灣本世紀之最大地震災變。

就中央研究院及中央氣象局之地震記錄，選取中部地區1935－1978年間地震規模大於5.0 之強震資料可發現后里、卓蘭地區附近地震相當活躍，地震規模及加速度亦大，因此預測今後威脅台中港地區之地震可能來自該區。由中央氣象局歷年地震紀錄分別就1935－1977年及1900－1977年之地震加以統計分析，繪製地震規模與回復週期關係如圖4-2 所示，顯示台中港區50年回復週期之地震規模分別為7.0及6.5，根據蔡義本等(1975)之分析統計，台中港區50年回復週期可能發生之最大地表加速度為0.15g，如圖4-3所示，本研究根據上述資料選定分析台中港區土壤液化潛能之地震規模M為7.0，地表最大加速度A_{max}為0.15g。

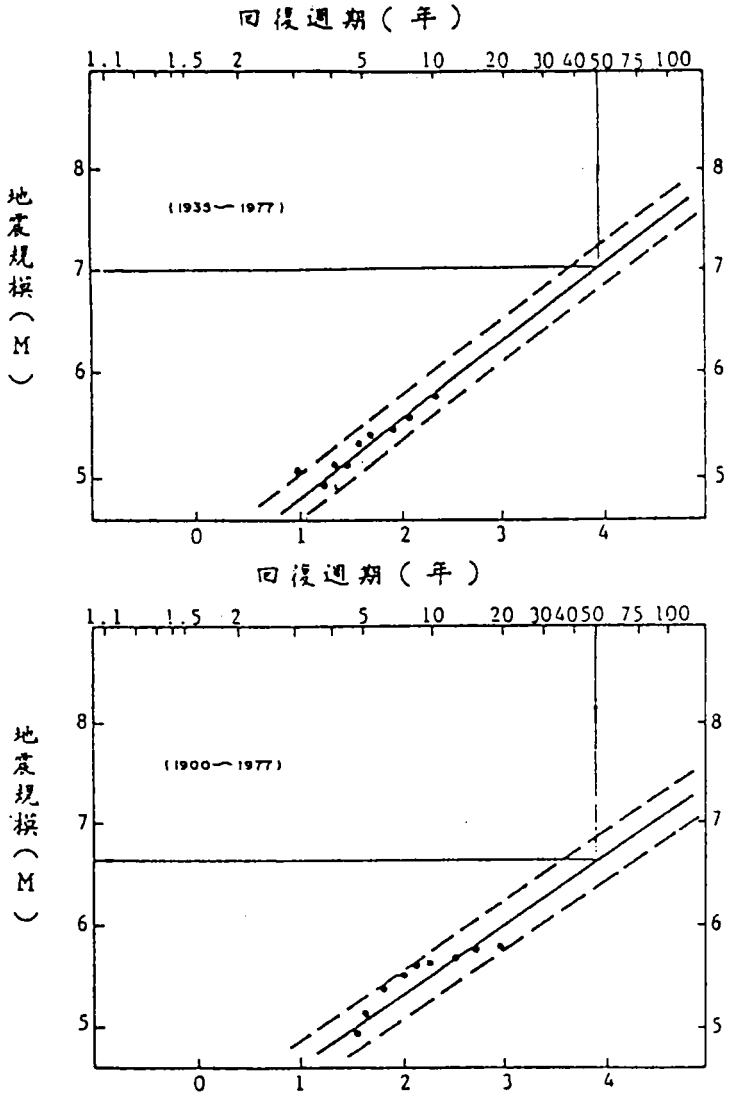


圖4-2　地震規模與回復週期之關係

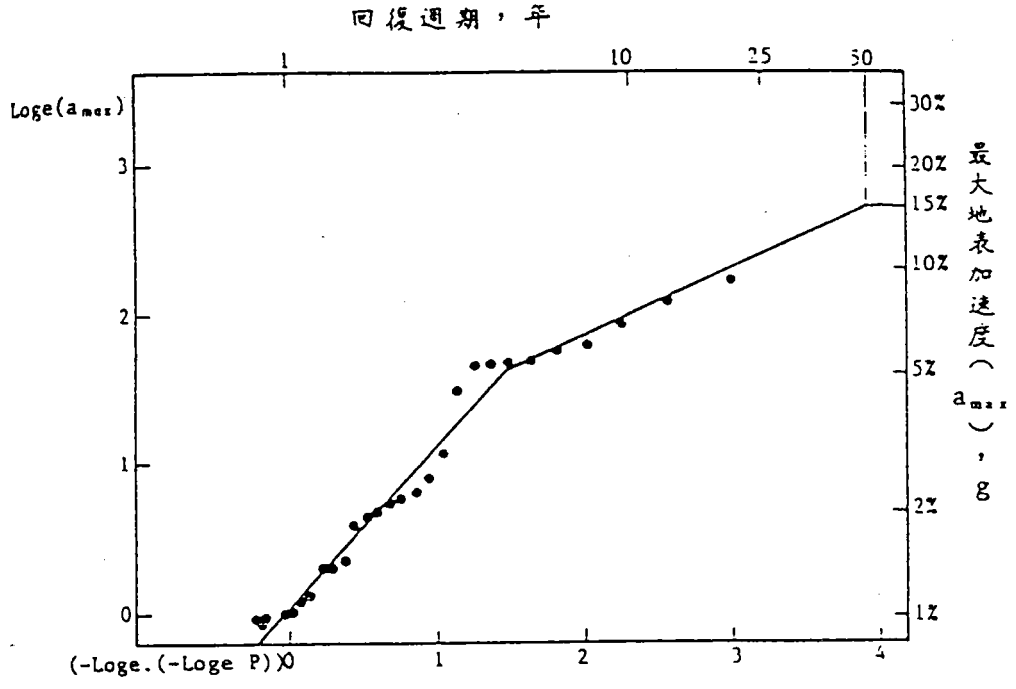


圖4-3　台中港區最大地震加速度與回復週期之關係

4-2 高雄港區地震分析

高雄地區有地震觀測前有多次較大地震之紀錄，分別發生於西元1654年，明朝永曆年間，餘震持續數週，西元1720元(康熙59年)震央位於屏東附近，地震規模約在7.0 以上，西元1786年（乾隆51年）震央在林邊東港一帶，未造成災害，西元1792年（乾隆57年）震央發生於嘉義彰化一帶，死一百人，1882年（光緒8年）地震規模推估可能超過8.0，震央在花蓮台東一帶，僅造成輕微損害。

根據多年來之地震觀測紀錄記載，高雄地區有災害發生之地震發生於1964年2月17日，震央在高雄甲仙附近，震源深度33米，地震規模5.7 級，造成3人死亡，四千多棟房屋受損。根據1900－1993年之震央分佈圖（圖4.4－圖4.6）所示，若以高雄港為中心，20公里及60公里為半徑畫圓，則於20公里半徑範圍內無地震發生，在20公里半徑圓周上有規模約5級之地震，震央在東港林邊一帶，20－60公里間地震主要發生於東北方，其最大規模有超過7.0 者，其它更遠的地震則發生於台灣東部台東外海地區及台灣嘉南一帶。根據圖4-1 台灣地區有紀錄地震規模大於7.0 之震央分佈顯示有三個位在西部地震帶，12個在東部地震帶，其震央與高雄最近者約為60－70公里。圖4-7 級蔡義本建議高雄港地區地震最大加速與回復週期之關係圖，根據上述資料及圖4-8 茅氏等所繪的等值加速度分佈圖，本研究採用地震規模M為7.0及地表最大加速度A_{max} 為0.12g分析研判高雄港區土壤液化潛能。

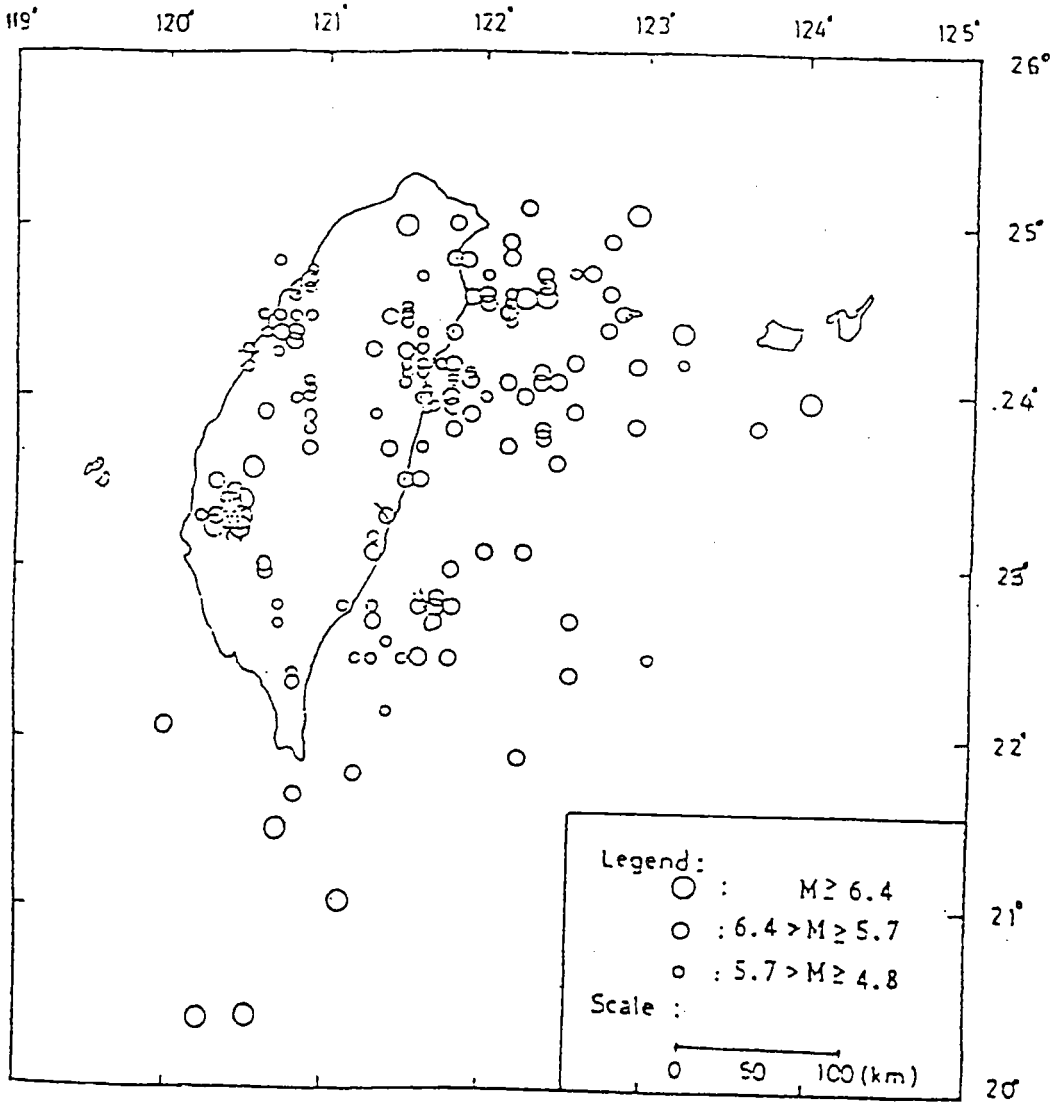


圖4-4　台灣地區1900至1935年間地震震央分佈情形

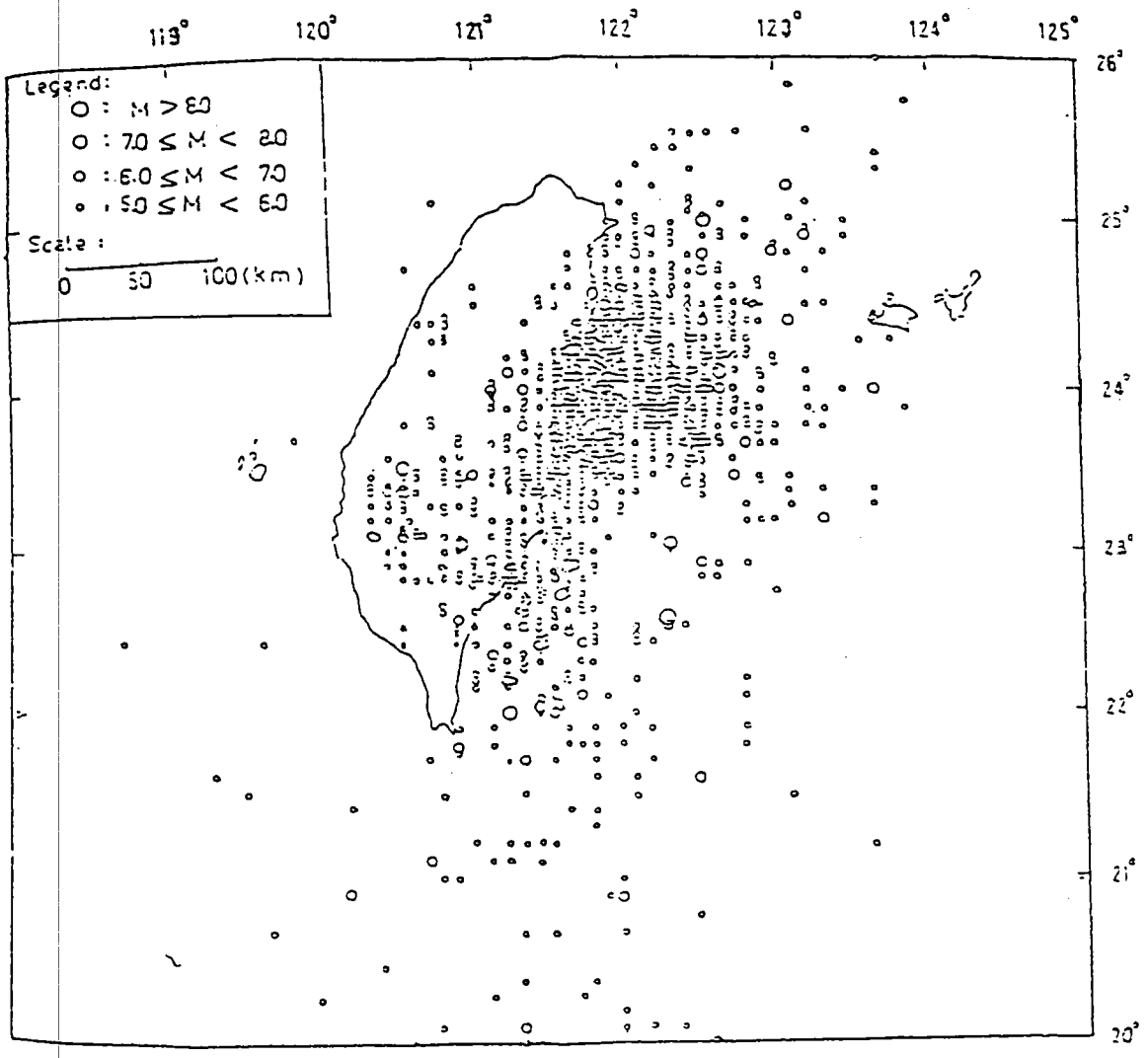


圖4-5　台灣地區1936至1973年間地震震央分佈情形

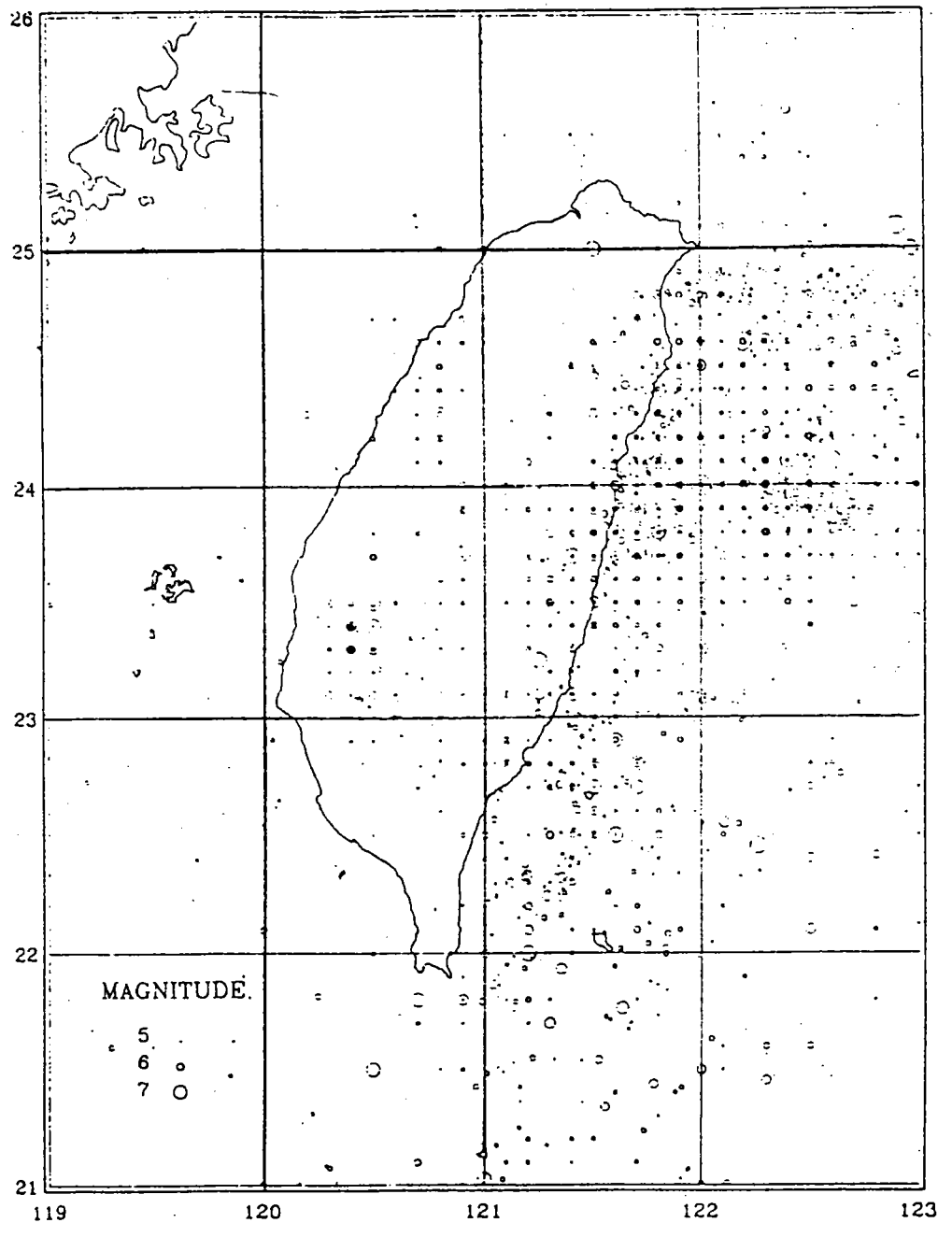


圖4-6　台灣地區1973至1993年間地震震央分佈情形

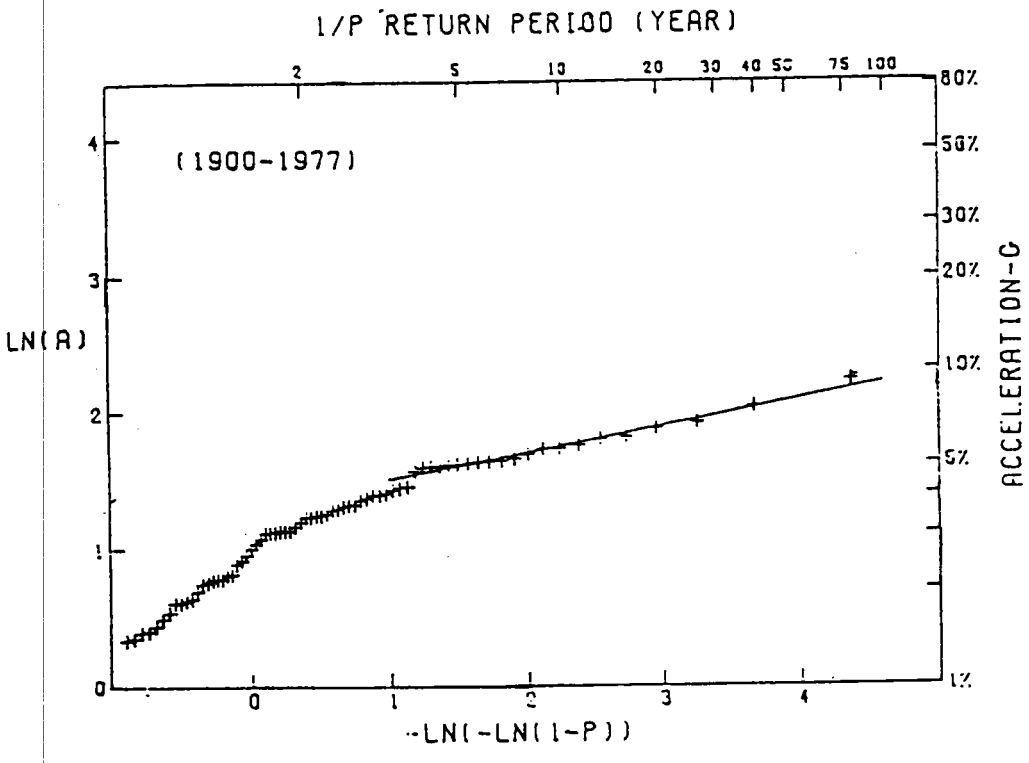
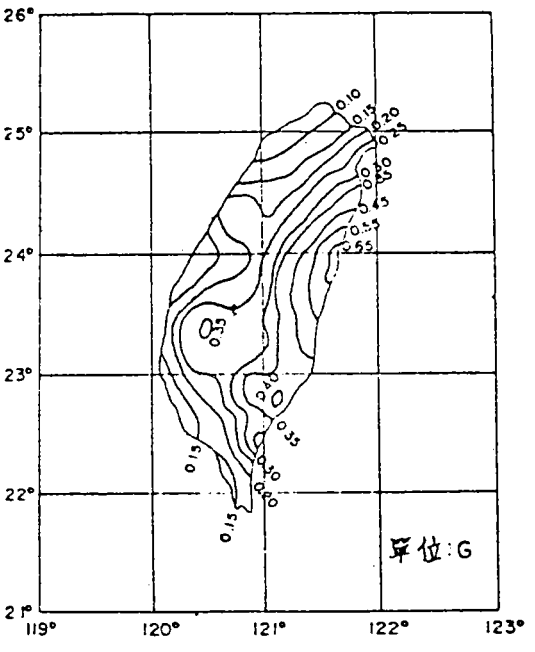
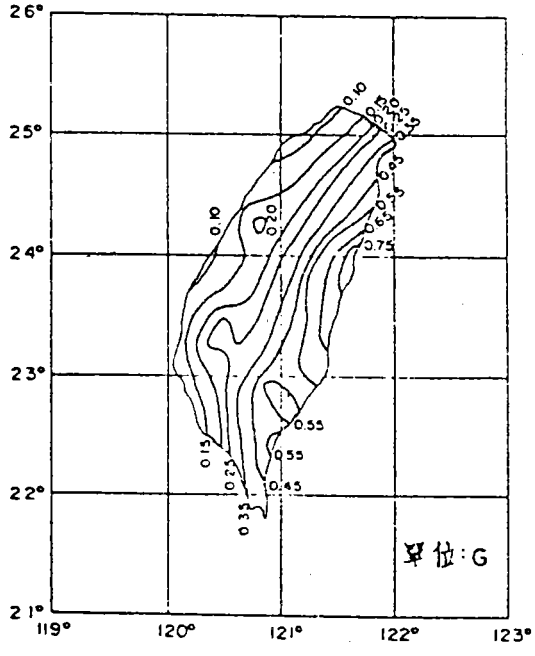


圖4-7　高雄港地震最大加速度與回復週期之關係



(a) (1936～1972)



(b) (1900～1972)

圖4-8　50年復發期之等加速度值分佈圖(單位為g)

4-3 布袋港區與安平港區之地震分析

於有地震觀測紀錄前，嘉南地區有災害紀錄之地震為數不少，最早之記載為1944年(明崇禎17年)發生於台南，造成城壁龜裂傾倒，其它較嚴重之災害分別為1654年(明永曆 8 年)台南地震，餘震持續三週，1721年(康熙59年)台南附近之震災，發生家屋倒潰，死傷多人，噴泥餘震持續十天，1736年(清雍正13年)發生於台南嘉義一帶，死者多數，1776年(乾隆41年)之嘉義地震，家屋倒潰，死傷多人，1792年(乾隆57年)嘉義彰化一帶死亡百人，另外1839年、1862年及1892年於台南嘉義亦發生多起家屋倒潰，死傷多人之大地震。

有地震紀錄以後於嘉南地區較嚴重之地震災害分別為1905年發生於嘉義梅山，地震規模7.1 級，造成死傷數千人，房屋倒塌數萬幢，並有斷層、地裂噴砂等現象發生，1927年 8 月及1930年12月發生於新營之數次地震，其地震規模6.5 級，亦造成不少人死亡，房屋倒塌數千間，1941年於嘉義中埔7.1 級之地震與1946年於新化台南之6.3 級地震均造成嚴重之人員財物損傷，至於嘉南地區最近一次之大地震是1964年於台南浦西地區規模6.5 級之大地震，造成數百人死傷，數萬間房屋倒塌損壞。由圖4.4－4.6可知嘉南地區是台灣西部地震帶地震次數最多之地區，尤其靠近布袋港區之嘉義梅山地區，該區附近有梅山地震斷層，曾於1905年及1906年發生多起5.5級以上之地震，而在台南安平港區東側之新化地區亦有一地震斷層，曾於前述之1946年發生地震。根據前述嘉南地區之地震資料及圖4-8 等值加速分佈圖，本研究使用地震規模7.0 及地表最大加速度0.12g分析布袋及安平港區之土壤液化潛能。

五、現地震測錐試驗

台灣西部沿海各港區均位處在台灣西部地震帶內，本研究選定在經濟開發及工程上較重要之四個港區加以調查研究其土層之液化潛能，四個港區分別是台中港區、布袋港區、安平港區及高雄港區。台中港區計進行22孔之震測錐試驗，每孔試驗深度約30米，其中16孔在第16號碼頭預定區，16個試孔分成二排，均與碼頭平行，1－8號孔距碼頭線約100米，而9-16號孔與第一排試孔相距約60米，其相對位置如圖5-1 所示。台中港區另 6 個試孔則位在台中港西碼頭區之中油油庫附近，與碼頭線之距離約100米，分成二排，南北走向，孔距約30米。

高雄港區計進行23個試孔，其中1-13孔位在第81號碼頭區，14－23號孔則位在78－80號碼頭區，每孔深度約為25－30米，相關位置如圖5-2 所示。安平港區則位在第九、十號碼頭預定區之後線如圖5-3 所示之填築區，計進行17個試孔，試孔順序由東向西漸增，孔距均約為50米，試驗區為東西走向全長約600 米。布袋港區之試孔則位在現有漁港南側之布袋海埔新生地第二期開發計劃區最靠海南北向之計劃道路上，計進行 8 個試孔，試孔順序由北向南漸增，孔距均約為70米。

震測錐之試驗是將震測錐頭以靜力貫入土層內，可量測連續土層斷面之錐頭阻力q_c，摩擦阻力f_s及動態孔隙水壓P_w。若欲進行孔內震測試驗則於錐頭每向前貫入一公尺均暫停，再錘擊產生剪力波並進行孔內震測試驗。於台中港區除西碼頭區及試孔 9 、11 、12 外均進行震測試驗，至於高雄港區則僅於1-13號試孔進行震測試驗，布袋港區進行震測試驗者為1－4號試孔，安平港區則除13試孔外均進行震測試驗，各試孔之CPT 試驗結果及孔內震測試驗結果詳如附錄。

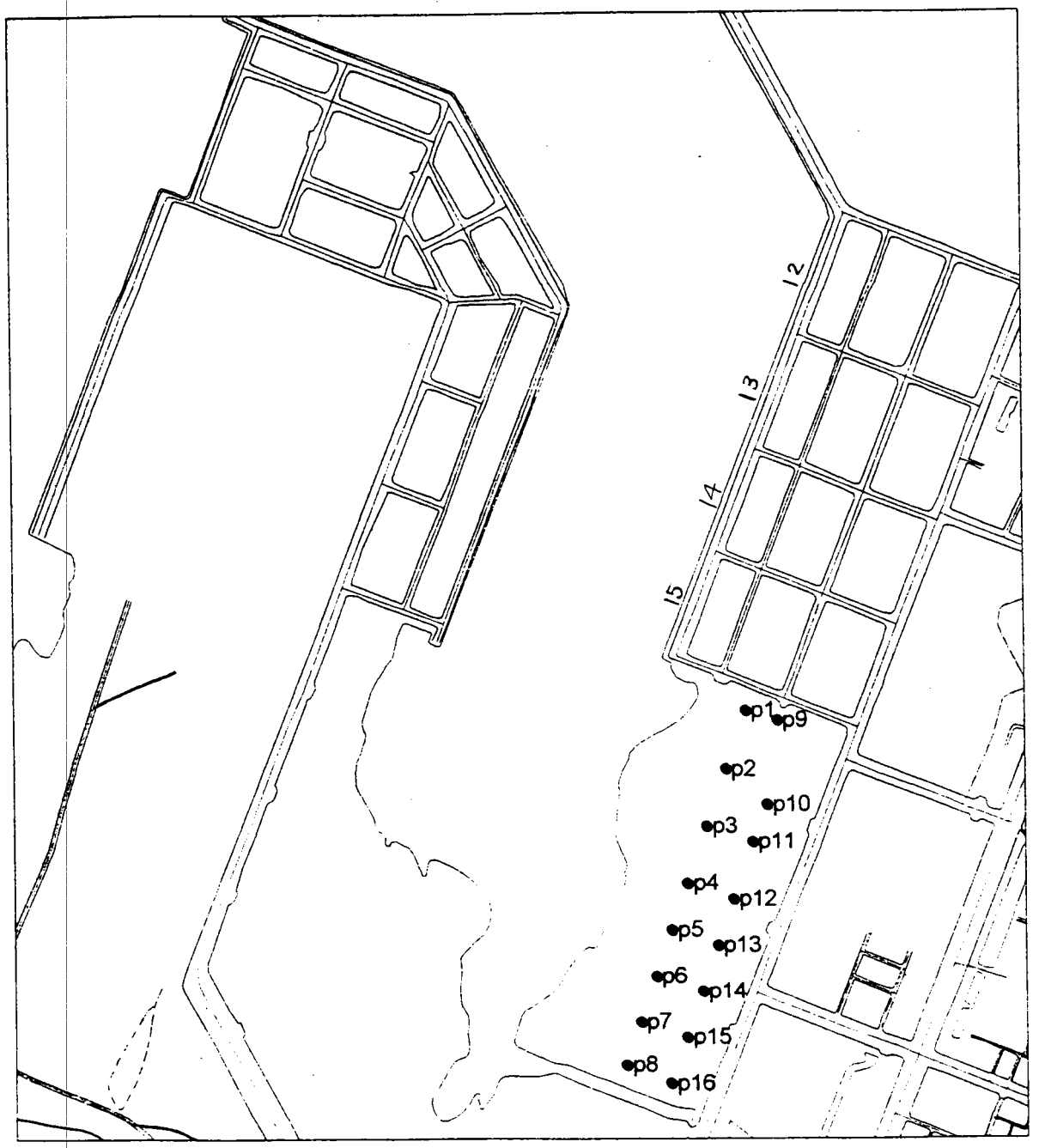


圖5-1 台中港16號碼頭區試孔位置

圖5-2 高雄港區震測錐試驗孔位置

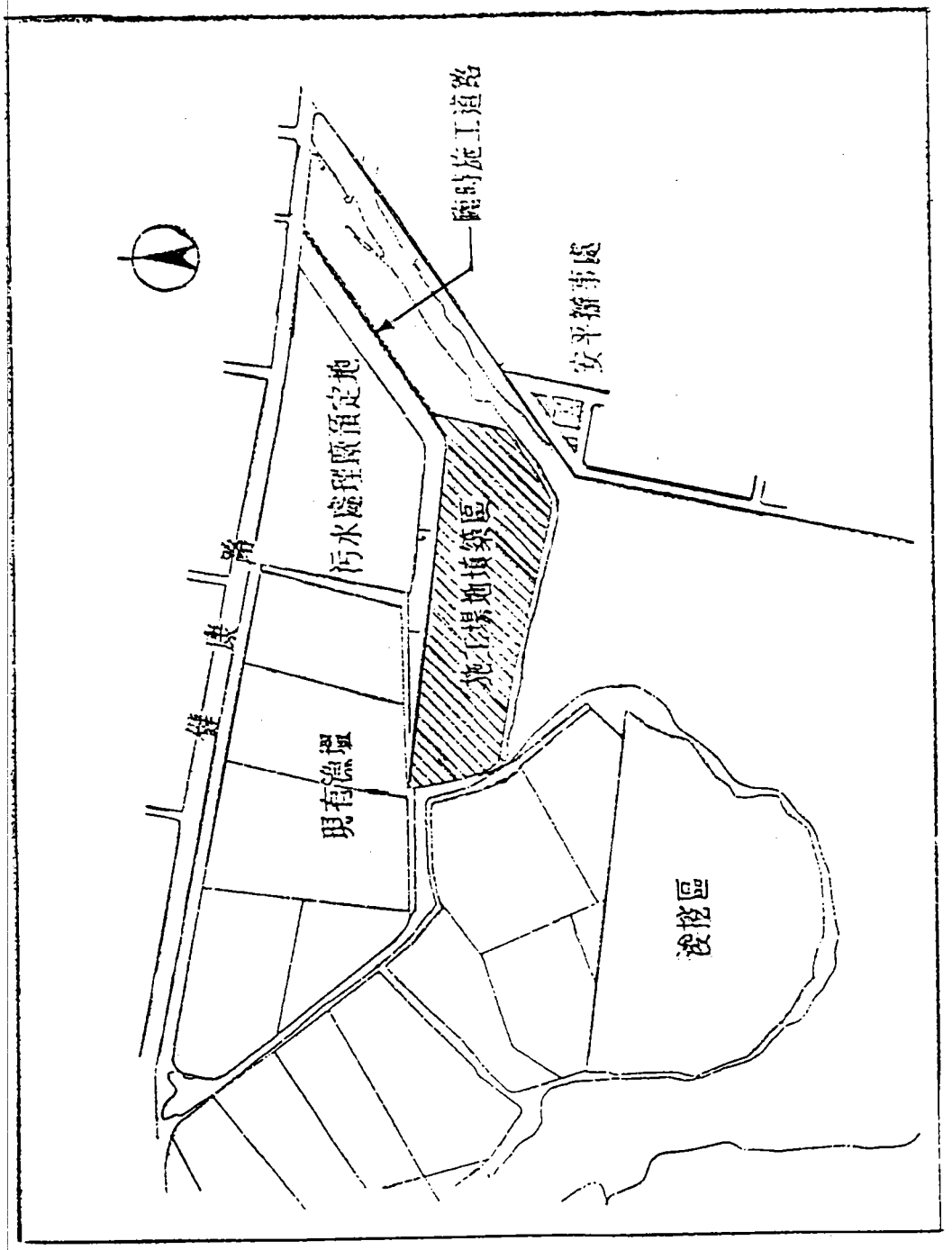


圖5-3 安平港震測錐試驗位置圖

六、試驗結果分析與討論

6.1 以錐頭貫入阻力評估土壤液化潛能

本研究利用Seed & Robertson所建議之經驗分析法來評估各地區土層之液化潛能，根據過去甚多研究資料顯示，具有液化潛能之土層其深度少有超過25米者，因之本研究僅就各試孔深度25米以內之土層分析探討其液化潛能，各試孔土層之液化潛能之分析結果如附錄所示，現就各地區土層斷面變化及液化潛能分佈情形分別說明如下：

(1)台中港區

本地區分析研判土層之液化潛能所使用之地震規模M為 7.0級，最大地表加速度A_{max}為0.15g。

a. 第16號碼頭預定區

本區計進行16個試孔，分成二排，兩排相距為60米，以錐頭阻力分析研判土層之液化潛能，本區土層剖面大致可分成七個次層，說明如下：

第一次層　SM（非液化土層）

本次層為厚約2米之表面土層，錐頭阻力為60-120kg/cm^2，為緊密之沉泥質砂土層，未具有液化潛能。

第二次層　ML（非液化土層）

本次層為厚約1.5-2米之黏土質沉泥，錐頭阻力為20-30kg/cm^2，未具有液化潛能。

第三次層　SM（液化土層）

本次層為深度約從 4 米起，厚度為7-9 米之沉泥質砂土層

，依錐頭阻力之強度本次層大致可分成上下二層，上層之錐頭阻力較高為60-80kg/cm^2，未具有液化潛能，下層之錐頭阻力為50-60kg/cm^2，為較疏鬆之砂土層，具有液化潛能，本次層偶夾有黏土薄層。

第四次層　CL　（非液化土層）

本次層為厚約1-2米之黏性土層，其錐頭阻力僅約20kg/cm^2，但不具有液化潛能。

第五次層　SM　（液化土層）

本次層為沉泥質砂，夾有薄黏土層，深度約從13米起，厚度約為7米，其錐頭阻力為40-120kg/cm^2，錐頭阻力有從北邊試孔1、9往南逐漸減少之趨勢，且第二排試孔P9-P16之錐頭阻力較第一排試孔P1-P8為高，本次層除錐頭阻力較高之北側試孔外，大都具有液化潛能。

第六次層　CL　（非液化土層）

本次層為厚約1-2米之黏性土層，錐頭阻力約為15-40kg/cm^2，本土層不具有液化潛能。

第七次層　SM　（非液化土層）

本次層為深度22米以下至25米均是，為沉泥質砂，其錐頭阻力大都高於100kg/cm^2，為較緊密之砂土層，未具有液化潛能。

b. 西碼頭區：

本區計進行6個試孔，依錐頭阻力評估土層之液化潛能，其土層剖面大致可分成六個次層，說明如下：

第一次層　SM　（非液化土層）

本次層為厚約2米之表面土層，為沉泥質砂，其錐頭阻力為40-120kg/cm^2，本土層未具有液化潛能。

第二次層　SM　（液化土層）

本次層為厚約2－3米之沉泥質砂，間雜有黏土層，部份試孔該間雜之黏土層甚至厚約1米，本土層之錐頭阻力約為10－60kg/cm^2，為較疏鬆之砂土層，具有液化潛能。

第三次層　SM　（液化土層）

本次層為深度約從4-6米起而厚度約為5-6米之沉泥質砂，其錐頭阻力為40－70kg/cm^2，屬於疏鬆砂土層，具有液化潛能。

第四次層　SM　（非液化土層）

本次層為厚約6米之沉泥質砂，其錐頭阻力為60－100kg/cm^2，屬於緊密之砂土層，本土層未具有液化潛能。

第五次層　CL　（非液化土層）

本次層為1－2米厚之黏性土層，位在深度約20米處，其錐頭阻力約為5－20kg/cm^2，未具有液化潛能。

第六次層　SM　（非液化土層）

深度約為20－25米間之沉泥質砂土質屬於本次層，此土層間雜有黏土薄層，甚至變為沉泥與黏土之互層，其錐頭阻力為60－100kg/cm^2，本土層不具有液化潛能。

(2)布袋港區

本區計進行8個試孔，試孔分佈為南北走向，全長計約500公尺，使用7.0級之地震規模及0.12g之地表最大加速度分析土層之液化潛能，本區土層剖面大致可分成五個次層，說明如下：

第一次層　SM　（部份試孔為液化土層）

本次層土壤屬沉泥質砂，厚度約為2－4米，錐頭阻力為30－60kg/cm^2，其中試孔PD08於本次層之錐頭阻力較低為30kg/cm^2，其它各試孔均為60kg/cm^{2}以上，故僅該試孔於本次層為疏鬆砂土層，具有小量之液化潛能。

第二次層　SM　（非液化土層）

本次層厚度約4－5米之沉泥質砂，其錐頭阻力60－80kg/cm^2，故本層土壤為不具液化潛能之緊密砂土，於本次層內可能夾有1－2米厚之黏土層，亦不具液化潛能。

第三次層　CL 夾雜SM(部份試孔為液化土層)

本次層為厚度約8米錐頭阻力很小之軟弱黏性土層，故本層土壤未具有液化潛能，於本次層內間雜夾有砂土層，於試孔PD07夾雜之砂土層錐頭阻力低於50kg/cm^{2}以下，為疏鬆砂土層具有液化潛能，其它各試孔於本次層均未具液化潛能。

第四次層　SM　（非液化土層）

本次層為厚度約1.5-4米之沉泥質砂，其錐頭阻力為60-140kg/cm^2，屬緊密性之砂土層，未具有液化潛能。

第五次層　CL　（非液化土層）

本次層為厚度約4－6米軟弱黏性土層，其間夾雜有沉泥質砂，無論黏土層或間雜之砂土層均不具液化潛能。

第六次層　SM　（非液化土層）

本次層為較緊密之沉泥質砂，其錐頭阻力60－100kg/cm^2，未具有液化潛能。

(3)安平港區

本試驗地區計進行17個試孔，試孔為東西走向延伸約有600米，根據CPT 試驗可知整個試驗地區土層剖面之變化不大，以錐頭阻力評估土層液化潛能，本地區於深度小於25米內之土層剖面可分六個次層，分析土層液化潛能是使用7.0級之地震規模及0.12 g 之地表最大加速度，現就六個次層說明如下：

第一次層　SM/ML　（非液化土層）

本次層厚度約為2米，屬於砂質沉泥，黏性細顆粒含量較多，因其為表面土層水分受到蒸發，含水量低，錐頭阻力約為80-140kg/cm^2，為較緊密沉泥層，未具有液化潛能。

第二次層　SM　（液化土層）

本次層為厚約2米之沉泥質細砂，錐頭阻力小於20kg/cm^2，為極為疏鬆之砂土層，因此本層具有液化潛能。

第三次層　CL　（非液化土層）

本次層為厚約1米之軟弱黏性土層，錐頭阻力很低，但未具有液化潛能。

第四次層　SM/ML　（非液化土層）

本次層為厚約2-3米之沉泥質細砂或砂質沉泥，依CPT試驗結果研判，位在最東邊之試孔APH01 其細顆粒之沉泥及黏土質含量較低，土壤分類屬SM，其錐頭阻力約為60kg/cm^2，漸往西邊之試孔，其土層漸變為含有細黏土顆粒較多之砂質沉泥，此時錐頭亦逐漸變小，本次層均不具液化潛能。

第五次層　CL夾雜SM　（夾雜液化土層）

本次層為厚度約5米之軟弱黏性土層，基本上錐頭阻力不大，但不具液化潛能，大部份之試孔於深度8.5或9.0米處夾有一厚約1米厚之砂土層，其錐頭阻力較低為35-50kg/cm^2，此

一夾雜砂土層為疏鬆土層，具有液化潛能。

第六次層　SM　（非液化土層）

本次層為沉泥質砂土層，深度從13米至25米，均屬此層，有些試孔在深度約20米處夾有一米厚之黏土層，本土層之錐頭阻力大致成階梯狀增加，其二個範圍分別為80及100kg/cm^2，本次層因錐頭阻力較高，屬較緊密之砂土層，不具有液化潛能。

(3)高雄港區

本研究於高雄港第五貨櫃中心計進行23孔之CPT試驗，分佈於78－81號碼頭上，根據試驗結果得知於81號碼頭與78－81號碼頭之土層剖面並不相同，為研判土層之液化潛能將試孔分成81號碼頭與78－80號碼頭兩組進行，本地區使用7.0級之地震規模及0.12g之地表最大加速度分析土層之液化潛能。

a.81號碼頭區

本區計進行13個試孔之CPT試驗，其孔號為KH01－KH13，依錐頭阻力分析研判本區土層剖面可分成三個次層，說明如下：

第一次層　ML/CL　（非液化土層）

本次層為1米厚之表面土層，因水分蒸發之故，含水量低，為堅硬之黏土質沈泥或沈泥質黏土，錐頭阻力為60－120 kg/cm^2，未具有液化潛能。

第二次層　CL　（非液化土層）

本次層為厚度為4－6米之軟弱黏性土層，其錐頭阻力很低，大約為5 kg/cm^2，本土層不具有液化潛能。

第三次層　SM　（液化土層）

本次層為沈泥質砂，夾雜有黏土薄層，深度6或7米以下至25米均屬此層，本層錐頭阻力大致成階梯狀分成二至三個範圍，隨深度增加而變大，錐頭阻力為50-110kg/cm^2，在深度約10米至15米之土層，大部分試孔其錐頭阻力僅約50kg/cm^{2}該土層具有液化潛能，試孔KH 8在深度13.5米以下至25米錐頭阻力降至35kg/cm^2，故該孔之液化土層深達23米。

b. 78－80號碼頭區

本區計進行12個試孔，依錐頭阻力研判土層剖面可分成三個次層，說明如下：

第一次層　ML/CL　（非液化土層）

本次層為2米厚之表面土層，含水量低為堅硬之黏土質沈泥或沈泥質黏土，其錐頭阻力較高為60－120kg/cm^2，不具有液化潛能。

第二次層　CL　（非液化土層）

本次層為黏性土層，厚度較81號碼頭處為厚，約為5－11米，在78號碼頭處之試孔KH 14－KH 16其錐頭阻力較小為5 kg/cm^{2}以下，在79－80號碼頭之試孔KH 17－KH 23其錐頭阻力則為35kg/cm^2，本土層均不具液化潛能，試孔KH 14在本次層上有一厚約3米之細砂層，其錐頭阻力僅為20kg/cm^2，為具液化潛能之疏鬆砂土層。

第三次層　SM　（78號碼頭為液化土層）

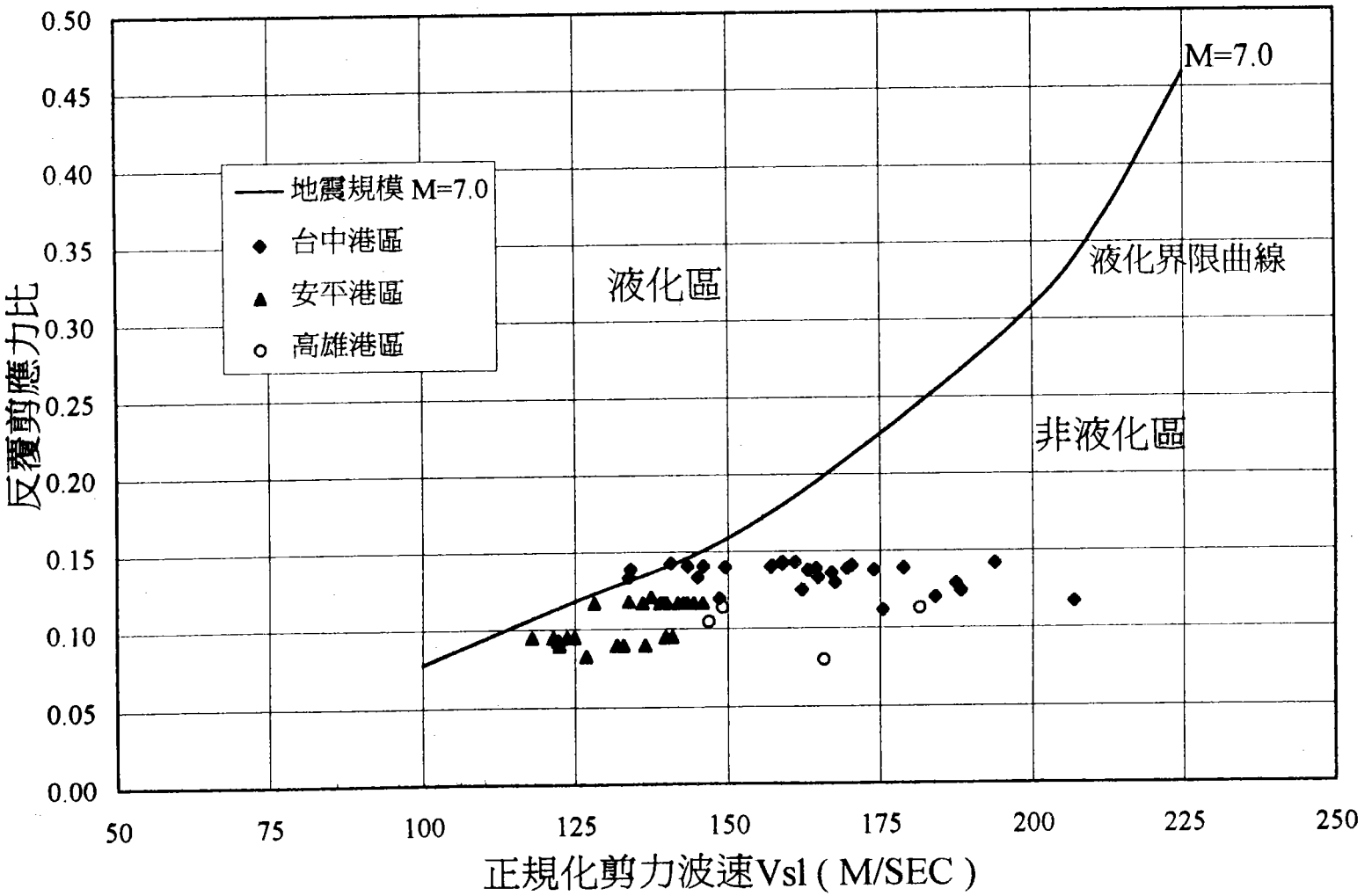
本次層為沈泥質砂，深度在11－13米以下至25米均屬此層，錐頭阻力隨深度成階梯狀之增加，約為50-80kg/cm^2，在

78號碼頭之試孔KH15－KH17其在緊接第二次層部份，錐頭阻力較小，具有液化潛能，其它在79－80號碼頭之本次層均不具液化潛能。

6-2 以剪力波速評估土壤液化潛能

Robertson(1990)曾以加州imperial Valley地區地震規模6.5級地表最大加速度0.17g 之地震，其於現地造成土壤液化之資料，認為該地區在深度20呎以內之土層其剪力波速若小於140m/sec則地震時會產生液化，本研究將前述利用Seed經驗分析法評估具有液化潛能土層之剪力波速加以正規化後與該土層地震時將承受之剪應力繪製如圖6-1， 圖中顯示具液化潛能土層之剪力波速範圍很廣，無法定出一臨界剪力波速來界定土層是否具液化潛能。但圖中顯示安平港區之全部及少部分台中港區及高雄港區之數據點其剪力波速均小於150m/see，經查該等數據點之土層其深度大都在10米以內，因此我們認為土層之深度若小於10米，則可以150m/sec當作研判土層是否液化之臨界剪力波速。圖6-1 內還顯示本研究所得之大部份數據點均落在由Robertson所建議之地震規模7.0級之液化界限曲線之下面，而應屬於非液化區，此等顯與前述由Seed經驗法之結果不符，我們認為該界限曲線是Robertson 根據加州地區之地震與土壤特性所定出，可能無法適用於台灣地區之土層，欲定出該界限曲線唯有國內多收集地震後現地土壤發生液化之資料並配合進行未擾動試樣之室內動三軸試驗，才能達成。

圖6.1 液化土層剪力波速與反覆剪應力比之關係圖



七、結論與建議

1.台中港區使用地震規模M＝7.0及地表最大加速度A_{max} ＝0.15g分析研判土層之液化潛能，於第16號碼頭預定區，深度25米以內之土層剖面大致可分成七個層次，具有液化潛能者為第三及第五次層，第三次層內在深度約10－12米間為疏鬆沉泥質砂其錐頭阻力為50－60kg/cm^2，第五次層在深度14－21米間，各試孔深淺厚薄不一，亦具有液化潛能。於西碼頭區土層剖面可分成六個次層，第二及第三次層具有液化潛能，深度約在2－12米間。

2.布袋港區分析土層液化潛能之地震規模為7.0 級，地表最大加速度為0.12g ，本地區土層抗液化之強度不差，僅在試孔PD08之表面土層其錐頭阻力較低為30kg/cm^2及試孔PD07在深度11－18米夾雜之砂土層較疏鬆，兩者具有液化潛能。

3.安平港第九、十號碼頭預定區土層剖面變化不大，使用M＝7.0及A_{max} ＝0.12g 分析土層之液化潛能，土層剖面在深度25米內大致可分成六個次層，具有液化潛能者為第二及第五次層，深度在2－4米間之第二次層為錐頭阻力小於 20kg/cm^2，具有較高液化潛能之疏鬆沉泥質砂，第五次層為厚度約5米之軟弱黏土層，本不具液化潛能。但其間夾有約1米厚之沉泥質砂其錐頭阻力僅為35－50kg/cm^2，具有不低之液化潛能。

4.高雄港第五貨櫃中心分析土層液化潛能使用之地震規模為7.0級，地表最大加速度為0.12g， 土層剖面於深度25米內可分成三個次層，79、80號碼區之試孔其土層均不具液化潛能，78號碼頭試孔KH15-KH17 在緊接黏性土壤之第二次層之下第三次層的較淺部份其錐頭阻力較小具有液化潛能，另外試孔KH14在深度2－5 米間之砂土層亦具有液化潛能，在81號碼頭後線之13個試孔，其第三次層在深度約10 － 15米間具有液化潛能，試孔

KH15及KH11 因錐頭阻力較小，液化潛能層之深度更達到20-23米。

5.震測錐為一極佳之現地試驗工具，能偵知土層連續變化剖面，對夾雜薄土層亦能精確分辨，黏性土層內若夾雜約一米厚疏鬆具有液化潛能之砂土層，若用過去SPT 之試驗方法，便難以獲得正確之相關資料來研判土層之液化潛能，加上震測錐試驗之人為誤失因素較少，故以震測錐試驗結果研判土壤液化潛能應是一種極佳之方法。

6.欲定出一臨界剪力波速來界限土層是否具液化潛能，由本研究結果顯示是無法達成，但試驗土層深度在10米以內，似乎可以150m/sec當作臨界剪力波速來研判土層是否液化。

7.研究結果顯示Robertson 建議之液化界限曲線無法應用於我們台灣地區，欲定出該曲線，唯有靠我們自己多收集地震後現地土壤發生液化現象之相關資料及進行未擾動試樣之動三軸試驗，才能達成。

八、參考文獻

1.Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of SMFE, ASCE, Vol.97, No. SM 9, Sept. 1971, PP.1249-1273.

2.MING-TUNG HSU, "Engineering Seismological Considerations" 地震工程研習會, 1981, 12.

3.台中港務局，"台中港地質調查與土壤液化研究" 1981, 6.

4.P.K.Robertson, "Recent Advances in Earthquake Design Using Laboratory and Insitu Tests" 1990, 2.

5.Robertson, P.K. and Campanella, R.G.(1985) "Liquefaction of Sands Using CPT", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, GT3, PP.384-403.

6.Robertson, P.K. and Campanella, R.G. (1983), "SPT-CPT Correlations", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.109, GT 11, PP. 1449-1459.

7.Seed, H.B. (1979), "Soil Liquefoction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, GT2, PP. 201-255.

九、附錄

CPT試驗結果圖

震測錐震測試驗結果圖

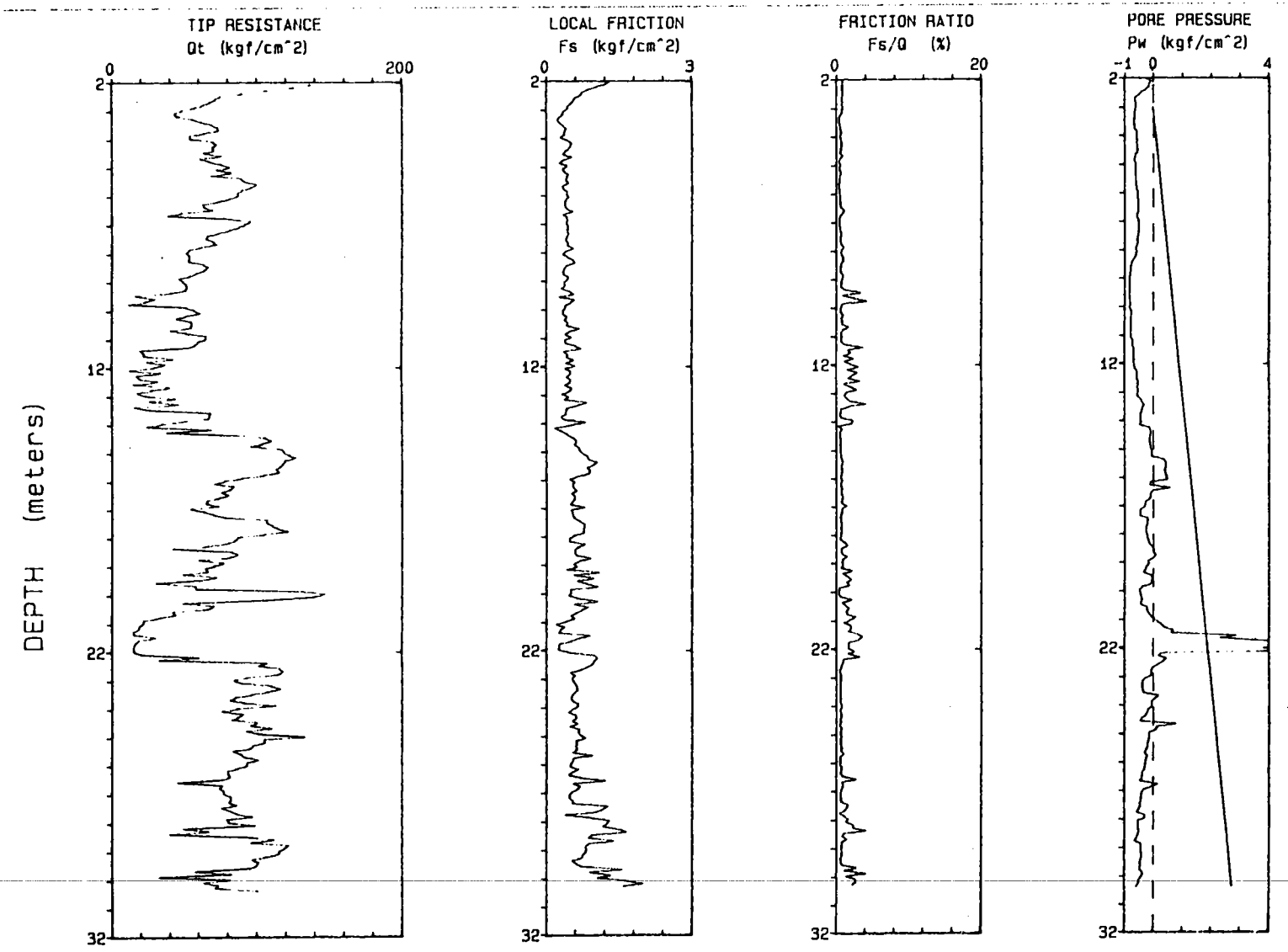
液化潛能分析研判結果表

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 12-19-94 09:19
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP01 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P1

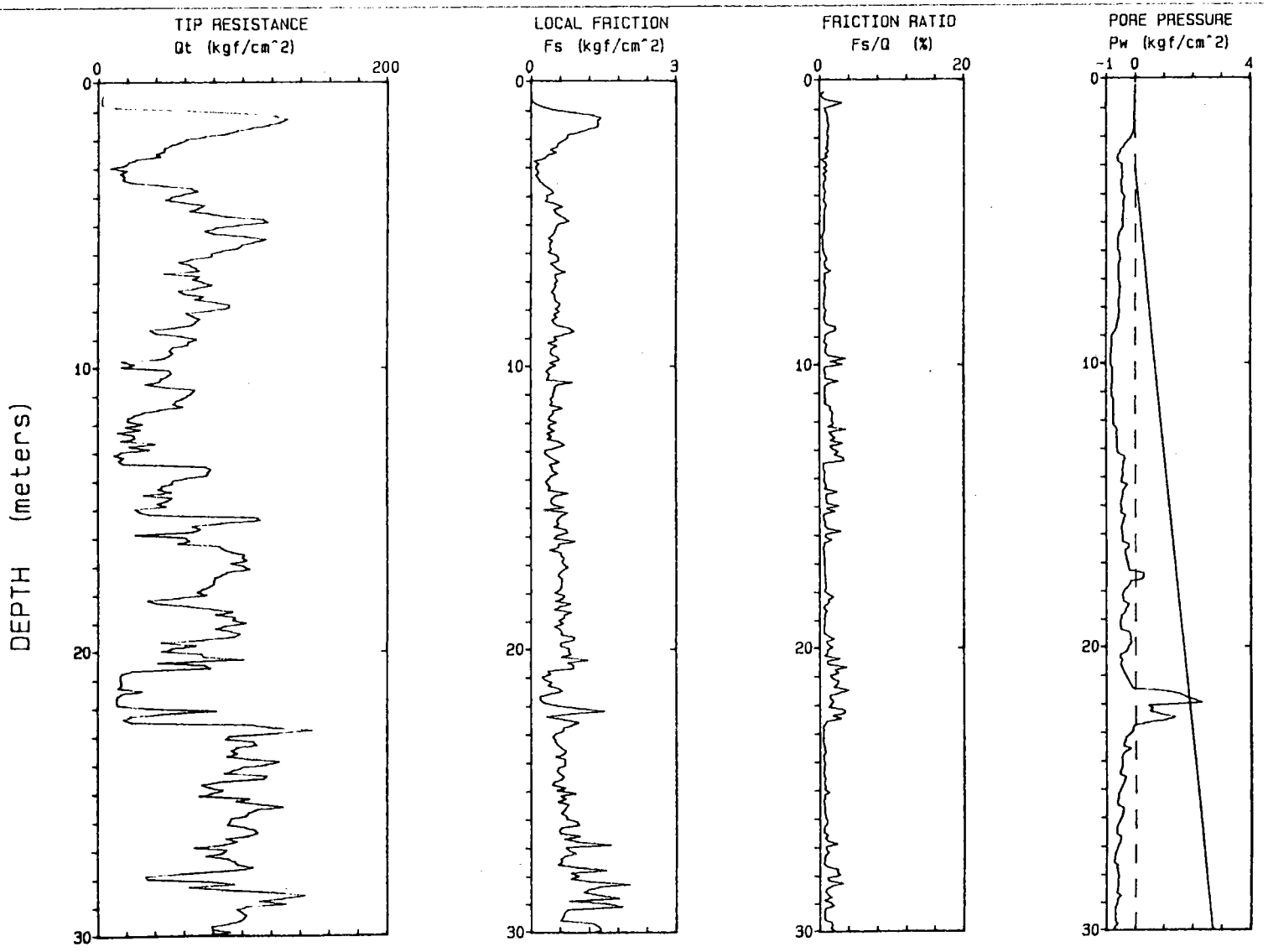


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.40 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
CPT Date : 12-15-94 09:41
Sounding : CPTP02 Pg 1 / 2
Location : NO 16 WHARF
Cone Used : 436TC
Job No. : CPT-P02



Depth Increment : .1 m

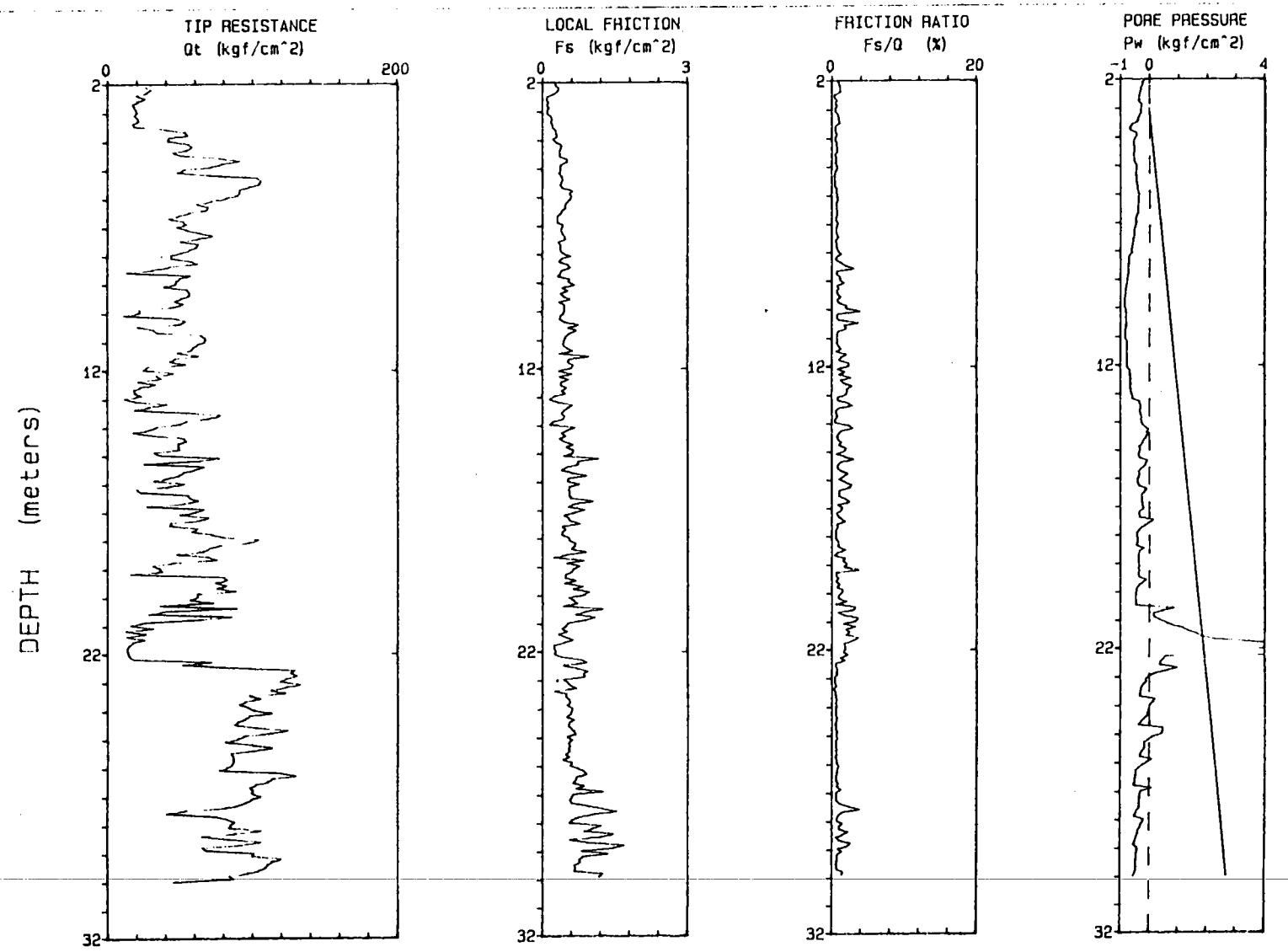
Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 12-13-94 10:03
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP03 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P3



Depth Increment : .1 m

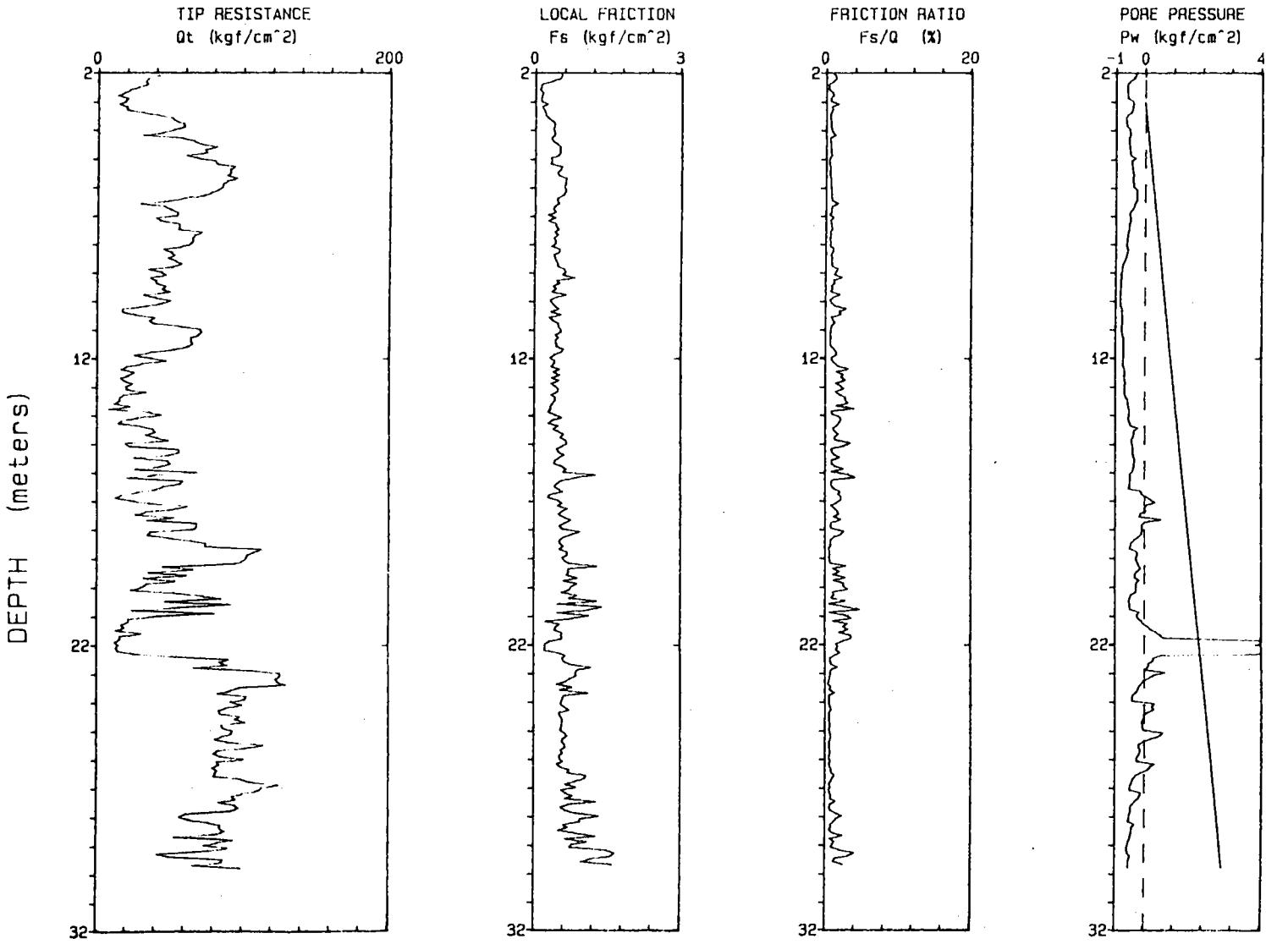
Max Depth : 30.00 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 12-09-94 10:09
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP04 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P04



Depth Increment : .1 m

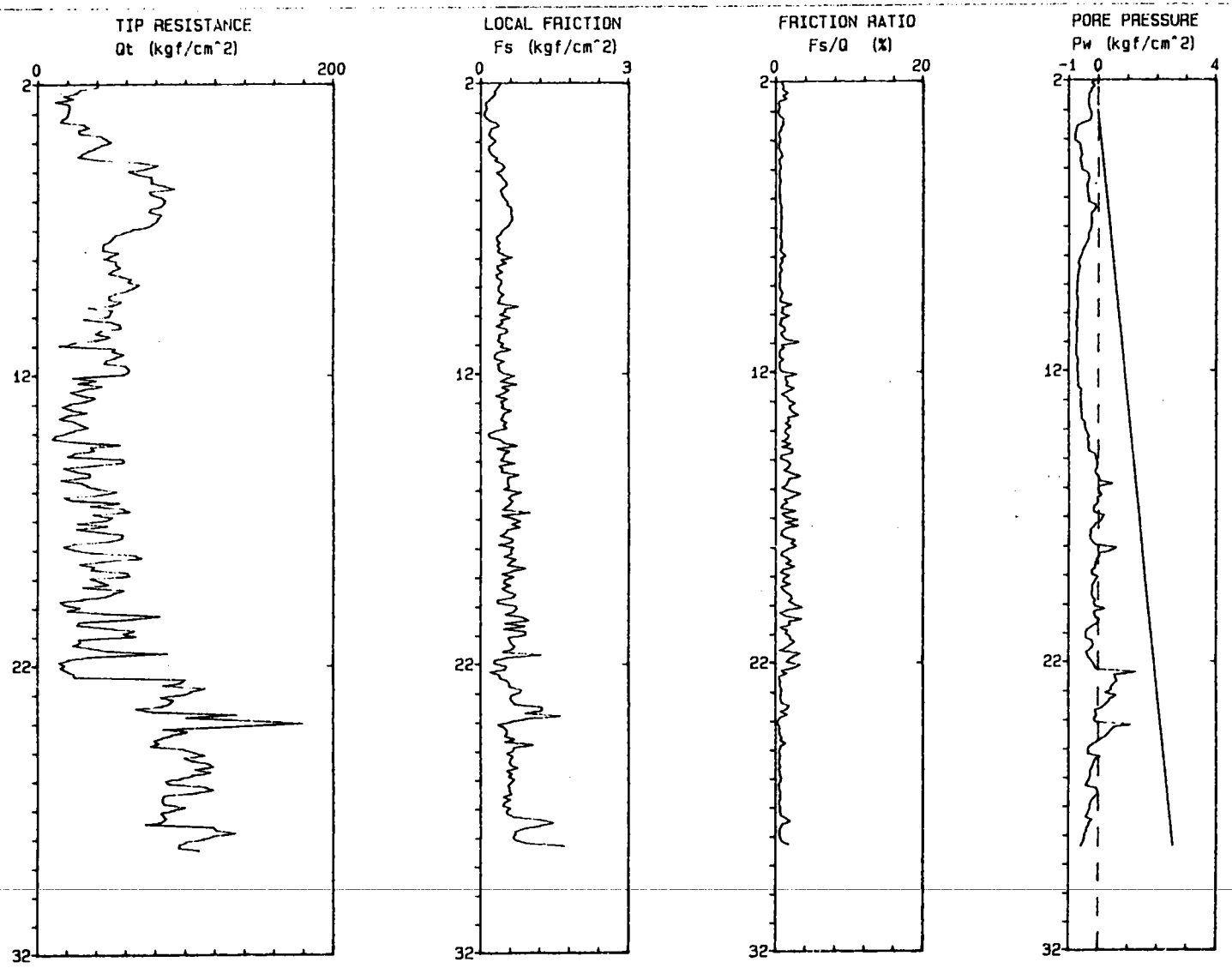
Max Depth : 29.80 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 12-08-94 09:55
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP05 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P5

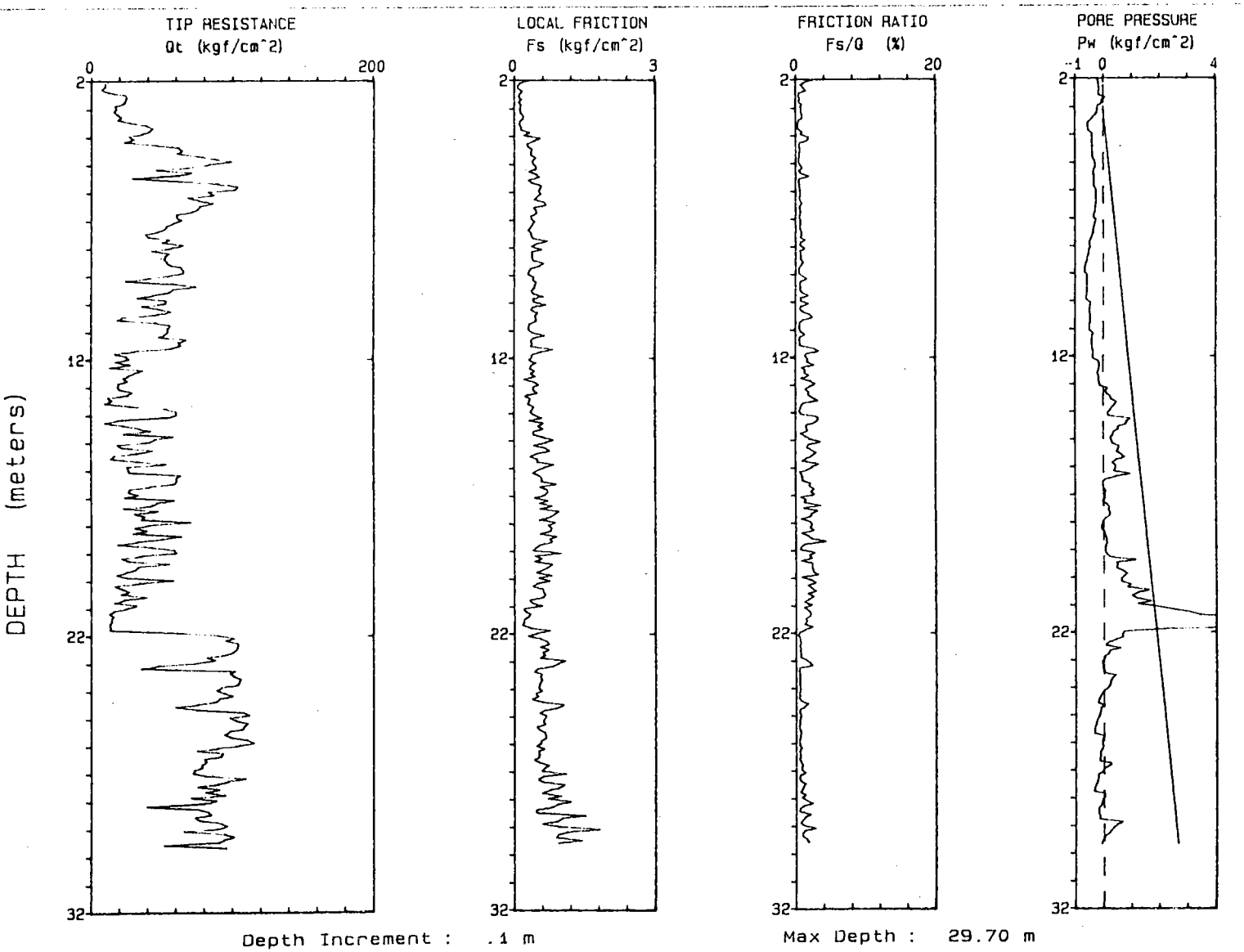


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 28.40 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
CPT Date : 12-07-94 09:44
Sounding : CPTP06 Pg 1 / 1
Location : NO 16 WHARF
Cone Used : 436TC
Job No. : CPT-P06

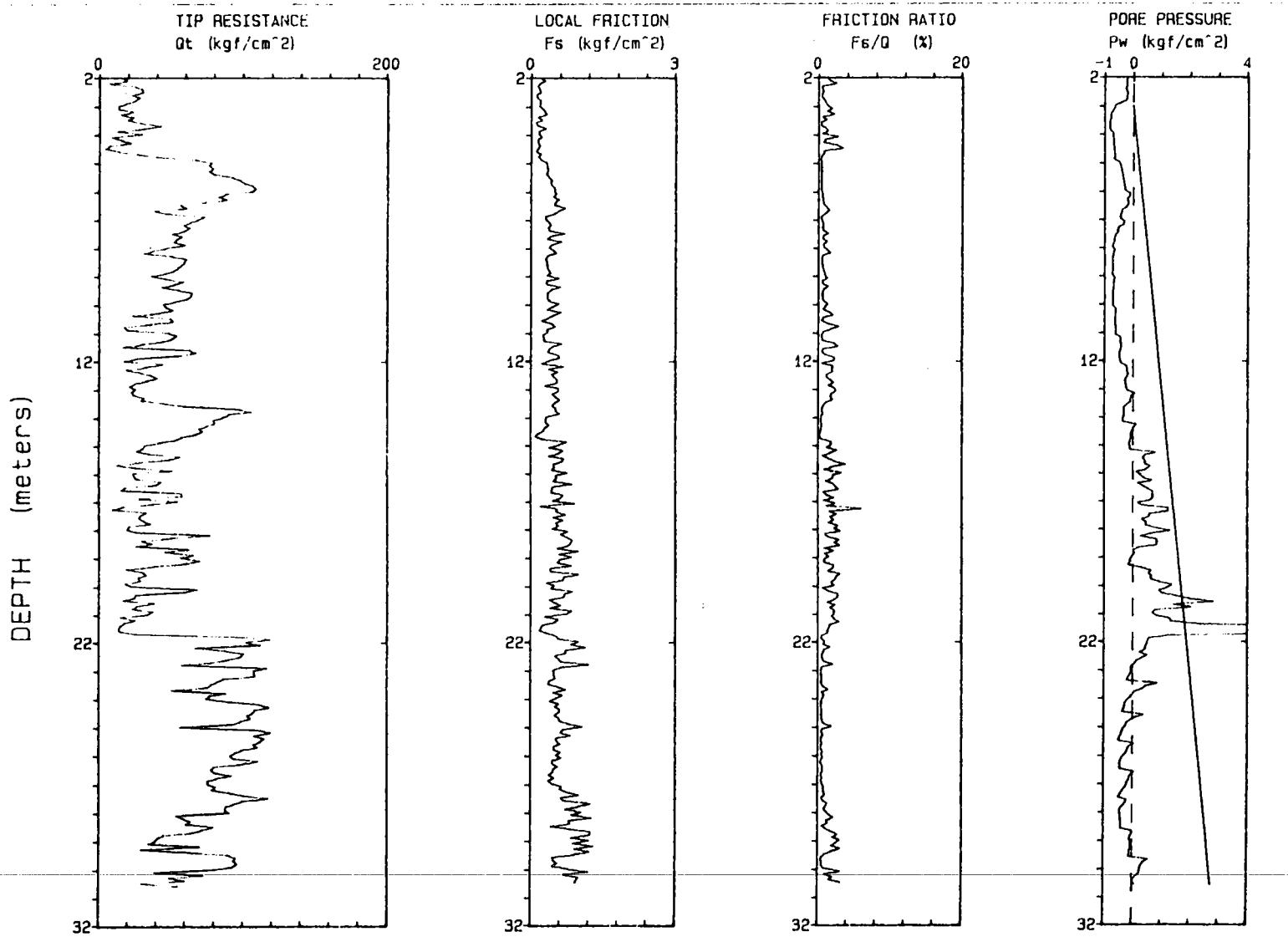


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 29.70 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
CPT Date : 12-05-94 10:14
Sounding : CPTP07 Pg 1 / 1
Location : NO 16 WHARF
Cone Used : 436TC
Job No. : CPT-P07



Depth Increment : .1 m

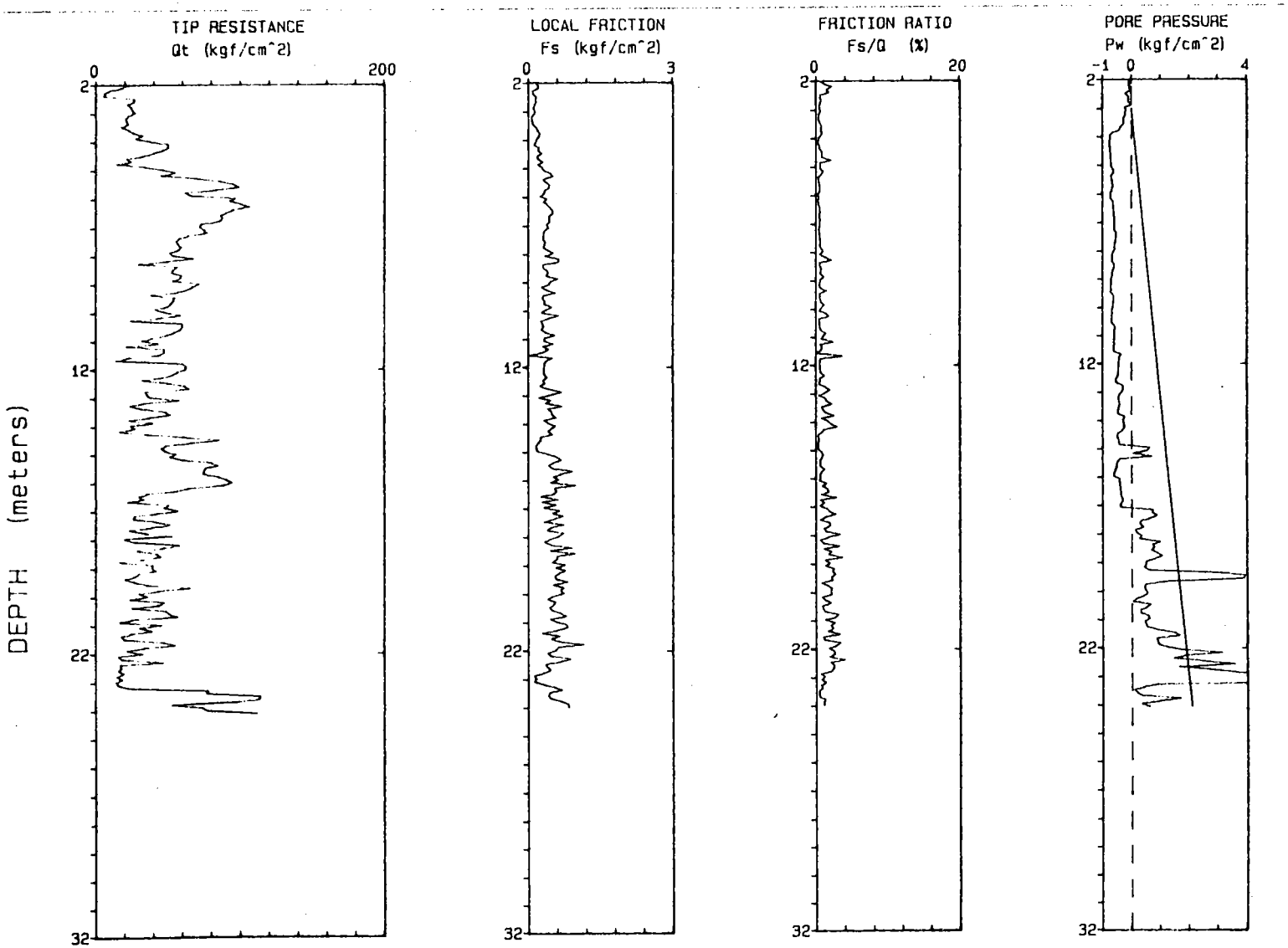
Max Depth : 30.60 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 11-29-94 10:15
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP08 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P08



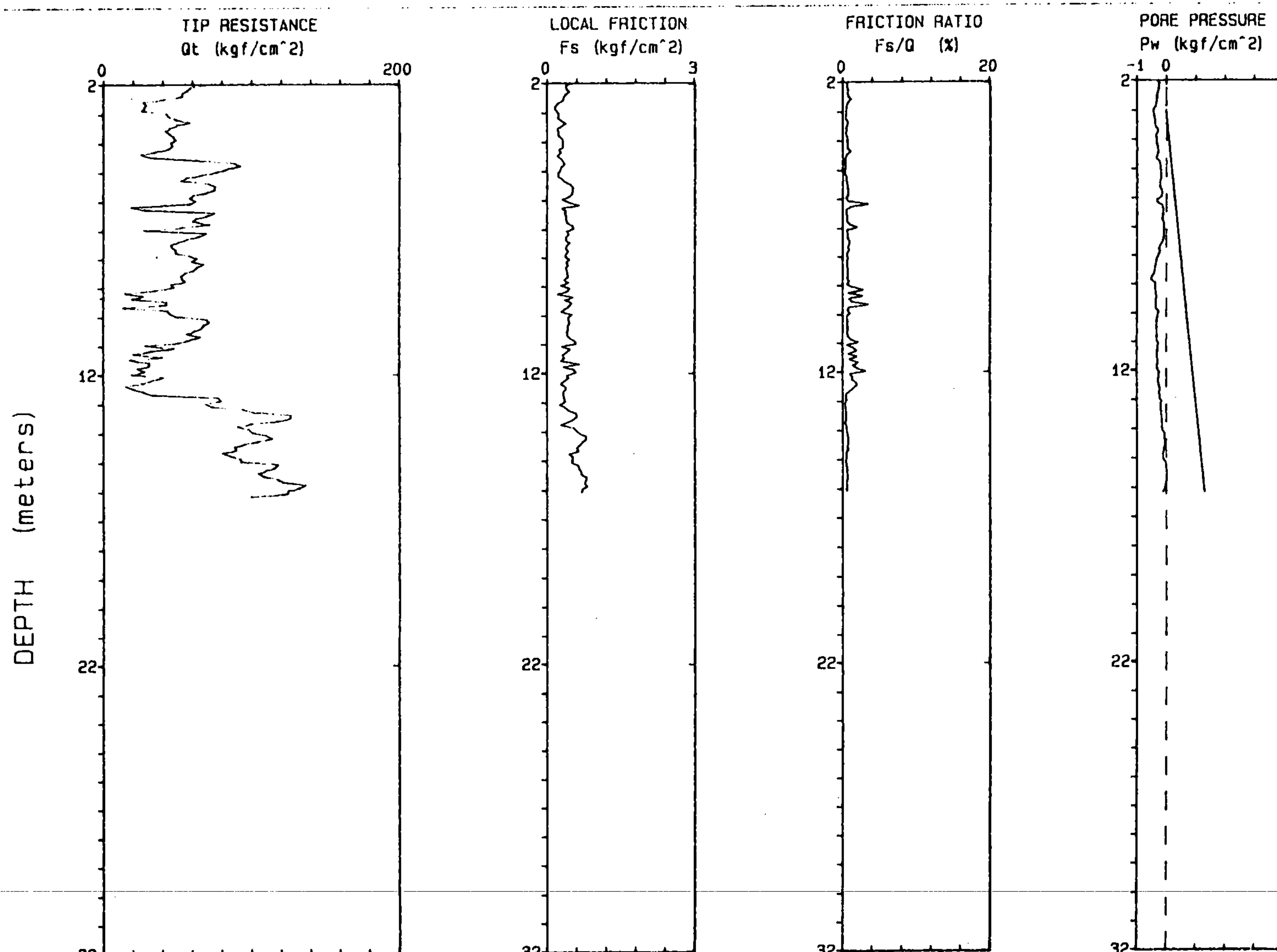
Depth Increment : .1 m

Max Depth : 24.10 m

IHMT

Operator : CHIN&SU | CPT Date : 11-10-94 10: 20 | Sounding : CPTP9 Pg 1 / 1

Location : NO: 16 HARBOR | Cone Used : 396 | Job No. : CPTP9

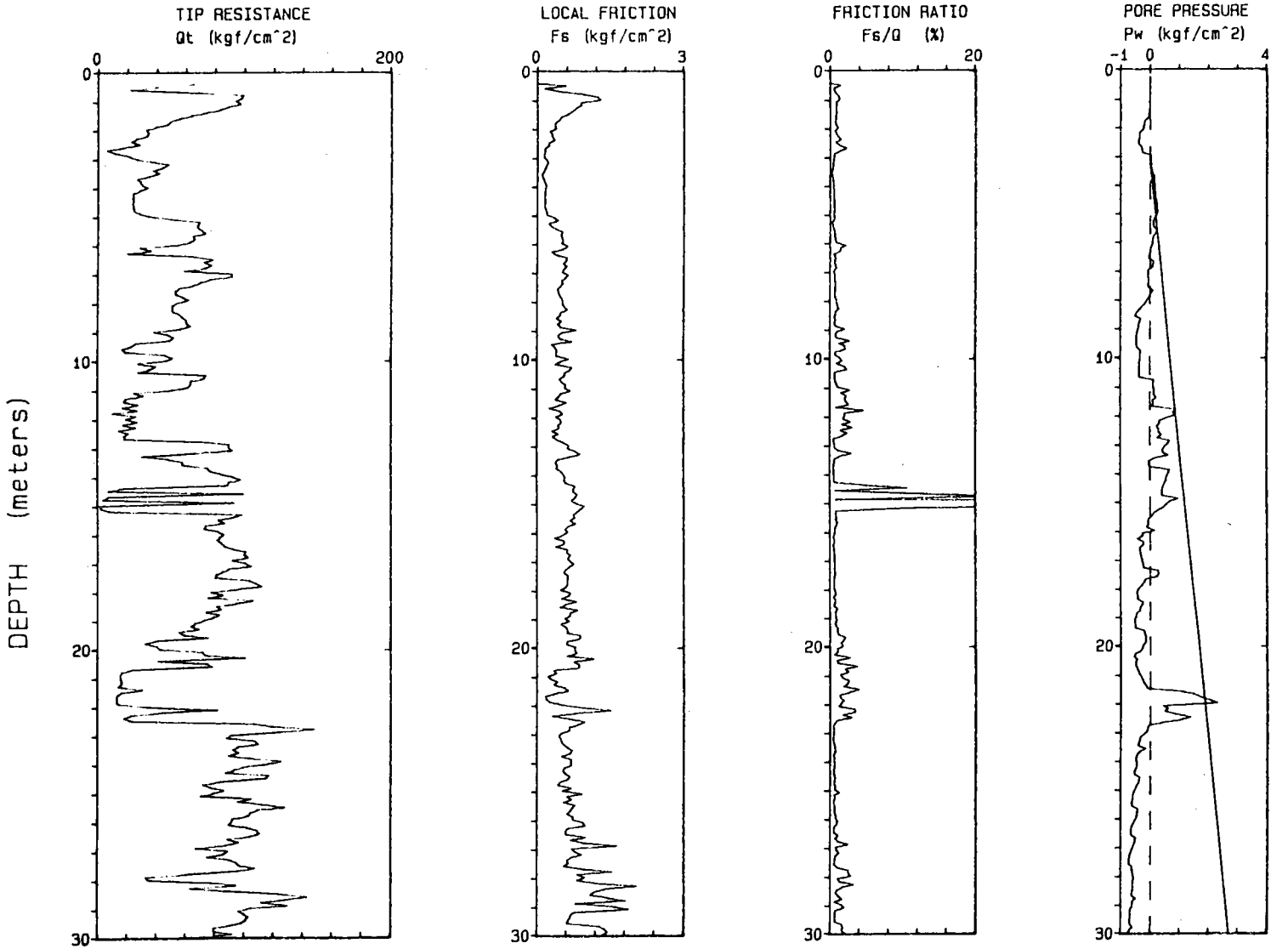


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 16.20 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
CPT Date : 11-14-94 09:41
Sounding : CPTP10 Pg 1 / 2
Location : NO 16 WHARF
Cone Used : 396
Job No. : CPT-P10



Depth Increment : .1 m

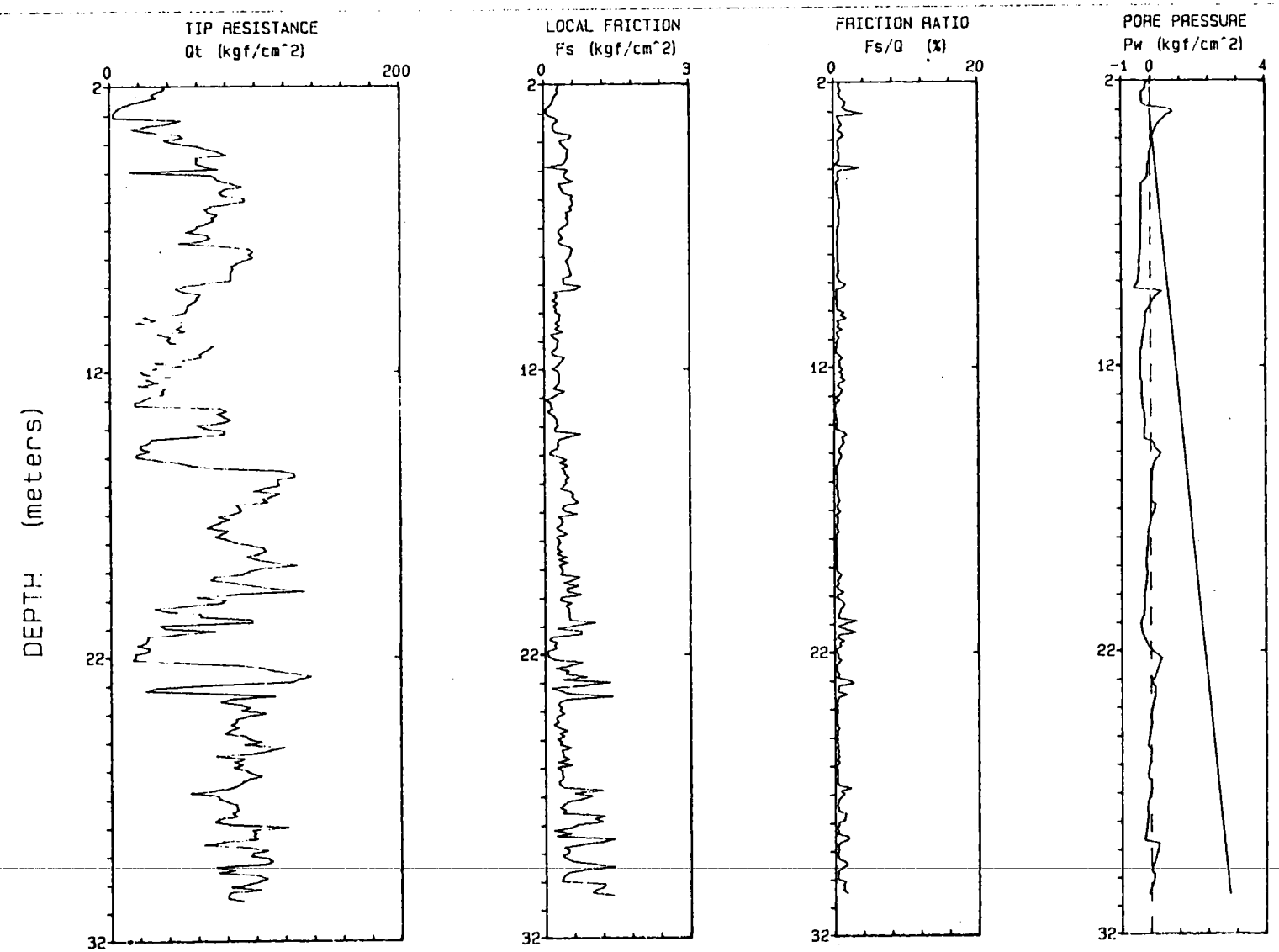
Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : CHIN&SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 11-15-94 09:56
Cone Used : 396

Sounding : CPTP11 Pg 1 / 1
Job No. : CPTP11

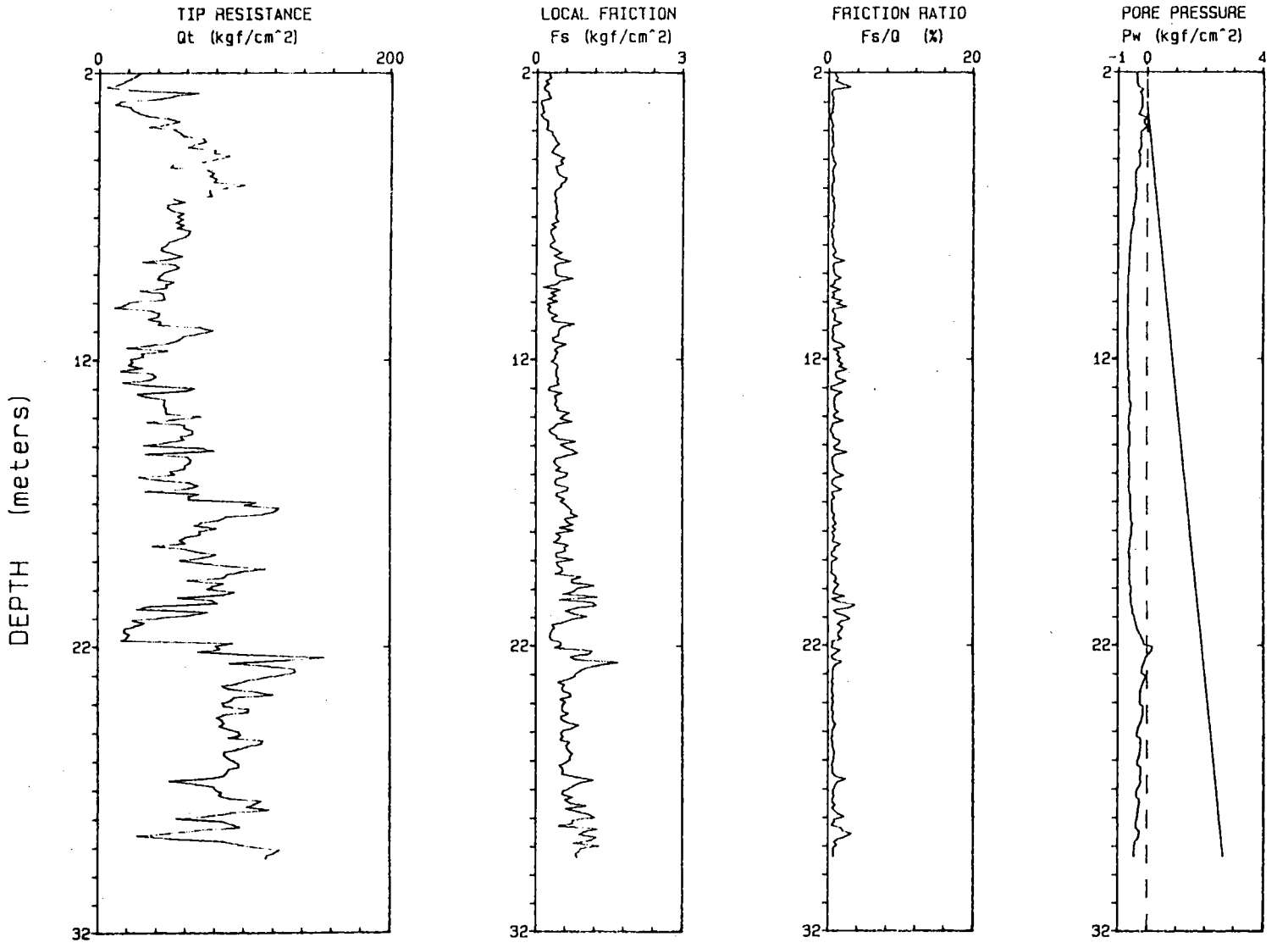


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.60 m

IHMT

Operator : CHIN&SU
CPT Date : 11-17-94 10:20
Sounding : CPTPS2 Pg 1 / 1
Location : NO 16 WHARF
Cone Used : 396
Job No. : CPTP12



Depth Increment : .1 m

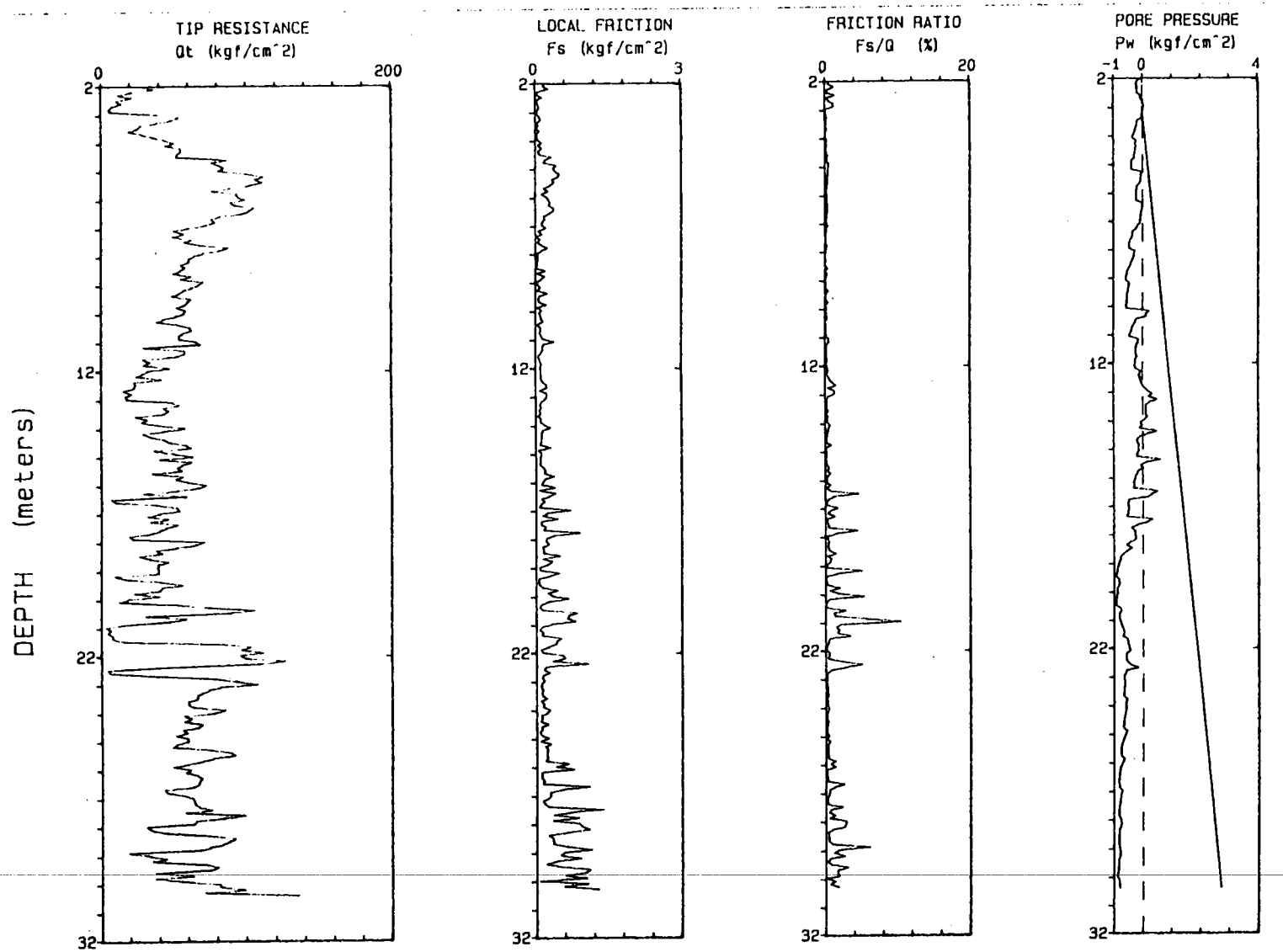
Max Depth : 29.40 m

IHMT

Operator : CHIN&SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 11-18-94 10:23
Cone Used : 396

Sounding : CPTP13 Pg 1 / 1
Job No. : CPTP13



Depth Increment : .1 m

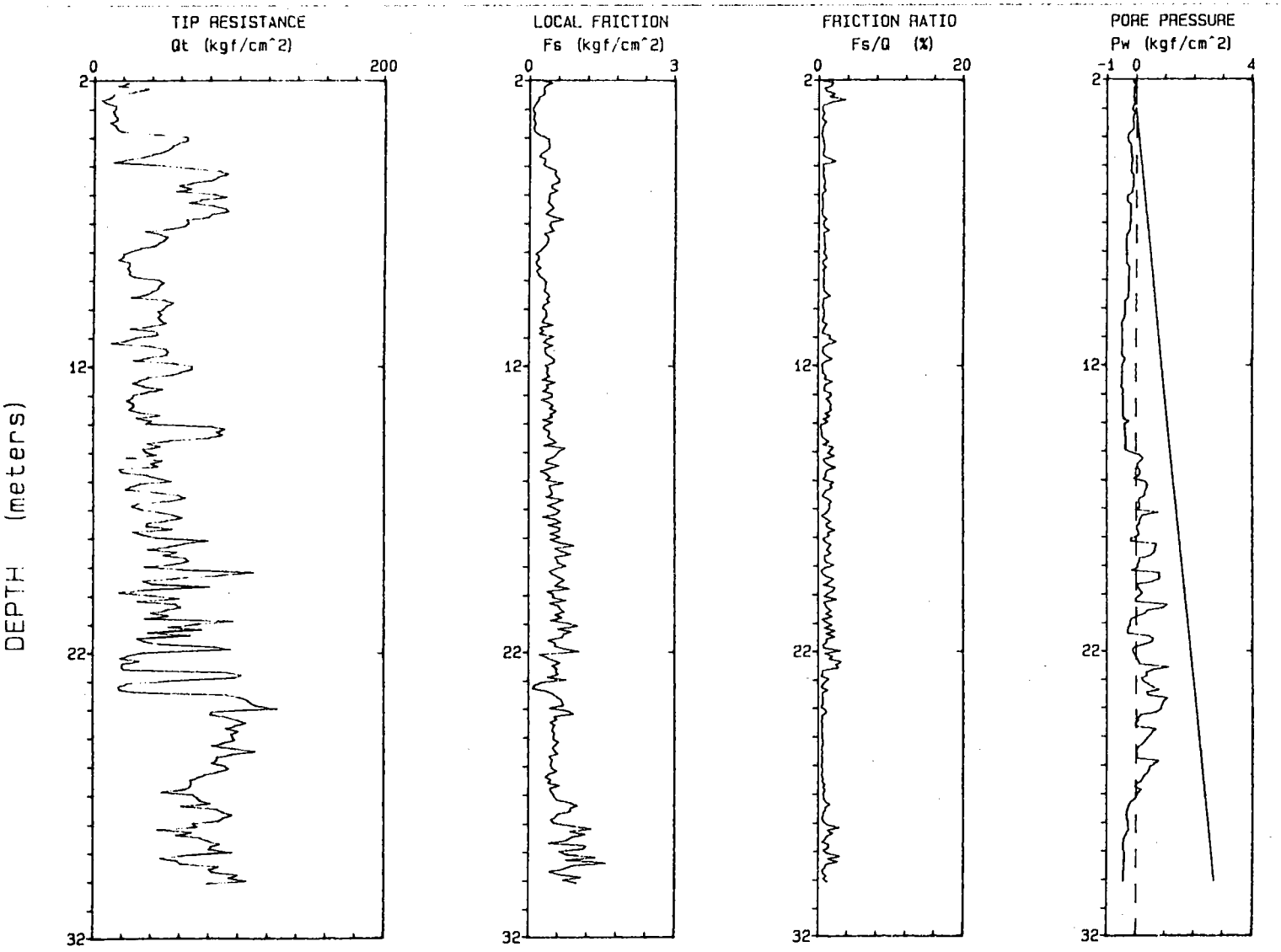
Max Depth : 30.40 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 11-21-94 10:25
Cone Used : 396

Sounding : CPTP14 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P14



Depth Increment : .1 m

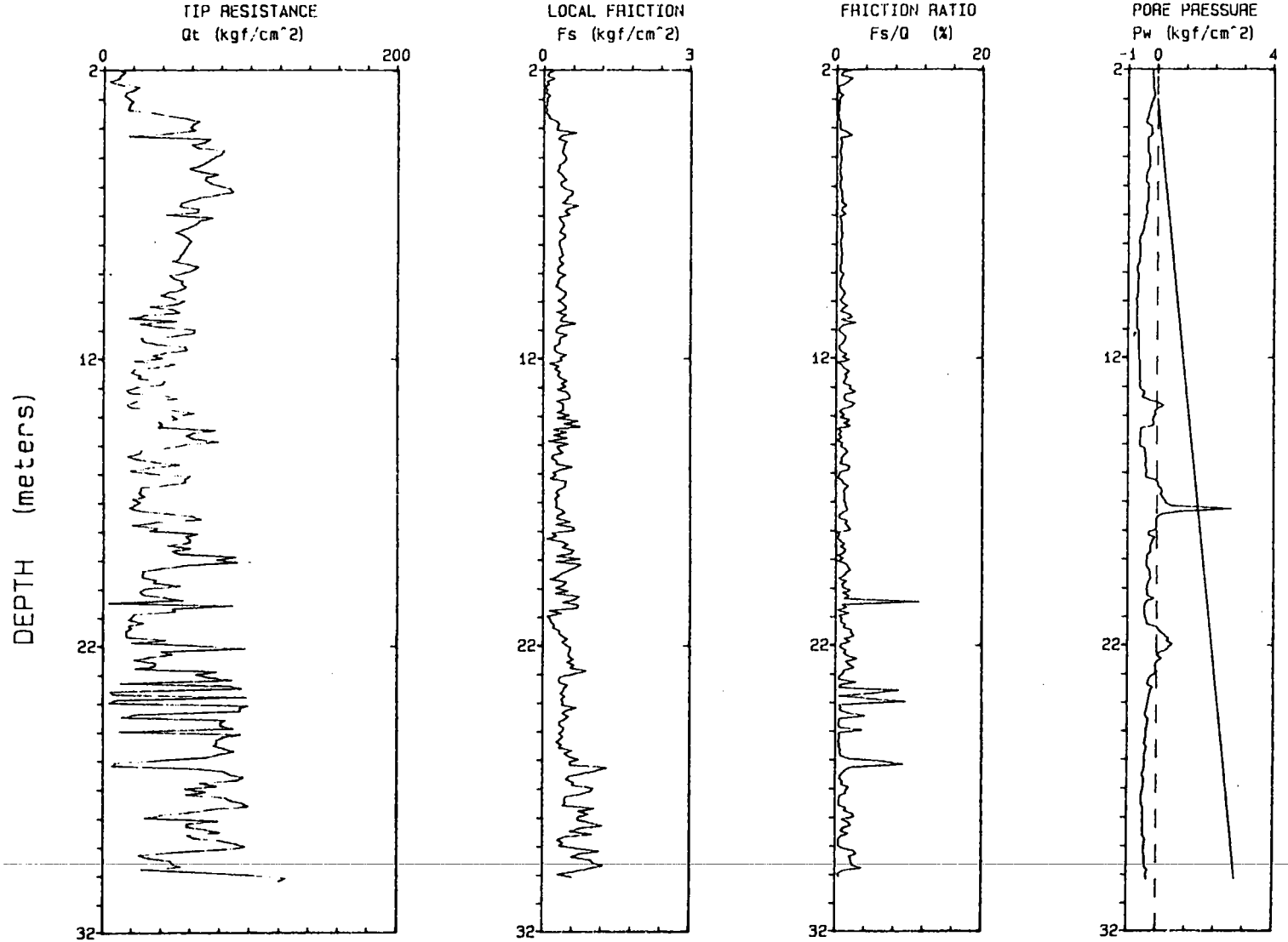
Max Depth : 30.10 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 11-28-94 09:26
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP15 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P15



Depth Increment : .1 m

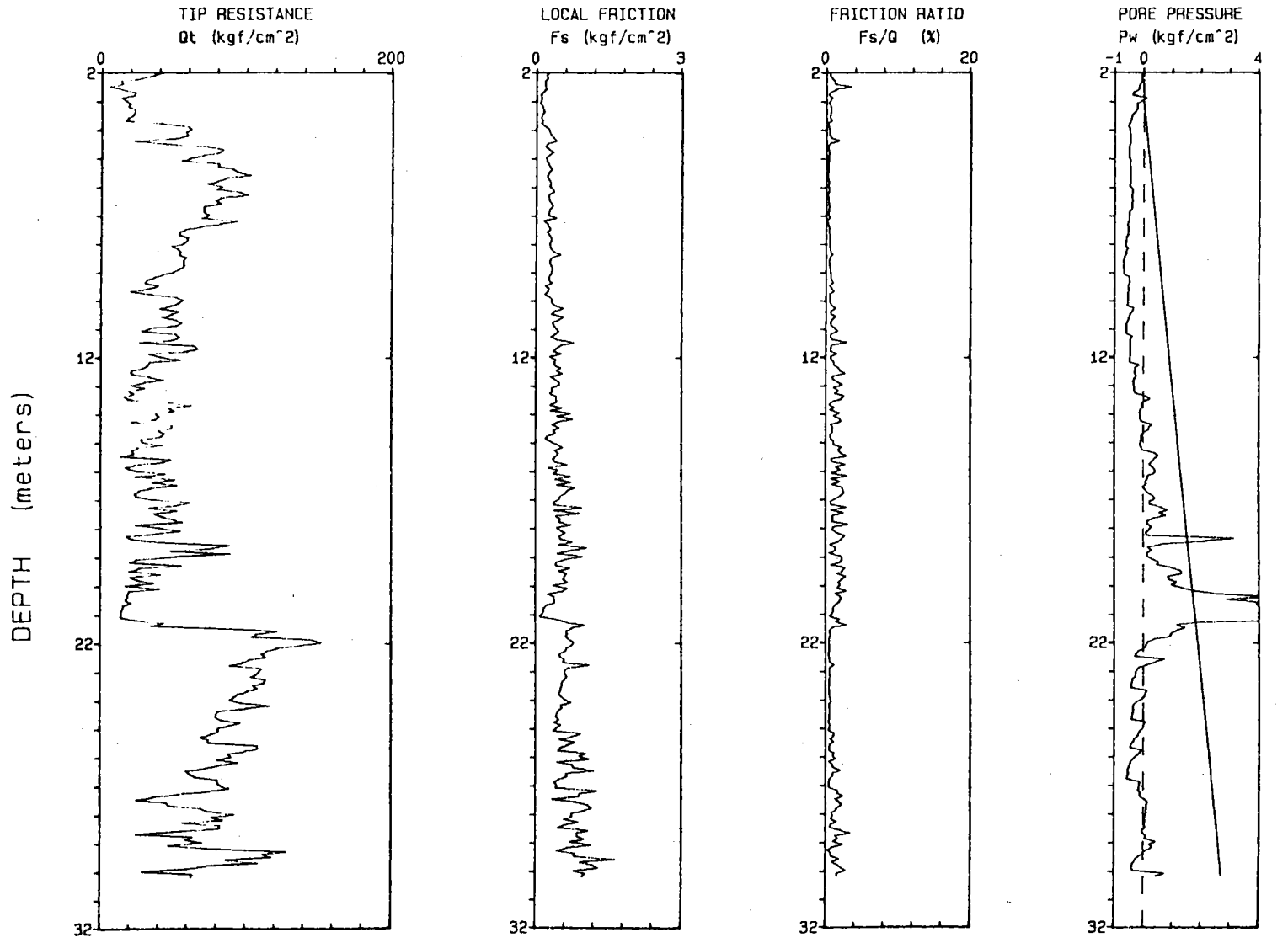
Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : CHIN & SU
Location : NO 16 WHARF

CPT Date : 11-28-94 09:26
Cone Used : 436TC

Sounding : CPTP16 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-P16



Depth Increment : .1 m

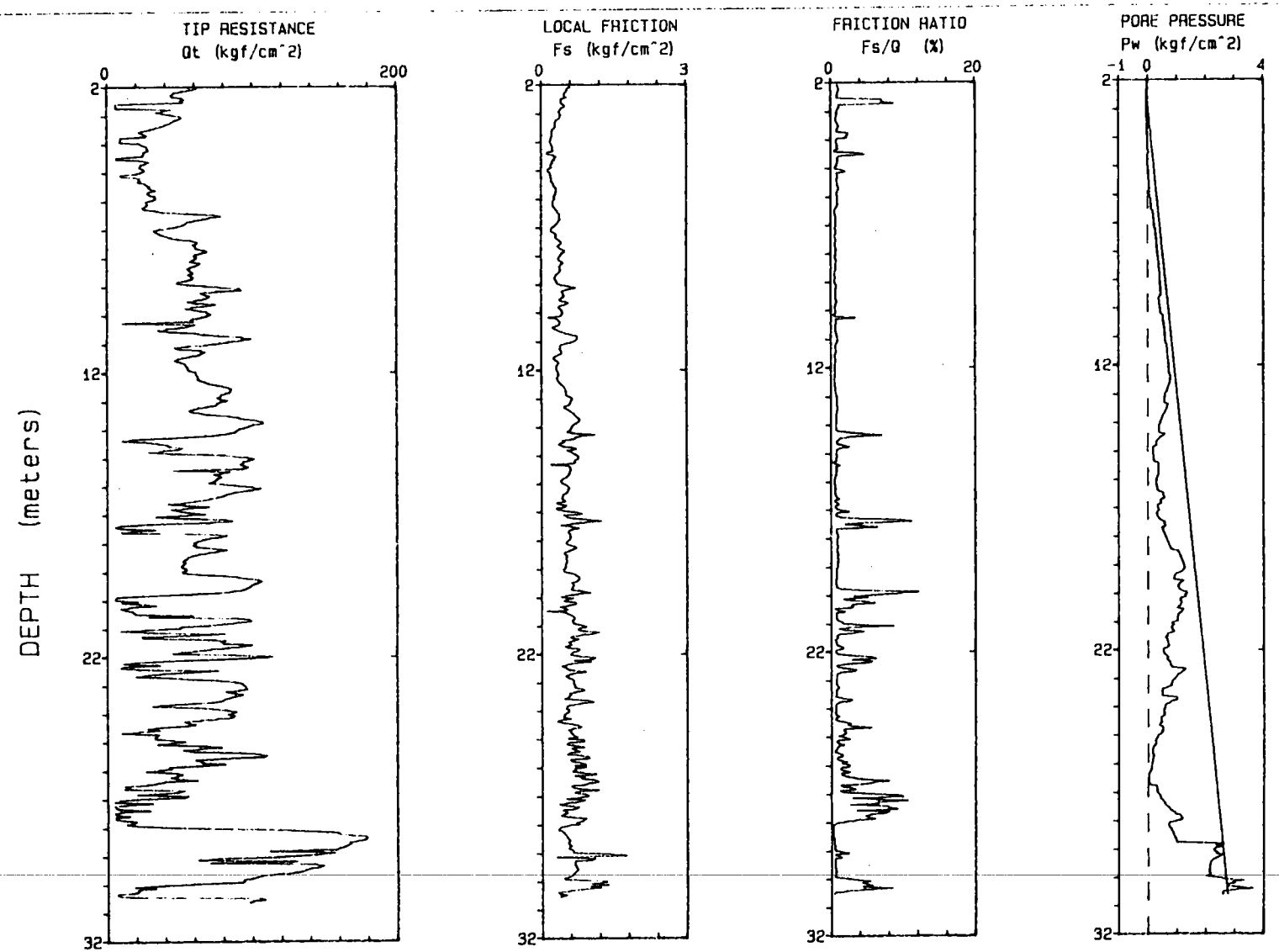
Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : SU
Location : W.HARBOR

CPT Date : 10-21-94 10:52
Cone Used : 396

Sounding : CPTC1 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-C1



Depth Increment : .05 m

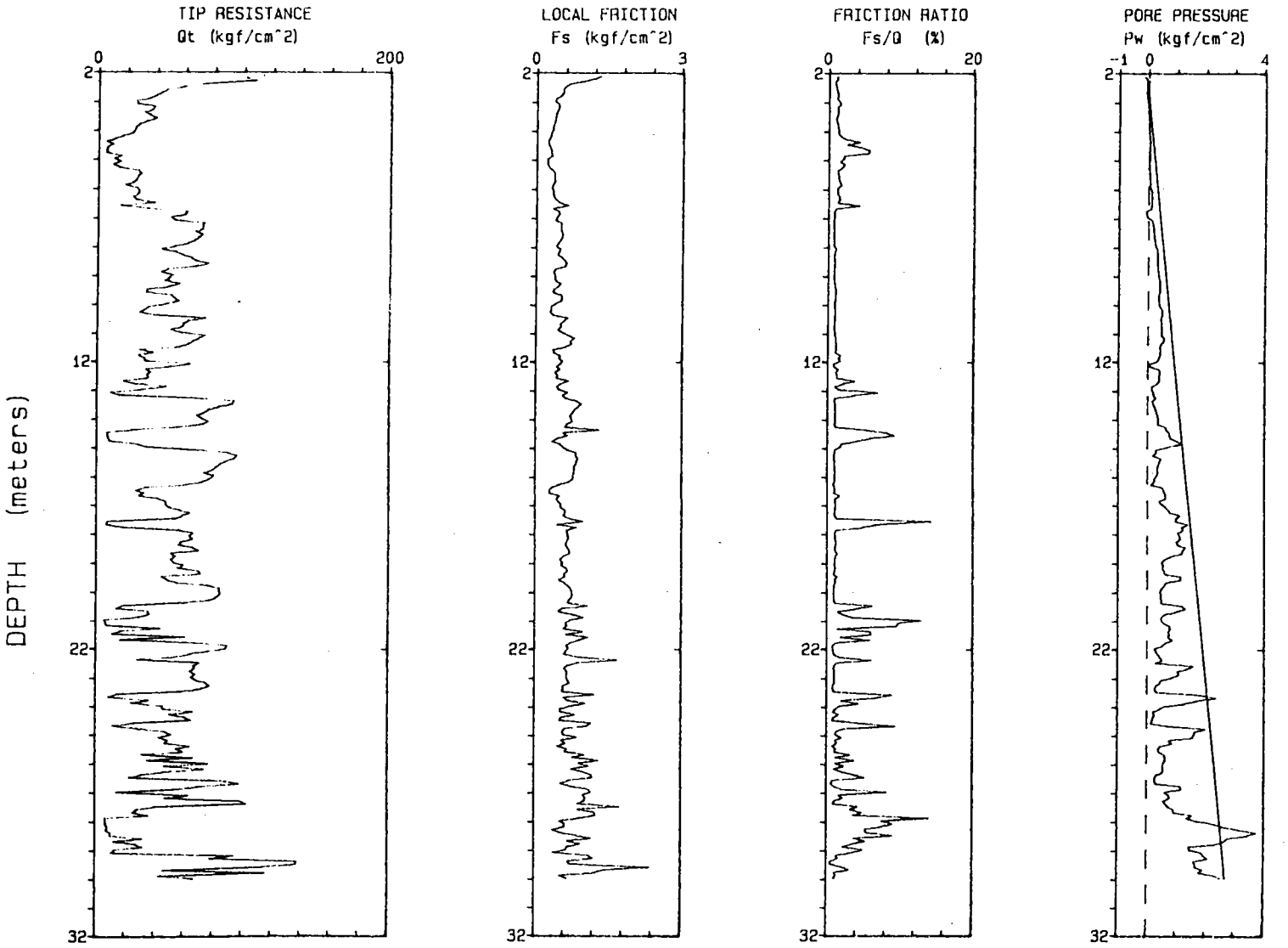
Max Depth : 30.65 m

IHMT

Operator : CHEN
Location : W.HARBOR

CPT Date : 10-20-94 12:20
Cone Used : 396

Sounding : CPTK25 Pg 1 / 1
Job No. : CPT--C2



Depth Increment : .1 m

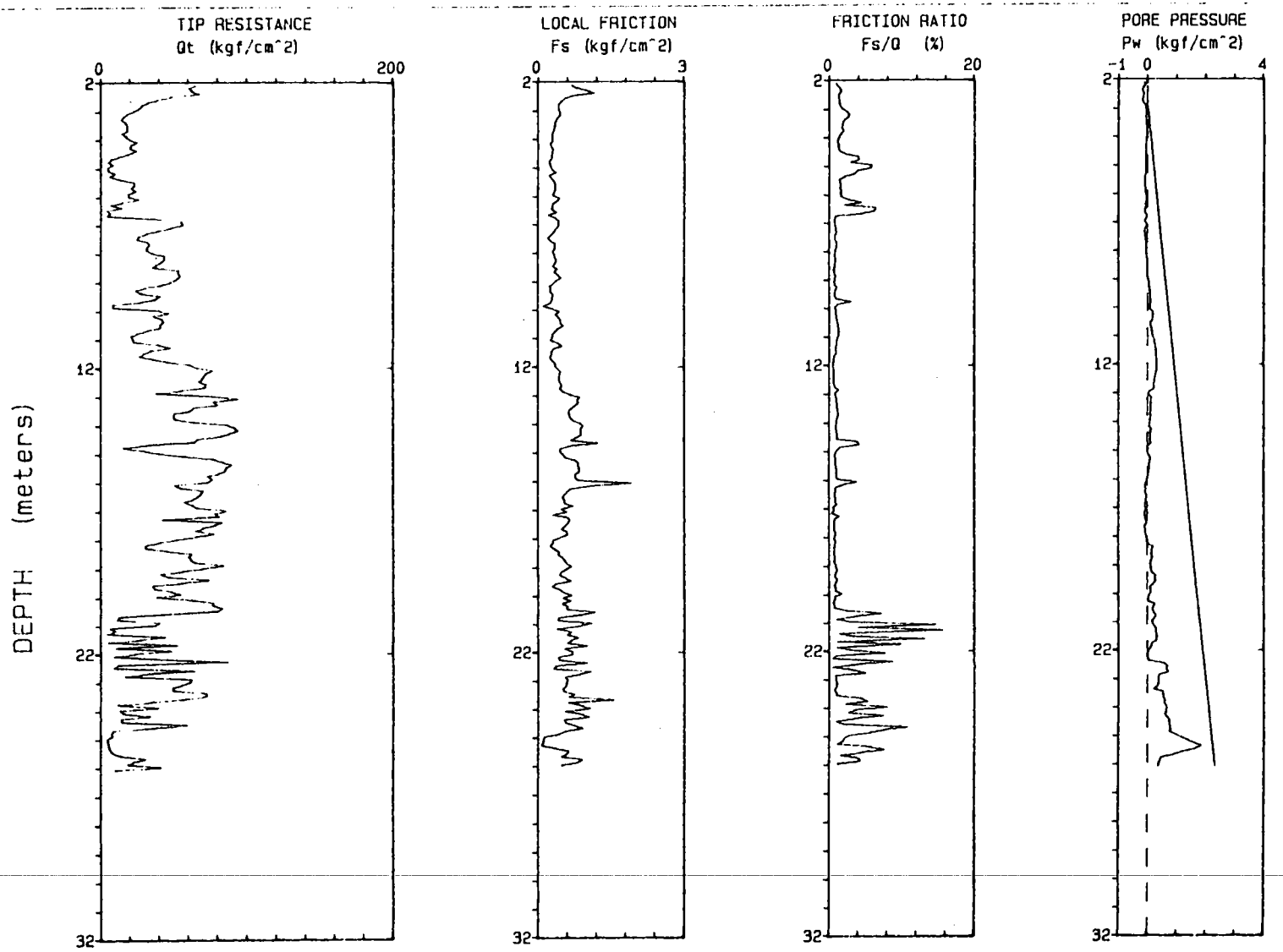
Max Depth : 30.00 m

IHMT

Operator : SU
Location : W.HARBOR

CPT Date : 10-26-94 10:35
Cone Used : 396

Sounding : CPTC3 Pg 1 / 1
Job No. : CPTC-3



Depth Increment : .1 m

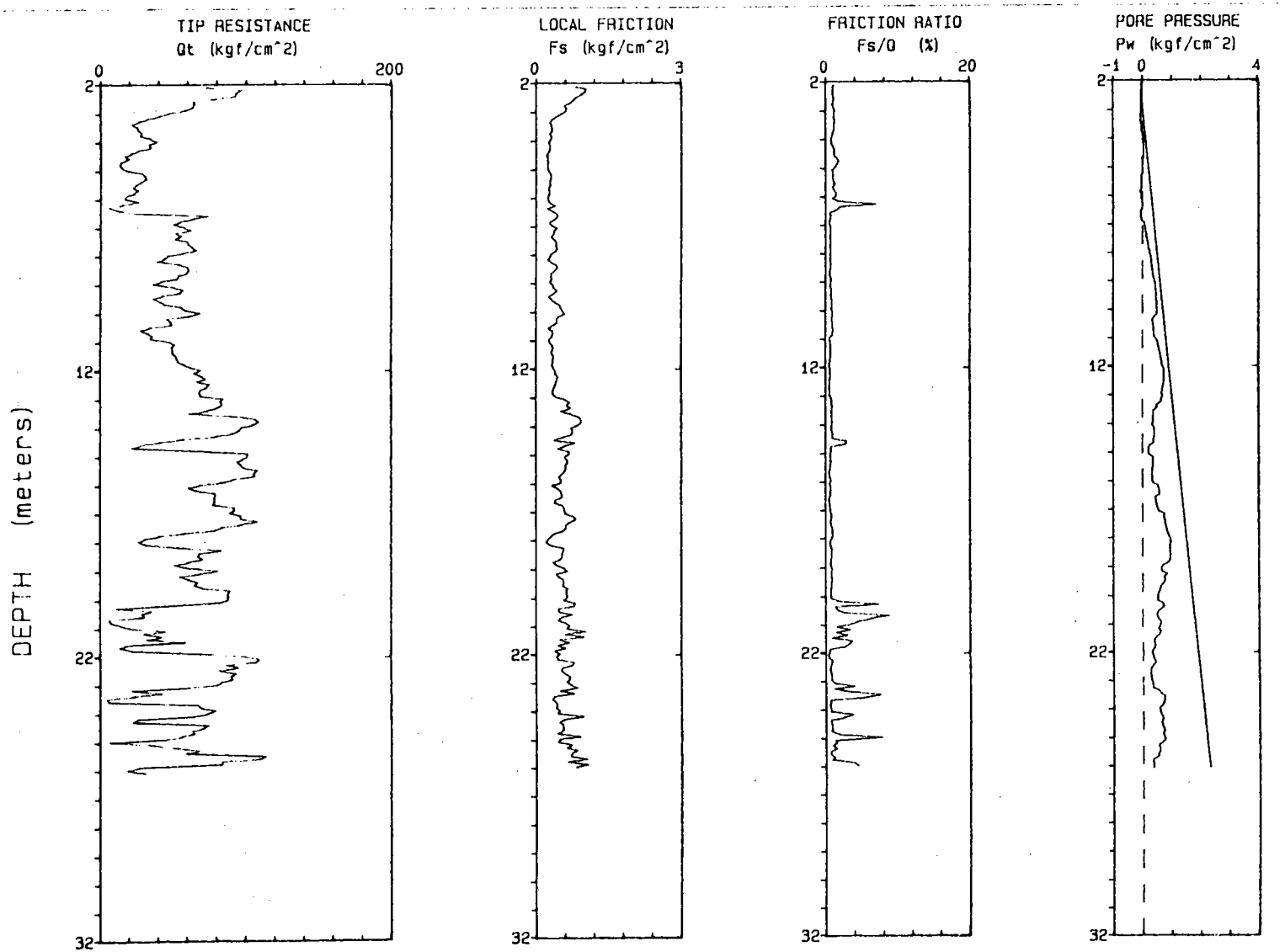
Max Depth : 26.10 m

IHMT

Operator : SU
Location : W.HARBOR

CPT Date : 10-24-94 11:11
Cone Used : 396

Sounding : CPTC4 Pg 1 / 1
Job No. : CPTC-4



Depth Increment : .1 m

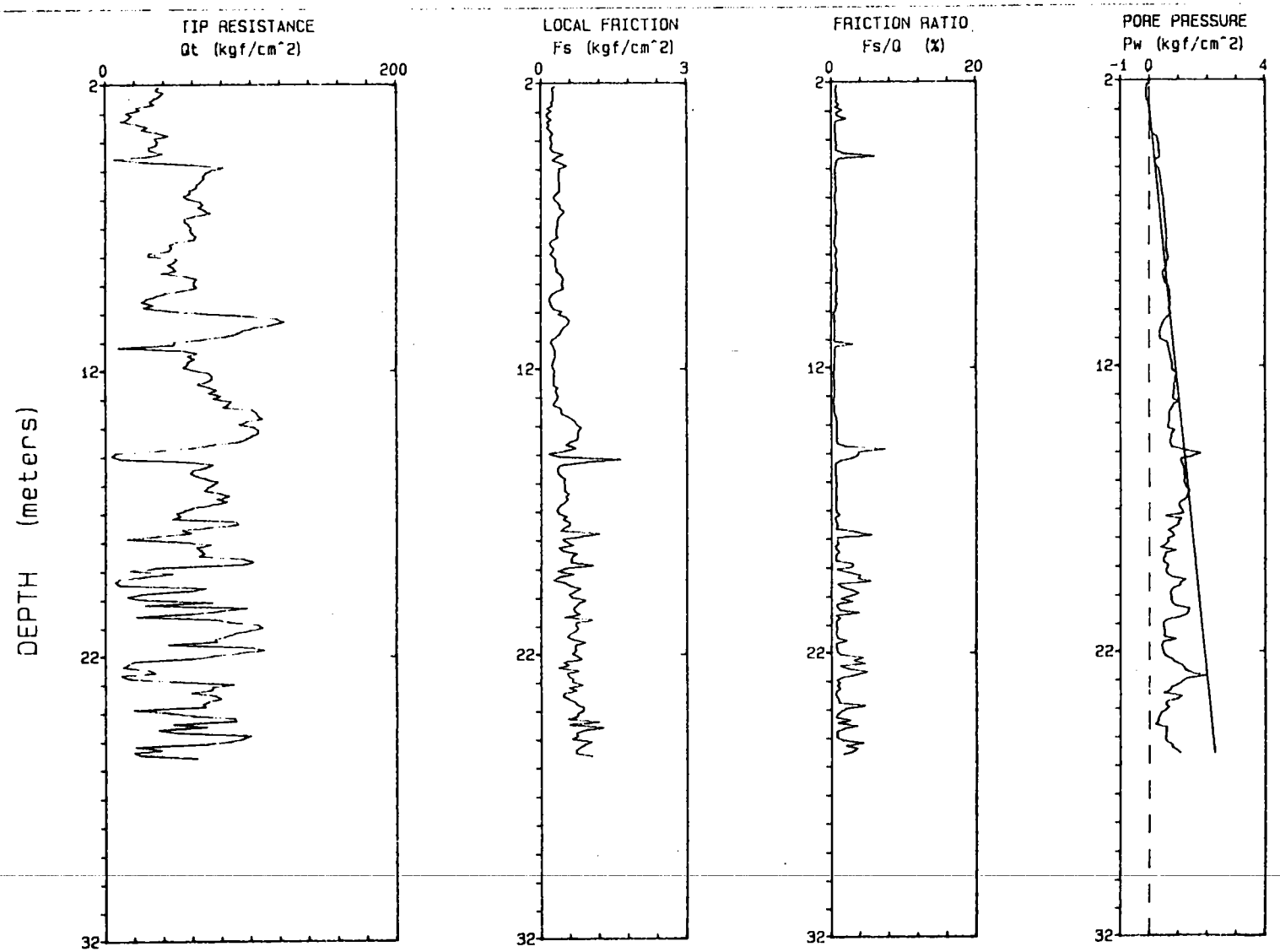
Max Depth : 26.10 m

IHMT

Operator : CHIN&SU
Location : W.HARBOR

CPT Date : 10-27-94 11:05
Cone Used : 396

Sounding : CPTC5 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-C5



Depth Increment : .1 m

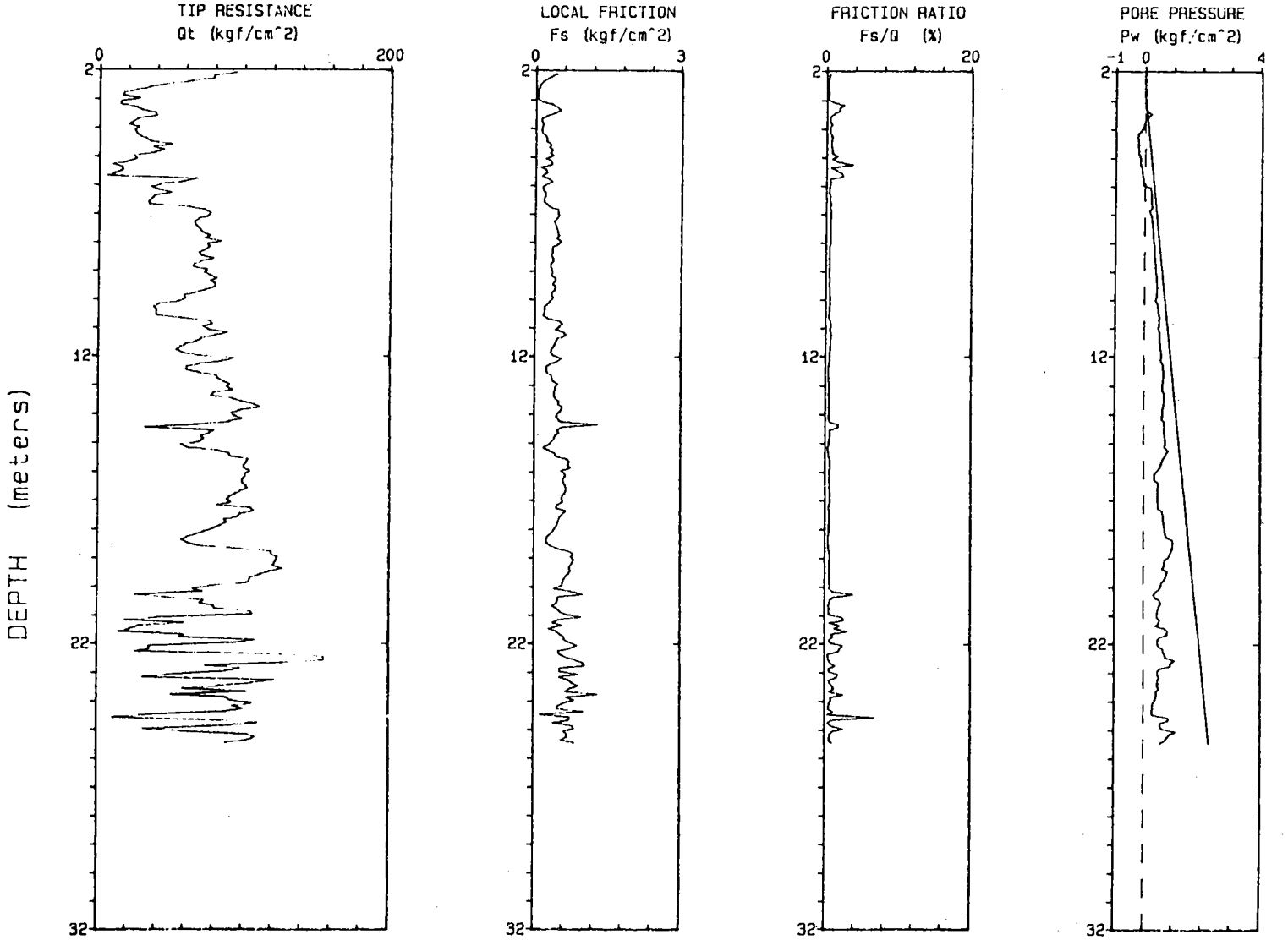
Max Depth : 25.60 m

IHMT

Operator : CHIN&SU
Location : W.HARBOR

CPT Date : 10-28-94 13:04
Cone Used : 396

Sounding : CPTC6 Pg 1 / 1
Job No. : CPT-C6



Depth Increment : .1 m

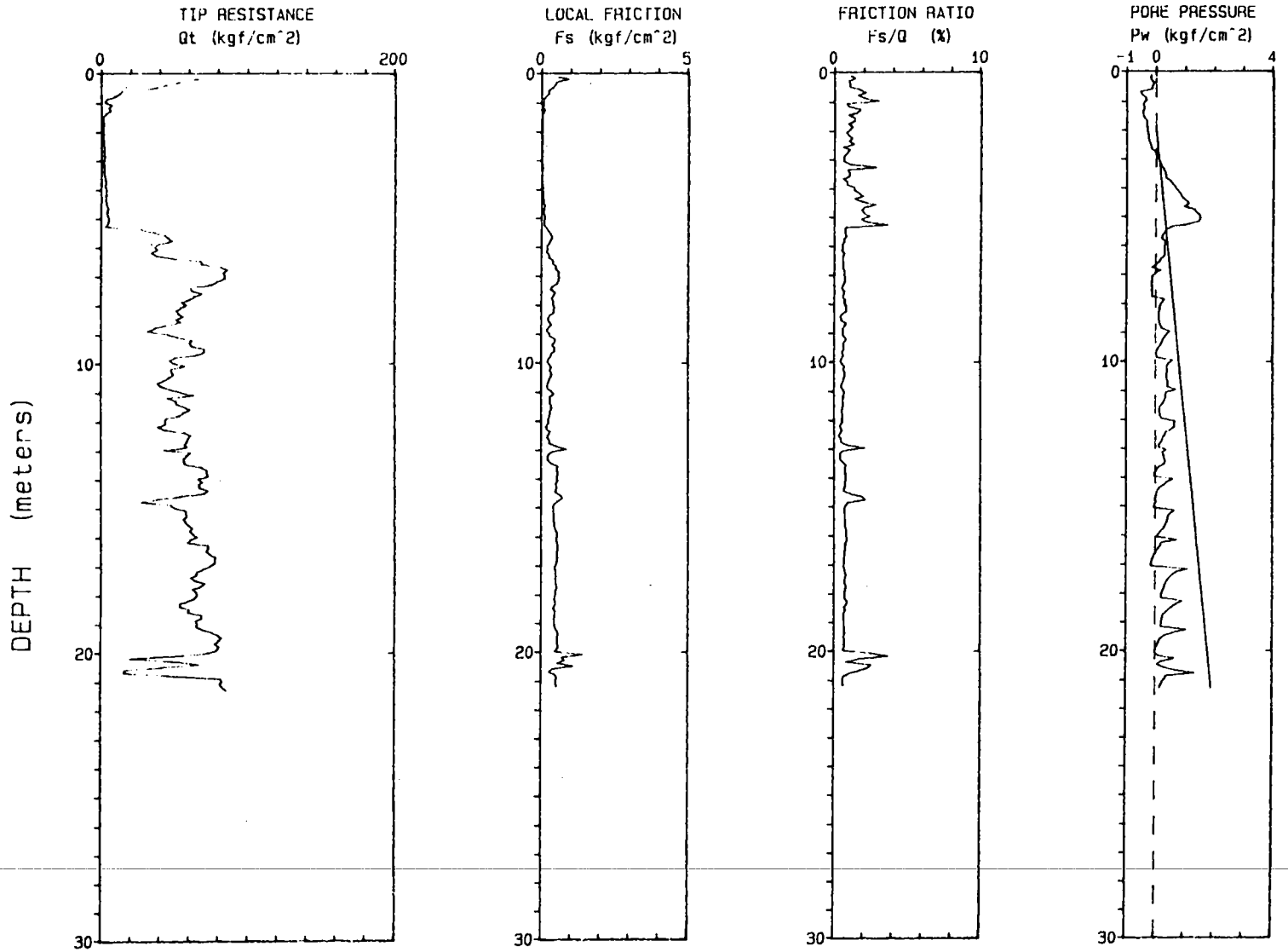
Max Depth : 25.50 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 06-07-95 10:12
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H01 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

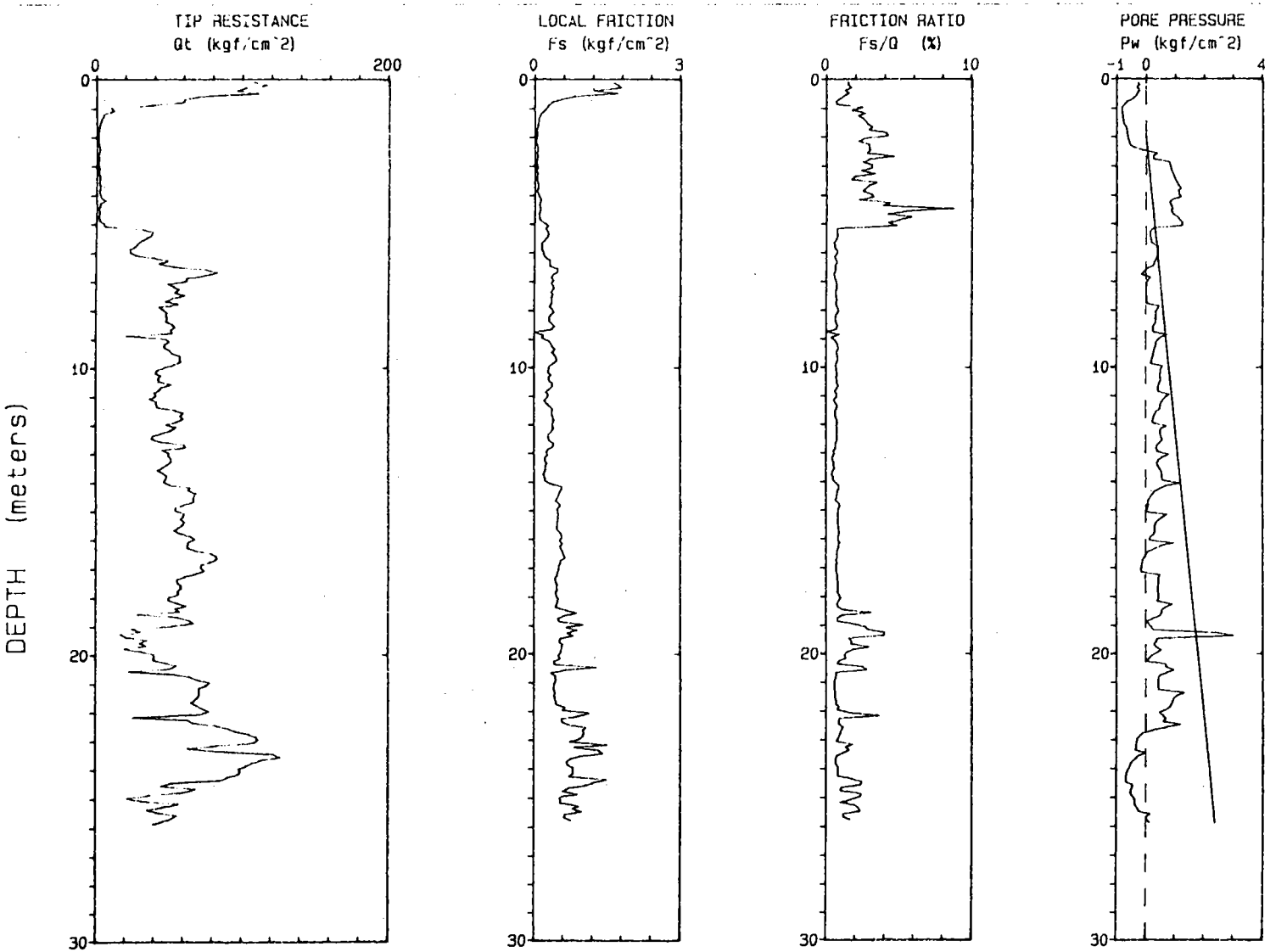
Max Depth : 21.30 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 06-06-95 16:16
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H02 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

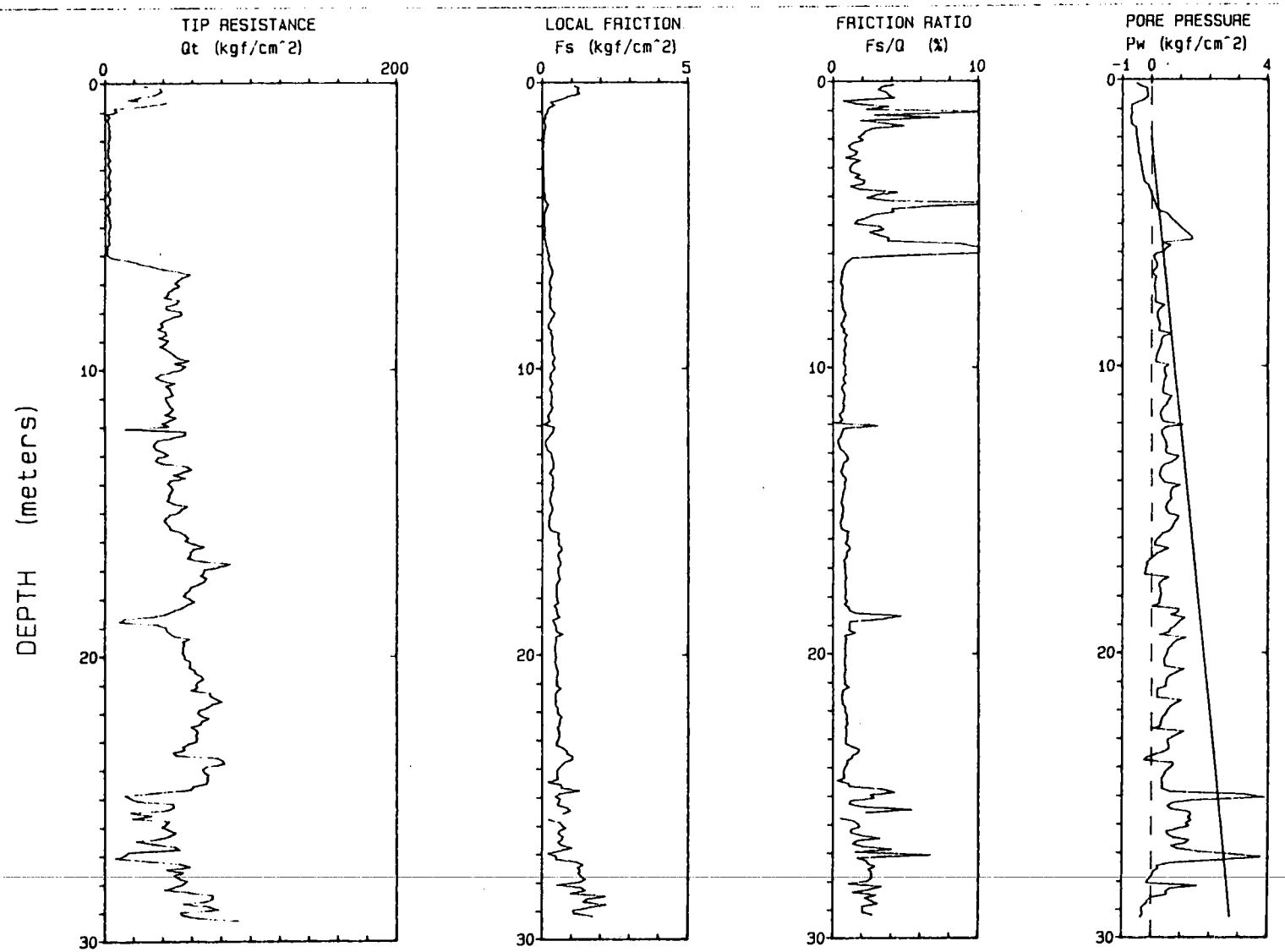
Max Depth : 25.90 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 06-06-95 10:44
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H03 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

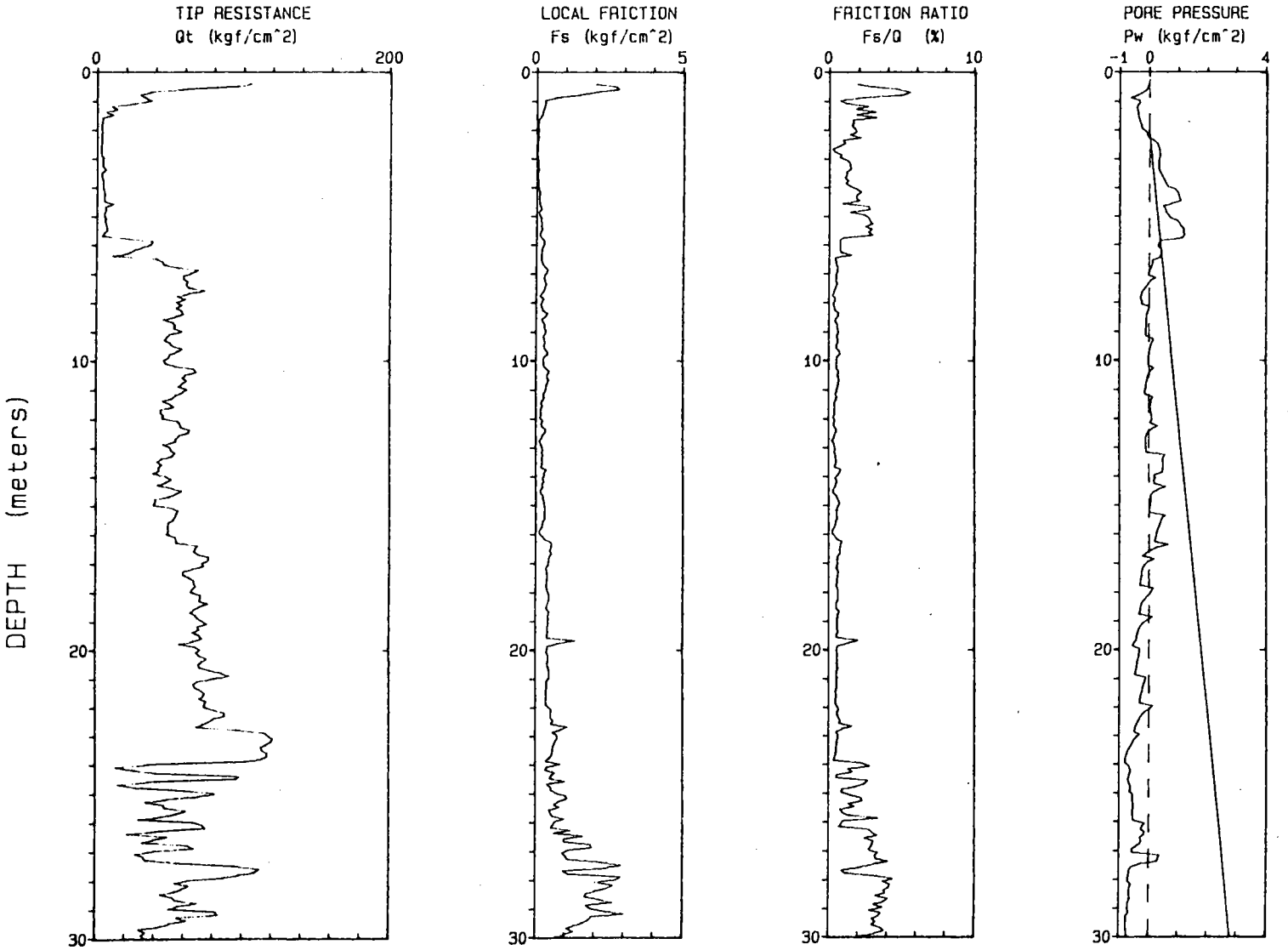
Max Depth : 29.30 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-23-95 12:37
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H4 Pg 1 / 2
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

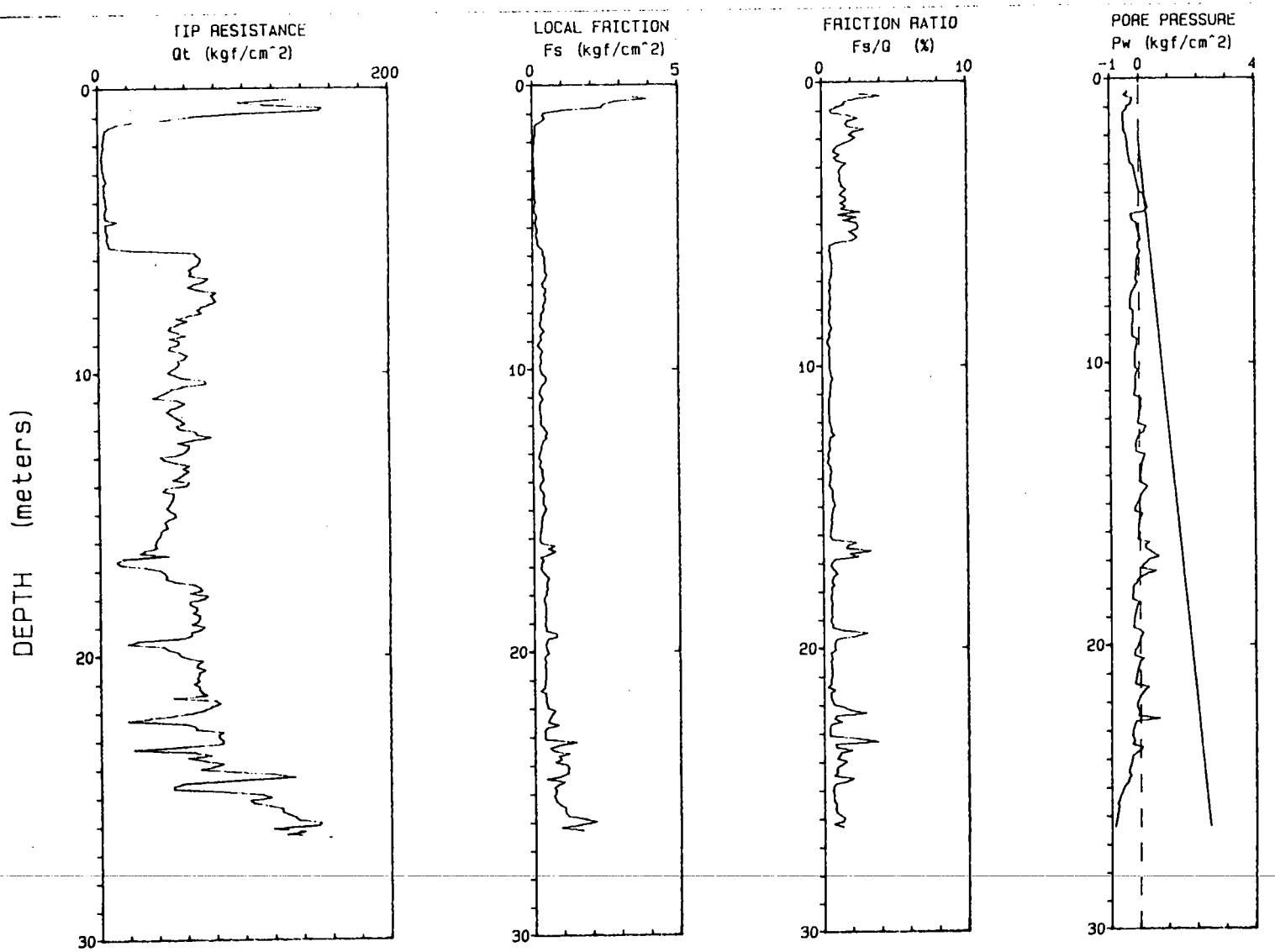
Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-23-95 09:05
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H5 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

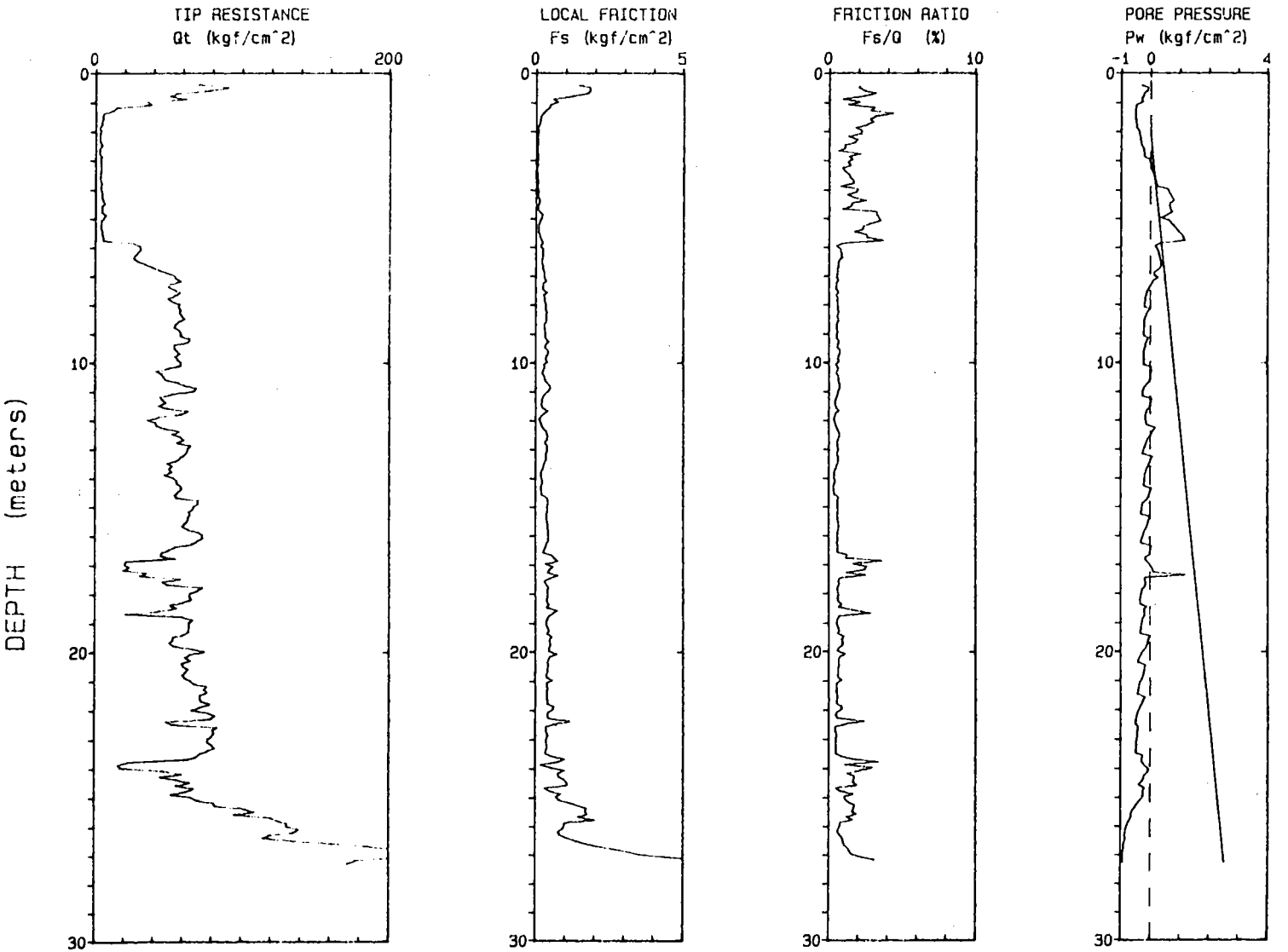
Max Depth : 26.40 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-22-95 12:23
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H6 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

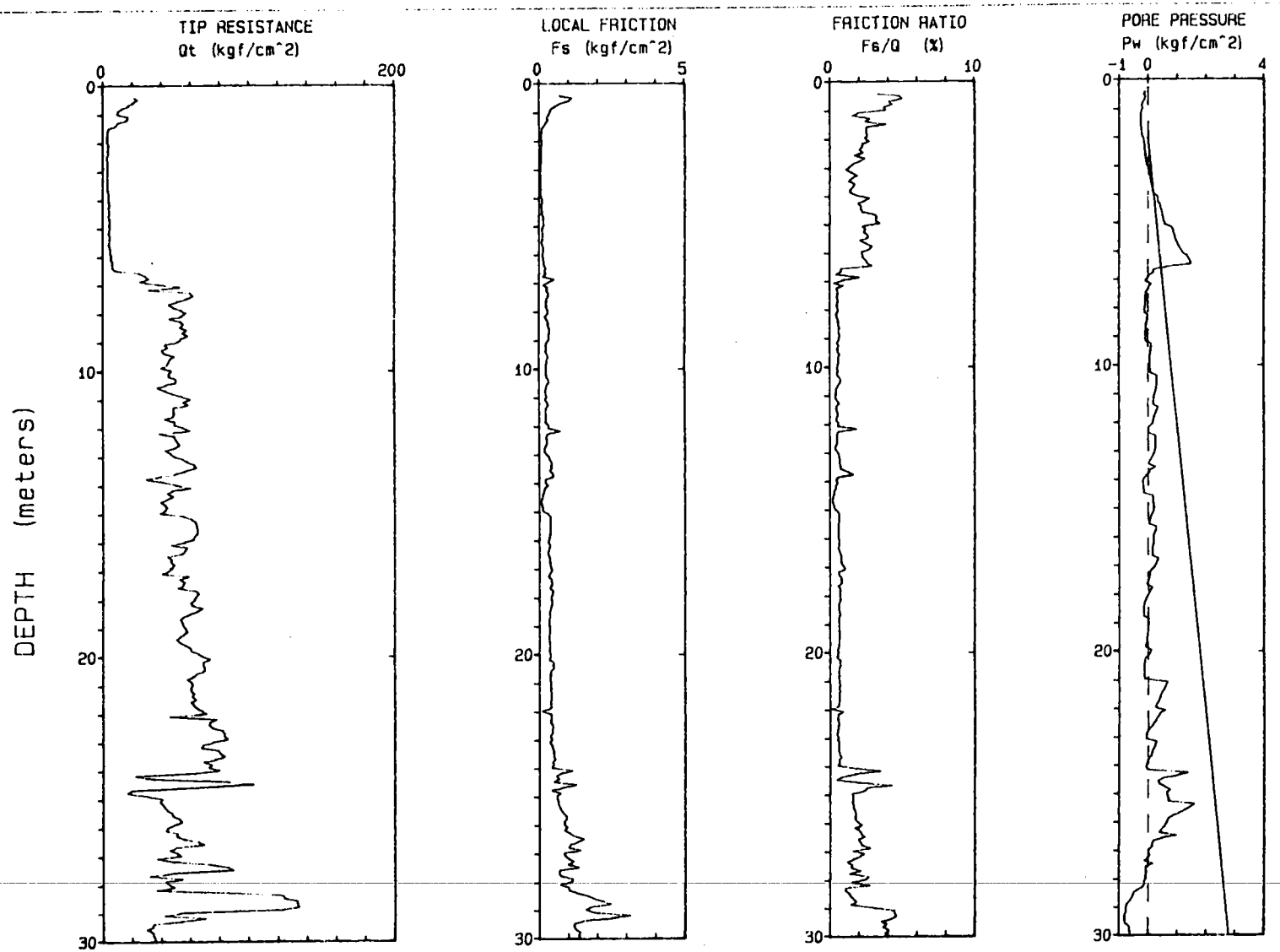
Max Depth : 27.30 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-22-95 08:46
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H7 Pg 1 / 2
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

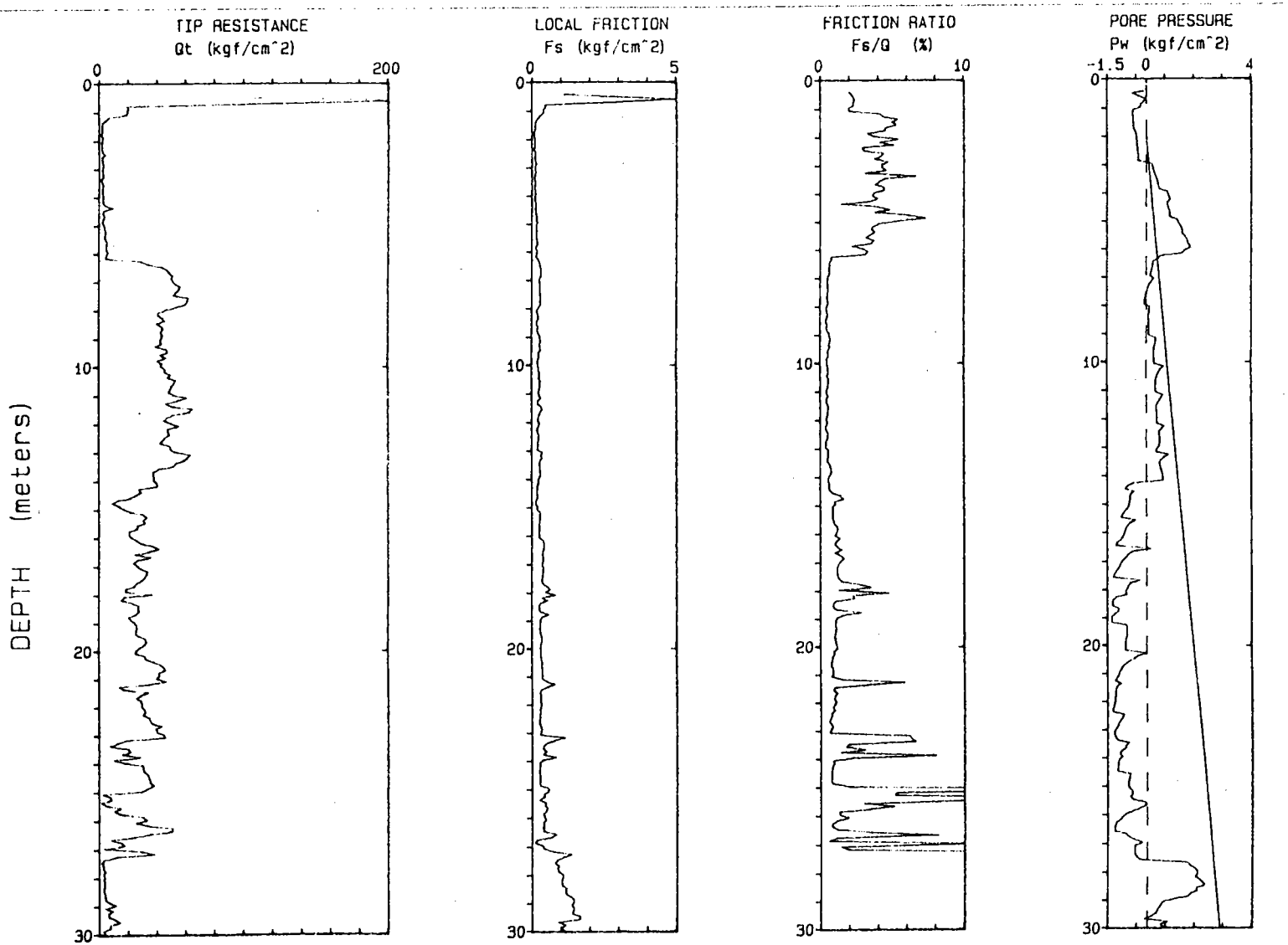
Max Depth : 30.10 m

IHMT

Operator : SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-21-95 10:17
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H8 Pg 1 / 2
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

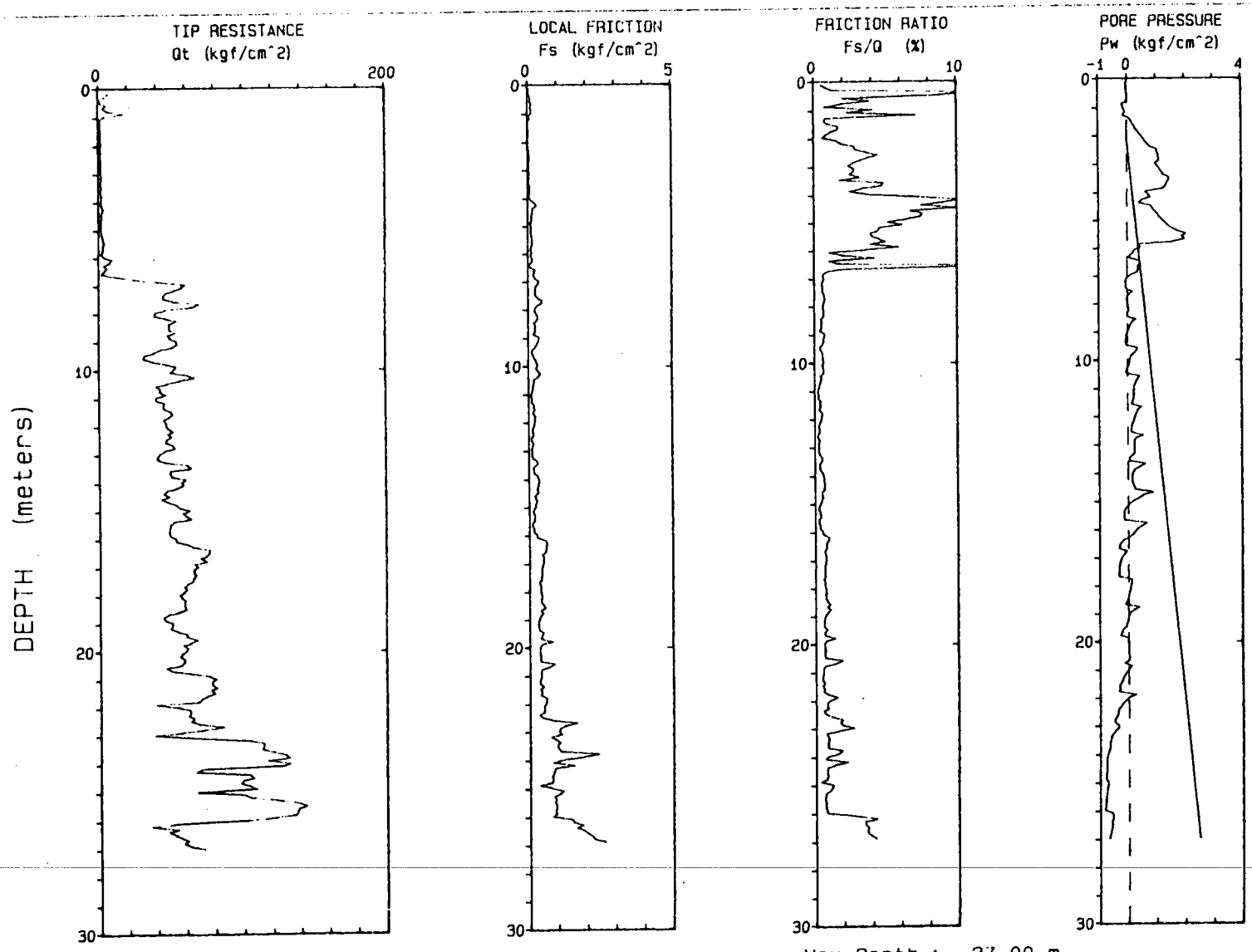
Max Depth : 30.50 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-24-95 12:15
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H09 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

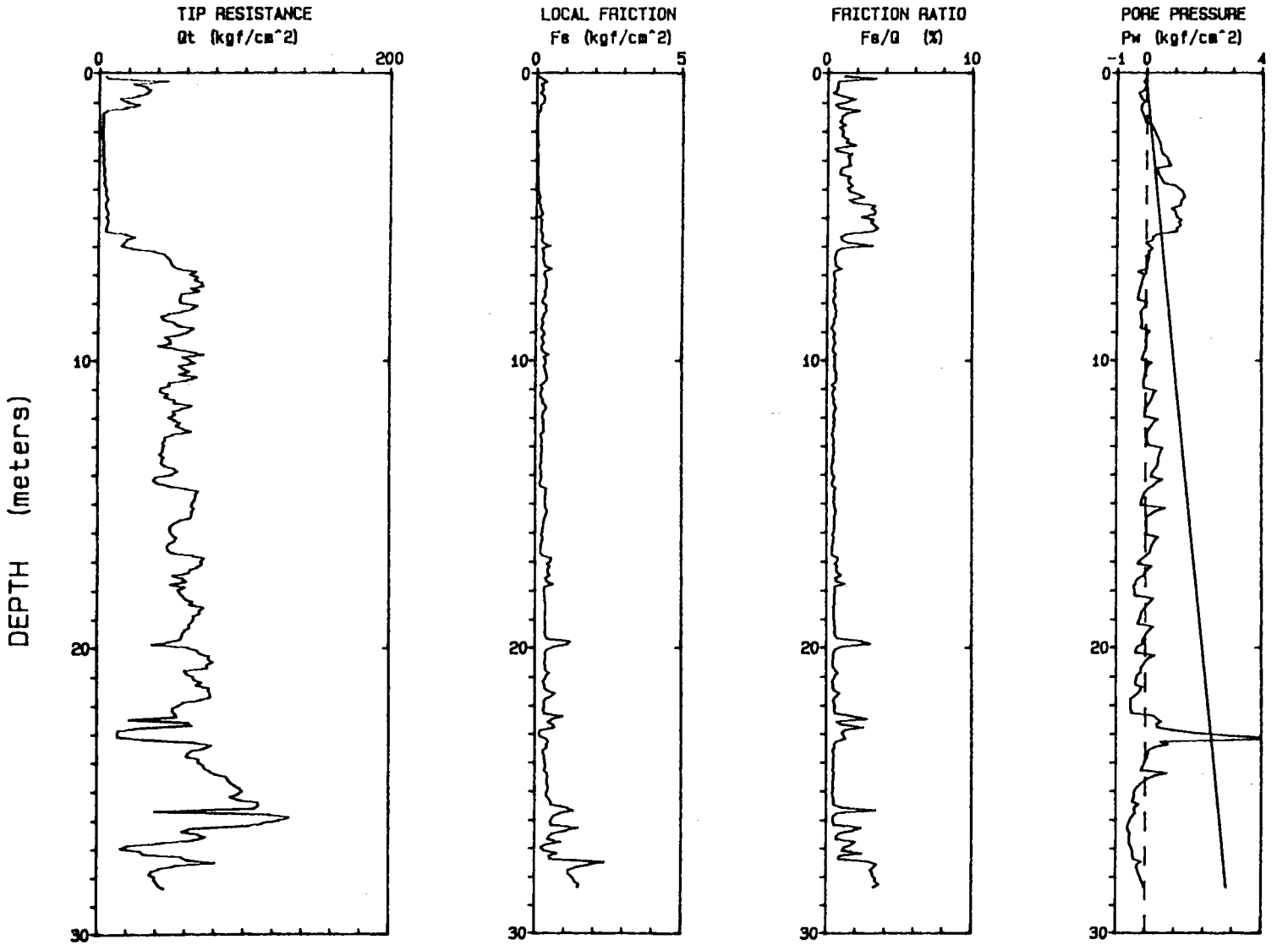
Max Depth : 27.00 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 03-24-95 08:56
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H10 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

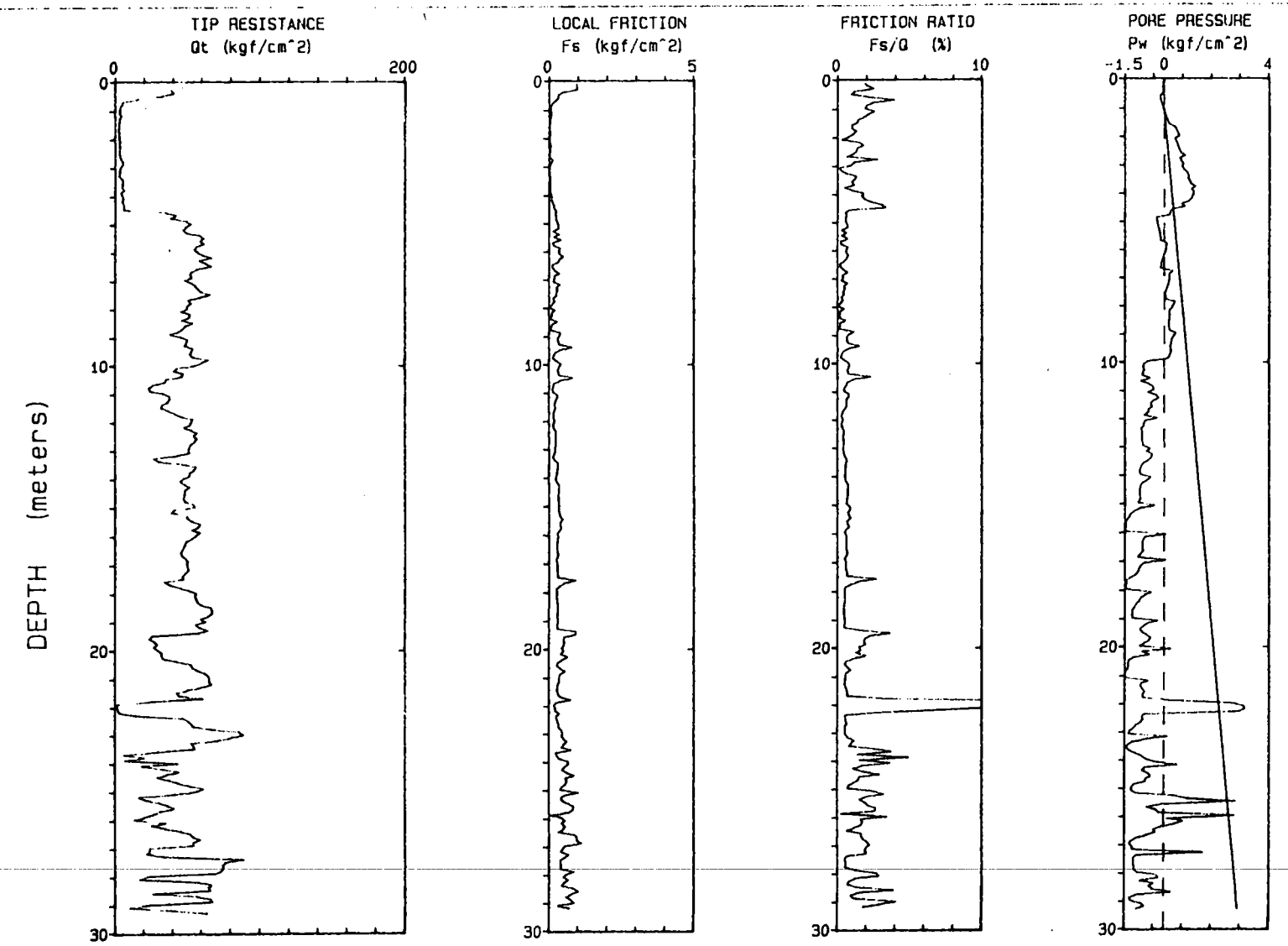
Max Depth : 28.40 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 06-07-95 15:28
Cone Used : 436TC

Sounding : KH-H11 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

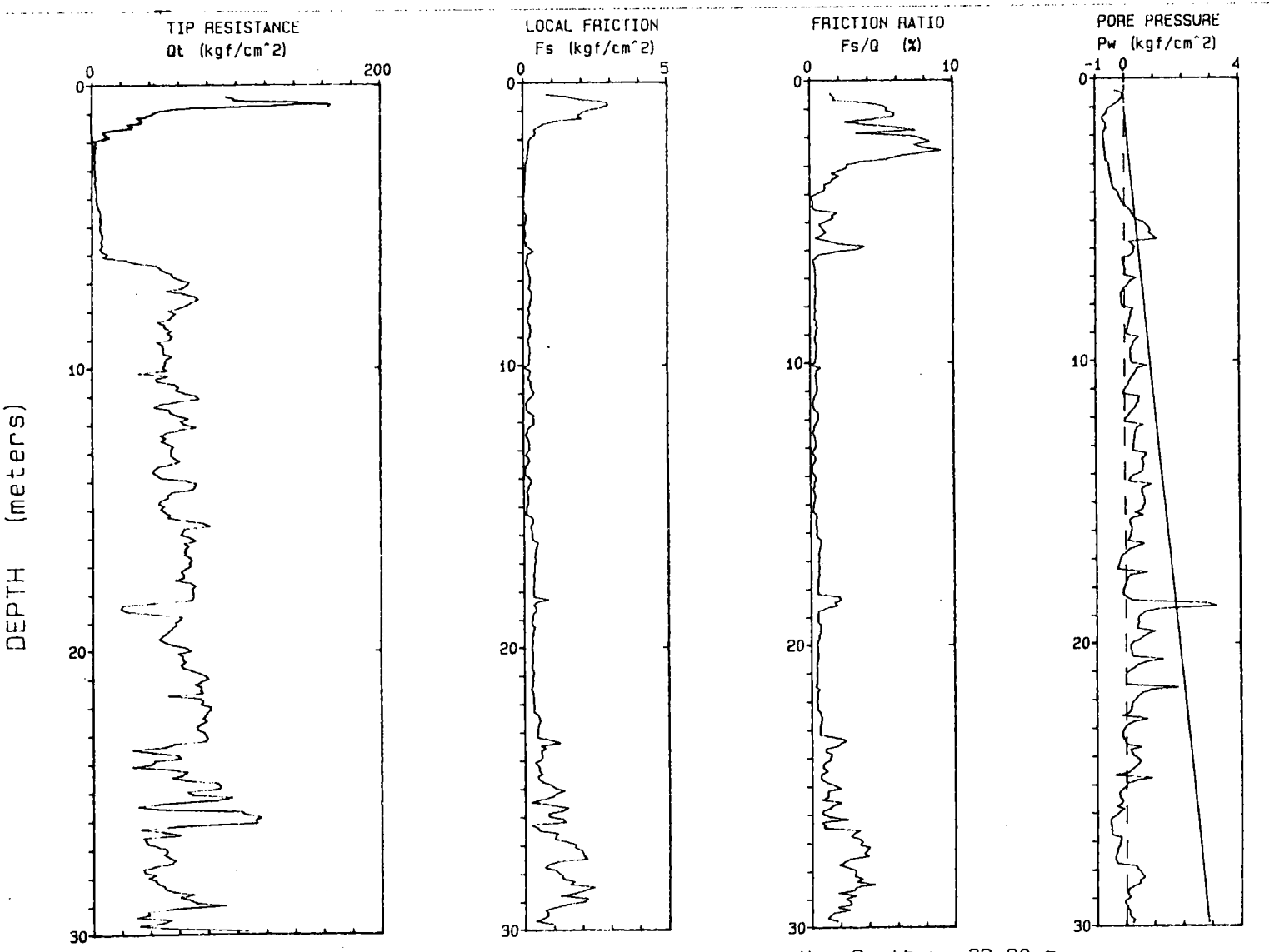
Max Depth : 29.30 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 06-08-95 10:36
Cone Used : 396

Sounding : KH-H12 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

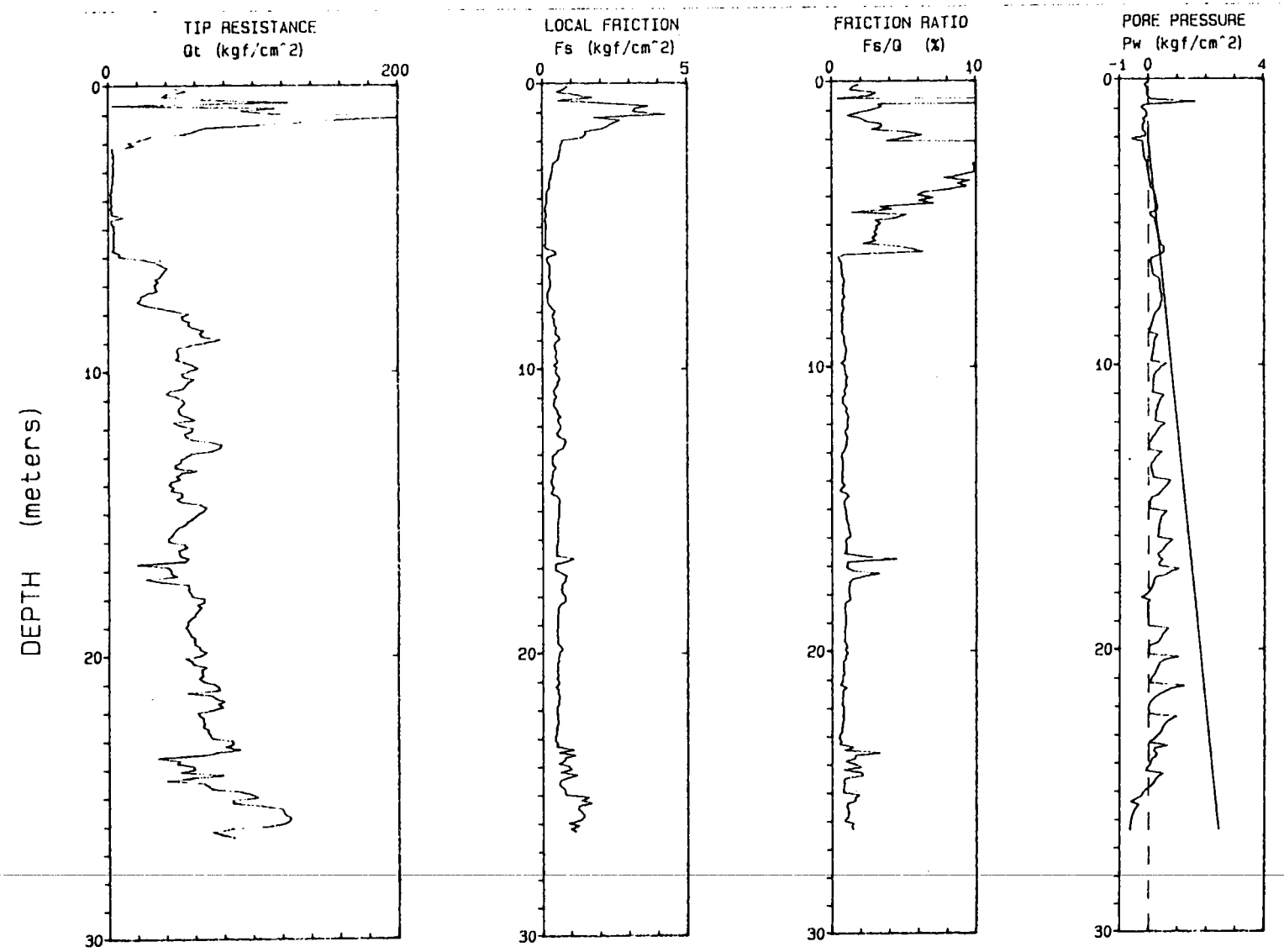
Max Depth : 29.90 m

JHMT

Operator : CH&SU
Location : K.H.HARBOR

CPT Date : 06-09-95 14:43
Cone Used : 396

Sounding : KH-H13 Pg 1 / 1
Job No. : NO.5 CON.CENTER



Depth Increment : .1 m

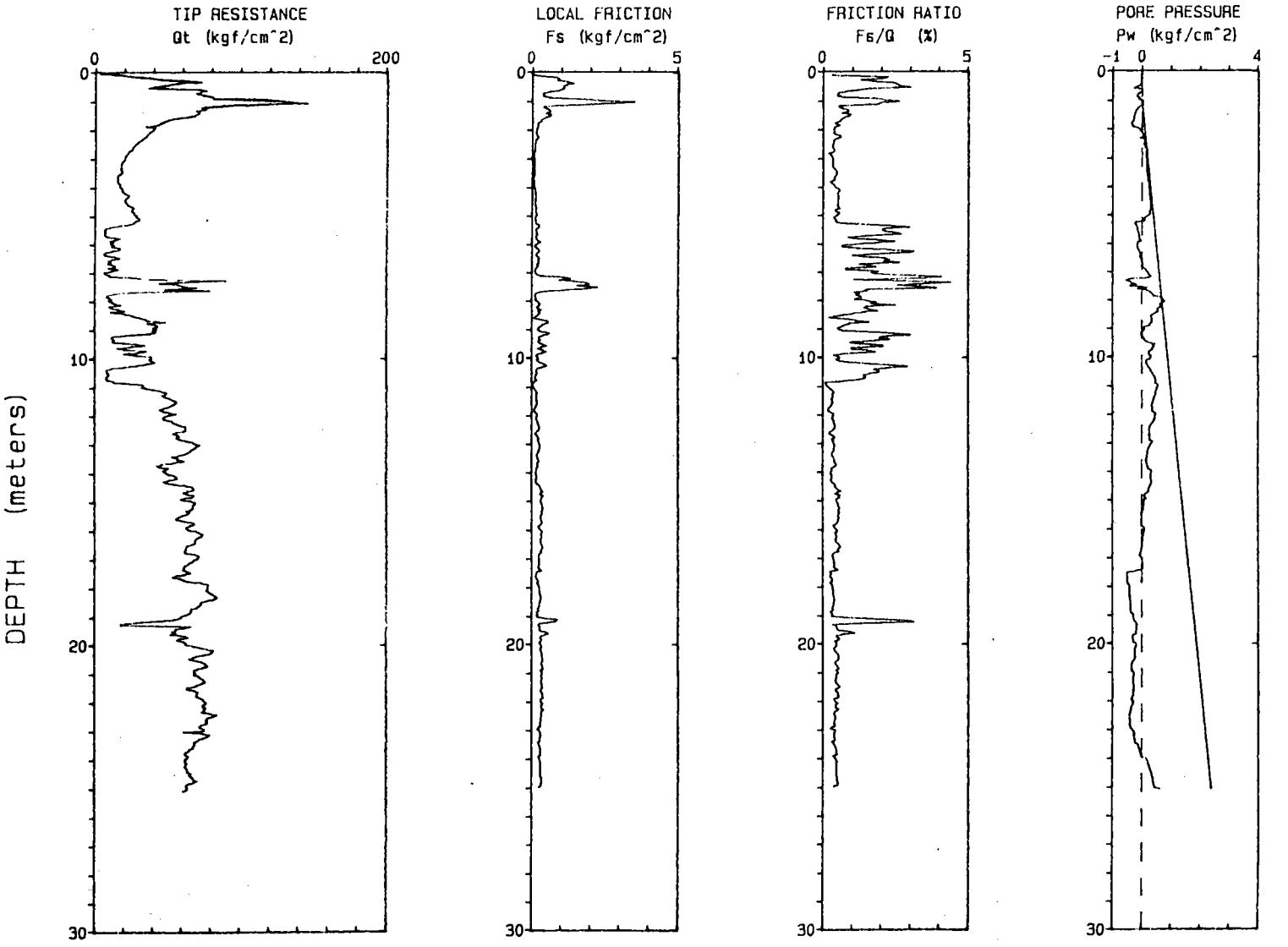
Max Depth : 26.40 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-20-95 10:46
Cone Used : 417

Sounding : CPTK49 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-14



Depth Increment : .05 m

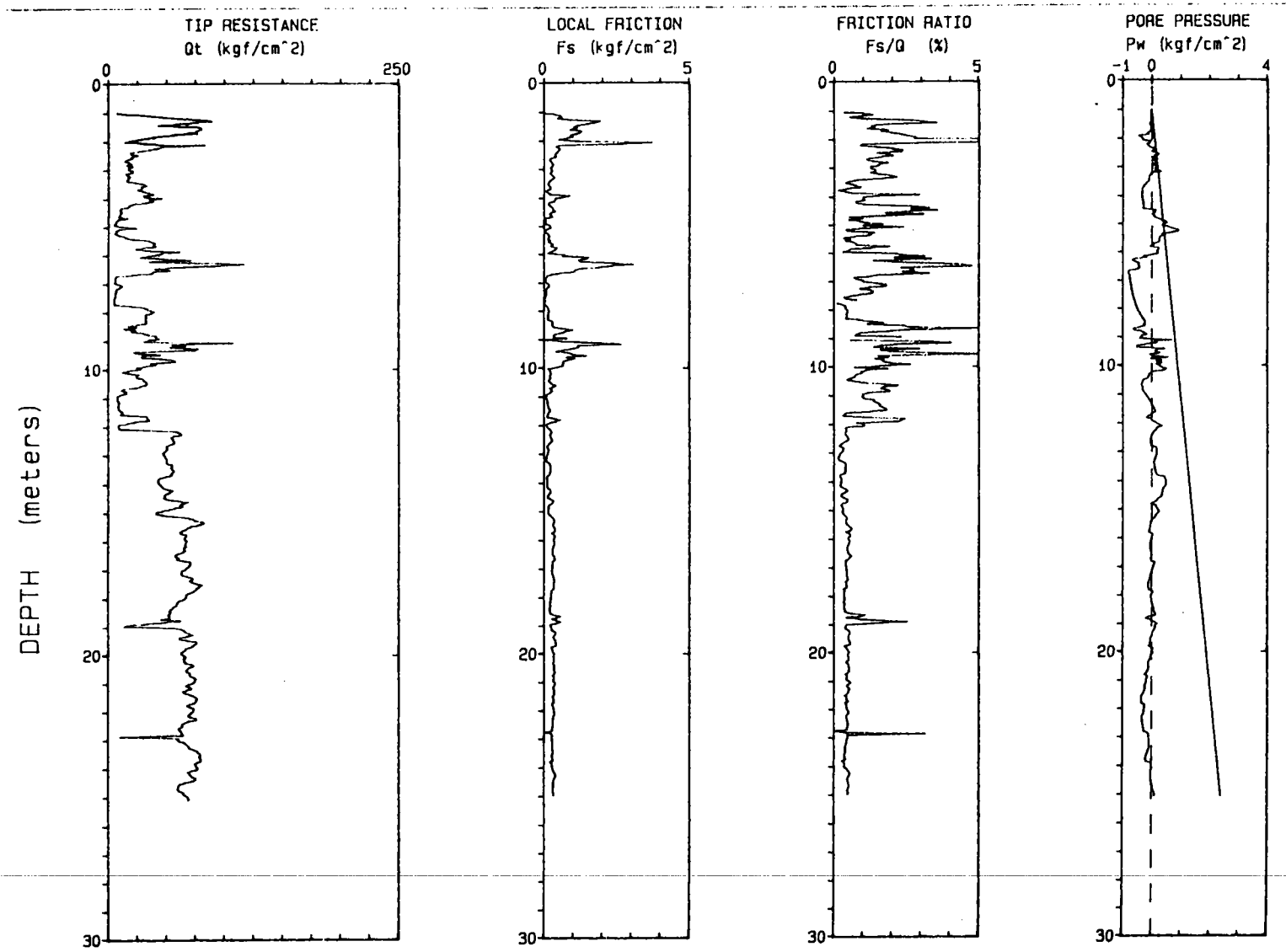
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-20-95 11:40
Cone Used : 417

Sounding : CPTK50 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-15

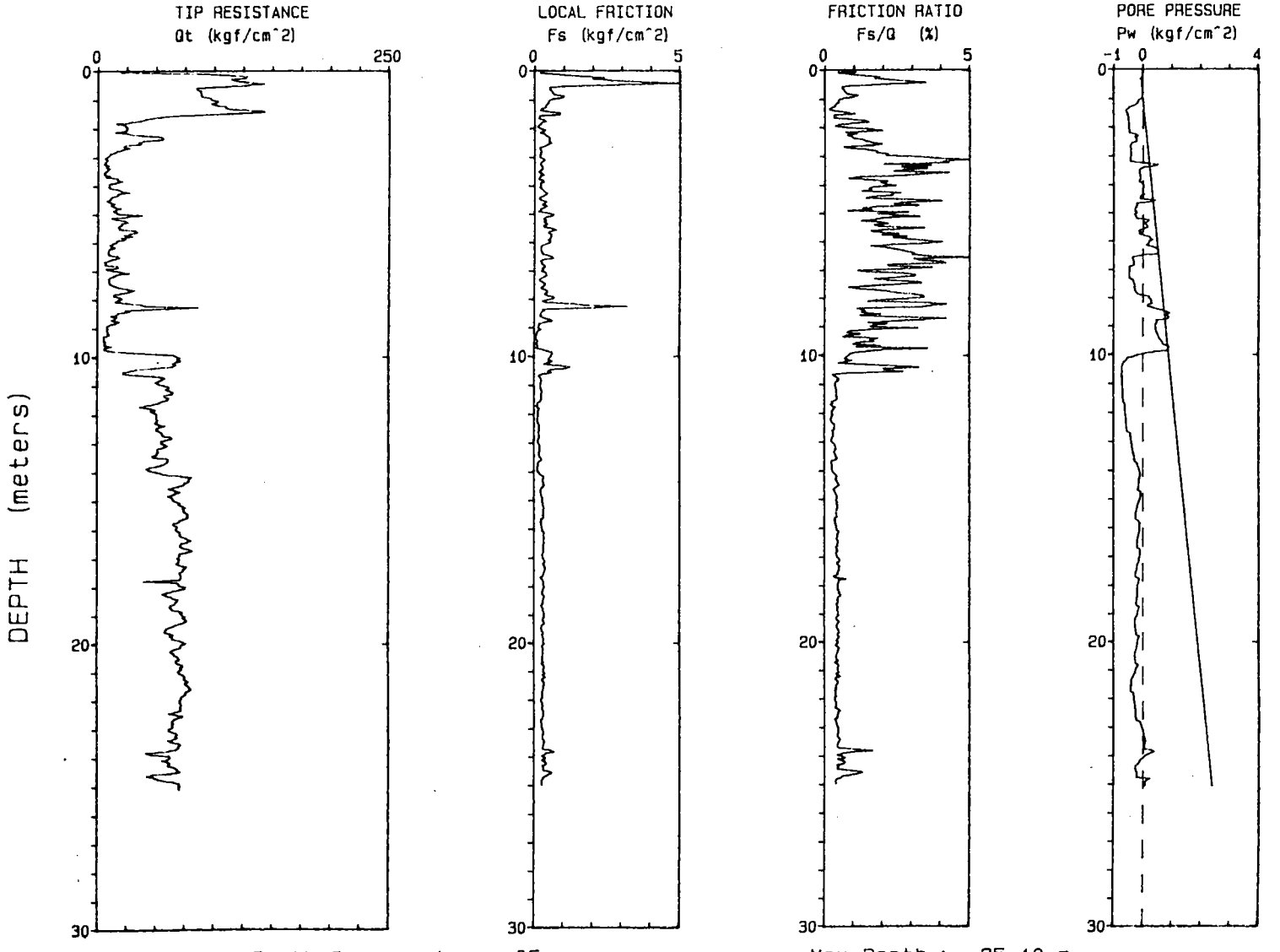


Depth Increment : .05 m

Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
CPT Date : 06-20-95 13:02
Sounding : CPTK53 Pg 1 / 1
Location : KAO-SHUNG
Cone Used : 417
Job No. : BORE-16



Depth Increment : .05 m

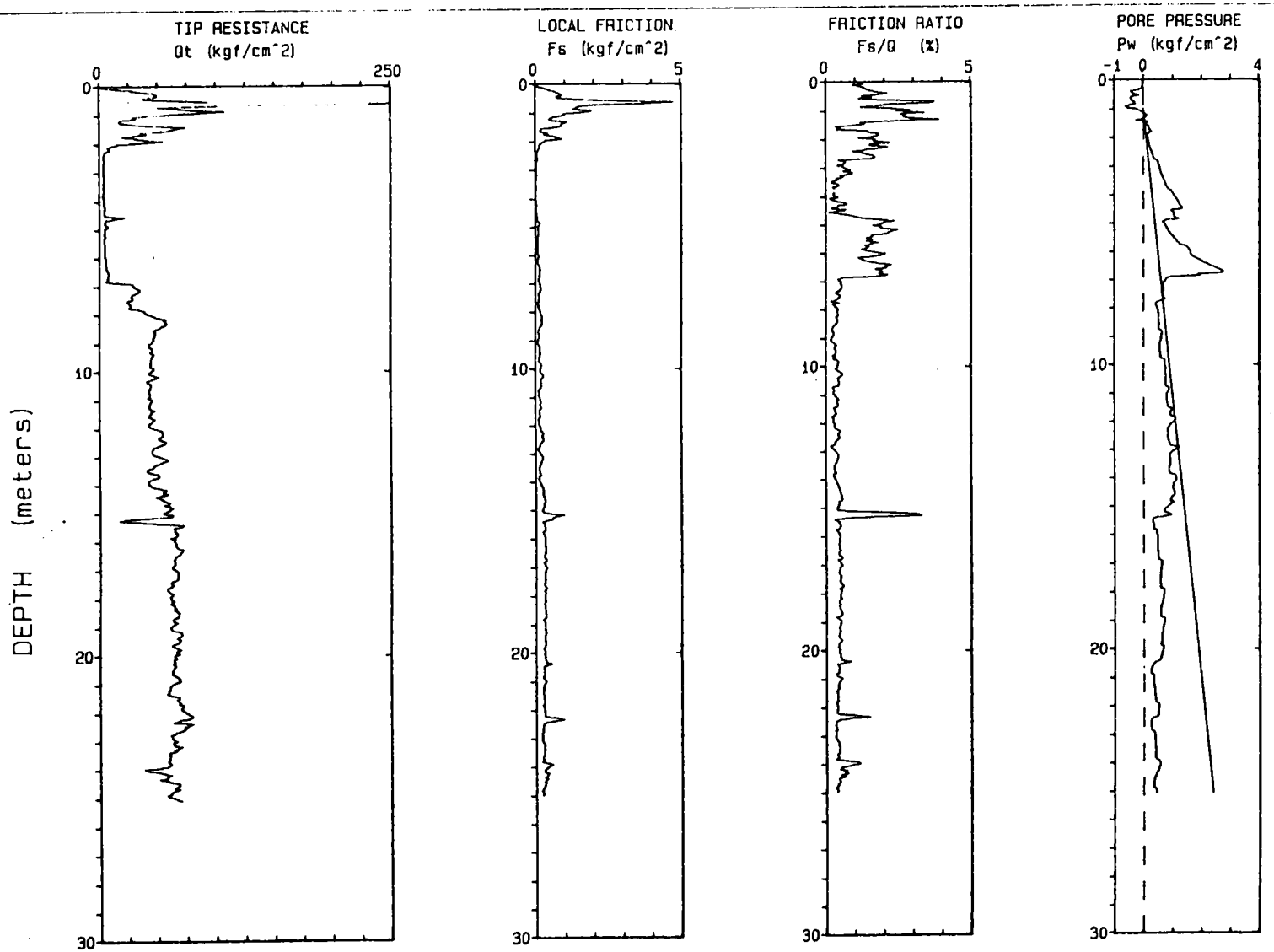
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-20-95 14:16
Cone Used : 417

Sounding : CPTK54 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-17



Depth Increment : .05 m

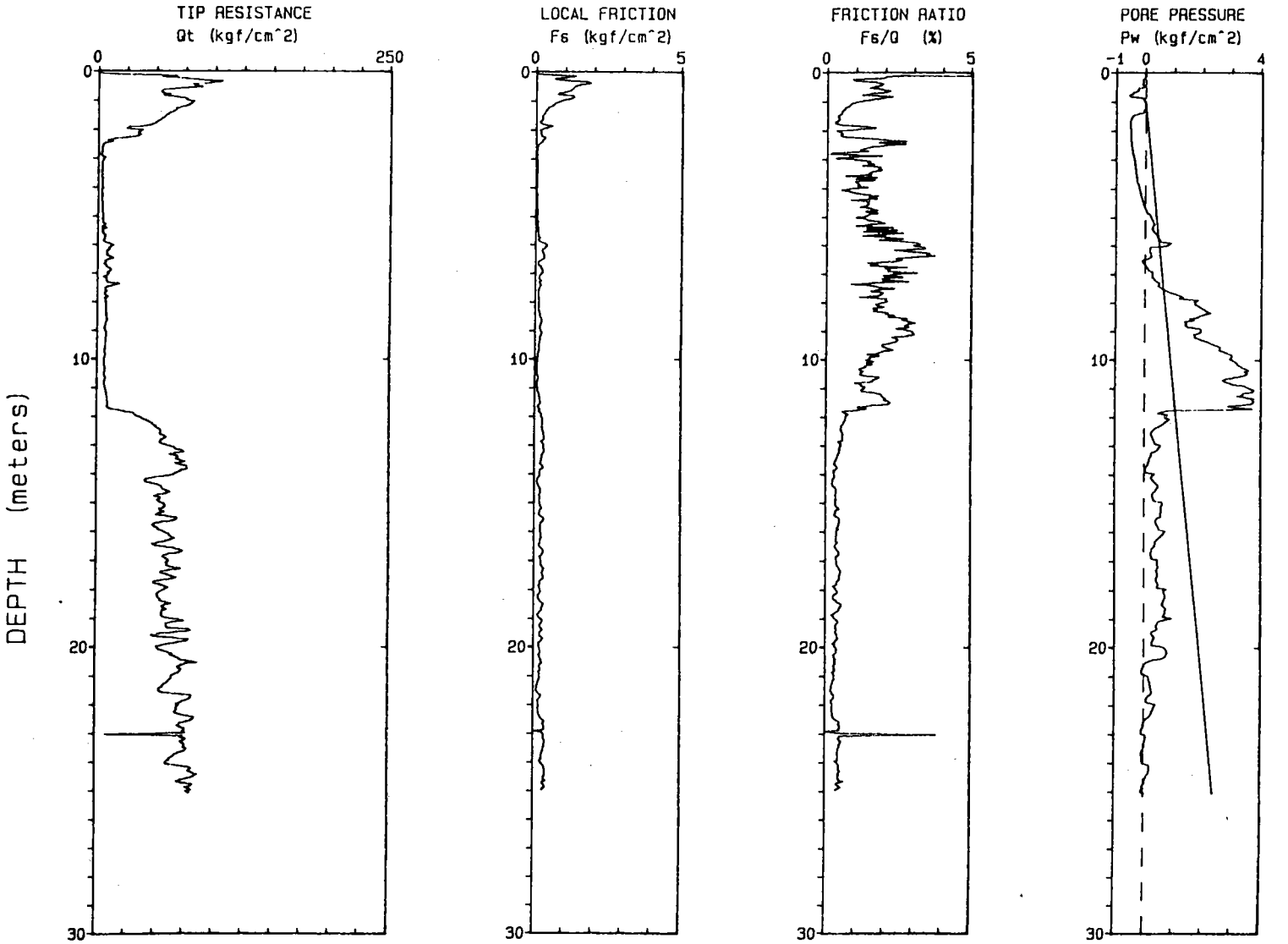
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-20-95 15: 18
Cone Used : 417

Sounding : CPTK55 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-18



Depth Increment : .05 m

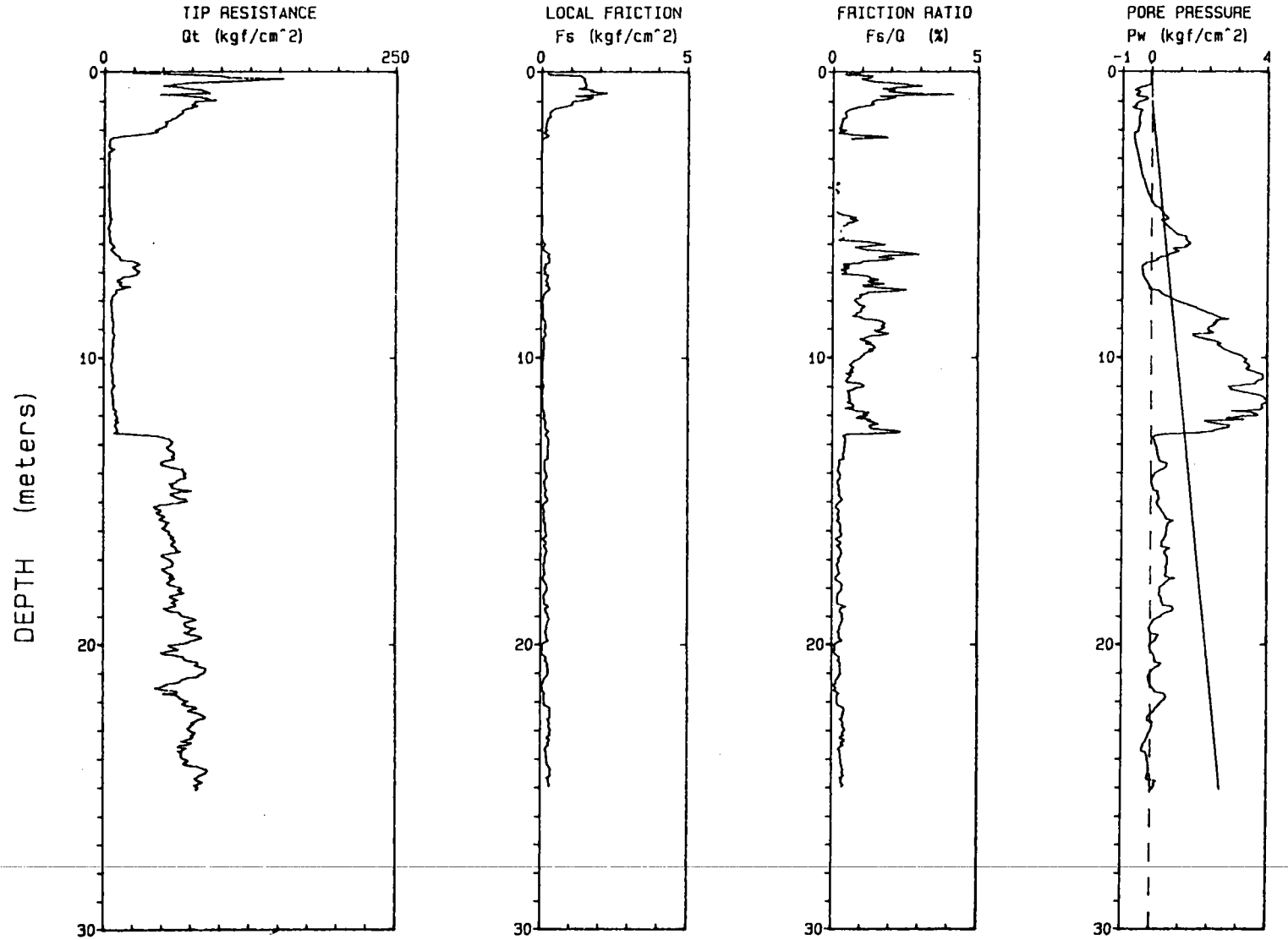
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-20-95 16:54
Cone Used : 417

Sounding : CPTK56 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-19



Depth Increment : .05 m

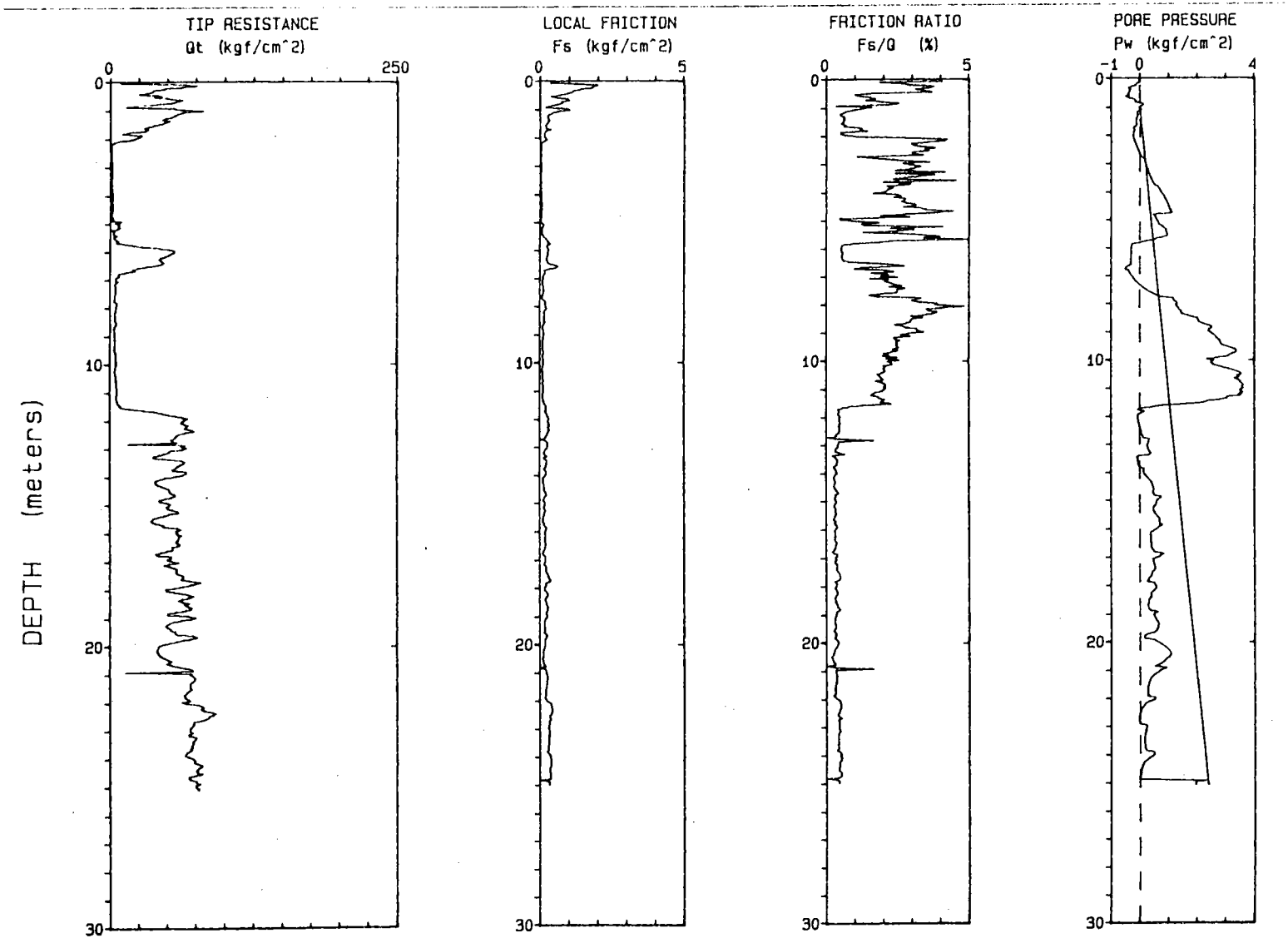
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-20-95 18:21
Cone Used : 417

Sounding : CPTK58 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-20



Depth Increment : .05 m

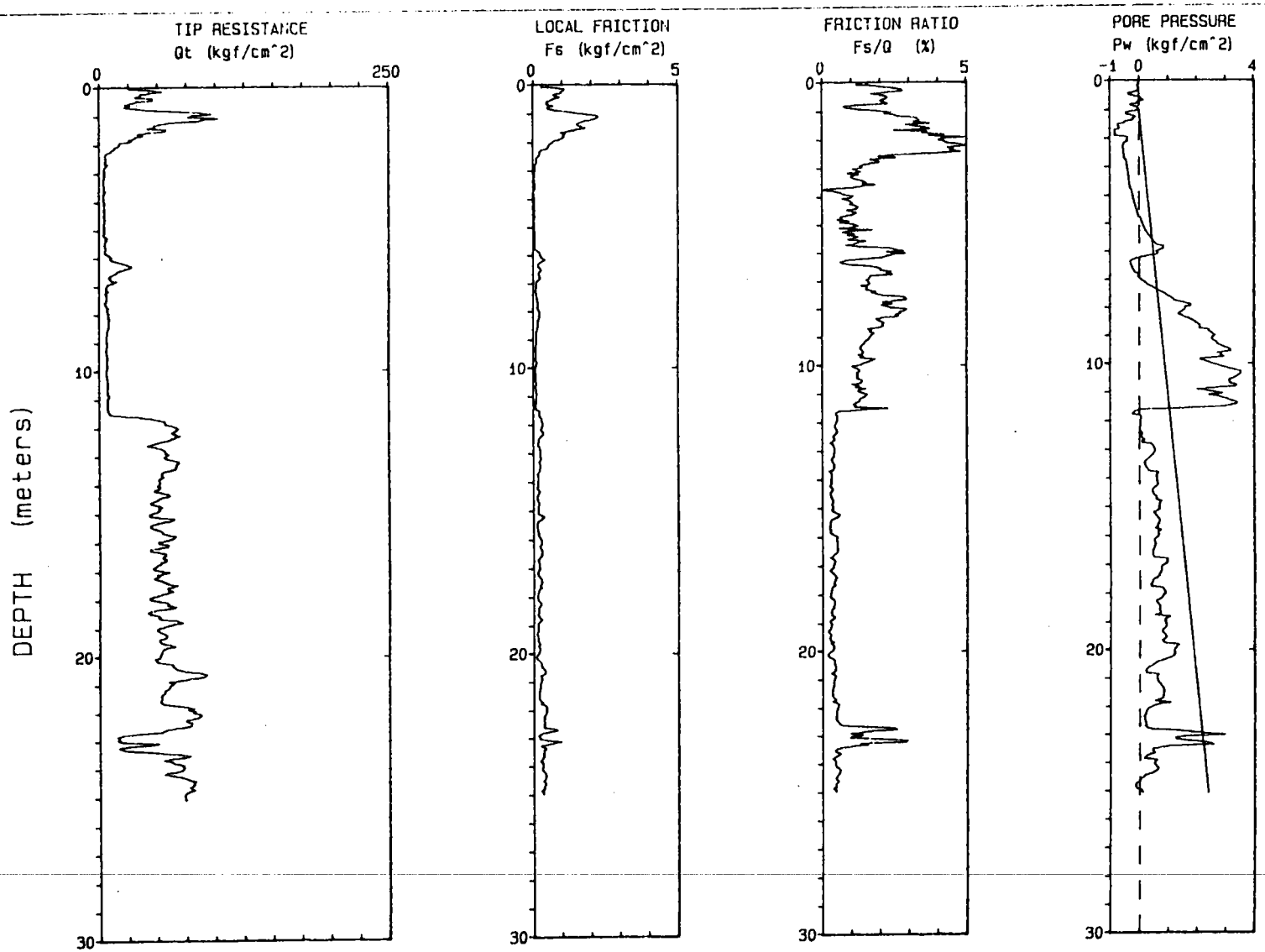
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-21-95 08:57
Cone Used : 417

Sounding : CPTK59 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-21

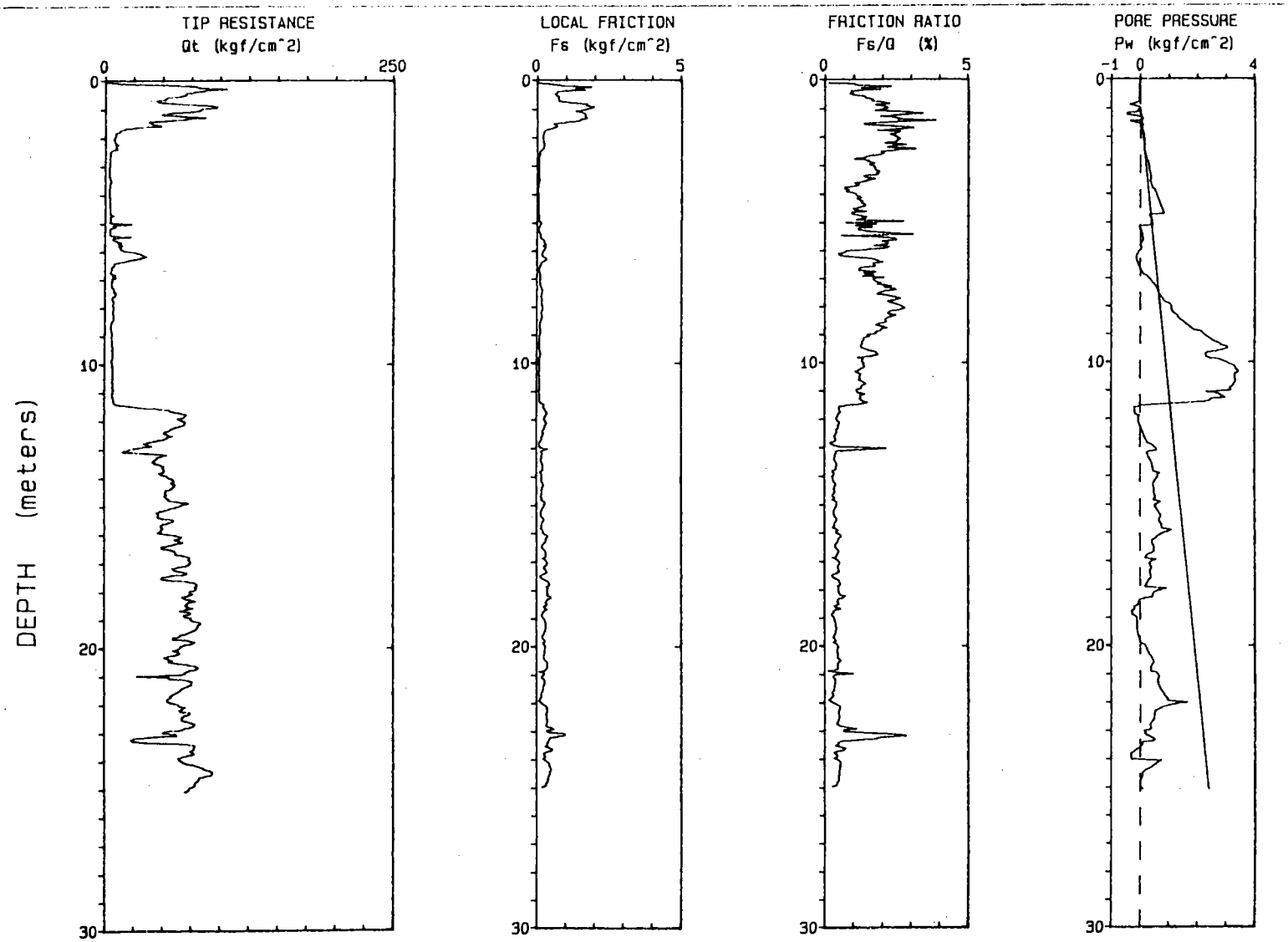


Depth Increment : .05 m

Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
CPT Date : 06-21-95 09:52
Sounding : CPTK62 Pg 1 / 1
Location : KAO-SHUNG
Cone Used : 417
Job No. : BORE-22



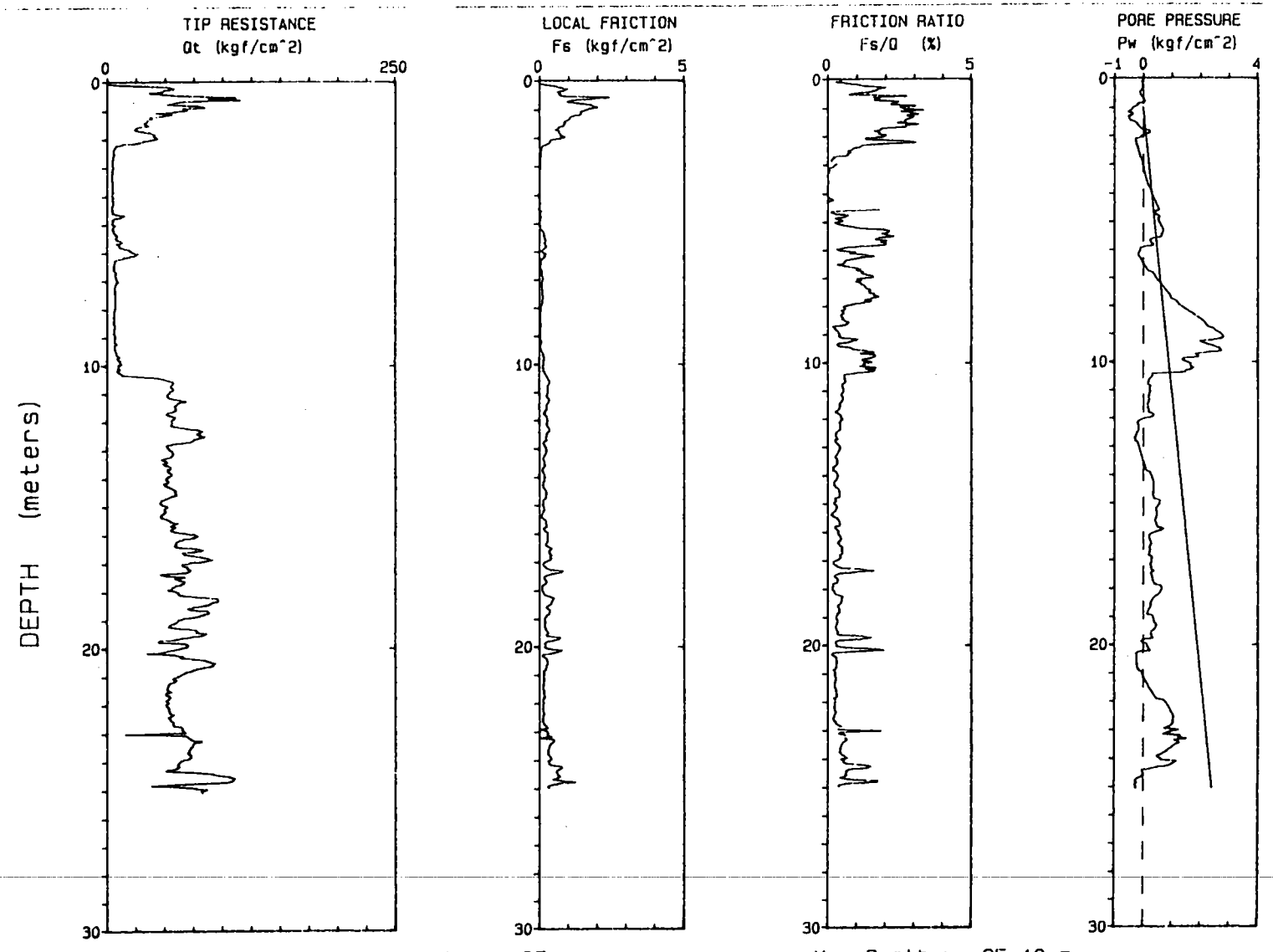
Depth Increment : .05 m
Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : KAO-SHUNG

CPT Date : 06-21-95 10:50
Cone Used : 417

Sounding : CPTK63 Pg 1 / 1
Job No. : BORE-23

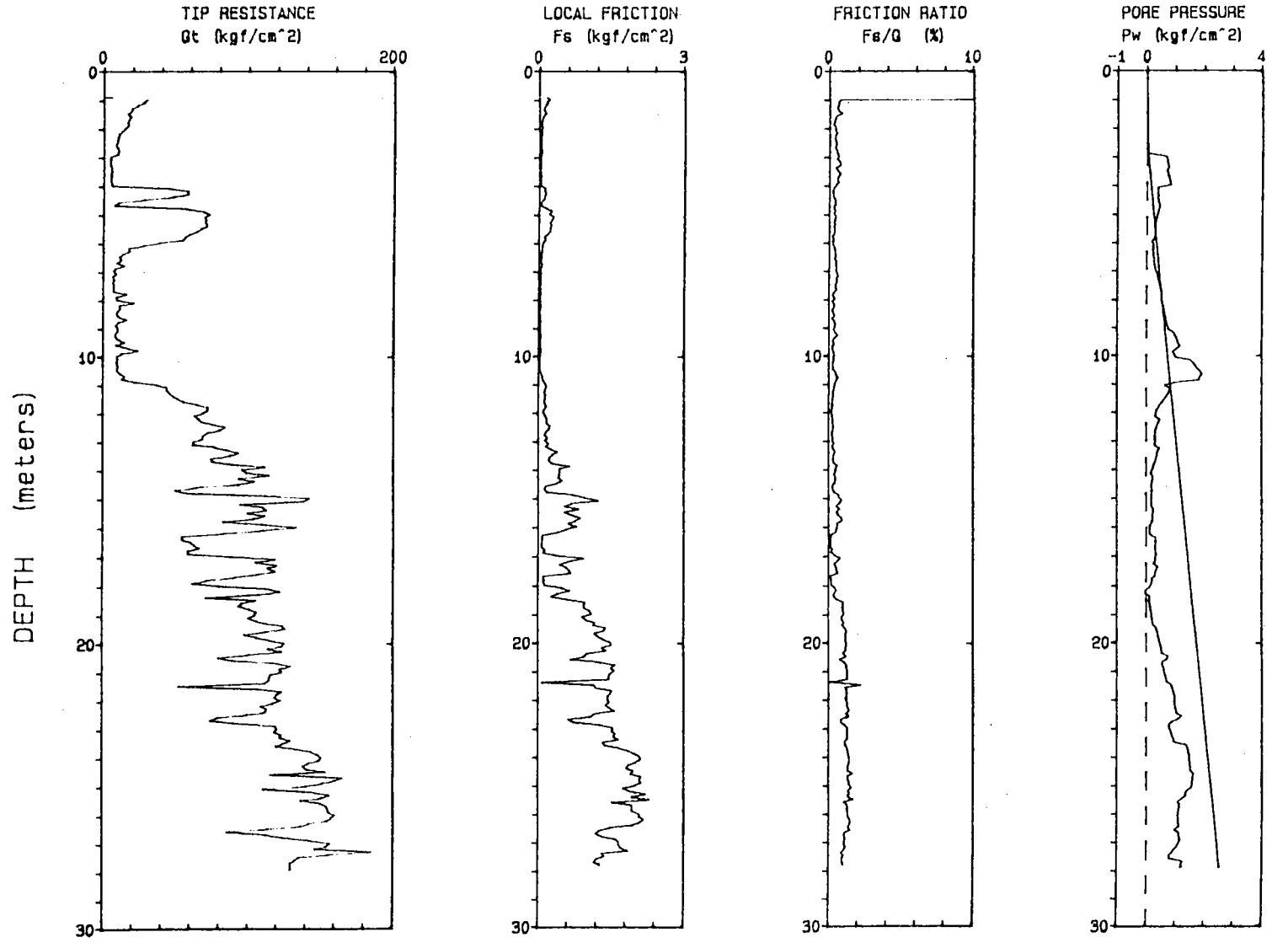


Depth Increment : .05 m

Max Depth : 25.10 m

IHMT

Operator : CH&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-03-95 13:21
Cone Used : 396
Sounding : APH001 Pg 1 / 1
Job No. : APH01

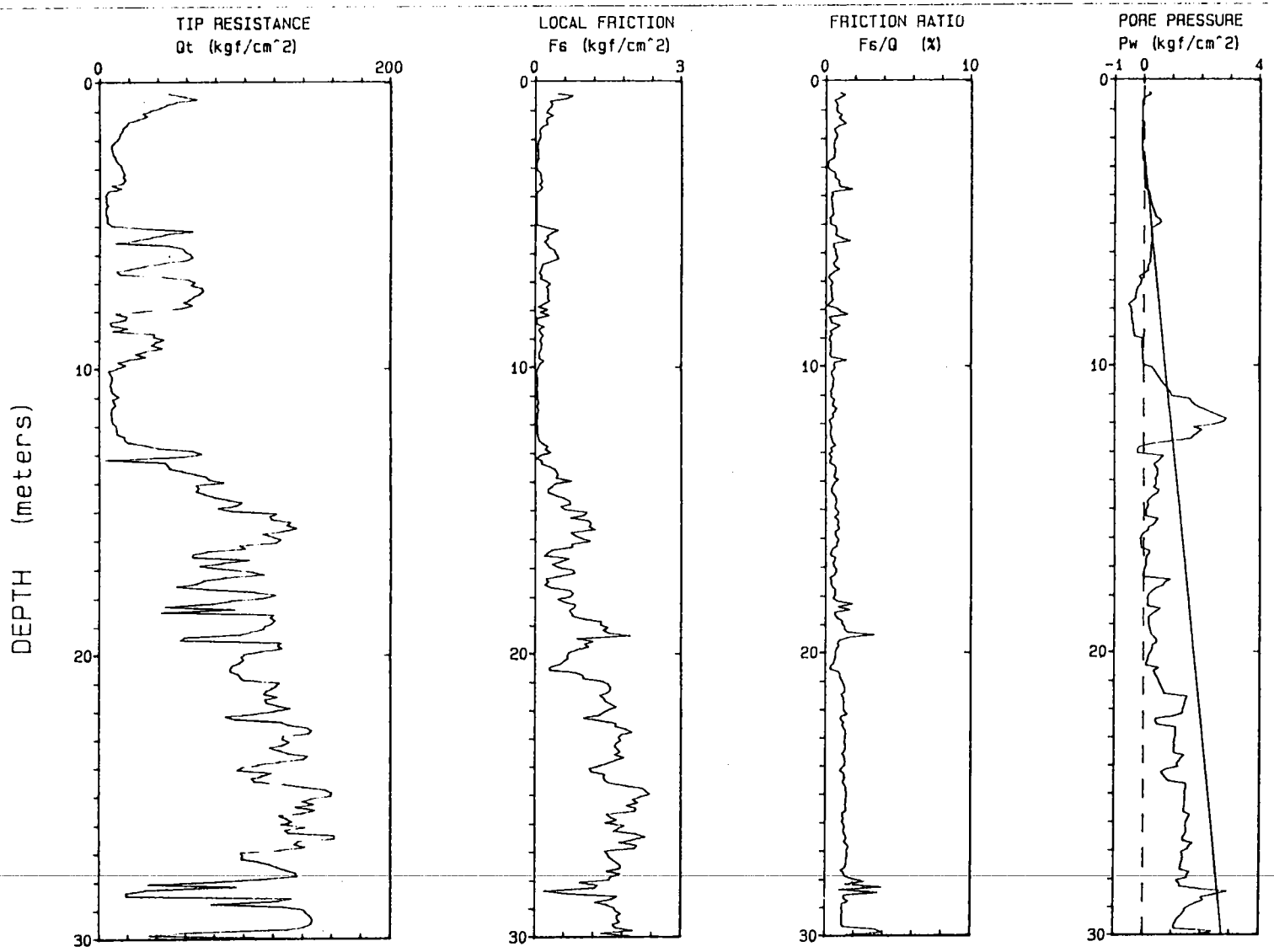


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 27.90 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-04-95 09:31
Cone Used : 396
Sounding : APH002 Pg 1 / 2
Job No. : APH02

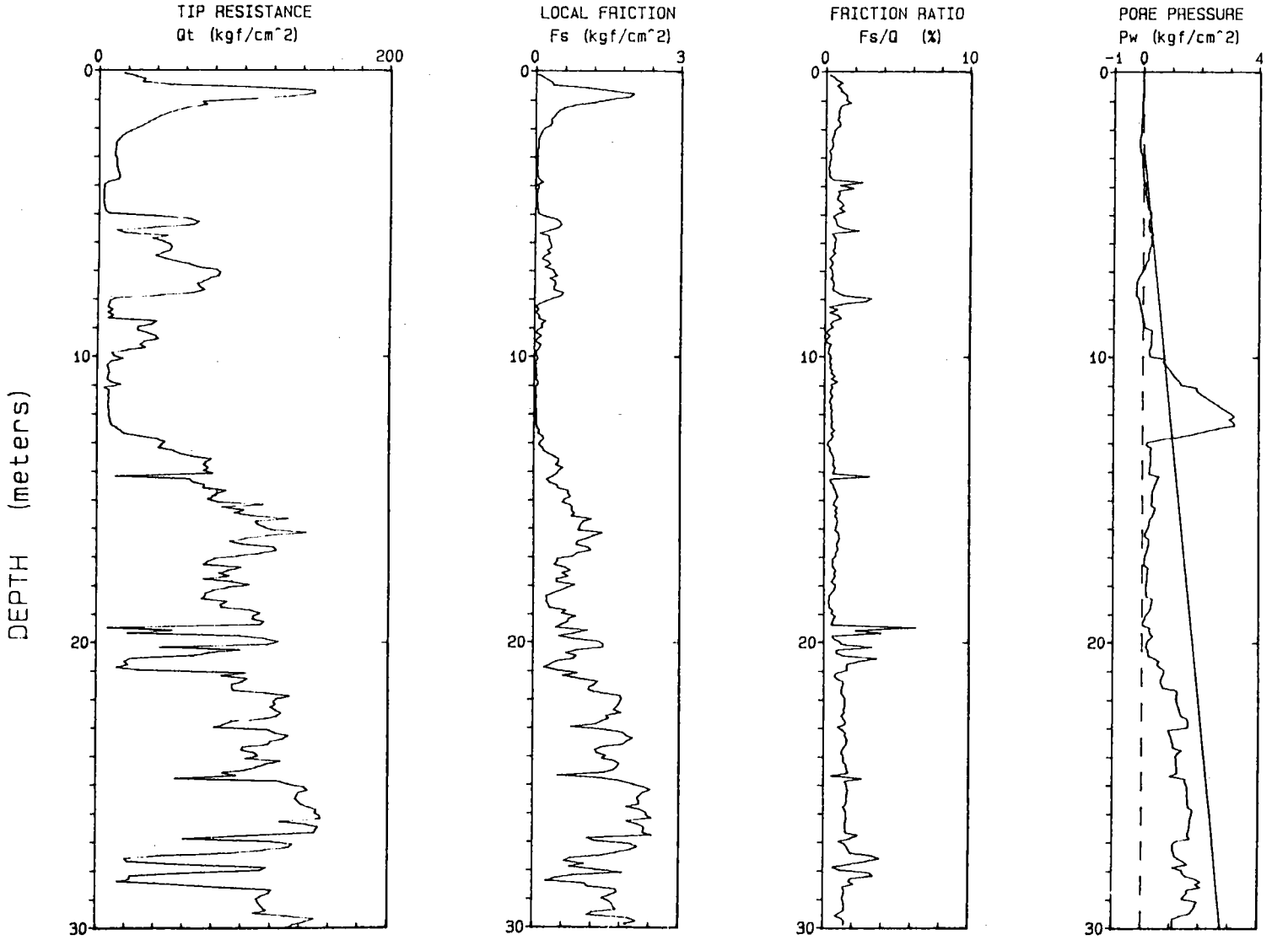


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.50 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-05-95 09:00
Cone Used : 396
Sounding : APH003 Pg 1 / 1
Job No. : APH03



Depth Increment : .1 m

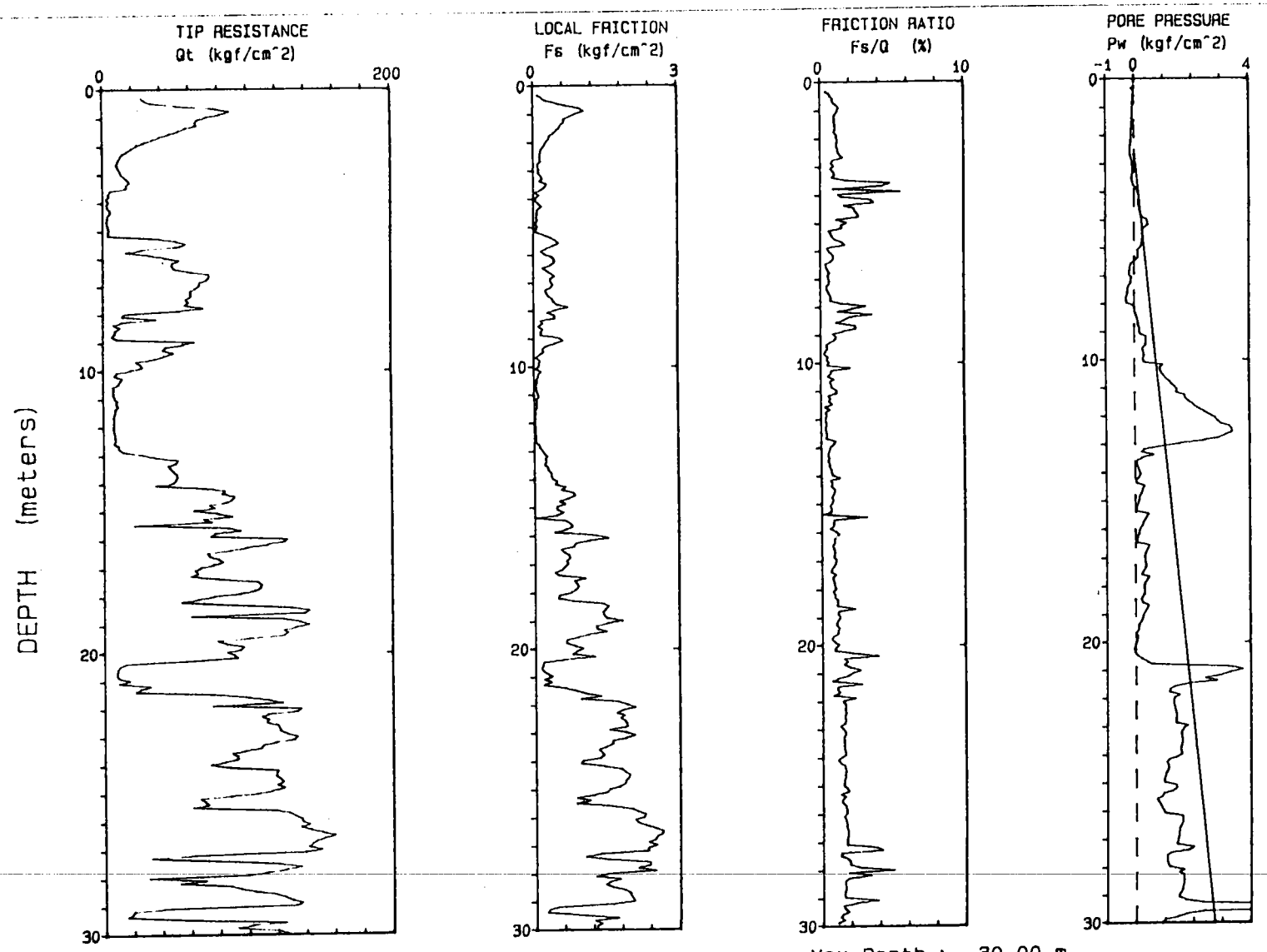
Max Depth : 30.00 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR

CPT Date : 10-06-95 08:58
Cone Used : 396

Sounding : APH004 Pg 1 / 1
Job No. : APH04

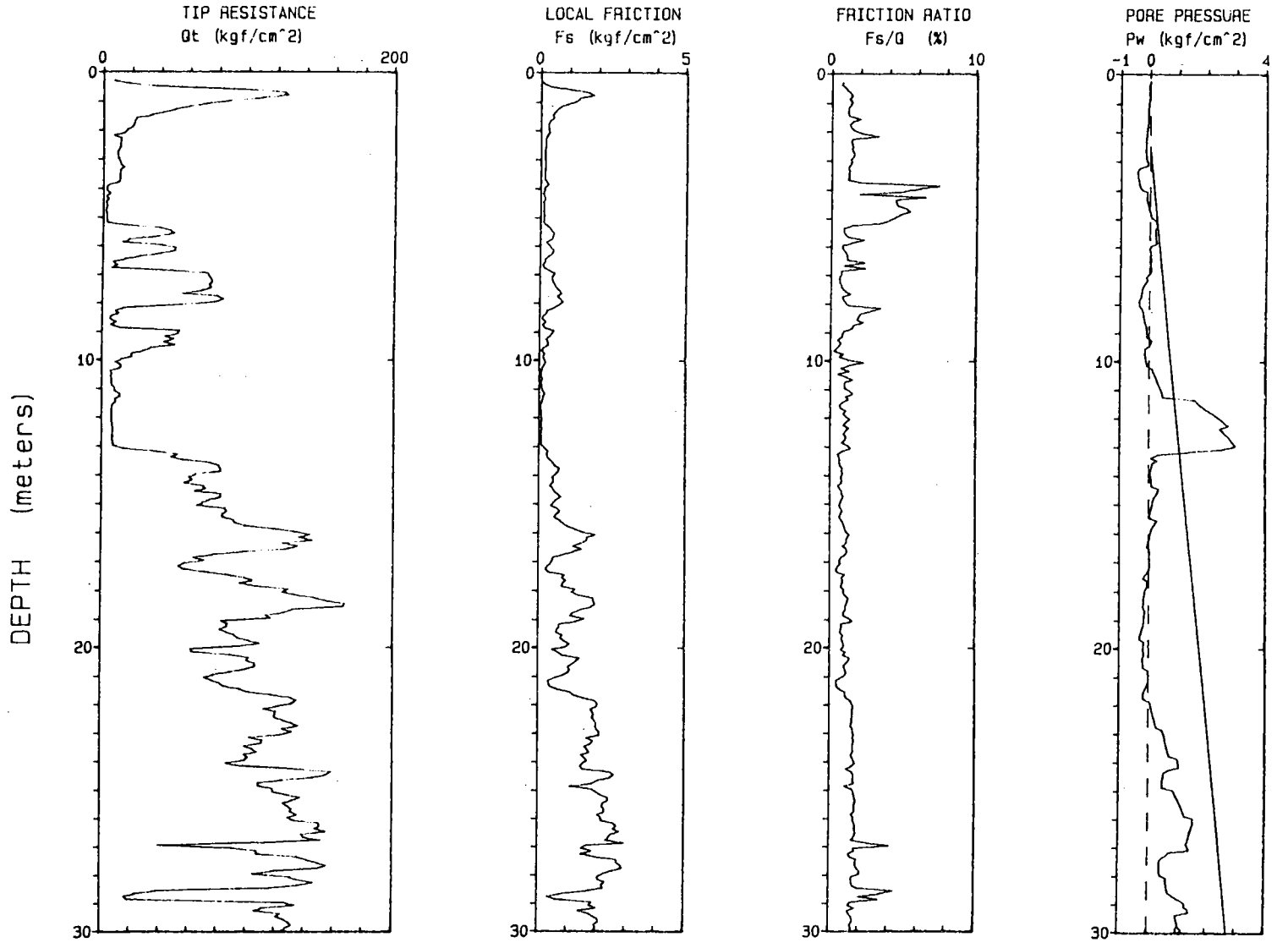


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.00 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-07-95 08:41
Cone Used : 396
Sounding : APH005 Pg 1 / 2
Job No. : APH05

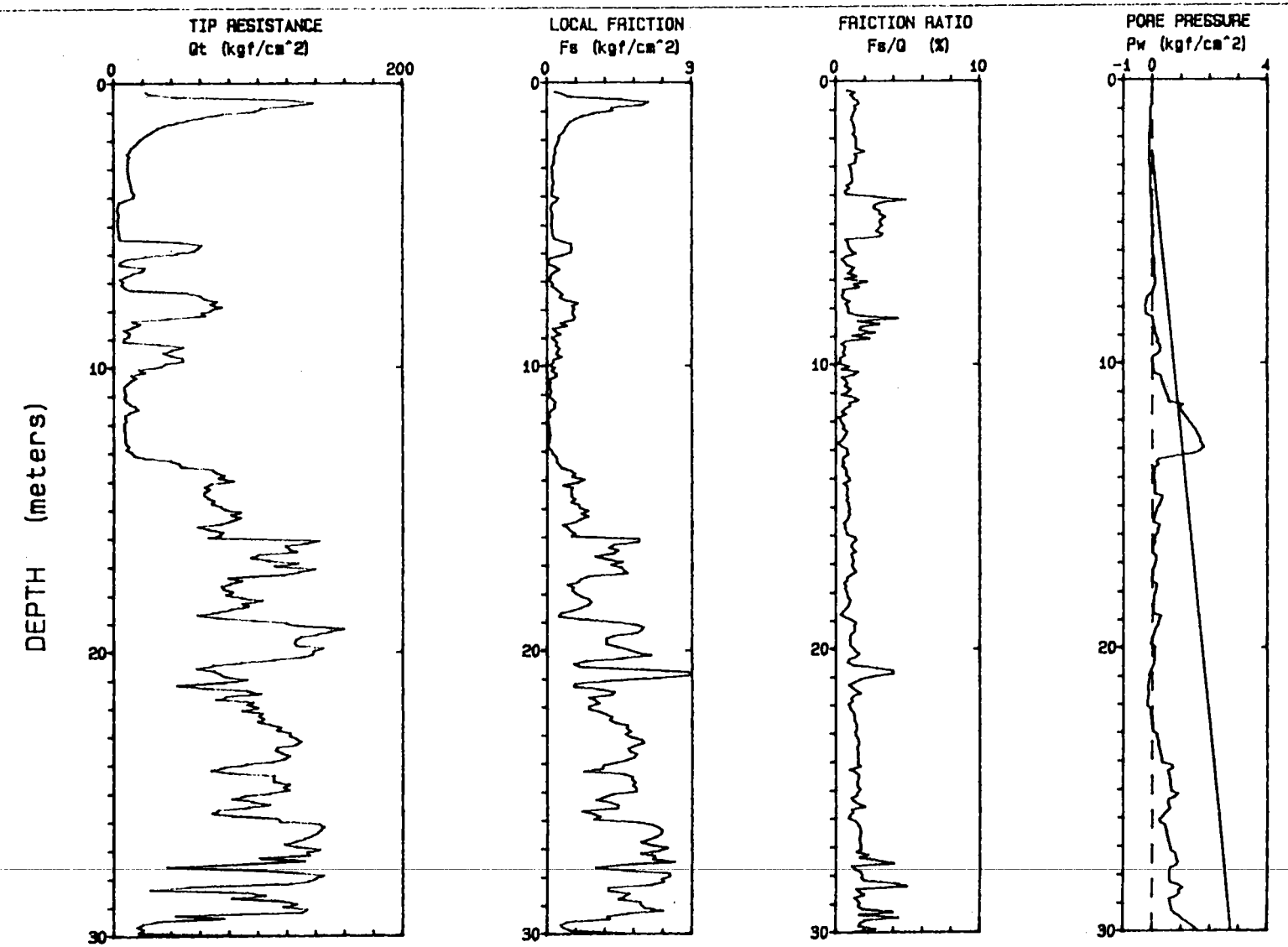


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.10 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-08-95 08:39
Cone Used : 396
Sounding : APH006 Pg 1 / 2
Job No. : APH06

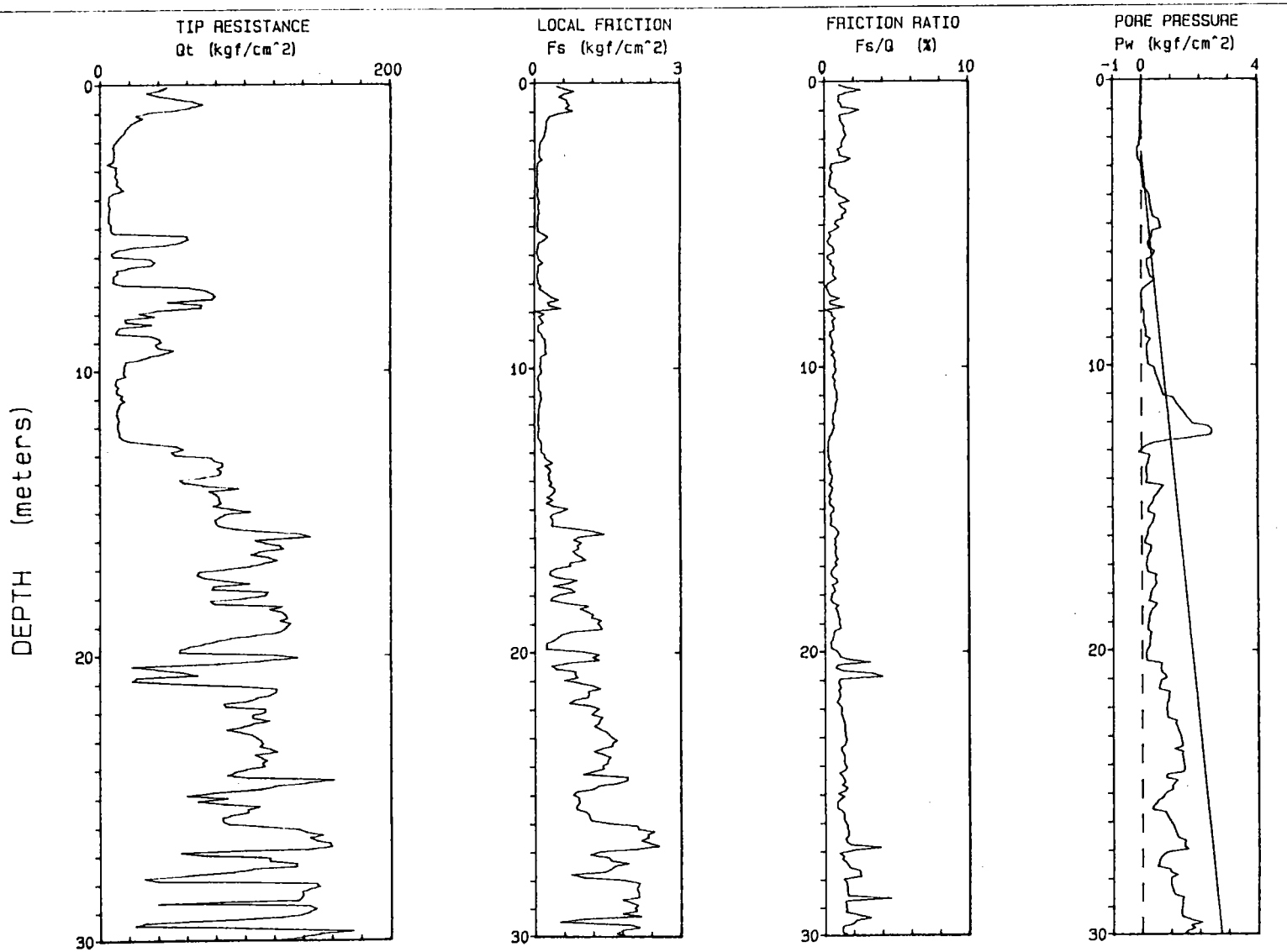


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-17-95 13:53
Cone Used : 396
Sounding : APH007 Pg 1 / 2
Job No. : APH07



Depth Increment : .1 m

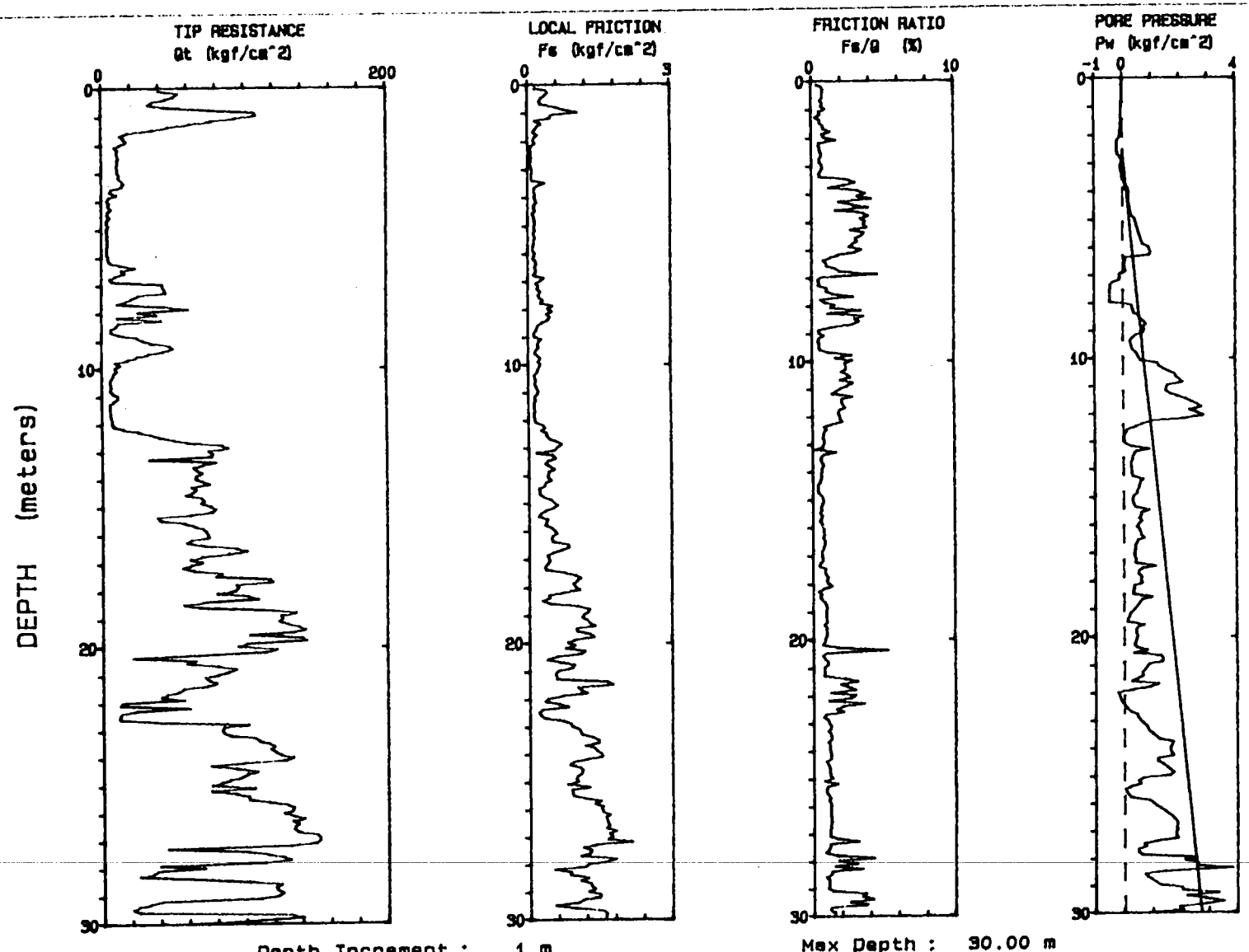
Max Depth : 30.40 m

IHMT

Operator : CHENSSU
Location : AN-PING HARBOR

CPT Date : 10-18-95 09:13
Cone Used : 396

Sounding : APH008 Pg 1 / 1
Job No. : APH08

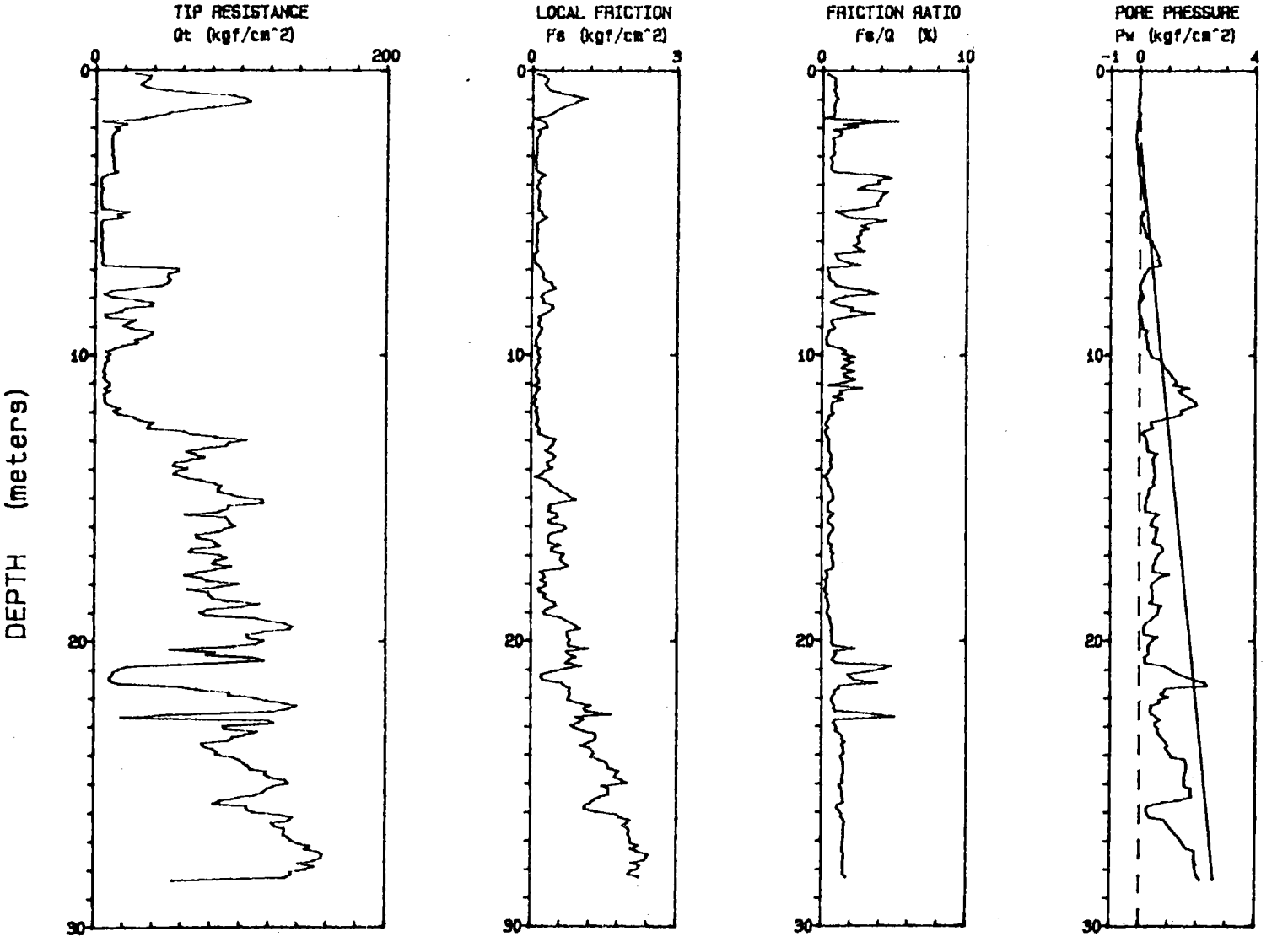


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.00 m

IHMT

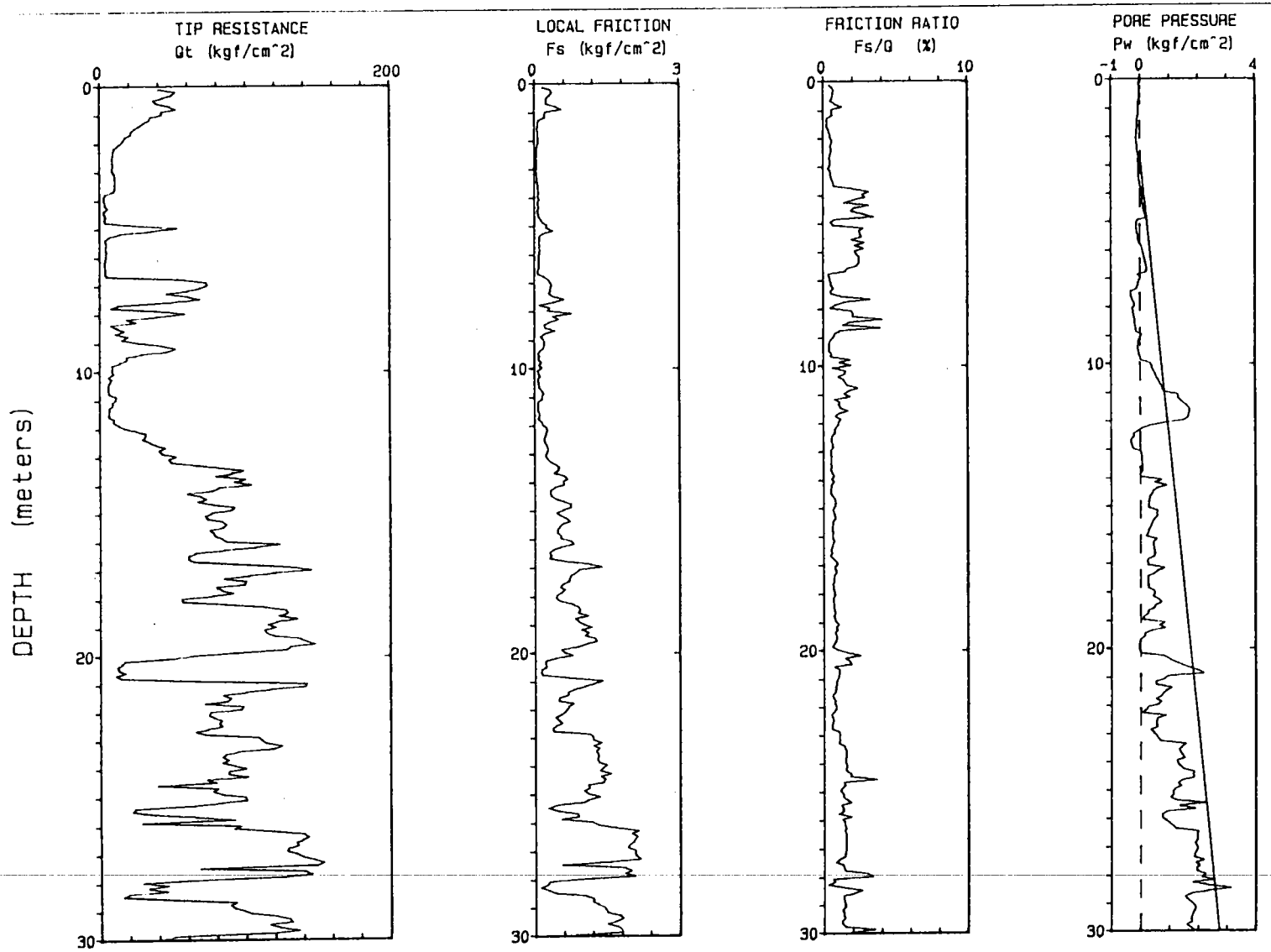
Operator : CHEN&SU
CPT Date : 10-19-95 09:13
Sounding : APH009 Pg 1 / 1
Location : AN-PING HARBOR
Cone Used : 436
Job No. : APH09



Depth Increment : .1 m
Max Depth : 28.40 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR
CPT Date : 10-20-95 08:50
Cone Used : 436
Sounding : APH010 Pg 1 / 2
Job No. : APH10

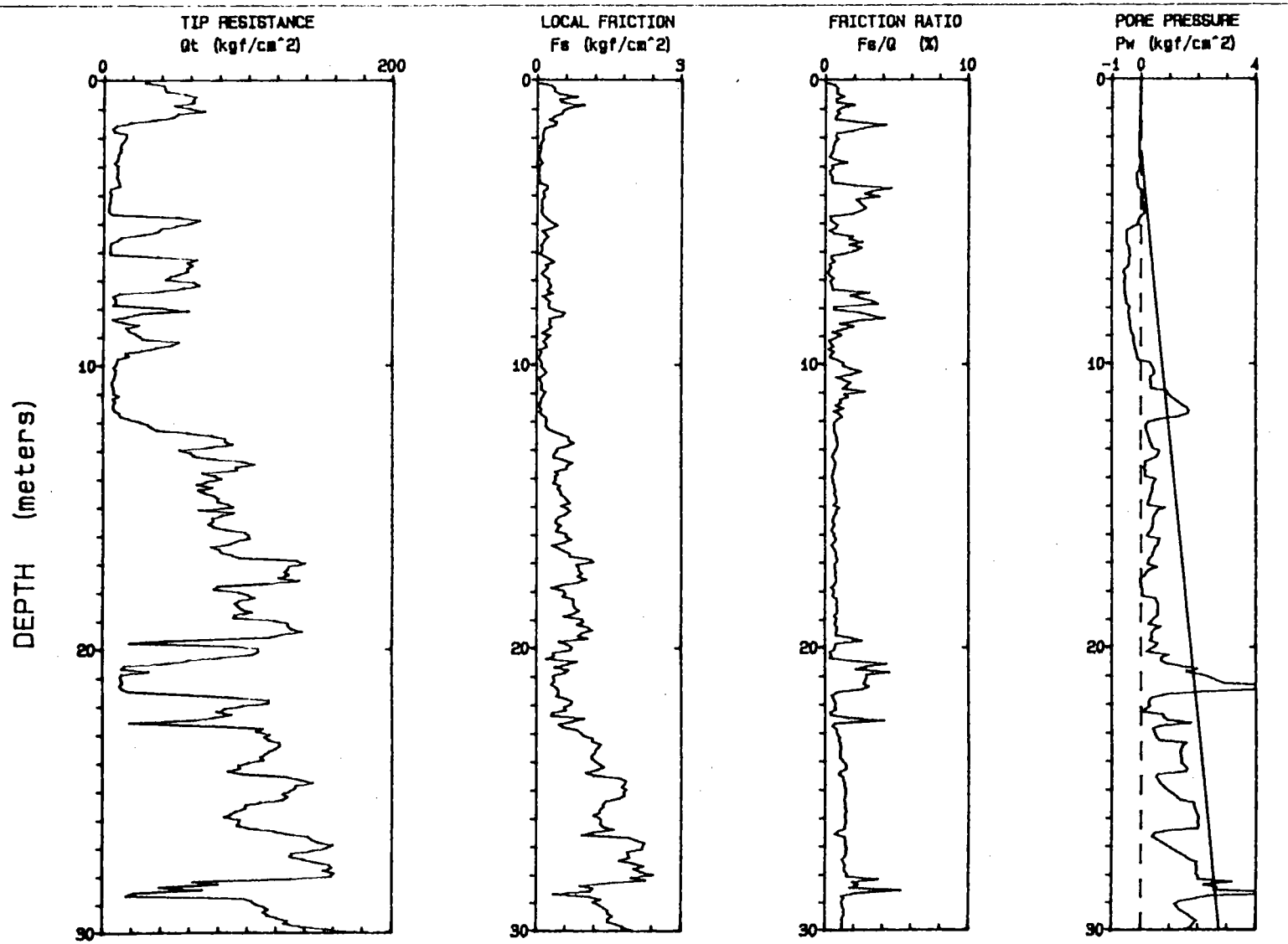


Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.30 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
CPT Date : 10-21-95 09:35
Sounding : APH011 Pg 1 / 2
Location : AN-PING HARBOR
Cone Used : 436
Job No. : APH11



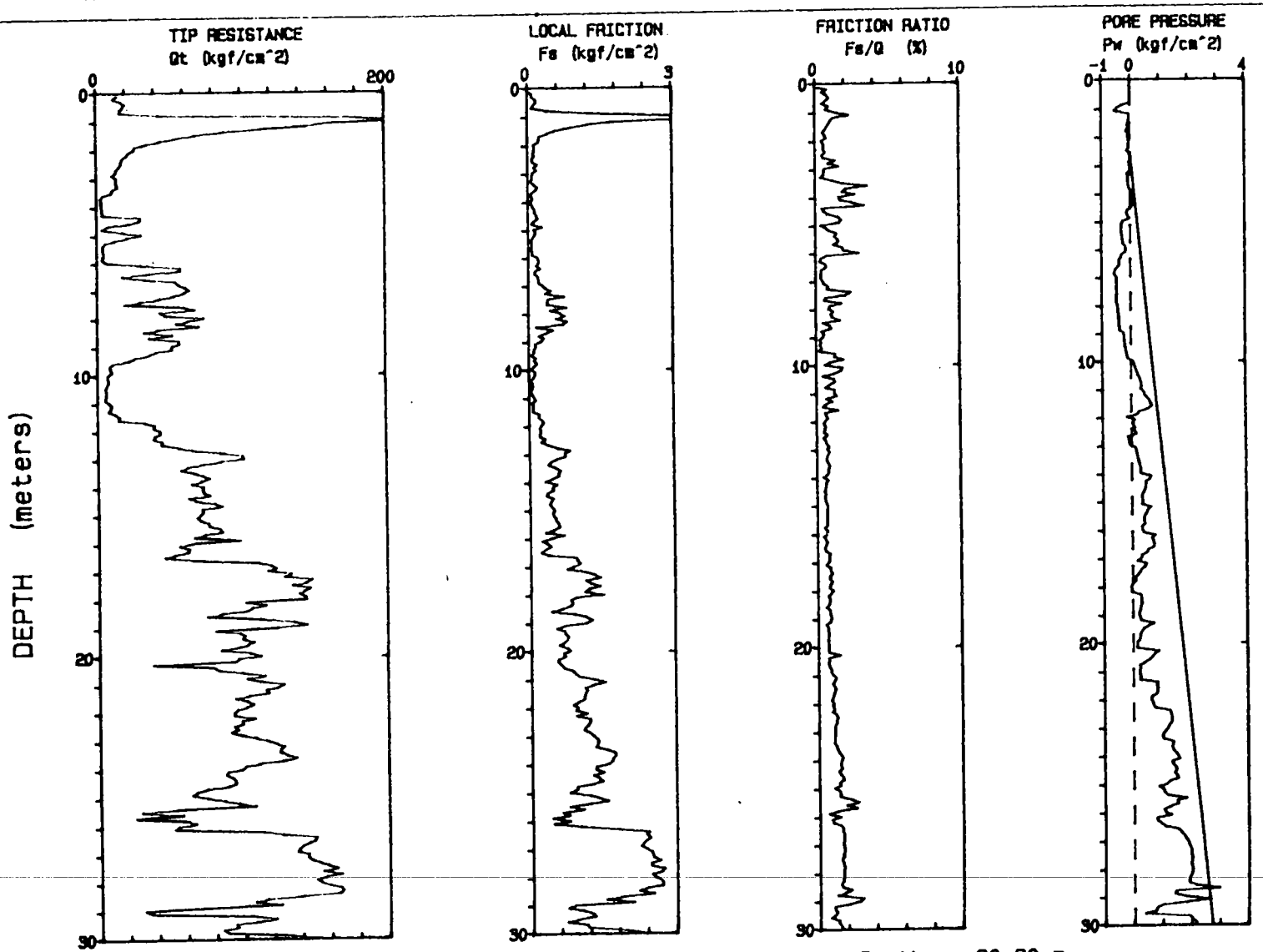
Depth Increment : .1 m
Max Depth : 30.90 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR

CPT Date : 10-22-95 08:48
Cone Used : 436

Sounding : APH012 Pg 1 / 2
Job No. : APH12



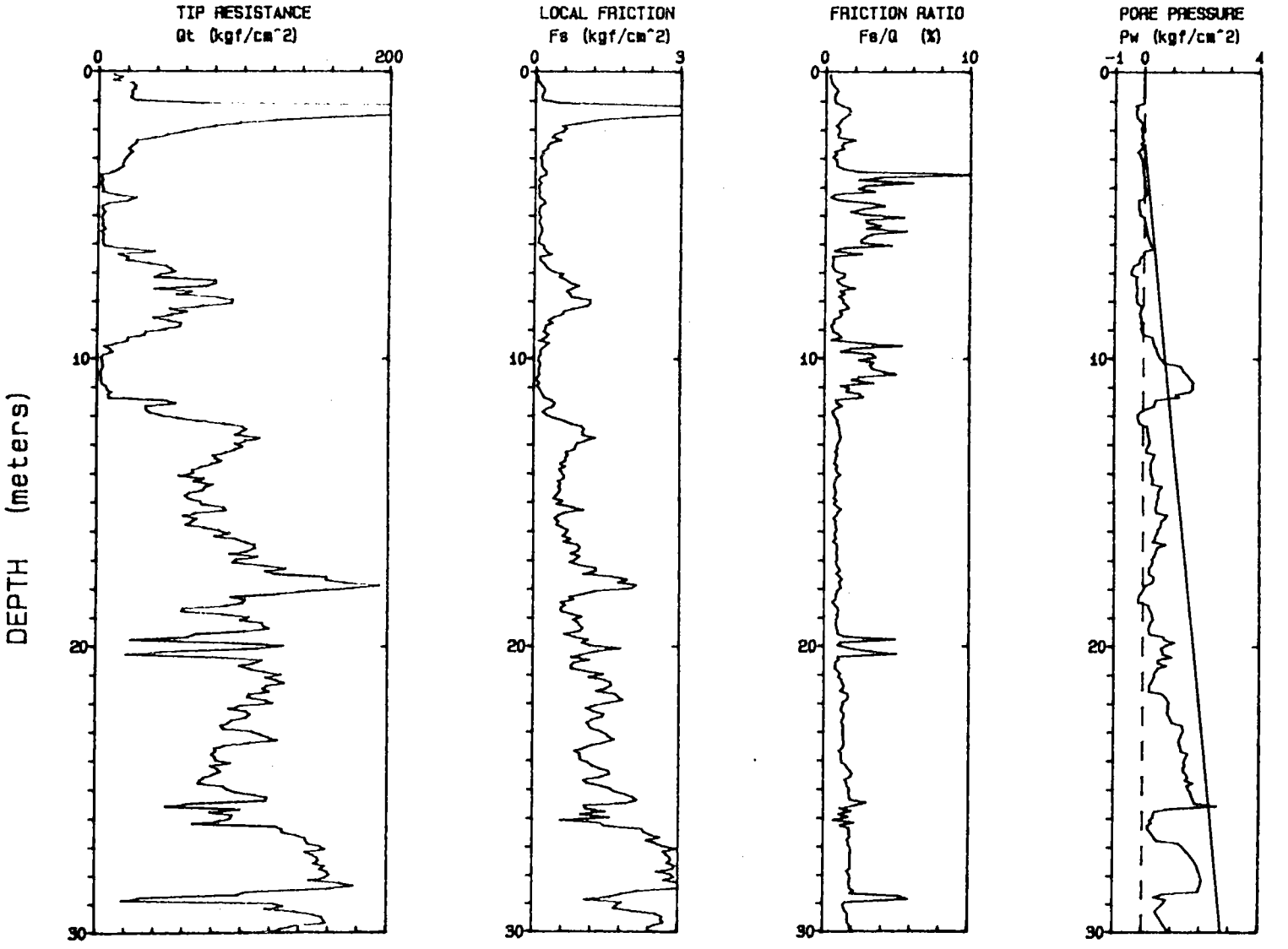
Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.30 m

IHMT

Operator : CHEN&SU | CPT Date : 10-23-95 08:51 | Sounding : APH013 Pg 1 / 1

Location : AN-PING HARBOR | Cone Used : 436 | Job No. : APH13



Depth Increment : .1 m

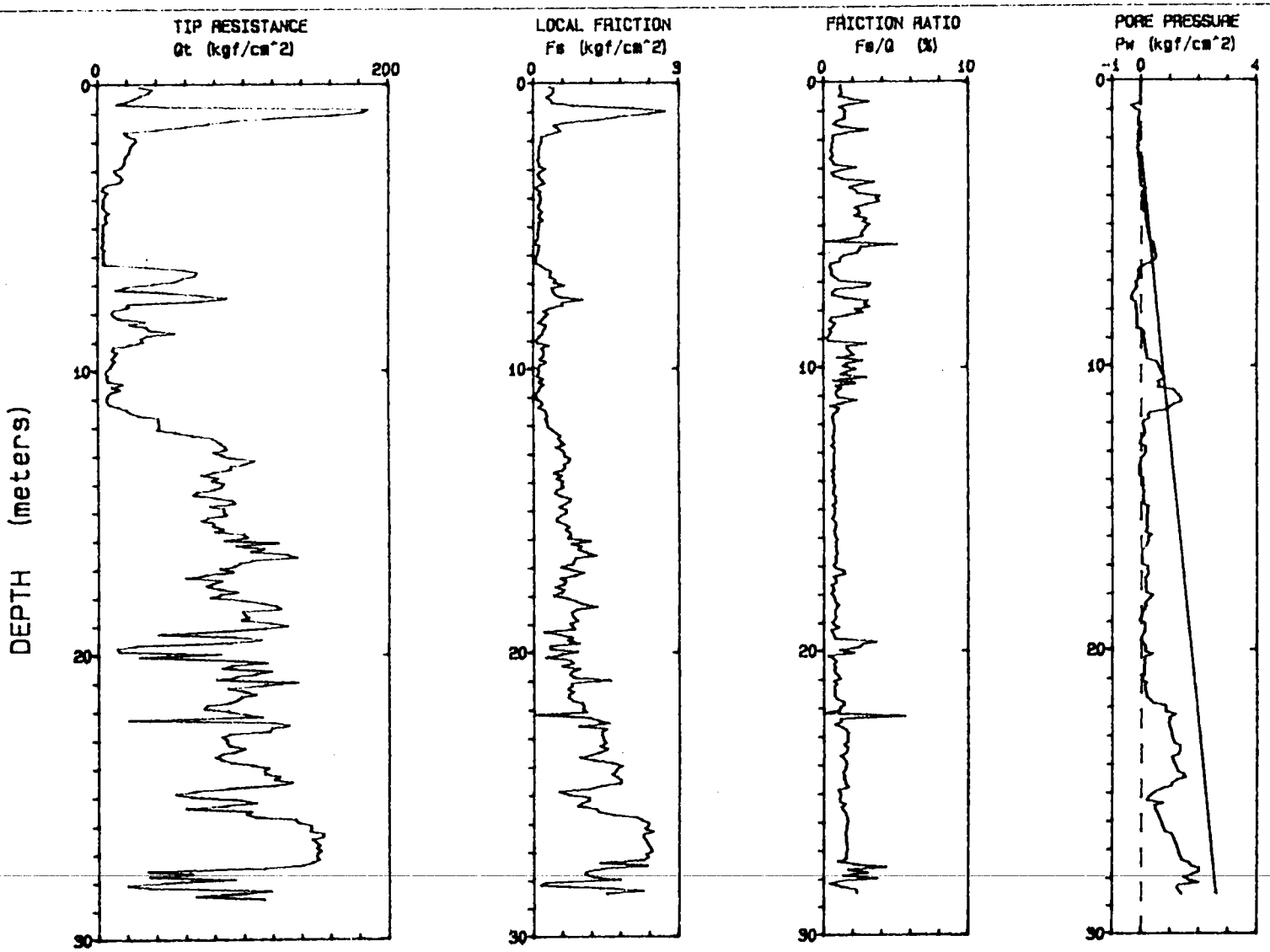
Max Depth : 30.00 m

IHMT

Operator : CHENGSU
Location : AN-PING HARBOR

CPT Date : 11-02-95 10:46
Cone Used : 436

Sounding : APH014 Pg 1 / 1
Job No. : APH14



Depth Increment : .1 m

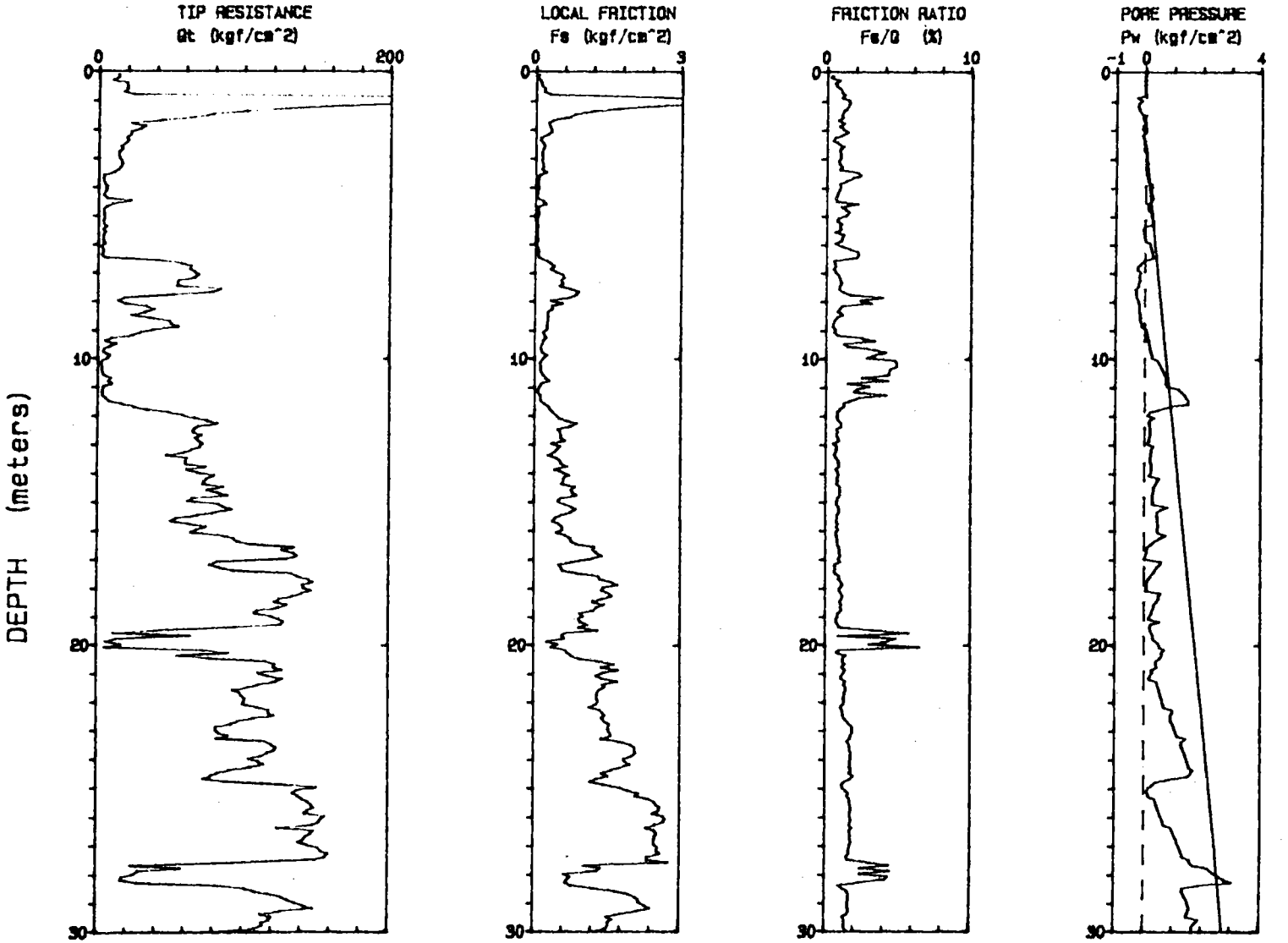
Max Depth : 28.60 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR

CPT Date : 11-03-95 10:31
Cone Used : 436

Sounding : APH015 Pg 1 / 2
Job No. : APH15



Depth Increment : .1 m

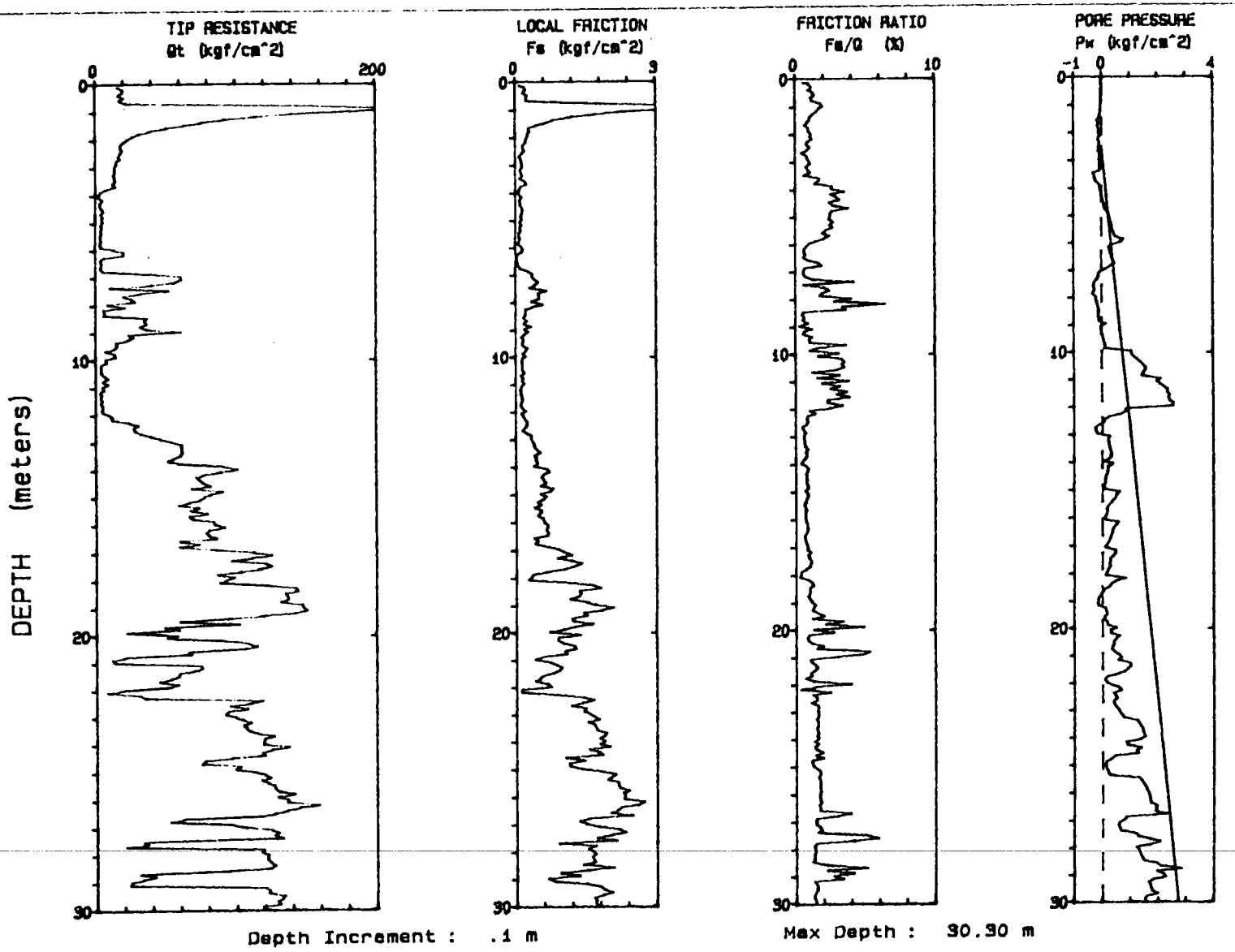
Max Depth : 30.20 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : AN-PING HARBOR

CPT Date : 11-04-95 09:14
Cone Used : 436

Sounding : APH016 Pg 1 / 2
Job No. : APH16



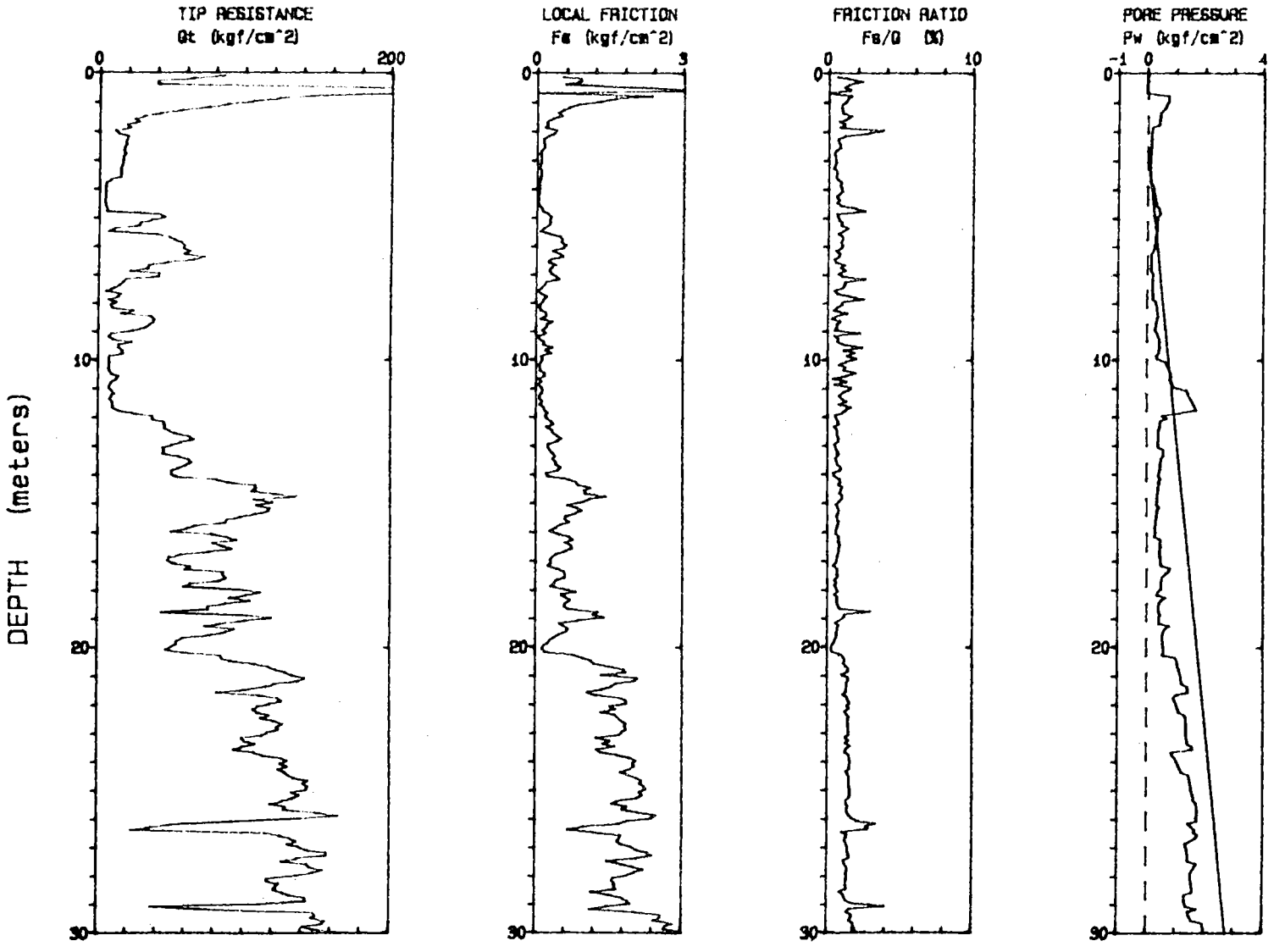
Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.30 m

IHMT

Operator : CHEN&SU | CPT Date : 11-05-95 08:48 | Sounding : APH017 Pg 1 / 2

Location : AN-PING HARBOR | Cone Used : 436 | Job No. : APH17



Depth Increment : .1 m

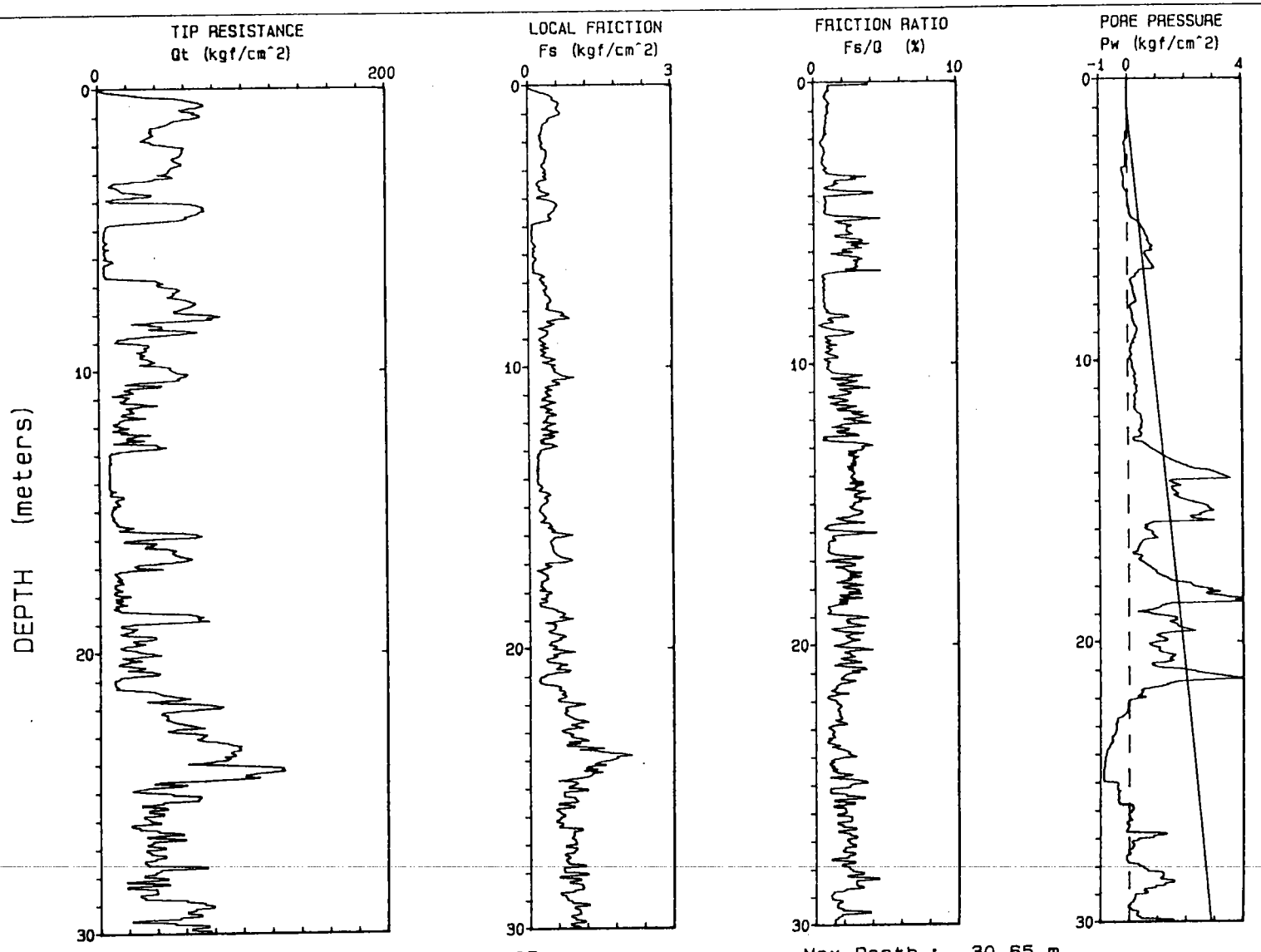
Max Depth : 30.10 m

IHMT

Operator : YU & CHEN
Location : PU-DAI PORT

CPT Date : 05-03-96 9:24
Cone Used : 417

Sounding ; CPTL44 Pg 1 / 2
Job No. : PDH01



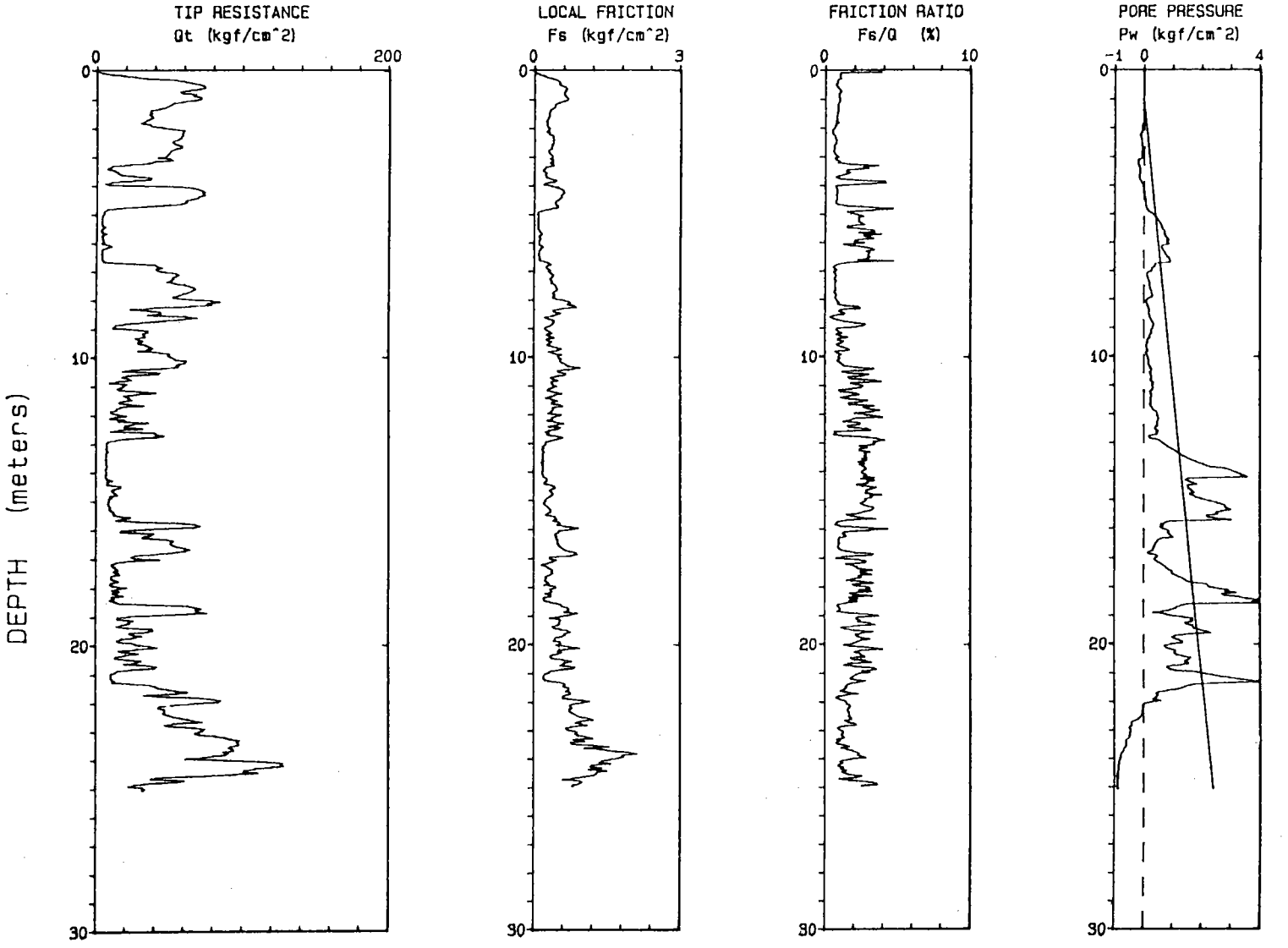
Depth Increment : .05 m

Max Depth : 30.65 m

I . H . M . T

Operator : YU & CHEN | CPT Date : 05-03-96 9:24 | Sounding ; CPTL44 Pg 1 / 1

Location : PU-DAI PORT | Cone Used : 417 | Job No. ; PDH01

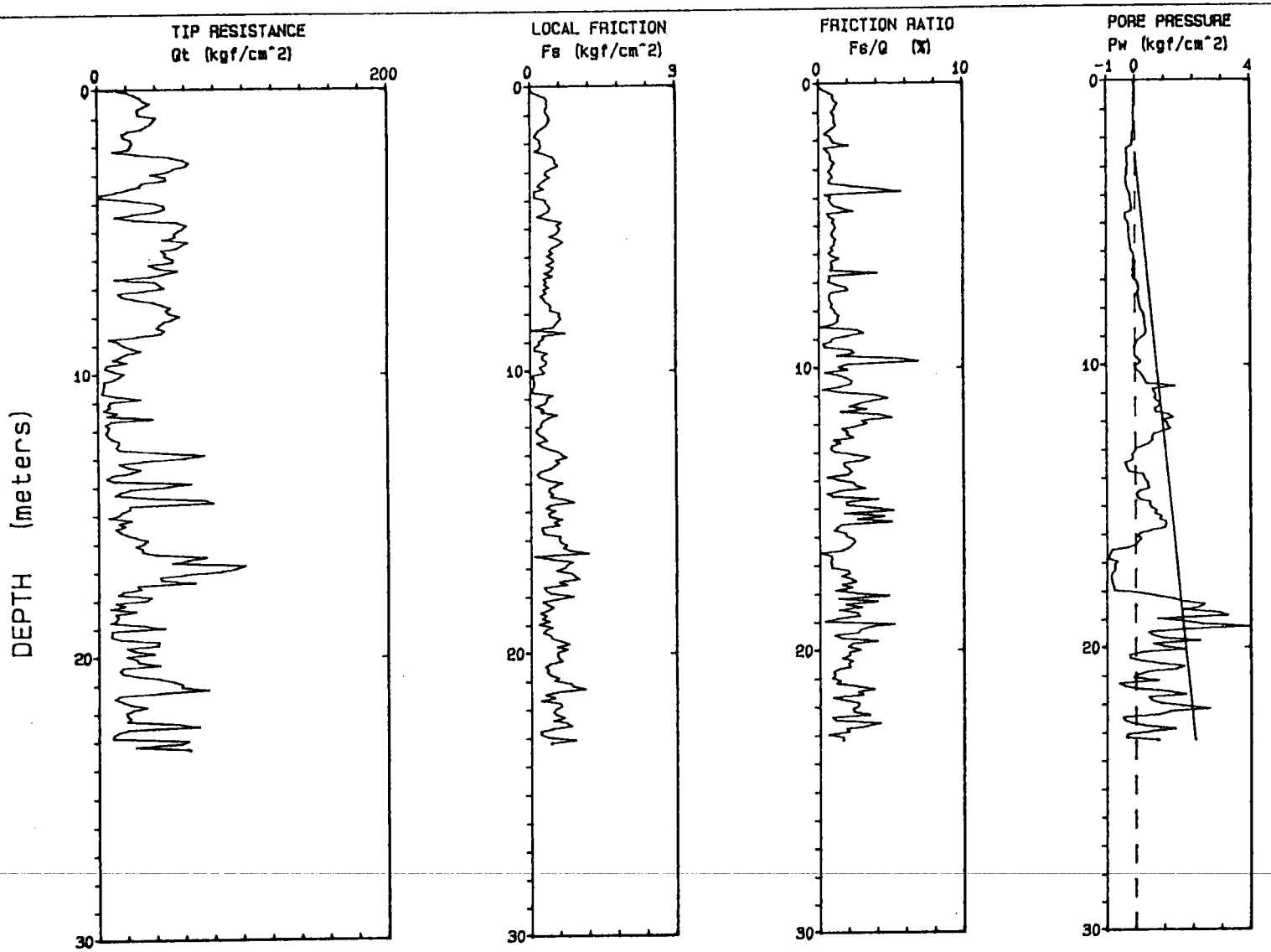


IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : PU-DAI HARBOR

CPT Date : 03-13-96 09:58
Cone Used : 436

Sounding : PDH02 Pg 1 / 1
Job No. : PDH02



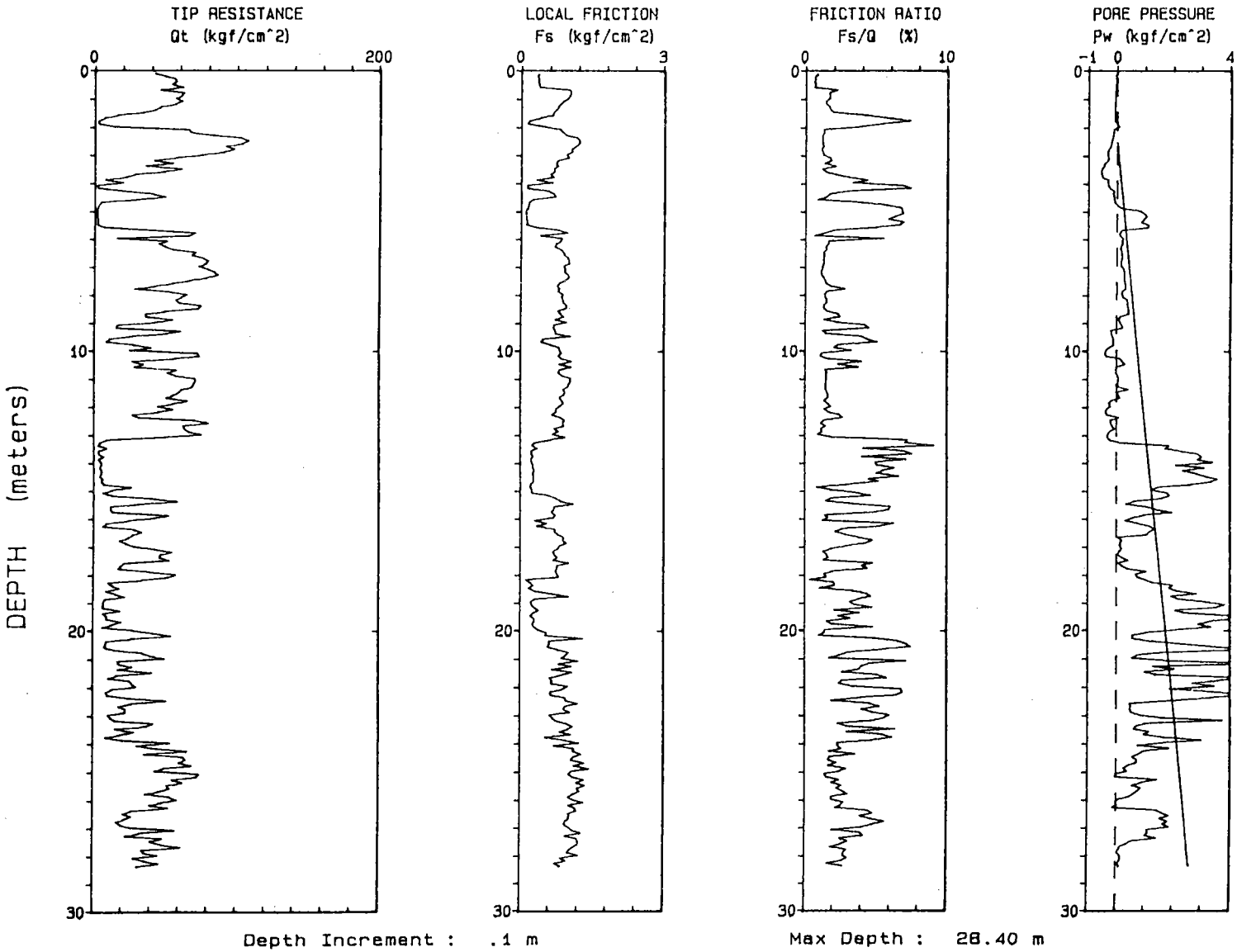
Depth Increment : .1 m

Max Depth : 23.30 m

IHMT

Operator : CHEN&SU CPT Date : 03-12-96 14:47 Sounding : PDH03 Pg 1 / 1

Location : PU-DAI HARBOR Cone Used : 436 Job No. : PDH03



Depth Increment : .1 m

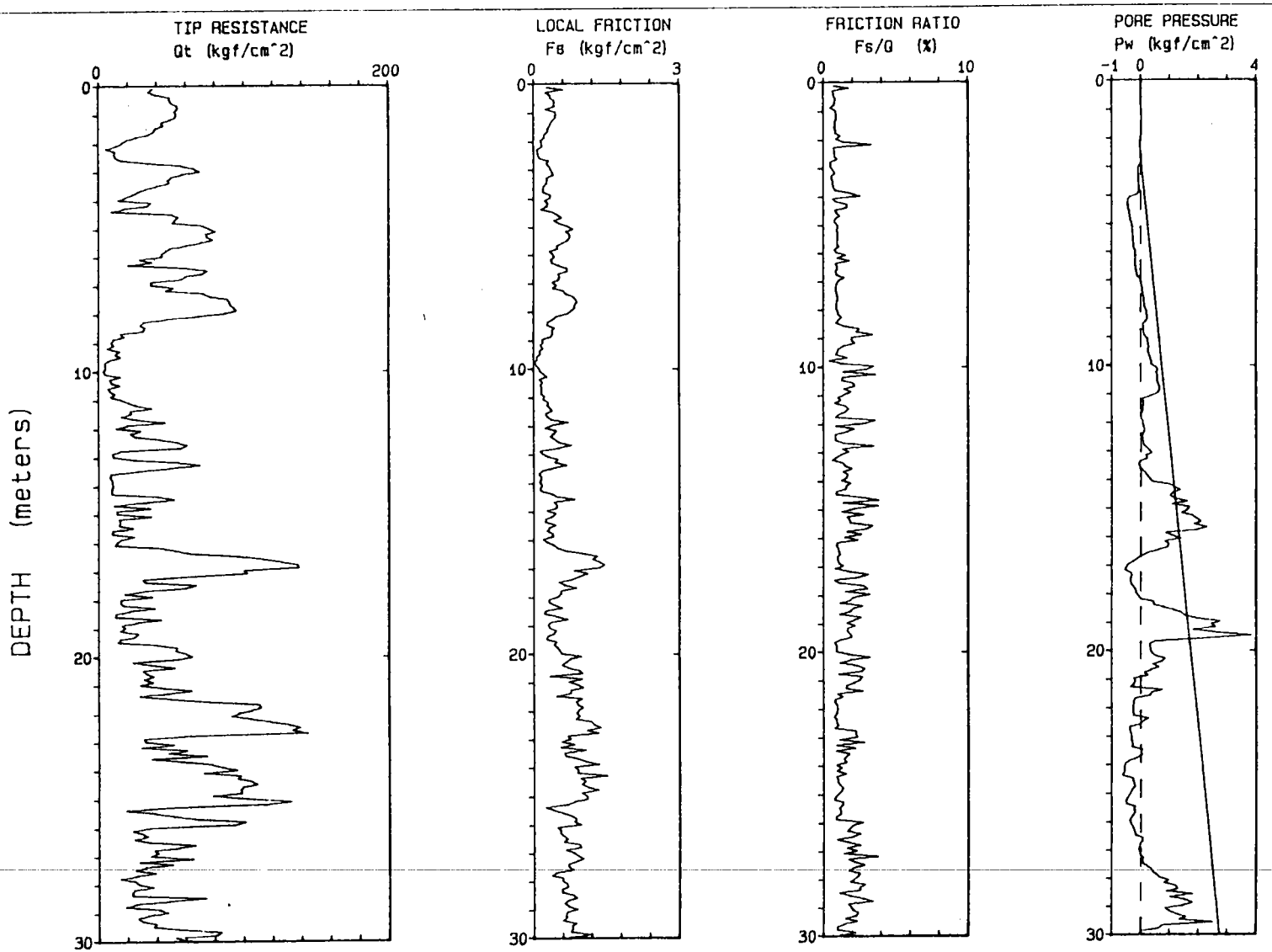
Max Depth : 28.40 m

IHMT

Operator : CHEN&SU
Location : PU-DAI HARBOR

CPT Date : 03-15-96 10:07
Cone Used : 436

Sounding : PDH04 Pg 1 / 2
Job No. : PDH04



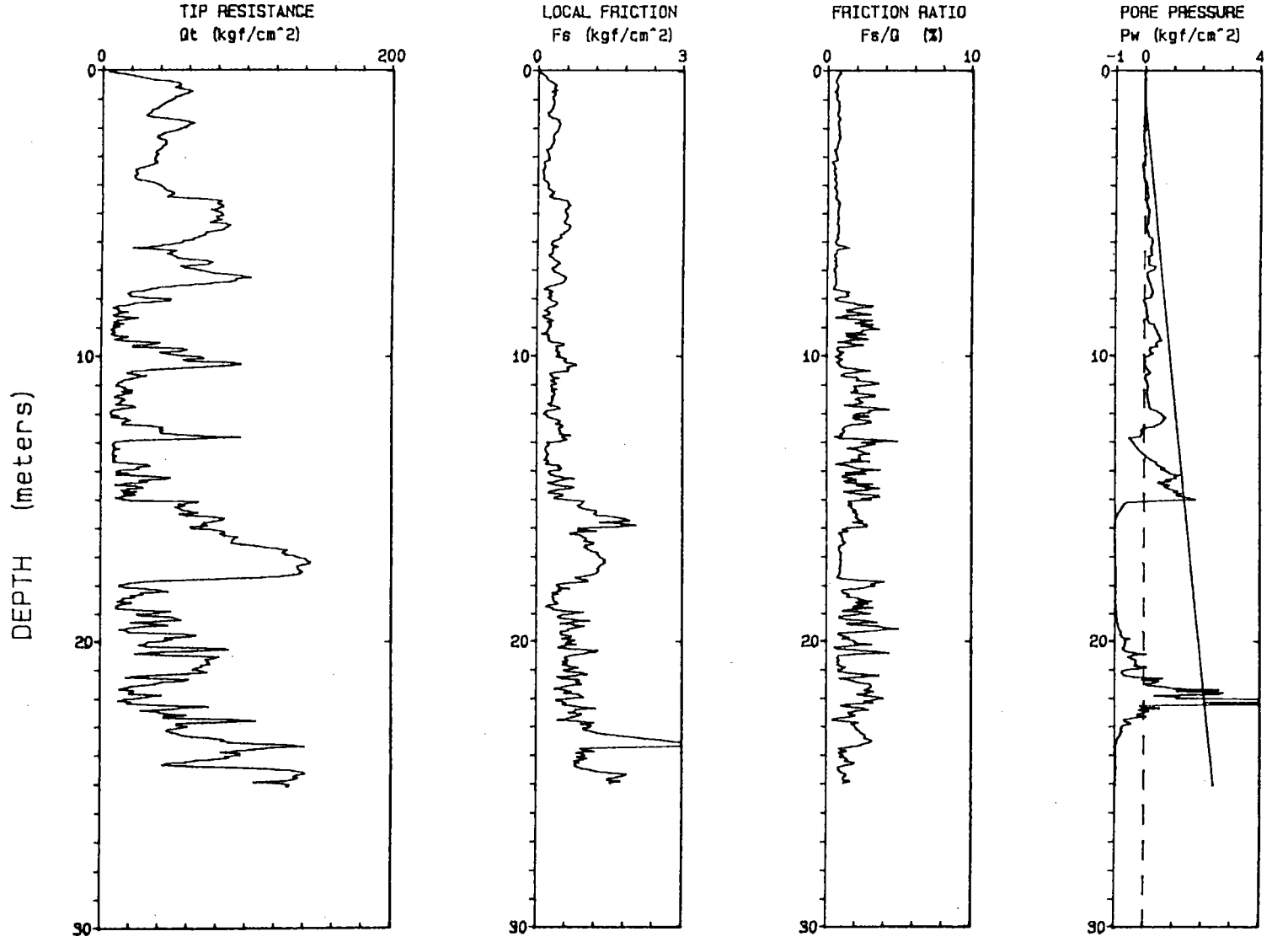
Depth Increment : .1 m

Max Depth : 30.20 m

I . H . M . T

Operator : YU & CHEN | CPT Date : 05-03-96 8:02 | Sounding : CPTL43 Pg 1 / 1

Location : PU-DAI PORT | Cone Used : 417 | Job No. : PDH05



Depth Increment : .05 m

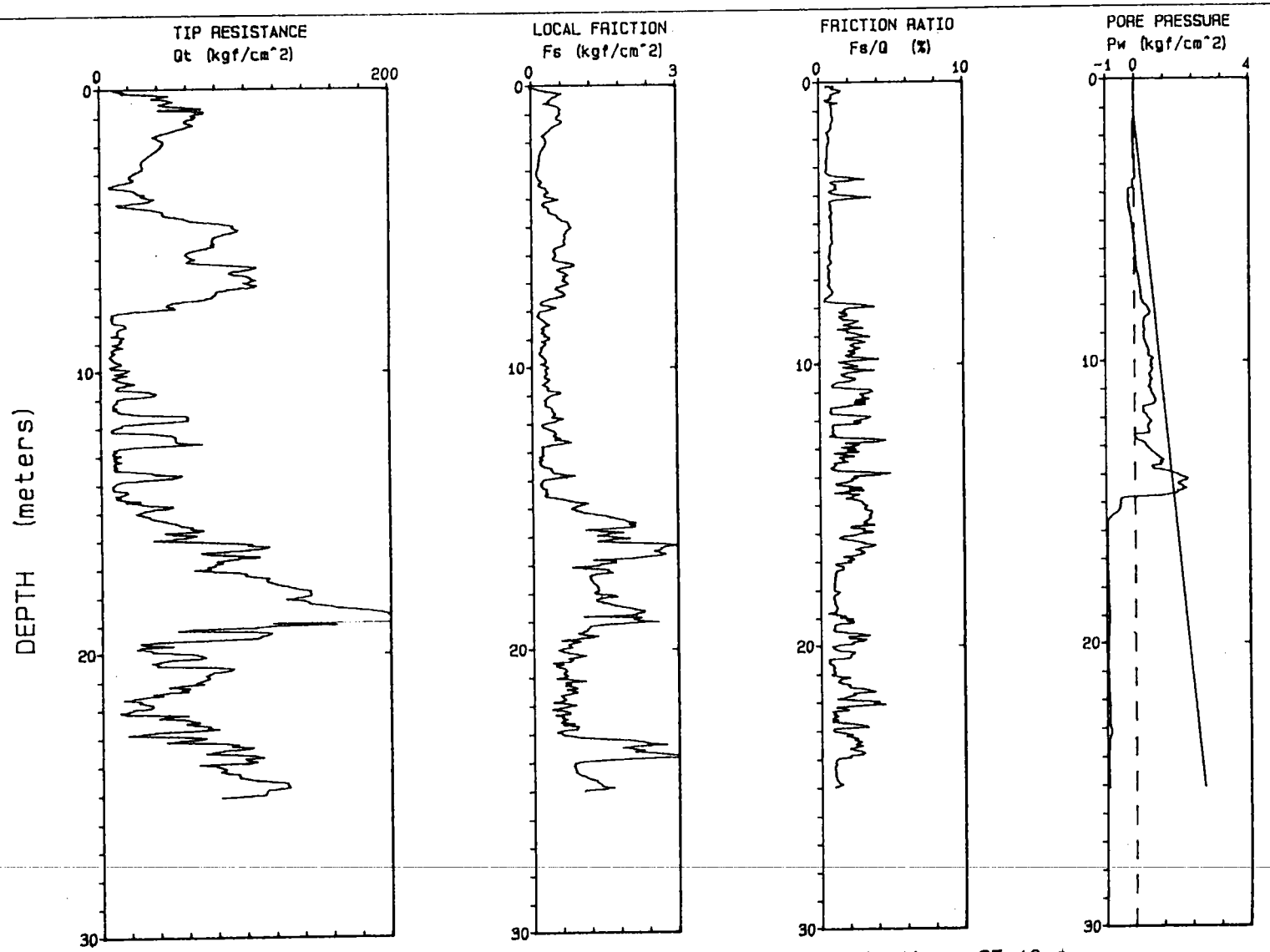
Max Depth : 25.10 m

I . H . M . T

Operator : YU & CHEN
Location : PU-DAI PORT

CPT Date : 05-03-96 7:00
Cone Used : 417

Sounding : CPTL42 Pg 1 / 1
Job No. : PDH06



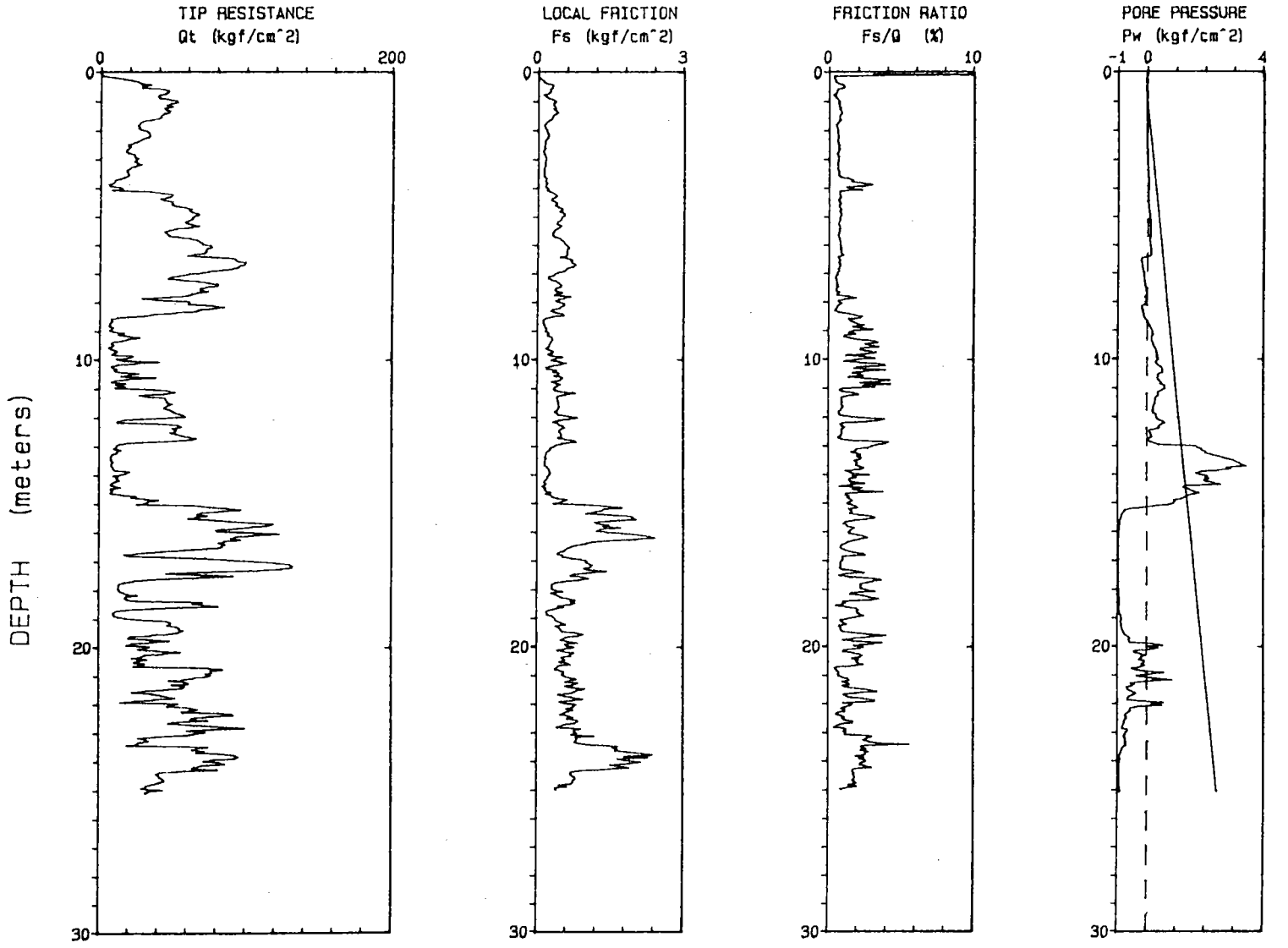
Depth Increment : .05 m

Max Depth : 25.10 m

I . H . M . T

Operator : YU & CHEN | CPT Date : 05-02-96 15:59 | Sounding : CPTL41 Pg 1 / 1

Location : PU-DAI PORT | Cone Used : 417 | Job No. : PDH07



Depth Increment : .05 m

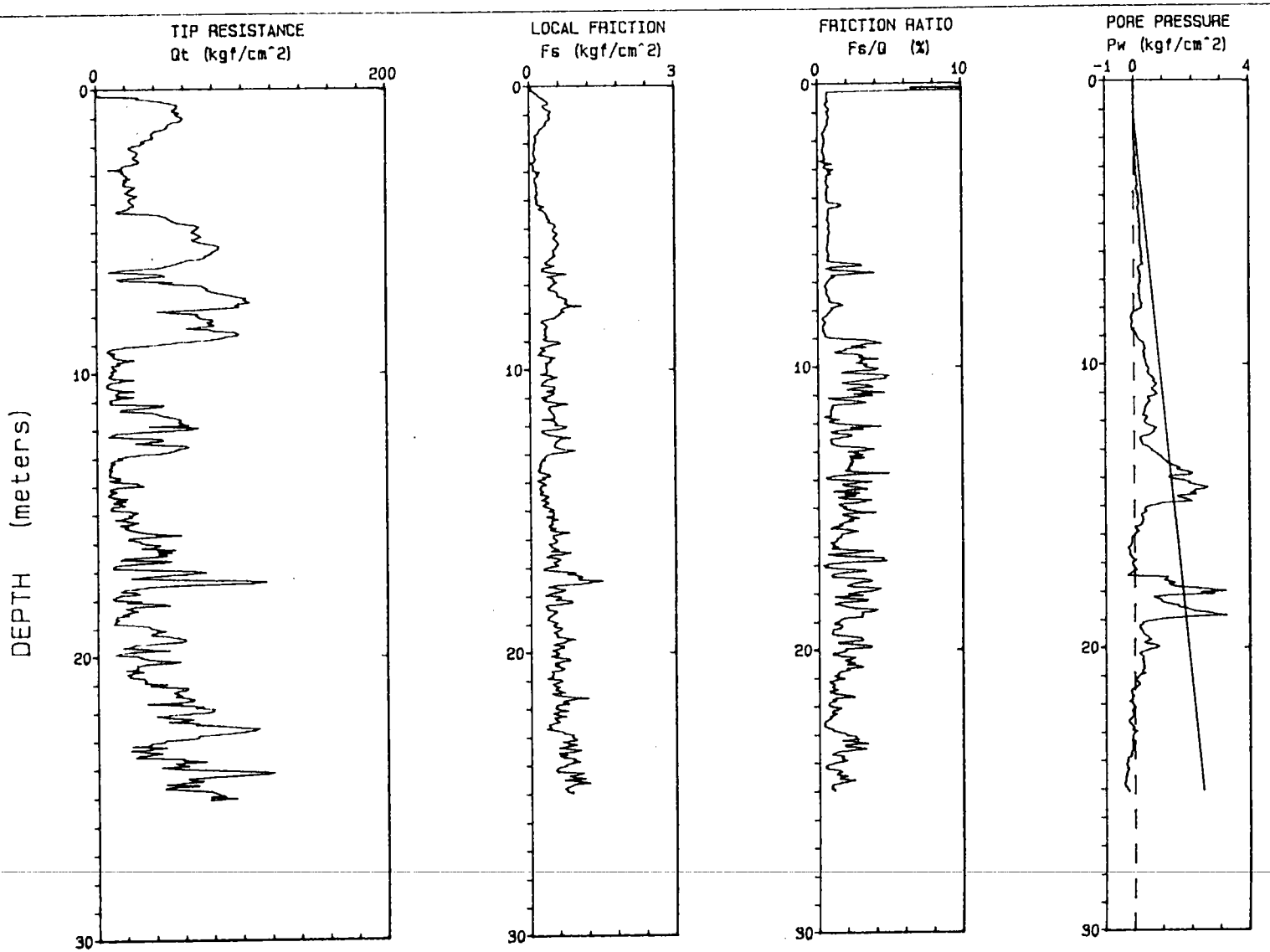
Max Depth : 25.10 m

I . H . M . T

Operator : YU & CHEN
Location : PU-DAI PORT

CPT Date : 05-02-96 14:57
Cone Used : 417

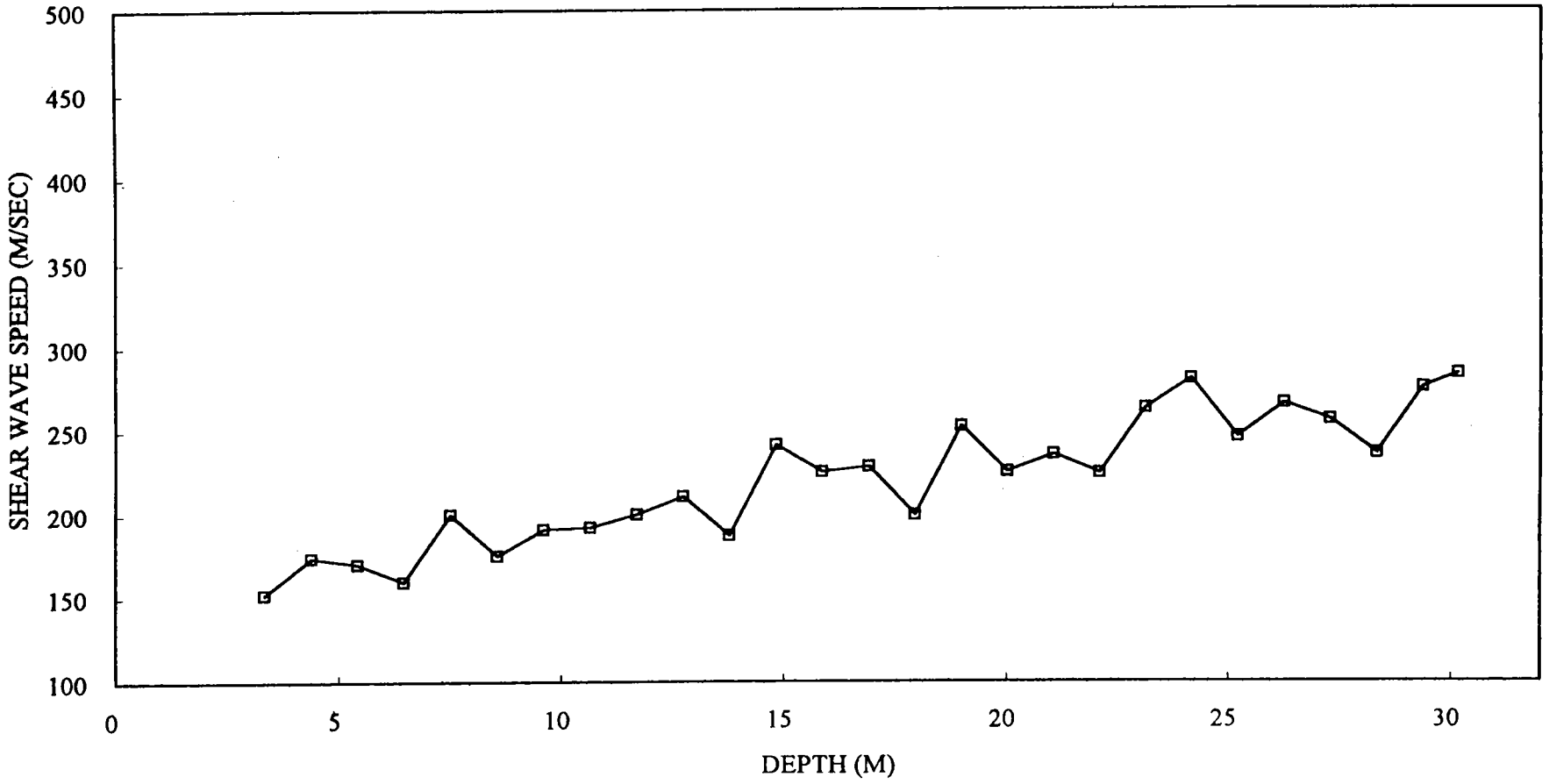
Sounding : CPTL40 Pg 1 / 1
Job No. : PDH08



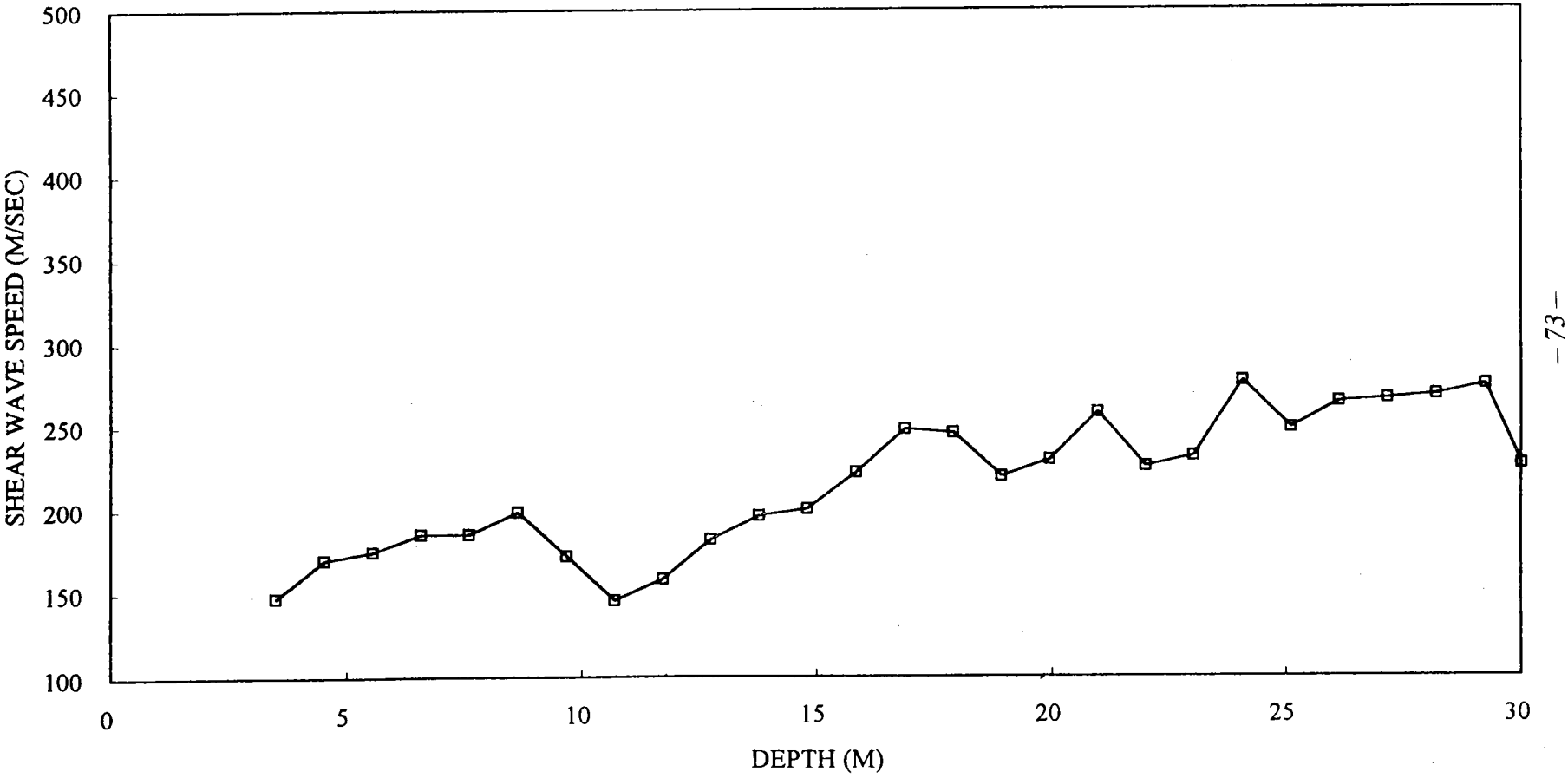
Depth Increment : .05 m

Max Depth : 25.10 m

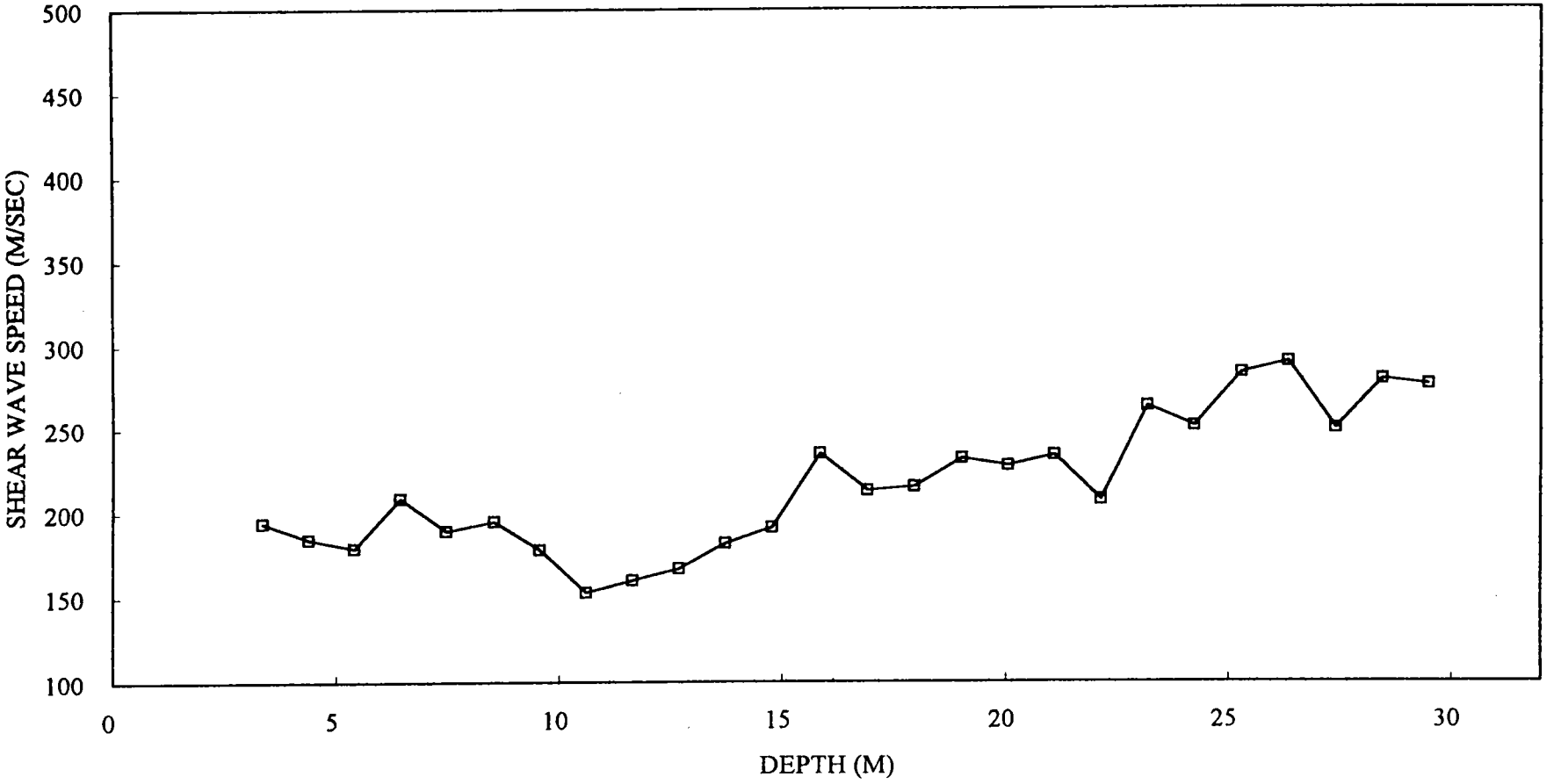
TAICHUNG HARBOR NO 16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP01



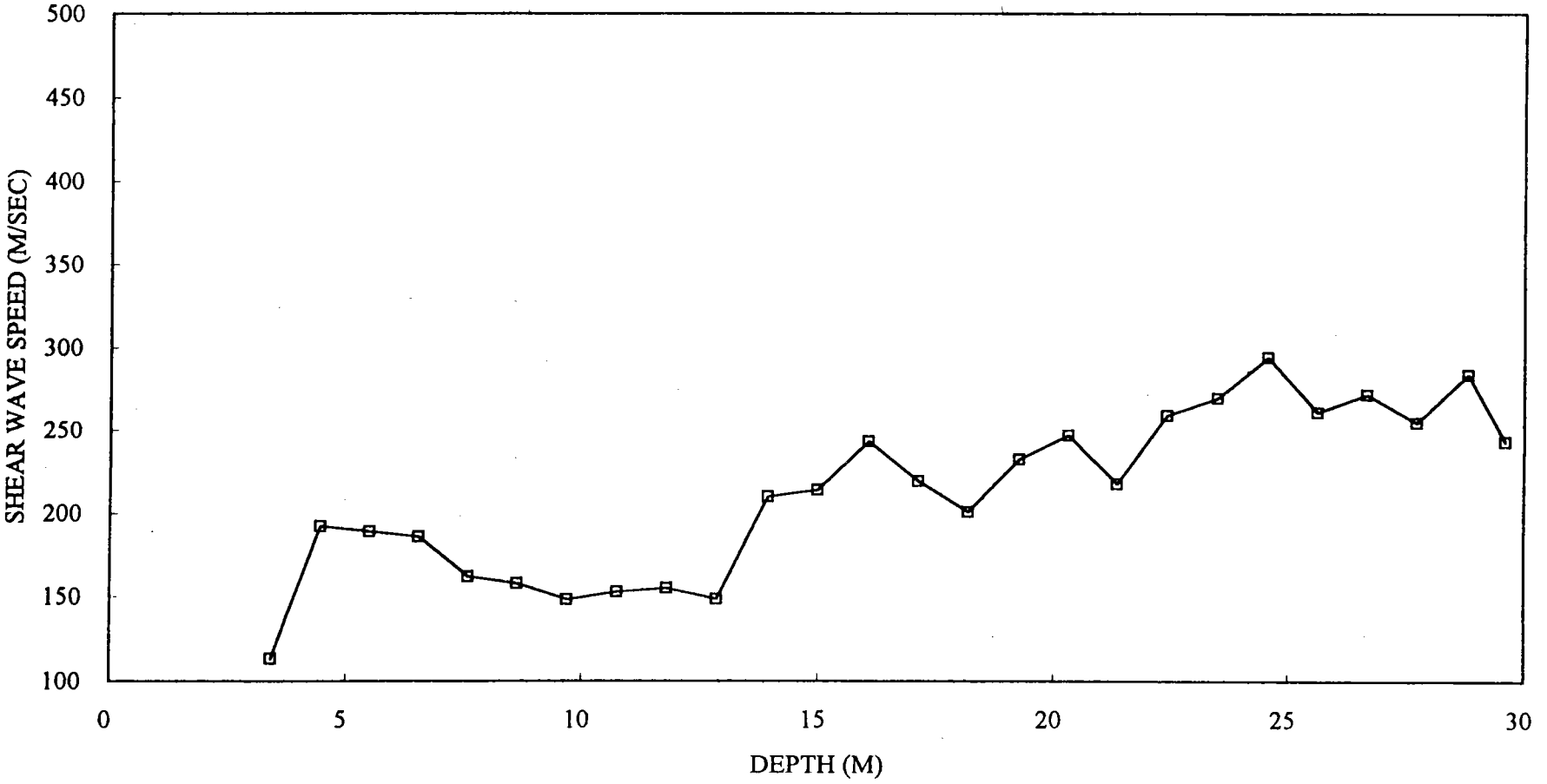
TAICHUNG HARBOR NO 16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP02



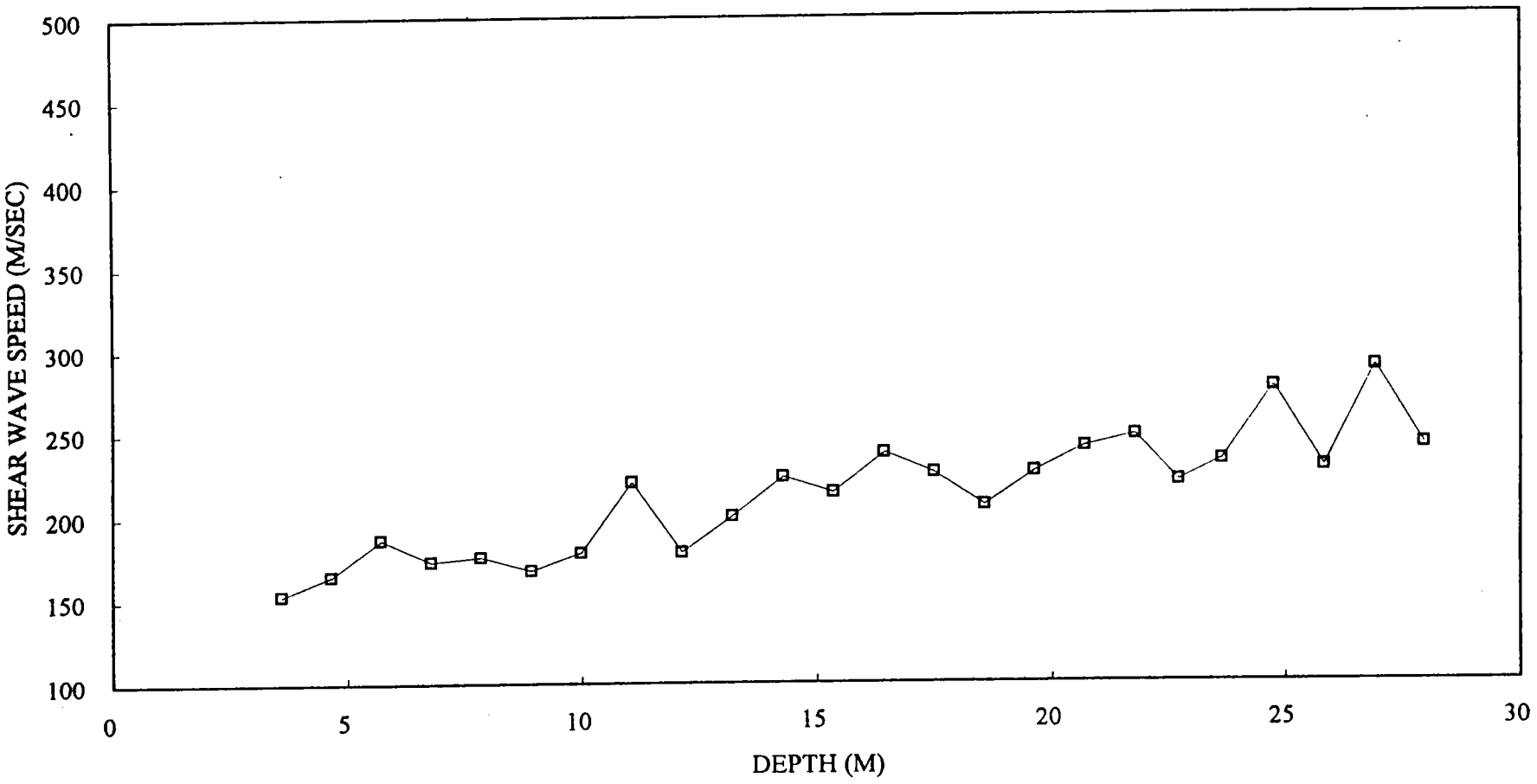
TAICHUNG HARBOR NO.16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP03



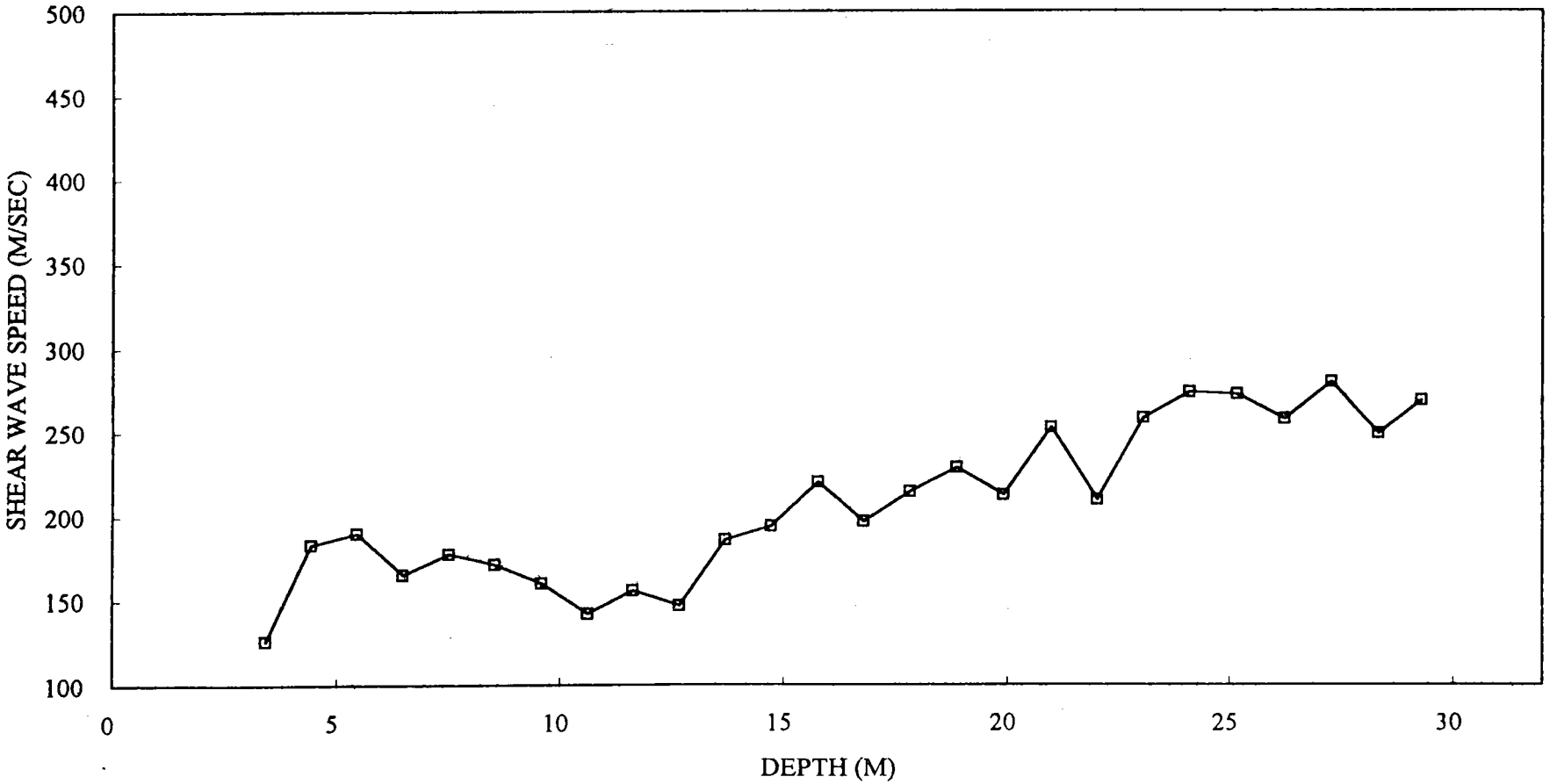
TAICHUNG HARBOR NO.16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP04



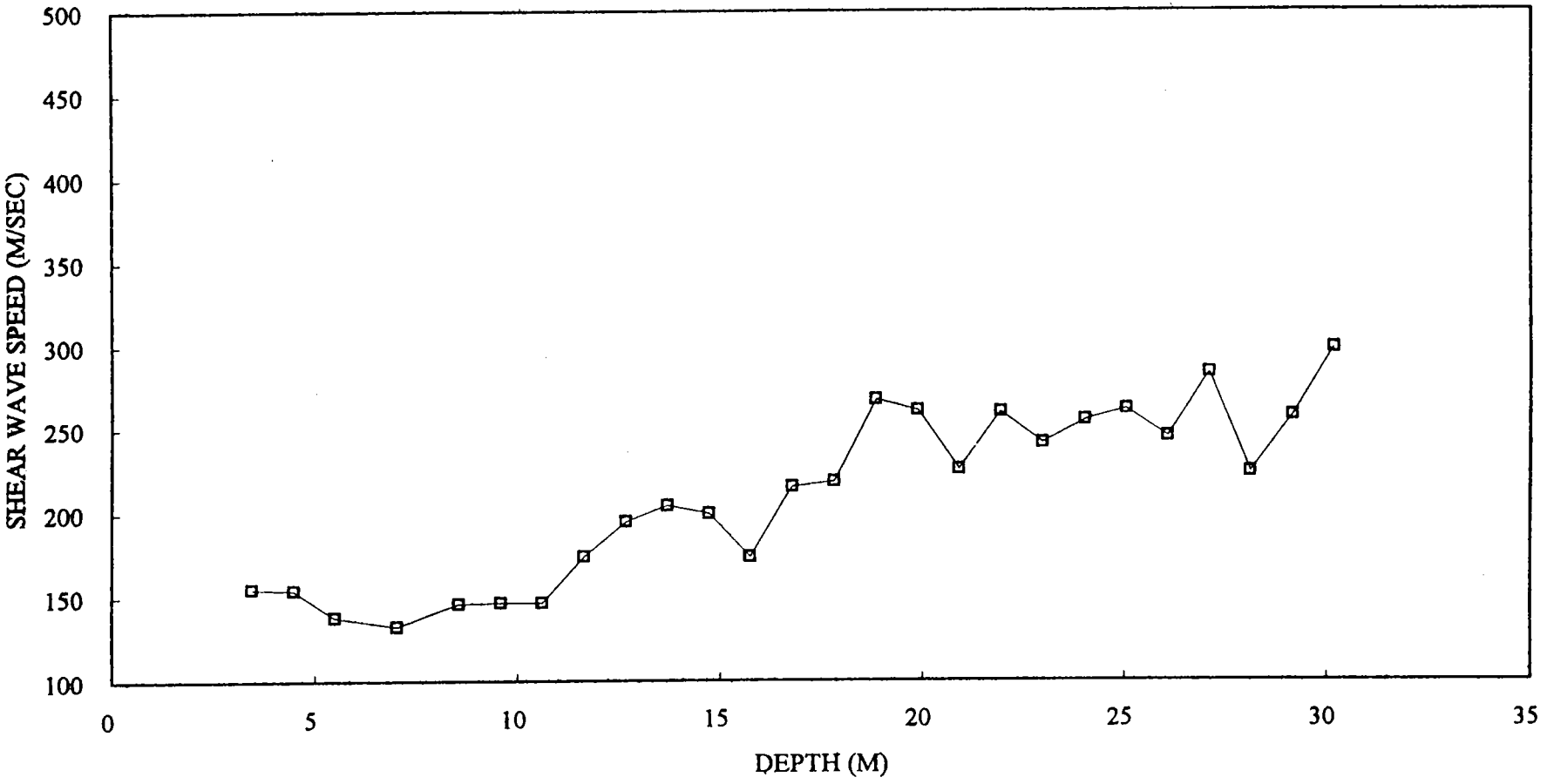
TAICHUNG HARBOR NO 16 WHARF
TEST HOLE N0 : CPTP05



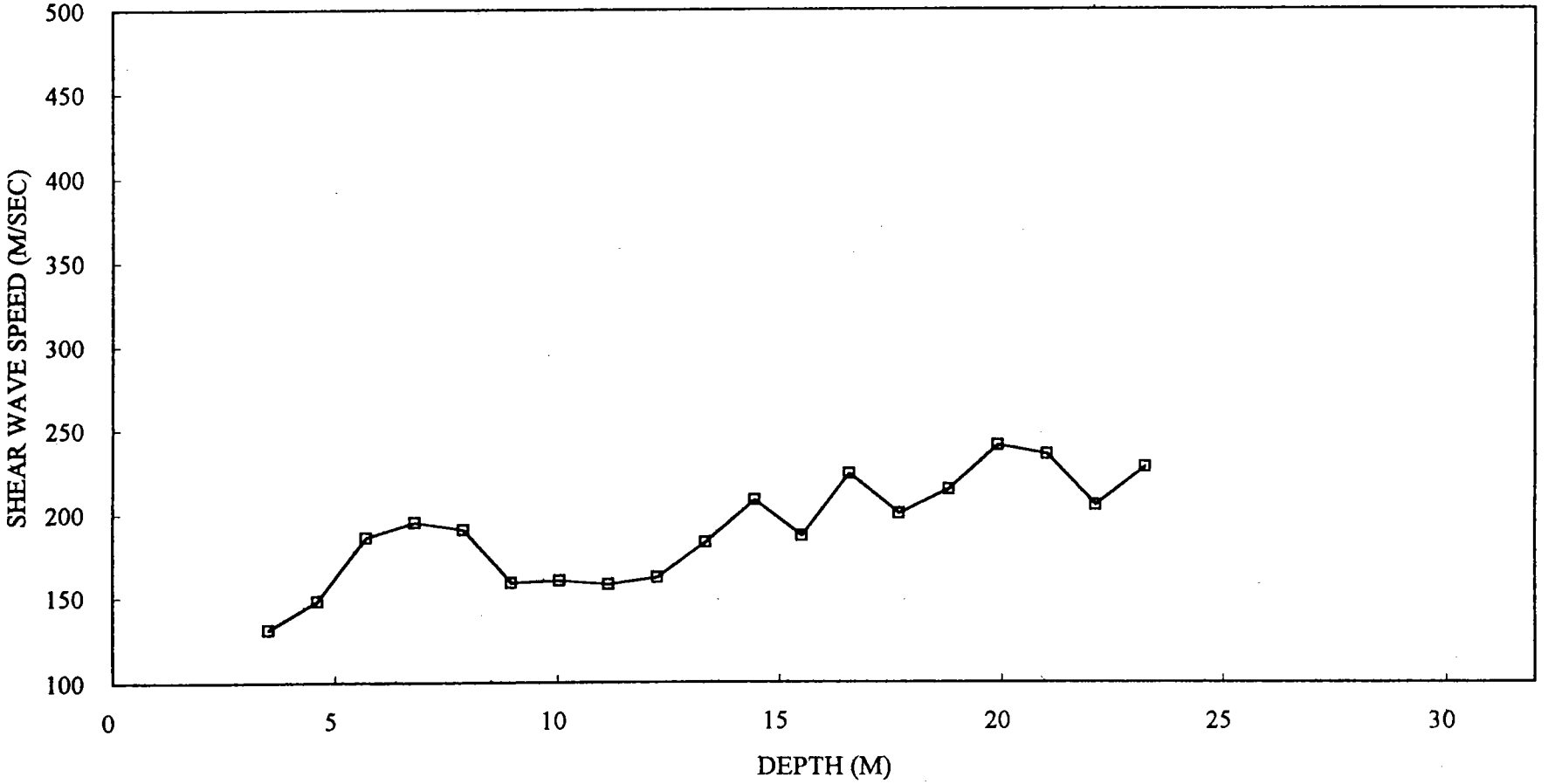
TAICHUNG HARBOR NO.16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP06



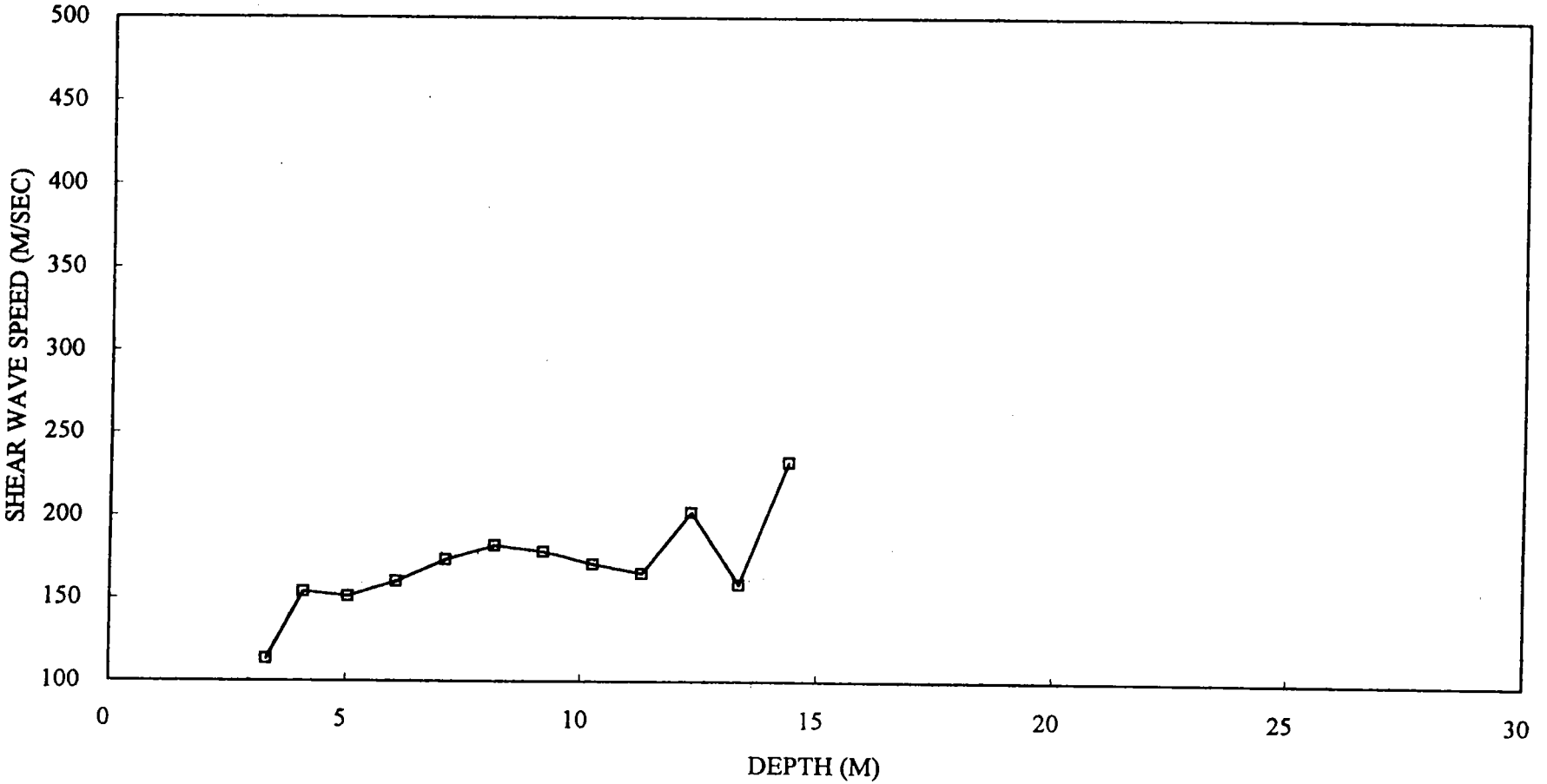
TAICHUNG HARBOR NO 16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP07



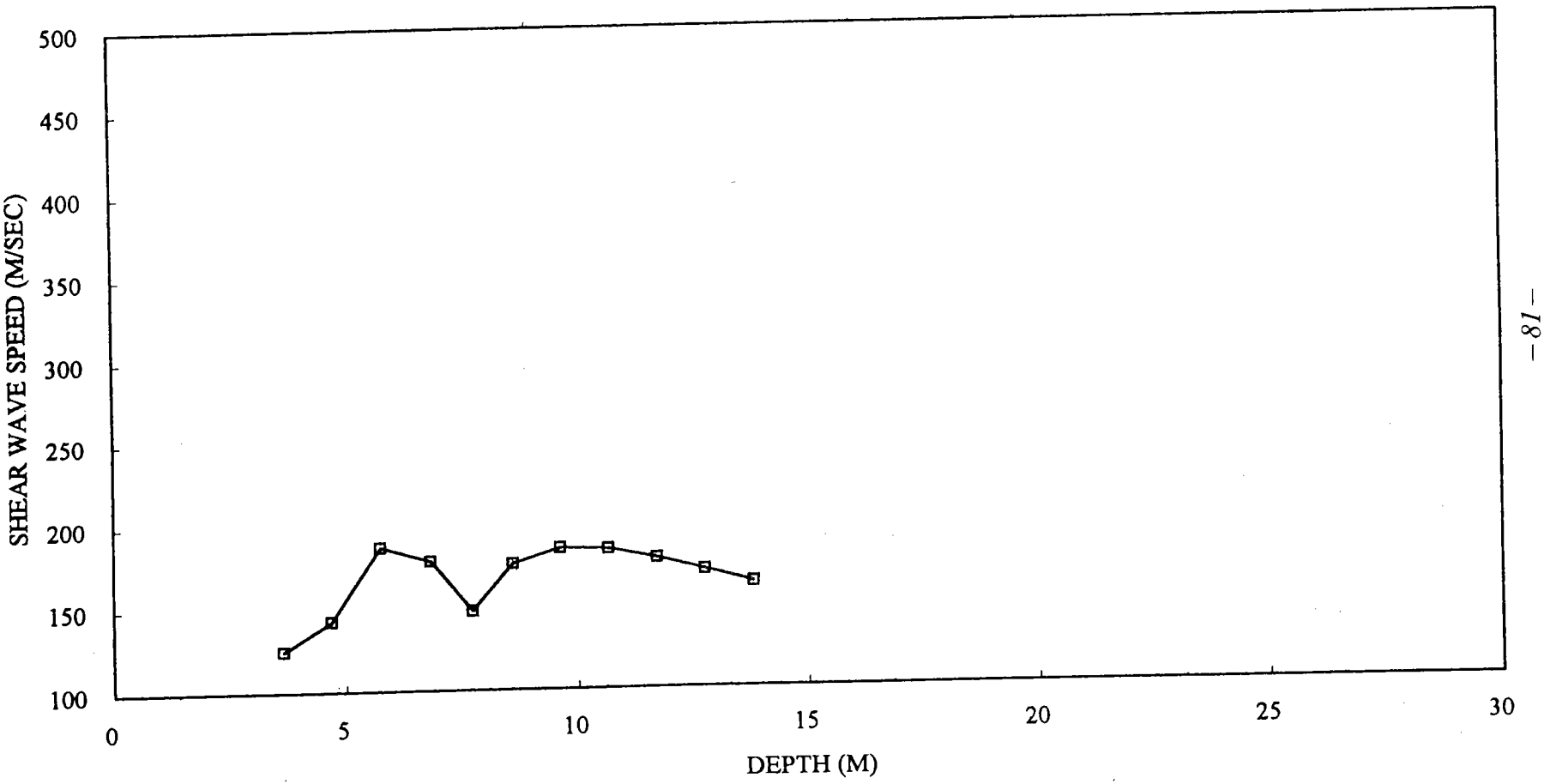
TAICHUNG HARBOR NO. 16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP08



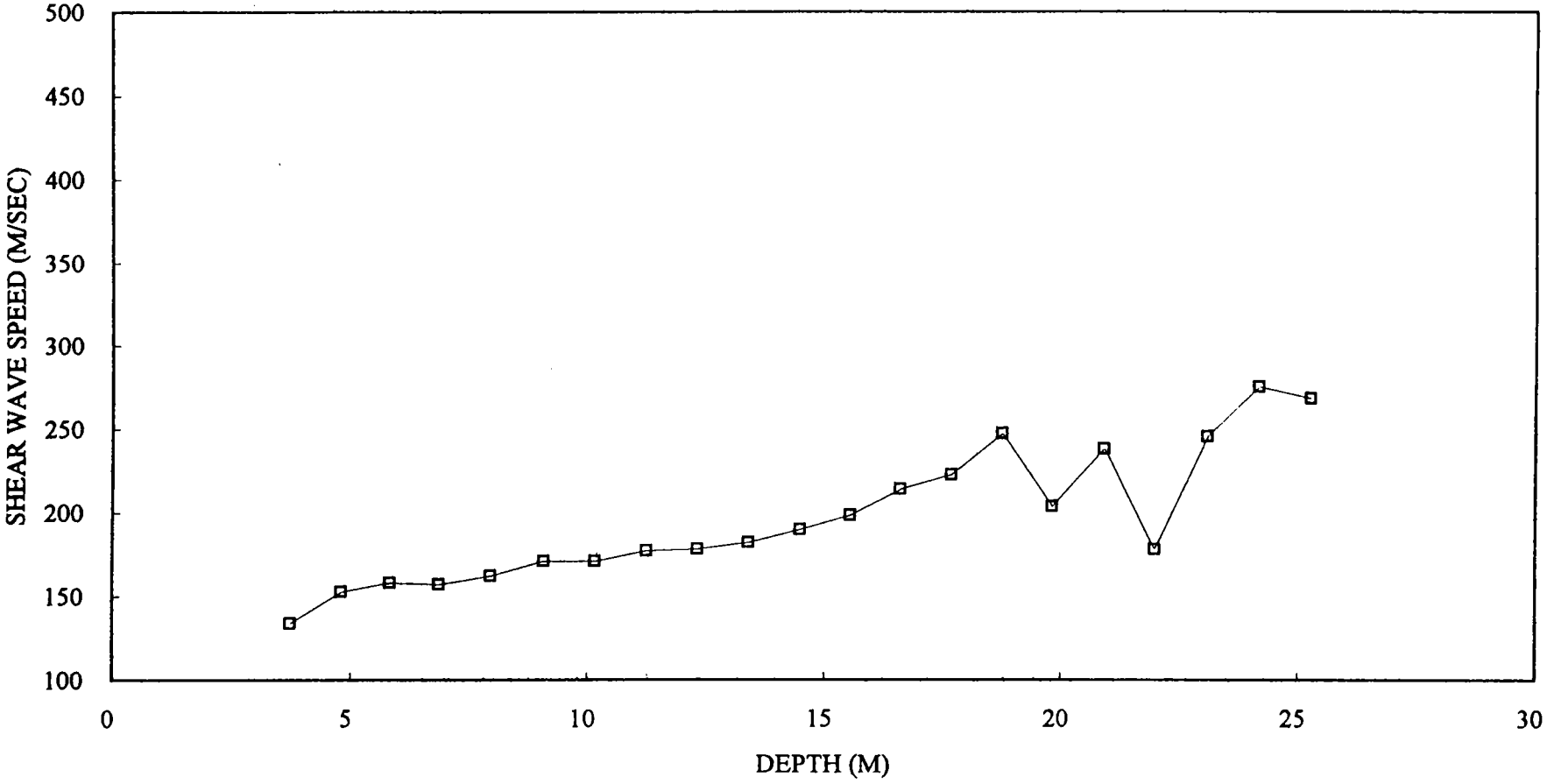
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : CPTP10



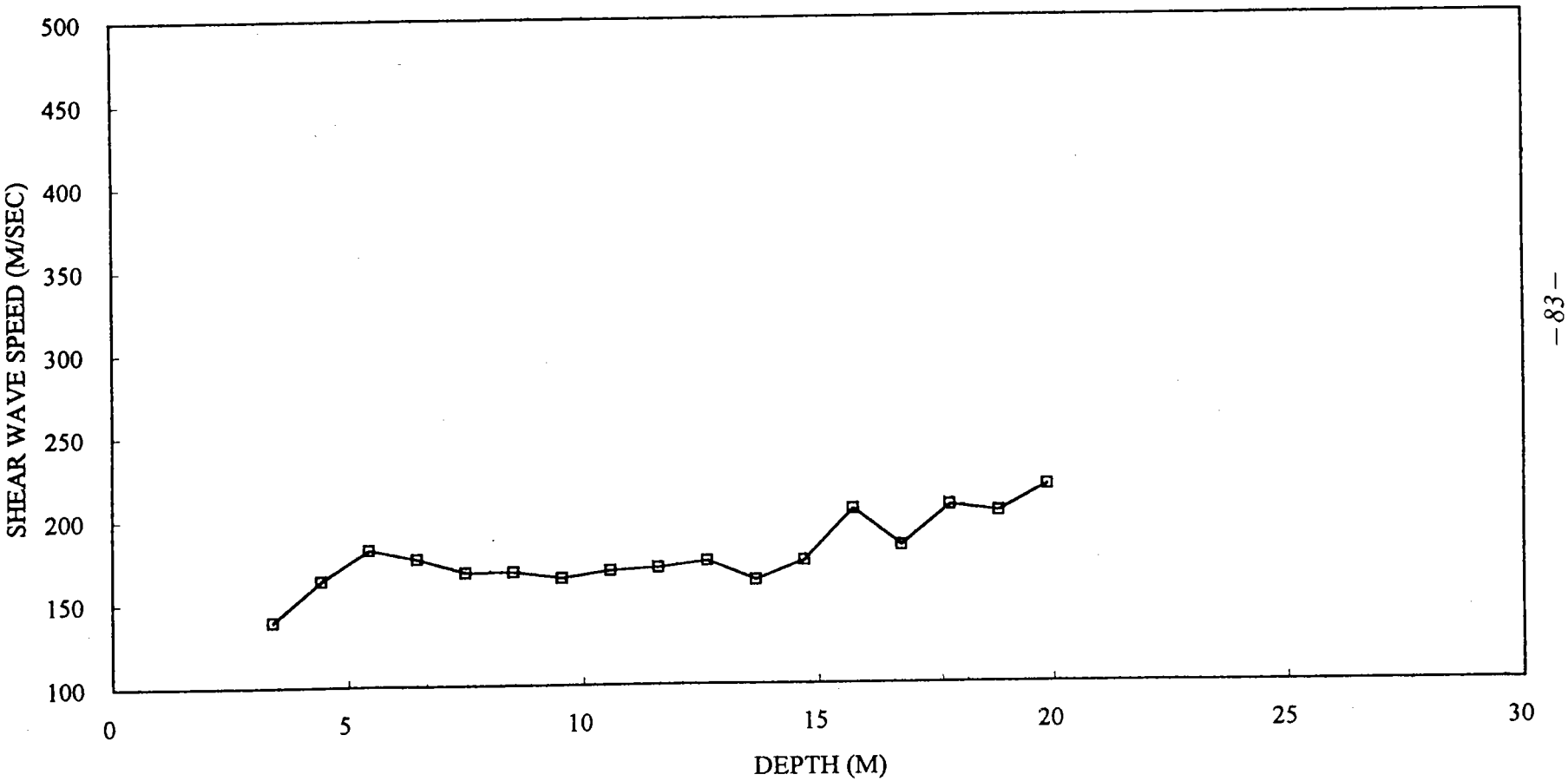
TAICHUNG HARBOR NO. 16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP13



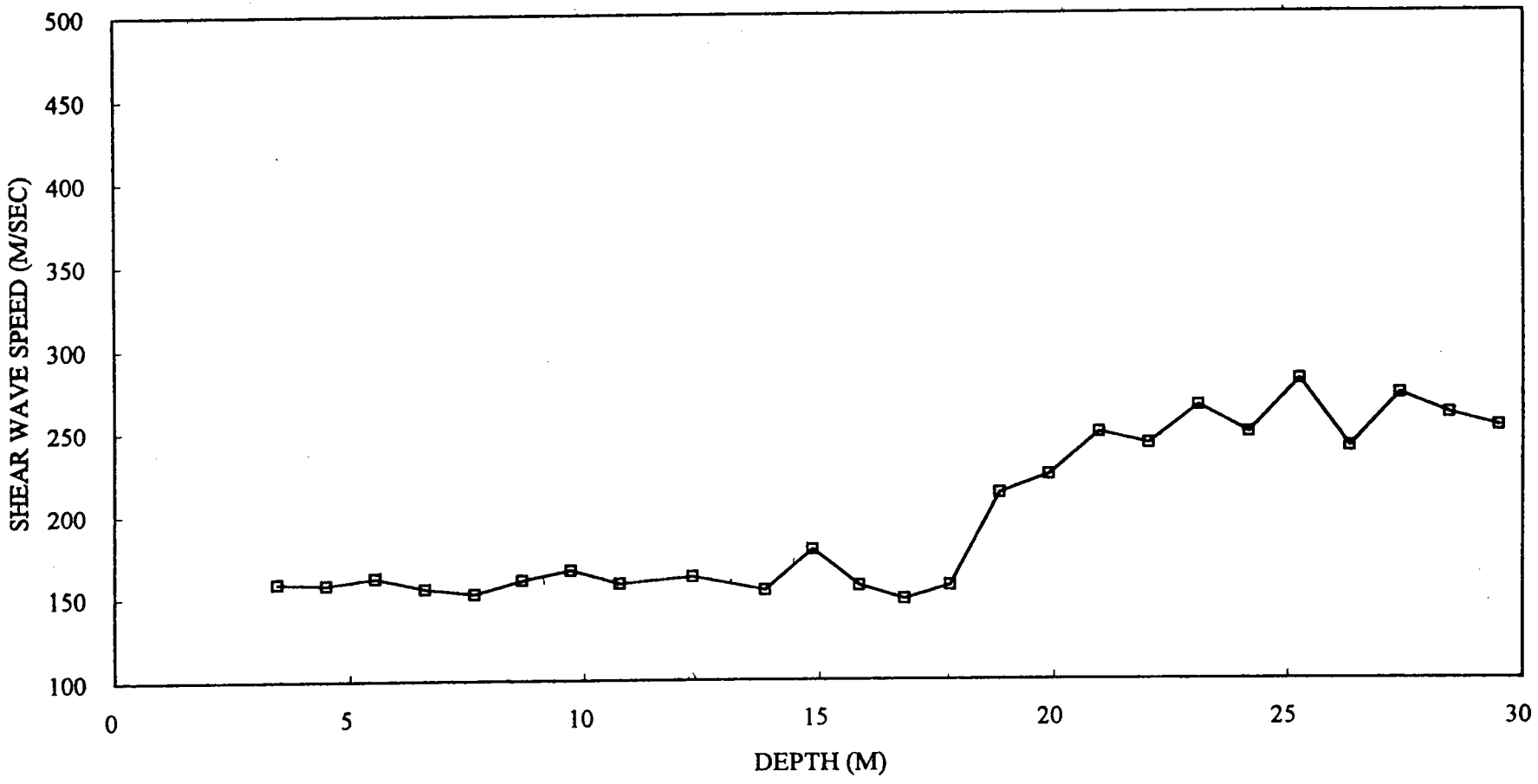
TAICHUNG HARBOR NO.16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP14



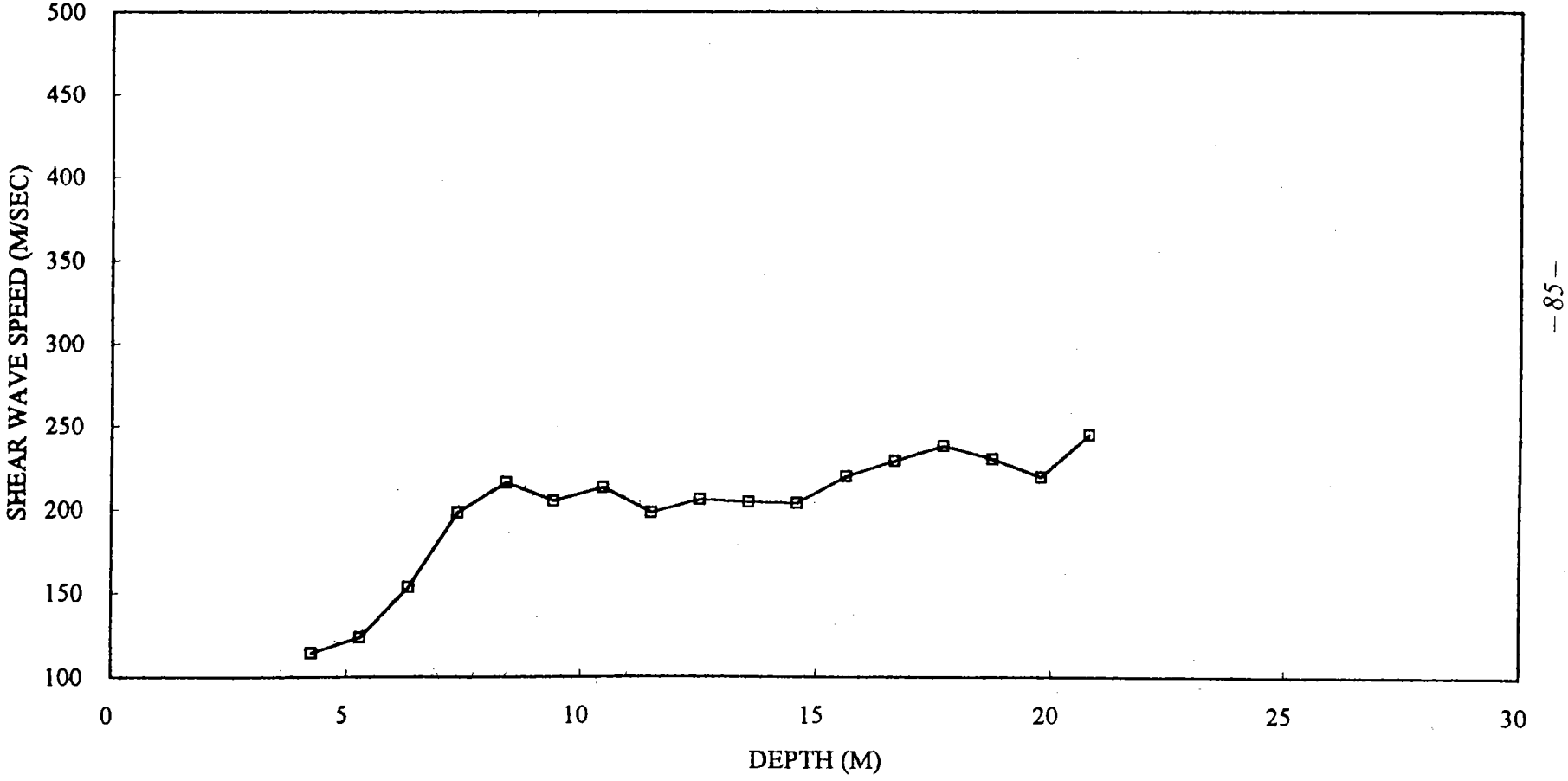
TAICHUNG HARBOR NO.16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP15



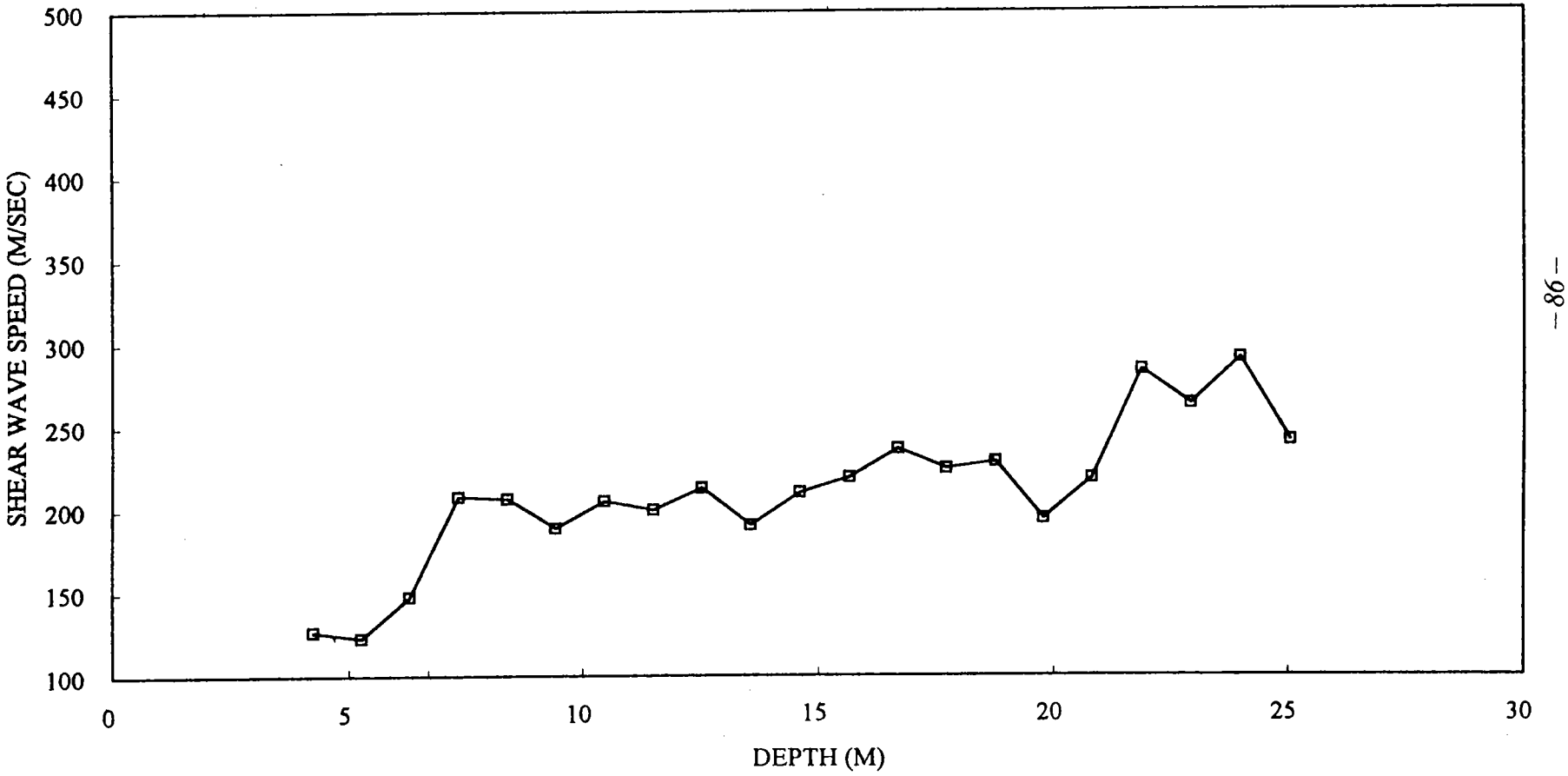
TAICHUNG HARBOR NO.16 WHARF
TEST HOLE NO : CPTP16



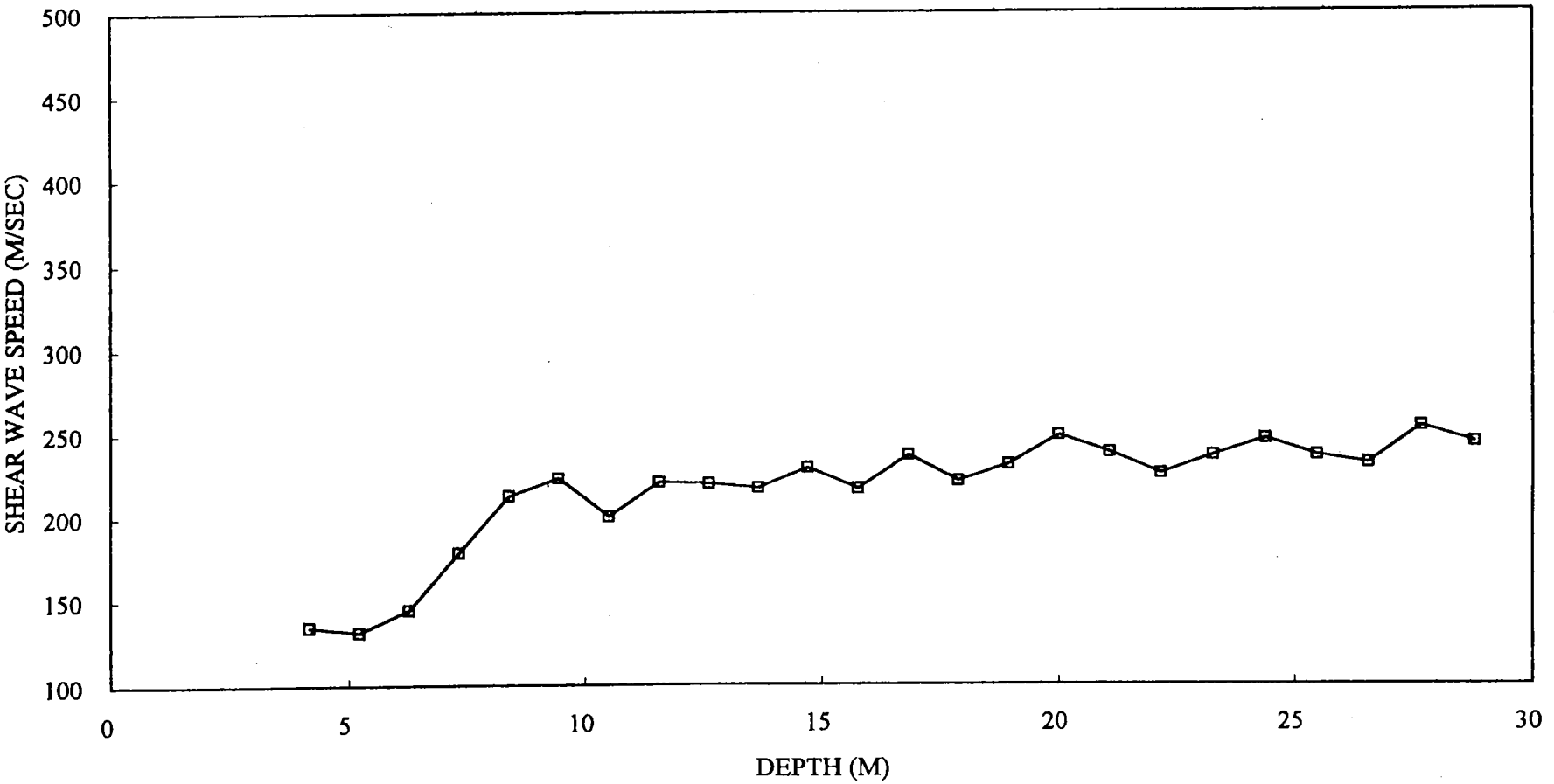
KAO-HSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H01



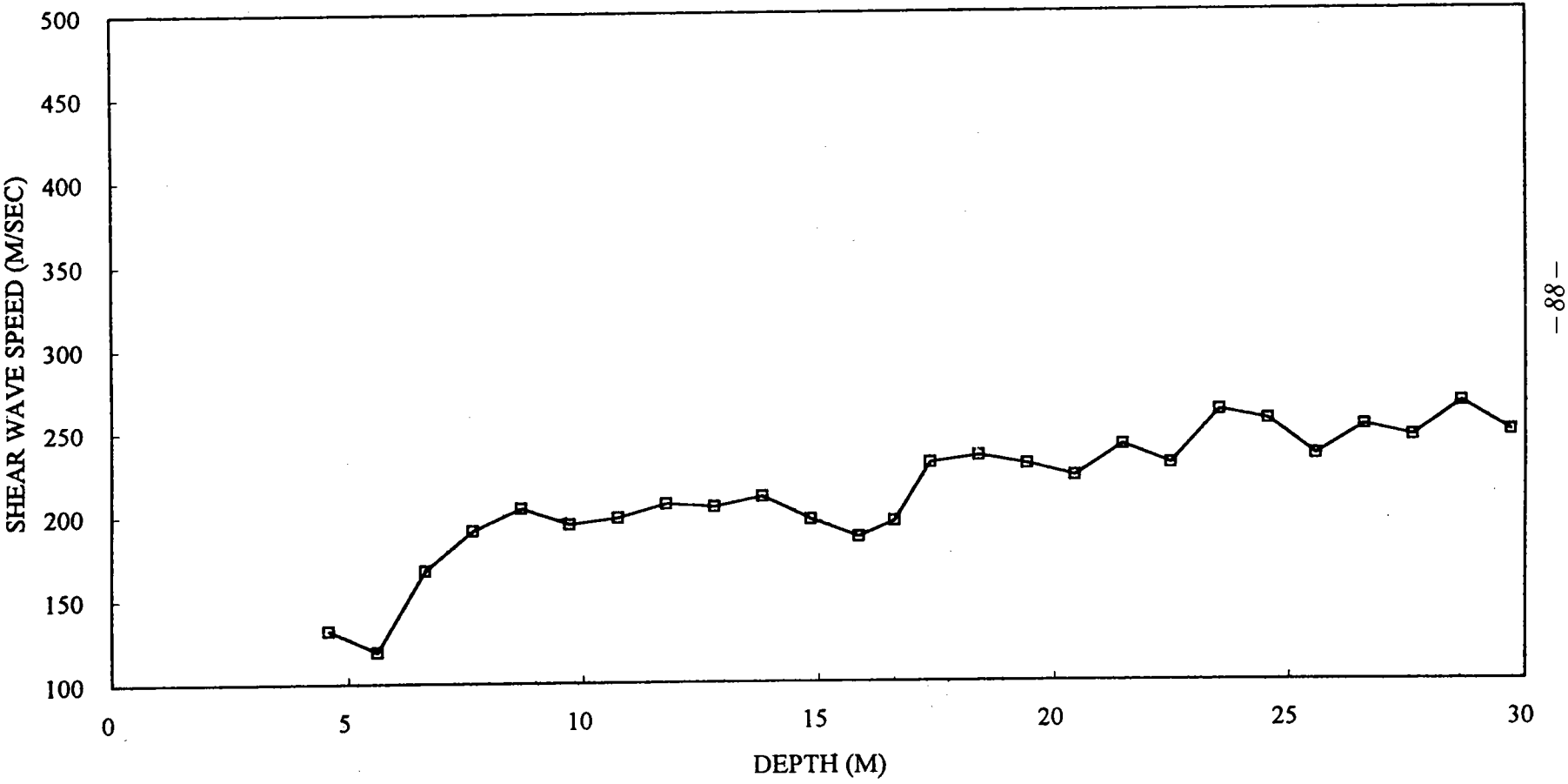
KAO-HSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H02



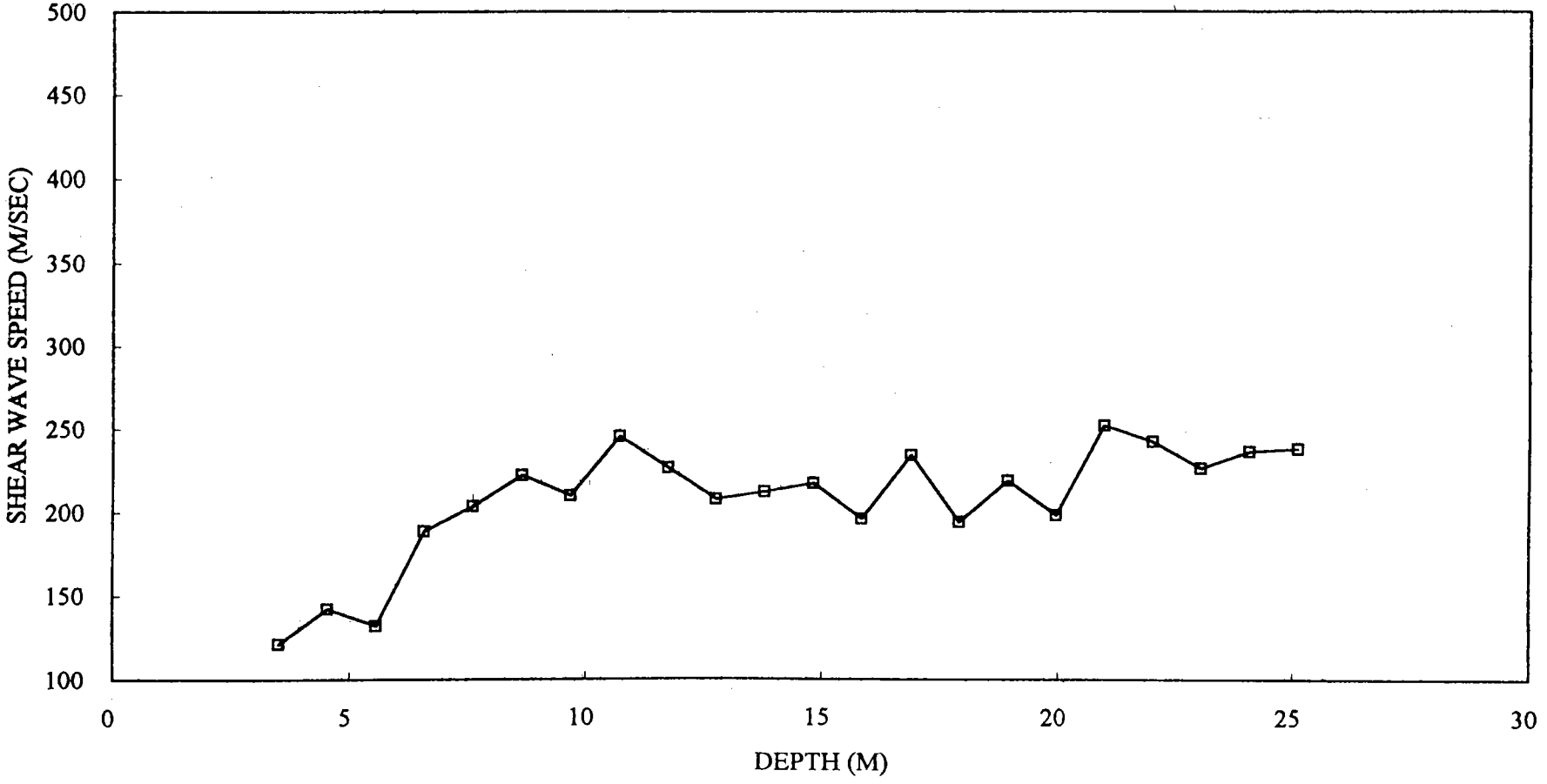
KAO-HSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H03



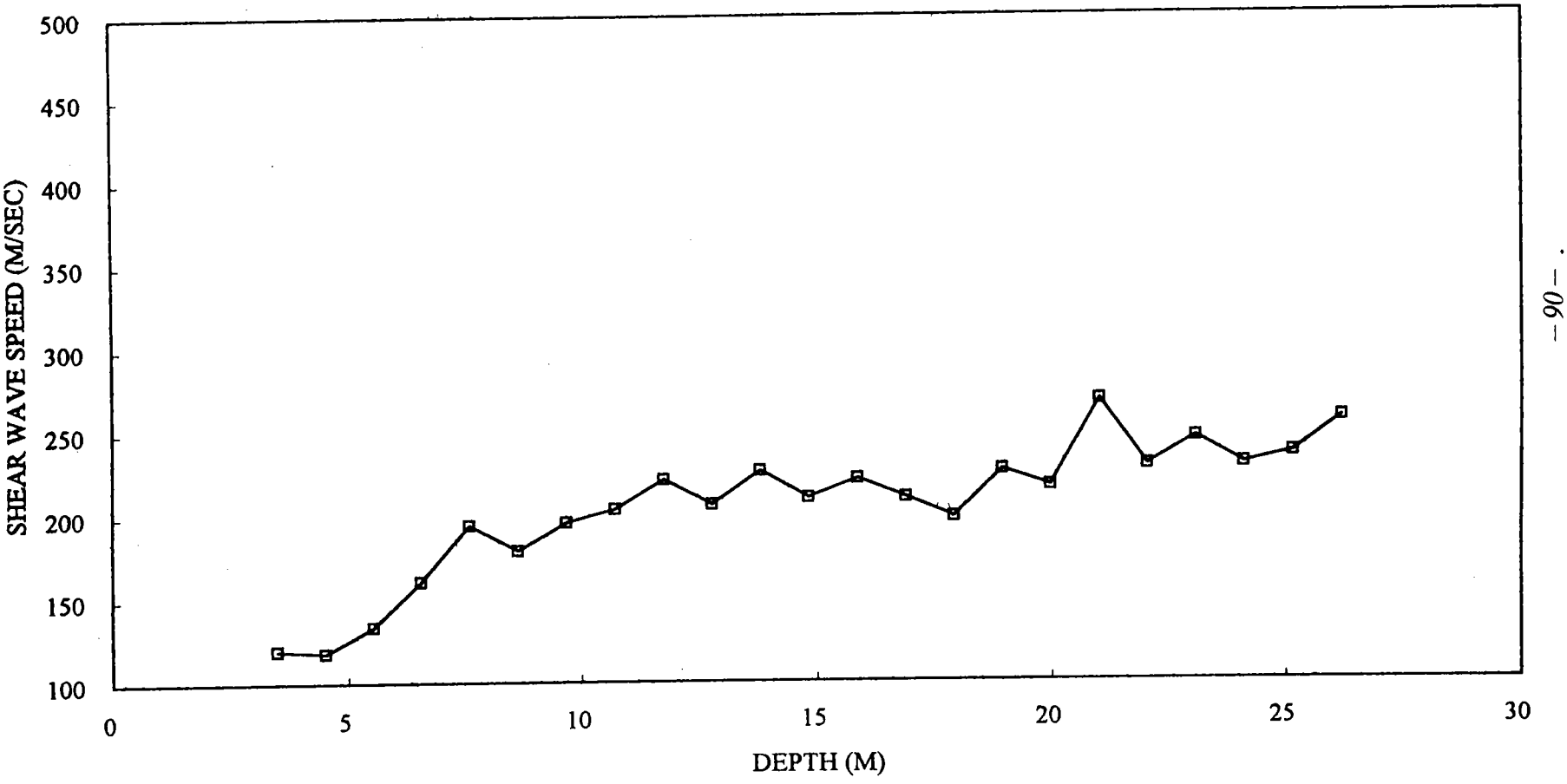
KAO-HSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H04



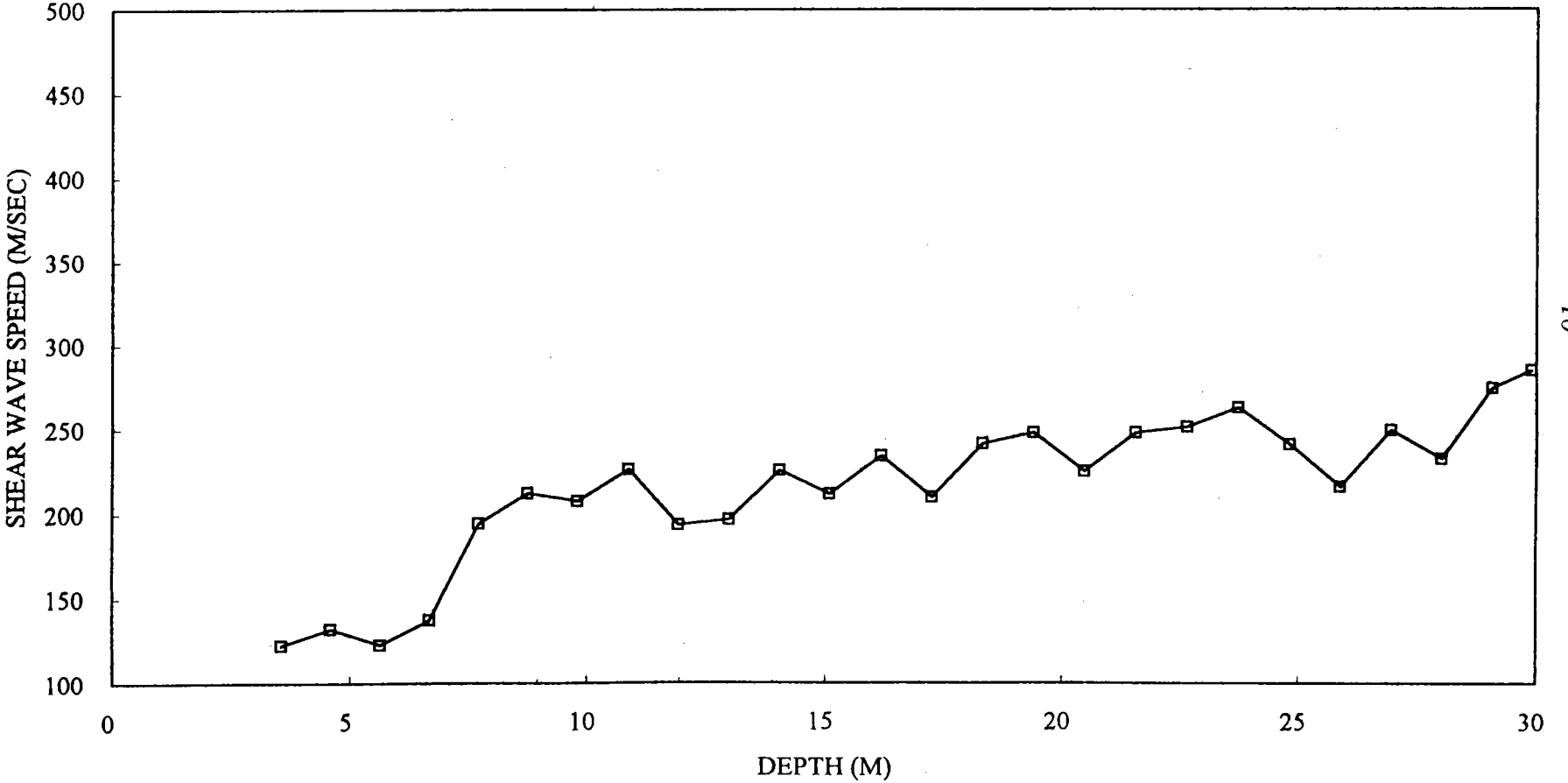
KAO-HSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H05



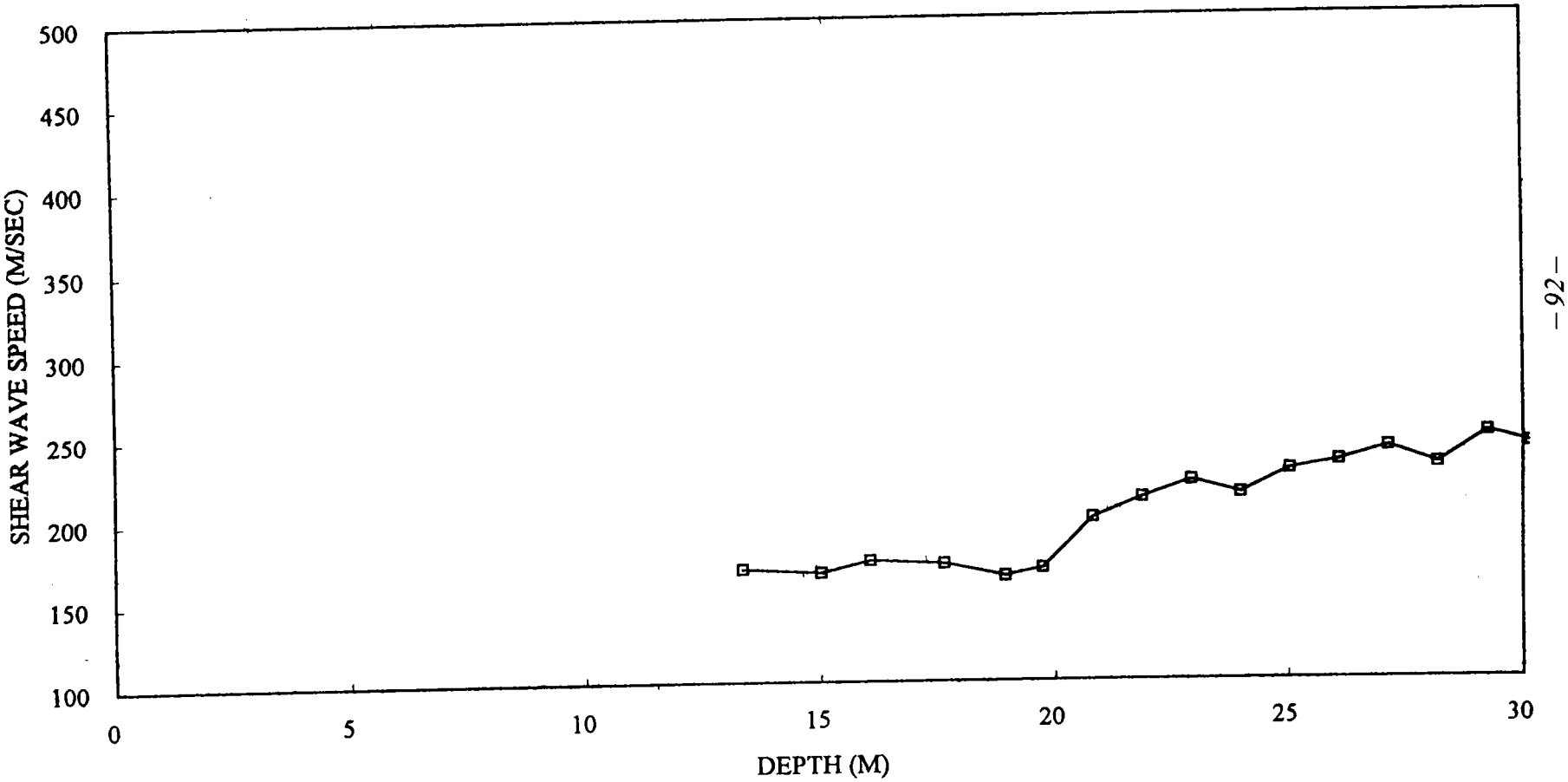
KAO-HSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H06



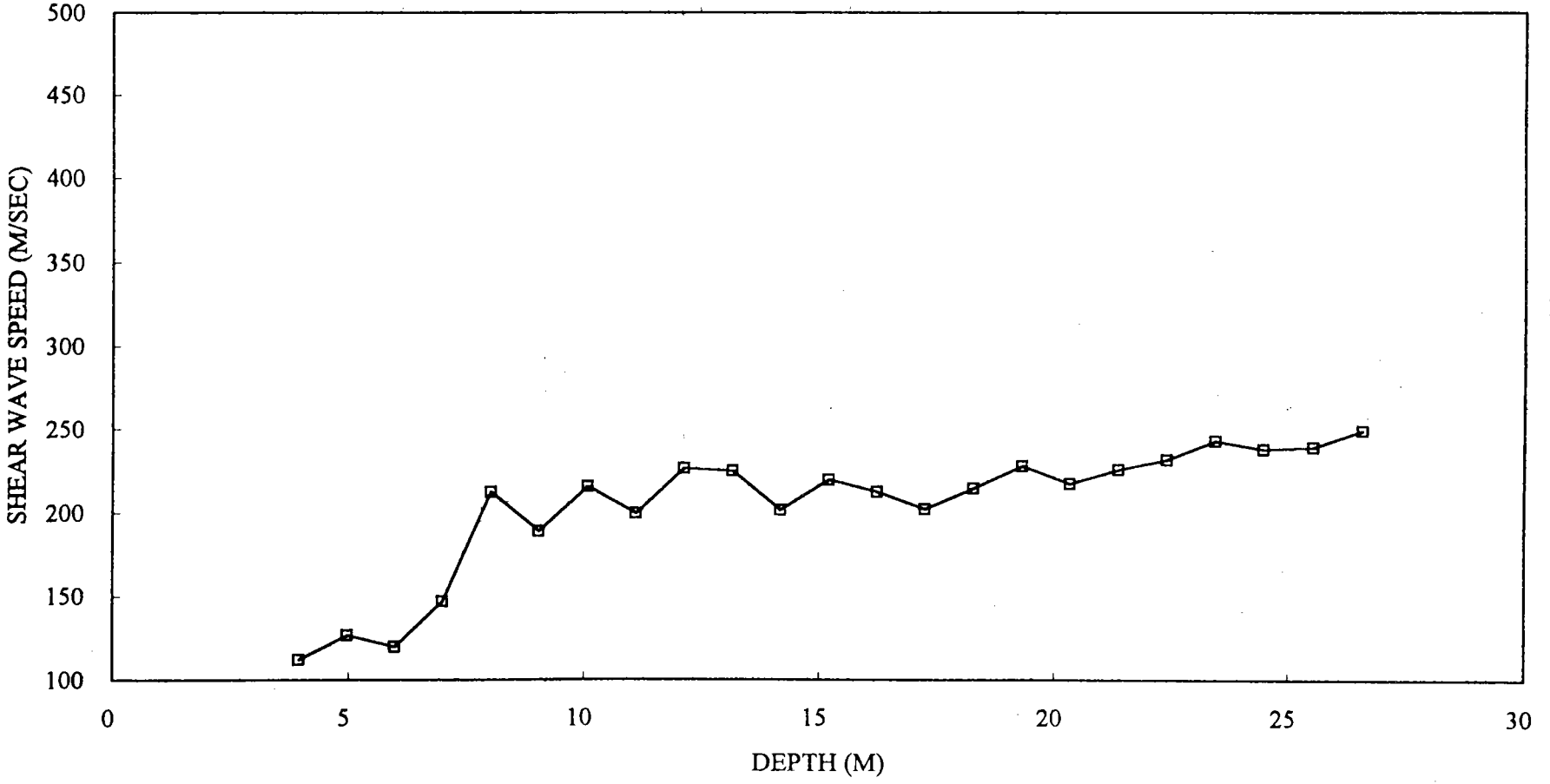
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H07



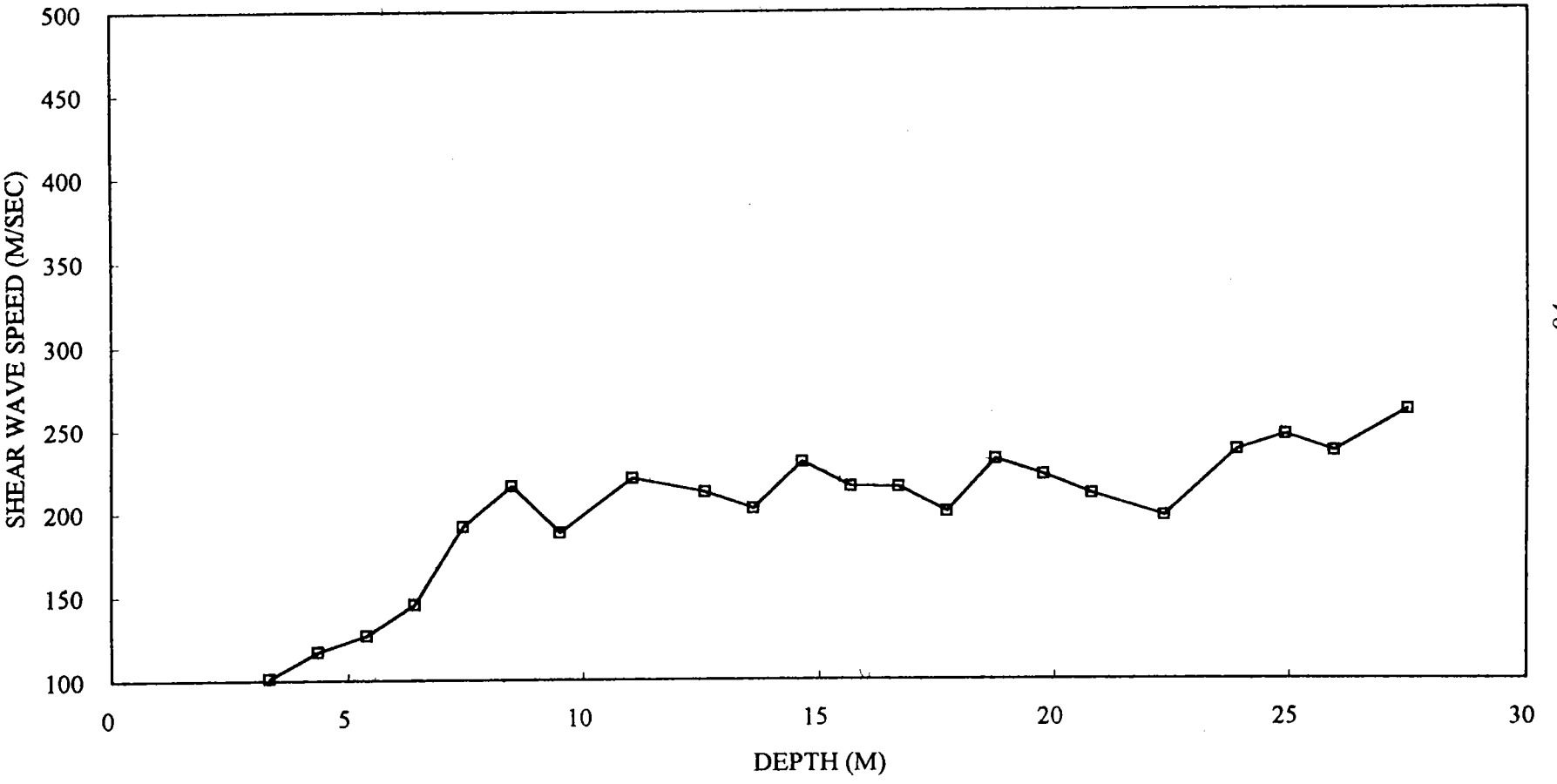
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H08



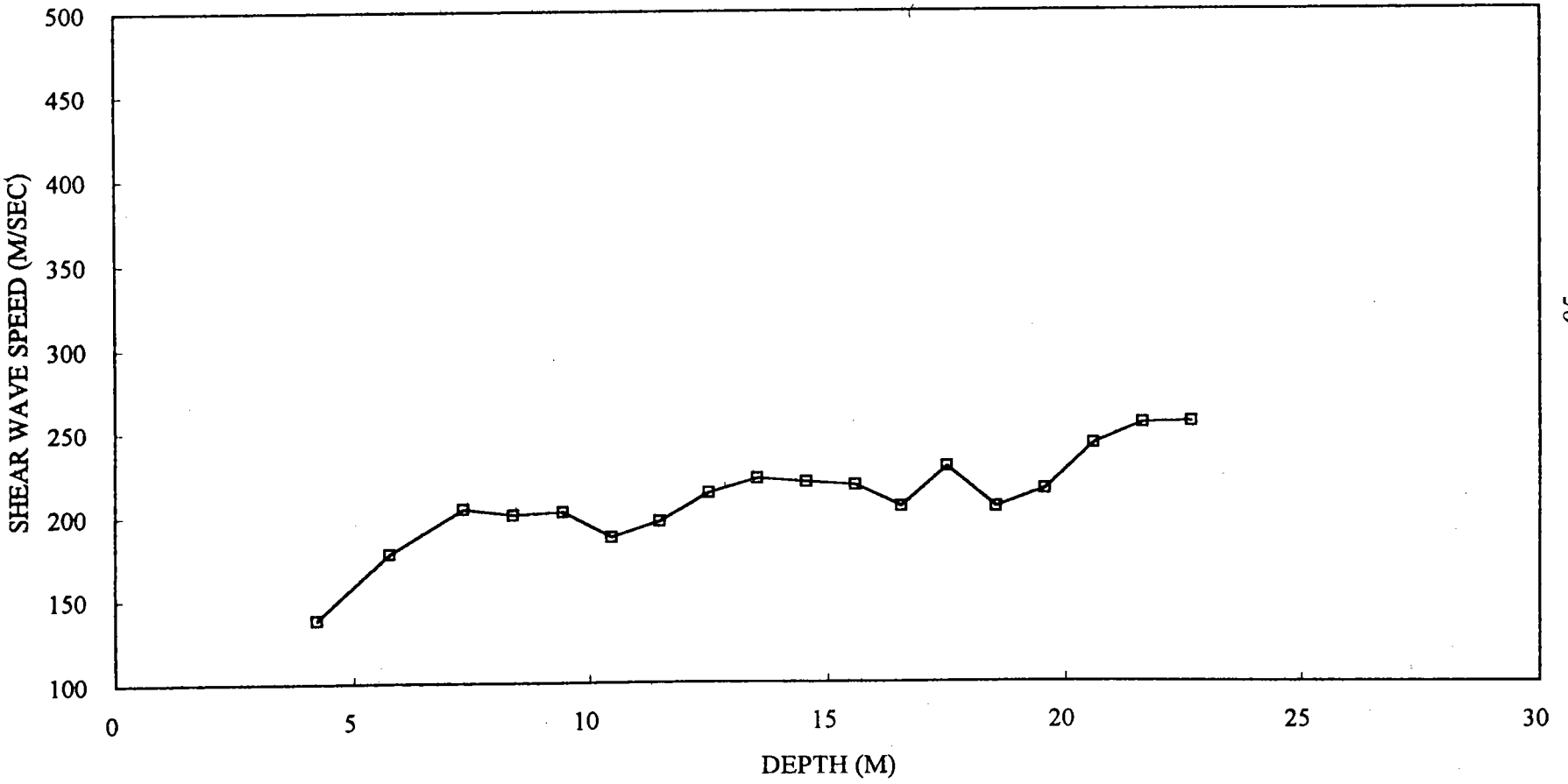
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H09



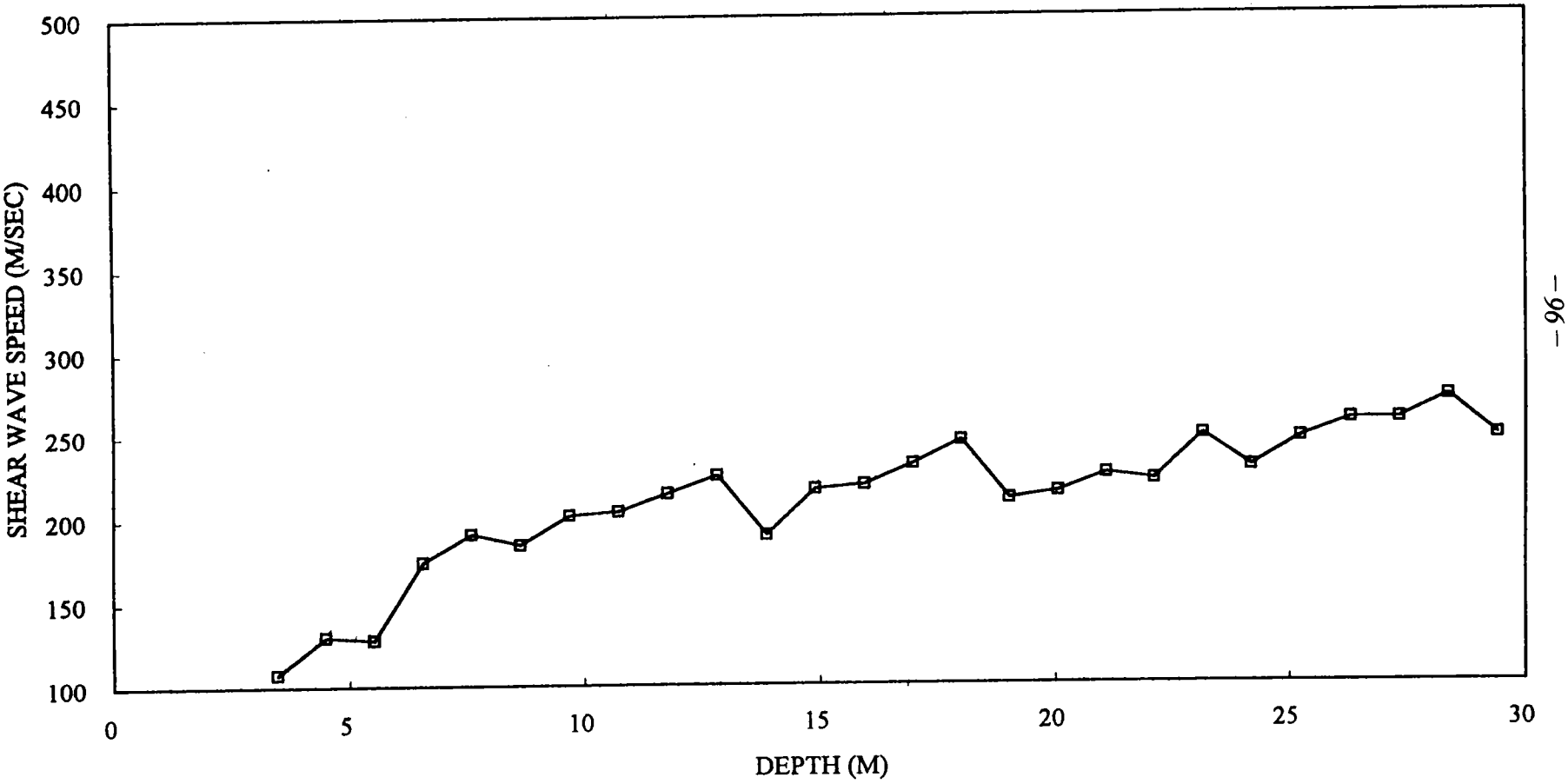
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H10



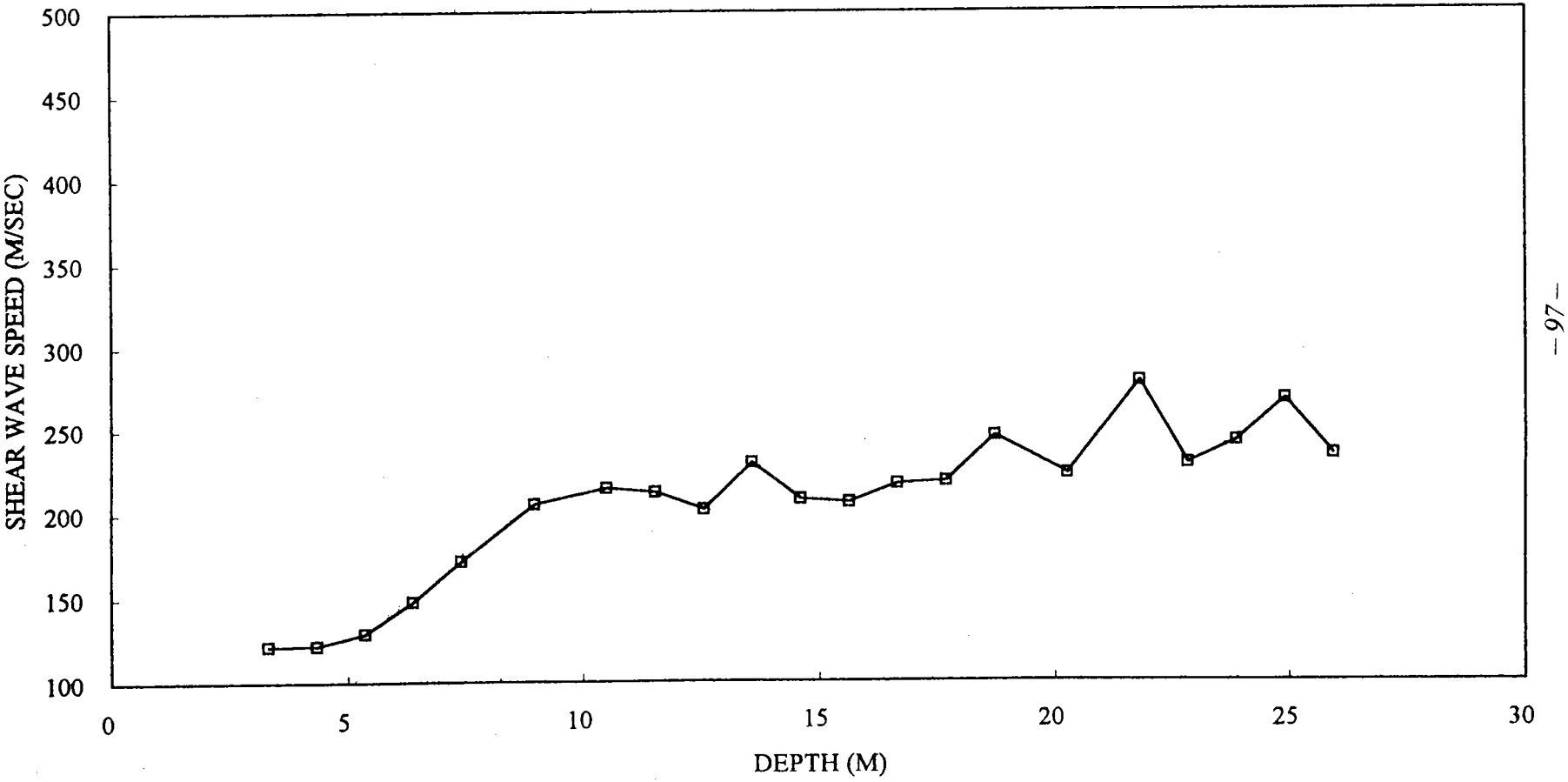
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H11



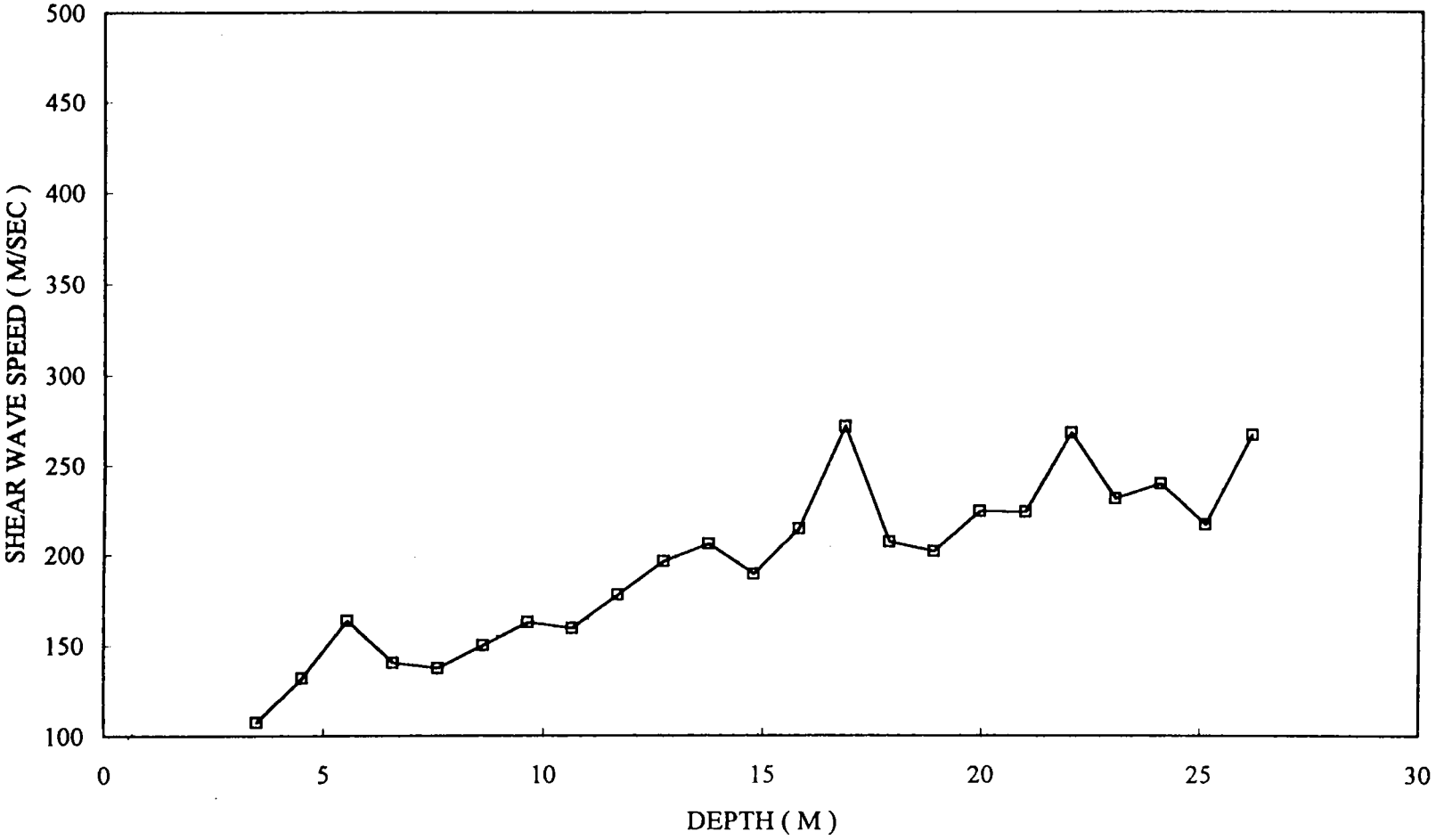
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H12



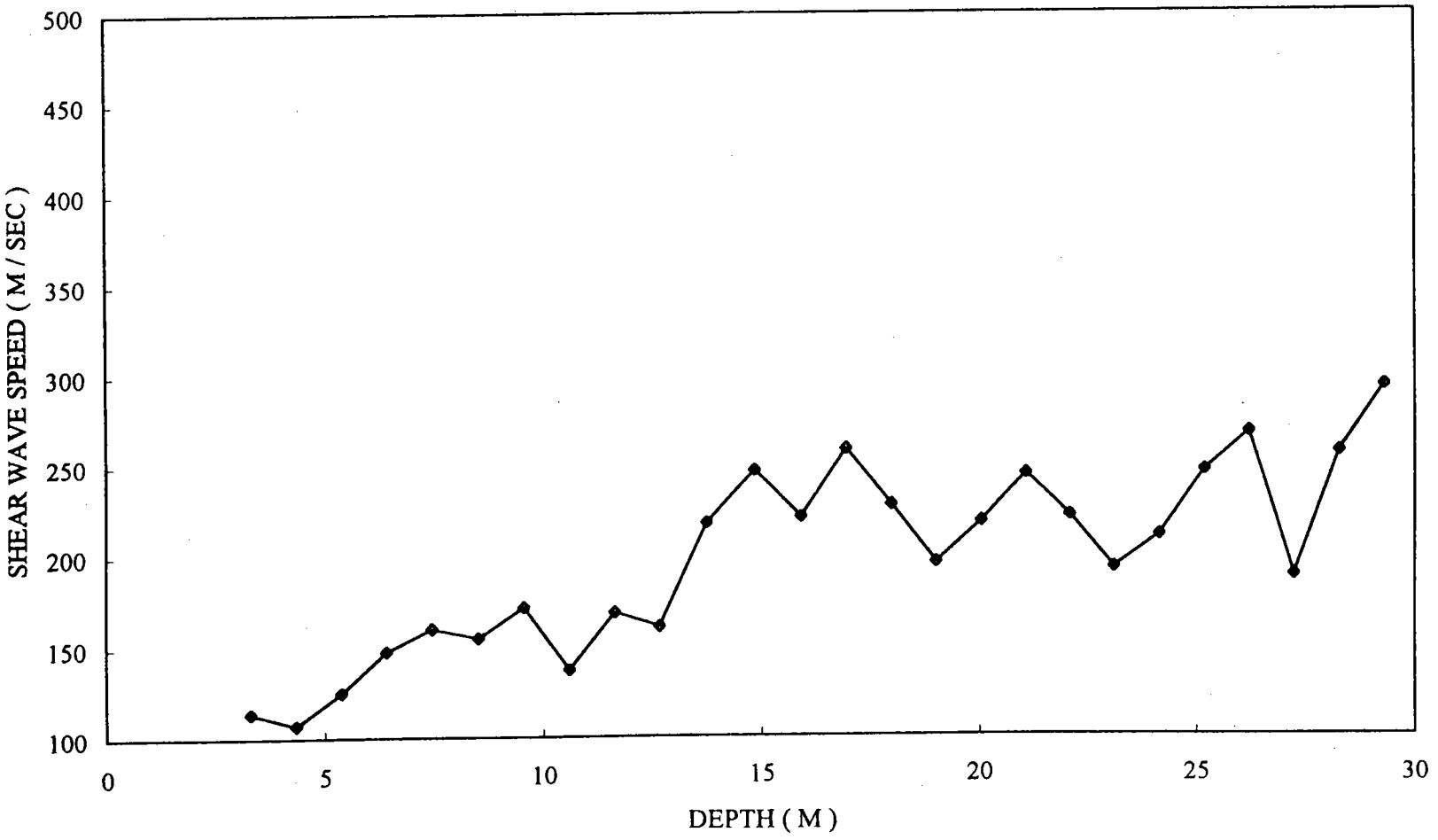
KAOHSIUNG HARBOR NO.5 CONTAINER CENTER
TEST HOLE NO : KH-H13



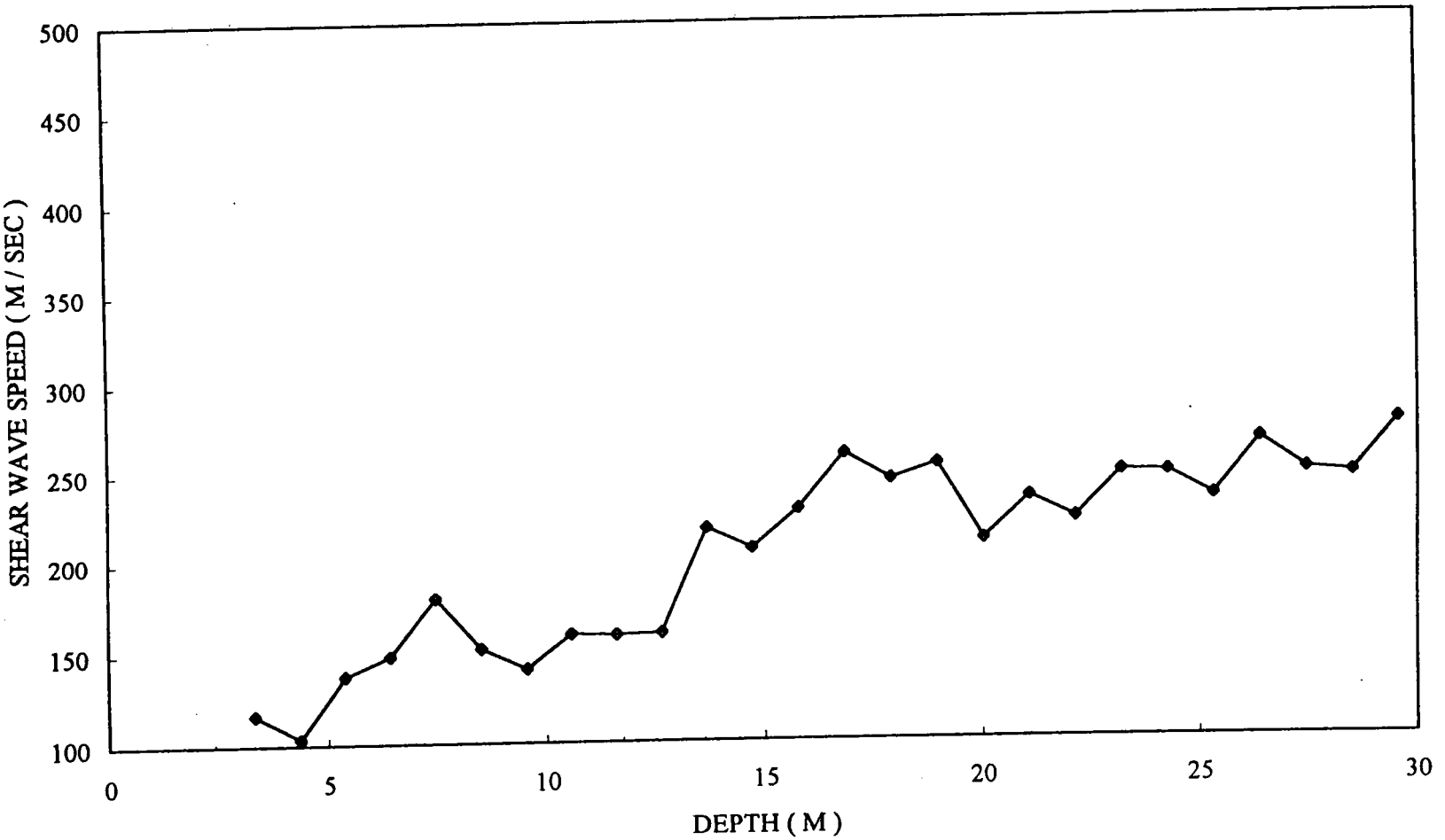
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH01



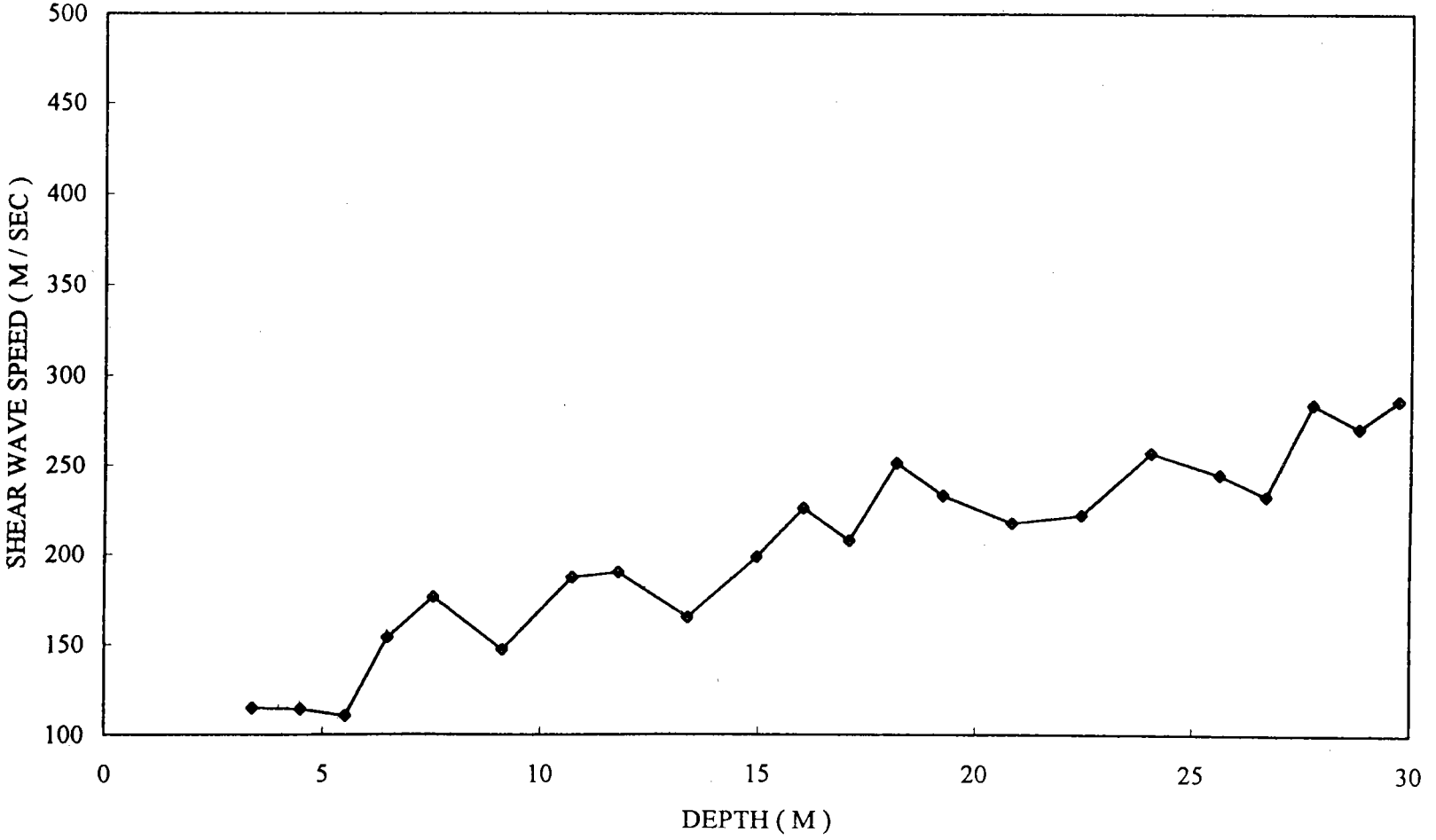
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH02



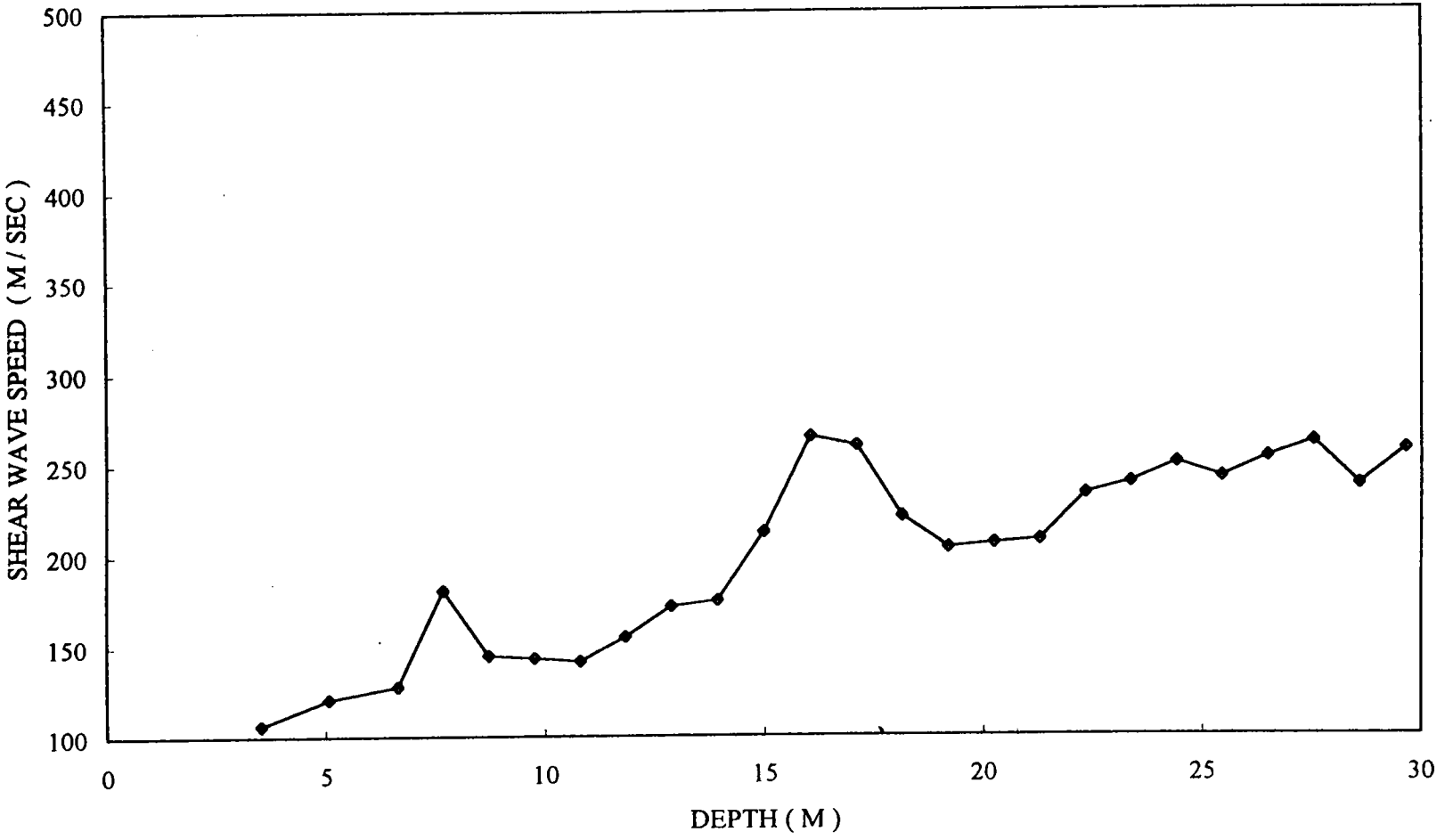
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH03



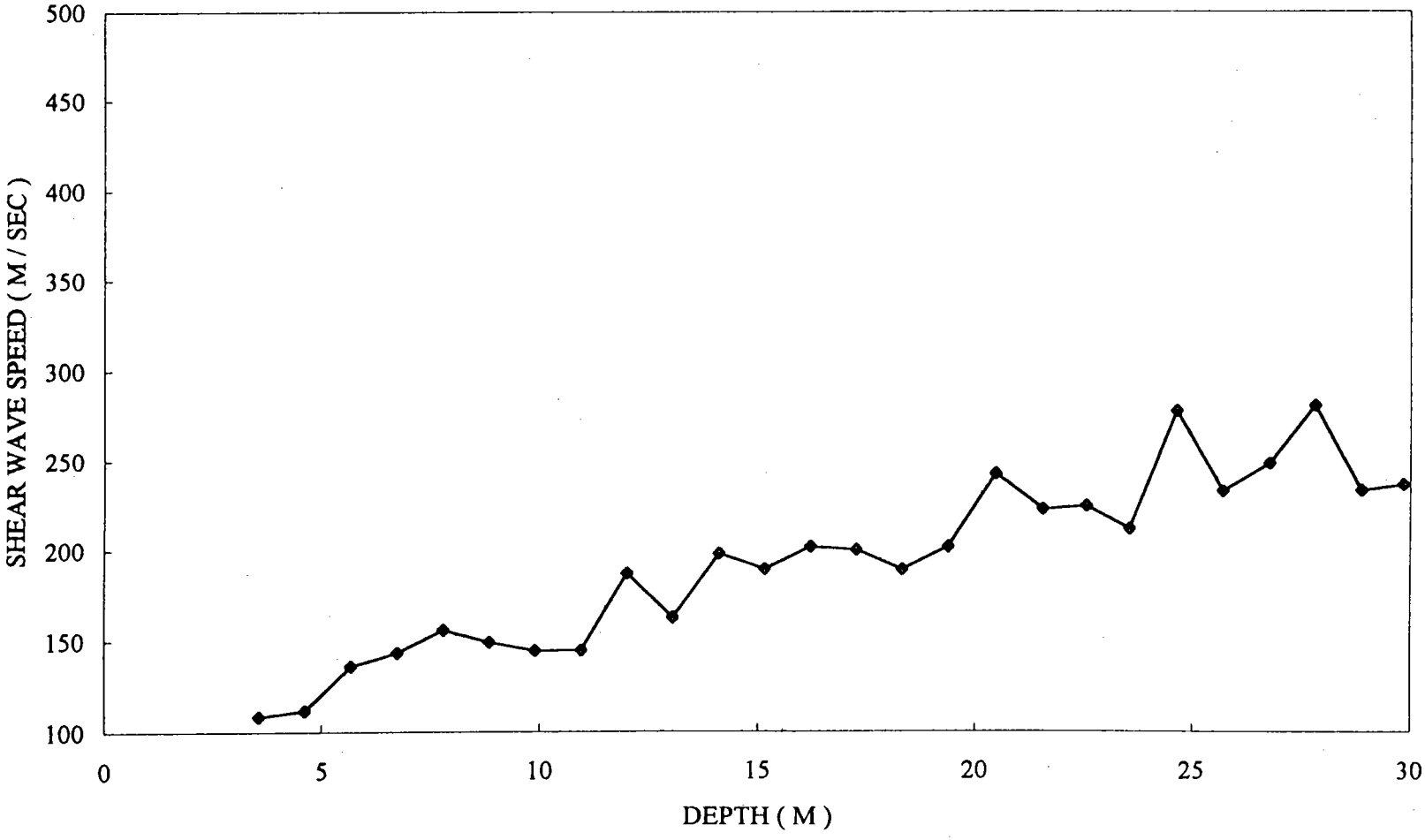
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH04



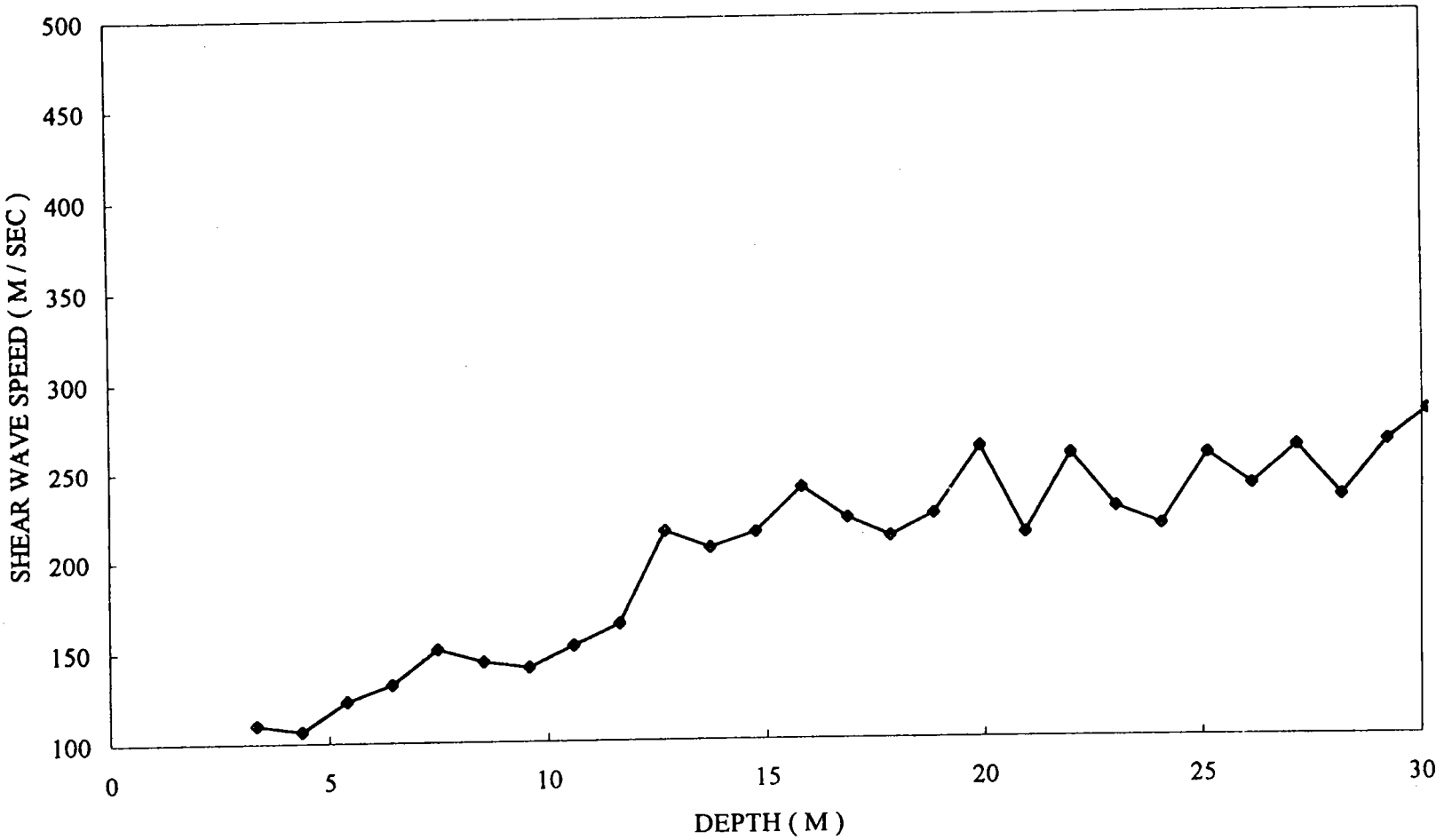
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH05



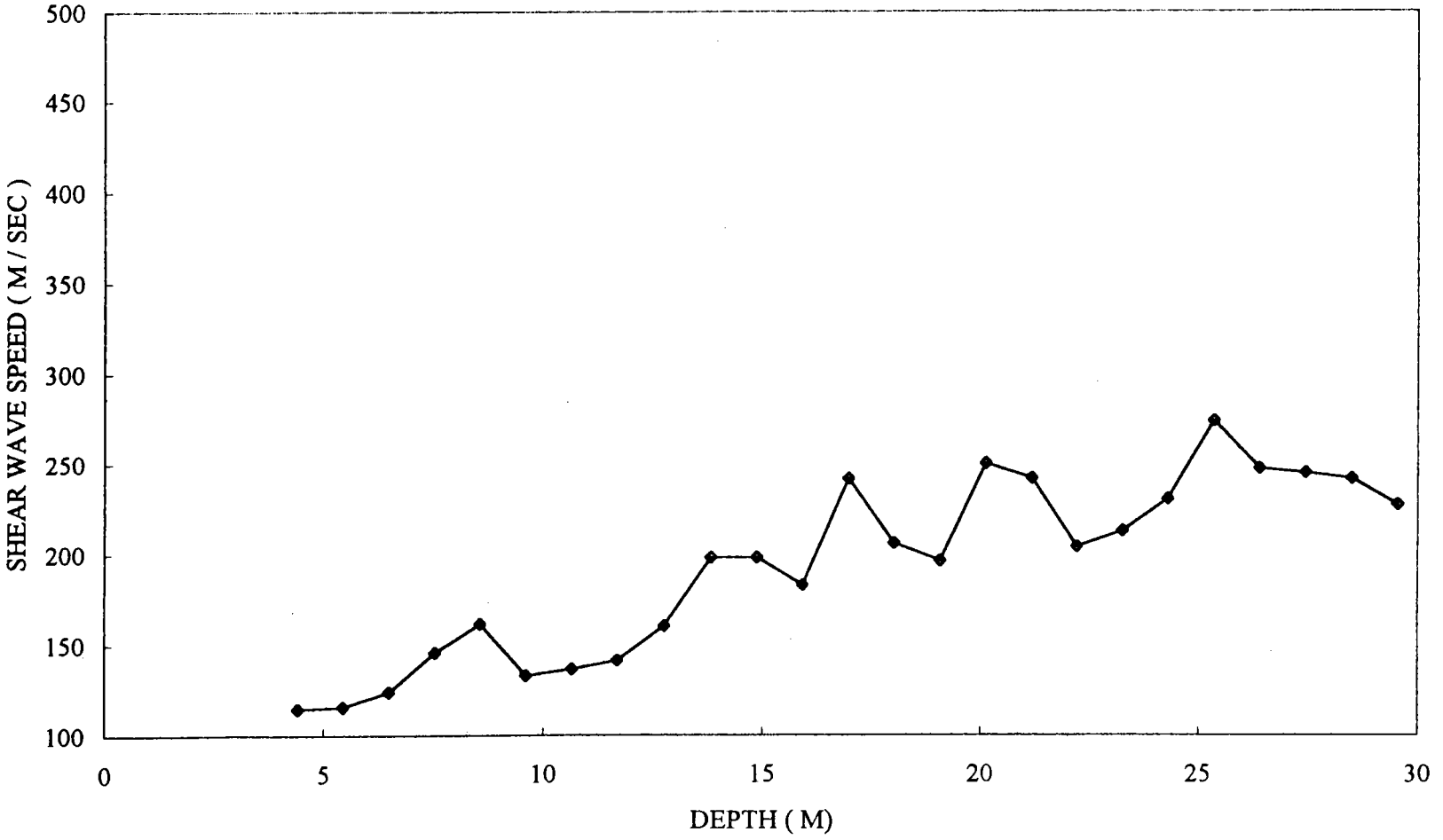
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH06



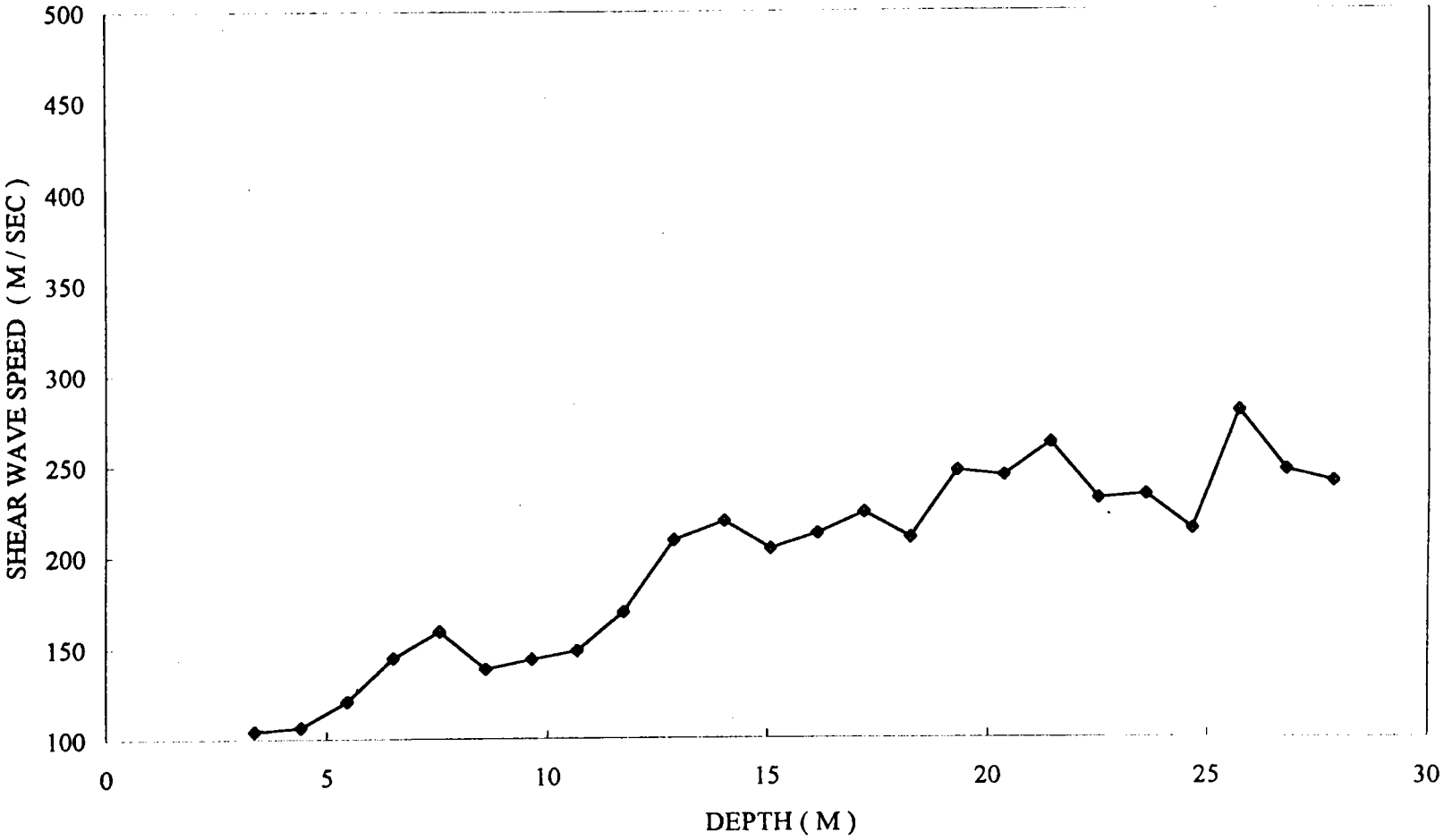
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH07



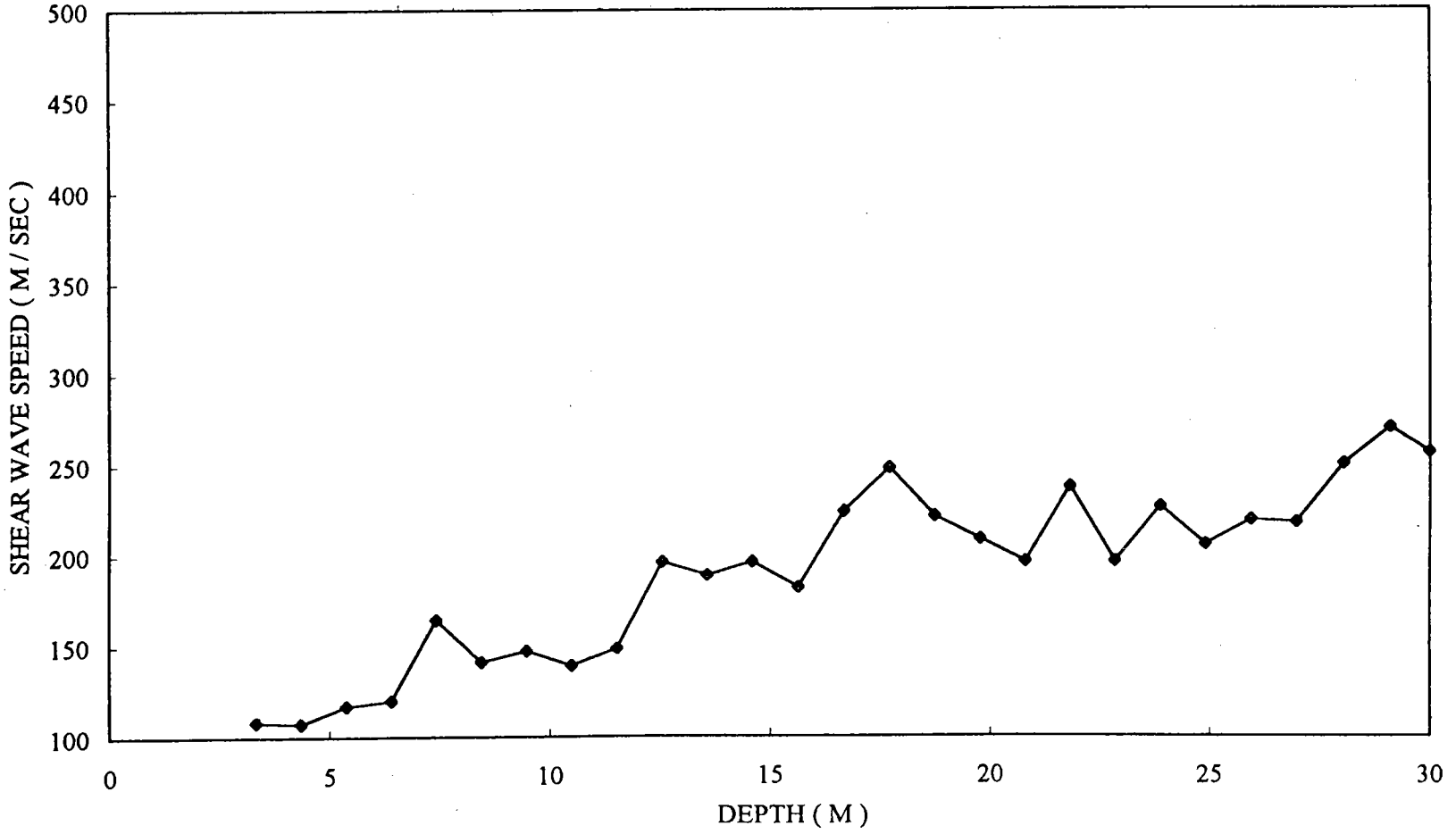
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH08



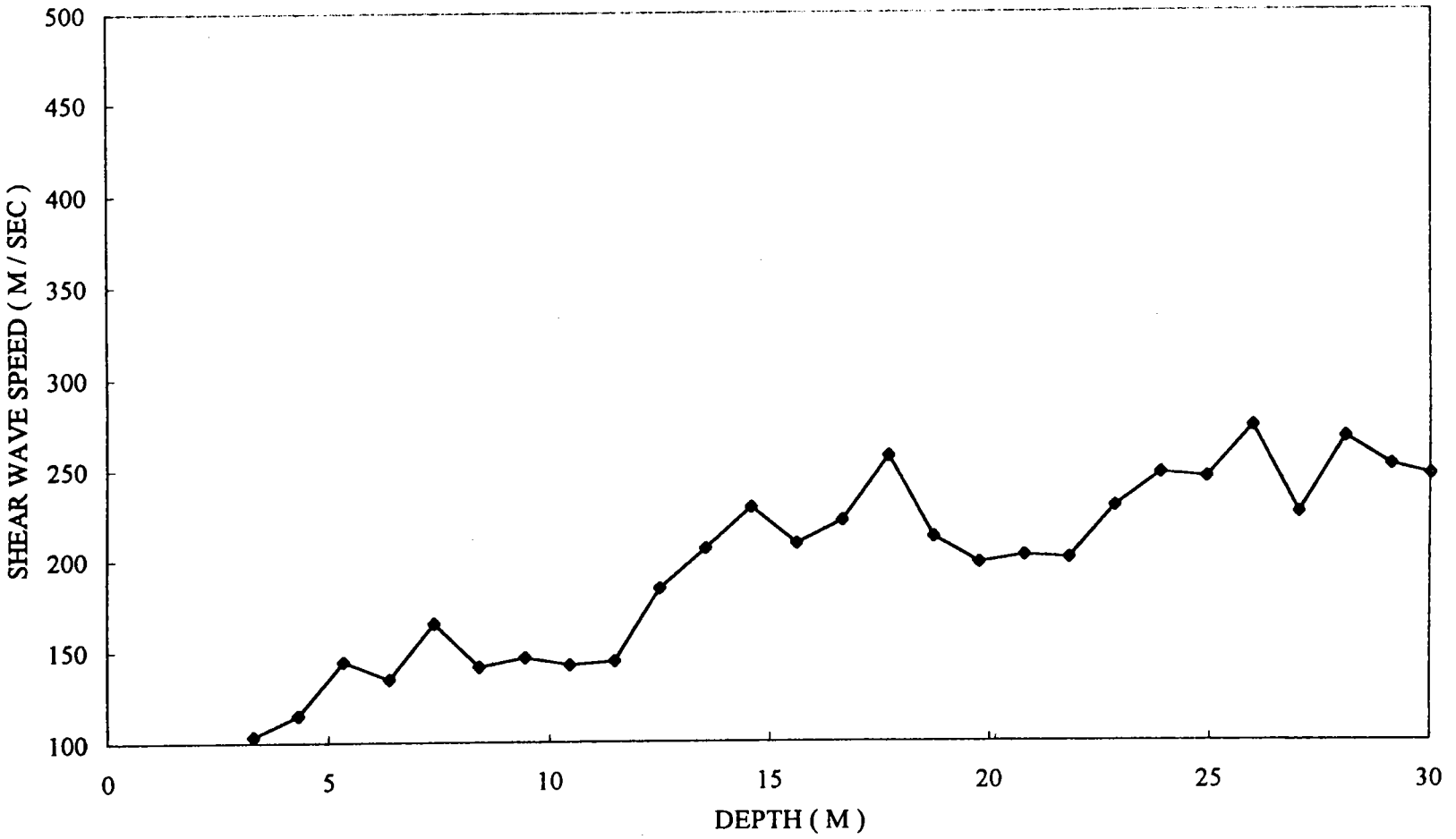
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH09



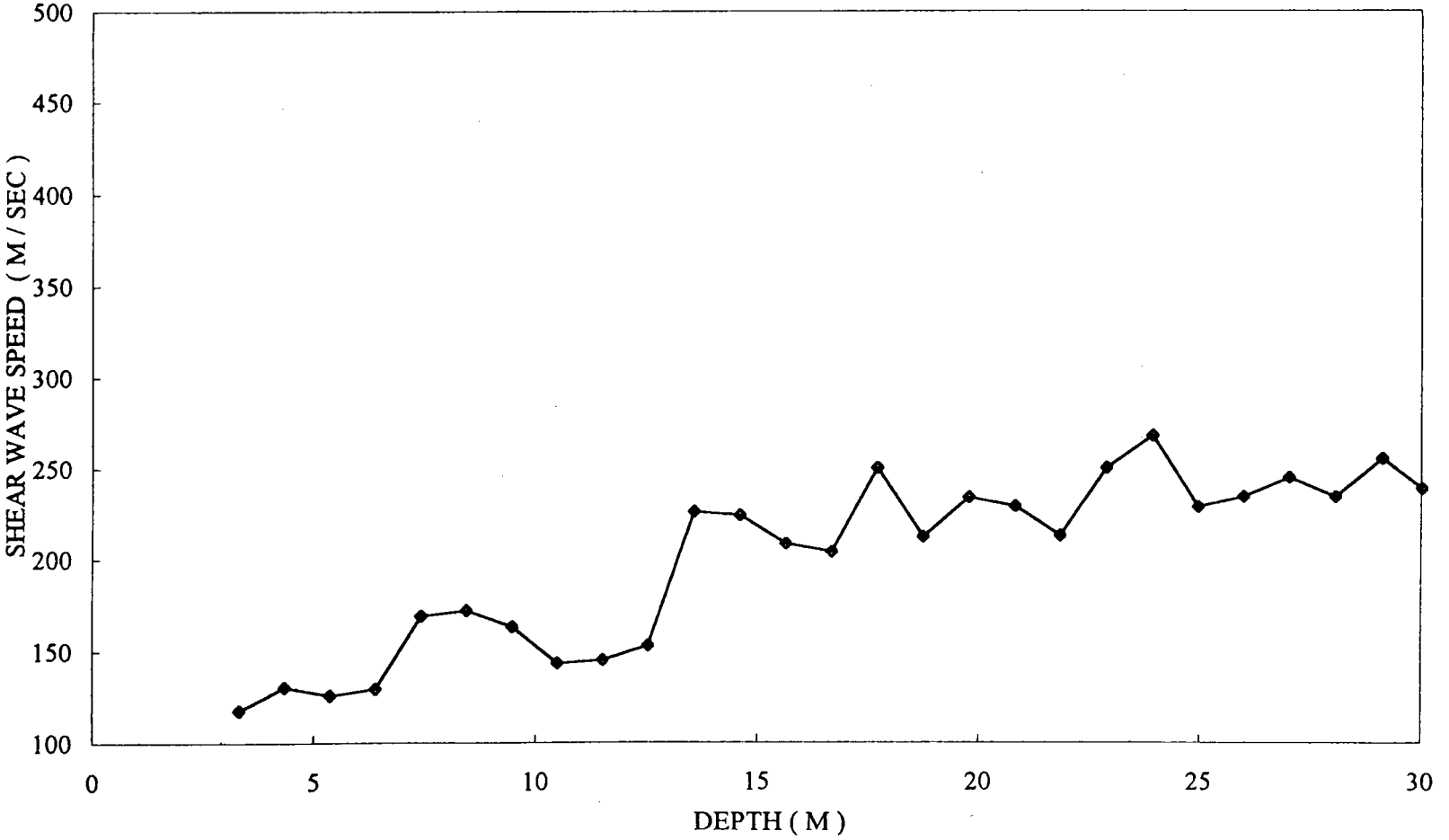
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH10



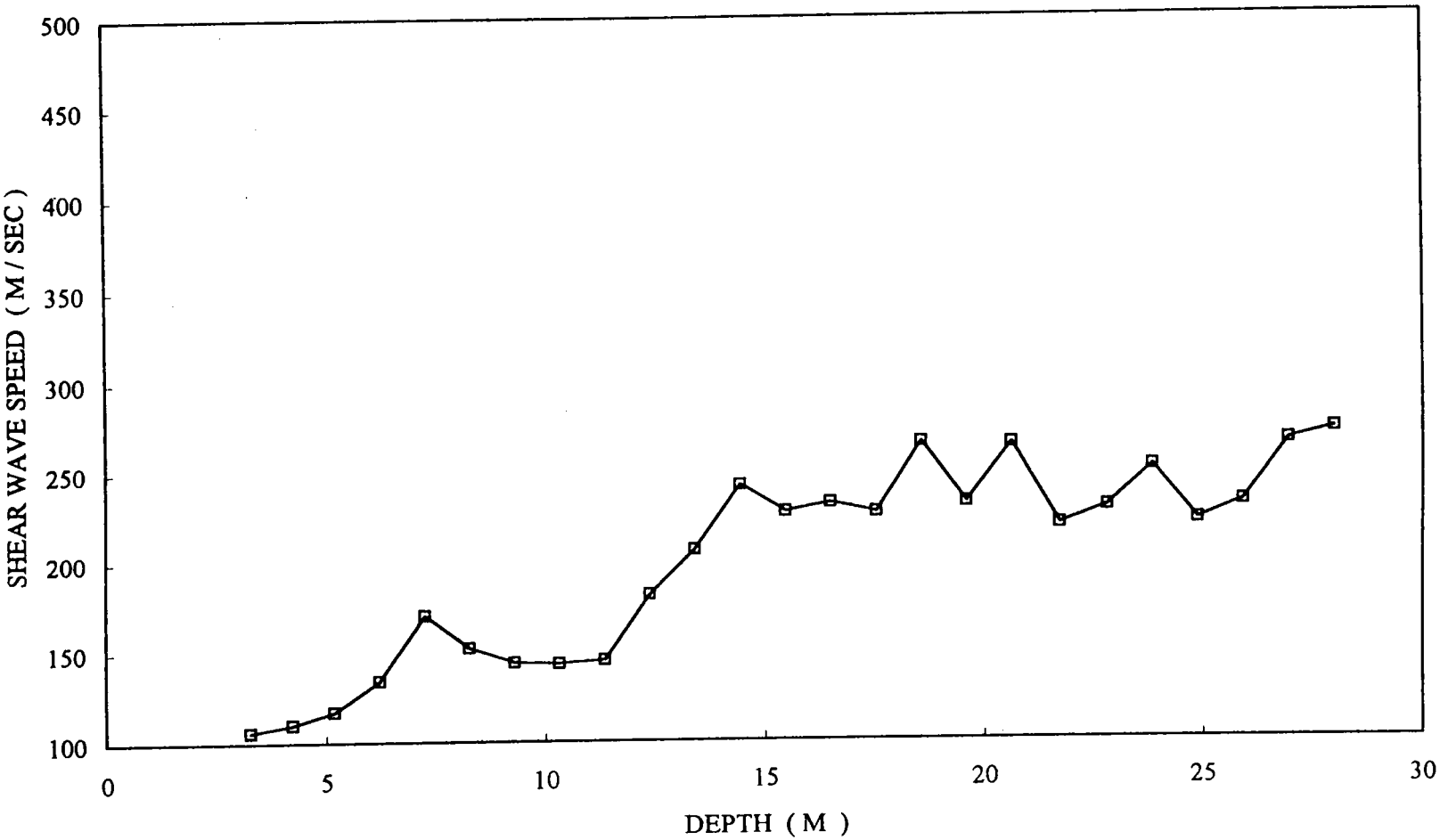
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH11



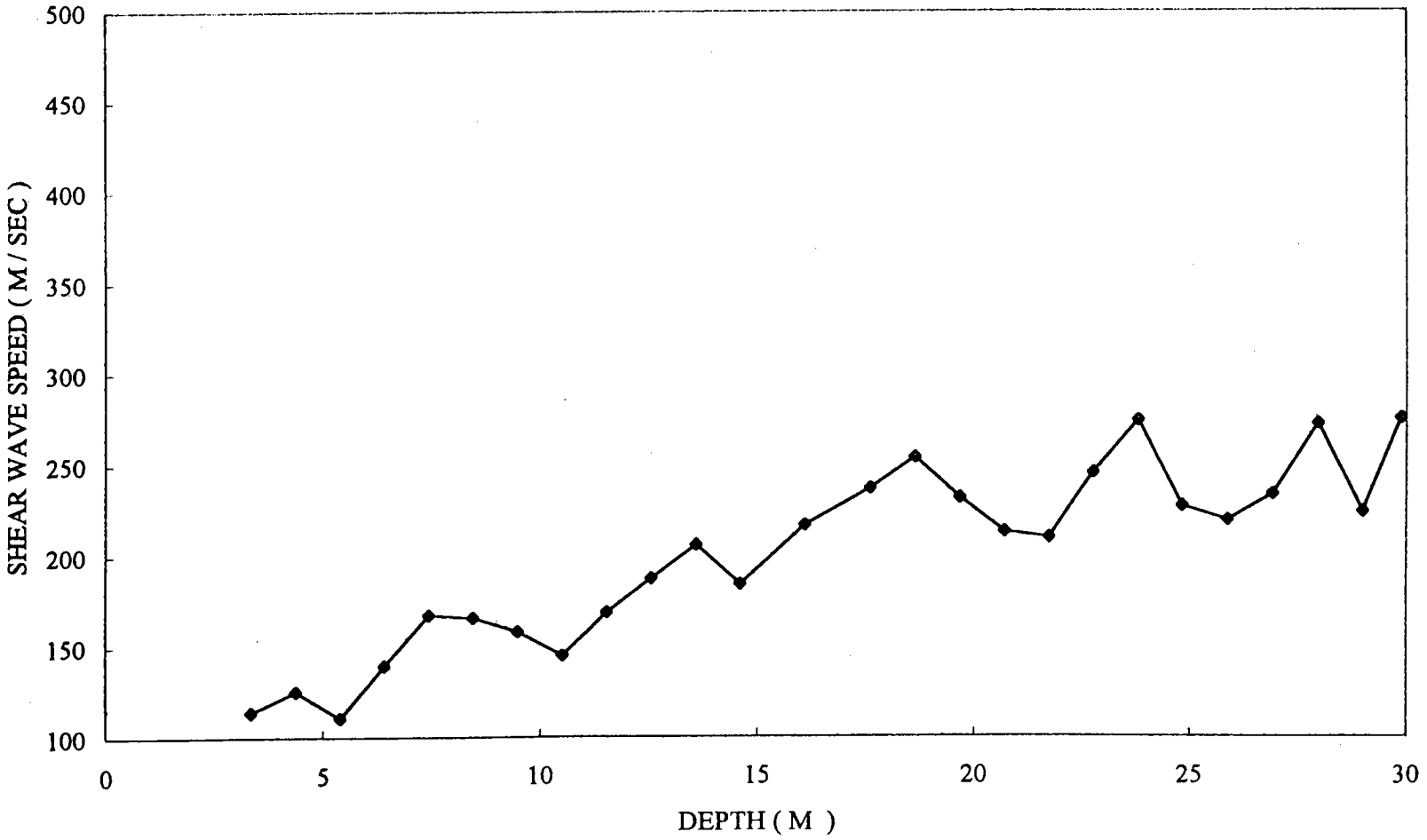
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH12



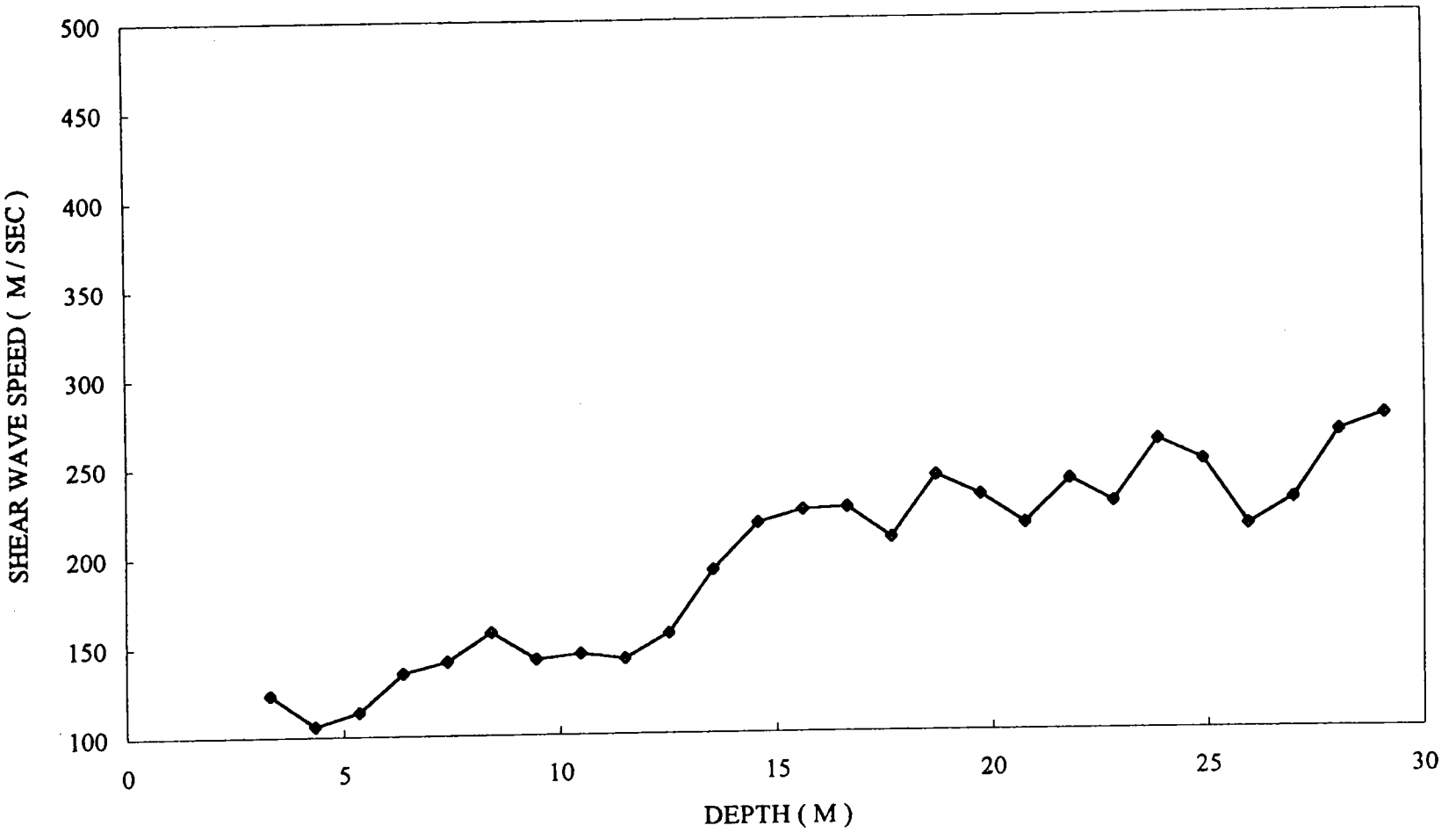
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH14



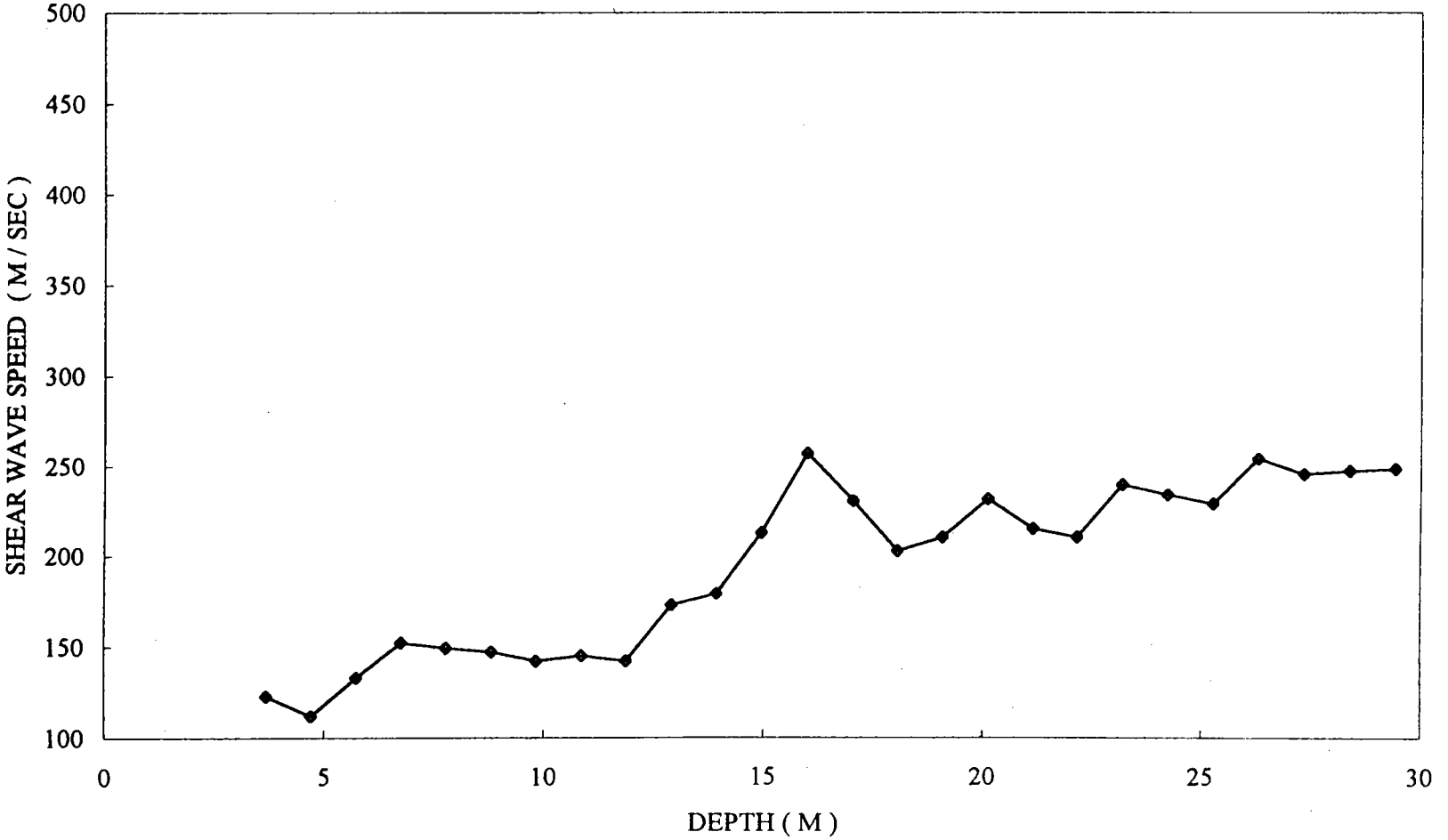
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH15

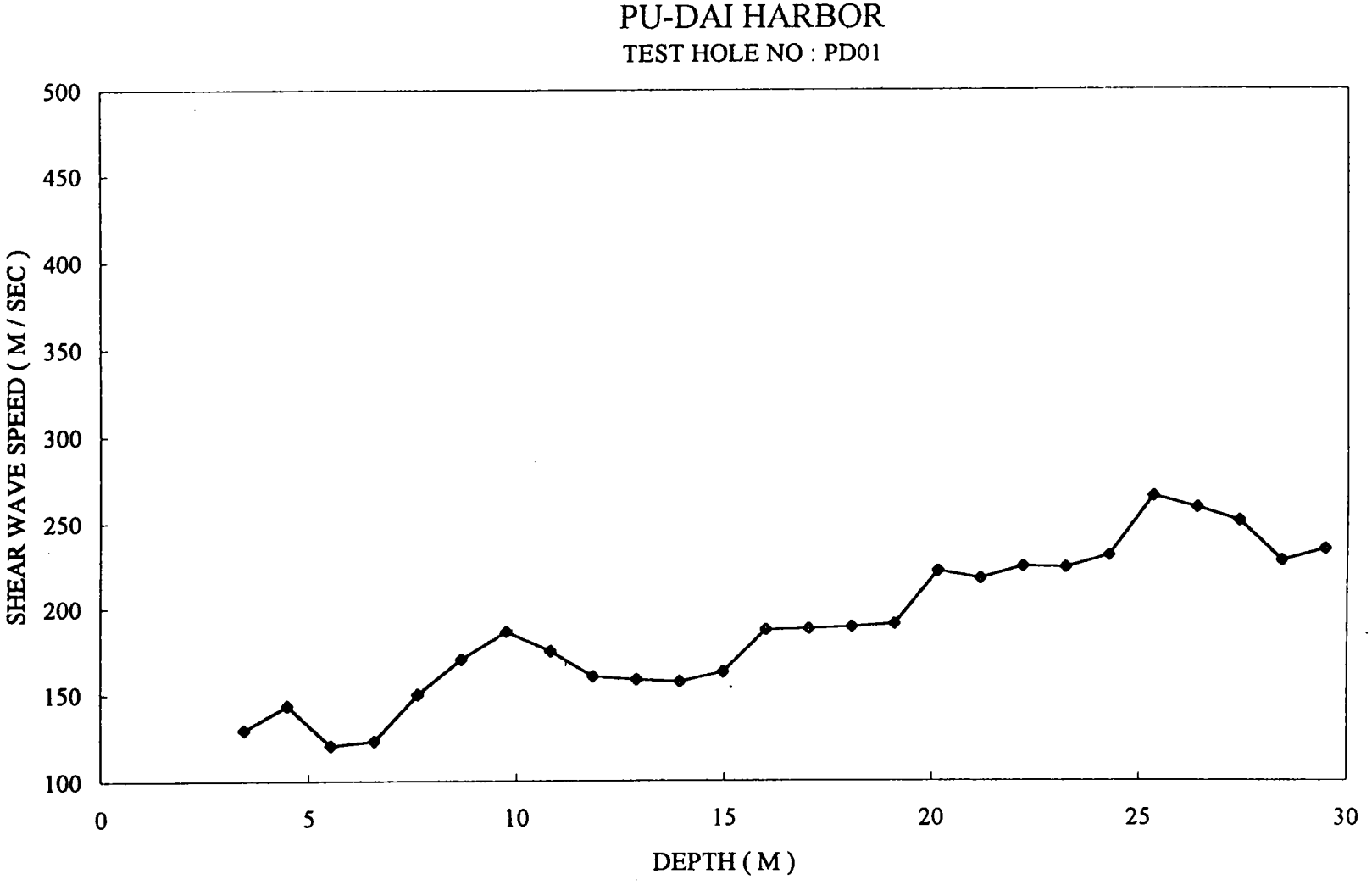


AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH16



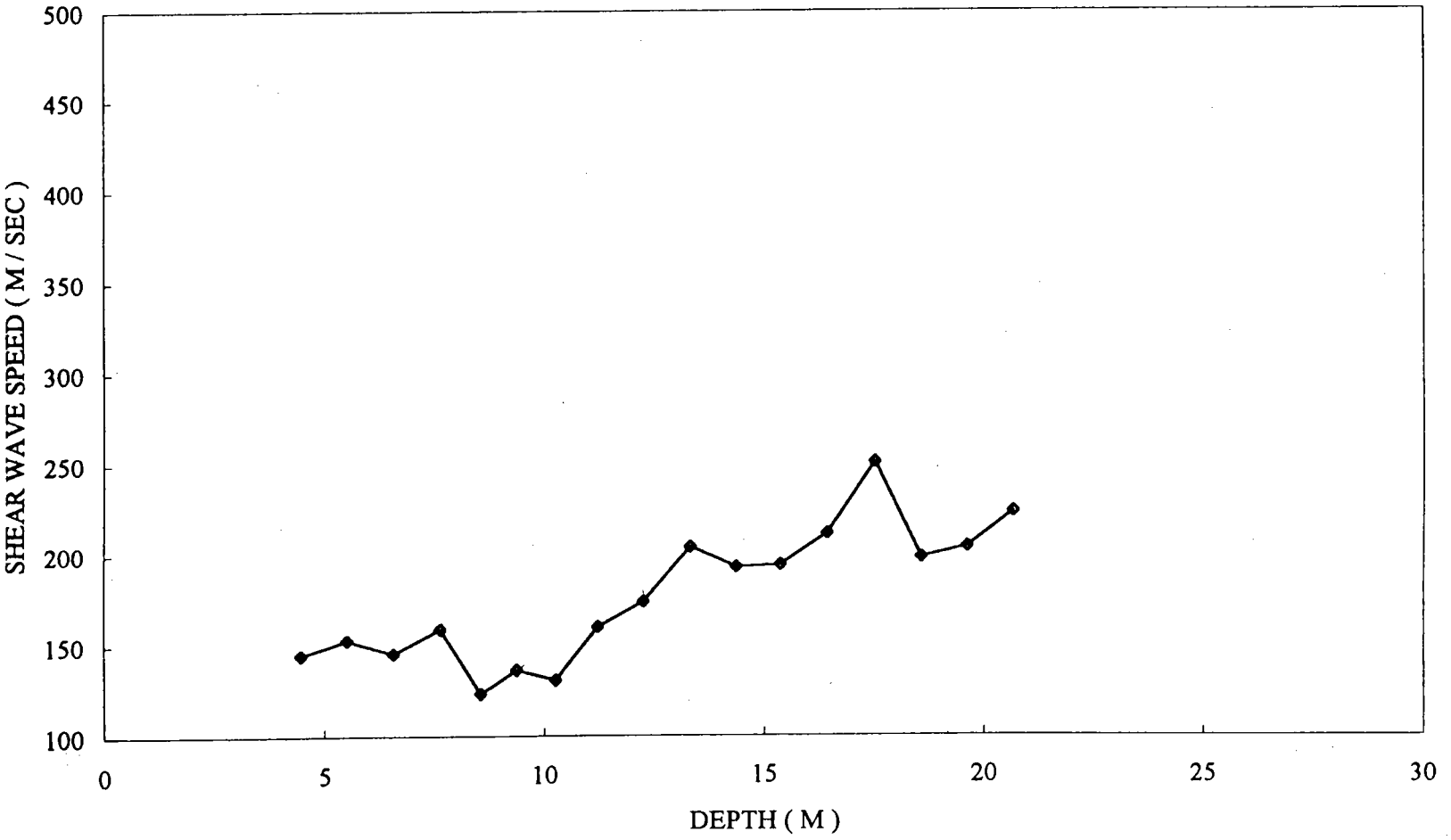
AN-PING HARBOR NO. 9 - 10 WHARF
TEST HOLE NO : APH17




PU-DAI HARBOR
TEST HOLE NO : PD01
SHEAR WAVE SPEED (M / SEC)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
0
5
10
15
20
25
30
DEPTH (M)

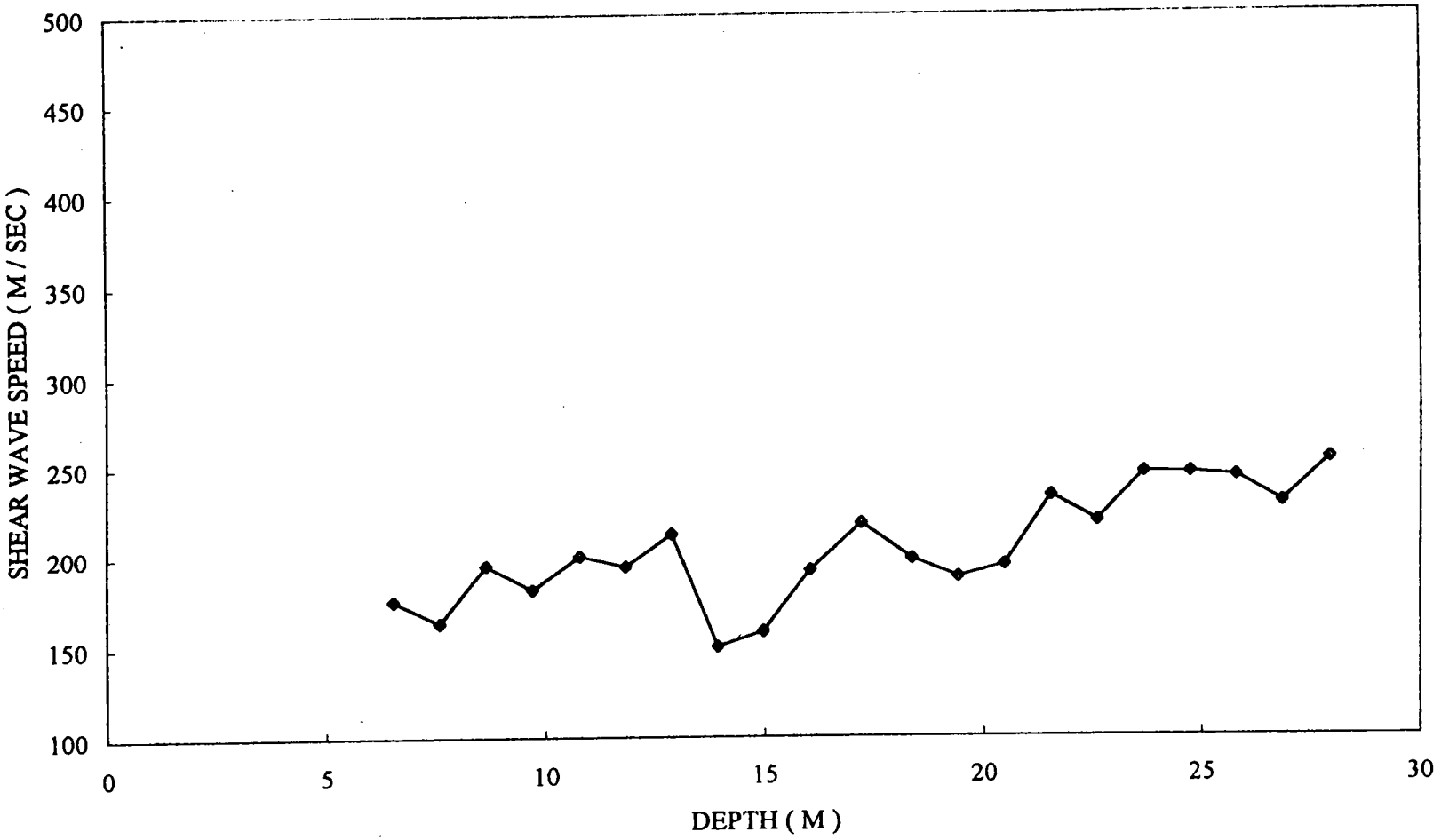
PU-DAI HARBOR

TEST HOLE NO : PD02



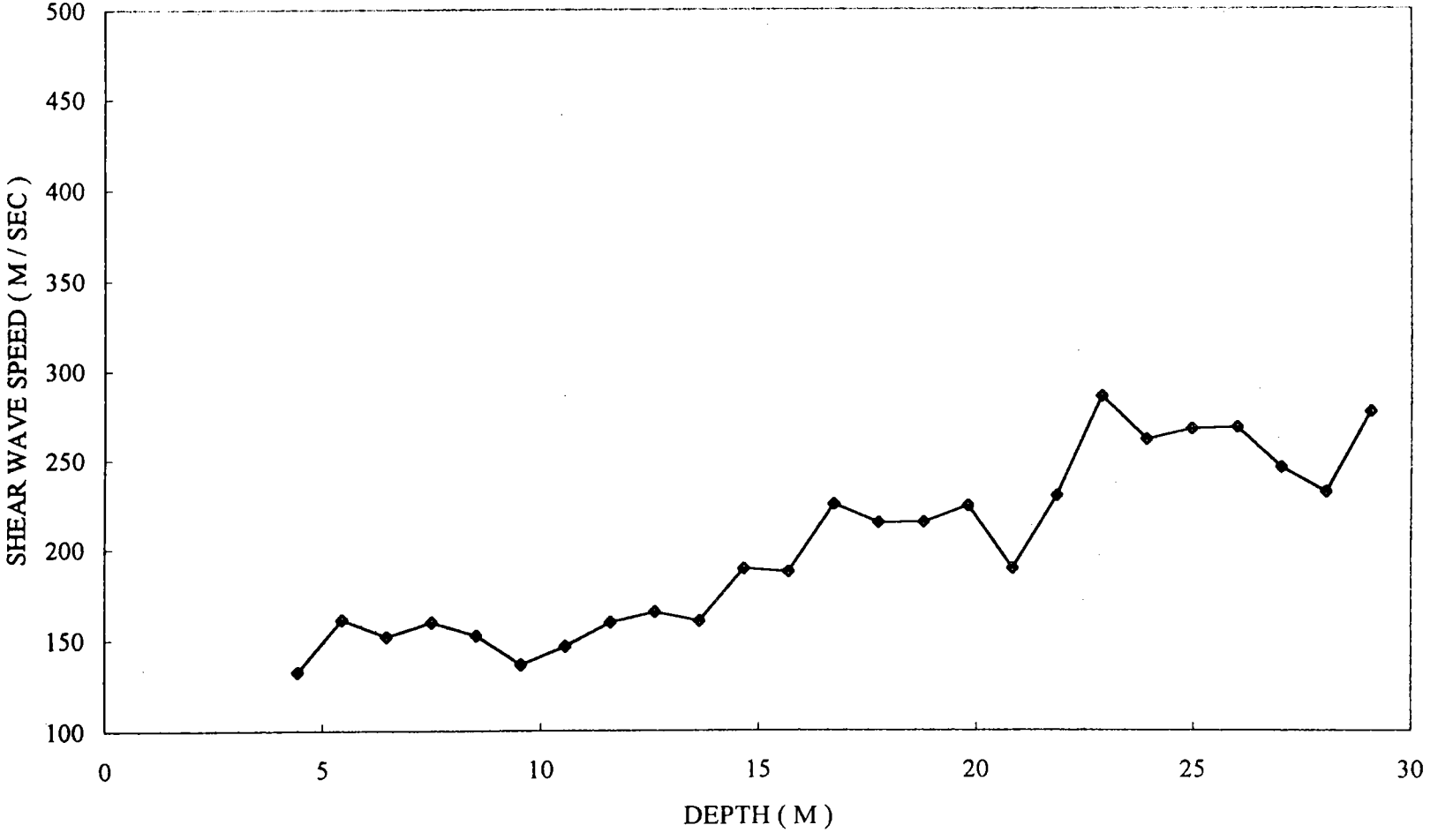
PU-DAI HARBOR

TEST HOLE NO : PD03



PU-DAI HARBOR

TEST HOLE NO : PD04



試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P01	2.50	SM	2.05	5.13	5.13	120	167.54	0.41	0.97	0.094	4.3394	NO
	3.00	SM	1.93	6.09	5.59	72	96.30	0.215	0.96	0.102	2.1084	NO
	9.00	SM	1.93	17.67	11.17	72	68.12	0.157	0.92	0.142	1.1064	NO
	10.00	CL	1.9	19.57	12.07				0.9	0.142		
	11.50	SM	1.93	22.47	13.47	57	49.12	0.119	0.87	0.142	0.8409	YES
	14.00	CL	1.9	27.22	15.72				0.79	0.133		
	16.00	SM	1.95	31.12	17.62	110	82.88	0.185	0.74	0.127	1.4516	NO
	17.50	SM	1.95	34.04	19.04	76	55.08	0.129	0.7	0.122	1.0572	NO
	18.50	SM	1.95	35.99	19.99	108	76.39	0.17	0.67	0.118	1.4454	NO
	19.50	ML	1.9	37.89	20.89	80	55.35	0.129	0.65	0.115	1.1222	NO
	20.50	SM	1.92	39.81	21.81	130	88.03	0.197	0.62	0.110	1.7854	NO
	22.50	CL	1.9	43.61	23.61				0.59	0.106		
	25.00	SM	1.92	48.41	25.91	107	66.47	0.154	0.55	0.100	1.5370	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P02	3.00	SM	2.05	6.15	5.65	105	139.69	0.322	0.97	0.103	3.1279	NO
	4.50	SM	2.05	9.23	7.23	18	21.18	0.056	0.96	0.120	0.4686	YES
	6.00	SM	1.93	12.12	8.62	90	96.94	0.219	0.95	0.130	1.6816	NO
	7.00	SM	1.93	14.05	9.55	63	64.47	0.149	0.94	0.135	1.1050	NO
	9.00	SM	1.93	17.91	11.41	63	58.98	0.136	0.92	0.141	0.9659	NO
	10.50	CL	1.9	20.76	12.76				0.89	0.141		
	11.50	SM	1.95	22.71	13.71	59	50.39	0.121	0.87	0.141	0.8612	YES
	13.50	CL	1.9	26.51	15.51				0.81	0.135		
	14.50	SM	1.95	28.46	16.46	73	56.90	0.132	0.78	0.131	1.0039	NO
	16.50	ML	1.9	32.26	18.26	40			0.73	0.126		
	19.50	SM	1.95	38.11	21.11	87	59.88	0.138	0.65	0.114	1.2062	NO
	22.50	CL	1.9	43.81	23.81				0.59	0.106		
	25.00	SM	1.92	48.61	26.11	102	63.12	0.146	0.55	0.100	1.4624	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m³)	總覆土壓力 σ_0 (t/m²)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m²)	錐頭阻力 q_c(kg/cm²)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm²)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P03	2.00	SM	2.03	4.06	4.06	75	117.71	0.27	0.98	0.096	2.8257	NO
	3.50	ML	1.9	6.91	5.91	21			0.97	0.111		
	6.50	SM	1.93	12.70	8.70	78	83.62	0.188	0.95	0.135	1.3904	NO
	7.00	SM	1.93	13.67	9.17	60	62.67	0.146	0.94	0.137	1.0684	NO
	12.00	SM	1.93	23.32	13.82	60	51.05	0.121	0.85	0.140	0.8651	YES
	13.00	CL	1.9	25.22	14.72				0.82	0.137		
	14.00	SM	1.95	27.17	15.67	58	46.34	0.111	0.79	0.134	0.8310	YES
	17.50	SM	1.95	33.99	18.99	58	42.09	0.1	0.7	0.122	0.8186	YES
	21.00	SM	1.9	40.64	22.14	77	51.75	0.127	0.61	0.109	1.1633	NO
	22.50	CL	1.9	43.49	23.49				0.58	0.105		
	25.00	SM	1.92	48.29	25.79	103	64.14	0.147	0.55	0.100	1.4640	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P04	2.00	SM	1.93	3.86	3.86	80	128.76	0.176	0.98	0.096	1.8420	NO
	3.50	ML	1.9	6.71	5.71	20			0.97	0.111		
	6.50	SM	1.93	12.50	8.50	79	85.69	0.176	0.95	0.136	1.2921	NO
	10.50	SM	1.93	20.22	12.22	48	43.42	0.116	0.89	0.144	0.8079	YES
	12.00	SM	1.93	23.12	13.62	59	50.56	0.134	0.85	0.141	0.9524	YES
	14.00	CL	1.9	26.92	15.42	23			0.79	0.134		
	17.00	SM	1.95	32.77	18.27	43	31.82	0.105	0.71	0.124	0.8455	YES
	18.00	CL	1.9	34.67	19.17	45	32.51	0.107	0.69	0.122		
	19.00	SM	1.95	36.62	20.12	85	59.93	0.188	0.66	0.117	1.6050	NO
	20.00	ML	1.9	38.52	21.02	51			0.63	0.113		
	21.00	SM	1.95	40.47	21.97	69	46.56	0.156	0.61	0.110	1.4238	NO
	22.00	CL	1.9	42.37	22.87	17			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.92	48.13	25.63	92	57.47	0.201	0.55	0.101	1.9958	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P05	2.00	SM	2.05	4.1	4.1	65	101.51	0.227	0.98	0.096	2.3757	NO
	4.00	ML	1.9	7.90	6.40	25			0.96	0.116		
	7.00	SM	1.93	13.69	9.19	81	84.49	0.19	0.94	0.137	1.3917	NO
	8.00	SM	1.93	15.62	10.12	52	51.69	0.127	0.93	0.140	0.9074	YES
	12.00	SM	1.93	23.34	13.84	52	44.20	0.108	0.85	0.140	0.7727	YES
	14.00	CL	1.9	27.14	15.64	28			0.79	0.134		
	15.00	SM	1.93	29.07	16.57	40	31.07	0.078	0.76	0.130	0.6000	YES
	16.00	CL	1.9	30.97	17.47	25			0.74	0.128		
	21.50	SM	1.95	41.70	22.70	67	44.47	0.108	0.6	0.107	1.0049	NO
	22.50	CL	1.9	43.60	23.60	18			0.57	0.103		
	25.00	SM	1.93	48.42	25.92	103	63.98	0.147	0.55	0.100	1.4674	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P06	2.00	SM	2.03	4.06	4.06	55	86.32	0.191	0.98	0.096	1.9990	NO
	4.00	ML	1.9	7.86	6.36	25			0.97	0.117		
	7.00	SM	1.93	13.65	9.15	78	81.54	0.183	0.94	0.137	1.3385	NO
	8.00	SM	1.93	15.58	10.08	55	54.78	0.129	0.93	0.140	0.9204	YES
	12.00	SM	1.93	23.30	13.80	55	46.82	0.113	0.85	0.140	0.8076	YES
	13.50	CL	1.9	26.15	15.15	26			0.81	0.136		
	14.00	SM	1.95	27.13	15.63	48	38.40	0.094	0.79	0.134	0.7030	YES
	20.50	SM	1.95	39.80	21.80	48	32.51	0.08	0.62	0.110	0.7249	YES
	22.00	CL	1.9	42.65	23.15	13			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.93	48.44	25.94	94	58.36	0.133	0.55	0.100	1.3282	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P07	2.00	SM	2.05	4.1	4.1	60	93.70	0.208	0.98	0.096	2.1769	NO
	4.00	ML	1.9	7.90	6.40	20			0.97	0.117		
	6.50	SM	1.93	12.73	8.73	88	94.21	0.208	0.94	0.134	1.5561	NO
	7.00	SM	1.93	13.69	9.19	56	58.42	0.134	0.93	0.135	0.9920	YES
	12.00	SM	1.93	23.34	13.84	57	48.45	0.119	0.85	0.140	0.8514	YES
	13.50	CL	1.9	26.19	15.19	25			0.81	0.136		
	15.00	SM	1.95	29.12	16.62	73	56.63	0.131	0.76	0.130	1.0089	NO
	18.00	CL	1.9	34.82	19.32	53			0.69	0.121		
	19.50	SM	1.95	37.74	20.74	60	41.66	0.1	0.64	0.114	0.8807	NO
	21.50	CL	1.9	41.54	22.54	40			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.93	48.30	25.80	107	66.62	0.154	0.55	0.100	1.5339	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P08	2.00	SM	2.05	4.10	4.10	60	93.70	0.208	0.98	0.096	2.1769	NO
	4.00	ML	1.90	7.90	6.40	30			0.97	0.117		
	5.00	SM	1.93	9.83	7.33	40	46.72	0.113	0.96	0.126	0.9002	YES
	8.00	SM	1.93	15.62	10.12	80	79.52	0.179	0.93	0.140	1.2790	NO
	9.00	SM	1.95	17.57	11.07	59	56.08	0.13	0.92	0.142	0.9131	YES
	14.00	SM	1.95	27.32	15.82	59	46.91	0.113	0.79	0.133	0.8495	YES
	16.50	SM	1.95	32.20	18.20	79	58.57	0.136	0.72	0.124	1.0949	NO
	23.00	CL	1.9	44.55	24.05	38			0.57	0.103		

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av} / σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P09	2.00	SM	2.05	4.1	4.1	70	109.32	0.244	0.98	0.096	2.5536	NO
	4.50	SM	2.05	9.23	7.23	46	54.12	0.128	0.96	0.120	1.0710	NO
	9.00	SM	1.93	17.91	11.41	61	57.11	0.131	0.92	0.141	0.9304	YES
	10.00	CL	1.9	19.81	12.31	29			0.9	0.141		
	11.00	SM	1.93	21.74	13.24	69	59.97	0.138	0.88	0.141	0.9795	NO
	12.50	CL	1.9	24.59	14.59	26			0.83	0.136		
	16.00	SM	1.95	31.42	17.92	119	88.91	0.199	0.73	0.125	1.5944	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P10	3.00	SM	2.05	6.15	5.65	70	93.13	0.206	0.97	0.103	2.0011	NO
	5.00	SM	1.93	10.01	7.51	38	43.85	0.108	0.96	0.125	0.8657	YES
	6.00	SM	1.93	11.94	8.44	60	65.31	0.149	0.95	0.131	1.1371	NO
	11.00	SM	1.93	21.59	13.09	60	52.44	0.127	0.88	0.142	0.8974	YES
	13.00	CL	1.9	25.39	14.89	20			0.82	0.136		
	14.50	SM	1.93	28.29	16.29	79	61.91	0.141	0.78	0.132	1.0675	NO
	15.50	CL	1.9	30.19	17.19	10			0.75	0.128		
	20.50	SM	1.95	39.94	21.94	89	60.09	0.138	0.62	0.110	1.2539	NO
	22.50	CL	1.9	43.74	23.74	12			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.95	48.61	26.11	112	69.31	0.158	0.55	0.100	1.5826	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av} / σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P11	2.00	SM	2.05	4.1	4.1	70	109.32	0.244	0.98	0.096	2.5536	NO
	3.00	ML	1.9	6.00	5.50	34			0.97	0.103		
	9.00	SM	1.93	17.58	11.08	78	74.10	0.167	0.92	0.142	1.1734	NO
	10.00	SM	1.93	19.51	12.01	52	47.45	0.117	0.9	0.143	0.8208	YES
	11.50	SM	1.93	22.41	13.41	52	44.91	0.109	0.87	0.142	0.7688	YES
	13.00	CL	1.9	25.26	14.76	39			0.82	0.137		
	14.00	SM	1.93	27.19	15.69	77	61.48	0.141	0.79	0.133	1.0562	NO
	15.50	CL	1.9	30.04	17.04	28			0.75	0.129		
	21.00	SM	1.95	40.76	22.26	98	65.68	0.152	0.61	0.109	1.3957	NO
	22.00	CL	1.9	42.66	23.16	22			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.93	48.45	25.95	98	60.84	0.139	0.55	0.100	1.3883	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P12	2.00	SM	2.05	4.1	4.1	60	93.70	0.208	0.98	0.096	2.1769	NO
	4.00	ML	1.9	7.90	6.40	25			0.97	0.117		
	6.00	SM	1.93	11.76	8.26	80	88.02	0.197	0.95	0.132	1.4939	NO
	7.00	SM	1.93	13.69	9.19	48	50.07	0.126	0.94	0.137	0.9229	YES
	11.50	SM	1.93	22.38	13.38	48	41.50	0.1	0.86	0.140	0.7129	YES
	13.00	CL	1.9	25.23	14.73	20			0.82	0.137		
	14.00	SM	1.95	27.18	15.68	54	43.13	0.104	0.79	0.134	0.7788	YES
	17.00	SM	1.95	33.03	18.53	54	39.67	0.097	0.71	0.123	0.7860	YES
	21.00	SM	1.95	40.83	22.33	98	65.59	0.152	0.61	0.109	1.3976	NO
	22.00	CL	1.9	42.73	23.23	18			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.93	48.52	26.02	108	66.96	0.154	0.55	0.100	1.5399	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P13	2.00	SM	2.05	4.1	4.1	60	93.70	0.208	0.98	0.096	2.1769	NO
	3.00	ML	1.90	5.70	5.20	15			0.97	0.104		
	4.50	SM	2.05	9.23	7.23	41	48.24	0.117	0.96	0.120	0.9790	YES
	8.00	SM	1.93	15.98	10.48	85	83.03	0.185	0.93	0.138	1.3380	NO
	9.00	SM	1.93	17.91	11.41	61	57.11	0.131	0.92	0.141	0.9304	YES
	12.00	SM	1.93	23.70	14.20	61	51.19	0.121	0.85	0.138	0.8748	YES
	13.00	CL	1.9	25.60	15.10	23			0.82	0.136		
	14.00	SM	1.95	27.55	16.05	60	47.36	0.113	0.79	0.132	0.8547	YES
	21.00	SM	1.95	41.20	22.70	60	39.82	0.097	0.61	0.108	0.8986	YES
	22.00	CL	1.95	43.15	23.65	5			0.6	0.107		
	23.00	SM	1.9	45.05	24.55	102	65.10	0.149	0.57	0.102	1.4610	NO
	25.00	SM	1.93	48.91	26.41	77	47.38	0.113	0.55	0.099	1.1378	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P14	2.00	SM	1.93	3.86	3.9	70	112.09	0.251	0.98	0.095	2.6541	NO
	4.00	ML	1.9	7.66	6.16	15			0.97	0.118		
	7.00	SM	1.93	13.45	8.95	79	83.51	0.188	0.94	0.138	1.3650	NO
	8.00	SM	1.93	15.38	9.88	40	40.24	0.097	0.93	0.141	0.6872	YES
	11.00	SM	1.93	21.17	12.67	40	35.54	0.087	0.88	0.143	0.6069	YES
	15.00	SM	1.95	28.97	16.47	55	42.86	0.104	0.76	0.130	0.7979	YES
	19.00	SM	1.95	36.77	20.27	45	31.61	0.079	0.66	0.117	0.6768	YES
	22.00	SM	1.93	42.56	23.06	65	42.80	0.104	0.6	0.108	0.9632	YES
	23.50	CL	1.9	45.41	24.41	15			0.56	0.102		
	25.00	SM	1.93	48.31	25.81	102	63.50	0.147	0.55	0.100	1.4644	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P15	2.00	SM	1.93	3.86	3.86	60	96.57	0.219	0.98	0.096	2.2920	NO
	3.50	ML	1.9	6.71	5.71	18			0.97	0.111		
	7.00	SM	1.95	13.54	9.04	77	81.01	0.182	0.94	0.137	1.3256	NO
	8.00	SM	1.93	15.47	9.97	56	56.10	0.13	0.9	0.136	0.9546	YES
	12.00	SM	1.93	23.19	13.69	59	50.43	0.121	0.85	0.140	0.8618	YES
	13.50	ML	1.9	26.04	15.04	40			0.8	0.135		
	14.00	SM	1.93	27.00	15.50	57	45.78	0.111	0.79	0.134	0.8273	YES
	16.00	SM	1.93	30.86	17.36	57	43.26	0.104	0.74	0.128	0.8109	YES
	17.50	CL	1.9	33.71	18.71	20			0.7	0.123		
	19.00	SM	1.95	36.64	20.14	62	43.69	0.108	0.66	0.117	0.9224	YES
	23.00	CL	1.9	44.24	23.74	27			0.57	0.104		
	25.00	SM	1.93	48.10	25.60	80	50.00	0.126	0.55	0.101	1.2504	NO

試驗地點: 台中港第16號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
P16	2.00	SM	1.93	3.86	3.86	60	96.57	0.219	0.98	0.096	2.2920	NO
	3.50	ML	1.9	6.71	5.71	21			0.97	0.111		
	9.00	SM	1.95	17.44	10.94	83	79.37	0.177	0.92	0.143	1.2376	NO
	10.00	SM	1.93	19.37	11.87	58	53.25	0.127	0.9	0.143	0.8868	YES
	12.00	SM	1.93	23.23	13.73	58	49.51	0.126	0.85	0.140	0.8985	YES
	13.50	CL	1.9	26.08	15.08	22			0.82	0.138		
	14.00	SM	1.95	27.05	15.55	44	35.28	0.083	0.79	0.134	0.6195	YES
	20.00	SM	1.95	38.75	21.25	44	30.18	0.073	0.63	0.112	0.6517	YES
	21.50	CL	1.9	41.60	22.60	17			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.93	48.36	25.86	113	70.28	0.16	0.55	0.100	1.5953	NO

試驗地點: 台中港西碼頭區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
C01	4.00	SM	1.95	7.80	6.30	43	54.17	0.128	0.97	0.117	1.0931	NO
	6.00	SM	1.95	11.70	8.20	24	26.50	0.068	0.95	0.132	0.5145	YES
	7.00	SM	1.95	13.65	9.15	61	63.77	0.147	0.94	0.137	1.0752	NO
	9.00	SM	1.95	17.55	11.05	61	58.03	0.134	0.92	0.142	0.9406	YES
	16.00	SM	1.95	31.20	17.70	73	54.87	0.129	0.74	0.127	1.0143	NO
	20.00	SM	1.95	39.00	21.50	70	47.74	0.117	0.63	0.111	1.0501	NO
	21.00	CL	1.9	40.90	22.40	5			0.61	0.109		
	25.00	SM	1.95	48.70	26.20	82	50.66	0.121	0.55	0.100	1.2139	NO

試驗地點: 台中港西碼頭區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
C02	4.00	SM	1.95	7.80	6.30	60	75.59	0.17	0.97	0.117	1.4518	NO
	5.00	CL	1.9	9.70	7.20	10			0.96	0.126		
	7.00	SM	1.95	13.60	9.10	25	26.21	0.065	0.94	0.137	0.4746	YES
	8.00	SM	1.95	15.55	10.05	65	64.84	0.149	0.93	0.140	1.0620	NO
	13.00	SM	1.95	25.30	14.80	71	58.36	0.137	0.82	0.137	1.0024	NO
	14.00	SM	1.95	27.25	15.75	80	63.75	0.147	0.79	0.133	1.1031	NO
	20.50	SM	1.95	39.93	21.93	80	54.03	0.128	0.62	0.110	1.1628	NO
	22.00	CL	1.9	42.78	23.28	20			0.6	0.108		
	25.00	SM	1.95	48.63	26.13	67	41.45	0.1	0.55	0.100	1.0019	NO

試驗地點: 台中港西碼頭區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
C03	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	43	58.79	0.136	0.97	0.103	1.3151	YES
	6.50	CL	1.9	12.50	8.50	18			0.94	0.135		
	7.00	SM	1.95	13.48	8.98	44	46.44	0.113	0.93	0.136	0.8300	YES
	12.00	SM	1.95	23.23	13.73	44	37.56	0.094	0.85	0.140	0.6703	YES
	13.00	SM	1.95	25.18	14.68	73	60.26	0.138	0.82	0.137	1.0062	NO
	20.50	SM	1.95	39.80	21.80	73	49.44	0.126	0.62	0.110	1.1417	NO
	25.00	CL	1.9	48.35	25.85	13			0.55	0.100		

試驗地點：台中港西碼頭區　　地震規模：7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
C04	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	70	95.70	0.215	0.97	0.103	2.0790	NO
	6.00	SM	1.95	11.70	8.20	29	32.03	0.079	0.95	0.132	0.5978	YES
	7.00	SM	1.95	13.65	9.15	62	64.82	0.149	0.94	0.137	1.0898	NO
	13.00	SM	1.95	25.35	14.85	72	59.08	0.137	0.82	0.136	1.0038	NO
	20.00	SM	1.95	39.00	21.50	92	62.74	0.146	0.63	0.111	1.3103	NO
	22.00	CL	1.9	42.80	23.30	30			0.61	0.109		
	25.00	SM	1.95	48.65	26.15	91	56.27	0.130	0.55	0.100	1.3031	NO

試驗地點: 台中港西碼頭區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
C05	4.50	SM	1.95	8.78	6.78	33	40.09	0.097	0.96	0.121	0.8001	YES
	5.00	SM	1.95	9.75	7.25	59	69.29	0.158	0.95	0.125	1.2684	NO
	10.00	SM	1.95	19.50	12.00	59	53.86	0.128	0.9	0.143	0.8977	YES
	15.00	SM	1.95	29.25	16.75	93	71.86	0.163	0.76	0.129	1.2597	NO
	19.00	SM	1.95	37.05	20.55	81	56.50	0.131	0.66	0.116	1.1291	NO
	20.50	CL	1.9	39.90	21.90	10			0.62	0.110		
	22.00	SM	1.95	42.83	23.33	96	62.86	0.146	0.6	0.107	1.3593	NO
	23.00	CL	1.9	44.73	24.23	8			0.57	0.103		
	25.00	SM	1.95	48.63	26.13	89	55.06	0.129	0.55	0.100	1.2925	NO

試驗地點: 台中港西碼頭區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.15g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
C06	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	63	86.13	0.191	0.97	0.103	1.8469	NO
	6.00	CL	1.9	11.55	8.05	31			0.95	0.133		
	7.00	SM	1.95	13.50	9.00	45	47.43	0.117	0.94	0.137	0.8511	YES
	10.50	SM	1.95	20.33	12.33	63	56.75	0.131	0.89	0.143	0.9154	YES
	15.00	SM	1.95	29.10	16.60	85	65.97	0.152	0.76	0.130	1.1701	NO
	21.00	SM	1.95	40.80	22.30	105	70.31	0.160	0.61	0.109	1.4704	NO
	22.00	CL	1.9	42.70	23.20	12			0.62	0.111		
	25.00	SM	1.95	48.55	26.05	86	53.28	0.127	0.55	0.100	1.2707	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH01	1.00	ML	1.9	1.90	1.90	40			0.99	0.077		
	6.00	CL	1.9	11.40	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	2.05	13.45	8.95	60	63.42	0.146	0.94	0.110	1.3250	NO
	14.50	SM	2.05	28.83	16.83	60	46.26	0.111	0.78	0.104	1.0649	NO
	15.50	ML	1.9	30.73	17.73	40			0.75	0.101		
	20.00	SM	2.05	39.95	22.45	67	44.72	0.119	0.63	0.087	1.3609	NO
	21.00	CL	1.9	41.85	23.35				0.61	0.085		

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH02	1.00	ML	1.9	1.90	1.90	82			0.99	0.077		
	5.00	CL	1.9	9.50	7.00				0.96	0.102		
	6.00	SM	2.05	11.55	8.05	52	57.96	0.133	0.95	0.106	1.2510	NO
	14.50	SM	2.05	28.98	16.98	52	39.91	0.097	0.78	0.104	0.9340	YES
	19.00	SM	2.05	38.20	21.70	69	46.84	0.113	0.66	0.091	1.2469	NO
	21.00	CL	1.9	42.00	23.50	31			0.61	0.085		
	22.50	SM	2.05	45.08	25.08	71	44.84	0.109	0.58	0.081	1.3403	NO
	25.00	SM	2.05	50.20	27.70	102	61.29	0.139	0.55	0.078	1.7879	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m³)	總覆土壓力 σ_0 (t/m²)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m²)	錐頭阻力 qc(kg/cm²)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm²)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH03	1.00	ML	1.9	1.9	1.90	40			0.99	0.077		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	2.05	13.45	8.95	48	50.74	0.121	0.94	0.110	1.0982	NO
	15.00	SM	2.05	29.85	17.35	48	36.44	0.093	0.76	0.102	0.9119	YES
	18.50	SM	2.05	37.025	21.03	65	44.83	0.109	0.68	0.093	1.1670	NO
	19.50	ML	1.9	38.925	21.93				0.65	0.090		
	20.00	SM	2.05	39.95	22.45	72	48.05	0.117	0.62	0.086	1.3596	NO
	25.00	SM	2.05	50.2	27.70	72	43.26	0.101	0.55	0.078	1.2991	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH04	1.50	ML	1.9	2.85	2.85	70			0.99	0.077		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	2.05	13.45	8.95	60	63.42	0.146	0.94	0.110	1.3250	NO
	16.50	SM	2.05	32.925	18.93	60	43.61	0.108	0.73	0.099	1.0902	NO
	17.00	SM	2.05	33.95	19.45	79	56.65	0.131	0.71	0.097	1.3552	NO
	23.00	SM	2.05	46.25	25.75	79	49.23	0.119	0.57	0.080	1.4902	NO
	24.00	SM	2.05	48.3	26.80	117	71.47	0.162	0.56	0.079	2.0579	NO
	25.00	ML	1.9	50.2	27.70	62	37.25	0.093	0.55	0.078	1.1962	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH05	1.50	ML	1.9	2.85	2.85	120			0.98	0.076		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	8.00	SM	2.05	15.5	10.00	70	70.00	0.16	0.93	0.112	1.4230	NO
	9.00	SM	2.05	17.55	11.05	57	54.22	0.128	0.92	0.114	1.1231	NO
	14.00	SM	2.05	27.8	16.30	57	44.65	0.109	0.79	0.105	1.0372	NO
	17.00	SM	2.05	33.95	19.45	44	31.55	0.079	0.71	0.097	0.8172	YES
	18.00	ML	1.9	35.85	20.35				0.69	0.095		
	19.50	SM	2.05	38.925	21.93	72	48.63	0.119	0.65	0.090	1.3221	NO
	20.50	ML	1.9	40.825	22.83				0.62	0.086		
	22.50	SM	2.05	44.925	24.93	73	46.24	0.111	0.58	0.082	1.3613	NO
	25.00	ML	1.9	49.675	27.18				0.55	0.078		

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH06	1.50	ML	1.9	2.85	2.85	65			0.98	0.076		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	2.05	13.45	8.95	59	62.36	0.141	0.94	0.110	1.2797	NO
	17.00	SM	2.05	33.95	19.45	63	45.17	0.109	0.71	0.097	1.1276	NO
	18.00	CL	1.9	35.85	20.35				0.69	0.095		
	19.00	SM	2.05	37.9	21.40	64	43.75	0.108	0.66	0.091	1.1846	NO
	24.00	SM	2.05	48.15	26.65	64	39.20	0.096	0.56	0.079	1.2164	NO
	25.00	CL	1.9	50.05	27.55				0.55	0.078		

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH07	7.00	CL	1.9	13.3	8.80				0.94	0.111		
	8.00	SM	2.05	15.35	9.85	55	55.42	0.129	0.93	0.113	1.1411	NO
	15.00	SM	2.05	29.7	17.20	55	41.94	0.098	0.76	0.102	0.9574	YES
	16.00	SM	2.05	31.75	18.25	63	46.63	0.113	0.74	0.100	1.1253	NO
	24.00	SM	2.05	48.15	26.65	63	38.59	0.096	0.56	0.079	1.2164	NO
	25.00	CL	1.9	50.05	27.55				0.55	0.078		

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH08	1.00	ML	1.9	1.9	1.90	105			0.99	0.077		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	2.05	13.45	8.95	54	57.08	0.131	0.94	0.110	1.1889	NO
	13.50	SM	2.05	26.775	15.78	54	42.99	0.104	0.82	0.109	0.9580	YES
	14.00	SM	2.05	27.8	16.30	33	25.85	0.065	0.79	0.105	0.6185	YES
	23.00	SM	2.05	46.25	25.75	33	20.56	0.056	0.57	0.080	0.7013	YES
	24.00	ML	1.9	48.15	26.65	15			0.56	0.079		
	25.00	SM	2.05	50.2	27.70	34	20.43	0.054	0.55	0.078	0.6946	YES

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH09	7.00	CL	1.9	13.3	8.80				0.94	0.111		
	8.00	SM	2.05	15.35	9.85	53	53.40	0.127	0.93	0.113	1.1235	NO
	15.00	SM	2.05	29.7	17.20	53	40.41	0.098	0.76	0.102	0.9574	YES
	16.00	SM	2.05	31.75	18.25	58	42.93	0.104	0.74	0.100	1.0357	NO
	23.00	SM	2.05	46.1	25.60	58	36.25	0.088	0.57	0.080	1.0991	NO
	25.00	SM	2.05	50.2	27.70	110	66.09	0.152	0.55	0.078	1.9551	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH10	1.50	ML	1.9	2.85	2.85	30			0.98	0.076		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	2.05	13.45	8.95	62	65.54	0.152	0.94	0.110	1.3795	NO
	13.00	SM	2.05	25.75	15.25	62	50.21	0.126	0.82	0.108	1.1667	NO
	14.50	SM	2.05	28.825	16.83	48	37.01	0.09	0.78	0.104	0.8635	YES
	15.00	SM	2.05	29.85	17.35	63	47.83	0.117	0.76	0.102	1.1472	NO
	23.00	SM	2.05	46.25	25.75	63	39.26	0.096	0.57	0.080	1.2022	NO
	24.00	CL	1.9	48.15	26.65				0.56	0.079		
	25.00	SM	2.05	50.2	27.70	75	45.06	0.109	0.54	0.076	1.4280	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH11	1.00	ML	1.9	1.9	1.9	40			0.99	0.077		
	5.50	CL	1.9	10.45	7.45				0.96	0.105		
	6.50	SM	1.9	12.35	8.35	59	64.57	0.149	0.95	0.110	1.3595	NO
	10.00	SM	1.9	19	11.50	59	55.02	0.129	0.9	0.116	1.1122	NO
	12.00	ML	1.95	22.9	13.40	37			0.85	0.113		
	13.00	SM	2.05	24.95	14.45	48	39.93	0.097	0.82	0.110	0.8783	YES
	19.50	SM	2.05	38.275	21.28	48	32.91	0.08	0.65	0.091	0.8771	YES
	20.50	CL	1.9	40.175	22.18	27			0.62	0.088		
	22.00	SM	2.05	43.25	23.75	60	38.93	0.096	0.6	0.085	1.1264	NO
	23.00	CL	1.9	45.15	24.65	53			0.57	0.081		
	24.00	SM	2.05	47.2	25.70	77	48.03	0.117	0.56	0.080	1.4585	NO
	25.00	CL	1.9	49.1	26.60	34			0.55	0.079		

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH12	2.00	ML	1.9	3.8	3.8	80			0.98	0.076		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	7.00	SM	1.9	13.3	8.80	53	56.50	0.131	0.94	0.111	1.1822	NO
	11.00	SM	1.9	20.9	12.40	53	47.60	0.117	0.88	0.116	1.0113	NO
	12.00	SM	2.05	22.95	13.45	61	52.60	0.127	0.85	0.113	1.1226	NO
	18.00	SM	2.05	35.25	19.75	61	43.41	0.108	0.69	0.096	1.1243	NO
	19.00	ML	1.9	37.15	20.65	20			0.66	0.093		
	20.00	SM	2.05	39.2	21.70	70	47.52	0.117	0.63	0.089	1.3180	NO
	23.00	SM	2.05	45.35	24.85	70	44.41	0.109	0.57	0.081	1.3434	NO
	25.00	ML	1.9	49.15	26.65	53	32.47	0.08	0.55	0.079	1.0111	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH13	2.00	ML	1.9	3.8	3.8	120			0.98	0.076		
	6.00	CL	1.9	11.4	7.90				0.95	0.107		
	8.00	SM	1.9	15.2	9.70	38	38.58	0.096	0.93	0.114	0.8445	YES
	17.00	SM	2.05	33.65	19.15	66	47.69	0.117	0.71	0.097	1.2023	NO
	18.00	ML	1.9	35.55	20.05	52			0.69	0.095		
	19.00	SM	1.9	37.45	20.95	81	55.96	0.13	0.66	0.092	1.4127	NO
	23.50	SM	2.05	46.675	25.68	81	50.55	0.121	0.56	0.079	1.5238	NO
	25.00	ML	1.9	49.525	27.03	53	32.24	0.079	0.55	0.079	1.0049	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH14	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	88			0.98	0.076		
	5.00	SM	2.03	9.81	7.31	25	29.24	0.073	0.96	0.100	0.7264	YES
	11.00	CL	1.86	20.97	12.47				0.88	0.115		
	12.00	SM	2.03	23	13.50	69	59.39	0.136	0.85	0.113	1.2040	NO
	14.50	SM	2.03	28.075	16.08	69	54.42	0.129	0.78	0.106	1.2140	NO
	15.00	SM	2.03	29.09	16.59	86	66.77	0.154	0.76	0.104	1.4815	NO
	25.00	SM	2.03	49.39	26.89	86	52.44	0.127	0.55	0.079	1.6118	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH15	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	75			0.98	0.076		
	12.00	CL	1.86	22.32	12.82				0.85	0.115		
	13.00	SM	2.03	24.35	13.85	51	43.34	0.104	0.82	0.112	0.9249	YES
	15.00	SM	2.03	28.41	15.91	51	40.43	0.098	0.76	0.106	0.9258	YES
	16.00	SM	2.03	30.44	16.94	74	56.86	0.131	0.74	0.104	1.2630	NO
	25.00	SM	2.03	48.71	26.21	74	45.71	0.111	0.55	0.080	1.3922	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH16	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	105			0.98	0.076		
	10.00	CL	1.86	18.6	11.10				0.9	0.118		
	11.00	SM	2.03	20.63	12.13	50	45.40	0.111	0.88	0.117	0.9508	YES
	14.00	SM	2.03	26.72	15.22	50	40.53	0.098	0.79	0.108	0.9059	YES
	15.00	SM	2.03	28.75	16.25	75	58.83	0.136	0.76	0.105	1.2967	NO
	25.00	SM	2.03	49.05	26.55	75	46.03	0.111	0.55	0.079	1.4005	NO

驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH17	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	53			0.98	0.076		
	7.00	CL	1.86	13.02	8.52				0.94	0.112		
	8.00	SM	2.03	15.05	9.55	52	53.21	0.127	0.93	0.114	1.1109	NO
	14.00	SM	2.03	27.23	15.73	52	41.46	0.1	0.79	0.107	0.9375	YES
	15.00	SM	2.03	29.26	16.76	71	54.84	0.129	0.76	0.103	1.2465	NO
	25.00	SM	2.03	49.56	27.06	71	43.16	0.104	0.55	0.079	1.3236	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH18	2.50	ML	1.86	4.65	3.72	75			0.98	0.096		
	12.00	CL	1.86	22.32	12.82				0.85	0.115		
	13.00	SM	2.03	24.35	13.85	73	62.03	0.141	0.82	0.112	1.2539	NO
	19.00	SM	2.03	36.53	20.03	73	51.58	0.127	0.66	0.094	1.3527	NO
	20.00	SM	2.03	38.56	21.06	78	53.75	0.128	0.63	0.090	1.4226	NO
	25.00	SM	2.03	48.71	26.21	78	48.18	0.117	0.55	0.080	1.4675	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH19	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	75			0.98	0.076		
	13.00	CL	1.86	24.18	13.68				0.85	0.117		
	14.00	SM	2.03	26.21	14.71	65	53.59	0.128	0.84	0.117	1.0964	NO
	19.00	SM	2.03	36.36	19.86	65	46.12	0.111	0.61	0.087	1.2742	NO
	20.00	SM	2.03	38.39	20.89	73	50.51	0.121	0.6	0.086	1.4069	NO
	25.00	SM	2.03	48.54	26.04	73	45.24	0.109	0.55	0.080	1.3630	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH20	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	51			0.98	0.076		
	11.50	CL	1.86	21.39	12.39	6			0.85	0.114		
	12.00	SM	2.03	22.405	12.91	64	56.34	0.13	0.84	0.114	1.142832	NO
	21.00	SM	2.03	40.675	22.18	64	42.98	0.104	0.61	0.087	1.19164	NO
	22.00	SM	2.03	42.705	23.21	75	49.23	0.119	0.6	0.086	1.381669	NO
	25.00	SM	2.03	48.795	26.30	75	46.25	0.111	0.55	0.080	1.394323	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m³)	總覆土壓力 σ_0 (t/m²)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m²)	錐頭阻力 qc(kg/cm²)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm²)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av} / σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH21	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	59			0.98	0.076		
	11.50	CL	1.86	21.39	12.39	6			0.85	0.114		
	12.00	SM	2.03	22.405	12.91	58	51.06	0.121	0.84	0.114	1.063713	NO
	20.00	SM	2.03	38.645	21.15	58	39.89	0.097	0.63	0.090	1.080068	NO
	21.00	SM	2.03	40.675	22.18	72	48.35	0.117	0.61	0.087	1.340595	NO
	25.00	SM	2.03	48.795	26.30	72	44.40	0.109	0.55	0.080	1.369201	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH22	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	70			0.98	0.08		
	11.50	CL	1.86	21.39	12.39	6			0.85	0.11		
	12.00	SM	2.03	22.405	12.91	57	50.18	0.12	0.84	0.11	1.054922	NO
	16.00	SM	2.03	30.525	17.03	57	43.68	0.108	0.74	0.10	1.043588	NO
	17.00	SM	2.03	32.555	18.06	74	55.07	0.129	0.71	0.10	1.291863	NO
	25.00	SM	2.03	48.795	26.30	74	45.63	0.111	0.55	0.08	1.394323	NO

試驗地點: 高雄港第五貨櫃中心　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
KH23	2.00	ML	1.86	3.72	3.72	59			0.98	0.08		
	10.00	CL	1.86	18.6	11.10	6			0.9	0.12		
	11.00	SM	2.03	20.63	12.13	61	55.39	0.13	0.88	0.12	1.113596	NO
	16.00	SM	2.03	30.78	17.28	61	46.40	0.113	0.74	0.10	1.099075	NO
	17.00	SM	2.03	32.81	18.31	75	55.43	0.13	0.71	0.10	1.310004	NO
	25.00	SM	2.03	49.05	26.55	75	46.03	0.111	0.55	0.08	1.400526	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP01	3.00	SM	1.85	5.55	5.05	20	28.14	0.072	0.97	0.083	0.8659	YES
	4.00	CL	1.9	7.45	5.95				0.96	0.094		
	6.00	SM	1.85	11.15	7.65	63	72.03	0.161	0.95	0.108	1.4907	NO
	11.00	CL	1.9	20.65	12.15				0.88	0.117		
	13.00	SM	1.85	24.35	13.85	65	55.23	0.129	0.82	0.112	1.1472	NO
	14.00	SM	1.95	26.30	14.80	108	88.78	0.199	0.79	0.110	1.8173	NO
	25.00	SM	1.95	47.75	25.25	108	67.97	0.157	0.55	0.081	1.9352	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP02	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	50	82.20	0.181	0.98	0.076	2.3679	NO
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	18	24.49	0.061	0.97	0.090	0.6803	YES
	5.00	CL	1.9	9.25	6.75				0.96	0.103		
	7.00	ML	1.9	13.05	8.55	40			0.94	0.112		
	8.00	SM	1.8	14.85	9.35	62	64.12	0.146	0.93	0.115	1.2672	NO
	9.00	CL	1.85	16.70	10.20				0.92	0.117		
	10.00	SM	1.8	18.50	11.00	40	38.14	0.094	0.9	0.118	0.7962	YES
	13.00	CL	1.9	24.20	13.70				0.82	0.113		
	15.00	SM	1.95	28.10	15.60	75	60.05	0.138	0.76	0.107	1.2924	NO
	21.00	SM	1.95	39.80	21.30	98	67.15	0.154	0.61	0.089	1.7322	NO
	25.00	SM	1.95	47.60	25.10	125	78.90	0.177	0.55	0.081	2.1756	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP03	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	80	131.52	0.300	0.98	0.076	3.9246	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	12	15.76	0.042	0.97	0.095	0.4411	YES
	5.00	CL	1.9	9.20	6.70	3			0.96	0.103		
	8.00	SM	1.8	14.60	9.10	55	57.66	0.138	0.94	0.118	1.1731	NO
	9.00	CL	1.85	16.45	9.95	7			0.93	0.120		
	10.00	SM	1.8	18.25	10.75	35	33.76	0.086	0.91	0.121	0.7137	YES
	13.00	CL	1.9	23.95	13.45	7			0.83	0.115		
	15.00	SM	1.95	27.85	15.35	70	56.50	0.13	0.78	0.110	1.1777	NO
	19.50	SM	1.95	36.63	19.63	100	71.38	0.162	0.63	0.092	1.7665	NO
	21.00	CL	1.9	39.48	20.98	7			0.6	0.088		
	25.00	SM	1.95	47.28	24.78	120	76.24	0.169	0.55	0.082	2.0645	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP02	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	50	82.20	0.181	0.98	0.076	2.3679	NO
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	18	24.49	0.061	0.97	0.090	0.6803	YES
	5.00	CL	1.9	9.25	6.75				0.96	0.103		
	7.00	ML	1.9	13.05	8.55	40			0.94	0.112		
	8.00	SM	1.8	14.85	9.35	62	64.12	0.146	0.93	0.115	1.2672	NO
	9.00	CL	1.85	16.70	10.20				0.92	0.117		
	10.00	SM	1.8	18.50	11.00	40	38.14	0.094	0.9	0.118	0.7962	YES
	13.00	CL	1.9	24.20	13.70				0.82	0.113		
	15.00	SM	1.95	28.10	15.60	75	60.05	0.138	0.76	0.107	1.2924	NO
	21.00	SM	1.95	39.80	21.30	98	67.15	0.154	0.61	0.089	1.7322	NO
	25.00	SM	1.95	47.60	25.10	125	78.90	0.177	0.55	0.081	2.1756	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP04	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	65	106.86	0.240	0.98	0.076	3.1397	NO
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	18	24.49	0.061	0.97	0.090	0.6803	YES
	5.00	CL	1.9	9.25	6.75				0.96	0.103		
	8.00	SM	1.9	14.95	9.45	60	61.72	0.141	0.93	0.115	1.2287	NO
	9.00	CL	1.9	16.85	10.35				0.92	0.117		
	10.00	SM	1.9	18.75	11.25	40	37.71	0.094	0.9	0.117	0.8034	YES
	13.00	CL	1.95	24.60	14.10				0.82	0.112		
	15.50	SM	1.9	29.35	16.35	73	57.09	0.131	0.76	0.106	1.2310	NO
	20.00	SM	1.95	38.13	20.63	102	71.02	0.162	0.63	0.091	1.7835	NO
	21.50	CL	1.9	40.98	21.98				0.61	0.089		
	25.00	SM	1.95	47.80	25.30	110	69.16	0.158	0.55	0.081	1.9494	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP05	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	74	121.66	0.273	0.98	0.076	3.5714	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	13	17.07	0.051	0.97	0.095	0.5356	YES
	5.00	CL	1.9	9.20	6.70				0.96	0.103		
	7.00	ML	1.9	13.00	8.50	38	41.22		0.94	0.112		
	8.00	SM	1.9	14.90	9.40	72	74.26	0.167	0.93	0.115	1.4524	NO
	9.00	CL	1.9	16.80	10.30				0.92	0.117		
	10.00	SM	1.9	18.70	11.20	52	49.14	0.119	0.9	0.117	1.0153	NO
	13.00	CL	1.9	24.40	13.90				0.82	0.112		
	16.00	SM	1.95	30.25	16.75	69	53.31	0.127	0.74	0.104	1.2183	NO
	19.00	SM	1.95	36.10	19.60	110	78.57	0.175	0.66	0.095	1.8456	NO
	25.00	SM	1.95	47.80	25.30	105	66.01	0.154	0.55	0.081	1.9000	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP06	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	80	131.52	0.298	0.98	0.076	3.8985	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	13	17.07	0.051	0.97	0.095	0.5356	YES
	5.50	CL	1.9	10.15	7.15				0.96	0.106		
	7.00	ML	1.9	13.00	8.50				0.94	0.112		
	8.00	SM	1.9	14.90	9.40	70	72.20	0.163	0.93	0.115	1.4176	NO
	9.00	CL	1.9	16.80	10.30				0.92	0.117		
	10.00	SM	1.9	18.70	11.20	43	40.63	0.096	0.9	0.117	0.8191	YES
	13.00	CL	1.9	24.40	13.90				0.82	0.112		
	16.00	SM	1.95	30.25	16.75	81	62.59	0.149	0.74	0.104	1.4294	NO
	25.00	SM	1.95	47.80	25.30	110	69.16	0.158	0.55	0.081	1.9494	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP07	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	40	65.76	0.154	0.98	0.076	2.0147	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	13	17.07	0.051	0.97	0.095	0.5356	YES
	5.50	CL	1.9	10.15	7.15				0.95	0.105		
	9.00	ML	1.9	16.80	10.30	40			0.92	0.117		
	10.00	SM	1.9	18.70	11.20	45	42.52	0.098	0.9	0.117	0.8361	YES
	13.00	CL	1.9	24.40	13.90				0.82	0.112		
	16.00	SM	1.9	30.10	16.60	82	63.64	0.147	0.74	0.105	1.4045	NO
	20.00	SM	1.95	37.90	20.40	105	73.51	0.165	0.63	0.091	1.8073	NO
	21.00	CL	1.9	39.80	21.30				0.61	0.089		
	25.00	SM	1.95	47.60	25.10	104	65.64	0.154	0.55	0.081	1.8929	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP08	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	70	115.08	0.260	0.98	0.076	3.4014	NO
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	15	20.41	0.054	0.97	0.090	0.6022	YES
	6.00	CL	1.9	11.15	7.65				0.95	0.108		
	9.00	ML	1.9	16.85	10.35	38			0.92	0.117		
	10.00	SM	1.9	18.75	11.25	43	40.54	0.095	0.9	0.117	0.8120	YES
	12.00	CL	1.9	22.55	13.05				0.85	0.115		
	16.00	SM	1.9	30.15	16.65	68	52.70	0.121	0.74	0.105	1.1577	NO
	21.50	SM	1.95	40.88	21.88	98	66.26	0.149	0.6	0.087	1.7038	NO
	23.00	CL	1.9	43.73	23.23				0.57	0.084		
	25.00	SM	1.95	47.63	25.13	96	60.56	0.138	0.55	0.081	1.6970	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP09	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	70	115.08	0.260	0.98	0.076	3.4014	NO
	3.80	SM	1.8	6.94	5.64	13	17.31	0.051	0.97	0.093	0.5478	YES
	7.00	CL	1.9	13.02	8.52				0.94	0.112		
	9.00	ML	1.9	16.82	10.32	34			0.92	0.117		
	10.00	SM	1.9	18.72	11.22	38	35.87	0.090	0.9	0.117	0.7684	YES
	12.00	CL	1.9	22.52	13.02				0.85	0.115		
	21.00	SM	1.95	40.07	21.57	83	56.51	0.131	0.61	0.088	1.4821	NO
	22.00	CL	1.9	41.97	22.47				0.6	0.087		
	25.00	SM	1.95	47.82	25.32	121	76.04	0.17	0.55	0.081	2.0982	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP10	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	50	82.20	0.183	0.98	0.076	2.3940	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	11	14.44	0.041	0.97	0.095	0.4305	YES
	7.00	CL	1.9	13.00	8.50				0.94	0.112		
	8.50	ML	1.9	15.85	9.85	60			0.92	0.115		
	9.50	SM	1.9	17.75	10.75	39	37.61	0.094	0.91	0.117	0.8021	YES
	12.00	CL	1.9	22.50	13.00				0.85	0.115		
	16.00	SM	1.9	30.10	16.60	83	64.42	0.147	0.74	0.105	1.4045	NO
	20.00	SM	1.95	37.90	20.40	109	76.32	0.170	0.63	0.091	1.8621	NO
	21.00	CL	1.9	39.80	21.30				0.61	0.089		
	25.00	SM	1.95	47.60	25.10	101	63.75	0.147	0.55	0.081	1.8069	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m³)	總覆土壓力 σ_0 (t/m²)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m²)	錐頭阻力 q_c(kg/cm²)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm²)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP11	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	55	90.42	0.200	0.98	0.076	2.6164	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	15	19.70	0.054	0.97	0.095	0.5671	YES
	6.00	CL	1.9	11.10	7.60				0.95	0.108		
	8.50	ML	1.9	15.85	9.85	56	56.42		0.92	0.115		
	9.50	SM	1.9	17.75	10.75	39	37.61	0.094	0.91	0.117	0.8021	YES
	12.50	CL	1.9	23.45	13.45				0.84	0.114		
	16.50	SM	1.9	31.05	17.05	82	62.80	0.146	0.73	0.104	1.4080	NO
	19.50	SM	1.95	36.90	19.90	108	76.56	0.172	0.65	0.094	1.8296	NO
	21.00	CL	1.9	39.75	21.25				0.61	0.089		
	25.00	SM	1.95	47.55	25.05	107	67.61	0.157	0.55	0.081	1.9280	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP12	2.00	CL	1.85	3.70	3.70	140			0.98	0.076		
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	18	24.49	0.061	0.97	0.090	0.6803	YES
	6.00	CL	1.9	11.15	7.65				0.95	0.108		
	8.50	ML	1.9	15.90	9.90	60			0.92	0.115		
	9.50	SM	1.9	17.80	10.80	52	50.04	0.120	0.91	0.117	1.0258	NO
	12.00	CL	1.9	22.55	13.05				0.85	0.115		
	17.00	SM	1.95	32.30	17.80	79	59.21	0.136	0.71	0.100	1.3533	NO
	25.00	SM	1.95	47.90	25.40	105	65.88	0.152	0.55	0.081	1.8788	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP13	2.50	SM	1.85	4.63	3.70	150	246.60	0.990	0.98	0.096	10.3611	NO
	3.50	SM	1.8	6.43	5.43	18	24.44	0.061	0.97	0.090	0.6808	YES
	6.50	CL	1.9	12.13	8.13				0.94	0.109		
	9.50	ML	1.9	17.83	10.83	65	62.47	0.146	0.91	0.117	1.2492	NO
	12.00	CL	1.9	22.58	13.08				0.85	0.114		
	17.00	SM	1.9	32.08	17.58	81	61.10	0.139	0.71	0.101	1.3753	NO
	19.50	SM	1.95	36.95	19.95	140	99.12	0.223	0.63	0.091	2.4502	NO
	20.50	CL	1.9	38.85	20.85				0.62	0.090		
	25.00	SM	1.95	47.63	25.13	105	66.24	0.152	0.55	0.081	1.8692	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP14	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	140	230.16	0.990	0.98	0.076	12.9513	NO
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	21	28.58	0.073	0.97	0.090	0.8141	YES
	6.00	CL	1.9	11.15	7.65				0.95	0.108		
	8.00	ML	1.9	14.95	9.45	60			0.93	0.115		
	9.00	SM	1.9	16.85	10.35	39	38.33	0.094	0.92	0.117	0.8046	YES
	12.00	CL	1.9	22.55	13.05				0.85	0.115		
	16.00	SM	1.9	30.15	16.65	82	63.55	0.147	0.74	0.105	1.4064	NO
	19.00	SM	1.95	36.00	19.50	100	71.61	0.163	0.66	0.095	1.7151	NO
	20.00	CL	1.9	37.90	20.40				0.63	0.091		
	25.00	SM	1.95	47.65	25.15	102	64.32	0.147	0.55	0.081	1.8086	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP15	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	142	233.45	0.990	0.98	0.076	12.9513	NO
	3.50	SM	1.8	6.40	5.40	22	29.94	0.075	0.97	0.090	0.8364	YES
	6.50	CL	1.9	12.10	8.10				0.94	0.110		
	8.50	ML	1.9	15.90	9.90	65	65.33					
	9.50	SM	1.9	17.80	10.80	51	49.07	0.119	0.91	0.117	1.0172	NO
	11.50	CL	1.9	21.60	12.60				0.86	0.115		
	16.00	SM	1.9	30.15	16.65	79	61.22	0.139	0.74	0.105	1.3299	NO
	19.50	SM	1.95	36.98	19.98	122	86.32	0.191	0.66	0.095	2.0043	NO
	20.50	CL	1.9	38.88	20.88				0.63	0.092		
	25.00	SM	1.95	47.65	25.15	112	70.62	0.162	0.55	0.081	1.9931	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP16	2.00	CL	1.85	3.70	3.70	140			0.98	0.076		
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	18	23.64	0.061	0.97	0.095	0.6406	YES
	7.00	CL	1.9	13.00	8.50				0.94	0.112		
	8.50	ML	1.9	15.85	9.85	55			0.92	0.115		
	9.50	SM	1.9	17.75	10.75	39	37.61	0.094	0.91	0.117	0.8021	YES
	12.00	CL	1.9	22.50	13.00				0.85	0.115		
	14.00	SM	1.9	26.30	14.80	60	49.32	0.119	0.79	0.110	1.0868	NO
	17.00	SM	1.95	32.15	17.65	82	61.72	0.141	0.71	0.101	1.3978	NO
	20.00	SM	1.95	38.00	20.50	123	85.91	0.191	0.63	0.091	2.0969	NO
	22.00	CL	1.9	41.80	22.30	58			0.6	0.088		
	25.00	SM	1.95	47.65	25.15	121	76.30	0.17	0.55	0.081	2.0915	NO

試驗地點: 安平港第九、十號碼頭　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av} / σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
AP17	2.00	SM	1.85	3.70	3.70	140	230.16	0.990	0.98	0.076	12.9513	NO
	4.00	SM	1.8	7.30	5.80	20	26.26	0.065	0.97	0.095	0.6826	YES
	5.50	CL	1.9	10.15	7.15				0.96	0.106		
	7.00	SM	1.9	13.00	8.50	55	59.66	0.138	0.94	0.112	1.2306	NO
	8.00	CL	1.9	14.90	9.40				0.93	0.115		
	9.00	SM	1.9	16.80	10.30	39	38.43	0.094	0.92	0.117	0.8031	YES
	12.00	CL	1.9	22.50	13.00				0.85	0.115		
	14.00	SM	1.95	26.40	14.90	60	49.15	0.119	0.79	0.109	1.0900	NO
	20.00	SM	1.9	37.80	20.30	83	58.25	0.133	0.63	0.092	1.4535	NO
	25.00	SM	1.95	47.55	25.05	126	79.61	0.179	0.55	0.081	2.1981	NO

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD01	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	62	84.76	0.190	0.97	0.083	2.2966	NO
	4.00	CL	1.9	7.75	6.25	12			0.96	0.093		
	5.00	SM	1.95	9.70	7.20	72	84.85	0.190	0.95	0.100	1.9033	NO
	7.00	CL	1.9	13.50	9.00	5			0.94	0.110		
	8.00	SM	1.95	15.45	9.95	59	59.15	0.136	0.93	0.113	1.2074	NO
	11.00	SM	1.95	21.30	12.80	59	52.15	0.122	0.88	0.114	1.0681	NO
	13.00	ML	1.9	25.10	14.60	30			0.82	0.110		
	16.00	CL	1.9	30.80	17.30	5			0.74	0.103		
	17.00	SM	1.95	32.75	18.25	58	42.93	0.104	0.71	0.099	1.0465	NO
	22.00	CL	1.9	42.25	22.75	13			0.6	0.087		
	25.00	SM	1.95	48.10	25.60	96	60.00	0.138	0.55	0.081	1.7121	NO

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD02	2.00	SM	1.95	3.90	3.90	33	52.84	0.127	0.98	0.076	1.6614	NO
	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	53	72.46	0.165	0.97	0.083	1.9944	NO
	8.50	SM	1.95	16.58	10.58	53	51.54	0.126	0.92	0.112	1.1203	NO
	16.00	CL	1.9	30.40	16.90	10			0.74	0.104		
	17.50	SM	1.9	33.25	18.25	79	58.48	0.136	0.7	0.099	1.3672	NO
	23.50	CL	1.9	44.65	23.65	20	13.01		0.56	0.082		

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD03	2.00	SM	1.95	3.90	3.90	60	96.08	0.215	0.98	0.076	2.8127	NO
	4.00	SM	1.95	7.80	6.30	82	103.31	0.230	0.97	0.094	2.4553	NO
	6.00	CL	1.9	11.40	7.90	3			0.95	0.107		
	9.00	SM	1.95	17.55	11.05	65	61.83	0.141	0.92	0.114	1.2371	NO
	10.50	CL	1.9	19.95	11.95	40			0.89	0.116		
	13.00	SM	1.95	25.35	14.85	62	50.88	0.121	0.82	0.109	1.1082	NO
	24.00	CL	1.9	45.60	24.10	10			0.56	0.083		
	25.00	SM	1.95	48.75	26.25	60	37.03	0.09	0.55	0.080	1.1296	NO

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD04	2.00	SM	1.95	3.90	3.90	48	76.86	0.172	0.98	0.076	2.2501	NO
	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	61	83.40	0.188	0.97	0.083	2.2724	NO
	8.50	SM	1.95	16.58	10.58	61	59.32	0.136	0.92	0.112	1.2092	NO
	16.00	CL	1.9	30.83	17.33	12			0.74	0.103		
	17.50	SM	1.95	33.75	18.75	103	75.22	0.169	0.7	0.098	1.7196	NO
	21.50	CL	1.9	41.35	22.35	15			0.6	0.087		
	23.00	SM	1.95	44.28	23.78	116	75.23	0.169	0.57	0.083	2.0412	NO
	24.00	CL	1.9	46.18	24.68	31			0.56	0.082		
	25.00	SM	1.95	48.13	25.63	102	63.72	0.147	0.55	0.081	1.8245	NO

試驗地點：布袋港區　　地震規模：7.0　　最大加速度：0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD05	4.00	SM	1.95	7.80	6.30	56	70.55	0.162	0.97	0.094	1.7294	NO
	5.00	SM	1.95	9.75	7.25	77	90.43	0.200	0.96	0.101	1.9861	NO
	8.00	SM	1.95	15.60	10.10	77	76.62	0.172	0.93	0.112	1.5351	NO
	9.50	CL	1.9	18.45	11.45	9			0.91	0.114		
	11.00	SM	1.95	21.38	12.88	60	52.88	0.127	0.88	0.114	1.1145	NO
	15.00	CL	1.9	28.98	16.48	8			0.76	0.104		
	18.00	SM	1.95	34.83	19.33	105	75.53	0.170	0.69	0.097	1.7528	NO
	23.00	ML	1.9	44.33	23.83	40			0.57	0.083		
	25.00	SM	1.95	48.23	25.73	102	63.59	0.147	0.55	0.080	1.8279	NO

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD06	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	57	77.93	0.175	0.97	0.083	2.1153	NO
	4.00	CL	1.9	7.60	6.10	21			0.96	0.093		
	8.00	SM	1.95	15.60	10.10	86	85.57	0.191	0.93	0.112	1.7047	NO
	15.00	CL	1.9	28.50	16.00	12			0.76	0.106		
	17.00	ML	1.9	32.30	17.80	65	48.72	0.119	0.71	0.100	1.1842	NO
	19.50	SM	1.95	38.03	21.03	143	98.62	0.223	0.65	0.092	2.4320	NO
	20.50	CL	1.9	38.95	20.95	42			0.62	0.090		
	21.50	SM	1.95	41.93	22.93	72	47.55	0.117	0.6	0.086	1.3670	NO
	23.00	CL	1.9	43.70	23.20	45			0.57	0.084		
	25.00	SM	1.95	48.75	26.25	91	56.17	0.13	0.55	0.080	1.6317	NO

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 qc(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 qcl(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD07	4.00	SM	1.95	7.80	6.30	39	49.14	0.119	0.97	0.094	1.2704	NO
	5.00	SM	1.95	9.75	7.25	73	85.73	0.191	0.96	0.101	1.8967	NO
	8.50	SM	1.95	16.58	10.58	73	70.99	0.162	0.92	0.112	1.4403	NO
	11.00	CL	1.9	21.33	12.83	12			0.88	0.114		
	13.00	SM	1.95	25.23	14.73	44	36.26	0.087	0.82	0.110	0.7940	YES
	15.00	CL	1.9	29.03	16.53	11			0.76	0.104		
	18.00	SM	1.95	34.88	19.38	102	73.28	0.165	0.69	0.097	1.7032	NO
	21.00	CL	1.9	40.58	22.08	18			0.61	0.087		
	25.00	SM	1.95	48.38	25.88	76	47.25	0.113	0.55	0.080	1.4089	NO

試驗地點: 布袋港區　　地震規模: 7.0　　最大加速度:0.12g

孔號	深度(m)	土壤分類	土壤單位重 (t/m^3)	總覆土壓力 σ_0 (t/m^2)	有效覆土壓力 σ'_0 (t/m^2)	錐頭阻力 q_c(kg/cm^2)	修正錐頭阻力 q_{cl}(kg/cm^2)	液化強度 τ / σ'_0	修正係數 r_d	地震力 τ_{av}/ σ'_0	SF τ / τ_{av}	液化否
PD08	3.00	SM	1.95	5.85	5.35	46	62.89	0.146	0.97	0.083	1.7648	NO
	4.00	SM	1.95	7.80	6.30	22	27.72	0.072	0.96	0.093	0.7766	YES
	5.00	SM	1.95	9.75	7.25	78	91.61	0.203	0.95	0.100	2.0371	NO
	9.00	SM	1.95	17.55	11.05	78	74.20	0.167	0.92	0.114	1.4653	NO
	11.00	CL	1.9	20.90	12.40	10			0.88	0.116		
	13.00	SM	1.95	25.35	14.85	55	45.13	0.110	0.82	0.109	1.0075	NO
	16.00	CL	1.9	30.40	16.90	15			0.74	0.104		
	17.50	SM	1.95	34.13	19.13	60	43.39	0.104	0.7	0.097	1.0675	NO
	21.00	CL	1.9	39.90	21.40	35			0.61	0.089		
	25.00	SM	1.95	48.75	26.25	79	48.76	0.119	0.55	0.080	1.4936	NO

台灣各港區土層分佈資料微電腦建檔及土壤動態性質分析研究

執行單位：大地工程組

計畫主持人：謝明志　副研究員

協同主持人：李延恭　研究員兼組長

參與人員：蘇吉立　助理

陳志芳　助理

張惠華　技術員

摘　要

本研究計劃廣泛搜集各港區土壤鑽探資料及相關試驗報告，彙整各試驗報表，設計資料庫格式，建立資料庫表格檔案，利用MapInfo公司所開發的地理資訊系統－MapInfo 3.05版及MapBasic使用者發展語言環境，設計港區土層分佈資料查詢展示系統，此應用軟體可依據鑽孔分佈位置查詢各鑽孔之土層資料及相關試驗結果，並展繪土層剖面圖。除了典藏傳統的標準貫入試驗鑽探資料外，本系統亦收錄荷式錐貫入試驗資料，使用者可以查詢到此種更精確的土層試驗數據，可對現地土層做更細緻的分析研判。

另外，本研究也針對台灣西部海岸地區土壤之動態性質，搜集了相關的試驗資料，包括試驗室試驗如共振柱試驗、動三軸試驗等及現場震測試驗等結果，加以綜合整理分析，分別求出台灣西部代表性地區土壤動剪力模數、阻尼比、壓縮波速度和剪力波速度等之範圍。根據已搜集的資料整理結果，台中港區砂性土壤剪力模數和阻尼比較高雄港區和興達港區之砂性土壤高，剪力波速度和壓縮波速度一般亦以台中港區之土層較其他地區稍高。該研究結果可供初步工程規劃之參考。

目　錄

摘要 …… I
附圖目錄 …… III
附表目錄 …… IV
一、前言 …… 謝明志…… 1
二、土層分佈資料建檔需求及系統配置 …… 謝明志…… 3
三、土層分佈資料庫架構程式設計及成果展示 …… 謝明志……12
四、各港區土壤動態性質分析研究 …… 李延恭……43
五、結論與建議 …… 李延恭、謝明志……66
參考文獻 …… 68

附圖目錄

圖3.1 壓密曲線之類別（取自李成亨，1988）……16
圖3.2 台灣主要港區分佈示意圖……33
圖3.3 台中港港區地圖……34
圖3.4 台中港區標準貫入試驗鑽探位置分佈圖……35
圖3.5 台中港區荷式錐貫入試驗分佈位置及附近地形……37
圖3.6 標準貫入試驗單鑽孔土層剖面柱狀圖……39
圖3.7 標準貫入試驗多鑽孔土層剖面柱狀圖……40
圖3.8 荷式錐貫入試驗成果圖……42
圖4.1 高雄港區砂性土壤剪力模數受不圍壓影響……46
圖4.2 高雄港區砂性土壤圍壓對阻尼比的影響……46
圖4.3 高雄港區砂質沉泥或粘土質沉泥剪力模數受不同圍壓影響……47
圖4.4 高雄港區砂質沉泥或粘土質沉泥阻尼比受圍之影響……47
圖4.5 高雄港區砂性土壤（圍壓爲1kg/cm^2）之剪力模數與應變關係曲線……48
圖4.6 台北盆地砂性土壤剪力模數與國外研究結果之比較……49
圖4.7 高雄港區砂性土壤G/Gmax與剪應變之關係……50
圖4.8 高雄港區砂性土壤阻尼比與剪應變之關係……51
圖4.9 高雄港區砂性土壤動力三軸試驗結果……53
圖4.10 台中港區砂性土壤剪力模數受不同圍壓影響……55
圖4.11 台中港區砂性土壤圍壓對阻尼比的影響……55
圖4.12 台中港區砂性土壤動力三軸試驗結果……57
圖4.13 台中港區沉泥質砂性土壤G/Gmax與剪應變之關係……58
圖4.14 台中港區沉泥質砂性土壤阻尼比與剪應數之關係……59
圖4.15 台中港區與高雄港區砂性土壤剪力模數比較結果……60
圖4.16 台中港區與高雄港區砂性土壤阻尼比比較結果……60
圖4.17 台中港區土壤動力三軸試驗結果……61
圖4.18 台中港區土壤SPT-N值與剪力波速度及深度變化圖……62
圖4.19 興達港區砂性土壤動力三軸試驗結果(a)……64
圖4.20 興達港區砂性土壤動力三軸試驗結果(b)……65

附表目錄

表3.1 鑽孔資料抬頭（取自李成亨，1988）……17
表3.2 A表格式（取自李成亨，1988）……19
表3.3 B表格式……20
表3.4 C表格式（取自李成亨，1988）……20
表3.5 D表格式（取自李成亨，1988）……20
表3.6 D表試驗代號說明（取自李成亨，1988）……22
表3.7 輔助記憶體內資料貯存架構……24
表3.8 港區各鑽孔之基本資料檔案及資料錄說明……25
表3.9 鑽孔之試驗資料檔案及資料錄說明……28
表3.10 土層分佈資料庫圖文查詢展示組織架構……29
表3.11 標準貫入試驗報表……38
表3.12 荷式錐貫入試驗報表……41

一、前言

港灣建設在工程規劃階段如有完整的土層分佈資料，將可節省大量經費，時間與人力。對已完成之港灣工程其土層分佈資料若能有系統的儲存建檔，亦將有助於港灣結構物之維護與受損原因之探討。

本研究計劃分爲土層分佈資料微電腦建檔研究和土壤動態性質分析研究兩部份。

1. 台灣各港區土層分佈資料微電腦建檔研究：

大凡建築工程之規劃設計，皆以搜集土層工程特性爲第一要務；而大型的港灣工程，其橫跨之區域動輒數公里以上，大地工程地質資料之獲得亦爲重要之規劃依據。若有完整的港區地工資料庫，則港灣建設在工程規劃階段，將可以節省龐大的經費、時間與人力。且因台灣地處環太平洋地震帶，港灣結構物的最大破壞力乃爲烈震强浪所帶來的强烈衝擊及其延生的土壤液化、變形等現象。依據1989年美國加州灣區烈震調查，受災最嚴重的位置，均在海灣淤泥層及填土區上，1994年1月17日，加州又現烈震，報告指出嚴重災區也多在軟弱地層上。隔年同日(1995年1月17日)，日本阪神發生加速度達833 gal的烈震，回填區大面積液化，可見震災之分佈與地質條件有絕對密切之關係。對於地震這類不可預知的天然災害，若能事先確知那些地點於地震時較可能受創，當可事先採取適當之防範措施，因此，對台灣各港區而言，建立完整的土層分佈地質資料庫，除了規劃預算階段可獲得省時、省力、省錢等效益外，亦能達到災害防治的目的。本研究計劃建入荷式錐貫入試驗資料於地質資料庫系統中，該資料比標準貫入試驗更加精確且具有連續性的土層强度反應值，另外仍搜集新增之標準貫入試驗資料，納入此系統中。將來並可依據這些土層資料來推估烈震侵襲時土壤發生液化的可能分佈範圍及其它工程應用，以作爲規劃設計及災害防治上的基本資料。

2. 土壤動態性質分析

工程師在進行港灣工程基礎分析及設計時，其結果可說是一個預測。預測之準確與否和原始資料之週全及假設是否合乎實際狀況息息相關，尤其有關土壤動力作用和液化問題的預測較之一般土木工程更爲困難，主要原因爲：(1)地層本身之變化多端。(2)大部份時間無法搜集足夠及準確之資料。(3)液化問題屬於大量資料之統計問題。

土壤在動態荷重作用下所引發之問題遠較靜態荷重者複雜與重要。在分析砂土層之液化問題時，應對土壤之動態性質有相當程度的瞭解。而動態性質資料之週全與否對液化問題分析影響極大。

本研究計畫擬廣泛搜集西海岸港灣地區現有土壤動態性質資料，作有系統的整理分析及建議，俾提供港灣工程規劃之參考。

二、土層分佈資料建檔需求及系統配置

2.1 資料建檔目的

由於土層分佈資料之獲得需大量的人力、物力、財力及時間，故取得不易，因此須有計劃的統整典藏各有關單位的珍貴資料，以避免因管理不善而造成資料的損毀或遺失。

電腦化的建檔方式能做大量而有系統的資料儲存工作，並可提供快速且有效的查詢作業服務，眞正達到資料共用共享的益處，且未來新的地質資料又可迅速的補充使資訊的流通更爲便捷，各港區的土層分佈資料建檔完成後可達到下列目的：

(1)工程依據：提供爾後港灣規劃、設計及工程研判上的需求。

(2)學術資料：可供各學術單位從事研究、分析所需的基本資料。

2.2 資料處理層次

一般對大量資料的處理可區分爲三個層次，即規格化、系統化及應用性，對本研究而言，五大港區之地層分佈調查資料因提供單位不同，其表格及內容亦有差異，是故資料處理的第一個步驟即是妥善規劃各港區的地質資料，訂定統一表格，使各種不同的地質資料經過整理而達同一規格。

就資料處理之系統化要求而言，即是要建立一個適合於管理及展示資料的資訊系統，本研究計劃所需求的資訊系統，基本上希望具有下列四項功能：

(1)建立各港區的地圖資料系統。

(2)建立各港區的土層分佈資料系統。

(3)能展示各港區的地層剖面資料。

(4)能撰寫分析程式。

而本研究資料處理的第三個層次－應用性，乃以發揮上述第四項功能爲其理想，即利用所建立的資料來撰寫分析程式推估相關工程性質，以供工程規劃參考。

2.3 資料建檔系統之基本需求及功能

依據上述資料處原則及建檔目的，本研究所需之建檔軟硬體，基本上須能符合下列需求：

2.3.1 硬體基本需求

1.電腦主機：

目前全世界使用的電腦主機種類從最快的超級電腦到個人電腦應有盡有。然而，其中最廣泛被人使用的主機主要可以分爲二級：其一爲工作站(Work-station)級電腦，目前工作站級電腦中以SUN，DEC，HP，Intergraph，Silcon Graphic等皆擁有相當多的使用者。其二爲個人電腦(Personal Computer)，其中以intel 80x86及Pentiun系列CPU的PC最爲廣泛使用，其次以Motorola 68K系列CPU的Mactoish數量亦不少。本研究建議至少採用80486級以上之主機，來做資料建檔處理用。

2.圖文展示監示器：

資料建檔系統由於必須能夠同時顯示圖形與屬性資料，因此，其所使用的監示器必須要能夠支援圖形顯示。而監視器必須匹配顯示卡所輸出的訊號才能使用，不同品牌或模組的監視器無法完全相互支援，因監視器在設計時已決定了它所能反應的訊號頻率範圍及它的掃描頻率與影像更新速率，所以在選用圖文展示監視器時，必須與顯示卡相匹配。

顯示卡係插在微電腦的擴充槽內，作爲訊號線的聯結站，可提供訊號到圖文展示監視器上，控制監視器的像束精度及色彩深度。

目前，工作站級的電腦，其圖文展示監示器之解析度一般均在1280* 1024以上，可以顯示的顏色都在256色以上；而個人電腦上的監示器解析度一般均在640*480以上，可以顯示的顏色亦都在256色以上。本研究建識採用256色以上，解析度640*480以上的監示器及顯示卡來使用。

3.儲存媒體(store media)：

土層資料建檔系統由於包含圖形資料，因此，其資料量要比普通的文數字資料庫來得大，所以必須配備容量十分龐大的儲存媒體。目前，最常被使

用的儲存媒體有硬式磁碟，可讀寫光碟(mo)、磁帶(tape)、唯讀光碟(cd-rom)等。本研究建議採用至少250Mb以上的硬式磁碟來供建檔系統及資料貯存用。

4.電腦滑電：

多數的資料建檔管理系統，設計時都已規劃滑鼠來輔助操作，滑鼠可連在微電膠水上任何一個序列輸出線上，配合其驅動程式來運作，而此驅動程式通常都拷貝到啓動磁碟機的根目錄上。

5.隨機存取記憶體(RAM)：

儘可能地利用隨機存取記憶體，可大爲提升龐大資料的處理效率，因此，在微電腦上，高於傳統記憶體區640K以上的記憶體，都應善加利用，有些軟體，可自行利用640K或1024K以上已規劃的延伸記憶體(XMS)或擴充記憶體(EMS)，有些軟體，須利用虛擬磁碟機或磁碟快取的功能，來提升執行速度及存放執行過程中所產生的中間檔，因此，須視所採用的建檔系統及微電腦品級，善加規劃及擴充足夠的隨機存取記憶體。建議隨機存取記憶體至少應在8Mb以上。

6.週邊設備：

視選用的建檔系統，資料的搜集及展示，須匹配有適當的輸出入設備，如彩色掃瞄機，可直接將地圖或照片作影像傳輸，處理成投影檔以供貯存，或高精度的螢幕或繪圖儀、列表機等，可提供資料展示使用。

2.3.2 資料建檔軟體之基本功能：

1.系統基本操作功能：

a. 須具有處理向量(vector)、影像(raster)、電腦輔助設計(CAD)三者的能力，可透過資料庫管理系統，來詮釋向量圖形。

b. 具操作簡易的人機介面對話盒及空間資料交談處理功能，能在以視窗操作基準的個人電腦上執行。

2.圖形處理能力：

a. 圖形處理包含圖形編輯、更新、顯示、拼圖、地圖投影座標建立／轉換，地圖幾何校正、分類及解說等功能。

b. 可提供橫麥卡托二分帶，經緯度等地圖投影方法，可按地理座標拼圖或交談式人工拼圖。

c. 須具豐富的桌面工具，用以量測、繪製、詮釋圖形，可提供螢幕上立即更新、描繪像片，以詮釋航照圖片。

d. 具地圖製作功能，可將相關輔助設計或向量圖形疊加於地圖影像上。

3.港區土層調查資料圖文顯示功能：

a. 可利用鑽探資在區域地圖上標示鑽孔位置，並顯示沿鑽孔深度變化的地質圖文資料。

b. 地圖必須顯示大地座標，以橫麥卡托二分帶爲地圖投影方法。

c. 描述土層之文字資料分屬三種方式存放：

C-1 鑽孔位置基本資料：含鑽孔編號、鑽探公司、鑽探日期、X、Y座標位置、地面高程、鑽孔深度等資料。

C-2 沿鑽孔深度之地質變化資料：該資料含深度、土壤分類、標準貫入試驗N值，而資料庫內的索引欄位(Index Key)，係利用鑽孔位置或鑽孔編號當做索引。

C-3 強度或特殊試驗資料，如遇有採樣或鑽孔後所執行的試驗，須能以表格方式加以貯存。

d. 輸入地圖後，可再輸入「鑽孔位置」相關資料，則鑽孔位置應按地理座標顯示於地圖上。

e. 使用者可在地圖上選擇欲顯示柱狀圖的鑽孔，叫用柱狀圖顯示功能，螢幕即顯示鑽孔群的地層柱狀圖。

f. 若有數個鑽孔之柱狀圖同時顯示時，柱狀圖上須註明高程鑽孔位置及沿深度所得之標準貫入試驗N值，以方便大地工程師之規劃設計使用。

2.4 建檔系統

2.4.1 建檔主要系統

依據資料建檔工作所需具備之軟體基本功能，本研究採用美國MapInfo公司所發展的地理資訊系統(Geographic Information System，簡稱GIS)應用軟體，該軟體即命名爲MapInfo，版本爲3.05版，本研究以此來作爲資料處理之

主要軟體，MapInfo在硬體匹配上分工作站版，PC個人電腦版及麥金塔版，爲顧及須提供資料予各港埠單位使用，本研究選用個人電腦版，該系統爲視窗操作軟體，採用下拉式功能表模式，操作程序層次分明且極具效率，可提供使用者快速搜尋而取得所需要的功能。該系統主要的功能有：

1. 使用多用途資料模式，使用者可非常方便的組合Lotus, dBASE, ORACLE和任意圖層的資料。
2. 提供航空照片幾何校正功能，可直接在螢幕上數化，影像格式包含SPOT(.bit)、.GIF、. TIF、. PCX、. BMP和. TPG。
3. 可直接讀取.DBF(DBASE, FoxBase, Clipper),Lotus1-2-3, Excel和ASCII檔，在主從架構下透過選擇式查詢資料聯結(SQL Data Link)，可直接查詢並讀取ORACLE和SYBASE的資料庫。
4. 功能强大的簡報及出圖能力，搭配中文視窗操作系統，可將屬性或文字資料以實體(True Type)中文字顯示於圖上。
5. 提供編圖工具箱，方便圖形切割剪貼和字型選擇非常方便，且可依特定比例尺出圖，並繪製圖例。
6. 使用多重文件界面(MDI)，可以很方便管理，並了解資料庫內每筆資料和圖形及統計表之間的關係。
7. 可配合資料內容產生大小不同之緩衝區，提供多種地圖投影方式，包括經緯度投影、橫麥卡托投影。
8. 具備多邊形交集、聯集分析，可隨時合併或分割大小不同的區域，甚至包含每個區域的屬性資料。
9. MapInfo可在Windows，Macintosh，Sun和HP上使用相同的使用者界面和資料格式，所開發的應用軟體可快速移植到其他硬體上。

本研究另外採用MapInfo公司所提供的使用者發展語言環境－MapBasic 3.05版，來開發港區土層分佈資料查詢展示系統。MapBasic的功能特性如下：

1. 提供程式發展者對於遠端資料庫查詢及更新的功能，使應用軟體可滿足主／從架構的需求。
2. 可以產生新的使用者界面，修改既有界面，或建立特殊需求的對話盒。
3. 可呼叫Visual Basic和C程式，編譯完成的程式可以在Mapinfo內執行或成爲一單獨可執行的模組。

4. 應用程式可在不同的硬體上執行。
5. 可經由一個專案檔案(Project file)連接多個小模組，因此程式發展者可同時發展個別的子模組。
6. 發展應用軟體時MapBasic提供下列兩種特性。
   a.特殊事件控制(Special Evcnt Handlers)
   b.交互處理溝通(Inter-process Communication)

MapInfo藉由MapBasic加以開發設計，可以做不同領域更專精的應用。目前的應用領域，包括1.業務規劃，2.市場策略，3.公共管線，4.保險服務，5.自然環境，6.有線電視，7.環境品質，8.區域及都市計劃，9.學校教育，10.市政管理。可見其應用範圍極爲廣泛，採用此一系統，將來在資源共享需求下，使用將更爲便捷。

2.4.2 建檔附屬系統

MapInfo 爲一圖檔處理極有效率的軟體工具，但在資料庫操作及對週邊設備之溝通上功能稍嫌不足。故本研究採用其它軟體來彌補MapInfo的這些缺憾：

①在數據資料庫之建立上，我們採用MS Foxpro及MS Access來建立基本表格檔。

②在影像檔案之輸入及編輯上，我們採用Photostyler軟體及Microteck掃描儀加以輔佐。

③基本地圖檔案保取用內政部資訊中心之基本圖檔，再利用Auto CAD軟體作圖檔轉入編輯，依據各港區所需的圖幅範圍結合成單一圖檔，再轉入MapInfo內使用。

④外建資料的傳送，係透過LL3軟體來傳送，或利用Novell網路系統，將各資料送回MapInfo工作主機上，再將Foxpro 及Photostyler所建立的檔案，轉成MapInfo的內部檔案，在MapInfo系統內加以聯結使用。

2.4.3 全球衛星定位接收系統

全球衛星定位系統的全名爲：授時與測距導航衛星系統／全球定位系統(Navigation Satellite Time and Ranging/Global Positioning System)，簡稱全球

定位系統(GPS)。

該系統是由美國國防部爲軍用定時、定位、定速而建立的新一代衛星導航系統。自1978年發射第一顆衛星，目前地球上空計有24顆衛星（內含3顆備用衛星）以近似圓形的軌道在運轉操作，其軌道傾角爲55度，共6個軌道面，每個軌道面含4顆衛星，高度爲20200公里，運轉週期爲11時58分。在地面上利用接收儀器，可在任何時間、任何地點做全天候觀測，不受天氣狀況的影響，定位速度快，觀測時間短，操作簡便。

本研究購置Trimble GeoExplorer全球定位系統接收儀乙台及相關處理軟體做爲鑽探孔位及鄰近地形現地量測使用。該接收儀之特性如下：

①接收速率：最快0.7秒。

②第一次定位時間：二維座標在二分鐘內

三維座標在三分鐘內

③6頻道平行／順序追綜L1載波之C/A電碼

④差分精度：一般條件下精度在5m以內，衛星天候條件優良下精度可達1m

⑤GEO-PC處理軟體：差分校正

⑥可記錄點、線及面積

⑦具有自動省電裝置

⑧可追綜8顆衛星

⑨內部記憶體：1/4 MB（可記錄超過9000點，3D GPS位置）

⑩使用者可自行選擇圖形座標系統顯示

⑪具可使用全世界及自己設定之座標資料

⑫可顯示GPS衛星狀態，包括方位、仰角、使用者距離精度、接收訊號之強弱等。

⑬具平均位置的功能

⑭具夜間操作的夜間顯示燈

⑮具ASCII, RTCM SC-104及XMODEM之傳輸

⑯具導航功能，包括距離、方向、追綜差量及可記憶點99點導航點

⑰具RTCM SC-104輸入之即時差分之功能

⑱可連續操作7-9小時

⑲QUICK PLAN 衛星規劃軟體；架構在微軟視窗作業系統下，操作容易，並可同時顯示衛星個數及空間點位、平面點位、高程、時間等各項定位精度因子。

⑳可轉換140種GIS之格式。包括ARC/INFO, AUTO CAD, INTERGRAPH

㉑軟體可顯示測量之點、線、面之屬性，並可計算線長及面積

衛星定位系統雖然使用便利，但有一些因素會影響定位精度，產生誤差如：衛星幾位分佈(Satellite Geometry; DOP Values)，觀測量雜訊(Measurement Noise)，衛星軌道偏斜(Satellite Orbital Bias)，衛星及接收儀時錶偏斜(Satellite and Receiver Clock Biases)，電離層遲延(Ionospheric Delay)，對流層遲延(Tropospheric Delay)。多路徑誤差(Multipath)及選置效用(Selective Availability，簡稱SA)等，特別自1993年3月起，美國國防部將SA裝置於Block II衛星上，刻意降低衛星所發送之民用C/A電碼精度，影響了衛星時鐘及衛星星曆的精度（但軍用接收儀不受影響，因軍用爲精密P電碼），對有高精度資料需求者而言，便需要利用一些方法來對C/A電碼的定位精度加以改善，因此，便發展出差分校正(Differential Correction)的技術；此方法是利用一已知精確座標之GPS測站作爲參考站(Reference Station)，由參考站接收衛星資料並計算參考站位置與衛星位置之間的距離，此一計算距離與參考站所測得之虛擬距離的差值（稱爲虛擬距離差），或是直接由利用測得虛擬距離計算出參考站之座標和參考站實際座標間的分量差，當成修正值(Correction)，對同一時間未知測站上的接收儀所得之數據進行修正，以提高未知測站之精度。

本研究採用Geo-Pc或Pfinder軟體來執行差分校正，對其它影響因素，可用Quick-Plan軟體作事先詳細規劃，再選擇最適當的時段來實施GPS接收作業。

綜上所論，本研究所採用的設備，硬體方面計有PC個人電腦、相關週邊設備及GPS接收儀，軟體系統則包含：

①MapInfo地理資訊系統

②MapBasic發展語言環境

③Foxpro及Access資料庫建構軟體

④Auto CAD電腦輔助設計軟體

⑤Novell網路系統與LL3資料傳送軟體

⑥Geo-Pc定位系統差分校正處理軟體

⑦Pfinder資料字典建構、差分及圖形展示軟體

⑧Quick-Plan衛星規劃軟體

三、土層分佈資料庫架構程式設計及成果展示

3.1 地層資料之處理原則：

本研究在資料之處理上，係依據李咸享(1988)在「大地工程地質資料庫系統及台北市區建檔之研究」上對工程地質資料之處理原則。確立資料處理之原則，乃爲要將龐大及不同格式之資料加以規格化，以提供工程上直接使用及學術上研究之便利。欲具有上述目標，除了資料庫在結構上須作妥善地規劃外，其餘則全賴工程地質資料的整理及歸類。要將項目雜、數量多、內容繁雜的各港區工程地質資料納入一個系統中，誠然不易。而且各家公司之鑽探報告格式不同，工程資料分類方法也多不相同。所以表格須先統一才能進行實質之建檔作業。本研究乃依據李氏之建議表格及處理方法，進行資料整理。

3.1.1 座標系統

目前由於地圖投影的方式不一，以致有許多的地圖座標系統。台灣地區位於北半球、低緯度區。爲配合國際性座標(Universal Transversal Meccator簡寫U.T.M.)，乃採橫麥卡托投影座標系統（簡稱TM系統），該系統在台灣之初建，係民國六十九年聯勤測量署以南投埔里虎子山一等三角點中心點所完成之TM二度分帶之全國三角點檢測。本報告即以此來建立一致性及普遍性的“港區土層分佈資料庫”座標系統。

每個鑽探孔位置，各以一組(X,Y,Z)數值來表示，(X,Y)表示鑽孔在TM二度分帶中之平面位置(Grid Coordination)（如有必要可經由換算公式，計算出鑽孔之經緯度值(Ellipsoidal Coordination)。Z值表示鑽孔的立面座標，即鑽孔位置地面高程大小。其中X座標以六位整數表示（省略前頭的E字母），Y座標以七位整數表示（省略前頭的N字母），Z座標爲具小數點的實數，帶正負號，表示高或低於地面，三者單位皆爲公尺。

3.1.2 基本地圖檔之建置

爲了尋孔(Search Borehole)簡便起見，在本研究中，我們先將各港區基本地圖檔存入電腦中，而在搜尋上分三個層次來處理，第一層顯示出台灣全島圖，分別標示出各港區位置，第二層則顯示各港區平面圖，第三層則利用圖形比例尺縮放功能來放大顯示目的範圍。如此可完成尋孔、定孔或直接選孔的工作。

3.1.3 處理原則

在處理、彙整鑽探報告中的地層分佈資料，本研究乃本著「忠於原著，評如原著」的精神，將所有的資料載入資料庫中。但是基於事實上的需要仍有若干資料須先行校正。處理原則分述如下：

1. 每一鑽孔資料，皆註明提供單位、鑽探公司、試驗單位及鑽孔的日期，除了說明該資料的來源，感謝提供單位外，尙可作爲使用者對資料的評估，然而，最大的希望是藉此惕勵工程界重視鑽探資料，提昇工程地質資料的完整性。
2. 鑽孔位置：基本上，每本鑽探報告上應具有鑽探孔的平面配置及鑽孔的座標值，但是，由於鑽探報告時代不同，標準不一，除了少數的鑽探報告是採用TM二度分帶座標系統外，其餘的鑽探報告的鑽孔座標常常是獨具一格，而造成處理工作的負擔。一般可分述如下：

   ①採用地藉圖座標系統，即日據時代遺留下來之TM三度分帶（全國戶籍圖中心在台中公園三角點）。

   ②鑽探公司自行建立的局部座標系統－－有平面配置圖及座標值。

   ③僅有鑽孔平面配置圖示其相關位置，卻無鑽孔座標值。

   ④鑽探公司自行建立的局部座標系統－－僅有鑽孔座標值，無平面配置圖。

   ⑤鑽探報告無明確地標出工作地點位置。

   ⑥僅有簡圖，而無任何工地及鑽孔彼此間的相關資料。

面對如此雜亂的座標值及位置圖，本研究乃以各種轉化公式、投影技巧、和建築物配置圖形來決定該批資料之取捨。由公式轉化的TM座標值較爲精確，而其它技巧得到的座標值誤差會較大。

3. 地下水水位高程：各類鑽探報告中，地下水位之標示，有標以地面下之深度值；有示之以高程大小，亦有記錄其長期地下水位之變化值，在此，我們以高程來標示地下水位，爲的是利於地下水位剖面圖之繪製，若有長期地下水位觀測值，則在緊鄰地下水位高程欄下，登錄六欄之水位觀測數據，且同時註明觀測之時間，以供使用者研判水位變化情形。
4. 採樣深度說明：鑽探報告書中，深度欄的記錄不外是採樣深度及試驗之土樣深度兩種，土樣皆以劈管或薄管取之，在長45公分劈管採樣深度中，以採樣器頂點深度爲採樣深度，實無具任何意義；若以採樣器之中間點深度爲採樣深度，則又似乎有點美中不足的地方，因爲大都知道在採樣的過程，上層幾個銅圈土樣常爲水洗雜質之擾動土樣，常不作爲試驗之土樣，所以綜合上述分析，採樣深度乃以開始採樣之深度加上30公分作爲採樣深度之標準點。試驗土樣之深度，則以土樣之中間點深度爲其試驗深度值。基於慣例，深度欄中的深度值皆是相對於地表面之深度，而非絕對高程，即每一深度值皆是代表著該位置距離地面鑽孔位置之直線距離，換言之，每一土樣之絕對高程座標，可藉鑽孔座標值減去該土樣之深度值來求得。
5. 標準貫入值(N值)之處理原則：N值的記錄，可分爲兩種：(1)可直接記錄之N值，此種N值多屬於一般土壤，例如：014即指貫入值爲14。(2)沒有完成之標準貫入試驗的N值，在鑽探報告上僅登錄其貫入值（即以最保守之數值登錄）
6. 土／岩層厚度分類：土樣的分類應該是根據其粒徑分析結果及標準貫入值，在彙整工程地質資料中，發現部份鑽探報告書內，土壤／岩石之分類與粒徑分析及N值結果有一致性，而若干鑽探公司的鑽探報告書中，可發現土壤分類與實驗室中的物理試驗不甚吻合，所以對於此種資料，我們檢核其試驗結果並修正其地層厚度。
7. 粒徑分析處理原則：正確的粒徑分析結果應有礫石、砂、粉土、黏土等四個項目，但是在鑽探報告書中卻不盡如此，或僅有粒徑分佈曲線、或僅有礫石、砂、黏土等三個項目，所以，這些資料我們都根據其原始顆粒分佈曲線並依ASTM規定，重新讀定礫石、砂、粉土、黏土的篩留重量百分比。
8. 荷式錐貫入試驗數據登錄原則：目前的荷式錐儀器設備都已由機械式錐頭改爲電子式錐頭，利用資料擷取系統依貫入深度收錄試驗數據。故本研究

荷式錐試驗資料檔案的建置上，也依照各個貫入深度登錄錐端阻抗值，摩擦阻抗值，孔隙水壓感應值、貫入傾斜值等。深度係以公尺爲單位，傾斜以度度量爲單位，其它强度值則以物理量Kgf/cm^{2}爲單位。

9. 單軸向壓密試驗之參數：因該試驗之結果，可得到許多參數，例如：壓縮係數Cc，壓密係數Cv，過壓密比OCR，過壓密後解載之解壓係數Cr，及體積壓縮係數Mv。而這些參數常常不是未登錄，就是登錄不全，或僅提供曲線圖形而已。所以，本報告將所有的壓密曲線依下列的處理原則加以研判：

   下列的處理原則加以研判：

   ①壓縮係數Cc：依圖3.1所示方法換算成工地未擾動之原始壓密曲線（即爲現場工地壓密曲線），如此可符合資料可直接使用的原則。

   ②壓密係數Cv及體積壓縮指數Mv，兩者皆隨著壓力大小而有所改變，所以，各依預壓力Pc值之0.2、0.5、1.0、2.0、4.0之倍數所相對應之值輸入，使用者亦可依其變化情形，內插取其所需之值。

   ③過壓密的狀態描述，則以輸入該土樣之預壓力Pc值，使用者自己可依工地現有覆載壓力，迅速計算出過壓密比OCR值。

10. 其它試驗曲線的輸入：在試驗報告書中，許多數據常以曲線圖形表示，例如CBR試驗，單軸壓密試驗……等等。對於曲線值輸入，本研究以存入五點數據爲原則，以供使用者參考，或自行依曲線配製(Curve fitting)求內插值，以得到需要的數據。

3.1.4土層相關試驗資料的歸類

基於上述的分析及處理原則，本報告將港區土層資料分爲標準貫入試驗資料、荷式錐貫入試驗資料、其它强度及特殊性質試驗資料四大類，標準貫入試驗資料是最普偏的資料，即工地上最常見的鑽孔基本資料。荷式錐貫入試驗資料是一高精度的土層連續資料，但以土層的反應强度爲主，缺乏相關的物理性質資料。强度性質試驗及特殊性質試驗是依其需要而採用之試驗。所以，依此原則則土層地質資料歸類爲A、B、C、D四表。即A表爲標準貫入試驗表，B表爲荷式錐貫入試驗表，C表爲强度性質試驗表，D表爲特殊試驗表。而對鑽孔資料來源、地理位置等斜述資料，則以表3.1的格式列在試驗

curve 1:原始壓密曲線 (virgin compression curve)

curve 2:室內壓密曲線 (Laboratory compression curve)

curve 3:重模（或擾動）樣品壓密曲線 (Remolded Sample compression curve)

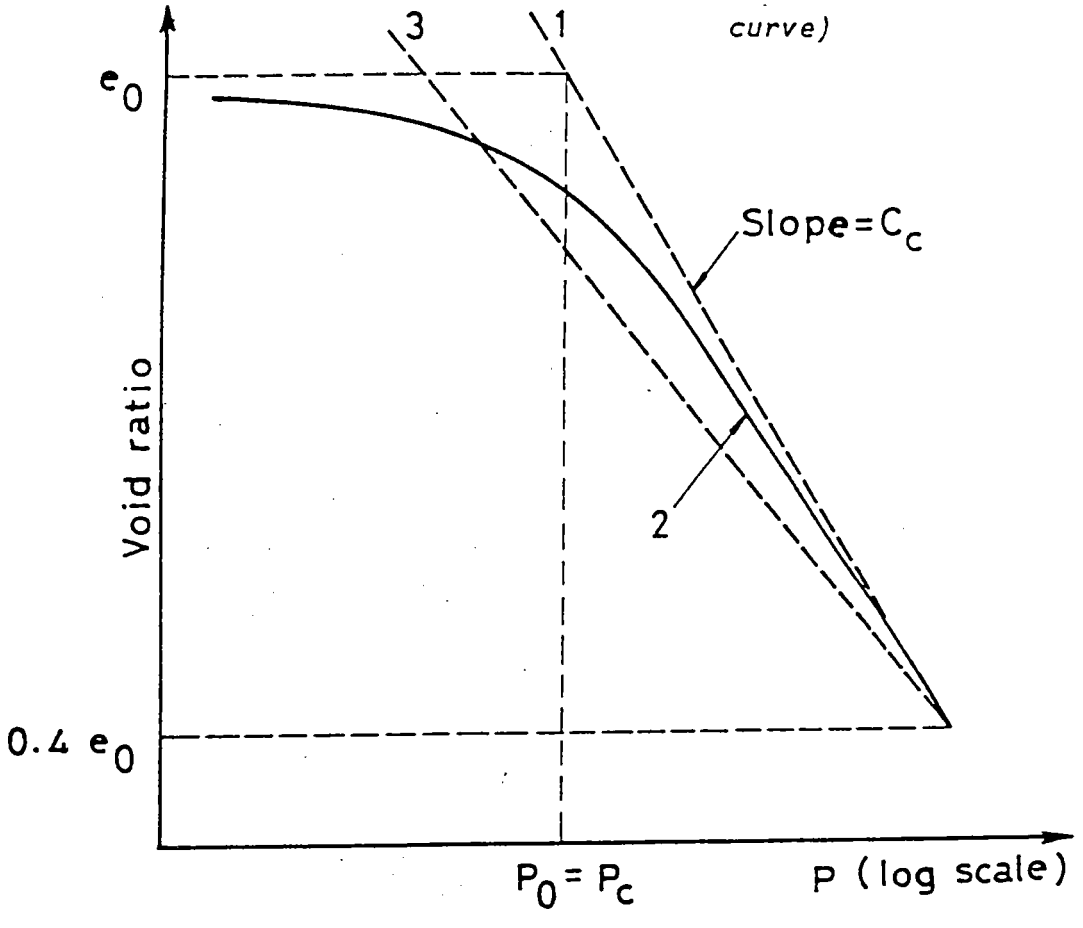


圖3.1 壓密曲線之類別（取自李成亨，1988）

表3.1　鑽孔資料抬頭（取自李咸亨，1988）

鑽孔資料－－抬頭

計劃項目：

鑽孔編號：　　X座標：　　鑽孔孔徑：　　cm
提供單位：　　Y座標：　　鑽孔深度：　　m
鑽探公司：　　Z座標：　　m　　鑽孔傾角：　　°
試驗公司：　　水位計：　　(1. 觀測井 2. 水壓計)
鑽探日期：　　埋設深度：　　m
鑽孔位置：

地下水位深度：－－－，－－－，－－－，－－－，－－－，－－－－
日期：／／，／／，／／　／／，／／，／／

表格之前，作爲抬頭資料。由於土壤與岩石性質之差異極大，A表乃以土壤爲主，岩石爲輔進行設計。未來仍需要一份以岩石爲主而土壤爲輔之表格方能涵蓋所有狀況下之資料。A表如表3.2所示，其建檔原則分述如下：

1. 每一鑽孔的基本資料皆存於A表，包括每一鑽孔的來源、時間、地點、位置及土層的物理性質之資料。
2. 爲便於檢核較常用之土壤／岩石分類與N值及粒徑分析，除了深度欄及地層說明欄外，土岩層分類欄、N值欄、粒徑分析欄在前面，接著爲自然含水量，阿太堡指數，再是單位重、比重、孔隙比。
3. 採樣編號以S,T,Comp,Loss,分別代表著劈管，薄管採樣乃夯實土樣，漏失土樣。例如：S011爲劈管第十一組取樣：T007薄管第七支取樣。若爲夯實土樣，則其相對之自然含水量欄及總體單位重欄，分別載入的是最佳含水量(O.M.C)及最大密度值(γ t)max〔即爲(γ d)max×(1+O.M.C)〕。

B表爲荷式錐貫入試驗表，如表3.3所示。荷式錐試驗適用於海岸沈積土層，可做連續性土層調查，但不適用於礫石層，也無法貫入岩層，爲純土壤的地層調查試驗，本表建檔原則乃將貫入記錄的結果依深度變化直接登錄，這些記錄包括貫入深度、錐端阻抗、摩擦阻抗、孔隙水壓及錐端傾斜角度等。

C表爲鑽孔之强度參數的表格，所以，無論是土壤或岩石，其凝聚值與摩擦角皆載入本表格中，再者大地工程上之地球物理探測、波速值或電阻值亦可記錄在本表格內。C表如表3.4所示，其建檔原則分述如下：

1. 樣品類欄用來說明試驗土樣的重類，以U，R，C分別代表著不擾動試體、重模試體及夯實驗體。
2. 土壤與岩石之强度試驗所得之强度參數符號略有不同，爲了便於存讀及節省空間起見，皆記錄於C表中，其中C、ϕ欄爲總應力之凝力值及摩擦角，C'，ϕ'欄則爲有效應力之凝聚力值及摩擦角。
3. Af值爲樣品破壞時之孔隙水壓力($\triangle U_f$)與軸差壓力($\triangle \sigma_f$) 之比值，即$\triangle U_f / \triangle \sigma_f$。由於Af值乃相對於圍壓大小，所以高圍壓應力下，所造成之偏高Af值，則捨去不用，其餘之Af值乃採平均值載入C表中。
4. 土壤的初始彈性係數E值，爲避免過大的誤差存在，仍以不同圍壓下之E值，作平均值載入C表中。
5. 地球物理探測：例如：橫井法、下井法、上井法或電阻值測量所得波

表3.2　A表格式（取自李咸亨，1988）

鑽孔資料－－A 表

深度 (m)	土/岩層說明	土壤岩石分類	取樣率 %	RQD %	N值	採樣編號	礫石 %	砂土 %	粉土 %	黏土 %	自然含水量 %	液性限度 %	塑性指數 %	總單位重 t/m³	比重 Gs	孔隙比 e	其它試驗

表3.3　B表格式

鑽孔資料－－B表

深度 (m)	錐端阻抗 (kgf/cm²)	摩擦阻抗 (kgf/cm²)	孔隙水壓 (kgf/cm²)	錐端傾斜 (度)

表3.4　C表格式（取自李咸亨，1988）

鑽孔資料－－C表

深度 (m)	試樣品類	試驗代號	强度參數 C kg/cm²	强度參數 φ deg	强度參數 C' kg/cm²	强度參數 φ' deg	εf %	Af	E kg/cm²	σmax kg/cm²

表3.5　D表格式（取自李咸亨，1988）

鑽孔資料－－D表

深度 (m)	試樣品類	試驗代號	I	II	IV	V	VI

速值或電阻值，乃以相對於深度欄之深度將該值載入。

D表乃記錄鑽孔之特殊試驗的表格，如表3.5所示，其建檔原則如下：

1. 樣品類欄意義如同C表。
2. 既爲特殊試驗，即是每種試驗的數據。其所代表之物理意義，皆無法相同，所以每種試驗皆給予六欄來記錄其試驗之數據，若一列不足以描述試驗結果，可續增至二列、三列……，直至紀錄完整爲止。各種特殊試驗之數據所代表之物理意義須與表3.6對照。

3.2 土層分佈資料庫架構

3.2.1 輔助記憶體資料貯存架構

由於五個國際港之土層鑽探試驗資料極其龐大，且須考慮後續資料的新增，本研究規劃了一個400Mb容量的輔助記憶體，供MapInfo系統軟體、MapBasic開發程式及港區資料貯存用。該輔助記憶體設定在MapInfo作主機的D槽，其貯存架構如表3.7所示，港區資料貯存在目錄<Harbor>下，以五個次目錄分別存放五大港區相關資料，由於目前磁碟操作系統(DOS)對檔案主檔名及目錄只能讀取8個字元，所以高雄港目錄之英文名稱只取前8個字，以免地層鑽探試驗程式設計上有誤讀之虞。而表3.7僅列台中港區資料目錄<Taichung>之內容，其餘四大港區之資料內容與台中港區內容相似。主要存放各港區之基本地圖資料、各項土層調查試驗資料等之相關資料庫檔案。

3.2.2 鑽孔位置及剖面土層資料庫架構

在每一個港區目錄下，本研究建置了兩類資料庫存放標準貫入試驗相關資料，將港區內各鑽孔之座標、高程、試驗公司等抬頭資料存放於Welldata.dbf資料庫表格檔內，此表格檔存有28個欄位，其欄位名稱、中文說明、資料型態及長度如表3.8所示，存放於以港區英文名稱命名的目錄下，該表格檔除了存放這些基本資料外，還可利用SQL選取方式，選擇Tag-Key,Pos_x,Pos_y等三個欄位之資料，建置出一新的檔案，再由此新檔案製作出鑽孔位置分佈地圖檔。

另外，以Welldata.dbf的索引標籤(Tag-Key)欄位資料，做爲該鑽孔之試驗

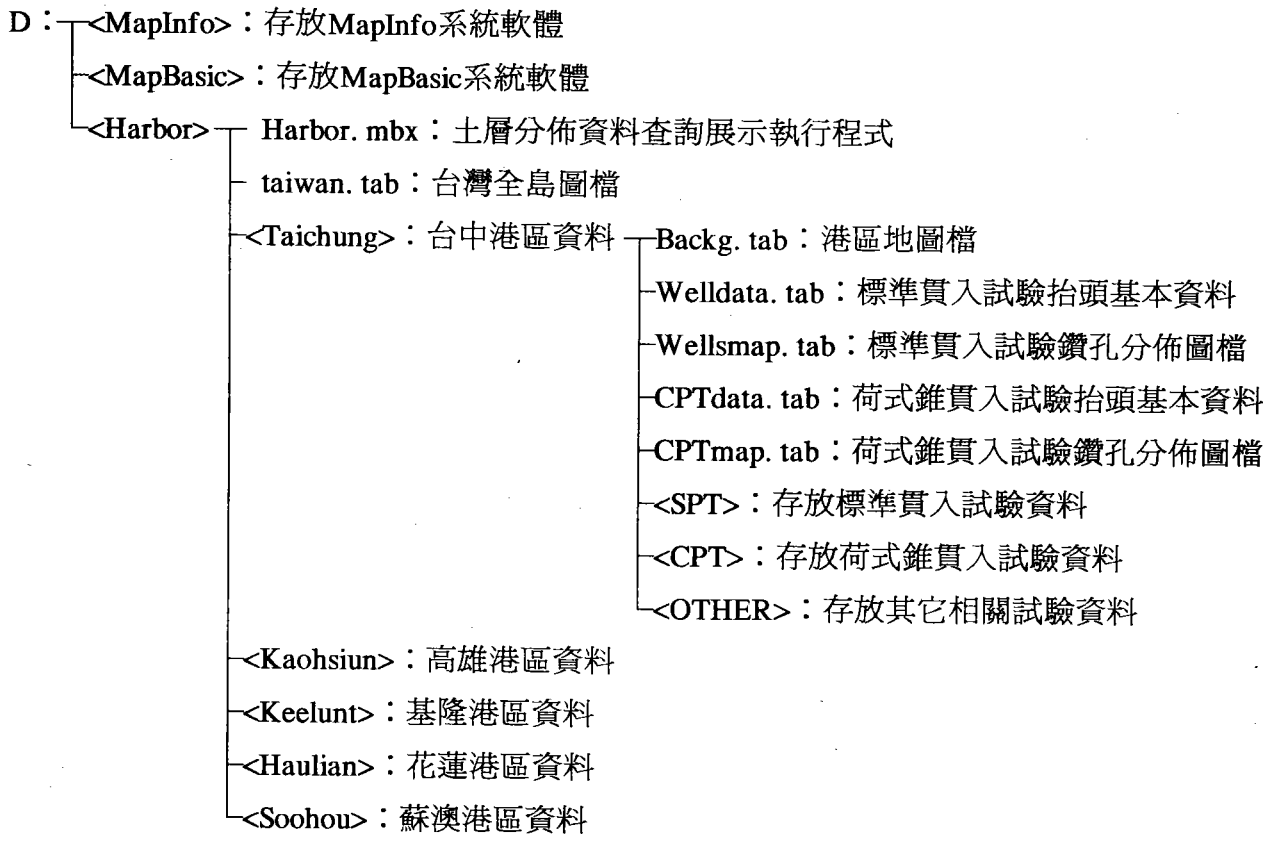
表3.6　D表試驗代號說明（取自李成亨，1988）

試驗代號	I	II	III	IV	V	VI
ODC	C_c	C_r	P_c kg/cm^2	E_f		
	(0.2 Pc) Cv mm^2/sec	(0.5 Pc) Cv mm^2/sec	(Pc) Cv mm^2/sec	(2 Pc) Cv mm^2/sec	(4 Pc) Cv mm^2/sec	
	(0.2 Pc) Mv mm^2/kg	(0.5 Pc) Mv mm^2/kg	(Pc) Mv mm^2/kg	(2 Pc) Mv mm^2/kg	(4 Pc) Mv mm^2/kg	
UCB	after compaction γ_d r/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3
	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)
	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)
RCT	confining pressure σ_3 kg/cm^2	Deviator stress peak $\sigma_1-\sigma_3$ kg/cm^2	Deviator stress residual $\sigma_1-\sigma_3$ kg/cm^2			
SCB	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3	after compaction γ_d t/m^3
	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)	after compaction ω (%)
	after soaking swelling (%)	after soaking swelling (%)	after soaking swelling (%)	after soaking swelling (%)	after soaking swelling (%)	after soaking swelling (%)
	after soaking ω (%)	after soaking ω (%)	after soaking ω (%)	after soaking ω (%)	after soaking ω (%)	after soaking ω (%)
	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)	C.B.R. (%)

表3.6 D表試驗代號說明（取自李成亨，1988）

試驗代號	I	II	III	IV	V	VI
LLT	earth pressure at rest P_o kg/cm^2	yield pressure P_y' kg/cm^2	fail pressure P_1' kg/cm^2	coef. of soil reaction Km kg/cm^2	elastic coef. Em kg/cm^2	mean radius of r value r_m (cm)
WQA	pH	calcium p.p.m.	magnesium p.p.m.	chlroide p.p.m.	sulfate p.p.m.	sulfate p.p.m.
SCP	pH	Cl^- ion concentration p.p.m.	$SO_4^=$ ion concentration p.p.m.	$SO_3^=$ ion concentration p.p.m.	organic matter %	
CTT	γ_d (t/m^3)	$\sigma_{dp}/2\sigma_{3c}$	Number of cycles to Liquefaction N_1	Shear strain γ(%)	Shear modulus G kg/cm^2	damping ratio D(%)
RCT	γ_d (t/m^3)	σ_c	Shear strain γ(%) 10^-4	Shear modulus G kg/cm^2	Damping ratio D(%)	
UCT	q_u kg/cm^2	E_f (%)	γ_d (t/m^3)			
TPT	consolidation pressure σ_c kg/cm^2	hydraulic gradient i	vertical permeability at 20 ℃ Kv cm/sec		horizontal permeability at 20 ℃ Kh cm/sec	
WQB	Cl^- ion p.p.m.	Total Fe p.p.m.	NO_2^- - N p.p.m.	NO_3^- - N p.p.m.	C. O. D. p.p.m.	

表3.7　輔助記憶體內資料貯存架構



註：<Kaohsiun> <Keelung> <Haulian>及<Soohou>次目錄內容與<Taichung>相似。

表3.8　港區各鑽孔基本資料檔案及資料錄說明

系統名稱：港區土層分佈資料庫			日期：　／　／	
檔案名稱：Welldata			檔案格式：表格(. DBF)	
檔案說明：港區各鑽探孔位座標高程試驗公司等資料				
編號	欄位名稱	欄位中文說明	資料型態及長度	備　註
1	Tag_key	索引標籤	Char(10)	
2	Project	計劃名稱	Char(40)	
3	Hole_no	鑽孔名稱	Char(10)	
4	Offer_comp	提供單位	Char(40)	
5	Borin_comp	鑽探公司	Char(40)	
6	Test_comp	試驗公司	Char(40)	
7	Borin_date	鑽探日期	Date	MMDDYY
8	Locat_desc	鑽孔位置	Char(40)	
9	Pos_x	X座標	Decimal(12, 2)	
10	Pos_y	Y座標	Decimal(12, 2)	
11	Pos_z	高程	Decimal(7, 2)	
12	Pizometer	水位計	Char(20)	
13	Pizo_depth	埋設深度	Decimal(7, 2)	
14	H_angle	鑽孔傾角	Decimal(3, 0)	
15	H_diameter	鑽孔孔徑	Decimal(6, 0)	
16	H_depth	鑽孔深度	Decimal(7, 2)	
17	Gw_level1	第1次地下水位量測深度	Decimal(7, 2)	

表3. 8　港區各鑽孔基本資料檔案及資料錄說明（續）

18	Gw_date1	第1次地下水位量測日期	Date	MMDDYY
19	Gw_level2	第2次地下水位量測深度	Decimal(7, 2)	
20	Gw_date2	第2次地下水位量測日期	Date	MMDDYY
21	Gw_level3	第3次地下水位量測深度	Decimal(7, 2)	
22	Gw_date3	第3次地下水位量測日期	Date	MMDDYY
23	Gw_level4	第4次地下水位量測深度	Decimal(7, 2)	
24	Gw_date4	第4次地下水位量測日期	Date	MMDDYY
25	Gw_level5	第5次地下水位量測深度	Decimal(7, 2)	
26	Gw_date5	第5次地下水位量測日期	Date	MMDDYY
27	Gw_level6	第6次地下水位量測深度	Decimal(7, 2)	
28	Gw_date6	第6次地下水位量測日期	Date	MMDDYY

資料檔案名稱，所建置的資料庫表格檔共具有18個欄位，其欄位名稱、中文說明、資料型態及長度如表3.9所示。爲了資料庫編輯的作業方便，這兩類資料庫都先用Foxpro或Access建檔，再轉入MapInfo內使用。

3.3 土層分佈資料查詢展示軟體程式設計

3.3.1 程式設計之目標功能

本研究利用MapBasic使用者發展語言環境來設計土層分佈資料查詢展示軟體，用以展示各港區的土層資料。本程式命名名爲Harbor.mbx，其預設的功能目標如下：

1.台灣主要港區分佈位置圖展繪

2.各港區基本地圖展繪

3.鑽孔位置展示

4.鑽孔基本資料查詢

5.單鑽孔柱狀圖展繪

6.鑽探資料文字表格展示

7.多鑽孔柱狀圖展繪

8.荷式錐貫入試驗資料文字表格展示

9.荷式錐貫入試驗成果圖展示

10.爲中文視窗作業環境，可使用多重文件介面

11.配置工具箱及基本展圖功能（放大、縮小、平移…等）

12.模組化功能設計

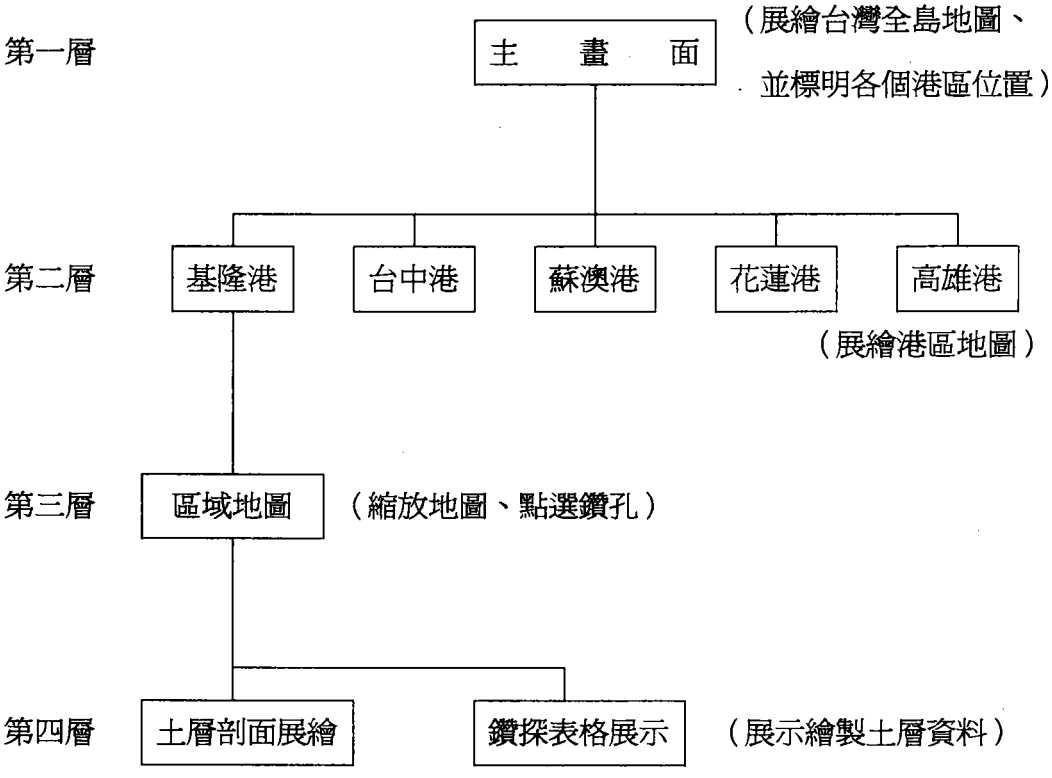
3.3.2 查詢展示程序之規劃

整個軟體的查詢展示程序，共分四層，如表3.10所示，在MapInfo下執行本程式後，即進入第一層主畫面，展繪出台灣全島地圖並標示各個港區位置。在螢幕上以滑鼠點選所需之港區後，即進入第二展示層，該層按所點選之港區可展繪出台中、高雄、基隆、花蓮、蘇澳等五個港區之地圖。再利用圖形縮放工具，可放大港區地圖，尋得目的鑽孔之位置，此爲第三展示層。再點選鑽孔後，則可展示鑽探表格及展繪土層剖面圖，此爲第四展示層。

表3.9　鑽孔之試驗資料檔案及資料錄說明

系統名稱：港區土層分佈資料庫			日期：　／　／	
檔案名稱：(tag-key)			檔案格式：表格(. DBF)	
檔案說明：鑽孔之試驗資料				
編號	欄位名稱	欄位中文說明	資料型態及長度	備　註
1	Depth	深度	Decimal(6, 2)	
2	Desc	土／岩層說明	Char(40)	
3	Class	土壤岩石分類	Char(10)	
4	Smpl_rate	取樣率	Decimal(3, 0)	
5	Rqd	岩心完整性	Decimal(3, 0)	
6	N_value	錘擊數	Decimal(3, 0)	
7	Smpl_no	採樣編號	Char(5)	
8	Gravel_%	礫石含量	Decimal(3, 0)	
9	Snad_%	砂土含量	Decimal(3, 0)	
10	Silt_%	粉土含量	Decimal(3, 0)	
11	Clay_%	黏土含量	Decimal(3, 0)	
12	Water_cont	自然含水量	Decimal(5, 1)	
13	LL	液性限度	Decimal(5, 1)	
14	PI	塑性指數	Decimal(5, 1)	
15	Unt_weight	總體單位重	Decimal(5, 2)	
16	W_gravity	比重	Decimal(5, 2)	
17	Void_ratio	孔隙比	Decimal(5, 2)	
18	Other_test	其它試驗	Char(20)	

表3.10　土層分佈資料庫圖文查詢展示組織架構



3.3.3　程式設計組織架構

本程式在撰寫上共分成五個模組，各模組的名稱及所包含的副程式計有：

(一)Harbor模組。本模組含括五個副程式，其名稱及功能如下：

(1)Main副程式：　主要功用爲呼叫LoadData副程式及SelChanged Handler副程式。

(2)MainMenu副程式：載入所設計的功能表

(3)LoadData副程式：載入台灣全島地圖及標示五大港區

(4)Select-harbor副程式：　跳回台灣全島地圖畫面，重新選擇所需港區

(5)QuitProgram副程式：終止本應用程式

(二)Event模組。本模組只含括一個名爲SelChangedHandler的副程式，該副程式之名稱爲MapBasic所內定，其功用爲當滑鼠之點選一改變時

MapBasic，即會自動呼叫這個副程式。

(三)Loging模組。本模組含括二個副程式及一個函數，其名稱及功能如下：

(1) Loging 副程式：繪製柱狀圖

(2) Show-WellsData副程式：展示鑽孔之抬頭資料

(3) ListLogData副程式：展示鑽探試驗紀錄

(4) Getpattern函數，載入柱狀圖圖樣

(四)ShowCPT模組。本模組包含兩個副程式如下：

(1) Print_CPTData副程式：展示荷式錐貫入試驗文字資料表

(2) CPT-log副程式：展示荷式錐貫入試驗鑽探成果圖

(五)UTI_LIB模組。本模組係處理各項函數及副程式的宣告用。

將上述五個模組分別編譯（compile）後，再利用MapInfo的專案檔案(Project file)方式，將這些模組聯結(Link)成一個執行檔。

3.4 建檔處理流程

在MapInfo系統上建立各港區土層分佈資料庫，並撰寫查詢展示軟體，其相關資料的處理流程，可分下列13個工作項目依序進行：

1.設定查詢展示程式功能

2.規劃查詢程序及展示項目

3.結合各港區基本地圖檔案

4.圖檔轉入及編輯

5.土層鑽探試驗報表格式彙整

6.設計資料庫架構

7.新增鑽孔位置量測

8.鑽孔基本資料建檔

9.鑽孔試驗資料建檔

10.製作孔位分佈向量圖檔

11.土壤分類圖樣編輯

12.程式撰寫編輯

13.程式測試

上述工作項目，其中③結合各港區基本地圖檔案係利用Auto CAD軟體來執行，④圖檔轉入及編輯、⑩製作孔位分佈向量圖檔及⑬式測試係在Map-Info系統上執行。⑦新增鑽孔位置量測係利用全球定位系統於現地施測。⑧鑽孔基本資料建檔及⑨鑽孔試驗資料建檔係利用Foxpro及Access資料庫軟體來建置，再轉入MapInfo系統內。⑫程式撰寫編輯係在MapBasic語言環境上作業。而所撰寫的查詢展示程式，也須要在MapInfo系統上執行。

3.5 建檔成果展示說明

本研究將分佈於台灣各國際港區土層鑽探資料做有系統的整理及貯存，並撰寫查詢展示程式，使各鑽孔的分佈位置及試驗資料能被快速的查詢及展示出來。本程式之查詢架構如附表3.10所示，程式操作程序如下：

1. 在視窗作業環境下，執行MapInfo系統，進入該系統內。
2. 點選功能表File＼Run MapBasic Program，選擇d:＼harbor內的Harbor.mbx執行檔，按OK選鈕，即進入港區土層分佈資料查詢展示系統。
3. 此時螢幕會展繪出台灣全島地圖，並標示基隆、台中、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置。此爲第一層主畫面。
4. 利用滑鼠，點選其中任一港區，則螢幕展繪出該港區的向量地圖檔，並以藍色實心圓標示出標準貫入試驗鑽探點位置，以紅色實心圓標示出荷式錐貫入試驗鑽探點位置，此時，所設計的主功能表也出列在螢幕上方，主功能表計有八項功能，依序爲：①標準貫入試驗資料、②荷式錐資料、③地圖視窗、④統計圖、⑤出圖視窗、⑥視窗控制、⑦維開系統等，此爲第二展示層畫面。
5. 利用工具箱內的放大、縮小、平移等工具，可作地圖縮放，以更精細地查詢目標鑽孔位置及鄰近地形。此爲第三展示層畫面。

6選用工具箱內的點選工具，再點選所需之目標鑽孔，若所點選之鑽孔屬標準貫入試驗時，主功能表的第一功能項（即標準貫入試驗資料功能項）底下所附屬的兩個次功能項（即鑽孔資料功能項和柱狀圖功能項）會由啓始的無效狀態轉變爲有效狀態。若所點選之鑽孔屬荷式錐貫入試驗時，主功能表的第二功能項（即荷式錐資料功能項）底下所

附屬的兩個次功能項（即鑽孔資料功能項和鑽探圖功能項）會由啓始的無效狀態轉變爲有效狀態。

7. 當目標鑽孔被點選到時，會有一深紅色正方形外框套住被點選的鑽孔位置實心圓標誌，若選中標準貫入試驗鑽孔，可在第一主功能項下點選“鑽孔資料”功能項，則系統會開出一新視窗，抬頭名稱爲“鑽探資料報表”，視窗內展示出該鑽探試驗各項數據文字資料，此時該功能項會變回無效狀態，其字體呈現灰白色。若點選“柱狀圖”功能項，則系統會開出另一視窗，抬頭名稱爲“柱狀圖”，視窗內展繪出該鑽探結果之土層剖面柱狀圖，且該功能項也會變回無效狀態其字體也會轉變爲灰白色。此種土層資料的展示繪製，即爲第四展示層。
8. 若要查詢另一港區的土層資料，可點選第一主功能項下的“選擇港區”功能，則系統會跳回主畫面。可依循步驟4至7，繼續查詢所需地區之土層資料。
9. 結束查詢，可點選至功能表的最後一個功能項“離開系統”，則可停止本程式的執行。

3.6 港區土層資料查詢說明－以台中港爲例

1. 按照上一節程式操作程序1至3，使用者可進入查詢系統的第一層主畫面，此時螢幕視窗會展繪出台灣全島地圖與主要港區的標示位置，如圖3.2所示。
2. 將滑鼠遊標移至台中港標示區內，按滑鼠左鍵，叫出台中港區地圖，如圖3.3所示。
3. 利用滑鼠點取工具箱內的放大工具（其圖樣如放大鏡），可放大欲查詢的地區。分佈於地圖上的標準貫入試驗鑽孔位置，係以藍色實心圓爲標誌。放大後之查詢地區地形及其上之標準貫入試驗鑽孔分佈如圖3.4所示。
4. 本系統之荷式錐貫入試驗鑽孔位置，係以紅色實心圓爲標誌，台中港區十六號碼頭附近有16孔荷式錐試驗，其鄰近地形及孔位分佈如圖3.5所示。
5. 點取工具箱內的點選工具（其圖樣如左斜箭頭），再將游標移至某一

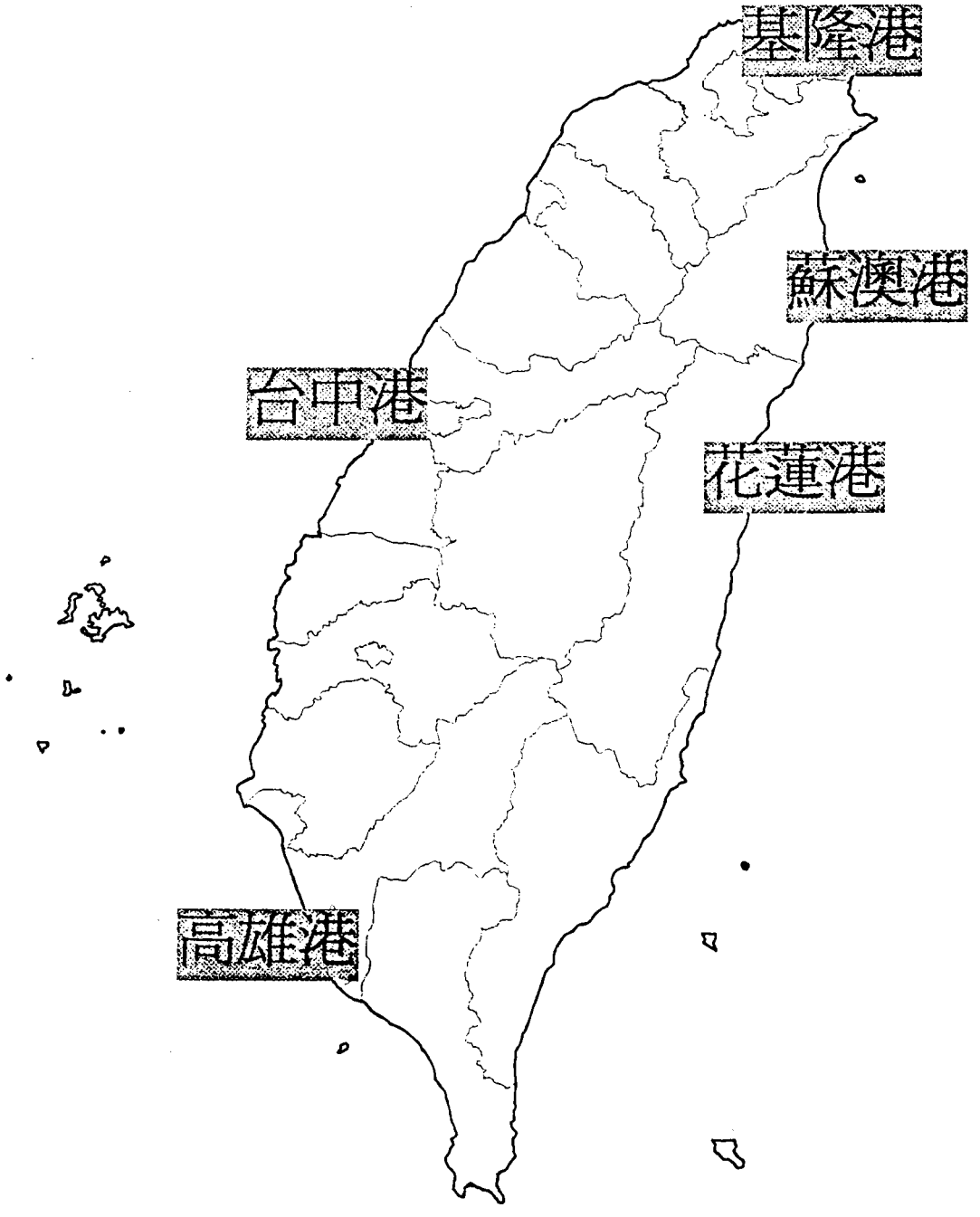


圖3.2　台灣主要港區分佈示意圖

圖3.3　台中港港區地圖

圖3.4　台中港區標準貫入試驗鑽探位置分佈圖

標準貫入試驗鑽孔位置上，按滑鼠左鍵，該鑽孔標誌會被一深紅色方形外框套住，表示此鑽孔已被點選。此時，可拉下主功能表的“標準貫入試驗資料”功能項，若點選“鑽孔資料”次功能項，則系統會出現該鑽探試驗報表視窗，展示出該鑽孔基本抬頭資料及各項試驗數據，如表3.11所示。若點選“柱狀圖”次功能項，則系統會出現該鑽孔之土層剖面柱狀圖展示視窗，如圖3.6所示。亦可按住<Shift>鍵，用滑鼠連續點取數個鑽孔，或用正方框、圖形框工具一次框選某一範圍內的數個鑽孔，再點選“柱狀圖”次功能項，可展繪出多鑽孔之土層剖面柱狀圖，如圖3.7所示。

6. 若點取荷式錐貫入試驗鑽孔位置，則可下拉“荷式錐資料”主功能項，再點選相關之次功能項。若點選“鑽孔資料”次功能項，則系統會出現該鑽孔貫入試驗之報表視窗，展示出隨土層深度變化之試驗數據。如表3.12所示，若點選“鑽探圖”次功能項，則系統會展示出該貫入試驗之成果圖。如圖3.8所示。

其它港區土層資料之查詢展示方式，與上述台中港區之查詢方式相同。其中，荷式錐貫入試驗，僅台中、高雄兩港有登錄，其餘基隆、花蓮及蘇澳等港區，因土層淺薄或礫石散佈，較不適合實施該項試驗，故迄今尚未收集到有關該試驗之資料。

圖3.5　台中港區荷式錐貫入試驗分佈位置及附近地形

表3.11 標準貫入試驗報表

鑽孔編碼：TC23-07
計劃名稱：第二期碼頭基礎鑽探　　X座標：200692　　鑽孔傾角：90
鑽孔編號：A/C-42　　Y座標：32684574　　鑽孔孔徑：　cm
提供單位：台中港務局　　Z座標：　m　　鑽孔深度：39.8m
鑽探公司：　　水位計：　(1.觀測井 2.水壓計)
試驗公司：成功大學土木系　　埋設深度：　m
鑽探日期：12-07-1975
鑽孔位置：17號碼頭

地下水位深度：　,　,　,　,　,
日期：　,　,　,　,　,

深度 (m)	土岩層說明	土壤岩石分類	取樣率 %	RQD	N值	採樣編號	礫石 %	砂土 %	粉土 %	黏土 %	自然含水量 %	液性限度 %	塑性指數	總單位重 tm^3	比重 Gs	孔隙比 e
3.50	灰色粉土質細砂	SM			16	S001	-	85	15	-	26.25	-	-	1.98	2.67	0.70
4.2																
4.95	灰色細砂	SP			20	S002	-	96	04	-	22.14	-	-	2.06	2.68	0.59
6.85	灰色細砂	SP			19	S003	-	96	04	-	21.19	-	-	2.06	2.67	0.57
7.0																
9.20	灰色細砂	SP-SM			04	S004	-	90	10	-	33.25	-	-	1.89	2.69	0.89
9.5																
9.75	灰色黏土質粉土	ML			12	S005	-	40	60	-	32.72	-	-	1.90	2.70	0.88
11.3																
12.85	灰色粉土質細砂	SM			15	S006	-	60	40	-	30.19	-	-	1.93	2.69	0.81
13.85																
14.85	灰色黏土質粉土	ML			14	S007	-	37	63	-	31.61	-	-	1.92	2.71	0.86
16.0																
17.20	灰色粉土質細砂	SM			19	S008	-	76	24	-	30.40	-	-	1.94	2.72	0.82
17.75	灰色粉土質細砂	SM			19	S009	-	62	38	-	30.70	-	-	1.93	2.70	0.83
20.85	灰色粉土質細砂	SM			19	S010	-	62	38	-	28.12	-	-	1.97	2.71	0.76
21.85																
22.85	灰色黏土質粉土	ML			32	S011	-	48	52	-	26.95	-	-	1.99	2.70	0.73
24.85	灰色黏土質粉土	ML			35	S012	-	35	65	-	28.54	-	-	1.97	2.71	0.77
26.85	灰色黏土質粉土	ML			39	S013	-	47	53	-	31.91	-	-	1.92	2.71	0.87
27.85																
28.85	灰色粉土質細砂	SM			31	S014	-	69	31	-	27.61	-	-	1.98	2.71	0.75
30.85	灰色粉土質細砂	SM			25	S015	-	68	32	-	35.17	-	-	1.88	2.71	0.95
32.85	灰色粉土質細砂	SM			31	S016	-	79	21	-	28.57	-	-	1.96	2.71	0.76
33.90																
34.95	灰色黏土質粉土	ML			36	S017	-	46	54	-	30.79	-	-	1.93	2.71	0.84
38.20	灰色黏土質粉土	ML			41	S018	-	45	55	-	29.89	-	-	1.94	2.71	0.81
39.65	灰色黏土質粉土	ML			38	S019	-	50	50	-	27.30	-	-	1.98	2.70	0.74
39.80																

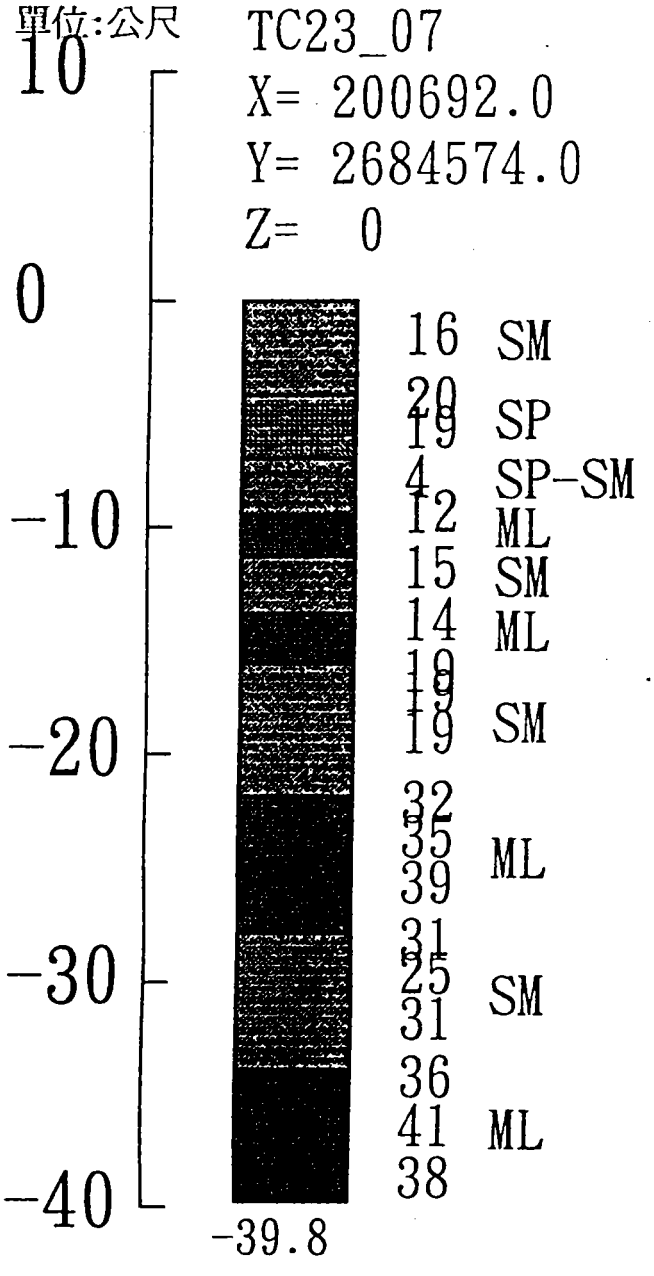


圖3.6 標準貫入試驗單鑽孔土層剖面柱狀圖

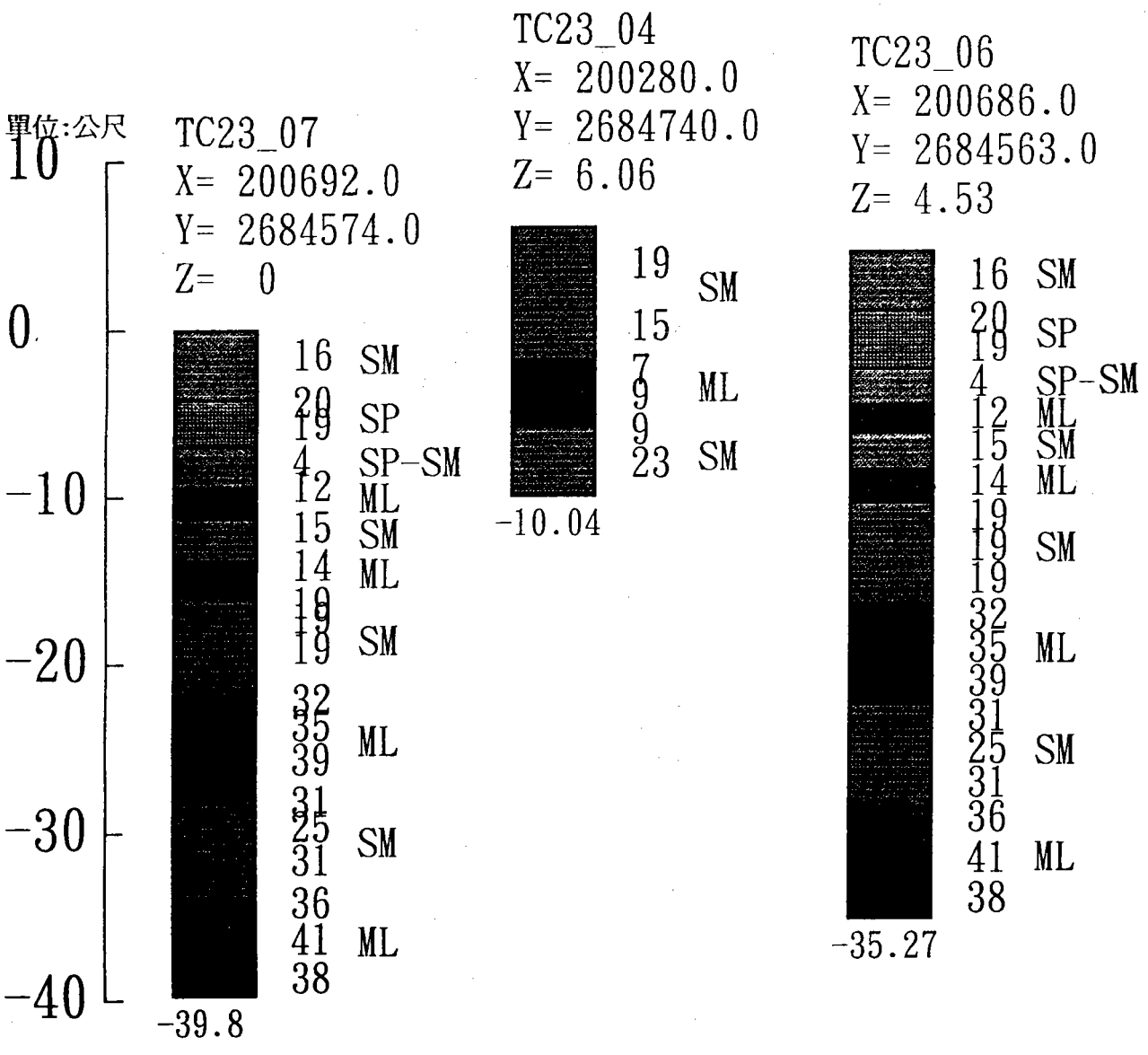


圖3.7 標準貫入試驗多鑽孔土層剖面柱狀圖

表3.12　荷式錐貫入試驗報表

鑽孔編碼：CPTP01
計劃名稱：海岸土壤動態特性與改良研究　X座標：200973.90　鑽孔傾角：90
鑽孔編號：CPT-P1　Y座標：2684878.42　鑽孔孔徑：　cm
提供單位：港灣技術研究所　Z座標：　m　鑽孔深度：30.4m
鑽探公司：港灣技術研究所　試驗起始深度：-3.0 m
試驗者　：陳奎璋,蘇吉立　試驗取樣間距 :0.1 m
鑽探日期：12-19-94 09:19
鑽孔位置：台中港16號碼頭附近

地下水位深度：-3.0　,　,　,　,　,
日期：12-19-94　,　,　,　,　,

深度 (m)	錐端阻抗 Qc (kgf/cm^2)	磨擦阻抗 Fs (kgf/cm^2)	孔隙水壓 PP (kgf/cm^2)	錐端傾斜
0.10	3.0	0.017	0.026	0.17
0.20	3.2	0.057	0.027	0.17
0.30	5.9	0.030	0.024	0.11
0.40	3.0	0.017	0.026	0.17
0.50	3.2	0.057	0.027	0.17
0.60	5.9	0.030	0.024	0.11
0.70	2.6	0.042	0.026	0.31
0.80	13.7	0.101	0.033	0.31
0.90	40.4	0.227	0.023	0.31
1.00	63.1	0.367	0.024	0.31
1.10	88.6	0.561	0.026	0.31
1.20	114.6	0.904	0.021	0.31
1.30	113.9	1.143	0.017	0.31
1.40	92.3	1.277	0.014	0.31
1.50	79.1	0.978	0.004	0.31
1.60	82.1	0.995	-0.084	0.31
1.70	126.0	1.088	-0.014	0.31
1.80	139.6	1.333	-0.053	0.35
1.90	148.9	1.447	-0.072	0.35
2.00	149.7	1.289	-0.206	0.35
2.10	137.0	1.226	-0.070	0.35
2.20	125.3	1.040	-0.140	0.35
2.30	107.2	0.856	-0.136	0.35
2.40	90.2	0.730	-0.252	0.35
2.50	75.0	0.709	-0.415	0.35
2.60	71.7	0.589	-0.498	0.35
2.70	68.0	0.548	-0.638	0.35
2.80	63.7	0.510	-0.641	0.35
2.90	57.2	0.430	-0.594	0.34
3.00	48.7	0.427	-0.616	0.34
3.10	43.1	0.338	-0.611	0.34
3.20	44.3	0.325	-0.651	0.34
3.30	55.8	0.256	-0.655	0.34
3.40	61.5	0.223	-0.665	0.34
3.50	68.9	0.286	-0.674	0.34

圖3.8　荷式錐貫入試驗成果圖

四、各港區土壤動態性質分析研究

4.1 土壤動態性質之推求

土壤承受之動力作用一般可分爲機器廠房震動與地震或爆破作用之兩種動力荷重，前者對於工程設施之基礎或結構物，產生較小之應變振幅行爲，後者則可能產生較小至甚大之應變振幅行爲，由於產生之應變不同，故所得之土壤動力性質數據，亦有所不同。港灣結構所須考慮之外力荷重以波浪力和地震力爲主，故均屬應變振幅較大之動力荷重。在分析基礎結構承受動力作用時，基礎土壤的動力反應行爲所需採用之土壤動力性質參數大致如下：

1. 動力强度：包括液化潛能參數反覆應力比(cyclic shear stresss ratio)，反覆剪應變(cyclic shear strain)，及動力荷重作用時孔隙水壓力變化關係，試體破壞時所需之反覆應力循環次數(Number of Cycles)與剪力强度等。
2. 動力性質：包括土層之顯著週期(Predominant period)，剪力模數(Shear modulus)，剪力波速率(Shear wave velocity)，阻尼比(Damping ratio)，包生比(Poisson ratio)等。

4.2 各港區土壤動態性質資料分析

4.2.1 現有土壤動態性質調查資料檢討

根據本研究所搜集的資料顯示，台灣西部海岸地區土壤動態性質相關研究資料大致如下：

1.試驗室土壤動態性質試驗資料

國內土壤動態性質試驗大都以共振柱式試驗和循環動力三軸試驗爲主，根據所搜集的資料顯示，台灣西部海岸土壤動態性質試驗主要集中在新竹外海中國石油公司長康 (CBK)海域油氣田，台中港區、高雄港區和興達港區，惟數量不多，就學術研究需要而言仍嫌不足。

2.現地土壤動態性質試驗

現地土壤動態性質主要由震測試驗結果推求，一般震測法包括地表震測法和井內震測法兩種，後者又包括交叉井測法和直下井測法兩種，國內均普遍採用，台灣西部海岸地區亦以台中港區和高雄港區試驗數量較多。

4.2.2 高雄港區土壤動態性質資料研討

1.高雄港及其鄰近地區地質概況

高雄地區地質大多屬於第四紀中之沖積層，層位平舖、未曾受過變動，此平坦海岸平原，大部份屬於瀉湖及沼澤沉積環境，其位置在濱海沙洲之後，爲較寧靜的沉積環境，沙洲外由於海浪潮汐影響，粘土、沉泥、細砂懸浮於海水中，一旦受潮汐海浪影響而進入瀉湖或沼澤，細砂、沉泥及粘土即依次沉積下來。因此本區地質組成主要爲沉泥質砂或砂質沉泥或砂質粘土及沉泥質細砂交互而成。

高雄地區除前述平坦海岸平原外尚有隆起之珊瑚礁，其高約數公尺至數十公尺，其他石灰岩中之珊瑚石灰岩，在本區內最爲普遍，如半屏山、萬壽山等均屬之，且底部多由珊瑚礁組成。此外還有小部份第三系之頁岩、砂質頁岩、砂岩等，因組織鬆軟、頗易風化而遭剝蝕。

高雄港區原屬於瀉湖及沼澤沉積環境，由於受潮汐海浪影響，細砂、沉泥及粘土進入瀉湖或沼澤即依次沉積下來，故本區地質組成爲砂，沉泥質砂、砂質沉泥或砂質粘土交互而成，各層次分佈厚度變化極大且極不均勻。

由於建港極早，高雄港港區經不斷的浚挖結果原地形已有很大的變化，而早期地質調查，鑽探孔位多無地面高程，加以港區遼闊，故港區的地層分佈無法整理出較具代表性的剖面。惟整體而言高雄港區土層分佈極厚，就已搜集之鑽探資料顯示，鑽探深度均未達礫石層或岩盤，推測沉積土層厚度應在80公尺以上，一般在鑽探深度內，其標準貫入試驗 N值約在10至30之間屬疏鬆至中等緊密程度，並無明顯之承載層。

2.土壤動態性質分析

(1)剪力模數與阻尼比特性

剪力模數與阻尼比特性，爲土壤之主要動力性質，根據Hardin & Drnevich(1970)之研究；砂性土壤之剪力模數與阻尼比大小，皆受土層土壤之

包圍壓力，應變振幅與孔隙比（或相對密度）等之影響甚大，而受土壤顆粒大小之影響較小，粘性土壤則受試體之軟硬程度，擾亂大小及應變振幅等變化之影響。

圖4.1及圖4.2分別表示高雄港區砂性土壤共振柱試驗結果土壤剪力模數和阻尼比受不同圍壓的影響，圖 4.1顯示剪力模數值隨剪應變之增加而遞減，隨圍壓的增加而增加，在低應變階段圍壓對剪力模數之影響較大，隨剪應變之增加，圍壓對剪力模數之影響程度逐漸減少。

圖4.2顯示共振柱試驗結果高雄港區砂性土壤圍壓對阻尼比的影響，阻尼比隨剪應變之增加而增加，圍壓增加亦會使阻尼比隨之增加，圖4.1及圖4.2均顯示在圍壓等於 2kg/cm²時無論剪力模數或阻尼比變化範圍均較大。

圖4.3及圖4.4分別表示高雄港區砂質沉泥或粘土質沉泥共振柱試驗結果，土壤剪力模數和阻尼比受不同圍壓的影響，由於各試驗間沉泥細料含量之變化甚大，是故圍壓對剪力模數和阻尼比的影響並不明顯，根據 Hardin & Drnevich(1970)之研究，砂性土壤之剪力模數與阻尼比大小，皆受土層土壤之包圍壓力，應變振幅與孔隙比（或相對密度）影響甚大，而受土壤顆粒大小尺寸之影響較小；粘性土壤則受試體之軟硬程度，擾亂程度大小，應變振幅等之變化影響，此亦可說明圖4.3及圖4.4高雄港區砂質沉泥或粘土質沉泥受圍壓之影響不明顯之原因。

吳偉特(1983)將Prakash & Puri (1981)對印度境內不同地點土壤，使用不同現地試驗結果及Seed & Idriss(1970)有關砂性土壤室內試驗之結果放入同一圖中比較，雙方圖形之土壤材料地區代表性雖不相同，但卻有相當程度之符合性，如圖4.5所示，本研究將高雄港區砂性土壤共振柱試驗資料數據，與圖中之圖形、曲線加以分析比較（見圖4.5），比較結果發現高雄港區砂性土壤之剪力模數值較前述學者整理出之範圍有偏低現象，並位於下限範圍之外，吳偉特(1983)對台北盆地進行共振柱試驗時亦得相同的結果（見圖4.6）。

若將全部砂質土壤之剪力模數試驗結果予以常態化(Normalized)，即以G/Gmax表示，則G/Gmax隨剪應變之增加而減少，變化範圍如圖4.7所示，圖4.7顯示高雄港區砂性土壤之剪力模數經常態化以後之變化範圍與Seed & Idriss (1970)建議之範圍極爲接近。

圖4.8爲高雄港區砂性土壤阻尼比與剪應變之關係，試驗資料顯示阻尼比

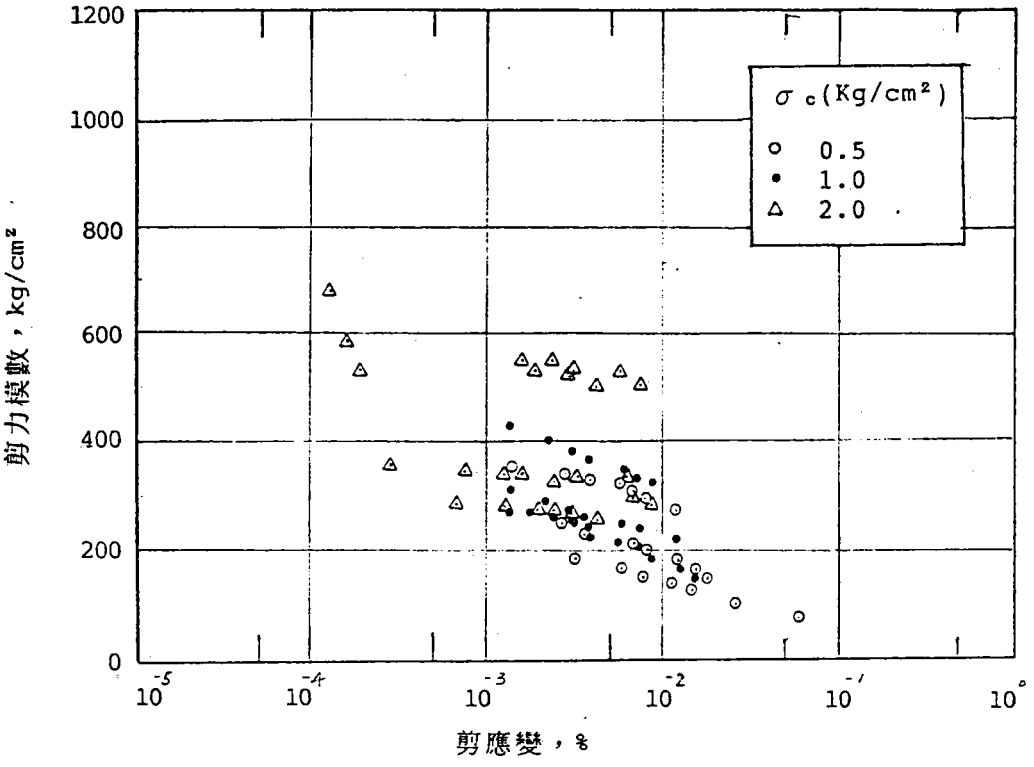


圖4.1　高雄港區砂性土壤剪力模數受不圍壓影響

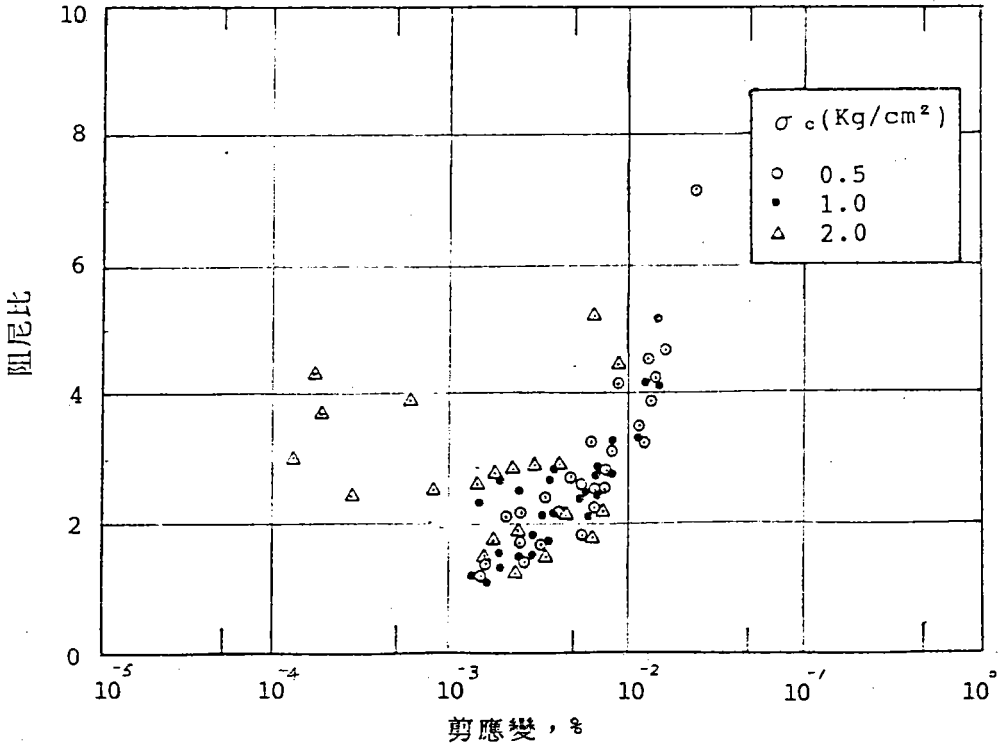


圖4.2　高雄港區砂性土壤圍壓對阻尼比的影響

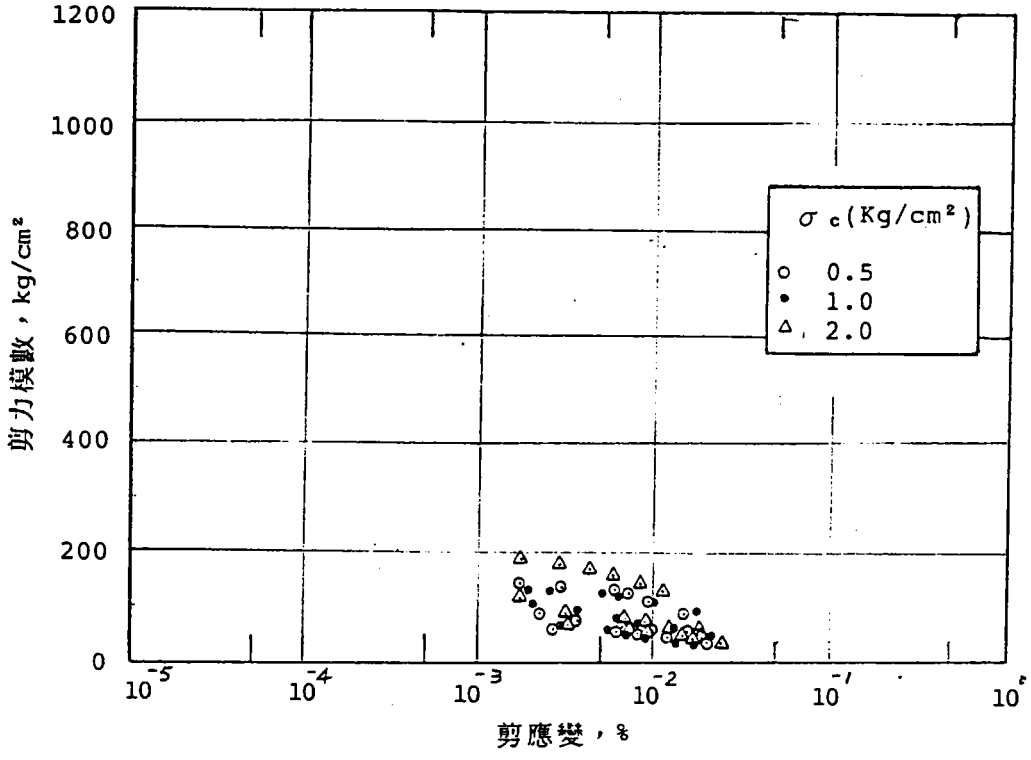


圖4.3　高雄港區砂質沉泥或粘土質沉泥剪力模數受不同圍壓影響

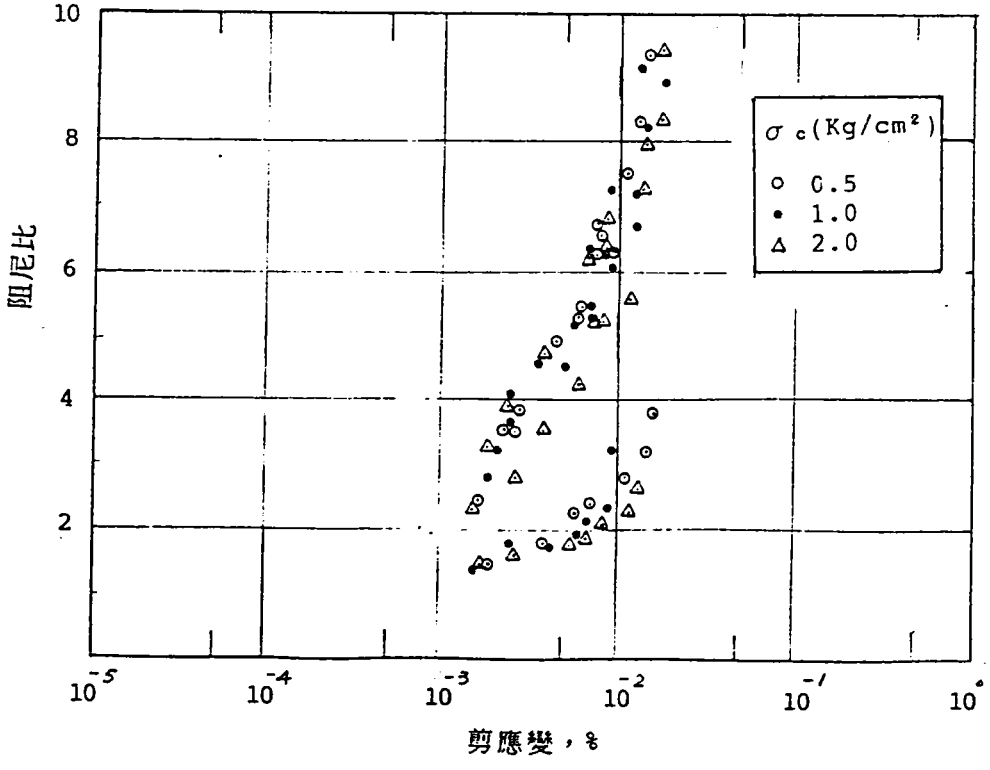


圖4.4　高雄港區砂質沉泥或粘土質沉泥阻尼比受圍之影響

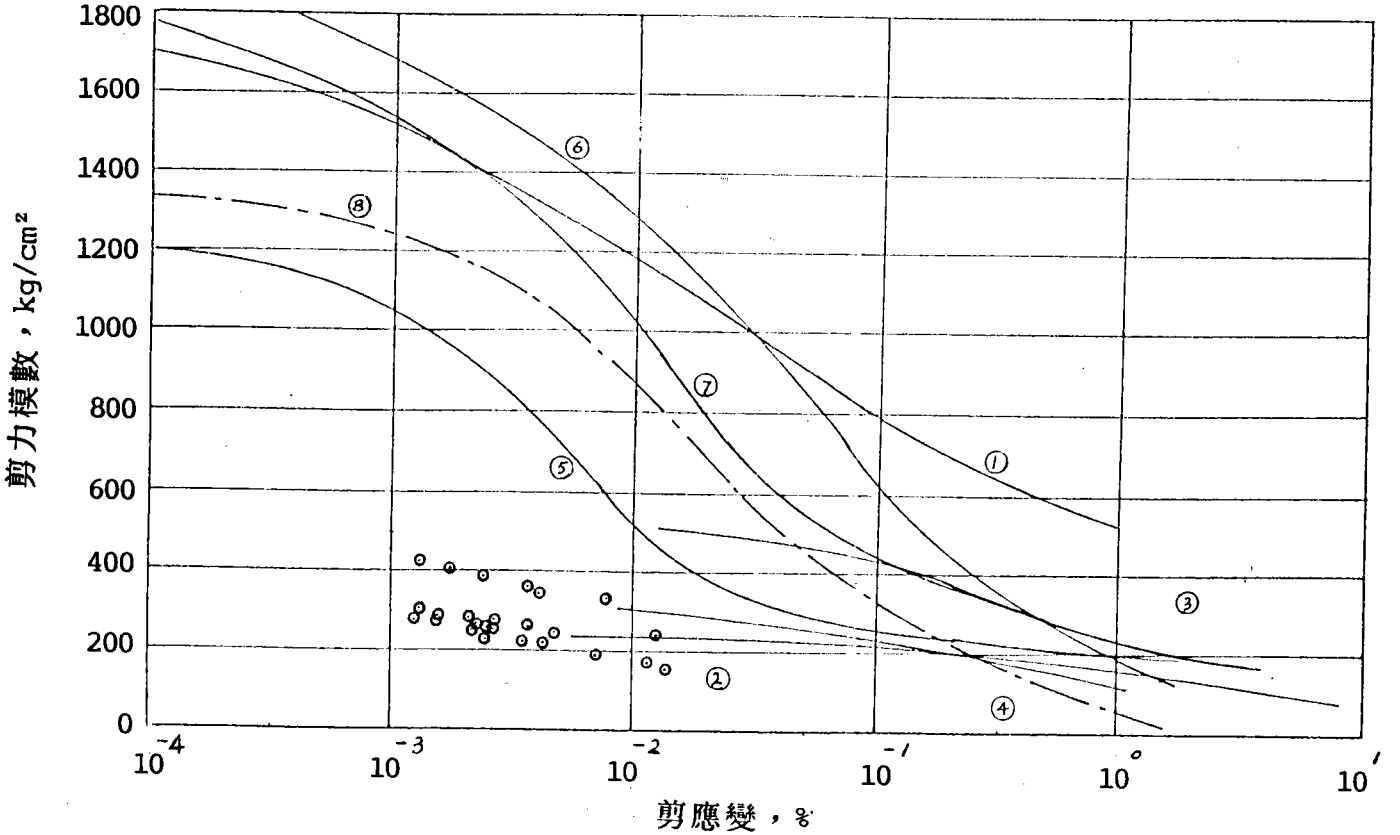


圖4.5　高雄港區砂性土壤（圍壓爲1kg/cm²）之剪力模數與應變關係曲線

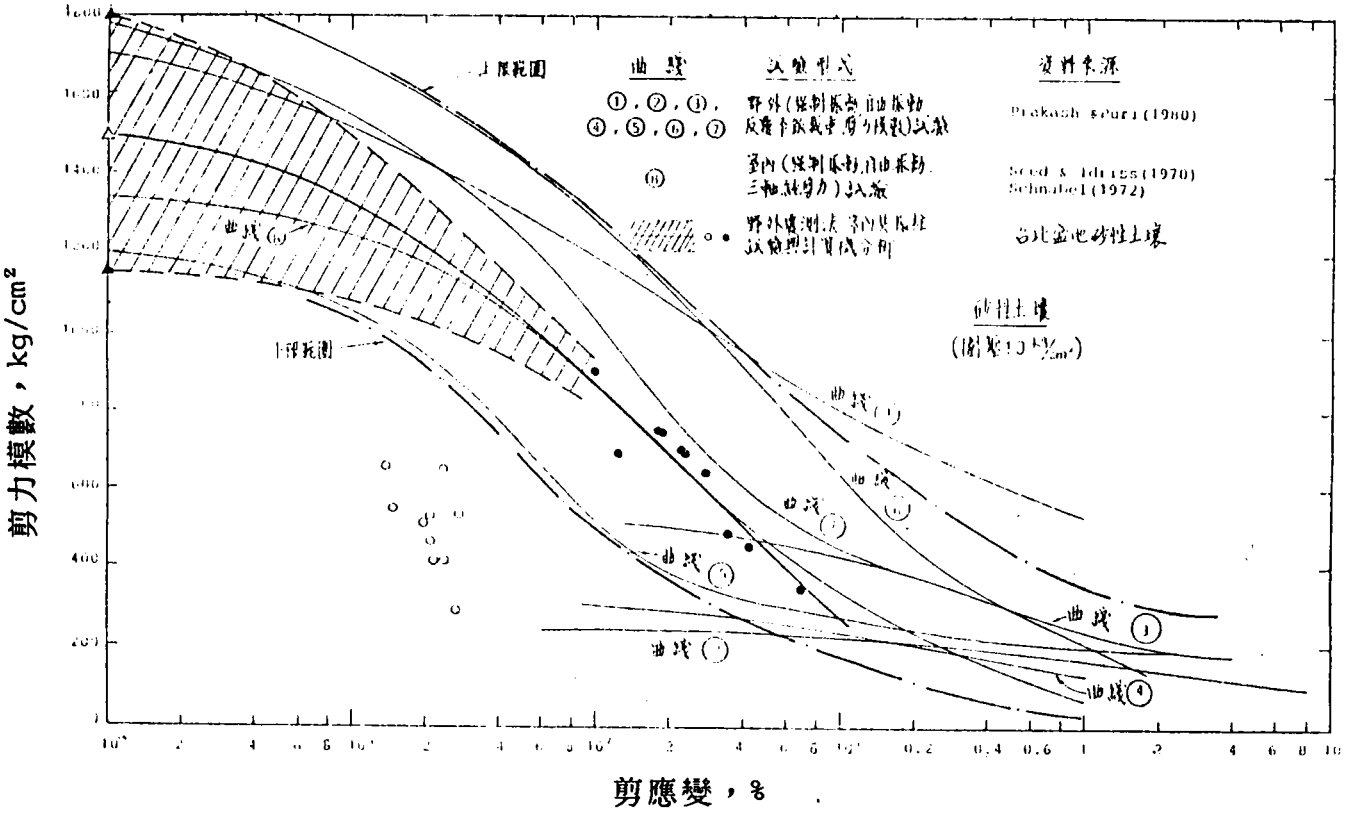


圖4.6 台北盆地砂性土壤剪力模數與國外研究結果之比較(吳偉特1983)

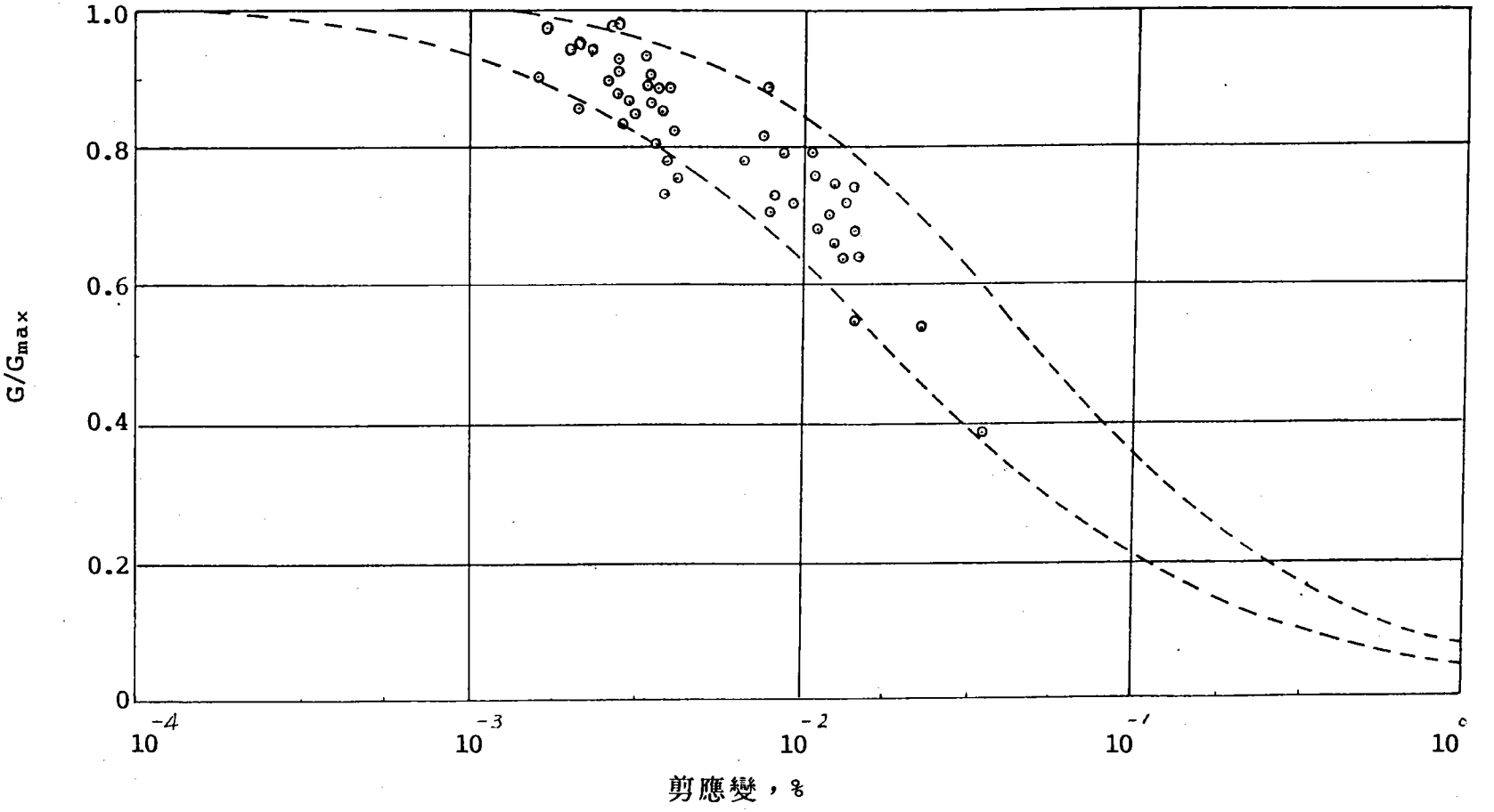


圖4.7　高雄港區砂性土壤G/Gmax與剪應變之關係

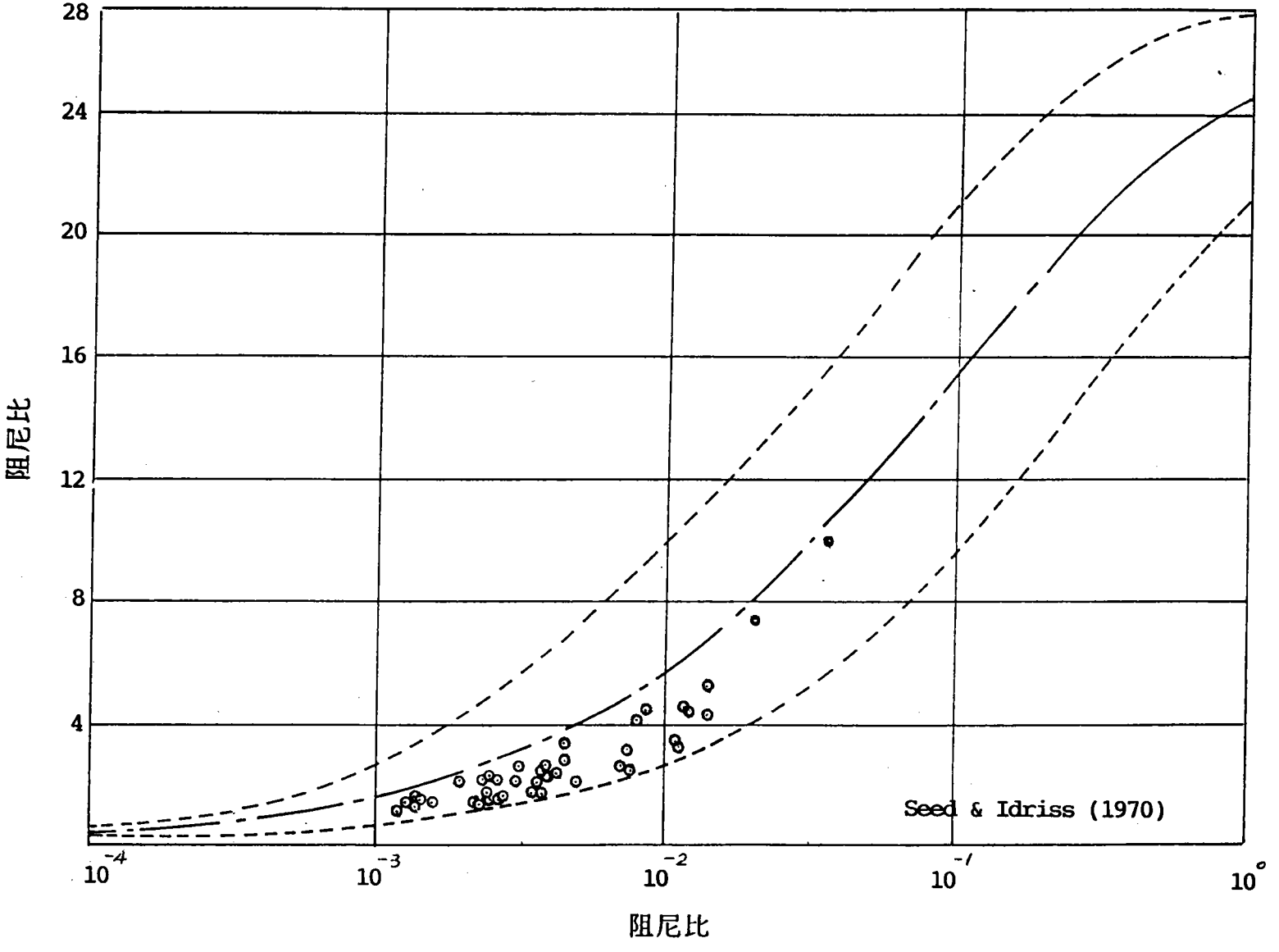


圖4.8　高雄港區砂性土壤阻尼比與剪應變之關係

與剪應變的關係與Seed & Idriss (1970) 之建議值相比較偏向其下限範圍。

(2)動力强度

土壤動力强度包括分析液化潛能參數之反覆應力比，反覆剪應變及動力荷重時孔隙水壓力變化關係及試體破壞時所需之反覆應力循環次數與剪力强度等，一般土壤承受反復剪應力作用之應力狀況可利用動力三軸試驗模擬。

圖4.9係不同相對密度之砂性土樣進行動力三軸試驗結果，相對密度變化範圍在65%至85%間，試驗資料顯示對同一土壤當振動循環數固定時，循環應力比 (Cyclic stress ratio)隨相對密度之增大而增大，當相對密度固定時，循環應力比隨振動循環數之增加而減少。大致而言，振動循環數在20週以後，循環應力比即趨於定值，是故Ishi-hara建議採用第20週的應力比做爲液化分析的依據。

根據圖4.9資料，整理結果顯示，高雄港區砂性土壤第20週循環數以後之循環應力比變化範圍約在0.2至0.3之間。

(3)土層之壓縮波速度與剪刀波速度特性

壓縮波速度到目前爲止並無較合理的經驗公式可資應用，根據亞新工程顧問公司委託新中光物理探測公司在高雄港務局聯合辦公大樓及中和國校，第二港口附近等之震測試驗結果顯示，在地表至深度10 m間壓縮波速度 Vp在 500m/sec至1650m/sec間，剪力波速度 Vs在135 m/sec至165m/sec間。深度10m以下，壓縮波速度爲1650m/sec，剪力波速度Vs在154m/sec至280m/sec間。

4.2.3 台中港區土壤動態性質資料研討

1.台中港區及其鄰近地區地質概況

台中港區原地形爲由大甲溪和大肚溪沖積形成之西部海岸平原，基地地盤構造屬台灣新第三紀地槽盆地中之台西－台中構造盆地，地表爲現代沖積層所覆蓋。

台中－台西構造盆地於第三紀早期原爲兩個個別獨立之構造盆地，其間爲北港高地所分離，漸新世晚期由於北港高地下陷，使台中、台西兩構造盆地合而爲一，此後由於間歇性之海進、海退現象持續至上新世晚期，而使台西－台中構造盆地形成數個含煤相及海相互層之沉積，上新世晚期之造山運動，一直延續到現在爲台灣最主要之造山運動，屬間歇性之造山運動並伴隨

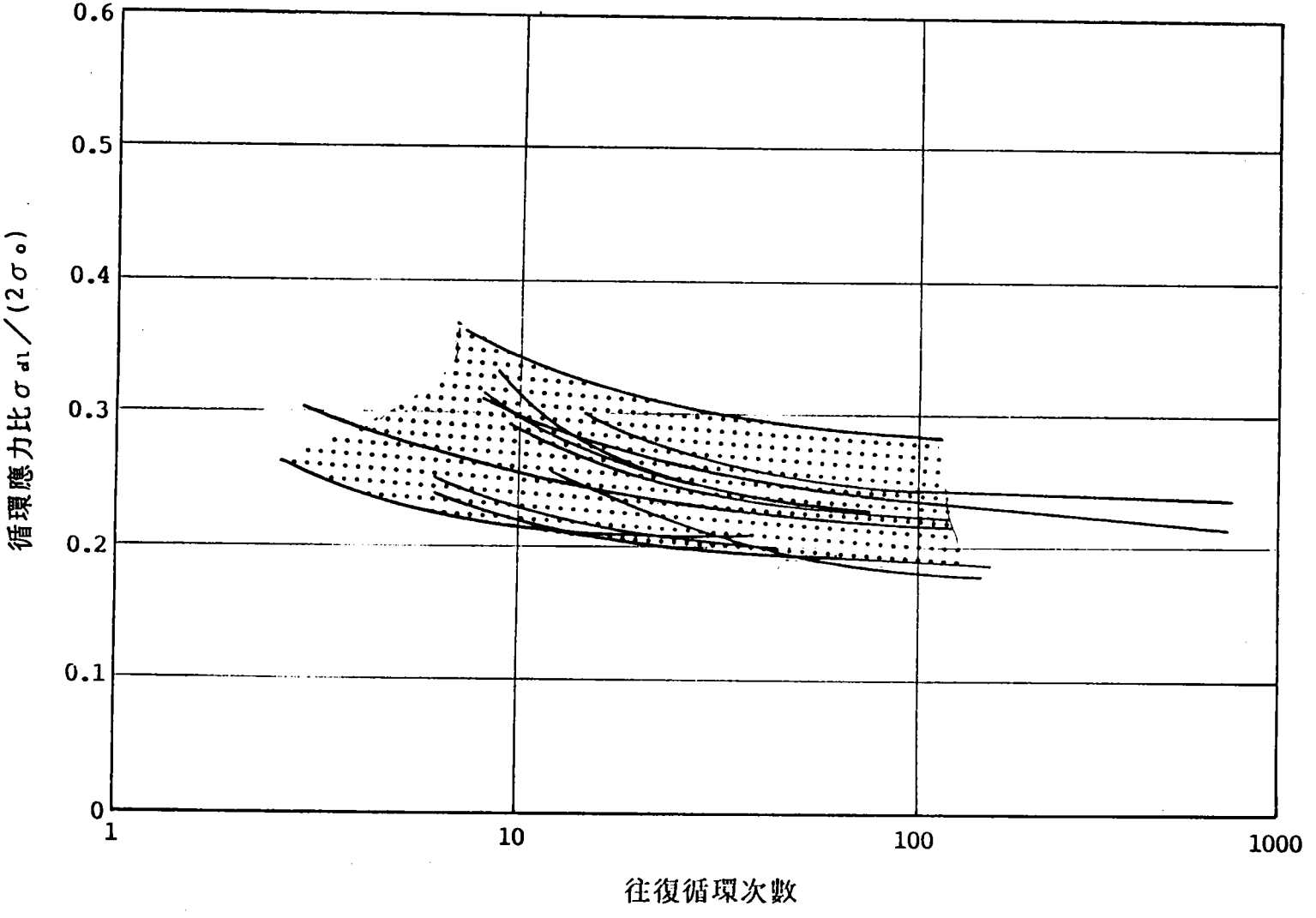


圖4.9　高雄港區砂性土壤動力三軸試驗結果

間歇性之海進及海退現象，致使本構造盆地中心軸由東向西漸移，而形成本構造盆地上部之第四紀沉積（更新世及全新世），由於海侵及海退現象，致使平均海水面因時而異，海侵時期平均海水面曾高於目前平均海水面約180公尺（大南灣海侵期），而 15000年前之海退期平均海水面低於目前平均海水面約140公尺，顯示本基地之地層所經歷之沉積環境及應力過程極爲複雜。

本基地近地表之地層爲由河川沖積及海洋沖積雙重作用所形成之巨厚現代沖積層所覆蓋，其下依次爲上新世及更新世未固結之頭嵙山層，上新世之卓蘭層及錦水頁岩層等，現代沖積層主要由粘土、沉泥、砂和礫石所組成，厚度甚厚，由鑽探結果顯示，地表下100至130公尺內大多爲沉泥質砂層間夾沉泥或粘土薄層，其下始有礫石出現。

台中港區地表地層爲由河川沖積及海洋沖積雙重作用所形成之巨厚現代沖積層所覆蓋，主要爲沉泥質砂，砂質沉泥，粘土質沉泥及沉泥質粘土等互相交雜而成。有關於沉積土層之厚度，根據台中港務局在台中港區內進行的鑽探資料顯示，鑽探深度至60公尺時仍爲沉積砂土層，而根據台灣電力公司在台中火力電廠的地質調查資料顯示，鑽探深度在150公尺時，僅在深度115公尺處發現0.6公尺厚之卵礫石層，在深度147公尺至150公尺間，偶含礫石，礫石粒徑在6公分以下，故現代沖積層爲厚層砂土層，其詳細厚度未知，惟根據鑽探資料可確定沖積層厚度應在150公尺以上。

根據已搜集之鑽探資料研判，台中港地區之地層分佈以沉泥質砂土層爲主，間夾有許多沉泥質粘土薄層或厚層，但常不延續而間斷出現，頗爲複雜，鑽探資料顯示標準貫入試驗 N值，在同一深度中分佈甚爲散亂，可見本區土層有交錯沉積之現象，一般而言，大致在高程-25m以下 N值大多高於30，屬中等緊密以上程度，而高程-80m以下，其N值大都高於100爲極緊密堅硬之層次，可提供比較可靠的承載力。

2.台中港區土壤動態性質分析

(1)剪力模數與阻尼比特性

根據本所進行的共振柱試驗結果，台中港區砂性土壤圍壓對剪力模數和阻尼比之影響如圖4.10和圖4.11所示，圖4.10顯示剪力模數隨剪應變的增加而遞減，隨圍壓的增加而增加，在低應變階段圍壓對剪力模數之影響較大，隨剪應變的增加圍壓對剪力模數之影響程度逐漸減少。

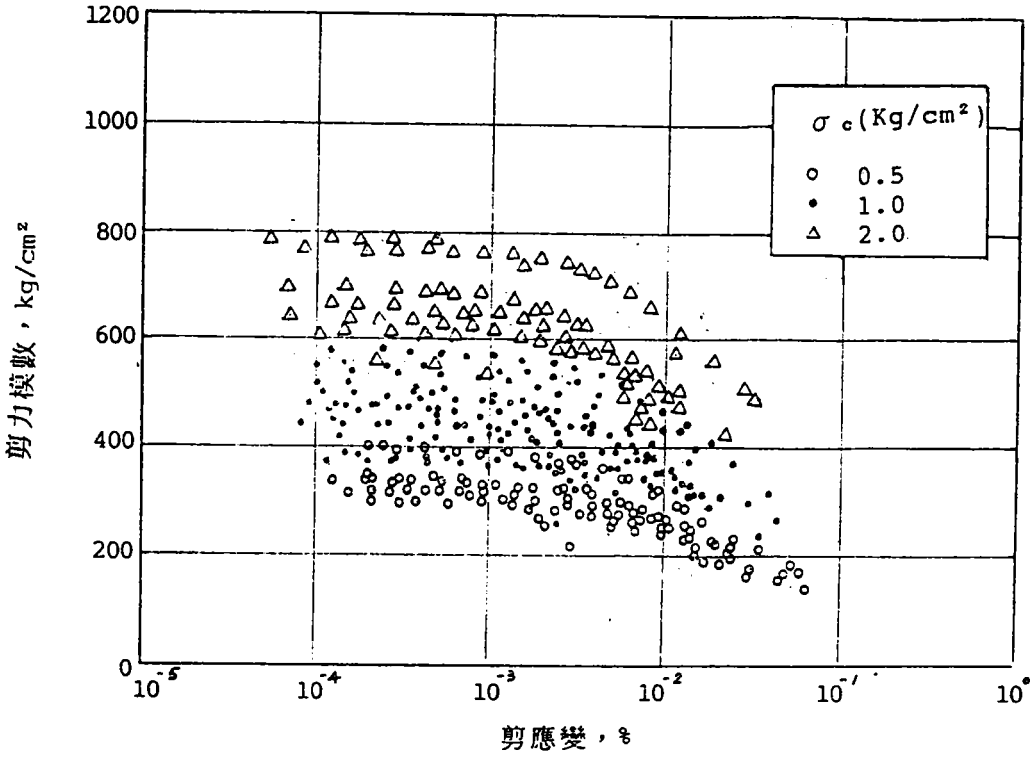


圖4.10　台中港區砂性土壤剪力模數受不同圍壓影響

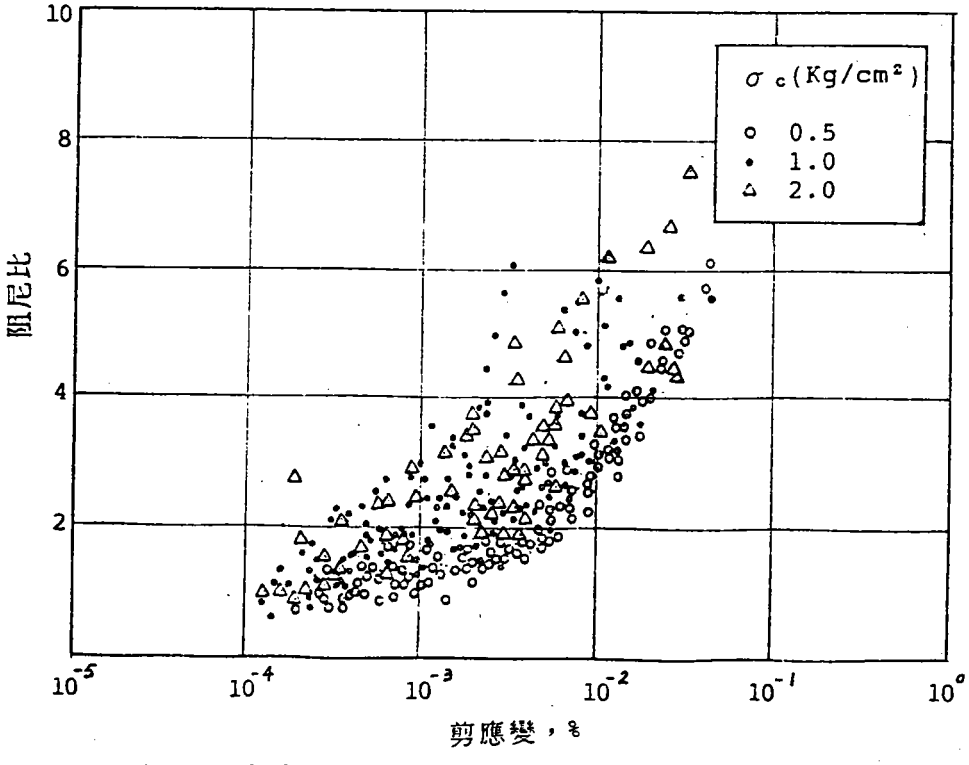


圖4.11　台中港區砂性土壤圍壓對阻尼比的影響

圖4.1和圖4.10相比較顯示台中港區砂性土壤之剪力模數較高雄港區砂性土壤之剪力模數高。

圖4.11顯示共振柱試驗結果台中港區砂性土壤圍壓對阻尼比的影響，阻尼比隨剪應變之增加而增加，圍壓增加亦會使阻尼比隨之增加，但不明顯，與高雄港區砂性土壤比較，台中港區砂性土壤之阻尼比稍高。

圖4.12爲台中港區砂性土壤動力三軸試驗結果楊氏模數，剪力模數及阻尼比與剪應變之關係，圍壓1.8kg/cm²及2.0kg/cm²，試驗結果與共振柱試驗結果極接近。

若將砂性土壤之剪力模數予以常態化處理如圖4.13所示，其變化範圍與Seed & Idriss(1970)之建議值比較，台中港區砂性土壤G/Gmax與剪應變關係偏向其上限範圍。

圖4.14顯示阻尼比與剪應變之關係，其變化關係在Seed & Idriss (1970)建議之範圍。

圖4.15及圖4.16爲台中港區與高雄港區砂性土壤共振柱試驗結果比較。比較結果顯示，台中港區砂性土壤之剪力模數和阻尼比均較高雄港區砂性土壤爲高。

(2)土壤動力强度

台中港區土壤亦極少有土壤動力三軸試驗之資料，亞新工程顧問公司進行台中港火力發電廠之地質調查和分析曾完成若干組動力三軸試驗，圖4.17爲綜合各組動力三軸試驗結果，由於取樣深度不同，各試驗細粒含量差異甚大，故圖4.17循環應力比與產生液化時循環次數之關係頗具分散性，惟大致而言，台中港區土壤之循環應力比較高雄港區爲高，第20個循環數以後之循環應力比約在0.35至0.7之間。

(3)震測法求土壤動態性質

台中港區極少進行震測試驗求取土壤之動態性質，本所曾於民國75年間進行下井法震測試驗量測現地土層之剪力波速度及剪力模數，試驗結果如圖4.18所示，亞新工程顧問公司在台中火力電廠之試驗結果亦示於圖4.18上，圖4.18顯示台中港區土層標準貫入試驗N值，剪力波速度及剪力模數之關係，試驗深度22m，標準貫入試驗N值在10至30間，屬疏鬆至中等緊密程度，剪力波速度平均在100m/sec至200m/s ec間，剪力模數200kg/cm至800kg/cm間，與

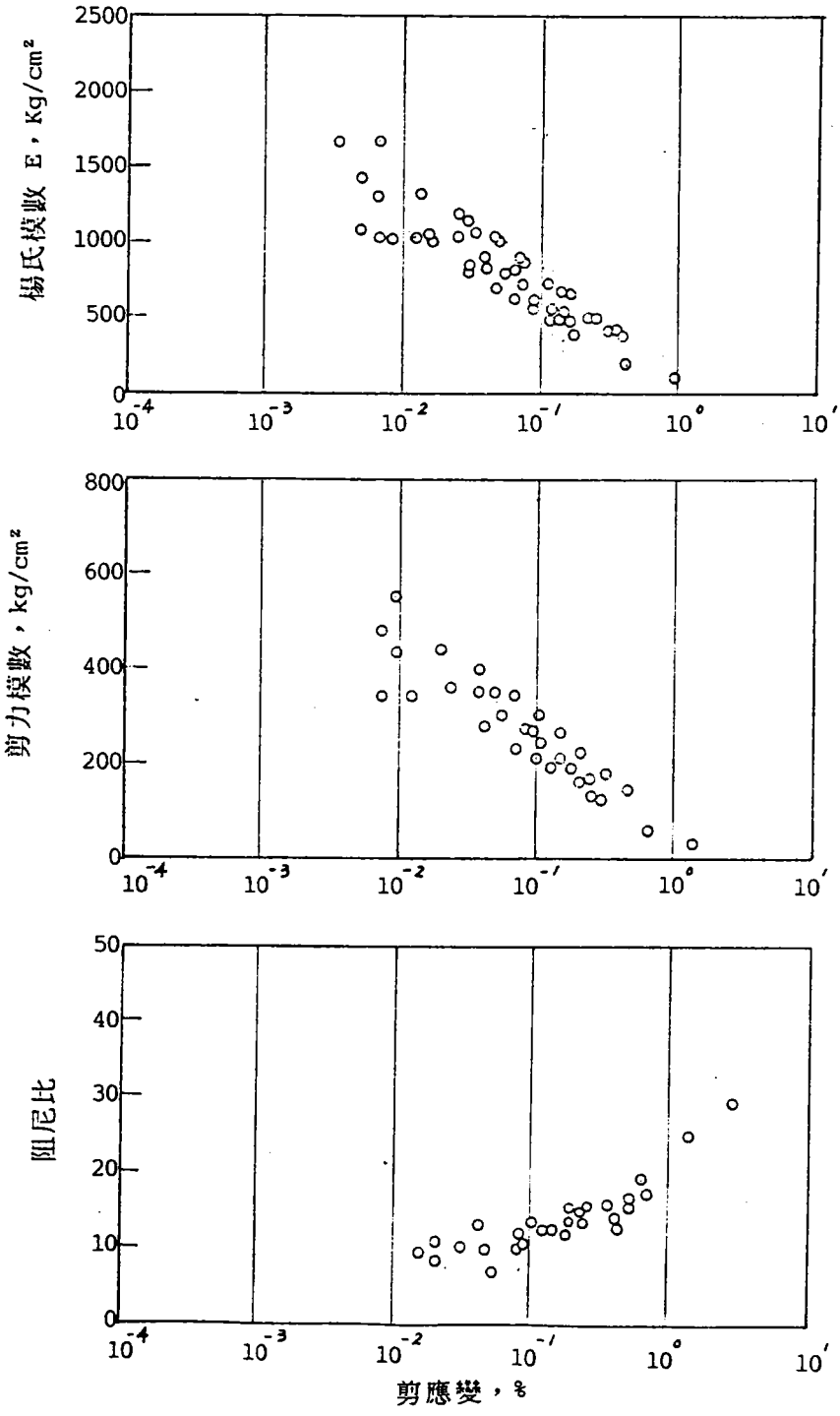


圖4.12　台中港區砂性土壤動力三軸試驗結果

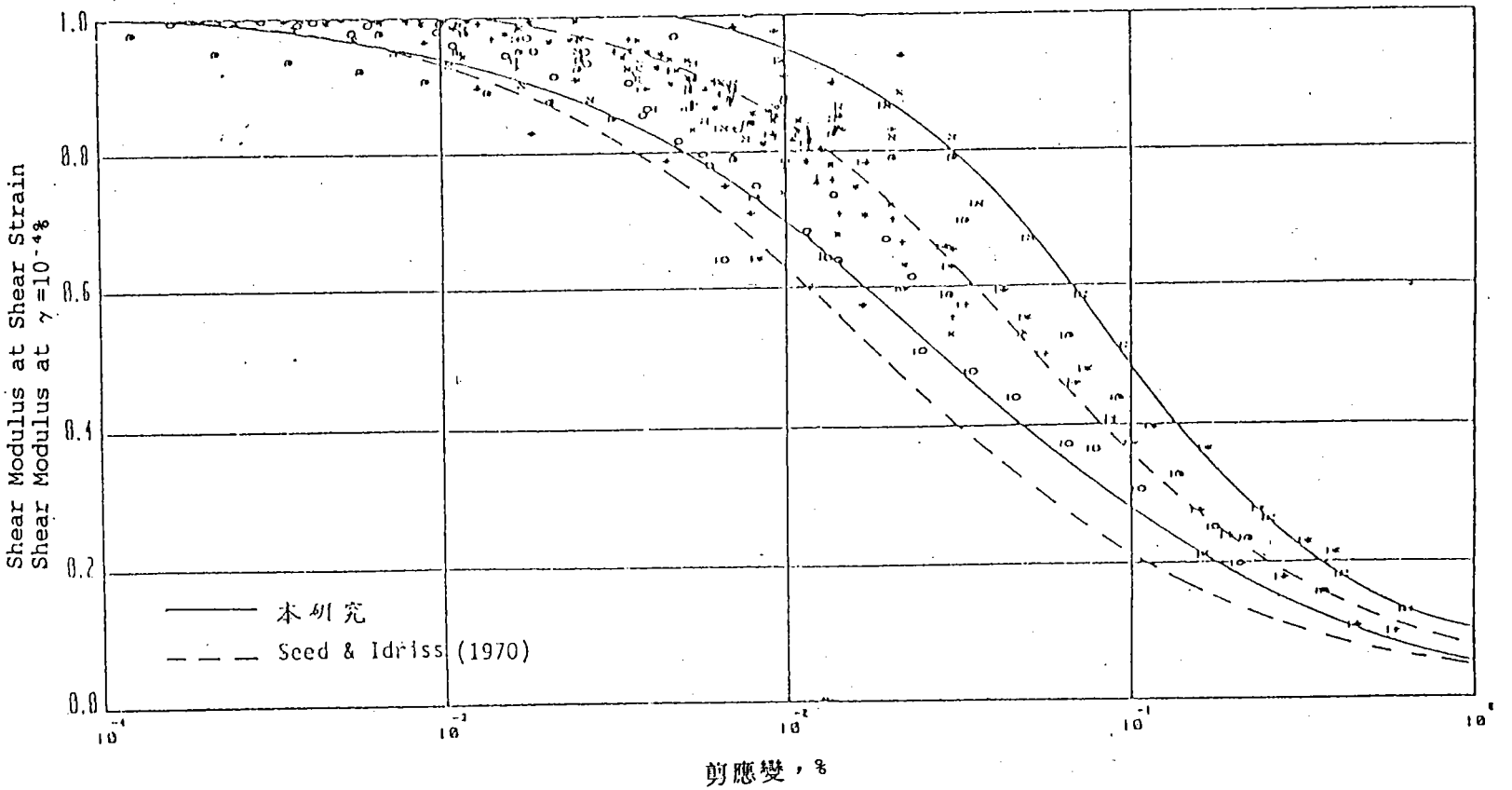


圖4.13　台中港區沉泥質砂性土壤G/Gmax與剪應變之關係

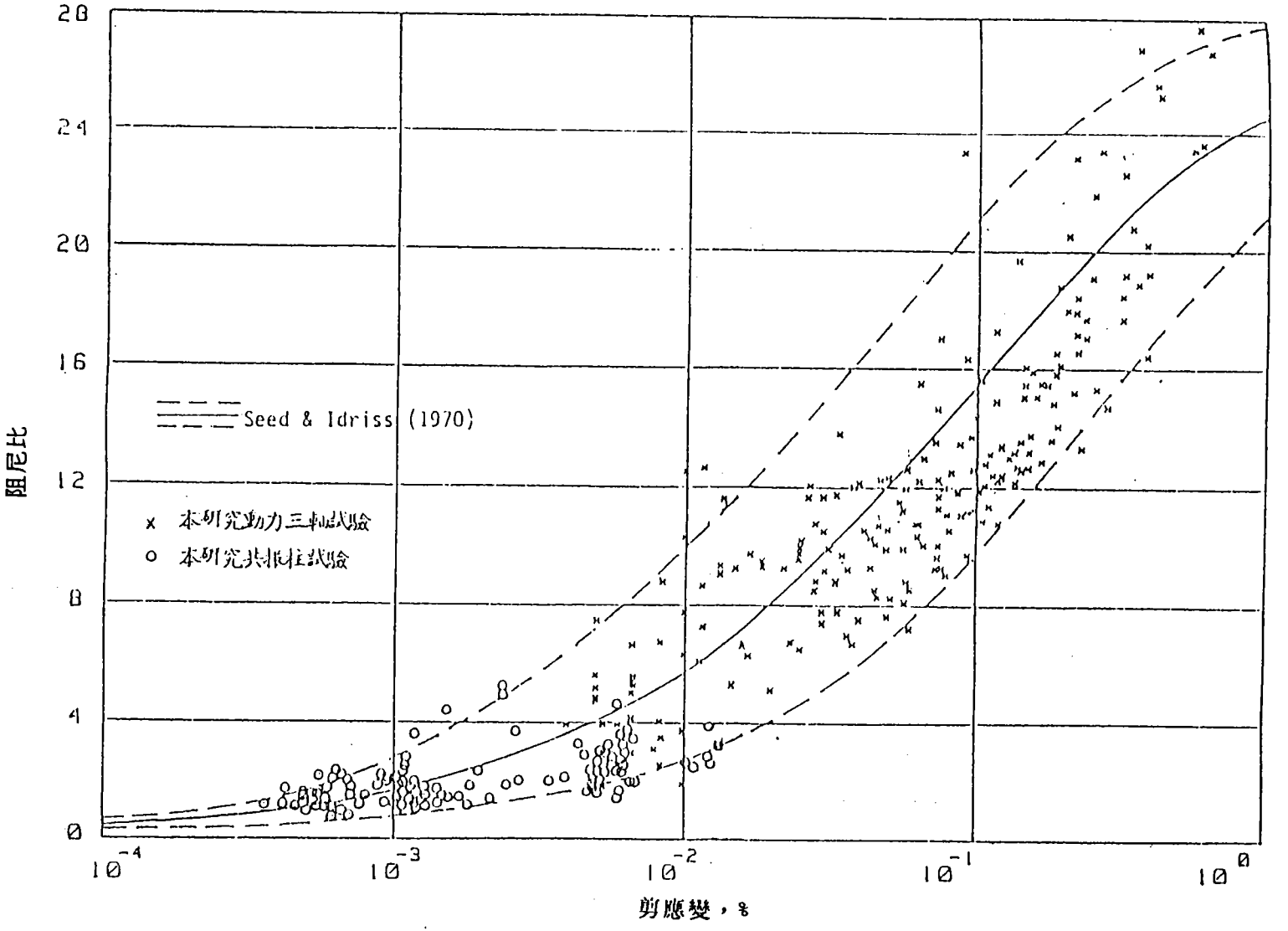


圖4.14　台中港區沉泥質砂性土壤阻尼比與剪應數之關係

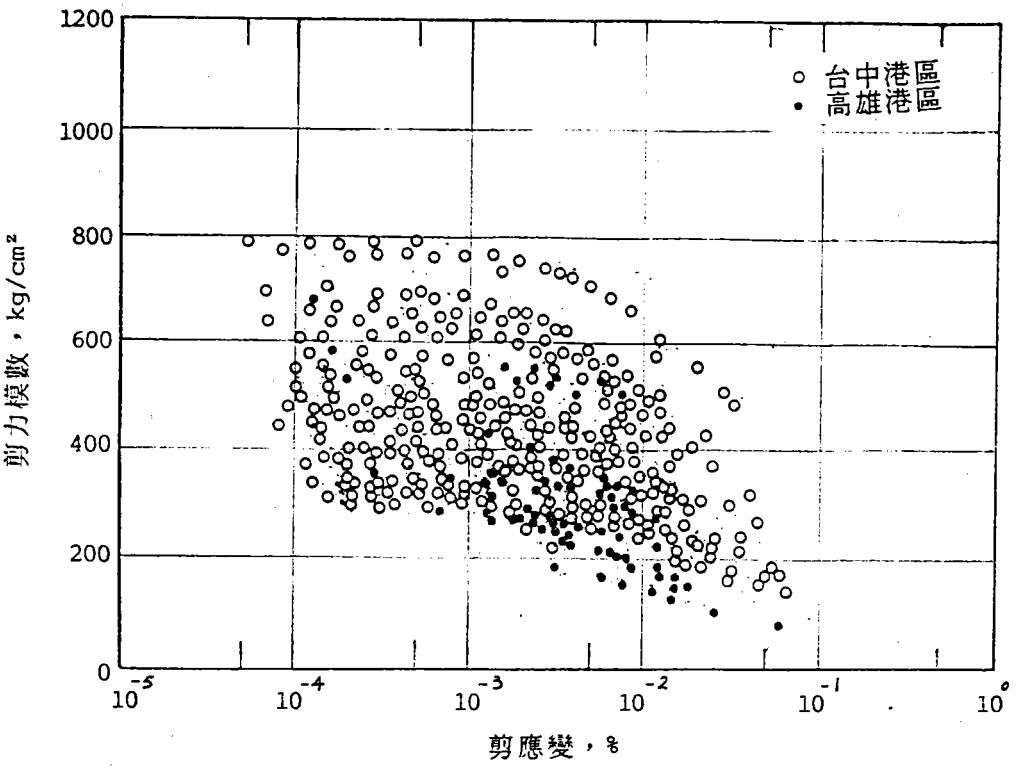


圖4.15　台中港區與高雄港區砂性土壤剪力模數比較結果

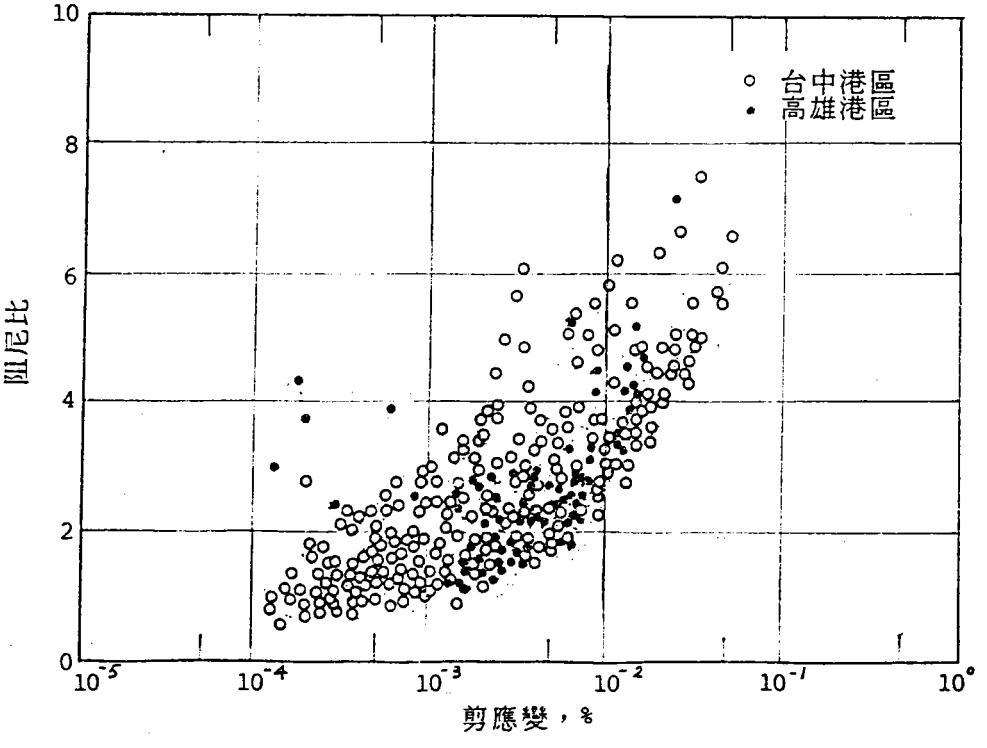


圖4.16　台中港區與高雄港區砂性土壤阻尼比比較結果

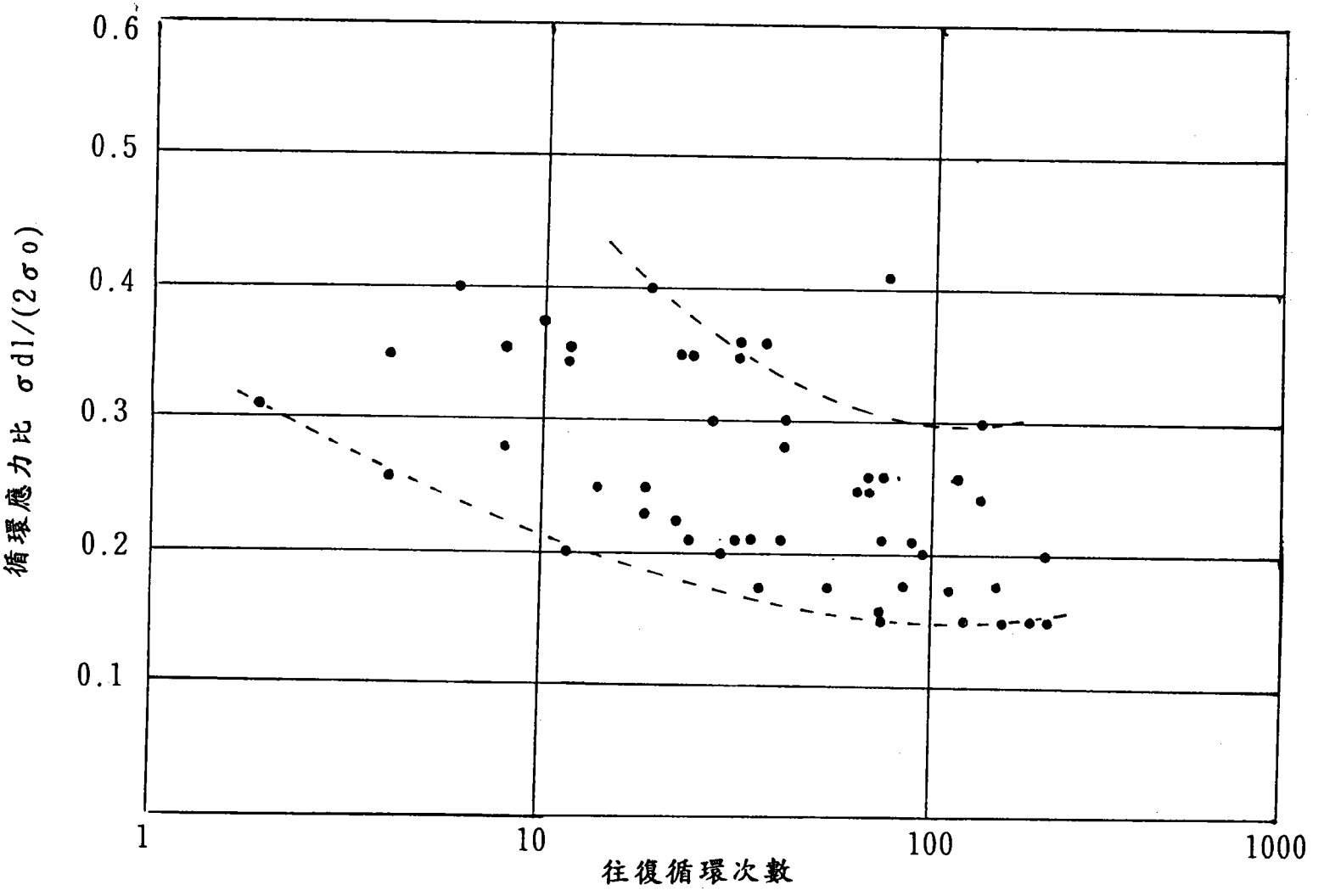


圖4.17　台中港區土壤動力三軸試驗結果

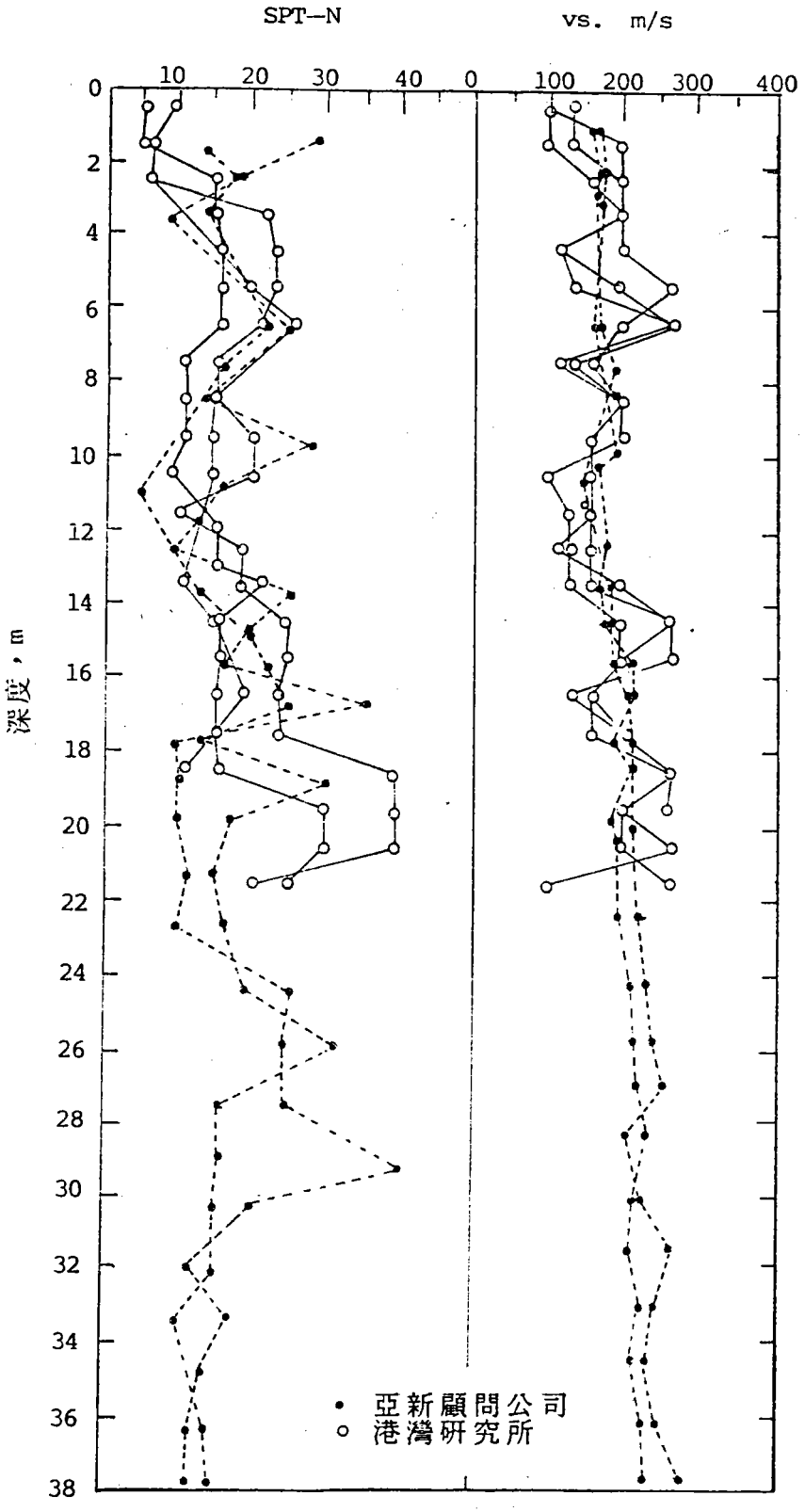


圖4.18　台中港區土壤SPT-N值與剪力波速度及深度變化圖

試驗室共振柱試驗及動三軸試驗結果（參閱圖4.10及圖4.12）極接近，惟現地試驗局部深度剪力模數有高達1200kg/cm以上者。

與高雄港區相比較，台中港區砂性土壤之剪力波速度或剪力模數均較高雄港區之砂性土壤爲高。

4.2.4 興達港區土壤動態性質資料研討

1.興達港區地質狀況

興達港區域爲台灣西南部海岸平原的一部份，地勢平坦，屬於海岸平原幼年期，沿海砂州甚爲發達，本區之地質組成主要爲沉泥質砂，砂質沉泥及沉泥質黏土交互而成，爲瀉湖沉積物質。沉泥質砂近地表處較爲疏鬆，隨深度受覆土壓力影響而漸趨緊密，沉泥質粘土亦爲近地表者較爲軟弱，隨深度受覆土壓力影響而成堅實狀態。

興達港地層除地表約有4公尺左右之人工抽砂回填層外，主要爲自然沖積形成，大致由數層砂性土層與粘性土層交互出現，此沖積土層厚度未知，根據鑽探資料顯示，此層厚度在160公尺以上。

在高程-15公尺以上之砂性土層現地標準貫入試驗 N值在2至15間，屬疏鬆至中等緊密程度，粘性土層，平均 N值約爲1或2屬極軟弱至軟弱稠度，高程-15公尺以下標準貫入試驗N值有明顯增高現象,平均N值在15至30以上,屬中等緊密至極緊密程度，粘性土層平均N值在10以上，屬極堅硬程度。

根據鑽探期間量測結果，興達港區地下水位大致在高程+0.5公尺至+1.5公尺間。

2.興達港區土壤動態性質分析

圖4.19爲本所對興達港區不擾動土樣進行動三軸試驗結果土壤剪力模數，阻尼比與剪應變之關係。圖4.20爲亞新工程顧問公司委託日本Ishihara及台灣大學進行動三軸試驗結果。

根據中華工程公司委託聯合大地工程顧問公司在興達港區進行交叉井震測法測得剪力波速度大致在126m/sec至254m/sec之間，與其他台灣西部海岸地區砂土層剪力波速度極接近。

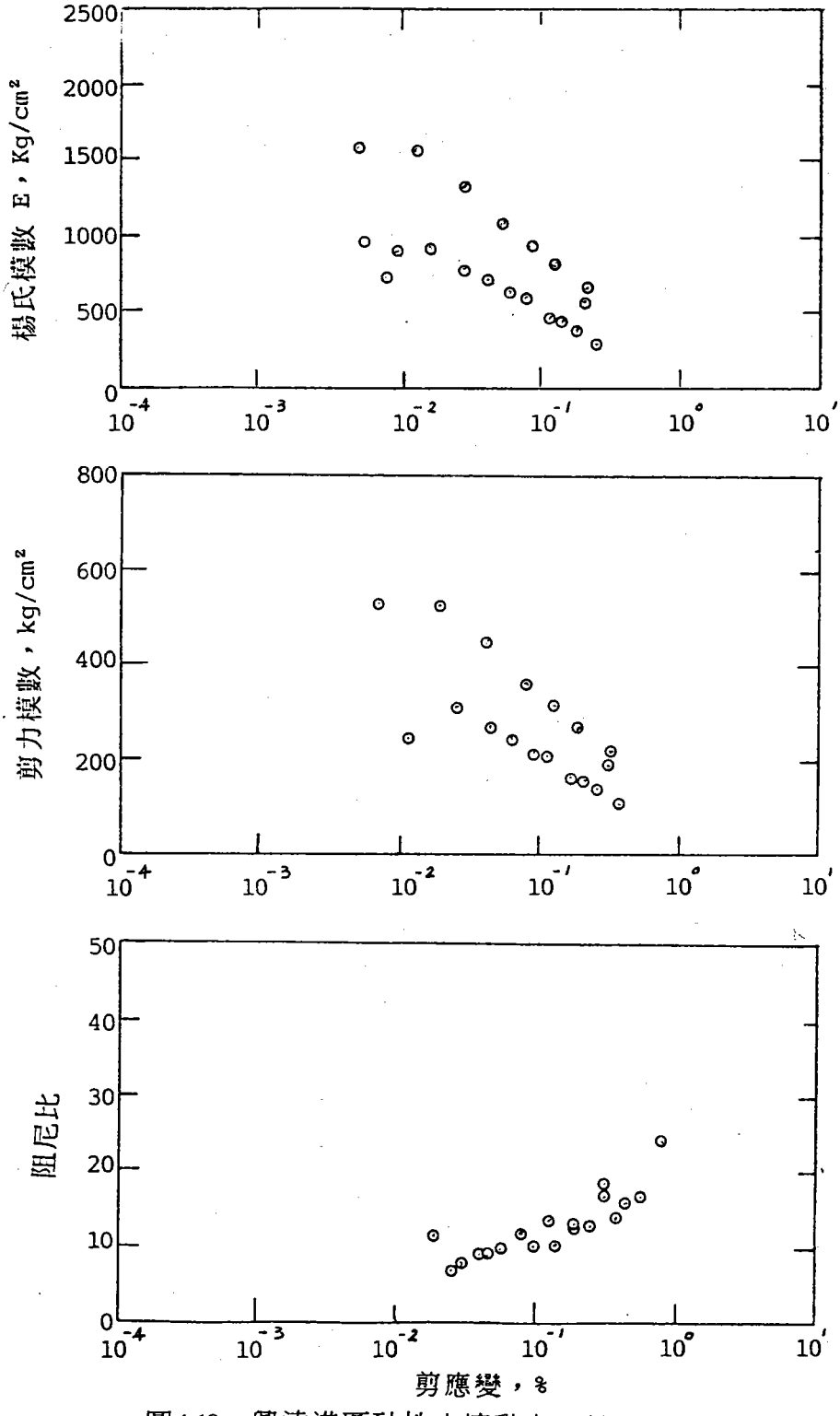


圖4.19　興達港區砂性土壤動力三軸試驗結果(a)

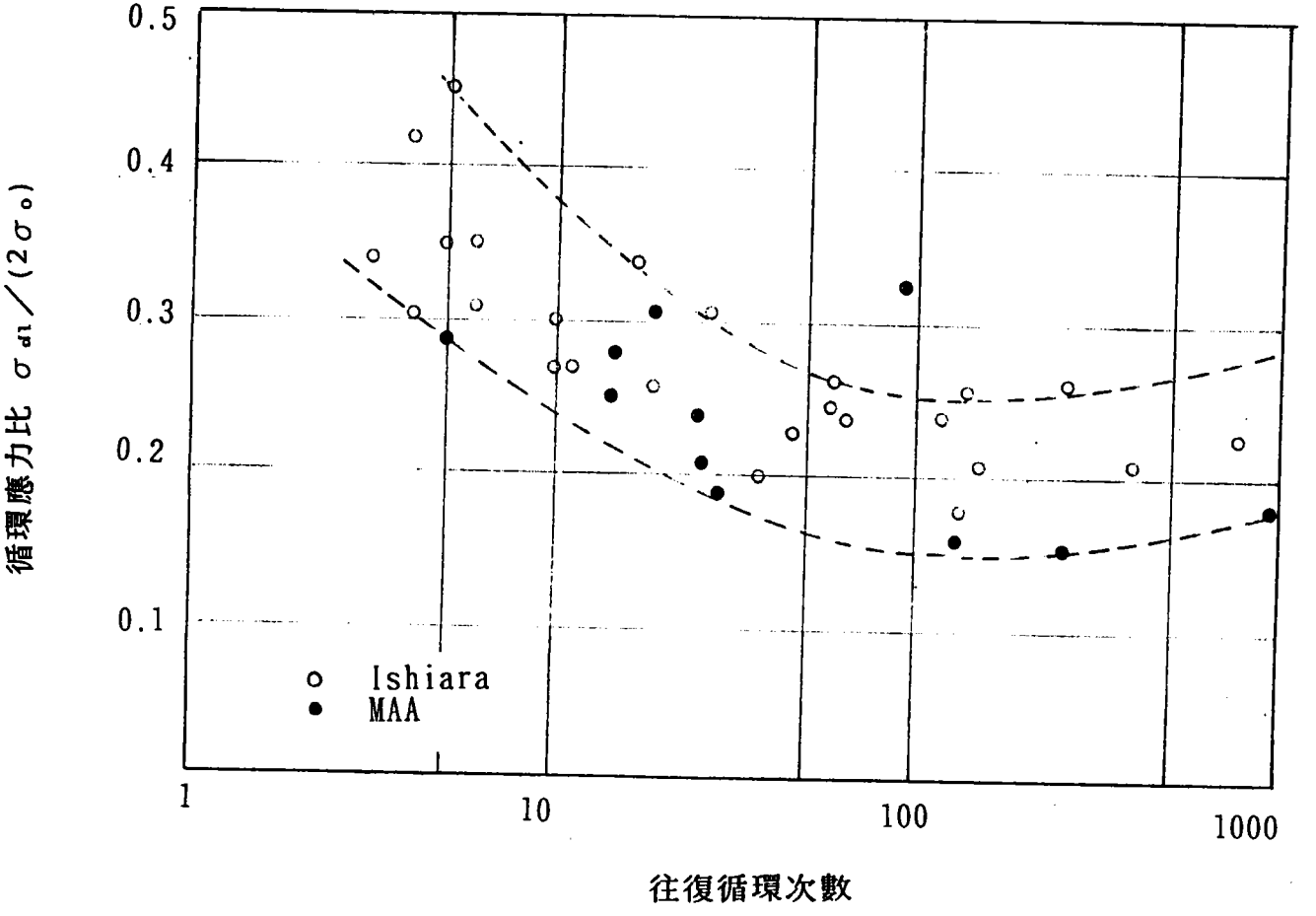


圖4.20　興達港區砂性土壤動力三軸試驗結果(b)

五、結論與建議

1. 國內各港區雖有許多地質資料可供參考利用，可惜這些資料散見於各有關單位，由於缺乏專人管理，資料極易遺失，故設立地質資料庫，有系統的整理分析與儲存土層分佈資料，已是極爲迫切性的問題。
2. 土層分布資料庫之建檔工作爲一永久性的計劃，須不斷的補充建檔，使各港區資料庫更趨完備，可靠度更加提高。
3. 本研究建檔軟體採用MapBasic語言撰寫，可直接提供各港埠單位配合MapInfo 系統使用，各港區於工程規劃階段或設計階段，可利用本土層分佈資料庫調閱所需之地質資料以節省時間及經費。
4. 建議各港務局協調提出鑽探“統一表格”，一方面營造廠商作業規格化，便於監工人員督導，一方面便於資料建檔儲存。而鑽探表格上所列之鑽孔位置、高程等基本資料應標示清楚，以方便日後查閱。各港區若有新的地質調查資料時，建議由專人列管，並提供乙份供本所建檔儲存。
5. 土壤之動態性質爲結構物耐震設計之重要考慮因素，尤其台灣西海岸多屬沖積土層，其主要結構爲沉泥質細砂或砂質沉泥層，地震時此飽和鬆軟砂性土層極可能發生液化現象，故對土壤動態性質之研究更爲重要。
6. 台灣西海岸土壤動態性質研究資料不多，到目前爲止對土壤動態性質更無較系統化的整理與分析，本研究儘量搜集現有土壤動態性質研究成果，包括土壤共振柱試驗和動三軸試驗資料，現地震測試驗資料等，並整理出各地區土壤之動態剪力模數，阻尼比，壓縮波速度及剪力波速度等特性供工程設計之參考。
7. 根據有限的土壤試驗資料整理結果，台中港區砂性土壤剪力模數和阻尼比較高雄港區和興達港區砂性土壤之剪力模數和阻尼比值高，剪力波速度和壓縮波速度一般亦以台中港區之砂性土壤較其它地區稍高，惟因可供比較的動態性質試驗資料極爲有限，此種比較結果僅供初步參考。
8. 由於土壤動態性質極爲複雜，影響因素又多，而所能獲取的資料實在有限，本研究成果僅能提供初步工程規劃分析應用參考，將來仍須更多的現場與試驗室資料補充，同時因試驗資料結果之正確與否，影響因素甚多，目前

仍有許多困難無法解決，故仍需更多的專家學者提供更多的研究成果，以求得台灣西海岸土壤動態性質有較完善的適用程度範圍及更安全可靠之設計參考數據。

9. 本報告有關各港區之土層分佈情況及土壤動態性質等，僅根據目前已搜集的資料加以研討，將來若陸續有新的資料補充時應再繼續檢討修訂。

參考文獻

Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1970) "Shear Modulus and Damping in Soils; I.Measurement and Parameter Effects, II. Design Eguations and Curves," Technical Reports UKY 27-70-CE 2 and 3, College of Engineering, Univ. of Kentucky, Lexington, Kentucky, July.

Prakash, S. & Puri, V.K. (1981) "Dynamic properties of soils from insitu Tests " JOGE, ASCE, vol.107, No. GT7 July pp.943～963

Imai, T., Fumoto, H. & Yokota, K. (1976),"P and S wave Velocities in Subsurface Layers of Ground in Japan" URAWA Reserarch Institute, OYO Crop., TOKYO, Japan.

Seed, H.B. and Idriss I.M. (1970)"Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Respones analysis" Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 70-100, U.C. Berkeley, Dec.

Seed, H.B. (1974) "Soil problems and soil Behavior" Earthquake Engineering, chapter I, prentice-Hall Co. y48

日本土質工學會(1973)「土と構造物の動的相互作用。」

楊勝明(1996)「地質鑽探資料庫建置及系統功能展示」，國土資訊系統自然環境基本資料庫分組地理資訊技術研討會，PP.4-1～4-31。

李咸亨，謝浩明(1988)「大地工程地質資料庫系統及台北市區建檔研究」，內政部營建署。

邱景升，周宜强(1995)「地理資訊系統入門與應用」，松崗圖書公司。

石正義譯(1994)「鑽探圖的判讀要領」，詹氏書局。

經濟部資訊中心(1994)「國土資訊系統自然環境基本資料分組雛型地質探勘資料庫整合建置專案」

吳偉特(1983)「台北盆地土壤之剪力模數與阻尼比特性」，土木水利季刊第十卷第一期，PP.69～88民國72年5月。

徐明同(1975)「台灣地區地震危險度之研究」，氣象學報第21卷第2期PP.33-40。

蔡義本(1976)「宜蘭地區之地震研究」，中央研究院地球物理研究所。

亞新工程顧問公司(1978)「高雄過港隧道地質探測與地震調查分析」。

台灣各港區土壤動態特性與改良研究

編輯者：李延恭 李豐博 陳圭璋 謝明志 賴聖耀
發行人：張金機
發行所：台灣省政府交通處港灣技術研究所
打字排版：港灣技術研究所大地工程組
台中縣梧棲鎮臨海路83號
04-6564216

中華民國八十五年六月出版，印製190本，非賣品