

96-37-7256

MOTC-IOT-95-H1DA002-1

# 港灣地區大地災害調查與常態 監測之研究

## 港灣碼頭災害案例之探討分析(1/2)



交通部運輸研究所  
中華民國 96 年 4 月

96-37-7256

MOTC-IOT-95-H1DA002-1

# 港灣地區大地災害調查與常態 監測之研究

## 港灣碼頭災害案例之探討分析(1/2)

著 者：林雅雯、賴聖耀、謝明志

交通部運輸研究所

中華民國 96 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

港灣地區大地災害調查與常態監測之研究：港  
灣碼頭災害案例之探討分析。(1/2) / 林雅雯  
， 賴聖耀， 謝明志著. -- 初版. -- 臺北市：  
交通部運研所， 民 96  
面；公分  
參考書目：面  
ISBN 978-986-00-9372-8(平裝)

1. 港埠工程 2. 防災工程

443.33

96006951

港灣地區大地災害調查與常態監測之研究  
— 港灣碼頭災害案例之探討分析(1/2)

著者：林雅雯、賴聖耀、謝明志  
出版機關：交通部運輸研究所  
地址：臺北市敦化北路 240 號  
網址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版/中心出版品)  
電話：(04)26587176  
出版年月：中華民國 96 年 4 月  
印刷者：承亞興企業有限公司  
版(刷)次冊數：初版一刷 110 冊  
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站  
定價：100 元  
展售處：  
交通部運輸研究所運輸資訊組 • 電話：(02)23496880  
國家書坊台視總店：臺北市八德路 3 段 10 號 B1 • 電話：(02)25781515  
五南文化廣場：臺中市中山路 6 號 • 電話：(04)22260330

GPN：1009600930

ISBN：978-986-00-9372-8 (平裝)

著作財產權人：中華民國 (代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

96 港灣地區大地災害調查與常態監測之研究——港灣碼頭災害案例之探討分析 (1/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1009600930  
定價 100 元

## 交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港灣地區大地災害調查與常態監測之研究—港灣碼頭災害案例之探討分析(1/2)			
國際標準書號 (或叢刊號) 978-986-00-9372-8 (平裝)	政府出版品統一編號 1009600930	運輸研究所出版品編號 96-37-7256	計畫編號 95-H1DA002-1
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：林雅雯 研究人員：賴聖耀、謝明志 聯絡電話：04-26587117 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 95 年 01 月 至 95 年 12 月
關鍵詞：碼頭災害、穩定分析、FLAC/SLOPE、FLAC、STABL			
摘要： 臺灣港區有部份碼頭建造於日據時期，至今仍繼續使用中，碼頭建造時之船舶海運規模與現今已大不相同，泊船時之衝擊力、牽引力及碼頭水深等之設計條件亦不同，因此老舊碼頭之安全性應重新檢討評估，否則一旦損毀其影響將甚大。探討分析港灣碼頭災害案例，可對現有老舊碼頭之損害原因做一探討，進而可對老舊碼頭安全性做一檢核，以提供老舊碼頭改建或補強之參考。  本研究以考慮變形性的 FLAC/SLOPE、FLAC 程式及基於極限平衡之 STABL 程式分析了解碼頭在不同影響因素下之破壞機制。首先分析高雄港 19 號碼頭坍塌案例，求得在分別受到浚挖過深、暴雨及基礎木樁腐朽等不利因素下之碼頭穩定性安全係數值，並藉由分析結果可了解在不同影響因素下之破壞機制。另 1999 年 921 大地震造成台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭各有不同程度之外移損壞，本研究亦針對台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭進行穩定性分析，再探討台中港 1 至 3 號碼頭背填土受震後液化對其穩定性之影響，分別以背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情形進行分析，得到不同液化情形之沉箱變位情形及變位量。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
96 年 4 月	80	100	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： 密 機密 極機密 絕對機密 (條件： 年 月 日解密， 公布後解密， 附件抽存後解密， 工作完成或會議終了時解密， 另行檢討後辦理解密) 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS**  
**INSTITUTE OF TRANSPORTATION**  
**MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

<b>TITLE: Cases Study of Wharf's disasters at Harbor Areas</b>			
ISBN (OR ISSN) 978-986-00-9372-8(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009600930	IOT SERIAL NUMBER 96-37-7256	PROJECT NUMBER 95- H1DA002-1
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Ya-wen PROJECT STAFF: S.Y. Lai, M.J. Hsieh PHONE: 04-26587117 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM January 2006 TO December 2006
<b>KEY WORDS: Wharf's Disasters, stability analysis, FLAC/SLOPE, FLAC, STABL</b>			
<p><b>ABSTRACT:</b></p> <p>Some wharves built in Japanese colony period are still in operation. However, the throughput has increased tremendously, and conditions of design such as the impact force and the traction force by anchoring ships and the depth of water have changed greatly as well. Therefore, it is imperative to conduct a thorough safety investigation of these wharves to prevent possible damages from wharf's operations. Conducting a study on wharf's disasters cases and evaluating the safety of old wharves are to provide references for wharf reconstruction or enhancement.</p> <p>In this study, three computer's programming, by the name of FLAC/SLOPE, FLAC and STABL, were used to realize the mechanical characteristic of damages in different situations. That FLAC/SLOPE and FLAC take deformation characteristic into account and STABL considers extreme equilibrium was the first topic. We first analyze the stability of Kaohsiung Harbor No.19 wharf's disaster, under some harmful circumstances of water depth over digging, erosion of woodpiles and a severe rainstorm. We also evaluate the stability of No.1~4 caisson style wharves damaged by 921 earthquake in 1999 at Taichung Harbor. Then we evaluate the effect on stability when backfilled soil was liquefied at No.1~3 wharves. At last, we analyze the deformation characteristic in three different situations including backfilled soil was liquefied, non- liquefied and partly liquefied.</p>			
DATE OF PUBLICATION April 2007	NUMBER OF PAGES 80	PRICE 100	CLASSIFICATION RESTRICTED    CONFIDENTIAL SECRET        TOP SECRET UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication do not necessarily represent those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 港灣地區大地災害調查與常態監測之研究—港灣碼頭 災害案例之探討分析(1/2)

## 目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
圖目錄	V
表目錄	IX
第一章 前言	1-1
1.1 研究緣起	1-1
1.2 研究目的	1-2
1.3 研究範圍與限制	1-2
1.4 研究方法	1-2
1.5 研究內容與流程	1-2
第二章 相關文獻回顧	2-1
2.1 重力式碼頭穩定性分析	2-1
2.2 方塊式碼頭穩定性分析	2-3
2.3 其他相關研究報告	2-4
第三章 老舊碼頭遭颱風豪雨之災害案例分析	3-1
3.1 分析程式之簡介	3-1
3.2 19 號老舊碼頭之背景資料	3-4
3.3 碼頭基礎土壤承載力分析	3-7

3.4	碼頭滑動穩定性分析-----	3-7
3.5	碼頭傾倒穩定性分析-----	3-13
3.6	碼頭圓弧滑動分析-----	3-18
3.7	小結-----	3-32
第四章	台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭案例分析-----	4-1
4.1	分析程式之簡介-----	4-1
4.2	台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭靜態穩定性分析-----	4-2
4.3	台中港 1~3 號碼頭受震分析-----	4-11
4.4	小結-----	4-19
第五章	結論與建議-----	5-1
5.1	結論-----	5-1
5.2	建議-----	5-2
參考文獻	-----	6-1

## 圖目錄

圖 2-1	重力式碼頭之設計流程-----	2-1
圖 2-2	對水平接縫而言穩定驗算時牆體所取之範圍-----	2-3
圖 2-3	不計入牆體重量之例-----	2-4
圖 3-1	STABL 程式之分析流程圖 -----	3-2
圖 3-2	FLAC/SLOPE 程式之分析流程圖 -----	3-3
圖 3-3	碼頭結構斷面圖-----	3-4
圖 3-4	鑽探孔柱狀土層資料-----	3-5
圖 3-5	平時正常水位情形主動土壓力及水壓力分佈圖-----	3-8
圖 3-6	碼頭方塊及其上之土砂編號代碼-----	3-10
圖 3-7	平時正常水位情形抗滑動安全係數圖-----	3-10
圖 3-8	暴雨時情形主動土壓力及水壓力分佈圖-----	3-11
圖 3-9	暴雨時滑動安全係數圖-----	3-12
圖 3-10	平時正常水位情形傾倒安全係數圖-----	3-15
圖 3-11	暴雨時抗傾倒安全係數圖-----	3-17
圖 3-12	水深 A-A 及 B-B 剖面圖 -----	3-19
圖 3-13	沉泥質粘土 $c=0.6t/m^2$ , 晴天、未浚挖、木樁完整分析結果	3-20
圖 3-14	沉泥質粘土 $c=0.6t/m^2$ , 晴天、未浚挖、木樁腐朽分析結果	3-21
圖 3-15	沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 未浚挖分析結果-----	3-21
圖 3-16	沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 浚挖 1.5 公尺分析結果 -----	3-22
圖 3-17	沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 浚挖 3 公尺分析結果-----	3-22
圖 3-18	沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 晴天分析結果-----	3-23

圖 3-19 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 暴雨分析結果-----	3-23
圖 3-20 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 木樁腐朽、浚挖 3 公尺並暴雨時分析 結果 -----	3-24
圖 3-21 碼頭改建後斷面圖-----	3-24
圖 3-22 碼頭改建後分析結果-----	3-25
圖 3-23 碼頭改建後 , 錨錠樁失效分析結果-----	3-25
圖 3-24 沉泥質粘土 $c=0.6t/m^2$ , 晴天、未浚挖及木樁完整時分析結果 -----	3-26
圖 3-25 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 晴天、未浚挖及木樁完整時分析結果 -----	3-26
圖 3-26 沉泥質粘土 $c=0.6t/m^2$ , 晴天、未浚挖、木樁完整時分析結果 -----	3-27
圖 3-27 沉泥質粘土 $c=0.6t/m^2$ , 晴天、未浚挖、木樁腐朽時分析結果 -----	3-28
圖 3-28 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 晴天、未浚挖、木樁完整時分析結果 -----	3-28
圖 3-29 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 晴天、未浚挖、木樁腐朽時分析結果 -----	3-29
圖 3-30 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 未浚挖時分析結果-----	3-29
圖 3-31 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 浚挖 1.5 公尺時分析結果 -----	3-30
圖 3-32 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 浚挖 3 公尺時分析結果-----	3-30
圖 3-33 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 晴天時分析結果-----	3-31
圖 3-34 沉泥質粘土 $c=2.5t/m^2$ , 暴雨時分析結果-----	3-31
圖 3-35 木樁腐朽、浚挖 3 公尺並暴雨時分析結果-----	3-32
圖 4-1 FLAC 程式之分析流程圖 -----	4-2

圖 4-2	台中港 1-3 號碼頭斷面圖	4-3
圖 4-3	主動土壓力及水壓力分佈圖	4-3
圖 4-4	台中港 1-3 號碼頭 STABL 分析結果	4-5
圖 4-5	台中港 1-3 號碼頭 FLAC/SLOPE 分析結果	4-5
圖 4-6	台中港 4 號碼頭斷面圖	4-6
圖 4-7	主動土壓力及水壓力分佈圖	4-6
圖 4-8	台中港 4 號碼頭 STABL 分析結果	4-7
圖 4-9	台中港 4 號碼頭 FLAC/SLOPE 分析結果	4-8
圖 4-10	台中港 4A 號碼頭斷面圖	4-8
圖 4-11	主動土壓力及水壓力分佈圖	4-9
圖 4-12	台中港 4A 號碼頭 STABL 分析結果	4-10
圖 4-13	台中港 4A 號碼頭 FLAC/SLOPE 分析結果	4-10
圖 4-14	背填土壤未液化之沉箱式碼頭示意圖	4-11
圖 4-15	背填土壤未液化之沉箱式碼頭受力示意圖	4-12
圖 4-16	背填土壤液化之沉箱式碼頭示意圖	4-12
圖 4-17	以重流體觀念解釋背填土壤液化之沉箱式碼頭受力示意圖	4-13
圖 4-18	以超額孔隙水壓解釋背填土壤液化之沉箱式碼頭受力示意圖	4-13
圖 4-19	背填土壤部份深度液化之沉箱式碼頭示意圖	4-14
圖 4-20	背填土壤部份深度液化之沉箱式碼頭受力示意圖	4-14
圖 4-21	分析網格圖	4-16
圖 4-22	未液化情形外力分佈圖	4-16
圖 4-23	未液化情形變位分析結果	4-17
圖 4-24	全部液化情形外力分佈圖	4-17

圖 4-25 全部液化情形變位分析結果-----	4-18
圖 4-26 部份深度液化情形外力分佈圖-----	4-18
圖 4-27 部份深度液化情形變位分析結果-----	4-19
圖 4-28 未液化、完全液化及部份深度液化情形變位分析結果-----	4-19

## 表目錄

表 3-1	19 號碼頭之土層性質	3-8
表 3-2	平時主動土壓力之計算表(地下水位於+0.29m)	3-9
表 3-3	平時水壓力之計算表(地下水位於+0.29m)	3-9
表 3-4	暴雨時主動土壓力之計算表(地下水位於+2.6m)	3-11
表 3-5	暴雨時水壓力之計算表(地下水位於+2.6m)	3-12
表 3-6	平時主動土壓力驅動力矩之計算表(地下水位於+0.29m)	3-13
表 3-7a	平時混凝土方塊抵抗力矩之計算表( $r=2.3, r'=1.3$ )	3-13
表 3-7b	平時土砂抵抗力矩之計算表	3-14
表 3-7c	平時混凝土塊及土砂抵抗力矩之計算表	3-14
表 3-7d	平時水壓力力矩之計算表	3-14
表 3-8	暴雨時主動土壓力之驅動力矩計算表(地下水位於+2.6m)	3-15
表 3-9a	暴雨時混凝土方塊抵抗力矩之計算表( $r=2.3, r'=1.3$ )	3-16
表 3-9b	暴雨時土砂抵抗力矩之計算表	3-16
表 3-9c	暴雨時混凝土塊及土砂抵抗力矩之計算	3-16
表 3-9d	暴雨時水壓力力矩之計算表	3-17
表 3-10	暴雨時抗傾倒安全係數之計算表	3-17
表 4-1	背填土液化、未液化、部分深度液化之受力大小	4-15

# 第一章 前言

## 1.1 研究緣起

臺灣港區有部份碼頭建造於日據時期，至今仍繼續使用中，碼頭建造時之船舶海運規模與現今已大不相同，泊船時之衝擊力、牽引力及碼頭水深等之設計條件亦不同，因此老舊碼頭之安全性應重新檢討評估，否則一旦損毀其影響將甚大。探討分析港灣碼頭災害案例，可對現有老舊碼頭之損害原因做一探討，進而可對老舊碼頭安全性做一檢核，以提供老舊碼頭改建或補強之參考。本研究將以考慮變形性的 FLAC/SLOPE、FLAC 程式及基於極限平衡之 STABL 程式分析老舊碼頭災害案例，以了解碼頭損壞之原因及特性。

高雄港 19 號碼頭即因使用年限長達五十年，而於民國 83 年 8 月 5 日凱特琳颱風豪雨後突坍陷損壞，由於造成該碼頭發生意外的原因可能有多種，本研究以數值計算及 STABL、FLAC/SLOPE 程式分析分別探討該碼頭穩定性。

另亦以數值計算及 STABL、FLAC/SLOPE 程式分析臺中港 1 至 4 號沉箱式碼頭穩定性，由於該碼頭受損於 1999 年 921 大地震時，造成台中港 1 至 3 號沉箱式碼頭外移 0.5~1.7 公尺，故本研究另以 FLAC 程式分析該碼頭土層未液化、部份液化及完全液化三種情形之變形特性。

## 1.2 研究目的

本研究目的可摘列整理如下：

1. 本研究除了以數值計算碼頭內穩定安全係數外，亦以 STABL、FLAC/SLOPE 程式分析其碼頭外穩定性，使國內港灣設計相關從業人員更能瞭解老舊碼頭受暴雨、浚挖之可能破壞模式與原因。
2. 本研究提供以 FLAC 程式靜力模式（非動力版）分析台中港 1 至 3 號沉箱式碼頭土層未液化、部份液化及完全液化三種情形之變形特性，以探討液化對沉箱式碼頭之影響。

3. 藉由本研究之探討，希望能提醒各港相關從業人員重視既有老舊碼頭之安全性及其耐震能力評估，並研提相關地質改良或結構補強之因應對策，以減少未來因豪雨、浚挖或地震所可能產生的災損。

### 1.3 研究範圍與限制

本研究重點在探討既有碼頭之穩定性分析(包括內、外穩定性)，求得碼頭在不同情況下之安全係數值，另再以 FLAC 程式靜態模式探討液化對沉箱式碼頭之影響，求得其變位情形，由於 FLAC 程式購買版本的問題，本研究對於以 FLAC 動力版分析沉箱式碼頭受震變位情形並不予著墨。

### 1.4 研究方法

本研究主要分析碼頭的穩定性，高雄港 19 號碼頭坍塌案例是混凝土方塊式的重力式碼頭，首先計算碼頭的內穩定，分析碼頭滑動、傾倒、承載力安全係數，再以 STABL、FLAC/SLOPE 程式分析碼頭的外穩定。

另臺中港 1 至 4 號碼頭是屬於沉箱式碼頭，亦先計算碼頭的內穩定，分析碼頭滑動、傾倒、承載力安全係數，再以 STABL、FLAC/SLOPE 程式分析碼頭的外穩定，最後再以 FLAC 分析臺中港 1 至 3 號碼頭受震後土層未液化、完全液化及部分深度液化此三種情形其變位情形。

### 1.5 研究內容與流程

本研究之主要工作項目如下所示。

1. 相關文獻研讀。
2. 國內碼頭災害案例蒐集與整理。
3. 案例分析及破壞模式探討。
4. 結論與建議。

## 第二章 相關文獻回顧

本章將針對基準規定之重力式碼頭穩定性分析、方塊式碼頭穩定性分析及其他相關研究報告一一說明。

### 2.1 重力式碼頭穩定性分析

重力式碼頭依其牆體型式可分為沉箱式碼頭、L型塊碼頭、混凝土塊碼頭、空心方塊碼頭及現場澆鑄混凝土式碼頭等。重力式碼頭之設計，其流程如圖 2-1 所示：

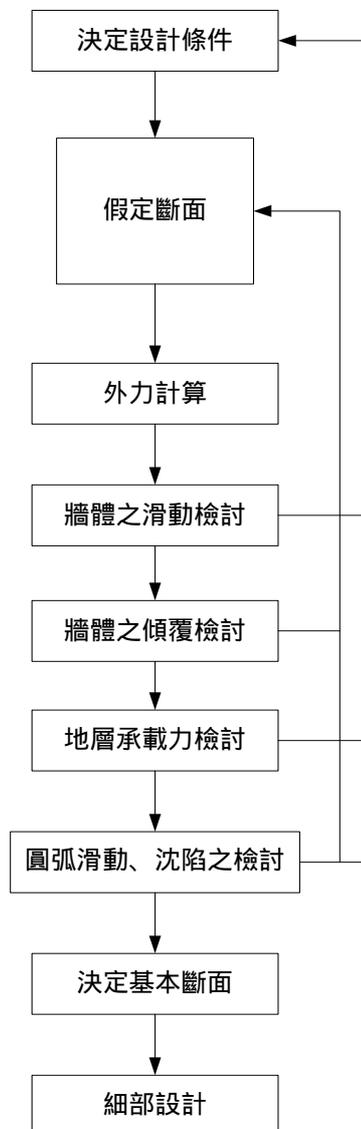


圖 2-1 重力式碼頭之設計流程

有關重力式碼頭之安定計算，通常應檢討下列各項：1. 牆體滑動。2. 基礎承載力。3. 牆體傾倒。4. 圓弧形滑動及沉陷。

### 1. 牆體滑動之檢討

重力式碼頭之滑動，應滿足下式：

$$F \leq \frac{fw}{P}$$

式中

W：作用於牆體之垂直合力（t/m）

P：作用於牆體之水平合力（t/m）

f：牆底與基礎之摩擦係數

F：安全係數

安全係數：平常時 1.2 以上；地震時 1.0 以上。

### 2. 基礎承載力之檢討

重力式碼頭之牆體，依結構型式分為淺基礎或樁基礎進行承載力之檢討，以策安全。

### 3. 牆體傾覆之檢討

重力式碼頭之傾覆檢討必須滿足下式：

$$F \leq \frac{Wt}{Ph}$$

式中

W：作用於牆體之全部垂直力（t/m）

P：作用於牆體之全水平力（t/m）

t：牆體前趾與作用於牆體全部垂直力合力作用點間之距離（m）

h：牆體底面至作用於牆體全部水平力合力作用點之高（m）

F：安全係數

安全係數：平常時 1.2 以上；地震時 1.1 以上。

## 2.2 方塊式碼頭穩定性分析

方塊式碼頭每一水平層均須作結構之穩定檢討，假設牆體之取法如下：

通常方塊間均設有凹凸楔樁，故其楔合度很好，但在安全檢討時，不考慮其效果。

### 2.2.1 滑動之檢討

如圖 2-2 所示，在所需檢討之平面上，將通過牆體後踵垂直面前之部份當作牆體計算之。

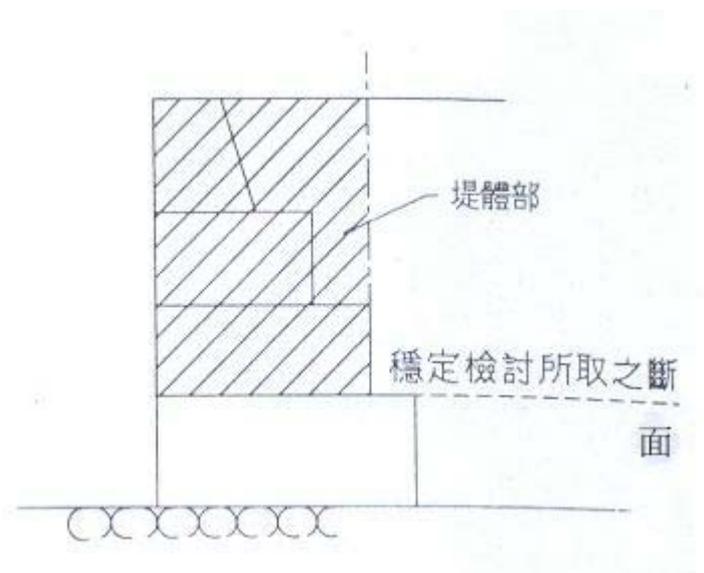


圖 2-2 對水平接縫而言穩定驗算時牆體所取之範圍

### 2.2.2 傾覆之檢討

在擬驗算之水平載面上，將通過海側一方塊上所載方塊群之最後端垂直面前之背填材料，當作牆體計算，如圖 2-3 所示。計算傾覆抵抗力時，不計方塊 B 及其上土砂 A 之重量。

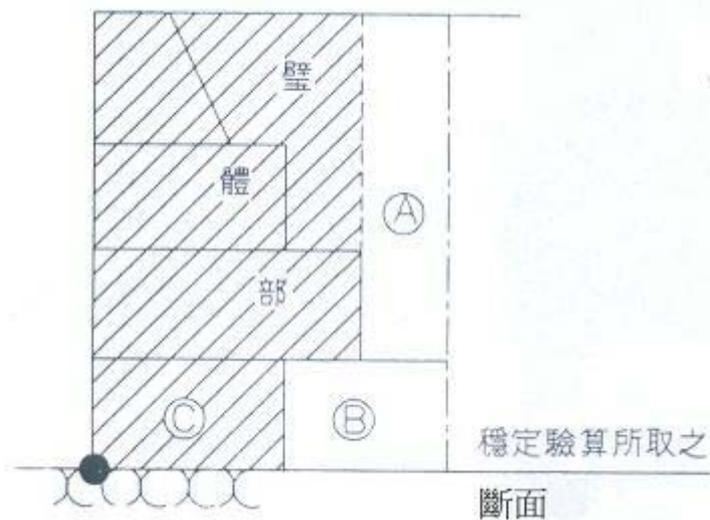


圖 2-3 不計入牆體重量之例

### 2.2.3 基礎承载力檢討

若以傾覆之假定斷面計算時，安全係數會很小。但若牆體載重局部集中的話，該部份將產生沉陷，而實際上載重並無極端集中，而是有一相當範圍分佈。而且檢討現有結構物之安定結果，以通過假定斷面牆體後踵之垂直面前之部份當作牆體計算亦無妨礙，用空心方塊時，牆體及中間填充物地層反力不同，因此最好下層方塊以一體性為佳。

## 2.3 其他相關研究報告

本節將分別對本中心過去之「高雄港 19 號碼頭坍塌原因檢討報告」及「港灣地區大地監測調查與液化防治之研究 (3/3) - 第六章 液化對沉箱式碼頭穩定性及位移量之影響分析」二本報告作一簡單之回顧，說明如下：

### 2.3.1 高雄港 19 號碼頭坍塌原因檢討報告

高雄港 19 號碼頭於民國 83 年 8 月 5 日下午約 16 時凱特琳颱風豪雨後突然坍塌損壞，長度約 100 公尺，岸壁本體全部沒入水下，碼頭面上之油駁船加油設施全毀，有部份油管斷裂及位移變形，部份之混凝土方塊被推擠散佈於離法線約 10 公尺以外之海床，緊急辦理拋

石搶修工程以求穩定。

該報告根據已搜集之資料研判，19 號碼頭發生坍塌主要原因綜合整理如下：

1. 碼頭牆背地下水位急速升高、造成堤體滑動破壞。
2. 因軟弱粘土薄層存在，導致對圓弧滑動之抵抗力減弱。
3. 因海床浚挖，導致圓弧滑動抵抗力矩降低。
4. 19 號碼頭基礎建造當時雖以木樁加強基礎承载力，但因長度不足且恰砌置於軟弱粘土薄層之上，根據該報告分析結果，因最可能之破壞面圓弧均穿過此軟弱粘土層，故木樁之存在對圓弧滑動抵抗之幫助應甚為有限。

### 2.3.2 「港灣地區大地監測調查與液化防治之研究 (3/3) - 第六章液化對沉箱式碼頭穩定性及位移量之影響分析」

1999 年 921 大地震，臺中港之地表水平最大加速度  $a_{hmax}$  為 0.163g，造成臺中港 1 至 3 號沉箱式碼頭外移 0.5 1.7 公尺，4 號沉箱碼頭外移 0 0.5 公尺，4A 號沉箱碼頭輕微外移(港，1999)，1995 年日本發生阪神大地震，神戶港之地表水平最大加速度  $a_{hmax}=0.55g$ ，造成神戶港碼頭 岸壁外移 2 5.9 公尺，港灣機能全面癱瘓(張 賴，2000)。使土壤液化是否會造成側向構造物之不穩定性的問題再次引起關切。因此，該報告針對港灣碼頭受到地震力時，其抗滑動之穩定性加以探討。

港灣碼頭有許多為沉箱式基礎所構築而成，在受到地震力時，不但碼頭本身有慣性力，背填土會引致動態土壓力及動態水壓力，若背填土壤發生液化，亦會產生液化之側壓力，造成港灣碼頭更加不穩定。為了探討液化對沉箱式碼頭或海堤穩定性之影響，茲分別以背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情形進行分析。

由 921 地震臺中港 1 4A 碼頭之穩定性之實例分析顯示：

1. 碼頭背填土若未液化，921 地震臺中港 1 3 碼頭其抗滑動安全係數， $F_s=0.95$  1.03，碼頭位移量分析結果為 0.21 公分，碼頭應屬

於穩定與不穩定之臨界附近，不致於發生外移 52 至 168 公分之現象。

2. 碼頭背填土若全部液化，921 地震臺中港 1 3 碼頭其抗滑動安全係數， $F_s=0.60$ ，碼頭位移量分析結果為 326 公分，碼頭應屬於極不穩定而向港側大移動。
3. 由賴、謝 (2000)之液化潛能分析得知，921 地震臺中港 1 3 碼頭後線土層，並未全部液化，其液化土層約為地表下 2.8 14m，即水力回填砂之深度(2.8 14m)液化，其抗滑動安全係數， $F_s=0.73$ ，其  $F_s$  雖較全部液化為高，但碼頭仍很不穩定，碼頭位移量分析結果為 93 公分，與實測之位移量相當，因此 1~3 號碼頭位移量 52-168 公分，應為背填土壤部分深度液化所造成。
4. 921 地震臺中港 1 3 碼頭向海側移動 0.5 至 1.7 公尺之原因，除了地震引致沉箱之慣性力外，可能是背填土部份深度液化，增加之側壓力所造成。若全部液化，其超額孔隙水壓力及動流體壓力產生之側壓力約為未液化主動土壓力之 2.4 倍，則碼頭不穩定之移動可能更大。
5. 由臺中港 1 3、4、4A 碼頭抗滑動之安全係數  $F_s$  比較可知：1 3 碼頭最小、4 碼頭次之、4A 碼頭較大，因此 921 地震時，1 3 碼頭最不穩定外移最大。而 4A 碼頭後線因有水泥圓倉之載重，其背填土壤之有效應力已大於  $2 \text{ kg/cm}^2$ ，不太可能發生液化，其抗滑動之安全係數  $F_s=1.00 \sim 1.07$ ，因此 921 地震時，4A 號沉箱碼頭幾乎沒有外移。

## 第三章 老舊碼頭遭颱風豪雨之災害案例分析

臺灣港區有部份碼頭建造於日據時期，至今仍繼續使用中，碼頭建造時之船舶海運規模與現今已大不相同，泊船時之衝擊力、牽引力及碼頭水深等之設計條件亦不同，因此老舊碼頭之安全性應重新檢討評估，否則一旦損毀其影響將甚大。探討分析港灣碼頭災害案例，可對現有老舊碼頭之損害原因做一探討，進而可對老舊碼頭安全性做一檢核，以提供老舊碼頭改建或補強之參考。

高雄港 19 號碼頭於民國 83 年 8 月 5 日下午約 16 時凱特琳颱風豪雨後突然坍塌損壞，長度約 100 公尺，岸壁本體全部沒入水下，碼頭面上之油駁船加油設施全毀，有部份油管斷裂及位移變形，部份之混凝土方塊被推擠散佈於離法線約 10 公尺以外之海床，緊急辦理拋石搶修工程以求穩定，之後於 86 年該碼頭辦理改建工程。

本研究除了以傳統之土壤承载力分析、滑動分析、傾倒分析，探討 19 號老舊碼頭損壞之原因；更進一步以基於極限平衡之 STABL 程式及考慮變形性的 FLAC/SLOPE 程式，數值模擬分析 19 號老舊碼頭災害案例，以了解碼頭損壞之特性，並探討老舊碼頭改建後之穩定性。

### 3.1 分析程式之簡介

#### 3.1.1 STABL 邊坡穩定分析程式

STABL 為解決一般邊坡穩定問題的程式，其使用的方法為改編的 Modified Bishop Method，改編後使其可分析假設的剪力面。藉由限制的平衡程序，可得到邊坡安全係數。破壞面的尋求可產生三種形式，圓形破壞面、滑動區塊破壞面和不規則破壞面。程式能力包含：一般邊坡剖面描述、地表載重、孔隙壓力（與地下水位、一區定義一常數、超載的一定比例、或以上三種的組合有關）、異向性強度定義、擬靜態地震力。

STABL 是由 FORTRAN IV 撰寫的兩向度限制平衡方法的邊坡穩定處理程式，邊坡安全係數的計算採用切片法，本版本採用的是改編的修正 Bishop Method，此改編後使分析不僅只能圓形破壞面。破壞面產生有圓形破壞面、滑動區塊破壞面、不規則破壞面。另亦可分析已定義的指定的試驗破壞面。

STABL 可以分析包括下列情形：不同種類的土壤、異向性土壤強度性質、由於剪力造成的超額孔隙水壓力、靜地下水及地表水、擬靜態地震力及地表載重。STABL 分析流程如圖 3-1 所示：

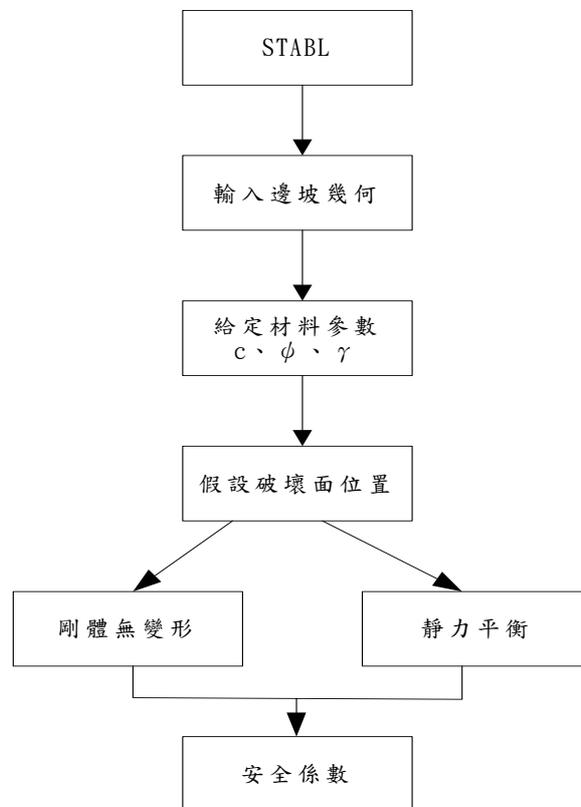


圖 3-1 STABL 程式之分析流程圖

### 3.1.2 FLAC/SLOPE 分析程式

FLAC/SLOPE 是迷你版的 FLAC 程式，用以計算邊坡穩定分析之安全係數，提供傳統極限平衡法求安全係數的另一種選擇，極限平衡法是基于切片法，假設數個破壞面（如破壞面位置、切片間力的角度）後再找出安全係數值最低的破壞面。另 FLAC/SLOPE 則提供應力一位

移、平衡與組合律的全解，藉由執行一系列的模擬，改變其強度性質（即折減剪力強度），可找到破壞面位置及其安全係數。FLAC/SLOPE 其較優於極限平衡法的項目如下：

- 1.破壞模式自由發展，不須先指定破壞面的範圍。
- 2.不須人工參數（如切片間力的角度）設定。
- 3.可模擬出多個破壞面或內部降伏的真實情況。
- 4.結構物（如岩栓、土釘或地工織物）可模擬為真實結合且一起變形的元件，而不是以等值力模擬。
- 5.其機制於運動學上是合理的，而非如極限平衡法只考慮力而已。

FLAC/SLOPE 分析流程如圖 3-2 所示：

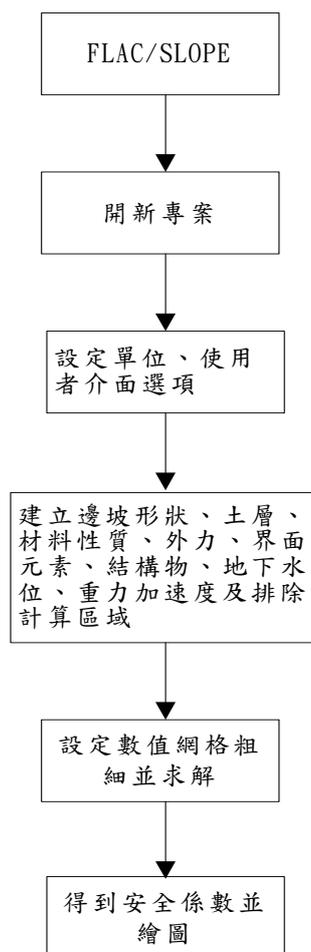


圖 3-2 FLAC/SLOPE 程式之分析流程圖

## 3.2 19 號老舊碼頭之背景資料

### 1. 潮汐資料

高雄港潮汐站位置有二處，分別位於第 10 號碼頭及第二港口第 110 號碼頭，根據 10 號碼頭潮位站 83 年 8 月 5 日量測資料，最高潮位發生於 06:00，潮高 1.42m，最低潮位發生於 14:00，潮高 0.55m，經查 19 號碼頭坍塌時間為下午 3 時 55 分，當時潮位為 0.60m 至 0.65m 之間，正好是由低潮位開始漲潮時。

### 2. 雨量資料

凱特琳颱風其後引進之西南氣流雨急時長，依氣象資料顯示碼頭崩塌前一日（8 月 4 日）降雨量高達 184.5 公釐，崩塌前連續兩日累積降雨量則達 283.5 公釐，致高雄地區嚴重積水，為三十年來罕見。

### 3. 碼頭結構

高雄港 18、19 及 20 號碼頭皆屬混凝土方塊重力式碼頭，設計水深為 -9 公尺，碼頭長度分別為 150、151.3 及 150.7 公尺，堤基為厚約 1.5 公尺之卵石基礎拋石，靠近基趾部分加打長 7 公尺、間距 1 公尺之木樁四排，其碼頭結構斷面圖詳圖 3-3。

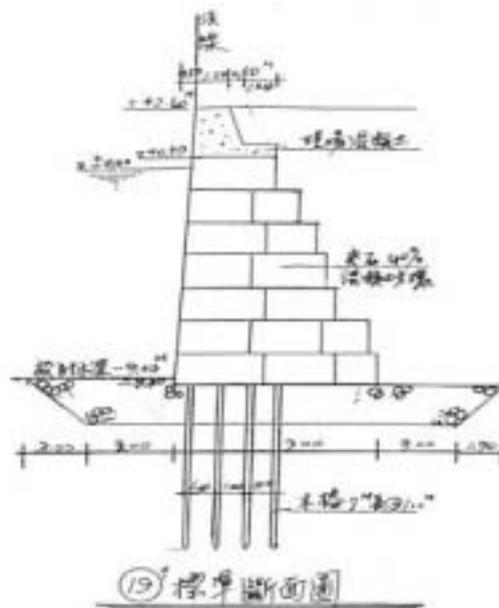


圖 3-3 碼頭結構斷面圖

#### 4.土壤性質

高雄港 19 至 21 號碼頭間在民國 48 年曾進行地質鑽探，鑽探孔柱狀土層資料如圖 3-4，本研究採用第 51 號鑽孔資料，19 號碼頭附近基礎土層由上而下分佈如下：

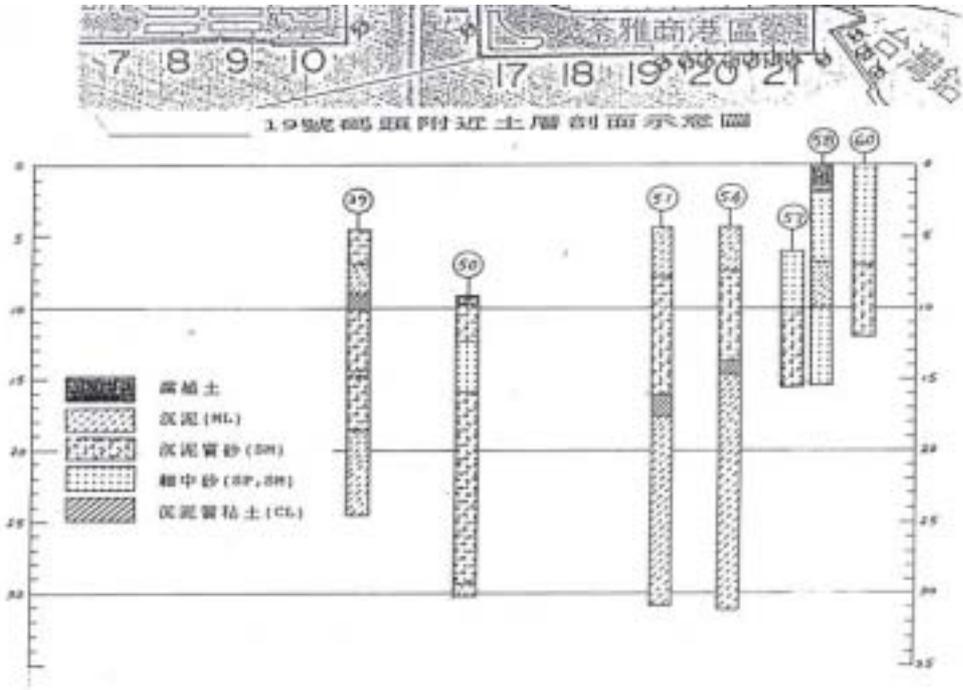


圖 3-4 鑽探孔柱狀土層資料

##### (1)沉泥層 (ML)

除局部地點發現有機質腐植土外，整個高雄港區於接近海床面，大致為厚約 2 公尺至 5 公尺之砂質或粘土質沉泥所覆蓋，例如 19 號碼頭分佈於-4m 至-7.8m 間。本層次含水量 30% 至 50%、土壤單位重  $1.9\text{t}/\text{m}^3$  至  $2.0\text{t}/\text{m}^3$  間，標準貫入試驗 N 值為 0 或 1、屬極為疏鬆軟弱之土壤，為基礎之不良承載層，考慮碼頭結構基礎安全，本層次應予挖除置換或採用深基礎穿過此層。19 號碼頭結構基礎穿過此層。

##### (2)沉泥質砂層 (SM)

極疏鬆軟弱沉泥層之下為灰色沉泥質砂層，此層現地標準貫

入試驗 N 值隨地點不同而異，惟大致在 30 以下，屬疏鬆至中等緊密程度，例如 19 號碼頭附近本層次分佈於高程-7.8m 至-16.1m 之間，N 值介於 15 至 22 間。19 號碼頭結構基礎高程為-9m，恰置於此層次。本層次土壤含水量在 20% 至 30% 間，土壤單位重 2.0 至 2.2t/m<sup>3</sup> 間，估計土壤有效內摩擦角  $\phi$  值約在 28 度至 35 度之間。

### (3) 沉泥質粘土層 (CL)

19 號及 20 號碼頭附近鑽探資料均發現有一層厚約 1 公尺至 1.5 公尺之沉泥質粘土層、呈灰色，例如 19 號碼頭附近本層次分佈於高程-16.1m 至-17.6m 之間，由於無現場標準貫入試驗資料，其強度未知，惟根據高雄港區鑽探資料顯示，此層粘性土層標準貫入試驗 N 值變化約在 1 至 5 之間、屬極軟弱至中等堅實粘土，平均含水量為 25%、土壤單位重 1.97t/m<sup>3</sup>。由於本粘土薄層上下均為透水性較高之砂土層，在經過碼頭結構荷重長期壓密作用下，其剪力強度隨時間應有適度的提高，估計土壤不排水剪力強度  $S_u$  約在 0.6t/m<sup>2</sup> 至 3.5t/m<sup>2</sup> 間。本粘性土層可能造成上部結構沉陷、圓弧滑動抵抗力減弱等不良影響。

### (4) 沉泥質砂或砂質沉泥層 (SM、ML)

本層次呈灰色、沉泥含量較高、於 19 號碼頭附近其分佈位置在高程-17.6m 以下、現場標準貫入試驗 N 值 19 號碼頭在 22 至 52 間，屬中等緊密程度至極緊密程度土壤。平均含水量 21.5%、土壤單位重 2.03t/m<sup>3</sup>。估計土壤有效內摩擦角  $\phi$  值在 35 度至 40 度之間。

根據地層資料研判，在圓弧滑動影響範圍內之土層為疏鬆之沉泥質砂層及厚約 1.5 公尺之沉泥質粘土層，疏鬆沉泥質砂層標準貫入試驗 N 值在 5 至 30 間，推測土壤有效內摩擦角約在 28 至 35 度間。粘土層則無任何資料可供研判其強度，惟根據高雄港區地層特性，此層 N 值變化約在 1 至 5 之間，估算其不排水剪力強度約在 0.6t/m<sup>2</sup> 至 3.5t/m<sup>2</sup> 間。

### 3.3 碼頭基礎土壤承载力分析

19 號碼頭設計水深為高程-9m，碼頭基礎恰置於疏鬆至中等緊密沉泥質砂層上，其標準貫入試驗 N 值在 15 至 22 之間，由於無試驗室土壤試驗資料，故其內摩擦角未知，惟根據 N 值及鄰近土層資料研判，內摩擦角合理之範圍約在 28 度至 35 度之間，而碼頭基礎又有厚 1.5 公尺之卵石拋石，故其土壤容許承载力保守估計在 30t/m<sup>2</sup> 以上。

19 號碼頭上部結構荷重估計約在 20t/m<sup>2</sup> 以下，故基礎土壤承载力應在容許範圍內，惟若碼頭基趾卵石拋石受到淘刷致偏心荷重加大，則基礎容許承载力可能不足。

### 3.4 碼頭滑動穩定性分析

重力式碼頭之滑動，應滿足式(3-1):

$$F = \frac{fW}{P} \dots\dots\dots (3-1)$$

式中

W：作用於堤體之垂直合力

P：作用於堤體之水平合力

f：堤體與基礎之摩擦係數，混凝土方塊與方塊間為 0.5，方塊與卵石基礎拋石間為 0.6

F：安全係數

本研究假設二種情況，即平時正常水位及暴雨時地下水位與碼頭面齊平時，分析堤體抗滑動穩定安全係數隨深度變化情形。

#### 1. 平時之抗滑動穩定分析

作用於堤體之水平合力，主要有堤體背後土壤之主動土壓力與水壓力，其中計算主動土壓力之主動土壓力係數如式(3-2)所示:

$$K_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i - \phi)}{\cos^2 \phi \cos(\delta + \phi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \sin(\phi_i - \beta)}{\cos(\delta + \phi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \dots\dots\dots(3-2)$$

式中， $\phi=27^\circ$ ， $\delta=15^\circ$ ， $\beta=0^\circ$ ，土層性質如表 3-1。

表 3-1 19 號碼頭之土層性質

土層性質	背填土壤 (+2.6m~-7.8m)	背填土壤 (-7.8m~-9.3m)	基礎土壤
溼單位量 (t/m <sup>3</sup> )	1.84	1.84	2.0
飽合單位量 (t/m <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.4
內摩擦角 $\phi_i$ (°)	30	32	35
$K_{ai}$	0.56	0.54	

平時正常水位：潮位高程於 0m，陸側水位常時為殘留水位+0.29m(即取最高潮差之 1/3，即(1.42-0.55)/3=0.29m)。

暴雨時水位：潮位高程於+0.65m，陸側水位與碼頭面齊平即+2.6m。

平時正常水位情形主動土壓力及水壓力分佈圖如圖 3-5：

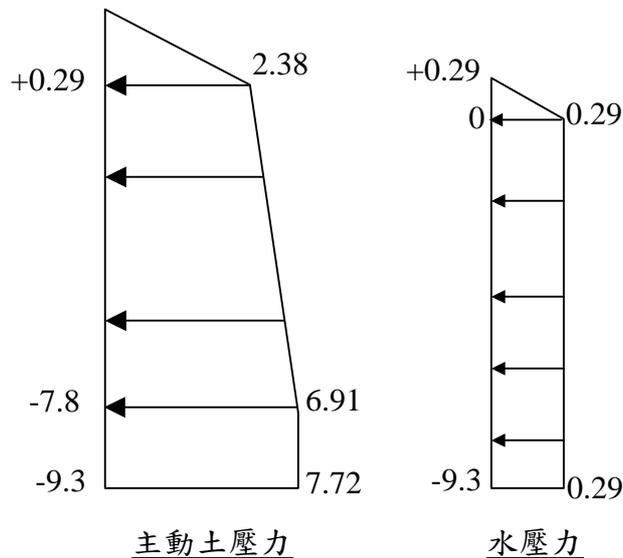


圖 3-5 平時正常水位情形主動土壓力及水壓力分佈圖

(1) 平時主動土壓力：平時主動土壓力之計算如表 3-2。

表 3-2 平時主動土壓力之計算表(地下水位於+0.29m)

EL (m)	深度 (m)	土壓力 (t/m)	主動土壓力 (t/m)
0.5	2.1	$1.84 \times 2.10 \times 0.56 = 2.16$	$2.16 \times 2.1 / 2 = 2.27$
-1.2	3.8	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (3.80 - 2.31) \times 0.56 = 3.21$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 3.21) \times (3.8 - 2.31) / 2 = 6.91$
-2.4	5	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (5.00 - 2.31) \times 0.56 = 3.89$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 3.89) \times (5.0 - 2.31) / 2 = 11.18$
-3.7	6.3	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (6.30 - 2.31) \times 0.56 = 4.61$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 4.61) \times (6.3 - 2.31) / 2 = 16.69$
-5.2	7.8	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (7.80 - 2.31) \times 0.56 = 5.45$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 5.45) \times (7.8 - 2.31) / 2 = 24.24$
-6.6	9.2	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (9.20 - 2.31) \times 0.56 = 6.24$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 6.24) \times (9.2 - 2.31) / 2 = 32.44$
-8.1	10.7	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (10.4 - 2.31) \times 0.56 + 1 \times (10.70 - 10.4) \times 0.54 = 7.07$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 6.91) \times (10.4 - 2.31) / 2 + (7.07 + 6.91) \times (10.7 - 10.4) / 2 = 42.42$
-9.3	11.9	$1.84 \times 2.31 \times 0.56 + 1 \times (10.4 - 2.31) \times 0.56 + 1 \times (11.90 - 10.4) \times 0.54 = 7.72$	$2.38 \times 2.31 / 2 + (2.38 + 6.91) \times (10.4 - 2.31) / 2 + (7.72 + 6.91) \times (11.9 - 10.4) / 2 = 51.3$

(3) 平時水壓力：平時水壓力之計算如表 3-3。

表 3-3 平時水壓力之計算表(地下水位於+0.29m)

EL (m)	深度 (m)	海測水壓力 (t/m)	陸測水壓力 (t/m)	殘留水壓力 (t/m)
0.5	2.1	0	0.00	0.00
-1.2	3.8	0.72	1.11	0.39
-2.4	5.0	2.88	3.62	0.74
-3.7	6.3	6.85	7.96	1.12
-5.2	7.8	13.52	15.07	1.55
-6.6	9.2	21.78	23.74	1.96
-8.1	10.7	32.81	35.20	2.39
-9.3	11.9	43.25	45.98	2.74

(3) 平時抗滑動之安全係數: 由於 19 號碼頭屬混凝土方塊重力式碼頭，因此需分別計算每一方塊之抗滑動安全係數，碼頭方塊之土砂編號代碼如圖 3-6，每一方塊之抗滑動安全係數如圖 3-7。

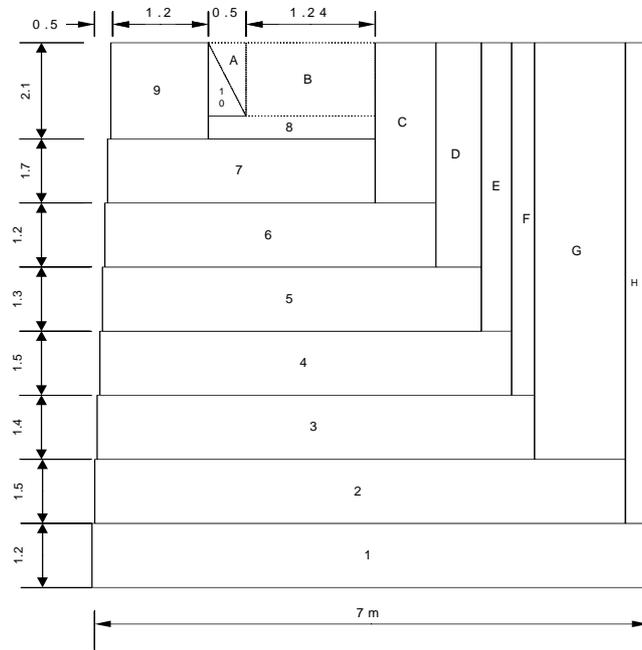


圖 3-6 碼頭方塊及其上之土砂編號代碼

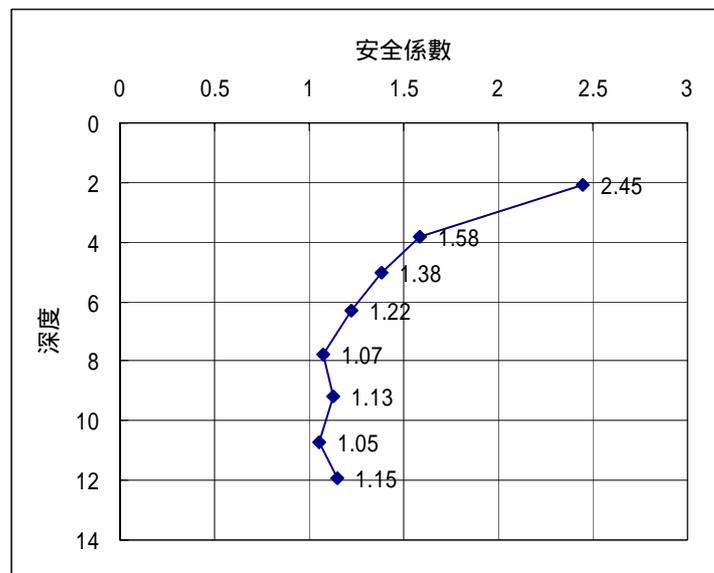


圖 3-7 平時正常水位情形抗滑動安全係數圖

由圖 3-7 顯示：平時正常水位之情況下，19 號碼頭之抗滑動安全係數皆大於 1.0，表示碼頭相當穩定，唯 8m 及 11m 方塊之安全係數接近 1.0，已接近滑動穩定之臨界。

## 2. 暴雨時之抗滑動穩定分析

暴雨情形之主動土壓力及水壓力分佈圖如圖 3-8 所示：

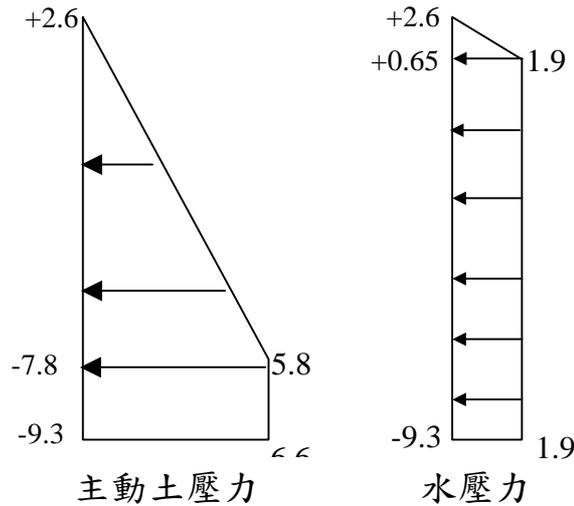


圖 3-8 暴雨時情形主動土壓力及水壓力分佈圖

(1) 暴雨時之主動土壓力：暴雨時主動土壓力之計算如表 3-4。

表 3-4 暴雨時主動土壓力之計算表(地下水位於+2.6m)

EL (m)	深度 (m)	土壓力 (t/m)	主動土壓力 (t/m)
0.5	2.1	$1 \times 2.1 \times 0.56 = 1.18$	$2.1 \times 1.18 / 2 = 1.24$
-1.2	3.8	$1 \times 3.8 \times 0.56 = 2.13$	$3.8 \times 2.13 / 2 = 4.05$
-2.4	5	$1 \times 5.0 \times 0.56 = 2.8$	$5.0 \times 2.80 / 2 = 7$
-3.7	6.3	$1 \times 6.3 \times 0.56 = 3.53$	$6.3 \times 3.53 / 2 = 11.12$
-5.2	7.8	$1 \times 7.8 \times 0.56 = 4.37$	$7.8 \times 4.37 / 2 = 17.04$
-6.6	9.2	$1 \times 9.2 \times 0.56 = 5.15$	$9.2 \times 5.15 / 2 = 23.69$
-8.1	10.7	$1 \times 10.4 \times 0.56 + 1 \times (10.7 - 10.4) \times 0.54 = 5.99$	$5.82 \times 10.4 / 2 + (5.99 + 5.82) \times (10.7 - 10.4) / 2 = 32.04$
-9.3	11.9	$1 \times 10.4 \times 0.56 + 1 \times (11.9 - 10.4) \times 0.54 = 6.63$	$5.82 \times 10.4 / 2 + (6.63 + 5.82) \times (11.9 - 10.4) / 2 = 39.6$

(2)暴雨時之水壓力：暴雨時水壓力之計算如表 3-5。

表 3-5 暴雨時水壓力之計算表(地下水位於+2.6m)

EL (m)	深度 (m)	海測水壓力 (t/m)	陸測水壓力 (t/m)	殘留水壓力 (t/m)
0.5	2.1	0	2.21	2.21
-1.2	3.8	1.71	7.22	5.51
-2.4	5.0	4.65	12.5	7.85
-3.7	6.3	9.46	19.85	10.39
-5.2	7.8	17.11	30.42	13.31
-6.6	9.2	26.28	42.32	16.04
-8.1	10.7	38.28	57.25	18.97
-9.3	11.9	49.5	70.81	21.31

(3)暴雨時抗滑動之安全係數：每一方塊之抗滑動安全係數如圖 3-9。

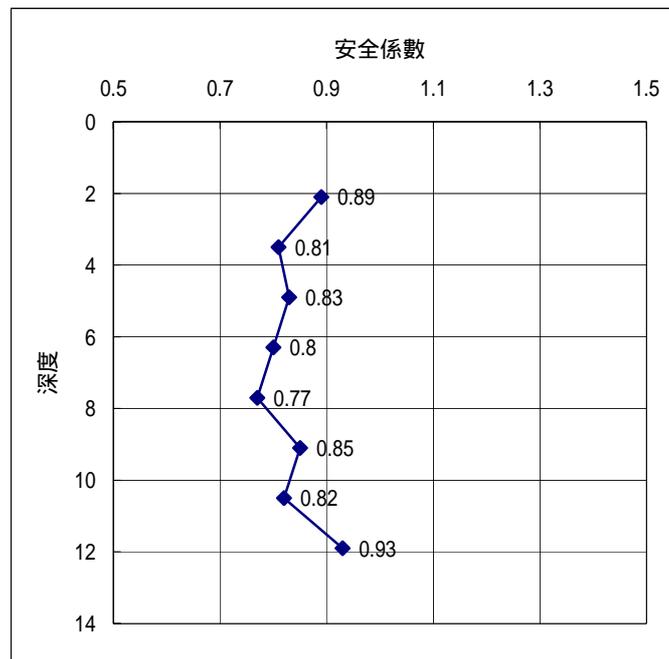


圖 3-9 暴雨時滑動安全係數圖

由圖 3-9 顯示：暴雨時地下水水位之情況下，19 號碼頭每一方塊之抗滑動安全係數皆小於 1，表示碼頭每一方塊皆相當不穩定。

### 3.5 碼頭傾倒穩定性分析

#### 1. 平時正常水位情形：

(1) 主動土壓力之驅動力矩：主動土壓力驅動力矩之計算如表 3-6。

表 3-6 平時主動土壓力驅動力矩之計算表(地下水位於+0.29m)

EL(m)	深度(m)	土壓力(t/m)	主動土壓力(t/m)	主動土壓力力矩(t-m/m)
0.5	2.1	2.16	2.27	1.59
-1.2	3.8	3.21	6.91	9.16
-2.4	5.0	3.89	11.18	19.94
-3.7	6.3	4.61	16.69	37.95
-5.2	7.8	5.45	24.24	68.5
-6.6	9.2	6.24	32.44	108.9
-8.1	10.7	7.07	42.42	250.87
-9.3	11.9	7.72	51.30	307.03

(2) 抵抗力矩：平時混凝土方塊抵抗力矩之計算如表 3-7a，土砂抵抗力矩之計算如表 3-7b，混凝土方塊及土砂之抵抗力矩計算如表 3-7c，水壓力之力矩計算如表 3-7d，其中表 3-7a 及表 3-7c 之碼頭方塊及其上之土砂編號代碼如圖 3-6 所示。

表 3-7a 平時混凝土方塊抵抗力矩之計算表( $r=2.3$ ,  $r'=1.3$ )

編號	寬度(m)	高度(m)	重量(t/m)	力臂(m)	彎矩(t-m/m)
10	0.5	1.6	0.92	1.87	1.72
9	1.2	2.1	5.796	0.6	3.48
8	1.74	0.5	2.001	2.07	4.14
7	2.9	1.7	7.018	1.45	10.18
6	3.8	1.2	5.472	1.9	10.4
5	4.5	1.3	7.02	2.25	15.8
4	4.9	1.5	8.82	2.45	21.61
3	5.3	1.4	8.904	2.65	23.6
2	6.6	1.5	11.88	3.3	39.2
1	7	1.2	10.08	3.5	35.28

表 3-7b 平時土砂抵抗力矩之計算表

編號	寬度(m)	高度(m)	重量(t/m)	力臂(m)	彎矩(t-m/m)
A	0.5	1.6	0.8	2.03	1.62
B	1.24	1.6	<b>1.6</b>	2.82	4.51
C	0.8	3.8	4.888	3.84	18.77
D	0.6	5	4.386	4.54	19.91
E	0.4	6.3	3.444	5.04	<b>17.36</b>
F	0.3	7.8	3.033	5.39	16.35
G	1.2	9.2	13.812	6.14	84.81
H	0.3	10.7	3.903	6.89	26.89

表 3-7c 平時混凝土塊及土砂抵抗力矩之計算表

EL(m)	深度(m)	彎矩(t-m/m)
-2.4	5.0	32.21
-3.7	6.3	61.93
-5.2	7.8	104.61
-6.6	9.2	147.93
-8.1	10.7	192.86
-9.3	11.9	315.37

表 3-7d 平時水壓力力矩之計算表

EL (m)	抵抗力矩 (海側彎矩,t-m/m)	驅動力矩 (陸側彎矩,t-m/m)
-2.4	2.3	3.24
-3.7	8.44	10.59
-5.2	23.43	27.58
-6.6	47.92	54.51
-8.1	88.57	98.43
-9.3	134.06	147

(3)平時抗傾倒之安全係數：由表 3-6 及表 3-7 之抵抗力矩除以驅動力矩，即可得每一深度之抗傾倒安全係數，如圖 3-10 所示。由圖 3-10 顯示：平時正常水位之情況下，19 號碼頭之抗傾倒安全係數大部

份大於 1.0，表示碼頭仍相當穩定，唯 8m 及 11m 方塊之安全係數已小於 1.0，已有傾倒危險。

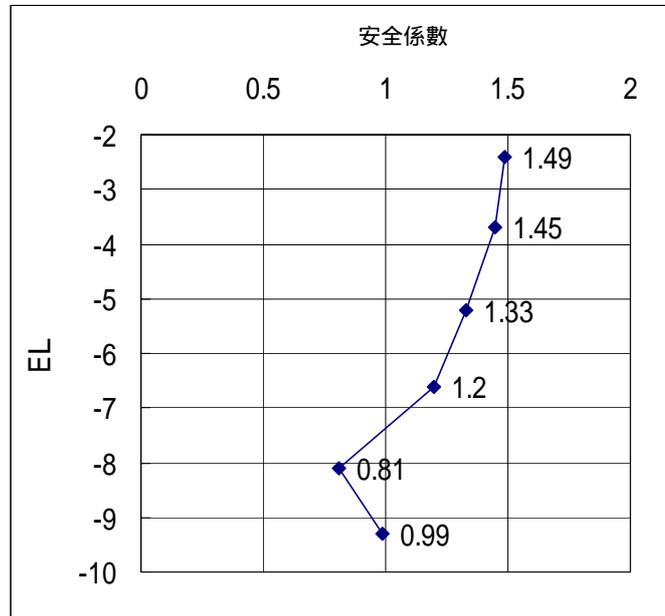


圖 3-10 平時正常水位情形傾倒安全係數圖

## 2. 暴雨時情形：

(1) 主動土壓力驅動力矩：暴雨時主動土壓力驅動力矩計算如表 3-8。

表 3-8 暴雨時主動土壓力之驅動力矩計算表(地下水位於+2.6m)

EL (m)	深度 (m)	土壓力 (t/m)	主動土壓力 (t/m)	主動土壓力力矩 (t-m/m)
0.5	2.1	1.18	1.24	0.87
-1.2	3.8	2.13	4.05	5.13
-2.4	5.0	2.80	7.0	11.67
-3.7	6.3	3.53	11.12	23.35
-5.2	7.8	4.37	17.04	44.3
-6.6	9.2	5.15	23.69	72.65
-8.1	10.7	5.99	32.04	114.34
-9.3	11.9	6.63	39.6	157.27

(2)抵抗力矩：暴雨時混凝土方塊抵抗力矩之計算如表 3-9a，土砂抵抗力矩之計算如表 3-9b，混凝土方塊及土砂之抵抗力矩計算如表 3-9c，水壓力之力矩計算如表 3-9d。

表 3-9a 暴雨時混凝土方塊抵抗力矩之計算表( r=2.3, r'=1.3)

編號	寬度(m)	高度(m)	重量(t/m)	力臂(m)	彎矩(t-m/m)
10	0.5	1.6	0.52	1.87	0.97
9	1.2	2.1	3.276	0.6	1.97
8	1.74	0.5	1.131	2.07	2.34
7	2.9	1.7	6.409	1.45	9.29
6	3.8	1.2	5.928	1.90	11.26
5	4.5	1.3	7.605	2.25	17.11
4	4.9	1.5	9.555	2.45	23.41
3	5.3	1.4	9,646	2.65	25.56
2	6.6	1.5	12.87	3.30	42.47
1	7	1.2	10.92	3.50	38.22

表 3-9b 暴雨時土砂抵抗力矩之計算表

編號	寬度(m)	高度(m)	重量(t/m)	力臂(m)	彎矩(t-m/m)
A	0.5	1.6	0.4	2.03	0.81
B	1.24	1.6	<b>0.8</b>	2.82	2.26
C	0.8	3.8	3.04	3.84	11.67
D	0.6	5.0	3.0	4.54	13.62
E	0.4	6.3	2.52	5.04	<b>12.70</b>
F	0.3	7.8	2.34	5.39	12.61
G	1.2	9.2	11.04	6.14	67.79
H	0.3	10.7	3.21	6.89	22.12

表 3-9c 暴雨時混凝土塊及土砂抵抗力矩之計算表

EL(m)	深度(m)	彎矩(t-m/m)
-2.4	5.0	24.20
-3.7	6.3	47.68
-5.2	7.8	85.38
-6.6	9.2	125.84
-8.1	10.7	168.99
-9.3	11.9	277.75

表 3-9d 暴雨時水壓力力矩之計算表

EL (m)	抵抗力矩 (海側彎矩,t-m/m)	驅動力矩 (陸側彎矩,t-m/m)
-2.4	2.3	20.83
-3.7	8.44	41.67
-5.2	23.43	79.09
-6.6	47.92	129.78
-8.1	88.57	204.17
-9.3	134.06	280.86

(3)暴雨時抗傾倒之安全係數：由表 3-8 及表 3-9 之抵抗力矩除以驅動力矩，即可得每一深度之抗傾倒安全係數，如表 3-10 及圖 3-11 所示。由圖 3-11 顯示：暴雨時之情況下，19 號碼頭之抗傾倒安全係數皆小於 1.0，表示碼頭已相當不相當穩定。

表 3-10 暴雨時抗傾倒安全係數之計算表

EL(m)	安全係數
-2.4	$(24.20+2.30)/(20.83+11.67)=0.82$
-3.7	$(47.68+8.44)/(41.67+23.35)=0.86$
-5.2	$(85.38+23.43)/(79.09+44.30)=0.88$
-6.6	$(125.84+47.92)/(129.78+72.65)=0.86$
-8.1	$(168.99+88.57)/(204.17+114.34)=0.81$
-9.3	$(277.75+134.06)/(280.86+157.27)=0.94$

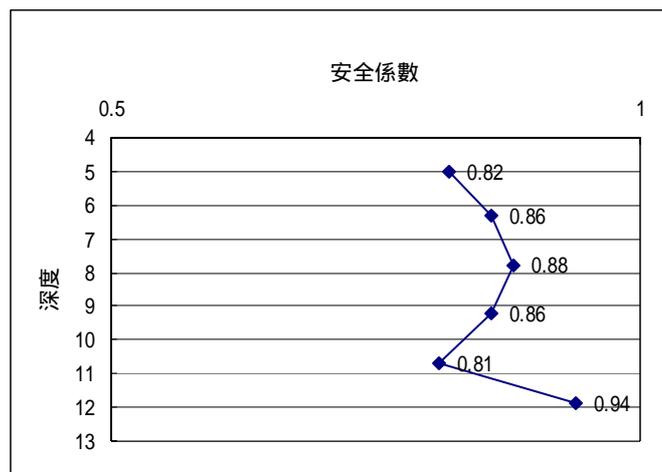


圖 3-11 暴雨時抗傾倒安全係數圖

### 3.6 碼頭圓弧滑動分析

19 號碼頭坍塌發生後為維護加油作業順暢，碼頭現場已緊急辦理維護搶修，是故現場碼頭破壞模式已很難確認，惟根據高雄港務局對災變發生當時的描述及高雄港第 19 號碼頭災變現場大面積坍塌現象研判，不排除 19 號碼頭坍塌有圓弧滑動破壞的可能。

本研究所採用的滑動破壞分析方法，為 Bishop 修正分析法，該方法為一具多年使用經驗的圓弧滑動面切片分析法，由大多數個案實例得知，本法所得之安全係數，皆位於採用正確方法求取斜坡相同正確答案的範圍內，其誤差約 1% 左右，數值相當穩定，為一邊坡穩定分析上相當良好正確的分析方法。

本研究分析之影響因素有三點：

- (1) 暴雨：是否因案發前的連日大雨而引致坍塌。
- (2) 浚挖：是否因海床浚挖而使圓弧滑動抵抗力矩減弱，進而導致坍塌。
- (3) 木樁腐朽：該碼頭興建迄今已超過 45 年，是否木樁已朽壞及木樁腐朽失去作用後對基礎穩定之影響。

本研究以上述三個影響因子來探討 19 號碼頭穩定性的安全係數，探討之方式如下：

- (1) 暴雨之影響：

對連日暴雨所產生的影響，本研究分下列兩種狀況加以討論：

- a. 天晴：天晴時碼頭後方之回填土層保持正常之殘留水位（即取最潮差之 1/3）、而潮位高程假設為零。
- b. 暴雨：因暴雨導致回填土層飽和，以當時地面積水情沿估計地下水水位線與碼頭面齊平，而暴雨時之潮位，係以鄰近 10 號碼頭

之潮位計所記錄 83.8.5.16:00 之潮位高程 +0.65m 為計算潮位值。

## (2) 浚挖之影響

根據中國石油公司提供之海床浚挖工程施工後之水深測量資料，任取水深剖面 A-A 及 B-B 如圖 3-12 所示，在距離碼頭法線 8m 即碼頭基礎卵石拋石範圍之外，水深約在 10.5m 至 12m 之間，此較原設計碼頭基礎高程約超挖 1.5m 以上。

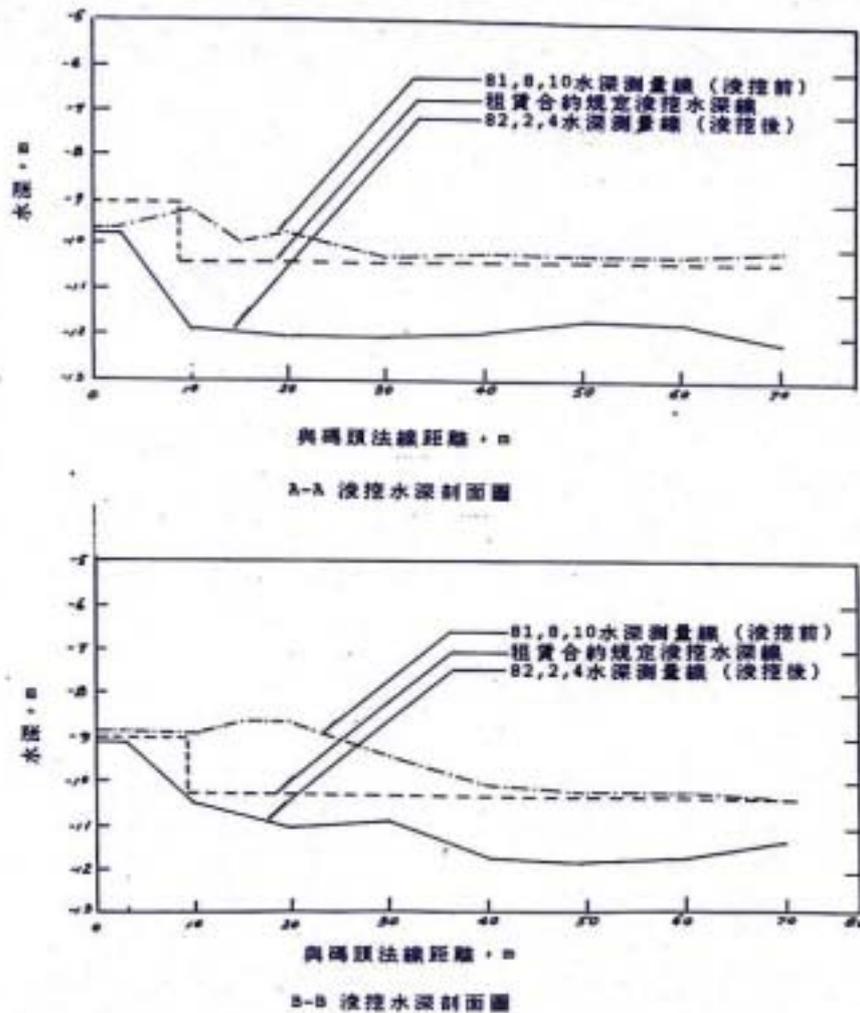


圖 3-12 水深 A-A 及 B-B 剖面圖

對海床浚挖所產生的影響，本研究分下列二種狀況來討論：

a. 未浚挖前：碼頭基礎設計高程為-9m。

b. 海床底面超挖 1.5m 及 3.0m (即水深 10.5m 及 12m)，其範圍至基礎卵石護床處 (亦即浚挖至距碼頭法線外 5 公尺之範圍)。

(3) 木樁的影響：

對木樁是否已老舊朽壞，本研究分下列兩種狀況加以討論：

a. 木樁完整。

b. 木樁腐朽 (即不存在)。

### 1. 使用 STABL 程式分析：

(1) 有無木樁之比較

當沉泥質粘土  $c=0.6t/m^2$ ，晴天、未浚挖、木樁完整，分析結果如圖 3-13 所示，其安全係數值為 1.33。當木樁腐朽分析結果如圖 3-14 所示，其安全係數值為 1.34。所以當沉泥質粘土層  $c$  值小時，破壞即通過此層，因木樁並未貫穿此粘土層，故其效用不大。

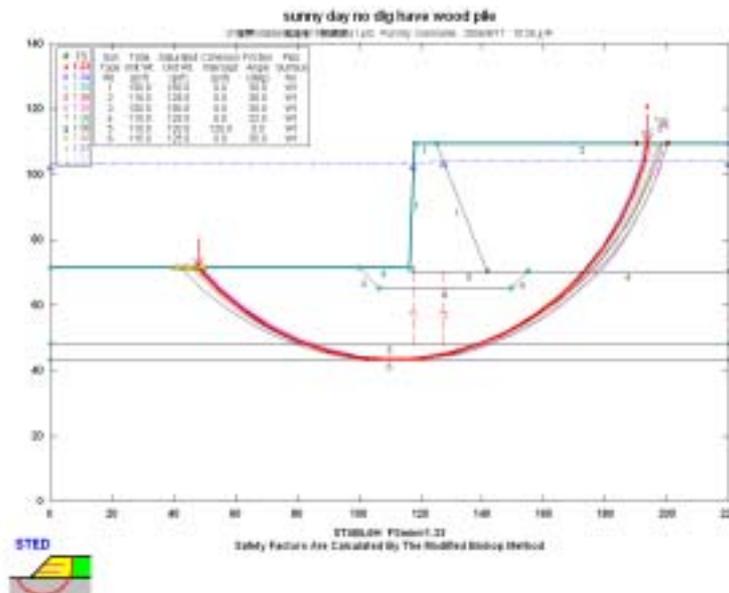


圖 3-13 沉泥質粘土  $c=0.6t/m^2$ ，晴天、未浚挖、木樁完整分析結果

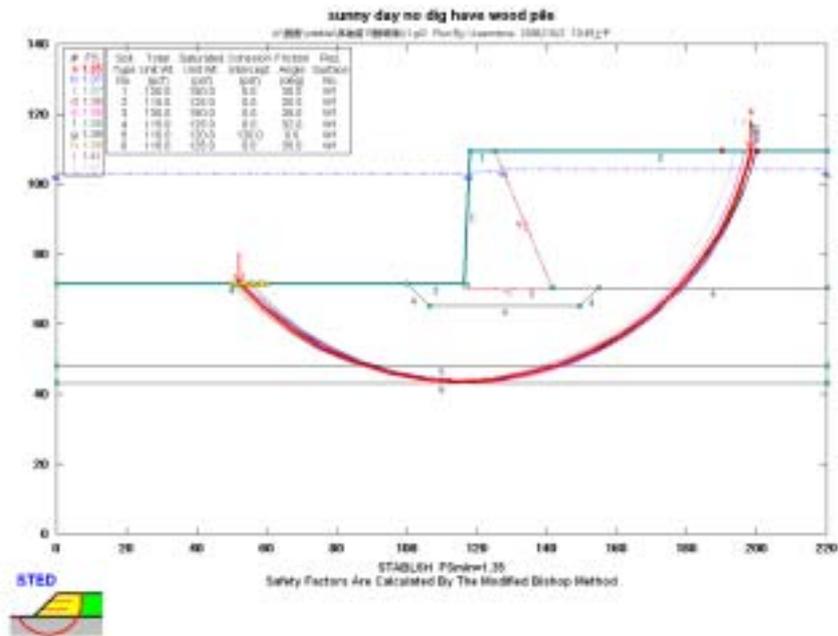


圖 3-14 沉泥質粘土  $c=0.6t/m^2$ ，晴天、未浚挖、木樁腐朽分析結果

### (2) 浚挖的影響

當沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，未浚挖時，分析結果如圖 3-15 所示，其安全係數值為 1.58，當浚挖 1.5 公尺時，分析結果如圖 3-16 所示，其安全係數為 1.35（安全係數減少 15%），當浚挖 3 公尺時，分析結果如圖 3-17 所示，其安全係數為 1.16（安全係數減少 27%）。可見浚挖對於穩定性有相當大的影響。

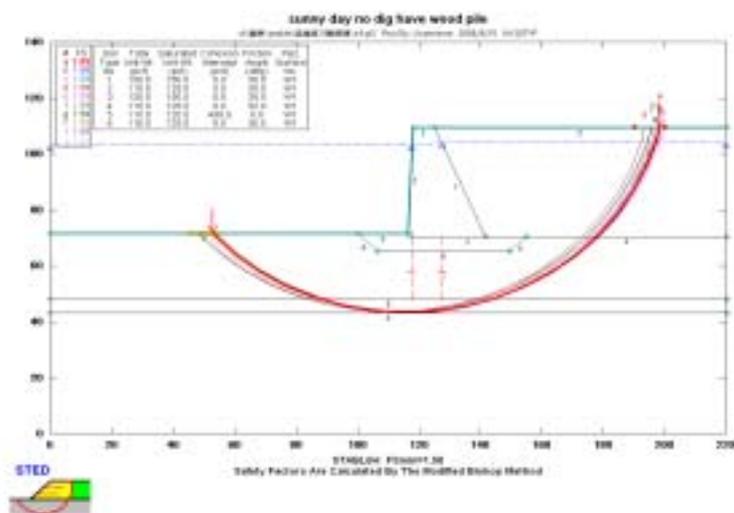


圖 3-15 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，未浚挖分析結果

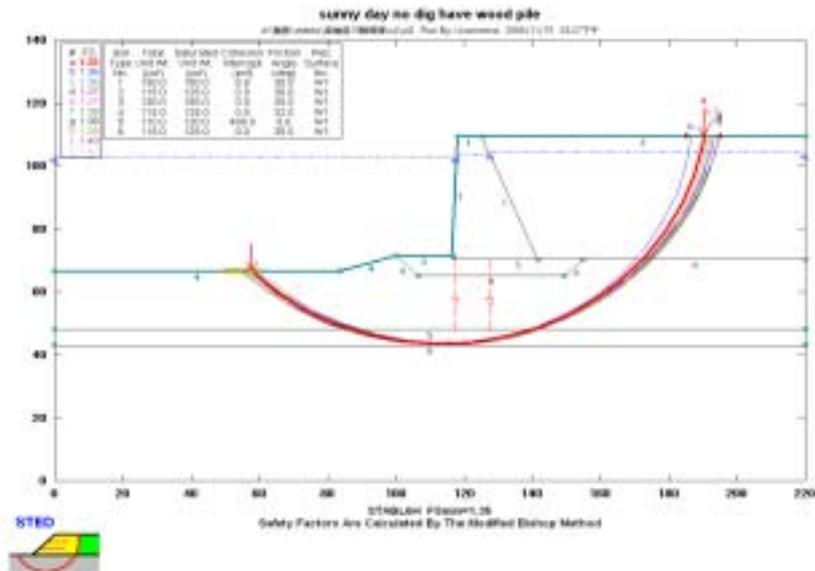


圖 3-16 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，浚挖 1.5 公尺分析結果

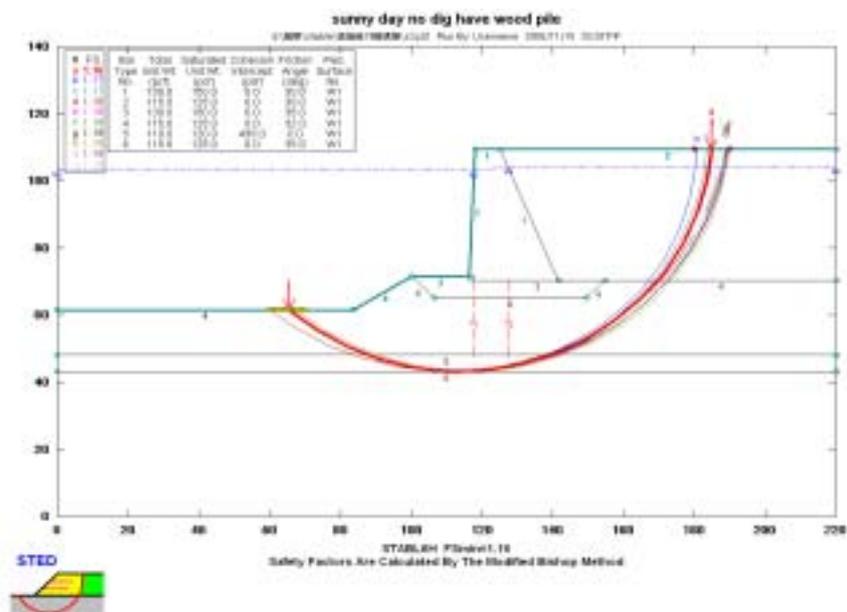


圖 3-17 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，浚挖 3 公尺分析結果

### (3) 暴雨的影響

當沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天時分析結果如圖 3-18 所示，其安全係數值為 1.58，當暴雨時分析結果如圖 3-15 所示，其安全係數值為 1.44（安全係數減少 9%），故暴雨對穩定性之影響較浚挖小。

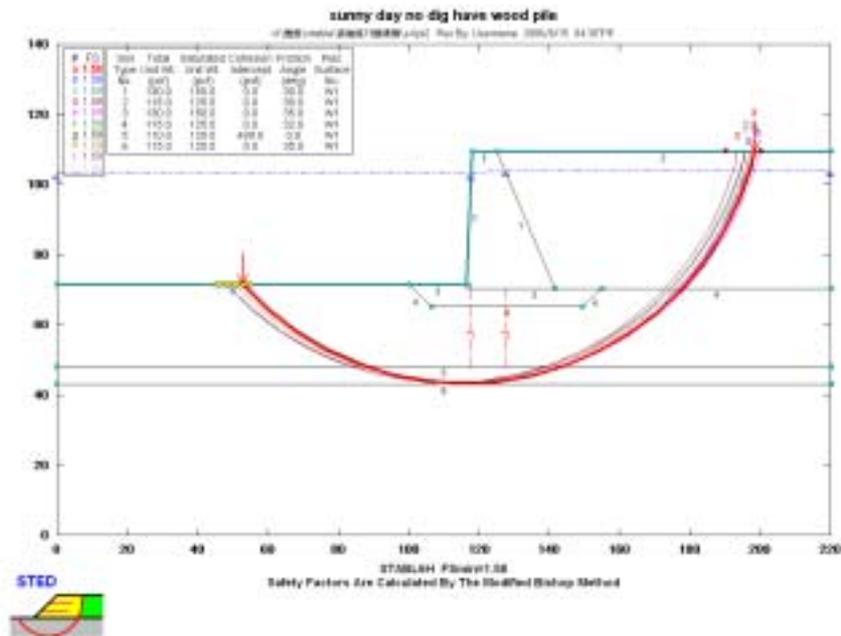


圖 3-18 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天分析結果

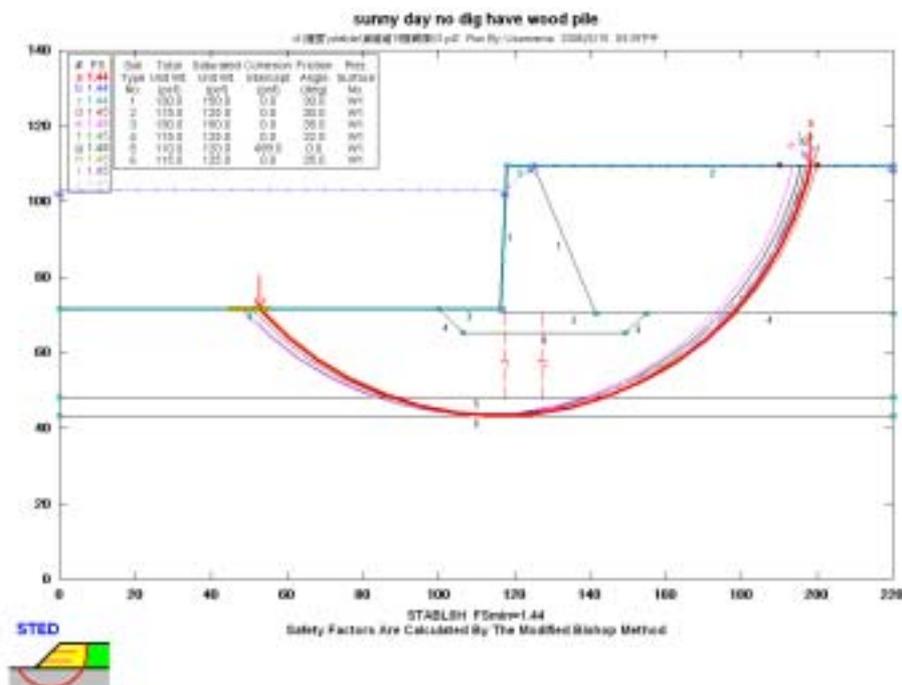


圖 3-19 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，暴雨分析結果

(4)當木樁腐朽、浚挖 3 公尺並暴雨時，沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，分析結果如圖 3-20 所示，其安全係數值為 1.04，安全係數較晴天未浚挖及木樁完好時降低 34%。

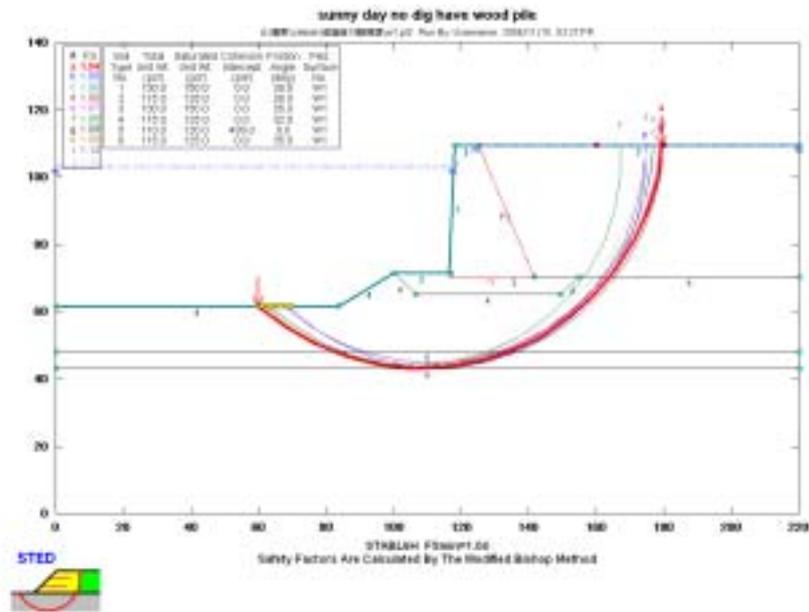


圖 3-20 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，木樁腐朽、浚挖 3 公尺並暴雨時分析結果

(5)碼頭改建後，其斷面圖如圖 3-21 所示，即於碼頭前方埋設鋼板樁，並於碼頭後方埋設錨錠樁，其穩定性分析結果如圖 3-22 所示，其安全係數值為 2.53。當改建後若錨錠樁失效，分析結果亦如圖 3-23 所示，其安全係數值亦有 2.02，可見改建後安全係數值提高不少。

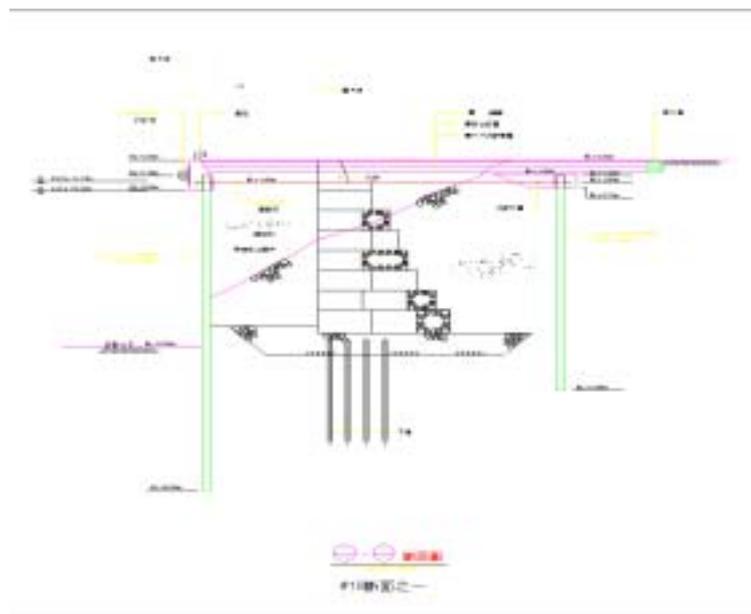


圖 3-21 碼頭改建後斷面圖

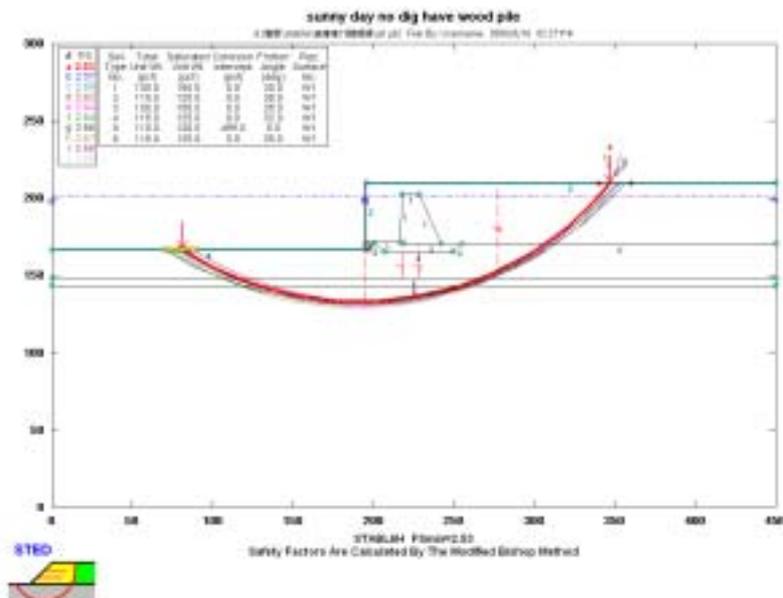


圖 3-22 碼頭改建後分析結果

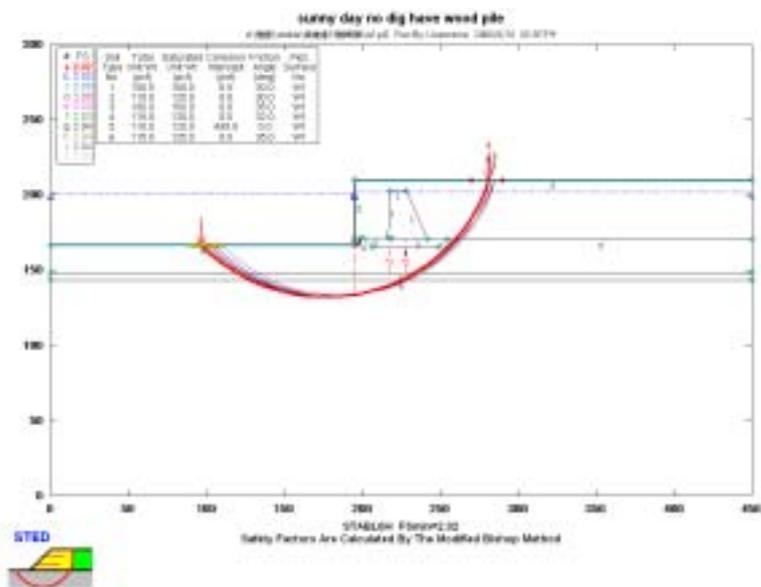


圖 3-23 碼頭改建後，錨錠樁失效分析結果

2.使用 FLAC/SLOPE 程式分析：

(2) Associated plastic flow  $\psi = \phi$  的情形：

為與極限平衡法 STABL 圓弧破壞比較，在 FLAC/SLOPE 程式

分析時，將其擴張角設等於摩擦角  $\psi = \phi$ ，張力強度設很高以避免折減，並假設 associated plastic flow 行為，當沉泥質粘土  $c=0.6t/m^2$ ，晴天、未浚挖及木樁完整時，分析結果如圖 3-24 所示，其安全係數值為 1.17。當沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天、未浚挖及木樁完整時，分析結果如圖 3-25 所示，其安全係數值為 1.35。且其破壞面皆通過沉泥質粘土層，其破壞機制大致與 STABL 相同。

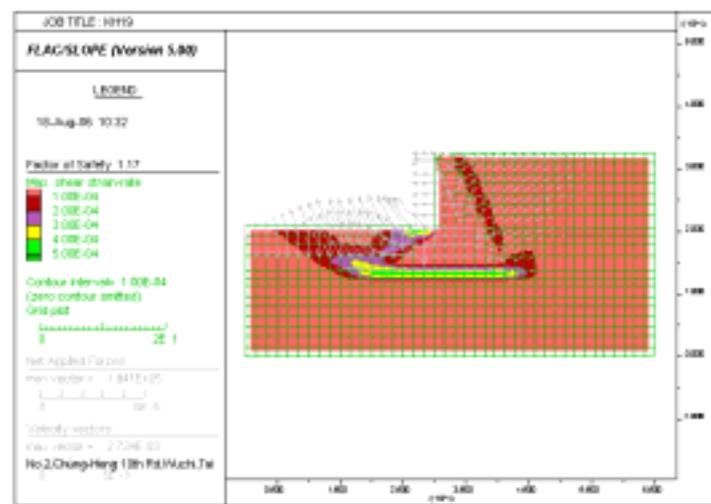


圖 3-24 沉泥質粘土  $c=0.6t/m^2$ ，晴天、未浚挖及木樁完整時分析結果

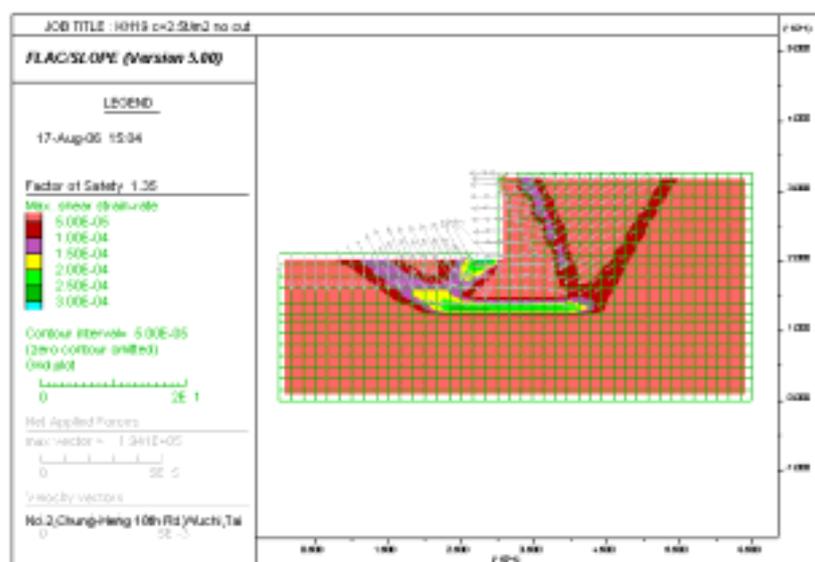


圖 3-25 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天、未浚挖及木樁完整時分析結果

## (2) Non-associated plastic flow $\bar{\psi} = 0$ 的情形：

### (a) 有無木樁之比較

當沉泥質粘土  $c=0.6\text{t/m}^2$ ，晴天、未浚挖、木樁完整，分析結果如圖 3-26 所示，其安全係數值為 0.88。當木樁腐朽，分析結果如圖 3-27 所示，其安全係數值為 0.85（降低 3%）。當沉泥質粘土  $c=2.5\text{t/m}^2$ ，晴天、未浚挖、木樁完整，分析結果如圖 3-28 所示，其安全係數值為 1.07。當木樁腐朽，分析結果如圖 3-29 所示，其安全係數值為 0.88（降低 17%）。

在 STABL 分析時因其考量為圓弧破壞，且土樁並未貫穿軟弱土層，故有無木樁其安全係數值大約相同。在 FLAC/SLOPE 分析時採用有限差分法，網格計算力平衡，而不限於圓弧破壞。沉泥質粘土  $c=0.6\text{t/m}^2$  時，破壞經由該軟弱沉泥質粘土層，無木樁時其安全係數降低 3%，且破壞面亦由沉泥質粘土層（木樁完整）移至擋土牆底部，故其破壞位置明顯不同。沉泥質粘土  $c=2.5\text{t/m}^2$  時，無論有無木樁其破壞面皆經由擋土牆底部，而不經由沉泥質粘土層，故有無木樁對其影響較大，無木樁時其安全係數降低 17%。

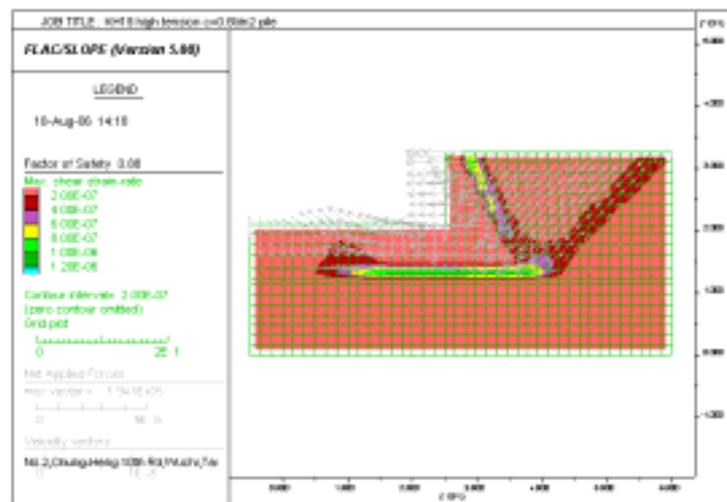


圖 3-26 沉泥質粘土  $c=0.6\text{t/m}^2$ ，晴天、未浚挖、木樁完整時分析結果

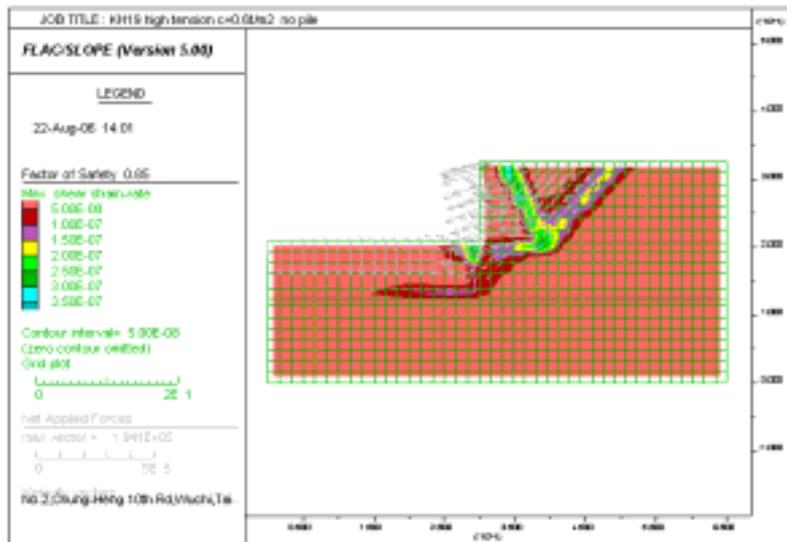


圖 3-27 沉泥質粘土  $c=0.6t/m^2$ ，晴天、未浚挖、木樁腐朽時分析結果

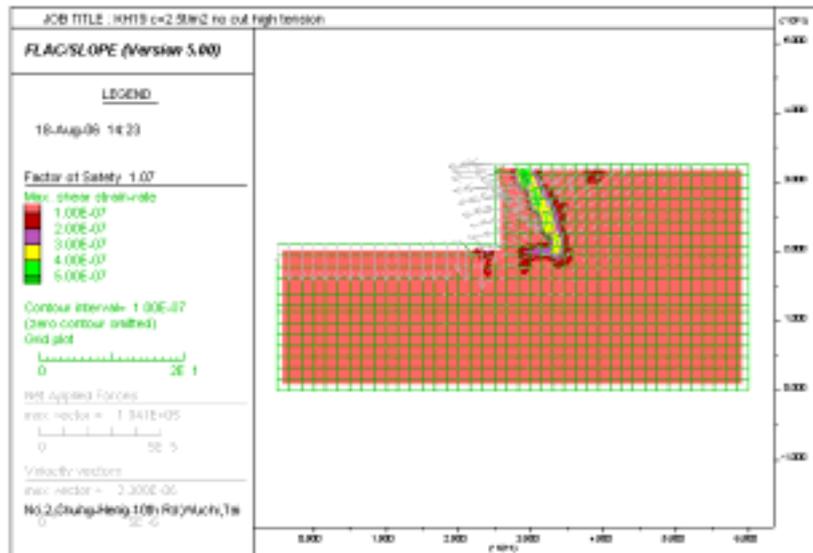


圖 3-28 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天、未浚挖、木樁完整時分析結果

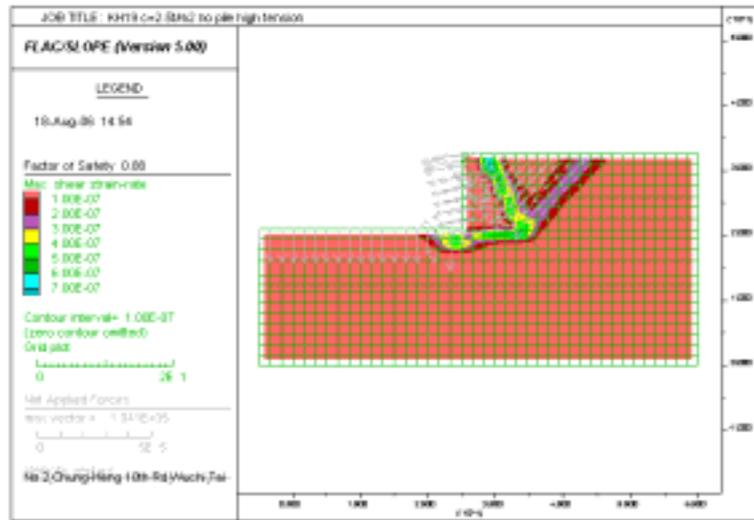


圖 3-29 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天、未浚挖、木樁腐朽時分析結果

### (b)浚挖的影響

當沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，未浚挖時，分析結果如圖 3-30 所示，其安全係數值為 1.07，當浚挖 1.5 公尺時，分析結果如圖 3-31 所示，其安全係數為 0.9（安全係數減少 16%），當浚挖 3 公尺時，分析結果如圖 3-32 所示，其安全係數為 0.76（安全係數減少 29%）。可見浚挖對於穩定性有相當大的影響。

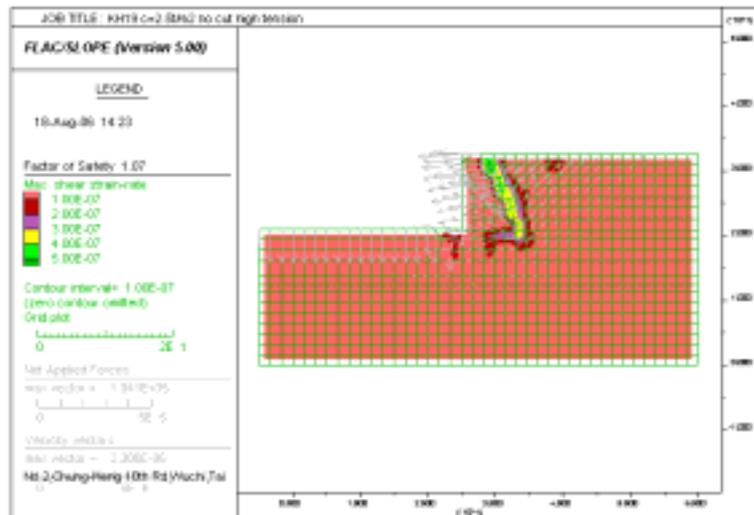


圖 3-30 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，未浚挖時分析結果

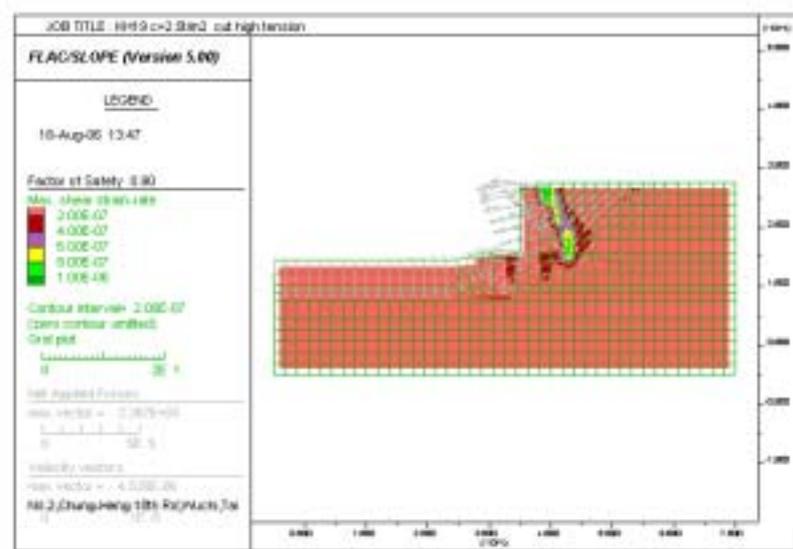


圖 3-31 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，浚挖 1.5 公尺時分析結果

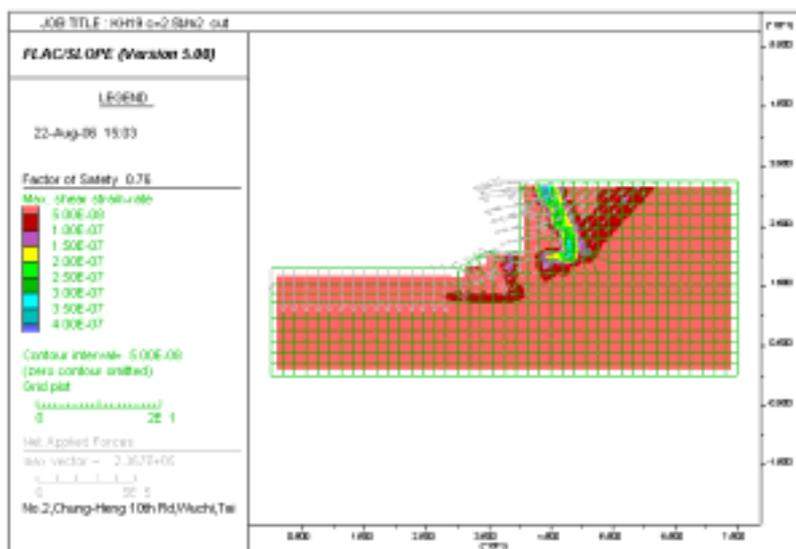


圖 3-32 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，浚挖 3 公尺時分析結果

### (c) 暴雨的影響

當沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天時，分析結果如圖 3-33 所示，其安全係數值為 1.07，當暴雨時，分析結果如圖 3-34 所示，其安全係數值為 0.83（安全係數減少 22%），故暴雨對穩定性亦有相當之影響。

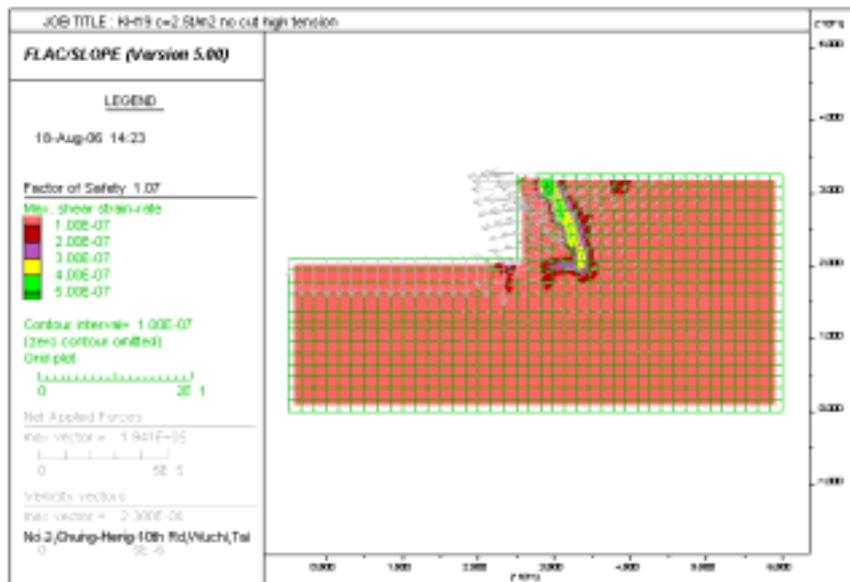


圖 3-33 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，晴天時分析結果

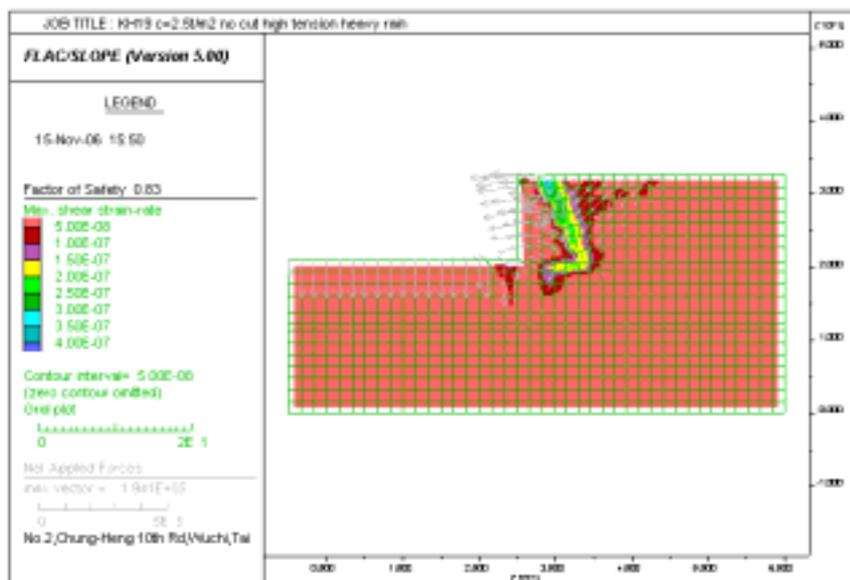


圖 3-34 沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，暴雨時分析結果

(d)當木樁腐朽、浚挖 3 公尺並暴雨時，沉泥質粘土  $c=2.5t/m^2$ ，分析結果如圖 3-35 所示，其安全係數值為 0.59，安全係數較晴天未浚挖及木樁完好時（安全係數為 1.07）降低 45%。

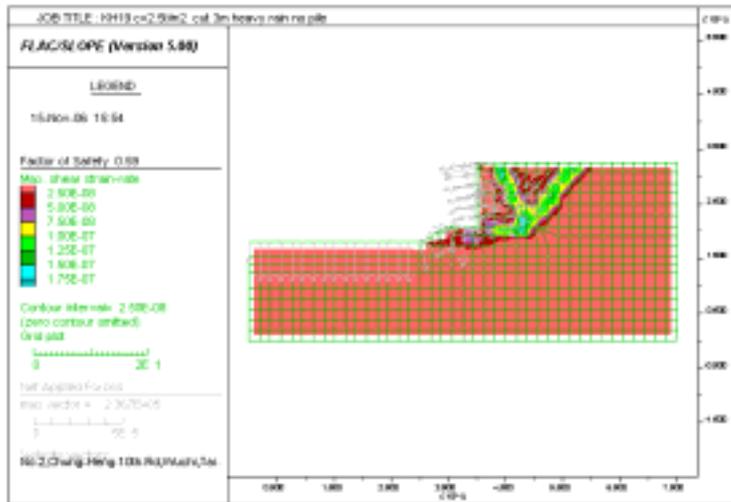


圖 3-35 木樁腐朽、浚挖 3 公尺並暴雨時分析結果

### 3.7 小結

1. 由碼頭結構穩定性分析結果，暴雨將導致碼頭滑動安全係數及傾倒安全係數皆小於 1，使碼頭處於不安全的狀態。
2. 由碼頭浚挖、暴雨及有無木樁對碼頭穩定性之影響分析結果，其大小分別為浚挖 > 暴雨 > 有無木樁，因木樁長度不足且洽置於軟弱粘土薄層之上，故木樁之存在對圓弧滑動抵抗之幫助甚為有限。
3. 由 STABL 和 FLAC/SLOPE 程式分析結果，其破壞面皆通過高程 -16.1m 至 -17.6m 間厚 1.5 公尺之極軟弱至軟弱沉泥質粘土層，其破壞機制大致相同。
4. 由碼頭改建後之穩定性分析結果，其安全係數值大於 2.0，可見改建後安全係數值提高不少。
5. 分別以考量圓弧破壞之 STABL 分析，及考量不限於圓弧破壞，採用有限差分法，網格計算力平衡之 FLAC/SLOPE 分析，對碼頭進行做穩定分析，可更加了解碼頭破壞機制，進而給予碼頭適當之結構系統補強或地盤改良。

## 第四章 台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭案例分析

港灣碼頭有許多為沉箱式基礎所構築而成，在受到地震力時，不但碼頭本身有慣性力，背填土會引致動態土壓力及動態水壓力，若背填土壤發生液化，亦會產生液化之側壓力，造成港灣碼頭更加不穩定。

1999 年 921 大地震，臺中港之地表水平最大加速度  $a_{hmax}$  為 0.163g，造成臺中港 1 至 3 號沉箱式碼頭外移 0.5~1.7 公尺，4 號沉箱碼頭外移 0~0.5 公尺，4A 號沉箱碼頭輕微外移(港，1999)，1995 年日本發生阪神大地震，神戶港之地表水平最大加速度  $a_{hmax}=0.55g$ ，造成神戶港碼頭、岸壁外移 2~5.9 公尺，港灣機能全面癱瘓(張、賴，2000)。使土壤液化是否會造成側向構造物之不穩定性的問題再次引起關切。。

因此，本文針對台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭先進行靜態穩定性分析，另為了探討液化對沉箱式碼頭或海堤穩定性之影響，針對台中港 1 至 3 號碼頭分別以背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情形進行變位分析。

### 4.1 分析程式之簡介

#### 4.1.1 FLAC 分析程式

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 為應用於大地工程的數值分析程式，其程式係利用外顯差分法 (explicit finite difference method) 模擬土壤、岩石彈塑性或其他達降伏限度後成塑性流動的材料所構成之構造物的行為。FLAC 程式在運算過程中是以「時階的形態」(time-stepping fashion) 來求解每一個節點的運動方程式，如此可看到整個系統的行為隨時間發展變化的過程，此時階並非代表實際時間，而是指程式反覆運算的次數，其運算過程如圖所示。在每一個時階中，利用系統原本的不平衡狀態決定每一節點的不平衡力，然後求解其運動方程式，以決定節點的速度分量。節點速度決定後，可將速度積分求得節點的位移及應變增量。應變增量決定

後再利用材料的組合律求得應力增量，將應力增量加上原來的應力狀態，即成為新得的應力狀態，並可得另一不平衡力，再進行下一時階的運算。如此反覆運算直至不平衡力趨近於零，達靜力平衡為止。

FLAC 分析流程如圖 4-1 所示：

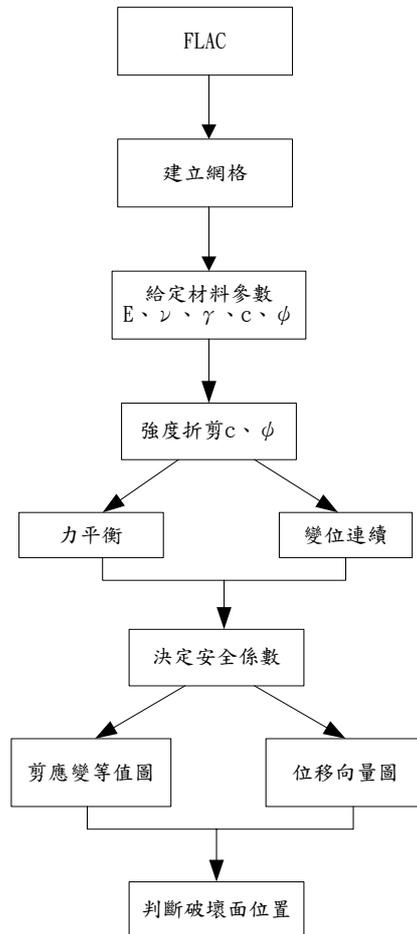


圖 4-1 FLAC 程式之分析流程圖

#### 4.1.2 STABL 及 FLAC/SLOPE 分析程式

此二程式之簡介請參照本報告第 3.1 節。

### 4.2 台中港 1 至 4A 號沈箱式碼頭靜態穩定性分析

台中港 1 至 4A 號碼頭皆屬沉箱重力式碼頭，碼頭面高程均為 +6.2m，設計水深分別為 1 至 3 號碼頭高程 -13m，4 號碼頭 -11.0m，4A 號碼頭 -9.0m，沉箱寬度分別為 1 至 3 號碼頭 17.6m，4 號碼頭 16.12m，4A 號碼頭為 16.8m，沉箱碼頭基礎為厚約 1.5 公尺之塊石及 1 公尺厚

之卵石基礎拋石。1 至 4A 號碼頭建造於 1976 年，其中 1 至 3 號及 4 號碼頭牆背為粒徑 10cm 以上之卵石，回填料成三角形分佈，回填料坡度約 1:1.5 接近回填料之安息角，其上加鋪 2 公尺厚粒徑 10cm 以下之河床料作為濾層，4A 號碼頭後線因有水泥圓倉，因此無背填卵石，1 至 4A 號碼頭基礎浚挖坡度為 EL.0 以上為 1:8，EL.0 以下為 1:3.5，其上再以水力回填砂回填作為碼頭後線作業場。本研究所使用之土壤參數為背填料之抗剪角  $\phi = 35^\circ$ ，疏鬆水力回填砂  $\phi = 30^\circ$ ，基礎及背填卵石  $\phi = 40^\circ$ ，原沖積土層  $\phi = 33^\circ$ ，沉箱與基礎之摩擦係數  $\mu = 0.6$ 。

以下針對台中港 1-3 號、4 號、4A 號碼頭進行靜態穩定性分析，計算其抗滑動、抗傾倒安全係數值並以 STABL 及 FLAC/SLOPE 程式分析其穩定性。

#### 4.2.1 台中港 1-3 號碼頭靜態穩定性分析

台中港 1-3 號碼頭斷面圖如圖 4-2 所示。

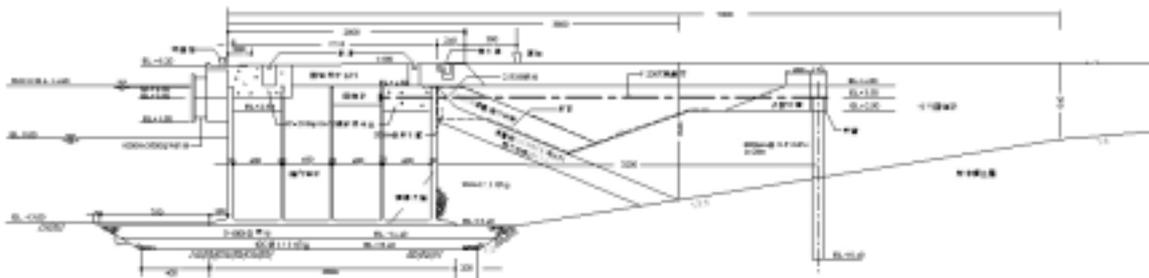


圖 4-2 台中港 1-3 號碼頭斷面圖

##### 1. 穩定分析

主動土壓力及水壓力分佈圖如圖 4-3 所示。

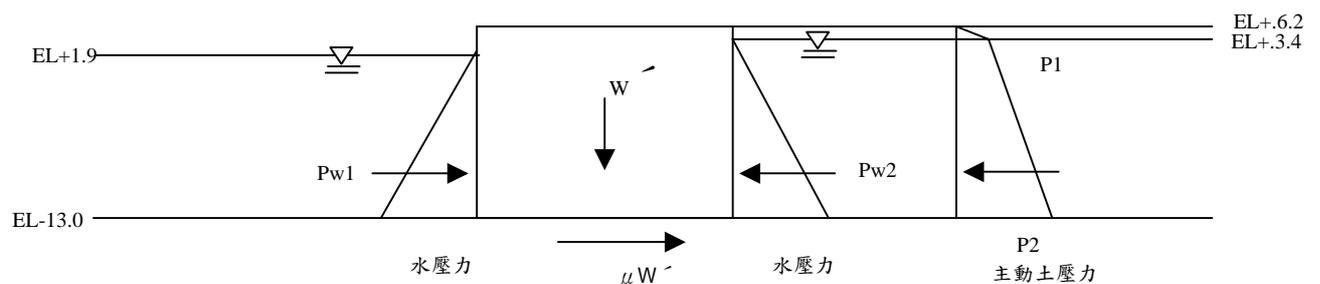


圖 4-3 主動土壓力及水壓力分佈圖

$$P_{w1} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 14.9^2 = 114.33$$

$$P_{w2} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 16.4^2 = 138.51$$

背填土動土壓力

$$k_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i - \phi)}{\cos^2 \phi \cos(\delta + \phi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \sin(\phi_i - \beta)}{\cos(\delta + \phi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} = 0.248$$

其中  $\phi = 0^\circ; \phi_i = 35^\circ; \delta = 15^\circ; \beta = 0^\circ$

$$P_1 = \gamma h k_{ai} = 1.8 \times 2.8 \times 0.248 = 1.25$$

$$P_2 = \gamma h k_{ai} = (1.8 \times 2.8 + 1 \times 16.4) \times 0.248 = 5.32$$

$$W' = 488.84$$

$$\mu \cdot W' = 0.6 \times 488.84 = 293$$

$$P_{\text{主動土壓力}} = \frac{1}{2} \times 2.8 \times 1.25 + \frac{1}{2} \times 16.4 \times (5.32 + 1.25) = 55.62$$

抗滑動安全係數：

$$F.S = \frac{293}{55.62 + 138.51 - 114.33} = 3.67 > 1.2(\text{ok})$$

抗傾倒安全係數

$$F.S = \frac{488.84 \times \frac{17.6}{2} + 114.33 \times \frac{14.9}{3}}{138.51 \times \frac{16.4}{3} + 1.75 \times \left( 16.4 + \frac{2.8}{3} \right) + \left( 1.25 \times 16.4 \times \frac{16.4}{2} \right) + \left( \frac{1}{2} \times 16.4 \times 4.07 \times \frac{16.4}{3} \right)}$$

$$= 4.28 > 1.2(\text{ok})$$

2. 使用 stabl 程式分析：

分析結果如圖 4-4 所示，其安全係數值為 1.45。

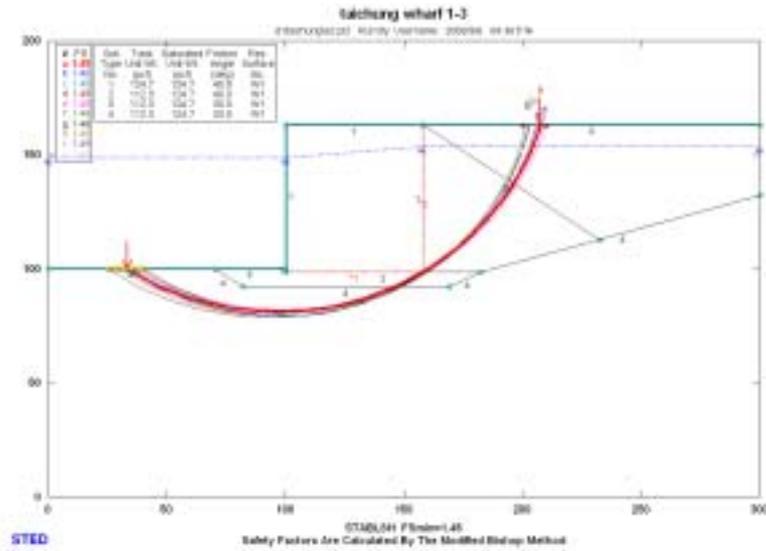


圖 4-4 台中港 1-3 號碼頭 STABL 分析結果

3. 使用 FLAC/SLOPE 程式分析：

分析結果如圖 4-5 所示，其安全係數值為 1.16，。

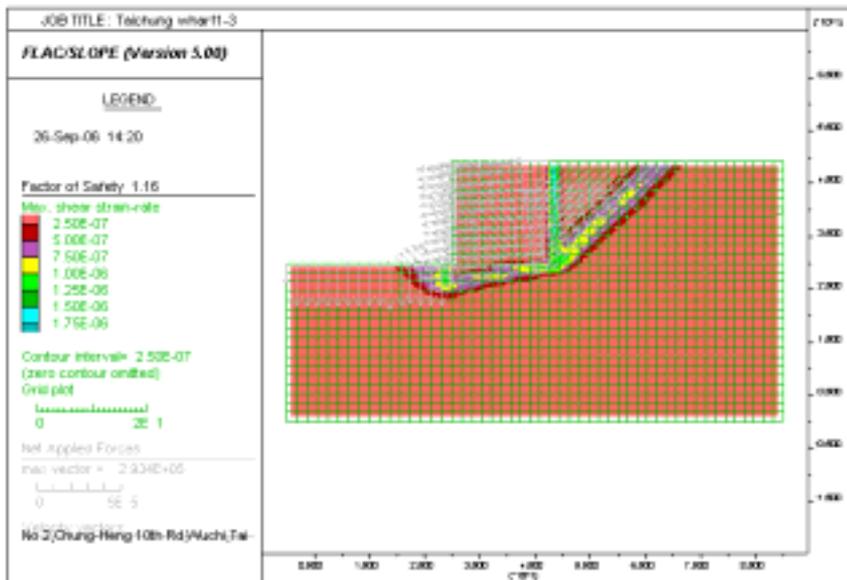


圖 4-5 台中港 1-3 號碼頭 FLAC/SLOPE 分析結果

4.2.2 台中港 4 號碼頭

台中港 4 號碼頭斷面圖如圖 4-6 所示。

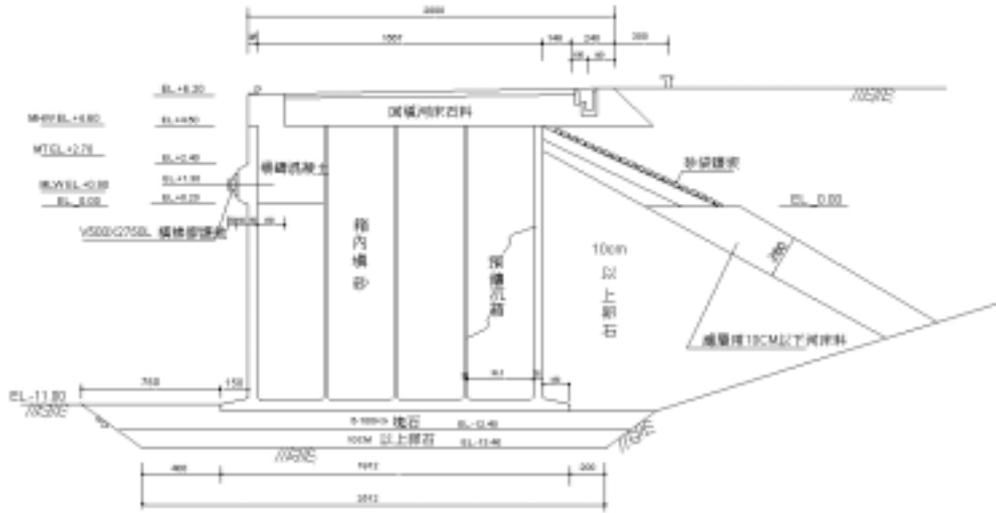


圖 4-6 台中港 4 號碼頭斷面圖

1. 穩定分析

主動土壓力及水壓力分佈圖如圖 4-7 所示。

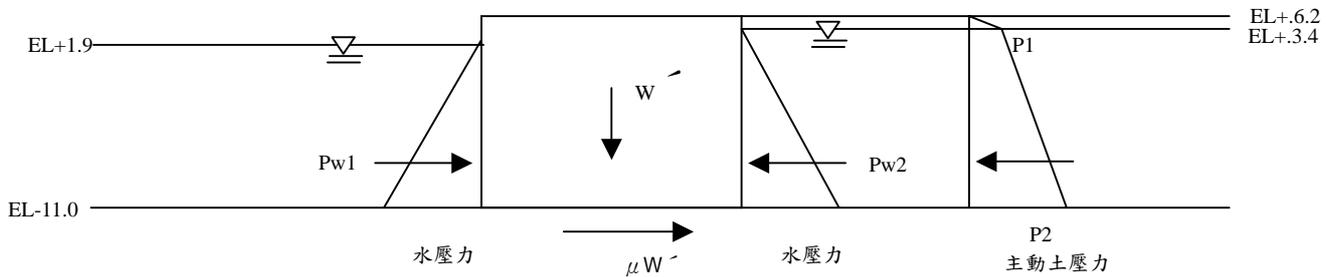


圖 4-7 主動土壓力及水壓力分佈圖

$$P_{w1} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 12.9^2 = 85.7$$

$$P_{w2} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 14.4^2 = 106.8$$

背填土動土壓力

$$k_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i - \phi)}{\cos^2 \phi \cos(\delta + \phi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \sin(\phi_i - \beta)}{\cos(\delta + \phi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} = 0.248$$

其中  $\phi = 0^\circ; \phi_i = 35^\circ; \delta = 15^\circ; \beta = 0^\circ$

$$P_1 = \gamma h k_{ai} = 1.8 \times 2.8 \times 0.248 = 1.25$$

$$P_2 = \gamma h k_{ai} = (1.8 \times 2.8 + 1 \times 14.4) \times 0.248 = 4.82$$

$$W' = 407.43$$

$$\mu \cdot W' = 0.6 \times 407.43 = 244.5$$

$$P_{\text{主動土壓力}} = \frac{1}{2} \times 2.8 \times 1.25 + \frac{1}{2} \times 14.4 \times (4.82 + 1.25) = 45.45$$

抗滑動安全係數：

$$F.S = \frac{244.5}{45.45 + 106.8 - 85.7} = 3.67 > 1.2(\text{ok})$$

抗傾倒安全係數

$$F.S = \frac{407.43 \times \frac{16.12}{2} + 85.7 \times \frac{12.9}{3}}{106.8 \times \frac{14.4}{3} + 1.75 \times \left(14.4 + \frac{2.8}{3}\right) + \left(1.25 \times 14.4 \times \frac{14.4}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} \times 14.4 \times 3.57 \times \frac{14.4}{3}\right)}$$

$$= 4.61 > 1.2(\text{ok})$$

2. 使用 stabl 程式分析：

分析結果如圖 4-8 所示，其安全係數值為 1.51。

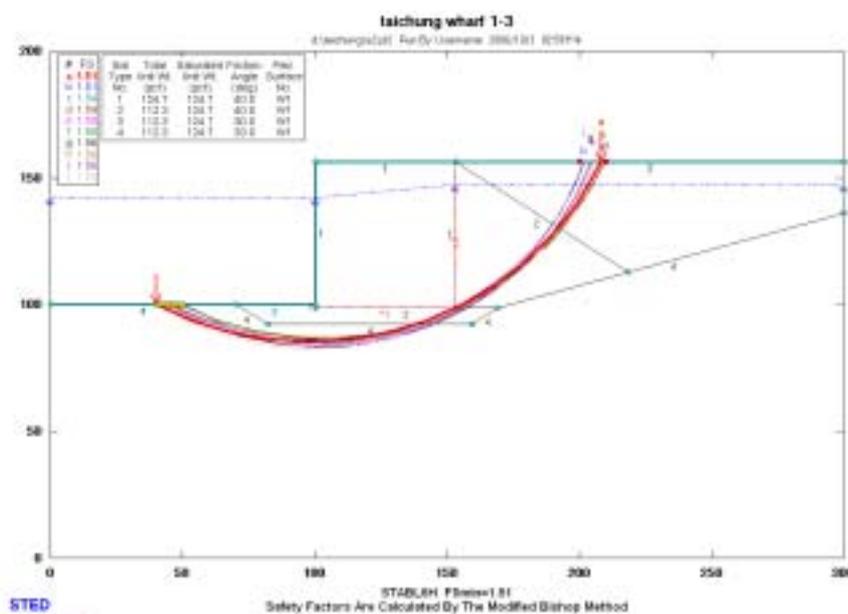


圖 4-8 台中港 4 號碼頭 STABL 分析結果

3. 使用 FLAC/SLOPE 程式分析：

分析結果如圖 4-9 所示，其安全係數值為 1.21。

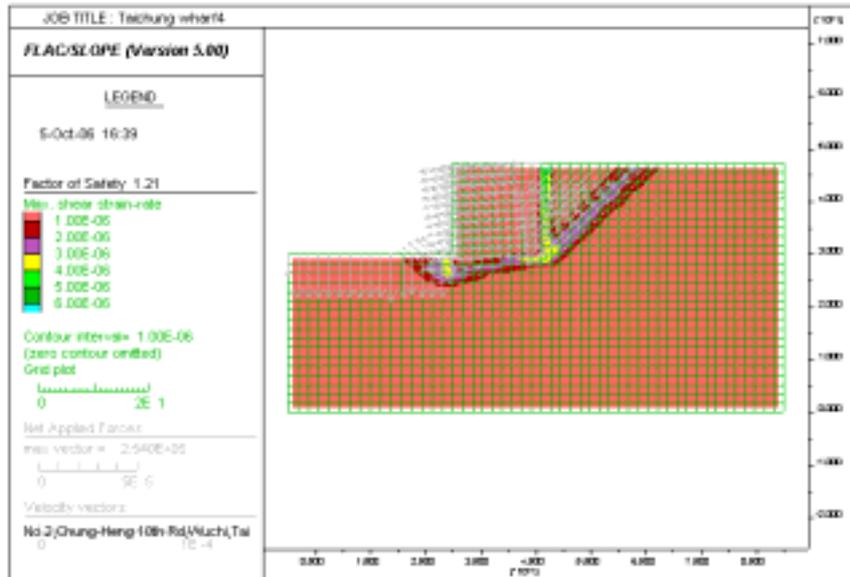


圖 4-9 台中港 4 號碼頭 FLAC/SLOPE 分析結果

#### 4.2.3 台中港 4A 號碼頭

台中港 4A 號碼頭斷面圖如圖 4-10 所示。

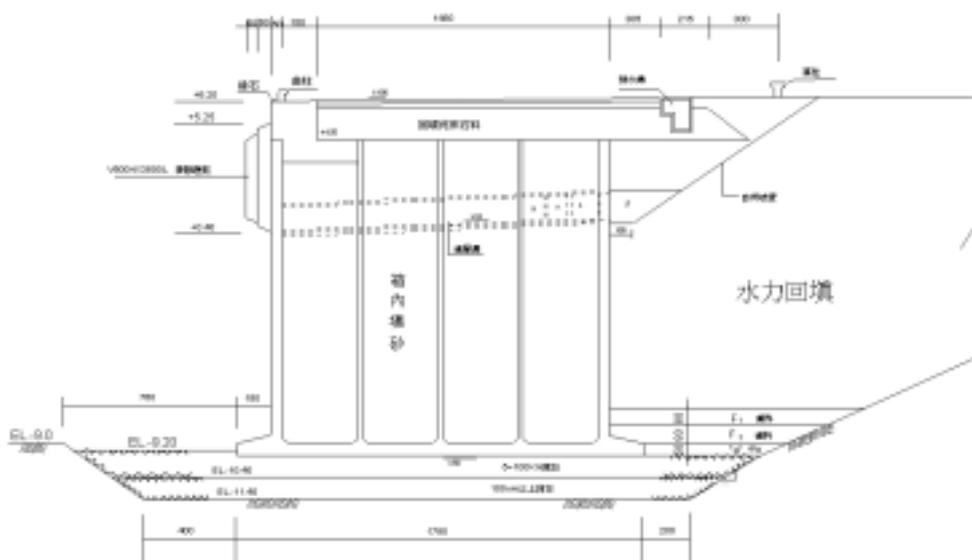


圖 4-10 台中港 4A 號碼頭斷面圖

1. 穩定分析

主動土壓力及水壓力分佈圖如圖 4-11 所示。

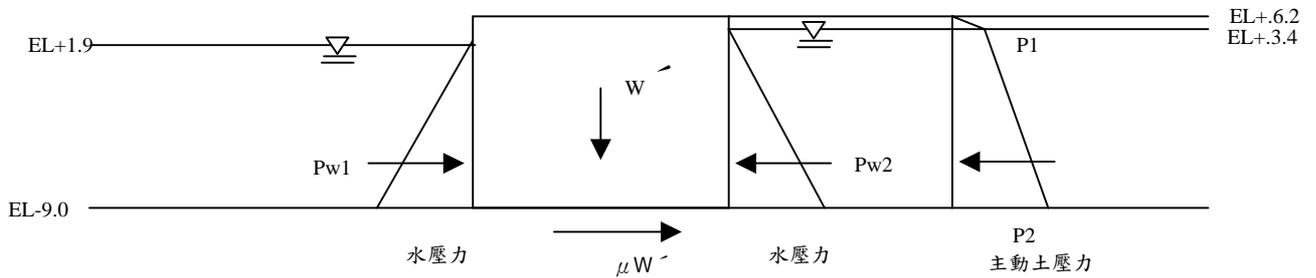


圖 4-11 主動土壓力及水壓力分佈圖

$$P_{W1} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 10.9^2 = 61.19$$

$$P_{W2} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 12.4^2 = 79.19$$

背填土動土壓力

$$k_{ai} = \frac{\cos^2(\phi_i - \phi)}{\cos^2 \phi \cos(\delta + \phi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_i + \delta) \sin(\phi_i - \beta)}{\cos(\delta + \phi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} = 0.248$$

其中  $\phi = 0^\circ$ ;  $\phi_i = 35^\circ$ ;  $\delta = 15^\circ$ ;  $\beta = 0^\circ$

$$P_1 = \gamma h k_{ai} = 1.8 \times 2.8 \times 0.248 = 1.25$$

$$P_2 = \gamma h k_{ai} = (1.8 \times 2.8 + 1 \times 12.4) \times 0.248 = 4.33$$

$$W' = 337.07$$

$$\mu \cdot W' = 0.6 \times 337.07 = 202$$

$$P_{\text{主動土壓力}} = \frac{1}{2} \times 2.8 \times 1.25 + \frac{1}{2} \times 12.4 \times (4.33 + 1.25) = 36.35$$

抗滑動安全係數：

$$F.S = \frac{202}{36.35 + 79.19 - 61.19} = 3.72 > 1.2(\text{ok})$$

抗傾倒安全係數

$$F.S. = \frac{337.07 \times \frac{16.8}{2} + 61.19 \times \frac{10.9}{3}}{79.19 \times \frac{12.4}{3} + 1.75 \times \left(12.4 + \frac{2.8}{3}\right) + \left(1.25 \times 12.4 \times \frac{12.4}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} \times 12.4 \times 3.08 \times \frac{12.4}{3}\right)}$$

$$= 5.81 > 1.2(ok)$$

2. 使用 stabl 程式分析：

分析結果如圖 4-12 所示，其安全係數值為 1.58。

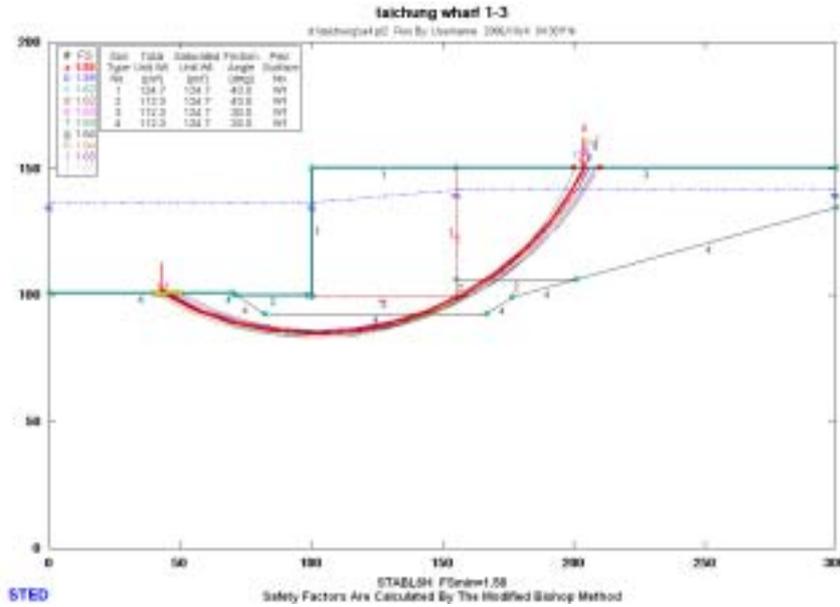


圖 4-12 台中港 4A 號碼頭 STABL 分析結果

3. 使用 FLAC/SLOPE 程式分析：

分析結果如圖 4-13 所示，其安全係數值為 1.38。

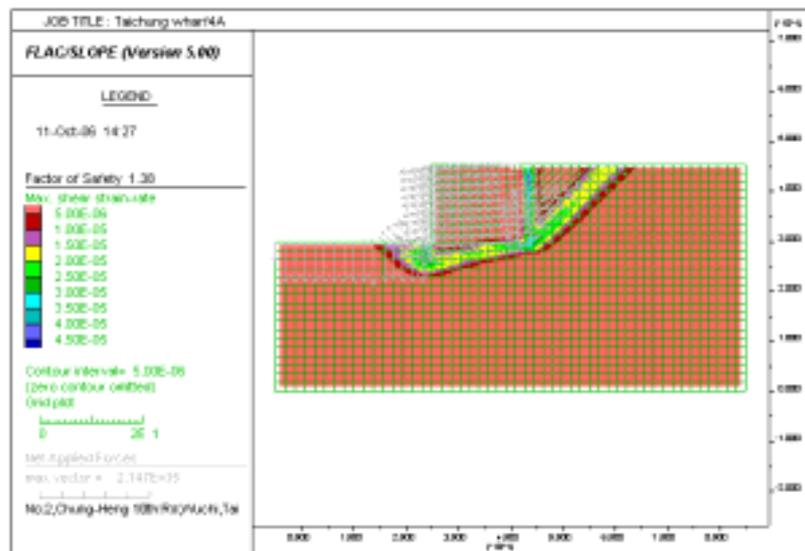


圖 4-13 台中港 4A 號碼頭 FLAC/SLOPE 分析結果

### 4.3 台中港 1~3 號碼頭受震分析

1999 年 921 大地震造成台中港 1 至 3 號沉箱式碼頭外移 0.5~1.7m，沉陷 0.4~0.8m，碼頭後線作業區發生噴砂、龜裂與下陷現象，港灣設施、道路和機具嚴重受損，港區無法正常作業。

港灣碼頭有許多為沉箱式基礎所構築而成，在受到地震力時，不但碼頭本身有慣性力，背填土會引致動態土壓力及動態水壓力，若背填土壤發生液化，亦會產生液化之側壓力，造成港灣碼頭更加不穩定。為了探討液化對沉箱式碼頭或海堤穩定性之影響，茲以 FLAC 程式針對台中港 1~3 號碼頭背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情形進行分析。

#### 1. 碼頭背填土壤未液化情形

背填土壤未液化之沉箱式碼頭，其示意圖如圖 4-14、4-15 所示。

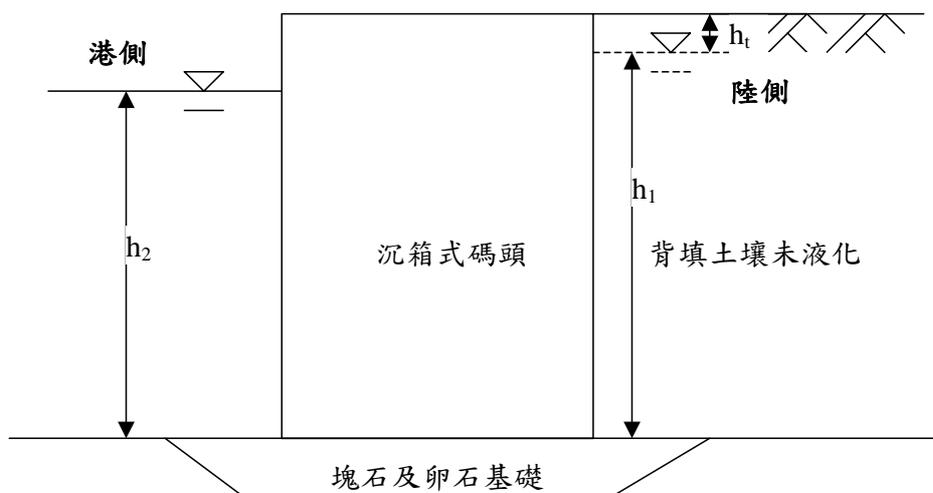


圖 4-14 背填土壤未液化之沉箱式碼頭示意圖

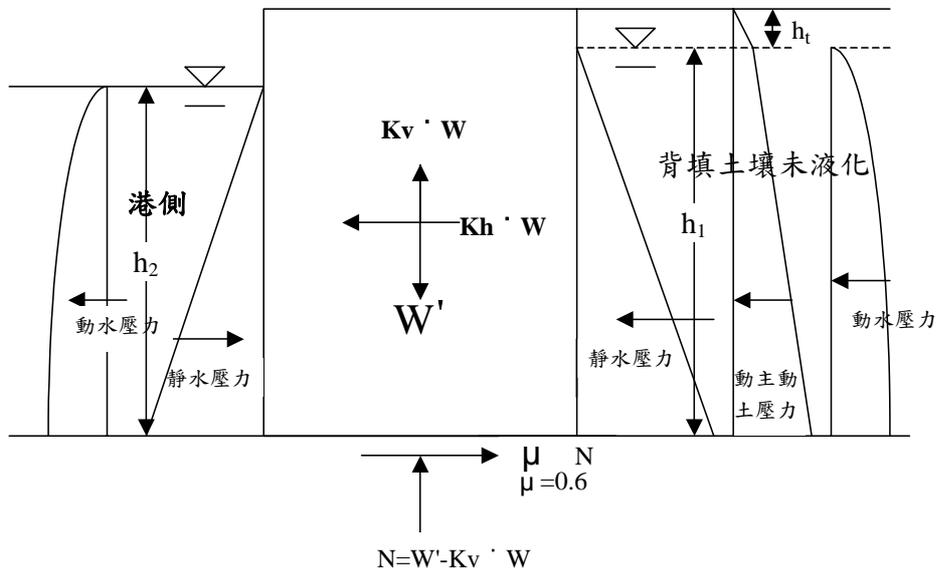


圖 4-15 背填土壤未液化之沉箱式碼頭受力示意圖

## 2. 碼頭背填土壤液化

背填土壤液化之沉箱式碼頭，其示意圖，如圖 4-16 所示，當背填土壤液化時，可有兩種觀念解釋沉箱之受力情況，說明如下：

一為以液化時土壤與水成為單位重  $\gamma_{sat}$  之重流體觀念解釋，此觀念之提出者有 Ishibashi & Madi(1990)、陳&黃(2000)等，其沉箱之受力示意圖，如圖 4-17 所示，由圖 4-17 可知，碼頭在水平方向之驅動力與土壤未液化時之驅動力有所不同，沉箱本身之慣性力不變，因背填土壤液化而不再有動態土壓力及靜水壓力，而以液化時之靜態重流體壓力取代，港側潮位震盪變化之動水壓力不變，但陸側地下水位震盪變化之動水壓力以液化時重流體震盪變化之動流體壓力取代。

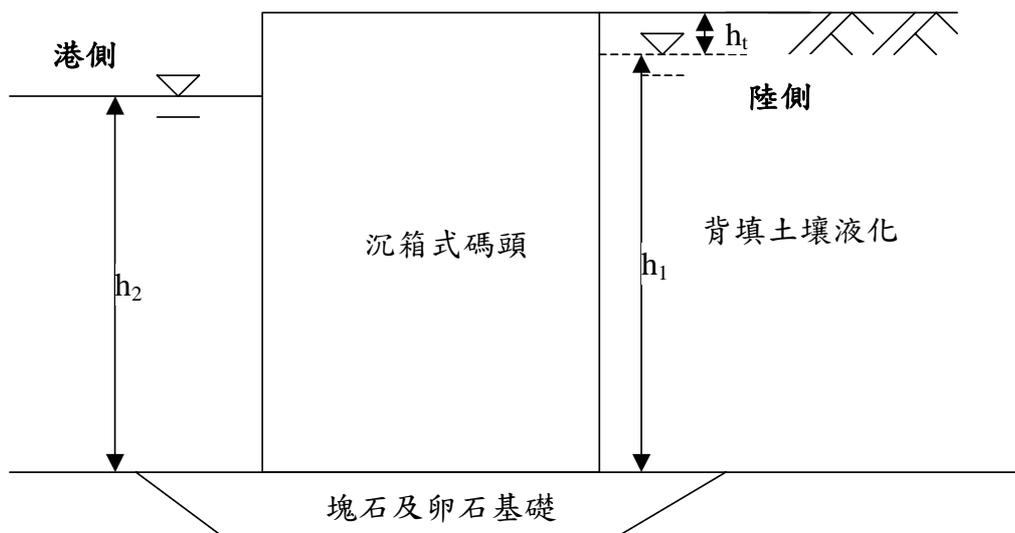


圖 4-16 背填土壤液化之沉箱式碼頭示意圖

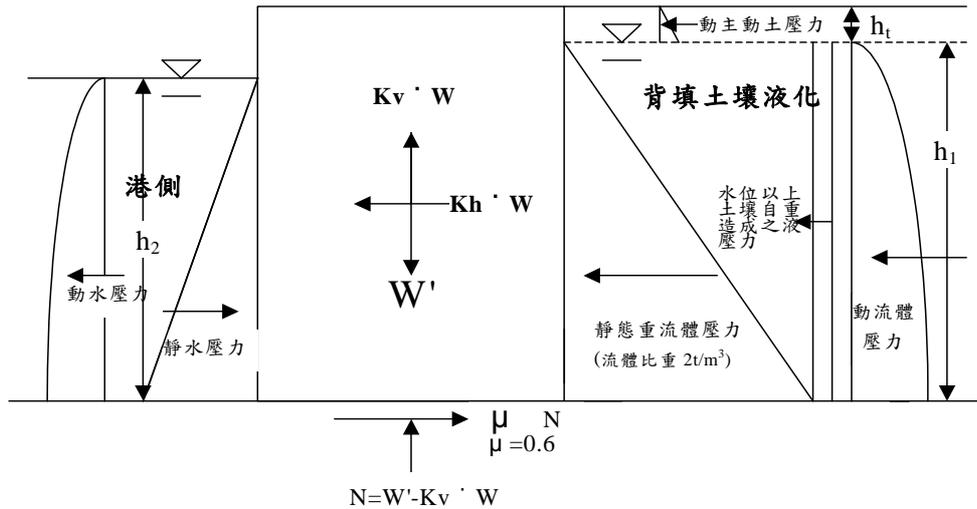


圖 4-17 以重流體觀念解釋背填土壤液化之沉箱式碼頭受力示意圖

另一為本文以液化時超額孔隙水壓力之觀念解釋，當背填土壤液化時，超額孔隙水壓力上升至與土壤之垂直壓力相等，此時土壤之有效應力為零，由於土壤之有效應力為零，因此不再有動態土壓力，而以液化時地下水位異常變化之超額孔隙水壓力取代，由於超額孔隙水壓力上升至與土壤原來之有效應力相等，因此液化時地下水位異常變化之超額孔隙水壓力等於土壤原來之有效應力，因此本文沉箱之受力示意圖，如圖 4-18 所示。

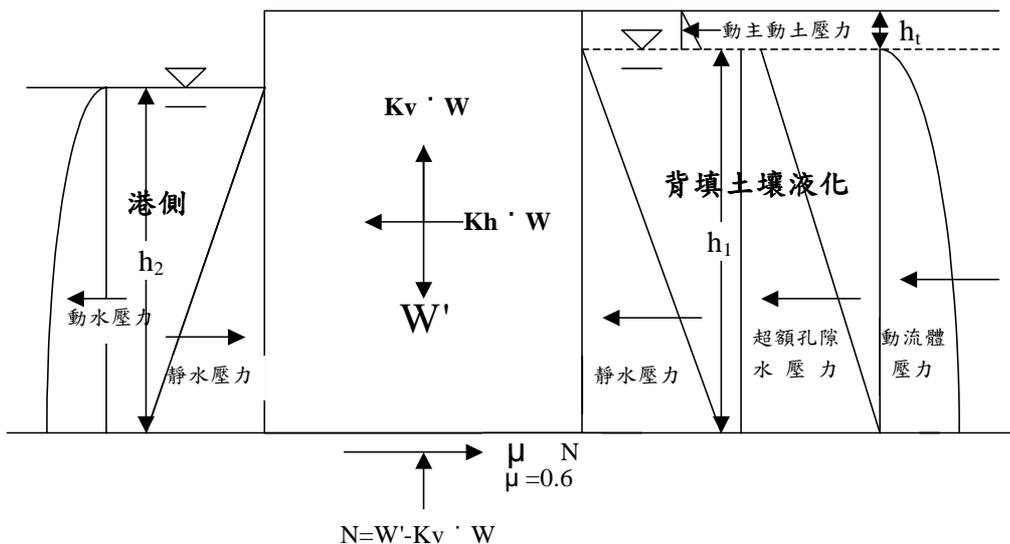


圖 4-18 以超額孔隙水壓解釋背填土壤液化之沉箱式碼頭受力示意圖

由圖可知，碼頭在水平方向之驅動力與土壤未液化時之驅動力有

所不同，沉箱本身之慣性力與兩側之靜水壓力不變，而背填土壤因液化而不再有動態土壓力，而以液化時地下水水位異常變化之超額孔隙水壓力取代，港側潮位震盪變化之動水壓力不變，但陸側地下水水位震盪變化之動水壓力以液化時重流體震盪變化之動流體壓力取代，而抗滑動力仍然是  $\mu \cdot (W' - K_v W)$ 。

### 3. 碼頭背填土壤部分深度液化

背填土壤部分深度液化，另部分深度非液化，其示意圖，如圖 4-19 所示，其沉箱之受力示意圖，如圖 4-20 所示。

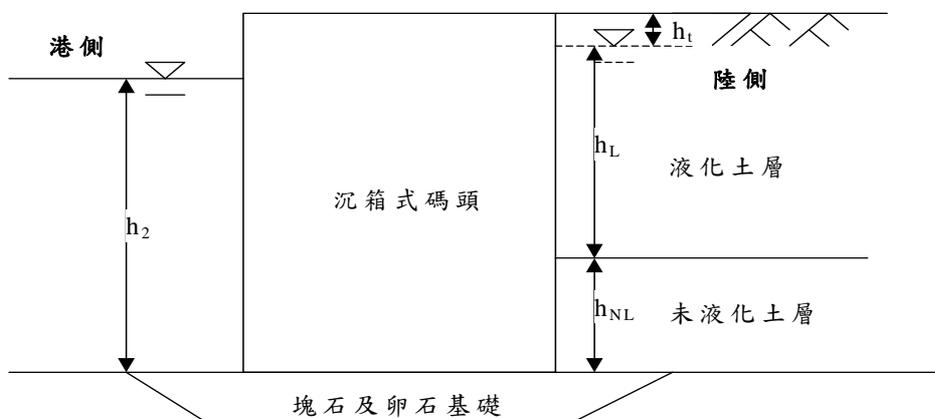


圖 4-19 背填土壤部份深度液化之沉箱式碼頭示意圖

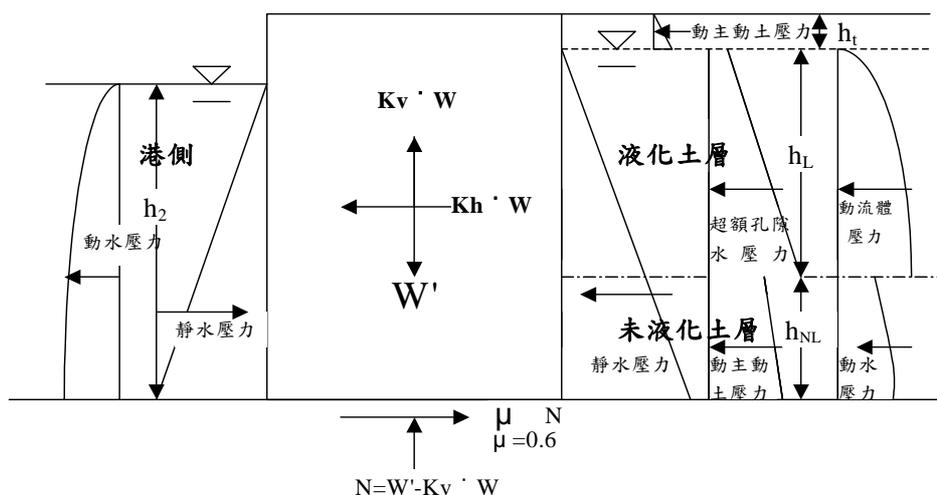


圖 4-20 背填土壤部份深度液化之沉箱式碼頭受力示意圖

台中港 1~3 號碼頭背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情

形之受力大小如表 4-1 所示：

表 4-1 背填土液化、未液化、部分深度液化之受力大小

	未液化	全部液化	部分深度液化（地表下 2.8~14m 液化）
地震力係數 Kh	0.163	0.163	0.163
地震力係數 Kv	0.060	0.060	0.060
抗滑動之摩擦力(t/m)	265.79	265.79	265.79
水平慣性力(t/m)	124.58	124.58	124.58
殘留水壓力(t/m)	23.48	23.48	23.48
動態土壓力(t/m) +	109.29	2.99	51.17
陸側動水壓力(t/m)			
港側動水壓力(t/m)	21.11	21.11	21.11
液化之動流體壓力(t/m)	0	51.14	23.42
液化之超額孔隙水壓力(t/m)	0	217.14	119.17
實測之位移量(cm)	52~168		

以 FLAC 針對上述三種情況（未液化、全部液化及部分深度液化）做分析，分析結果如下：

分析網格圖如圖 4-21 所示：

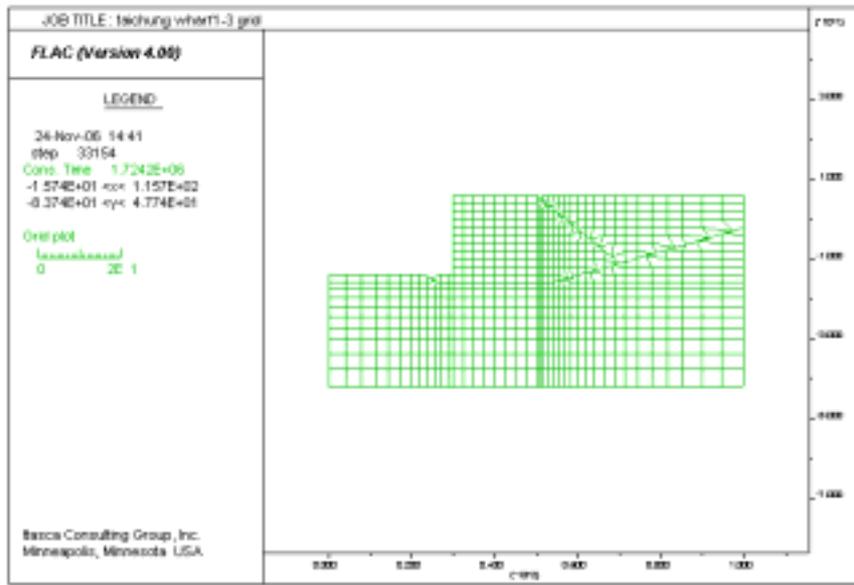


圖 4-21 分析網格圖

未液化情形外力施加情形如圖 4-22 所示。

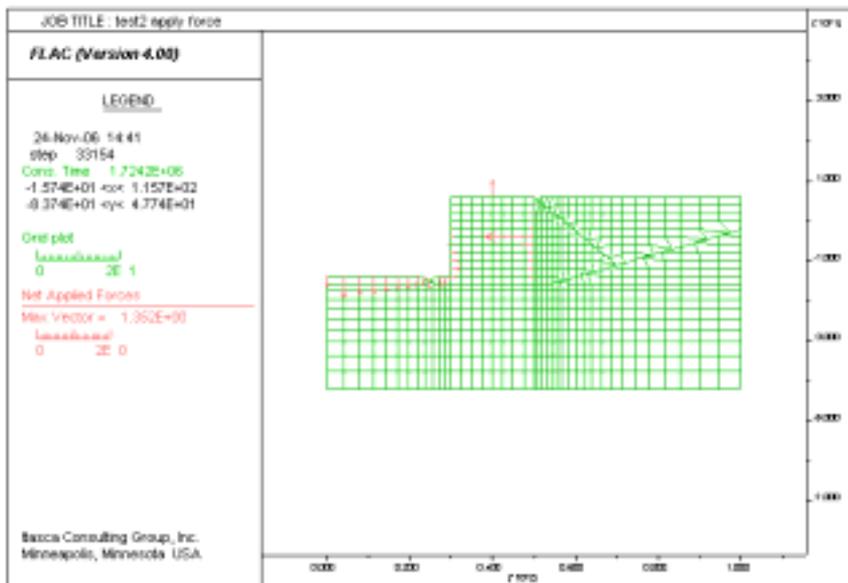


圖 4-22 未液化情形外力分佈圖

未液化情形變位分析結果如圖 4-23 所示。

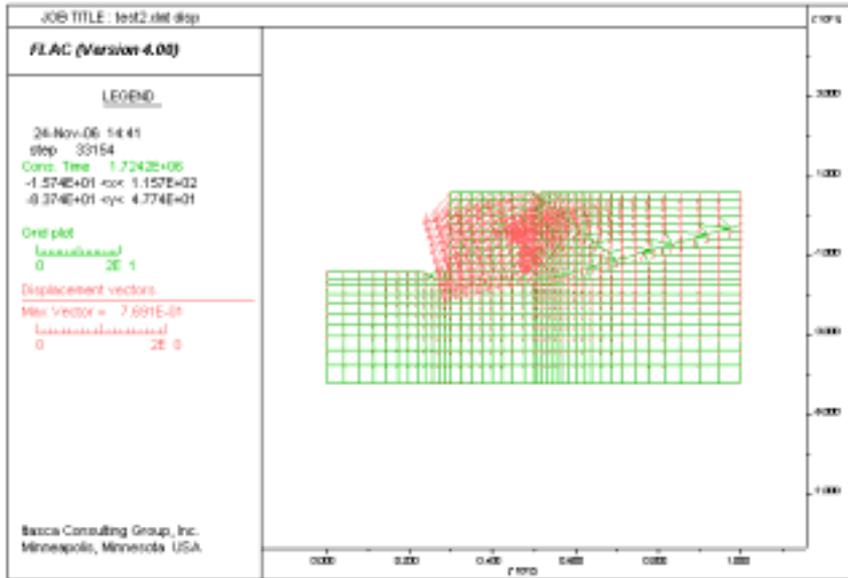


圖 4-23 未液化情形變位分析結果

全部液化外力施加情形如圖 4-24 所示。

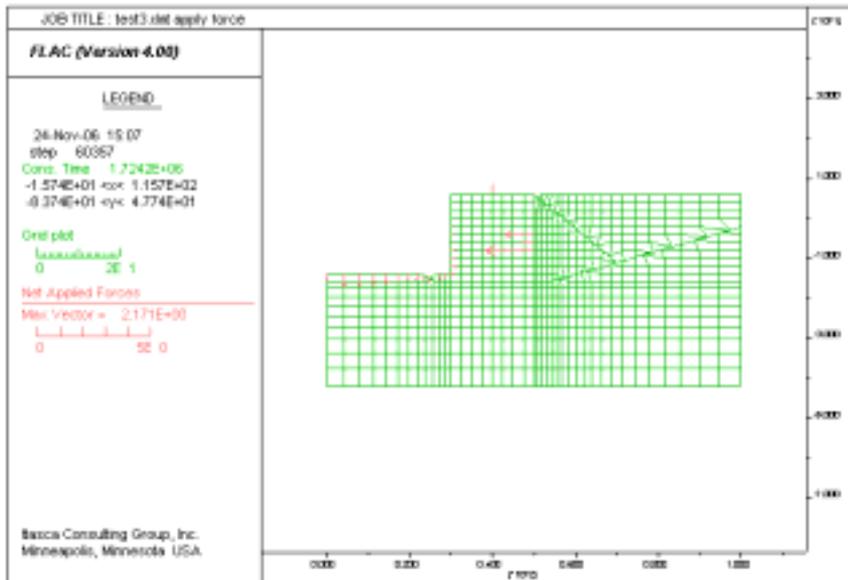


圖 4-24 全部液化情形外力分佈圖

全部液化變位分析結果如圖 4-25 所示。

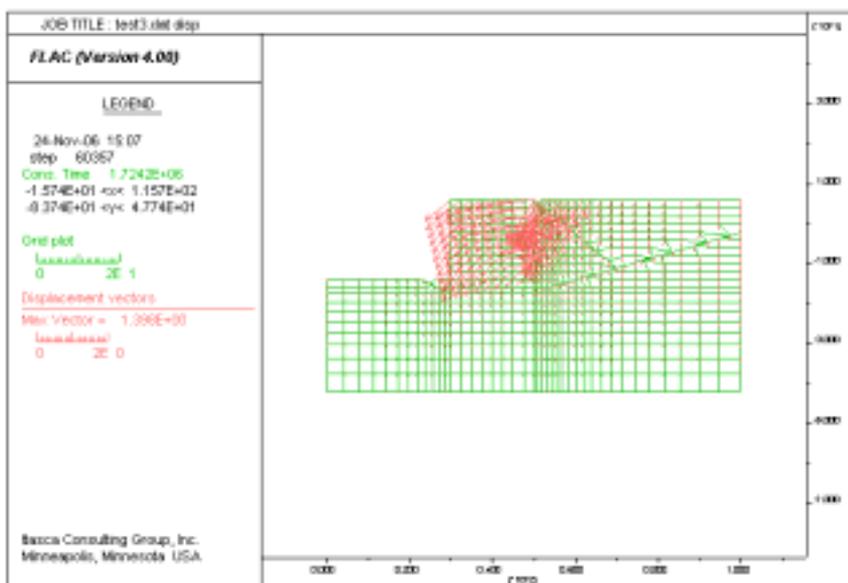


圖 4-25 全部液化情形變位分析結果

部分深度液化外力施加情形如圖 4-26 所示。

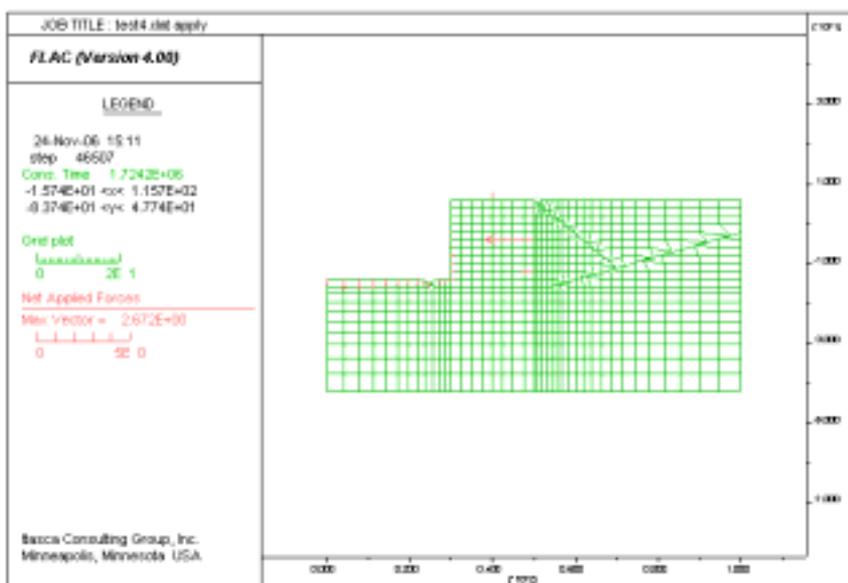


圖 4-26 部份深度液化情形外力分佈圖

部分深度液化變位分析結果如圖 4-27 所示。

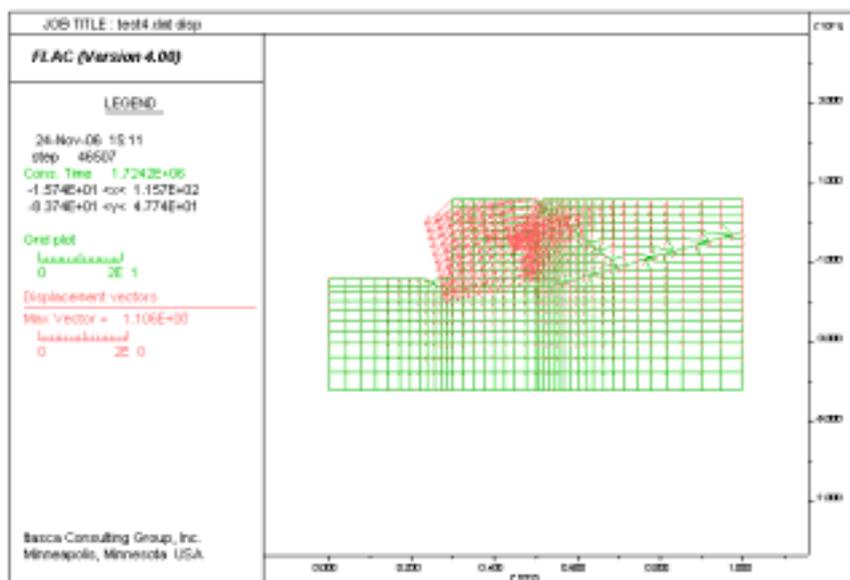


圖 4-27 部份深度液化情形變位分析結果

三種情形沉箱之變位值如圖 4-28 所示。

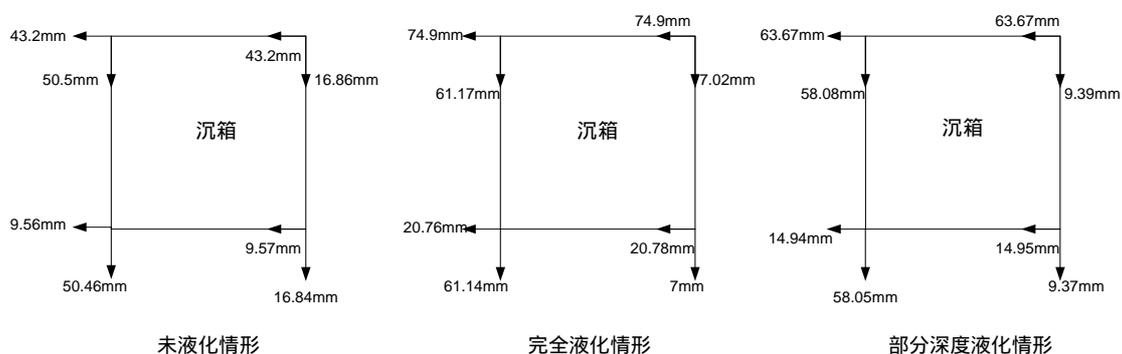


圖 4-28 未液化、完全液化及部份深度液化情形變位分析結果

#### 4.4 小結

1. 台中港 1 至 4A 號碼頭，於平時無地震情形，其滑動、傾倒安全係數或 STABL、FLAC/SLOPE 分析所得安全係數皆符合規範要求，屬於安全狀態。
2. 由 FLAC 分析台中港 1 至 3 號沉箱式碼頭背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情形，再比照碼頭實際外移 0.5~1.7m，沉陷 0.4~0.8m，可知會造成如此大的位移量，應是背填土發生液化之影響。

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

由高雄港 19 號碼頭坍塌案例可知：

1. 由碼頭結構穩定性分析結果，暴雨將導致碼頭滑動安全係數及傾倒安全係數皆小於 1，使碼頭處於不安全的狀態。
2. 由碼頭浚挖、暴雨及有無木樁對碼頭穩定性之影響分析結果，其大小分別為浚挖 > 暴雨 > 有無木樁，因木樁長度不足且洽置於軟弱粘土薄層之上，故木樁之存在對圓弧滑動抵抗之幫助甚為有限。
3. 由 STABL 和 FLAC/SLOPE 程式分析結果，其破壞面皆通過高程 -16.1m 至 -17.6m 間厚 1.5 公尺之極軟弱至軟弱沉泥質粘土層，其破壞機制大致相同。
4. 由碼頭改建後之穩定性分析結果，其安全係數值大於 2.0，可見改建後安全係數值提高不少。
5. 分別以考量圓弧破壞之 STABL 分析，及考量不限於圓弧破壞，採用有限差分法，網格計算力平衡之 FLAC/SLOPE 分析，對碼頭進行做穩定分析，可更加了解碼頭破壞機制，進而給予碼頭適當之結構系統補強或地盤改良。

由台中港 1 至 4A 號沉箱式碼頭案例可知：

1. 台中港 1 至 4A 號碼頭，於平時無地震情形，其滑動、傾倒安全係數或 STABL、FLAC/SLOPE 分析所得安全係數皆符合規範要求，屬於安全狀態。
2. 由 FLAC 分析台中港 1 至 3 號沉箱式碼頭背填土壤液化、未液化、部分深度液化三種情形，再比照碼頭實際外移 0.5~1.7m，沉陷 0.4~0.8m，可知會造成如此大的位移量，應是背填土發生液化之影響。

## 5.2 建議

1. 應針對國內各港老舊碼頭、堤防等進行總體檢，了解其地質、浚挖情形、潮汐海象資料，並針對碼頭結構穩定性作一整體檢核，對於穩定性不佳之碼頭，應給予碼頭適當之結構系統補強或地盤改良，以避免其它災害再次發生。
2. 使用 FLAC 動力版程式，利用其程式內建之 Finn 模式應更能有效模擬飽和砂土受反覆荷重（如地震）使體積減小而激發超額孔隙水壓致土壤液化問題，並可輸入實際地震紀錄模擬施加地震力。

## 參考文獻

1. 賴聖耀等，"港灣地區大地監測調查與液化防治之研究 ( 3/3 )"，交通部運輸研究所，民國 94 年 1 月。
2. 交通部，「港灣構造物設計基準 - 碼頭設計基準及說明」，民國 86 年 7 月。
3. 李延恭、謝明志，"高雄港 19 號碼頭坍塌原因檢討報告"，港灣技術研究所，民國 84 年 1 月。
4. 李佳翰，「沉箱式碼頭受震引致土壤液化之數值模擬」，國立中央大學應用地質研究所，民國 90 年 6 月。
5. 林四川、吳文隆、周功台，「邊坡穩定分析程式 ( STABL ) 應用之探討」，土工技術雜誌第 41 期，民國 82 年 3 月。
6. FLAC/Slope，"a mini-version of FLAC to calculate factor of safety for slopes"，User's Guide，Itasca Consulting Group Inc.，U.S.A.，2005.
7. FLAC，"Fast Lagrangian Analysis of Continua"，Version 4.0，User's Guide，Itasca Consulting Group Inc.，U.S.A.，2000.
8. STABL，"A Description of the Use of STABL's Programmed Solution for the General Slope Stability Problem"，User's Manual，Purdue University，1975.
9. Harald W. Van Aller, P.E.，"User's Guide to STEDwin 2.7 ( 32-bit )"，Annapolis Engineering Software，2002.