

基本研究—研究計畫(一)

執行期間：民國七十二年七月至七十四年六月卅日

計畫名稱：港內波對碇泊船隻衝擊之碼頭設計改善研究

計畫主持人：

副所長 侯 和 雄

協同主持人：

組 長 歐陽餘慶

研究人員：

副研究員 王 慶 福

副研究員 曾 哲 茂

助理研究員 翁 國 和

研究助理 江 金 德

技 工 曾 文 傑、柯 正 龍、徐 如 娟

臺灣省交通處港灣技術研究所

中華民國七十四年六月卅日

港內波對碇泊船隻衝擊之碼頭設計改善研究

目 錄

摘 要

第一章 概 論

1.1 緒 言	1
1.2 數值模擬與試驗研究	1
1.3 改善研究	2
1.4 預期效益	2

第二章 理論數值模擬

2.1 利用格林函數解船體運動 $\eta_1(t)$ 之理論分析	3
2.1.1 積分方程式	3
2.1.2 數值解析	4
2.1.3 船體運動 $\eta_1(t)$ 之靜定解	5
2.2 船體 6 自由度運動理論	6
2.2.1 基本假設	6
2.2.2 運動方程式	7
2.3 數值分析結果之討論	8

第三章 試驗儀器及測定

3.1 運動計測裝置	30
3.2 加速度測定	32
3.3 張力、傾斜的計測	32
3.4 資料讀取機—20 F 型	33

第四章 模型試驗

4.1 試驗比例尺與模型律	39
---------------	----

4.2	船體及碼頭模型製作.....	39
4.3	試驗條件及內容.....	39
4.4	試驗步驟.....	40
4.5	試驗結果.....	44
4.5.1	運動量.....	44
4.5.2	張 力.....	65
4.5.3	纜繩晃動角.....	67
4.5.4	加速度.....	71
第五章	結論與建議.....	75

港內波對碇泊船隻衝擊之碼頭設計改善研究

摘要

本研究乃以理論與試驗方法預測碇泊船舶（貨櫃船為對象）承受波浪作用之動力反應。以不同入射波研析碇泊船隻之動力反應，可由實際可能港口之入射波模擬造波，船體分空載與滿載兩種情況，分別解求碇泊船隻之運動，以及纜繩受力的大小，並點繪結果求得船舶固有週期及對應波浪週期下最大纜繩拉力（繫船柱受力）。

第一章 概 論

1.1 緒 言

一般海岸港灣工程經過室內作業之規劃設計與佈置的適當選擇後，通常再實施數值分析（Computer Modeling）或模型試驗（Model test），來模擬現場之變化情況。水工遮蔽模型試驗就是用來求得各種防波堤、碼頭之最佳佈置情況。其目的在使外廓堤防的佈置能有效的阻止外海波浪侵入港區，使得碼頭前得到一個比較穩靜的水域，進而有充分的碼頭裝卸作業條件。這是從港池波高的大小分佈觀點來考慮。事實上，在規劃設計過程中，估計碼頭的作業能力，碇泊船隻的運動而導致纜繩受力的大小，護舷受力的大小，也是一個主要的考慮因素。經濟上直接影響到主要的投資，間接的也影響到維護的費用和作業的可行性，足見本計畫的重要性。

本計畫僅就（一）船體受波浪作用之動態分析，（二）纜繩與繫船柱之動態分析進行研究。

1.2 數值模擬與試驗研究：

分析碇泊船隻的運動，纜繩的受力，必須對整個振動系統模擬，包括船隻本身，錨繫系統及外力。

試驗儀器：

1. 船模運動試驗儀：俯仰計，二次檢定器，震動器 (Vibrator)。
2. 船模衝擊試驗儀：加速度測定儀，自動平衡信號，調節器，記錄儀。
3. 船模錨碇試驗儀：張力計。

試驗內容：

採 Froude Model Law 各項縮尺為 $l_m/l_p = \frac{1}{100}$,
 $V_m/V_p = (l_m/l_p)^{1/2} = \frac{1}{10}$, $F_m/F_p = (l_m/l_p)^3 = \frac{1}{10^3}$
 $t_m/t_p = (l_m/l_p)^{1/2} = \frac{1}{10}$

擬對模型船 (貨櫃船)，有系統的改變波浪週期進行試驗，測定船舶本身的運動，繫船纜繩的受力。

1.3 改善研究：

1. 改變碼頭或泊地的方向。
2. 改變纜繩的勁度。

1.4 預期效益：

瞭解各種入射波作用下，船舶運動量大小，船舶運動共振週期及纜繩繫船柱受力的大小，以供港灣規劃設計及碼頭作業之參考。

第二章 理論數值模擬

2.1 利用格林函數解船體運動 $\eta_1(t)$ 之理論分析

2.1.1 積分方程式

考慮 $\vec{x}$, $G(\vec{x}, \vec{\xi})$ 函數滿足下列條件

$$\nabla^2 G(\vec{x}, \vec{\xi}) = \delta(\vec{x} - \vec{\xi}) \quad -h \leq z \leq 0 \quad -h < \zeta < 0 \quad (2-1)$$

$$-w^2 G + g \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad \text{在 } z = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial G}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } z = -h \quad (2-3)$$

$$G \sim \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} r^{-1/2} e^{ikr}, \quad \text{當 } r \rightarrow \infty \quad (2-4)$$

(2-1) 式為 Dirac delta 函數，可由下式獲其定義

$$\int_D h(\vec{x}) \cdot \delta(\vec{x} - \vec{\xi}) dV(\vec{x}) = h(\vec{\xi}), \quad \vec{\xi} \text{ 在 } D \text{ 域內} \quad (2-5)$$

$h(\vec{x})$ 為某定級內之試驗函數

應用格林定理於 $G(\vec{x}, \vec{\xi})$ 中而 ϕ_1 為 S_0 在 $z = 0$ ，與 $z = -h$ 包圍之區域內，可以證明 ϕ_1 代表為

$$\phi_1(\vec{x}) = \int_{S_0} Q_1(\vec{\xi}) \cdot G(\vec{x}, \vec{\xi}) ds \quad (2-6)$$

Q_1 為源密度函數待決定。柯諾 (Kernel) 函數 $G(\vec{x}, \vec{\xi})$ 名為就 ϕ_1 問題之格林函數。類此一函數，可寫成兩種一般形式，依據 Wehausen 及 Laitone (1960) 表示成積分形式為

$$\begin{aligned} G(\vec{x}, \vec{\xi}) = & \frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + 2PV \int_0^\infty (\mu + \nu) e^{-\mu h} \\ & \frac{\cosh[\mu(\zeta+h)] \cdot \cosh[\mu(z+h)]}{\mu \sinh(\mu h) - \nu \cosh(\mu h)} \cdot J_0(\mu r') d\mu \\ & + j \frac{2\pi(k^2 - \nu^2)}{k^2 h - \nu^2 h + \nu} \cdot \cosh[k(\zeta+h)] \cdot \\ & \cosh[k(z+h)] \cdot J_0(\mu r') \end{aligned} \quad (2-7)$$

表示成系列形式則為

$$G(\vec{x}, \vec{\xi}) = \frac{2\pi(\nu^2 - k^2)}{k^2 h - \nu^2 h + \nu} \cdot \text{Cosh}[k(\zeta + h)] \cdot \text{Cosh}[k(z + h)] \cdot \\ [Y_0(kr') - iJ_0(kr')] + 4 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(\mu_j^2 + \nu^2)}{\mu_j^2 h + \nu^2 h - \nu} \cdot \\ \text{Cos}[\mu_j(\zeta + h)] \cdot \text{Cos}[\mu_j(z + h)] \cdot \\ K_0(\mu_j r') \quad (2-8)$$

式中

$$\nu = \frac{w^2}{g} = k \tanh kh \quad (2-9)$$

$$R = [(\bar{x} - \bar{\xi})^2 + (\bar{y} - \bar{\eta})^2 + (\bar{z} - \bar{\zeta})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-10)$$

$$R' = [(\bar{x} - \bar{\xi})^2 + (\bar{y} - \bar{\eta})^2 + (\bar{z} + 2h + \bar{\zeta})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-11)$$

$$r' = [(\bar{x} - \bar{\xi})^2 + (\bar{y} - \bar{\eta})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-12)$$

J_0 與 Y_0 各為零階第一類與第二類貝諧 (Bessel) 函數。 k_0 表示零階之第二類修正貝諧函數。(2-7) 式中 PV 表示為積分之主要值 (Principal Value)，(2-8) 式中之 μ_j 表下列方程式之實數正根

$$\mu_j \tan(\mu_j h) + \nu = 0 \quad (2-13)$$

因為 (2-6) 式中 x 在個體邊界上之一點亦滿足，對 (2-6) 式取 ϕ_j 正向微分并應用邊界條件方程式

$$\nabla^2 \phi_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 7$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} = - \frac{\partial \phi_0}{\partial n}, \quad \text{在 } S_0 \text{ 上}$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = n_j, \quad j = 1, \dots, 6 \quad \text{在 } S_0 \text{ 上}$$

則獲致下列方程式

$$\int_{S_0} Q_j(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{\xi})}{\partial n} ds = \begin{cases} -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} & j = 7 \\ n_j & j = 1, \dots, 6 \end{cases} \quad (2-14)$$

此邊界值問題之解法，乃在於解 (2-14) 式之源密度函數 Q_j ，如 Q_j 獲知，則 ϕ_j 可直接由 (2-6) 式求得。

2.1.2 數值解析

(2-14) 式可用數值解析，將個體表面分割成 n 個方格，每方格

面積 ΔS_k ($k = 1, \dots, N$) 因為 (2-6) 式中及 (2-14) 式中之源密度函數 Q_j ($j = 1, \dots, 7$) 為連續的，完整的函數，假定源密度在每一方格皆均勻分佈，則這些積分則大致由其總和求得。

因此 (2-14) 式可改寫為

$$\alpha_{pq}(Q_j)_q = \begin{cases} -(\frac{\partial \phi_0}{\partial n})_p, & j = 7 \\ (n_j)_p, & j = 1, \dots, 6 \end{cases} \quad p, q = 1, \dots, N \quad (2-15)$$

$$\alpha_{pq} = \int_{\Delta S_q} \frac{\partial G}{\partial n}(\vec{x}_p, \vec{x}) ds, \quad p, q = 1, \dots, N \quad (2-16)$$

式中 α_{pq} 有其物理意義，由於 q 個方格之單位密度源分佈在 p 個方格內， p 控制點上之影響， $(Q_j)_q$ 為 q 方格上 j 個 ($j = 1, \dots, 7$) 振動模式之速度勢。

同理，由 (2-6) 式可得為

$$(\phi_j)_p = \beta_{pq} \cdot (Q_j)_q \quad j = 1, \dots, 7 \quad p, q = 1, N \quad (2-17)$$

式中

$$\beta_{pq} = \int_{\Delta S_q} G(\vec{x}_p, \vec{x}) ds \quad (2-18)$$

由 (2-15) 式至 (2-18) 式可知，一旦 α_{pq} 與 β_{pq} 由 (2-16) 式與 (2-18) 計算得其值，那麼 $(Q_j)_q$ 則降至解 (2-15) 式之 N 值線性代數方程式，接著 $(\phi_j)_p$ 即可由 (2-17) 式直接計算求得。

實際上，計算 α_{pq} 與 β_{pq} 有某些困難，因此需講求某些數值分析技巧。

2.1.3 船體運動 $\eta_j(t)$ 之靜定解

一旦 $(Q_j)_p$ 由表面分割技巧計算求得後，則運動方程式中

$$\begin{aligned} & \int_{S_b} \rho(-j\omega) \cdot (\phi_0 + \phi_7) e^{-j\omega t} n_j ds \\ & + \int_{S_b} \rho(-j\omega) \cdot (-j\omega \bar{\eta}_k \phi_k) e^{-j\omega t} n_j ds - C_{jk} n_k(t) \\ & = M_{jk} \ddot{\eta}(t) \quad j, k = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2-19)$$

定義

$$F_j = (-j\omega) \cdot \rho \int_{S_b} (\phi_0 + \phi_7) n_j ds \quad (2-20)$$

$$A_{jk} = -\rho \operatorname{Re} \left[\int_{S_b} \phi_j n_k ds \right] \quad (2-21)$$

$$B_{jk} = -\rho \omega \operatorname{Im} \left[\int_{S_b} \phi_j n_k ds \right] \quad (2-22)$$

(2-20)式至(2-22)式之係數 A_{jk} ， B_{jk} ， F_{jk} 即可依同理求得

$$F_j = (-j\omega) \cdot \rho \sum_{q=1}^N (\phi_0 + \phi_7)_q (n_j)_q \Delta S_q, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (2-23)$$

$$A_{jk} = -\rho \operatorname{Re} \left[\sum_{q=1}^N (\phi_j)_q (n_k)_q \Delta S_q \right], \quad j, k = 1, \dots, 6 \quad (2-24)$$

$$B_{jk} = -\rho \omega \operatorname{Im} \left[\sum_{q=1}^N (\phi_j)_q (n_k)_q \Delta S_q \right], \quad j, k = 1, \dots, 6 \quad (2-25)$$

又如(2-20)式(2-21)式及(2-22)式代入(2-19)式經整理後可寫為二階常微分方程式如

$$(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\eta}_k(t) + B_{jk} \dot{\eta}_k(t) + C_{jk} \eta_k(t) = F_j e^{-i\omega t} \\ j, k = 1, \dots, 6 \quad (2-26)$$

將 $\eta_j(t) = \bar{\eta}_j e^{-i\omega t}$ 代入(2-26)式，即可得

$$\{ [-\omega^2 (A_{jk} + M_{jk}) + C_{jk}] + j [-\omega B_{jk}] \} \bar{\eta}_k = F_j \\ j, k = 1, \dots, 6 \quad (2-27)$$

船體運動 $\bar{\eta}_k$ 之複數振幅即可因解(2-27)式而獲致解答，模擬結果如圖2.1至圖2.20所示(均為無碼頭情況，且圖2.1~2.10為自由運動，圖2.11~2.20為有纜繩系統，系統 $k_x = 1.85 \times 10^7$ 牛頓/米， $k_y = 3.14 \times 10^7$ 牛頓/米， $k_z = 1.18 \times 10^5$ 牛頓·米/度，係由圖4.22 k值換算成原型值)。

2.2 船體6自由度運動理論

2.2.1 基本假設

為使問題簡化便於理論分析，作下列基本假設：

1. 船體只受波力之作用，不考慮潮流及風力之影響。
2. 船體運動時之慣性力(Inertial force)、阻滯力(Damping force)

、彈性回復力 (Elastic restoring force)、回復浮力 (Buoyant restoring force) 及波力 (Wave force) 之間均為線性關係。

3. 波浪為小振幅波。

4. 船體受波力作用後亦為週期性運動，運動之頻率與波浪之頻率相同，惟位相不同。

5. 繫船索假設僅對 Sway 及 Roll 有作用，對 Heave 言，因水之回復浮力 (Buoyant restoring force) 甚大於繫船索之彈性回復力，故後者可以忽略。

6. 繫船索及繫船樁受力時，其荷重與變位的關係合於虎克定律 (Hook's Law)。

2.2.2 運動方程式

一繫留船體在海中受波力之作用後，六自由度 (Degree) 運動，即 Surge, Sway, Heave, Roll, Yaw 及 Pitch 等，為便於敘述船體運動，建立兩個座標系統，一隨船體運動，一固定於空間 (參考圖 4.3)， x, y, z 表線性位移 Surge, Sway, Heave, ϕ, θ, ψ 表角轉動量。縱向運動 (Longitudinal motion) Surge, Heave, Pitch 與橫向運動 (Transverse motion) Sway, Roll, Yaw 互相獨立。若波浪由 Y 軸方向入射，假設波力、船體及繫留索均與 Y 軸對稱，無 Surge, Pitch 及 Yaw 運動，方程式可表為：

$$\text{Surge : } m \ddot{Y} = F_y^i + F_y^d + F_y^m + F_y^w \quad (2-28)$$

$$\text{Heave : } m \ddot{Z} = F_z^i + F_z^d + F_z^m + F_z^w \quad (2-29)$$

$$\text{Roll : } I_x \ddot{\phi} = M_\phi^i + M_\phi^d + M_\phi^m + M_\phi^w \quad (2-30)$$

m : 船之質量

I_x : 船體對 X 軸之轉動慣量 (Moment of inertia)

F^i : 慣性力 (Inertia force)

F^d : 阻滯力 (Damping force)

F^w : 水之回復力 (Hydrostatic restoring force)

F^m : 繫船索之拉力 (Mooring restoring force)

F^w : 波力 (Wave force)

$\ddot{Y}$, $\ddot{Z}$: 船體在 Y , Z 方向之加速度

$\ddot{\phi}$: 因 Roll 轉動產生之角加速度

解方程式時 (2-28) 與 (2-30) 聯立，而 (2-29) 式獨立解之。
假如考慮以上之運動方程式均為線性關係，入射波為微小振幅波，則各方向之運動為正 (餘) 弦函數，且頻率相同之週期性運動，惟位相不同。
為方便計，將方程式 (2-28)，(2-29)，(2-30) 改寫成 (2-31) 及 (2-32) 兩式：

$$\begin{bmatrix} a_{22} & a_{24} \\ a_{42} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{22} & b_{24} \\ b_{42} & b_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{22} + e_{22} & c_{24} + e_{24} \\ c_{42} + e_{42} & c_{44} + e_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_2 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

$$a_{33} \ddot{Z} + b_{33} \dot{Z} + c_{33} Z = F_3 \quad (2-32)$$

Y , ϕ , Z , F_2 , F_4 均為時間 t 之函數

a_{ij} : 慣性質量係數 (Inertial mass coefficient)

b_{ij} : 阻尼係數 (Damping coefficient)

c_{ij} : 回復浮力係數 (Hydrostatic restoring coefficient)

e_{ij} : 回復彈性係數 (Elastic restoring coefficient)

Y , Z 表 Sway Heave 之位移

ϕ : 表 Roll 之轉角

i : 某特定量之方向

j : 某特定量藉以產生運動之方向

指數 2 , 3 表 Sway , Heave

指數 4 表 Roll

2.3 數值分析結果之討論

1. Heave 運動在船體空載時，碼頭與波向形成 45° 與 135° ，其結果極為

相近，其力之大小隨週期增長而加大，但空載碼頭與波向成 90° 之波浪作用時 Heave 漂移力則隨週期增長而有略為降低之趨勢。空載 180° 則有隨週期增加而 Heave 降低後再增加。滿載成 0° 與 180° 則亦隨週期增加 Heave 降低後再增加。

2. Surge 運動，由數值分析顯示在船體上作用，則有隨波浪週期增長，而作用力有顯著增大之趨勢。

3. Pitch 運動，在船體各種配置下均有相同之運動趨勢，且其 Pitch 最大運動量均發生在波週期 20 秒情況，理論模式結果顯示 Pitch 運動量由波週期 10 秒至 20 秒一直上升，自 20 秒以後 Pitch 運動量緩慢下降。

4. 船體配置方位在各種運動量顯示與波向平行時之量變小，亦即船體有轉其方向面對波浪進行方向之趨勢。

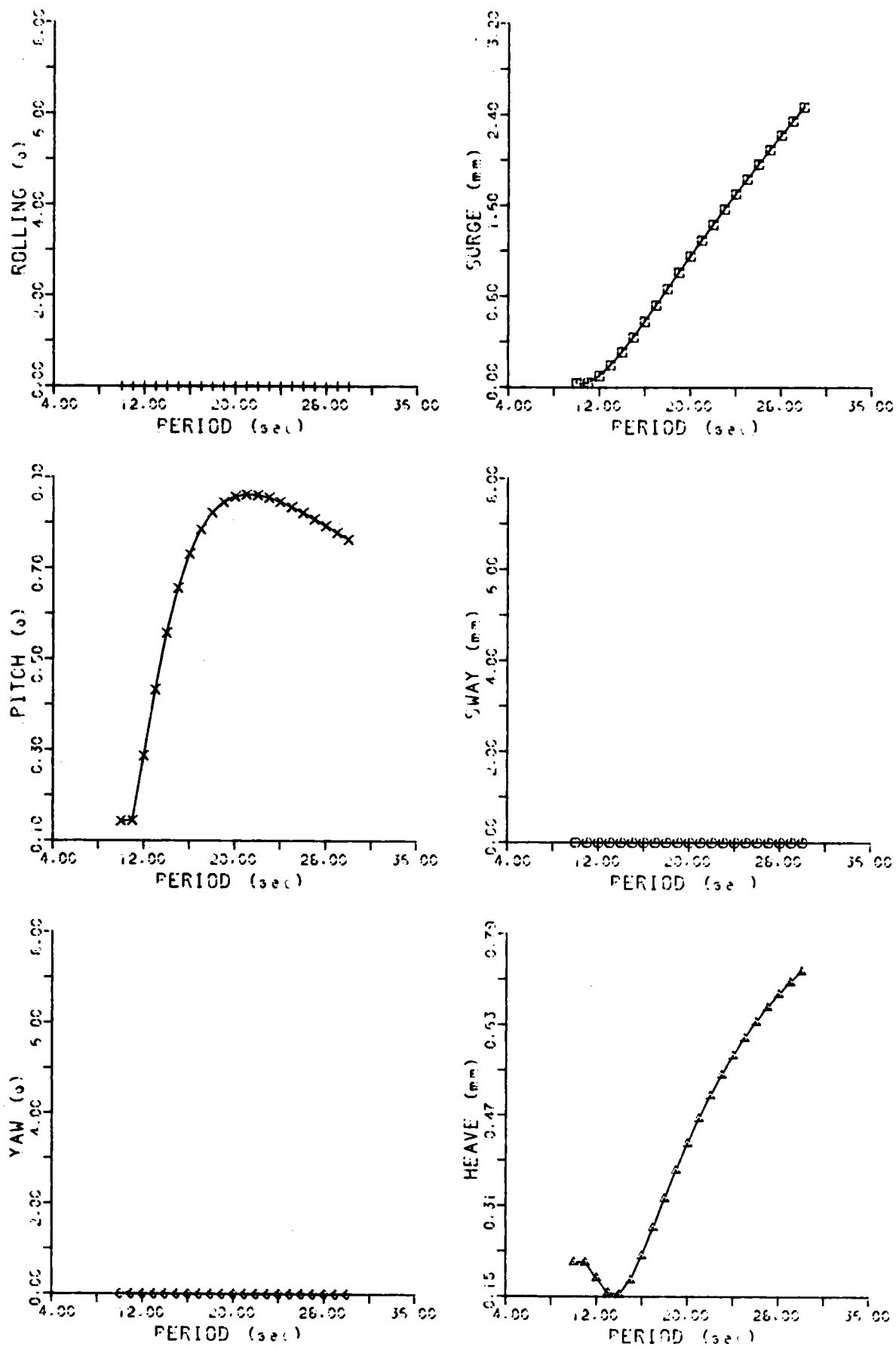


圖 2·1 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 空載重 波向 0°)

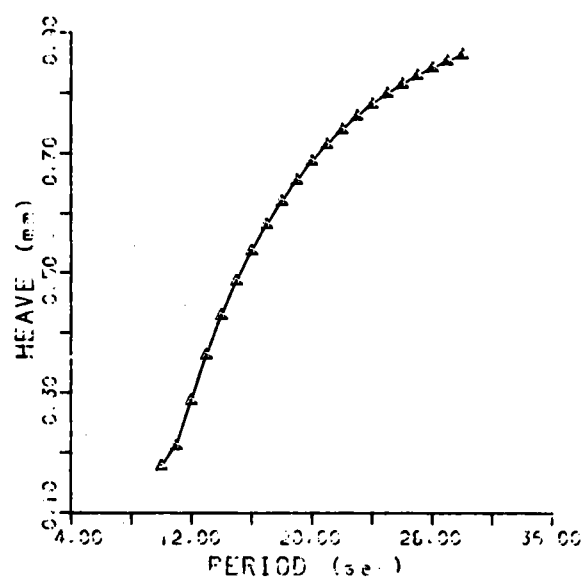
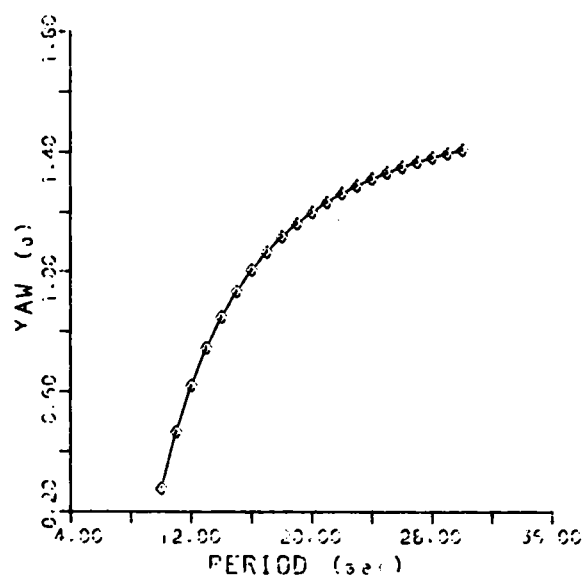
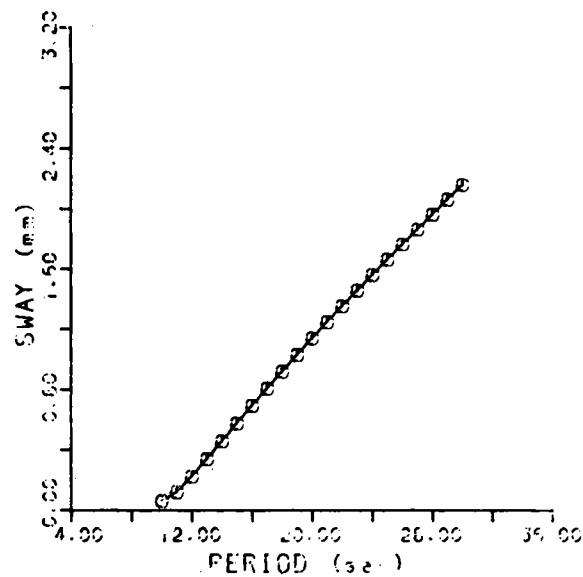
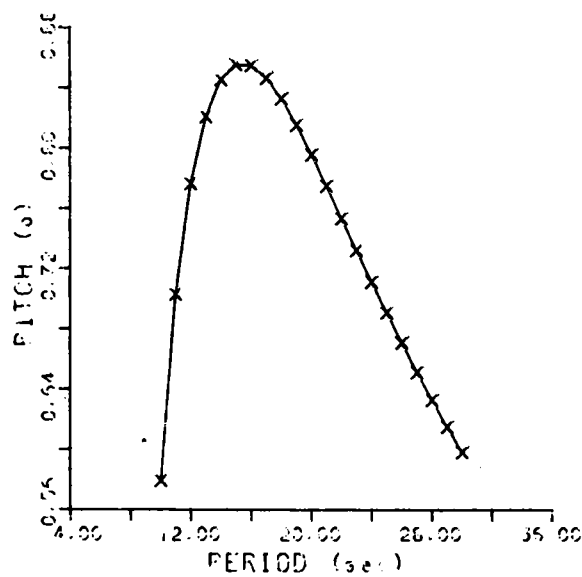
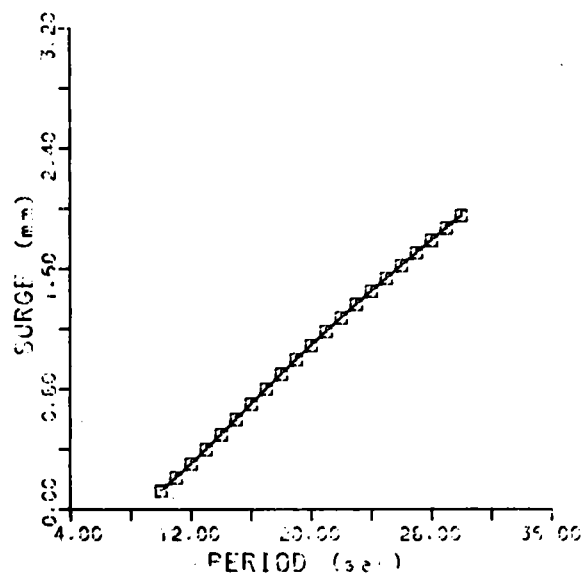
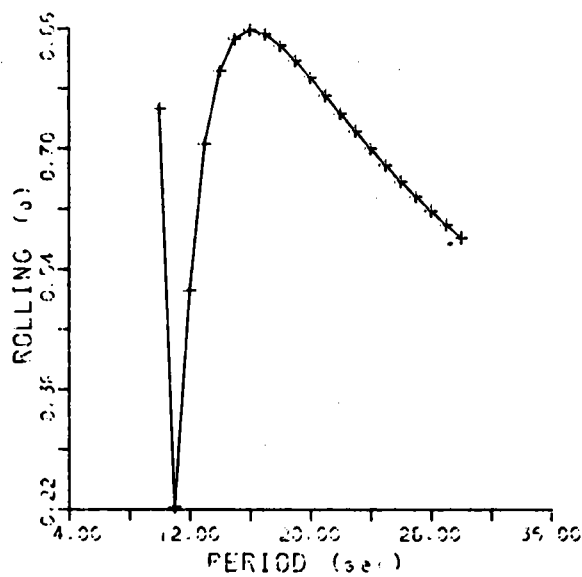


圖 2.2 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 空載重 波向 45°)

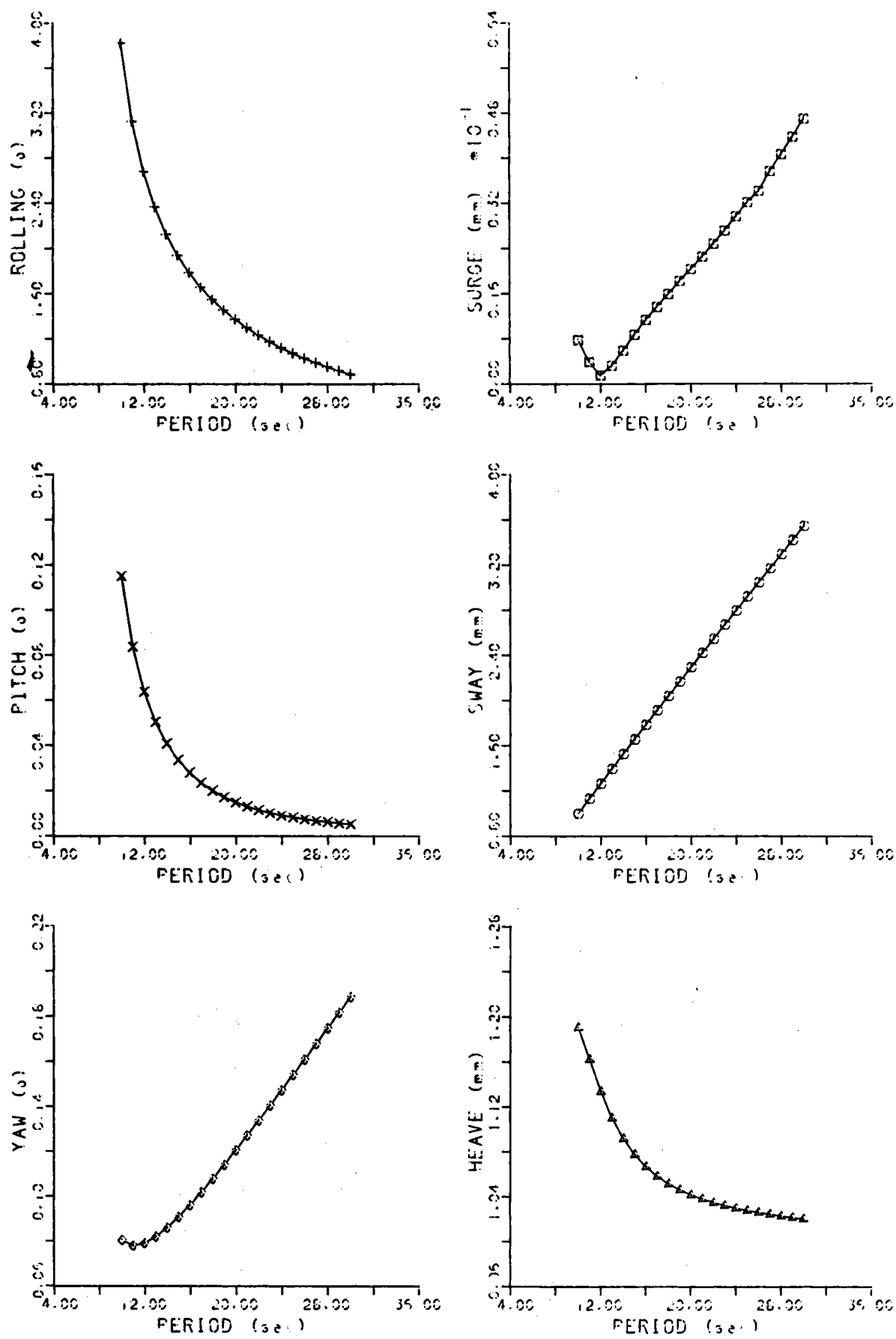


圖 2.3 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 空載重 波向 90°)

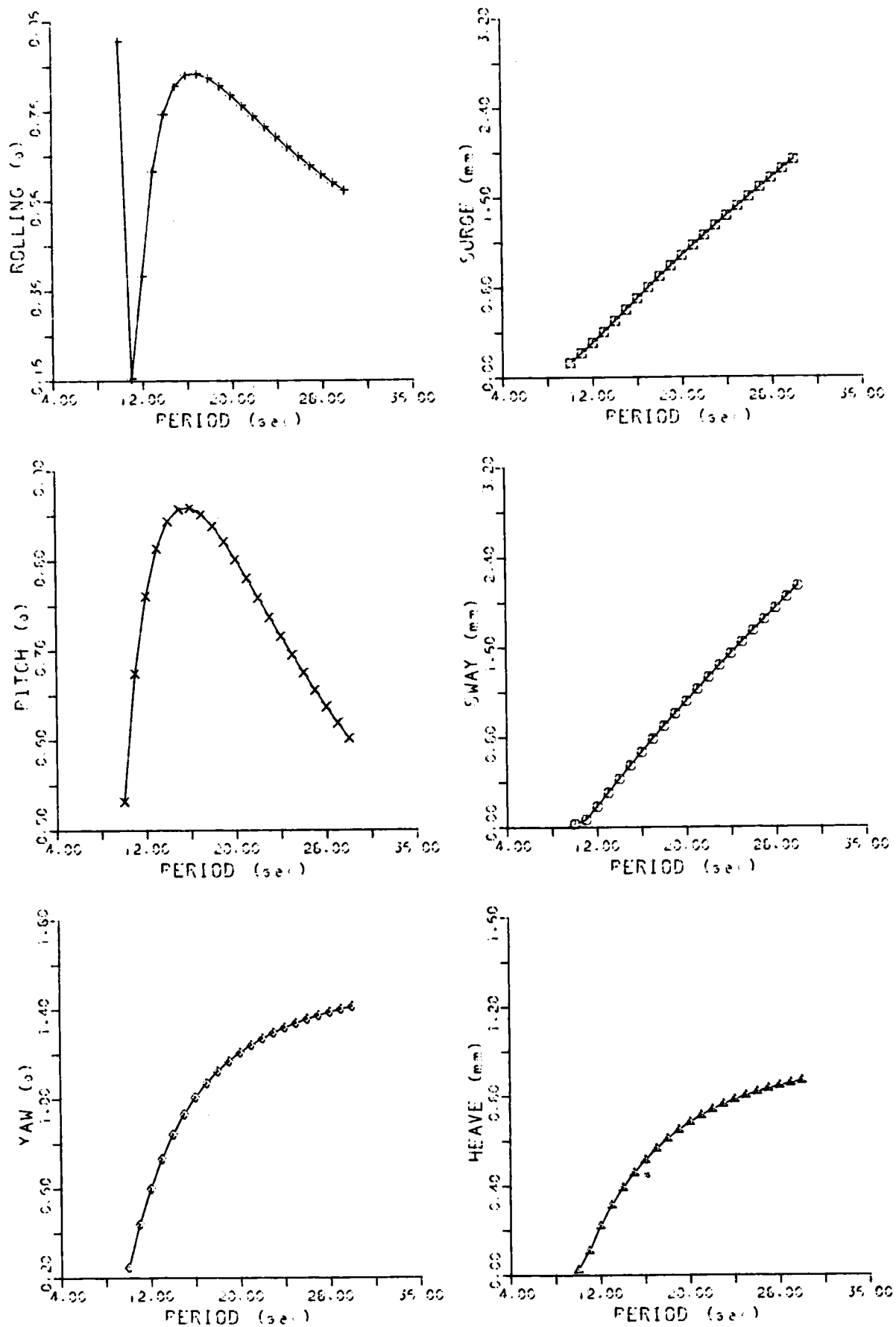


圖 2.4 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 空載重 波向 135°)

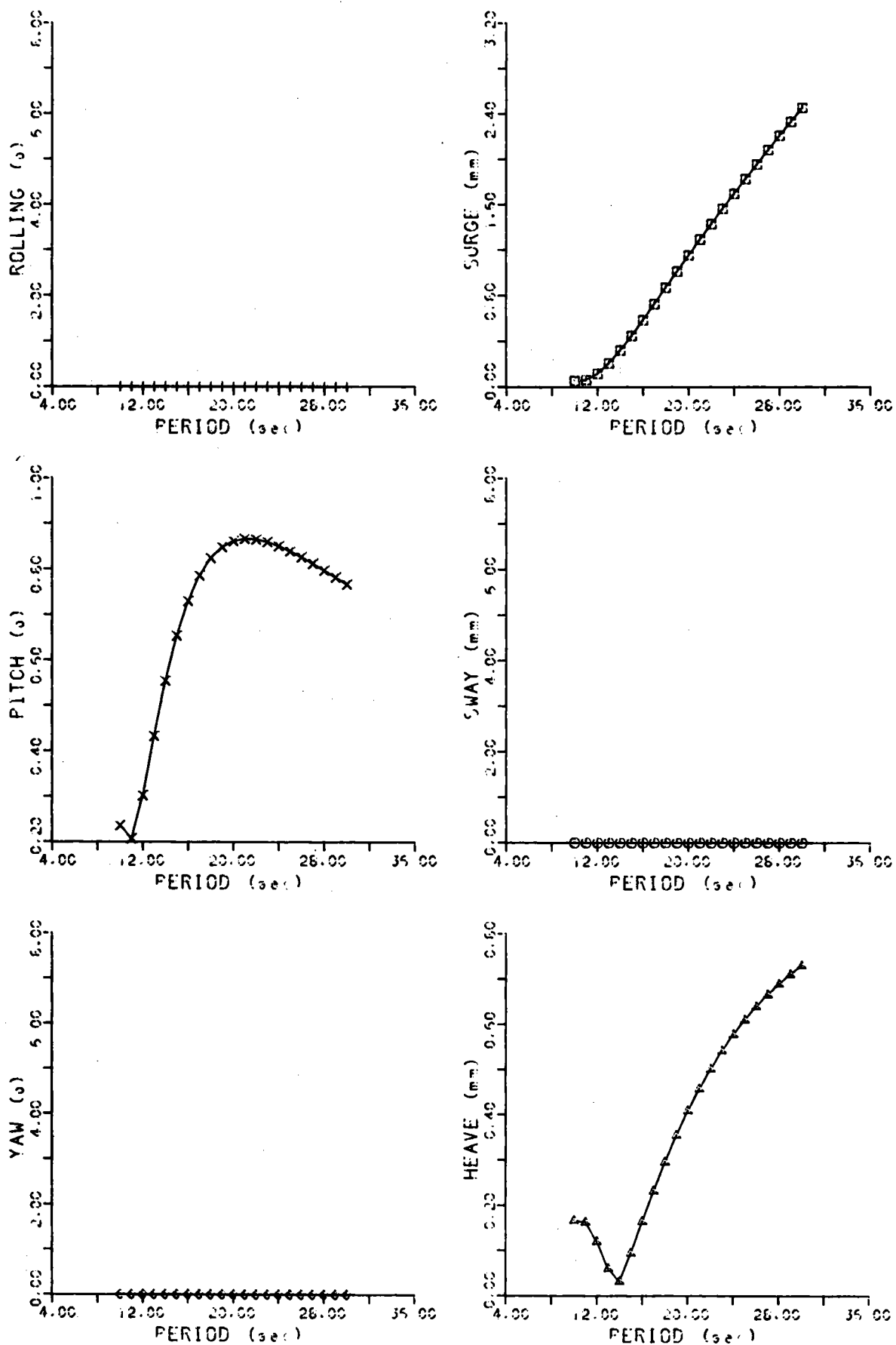


圖 2.5 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 空載重 波向 180°)

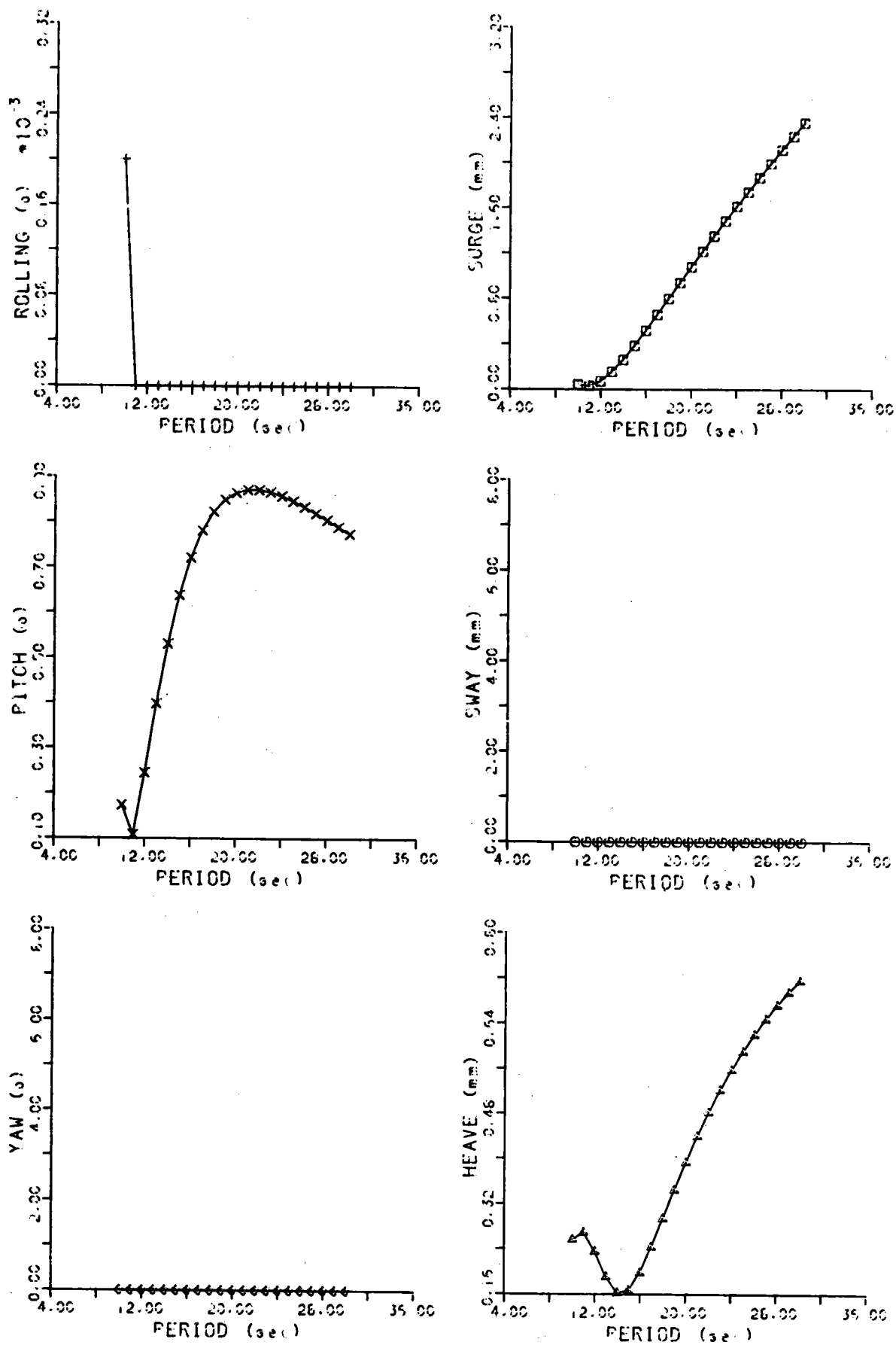


圖 2.6 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 滿載重 波向 0°)

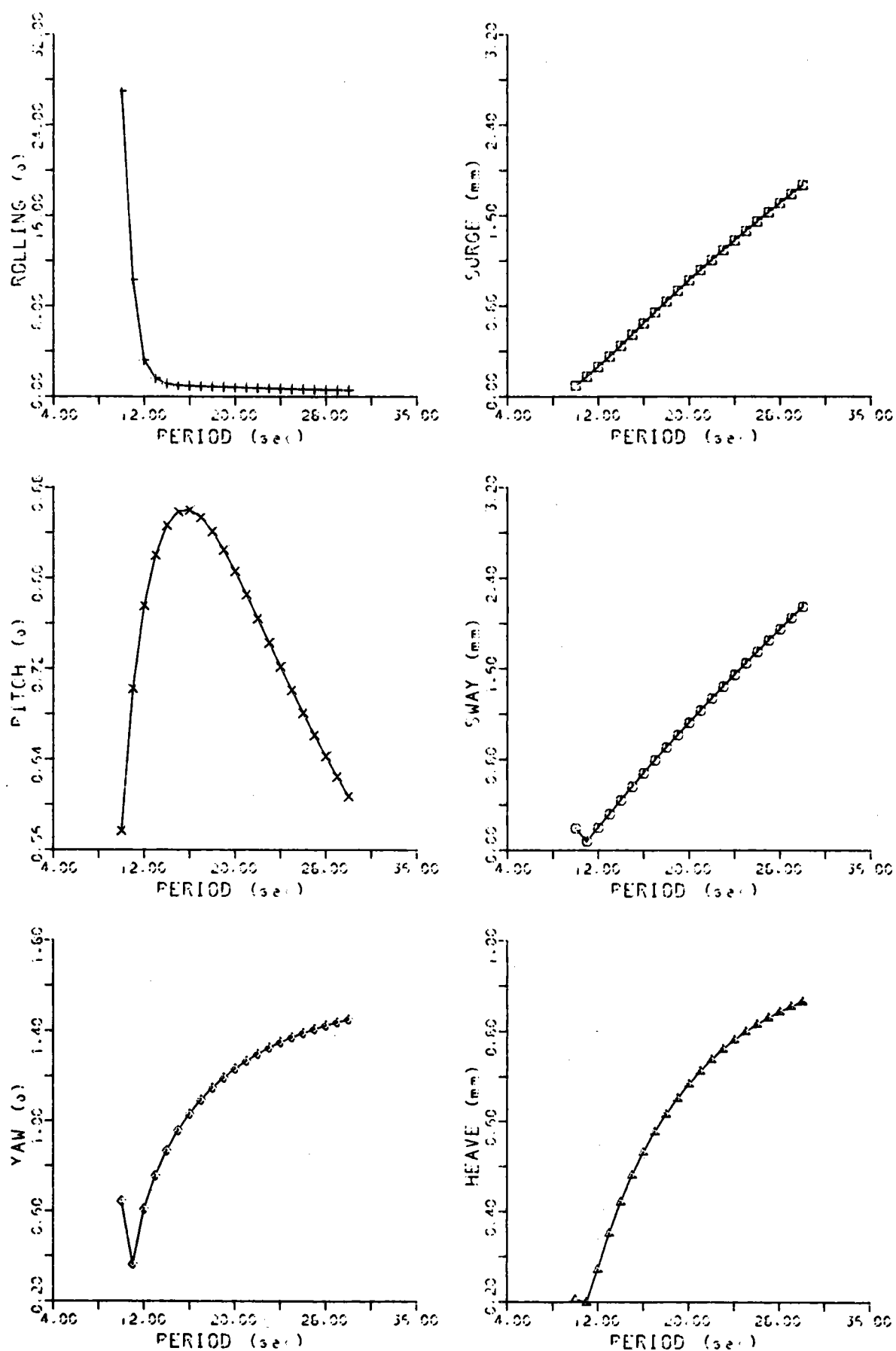


圖 2.7 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 滿載重 波向45°)

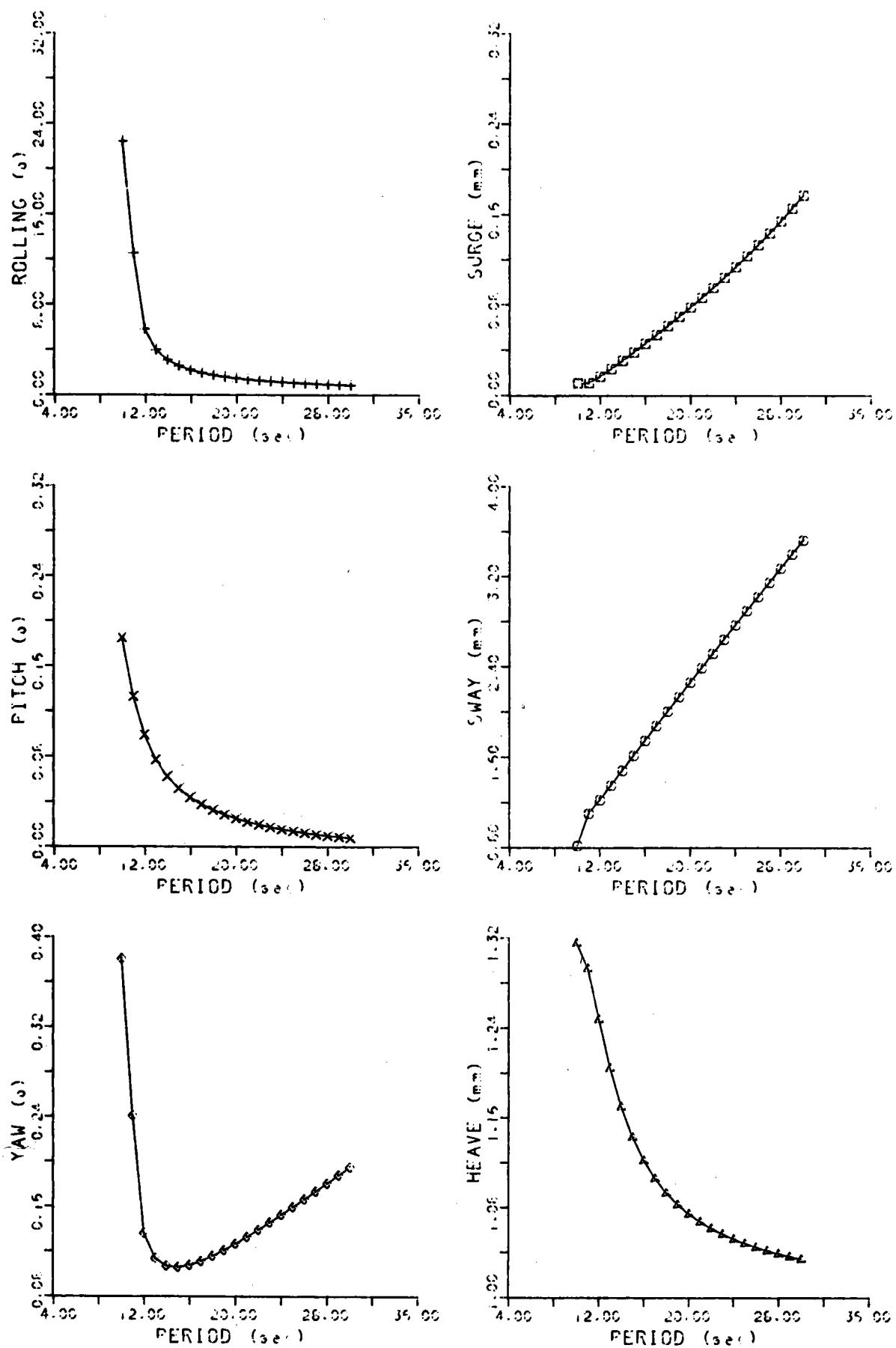


圖 2.8 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 滿載重 波向 90°)

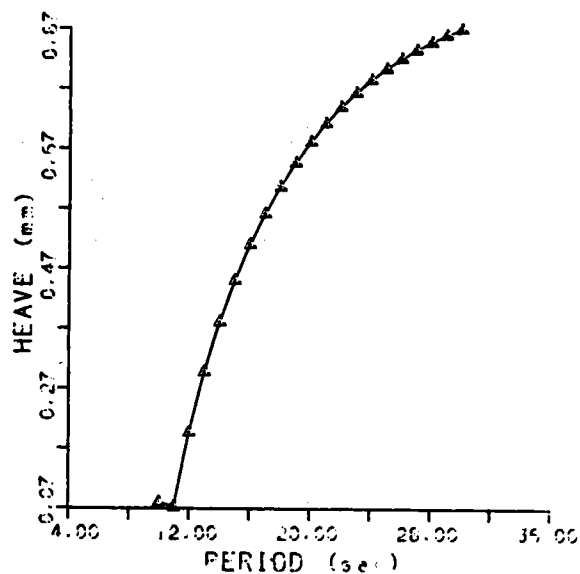
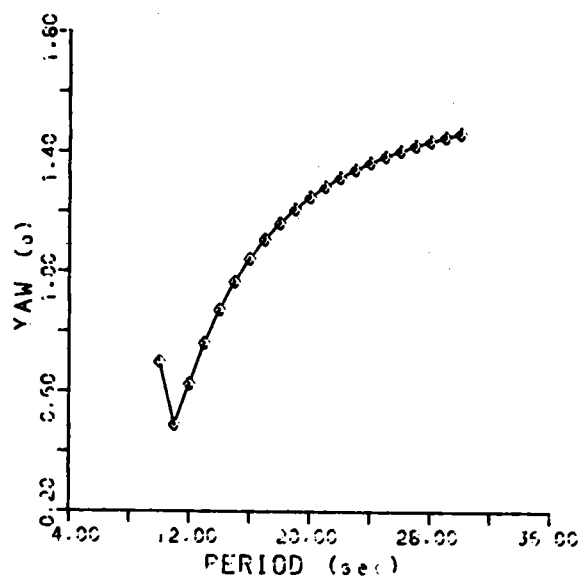
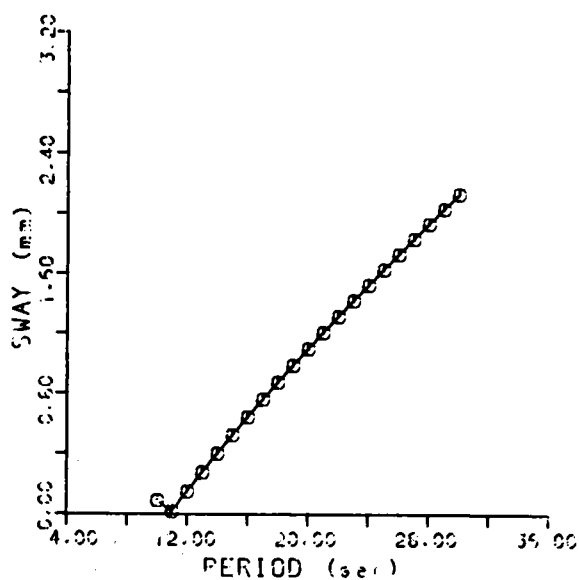
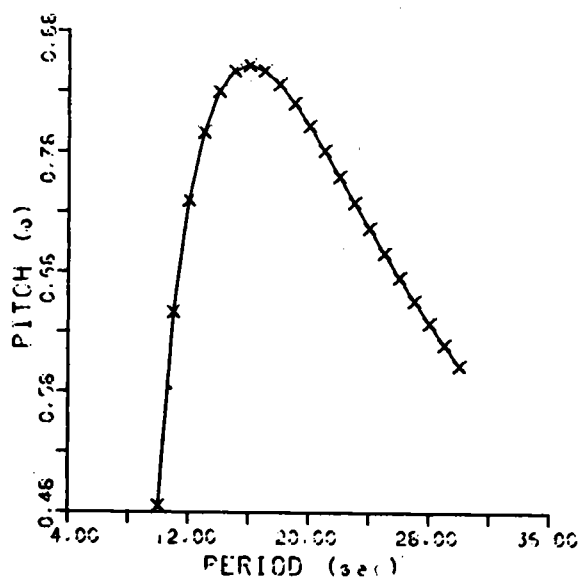
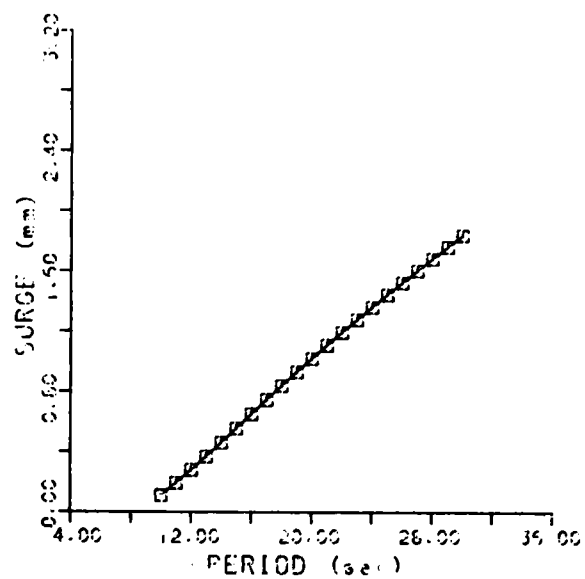
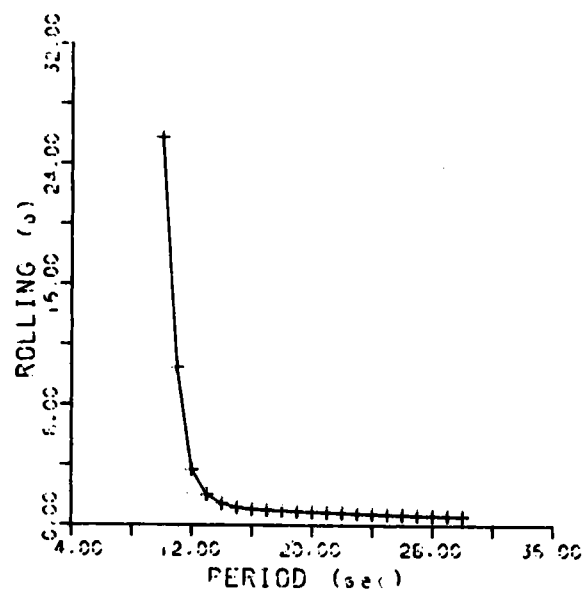


圖2.9 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 滿載重 波向135°)

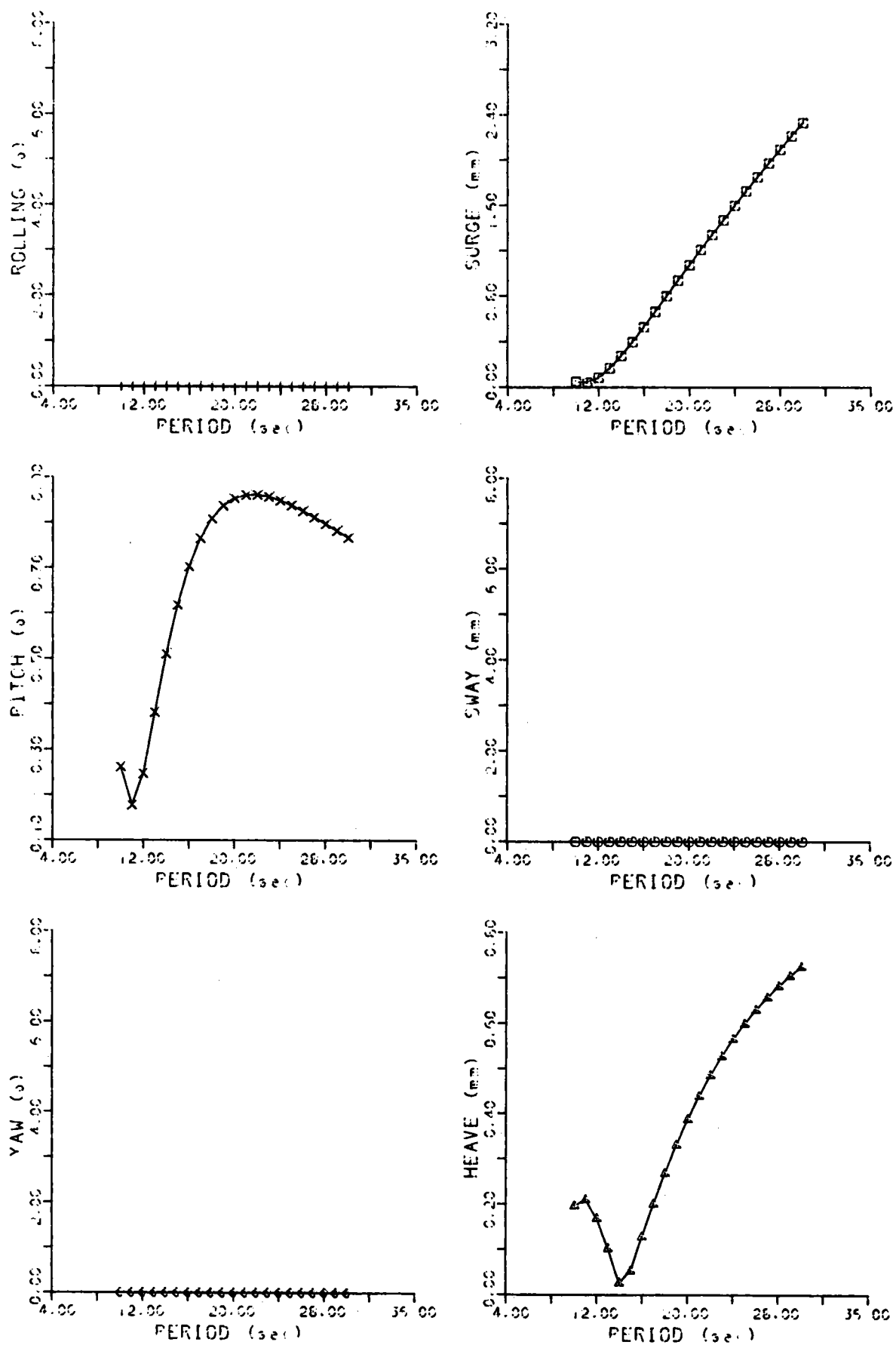


圖 2.10 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(不繫纜 滿載重 波向 180°)

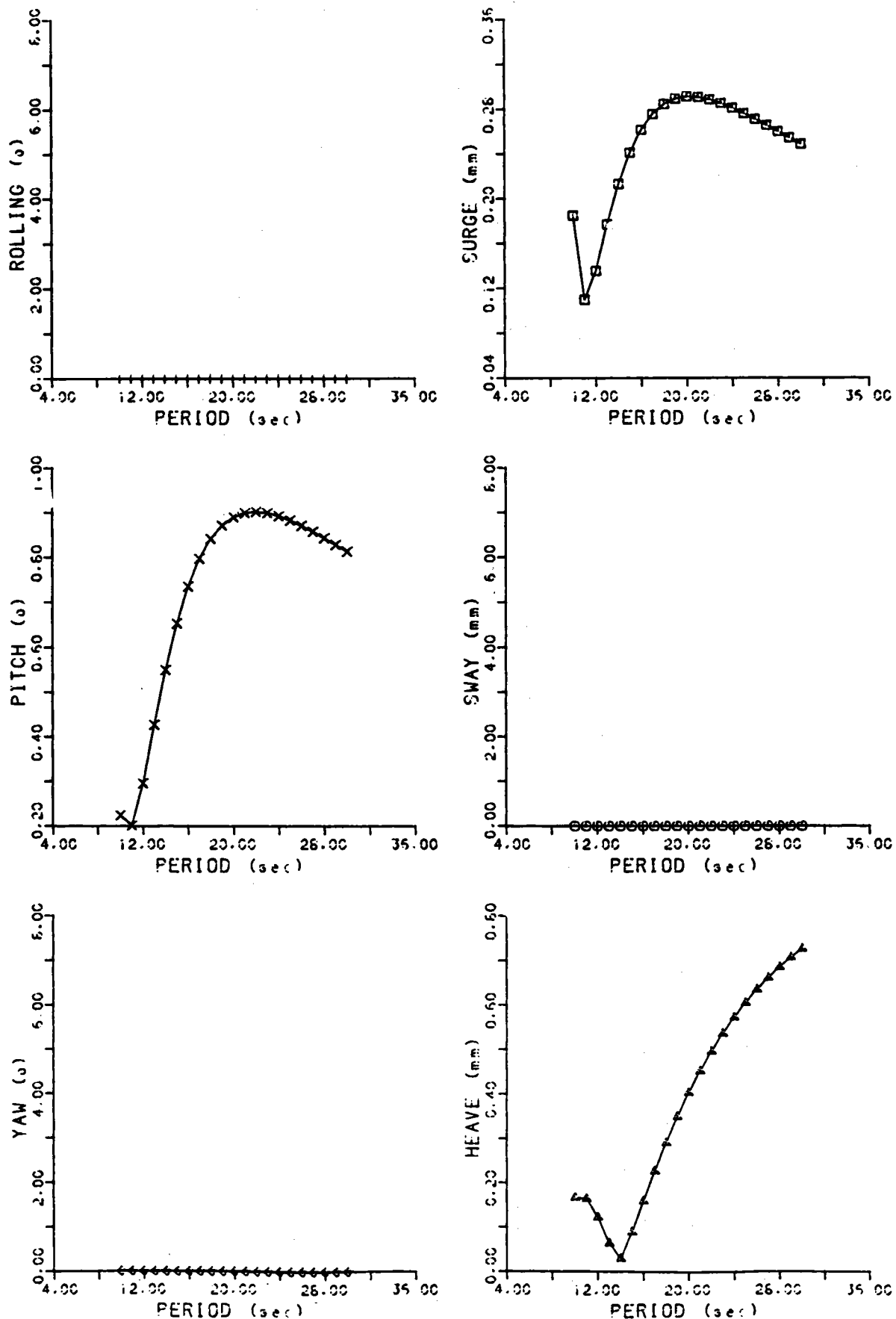


圖 2.11 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 空載重 波向 0°)

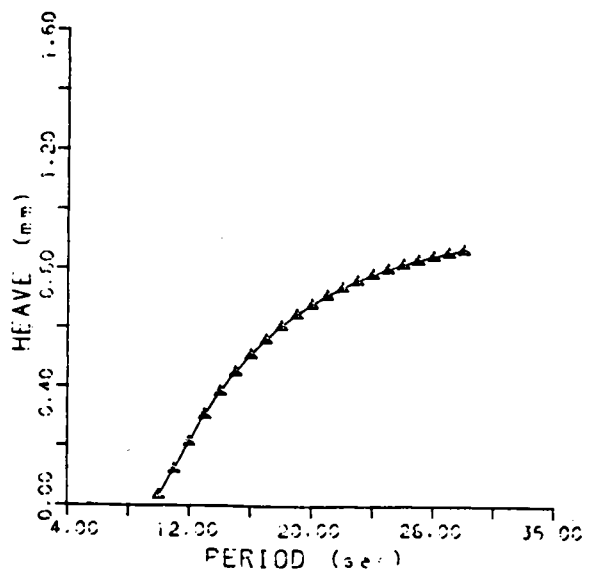
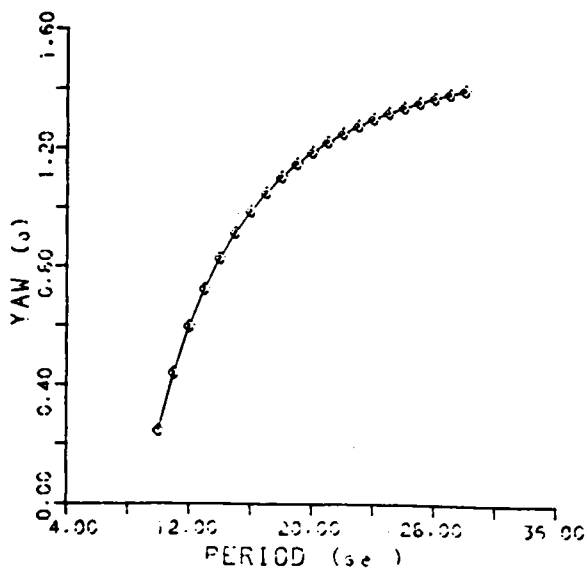
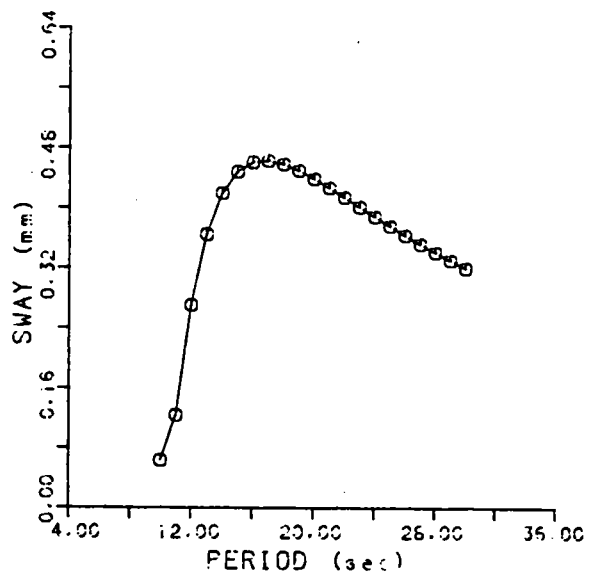
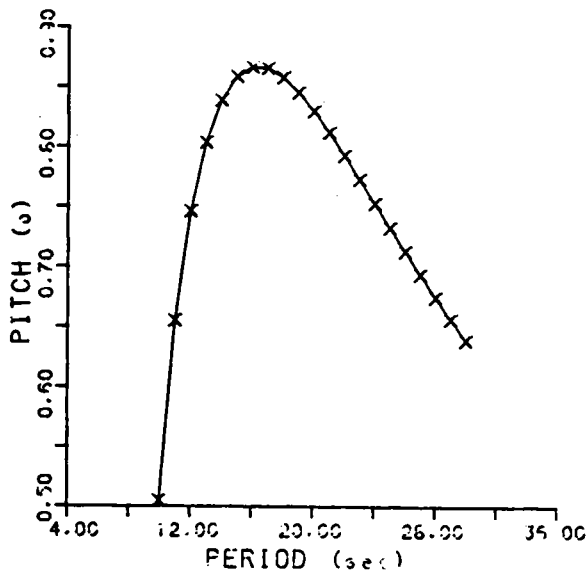
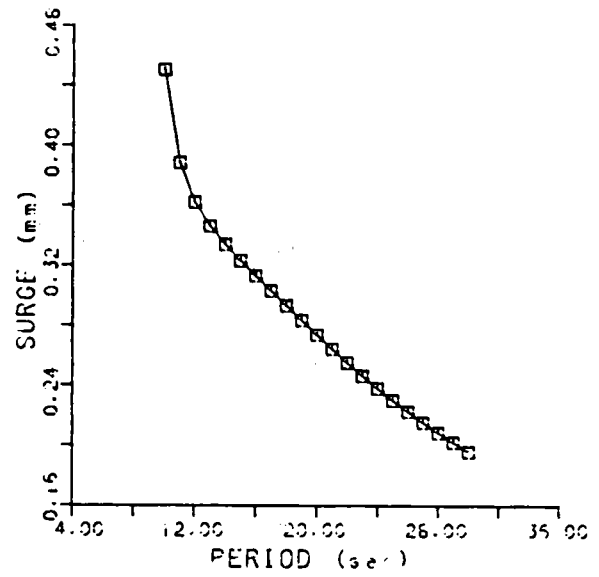
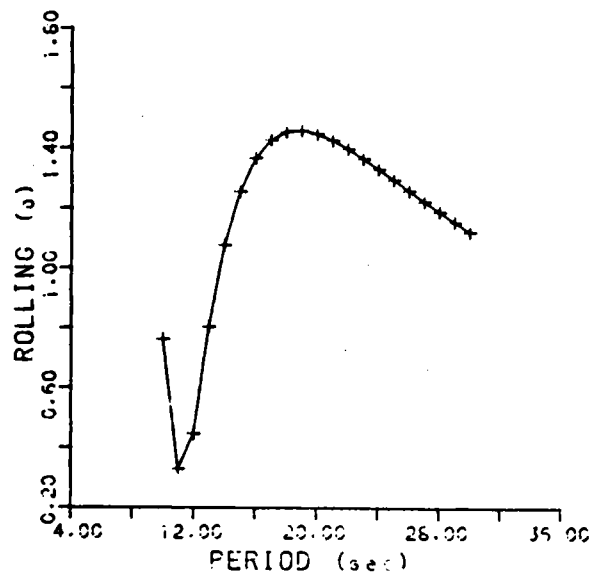


圖 2.12 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 空載重 波向 45°)

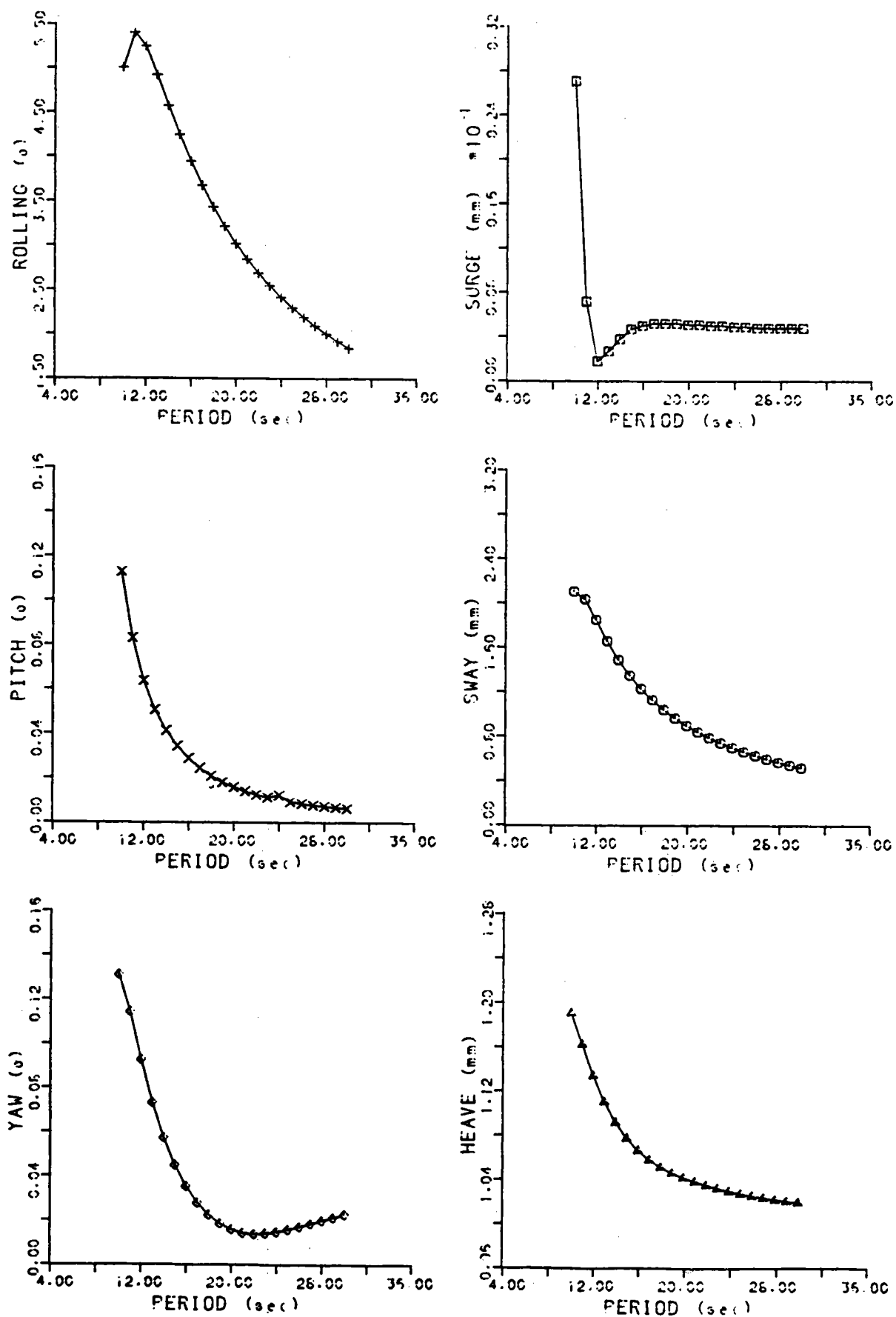


圖 2.13 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 空載重 波向 90°)

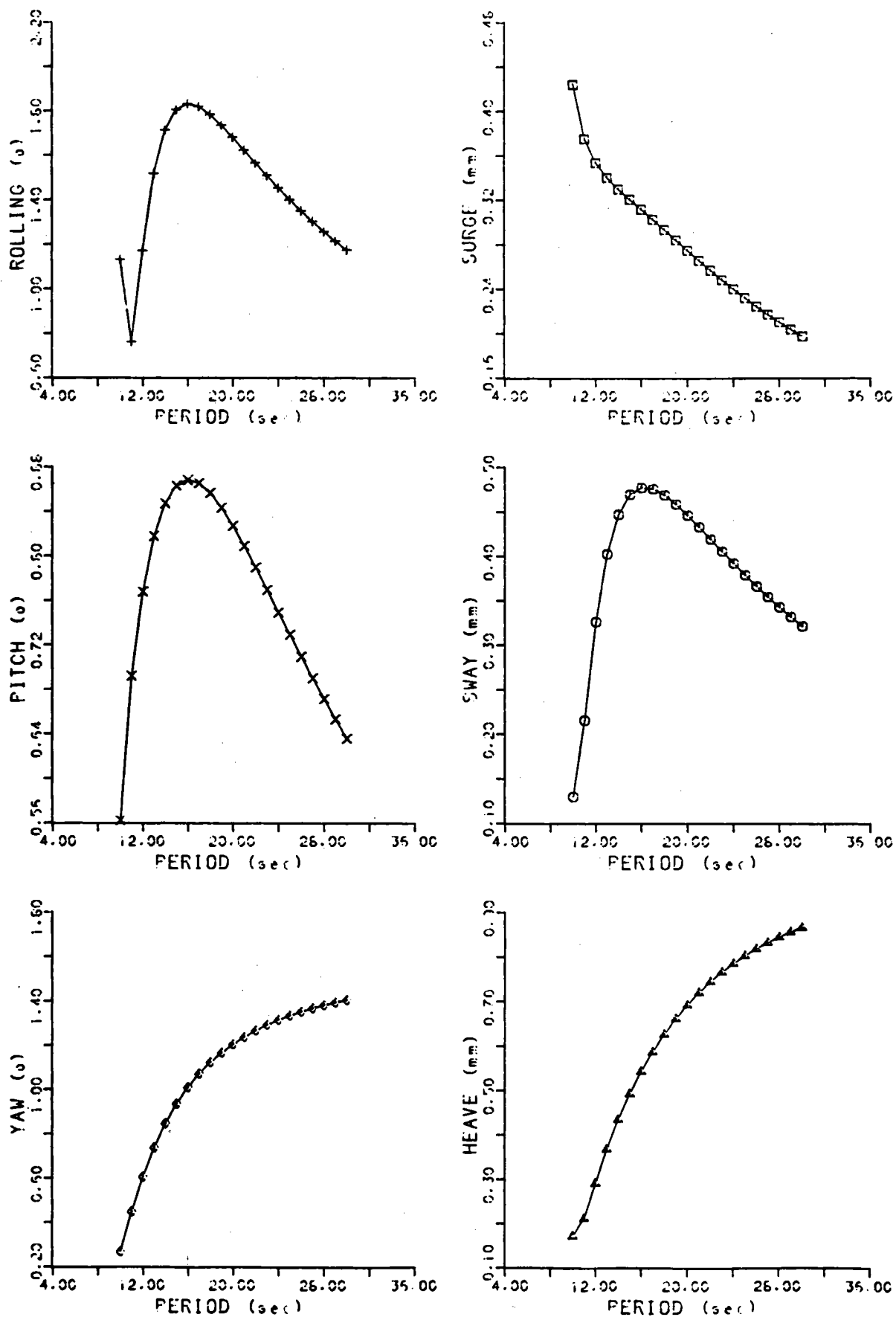


圖 2.14 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 空載重 波向135°)

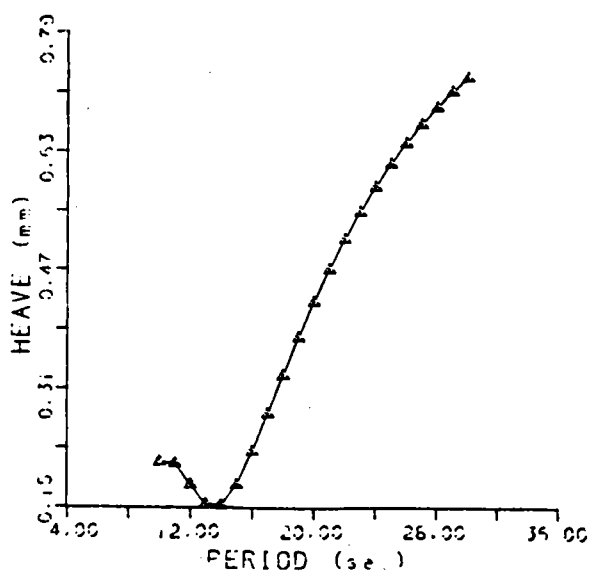
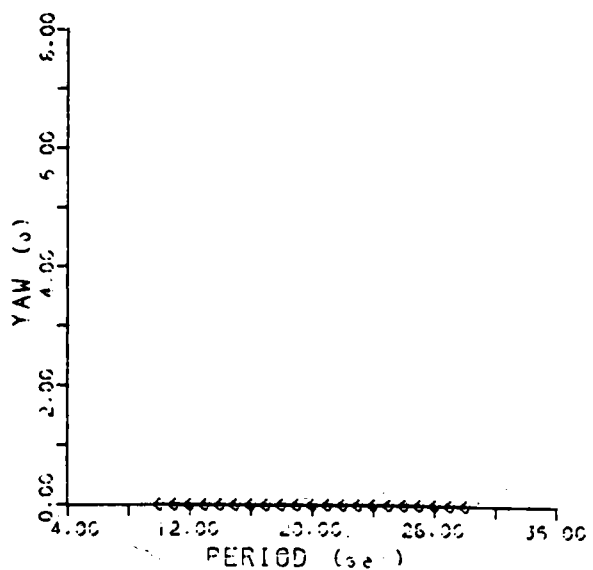
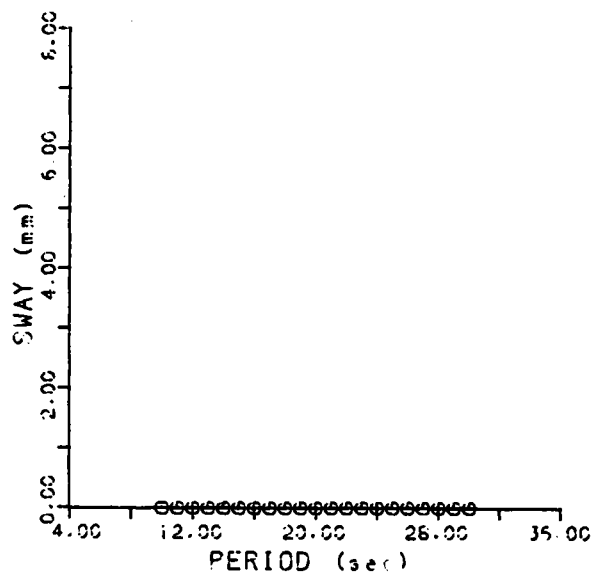
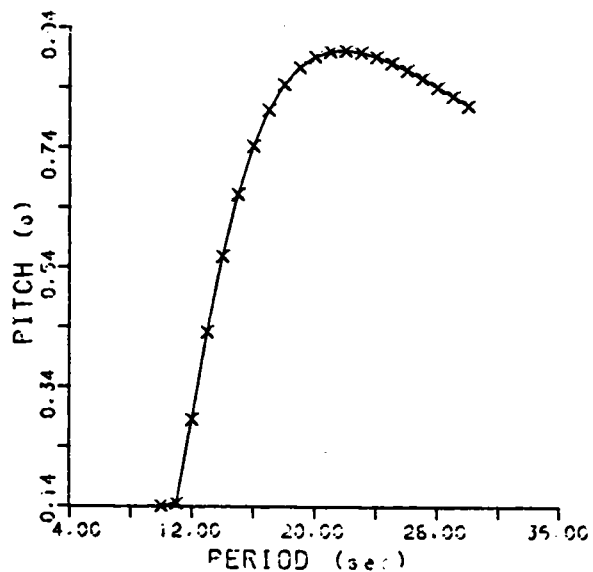
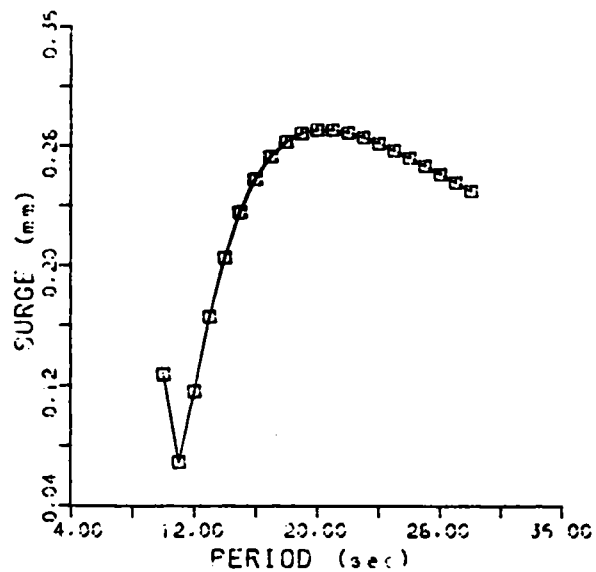
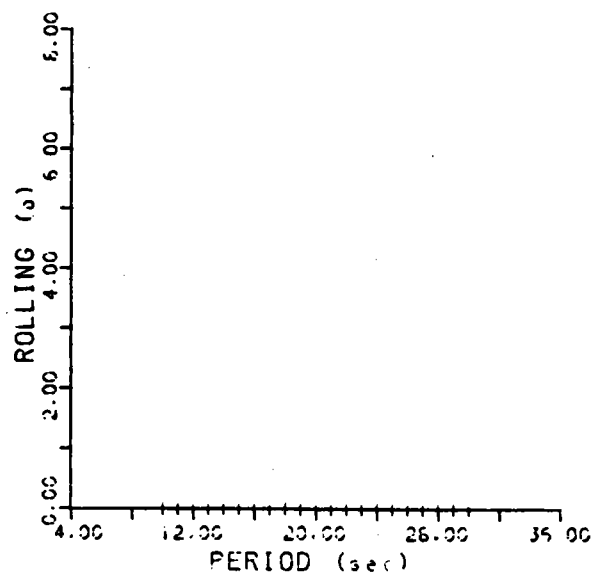


圖 2.15 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 空載重 波向 180°)

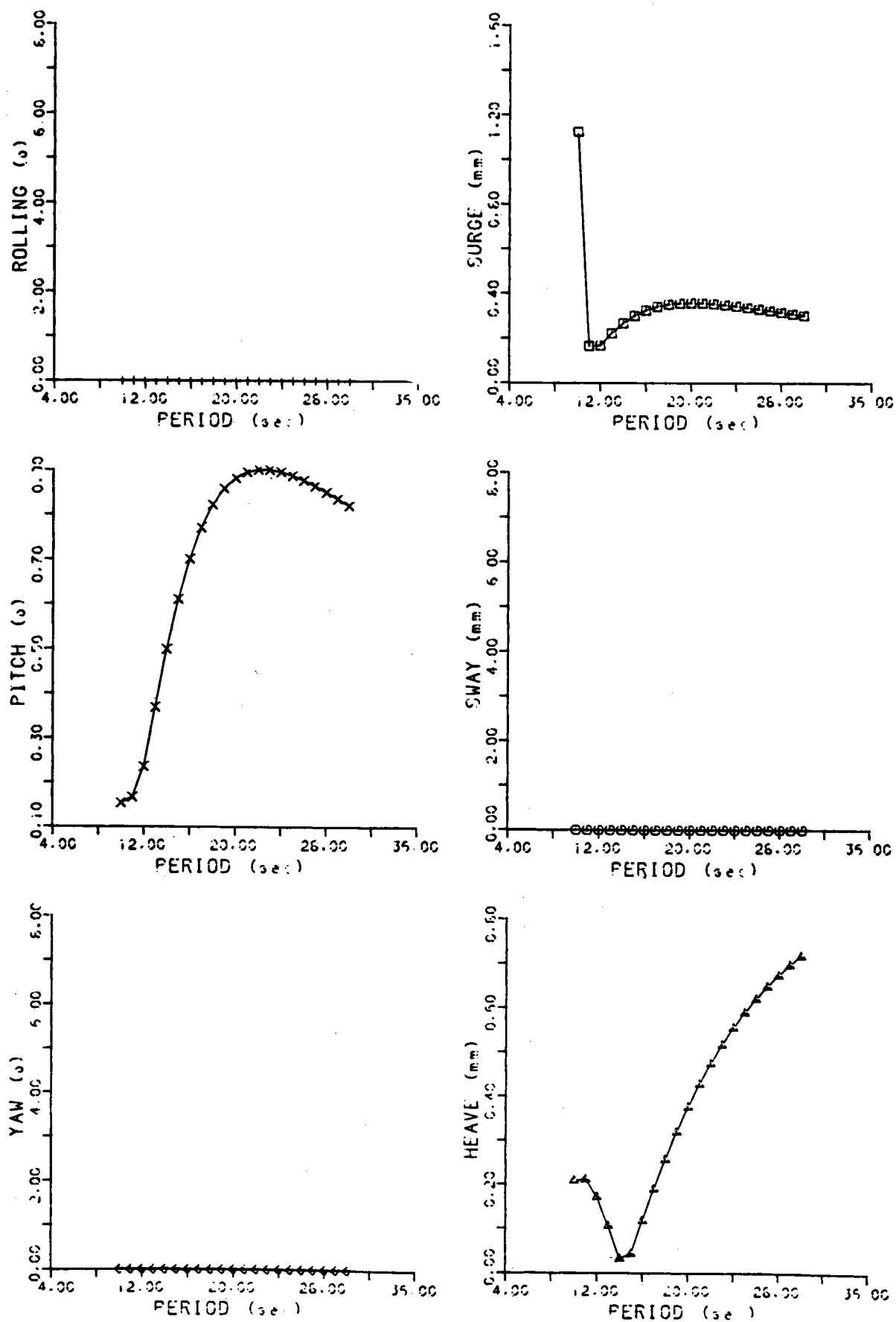


圖 2.16 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 滿載重 波向 0°)

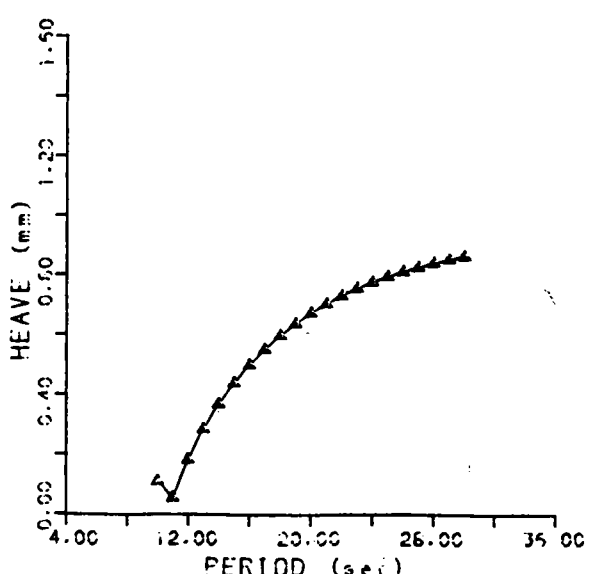
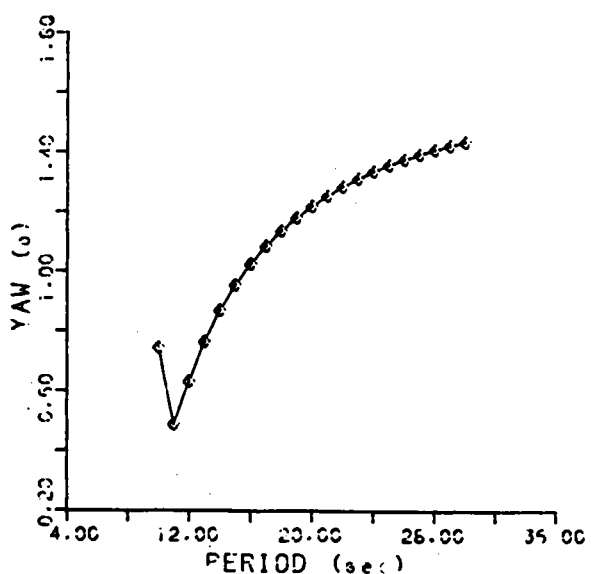
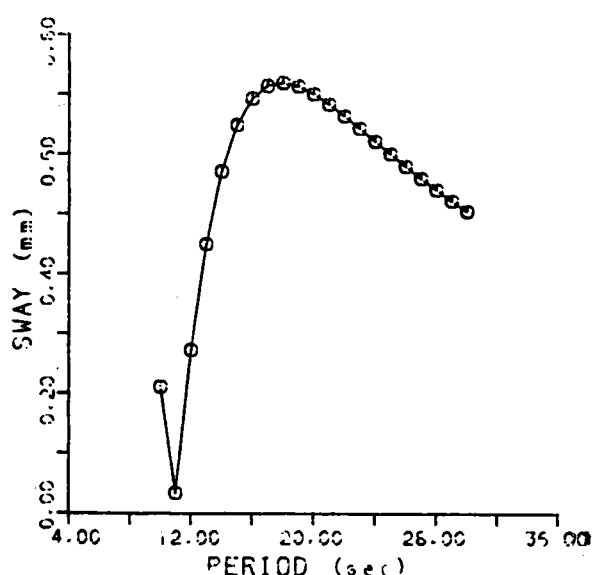
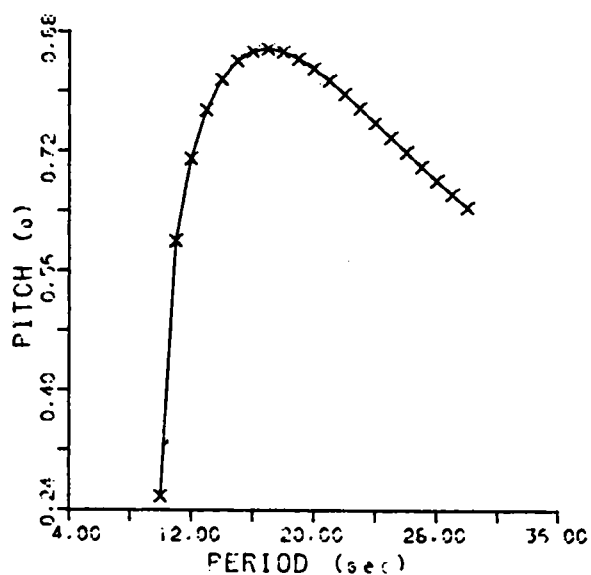
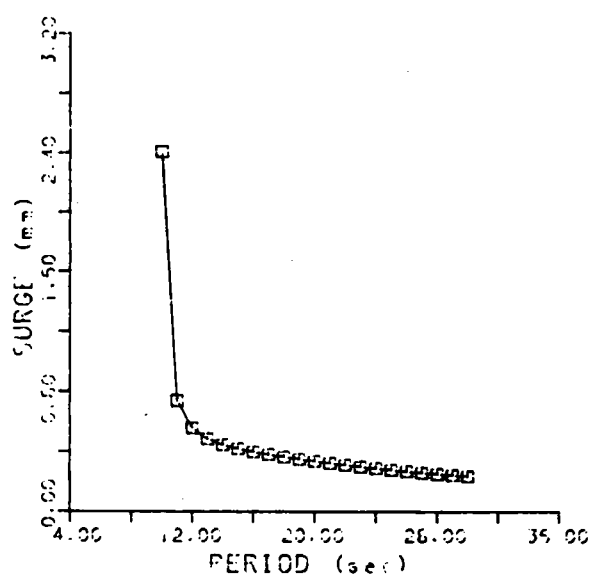
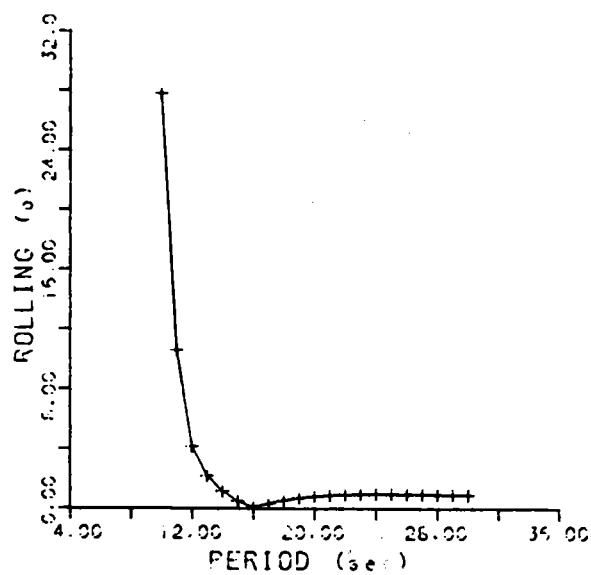


圖 2.17 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 滿載重 波向 45°)

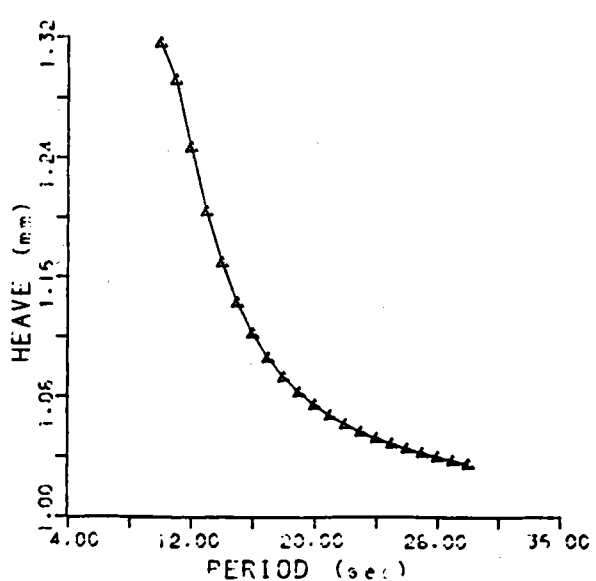
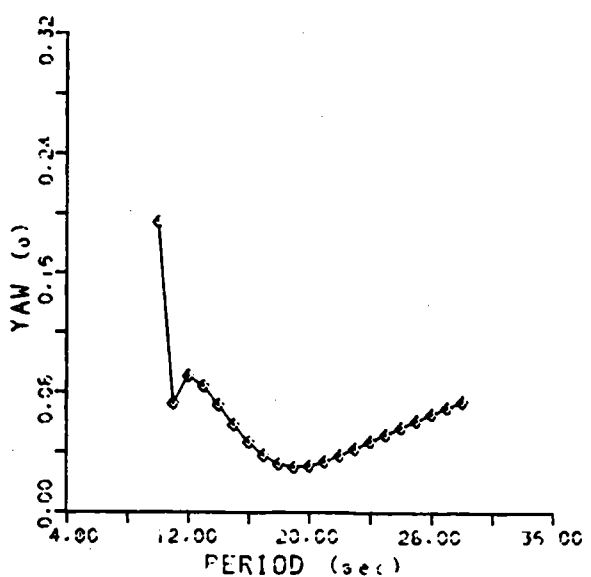
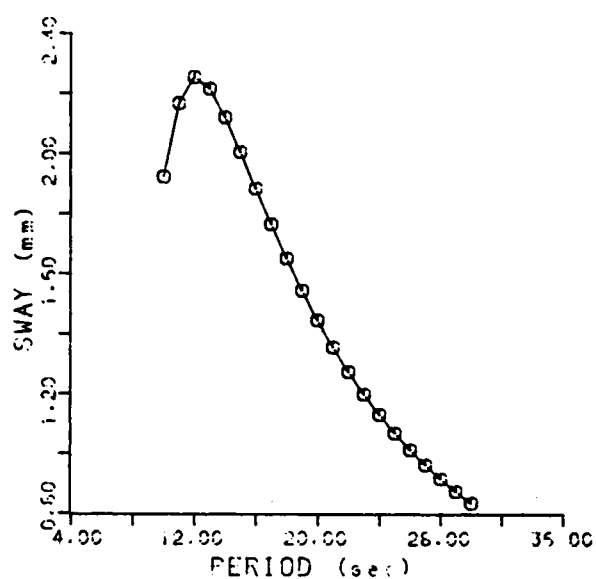
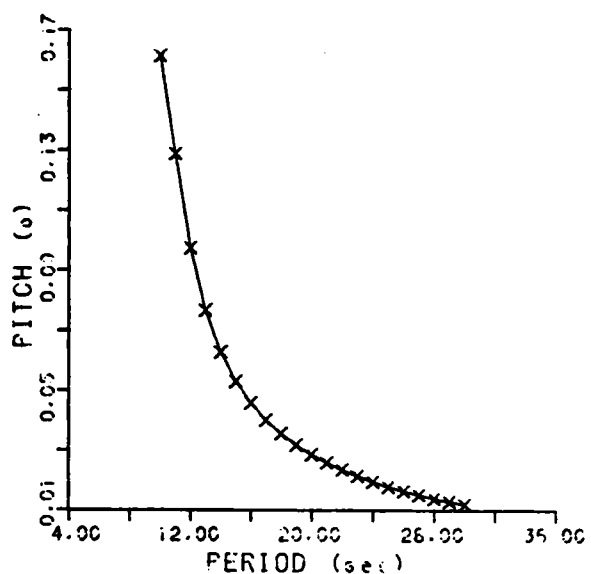
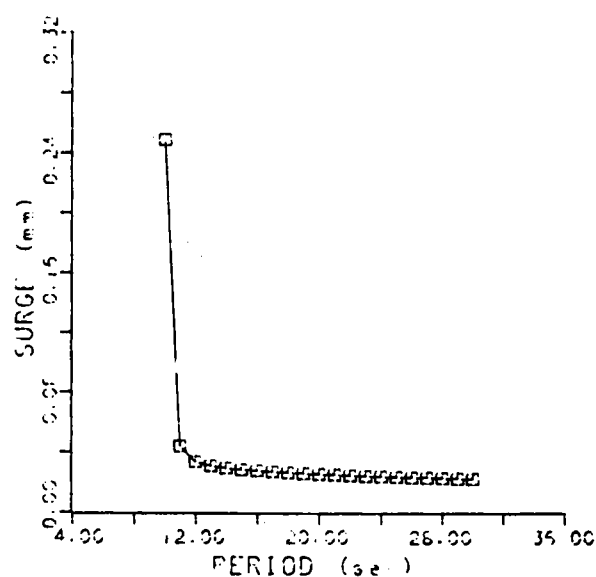
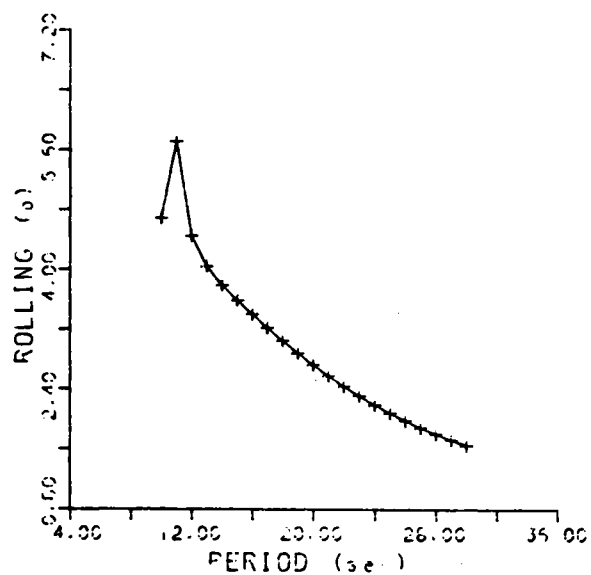


圖 2.10 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 滿載重 波向 90°)

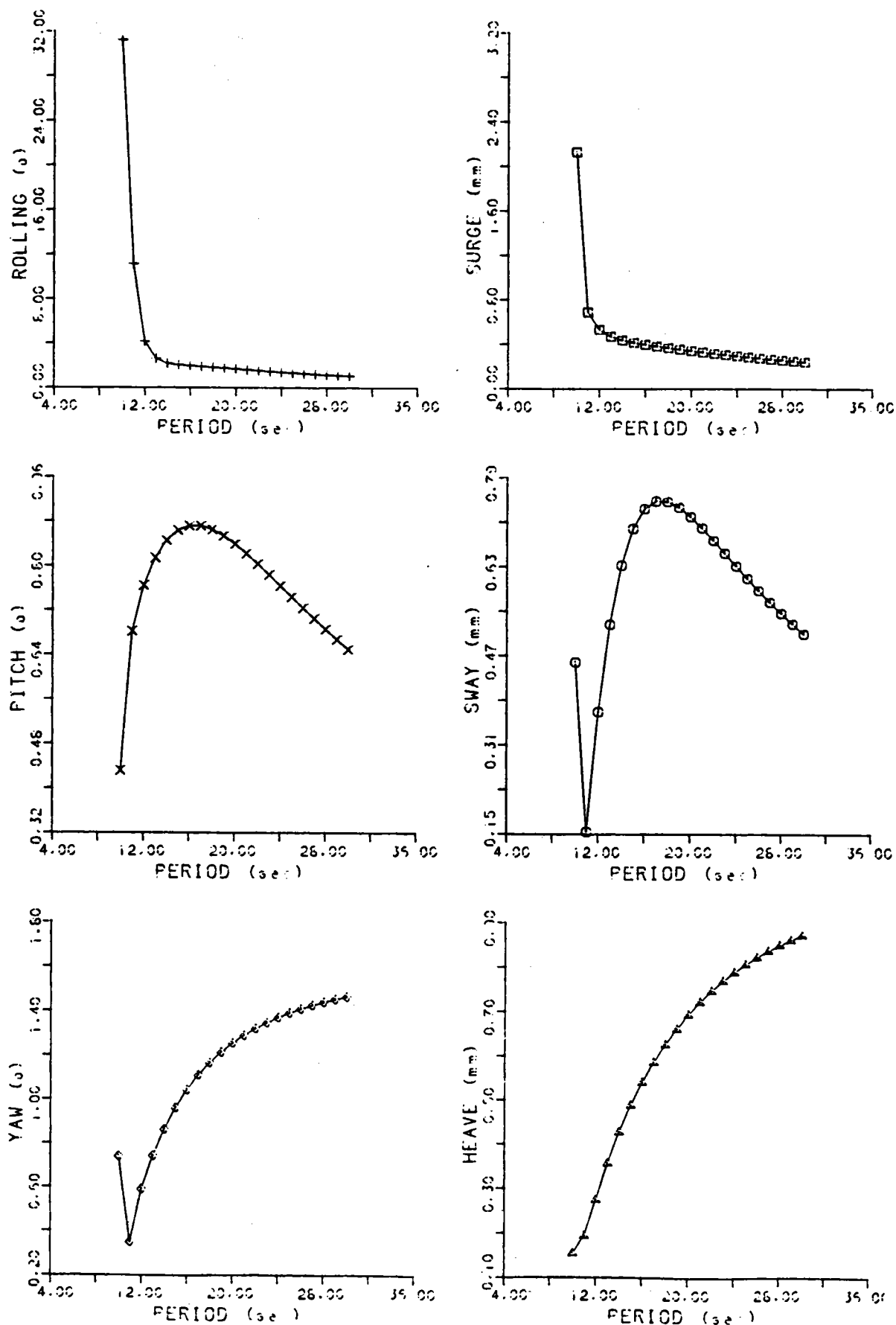


圖 2.10 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 滿載重 波向 135°)

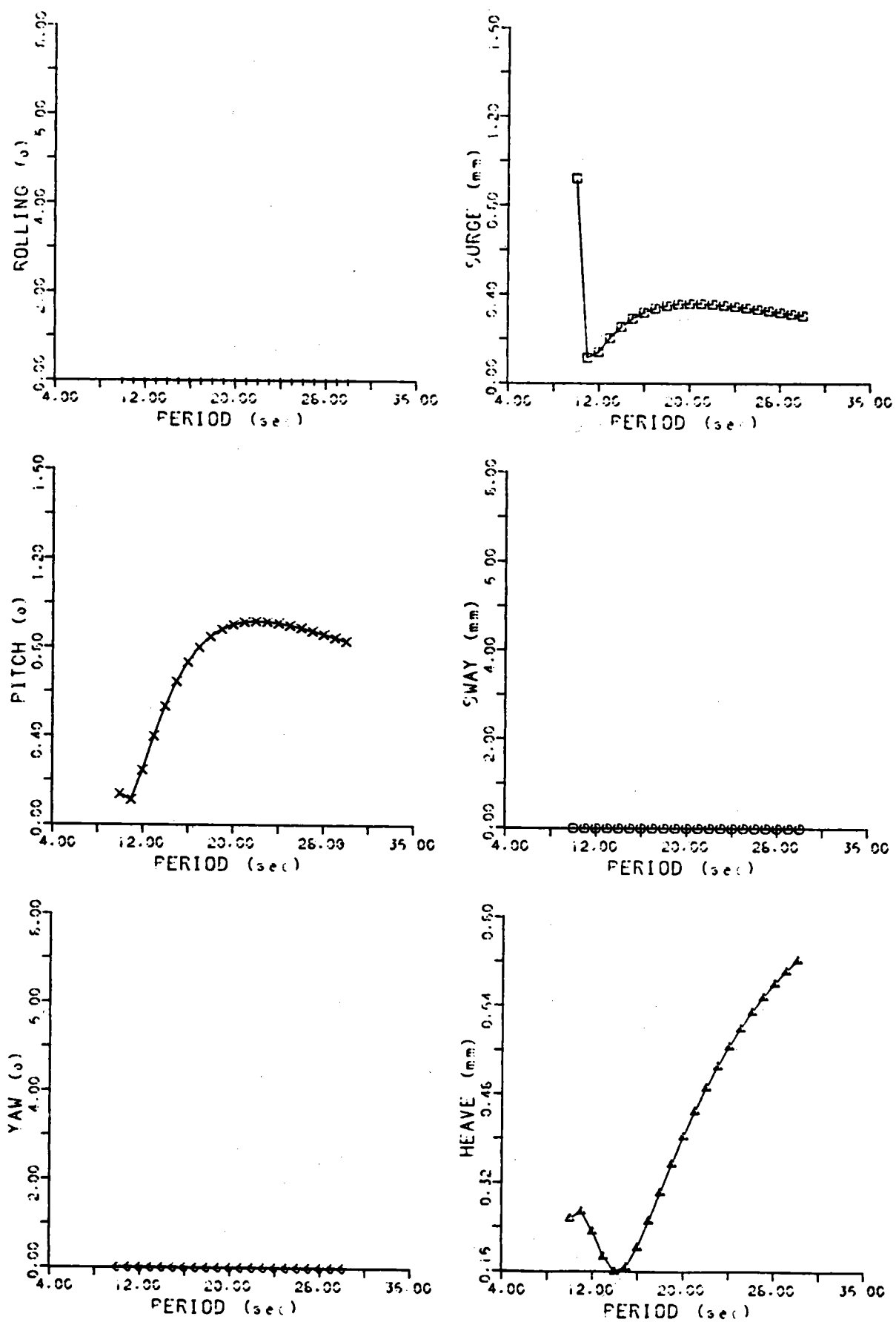


圖 2.20 船體六個自由度運動對週期之數學模擬關係
(繫纜 滿載重 波向180°)

第三章 試驗儀器及測定

3.1 運動計測裝置

計測運動儀器本身可將浮式物體像防波堤和模型船等複雜的運動分成六個方向分量的運動，以位勢計（potential meter）的電流變化量測運動分量，再以擴大器放大（amplifier），以便記錄在示波器（oscillograph）和磁帶上。

圖 3.1 為六分量運動計測裝置組立圖，圖 3.2（並參考照片 3.1～3.4）為動搖計（vibrator），校正器（calibrator），擴大器（amplifier），記錄器（recorder），連接示意圖。

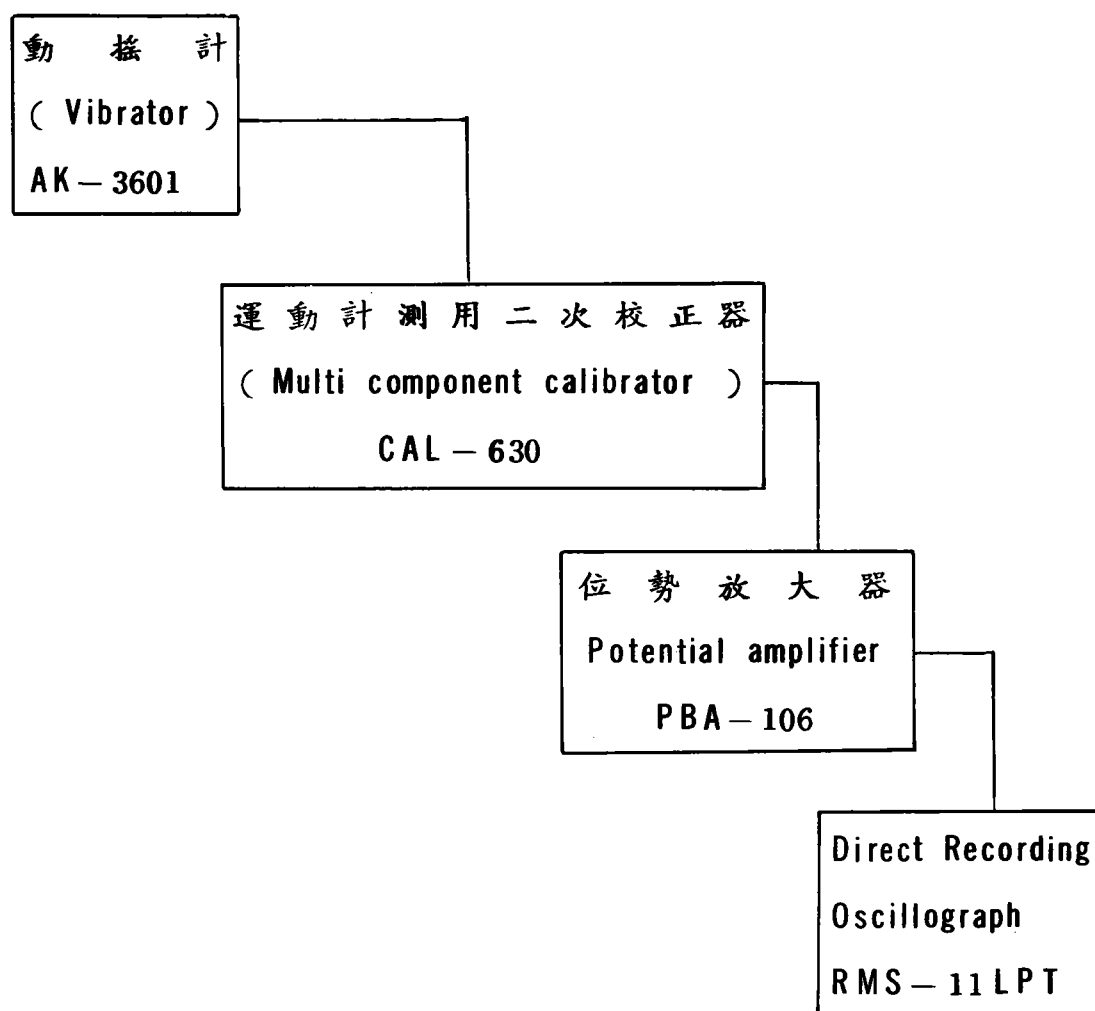


圖 3.2 動搖測定裝置組立示意圖

3.2 加速度測定：

以有加速度轉送器 (acceleration transducer) 的應變感應計 (Strain gage sensor)，量測加速度或振動轉換成等量的電流或電壓，再經調節器 (conditioner) 放大，以便記錄於電磁示波器的資料記錄紙上，圖 3.3 為加速度轉送感應器 (acceleration transducer)，信號調節器 (signal conditioner)，記錄器 (recorder) 連接示意圖。

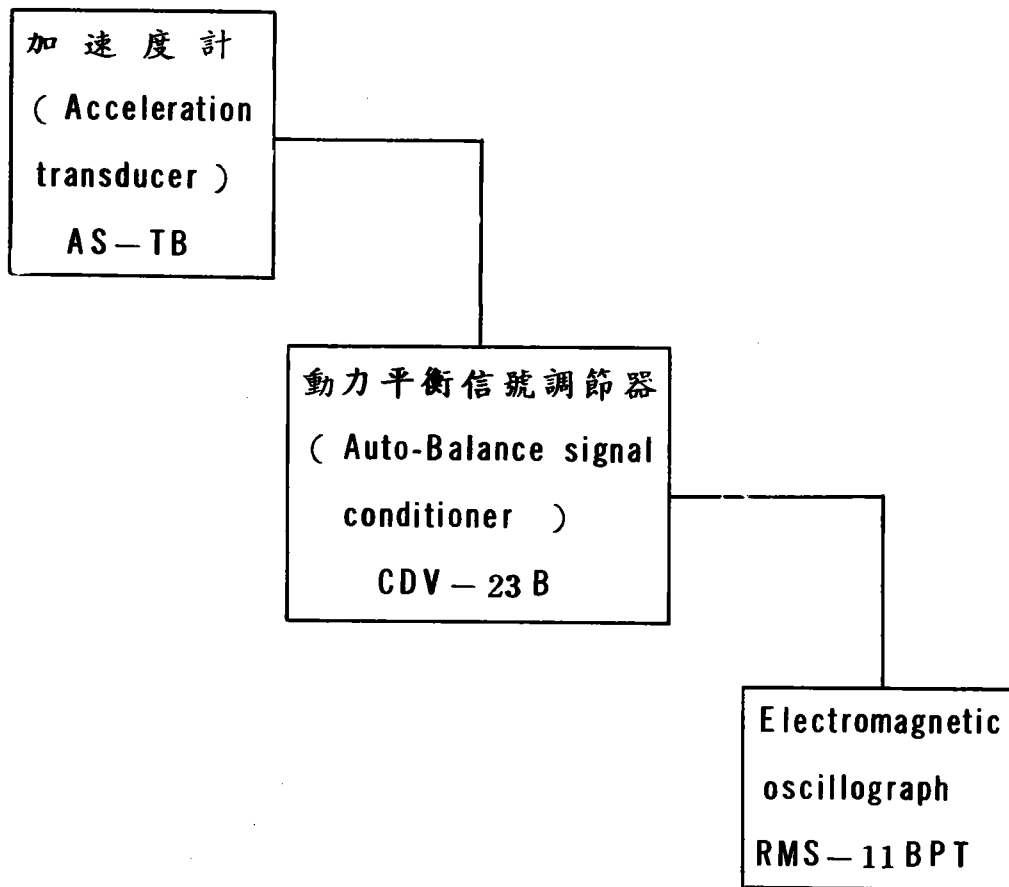


圖 3.3 船體加速度測定組立示意圖

3.3 張力、傾斜的計測：

以記憶式張力計 (memory tension meter)，傾斜計 (inclination meter) 計量纜繩之張力、傾斜角，記錄到內部的資料記憶儲存器 (data-logger)，再經由記憶讀取機 (memory reader) 將記憶感應器的資料記錄以電纜傳送到 HC-20 F，有效地輸進小型錄音磁帶和小型印表機。測定組

立示意圖如圖 3.4 所示（並參考照片 3.5 ~ 3.6）。

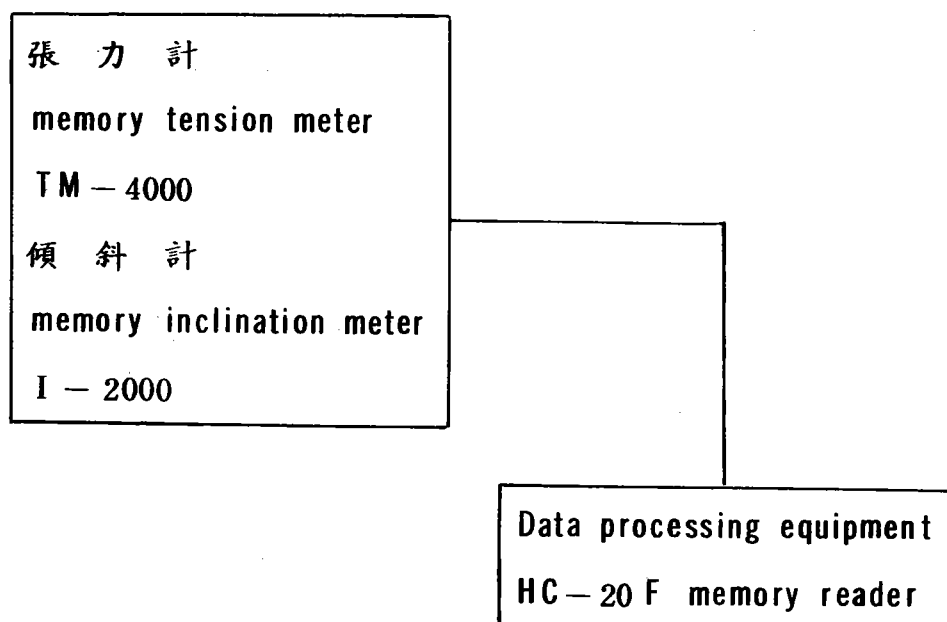


圖 3.4 船體纜繩張力與傾斜測定裝置組立示意圖

3.4 資料讀取機—20 F 型

本機包括傳輸介面及手提家用電腦 Epson 公司製造的 HC-20，用於將記錄於暫存記憶器的張力或傾斜資料，經用介面傳輸至 HC-20 進行資料分析，整個運作可以圖 3.5 說明。

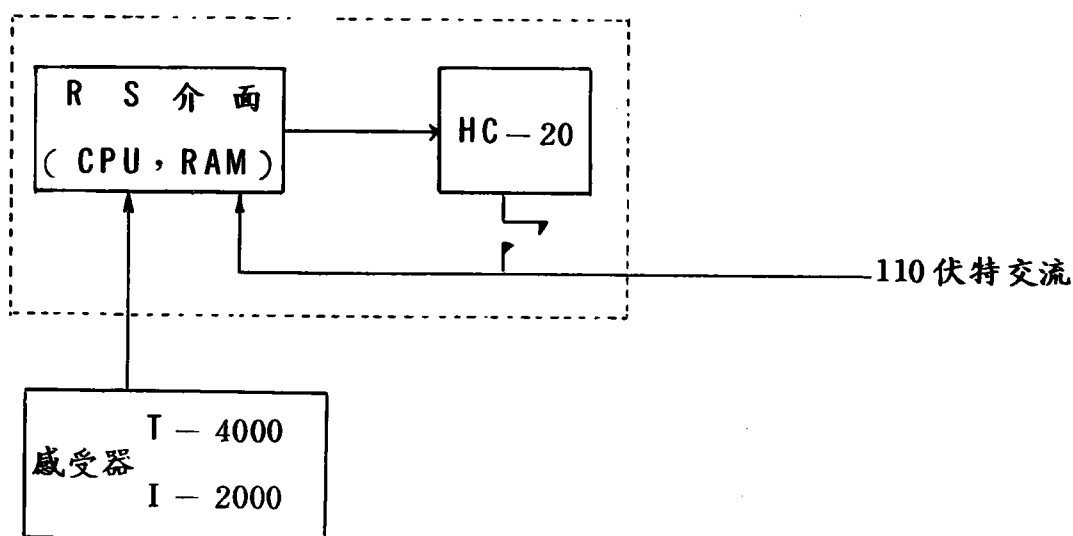
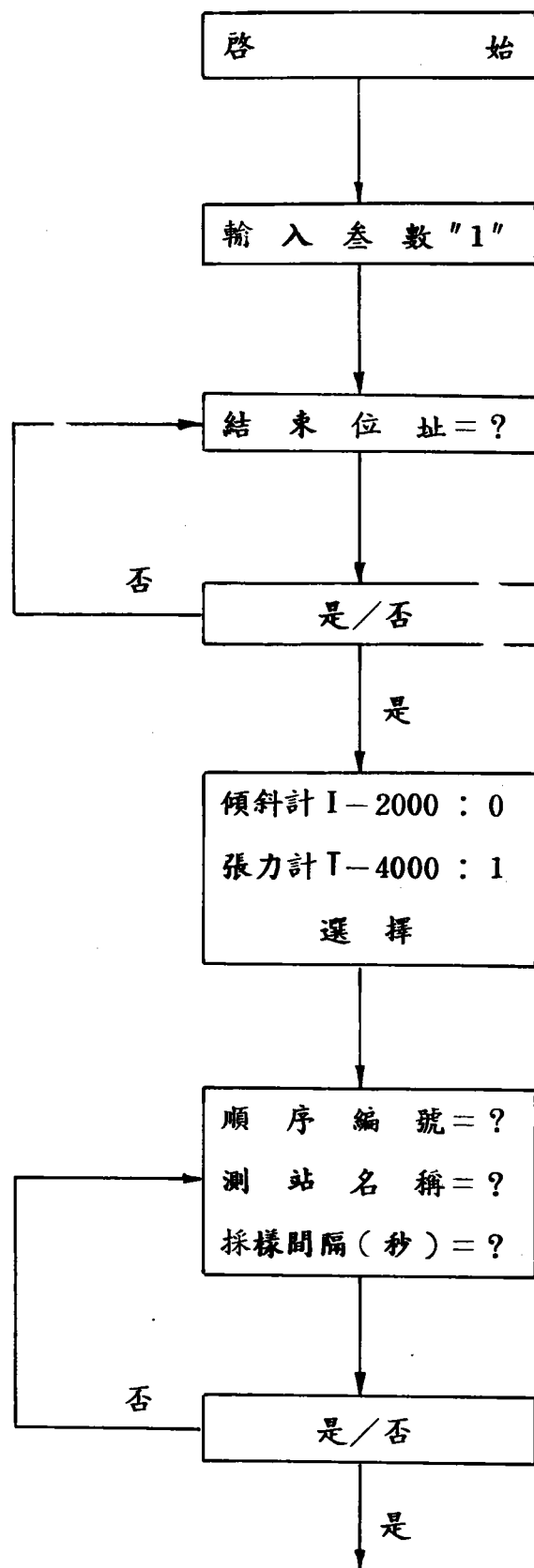
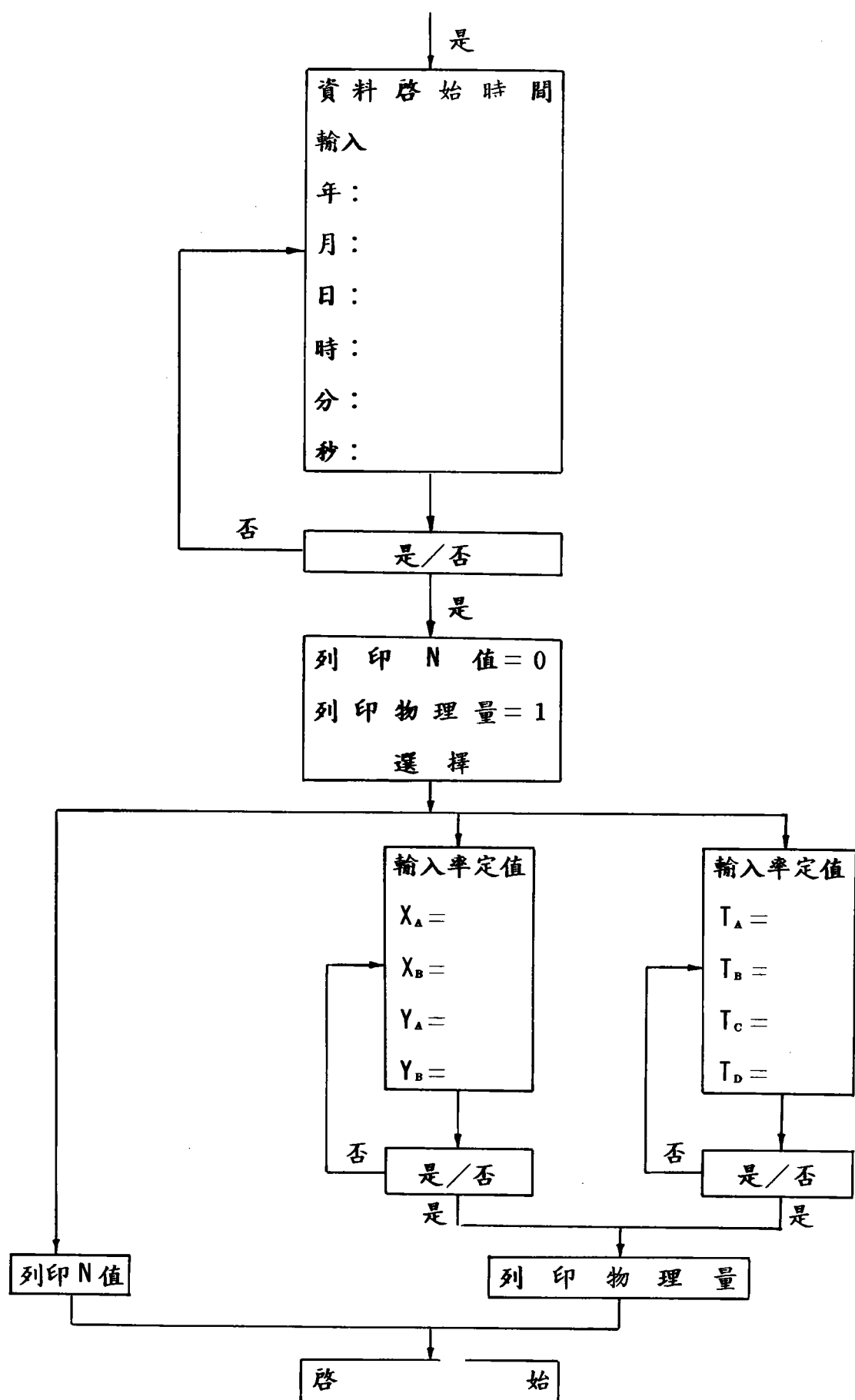
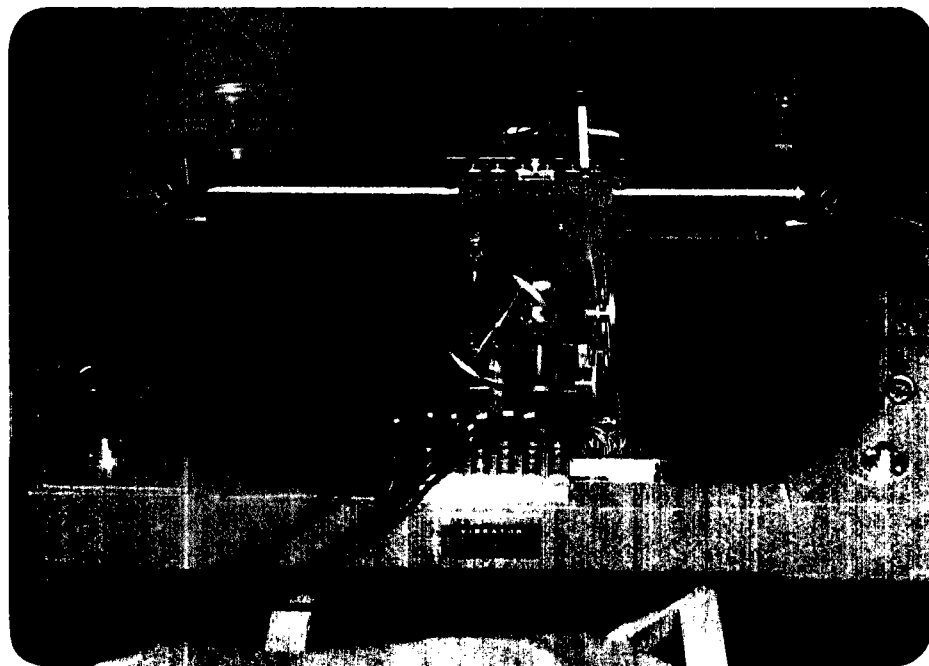


圖 3.5 資料讀取分析示意圖

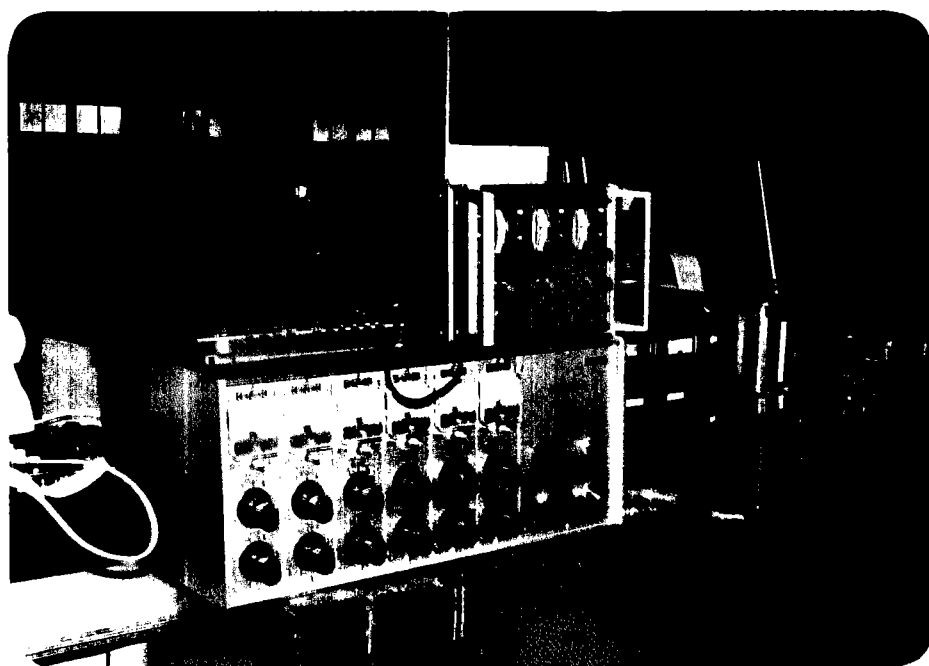
HC-20 資料讀取及處理流程







照片 3.1 六分力計測之動搖計



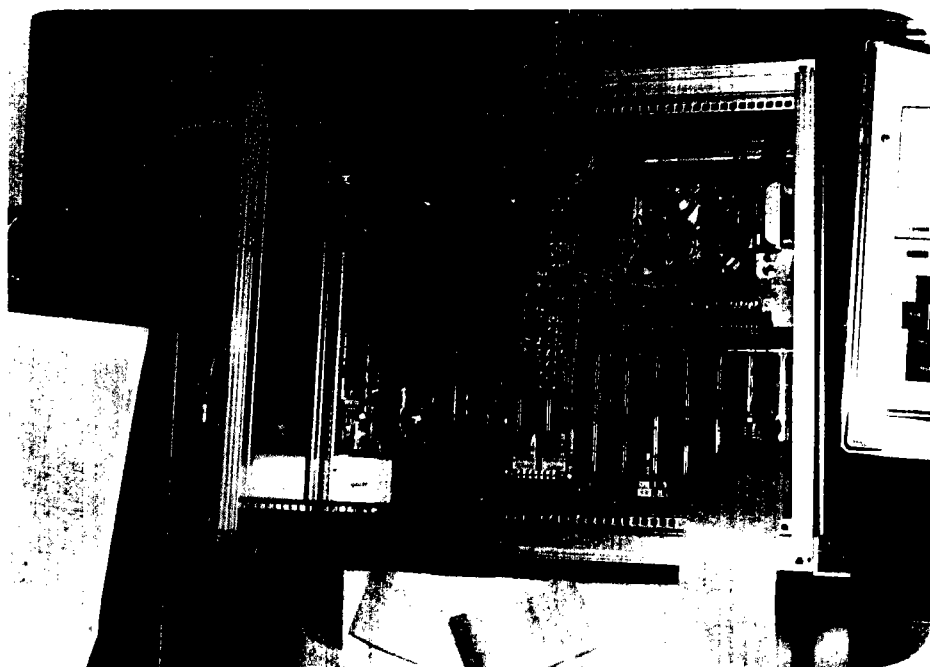
照片 3.2 六分力計測儀器系統



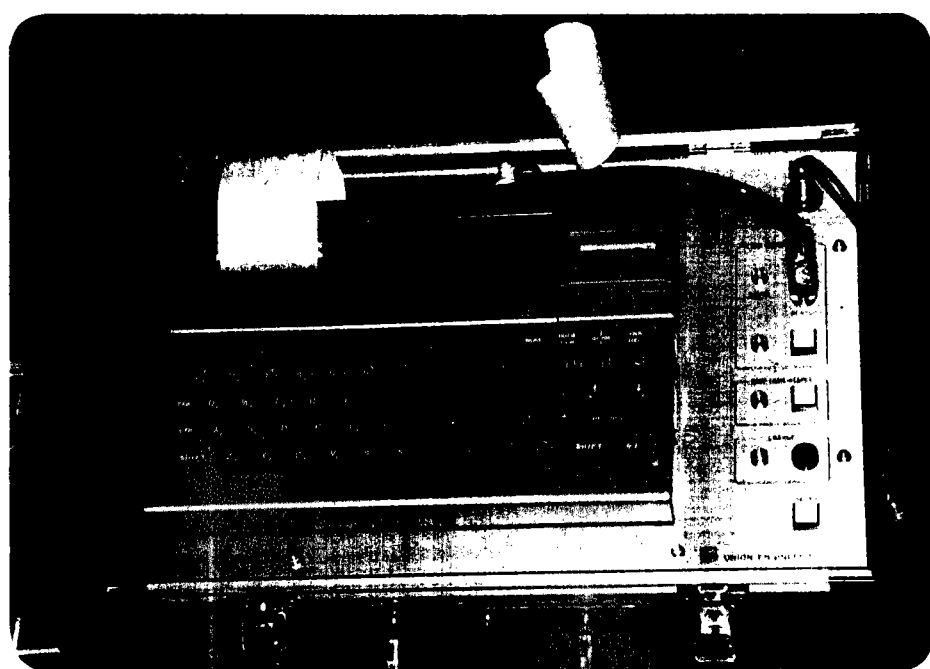
照片 3.3 六分力計測紀錄儀



照片 3.4 船體運動測定系統



照片 3.5 張力測定檢出儀器



照片 3.6 資料處理儀

第四章 模型試驗

4.1 試驗比例尺與模型律

考慮本所試驗水池大小、波浪反射以及施測儀器容許限度等因素決定試驗比例尺為 1 : 100。本試驗主要外力為慣性力、重力及波壓力，因此採用福祿德模型相似律，有關之動力參數縮尺

長度 $L_r = 1 : 100$ ，時間 $T_r = 1 : 10$ ，速度 $V_r = 1 : 10$ ，

轉動量 $\theta_r = 1 : 1$ ，力 $F_r = 1 : 10^6$

4.2 船體及碼頭模型製作

本次試驗所採用之船模係以十萬噸級貨櫃船按 1 : 100 比例尺，委請台大造船所製作如照片 (4.1)；碼頭模型因採用比例尺為 1 : 100 棧橋式 (樁基間空間太小，與沉箱式碼頭效果接近) 效果不易發揮，本次試驗僅作沉箱式型態一種，如照片 (4.1)。

4.3 試驗條件及內容

本次試驗考慮水深為 18^M (按台中港 1 ~ 3 號碼頭水深為 - 13^M，高潮位可達 + 5.2^M)；因比例尺，造波機性能以及考慮一般港內波，本次試驗波浪週期選用 1.0^{sec} (原型 10^{sec})，1.5^{sec} (原型 15^{sec})，2.0^{sec} (原型 20^{sec}) 三種，波高選用 0.7^m (原型 0.7^M)，1.2^m (原型 1.2^M)，2.0^m (原型 2.0^M) 三種，波向選用 0°，45°，90° 三種；考慮船體受不同拉力作用下產生不同運動量，本次試驗採用兩種纜繩及一種不加纜繩計三種情況進行；考慮船體吃水不同，有不同運動量產生，本次試驗就空載重及滿載重兩種情況進行。本次試驗目的在測定船體 Surge，Heave，Sway，Roll，Yaw，Pitch 等六個運動量及三個方向加速度，纜繩拉力以及拉力傾角。茲將試驗條件及內容列如表 (4.1) (均以原型量表示)。

表 4.1 試驗條件及內容

項	目	說	明
水	深	18 ^M	
週	期	10 ^{sec} , 15 ^{sec} , 20 ^{sec}	
波	高	0.7 ^M , 1.2 ^M , 2.0 ^M	
波	向	0° , 45° , 90°	
纜	繩	$k_A = 4.75^{Kg/cm}$, $k_B = 0$, $k_C = 8.73^{Kg/cm}$	
載	重	方式	空載重, 滿載重
運	動	量	Surge(x) , Sway(y) , Heave(z) , Roll(θ_x) Pitch(θ_y) , Yaw(θ_z)
加	速	度	a_x , a_y , a_z
拉	力		T
拉力傾角及變化範圍			θ_r , $\Delta\theta_r$

4.4 試驗步驟

- (一)進水於試驗水池至所需水深, 即 18^{cm}, 船模試驗平面配置圖如圖 4.1。
- (二)調整造波機週期至 1.0^{sec} (實地為 10^{sec})。
- (三)安置空載重船模與造波方向成 0° (圖 4.1 為 90° 情況)。
- (四)以第一種纜繩繫綁船體與碼頭, 繫綁方式如圖 4.2。
- (五)調整造波機造波板偏心距至造波 0.7^{cm} (實地為 0.7^M)。
- (六)造波, 測定各運動量 (Surge x , Sway y , Heave z , Roll θ_x , Pitch θ_y , Yaw θ_z) , 加速度 (a_x , a_y , a_z) , 纜繩拉力及傾角。
- (七)更換第二種纜繩, 重複(六)步驟。
- (八)不設置纜繩, 重複(六)步驟。
- (九)將船模加重塊至滿載重, 重複(四)、(五)、(七)、(八)步驟。
- (十)調整造波機造波板偏心距至造波 1.2^{cm} (實地 1.2^M) , 重複(九)步驟。
- (十一)重複(三)、(四)、(六)、(七)、(八)步驟。

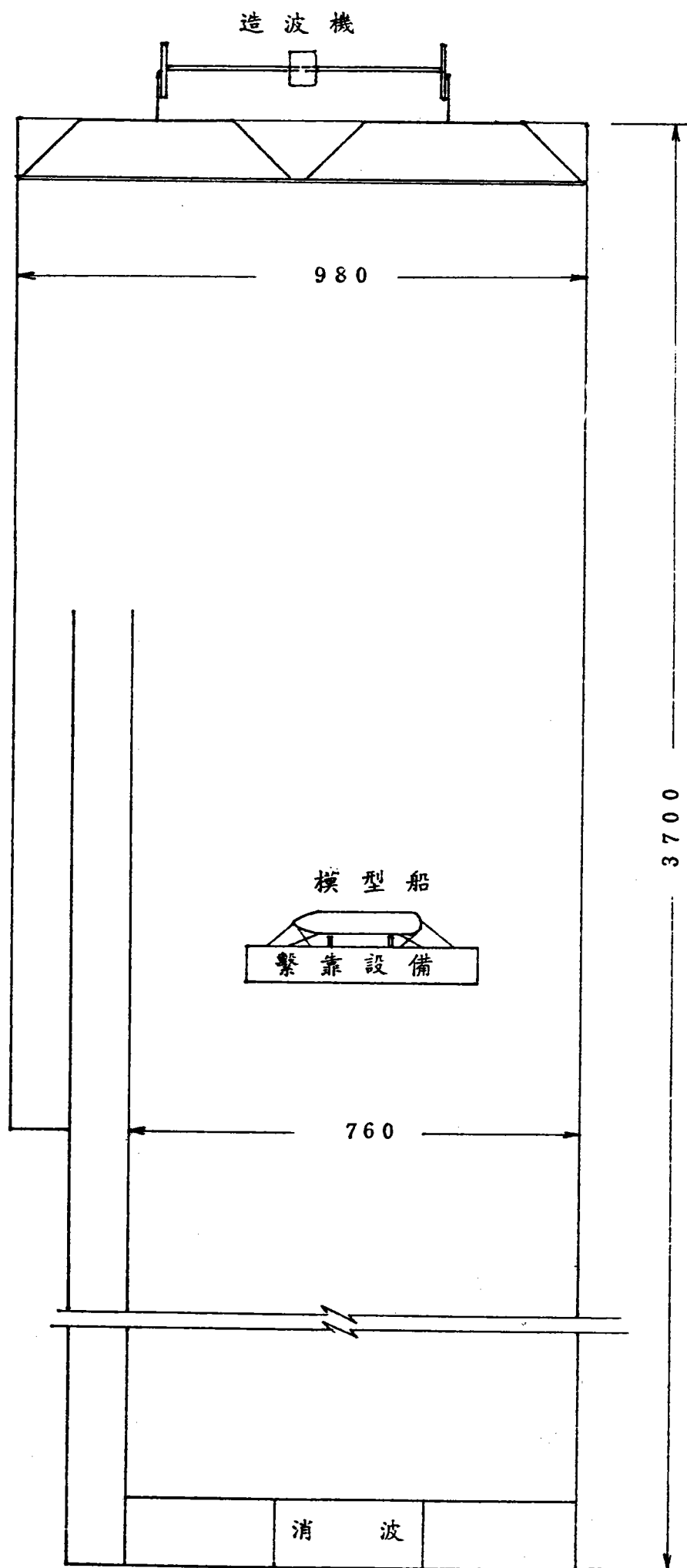


圖4.1 船模試驗平面配置圖 CM

θ 值
 空載重 $\approx 16^\circ$
 滿載重 $\approx 10^\circ$

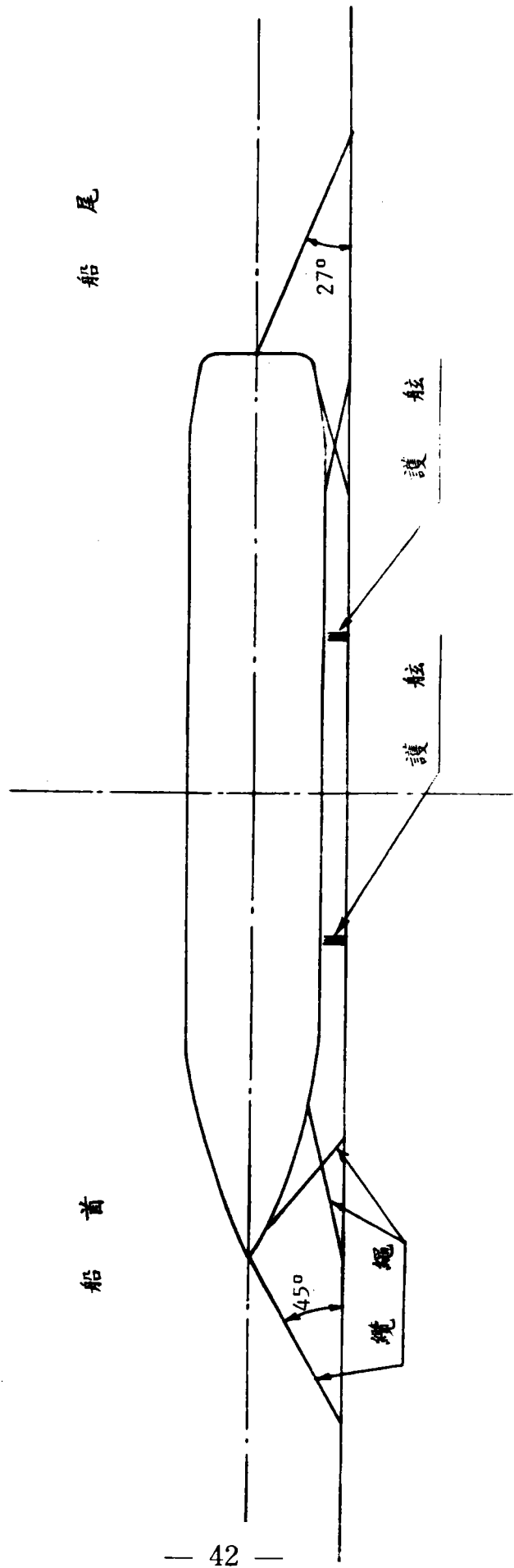
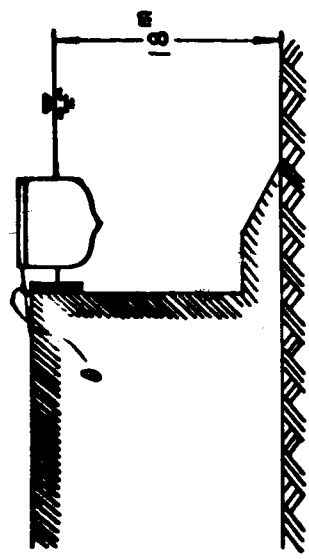


圖4.2 船模纜繩繫綁方式



照片 4.1 船模及碼頭模型

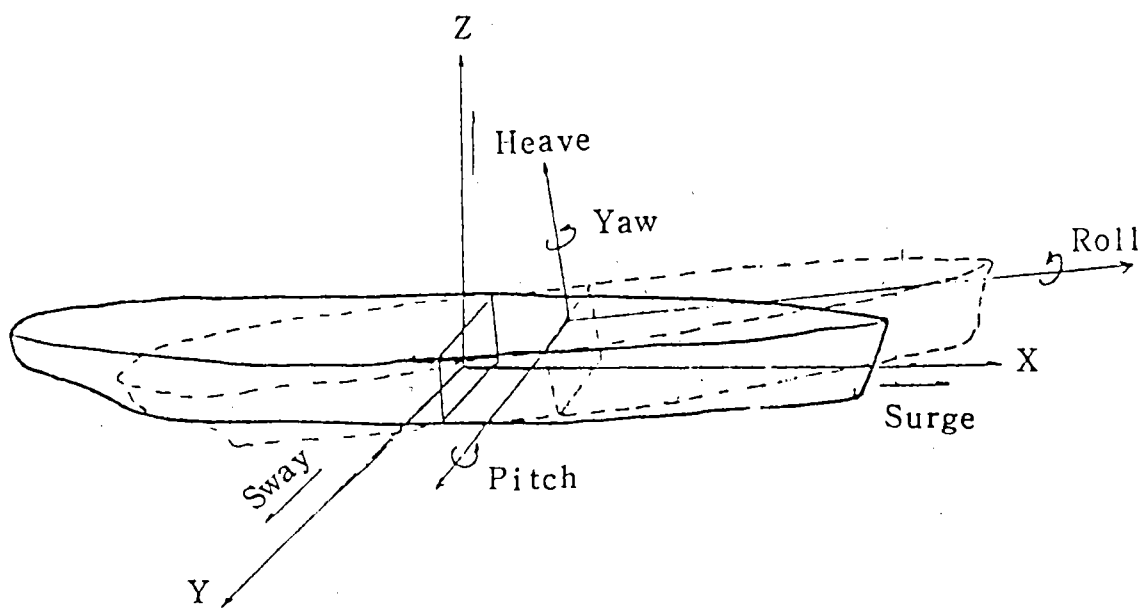


圖4.3 船體運動座標

(三)調整造波機造波板偏心距至造波 2.0°M (實地 2.0°M)，重複(三)、(四)、(六)、(七)、(八)、(九)步驟。

(四)改變船體與造波方向成 45° ，重複(三)~(三)步驟。

(五)改變船體與造波方向成 90° ，重複(三)~(三)步驟。

(六)調整造波機週期至 1.5°M (實地為 15°M)，重複(三)~(三)步驟。

(七)調整造波機週期至 2.0°M (實地為 20°M)，重複(三)~(三)步驟。

照片 4.2，4.3 分別為船體自由運動及繫泊碼頭纜繩張力模型配置。

4.5 實驗結果：

4.5.1 運動量：

對船體的六個自由運動：縱移 (Surge) — 船艏向之直線運動。

橫移 (Sway) — 船向之直線運動。

起伏 (Heave) — 垂向之直線運動。

橫搖 (Roll) — 繞縱向軸之轉動。

縱搖 (Pitch) — 繞橫向軸之轉動。

平擺 (Yaw) — 繞垂向軸之轉動。

座標系統，如圖 4.3 所示，各種條件下試驗結果如圖 4.4 至圖 4.21 所示，分述如下：

一、迎浪時 (head sea)

除短週期外，對同一週期而言，縱移量隨著波高增加而增大。而單位波高振幅所產生的縱移量，隨週期的增長而增加。

縱移量隨纜繩的強韌度 (stiffness) 增加而增加，尤以長週期為顯著。且隨載重增加而減少，以長週期更為顯著，但勁性大的纜繩，載重影響減少。

波高對橫移量的影響大致以長週期，載重小，使用強韌度較大之纜繩時，有較顯著的增加。

單位波高振幅所產生之橫移量，一般在週期 (15sec) 時，達到高峰 (peak)，最大橫移量產生於載重小，纜繩強韌度大的情況 (空載

重，纜繩 C)。

起伏量隨波高的增加而增加，以週期長時較顯著，而隨纜繩之強韌度增加而減少。

單位波浪振幅所產生之起伏量高峰，一般產生在載重小，週期長時，在纜繩之強韌度小，載重小的情況（空載重，纜繩 B ）起伏量隨週期增長而增加。反之在纜繩強韌度大，載重大時（滿載重，纜繩 C ），起伏量隨週期增加而減少。

載重小，繫纜強韌度小的情況下，橫搖受波高增加的影響較顯著。相同的纜繩，載重增加，橫搖量大致增加，但同載重時，波高增加並不一定增加橫搖量。

不同週期下的橫搖，在波浪週期 15sec 到達高峰，此乃有可能在自然週期的範圍內所造成的結果，載重大，低強韌度的纜繩，導致橫搖略為降低。

縱搖大致隨著波高的增加而增大，週期增長縱搖也有增加的趨勢。載重小也可導致較大的縱搖。

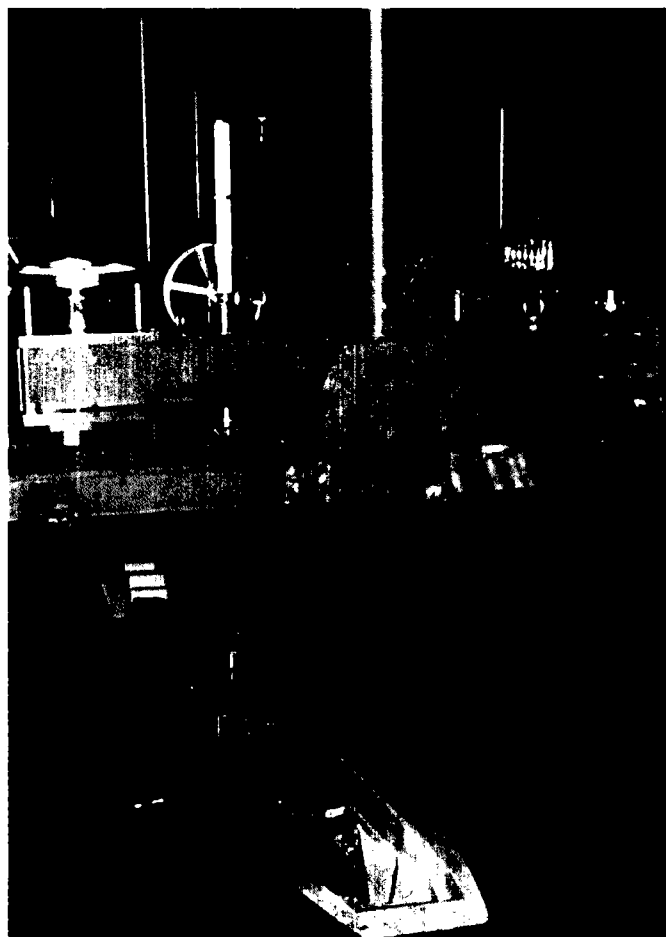
一般而言，平擺的幅度均不大，此乃是由於對稱性碇泊的結果，平擺隨著波高的增加略有增加，載重小時，有較大的平擺，強韌度大的纜繩也可導致較大的平擺。

二、斜浪（oblique sea）時：

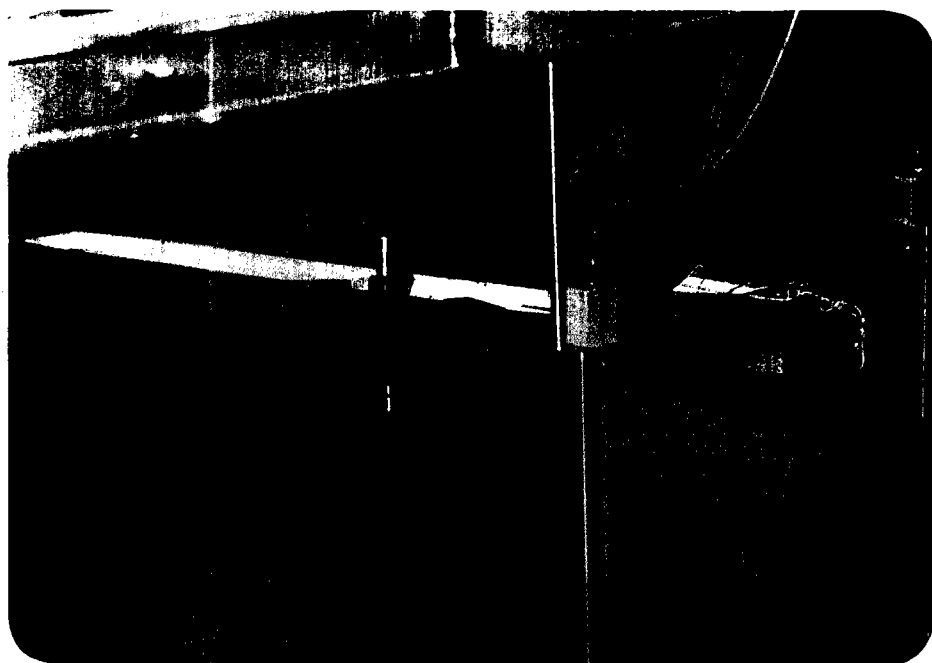
較長週期波（15sec），波高增加導致顯著的縱移增加，縱移大致隨波浪週期增長而增加。

較短週期波浪，造成低載重船較大的縱移，長週期波時，大載重船反而有較大的縱移，尤以強韌度大纜繩為甚。橫移、起伏均隨波高之增加而增加，以長週期波作用低載重船且有較大強韌度繫纜時，影響最為顯著。橫移起伏受波浪週期增加而增加，且以低載重或較大強韌度繫纜最為明顯。

較長週期波，橫搖受波高增加而增加運動量。橫搖大致在波浪週



照片 4.2 船體自由運動模型裝置



照片 4.3 船體繫泊碼頭・繩張力模型配置

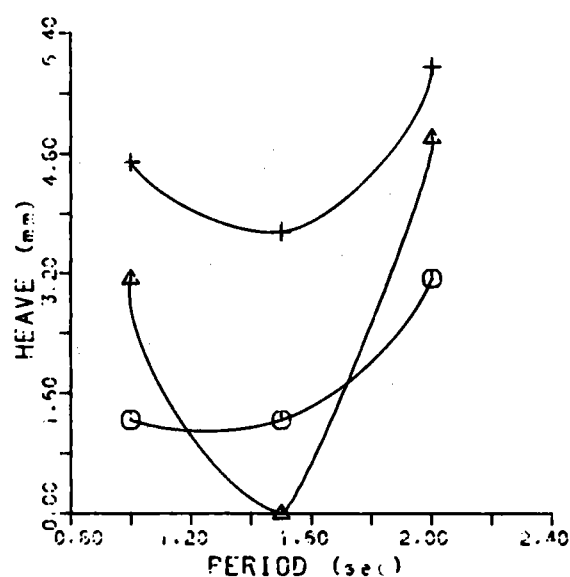
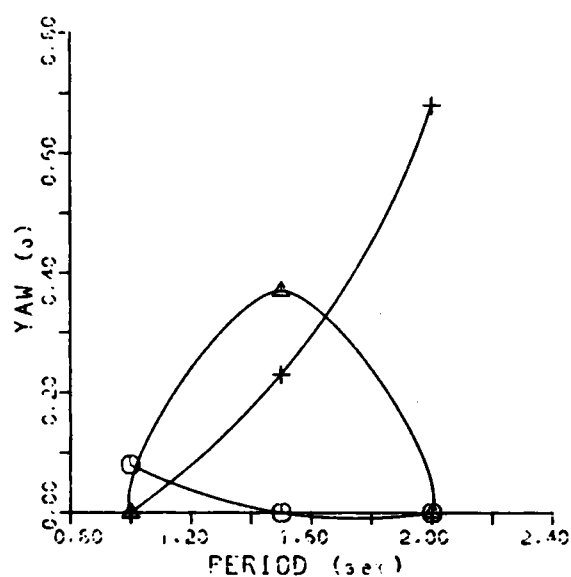
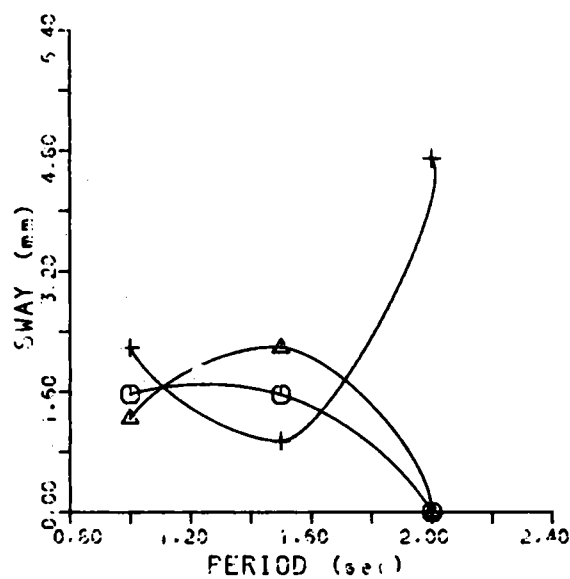
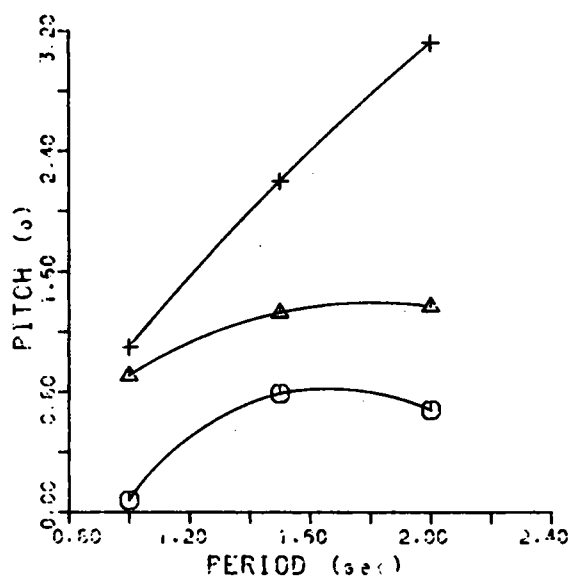
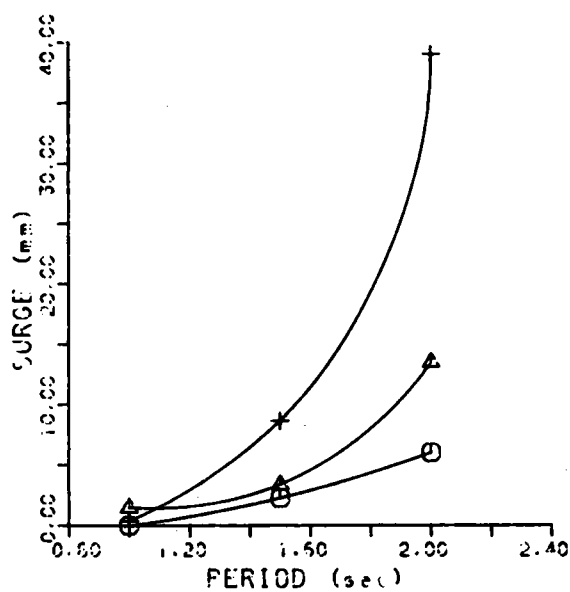
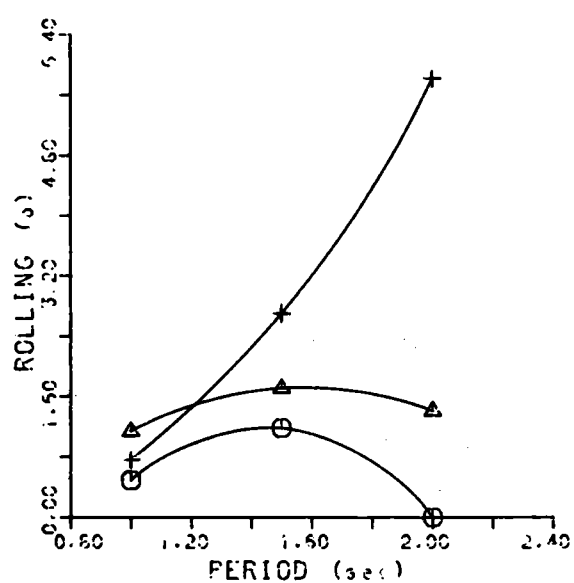


圖 4.4 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 空載重 繫纜 A)

○ H1=0.7M
Δ H2=1.2M
+ H3=2.0M

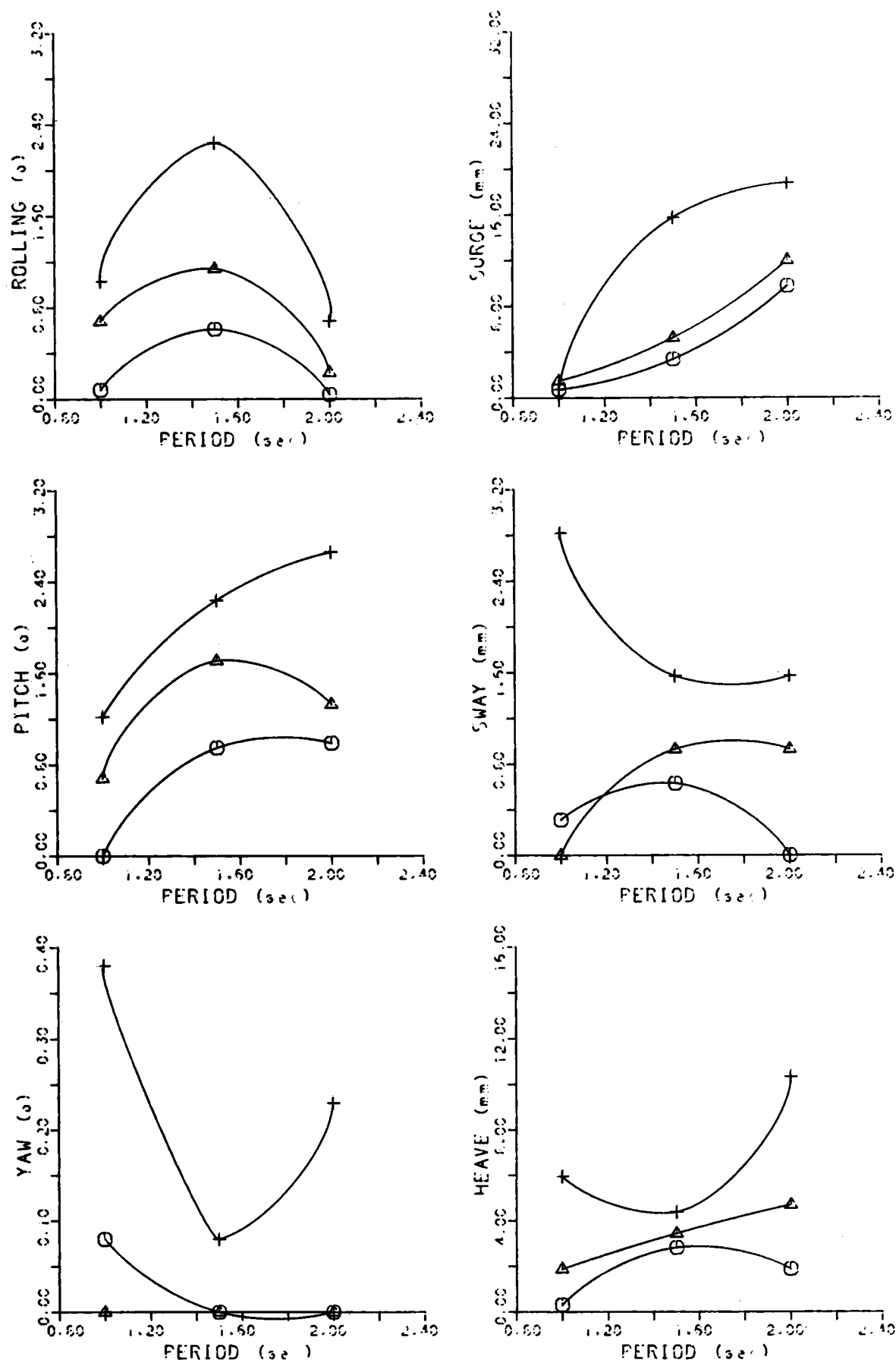


圖 4.5 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 空載重 繫纜 B)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

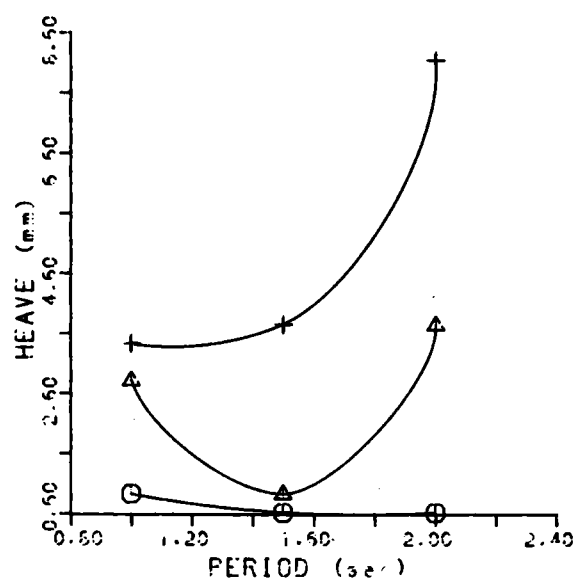
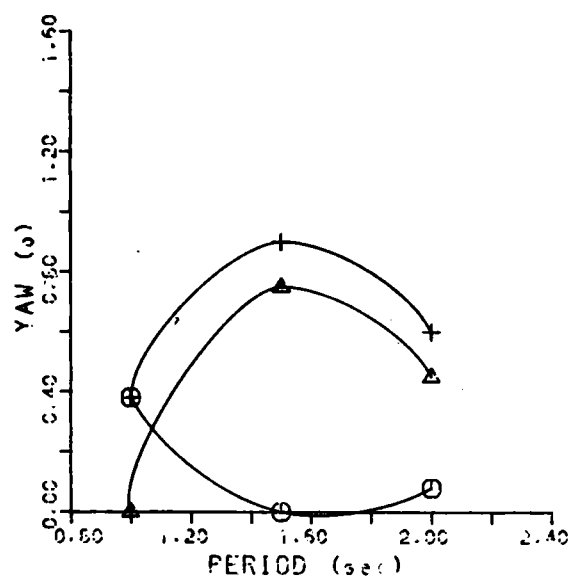
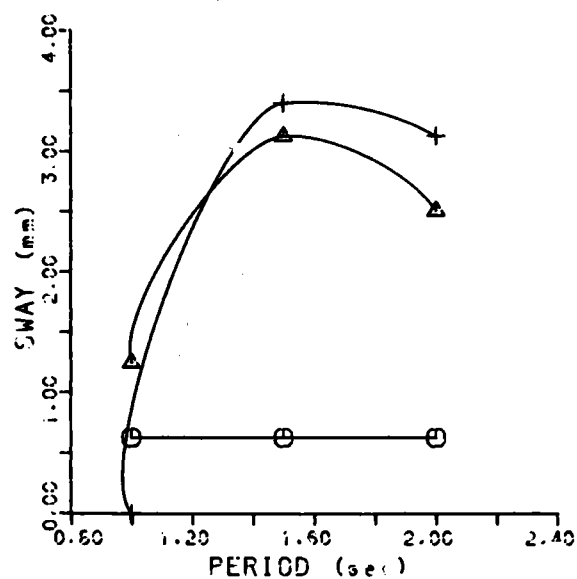
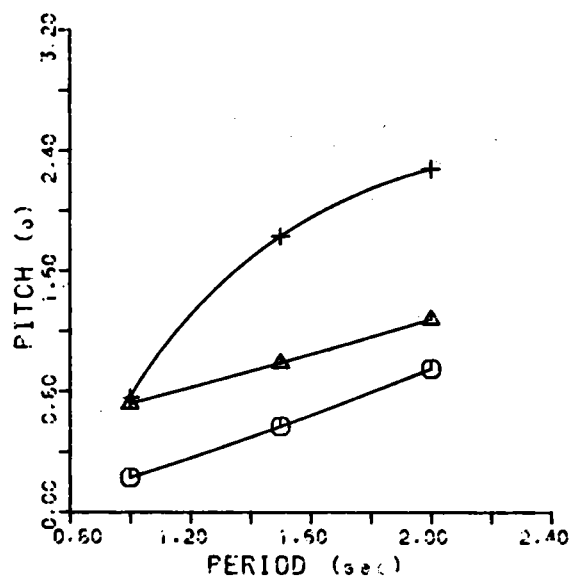
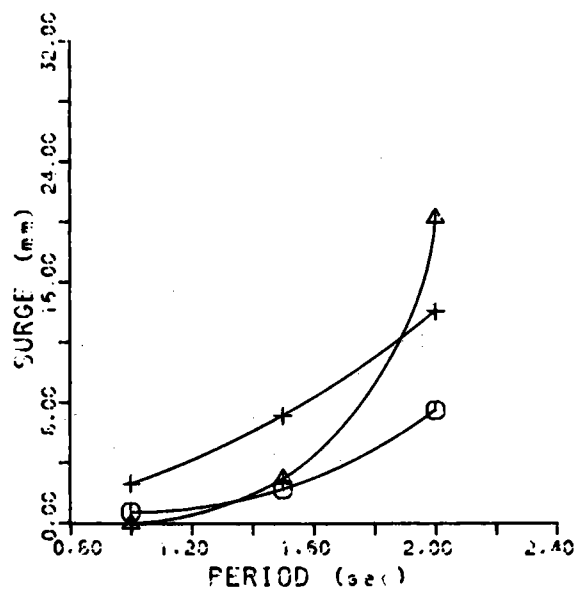
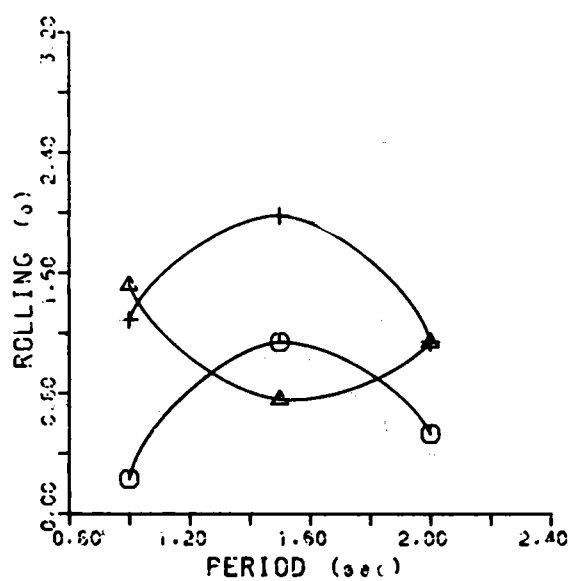


圖 4.6 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 空載重 繫纜 C)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

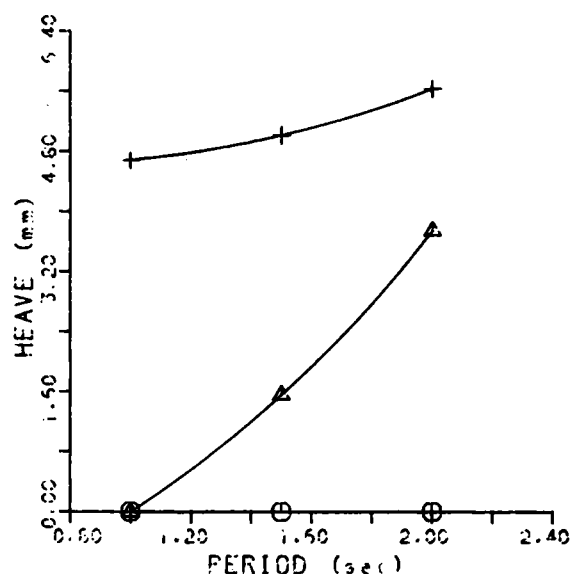
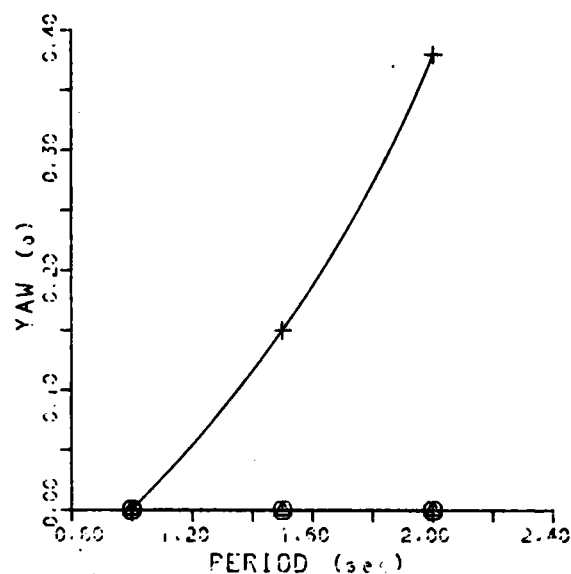
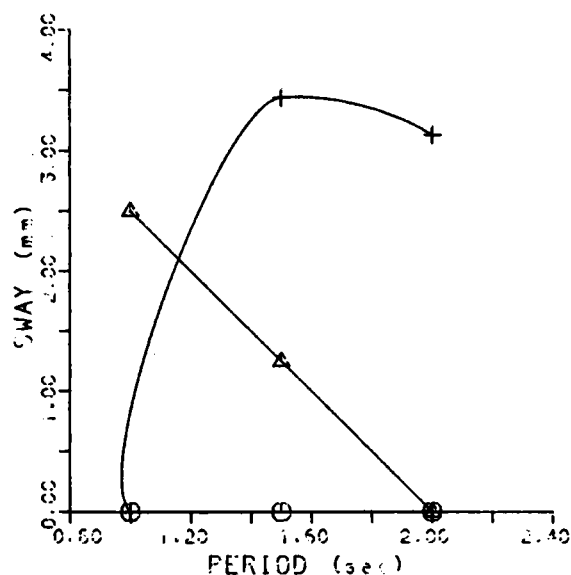
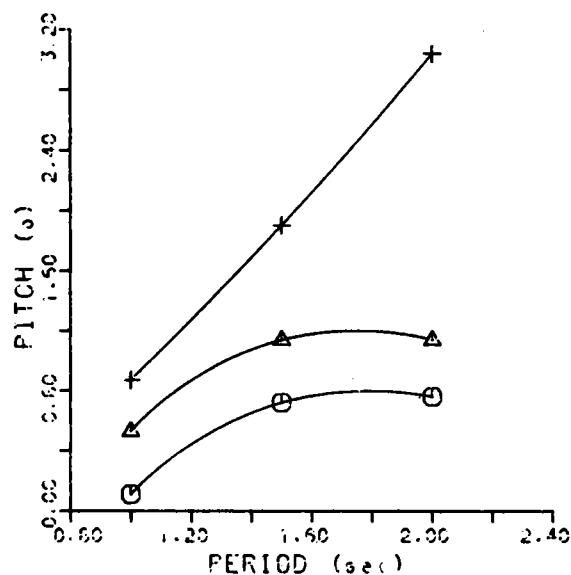
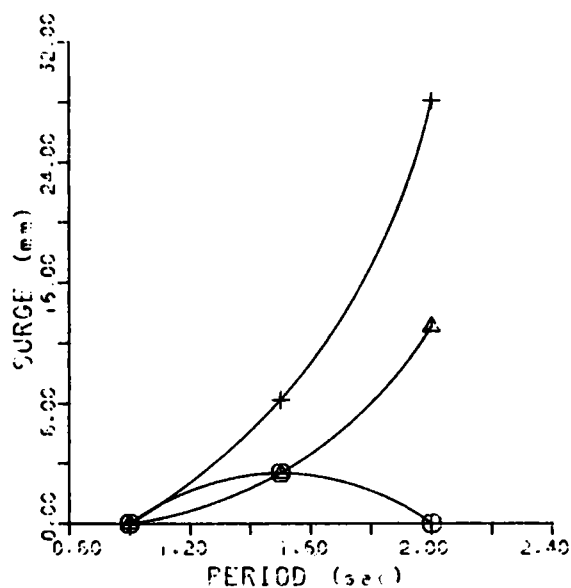
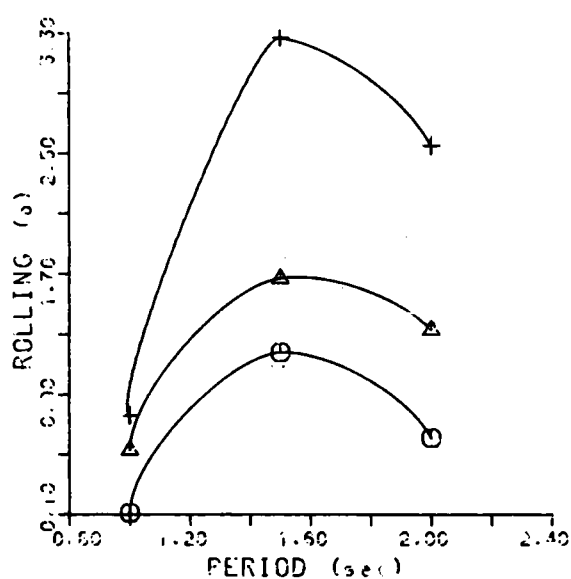


圖 4.7 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 滿載重 繫纜 A)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

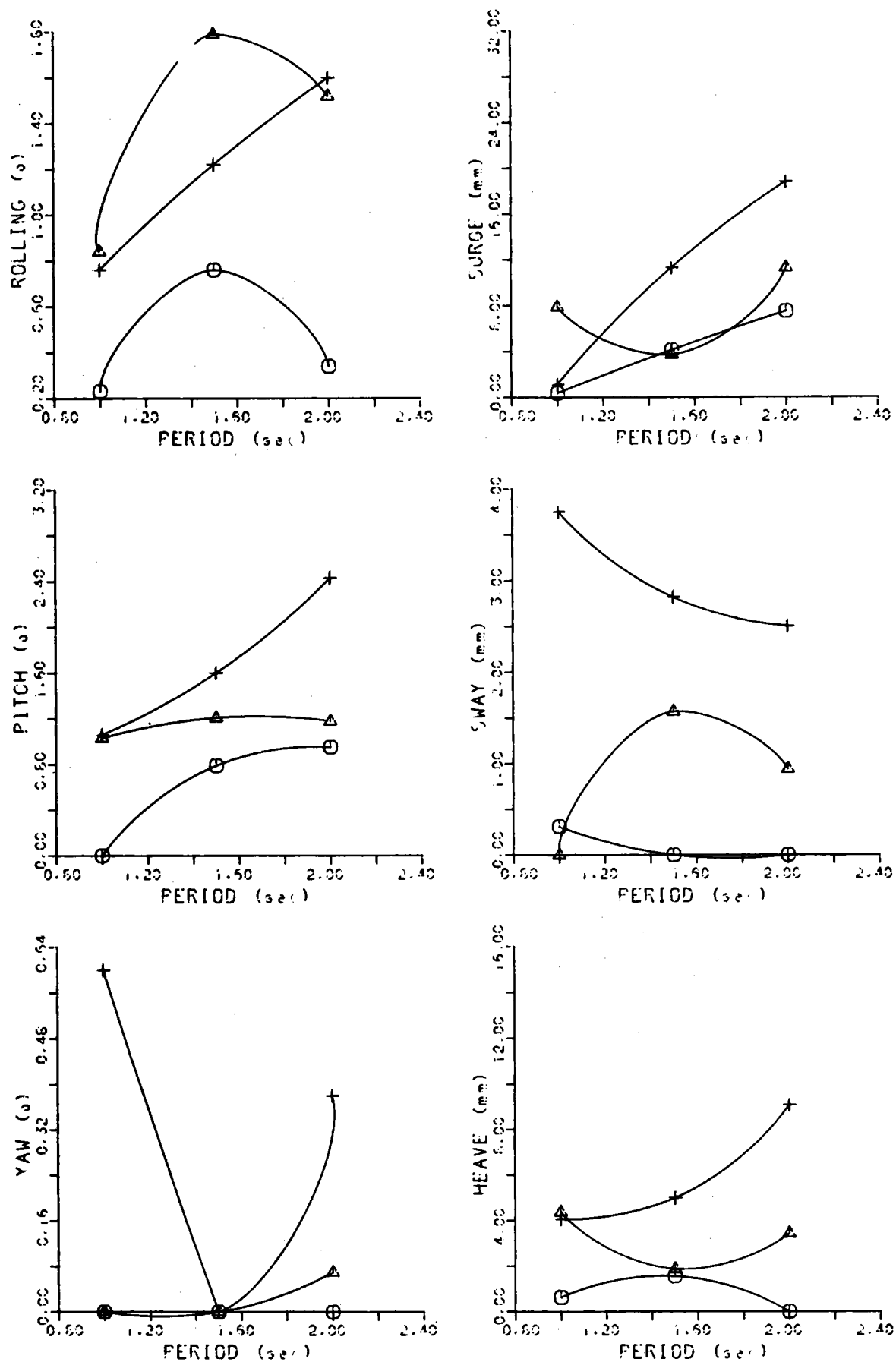


圖 4.8 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 滿載重 繫纜 B)

○ $H_1 = 0.7M$
 △ $H_2 = 1.2M$
 + $H_3 = 2.0M$

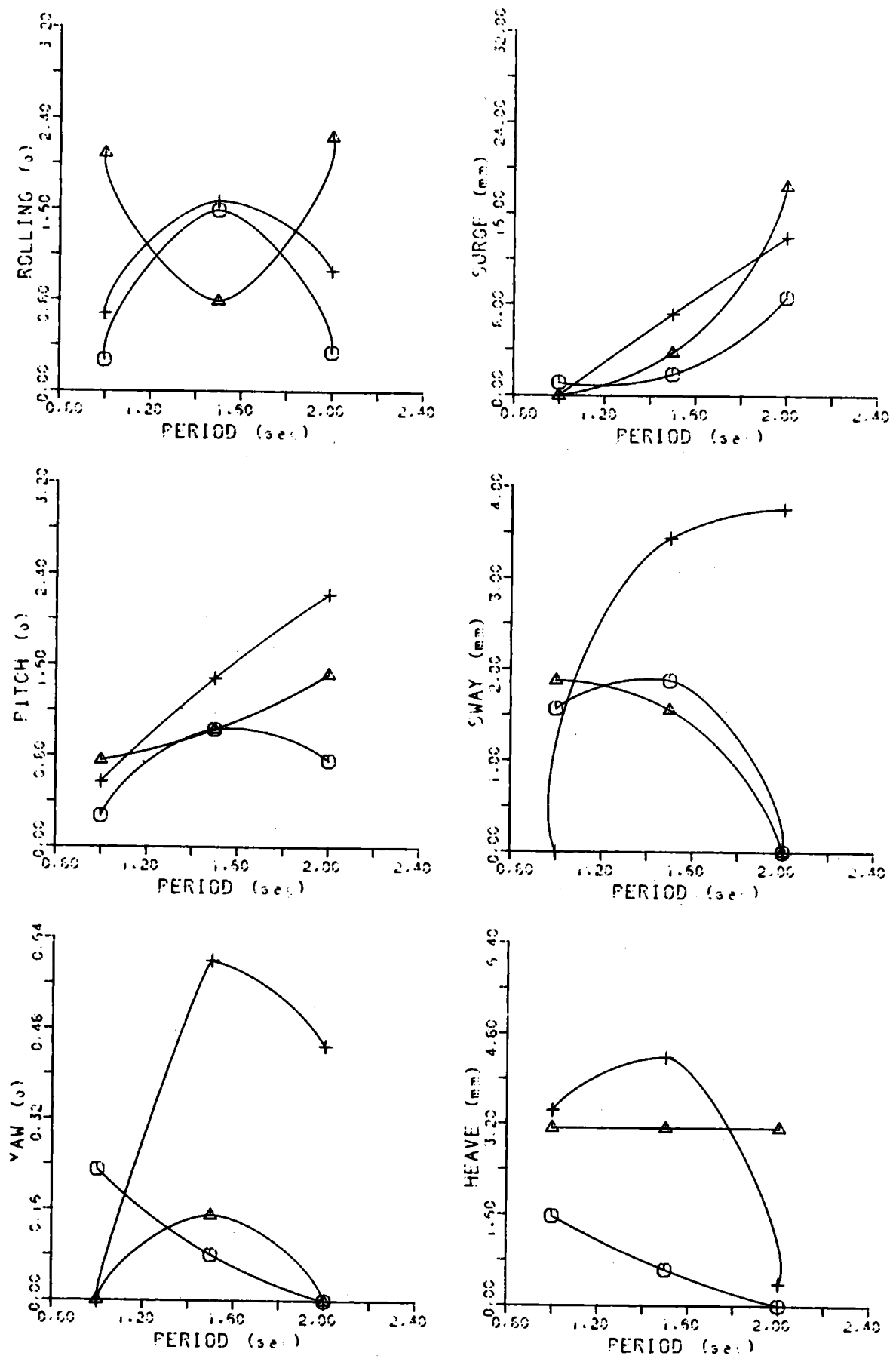


圖 4.9 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 滿載重 繫纜 C)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

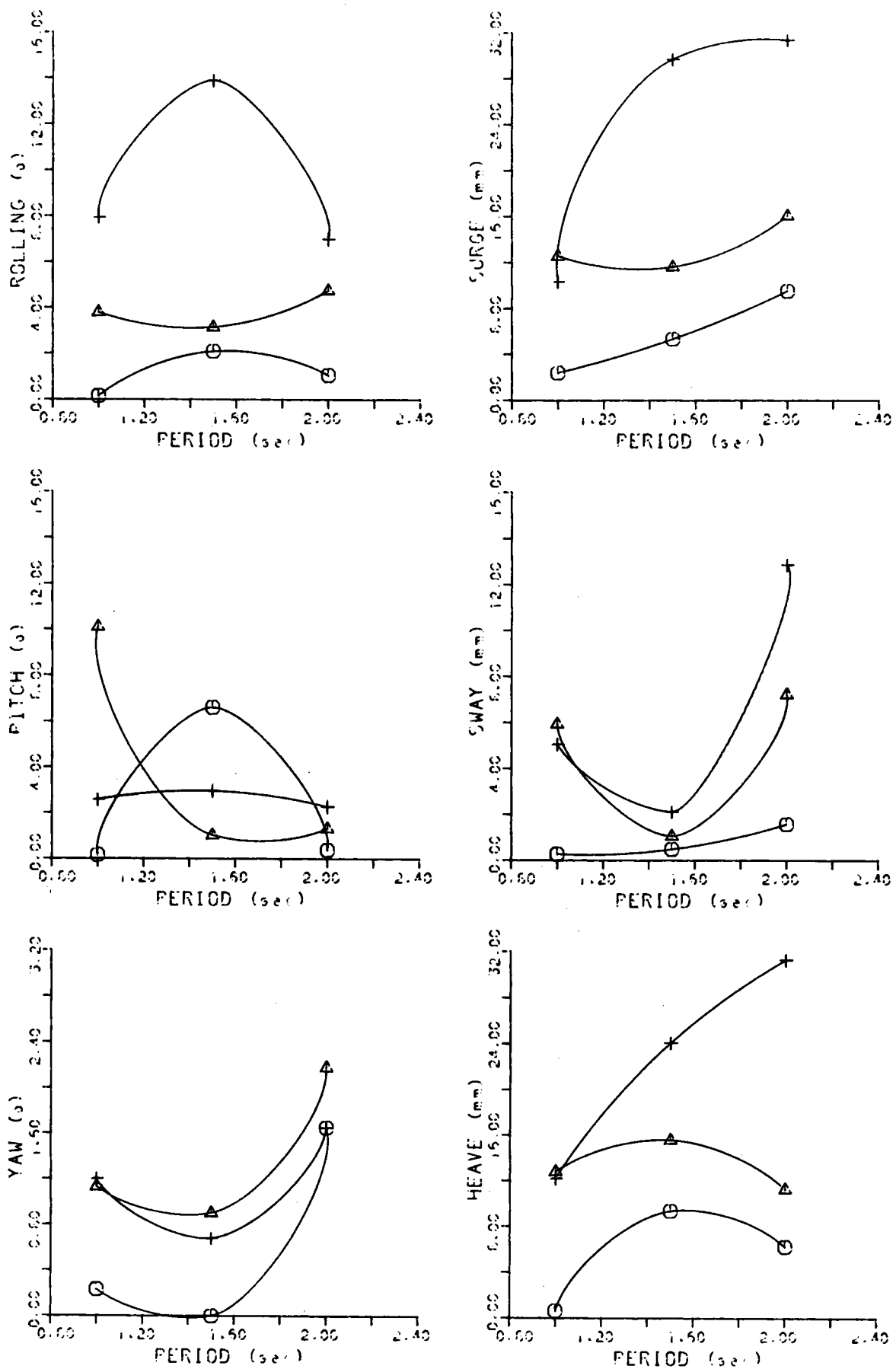


圖 4.10 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 45° 空載重 繫纜 A)

○ H1-0.7M
△ H2-1.2M
+ H3-2.0M

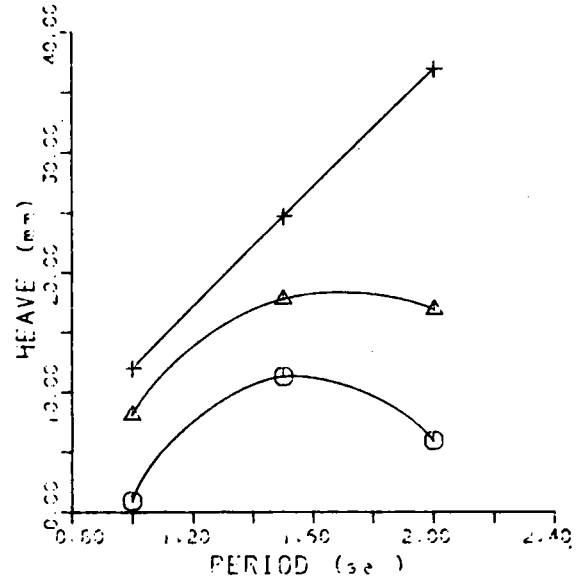
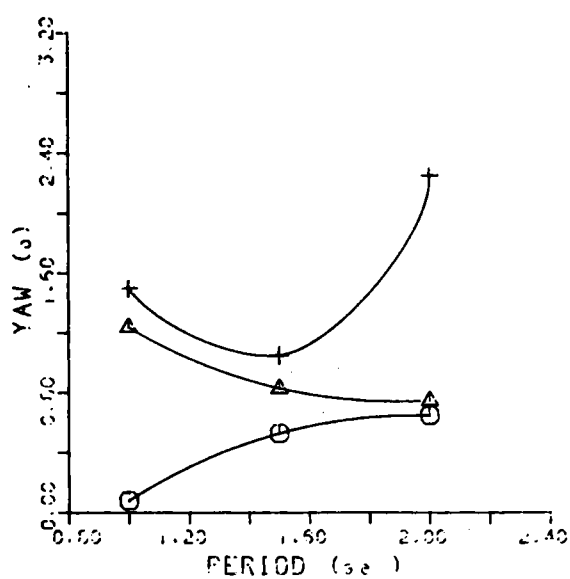
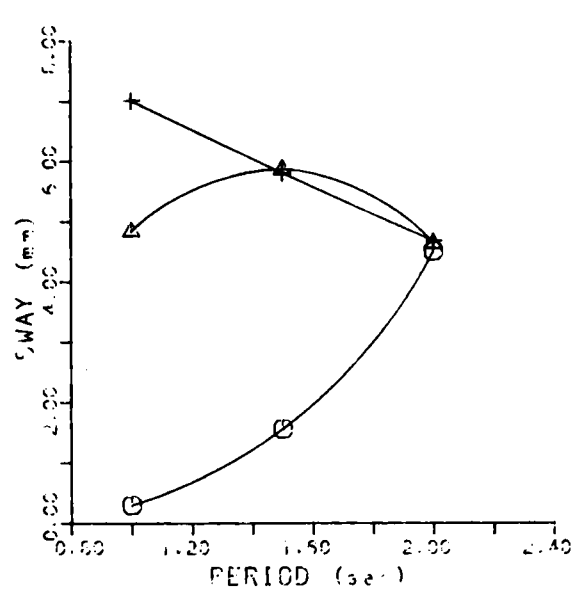
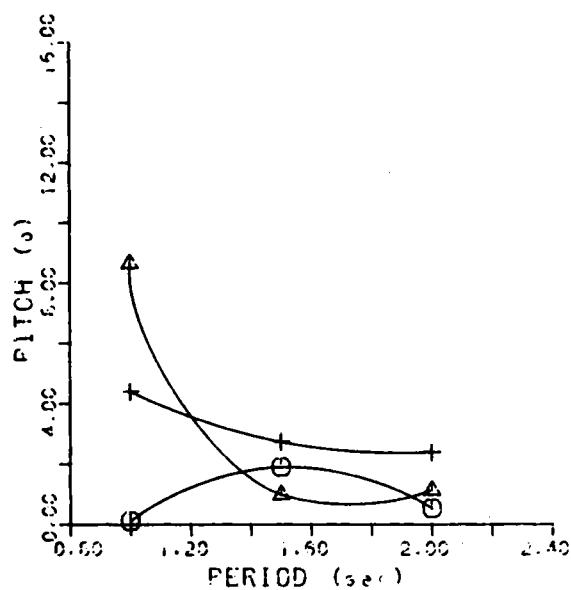
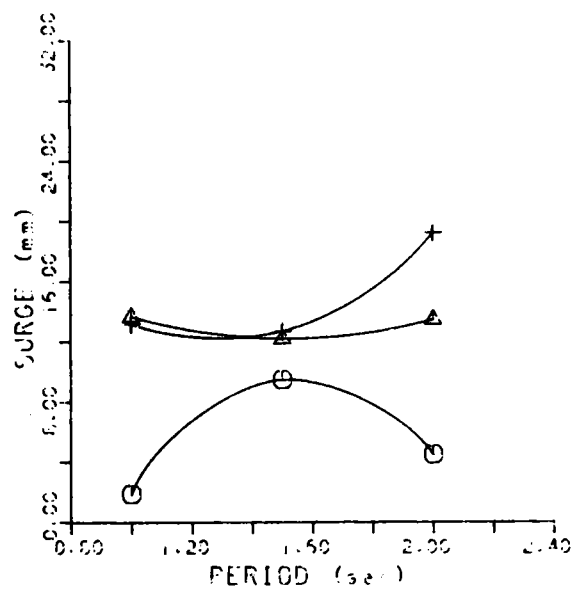
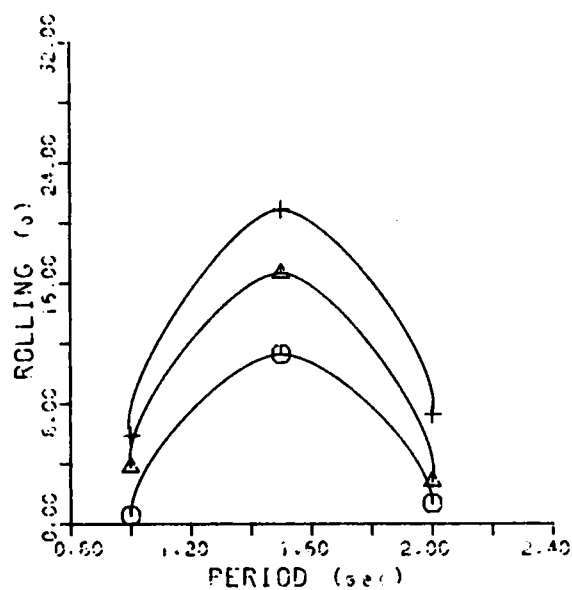


圖 4.11 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 45° 空載重 繫纜 B)

○ H1-0.7M
△ H2-1.2M
+ H3-2.0M

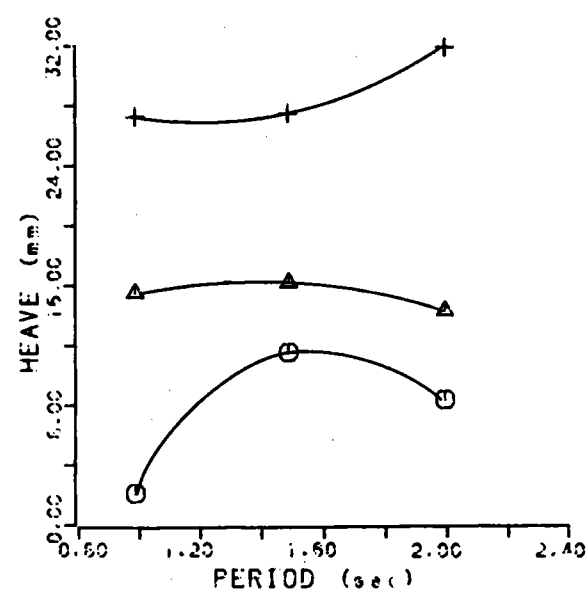
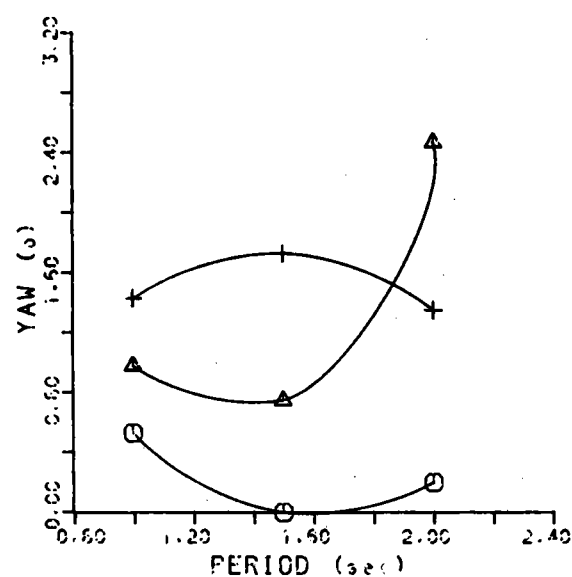
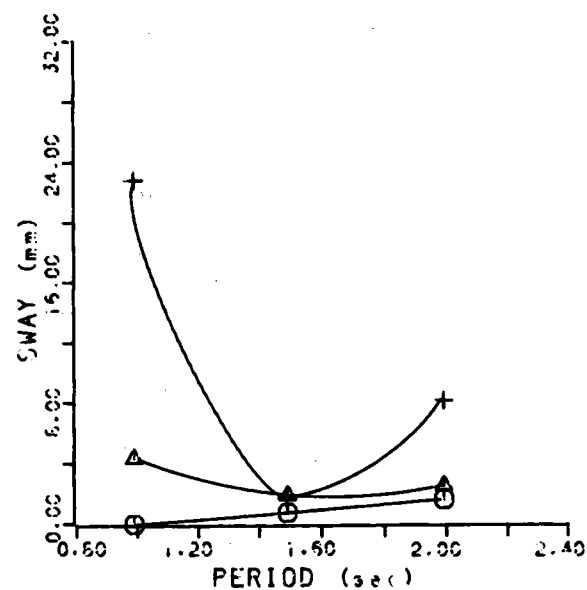
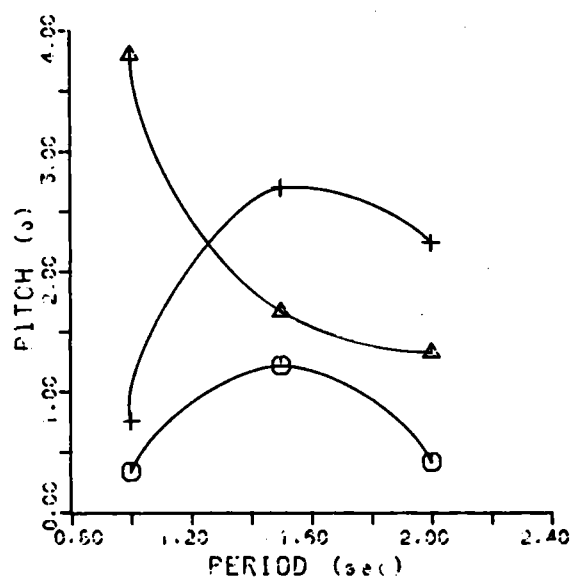
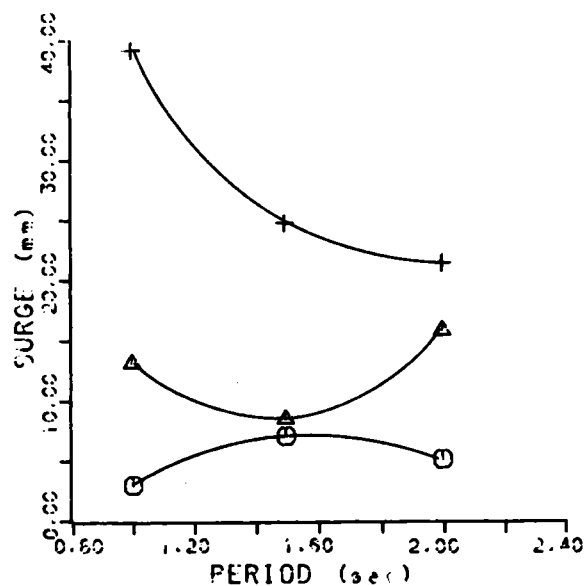
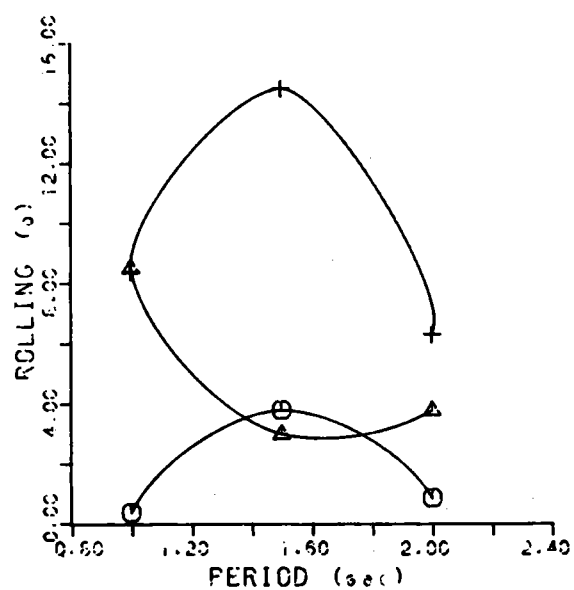


圖 4.12 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 0° 空載重 繫纜 C)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

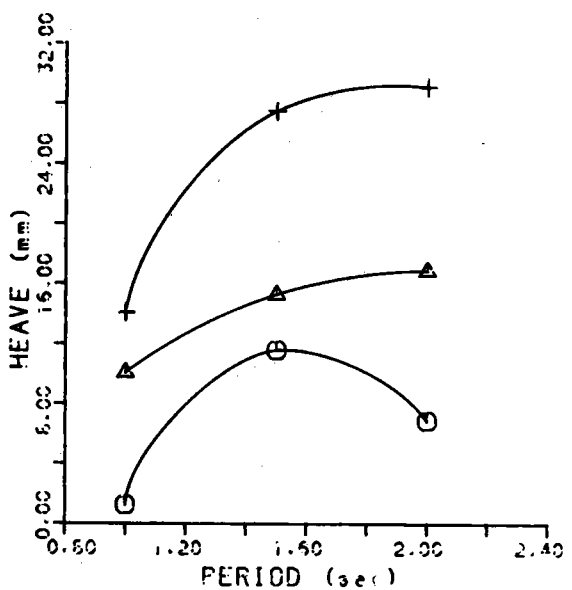
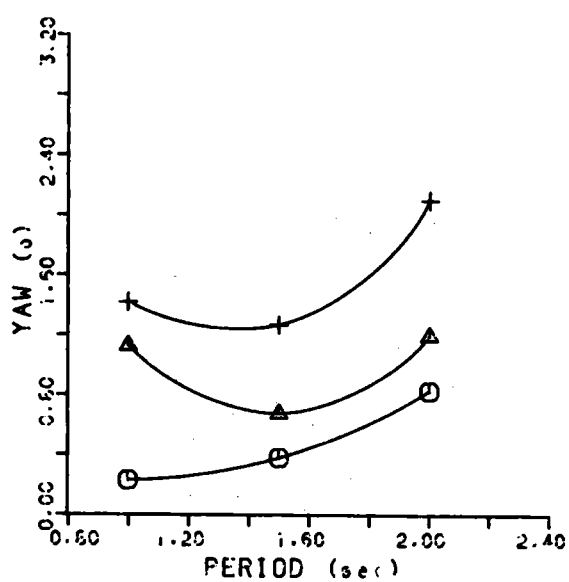
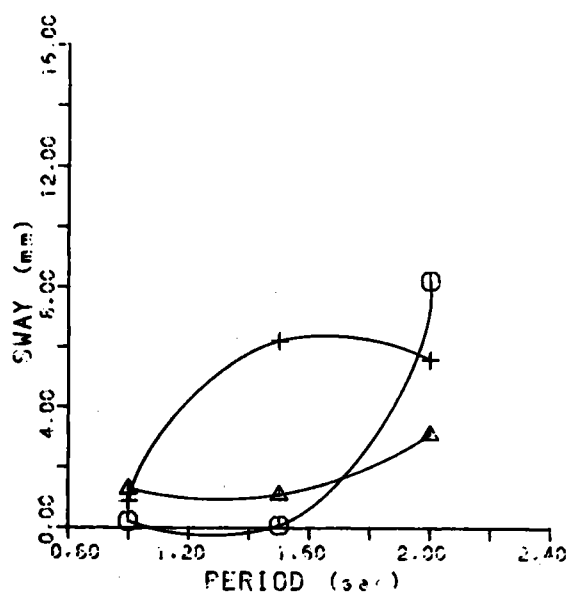
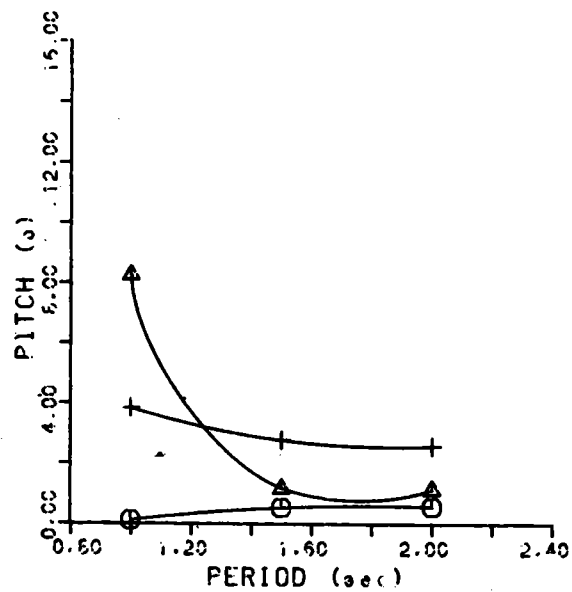
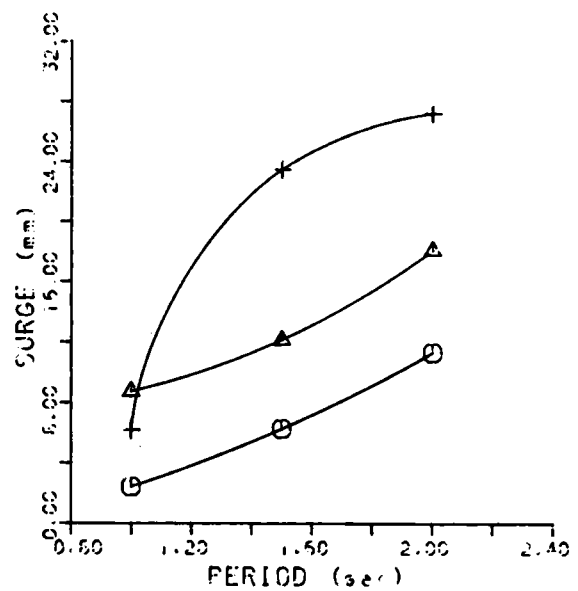
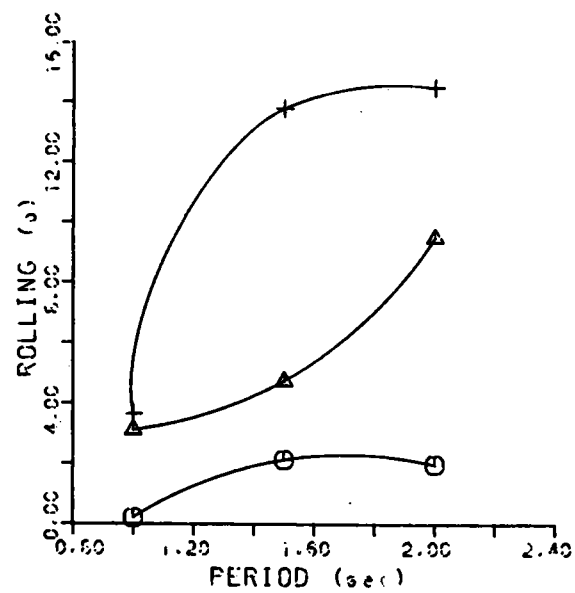


圖 4.13 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 45° 滿載重 繫纜 A)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

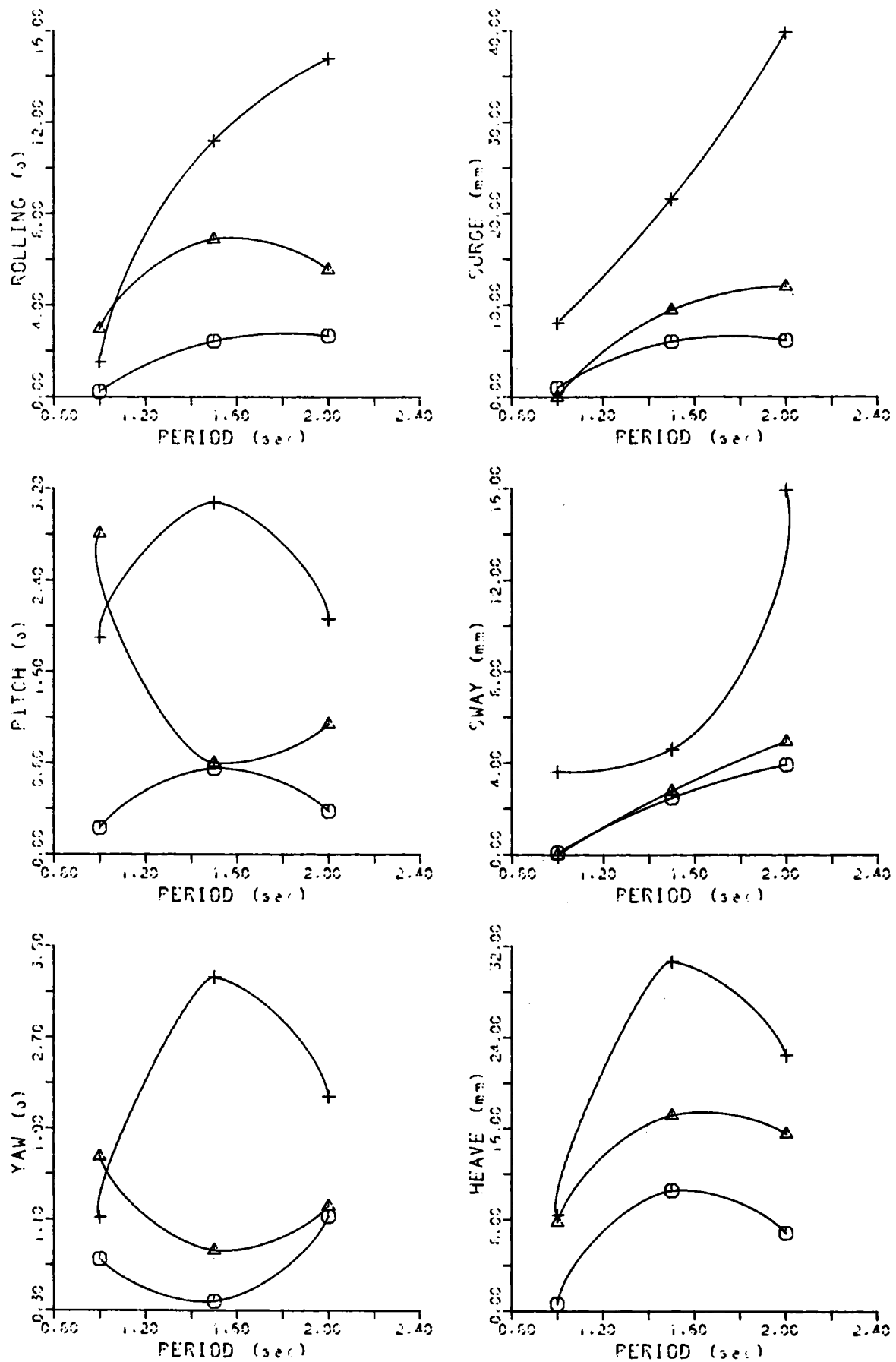


圖 4.14 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 45° 滿載重 繫纜 B)

○ $H1=0.7M$
 △ $H2=1.2M$
 + $H3=2.0M$

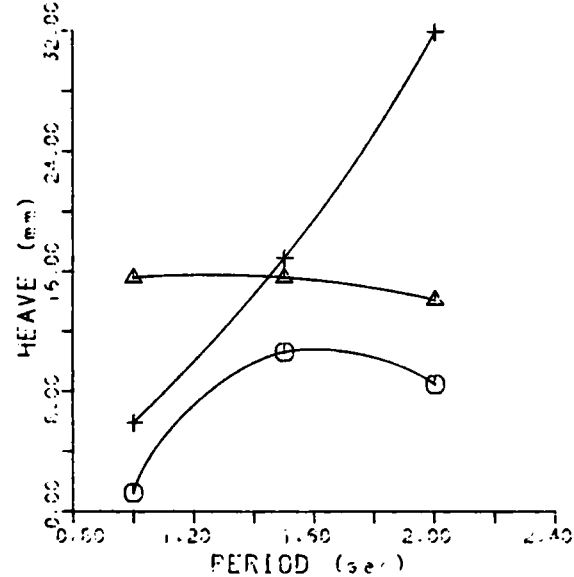
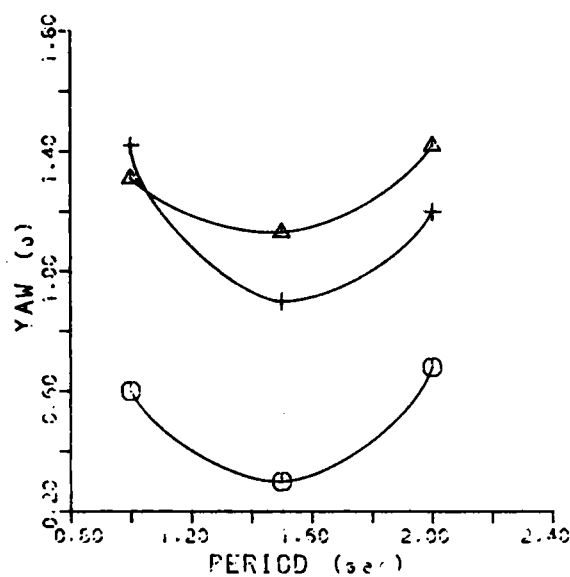
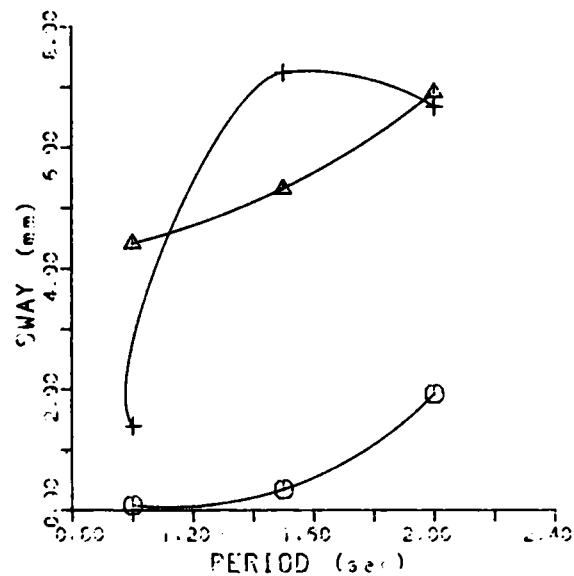
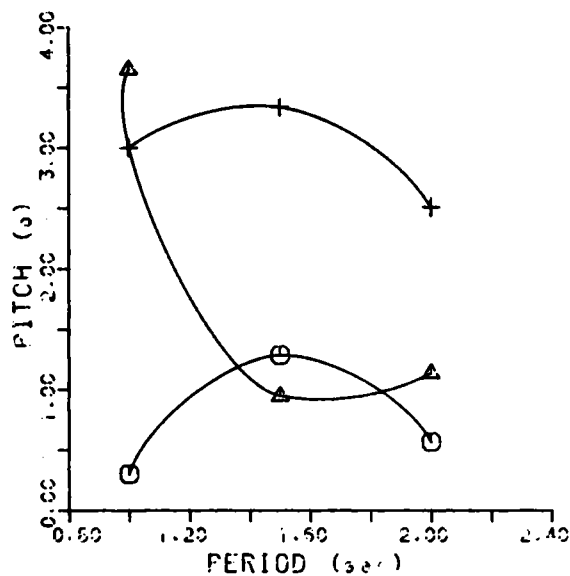
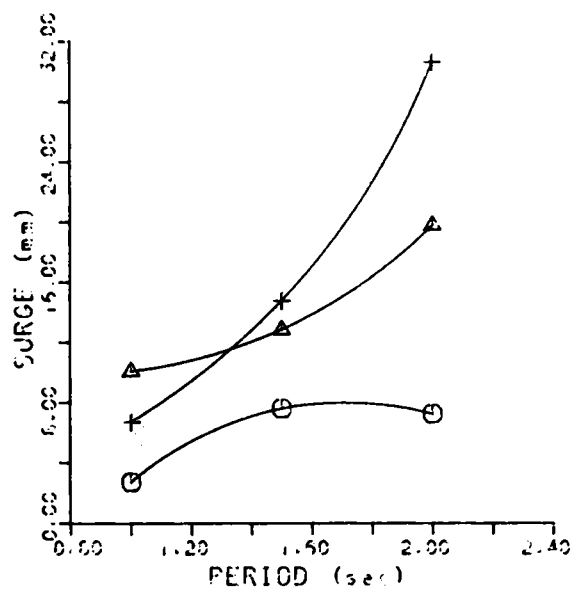
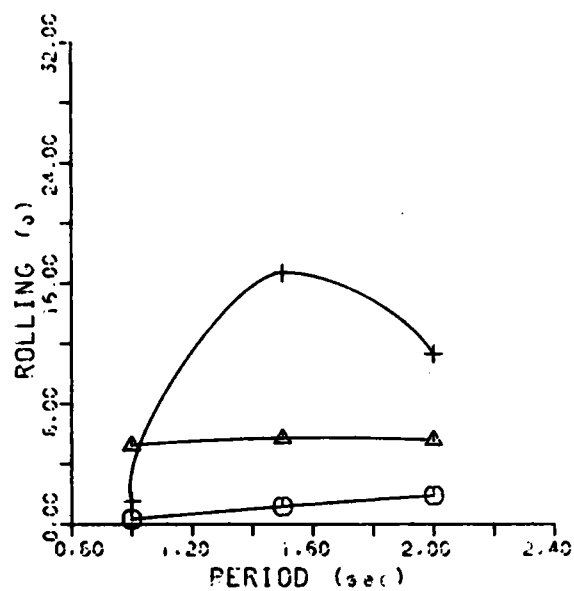


圖 4.15 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 45° 滿載重 繫纜 C)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

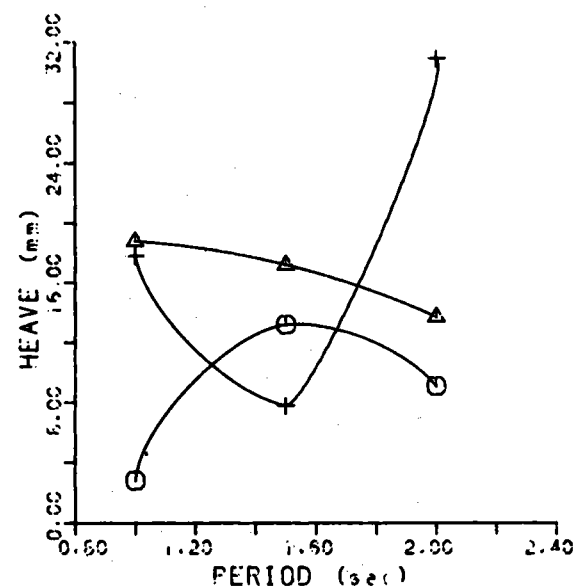
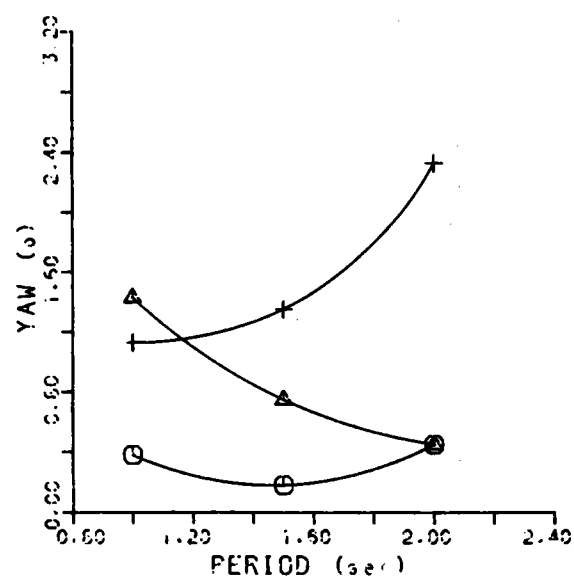
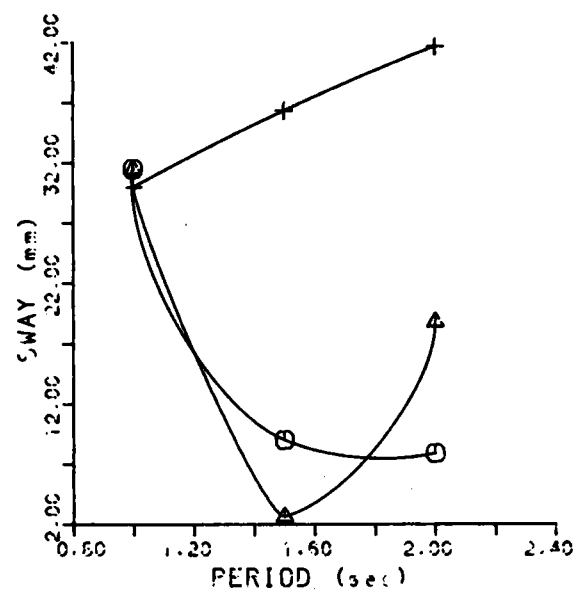
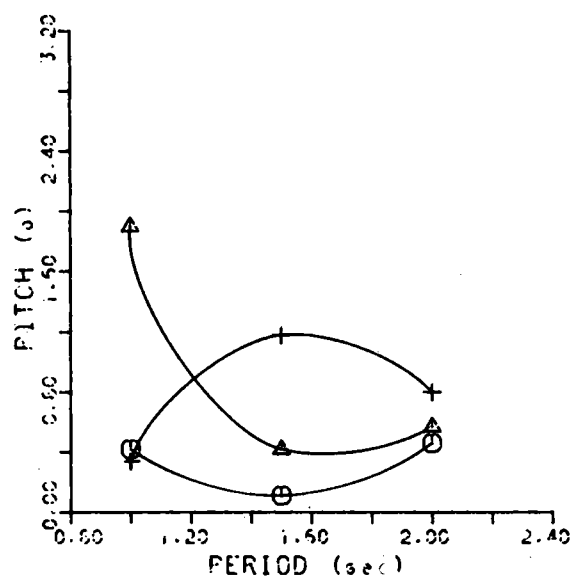
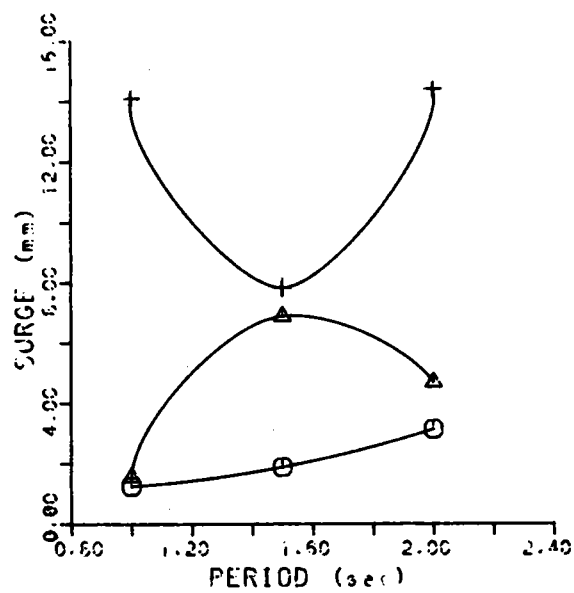
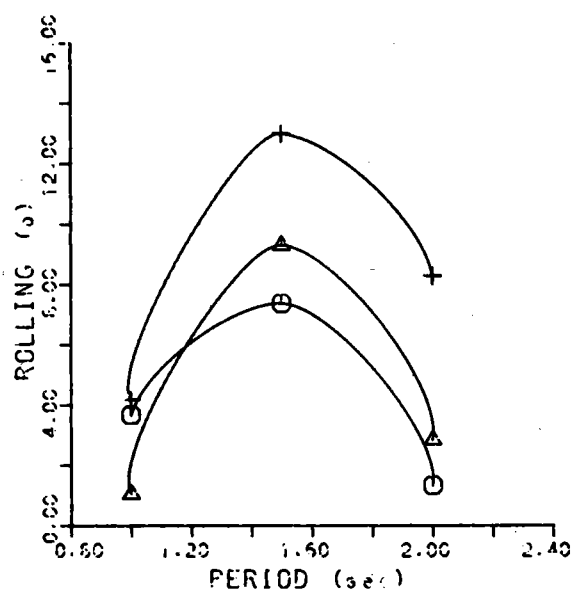


圖 4.16 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 90° 空載重 繫纜 A)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

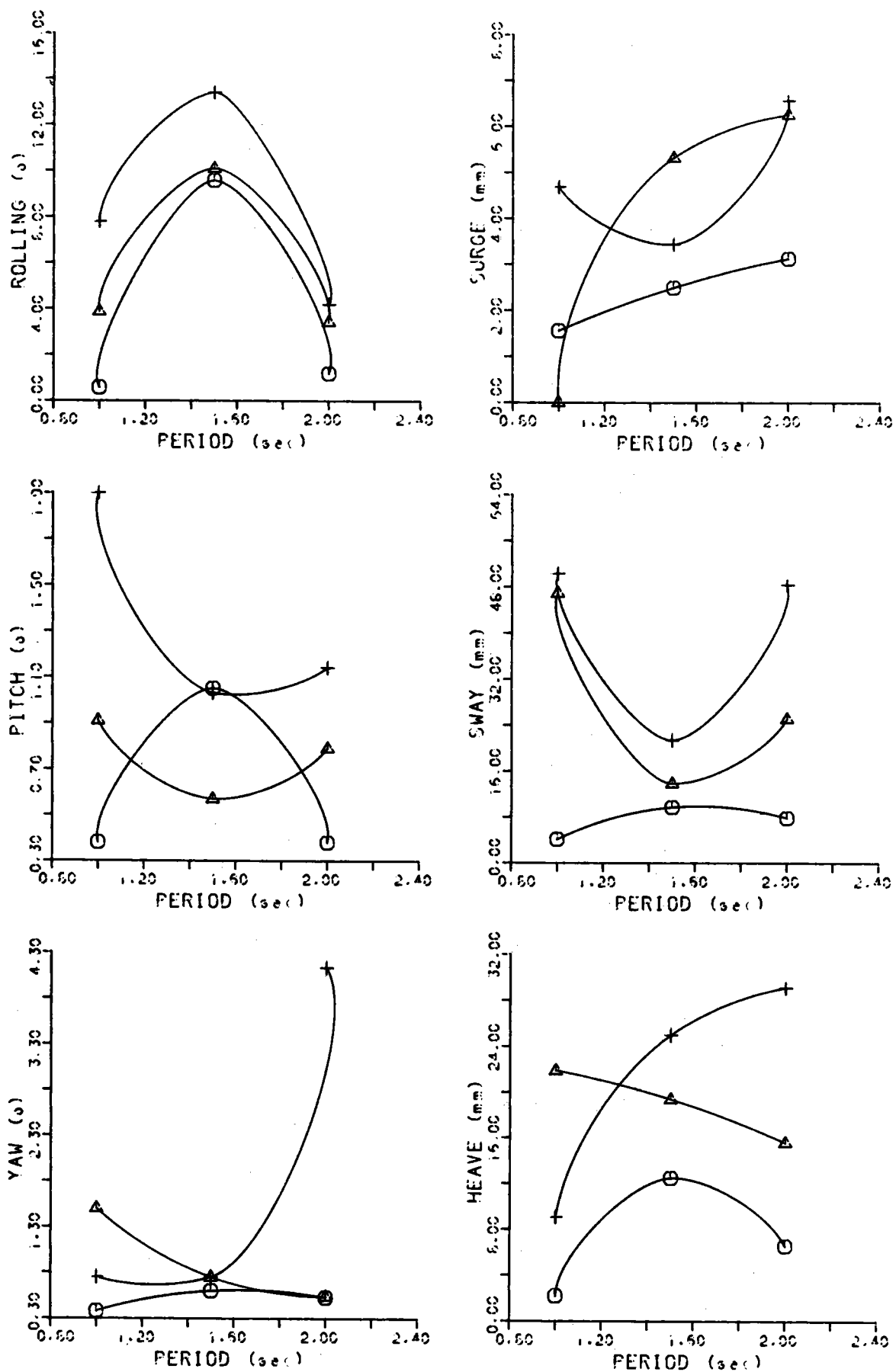


圖 4.17 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 90°空載重 繫纜 B.)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

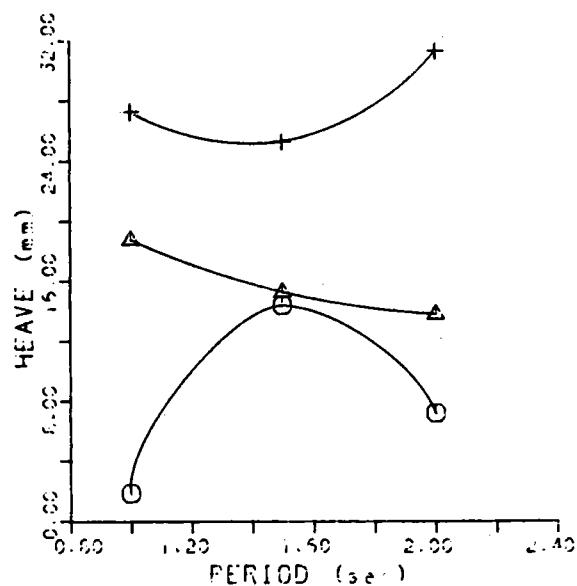
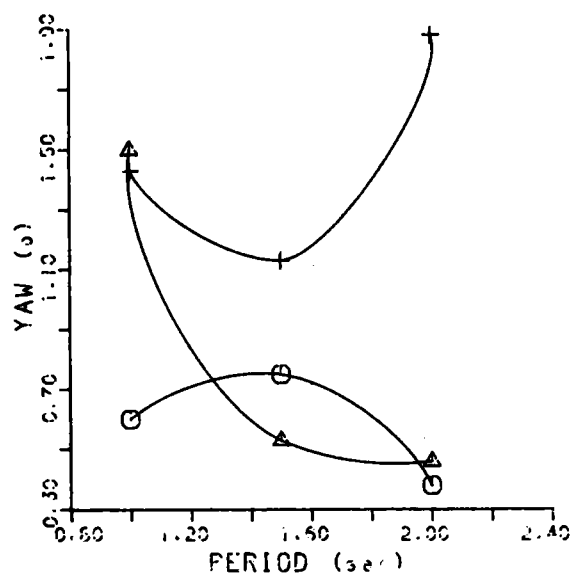
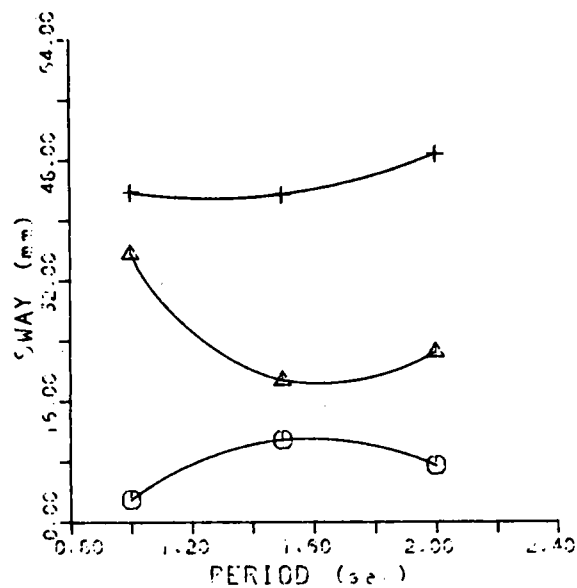
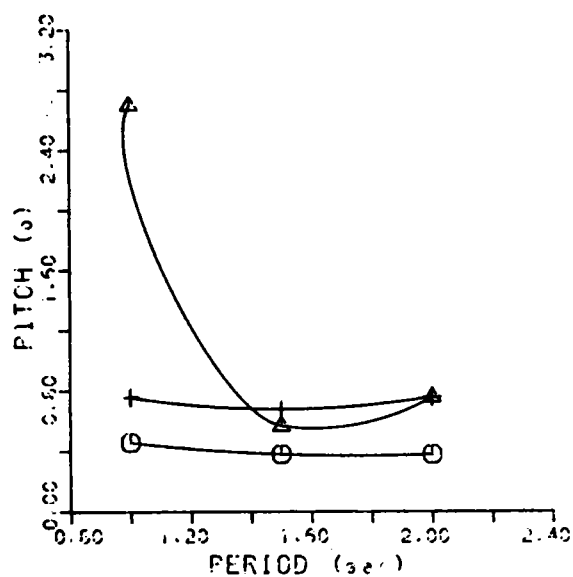
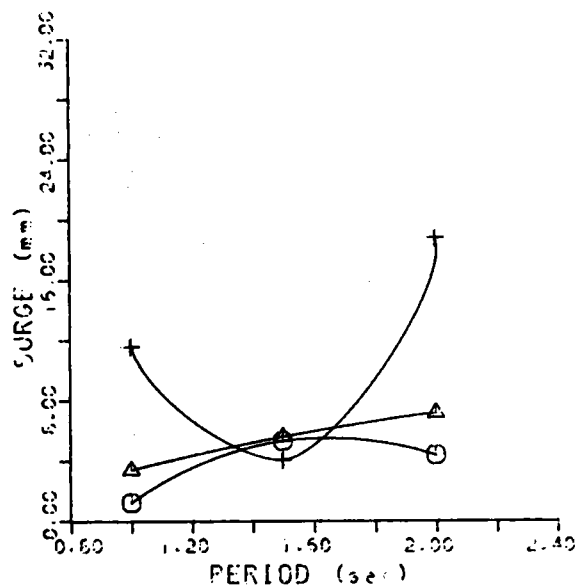
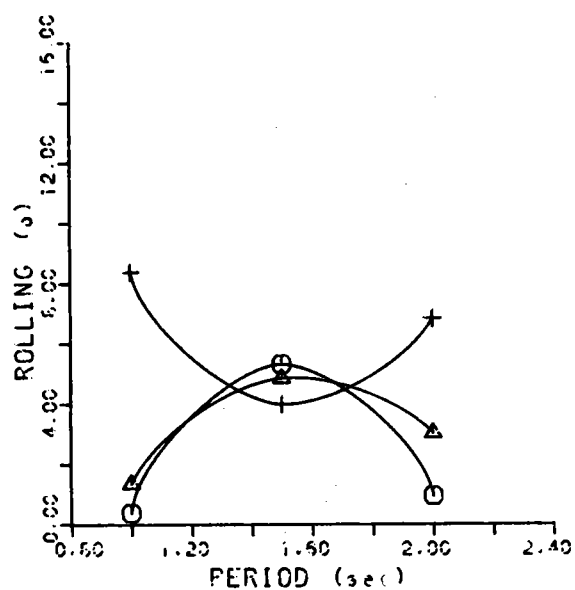


圖 4.18 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 90° 空載重 繫纜 C)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

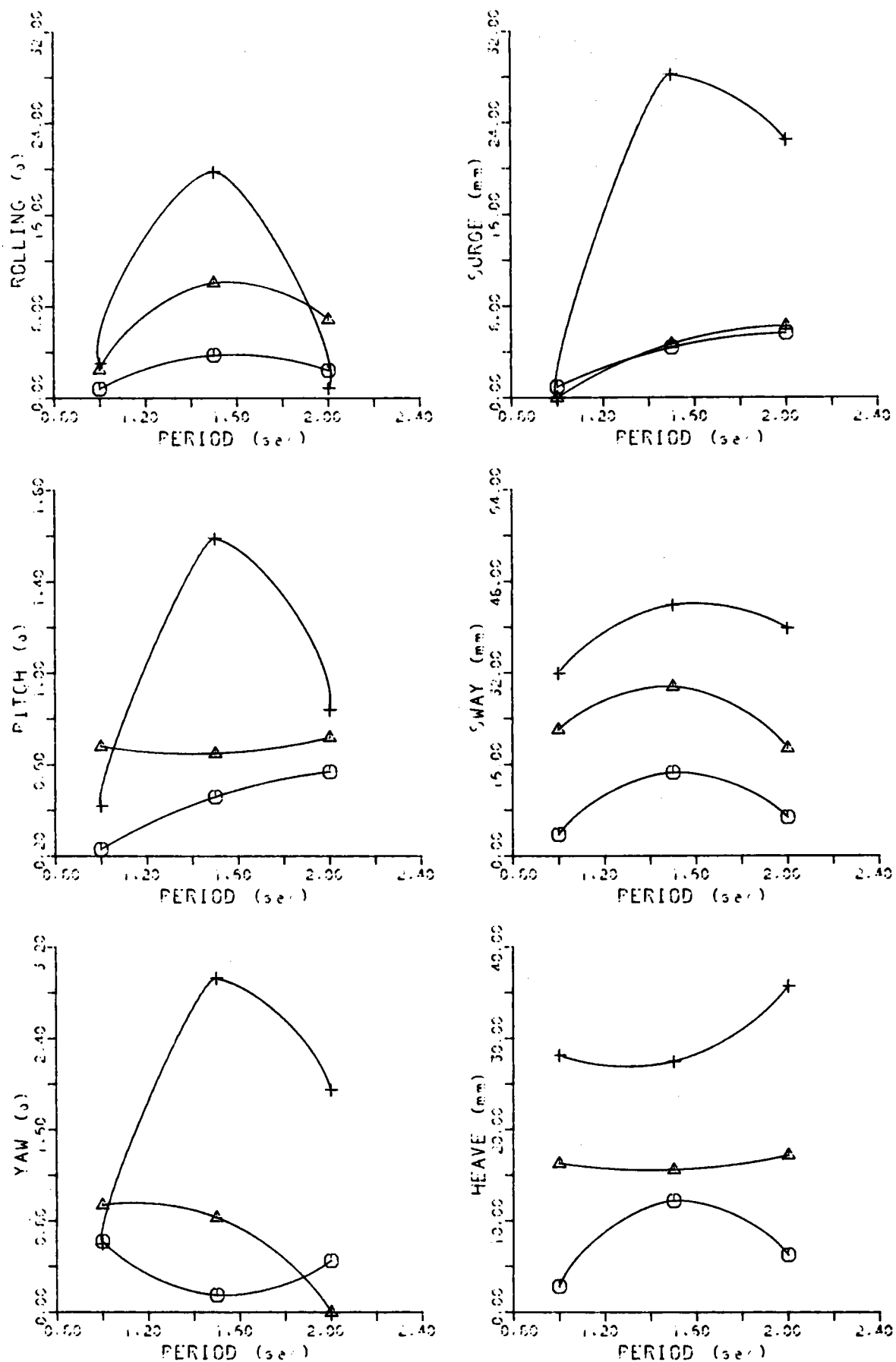


圖 4.19 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 90° 滿載重 繫纜 A)

○ $H_1 = 0.7M$
 △ $H_2 = 1.2M$
 + $H_3 = 2.0M$

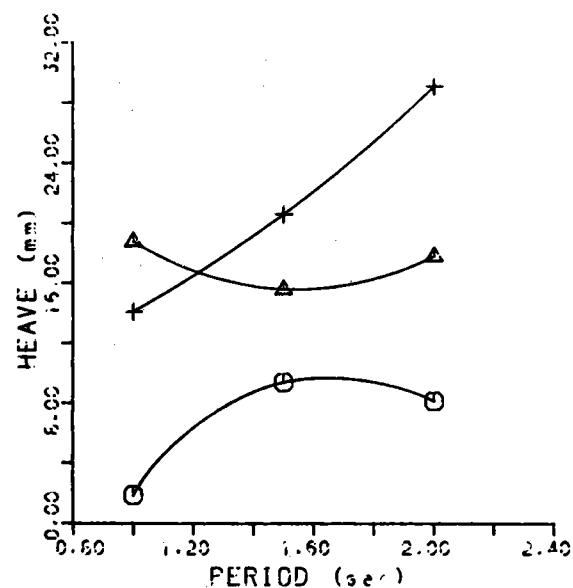
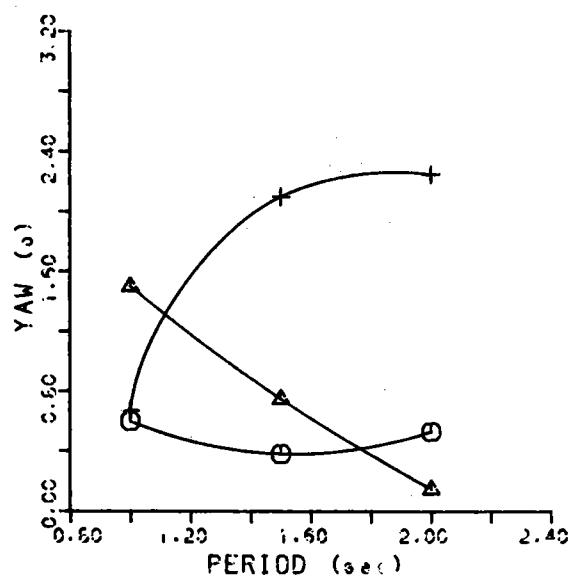
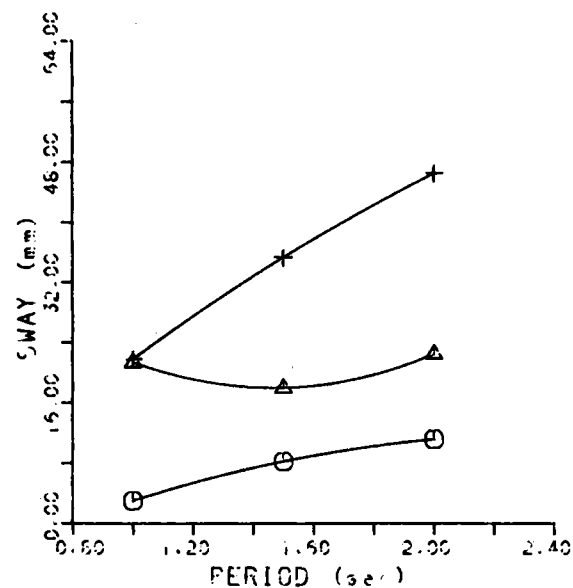
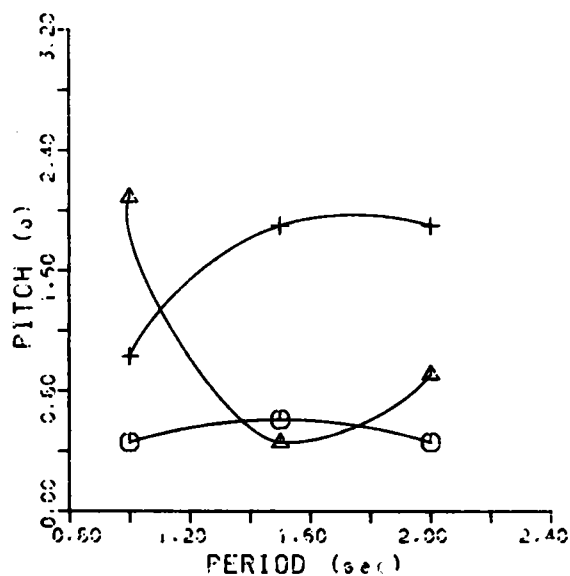
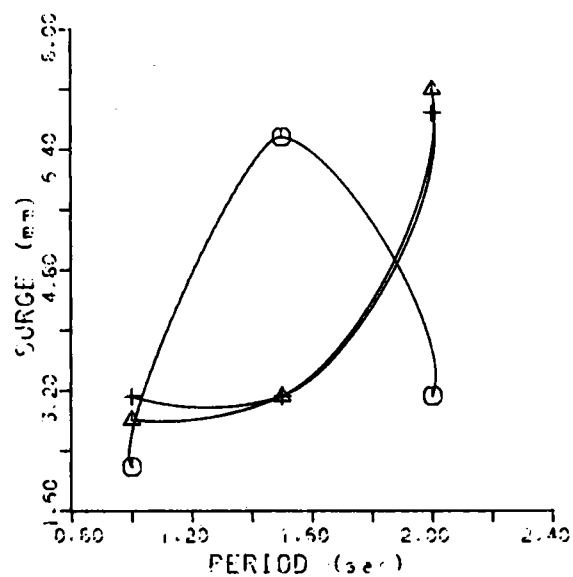
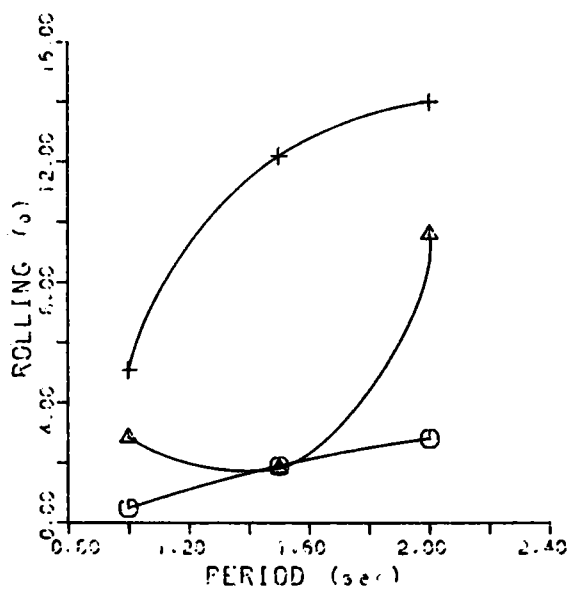


圖 4.20 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向 90° 滿載重 繫纜 B)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

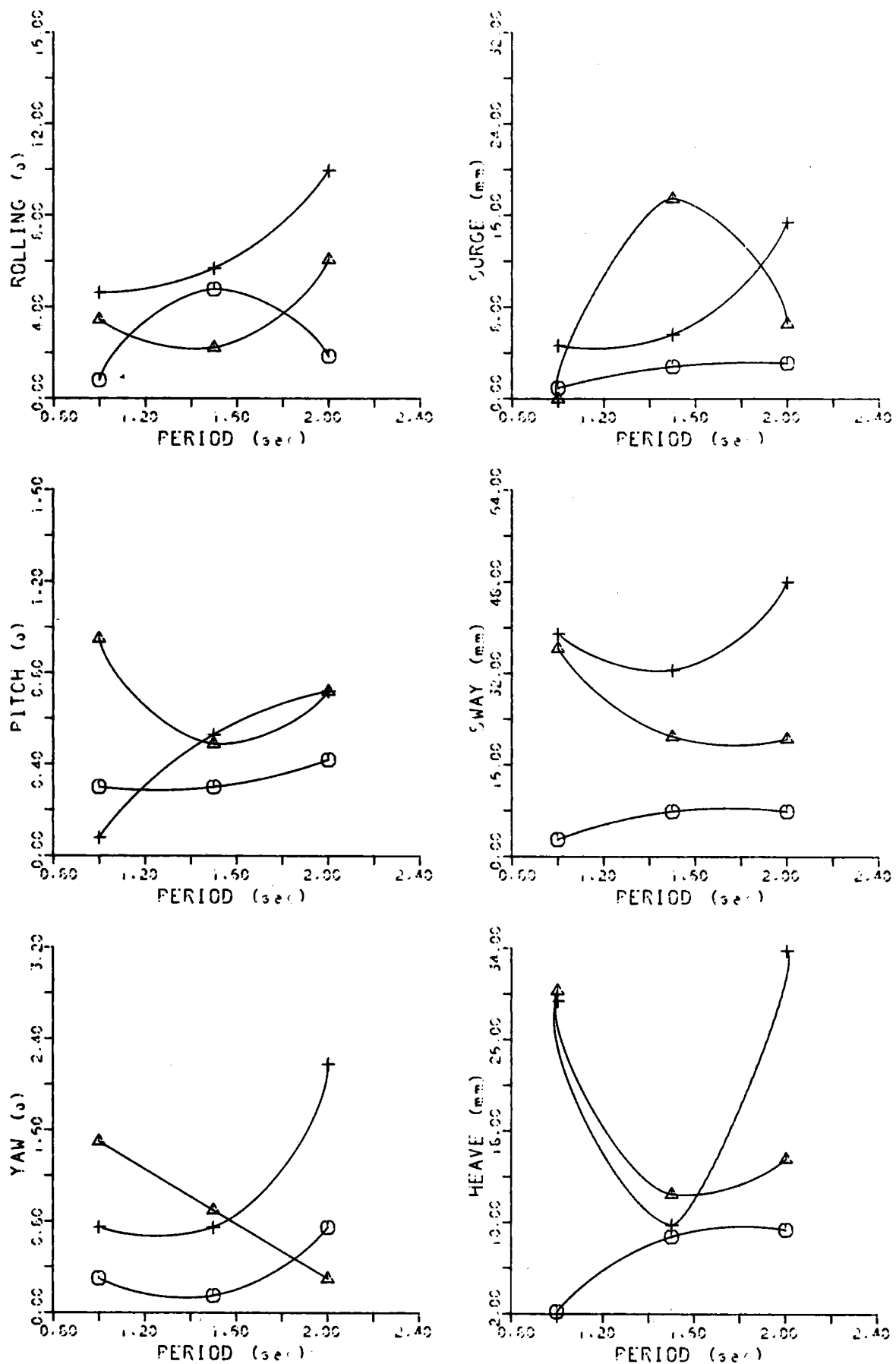


圖4.21 不同波高下船體六個自由度運動對週期之關係
(波向0° 滿載重 繫纜C)

○ H1=0.7M
△ H2=1.2M
+ H3=2.0M

期 15° 左右有一高峰。短週期波作用下，低載重船有較大的橫搖，反之，長週期波作用下，大載重船有較大的橫搖。

短週期波時，具有較大強韌度繫纜時，且載重小，橫搖增加。反之，較長週期波時，具有較大強韌度繫纜且載重增加，橫搖增加。

縱搖，平擺一般值均小，低載重船和短週期波作用時，有較大運動量。

三、橫浪 (Transverse sea) 時：

縱移隨週期增長而增加之趨勢，以載重小較為明顯。繫纜的強韌度增加，縱移隨波高增加而劇增。

橫移明顯地隨波高增加而增加。短週期波時，低強韌度繫纜和大載重橫移量顯著減少。

波高影響起伏的增加，以載重小，高強韌度纜繩最為顯著，此外長週期也是重要因素。

橫搖也隨著波高增加而增加，載重小時，橫搖在波浪週期 15sec 左右到達高峰，載重大時，略為降低，短週期波浪 $< 15\text{sec}$ ，大載重船舶，低強韌度繫纜時，橫搖小於高強韌度繫纜時之橫搖。反之，長週期波浪 (20sec) 時，略有增高。

縱搖幅角不大，但以載重小，繫纜的強韌度小時，振幅較大，縱搖在長週期波，受波高影響較為顯著。

除了週期較長，波高較大時外，平擺幅角均不大，長週期波時，載重小船舶的平擺量略為提高。

4.5.2 張 力

本試驗採用繫纜方式主要分為 A，B，C 三種，A，C 為粗細兩種不同的纜繩 (A，C 纜繩之 k 值分別為 $4.75^{\text{kg}}/\text{mm}$ ， $8.73^{\text{kg}}/\text{mm}$ ，整個系統之 k 值經率定如圖 4.22，4.23 各直線之斜率)，而 B 不繫纜繩為自由運動。為控制試驗條件能夠一致，以便分析比較，我們儘量保持船模相對於碼頭的位置。纜繩的繫綁方式以及長度不變。試驗結果如圖 4.24

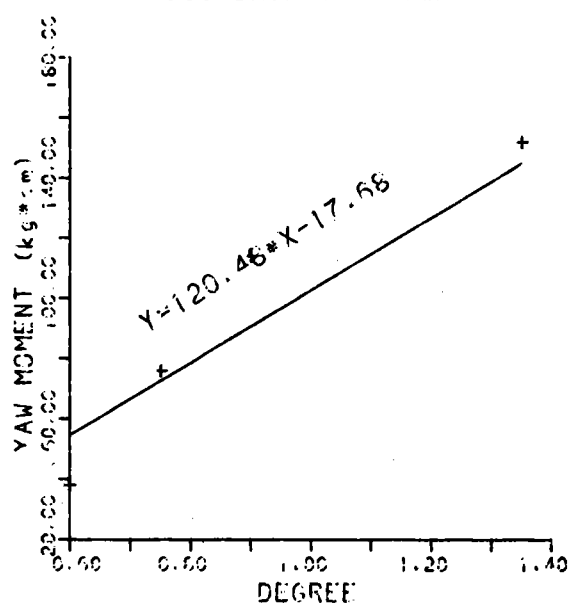
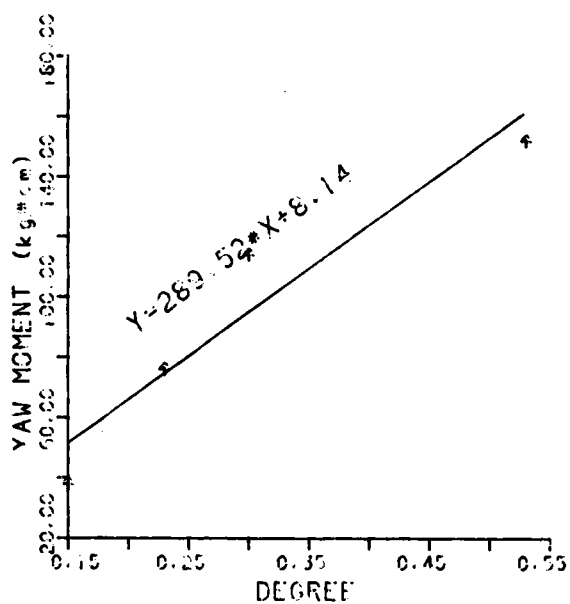
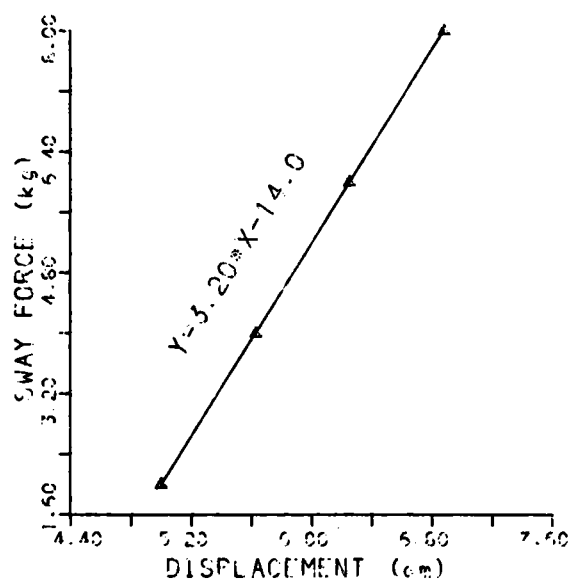
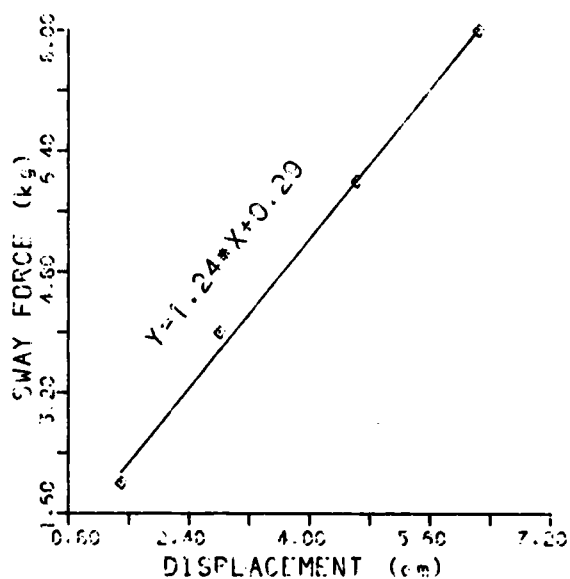
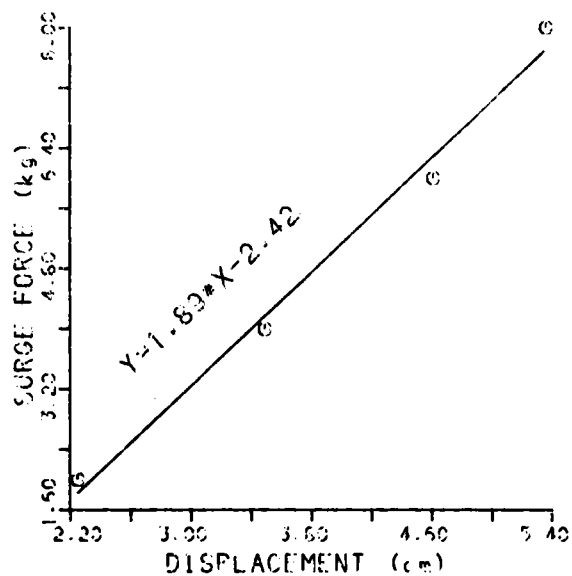
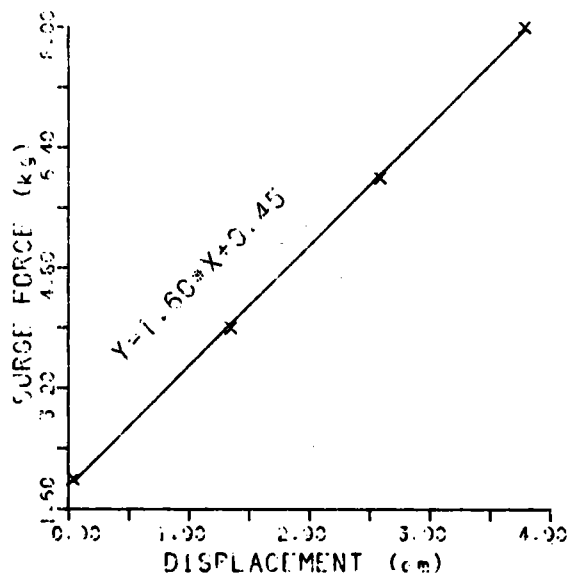
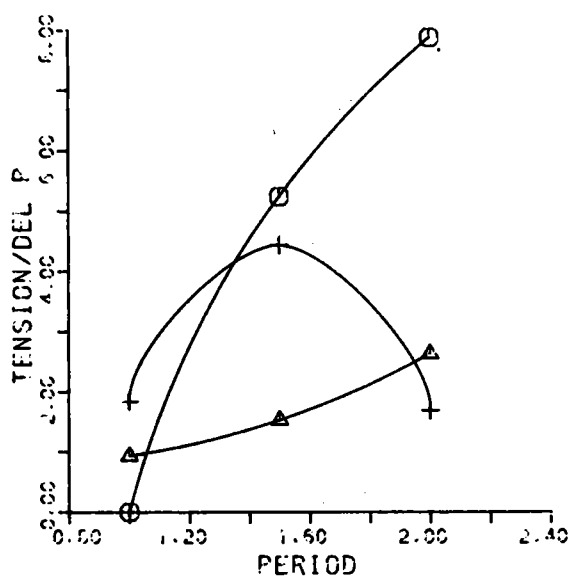
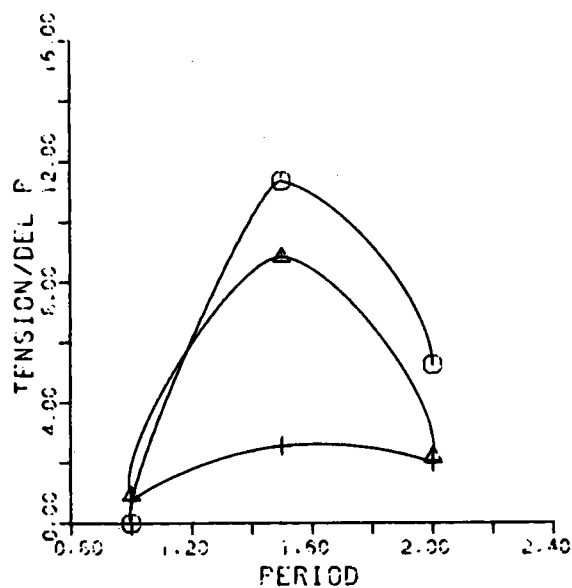


圖 4.23 纜繩 K 值率定曲線 (繫纜 C)

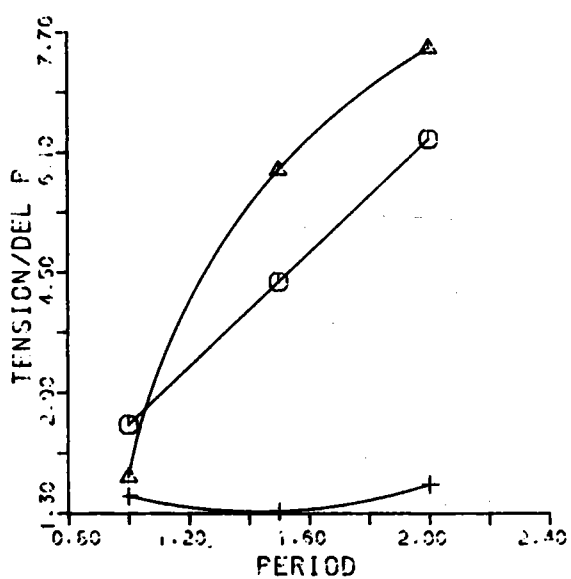
圖 4.22 纜繩 K 值率定曲線 (繫纜 A)



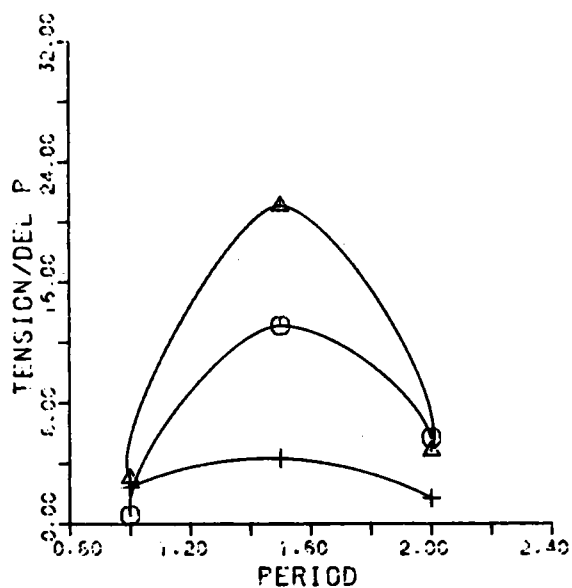
滿載 繫纜 A



空載 繫纜 A



滿載 繫纜 C



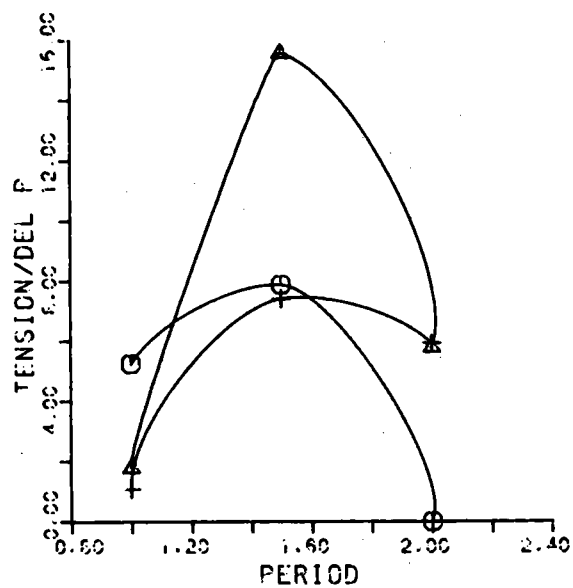
空載 繫纜 C

○ H1=0.7M

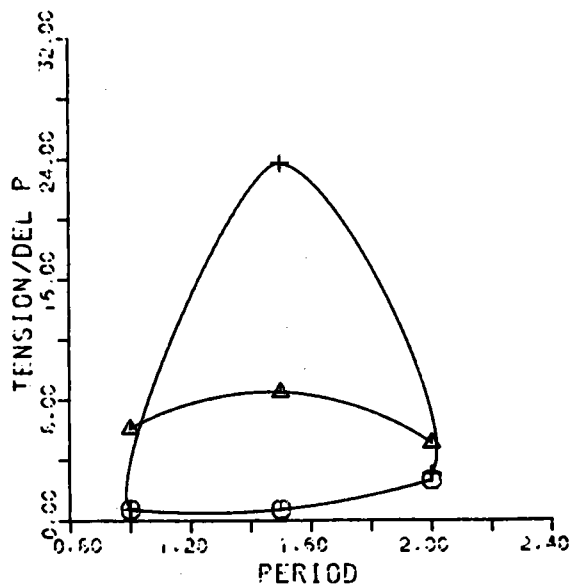
△ H2=1.2M

+ H3=2.0M

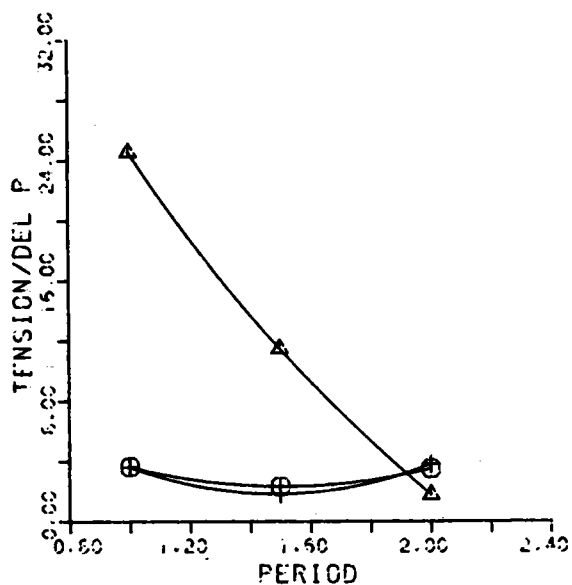
圖 4.24 不同波高下纜繩張力對週期之關係(波向 0°)



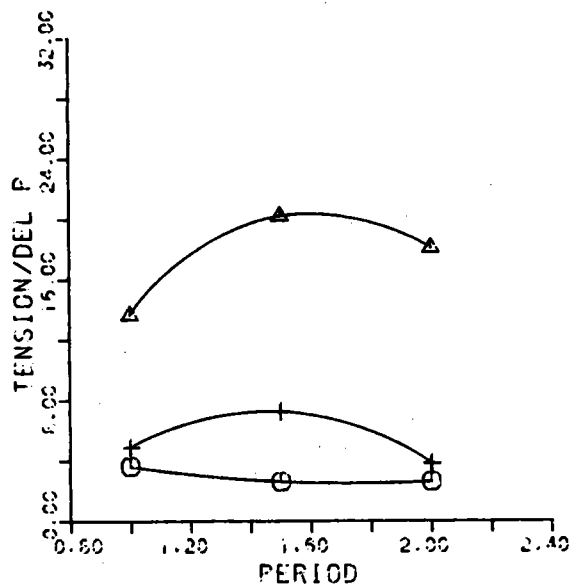
滿載 繫纜 A



空載 繫纜 A



滿載 繫纜 C



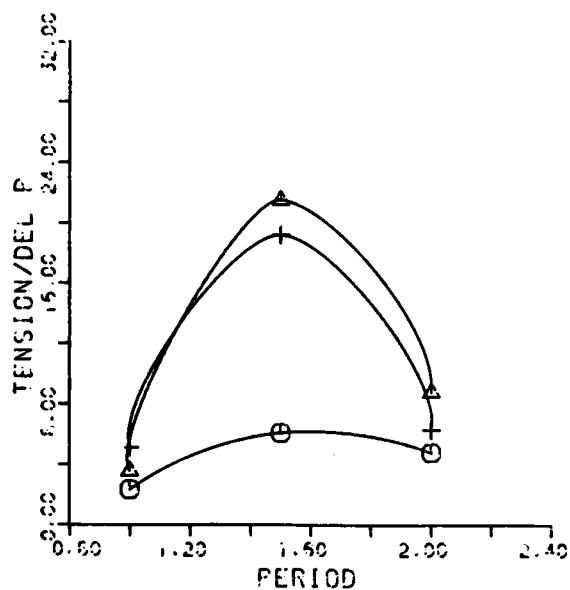
空載 繫纜 C

○ H1=0.7M

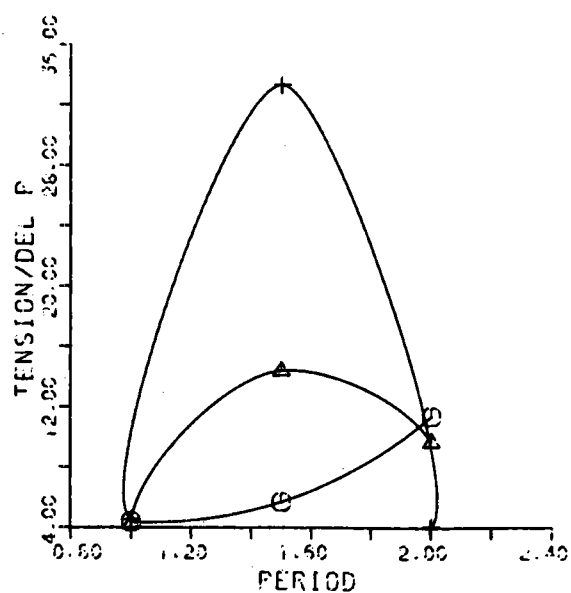
△ H2=1.2M

+ H3=2.0M

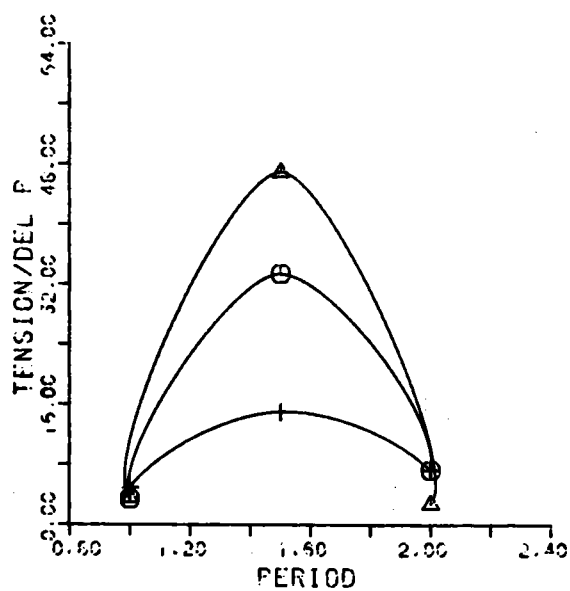
圖 4.25 不同波高下纜繩張力對週期之關係(波向 45°)



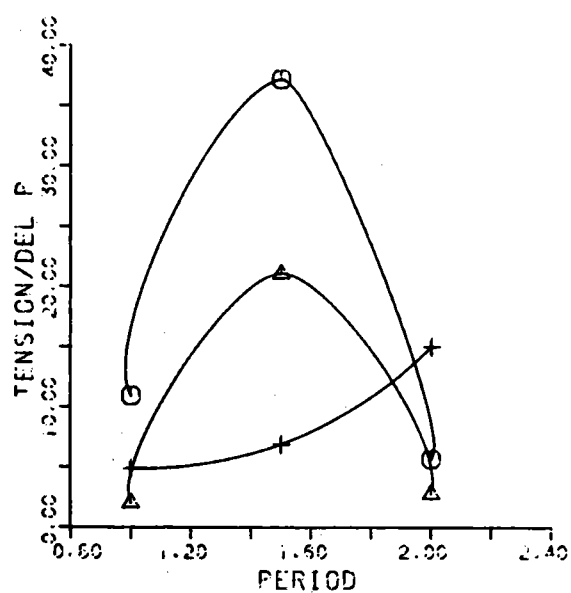
滿載 繫纜 A



空載 繫纜 A



滿載 繫纜 C



空載 繫纜 C

○ H1=0.7M

△ H2=1.2M

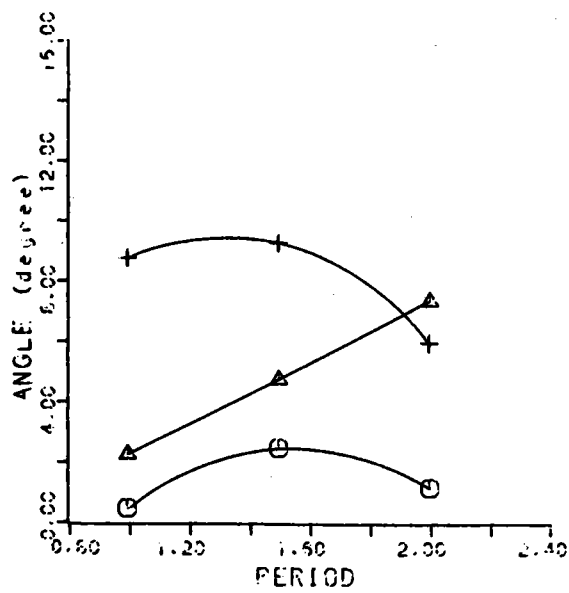
+ H3=2.0M

圖 4.26 不同波高下纜繩張力對週期之關係 (波向 90°)

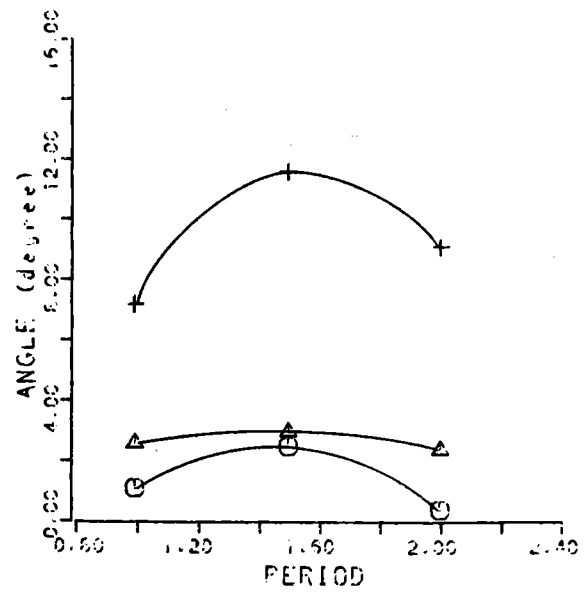
一般船舶繫纜的傾斜角均在水平線上下 20° 範圍內，為彌補此項缺失，我們在固定傾斜計時，讓它剛好與纜繩保持 90° ，以便將纜繩與碼頭面水平的夾角轉換成與地表垂直線的夾角，並使得角度變化的範圍恰好落在傾斜計線性變化的區間。另外纜繩橫向的晃動角由於繫船柱係一圓柱體，中心對稱，對最大拉力的計算不甚重要，因此整個試驗主要著重在纜繩縱向晃動角的測定。其結果如附圖 4.27 ~ 4.29 所示，一般而言，對同一週期之晃動角隨波高之增大而增加，但對同一波高而言，週期變化對晃動角的影響似顯零亂。唯當波高增大時，晃動角顯然有隨著週期增大而變小的趨勢。

4.5.4 加速度

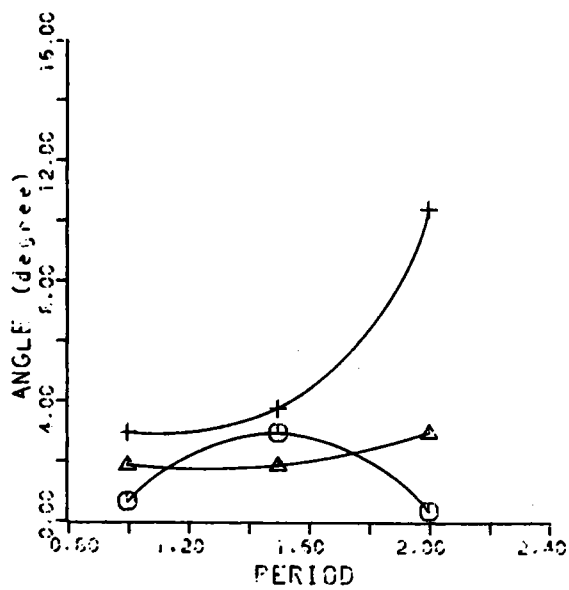
本次試驗，各種移動加速度 (a_x , a_y , a_z) 均甚小而不予列錄



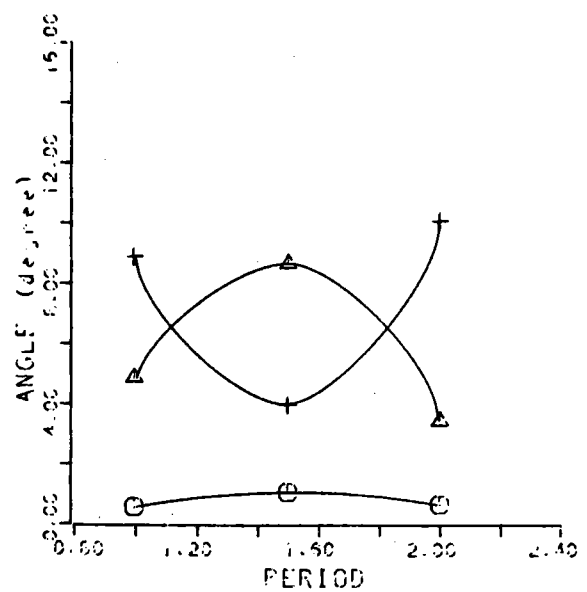
滿載 繫纜 A



空載 繫纜 A



滿載 繫纜 C



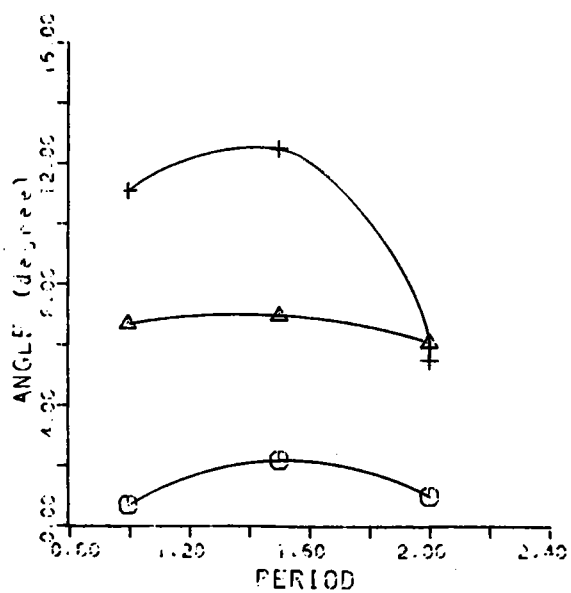
空載 繫纜 C

○ H1=0.7M

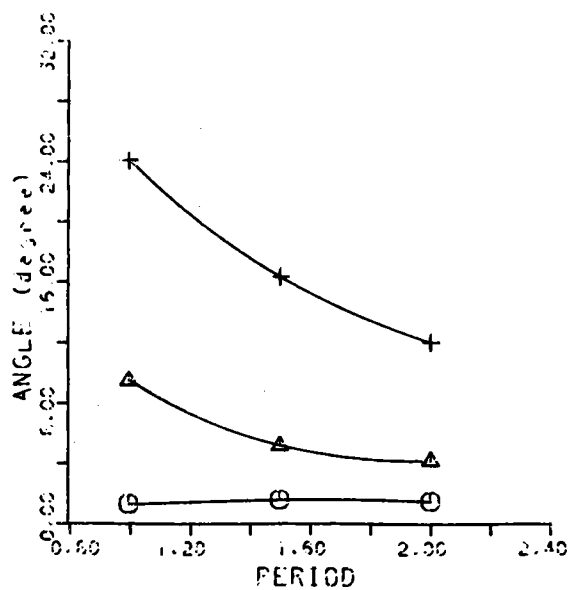
△ H2=1.2M

+ H3=2.0M

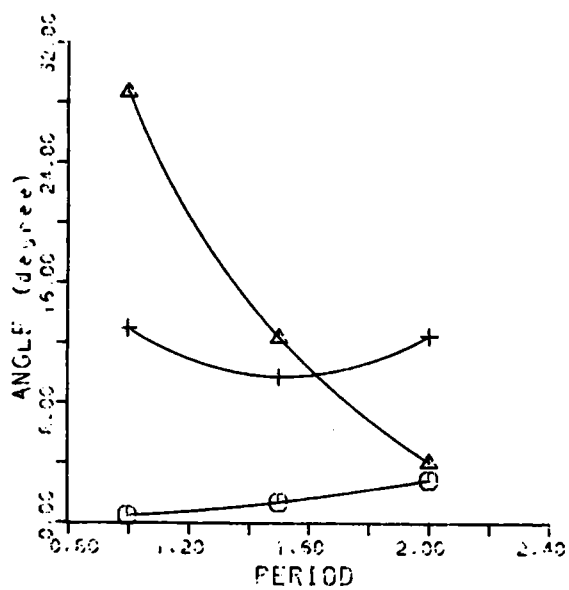
圖 4.27 不同波高下纜繩晃動角對週期之關係(波向 0°)



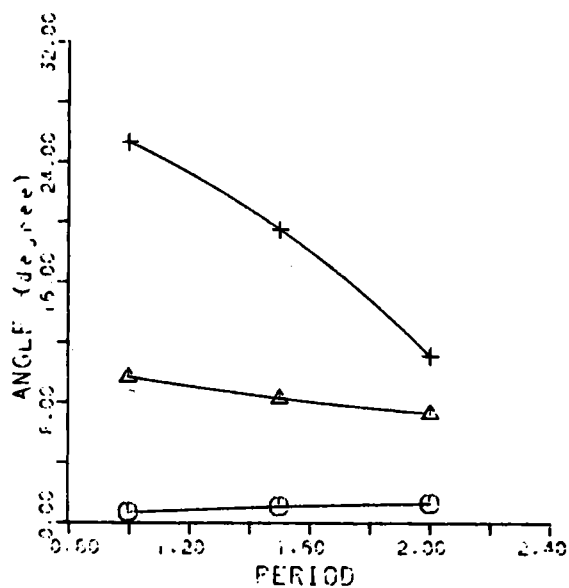
滿載 繫纜 A



空載 繫纜 A



滿載 繫纜 C



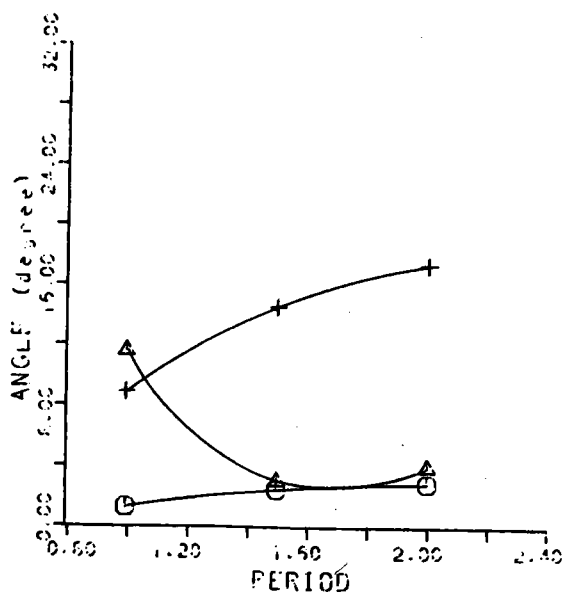
空載 繫纜 C

○ H1=0.7M

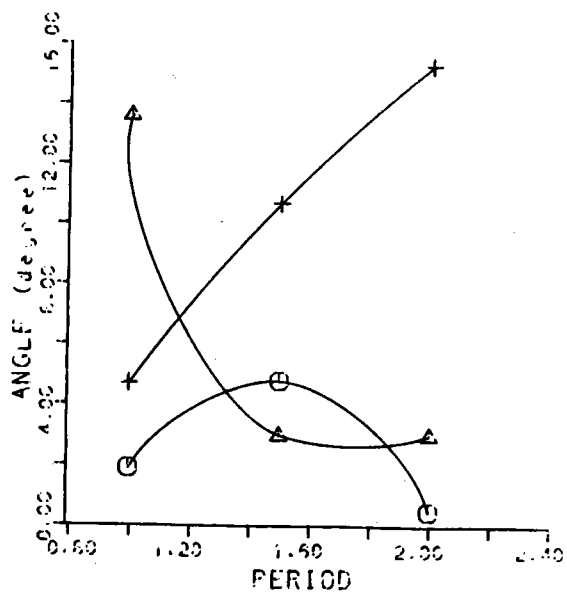
△ H2=1.2M

+ H3=2.0M

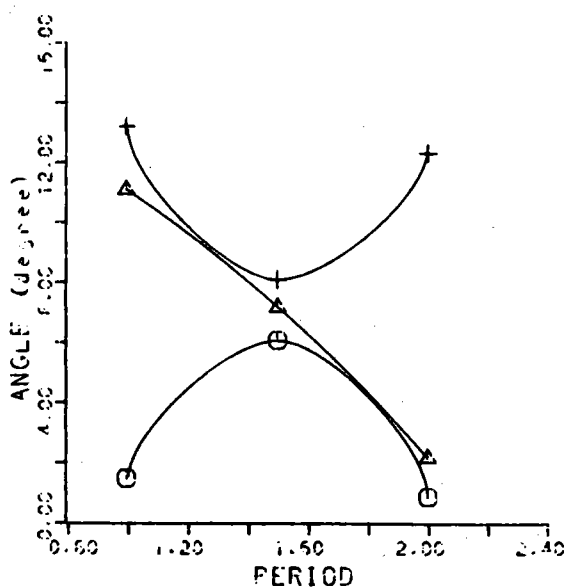
圖 4.28 不同波高下纜繩晃動角對週期之關係 (波向 45°)



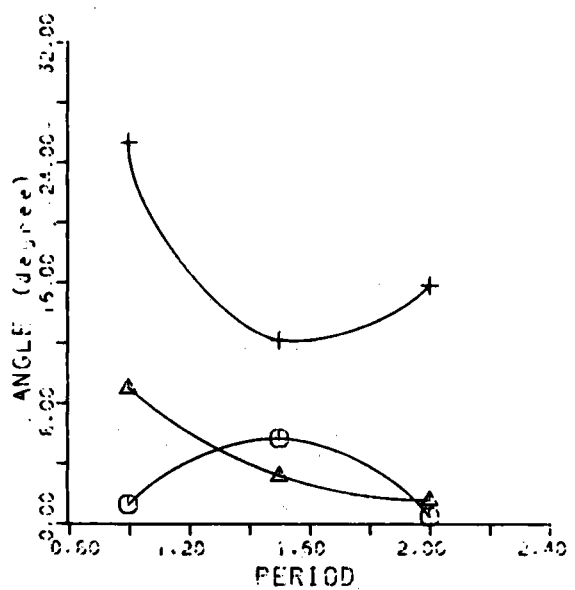
滿載 繫纜 A



空載 繫纜 A



滿載 繫纜 C



空載 繫纜 C

○ $H_1=0.7M$

△ $H_2=1.2M$

+ $H_3=2.0M$

圖 4.29 不同波高下纜繩晃動角對週期之關係 (波向 30°)

第五章 結論與建議

一、由纜繩張力 K 值之率定曲線知，位移與力之關係確呈直線關係，惟轉動角度與 Yaw 彎矩運動略呈直線。

二、由纜繩張力／波動壓力與波浪週期關係曲線，顯示週期在約 1.5 秒時共振情形發生，亦即該新型貨櫃船在現場 15 秒週期有危險情況發生，應特別注意。

三、6 自由度運動與波浪週期間的關係，由試驗值顯示，Surge，Sway，Yaw 對貨櫃船裝卸有顯著影響。Rolling 受纜繩影響不大，在 15 秒有共振週期，理論分析亦同。

Pitch 在不靠碼頭時亦有 15 秒共振週期，在靠碼頭時，試驗值較散亂，并無明顯共振週期。

四、理論值 Yaw，Sway，Rolling 在 0° 與 180° 之值均為零，Surge 隨週期增長而加大。Heave 理論上在短週期有偏小，長週期有增大之趨勢。

五、Surge，Sway，Rolling 空載重較滿載重時有顯著加大趨勢。

六、Rolling 於波向 45° 及 90° 入射時，空載重較滿載重有急速增大的情形。

Heave 於波向 90° 入射時，隨波浪週期增長而降低，其他角度則隨波浪週期增長而上升。

七、纜繩晃動角與波浪週期關係曲線顯示波高在 1.2^m 以下時，晃動角有隨週期之增加而變小之趨勢。

八、本研究成果可供港灣工程界規劃碼頭及設計繫船柱之參考，惟本研究極為新穎，執行期間，諸多摸索，尤以試驗纜繩材料及繫綁方式，儀器操作等為最，加上比例尺效應，儀器時有偏離正常狀態情事發生，試驗水池水位未能完全控制為 18^m ，波高觀測未能完全一致等因素，致試驗值與理論值或未盡相同，建議往後能爭取預算，繼續是類有關研究，俾藉本次研究經驗以獲致進一步完善結果。