

78 研 (四)

潮流、波浪對船舶運動、繫纜受力
之 耦 合 效 應 研 究

The Study of The Effect of Wave - Current Interactions
on Ship Motion and Mooring Force

計畫主持人：副研究員 洪憲忠

協同主持人：組 長 歐陽餘慶

兼任顧問：副教授 邱逢琛

研究人員：研究員 黃清和

副研究員 李勇榮 徐進華

助 研 員 曾相茂 邱永芳

助 理 廖慶堂 張富東

謝瑞豐

技 工：蔡金吉 蔡瑞成 何炳紹

李永勝 陳進冰 楊怡芸

報告撰寫人：洪憲忠

台灣省交通處港灣技術研究所

中 華 民 國 七 十 八 年 六 月 三十 日

摘 要

本計劃首先探討繫纜船舶在波浪作用下以波譜法分析其運動之可行性。其次，探討繫纜船舶在波浪、流作用下，以波譜法分析其運動之可行性。最後，探討繫纜船舶在單獨波浪作用下與波浪、流共同作用下運動之差異性。

目 錄

一. 緒 論	1
二. 計 算 方 法	3
2.1 轉 換 函 數	
2.2 波 譜 法	
三. 實 船 之 模 擬	9
3.1 模 型 相 似 律	
3.2 船 模 載 重 之 校 正	
3.3 實 船 資 料	
3.4 模 擬 實 船 而 得 之 船 模 資 料	
四. 繫 纜 之 模 擬	18
4.1 繫 纜 之 佈 置	
4.2 艤 裝 數 計 算 及 繫 纜 之 決 定	
五. 試 驗 設 備	25
5.1 造 波 設 備	
5.2 造 流 設 備	
5.3 6 維 運 動 量 測 設 備	
5.4 繫 纜 受 力 量 測 設 備	
5.5 護 舷 受 力 量 測 設 備	
5.6 資 料 擷 取 系 統	
5.7 波 高 計	
5.8 測 流 計	
5.9 消 波 板	

六. 試 驗 內 容	38
七. 資 料 分 析	48
八. 結 論 與 建 議	102
九. 參 考 文 獻	103

一、緒論

St.Denis & Pierson (1953) 發表一篇有關不規則波之波譜法理論，其認為只要作一些不同頻率規則波下物體之運動，即可將這些規則波下物體運動線性疊加而求得物體在不規則波下之運動情形。此理論在深海船舶運動方面已廣被使用，但在淺海水域之適用範圍，由於資料甚少，其適用性值得探討。

深水波中船舶運動理論 --- Strip Theory，於 1957 年，首先由 Korvin - Kroukovsky 及 Jacob 提出，至今已發展得相當正確，然而對於淺水波中繫泊之船舶運動，因屬三度空間之問題，則須藉助於 3-D Source Technique 或其他數值計算方法（如有限元素法，有限差分法 等）較為適宜。

對海洋結構物而言，通常，波浪力為主要的流體動力負荷，然而，海流之存在，常常激烈地改變波浪的狀態。已經有許多報導，當船遭遇波浪、強流同時存在之地區時，船舶沈沒、折成兩半或嚴重受損之案件，故流的效應實不可忽視。

本文，採取計算及試驗並重的方法，首先探討在規則波下，船舶運動及繫纜受力之轉換函數（Transfer Function）。其次，探討在不規則波下，船舶運動及繫纜受力之轉換函數。由規則波及不規則波之轉換函數之密合性來了解淺水海域之非線性之效應，同時可知波譜法之適用性。

在完成單獨波浪作用下船舶運動及繫纜受力反應之探討後，同樣地，以波譜法進行波浪、流交互作用下，船舶運動及繫纜受力之反應研究。

此計劃同時探討波譜法運用於淺海中波浪作用下或波浪、流交互作用下船舶運動及繫纜受力反應之可行性。倘若可行，則未來只須以規則波作用下，測得或以數值計算方法算得某船之運動及繫纜受力之轉換函數，配合波譜法，即可預估在淺海各不規則波浪、流下船舶之運動及繫纜受力之反應，以供港池設計之參考。此乃探討淺水海域不規則波、浪作用下海洋結構物動力反應之基礎工作，相當重要。

二. 計 算 方 法

2 - 1 轉 換 函 數 (Transfer function)

對一線性動力系統，假設其輸入為 $X(t) = X_0 \cdot e^{i\omega t}$ ，則其相對之輸出為

$$\begin{aligned} Y(t) &= Y_0 e^{i(\omega t + \phi)} \\ &= (Y_0 e^{i\phi} / X_0) \cdot X(t) \\ &= H(\omega) \cdot X(t) \end{aligned}$$

式中，

$H(\omega)$: 轉換函數

2 - 2 波 譜 法 (Spectrum Analysis method)

在受到不規則波作用之線性動力系統中，倘若輸入之波譜及其反應函數已知，則可利用波譜法，求出此系統之反應波譜，從而，可了解系統動力反應的各特性。今敘述如下：假設入射之不規則波及船舶運動、繫纜受力等反應具有統一隨機特性 (Ergodic Random Process)。

對一個可決定的線性系統 (Deterministic Linear System) 而言，其輸入—輸出關係 (Input-Output relationship) 可以迴旋積分 (Convolution Integral) 表示為：

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) Q(t - \tau) d\tau \quad (2.1)$$

其中，

a. 輸入函數 (Input Function)

$$Q(t - \tau) = 0 \text{ for } \tau > t$$

b. 單擊反應函數 (Unit - Impulse Response Function)

$$h(\tau) = 0 \text{ for } \tau < 0,$$

且 $h(t)$ 與 $H(\omega)$ 形成傅立葉轉換 (Fourier Transform Pair) 如下：

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

$$H(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{i\omega t} dt$$

c. 系統反應為 $q(t)$

因此，系統輸出的自相關函數 (Autocorrelation Function) $R_{qq}(\tau)$ 可定義為

$$\begin{aligned}
R_{qq}(\tau) &= \langle q(t) q(t + \tau) \rangle \\
&= \langle q(t - \tau) q(t) \rangle \\
&= R_{qq}(-\tau)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

將 (2.1) 代入 (2.2) 得

$$\begin{aligned}
R_{qq}(\tau) &= \left\langle \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) Q(t - \tau_1) d\tau_1 \cdot \right. \\
&\quad \left. \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_2) Q(t + \tau - \tau_2) d\tau_2 \right\rangle \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) h(\tau_2) \langle Q(t - \tau_1) \\
&\quad Q(t + \tau - \tau_2) \rangle d\tau_1 d\tau_2 \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) h(\tau_2) R_{qq}(\tau + \tau_1 - \tau_2) \\
&\quad d\tau_1 d\tau_2
\end{aligned} \tag{2.3}$$

式中，

- a. $\langle \rangle$ 表示對時間之平均 (Temporal Average)
- b. $R_{qq}(\tau + \tau_1 - \tau_2)$ 表示系統輸入之自相關函數。根據波譜分析之理論知，波譜 (Spectral Density Function) 與自相關函數形成傅立葉轉換如下：

$$R_{qq}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{qq}(w) e^{i\omega\tau} dw \quad (2.4)$$

$$S_{qq}(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{qq}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.5)$$

將 (2.3) 代入 (2.5) 得

$$\begin{aligned} S_{qq}(w) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) h(\tau_2) \right. \\ &\quad \left. R_{qq}(\tau + \tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \right] \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1) e^{i\omega\tau_1} d\tau_1 \right] \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_2) \cdot \right. \\ &\quad \left. e^{-i\omega\tau_2} d\tau_2 \right] \cdot \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{qq}(\tau + \tau_1 - \tau_2) \right. \\ &\quad \left. e^{-i\omega(\tau + \tau_1 - \tau_2)} d(\tau + \tau_1 - \tau_2) \right] \\ &= H^*(w) \cdot H(w) \cdot S_{qq}(w) \\ &= |H(w)|^2 S_{qq}(w) \quad (2.6) \end{aligned}$$

式中

$S_{qq}(\omega)$: 系統輸出之波譜。

$S_{qq}(\omega)$: 系統輸入之波譜。

$H(\omega)$: 轉換函數。

由 (2.2) 式知，自相關函數為 τ 之偶函數 (Even Function)，故波譜亦為自相關函數之偶函數，所以

$$\begin{aligned} R_{qq}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{qq}(\omega) \cos \omega \tau d\omega \\ &= \int_0^{\infty} 2 S_{qq}(\omega) \cos \omega \tau d\omega \\ &= \int_0^{\infty} \Phi_{qq}(\omega) \cos \omega \tau d\omega \end{aligned} \quad (2.7)$$

式中，

單邊波譜 (One-sided Spectral Density Function)

$\Phi_{qq}(\omega)$ 為

$$\Phi_{qq}(\omega) = \begin{cases} 2 S_{qq}(\omega) & (\omega \geq 0) \\ 0 & (\omega < 0) \end{cases} \quad (2.8)$$

由 (2.6) 及 (2.8) 知

$$\Phi_{qq}(\omega) = |H(\omega)|^2 \Phi_{qq}(\omega)$$

上式之關係，如圖 2 - 1 所示。

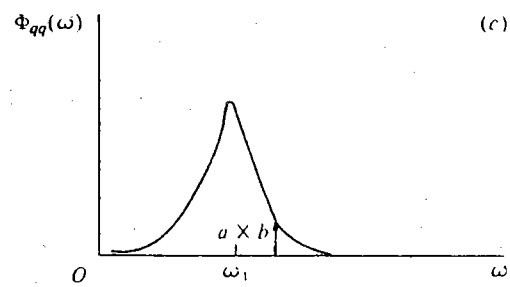
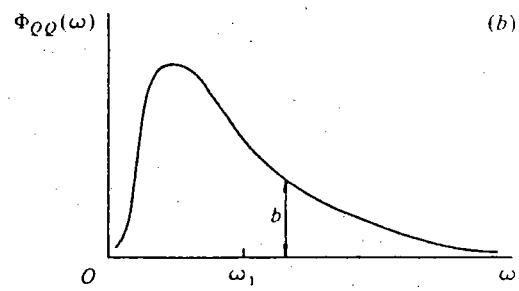
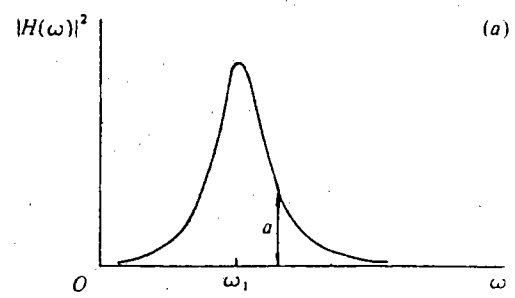


圖 2 - 1 波 譜 法 之 圖 示

三. 實 船 之 模 擬

3.1 模 型 相 似 律

由於波浪作用下之船舶運動主要與重力、慣性力相關，因此為了達到船模 (MODEL) 與實船 (Prototype) 間之動力相似 (Dynamic Similarity)，兩者首先須滿足幾何相似 (Geometric Similarity)，所以船模線圖 (Lines) 須由實船依長度比例 ($S = L_m / L_p$) 縮小來製作。

其次，兩者間須再滿足佛勞德相似律 (Froude Law of Similarity) 即

$$\frac{V_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g \cdot L_p}}$$

由此，導得船模與實船間之數種比例關係如下：

a. 速度比例	$\sqrt{s}$
b. 時間比例	$\sqrt{s}$
c. 加速度比例	1
d. 旋轉半徑比例	s
e. 力之比例	s^3

3.2 船模載重之校正

船模載重之校正過程如下：

a. 船模重量：

量稱載重後船模重量，其須與實船成適當比例，以確定船模總重是否正確。

b. 吃水、俯仰及傾斜角：

調整載重後，船模吃水、俯仰及傾斜角須與實船者成適當比例，以確定船模重心之縱向、橫向位置及模型製作是否精確。

c. 傾斜試驗 (Inclining Experiment)：

如圖 3-1，用以確定船模之定傾高度 (Metacentric Height)，船模重心之垂向高度則為定傾高度之函數
定傾高度如下式：

$$GM = \frac{w \cdot d \cdot l}{(\Delta + w) a}$$

d. 橫搖試驗 (Rolling Experiment)：

如圖 3-2，可用以決定船模橫搖之慣動半徑。

e. 縱搖試驗 (Pitching Experiment)：

如圖 3-3，可用以決定船模縱搖之慣動半徑。

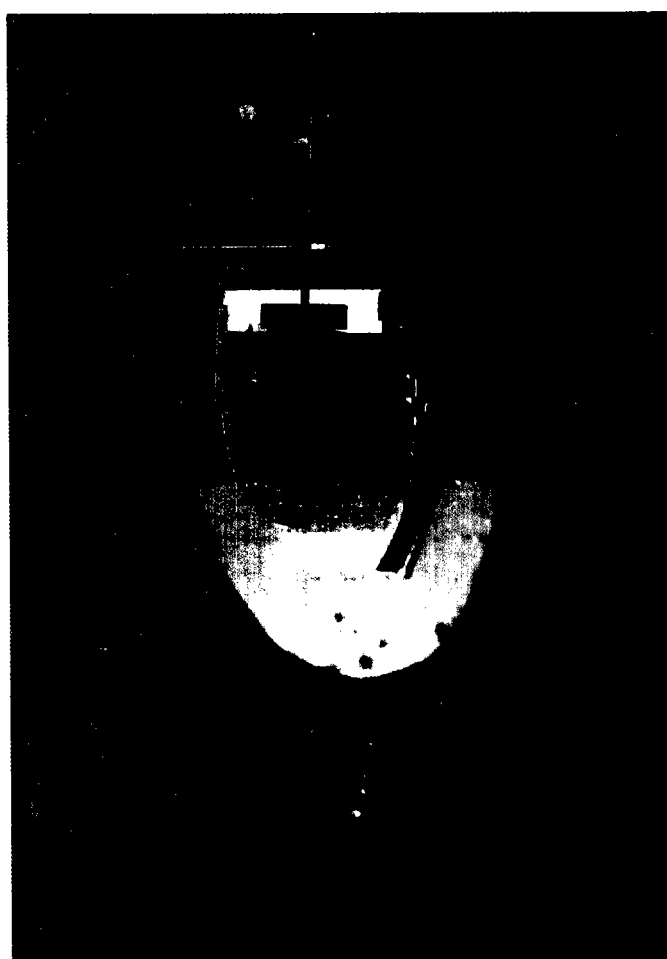


圖 3 - 1 傾 斜 試 驗



圖 3 - 2 橫 搖 試 驗

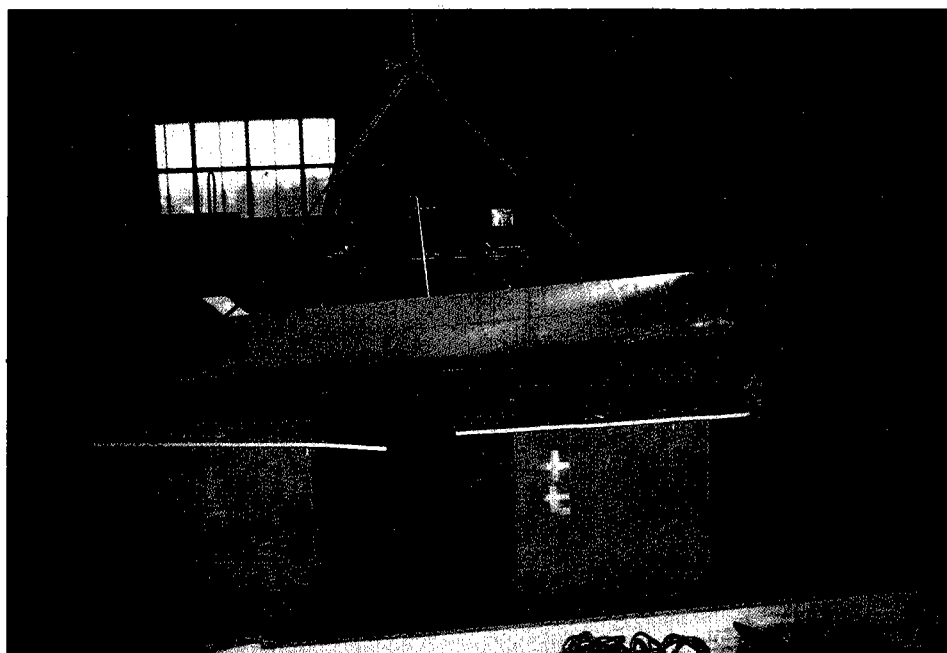


圖 3 - 3 縱 搖 試 驗

3.3 實 船 資 料

本船為 25000 噸級貨櫃船，能裝載 1350 TEU 國際標準貨櫃，船之橫剖面線圖（ Body Plan ）如圖 3 - 4 ，側視圖（ Profile ）及上視圖如圖 3 - 5 所示。船線座標表（ offsets ）如表 3-1 所示。

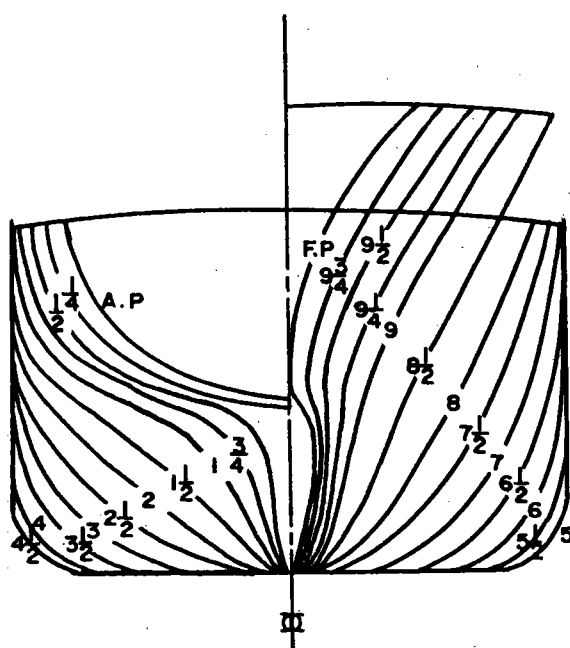


圖 3 - 4 船 之 橫 剖 面 線 圖

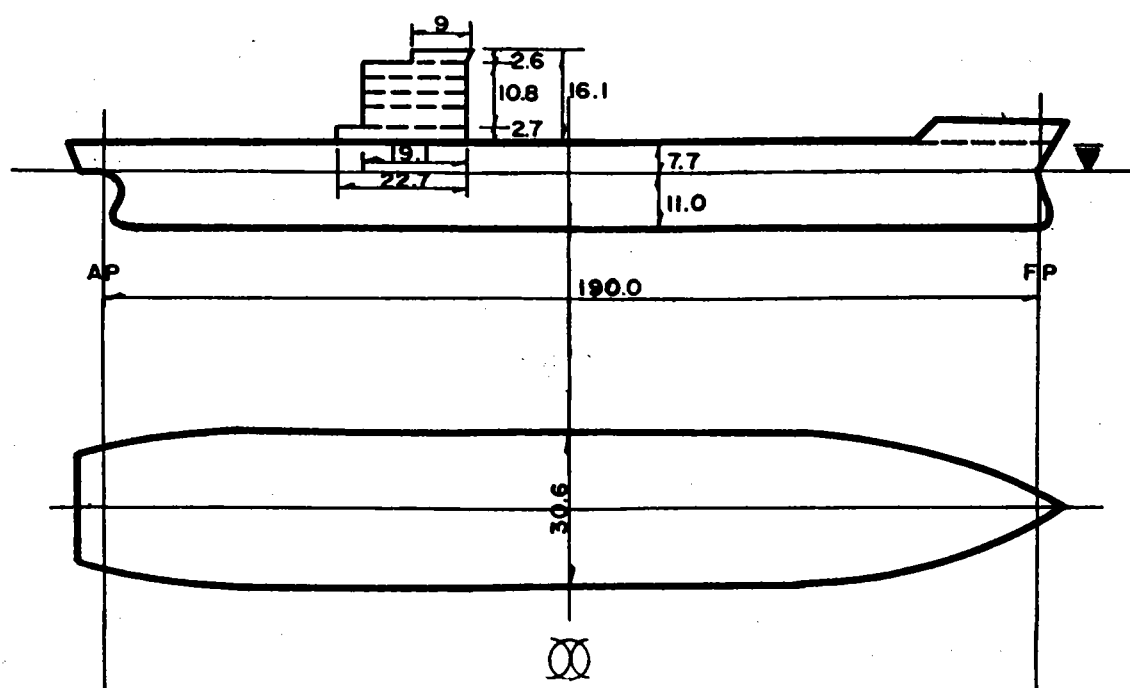


圖 3 - 5 船之簡要側視圖及上視圖

表 3 - 1 船之船線座標表

NO OF STAT	HALF BREADTH (M M)															FCLE DKSL
	DEAD FLAT BL	1 ^M 00 WL	2 ^M 00 WL	4 ^M 00 WL	6 ^M 00 WL	8 ^M 00 WL	10 ^M 00 WL	12 ^M 00 WL	14 ^M 00 WL	16 ^M 00 WL	18 ^M 00 WL	UPPER DKSL	20 ^M 00 WL	22 ^M 00 WL	24 ^M 00 WL	
AP	-	-	-	-	-	-	3805	8588	10590	11700	12240	12405	-	-	-	-
1/4	-	-	-	-	-	-	5833	10015	11804	12783	13316	13425	-	-	-	-
1/2	111	970	1008	1251	1448	2615	7721	11318	12873	13718	14148	14215	-	-	-	-
3/4	145	1091	1545	2200	2942	4797	9310	12422	13754	14405	14731	14800	-	-	-	-
1	182	1411	2136	3250	4565	6858	10793	13295	14381	14888	15092	15113	-	-	-	-
1 1/2	292	2296	3491	5436	7770	10345	12950	14515	15095	15250	15300	15300	-	-	-	-
2	415	3557	5287	8070	10485	12550	14238	14975	15214	15272	15300	15300	-	-	-	-
2 1/2	1100	5594	7870	10760	12630	14048	14890	15145	15231	15272	15300	15300	-	-	-	-
3	3218	8619	10590	12810	14007	14723	15070	15221	15290	15300	15300	15300	-	-	-	-
3 1/2	6811	11300	12697	14120	14762	15080	15231	15290	15300	15300	15300	15300	-	-	-	-
4	10000	13053	14027	14971	15261	15275	15300	15300	15300	15300	15300	15300	-	-	-	-
4 1/2	11600	11598	14712	15293	15300	15300	15300	15300	15300	15300	15300	15300	-	-	-	-
5	11600	11598	14712	15293	15300	15300	15300	15300	15300	15300	15300	15300	-	-	-	-
5 1/2	10508	12895	13890	14834	15155	15280	15300	15300	15300	15300	15300	15300	-	-	-	-
6	8595	11228	12460	13875	14553	14886	15053	15165	15240	15293	15300	15300	-	-	-	-
6 1/2	6047	9080	10487	12270	13295	14000	14480	14840	15065	15215	15293	15300	-	-	-	-
7	3300	6709	8222	10223	11609	12638	13405	13981	14443	14816	15035	15080	-	-	-	-
7 1/2	1100	4497	5933	7965	9479	10740	11750	12590	13298	13904	14402	14550	-	-	-	-
8	200	2977	4165	5780	7080	8286	9416	10471	11444	12371	13240	13625	-	-	-	-
8 1/2	0	2000	2925	4071	4950	5845	6808	7843	8949	10090	11270	11903	12446	13625	-	-
9	0	1327	1973	2668	3126	3594	4200	5022	6081	7281	8525	9298	9789	11052	12316	12830
9 1/4	0	1050	1575	2109	2425	2706	3010	3613	4576	5730	6977	7762	8253	9566	10884	11500
9 1/2	0	800	1221	1644	1885	2020	1900	2281	3078	4133	5330	6141	6634	7996	9417	10137
9 3/4	0	536	865	1289	1525	1497	938	1075	1673	2555	3625	4412	4884	6297	7853	8673
FP	0	280	545	1000	1310	1089	0	69	385	972	1865	2602	3062	4503	6129	7085

3.4 模擬實船而得之船模資料

依模型相似律（船模與實船間之長度比例為 1/100）
模擬實船而得之船模資料如下：

a. Length Overall	205.000cm
b. Length Between Perpendiculars	190.000cm
c. Breadth	30.600cm
d. Depth	18.700cm
e. Draft	10.000cm
f. Displacement	34.500kg
g. Roll Radius of Gyration	10.590cm
h. Pitch Radius of Gyration	40.430cm
i. Yaw Radius of Gyration	40.430cm
j. Metacentric Height	0.502cm
k. LCG Behind $\odot$	3.500cm

四、繫纜之模擬

4.1 繫纜之佈置

本船繫纜佈置如圖 4-1、圖 4-2、圖 4-3 所示。座標系統原點訂在船模重心之垂直上方且位於船模之滿載設計水線上，正 X 軸沿船中心線指向船頭，正 Y 軸指向左舷，正 Z 軸垂直向上。試驗前，船模位置歸零時，相對本座標系統，繫纜兩端中，一端繫於船上，另一端固定於第五章 5.4 節之繫纜受力量測設備，其座標 (x, y, z) 示於圖 4-1 上，單位為 cm。

4.2 艙裝數 (Equipment Number) 計算及繫纜之決定 :

參 考 圖 3 - 5

Profile Area (A)	
Deck	Area
Upper DK - Boat DK	61.29
Boat DK - NAV BRI. DK	206.28
NAV BRI. DK - COMP. DK	23.40
Upper DK - F'cle DK	148.16
Bulwark	11.13
L.W.L. - Upper DK	1463
Total Area (M ²)	1913.26

Equipment Number calculation (By ABS rule)	
ITEM	VALUE
$\Delta^{2/3}$	1059.36
2 Bh	1456.56
0.1 A	191.32
Equipment Number	2707.24
$= \Delta^{2/3} + 2 Bh + 0.1A$	

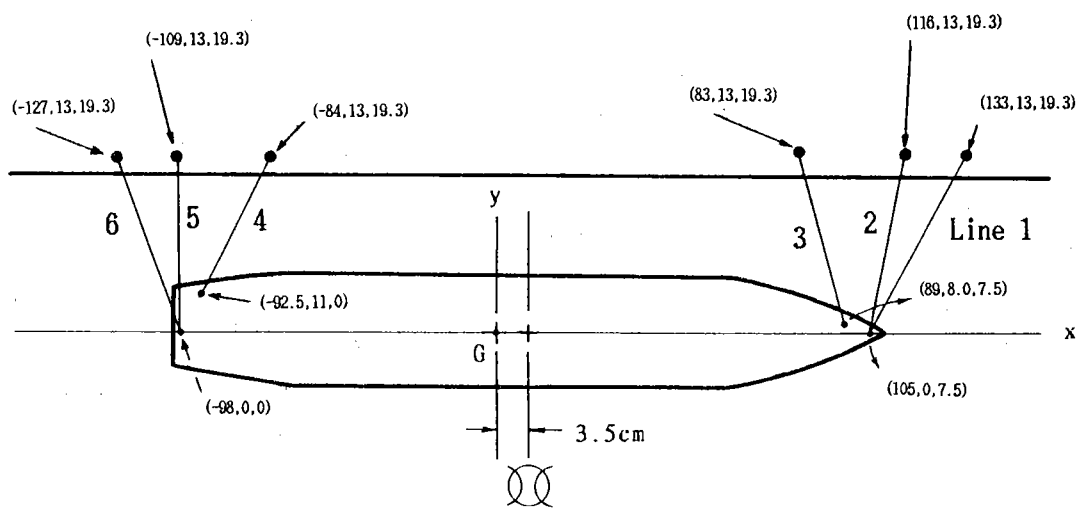


圖 4-1 繫纜佈置及座標

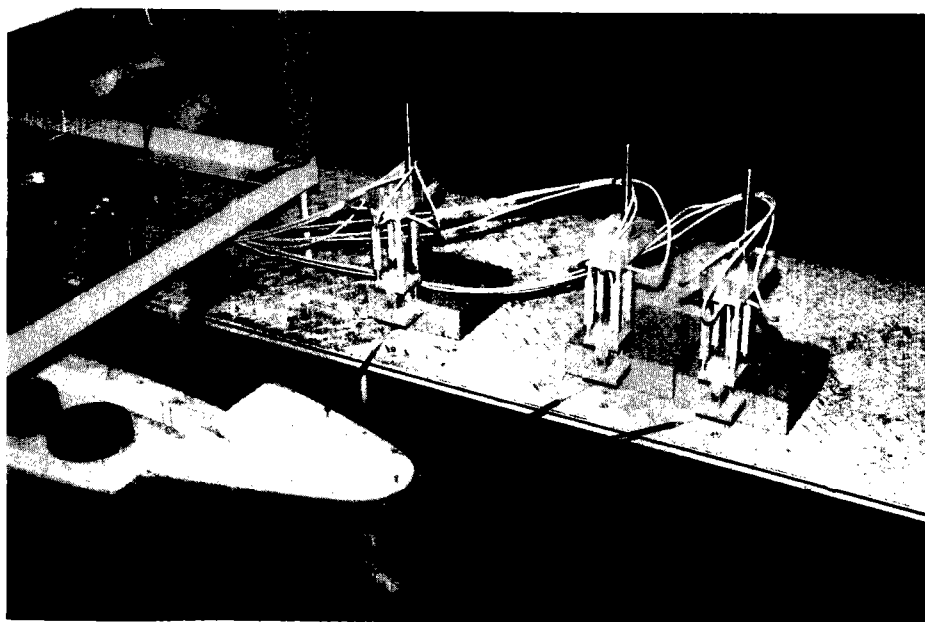


圖 4 - 2 船 艉 之 繫 纜

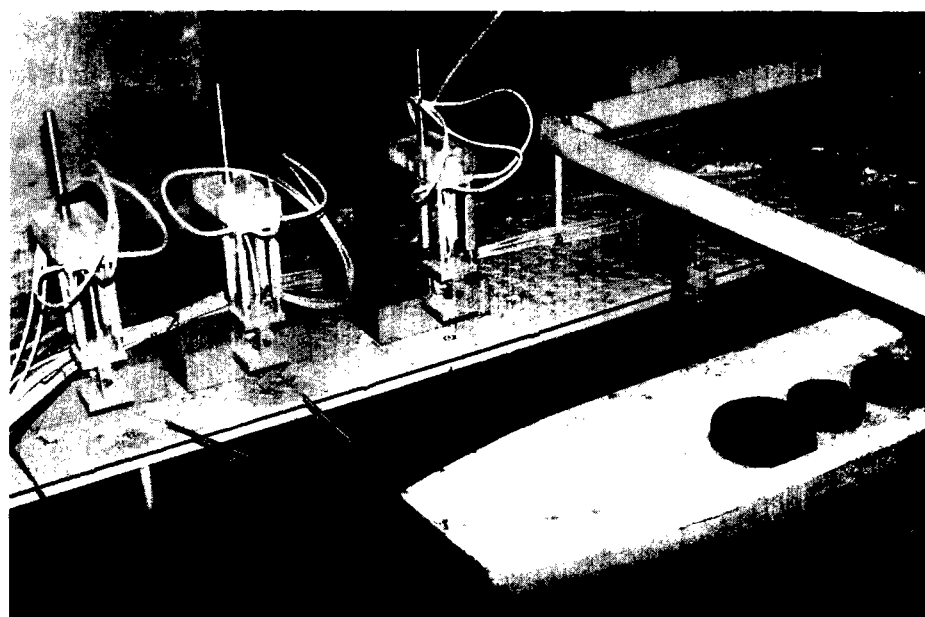


圖 4 - 3 船 艉 之 繫 纜

依據美國驗船協會船級法規 (ABS Rule) 之規範及日本工業規格 (JIS), 選繫纜為 60 mm x 200 m 之尼龍繩 (Nylon rope), 其斷裂強度 (Breaking Strength) 為 55.8 ton, 自重為 0.451 ton / 200 m. JIS 中有關尼龍繩強度及重量如表 4-1。繫纜負荷 - 斷裂強度比與伸長量之關係曲線原如圖 4-4 所示。本試驗之繫纜之負荷 - 斷裂強度比與伸長量之關係為由圖 4-4 中負荷為 20 Ton (20 gram in model) 時取水平線與 Nylon line 曲線交點之切線, 即假設繫纜之負荷 - 伸長量關係為線性的。試驗時繫纜由釣魚線 (假設不可伸張) 及彈簧組成。繫纜 1 及 6 之釣魚線長 31.2cm, 彈簧長 8.8cm, 彈簧常數為 6.06 gram/cm; 繫纜 3 及 4 之釣魚線長 23.4cm, 彈簧長 6.6cm, 彈簧常數為 8.0gram/cm; 繫纜 2 及 5 之釣魚線長 15.6cm, 彈簧長 4.4cm, 彈簧常數為 12.05gram/cm。

表 4 - 1 JIS 中有關尼龍繩強度及重量

直 徑 (mm)	尼 龍 繩	
	抗拉強度 (t)	重 量 (kg)/200m
4	0.33	
5	0.50	
6	0.71	4.46
7	0.94	6.21
8	1.21	8.10
9	1.51	10.2
10	1.85	12.7
11	2.21	15.2
12	2.80	18.2
14	3.73	24.7
16	4.78	32.2
18	5.94	40.0
20	7.23	50.4
22	8.63	61.0
24	10.2	72.5
26	11.8	85.1
28	13.5	98.7
30	15.4	112
32	17.3	129
34	19.4	145
35	20.5	153
36	21.6	162
38	23.9	181
40	26.3	201
42	28.7	221
45	32.7	253
50	39.8	313
55	47.5	379
60	55.8	451
65	64.8	528
70	74.3	614
75	84.5	703
80	95.3	800
85	107	900
90	119	1,009
95	131	1,125
100	144	1,246

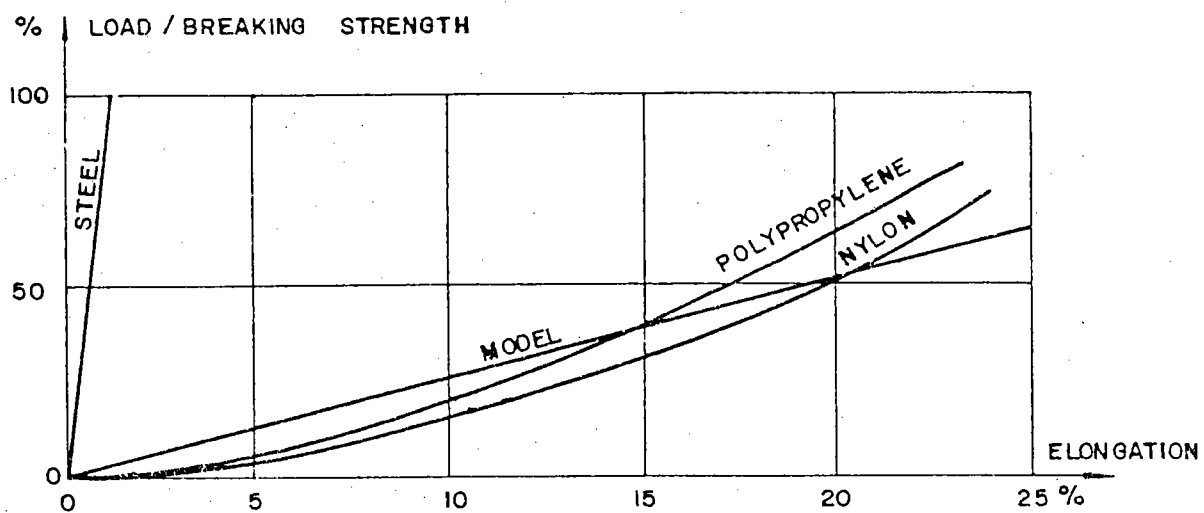


圖 4-4 繫纜負荷與伸長量之關係圖

五. 試驗設備

5.1 造波設備

本所第二試驗廠棚，長 84m，寬 60.5m。內有試驗水池，長 62m，寬 57m，深 1m，附屬設備有雙向移動台車、吊車、環流設備等，其造波機為丹麥水工試驗所(DHI)製造之不規則油壓推移式造波機，由 2 部 20 HP 驅動馬達，帶動四台長各 5.5m 之造波機，造波機及其資料收集處理系統如圖 5-1 所示。

5.2 造流設備

本所第二試驗廠棚之試驗水池，雖長 62m，寬 57m。但本計劃試驗時所取之水池只為其中之一部份，造流設備可造出 $0 \sim 20 \text{ cm / sec}$ 間之均勻流場，其佈置如圖 5-2 所示。

5.3 六維運動量測設備

在三度空間中，船舶之運動有六個分量，其中包含三個位移 - 縱移 (Surge) n_1 、側移 (Sway) n_2 、起伏 (Heave) n_3 、三個旋轉 - 橫搖 (Rolling)

n_4 、縱搖 (Pitch) n_5 、平擺 (Yaw) n_6 ，如圖 5-3 所示。

本試驗所用之 6 維運動量測設備，係日本 NISSHO 之產品，如圖 5-4 所示，它同時偵測第四章 4.1 節中座標原點之 6 個運動分量。

5.4 繫纜受力量測設備

如圖 5-5 所示，此裝置為三分力計，其之感應器與某一繫纜之岸上端點固定在一起，可同時量取該繫纜 X、Y、Z、方向之分力 F_x 、 F_y 、 F_z 。為丹麥水工試驗所 (DHI) 所製造之應變計 (Strain Gage)，額定負荷為 $F_x : 2\text{kg}$ ， $F_y : 2\text{kg}$ ， $F_z : 2\text{kg}$ ，容許力矩 M_x ， M_y ， $M_z \geq 0.5\text{kg-M}$ ，最大容許負荷為額定負荷之 1.5 倍。本試驗之繫纜共有 6 條，每條繫纜與一組三分力計相連，因此，共有 6 組三分力計。

5.5 護舷受力量測設備

如圖 5-6，可調整彈簧長度、平衡重量及頂距以改變其應變之關係，佈置如圖 5-7 所示，所取力與變形關係，如圖 5-7-1 所示。

5.6 資料擷取系統

本資料擷取系統係將感應器擷取之類比訊號經放大器放大後，經 A-D Converter 轉成數位訊號後，存入個人電腦之磁碟內。如圖 5-8 及圖 5-9 所示。

5.7 波 高 計

本試驗所用波高計為電容式波高計，如圖 5-10 所示。

5.8 測 流 計

本試驗所用測流計為電磁式測流計如圖 5-11 所示。

5.9 消 波 板

如圖 5-12，為弧形之多孔鐵板，其消波效果不錯。

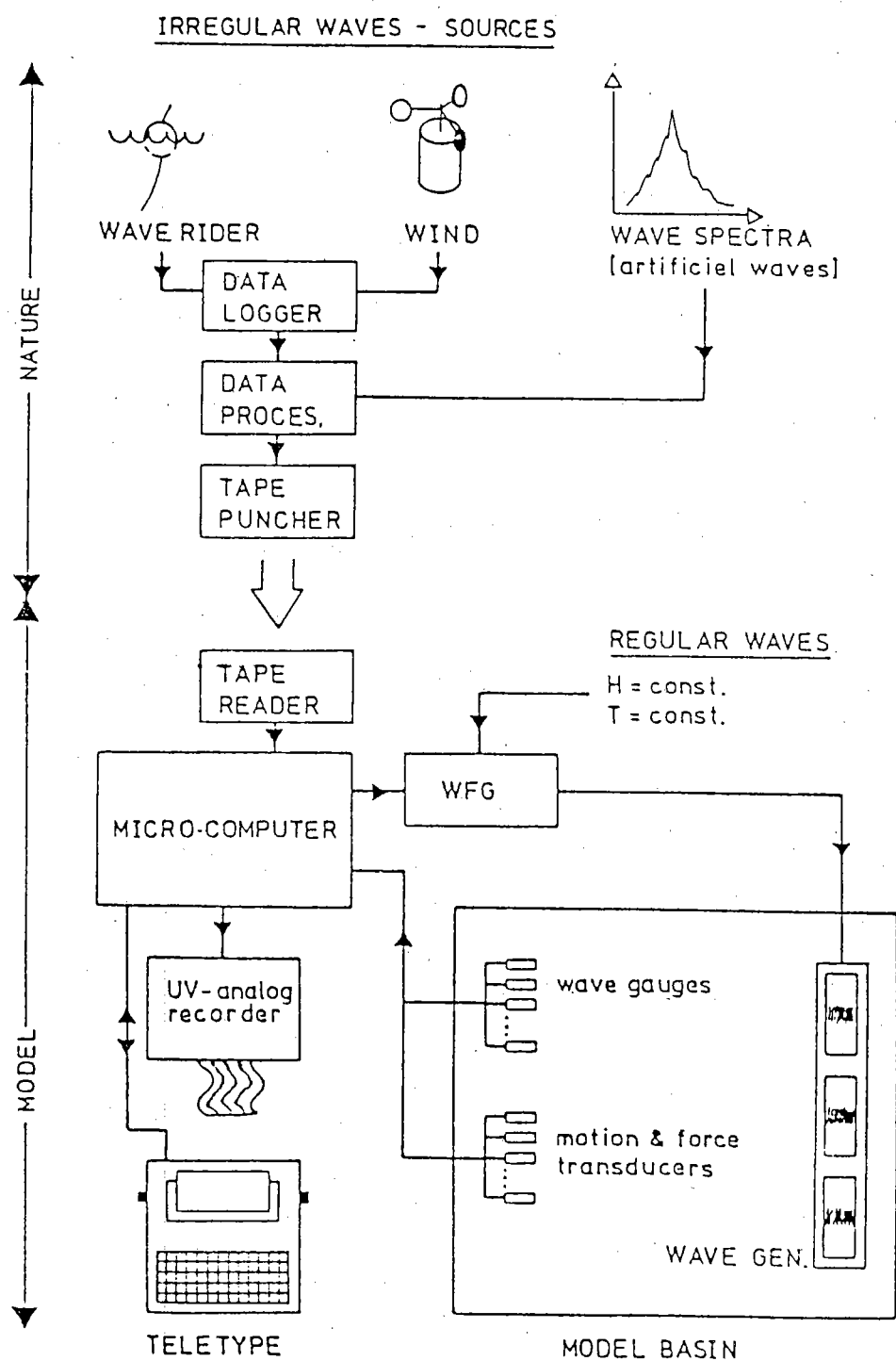


圖 5 - 1 DHI 造波機及資料收集處理系統

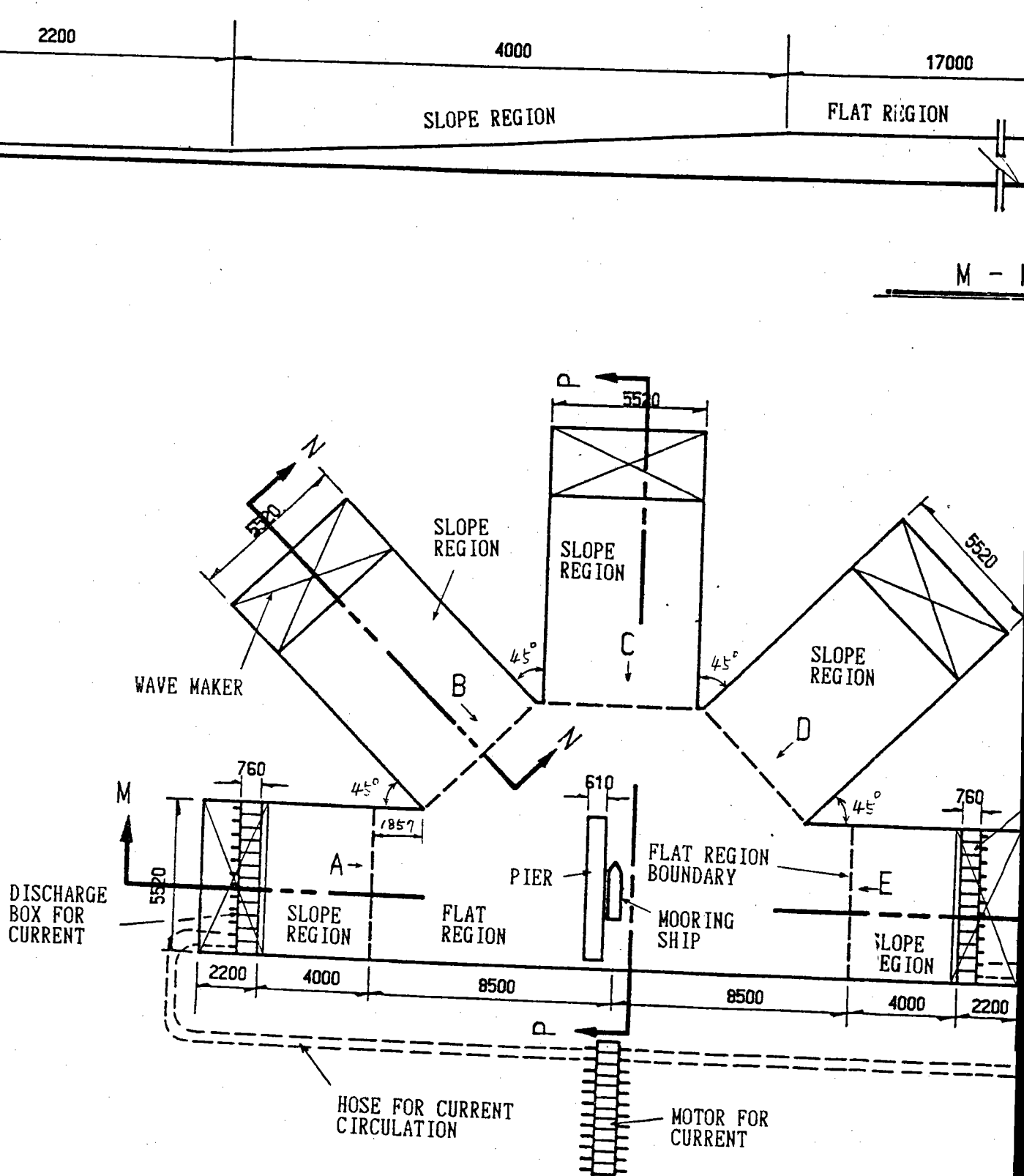
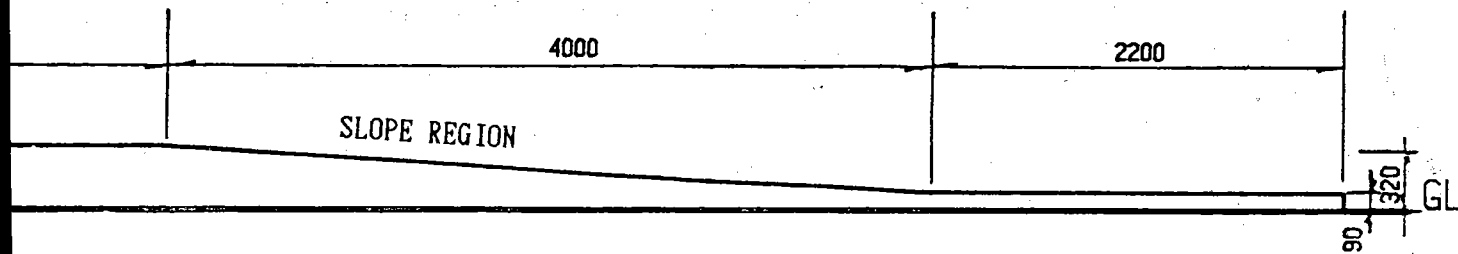
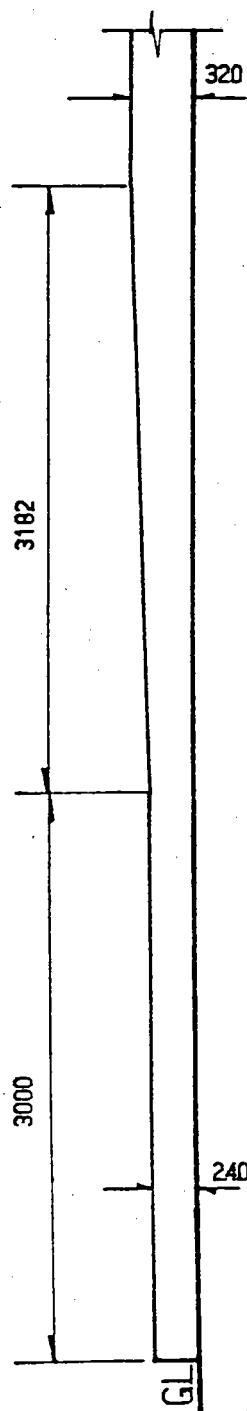
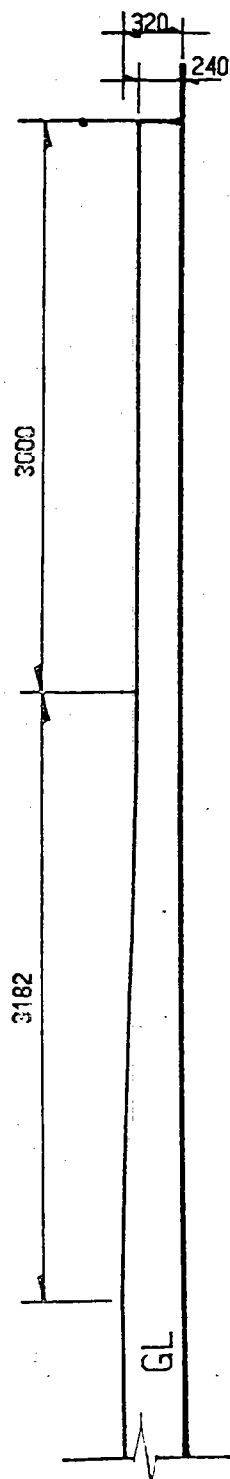


圖 5 - 2 造流設備佈置圖



CURRENT
SUCTION
BOX

M



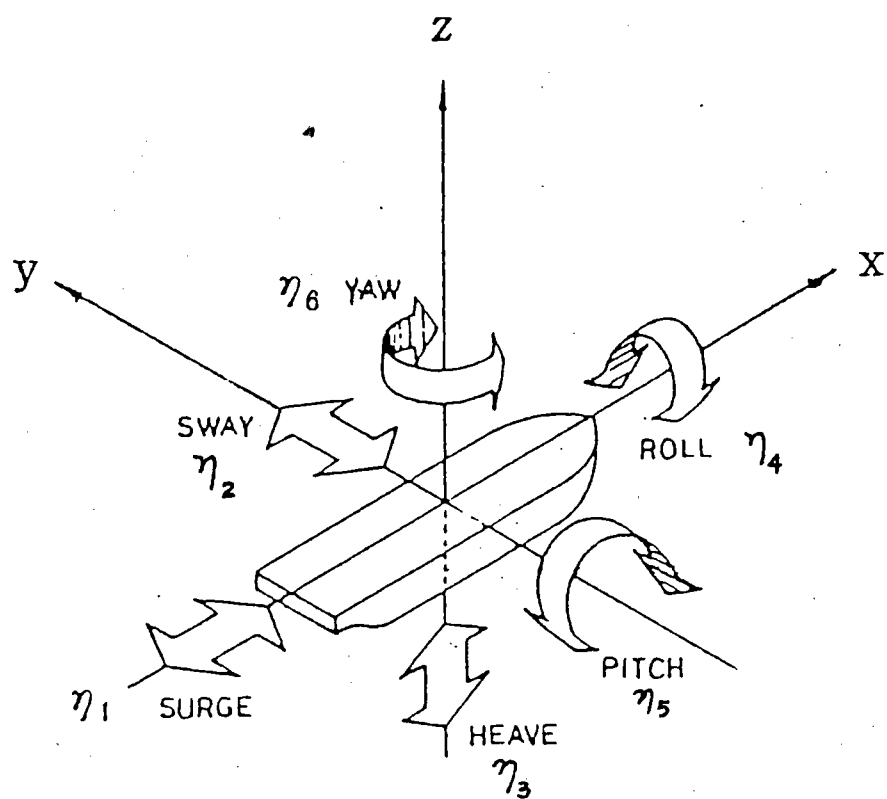


圖 5 - 3 船 舶 運 動 座 標 系

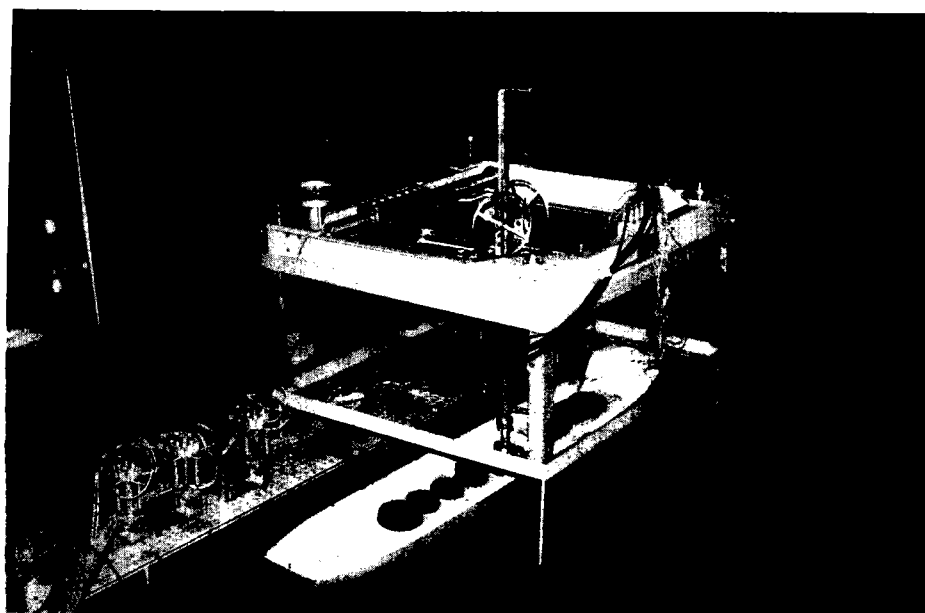


圖 5 - 4 6 維 運 動 量 測 設 備

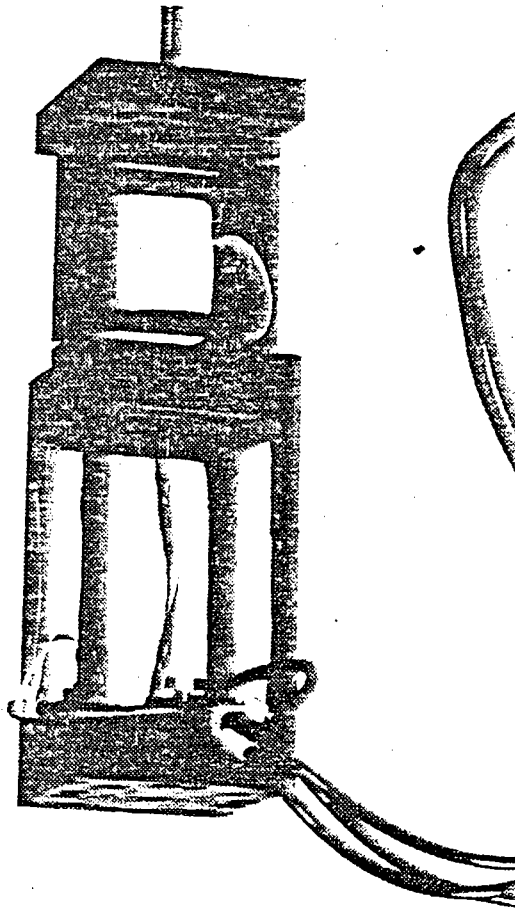


圖 5 - 5 繫 纜 受 力 量 測 裝 置

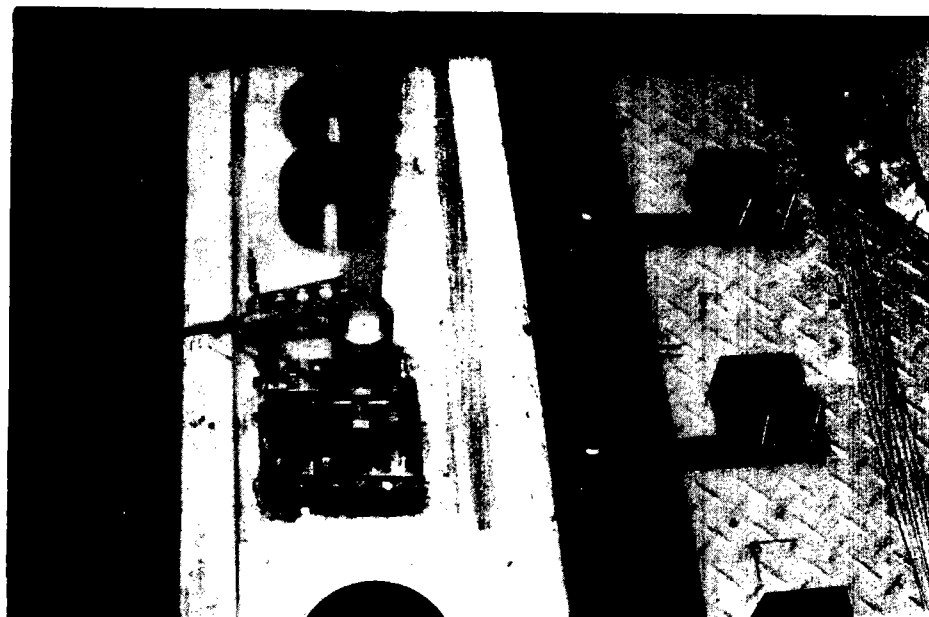


圖 5-6 護 舷 模 型

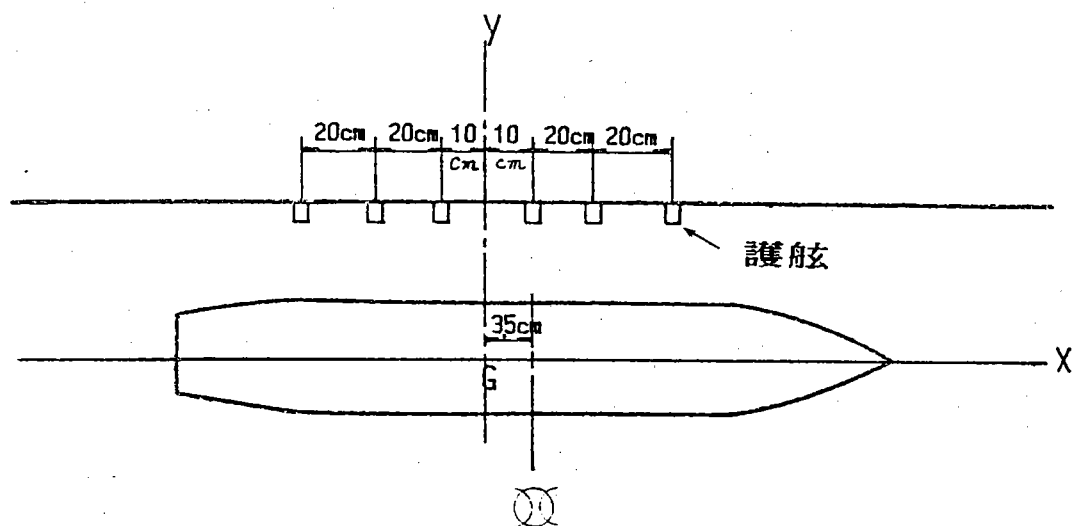


圖 5-7 護舷佈置圖

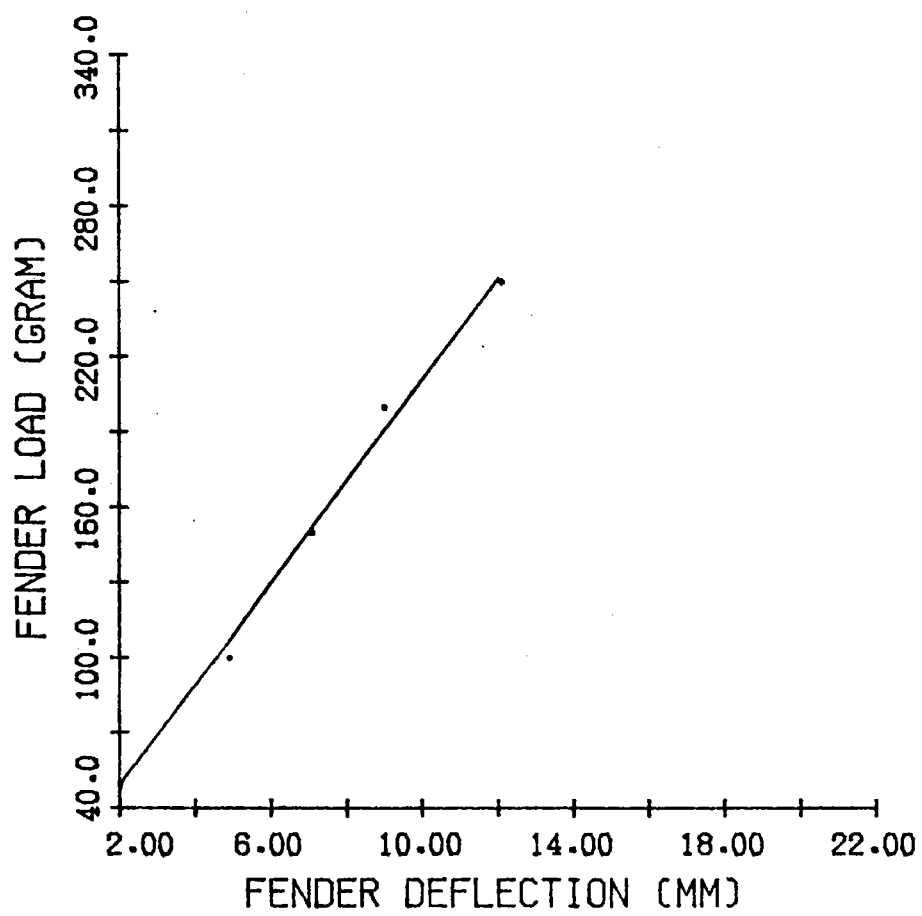


圖 5-7-1 護舷負荷與變形關係

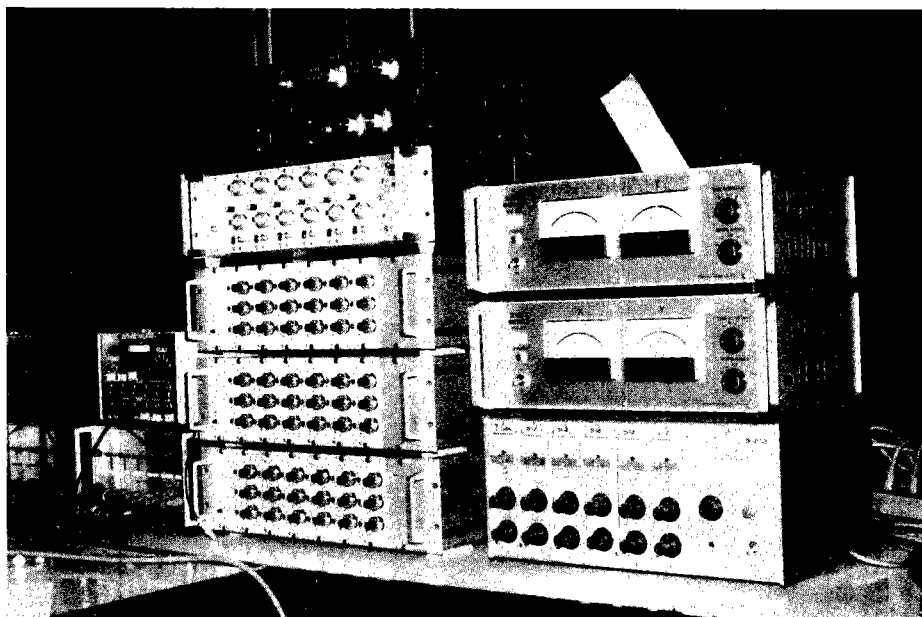


圖 5-8 放大器及 A-D Converter

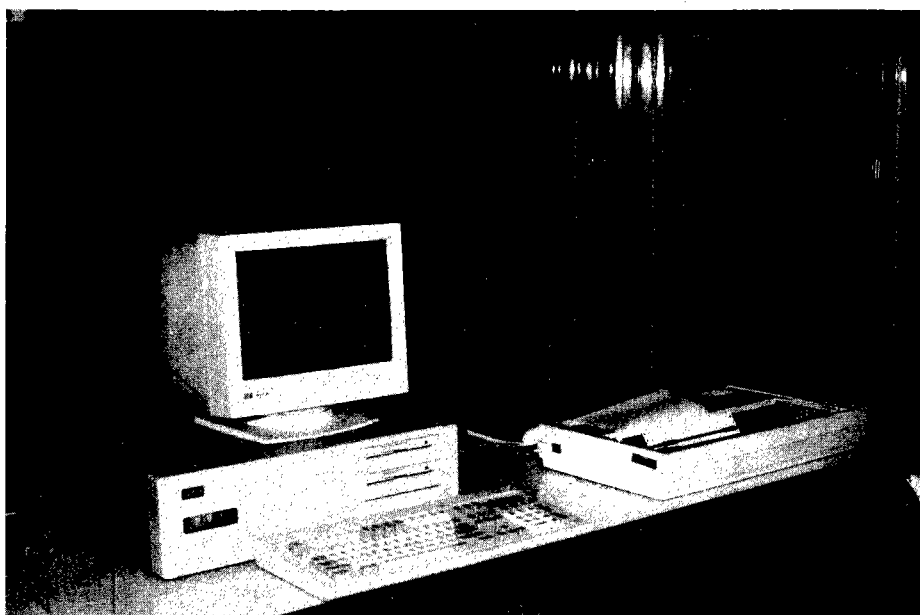


圖 5-9 個人電腦及印表機

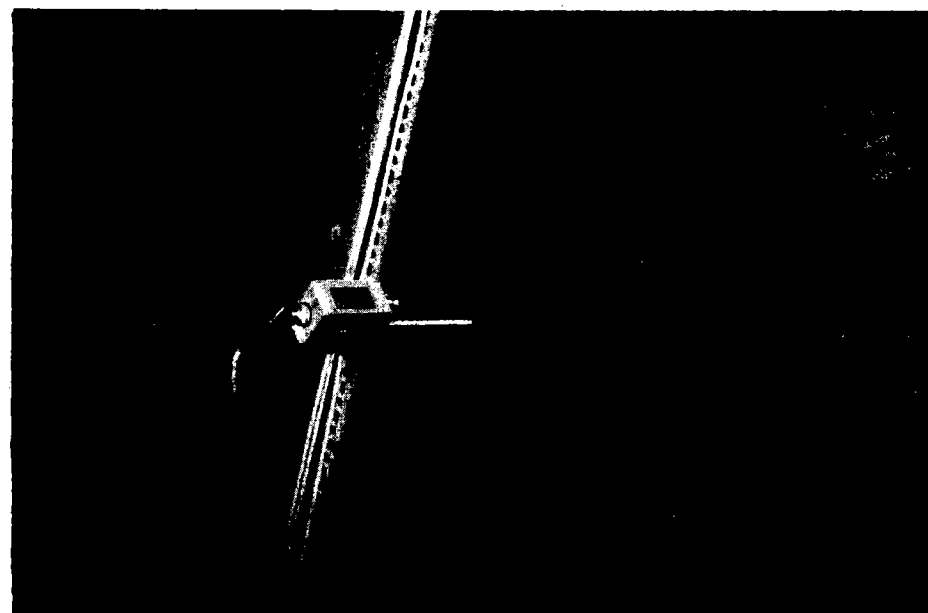


圖 5-10 電容式波高計

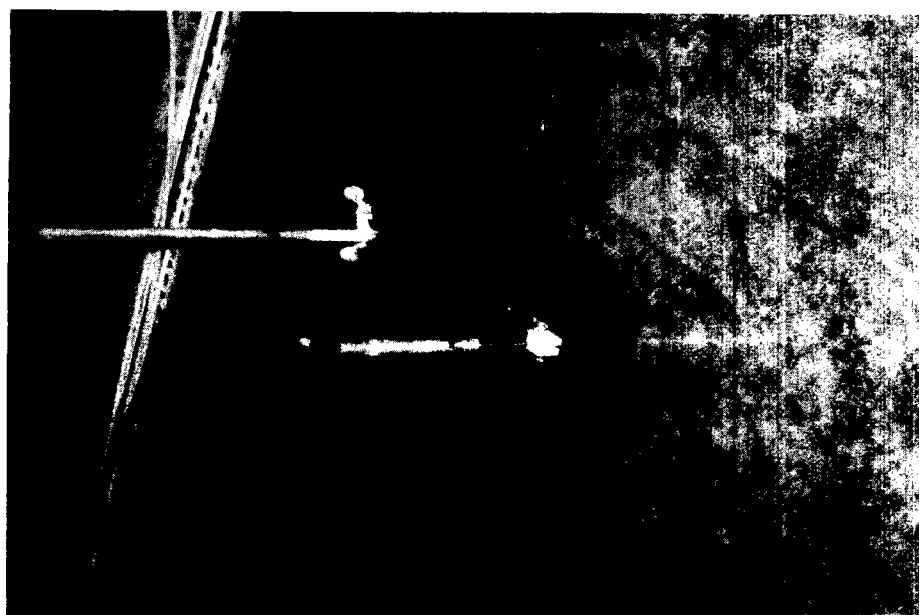


圖 5-11 電磁式測流計

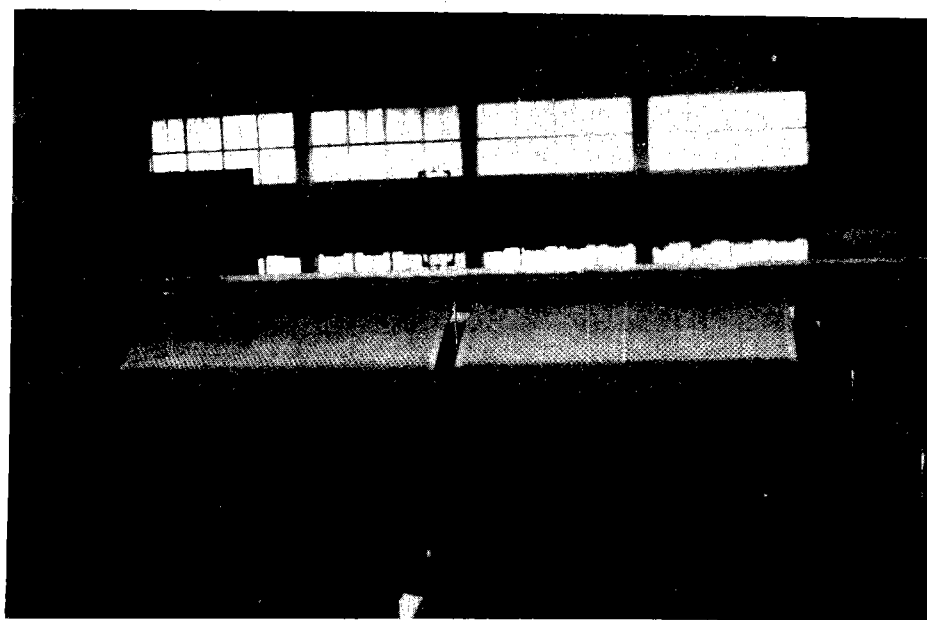


圖 5-12 消 波 板

六. 試驗內容

整體試驗佈置，如圖 6-1 所示。船模為滿載情況，即吃水達設計水線，碼頭為棧船式，假設碼頭沒造成波浪之反射，碼頭處水深 18cm。流的方向固定由船的橫方向入射，如圖 5-2 之 A 方向；調整造流設備馬達之閘門，以使船模附近平行船長方向 8 個定點各別五次平均流速約為 7.5cm/sec。波的方向有 5 個，如圖 6-2 ~ 圖 6-6 所示。

試驗前，每條繫纜各先施予 20 gram(in model) 之預力。

圖 6-7 顯示，B 方向不規則波作用下，船舶之各方向運動時間序列。

A 方向不規則波之有義周期 $T_{1/3}$ 為 0.985sec，有義波高 $H_{1/3}$ 為 1.17cm，規則波之 ($T_{1/3}$, $H_{1/3}$) 有下列各組：

- (1.219sec, 2.02cm)
- (0.985sec, 2.23cm)
- (0.914sec, 1.76cm)
- (0.800sec, 2.05cm)
- (0.711sec, 1.41cm)
- (0.610sec, 1.76cm)
- (1.506sec, 2.65cm)
- (1.113sec, 2.37cm)

B 方向不規則波之有義周期 $T_{1/3}$ 為 1.024sec，有義波高 $H_{1/3}$ 為 1.61cm，規則波之 ($T_{1/3}$, $H_{1/3}$) 有下列各組：

(0.985sec, 1.78cm)
(0.914sec, 2.20cm)
(0.800sec, 2.12cm)
(0.674sec, 0.82cm)
(1.347sec, 1.42cm)
(1.969sec, 3.20cm)
(0.674sec, 2.00cm)

C 方向不規則波之有義周期 $T_{1/3}$ 為 1.219sec, 有義波高 $H_{1/3}$ 為 2.01cm, 規則波之 $(T_{1/3}, H_{1/3})$ 有下列各組 :

(0.985sec, 2.15cm)
(0.914sec, 2.13cm)
(0.800sec, 1.64cm)

D 方向不規則波之有義周期 $T_{1/3}$ 為 1.28sec, 有義波高 $H_{1/3}$ 為 2.45cm, 規則波之 $(T_{1/3}, H_{1/3})$ 有下列各組

(0.985sec, 2.49cm)
(0.914sec, 2.39cm)
(0.800sec, 1.96cm)

E 方向不規則波之有義周期 $T_{1/3}$ 為 1.113sec, 有義波高 $H_{1/3}$ 為 1.51cm, 規則波之 $(T_{1/3}, H_{1/3})$ 有下列各組 :

(0.985sec, 1.74cm)
(0.883sec, 1.62cm)
(0.853sec, 1.48cm)

本試驗所取 Froude Similarity Law 之 Scale 為 1/100。

本節所取有義波高 $H_{1/3}$ 乃由波譜總能量 m_0 ，先開根號後再乘 4.0 而得，即 $H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0}$ 。

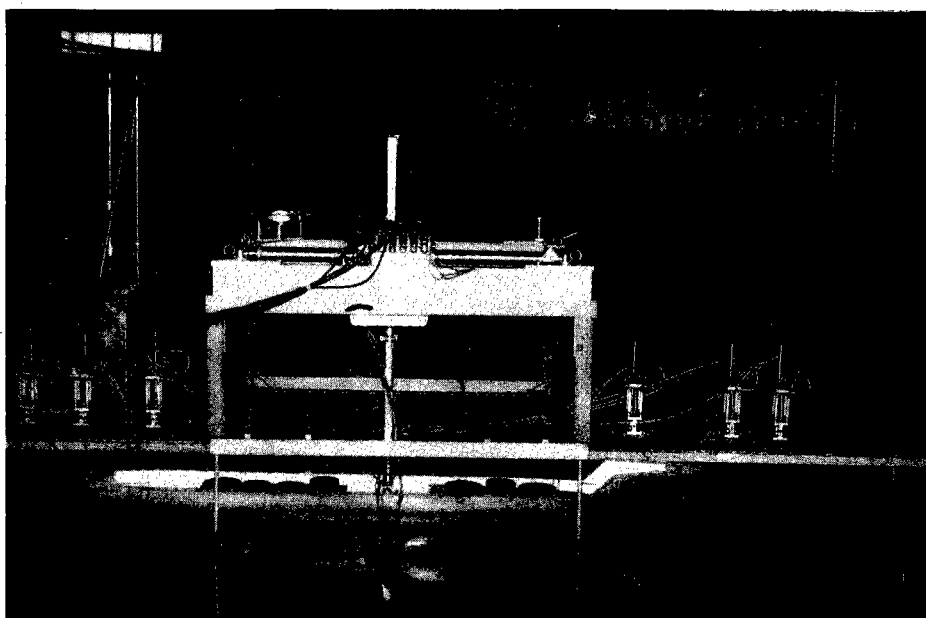


圖 6-1 試 驗 佈 置

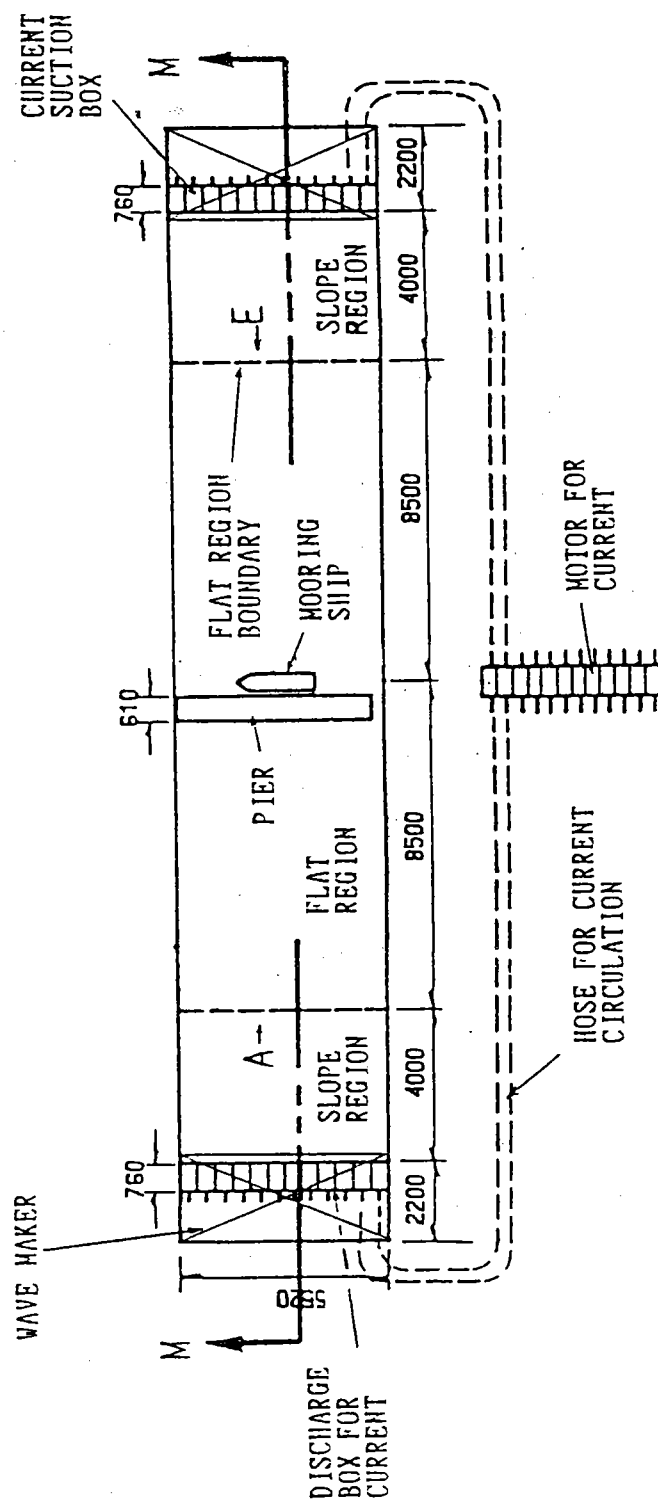


圖 6-2 試驗佈置圖 (波向為 A)

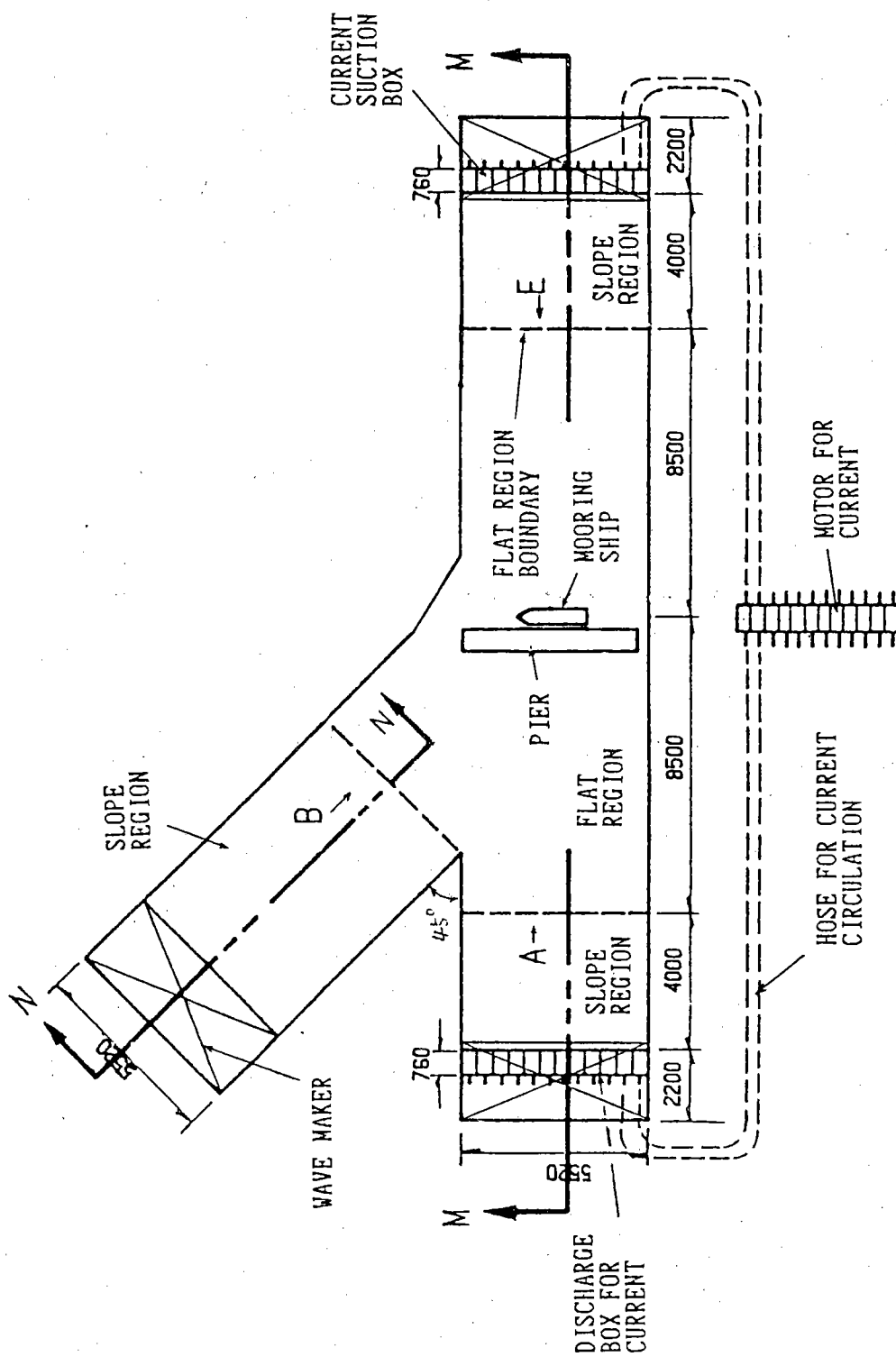


圖 6-3 試驗佈置圖 (波向為 B)

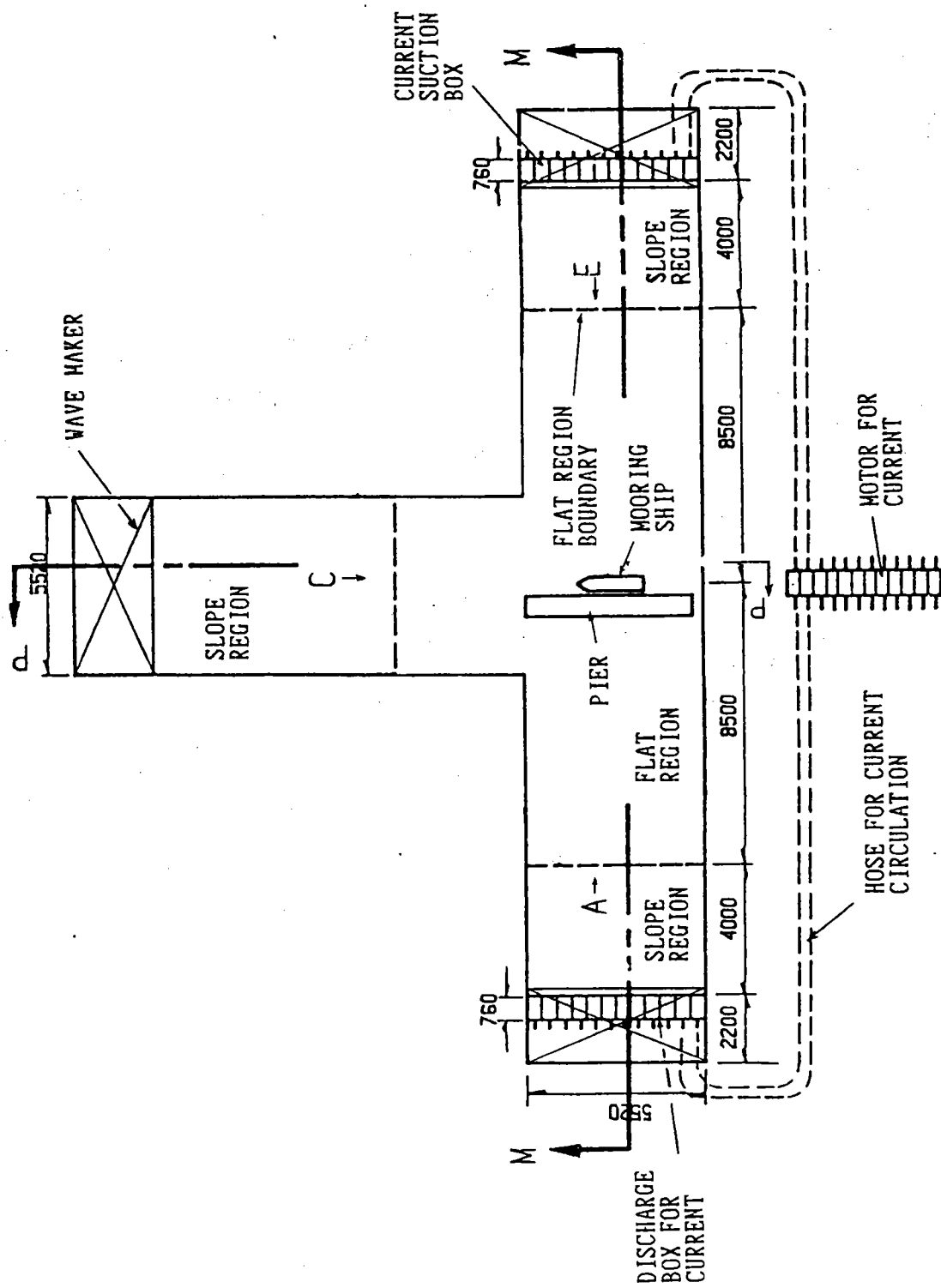


圖 6-4 試驗佈置圖 (波向為 C)

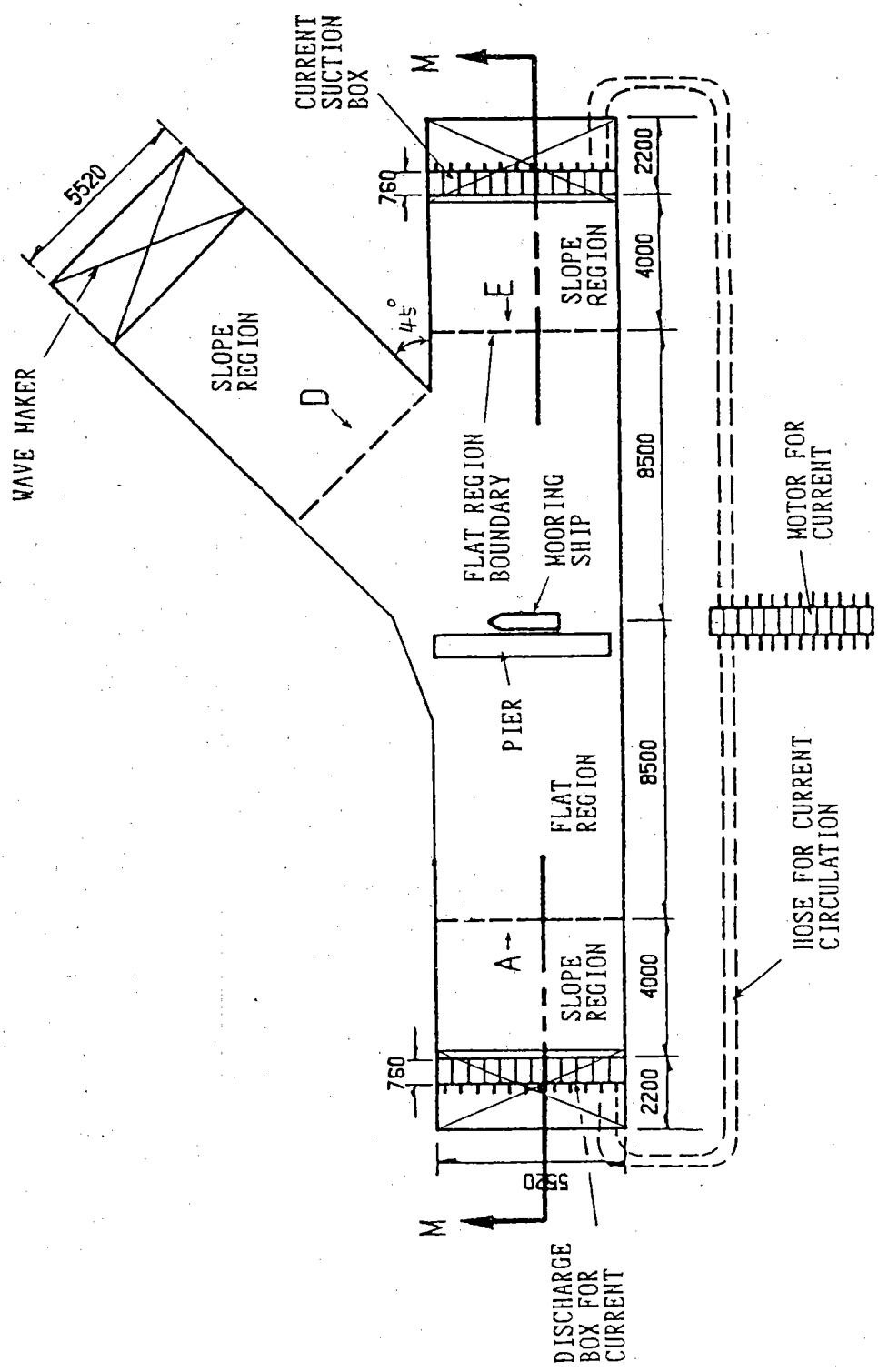


圖 6-5 試驗佈置圖 (波向為 D)

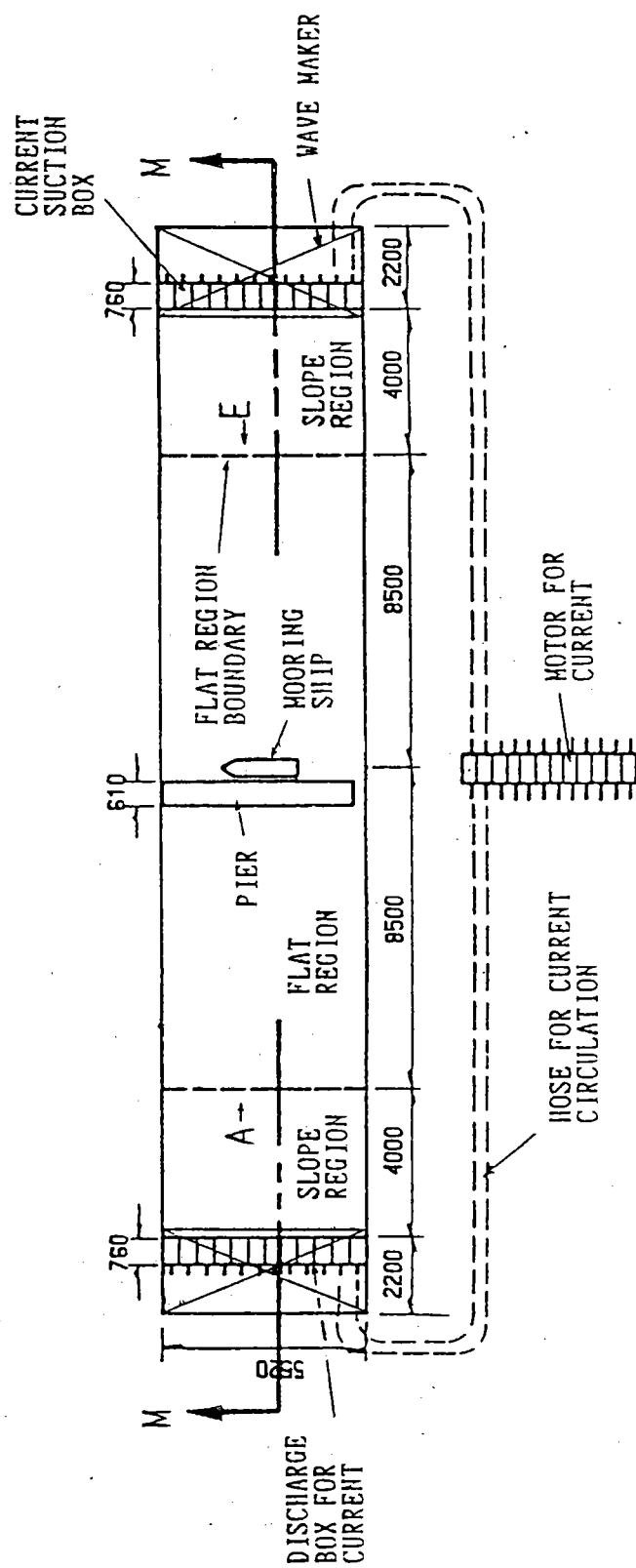
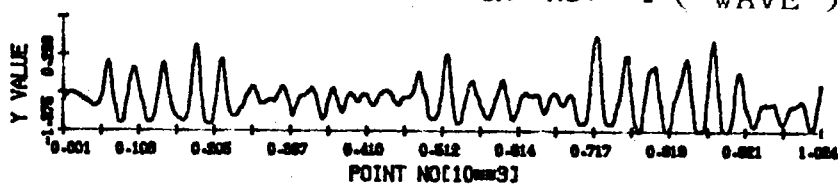


圖 6-6 試驗佈置圖 (波向為 E)

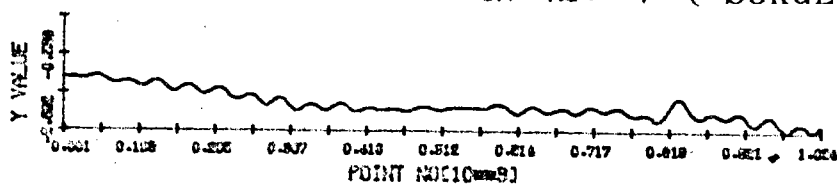
FILE: BNIS.D04

CH. NO: 4 (WAVE)



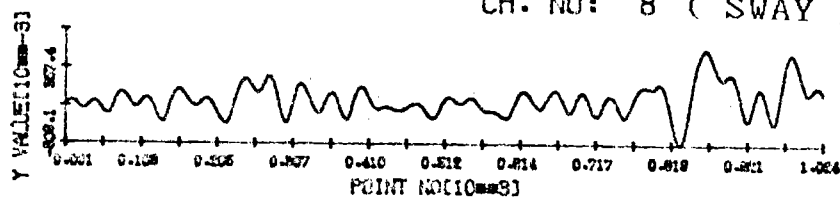
FILE: BNIS.D04

CH. NO: 7 (SURGE)



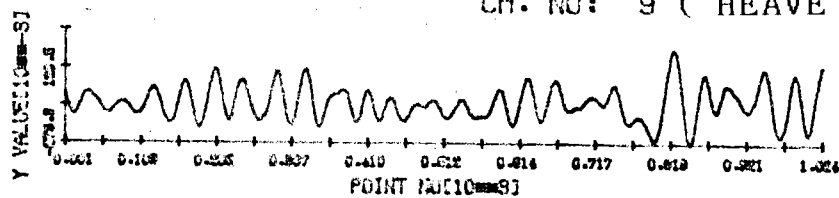
FILE: BNIS.D04

CH. NO: 8 (SWAY)



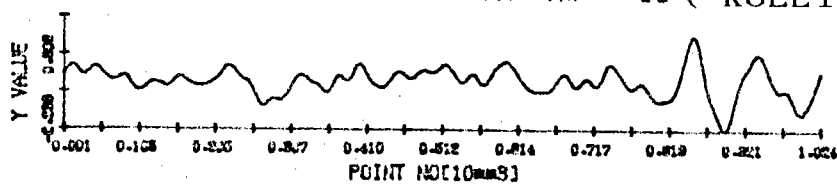
FILE: BNIS.D04

CH. NO: 9 (HEAVE)



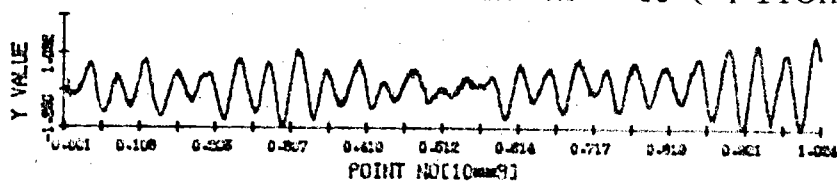
FILE: BNIS.D04

CH. NO: -10 (ROLLING)



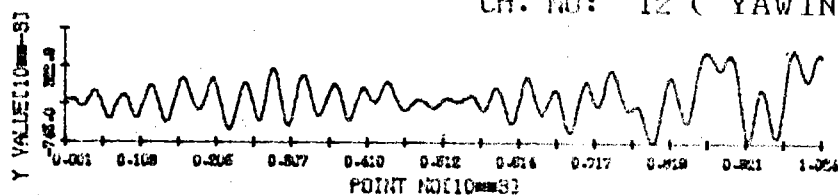
FILE: BNIS.D04

CH. NO: 11 (PITCHING)



FILE: BNIS.D04

CH. NO: 12 (YAWING)



七. 資料分析

圖 7-1 ~ 圖 7-48 中,各圖中曲線表不規則波作用下,由試驗及波譜法之理論計算後,船之某運動或繫纜受力之轉換函數,而圓點則表由規則波試驗分析後船運動或繫纜受力之轉換函數。

圖 7-1 ~ 圖 7-6,表圖 6-3 中, B 方向只有波作用,但 A 方向無流存在時船各運動之轉換函數。在圖 7-3、7-4、7-5、7-6 中,在周期 0.674 秒處有二圓點,其較高之圓點乃由有義波高 0.82 公分之規則波所分析而得;較低之圓點乃由有義波高 2.0 公分之規則波而得。此二波高所造成之圓點在圖 7-1 及 7-2 二圖中重合在一起,表示在此情況下,不同波高對船縱移、側移運動影響相同。平均而言,由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢相近。

圖 7-7 ~ 圖 7-12,表圖 6-3 中, B 方向有波作用,且 A 方向同時有流存在時,船各運動之轉換函數。由圖可知,在圖 7-3 ~ 圖 7-6 中,在周期 0.674 秒處,因不同波高所造成的二圓點,在此海況全部重合在一起,可知在此波、流同時存在的情況,此二不同波高造成的船舶運動轉換函數相同。平均而言,由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

圖 7-13 ~ 圖 7-18,表圖 6-5 中, D 方向只有波作用,但 A 方向無流存在時,船運動之轉換函數,平均而言,由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

圖 7-19 ~ 圖 7-24, 表圖 6-5 中, D 方向有波作用, 且 A 方向同時有流存在時, 船運動之轉換函數, 平均而言, 由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

圖 7-25 ~ 圖 7-30, 表圖 6-3 中, B 方向只有波作用, 但 A 方向無流存在時, 各繫纜受力轉換函數。在周期 0.674 秒處有二圓點, 除了圖 7-28 相反以外, 其較高之圓點乃由有義波高 0.82 公分之規則波所分析而得; 較低之圓點乃由有義波高 2.0 公分之規則波而得。平均而言, 由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

圖 7-31 ~ 圖 7-36, 表圖 6-3 中, B 方向有波作用, 且 A 方向同時有流存在時, 各繫纜受力之轉換函數。在周期 0.674 秒處, 除了圖 7-35 以外, 由有義波高 0.82 公分及 2.0 公分之規則波所造成之二圓點均重合在一起。而圖 7-35 中, 周期 0.674 秒處, 較高之圓點乃由有義波高 2.0 公分之規則波所造成。平均而言, 由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

圖 7-37 ~ 圖 7-42, 表圖 6-5 中, D 方向只有波作用, 但 A 方向無流存在時, 各繫纜受力轉換函數。平均而言, 由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

圖 7-43 ~ 圖 7-48, 表圖 6-5 中, D 方向有波作用, 且 A 方向同時有流存在時, 各繫纜受力之轉換函數

。平均而言，由不規則波及規則波而得之轉換函數趨勢頗為接近。

由表 7-1 ~ 表 7-3 可知流之存在對船舶各方向運動及繫纜受力有顯著影響。在長週期波（如 1.374sec、1.969sec）作用下，有流存在時船舶之 SWAY 運動及各繫纜受力比無流存在時為小，而在短週期波之情況，則反之，此應是因在短週期波下，流之明顯作用為將船推離碼頭，故繫纜受力及 SWAY 均增加，而在長週期波作用下，船舶有劇烈運動，故流之推離作用被抵消所致。

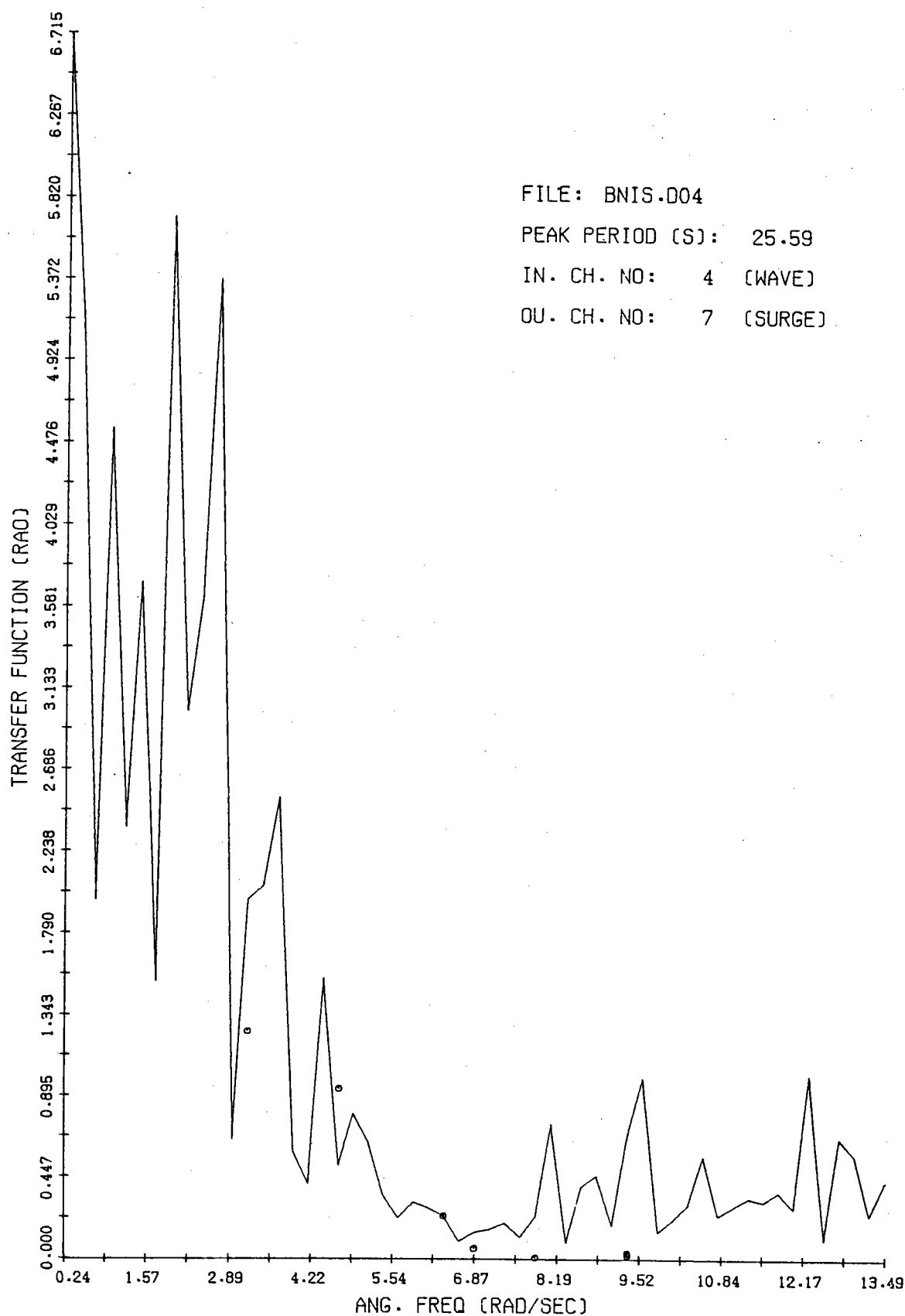
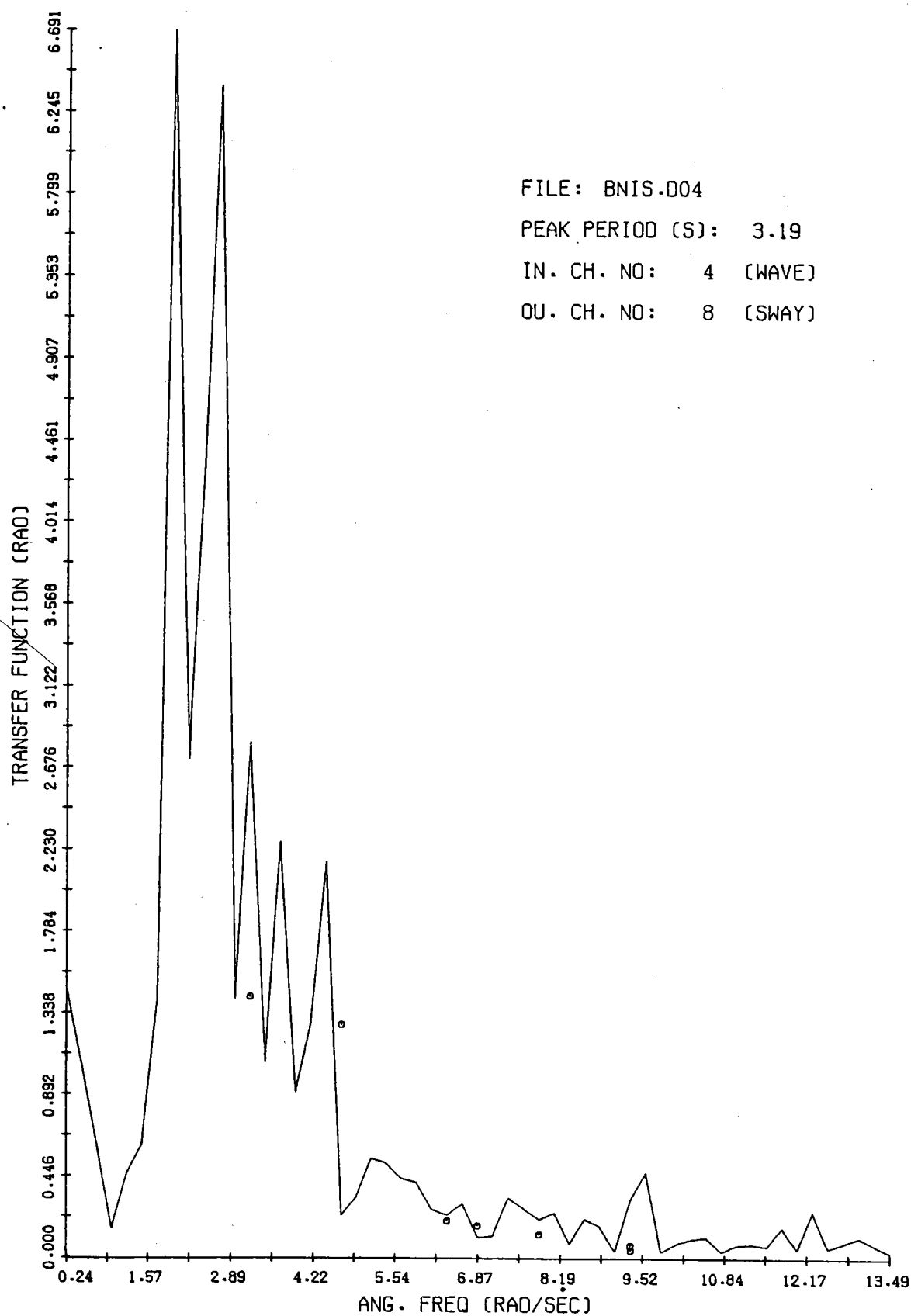
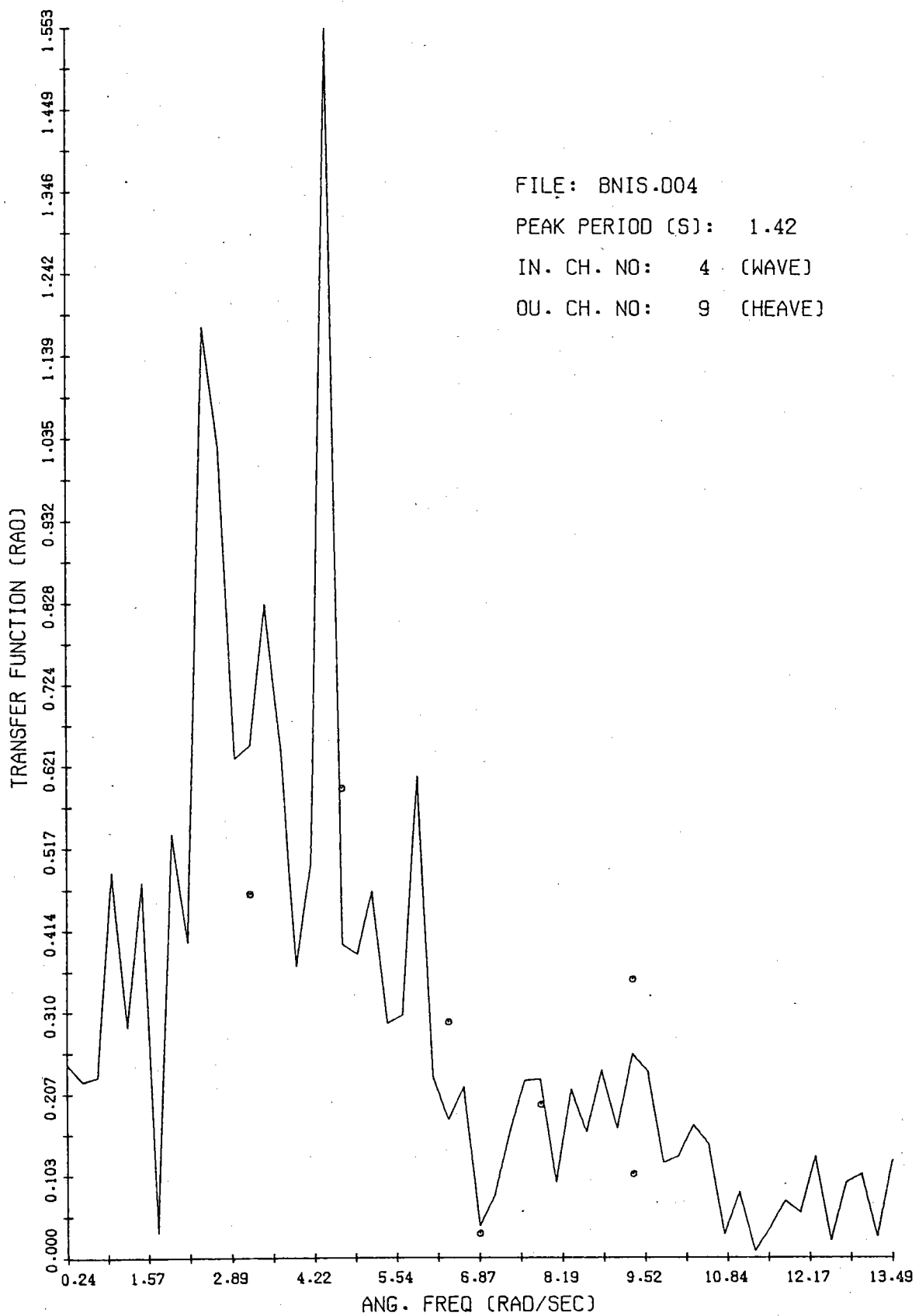


图 7-1



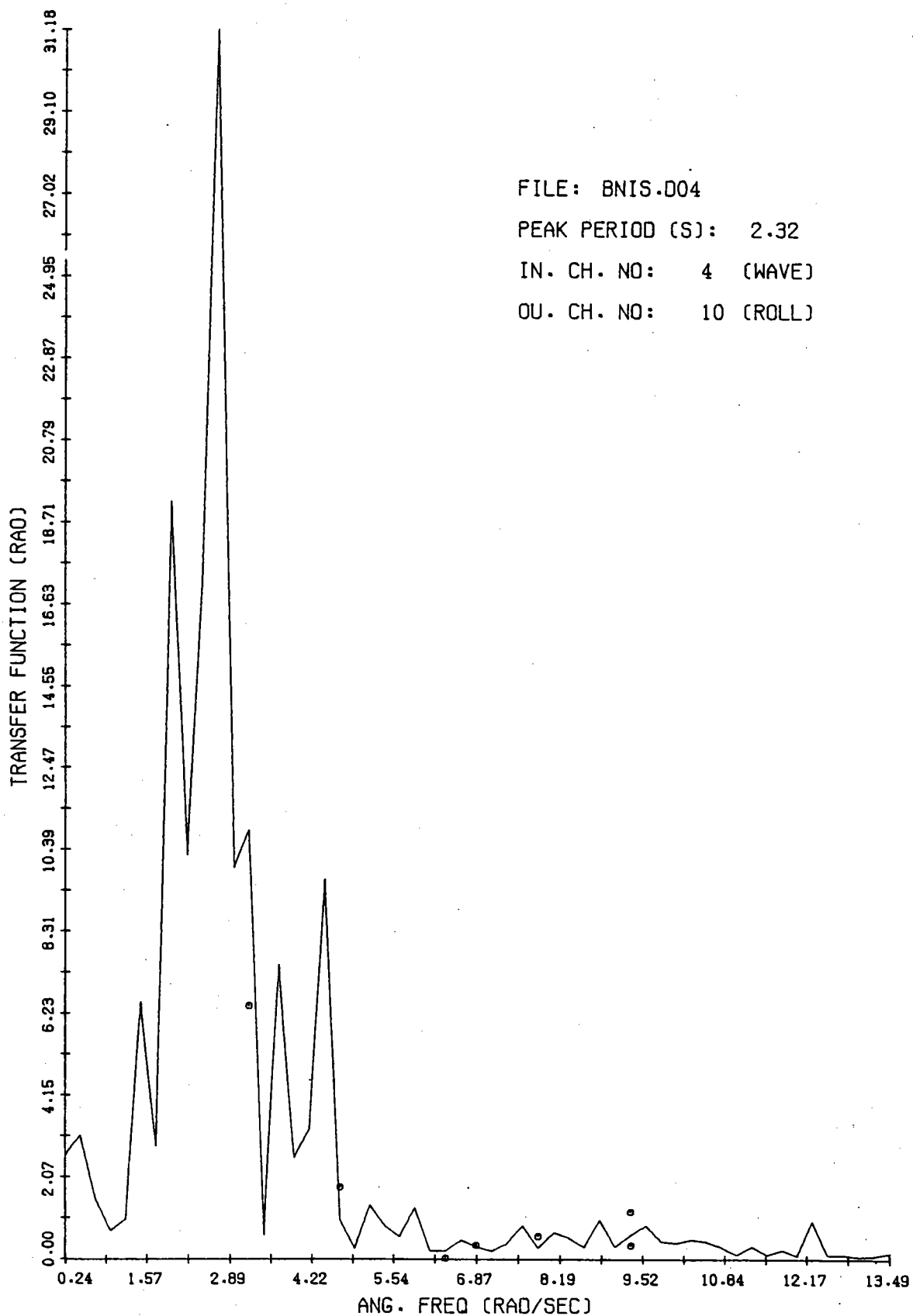
7-2

~ 52 ~



7-3

~ 53 ~



7-4

~ 54 ~

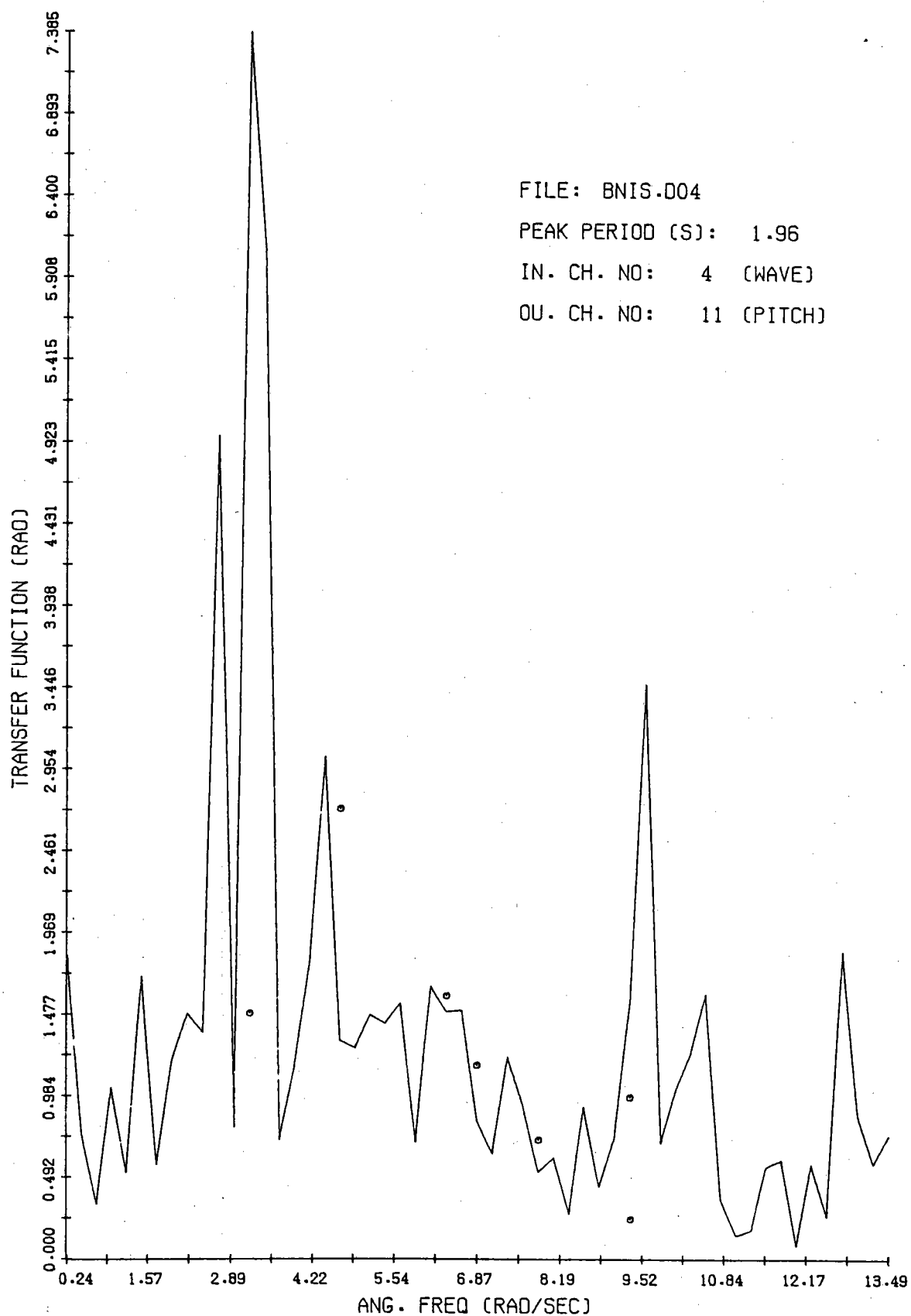
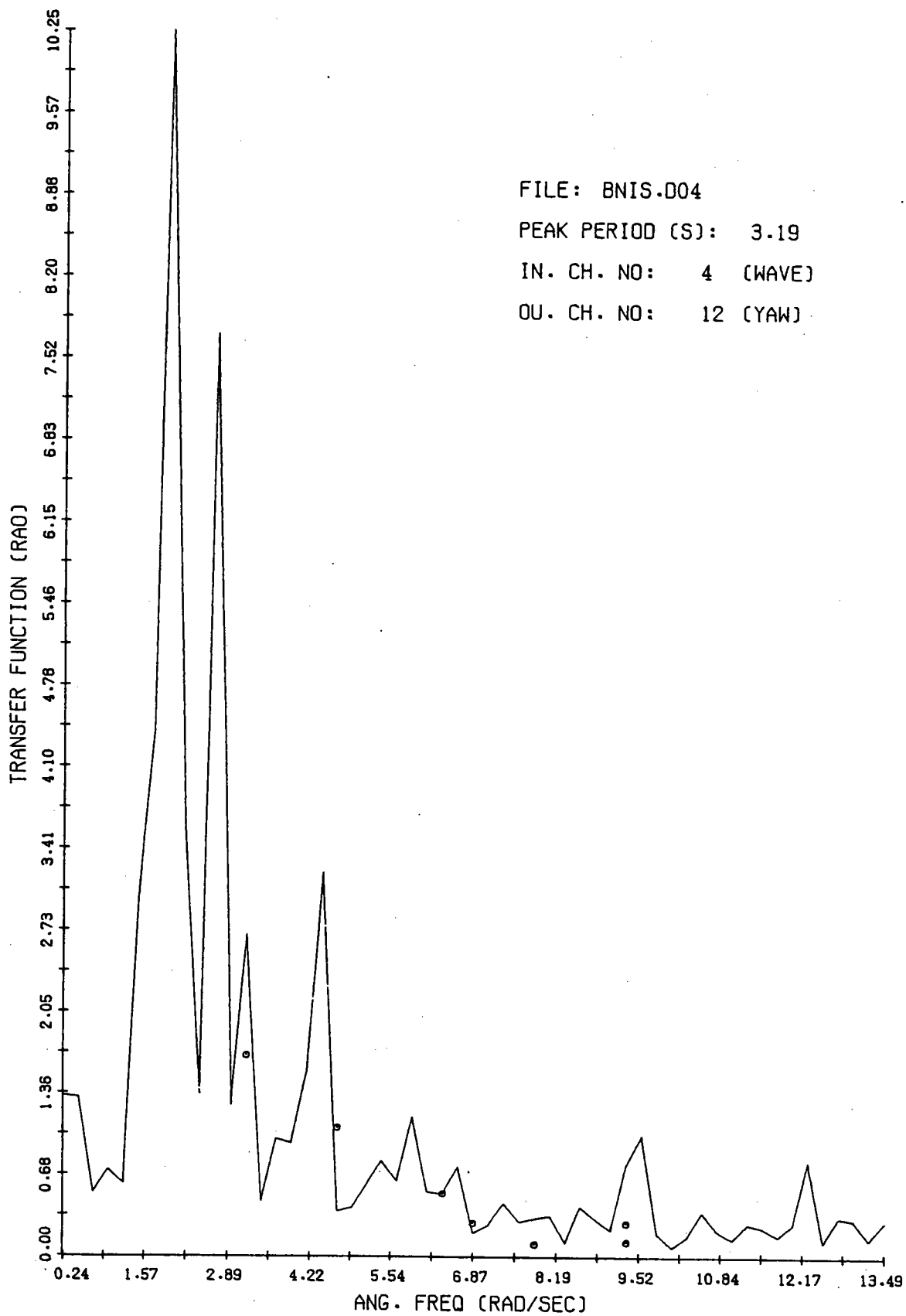


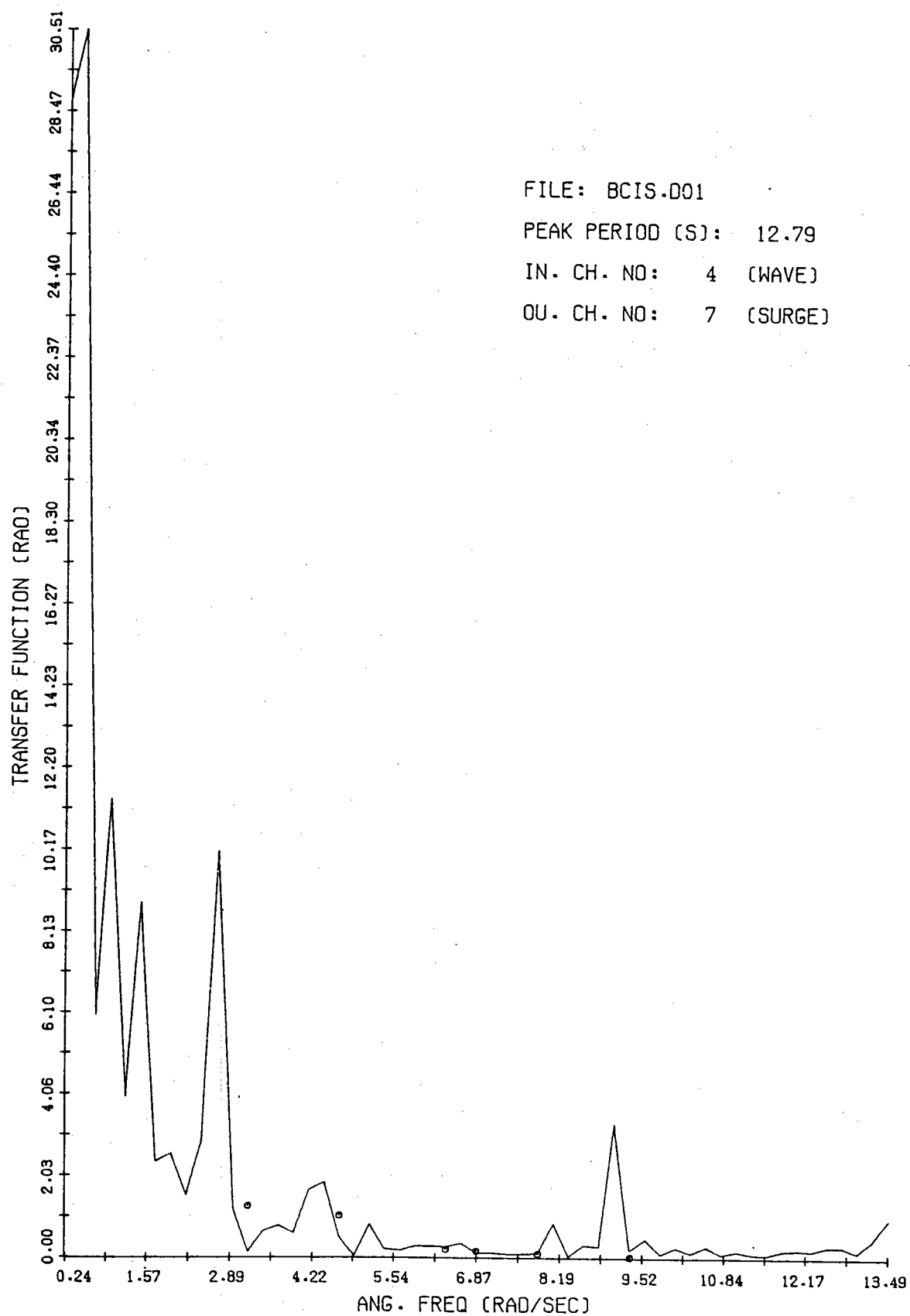
图 7-5

~ 55 ~

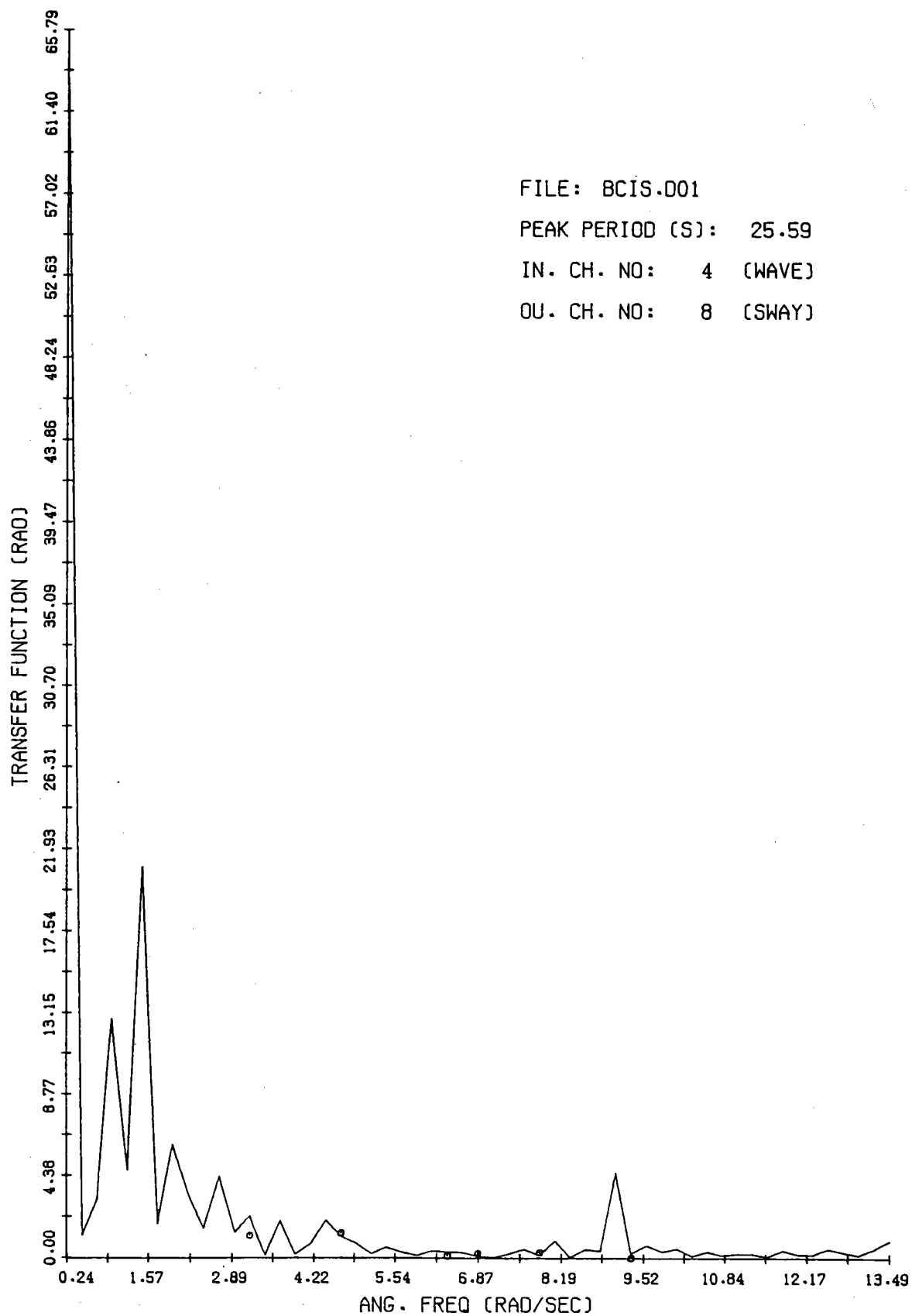


7-6

~ 56 ~



7-7



7-8

~ 58 ~

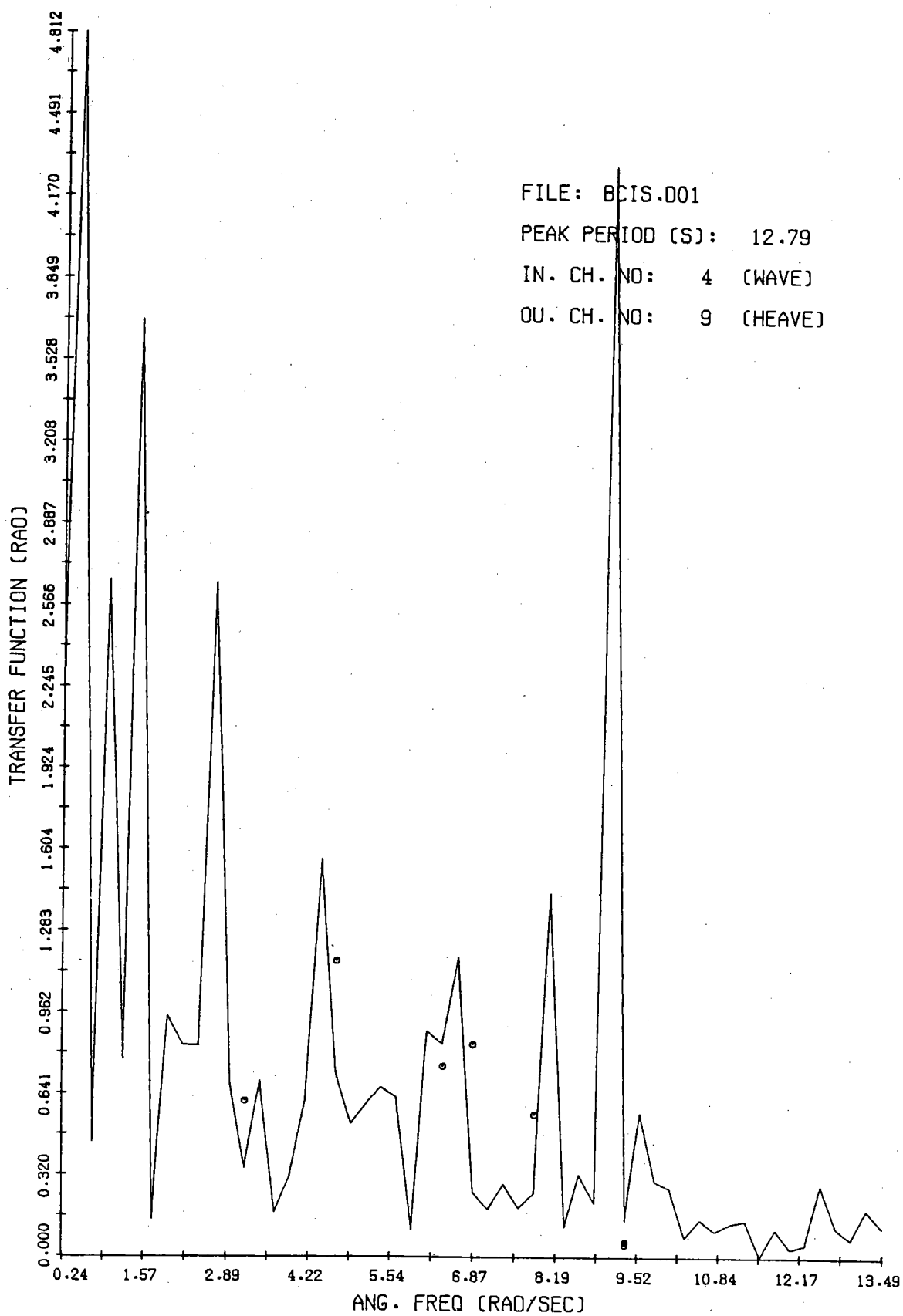
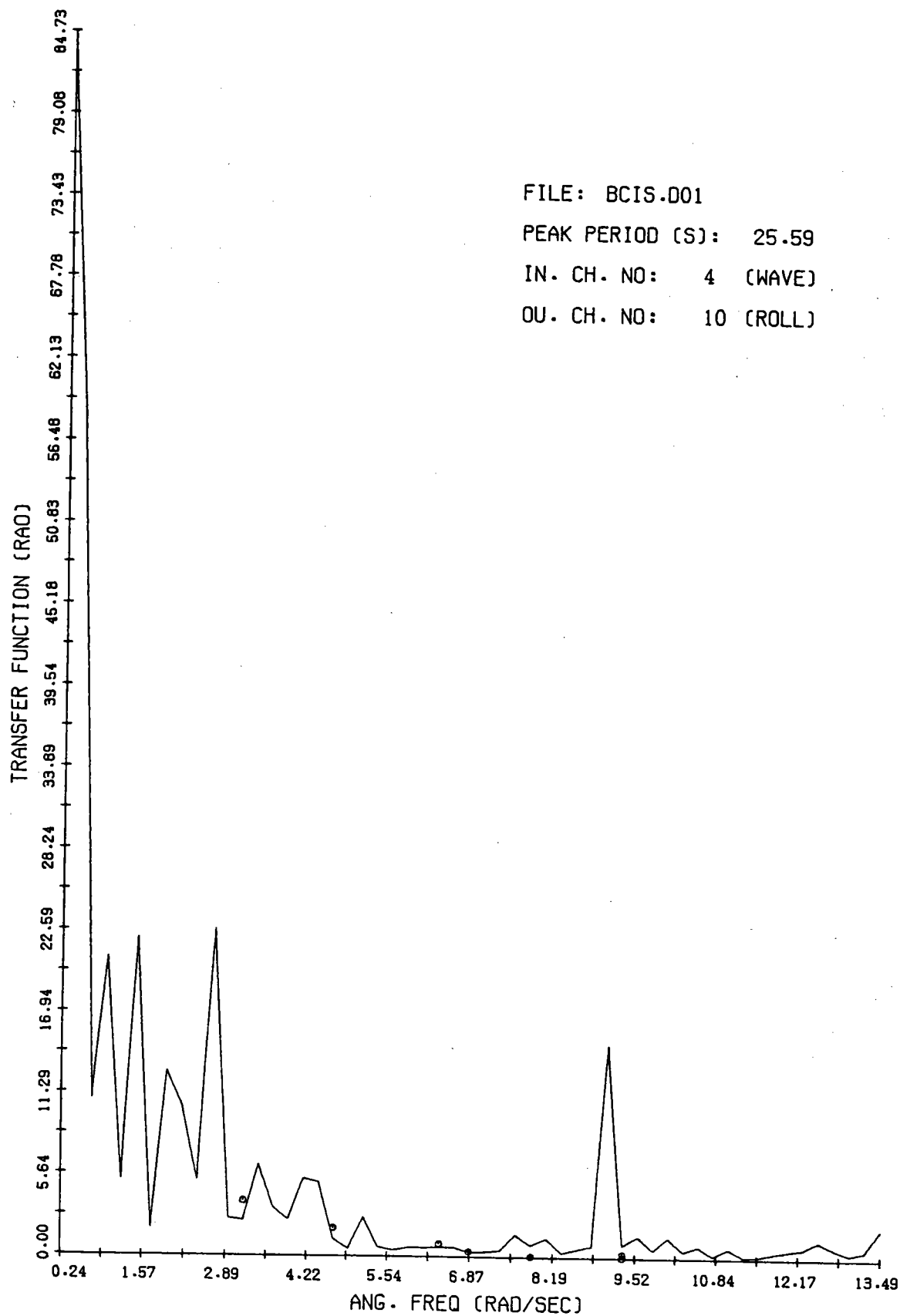


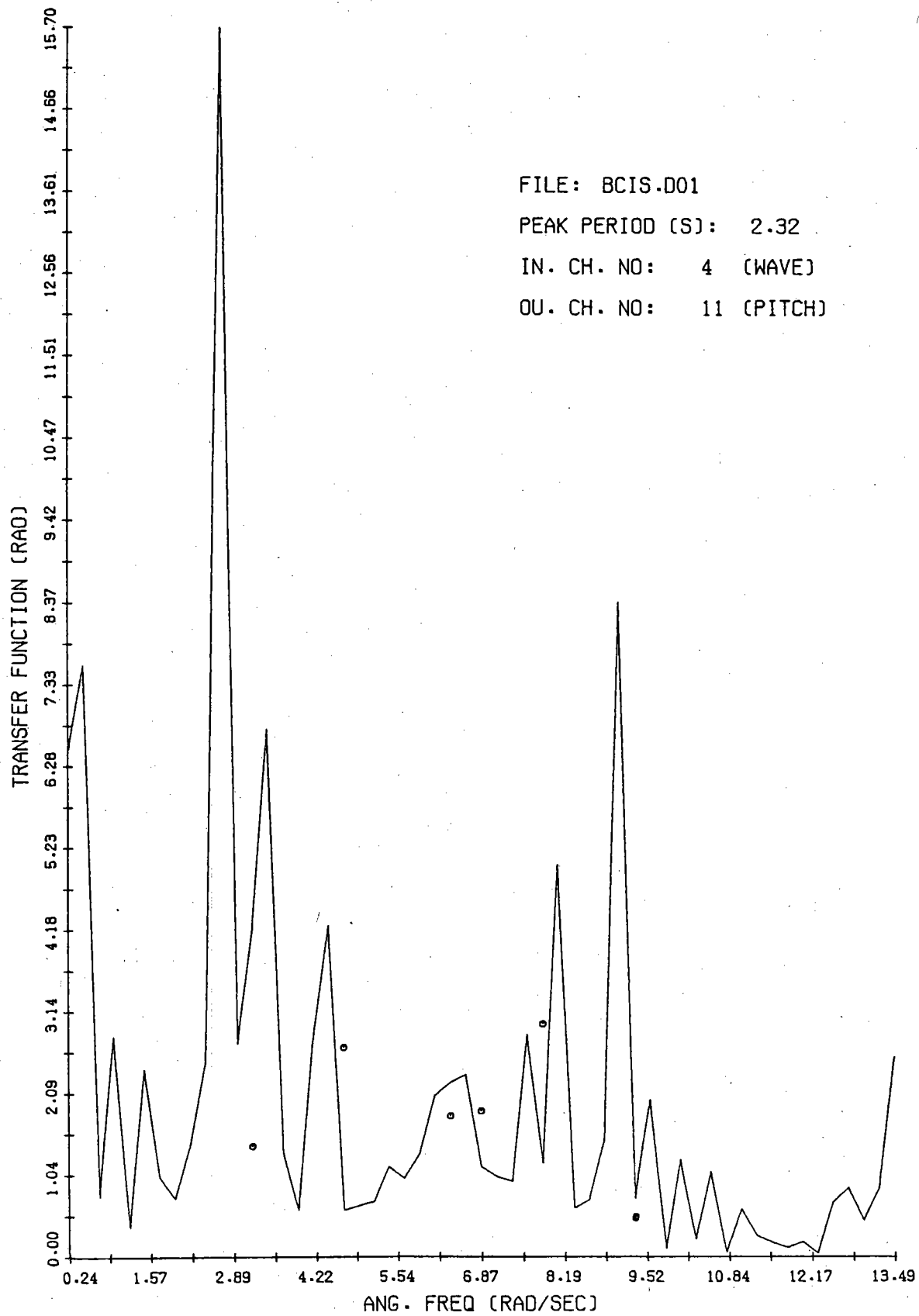
圖 7-9

~ 59 ~



7-10

~ 60 ~



7-11

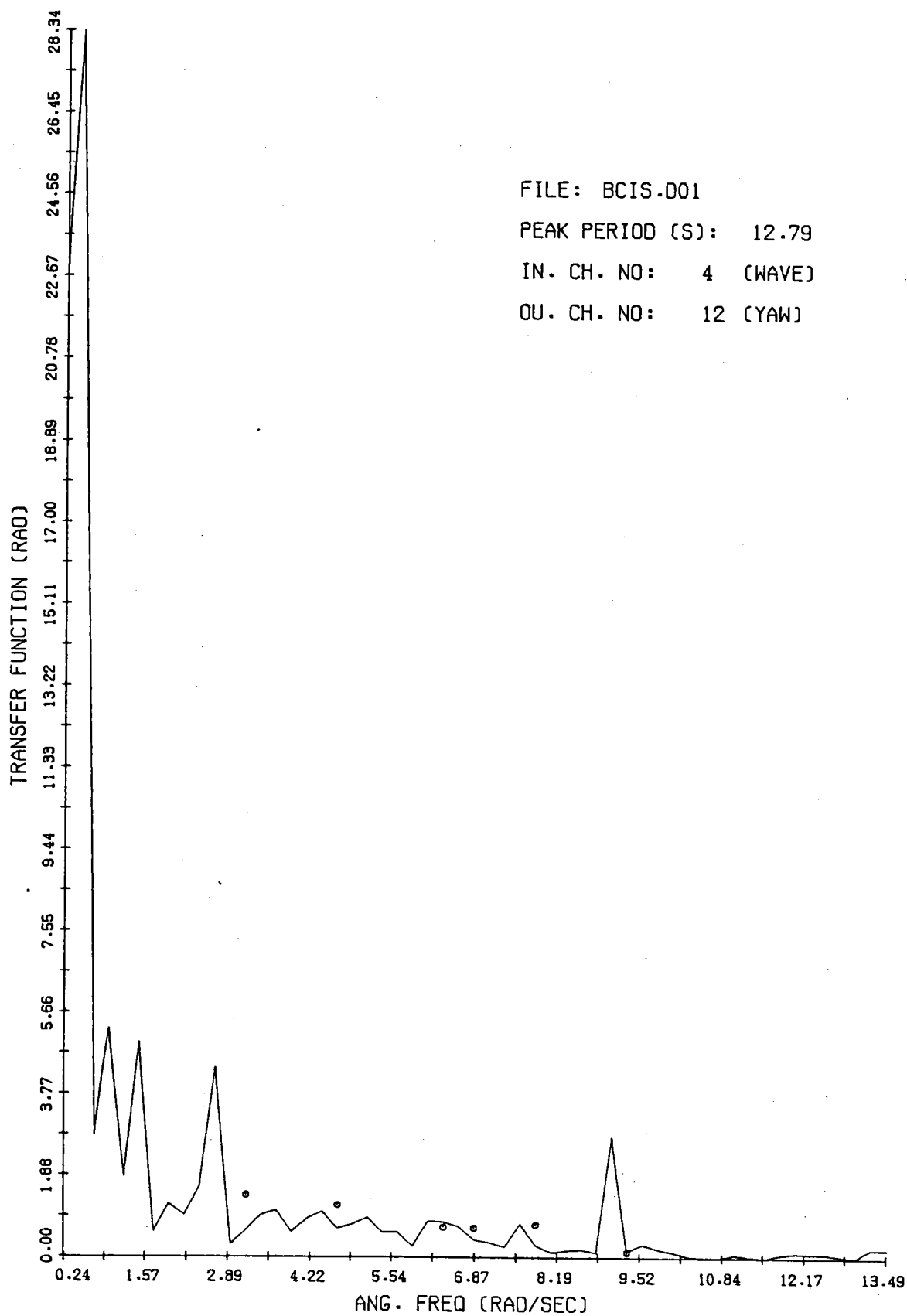
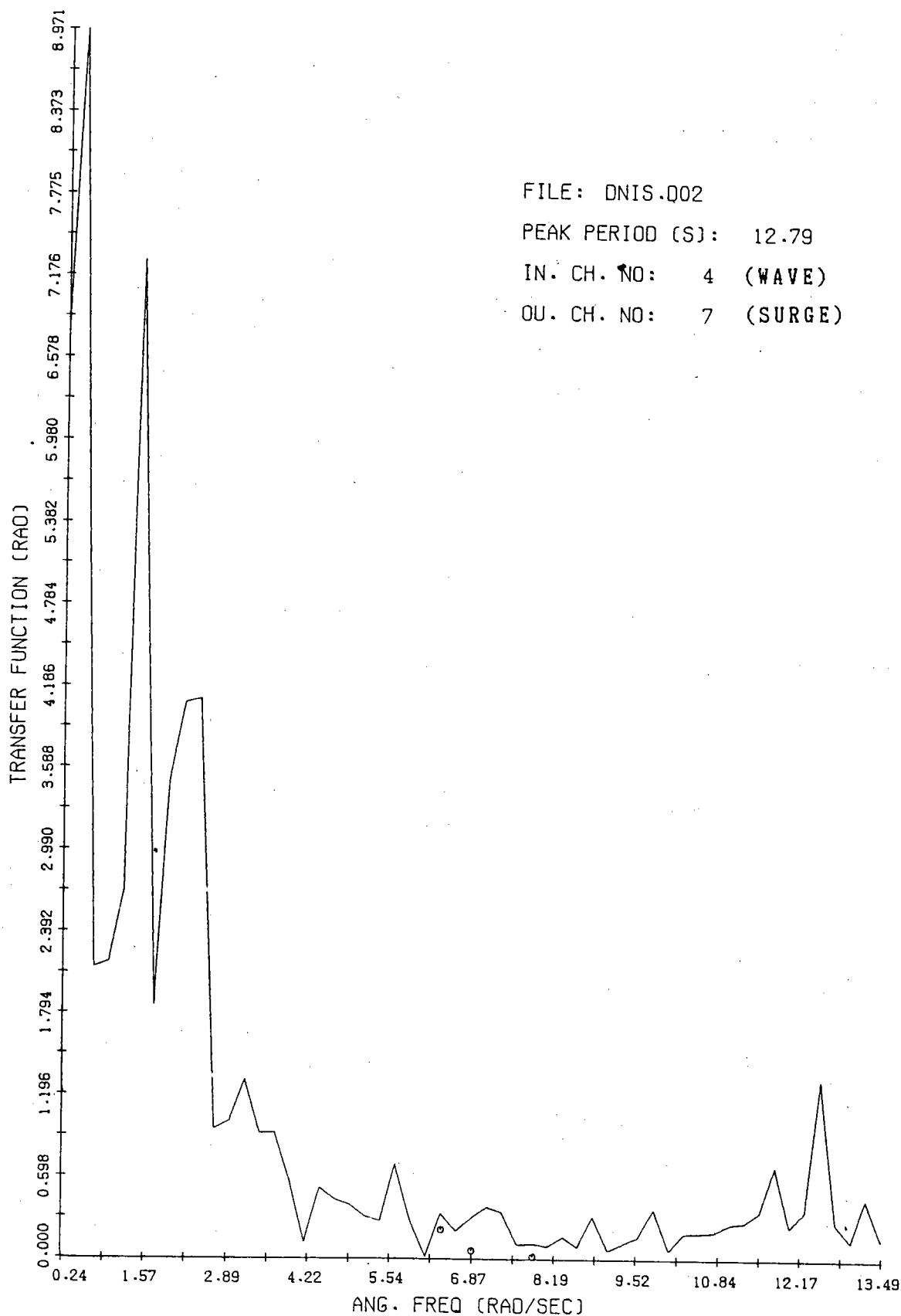


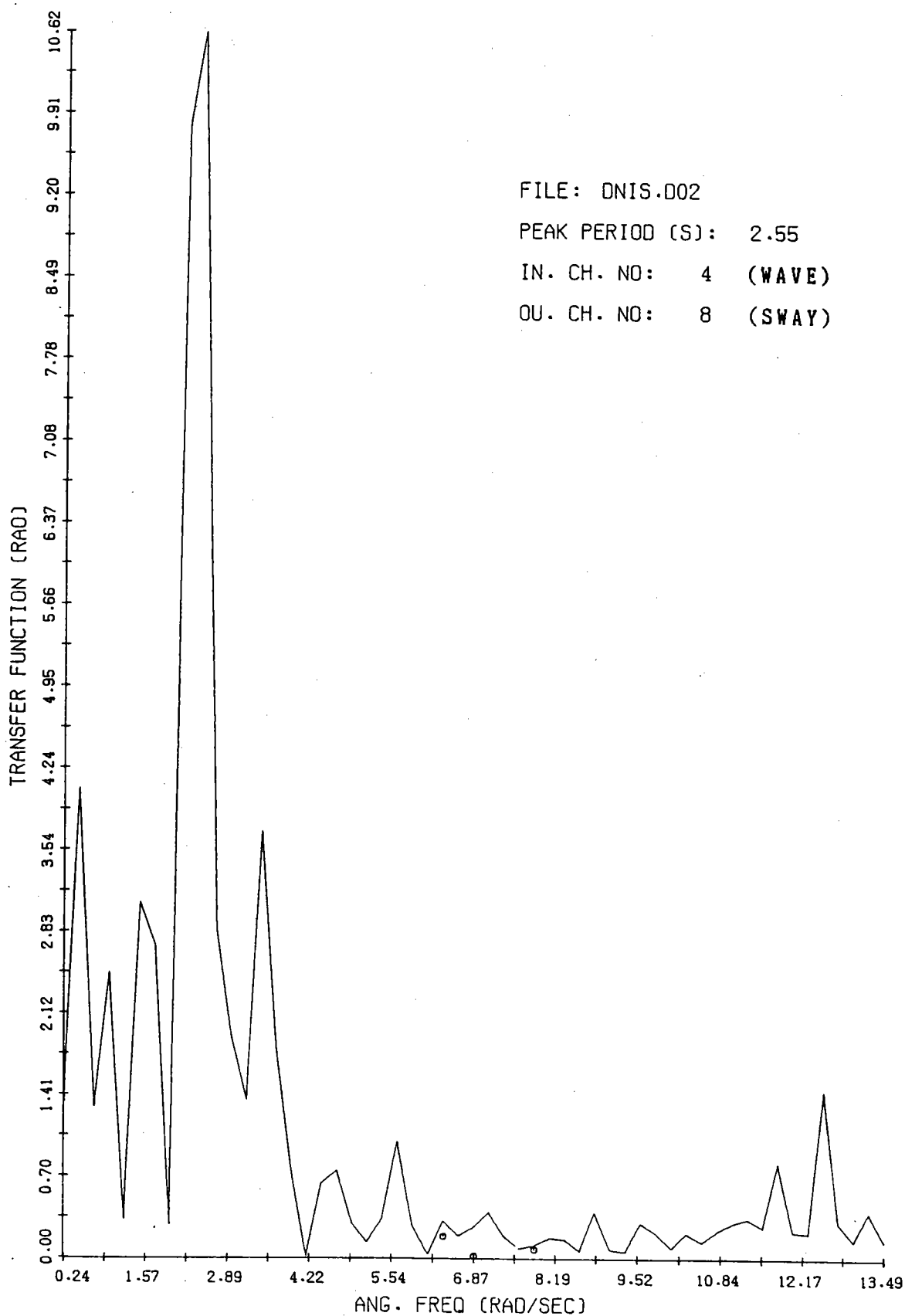
圖 7-12

~ 62 ~

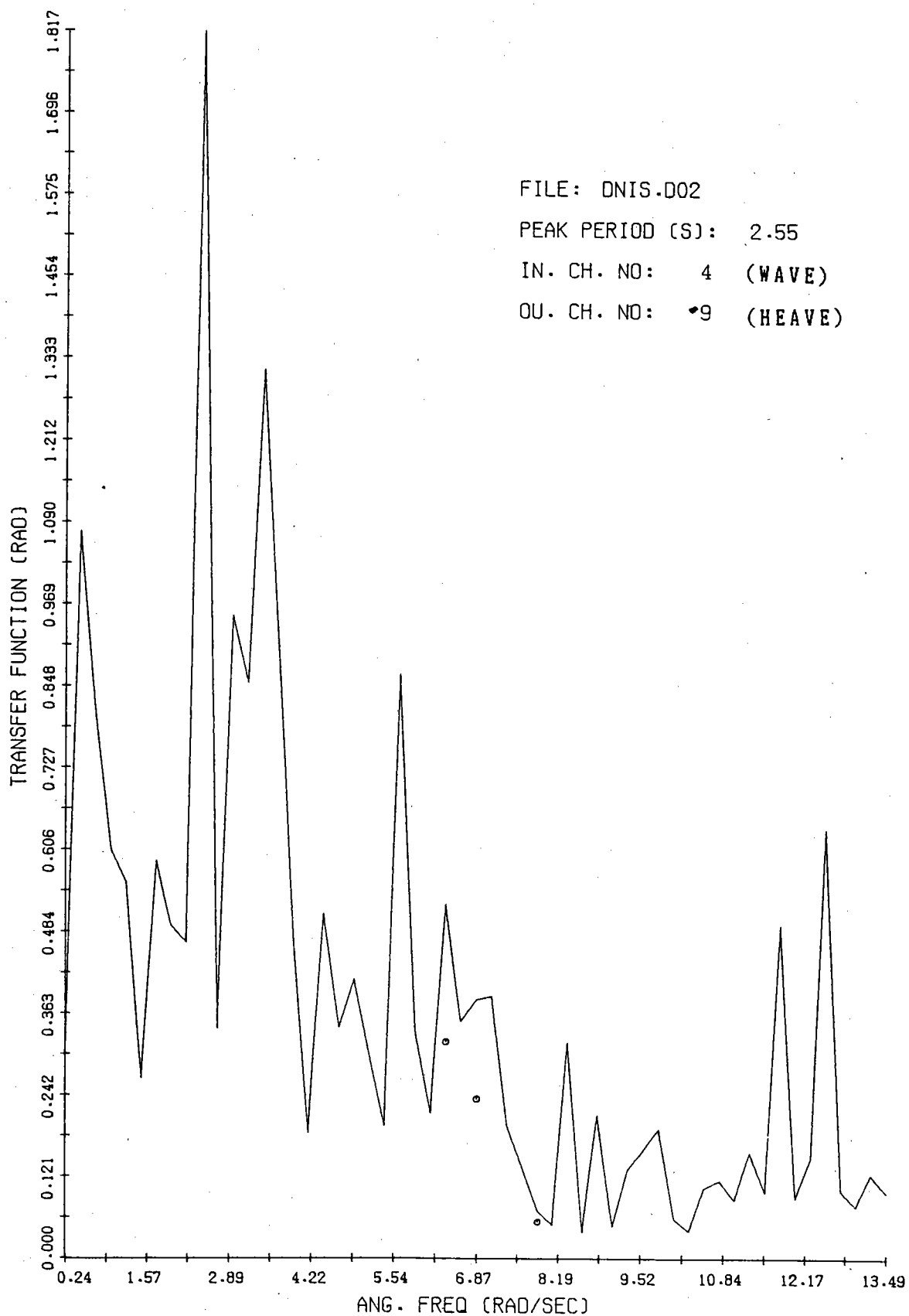


7-13

~ 63 ~



7-14



7-15

~ 65 ~

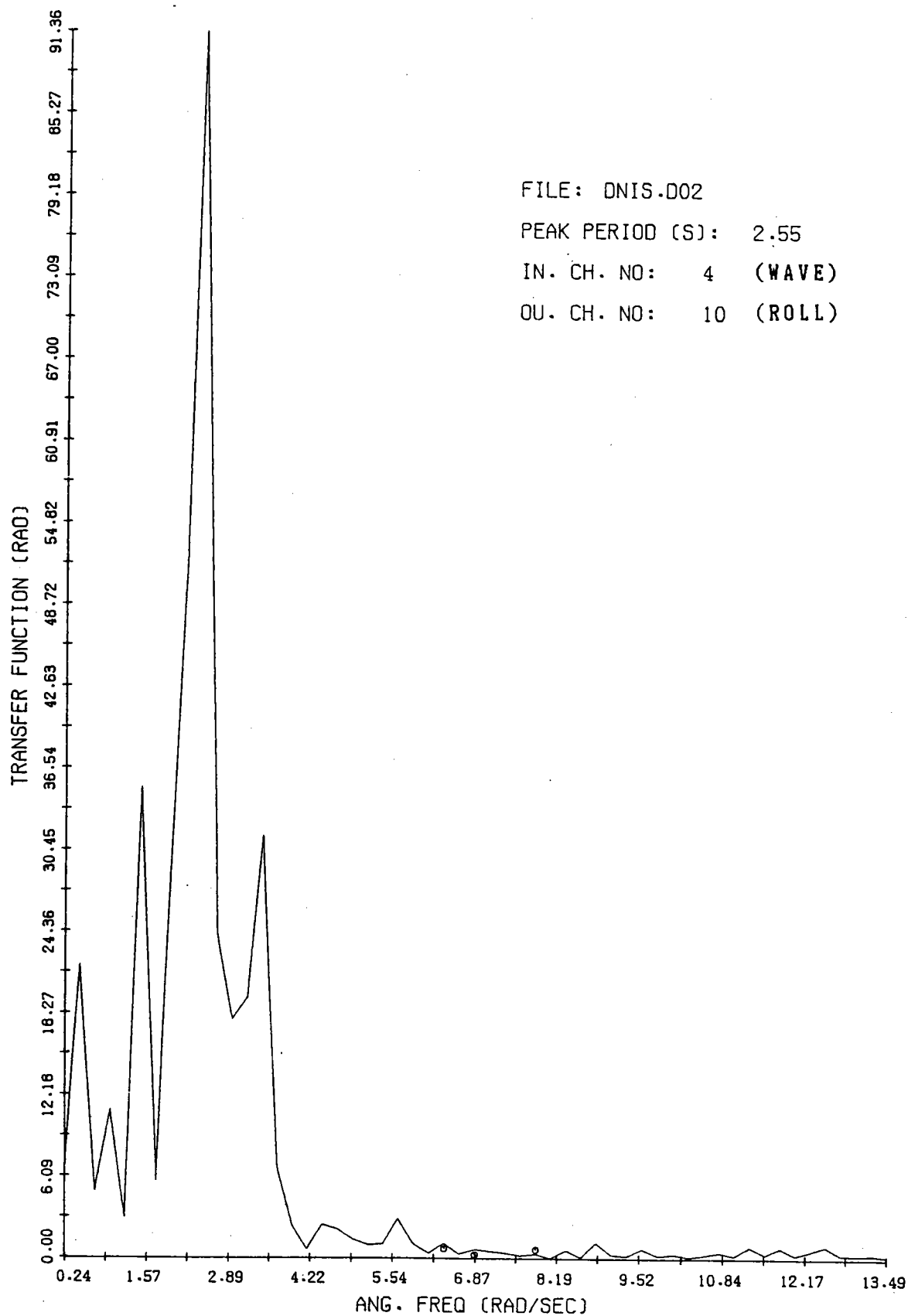
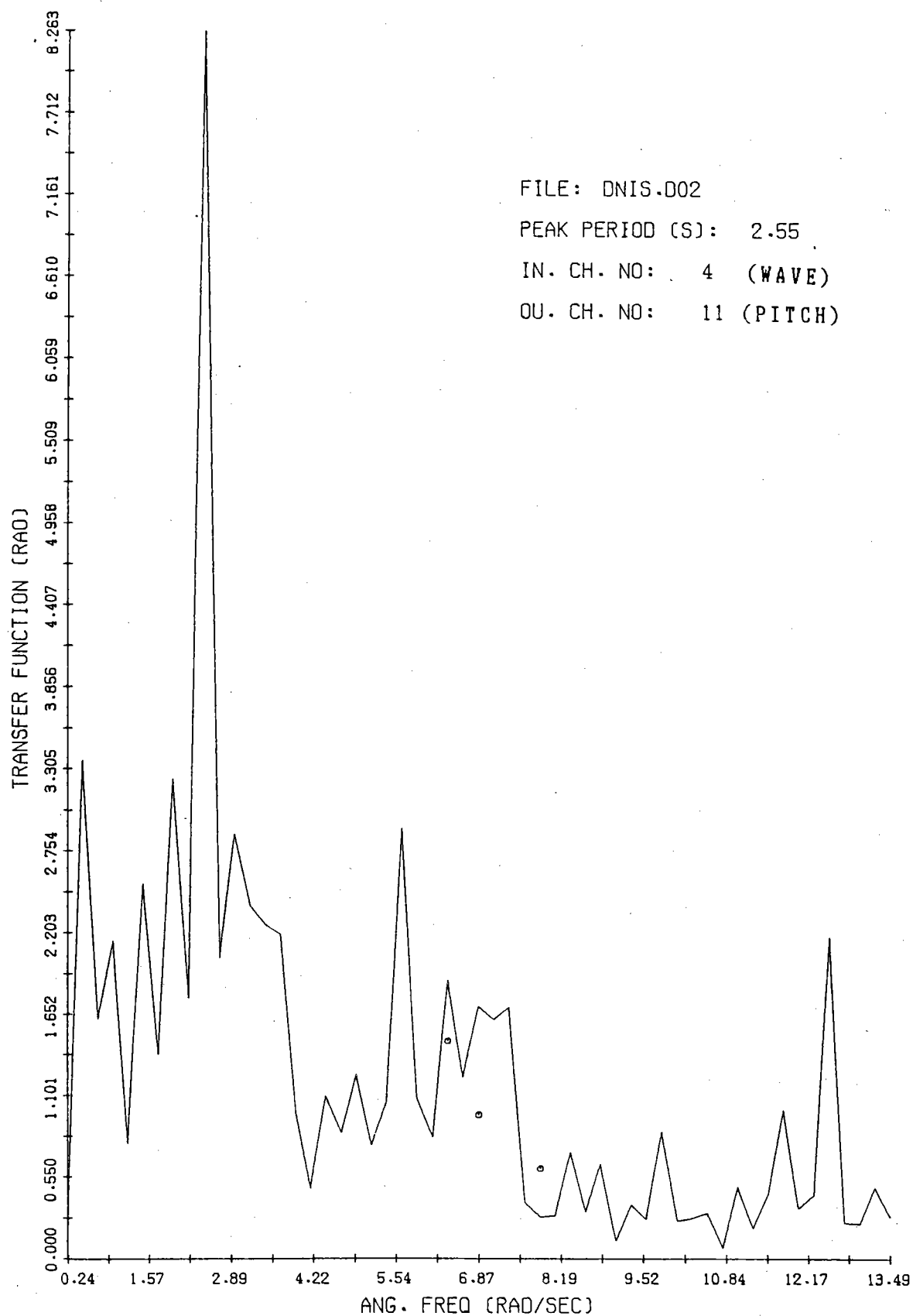


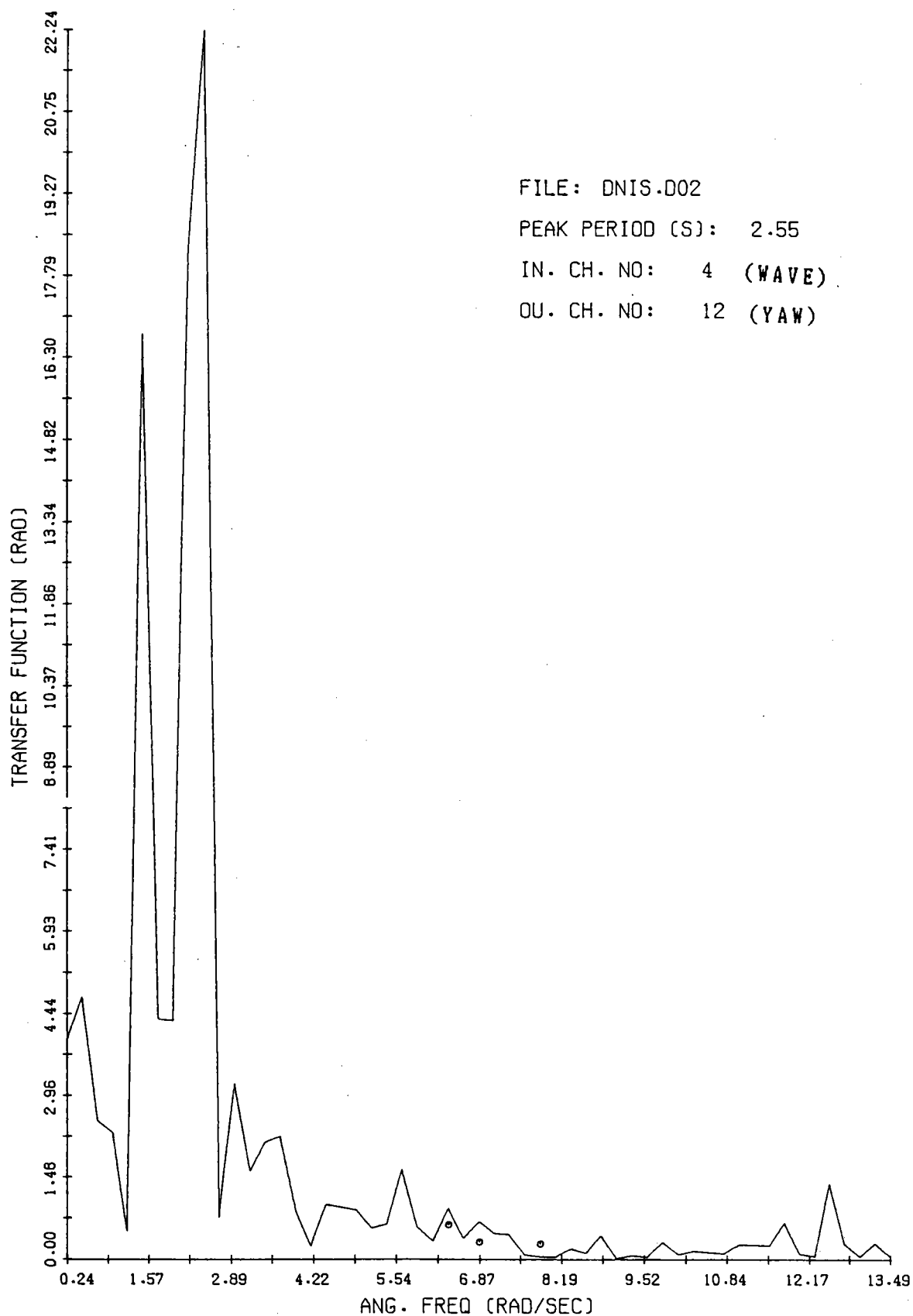
圖 7-16

~ 66 ~



7-17

~ 67 ~



7-18

~ 68 ~

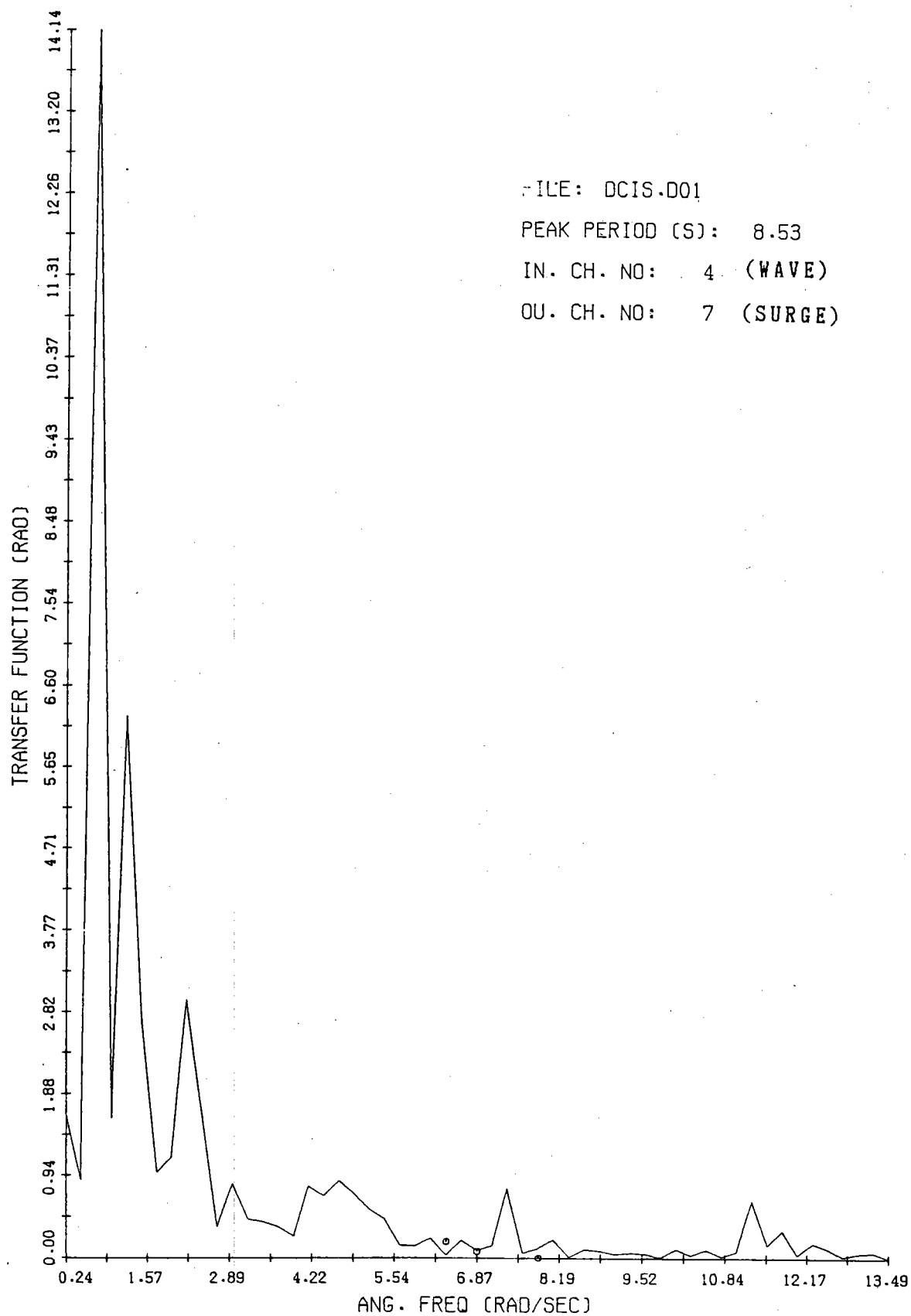
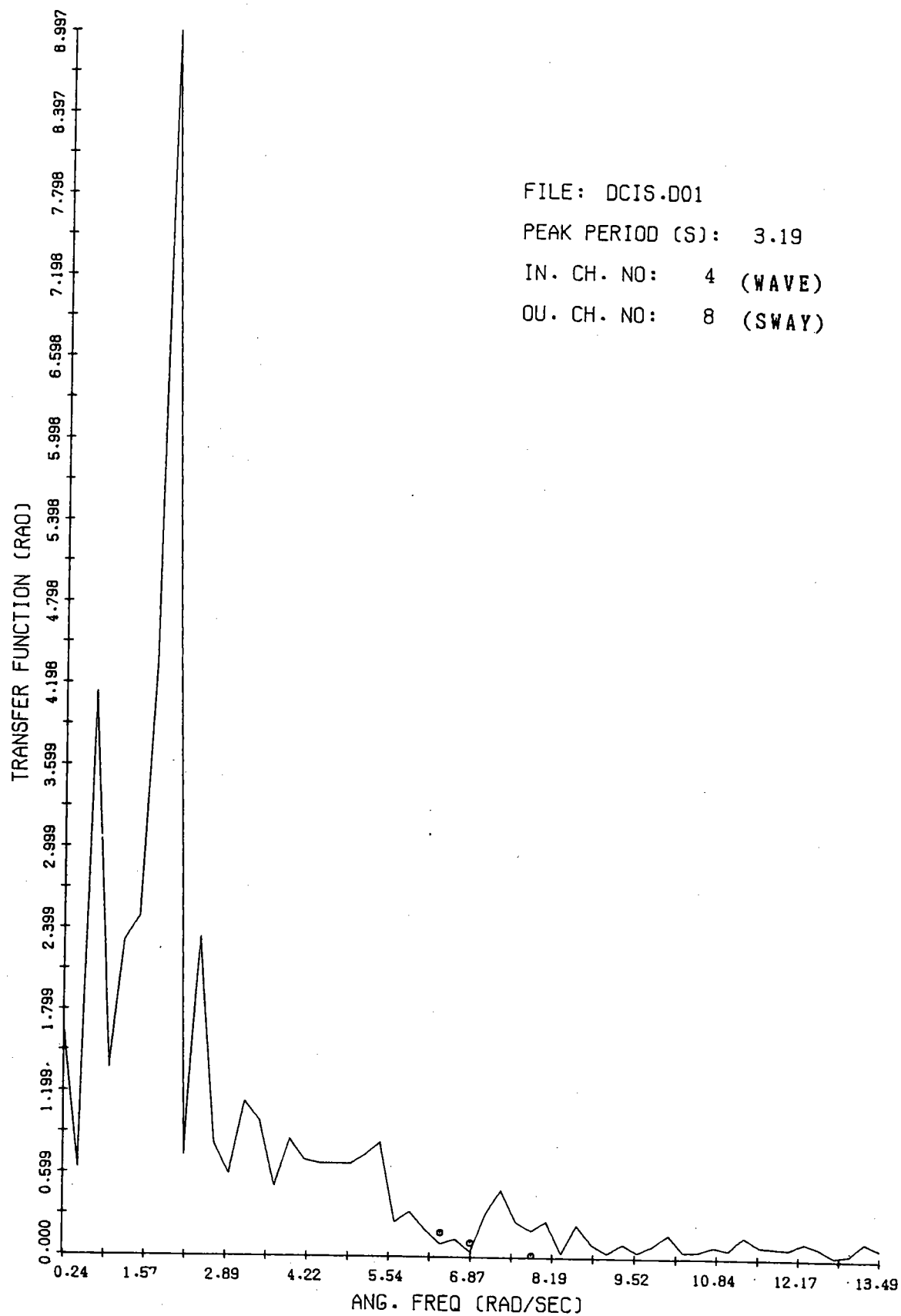


圖 7-19



FILE: DCIS.D01

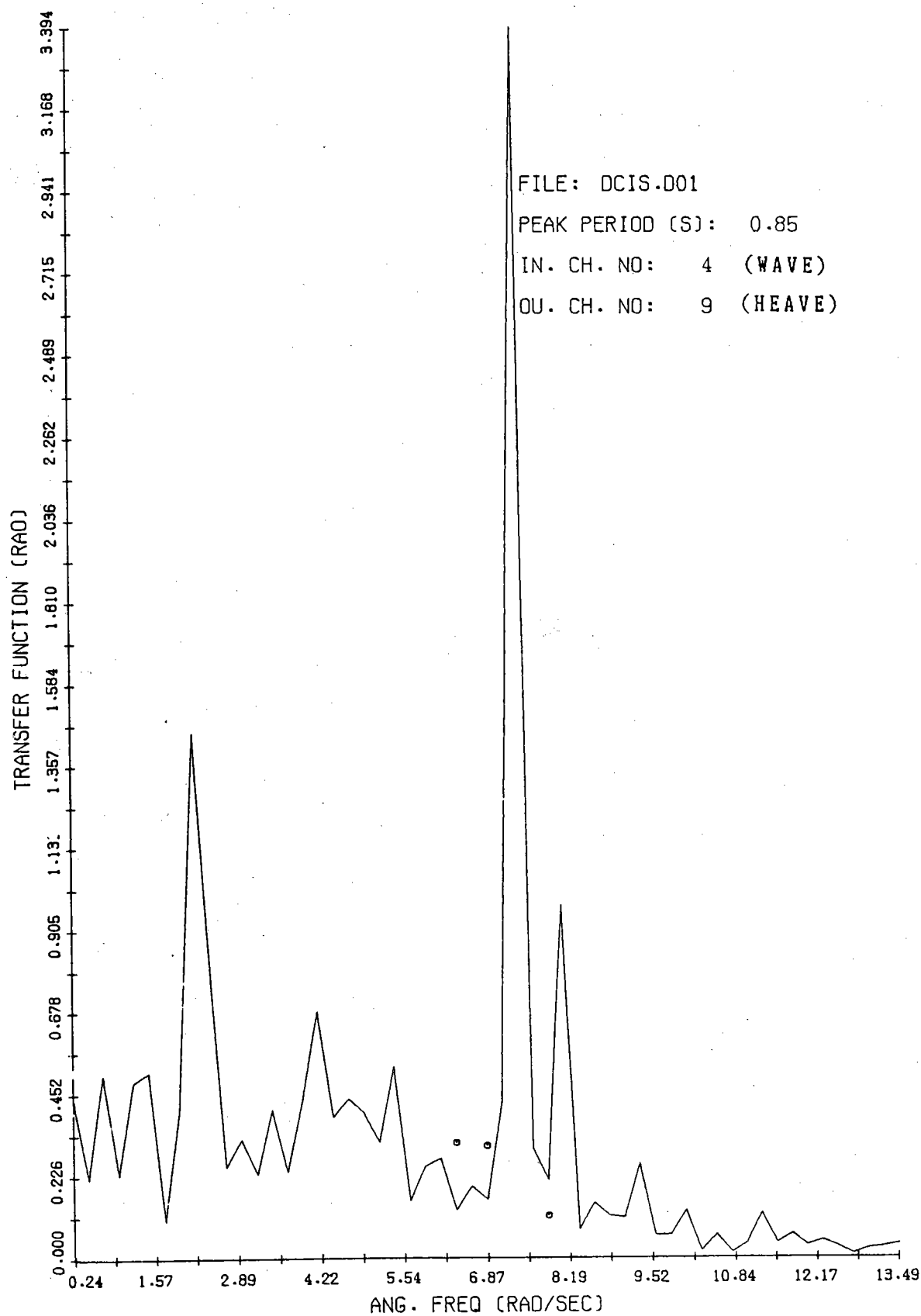
PEAK PERIOD (S): 3.19

IN. CH. NO: 4 (WAVE)

OU. CH. NO: 8 (SWAY)

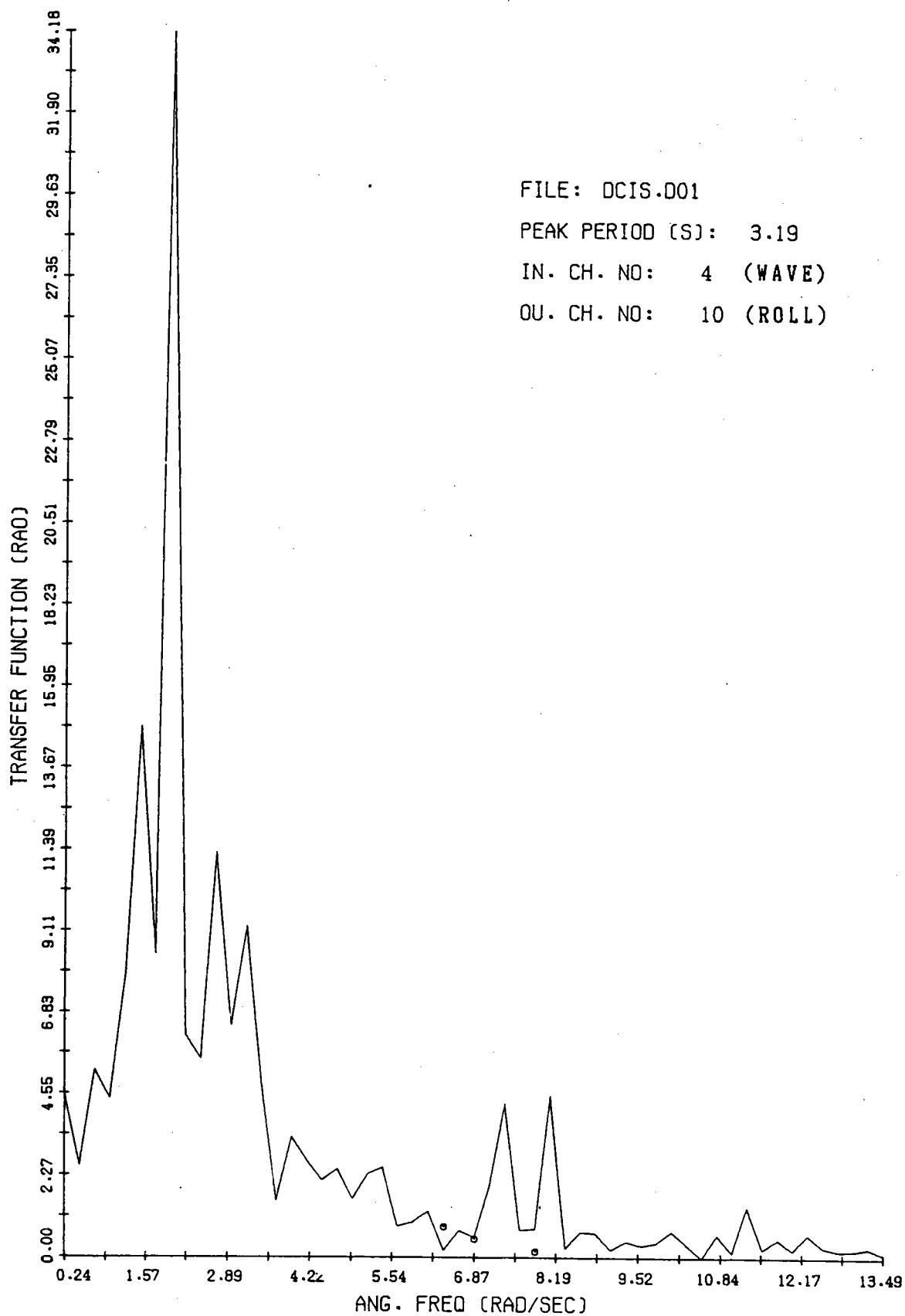
7-20

~ 70 ~



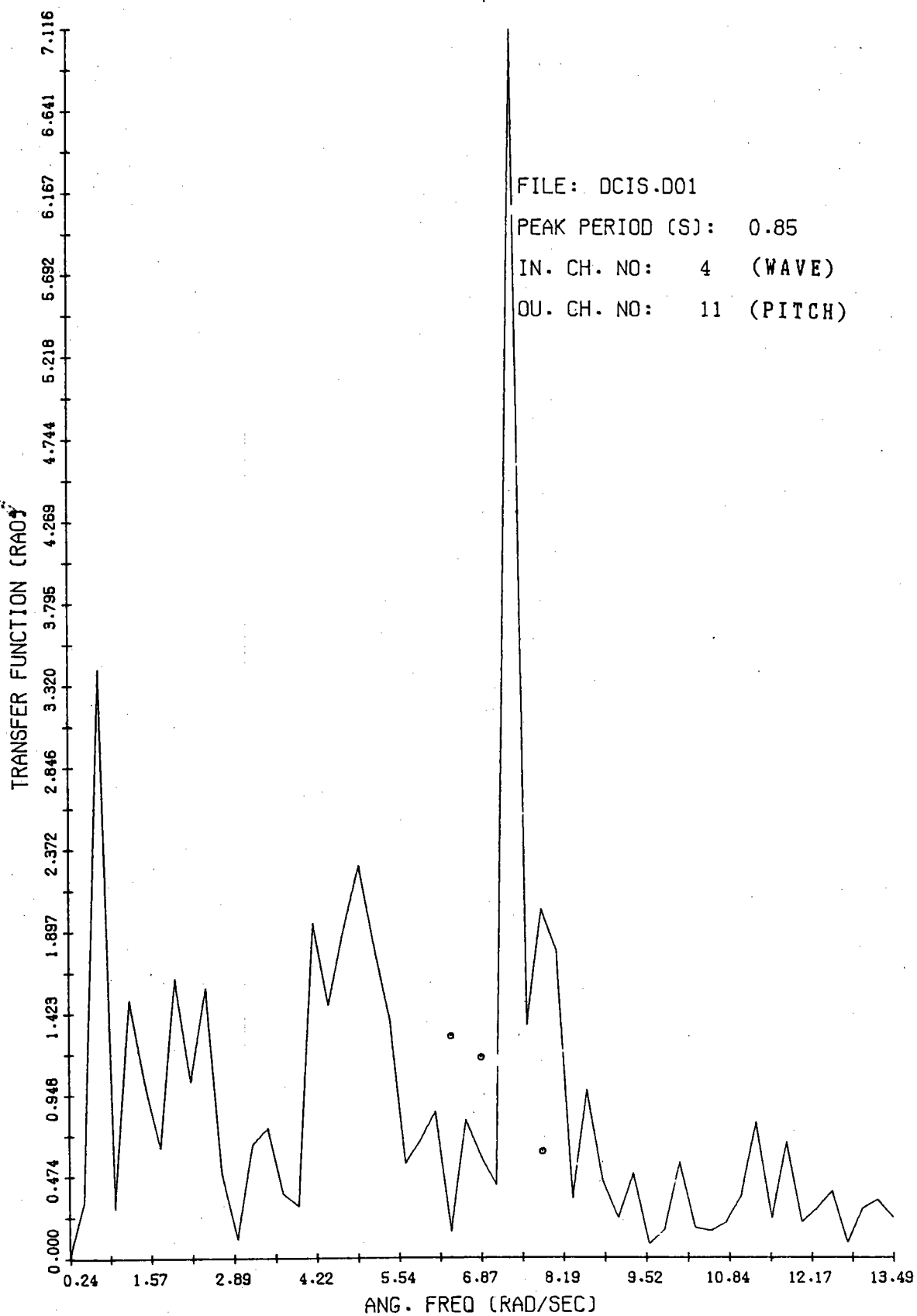
7-21

~ 71 ~



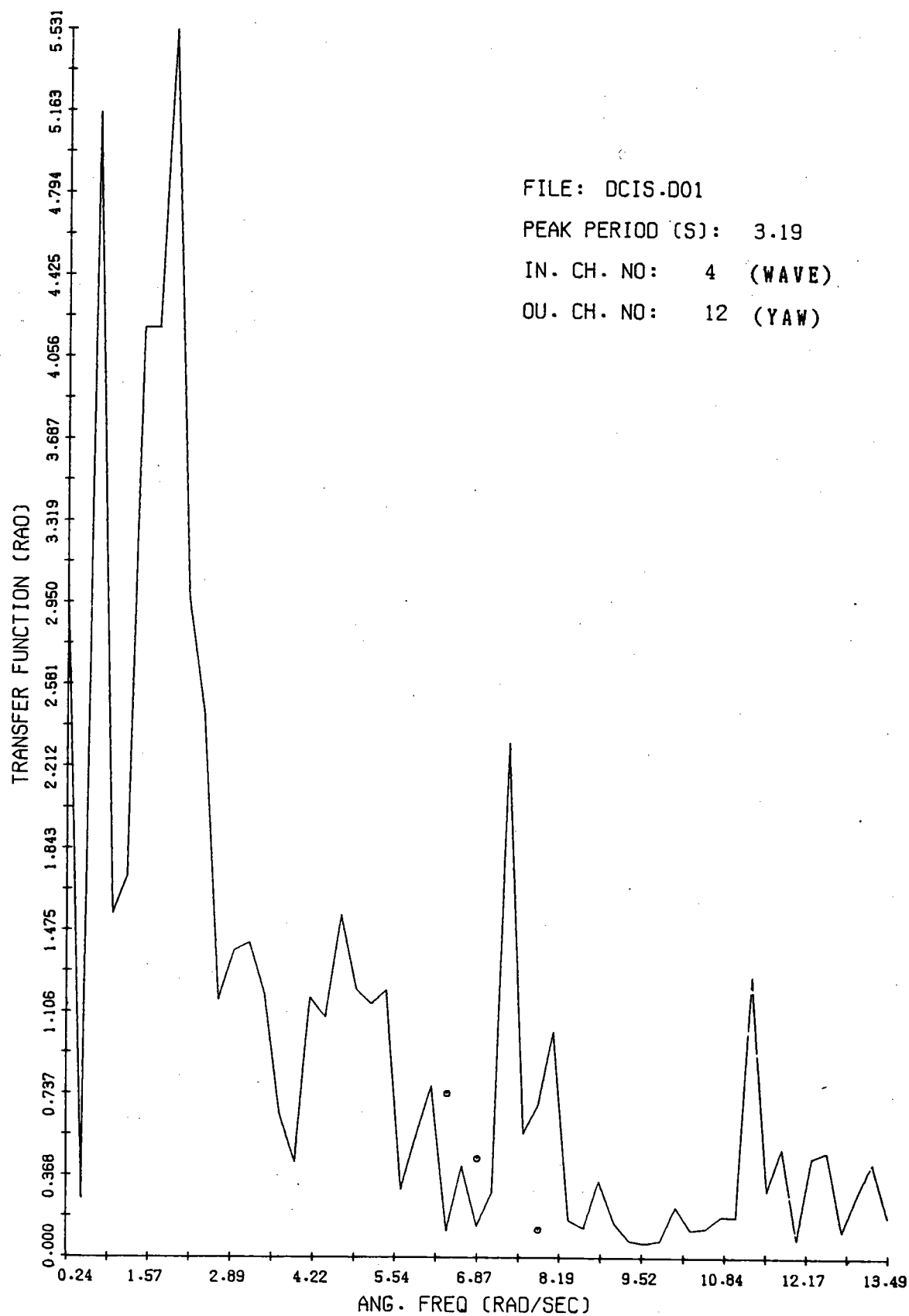
7-22

~ 72 ~



7-23

~ 73 ~



7-24

~ 74 ~

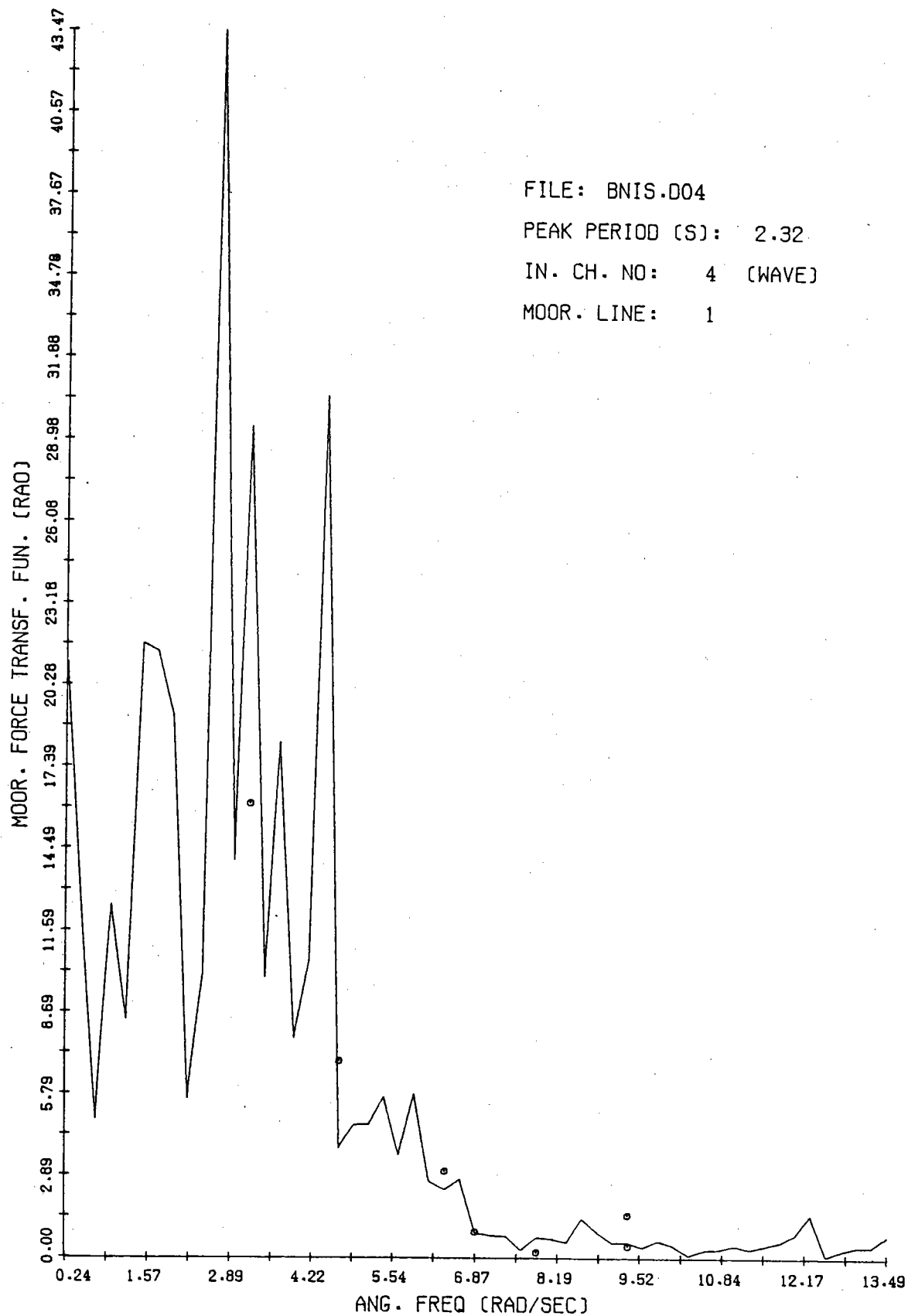
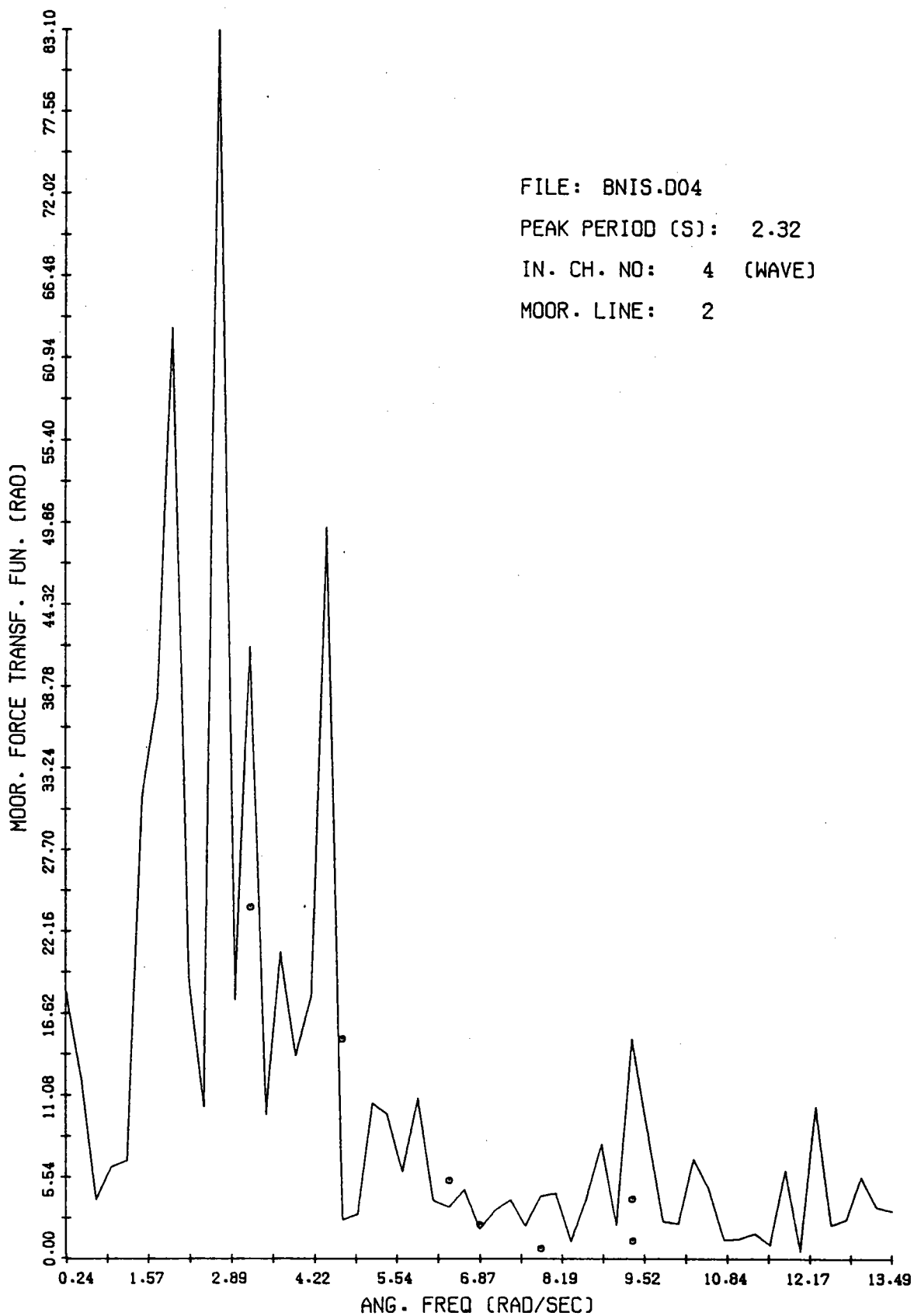


圖 7-25

~ 75 ~



7-26

~ 76 ~

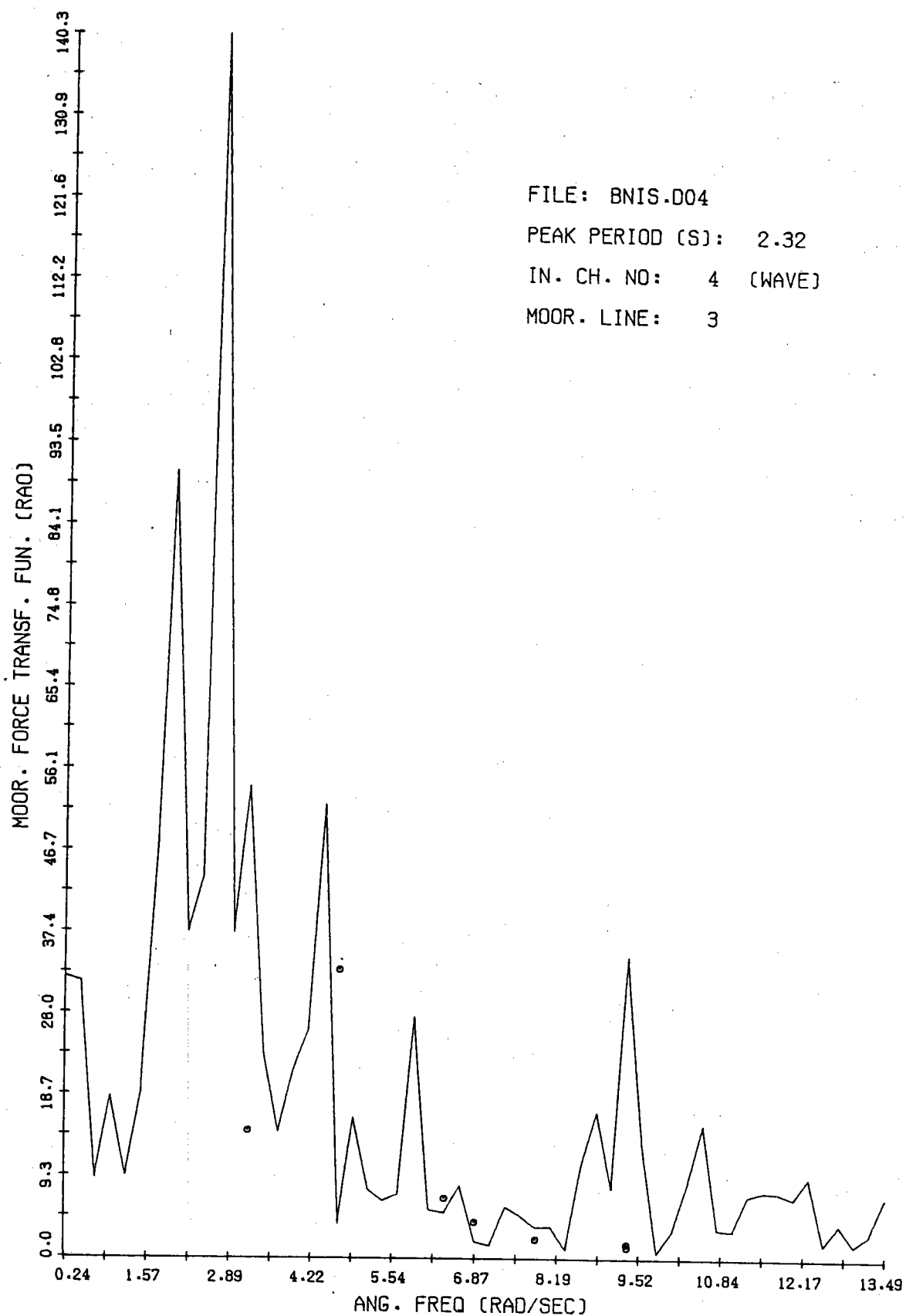
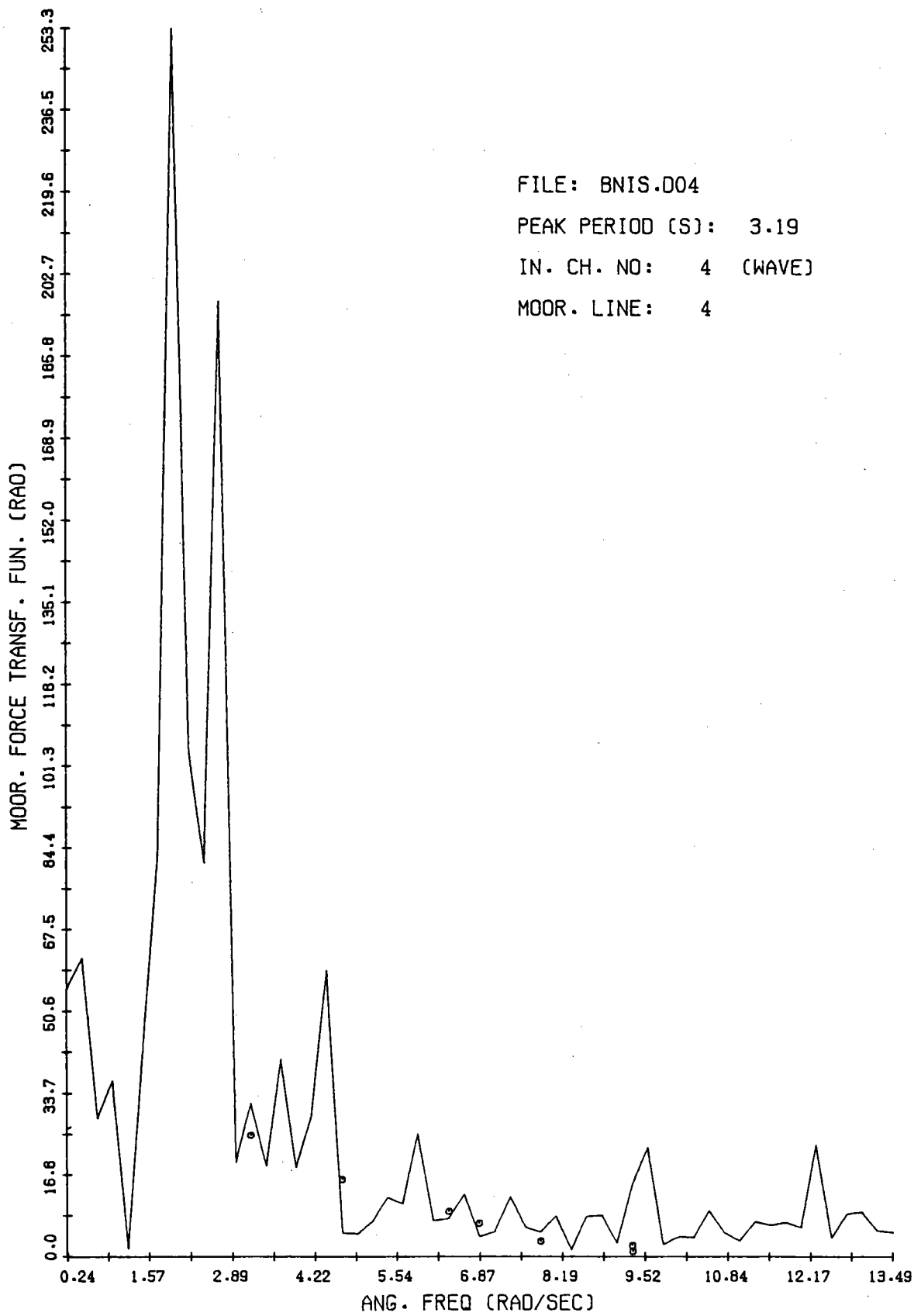


图 7-27

~ 77 ~



7-28

~ 78 ~

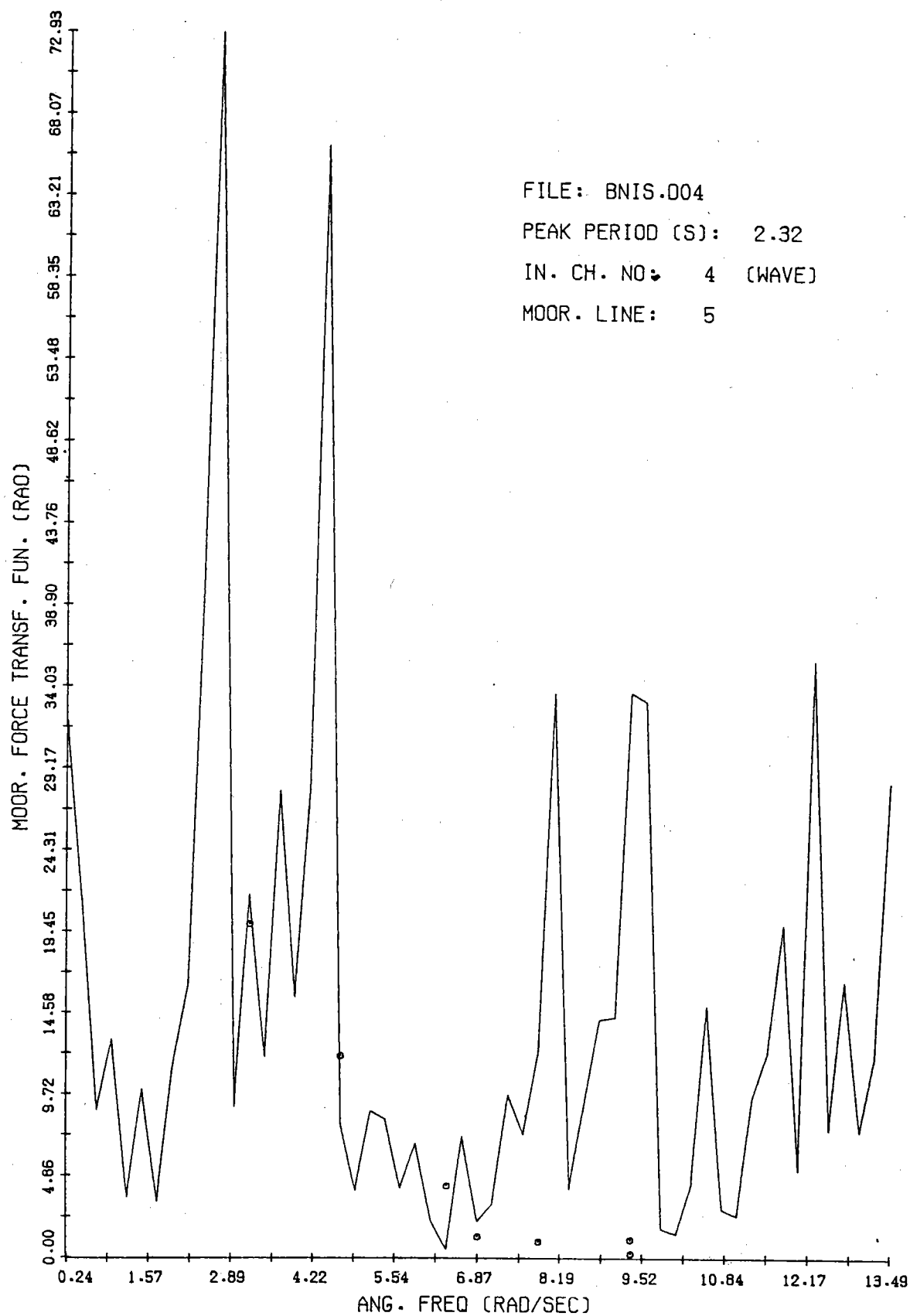
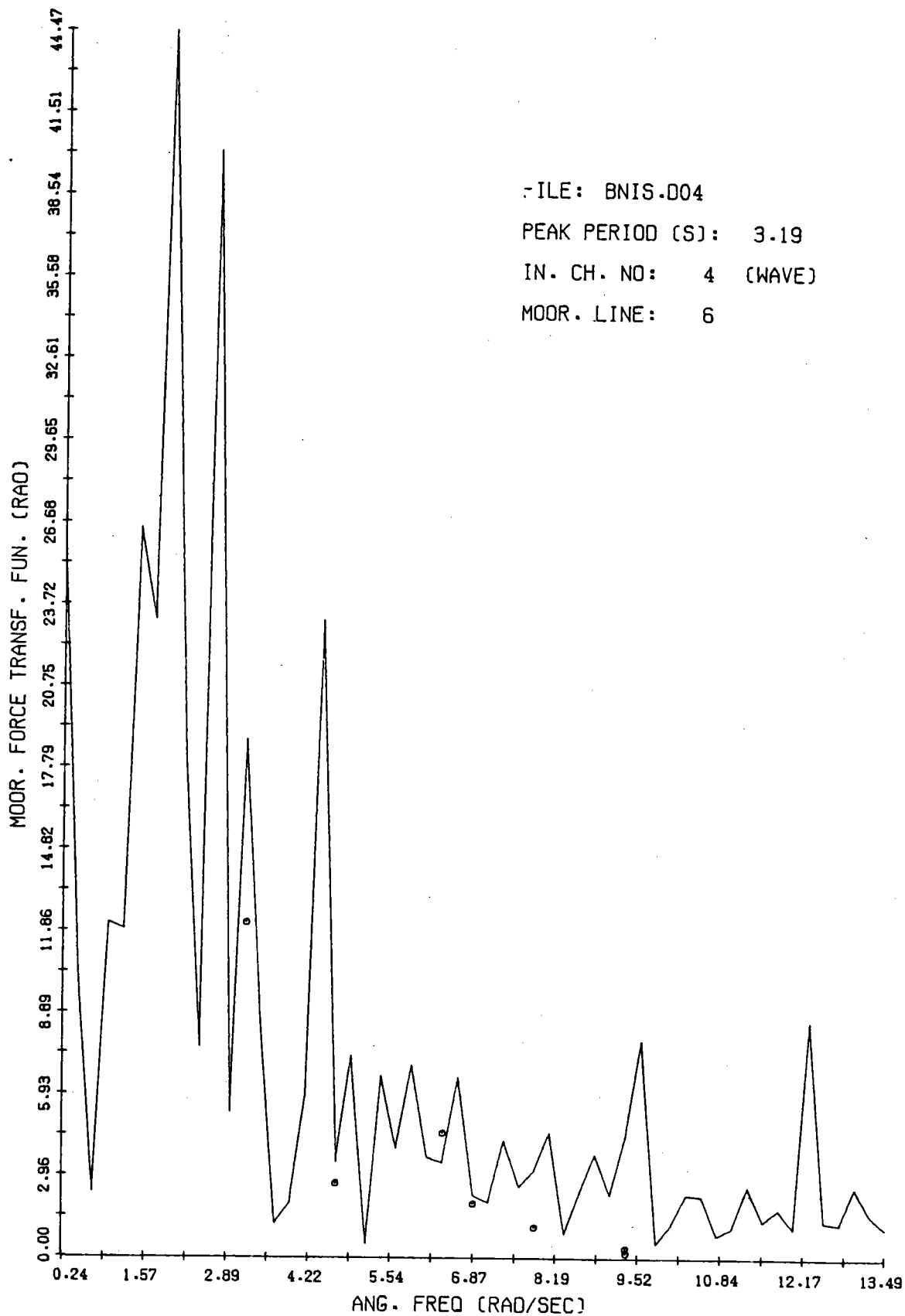
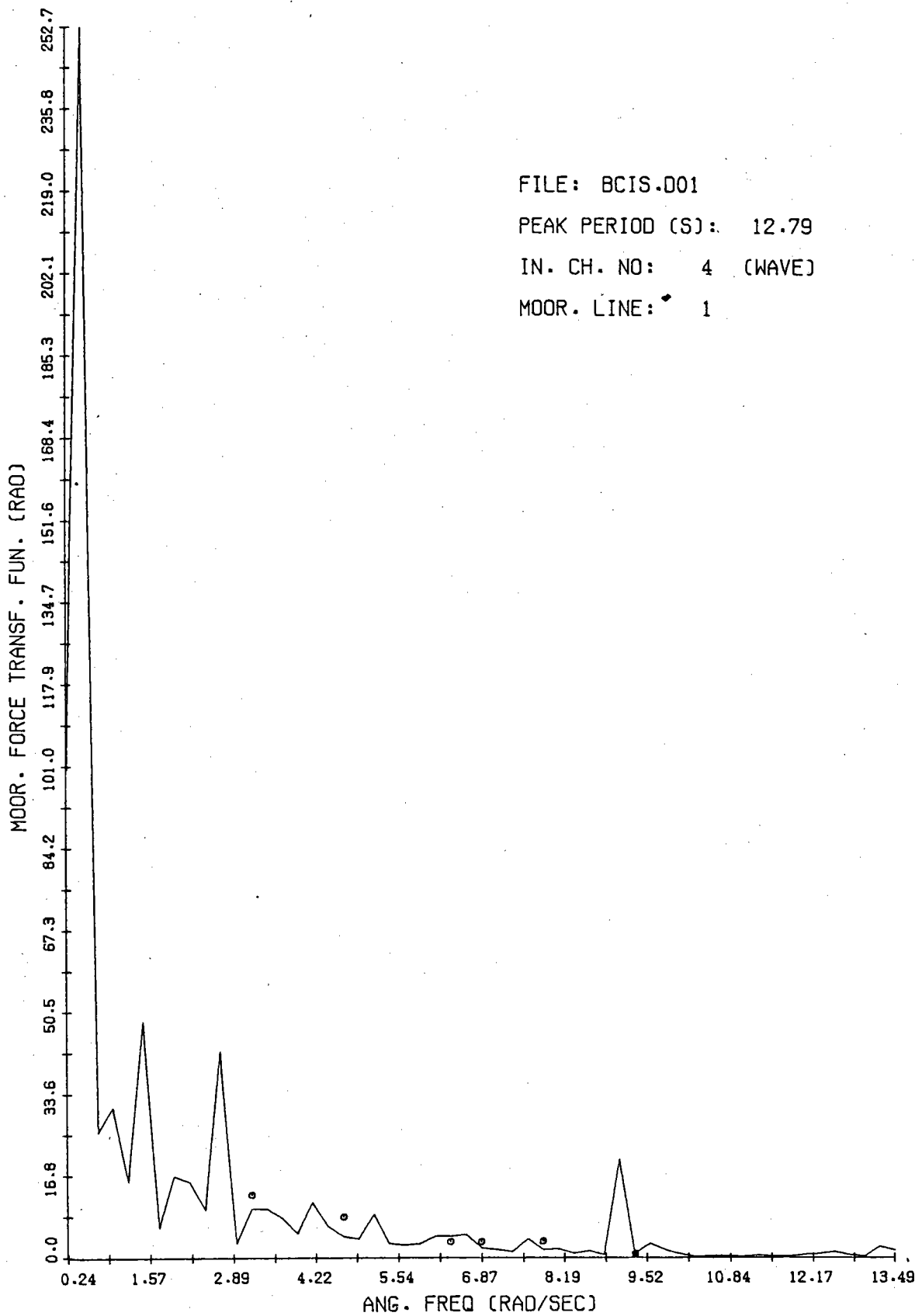


圖 7-29



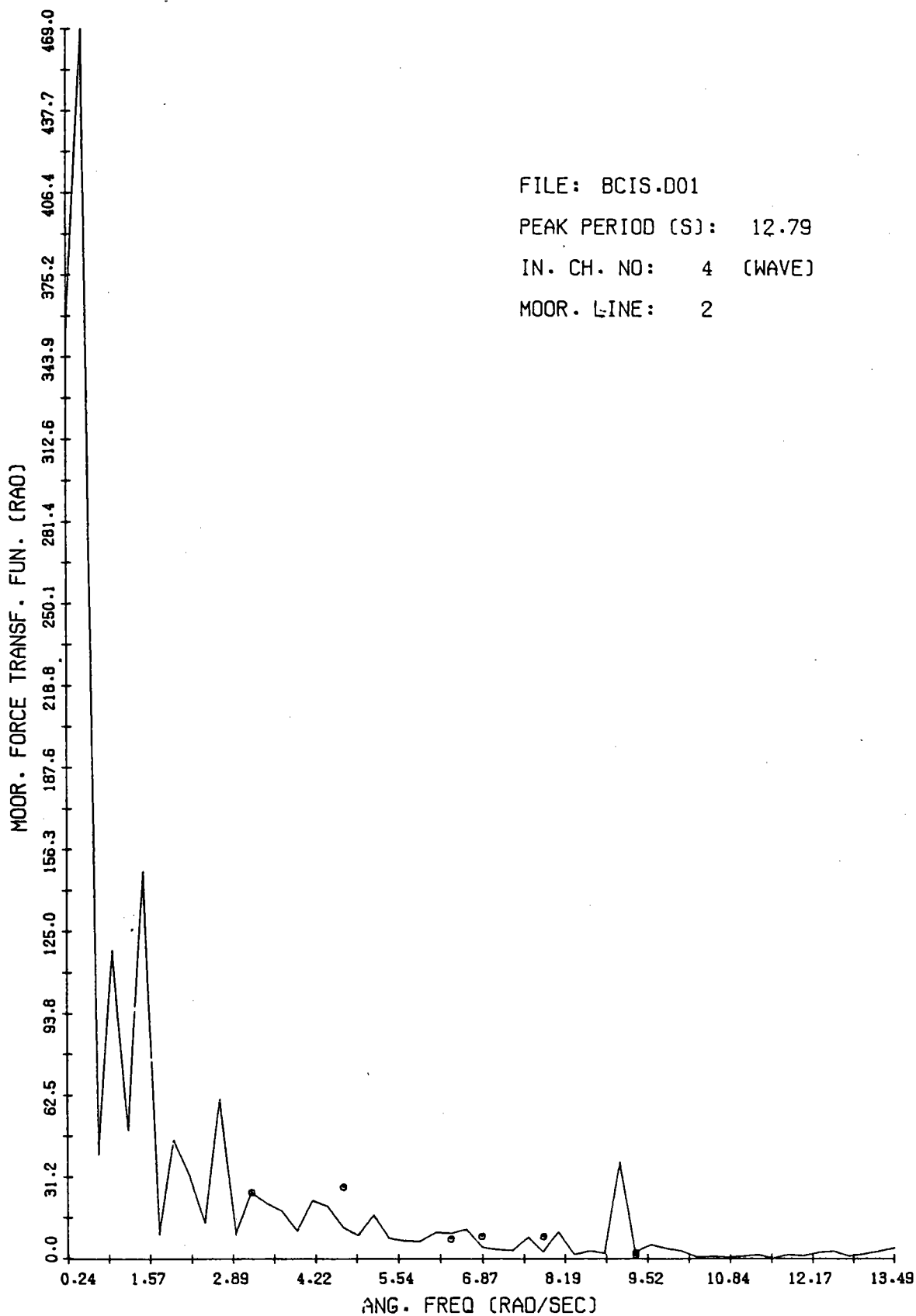
7-30

~ 80 ~



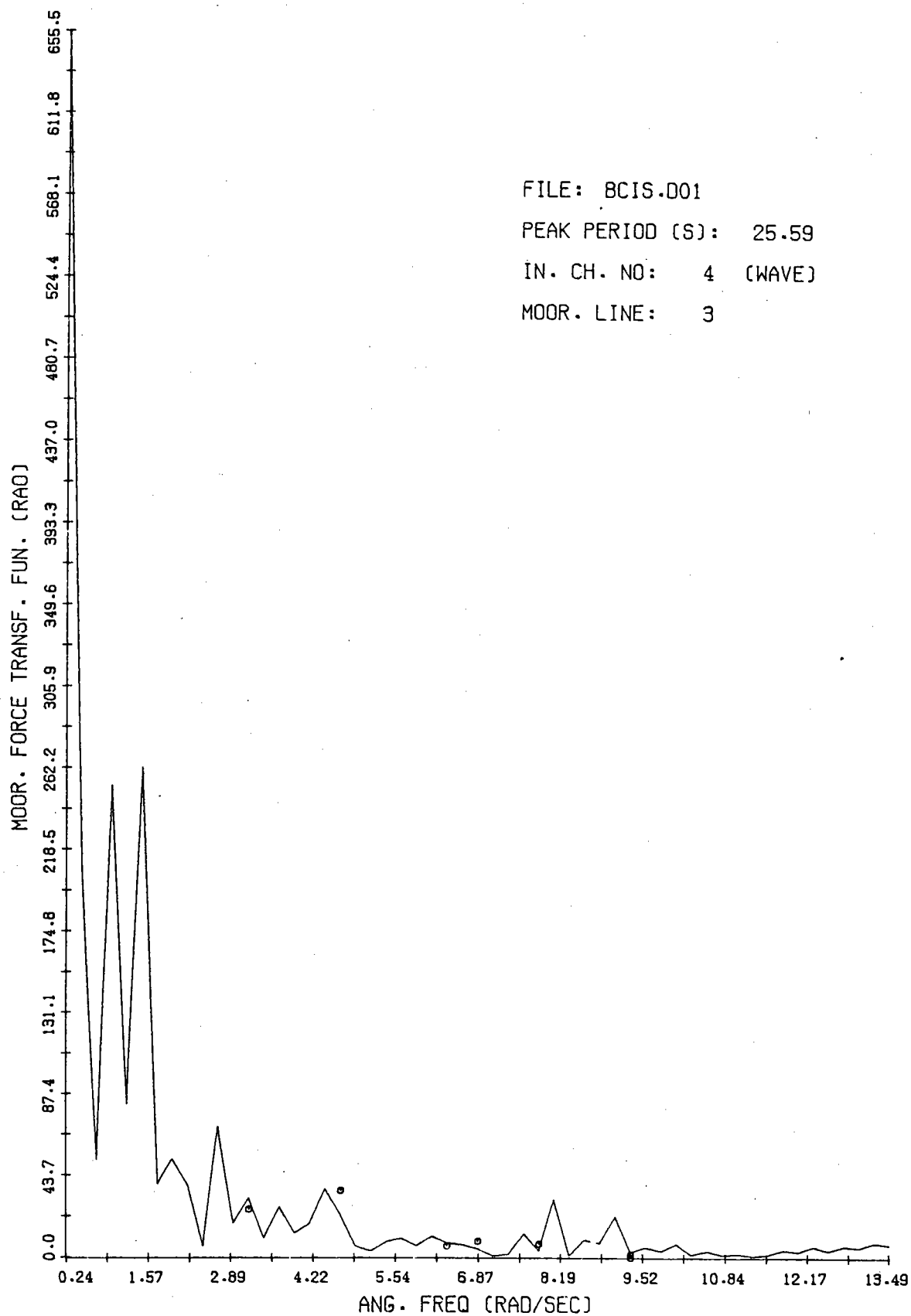
7-31

~ 81 ~



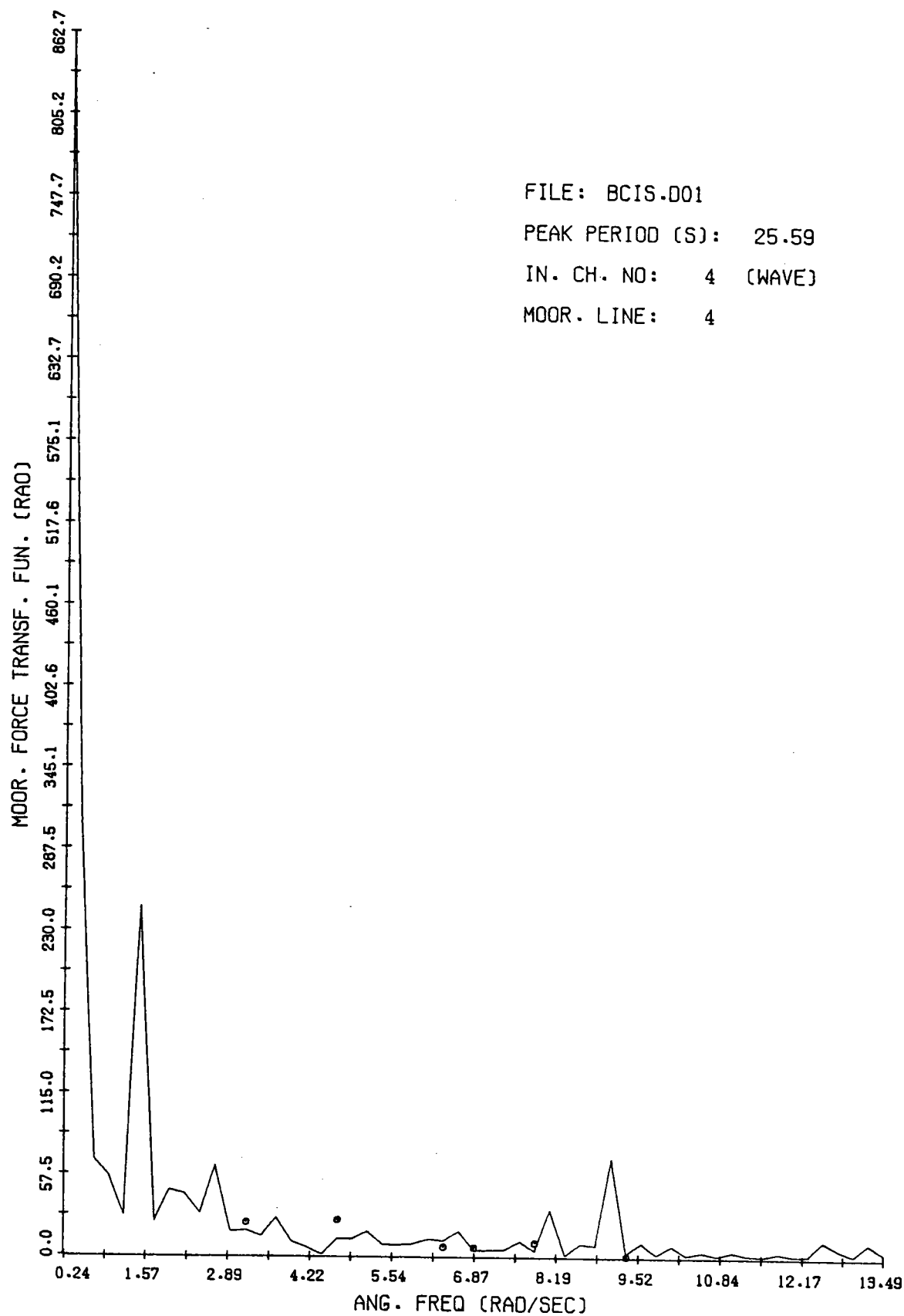
7-32

~ 82 ~



7-33

~ 83 ~



ANG. FREQ (RAD/SEC)

图 7-34

~ 84 ~

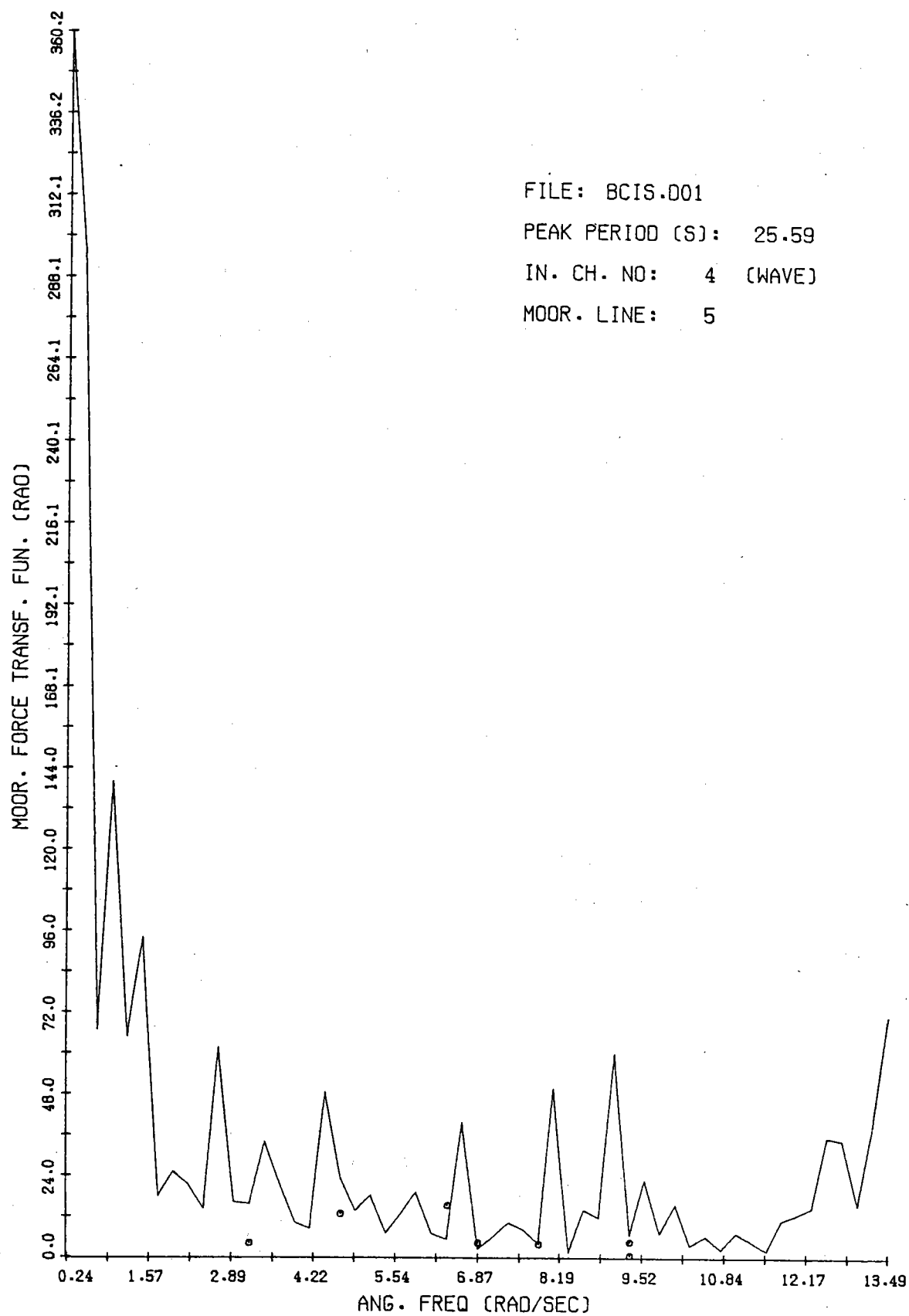
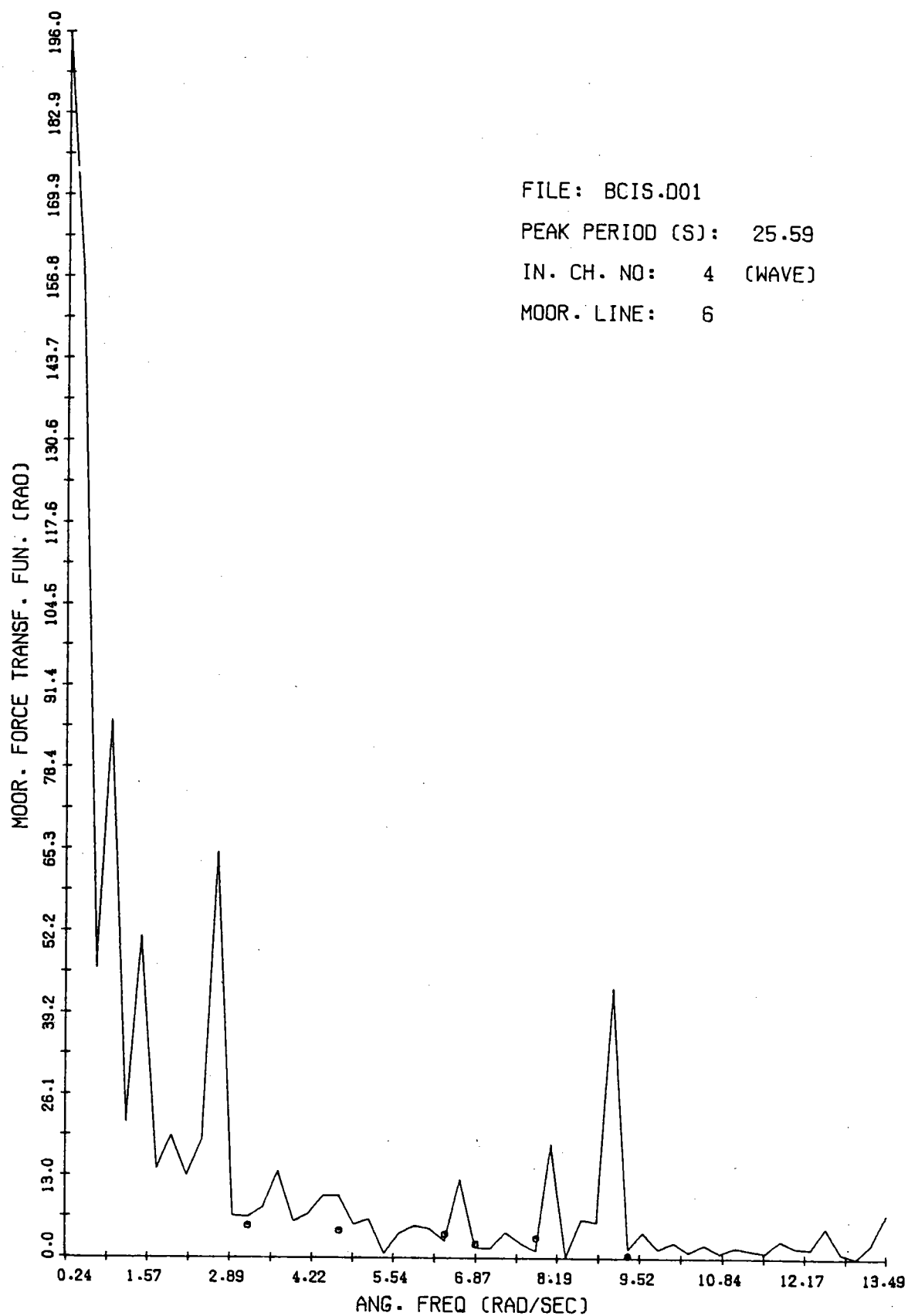


圖 7-35

~ 85 ~



7-36

~ 86 ~

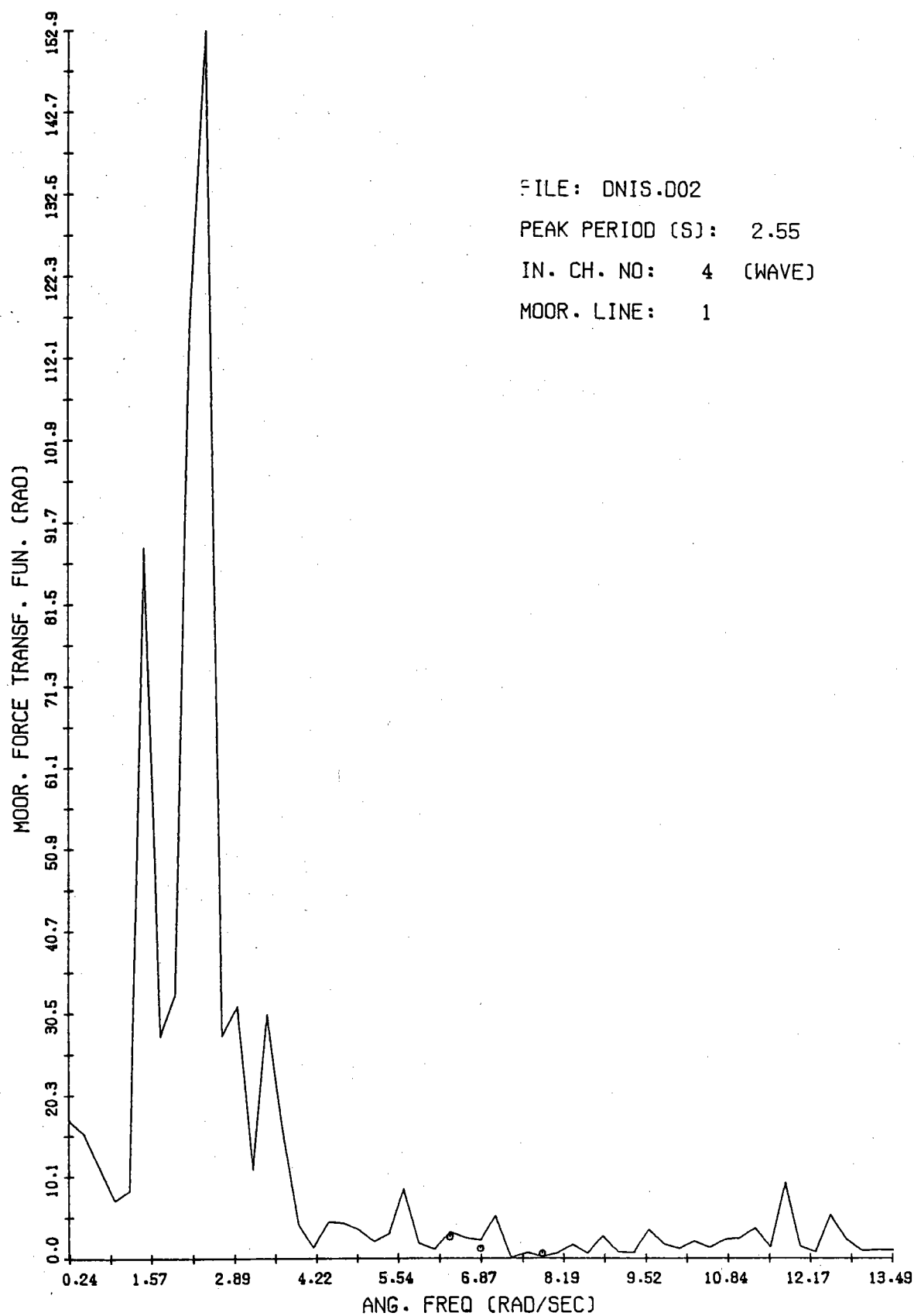
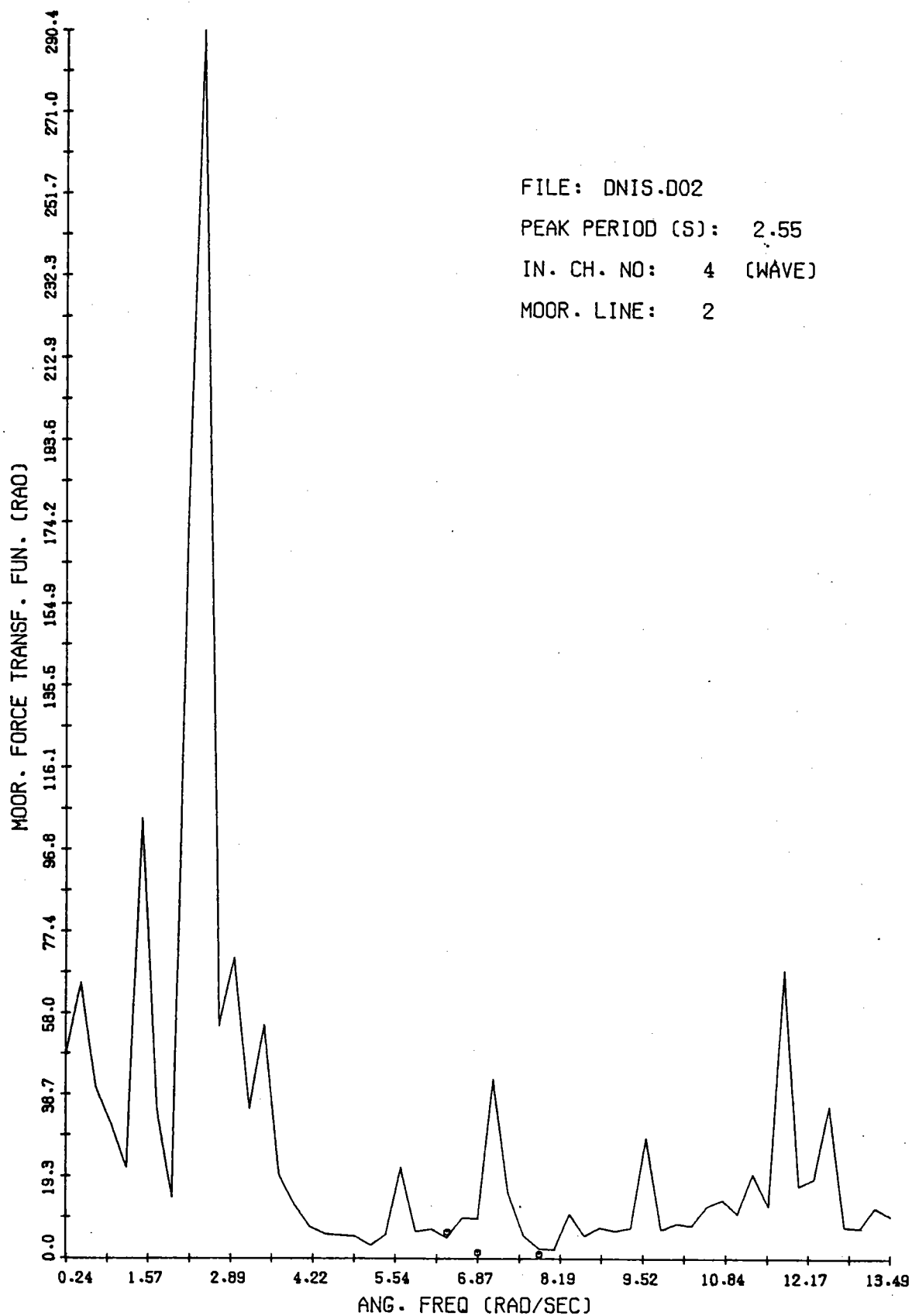


圖 7-37

~ 87 ~



7-38

~ 88 ~

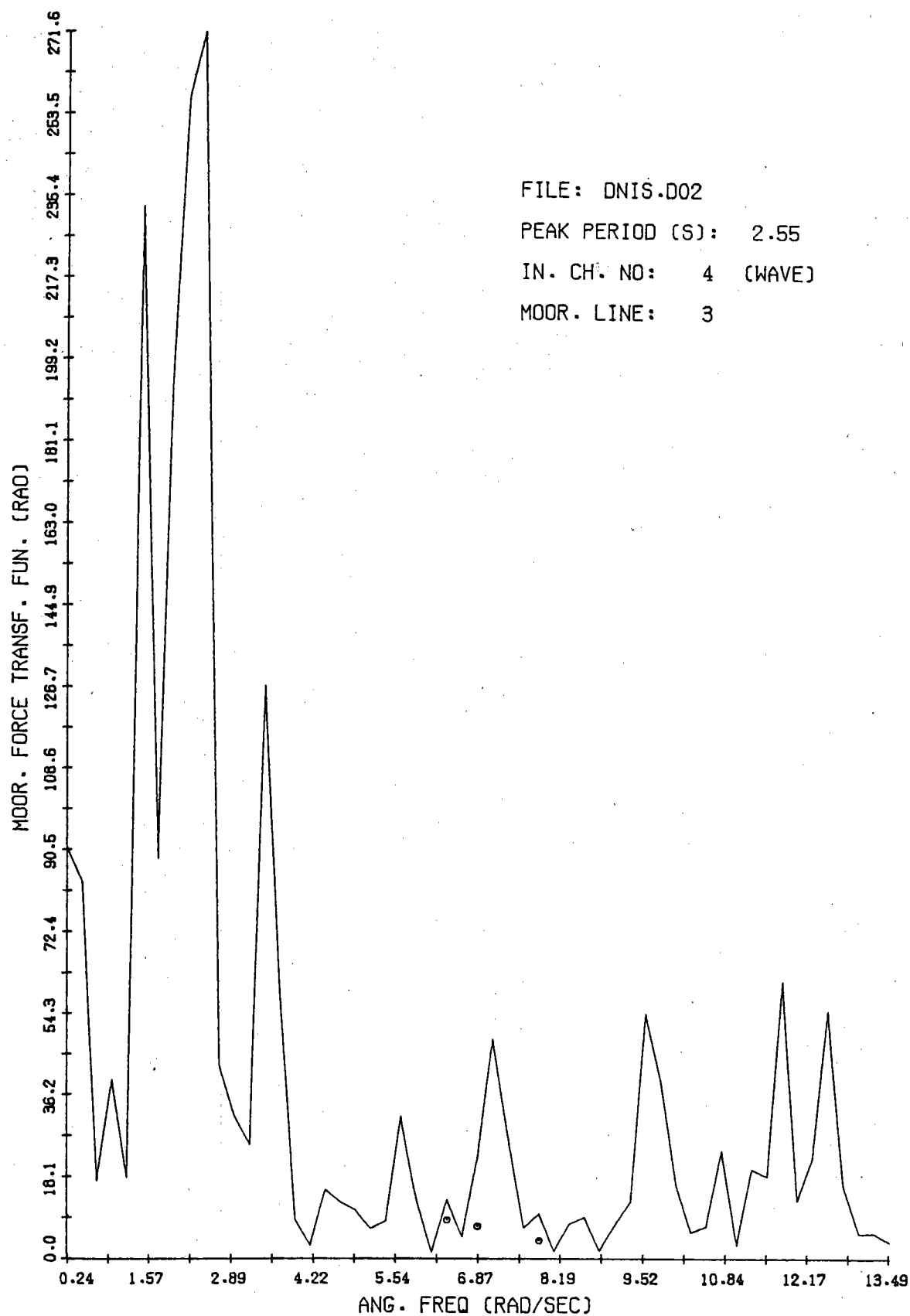
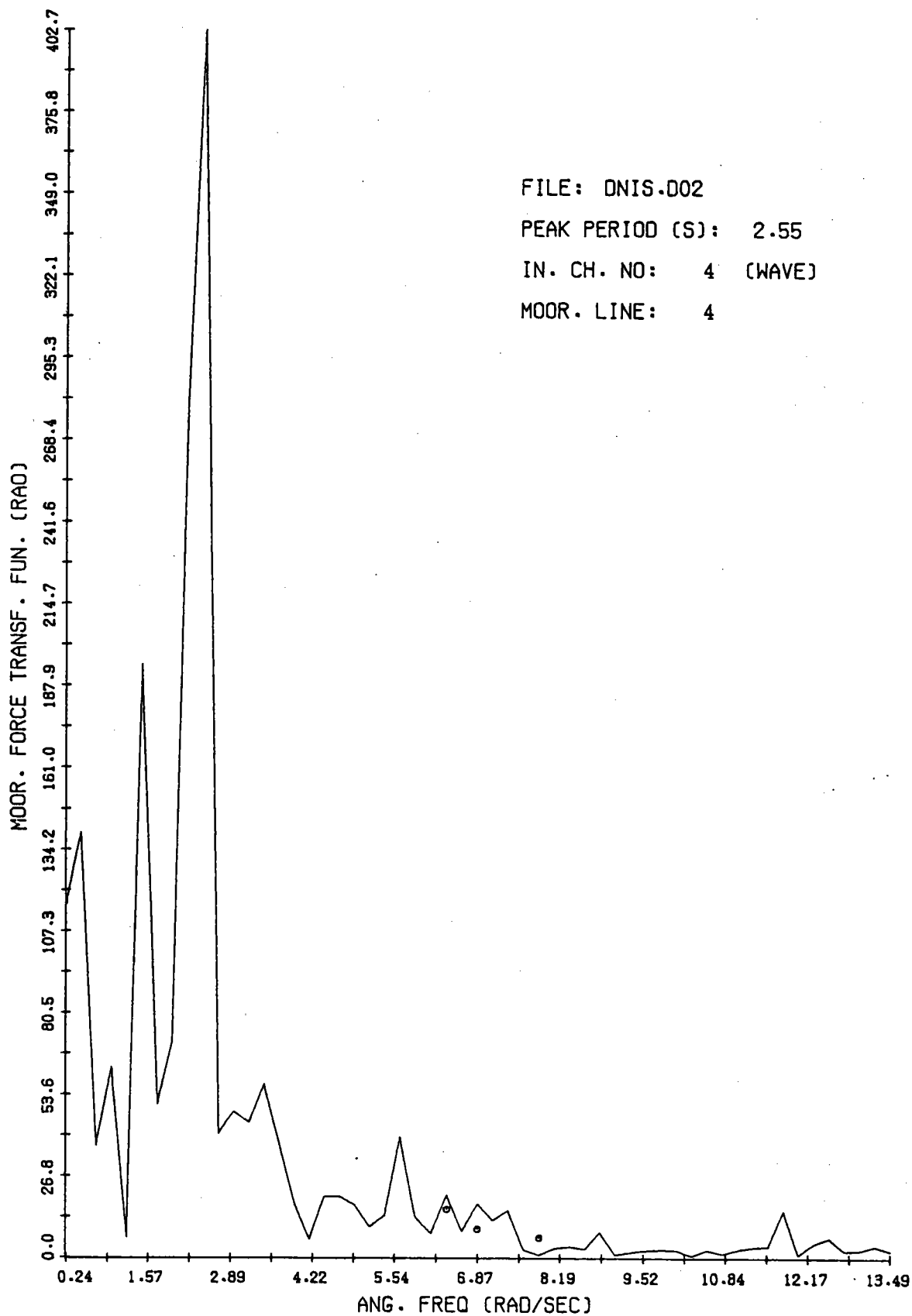


图 7-39

~ 89 ~



7-40

~ 90 ~

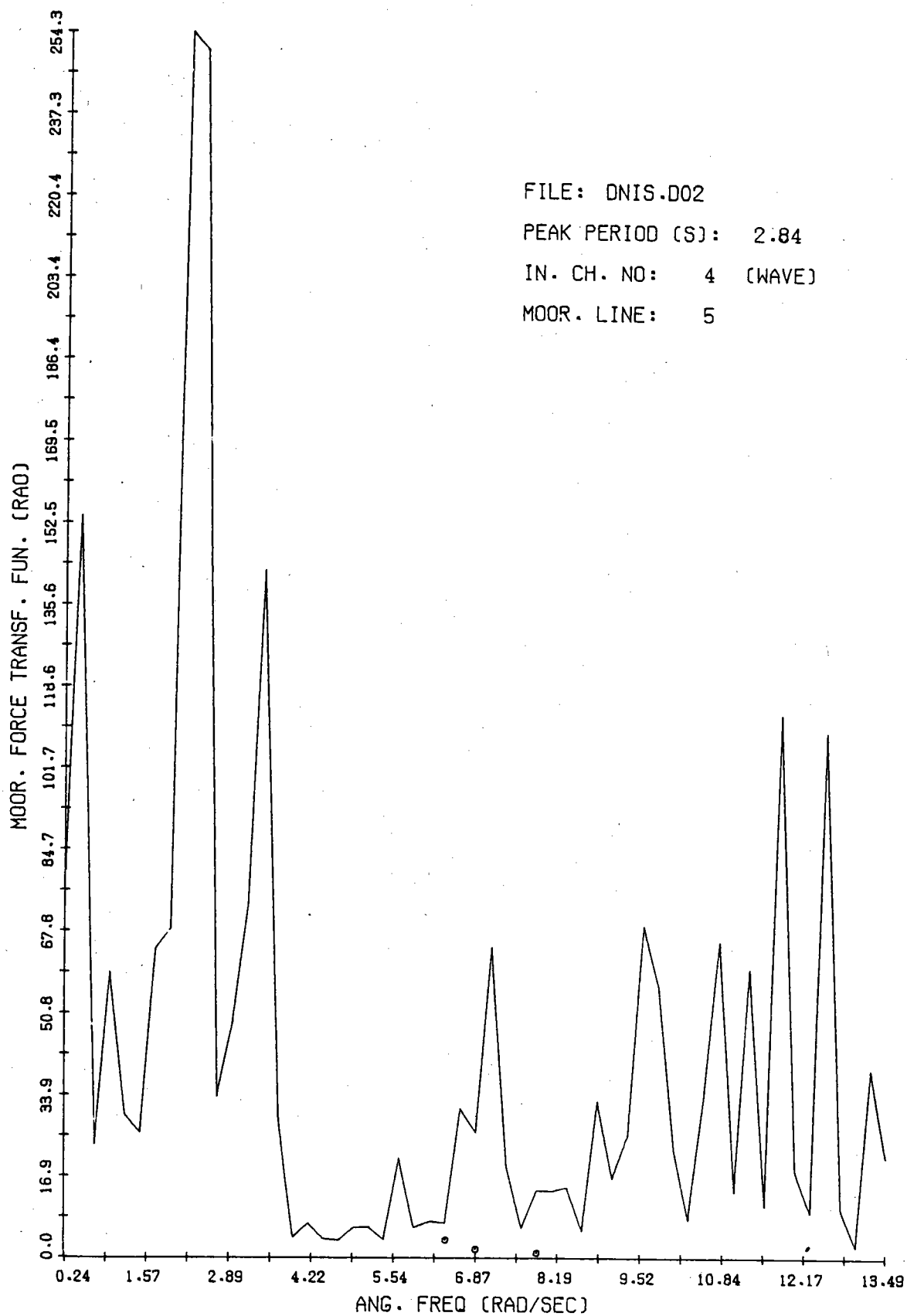
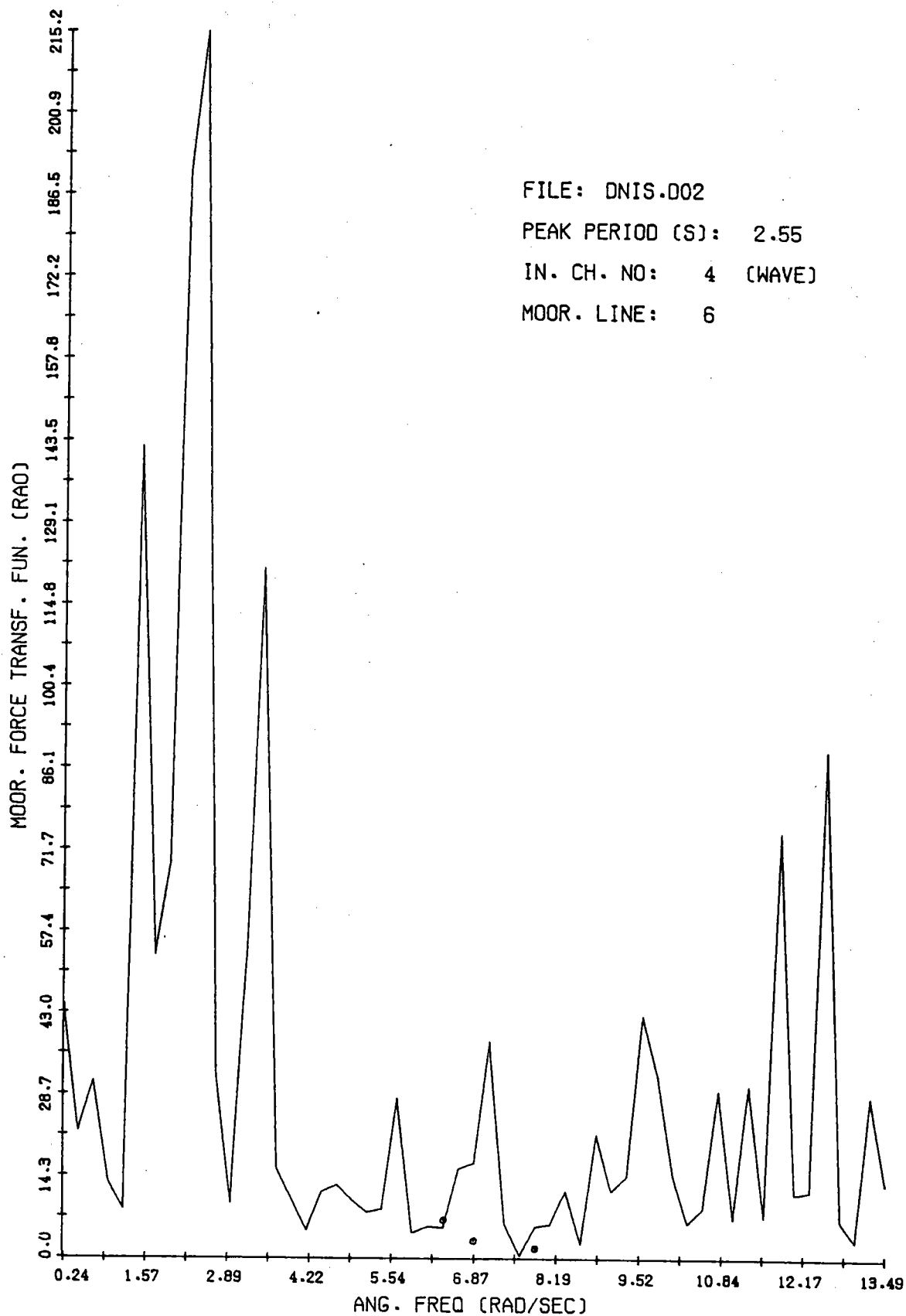


圖 7-41

~ 91 ~



7-42

~ 92 ~

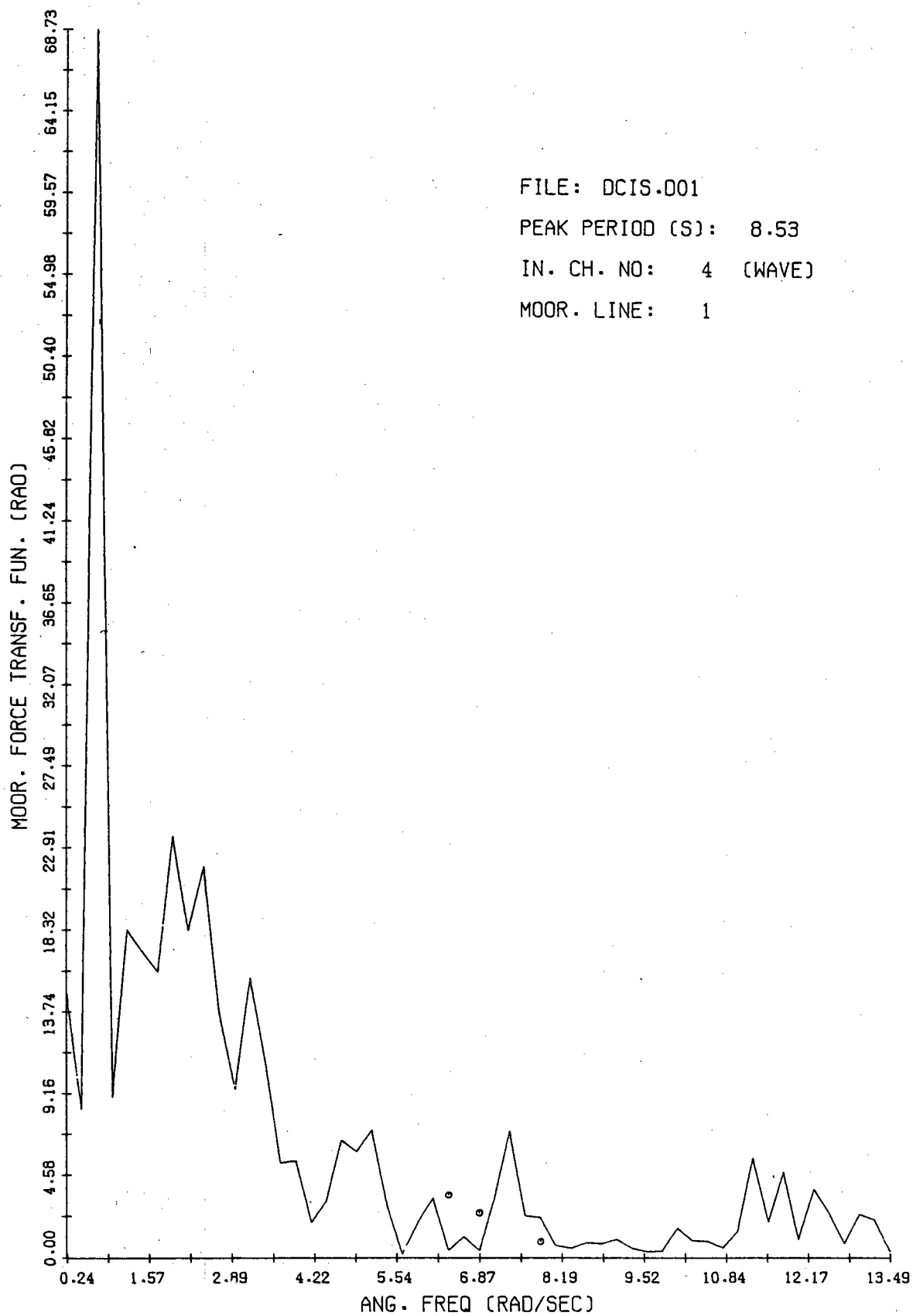
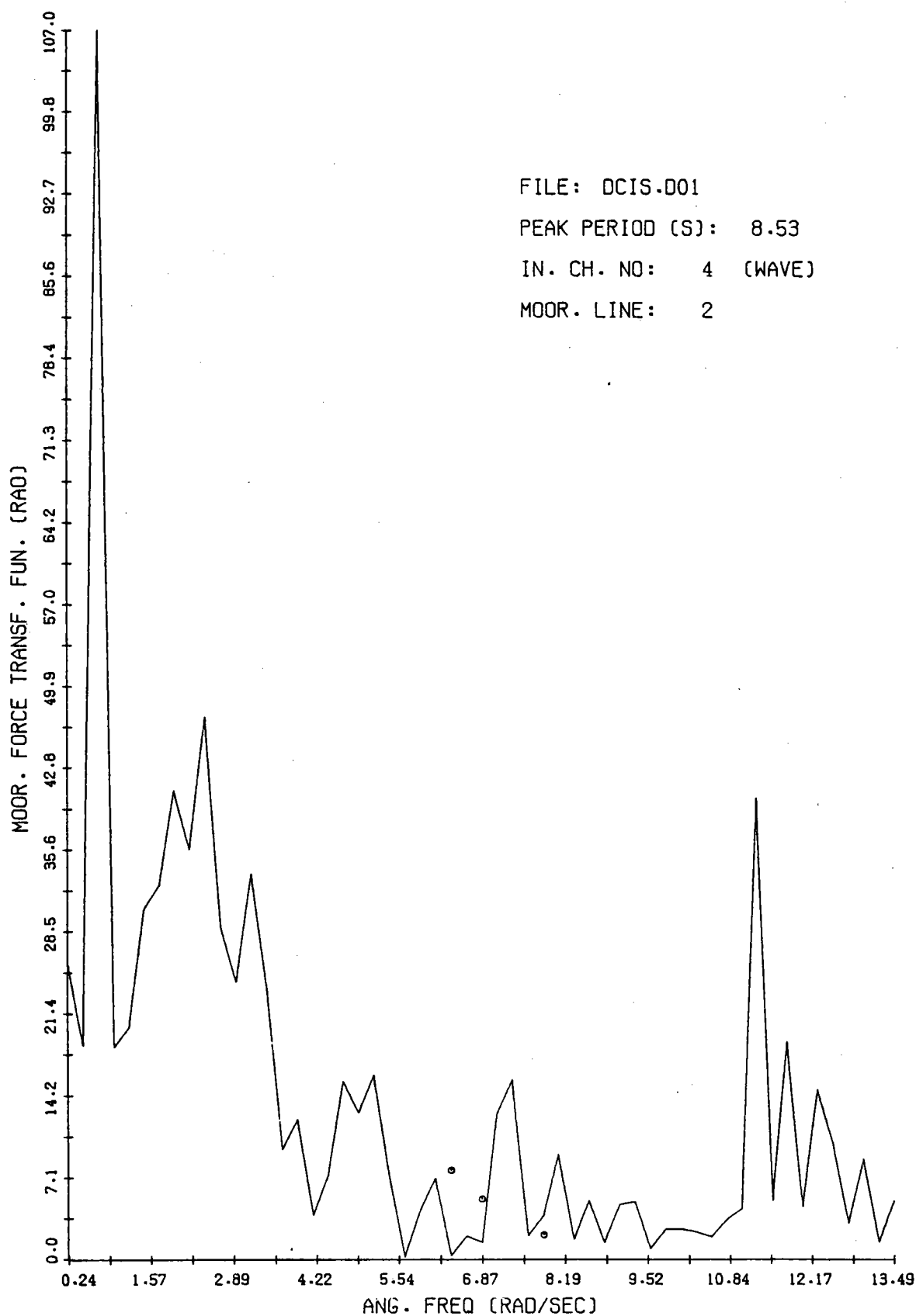
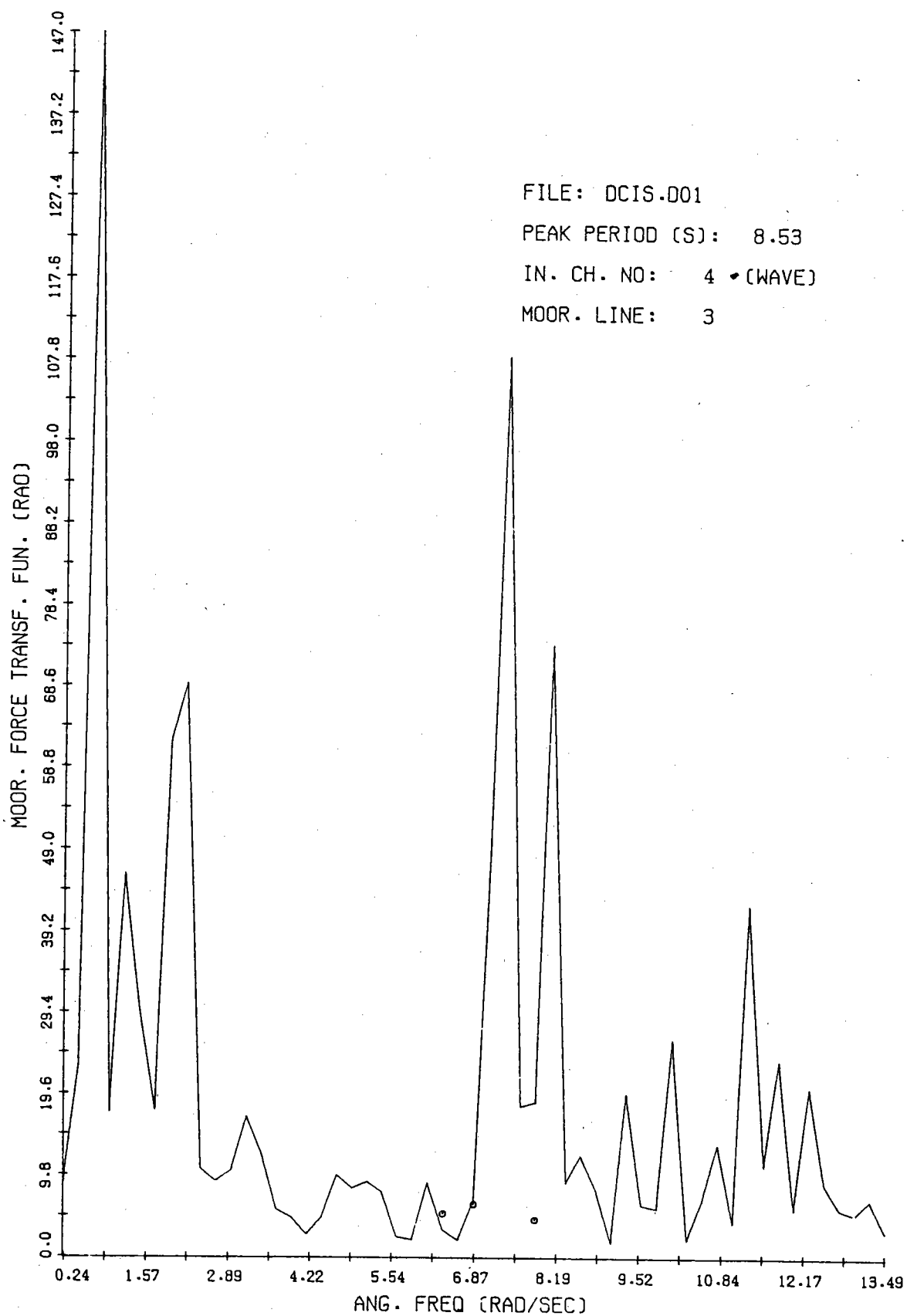


圖 7-43



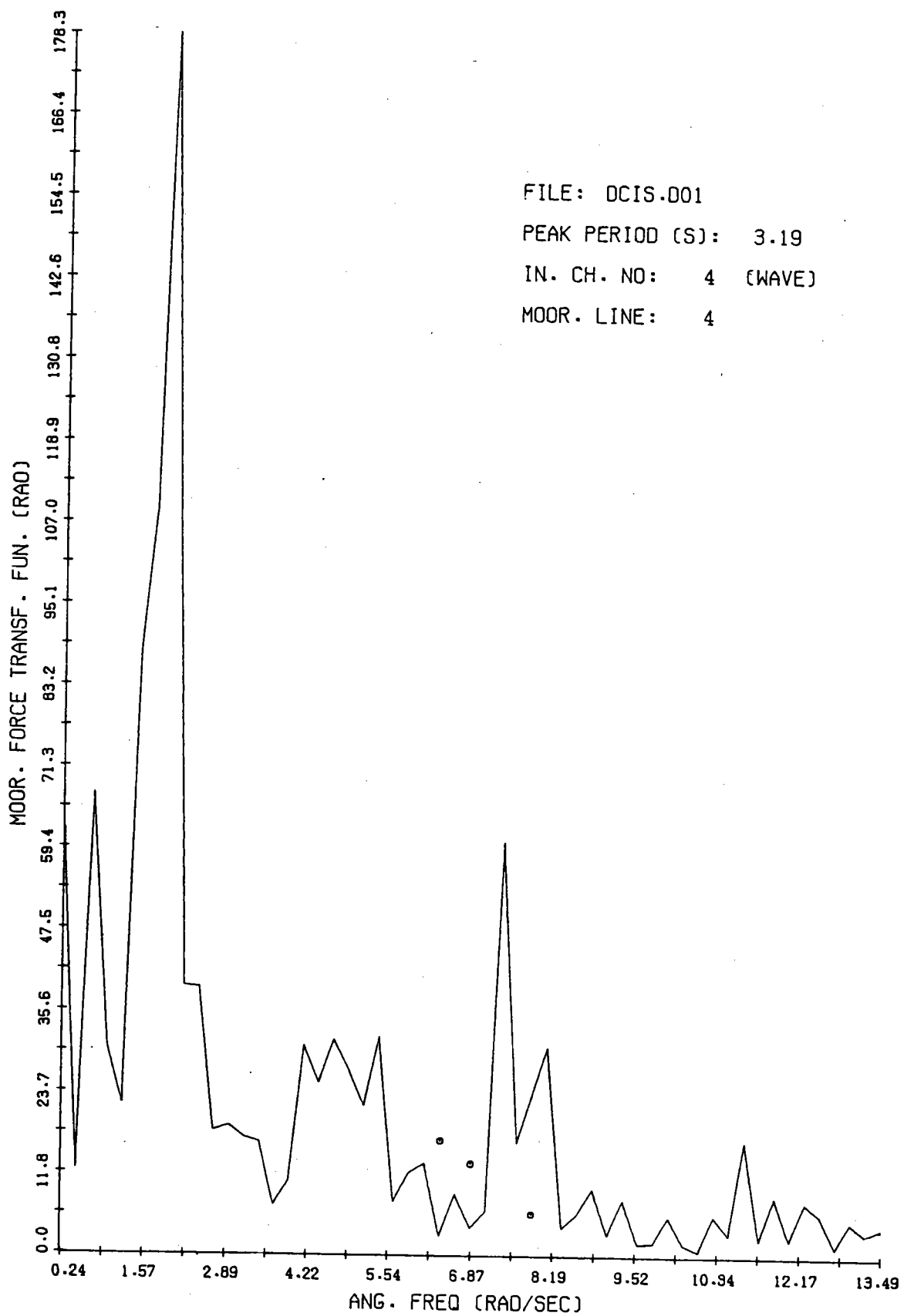
7-44

~ 94 ~



7-45

~ 95 ~



FILE: DCIS.D01

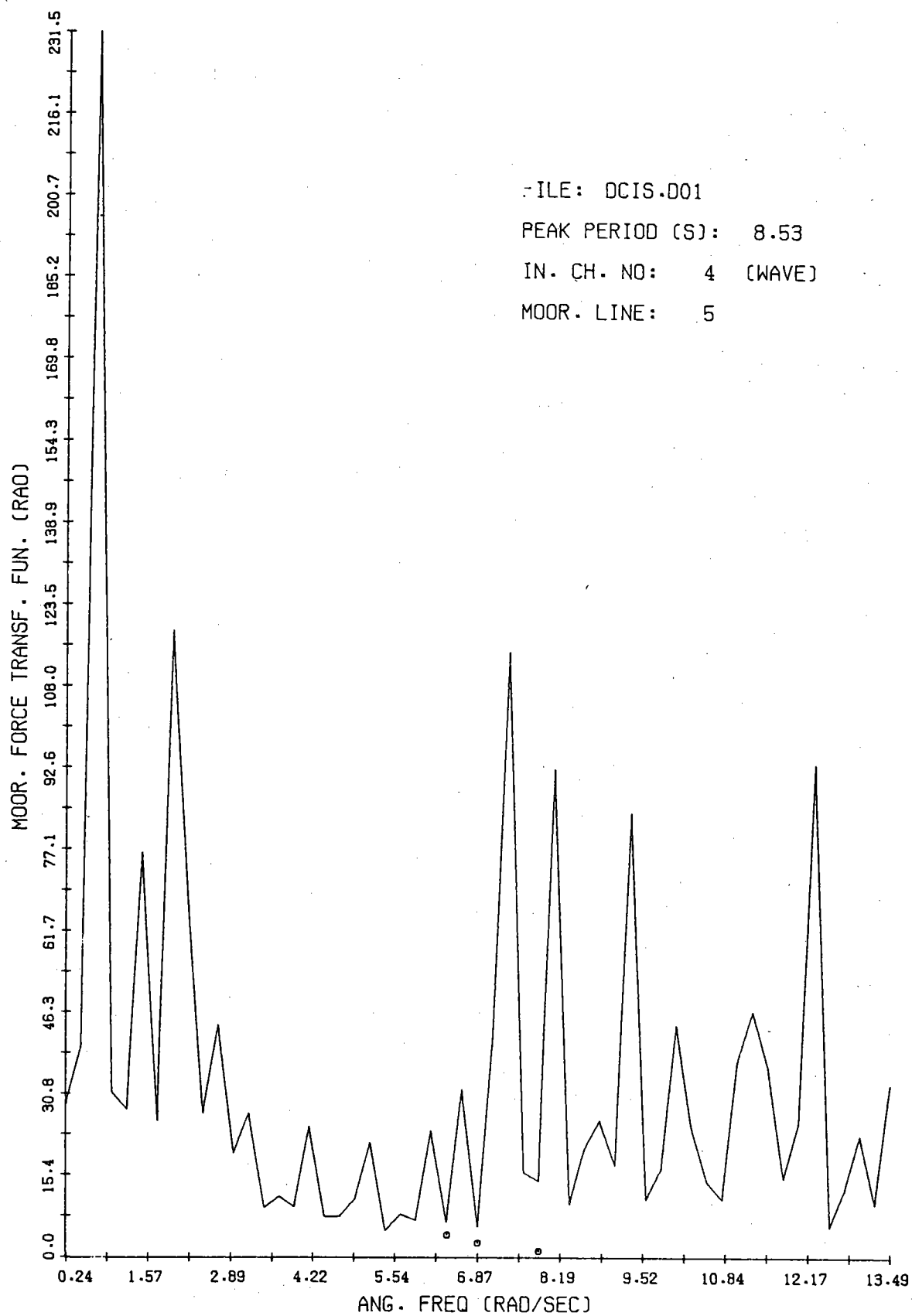
PEAK PERIOD (S): 3.19

IN. CH. NO: 4 (WAVE)

MOOR. LINE: 4

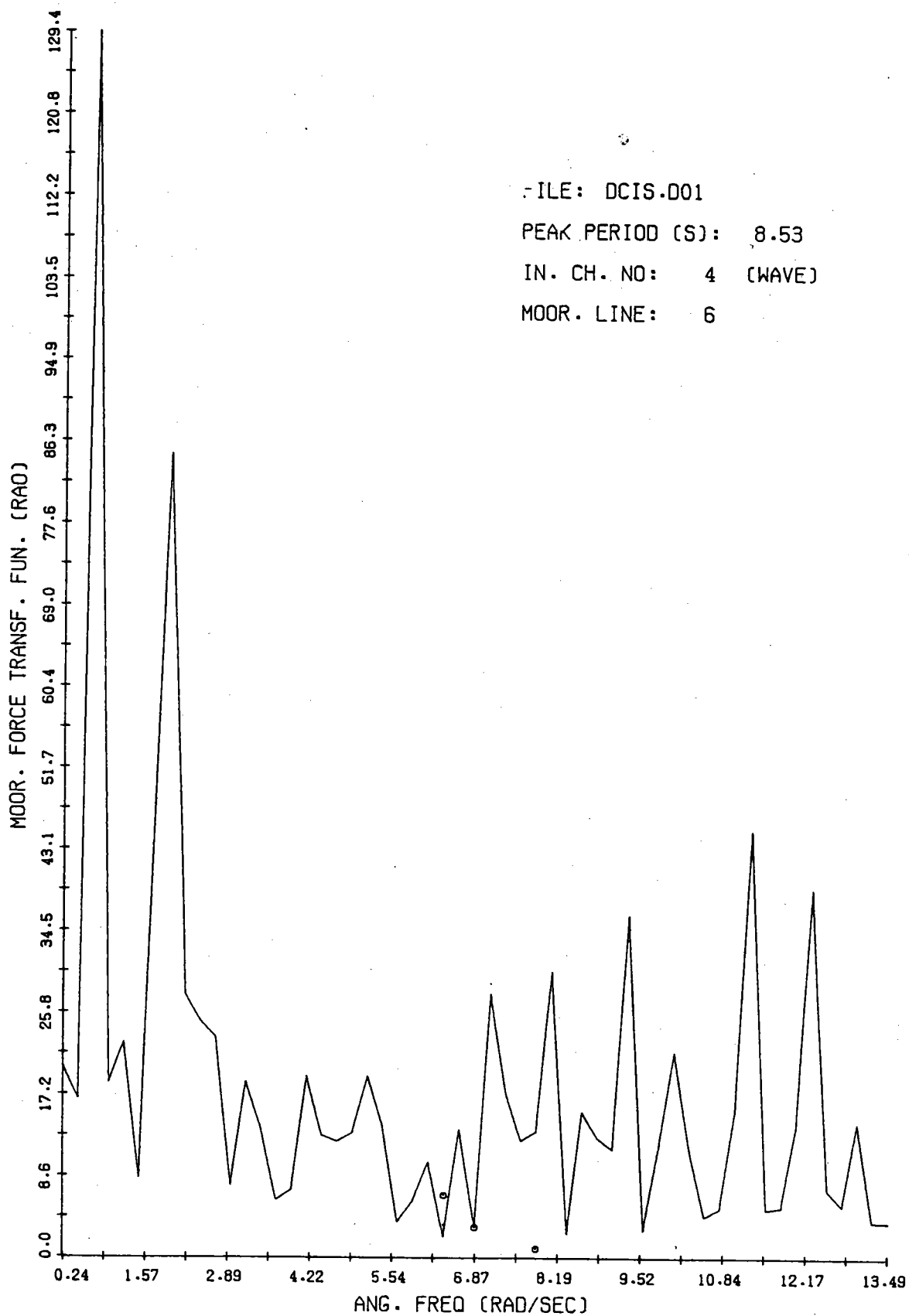
7-46

~ 96 ~



7-47

~ 97 ~



7-48

表 7-1 B 方向波、流組合效應 (in Lab)

方 向	周 期 (sec)	波 高 (cm)	流 速 cm/sec	船 舶 運 動 (前三分之一較大值平均)						Mooring Force (gram) (前三分之一較大值平均)					
				Surge (cm)	Sway (cm)	Heave (cm)	Roll degree	Pitch degree	Yaw degree	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
B	0.985	1.780	0	0.540	0.355	0.559	0.251	3.441	1.032	5.899	10.340	12.490	18.320	9.228	8.666
B	0.985	1.780	7.5	0.441	1.240	0.868	2.790	2.258	0.916	7.647	17.451	24.851	15.478	26.366	8.376
B	0.914	2.200	0	1.716	0.389	0.0855	0.793	2.570	0.585	5.873	6.025	10.072	16.325	4.512	6.361
B	0.914	2.200	7.5	0.462	0.960	1.123	0.963	2.523	1.182	6.104	15.489	20.734	24.967	15.732	8.269
B	0.800	2.120	0	0.834	0.310	0.409	1.407	1.484	0.312	3.281	3.908	4.845	7.537	2.530	2.780
B	0.800	2.12	7.5	0.922	0.843	0.626	0.778	3.401	0.945	6.746	14.958	16.275	17.085	8.467	5.983
B	0.674	0.820	0	0.222	0.066	0.275	1.006	0.775	0.229	1.531	3.399	1.841	2.235	1.433	1.065
B	0.674	0.820	7.5	0.595	0.561	0.262	1.171	1.094	0.440	3.758	9.603	14.249	10.808	25.398	6.876

表 7-2 B 方向波、流組合效應 (in Lab)

方向	周期 (sec)	波高 (cm)	流速 cm/sec	船舶運動 (前三分之一較大值平均)						Mooring Force (gram) (前三分之一較大值平均)					
				Surge (cm)	Sway (cm)	Heave (cm)	Roll degree	Pitch degree	Yaw degree	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
B	1.347	1.420	0	1.556	2.562	1.043	3.677	4.193	2.454	10.188	25.460	58.279	56.745	37.582	14.367
B	1.347	1.420	7.5	1.155	1.410	1.003	2.175	2.336	0.964	6.973	21.537	28.785	27.223	16.972	9.683
B	1.969	3.200	0	4.628	7.138	1.590	21.658	4.772	9.556	53.085	99.016	102.89	206.29	109.47	62.775
B	1.969	3.200	7.5	4.200	4.458	2.066	13.602	4.636	5.679	41.923	87.160	96.491	110.71	62.634	31.930
B	0.674	2.000	0	0.414	0.108	0.208	0.727	0.506	0.273	1.022	2.765	3.216	2.806	1.287	1.275
B	0.674	2.000	7.5	0.162	1.834	0.158	3.301	0.477	0.586	6.408	19.849	29.531	16.348	6.106	4.547

表 7-3 D 方向波、流組合效應 (in Lab)

方向	周期 (sec)	波高 (cm)	流速 cm/sec	船舶運動 (前三分之一較大值平均)						Mooring Force (gram) (前三分之一較大值平均)					
				Surge (cm)	Sway (cm)	Heave (cm)	Roll degree	Pitch degree	Yaw degree	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
D	0.985	2.49	0	1.404	0.497	0.821	1.812	3.636	1.586	7.888	16.502	22.199	40.901	20.071	17.691
D	0.985	2.49	7.5	1.403	0.665	0.895	3.527	3.531	2.149	10.776	22.869	19.390	48.125	30.114	20.967
D	0.914	2.39	0	1.605	0.067	0.545	0.712	2.279	0.740	4.702	4.527	17.478	23.874	6.196	8.398
D	0.914	2.39	7.5	0.877	0.902	0.571	2.175	1.946	1.256	7.452	16.444	23.037	29.153	9.434	6.043
D	0.800	1.96	0	0.845	0.164	0.112	1.284	1.124	0.525	1.778	2.264	8.033	13.182	5.212	3.907
D	0.800	1.96	7.5	0.701	1.795	0.493	2.969	1.640	0.911	8.888	20.111	35.864	24.762	10.043	4.711

八. 結論與建議

1. 綜合分析結果，可知，大部份趨勢很接近。因此，在本研究（實際常出現）的波高、周期範圍內，平均而言，可用波譜法來概估船舶及繫纜在不規則波、流作用下之動力反應，其結果可供港灣設計規劃之參考。
2. 運用波譜法必須先知道 a. 入射波之波譜 b. 轉換函數，其中，入射波之波譜可由實測而得，而轉換函數則須由試驗或運用數值計算方法計算而得。因為計算機之發達及省時、省力之優點，目前歐美的潮流趨勢為走數值計算方法之路線，因此未來應對數值計算方法在淺海船舶運動方面之應用，作深入之探討，以期達成用數值計算方法直接來計算淺海船舶運動、繫纜受力之轉換函數。
3. 當達成用數值計算方法直接計算淺海船舶運動及繫纜受力之轉換函數後，再加上實測得之波譜後，則吾人即可對淺海船舶運動及繫纜受力做數值模擬估算。
4. 由本研究，可知流的效應對淺海船舶運動影響不可忽視。
5. 以上結論針對現場吃水 18m 之水深且碼頭為棧橋式碼頭，對於其他海況，有待進一步探討。

九. 參考文獻

1. M. ST. Denis & W. J. Pierson, " On the Motion of ships in confused seas. ", TRANS. SNAME, Vol. 61. 1953.
2. Salvesen, N., Tuck, E. O., and Faltinsen, O., " Ship Motions and sea loads. " Trans. SNAME, Vol - 78. 1970.
3. Michael S. Triantafyllou " Strip Theory of ship Motions in the presence of a Current " Journal of ship Research, Vol. 24, No.1, March 1980, PP. 40 - 44.
4. DR. IR. G. VAN OORTMERSSEN " The Motions of a Moored ship in Waves " Publication No. 510 Netherlands ship Model Basin (NSMB) Wageningen, the Netherlands.
5. R.E.D. Bishop & W.G. Price " Hydroelasticity of ships. ", Cambridge University Press, 1979.
6. W. G. Price & R. E. D. Bishop " Probabilistic Theory of ship Dynamics. ", Chapman and hall, London, 1974.
7. D.E.Newland, " An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis ", 1975.
8. Yue, D.K.P., Chen, H.S. & Mei, C.C. " A Hybrid Element Method for Calculating Three - Dimensional Water wave Scattering. " Rept. No. 215, R. M. Parsons Water Resour. Hydrodyn., M.I.T., 1976

9. Zienkiewicz, O.C. " The Finite Element Method " , 3rd Edition, McGraw - Hill, New York, 1977.
10. Watanabe ; Ronald Ken " The Effect of wave-Current Interaction on the Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures " , Texas A & M University, PH.D. 1982.
11. American Bureau of shipping (ABS)。
12. 藤野正隆、邱逢琛 " 向波中 を 航走 する高速艇 の 縱運動 および " 波浪荷重 " , 日本造船學會論文集 154 號, 1983 年 12 月。
13. 張金機, " 港池波浪與船模動力試驗研究 " 港研所專刊第 11 號, 72 年 12 月。
14. 謝傳璋 " 浮體運動與漂流力之計算 ", 中國造船工程學刊, 1984。
15. 梁乃匡, " 颱風波浪波譜的估計 " 省交通處港灣技術研究所, 港灣技術第一期. 74 年 6 月。
16. 侯和雄、歐陽餘慶, " 港內波對碇泊船隻衝擊之碼頭設計改善研究 " 港研所 74 - 研 (一)。
17. 造船設計便覽, 日本關西造船協會編, 第 4 版。
18. 歐晉惠, " 波浪統計特性及波譜之參數決定法 " 成功大學土木研究所博士論文, 1977。
19. " 港灣構造物設計基準 " 台灣省政府交通處印行。
20. 蔡益超, " 工程或然率 " 中國土木水利工程學會。
21. 25000 噸級貨櫃船基本設計之研究發展報告, 經濟部 68 年度研究發展專題。