

目 錄

摘 要

壹 前 言

貳 往日學者理論研究

叁 使用規則波試驗對結果之影響

肆 試驗設備

伍 試驗條件及步驟

陸 試驗結果分析及討論

柒 結論與建議

致 謝

參考資料

附 錄 A

摘 要

本文分別利用規則及不規則波浪條件針對結構物波浪越波後其波浪傳遞 (wave transmission) 特性加以試驗研究，模型縮尺採 1:25 並將試驗結果與以往學者規則波浪傳遞係數之理論值以及不同縮尺之試驗值相比較，結果顯示彼此間關係均非常一致，並得一規則波 K_t 值

關係式即 $K_t = \frac{(H_t)_{\text{mean}}}{H_1} = 0.594(1.02 - \frac{H_e}{R})$ ，其中 H_t 值則利用

組體圖 (histogram) 觀念消去其較高簡諧效應 (higher harmonics)， R 值則摒棄利用傳統之經驗公式求得，例如 Hunt 之 $R =$

$\sqrt{H_1 L_0} \tan \phi$ 公式，而係利用波高計直接量測之數值，並進而推導一

試驗公式用以推測波浪溯上垂直高度，i.e., $R = c_1 \sqrt{H_1 L_0} \tan \phi + 0.6H_c + c_2$ ，其中 c_1, c_2 為常數與波浪週期有關。同時發現波浪傳遞後週期減衰情形與堤頂水面高度和溯上垂直高度之比值 $\frac{H_e}{R}$ 關係亦

極密切即 $K_t = \frac{T_t}{T_1} = 0.976 - 0.104 \frac{H_e}{R} - 1.07 \left(\frac{H_e}{R} \right)^2$ 。有關不規

則波部份，其試驗結果顯示波浪傳遞係數 $K_t = \frac{(H_t)_{\frac{1}{3}}}{H_1} \sim \frac{H_e}{R}$ 之關係

式與規則波之 $K_t = \frac{(H_t)_{\text{mean}}}{H_1} \sim \frac{H_e}{R}$ 之關係式非常類似。而對於

相同之 $\frac{H_e}{R}$ 值其對應之 $K_t = \frac{(H_t)_{\text{ave}}}{H_1}$ ， $K_t = \frac{(H_t)_{\frac{1}{3}}}{H_1}$ ，

$K_t = \frac{(H_t)_{\frac{1}{10}}}{H_1}$ 與 $K_t = \frac{(H_t)_{\text{may}}}{H_1}$ 值則依順增加， $\frac{H_e}{R}$ 值愈小則

其差距愈大，故可根據規則波之 K_t 值用來推算不規則波之 K_t 值進而決定港內波高能否滿足船隻碇泊及作業要求。有關波浪越過結構物

後其週期之減衰現象在不規則波試驗部份則較不明顯，惟試驗結果顯示當 $\frac{H_0}{D}$ 值達 0.23 而入射波浪週期 $\frac{T_1}{3}$ 大於 8 秒者，其傳遞波浪之週期增長達 3 ~ 5 倍左右，此為規則波試驗所沒有現象，故設計時應特加注意以避免港內水域因波浪之傳遞而產生共振現象(oscillation)，故作者建議防波堤設計時 $\frac{H_0}{D}$ 值應小於 0.23 。最後本文圖表可提供有關單位爾後防波堤規劃設計時之參考。

壹 前 言

舉凡港灣外廓堤防工程配置其目的不外乎在於求得港內水域之穩靜，俾使得船舶裝卸工作順利，船舶得以安全航行及繫泊並庇護港內設施之安全。故外廓堤防配置除應針對海象、氣象波浪特性條件考慮遮蔽效果以防止波浪繞射（Diffraction）影響外亦應考慮外廓堤防堤頂設計高度以減少波浪因越波（overtopping）造成港內水域之穩靜。通常堤頂設計高度根據交通處港灣構造物設計標準為 堤頂高 = 最高天文潮位 + 氣象潮偏差 + 波浪溯上高 + 基礎沈陷量 + 餘裕。堤頂過高固可確保港池水域之穩靜效果，但其工程費用將相對成倍數之增加，故堤高之決定通常就下列情況考慮之

- (1) 容許部份之波浪可溢流，但不足於危害堤防及背後保護物之安全。
- (2) 飛沫可以越堤，但波浪不得溢流。
- (3) 波浪與飛沫均不得溢流。

通常設計時考慮上列第(2)項條件為多。故如何設計一安全經濟合理之斷面實有賴於對堤頂越波傳遞作進一步之研究俾供設計之參考。

往昔學者為了簡化分析過程或限於設備問題往往著重於防波堤結構物對正弦規則波浪（sinusoidal regular wave）堤頂越波其越波量及波浪傳遞之理論或試驗研究。我國目前各港務局採用之堤頂高度設計亦僅考慮設計 $H_{\frac{1}{3}}$ 波高可越波（overtopping）而規定者，如須徹底防止越波則應將結構物之高度提高至越波高度以上，惟最高之越波高度則有賴於從不規則波浪之分佈範圍經試驗研討得之。故本試驗研究目的即在於比較規則波浪及不規則波浪兩者受防波堤結構物作用後其防波堤內側產生之傳遞波浪特性（包含波高及週期）之差異以作

為爾後我國港灣工程設計對堤頂高度設計預估之依據，俾得到一最佳合理斷面設計以確保港池水域之安全及節省公帑。

貳 往日學者理論研究

Goda, Seelig 於 1969 年及 1979 年分別提出有關波浪傳遞 (wave transmission) 研究，強調影響波浪傳遞現象最重要之因素為入射波高 (incoming wave height) 及靜水面至堤頂之高度 (breakwater freeboard)。1977 年 Shi-gai 和 Hsu 認為波浪溯上現象 (run up) 其越波量 (amount of water) 與波浪傳遞關係亦極密切。而早期 1971 年 Cross 和 Sollitt 利用全部越波量能量原理 (the energy content of the overtopping water) 提出一理論關係式用以推算波浪越波之傳遞係數 (transmitted wave coefficient)。該理論係假設波浪作用於梯形斷面之溯上 (run up) 表面，成拋物線分佈其頂點恰好落於第一個波谷處如圖 1 所示

$$\text{令 } Y = M X^2 - A \text{ --- (2 - 1)}$$

Y = 靜水面上高度

X = 為自第一個波谷開始量取之距離

A = 在波谷處之振幅 (Amplitude)

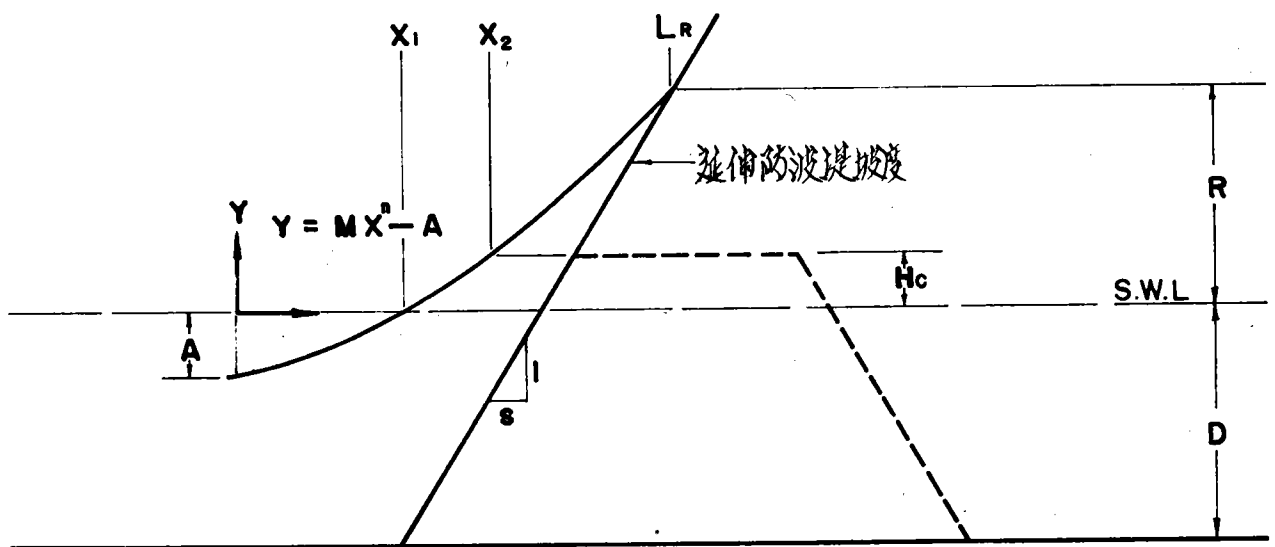


圖 1. 結構物溯上剖面定義圖

將上式化為無因次，以振幅 A 除(1)式得

$$\frac{Y}{A} = \frac{M L_R^n}{A} \left(\frac{X}{L_R} \right)^n - 1$$

L_R ：為 $Y = R$ ，即溯上高度 (run-up height) 處之 X 值

定義於圖 1 中之 H_o, D, X_1, X_2 和 S 亦可定義為無因次值

$$\text{即令 } y, r, h_o, d, l = \frac{Y}{A}, \frac{R}{A}, \frac{H_o}{A}, \frac{D}{A}, \frac{A}{A}$$

$$x, x_1, x_2, s, l = \frac{X}{L_R}, \frac{X_1}{L_R}, \frac{X_2}{L_R}, \frac{AS}{L_R}, \frac{L_R}{L_R}$$

則無因次溯上表面分佈曲線可化簡為下式 (如圖 2 所示)

$$y = (r + 1) x^n - 1 \quad \text{--- (2 - 2)}$$

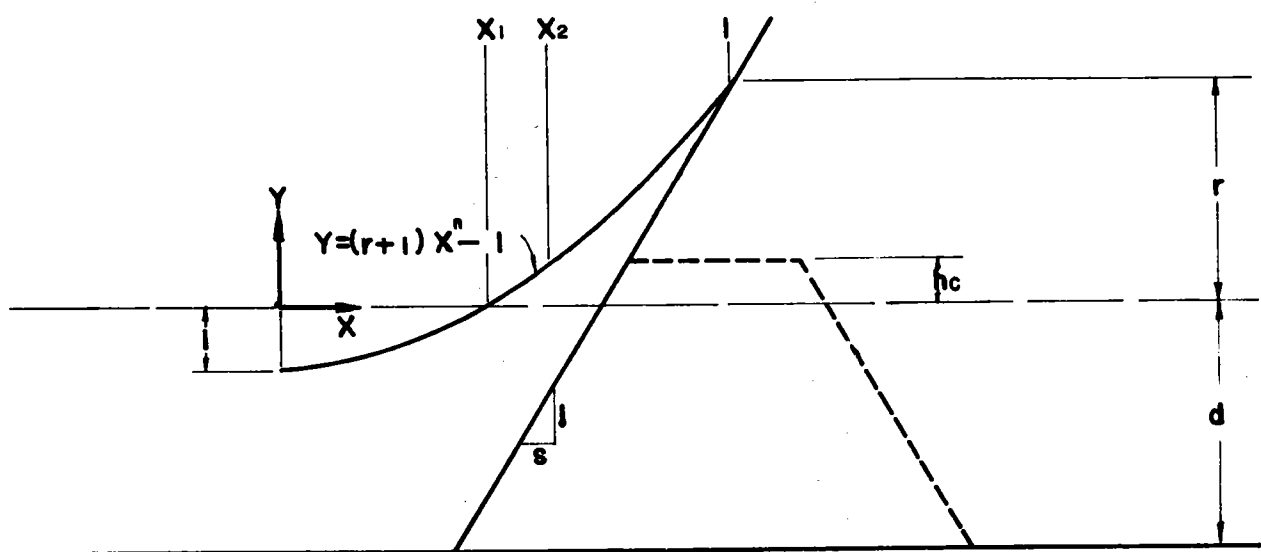


圖 2. 結構物溯上剖面無因次定義圖

依據質量守恒定理 (mass conservation) 以(2)式代入下式

$$\int_0^1 y dx - \frac{s r^2}{2} = 0$$

積分得

$$n = \frac{r+1}{\frac{sr^2}{2} + 1} - 1 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{--- (2-3)}$$

或 $s = \frac{2}{r^2} \cdot \frac{r-n}{n+1}$ 此處 $n = 1.0$

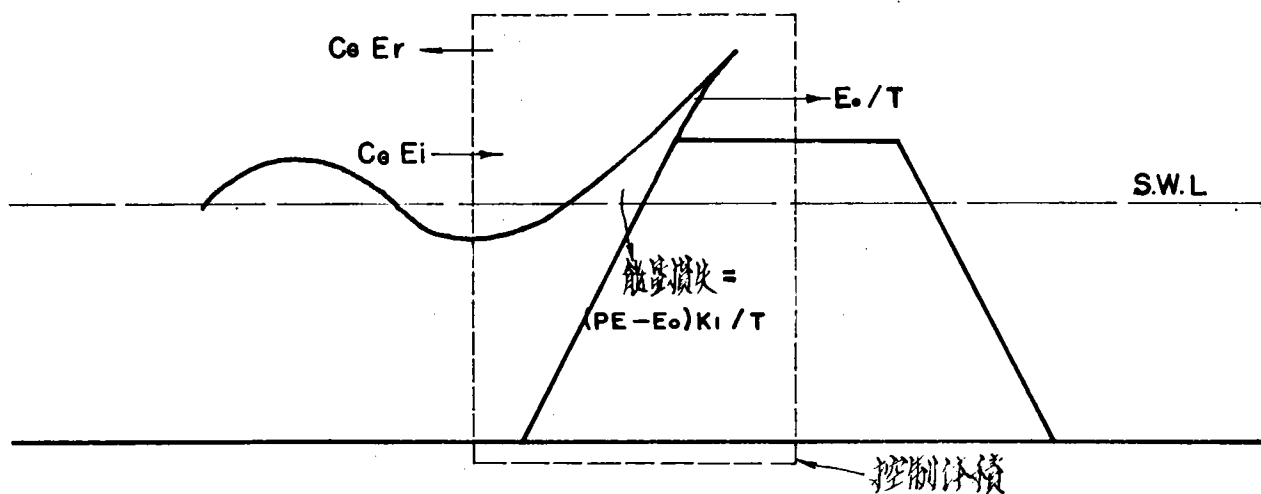


圖 3. 海側控制體積

吾人若考慮如圖 3 所示控制體積 (control volume) 假設傳遞波浪能量得自越波能量 E_o ，則於週期 T 時間能量通率 (energy flux) 可以下式表之

$$E_{\text{進}} - E_{\text{出}} = E_{\text{損失}} \quad \text{--- (2-4)}$$

$E_{\text{進}}$: 入射波能量

$E_{\text{出}}$: 包括反射波及越波能量部份

令 PE 定義為整個超出靜水面之溯上楔形體之位势能則 $PE - E_o$ 即為溯上能量回流之能量部份，則根據線性波浪理論 (linear wave theory) 中能量通率關係(4)式可改寫為

$$E_i C_g - E_r C_g - \frac{E_o}{T} = \frac{(PE - E_o)K_1}{T} \quad \text{--- (2-5)}$$

C_g : 能量傳播率即群速度 (Group Velocity)

$$E_i = \text{入射波能量} = \frac{1}{2} r A_i^2$$

$$E_r = \text{反射波能量} = \frac{1}{2} r A_i^2 K_r^2$$

K_1 : 能量損失常數

$$\text{令 } T = \frac{L}{C} = \frac{\text{波長}}{\text{波速}}, \quad P_e = \frac{PE}{r A^2 L_R}, \quad e_o = \frac{E_o}{r A^2 L_R}$$

此處 P_e 和 e_o 為無因次位勢能量

$$\text{已知 } A = A_i (1 + K_r) \quad \text{代入(5)式得}$$

$$P_e + e_o \left(\frac{1}{K_o} - 1 \right) = \frac{C_g}{C} \cdot \frac{L}{L_R} \cdot \frac{1}{2K_o} \cdot \frac{(1 - K_r^2)}{(1 + K_r)^2} \quad (2-6)$$

$$\text{其中 } K_r = K_m \frac{(d + h_o)}{(d + r)} \text{-----} (2-7)$$

K_m : 表 Miche's 反射係數

則溯上楔形體之位勢能可直接由下式求得

$$P_e = \int_{x_1}^1 \frac{y^2}{2} dx - \frac{s r^3}{6}$$

$$\text{於 } x = x_1, y = 0 \quad \text{代入(2)式故 } x_1 = \left(\frac{1}{r+1} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

積分並代入邊界條件得

$$\begin{aligned} P_e = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(r+1)^2}{2^{n+1}} \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{2+\frac{1}{n}}} \right] - \frac{2(r+1)}{n+1} \right. \\ \left. \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{1+\frac{1}{n}}} \right] + \left[1 - \frac{1}{(r+1)^{\frac{1}{n}}} \right] \right. \\ \left. - \frac{s r^3}{3} \right\} \text{-----} (2-8) \end{aligned}$$

$$\text{而 } e_o = \int_{x_2}^1 (y-h_o) \left(h_o + \frac{y-h_o}{2} \right) dx - \frac{s(r-h_o)^2}{2} \left(h_o + \frac{r-h_o}{3} \right)$$

$$\text{於 } x = x_2, y = h_o \text{ 故 } x_2 = \left(\frac{h_o+1}{r+1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

積分得

$$\begin{aligned} e_o = \frac{1}{2} \left\{ \frac{(r+1)^2}{2n+1} \left[1 - \left(\frac{h_o+1}{r+1} \right)^{2+\frac{1}{n}} \right] - \frac{2(r+1)}{n+1} \right. \\ \left. \left[1 - \left(\frac{h_o+1}{r+1} \right)^{1+\frac{1}{n}} \right] + (1-h_o^2) \left[1 - \left(\frac{h_o+1}{r+1} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\} \\ - \frac{s}{3} (r-h_o)^2 (r+2h_o) \} \text{------(2-9)} \end{aligned}$$

有關波浪傳遞能量則由圖 4 控制體積依據能量不減原理可求得

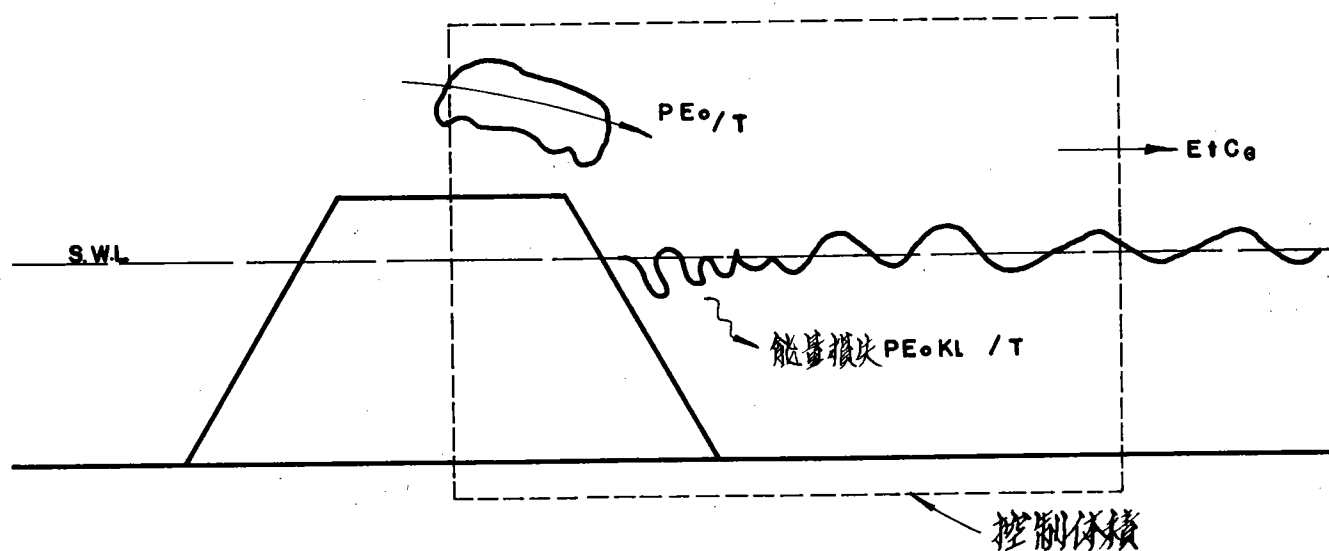


圖 4. 港內控制體積圖

$$\text{即 } \frac{E_o}{T} - \frac{rA_1^2}{2} K_t^2 C_g = \frac{E_o}{T} K_1 \text{------(2-10)}$$

$$E_o = rA_1^2 (1 + K_r)^2 L_R e_o \text{------(2-11)}$$

$$T = \frac{L_t}{c}, \quad L_t: \text{傳遞波波長}$$

假設防波堤前後水深相同 i.e. $L_t = L$

$$\text{則 } K_t^2 = 2 e_0 \frac{C}{cg} \frac{L_R}{L} (1 + K_r)^2 (1 - K_1) \text{ --- (2-12)}$$

此式即為 Cross 和 Sollittle 導出之波浪傳遞係數之理論關係式，原作者並曾根據 Saville's 試驗數據得一傳遞波浪係數 K_t 值包絡線 (envelope)

$$K_t = 0.65 \left(1.10 - \frac{H_0}{R} \right), \frac{H_0}{R} < 1.0 \text{ --- (2-13)}$$

而近期於 1982 年 Hamer D. G 和 Hamer F. C 亦利用規則波浪從事光滑 (smooth)，不透水 (impermeable) 防波堤研究波浪傳遞導出另一試驗波浪傳遞係數與 $\frac{H_0}{R}$ 之關係式

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = 0.69 \left(0.84 - \frac{H_0}{R} \right) \text{ --- (2-14)}$$

H_i ， H_t ， H_0 及 R 之定義如圖 5 所示

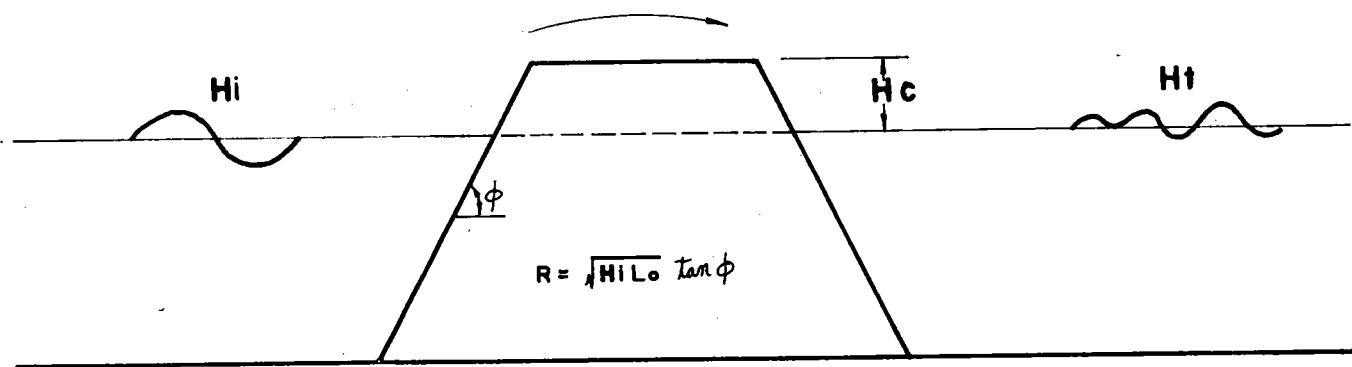


圖 5. 結構物水面上高度

其中 R 為波浪溯上高度 (wave run-up height) 理論值係根據 Hunt (1959) 經驗公式而求得

$$R = \sqrt{H_i L_0} \tan \phi, \text{ 當 } \tan \phi \leq 5.7 \sqrt{\frac{H_i}{g T^2}}, H = H_0 \text{ (2-15)}$$

叁 使用規則波試驗對結果之影響

實際海洋上之波浪極不規則，尤以直接因風而生之風浪 (wind wave) 故海面上水位變化顯為一隨機過程 (random process) 而目前國內進行物理模型所採用之試驗波浪均為近似正弦曲線 (sinusoidal curve) 之規則波按海面波浪在一定氣象條件之下，可視為定常及均合之機率過程 (stationary and ergodic stochastic process) 按 Louguet-Higgins 及 Watters (1953) 根據多數波浪記錄研究結果求得波峯波谷之包絡線 (envelope) 求得波高曲線為 Rayleigh 之分佈其概率密度函數為

$$P(H) = \frac{H}{2E} \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{4E}\right) \cdots \cdots \cdots (3-1)$$

波高在某一數值 K 以下之概率為

$$\begin{aligned} P(0 < H < K) &= \int_0^K \frac{H}{2E} \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{4E}\right) dH = -\left[e^{-\frac{H^2}{4E}}\right]_0^K \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{K^2}{4E}\right) \cdots \cdots \cdots (3-2) \end{aligned}$$

上式中 $\sqrt{\frac{E}{2}}$ 為波浪中水位變化之標準偏差 (standard deviation)

) E 為波浪觀測期間 T^* 內水位 η 之自乘平均之 2 倍

$$\text{即 } E = \lim_{T^* \rightarrow \infty} \frac{2}{T^*} \int_0^{T^*} \eta^2 dt$$

T^* 之極限，雖為無限大，實際上大約為 20min 前後，因實際海面上之水位變動，受氣象狀況左右，在 20 min 以內可視為定常及均合。

E 值又與海面測定地點單位面積之波能總量 E_T 成正比，故平均

波高 $\bar{H}$ 為

$$\bar{H} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{H^2}{2E} \exp\left(1 - \frac{H^2}{4E}\right) dH}{\int_0^{\infty} \frac{H}{2E} \exp\left(1 - \frac{H^2}{4E}\right) dH} = \sqrt{\pi E} \quad \text{--- (3-3)}$$

$$\text{即 } E = \frac{(\bar{H})^2}{\pi} \quad \text{--- (3-4)}$$

代入 (3-2) 式得

$$P(0 < H < K) = \int_0^{H=K} \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}} \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} d\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \quad \text{--- (3-5)}$$

波高大於某數值 H_a 之發生概率為

$$\begin{aligned} P_a(H_a < H < \infty) &= \int_{H=H_a}^{\infty} \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}} \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} d\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \\ &= \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H_a}{\bar{H}}\right)^2\right] \quad \text{--- (3-6)} \end{aligned}$$

波浪記錄中大於 H_a 之波高平均值 $\bar{H}_a$ 為

$$\bar{H}_a = \frac{\int_{H_a}^{\infty} \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2 \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} d\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)}{\int_{H_a}^{\infty} \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} d\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)} \quad \text{--- (3-7)}$$

計算結果為

$$\frac{\bar{H}_a}{\bar{H}} = \frac{H_a}{\bar{H}} + \exp\left\{\frac{\pi}{4} \left(\frac{H_a}{\bar{H}}\right)^2\right\} \left\{1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{H_a}{\bar{H}}} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) d\omega\right\} \quad \text{(3-8)}$$

(3-8) 式中之 $\int \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) d\omega$ 為概率積分可由統計數表查出

波浪記錄中之 $\frac{H_1}{3}$ 可由 (3-6) 式，令 $P_a = \frac{1}{3}$ ，求出 $\frac{H_a}{\sqrt{H}}$ 數值

再代入 (3-8) 式求得 $\frac{\frac{H_1}{3}}{\bar{H}} = 1.598$ ， $\therefore \frac{H_1}{3} = 2.83\sqrt{E} \div \sqrt{8E}$

以 $\frac{H_1}{3}$ 為波高之正弦規則波之總能量 (E_T) $\frac{H_1}{3}$ 為

$$(E_T)_{\frac{H_1}{3}} = \frac{1}{8} \rho g \left(\frac{H_1}{3}\right)^2 = \frac{1}{8} \rho g (\sqrt{8E})^2$$

$$= \rho g E \quad (\rho g \text{ 為海水單位重}) \quad \text{-----} (3-9)$$

實際發生之不規則波浪之能量為

$$E_T = 2E_P = \lim_{T^* \rightarrow \infty} \frac{2}{T^*} \int_{t=0}^{t=T^*} \int_{Z=0}^{Z=7} \rho g 7 dZ dt$$

$$= \lim_{T^* \rightarrow \infty} \frac{\rho g}{T^*} \int_0^{T^*} 7^2 dt = \frac{1}{2} \rho g E$$

$$(\because E = \lim_{T^* \rightarrow \infty} \frac{2}{T^*} \int_0^{T^*} 7^2 dt) \quad \text{-----} (3-10)$$

式中 E_P 為單位面積上之位能， T^* 為觀測期間，7 為以靜水面為準之水位故用 $\frac{H_1}{3}$ 為波高在模型中鼓出之人工浪，其能量相當於同一縮尺自然波浪之 2 倍，故為期獲得一合理較佳之斷面實有賴於規則波及不規則波兩種波浪之試驗比較。

肆 試驗設備

本試驗主要設備如下

- (一)風洞水槽：係一室內試驗水槽長 100 公尺寬 1.5 公尺高 2.0 公尺，如圖 6 所示設有兩處玻璃觀測段長 15 公尺作為試驗現象觀測用，主要部份含鼓風機環流系統，不規則造波機及消波設施等，其配置如圖 7 所示。

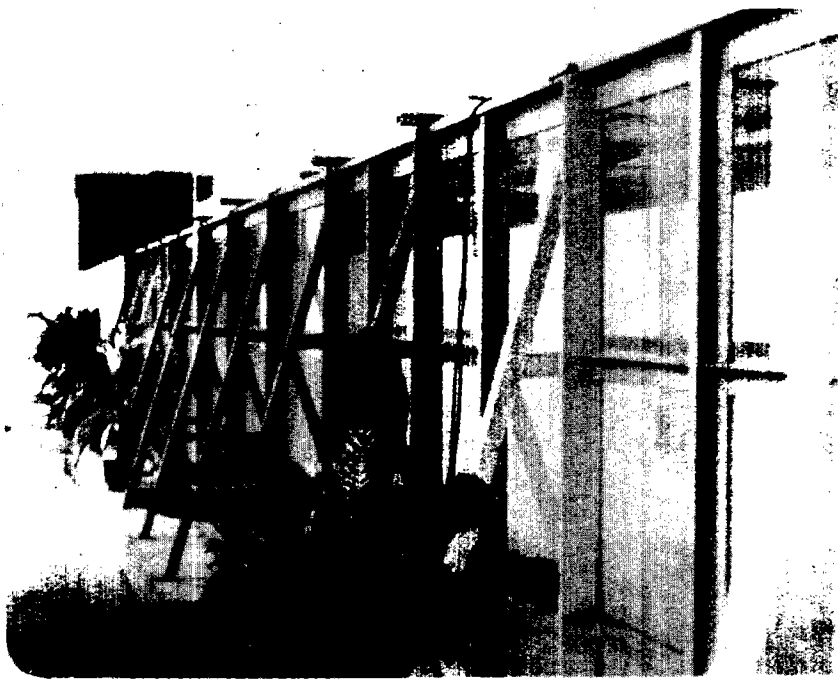


圖 6 室內風洞試驗水槽

- (1)鼓風機 (wind blower)

裝置於水槽首端，利用 75HP 馬達帶動變速機藉以調整風速風量可達 $30\text{m}^3/\text{sec}$ 以上即在 1 公尺水深時風速可達 $20\text{m}/\text{sec}$ 以上

- (2)環流系統 (circulation system)

沿水槽裝設 30 cm ϕ 管路以 50HP 泵帶動水流可供各種流況試驗。

- (3)不規則造波機 (irregular wave generator)

裝置於水槽首端鼓風機下方寬 1.5 公尺高 1.5 公尺，係英國 Armfield 公司製造為油壓式不規則波造波機以波譜特性（本試驗採用 Mosquitz type spectrum）為輸入條件，經由電腦程式分析獲得控制箱各種參數值以製造所需試驗波譜。

(4) 消波設施

於水槽末端置消波塊石坡度為 1.5 : 10 上部並裝置一可變換坡度之木製橫條消波器材，如圖 7 所示。

(二) 容量型波高計 (Capacitence type wave meter)

為試驗用波浪測定儀器，係將水面起伏變化先經一對白金電容線感受器轉變為電阻變化，藉惠氏登電橋換成電流再經增幅器 (Amplifier) 予以放大後變成電壓，經電腦類比數據轉換器獲得波浪之資料，如圖 8 所示。

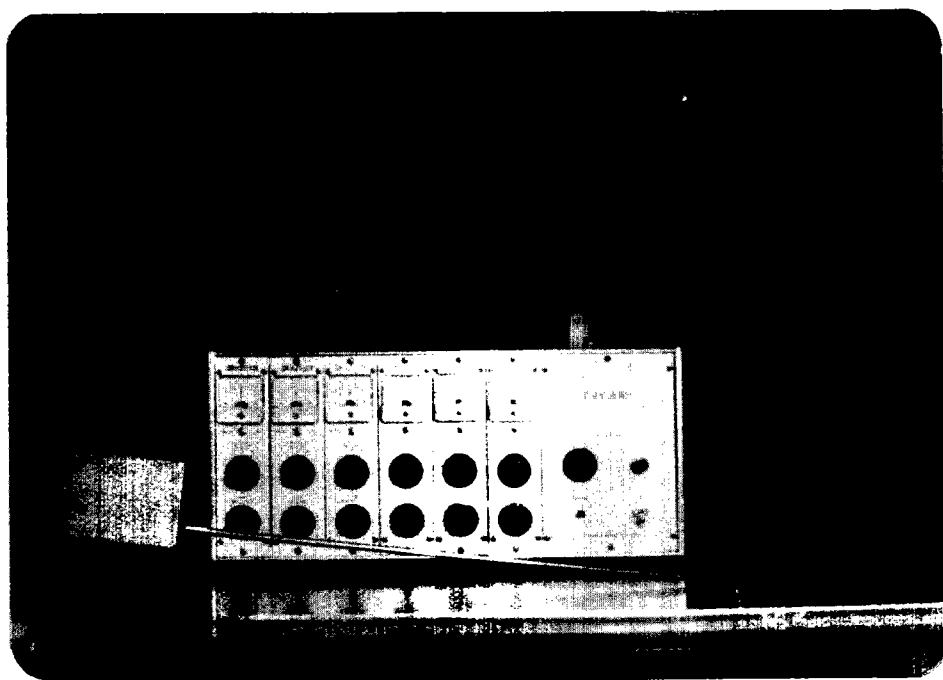


圖 8 容量型波高計和增幅器

(三)數據處理系統 (Data Acquisition System)

係將控制箱輸出之電壓，改接於類比／數據轉換器 (Analog / Digital converter) 利用 A / D 轉換器系統掃瞄水位變化值如圖 9 所示，儲存於 HP 1000型電腦記憶體內，再經程式處理計算所需資料，由列表機 (Line Printer) 及繪圖機 (Plotter) 輸出計算結果，此系統塊狀圖如圖 10 所示。

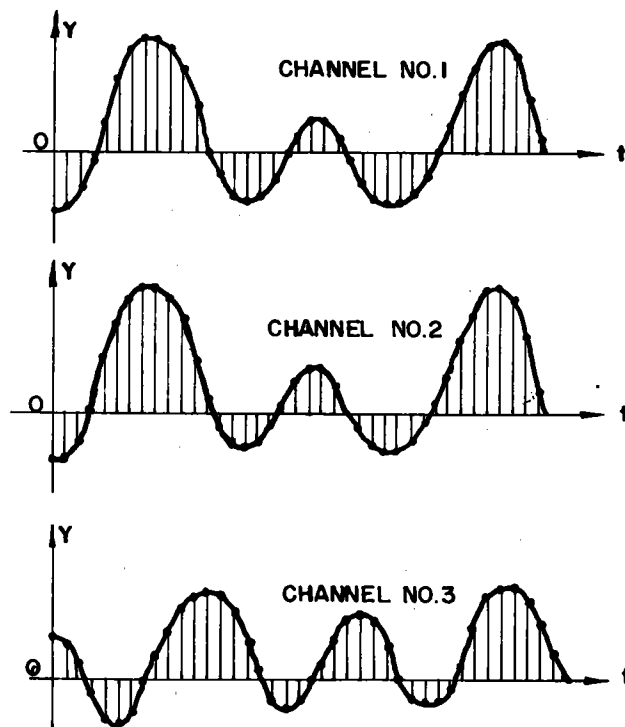


圖 9. 系統掃描水位變化圖

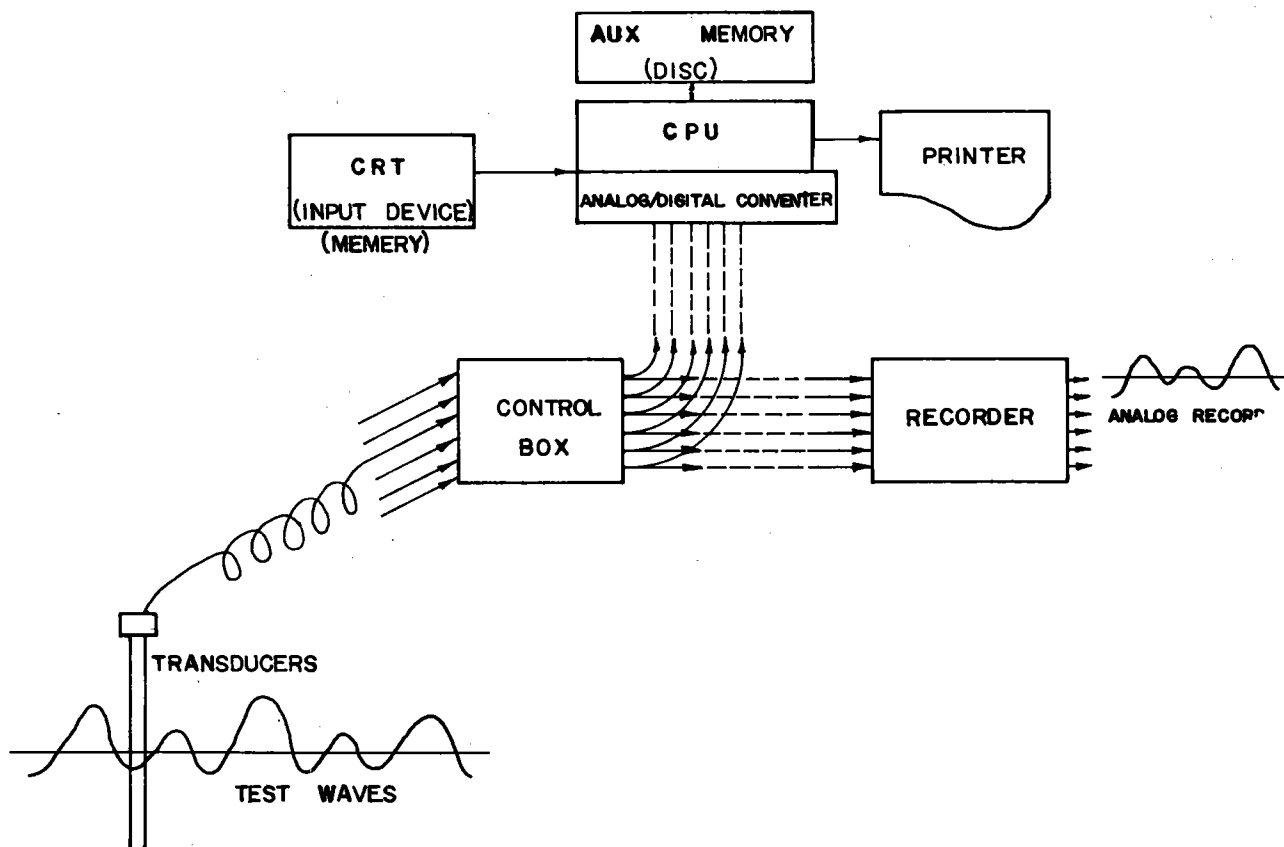


圖 10. 電腦資料處理系統塊狀圖

伍 試驗條件及步驟

5.1 試驗條件 (Experimental Conditions)

本試驗用來探討自然界經常發生之波浪週期 5 秒~12 秒，波高 2 m ~ 5 m 採用模型縮尺 1 : 25 比例分別進行規則波浪 (regular waves) 及不規則波浪 (irregular waves) 試驗。有關不規則模型波浪試驗條件如表 1 ~ 表 3 所示，係根據 Moskowitz 波譜條件所得之入射波浪 (incident wave) 分別於三種不同水深 d 即 65 公分、70 公分和 75 公分等進行試驗且為便於規則波浪及不規則波浪兩者差異之比較，規則波浪試驗條件採用不規則波浪條件之 $\frac{H}{3}$ 和 $\frac{T}{3}$ 作為模型入射波浪條件分別如表 4 ~ 表 6 所示。水槽中防波堤構造物以梯形斷面防波堤為主，堤寬固定為 10 公分，高度固定為 80 公分，斜邊坡度為 1 : 1.5 採光滑不透水面，由木板所構成。

表 1

試驗編號	水 深 D (cm)	堤頂高度 Hc (cm)	波 高 $H \frac{1}{8}$ (cm)	週 期 $T \frac{1}{8}$ (sec)	波 高 $H \frac{1}{10}$ (cm)	週 期 $T \frac{1}{10}$ (sec)	備 註
Run IB-1	75	5	8.76	1.23	11.12	1.22	
IB-2	75	5	10.61	1.29	13.28	1.24	
IB-3	75	5	12.45	1.33	15.12	1.29	
IB-4	75	5	13.52	1.39	17.24	1.37	
IB-5	75	5	14.47	1.41	18.26	1.34	
IB-6	75	5	9.01	1.63	10.99	1.63	
IB-7	75	5	10.26	1.60	11.97	1.54	
IB-8	75	5	11.95	1.60	14.50	1.63	
IB-9	75	5	13.80	1.71	17.41	1.54	
IB-10	75	5	15.71	1.72	20.79	1.65	
IB-11	75	5	9.42	2.10	12.57	2.75	
IB-12	75	5	10.67	2.29	13.90	3.31	
IB-13	75	5	11.82	2.35	15.28	2.90	

表 2

試驗編號	水 深 D (cm)	堤頂高度 H _c (cm)	波 高 H $\frac{1}{3}$ (cm)	週 期 T $\frac{1}{3}$ (sec)	波 高 H $\frac{1}{10}$ (cm)	週 期 T $\frac{1}{10}$ (sec)	備 註
Run IC-1	70	10	8.80	1.21	10.88	1.21	
IC-2	70	10	10.54	1.27	13.42	1.26	
IC-3	70	10	11.99	1.30	14.52	1.30	
IC-4	70	10	12.68	1.35	15.39	1.34	
IC-5	70	10	13.97	1.44	16.78	1.43	
IC-6	70	10	9.30	1.65	11.98	1.59	
IC-7	70	10	11.46	1.65	15.15	1.66	
IC-8	70	10	12.12	1.78	15.41	1.89	
IC-9	70	10	13.58	1.68	16.11	1.65	
IC-10	70	10	15.21	1.78	18.22	1.71	

表 3

試驗編號	水 深 D (cm)	堤頂高度 Hc (cm)	波 高 $H \frac{1}{3}$ (cm)	週 期 $T \frac{1}{3}$ (sec)	波 高 $H \frac{1}{10}$ (cm)	週 期 $T \frac{1}{10}$ (sec)	備 註
Run ID-1	65	15	9.25	1.22	11.84	1.21	
ID-2	65	15	10.20	1.24	13.31	1.21	
ID-3	65	15	11.99	1.34	14.93	1.33	
ID-4	65	15	13.75	1.40	17.09	1.39	
ID-5	65	15	14.53	1.46	17.94	1.40	
ID-6	65	15	9.19	1.60	12.01	1.46	
ID-7	65	15	10.73	1.61	13.74	1.65	
ID-8	65	15	12.88	1.69	15.67	1.70	
ID-9	65	15	14.72	1.84	19.07	1.81	
ID-10	65	15	9.58	2.26	11.97	2.61	

表 4

試驗編號	水 深 D (cm)	堤頂高度 Hc (cm)	波 高 H (cm)	週 期 T (sec)			備 註
RunRB-1	75	5	8.62	1.23			
RB-2	75	5	10.52	1.27			
RB-3	75	5	12.62	1.30			
RB-4	75	5	13.22	1.36			
RB-5	75	5	14.59	1.39			
RB-6	75	5	8.86	1.60			
RB-7	75	5	10.40	1.61			
RB-8	75	5	11.57	1.66			
RB-9	75	5	13.72	1.67			
RB-10	75	5	15.79	1.73			
RB-11	75	5	9.57	2.10			
RB-12	75	5	10.46	2.26			
RB-13	75	5	11.94	2.33			

表 5

試験編號	水深 D (cm)	堤頂高度 Hc (cm)	波高 H (cm)				備註
RunRC-1	70	10	1.22				
RC-2	70	10	1.27				
RC-3	70	10	1.31				
RC-4	70	10	1.39				
RC-5	70	10	1.47				
RC-6	70	10	1.63				
RC-7	70	10	1.66				
RC-8	70	10	1.78				
RC-9	70	10	1.68				
RC-10	70	10	1.79				

表 6

試驗編號	水深 D (cm)	堤頂高度 Hc (cm)	波高 H (cm)	週期 T (sec)			備註
RunRD-1	65	15	9.16	1.22			
RD-2	65	15	10.62	1.23			
RD-3	65	15	11.11	1.34			
RD-4	65	15	13.40	1.41			
RD-5	65	15	15.07	1.46			
RD-6	65	15	8.95	1.57			
RD-7	65	15	10.93	1.59			
RD-8	65	15	12.62	1.66			
RD-9	65	15	15.04	1.82			
RD-10	65	15	9.66	2.27			

5.2. 試驗步驟 (Experimental Procedure)

本試驗其進行試驗過程如下

(1) 首先率定容量型波高計 (capacitence type wave meter)，試驗證明該波高計性能極為良好呈線性關係 (linear relation) 如圖 11。

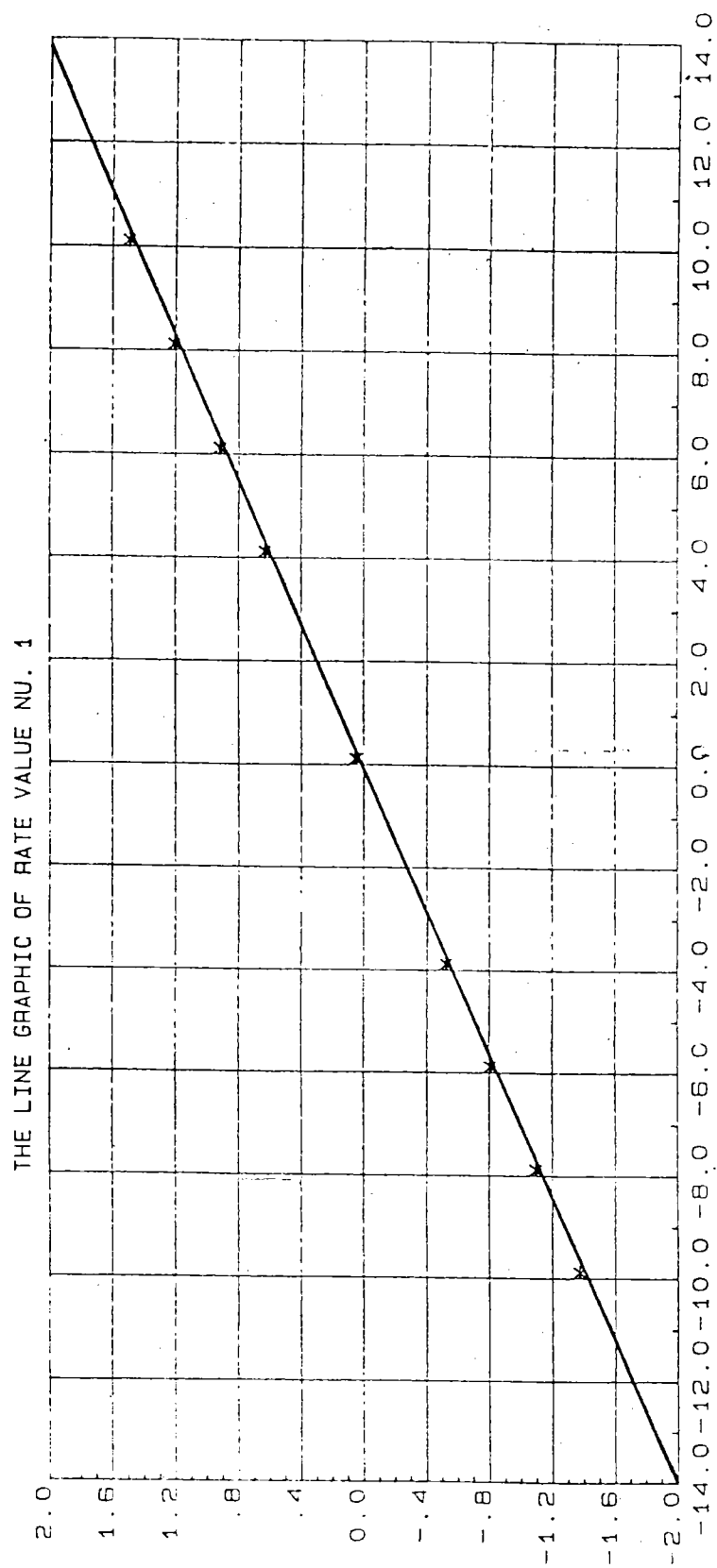
(2) 將構造物置放於水槽末端觀測斷面前緣，在相同水深條件下依照表 1 ~ 表 3 數據製造不同波高及週期等波浪進行不規則波試驗，並採近似之 $\frac{H_1}{3}$ 和 $T_{\frac{1}{3}}$ 值波浪條件如表 4 ~ 表 6 進行規則波試驗以資比較

。所有波浪情況均維持在結構物前未碎波 (breaking) 條件。並於置放結構物前先行量測該處波高定義為入射波高 H_i ，有關不規則波入射波能量波譜 (spectrum) 分別如附錄 A 所示。

(3) 在結構物中心線後一個波長及二個波長處分別置放二波高計，同時記錄越波之傳遞波高 (transmitled wave height) 取二者平均值定義為傳遞波高 $(H_t)_{ave}$ 或 $(H_t)_{\frac{1}{3}}$ 。

(4) 置放波高計於堤頂上直接量測波浪越波垂直高度 R' 並定義波浪溯上 (wave run-up) 垂直高度 $R = R' + H_0$ 。此處 H_0 定義為靜水面上堤頂之高程，對於規則波浪 R' 值應相等殆無疑義，惟對於不規則波浪越波垂直高度取其最大 $\frac{1}{3}$ 部份平均值定義為 $(R')_{\frac{1}{3}}$ 。

(5) 分別變換三種不同水深 $d = 65$ 公分， $d = 70$ 公分和 $d = 75$ 公分等進行試驗並重複步驟 (1) ~ (4) 過程。



THE RATE VALUE = 6.9521 COR. COEF. = 1.000

Y = .0078 + .1438 X. VARIANCE = .0000

圖 11 波高計率定線

陸 試驗結果分析及討論

(A) 規則波試驗部份

有關規則波試驗，儘管其入射波浪條件具有週期性，惟試驗結果顯示，結構物後之傳遞波浪 (transmitted wave) 則呈不規則性，推究其原因主要是由於越波 (overtopping) 產生較高簡諧現象 (higher harmonics) 所致如圖 12 所示

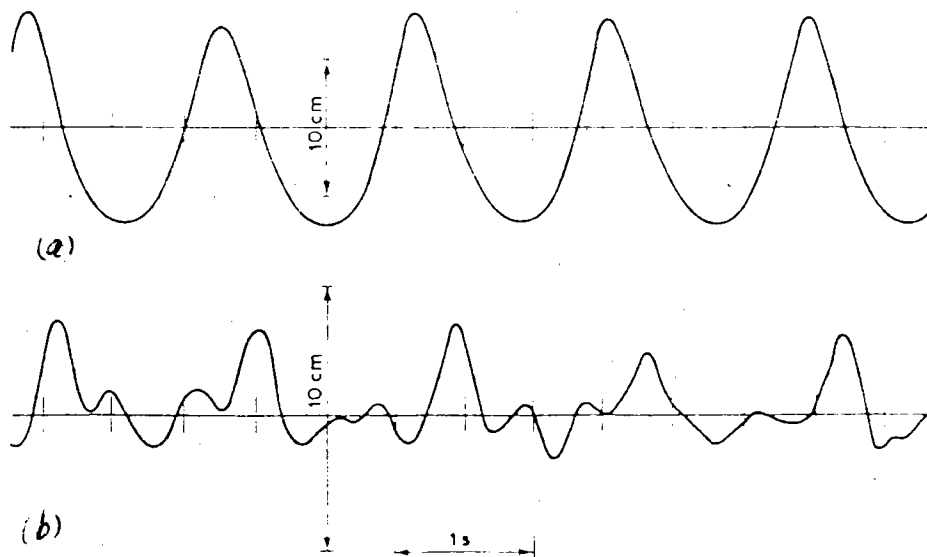


圖 12 (a)表入射波

(b)表構造物後之傳遞波浪

吾人為進一步分析波浪傳遞波高數據 (每一個 Run 取 20 個記錄) 特採用組體圖 (histogram) 觀念分析所記錄之傳遞波高，試驗結果顯示，當越波現象不明顯時組體圖僅有一個波峯產生，而越波現象顯著時則組體圖將產生兩個波峯如圖 13 所示

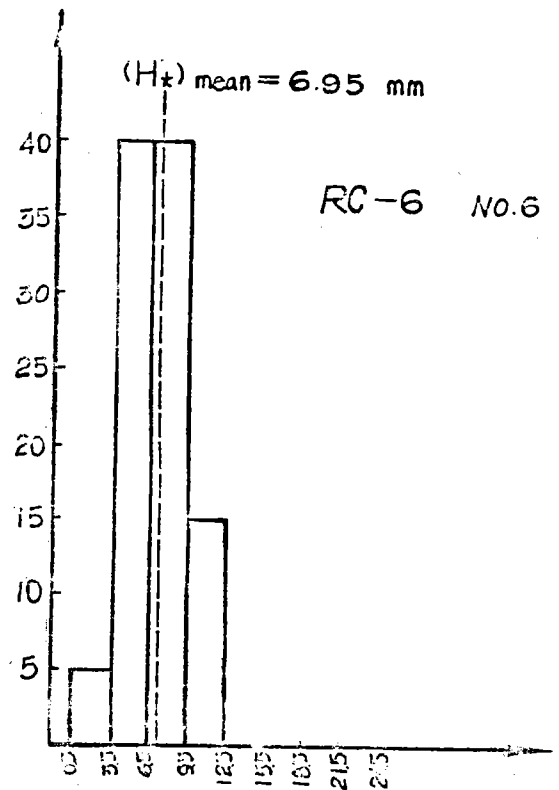
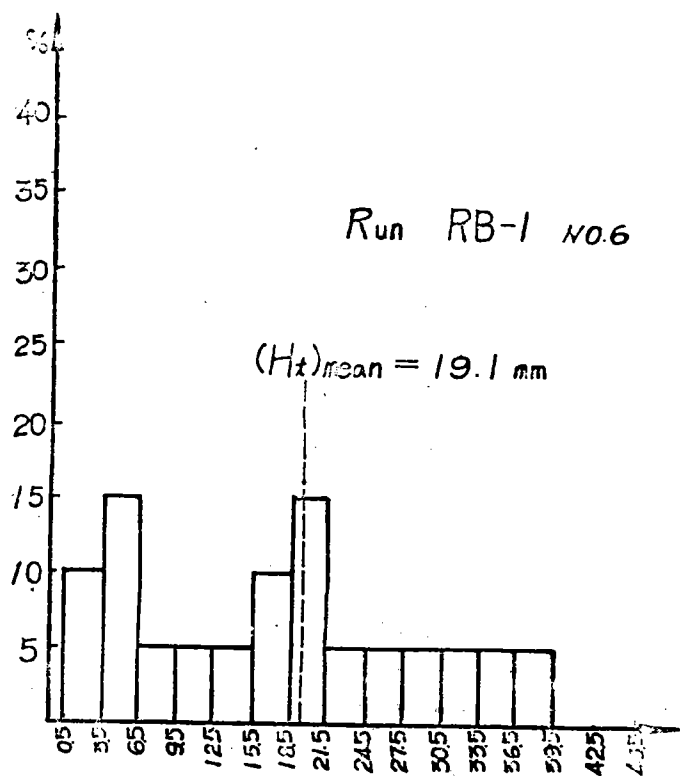


圖 13 組 體 圖

第一個波峯表較高階簡諧 (higher harmonics) 現象，第二個波峯則代表一階基本傳遞波 (first order basic wave)，吾人取其數平均值 (weighted average value) 作為傳遞波高 (H_t) 值並定義無因次之傳遞係數 (transmitted coefficient) 為

$$K_t = \frac{H_t}{H_1} \quad , \text{ 其中 } H_t \text{ 係取結構物後一個波長及二個波長處波高計之}$$

平均值

其次經由波高計直接量得之堤頂越波 (overtapping) 高度以 R' 表之，若 H_0 表堤頂靜水面上之高度則波浪溯上 (wave run-up) 垂直高度 R 即定義為 $R = R' + H_0$ ，並取無因次值 $\frac{H_0}{R}$ 為一重要參數，將此試驗結果分別與 R . H . Cross & C . K . Sollitte (1970)

等利用能量原理所推導之傳遞波高係數 $K_t = \frac{H_t}{H_1} \sim \frac{H_0}{R}$ 之理論

值 (假設其中 $\rho = 0.4$ $K_1 = 0.8$, $\frac{R}{H_1} = 1.0$) 以及 Dana Poist

之 1:50 小比例縮尺及 1:5 大比例縮長之模型試驗值相比較如圖 14 所示。圖形顯示本次試驗值與理論值等非常一致，故將這些試驗數據利用最小二乘方法 (least-square method) 得一綫性關係式

$$K_t = 0.594 \left(1.02 - \frac{H_c}{R} \right) \dots\dots\dots (6-1)$$

其 K_t 值之包絡綫 (envelope) 如圖 15 所示

$$K_t = 0.594 \left(1.16 - \frac{H_c}{R} \right) \dots\dots\dots (6-2)$$

若將其二次方 Fitting 曲綫與 R.C.Cross & C.K.Sollittle 理論曲綫繪於圖 16 所示相比較，可發現二者關係非常一致。由於以往試驗者對於波浪溯上垂直高度 R 值均採用經驗公式推算，例如 Hunt (1959) 經驗公式 $R = \sqrt{H_1 L_0 \tan \phi}$ ，僅考慮入射波浪特性及構造物坡度為參數即 $R = f(H_1, T, \phi)$ ，而作者認為溯上垂直高度 R 除與入射波浪特性，防波堤斜坡度 $\tan \phi$ 有關外，堤頂靜水面上之高度 H_c 實亦為一重要因素，故特利用 R 值之實測值除考慮波浪特性外並考慮 H_c 值為參數加以分析，吾人發現 R 值與 H_1 ， T ， $\tan \phi$ 以及 H_c 間有一極佳綫性關係如圖 17 所示，根據此綫性關係作者求得一預測波浪溯上垂直高度 R 值之試驗公式

於模型 (model) 中，其關係式為

$$C (R - 0.6 H_c) = 0.4065 \sqrt{H_1 L_0 \tan \phi} - 3.921 \quad (6-3)$$

$$\text{即 } R = \frac{0.4065}{C} \sqrt{H_1 L_0 \tan \phi} - \frac{3.921}{C} + 0.6 H_c \quad (6-4)$$

其中 單位為：cm

$C = f(T)$ 即 C 為常數與波浪週期有關

換算為原型 (prototype) 即為

$$R = \frac{0.4065}{C} \sqrt{H_i L_o} \tan \phi - \frac{0.98}{C} + 0.6 H_c \quad (6-5)$$

其中 單位：m

$$T < 7 \text{ 秒時} \quad C = 1.38$$

$$7 \text{ 秒} \leq T \leq 10 \text{ 秒時} \quad C = 1.78 \dots\dots\dots (6-6)$$

$$10 \text{ 秒} < T \text{ 時} \quad C = 2.64$$

將此值代入上式得

$$R = C_1 \sqrt{H_i L_o} \tan \phi + 0.6 H_c + C_2 \dots\dots\dots (6-7)$$

$$C_1 = 0.294 ; C_2 = -0.711 \quad \text{當} \quad T < 7 \text{ 秒}$$

$$C_1 = 0.228 ; C_2 = -0.551 \quad 7 \text{ 秒} \leq T \leq 10 \text{ 秒} \quad (6-8)$$

$$C_1 = 0.154 ; C_2 = -0.371 \quad 10 \text{ 秒} < T$$

同時於規則波試驗當中，吾人亦發現波浪越波後其傳遞波浪週期之變化與 $\frac{H_c}{R}$ 比值有密切關係。吾人若定義週期之減衰係數 K_T 為傳遞

波高週期與入射波高週期之比值即 $K_T = \frac{T_t}{T_i}$ ，則 K_T 與 $\frac{H_c}{R}$ 關係如圖

18 及圖 19 所示。圖 18 係利用最小二乘方法假設其為綫性關係，所得圖形其關係式為

$$K_T = \frac{T_t}{T_i} = 0.987 \left(1.14 - \frac{H_c}{R} \right) \dots\dots\dots (6-9)$$

其週期減衰係數變化與波高傳遞係數有相同之趨勢即 $\frac{H_c}{R}$ 比值愈大傳遞波浪之週期有減小之趨勢。圖 19 則係利用最小二乘方法假設兩者為二次方相關所得之圖形，其關係式為

$$K_T = \frac{T_t}{T_i} = 0.976 - 0.104 \left(-\frac{H_c}{R} \right) - 1.07 \left(-\frac{H_c}{R} \right)^2 \dots\dots\dots (6-10)$$

所有實測之規則波試驗記錄值如表 7 所示

表 7 規則波試驗記錄

試驗 編 部	模 型 週 期 (T)	入 射 波 高 H_i (cm)	傳 遞 波 高 H_t (cm)	R (cm)	H_o (cm)	傳遞波 高週期 (sec)	$K_t = \frac{H_t}{H_i}$	$K_r = \frac{T_t}{T_i}$	$\frac{H_o}{R}$
RB-1	1.23	8.62	1.903	9.0	5	0.70	0.221	0.569	0.556
RB-2	1.27	10.52	3.282	10.54	5	0.93	0.312	0.732	0.474
RB-3	1.30	12.62	4.580	11.53	5	0.84	0.363	0.646	0.434
RB-4	1.36	13.22	4.498	12.304	5	0.95	0.340	0.698	0.406
RB-5	1.39	14.59	5.73	12.70	5	0.88	0.393	0.633	0.394
RB-6	1.60	8.86	2.13	9.088	5	0.78	0.240	0.491	0.550
RB-7	1.60	10.40	3.29	10.30	5	0.87	0.316	0.588	0.485
RB-8	1.66	11.57	3.98	11.768	5	0.94	0.344	0.566	0.425
RB-9	1.67	13.72	5.58	12.808	5	0.93	0.407	0.557	0.390
RB-10	1.73	15.79	5.895	13.69	5	1.17	0.373	0.676	0.365
RB-11	2.10	9.57	1.603	10.174	5	0.77	0.168	0.367	0.491
RB-12	2.26	10.46	2.69	10.934	5	0.98	0.257	0.434	0.457
RB-13	2.33	11.94	3.515	11.807	5	1.08	0.294	0.464	0.423
RC-1	1.22	8.76	0.27	11.70	10	0.26	0.031	0.213	0.855
RC-2	1.27	10.26	1.10	13.05	10	0.61	0.142	0.480	0.766
RC-3	1.31	11.85	2.30	13.96	10	0.61	0.194	0.496	0.716
RC-4	1.39	12.60	3.0	14.91	10	0.81	0.238	0.583	0.617
RC-5	1.47	14.05	3.97	14.67	10	0.75	0.283	0.510	0.682
RC-6	1.63	9.54	0.93	12.33	10	0.62	0.097	0.380	0.811
RC-7	1.66	11.43	2.57	13.85	10	0.74	0.225	0.446	0.722
RC-8	1.78	12.11	2.51	14.50	10	0.88	0.207	0.494	0.690
RC-9	1.68	13.56	3.96	15.33	10	0.87	0.292	0.518	0.652
RC-10	1.79	14.89	4.34	16.80	10	0.97	0.291	0.542	0.595
RD-1	1.22	9.16	0.2	15.59	15	0.14	0.022	0.115	0.962
RD-2	1.23	10.62	0.22	16.08	15	0.13	0.021	0.114	0.933
RD-3	1.34	11.11	0.88	18.44	15	0.55	0.079	0.410	0.813
RD-4	1.41	13.40	2.00	19.13	15	0.58	0.149	0.441	0.784
RD-5	1.46	15.07	2.60	18.53	15	0.73	0.173	0.500	0.809
RD-6	1.57	8.95	0.2	16.05	15	0.19	0.022	0.120	0.935

(B) 不規則波試驗部份

有關不規則波試驗部份，吾人係假設大海波浪其波譜為 Moskowitz 分佈，此處 R' 值之定義吾人係取實測不規則波之越波高度值前面 $\frac{1}{3}$ 部份之平均值當作 R' 值而求得波浪溯上垂直高度 $R = R' + H_c$ ， H_c 為堤頂水面上之高度，依此而定義 $\frac{H_c}{R}$ 值當作一重要參數 (parameter)

而傳遞係數 K_t 值之定義則分別依照傳遞波浪之 $(H_t)_{\max}$ ， $(H_t)_{\frac{1}{10}}$ ， $(H_t)_{\frac{1}{8}}$ 以及 $(H_t)_{\text{ave}}$ 值定義 $(K_t)_{\max} = \frac{(H_t)_{\max}}{(H_1)_{\frac{1}{8}}}$ ，

$$(K_t)_{\frac{1}{10}} = \frac{(H_t)_{\frac{1}{10}}}{(H_1)_{\frac{1}{8}}}, \quad (K_t)_{\frac{1}{8}} = \frac{(H_t)_{\frac{1}{8}}}{(H_1)_{\frac{1}{8}}} \quad \text{及} \quad (K_t)_{\text{ave}} = \frac{(H_t)_{\text{ave}}}{(H_1)_{\frac{1}{8}}},$$

吾人將 $(K_t)_{\max} \sim \frac{H_c}{R}$ ， $(K_t)_{\frac{1}{10}} \sim \frac{H_c}{R}$ ， $(H_t)_{\frac{1}{8}} \sim \frac{H_c}{R}$ 以及

$(K_t)_{\text{ave}} \sim \frac{H_c}{R}$ 之關係圖分別繪如圖 20～圖 29 所示。其中圖 20～圖 23 係假設 K_t 值與 $\frac{H_c}{R}$ 值成綫性相關所得之直綫關係式，由圖中

吾人發現除 $(K_t)_{\max}$ 以及 $(K_t)_{\frac{1}{10}}$ 值較為散亂外， $(K_t)_{\frac{1}{8}}$ ， $(K_t)_{\text{ave}}$ 與 $\frac{H_c}{R}$ 關係幾呈綫性關係，其關係性分別為

$$(K_t)_{\text{ave}} = 0.335 - 0.299 \frac{H_c}{R} = 0.299 (1.12 - \frac{H_c}{R}) \quad (6-11)$$

$$(K_t)_{\frac{1}{8}} = 0.555 - 0.478 \frac{H_c}{R} = 0.478 (1.16 - \frac{H_c}{R}) \quad (6-12)$$

$$(K_t)_{\frac{1}{10}} = 0.743 - 0.619 \frac{H_c}{R} = 0.619 (1.20 - \frac{H_c}{R}) \quad (6-13)$$

$$(K_t)_{\max} = 1.073 - 0.908 \frac{H_c}{R} = 0.908 (1.18 - \frac{H_c}{R}) \quad (6-14)$$

而圖 25～圖 28 係假設其 K_t 值與 $\frac{H_c}{R}$ 值成二次曲綫所得圖形其

關係式分別為

$$(K_t)_{\text{ave}} = 0.308 - 0.192 \frac{H_c}{R} - 0.996 \left(\frac{H_c}{R} \right)^2 \quad (6-15)$$

$$(K_t)_{\frac{1}{8}} = 0.497 - 0.248 \frac{H_c}{R} - 0.215 \left(\frac{H_c}{R} \right)^2 \quad (6-16)$$

$$(K_t)_{\frac{1}{10}} = 0.595 - 0.709 \frac{H_c}{R} - 0.484 \left(\frac{H_c}{R} \right)^2 \quad (6-17)$$

$$(K_t)_{\text{max}} = 0.864 - 0.174 \frac{H_c}{R} - 0.613 \left(\frac{H_c}{R} \right)^2 \quad (6-18)$$

而圖 24 與圖 29 係將上述四種關係式繪於相同座標以資比較，吾人發現當 $\frac{H_c}{R}$ 值愈大時，四種 K_t 值相差愈小，而當 $\frac{H_c}{R}$ 值趨小時，四種 K_t 值則相對之增加

而圖 30 與圖 31 則係規則波浪之波高傳遞係數與不規則波部份波浪傳遞係數之比較。吾人發現規則波浪傳遞係數與不規則波波浪傳遞係數 $(K_t)_{\frac{1}{8}}$ 值非常一致，亦即根據規則波試驗所求得之波浪傳遞係數事實上和不規則波傳遞波浪，若考慮其前面 $\frac{1}{3}$ 部分波高之平均值所得之結果是相同。此點觀念上非常重要，因為由前面所述使用規則波試驗對結果之影響之公式推導，吾人所得之結論係規則波試驗用 $H_{\frac{1}{8}}$ 為波高在模型中鼓出之人工浪，其能量相當於同一縮尺自然不規則波浪能量之兩倍，故有些設計工程師時常誤認為利用規則波所作模型試驗之結果可謂過於安全而往往建議上級決策單位降低堤頂高度之設計以節省工程費惟由試驗結果顯示，與事實恰好相反，吾人應相對地提高其安全係數才對以確保港池之穩靜。

有關不規則波浪其越波後傳遞波浪各種 T_{max} ， $T_{\frac{1}{10}}$ ， $T_{\frac{1}{8}}$ 及 T_{ave} 與

入射波浪週期 $(T_i)_{\frac{1}{8}}$ 比值 $\sim \frac{H_c}{R}$ 值關係如圖 32 ～圖 35 所示，圖形顯示其傳遞波浪週期與入射波浪週期比值與 $\frac{H_c}{R}$ 之相關性較規則波不明顯，除傳遞波浪 T_{max} 於本次試驗中有 42 % 之傳遞波浪其週期大於原入射波浪 $T_{\frac{1}{8}}$ 週期外，其餘如 $T_{\frac{1}{10}}$ ， $T_{\frac{1}{8}}$ 以及 T_{avo} 等絕大部份均較原入射波浪週期為短，對 $T_{\frac{1}{10}}$ 而言約為原入射波浪週期 $T_{\frac{1}{8}}$ 之 90 %，而 $T_{\frac{1}{8}}$ ， T_{avo} 則浪次為原入射波浪週期 $T_{\frac{1}{8}}$ 之 85 % 與 80 %。惟由圖形當中，吾人有一點必須特別注意者即當 $\frac{H_c}{R}$ 比值大於 0.23 而入射週期 $T_{\frac{1}{8}} > 8$ 秒時，根據試驗結果顯示其傳遞波浪週期增大有達數倍者此為規則波試驗所沒有之現象，該種長週期波浪其波高雖不甚大惟若港池形狀配置不當時，極易造成港內波浪共振現象 (oscillation) 以致影響船隻旋泊及作業安全，設計時尤應注意防範

所有實測之不規則波試驗記錄值如表 8 所示

表 8 不規則波試驗紀錄

$(H_t)_{\max}$ (cm)	$(H_t)_{\frac{1}{10}}$ (cm)	$(H_t)_{\frac{1}{8}}$ (cm)	$(H_t)_{\text{ave}}$ (cm)	R (cm)	$\frac{(H_t)_{\max}}{H_1}$	$\frac{(H_t)_{\frac{1}{10}}}{H_1}$	$\frac{(H_t)_{\frac{1}{8}}}{H_1}$	$\frac{(H_t)_{\text{ave}}}{H_1}$	$\frac{H_c}{R}$
4.22	3.01	2.07	1.16	8.37	0.482	0.344	0.243	0.133	0.597
6.54	4.56	3.14	1.67	11.52	0.616	0.430	0.296	0.157	0.515
7.37	5.41	3.95	2.24	10.46	0.592	0.434	0.317	0.180	0.478
7.76	5.89	4.28	2.40	10.37	0.574	0.436	0.316	0.177	0.482
9.16	6.57	4.56	2.53	10.90	0.633	0.454	0.328	0.175	0.459
5.51	3.47	2.36	1.28	9.42	0.611	0.385	0.262	0.142	0.531
5.99	3.90	3.44	2.02	10.41	0.584	0.380	0.336	0.197	0.480
8.78	5.86	4.45	2.70	12.41	0.734	0.490	0.373	0.226	0.403
10.58	7.16	5.25	3.14	13.10	0.767	0.519	0.381	0.228	0.382
12.24	9.68	7.20	4.24	14.95	0.779	0.616	0.459	0.269	0.334
5.03	3.33	2.55	1.51	9.20	0.534	0.354	0.271	0.160	0.543
6.52	4.60	3.19	1.88	10.11	0.612	0.431	0.299	0.176	0.494
5.72	4.36	3.30	2.04	10.69	0.484	0.368	0.279	0.172	0.468
2.29	1.88	1.32	0.74	16.08	0.260	0.214	0.150	0.084	0.778
3.62	2.91	2.10	1.21	13.54	0.344	0.276	0.199	0.115	0.738
5.27	3.69	2.85	1.64	13.88	0.439	0.308	0.237	0.137	0.720
10.52	6.31	3.91	2.22	19.82	0.830	0.498	0.308	0.226	0.504
6.02	4.68	3.56	2.13	14.67	0.431	0.335	0.255	0.152	0.682
4.28	3.39	2.20	1.13	13.52	0.461	0.364	0.236	0.122	0.740
4.16	3.53	2.80	1.64	16.08	0.363	0.308	0.244	0.143	0.622
7.46	4.60	3.30	1.92	15.29	0.616	0.378	0.272	0.158	0.654
7.64	5.23	3.74	2.23	15.68	0.562	0.385	0.275	0.164	0.637
9.96	6.52	4.68	2.27	16.61	0.655	0.429	0.308	0.182	0.602
1.52	1.16	0.97	0.48	19.37	0.164	0.126	0.105	0.052	0.878
3.96	3.12	2.36	1.35	19.89	0.330	0.260	0.197	0.112	0.647
4.60	3.40	2.58	1.51	18.99	0.335	0.248	0.187	0.110	0.790
5.78	4.09	3.04	1.80	20.74	0.398	0.281	0.209	0.124	0.723
7.29	4.44	2.44	1.31	20.45	0.761	0.463	0.255	0.137	0.733

表 8 (續) 不規則波試驗記錄

T_{max} (sec)	$T_{\frac{1}{10}}$ (sec)	$T_{\frac{1}{3}}$ (sec)	T_{ave} (sec)	T_{in} (sec)	$(K_T)_{max}$	$(K_T)_{\frac{1}{10}}$	$(K_T)_{\frac{1}{3}}$	$(K_T)_{ave}$	$\frac{H_c}{R}$
0.96	0.98	0.94	0.85	1.23	0.776	0.801	0.764	0.691	0.597
1.26	1.19	1.10	0.97	1.29	0.977	0.922	0.853	0.752	0.515
1.34	1.25	1.16	0.95	1.33	1.08	0.940	0.872	0.714	0.478
1.28	1.30	1.12	0.94	1.39	0.921	0.935	0.806	0.676	0.482
1.42	1.34	1.14	0.94	1.41	1.08	0.950	0.808	0.667	0.459
1.02	1.04	1.05	0.91	1.63	0.626	0.638	0.644	0.558	0.531
1.40	1.30	1.15	1.08	1.60	0.875	0.812	0.719	0.675	0.480
1.61	1.40	1.20	0.99	1.60	1.00	0.878	0.750	0.619	0.403
1.80	1.61	1.24	1.07	1.71	1.05	0.942	0.725	0.626	0.382
1.75	1.70	1.49	1.24	1.72	1.02	0.988	0.866	0.721	0.334
2.35	1.61	1.22	0.97	2.10	1.12	0.767	0.581	0.462	0.543
3.04	1.81	1.35	1.09	2.29	1.33	0.790	0.590	0.476	0.494
0.73	1.51	1.30	1.00	2.35	0.311	0.642	0.553	0.426	0.468
0.71	0.96	0.85	0.90	1.21	0.587	0.793	0.702	0.244	0.778
1.16	1.03	0.92	0.84	1.27	0.913	0.811	0.724	0.761	0.738
1.31	1.12	0.98	0.81	1.30	1.01	0.862	0.754	0.623	0.720
1.01	1.36	1.16	0.95	1.35	0.748	1.00	0.859	0.704	0.504
1.12	1.20	1.07	0.87	1.44	0.778	0.833	0.743	0.604	0.682
1.01	1.05	0.98	1.10	1.65	0.612	0.636	0.594	0.667	0.740
1.23	1.11	1.02	0.88	1.65	0.745	0.673	0.618	0.533	0.622
0.96	1.13	1.07	0.88	1.78	0.539	0.635	0.601	0.494	0.654
1.53	1.17	1.08	0.92	1.68	0.908	0.696	0.643	0.548	0.637
1.90	1.32	1.20	0.96	1.78	1.07	0.742	0.674	0.539	0.602
0.78	0.89	0.85	0.74	1.22	0.639	0.730	0.697	0.606	0.878
0.60	0.89	0.83	0.86	1.24	0.484	0.718	0.669	0.694	0.615
0.93	0.93	0.91	0.75	1.34	0.694	0.694	0.679	0.560	0.647
1.10	1.11	0.98	0.85	1.40	0.786	0.793	0.700	0.607	0.790
1.17	1.02	0.94	0.80	1.46	0.801	0.699	0.644	0.548	0.723
0.6	0.89	0.83	0.86	1.60	0.375	0.556	0.519	0.538	0.615
5.26	8.21	4.50	2.80	1.61	3.27	5.10	2.79	1.74	0.718
2.76	2.08	1.87	1.41	1.69	1.63	1.23	1.11	0.834	0.719
3.02	2.23	1.68	1.26	1.84	1.64	1.21	0.910	0.685	0.693
4.1	2.90	1.72	1.26	2.26	1.81	1.28	0.761	0.560	0.776

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

Data Point
 Model Data

□ 1:50 Model

△ 1:5 Model

— Theory

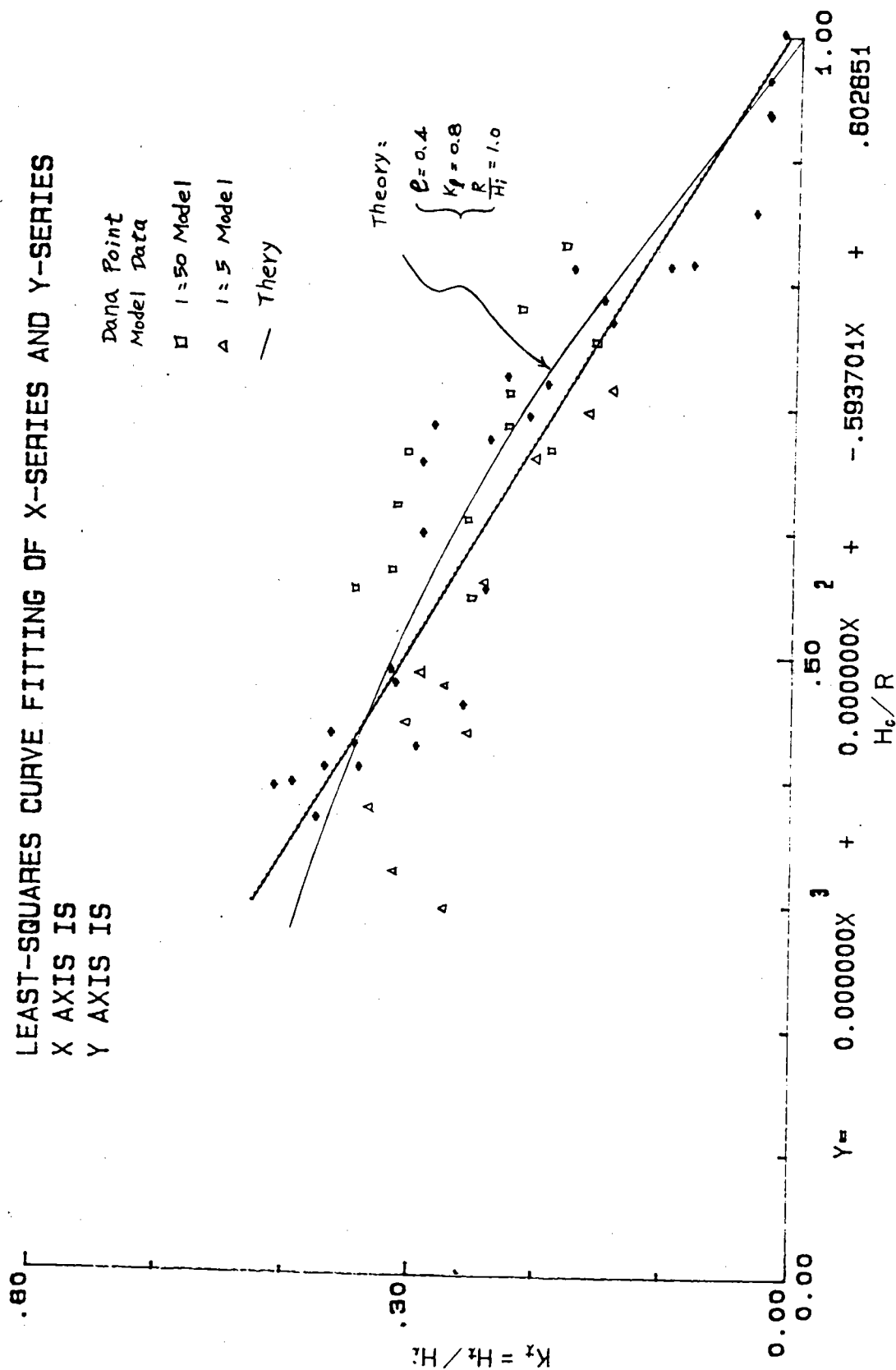


圖14. 規則波 K_1 值與 Cross & Sollitt 理論值等之比較

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

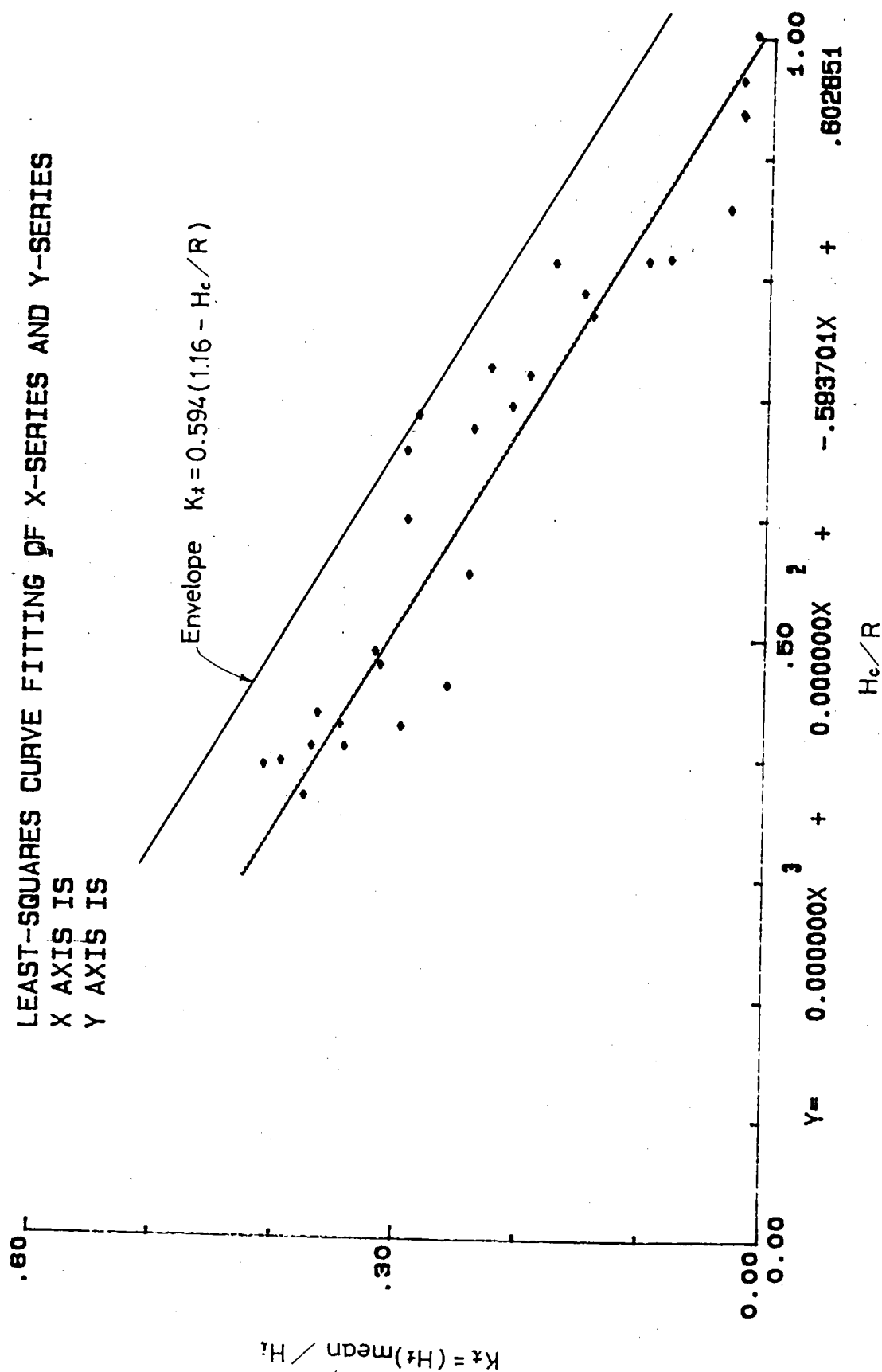


圖 15. 規則波 $K_t \sim H_c/R$ 關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

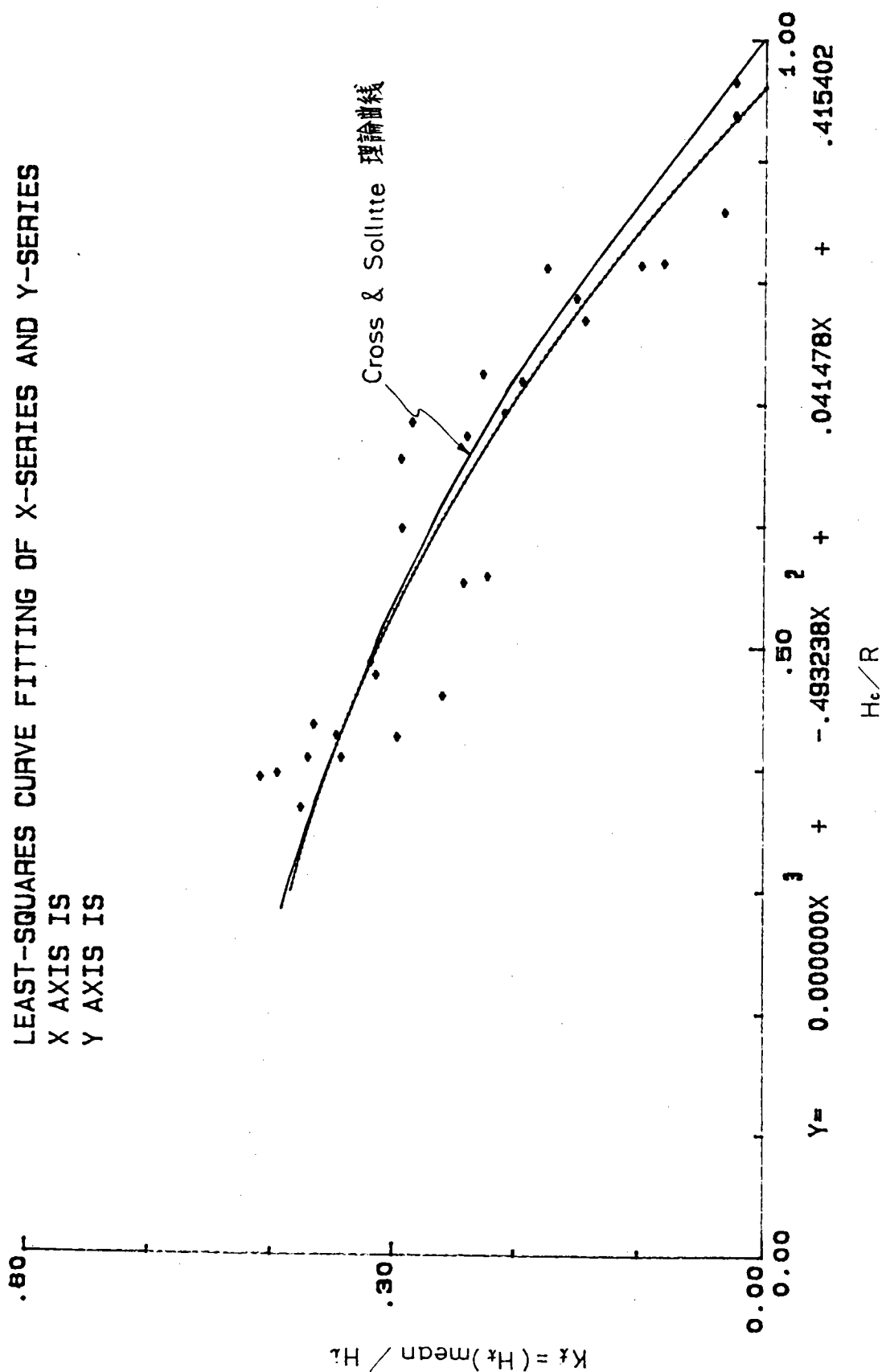


圖 16. 規則波試驗數據二次 Fitting 曲綫與 Cross & Sollitte 理論曲綫比較圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

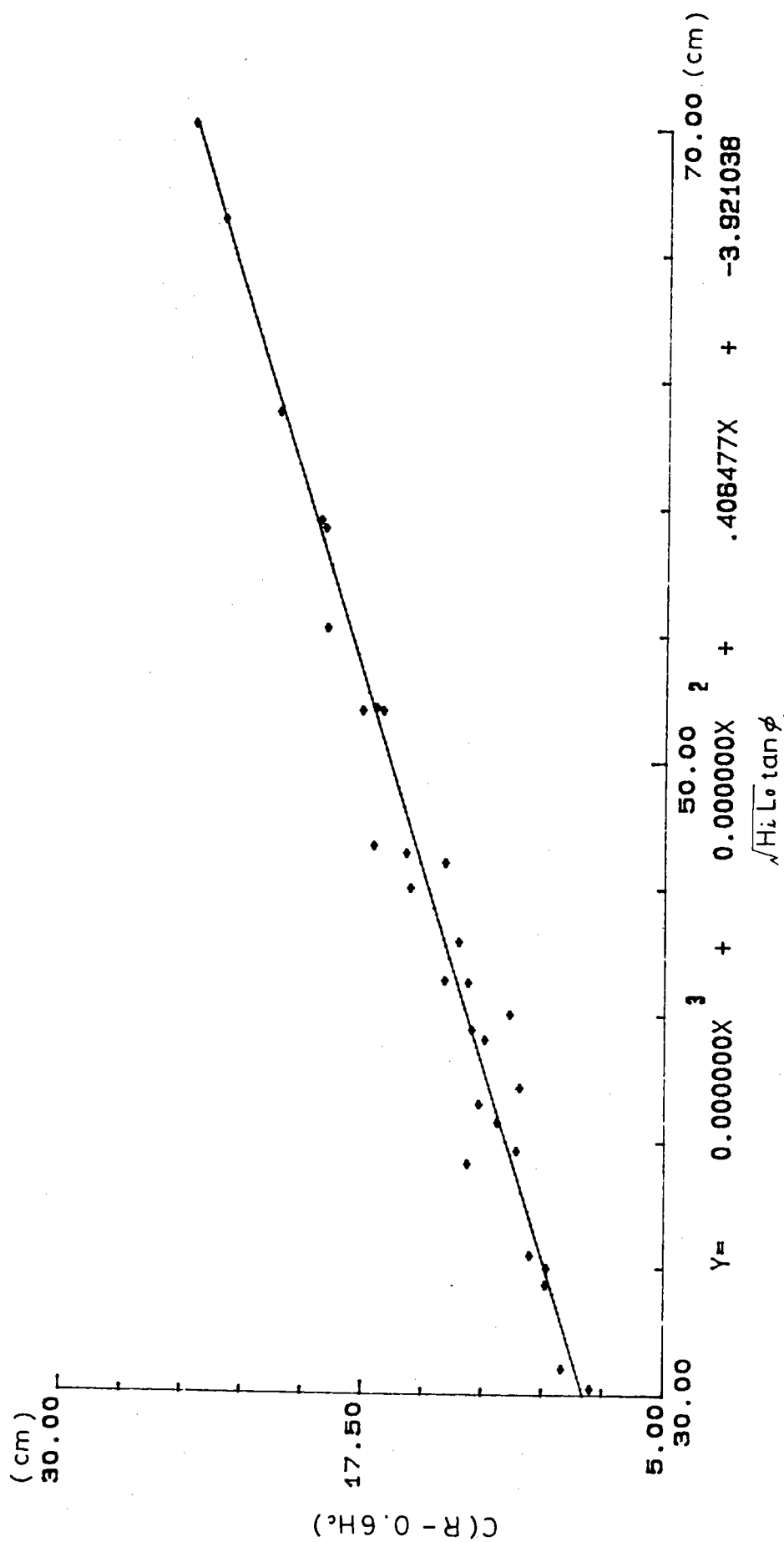


圖 17. 規則波 $C(R - 0.6H_c)$ 與 $\sqrt{H_i L_0} \tan \phi$ 關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

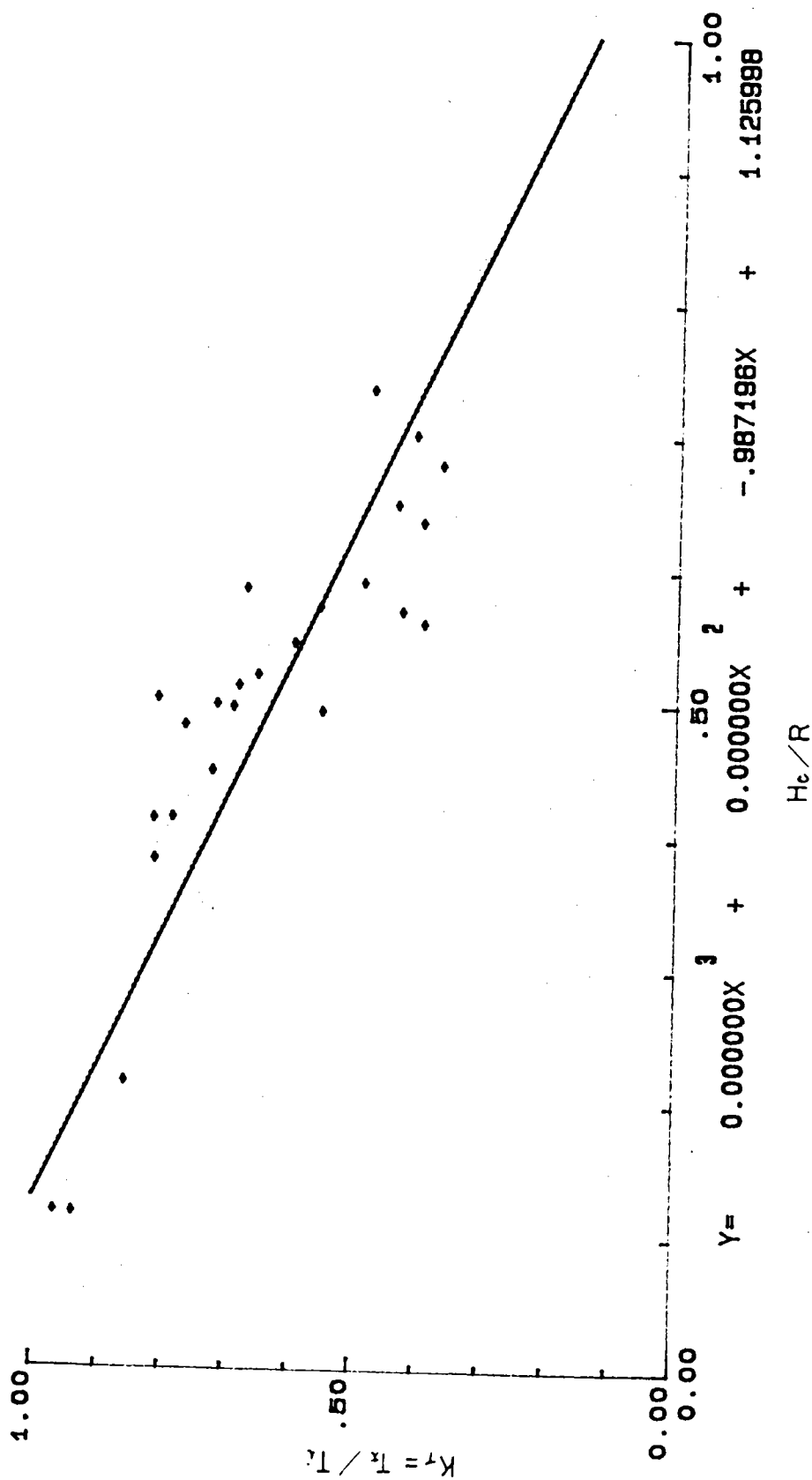


圖 18. 規則波堤頂越波後傳遞波浪週期減衰係數 $K_r \sim H_c / R$ 綫性關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

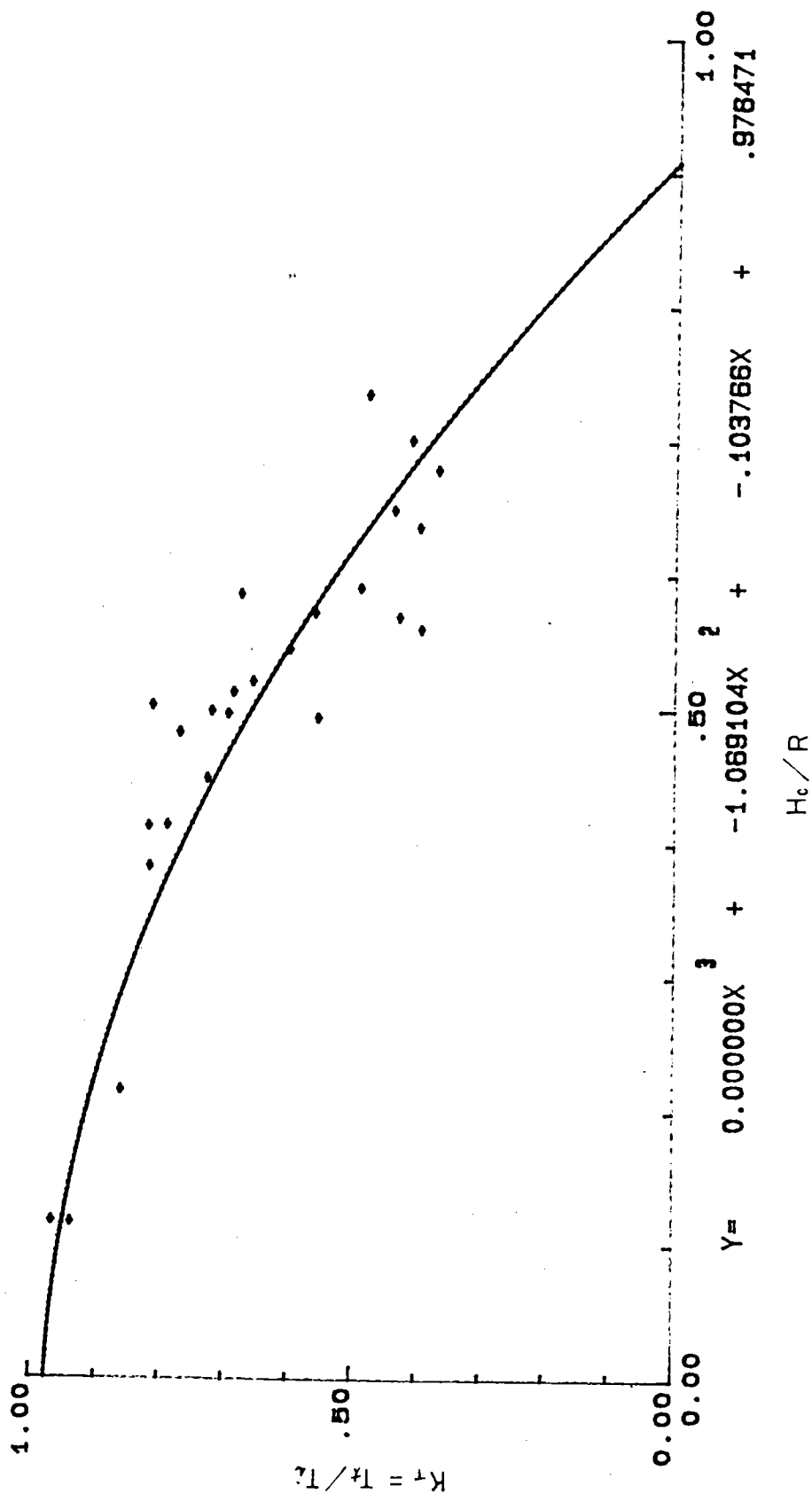


圖19. 規則波堤頂越波後傳遞波浪週期減衰係數 $K_T \sim H_c / R$ 二次曲綫關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

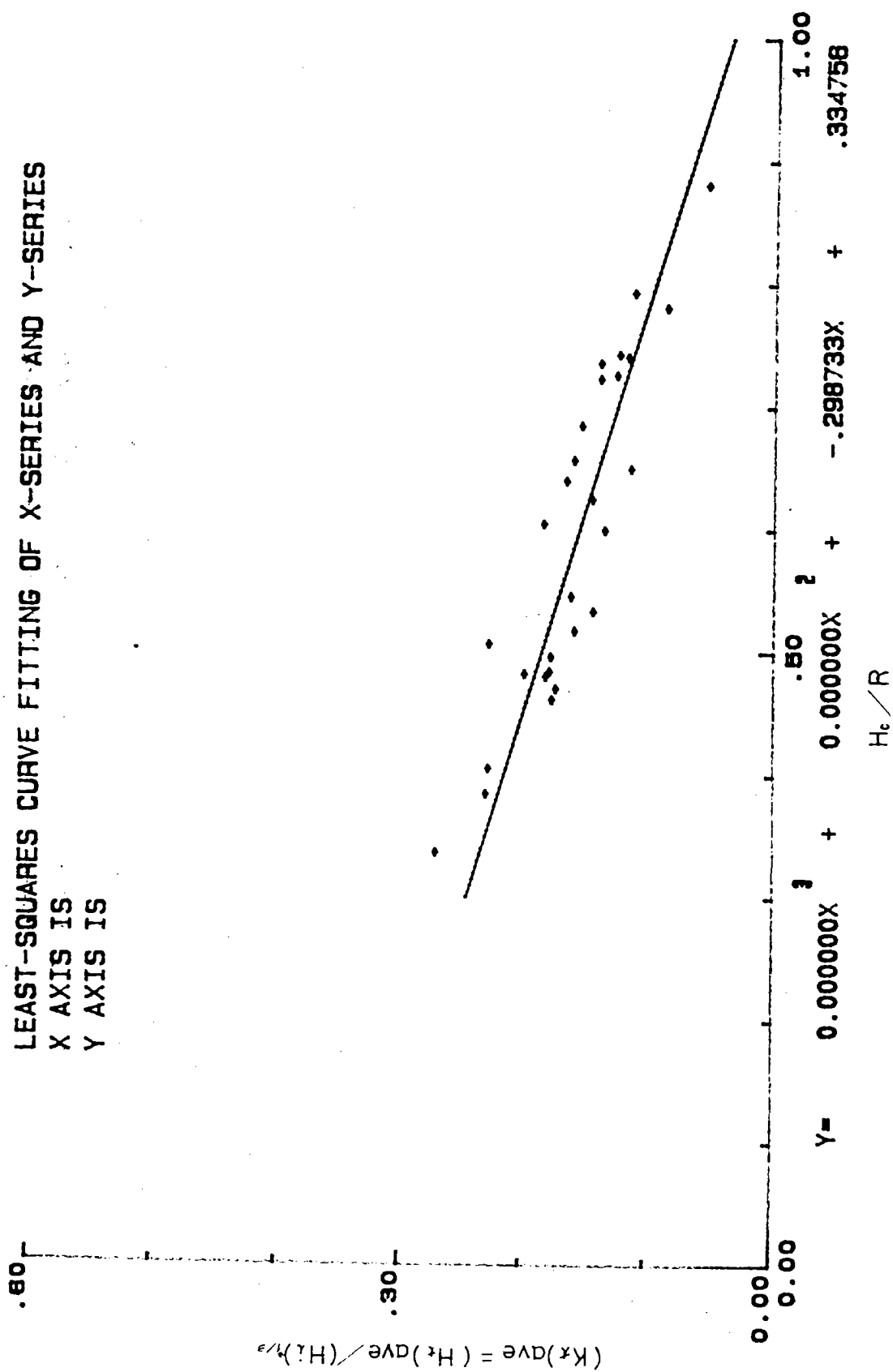


圖 20. 不規則波 $(K_x)_{ave} \sim H_c/R$ 线性關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

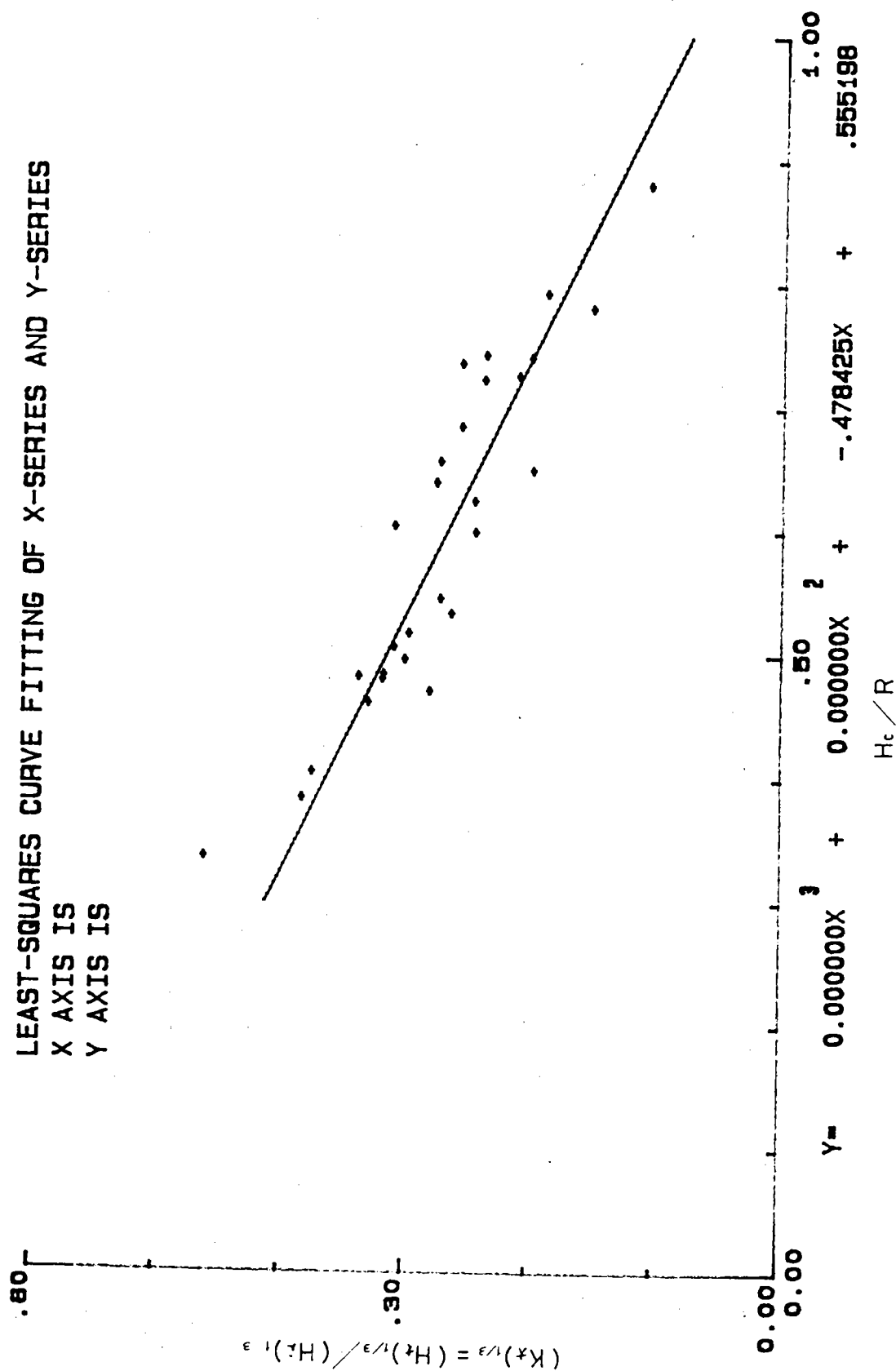


圖 21. 不規則波 $(K_x)_{1/3} \sim H_c/R$ 綫性關係圖

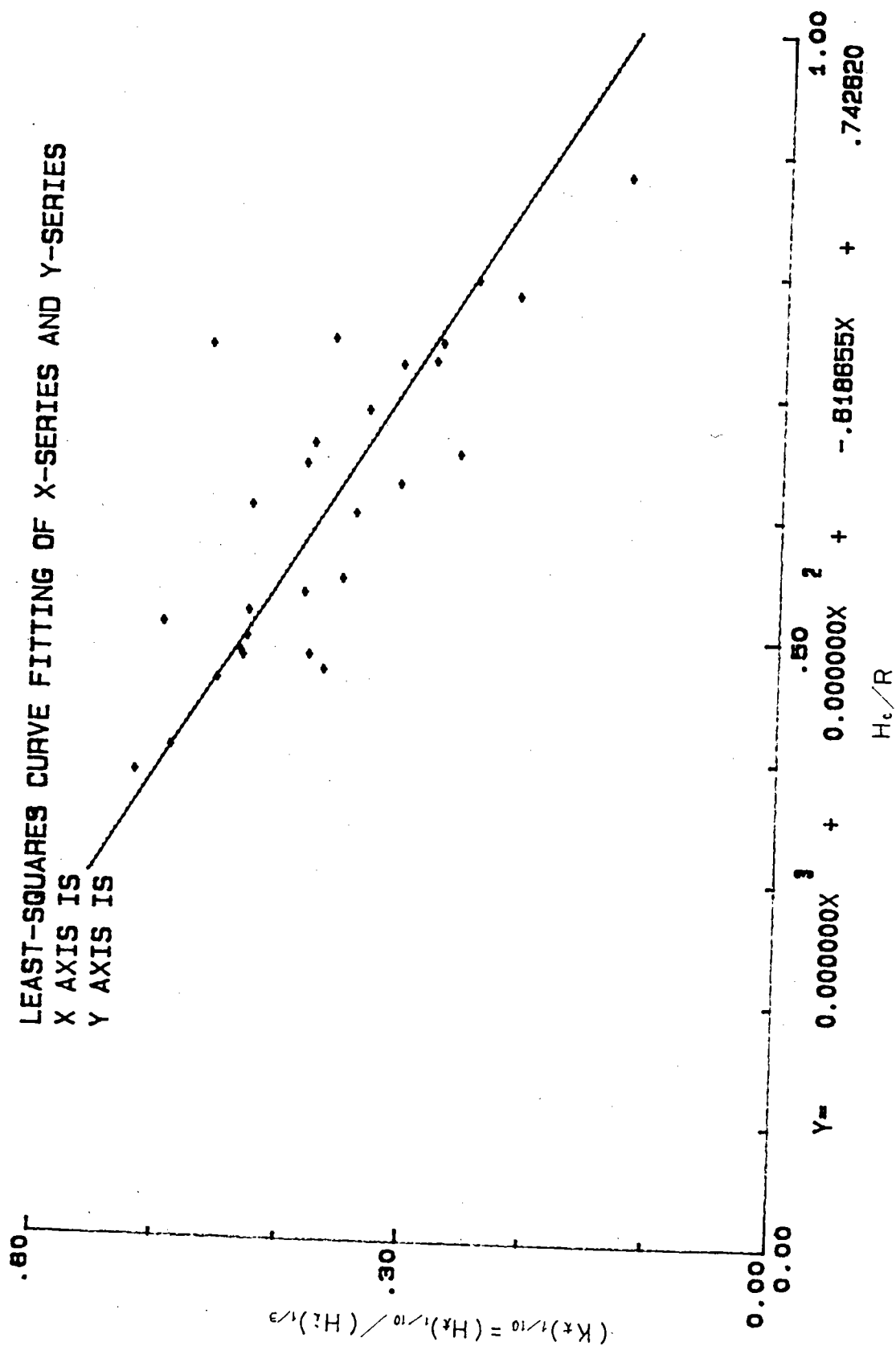


圖22. 不規則波 $(Kx)_{1/10} \sim H_c/R$ 綫性關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

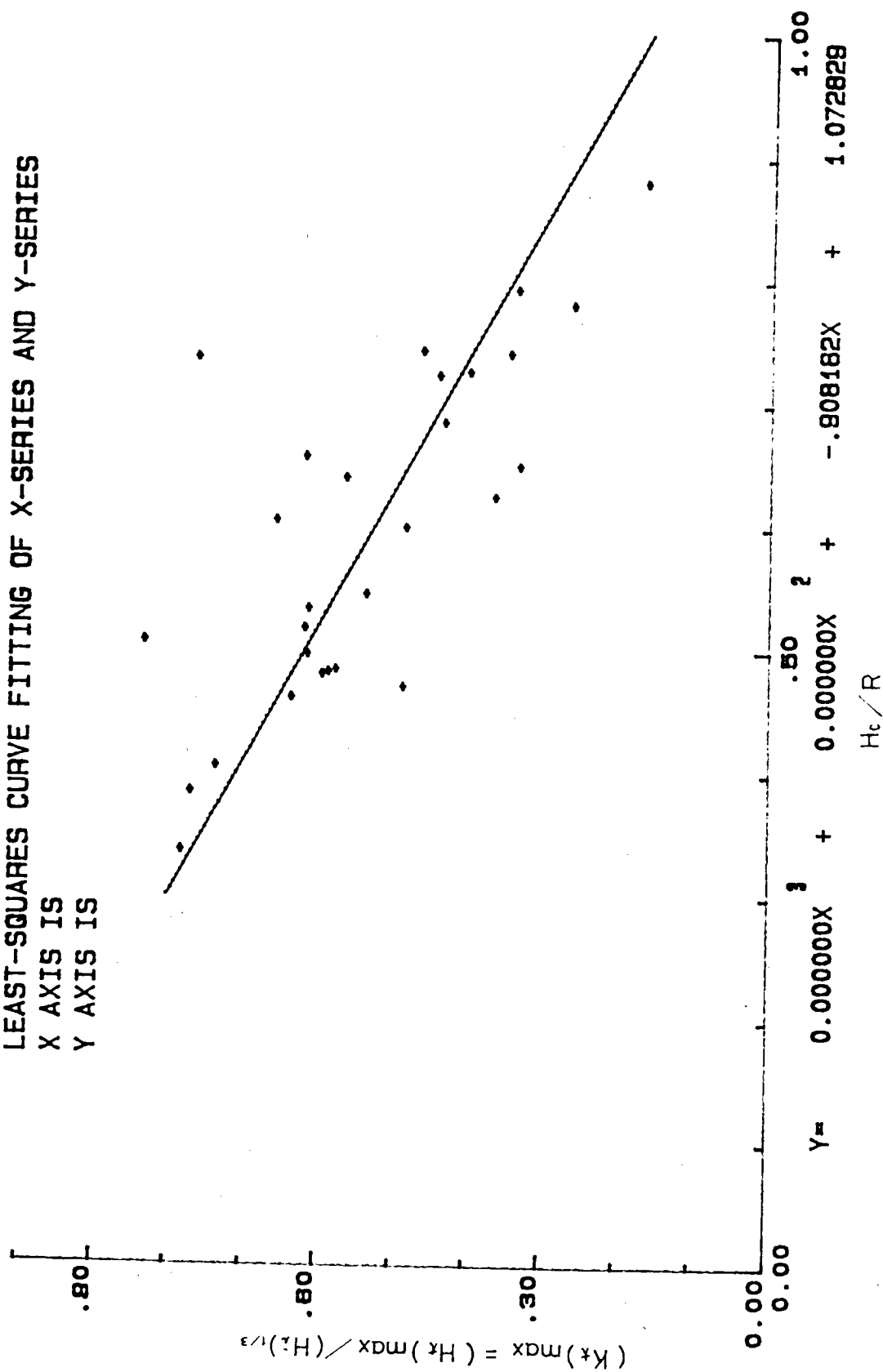


圖 23. 不規則波 $(K_x)_{\max} \sim H_c / R$ 綫性關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

$(K_x)_{\max} \sim H_c/R$
 $(K_x)_{1/10} \sim H_c/R$
 $(K_x)_{1/3} \sim H_c/R$
 $(K_x)_{\text{ave}} \sim H_c/R$

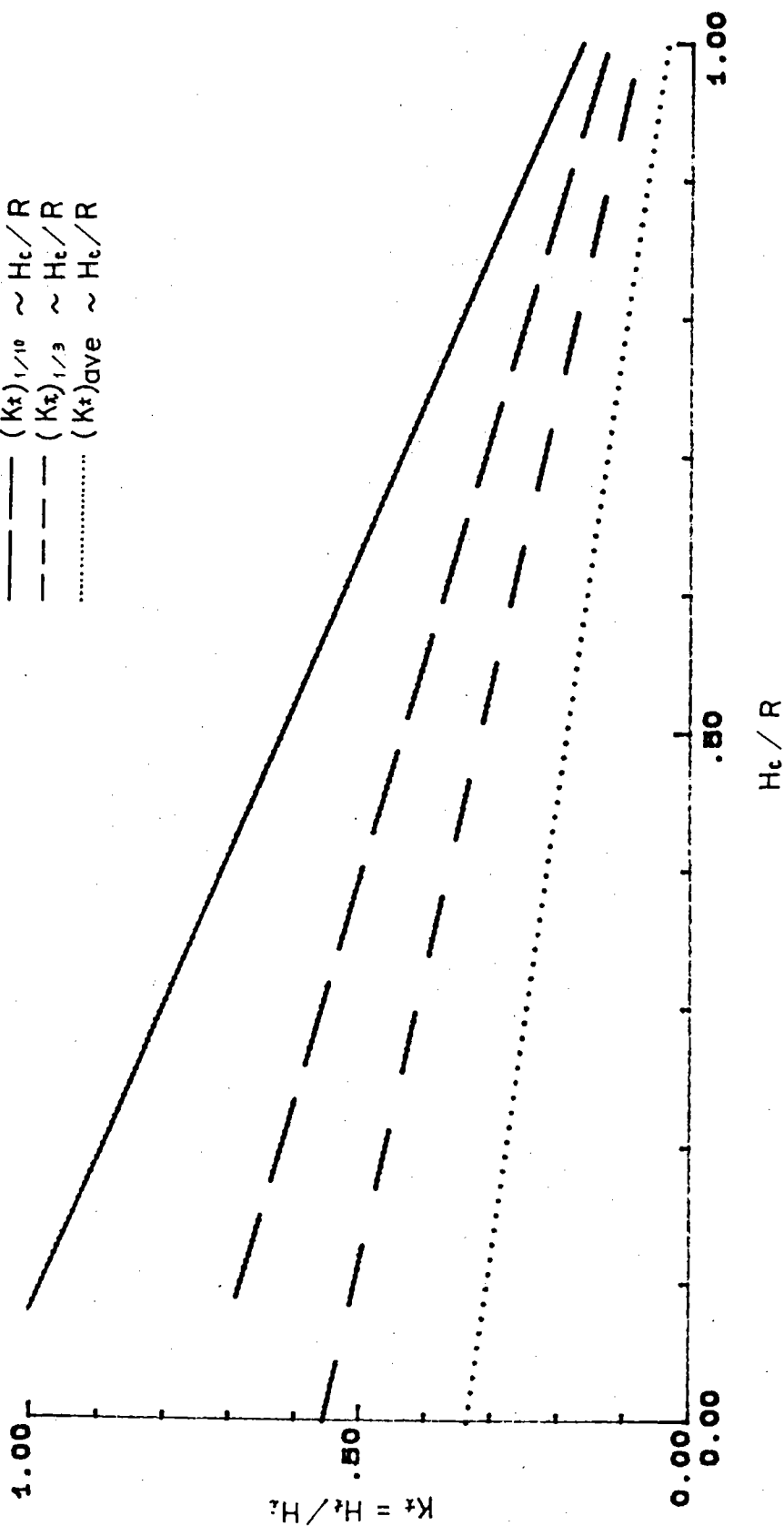


圖 24. 不規則波 $(K_x)_{\max}$, $(K_x)_{1/10}$, $(K_x)_{1/3}$, $(K_x)_{\text{ave}}$ 與 H_c/R 線性關係比較圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

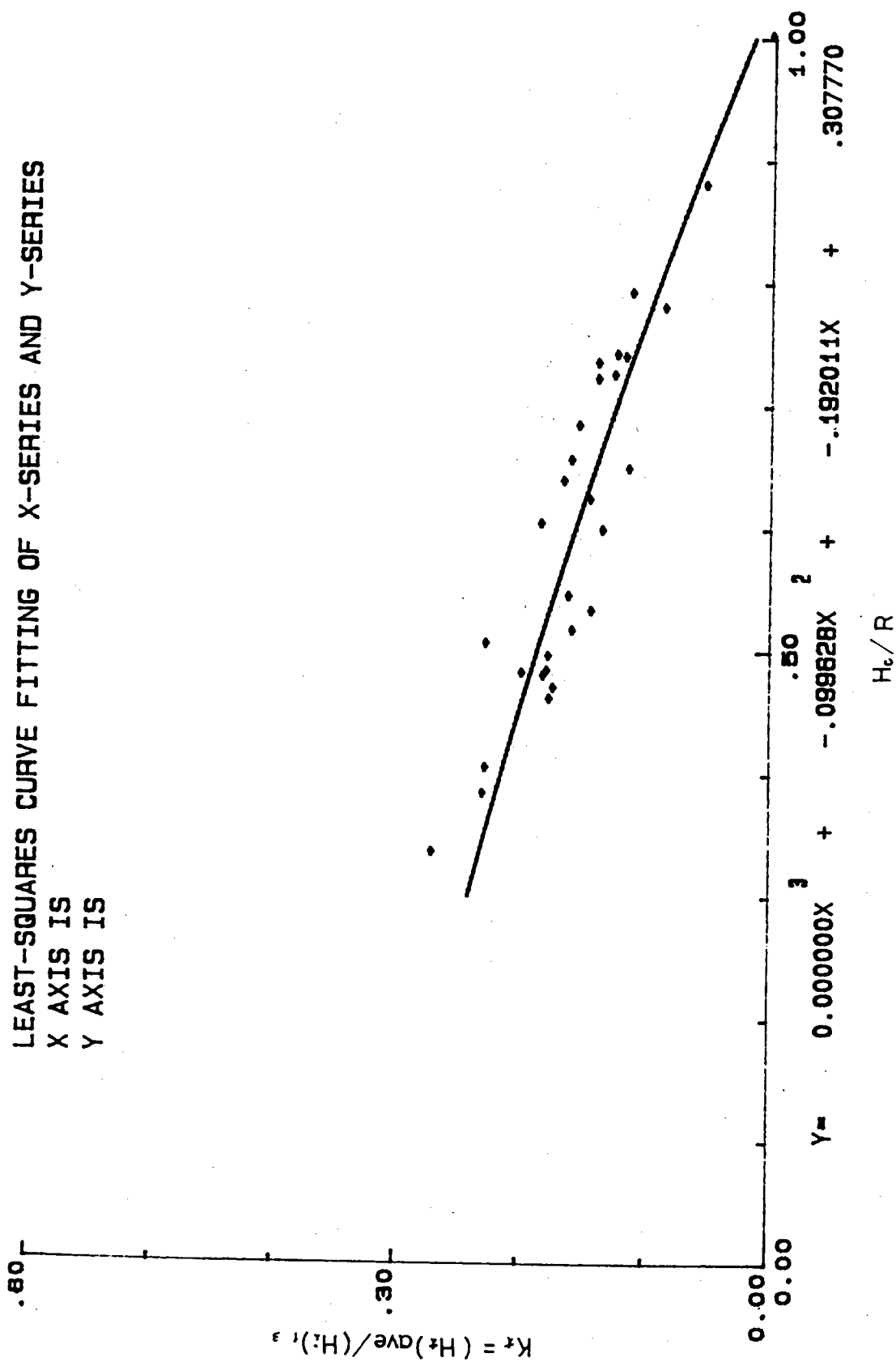


圖 25. 不規則波 $(K_x)_{ave} \sim H_c / R$ 二次曲線關係圖

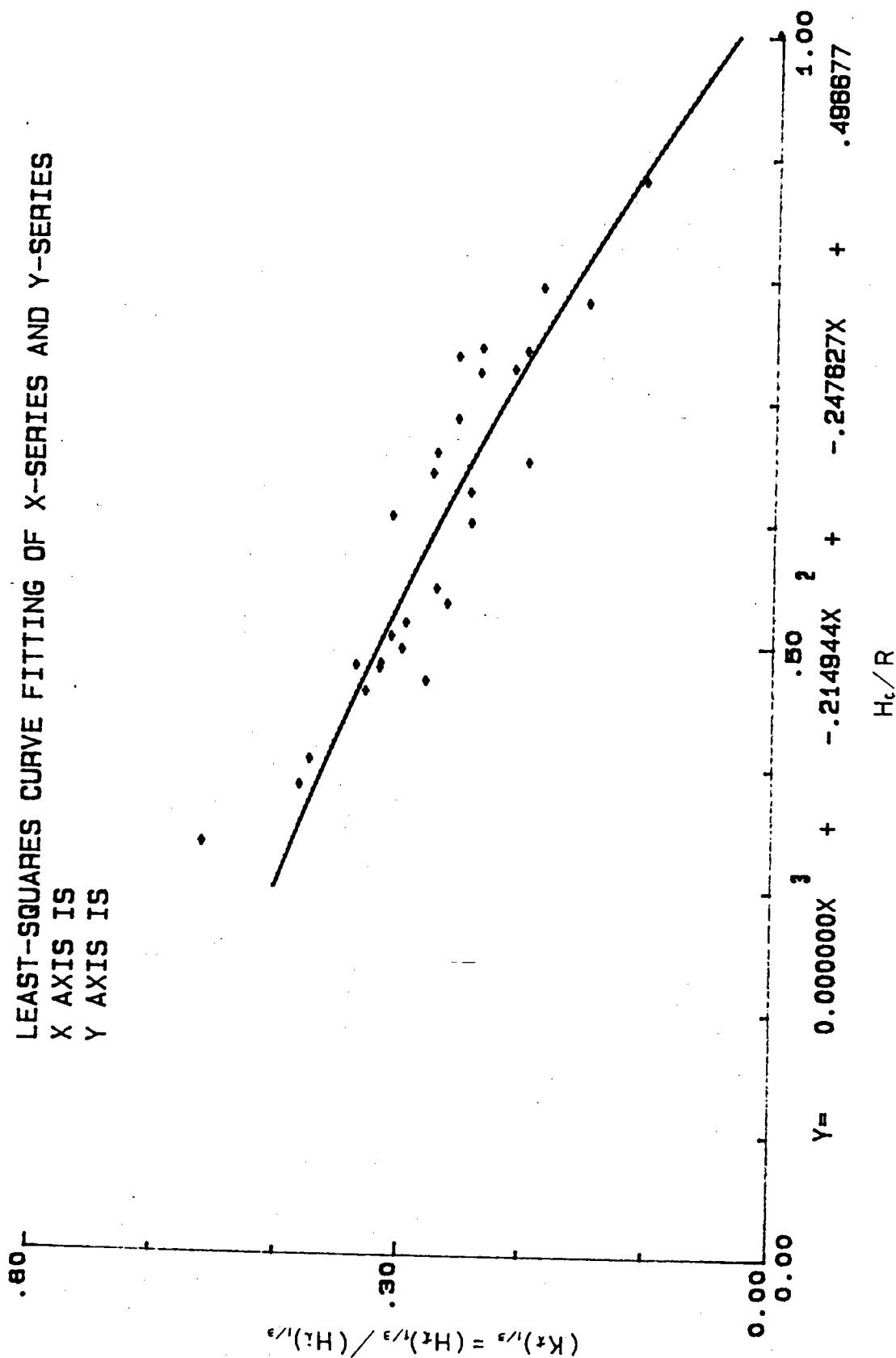


圖26. 不規則波 $(K_x)_{1/3} \sim H_c/R$ 二次曲綫關係圖

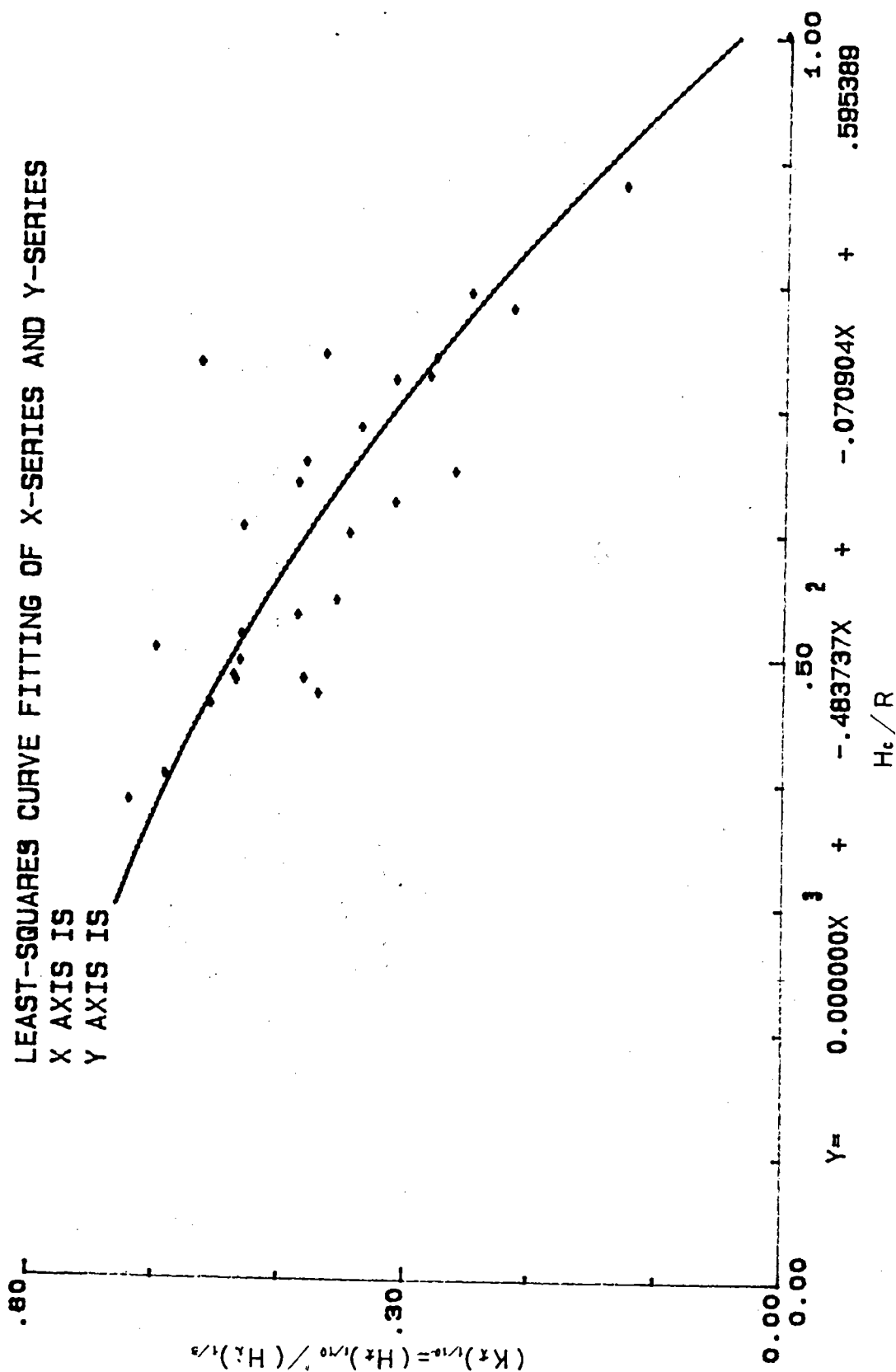


圖27. 不規則波 $(Kx)_{1/10} \sim H_c/R$ 二次曲線關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES
 X AXIS IS
 Y AXIS IS

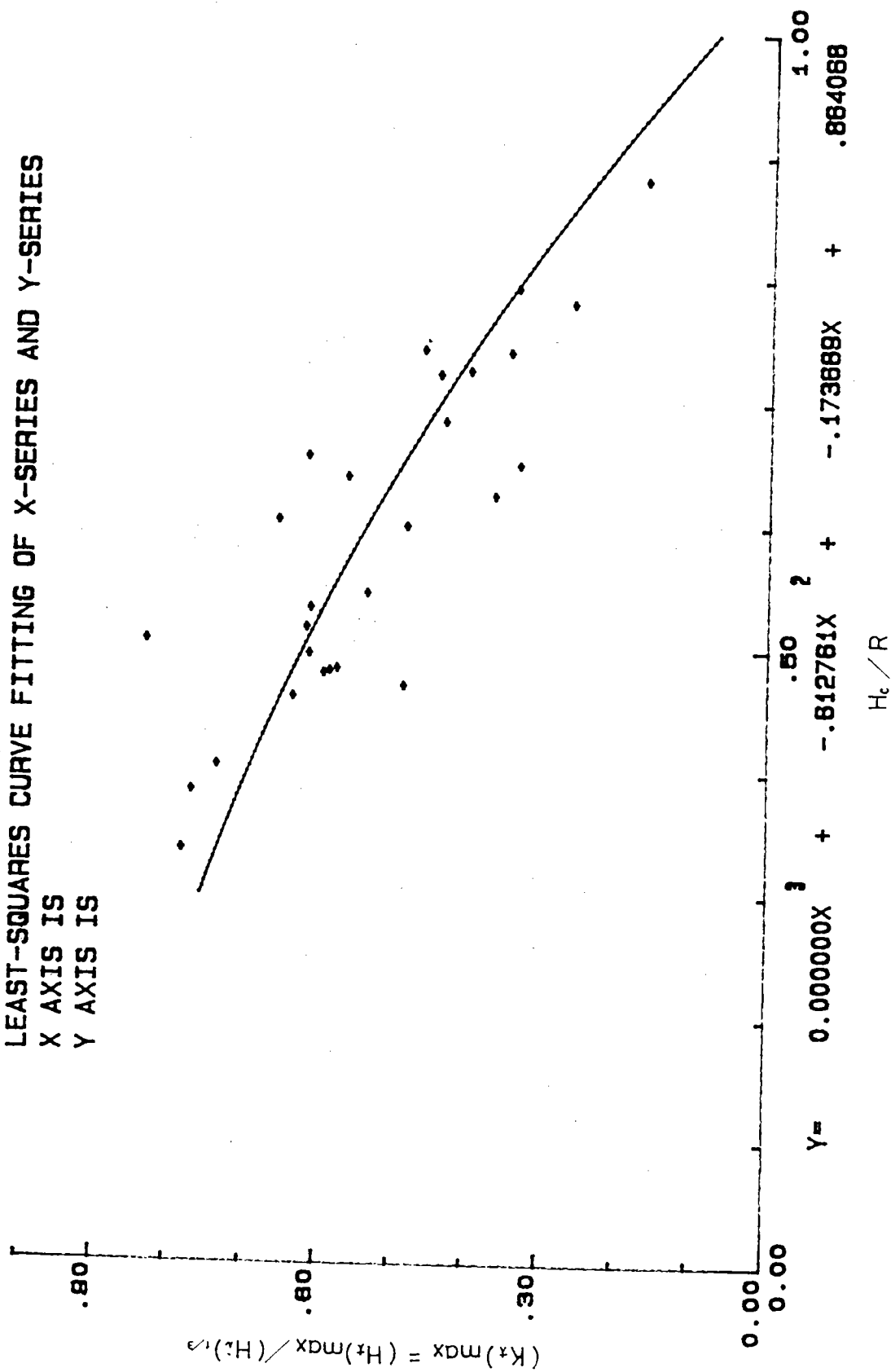


圖28. 不規則波 $(K_x)_{\max} \sim H_c / R$ 二次曲線關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

X AXIS IS :

Y AXIS IS :

- $(K_x)_{\max} \sim H_c/R$
- - $(K_x)_{1/10} \sim H_c/R$
- - - $(K_x)_{1/3} \sim H_c/R$
- $(K_x)_{\text{ave}} \sim H_c/R$

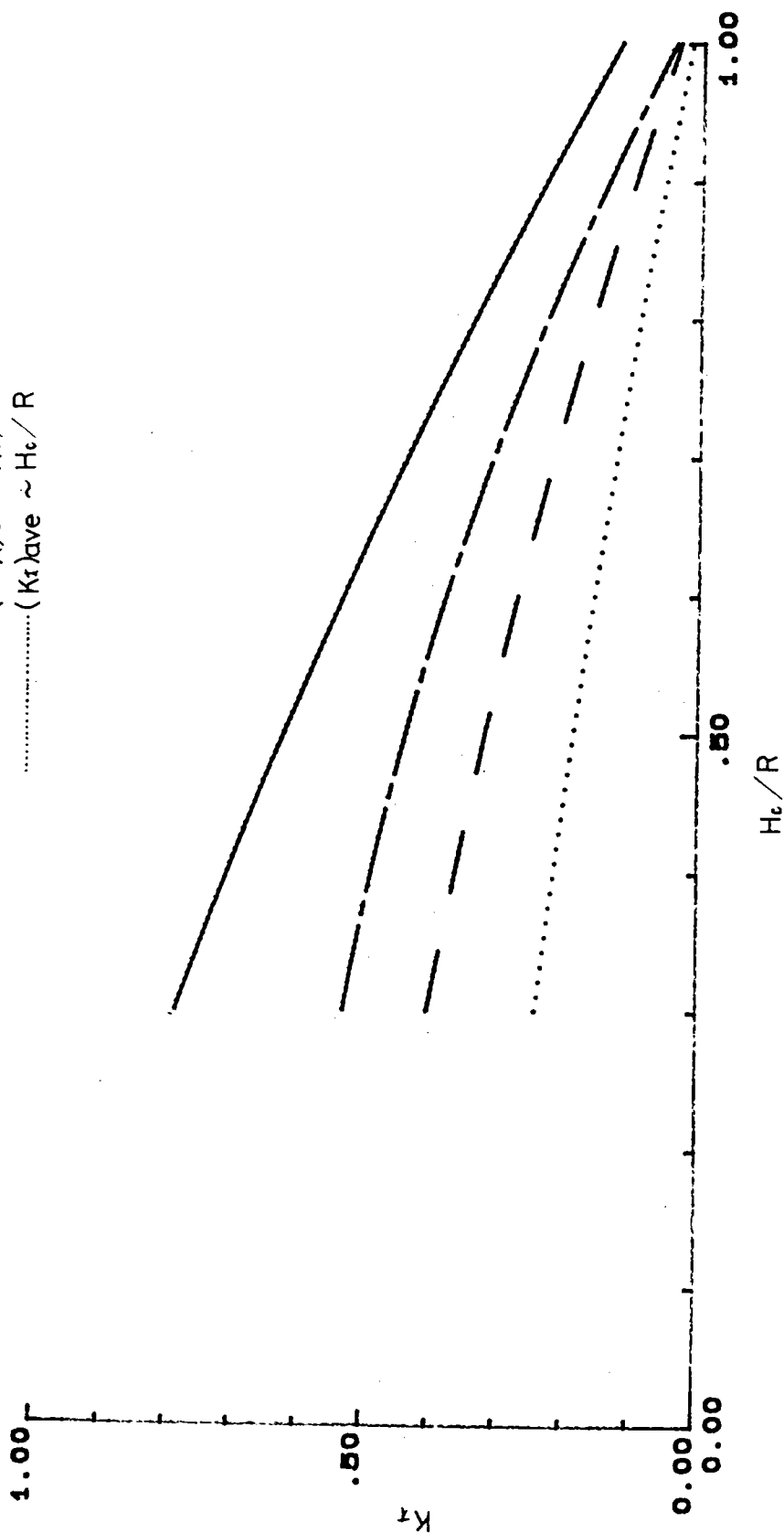


圖29. 不規則波 $(K_x)_{\max}$, $(K_x)_{1/10}$, $(K_x)_{1/3}$, $(K_x)_{\text{ave}}$ 與 H_c/R 二次曲線關係比較圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

X AXIS IS

Y AXIS IS

$(K_t)_{\max} \sim H_c/R$
 $(K_t)_{1/10} \sim H_c/R$
 $(K_t)_{1/3} \sim H_c/R$
 $(K_t)_{\text{ave}} \sim H_c/R$

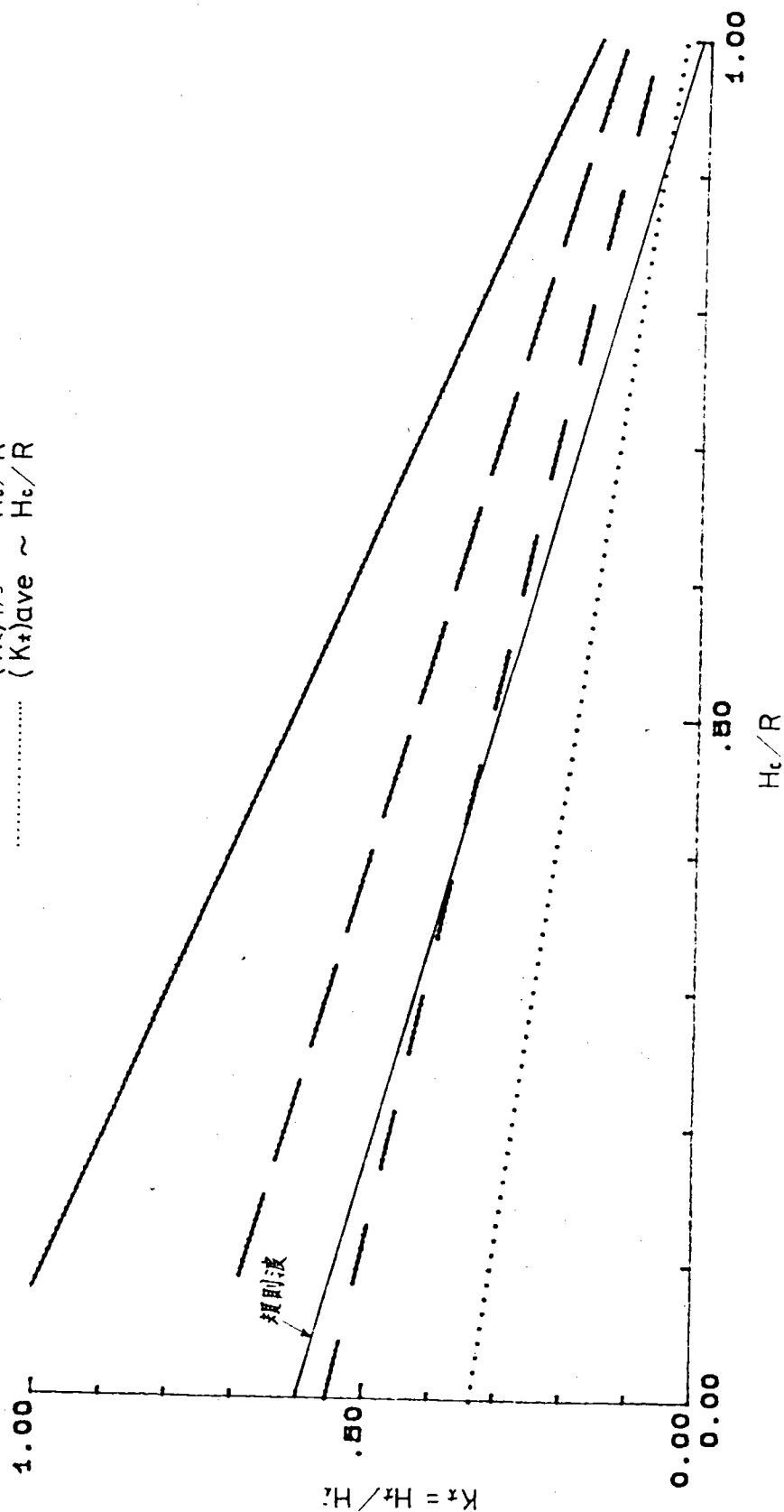


圖 30. 規則波與不規則波 $K_x \sim H_c/R$ 綫性關係比較圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

X AXIS IS :

Y AXIS IS :

- $(K_t)_{\max} \sim H_c/R$
- $(K_t)_{1/10} \sim H_c/R$
- - $(K_t)_{1/2} \sim H_c/R$
- $(K_t)_{\text{ave}} \sim H_c/R$

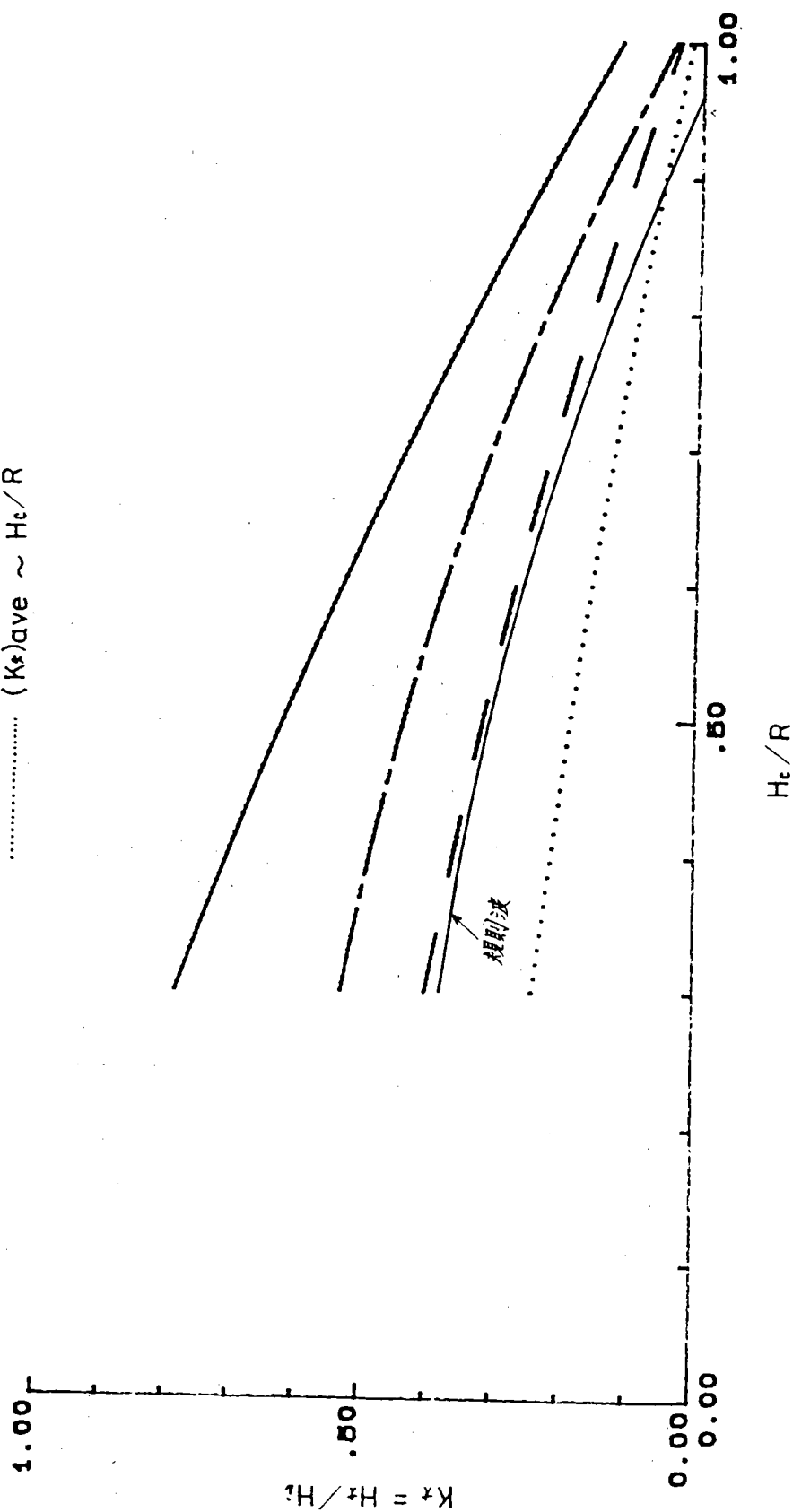
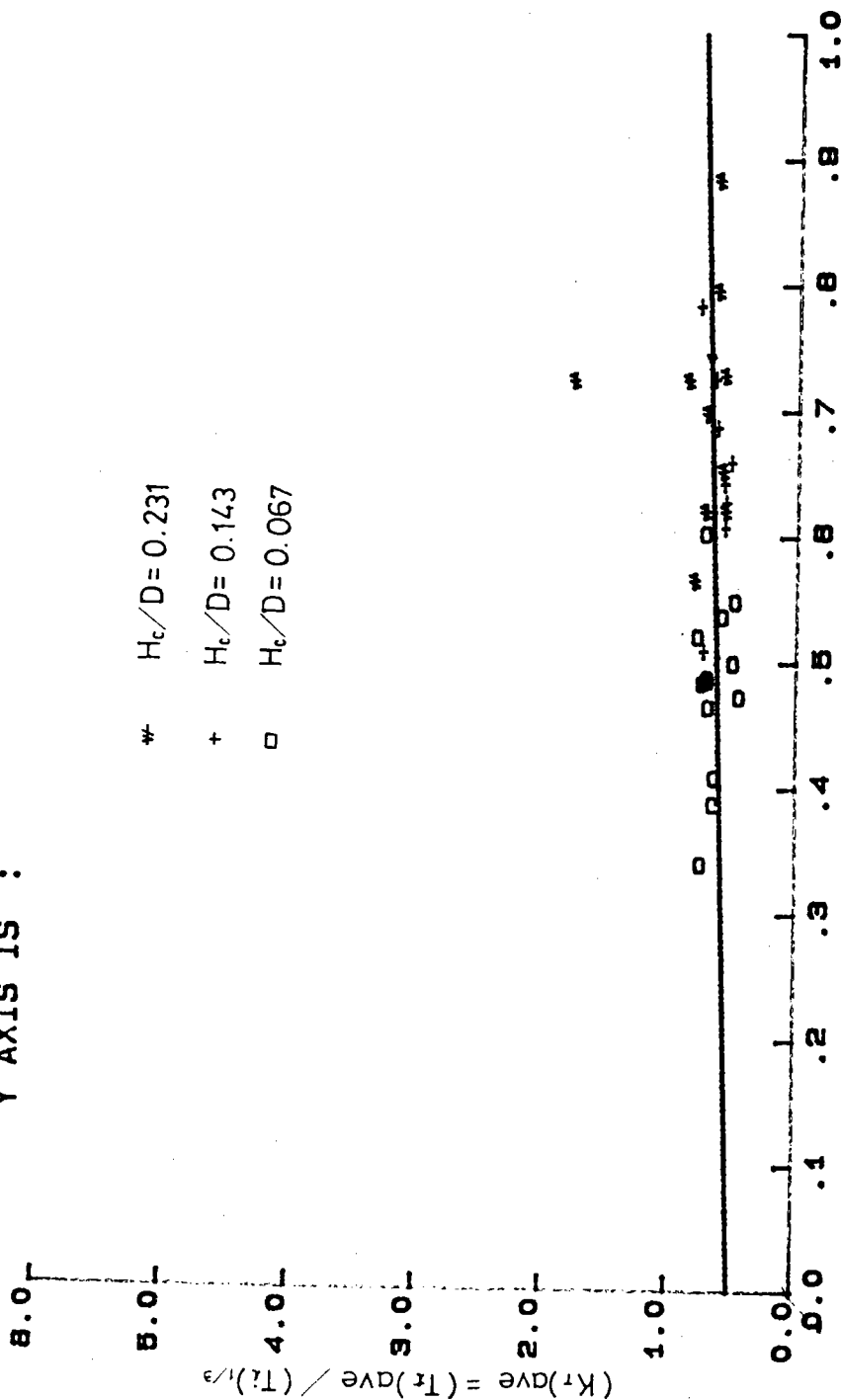


圖31. 規則波與不規則波 $K_t \sim H_c/R$ 二次曲線關係比較圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

X AXIS IS :

Y AXIS IS :



$$Y = 0.000000X^3 + 0.000000X^2 + 0.253405X + 0.507593$$

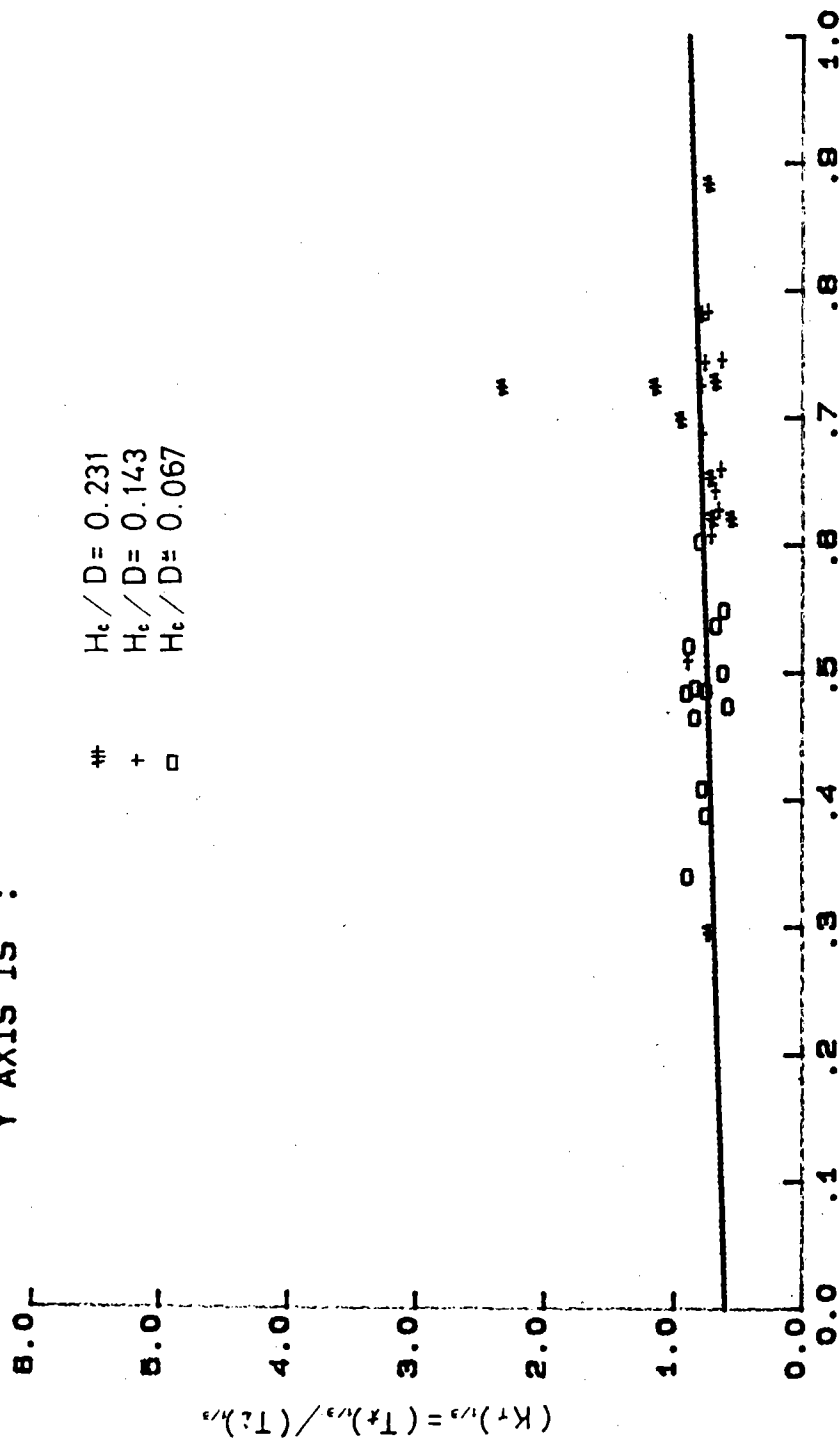
H_c/R

圖 32. 不規則波 $(K_T)_{ave} = (T_*)_{ave} / (T_L)_{1/3} \sim H_c/R$

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

X AXIS IS :

Y AXIS IS :



$$Y = 0.000000X^3 + 0.000000X^2 + 0.266809X + 0.612586$$

H_c / R

圖33. 不規則液 $(K_T)_{1/3} = (T_x)_{1/3} / (T_i)_{1/3} \sim H_c / R$ 綫性關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

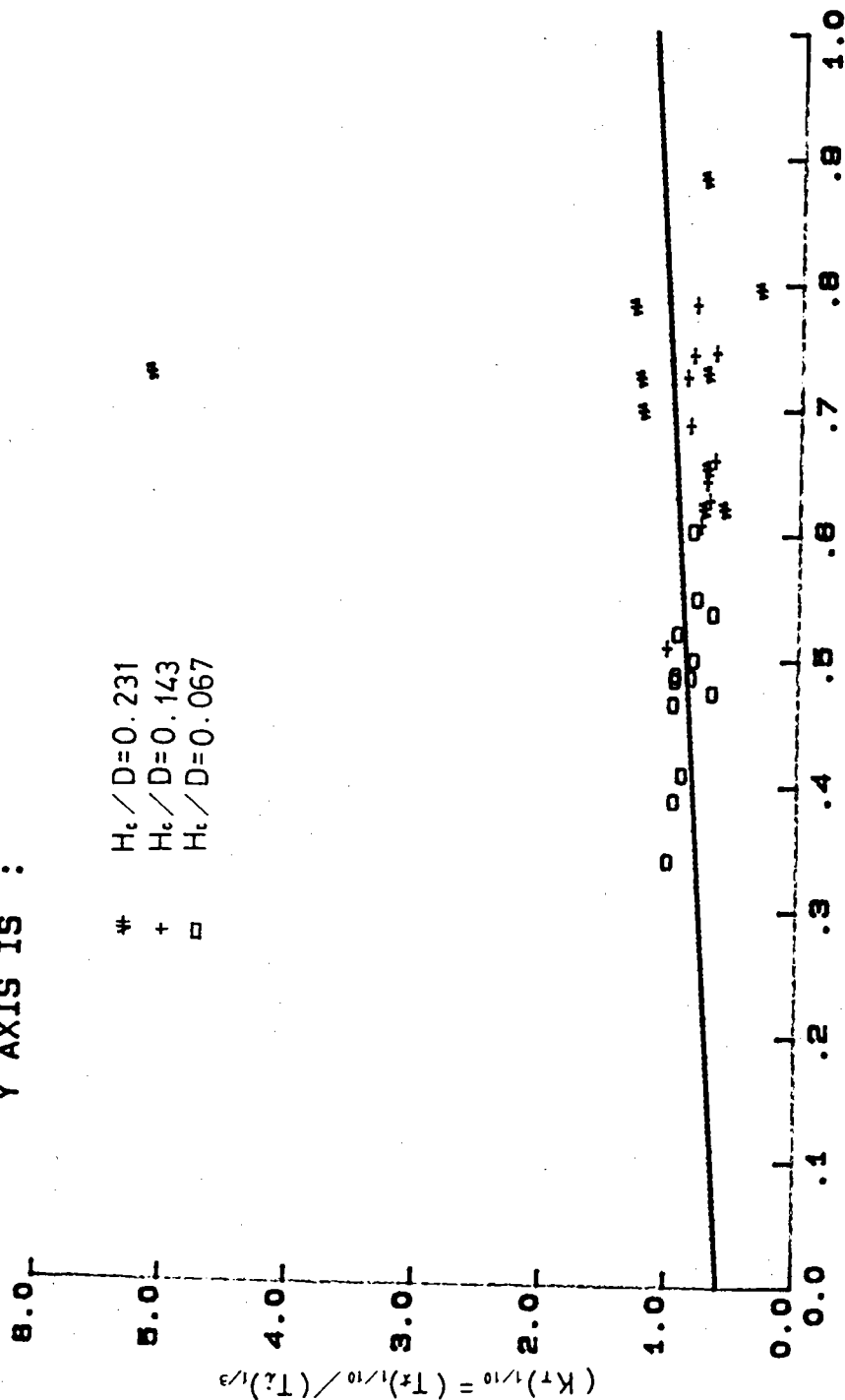
X AXIS IS :

Y AXIS IS :

$H_c/D=0.231$

+ $H_c/D=0.143$

□ $H_c/D=0.067$



$$Y = 0.000000X^3 + 0.000000X^2 + 0.593204X + 0.585681$$

H_c/R

圖 34. 不規則波 $(K_T)_{1/10} \sim H_c/R$ 綫性關係圖

LEAST-SQUARES CURVE FITTING OF X-SERIES AND Y-SERIES

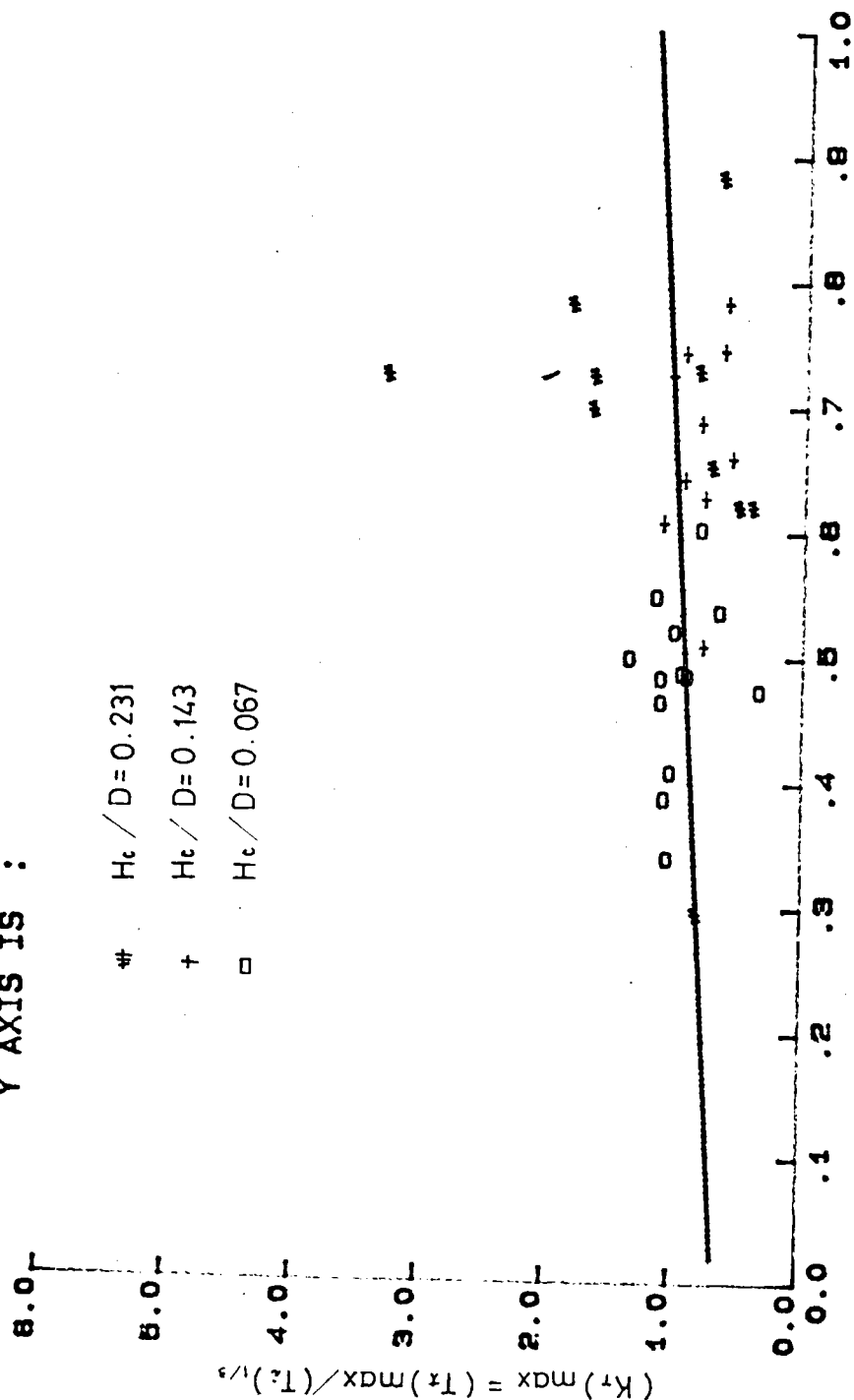
X AXIS IS :

Y AXIS IS :

$H_c / D = 0.231$

+ $H_c / D = 0.143$

□ $H_c / D = 0.067$



$$Y = 0.000000X^3 + 0.000000X^2 + 0.552317X + 0.849348$$

H_c / R

圖35. 不規則波 $(K_T)_{\max} \sim H_c / R$ 线性關係圖

柒 結論與建議

綜合以上試驗結果吾人可獲得以下數點結論

(一)規則波浪經越波 (overtopping) 後，其波浪傳遞係數 K_t 值和堤頂靜水面上高度與波浪溯上垂直高度比值 $\frac{H_o}{R}$ 有密切綫性關係，其 K_t 值包絡綫 (envelope) 為 $K_t = 0.594 (1.16 - \frac{H_o}{R})$ 。同時此 K_t 試驗值經與 Cross & Sollitte (1970) 理論值及其他不同模型縮尺試驗值比較其關係非常一致。

(二)有關規則波浪越波後其傳遞波浪週期減衰情形與 $\frac{H_o}{R}$ 比值關係亦極密切即 $K_T = \frac{T_t}{T_1} = 0.987 (1.14 - \frac{H_o}{R})$ ， K_T 值隨著 $\frac{H_o}{R}$ 值之增加而遞減。

(三)根據試驗數據，吾人得一預測波浪溯上垂直高度 R 值之試驗公式

$$R = C_1 \sqrt{H_1 L_o} \tan \phi + 0.6 H_o + C_2$$

其中 $C_1 = 0.294$; $C_2 = -0.711$ 當 $T < 7$ 秒時

$C_1 = 0.228$; $C_2 = -0.551$ 7 秒 $\leq T \leq$ 10 秒時

$C_1 = 0.154$; $C_2 = -0.371$ $T > 10$ 秒時

(四)有關不規則波試驗部份其波浪傳遞係數 K_t 與 $\frac{H_o}{R}$ 關係亦極密切

，其綫性關係分別為

$$(K_t)_{\max} = \frac{(H_t)_{\max}}{(H_1)_{\frac{1}{3}}} = 0.908 (1.18 - \frac{H_o}{R})$$

$$(K_t)_{\frac{1}{10}} = \frac{(H_t)_{\frac{1}{10}}}{(H_1)_{\frac{1}{3}}} = 0.619 (1.20 - \frac{H_o}{R})$$

$$(K_t)_{\frac{1}{8}} = \frac{(H_t)_{\frac{1}{8}}}{(H_1)_{\frac{1}{8}}} = 0.478 \left(1.16 - \frac{H_c}{R} \right)$$

$$(K_t)_{ave} = \frac{(H_t)_{ave}}{(H_1)_{\frac{1}{8}}} = 0.299 \left(1.12 - \frac{H_c}{R} \right)$$

對於相同之 $\frac{H_c}{R}$ 值其 $(K_t)_{max}$, $(K_t)_{\frac{1}{10}}$, $(K_t)_{\frac{1}{8}}$ 及 $(K_t)_{ave}$ 值依序增加 $\frac{H_c}{R}$ 值愈小其差距愈大。

(五)不規則波試驗波浪經越波後其傳遞波浪之週期變化與 $\frac{R_c}{R}$ 關係較

不明顯，除傳遞波浪 T_{max} 於本次試驗中有 42 % 之傳遞波浪其週期大於原入射設計波浪週期 $T_{\frac{1}{8}}$ 外，其餘如 $T_{\frac{1}{10}}$, $T_{\frac{1}{8}}$ 以及 T_{ave} 等依次約為原入射波浪週期之 90 % , 85 % 及 80 % 等。惟當 $\frac{H_c}{D}$ 比值（比處 D 為水深）大於 0.23 而入射週期 $T_{\frac{1}{8}}$ 大於 8 秒時，試驗結果顯示其週期增長達數倍左右。故若港池形狀配置不當極易造成港內波浪共振現象（oscillation）以致影響船隻碇泊及作業要求，設計時尤應注意防範。

(六)規則波及不規則波試驗兩者差異為

$$\text{不規則波浪 } (K_t)_{max} \div 1.90 (K_t)_{regular}$$

$$\text{不規則波浪 } (K_t)_{\frac{1}{10}} \div 1.30 (K_t)_{regular}$$

$$\text{不規則波浪 } (K_t)_{\frac{1}{8}} \div (K_t)_{regular}$$

$$\text{不規則波浪 } (K_t)_{ave} \div 0.63 (K_t)_{regular}$$

故吾人可依據規則波浪之傳遞係數依據設計者之需要而預估不規則波浪之傳遞係數。

(七)本文圖表可提供有關單位作為爾後防波堤堤頂高程規劃設計時之依據或參考。

建 議

- (一) 建議應對結構物坡度與波浪傳遞係數 K_t 值之影響作進一步之試驗研究分析。
- (二) 對於不規則波浪建議採用 Jhonswap 波譜為輸入條件進行試驗以資比較 Mosquitiz 與 Jhonswap 兩種波譜之差異。
- (三) 建議採用固定水深並變換 H_o 值條件直至不產生任何越波現象為止，進行波浪傳遞試驗以了解水深變化對傳遞係數 K_t 值之影響。

致 謝

本文承蒙本組張金機組長之鼎力支持並提供寶貴意見以及何良勝，蘇青和二位仁兄及本組其他同仁之協助試驗進行與電腦資料分析得以順利完成，並感謝蔡金吉先生之繪圖，在此一併致最誠摯之謝意。

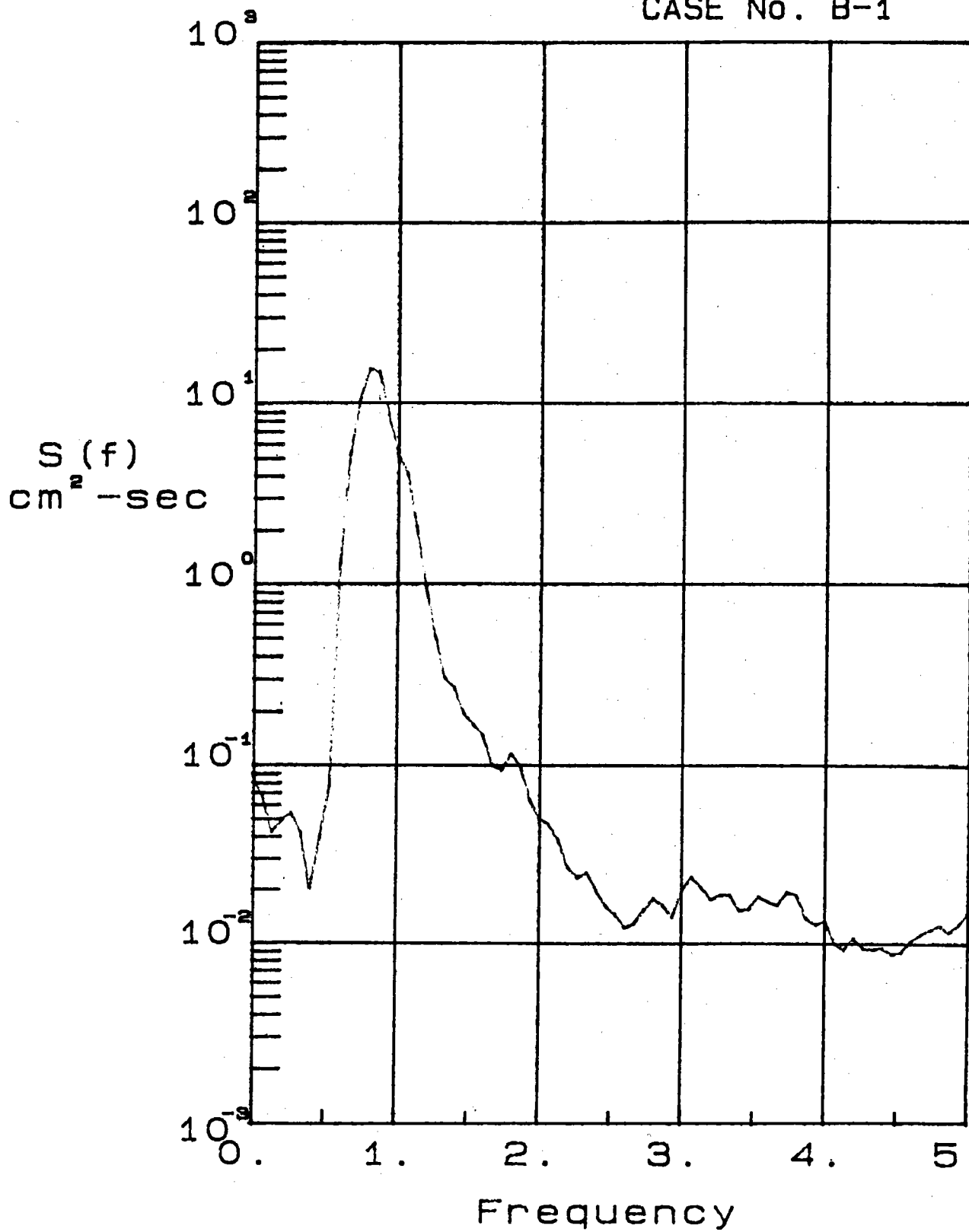
參考資料

- 1 “海岸工程”，郭金棟着，中國水利工程學會印行。
- 2 “海岸工程規劃設計”湯麟武着，農復會發行。
- 3 “電腦資料處理系統在水工試驗之應用”，張金機，第二屆海洋工程會議論文集。
- 4 港灣設計構造物設計標準，台灣省政府交通處印行。
- 5 Cross R.H. & Sollitte, C.K. (1970) Wave transmission by over topping, Tech Note no.15, MIT, USA
- 6 Hunt, I.A. (1959) Design of seawalls and breakwater, ASCE (WW3)
- 7 Seelig, W.N. (1979) Effects of breakwater on waves: laboratory tests of wave transmission by overtopping, Proc Conf Coastal structure 79, 2
- 8 Saville, T, Jr (1955) Laboratory data on wave runup and overtopping on shore structure, BEB Tech No. 64. USA
- 9 Dirk G Hamboz & FRANS C Hamber (1982) “Laboratory experiments on wave transmission by overtopping” Coastal Eng P 209 ~ T 215 Netherland
- 10 Lomarre, P. (1967) “Water wave transmission by overtopping of an impermeable breakwater” MIT, Cambridge, Mass. U.S.A.

Appendex A

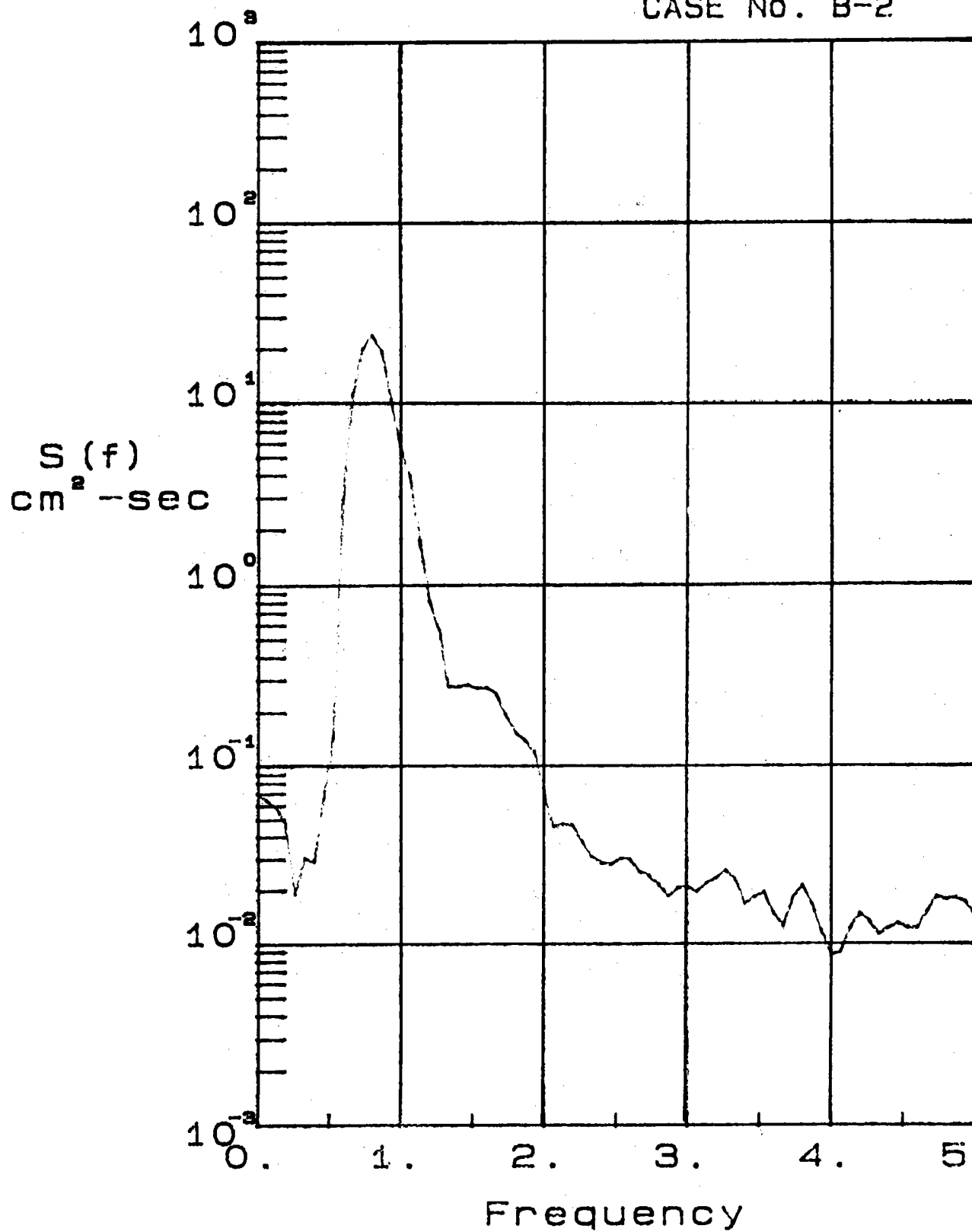
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-1



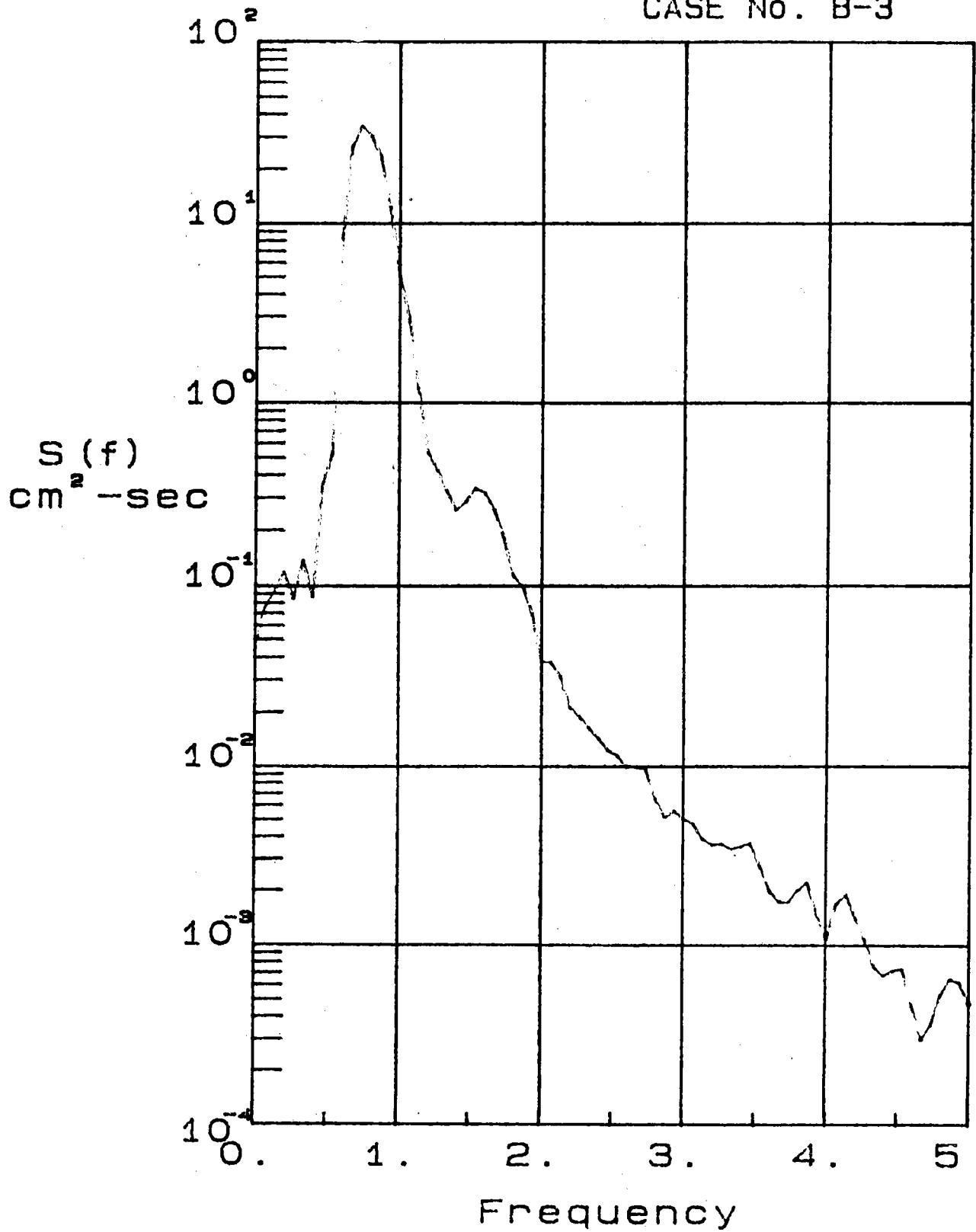
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-2



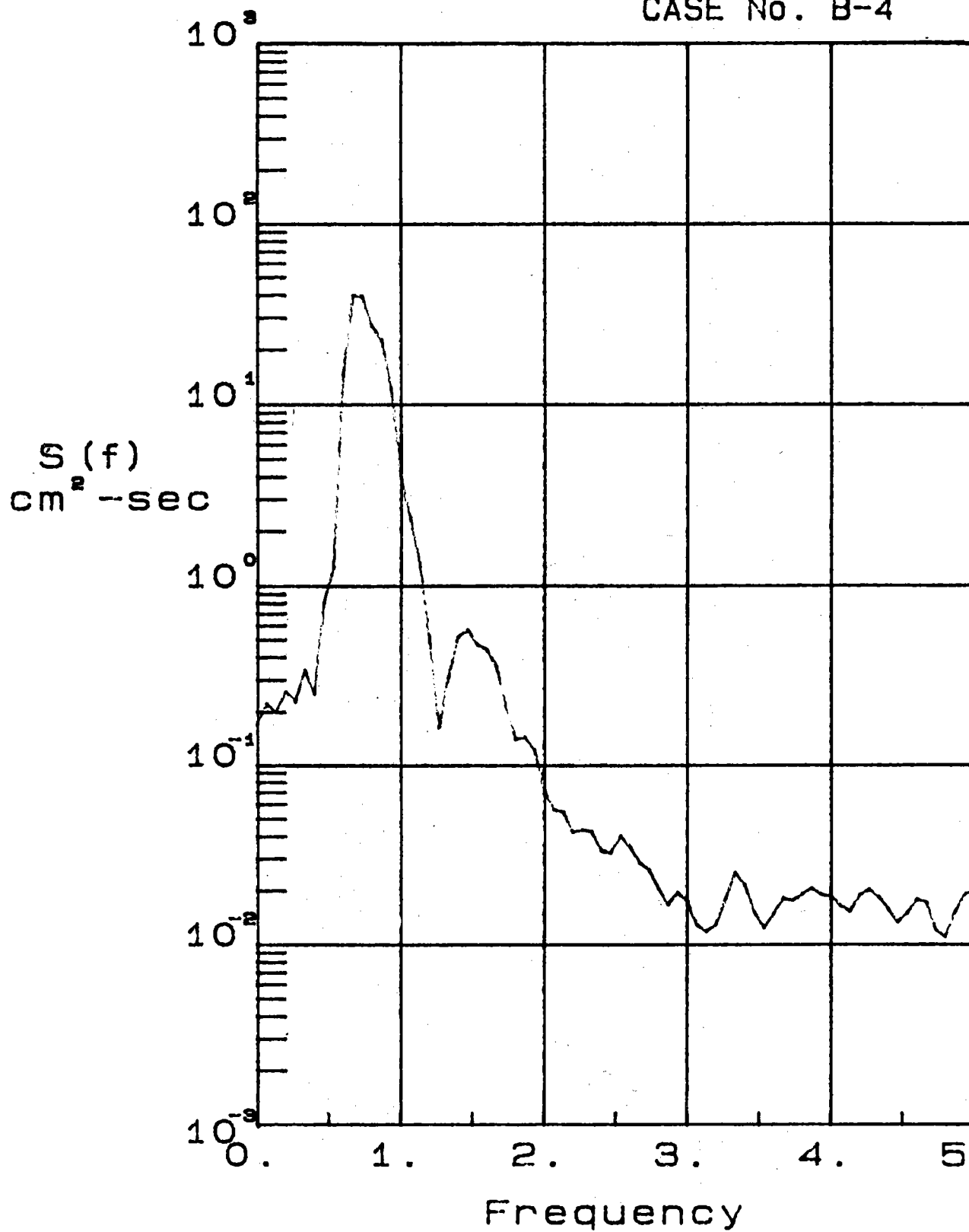
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-3



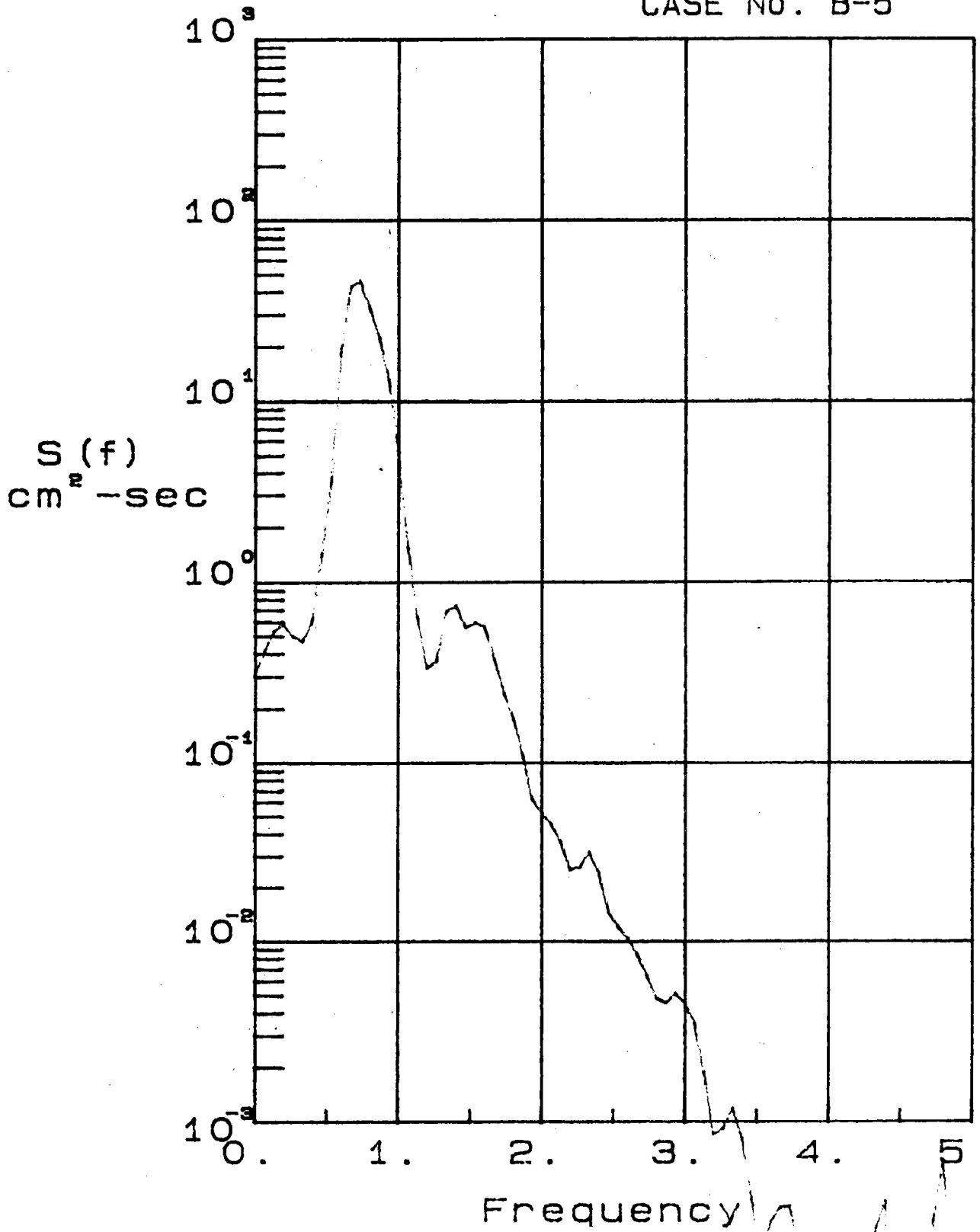
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-4



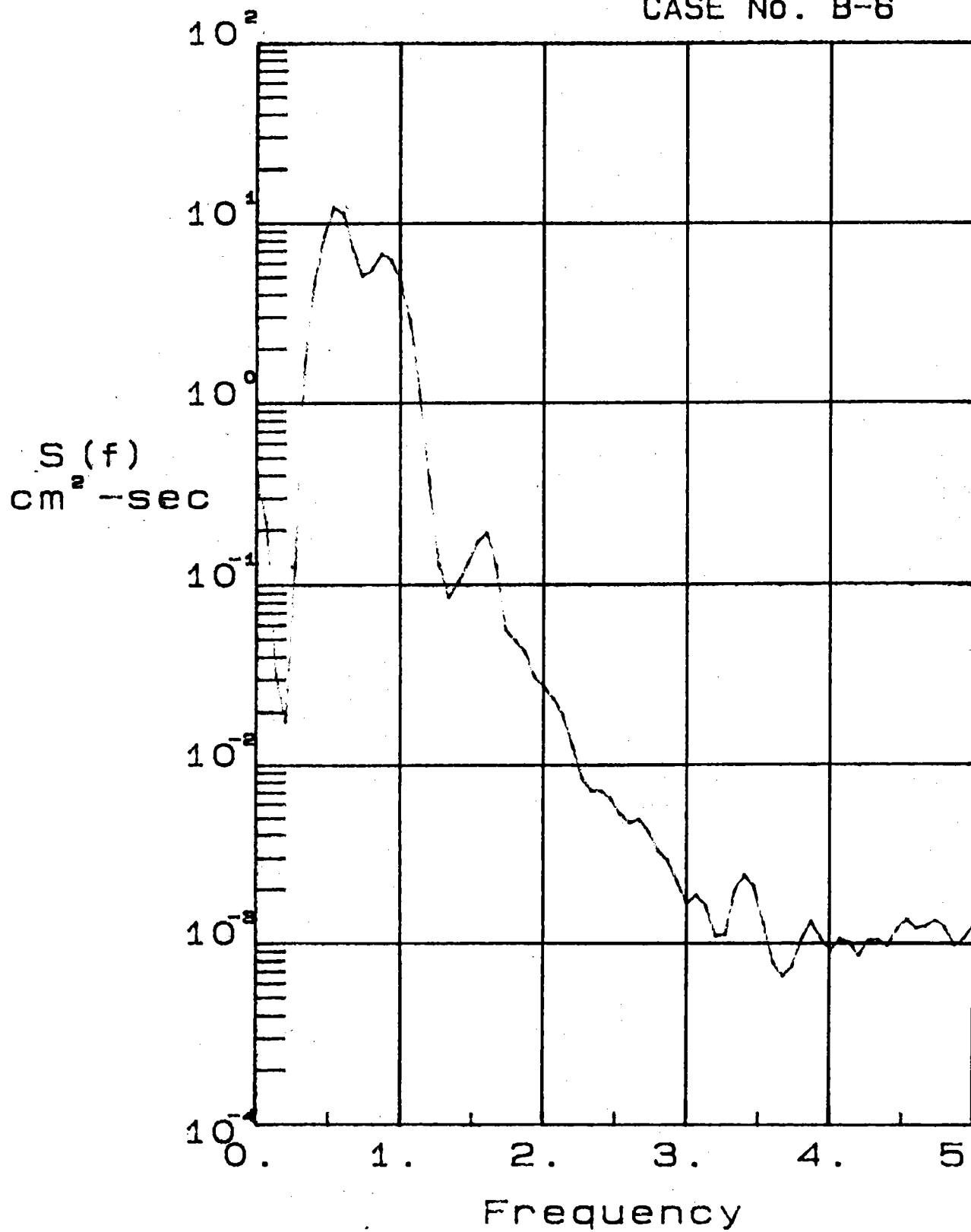
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-5



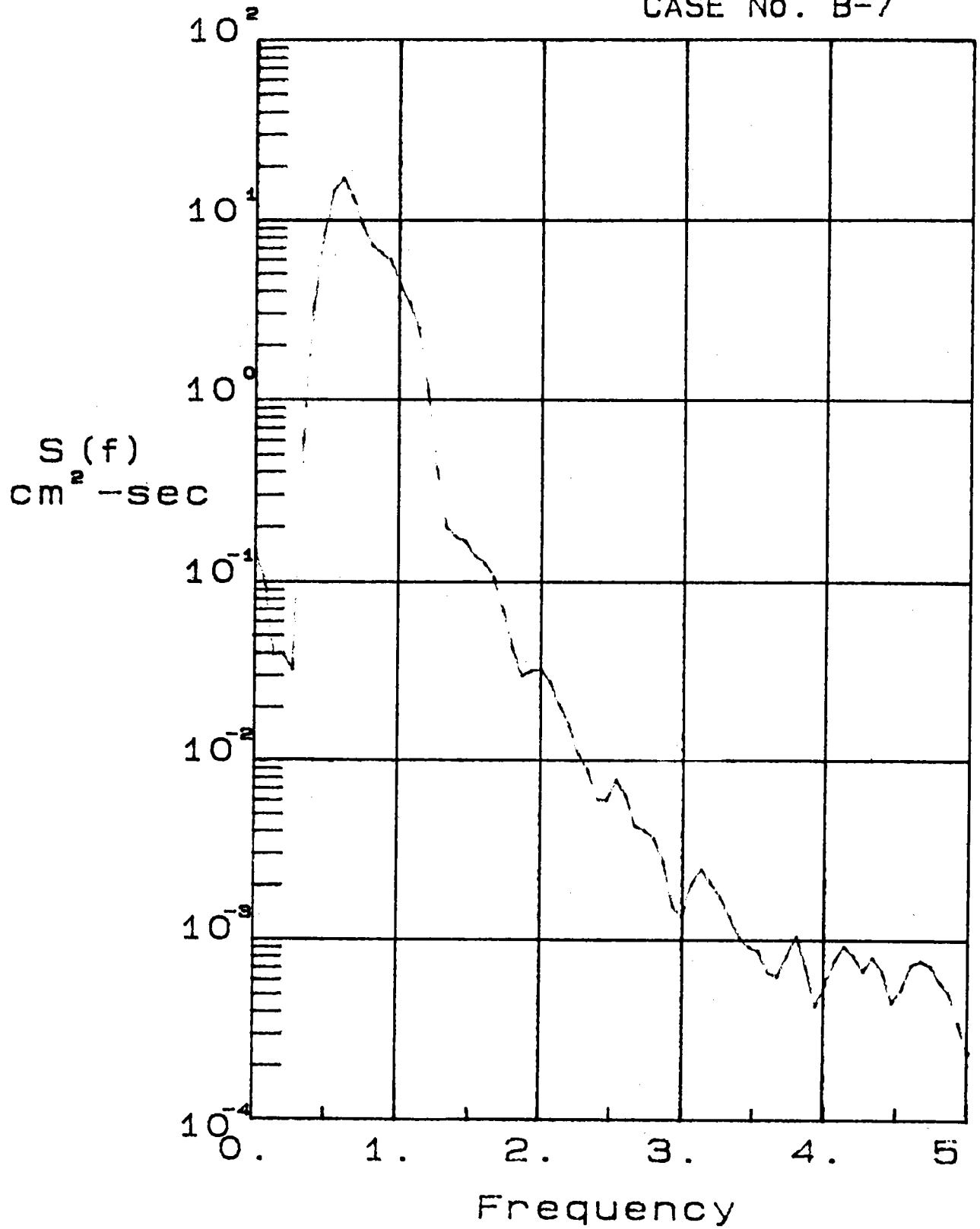
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-6



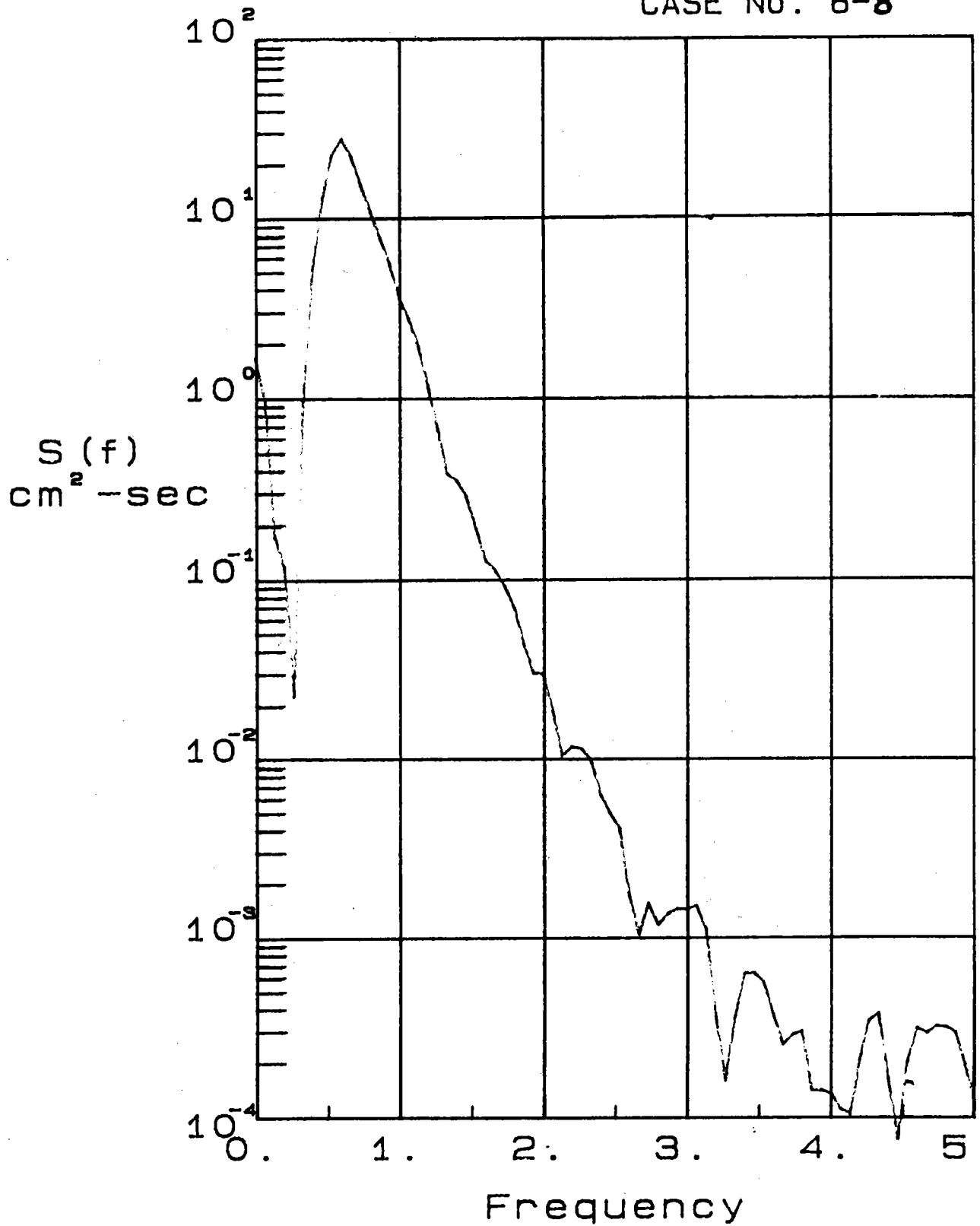
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-7



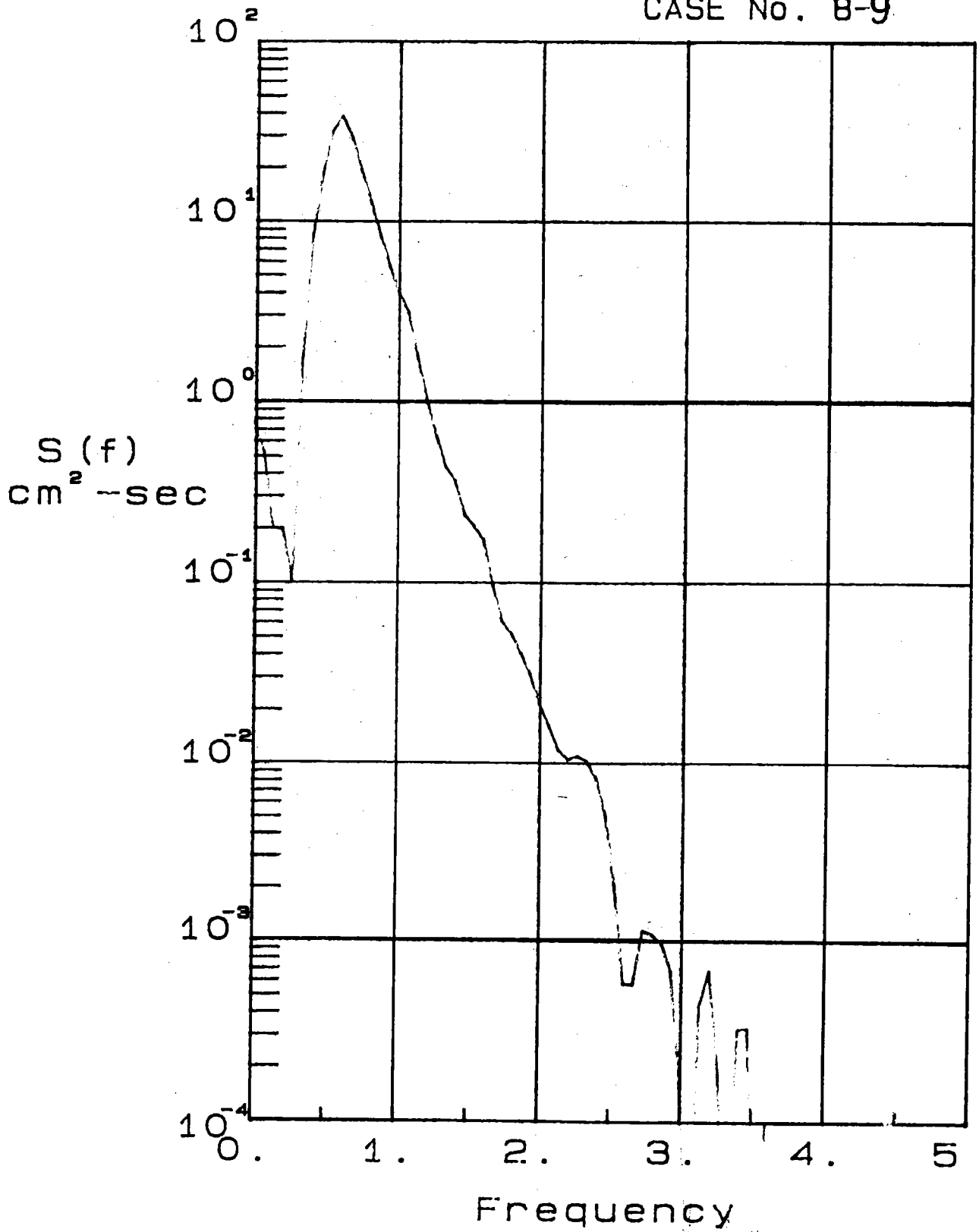
WAVE SPECTRUM

CASE No. 8-8



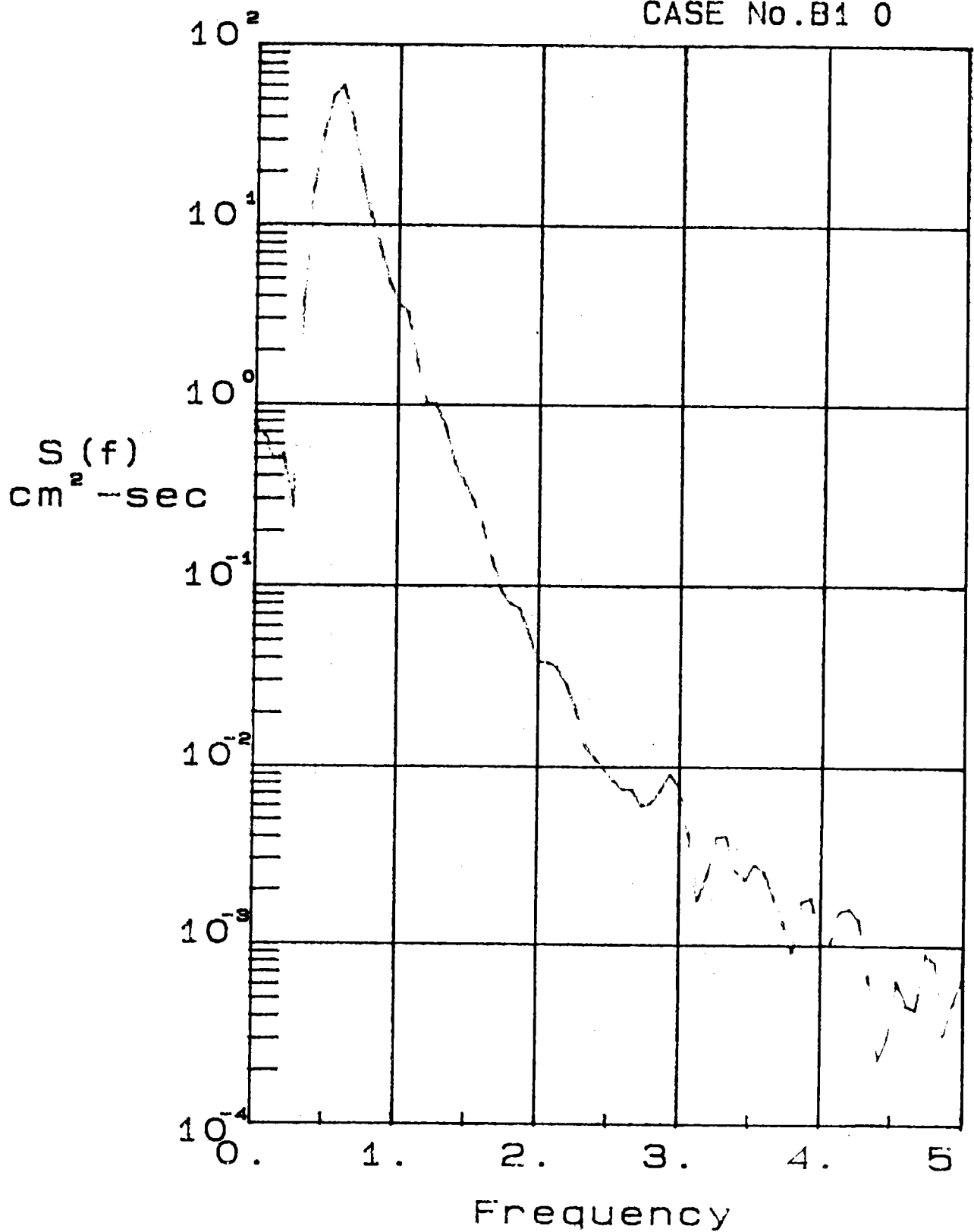
WAVE SPECTRUM

CASE No. B-9



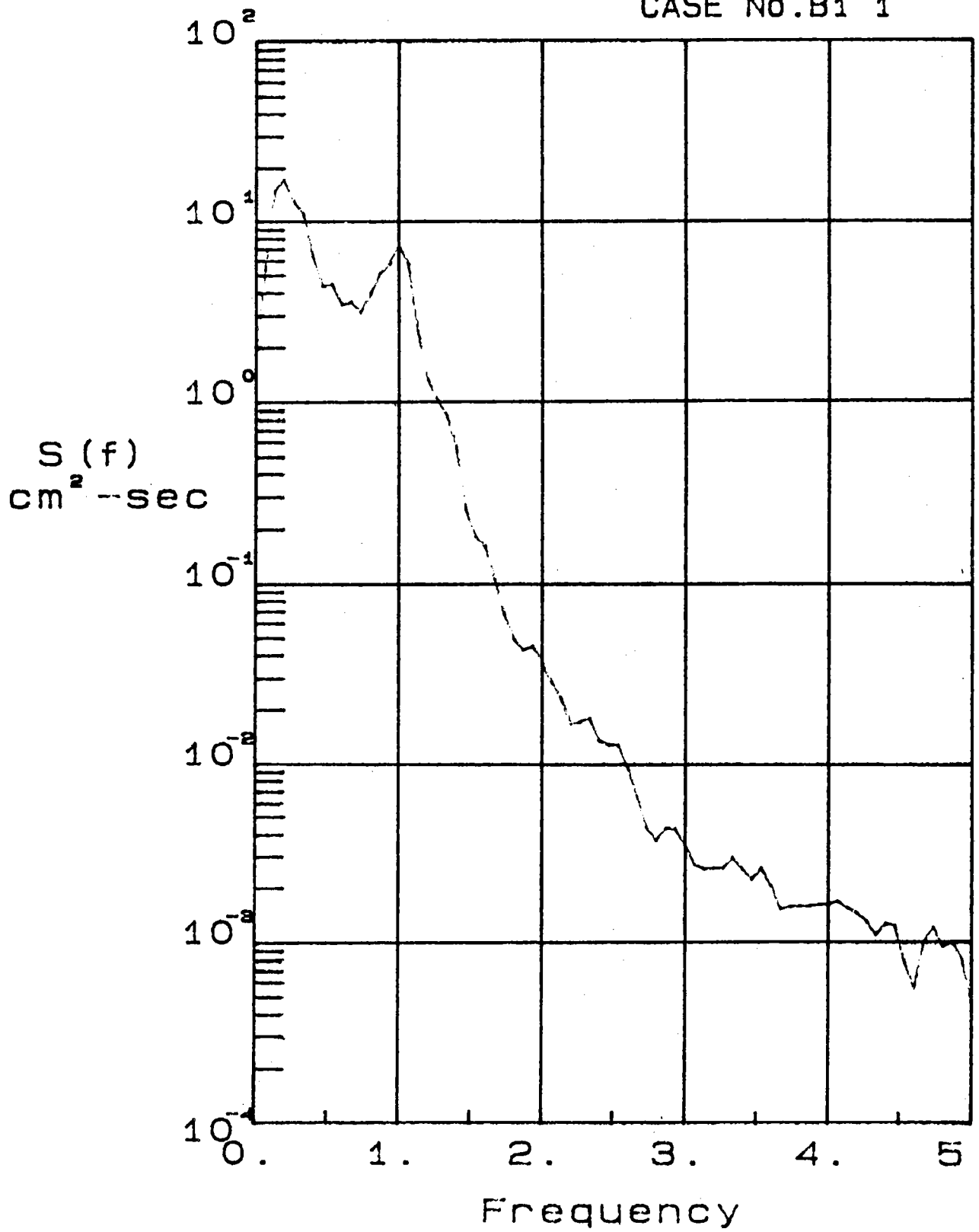
WAVE SPECTRUM

CASE No.B1 0



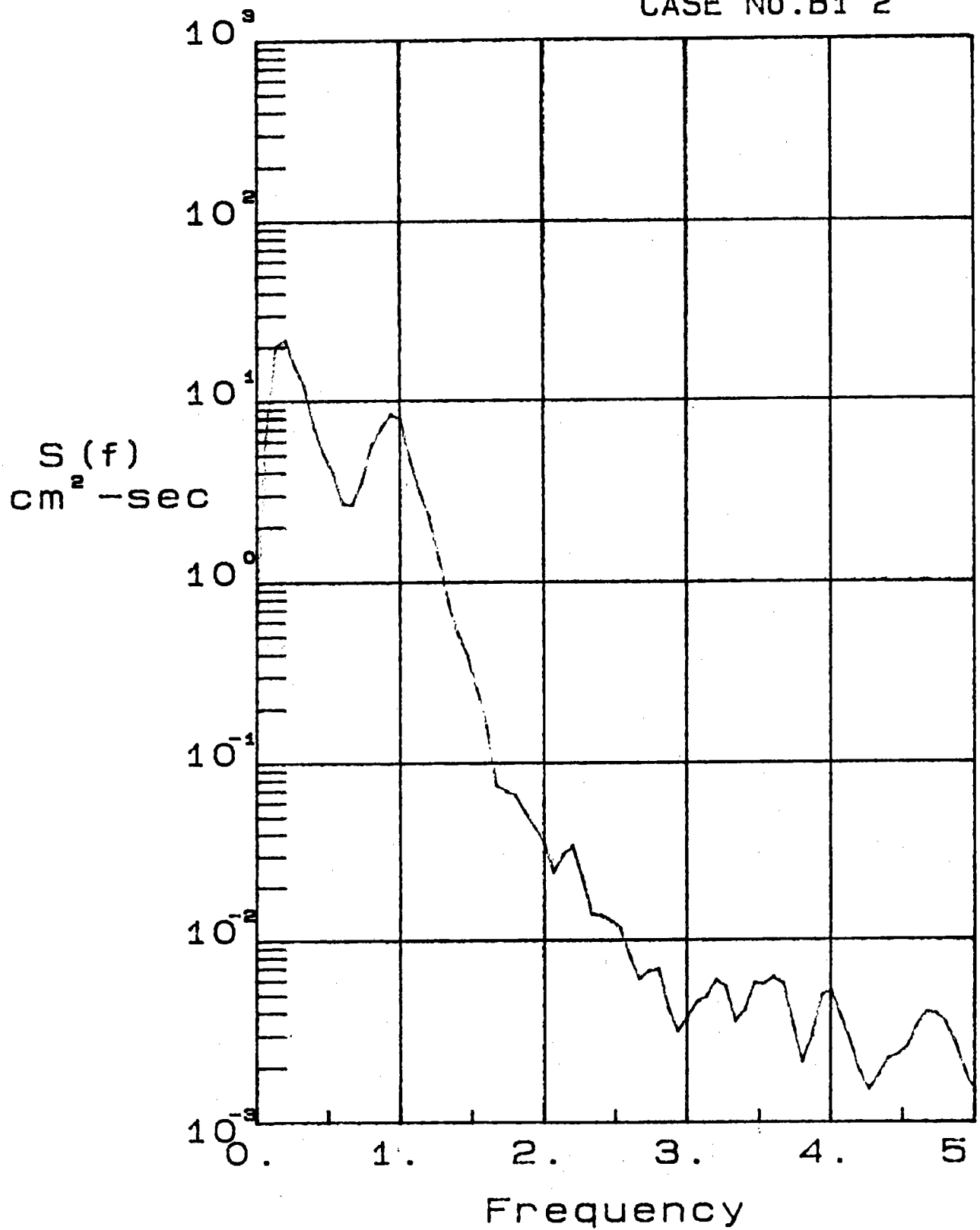
WAVE SPECTRUM

CASE No.B1 1



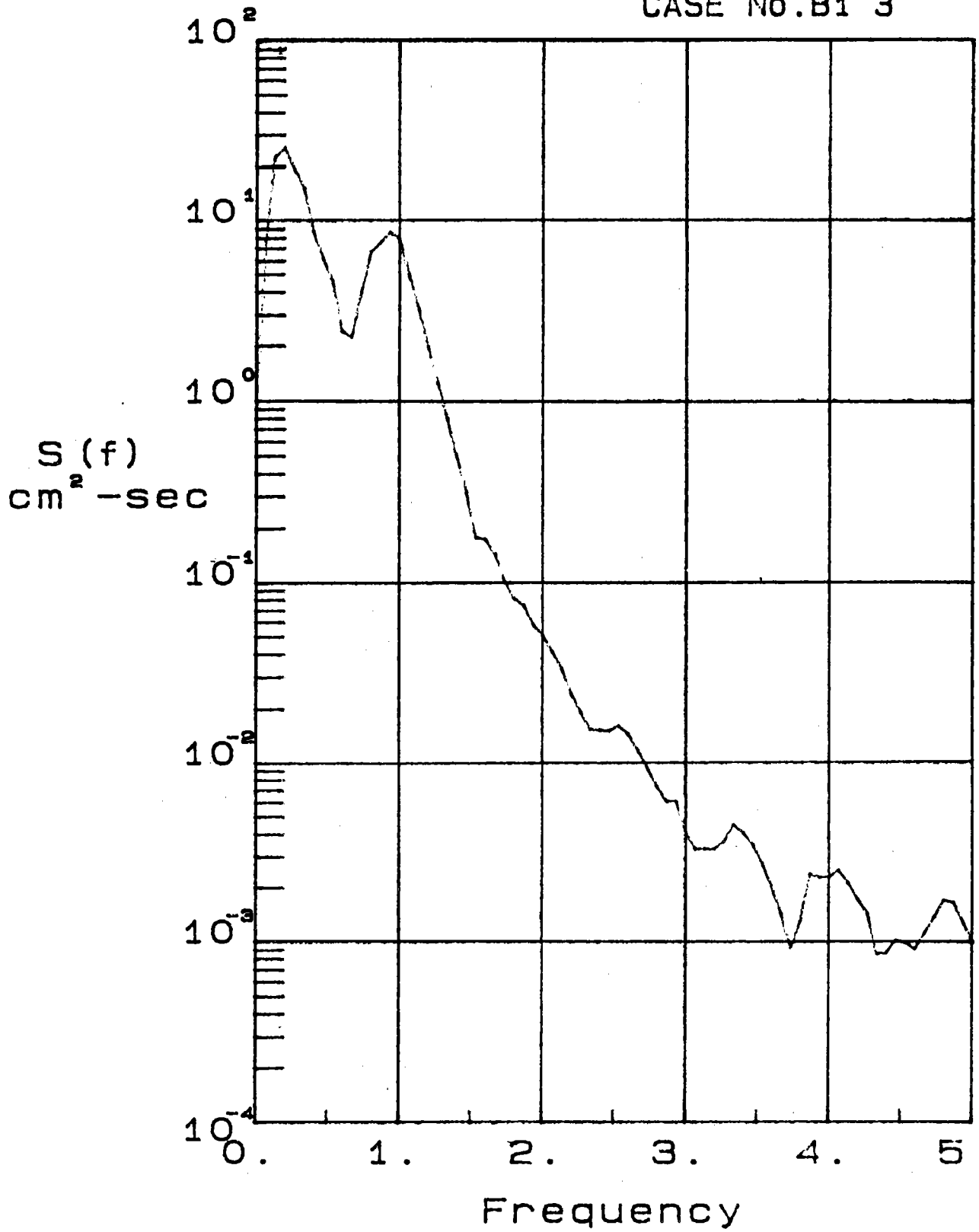
WAVE SPECTRUM

CASE No.B1 2



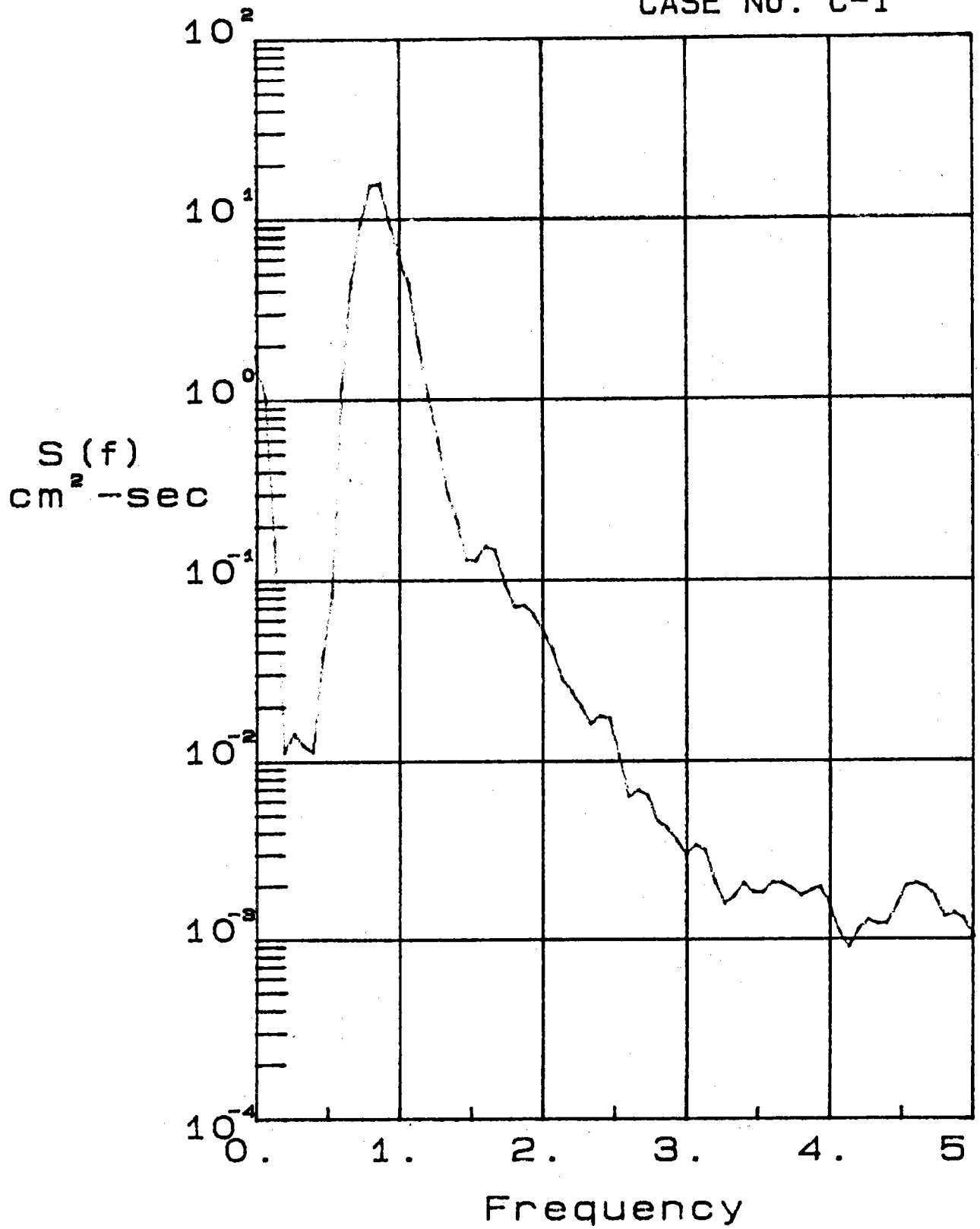
WAVE SPECTRUM

CASE No.B1 3



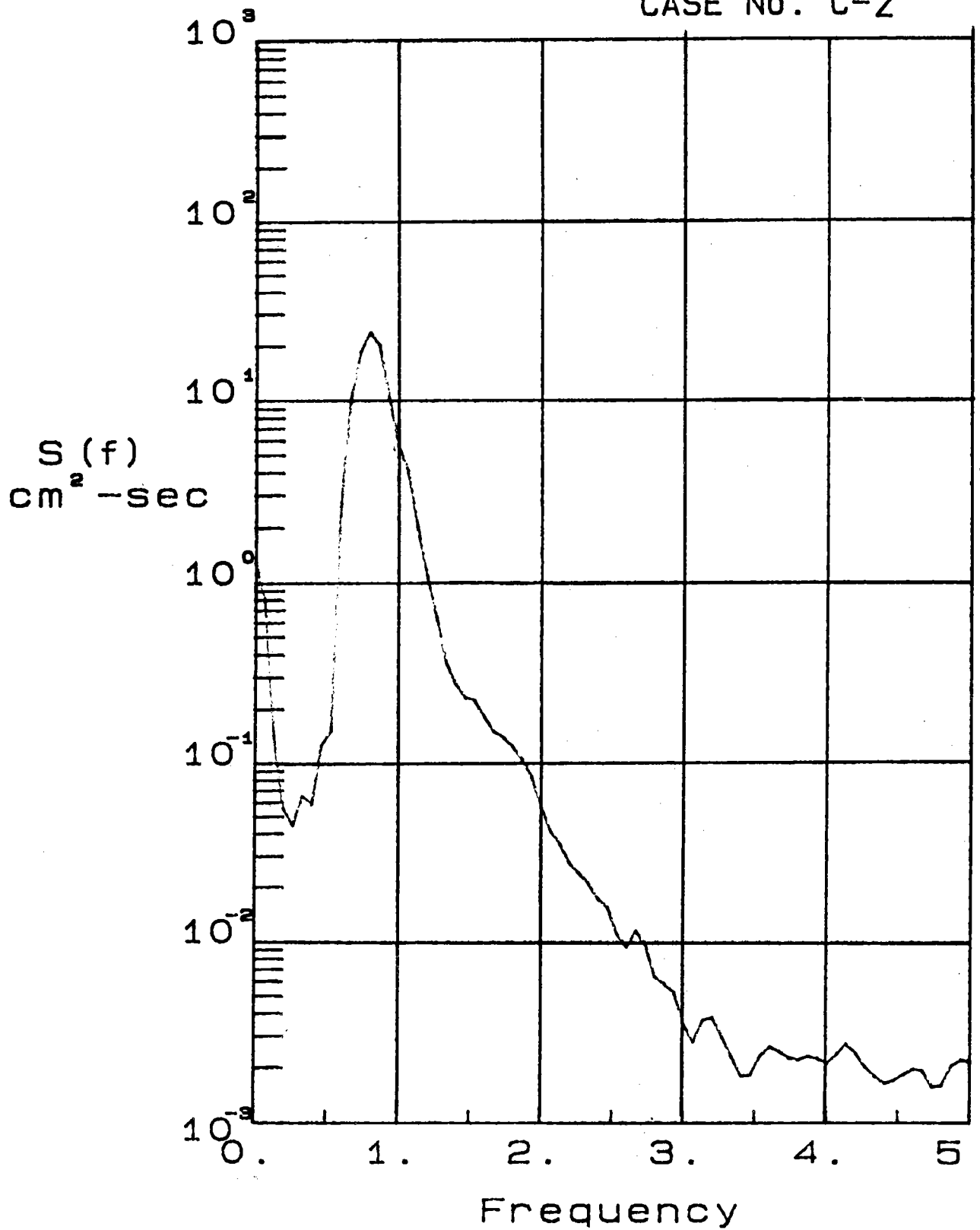
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-1



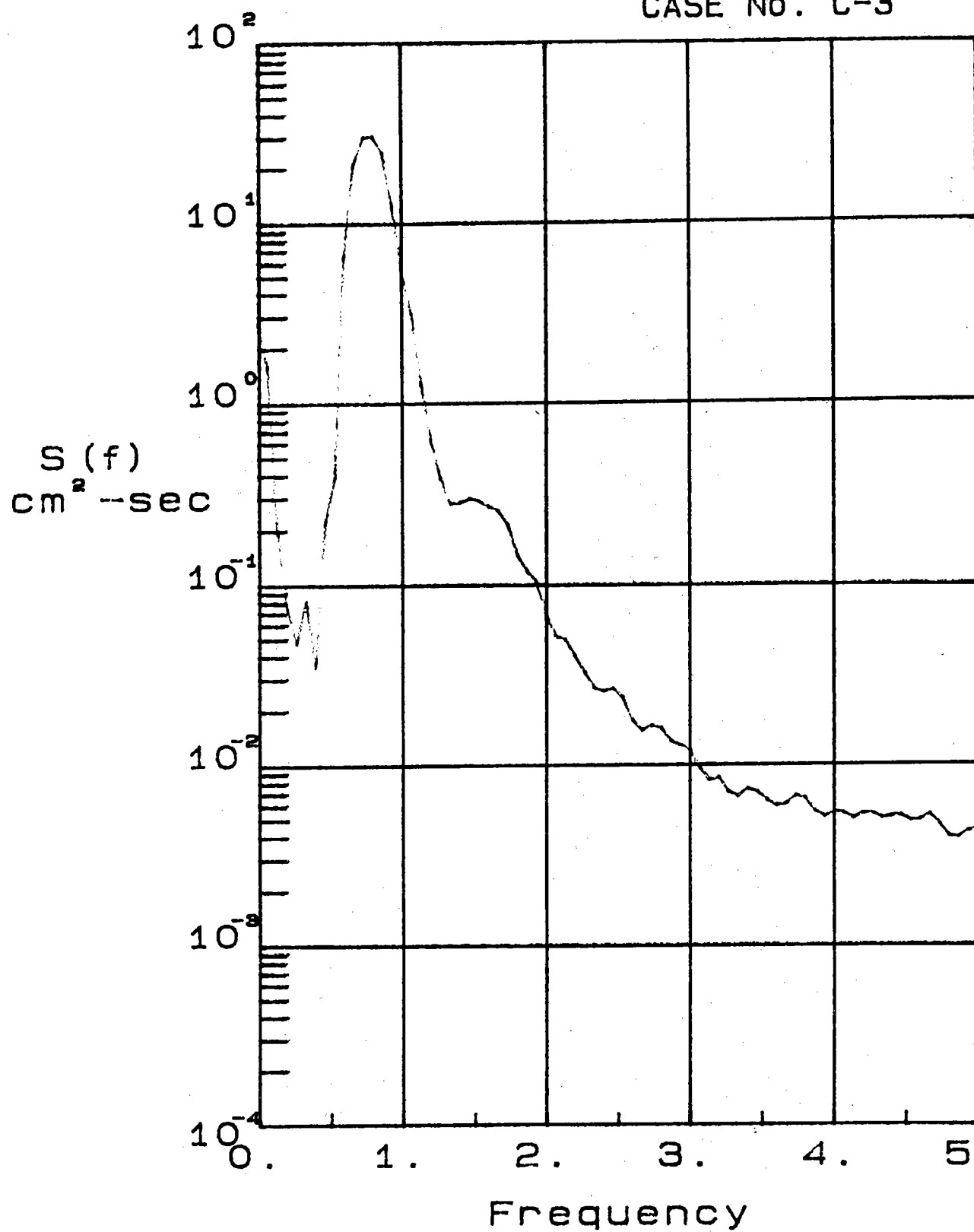
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-2



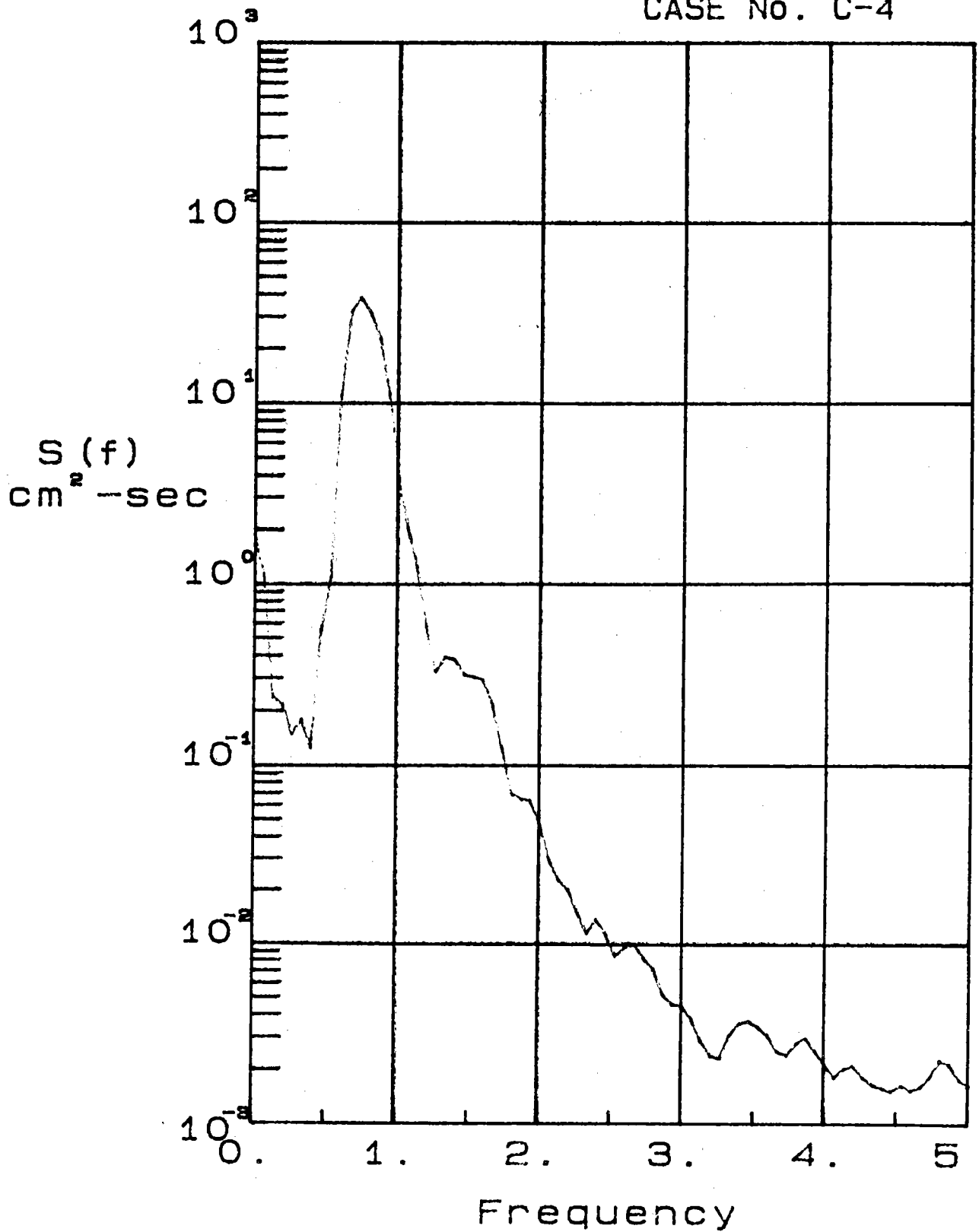
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-3



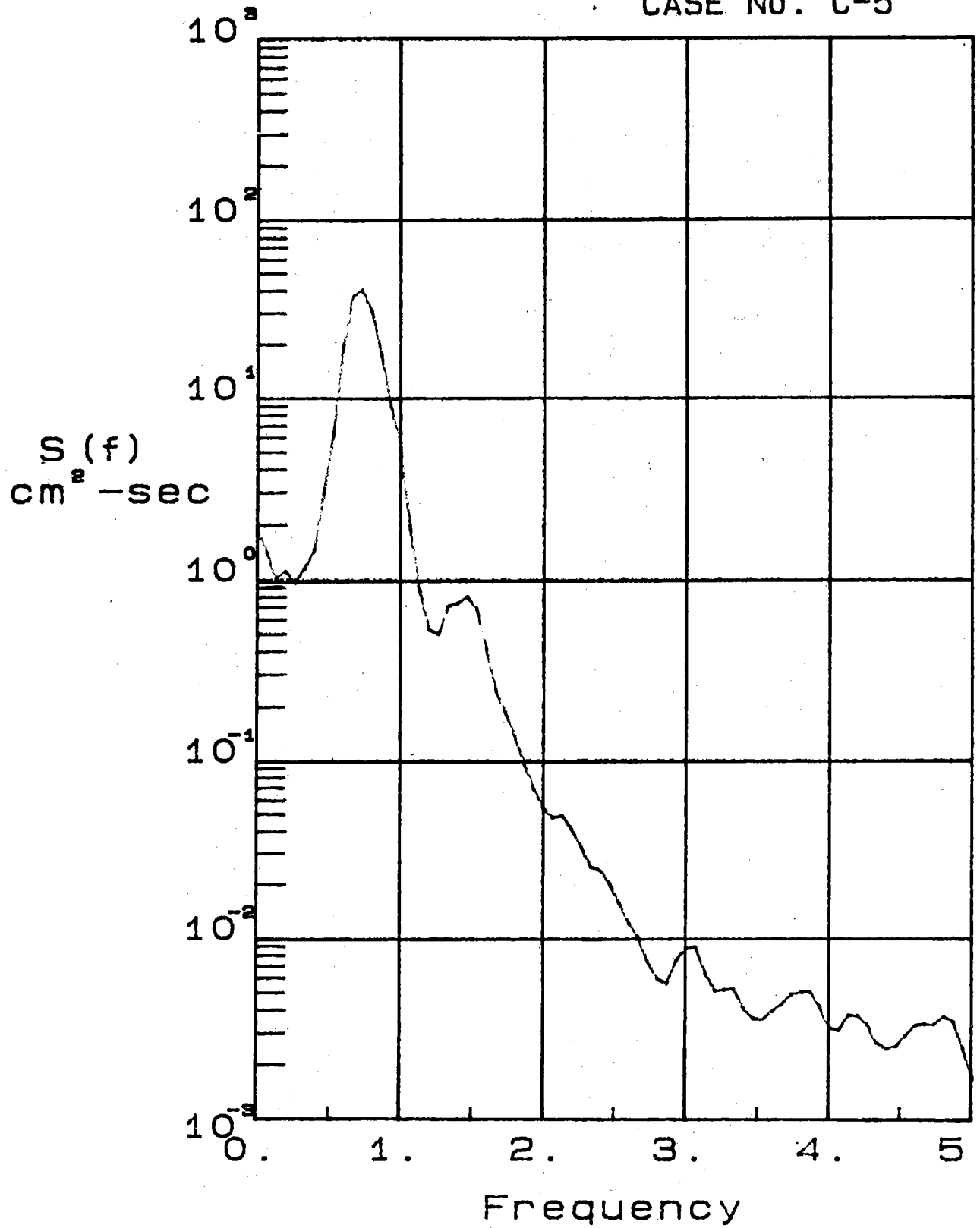
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-4



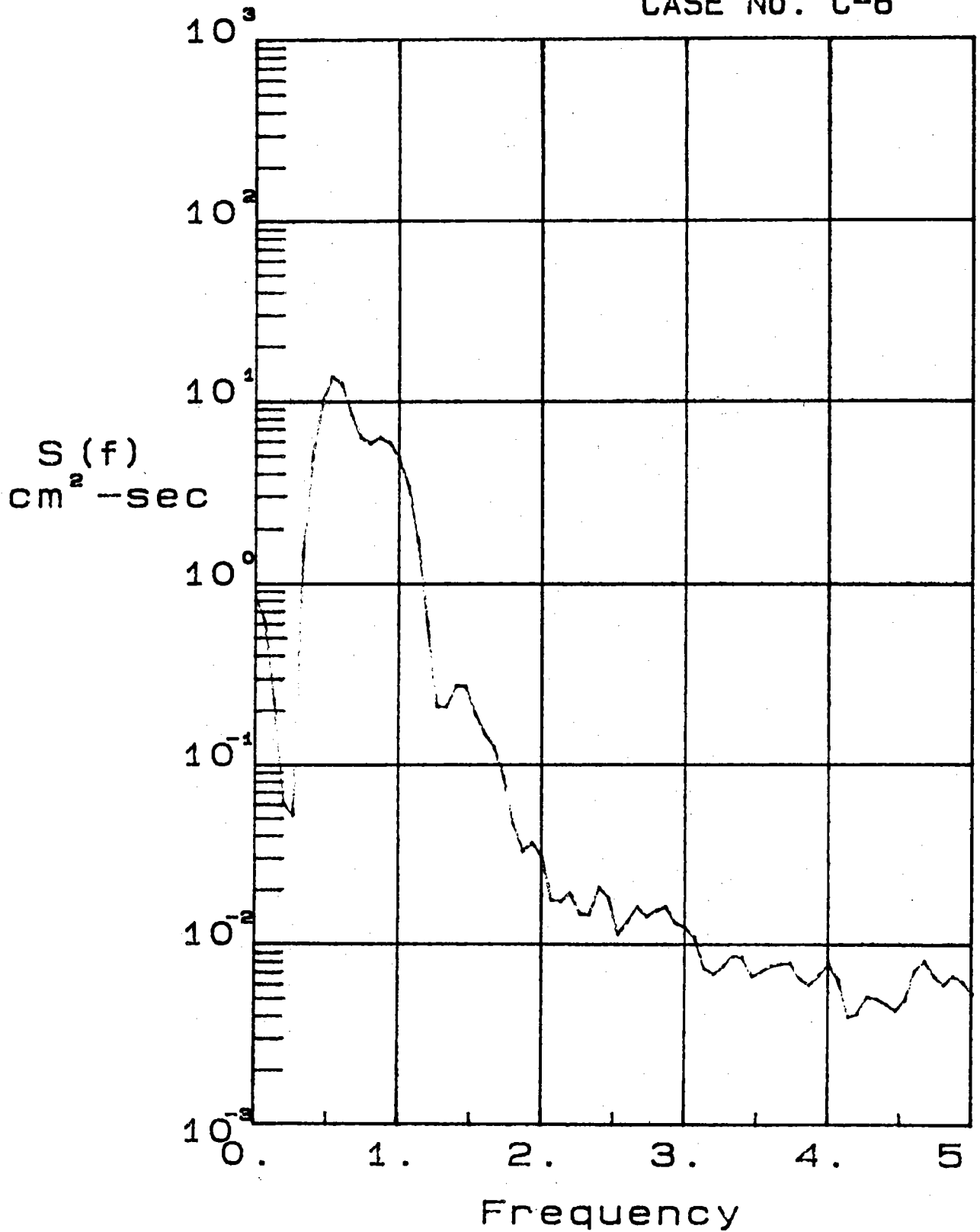
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-5



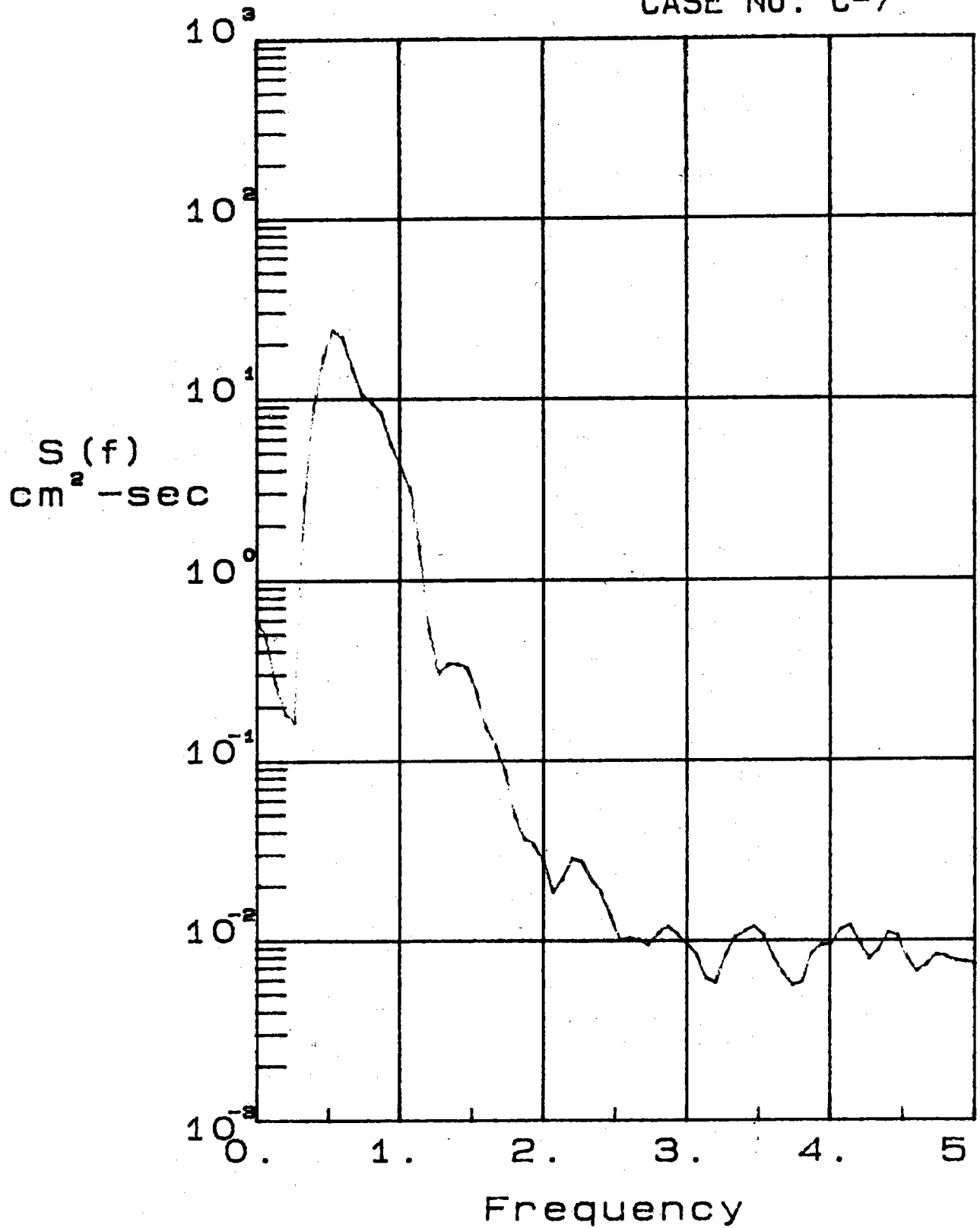
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-6



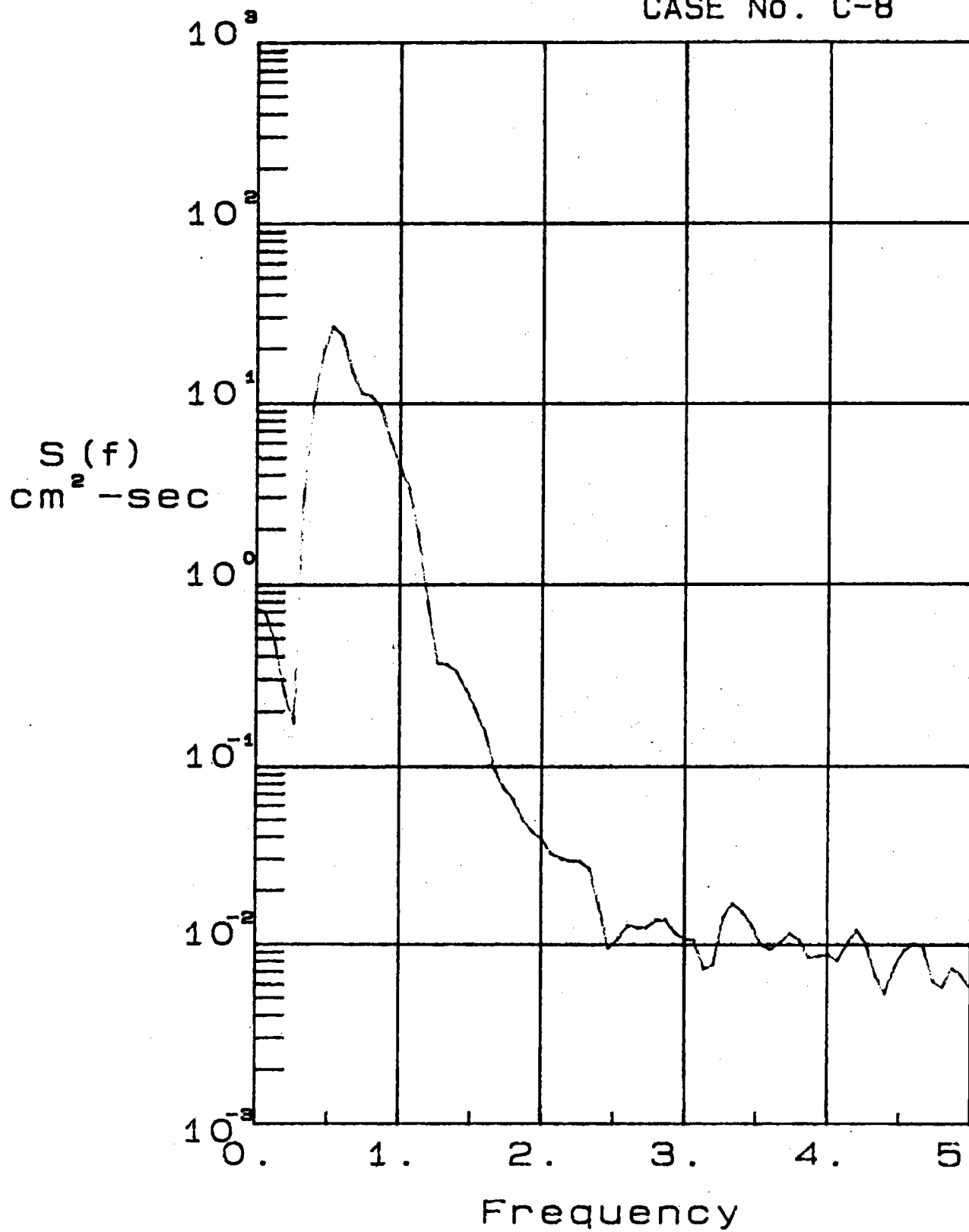
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-7



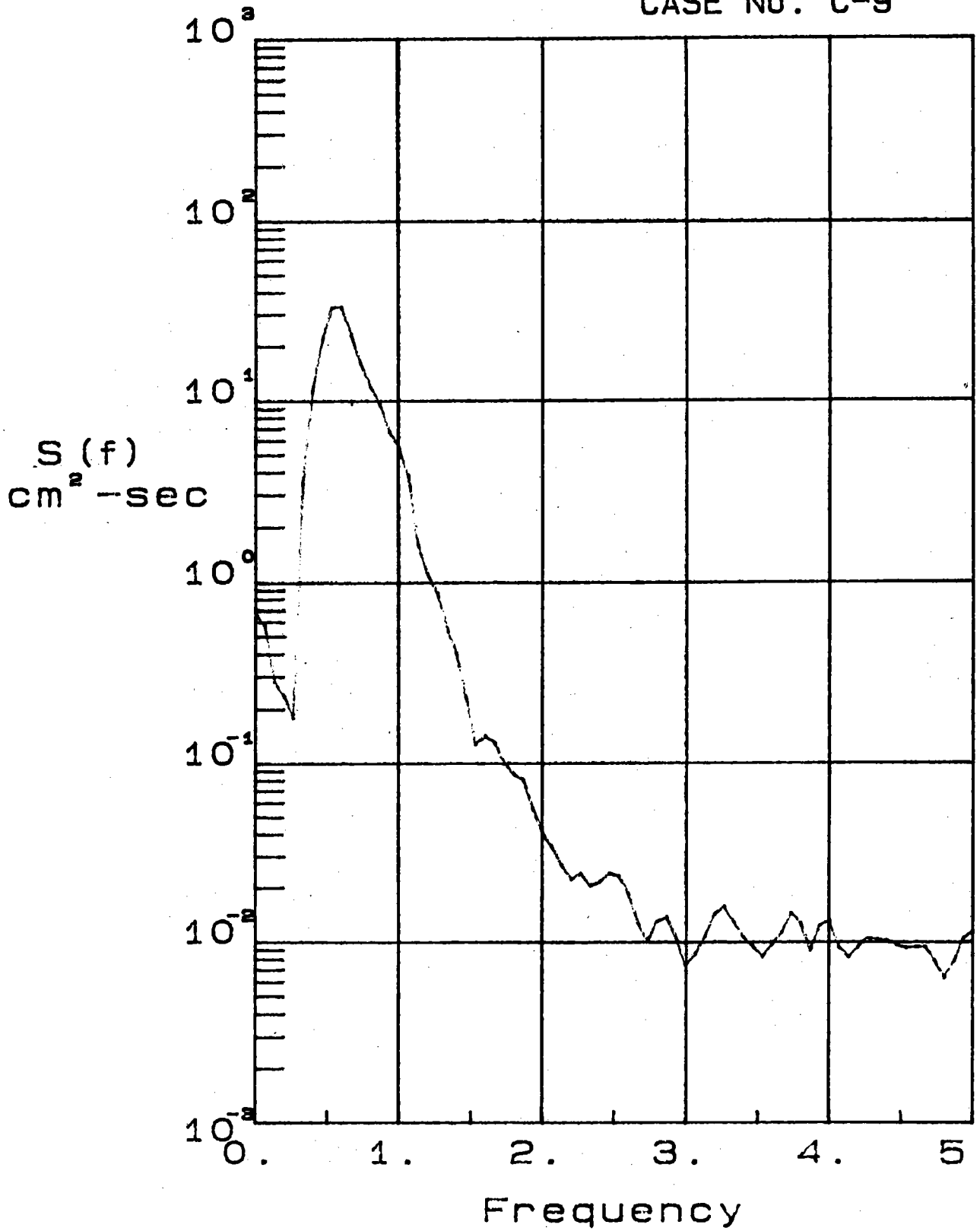
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-8



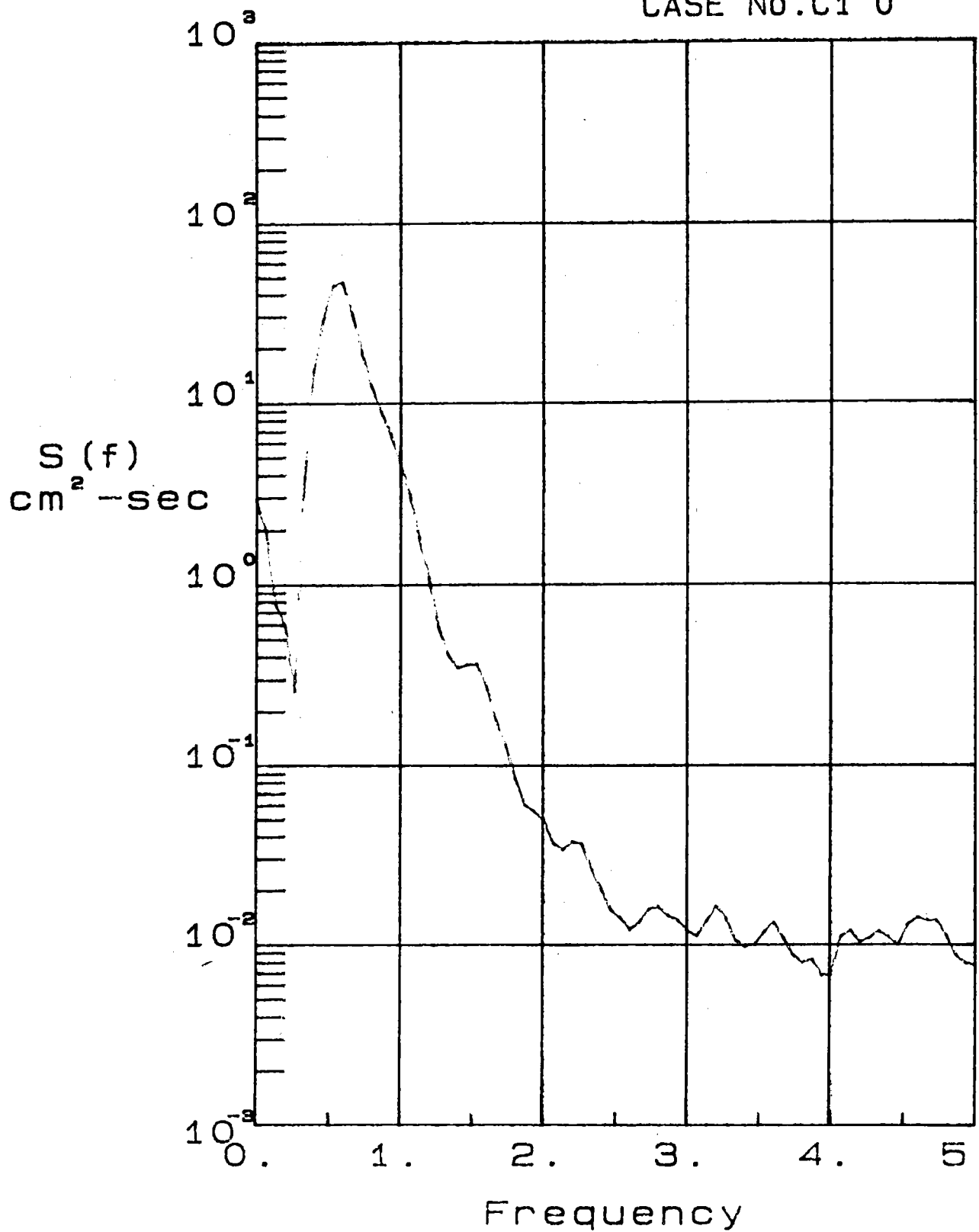
WAVE SPECTRUM

CASE No. C-9



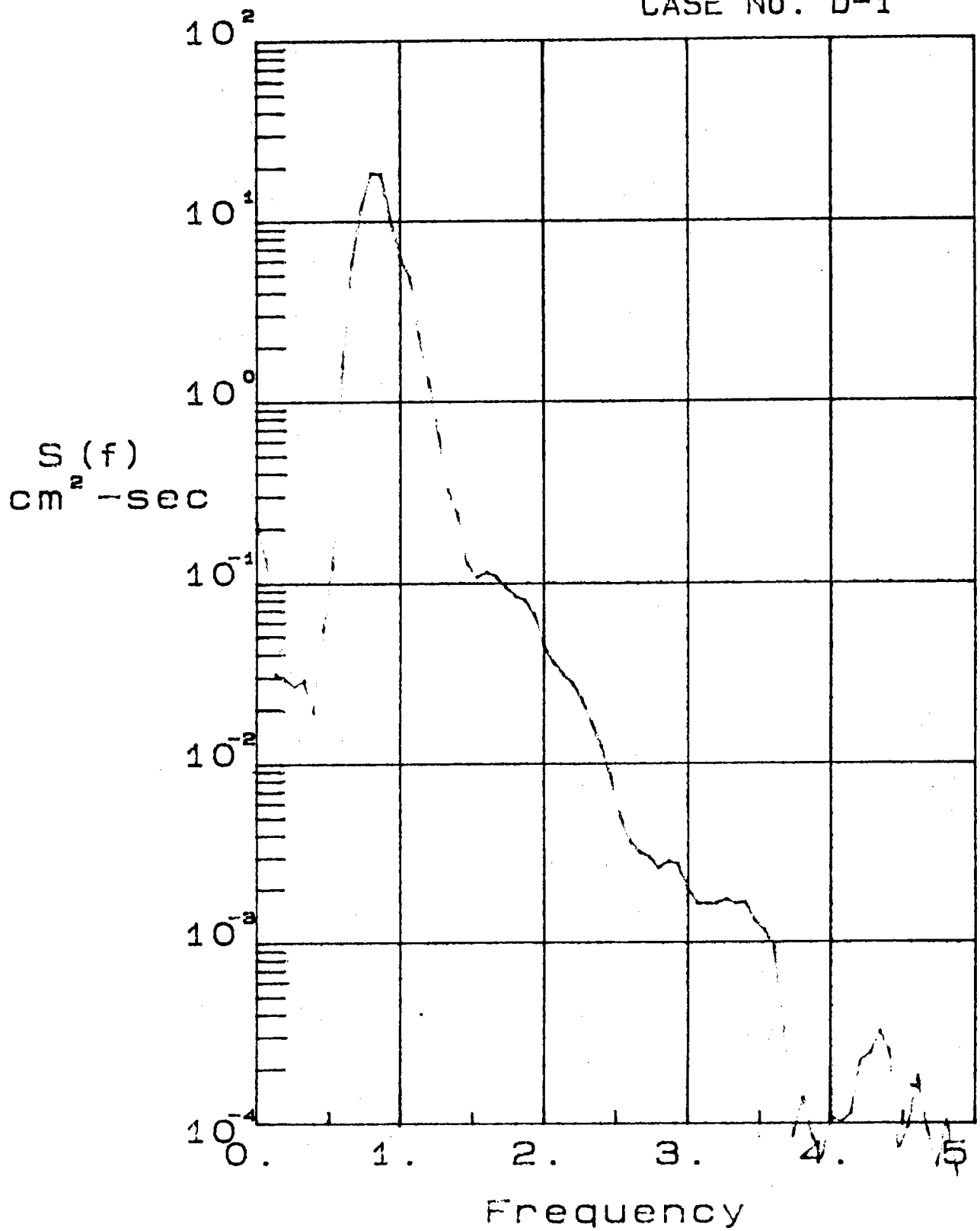
WAVE SPECTRUM

CASE No. C1 0



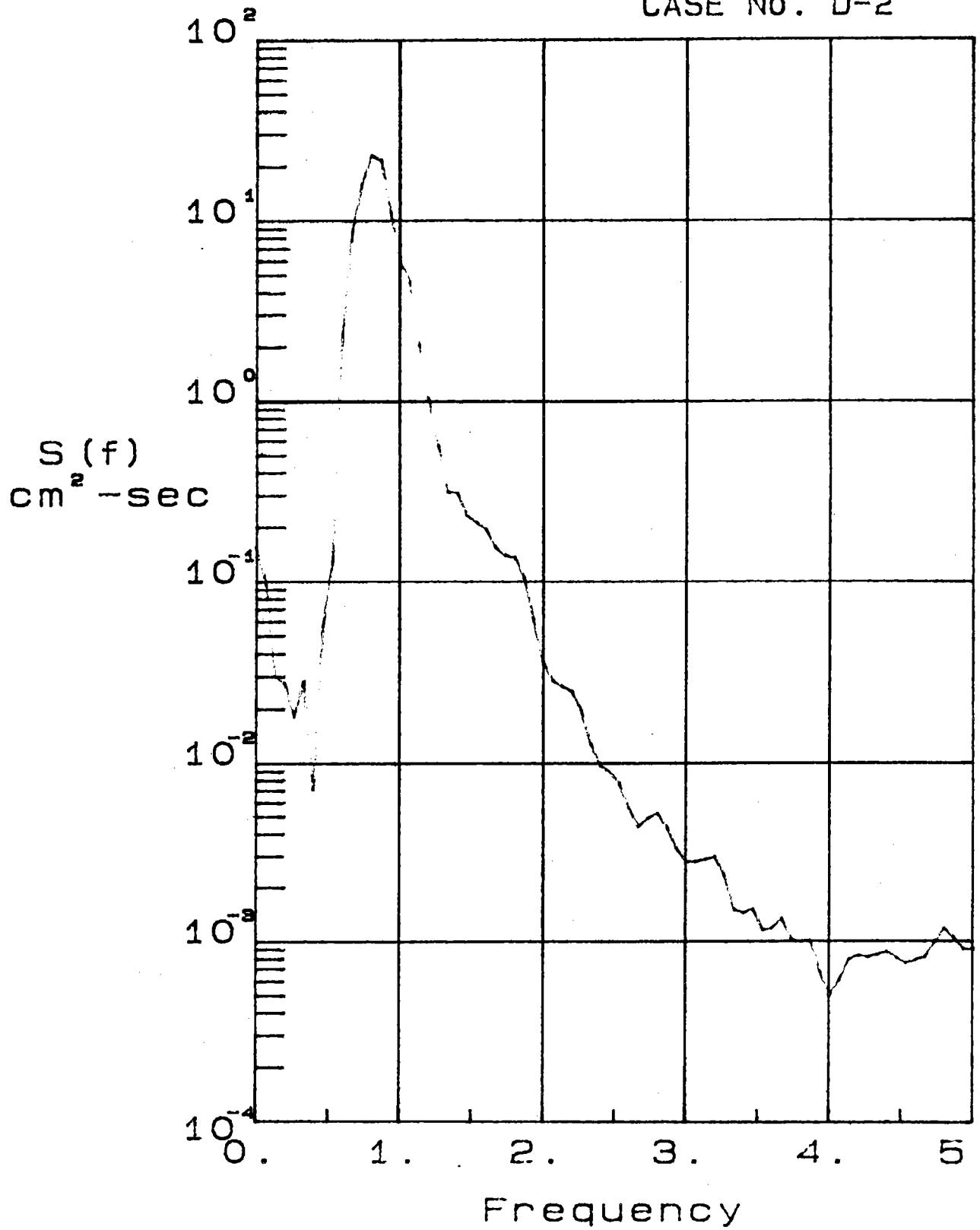
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-1



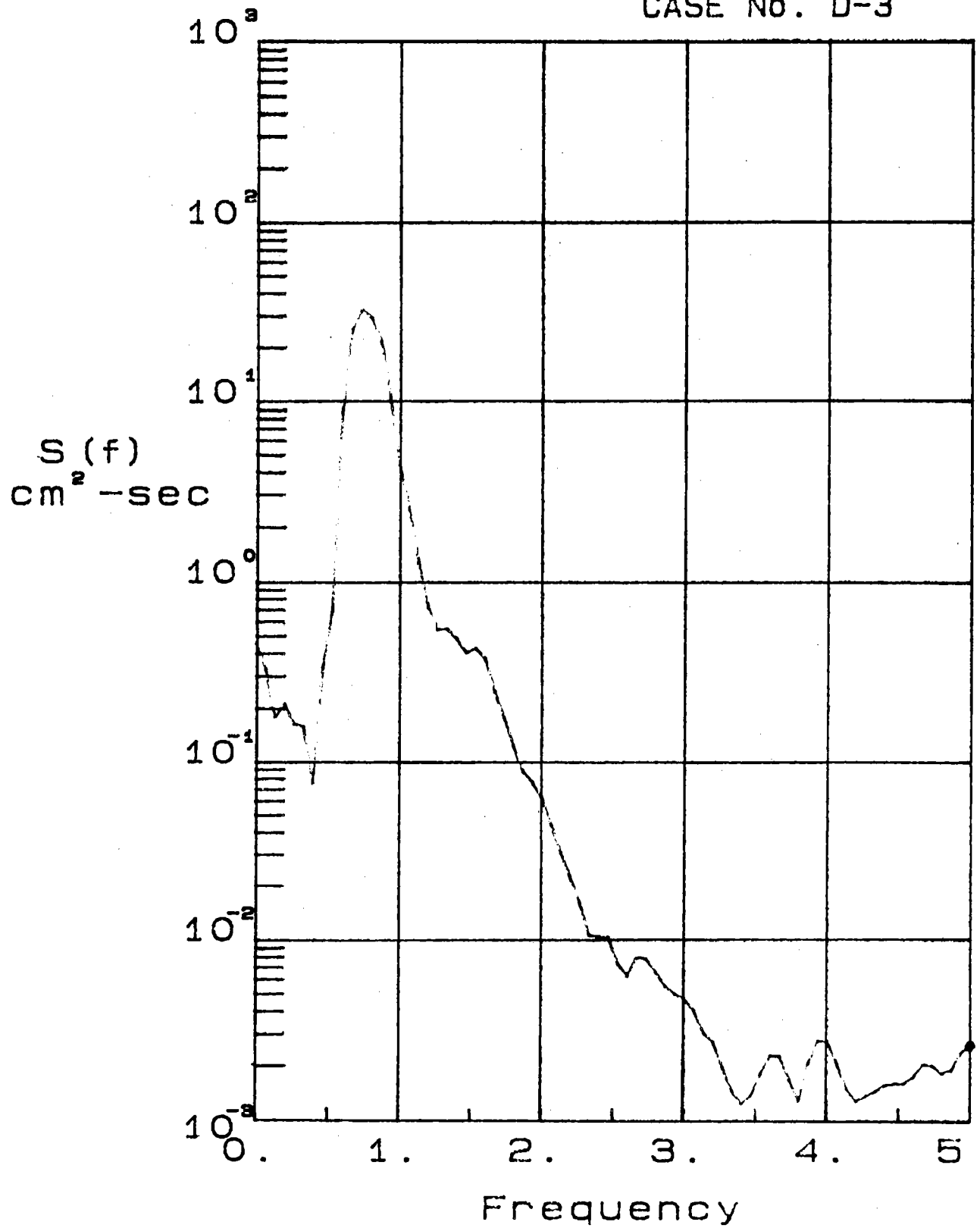
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-2



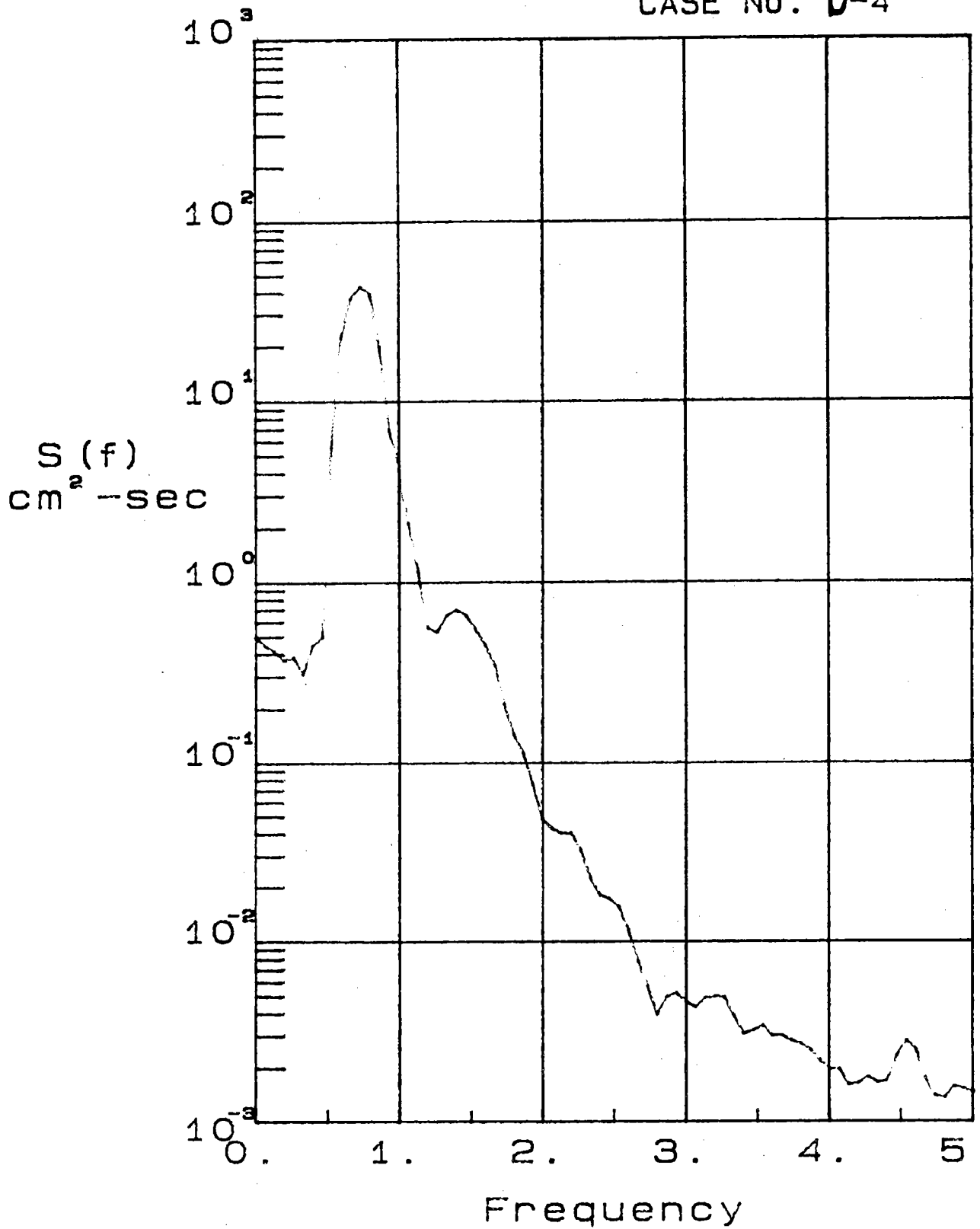
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-3



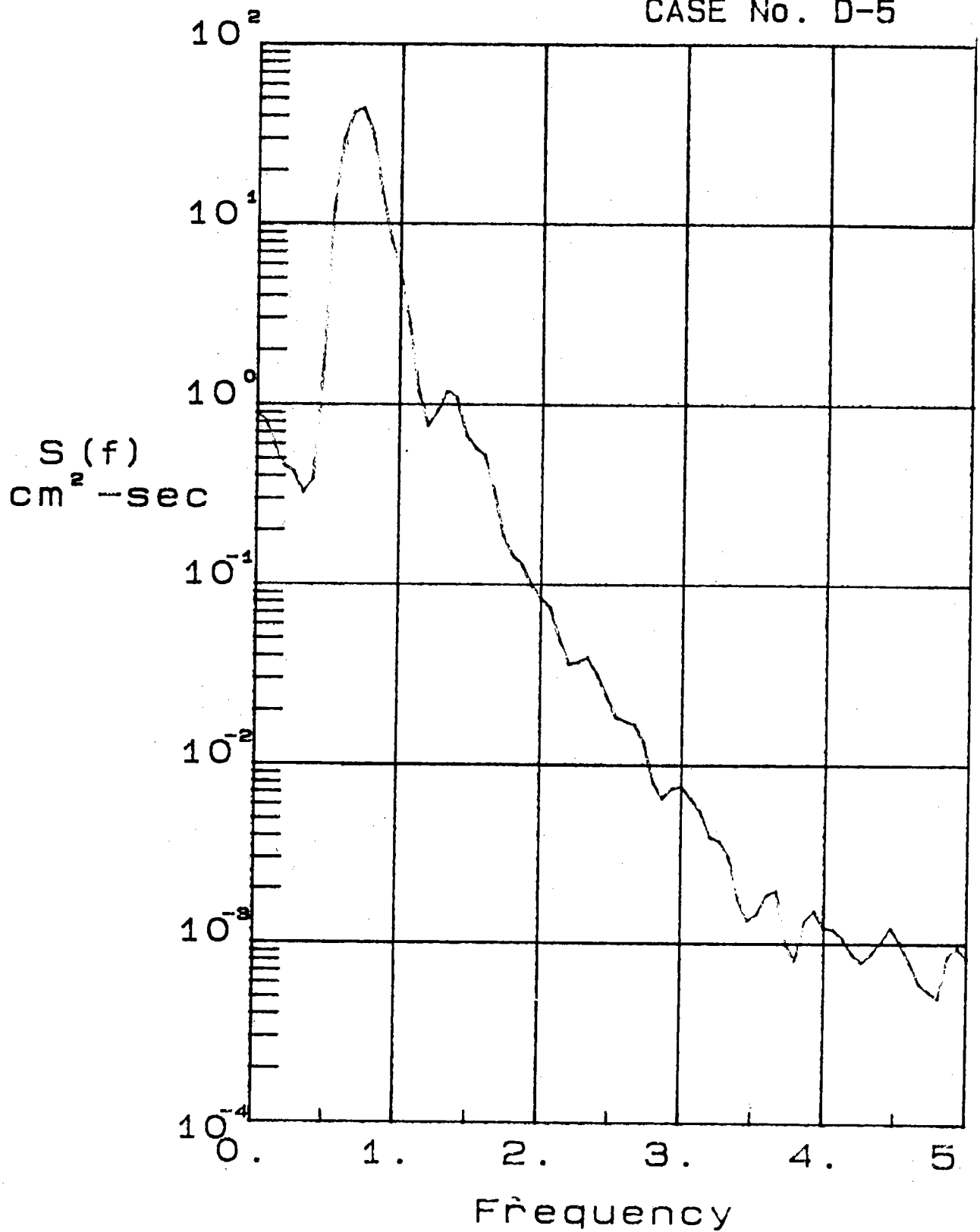
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-4



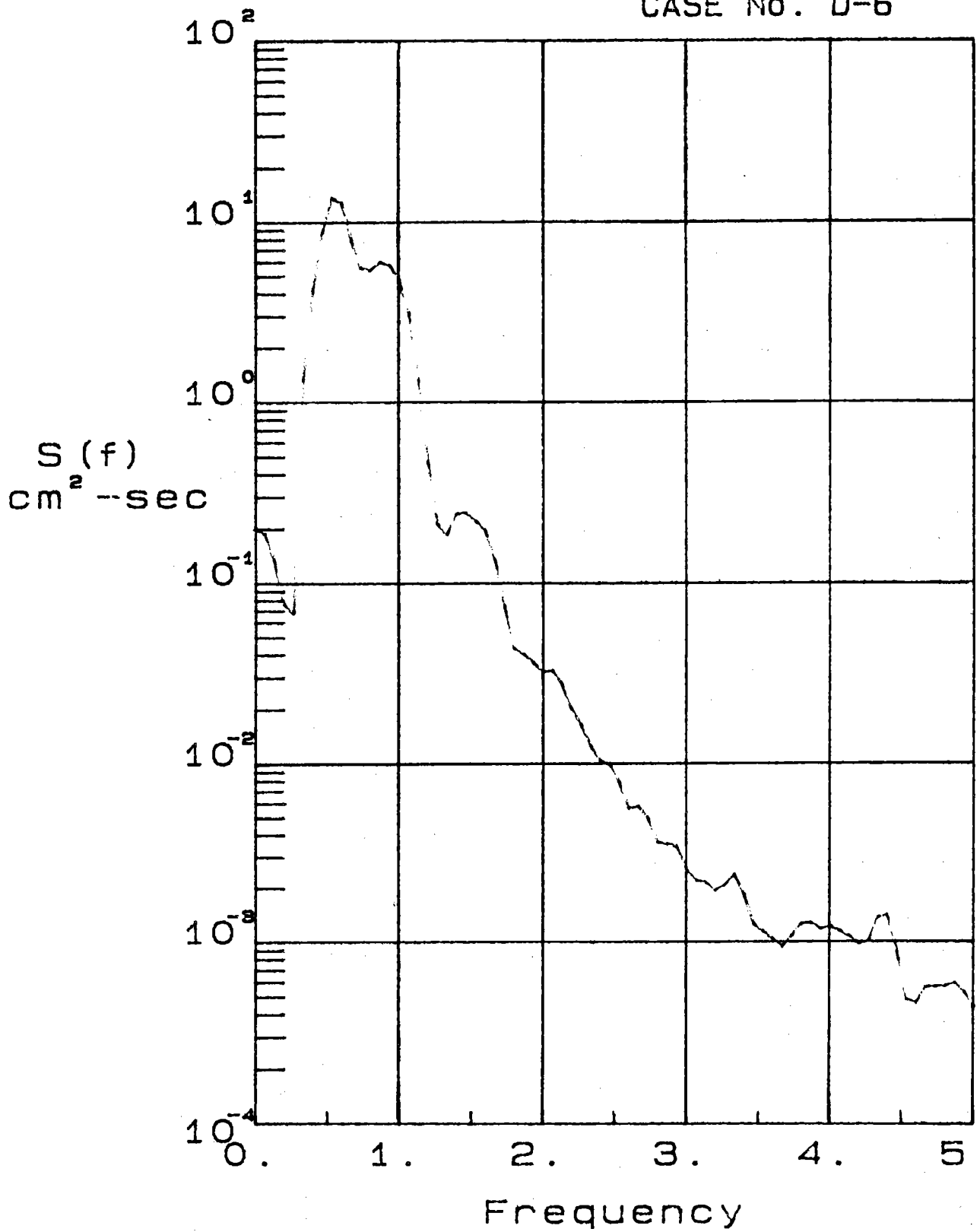
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-5



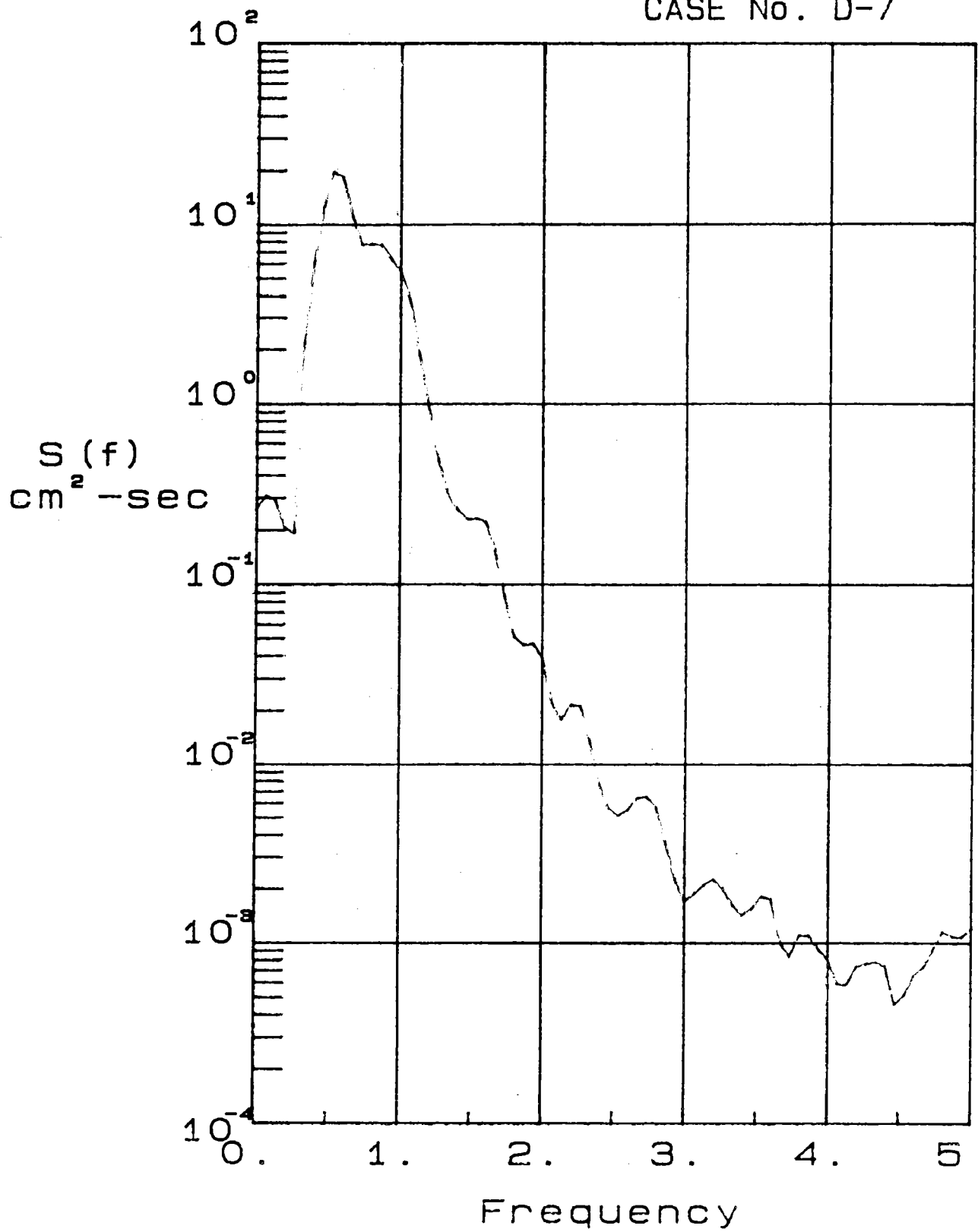
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-6



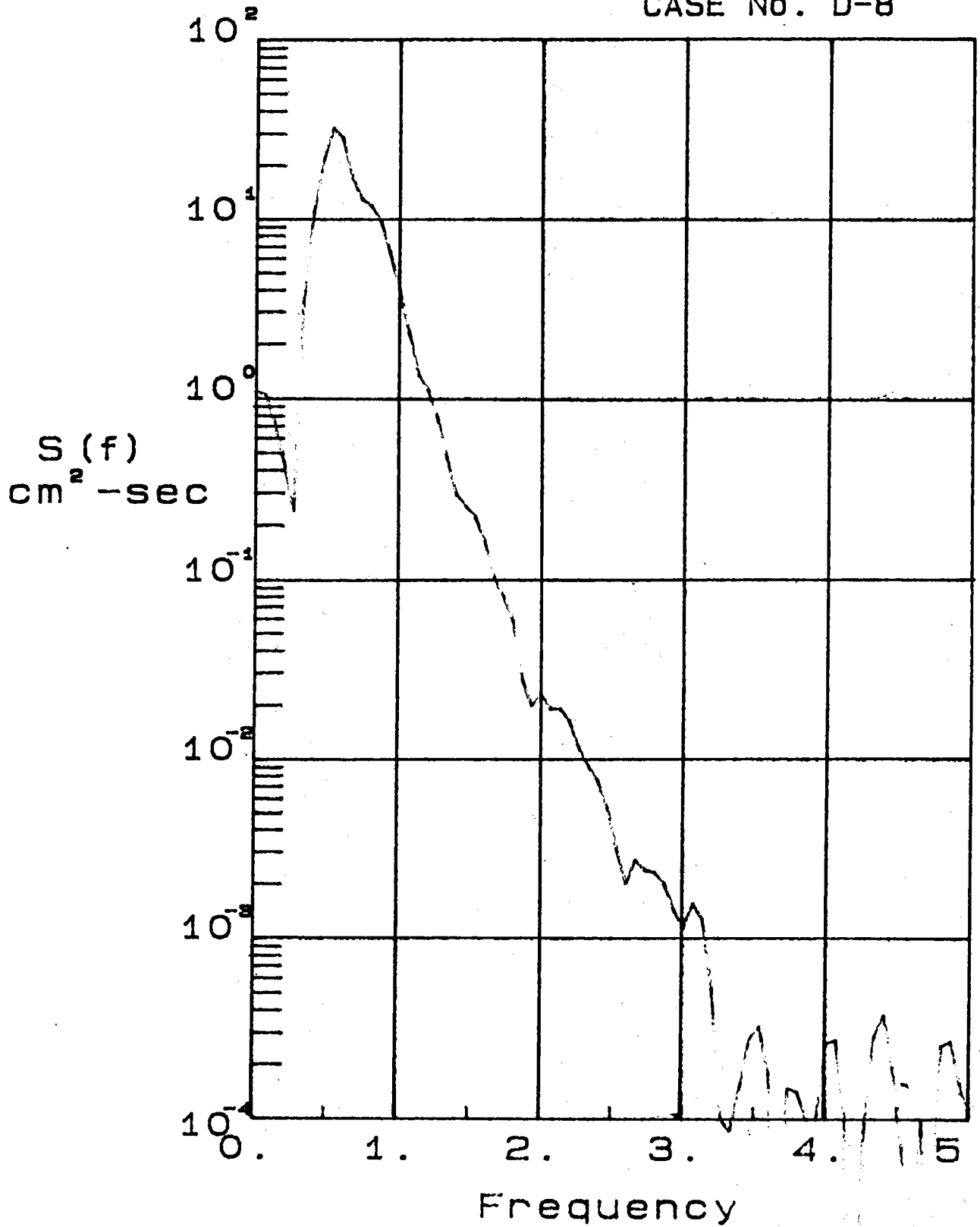
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-7



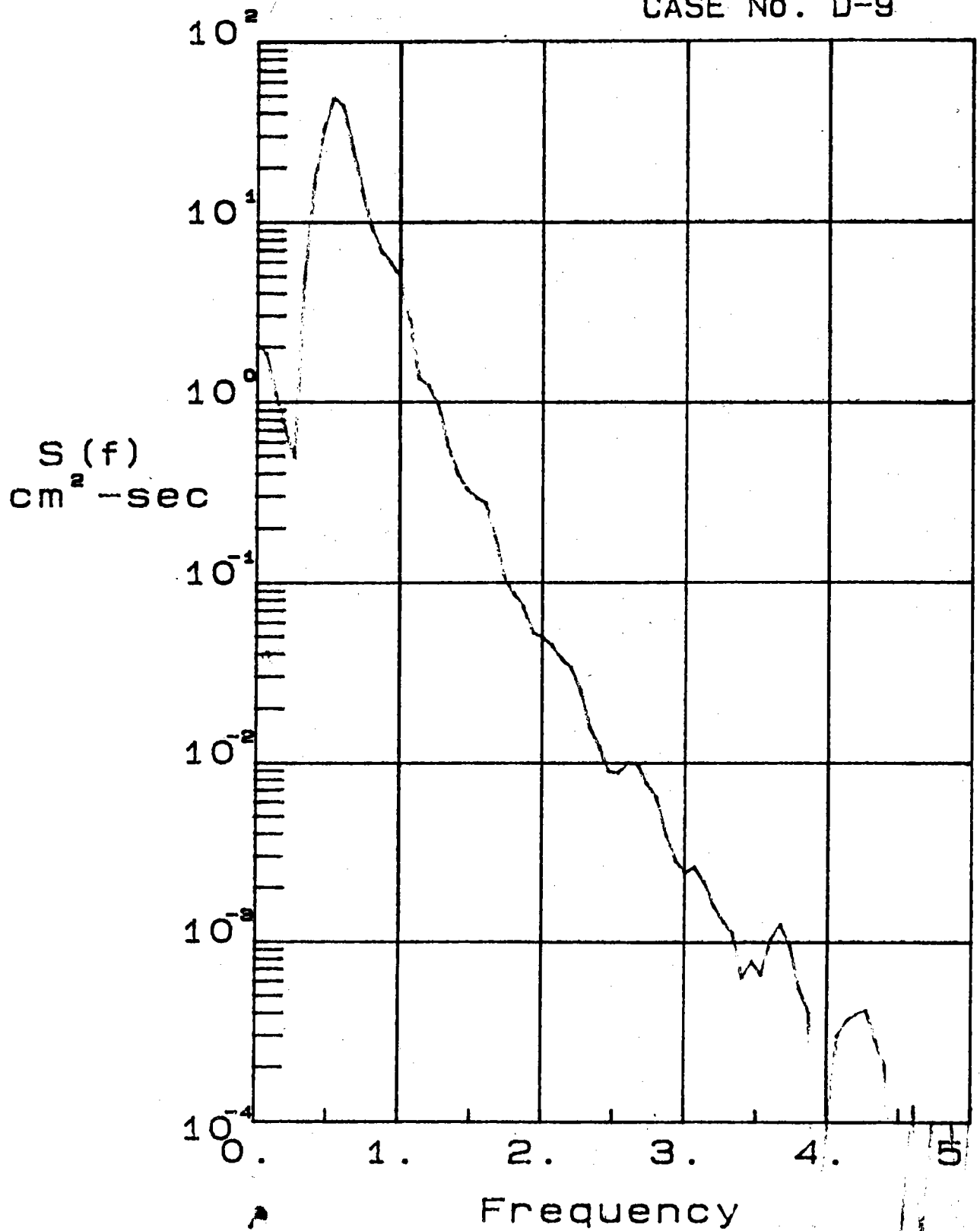
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-8



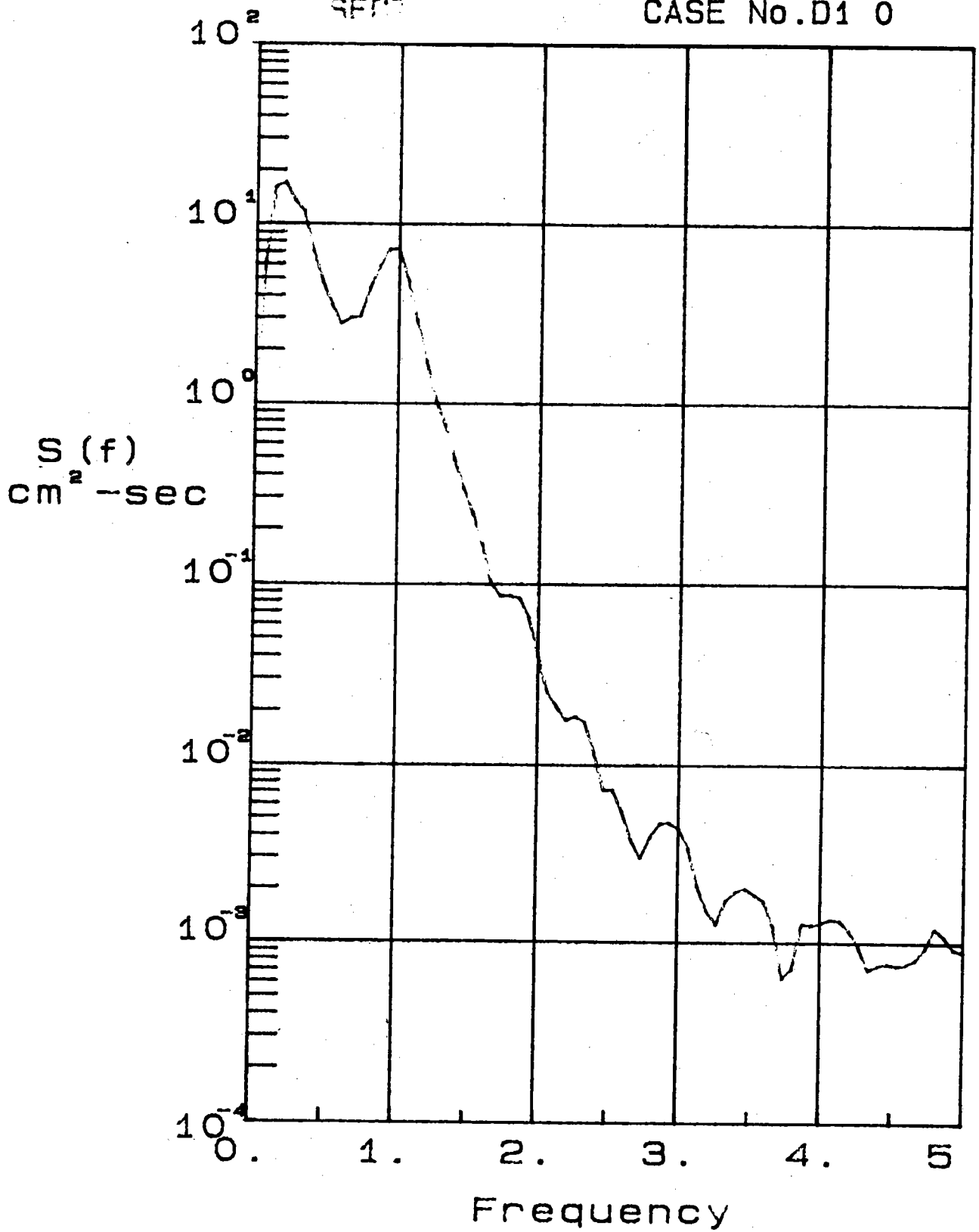
WAVE SPECTRUM

CASE No. D-9



WAVE SPECTRUM

CASE No.D1 0



ABSTRACT

An experimental studies of wave transmission by overtopping for a smooth, impermeable breakwater with a 1-in-1.5 slope under regular and irregular waves were considered. A resulting relationship between the transmission coefficient (such as wave height, wave period) and a breakwater height above mean sea level normalized with a directly measured wave run-up height is reported; meanwhile their differences both regular and irregular waves are also discussed in this paper. All experimental data are compared with the theoretical values and the other variety scale model data. The results indicate that they are in a good agreement. The author also get an experimental formula of wave run-up height, i.e.,

$$R = c_1 \sqrt{H_1 L_0} \tan \phi + 0.6 H_c + C_2, \quad C_1 \text{ \& } C_2 \text{ are constants}$$

depending on the incoming wave period here. And the author also finds that the transmitted wave period by overtopping breakwater under irregular waves may be much longer than the incoming wave period $T_{\frac{1}{3}}$. This phenomenon is especially prominent when the breakwater height above mean sea level to water depth ratio (i.e. $\frac{H_c}{D}$) is greater than 0.23 and incoming wave period is longer than 8 secs. In order to avoid the harbour resonance take place due to this long period waves generated at the back of breakwater by overtopping, the author

recommends that the $\frac{H_c}{D}$ values should be less than 0.23 in design. The studied results could be used for the planning and design criteria of the outer-breakwater crest hight.