

作用在傾斜坡面之波壓力研究

周宗仁* 廖哲民**

摘要

本研究針對影響作用在海岸結構物上波壓力之因素，如波浪週期、波高、波形尖度，及海底坡度等，以自然光滑坡面模型進行實驗。

由實驗結果修正 Sainflou 直立壁波壓公式使之適用於斜面波壓設計之用，經和實驗結果相較，效果非常良好，可作一般傾斜海岸結構物設計波壓之用。

一、前言

有關作用在直立壁面波壓力之研究已有許多著作發表如 Sainflou (1928)⁽¹⁾， Biesel (1955)⁽²⁾， Denny (1951)⁽³⁾……等，對直立壁所受的之波壓計算公式已大致確定。然傾斜面之波壓設計則少之又少， Krylov vv⁽⁴⁾ (1966)曾作過傾斜面波壓公式之整理，然其公式純粹只考慮最大波壓點之設計。首藤⁽⁵⁾ (1972)把長波水粒子之運動以 Lagrangian法描述，導得作用在傾斜壁面之波壓公式效果良好，惜其公式僅限於長波之設計，使用範圍過小。

基於上述理由，本文利用實驗結果以最小平方求出最大（水面點）及最小（水底點）之壓力，綜合分析出影響波壓的因素，修正了 Sainflou 直立壁波壓公式，使之能適用於任何傾斜面之波壓設計之用，修正之公式如下：

$$P_1 = (1 - 0.2 \cos^2 \theta) \cdot \gamma \cdot (P_2 + \rho gh) \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \dots\dots\dots (1.1)$$

$$H/L \geq 0.02 \quad \gamma = 1.07 e^{-3.6 H/L}$$

$$H/L < 0.02 \quad \gamma = 1.41 e^{-17 H/L}$$

$$P_2 = (1 - 0.2 \cos^2 \theta) \cdot \beta \cdot \frac{\rho gH}{\cos hkh} \dots\dots\dots (1.2)$$

* 國立台灣海洋學院河海工程學系教授，工學博士

** 國立台灣海洋學院河海工程研究所畢業，工學碩士

$$\beta = 1.31 e^{2H/L}$$

$$\Delta = (H + \delta_0) \cdot \csc \theta \cdot (1 + 1.4 \cos^2 \theta \cdot \alpha) \dots \dots \dots (1.3)$$

$$\delta_0 = \pi H^2 / L \cot hkh \qquad \alpha = 0.48 e^{2.3H/L}$$

P_1 = 坡面靜水面點之波壓力

P_2 = 坡面底面點之波壓力

Δ = 潮上點

H/L = 波形尖度

θ = 斜坡角度

二、本研究之座標及符號表示法

本研究主要乃欲求垂直坡面之壓力，是以沿斜面 $y \csc \theta = 0$ 處之垂直軸表壓力大小之無因次 $P/\rho gH$ ，往上表波峯來時之壓力，往下表波谷來之壓力，斜面長度以 $y \csc \theta$ 表示， y 表水深， a 及 L 水平面上入射波之振幅及波長， θ 表斜坡角度， R 表潮上高度，如下圖 1

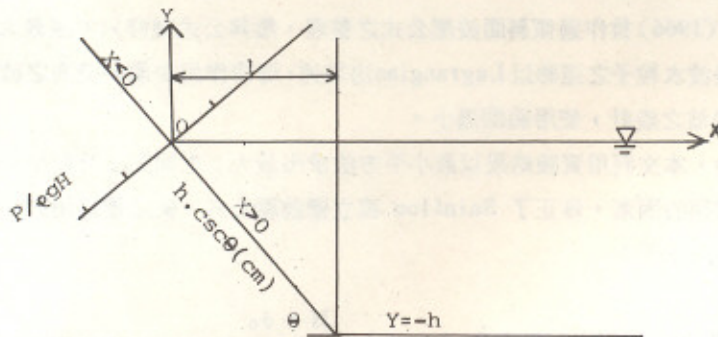


圖 1

wave generator

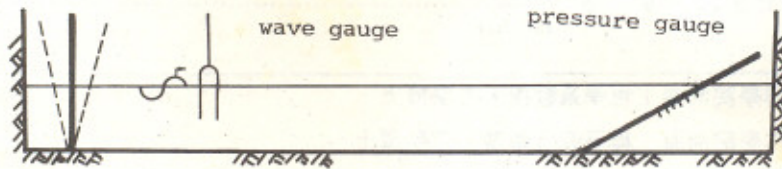


圖 2

三、實驗設備和實驗條件

實驗設備如圖二，水槽長 30m，寬 1.2 m，高 1.0 m。造波機為 5 馬力之規則造波機，斜面以不透水鋼板覆蓋，沿斜坡中線相隔 5 cm 置 6 個 9 GM-2KC 型的波壓計，由記錄器記錄造波後的波壓歷時曲線，同時記錄入射波高，固定水深 $h = 60\text{cm}$ 。

實驗條件如表 1：本研究共造 16 種 H/L 之波浪，8 種斜坡角度，共 144 組波壓資料。

表一：波浪條件

斜坡角度 (θ)	90° 75° 60° 45° 37.5° 30° 22.5° 15°
入射波高 (H)	14.6 cm — 2.1 cm
入射週期 (T)	0.9 sec — 3.47 sec
波形尖度 (H/L)	0.0026 — 0.106
水深 (h)	60 cm
坡面佈置：	光面
$\sigma^2 h/g$ ：	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.35, 0.2
偏心距：	二種

四、波壓理論公式

4-1 Simplified sainflou 直立壁波壓公式：

直立壁面的波壓力公式由 Sainflou 在 1928 年提出，其式如下：

$$P_1 = (P_2 + \rho g h) \left(\frac{H + \delta_0}{H + h + \delta_0} \right)$$

$$P_2 = \frac{\rho g H}{\cos h k h}$$

$$P'_1 = \rho g (H - h_0)$$

$$P'_2 = P_2 = \rho g h / \cos h (k h)$$

$$\delta_0 = \pi H^2 / L \cot h k h$$

式中 P_1 及 P_2 分別表水面及水底波峯來時之壓力， P'_1 及 P'_2 表波谷來時最大及最小壓力， H, h, k 分別表波高、水深及週波數。

4-2 Shuto 斜坡面波壓公式：

首藤 (1972) 解析長波水粒子之運動，其水粒子移動之位置以下式表示：

$$X = x_0 - 4 \frac{a}{l} \frac{J_1(4\pi l/L(x_0/l)^{\frac{1}{2}})}{[J_0^2(4\pi l/L) + J_1^2(4\pi l/L)]^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{4\pi l/L(x_0/l)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots ①$$

當 $X < 0$

$$\frac{P}{\rho g \alpha l} = \frac{x_0}{l} - 2 \frac{a}{\alpha l} \frac{J_2(4\pi l/L(x_0/l)^{\frac{1}{2}})}{[J_0^2(4\pi l/L) + J_1^2(4\pi l/L)]^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots ②$$

當 $X > 0$

$$\frac{P}{\rho g \alpha l} = \frac{2}{\alpha} \frac{a}{l} \frac{J_0(4\pi l/L(x_0/l)^{\frac{1}{2}})}{[J_0^2(4\pi l/L) + J_1^2(4\pi l/L)]^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots ③$$

式中 x_0 表水粒子靜止時之座標， P 表壓力， α 表 $\tan \theta$ ， $l = h \cot \theta$ ， J_0 、 J_1 、 J_2 表 Bessel 函數， k 、 L 、 a 表入射波之週波數、波長及振幅。

五、實驗結果及討論

圖三表示直立壁時靜水面最大波壓相對 16 種波形尖度之波浪作圖，● 表實驗值，○ 表依 Sainflou 公式所求出之值，可以看出隨著波形尖度之加大，實驗值之壓力大小 $P / \rho g H$ 由大變小，而 Sainflou 之值則固定在 $P / \rho g H = 1.0$ 左右。

圖四及圖 5 表壓力之示義圖， P_{max}^+ 、 P_{max}^- 表直立壁時波峯及波谷來時壓力， P^+ 、 P^- 表斜坡面時波峯及波谷來時之壓力。

圖 6 表直立壁時波谷來時之波壓，可看出實驗值約在 -0.5 之處，而 Sainflou 理論值稍大。

圖 7、圖 9 分別表斜坡角 $\theta = 75^\circ$ 及 60° 時之壓力，圖 8 及圖 10 表與直立壁時波峯及波谷來時之壓力比較，可以看出波峯來時之壓力逐漸減小而波谷來時之壓力漸加大。

六、修正之 Sainflou 公式

6.1 修正之過程：

6.1.1 最大及最小壓力之修正：

本研究針對 144 組光滑面所測之壓力資料，以最小平方方法先求出實驗值之直線表示，得出靜水面及水底面當波峯來時之壓力 P_1 及 P_2 ，拿 16 組直立壁所測之資料與由 Sainflou 公式所求出之值相除得圖 11 及圖 13，是以先以波形尖度 H/L 對 Sainflou 公式加以修正。再由小於 90° 的波壓資料，整理分析出影響斜面波壓的角度因素 $f(\theta) = 1 - 0.2 \cos^2 \theta$ ，得以下修正之 Sainflou 公式

$$P_1 = (1 - 0.2 \cos^2 \theta) \cdot \gamma \cdot (P_2 + \rho gh) \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$H/L \geq 0.02 \quad \gamma = 1.07 e^{-3.6H/L}$$

$$H/L < 0.02 \quad \gamma = 1.41 e^{-17H/L}$$

$$P_2 = (1 - 0.2 \cos^2 \theta) \cdot \beta \cdot \frac{\rho gH}{\cos kh} \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\beta = 1.31 e^{2H/L}$$

6.1.2 溯上點之修正：

圖 14 表示未碎波時波浪之溯上記錄，分析圖 25，略去碎波部份而得以下結果：

$$\Delta = (H + \delta_0) \cdot \csc \theta \cdot (1 + 1.4 \cos^2 \theta \cdot \alpha) \dots\dots\dots (5.3)$$

$$\alpha = 0.48 e^{-7.3 H/L}$$

式中 P_1 及 P_2 各代表波峯來時水面及水底面點所受之波壓，由於實際海岸工程設計壓力純考慮波峯來時之壓力即可，是以本研究僅提出正壓力之修正，而略去負壓力。

6.2 修正之 Sainflou 公式理論值及實驗值之比較：

圖 15 — 22 表直立壁時之波壓理論值及實驗值，虛線……表 Sainflou 值，實線——表修正後之 Sainflou 公式值（僅列正壓力），……表實驗值，可以看出修正後之值更加接近實驗值，特別在長波實驗值和修正之值幾乎完全一致。

圖 23 — 30 表傾坡角 $\theta = 75^\circ$ 時之理論及實驗值，實線表修正之 Sainflou，——表 shuto 理論值，由圖 26 可看出修正之 Sainflou 值和實驗值完全一致，圖 30 和 shuto 相較亦甚良好。

圖 31 — 38 表 $\theta = 60^\circ$ 時之壓力比較，可看出在短週期波 $\sigma^2 h / g = 3.0, 2.5, 2.0$ 水面上之壓力理論值稍大於實驗值，其餘週期皆甚良好，在長波處和 shuto 值相較亦不遜色（圖 36、37、38）

圖 39 — 44 表 $\theta = 30^\circ$ 時壓力之理論及實驗值，由圖 39、40、41 可看出碎波點處壓力之實驗值大過修正之 Sainflou 值，其餘點處之壓力理論及實驗值仍甚相合。

圖 45 — 50 表 $\theta = 15^\circ$ 時之壓力分佈，由圖 45、46、47 可看出水面上壓力值理論大過實驗值，碎波點處之壓力（標 B 處），壓力加大，其餘水下點實驗及理論值仍相合。

七、結論

1 根據本研究建議之修正公式，對直立壁時可擴大原來之 Sainflou 波壓公式之適用範圍，更可將波形尖度對波壓之影響更精密的算出。

2 利用本修正公式當坡面之坡度大於 15° 時均可適用，但若發生碎波時，由於碎波點處壓力顯著

變化之關係，根據本修正公式所得之值除碎波點處之值小於實驗值外，其它點處和實驗值仍相合，仍可用於設計。

3 斜坡角度之變緩對波峯來時之壓力影響不大，但却會明顯的加大波谷來時之壓力。

八、參考文獻

1. Sainflou, M, : "Essai sur les Diguees Maritimes verticales," Ann ports
chauss., 98:2 (1928)
2. Biesel, F, : "Etude Theorique de la Reflexion de la Houle sur certains
obstacles," La Houille Blanche, no. 10, 1955
3. Denny, D.F. : "Further Experiments on wave pressures," J. Inst, C.E., Vol.
35, 1951
4. KAYLOVV V. "on Design of wave pressure Acting on Structure of sloping Type."
Coastal Engineering Vol. 1. pp. 953
5. Shuto, N. : "Standing wave in front of a sloping dike." Coastal Engineering
in Japan. Vol, 15, 1972.

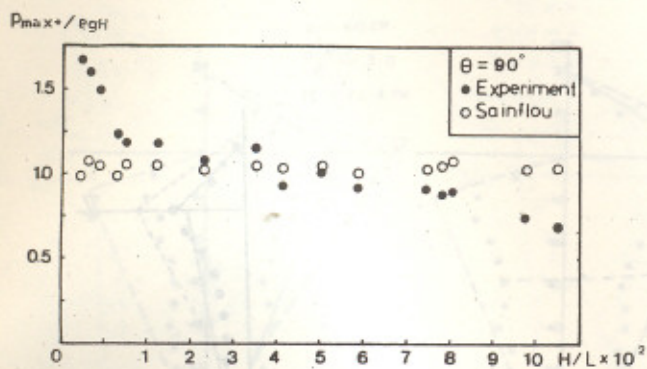


圖 3

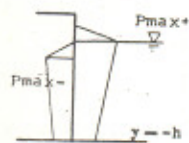


圖 4

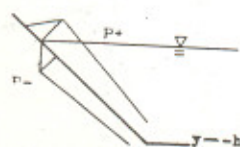


圖 5

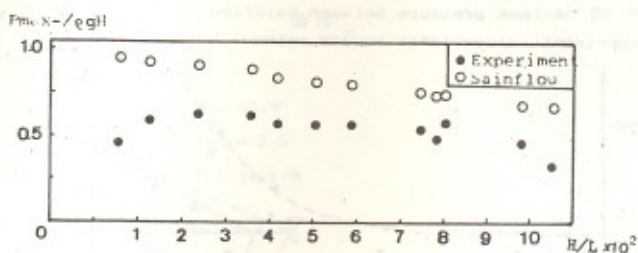


圖 6

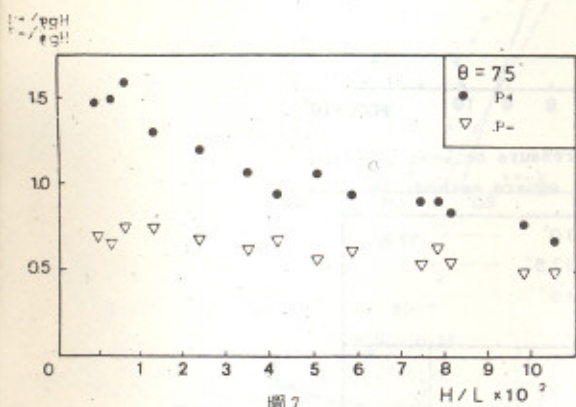


圖 7

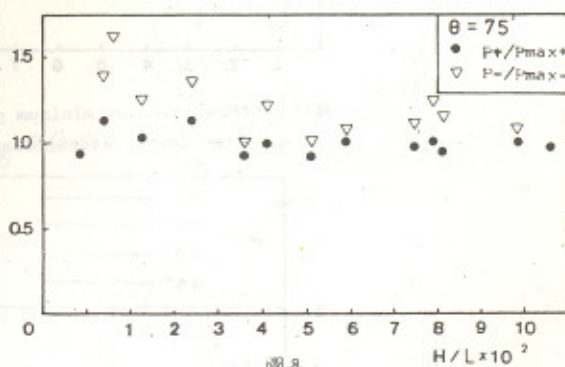


圖 8

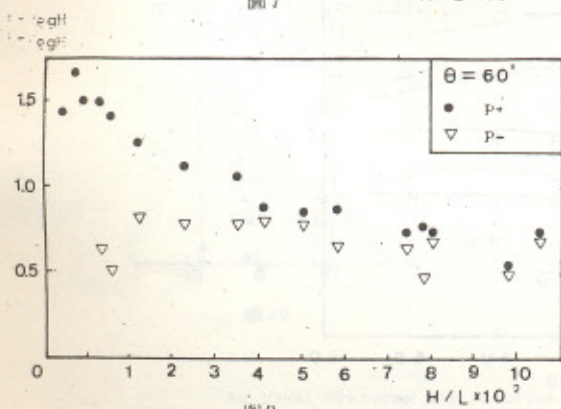


圖 9

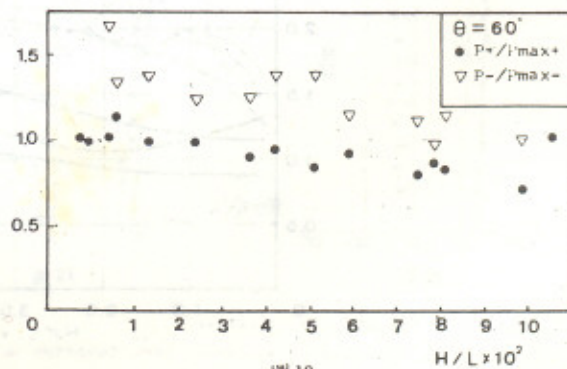


圖 10

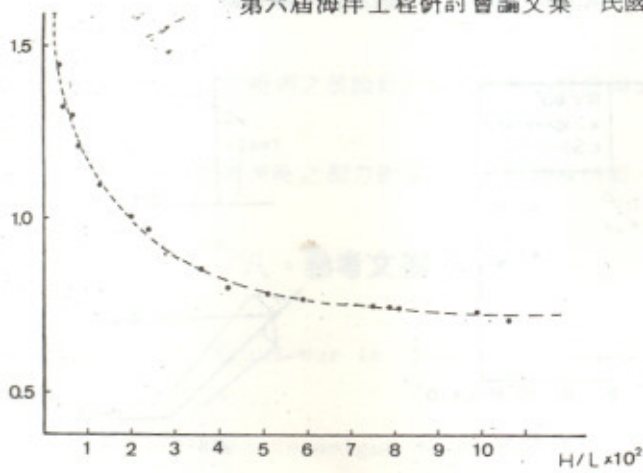


圖 11 Comparison of maximum pressure between Sainflou and experiment values(least square method)

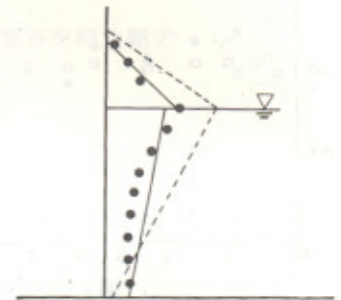


圖 12 Pressure distribution

- Experiment
- Sainflou values
- Least square method

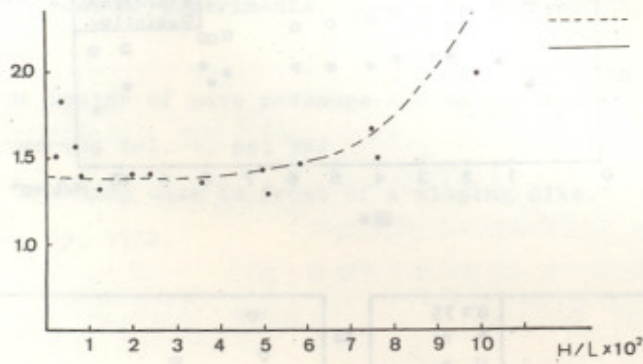


圖 13 Comparison of minimum pressure between Sainflou and experiment values(least square method)

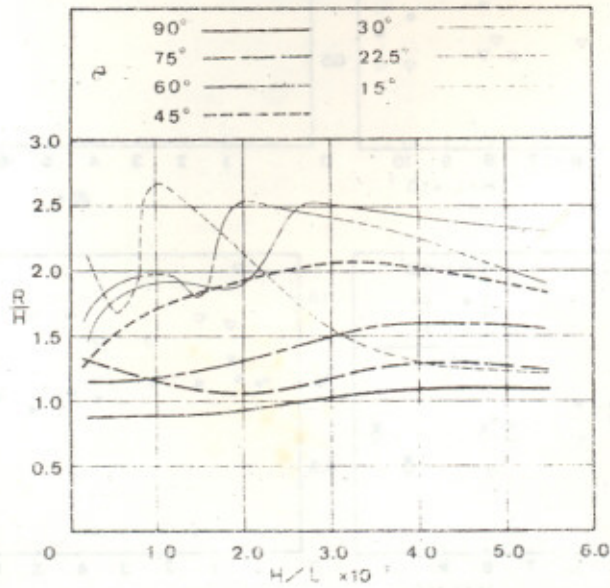


圖 14 Wave run up height

作用在傾斜坡面之波壓力研究……周宗仁、廖哲民

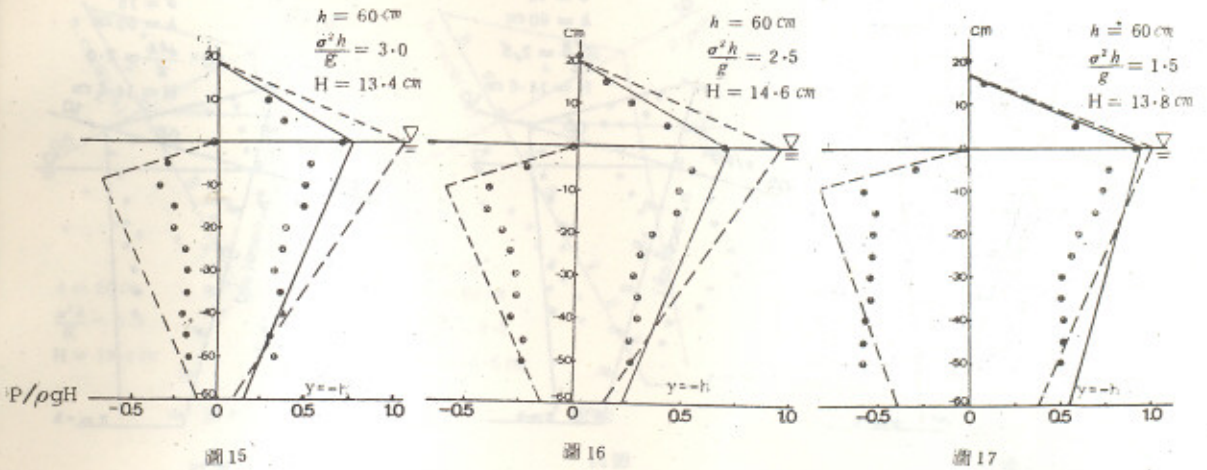


圖 15

圖 16

圖 17

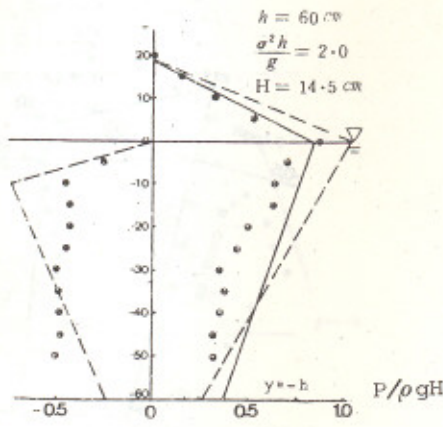


圖 18

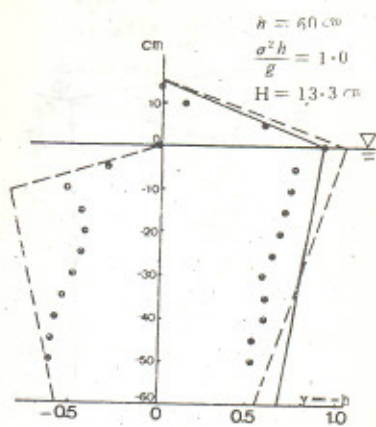


圖 19

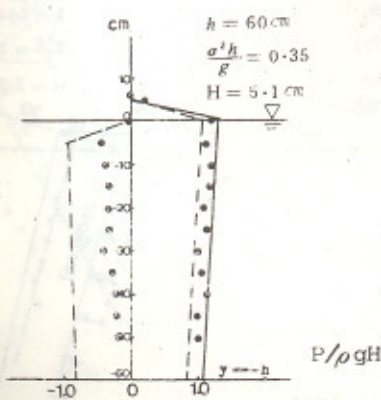


圖 20

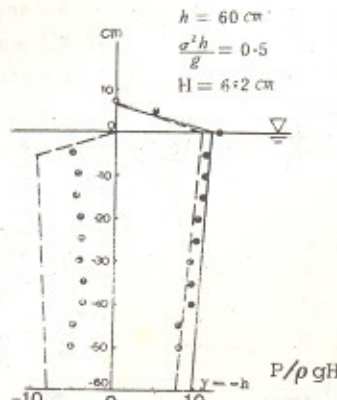


圖 21

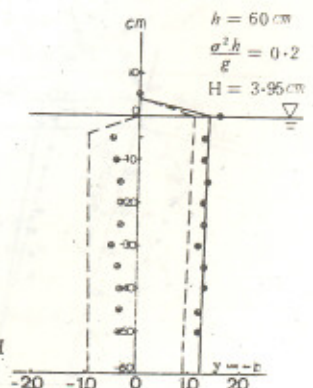


圖 22

Fig 15-22 Pressure distribution on vertical wall

- Experiment
- Sainflou
- Modified Sainflou

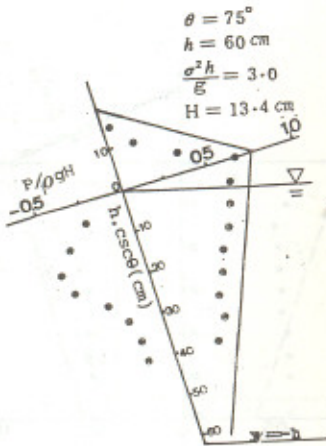


圖 23

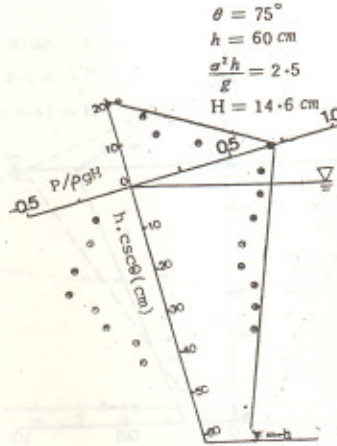


圖 24

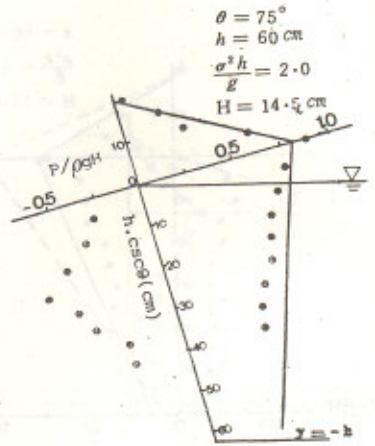


圖 25

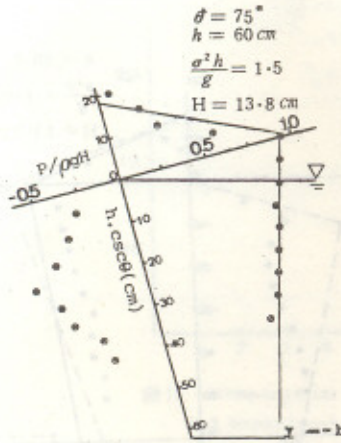


圖 26

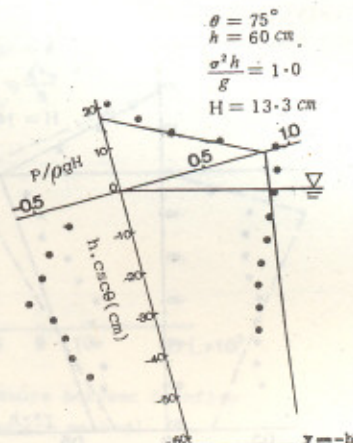


圖 27

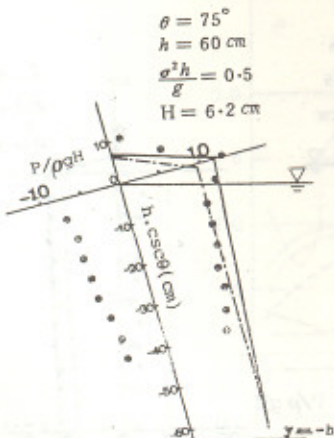


圖 28

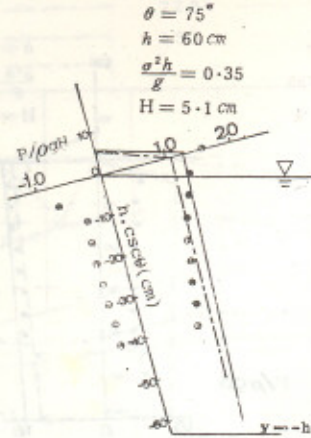


圖 29

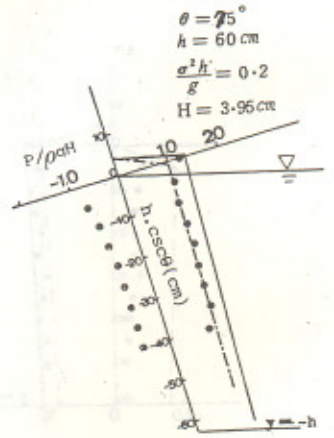


圖 30

Fig 23-30 Pressure distribution ($\theta=75^\circ$)

..... Experiment
 ——— Shuto
 ——— Modified Sainflou

作用在傾斜坡面之波壓力研究 ……周宗仁、廖哲民

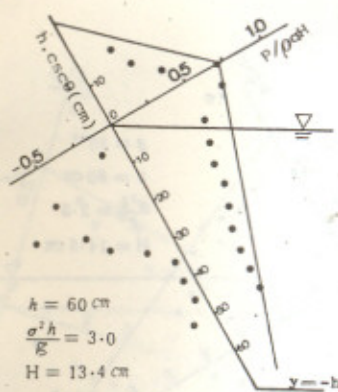


圖 31

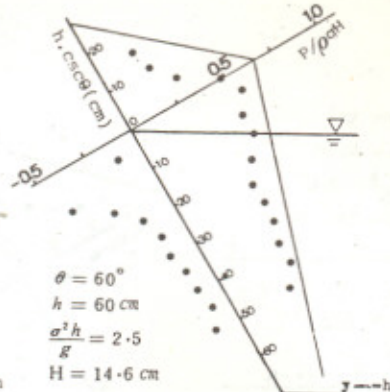


圖 32

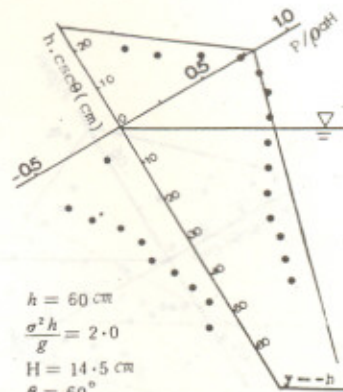


圖 33

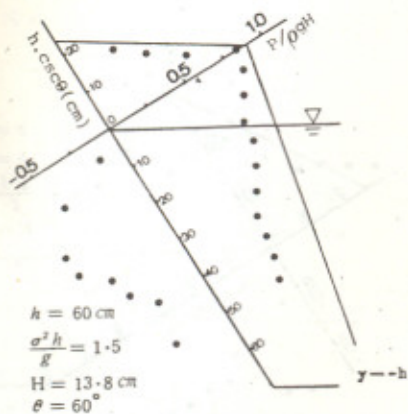


圖 34

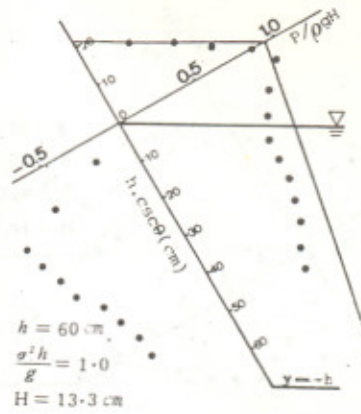


圖 35

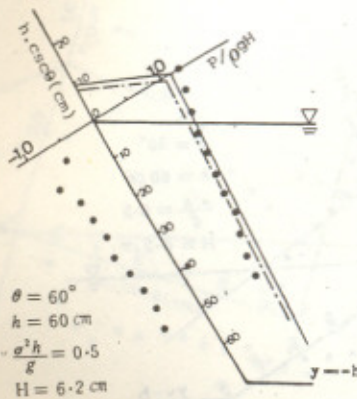


圖 36

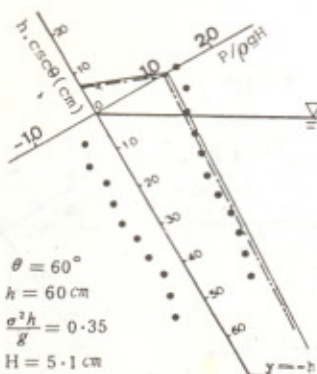


圖 37

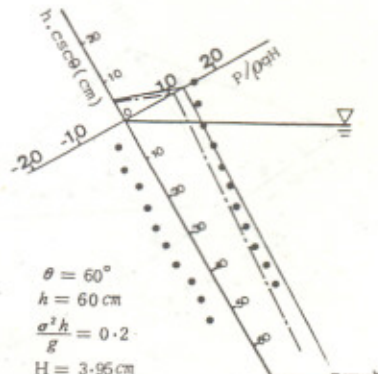


圖 38

Fig 31-38 Pressure distribution ($\theta=60^\circ$)

..... Experiment
 - - - - - Shuto
 ——— Modified Sainflou

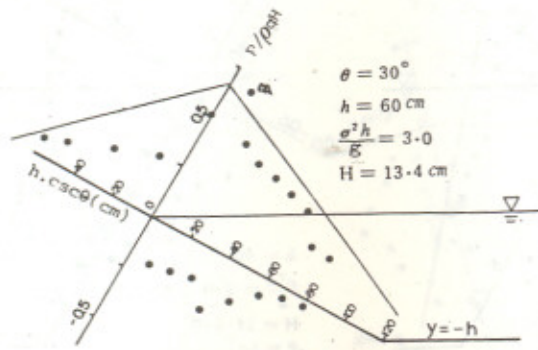


圖 39

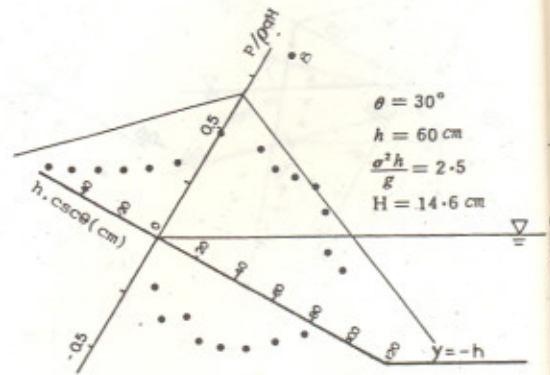


圖 40

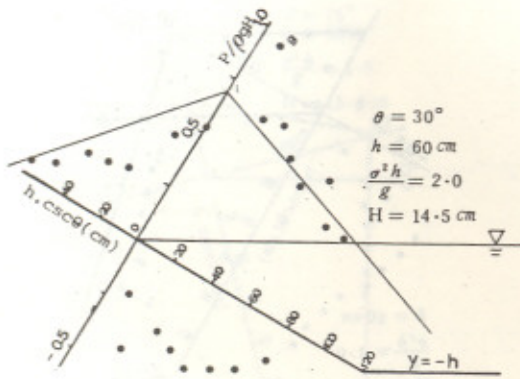


圖 41

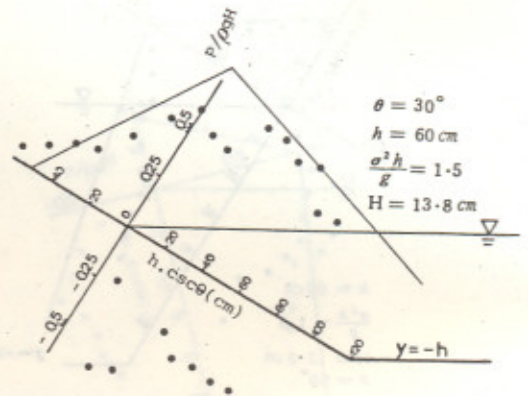


圖 42

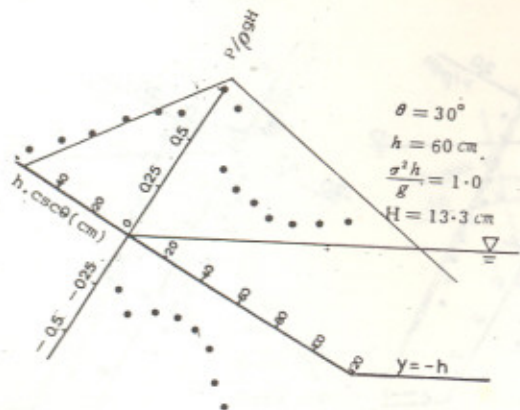


圖 43

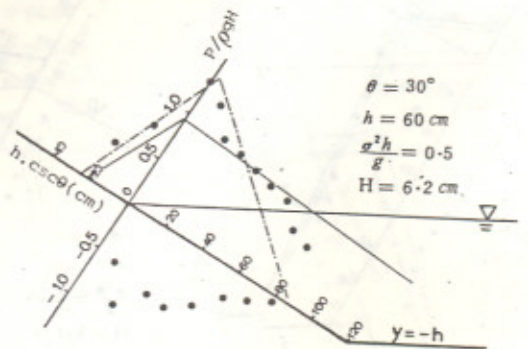


圖 44

..... Experiment
 - - - - - Shuto
 ——— Modified Sainflou

Fig 39-44 Pressure distribution ($\theta=30^\circ$)

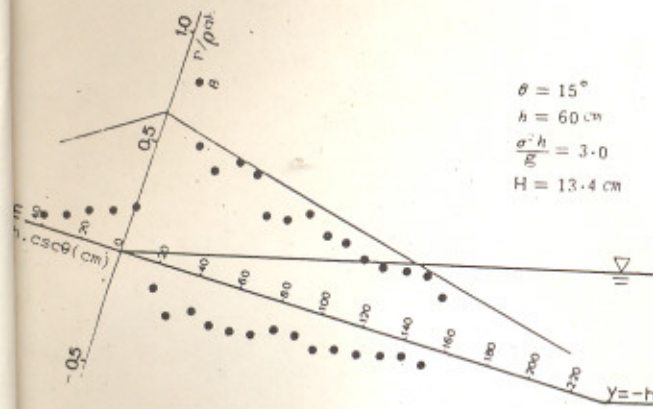


圖 45

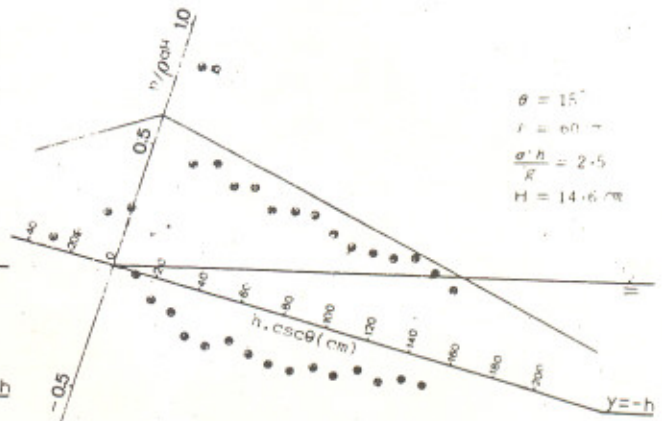


圖 46

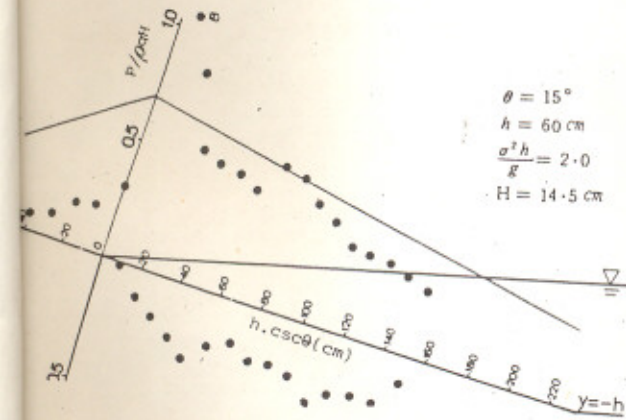


圖 47

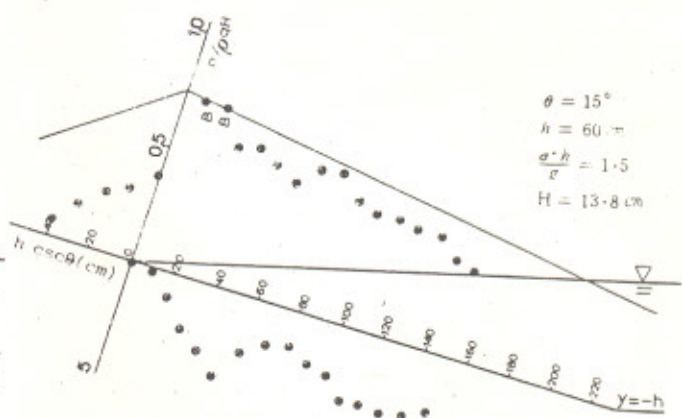


圖 48

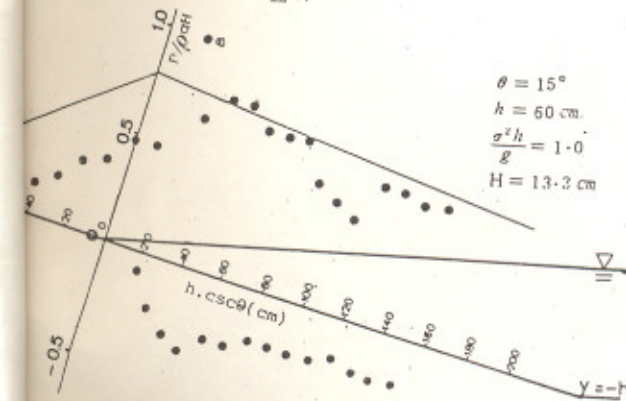


圖 49

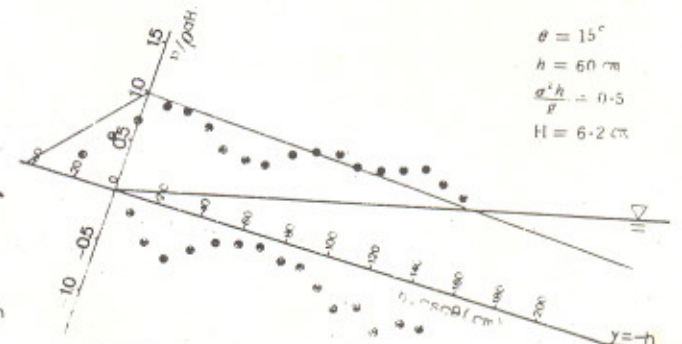


圖 50

..... Experiment

———— Modified Rainflow

Fig 45-50 Pressure distribution ($\theta=15^\circ$)