

混成防波堤直立部の波圧に関する実験的研究

郭 金 棟*・蘇 棋 福**

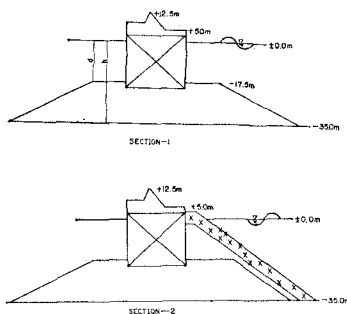
1. ま え が き

台湾北部において現在いくつかの港湾が計画されている。これらの防波堤の設置位置は -27 m から -35 m にあり、冬季々節風と台風の激浪にさらされる外海に面する地点である。従来の防波堤設置水深は -20 m 程度がほとんどであり、 -30 m を越える例はまだ少ない。このため港湾計画の作成にはこのことを十分に配慮し、設計・施工面から対策が企てられている。この防波堤断面の一つとして混成堤が計画され、直立部ケーソンの設計条件を十分に把握するため模型実験を行ない、作用する波力を求め、大水深における波圧を明らかにするものである。

一般に実際に作用する重複波の波圧は Sainflou の式によって求めた値よりは小さいと言われているが、理論値よりどれほど異なっているかは明確な結論がないようである。ここでは静水面とケーソン底面の圧力分布を把握することに重点をおき、全波圧についても検討を行ないたい。

2. 実験装置と方法

実験は中興大学土木工学系内の二次元水路を使用した。水路は長さ 50 m (内 10 m は両側ガラス張り)、幅 2.0 m 、高さ 1.7 m である。水路中間は隔壁により幅 97 cm ずつの二つの水路に仕切られており、実験断面はそ



図—1 混成堤断面図

の内の一方に設置した。造波機はフラップ式であり、周期は $0.8\sim 3.2\text{ sec}$ 、最大造波々高は 2.5 sec の周期において 30 cm である。

実験に用いられた防波堤断面は 図—1a に示すような高基混成堤である。図—1b は 図—1a の直立堤前に勾配 $1:1.5$ の 40 ton の Dolos を消波ブロックとして被覆したものである。防波堤の設置水深は -35 m 、マウンド天端は -17.5 m となり、設計水位と中水位は各々 $+3.0\text{ m}$ と $+0.9\text{ m}$ である。実験に用いられた条件は表—1 のようである。

表—1 実験条件

設置水深 (d)	105.5 cm, 99.7 cm, 97.2 cm
マウンド天端水深 (h)	56.9 cm, 51.1 cm, 48.6 cm
波高	$\sim 38\text{ cm}$
周期	1.33 sec, 1.67 sec, 2.0 sec, 2.33 sec
海底勾配	1/18
模型縮尺	1/36

波圧分布の測定には 2 個の波圧計を厚さ 15 mm 、幅 10 cm 、長さ 90 cm のアクリル測定板に配置し、それを防波堤直立部中央に設置し、測定板を上下移動して全断面の圧力分布を測定した。波圧計はトヨタ社製品 PMS-5 半導体ひずみゲージタイプの小型圧力変換器である。圧力変換器は動ひずみ増幅器とオシログラフに連結して記録した。防波堤に波を作用させ数分間後に造波を一時停止し、波圧測定板を 6 cm 上げ下げしてさらに造波を起し、同一条件で数回繰り返しながら全断面にわたる各点の波圧を測定した。よって断面に作用する同時波圧でなく、各点における最大波圧分布の測定を行なったものである。波高計は抵抗線式波高計を固定水深部、防波堤前方 $1/4$ と $1/2$ 波長の所に設置し、それにより深海波高と設置地点の波高を測定した。波圧と波高は第 7 波より第 15 波を読み取って平均したものである。

3. 実験結果とその考察

防波堤に作用する波圧は断面の形式、入射波特性、設置水深及びマウンド水深などによって変り、特に重複波か砕波で堤体に作用するかによって波圧は数倍も変りうる。本実験においては水深が深く波は重複波として作用

* 正会員 工博 中華民国国立成功大学教授 工学院水利工学系

** 正会員 中華民国台湾漁業技術顧問社技師長

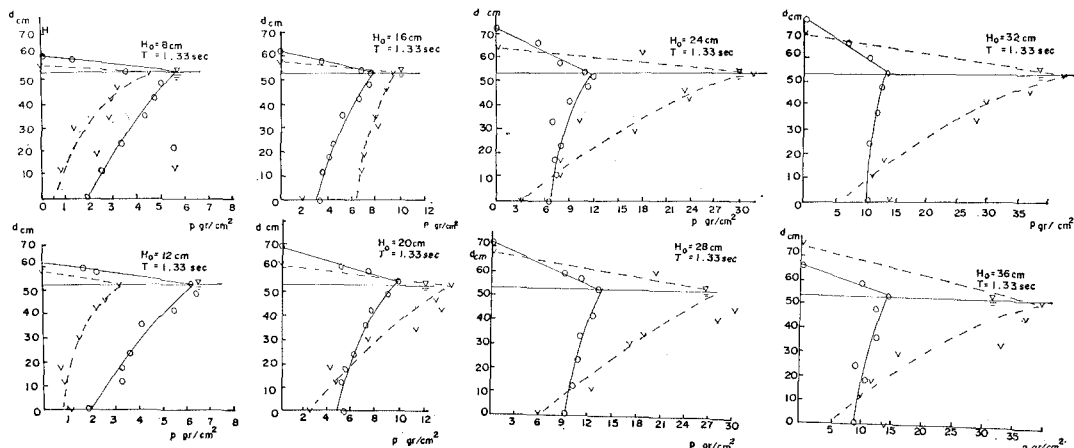


図-2 波圧分布測定例

する。この場合波圧曲線は緩やかな単峰か双峰の曲線となり、断面各点の波圧の峰はほぼ同時に表われる。この実験においては波圧計の不足により同時波圧を測定する事ができず、一回2点ずつ測定しその最大波圧を読み取って解析した。図-2は水深102cm、マウンド天端水深53cm、周期1.33secの実験例である。○印は断面Ⅰの測定値を示し、▽印は断面Ⅱ消波ブロックのある場合の測定値を示す。断面Ⅰにおいては波圧は波高の増大に伴って大きくなり、静水面以上の部分においては波圧は直線に分布し、静水面以下はやや放物線の形をなす。断面Ⅱにおいては波高が小さい場合断面Ⅰの波圧よりは波力が小さいが、やがて波高が大きくなるとのり面上で碎波となり衝撃波圧を生じるので最大波圧は急に著しく増加し断面Ⅰの場合よりも波圧は数倍大きくなる。静水面以下の部分では波圧はほぼ直線に減小し底面では断面Ⅰの波圧よりも小さくなる。ここでは波圧特性を把握するため直立部に作用する波圧について検討する。

1) 直立部に作用する波圧強度

a) 静水面における波圧強度

波圧特性をより良く把握するためにここでは静水面における波圧とマウンド上の波圧のみについて解析を試みる。図-3は静水面における波圧係数 $p_{se}/\gamma H$ と波形勾配 H/L の関係を表わしたものである。ただし p_{se} は静水面における測定波圧、 γ は流体の単位体積の重さ、 H は波高、 L は波長である。同図に示されている点線は広井公式：

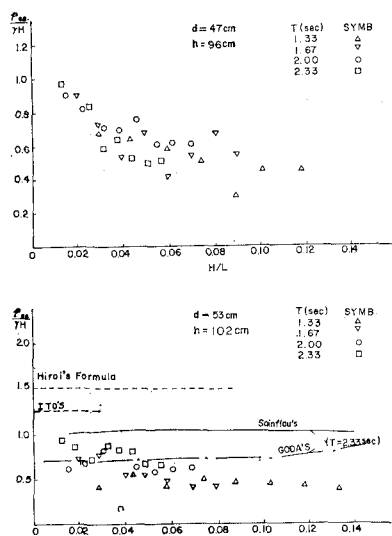
$$p = 1.5\gamma H \quad \dots\dots\dots (1)$$

と伊藤公式：

$$p = 0.7\gamma H; \quad H/d \leq 1$$

$$= \left\{ 0.7 + 0.55 \left(\frac{H}{d} - 1 \right) \right\} \gamma H; \quad H/d \geq 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

鎖線は合田式：

図-3 静水面における波圧係数 $p_{se}/\gamma H$ と H/L の関係

$$p_{se} = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\alpha_1 + \alpha^2 \cos^2 \beta) \gamma H \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに；

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H}{d} \right)^2, \frac{2d}{H} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\min \{a, b\}$; a または b のいずれか小の値

ただし； d はマウンド天端水深、 h_b は碎波水深、 β は入射波の主方向と防波堤法線に対する垂線とのなす角度である。実線は Sainflou の式

$$p_{ss} = (p_a + \gamma d) \frac{H + \Delta h}{d + \Delta h + H} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$p_a = \frac{\gamma H}{\cosh \frac{2\pi d}{L}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta h = \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \dots\dots\dots (8)$$

である。ここにおける曲線は周期 2.33 sec についての計算値である。この比較からわかるように波形勾配 H/L と相対水深 d/L が小さい時に Sainflou 式がもっとも実験値に近い値を示し合田の式はやや小さい値を与える。波圧係数 $p_{se}/\gamma H$ は H/L が大きくなると小さくなり、また d/L が大きくなるに伴って小さくなる。 H/L が大きい場合、合田式も Sainflou 式も共に実験値をかなり上まわっている。静水面における実験波圧と Sainflou 理論波圧の比 p_{se}/p_{ss} と波形勾配 H/L の関係を示したのが図—4 である。図から明らかなように波形勾配が大きくなるに伴って p_{se}/p_{ss} は小さくなる。即ち、 H/L が大きい場合 Sainflou 式で求めた静水面における波圧

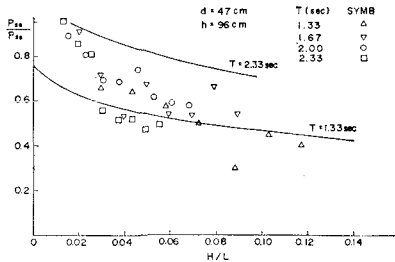
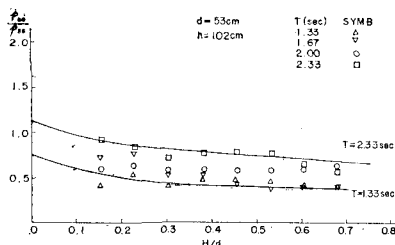
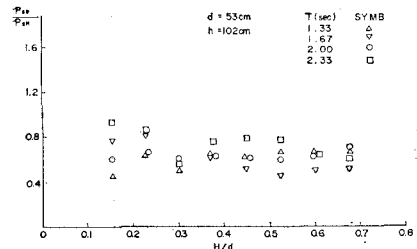
は過大となる。図—5 は p_{se}/p_{ss} と H/d の関係を示すものである。図より H/d が大きくなると実験値と Sainflou 理論値の比は小さくなり、特に d/L が大きい時に顕著となる。以上の比較から経験的に実測値は次式の関係：

$$\frac{p_{se}}{\gamma H} = \frac{p_{ss}}{\gamma H} \frac{0.65[1-(H/L)^{0.4}]}{\tanh \frac{2\pi d}{L}} \dots\dots\dots (9)$$

によって Sainflou 式を修正することによって求められる。図—4 と 図—5 の曲線は (9) 式の関係を示すものである。図—6 は実験波圧と浜田の式によって求めた静水面の波圧 p_{sH} の比 p_{se}/p_{sH} と H/d の関係である。但し p_{sH} は次式

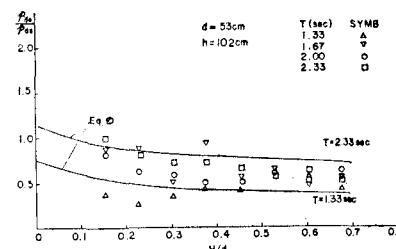
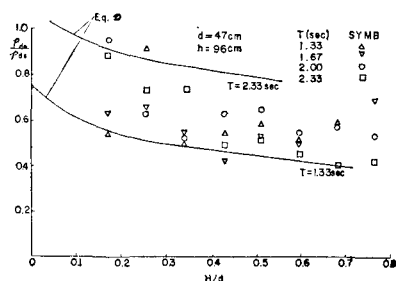
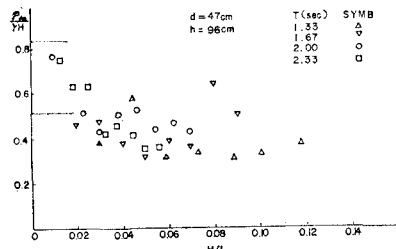
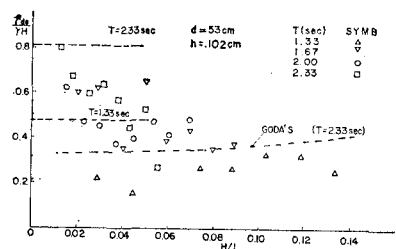
$$\begin{aligned} \frac{p}{\gamma H} = & \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh^2 kh} \cos kx \cos \sigma t \\ & + \frac{Hk}{2 \sinh 2kh} \left\{ \frac{3}{2} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^2 kh} \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \right\} \cos 2kx \cos 2\sigma t \\ & - \frac{Hk}{2} \frac{\sinh^2 k(z+h)}{\sinh 2kh} + \frac{Hk}{4} \frac{1}{\sinh 2kh} \cos 2kx \\ & + \frac{Hk}{2} \left\{ \frac{\sinh^2 k(h+z)}{\sinh 2kh} - \tanh kh \right\} \cos 2\sigma t \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

より $z=0$ として求めたものである。この図より知るように p_{se}/p_{sH} は H/d の影響を受けず同じ d/L においてはほぼ一定となる。また、 d/L が小さい場合、浜田の 2 次解は実験値に近い値を示すが、 d/L が大きくなると実験値より大きくなる。図—4, 5 と 図—6 の比較からも明らかなように浜田の式は Sainflou 公式よりも実験値に近い値を与える。


 図—4 p_{se}/p_{ss} と H/L の関係

 図—5 p_{se}/p_{ss} と H/d の関係

 図—6 p_{se}/p_{sH} と H/d の関係

b) 直立部底面に作用する波圧

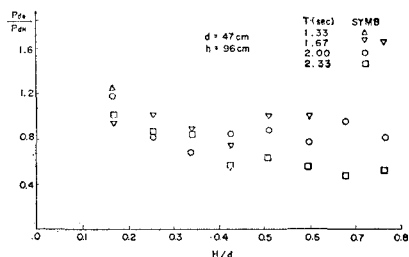
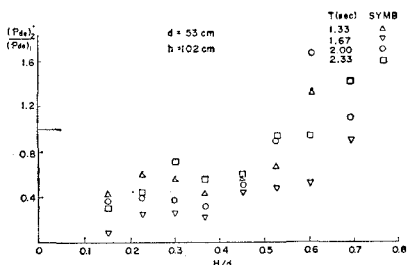
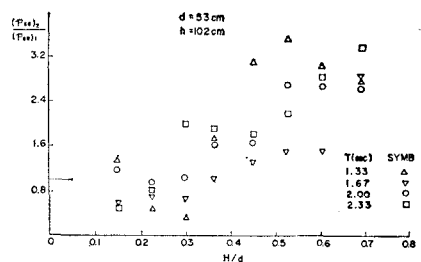
底面における波圧係数 $p_{ae}/\gamma H$ と H/L の関係は 図—7 によって示される。 $p_{ae}/\gamma H$ は H/L が大きくなると小さくなる傾向をもつ。図中に示されている線は Sainflou の (7) 式による計算値である。底面における実験波圧と Sainflou 理論波圧の比 p_{ae}/p_{as} と H/d の関係は 図—7 に示されているように H/d が大きくなると p_{ae}/p_{as} は小さくなり、一般に実験値は Sainflou 理論値よりも小さい。また Sainflou 理論値の修正は静水面の波圧と

図-7 底面波圧係数 $p_{ae}/\gamma H$ と H/L の関係

同様に (9)式によって求められる。図-7 の曲線はこの関係を示すものである。浜田の (10)式との比較は 図-8 で示すように H/d が小さい場合かなり実験値に近い値を与えている。ここにおける p_{an} は (10)式を $z=-d$ として求めた値である。

2) 消波ブロックのり面をつけた場合の波圧

一般に直立堤前面に消波ブロックのり面をつけた場合波圧は半減すると言われている。勿論のり面の厚さやのり勾配によってもかなり変わるであろう。本実験断面においては水深が深いため、直立壁に作用する波は重複波となり衝撃的な波は見られなかった。今消波ブロックをつけると波高がある程度達した時波はのり面の上で砕波する。この場合に衝撃波圧が発生しそれが直立壁に伝達して重複波の波圧よりも大きいピーク波圧を記録し、原来消波ブロックの消波効果によって減少されるべき波圧

図-8 p_{ae}/p_{an} と H/d の関係図-9 $(p_{ae})_2/(p_{ae})_1$ と H/d の関係図-10 $(p_{se})_2/(p_{se})_1$ と H/d の関係

が逆に波圧を増大させる事になる。図-9 は直立壁のみの底面波圧 $(p_{ae})_1$ と消波ブロックをつけた場合の底面圧力 $(p_{ae})_2$ の比 $(p_{ae})_1/(p_{ae})_2$ と H/d の関係を示したものである。底面波圧は消波ブロックによって減少され著しい場合 20% まで減小する。しかし、 H/d が大きくなるに従い消波ブロックの効果は逐次失われ、 H/d の増大に伴い $(p_{ae})_1/(p_{ae})_2$ は大きくなり遂に 1 よりも大きくなる。静水面における波圧も 図-10 に示されるように $(p_{se})_1/(p_{se})_2$ は H/d の増大に伴って大きくなる。特に小さい波高を除けば静水面の波圧は消波ブロックの存在により波圧は逆に大きくなっている。その原因は恐らくマウンドの厚さが不足であったことによるものであろう。また、一般に直立ケーソンの前に消波ブロックを設置するケースは比較的水深が浅く波が砕波として直立壁に直接衝撃するから勿論消波工をつけた場合砕波波圧は減少されるがこの場合は重複波と砕波の差によるものであるから静水面波圧が逆に大きくなったのではないと思われる。

3) 直立部における全波圧

全波圧 P は一般に $P/\gamma hH$ として表示されているが、この値は H/L , H/d によって起伏し明白な傾向が見いだ

しにくい。ここでは新しいパラメータ $P/\gamma d^2$ として全波圧を表わす。図-11 は $P/\gamma d^2$ と H/d の関係を示した

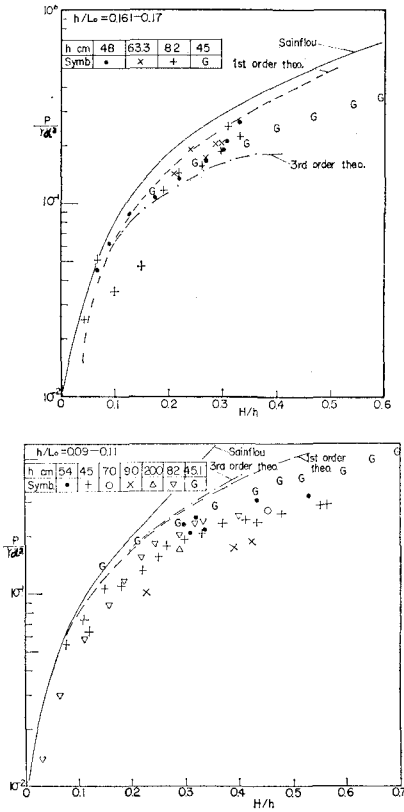


図-11 $P/\gamma d^2$ と H/d の関係

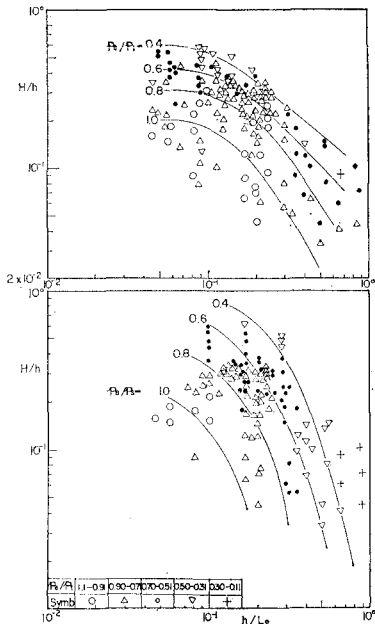


図-12 実験全波圧と理論全波圧の比例

一例である。この関係から明らかに H/d の増大と共に $P/\gamma d^2$ は大きくなる。同図に示されている実線は Sainflou の理論値

$$\frac{P_s}{\gamma d^2} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{H}{d} + \frac{k d (H/d)^2}{2} \coth kh \right] \times \left(1 + \frac{H/d}{\cosh kd} \right) \quad (11)$$

ここに、 $k = 2\pi/L$ である。点線は 1 次近似解の (12) 式

$$\frac{P_1}{\gamma d^2} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{H}{d} \right)^2 \right] + \frac{H/d}{k d} \tanh kh \left(1 + \frac{H}{h} \right) \quad (12)$$

鎖線は Tadjbakhsh-Keller による重複波三次近似解を示す。図-12 は実験全波圧 P_e と理論全波圧 P_1 , P_s と P_3 の比を H/d と h/L_0 をパラメータとして表わしたものである。ただし、 P_1 , P_3 は各々 1 次近似解と 3 次近似解の理論値、 P_3 は Sainflou 理論値を表わす。図から明らかに H/d と h/L_0 が小さい場合実験全波圧は理論値に近ずき、 h/L_0 と H/d が大きくなると 1 次近似と Sainflou 式の値は過大になる。しかし 3 次近似解は一般に実験値よりも小さく、 H/d と h/L_0 が大きい場合 P_e/P_3 の値は特に大きくなる。

4. 結 論

以上混成堤直立部における波圧強度と全波圧につき波圧特性と波形勾配、相対水深と波高水深比について検討し、また理論値とも比較し波圧特性の解明を試みた。波圧強度は静水面及び底面においても共に Sainflou 式よりは大きく特に H/d と h/L_0 が大きい時に実験値は理論値よりもかなり小さくなる。その修正として (9) 式を提案した。また全波圧については $P/\gamma d^2$ で表現すると H/d と共に大きくなる。1 次近似と Sainflou 理論値は h/L と H/d が小さい時に実験値と良い一致を示すが、 h/L と H/d が大きい時波圧を過大評価する。3 次近似は一般的に過小評価するようである。

参 考 文 献

- 1) 浜田徳一：表面波の二次干渉，海岸工学講演会第 11 回講演集，pp. 12~18, 1964.
- 2) 合田良実：防波堤の設計波力に関する研究，港湾技研報告，Vol. 12, No. 3, pp. 31~69, 1973.
- 3) Goda, Y.: New Wave Pressure Formular for Composite Breakwater, Proc. 14th Coastal Eng., pp. 1702~1720, 1974.
- 4) Nagai, S.: Researchs on Seawalls, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., 1970.
- 5) Tadjbakhsh and Keller: Standing Surface Waves of Finite Amplitude, Jour. Fluid Mech., Vol. 8, 1960.
- 6) 谷本・石塚・合田：防波堤の設計波力算定式についての検討，第 23 回海岸工学講演会論文集，1976.