

混成堤に作用する斜め入射波圧に関する実験的研究

Wave Pressure on Upright Sections of Composite
Breakwaters by Oblique Incident Waves

水野雄三* 牛嶋龍一郎** 岸哲也***

Yuzo MIZUNO, Ryuichiro USHIJIMA and Tetsuya KISHI

混成堤に斜めに波が作用する場合の波圧は、入射角度によって変化する。本研究は、防波堤の経済設計に資するため、波圧実験を実施し、波圧および波圧作用高と波向きの関係について検討を加えた。

その結果、主に港湾の防波堤の設計に用いられている合田式の波向補正は、今回の実験条件のもとでは妥当なものであることを確認した。

《波力；斜め入射波圧；混成堤；合田式》

When the wave direction is oblique to a line of breakwaters, the wave pressure on upright sections is affected by the incident wave angle. Laboratory experiments were performed to determine the relation between the incident angle and the wave pressure and also the height up to which the wave pressure is exerted.

Goda's formula, which is usually employed in breakwater design and includes an adjustment for the effect of oblique waves was compared with the experimental results.

It was shown that Goda's formula is very close to the experimental values for nonbreaking waves.

Keywords: wave force, oblique incident wave pressure, composite breakwater, Goda's formula.

1. ま え が き

混成堤に斜めに波が作用している場合の波圧は、直角入射する波の波圧を基本として入射角により補正を行っているが、その方法は波圧公式により異なっている。また、これらの補正方法の検証は、運輸省第一港湾建設局および第三港湾建設局が実施した滑動実験^{1),2),3)}によるもののみである。

本研究は、模型実験により混成堤に作用する斜め入射波圧分布を求め、通常港湾の施設の設計に用いられている波圧式の波圧分布、波圧合力および波圧の作用高と入射角との関係について検討し、防波堤の経済設計に資することを目的とするものである。

2. 実 験

(1) 実験水槽

本実験は、土木試験所第4実験棟の中型平面水槽(23m×18m×1m)の一部を図-1に示すとおり幅9m、長さ13.45mに仕切り、造波板の中立位置より堤体側へ1.45~4.15mの範囲を1/12.3の勾配をつけ、それより陸側は水平床とし、その一部に実験堤体を設置して実施した。なお、水平床としたのは、実験堤体を回転させて斜め入射波を作用させるため、堤体設置水深に変化が生じないようにしたためである。

水槽の両仮設側壁および正面壁には、消波籠を配置して実験堤体付近への反射波の影響を減少させた。

*港湾研究室長 **同室主任研究員 ***前港湾研究室員 現釧路開発建設部根室港湾建設事業所

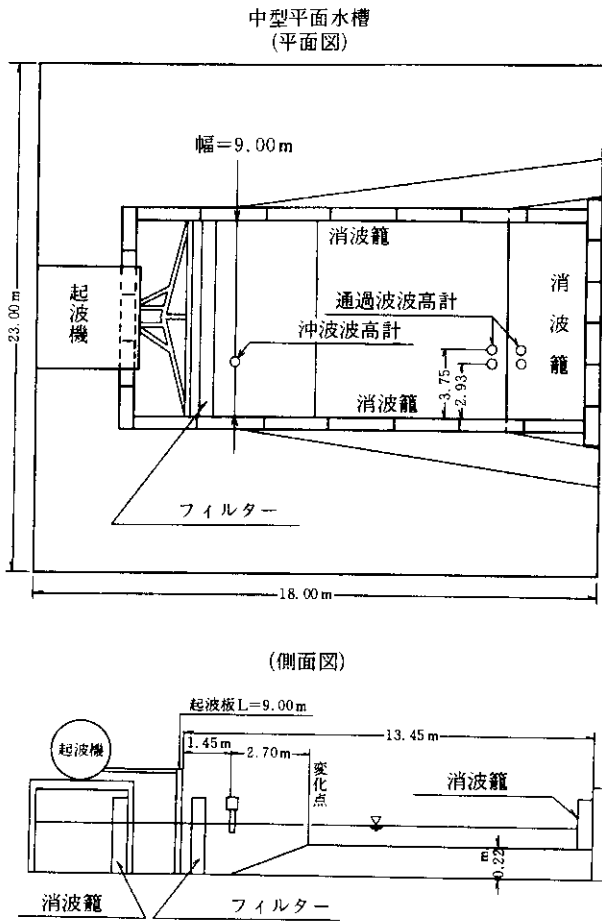


図-1 実験水槽

造波装置は、フラップ型起波機で規則波を用いて実験した。

(2) 実験堤体

実験堤体は、水槽の水深、造波能力などを考慮して、マウンド水深/実験堤体設置水深の値が変化するように図-2に示す3断面とし、堤体法線に対する垂線と波の入射方向とのなす角度（以下「入射角」という）が 0° 、 15° 、 30° および 45° となるように実験堤体の位置を回転させて実験した。

実験堤体のほとんどの部分は木製であるが、波圧測定位置では波圧計を取付けられるようにアクリル製とし、碎石を用いて作成した捨石マウンド（堤体前面天端幅20cm、のり勾配1:3）上に設置した。なお、実験堤体の天端は捨石マウンド上45cmのところであり、越波が生じない高さとした。

(3) 実験ケース

実験ケースは表-1に示すとおり3ケースで、各ケースごと波高を3種類、波向きを 0° 、 15° 、 30° および 45° の4種類について2回ずつ実験をした。

実験堤体の平面配置は図-3に示すとおりであり、波圧

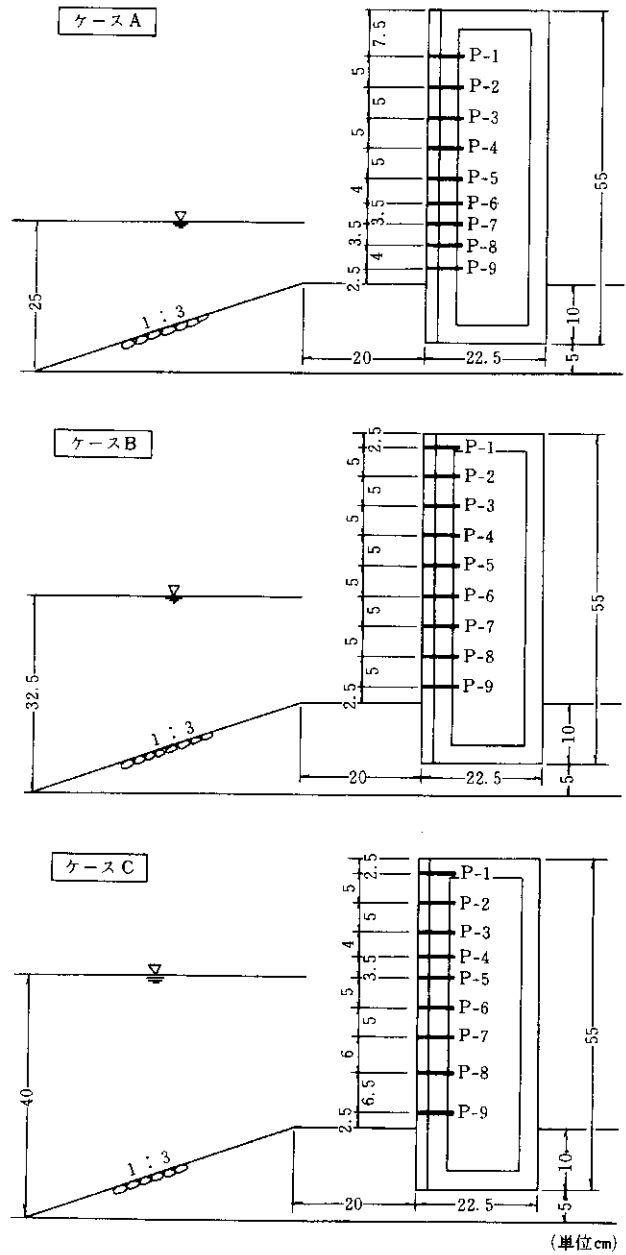


図-2 実験堤体

表-1 実験ケース

ケース名	A	B	C
水深 $h(\text{cm})$	25.0	32.5	40.0
マウンド水深 $d(\text{cm})$	10.0	17.5	25.0
周期 $T(\text{sec})$	1.70	1.55	1.45
波長 $L(\text{m})$	2.51	2.51	2.50
入射波高 $H_i(\text{cm})$	5, 6, 7	7, 8.5, 10	9, 11, 13
d/h	0.400	0.538	0.625
h/L	0.100	0.129	0.160

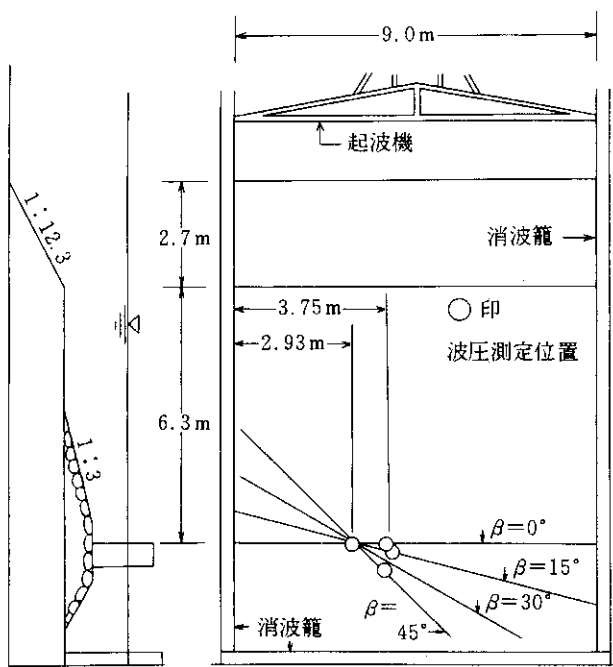


図-3 実験堤体平面配置

測定位置は図中に○印で示した。

(4) 測定項目

①波高測定

波高の測定には容量式波高計を用い、増幅器をとおしてビシグラフに記録した。測定位置は、堤体通過波測定時には図-1に示す○印の3カ所で、沖波と堤体通過波を測定し、波圧計測定時には2カ所で、沖波と実験堤体前面波を測定した。なお、波圧測定位置は後述するように、波向きによって多少違うため2測線上で堤体通過波を測定した。

②波圧測定

波圧測定には共和電業製の波圧計(PGM-02 KG)を用い、出力を動ひずみアンプをとおしてビデオカセット式データレコーダーに記録した。A/D変換はオフラインにより、サンプリング周波数80Hzで実施し、各時刻ごとの堤体に作用している波圧合力のうち、最大となる時刻の測定値を最大同時波圧値として求めた。なお、波圧計の鉛直方向の配置は、図-2に示すとおり各ケース9測点である。

(5) 測定位置

斜め入射波実験の場合、実験堤体で反射した波が水槽側壁へ進行し、再反射して実験堤体に再び返ってくるため、できるだけ側壁からの反射を少なくすることが必要である。さらに図-3からわかるように、入射角が大きくなるほど実験堤体と水槽側壁とで形成されるくさび状の水域のため、波高増大が生じるため本実験では水槽の仮

設側壁はサンフレックス製の消波籠を設置するだけの透過壁とした。

仮設側壁を透過性にしたことにより、図-3に示すように入射角0°、15°の場合、実験堤体が島堤状態と考えられ、入射角30°、45°の場合、実験堤体と正面壁(不透過壁)とで隅角部を形成することから、隅角部を有する防波堤状態と考えられる。

このような場合、防波堤沿いに波高分布が異なるため防波堤前面の波高分布計算を実施して、各入射角ごとの波圧測定位置での防波堤前面波高比ができるだけ同じ値になるように測定位置を定めることとした。

防波堤前面の波高分布計算は近似解法⁴⁾で行い、反射率を実験堤体、正面壁について、それぞれ1.0および0.4として計算した。

図-4に示した計算結果からわかるように、測定位置の違いによって波高比がかなり変動している。さらに計算位置以外の値は直線近似していることから、測定位置における防波堤前面波高比は1.9~2.1の間で、各入射角ごとの測定位置ができるだけ一致し、かつ、堤体長が5cm単位となるように、約2.1と定めた。

以上のことから、測定位置は図中●印の位置とし、堤体通過波高測定位置は入射角0°、15°、45°の場合、左側壁より3.75mの位置、入射角30°の場合2.93mの位置とし

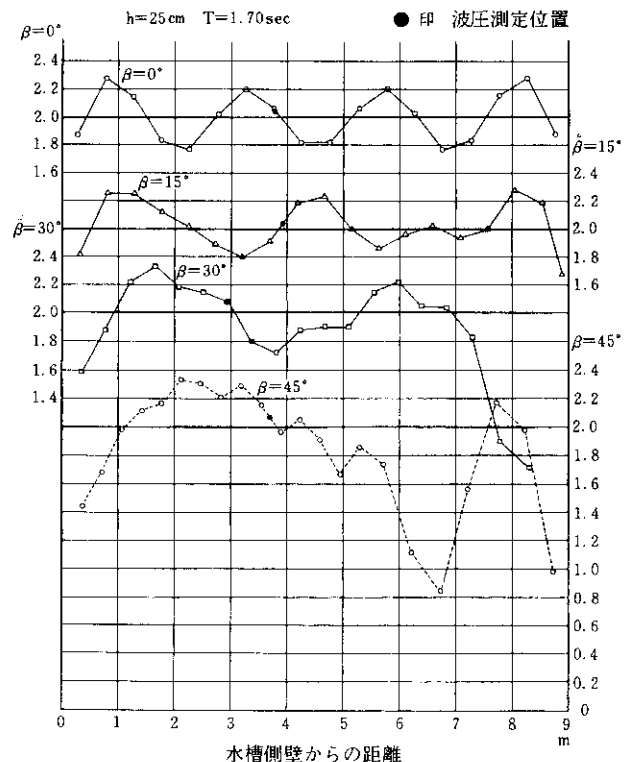


図-4 実験堤体前面の波高分布

た。

3. 実験結果

(1) 波圧分布

図-5.1~5.3に、各ケースごとの波圧分布を示す。各測点の波圧値は、2度の繰返し実験ごとに有効測定波のうち、連続する3波についてそれぞれ最大同時波圧値を求め、平均したものである。

図中の実線、点線および一点鎖線は、実験に用いた入射波高を設計波高として合田式で計算した波圧分布を表わしている。図中の縦軸は静水面からの高さを表わし、数値が示されている高さに波圧計が設置されている。

各ケースとも共通にいえることは、静水面位置における波圧強度が最大となっており、入射波高に比例して、波圧の作用高および各測点の波圧強度が増加する傾向にある。入射角の波圧強度への影響については、多少ばら

つきがみられるものの、入射角の増大に合わせて強度が減少している。

波圧の作用高については、入射波高が大きいほど、また入射角が小さいほど高くなる傾向となっている。

(2) 波圧合力

図-6には、各ケースごとの入射波高と実験波圧合力との関係を示した。ここでいう実験波圧合力とは、静水面上1.0×入射高の高さから捨石マウンド(-dの位置)までの間に作用している波圧合力をいう。この理由は、本実験の波圧計設置間隔および設置本数に制限があったことから、図5.1~5.3の結果から明らかなように実験ケースによっては静水面上の波圧が作用する上限付近に波圧計が配置されていない場合があるため、波圧合力を計算する上で誤差が大きくなるように考えて、静水面上1.0Hまでの範囲とした。なお、通常防波堤の天端高も静水面上1.0Hの高さ以下の場合がほとんどであるので、実

実験ケース A

入射波高	合田式	実験値
7.0 cm	——	○
6.0 cm	----	△
5.0 cm	- - - -	□

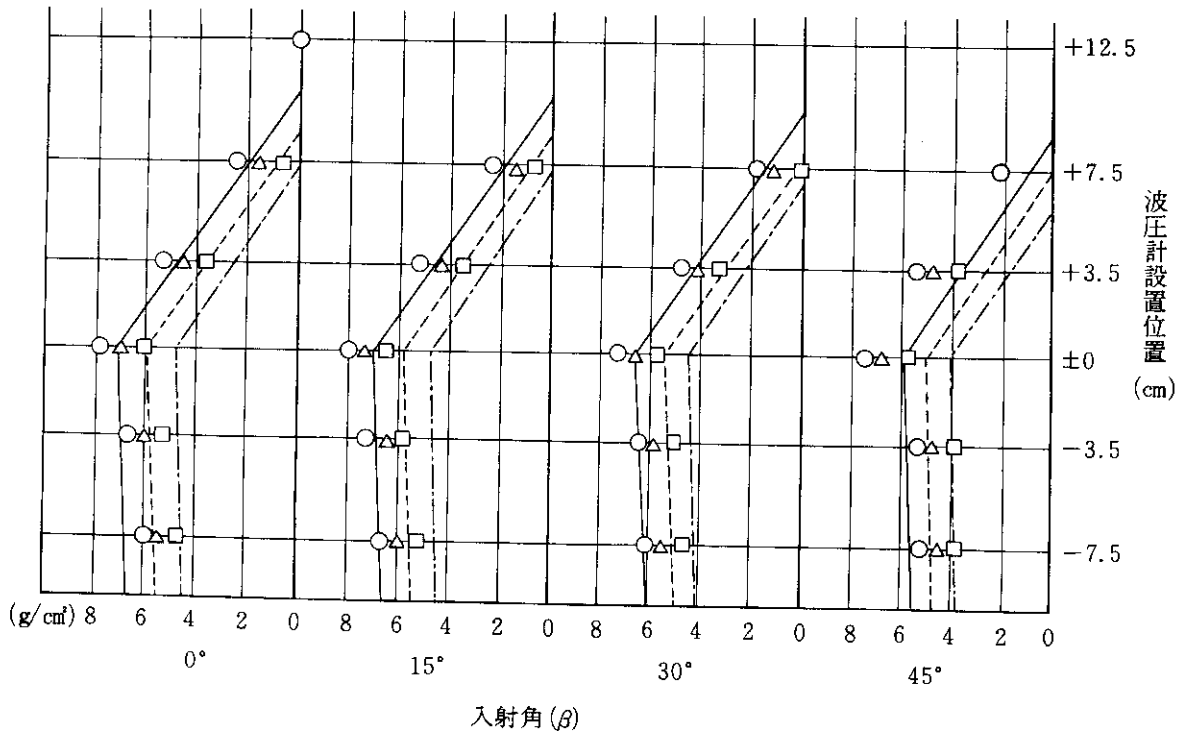
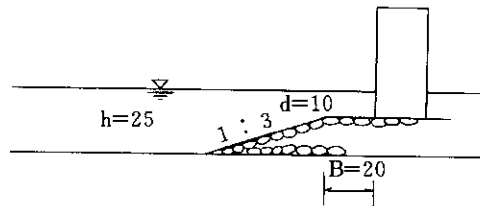


図-5.1 波圧分布 (ケースA)

実験ケース B

入射波高	合田式	実験値
10.0cm	——	○
8.5 cm	- - - -	△
7.0 cm	- · - · -	□

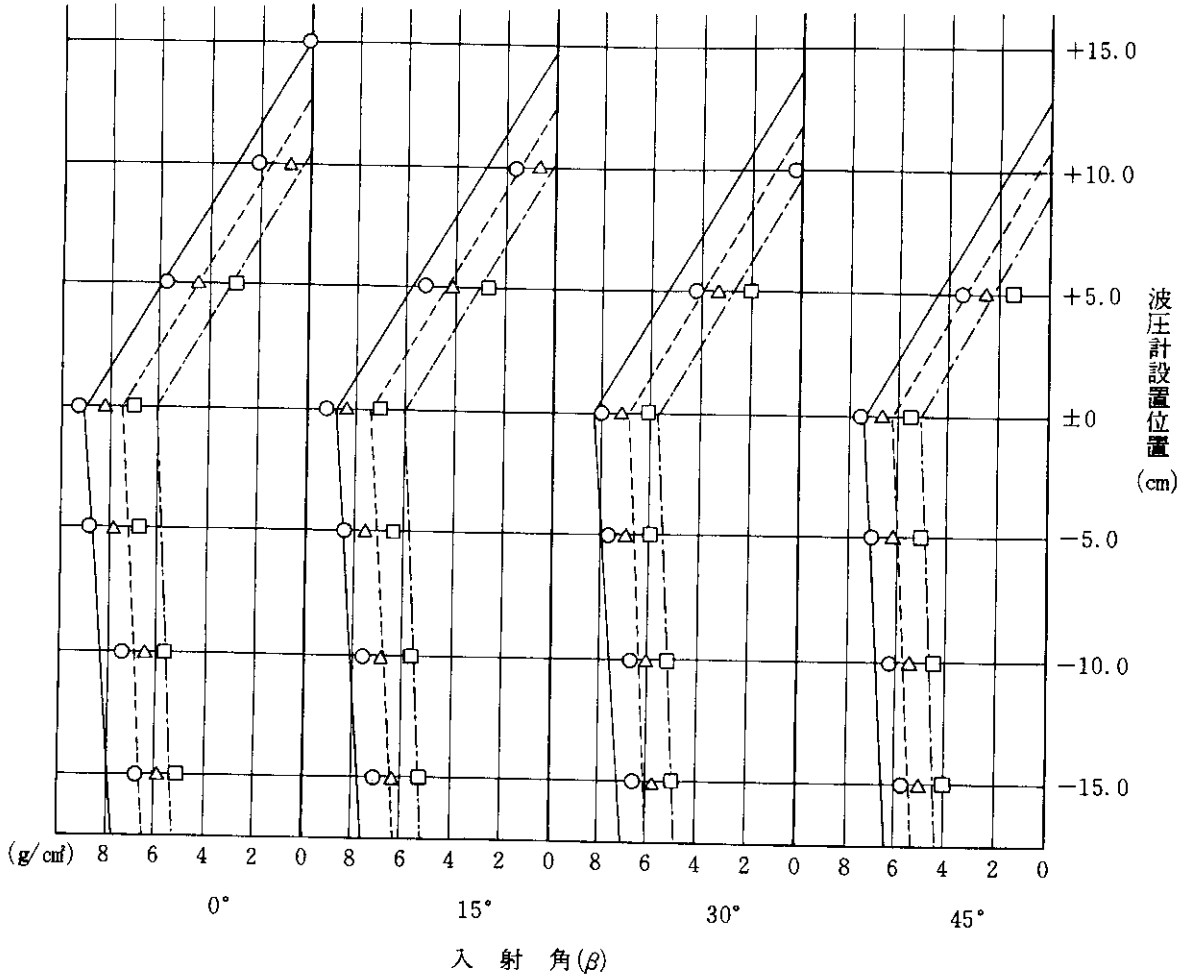
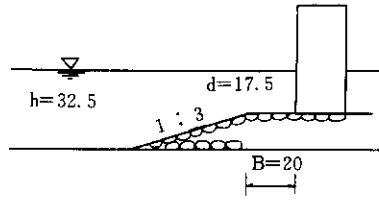


図-5.2 波圧分布 (ケースB)

用上問題がないと考えている。

図から明らかなおおむね入射波高に比例して波圧合力が増加している。入射波高が同じ場合は、おおむね入射角が大きくなるほど波圧合力が小さくなる傾向にある。

4. 考 察

(1) 実験波圧合力と波圧式

混成堤の設計に用いられる波圧式は、港湾の施設の場合、合田式が一般的であるが、耐波実績などがあれば、従来式（広井式、部分砕波式など）を用いることができ

るので、ここでは合田式および部分砕波式（今回の実験条件の場合、重複波領域となる）について、実験波圧合力と波圧式による波圧合力との比較を行った。

合田式は図-7に示すとおりで、計算に用いる波高 H_D は最高波高 H_{max} を用いるので、本実験に用いた入射波高 H_i を H_D として用いた。

部分砕波式は図-8に示すとおりで、計算に用いる波高 H_D は有義波高 $H_{1/3}$ を用いるため、本実験に用いた入射波高 H_i を最高波高 H_{max} と考えて、以下のとおり $H_{1/3}$ を推定した。

初めに、換算沖波高 H_0' を仮定して、合田の砕波変形

実験ケース C

入射波高	合田式	実験値
13.0cm	—	○
11.0cm	- - -	△
9.0cm	- · - ·	□

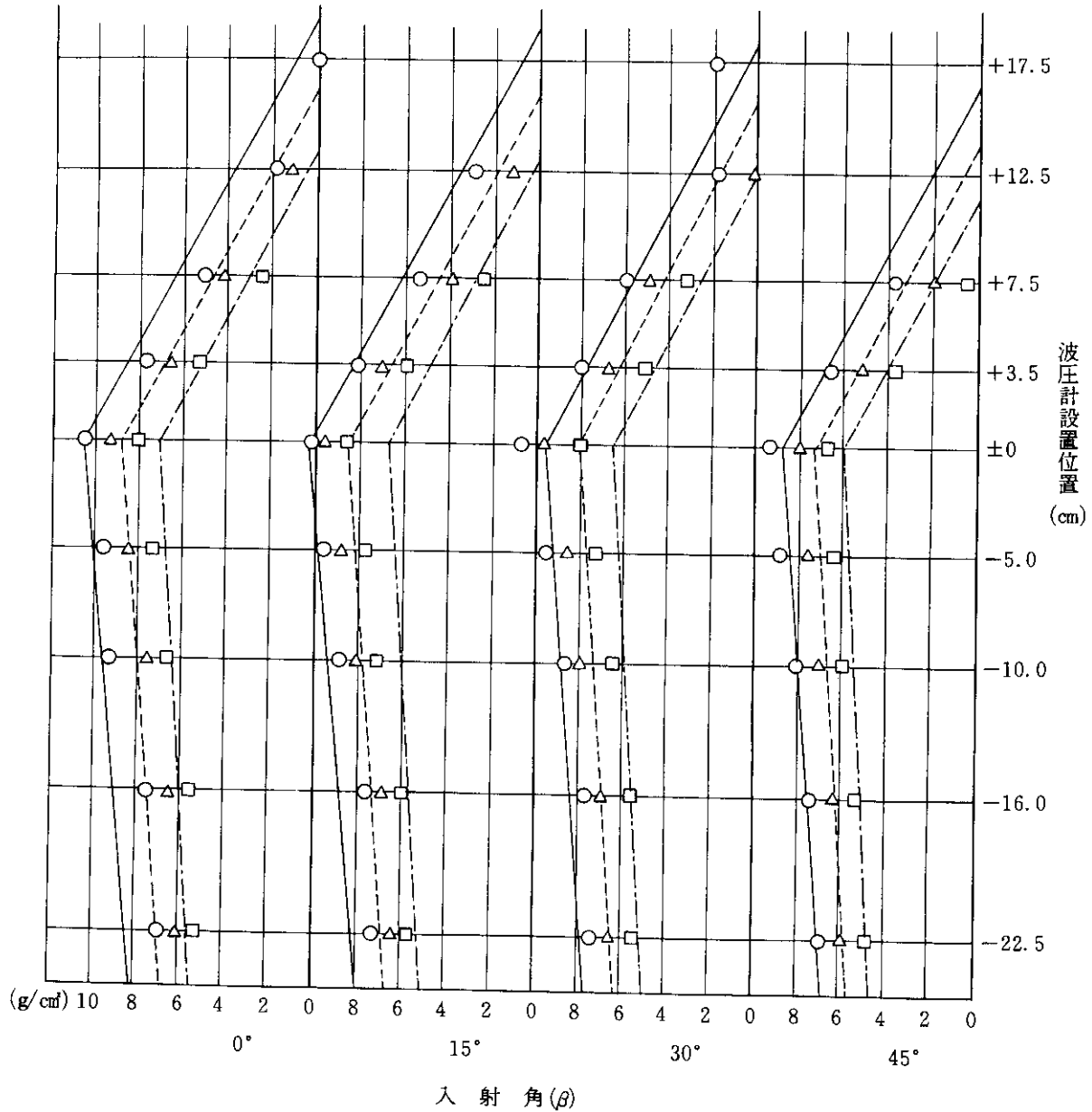
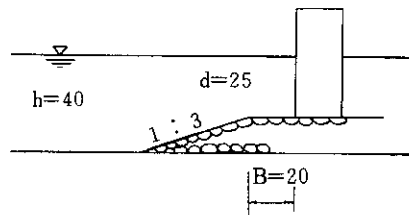


図-5.3 波圧分布 (ケースC)

理論⁵⁾を用いて H_{max} を求め、 H_i と等しくなるまで繰返し、等しくなった時の H_0' を用いて同じ理論により $H_{1/3}$ を求めた。なお、これらの $H_{1/3}$ は表-2 に示した。

図-9 は縦軸に実験波圧合力/計算波圧合力 (P_E/P_C) を、横軸に入射角 (β) をとり、実線が合田式による計算波圧

合力を、点線が部分砕波式による計算波圧合力を用いて、 P_E/P_C を計算したものである。

P_E/P_C が1に近いほど波圧式は実験波圧を的確に再現していることとなるが、図-9 より明らかとなお、3実験ケースともに合田式の方が1に近い。また、入射角の

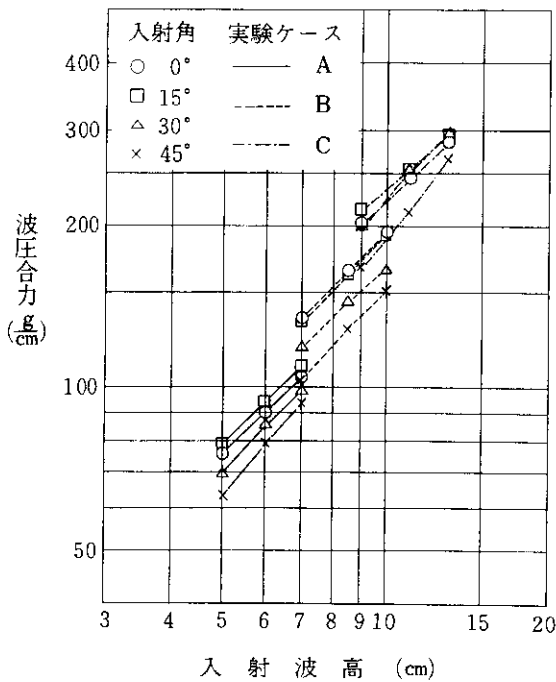


図-6 入射波高と実験波圧合力

$$\eta = 0.75(1 + \cos\beta) H_D$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2\beta) w_0 H_D$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

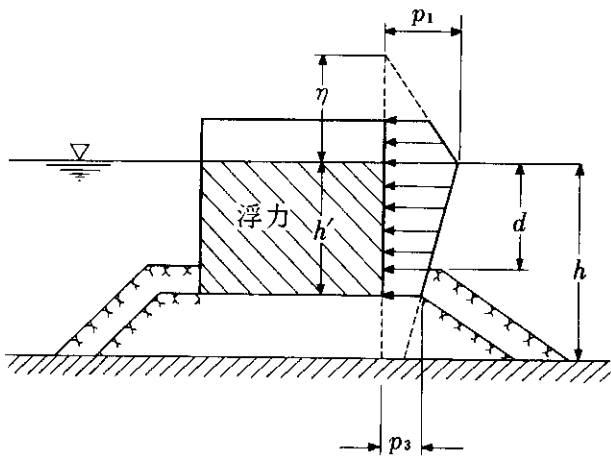


図-7 合田式

違いによる P_E/P_C の変動が小さいほど、波向補正の優れた波圧式となるが、合田式の場合、 P_E/P_C の変動も最大で $\pm 7\%$ 程度であった。

(2) 合田式の波向き補正

合田式の方が、従来の波圧式である部分砕波式よりも波圧合力の再現性がよいことが明らかになった。ここでは、合田式の波向き補正について検討する。

直角入射(入射角 0°)の場合の実験波圧合力 P_{E0} に対す

$$p_b = 1.5 w_0 H_D \cos^2\beta$$

$$p_1 = (p_2 + w_0 h) \frac{H_D + \delta_0}{h + H_D + \delta_0}$$

$$p_2 = \frac{w_0 H_D}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$\delta_0 = \frac{\pi H_D^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

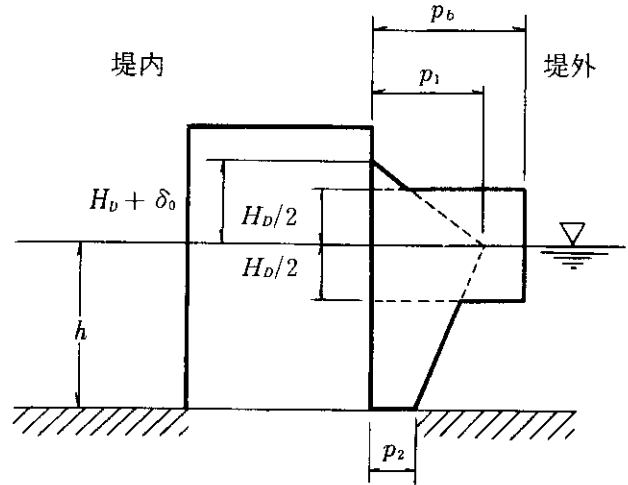


図-8 部分砕波式

表-2 有義波高の推定

ケース	実験波高 (cm)	周期 (sec)	有義波高 (cm)
A	5.0	1.70	2.8
	6.0		3.3
	7.0		3.9
B	7.0	1.55	3.9
	8.5		4.7
	10.0		5.6
C	9.0	1.45	5.0
	11.0		6.1
	13.0		7.3

る入射角 β の場合の実験波圧合力 $P_{E\beta}$ との比 ($P_{E\beta}/P_{E0}$) を、図-10に示した。また、図中の線はそれぞれの入射波高に対して合田式で計算した $P_{C\beta}/P_{C0}$ の値を示した。

合田式の波向き補正法を評価するため、 $\{(P_{E\beta}/P_{E0})/(P_{C\beta}/P_{C0})\}$ の比を各入射角ごとに検討してみると、最大で1.14、最小で0.94とばらつきも小さく、合田式の波向き補正はほぼ妥当なものと考えられる。

(3) 最大同時波圧時の波圧作用高

静水面より上に設置した測点の波圧値(波圧値がゼロの測点は除く)と、その位置から最大同時波圧時の波圧作用高を最小自乗法で求め、合田式による波圧の作用高と比較したものを図-11に示す。図中の対角線の近くに点

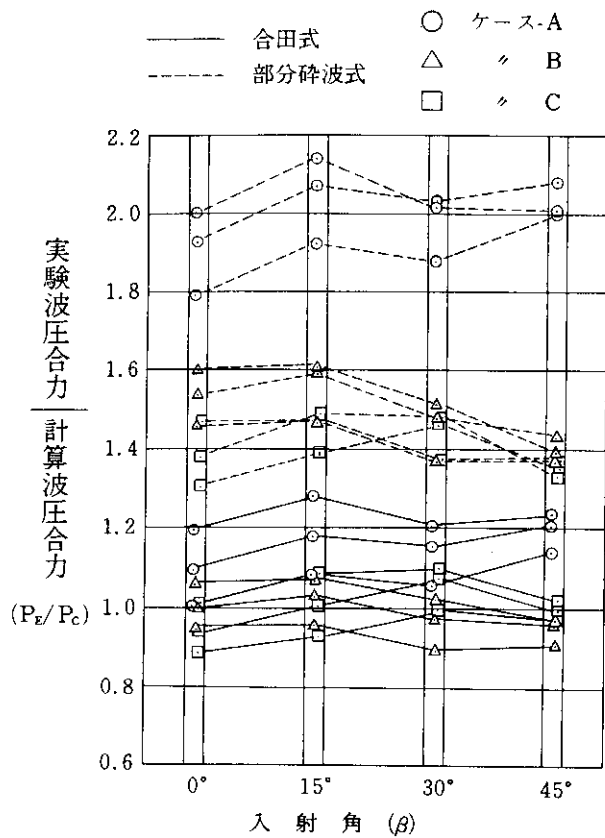


図-9 実験波圧合力と波圧式

が分布するほど、合田式の波圧作用高の算定法が実験の波圧作用高をよく再現していることになる。図中の1点鎖線は回帰直線を表わしており、対角線よりもやや左上に位置するものの、ほぼ対角線に一致しているとみることができ。また、各入射角ごとの傾向をみても全体の傾向と変化がないことから、合田式の波圧作用高およびその波向き補正の考え方はほぼ妥当なものと考えられる。

5. まとめ

今回の実験は重複波領域での実験であるが、以下の事項について明らかになった。

- ① 合田式と従来式である部分砕波式との比較では、合田式の方が実験波圧合力を的確に表わしており、実験波圧合力 P_E と合田式による計算波圧合力 P_C との比 P_E/P_C の入射角の違いによる変動は、今回の実験の範囲では $\pm 7\%$ 以内であった。
- ② 直角入射 ($\beta=0^\circ$ に対応) する場合は、実験波圧合力 P_{E0} に対する各入射角の場合の実験波圧合力 $P_{E\beta}$ との比 ($P_{E\beta}/P_{E0}$) の合田式の同様の比 ($P_{C\beta}/P_{C0}$) に対する変動をみると、今回の実験の範囲では、0.94~1.14の範囲にあり、実験精度を考慮すれば、合田式の波向補正はほぼ妥当な値を示している。
- ③ 波圧の作用高について、合田式の波圧作用高と実

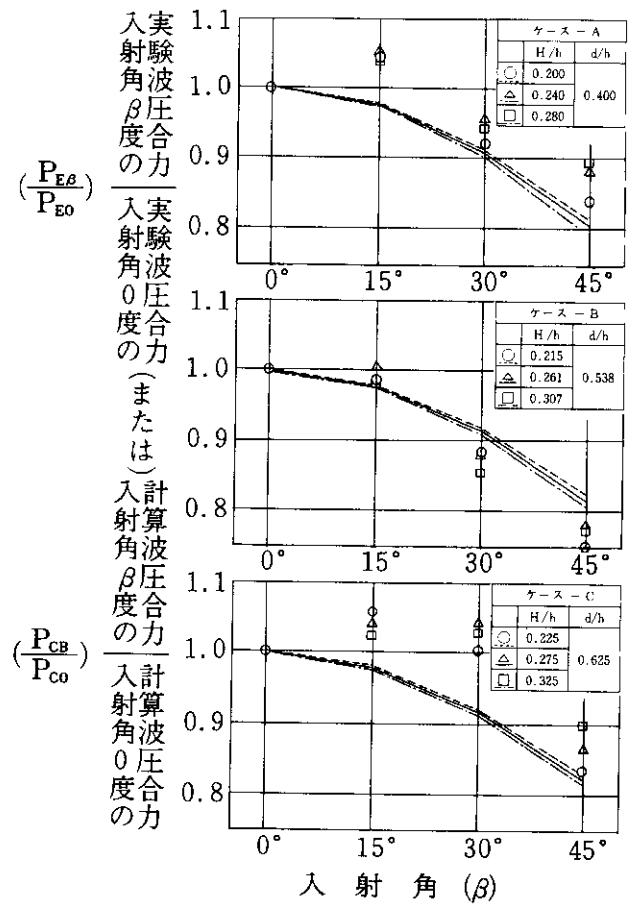


図-10 入射角0度に対する波圧比

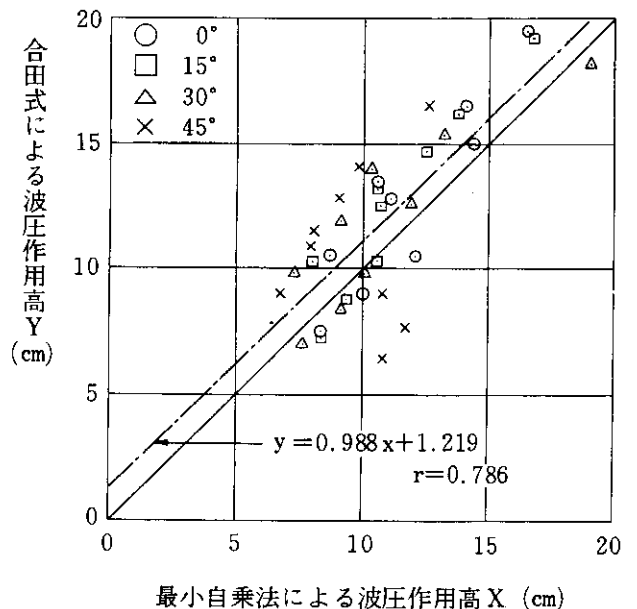


図-11 波圧作用高

験から最小自乗法で求めた波圧作用高とを比較すると、合田式の波圧式の波圧作用高がやや高く計算されるものの実験結果との相関が高く、波圧作用高の

波向き補正も妥当な値を示している。

参 考 文 献

6. あとがき

平面水槽を用いた斜め入射波に対する波圧実験は、波圧測定位置が的確に定められているかが、実験精度に大きく影響する。そこで、防波堤前面における波高分布を考慮して実験を行った。実験結果から判断すると、精度の点で若干問題があったものの貴重なデータが取得できたと考えている。

今回の実験は、重複波領域に限っての実験であるため、今後碎波領域での実験について検討し、総合的な考察をする必要がある。

最後に、本実験計画の策定に当たり、御指導をいただいた前港湾研究室長 梅沢一之氏に対し、紙面をかりて御礼申し上げる次第である。

- 1) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所：安全港湾対策に関する防波堤の諸問題について(II)，第13回管内工事報告会，pp. 123～146，1975.
- 2) 奥村研一，西田芳浩：斜め入射波による防波堤の滑動実験について，第26回海岸工学講演会講演集，土木学会，pp. 357～361，1979.
- 3) 谷本勝利：港湾技術研究所講演会講演集(1)，pp. 1～26，1976.
- 4) 小舟浩治，大里陸男：防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究，港湾技術研究所報告第15巻第2号，pp. 55～88，1976.
- 5) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第14巻第3号，pp. 59～106，1975.

*

*

*