

混成防波堤直立部に作用する波力および揚圧力に関する実験的研究

堀 川 清 司*・宮 崎 和 行**

1. 緒 論

混成防波堤直立部に作用する波力および揚圧力については、重複波領域から砕波領域への遷移領域の扱い方、越波の有無および越波の程度の影響、消波工の効果など、いまだ検討を要する問題が多い。

このような観点から著者らは混成防波堤直立部に作用する波力および揚圧力に関する実験的研究を行なった。水路の水平床部分に模型を設置し、捨石マウンドの高さ、堤体の寸法、水深、波の周期、波高を変化させ、また波の条件は重複波領域から砕波領域に至るまで、また防波堤の高さは越波の生じない条件から越波の生じる条件に至るまで、広範囲にわたって変化させている。さらに混成堤と同じ条件で消波工を被覆した場合の効果も調べた。以下にその成果を述べる。

2. 実験の装置、方法および条件

実験には長さ 22.0m、幅 0.8m、高さ 1.5m の 2 次元造波水路を用い、造波機より 18.5m の地点に模型を設置した。海底勾配は堤体より沖側 3.0m を水平床（水路底より 20.0cm の高さ）とし、さらにその沖側は 1/10 の勾配にした。

実験に用いた防波堤断面は 図—1、図—2 に示すように 2 種類の混成防波堤とそれに消波工を被覆した場合の合計 5 種類である。

実験に使用した波力計は、ひずみゲージ式圧力変換器を上部に 1 つ、下部に 2 つ使用したものであって、堤体の中央に取り付けてある。波力計の固有振動数は空气中で 250 Hz、水中で 200 Hz であり、測定可能範囲は 0~6 kg である。揚圧力は半導体の圧電抵抗効果を利用した圧力変換器（固有振動数 10 000 Hz、測定可能範囲 -500~500 g/cm²）を堤体前趾に取り付けて、波力と同時に電磁オシログラフに記録し、おのおの最大値を読み取った。波高と周期は模型設置前の地点に抵抗線式波高計を取り付けて測定した。

実験条件は 表—1 に示すとおりであり、また無次元量で実験の範囲を示すと、次のようになる。

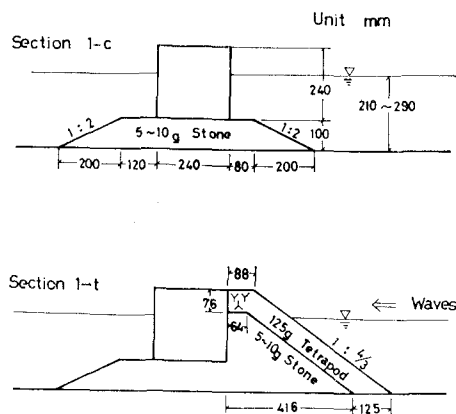
$$d/h=0.29\sim0.66$$

$$B/h=0.28\sim0.38$$

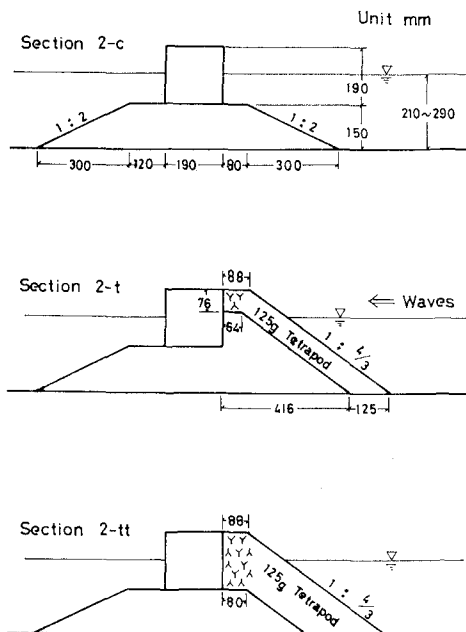
$$H/L=0.020\sim0.11$$

$$H/d=0.28\sim2.3$$

$$H/h_0=0.50\sim2.8$$



図—1 実験断面図 (I)



図—2 実験断面図 (II)

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 土浦技術センター

表-1 規則波の諸元

模型設置位置 前の水深 h (cm)	堤体 断面の高 h_c (cm)	断面	捨石マウンドの 高さ (cm)	堤脚水深 d (cm)	波の周期 (sec)	模型設置位置における通過波高 H (cm)							
29.0	5.0	1 2	10.0 15.0	19.0 14.0	0.80	5.4	6.4	6.9	8.1	8.6	9.7	10.1	10.6
					1.40	6.0	7.6	9.6	11.9	13.5			
					2.00	6.1	8.4	10.2	11.6	13.9			
25.0	9.0	1 2	10.0 15.0	15.0 10.0	0.80	5.5	7.0	8.7	9.4	10.0			
					1.40	6.6	8.5	10.6	11.4	13.6			
					2.00	7.2	8.2	10.4	12.3	13.3			
21.0	13.0	1 2	10.0 15.0	11.0 6.0	0.80	6.0	6.9	8.2	8.8	9.8			
					1.40	6.1	7.6	8.5	9.7	11.7			
					2.00	6.5	7.9	10.0	11.8	14.0			

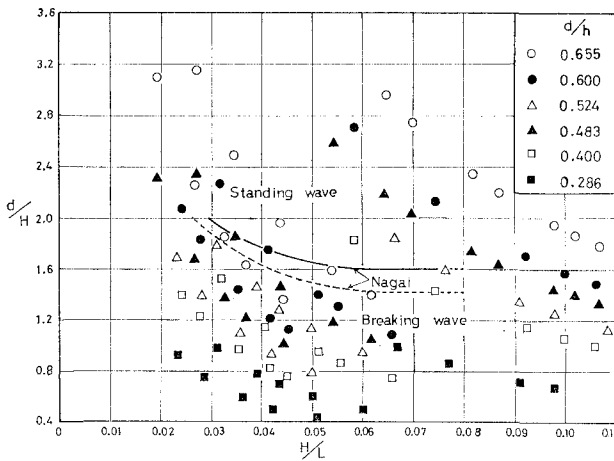


図-3 砕波と重複波の限界

ここで、 d は堤脚水深、 h は模型設置前の水深、 B は捨石マウンドの天端幅、 H および L は模型設置位置における通過波の波高と波長、 h_c は静水面より測った堤体の天端高である。本実験においては B を一定にとっており、 B/h の範囲は $0.28 \sim 0.38$ に限定されているので、その影響を調べることはできない。なお 図-3 は、混成防波堤に作用する波力が砕波によるか重複波によるかの限界を示す永井の曲線²⁾とわれわれの実験条件の範囲を参考のために示したものである。また、永井・大坪²⁾は $d/h \geq 0.40$ をそれぞれ低基および高基混成堤の条件と規定しており、これによればわれわれの実験条件では $d/h = 0.286$ の場合が高基混成堤に属することになる。

3. 実験結果と考察

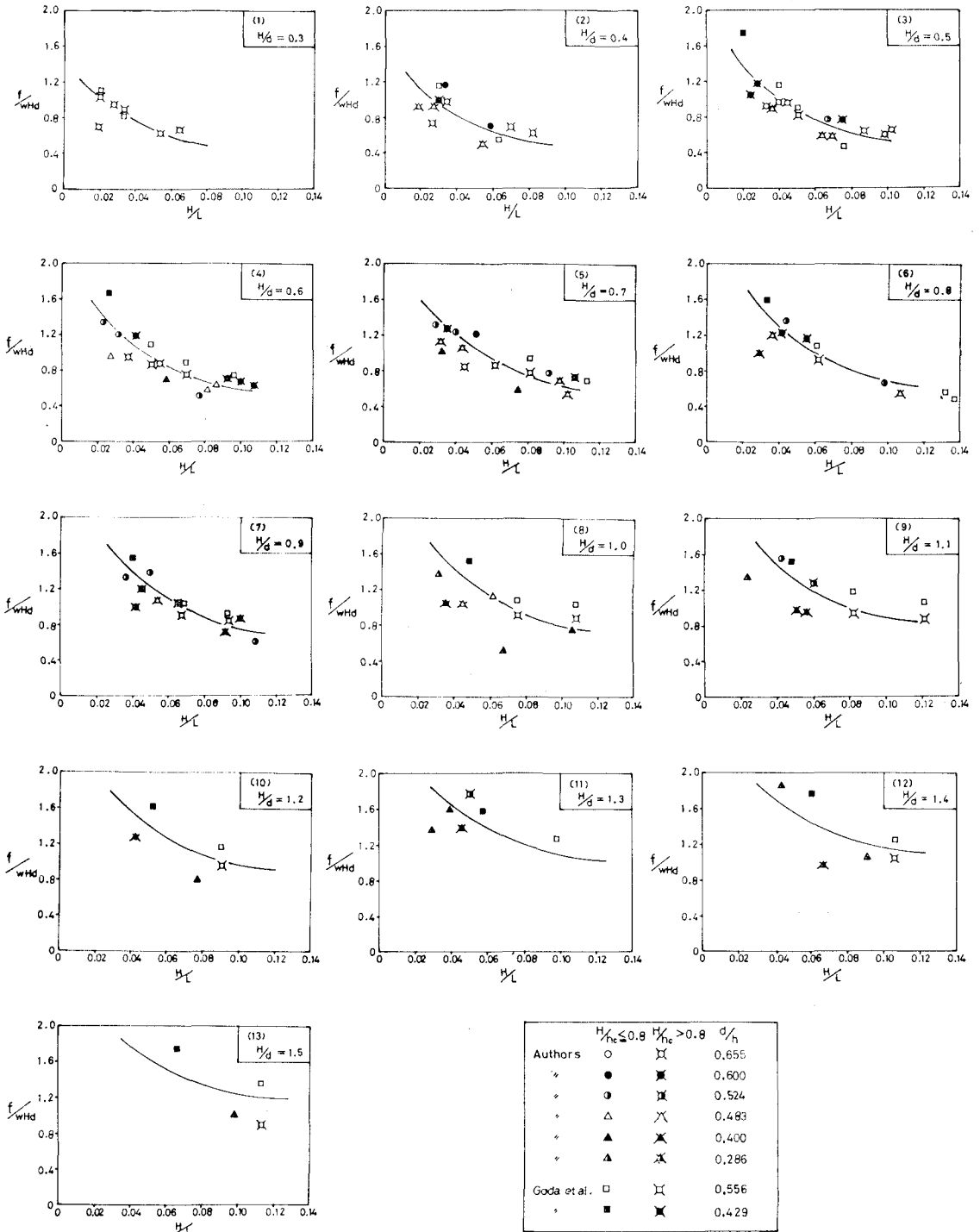
実験によって得られた模型設置位置における通過波高 H 、全波力 f 、堤体前趾の揚圧力 p_u の変動率はそれぞれ $\sigma_H/\bar{H} = 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$ 、 $\sigma_f/\bar{f} = 0 \sim 5 \times 10^{-1}$ 、 $\sigma_{p_u}/\bar{p}_u = 0 \sim 7 \times 10^{-1}$ であり、周期の長い波ほど変動率は小さい。次に消波工を被覆した場合について調べると、全波力と揚圧力の変動率は上記の場合よりもさらに小さくなった。

(1) 無次元波力による表示

無次元波力 f/wHd (f : 全波力、 w : 水の単位体積重量) を支配する無次元要素として、 d/h 、 B/h 、 H/L 、 H/d 、 H/h_c などが考えられる。そこで種々の関係を調べた結果 図-4 が得られた。図-4 は H/d をパラメーターにして、 f/wHd と H/L の関係を合田・福森³⁾の実験値をも加えて示したものである。なお h_c が $1.25H$ 以下のときには越波あり、 h_c が $1.25H$ 以上のときには越波なしとみなして分類した。また H/d が 1.6 以上のものについては資料数が十分でないのを除いてある。 H/d の小さいときは重複波が作用している場合に相当し、 H/d が大きくなるに伴って砕波の作用する場合に遷移している。

点の散乱の程度は砕波の条件になるにつれて大きくなっているように見える。この図によると越波の程度を示す量 H/h_c による変化はほとんどない。つまり越波による全波力の変化はあまりないと考えられる。換言すれば、越波によって平均波圧強度は増加すると考えられる。またこの実験の範囲では d/h の影響も無視しうるのである。次に B/h の影響について調べてみた。その結果、本実験では $B/h = 0.28 \sim 0.38$ 、合田らの実験では、 $B/h = 0.44 \sim 0.57$ であり、このような範囲では B/h の影響は明らかではなかった。なお低基混成堤に働く波圧に関して永井・大坪²⁾の研究があるが、 B/h の大きい領域を主として対象としているので、本実験の結果と対応させることができなかった。

図-5 は 図-4 をまとめたものである。これは平均的な曲線の傾向を示したものであり、おのおのの曲線に対して相当のばらつきのあることには注意しなければならない。図-5 によると H/d が大きくなるほど、 f/wHd は増加し、また H/d が大きくなるに従って H/L の減少とともに f/wHd は急激に増加する傾向がある。なお本実験では砕波後の波は扱っていないが、 H/d と H/L が

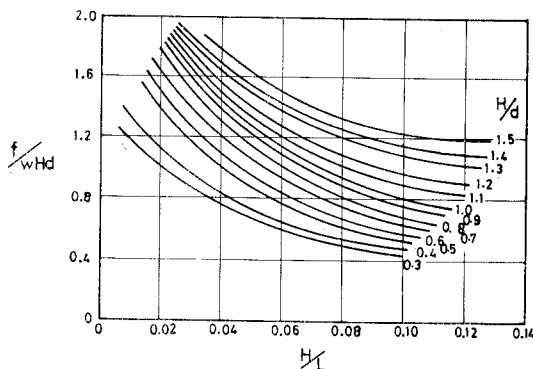


図—4 無次元波力による表示

大きい碎波後の領域になると、 H/d の増加とともに上昇してきた曲線群は今度は下降して行くものと思われる。

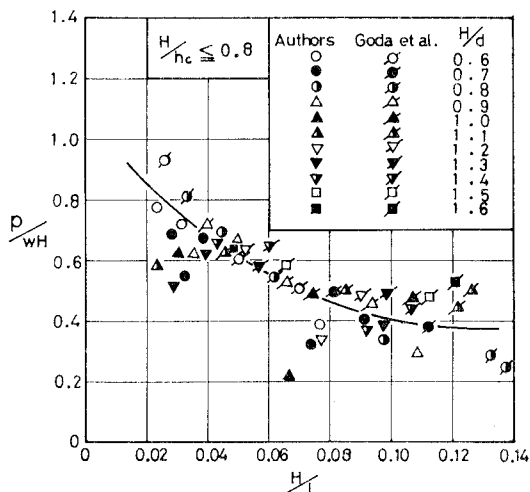
(2) 波力係数による表示

波力係数 p/wH (p : 平均波圧強度) によって表示する場合も、無次元波力と同様な取扱いが考えられるが、重複波領域と碎波領域および越波の有無によってこれを区別しなければならないことが明らかになった。

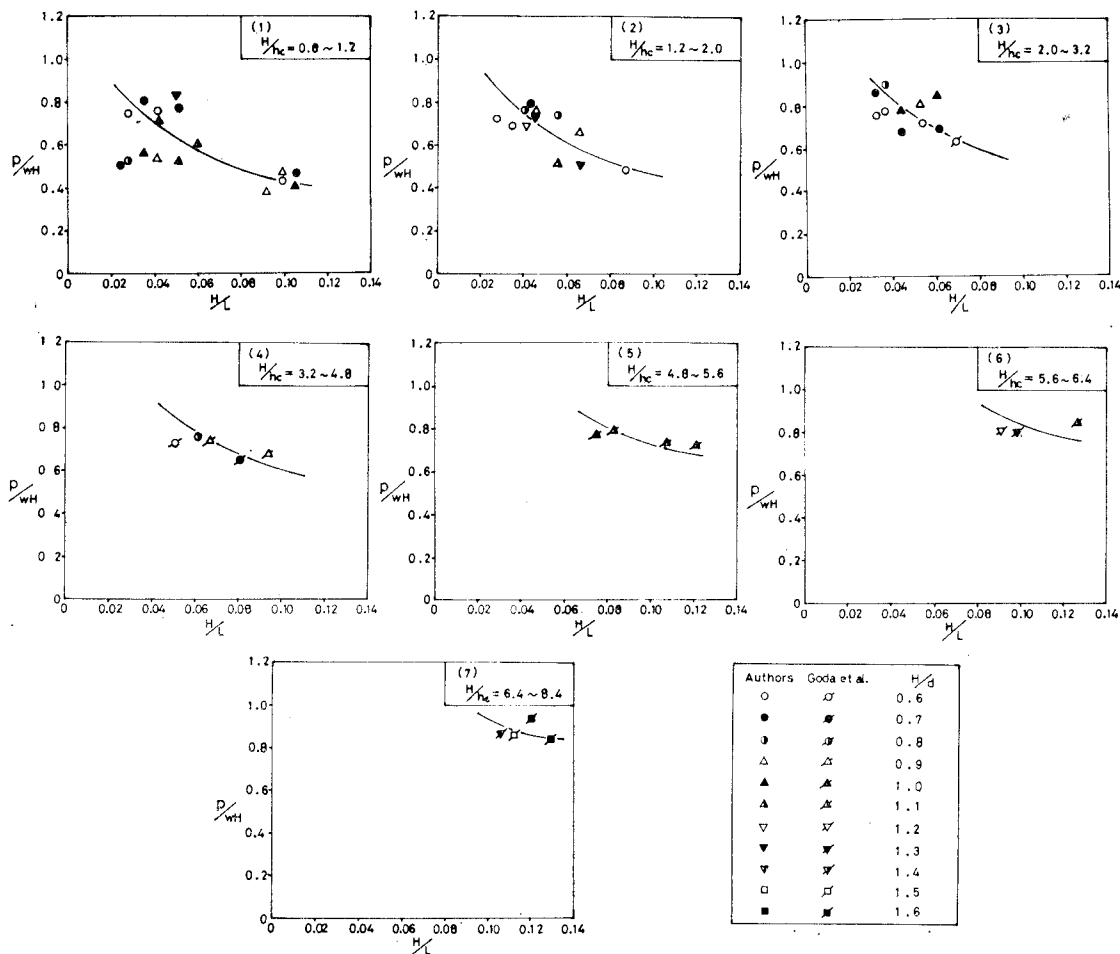


図—5 無次元波力による表示

図—6 は碎波領域で越波の生じない場合について、 p/wH と H/L の関係を示したものであり、 H/d は影響しないことがわかる。なおこの場合の平均波圧強度 p は



図—6 波力係数による表示 (越波なし)



図—7 波力係数による表示 (越波あり)

静水面上 $1.25H$ の高さまで波力が作用するものとして、 $p=f/(d+1.25H)$ によって計算してある。

碎波領域で越波の生じる場合については、越波の程度を示す模型設置位置における通過波高と天端高の比 H/h_c の影響を受けると考えられる。そこで H/h_c によって分類したものが図-7である。なおこの場合の平均波圧強度 p は波力が堤頂まで作用するので、 $p=f/(d+h_c)$ として計算してある。

図-6と図-7をまとめたものが図-8である。これも図-5と同様に平均的な曲線の傾向を示したものであり、おのおのの曲線に対して相当のばらつきのあることに注意しなければならない。図-8によると越波の生じない場合は1本の曲線で近似しうが、越波の生じる場合には、 H/h_c の大きいほど、つまり越波の程度の大きいほど、 p/wH は大きく評価されるべきことがわかる。

(3) 最大波力の生ずる条件

図-9 は本間・堀川・長谷⁴⁾ による最大波力の生ずる堤

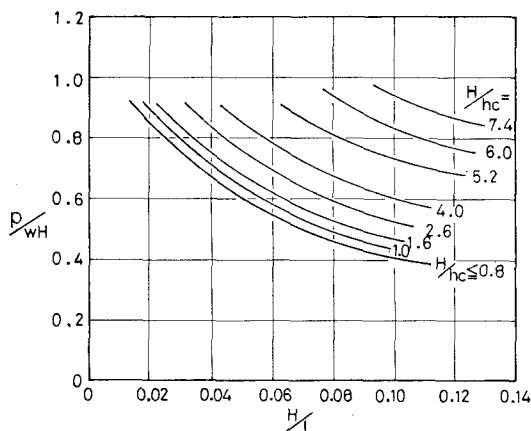


図-8 波力係数による表示 (碎波の場合)

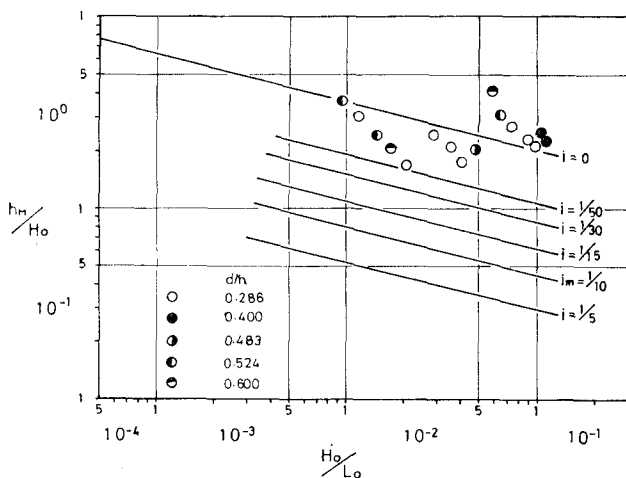


図-9 最大波力の生ずる堤脚水深

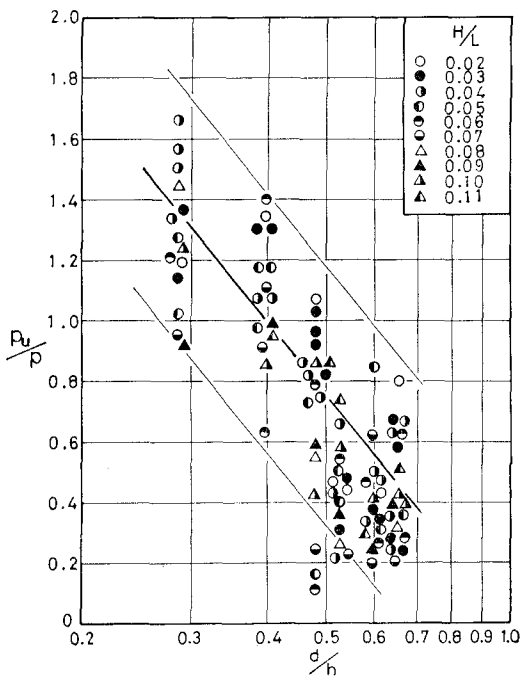


図-10 堤体前趾の揚圧力と平均波圧強度の関係

脚水深の直線群に本実験値をプロットしたものである。なお直線群中 i は斜面勾配、 H_0 は沖波波高、 L_0 は沖波波長、 h_M は最大波力の生ずる堤脚水深である。本実験は混成堤に対するものであって実験条件が異なるが、 B/h が本実験のように小さい領域においては、 d/h の影響を無視し、堤体と捨石マウンドを一体の直立壁とみなし、最大波力を生ずる条件を評価することができると考えられる。

(4) 波力と揚圧力の関係

全波力の最大値 f と堤体前趾の揚圧力の最大値 p_u の出現するときの位相のずれは全ケースにわたってほとんどなく、同時に出現すると考えて十分である。

図-10 は堤体前趾の揚圧力と平均波圧強度の比 p_u/p と、堤脚水深と模型設置前の水深の比 d/h の関係を調べたものであり、波力を支配する重要な無次元要素である H/L や、ここには示さなかったが H/d の影響がでない。図-10 によると平均的に $d/h=0.4$ を境にして、堤体前趾の揚圧力と平均波圧強度の大きさが逆転している。堤体前趾の揚圧力は堤体下端の波圧強度に等しいと考えられるのでこの関係は、堤体下端の波圧強度と平均波圧強度の比に置き換えることができる。このように考えれば波圧分布の形状は主として d/h 、その他 H/L 、 H/d の条件によって変

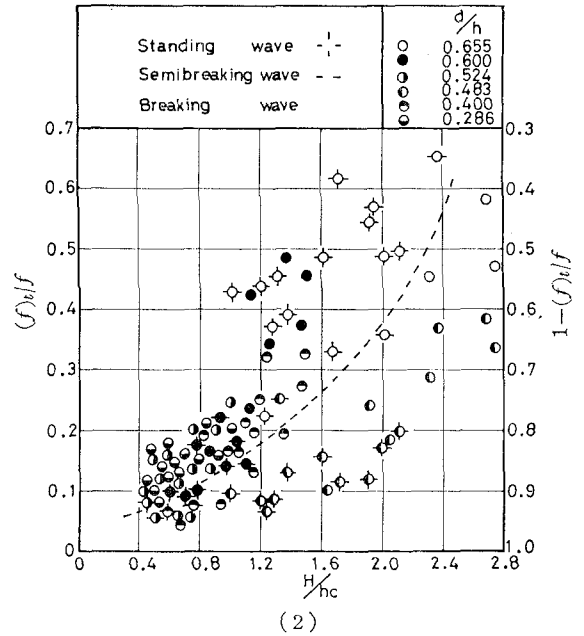
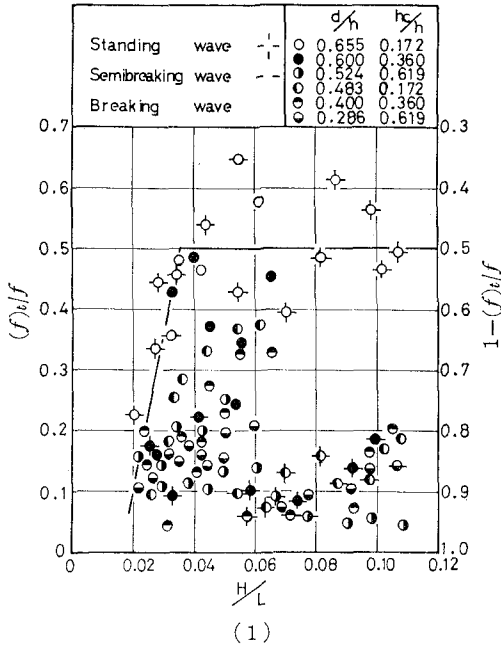
化するものと考えられ、このことは永井⁷⁾の提案したように、波圧の分布はA型、B型、C型のように変化するという結果と符合している。

(5) 消波工の効果

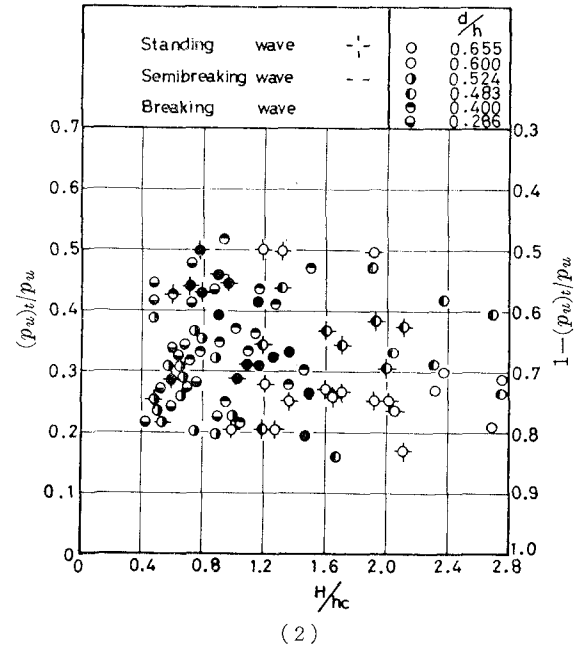
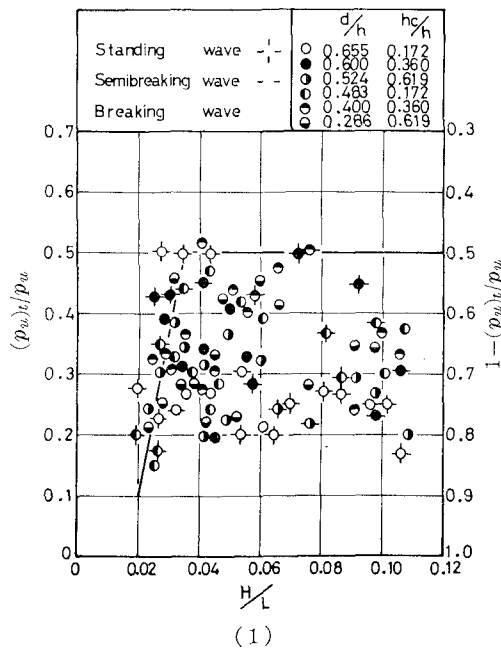
図一11～図一13において示される添字 t , tt はそれぞれテトラポッドを2層に被覆した場合、テトラポッドを

全断面に被覆した場合の実験断面に対応する。

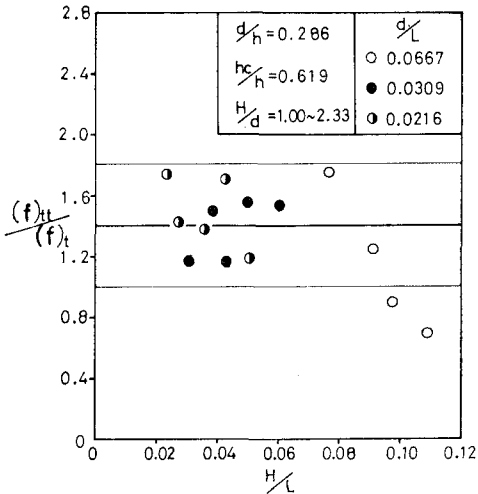
図一11 はテトラポッドを2層に被覆した場合の波力の減殺効果を示したものであり、 H/L の小さいすなわち強大な波力の作用するほど、また H/h_c の小さいほど、波力の減殺効果は著しい。 $H/h_c \leq 0.8$ ($h_c \geq 1.25H$) では80%以上の減殺効果が、また $H/h_c \leq 1.4$ ($h_c \geq 0.7H$) で



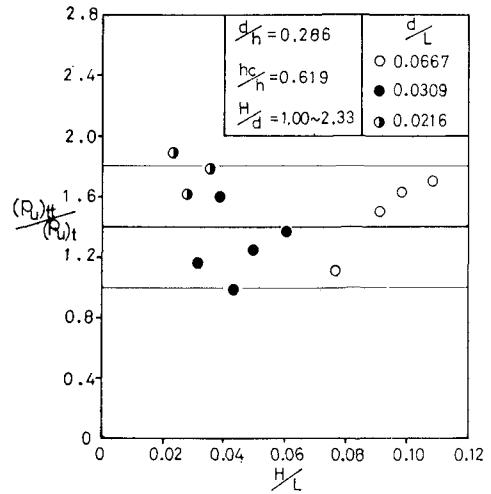
図一11 消波工による波力の減殺効果



図一12 消波工による揚圧力の減殺効果



図—13 (1) テトラポッドを全断面に被覆した場合と2層に被覆した場合の波力の比較



図—13 (2) テトラポッドを全断面に被覆した場合と2層に被覆した場合の揚圧力の比較

は50%以上の減殺効果が期待できる。しかしながら d/h の大きい重複波領域ではあまり減殺効果は期待できない。

図—12 はテトラポッドを2層に被覆した場合の堤体前趾の揚圧力の減殺効果を示したものであり、ほぼ波力の場合と同じような傾向が見受けられる。

図—13 はテトラポッドを全断面に被覆した場合と2層に被覆した場合の波力と揚圧力を比較したものであり、全断面に被覆した場合は多少効果が落ちるようである。

4. 結 論

得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 無次元波力 f/wHd によって表示した場合は、図—5 に示すような傾向があり、 H/d の小さいときは重複波が作用している場合に相当し、 H/d が大きくなるに伴って碎波の作用する場合に遷移している。図—5 によると H/d が大きくなるほど、 f/wHd は増加し、 H/d が大きくなるに従って H/L の減少とともに f/wHd は急激に増加する傾向がある。また越波による全波力の変化はあまりなく、したがって越波によって平均波圧強度は増加すると考えられる。

(2) 碎波の作用する場合の波力係数 p/wH は図—8 に示すような傾向があり、越波の生じない場合は1本の曲線で近似しうるが、越波の生じる場合は、 H/h_c の大きいほど、つまり越波の程度の大きいほど p/wH は大きく評価されるべきことがわかる。

(3) 堤体前趾の揚圧力と平均波圧強度の比 p_u/p は図—10 に示されるように主として d/h の大きさによって影響を受ける。また堤体前趾の揚圧力は堤体下端的の波

圧強度に等しいと考えられるのでこの関係は、堤体下端的の波圧強度と平均波圧強度の比に置き換えることができる。このように考えれば波圧分布の形状は主として d/h 、その他 H/L 、 H/d の条件によって変化するものと考えられる。

(4) 消波工を被覆した場合は H/L の小さいすなわち強大な波力の作用するほど、また H/h_c の小さいほど波力および揚圧力の減殺効果は著しい。また $H/h_c \leq 0.8$ ($h_c \geq 1.25H$) では80%以上、 $H/h_c \leq 1.4$ ($h_c \geq 0.7H$) では50%以上の波力の減殺効果が期待できる。しかしながら d/h の大きい重複波領域では波力の減殺効果はあまり期待できない。

以上より、重複波領域より碎波領域に至るまで、また越波の有無および越波の程度による波力および揚圧力の評価、さらに消波工の効果などについてある程度明らかにすることができた。しかしながら捨石マウンドの形状(天端幅、のり面勾配、捨石の大きさ)の影響および碎波後の波力などさらに検討すべき問題があり、これらは今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 永井莊七郎：防波堤に働く碎波の圧力に関する研究，土木学会論文集，第65号，別冊3-3，1959，12.
- 2) 永井莊七郎・大坪崇彦：低基混成堤に働く波圧，第15回海岸工学講演会講演集，1968.
- 3) 合田良実・福森利夫：直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第11巻，第2号，1972，6.
- 4) 本間 仁・堀川清司・長谷直樹：護岸に働く波力について，第9回海岸工学講演会講演集，1962.