

大水深混成防波堤に作用する波力について

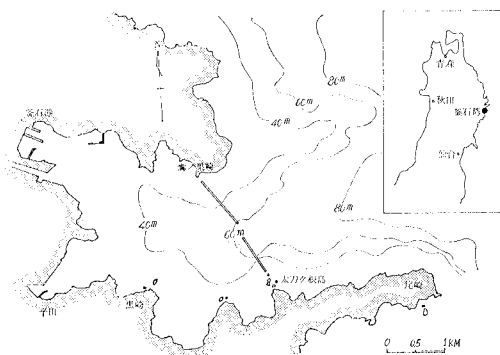
中村 竜二*, 守口 照明**, 柳 島 慎一***, 田 川 昌 宏****

1. はじめに

最近の港湾構造物は従来に比し苛酷な自然条件を受ける場所に設置されることが多くなり、特に防波堤の設置水深は一段と深くなってゆく傾向にある。

運輸省第二港湾建設局によって建設されようとしている釜石港湾口防波堤は津波防止機能も持たせるため図一1に示すようにその設置位置は釜石湾湾口部に計画されており、設置水深は -60 m にも達する。今までの我が国における大水深防波堤としては大船渡港の設置水深 -35 m があるのみで釜石港湾口防波堤のような大規模な防波堤の建設は初めての経験であり、現在構造断面決定のための作業が進められている。

構造形式の一つとして高マウンド形式の混成堤が考えられるが、今までこのような大水深防波堤に作用する波力についての研究はほとんどなされていない。また、合田^{1),2)}は最近重複波から碎波後の波まで適用可能な波圧式(合田式と呼ぶことにする)を提案したが大水深に設置された高マウンド防波堤に作用する波力については検証していない。そこで大水深混成堤に作用する波力を解明するために模型実験を行ない、合田式との比較検討を行なったものである。

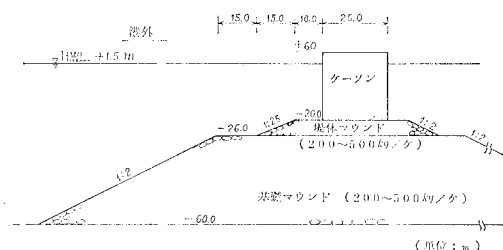


図一1 位置図

2. 波圧, 揚圧力実験

(1) 実験方法

実験は模型の設置水深を全て -60 m とし、図一2に示すような捨石マウンドと直立壁ケーソンから成る混成堤断面を用いた。表一1に波浪条件及び構造物条件の組み合わせを示す。実験は長さ 30 m 、高さ 1.5 m 、幅 1 m を中央で仕切った規則波造波水路にて模型縮尺 $1/100$ で行なった。模型堤体は鉄製の箱を用い、波圧及び揚圧力はひずみゲージ式の圧力変換器によって測定した。また波高は容量式波高計を用いて測定した。測定は同一条件について3回繰り返し行なった。



図一2 防波堤断面

表一1 実験条件

波浪条件	波 高	$H=7.0, 10.0, 13.0\text{ m}$
	周 期	$T=12.0, 14.0\text{ sec}$
	潮 位	H.W.L. + 1.5 m
構造物条件	設置水深	$h=-60.0\text{ m}$
	マウンド水深	$d=-15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 40.0\text{ m}$
	マウンド法勾配	$i_m=1:2, 1:3$
	越 波	有(堤体天端+6.0m), 無

(2) 実験結果および考察

a) 波の変形

図一3はマウンド法勾配が $1:2$ におけるマウンド上の通過波高を示している。測定値のばらつきは大きい、マウンドによる波の変形はマウンド水深 d 、入射波高 H_I 、周期 T によって変化し、周期 12 秒 の場合 H_I/d が 0.3 前後で、周期 14 秒 の場合 H_I/d が 0.45 前後を境にマウンド通過波高 H_M の増大と減少が生じ、今回測定

* 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所長

** 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所建設専門官

*** 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所

**** 正会員 (株)日本港湾コンサルタント水理研究所

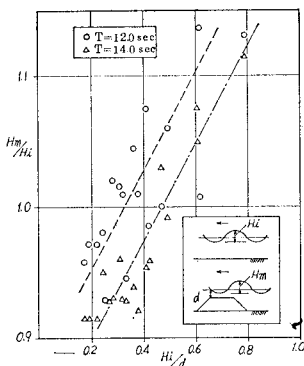


図-3 マウンド上の通過波高

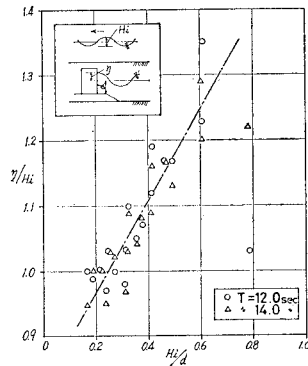


図-4 堤前面波峰高

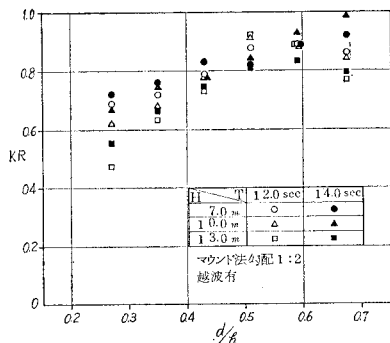


図-5 反射率

範囲では周期を一定とすれば H_M/H_I と H_I/d にはほぼ一次比例の関係が見られる。なお法勾配が 1:3 の場合は 1:2 の時と同様な傾向を示している。

堤体設置後の堤体前面波高 H は法勾配 1:2 の場合、 $H_I/d < 0.6$ の範囲では周期にかかわらず $H/H_I = 1.8 \sim 1.9$ が測定され、 $H_I/d \geq 0.6$ を越えると H/H_I の最大値は 2.0 となるがこの段階より今回の天端高では越波を生じるため H_I/d が大きくなっても H/H_I は大きくならない。

図-4 は堤前面波峰高 η を H_I/d と η/H_I によって整理したものである。この場合も越波を生じる $H_I/d > 0.6$ を除くと、 η/H_I と H_I/d は周期に関係なく強い相関を示しており、 $H_I/d = 0.25$ 付近で入射波高と波峰高がほぼ同じ値を示し、 $H_I/d > 0.25$ では波峰高は入射波高より高い値を示す。

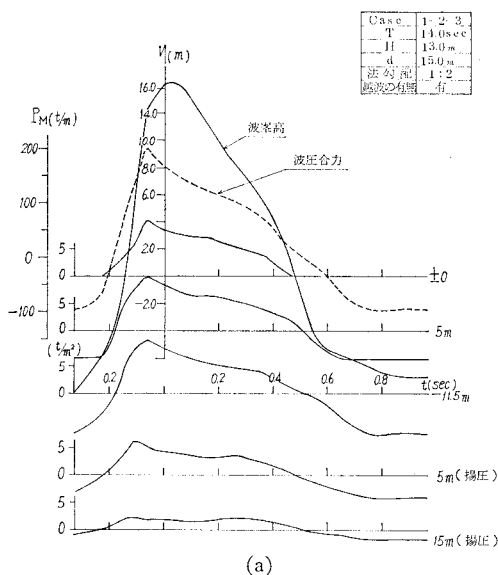
図-5 は各断面における反射率を示している。反射率は $d/h > 0.5$ の場合に 0.8~0.9 の範囲でほぼ同じ値を示

すが、 $d/h < 0.5$ の場合は減少する傾向を示す。

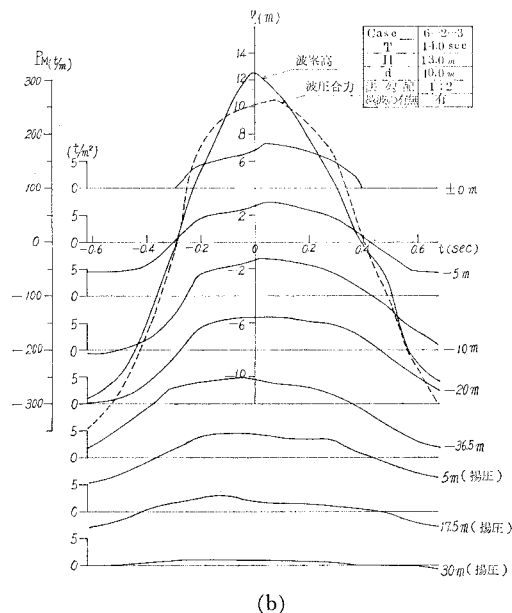
b) 波圧、揚圧力

波圧及び揚圧力の測定例を 図-6 (a), (b) に示す。マウンド水深が浅い場合波圧は砕波的な波形となり、深い場合は重複波的な波形となる。各測点における波圧のピークはマウンド水深が浅い場合にはほぼ同時刻に発生し、波圧合力が最大になるのは波峰高が最大になる直前である。マウンド水深が深い場合は深い測点ほど波圧のピークは早く現れ各測点でのピークはずれている。越波を無くした断面の波圧波形は双峰型を示し、波圧合力の最大は波峰高が最大になる時刻の前後 0.1 秒におおの生じている。双峰型の波圧波形はマウンド水深が浅く、越波が無い場合ほどははっきり現れている。揚圧力のピークは波圧のピークが現れる以前で生じている。

図-7 (a), (b) に各測点における最大波圧及び最大揚圧力の分布例を示す。波圧の最大値は静水面付近で生じ

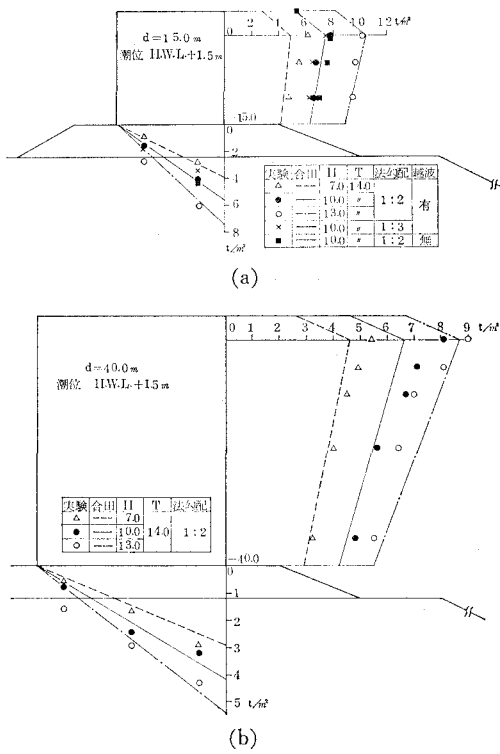


(a)



(b)

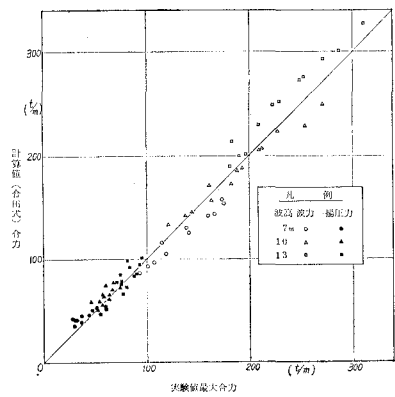
図-6 波圧、揚圧力測定例



図一七 最大波圧、最大揚圧力分布

ており、水深が深くなるとともに減少している。この減少の傾向は、マウンド水深が浅い場合、直線的に減少するのに対してマウンド水深が深い場合は中間部で凹の分布型となる。マウンド法勾配の変化による波圧の有意な差は見られなかった。なお越波が無い場合の静水面付近での波圧は越波がある場合よりも大きくなっており、越波が有る場合に較べて波圧合力は 10 % 程大きくなっている。揚圧力は堤体前趾付近で最も大きく後趾でほぼ 0 となる三角形分布をしているが、波高 13 m の場合、後趾付近のデータがばらついている。これは越波によって堤体背後に水塊が飛び込み擾乱が生ずるためと考えられる。マウンド法勾配、越波の有無による揚圧力の変化は見られなかった。波圧、揚圧力の測定結果から推定した前趾揚圧力と堤体下端波圧とはほぼ一致している。

次に実験によって得られた波圧、揚圧力と合田式によって計算した波圧、揚圧力とを比較する。図一七(a), (b) には合田式による波圧、揚圧力を同時に示しているが、波高 7 m の場合は計算値の方が実験値より小さく、波高 10 m でほぼ一致し、波高 13 m の場合は計算値の方が大きくなっている。各測点の最大波圧及び最大揚圧力の測定結果を用いて単位幅当りの波圧、揚圧力の合力を求め、合田式による計算値と比較したものを 図一八 に示す。波圧、揚圧力とも実験値と計算値はよく一致している。特に波高 10 m の時の一致度はよく、波高 7 m の時



図一八 実験値合力と計算値合力

表一 二 波力、揚圧力比較表 ($T=14.0$ 秒, $H=13.0$ m)

マウンド 水深 (m)	波 圧			揚 圧 力		
	各点最大 波圧合力 (t/m)	同時最大 波 圧 (t/m)	合田式 (t/m)	各点最大 揚圧力合力 (t/m)	同時揚 圧 力 (t/m)	合田式 (t/m)
-15.0	197.9	192.9	202.2	80.0	67.5	72.8
-20.0	199.2	198.3	215.2	78.6	76.1	86.3
-25.0	222.6	215.6	249.5	81.0	71.7	97.8
-30.0	252.0	241.5	276.2	82.5	66.7	92.3
-35.0	284.6	276.9	302.3	94.5	78.1	101.0
-40.0	310.9	287.9	328.1	92.8	73.5	94.5

は実験値の方が約 10 % 大きく、波高 13 m の時は逆に約 8 % 小さくなっている。揚圧力は波高 13 m の時実験値と計算値はほぼ一致しているが波高 7, 10 m では実験値の方が約 7 % 小さい値を示している。

次に同時刻に各測点の波圧合力が最大になる時の波力（同時最大波力と呼ぶ）および、同時最大波力が生じたと同時刻の揚圧力合力（同時揚圧力と呼ぶ）を周期 14 秒、波高 13 m について計算した結果を 表一 二 に示す。表中には各測点の最大波圧及び最大揚圧力合力および合田式によって計算した値も示しているが、同時最大波力は最大波圧合力の 0.93~0.98 とほとんど変りない。しかし、同時揚圧力は揚圧力の生じる時間がずれているため最大揚圧力合力の 0.79~0.96 となっている。

3. 滑 動 実 験

(1) 実験方法

波圧、揚圧力実験で得られた波圧及び揚圧力を検証するため滑動実験を行なった。実験は堤体天端を +6 m, マウンド法勾配を 1:2 とし、波圧、揚圧力実験と同様の 6 種のマウンド水深について、周期 14 秒、波高 13 m の波浪条件のもとに模型縮尺 1/100 で行なった。模型堤体はモルタル製であり、堤体マウンドは碎石によって作った透水性固定マウンドを用いた。滑動量の測定には直流差動トランス型変位計を用い、堤体前面水位と同時に記録した。測定は同一条件の断面について 6 回繰り返し行

なった。

(2) 実験結果および考察

a) 摩擦係数

摩擦係数の測定結果を表-3 に示す。摩擦係数は 0.63 ~0.75 の中にあり、平均値は 0.7、標準偏差は 0.03 と

表-3 摩擦係数

マウンド水深 (m)	重量 (kg)	実験前	実験後
-15.0	22.9	0.71	0.70
-20.0	30.3	0.67	0.69
-25.0	39.8	0.71	0.71
-30.0	44.8	0.70	0.72
-35.0	55.1	0.73	0.70
-40.0	56.2	0.70	0.68
		平均値 0.70	標準偏差 0.03

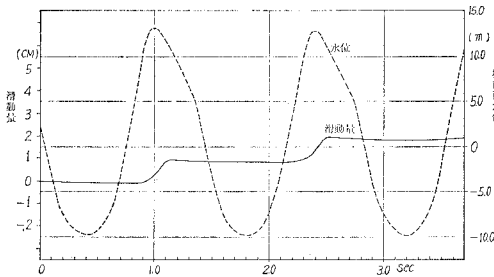


図-9 滑動記録 ($d = -30$ m, $W_0 = 18,100$ t)

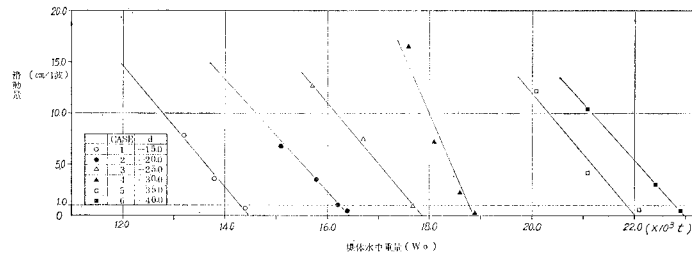


図-10 滑動量と堤体水中重量

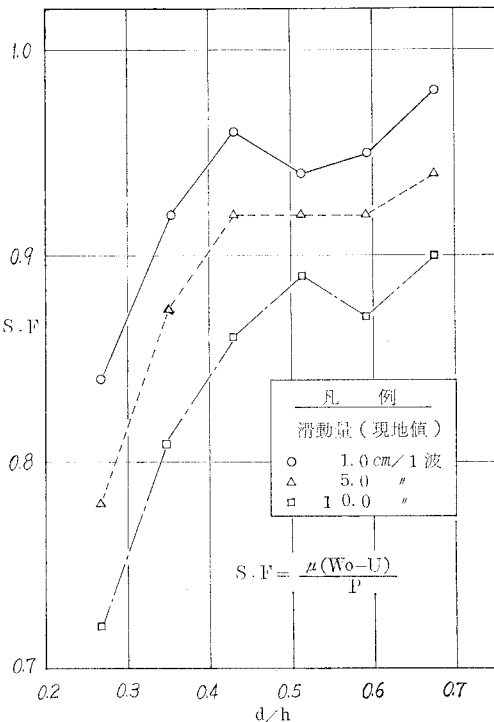


図-11 滑動安全率

ばらつきが少ない。これはマウンド床を固定床としたためと考えられる。

b) 滑動量

図-9 に滑動記録の例を示す。堤体は各波ごとにほぼ等量ずつ滑動する場合としない場合とがある。これは波の不安定および堤体とマウンドとのすり合せによるものと考えられる。滑動が始まるのは堤前水位がピークになる

直前であり、滑動が止まるのは水位がピークに達した直後である。

図-10 に堤体水中重量と滑動量との関係を示す。各マウンド水深共滑動量は堤体水中重量が増大するとともに直線的に減少しており、その減少率は各水深共ほぼ同じである。滑動限界重量は滑動量が 0 となる時であるが、この重量を求めることは困難である。そこで本実験においては、現地の値で 1 波当たり 1 cm 滑動する重量をもって限界重量とした。この限界重量と波力、揚圧力との力関係を検討するために次式で表わされる滑動安全率を求めた。すなわち、

$$S.F = \frac{\mu(W_0 - U)}{P}$$

ここで、 $S.F$ は滑動安全率、 μ は摩擦係数、 W_0 は堤体水中重量、 U は同時揚圧力、 P は同時最大波力である。図-11 に滑動安全率の計算結果を示す。限界重量に対する滑動安全率は、0.84~0.98 となり、波力、揚圧力と堤体重量との力関係はほぼつり合っている。

4. 結 論

大水深混成防波堤に作用する波力について模型実験を行なった結果、防波堤に作用する波力はマウンド水深に関係なく合田が提案した波圧式によって求まる値によく一致している。しかし、波高が大きい場合には合田式による値は実験値より 8 % 程度大きな波力になり設計に際してはこの点に注意する必要がある。また今回行なったマウンド法勾配の範囲では波力の変化は見られなかったが、越波が無い断面において越波がある場合の 10 % 程度大きな波力を生じている。

波力検証のための滑動実験において、波力、揚圧力と滑動限界重量との力関係はほぼつり合っており、波圧、揚圧力実験の妥当性が確認された。

最後に本実験の実施ならびに解析に当っては運輸省港湾技術研究所水工部、海洋水理部の御指導、御協力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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.
 - 2) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻第3号，1973.
-