

一部急勾配斜面を有する砂マウンド式混成堤の波圧特性

梅沢信敏*・遠藤仁彦*・柳瀬知之*・牛嶋龍一郎**

1. ま え が き

比較的水深の大きい海域における混成堤の経済的な設計法の一つとして、安価な浚渫土砂を用いて海底面上に砂でマウンドを形成し、捨石マウンド厚の低減を図る方法が考えられる。このような砂マウンド式混成堤を実用化するためには、同工法の波圧、洗掘、支持力、液状化特性などの技術的課題を解決することが不可欠である。北海道開発局ではそれらの解決に向けて昭和61年度より水理模型実験と並行して苫小牧東港において現地実証実験を行うなど具体的な取り組みを実施してきている。

本報告はそのうち、砂マウンド式混成堤に作用する波圧特性について水理模型実験結果を基に取りまとめたものである。本実験の主眼は、ある条件によっては砂マウンド斜面上で波が碎け、堤体に強大な波力が作用することから、一部急勾配斜面を有する砂マウンド式混成堤の衝撃碎波圧発生機構を解明することにある。これまででも通常の混成堤に作用する衝撃碎波圧に関する研究（谷本ら、1981）は数多く行われてきているが、緩勾配の海底面上に0.2~5波長程度の比較的延長が短く、1/15~1/50の急勾配を有するような変断面形状をもつ場合の同種の研究はほとんど例がなく、岩盤地帯で同様な海底地形を有している海域に通常の混成堤を設計する場合においても参考になるものと期待される。

2. 規則波による波圧特性

(1) 実験装置および方法

実験は一端にペンデュラム型造波機を有する2次元造

波水路（長さ28m、幅80cm、高さ1m）において実施した。縮尺は1/75とし、相似則はフルード則によった。

図-1に実験水路を示す。実験は通過波を原地形（図中で固定床と表示）で測定した後、原地形上に順次砂マウンド地形をモルタルで形成していき、その上に混成堤を設置して波圧測定を行った。砂マウンド地形を製作した後の実験に用いた波高は原地形で測定した値を用いた。

図-2に実験断面を示す。モルタルで形成した砂マウンド上には碎石により捨石マウンドを設け、その上に堤体を設置した。捨石マウンドの法勾配は1:3とした。堤体はアクリル板をステンレス製アングルの枠に固定して振動を抑えたものを用い、堤体全体を波力によって振動しないよう確実に固定した。堤体前面のアクリル板には深さ方向に3.0cm間隔でマウンド水深に応じて6~7個のひずみゲージ式の波圧計（定格0.2kgf/cm²）を取り付けた。波圧計の出力は動ひずみアンプを通してデータレコーダに収録し、オフラインでA/D変換を行いパソコンにより解析した。A/D変換の際のサンプリング周波数は80Hzとした。測定波は有効測定波のうち9波とし、波圧計の配置による重み付けを行って合成した波圧合力が最大となる時刻の波圧（最大同時波圧）を算出して、その時の各波圧計の値を読みとり、9波の平均値を最終の出力データとした。

実験条件は表-1に示すように、砂マウンド厚(t)・勾配(α)、捨石マウンド厚(r)・肩幅(B_m)、水深(h)を変化させ、その堤体に6波高、3周期の波を作用させた。捨石マウンドの厚さは基本断面として砂マウンドが無い状態で8~12cmのものを定め、砂マウンドが有る

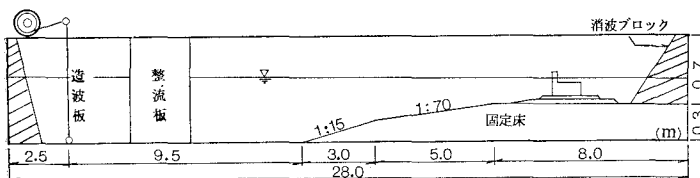


図-1 実験水路

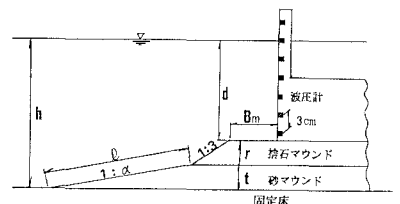


図-2 実験断面

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 港湾研究室

** 正会員 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所

表-1 規則波実験条件 (単位 cm)

砂マウンド 勾配 厚さ	水深	捨石マウンド 肩幅 厚さ	実験波
0 0	20 24	14 8,10 8,10,12	水深 20cm のとき $T=1.1s, 1.3s, 1.5s$ $H=8.0, 9.0, 9.5, 10.0$ 10.5, 11.0
1/15 4	20 24	14 4, 6 4, 6, 8	水深 24cm のとき $T=1.1s, 1.3s, 1.5s$ $H=10.0, 11.0, 11.5$ 12.0, 12.5, 13.0
1/15 6	20 24	14 4, 6	
1/30 4	20 24	14 19 24 4, 6, 8	
1/30 6	20 24	14 19 24 4, 6, 8	堤体天端高 +8.0 海底勾配 1/70

場合にはその厚さと捨石マウンド厚の合計 ($\Sigma r=r+t$) が基本断面の捨石厚と同じとなるように各々の値を定めた。砂マウンド勾配は土運船からの直接方式を想定し、現地(苫小牧東港)の投入実験結果などを参考に自然法勾配を1/15とし、比較ケースとして1/30を行った。

(2) 実験結果と考察

a) 砂マウンド形状と波圧強度

図-3 は規則波実験により得られた水深 24 cm, 周期

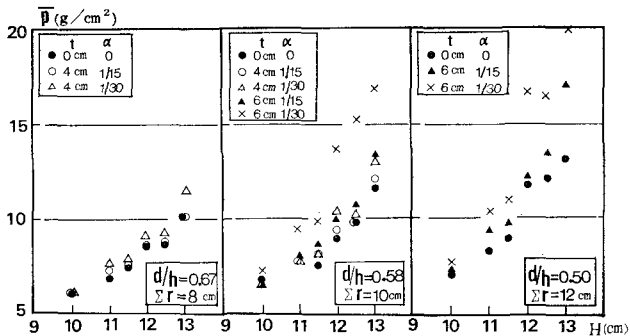


図-3 砂マウンド形状と波圧強度 ($h=24$ cm, $T=1.3$ s)

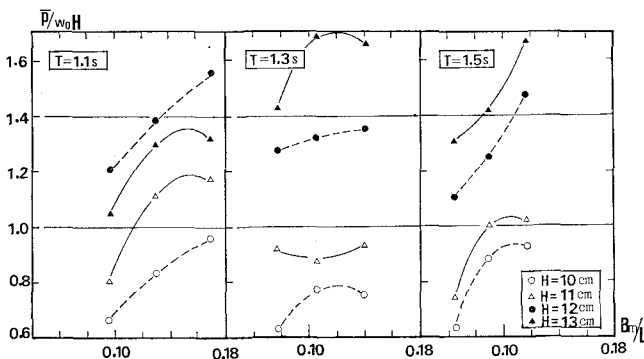


図-4 捨石マウンド肩幅と波圧係数 ($h=24$ cm, $t=6$ cm, 1/30)

1.3s の平均波圧強度の変化状況を示したものである。 $d/h=0.67$, $\Sigma r=8$ cm の場合は砂マウンドが波圧強度に及ぼす影響はほとんどみられず、このような条件においては砂マウンドを捨石マウンドの一部とみなしてよいものと考えられる。 $d/h=0.58$, $\Sigma r=10$ cm の場合は、 $t=6$ cm, $\alpha=1/30$ (×印) では波圧の増大が著しいが、それ以外は波圧は増大するもののその度合いは小さくなっている。 $d/h=0.50$, $\Sigma r=12$ cm の場合は全体に波圧強度が大きく、高マウンドのために砂マウンドが無くても衝撃碎波的な波圧が作用すると考えられるが、波圧の変化状況を見ると $\alpha=1/30$ の場合の方がより衝撃的な波圧が多く発生しているようである。

以上のことから海底勾配が一様の場合、一般的には急勾配になる程衝撃碎波圧が発生しやすくなるといわれているが、今回のケースのように砂マウンドにより部分的に海底面が変断面形状を呈している場合には、種々の波浪条件に対して衝撃碎波圧をひき起こす巻き波を生じさせるような適当な延長と勾配を有する砂マウンド斜面が存在するものと推察される。

b) 捨石マウンド前肩幅と波圧強度

砂マウンド式混成堤の捨石マウンド前肩幅を変化させたときの波圧の変化を調べたものが図-4 である。図は横軸に捨石マウンド肩幅 (B_m) と堤体設置位置における水深に対する波長 (L) の比を、縦軸には平均波圧強度係数 ($\bar{p}/w_0 H$) をプロットしたものであり、捨石マウンド肩幅以外の形状は同じである。これをみると、周期 1.1s, 1.3s では捨石マウンド肩幅が大きくなるのに伴い波圧係数がピークを示す傾向がみられる。また、周期 1.1s では波高 13 cm のときの波圧係数が波高 12 cm より小さくなっており、波高 13 cm の場合は斜面上で完全に碎波していることがわかる。また、周期 1.5s では波高が大きい場合、波圧係数が増大の傾向を保っており、碎波が進行中であることを示している。

以上より、砂マウンド式混成堤の場合においても通常の混成堤で高橋ら(1983)が指摘しているように適当に捨石マウンド肩幅が広い場合は衝撃碎波圧が生じやすくなるものと考えられる。

3. 不規則波による波圧特性

(1) 実験装置および方法

規則波実験によりおおよその衝撃碎波圧発生傾向が把握できたので、次にパラメータを絞り込んで不規則波による波圧実験を行った。

実験は一端に波面検出型吸収式不規則波造波装置を有する2次元造波水路(長さ 24m, 幅 80 cm, 高さ 1m)において実施した. 縮尺は規則波実験と同じ1/75とし, 水路床は海底勾配を 1/100 としたほかは, ほぼ同様である.

使用した不規則波のスペクトル形は修正プレットシュナイダー光型型で, 測定時間は概ね測定波数が 200 波以上になるように有義波周期×200秒とした. A/D 変換の際のサンプリング周波数は 100 Hz とし, 解析方法は変換後の各波圧を波圧計の配置による重み付けを行って平均同時波圧として合成し, ゼロアップクロス法により合成波圧波形個々のピーク値を求めた. 次にこれらのピーク値を測定時間内の全波圧波形について求め, 大きい方から 200 波圧データを取り出した. 整理の方法は波浪の統計と同様の方法で 200 波圧中の最大値を最大同時平均波圧, 大きい方から数えて全体の1/10の数の測定値の平均値を1/10最大同時平均波圧, 同じく 1/3 の数の平均値を 1/3 最大同時平均波圧と定義し, それぞれ, $\bar{p}_{max}$, $\bar{p}_{1/10}$, $\bar{p}_{1/3}$ と表す.

実験は表-2 に示すように 2 種類に大別される. 実験 1 は規則波実験と同様に固定床で行っており, 変化させた条件は砂マウンド勾配および厚さと堤体設置水深である. なお, 捨石マウンド形状は規則波実験を参考に前肩幅 B_m は根固方塊と被覆ブロック各 2 個並びを想定した最小の 14 cm (現地 10.5m) とし, 厚さは経済性を勘案してできるだけ薄い方が有利であるとの判断から, 砂マウンドへのめり込みに被覆ブロック 厚分を加えて 4 cm (現地 3m) とした. それらの堤体に有義波 6 波高, 3 周期を作用させた. 実験 2 は移動床で行っており, 砂マウンドが洗掘された後の波圧の変化を調べたものである. 移動床は固定床と同一断面で砂マウンドおよび海底部を砂で置き換えたもので, 模型砂として珪砂 7 号 (中央粒径 $d_{50}=0.16$ mm) を使用した. これは漂砂の移動形態の相似を考え, 現地砂マウンド材の中央粒径 $d_{50}=1$ mm に相当するものである. 変化させた条件は砂マウンド勾配, 洗掘防止工幅で, それぞれ 4 時間の起波を行い精密連続計測式水底形状測定器で洗掘後の砂面計測を行った

表-2 不規則波実験条件 (単位 cm)

実験	砂マウンド		水深	実験波
	勾配	厚さ		
1	1/15	4	20, 24	水深 20cm のとき $T_{1/3}=1.1s, 1.3s, 1.5s$ $H_{1/3}=6.0, 6.5, 7.0, 7.5$ 8.0, 9.0
	1/15	6	20, 24	
	1/15	8	24	
	1/30	6	20, 24	水深 24cm のとき $T_{1/3}=1.1s, 1.3s, 1.5s$ $H_{1/3}=7.0, 7.5, 8.0, 8.5$ 9.0, 10.0
	1/50	6	20, 24	
2	砂マウンド勾配	洗掘防止工幅	水深	捨石マウンド 肩幅 14.0 厚さ 4.0 堤体天端高 +8.0 海底勾配 1/100
	1/15	6	4.0	
	1/15	6	13.5	
	1/50	6	4.0	

後, 実験 1 と同様の波浪条件で波圧計測を行った.

(2) 実験結果と考察

a) 波圧強度に及ぼす砂マウンド厚の影響

図-5 は $\alpha=1/15$, $h=24$ cm, $T_{1/3}=1.1$ s を同条件とし, 砂マウンド厚を $t=4, 6, 8$ cm と変化させた場合の有義波高と平均波圧強度の関係をプロットしたものである. 各ケースとも波高が大きくなるにつれて $\bar{p}_{1/10}$ と $\bar{p}_{1/3}$ もほぼ比例して増加している. しかしながら, $\bar{p}_{max}$ は明らかに砂マウンド厚の増加に伴って衝撃的な波圧を発生させる波高の範囲が拡大していることがわかる. これは捨石厚は全ケースとも同じであることから, 水深と捨石マウンド天端水深 (d/h) の影響が大きいものと考えられる.

b) 波圧強度に及ぼす砂マウンド勾配の影響

$t=6$ cm, $h=24$ cm のときに砂マウンド勾配を 1/15, 1/30, 1/50 と 3 通りに変化させた場合の波圧強度係数の変化をみたものが図-6 である. 全体的な傾向としては一番急な勾配をもつ $\alpha=1/15$ のときに, 同係数が最も大きくなっている場合が多いが周期が長くなると緩勾配のときに同係数が大きくなるものも数ケース存在する. これは波浪条件によっては砂マウンド勾配がやや緩く適当な斜面長をもつ場合の方が急勾配の砂マウンド堤よりも

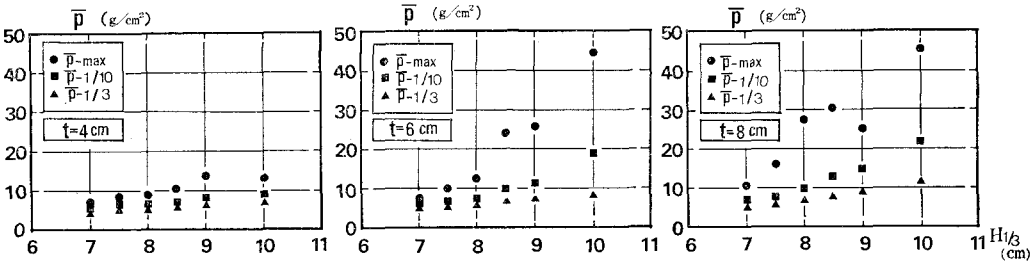


図-5 砂マウンド厚と波圧強度 ($h=24$ cm, $\alpha=1/15$, $T_{1/3}=1.1$ s)

衝撃碎波圧が生じやすくなる可能性があることを示していると考えられ、規則波実験結果と一致する。

c) 砂マウンドの洗掘前後の波圧強度の変化

これまで実施してきた波圧実験はすべて固定床で行ってきており、換言すれば砂マウンド堤の施工直後に種々の波浪が作用したときの安定問題を検討しているということになる。長期的な見地から砂マウンド堤の安定問題を論じる場合、砂マウンド自体の洗掘に対する安定性は最も重要な検討課題であるが、併せて砂マウンド上の洗掘防止工前面などが掘られて部分的に砂マウンド形状が変化した場合の波圧に及ぼす影響も検討しておく必要があるものと考えられる。

図-7 は $h=24$ cm, $t=6$ cm は同一で前掲の表-2 に示す条件の断面において、各ケース $H_{1/3}=8.5$ cm, $T_{1/3}=1.3$ s の波を4時間作用させた場合のものである。洗掘状況では $\alpha=1/15$ の方が $1/50$ の場合よりも洗掘量は多く、またこの場合、洗掘防止工幅の短い(a)図がより洗掘防止工前面の掘れ方が大きい。現地の再現性については問題がある。今回の最大洗掘深を現地換算に直すと1~1.5m程度である。

これらの洗掘前後の波圧強度を比較すると、 $\bar{p}_{1/3}$ についてはほとんど変化がなかった。また、 $\bar{p}_{\max}$ は洗掘前の方が大きな値を示した。このような傾向は他の周期の場合もほぼ同様であったが、全般的にみると、この程度

の洗掘形状では波圧特性に特に際立った差異は示さないものと推察される。

d) 衝撃波圧発生の可能性の推定

以上の検討結果から、砂マウンド式混成堤には種々の条件によって強大な衝撃碎波圧が作用することが確認された。この衝撃碎波圧発生の可能性を判定する図表として図-8を作成した。これは縦軸に有義波高($H_{1/3}$)と捨石マウンド天端水深(d)の比、横軸に砂マウンド斜面長(l)と波長(L)の比という2つの無次元量を用いて、最大同時平均波圧強度係数($\bar{p}_{\max}/w_0 H_{\max}$)を適当なランクに分けてプロットしたものである。図中の破線および一点鎖線は同係数がそれぞれ1.5および2.0以上となる境界を示しており、これより上側領域の条件では衝撃碎波圧発生の可能性が高いものと推定される。

4. まとめと今後の課題

今回の砂マウンド式混成堤に関する一連の波圧実験が得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 砂マウンドが小規模で厚さが薄く斜面長が短い場合には、堤体に作用する波圧は砂マウンドを捨石マウンドの一部と考えて計算することが可能である。
- (2) 砂マウンド式混成堤においても捨石マウンド前肩幅を広げると通常の肩幅(根固方塊・被覆プロ

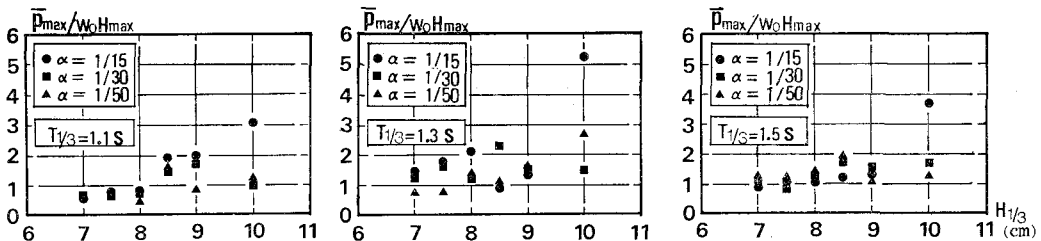


図-6 砂マウンド勾配と波圧強度 ($h=24$ cm, $t=6$ cm)

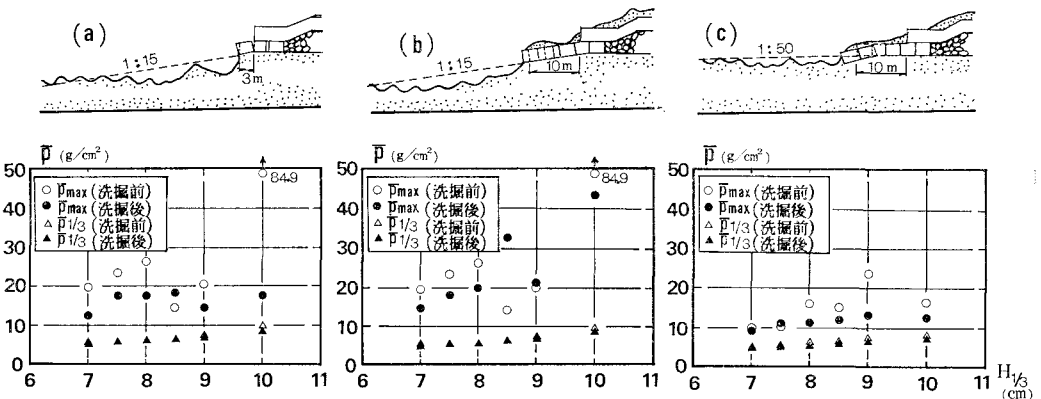


図-7 砂マウンド洗掘前後の波圧強度の変化 ($h=24$ cm, $t=6$ cm, $T_{1/3}=1.3$ s)

ック各2個並び)での波圧より非常に大きくなるので、捨石マウンド肩幅はできる限り小さくする方がよい。

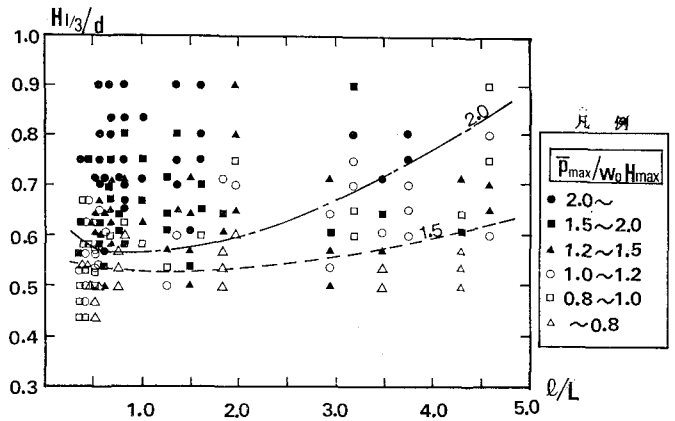
- (3) 砂マウンド勾配と衝撃碎波圧発生の関係は勾配の緩急のみでなく、種々の波浪条件に対して衝撃碎波圧発生の危険が高い適当な砂マウンドの勾配と斜面長が存在するようである。

- (4) 砂マウンド洗掘前後の波圧特性について検討を行った。今回の実験結果からは洗掘前後の波圧強度について大きな差異はみられなかった。

- (5) 有義波高 ($H_{1/3}$) と捨石マウンド天端水深 (d) および砂マウンド斜面長 (l) と有義波周期に対する波長 (L) の比の2つの無次元量を用いて、図—8より衝撃碎波圧発生の可能性を概ね推定できる。

- (6) 岩盤地帯で砂マウンドと類似な変断面形状を有している海域に通常の混成堤を設計する場合には同様な波圧特性を示す可能性が高いので、十分注意する必要がある。

衝撃波碎波圧が発生する際の波の変形過程を観察すると、先行する波が堤体によって重複波的に反射し、引き波の谷の程度がより大きくなるときに強大な波圧を引き



図—8 衝撃碎波圧発生の可能性

起こす壁のように切り立った巻き波が生じやすい。このため、反射波をできるだけ抑えることによって衝撃碎波圧を発生しづらくできるものと推察される。このようなことから、今後、洗掘防止および衝撃碎波圧発生抑止の両面から、親水性をも加味した低反射型堤体を用いた場合の効果について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司(1983): 直立壁に作用する衝撃碎波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 22巻, 4号, pp. 3~31.
谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄(1981): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力の発生と対策について, 港研報告, 20巻, 2号, pp. 3~39.