

低天端混成堤の諸特性について

中田 邦夫*・寺内 潔**・西田 仁志***・梅木 功****

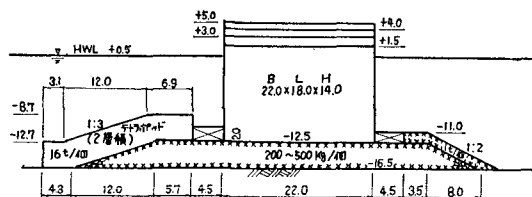
1. ま え が き

今日の防波堤は、建設地点の大水深化、地盤条件の悪化等に伴い建設費が増大しているとともに公共事業の抑制等のため、防波機能を発揮する延長の整備を図るには長い年月が必要な状況にある。この解消策の一つとして、低天端混成堤による暫定断面整備方式で早急に整備延長をかせぐ方策が考えられるが、現行設計法では通常天端の混成堤に比べると低天端混成堤の方が堤体巾が大きくなり不経済な断面となる傾向がある。しかしながら、低天端堤の安定実験は十分に実施されていなかった経緯もあり、今回より詳しく低天端混成堤の反射伝達及び滑動特性を調べるため二次元水理模型実験を行った。

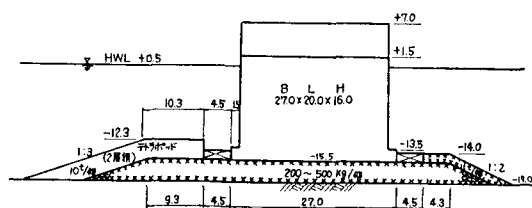
本報文は、上記の実験より得られた成果を報告するものである。

2. 実験条件及び実験方法

実験に使用した造波水路は、新潟調査設計事務所所有のもので、長さ 53m×幅 1.25m×高さ 1.5m の二次元水路である。実験は、低天端の範囲で高さを変えたケースと通常の高天端と低天端の比較を行うケースの 2 とおりを実施した。実験断面を 図-1 に示す。模型の縮尺は



ケース 1



ケース 2

図-1 実験断面

1:50 とし、フルード相似則による歪なしの二次元模型を用いた。なお、作用させた波はブレットシュナイダー型の不規則波であり、実験内容は 表-1 のとおりである。

3. 実験結果

(1) 反射波実験

実験結果を相対天端高と反射率で整理したものが 図-2 である。当然のことではあるが、相対天端高が高くなるに従い K_R は大きくなっており、相対天端高が 0.1~1.5 の範囲で 0.5~0.85 まで変化している。また、既応の実験結果と比較すると、データのバラツキはあるけれどもほぼ一致した値となっている。

(2) 伝達波実験

実験結果を相対天端高と伝達率で整理したものが 図-3 である。相対天端高が低い程伝達率は大きく、相対天端高が 0.1 のとき伝達率は 0.3 以上となっている。また合田らの行った規則波による実験で得られた報告¹⁾と比較すると、今回の方が全体に小さいが、実験はマウンドを不透過にした状態で行ったものであるため、マウンド

表-1 実験内容

実験 ケース	断 面 形 状				波 浪 条 件				潮 位 H.W.L.	前面 海底 勾配 i
	天端高	前面水深	マウンド水深	被覆天端水深	反射・伝達波		滑動・波圧			
	R (m)	h (m)	h' (m)	d (m)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)		
1	+1.5	-16.5	-12.5	-8.7	4.0	11.0	9.0	16.0	+0.5	1/100
	+3.0	〃	〃	〃					〃	
	+4.0	〃	〃	〃	9.0	16.0			〃	
	+5.0	〃	〃	〃	〃					
2	+1.5	-19.0	-15.5	-12.3	3.0	7.7	10.0	15.0	〃	1/50
					5.0	9.6			〃	
					7.0	11.4			〃	
	+7.0	〃	〃	〃	10.0	15.0			〃	

* 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所長

** 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所次長

*** 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所建設専門官

**** 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所工事専門官

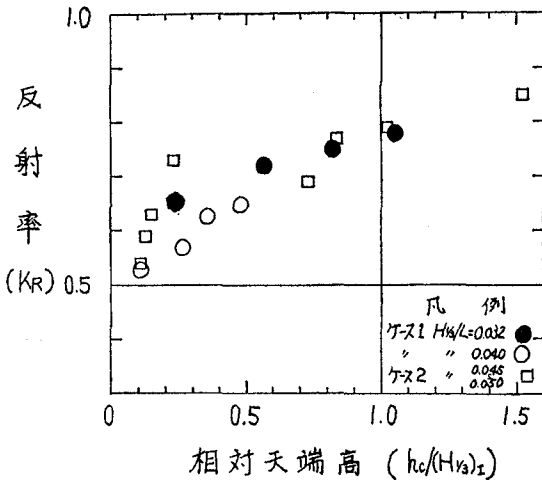


図-2 相対天端高と反射率

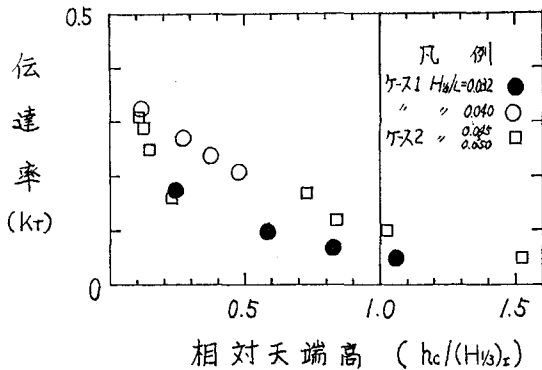


図-3 相対天端高と伝達率

ばほぼ一定となり 70~80% である。しかし、越波形態は天端高により異なり、天端が低い時は越流し流れ込むタイプであるが、高くなるに従い堤体前面で遡上し上部工に落下したり一部が港外側へ戻るタイプに変わる。このため、伝達率は越波率と無関係に減少している。

(3) 滑動実験

実験波を 10 分間作用させ、堤体重量と滑動量の関係を調べた。各断面の滑動状況は表-2 に示すように、2 ケースとも天端が高い程限界滑動重量は大きくなる。次に、滑動量と限界滑動重量との関係をケース 1 でみてみると、低天端 ($R=+1.5m$) では滑動量 0mm の時の限界滑動重量が滑動量 5mm の時のそれと比べて 1.18 倍であるが、 $R=+5.0m$ になると 1.46 倍必要である。ケース 2 でもほぼ同様な状況を示している。すなわち、天端が低い方が天端が高い時と比べると、限界滑動重量の増加量が小さくても滑動量を減少させる効果は大きく、わずかの重量の差が大きく滑動に影響を与えるといえる。ということは、滑動安全率を一率にとり現行設計をすれば、天端の低い時は設計断面の方が限界滑動重量よりも重いということになる。

(4) 波圧実験

波圧は、前壁 6 点、底板 3 点で実験波を 10 分間作用させて行った。更に、いくつかの断面で上部工及び後壁でも行った。

各波圧測定点の波圧データを台形近似させて求めた波圧合力に関して天端高の違いをみるためケース 1 について、各 10 分間の最大波圧合力の最大・最小及び平均値の関係を整理したものが図-4 である。前壁波圧合力は天端が低い程水面付近の波圧変動が大きいため波圧合力の最大と最小の差は大きい、天端が高くなるに従い小さくなる。また、波圧合力は、天端が高くなるに従い大きくなるが、その増加量は天端が低いときは大きく高くなるに従い小さくなる。合田式で求めた波力と比較すると、 $R=+1.5m$ の時はかなり小さくなっているがその他の場合はほぼ同様な値となっている。揚圧合力については、天端が高くなるに従い急激に大きくなる傾向

を示している。合田式と比較すると、実験値の方が 1.5~2 倍大きくなっている。これは、揚圧力が底板の港内側で 0、港外側と中央でほぼ同じ値の台形分布を示しているためである。けれども、港外側の波圧強度は計算値とほぼ同じ値を示している。

次に、ケース 2 の結果をもとに通常天端と低天端の波圧分布を比較したのが図-5 である。通常天端の場合、合田式の波圧分布と同じ形状を示しており、値そのものも同程度となってい

表-2 各断面の限界滑動重量

項目 R		堤体の限界滑動重量* (t/m)			限 界 滑 動 重 量 の 比		
		滑動量 5 mm の時**	滑動量 1 mm の時**	滑動量 0 mm の時**	滑動量/滑動量 1 mm / 5 mm	滑動量/滑動量 0 mm / 1 mm	滑動量/滑動量 0 mm / 5 mm
ケース							
1	+1.5	354.2	395.8	416.7	1.12	1.05	1.18
	+3.0	444.4	500.0	597.2	1.13	1.19	1.34
	+4.0	506.9	576.4	645.8	1.14	1.12	1.27
	+5.0	541.7	673.6	791.7	1.24	1.18	1.46
2	+1.5	368.8	425.0	468.8	1.15	1.10	1.27
	+7.5	656.3	856.3	968.8	1.30	1.13	1.48

* 水中重量

** 波を 10 分間作用させた時の移動量 (模型スケール)

透過率を考慮すれば、ほぼ同様な値が得られたものと推定される。

実験中の観察から越波率を求めてみた。越波率とは、堤体の前面を越える波を越波とみなして読み取った波数の入射した全波数に占める割合である。越波率は、相対天端高が高い程小さいが、相対天端高が 0.4 以下であ

る。低天端の場合には、波圧分布は似た形状であるが、値はかなり小さく 0.7~0.8 である。低天端の特徴として、静水面付近では越波することが多いため波圧強度の

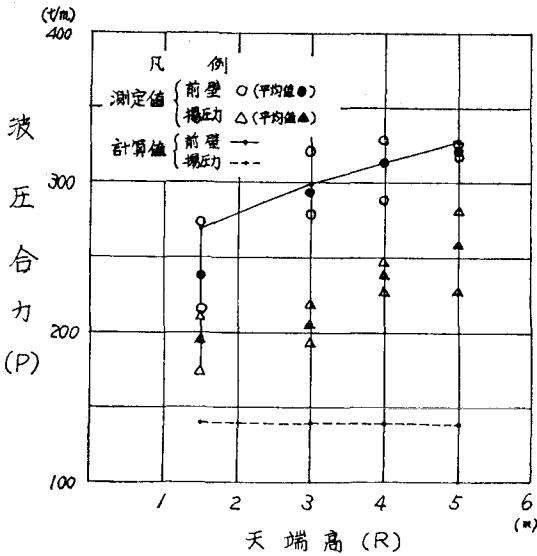


図-4 天端高と波圧合力 (ケース 1)

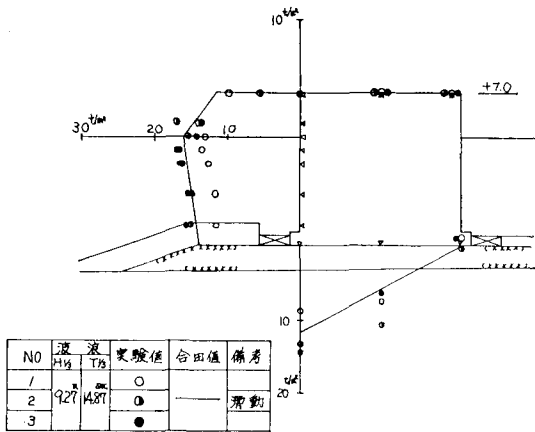


図-5 (1) 通常天端の波圧分布 (ケース 2)

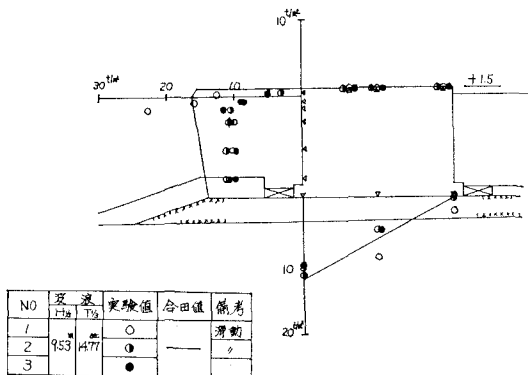


図-5 (2) 低天端の波圧分布 (ケース 2)

変動が大きい場合がある。また、通常天端と低天端の波圧を比較すると、波浪条件が同じで断面も天端高が違うだけだから静水面以下の波圧は同じとなるはずだが、低天端の方がかなり小さい。

低天端の場合、越波量が多いことが堤体の安定にどのように関係するかを調べるため、上部工及び後壁の波圧を測定したが、波圧が最大を示すのは前壁波圧合力及び揚圧合力がピークを示す時よりも遅く、ケース 1 の場合上部工では現地換算で 2 秒程度、後壁で 3 秒程度の位相差を示す。前壁波圧合力、揚圧合力が極大になるときについては、ほぼ上部工波圧、後壁波圧の合力は 0 であり越波による現象が堤体の安定特性に寄与する荷重増加を生じさせていない。また、滑動現象は前壁波圧合力、揚圧合力がピークのときに生じている。

(5) 低天端混成堤の安定特性

滑動実験から低天端混成堤の安定性は高いことがわかったが、それを確認するため、実験結果から求めた限界滑動重量と合田式で求めた波力を用い滑動安全率を 1.2 とした時の必要水中堤体重量を比較したものが 図-6 である。相対天端高が低い程 W_a'/W_a の比は小さく、高くなるに従い大きくなり一定の値に近付いている。相対天端高が 0.1 の場合、概そ 0.7 となる。また、この結果をみると、通常天端の場合、必要水中堤体重量 (滑動安全率 1.2) と対応する限界滑動重量は滑動量 1 mm の値と推定される。

このように、低天端混成堤の安定性が高いのは、作用する波力が合田式で求まる波力よりも小さいためであると思われる。波圧実験から得られた成果も同じことを示している。この理由としては、波圧合力が最大となるのは堤体前面で砕波した波が直立壁に当たったときであるが、天端が低い場合には、波が越流して背後に伝わることから直立壁で受け止めるエネルギーが小さくなり、そのた

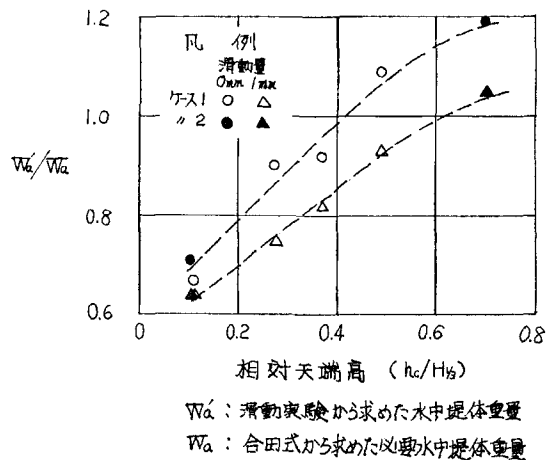


図-6 限界滑動重量 (滑動実験) と必要水中堤体重量 (設計式) の関係

め波圧が小さくなるのではないと思われる。

(6) 低天端混成堤に作用する波力

前項までで述べてきたように、低天端に作用する波力は通常天端の波力よりも小さいと推定される。そこで、低天端混成堤に作用する波力を、合田波圧に波圧低減係数 κ を乗じて求める方法を検討した。

$$\left. \begin{aligned} p' &= \kappa p, & P' &= \sum p' \\ p'_u &= \kappa p_u, & P'_u &= \sum p'_u \\ p', p'_u &: \text{低天端に作用する波圧, 揚圧} \\ p, p_u &: \text{合田波圧, 揚圧} \\ P', P'_u &: \text{低天端に作用する波力, 揚圧力} \\ \kappa &: \text{波圧低減係数} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

2 ケースの断面及び波浪諸元と滑動実験から得られた限界滑動重量をもとにして、(1) 式の κ を求めた。求め方は、実験断面、実験波から合田式により作用する波力を計算する。次に滑動実験から得られた限界滑動重量、摩擦係数と合田波力及び以下に示す滑動安全率を滑動計算式に代入して κ を逆算した。滑動量 0mm の限界滑動重量に対応する滑動安全率を 1.1 とし、滑動量 1mm の場合のそれを 1.0 とした。この滑動量と滑動安全率の関係を決めた理由は次のとおりである。通常天端の場合には、滑動量 1mm の限界滑動重量が滑動安全率 1.2 に対応するけれども、低天端の場合には、重量のわずかな変化が滑動量に大きく効くことから、安全側に設定した。その結果を相対天端高と関係づけたものが 図-7 である。

図をみると、 κ は相対天端高が低いときには相対天端高と直線関係にあることがわかる。また、波圧を低減できるのは、相対天端高が 0.35 より低い範囲といえる。波圧低減係数 κ と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ の関係を表わすと (2) 式のようになる。

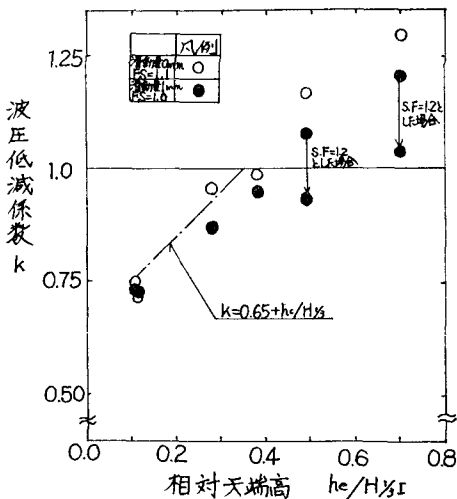


図-7 波圧低減係数と相対天端高の関係

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= 0.65 + h_c/H_{1/3} \\ 0.1 \leq h_c/H_{1/3} &< 0.35 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

低天端混成堤の断面は、合田波圧にこの波圧低減係数を乗じて波力を算出し、安定計算を行うことによって設計できる。

4. 考 察

今回の実験により、天端が低い場合には波圧が減少するという成果が得られた。このような結果に対し、既応の研究成果を調べてみた。伊藤・藤島・木谷²⁾は、天端が低い時の波圧を重複波領域の規則波を作用させ調べた結果、天端高の違いが波圧に与える影響はあまりないと述べられている。また、合田、福森³⁾は、規則波による実験結果から越波と波圧の関係について、「越波による波圧の変化は、複雑であり、波の条件によってあるときは減少し、あるときは増大する。しかし、その変化は10~20%の程度であり、実用上は越波による波圧の変化を無視するのが妥当であると考えられる。」と述べられている。しかし、この実験における相対天端高は低天端としては比較的高いケースで行われたものである。けれども、この報告のなかで、入射波が部分砕波から砕波にいたる領域では、波圧が減少したと述べられている。

これから考えると、低天端混成堤の波力を減少できるのは、砕波領域であり水深波長比も今回の実験条件である0.1前後のときに限定すべきであろう。

5. 結 論

(1) 反 射 率

天端の低い方が、当然のことではあるが越波が多いことにより反射は小さい。相対天端高が0.5以下では0.5~0.7である。

(2) 伝 達 率

伝達率が大きいことが低天端の弱点であり、特に越流形態となる場合には、背後に生じる流れの大きさ及び影響範囲が問題となるが、この点については今後検討をしていく必要がある。

(3) 限界滑動重量

滑動実験から求まる限界滑動重量は、天端が低い程急激に小さくなる傾向にあり、低天端は通常天端のものと比べると安定性が高いといえる。相対天端高が0.1であれば、現行設計重量より3割程度重量を減じることができる。

(4) 波 圧 実 験

波浪条件、前面水深等の条件が同じでありながら、波圧分布は低天端の方が通常天端より小さく、そのため、堤体に受ける波圧合力は小さくなっている。

(5) 低天端混成堤の安定特性と作用波力

低天端混成堤は、現行の設計方法から求まる必要堤体

重量を減じた重量でも安定であることがわかった。これは、相対天端高が低い場合には作用する波力が低減されるためと推定される。そこで、相対天端高をパラメータとする波圧低減係数 K を求めて、合田式を用いて波力を算定する手法を提案した。しかし、低天端混成堤の波力が低減する理由は不明な点が多く、今後更に検討を進める必要がある。

6. おわりに

本実験の結果、低天端混成堤の場合には現行の設計法で決められる断面より小さな断面とすることができ、経済的な断面であることがわかった。しかし、現地での採用にあたって単位長さ当りの防波機能は減少することか

ら、暫定断面としての低天端の特性を把握したうえで設置条件、更には機能増加を図るための改良方法について事前に充分検討をしておく必要がある。

本報告を終えるに当たり、この実験の実施に関係された各位の労に感謝を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Goda, Y.: Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. PHRI, Vol. 8, No. pp. 3~18, 1969.
- 2) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄: 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 5, No. 14, 1966.
- 3) 合田良実・福森利夫: 直立壁および混成堤直立部に動く波圧に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 2, pp. 3~45, 1972.