

広天端幅潜堤の越波低減効果に関する不規則波実験

高山 知司*・池田直太**・永井紀彦***・高山 優****

1. ま え が き

高波の来襲による災害を防止するためには、海岸汀線付近に天端の高い護岸や堤防を築くことが最も経済的で、早期対応できる防災対策である。しかし、近年においては、海浜をレクリエーションの場として認識し、海岸環境を悪化させることのない防災対策施設の建設が要望されるようになってきた。このような状況の下に新たに考え出されたのが、面的防護方式である。面的防護方式とは、複数の施設を空間的な広がりを持って配置し、各施設の機能を有効的に発揮させることによって総合的な防災施設として、高潮、高波、海岸浸食等の災害から人命や財産を防護するとともに、海岸空間の面的な利用の促進、環境の保全を図る方式である。

面的防護方式の一形態として、潜堤による防護方式がある。潜堤は離岸堤の一形態であるが、通常の離岸堤と異なり、常時水面下に没していることをその特徴としている。そのため、景観を損なう恐れがなく、海水交換もよく、海岸環境の保全上有効な施設である。また、潜堤は、離岸堤と異なり、波高の低い波はそのまま通過させ、波高が高くなると、その天端上で波を砕波させ、波高を減少させるといったように伝達波高の選択効果を有

しており、防災上有効な施設であると考えられる。このような潜堤の選択的波浪減殺効果に着目して、伝達波高に関する研究が過去にいくつか行われてきた^{1),2),3)}が、潜堤の建設事例は非常に少ない。海岸空間の有効利用および景観や海岸環境の保全が叫ばれるようになった今日においては、潜堤の有効性が再度見直される時代にきている。

そこで、本研究においては、潜堤による越波防止効果について実験的な検討を行った。本研究では、潜堤の天端幅が狭いと潜堤通過後に砕波し、背後の海底地形を大きく変化させるとともに、潜堤背後の堤脚部を洗掘させる恐れがあるので、潜堤の天端幅を広くとり、潜堤上で波が砕波するようにした。

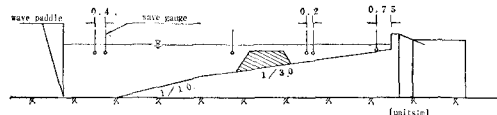
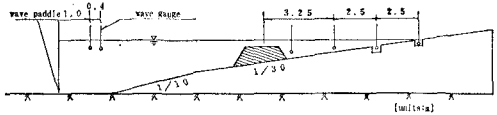
2. 実験条件および実験方法

(1) 実験装置と潜堤模型

実験は、長さ 30 m、幅 5 m、深さ 1.5 m の水路を仕切壁によって、幅 0.6 m と 4.3 m の 2 つに分けた水路のうち幅 0.6 m の小水路を用いた。本水路には、幅 5 m の造波板を有する不規則波造波装置が設置してある。

模型床は木製で、全面を 1/30 一様斜面とすると、斜面長が非常に長くなるため、水路床から 35 cm の高さまでの斜面端部は 1/10 勾配斜面とした。波高計は図一 1 に示すように配置した。図一 1 (a) は潜堤による波浪変化を調べる場合、図一 1 (b) は越波実験を行っている場合の配置を示している。

潜堤模型は 480 g のテトラポット模型の 3 属積みとした。潜堤の天端幅は、広天端幅とし、30、60 および 90 cm の 3 種類に変化させた。ただし、潜堤天端高は 17.5 cm と一定に保ち、天端水深を変えるときは、水位を上昇させた。



図一 1 模型断面と波高計の配置

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室
*** 正会員 運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所次長
**** 運輸省第四港湾建設局 別府港工事事務所 工事課

表一 1 実験不規則波の目標諸元

波	H_0 (cm)	T_0 (sec)	H_0/L_0
1	10	2.31	0.012
2	10	1.33	0.036
3	15	1.63	0.036

(2) 実験波の条件

実験波としては、波形勾配が0.012程度のうねり性の波と0.036程度の風波を用い、目標沖波の諸元を表-1に示す。各波について異なる2種類の波群の波を発生させ、実験結果は2種類の波群に対する平均値で示した。

不規則波としては、Bretschneider-光易型の周波数スペクトル波を発生させることを目標にした。造波信号は造波機の運動応答特性および造波効率を考慮して、成分波重ね合わせ法によって求めた。

3. 潜堤背後の波浪および平均水位の変化の概要

(1) 潜堤背後の波高と平均水位上昇量の変化

潜堤背後の波高変化については、既に、著者等⁴⁾が発表しているが、後述する越波と密接な関連があるため、ここでその概要を述べる。

図-2は、潜堤背後の有義波高の変化と平均水位の上昇量を天端幅60cmに関して示した図である。図中の実線は、合田⁵⁾によって提案された一様斜面における碎波変形の算定法を本実験条件に適用して計算した線である。この図に示すように、潜堤天端上へ乗り上げた波は、潜堤の天端水深が浅いため、碎波して急激に波高を減少させる。潜堤背後では、伝播に伴って水深が浅くなっても、ほぼ碎波後の波高をそのまま保ちながら伝播してゆくが、その波高が一様斜面の碎波変形曲線に近づいた地点からは再び碎波し始めて、波高が減少する。波高の減少は碎波変形曲線にほぼ沿って減少し、再碎波後の波高変化は潜堤がない状態での波高変化にほぼ等しい。天端上での碎波による波高変化は、天端水深が浅いほど大きく、天端水深 h_{RT} が $h_{RT}/H_0=1.0$ では沖波の0.7倍程度まで下がる。他の実験結果との比較では、潜堤の天端幅が広いほど波高減衰は大きくなっている。

また、平均水位の上昇量は、天端上で波が碎波したときに急激に上昇し、潜堤背後では再碎波し始めるまでは平均水位の上昇量はほとんど変化しない。碎波し始める

と、水位は少しずつ上昇し始める。潜堤天端水深が浅く、波高が大きく減少する場合、再碎波は非常に水深の浅い地点からでないと起こらないため、再碎波による平均水位の上昇量は少ない。

以上の一般的特性を踏まえて、波高変化に対する潜堤の効果として、潜堤がない場合の各地点の波高に対する潜堤がある場合の波高比 K_H について検討した結果では、 K_H は潜堤の天端水深と沖波波高の比、潜堤天端幅と波長との比および波形勾配に強い影響を受け、次のような関係になることが分かった。

$$K_H = -0.92(B/L_0) + 0.42(h_{RT}/H_0) + 3.8(H_0/L_0) + 0.51 \quad (1)$$

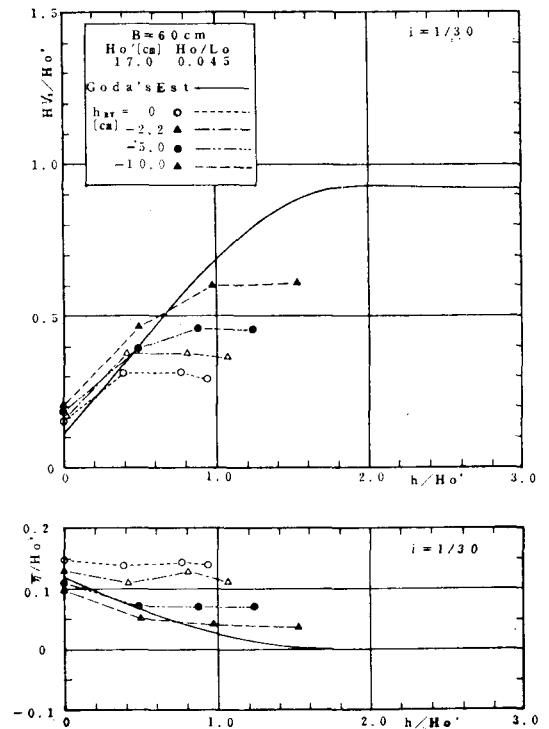


図-2 潜堤背後の波高変化と平均水位の上昇量

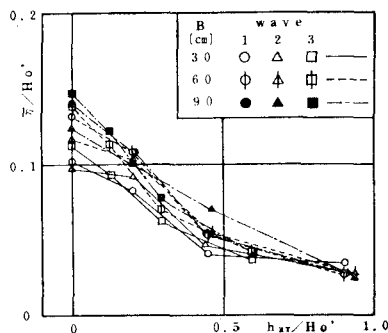


図-3 潜堤天端水深による平均水位上昇量の変化

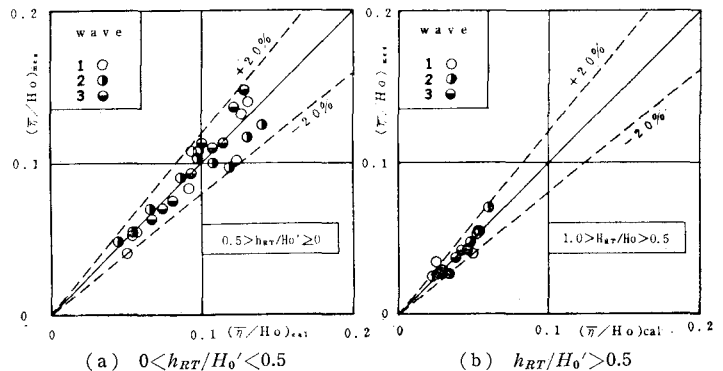


図-4 平均水位上昇量の推定値と実験値の比較

式(1)の適用範囲は碎波によって波高が大きく減衰する $h_{RT}/H_0' < 1.0$ の場合である。また、一般に、波は波形勾配が小さいほど、透過し易くなるが、式(1)では逆になって表れている。この理由として、波形勾配が小さいと、浅水変形で波高が大きくなり易く、天端上での碎波によって波高が減少すると、 K_H の比が必然的に小さくなることによっている。

(2) 平均水位上昇量の推定

図-3は、平均水位の上昇量について、 $\bar{\eta}/H_0$ と h_{RT}/H_0' の関係を調べたものである。この図からわかるように、平均水位の上昇量は、潜堤の天端水深が浅いほど、大きくなる。また、 $h_{RT}/H_0' > 0.5$ では、平均水位の上昇量は小さく、 $h_{RT}/H_0' < 0.5$ になると、急激に大きくなる。これは、図-2の平均水位の上昇量において、一様勾配に関する合田⁵⁾の算定式で求めた実線が示すように、 h/H_0' が小さくなるにつれて、平均水位の上昇量の増加率が増大する傾向によく類似している。平均水位の上昇量は、 h_{RT}/H_0' によって連続的に変化すると考えられるが、図-3を参考にして、 $h_{RT}/H_0' = 0.5$ 付近を境にして、異なる直線で近似することにした。また、平均水位の上昇量は、 B/L_0 および H_0'/L_0 にも関係するため、 h_{RT}/H_0' 、 B/L_0 、 H_0'/L_0 に対して線形的な関係にあると仮定して、最小自乗法で、各要素に対する係数を決定した。その結果、以下ようになった。

$$\bar{\eta}/H_0' = \begin{cases} 0.085(B/L_0) + 0.16(h_{RT}/H_0') \\ \quad - 0.38(H_0'/L_0) + 0.125 : \\ \quad \quad \quad 0 < h_{RT}/H_0' < 0.5 \\ 0.048(B/L_0) + 0.056(h_{RT}/H_0') \\ \quad - 0.21(H_0'/L_0) + 0.076 : \\ \quad \quad \quad h_{RT}/H_0' > 0.5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式の推定精度を調べるために、式(2)で求められる平均水位の上昇量と実験で求めたものとを比較した。その結果が図-4(a),(b)に示してある。

図-4で示すように、式(2)で推定した平均水位の上昇量の周りに実験値はばらついてはいるが、実験値は式(2)による推定値の $\pm 20\%$ の範囲にはほとんどが含まれており、この程度の誤差を許容するならば式(2)で実用上十分に平均水位の上昇量を推定することができると考えた。

(3) 潜堤背後の長周期水位変動

潜堤は、その天端上で波を碎波させ、波高を減少させる効果があり、潜堤背後の海底地形の大きな変動を抑えるのにも有効に働くと考えられる。田中²⁾は、潜堤背後の地形変動に関して規則波による実験を行い、短周期波に対しては、潜堤の砂浜安定効果は大きい、長周期の波に対しては、相当天端幅が広くないとその効果が現れ

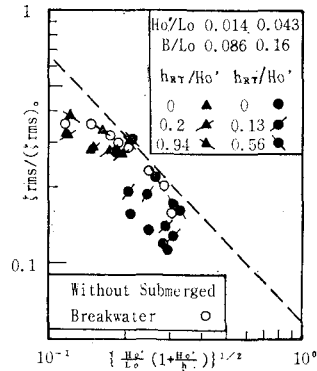


図-5 長周期波の変動量

ないと述べている。この実験結果は、潜堤背後の海底地形変動には、潜堤による単に波高減衰の効果だけではなく、波形勾配に係わる現象が大きく影響していることを示している。そこで、波形勾配に関係するものとして、潜堤背後の長周期波の特性を調べた。

図-5は、潜堤直背後における長周期波の水位変動の自乗平均 ζ_{rms} の変化を示したものである。長周期波としては、沖波有義波周期の概ね2.3倍より長い周期の波としている。図-4縦軸の $(\zeta_{rms})_0$ は、沖波の水位変動の自乗平均値である。また、横軸は合田⁵⁾がサーフボートの解析に用いたものを採用している。図中の破線は、1/30一様勾配斜面での実験において、合田が求めた次の関係式を示したものである。

$$\zeta_{rms}/(\zeta_{rms})_0 = 0.068/\sqrt{(H_0'/L_0)(1+h/H_0')} \quad \dots (3)$$

ここに H_0' は換算沖波波高、 L_0 は沖波波長、 h は測点での静水深である。潜堤がない場合の実験値が白丸で示してある。潜堤がない場合の長周期波の ζ_{rms} は、破線の式(3)より少し小さいが、その減少は破線に沿っている。潜堤を設置すると、天端水深が浅い $h_{RT}/H_0' < 0.2$ では、長周期の変動量は潜堤がない場合に比して小さくなる。特に、波形勾配の大きい $H_0'/L_0 = 0.042$ の場合には、特に長周期変動量が小さくなる。たとえば $h_{RT}/H_0' = 0$ の場合、 $H_0'/L_0 = 0.042$ では、潜堤がない場合の約1/2になるのに対し、 $H_0'/L_0 = 0.013$ では1/1.1程度である。長周期変動量の変化は、潜堤がある場合でも式(3)にはほぼ平行になっており、式(3)の係数0.068を h_{RT}/H_0' の値毎に変化させることによって表すことができそうである。 h_{RT}/H_0' が大きくなると、 $\zeta_{rms}/(\zeta_{rms})_0$ の値は、潜堤がない場合に近づき、 $h_{RT}/H_0' > 0.5$ ではほぼ潜堤がない場合に一致する。以上のように、潜堤を設置することによって、長周期の変動量が増大されることはなく、かえって小さくなる。

田中の実験で潜堤背後の海浜が風浪の場合に安定したのは、潜堤によって長周期水位変動量が抑えられたため

であり、長周期の波で海浜があまり安定しなかったのは、波形勾配が小さい場合には潜堤によっても長周期変量動があまり小さくならないためではないかと推測される。

4. 潜堤による護岸越波量の低減効果

(1) 潜堤による越波量の変化

図-6(a)と(b)は、護岸天端高による無次元越波量の変化を示したものである。図中の白丸は潜堤を設置しない場合、黒丸は潜堤を設置した場合の越波量の変化を示している。両図ともに、潜堤天端水深 h_{RT} が 5 cm

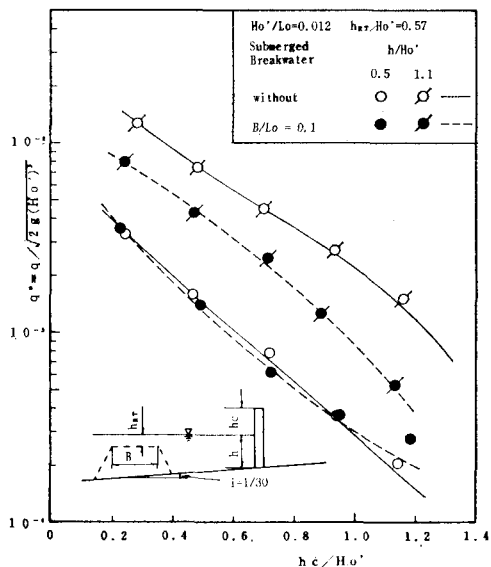
の場合であるが、図-6(a)は $H_0'=10.5$ cm, $T_0=2.2$ s の波 1 で、波形勾配が小さい場合、図-6(b)は $H_0'=16$ cm, $T_0=1.56$ s で、波形勾配が 0.042 と大きい波 3 の場合である。

両図ともに、護岸天端高が高くなればなるほど越波流量は低減している。潜堤の有無による越波流量の変化は、護岸の設置水深によって大きく異なる。護岸水深が浅い、 $h/H_0' < 0.5$ の場合には、潜堤の有無によって護岸越波流量はほとんど変わらないのに対して、 $h/H_0' > 0.8$ では、潜堤を設置すると、越波流量が潜堤がない場合の半分以下に低減している。特に、護岸の相対天端高が高くなると潜堤の越波流量低減効果が大きくなる。このような越波流量の変化は、前述の潜堤による波高の変化から次のように説明できる。潜堤背後の水深が深い部分には、天端上で碎波して波高が低下した波がそのまま進入してくるので、越波は減少するが、水深が浅くなって再碎波し始めると、波高は潜堤がない場合とあまり変わらないので、越波量は潜堤の有無によって変化しなくなる。ただし、潜堤によって急激に平均水位が上昇するので、波高の変化からだけでは単純に推定できない。つまり、波高と平均水位の上昇量の変化に対する越波量への相対的影響度に支配されるものと考えられる。

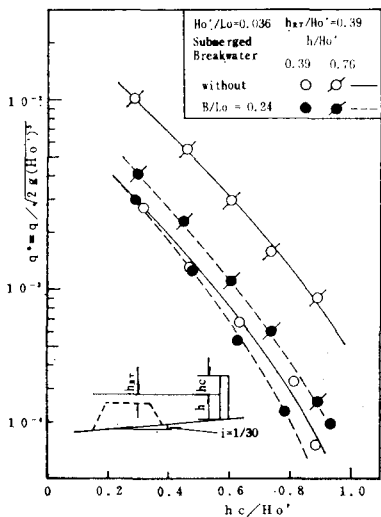
(2) 潜堤による護岸天端高の低減効果

(1)で述べた越波流量の変化の特性を考慮して、潜堤直背後の伝達波高に対する護岸設置水深との比を横軸にとって、同一越波量に対して、潜堤がある場合とない場合の護岸天端高の比 β (換算天端高係数) の変化を示したのが、図-7 である。図中の破線は、平均的な変化曲線として目安のために入れたものである。

この図でわかるように、 β は h/H_{RT} が小さい場所では $\beta \approx 1.0$ で、 h/H_{RT} が大きくなると β は小さくなり、 $h/H_{RT} > 1.5$ では β はほぼ一定値の 0.7 程度の値となる。このことから、護岸の設置水深が伝達波高に比して浅い場合には、潜堤による越波量の低減効果はほとんど期待できない。越波量を低減することを第一目的として潜堤を設置する場合には、護岸水深が伝達波高の 1.5 倍以上あることが必要となる。



(a) 波 1



(b) 波 3

図-6 護岸越波量の変化

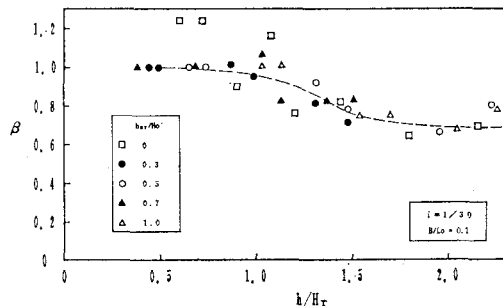


図-7 護岸設置水深に対する換算天端高係数の変化

(3) 潜堤を設置した場合の護岸越波量の推定法

以上の検討結果に基づいて、潜堤を設置した場合の護岸越波流量を次のような順序で推定することを考えた。

- ①式(1)によって、潜堤直背後の波高 H_T 算定する。
- ②式(2)によって、潜堤による平均水位の上昇量 $\bar{\eta}$ を算定する。
- ③潜堤背後の水位が $\bar{\eta}$ 上昇したとして、 $h+\bar{\eta}$ での水深における浅水係数 K_s を求め、 H_T/K_s で潜堤透過後の波高の換算沖波波高 ($=H_{T0}'$) を求める。
- ④護岸設置水深は静水深に水位上昇量を加えて、 $h+\bar{\eta}$ と置き、また、護岸天端高は、 $h_c-\bar{\eta}$ とする。
- ⑤ H_{T0}' 、 $h+\bar{\eta}$ 、 $h_c-\bar{\eta}$ および H_{T0}'/L_0 を用いて護岸越波流量を求め、これを潜堤を設置したときの護岸越波流量とする。本報告では、合田⁶⁾の越波流量図を参照して、著者等⁷⁾が求めた護岸越波量算定式を用いて、越波流量を推定している。

①～⑤の方法で求めた護岸越波流量を H_0' で無次元化して示した q^{*cal} と実験から求めた無次元越波流量 q^{*mes} との比較を行ったのが図-8 である。この図でわかるように、越波流量が大きいと両者はよく一致するが、越波流量が小さいと、計算値が小さくなる傾向がある。そこで、 q^{*cal} と q^{*mes} の平均的な関係を求めると、

$$q^{*mes} = 0.30(q^{*cal})^{0.81} \dots\dots\dots (4)$$

となった。越波流量が小さいと、実験値は式(4)のまわりに大きくばらつく。一般に、越波実験では越波流量が小さくなると、1回1回測定した越波量は大きく変動

することは避けられない。そこで、潜堤による越波量の算定に当たっては、①～⑤で示した方法で q^{*cal} を求め、式(4)で越波量を補正し、これに図-6で示す越波流量の変動性を考慮して護岸天端高の設計に用いる越波量を求める。

5. あとがき

潜堤を設置したときの潜堤背後の波高および平均水位の上昇量、長周期波変動について、それらの特性を調べるとともに、潜堤を設置したときの護岸越波流量の変化特性を調べた。これによると護岸の設置水深が浅いと、潜堤の越波流量低減効果は小さく、潜堤によって越波を低減するためには、護岸水深が比較的深くなければならないことがわかった。これらの結果を基にして、潜堤を設置したときの越波量推定法を提示した。

潜堤は、越波に限られた問題ではなく、背後の海浜の安定にも有効に働くと考えられるので、今後は、海浜の安定の面からの詳細な検討が必要である。また、潜堤の建設においては、被覆材の重量に対する検討も今後は重要となる。

本研究の実験およびデータ解析に当たっては、元波浪研究室員、関口忠志技官に多大なる協力を得たことを記して、感謝を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・白石英彦・佐々木泰男：潜堤による消波について、第13回海岸工学講演会講演集，pp. 76～79, 1966.
- 2) 田中則男：天端幅の広い潜堤の波浪低減および砂浜安定効果について、第23回海岸工学講演会論文集，pp. 152～157, 1976.
- 3) 永井莊七郎・倉田克彦・長谷川恵一：潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 303～307, 1977.
- 4) 高山知司・永井紀彦・関口忠志：広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 545～549, 1985.
- 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.
- 6) 合田良実・岸良安治・神山 豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，pp. 3～44, 1975.
- 7) 高山知司・永井紀彦・西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，pp. 151～205, 1982.

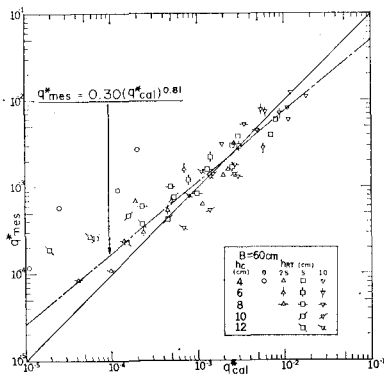


図-8 潜堤設置による護岸越波量の推定値と実験値の比較