

2 重堤の水理特性について

笹島隆彦*・山中浩次**・木村克俊**
水野雄三***・菊地聡一**

1. ま え が き

従来の防波堤形式は、静穏度確保が主目的である現状においてはその役割を十分果たしている。しかし一面では、港内閉塞による水質悪化や高天端化による利便性の低下などにみられるように、一般市民のための快適な水辺空間の創出あるいは水産業との積極的な協調といった港湾に対して高まりを見せる新たな要請に対応し切れない状況にある。

本研究の対象としている2重堤は、沿岸整備などに用いられている離岸堤・潜堤形式の面的防御の考え方を防波堤に応用したものである。図-1のように消波工と本体工を分離したことで段階的な施工および波浪制御が可能となり構造物の安定性の向上が見込まれる(佐伯ら, 1980)他、静穏度を保ちながら本体工の低天端化を図る(山本ら, 1984)など多様な目的を同時に満足する設計も可能となる。さらに、構造上、消波工と本体工の間に海水交換の盛んな準静穏海域があり、通常波浪時には海洋レクリエーションの場として、水産生物の生息地、増殖の場として期待されるなど、2重堤は静穏度確保だけで

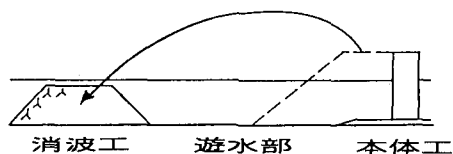


図-1 2重堤概念図

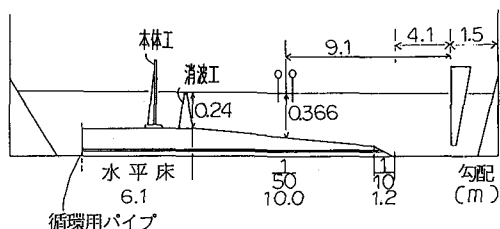


図-2 実験水路

なく多様な要請に同時に応え得る構造形式であり、その設計手法の確立が望まれている。

本論文は、2重堤の水理特性を2次元模型実験より明らかにするとともに、2重堤の設計手法に関して、越波特性の観点からの検討を加えるものである。

2. 実験概要

(1) 実験装置

実験は、図-2に示した2次元断面水路において行った。模型床勾配は消波工前まで1/50、消波工後は水平床とした。消波工と本体工に挟まれた遊水部の水位変動は遊水部長に応じて1~4箇所計測した。越波流量は、越波水を本体工天端中央に設置した10cm幅の樋により集水升にとりこみ計測した。

(2) 実験・解析方法

実験は不規則波を用いた。そして、2重堤の構造条件として、消波工天端高、消波工天端幅、遊水部長を種々変え、それぞれのケースについて本体工天端高を6段階に変化させ越波量を計測し、図-3に示すとおり本体工天端高と越波流量との関係図をケース毎に作成した。縦軸は無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ (以下、 K_q という)、横軸は本体工天端高を換算沖波波高で割って無次元化した h_c/H_0 である。また、この図を基に越波流量を $K_q=10^{-3}$ に抑制するのに必要な h_c/H_0 (以下、所要天端高という) を求め、その変化を調べることで構造条件による越波規模の違いを検討した。同時に反射率、遊水部への伝達波高の検討も行った。

(3) 実験条件

実験縮尺は1/50とした。実験波条件は表-1に示す。

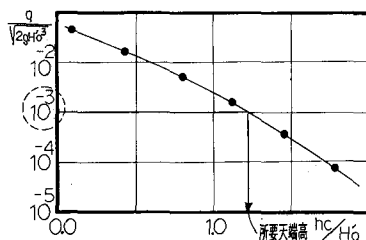


図-3 所要天端高算出図

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室 副室長
** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室
*** 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室 室長

表-1 実験波条件

	周期 $T_{1/3}$ (s)	入射波高 $H_{1/3}$ (cm)
A	1.84	13
B	2.12	13
C	2.40	13

計測は造波後 45 秒より開始し、約 100 波 (ND=2048 個) 行った。目標スペクトルはブレッドシュナイダー・光易型とした。実験は以下の 5 項目について行った。

a) 消波工の天端高及び本体工との距離 消波工は 550 g の異形ブロックを使用し、天端高を $h_{rc} = -6, -3, 0, 3, 8$ cm の 5 段階、遊水部長を $l = 168, 224, 280, 336, 392$ cm の 5 段階に変化させた。2 重堤設置水深 $h = 24$ cm, 消波工天端幅 $B_r = 21$ cm, 実験波は A 波を用いた。

b) 消波工の天端幅 消波工天端幅を $B_r = 21, 42, 63$ cm の 3 段階に変化させた。 $h = 24$ cm, $h_{rc} = -3$ cm, $l = 280$ cm で実験波は A 波を用いた。

c) 実験波周期 $T = 1.84, 2.12, 2.4$ s の 3 種類, $l = 168, 224, 280, 336, 392$ cm の 5 段階に変化させた。 $h = 24$ cm, $h_{rc} = 0$ cm, $B_r = 21$ cm で実験を行った。

d) 消波工透水率 透水率は不透壁の有無で 2 段階に変化させた。不透壁は消波工の中央に設置し、壁高は消波工が潜堤形式の場合は消波工天端面まで、消波工天端面が水面上に出る場合は静水面までとした。 $h = 24$ cm, $h_{rc} = -6, -3, 0, 3, 8$ cm, $B_r = 21$ cm, $l = 280$ cm, 実験波は A 波を用いた。

e) 他形式との比較 2 重堤の特性を明らかにするために消波ブロック被覆堤、混成堤についても所要天端高を求めた。消波ブロック被覆堤の被覆幅は天端 2 個並び (14 cm), 勾配 1:1.5 とした。また、消波工単独の水理特性についても検討した。 $h = 24$ cm, $h_{rc} = -6, -3, 0, 3, 8$ cm, $B_r = 21$ cm, 実験波は A, B, C 波を用いた。

3. 実験結果と考察

(1) 伝 達 波

図-4 は 2 重堤、潜堤の消波工背後部への伝達波高及び周期を示したものである。波高は合田の入射分離法により求めた。潜堤に比べ波高、周期とも小さくなっている。図-5 は消波工背後部の水位上昇量を示したものであるが、潜堤との大きな差はみられない。これから 2 重堤の伝達波高が小さくなっているのは本体工の反射波との干渉によるものと推察される。

また、2 重堤は遊水部の平均水位が上昇することを利用して海水交換を行うことが期待されるが、本体工の開口率 100 % と想定できる潜堤のみのケースでも図-4 程度の伝達波増大に抑えられることからこれによる越波特

性への影響は小さいものとする。

図-6 は堰越えの式 (樺ら, 1978) を導入し本体工での越波を考慮した不規則波非定常緩勾配方程式 (渡辺ら, 1984) より計算した遊水部の水位変動を実験値との比で表したものである。 h_c による変動が実験値より大きいのが遊水部長が大きくなるにつれ実験値に近づく。消波工天端水深が 0 になると非定常緩勾配方程式では計算ができなくなるので今後は長波の遡上の式などを用いた検討が必要となつてこよう。

(2) 反 射 率

図-7 は 2 重堤、潜堤の反射率を示したものである。潜堤は h_{rc} が大きくなるにつれ消波性能が上がる反面、反射率は大きくなる。一方、2 重堤では本体工での反射の影響から h_{rc} が小さいときに反射率が大きくなる。遊水部長による差異もみられ、これは遊水部への伝達波高と同様の傾向を示している。 h_{rc} が大きくなり本体工での反射波の影響が沖に及ばなくなるにつれ潜堤と同等の値となる。図-8 は周期の影響を見たもので、 $h_{rc} = 0$ cm のデータを横軸に波形勾配をとって整理した。2 重堤の反

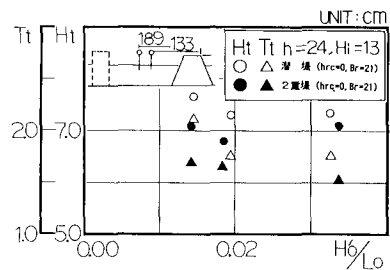


図-4 伝達波高および周期

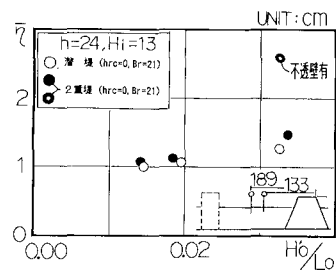


図-5 遊水部の平均水位

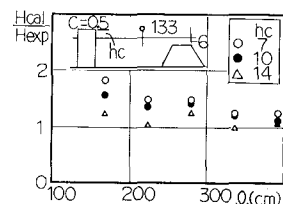


図-6 数値計算の整合度

射率は遊水部長による変化が小さかったので $l=168\sim392$ cm の平均値を示した。潜堤の反射率は消波工高水深比 h_s/h により変化し周期にはよらない。2重堤の反射率は潜堤より大きいが潜堤と同様に周期によらない。消波ブロック被覆堤が長周期側で消波性能が低下しているのと比べ広範囲の周期に対して有効である。

(3) 2重堤の越波特性

図-9 は2重堤の越波特性を直立堤及び消波ブロック被覆堤と比較したものである。2重堤のデータは $h=24$ cm, $h_{rc}=-6$ cm, $B_r=21$ cm, A波, $l/L=1.2$ のもので、直立堤及び消波ブロック被覆堤は合田 (1975) の越波図表より読みとった。図に示すように消波ブロック被覆堤に比べ $K_q \leq 10^{-4}$ の領域の小規模越波に対する抑制性能が劣っている。消波ブロック被覆堤はブロックにより波

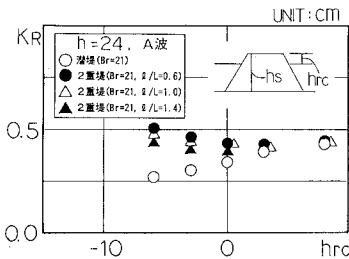


図-7 反射率 (消波工天端水深の影響)

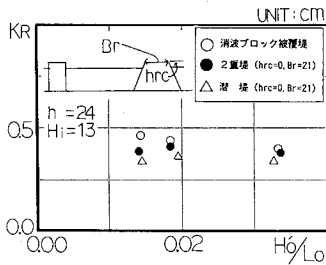


図-8 反射率 (周期の影響)

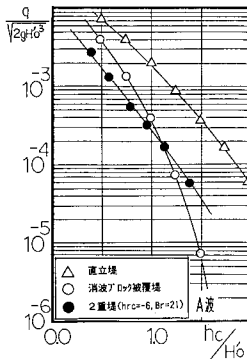


図-9 2重堤の越波特性

当たりを弱めるとともに波の這い上がりを抑える効果もあるため直立堤に比べて天端高が大きくなったときの越波流量の減少が著しい。2重堤の消波工の規模を大きくすれば越波規模を消波ブロック被覆堤よりも小さく抑えられるが、本土工に直立堤を用いている今回の2重堤の形状では小規模越波に対する抑制性能に劣るものと考えられる。小規模越波に対応するためには直立消波等を本土工に用いた形式の検討もしていく必要がある。

(4) 所要天端高の変化

a) 遊水部長の影響 図-10 は2重堤の遊水部長の影響をみたものである。この図から $l/L < 1$ では遊水部長が広がるにつれて所要天端高が小さくなり、 $l/L > 1$ では $l/L=1\sim1.2$ で極小値をとった後は遊水部長が広がるにつれて所要天端高は大きくなる。このように遊水部長を大きくとっても所要天端高は単純減少せず、最適な遊水部長が存在することが分かる。しかし、消波工が広天端のデータ ($B_r=63$ cm) ではこのような周期的な変化はなく、遊水部長が長くなると所要天端高は一様に小さくなっている。図-11 は遊水部への伝達波高、周期の消波工

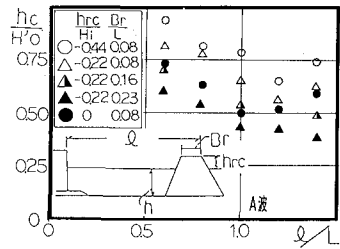


図-10 遊水部長の影響

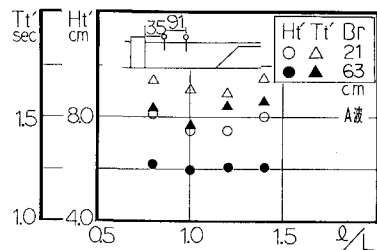


図-11 伝達波高、周期の消波工天端幅の影響

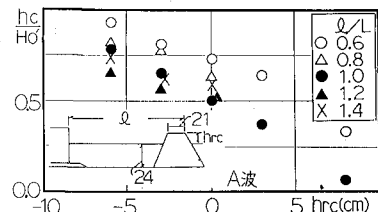


図-12 消波工天端高の影響

天端幅 B_r の影響をみたものであるが、 $B_r=63\text{ cm}$ の伝達波高は遊水部長の影響を受けておらず、より広い周波帯の波に対して有効であることが分かる。また、周期も短くなっており、越波しづらい条件となっている。

b) 消波工天端高の影響 図-12は図-10と同じデータを再整理して、消波工の天端高の影響をみたものである。同図によるとどのケースにおいても消波工天端高が大きくなるにつれ本体工の所要天端高が小さくなっている。○印の $l/L=0.6$ と●印の $l/L=1.0$ のデータに注目するとほぼ一様の右下がり勾配で所要天端高が小さくなっている。その勾配は -0.041 と -0.053 である。

c) 消波工天端幅の影響 図-13は消波工天端幅の影響をみたものである。消波工天端幅が大きくなるにともないほぼ一様の右下がり勾配で所要天端高が小さくなっており、その勾配は $l/L=1.2$ のデータを除き -0.005 となっている。

d) 消波工透水率の影響 図-14は消波工の透水率の影響をみたもので、消波工不透壁の有無の2ケースのデータについて整理したものである。消波工天端が水面下のとき、不透壁がある方が所要天端高が小さい。しかし、消波工天端が水面上にでているケースにおいては不透壁の有無による差はみられない。図-15は遊水部の水位上昇量を示したものであるが、不透壁がある場合、通常の2倍近くの値となっている。潜堤形式のように天端上を波が通過する場合はこのような遊水部の水位変動の影響を受け易く不透壁の効果が発現したが、天端面が水面上にある場合は越波によって波が伝達するので遊水部の水位変動などの影響を受けにくかったものと考えら

れる。

e) 周期の影響 図-16は2重堤と消波ブロック被覆堤の所要天端高の比を表したものである。所要天端高は周期が長くなるにつれ大きくなるが、消波ブロック被覆堤との比では周期の影響は小さくほぼ同じ値を示している。これから2重堤の所要天端高は消波ブロック被覆堤の所要天端高にこの図から求まる天端高低減係数を乗ずることで推定できるものと考えられる。

(5) 所要ブロック量の比較

今までの検討で2重堤においては堤体間距離を離すことで本体工の所要天端高を概ね小さくできることが分かった。しかし、堤体間距離を大きくすると消波工天端水深が深くなるので消波工のブロック量が増大し、経済性では不利となる。図-17は越波流量を $K_q=10^{-3}$ に抑えようとしたときの消波ブロック被覆堤と2重堤の所要ブロック量を比較したものである。パラメーターは2重堤本体工の天端高を換算沖波高であらわしたもので、これが小さい程大きな消波工が必要となる。消波ブロック被覆堤のブロック量 V_0 は天端2個並びで勾配 $1:1.5$ と

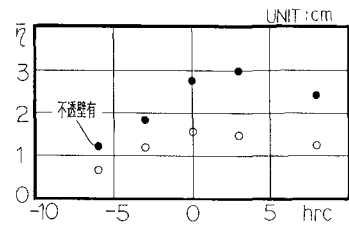


図-15 不透壁有の時の遊水部の水位上昇量

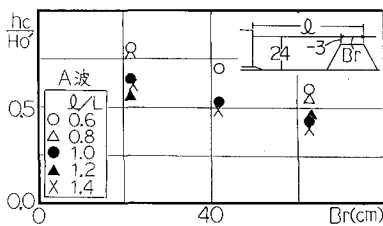


図-13 消波工天端幅の影響

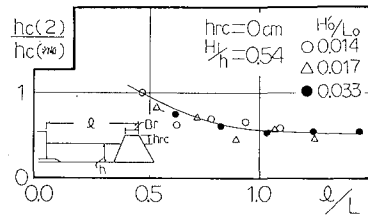


図-16 2重堤の本体工天端高低減係数

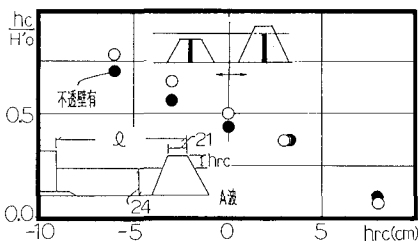


図-14 消波工の透水率の影響

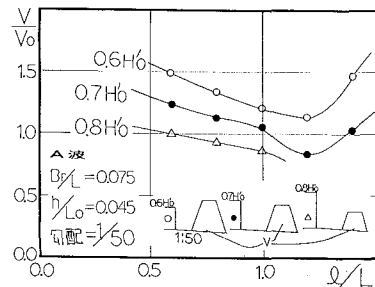


図-17 所要ブロック量

して天端高は合田の越波図表よりの読みとり値 $0.8H_0'$ で計算した。2重堤消波工のブロック量 V は天端3個並びで天端幅 $B_T=21$ cm, 勾配 $1:1.5$ で消波工天端高は図-12より本体工の天端高に応じた消波工の所要天端高を読みとり計算した。なお、実験は遊水部を水平床で行ったため遊水部に勾配をつけて計算すると消波工設置水深が合わないが今回は消波工の設置水深による影響は考慮していない。

これらの図から $l/L < 1.2$ ではどの本体工天端高においても遊水部長を離すことによる効果が勾配によるブロック量増大率より効いて V/V_0 は減少しており、本体工天端高を消波ブロック被覆堤と同程度の $0.8H_0'$ では V/V_0 は1より小さくなっている。このように2重堤は消波ブロック被覆堤と同程度の経済性は有しているものと考えられる。

4. ま と め

(1) 2重堤の所要天端高は遊水部長によって変化し、 $l/L=1.0\sim 1.2$ の範囲で極小値をとる。しかし、消波工が広天端の条件ではこのような周期的な変化はなく、より広い周波帯の波に対して有効であることが分かった。

(2) 2重堤にすることで消波工後の伝達波高は消波工単体に比べておよそ $0.9\sim 1.0$ 程度に小さくなる。また、周期も短くなり、より越波しづらい条件となることが分かった。

(3) 所要ブロック量を比較すると2重堤本体工の天端高によっては消波ブロック被覆堤よりも有利な断面と

なることが分かった。

(4) 2重堤の本体工の天端高は消波ブロックの所要天端高に天端高低減係数を乗ずることで推定できることが分かった。天端高低減係数は遊水部長と消波工の規模によるが周期の影響は受けない。

5. あとがき

従来、分離堤や遊水部付き防波堤といわれている形式は、遊水部長が短く傾斜堤形式の消波工であることが多いが、越波特性による検討から本研究で提案する2重堤形式は、実験でみられた消波工で生じた数波の走り波の衝撃的な作用を防ぐために遊水部長を長くし、より広い周波帯に対応するために消波工は広天端潜堤としたものである。今後は、このような条件の2重堤について、波力特性に関する検討を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 合田良美・鈴木康正・吉良安治・菊地治 (1976): 不規則波実験における入・反射の分離推定法, 港研資料, No. 248, 24 p.
- 合田良美・吉良安治・神山豊 (1975): 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, 港研報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- 佐伯 浩・菊池秀明・京谷 修・松井弘夫・尾崎 晃 (1980): 分離式防波堤の水利機能と設計波圧について, 第27回海講, pp. 335-338.
- 椿東一郎・荒木正夫 (1978): 水理学演習上巻, 森北出版, pp. 225-226.
- 山本正昭・西 裕司 (1984): 越波の少ない低天端堤の開発, 第31回海講, pp. 537-541.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析, 第31回海講, pp. 103-107.