

透過潜堤による波高減衰効果と堤内水位上昇に関する研究

加 藤 始*

1. ま え が き

近年、良質な海岸環境を維持しつつ海浜を保全するための波浪制御構造物として広天端幅潜堤が計画・施工されるのに伴い、透過潜堤の波浪制御効果が注目され、実験と数値計算の両面から活発に研究が行われている。出口ら(1988)は透水層上の波の減衰に透水層内の波動運動によるエネルギー損失が寄与することを示しており、これは、透過潜堤は天端幅が大きいほど大きな波高減衰効果をもつことを意味している。透過潜堤の波高減衰効果を調べた従来の実験では、不規則波を使った高山ら(1985)の詳しい実験も含めて、天端幅はあまり大きくない。また2次元水路で潜堤の実験を行う場合、現地の条件と比べて堤内で過大な水位上昇が生じ、潜堤上に過大な戻り流れを生じるから、透過率等の実験結果をそのまま現地に適用出来るかどうかには多少の疑問もある。

本研究では、天端幅と波長の比を広範囲に変えた実験を行って、透過潜堤の透過率に及ぼす天端幅や天端水深の影響を調べた。また潜堤背後の水位上昇にも注目して、強制的に潜堤背後の水を潜堤の沖側へ還流させたときの透過率や水位差、および潜堤上の流れの変化を実験的に調べた。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には、長さ 20 m、高さ 55 cm、幅 60 cm の吸収制御造波装置付きの2次元水路を用いた。図-1に示すように、この中にステンレス鋼とベニヤ板製の勾配 1/20 の斜面を設置し、その上に粒径約 3.5 cm の玉石で作った潜堤の模型(空隙率 40%)をおいた。潜堤の天端幅は $B=200$ cm と 50 cm の2種類とし、堤体の高さは沖側法肩で 23.7 cm、法面勾配は岸・沖側とも 1:3 とした。一樣水深部の水深を $h=36, 38, 40$ cm と変えることにより、天端水深 R は $R=3, 5, 7$ cm の3種類に変化させた。波は周期 $T=1.0, 1.5, 2.0$ s の3種類、

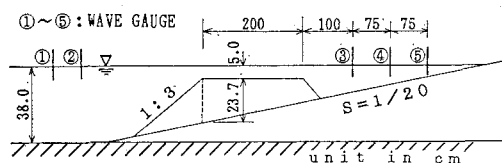


図-1 潜堤模型配置図

波高は $H=2\sim 10$ cm で実験を行った。

波高と水位変化の測定には容量式波高計を使用し、透過率と水位変化の測定は図-1に示した①～⑤の位置で行った。後述のポンプを使った実験では、潜堤の上と内部での平均流速の概略値を測定するために、電磁流速計を使用した。潜堤内での測定では、プローブが入るだけの空間を金網を使って潜堤の内部に設けた。

(2) 実験方法

実験波の波高の再現性を確保するため、造波装置へ入力する正弦波信号の振幅はデジボで調整した。潜堤背後への透過波は波形が変形するので、波のデーターはA-D変換してパソコンのFDに記録した。波の透過率 K_T は透過波と入射波の水面変化の rms 値の比として求めた。

潜堤背後と前面での水位差を減らす目的で、汀線より後方の水をポンプで潜堤の約 6 m 前方の水路の中へ環流させる実験も行った。ポンプの流量はバルブの開度を4段階(30, 45, 60, 90度)に変えて変化させた。検定の結果、最大流量は 2.80 l/s であった。

高山ら(1985)は潜堤の波高減衰効果を表わすために潜堤のあるときとないときの波高の比として影響係数 K_H を定義し、その大きさを調べた。今回の実験でも、図-1の③の点で影響係数を測定したが、 $B=200$ cm の場合、波高の大きい波は③の点でも砕波した。そこで、この条件に対する潜堤なしの③の点の波高としては仮想的な非砕波の波のものをを用いることとし、Le Mehaute and Webb (1964)の方法で計算した3次近似の浅水変形波高の値を使った(図-4参照)。

(3) 実験条件

改めて実験条件をまとめると次のようになる。実験での潜堤模型は天端幅 B が 200 cm と 50 cm の 2 種類であり、図-1 のように、沖側の一様水深 h が 38.0 cm のときに天端水深が $R=5.0$ cm、沖側法肩水深が 23.7 cm の位置に潜堤模型をおいた。したがって天端幅が 50 cm と 200 cm のケースでは、堤体直後の水深が異なる。

透過率の実験では、波を周期 $T=1.0, 1.5, 2.0$ 秒、波高 $H=2, 4, 6, 8, 10$ cm と変化させ、天端水深を $R=3, 5, 7$ cm と 3 種類変えた組み合わせのケースについて、図-1 の 5 点で波高計の記録をとった。ポンプを用いて潜堤背後の水位を強制的に低下させた実験では、上記の組合せのうち波高は $H=8.0$ cm の場合だけにポンプ流量を 4 種類変えて、透過率と水位差および潜堤上の流速がどう変わるかを調べた。

3. 波の透過率

従来行われた高山ら (1985) やその他の潜堤に関する実験の結果から、潜堤の波高低減効果は潜堤の天端水深、天端幅によって変わることが知られている。図-2 は今回の実験における透過率の測定結果を、天端水深と入射波高の比 R/H をパラメーターと考えて、天端幅と入射波の波長の比 B/L に対してプロットしたものである。図中の各点は R/H がどの範囲をとるかを記号別に示してあるが、個々の点の R/H の値も参考にとると、 $R/H=0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ に対する概略の等値線を図中の実線のように引くことができる。この図の結果から、 R/H が同じ値をとるときは、 B/L が大きいほど K_T は小さくなり、同じ B/L の値の下では R/H が小さいほど K_T は小さくなることわかる。

浦上ら (1991) は深さ 1.8 m の二次元造波水路の 1/20 勾配斜面上で、天端幅 $B=20\sim70$ cm、天端水深 $R=5\sim15$ cm、法勾配 1:3 の潜堤について実験を行っている。彼らは波の透過率の実験式を、潜堤の沖側法肩での堤体高 d と設置水深 h_1 との比 d/h_1 を含む 4 つの式で提案している。今回の実験の $R=5$ cm のケース ($d/h_1=0.826$) に彼らの $0<R/H\leq 2.5$ のときの式をあてはめてみると、

$0<B/L\leq 0.3$ のとき

$$K_T = 0.047(R/H) - 1.09(B/L) + 0.56 \quad \cdots \cdots (1)$$

$B/L > 0.3$ のとき

$$K_T = 0.047(R/H) + 0.33 \quad \cdots \cdots (2)$$

となる。これらの式に従って $R/H=2.0$ と 0.5 の条件に対して求めた関係を図-2 の中に点線と一点鎖線で記入してある。彼らの提案式では $B/L > 0.3$ のとき K_T は B/L によって変化しないが、その点は今回の実験結果と一致しない。

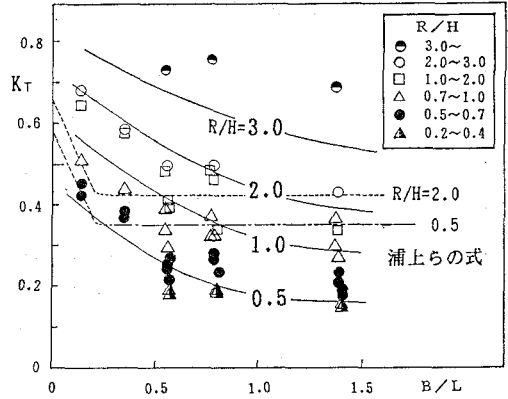


図-2 透過率の測定結果

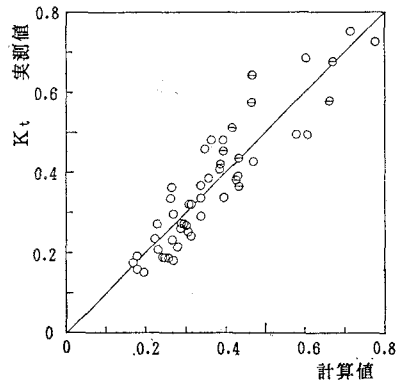


図-3 透過率の推定式の精度

K_T に影響するパラメータとして上に述べた $B/L, R/H$ と波形勾配 H/L をとり出し、 K_T がそれらの線形の式で表されると仮定すると、最小二乗法により次式がえられる。

$$K_T = -0.195(B/L) + 0.166(R/H) + 2.21(H/L) + 0.267 \quad \cdots \cdots (3)$$

図-3 は式 (3) による計算値と実測値を比較したものであり、必ずしも十分ではないが、式 (3) は透過率 K_T の $B/L, R/H, H/L$ への依存性をかなりよく表しているといえる。

高山ら (1985) は潜堤の波高低減効果を影響係数 K_H の形で求め、 K_H が $B/L_0, R/H_0$ および波形勾配 H_0/L_0 に対し直線的に変化するものと仮定して次の関係を求めた。

$$K_H = -0.92(B/L_0) + 0.42(R/H_0) + 3.8(H_0/L_0) + 0.51 \quad \cdots \cdots (4)$$

この高山らの式 (4) と比較するため、今回の実験における影響係数 K_H を図-1 の③の点の測定値について計算した。図-4 はこの場合に使用した 3 次近似的浅水変形波高と、潜堤のない場合の斜面上での波高の実測

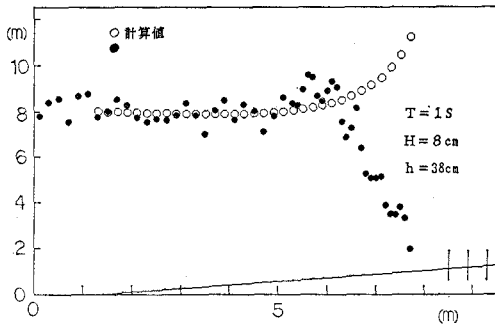


図-4 浅水変形波高と実測値の比較

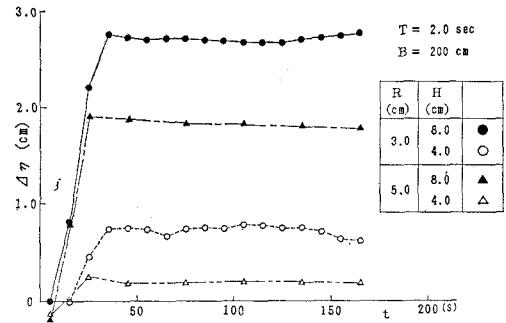


図-6 水位上昇量の変化

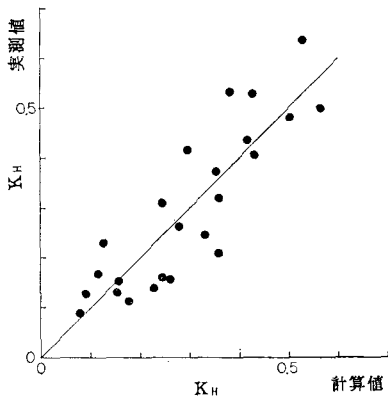


図-5 潜堤影響係数の推定式

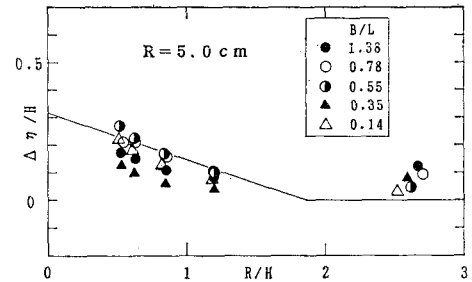


図-7 水位上昇量の測定例

値とを比較したものであるが、砕波直前の点より深いところでの両者の一致は良い。影響係数 K_H の測定結果を式 (3) と同じパラメタに対する回帰式の形にまとめると次式が得られる。

$$K_H = -0.166(B/L) + 0.406(R/H) + 6.39(H/L) - 0.126 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) による計算値を実測値と比較すると図-5 のようになり、両者の一致度は図-3 の透過率の場合と大差ない。

式 (3) と式 (5) とを比較すると、天端幅と波長の比 B/L の相対的な影響度は透過率の式 (3) の方が影響係数の式 (5) よりも 2 倍以上強く表れていることがわかる。高山ら (1985) が示したように、潜堤通過後の波は透過波の砕波水深に近づくまではほぼ一定の波高のまま進行する。このことから、潜堤背後で水深変化がある場合でも透過率で潜堤の波高低減効果を表すのにあまり問題はないと考えられる。

4. 潜堤背後の水位上昇量

図-6 は波をかけはじめた直後の経過時間と潜堤の後ろと前の水位差の関係を $R=5\text{ cm}$ と 3 cm で周期 2.0 秒の場合について示したものである。どのケースでも波を

かけ始めて約30秒後に水位差はほぼ一定な値に達することがわかる。ここに示していない周期 1.0 秒の場合の水位差は図-6 の $T=2.0$ 秒の対応する各ケースより小さいので、最終的な水位差は天端水深が小さいほど、波高が大きいほど、そして周期が長いほど大きいことがわかる。

図-7 は $R=5\text{ cm}$ の場合の全ケースの水位差 $\Delta\eta$ の測定結果を入射波高 H で無次元化して、天端水深・波高比 R/H を横軸にとってプロットしたものである。浦上ら (1991) は水位上昇量の実験式も提案しているが図-7 の中の実線は彼等の式を図-7 に示した実験条件にあてはめたときの関係を表している。図からわかるように、今回の実験結果は大まかには彼らの式の傾向に近い変化を示しているが、詳しく見ると、 B/L の値に強く依存している。すなわち、同じ天端幅に対しては周期が大きいほど、すなわち B/L が小さいほど無次元化した水位差は大きくなっている。

最近、泉宮ら (1989) と Somchai ら (1990) は透過潜堤上での砕波等による波高変化の数値計算モデルを導いている。ここでは後者のモデルにより波高変化を、そして磯部ら (1988) と同様の方法で水位変化を計算して、実験結果と比べてみた。Somchai ら (1990) のモデルの基本式は次式で表される。

$$\frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{d\hat{\eta}}{dx} \right) + (k^2 \alpha - i \sigma \alpha f_D) \hat{\eta} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

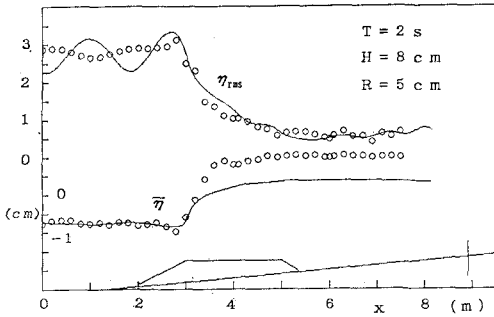


図-8 波高と水位変化の数値計算結果と実測値の比較

ここに、 x は岸沖座標、 η は水面変動の複素振幅、 f_D はエネルギー減衰係数、 σ は角周波数、 k は複素波数 ($=k_r - ik_i$) である。 α は空隙率、質量係数、線形抵抗係数、局所的な水深と透水層の厚さ、および k の関数として与えられる。なお、潜堤上のラディエーション応力の計算では近似的に空隙部分の水を加えた水深を使い、碎波減衰係数は Somchai ら (1990) の $1/2.5$ の値で計算した。

図-8 は $T=2.0$ s, $H=8.0$ cm, $R=5$ cm, $B=200$ cm の場合について、波高 (rms 値) と水位の実測値 (○) を計算値 (実線) と比較したものである。計算値には反射波が過大にており、この例では計算値の水位変化は実測値の 65% 程度と小さい。一方、ここには示していないが周期が $T=1.0$ s の場合には、両者はよく一致した。

5. 潜堤後方の水を沖側へ還流させたときの結果

潜堤背後の汀線より後方からポンプで水を沖の水域に還流させる実験は、周期 $T=1.0$ と 2.0 秒、波高 $H=8.0$ cm のケースについてのみ行った。 $B=200$ cm でポンプを使用しないときの各ケースの水位差を表-1に示す。図-9 は、水位差がもっとも大きい $R=3$ cm, $B=200$ cm の場合につき、ポンプ流量を3段階に変えたときの水位差の変化を、そのときの波の透過率 K_T の測定結果 (白抜き記号) と共に示している。この図の場合には、ポンプ流量の増加と共に水位差は一様に減少し、またそれと同時に透過率もほぼ一様に減少する。一方、天端水深が 5 cm, 7 cm と大きくなると、ポンプを使わない $Q=0$ の時の水位差は表-1 のように小さくなる

表-1 ポンプなしの実験における水位差 (単位 cm)

T	$R=3.0$ cm	$R=5.0$ cm	$R=7.0$ cm
1.0 s	1.45	0.98	0.82
2.0 s	2.38	1.84	1.44

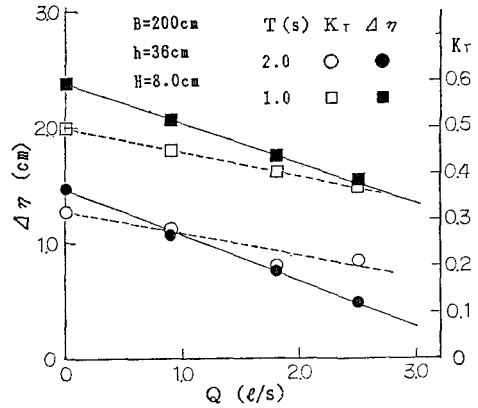


図-9 ポンプ流量の変化に対する透過率と水位差の変化

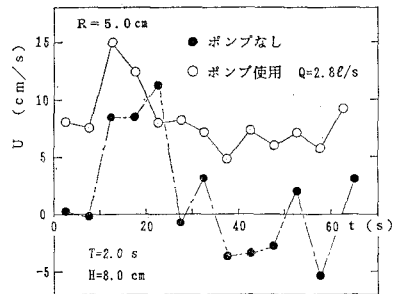


図-10 潜堤上の流速の経時変化

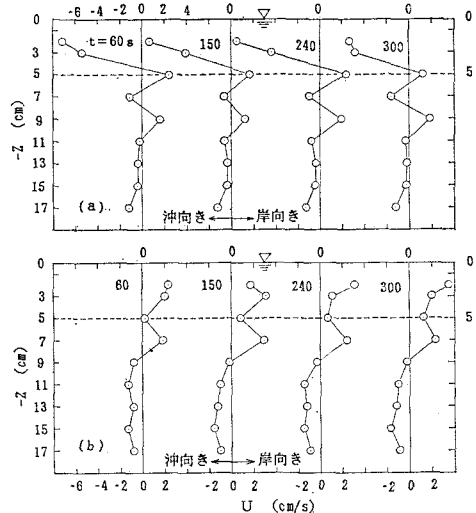


図-11 潜堤の上と中での沿直流速分布の変化
(a) ポンプなし (b) ポンプあり

が、それともなう (ここには示していないが) ポンプ流量の増加にともなう水位差と透過率の低下量も小さくなる。このことは開口部のない2次元実験では、天端水深が小さいときほど過大な水位上昇が生じることを示

唆している。これは、天端水深が小さいと天端上の戻り流れに対する抵抗が大きくなり、同じ流量の戻り流れを起こすためにより大きな水位差を必要とするためではないかと考えられる。

図-10 はポンプ流量が 0 の場合と、ポンプ流量が $Q = 2.8 \text{ l/s}$ の場合の潜堤上(岸沖方向の中央)の $z = -3 \text{ cm}$ における平均流速(移動平均)の波スタート時からの経時変化を示している。図-6 の水位差の変化に対応するように、波スタート後 20~30 秒では岸向きの流速増加がするが、 $Q=0$ の場合には $t > 30$ 秒になると沖向きの戻り流れが発生している。図-11 はポンプなしの場合(a)とポンプ流量が $Q = 2.8 \text{ l/s}$ の場合(b)における潜堤上(波のトラフより下)と潜堤内部での平均流速分布の経時変化($B=200 \text{ cm}$, $R=5 \text{ cm}$, $T=2.0 \text{ s}$)を示しており、図中の破線は堤体の天端の位置を示す。片野ら(1991)は、透過潜堤上の戻り流れは不透過潜堤の場合より小さいことを指摘しているが、図-11 の結果では、平均流速は主として天端より上で生じている。また、ポンプ使用時に堤体内で沖向きの流速がやや大きくなる傾向があるが、これはここに示していない $T=1.0 \text{ s}$ の測定結果でも見られる。

図-9 に示された戻り流れの減少に伴って波の透過率が減少する理由は、潜堤の天端上で戻り流れが、碎波を生じない範囲では波高を増大させるという性質をもつからではないかと考えられる。

6. 結 論

2 次元水路内の 1/20 勾配斜面上においた天端幅 $B = 200 \text{ cm}$ と 50 cm の透過性潜堤を対象に、幅広い波の条件の下で波の透過率と水位上昇量を測定した。また潜堤上の戻り流れを減らす目的で、ポンプを使って潜堤後方の水を潜堤の沖側に還流させ、透過率と水位差の変化を調べた。本研究の結論はほぼ次の通りである。

(1) 透過率 K_T は天端幅と波長の比 B/L 、天端水深と波高の比 R/H に依存して変化することを確認し、 K_T を B/L , R/H , H/L の線形な関係で表した実験式を求めた。

(2) 波スタート直後に潜堤上で強い岸向きの平均流

が生じ、潜堤の岸側と沖側に水位差がつく。約30秒後には岸向きの流れと戻り流れがバランスして水位差は一定値に落ち着く。また潜堤断面を通る岸沖方向の平均流は、主として潜堤の天端より上で生じ、堤体内での流速は小さいことがわかった。

(3) 潜堤背後の水位上昇量は天端水深が小さく、波の周期が大きいきほほど大きくなる。今回のような2次元実験で天端水深が小さい場合、過大な水位差による戻り流れのため、開口部のある場合より透過率は少し大きめに出ると考えられる。

謝辞：最後に、本研究を行うにあたり度々有益なご意見を頂き、また論文作成にあたっても貴重な時間をさいてご協力頂いた、同じ研究室の三村信男助教授に心から感謝致します。また実験とデータ整理に協力して頂いた、当時学生の山崎剛君(現パシフィックコンサルタント)にも謝意を表します。また、図面の作成等で研究室の伊佐治進技官をはじめ多くの学生諸君にお世話になりました。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・柴田洋三・泉宮尊司・渡辺 晃(1988)：不規則波によるリーフ上の平均水位上昇に関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp.192-196.
- 泉宮尊司・遠藤雅人(1989)：潜堤及び透過性構造物のある海況における流動場解析，海岸工学論文集，第36巻，pp.638-642.
- 浦上博之・岡本正由・佐藤己・柴田浩二(1991)：捨石潜堤の波浪減衰ならびに堤内水位上昇に関する実験式の提案，土木学会第46回年講Ⅱ，pp.846-847.
- 片野明良・服部昌太郎(1991)：海浜・幅広潜堤システムの消波特性，土木学会第46回年講2，pp.882-883.
- 高山知司・永井紀彦・関口 忠(1985)：広天端幅潜堤の波浪減衰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.
- 出口一郎・榎木 亨・白谷宏司(1988)：透水層上の波浪変形に対する非線形非定常ダルシー則の適用性について，第35回海岸工学講演会論文集，pp.487-491.
- Somchai, R.・磯部雅彦・渡辺 晃(1990)：透過潜堤上における波の碎波変形計算法，海岸工学論文集，第37巻，pp.549-553.
- Le Mehaute, B. and L. M. Webb (1964)：Periodic gravity waves over a gentle slope at a third order of approximation, Proc. 9th Conf. on Coastal Eng., pp.23-40.