

幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について

榎木 亨*・出口 一郎**・岡原 義典***

1. はじめに

近年海岸侵食制御等の海岸防災あるいは海浜利用等の種々の目的を持った幅広潜堤が各地で計画され、一部は既に施工されている。このような潜堤に要求される主な機能は、海浜にとって有害となる高波浪を強制的に砕波させ波浪エネルギーを減殺させることである。したがって潮位偏差の大きい海岸に潜堤を施工することに対しては、潮位によってその天端水深が変化することから有効ではないという意見もある。しかし、一般に潜堤堤体は捨石等で構成され、透水性を持つことから、入射波が強制砕波しなくても堤体の透水性及び天端表面の境界摩擦により波浪エネルギーの逸散が生ずる。非線形、非定常 Darcy 則を適用した透水層上の波動運動の解析結果(出口ら, 1988)によると、透水層構成材の空隙が小さく、透水性が低い場合は境界摩擦より透水層内の流体運動に伴うエネルギー逸散が、また構成材の空隙が大きく透水性が高い場合には透水性よりは境界摩擦によるエネルギー逸散が大きくなる。このことは透水性を持つ潜堤の波浪減衰効果を実験的に明らかにしようとする場合には、そのスケールによって空隙の大きさが異なり、減衰機構が異なることから縮尺効果が現れる可能性があることを示している。

本研究の目的は、既設幅広潜堤の波浪減衰効果に関する現地実測を行い、得られた結果を縮尺の異なる模型実験で再現することによって縮尺効果の有無について検討し、さらにそれらの結果に対して非線形、非定常 Darcy 則に基づく透水層上の波浪変形理論の適用性について検討することである。また、潜堤上での入射波の強制砕波限界に対しても同時に考察を行う。

2. 幅広潜堤の波浪制御効果に関する現地実測と模型実験

(1) 幅広潜堤周辺の波浪変形に関する現地実測

現地実測の対象とした潜堤は、大阪府の二色の浜海岸

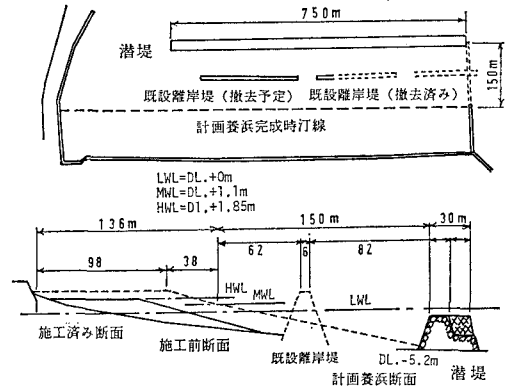


図-1 二色の浜海岸潜堤の概要

に施工中の潜堤でありその概要を図-1 に示す。

二色の浜海岸は昭和41年に我が国で初めて人工養浜が行われた海岸として海岸工学上種々の注目を集めてきた海岸で、長さ約200mの離岸堤が開口幅50mで3基設置されていた。しかし、関西新空港の建設に伴う周辺環境整備の一環として二色の浜海水浴場の沖合い移転が決定し、その付帯工事として大阪府港湾局によって昭和63年度から潜堤の建設が開始された。潜堤の天端水深 R は、M.W.L. 下 1.9m、堤高 4.3m、天端幅 B は 30m であるが、これらの諸元は2次元移動床実験により潜堤背後の養浜砂が顕著な離岸方向の移動を生じない諸元として決定されたものである(榎木ら, 1987)。また二色の浜海岸の H.W.L. は M.W.L. +0.75m, L.W.L. は M.W.L. -1.1m である。波浪観測は、潜堤天端中央と、天端中央より沖側 45m 及び岸側 45m の3点に設置したH型鋼に 50cm 間隔のスケールを取り付け、その水位変動をビデオカメラにより撮影することによって行い、潜堤沖側及び岸側で測定された波高をそれぞれ入射波高、透過波高とした。撮影された水位変動は画像解析装置上で再生し、H型鋼のスケールを用いてサンプリング時間 $\Delta t = 1/6 \text{ sec}$ で、パーソナルコンピュータに入力し周波数スペクトル、有義波高、有義周期等の統計量を算出した。

なお、二色の浜においては実測期間が短かったために

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

*** 学生員 大阪大学大学院 工学研究科

得られたデータの数も限られている。そこで既に多数の波浪制御効果に関する実測データが得られている新潟海岸潜堤(浜口ら, 1988)に関する同時に模型実験を行った。新潟海岸潜堤の天端幅は50m, 天端水深は M. W. L. 下 2.0m (堤高約 3m) で, 潜堤の表面は 200~500 kg の捨石で構成されている。H. W. L. は, M. W. L. + 0.19m, L. W. L. は, M. W. L. - 0.25m と二色の浜海岸に比べて潮位変動は少ない。

また潜堤周辺の波高は主として容量式波高計によって測定されたものであるが, これらのうち二基設置された潜堤の開口部沖側での測定値を入射波高, 潜堤背後約 30m の地点で測定された波高を透過波高とした。

上記2つの海岸の潜堤の諸元を表-1 にまとめて示しておく。

表-1 現地潜堤諸元

	二色の浜海岸潜堤	新潟海岸潜堤
天 端 水 深	M. W. L. -1.9m	M. W. L. -2.0, m
天 端 幅	30m	50m
堤 高	4.4m	3.0m
潜 堤 表 面	400~600kg 捨石 及びテトラポッド	200~500kg 捨石
沖 側 法 勾 配	1/2~2	1/3

(2) 幅広潜堤の波浪減衰効果に関する2次元模型実験

現地波浪は不規則であること, あるいは実測期間中に適当な波浪が来襲しなかったことなどの理由で先に述べた現地観測結果からは, 潜堤の波浪減衰効果を詳細に議論することが困難である。そこで先述の現地潜堤をモデルに縮尺の異なった模型実験を行い, その波浪制御効果及びそれに関する縮尺効果について検討した。

実験対象波は新潟海岸では周期 5.3~10.6 秒の間で, 二色の浜海岸は周期 4.2~7.1 秒の間でそれぞれ 5 種類, 波高はそれぞれの周期に対して 0.5~2.5m の間の 5 種類とし, 模型縮尺は 1/50 とした。ただし, 新潟海岸においては, 潜堤の波浪制御効果に対する縮尺効果を明らかにするため縮尺 1/10 の実験も行った。

実験に使用した水槽は, 長さ 28m, 幅 1.5m, 高さ 1.9m の大型 2 次元水槽と, 長さ 30m, 幅 0.7m, 高さ 0.9m の小型 2 次元水槽である。潜堤構成材には砕石を使用した。粒径は縮尺 1/10 の実験で 4.5 cm, 縮尺 1/50 の実験では 1.0 cm であるが, これらは Froude 則で現地スケールに換算すると二色の浜海岸潜堤では構成材粒径の下限に, また新潟海岸潜堤では構成材粒径の上限に対応している。潜堤周辺の水位変動は容量式波高計によって現地スケールで潜堤沖側約 40m から岸側約 30m まで 5m 間隔で測定し, その結果に基づいて波高, 平均水

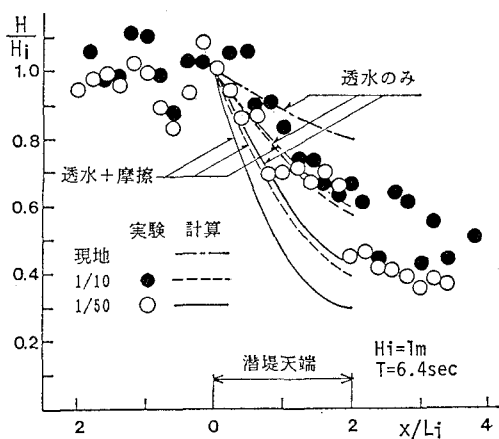
位変動量を計算した。なお, 実験対象潮位はいずれも M. W. L. とした。

3. 幅広堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について

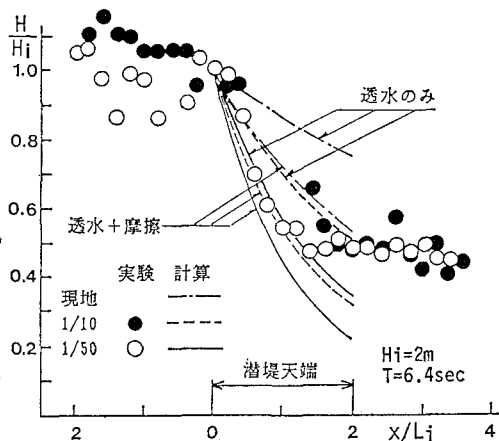
(1) 幅広潜堤上の波高変化とその縮尺効果

まず, 先に述べた模型実験によって得られた潜堤上の波高変化に基づき, その波浪減衰効果及び縮尺効果の有無について検討する。

図-2 は新潟海岸潜堤に関する実験で測定された潜堤上の波高変化を示したものであり, 図 (a) は入射波が非碎波で透過する場合, (b) は潜堤沖側天端で碎波が生ずる場合の結果である。



(a) 非碎波の場合



(b) 碎波する場合

図-2 幅広潜堤上の波高変化

それぞれの図中の●は縮尺 1/50, ○は縮尺 1/10 の実験結果であり縦軸は測定された波高 H を潜堤天端沖側 ($x=0$ とする) で測定された波高 H_i で除した無次元波高を示し, 横軸は天端沖側端から岸向きに測った距離 x

を微小振幅波理論から求まる天端上の波長 Li で無次元化した x/Li をとってある。図中に示す実線及び破線は潜堤天端上で生ずる波高変化に対する解析結果であるがその詳細については後述する。

図 (a) に示す非碎波の場合の波浪は潜堤上をほぼ一様に減衰しながら伝播し、最終的には50%程度に波高が減衰するのに対し、碎波が生ずる図 (b) の場合は天端上 $x/Li \leq 1$ の領域で入射波高が急激に1/2程度に減衰し、その後の減衰は顕著ではない。この様に、潜堤上で波浪変化の様子には差異はあるものの、潜堤上で碎波せずに伝播する場合でも碎波が生ずる場合と同程度の波高減衰が生ずることがわかった。一方、縮尺1/10及び1/50の波高変化は、後者の方が若干大きな波高減衰を示すが、その差異は顕著ではなく、縮尺1/50程度までの模型実験では透水性を考慮せず潜堤構成材を含めてすべてFroude則で縮小しても有意な縮尺効果は現れなかった。ただし、潜堤上で碎波が生ずる場合は、目視観測によると縮尺1/10の実験ではPlunging型の碎波型でも縮尺1/50の場合はSpilling型の碎波になる場合があり、碎波型には縮尺効果が現れた。

(2) 潜堤上の碎波限界

先に考察したように潜堤上で碎波する場合と非碎波の場合の波高減衰の様子は明らかに差異があり、減衰の機構が異なるものと考えられることから、碎波限界について考察する。この碎波限界を明らかにすることは、今後の潜堤の設計において天端水深を決定する上でも重要な要素となる。

図-3は今回行った実験及び二色の浜潜堤の海浜安定

効果に関する実験(榎木ら, 1987)において、目視観測によって潜堤天端で碎波が生じたと認められた場合と非碎波の場合を、横軸に堤脚水深に対応する比水深 h/L 、縦軸に天端水深と入射波高の比 R/H_i をとって示したものである。図中には永井ら(1975)によって碎石(平均粒径約1cm)で作成された沖側法勾配1/5の潜堤上の波浪変形に関する実験から求められた碎波限界も一点鎖線で示してある。なお、永井らの実験は $B/L < 0.5$ の範囲で行われたものである。図より明らかなように、実験の縮尺、入射波波形勾配、堤脚水深に関わらず、 $R/H_i = 1.6 \sim 1.8$ の狭い領域で碎波が生じており、この結果は永井らの碎波限界 $R/H_i \approx 1.5$ に近い結果となる。

(3) 幅広潜堤の波浪減衰効果について

ここでは、先に定義した両海岸の入射波高 H_i 及び透過波高 H_t から求められる波高伝達率 $Kt = H_t/H_i$ に基づいて幅広潜堤の波浪減衰効果について検討する。

図-4は二色の浜海岸及び新潟海岸で実測された Kt 及びそれぞれの海岸の模型実験で得られた Kt と、無次元天端水深 R/H_i の関係を示したものである。ただし、両海岸とも実測結果の H_i 、 H_t には平均波高を用いており、その値より求められる Kt を示してある。なお、実験、実測結果とも入射波の波形勾配による Kt の顕著な差異は現れなかったので天端幅 B と入射波長 L の比 B/L をパラメータにして示した。また、図中に示す一点鎖線は、先に述べた永井らの波高伝達率に関する実験結果を示し、実線及び破線は後述する有限厚を持つ一様透水層上の波動論を適用して解析した結果である。

まず図 (a) に示す二色の浜海岸における Kt は、 $R/H_i < 3$ の領域では R/H_i の減少にともなって徐々に減少するが、 $R/H_i = 2$ 付近で一度 $Kt = 1$ まで増加し、その後碎波限界 ($R/H_i = 1.6 \sim 1.8$) を経て急激に減少する。また、 $B/L \geq 1$ の場合の Kt の方が $B/L < 1$ の場合に比べて若干小さな値を示している。一方、図 (b) に示す新潟海岸においても二色の浜海岸同様 $R/H_i = 2$ 付近で Kt が極大値を示すが、 $R/H_i < 1.6$ の碎波限界以下の領域においては急激に減衰する。さらに、 R/H_i のすべての領域において実験結果と実測結果の間には有意な差異は認められない。このことから、縮尺1/50程度の模型実験においては、潜堤構成材の大きさも含めて、すべてFroude則で縮小しても顕著な縮尺効果は現れないことがわかる。

なお、今回行った実験結果は、潜堤上で入射波が碎波する領域 ($R/H_i < 1.6 \sim 1.8$) においては永井らの実験結果とほぼ一致する。しかし、 $R/H_i > 2$ の領域における Kt は、永井らが推定しているように1には漸近せず、図-4からも明らかなように、 $R/H_i = 4$ においても $Kt = 0.8$ 程度の値を示す。

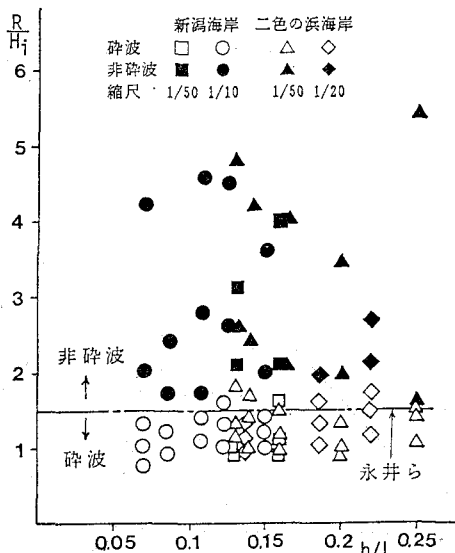
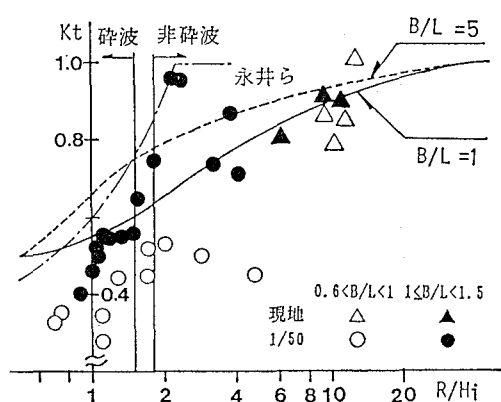
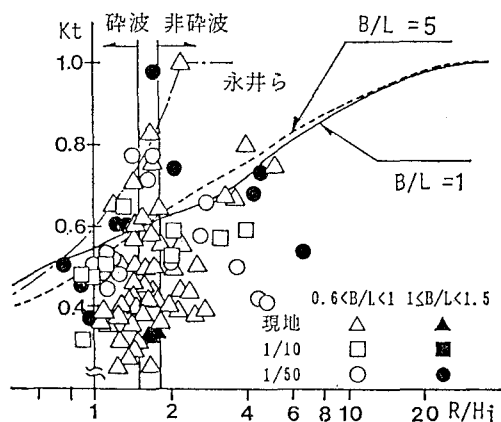


図-3 碎波限界



(a)



(b)

図—4 幅広潜堤の波浪減衰効果

4. 幅広潜堤上の波浪変形に対する一様透水層上の波動論の適用性

著者らはすでに有限厚さを持つ水平方向に一樣な粗い透水層上の波動に対して非線形・非定常 Darcy 則を適用した解析を行い、その妥当性を実験的に検証している(出口ら, 1988)。ここではまず著者らの解析結果に基づき、波高減衰に及ぼす透水層の影響について考察し、ついで幅広潜堤天端上に伝播する波浪に対するその適用性について検討する。

(1) 波高減衰に及ぼす透水層の影響

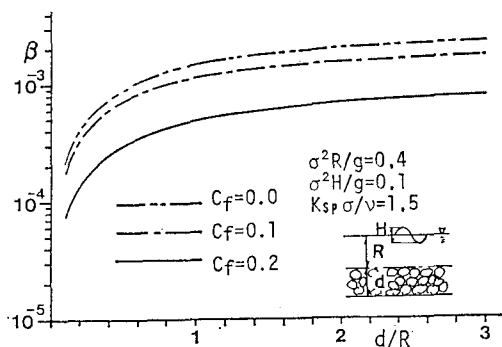
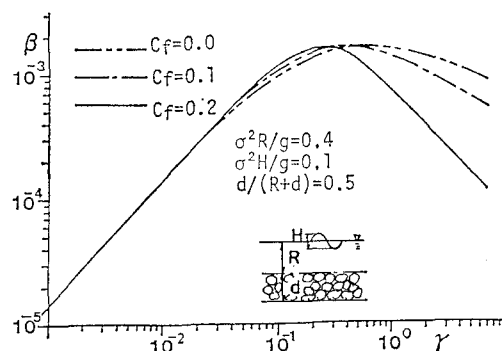
厚さ d の透水層(層上水深を R とする)上を x -軸正方向に伝播する周期 T (角振動数 $\sigma = 2\pi/T$)、波数 k の波動

$$\eta = \hat{\eta} e^{i(kx - \sigma t)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

に対する分散関係式は、次式で表される。

$$\sigma^2 = gk \frac{(rs+i) \sinh kh \cosh kd + \gamma \cosh kh \sinh kd}{(rs+i) \cosh kh \cosh kd + \gamma \sinh kh \sinh kd} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに $\gamma = kps\rho/\nu$ (kps : Lorenz の等価仕事則によって決定される等価透水係数, ν : 水の動粘性係数), $S = \{(1 - \lambda)Cm + 1\}/\lambda$ (λ : 透水層の空隙率, Cm : 付加質量係数)で、複素波数 $k(=\alpha + \beta i)$ は (2) 式の解として求められる。したがって、(1) 式で表される進行波は伝播にともなう振幅が $\hat{\eta} e^{-\beta x}$ で減衰する。そこで、透水性に起因する波浪減衰に影響を及ぼすパラメータを次元解析により抽出し、振幅の減衰率 β がそれらのパラメータによってどの程度変化するかということに対して検討した。ここではそうしたパラメータのなかで、特に幅広潜堤の諸元と直接関係する透水層厚と層上水深の比 d/R 及び無次元透水係数 $\gamma(=kps\rho/\nu)$ が減衰率 β に及ぼす影響について考察する。図—5, 6 は β に及ぼす d/R 及び γ の影響を示したものである。図中の Cf は非線形 Darcy 則における乱流抵抗係数で透水層構成材の粒径が 1 cm 以上の場合はほぼ 0.1~0.3 の値をとる。なお、計算においては $\lambda = 0.6$, $Cm = 0$ とした。図—5 より、 β は d/R の増加に対して単調に増加し、その増加率は $d/R < 0.4$ では急激で、 $d/R > 0.8$ になると徐々に増加し、一定値に漸近する。

図—5 波高減衰に及ぼす d/R の影響図—6 波高減衰に及ぼす γ の影響

したがって、透水層上水深 R に比べて透水層厚 d が大きければ大きいほど波高減衰率は大きい、 d/R の値が 0.8 を越えるとそれ以上 d/R を増加させても顕著な減衰効果は期待できない。一方、図-6 より β は γ が 0.2~0.4 の間で極大値を示し γ に大きく依存していることがわかる。このことから、入射波周期が与えられた場合には β が極大となるような透水層材料を選定することによって効率よく波高減衰を生じさせることができるものと思われる。

(2) 幅広潜堤上の波浪変形に対する適用性

最後に、以上で述べた非線形・非定常 Darcy 則を適用した一様透水層上の波動論を幅広潜堤上の波浪変化予測に適用する。ただし、透水層内の流体運動に対する非線形な抵抗則を線形化する際に Lorenz 等価仕事則を適用するという煩雑さを避けるために著者らが実験的に求めた等価線形抵抗係数に基づく等価透水係数 kps (出口ら, 1988) を用いて計算を行った。それらの関係式を次式に示しておく。

$$f = \{10 + 50(u\sigma/Dm)\} Rd^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

$$kps = \nu / (f\sigma) \text{ あるいは } \gamma = 1/f \dots\dots\dots (4)$$

ここに u : 透水層表面の水平方向水粒子速度振幅 (近似的に Airy 波理論から求められる 透水層表面流速とする), Dm : 捨石粒径, $Rd = uDm/\nu$ である。

また、潜堤天端上の境界摩擦によるエネルギー逸散によって生ずる波高減衰は、 $u/(2Dm\sigma)$ が 25 以下の場合には Riedel らの、25 以上の場合には Jonsson の摩擦係数を用いて底部せん断力を評価することによって求めた。ただし、摩擦係数の最大値は 0.3 とした。

図-2 に示す実線、破線及び一点鎖線は潜堤天端沖側端での波高を入射波高として計算された透水性のみを考慮した場合と境界摩擦も考慮した場合の波高変化で、それぞれ縮尺 1/50, 1/10 及び 1/1 (現地スケール) に対応する。図 (a) に示す非碎波の場合は縮尺 1/50 に対応する計算結果の波高減衰が最も大きく、現地スケールの計算結果の約 2 倍の減衰が生じている。また、透水性のみを考慮した場合の計算結果は、縮尺 1/10 及び 1/50 の場合とも実験で得られた波高減衰を若干過大評価している。さらに、さきに述べた境界表面に境界せん断力を作用させる方法で境界摩擦も考慮した計算結果は当然実験結果を大きく過大評価することになるが、現地スケールで境界摩擦の影響を考慮した計算結果は実験結果とよい一致を示す。したがって、境界の影響は境界摩擦という簡易的な形ではなく透水性を持つ境界において生ずる境界層理論に基づいて厳密に評価する必要がある。

一方、計算結果には縮尺による波高減衰に差異が明確に現れた。計算条件は実験同様すべて Froude 則によって縮尺されている。したがって、波高減衰にかかわる諸

量で縮尺によって変化するのは無次元透水係数 γ のみである。図-2 (a) に示す現地スケールの γ は約 3 であるが、(3), (4) 式からわかるように γ には動粘性係数が関係することから、Froude 則で縮尺した模型では縮尺 1/10 で約 0.54, 縮尺 1/50 で約 0.16 と変化する。(3), (4) 式から求められる γ は乱流抵抗係数 Cf を含んだ等価透水係数 kps に基づいている。図-6 の $Cf=0$ の場合のこれらの γ に対応する減衰係数 β は、縮尺 1/50 の場合に最大となり、現地スケールで最小となる。したがって、計算結果において縮尺の差異によって生じた波高減衰の差異は、縮尺によって無次元透水係数 γ に差異が生ずるためである。

図-2 (b) に示す碎波が生ずる場合も計算結果を示しているが、この場合の実験結果は当然透水性のみによる波高減衰の計算結果よりも大きい減衰を示すが、その差異はわずかである。

以上で考察したように、境界摩擦の評価方法にはまだまだ多くの問題点が残されているが、二色の浜及び新潟海岸潜堤の波高伝達率の計算も行った。図-4 中に示す実線は $B/L=1$, 破線は $B/L=5$ とし、境界摩擦摩擦も考慮した場合の計算結果である。図よりいずれの海岸においても計算結果は $R/H_i > 3$ の領域では実測及び実験で得られた K_t のほぼ上限を予測している。しかし、 $R/H_i=2$ 付近における K_t の増大は説明できない。

5. 結 語

透水性を有する幅広潜堤の波浪制御効果について現地実測結果とその縮尺の異なる模型実験を行うことによって検討した。その結果潜堤天端上で碎波しないような波浪に対しても堤体の透水性によって波高を減衰させる効果が確認できたが、明確な縮尺効果は現れなかった。透水層内の流体運動に対して非線形・非定常 Darcy 則を適用した波浪変形計算によっても潜堤上で有意な波高減衰が生ずることが示されたが、計算結果においては明確な縮尺効果が現れた。今後潜堤上での波浪変形の予測精度を高めるために必要となる境界摩擦及び透水層上で生ずる碎波によるエネルギー逸散の評価方法等に対してさらに検討を加えるて行くつもりである。

参 考 文 献

- 植木 享ら (1978): 二色の浜公園基本設計報告書, (財) 災害科学研究所, 30 p.
- 出口一郎ら (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. 478~491.
- 永井莊七郎ら (1975): 大水深緩傾斜面捨石潜堤に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 409~414.
- 浜口達男ら (1988): 人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 123~132.