

透過式潜堤の最適配置による長周期波の低減効果とその評価手法について

田島芳満*・小塚将之**・大島香織**・森屋陽一***

長周期波の消波構造物として透過式潜堤に着目し、効率よく長周期波を減衰させることのできる潜堤の形状や設置位置について、数値実験を通じて検証した。数値モデルには、著者らが構築した任意形状の透過層による流速低減効果を考慮した修正ブシネスク方程式法を用い、室内実験結果との比較からその妥当性を確認した。完全反射壁の前面に透過式潜堤を設置して規則波および不規則波を入射させた数値実験では、重複波の消波効果は潜堤の設置位置に大きく依存し、水平流速が大きな重複波の節の位置に潜堤を設置することによって、より効果的な消波機能が得られることが明らかになった。最後にモデル港湾における数値実験を実施し、港内における消波潜堤の設置位置について考察した。

1. はじめに

近年、港内に停泊した船舶の動揺と長周期波との因果関係が明らかになり、港内における長周期波対策に関する研究が盛んに行われている。港内における長周期波反射対策工としては、スリットと粒径の異なる碎石層を組み合わせた方法（平石・永瀬, 2004）や遊水室を併設して反射波間の位相差を利用する方法（池野ら, 2004）、また、スリットケーソン内部で直立導水板を斜めに配置し、導水板間で水平渦を誘発して消波を促進させる方法（大島・森屋, 2005）など、様々な消波護岸が提案され、その消波効果が確認されている。しかしながら、いずれの消波護岸も構造が長大となり、建設コストや港湾レイアウトの機能性の観点で、実用上の問題点も残されている。

本研究では、長周期波の消波構造物として透過式潜堤に着目する。通常の消波護岸では消波構造物を護岸反射面の近傍、すなわち、水平流速が相対的に小さい重複波の腹の位置に設置するために、特に長周期波を対象とする場合には流速低減による消波効果が得られにくい。これに対して透過式潜堤では、流速の大きな重複波の節の位置に設置することによって、流速低減によるより効率的な消波効果が期待できる。港内に潜堤を設置すると航行船舶の障害となる恐れもあるが、港湾レイアウト上港内への潜堤の設置が可能であれば、消波護岸に比べて潜堤には上述したような利点があると考えられる。

本論文では、潜堤や通常の消波護岸などの任意形状の透過層による波の変形・減衰を考慮した波浪場算定モデル（田島ら, 2005）を用いて、透過式潜堤による長周期波の消波機能について検証する。

2. モデルの概要

透過式潜堤周辺における波浪の伝播・減衰計算には田島ら（2005）のモデルを用いる。透過層を考慮した波浪場の算定モデルとしては、Cruz ら（1997）のように透過層域と水域を分割した 2 層のモデルも提案されているが、本モデルでは、通常の急勾配斜面を有する消波構造物への波の遡上などが比較的容易に算定できる Madsen ら（1997）の単層ブシネスクモデルを基にした次の運動方程式を用いている。

$$\left(\frac{\tau_v}{\lambda}\right)\frac{\partial P}{\partial t} + \left(\frac{\tau_x}{\lambda}\right)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{A}\right) + gA\frac{\partial \eta}{\partial x} + \Psi_x + D_{sp} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで P : 線流量, η : 自由水面水位, A : 間隙部分のみを考慮した間隙水深, $\lambda = A/(h+\eta)$: 全水深に占める間隙水深の割合, ε : 空隙率, Ψ_x : ブシネスク方程式の分散項である。図-1 にこれらの変数の定義を示す。 τ_v および τ_x は、透過層における慣性力を考慮した係数である。

透過層による減衰項 D_{sp} は、鹿島・長谷川（2003）と同様に次の管路抵抗モデルで算定する。

$$D_{sp} = \frac{f_s}{4R} \frac{z_l}{2} |U_s| U_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで f_s : 透過層による抵抗係数, z_l : 透過層高さ, R : 透過層を管路とみなした場合の径深, U_s : 透過層内における流速である。抵抗係数 f_s は、透過層を構成する

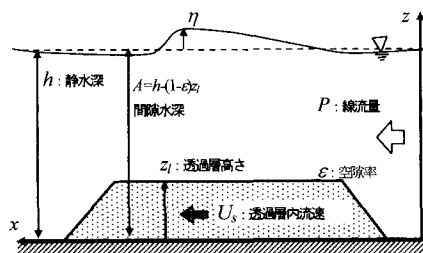


図-1 透過層モデルの概要

* 正会員 Ph.D. 五洋建設(株)技術研究所
** 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
*** 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所

ブロックの形状や大きさ、ブロックの積み方などによって変化する。透過層の条件に応じて値を設定する必要がある。本研究ではテトラポッドによる乱積み堤を対象とし、室内実験および現地スケール(鹿島・長谷川, 2003)での実測結果(図-2)に基づく次式で f_s を算定する。

$$f_s = 310Re^{-1} + 0.94 \quad (3)$$

ここで $Re = U_s 4R/\nu$ はレイノルズ数、 ν は流体の動粘性係数である。テトラポッドの径深 R はテトラポッドの高さ h_t を用いて $R = 0.103h_t$ で算定する。

最後に式(2)の透過層内流速 U_s については、次の透過層内における非線形長波運動方程式を用いて算定する。

$$\tau_v \frac{\partial U_s}{\partial t} + \tau_x U_s \frac{\partial U_s}{\partial x} - \tau_x U_{zi}^2 \frac{\partial z_i}{\partial x} + g\varepsilon \frac{\partial \eta}{\partial x} + D_{sp} = 0 \quad (4)$$

ここで左辺第三項は透過層の境界面を通過する水平流速による移流項であり、 U_{zi} は境界面上での水平流速である。本研究では、移流項に2次の風上差分を用いて、 U_{zi} を式(1)で算定した断面平均流速で代表させた。自由水面を含む全水深が透過層内にある条件では、式(4)は分散項 Ψ_x を除いて式(1)と一致する。しかしながら、潜堤条件のように透過層域と水域が混在した条件では U_s は P から算定される断面平均流速 U とは異なる。たとえば後述するテトラポッド乱積み潜堤による実験条件では、 U_s は U よりも小さくなり、式(2)で U_s の代わりに U を用いると透過層による減衰項を過大評価した(田島ら, 2005)。

3. モデルの検証

モデルの妥当性を確認するために、次に示すテトラポッドによる消波工および潜堤を用いた室内実験を実施し、モデルによる再現計算を試みた。

(1) テトラポッド乱積み式消波工による実験

延長50 m、幅60 cm、深さ1.2 mの断面二次元水槽の一樣水深部に、直立壁とその前面にテトラポッドを全断面乱積みした消波護岸を設置し、様々な波形勾配の規則波を入射させた(図-3)。実験スケールは実スケールの1/30とし、テトラポッドの模型は実スケールで4 t型のテトラポッドを再現する130 g型のものを用いた。

消波護岸の反射率が0.46程度となった入射波周期 $T=1.82$ sのケースについて、消波護岸前面における波高分布の計算値と実測値を図-4に比較する。図にみられるように、モデルは部分重複波の波高と腹節の位置を妥当に再現できている。図-5には、入射波の周期(相対水深)を変えたそれぞれの条件に対して、消波護岸の反射率を比較する。図に示した反射率は、実測値および計算値ともに、香取ら(1992)の波形追跡による入射分離法を用いて水位の時系列データから算定した。図より、消波護岸による反射率は、波長が長くなるほど大き

くなり、モデルはこの現象を適切に再現している。

(2) テトラポッド乱積み式潜堤による実験

上述の消波護岸と同じ断面水槽にテトラポッドによる高さ13 cm(天端水深10 cm)、天端幅2 mの潜堤を設置し、波形勾配の異なる様々な規則波を入射させて潜堤周辺における水位変動を計測した。図-6に入射波形勾配の異なる3ケースを対象として、潜堤周辺での波高分布について実測値と計算値を比較した。なお、Case2については、同じ入射波条件で不透過式潜堤を用いた場合の実測値と計算値も比較した。いずれのケースにおいても、モデルは潜堤前面における部分重複波の波高と潜堤背後の透過波の波高を妥当に再現できている。本モデルを用いることで、透過式潜堤および消波工による波浪変形・減衰を精度良く再現できることが示された。

4. 透過式潜堤による消波効果の検証

次に本モデルを用いた数値実験を行い、透過式潜堤による長周期波の消波効果について検証する。

(1) 実スケールにおける消波効果の確認

図-6のCase3には、実験と同じ条件でスケールを30

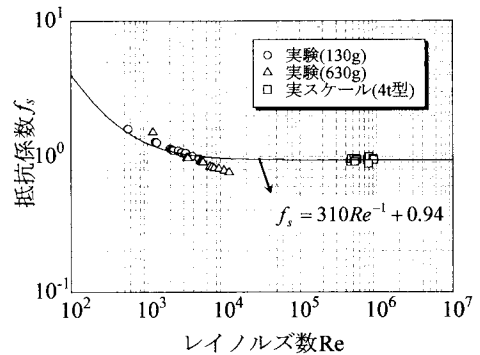


図-2 乱積みテトラポッドによる透過層の抵抗係数 f_s

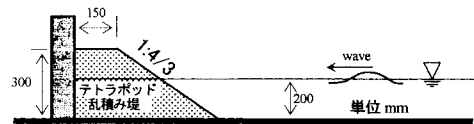


図-3 消波護岸の形状

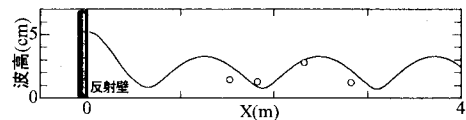


図-4 波高分布

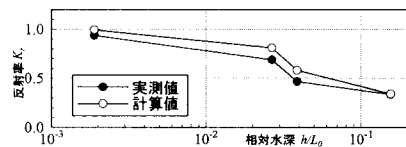


図-5 周期別反射率の比較

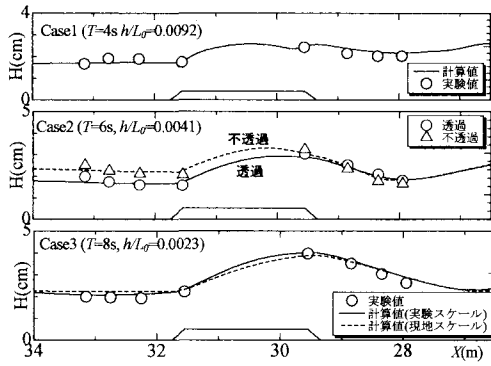


図-6 潜堤周辺における波高分布

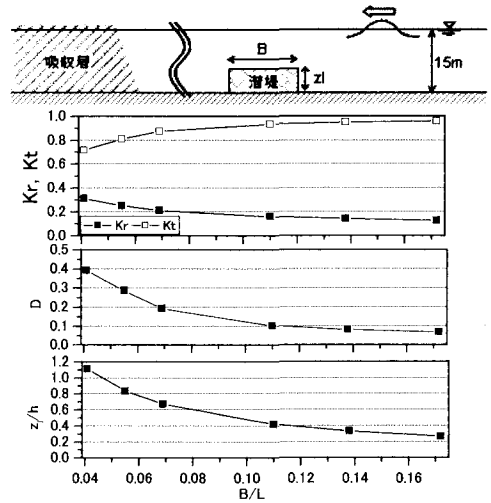
倍とした現地スケールでの計算結果も破線で示した。図より、現地スケール条件では実験スケール条件に比べて潜堤背後の波高がやや大きくなったが、その差異は微小だった。潜堤中央部での流速の計算結果から算定したレイノルズ数(図-2の横軸)を比較したところ、実験スケールではその値が 10^3 オーダーとなり、現地スケールでは 10^5 オーダーとなった。図-2に示した乱積みテトラポッドの抵抗特性では、レイノルズ数が 10^3 程度以上のときは抵抗係数 f_s がほぼ一様となっている。このことから、本実験結果による波高減衰量は現地スケールにおけるそれとほぼ同等であったと考えられる。以下の検討では、10t型テトラポッドの乱積みによる透過層を想定して数値実験を行う。

(2) 潜堤の形状とエネルギー吸収率

波浪減衰効果と潜堤の高さ z_l および天端幅 B との関係を調べるために、潜堤の断面積 $S = Bz_l$ を一定($=5000 \text{ m}^2$)とした条件で B と z_l を変化させ、それぞれの条件で潜堤前面の入射波高 H_{in} および透過層による反射波高 H_r 、潜堤背後の透過波高 H_t を算定した。入射波条件は、長周期波を想定して波高50 cm、周期60 sとし、潜堤周辺の水深 h は一律に15 mとした。図-7に数値実験条件の概要図と、天端幅 B に対する反射率 K_r ($=H_r/H_{in}$)と透過率 K_t ($=H_t/H_{in}$)、透過層によるエネルギー吸収率 $D = 1 - (H_r^2 + H_t^2)/H_{in}^2$ の計算結果を示す。図中 L は一律水深部での波長である。図より、透過層の断面積を同一とした条件では、天端幅 B を延長するよりも天端高さ z_l を大きくした方が、透過層内でのエネルギー減衰率 D が大きくなることが分かった。しかしながら、天端高さを高くすると潜堤による反射率も大きくなるため、港内など多重反射波が顕著となる場では、潜堤による反射波の影響についても考慮する必要があると考えられる。

(3) 重複波条件下での消波効果

直立護岸などの反射境界前面は、重複波の腹に位置するため、相対的な水平流速が小さくなる。したがって、

図-7 天端幅 B を変化させた時の K_r および K_t

透過式潜堤のように流速低減による波浪減衰効果を図った消波構造物では、その設置位置を反射壁前面とするよりも、少し離れた地点で水平流速が相対的に大きな場所とすることによって消波効果の改善が見込める。ここでは、透過式潜堤の設置位置を反射境界から離れた条件で数値実験を行い、効果的な長周期波の消波機能が得られる潜堤の最適設置位置について検証する。数値実験では前節(2)で天端幅 B を50 mとした潜堤を対象とし、直立壁と潜堤設置位置の距離を変えながら、潜堤手前の一様水深部における波高分布から反射率を算定した(図-8)。図-8には、潜堤の設置位置を変化させたそれぞれの条件について、潜堤の上手側(図-8右側)での波浪場の計算結果から算定した反射壁+潜堤の反射率を示す。図の横軸 X は反射面からの距離を表し、一様水深部での波長 L を用いて無次元化した。さらに図には、潜堤を設置しなかった場合、あるいは、反射率が最小となったときの潜堤設置位置($X/L = 0.17$ および 0.65)における、重複波の波高および断面平均流速振幅をそれぞれ示した。ここで図の波高および流速は、それぞれ入射波の値で除して無次元化した。図に見られるように、潜堤を $X/L = 0.17$ の位置に設置した条件では、潜堤の設置位置で水位の変動振幅が極小値、流速振幅が極大値となっており、この地点が部分重複波の節の位置であったことがわかる。図の流速振幅の比較で流速が局所的に大きくなっているのは、潜堤位置で全水深が小さくなったことによるものである。

以上の結果から、潜堤の設置位置を流速振幅が大きな部分重複波の腹の位置とすることによって、長周期波の反射率を効果的に低減できることが分かった。また、潜堤を設置した場合には、潜堤位置での水深が小さくなるために波長が短くなり、結果として部分重複波の節の位置は

潜堤を設置しなかった場合に比べて反射壁側に近づいた。透過式潜堤の最適配置を検討する際には、潜堤による水深変化も考慮した波浪変形計算を実施し、流速振幅が極大となる地点を正確に算定する必要があると考えられる。

(4) 不規則波条件下での消波効果

不規則波条件下における透過式潜堤の消波機能について検証するため、上述(3)の実験条件で潜堤を設置しなかった場合 (caseA)、潜堤の設置位置をそれぞれ $X/L = 0.04$ および $X/L = 0.17$ とした場合 (caseB および C) の3ケースについて数値実験を行った。入射波は長周期波成分を考慮した有義波高2.0 m、有義波周期8.0 sの不規則波とし、短周期成分については Bretschneider-光易型スペクトルに従うものとして、長周期成分については拘束波と同等なエネルギーを有する自由波として与えた。数値実験では、一様水深部における部分重複波の水位変動の時系列データから、フーリエ変換を用いて10 s 間隔の周期帯に成分分割し、それぞれの周期帯における自乗平均波高の空間分布を算定した。図-9に、周期帯を60~70 s、70~80 s とした場合の部分重複波波高の空間分布を示す。図の波高は、入射波の同じ周期帯成分の波高で除して無次元化した。図の周期帯60~70 sの波高分布を見ると、case Cでは他のケースに比べて潜堤の上手(図中右)側で波高分布が一樣となっており、反射波成分が消失しているのが分かる。これは、前述の規則波による数値実験結果、すなわち、潜堤を case Cの

位置に設置することによって、周期60 sの波を最も効率よく消波できた結果と合致する。これに対して、周期帯70~80 sの波高分布では、全てのケースで潜堤右側の波高分布が波状になっており、反射波成分の減衰効果が低かったことが分かる。図-10には、上述の3ケースについて、周期帯ごとに算定した潜堤上手側の部分重複波の波高の最大値と、同じ周期帯における入射波成分の波高の比 H_{max}/H_{in} を示す。ここで、 H_{max}/H_{in} が2に近ければシステムが完全反射条件に、1に近ければ無反射条件に近かったことを示す。潜堤を設置しなかった case Aでは全ての周期帯で H_{max}/H_{in} が2となった。これに対して潜堤を直立壁に接続させた Case Bでは、周期帯が40~50 s 上となると H_{max}/H_{in} が大きくなって消波効率が低下した。また case Cでは、周期帯20~30 s、30~40 s では H_{max}/H_{in} が case B よりもやや大きくなったものの、周期70 s までの周期帯で H_{max}/H_{in} が1.5程度となり、高い消波効率が維持できた。case Cで、重複波の節の位置が潜堤の設置位置とは一致しない周期60 s 未満の周期帯の成分波でも高い消波効率が得られたのは、直立壁と潜堤の間でこれらの周期帯の波が多重反射して位相がずれたことなどが原因として考えられるが、今回の数値実験ではそれを証明するまでには至っていない。

(5) モデル港湾における消波効果の検証

最後に、図-11に示すようなモデル港湾を想定し、透過式潜堤による消波効果を検証した。モデル港湾周辺の水深は一律に15 m とし、計算ケースとしては、消波対策工を設置しなかった場合、防波堤港内側に消波工を設置した場合、さらに、潜堤2基を設置した場合(2ケー

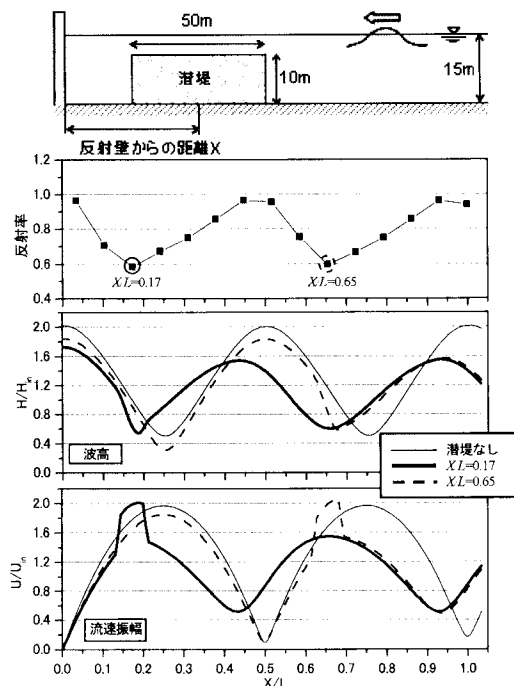


図-8 潜堤設置位置を変化させた場合の反射率と波高および流速振幅の岸沖方向分布

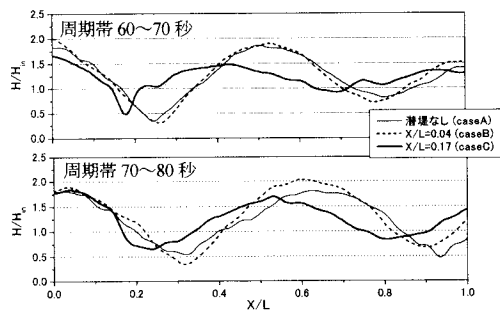


図-9 周期帯60~70 s、70~80 sの成分波の波高分布 (Lは図-8と同様に周期60 sに対する波長)

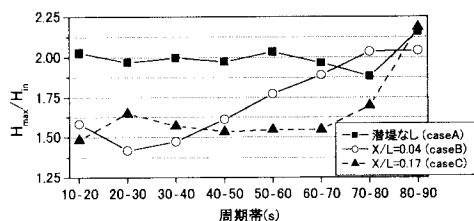


図-10 周期帯別成分波の H_{max}/H_{in}

ス)の合計4ケースを考慮した。消波工の条件では図-11に示す防波堤AB及びCDに10t型テトラポッドを天端幅10m, 天端高+2.0mで全段面乱積みとした。一方, 潜堤条件では幅200m, 延長300m, 高さ5m(天端水深10m)の潜堤を, 図-11に示した設置領域1~3のうち, 2および3, あるいは1および3に設置した。また比較のために, 消波工あるいは潜堤2基を設置した場合の, テトラポッドの使用数量は同数とした。入射波は有義波高2.0m, 有義波周期8.0s, 主波向0度, 方向集中度(S_{max})が25の多方向不規則波とした。長周期成分についても主波向を0度とし, 方向分布関数を光易型で与えた($S_{max}=5$)。

図-11には消波対策工なしの条件における港内の長周期波成分(50~70s)の流速振幅の平面分布も示した。図より, 港内に節が3つ入る重複波浪場が形成されている。潜堤の設置位置については, この周期帯(50~70s)成分の消波をターゲットとして, この周期帯成分の流速振幅が大きかった領域として, 図-11の3領域を選択した。

図-12には, 消波工を設置しなかった場合と潜堤2および3を設置した場合における, 長周期波成分(50~70s)の自乗平均波高の平面分布を示す。ただし, 波高は入射波の値($H_{in}=0.02$ m)で除して無次元化した。両者を比較すると, 潜堤を領域2および3に配置することにより, 長周期波成分の波高が効果的に減衰されている。

図-13には図-12で示した長周期波成分の無次元波高のABCD線上(図-11)における分布を示す。図にみられるように, 消波工を設置した場合で1割, 潜堤2および3を設置した場合で2割程度の長周期消波効果が確認できた。さらに, 消波工ではあまり減衰効果が見られなかったAB及びCD線上においても潜堤の場合は長周期波減衰効果が確認できた。また, 潜堤2の代わりに, 流速振幅が最も大きかった港口の潜堤1を設置した条件では, 潜堤2および3を設置した場合に比べて港内の波高低減効果が小さかった。以上より, 港口に潜堤を設置するよりも, 多重反射波が何度も通過する港内に潜堤を設置したほうが港内波の消波効率は高かった。

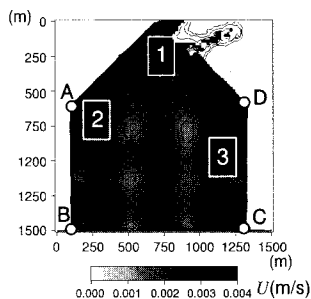


図-11 長周期成分(50~70s)の流速振幅と潜堤の設置位置

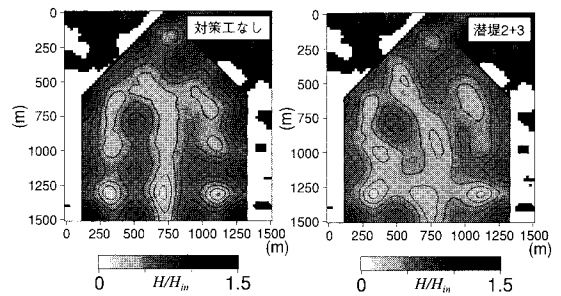


図-12 長周期成分(50~70s)波高の平面分布

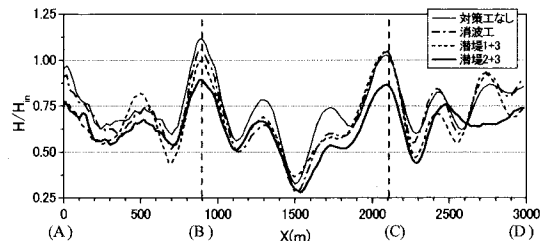


図-13 防波堤沿いの長周期成分(50~70s)波高の比較

5. おわりに

長周期波の消波構造物として透過式潜堤に着目し, 著者らが開発した任意形状の透過層周辺における波浪変形モデルを用いた数値実験を行ってその消波機能を検証した。重複波条件下での消波効果は潜堤の設置位置に大きく依存し, 潜堤を水平流速が大きな重複波の節の位置に設置することによって, より効果的な長周期波の消波機能が得られた。

参考文献

- 池野勝哉・熊谷隆宏・森屋陽一・大島香織・関本恒浩 (2004): 長周期波を対象とした直立消波構造物の開発, 海工論文集, 第51巻, pp. 731-735.
- 大島香織・森屋陽一 (2005): 導水板によるスリット構造物の長周期波浪特性, 海洋開発論文集, vol. 21, pp. 791-796.
- 鹿島遼一・長谷川寛 (2003): 消波ブロックによる放水口減勢工の抵抗係数について—実規模テトラポッドの抵抗係数, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 535-540.
- 香取完和・平良達也・水口優 (1992): 波形追跡法による入反射の分離, 海工論文集, 第39巻, pp. 16-20.
- 田島芳満・小塚将之・大島香織 (2005): 透過式潜堤による非碎波波浪の低減効果およびその評価手法について, 海洋開発論文集, vol.21, pp. 499-504.
- 平石哲也・永瀬恭一 (2004): 長周期波対策護岸の最適構造に関する実験, 海工論文集, 第51巻, pp. 721-725.
- Cruz, E.C., M. Isobe, and A. Watanabe (1997): Boussinesq equations for wave transformation on porous beds, Coast. Eng., vol.30, pp. 125-156.
- Madsen, P.A., O.R. Sorensen, H.A. Schaffer (1997): Surf zone dynamics simulated by a boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coastal Eng., 32, pp. 255-287.