

多層透水層による波浪変形特性に関する実験的研究

間瀬 肇・作中淳一郎*・安田誠宏・Changhoon Lee**・
中平順一***・新井雄太郎***

*京都大学大学院工学研究科

**韓国Sejong大学

***八千代エンジニアリング株式会社

要 旨

本研究では、多層の透水層による波浪変形を予測する理論式を誘導した際にその検証データが必要となることを考慮し、水理実験により鉛直方向に透水性が異なる場合および水平方向に透水性が異なる場合についての波浪変形に関する実験データ（波高減衰率、線形抵抗係数、反射率、透過率）を整理し、その特性を検討する。

キーワード：多層透水層、波高減衰、線形抵抗係数、反射率、透過率

1. 結 論

透水性が高い砂礫層からなる海底地盤や捨石潜堤上を伝播する波浪変形、港内での長周期波対策用の消波層による波の変形、また消波構造物を平面的に設置した場合の波浪低減効果を算定するためには、透水層を考慮した波浪変形理論が必要である。その際、鉛直方向に透水性が異なる砂礫層からなる海底地盤、外側被覆層と内側裏込層の透水性が異なる多層の捨石防波堤や離岸堤による波浪変形特性を知るためには、多層透水層の影響を考慮できる波浪モデルが必要である。

泉宮・遠藤(1989)、Somchaiら(1989) および間瀬ら(1994) は、透過性構造物による波浪変形や透水層上を伝播する波の変形を予測可能な緩勾配方程式を導いた。これらの波動方程式の中には、透水層内での流体運動に対する抵抗力を表すために、線形抵抗係数が含まれている。

本研究では、単層と2層の透過性地盤上の波高減衰の水理模型実験結果をもとに、透水層の材質、波高、周期の条件ごとに線形抵抗係数についてのデータを整理し、単層の場合と多層の場合の相違について検討する。また、直立消波堤による反射および透過に関する水理模型実験も行い、多層透水層の影響を考察する。

これらの実験データは、今後誘導する理論式（多層透水層を考慮した緩勾配方程式、放物型方程式およびブシネスク方程式）の検証に用いる。

2. 透水層による波浪変形の理論

実験結果を整理する上で、透水層を考慮した波の分散方程式が必要である。ここでは、間瀬ら(1994) の緩勾配方程式とともに分散関係式を示す。緩勾配方程式は、Fig. 1 に示す条件の元で得られる。

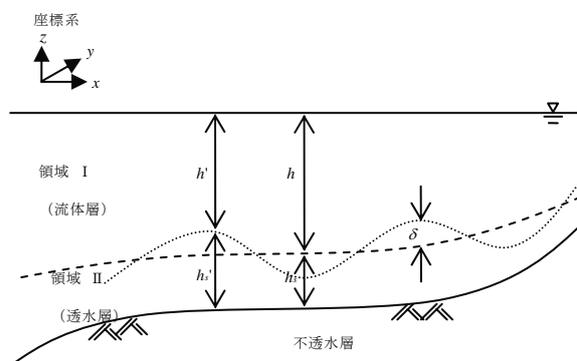


Fig. 1 Coordinate system of mild-slope equation on permeable layer

記号は、 $h'(x)$: 全水深、 $h(x)$: 平均水深、 $\delta(x)$: 水深の凹凸、 $h'_s(x)$: 全透水層厚、 $h_s(x)$: 平均透水層厚である。式の誘導に当たっては、緩勾配と微小振幅、および水深変動凹凸が波長オーダーであることを仮定する。

最終的な方程式は、以下のように表される。

$$\nabla_h \cdot \left\{ \left(p + \frac{q}{\gamma} \right) \nabla_h \tilde{\phi} \right\} + \left(p + \frac{q}{\gamma} \right) k^2 \tilde{\phi} - \frac{\cosh^2(kh_s)}{D^2} (1-\gamma) \nabla_h \cdot (\delta \nabla_h \tilde{\phi}) = 0 \quad (1)$$

ここで、

$$p = \frac{1}{4kD^2} \left\{ \begin{aligned} & \cosh^2(kh_s) \sinh(2kh) \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right\} \\ & + \gamma \sinh(2kh_s) \{ \cosh(2kh) - 1 \} \\ & + \gamma^2 \sinh^2(kh_s) \sinh(2kh) \left\{ 1 - \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{4kD^2} \left\{ \gamma^2 \sinh(2kh_s) \left\{ 1 + \frac{2kh_s}{\sinh(2kh_s)} \right\} \right\} \quad (3)$$

$$\gamma = n / (\tau + if) \quad (4)$$

である。また、分散関係式は以下のものである。

$$\omega^2 = gk \frac{\tanh(kh) + \gamma \tanh(kh_s)}{1 + \gamma \tanh(kh) \tanh(kh_s)} \quad (5)$$

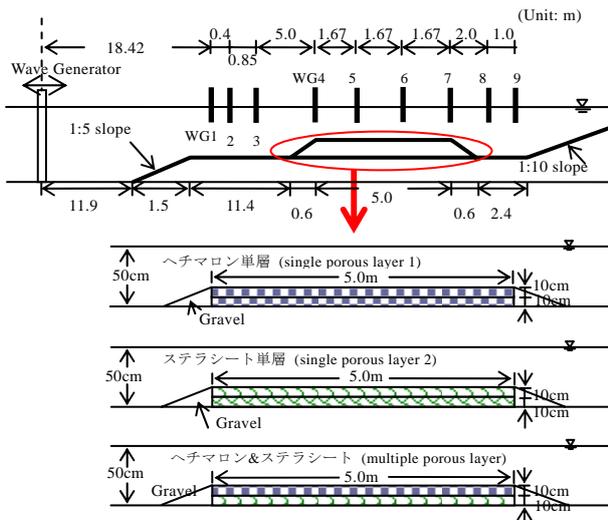


Fig. 2 Cross section of permeable seabed case

3. 実験装置および実験条件

3.1 実験装置

透水層の材料として用いたのがヘチマロン（新光ナイロン株式会社）とステラシート（日建工学株式会社）である。空隙率はヘチマロンが94%、ステラシートが93%であった。ヘチマロンはどの方向から見ても同じ割合で空隙が存在しているようであるが、ステラシートは等方性ではないようである。

透水性海底地盤上を伝播する波浪変形実験の模型設定状況を Fig. 2 に示す。直立消波堤による反射・透過実験のための模型設置状況は、Fig. 3 に示す。

Fig. 2 の実験では、ヘチマロンやステラシートを用いて、厚さ 20cm および幅 5.0m の海底地盤を作製し、その上を伝播する際の波高減衰を測定した。Fig. 3 の実験では、幅 60cm および高さ 100cm の直立消波堤モデルを設置し、その沖側と岸側で波を測定した。模型縮尺は 1/30 を想定した。

3.2 実験条件

反射波吸収型造波装置により、規則波および不規則波を造波した。一樣水深領域の水深は 50cm とした。規則波実験の場合、波高を 3.0cm および 6.0cm とし、それぞれのケースに対して周期を 1.0s, 1.5s および 2.0s とした。不規則波実験の場合は、有義波高を 3.0cm と 6.0cm にし、それぞれに対して有義波周期を 1.0s, 1.5s および 2.0s とした。

4. 実験結果および考察

4.1 透水層上を伝播する波浪変形

ここでは、単層および鉛直方向に透水性が異なる

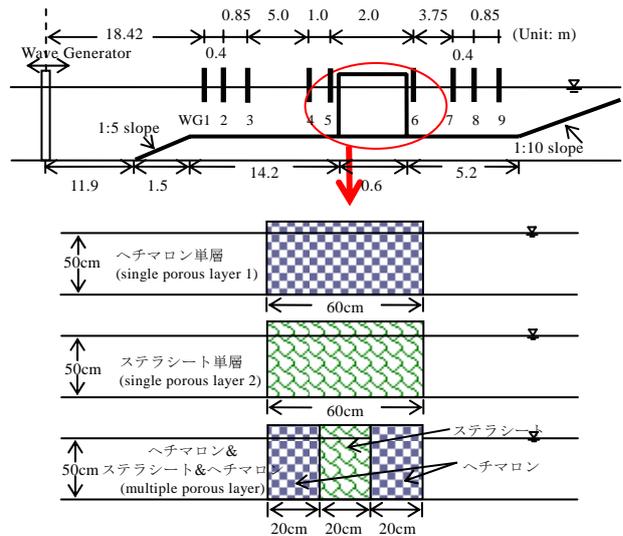


Fig. 3 Cross section of permeable breakwater case

多層（実際には2層）の透水性地盤上における波浪減衰の数理実験データを解析する。透水層上を伝播する波の水位変動は、次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \eta &= A \exp\{i(kx - \omega t)\} \\ &= A \exp(-k_i x) \exp\{i(k_r x - \omega t)\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 k_r および k_i は、それぞれ分散関係から得られる複素波数 k の実数部および虚数部である。式(6)からわかるように、透水層上の伝播に伴い波の振幅は指数関数的に減衰する。波振幅の空間的变化から波高減衰係数 k_i が求められる。式(5)を用いて k_i から線形抵抗係数 f の値が求められるが、その際、慣性係数 τ の値が必要である。しかし、 k_i が小さい場合には、 τ にあまり影響されないため、線形抵抗係数 f の算定に当たっては慣性係数 τ を 1.0 とする。波高減衰係数 k_i は、実験結果より求める。

Fig. 2 に示した透水層上にある波高計WG4, 5, 6, 7 地点の水位変動記録を用いて波高減衰を調べる。ここでは、規則波の実験データのみを用いる。波高計WG4 地点の波高を H_4 として、WG4, 5, 6, 7 地点での波高を H_x で無次元化する。横軸を WG4 からの距離とし、縦軸に無次元化した波高を対数軸でプロットし、指数関数で近似した線を描いたものが、Fig. 4～9 である。

Fig. 4 および 5 のヘチマロン単層（single porous layer 1）の場合は、周期が1.0s, 1.5s, 2.0s の順で波高減衰が大きくなった。

Fig. 6 のステラシート単層（single porous layer 2）の波高 3.0cm の場合には周期が 2.0s, 1.0s, 1.5s の順となった。同じくステラシート単層で波高 6.0cm の場合には、Fig. 7 によると、周期が 2.0s, 1.5s, 1.0s の順であった。ただし、周期 1.0s と周期 1.5s の波高減衰率には大きな差がない。

Fig. 8 および 9 のヘチマロン&ステラシートの場合（multiple porous layer）は、波高 3.0cm では、1.5s と 2.0s の波高減衰がほぼ同じであるが、概ね周期が 1.0s, 2.0s, 1.5s の順で波高減衰が大きくなっており、ステラシートの特性と同じである。

k_i に対して f は2つ求められる。小さいほうの値を f_1 、大きいほうの値を f_2 とする。Fig. 10～13 は線形抵抗係数 f_1 および f_2 を示したものである。Fig. 13 におけるステラシート単層の波高 6.0cm, 周期1.0s のケースでは、 k_i の値が大きく f が求まらなかった。

Fig. 10 および 11 によると、ヘチマロンの場合、周期が大きくなると f_2 は減少するが、 f_1 はほぼ一定である。線形抵抗係数とは透水層内での流体運動に対する抵抗力を表すもので、透水層ごとに固有の

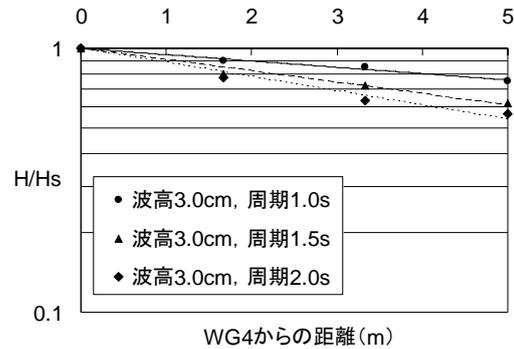


Fig. 4 Wave damping (wave height = 3.0cm using single porous layer 1)

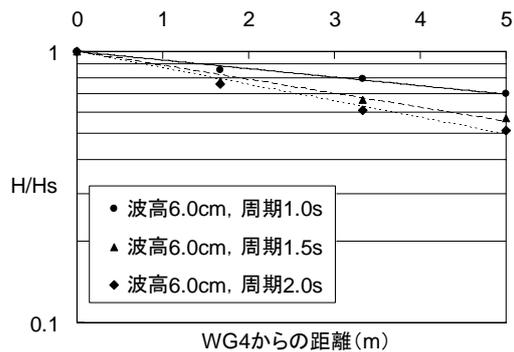


Fig. 5 Wave damping (wave height = 6.0cm using single porous layer 1)

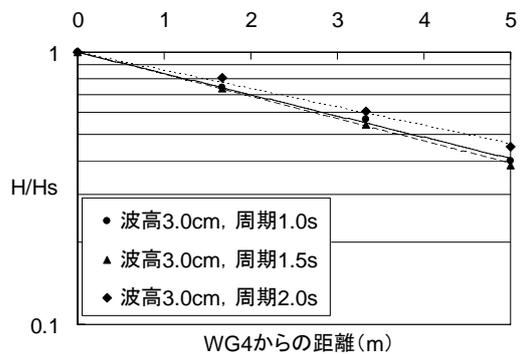


Fig. 6 Wave damping (wave height = 3.0cm using single porous layer 2)

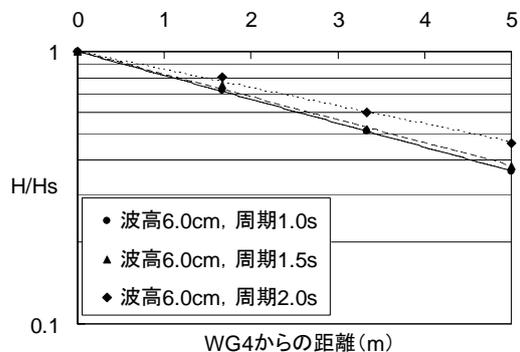


Fig. 7 Wave damping (wave height = 6.0cm using single porous layer 2)

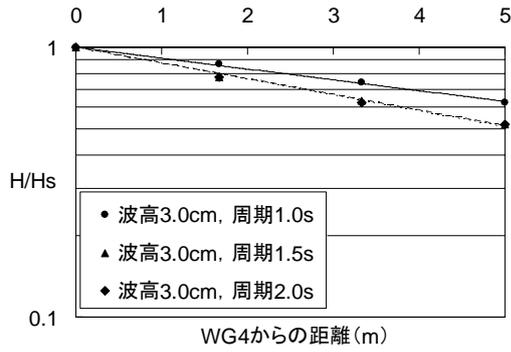


Fig. 8 Wave damping (wave height = 3.0cm using multiple porous layer)

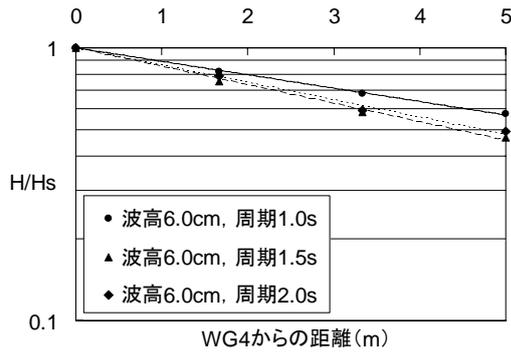


Fig. 9 Wave damping (wave height = 6.0cm using multiple porous layer)

値を持つと考えると、線形抵抗係数の値として f_1 を採用するのが良い。

ステラシートの場合は Fig. 12 および 13 より、線形抵抗係数 f_1 および f_2 の値はともに周期にかかわらずほぼ一定であるが、 f_1 のほうがより変化が小さい。ステラシートの線形抵抗係数 f_1 は、ヘチマロンのそれに比べて2~5倍である。

4.2 直立透水層による反射と透過

ここでは、透水層、周期、波高の条件ごとに直立消波堤における反射率や透過率を求め、単層と多層の直立消波堤による波浪変化特性を調べた。反射率は、Goda & Suzuki (2005)の方法によって算定した。

Fig. 14~17 は、それぞれ波高 3.0cm の規則波および不規則波、波高 6.0cm の規則波および不規則波の反射率を示したものである。どの条件においても周期が 1.0s, 1.5s, 2.0s の順で、反射率は大きくなる。透水層別にみると、ヘチマロン単層、ヘチマロン&ステラシート&ヘチマロン、ステラシート単層の順で反射率が大きくなる。

Fig. 18~21 は、Fig. 14~17 に対応する透過率を示したものである。これらの図から、すべての条件において周期が 1.0s, 1.5s, 2.0s の順で透過率が大きくなる。また、透過率は、ステラシート単層、ヘ

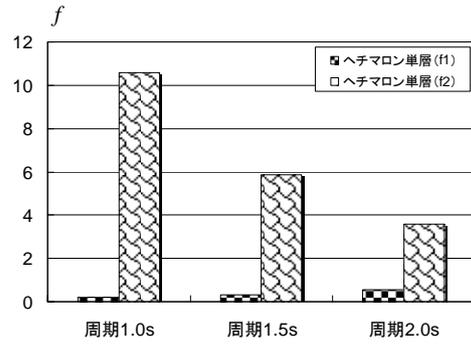


Fig. 10 Equivalent resistance coefficients of f_1 and f_2 (wave height = 3.0cm using single porous layer 1)

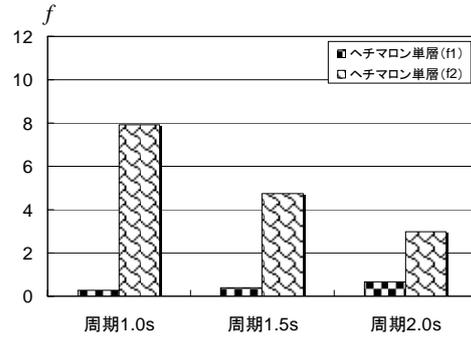


Fig. 11 Equivalent resistance coefficients of f_1 and f_2 (wave height = 6.0cm using single porous layer 1)

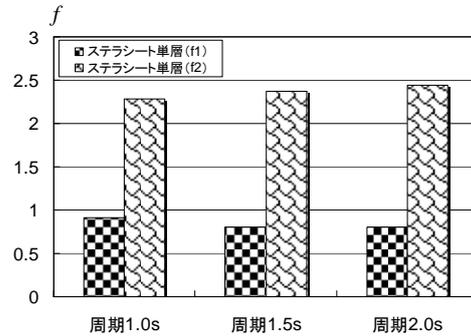


Fig. 12 Equivalent resistance coefficients of f_1 and f_2 (wave height = 3.0cm using single porous layer 2)

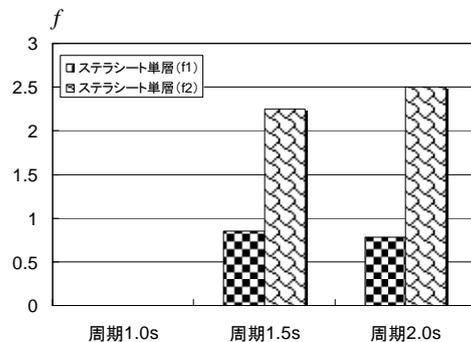


Fig. 13 Equivalent resistance coefficients of f_1 and f_2 (wave height = 6.0cm using single porous layer 2)

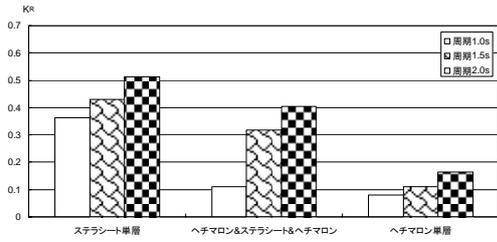


Fig. 14 Reflection coefficient (wave height = 3.0cm by regular wave)

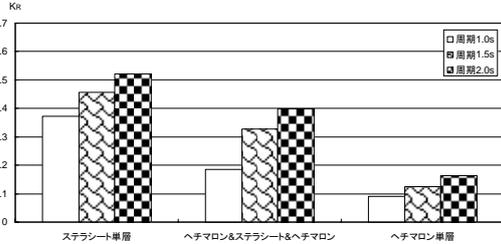


Fig. 15 Reflection coefficient (wave height = 3.0cm by irregular wave)

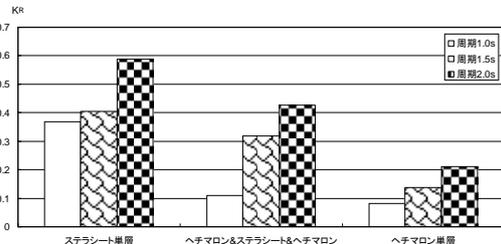


Fig. 16 Reflection coefficient (wave height = 6.0cm by regular wave)

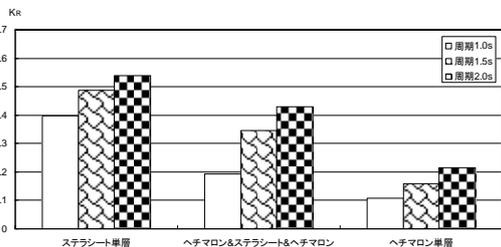


Fig. 17 Reflection coefficient (wave height = 6.0cm by irregular wave)

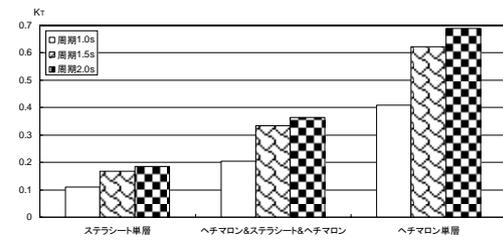


Fig. 18 Transmission coefficient (wave height = 3.0cm by regular wave)

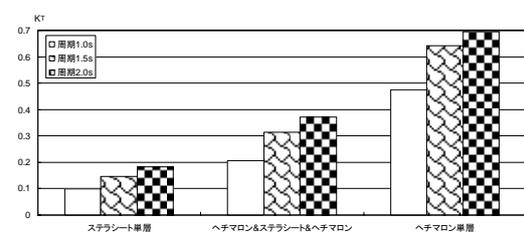


Fig. 19 Transmission coefficient (wave height = 3.0cm by irregular wave)

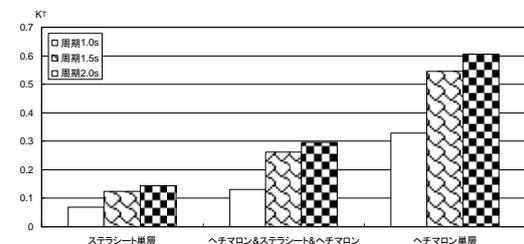


Fig. 20 Transmission coefficient (wave height = 6.0cm by regular wave)

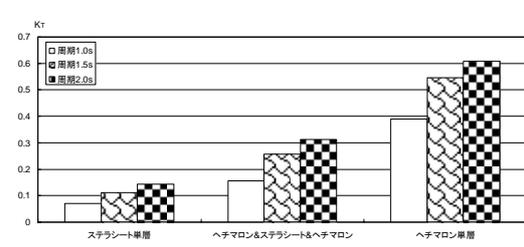


Fig. 21 Transmission coefficient (wave height = 6.0cm by irregular wave)

チマロン&ステラシート&ヘチマロン, ヘチマロン単層の順で透過率が大きくなる。

Fig. 14と15, Fig. 16と17, Fig. 18と19, Fig. 20と21の比較から, 規則波と不規則波による傾向の違いはほとんどないことがわかる。

5. 結語

ここで, 本研究で得られ1た主要な結果を整理し結論とする。主要な結果は, 以下のようである。

1) ヘチマロン単層の海底地盤の場合は, 周期が大きいほど波高減衰が大きくなった。一方, ステラシ

ート単層の海底地盤では, 周期が小さいほど波高減衰が大きくなった。

- 2) 線形抵抗係数はある波高減衰に対して2つ存在するが, 波の条件が変わってもあまりその値が変化しない f_1 を採用するのが良い。
- 3) 周期が大きいほど, 直立消波堤によるエネルギー散逸が小さく, 波の吸収や消波が難しい。
- 4) 規則波と不規則波の反射率や透過率の周期や波高, 透水層材料に対する変化傾向はほぼ同じであった。

本研究プロジェクトの最終目標は, 多層透水層を考慮した緩勾配方程式, 放物型方程式および拡張ブ

シネスク方程式などの波動モデルの導出と、これらの波動方程式を用いて実際の海岸に設置されている離岸堤群による波浪変形、港湾内に設置された消波構造物の影響、さらには、こうした消波構造物の最適設置場所を算定するための波浪変形予測モデルを構築することである。

今後、本研究で示した実験結果を検証データとして用いて行く。

参考文献

泉宮尊司・遠藤雅人(1989): 潜堤および透過性構造物

のある海浜における波動場解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.638-642.

間瀬 肇・竹葉 憲・酒井哲郎・喜岡 渉(1994): 波状透水層上の波動方程式と Bragg 散乱解析, 土木学会論文集, 第485号, II-26, pp.95-102.

Somchai・磯部雅彦・渡辺 晃(1989): 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.643-647.

Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976): Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proc. 15th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.828-845.

Experimental Study on Characteristics of Wave Deformation by Multi-Permeable Layer

Hajime MASE, Junichirou SAKUNAKA*, Tomohiro YASUDA,
Changhoon LEE**, Junichi NAKAHIRA*** and Yutaro ARAI***

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

** Dept. Civil and Environmental Engineering, Sejong University

*** Yachiyo Engineering, Co., Ltd.

Synopsis

This study examines wave deformation due to porous media of single and multi layers as modeled porous horizontal seabed and vertical breakwaters. By utilizing the theoretical dispersion relation including permeability of seabed, linearized friction factors of porous media are estimated through hydraulic experiments. The characteristics of friction factors are examined with respect to wave conditions and porous media. The reflection and transmission coefficients are also obtained for uniform and multiple porous breakwaters. These experimental data will be used as the verification data for newly developed wave models taking into account of multiple porous layers installed in coastal areas.

Keywords: porous seabed, porous structures, wave deformation, wave reflection, wave transmission, linearized friction factor