

透水性テラス護岸の越波流量算定法

A CALCULATION METHOD OF WAVE OVERTOPPING RATE ON PERMEABLE TERRACE-TYPE SEAWALL

谷本勝利¹・齋藤将人²・信太秀哉³

Katsutoshi TANIMOTO, Masato SAITO and Hideya SHIDA

¹フェロー会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工修 福島県 いわき建設事務所 (〒970-8026 いわき市平字梅本15番地)

³ (株) ソフトウェアクレードル 東京営業所 (〒141-0022 東京都品川区東五反田1-6-3)

The permeable terrace-type seawall is a seawall with a wave chamber filled by wave dissipating materials like stones or concrete blocks between a permeable front wall and an impermeable rear wall. In the present paper, a calculation method of wave overtopping rate on the permeable terrace-type seawall has been proposed on the basis of laboratory experimental results. The performance to reduce wave overtopping is discussed in comparison with conventional vertical seawall and sloping seawall. It is concluded that the permeable terrace-type seawall can reduce wave overtopping effectively with a low crest height and less wave dissipating materials comparing with a sloping seawall. An example of application to the field site at the water depth of 12m including tide demonstrates that the permeable terrace seawall with the crest height of 2.4m and the width of 8.5m satisfies the allowable overtopping rate of $0.01\text{m}^3/\text{m/s}$ against design waves of 9.05s in the significant wave period and 3.0m in the significant wave height.

Key Words : Seawall, permeable terrace, wave overtopping, expected overtopping rate

1. はじめに

台風の常襲国であるわが国では、高潮・高波による越波災害が毎年のように発生している。越波を防ぐには天端を高くすればよいが、天端を高くすると、景観を損なうとか日々の生活に不便をきたすとかの問題が生じる。つまり、現代の港湾・海岸防災施設の整備においては、防災機能ばかりでなく、平時の利用や環境といった面への配慮が求められている。

そのため、たとえば横須賀港馬堀海岸地区の埋立護岸では、高潮災害後、低天端を維持したままで防災機能の向上を図ることを基本として、平時の利用や環境共生に配慮した人工リーフ付き透水性護岸が採用された¹⁾。これは、図-1に示すように三段構造となっており、最初の段(人工リーフ)で波を強制的に砕波させて波高を減じ、二段目、三段目の透水構造で波を吸収するものである。二段目、三段目の部分は平時においては、写真-1に示しているように、遊歩道として市民に開放され活用されている。

しかしながら、この構造は図にも見られるように大断面であり、どこでも採用できるというものではない。そのため、低天端でかつコンパクトな形で、

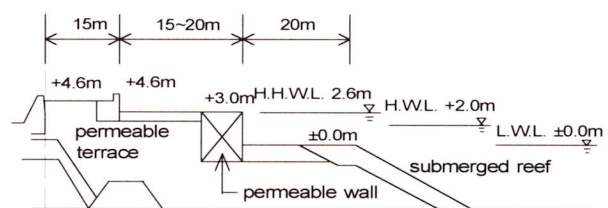


図-1 横須賀港馬堀海岸地区護岸断面



写真-1 横須賀港馬堀海岸地区護岸

越波を効果的に防ぐ構造の開発が望まれる。筆者らはこれに応えるため、低天端の直立構造であって、越波軽減効果の高い構造の開発を目指した研究を行っている。具体的には、直立の透過前壁と不透過後壁の間に石あるいは特殊なブロックを詰めた構造で、これを透水性テラス護岸と呼ぶ。これは、図-1の構造で言えば、人工リーフを廃して直立構造とし、かつ一段の透水構造としたものに相当する。波高が大きい場合などにおいては、沖に潜堤を設けた複合型とすることも考えられる。

本論文では、そうした透水性テラス護岸の可能性を明らかにすることを目的として、基本的な構造について模型実験を行い、越波流量の算定法を提案するとともに、在来構造と越波軽減性能を比較・検討するものである。

2. 越波実験の概要

越波を考える場合、不規則波を対象とするのが原則であるが、規則波の越波流量の算定式が得られれば、波高の確率分布を用いて、不規則波の期待越波流量を求めることができる。そのため、本研究では、第一段階として規則波による越波実験を行う。実験に用いた造波水路は、全長18m、幅0.4m、高さ0.7mで、水深 h は37.5cmで一定とした。透水性テラス護岸の模型は、図-2に示しているように、木製の縦スリット前壁（空隙率0.49）と不透過後壁の間に碎石（平均粒径2.5cm）を詰めたもの（空隙率0.48）で、透水部の幅 B_p を0（通常の直立壁に相当）、18、36、70cmの4種、天端高 h_c を5.5、7.5、9.5cmの3種に変化させた。写真-2は水路に設置した模型を正面から見たものである。実験波は周期 T が1.2～2.0s、入射波高 H_I が5～13cmの範囲の25種で、いずれも非碎波の条件である。

実験では、波高と越波量を測定した。越波量は後壁に幅8cmの樋を設け、造波板からの再反射波の影響を避けた有効測定時間内で3～4波分の越波水を容器にとり、それを（樋の幅×波数×周期）で割って、単位長さあたりの越波流量 q_0 とした。

図-3は $h_c=7.5$ cm、 $T=1.6$ s、 $H_I=12.4$ cmの場合の波高（ H ）、峰の高さ（ η_c ）、平均水位（ η_m ）、谷の深さ（ η_t ）の分布を、 $B_p=0$ 、18、36、70cmに対して示したものである。図中、 x は不透過後壁からの

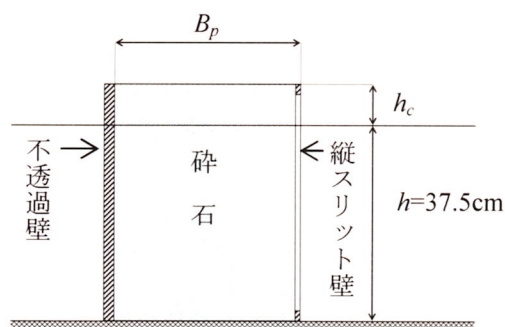


図-2 透水性テラス護岸模型断面



写真-2 透水性テラス護岸模型（ $B_p=70$ cm）

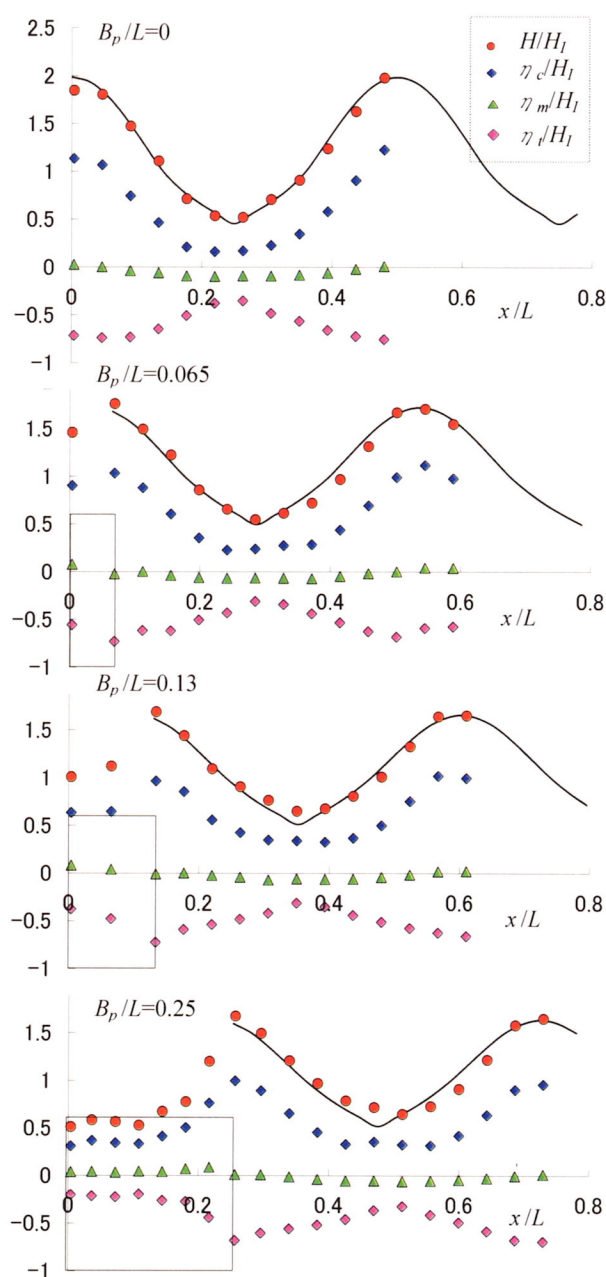


図-3 波高、平均水位、波の峰・谷の高さの分布

距離, L は入射波の波長である. $B_p=0$ の結果は通常の直立壁に相当し, 前面に重複波が形成される. 透水性テラスを設けた場合の結果では, 波高は透水性テラス前面で高く, テラス内で減少していく. 不透過後壁での波の峰の高さ(波頂高)が天端高より高くなれば越波が生じるが, 越波流量は $B_p=0, 18, 36, 70\text{cm}$ の場合, それぞれ37.31, 15.44, 1.12, 0 $\text{cm}^3/\text{cm/s}$ と減少傾向を示す. また, 反射率を有限振幅部分重複波第3次近似理論²⁾による波高分布と比較することによって求めると, それぞれ, 0.90, 0.66, 0.60, 0.58となり, 幅が広くなるにつれて, 反射率も減少傾向にある. 図中の波高に対する曲線はその理論による分布を示したものである.

3. 越波流量の算定式

規則波の越波流量 q_0 は, 吉川・椎貝・河野³⁾の堰の流量公式に基づいた式を, 合田⁴⁾が修正した式によって与える. ただし, 波高は透水性テラスによる波高減衰効果を表す係数 K_p を入射波高に乗じたものとする. このとき, 越波流量の算定式は次のようになる.

$$q_0 = \sqrt{2g} A_0 \left(\frac{K}{K+1} \right)^{\frac{3}{2}} (K_p H_I)^2 \left(1 - \frac{h_c}{K(K_p H_I)} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

$$K = \min \left[\left\{ 1.0 + a \frac{K_p H_I}{h} + \frac{b}{K_{sb}} \left(\frac{K_p H_I}{h} \right)^2 \right\}, c \right] \quad (2)$$

ここに, g は重力の加速度, A_0 は越流係数に相当する係数, K はもともと壁面での波頂高比であるが, 堰の公式を修正しており, 厳密な意味ではない. a, b, c は定数で, 合田⁴⁾は通常の直立護岸に対して次のように与えている.

$$a=1, b=0.8, c=10 \quad (3)$$

また, K_{sb} は浅水・碎波係数であり, 不規則波の場合には換算沖波(有義)波高 H_0' に対する当該地点での有義波高の比で与えるが, 本研究の規則波に対しては非碎波条件を対象としているので, 岩垣ほか⁵⁾の浅水係数の近似式を, 合田⁶⁾が若干修正した次式(波高に K_p を乗じる)を用いる.

$$K_s = K_{si} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0} \right)^{-2.9} \left(\frac{K_p H_0'}{L_0} \right)^{-1.3} \quad (4)$$

式(1)と(2)は K_p を透水性テラスがないとき, つまり $B_p=0$ のとき, $K_p=1$ となるように定めれば, 通常の直立護岸の算定式に帰着する. A_0 については, 堰の越流係数を用いれば0.16~0.18となるが, 合田⁴⁾は不規則波に対する最適値として0.10を採用している. 本研究では後述するように, $B_p=0$ の場合の越波流量の実験結果から得られた最適値を用いることとし, $A_0=0.18$ とする.

K_p は, 透水性テラスがあることによって, 不透過後壁への入射波高がどのように変化するかを表すものである. 非碎波の場合, 不透過後壁面での波高 H_W

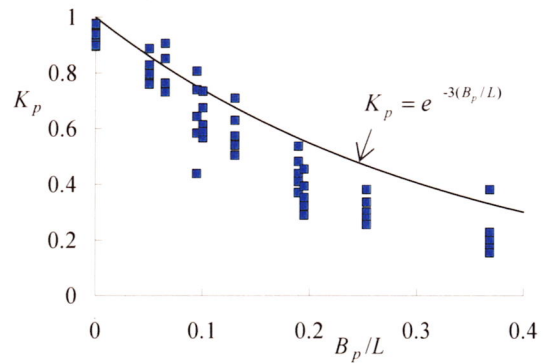


図-4 相対テラス幅と K_p

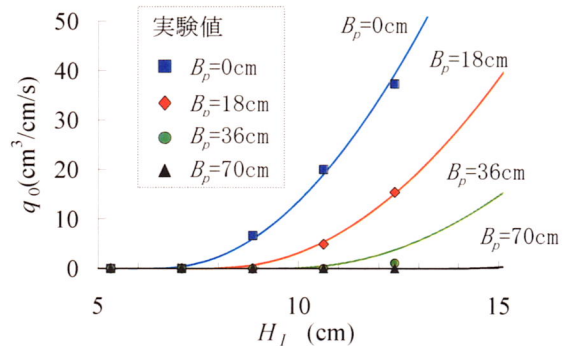


図-5 実験値と算定値(曲線)の比較例
($h_c=7.5\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$, $H_I=12.4\text{cm}$)

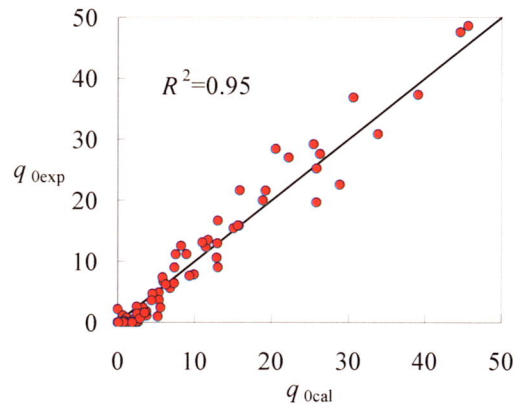


図-6 算定値と実験値の相関(単位: $\text{cm}^3/\text{cm/s}$)

はそこへの入射波高の2倍となると考えることができる. そのため, H_W の測定値を H_I の2倍で割って, 相対テラス幅 B_p/L に対しプロットしたのが図-4である. データはばらついてはいるけれども, 相対テラス幅が大きくなるにつれて減少する傾向を示している. この傾向と, 越波流量の実験値との適合度を勘案し, K_p を B_p/L の関数として次式のように決定した.

$$K_p = e^{-3(B_p/L)} \quad (5)$$

図-4の曲線はこれを示したものであるが, ばらつきのほぼ上限に対応している.

図-5は横軸に入射波高をとって, 越波流量の実験値と算定値を比較した例である. また, 図-6は全データに対する越波流量の算定値 $q_{0\text{cal}}$ と実験値 $q_{0\text{exp}}$ の

相関を示している。これらによって、算定値は実験値と相当程度あっているといえる。

4. 在来の護岸構造との比較

(1) 直立護岸の越波流量算定法

在来の護岸構造としては、直立護岸と傾斜護岸を考える。直立護岸の越波流量は、 $K_p=1$ のときの式(1)と(2)を用いて算定する。 A_0 は、前述したように、0.18である。算定値と実験値を図-7に比較している。ただし、この場合、算定値は周期によってほとんど変化しないので、 $T=1.6s$ の例を示している。 $T=2.0s$ の実験値がやや小さいものの、全体的には、算定値は実験値に良く合っているといえる。

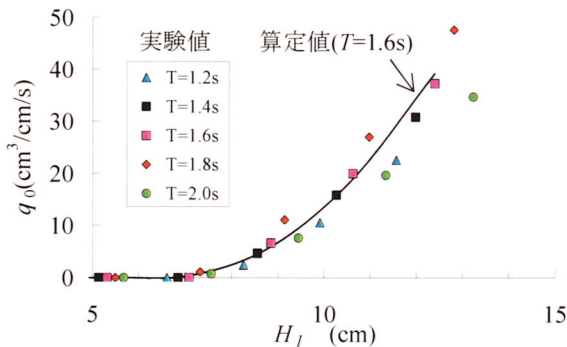


図-7 直立護岸の越波流量 ($h_c=7.5\text{cm}$)

(2) 傾斜護岸の越波流量算定法

直立壁前面に捨石や消波ブロックを投入した傾斜護岸の越波流量の算定も式(1)と(2)に基づく。ただし、 $K_p=1$ であり、式(2)の定数は合田ら⁴⁾による次の値とする。

$$a=0.5, b=0, c=5 \quad (6)$$

この算定法は捨石マウンドの上を2層の消波ブロックで被覆した傾斜護岸を対象として、不規則波に対し提案されたものである。ここで考えている規則波に対する検討では、他構造と同等性を保つため適合性の検証が必要である。そのため、透水性テラス護岸の実験に用いた砕石（天端面ではやや大きい砕石）を用いて実験をあらためて行った。砕石の天端幅は16cmで、斜面勾配は1:4/3である。水深は37.5cm、天端高は7.5cmで一定とし、波の条件は

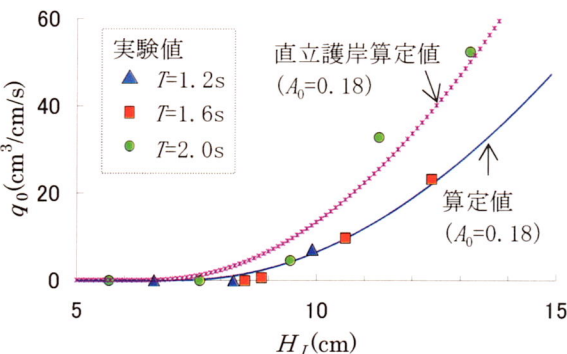


図-8 傾斜護岸の越波流量

周期を1.2, 1.6, 2.0sの3ケースに限った。

その結果を図-8に示しているが、 $T=2.0s$ の波高の大きい2ケースを除き、直立護岸と同様 $A_0=0.18$ とした算定値と良く一致している。 $T=2.0s$ の波高の大きい2ケースでは、図-8に示している直立護岸の算定値とやや大きいと同程度である。これは既に中野ら⁷⁾によって指摘されているように、前面を傾斜型とすることによって、越波がかえって増えることがある条件に対応しているものと考えられる。本研究では、 $A_0=0.18$ とした算定式を用いて傾斜型の越波流量を求めることとする。

(3) 天端高を変えたときの比較

比較は現地量を想定して行う。潮位を含めた水深を12m、入射波の周期を9.05s、波高を4.5mとして、まず天端高を変化させたときの越波流量を算定する。その際、傾斜護岸の透水部天端幅と斜面勾配はそれぞれ3.8mと1:4/3で一定とし、透水性テラスの幅 B_p は同じ天端高の傾斜護岸の透水部断面積と同じとなるように設定する。

図-9は3種の構造の越波流量算定結果を示したものである。透水性テラス護岸の越波流量は、直立護岸はもとより、傾斜護岸より小さくなるのがわかる。ちなみに、越波流量が $0.01\text{m}^3/\text{m/s}$ となる条件で、天端高と透水部断面積を比較した結果を表-1に示している。この場合、透水性テラス護岸の天端高は直立護岸の51%、傾斜護岸の65%に、透水部の断面積は傾斜護岸の83%に小さくすることができる。

なお、入射波の波高水深比は0.375で、実験の範囲を若干超えるものの、入射波としては碎波しない。今回提案した算定式の適用範囲内での条件と考えられる。

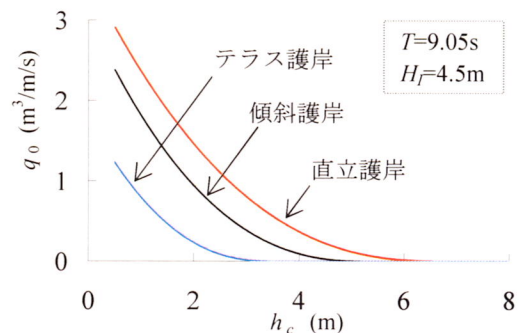


図-9 天端高を変えたときの越波流量の比較

表-1 越波流量が $0.01\text{m}^3/\text{m/s}$ となる天端高と断面積 S

	透水性 テラス	傾 斜	直 立
$h_c(\text{m})$	3.1	4.8	6.1
$S(\text{m}^2)$	195	231	0

(4) 不規則波に対する期待越波流量

規則波に対する越波流量が求まれば、波高の確率分布を考慮して、不規則波に対する期待越波流量を

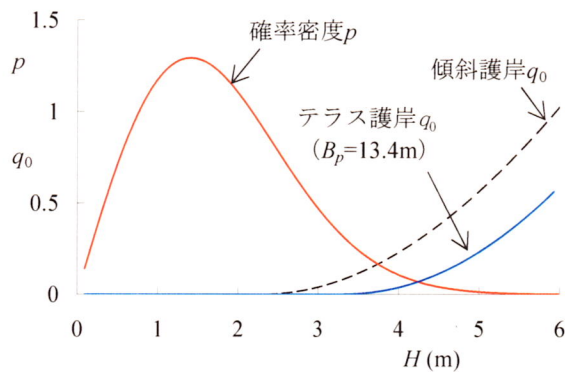


図-10 波高の確率分布と規則波の越波流量 ($\text{m}^3/\text{m/s}$)

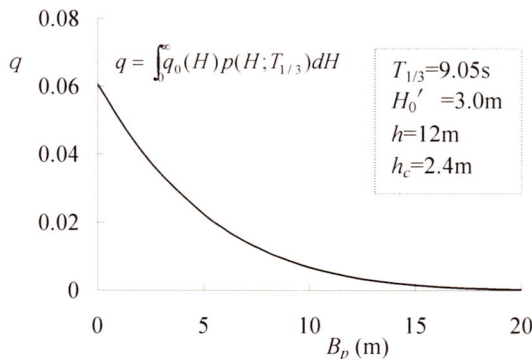


図-11 テラス幅による期待越波流量 q ($\text{m}^3/\text{m/s}$) の変化

算定できる。波高の確率分布は合田⁸⁾による不規則波の浅水・砕波変形モデルを用いて計算する。計算条件は、有義波周期 $T_{1/3}=9.05\text{s}$ 、換算沖波有義波高 $H_0'=3.0\text{m}$ で、水深 12m のところでの、静水面上天端高 2.4m の傾斜護岸と透水性テラス護岸を考える。テラス幅 B_p は(3)で考えた傾斜護岸と同じ断面積とすると 13.4m となる。この場合の波高の確率分布と規則波の越波流量を図-10に示している。期待越波流量(図-11中に示した式による)は、傾斜護岸は $0.017\text{m}^3/\text{m/s}$ となるのに対し、透水性テラス護岸は $0.0026\text{m}^3/\text{m/s}$ と非常に小さい。

一方、図-11は透水性テラス護岸の幅を変えたときの期待越波流量 q の変化である。傾斜護岸の期待越波流量とほぼ同じとなる幅は 6.2m であり、断面積は傾斜護岸の46%に減じることができる。また、許容越波流量を $0.01\text{m}^3/\text{m/s}$ とすれば、所要幅は 8.5m となり、現実に対応可能であるといえる。

5. 考察

最後に、形状を除いて同じ条件での透水性テラス護岸と傾斜護岸の越波実験結果から、テラス護岸の越波軽減効果が高い理由を考察する。水深は 37.5cm 、天端高は 7.5cm 、入射波の周期は 1.6s 、波高は 12.4cm で、透水性テラス幅は 36cm 、傾斜型の天端幅と勾配は 16cm 、 $1:4/3$ の条件である。この傾斜型の天端幅 16cm は、水底から 14cm まではマウンドと考え、それより上の透水部断面積が透水性テラス護岸と傾斜護岸でほぼ等しくなるように設定したものである。

図-12は不透過後壁から 1cm 地点での水位 η の時間

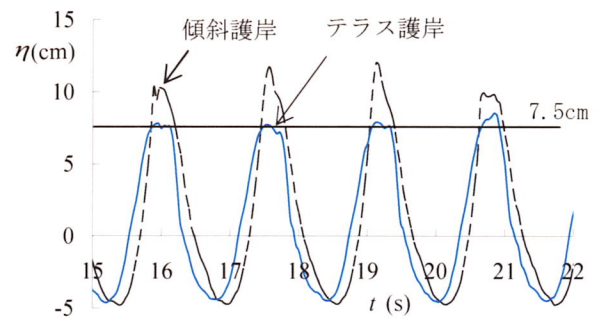


図-12 不透壁面での水位の時間変化

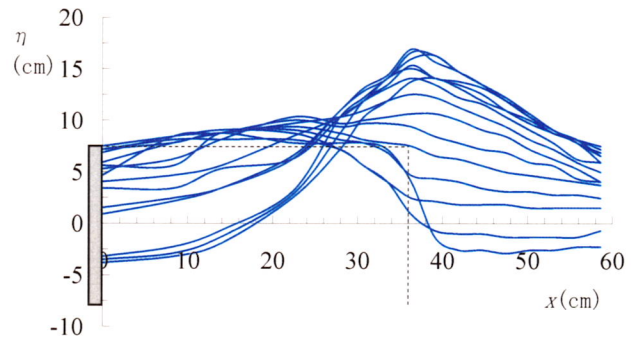


図-13 透水性テラス護岸での波面の変化

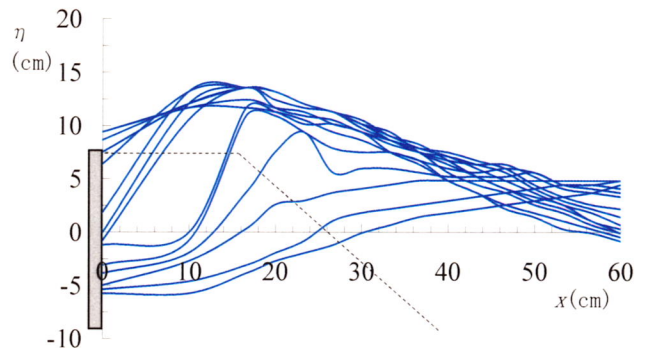


図-14 傾斜護岸での波面の変化

変化である。再反射波の影響のない7波から10波の4波分を示している。天端高 7.5cm を超えるとき越波が生じると考えられ、この場合の越波流量は透水性テラス護岸の場合 $1.12\text{cm}^3/\text{cm/s}$ 、傾斜護岸の場合 $23.3\text{cm}^3/\text{cm/s}$ である。このように、傾斜護岸の場合の不透壁面での水位が高く、 7.5cm を超える時間も長いので、越波流量が多くなっていることがわかる。したがって、なぜそのような結果となるかが問題であり、それについてさらに考察する。

写真-3と4は透水性テラス護岸と傾斜護岸への波の作用状況を $1/6\text{s}$ ごとに示したものである。このような写真から、 $1/24\text{s}$ ごとの波面を描いたのが図-13と14である。これらから、傾斜護岸の場合は波が斜面から天端に乗り上げ、急峻な波面が前進速度をもって不透壁に勢いよく達し越流していることがわかる。これに対し透水性テラス護岸の場合は、鉛直な透水性テラスの前面で波はせき止められ水位は高く上昇するものの、幅の広い透水性テラスで効果

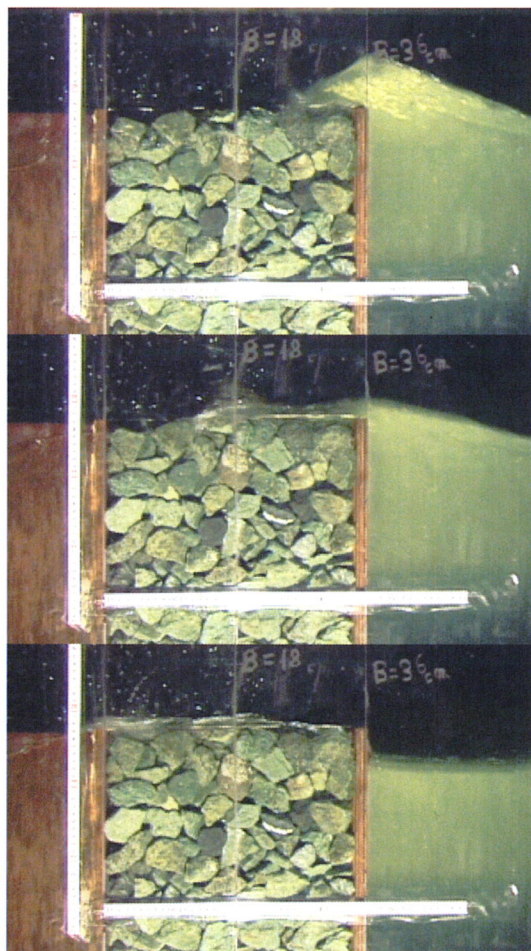


写真-3 透水性テラス護岸への波の作用

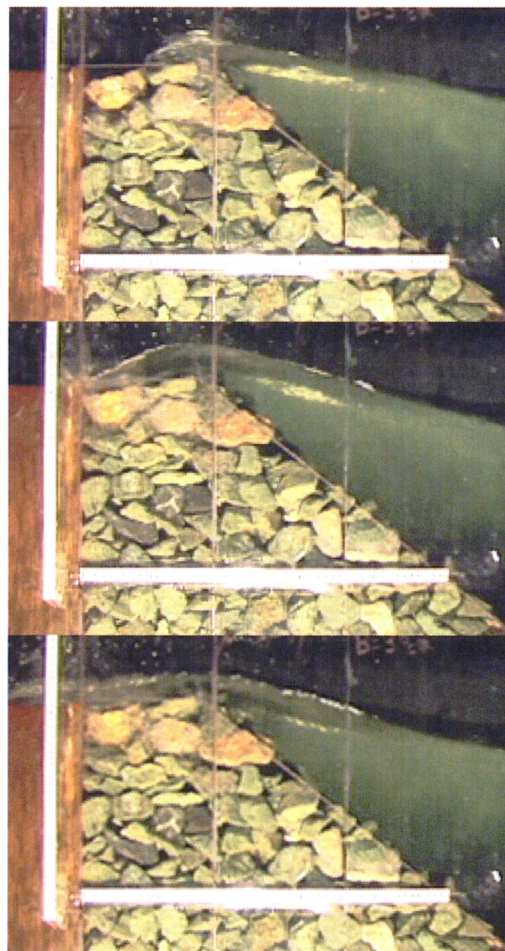


写真-4 傾斜護岸への波の作用

的に波を吸収して不透過壁面での水位を小さくしている。すなわち、透水性テラス護岸は前面を鉛直として波の前進運動を抑えるとともに、水面付近で幅広となるように材料を効果的に配置することによって越波軽減機能を高めているといえることができる。

6. むすび

本研究において、透水性テラス護岸の越波流量の算定法を提案するとともに、在来の直立護岸、傾斜護岸と越波軽減効果を比較検討した。その結果、透水性テラス護岸の越波軽減効果は高く、傾斜護岸よりも優れていることを例証した。透水性テラス護岸が傾斜護岸より越波軽減効果が高いのは、前面を鉛直とすることによって、同じ材料の量で天端幅を広くでき、かつ鉛直な前面で波の前進運動を抑えることができることによる。有義波周期9.05s、換算沖波有義波高3.0mで、水深12mのところでは天端高が2.4mのときの試算結果では、許容越波流量 $0.01\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ に対し、所要幅は8.5mであり、構造的に現実的であるといえる。

しかしながら、今回の検討は非碎波の条件を対象としたものであり、今後碎波を含めた検討が必要である。また、不規則波実験による期待越波流量の検

証も今後の課題である。

謝辞：実験に際しては、埼玉大学工学部技術部藤田明人技術員の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 鈴木智浩, Mohammed Fazlul Karim: 人工リーフ付き透水性防波護岸の水理特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.701-705, 2001.
- 2) Goda, Y. and Abe, Y.: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, *Report of Port and Harbour Research Institute*, Vol.7, No.3, pp.3-58, 1968.
- 3) 吉川秀夫, 椎貝博美, 河野二夫: 海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1), 第14回海講講演集, pp.118-122, 1967.
- 4) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 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, 1975.
- 5) 岩垣雄一, 塩田啓介, 土居宏行: 有限振幅波の浅水係数と屈折係数, 第28回海講論文集, pp.99-103, 1981.
- 6) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990.
- 7) 中野修, 奥野俊也, 藤井直樹, 榊山勉, 大熊義夫: 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 731-735, 2001
- 8) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻第3号, pp.59-106, 1975.