

直立護岸に設置した越波対策工の越波低減効果と作用波圧特性

Reduction Effect of Wave Overtopping of Upright Seawall with Countermeasure and Wave Pressure Characteristics

川崎浩司¹・笹田泰雄²

Koji KAWASAKI and Yasuo SASADA

The purpose of this study is to examine the reduction effect of wave overtopping of an upright seawall with a triangle-shaped countermeasure and wave pressures exerting on the seawall and the countermeasure throughout hydraulic experiments. As a result, the countermeasure placed on the seawall was found to have a great effect on the reduction of wave overtopping rate. It was evident that the reduction effect is mainly governed by the wave steepness, the relative water depth and the relative crown height. Especially, the relative crown height had the most influence on the reduction effect. It was also found from the experimental results that large wave pressure acts on the countermeasure.

1. はじめに

台風など低気圧接近時に沿岸域で発生する越波は、護岸背後の地域に物的・人的被害をもたらす。そのため、越波防止・低減対策は古くから数多く行われており、例えば、直立護岸や消波護岸は我が国の海岸において広く普及している。近年では、防災面のみならず海域の環境・利用面を考慮した新形式護岸の開発・検討も実施されている。一方、国や自治体の財政悪化などといった社会情勢の変化に伴い、護岸の新設や嵩上げなどが困難となる場合も想定され、簡易かつ効果的な越波対策が望まれる。その一例として、既存の直立護岸に小型構造物（越波対策工）を付加設置することで越波流量を低減させるといった試みが検討されつつある。

既設護岸に付加された越波対策工に関する既往の研究例として、坂井・山本（2007）は、対策工の越波低減効果を示すとともに、消波ブロックとの併用による対策工の効果低減について言及している。また、三角形対策工に作用する水平波力は対策工を設置していない場合の1.2～2.0倍になること、三角形越波対策工の形状が大きいほど、越波低減効果がより発揮されることを示している。しかしながら、越波対策工を有する直立護岸に対して、詳細な越波特性や作用波圧特性に関する研究は十分に実施されていないのが現状である。一方、護岸上端に護岸と一体的に設置され、曲線形状を有する一般的な波返し工については、例えば、宮島ら（2004）がその越波低減効果を示している。しかし、直立護岸に付加設置

された越波対策工は、一般的な波返し工と異なる形状であるため、越波低減効果や波圧特性について把握する必要がある。

上述の背景・現状を踏まえ、本研究では、水理模型実験により、直立護岸に設置した直角二等辺三角形形状の越波対策工の越波低減効果および越波対策工に作用する波圧特性について考究する。

2. 水理模型実験

断面2次元造波水路（長さ30m、高さ0.9m、幅0.7m）を用いて、越波流量と作用波圧に関する2種類の水理模型実験を実施した。図-1に、各実験に対する造波水路の断面図を示す。越波実験は模型縮尺1/30で海底勾配1:30の一樣勾配地形とし、波圧実験は模型縮尺1/15の一樣水深地形とした。直立護岸および直角二等辺三角形形状の越波対策工を有する直立護岸それぞれに対して越波量と作用波圧を測定した。また、9本の波高計（図中のW1～W9）を用いて、沖合から護岸周辺までの水位変動を計測することにより、波浪変形についても調べた。

本研究では、越波流量および護岸の作用波圧の影響因

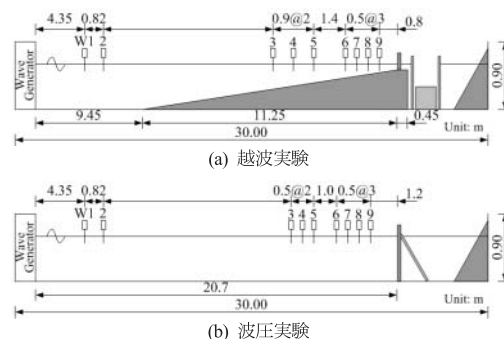


図-1 2次元造波水路の断面図

1 正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員 修(工) 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド呉事業所工作部

表-1 越波に関する実験条件

	規則波	不規則波
波形勾配 H_0/L_0	0.012, 0.024, 0.036	
相対水深 h/H_0'	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	
相対天端高 h_c/H_0'	1.25	0.50, 0.75, 1.00, 1.25

表-2 作用波圧に関する実験条件

	規則波	不規則波
波形勾配 H_0/L_0	0.006 ~ 0.077	0.011 ~ 0.051
相対水深 h/H_0'	2.9 ~ 6.2	2.4 ~ 5.8
相対天端高 h_c/H_0'	0.97 ~ 2.05	0.86 ~ 1.93

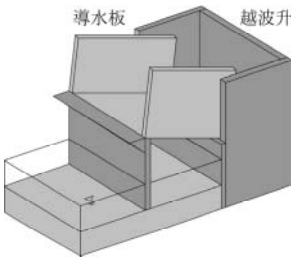


図-2 越波集水方法

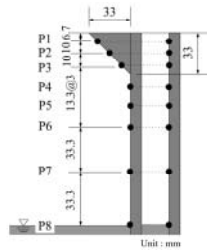


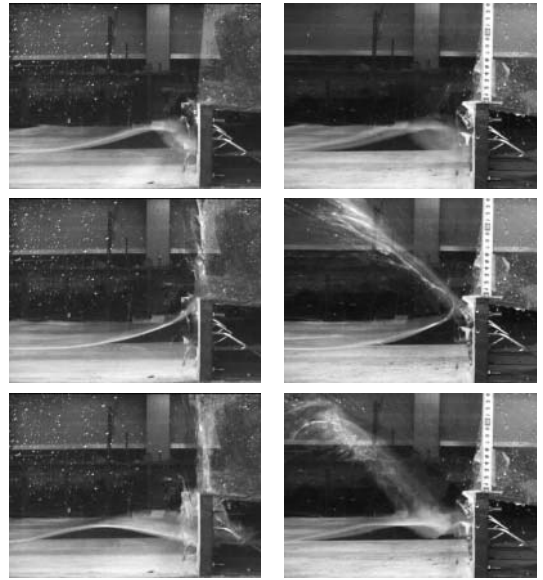
図-3 波圧測定位置

子として、Buckinghamの π 定理に基づき、波形勾配 H_0/L_0 、相対天端高 h_c/H_0' 、相対水深 h/H_0' の3つの無次元量を取り上げることとした。越波および作用波圧に関する実験条件はそれぞれ表-1、表-2に示すとおりである。なお、不規則波の波スペクトルタイプは修正Bretschneider・光易型とし、230波を入射した。越波水塊については、図-2に示す越波升を護岸背後に設置し、導水板を介して収集した。また、越波量は、ばらつきを考慮して各ケース3回測定し、その平均値とした。護岸に作用する波圧に関しては、図-3に示すように、対策工の設置部分に3点、直立部分に5点の計8箇所に対して、小型圧力センサーを用いてサンプリング間隔1kHzで波圧を計測した。なお、対策工上の測点P1～P3の波圧については、水平成分のみを解析対象とした。その理由として、対策工の形状が直角二等辺三角形で水平波圧と鉛直波圧の値が同じとなること、他の測点を含めた水平波圧分布を把握するためである。

本研究では、対策工による越波低減効果をより明確にするために、越波低減率 $R[\%]$ を次式のように定義した。

$$R = \frac{q - q_c}{q} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

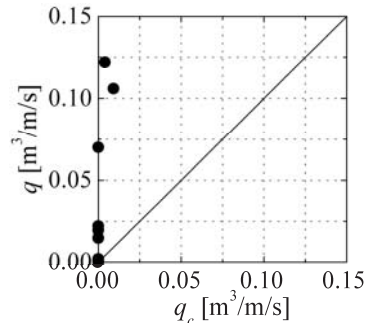
ここで、 q 、 q_c はそれぞれ直立護岸、対策工を有する直立護岸に対する越波流量であり、 $R=100\%$ は完全な越波防止を表す。



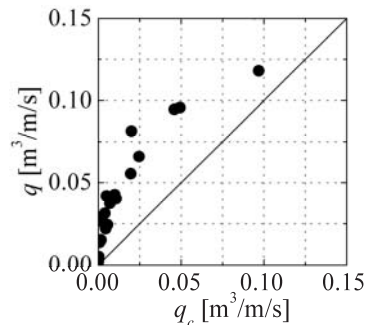
(a) 直立護岸

(b) 対策工設置護岸

写真-1 越波状況



(a) 規則波作用下



(b) 不規則波作用下

図-4 対策工の有無による越波流量の比較

3. 越波対策工による越波低減効果

写真-1に、規則波作用下における直立護岸および対策工設置護岸に対する越波状況を例示する。なお、この場合の実験条件は、波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ 、相対水深 h/H_0'

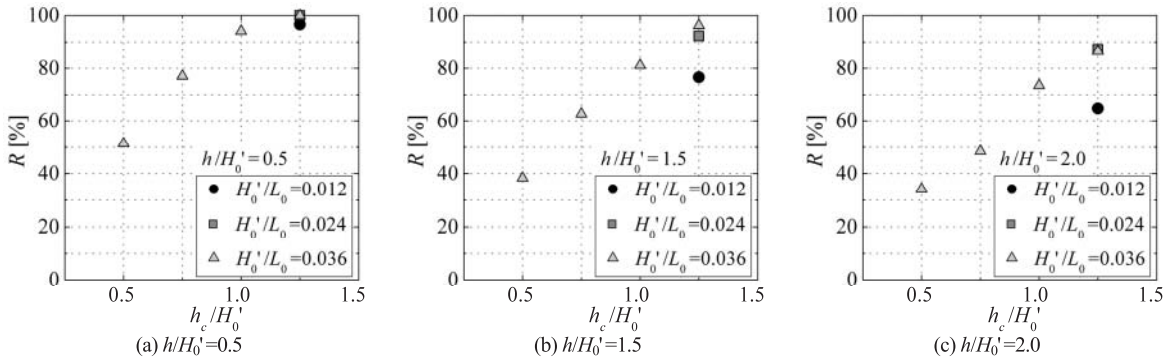


図-5 相対天端高による越波低減率の違い

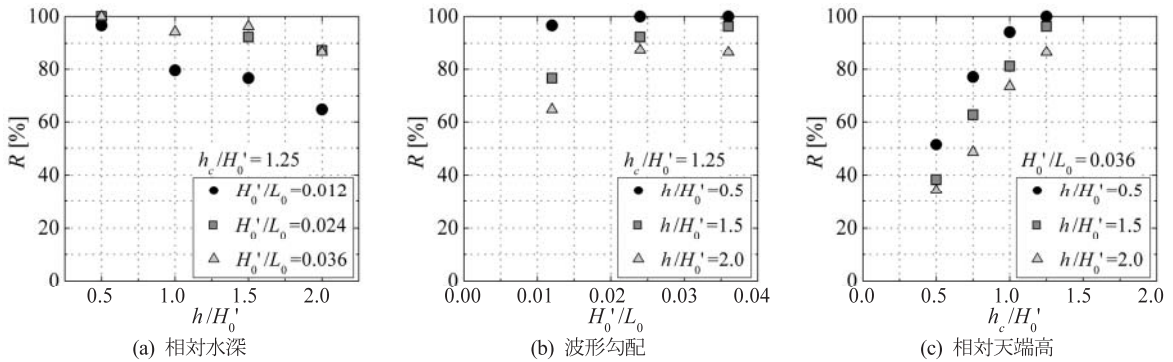
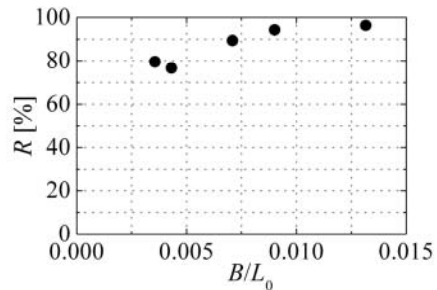


図-6 各種無次元量の変化に対する越波低減率

=0.5, 相対天端高 $h_c/H'_0=0.75$ である。写真-1 (a) と (b) の比較から、入射波は越波対策工によって沖側に跳ね返され、越波対策工が越波を低減している様子が顕著に認められる。図-4は、越波対策工を設置した場合の越波流量 q_c と設置しない場合の越波流量 q の比較を示したものである。ここで、(a), (b) はそれぞれ規則波、不規則波を作用させた場合である。同図から、入射波の条件にかかわらず、対策工は越波低減効果を有していることがわかる。しかし、図-4 (b) からわかるように、不規則波作用下では、無次元越波流量の増大に伴い、対策工による越波流量の低減が小さくなる傾向がみられる。

上記から、越波低減に対する対策工の有用性について確認したものの、入射波や護岸の諸条件による越波低減効果について検討する必要があるといえる。そこで、本研究では、不規則波作用下を対象に、相対水深 h/H'_0 、波形勾配 H'_0/L_0 、相対天端高 h_c/H'_0 の3つの無次元量が対策工の越波低減効果に与える影響について検討する。

図-5は、波形勾配 H'_0/L_0 をパラメータとして、越波低減率 R に及ぼす相対天端高 h_c/H'_0 の影響について示したものである。ここで、(a) ~ (c) はそれぞれ相対水深 h/H'_0 が 0.5, 1.5, 2.0 の場合である。同図からわかるように、相対水深に関わらず、相対天端高が増加するにつれて、越波低減率が大きくなっていることがわかる。また、

図-7 B/L_0 の変化による越波低減率

相対天端高が0.5の場合、つまり波高の半分の天端高を有する直立護岸に対しては、対策工による越波低減率が最も低くなっている。しかし、運輸省港湾局 (1968) の港湾構造物設計基準によると、通常、越波対策として直立護岸を設置する場合には、護岸天端高を波高の1.0~1.3倍とすることが多い。このことを勘案して、図-5をみると、対策工は $h_c/H'_0 \geq 1.0$ の範囲で大きな越波低減効果があると判断される。

図-6 (a) ~ (c) は、それぞれ相対水深、波形勾配、相対天端高が及ぼす越波低減率への影響を示したものである。なお、上記の理由により、図-6 (a), (b) では、相対天端高を1.25と固定した。図-6 (a) から、同一の相

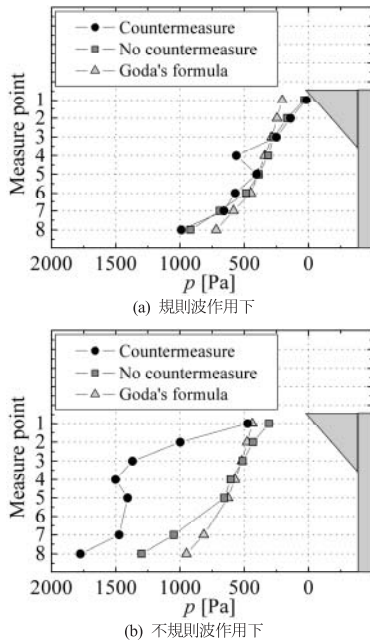
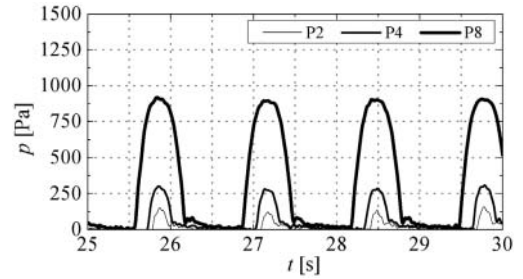


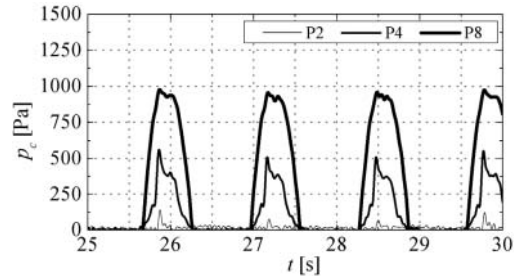
図-8 最大水平波圧の鉛直分布

対天端高に対して、相対水深が大きくなるほど越波低減率が減少することがわかる。これは、対策工を実海域に適用する際には、潮汐変化に対する検討も加味する必要があることを示す。また、今後、予想されている地球温暖化による海面上昇によって対策工の越波低減効果が減少することも示唆している。また、図-6 (b) から、波形勾配が大きくなるにつれて越波低減率も大きくなることが認められる。これは、同一周期の波に対して波高が大きく、あるいは同一波高の波に対して周期が短くなるほど、対策工が効果的に越波を低減することを示している。また、波形勾配がある値以上になると、越波低減率の変動はほぼなくなる傾向がみられた。図-6 (c) をみると、越波低減率は相対天端高の増加とともにほぼ線形的に増大していることがわかる。また、図-6 から、相対水深および波形勾配を変化させた場合には、60%以上の越波低減効果が確認できるが、相対天端高を変化させた場合は、約30%まで越波低減率が減少していることが確認される。

以上のことから、相対水深、波形勾配および相対天端高の3つの無次元量は、対策工の越波低減効果に対して支配的であることがわかる。特に、3つの無次元量の中でも、相対天端高が最も対策工の越波低減率に影響を与えるといえる。図-6 (c) をみると、相対天端高が1.0以上で越波低減率 R は80%以上となり、越波低減効果が高いことを示している。前述したように、この値は、運輸省港湾局 (1968) の港湾構造物設計基準において、護岸の天端高の標準を波高の1.0~1.3倍としていることと一致しており、対策工を既存の直立護岸に設置することに



(a) 直立護岸



(b) 対策工設置護岸

図-9 波圧の時系列

より、大きな越波低減効果を発揮できると期待される。

本研究では、対策工の形状と大きさを1種類に限定しているが、対策工の大きさの違いによる越波低減率への影響を把握するために、三角形の護岸全面張り出し部分 B を入射波の波長 L_0 で無次元化した B/L_0 と越波低減率の関係を調べた。図-7に、不規則波作用下での B/L_0 の変化による越波低減率を示す。なお、ここでは、相対天端高1.25を対象とした。同図から、 B/L_0 が小さい場合でも、越波低減に対する対策工の効果を有しているといえる。

4. 対策工設置護岸に作用する波圧

図-8に、規則波および不規則波作用下での護岸に作用する最大水平波圧の鉛直分布を例示する。ここで、同図に、重複波圧の算定式 (合田, 1973) による値も示した。なお、図-8 (b) に示す不規則波作用下では、設計波圧を算出する際に $H_{\max}$ を $1.8H_{1/3}$ とするのが標準とされているため、本研究においても $1.8H_{1/3}$ を入力波高として波圧を算出した。図-8から、直立護岸に対する作用波圧の実験値と合田式はほぼ一致しており、本研究における波圧の測定精度が良いことを確認した。また、同図から、直立護岸に作用する波圧は静水面上 (測点P8) で最大となり、護岸上部になるにつれて小さくなる傾向が認められる。しかし、直立護岸に対策工を設置した場合は、対策工がない直立護岸に比べて、対策工直下 (測点P4) での作用波圧が特に大きくなっている。これは、護岸に沿って打ち上がった波が対策工の張り出し部分にぶつかり、大きな衝撃力が作用したためと推察される。なお、不規則波

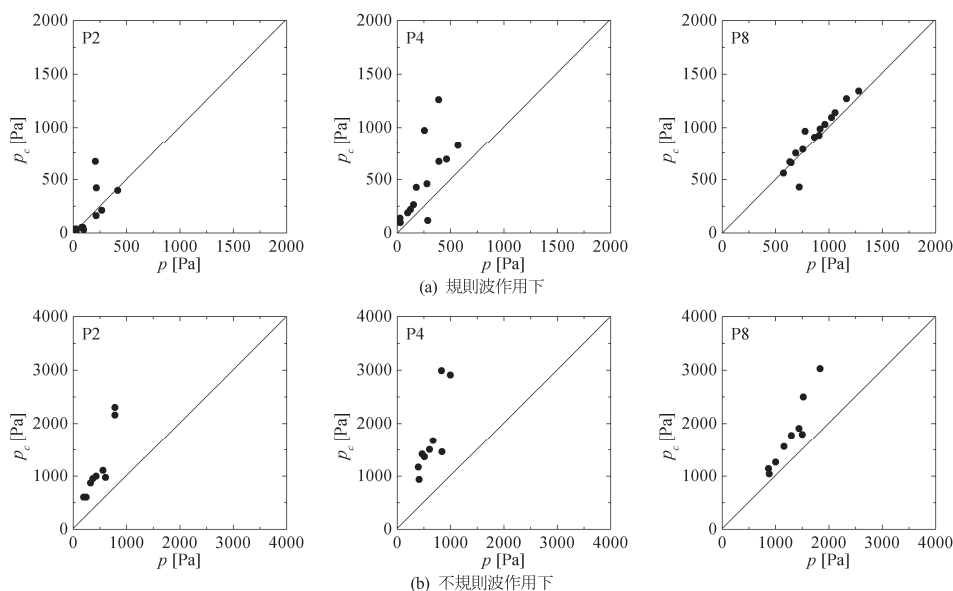


図-10 直立護岸と対策工設置護岸の作用波圧の比較

作用下でも、規則波と同様に、P4での波圧が特に大きくなっているが、不規則波作用下ではP4以外の測点に対しても波圧の増大がみられた。

図-9に、規則波を作用させた時の作用波圧の時系列を示す。同図から、対策工設置位置から遠い静水面上の測点P8では、直立護岸と対策工設置護岸ともに、重複波圧が作用している。一方、対策工直下（測点P4）では、対策工を設置した場合のみ、衝撃的な波圧が作用していることから、P4での波圧が大きくなったといえる。さらに、図-10に、測点P2、P4、P8における直立護岸と対策工設置護岸の作用波圧の比較を示す。ここで、(a)、(b)はそれぞれ規則波、不規則波を作用させた場合である。図-10 (a)、(b)の両図から、越波対策工を直立護岸に設置することにより、護岸と対策工に作用する波圧は増加傾向にあるといえる。一方、図-10 (a)と(b)の比較から認められるように、不規則波作用下では対策工を設置したことによる作用波圧の増加量が規則波作用下より大きくなっている。これは、不規則波作用下における波同士の非線形干渉や波と構造物の相互作用による影響と推察される。なお、本実験の範囲内では、不規則波作用下において、対策工を設置した場合は、設置しない場合に比べて、1.5～4.3倍大きな波圧が作用したことがわかった。

5. おわりに

本研究は、簡易かつ効果的な越波対策として、直角二等辺三角形形状の対策工を直立護岸に設置し、対策工の越波低減効果と作用波圧特性について検討した。その結果、対策工は優れた越波低減効果を有することを確認した。

対策工による越波低減率 R に対し、波形勾配 H_0'/L_0 、相対天端高 h_c/H_0' 、相対水深 h/H_0 が支配因子であり、特に、相対天端高の変化は越波低減率に最も大きな影響を与えることが判明した。また、対策工を設置することで、対策工直下では、直立護岸と比較して大きな波圧が作用することが明らかとなった。このことから、対策工を既存護岸に設置する際には、対策工の耐波性のみならず、護岸自体の強度にも十分留意する必要があるといえる。

今後は、水理模型実験と数値計算の両面から、越波低減効果に及ぼす対策工の形状・規模の影響、対策工の水平・鉛直波圧、作用モーメントについても検討し、対策工の適用限界を精緻に評価する予定である。

謝辞：本論文を作成するにあたり、名古屋大学大学院生D2・菊雅美さん、M2・戸田圭亮君の協力を得た。また、本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究（A）（研究代表者：名古屋大学・川崎浩司、課題番号：21686046）であることをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 運輸省港湾局編（1968）：港湾構造物設計基準，pp. 7-3-6 - 7-3-10.
- 合田良実（1973）：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，pp. 31-69.
- 坂井洋平・山本泰司（2007）：護岸の低天端化を目指した簡易な越波対策工について，第50回北海道開発技術研究所発表会，論文No. コ-17（on CD-ROM）.
- 宮島正悟・小椋進・大橋幸彦・森川高德・奥田純生（2004）：波返し付き傾斜護岸の越波流量特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第51巻，pp. 636-640.