

海面上昇に対するフレア型護岸の 防波特性の変化について

CHANGES OF HYDRAULIC CHARACTERS ON FLARING SHAPED SEAWALL AGAINST SEA LEVEL RISE

村上啓介¹・若村太郎²・真木大介³・上久保祐志⁴

Keisuke MURAKAMI, Taro WAKAMURA, Daisuke Maki and Yuji KAMIKUBO

¹正会員 博士(工学) 宮崎大学 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

²学生員 宮崎大学 大学院工学研究科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台1-1)

³正会員 修士(工学) 宮崎大学 工学部 (〒889-2192 宮崎市学園木花台1-1)

⁴正会員 博士(工学) 八代工業高等専門学校 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

Changes of hydraulic characters on the Flaring Shaped Seawall were investigated on a supposition of sea level rise that might be brought near future. Two-dimensional hydraulic experiments were conducted to evaluate some hydraulic characters such as a checking effect of wave overtopping, wave reflection, wave overtopping rate, and wave pressure distributions against sea level rise. A critical maximum wave height, that is a maximum wave height on which no wave overtopping occurs at all, tends to decrease with sea level rise. The model equation that estimates the critical wave height was obtained, and its accuracy was verified. The wave overtopping rate increases with sea level rise. This increasing tendency on longer waves was more significant than that on shorter waves. A clear difference between Flaring Shaped Seawall and vertical one on their checking effect of wave overtopping was observed up to a certain decreased ratio of seawall crown height.

Key Words : *Flaring Shaped Seawall, sea level rise, wave overtopping, wave reflection, wave pressure*

1. はじめに

過去 100 年の間に地上平均気温が 0.74°C 上昇しその傾向は加速していることが IPCC 第 4 次評価報告書で明らかにされた。地球温暖化に伴う平均海面の上昇量は、その予測シナリオや予測モデルに含まれる不確定性によって変動するが、IPCC 第 3 次評価報告書では 1990 年から 2100 年までに 0.08m から 0.88m の範囲と予測されている。沿岸低地に社会経済活動が集積する我が国では、平均海面の上昇が社会に与えるインパクトは大きく、これまでに様々な影響評価と対応策が検討されてきた(例えば三村ら¹⁾、松井ら²⁾、細見ら³⁾、国土交通省⁴⁾)。

平均海面の上昇が海岸構造物に与える影響の一つとして作用波高の増大や堤体浮力の増大等による耐波安定性の低下が考えられる。高山⁵⁾は海面上昇による防波堤の滑動安定性の低下について信頼性理論を用いて検討し、砕波帯内で水深の浅い地点の防波堤ほど海面上昇による滑動安定性の低下が大き

いことを指摘している。酒井ら⁶⁾は信頼性設計法において海面上昇を長期変動成分としてとらえ、防波堤の滑動安定性に対する海面上昇の影響を検討するとともに、海面上昇を考慮した最適堤体断面の決定手法を提案している。

平均海面の上昇が沿岸域に与える他の影響として、越波量の増大に伴う海岸防護機能の低下も考えられる。井上ら^{7), 8)}は海面上昇に伴う既存護岸の越波阻止機能の低下を模型実験により検討するとともに、護岸形式や護岸断面形状が機能低下に及ぼす影響を評価している。

筆者ら^{9), 10)}は、深い円弧断面を持つフレア型護岸を提案し、その越波阻止機能や作用波圧の特性を検討するとともに、耐波安定性に優れた護岸断面への改良を進めてきた。フレア型護岸の断面設計は、供用期間内の設計潮位は他の海岸構造物と同様に一定と仮定し、設計潮位が護岸の最奥部となることを前提にしてきた。一方で、地球温暖化に伴う平均海面の上昇が予測される今後は、供用期間内に設計潮

位が見直されることは十分考えられ、それに対して適切な対応策を準備しておく必要がある。また、海面上昇を考慮したフレア型護岸の最適断面の設計法を検討しておくことも重要と考える。

直立護岸や直立消波護岸の場合には、設計潮位の見直しに対して護岸天端を嵩上げすることで機能維持を図る対策が考えられ、その嵩上げ高さは従来の設計手順に従って決めることができる。一方、フレア型護岸においても天端の嵩上げが最も簡易な対策の一つではあるが、嵩上げによる機能保全を適切に評価する手法はない。また、設計潮位が見直された際にフレア型護岸の越波阻止機能がどの程度維持されるのかについても検討されてはいない。本研究は、海面上昇に対するフレア型護岸の越波阻止機能、護岸反射率、越波量および作用波圧の特性変化を水理模型実験により検討することを目的に実施したもので、ここでは越波阻止機能、護岸反射率および越波量の特性変化を中心に述べる。

2. 実験の方法

(1) 実験装置と実験条件

実験は反射吸収式の2次元造波水路（長さ15m，高さ0.6m，幅0.4m）を用いて実施した。図-1に示すように、水路内に勾配が1/20の一樣斜面を設け、模型縮尺は1/30を想定し、マウンド法先水深 h が0.115mになる位置に高さ $h_M=0.05$ mのマウンドを設置し、その上にフレア型護岸を固定した。フレア型護岸模型の高さ B は0.14mとし、上久保¹¹⁾の結果をもとに護岸奥行き深さ D は $D/B=1/2$ となるように0.07mとした。

フレア型護岸断面の設計では供用期間内の設計潮位は一定と仮定し、設計潮位が護岸最奥部になることを前提としてきた。実験ではこの水位を“基準水面”と定義し、海面上昇を想定して水路内の水位を基準水面から上昇させたケースを設定した。基準水面時の沖水深 h_0 は0.4mで、基準水面に対する護岸天端高さ h_c （以下“基準天端高”と呼ぶ）は0.075mである。

水位は基準水面から0.015mステップで4段階上昇させた。上昇量が0.015mと0.03mの2ケースは想定

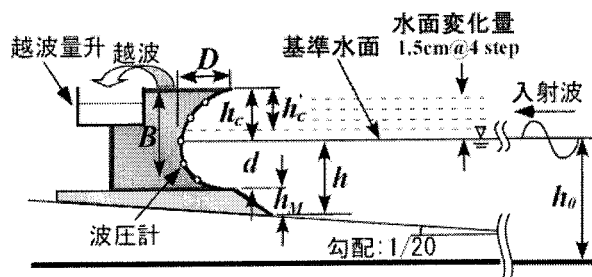


図-1 実験装置の概略

表-1 設定水位に関わる実験条件

水位上昇量	天端高さ (h_c')	マウンド法先水深 (h)	天端高比 (h_c'/h_c)
0.0	0.075	0.115	1.0
0.015	0.060	0.130	0.8
0.030	0.045	0.145	0.6
0.045	0.030	0.160	0.4
0.060	0.015	0.175	0.2

(単位:m)

される海面上昇の範囲に相当する条件であり（実スケールで0.45mと0.9m），0.045mと0.06mはこれらよりも更に潮位変化が生じた場合の条件に相当する。水位上昇に伴い護岸天端高さは相対的に低くなる。その際の護岸天端高さを h_c' で表し、基準天端高さ h_c とは区別して用いる。表-1に水位に関わる実験条件をまとめて示す。

(2) 水理諸量の計測方法

実験の計測項目は、越波限界波高（ある護岸天端高において越波が生じない最大の入射波高）、越波量、護岸反射率、作用波圧分布である。

基準水面および水位上昇させた各ケースにおいて水路内に規則波を発生させて実験をおこなった。入射波の周期 T は1.0秒から2.0秒の範囲について0.2秒間隔で変化させた。各入射波の周期において入射波高を様々に変えた波を発生させ、護岸天端で越波が生じない最大の入射波高（越波限界波高 H_c ）を求めた。ここで、護岸上に微量の水滴飛沫が付く状況は越波とは判断しないこととし、越波の発生の有無は目視で判断した。

次に、越波限界波高の波が護岸に作用する際の護岸反射率と作用波圧を計測した。反射率の計測には分離推定法を用いた。作用波圧は図-1に示す護岸表面の5箇所に直径約0.01mの波圧計を埋め込み、サンプリング周波数500Hzで計測した。また、越波限界波高から入射波高を約0.01m間隔で徐々に大きくした波を発生させ、越波した3～10波分の越水を護岸背後に設けた容器に貯めて越波流量を計測した。越波流量に関しては、比較のために護岸天端高さが等しい直立護岸をフレア型護岸に替えて水路内に設置し、同じ条件の入射波を作用させた場合について計測をおこなった。

3. 実験結果

(1) 海面上昇に伴う越波限界波高の変化特性

図-2は基準水面および水位を上昇させた各ケースにおける越波限界波高を示したものである。図の横軸は沖波入射波長に対するマウンド法先水深の比を表し、縦軸は基準天端高さ h_c に対する各設定水位における越波限界波高を示している。図中の各プロットは水位上昇に伴う護岸天端高さの低下割合

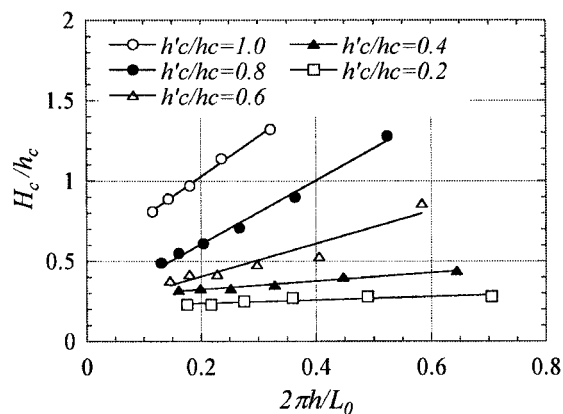


図-2 水位上昇に伴う越波限界波高の特性変化

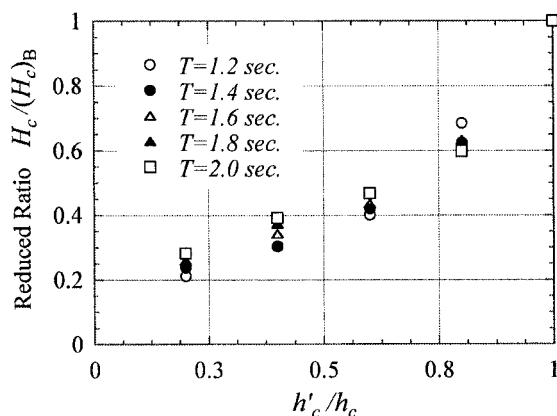


図-3 水位上昇に伴う越波限界波高の低下率

h'_c/h_c を表している。

基準水面から水位が上昇すると相対的に護岸天端高さ h'_c が低くなるため越波限界波高は低下する。また、入射波の波長に対しては、波長の減少に伴い越波限界波高は単調に増加する傾向を示し、この特性は水位が上昇した場合においても同様である。ただし、護岸天端高が相対的に低くなると波返し機能に関わる護岸円弧部も減少するため、越波限界波高の入射波周期に対する依存性は徐々に小さくなる。

図-3は水位上昇による越波限界波高の低下率を示したものである。図の横軸は水位上昇に伴う護岸天端高の低下割合 h'_c/h_c 、縦軸は基準天端高における越波限界波高(H_c)_Bに対する各水位における越波限界波高 H_c の比を示している。ここで、入射波周期が1秒の場合は、基準天端高における越波限界波高が実験装置の造波限界を超えていたためデータが得られなかった。

図-3より、水位上昇に伴い護岸天端高は相対的に低くなるので越波限界波高も低下するが、越波限界波高の低下割合は入射波の周期にほとんど依存しないことがわかる。水位上昇量が0.015mの場合（実スケールで0.45m）には越波限界波高は設計時の約60%～70%に低下し、0.03mの場合（実スケールで0.9m）約40%～50%に低下する。

図-2に示したように、護岸断面形状が与えられ

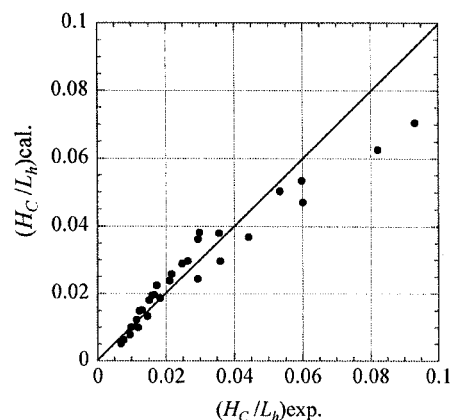


図-4 越波限界波高に関する推定値と実験値の相関

た条件の下で水位上昇が生じた場合の越波限界波高は、入射波の周期と護岸天端高によって概ね決まる。そこで、水位上昇時の越波限界波高が次式のパラメータに依存すると考え推定式を誘導した。

$$H_c = f(g, T, h'_c, L_h) \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 T は入射波周期、 h'_c は護岸天端高、 L_h はマウンド法先での波長を表している。式(1)について次元解析をおこない次式に示す越波限界波高の推定式を得た。

$$\frac{H_c}{L_h} = 7.72 \left(\frac{gT^2}{L_h} \right)^{-0.88} \left(\frac{h'_c}{L_h} \right)^{0.95} \quad (2)$$

図-4は式(2)で求めた推定値と実験値の相関を示したものである。波形勾配が大きくなるに従い推定値は実験値を僅かに過小評価する傾向が見られるが、両者の一致は概ね良好であることを確認した（相関係数は0.94）。

(2) 海面上昇に伴う護岸反射特性の変化

基準海面から水位が上昇すると、護岸前面での波運動の形態が変化して護岸の反射特性も変化する。

図-5は水位上昇に伴う護岸の反射特性の変化を示したものである。図の横軸はマウンド法先での相対水深、縦軸は越波限界波高の波が護岸に作用した際

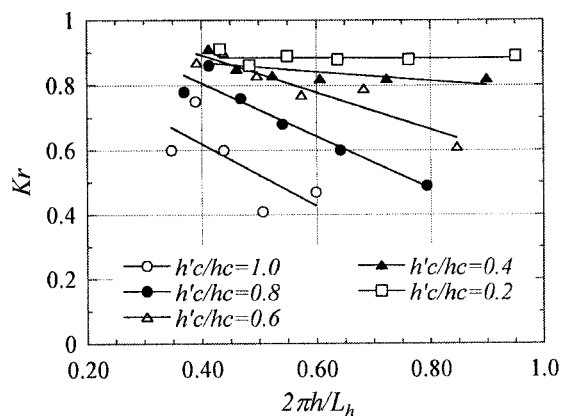


図-5 水位上昇に伴う護岸反射特性の変化

の反射率を示している。

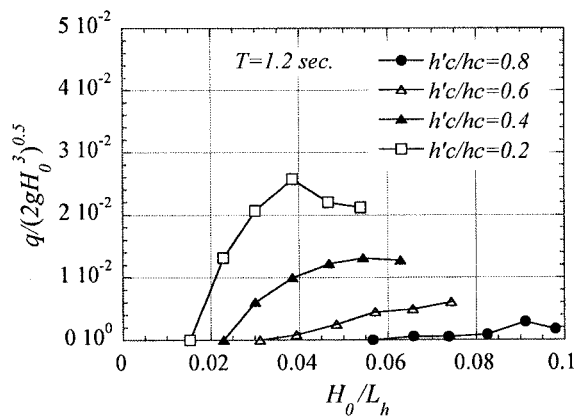
基準水面において長波長の波が入射する場合は、重複的な運動を伴って護岸前面で波返しが生じ、護岸反射率は0.6程度の値を示している。また、護岸法先での波長が短くなるに従い波返し運動はより顕著になり、それに伴う乱れによって護岸反射率は低減する傾向を示している。

一方、水位上昇が生じると波返し運動の規模は徐々に小さくなり、重複的な運動が支配的となって護岸反射率は上昇する傾向を示す。また、水位上昇に伴い護岸反射率の入射波長に対する依存性は徐々に見られなくなる。

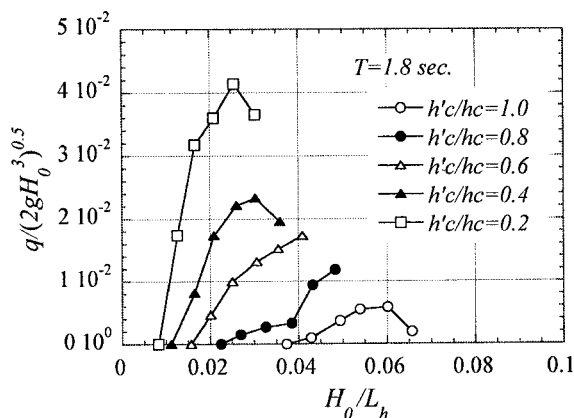
(3) 海面上昇に伴う越波流量の変化

水位上昇に伴うフレア型護岸の越波流量の特性変化の一例を図-6 に示す (図-6(a) は入射波周期が 1.2 秒, 図-6(b) は 1.8 秒の場合)。図の横軸はマウンド法先での入射波の波形勾配, 縦軸は無次元越波流量を表している。図中の各プロットは水位上昇に伴う護岸天端高の低下割合 h'/hc を示している。入射波周期が 1.2 秒で $h'/hc=1$ の場合は越波限界波高よりも大きい波が造波できなかったためデータが得られなかった。

入射波高が越波限界波高を超えて増大するにつ



(a) $T=1.2$ sec.

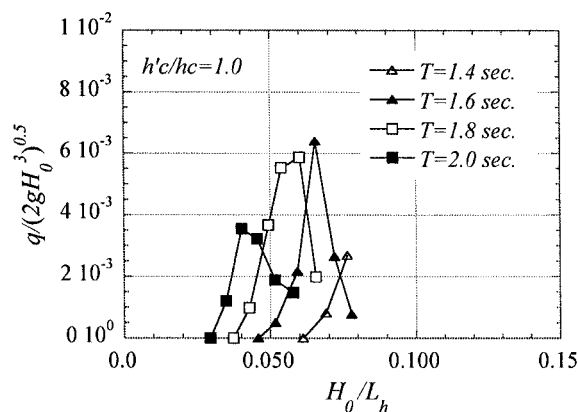


(b) $T=1.8$ sec.

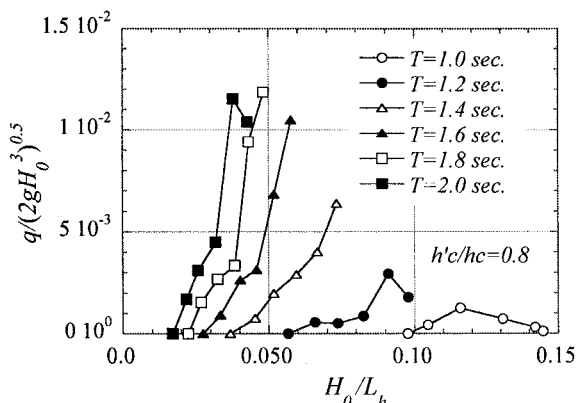
図-6 水位上昇に伴うフレア型護岸の越波流量の特性変化

れ越波流量は徐々に増加する傾向を示し、水位が極端に上昇した場合 ($h'/hc=0.2$ や 0.4) を含め、ある波形勾配を境に減少に転じる場合が見られる。波形勾配に対する越波流量の増加割合は、水位上昇によって護岸の天端高が低下するほど大きくなる。また、入射波周期が長いほど越波流量の増加割合が大きくなる傾向が見られる。

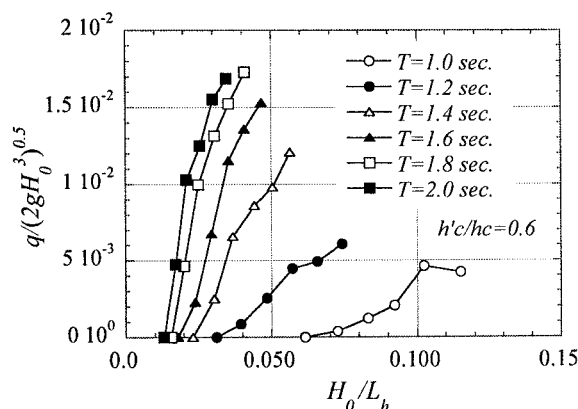
図-7 は基準水面および水位を上昇させたケースにおけるフレア型護岸の越波流量特性を示したもので、図中の各プロットは入射波周期の違いを表している。図-7(a) は基準水面の場合の結果であり、入射波高を越波限界波高から徐々に大きくすると越波



(a) $h'/hc=1.0$



(b) $h'/hc=0.8$



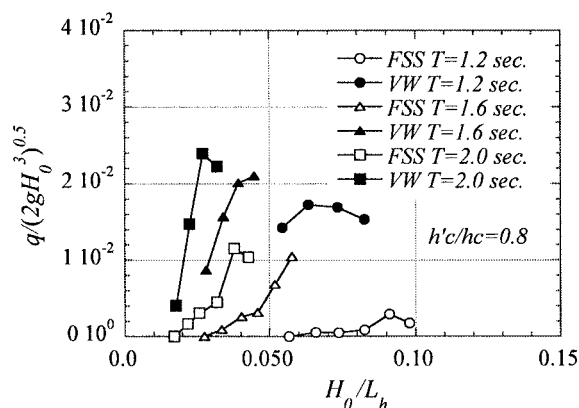
(c) $h'/hc=0.6$

図-7 基準水面および水位を上昇させたケースにおけるフレア型護岸の越波流量特性

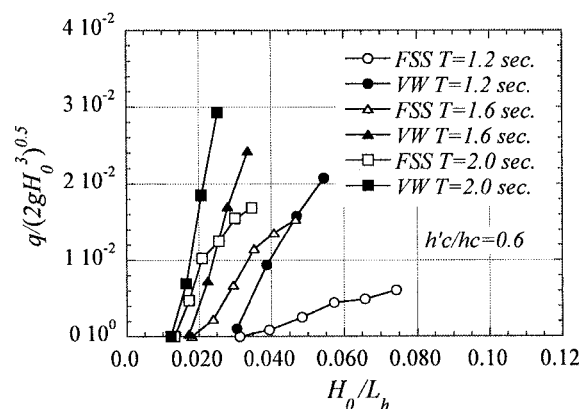
流量は増加する傾向を示し、護岸前面で碎波が発生し始めると減少に転じている。

図-7(b)は水位上昇が 0.015m の場合、図-7(c)は 0.03m の場合を示したものである。図-7(a)から図-7(c)を比較すると、各入射波周期において波高の増加に伴う越波流量の増加割合は、水位上昇に伴って大きくなる傾向を示している。特に、入射波周期が長い波ほど増加割合は大きい傾向が見られ、水位上昇に対する越波流量増大の影響は長周期の波ほど顕著であることを示唆している。

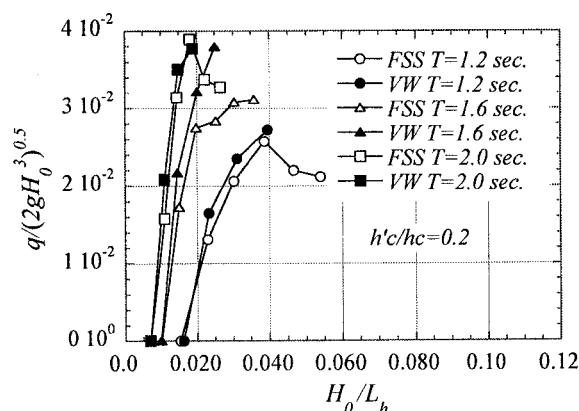
図-8 は水位上昇に伴う越波流量の増大傾向をフレア型護岸 (FSS) と直立護岸 (VW) で比較した



(a) $h'/h_c=0.8$



(b) $h'/h_c=0.6$



(c) $h'/h_c=0.2$

図-8 水位上昇に対するフレア型護岸および直立護岸の越波流量変化の比較

ものである。図-8(a)は水位上昇に伴う護岸天端高の低下割合が $h'/h_c=0.8$ の場合の結果を示している。各入射波周期においてフレア型護岸と直立護岸の越波流量およびその増加傾向には明確な相異があり、短周期の波ほどその差は大きい。図-8(b)は h'/h_c が 0.6 の場合について同様に示したもので、この場合もフレア型護岸の越波流量の低減効果を同様に確認することができる。

一方、図-8(c)は h'/h_c が 0.2 の場合について示したものであるが、水位が極端に上昇した場合にはフレア型護岸の波返し機能は見られず、直立護岸と非常に類似した越波流量特性を示している。これらの結果より、水位上昇に伴う相対的な護岸天端の減少 (h'/h_c) が 0.6 程度までは、越波流量およびその増加傾向についてフレア型護岸と直立護岸の間に明確な相異が見られ、護岸断面形状に由来する越波阻止機能の相異が確認できる。

(4) 海面上昇に伴う作用波圧特性の変化

基準水面から水位が上昇すると護岸前面での波運動の形態が変化する。それに伴い護岸への波当たりの状況も変化する。フレア型護岸に作用する波圧特性も大きく変化することが考えられる。

図-9は水位の上昇に伴う作用波圧分布の変化を入射波の周期毎に示したものである。図の横軸は越波限界波高の波が作用した際の各測点での最大波圧を入射波高相当の静水圧で無次元化した値で示している。また、縦軸は基準水面を原点として鉛直上方に取った座標を護岸高さBで無次元化した値で示している。

基準水面の条件 ($h'/h_c=1$) において入射波の周期が長い1.8秒や2秒の場合は、波はその波面を大きく前傾させて護岸に作用する状況であったので、最大波圧は図-9に示すように入射波高相当の静水圧の8倍程度と大きな値を示した。この値は既往の研究¹⁰⁾に比べて若干大きな値であった。その理由として、今回の実験で用いた護岸寸法が既往のものに比べて大きいために越波限界波高も大きく、護岸前面浅海部での波変形における非線形効果によって護岸前面での波当たり状況が異なっていたことが考えられる。

図-2や図-3で述べたように、水位上昇に伴い越波限界波高は低くなり、護岸前面での強い波返しの状況は徐々に重複波的な運動に遷移していった。そのため、図-9に示すように入射波の広い周期帯において基準水面付近で生じる最大波圧は大きく低下した。特に、入射波周期が長い場合ほどその低下割合は顕著で重複波的な波圧分布に近づく傾向を示している。

今回の実験では水位上昇時の越波限界波高の波が作用する場合の波圧を求めたが、設計では基準水面時の越波限界波高をもとに水位上昇を考慮した波高

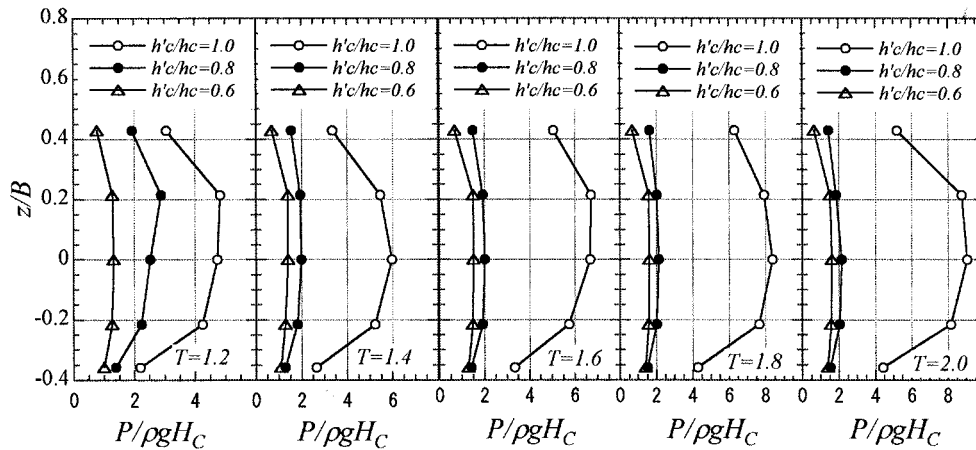


図-9 水位上昇に伴う波圧分布の変化

が作用する際の波圧分布が必要となる。それについてはさらに検討を進める予定である。

4. まとめ

海面上昇に対するフレア型護岸の越波阻止機能、越波量、護岸反射率および作用波圧の特性変化を水理模型実験により検討した。本研究で得られた結果は以下の項目に要約される。

- (1) 水位上昇に伴い護岸天端高は相対的に低くなるので越波限界波高は低下する。越波限界波高の低下割合は入射波の周期にほとんど依存しない。護岸天端高が相対的に20%低くなると越波限界波高は設計時の約60%~70%に低下し、40%の場合は約40%~50%に低下した。
- (2) 護岸断面形状が与えられた条件の下での越波限界波高の推定式を求め、推定値と実験値が良好な一致を示すことを確認した。
- (3) 水位上昇によって護岸天端高が相対的に低くなると波返し運動の規模が徐々に小さくなり、重複波的な運動が支配的となって護岸反射率は上昇する傾向を示す。護岸反射率の入射波長に対する依存性は水位上昇に伴い徐々に見られなくなる。
- (4) 水位上昇に伴い越波流量の増加割合は大きくなる傾向がある。水位上昇に対する越波流量の増大は長周期の波ほど顕著である。水位上昇に伴う相対的な護岸天端の減少 (h'_c/h_c) が0.6程度までは、越波流量およびその増加傾向においてフレア型護岸と直立護岸の間に明確な相異が見られ、護岸断面形状に由来する越波阻止機能が確認できる。
- (5) 水位上昇によって護岸天端高が相対的に低くなると越波限界波高も低下し、護岸前面での強い波返

しの状況は徐々に重複波的な運動に移移する。その結果、入射波の広い周期帯において基準水面付近で生じる最大波圧は低下する。特に入射波周期が長い場合ほどその低下割合は顕著で重複波的な波圧分布に近づく。

参考文献

- 1) 三村信男, 磯部雅彦, 灘岡和夫: 海面上昇・気候変動による沿岸域への影響とその対応策, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 863-867, 1990.
- 2) 松井貞二郎, 立石英機, 磯部雅彦, 渡辺晃, 三村信男, 柴崎亮介: 海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1031-1035, 1992.
- 3) 細見寛, 角湯克典, 内田智, 五味久昭, 板橋直樹, 三村信男: 地球温暖化に伴う海面上昇に対する住民意識と長期的対策のあり方, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1291-1295, 2005.
- 4) 国土交通省: 地球温暖化に伴う海面上昇に対する国土保全研究会報告書, pp. 107, 2002.
- 5) 高山知司: 防波堤の滑動安定性に及ぼす海面上昇の影響, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 873-877, 1990.
- 6) 酒井和彦, 岡安章夫: 温暖化による海面上昇を考慮した防波堤の信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 686-690, 2004.
- 7) 井上雅夫, 島田広昭, 坂本佳弘: 海岸護岸の越波特性に及ぼす海面上昇の影響, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 696-700, 1993.
- 8) 井上雅夫, 島田広昭, 坂本佳弘: 海面上昇に伴う海岸護岸の越波防止機能低下について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 676-680, 1994.
- 9) 村上啓介, 入江功, 上久保祐志: 非越波型防波護岸の護岸天端高さと作用波圧について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 776-780, 1996.
- 10) 村上啓介, 清水健太, 上久保祐志, 片岡保人: マウンドを有するフレア型護岸の越波流量と波圧について, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 661-665, 2005.
- 11) 上久保祐志: 非越波型護岸断面に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, pp. 122, 2000.