

高波浪海域における防波護岸に作用する波力 および越波特性に関する実験的検討

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS OF WAVE FORCES AND WAVE OVERTOPPING FOR SEAWALLS IN ROUGH SEA AREAS

下迫健一郎¹・大寄菜々子²
Kenichiro SHIMOSAKO and Nanako OSAKI

¹正会員 (独法) 港湾空港技術研究所 耐波研究室長 (〒239-0804 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²元 (独法) 港湾空港技術研究所 耐波研究室 (〒239-0804 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Seawalls constructed in rough sea areas are exposed to huge wave forces especially having a steep slope sea bottom in front of the structures. Hydraulic model experiments were conducted in a wave flume in order to investigate the characteristics of wave forces and wave overtopping for seawalls. Wave forces on seawalls constructed in deep water area can be estimated by Goda formula, while in shallow water area having a steep slope in front of the structure are often subjected to impulsive breaking wave force much larger than the force calculated by Goda formula. Wave overtopping quantity for the front wall can be estimated by Takayama formula, while the overtopping quantity for the rear parapet is proportional to that for front wall.

Key Words : Seawall, wave overtopping, impulsive breaking wave force, steep slope sea bottom

1. はじめに

高波浪海域において人工島などの埋立地を建設する場合、沖合に防波堤を建設し、その内側に施設を建設するのが一般的である。しかしながら、地形条件等の制約により、防波堤を設置せず、防波護岸により直接背後地を波から守らなければならない場合もある。

このような場合、防波護岸には強大な波力が作用することになり、特に、前面の海底勾配が急な場合や、リーフを含む複雑な海底地形上に建設される場合、衝撃砕波力が作用する危険性がある。ケーソン式護岸の場合、背後が埋め立てられればケーソンが滑動することはなくなるものの、ケーソン壁やパラペットが波によって破壊される恐れもある。一般に、直立壁に作用する波力の算定には合田式が用いられるが、防波護岸の場合、防波堤に比べて天端がきわめて高いため、波力を過小評価する危険性がある。

一方、越波量についても、前面の海底勾配が急な場合やパラペットを二重にした構造の場合に、従来の越波量算定式をそのまま適用できるか明らかでない。そこで、本研究では設計有義波高が10mを超えるような、これま

でに前例のない高波浪海域における防波護岸を対象として、護岸前面に作用する波力および越波特性について断面水理模型実験による検討を行った。

2. 実験の概要

(1) 実験水路

実験は、図-1に示すように、全長105m、幅3.0m、高さ2.5mの長水路で実施した。造波機はピストン形式で周期0.5s~10s、最大波高80cmの波を造波可能であり、不規則波については入力信号に対応したスペクトルの波を発生させることができる。

水路床は造波板位置から27m区間は平坦で、そこから4m区間は1:15の勾配があり、そのあとの1:100勾配の水路床の上に海底地形模型を設置した。堤体設置位置の側壁はガラス張りになっている。また、水路は途中から隔壁によって幅200cmと80cmに分かれており、今回は幅80cmのほうを用いた。なお、今回の実験における模型縮尺は1/50を想定しており、本論文における値は原則として現地換算で示している。

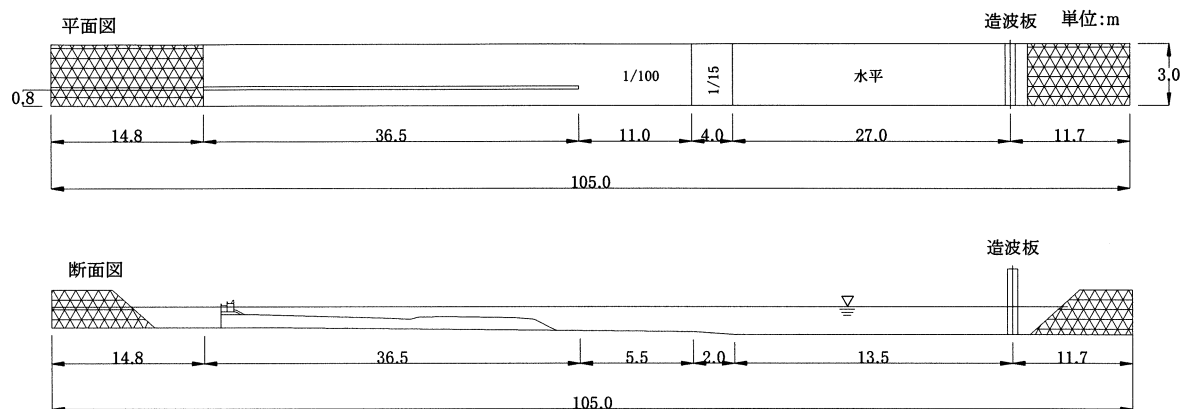


図-1 実験水路

(2) 海底地形と堤体断面

対象とした海底地形は、図-2に示すように、堤体位置の水深が-19.4mと比較的深く、前面の海底地形が1/30の一樣勾配である断面Aと、水深が-10.5mおよび-12.0mと比較的浅く、前面の海底地形の一部が1/7の急勾配地形である断面Bの2つであり、いずれも沖側に最浅部の水深が50m程度のリーフ状の地形を有している。断面Aは混成堤形式、断面Bは混成堤と傾斜堤の2形式について、それぞれ越波および波力特性に関する実験を実施した。

図-3は、代表的な堤体断面の例を示したものである。混成堤の場合、ケーソンの前面側と背面側にパラペットを有している（それぞれ第1パラペット、第2パラペットと呼ぶ）。断面Aにおける混成堤の越波実験については各パラペットの形状および高さを変化させたケースについても実験も行った。また、混成堤の波力実験については、完成断面だけでなく施工時（ケーソンの上部工および背後の埋立土のない防波堤状態）断面についても一部のケースについて実験を行った。なお、断面Bについては、急勾配斜面上における衝撃碎波の発生を防ぐため、図-4に示すように、斜面上にコンクリートブロックによる潜堤を設置したケースについても実験を行った。

(3) 計測方法と実験ケース

越波実験では、有義波周期18.5sの不規則波（約200波）を用い、波群を3種類変えて実験を行った。波高については碎波により波高が頭打ちとなるレベルまで、3段階に変化させており、実験における潮位はHHWL（現地換算で+3.30m）である。越波量については、水路幅80cmのうち中央部40cmに越波計測用水路を設けて計測した。

一方、波力実験では周期15.6sと18.5sの規則波（有効波数5波）を用いて実験を行った。波高は5段階に変化させており、実験における潮位は、LWL（+0.07m）、HWL（+2.16m）、HHWL（+3.30m）の3種類である。波力については、混成堤ではケーソン前面および底面とパラペット部、傾斜堤では上部工前面および底面とパラペット部にそれぞれ圧力センサーを取り付け、サンプリングタイム1msで波圧を測定した。

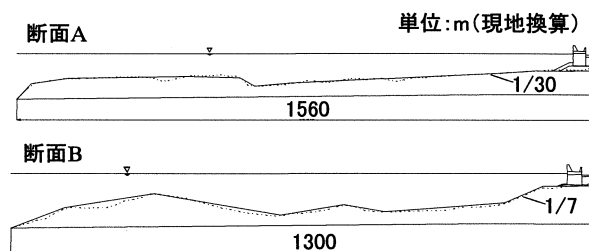


図-2 海底地形断面

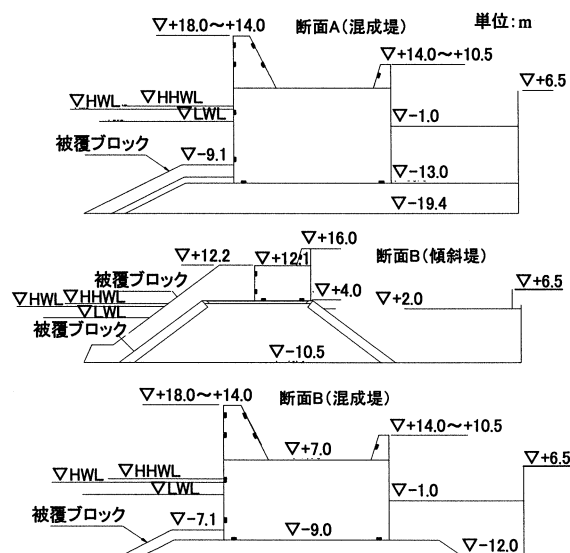


図-3 代表的な堤体断面

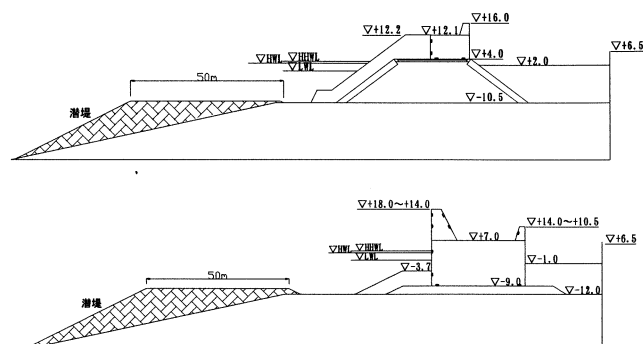


図-4 潜堤を設置した断面

3. 実験結果

(1) 越波実験

a) 混成堤の越波特性

図-5(1)は、断面Aにおいて第1パラベットの高さを+15～+18mまで変化させたときの第1パラベット背後（以後、第1排水路と呼ぶ）への越波量について、横軸に堤前有義波高 $H_{m1/3}$ をとり、実験結果と高山ら¹⁾の近似式による計算値をプロットしたもので、有義波周期18.5sの結果である。ここに、計算値については、海底勾配が1/30で一定と仮定し、実験における $H_{m1/3}$ をもとに碎波の影響を考慮した波浪変形計算プログラムに基づいて沖波波高 H_0 に割り戻し、近似式に代入して求めている。データには多少のばらつきはあるものの、計算値と実験値は比較的良好に一致していることがわかる。沖合にリーフを有する地形の場合、実際には平面的な波浪変形の影響も考慮しなければならないが、今回の断面実験結果だけから判断すると、水深が比較的深ければ、沖合の複雑な地形の影響を考慮しなくても、堤体位置での波高から越波量を算定することが可能であると考えられる。

一方、図-5(2)は、断面Bにおける第1排水路への越波量について同様に示したもので、第1パラベットの高さは+18mである。実験値は計算値の25～60%程度と小さくなっている。断面Bの場合、前面の海底地形が急勾配であるため、斜面上で碎波して堤体に衝撃碎波力が作用しており、越波の打ち上げ高さは模型量で2m程度ときわめて大きかった。ただし、水塊がほぼ鉛直に打ち上げられ、パラベットの越えずに沖へ戻される部分もかなりあるため、越波量がそれほど多くならなかったと考えられる。

図-6は、断面Aにおける高さ+17mの第1パラベットについて、パラベットの前後逆向きに取り付けて、上部斜面堤のようにパラベットの沖側に2:1の傾斜を付けた場合の越波量を、同じ高さの直立型パラベットの場と比較したものである。斜面型の場合、直立型に比べて越波量はほぼ2倍程度に増加している。

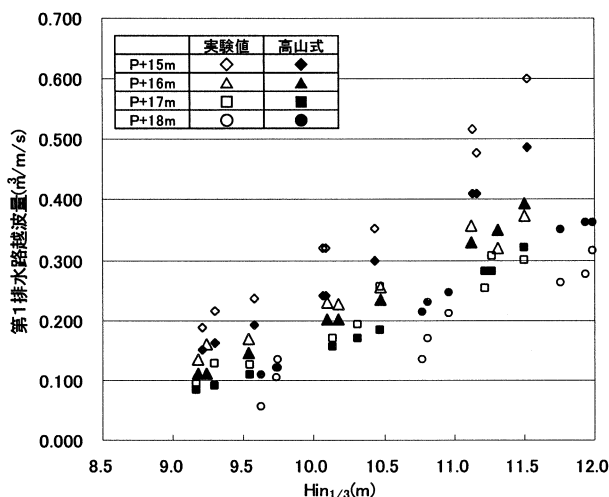


図-5(1) 入射波高と越波量の関係（断面A）

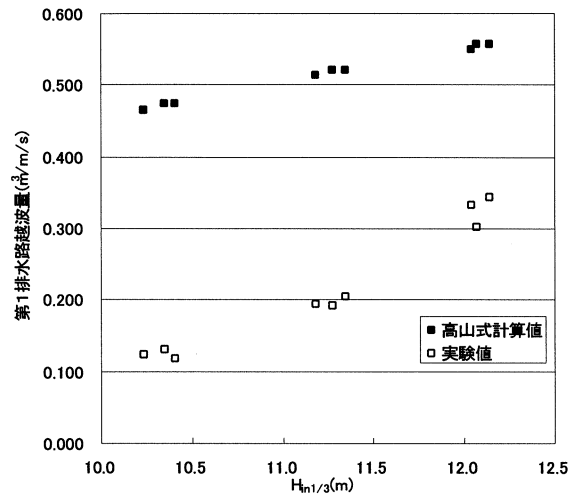


図-5(2) 入射波高と越波量の関係（断面B）

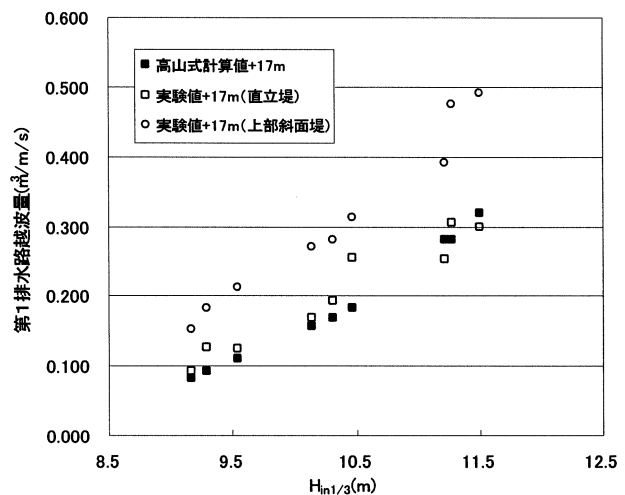


図-6 直立堤と上部斜面堤の越波量比較

第1パラベットの越波した水塊の一部は、さらに第2パラベットも越波する。図-7は、断面Aにおける第1排水路への越波量と第2パラベット背後（以後、第2排水路と呼ぶ）への越波量の関係を示したもので、ケーソン幅は27m、第1パラベットの高さは+18mで一定とし、第2パラベットの形状と高さを変化させた。凡例中の傾斜第2パラベットとは、前述の第1パラベットと同様に、沖側に2:1の傾斜を有する形状を表している。

第2排水路への越波量は、第2パラベットの形状や高さによって異なるが、同じ構造であれば第1排水路の越波量の変化に関係なく、ほぼ一定の比率となっている。なお、ここには示していないが、第1パラベットの低くすると、第1パラベットの越波したあと第1排水路に落下することなくそのまま第2パラベットも越波してしまう水塊の量が多くなり、第2パラベットの高くしても第2排水路への越波量はかなり多くなる。したがって、背後地への越波量を低減させるためには、まず第1パラベットでできるだけ高くすることが効果的である。ただし、その分第1パラベットに作用する波力は大きくなることも考慮する必要がある。

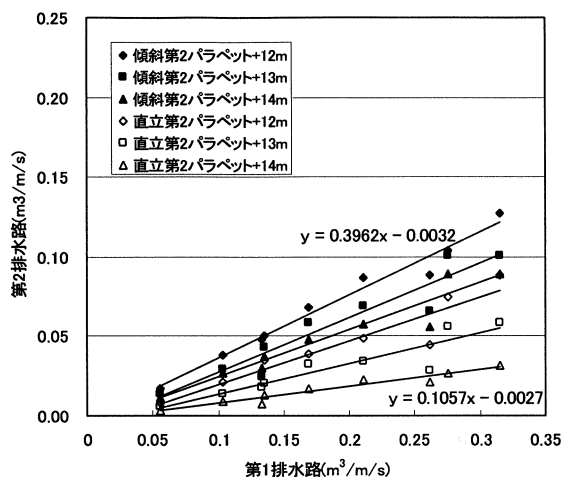


図-7 第1排水路と第2排水路の越波比率（断面A）

b) 傾斜堤の越波特性

図-8は、断面Bの傾斜堤における上部工背後（混成堤の第2排水路に相当）への越波量と、さらに背後の埋立地（上部工背面から47m後方、天端高+6.5m）への越波量について示したものである。図-4に示したように、1/7勾配の斜面上に、コンクリートブロックによる天端幅50mの潜堤を設置した場合の結果についても、合わせて示している。

潜堤を設置することにより、越波量は潜堤のない場合の20～50％程度に低減している。これは、潜堤があることにより碎波位置が沖側に移動するため、碎波した波が上部工に到達するまでに減衰するエネルギーの量が多くなり、越波量が減少したと考えられる。

なお、傾斜堤の場合、混成堤に比べて波高の増大による越波量増加の割合がやや大きくなっている。これは、混成堤と傾斜堤の越波メカニズムの違いが原因であると考えられる。すなわち、混成堤の場合には直立部で水塊が上方へ打ち上げられるため、一部は越波するものの、一部は越波せずに沖側へ戻されるのに対して、傾斜堤の場合、水塊は斜面上を遡上しながら進むため、天端より高い部分の水塊はほとんどそのまま越波することになり、波高が大きくなると越波量が急激に増加するものと考えられる。

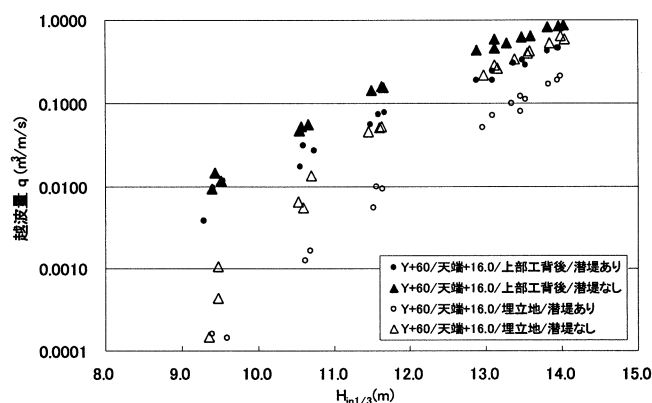


図-8 傾斜堤の越波量（断面B）

(2) 波力実験

a) 断面Aにおける混成堤の波力特性

図-9は、断面Aにおけるケーソンおよびパラベットに作用する波圧について、実験におけるピーク値と合田式による計算値の分布を示した例である。実験値は、各点ごとのピーク値について5波の平均をとったものであり、同時波圧分布ではない。周期15.6sの場合、計算値とほぼ一致しており、周期18.5sの場合、実験値は計算値よりも小さくなっている。

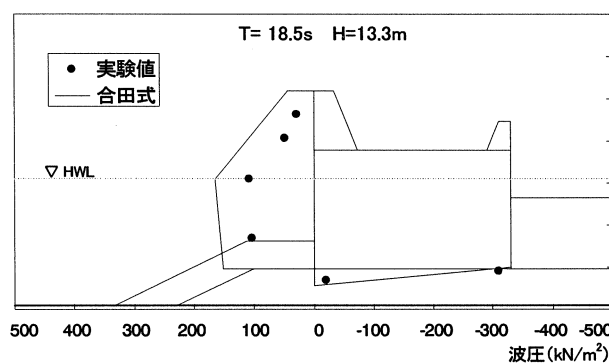
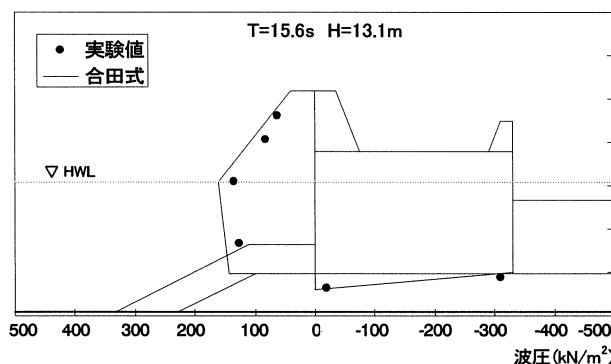


図-9 直立部に働く波圧分布の例（断面A）

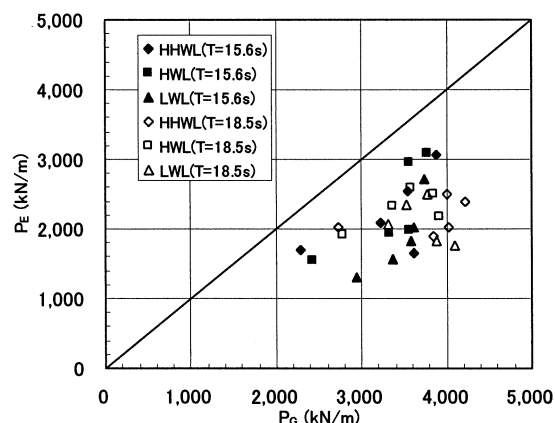


図-10 水平波力の計算値と実験値の比較（断面A）

図-10は、直立部全体に作用するケーソン幅1mあたりの水平波力について、合田式による計算値と実験値を比較したものである。一般に、通常の防波堤の天端高（有義波高の0.6倍）よりも高い場合、波力は合田式の計算値よりもやや大きくなることが知られている。しかしながら、今回の実験条件の範囲では、実験値はすべて計算

値よりもやや小さめの値となっており、波力の絶対値としては非常に大きいものの、合田式による波力を用いることで安全側の設計となることがわかる。なお、ここには示していないが、施工時断面（パラペットのない状態）の場合の波力では、天端が低いことにより多少波力が低減し、完成時断面と比べてやや小さいケースもあったが、あまり大きな差は見られなかった。

b) 断面Bにおける混成堤の波力特性

断面Bの場合、前面の急勾配斜面上で碎波した波が壁面に激しく衝突して、合田式による計算値の2倍以上の大きな波力が発生するケースがある。図-11は、断面Bにおける波圧分布について、図-9と同様に示した例である。図中の合田式②は、水深を仮想的に波高の2倍とし、前面の1/7勾配の斜面をマウンドと同様に見なして波力を計算した結果であり、合田式③は、衝撃碎波力係数 α_1 の算定²⁾において上久保ら³⁾の提案している補正（海底勾配が1/30以上の急斜面の場合には水深を2倍とする）方法を適用した計算値である。周期15.6sの場合、実験値は静水面付近の波圧が特に大きくなっており、底面前側の揚圧力も非常に大きな値となっている。このように、前面に急勾配斜面を有する場合、周期、波高、潮位等によって碎波位置および堤体への波の作用形態が変化し、合田式による計算値をはるかに上回る波力が作用するケースがある。一方、周期18.5sの場合、実験値は計算値よりも小さくなっている。

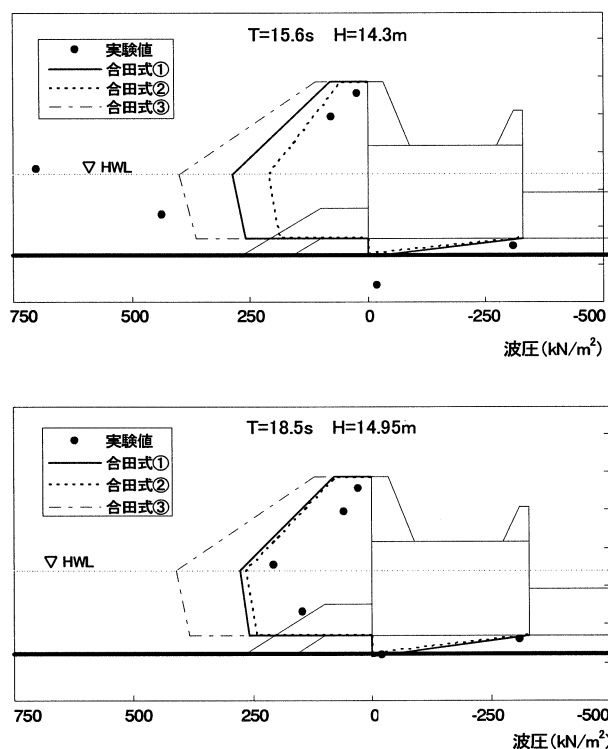


図-11 直立部に働く波圧分布の例（断面B）

図-12は、1/7勾配の斜面上に、コンクリートブロックによる天端幅50mの潜堤を設置した場合について、図-11と同じ波浪条件の場合の結果を示したものである。周期

15.6sの場合、潜堤の設置により碎波位置が沖側へ移動したため、堤体位置では碎波後の波が作用し、波力が大きく低減している。一方、周期18.5sの場合、逆に波力が增大しているおり、潜堤を設置することによって、すべてのケースについて波力が低減するわけではないことがわかる。

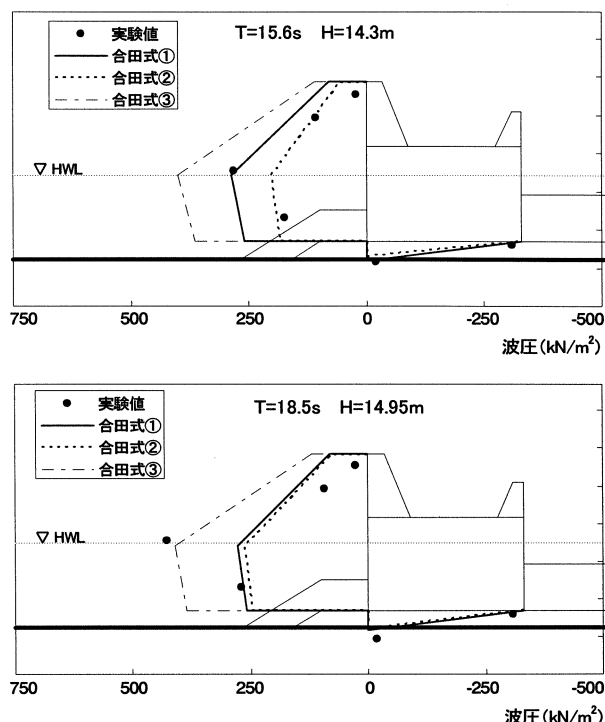


図-12 直立部に働く波圧分布の例（断面B、潜堤あり）

図-13は、HWLの場合における、直立部全体に作用するケーソン幅1mあたりの水平波力について、潜堤なしのときの波力 P_E と潜堤ありのときの波力 P_{Es} を比較したものである。周期15.6sでは潜堤を設置したほうが波力が小さくなっているのに対して、周期18.5sの場合には、潜堤の設置によって逆に波力が増大している。

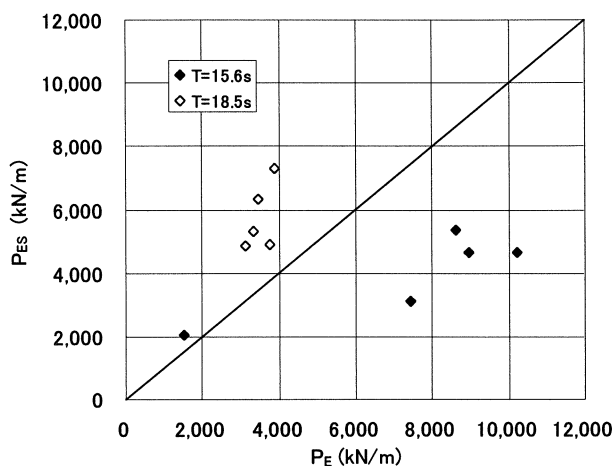


図-13 潜堤の有無による水平波力の比較

c) 傾斜堤上部工の波力特性

図-14は、傾斜堤上部工に作用する波圧分布について混成堤と同様に例示したもので、潜堤のある場合とない場合の両方の結果を示している。上部工前面の波圧については、谷本・小島⁴⁾の波力算定式の値も示している。周期15.6sの場合には潜堤ありのほうがやや大きく、周期18.5sの場合には潜堤なしのほうがやや大きい。全体的には、混成堤の場合に比べて潜堤の影響は小さい。

上部工背面側のパラペットに作用する波圧について、潜堤なしの場合にはかなり大きな波圧が作用しているが、潜堤ありでは半分近くに低減している。これは、潜堤の設置によって碎波位置が沖側に移動するため、パラペットへの波の作用が弱まったことによるものであり、前述した越波量が低減することと同じ理由である。なお、上部工前面に作用する波力とパラペット部に作用する波力とは位相差があり、合力が最大となるときにはパラペット部にはほとんど波力が作用しないため、上部工全体の安定性に関しては、谷本・小島の算定式を用いてよいと考えられる。ただし、パラペット部の安定性については、別途検討する必要がある。

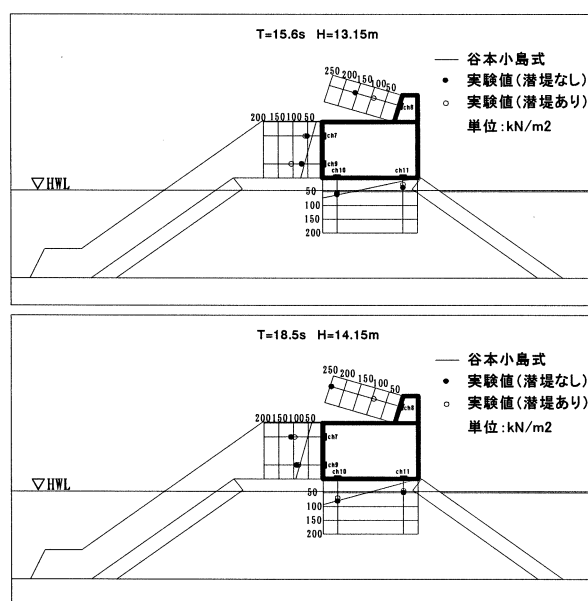


図-14 傾斜堤上部工に働く波圧分布の例（断面B）

4. まとめ

本研究における主要な結論は以下のとおりである。

1) 水深が比較的深い断面Aの場合、混成堤の第1排水路

への越波量は、高山らの近似式とよく一致する。また、ケーソン前面に作用する波力は、今回の実験条件の範囲では合田式の計算値よりもやや小さい。

2) 水深が浅く前面に急勾配斜面を有する断面Bの場合、混成堤の直立部には強大な衝撃碎波力が作用し、合田式の計算値をはるかに上回る波力が作用する場合がある。急勾配斜面上に潜堤を設置することにより波力を低減できる場合もあるが、逆に波力が増大するケースもある。第1排水路への越波量については、平均的には高山らの近似式の半分程度である。

3) 断面Bにおける傾斜堤の場合、潜堤を設置することによって越波量が低減する。上部工に作用する波力については、谷本・小島の算定式が適用可能である。上部工のパラペット部にはかなり大きな波力が作用するが、これについても潜堤を設置することによりかなり低減できる。

今回の研究により、高波浪海域に防波護岸を直接建設する場合、比較的水深の深い場所であれば、直立部に作用する波力自体は大きいものの、基本的に合田式を用いて波力を算定してよいことが確認できた。一方、比較的水深が浅く前面に急勾配斜面を有する場合、周期、波高、潮位等によって碎波位置や堤体への波の作用形態が複雑に変化するため、混成堤の直立部に作用する波力は、上久保らの補正を適用した合田式を用いても適切に算定できない場合があることが明らかになった。ただし、今回の研究では、実験ケースが限られており、合田式が適用できない条件を具体的に示すことはできなかったため、今後さらに詳細な検討を行う必要がある。また、防波護岸の場合、パラペット部の天端が非常に高くなり、巨大な構造となるため、直立部全体の安定性だけでなく、パラペット部のみの耐波安定性についても十分な注意が必要である。

参考文献

- 1) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告 第21巻第2号, pp. 151-205, 1982.
- 2) 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎, 細山田得三: 混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 676-680, 1992.
- 3) 上久保勝美, 木村克俊, 平澤充成, 平野誠治, 遠藤強: 急勾配斜面上の混成堤直立部に作用する衝撃波力算定法, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 941-945, 2000.
- 4) 谷本勝利, 小島朗史: 傾斜堤上部工およびブロック式混成堤に働く波力, 港湾技研資料, No. 450, 32p., 1983.