

# 消波型高基混成堤の越波特性に関する大型模型実験

木村克俊\* ・早川哲也\*\* ・高橋重雄\*\*\*  
下迫健一郎\*\*\*\* ・H. Oumeraci\*\*\*\*\*

## 1. まえがき

防波護岸や沖合人工島の埋立護岸の建設費縮減と環境への影響の緩和を目的として、著者らは図-1に示す消波型高基混成堤の開発を行ってきた。その基本構造は、通常の混成堤よりも高いマウンド上にスリット型直立部を設置するもので、マウンド上での碎波によって波のエネルギーを減衰させるとともに、スリット型直立部によって波力や越波を抑えることを狙ったものである。

これまでに下迫ら (1995, 1996) は系統的な実験を行い、消波型高基混成堤の直立部に働く波力特性を確認している。またマウンド部に関しては、鈴木ら (1997) が模型実験を行い、被覆材の安定重量を検討している。一方、高橋ら (1997) は小型模型実験を行って、図-2に示す「基本型」の越波特性を明らかにするとともに「改良型」についても検討し、波返工として設置したスリット上部の水平板と後壁のパラペットの効果を確認している。しかしながら、背後地における利用障害が問題となるような越波流量が少ない条件に対しては模型の縮尺効果が現れ易いため(たとえば合田; 1990)、波返工の設計に際しては大規模実験による確認が必要である。

平成9年度に開発土木研究所では、ドイツのブラウンシュバイク工科大学と国際共同研究を行い、同大学が所有する大型造波水路 (GWK: Grosser Wellen Kanal) において、波返工を有する消波型高基混成堤の越波および波力実験を実施した。本報告では、越波流量や波の打ち上げ高さに対する波返工の効果とともに、作用波力特性を明らかにするものである。

## 2. 実験の方法

### (1) 実験水路および堤体断面

実験はドイツのニーダーザクセン州ハノーファー市郊外にある大型造波水路 (長さ 320 m, 幅 5 m, 深さ 7 m) で実施した。水路内に勾配 1/50 の砂地盤を設け、図-3

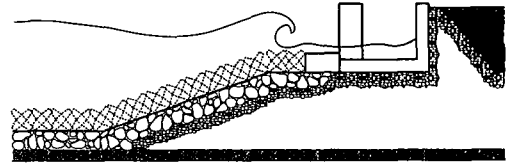


図-1 消波型高基混成堤の概念図

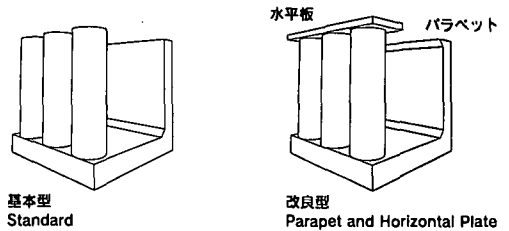


図-2 直立部の形状

に示す消波型高基混成堤の模型を設置した。なお現地に対する縮尺は 1/4 程度を想定している。捨石マウンドは 0.5~5 kg の石材で形成し、その上にスリット型直立部を設置した。直立部は水路幅方向の長さが 1.63 m の鉄筋コンクリート製で、同一のものを 3 個並べている。実験水位は WL1, WL2 および WL3 の 3 種類とし、それぞれの堤体の設置水深  $h$  は 2.05, 2.65 および 2.8 m となる。

直立部は円筒型スリット壁と遊水部を持つ消波構造で、前出図-2に示すように基本型と改良型の 2 種類とした。ともに円筒スリットの直径は 40 cm, スリットの中心間隔は 56 cm であり、正面から見た開口率は約 30% となる。改良型は波の打ち上げを低減するため、スリット上部に幅 54 cm の水平板と、後壁に幅 7 cm のパラペットを設置した構造である。

### (2) 実験波

実験では、①波の打ち上げ高さ、②越波流量、③波返工に働く波力を測定した。波の打ち上げ高さに関しては規則波および不規則波を用い、越波流量の測定はすべて不規則波により実施した。また波返工に働く波力実験には規則波を用いた。実験波の周期は 3.6, 5.0 および 7.0 s の 3 種類とし、波高は規則波で  $H=0.7\sim 1.3$  m, 不規則

\* 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室副室長  
\*\* 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室研究員  
\*\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部副波研究室長  
\*\*\*\* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官  
\*\*\*\*\* Dr.-Ing ブラウンシュバイク工科大学教授

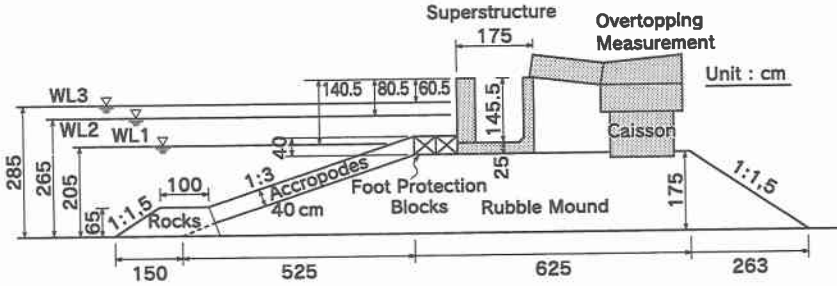


図-3 実験模型

波で  $H_{1/3} = 0.7 \sim 1.1$  m とした。不規則波のスペクトル形は JONSWAP 型 ( $\gamma = 1.0$ ) を目標とした。1 ケースの計測時間は、規則波では約 90 波分、不規則波で約 200 波分とした。

### 3. 波の打ち上げ特性

#### (1) 測定方法

直立部への波の作用状況は、位相別に検討する必要がある。ここでは、波面がスリット部に衝突したタイミングを Phase-1、後壁に衝突したタイミングを Phase-2 と定義する。

写真-1 は、水位が WL1、周期  $T_{1/3} = 5$  s、波高  $H_{1/3} = 0.9$  m の条件に対して、基本型の Phase-2 における波の作用状況を示している。波の打ち上げ高さを調べるため、堤体正面から沖側に 10 m 離れた地点でビデオ撮影を行った。堤体の背後には、波の打ち上げ状況を把握しやすいように暗緑色のスクリーンを設置した。越波画像は毎秒 8 フレームでパーソナルコンピュータに取り込んだ。解析対象は堤体前面の縦 6.4 m、横 4.8 m の範囲とし、1 辺 10 cm の正方形を基本画素として、縦 64 個 × 横 48 個の画素に分割した。各画素は 256 階調のグレースケール化を行い、色調度数は黒の場合を 1、白の場合を 256 とした。ここで、目視観測結果との比較から、波とスクリーンの色調の閾値を 196 とした。

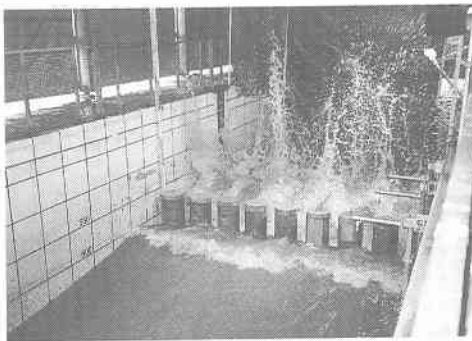


写真-1 波の作用状況図

図-4 は、パーソナルコンピュータに取り込んだ越波画像を模式的に示したものである。画像解析においては、波の実質部分に相当する部分を「水塊」、波面から分離した部分を「飛沫」と定義した。飛沫については、直径 1~2 cm の水滴に着目しており、色調が閾値以上を示す最も上方にある画素の位置から、打ち上げ高さを算定した。また、水塊については、色調が閾値以上である画素の連続という条件を用いた。

以下の検討においては、静水面を基準とした水塊および飛沫の打ち上げ高さを  $R_w$  および  $R_s$  と呼ぶ。不規則波実験では 1 波ごとに読み取った打ち上げ高さを統計処理し、それぞれの 1/3 最大値  $R_{w1/3}$  および  $R_{s1/3}$  を求めた。また規則波実験では、作用波数に対する平均値を求めた。

#### (2) 基本型

基本型の波の打ち上げ特性を不規則波実験により調べた。図-5 は Phase-1 と Phase-2 の打ち上げ高さを比較したものである。スリット壁における  $R_{w1/3}$  は、後壁での値の 0.5~1.0 倍程度となっている。以下、打ち上げ高さが大きい後壁での値に着目する。

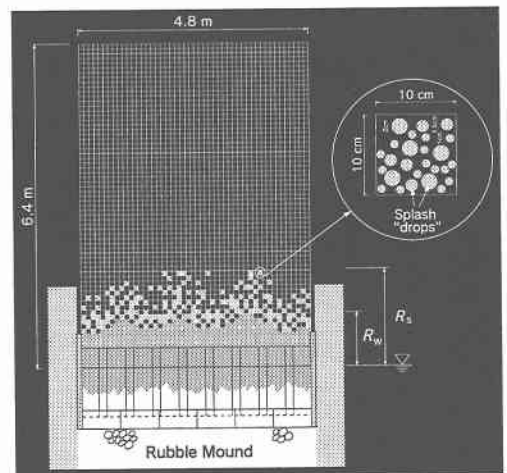


図-4 波の打ち上げ状況

図-6は後壁における水塊の打ち上げ高さ  $R_{W1/3}$  と飛沫の打ち上げ高さ  $R_{S1/3}$  を比較している。飛沫は水塊の3倍程度の高さまで打ち上げられるが、 $R_{S1/3}$  が3 m程度で頭打ちになっている。高橋ら (1997) が行った縮尺1/25の実験では、飛沫は水塊の打ち上げ高さの2倍程度であり、小規模実験ではスケール効果により飛沫の打ち上げ高さを過少評価する危険がある。

図-7は、縦軸に水塊の打ち上げ高さ  $R_{W1/3}$  を入射波高  $H_{1/3}$  で除して無次元化し、横軸には水深  $h$  と入射波高  $H_{1/3}$  の比を示している。 $R_{W1/3}/H_{1/3}$  の変化には  $h/L$  の影響は小さく、 $H_{1/3}/h$  が0.3付近で極大となる。 $H_{1/3}/h$  がそれ以上の条件ではマウンド上での碎波するため  $R_{W1/3}/H_{1/3}$  が小さくなっている。

(3) 改良型と基本型の比較

写真-2は改良型の Phase-1 の状況である。水平板によって水塊の飛散が抑えられていることがわかる。その後 Phase-2 では、写真-3に示すようにパラペットによって波の打ち上げ方向が沖側に変化している。

図-8は、規則波実験結果に基づいて、改良型と標準型

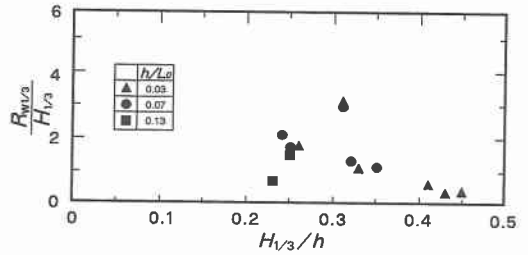


図-7 波高と打ち上げ高さの関係

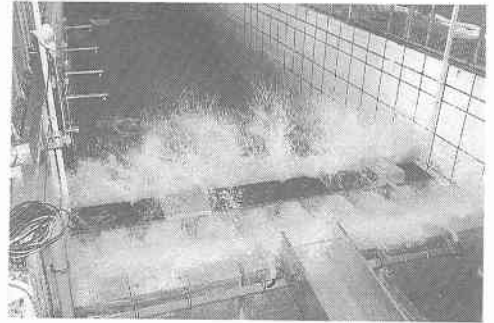


写真-2 水平板への波の作用状況

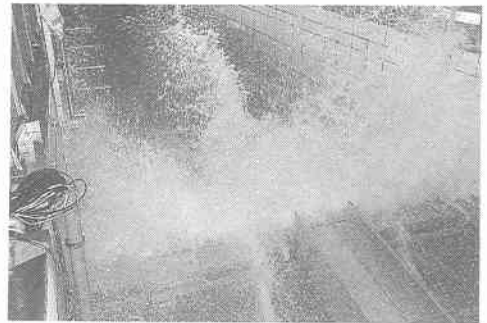


写真-3 パラペット部への波の作用状況

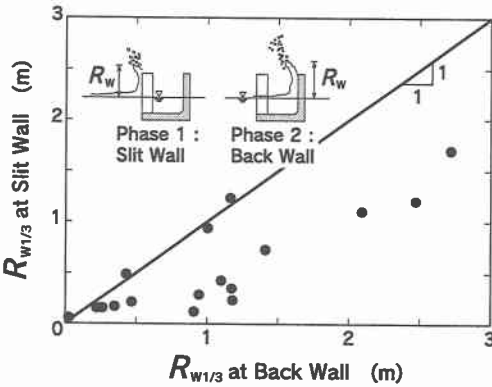


図-5 Phaseごとの打ち上げ高さ

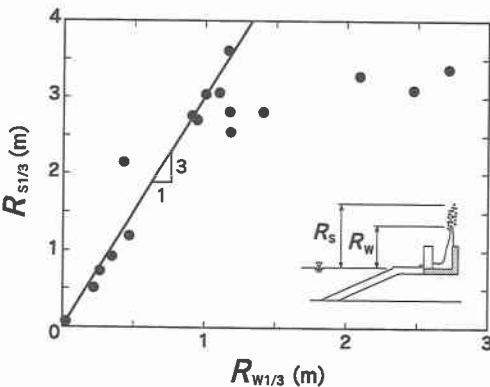


図-6 水塊と飛沫の打ち上げ高さ

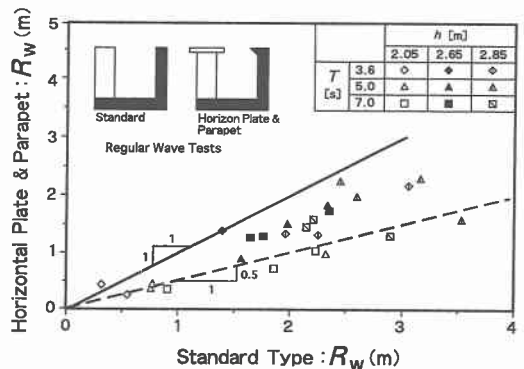


図-8 基本型と改良型の打ち上げ高さ

の波面の打ち上げ高さを比較したものである。水位が WL1 の条件に対しては、改良型では水塊の打ち上げ高さを基本型の 1/2 程度に低減できることがわかる。これに対し水位が高い WL2 および WL3 の場合には非砕波状態で直立部に波が作用するため、打ち上げ高さの低減効果が発揮されにくくなっている。

4. 越波特性

(1) 測定方法

越波水は図-9 に示すように、後壁上に固定した導水樋(幅 50 cm)を通じて堤体背後に設置した取水函に集め、その重量変化を測定した。ただし取水函の貯留量が限られているため、適宜排水ポンプを作動させ、その排水量を考慮して、単位時間、単位幅当りの越波流量  $q(m^3/m/s)$  を求めた。

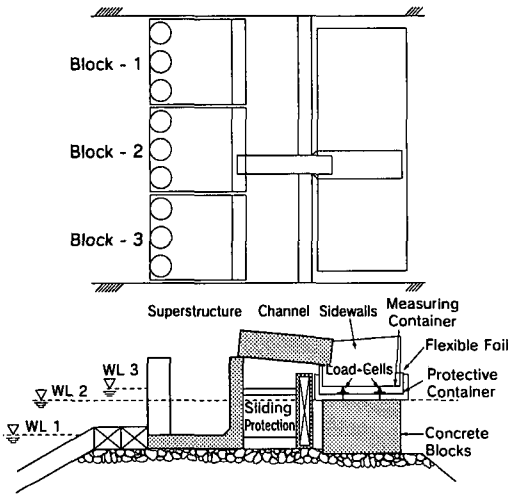


図-9 越波量の測定方法

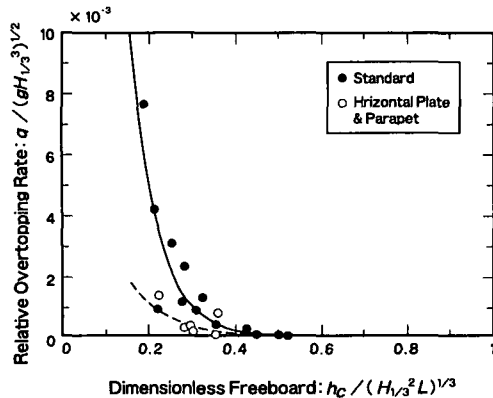


図-10 越波特性

$m/s)$  を求めた。越波実験結果は Ahrens and Heimbaugh (1988) と同様に無次元越波流量  $q(gH_{1/3}^3)^{1/2}$  と無次元天端高さ  $h_c/(H_{1/3}^2 L)^{1/3}$  の関係にまとめた。ここで、 $g$  は重力加速度、 $H_{1/3}$  は有義波高、 $h_c$  は直立部の天端高さ、 $L$  は波長を表わしている。

(2) 改良型と基本型の比較

図-10 に示すように、天端が低いほど、また波長が長いほど越波流量が大きくなる傾向がある。改良型の越波流量は、基本型よりも小さく、最大で 1/4 程度まで低減されている。基本型および改良型の実験結果の平均的な傾向に着目すると、それぞれ実線および破線で示す実験曲線が得られる。これらを以下に示すように定式化した。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = Q_0 \cdot \exp\left[-b \cdot \frac{h_c}{(H_{1/3} \cdot L)^{1/3}}\right] \dots\dots(1)$$

式(1)中の係数としては、基本型の場合  $b=0.11$  および  $Q_0=15.5$ 、改良型の場合  $b=0.40$  および  $Q_0=24.4$  となる。

5. 波返工に働く波力

(1) 測定方法

図-11 に示すように波返工の部材の一部を本体から分離し、これを 3 台のロードセルで固定し作用波力を測定した。測定部材の波向き直角方向の幅を 56 cm とし、波力の測定値は受圧面積で除して波力強度  $p$  とした。

実験はすべて規則波で行い、水位 3 種類に対して、周期  $T$  を 3.6、5.0 および 7.0 s の 3 種類とし、波高  $H$  を 0.7~1.1 m の範囲で 3 種類に変化させた。

(2) 水平板に働く波力

図-12 はスリット上部に設置された水平板に働く波力特性を示している。周期による大きな差は見られず、波高と天端高さの比  $h_c/H$  が小さいほど波力が増大する傾向がある。無次元波力強度  $p/w_0 H$  は最大で 3 程度になるけれども、 $h_c/H$  を 1 程度にすれば  $p/w_0 H$  は 1 以下に

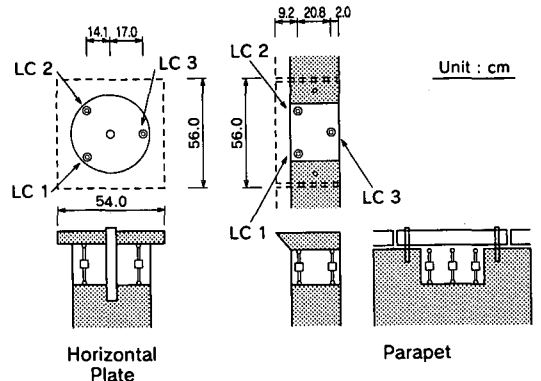


図-11 波力の測定方法

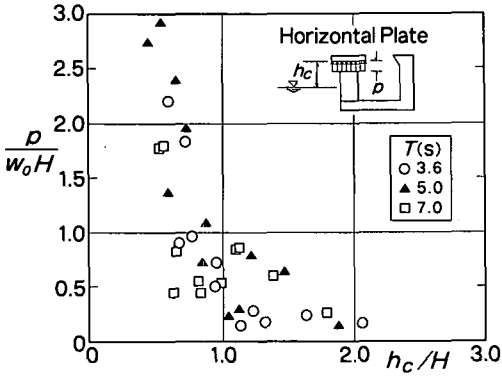


図-12 水平板に働く波力

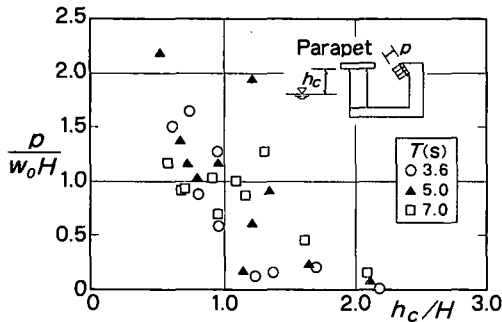


図-13 パラペット部に働く波力

抑えることができる。

### (3) パラペット部に働く波力

図-13は後壁上部に設置されたパラペット部に働く波力特性を示している。ばらつきが大きいかいけれども、 $h_c/H$ が小さいほど波力が大きくなる傾向がある。周期の影響は小さく、波圧強度  $p/w_0H$  は最大で2程度となっている。

下迫ら(1997)の部材波力実験では後壁に働く波力強度は  $1 \sim 2w_0H$  の範囲であり、パラペット部に対しても同程度の波力を見込めれば良いことがわかる。

## 6. まとめ

消波型高基混成堤の越波特性について、以下の事項が明らかになった。

1) 基本型に対して、水塊の打ち上げ高さと同程度の関係を示した。飛沫部分については、水塊の3倍程度の高さまで打ち上げられる。

2) 改良型では、水位が低いWL1の場合には水塊の打ち上げ高さを基本型の1/2程度まで低減できる。

3) 波返工を有する改良型では、基本型に比べて越波流量を低減できる。

4) 波返工に働く波力は、無次元波力強度が最大で  $2 \sim 3w_0H$  となるが、水面とのクリアランスを設けることで波力は低減できる。

波の打ち上げ特性に関しては模型のスケール効果が現れるため、大型模型実験の必要があることが明らかになった。今回検討の対象とした波返工は比較的簡単な構造であるが、波の打ち上げ高さおよび越波流量の低減効果が認められた。また作用波力についても一般的な施工方法で対処可能な範囲と考えられる。今後は以上の実験結果をふまえて、現地施工を目的とした検討を行う予定である。

本報告で示した大型実験の実施に当たっては、ブラウンシュバイク工科大学ライヒトヴァイス海岸水理研究所のM. Kudella 研究員およびM. Muttray 助手の協力を得た。また実験データのとりまとめに際しては、開発土木研究所港湾研究室の森昌也技官ならびに日本データサービス(株)の遠藤強氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 合田良賢(1990): 港湾構造物の耐波設計(増補改訂版), 鹿島出版会, pp. 127.
- 下迫健一郎・高橋重雄・斎藤祐一・三浦裕信(1995): 消波型直立部を用いた高基混成堤の開発, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 851-855.
- 下迫健一郎・高橋重雄・斎藤祐一・M. Muttray・H. Oumeraci・細川泰廣(1996): 高基混成堤の水理特性および耐波安定性に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 826-830.
- 鈴木孝信・木村克俊・明田定満(1997): 高基混成堤のマウンド被覆ブロックの耐波安定性, 第40回北海道開発局技術研究発表会概要集, pp. 343-348.
- 高橋重雄・下迫健一郎・斎藤祐一・三浦裕信・姜 関求(1997): 消波型高基混成堤の越波特性, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 573-578.
- Ahrens, J.P. and Heimbaugh, M.S. (1988): Seawall Overtopping Model, Proceedings of 21st International Conference on Coastal Engineering, pp. 795-806.