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

下迫健一郎* ・ 高橋重雄** ・ 斉藤祐一***
M. Muttray**** ・ H. Oumeraci***** ・ 細川泰廣*****

1. ま え が き

高基混成堤は、通常の混成堤よりも高いマウンドの上に比較的小さい直立部を有する構造である。従来、高基混成堤は衝撃碎波力が作用することがあるため、危険な構造とされており、わが国においてはマウンドの低い低基混成堤が主流となっている（高橋・下迫，1996）。しかし、高基混成堤は防波堤や護岸の構造として、施工面や全体的な経済性、環境面への影響などから、条件によっては低マウンドの混成堤よりも有利となる場合も多い。特に、内湾域で比較的水深が浅く、設計潮位の大きいところに適した構造である。

著者らは1994年から、直立部に消波構造を用いた高基混成堤の開発に取り組んでいる。図-1は、消波型高基混成堤を用いた護岸のイメージを示したものである。L.W.L.時には、マウンド天端面が静水面上にあり直立部が完全に露出しているため、波はほとんど作用しない。一方、H.H.W.L.時には、大きな波はマウンド法肩付近で碎波して直立部に作用するが、碎波後の波であり、かつ直立消波構造によって波の作用は衝撃的ではなくなる。

著者らはすでに越波特性に関する小型模型実験（1995，1997）を行っており、消波型高基混成堤が、通常の消波ブロック被覆型傾斜堤に比べてはるかに越波が少なく、低天端型護岸として適した構造であることを明らかにしている。また、波力特性についても小型模型実験（1996）を行っており、消波構造を用い、なおかつ適切な高さと前肩幅のマウンドとすることによって波力が著しく低減し、耐波安定性が高くなることを明らかにしている。

このように、小型模型実験を主とした研究によって、高基混成堤の基本的な特性についてはかなり明らかになっている。しかしながら、小型実験による検討だけでは、模型縮尺の影響により現地における現象を十分に再現できない場合もある。たとえば、直立部の耐波安定性

図-1 消波型高基混成堤護岸のイメージ図

では、衝撃碎波力の問題や波力によって各部材に生じるひずみの問題などが重要となる。また、水理特性に関しては、高マウンドであるためマウンド部を透過する波が通常の混成堤に比べて大きく、比較的潮位が低い場合でもある程度の波が港内側へ伝達する。これらの問題は模型縮尺の影響が大きいいため、小型実験だけでなく大縮尺の模型実験か、あるいは現地実験により検証する必要がある。

本報告は、科学技術庁の科学技術振興調整費による個別重要国際共同研究として行った、運輸省港湾技術研究所とドイツのブラウンシュバイク工科大学の共同研究の成果をとりまとめたもので、高基混成堤の水理特性および耐波安定性について、大縮尺の水理模型実験により検討した結果を述べるものである。

2. 実験の方法

2.1 実験水路および実験断面

今回の実験は、ドイツのハノーバー大学にある大型造波水路（長さ320m、幅5m、深さ7m）で実施した。図-2は、今回対象とした高基混成堤の断面を示したものである。現地に対する模型縮尺は1/4程度を想定している。

模型堤体は、まず海底勾配1/75の砂地盤をつくり、そ

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
** 正会員 工 博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長
*** 前運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室
**** Technical University of Braunschweig
***** Dr.Eng. Prof. Technical University of Braunschweig
***** 運輸省第五港湾建設局 中部新国際空港調査室長

図-2 堤体断面図

の上に捨石マウンドを設置した。捨石の重量は0.5～5 kgである。マウンド上に据え付けた直立部は、図-3に示すように、水路幅方向の長さが1.63 mの鉄筋コンクリート製の上部工が3個並んでおり、前面には300 kgの根固めブロックを置いている。また、マウンド斜面は40 kgのブロックで被覆しており、さらに、法先部には洗掘防止のために約90 kgの被覆石を置いている。マウンドの前面勾配は、環境への効果を考慮して1:3の緩勾配となっており、マウンド前肩幅BMは1.0 mである。直立部は円筒型スリット壁と遊水部を持つ消波構造で、円筒スリットの直径は40 cm、スリットの中心間距離は56 cmであり、前面からみた見かけ上の開口率は約29%となる。この断面を消波型と呼ぶ。比較のために直立部の前後を逆向きにして、前面を直立壁にした場合についても実験を行った。これを直立型と呼ぶ。

実験においては、潮位の影響を調べるため、図に示すようにWL1～WL3の3種類に潮位を変化させた。ここに、WL1, WL2はそれぞれH.W.L., H.H.W.L.に対応しており、WL3は、比較のためWL2よりもさらに25 cm潮位を高くしたものである。ただし、直立型についてはWL3は行っていない。なお、これらの実験条件は、基本的には以前に実施した小型模型実験（模型縮尺1/25）と相似となるように設定している。

2.2 実験波および計測方法

実験波は、周期3.6, 5.0, 7.0 sの規則波および不規則波を用いており、波高は、規則波で $H=0.4\sim1.45$ m, 不規則波で $H_{1/3}=0.5\sim1.0$ m程度である。不規則波のスペクトルは、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、不規則波では約200波分とした。ただし、直立部が大きく滑動した場合には途中で計測を打ち切っている。なお、規則波の実験では、通常は造波板からの再反射波が堤体に作用するまでが有効造波時間となるが、本水路の造波機は反射波吸収型であるため再反射波の影響はほとんどなく、長時間にわたる計測が可能である。

実験では、図-3に示すように3個の上部工をそれぞれ滑動量測定用、波圧測定用、ひずみ測定用とした。滑

図-3 堤体平面図

図-4 センサーの配置

動量測定用では、トランシットを用いて波の作用前と作用後の位置を計測し、1ケースでの総滑動量を求めた。波圧測定用では、超小型波圧計を用いて直立部各部に作用する波力を計測した。ひずみ測定用では、内部の鉄筋にひずみ計を取り付け、波力により生じる各部材のひずみを計測した。また、ひずみ測定用には、加速度計およびロッキング測定用の変位計も取り付けている。これらのセンサーの配置は図-4に示すとおりである。このほかに、堤体の前後に波高計を設置し、反射波および伝達波の計測も行っている。

3. 反射・伝達特性

図-5は、直立型および消波型高基混成堤の反射率を示したもので、横軸には碎波相似性パラメータ ξ をとっている。図には3つの潮位における実験結果をすべてプロットしており、規則波と不規則波については記号を変えて示している。データにはばらつきがみられるが、全体的には ξ が大きいほど反射率も大きくなっており、また、消波型のほうが直立型よりも20～50%程度反射率が小さい。消波型の場合、反射率は最大でも0.3程度であり、マウンド上での碎波と直立部による消波機能によつ

て、反射波がきわめて小さくなることわかる。なお、以前に行った小型実験においては、反射率は0.2~0.3程度であり、今回の実験結果とほぼ一致している。

図-6は、不規則波における直立型および消波型の波高伝達率を示したもので、図-5と同様に3つの潮位における結果をすべてプロットしている。なお、高基混成堤の場合、通常の低マウンドの混成堤に比べてマウンド内を透過する波の割合が高く、しかも越波の低減効果が高いため、伝達波の大部分は、越波ではなくマウンド透過波である。そこで、マウンド形状の影響を考慮した

図-5 反射率

図-6 波高伝達率

図-7 壁面に作用する波力

め、横軸には前面水深 h と波長 L の積を平均マウンド幅 l_{eff} の2乗で無次元化した値をとっている。伝達率はこの値にほぼ比例して大きくなっていることがわかる。直立型と消波型の違いによる顕著な伝達率の差はなく、今回の実験範囲では、伝達率は最大で0.25程度である。

エネルギー消費率 K^2 は、反射率 K_r および伝達率 K_t を用いて、 $K^2 = 1 - K_r^2 - K_t^2$ で定義できる。不規則波における高基混成堤のエネルギー消費率は消波型で0.86~0.98、直立型でも0.73~0.94であり、碎波によって非常に多くのエネルギーが消費されることがわかる。

4. 部材波力特性

4.1 直立部に働く波力に対する模型縮尺の影響

マウンド前肩幅の広さが十分でない場合、直立型高基混成堤の前面壁には、かなり大きな衝撃碎波力が作用する。また、消波型の後壁にも比較的大きな碎波力が作用する場合がある。このような衝撃碎波力については、波作用時の空気を取り込みなどに相似則が成り立たないため、模型縮尺によってその値が変化することも考えられる。こうした模型縮尺の影響を調べるため、小型実験における結果と今回の実験結果の比較を行った。

図-7は、直立型の前面壁および消波型の後壁に作用する波力のピーク値を表したもので、潮位がWL2で規則波の場合の結果である。横軸は波高とマウンド上水深の比 H/d をとっており、縦軸は平均波力強度 p を水の単位体積重量 w_0 と波高 H で無次元化した値をとっている。図において白抜きのプロットが以前に行った小型実験結果であり、黒塗りが今回の結果である。小型実験では $H/d > 2.0$ の波高の大きい範囲についてのみを対象としているが、今回の実験では波高の小さい場合についても波力を測定している。

直立型に働く波力は非常に大きく、ばらつきもかなり大きい。これは、 $H/d = 2.0$ 付近でピークとなっている。これは、今回の断面の場合、 $H/d = 2.0$ 程度の波高のとき、直立部前面で碎波した波がもっとも厳しく壁面にぶつかるためと考えられる。したがって、直立型高基混成堤では、設計波に対して $H/d \gg 2.0$ であることが望ましい。

一方、消波型に働く波力は、スリット壁で波が乱されるため、直立型に働く波力よりもかなり小さい。また、 $H/d = 1.2$ 付近で無次元波圧がピークとなっており、直立型に比べてピークとなる波高が小さい。これは、 $H/d = 1.2$ 程度の比較的波高が小さいときには、遊水室幅も含めた壁面までの実質的な距離でちょうど碎波するようになるためと考えられる。ただし、この無次元波圧が最大となる H/d の値は、 d/h や B_m/L の値によって変化すると考えられる。なお、これらは無次元波圧についての傾向であり、絶対値としては、やはり波高の大きいほうが

波力も大きくなる。全体的にみて、小型実験結果と今回の実験結果は比較的一致しており、縮尺の影響は明確ではない。

4.2 直立部に働く波力と部材のひずみ

部材の耐波設計においては、作用する波力の大きさそのものよりも、波力によって生じるひずみの大きさのほうが重要である。特に、衝撃的な波力の場合、値は大きくても作用時間が短いため、部材に生じるひずみはそれほど大きくならないことに注意する必要がある。

図-8は、消波型のスリット壁に働く曲げモーメントについて、波圧計から求めた波力をもとに計算される値 M_L と、内部の鉄筋に取り付けたひずみ計から得られたひずみをもとに計算される値 M_R を比較したもので、規則波の場合の結果である。図では碎波の状況によって記号を変えて示している。

非碎波の場合は M_L と M_R はほぼ等しいが、碎波および碎波後の波の場合はひずみからの値 M_R のほうがやや小さい。これは、非碎波の場合には波力の時間変化がゆるやかであるため、円筒スリット前面と側面との位相差の影響が小さく、前面の波圧がピークとなると、側面にもほぼ同じ波圧が作用し、等分布に近い波圧分布になるためと考えられる。これに対して、碎波および碎波後の場合には波力の時間変化が急激であるため位相差の影響が大きく、ピーク時には側面が小さい偏分布の波圧となる。今回の実験では正面のみで波圧を測定しており、計算される波力がやや過大であったと考えられる。なお、部材の固有振動数が低く、しかも波力が衝撃的で作用時間が短い場合には、動的応答特性によりあまり大きなひずみが生じないこともあるが、今回の円筒スリットの固有振動数は約 90 Hz と比較的高いため、こうした影響は小さいと考えられる。

図-9は、直立型の前面壁および消波型の後壁に働く曲げモーメントについて、図-8と同様に示したものである。図-8のスリット壁の場合と比べてかなり大きなモーメントとなっており、とくに直立型の碎波および碎波後における値が大きい。直立型、消波型ともに、ひずみからの値 M_R のほうが波力から求められる値 M_L よりも小さく、曲げモーメントの絶対値が大きくなるほどその傾向が顕著であり、特に、直立型では M_R は M_L の 30~50%程度となっている。直立壁の固有振動数は約 50 Hz であり、あまり低くないが、それでも波力が衝撃的で作用時間が非常に短いため、動的応答特性により大きなひずみが生じなかったものと考えられる。また、衝撃的な波力はその発生が非常に局所的であり、必ずしも全体に同時に作用するわけではなく、波圧計による値の平均値は、実際の波力よりも大きな値となる場合もある。したがって、衝撃的な波力が作用する場合には、部材に

図-8 スリット部に作用する曲げモーメント

図-9 壁面に作用する曲げモーメント

対する設計外力として波力の値をそのまま静的荷重で与えることは明らかに過大な設計であり、実際に生じるひずみと等価となるような有効波力を与えればよいことがわかる。

5. 滑動安定性

小型実験における滑動実験では、潮位 WL 2、周期 $T=1.44$ s (大型実験換算 $T=3.6$ s) のみを対象とし、マウンド前肩幅と直立部の重量を変化させて、滑動量の測定を行った。その結果、消波型は直立型に比べて約 1/3 の重量で滑動安定性を確保できることが明らかになった。今回の実験では、マウンド形状と直立部の重量は一定とし、潮位、波高、周期を変化させて滑動量を測定した。

図-10 (1) は、WL 1 の場合の規則波による滑動実験結果を示したものである。縦軸は 1 ケースの総滑動量であり、横軸は波高 H を合田式による波力から逆算される滑動限界波高 H_{cc} で無次元化した値である。直立型では、波高が $H/H_{cc}=1.0$ を超えると大きく滑動するケースがみられるが、消波型では、滑動量は最大でも数 cm 程度であり、ほとんど滑動していない。これは、WL 1 の場合にはすべての波が直立部からかなり離れた位置で碎波し、消波型の後壁には大きな波力が作用しないためである。

図-10(1) 滑動実験結果 (WL1)

図-10(2) 滑動実験結果 (WL2)

図-10(2)は、WL2の場合の滑動実験結果について同様に示したものである。直立型については、 $H/H_{CG}=1.5$ 付近で、WL1と同様に非常に大きく滑動している。ただし、潮位が異なるため H_{CG} の値は WL2 のほうが3割ほど小さく、WL1よりも小さい波高で滑動していることになる。消波型については、 $H/H_{CG}>2.0$ になると多少滑動しているが、滑動量は最大でも8cm程度であり、全体的にはほとんど滑動していないといってよい。ただし、今回の実験は同じケースの繰り返しをほとんど行っていないため、摩擦係数のばらつきなどによっては消波型であっても多少の滑動が生じる可能性はある。

小型実験の結果と比較すると、波高レベルや作用波数の違いもあり一概には比較できないが、直立型については小型実験の結果と同様であり、合田式による波力から計算される滑動限界が実験結果とほぼ一致している。消波型については、大きく滑動する波高まで実験できなかったため、滑動限界は明確でないが、小型実験において滑動が生じたのは $H/H_{CG}>2.5$ のときであり、それ以下の波高ではほとんど滑動しなかった点は一致している。

なお、ここでは示していないが、潮位の高い WL3 の場合には消波型でも比較的大きな滑動が生じた。なお、直立型については、非常に大きな衝撃碎波力により直立部

が破壊される可能性があったため実験を行っていない。

6. まとめ

今回の研究により、消波型高基混成堤は低反射性の構造物でエネルギー消費率もきわめて大きいことが明らかになった。また、波力特性については、以前に行った小型実験の結果とほぼ同じで、縮尺の影響はほとんどないことがわかった。さらに、直立部に衝撃的な波力が作用する場合でも、部材に生じるひずみはそれほど大きくなりませんことも明らかになった。

これまでの研究より、高基混成堤がその特性を十分に発揮するためには、以下の条件を満足する必要がある。

- 1) マウンド天端高が L.W.L.以上である。
- 2) 設計潮位におけるマウンド上水深とその位置における水深の比 d/h が 0.25 以下である。
- 3) マウンド前肩幅と波長の比 B_m/L が直立型の場合で 0.15 以上、消波型の場合で 0.05 以上であること。
- 4) 設計波高 H_D がマウンド上水深 d の 2 倍以上である。
- 5) 消波型の場合、直立部が透過壁と遊水室を有し、透過壁の開孔率は 20~35%、また、遊水室幅が波長 L の 10% 以上である。

1) は高基混成堤の基本的特徴である。2), 3) および 4) は波力低減効果のために必要な条件である。5) は消波機能のために必要な条件であるが、反射波の低減というよりも、むしろ波力や越波の低減に必要な条件である。

今後は、直立部全体の滑動安定性の検討および部材設計に用いることができる一般的な波力算定法の確立を目指して、さらに研究を進めていく予定である。

本研究の遂行に当たっては、運輸省第五港湾建設局のご協力を得ており、特に片平和夫設計室長には、実験の実施に当たって適切なご助言をいただいている。ここに記して感謝の意をする次第である。

参考文献

- 下迫健一郎・高橋重雄・斉藤祐一・三浦裕信・H. Oumeraci (1996): 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.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・三浦裕信・斉藤祐一 (1995): 低天端型防波護岸の越波に関する一実験, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 193-198.
- 高橋重雄・下迫健一郎 (1996): 防波堤の耐波設計, 港湾専門技術者研修 (水工コース) テキスト, 85 p.
- 高橋重雄・下迫健一郎・斉藤祐一・三浦裕信・姜 閔求 (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.