

構造物の消波性能も波の入・反射パワーから求めた反射率で評価できる。すでにこれを使って護岸背後の間隙水圧の分布などについて研究（高橋ら，1996；2002）を実施しており，実験との整合性は確かめられている。

計算では，基本型の中心ケースとして，水深 $h=18\text{ m}$ ，長周期波の周期 $T=60\text{ s}$ ，波長 $L=798\text{ m}$ ，波高 $H=0.1\text{ m}$ ，護岸直立部（ケーソン）の幅 $B_c=20\text{ m}$ ，捨石マウンドの幅 $B=33\text{ m}$ ，捨石マウンドの厚さ $D=3\sim 9\text{ m}$ ，ケーソン背後の共振領域の幅 $b=0\sim 1L$ の条件を用いている。浅水型では浅水部の水深 $d=0.5\sim 3\text{ m}$ ，ケーソン背後と浅水部の間（導水部）の距離 $b_s=1\sim 3\text{ m}$ としており，傾斜堤型では，マウンドの平均幅 $B=37, 67\text{ m}$ としている。なお，メッシュの基本的な大きさは，水深方向 2 m で水平方向 $L/32$ である。波のパワーは入射境界で計っている。

(2) 透水係数と捨石の粒径

数値計算においてマウンドの捨石の効果は，透水係数によって表される。透水係数は主として粒径によるが，マウンド内の流速によっても見かけ上その値が変る。特に，流速が小さい場合には，通常よりも透水係数は大きくなる。そうした関係は，Dupuit-Forchheimer 則（Engering・Spierenburg，1992）で示されている。この論文では，粒径 $D_M(d_{15})$ で表すこととしており，数値計算を繰り返すことによって，代表流速 u （マウンド内の最大流速の平均値）に対して収束する透水係数を求めている。

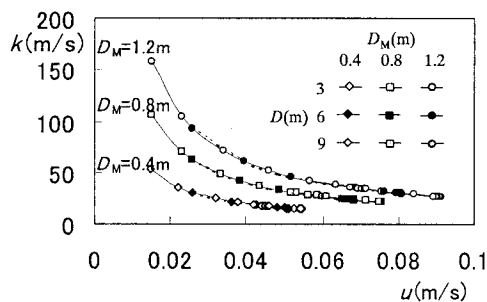


図-2 流速と透水係数の関係

図-2には，得られた粒径と透水係数 k の関係の例を示している。図中の D_M は捨石の大きさであり， $D_M=0.4, 0.8, 1.2\text{ m}$ の3種類について，それぞれの D および b の条件で収束した k の値である。例えば， $D_M=0.8\text{ m}$ ， $D=6\text{ m}$ ， $b/L=0.125$ で $u=0.07\text{ m/s}$ ， $k=23\text{ m/s}$ であり， D_M が大きいほど，また D が大きいほど流速は小さく，その結果 k は大きくなっている。なお $D_M=0.4\text{ m}$ は質量 87 kg の球状の石， 0.8 m は 696 kg ， 1.2 m は 2350 kg の石に相当する。 0.8 m や 1.2 m の捨石は被覆石に相当し，通常のマウンド石としては大きすぎる。後の結果で示すように，長周期波の消波では k が大きいところで消波効果が高いため，比較のためにこ

うした捨石の径についての結果も示している。

4. 基本型の消波性能

(1) 基本型の反射率

図-3(a)は，基本型の計算結果の例を示すものであり，横軸に遊水室幅 b と波長 L の比をとり，縦軸に反射率 K_R をとるものである。この例では，長周期波の周期 $T=60\text{ s}$ ，波高 $H=0.1\text{ m}$ ，水深 $h=18\text{ m}$ で，マウンドの幅 $B=33\text{ m}$ ，高さ $D=3, 9\text{ m}$ ， $D_M=0.4, 1.2\text{ m}$ の場合である。この図では b/L が 0 から 0.15 あたりで最も小さくなり， b/L が 0.5 付近で K_R が 1.0 に戻っている。

図-3(b)は， b/L が 0.12 付近までを詳しく見たものである。例えばマウンド厚 $D=6\text{ m}$ で $D_M=0.8\text{ m}$ の場合では，共振領域の幅 $b=60\text{ m}$ ($b/L=0.07$) で反射率を 0.5 以下にすることができる。マウンドの透水性が高いほど反射率は小さくなっており，マウンド厚や捨石の径を大きくしてマウンドの透水性を高めれば，反射率 K_R を 0.2 以下にする事も可能である。なお，反射率が小さいほど，最も反射率が小さくなる b/L が $1/8$ に近くなっている。

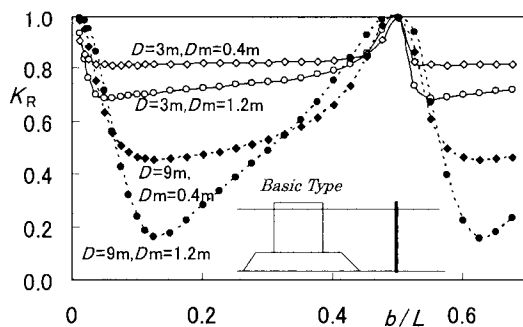


図-3(a) 基本型の消波性能(反射率)

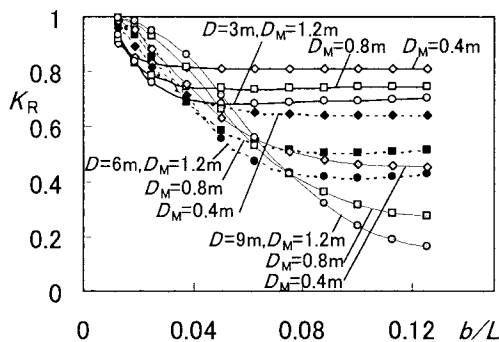


図-3(b) 基本型の消波性能 ($b/L < 0.13$)

(2) ケーソン前後面での水位とその位相差

図-4(a)は，ケーソン付近の水面と流速のベクトルの計算結果の例を示すものであり， $b/L=0.125$ ， $D=9\text{ m}$ ， $D_M=1.2\text{ m}$ で反射率が最も小さい場合である。ちょうど前面の水位がピークとなり，ほぼ 90° 遅れた位相でケ

ケーソン背後に長周期波が侵入していることがわかる。背後での水位の振幅は前面とほとんど変わらず、マウンド内の流速も 0.071 m/s と大きく、ここで大きくエネルギーの消費が行われている。

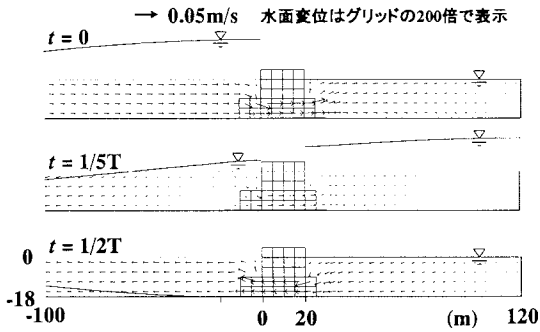


図-4(a) 長周期波の共振領域への侵入と消波

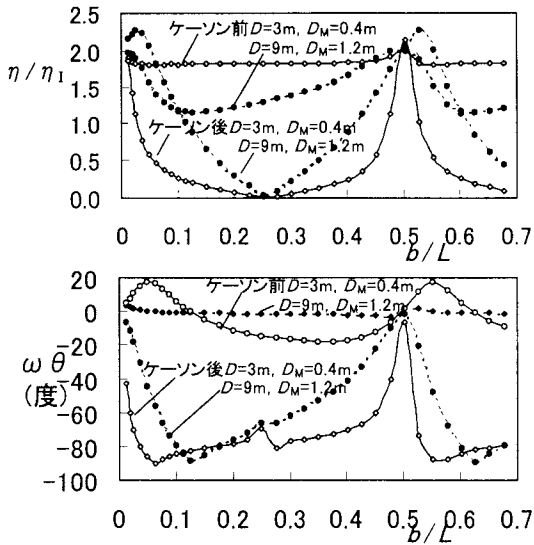


図-4(b) 前面波高と前後水面水位の位相差

図-4(b)は、ケーソン前後面での水位とその位相差を示すもので、反射率が全体に高い $D=3 \text{ m}$, $D_M=0.4 \text{ m}$ の場合と反射率が全体に低い $D=9 \text{ m}$, $D_M=1.2 \text{ m}$ の場合である。この図と前掲図-3(a)から、いくつかの特徴的なことが指摘できる。

- ①ケーソン前面の波高は反射率にほぼ対応しており、 $1 + K_R$ でほぼ表される。したがって、 $D=3 \text{ m}$, $D_M=0.4 \text{ m}$ の場合には全体的に高く、 $D=9 \text{ m}$, $D_M=1.2 \text{ m}$ の場合は全体に低い。反射率が最も低くなる b/L で最も小さくなり、 b/L が 0 と 0.5 では完全反射の 2.0 となる。
- ②ケーソン後面の波高は反射率が低いほど高くなる傾向にあるが、 b/L が 0.25 で 0 となり、 0.5 で 2 となる。ただし、 $D=9 \text{ m}$, $D_M=1.2 \text{ m}$ の場合は b/L が 0 と 0.5 をやや越えるところで、 2 を上回っている。

- ③ケーソン前面の水位の位相は、ほぼ 0° で一定であるが、 $D=3 \text{ m}$, $D_M=0.4 \text{ m}$ の場合にやや変化する。
- ④ケーソン後面の水位の位相は、反射率が最も低い b/L のところでほぼ 90° 遅れていることが大きな特徴である。また、 b/L が 0.5 では 0° となり、前後面で同位相でしかも同じ振幅で振動することがわかる（共振領域内で完全重複波となっている）。この場合には、マウンドを通過する流速は無く、エネルギー損失は無いため、反射率は 1.0 となることが分かる。

(3) 高い透水性への改良(ケーソン開口型)

図-3(a)(b)の計算結果から、マウンドの透水性を高めることが、消波効果を高めるのに有効であることが分かる。ここでは、ケーソンに開口部を設けることによって、見かけ上の透水係数を大きくすることを考えている。

図-5は、 $D=3 \text{ m}$ で $D_M=0.4$ とマウンドの透過率が最も低い場合を対象とし、そのケーソン底面と中央部に2つの開口部を設けており、その合計の開口率 ε (ケーソン開口部の高さ/水中部の高さ)を 6.7 , 20 , 40% に変えている。ただし、計算上この開口部のメッシュには、見掛け上の抵抗を考えるために透水係数 $k=100 \text{ m/s}$ を与えている。いずれの空隙率でも反射率は小さくなり、 $\varepsilon=40\%$ の場合は $b/L=0.1$ 付近ではほぼ反射率が 0.1 となる。

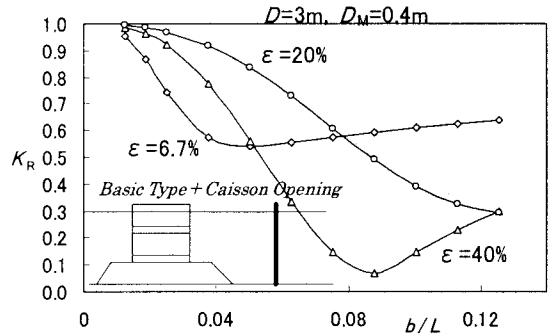


図-5 ケーソン開口型の消波性能(反射率)

5. 浅水型の消波性能

図-6は浅水型について消波性能の計算例を示すものである。浅水部とケーソン間の距離 $b_s=3 \text{ m}$ のケースであり、(a)が $D=3 \text{ m}$ で(b)が $D=6 \text{ m}$ の場合であり、浅水部の水深 $d=0.5, 1, 3 \text{ m}$ で粒径 $D_M=0.4, 0.8, 1.2 \text{ m}$ の場合である。

図-3と比べると、明らかに浅水域で波長が短くなった効果が認められる。この計算で反射率が最も低い b/L の値は、 0.04 付近となり、図-3の場合の $1/2$ 以下となっている。浅水域の水深 d によっても当然変化しており、 d が小さいほど、反射率が最も小さくなる b/L は小さくなる。また D_M や D に対する反射率の傾向はほぼ同じであり、横軸方向に図が縮められたようになっている。な

お、 $D=6$ m で $D_M=0.8$ m であれば、 b/L が 0.05 (40 m) 程度でも反射率は 0.5 程度にする事ができ、短い共振領域の幅で実効的な消波が得られることが分かる。

図には示していないが、ケーソン背後から浅水域までの距離 b_s によっても反射率は変化し b_s が 3 m より小さくなると反射率がやや高くなる。また、この部分を $D_M=1.2$ m 程度の大きな捨石で埋めて、浅水域と同じ水深にする事が現実的であり、そうした場合の計算も行ったが、透水性がやや低くなるために、やや反射率が高くなっている。こうする場合にも、ケーソンの側の透水性を大きくしておくこと消波効果は高くなる。

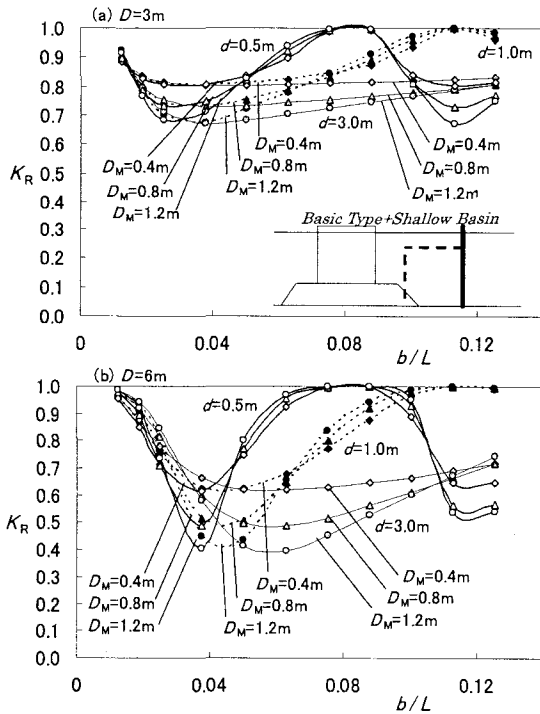


図-6 浅水型の消波性能 (反射率)

6. 傾斜堤型の消波性能

(1) 傾斜堤の形状と反射率

ケーソン式護岸のマウンド部をさらに高くすると、捨石堤 (傾斜堤) の断面とほぼ等しくなる。図-7 は、傾斜堤型の場合の共振効果の概念図であり、マウンド透過波と共振領域における共振効果を期待するものであるが、マウンド部が大きいため透水性が大きくなることが期待される。傾斜堤型においても、堤体の捨石の大きさによって長周期波の消波効果は大きく異なるが、 $D_M=0.4, 0.8, 1.2$ m の 3 種類について検討している。堤体が、消波ブロックだけでできている捨ブロック型であれば、 D_M はさらに大きくなると考えられるがここでは計算していない。

図-8 は、傾斜堤型の反射率を示すものであり、上部

工の幅 B_c が 10 m と 40 m で、マウンドの平均幅 B が 37 m と 67 m の場合を示している (マウンドの勾配は沖側が 1 : 2 で岸側が 1 : 1 を仮定)。図-3 のケーソン護岸の場合より透水性が高いため、反射率は全体的にかなり低い。 $B=40$ m の場合の方が、反射率はやや低く、 $b/L=0.15$ 付近で 0.2 以下となる。

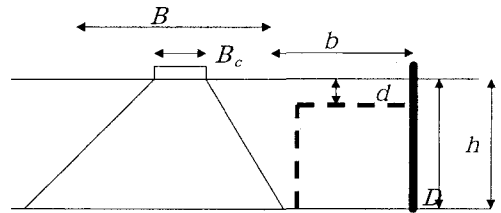


図-7 傾斜堤型の概念図

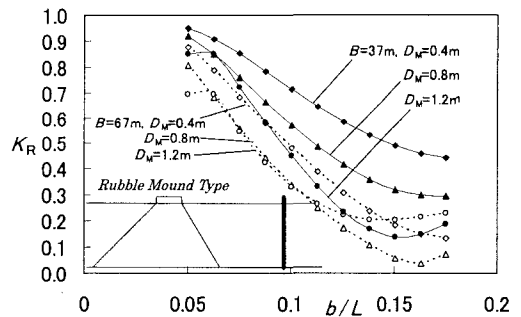


図-8 傾斜型の消波性能 (反射率)

(2) 浅水型で傾斜堤型の反射率

傾斜堤型でも浅水型が考えられる。図-9 に示している $B=37$ m で $D=6$ m の傾斜堤で浅水型の計算結果では、必要な b の長さを 1/2 程度にする事ができる。ただし、マウンドの斜面の影響により、実質的な b_s が大きく、図-6 の場合より反射率が最も低くなる b/L はやや大きい。

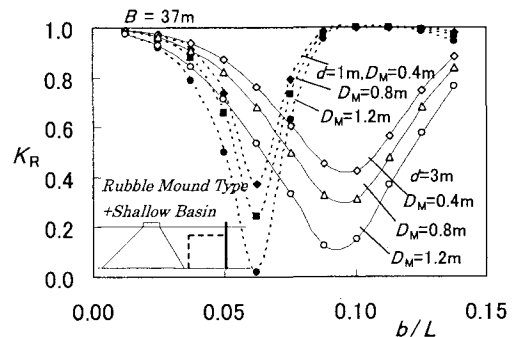


図-9 傾斜堤型で浅水型の消波性能

7. 捨石充填型の消波性能

さらに、図-10 は、傾斜堤の場合の堤体背後の共振領域を捨石で埋めた場合である。ただし、堤体の前面は直立とし、充填する捨石と堤体とは同じ捨石を使うため、

全体が幅 b の長い長方形断面の捨石層となる。

この場合でも、 b/L が 0.15 付近で反射率が低くなっており、図-8 あるいは図-3 とほぼ類似した結果となっている。ただし、 $D_M=0.4$ で粒径が小さいとき反射率は高く、 b/L が大きくなっても反射率は低減しない。 $D_M=1.2$ m と大きい場合は、 b/L が 0.15 付近で反射率が 0.2 以下となり、 b/L が大きくなると反射率が大きくなって、 $b/L=0.35$ 付近でピークとなり、さらに b/L が大きくなると再び反射率が小さくなり、 $b/L=0.5$ で再び小さな反射率となっており、 b/L による変化が顕著である。粒径をさらに大きくした場合 ($D_M=2.4$ m) とした場合には、こうした変化がより顕著となり、 $b/L=0.15$ のときより $b/L=0.5$ のときの反射率がより小さくなり、0 に近づくことが特徴である。

このように、共振領域を捨石で充填しても、共振現象が認められることがよくわかる。ただし、この領域を捨石で埋めなくても同様な消波効果があることにも留意する必要がある。また、この共振現象の内容は捨石が充填されていない場合とやや異なっていることに留意してはならない。さらに、捨石の粒径が 0.4 m より大きいと、堤体前面の反射が大きくなり、消波効果はかなり小さくなることにも留意が必要である。

ここでは図示していないが、マウンド前後面 (上部工の前後面) の水位と岸側不透過壁前面水位について検討すると、以下のようなことが分かる。

- ① 捨石内の波長は、見かけ上波長が短くなっている。共振領域が水だけの場合は、 $b/L=0.5$ で完全重複波状態であったが、捨石充填の場合は b/L が 0.35 付近となっており、粒径が小さいほど波長は短くなる。
- ② $b/L=0.15$ 付近で反射率が最も低くなっているが、このときは、岸側の不透過壁で腹となっており、捨石層の沖側で節となるような $b/L=0.25$ の場合に近い。このとき、充填された捨石内での流速が大きくなるため、エネルギー損失が大きく反射率が小さくなる。

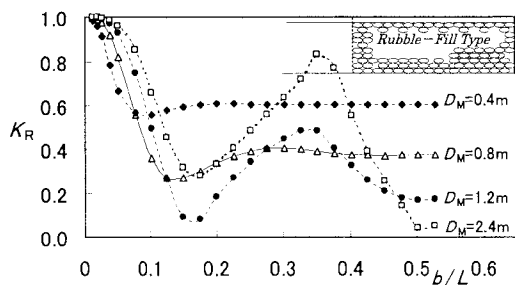


図-10 捨石を充填した場合の消波性能

8. おわりに

護岸の背後に共振領域を設けた長周期波の消波システ

ムについて、その原理を提案し、その特性を数値計算で確認した。主要な結論は以下のとおりである。

- ① 基本型では、護岸の直立部の背後の共振領域を長周期波の波長の10から15%程度の長さにすると共振効果によってこの領域に長周期波のエネルギーが取り込まれやすくなり、護岸のマウンドを透過する際のエネルギー損失によって消波できる。
- ② 基本型では、護岸のマウンドの透過性が高いほど消波効果は高く、反射率を0.2以下にすることも可能である。護岸の透過性を高めるために、直立部に開口部を設けることも有効である。
- ③ 共振領域を浅くした浅水型では、最も消波できる共振領域の長さを1/2以下に小さくできる。
- ④ 基本型のマウンド部を大きくすると、傾斜型の断面となり、基本型より透過性を高めることができ、反射率を全体的に小さくできる。傾斜型でも、浅水型にすることができ、共振領域の長さを小さくできる。
- ⑤ 傾斜堤型の背後の共振領域を捨石で充填することもできる。その場合の共振メカニズムは捨石を充填しない場合と多少異なるものであるが、同様な消波効果が認められる。

本論文は基本特性をとりまとめたものであり、その具体的な適用法については、さらに検討する予定である。

参考文献

- 池野勝成・熊谷隆宏・森屋陽一・大島香織・関本恒浩 (2004) : 長周期波を対象とした直立消波ケーソン消波構造物の開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 731-735.
- 沿岸開発技術研究センター (2004) : 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸技術ライブラリー, No. 21, 120p.
- 倉田克彦・巻幡敏秋・桑原正博・川野成仁 (1980) : 混成堤捨石マウンドからの透過現象に関する考察, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 401-405.
- 関本恒浩・森屋陽一・水口優 (2000) : 自由長周期波の発生とその定量的評価に関する理論的考察, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 236-240.
- 高橋重雄・鈴木高二郎・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功企・山崎浩之 (1996) : 護岸の吸出しに関する水理模型実験, 港研報告, 第35巻2号, pp. 3-58.
- 高橋重雄・鈴木高二郎・朴 佑善 (2002) : 護岸の裏込部への波圧伝達に関する数値計算, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 233-238.
- 平石哲也 (2004) : 長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算, 港空研資料, No. 1093, 21p.
- Engering, F. P. H. and Spijkenburg (1992) : Computer model for water motion on and inside a rubble mound breakwater, Delft Geotechniques, 84p.
- Mei, C.C., and C. Benmoussa (1984) : Long waves induced by short-wave groups over an uneven bottom, J. Fluid Mech., Vol. 139, pp. 219-235.
- Park, W. S., and S. Takahashi (1994) : FEM simulation of wave-soil-structure interaction problem, Proc. 3rd Asian Pacific Conf. Comput. Mech., pp. 845-850.