# 1　概説

近年，波浪制御構造物として潜堤の施工例が増えている．潜堤は，景観や水質交換性の面で利点があるが，小型船舶等の航行に支障をきたす場合がある．このため，ブイ等により潜堤の設置位置が明示されることが多いが，最近，より自然に近い景観を創造するため，ブイの代わりに擬岩を設置する工法が採用され始めている．

擬岩の耐波設計のためには波力の算定が不可欠であるが，擬岩は形状が複雑であるばかりでなく，潜堤上に設置される場合，砕波や砕波後の波が作用するため，衝撃的な波力の作用も考慮する必要がある．円柱に作用する衝撃砕波力の研究は，Ross（1955，1959）やHall（1958）による実験が行われており，また，合田ら（1966）はKarmanの付加質量理論（1929）を応用した衝撃波力の算定手法を提案している．この手法は，砕波形式を考慮することができ，また衝撃力の時間変化が算定されるため構造物の動的挙動の予測も可能であり，実用的である．同様な研究が堀川ら（1973），光易ら（1973）によっても行われている．また，椹木ら（1982，1983）は波面の傾斜を考慮した衝撃砕波力の算定法について検討している．しかし，これら研究はすべて直円柱を対象としたものであり，本研究で対象とするような構造物に働く衝撃砕波力に関する研究は行われておらず，その実態は未解明である．さらに，潜堤上では天端水深に比べて水位変動が大きいため，常時水圧の作用を受ける部分より一時的に水圧の作用を受ける部分が大きく，その波力特性は極めて複雑であることが予想される．

本研究では，潜堤上の擬岩模型に作用する波力の特性を水理実験により考究するとともに，その算定手法について検討を加えるものである．

# 2　水理実験

2次元鋼製水槽（長さ25 m，幅0.7 m，高さ0.9 m）内に1/30の不透過一様斜面を設置し，その上に石により構築した潜堤を設置した．潜堤は法先水深htによる波力の影響を調べるため，htを10，20 cmの2種類変化させた．なお，天端水深（d = 4 cm）は一定とした．

実験で使用する擬岩模型として，施工例を参考に擬岩の形状を理想化し，図-2.1に示す円錐台および四角錐台（上底4 cm，下底D = 12 cm，高さ10 cm）を採用した．

構造物模型を，水槽上端に固定した支持台に取り付けた三分力計を介してつり下げ，波力の計測を行った．この際，潜堤天端と構造物底面には2 mm程度の隙間が設けられている．この構造物模型の設置位置を，沖側法肩の距離（x）を7種類（x = 7～92 cm）変化させた．



　 (a)　円錐台　　(b)　四角錐台

図-2.1　擬岩模型の概要

入射波は規則波とし，その周期Tを3種類（1.0，1.4，2.0 s），入射波高HIを3種類（8，14，20 cm）変化させた．なお，入射波高は沖波換算波高の値を採用し，入射波の波長を水深40 cmで評価した値を使用した．

各々の条件に対し，構造物に作用する水平（x）・鉛直（z）の両方向の波力（Fx，Fz），構造物中心位置での水位変動とそこでの天端上1 cmにおけるx，z方向流速（u，w），および水深40 cmでの水位変動を同時に計測した．なお，水位変動を電気容量式水位計で，流速を電磁流速計で計測した．これらの出力は，ペン書きレコーダーに記録すると同時に，サンプリングタイム0.02 s，データ数2600でAD変換し，そのデータもフロッピーディスクに収録した．なお，実験及び計測はすべて静水状態から開始した．

# 3　最大波力

## 3.1　最大流速の特性



図-3.1　水平方向の無次元最大流速の変動特性の例

図-3.1に水平方向の無次元最大流速とx/Lの関係を例示する．全体的には，はht/Lにあまり関係が無く，x/Lが0.0から0.15の範囲で最大値をとり，その後減少する．また，HI/htが大きい方が大きくなるが，これは，一般に波高に比例する流速を波高の1/2乗で無次元化したことによる．

図示したd/ht = 0.2の場合，x/L < 0.3で最大流速の値が全般的に大きいが，これは，マウンド法面の水深の減少により浅水変形が起こり，波高が増大したために流速が大きくなったことによる．最大値が生じた後は急激に減少するが，これは砕波することにより乱れや渦が発生し，エネルギーの逸散が起こったことによる．その後，はx/L > 0.5でほぼ一定となる．図示していないが，d/ht = 0.4の場合，全ての砕波後の波が入射するため，最大値の変化は比較的小さく，特にHI/ht = 2.0の場合，ほとんど一定値であった．また，鉛直方向流速については，x/Lによる変動はあまりなく，また，d/htによる差もほとんどない．

## 3.2　最大波力の特性

図-3.2に水平方向の無次元最大波力Fxm/gHID2とx/Lの関係を示す．x/Lの増加にともない無次元最大波力Fxm/gHID2は，法肩付近で大きくなる．一般に，波は法面上で浅水変形のため波高が増大し，流速が最大値に達して砕波するが，無次元最大波力が最大となるのは流速が最大となる点，すなわち，砕波が始まる点とは若干異なり，無次元最大流速が最大となる点より若干岸側になる．換言すれば，無次元最大波力は波が構造物のやや前方で砕けるようなときに最大となる．これは，本実験ではマウンドにより波を強制砕波させるため，構造物の前方で砕けるx/L = 0.1付近では砕け始めた巻き波が構造物に作用し，大きな衝撃波力が作用することによる．これらのx/Lにともなう変動特性は，図-3.1に示した流速の変動特性と非常によく似ており，波力が流速場に強く支配されていることがわかる．

鉛直上向きの最大波力については，水平方向とは異なり構造物の形状による明瞭な違いは認められず，また，水平方向の場合と同様，ht/Lにはほとんど関係なくx/Lによって支配されるが，このx/Lの違いによる変動の幅は水平方向の場合より小さく，天端上どの位置でもほぼ一定の値となった．これは，鉛直方向の水粒子の運動が，x/Lにともないあまり変化しないためである．

ところで，図-3.2より，構造物の形状の差による無次元最大波力の差として，入射波に対して曲面を持つ円すい台は，平面全体で波を受ける四角すい台に比べてht/L，x/Lによらず常に波力は30%ほど小さくなる．これは，波圧は構造物の面に対して垂直に作用するが，四角錐前面に作用する波圧のほとんどがFxに寄与するが，円柱の場合，表面が曲率をもつため，その成分の一部がFyに寄与し，Fxへの寄与分が減少することによる．



(a)　円錐台（d/ht = 0.2）



(b)　四角錐台（d/ht = 0.2）



(c)　円錐台（d/ht = 0.4）

図-3.2　水平方向の無次元最大波力の変動特性

また，法先水深の小さい場合は，砕波が潜堤に入射する前に起こるため，砕波後の波が入射する．このため，無次元最大流速は，ht/L，x/Lに伴う変化は小さく，天端上の位置による大きな変動は見られない．なお，比較のために非砕波の実験も別途行ったが（図中－印），非砕波の条件に対する値は，x/Lが増加するにしたがって最初は少し増大し，その後減少するが，その変化の割合は砕波の場合に比べて小さいことが判明した．さらに，無次元最大波力Fxm/gHID2は，波高が大きい方が小さく，砕波の場合より非砕波の場合の方が値は大きくなる．

# 4　波力の予測手法

## 4.1　モリソン式

本研究の対象構造物は，波長に比べて十分小さく，Morison式が適用されうる構造物である．Morison式は以下の式で表現できる．

 (4.1)

 (4.2)

ここに，CDXとCDZはそれぞれx，z方向の抗力係数，CMXとCMZはx，z方向の慣性力係数であり，Aは構造物の水中部分の流れ方向の投影面積，Vは没水体積である．

しかし，既述したように，潜堤上に構造物を設置すると，水深が波高に比べて非常に浅いため，水中部分の投影面積や体積を時間の関数として評価する必要がある．一方，構造物が小さいにもかかわらず，構造物の前後での水位差は位相によっては無視できない．しかし，このような水位差を評価するのは困難である．そこで本研究では，波力と同時に計測した構造物中心位置での水位変動を平均的な水位として，その水位より下にある部分を構造物の水中部分としてMorison式中の投影面積Aと没水体積Vを水位変動の関数として評価した．

式(4.1)と式(4.2)に構造物の中心位置で計測した水位変動，実測波力，流速，加速度の実験データを代入し，最小二乗法で求めた波力係数を使ってMorison式により計算した波力の時間波形を図-4.1に示す（図中の破線）．これによると，計算波力は実測波力（図中○）とは大きく異なっていることがわかる．特に最大波力が発生した後の落ち込みが実験値から大きく異なっている．明示していないが，このときの計算波力の抗力係数はCDX = -9.261と大きな負の値になっていることが判明した．



図-4.1　波力の計算値の比較例



図-4.3　最大波力の比較例（円錐台）



図-4.2　水位変動，流速，加速度，波力の実験値と

　　　 計算波力の例

図-4.2に水位変動，流速，加速度と波力の時間波形を例示する．一般に，本研究で対象とするような構造物の作用波力は，波峰が構造物前面に衝突したときに最大となるが，この瞬間では，流速測定位置が構造物の中心位置，すなわち構造物前面より6 cm程後ろであるため，流速，加速度ともまだ最大になっていない．すなわち，中心位置における流速，加速度ともに波力の時間波形よりも位相が遅れることになる．このため，最小自乗法によるMorison式のフィッティングを行うと，流速の負の最大値の位相で波力が最大となるよう，抗力係数が負値として評価されることになる．その結果が図-4.1の破線である．したがって，構造物中心位置で計測した流速，およびそれから求めた加速度ではこのような波力を正確に予測できないことになる．このような波力の発生機構から判断すれば，Morison式でより精度高い波力の予測を行うには，構造物前面での流速・加速度を使用した方が妥当であると考えられる．本研究では，構造物前面での流速と加速度の計測を行っていないため，構造物中心位置で計測した流速の時間波形の位相を進めることにより，擬似的に構造物前面での流速と加速度としてMorison式に代入することとした．なお，位相のずれは長波の波速を使用して計算した．

この流速の時間変化を使って計算した結果が図中の実線で示した計算波力である．これにより，計算波力と実測波力はほぼ一致し，全般的に相関係数は0.8以上と高いことが確認できた．また，工学的に特に重要となる最大波力についても図-4.3に例示したように，ほとんどが10%の誤差の範囲内に収まっている．このことから，本実験値は，衝撃的な砕波力をも含んでいるが，それに関する新たな項を加えることなく，Morison式で波力の算定が可能であるといえる．しかし，鉛直方向波力については，浮力の時間変化や揚力の影響等によりMorison式の適用性はよくなかった．この点については，今後，浮力などの項を考慮しながら算定手法を検討する必要がある．

## 4.2　波力係数の特性

Morison式を使用する場合，同式中の抗力係数と慣性力係数の特性を明らかにしておくことが工学上極めて重要である．そこで，以下に波力係数の特性について考察する．なお，水平方向波力のみを対象とする．



(a)　円錐台



(b)　四角錐台

図-4.5　慣性力係数とK.C.数の関係

まず，抗力係数についてその特性を述べる．図-4.4に水平方向の抗力係数CDXとK.C.数の関係を示す．一般には，抗力係数はht/L，HI/htによらず，K.C.数によって支配されると見なせる．K.C.数が約4～5以下では，ばらつきは大きいもののK.C.数の減少にともない，抗力係数は増加する傾向がある．これは，従来より直立円柱の抗力係数に対して認められている傾向に一致する．K.C.数がそれ以上では，ほぼ一定値に収束していく傾向がある．実験値にばらつきがあり，しかもデータ数が限られているので，収束値の正確な値を判断するのは困難であるが，円錐台の場合は2.5前後，四角錐台の場合は，円錐台より若干大きく，3.0前後であるといえる．なお，K.C.数が4～5以下で抗力係数の範囲が非常に広くなるが，これはこの範囲では抗力は慣性力に比べて非常に小さく，抗力係数のばらつきは計算波力に大きく影響を及ぼすことはない．

次に慣性力係数の特性について考察する．図-4.5に水平方向の慣性力係数CMXとK.C.数の関係を示す．抗力係数と同様にht/L，HI/htによる明瞭な違いはほとんどなく，また，抗力係数と異なり，K.C.数による変動もほとんどなく，ほぼ一定値の周りに分布している．d/htが0.2の場合，円錐台，四角錐台ともに2.0前後の値であるが，四四角錐台の慣性力係数の方が全体的に10%ほど大きいようである．完全流体のポテンシャル流れの慣性力係数は円柱で2.0，四角柱は2.19とされており，本研究の構造物は一様断面でないものの両者の差は，妥当なものと考えられる．

図-4.6は，計算波力を抗力と慣性力に分離したときのそれぞれの最大値FdmとFimの比のK.C.数に伴う変化特性を示したものである．d/ht = 0.2の場合は，既述したようにほとんど慣性力が支配的な波力成分となっていることがわかる．この場合，波力の最大値は一般的には波峰が前面にぶつかるときであるが，このときの力は水塊の持っていた運動量が力積として作用したものと考えることができる．すなわち，運動量の時間変化が主な波力成分であり，したがって慣性力が主な波力成分となると考えられる．



図-4.6　抗力と慣性力の比較例

図示していないが，d/ht = 0.4の場合，K.C.数が小さいにもかかわらず抗力が慣性力よりも卓越すする場合の多いことが確認された．既述したように，この場合，全て砕波後の波が入射しており，d/ht = 0.2の場合のように衝撃的な波力の作用はほとんどない．これに対して，d/ht = 0.2の場合と同様，長波の波速により流速，加速度の位相を補正したことが原因であると考えられる．流速，加速度の位相は，抗力係数や慣性力係数に重大な影響を持つため，流速，加速度の評価位置については，今後更に検討を要する．

# 5　結論

本研究では，潜堤上に設置された擬岩模型に作用する波力を取り上げ，その特性と予測手法について水理模型実験の結果に基づいて考察してきた．以下，本研究で得られた主要な結論を要約する．

1)　水平方向の無次元最大流速は，ht/Lには関係なくx/Lによって変動する．砕波が発生すると流速は急激に減少し，x/L > 0.5でほぼ一定となる．流速の減少に及ぼす砕波の影響は大きい．

2)　鉛直方向の無次元最大流速は水平方向と同じくx/Lにより変動するが，その値は小さく，また，変動も小さい．

3)　水平方向の無次元最大波力は浅水変形によって波高が増大する法肩付近で大きくなり，波が構造物のやや前方で砕波するようなとき最大となる．また，波高が大きい方が無次元最大波力は小さく，砕波より非砕波の方が値は大きくなる．また，四角錘台は円錐台に比べて作用波力は30%程大きくなる．

4)　構造物に作用する水平方向の波力はMorison式で予測可能である．ただし，構造物による波の変形が無視できるような小口径構造物であっても，構造物中心位置ではなく構造物前面で流速を評価する必要がある．

5)　抗力係数はK.C.数が約5以上で一定値に収束する傾向があるが，それ以下では広範囲に分布する．一方，慣性力係数はほぼ2.0を中心に分布する．

# 参考文献

合田良実・原中祐人・北畑正記（1966）：直柱に働く衝撃砕波力の研究，港湾技術研究所報告，第5巻，第6号，pp.1-30．

椹木亨・後野正雄（1982）：円柱に作用する砕波局部波力に関する実験的研究，第回海岸工学講演会論文集，pp.438-442．

椹木亨・後野正雄・岩橋哲哉（1983）：浅海域における円柱構造物の砕波局部衝撃波力特性と全体波力について，第30回海岸工学講演会論文集，pp.376-380．

堀川清司・渡辺　晃・勝井秀博（1973）：円柱に作用する砕波力に関する研究，第20回海岸工学講演会論文集，pp.37-42．

光易恒・本多忠夫（1973）：円柱に作用する砕波の波力，第20回海岸工学講演会論文集，pp.43-47．

Hall, M.A. (1958) : Laboratory study of breaking wave forces on piles, TM-106, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C.

Ross, C.W. (1955) : Laboratory study of shock pressures of breaking waves, TM-59, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C.

Ross, C.W. (1959) : Large-scale tests of wave forces on piling, TM-111, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C.

Von Karman, Th. (1929) : The impact on seaplane floats during landing, NACA,TN 321.