

潜堤上の構造物に作用する波力の特性と Morison 式の適用性に関する研究

WAVE FORCES ON A STRUCTURE INSTALLED ON A SUBMERGED BREAKWATER AND APPLICABILITY OF MORISON EQUATION

水谷法美¹・許東秀²・米勢嘉智³・倉田克彦⁴・遠藤正男⁵・岩田好一朗⁶

Norimi MIZUTANI, Don-Su HUR, Yoshitomo YONESE, Katsuhiko KURATA, Masao ENDOH and Koichiro IWATA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³正会員 工修 玉野総合コンサルタント(株) 設計第1部 (〒464-0076 名古屋市千種区豊年町9-20)

⁴正会員 工博 東洋建設(株) 総合技術研究所鳴尾研究所所長 (〒663-8142 西宮市鳴尾浜1-25)

⁵正会員 東洋水研(株) 技術部長 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町2-4-63)

⁶フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Wave forces on a structure installed on a submerged breakwater have been measured to investigate their characteristics. It has been observed that the impulsive wave force due to wave breaking acts on the structure located the vicinity of the leading crown of the breakwater. The magnitude of the impulsive wave force has been revealed to be much larger than those of the non-breaking waves. The time variation of the impulsive wave force is well evaluated with the Morison equation by adopting the velocity and acceleration at the front face of the structure. Moreover, it has been revealed that the drag coefficients decrease for higher values of KC approaching the constant value. On the other hand, the inertia coefficients are almost constant for all the tested values of KC.

Key Words : Artificial rock, submerged breakwater, impulsive wave force, Morison equation

1. 緒言

近年, 沿岸域の景観や環境保全などの観点から波浪制御構造物としての潜堤が高く位置づけられ, その施工例も増えている。潜堤は, 天端が静水面下に没していることによる景観面や海水交換性面の長所を有する反面, 船舶航行の面からは目に見えない障害となり得る。そのため必要に応じてブイの設置等によりその位置が明示されるが, 近年, ブイに代わって表面の形状を岩のように加工した人工岩(擬岩)を設置する工法が提案され, 実際の施工例も増えつつある。

この擬岩のような構造物の設計にあたっては, 構造物に作用する波力の正確な予測が必要となるが, 擬岩は形状が複雑であるばかりでなく, 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。衝撃砕波力は円柱構造物を中心に検討され

ているが¹⁾⁹⁾, このような形状の異なる構造物に作用する衝撃砕波力は検討されておらず, その実態は解明されていない。さらに潜堤上では, 設置位置の水深に比べて水位変動が大きく, その影響も充分考慮する必要がある。著者らは水理実験結果に基づき, このような波力の特性について検討を加えると同時に, Morison 式の適用性について報告しているが⁷⁾, 砕波の状況と関連づけた検討を十分行っていないなど, その成果は十分であるとはいえない。

本研究では, 水理実験を行って透過潜堤上に設置された擬岩に作用する波力を砕波の状況を変化させながら計測し, その特性を考究する。そして, このような構造物の算定手法について検討を加える。

2. 水理実験

実験を、名古屋大学土木工学科の片面ガラス張り2次元鋼製水槽(長さ25m, 幅0.7m, 高さ0.9m)を使用して行った。図-1に実験装置の概要を示す。水槽の一端にはフラップ型造波装置が設置されており、他端には反射波を小さくするために消波装置が設置されて

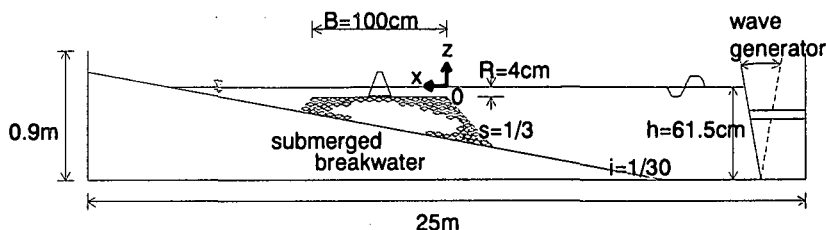


図-1 実験水槽の概要

いる。水槽内には勾配 1/30 の木製斜面を設置し、その上に石により構築した潜堤を設置した。マウンドは法先水深の違いによる波圧の影響を調べるため、高さを2種類変化させた。なお、天端水深($R=4\text{cm}$)は一定とした。

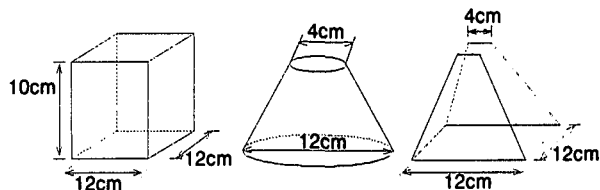


図-2 実験模型

対象構造物の形状として、実際に施工例のある擬岩の形状を理想化した円錐台と四角錐台(上底 4cm, 下底 12cm, 高さ 10cm), および比較のための直方体(底辺 12cm, 高さ 10cm)の三種類を採用した(図-2 参照)。

水槽上端に固定した三分力計から構造物をつり下げ、その設置位置を7箇所($x=7, 17, 27, 37, 52, 72, 92\text{cm}$)変化させ、 x 方向と z 方向の波力を計測した。

入射波は3種類($T=1.0, 1.4, 2.0\text{s}$)の周期の規則波とし、その波高 H_i を構造物の各設置位置について、以下のように決定した。すなわち、(A)非碎波の場合(構造物より岸側で碎波する場合も含む)、(B)構造物の中心位置で碎波する場合、(C)構造物の前面で碎波し、構造物に衝撃碎波力が作用する場合、(D)構造物の沖側で碎波し、構造物が碎波後の乱れた領域に含まれる場合、の4種類である。ただし、設置位置で所定の碎波条件が得られない場合は、その条件を割愛した。

各々の条件に対し、水平・鉛直方向波力(F_x, F_z)、構造物中心位置の水位変動 η と水平・鉛直方向流速(u, w)、および沖波の水位変動を同時に計測した。さらに、水谷らは、波力の予測に構造物前面位置での流速を使用の方が予測精度が良いことを指摘しているため、本研究ではさらに構造物前面での水平・鉛直方向流速の計測も同時に行った。ただし、流速の計測位置をいずれも潜堤天端上1cmの高さとした。なお、

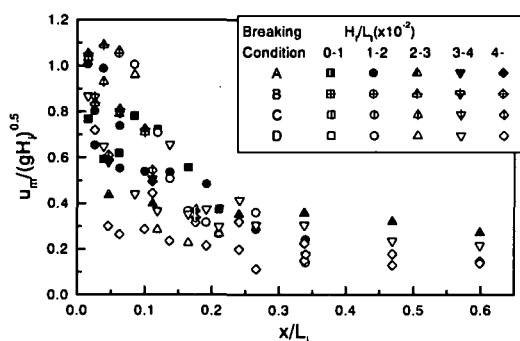
水位変動を電気容量式水位計、流速を電磁流速計で計測した。これらの出力は、2台のパーソナルコンピュータを使用して、それぞれサンプリングタイム40msと0.5msでAD変換し、そのデータをハードディスクに収録した。なお、実験及び計測はすべて静水状態から開始した。

3. 流速場の特性

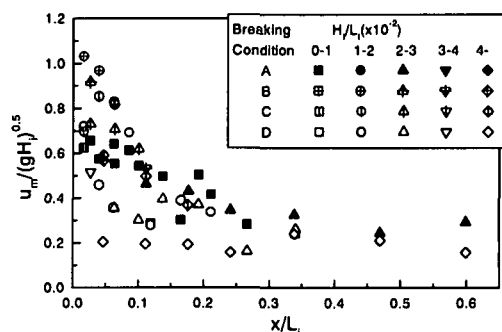
構造物に作用する波力は流速場に大きく支配される。したがって、まず潜堤上の流速分布の特性を明らかにしておく必要がある。なお、流速の測定を構造物の中心位置と前面位置の2カ所で行っているが、後述するように、波力の予測手法には前面位置での流速値を用いる方が適当であることから、ここでは、構造物の前面位置での流速値について考察する。

(1) 水平方向最大流速の特性

図-3(a)と(b)にそれぞれ R/h_i が 0.2 および 0.4 の場合の水平方向の無次元最大流速 $u_m/\sqrt{gH_i}$ の x/L_i に伴う変動特性を示したものである。 $u_m/\sqrt{gH_i}$ は H_i/L_i や碎



(a) $R/h_i=0.2$



(b) $R/h_i=0.4$

図-3 水平方向最大流速の変動特性

波形式によらず x/L_1 により同様の変動特性を示し、一般的に x/L_1 が小さなおとこでは、最大流速は大きな値となっている。これは、潜堤法面での水深の減少による浅水変形によって波高が増大し、流速が大きくなっているためである。

また、 x/L_1 が0.0から0.1の範囲で $u_m/\sqrt{gH_1}$ は最大となり、最大値をとるときの碎波形式はBまたはC、すなわち衝撃碎波力が作用する場合であり、碎波時には水平方向流速が大きくなっていることがわかる。そして、 x/L_1 が0.3のあたりで急激に減少し、その後、ほぼ一定値をとる。非碎波の場合は、 x/L_1 の増加による $u_m/\sqrt{gH_1}$ の値の減少は、碎波の場合に比べて緩やかであり、 $x/L_1 > 0.2$ の範囲では、碎波の場合に比べて大きな値となっている。これは、碎波が構造物より沖側で起こる場合は、その規模に比例して碎波後の波高は減少し、流速値も小さくなるためであり、このことから、流速の減少に及ぼす碎波の影響が大きいことがうかがえる。

R/h_1 が小さい場合でも、 $u_m/\sqrt{gH_1}$ の x/L_1 に伴う変動はほぼ同様であるが、 R/h_1 が大きい方が無次元流速の減少する位置が法肩に近くなる。これは、入射波高が大きくなると碎波が生じるが、潜堤上での碎波位置は、 R/h_1 の大きい場合は沖側法肩付近に限られていたためである。したがって、図からもわかるように、衝撃的な碎波力が作用しうる範囲も法肩付近に限られ、 x/L_1 が約0.1以下となる。

(2)鉛直方向最大流速

図4に、 $R/h_1=0.2$ の場合の x/L_1 にもなう鉛直上向きの無次元最大流速 $w_m/\sqrt{gH_1}$ の変動特性を示す。鉛直方向の最大流速は、値は水平方向流速に比べて約1/4程度と小さいが、 x/L_1 にもなう変動特性は水平方向流速とほぼ同様で、 x/L_1 が0.1までの範囲で最大値を取り、その後、 x/L_1 の増加とともに減少していくが、その変動量は水平方向に比べて小さい。これは、鉛直上向きの流速は潜堤内部からの流れであり、潜堤内部の抵抗によるエネルギー減衰も手伝って、潜堤上での波変形の影響を直接強く受けていないことによると考えられる。図示していないが、 $R/h_1=0.4$ の場合も

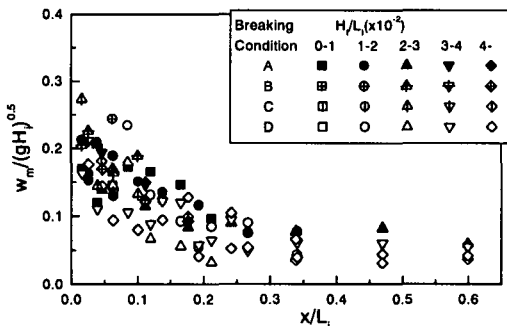


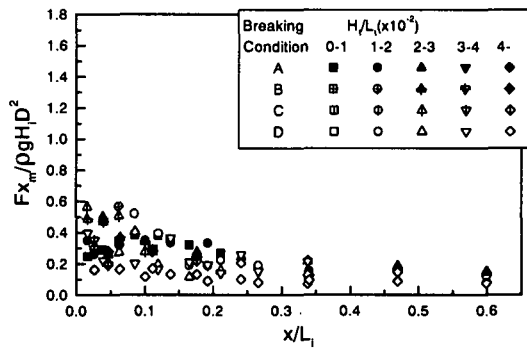
図4 鉛直方向最大流速の変動特性 ($R/h_1=0.2$)

ほとんど同様の結果を得ている。

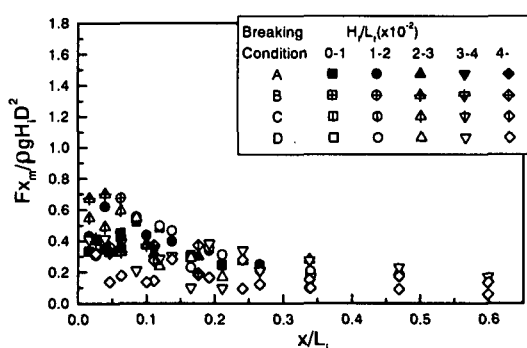
4. 最大波力の変動特性

(1)水平方向最大波力の特性

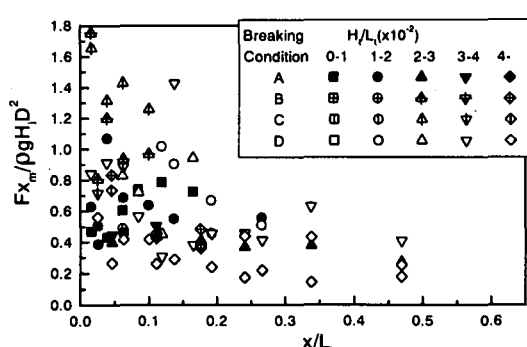
図5に水平方向無次元最大波力 $F_{xm}/\rho g H_1 D^2$ と x/L_1 の関係を示す。まず、図より、構造物の形状の差による無次元最大波力の差として、円錐台、四角錐台、直方体の順に大きくなっている。波圧が作用する前面が傾斜している円錐台や四角錐台と比べて、直立面となる直方体は、その作用波力の大きさが x/L_1 によらず他の形状の1.5倍から最大で2倍以上となることがわ



(a)円錐台



(b)四角錐台



(c)直方体

図5 水平方向最大波力の変動特性($R/h_1=0.2$)

かる。さらに、入射波に対して曲面を持つ円錐台は、四角錐台に比べて、0.7~0.8 倍程度に作用波力が小さくなっている。したがって、大きな波圧が作用する前面に傾斜があり、かつ曲率を有するような形状が波力の面から有利であるといえる。

ところで、構造物の形状によらず最大値は衝撃砕波力が作用する場合に発生し、直方体の場合は特に大きな値となる。これは、直方体の場合、構造物上部が上にすばむ形をしている円錐台、四角錐台に比べて、波の頂点から砕波による波峰のつっこみの衝突を広い面で受けることによると考えられる。

図-6 に $R/h_t=0.4$ の場合の円錐台に作用する水平方向の無次元最大波力の変動特性を示す。同図に例示するように、 R/h_t の大きい場合でも最大波力は衝撃砕波力によって生じるが、一般的にこの衝撃砕波力の値は R/h_t の大きい方が大きくなる。これは R/h_t が大きい場合の砕波波高は、 R/h_t の小さい場合に比べて小さく、したがって越波の影響が小さくなり、砕波時の波頂部(jet)の衝突面積が大きくなることが要因と考えられる。しかし、そのような衝撃波力および構造物の形状による波力の絶対値の差をのぞけば、無次元最大波力の変動特性は、 R/h_t によらず $F_{x_m}/\rho g H_t D^2$ は、法肩から x/L_t が0.2 以内で最大値をとった後、 x/L_t の増加に伴い x/L_t が0.3 あたりまで減少して、その後一定になる傾向がある。

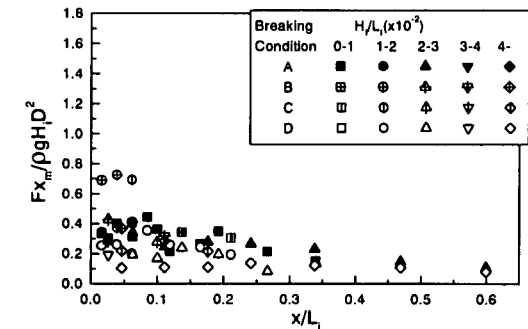


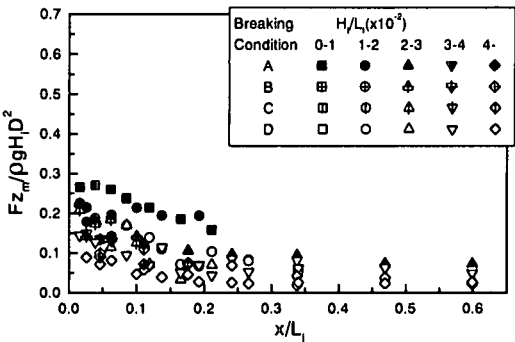
図-6 円錐台の水平方向最大波力($R/h_t=0.4$)

(2) 鉛直方向最大波力の特性

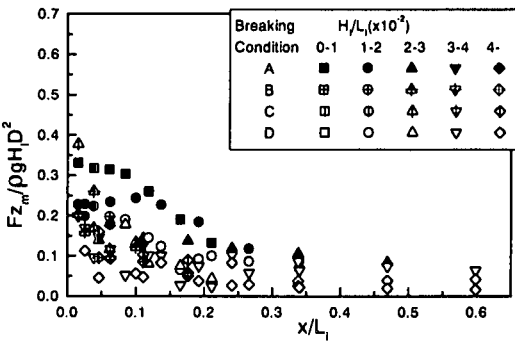
図-7 に鉛直上向きは無次元最大波力 $F_{z_m}/\rho g H_t D^2$ と x/L_t の関係を示す。水平方向に比べて、波力の値は小さくなっており、 x/L_t による変動幅も小さい。 x/L_t による変動特性および構造物の形状の差は、 R/h_t によらず、水平方向の場合と同様の傾向を示している。ただし、砕波の起こる場合、水平方向では、砕波による流速の増大に伴い波力も大きくなる傾向にあったのに対し、鉛直方向の無次元最大波力は、非砕波の場合の方が砕波の場合よりも大きくなっている。これは、潜堤

上では水位変動の影響が大きく、それにとまう浮力の時間変化の影響が有意な大きさになっていることが一因と考えられる。

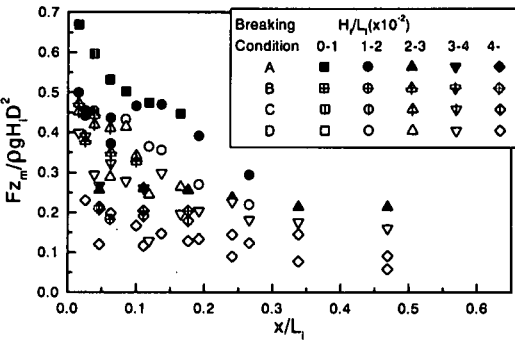
ところで、鉛直方向最大波力の大きさも円錐台、四角錐台、直方体の順に大きくなる。四角錐台は円錐台に比較して底面が大きく、圧力の作用面積が大きくなるため、両者の差が生じたと考えられる。一方、直方体は四角錐台と同じ底面積であるが、波力は大きくなる。これは、鉛直方向に同一の断面を有する直方体の場合、局所的な波変形が四角錐台に比べて若干大きく、その影響が底面の圧力に現れたと考えられる。紙面の都合上図示していないが、同一の波浪条件に対して、底面の圧力は四角錐台に比べ直方体の方が大きく



(a)円錐台



(b)四角錐台



(c)直方体

図-7 鉛直方向最大波力の変動特性($R/h_t=0.2$)

なることを確認している。

5. Morison 式

潜堤上のような、碎波の影響が無視できない場合、衝撃碎波力を充分考慮する必要があることが明らかとなった。したがって、このような波力の予測手法を明らかにしておく必要がある。

本研究で対象とする構造物は入射波長に比べて充分小さい構造物であり、したがって Morison 式が作用波力算定式として使用できれば実用的である。著者らは、潜堤上での水位変動の効果を体積と投影面積を構造物中心位置での水位変動の関数として評価した Morison 式に、構造物前面で評価した流速と加速度を使用すれば衝撃力を評価するための付加項を加えることなく、水平方向波力を Morison 式で評価できることを報告している⁷⁾。しかし、彼らは構造物中心位置で計測した流速を長波の波速を仮定して構造物前面での流速・加速度を評価している。本研究では、構造物中心位置と構造物前面で流速を計測しているので、この点も再度検討する。一方、鉛直方向波力には、水位変動に伴う浮力の変化も重要と考えられるため、鉛直方向波力に浮力を加えた次式を考える。

$$F_x = 0.5C_{Dx}\rho A(\eta)u|u| + C_{Mx}\rho V(\eta)\dot{u} \quad (1)$$

$$F_z = 0.5C_{Dz}\rho A_z w|w| + C_{Mz}\rho V(\eta)\dot{w} + \rho g(V(\eta) - V(0)) \quad (2)$$

ここに、 $V(\eta)$ と $A(\eta)$ は $z=\eta$ より下にある構造物の体積と x 方向の投影面積、 A_z は底面面積、 C_{Dx} と C_{Dz} は抗力係数、 C_{Mx} と C_{Mz} は慣性力係数、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。

図-8 に 2 カ所の流速と加速度を使って Morison 式で計算した水平方向の計算波力を実験値と比較した結果を例示する。著者ら⁷⁾が指摘したように、構造物中心位置で計測した流速・加速度は、波が構造物前面に衝突した際に最大となる波力の時間変化に比べて位

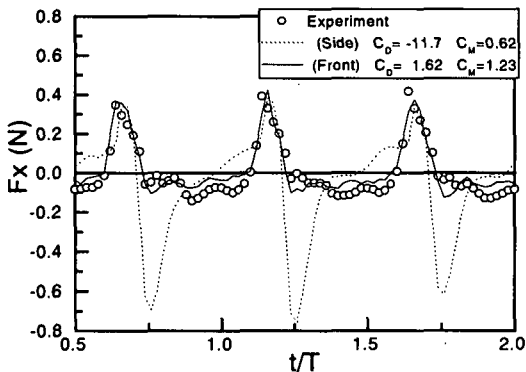


図-8 計算波力と実験値の比較

相が遅れるため、最小自乗法を使って実験結果にフィッティングさせると抗力係数が大きな負値となり、時間波形は実験値と大きく異なる。これに対し、構造物前面で計測した流速・加速度を使用した場合、計算波力は実験値と良好に一致する。特に、衝撃的な碎波力が作用する場合であっても、実験値と計算値は良好な一致度が得られている。さらに、後述するが、抗力係数と慣性力係数もほぼ安定した値となっており、これらの結果から判断すれば、潜堤上の構造物の作用水平波力は、構造物前面での流速と加速度を使用すれば、抗力と慣性力の和である Morison 式で精度良く算定できるといえる。

一方、鉛直方向波力は、図-9 より明らかなように、鉛直方向波力に占める浮力が支配波力成分となる。図が煩雑になるため示していないが、抗力と慣性力の割合は非常に小さい。すなわち、鉛直方向波力は、構造物底面に作用する圧力の寄与が大きく、その圧力はほぼ静水圧によって与えられることになる。したがって、浮力の時間変化、換言すれば、潜堤上での水位変動がわかれば鉛直方向波力は予測可能といえる。なお、浮力の最大値が平坦になっているのは、水位変動が構造物を越える状態では浮力が一定となるためである。

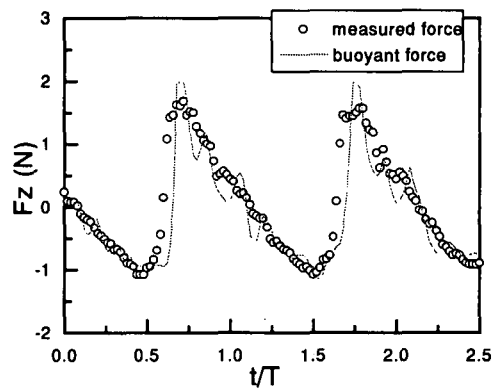


図-9 鉛直方向波力と浮力の時間変化の例
($R/h_0=0.2$, $H/L_0=0.0141$)

6. 波力係数

Morison 式を使用する場合、同式中の波力係数(抗力係数・慣性力係数)の特性を明らかにしておくことが工学上きわめて重要である。そこで、波力係数の特性について考察する。なお、記述したように、鉛直方向波力は浮力を考慮することによりほぼ予測可能であるため、ここでは水平方向波力の結果のみを示す。

図-10 に円錐台の抗力係数の KC 数にともなう変動を例示する。抗力係数は、構造物の形状に関係なく、

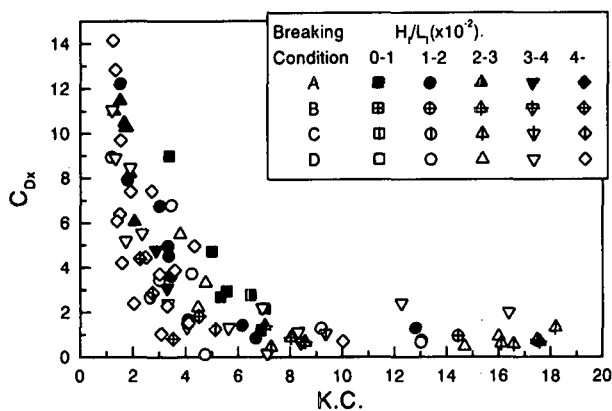


図-10 抗力係数とK.C.数の関係 (円錐台, $R/h=0.2$)

K.C.数が4~5以下では、比較的広範囲にばらつきながら、K.C.数の減少にともない増大する。これは、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。しかし、K.C.数が4~5以上になると、K.C.数の増大にともない、ほぼ一定値に収束していく傾向がある。しかし、収束値は構造物の形状によって若干変化し、円錐台が最も小さく、ついで四角錐台、直方体の順で大きくなる。それほど関係なく、ほぼ0.8前後の値になっている。

なお、Morison 式に構造物中心位置で計測した流速・加速度を使用した場合、図-8 に例示したようにほとんどの場合で抗力係数が負値となることが判明した。これは、波力がピーク値となるとときには構造物中心位置での流速・加速度はまだ充分増加しておらず、むしろ流速の極小値（負の最大値）の位相に波力のピーク値が近くなっていることに起因する。

図-11 に円錐台の慣性力係数の特性を例示する。慣性力係数は、抗力係数と異なり、K.C.数にともなう変動は非常に小さく、全般的にほぼ一定値とみなせる。円錐台の場合、約1.3であるが、この値は構造物の形状によって異なり、抗力係数と同様、円錐台、四角錐台、直方体の順で大きくなる。

7. 結論

本研究で得られた主要な結論を要約する。

- 1) 無次元最大波力は、 x/L_r が0~0.2の範囲で最大となる。特に衝撃砕波力が作用する場合には大きな値となるが、 x/L_r が0.2以上では衝撃砕波力の作用するような砕波条件にはならず、波力の最大値は減少する。なお、円錐台と比較して、四角錐台では1.2~1.3倍、直方体では1.5~2倍の波力の最大値をとる。
- 2) 鉛直方向波力は、抗力、慣性力の影響はほとんど

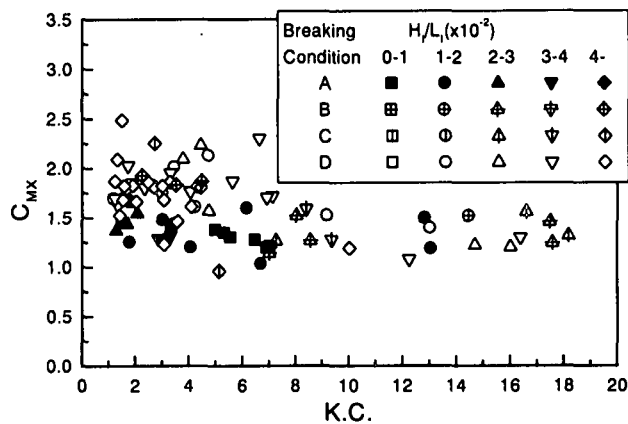


図-11 慣性力係数とK.C.数の関係 (円錐台, $R/h=0.2$)

なく、浮力が支配的な波力成分である。

- 3) 構造物前面での流速・加速度を使用することにより、水平方向波力を Morison 式により予測可能である。
- 4) 円錐台の場合、慣性力係数は1.3程度、抗力係数は0.8程度の値に収束する。四角錐台の場合は若干両係数とも大きくなる。

謝辞：本実験を行うにあたり、浜松市の小島一哲君（当時名古屋大学工学部研究生）に多大な協力を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 榎木亨・後野正雄：円柱に作用する砕波局所波力に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp.438-442，1982。
- 2) 榎木亨・後野正雄・岩橋哲哉：浅海域における円柱構造物の砕波局所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.376-380，1983。
- 3) 堀川清司・渡辺晃・勝井秀博：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.37-42，1973。
- 4) 光易恒・本多忠夫：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.43-47，1973。
- 5) Ross, C.W. : Laboratory study of shock pressures of breaking waves, TM-59, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C., 1955.
- 6) Ross, C.W. : Large-scale tests of wave forces on piling, TM-111, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington D.C., 1959.
- 7) 水谷法美・許東秀・小島一哲・倉田克彦・遠藤正男・岩田好一朗：潜堤上の構造物に作用する波力に関する一考察，第45回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅱ，pp.151-152，1998。

(1999. 4. 19 受付)