

円柱に作用する砕波衝撃波力の数値的検討

榎 木 亨*・後野 正雄**・野崎 智文***

1. 緒 論

一般に栈橋の脚などの円柱構造物は砕波点付近に設置されることが多い。このような領域に設置される円柱構造物に作用する外力としては砕波による波力が主たるものであり、その特性として衝撃的な性格を有することがすでに明らかになっている。円柱に作用する波力については Morison 式が有名であるが、これは衝撃的な力を表現するものではない。砕波による衝撃波力に対しては合田ら(1966)によって理論的なアプローチが試みられており、彼らはモデル化した砕波の波面が円柱に衝突するときの衝撃力を、付加質量より求めている。また榎木・後野ら(1982, 1983)は合田らの理論に波面の傾きの影響を考慮した修正波力式を提唱している。また実験的には円柱の単位高さあたりに作用する局部波力が測定されており、局部波力の時系列・鉛直分布の特性とともに円柱に働く全砕波衝撃力についても砕波帯相似パラメータ Ir との関係が調べられている。谷本ら(1986)は同様の実験によって傾斜円柱に作用する砕波波力を測定し、これに基づいて局部波力の鉛直分布のモデルを提唱するとともに、砕波巻き込み率を彼らの提唱したパラメータによって整理している。これらの実験的研究では合田の理論に対する検証がなされておらず、付加質量理論の衝撃波力への適用性に対しても疑問が残されている。

本論文では、2次元造波水槽における斜面上砕波を数値計算によって求め、波面の形状、流体内部の圧力値を用いて円柱に作用する砕波による衝撃波力の算定を試みたものであり、既往の実験結果との比較により、理論の適用性を検証するとともに、任意の水底形状での砕波による衝撃波力の算定を可能にしている。

2. 円柱に作用する一般の波力

波による衝撃波力について考察を進める前に、円柱に作用する一般の流体力について考えてみる。まず、没水・非没水にかかわらず、円柱の単位長さあたりに働く

流体力 F_{a11} は、物体が存在しない状態での流体場における物体の表面位置の圧力を積分した Froude-Krylov 力と、物体があることによる影響で生じる力の和で表すことができる。物体の影響による力は適当な付加質量を仮定することにより表すことができる。したがって、円柱に作用する全流体力は次のようになる。

$$\vec{F}_{a11} = \int_S p_{FK} \vec{n} dS + M \frac{d\vec{u}}{dt} + \vec{u} \frac{dM}{dt} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 p_{FK} : 円柱がない場合の円柱周囲の圧力値

S : 円柱周囲の境界

$\vec{n}$: 円柱周囲に対する単位法線方向ベクトル

M : 円柱水没部分の付加質量

$\vec{u}$: 円柱中心位置における代表流速

右辺第一項は Froude-Krylov 力、第二、三項は付加質量力を表す。ただし、この時点では、付加質量 M がどのような値をとるかについてはわかっていない。

衝撃波力 $\vec{F}$ が生じるのは波の峰が円柱に作用するときであり、この時 $d\vec{u}/dt$ は十分に小さい。また衝撃力の作用時間は非常に短いので dM/dt が相対的に大きくなり、結局、 $M d\vec{u}/dt$ は $\vec{u} dM/dt$ に比して無視できる。したがって、衝撃波力は次のように書ける。

$$\vec{F} = \int_S p_{FK} \vec{n} dS + \vec{u} \frac{dM}{dt} = \vec{F}_{FK} + \vec{F}_{AM} \quad \dots\dots\dots (2)$$

合田ら(1966)、榎木ら(1982)は、波力の衝撃的な成分として付加質量力を示す F_{AM} 項のみを考えている。

本研究においては式(2)の F_{FK} と F_{AM} の両方が衝撃的であると考え、衝撃力の算定に組み入れている。 F_{FK} が衝撃的な性格を有すると考える理由は、後述する砕波時の内部圧力分布の特性による。

F_{FK} すなわち Froude-Krylov 力については、円柱が存在しない状態における流体内部の円柱表面位置での圧力を積分することにより求めることができる。また F_{AM} すなわち付加質量項については、砕波の計算より得られた波面の形状に榎木・後野(1982)が提案した修正波力式を適用することによって、算定が可能である。

3. 数値計算による斜面上砕波の再現

本論文の方法によって円柱に作用する衝撃波力を計算

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪工業大学講師 土木工学科

*** 正会員 工修 建設省四国地方建設局

するためには、砕波点近傍における波の水面形や、内部の圧力が求められなければならない。筆者らは波力を計算する波を数値計算によって再現し、その結果を波力の計算に適用した。2次元造波水槽における斜面上砕波現象を数値計算によって再現するために、筆者らは境界要素法を用いた。この方法によれば、流体領域内の速度ポテンシャルを非線形な境界条件とともに解くことが可能となる。計算手法の詳細についてはSawaragiら(1989)、野崎(1989)を参照していただきたい。

計算結果の例として図-1に各時間ステップにおける水面形を重ね描きしたものを示してある。また、図-2は砕波直後の流体内部の圧力分布を示したもので、この図より、突出した水面直下の凹部の内側に高い圧力が発生することがわかる。このように圧力の高い領域が存在し、短時間に円柱を通過すれば、Froude-Krylov力そのものが衝撃的な力となる可能性が考えられる。ただし、本論文において定義した砕波点とは波頂部が最大となる位置である。

4. 円柱に作用する衝撃波力の算定方法

(1) 付加質量による力

本論文では、円柱に作用する衝撃波力が付加質量の時間変化による力と Froude-Krylov 力よりなると考え、双方について計算している。まず付加質量力の算定方法

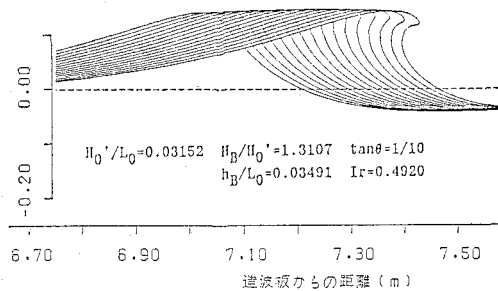


図-1 水面形の変化

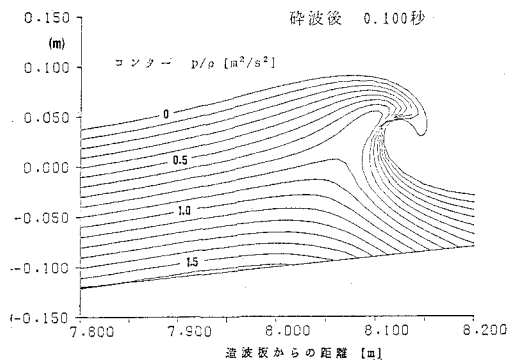


図-2 砕波後の高圧力部の発生

について述べてみよう。

樫木・後野(1982)は波が円柱に衝突するときの波面の傾きによる衝撃力発生時刻の遅れを考慮し、Karman型の付加質量を用いた修正波力式を導いた。この修正波力式については本研究における波力の計算においても応用しているので、少し説明を加える。円柱軸方向単位長さ dz あたりに作用する局部衝撃波力は次のように算定される。円柱軸に垂直な面から角 θ_s だけ傾いた波面が、円柱軸に垂直な方向に速さ V で進行しているとす (図-3)。

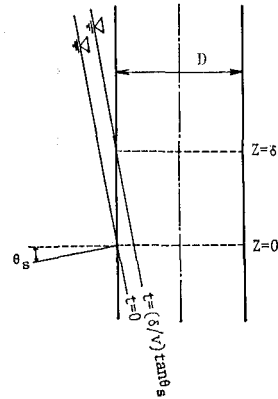


図-3 修正波力式のご概念

微小長さ dz の間に作用する衝撃力には Karman モデルを応用した合田の理論が適用できるとする。 δ を局部波力を計算する円柱軸方向の要素の高さとし、区間 $[0, \delta]$ に作用する衝撃波力を F とし、 F, z, t を以下のように無次元化する。

$$\left. \begin{aligned} z^* &= z/\delta \\ F^* &= F/(\pi\rho C^2 D\delta/2) \\ t^* &= t/\tau \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

以上のことより、 F^* は次のように表される。

$$F^* = \int_0^1 \left(1 - t^* + \frac{z^*}{\beta}\right) \cdot W\left(t^* - \frac{z^*}{\beta}, 1 + \frac{z^*}{\beta}\right) \cdot dz^* \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\beta = (V\tau/\delta) \tan \theta_s \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau = \frac{D}{2V} \dots\dots\dots (6)$$

また、関数 W は次のように定義される。

$$W(t-a, b) = \begin{cases} 1 & a \leq t \leq b \\ 0 & t < a, b < t \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

この β は円柱径 D と区間長 δ 、波面勾配 $\tan \theta_s$ の関係によって波力の特性が変化することを示す。また、 τ は衝撃波力の作用時間である。修正波力式を用いて円柱に作用する全体波力を算定する場合、衝突中の波面の勾

配が一定ではなく位置によって異なるため、実際の衝撃波力を修正波力式によって求めるには波面の形が正確に得られなければならない。

さらに筆者らは次のような検討を行ない、修正波力式に変更を加えた(図-4)。まず波面衝突中のある瞬間における付加質量による力を碎波計算時の波面の計算要素高さごとに求める。すなわち局部波力を計算する要素の高さ δ は波面の計算要素の鉛直方向長さとなる。局部要素ごとの付加質量を M_a (図-4 斜線部)、水面上の水粒子の水平方向速度を V_{sn} とする。従来、 M_a の時間変化を支配する円柱の没水速度は V_{sn} と同じものを用いてきた。

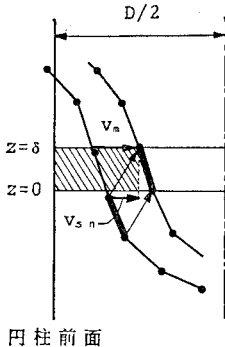


図-4 修正波力式に対する変更

本研究においては、付加質量 M_a の時間変化を決定する円柱の水没速度(すなわち波面の移動速度の水平方向成分) V_m と、力の方向を決定する水面上の水平方向水粒子速度 V_{sn} は異なるものであると考える。このことより、無次元化された修正波力式および β に対して変更が加えられ次式のようになる。

$$dF^* = \int_0^1 \frac{V_{sn} \cdot V_m}{C^2} \left(1 - t^* + \frac{z^*}{\beta} \right) \times W \left(t^* - \frac{z^*}{\beta}, 1 + \frac{z^*}{\beta} \right) dz^* \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{V_m \tau}{\delta} \tan \theta_s \\ \tau &= \frac{D}{2V_m} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(2) Froude-Krylov 力

Froude-Krylov による波力を計算するには、碎波の数値計算結果より内部の任意点における圧力値を計算し得ることを利用して、数値積分により求めた。この時、円周方向には Legendre-Gauss の4点公式、円柱の軸方向には台形公式を用いた。

(3) 数値実験の波形に対する適用について

式(8)を斜面上碎波の数値実験より得られた波形に適用して、付加質量項を算定するにあたって、次のような

考え方で行なった。まず、衝撃波力に最も大きな影響を与えると思われる基準波形を選び、その基準波形より算出される波面勾配・波面速度が衝突中は一定であるとして、局部波力を要素ごとに計算する。基準波形の決定方法は、最大局部波力が現われると予想される位置(樫木ら, 1983)、すなわち $z/\eta_B = 0.65$ の点を切った直後の波形を基準波形とする。すなわち、図-5 において $t = (n+1)\Delta t$ の時刻の波形を基準波形とする。また、碎波時の波速には孤立波の第2次近似解の波速を用いた。

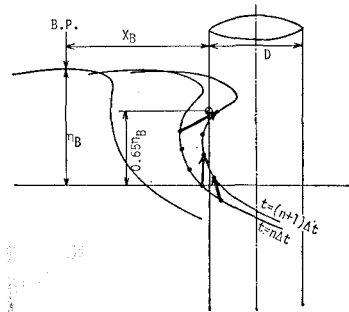


図-5 基準波形の決定方法

5. 計算された碎波衝撃力の特性

(1) 局部波力の時系列について

数値計算によって局部波力の時系列を計算し、Froude-Krylov を考慮した場合としない場合とを比較したところ次のようなことが明らかになった。まず Froude-Krylov 力を考慮しない場合には、局部波力のピークの現われる時刻が局部波力の作用位置によって大きく異なる。特に静水面に近いほど水面が円柱と衝突する時刻は早くなり、ピークが早く現われる。逆に、Froude-Krylov 力を考慮するとピークの現われる時刻が局部波力の作用位置によらずほぼ同時刻となる。実験結果ではほぼ同時刻にピークが生じており、Froude-Krylov 力を考慮することにより実験結果をうまく表すことができる。このことより、実験で得られた局部碎波波力において、静水面近傍の波力は付加質量力よりも Froude-Krylov 力の方が卓越していることを表すものと考えられる。

(2) 局部波力の鉛直分布について

Plunging 型碎波に対する局部波力のピーク値の円柱軸方向の分布の計算結果の1例を図-6に示す。図中の4種類の結果は各々異なる円柱設置位置における局部波力のピーク値を連ねたものである。図中 X_B/L_A は円柱設置位置から碎波点までの距離を岸向きに測った距離 X_B を円柱設置水深における微小振幅波の波長 L_A で無次元化した値を表している。また、樫木・後野らによる局部波力の鉛直分布の実験結果を図-7に示す。図-6と同じく plunging 型碎波による結果である。実験結果

では $z/\eta_0=0.6\sim 0.7$ のところで最大の局部波力が現われているのに対し、計算結果では $z/\eta_0=1.0$ 付近すなわち波峰付近に大きな値が現われ、実験結果と異なっている。実際の現象では波峰付近において気泡が発生し、局部波力が低減するはずであるが、今回の計算ではこの気泡の影響を考慮していないため、波峰付近の局部波力を過大評価したものと思われる。このことを除けば、数値計算による結果には plunging 型碎波における最大局部波力の鉛直方向のピークが $z/\eta_0=0.65$ 程度の位置に現われており、実験結果と一致する。またこのときのピーク値も、実験結果の $X_B/L_A=0.05$ (図中 $X_B=8.1$ cm に相当) の場合に 2.0、計算結果の $X_B/L_A=0.06$ に対して 2.0 となっており、計算結果は実験結果をよく表現しているといえる。なお、局部波力のピーク値における付加質量力と Froude-Krylov 力の割合を見ても、静水面近傍では Froude-Krylov 力が卓越し、 $z/\eta_0 > 0.5$ では付加質量力が卓越していた。

(3) 全体波力の時系列について

第4節で述べたような方法により要素ごとの局部波力を計算した後、同時刻の局部波力を鉛直方向に積分することによって、全体波力 F^* の時系列を得ることができる。その碎波点における計算結果を図-8 に示す。図中、碎波点から円柱設置位置までの相対距離を X_B/L_A で示してある。また、 F_{AM} は式 (8) により算定した付加質量力、 F_{FK} は Froude-Krylov 力を表し、両者の和も書き入れている。

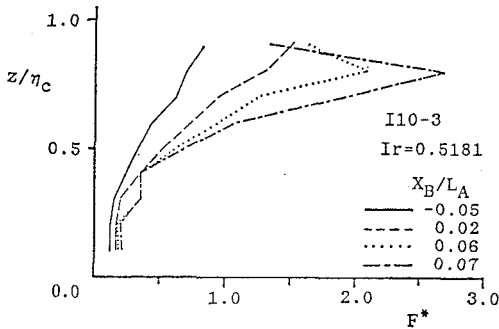


図-6 局部波力のピーク値の鉛直分布 (計算結果)

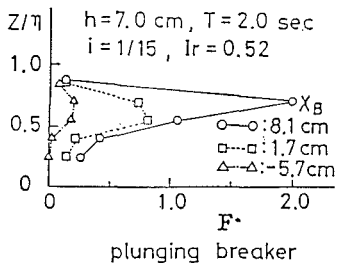


図-7 局部波力のピーク値の鉛直分布 (実験結果, 樫木ら, 1983)

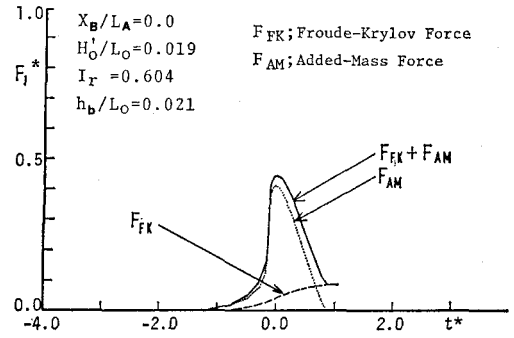


図-8 計算による全体波力の時系列

全体波力の時系列におけるピーク値に与える Froude-Krylov 力の影響を見ると、ピーク付近における F_{FK} の寄与は小さい。すなわち、今回衝撃的な性格を持つと予想した Froude-Krylov 力の影響は、予想に反して小さいものとなった。したがって、全体波力のピーク値が最も大きくなるような位置に円柱を設置した場合、すなわち最大全体波力 F_{IP}^* について考える場合には、修正波力式による付加質量力のみを考えても問題はないといえる。

(4) 円柱設置位置による全体波力のピーク値の変化

円柱に作用する衝撃波力は円柱の設置位置によって変化する。樫木ら (1983) は円柱設置位置が碎波点より少し岸側の場合にそのピーク値 F_{IP}^* が最も大きくなることを既に報告している。その実験結果を図-9 に示す。

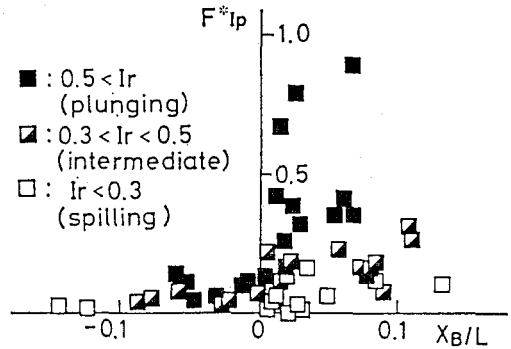


図-9 全体波力のピーク値の円柱設置位置による変化 (実験結果, 樫木ら, 1983)

今回の数値計算結果を同様に整理した結果の 1 例を図-10 に示す。この図は碎波の数値実験ケースより $Ir > 0.5$ 、すなわち樫木ら (1983) による plunging 型碎波に属する波による波力を示したものである。図中の破線は、全体波力の時系列から判断して的確な計算が行われていないと思われるところで、この位置においては基準波形の前面が大きく巻き込んだ状態となっている。実際にこのような流体領域が円柱に衝突する際には、波峰付近に多くの気泡を含み、衝撃力の大きさが低減することが

予想されるので、破線で示した値はより小さくなるものと考えられる。また I_r の差異による変化は小さく、このことから I_r そのものよりも砕波形式の方が砕波衝撃波力の大きさを支配する重要なパラメーターであることがわかる。spilling 型砕波に関しては、砕波の数値計算の際に最高波頂高が現われたあと数ステップで計算が終了しているため、plunging のように明確な巻き込みが現われないまま計算を終了している。したがって、 X_B/L_A

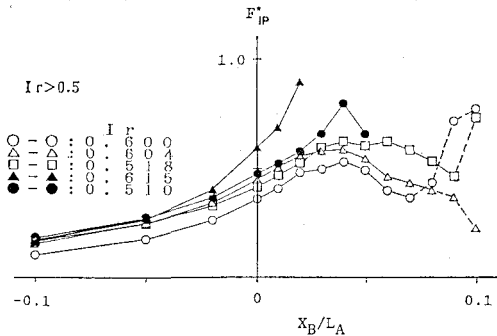


図-10 全体波力のピーク値の円柱設置位置による変化 (計算結果)

が大きい領域では計算結果が得られていない。 F_{IP}^* の最大値そのものの値は、plunging 型については 0.9 程度であり、実験結果と符合しているが、これ以外の遷移型、spilling 型については実験値に比べて計算値が過大となっていた。また、図-10にも見られるようにすべてのケースについて、 $X_B/L_A \leq 0$ の領域 (円柱を砕波点より沖側に設置した場合) での波力が実験結果にたいして過大となっている。このような領域では波面の傾きが緩やかであり、水面と円柱面との接触状態がもはや衝撃的な現象とはならないため、付加質量力の仮定が通用しなくなると考えられる。また、このような傾きの緩やかな水面が円柱に衝突する際に水面が上方へと盛り上がり、そのために実際には衝撃力が低減するはずであるが、本計算においてはこういった現象が考慮されていないことが過大評価の原因と考えられる。以上のことから、本研究の方法によれば、最大の全体波力が小さい spilling 型、遷移型の砕波に対する波力は過大となるものの、工学上重要な plunging 型砕波に対する波力に対しては、適当な値を得ることができるといえる。

(6) 砕波時のパラメータによる衝撃波力の整理

谷本ら (1986) は円柱軸方向の局部波力の分布形を二等辺三角形によって近似しており、この分布形による補正係数 ν を定義している。彼らによると合田による砕波巻き込み率 λ と $\nu = 4\lambda$ の関係となる。彼らは $i/(H_B/L_0)$ で定義されるパラメータによって実験結果より導かれる ν の値を整理しており、 $i/(H_B/L_0)$ および円柱傾斜角

θ をパラメータとした ν の関数形を提案している。一方、筆者らは、谷本らの実験値と今回の計算値の λ を、 $I_r = i/\sqrt{H_B/L_0}$ によって整理した (図-11)。なお図中には円柱を傾斜させた場合の結果も示してあり、 $\theta = 30^\circ$ は円柱上部が沖に向かって 30° 傾いていることを示す。谷本らの実験値と本計算値はまとまりがよく、 I_r の増加に伴って λ が増加するという傾向が現われている。図中には円柱を傾斜させた場合の計算結果も示してあるが、円柱の傾斜角の λ への影響は明らかではないが、少なくとも I_r と λ の間に連続的な単調増加の関係があることが予想される。今後、模型実験および数値実験の結果を蓄積し、 I_r によって整理することによって、 $\lambda \sim I_r, \theta$ の関係が明らかになるものと考えている。

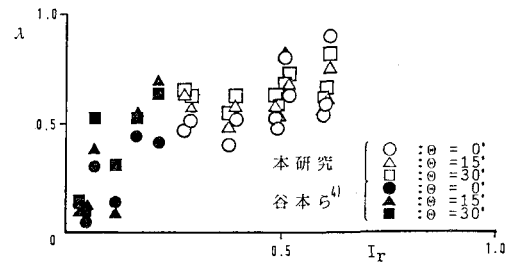


図-11 $\lambda \sim I_r$ の関係

6. 結 論

本論文における計算により、砕波衝撃力に関する既往の実験結果を説明し得る計算結果を得ることができた。これにより付加質量理論を衝撃波力に適用することの妥当性が検証できたものとする。また本計算方法は任意の海底地形に対して適用可能であり、このことは、一般の海底形状での砕波による円柱に作用する衝撃波力を数値計算で求め得ることを示唆するものである。

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, 港研報告, 第5巻, 第6号, pp. 1~30.
- 榎木 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29回海岸工学講演会論文集, pp. 438~442.
- 榎木 亨・後野正雄・岩崎哲哉 (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. 376~386.
- 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小蔵絃一郎 (1986): 円柱に働く衝撃砕波力に関する実験的研究, 港研報告, 第25巻, 第2号, pp. 29~87.
- 野崎智文 (1989): 砕波の内部機構および円柱に作用する砕波衝撃力について, 大阪大学修士論文.
- Sawaragi, T. and M. Nochino (1989): Water Wave Breaking on Uniform Slope, Proc. The 3rd ISCFD, Nagoya, (in publishing)