

傾斜円柱に働く衝撃砕波力の実験的研究

谷本勝利*・高橋重雄**・金子忠男***・塩田啓介****

1. まえがき

外海に面し、大きな波浪が来襲する地点にシーバースを建設する場合には、基礎杭などの円柱部材に働く衝撃砕波力が設計外力として重要になることがある。円柱に働く衝撃砕波力に関する研究は合田¹⁾、光易²⁾、最近では榎木^{3,4)}によって行われているが、その特性は十分解明されておらず、構造物の設計を行う際に砕波による衝撃力をどのように取り扱うかについては未解決の点も多い。特に、シーバースの基礎杭にみられるような傾斜した円柱を対象とした研究例はみあたらない。

本研究では、従来明らかにされていない円柱の傾斜度と衝撃砕波力の関係を模型実験によって調べると同時に、部材が1自由度ではなく多自由度振動系である場合の衝撃応答特性について考察した。また、砕波の波面を直線で近似した衝撃砕波力算定モデルにもとづく計算結果と実験結果を比較検討した。

2. 模型実験の方法

実験は、長さ 35m、幅 1m、深さ 0.94m の二次元造波水槽を使用して行った。造波板から 18.5m 離れた地点より 1/10 勾配の鋼製斜面を設け、斜面先端から岸側に 4.5m 離れた地点に波力測定系を設置した。波力測定系は、図-1 に示すように直径 $D=4.8\text{cm}$ 、肉厚 4mm の硬質塩化ビニルパイプの模型円柱と幅 5cm の鋼製アームをボルト接合し、アームの上部を固定した片持ばり式で、アームの表裏に貼付した 4 枚のひずみゲージによって円柱と直角方向に働く力を検出するものである。円柱の傾斜角 θ は、静水面に垂直な軸に対して沖方向の傾斜を正にとり、 0° 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ の 5 種類とした。また、アームの板厚 d を 9、12 および 25mm の 3 種類とし、波力測定系の振動特性を変化させた。円柱が静水面と交差する地点および沖側に 50cm 離れた地点に波高計を設

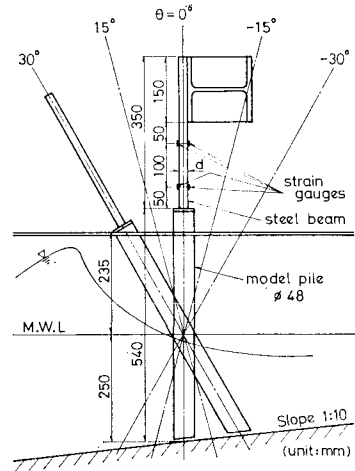


図-1 波力測定系

置し、水位を記録するとともに、円柱に砕波が衝突する状態を高速度カメラを用いて水槽側方からシャッター間隔 $\Delta t=1/64\text{s}$ で連続撮影した。波力および水位の記録は、データレコーダにテープ速度 4.8cm/s で収録し、1.2cm/s で再生した。

一様水深部の水深は 70cm とし、円柱が静水面と交差する地点の水深 h を 25cm に設定した。波の周期 T は 1.5、2.0 および 2.5s とし、波高を漸変させた。なお、砕波はすべて Plunging 型であった。

3. 波力測定系の衝撃応答特性

衝撃的な荷重を測定する場合には、測定系の動的応答特性が問題となるが⁵⁾、今回の実験においても同様であり、円柱に衝撃砕波力が働いたときの実験値には波力測定系の動的応答効果が含まれている。したがって、実験値から衝撃砕波力の特性を推定可能とするため、有限要素法を用いて波力測定系の振動解析を行い、衝撃応答特性を調べた。計算は、構造解析プログラム MSC/NASTRAN の直接法による過渡応答解析を使用し、波力測定系の円柱部 17 要素、アーム部 3 要素の振動モデルとした。

図-2 は、波力測定系の水中自由振動実験における応

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長

** 正会員 M.S 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

*** 正会員 工博 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部研究開発センター主任研究員

**** 正会員 工修 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部研究開発センター

答値 F_e の時間変化について、減衰定数 β を 0.005 とおいた場合の計算値と実験値を比較したものである。実験値は多自由度の振動を呈し、初期には振動数 $f_1=30.0$ Hz の基本振動に重なる $f_2=122$ Hz の 2 次の振動が顕著に現われているが、これは波力測定系の円柱部の曲げ剛性がアーム部のそれより小さく、高次の振動モードが現われ易い構造である結果と考えられる。計算値は振動数および減衰が実験値と若干異なるものの、多自由度の振動特性を良く表わしている。特に、振動の初期には計算値が実験値と良好に一致していることから、衝撃砕波力が作用した直後の波力測定系の応答特性は本振動モデルによって解析可能であるといえる。

図-3 は、波力測定系の振動計算モデルに種々の衝撃

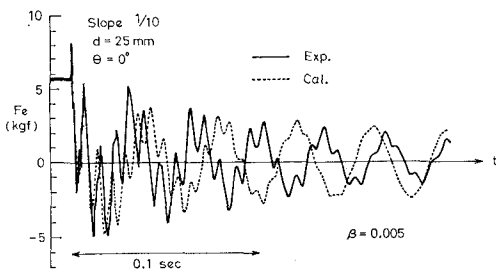
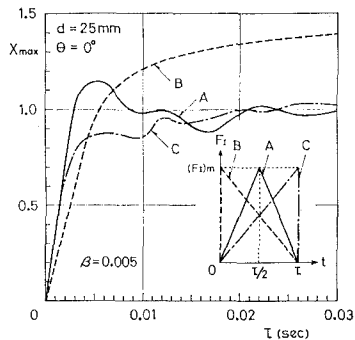
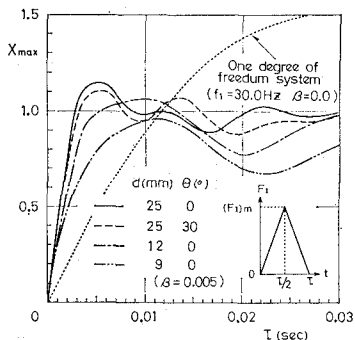


図-2 水中自由振動の計算値と実験値の比較



(a)



(b)

図-3 波力測定系の衝撃応答係数

荷重 F_I を与えて計算を行い、応答波形の最大値 $(F_{Ie})_m$ と入力波形の最大値 $(F_I)_m$ との比で表わされる衝撃応答係数 $X_{\max} = (F_{Ie})_m / (F_I)_m$ を求め、衝撃荷重の作用時間 τ との関係を示したものである。荷重は静水面上 5~15 cm の範囲に等分布として与えた。(a) は、アーム板厚 $d=25$ mm、傾斜角 $\theta=0^\circ$ の波力測定系に対称三角形パルス: A、前傾三角形パルス: B および後傾三角形パルス: C の衝撃荷重を入力した場合である。今回の実験における衝撃砕波力の作用時間は、円柱の直径と波速の関数より $\tau=0.01\sim0.02$ s と考えられることから、衝撃力のパルス型が異なっても $X_{\max}$ は 0.85~1.35 の範囲にあると推定される。(b) は、異なる振動特性を有する波力測定系に対称三角形パルス荷重を入力した場合である。傾斜角 θ によって円柱の長さが異なるが、 $\theta=0^\circ$ と 30° のときの結果を比較すると振動特性はほとんど変わらないことがわかる。また、アーム厚板 d が小さくなるにしたがって $X_{\max}$ は全体的にみて若干減少する傾向がある。

同図の点線は、 $d=25$ mm、 $\theta=0^\circ$ の波力測定系の水中での基本振動数 $f_1=30.0$ Hz を用いて、非減衰 1 自由度振動系と考えた場合の応答を求めたものであるが、有限要素法による多自由度振動系としての計算結果(実線)と大きく異なり、 τ に対する $X_{\max}$ の変化が著しい。今回の実験に使用した波力測定系は、振動の初期に高次の振動モードが顕著に現われ、 τ が 0.005 s 以上になると $X_{\max}$ は一定値に収束し始める特性を有することから、1 自由度振動系の波力測定系を使用した場合に比べて衝撃砕波力の最大値の推定が容易であるといえる。逆に、衝撃砕波力に対する構造物の応答予測の立場から考えた場合、構造物が多自由度振動系の特性を有するにもかかわらず、基本振動のみを考慮した 1 自由度振動系の衝撃応答計算により部材の応力・変位などを推定すると、大きな誤差を生じる可能性があることを示唆する結果といえる。

4. 実験結果

円柱と直角方向に働く全砕波力の最大値 F_m は、モリソン式の抗力および慣性力で表わされて比較的静的な変化をする波力 F_s と砕波の急な波面が円柱に衝突する瞬間に水粒子の運動量の一部が失われることによって生じる衝撃砕波力 F_I の最大値 $(F_I)_m$ との和として次式で示される。

$$F_m = F_s + (F_I)_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

このとき、波力測定系の応答波形の最大値(等価最大波力) F_{em} は、 F_I による動的応答効果を考慮して、

$$\begin{aligned} F_{em} &= F_s + (F_{Ie})_m \\ &= F_s + X_{\max} \cdot (F_I)_m \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

と表わされる。ここに、 $(F_{Ie})_m$ は F_I の作用によって応

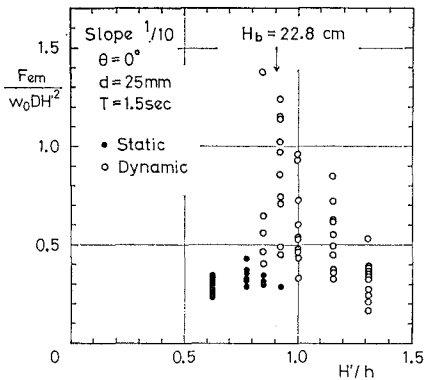


図-4 等価最大波力と仮想通過波高の関係

答波形に現われる急な立ち上がり部分の大きさである。

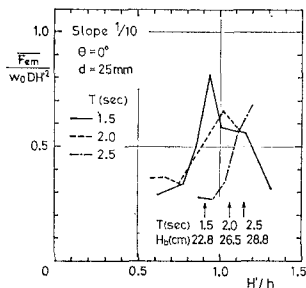
したがって、実験によって得られた F_{em} の傾向を調べ、3. で述べた波力測定系の応答特性を考慮すれば、工学的に最も重要である全砕波力の最大値 F_m の特性を推定することができる。

図-4 は、傾斜角 $\theta=0^\circ$ 、アーム板厚 $d=25\text{mm}$ 、周期 $T=1.5\text{s}$ の場合について等価最大波力の無次元量 F_{em}/w_0DH^2 と波高水深比 H'/h の関係を示したものである。ここに、 w_0 : 水の単位体積重量、 H' : 仮想通過波高(砕波以前の波は測定点、砕波後の波は砕波点における波高に相当する。)である。図中白丸は応答波形に衝撃砕波力による動的応答が現われているもの、黒丸はそうでないものを表す。また、合田による砕波指標⁹⁾から読み取った砕波波高 H_b を矢印で示した。波高が次第に増大して砕波波高に近づくとき円柱に衝撃砕波力が働くようになり、 F_{em} は急に大きくなると同時にばらつきが著しくなる。また、ピーク位置は砕波波高と一致しており、 F_{em} の最大値は約 $1.4w_0DH^2$ であるが、このうち $(F_{re})_m$ は約 $1.1w_0DH^2$ であった。したがって、衝撃応答係数 X_{max} が $0.85\sim 1.35$ であることを考慮すると(1)および(2)式より全砕波力の最大値 F_m は $1.1\sim 1.6w_0DH^2$ と推定される。また、合田らのモデル¹⁾に従って F_I を前傾三角形パルスと仮定した場合には X_{max}

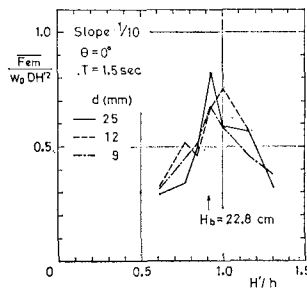
は約 1.3 となり、衝撃砕波力の最大値 $(F_I)_m$ は約 $0.85w_0DH^2$ で砕波巻き込み率は 0.39 と算定されるが、これは合田らの結果と一致している。

図-5 は、全砕波力の最大値 F_m におよぼす各実験パラメータの影響を調べるため、無次元等価最大波力の平均値 $\overline{F_{em}}/w_0DH^2$ の傾向を示したものである。(a) は、傾斜角 $\theta=0^\circ$ 、アーム板厚 $d=25\text{mm}$ の場合について周期 T の影響をみたものであるが、 T が大きくなるとともにピーク値が現われる波高 H' は増大し、砕波波高 H_b の位置とよく一致していることがわかる。(b) は、 $\theta=0^\circ$ 、 $T=1.5\text{s}$ でアーム板厚 d が異なる場合の比較であるが、 d が小さくなるとピーク値も若干低下している。これは図-3 (b) の波力測定系の衝撃応答特性の傾向と同じであり、振動計算モデルの妥当性を示す結果である。(c) は、 $d=25\text{mm}$ 、 $T=1.5\text{s}$ の場合について、円柱の傾斜角 θ の影響を調べたものである。 θ が正から負へ移るにしたがってピーク値は低下し、ピーク値が現われる波高 H' がやや増大する傾向が明瞭に示されている。これは砕波の波面と円柱とのなす角度が衝撃砕波力に大きく影響する結果といえる。すなわち、円柱が沖方向に傾斜している場合には、砕波する直前における直線的できり立った波面が円柱の傾斜と一致し、大きな衝撃力が働くのに対し、岸方向に傾斜している場合には、砕波直後の巻き込んだ波面のごく一部が円柱の傾斜と一致するにすぎず、そのうえ波面の乱れが著しいため衝撃力は低下すると考えられる。なお、 $T=2.0\text{s}$ の場合も同様な傾向が確認された。

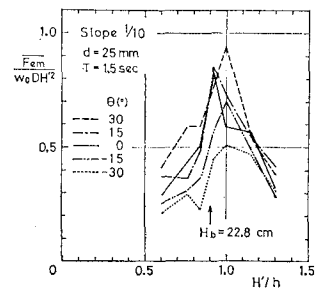
図-6 は、砕波波高を用いて無次元表示した等価最大波力の平均値 $\overline{F_{em}}/w_0DH_b^2$ について、図-5 と同様にして求めたピーク値と円柱の傾斜角 θ との関係を示したものである。図中には $d=25\text{mm}$ 、 $T=1.5$ および 2.0s の場合を示してあるが、 $T=2.5\text{s}$ の場合は造波能力の限界によりピーク値が得られなかった。同図より、 $\theta=\pm 15^\circ$ のときの等価最大波力は $\theta=0^\circ$ のそれとほとんど変わらないが、 $\theta=\pm 30^\circ$ になると円柱の傾斜の影響が顕著に現われるようになり、沖方向に 30° 傾斜した円柱



(a)



(b)



(c)

図-5 等価最大波力におよぼす各種パラメータの影響

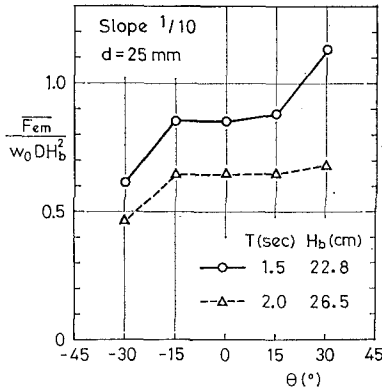


図-6 等価最大波力のピーク値と円柱の傾斜角の関係

に働く全砕波力は直円柱の場合に比べて約 1.3 倍増大し、逆に、岸方向に 30° 傾斜した円柱の場合は約 0.7 倍に減少する特性があることがわかる。

5. 従来の衝撃砕波力算定モデルにもとづく計算値と実験値の比較

樫木らは、水上飛行機の着水衝撃力の計算を参考にした合田らの衝撃砕波力理論⁹⁾を拡張し、直円柱に傾斜した直線波面が衝突する場合の計算式を示している⁹⁾。

いま、図-7 のように傾斜角 θ の円柱に高さ δ 、角度 α の直線波面をもつ砕波が波速 C で衝突する場合を考え、直線波面が衝突する長さ δ' 、円柱の法線と波面との角度 ϕ および円柱と直角方向の波速成分 C_n を θ , δ , α および C の関数で表わすと、樫木らの計算式を用いて衝撃砕波力 F_I を計算することが出来る。

図-8 は、高速度撮影による連続写真から波形をトレースしたうえで波面を点線で示す直線で近似し、衝撃砕波力の計算に必要なパラメータを読み取ったものである。

図-9 は、図-8 に示した各ケースについて、 F_I の算定値 (1 点鎖線) を波力測定系の振動計算モデルに入力して求めた応答波形 F_{Ie} (点線) と実験値 (実線) を

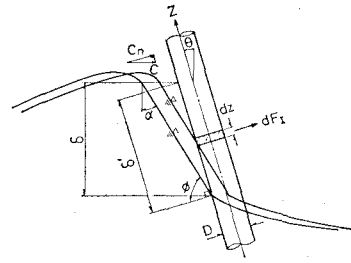


図-7 傾斜円柱に衝突する砕波のモデル

比較したものである。実験値には衝撃砕波力による急な立ち上がりと残留振動が現われているが、その振動数は波力測定系の 2 次の振動数 f_2 と一致しており、多自由度振動系に衝撃砕波力が働く場合には高次の振動モードが顕著に応答することがわかる。波面が直線によって比較的良好に近似できて波面と円柱の傾斜がほぼ等しい Case A および C の場合、 F_I の算定値は前傾三角形パルスに近く、応答波形の計算値は実験値と良く一致している。一方、波面の巻き込みが大きい Case B の場合は、直線によって波面を近似することが困難で、あえて図-8 (b) のように平均的な直線で表わすと F_I の算定値は作用時間が長い対称三角形パルスに近くなり、波力測定系の動的応答が小さく計算され、実験値と一致しない。応答波形の実験値は Case A および C と類似していることから、実際の F_I はピーク値に達するまでの立ち上がり時間が短い前傾三角形に近いパルスと推定される。したがって、衝撃砕波力は巻き込み部に平均的に分布して働いているのではなく、波面と円柱のなす角度が小さい巻き込みの中央部に集中して瞬間的に作用しているものと思われ、このような場合には本モデルを適用できないと考えられる。図-5 (c) の実験結果について考察したとおり、円柱が岸方向に傾斜した場合には砕波直後の巻き込んだ波による衝撃力が重要となるため、この結果は本モデルの実用上の問題点を示すものといえよう。

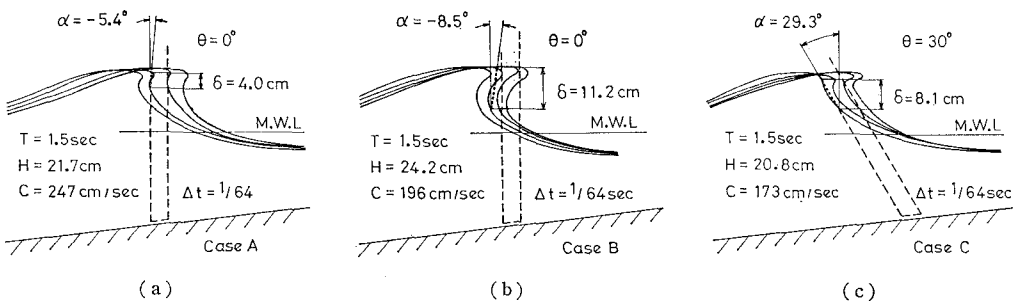
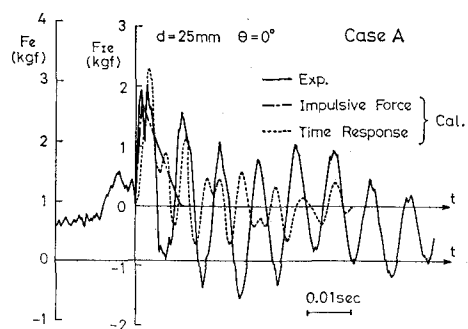
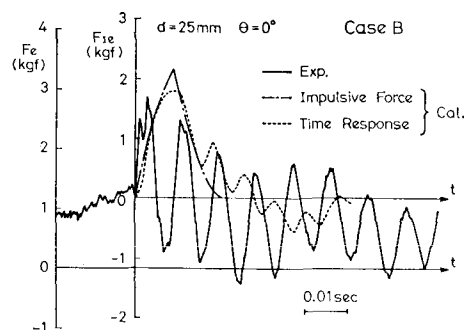


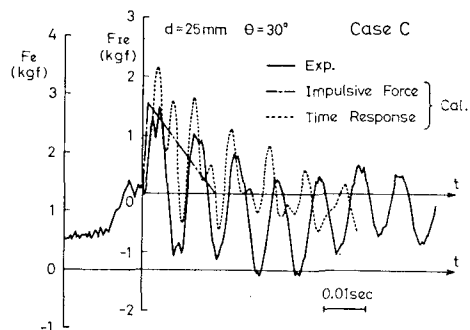
図-8 砕波の衝突状態と波面の直線近似



(a)



(b)



(c)

図-9 衝撃砕波力による応答波形の計算値と実験値の比較

6. あとがき

模型実験に使用した波力測定系について衝撃応答特性の解析を行い、多自由度振動系に衝撃砕波力が働く場合には高次の振動モードが顕著に応答し、1自由度振動系の応答とかなり異なることを明らかにした。衝撃砕波力の大きさは円柱の傾斜角と密接な関係を有し、沖方向に傾斜した円柱に働く全砕波力は直柱の場合に比べて大きくなるが、逆に、岸方向に傾斜した円柱では減少する実験結果が得られた。砕波の波面を直線で近似した衝撃砕波力算定モデルは、波面が直線によって良好に近似できる場合には妥当な算定値を与えるが、砕波が進行して巻き込みが大きくなった場合には波面を直線で表わすことが困難であり、平均的な直線で近似した場合の計算結果は実験結果と一致しないことが判明した。

今後は、波圧計を使用した実験によって円柱周囲の局所的な衝撃波圧特性を究明し、今回の実験結果と総合して厳密な衝撃砕波力算定モデルを考案するとともに、設計における取り扱い方の検討を行う所存である。

最後に、本研究を実施するにあたって、終始有益な御教示をいただいた港湾技術研究所の合田良実水工部長に深謝するとともに、実験施設の使用をはじめ細心の御協力を得た東亜建設工業株式会社の諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 合田良実・原中祐人・北畑正記：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, 1966.
- 2) 光易 恒・本多忠男：円柱に作用する砕波の波力，第20回海講論文集，pp. 43~47, 1973.
- 3) 樺木 亨・後野正雄：円柱に作用する砕波局部波力に関する実験的研究，第29回海講論文集，pp. 438~442, 1982.
- 4) 樺木 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部衝撃波力特性と全体波力について，第30回海講論文集，pp. 376~380, 1983.
- 5) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃波圧とその測定について，第30回海講論文集，pp. 317~321, 1983.
- 6) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 39~49, 1970.