

外洋シーバースのジャケットに作用する衝撃碎波力の評価

筒井勝治*・北野正夫**・八木典昭***
殿最浩司****・後野正雄*****

1. はじめに

近年、汽力発電所に代表される臨海での電源立地を考える場合、高波浪の来襲する外洋に面した大水深部を立地場所を選択する可能性が少なくない。一方、燃料輸送船の大型化に伴い、シーバース方式の採用によるコスト低減を図ることができる。ここではシーバース構造として、施工性、経済性に優れたジャケット式構造を選択したが、台風の来襲時には非常に高波浪となり、ジャケットの円柱部材には非常に短時間の間に通常のモリソン式で計算される波力の数倍にもおよぶ衝撃碎波力が働く危険性が考えられる。

円柱に働く衝撃碎波力の研究は、合田ら(1966)、榎木ら(1982, 1983)、谷本ら(1986)によって水理実験が行われており、その実験結果に基づいた算定式が提案されている。しかし、碎波現象は現地の波浪条件および地形による影響を受け、衝撃碎波力が作用する現象も大きく異なる。また、本計画では谷本らの実験で想定した条件に比べ大水深かつ円柱部材の径が細いこと、実験におけるスケール効果について議論したものもないことなどから、本研究では中型と大型の2次元造波水路を用いて水理実験を実施し、碎波の特性を把握するとともに、ジャケットに作用する衝撃碎波力を推定した。また、動的解析によりジャケットの応答特性を把握することにより、ジャケットの構造上の安全性を検討した。

2. 実験の概要

(1) 実験水路および海底地形

実験は、図-1に示す関西電力総合技術研究所の2次元造波水路(長さ50m×幅1.0m×高さ1.2m)と電力中央研究所の大型2次元造波水路(長さ205m×幅3.4m×高さ6.0m)を用いて行った。計画地点の地形を海底勾配1/50~1/100で再現した。水深25.9mの位置に直

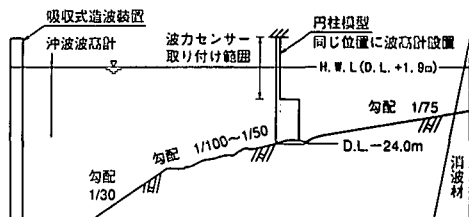


図-1 海底地形および円柱部材設置位置

径1mの円柱模型を設置した。模型縮尺は水槽の大きさおよび造波機の性能を勘案して、それぞれ、1/80と1/20とした。

(2) 実験方法および波力センサー

実験は、波高計測、高速ビデオカメラ(500コマ/1s)による撮影、波力センサーによる波力計測を行った。

衝撃碎波力の計測にあたっては、現象が円柱の半径を通過する短時間($\tau = 0.5\phi/2/\sqrt{g(h+\eta)} \approx 0.002$ s)内に終了することから、計測機器の固有振動数を $1/\tau$ 以上にする必要がある。そこで、本研究では谷本ら(1986)の実験を参考に、衝撃碎波力を精度よく計測できる高周波数の波力センサーを製作した。縮尺1/80の実験で用いた波力センサーの概要を図-2に示す。波力センサーは、厚さ0.75mm、外寸直径12.5mmの真鍮製のリングを、厚さ0.3mmの2枚の真鍮製の板はりで支柱に固定した構造となっている。はりの支柱に近い部分にひずみゲージを貼り付け、この部分に発生する曲げひずみを検出することによって、リングの外周辺に働くはりと直角方向の波力を計測することができる。波力センサーは非常に小型ではあるが、感度0.45gf(4.4×10^{-3} N/ μ)、最大120gf(1.18N)まで計測できることを確認した。波力センサーの固有振動数 f 、減衰定数はそれぞれ水中で3300Hz、0.046である。波力センサーの特性を縮尺1/20のものも併せて表-1に示す。衝撃碎波力が作用すると予想される波峰付近を中心に鉛直方向に12個配置し、実験では波力センサーの受感部以外の振動、特に支柱の振動を拾って共振現象を起こさないように上端部を固定するとともに、静水面より下後方に羽を取り付けて固定を強めた。また、防水性を確保するために波力センサーの周りには

* 正会員 工修 関西電力(株)土木建築室
** 工修 関西電力(株)土木建築室副調査役
*** 正会員 関西電力(株)総合技術研究所
**** 正会員 工修 (株)ニュージェック河川・海岸部
***** 正会員 工博 大阪工業大学土木工学科教授

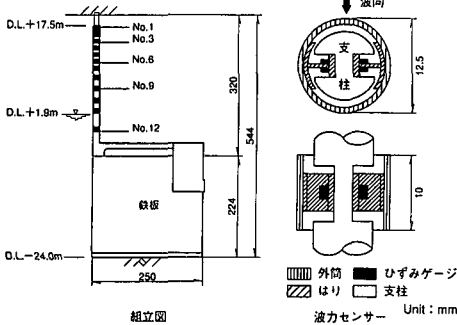


図-2 波力センサーの概要 (縮尺 1/80)

表-1 波力センサーの特性

模型縮尺	1/80	1/20
円柱径 ϕ	12.5 mm	50.00 mm
固有振動数	3300 Hz	3400 Hz
減衰定数	0.046	0.107
感度	0.45 gf/(0.0044 N/ μ)	43 gf/ μ (0.42 N/ μ)

厚さ 0.03 mm のゴムを巻いた。なお、この波力センサーを用いて計測する場合のサンプリング周波数は 10 kHz とした。

本計画地点の設計波は、 $H_{1/3}=11.3$ m, $T_{1/3}=15.5$ s(50 年確率波)で、 $H_{\max}$ に相当する規則波を用いて行うことを基本としたが、造波波高を微妙に変化させて円柱部材設置地点で最大の波力になる条件を探した。なお、周期 $T=9.0, 12.0$ s の波についても実験を行った。

3. 実験結果

(1) 砕波波高と砕波型式

周期ごとの造波波高と円柱部材設置地点での波高の関係を図-3 に示す。海底勾配 1/50~1/100, 沖波波形勾配 0.03~0.09 (周期 9~15.5 s) の条件では、崩れ波型砕波となることを確認した。

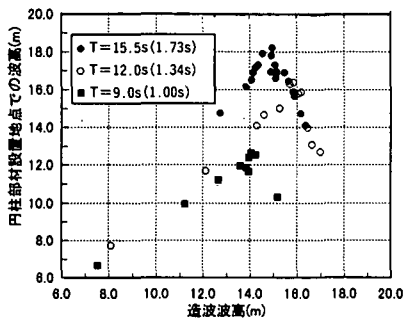


図-3 造波波高と円柱設置地点波高の関係

(2) 波力センサーによる波力計測結果

周期 15.5 s の規則波の波力計測記録例 (縮尺 1/80) を図-4(a) に示す。規則波による実験ではあるが、波の非線形性が強いこと、砕波位置および砕波した波が円柱に衝突する高さ、角度が微妙にばらつくことから、波高、衝撃砕波力ともにばらつく現象がみられる。

図-4(a) の矢印で示した衝撃砕波力を時間方向に引き延ばしたものを図-4(b) に示す。衝撃砕波力の作用時間は非常に短く(約 0.002 s), 時間的な変化が著しいことがわかる。実験で得られた波形は衝撃砕波力が作用して立ち上がる部分には振動が現れていないが、減衰する部分には波力センサーの固有振動と思われる 3300 Hz の振動が現れている。

図-4 の衝撃砕波力のうち最大のものについて、その鉛直方向の分布と谷本ら (1986) が提案したモデル (以下谷本式という) の分布とを比較したものを図-5 に示す。実験では、波頂付近にモリソン式で計算される波力の 3~6 倍の衝撃砕波力が計測された。また、その分布形は谷本式と概ね一致するが、衝撃砕波力の鉛直分布の最大値 (以下ピークという) は谷本式よりやや高い位置に現れ、そのピーク値も若干大きくなる。

次に、図-4(a) の No. 3 センサーの衝撃波形をカット

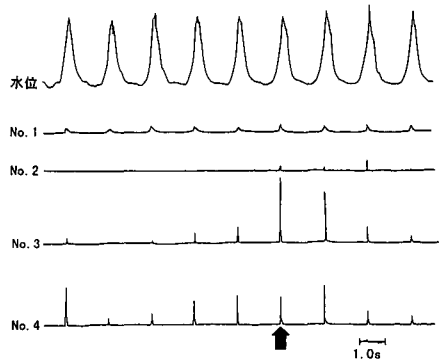


図-4(a) 規則波による衝撃砕波力の計測事例

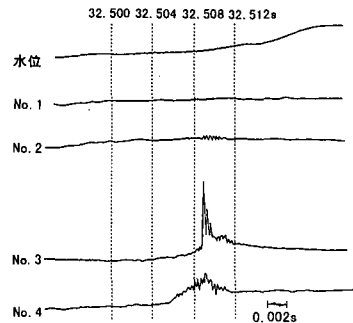


図-4(b) 衝撃砕波力の時間変化の例

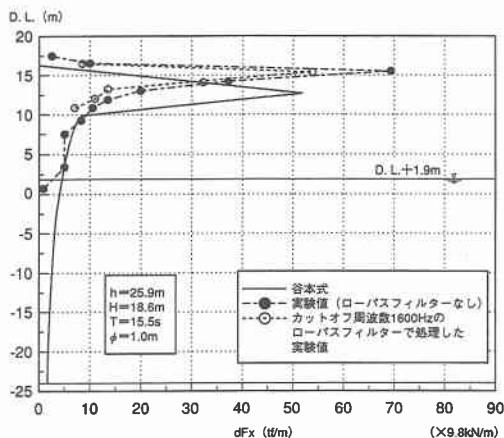


図-5 衝撃碎波力の鉛直分布の比較

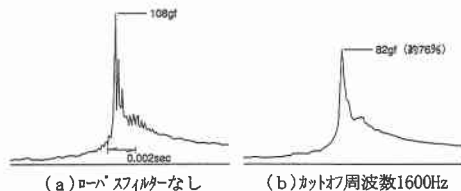


図-6 ローパスフィルターの効果 (No. 3 センサー)

オフ周波数を 1600 Hz とし、ローパスフィルターを通して出力したときの波形を図-6 に示す。衝撃碎波力の値は約 76% に減少し、波力センサーによる減衰振動がみられなくなる。また、このときの衝撃碎波力の鉛直方向の分布を図-5 に○印で示す。ピーク値と円柱全体に作用する波力の大きさ (以下全波力という) は谷本式とよい一致を示す。ここに、谷本ら (1983) は、衝撃力の作用時間が測定系の固有周期の 2 倍以上でかつ減衰定数が小さい (0.38 以下) 場合には、ローパスフィルターのカットオフ周波数を波力センサーの固有振動数の約 50% にすることで作用衝撃力を精度よく推定できることを示している。以上から、これ以降波力センサーにより計測した値をカットオフ周波数 1600 Hz でローパスフィルターをかけて処理することとした。

(3) 衝撃碎波力の時間変化

図-4(b) の波が円柱部材に衝突する様子を高速ビデオカメラで撮影したものを写真-1 に示す。(a), (b) では波峰の前面と円柱とのなす角は比較的大きく、衝撃的な波力は発生しない。しかし、(c) と (d) の間で碎波したジェットの部分と円柱に衝突する際に衝撃的な波力が作用する。したがって、衝撃碎波力のピーク値が波頂付近に現れることが推察できる。

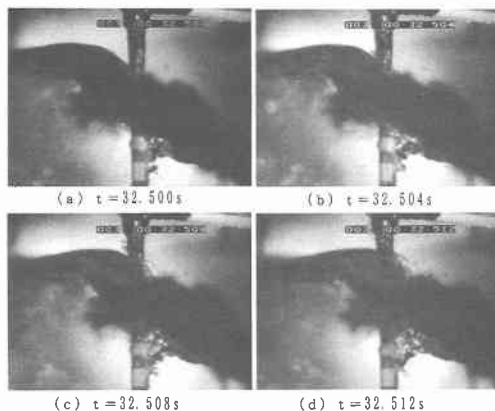


写真-1 波が円柱に衝突する様子

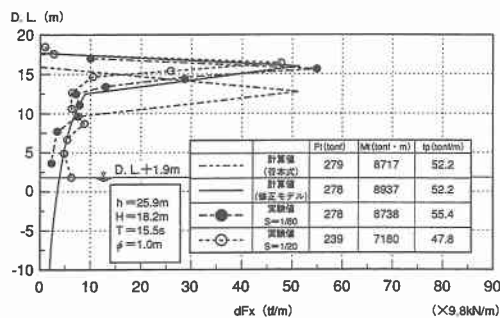


図-7 衝撃碎波力の鉛直分布の比較

(4) スケール効果の確認

縮尺 1/80 と 1/20 の実験による衝撃碎波力の鉛直分布を比較したものを図-7 に示す。なお、図中には谷本式および後述する修正モデルも合わせて図示している。これによると、衝撃碎波力のピークの作用位置はほぼ一致するが、その作用幅は縮尺 1/20 の実験結果の方がやや小さくなり、全波力も若干小さくなる傾向を示している。しかしながら、このような衝撃碎波力の変動性を勘案すると、両者に顕著なスケール効果はみられないと考えられる。したがって、設計波力の検討は縮尺 1/80 の実験結果に基づいて進めた。

4. 衝撃碎波力のモデル化

実験は、周期 15.5 s の波を造波波高を微妙に変えて 3 種類×7 波=21 波与えた。実験から得られた 1 波ごとの衝撃碎波力のピーク値、その作用位置、全波力と波高との関係を図-8 に示す。図中実線は、21 波の平均波高 18.2 m のときの谷本式の値を示す。実験のピーク値、全波力にはかなりのばらつきがみられるが、それぞれの最大値は谷本式とほぼ同程度になった。しかし、実験のピー

クの作用位置はばらつき、谷本式よりも上方に作用する
場合が多くみられた。衝撃碎波力の鉛直方向の分布形は、
概ね図-9に示す3種類に分類される。(I)および(II)

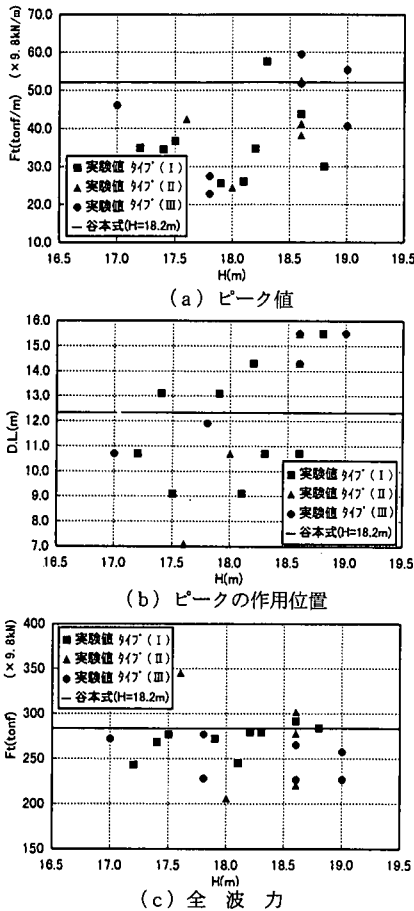


図-8 衝撃碎波力の1波ごとの計測結果

の場合、衝撃碎波力は0.03~0.05 s(模型値)の時間差を
もって円柱の下から上に作用する。(III)の場合は、衝撃
碎波力は鉛直方向にほぼ同時に作用する。したがって、
もっとも危険となる分布形はタイプ(III)である。

以上より、衝撃碎波力のモデル化にあたっては、谷本
式を基本としピークの作用位置および作用幅を修正し
て、図-10のような修正モデルを提案した。

5. 水平材の実験結果

シーパースのジャケットには、中間材として水平材も
用いられることから、鉛直材と同様に波力センサーを用
いて波力計測を行った。

水平材による実験結果を図-11に示す。実線は鉛直材
に作用する衝撃碎波力の鉛直分布モデル(修正モデル)
を示す。鉛直材と同様に波頂付近に比較的大きな衝撃碎
波力が計測され、その最大値は鉛直材のピーク値の約
1.5倍にも達する。波のジェットが衝突する角度が鉛直
材と水平材で微妙に違うことが原因として考えられる。
したがって、設計では静水面上の衝撃碎波力の作用する
位置には水平材を極力配置しないこととした。

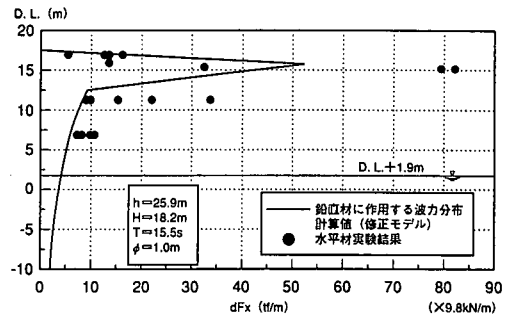


図-11 水平材に作用する衝撃碎波力の鉛直分布

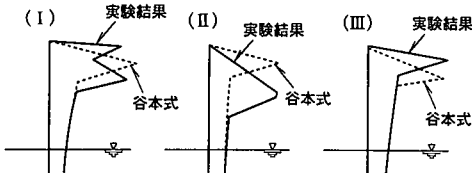


図-9 衝撃碎波力の鉛直方向の分布形状

6. ジャケットの応答特性

3次元動的有限要素法を用いてワーキングプラットフォーム(以下WPという)の動的応答解析を行った。衝
撃碎波力の分布形は4.の修正モデルとし、作用時間 τ は
実験結果から0.018 sとした。パルスは、谷本ら(1983)
による衝撃応答波形からの外力推定法を参考にして、実
験で計測された応答波形から二等辺三角形に近似して与
えた。また、衝撃碎波力を、波の位相差を考慮して各部
材に作用させた。解析モデルを図-12に示す。なお、WP
の法線方向の固有周期 T_N は0.99 sである。

(A) 部材の曲げモーメントの最大値の鉛直分布を
図-13に示す。図中には静的解析の結果も合わせて示
す。上端を除いて静的解析の約1/3以下になる。上端は、
変位拘束が大きく、部材の応答が衝撃碎波力の作用に追

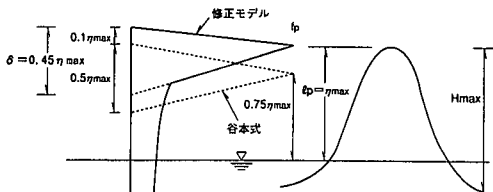


図-10 衝撃碎波力の修正モデル

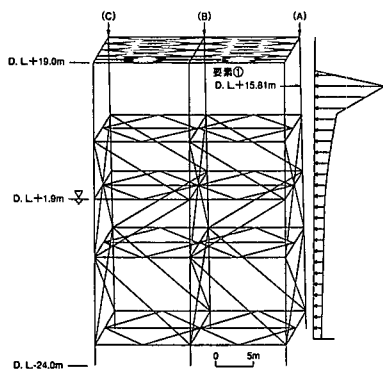


図-12 解析モデル

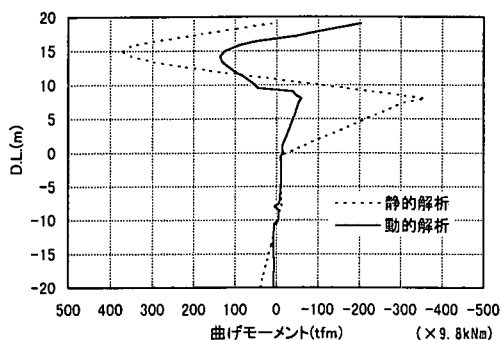


図-13 曲げモーメントの鉛直分布 (A部材)

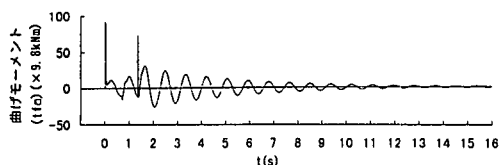


図-14 曲げモーメントの時間変化 (A部材要素①)

随できないため、静的解析に比べて若干大きくなるものと考えられる。また、上端における WP の水平変位量は静的解析に比べて約 1/5 の 1 cm 以下である。

次に、(A) 部材の要素①の曲げモーメントの時刻歴を図-14 に示す。波形に現れたスパイクは、0.67 s の時間差で隣り合う部材に作用させた衝撃砕波力の応答である。衝撃砕波力によって発生する振動は、来襲波の 1 周期 (15.5 s) 以内にはほぼゼロに減衰する。

以上より、衝撃砕波力を静的に載荷して設計する場合

は、上端部を除いて過剰な設計になることがわかる。

7. あとがき

外洋シーパースのジャケットに作用する衝撃砕波力を水理実験により、波力センサーを用いて精度よく計測することができた。次に、実験で得られた修正モデルの波力を与えて動的応答解析により、ジャケット (WP) の応答特性を把握した。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 本計画地点における砕波の型式は崩れ波型砕波であり、衝撃砕波力のピーク値、全波力は谷本式により得られる値とほぼ同程度であることがわかった。

(2) 模型縮尺 1/80 と 1/20 の実験結果を比較した結果、衝撃砕波力の変動性を勘案すると両者に顕著なスケール効果はみられなかった。

(3) 衝撃砕波力のピークの作用位置は谷本式よりもやや上方にあり、衝撃砕波力のモデル化にあたっては、谷本式の分布形をやや上方に修正した分布形を採用した。

(4) WP の動的応答は、上端を除いて静的解析の約 1/3 以下になる。また、上端での WP の水平変位量は約 1/5 の 1 cm 以下である。

以上より、外洋シーパースの衝撃砕波力に対する構造面での安全性を確認することができた。

最後に、本研究を進めるにあたり運輸省港湾技術研究所高橋重雄室長ならびに(財)電力中央研究所水理部に指導・助言を頂いたこと、(株)日本工業試験所所員には波力センサーの製作および衝撃砕波力の計測に尽力して頂いたことを付記し、謝意を表する次第である。

参考文献

- 合田良実・原田祐人・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.
- 樫木 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.
- 樫木 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.
- 谷本勝利・高橋重雄・吉本昭俊 (1983): 衝撃応答波形からの外力推定法について, 港研資料, No. 74, pp. 1-24.
- 谷本勝利・高橋重雄・金子忠夫・塩田啓介・小蔵敏一郎 (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.