

ブシネスク方程式による港内長周期水位変動の数値計算

金山 進*・田口 智*・清水 琢三*
長 船 徹**・植木 一浩***・中原 和彦****

1. ま え が き

港内および周辺での長周期水位変動および平均水位上昇については、陸上施設や係留船舶の被災のみならず、構造物への外力増大をもたらす可能性などからもこれを把握することの重要性が認識されて久しいが、これらの発生機構には、港内副振動以外にも波群拘束波の励起、砕波点の変動による強制振動的な効果など、波の非線形性に起因する部分が大きいため、現在のところ通常波浪成分のように実用的な数値シミュレーション方法は確立されていない。金山ら(1994)は砕波を考慮したブシネスク方程式により、港がほぼ完全に砕波帯に包含された状態となる高波浪時の漁港の水理実験結果を再現しているが、港湾の規模が比較的大きい条件での適用については検討の余地が残されている。

また、入射波浪中の長周期波の与え方については、通常波浪成分の時系列から set-down 波として算定する方法があるが、条件によっては過大評価となることが知られている。

本研究では、東京電力㈱福島第二原子力発電所専用港湾における現地調査および水理実験の結果を基に、港内および周辺海域における長周期水位変動の数値計算法を検討した。

入力条件として要求される波群拘束波の評価方法を現地調査に基づいて検討し、計算領域内での波浪変形評価精度については現地の特性を反映させた水理実験結果の再現により検討した。波浪発生源から沖側境界に至るまでの長い伝播距離の間に形成される波群拘束波については現地での実測結果より情報を抽出するのが適切であり、一方、計算領域内での精度検証は、波浪の非線形性以外の要因による長周期波の影響が少ない実験水槽内での現象を対象に行うのが適切と判断したからである。水槽の固有振動という実験特有の現象も懸念されるが、数値計算の精度検証という観点では、境界条件を実験水槽と同じにすることでこの問題は解消される。

2. 現地調査, 水理実験および数値計算の概要

(1) 現地調査の概要

現地波浪データは、東京電力(株)福島第二原子力発電所専用港湾および周辺海域で平成6年2月～3月(冬期調査)および9月～10月(夏期調査)の2期間にわたって実施された現地調査において取得されたものであり、自記記録式の水圧センサーによってサンプリング間隔1秒、約1ヶ月間の連続時系列として取得された。代表測点を図-1に●で示す。

調査期間中の有義波高4m以上の高波浪ピークは平成6年2月21日22:00($H_{1/3}=4.03$ m, $T_{1/3}=13.5$ s:冬期)および平成6年9月20日0:00($H_{1/3}=5.15$ m, $T_{1/3}=13.8$ s:夏期)に観測された。

(2) 水理実験の概要

水理実験は図-1の範囲を対象とし、スネーク式造波装置付きの平面水槽を用いて行った。模型縮尺は1/150とし、現地を平行等深線海岸にモデル化した海底地形を対象とした。図中、実線の等深線が実際の海底地形、破線が実験地形を示す。

実験波は単一方向不規則波を基本とし、通常波浪成分(周期30秒以下)の周波数スペクトルをJONSWAP型で与え、係数 γ は測点P-0における現地データに基づいて設定した。長周期成分(周期30秒以上)については、通常波浪成分の set-down 波に現地データに基づく補正係数を乗じたものを目標に制御した。有義波高は2, 3, 4, 5 m(有義波周期はそれぞれ9, 10, 11, 13 s)の4種類とした。

現地では冷却水の取水による流れが存在するが、実験では取水の無い状態を対象にしたケースも実施した。

容量式波高計による計測はサンプリング間隔0.05秒(現地換算で0.612秒)で行い、現地調査における波浪測点に加えて図中○の代表測点を設定した。

(3) 数値計算の概要

数値計算には、非線形干渉による波群拘束波の発達、砕波位置の変動による強制振動的なサーフビートの励起、港内副振動による固有周波数成分の選択的な増幅といった機構の全てを評価する必要から砕波モデルを組み

* 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所
** 正会員 東電設計(株) 原子力土木部
*** 正会員 工修 東電設計(株) 原子力土木部
**** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力建設部

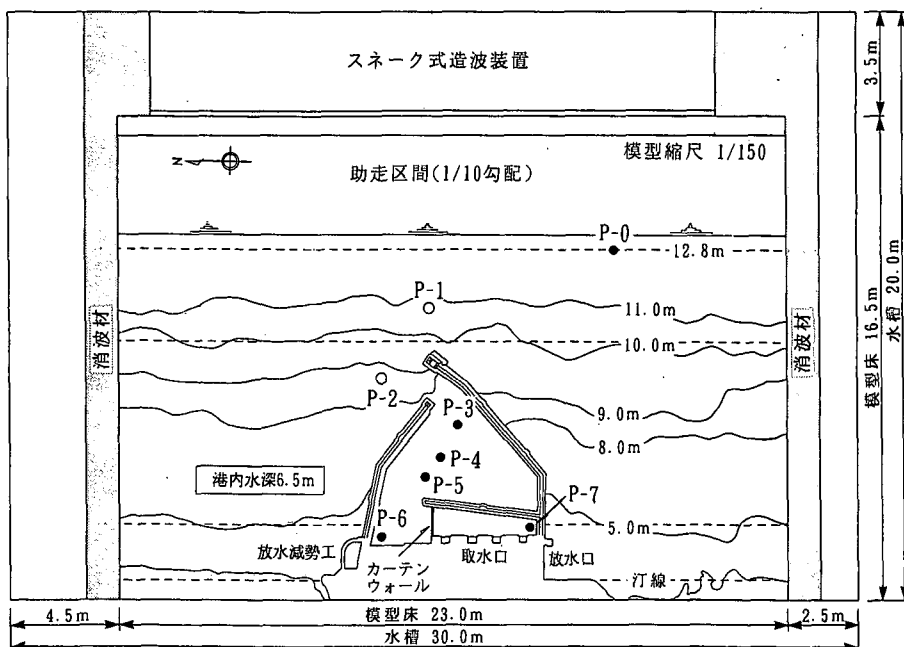


図-1 現地調査、水理実験の代表測点

込んだ平面2次元のブシネスク方程式を用いた。また、非線形項の効果について比較検討するため、線形化されたブシネスク方程式による計算も併せて実施した。計算手法は基本的には金山ら(1994)と同様であるが、港内波浪場の精度を重視し、防波堤を渦動粘性項タイプのスポンジレイヤーとすることで傾斜堤による波浪エネルギーの消散効果を表現した。係数については港内における波高比分布の再現性が得られるように調整した。堤体法尻までの最短距離(m)に24.0を乗じた値をその格子点における渦動粘性係数(m^2/s)とし、堤体の中心線は閉境界とした。

12.8mの等深線から岸側を対象とし、格子幅は岸沖方向(163格子)、沿岸方向(300格子)ともに10mとした。時間間隔 Δt は0.2sとし、反射波成分が線形長波の波速で沖へ透過する境界条件の下で単一方向不規則波を入力した。

3. 入射波浪に含まれる長周期波の評価

長周期波を含む波浪変形計算を行う場合、入射波浪中に波群拘束波として存在する長周期波は沖側境界より通常波浪成分とともに入力しなければならない。したがって、実測された波浪時系列を入力する場合以外は、所定の諸元の通常波浪成分時系列を作成した後にこれに対応する長周期波時系列を加えて入力波時系列を作成する方法が一般的と考えられる。

図-2は有義波高4.0mの高波浪時(平成6年2月21

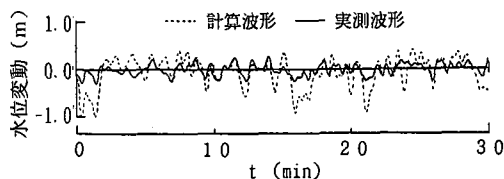


図-2 長周期成分と set-down 波の時系列

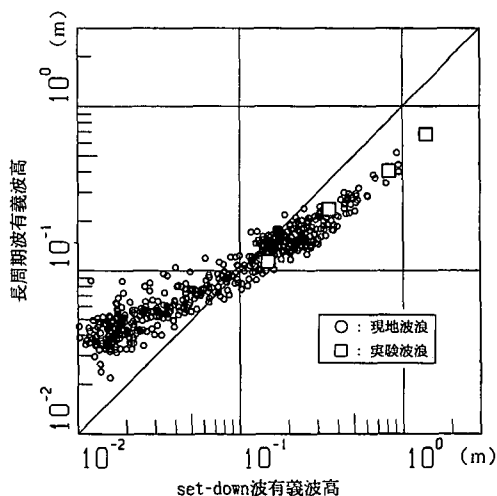


図-3 長周期成分と set-down 波の有義波高

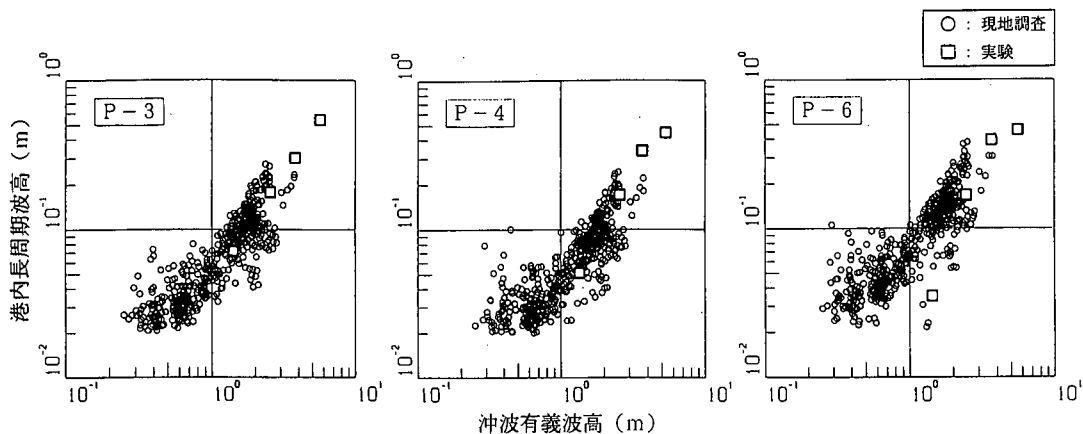


図-4 代表地点の長周期成分と沖波有義波高

日 22:00) の現地沖波時系列 (図-1 の P-0: 水深 12.8 m) に周期 30 秒のローパスフィルターを施して抽出した長周期成分 (実線) と set-down 波 (破線) を比較したものである。set-down 波は Sand (1982) の方法で単一方向波を仮定して計算した。両者の時系列的な対応、すなわち位相の整合性は良好であるが、set-down 波のほうが振幅が大きいという傾向が認められる。図-3 は実測長周期成分の有義波高と set-down 波の有義波高を比較したものであるが、過大評価を示す定量的な関係はかなり明確な相関を示す。したがって、沖波に含まれる長周期波形を評価するためには図-3 の関係に基づいて搬送波の set-down 波形の振幅を低減する必要がある。

こういった修正の必要性については、合田ら (1982) が指摘しており、この原因として搬送波の波形の非対称性を考慮していないことを挙げている。今回の場合、多方向不規則波である現地波浪に対して単一方向波を仮定したことも原因の一つと考えられる。また、一方では、松良ら (1994) のようにこういった修正が不要であった例も報告されており、図-3 の関係は現地の波浪特性によって変化するものと考えられる。

水理実験の入射波浪には上記のような現地沖波の特性を反映させる必要があるが、今回の実験においては図-3 に□で示すように set-down 波に対する振幅低減率について現地と同一の関係を与えることができている。

4. 浅海域および港内における長周期波の評価

(1) 現地と水理実験結果の整合性

数値計算の精度検証は実験結果との比較によって行うが、これに先立ち現地と実験結果の整合性を確認する必要がある。図-4 は代表測点における長周期成分有義波高を入射波浪有義波高に対して整理し、現地と実験と比較したものである。入射波高 2 m のケースでは港内奥の

測点において図中に□で示された実験結果が現地データの傾向をかなり下回っているが、これを除けば概ね同一の傾向にあり、水理実験が現地の長周期波特性を再現しているといえる。

(2) 水理実験結果による数値計算の検証

長周期波の励起が最も顕著となる入射波高 5 m の場合について数値計算と水理実験の比較を行った。波浪の効果のみを評価する目的で取水を行わないケースを対象とした。

a) 波浪時系列

図-5 は測点 P-1 に第 1 波目が到達した時点から 5 分間の波形を代表地点について示したものであり、太線が計算結果 (ブシネスク)、細線が実験結果を表す。測点 P-2 の第 2 波、第 3 波など波形の先鋭化が十分に表現されていない部分が一部認められるが、概ねの形状は良好に再現されている。また、港内 (測点 P-3 以降) へ到達後、通常波浪成分の比率が次第に低下し、測点 P-5、P-6 では殆ど長周期成分のみが残るといった様子も良好に再現されている。

b) 長周期波時系列

造波開始から 20 分 (造波板と汀線の間を線形長波の波速で約 2 往復できる時間) 経過後の 15 分間を対象に周期 30 秒のローパスフィルターを施して抽出した長周期波時系列を図-6 に示す。

港外の測点 P-1、P-2 に注目すると、ブシネスク方程式の計算結果は周期 1 分弱の成分の励起に特徴づけられ、特に水位上昇時に実験結果との良好な整合を示している。線形方程式のものにはこういった傾向がそれほど顕著に現れておらず、これは非線形の効果に起因するものと考えられる。

港内では線形と非線形の計算結果が時系列的に類似していることから港湾副振動が主体と考えられるが、平均

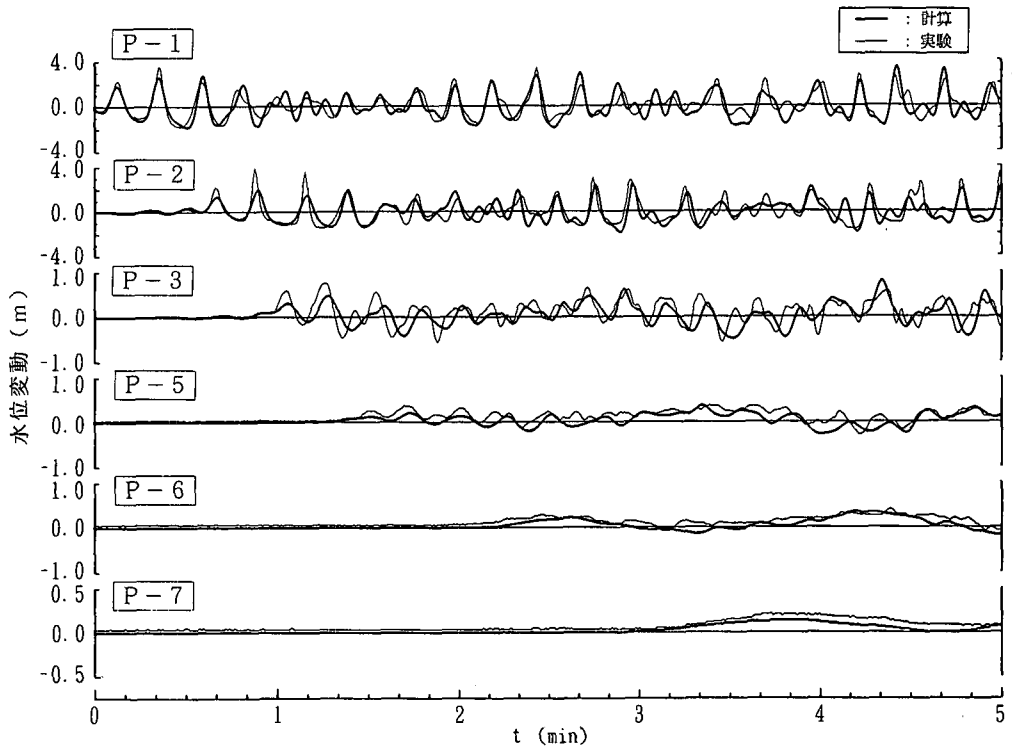


図-5 波浪時系列の再現結果

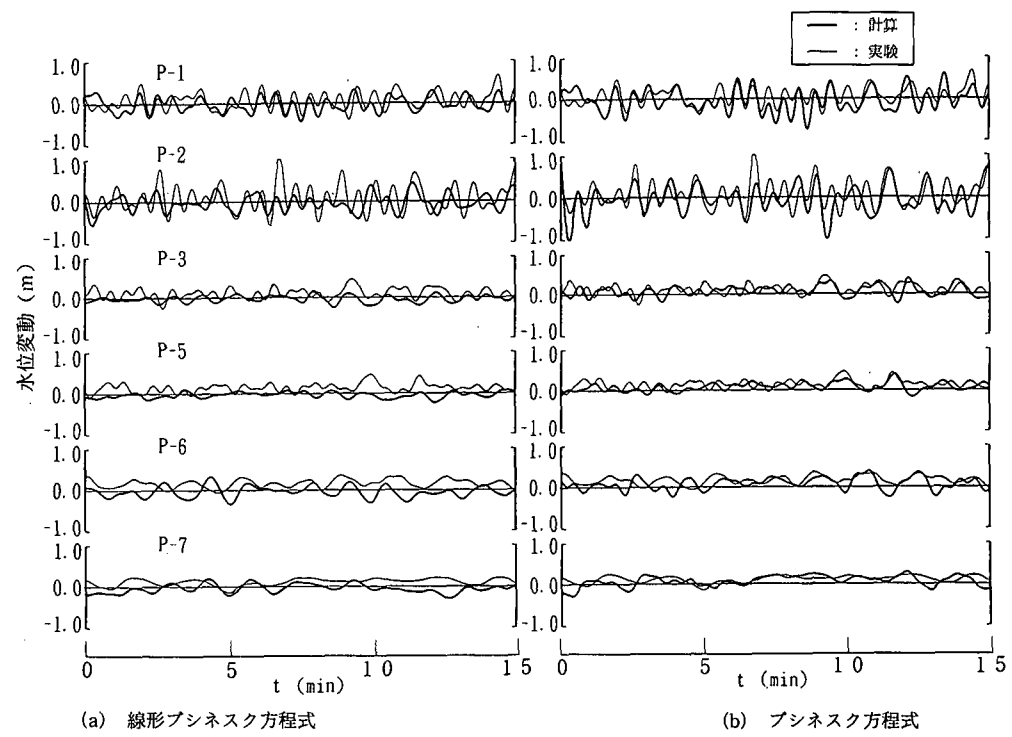


図-6 長周期波時系列の再現結果

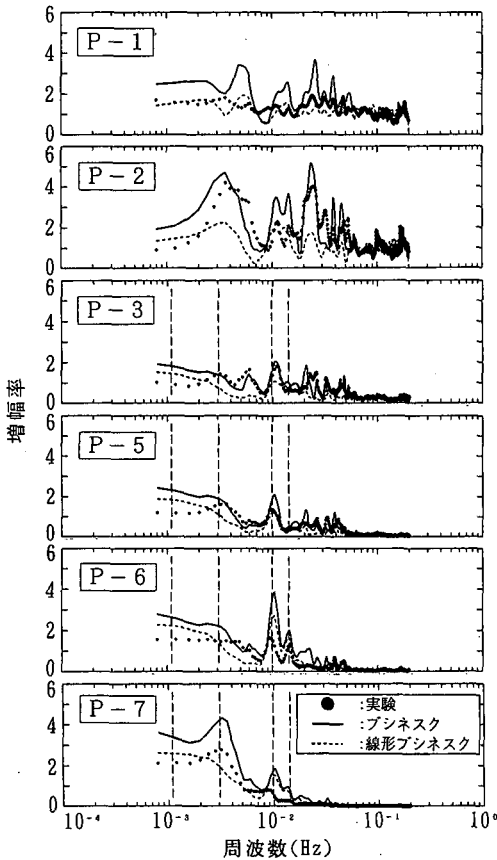


図-7 入射波浪に対する周波数応答

水位上昇が表現できている非線形の結果のほうが実験との整合性が良好である。

c) 周波数応答

図-7 は代表点における波浪時系列と入射波浪時系列の周波数応答を示したものであり、港内の測点については Lee (1971) の方法で求めた共振周波数を併せて示してある。

測点 P-1 においては実験結果および線形の計算結果が全ての周波数域でほぼ 1 の増幅率となっているのに対して非線形の計算ではいくつかの応答ピークが現れてい

る。このピークは測点 P-2 において実験結果にも認められるようになり、非線形の計算結果とかなり良好な整合を示す。測点 P-1 において非線形計算による長周期波の励起が過大評価となっていることについては検討の必要があるが、測点 P-2 における長周期波の発達は非線性を考慮しなければ表現できない現象であることがわかる。

港内代表測点のうち港内奥の隅角部にあたる測点 P-6, P-7 では線形、非線形とも計算値が過大評価となっているが、比較的港口に近い P-3 においては非線形計算と実験の整合性は良好である。

以上の結果より、港口周辺から港内にかけての長周期波を全般的に評価するためには非線形項の考慮が不可欠であることが確認された。

5. あとがき

碎波モデルを組み込んだブシネスク方程式による長周期波の数値計算モデルにスポンジレイヤーで構造物反射率を表現する方法を導入し、傾斜堤で形成された港湾の模型実験結果によりその適用性を検証した。港外および港内での長周期波の全般的な挙動を波浪成分とともに概ね良好な精度で評価することが可能となり、モデルの適用性を向上することができた。今後は、スポンジレイヤー粘性係数の合理的な評価法の確立、多方向不規則波への適用などの課題に取り組み、本モデルの実用化を図ることが急務である。

参考文献

- 金山 進・清水琢三・磯部雅彦 (1994): ブシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面二次元計算, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 61-65.
- 合田良実・諫山太郎・佐藤慎司 (1990): 碎波帯内の長周期波の発達機構に関する実験と現地観測, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 96-100.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と般体動揺に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 71-75.
- Lee, J.J. (1971): Wave induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, J. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 375-394.
- Sand, S.E. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 195-208.