

高波浪継続時の波高の出現特性

日本建設コンサルタント(株) 萩 義紀

1. はじめに

数時間から数十時間にわたる高波浪状態の継続による海岸構造物への被害を防ぐためには、高波浪期間での波高の統計学的特性を知り、それに基づく耐波設計が必要になる。波高の確率分布は定常性を前提に Rayleigh 分布で表されるが、実際の波浪場は非定常であり、ある程度以上の期間における波高の出現頻度がこの分布に従う保証はない。非定常性を前提に波高の確率分布を導くことは困難であるため、本研究ではまず高波浪期間の連続観測データを解析し、その波高の出現特性を検討する。さらに、連続観測データを補うことを目的に、線形および非線形不規則波の数値シミュレーションデータにより波高の出現特性を推定することの可能性を検討する。

2. 波浪の連続観測データの基礎的特性

本研究では山形県由良港の北西沖で連続観測された7ケース(D70831, D71217, D81214, D71124, D80109, D80202, D00125)の水位変動データを用いる。基礎的な解析として、まず観測データを20分間の区間に分割し、区間ごとに平均水位を補正した後、ゼロダウンクロス法で解析を行う。この結果、D70831, D71217, D81214では有義波高の変化が大きいのに対し、他の4ケースではその変化は小さいことが示された。また連続観測データのスペクトルと、波浪の標準的なスペクトルである JONSWAP スペクトル, Wallops スペクトルとの比較を行い、前者の方が観測データとの適合度がよいことが確認された。

3. 波高の出現特性の検討

連続観測データの解析と併せて、成分波の線形重ね合わせによる水位変動の数値シミュレーションを行い、そのデータも解析する。数値シミュレーションは、1時間毎の有義波諸元が得られている場合を想定し、これをスプライン補間して求めた20分毎の有義波諸元をもとに計算する。また、シミュレーションにはスペクトルも必要である。上述のように、連続観測データに対しては JONSWAP スペクトルの適合性を確認しているが、さらにその形状パラメータの値を決めなければならない。そのため、それぞれの連続観測データで有義波高が最大となるあたりのスペクトルと、 $\gamma = 2.0$ と 3.3 の JONSWAP ス

ペクトルとの適合性を比較した。しかし、どちらがより適合しているかが明確ではなかったため、 $\gamma = 2.0$ と 3.3 の両方を用いる。

この数値シミュレーションデータによる波高の出現特性の推定が可能であるかを検討するために、連続観測データによる波高の出現特性との比較を行う必要がある。そのための解析対象となる高波浪期間は以下のように設定する。有義波高の変化が大きい3ケースでは、 $0.8 \times (H_{1/3})_{\max}$ を下限の目安として基準値を決め、有義波高がそれ以上となっている期間を高波浪期間とする。他の4ケースでは、変化が小さく基準値の設定が困難であるため、ほぼ定常と見なせる期間を高波浪期間とする。この期間において水位変動データをゼロダウンクロス法で解析し、各種代表波の波高および波高の相対度数を求める。さらに、累積相対度数に対して Weibull 分布の当てはめを行う。その結果、連続観測データとシミュレーションデータに対する Weibull 分布の形状母数とともに 2.0 以上となり、また両者は近い値となることが確認された。図-1, 2に D70831(基準値 5.5m) における波高の超過確率を示す。図中の \circ は連続観測データ、 \square はシミュレーションデータ、実線はシミュレーションデータに当てはめた Weibull 分布、破線は Rayleigh 分布である。 γ の値に関係なく連続観測データとシミュレーションデータの超過確率はよく合っており、波高の出現特性をほぼ再現しているといえる。

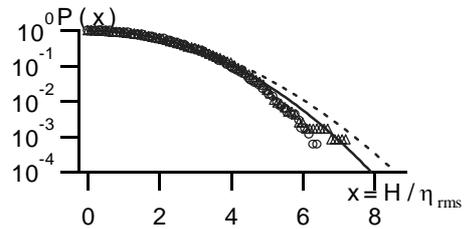


図 1 超過確率 D70831($\gamma=2.0, 5.5\text{m}$)

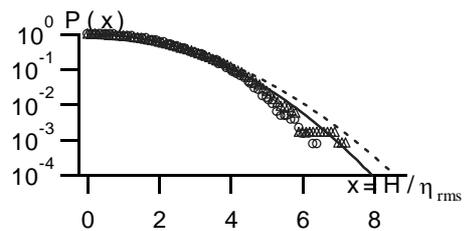


図 2 超過確率 D70831($\gamma=3.3, 5.5\text{m}$)

4. 波浪観測点のデータによる波高の出現特性の推定

3.に示したシミュレーション手法を用い、通常の波浪観測データ（有義波諸元）をもとに、高波浪期間における波高の出現特性の推定を行う。対象とするのは、気象庁による波浪観測点のうち、日本海側の4地点（松前、温海、経ヶ岬、鹿島）における観測データである。各観測点において、大きな有義波高が観測されたときを対象として、3.で述べた数値シミュレーションとデータ解析を行う。結果の一例として、図-3、4に松前の基準値6.5mにおける波高の超過確率を示す。図中の実線が当てはめたWeibull分布を表すが、シミュレーションデータ（図中の○）との対応はよい。また、Weibull分布の形状母数は2.0に近い値となるケースが多くなった。さらに、高波高の領域でWeibull分布とRayleigh分布の両方を上回る出現確率の波が見られるケースがある。しかし、観測データの $(H_{1/3})_{\max}$ を基準とすると、その2倍以上の波は存在しておらず、従来の設計波基準の範囲内にある。

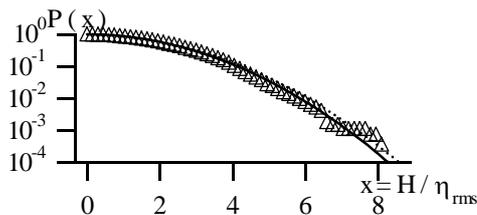


図 3 超過確率 松前(γ=2.0,6.5m)

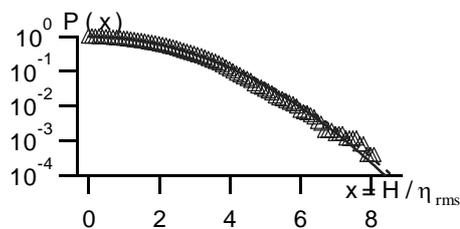


図 4 超過確率 松前(γ=3.3,6.5m)

5. 非線形干渉を考慮した不規則波の数値シミュレーションと波高の出現特性

3, 4では線形不規則波による検討を行ったが、実際の波浪では成分波間の非線形干渉が生じていると考えられる。本研究で対象としている高波浪の場合には、その影響を考慮する必要がある。そこで Dommermuth and Yue (1987) の手法により非線形干渉を考慮した不規則波の数値シミュレーションを行い、そのデータに基づいて波高の出現特性を検討する。ここで用いる基礎方程式は次式のように与えられる

$$\eta_t = -\phi_x^s \cdot \eta_x + \{1 + (\eta_x)^2\} \phi_z \quad (1)$$

$$\phi_t^s = -\eta - \frac{1}{2} (\phi_x^s)^2 + \frac{1}{2} \{1 + (\eta_x)^2\} \phi_z^2 \quad (2)$$

ここに、 η は水面波形、 ϕ^s は水面での速度ポテンシャルである。また、 ϕ_z はN個のフーリエモードからなる波動場においてM次まで非線形干渉を考慮した場合、

$$\phi_z = \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{M-m} \frac{\eta^k}{k!} \sum_{n=1}^N \phi_n^{(m)}(t) \frac{\partial^{k+1}}{\partial z^{k+1}} \psi_n(x, 0) \quad (3)$$

$$\psi_n(x, z) = \frac{\cosh\{k_n(z+h)\}}{\cosh k_n h} \exp(ik_n x) \quad (4)$$

となる。ここで、 $\phi_n^{(m)}$ は式(5),(6)を逐次解けばよい。

$$\sum_{n=1}^N \phi_n^{(1)}(t) \psi_n(x, 0) = \phi^s \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N \phi_n^{(m)}(t) \psi_n(x, 0) = - \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\eta^k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial z^k} \left[\sum_{n=1}^N \phi_n^{(m-n)}(t) \psi_n(x, 0) \right] \quad (m=2, 3, \dots, M) \quad (6)$$

η と ϕ^s の初期値は線形近似のもとで、JONSWAPスペクトルと有義波諸元を用いて与える。 ϕ_z の計算は実空間上でaliasing誤差を除去しつつ行い、時間発展は4次のRunge-Kutta法で計算する。解析対象とするデータは有義波高の変化が大きい3ケースであり、解析区間は3.と同様のものである。図-5に、D70831の基準値5.5mにおける波高の超過確率を示す。非線形不規則波のシミュレーションデータによる波高の超過確率（図中の○）は、連続観測データ（△）に比べて $x > 6.0$ の領域で過大な出現確率を与えている。また、 $x > 7.0$ の領域でWeibull分布、Rayleigh分布の両方を上回る出現確率の波が存在するケースがある。しかし、4.の結果と同様に、 $(H_{1/3})_{\max}$ を基準とするとその2倍を大きく越える波高とはなっていない。

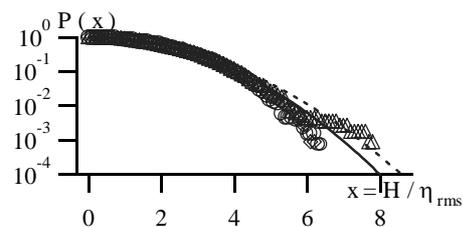


図 5 超過確率 D70831(γ=3.3,5.5m)