

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) 正会員 ○萩 義紀
鳥取大学工学部 正会員 太田隆夫
鳥取大学工学部 正会員 木村 晃

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。波高の確率分布は波浪場の定常性などを前提に 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。とはいえ、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ことから、本研究ではまず高波浪時に連続観測された水位変動データを解析し、波高の出現特性を検討する。さらに、あまり多くはない連続観測データを補う目的で、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. 水位変動データの解析および数値シミュレーション

表-1 連続観測データの概要

データコード	観測年月日	開始時刻	継続時間	データ数
D70831	1987. 8.31	18:18	21:40:09	78009
D71124	1987.11.24	8:12	23:45:47	85547
D71217	1987.12.17	10:13	22:25:54	80754
D80109	1988. 1. 9	18:18	37:41:05	135665
D80202	1988. 2. 2	16:13	24:45:12	89112
D81214	1988.12.14	10:33	30:04:41	108281
D00125	1990. 1.25	16:34	23:44:18	85458

本研究では、運輸省船舶技術研究所(当時)により山形県由良港北西沖で連続観測された水位変動データを用いる。

表-1 にその概要を示す。これらのデータの基礎的解析として、まず観測データを 20 分間の区間に分割し、区間ごとに有義波諸元および周波数スペクトルを求める。連続観測データの周波数スペクトルについては、波浪の標準的なスペクトルである JONSWAP および Wallops スペクトルとの比較を行う。その結果として、JONSWAP スペクトルの適合が確認された。つぎに、波高の出現特性を検討する高波浪期間を以下のように設定する。すなわち、有義波高の変化が大きい 3 ケース (D70831, D71217, D81214) では、最大有義波高 ($H_{1/3}$)_{max} の 80% 程度を下限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、有義波高の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ncross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。累積相対度数に対しては Weibull 分布の当てはめを行う。さらに、連続観測データの解析と併せて、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。上述の高波浪期間において、連続観測データと数値シミュレーションデータによる波高の出現特性を比較することにより、シミュレーションの有用性を検討する。通常の波浪観測と同様に 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 分毎の有義波諸元と JONSWAP スペクトルを用いて水位変動のシミュレーションを行う。水位変動の計算は、FFT を用いた成分波の重ね合わせによる線形不規則波と、Dommermuth and Yue (1987) の手法による非線形不規則波について行い、連続観測データと同様に解析する。非線形不規則波の計算において用いる基礎方程式は、次式のように与えられる (安田ら (1992))。

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

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 次までの非線形干渉を考慮した場合、

$$\phi_z = \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{M-m} \frac{\eta^k}{k!} \sum_{n=1}^N \phi_n^{(m)}(t) \frac{\partial^{k+1}}{\partial z^{k+1}} \psi_n(x, 0) \quad (3) \quad \psi_n(x, z) = \frac{\cosh\{k_n(z+h)\}}{\cosh k_n h} \exp(ik_n x) \quad (4)$$

となる。ここで、 $\phi_n^{(m)}$ は次式を逐次解くことにより与えられる。

$$\sum_{n=1}^N \phi_n^{(1)}(t) \psi_n(x, 0) = \phi^s, \quad \sum_{n=1}^N \phi_n^{(m)}(t) \psi_n(x, 0) = -\sum_{k=1}^{m-1} \frac{\eta^k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial z^k} \left[\sum_{n=1}^N \phi_n^{(m-k)}(t) \psi_n(x, 0) \right] \quad (m=2, 3, \dots, M) \quad (5)$$

本研究では $M=3$ とし、 η と ϕ^* 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 に関する計算は実空間上で aliasing 誤差を除去しつつ行い、 η と ϕ^* の時間発展は 4 次の Runge-Kutta 法で計算する。

3. 波高の出現特性

表-2 に、連続観測データとシミュレーションデータに当てはめた Weibull 分布の形状母数と尺度母数を示す。表中の meas は観測データ、sim1 は線形シミュレーションデータ、sim2 は非線形シミュレーションデータを表す。また、図-1 に波高の超過確率の一例を示す。これらの結果より、連続観測データに対しては何れのケースでも形状母数が 2.0 以上の Weibull 分布が適合し、Rayleigh 分布は高波高領域で過大な出現確率を与えることがわかる。線形シミュレーションデータの超過確率は、どのケースでも連続観測データとよく合っており、ここで用いた方法により波高の出現特性を推定し得ることを示している。非線形シミュレーションデータでは、すべてのケースにおいて高波高領域でやや過大な出現確率を示す結果となった。また、高波浪期間における最大波高 $(H_{\max})_{\max}$ と最大有義波高 $(H_{1/3})_{\max}$ との比は、連続観測データで 1.65~2.11、シミュレーションデータで 1.54~2.10 の範囲にあった。

4. 波浪観測点のデータによる波高の出現特性の推定

2. 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、数値シミュレーション（線形）とデータ解析を行う。結果の一例として、図-2（a）に経ヶ岬の基準値 6.0m、（b）に鹿島の基準値 5.0m における波高の超過確率を示す。図中の実線は当てはめた Weibull 分布を表すが、シミュレーションデータ（図中の Δ ）との対応はよい。また、Weibull 分布の形状母数は、表-2 の結果に比べて 2.0 に近い値となるケースが多くなった。 $(H_{\max})_{\max}/(H_{1/3})_{\max}$ の値は 1.70~2.00 の範囲にあり、3. の結果と合わせて、 $(H_{\max})_{\max}$ としては $(H_{1/3})_{\max}$ の少なくとも 2 倍の値を考慮すべきであるといえる。

参考文献：Dommermuth, D.G. and D.K.P. Yue (1987) : A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves, J. Fluid Mech., vol.184, pp.267-288.
安田孝志・伊藤一教・森 信人(1992) : 1 方向不規則波の波高分布に及ぼす非線形干渉の影響について、土木学会論文集, No.443/II-18, pp.83-92.

表-2 Weibull 分布の母数

データ	基準値 (m)	形状母数 α			尺度母数 β		
		meas	sim1	sim2	meas	sim1	sim2
D70831	5.0	2.067	2.097	2.078	7.751	8.224	8.133
	5.5	2.110	2.083	2.078	8.171	8.112	8.148
	6.0	2.077	2.106	2.116	7.812	8.440	8.556
D71217	5.5	2.018	2.125	2.034	7.360	8.561	7.900
	6.0	2.026	2.125	2.020	7.448	8.574	7.763
	6.5	2.077	2.088	1.974	8.042	8.206	7.283
D81214	4.0	2.056	2.060	1.999	7.545	7.819	7.370
	5.0	2.051	2.047	1.986	7.531	7.711	7.263
D71124	5.0	2.056	2.029	2.025	7.542	7.473	7.627
D80109	5.0	2.074	2.078	2.078	7.427	7.879	7.879
D80202	5.0	2.007	2.021	2.021	7.224	7.403	7.403
D00125	5.0	2.029	2.116	2.116	7.349	8.326	8.326
	5.0	2.097	2.074	2.074	7.951	7.894	7.894

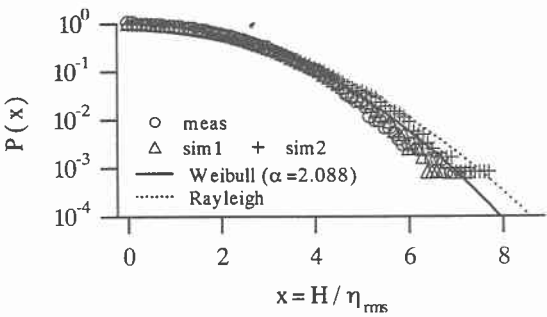
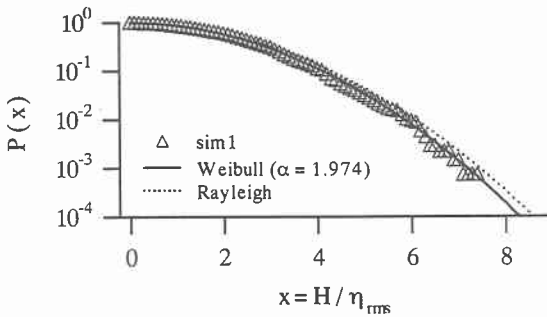
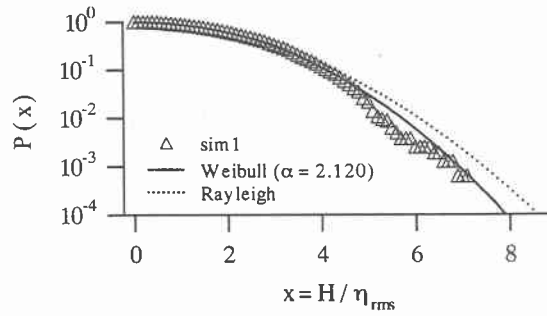


図-1 波高の超過確率 (D71217, 6.5m)



(a) 経ヶ岬, 基準値 6.0m



(b) 鹿島, 基準値 5.0m

図-2 波高の超過確率