

高架橋波浪対策護岸における越波および水塊打上げ高の確率分布特性に関する研究

PROBABILITY DISTRIBUTION OF SPLASH HEIGHT OVER BLOCK MOUND SEAWALL

泉宮尊司¹・中野秀紀²・石橋邦彦³

Takashi IZUMIYA, Hideki NAKANO and Kunihiko ISHIBASHI

¹ 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050)

² 工修 前新潟大学大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050)

³ 正会員 新潟大学技術職員 工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050)

Series of laboratory experiments have been carried out to investigate on splash height and overtopping rate of block mound seawall. The splash height and overtopping rate are formulated as a function of the relative crown height and deepwater wave steepness. Probability distribution of a splash height is calculated by using the joint probability density function of significant wave height and period proposed by Mathisen and Bitner-Gregersen. Representative heights of a splash over a seawall are evaluated with the probability distribution function. The present method is applied to estimate the expected heights of wave spray during the occurrence of storm waves on the Oyashirazu Coast in Niigata Prefecture.

Key words: *wave spray, splash height, probability distribution, overtopping rate, block mound seawall*

1. はじめに

海岸に設置される護岸は、陸地の侵食を防ぐとともに、高潮や波浪による陸地の浸水を防ぐ目的で設置される。その天端高さの設定にあたっては、越波量や打上げ高さを考慮して設計されるのが通例である。しかしながら、水塊や飛沫の打上げ高さについては特に考慮されることはなく、それらの特性については未だ不明な点が多い。近年では、全国的に海岸侵食が激しくなり、護岸前面の水深が設計当時より大きくなってきていることから、越波被害や護岸の倒壊などが頻繁に生じてきている。

新潟県親不知海岸では、年々侵食する海岸侵食により高速道路高架橋橋脚が海中に没し、冬季暴浪により甚だしい磨耗損傷を受けるようになってきている。これは、この海岸がやや急勾配の礫海岸であることや冬季風浪の波高が極めて大きいことに原因していると考えられる。橋脚の磨耗対策として、離岸堤や各種護岸が考えられたが、魚場・藻場を含む環境の保全や費用の面を考慮して、やや低天端の波浪対策護岸を設置して、橋脚を保全する工法が採用され施工が始まっている。これまで消波護岸

の越波飛沫の打上げ高さの測定例は数少なく、僅かに木村ら (1998, 2001) の研究があるに過ぎない。しかしながら、その波浪対策護岸の越波特性および水塊や飛沫の打上げ高さについては不明なところが多く、越波水の排水対策も含めてそれらの特性を明らかにしておく必要がある。

そこで本研究では、まず越波および飛沫の打上げ高さに関する模型実験を行い、その基本的な特性を明らかにする。また、水塊および飛沫の打上げ高さと波浪諸元とを結びつけた簡便な評価式を提案する。さらに、その評価式を不規則波にも適用できるように、波高と周期の結合確率分布を用いて、水塊および飛沫の打上げ高の確率分布を算定することを研究の目的としている。

2. 越波および飛沫に関する実験概要

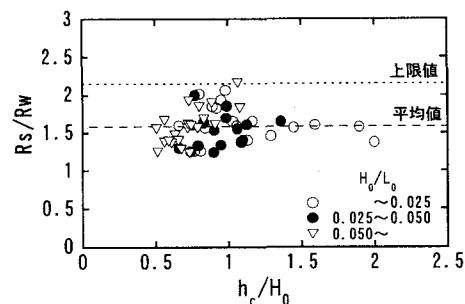
越波および飛沫の打上げ高さに関する実験は、長さ 10m、高さ 0.8m、幅 0.4m の 2 次元造波水槽において実施した。実験装置の断面形状を図 - 1 に示す。水路内に海底勾配 i が 1/15 となるように木製斜面を設置し、その

次に実験条件は、堤脚水深を $h = 5.9\text{m}$ と一定とし、実験に使用した波浪は新潟県内における年数回波浪、5年、10年、30年および50年再現確率波高を想定し、換算沖波波高 $H_o = 1.38 \sim 7.38\text{m}$ 、有義波周期 $T = 5.0 \sim 12.6\text{s}$ に変化させた規則波を造波し、測定を行った。越波流量は護岸背後に設置した越波升の総越波量を波作用時間で除した平均越波流量 $q(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ を求めた。また、越波の打上げ状況は、水槽側壁に格子線を描き、ビデオ撮影による目視観測で、越波の実質部分に相当する「水塊」と、これよりも小さな径が数 mm 以上で軌跡の鮮明な粒子を「飛沫」とし、両者の静水面からの打上げ高さを読み取り、水塊打上げ高を R_w 、飛沫打上げ高を R_s と定義した。なお、測定結果はすべて換算沖波波高 H_o を用いて無次元化して考察を行った。

一般に波の打上げ高は、主として相対護岸天端高 h_c/H_o と波形勾配 H_o/L_o ($L_o = gT^2/2\pi$) との関数であると考えられる。ここに、 H_o は沖波波高、 h_c は護岸天端高、 L_o は沖波波長である。水塊および飛沫の打上げ高も、これに準じてそれらの関数として表されるものと予想される。図-2は、実験により求めた波形勾配 H_o/L_o をパラメタとした相対水塊打上げ高 R_w/H_o および相対飛沫打上げ高 R_s/H_o と相対護岸天端高 h_c/H_o との関係を示している。この図から全体的に波形勾配が小さいほど、また相

Figure 1 consists of two scatter plots. The top plot shows the ratio of the radius of gyration to the radius of the gyration (R_w/H_0) on the y-axis (ranging from 0 to 4) versus the ratio of the radius of gyration to the radius of the gyration (h_c/H_0) on the x-axis (ranging from 0 to 2.5). The bottom plot shows the ratio of the radius of gyration to the radius of the gyration (R_s/H_0) on the y-axis (ranging from 0 to 6) versus the ratio of the radius of gyration to the radius of the gyration (h_i/H_0) on the x-axis (ranging from 0 to 3). Both plots show data points for three different values of the ratio H_0/L_0 : 0.025 (open circles), 0.025-0.050 (filled circles), and 0.050 (open triangles). The data points generally show a positive correlation between the radius ratios and the h_c/H_0 ratio.

次に水塊と飛沫打上げ高との関係について調べた。図-3は水塊と飛沫の打上げ高比 R_s/R_w を示している。全体的にはばらつきが大きい。比率 R_s/R_w の上限値は2.15で、平均値は1.58であった。また、相対護岸天端高 h_c/H_o と波形勾配 H_o/L_o との関連性は余り認められず、1.2から2.0程度の値をとっていることが分る。



水塊および飛沫打上げ高は、図-2に示されるように、
 相対護岸天端高 h_c/H_o と波形勾配 H_o/L_o の関数となる
 と考えられるので、次式のように定式化することにした。

- 120 -

この式を用いて回帰分析することにより、係数 A 、指数 m および n を求め、規則波での相対水塊および飛沫打上げ高の算定式とした。ただし、実験条件より適用範囲は、 $H_o/L_o = 0.012 \sim 0.135$ および $h_c/H_o = 0.5 \sim 2.8$ である。式 (1) により求めた相対打上げ高の推定値と実験値との比較を図-4に示す。相対水塊打上げ高 R_w/H_o は、おおよそ実験値と比較的によく一致していると言えるが、 R_s/H_o は若干のばらつきが認められ、波形勾配が小さい波ほど、また相対天端高 h_c/H_o の増加とともにデータのばらつきも大きくなっている。これは、現象自体の変動特性や実験値の測定誤差の影響が現れていると考えられる。

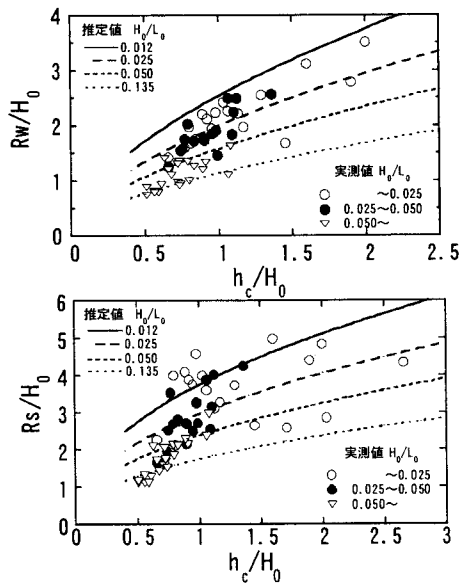


図-4 相対打上げ高の実測値との比較

(3) 波別解析法による不規則波に対する算定法

実際の海の波は不規則波であり、規則波に対する水塊および飛沫打上げ高の算定式では不十分であるため、波別解析法により波高および周期分布を考慮して、打上げ高の期待値を求めることにする。式 (1) で求めた規則波での打上げ高の関係式 $R = R(H_o, L_o) = R(H_o, T)$ を適用して、不規則波に対応した波の相対打上げ高の期待値 $E(R)$ を次式で求める。

$$E(R) = \int_0^\infty \int_0^\infty R(H_o, T) p(H_o, T) dH_o dT \quad (2)$$

ここに、 $p(H_o, T)$ は波高と周期の結合確率密度関数であり、その無次元化された結合確率密度関数は、

$$p(\zeta, \eta) = \frac{1}{8\sqrt{2\pi\nu}} \left(1 + \frac{\nu^2}{4}\right) \left(\frac{\zeta}{\eta}\right)^2$$

$$\exp \left\{ -\frac{\zeta^2}{8} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^2 \frac{1}{\nu^2} \right] \right\} \quad (3)$$

で表される (Longuet-Higgins, 1983)。ここに、

$$\zeta = \frac{H}{\sqrt{m_o}}, \quad \eta = \frac{T}{m_o/m_1} \quad (4)$$

$$\nu = \left(\frac{m_o m_2}{m_1^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (5)$$

である。また、 m_n は波の周波数 f に対する n 次モーメントであり、

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (6)$$

で表される。周波数スペクトル $S(f)$ に関しては、工学的によく用いられている Bretschneider・光易型スペクトル (合田, 1990)

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(Tf)^{-4}] \quad (7)$$

を用いている。

式 (3) により求めた不規則波の無次元波高と周期の結合確率密度分布を図-5に示す。出現確率値は共に無次元値で3.0程度以内にほぼ限られ、波高・周期比ともに、およそ1.0付近が出現頻度のピークとなっていることが分かる。また、短周期の波の相対波高が小さく、波高の大きな部分で周期の出現範囲が狭くなる傾向が認められることから、不規則波の性質をほぼ的確に表現していると言える。

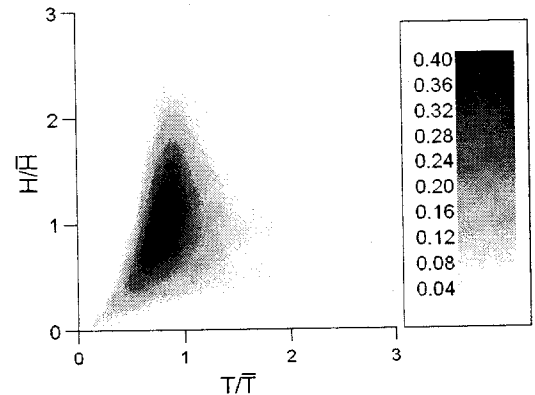


図-5 不規則波の無次元波高と周期の結合確率密度分布

図-6は、式 (2) の波高・周期分布を考慮して算定した相対打上げ高の期待値と規則波の実験結果とを比較したものである。左側の図の水塊の相対打上げ高 R_w/H_o においては、全体的に不規則性を考慮した期待値の方が

10% から 20% 程度大きくなっている。したがって、波高・周期分布を考慮することによって、相対打上げ高が増加することが分る。右図の飛沫打上げ高 R_s/H_o についても、水塊相対打上げ高とほぼ同様な傾向にあるが、全体的にデータのばらつきがやや大きく、相対打上げ高が大きくなるほどその傾向にあると言える。

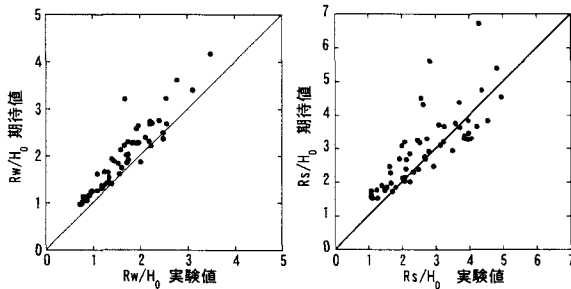


図-6 不規則波に対応した相対打上げ高の期待値と規則波との比較

4. 結合確率密度関数を用いた波の打上げ高の推定

(1) 有義波高と周期の結合確率密度関数の算定法

年間の水塊および飛沫の打上げ高を確率論的に評価するために、波浪統計に基づき波高分布としてワイブル分布、周期分布には Mathisen・Bitner-Gregersen(1990) による有義波高 $H_{1/3}$ と条件付きの対数正規分布 $p(T_{1/3}|H_{1/3})$ を用い、有義波高と周期の結合確率密度関数を次式により算定した。

$$P(H_{1/3}, T_{1/3}) = p(H_{1/3}) \cdot p(T_{1/3}|H_{1/3})$$

$$= \frac{k(H_{1/3} - B)^{k-1}}{A^k} \exp \left\{ - \left(\frac{H_{1/3} - B}{A} \right)^k \right\}$$

$$\cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(H_{1/3})T_{1/3}} \exp \left\{ - \frac{[\ln T_{1/3} - \nu(H_{1/3})]^2}{2[\sigma(H_{1/3})]^2} \right\}$$
(8)

ここに、対数正規分布のパラメータ $\nu(H_{1/3})$, $\sigma(H_{1/3})$ は、有義波高の関数として次式で与えた。

$$\nu(H_{1/3}) = \alpha_1 + \alpha_2 H_{1/3}^3$$
(9)

$$\sigma(H_{1/3}) = \beta_1 + \beta_2 \exp\{\beta_3 H_{1/3}\}$$
(10)

パラメタ A, B, k および $\alpha_1 \sim \alpha_3, \beta_1 \sim \beta_3$ は、波浪の実測データから決定される定数で、本研究では新潟県姫川港での約6年間の毎偶数時の波浪観測データを用いて算出した。

図-7に、波浪観測データの有義波高・周期の出現頻度分布と式(8)により求めた有義波高と周期の結合確率密

度分布の比較を示す。この図より結合確率密度関数はほぼ実測データの出現頻度分布を代表していると言える。

次に、波形勾配による碎波の影響がどれだけ効いているかを確認するために、有義波高 $H_{1/3}$ と波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の結合確率分布を算定する。有義波高および周期の結合確率密度分布と有義波高および波形勾配の結合確率密度関数との間には、

$$P(H_{1/3}, T_{1/3}) dH_{1/3} dT_{1/3}$$

$$= P(H_{1/3}, H_{1/3}/L_{1/3}) dH_{1/3} d(H_{1/3}/L_{1/3})$$
(11)

なる関係が成り立つので、 $P(H_{1/3}, T_{1/3})$ の結合確率密度関数から有義波高と波形勾配の結合確率密度関数を求めることができる。図-8は、このようにして求められた結果を示したものである。規則波の深海域における碎波限界波形勾配 $(H_o/L_o)_{max}$ は14%程度であるが、算定された確率密度から波形勾配はほぼ8%程度以内に収まっていることが分かる。よって、本研究で用いた結合確率密度関数モデルでも波形勾配8%以上の波は殆ど存在しない事が確認できた。

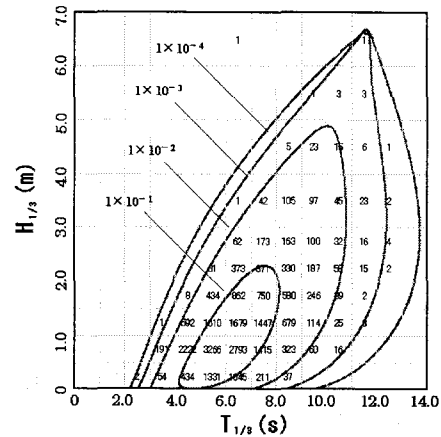


図-7 有義波高と周期の結合確率密度分布

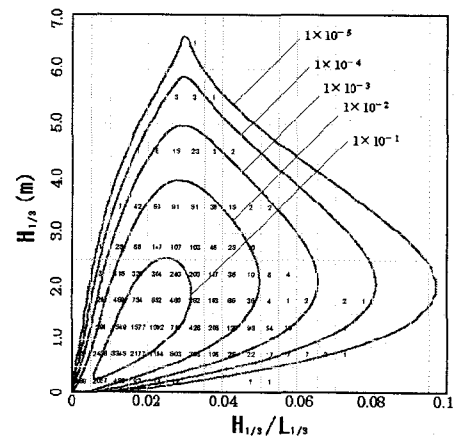


図-8 有義波高と波形勾配の結合確率密度関数

(2) 特性関数を用いた年間打上げ高分布の推定

水塊および飛沫の打上げ高は、相対天端高と波形勾配の関数で表され、それは結局沖波波高と周期の関数となる。年間の無次元打上げ高の確率密度関数を求めるため、まず打上げ高の特性関数 $\psi(s)$ を、有義波高と周期の結合確率密度関数により次式で算定できる。

$$\begin{aligned}\psi(s) &= E(e^{isx}) = \int e^{isx} P(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{isx} P(H_{1/3}, T_{1/3}) dH_{1/3} dT_{1/3}\end{aligned}\quad (12)$$

ここに、 $x = R/H_o$ 、 E は期待値を表し、 $P(x)$ は x の確率密度関数、 $P(H_{1/3}, T_{1/3})$ は、式 (8) で求めた有義波高と周期の結合確率密度関数である。特性関数は確率密度関数の Fourier 変換に他ならないので、上式を Fourier 逆変換することにより、 $R/H_{1/3}$ の年間確率密度関数 $p(R/H_{1/3})$ は、次式のように表される。

$$p(R/H_{1/3}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-isR/H_{1/3}} \psi(s) ds \quad (13)$$

図-9 は、相対打上げ高の年間確率密度分布を示している。この図より、 $R_w/H_{1/3}$ および $R_s/H_{1/3}$ の年間最頻値はそれぞれ 2.80、3.94 であり、相対飛沫打上げ高の方が分布に広がりがあることが分る。次に、打上げ高を定量的に評価するために、無次元値を次元値に変換し、その年間非超過確率分布を算定した結果を図-10 に示している。この非超過確率分布より超過確率が年間 1% となる打上げ高は、 $R_w = 7.92$ m、 $R_s = 11.58$ m と算定された。

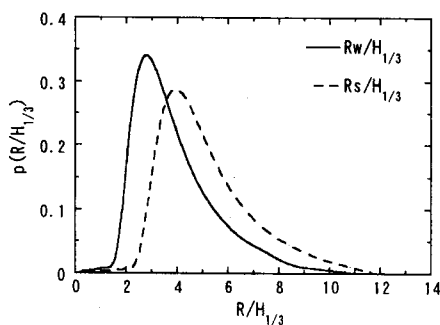


図-9 年間の相対打上げ高の確率密度関数

5. 現地波浪対策護岸への適用

親不知海岸高架橋 (3.4km) に現在施工されている波浪対策護岸に対して、2003 年 12 月 20 日から 21 日にかけて日本海側を襲った、高波浪時において波高の変化が

著しかった 20 日の 9:00 から 21 日の 8:00 までの現地観測データを用いて、実際に高波浪時の波の越波および打上げ高の推定を行った。

観測データは、親不知海岸の沖で水深 20 m 地点において超音波式波高計により毎正時を中心として前後 10 分間、0.5s おきに測定された。生データにはノイズ成分が含まれているため、データを利用する際には、ローパスフィルタなどを用いて平滑化を行う必要がある。そこで取敢えず簡便な方法として低周波成分は周期 30s 程度以上の成分にローパスフィルタをかけて分離し、高周波成分は水位を 3 点移動平均してノイズ成分を除去した。次にこの処理データからゼロアップクロス法により、波高および周期を算定し、高波浪時における有義波高 $H_{1/3}$ 、最大波高 H_{max} 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、最大波周期 T_{max} の経時変化を、図-11 に示す。この図より有義波高の最大値は 6.78m、最大波高の最大値は 12.1 m となり、かなりの巨大波浪が襲来したことが分る。

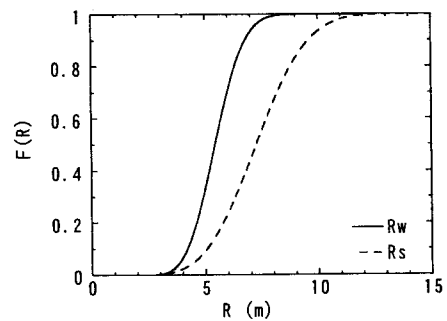


図-10 年間の相対打上げ高の非超過確率分布

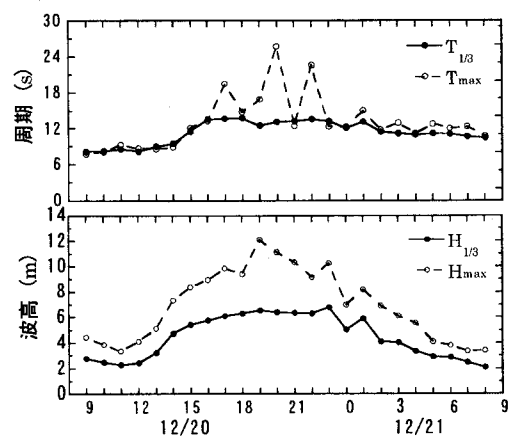


図-11 高波浪時における観測データ

図-12 は、本研究で求めた打上げ高の期待値を用いた高波浪時における水塊および飛沫打上げ高の推定値の経時変化を示したものである。波浪対策護岸の最大時の

打上げ高の期待値は、 R_w で 10.54m, R_s で 15.68m であり、この値はそれぞれ年超過確率 0.2% に相当していることが分った。

越波流量に関しては、合田ら (1975) による越波流量の算定図の近似式 (高山ら, 1982) と本研究で得られた実験値とを比較したところ、比較的大きいばらつきが見られたが、越波流量の推定値のばらつきの許容範囲にほぼ収まっていた。よって、これらの変動を考慮した上で、高山らの近似式により現地越波流量を推定することにした。

図-13 は、高波浪時における越波流量の推定値の経時変化を示したものである。この図より、越波流量はピーク時には $0.6\text{m}^3/\text{s/m}$ を超えており、高波浪時にはかなりの越波流量があったことが確認された。

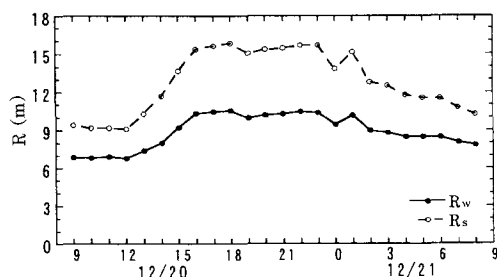


図-12 高波浪時における打上げ高推定

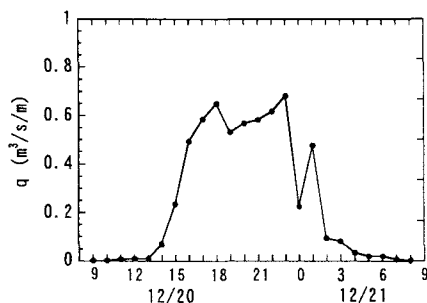


図-13 高波浪時における越波流量の推定値

5. 結 論

本研究では、高架橋波浪対策護岸を対象として模型実験を行い、その結果に基づいて不規則波浪に対する水塊および飛沫の打上げ高を推定した。以下に、本研究で得られた主要な結論を述べる。

(1) 波形勾配と相対護岸天端高を用いた規則波での相対水塊および飛沫打上げ高算定式を提案した。さらに、波別解析法により不規則波に対応した波の打上げ高の期

待値を推定した。その結果、不規則性を考慮すると、水塊および飛沫打上げ高は 10% 程度大きくなることが示された。

(2) 新潟県姫川港における年間の波浪の発生頻度を考慮して、有義波高と周期の結合確率密度関数を推定した結果、実測の観測値とほぼ一致することが確かめられた。また、この推定された結合確率密度関数を用いて特性関数を評価し、水塊等の打上げ高の年間非超過確率分布を理論的に推定できることを示した。

(3) 解析対象地における高波浪襲来時での打上げ高を推定した結果、最大打上げ高は R_w で 10.54m, R_s で 15.68m となり、年 0.2% の年超過確率程度と推定できた。また越波流量は、 $0.6\text{m}^3/\text{s/m}$ にも及ぶことが推測された。

最後に、本研究で用いた親不知海岸の波浪観測データは、日本道路公団北陸支社信越工事事務所によって取得されたものであることを付記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 木村克俊, 藤池貴史, 上久保勝美, 安倍隆二, 石本敬志: 道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.676-680, 1998.
- 2) 木村克俊, 安田佳乃子, 山本泰司, 梅沢信敏, 清水敏晶, 佐藤隆: 道路護岸における越波による通行障害とその対策について, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.756-760, 2001.
- 3) 木村克俊, 浜口正志, 岡田真衣子, 清水敏晶: 消波護岸における越波飛沫の飛散特性と背後道路への影響, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.796-800, 2003.
- 4) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 4 巻, 第 4 号, pp.3-44, 1975.
- 5) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻, 第 2 号, pp.151-206, 1982.
- 6) Longuet-Higgins, M.S.: On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field. Proc. Roy. Soc. London, Ser.A, 389, pp.241-258, 1983.
- 7) Mathiesen, J. and Binter-Gregersen, E: Joint distribution for significant wave height and zero-crossing period, Appl. Ocean Res., Vol.12, No.2, pp.93-103, 1990.
- 8) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計 - 波浪工学への序説 -, 鹿島出版, pp.17-21, 1990.