

大成建設株式会社 正会員 勝井秀博

1. はじめに

パイプラインをはじめとする海洋構造物の洗掘防止工の設計において、従来までは不規則波の取り扱い方に明確な指針がなかった。即ち、洗掘防止工として用いられる被覆用礫材の粒径や比重の選定に際して、如何なる確率で底面せん断力が限界掃流力を越える事が許されるか、或いは、底面せん断力の算出に当たって如何なる波 ($H_{1/3}$, H_{RMS} etc) で不規則波を代表させれば合理的であるか等の問題は、十分に論じられていなかった。これに対して、著者は、合理的な洗掘防止工の設計方法を得る第一段階として、底面せん断力の確率分布と既往の漂砂量公式を組み合わせる事により、水平床における漂砂量の期待値を求める式を導いた。¹⁾ここでは、この期待漂砂量の概念を紹介し、これを用いた設計法と従来の確定波による設計法との比較を行なう。

2. 底面せん断力の確率分布

水平床の底面に働くせん断力の確率分布を導くに当り、以下の仮定を設ける。1) 底面せん断力 $\tau(t)$ は、 $\tau(t) = r u(t) |u(t)|$, $r = 1/2 \rho f_w$ の形に書ける。ここで、 $u(t)$ は底面における水平流速、 ρ は水の密度、 f_w は Jonsson の摩擦係数である。2) 上記 r は Bijker⁽²⁾ に従って定数とおく。3) $u(t)$ は、平均値がゼロ、共分散が σ_u^2 のガウス分布をなす確率変数とみなす。4) ガウス分布の仮定により、流速の極値 u_{max} は、レーリー分布をなすものとする。

以上の仮定より、 $\tau(t)$ の確率分布は無次元化を行なって、次のように表わすことができる。

$$p_{\xi}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{8\pi\alpha}} \cdot \frac{1}{\sqrt{|\xi|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{|\tau|}{\alpha}\right) \quad \dots(1)$$

ここで、 $\xi = \tau(t)/\sigma_{\tau}$, $\alpha = r\sigma_u^2/\sigma_{\tau} = 1/\sqrt{3}$, σ_{τ}^2 は $\tau(t)$ の共分散である。

また、仮定4) より、 $\tau(t)$ の極値 τ_{max} の確率分布は、次式で表現される。

$$p_{\zeta}(\zeta) = \frac{1}{2\alpha} \exp\left(-\frac{\zeta}{2\alpha}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \exp\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\zeta\right) \quad \dots(2)$$

ここで、 $\zeta = \tau_{max}/\sigma_{\tau}$ 。

式(2)を用いて、レーリー分布の波高についてと同様に、 ζ の平均値、RMS、 $1/3$ 最大値等を求めると、 $\bar{\zeta} = 1.1547$ ($P(\zeta > \bar{\zeta}) = 36.8\%$)、 $\zeta_{RMS} = 1.6330$ ($P(\zeta > \zeta_{RMS}) = 24.3\%$)、 $\zeta_{1/3} = 2.4232$ ($P(\zeta > \zeta_{1/3}) = 12.3\%$) となり、波高に比べその超過確率 P は幾分大きめである事が判る。

3. 期待漂砂量

漂砂量公式としては、簡便化の為、以下に示す Brown の公式と、その公式に流速が $\cos$ 波形で変化すると仮定して導かれた Madsen & Grant の公式を用いる。

$$\phi(t) = 40 \Psi^3(t) \quad (\text{Brown}) \quad \dots(3)$$

$$\bar{\phi} = 12.5 \Psi^3 m \quad (\text{Madsen \& Grant}) \quad \dots(4)$$

ここで、 $\phi = q/(w \cdot D_{50})$ で、 q は単位幅当りの漂砂量、 w は粒子の沈降速度、 D_{50} は中央粒径、 $\Psi_m = \tau_{max}/\{\rho(s-1)gD_{50}\}$ で、 s は粒子の比重である。

無次元の期待漂砂量は、式(1)、および式(3)を組み合わせて求める事ができる。

$$\xi \phi_{E+} = \int_{\xi_c}^{\infty} \phi(\xi) \cdot p_{\xi}(\xi) d\xi = 40 \varepsilon^3 \frac{4}{\sqrt{\pi}} \{ \sqrt{r} e^{-r} (r^2 + 2.5r + 3.75) + 3.75 \sqrt{\pi} Z(\sqrt{2r}) \} \quad \dots(5)$$

$$\text{ここで, } Z(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{1}{2}x^2} dx, \quad \varepsilon = \frac{r \sigma_u^2}{\rho(s-1)gD_{50}}, \quad \gamma = \frac{\tau_c}{2r\sigma_u^2}, \quad \xi_c = \frac{\tau_c}{\sigma_\tau}, \quad \tau_c: \text{限界せん断力}$$

である。但し、 $\xi\phi_{E+}$ は波の半周期における正方向の漂砂量の期待値であり、微小振幅波理論の下では、 $\xi\phi_{E+} + \xi\phi_{E-} = 0$ となり正味の漂砂量はゼロとなる。しかしながら、実際は、一旦正方向に移動した砂が、次の半周期で完全に元に戻る事は無く、漂砂量の正逆の僅かな差が、長時間にわたって積分されて正味の漂砂量となる。したがって、 $\xi\phi_{E+}$ はこの正味の漂砂量のオーダー又は、上限を把握する上で有効なパラメーターと考える。γは一般にはゼロに近い値を取り、その場合近似的に次式が成立する。

$$\xi\phi_{E+} = 3.00 \varepsilon^3; \gamma = 0 \tag{6}$$

流速やせん断の極値を用いても、上記と同様の考え方で期待漂砂量式を導くことができる。この場合は、式(2)と式(4)より、

$$\begin{aligned} \xi\phi_{E+} &= \int_{\xi_c}^\infty \phi \cdot \frac{1}{2} p_\zeta(\zeta) d\zeta = 5.0 \varepsilon^3 e^{-\gamma} (\gamma^3 + 3\gamma^2 + 6\gamma + 6) \dots(7) \\ \xi\phi_{E+} &= 3.00 \varepsilon^3 \quad (\gamma = 0) \dots(8) \end{aligned}$$

式(5)と式(7)による無次元期待漂砂量の計算値の比較を $\varepsilon = 0.1$ を例にとって図-1に示した。異なった漂砂量公式の適用にもかかわらず、漂砂量の期待値に両者は大差ない事が判る。また、従来の設計思想からはほぼ安全と見なされる $\xi_c = \tau_c / \sigma_\tau = 4.8$ ($\tau_c \div 2\tau_{1/3}$) という大きな値においてさえも、 $\phi_E \div 0.1$ 即ち、 $\xi_c = 0$ で生じる最大値 $\phi_E = 0.3$ の約 $1/3$ もの漂砂量が期待される事が判る。

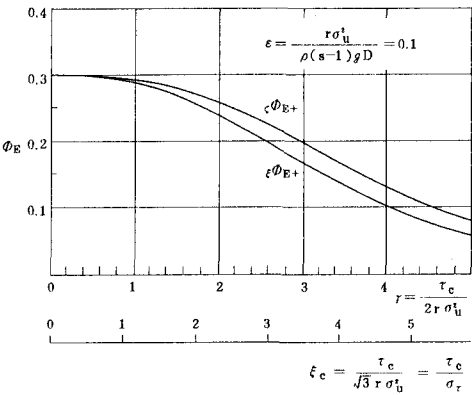


図-1 無次元期待漂砂量の比較

上記の事を実際のパイプライン被覆工の設計条件を例にとって具体的に示したものが表-1である。海象条件は、水深 $h = 47 \text{ m}$ 、 $H_{1/3} = 15 \text{ m}$ 、 $T = 13 \text{ sec}$ で、海底に敷設した $D_{50} = 2.0 \text{ mm}$ の被覆礫の安全性に関する検討である。表中、確定波法とあるのは、代表波を H_{RMS} に選んで、底面せん断力を計算し、礫の限界せん断力 ($\tau_c = 1.62 \text{ N/m}^2$) より大きいかな否かで、設計を行なう方法で、不規則波法は、本論文で述べた期待漂砂量を求めて、この大小で設計を行なう事を提案したものである。確定波法では、この設計で安全であるが、不規則波法では、不安全と判断できる事が判る。

表-1 漂砂量設計法の比較

計算法	(1) 確定方法 HRMS	(2) 不規則波法 $\tau(t) \rightarrow \xi\phi_E$
波	$H = H_{\text{RMS}} = 10.6 \text{ m}$ $T = T_{1/3} = 13 \text{ sec}$	Jonswap Spectrum $S_{\eta\eta}$
底面流速	$u = 1.51 \text{ m/sec}$	$\sigma_u = 0.975 \text{ m}$
底面せん断力	$\tau = 7.39 \text{ N/m}^2$ (peak値) *1)	$\sigma_\tau = 5.33 \text{ N/m}^2$ { $\tau_{\text{max RMS}} = 87.0 \text{ N/m}^2$ } { $\tau_{\text{max } 1/3} = 129.2 \text{ N/m}^2$ }
正方向の漂砂量 (無次元)	$\phi_+ = 0.148$ *2) (peak値)において	$\phi_{E+} = 0.259$ (期待値) *3)
1時間当りの 正方向の漂砂量	$Q_+ = 5.8 \text{ m}^3/\text{m}$ (同上) *2)	$Q_{E+} = 20.1 \text{ m}^3/\text{m}$ (期待値)

*1) $\tau = r \cdot u |u| = 3.24 u |u| \text{ (N/m}^2\text{)}$
 *2) $\phi = 1.25 \psi_m^3$ *3) $\phi(t) = 4.0 \phi^3(t)$

3. 結 論

海底面における洗掘防止用被覆礫の設計に関して、漂砂量の期待値を設計指標とする事を提案した。今後波と流れの共存系における期待漂砂量の導入、設計値としてどのような期待値を用いるか等について研究を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) Katsui, H.: Expected Transport Rate on Horizontal Sea Bed, 大成建設技術研究所報, 第16号, 1983
- 2) Bijker, E.W.: Some Considerations about scales for coastal models with movable bed, Delft Hydraulic Laboratory, Publication No50, Delft, 1967