

現行設計法における防波堤の滑動安定性

高山 知 司*・池 田 直 太**

1. ま え が き

現行の設計法では、防波堤の滑動あるいは転倒等の安定性に対して設定した安全率を確保することを基準としている。滑動および転倒の安全率は1.2が標準となっているが、この安全率は経験的に定まった数値で、必ずしも堤体の安定性の度合いを示す指標ではない。そのため、現行の設計法で設計した防波堤がどの程度の安全度を有しているかについては明らかでない。

近年においては、不確定な要素に伴う推定誤差を確率的に取り扱って、構造物を設計する信頼性設計が導入されるようになってきている。防波堤の設計における不確定要素としては、限られた数の波浪観測値や推算値による設計沖波の推定誤差、波浪変形計算や波力の算定誤差、堤体と捨て石マウンドとの間の摩擦係数のばらつき等がある。これらの不確定要素を確率的に取り扱って、防波堤の滑動安定性を定量的に推定する方法については、著者の一人（高山，1989）が既に提案してきている。また、この方法を用いて、地球の温暖化による海面上昇に伴って起こる防波堤の安定性の低下するかについても検討を行っている（高山，1990）。しかしながら、これらの検討においては、波浪変形計算や波力の算定誤差、摩擦係数のばらつきについては仮想の数値を用いて計算しており、実際の数値がどのような値になるかについては十分な検討を行っていない。

本論文においては、波浪変形計算や波力の算定誤差、摩擦係数のばらつきについて、既往の模型実験を用いて調べ、それから得られる値を用いて、現行の設計法で設計された防波堤の滑動安定度について検討している。

2. 波浪変形計算や波力の算定誤差および摩擦係数のばらつき

(1) 波浪変形計算の精度

現在、波浪変形計算法としてよく用いられている方法としてエネルギー平衡方程式法と緩勾配方程式法がある。これらの計算法の精度を既往の実験や現地観測に基

づいて検討を行った。検討に当たっては、実験値あるいは観測値と計算値との比の頻度分布形を求め、この頻度分布形が正規分布形とするとして、比の平均値と標準偏差を求めた。ただし、現地の波が多方向波であることを考慮して、多方向波を用いた模型実験結果を中心にして調べた。

図-1 は著者ら（高山ら，1991）によって行われた、多方向不規則波による波浪変形模型実験の結果を用いて、エネルギー平衡方程式法の精度を検討したものである。実験値と計算値の比の平均は0.92であり、標準偏差は0.04となっており、比較的精度よく実験値を推定していることがわかる。

図-2 は、現地観測値（泉宮，1986；磯部，1988）を用いて、放物型方程式の計算誤差を検討したものである。現地観測値と計算値との比の平均は0.94で、標準偏差は0.15となっており、現地観測であることもあって、標準偏差が少し大きい。

その他の実験結果も加えて、波浪変形計算法の精度を検討した結果、エネルギー平衡方程式法では計算値との比の平均値が0.97、標準偏差が0.04となり、放物型方程式法では、平均値が0.98、標準偏差が0.14となった。このことから、エネルギー平衡方程式法と緩勾配方程式法との間にはほとんど差がないことがわかる。海底地形が複雑な箇所と単純な箇所とでは計算精度が異なる傾向があったため、2つに分けて計算精度を検討し、平均値の偏り α_m と変動係数 γ_m をそれぞれ次のようにに定

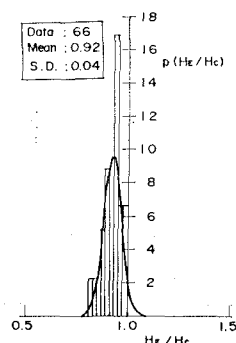


図-1 エネルギー平衡方程式法の推定精度

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 部長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室

めた。海底地形変化が緩やかな場合、 $\alpha_m = -0.03$, $\gamma_m = 0.04$, また、変化が急な場合、 $\alpha_m = 0.06$, $\gamma_m = 0.09$ とした。

上記の波浪変形計算の精度は有義波高に関するものであるが、防波堤の設計波力は最高波高を対象にして算定される。そこで、最高波高の推定誤差を検討した。最高波高の推定値としては、合田 (1975) の碎波変形計算値を用いた。検討に用いたデータは、合田 (1975) の現地観測値と谷本ら (1984) の実験値を参照した。その結果、平均値の偏り $\alpha_M = -0.13$, 変動係数 $\gamma_M = 0.09$ となった。

(2) 波力算定式の精度

波力算定式についても、実験によって求めた波力 P_s と計算波力 P_c との比の頻度分布を求め、その比の平均値と標準偏差を求めた。検討した防波堤形状は、混成堤および消波工被覆堤、直立消波堤、曲面スリット堤である。

a) 混成堤

図-3 は合田 (1972, 1973) の実験結果を参照して、合田波力公式の推定精度を検討したものである。これによると、波力比の平均値は 0.91 となり、波力公式が平均的に 10% 近く大きめに推定していることがわかる。また、標準偏差は 0.19 であった。その他、谷本ら (1976, 1984) の実験結果も参照して、平均値の偏りは $\alpha_P = -0.09$, 変動係数は $\gamma_P = 0.17$ のように定めた。

b) 消波工被覆堤

消波工被覆堤の波力式は、混成堤に対する合田の波力公式を修正した式が用いられている。修正方法としては、合田公式中の前面のマウンドの効果を示す項を無視するとともに、波圧公式の全体に波力低減係数を乗じる方法がとられている。波力低減係数の値としては、高橋ら (1990) が提案した式を用いて算定した。

図-4 は、低減係数で補正した波力の算定誤差を谷本ら (1979) による実験結果を用いて検討したものである。この図によると、消波工被覆堤の場合の波力算定式は平均的に 20% 程度実験値より大きく推定していることがわかる。また、標準偏差は 0.06 である。これ以外の実験値についても検討を行った結果、平均値の偏りは $\alpha_P = -0.16$ および変動係数は $\gamma_P = 0.10$ となった。

c) 直立消波堤

直立消波堤の安定性の検討に用いる波力算定式としては、堤体前面の多孔壁やスリットの効果で衝撃的な波力が発生しないこともあって、合田公式において前面マウンドの効果を無視した式が用いられている。

谷本ら (1976) は、多孔壁および平型スリット壁、駒形スリット壁について実験を行っている。図-5 は、そのうちの多孔壁の直立消波堤に関して波力公式の計算誤差を検討したものである。この図によると、平均値は 0.94, 標準偏差は 0.16 となる。平型スリット壁や駒形スリット壁の場合も加えて、直立消波堤の波力算定式の精度について検討した結果、平均値の偏りは $\alpha_P = -0.16$, 変動係数は $\gamma_P = 0.10$ となった。

d) 曲面スリット堤

曲面スリット堤の安定計算には直立消波堤と同じ波力公式が用いられている。図-6 は、滑動に対する実験値 (谷本ら, 1980) を用いて波力公式の精度を検討したものである。これによると、平均値は 0.86, 標準偏差は 0.24 となって、他の構造形式に比して、標準偏差が少し大きい。これ以外に、3 分力計によっても水平波力が測定されており、これらの実験結果も加えて波力算定式の精度を検討すると、平均値の偏りは $\alpha_P = -0.07$, 変動係数が $\gamma_P = 0.27$ になった。

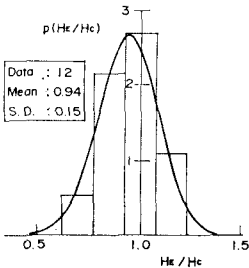


図-2 緩勾配方程式法の推定精度

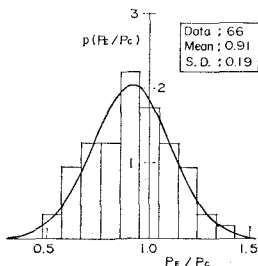


図-3 混成堤に働く波力の推定精度

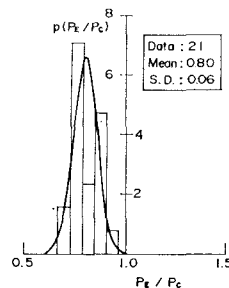


図-4 消波工被覆堤に働く波力の推定精度

(3) 摩擦係数のばらつき

堤体と捨石マウンドとの間の摩擦係数の値は、堤体の安定性に大きな影響を及ぼす。通常、設計では摩擦係数として $f_D=0.6$ が用いられているが、実際の摩擦係数がこの値になるとは限らない。そこで、実物に近い捨石マウンドおよび堤体を用いて行った既往の模型実験結果（森平ら、1978、1979；日本海洋開発産業協会、1985；運輸省第2港湾建設局、1986）を用いて、摩擦係数のばらつきを検討した。

摩擦係数は、引張り荷重が一定となったときの荷重から算定した。図-7は摩擦係数のばらつきを示しており、比較的よく正規分布に一致している。平均値は1.06、標準偏差は0.16となり、模型実験から得られた摩擦係数は設計に用いている値より平均的に6%程度大きく、0.6より小さな摩擦係数になる確率は約35%であった。

3. 現行設計法における防波堤の滑動安定度

(1) 計算条件と方法

年最大波 X_R の分布形として、次式の Weibull 分布

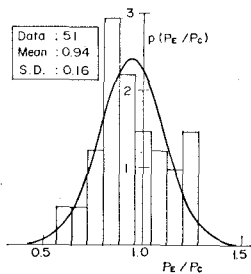


図-5 直立消波堤に働く波力の推定精度

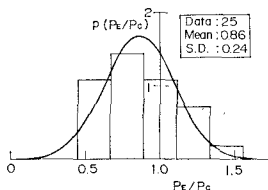


図-6 曲面スリット堤に働く波力の推定精度

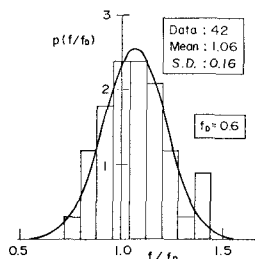


図-7 摩擦係数のばらつき

を仮定した。

$$p_R(X_R) = \frac{k}{A} \left(\frac{X_R - B}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{X_R - B}{A} \right)^k \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A および B 、 k は Weibull 分布の母数である。

荷重係数の計算に当たっては、 $A=2.5$ 、 $B=1.55$ とし、 k の値としては、 $k=1.0$ および 2.0 の2つの値を採用した。海底は一様勾配、波は等深線に直角に入射すると考え、波の屈折による波高変化は小さいとして無視した。碎波変形については、合田(1975)による碎波変形の簡略式を用いた。沖波の波形勾配は、 $H_0/L_0=0.035$ とした。

堤体の設置水深 h およびマウンドの水深 h' 、根固め工を含む堤体の前面マウンド水深 d は表-1のように設定した。表-1の水深は設計基準面から測ったものである。高潮は発生しないと仮定し、潮位は設計基準面上1.5mとした。また、海底勾配 $\tan \theta$ としては、表-1に示す4種類について計算した。

まず、現行の防波堤の設計法にしたがって、設計基準面上の天端高および堤体幅を計算した。ただし、天端高および堤体幅は0.5m毎に大きめに丸めた値を用い、堤体重量は、滑動安全率が1.2~1.23の間にはいるように設定した。このときの設計沖波波高としては再現期間50年に対応する波高を用い、 $k=1.0$ の場合11.3m、 $k=2.0$ の場合6.5mとした。

上記のように設計された堤体に対して、著者の1人（高山、1990）が提案した方法に従って、耐用年数50年間における防波堤の滑動遭遇確率を計算した。滑動遭遇確率の計算に当たっては、沖波や波浪変形計算、波力の

表-1 堤体の設置条件

h [m]	h' [m]	d [m]	$\tan \theta$
5	3.5	2	1/10
10	8	6.5	1/20
15	11	9.5	1/50
20	15	13.5	1/100

表-2 計算に用いた平均値の偏りと変動係数

検討項目	α	γ
沖波	0	0.10
碎波変形	-0.13 (-0.10)	0.09 (0.10)
波力		
1) 混成堤	-0.09 (-0.05)	0.17 (0.20)
2) 消波工被覆堤	-0.16 (-0.15)	0.10 (0.10)
3) 直立消波堤	-0.10 (-0.10)	0.17 (0.20)
4) 曲面スリット堤	-0.07 (-0.05)	0.27 (0.30)
摩擦係数	0.06 (0.05)	0.16 (0.15)

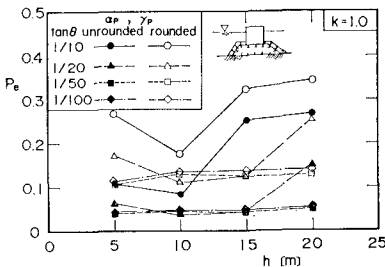
算定誤差は 2. で検討した値をそのまま用いた場合と、これらの値を 0.05 毎に大きめに丸めた値を用いた場合について計算を行った。計算に用いたこれらの値を表 1-2 に示している。表中の () 内が丸めた値である。

(2) 各種防波堤の滑動安定性

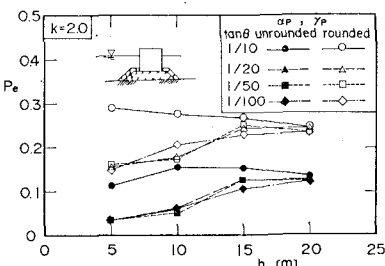
再現期間50年の波を用いて現行の設計法で設計した防波堤が耐用年数50年間に滑動する遭遇確率 P_e を計算した。以下には、各防波堤毎にその結果を示す。

a) 混成堤

図-8 (a) および (b) はそれぞれ沖波の出現確率分布が $k=1.0$ および 2.0 の場合である。平均値の偏りや変動係数を危険側に丸めた数値で計算した滑動遭遇確率は実験値から得られた値をそのまま用いた場合より $0.1 \sim 0.2$ 大きくなっている。このような差は、 $\alpha_P = -0.09$ であったものを $\alpha_P = -0.05$ に大きく丸めたことによると考えられる。海底勾配が急な $1/10$ の場合は、 $1/20$ より緩やかな場合に比較して、滑動遭遇確率が大きい。 $1/20$ より緩やかな海底勾配では、 $k=1.0$ の場合、滑動遭遇確率は、設置水深によってほとんど変化せず、平均値の偏りおよび変動係数を丸めない数値で 0.05 、丸めた数値で 0.15 程度である。一方、 $k=2.0$ の場合、滑動遭遇確率は、設置水深が 5m から 15m に深くなると、丸めない数値で 0.04 から 0.13 、丸めた数値で 0.11 から 0.25 に増大し、それより深くなってもほぼ同じ値である。このように滑動遭遇確率が沖波の波高出現分布形状によって異なるのは、 $k=1.0$ の場合、設計沖波波高が 11.3m と大きく、水深 20m でも砕波



(a) $k=1.0$



(b) $k=2.0$

図-8 混成堤の滑動遭遇確率

しており、水深によって最高波高がほとんど決まるのに対して、 $k=2.0$ の場合、設計波高が 6.5m と小さく、設置水深が 10m あるいは 15m と深くなると、砕波の影響が小さくなり、沖波波高がそのまま堤体の滑動に影響するようになるためである。

遭遇確率が 0.05 とは、1000函のケーソンのうち平均的にみて毎年1函のケーソンが滑動する程度の値である。

b) 消波工被覆堤

図-9 は、設置水深に対する消波工被覆堤の滑動遭遇確率の変化を示したものである。消波工被覆堤の滑動遭遇確率は、非常に小さく、平均値の偏りおよび変動係数を丸めた値を用いても、水深 5m で 0.01 、水深が深くなると大きくなるが、水深 20m でも 0.05 である。丸めない値でも、最大で 0.01 程度しか小さくならない。このように滑動遭遇確率が小さくなったのは、 $\alpha_P = -0.15$ 程度で、 $\gamma_P = 0.10$ と小さいことによる。

消波工被覆堤の場合、設計波よりも大きな波が作用すると、消波工が移動し、被災を受ける可能性がある。その場合、堤体には大きな波力が作用することになり、滑動遭遇確率が增大する可能性がある。そのため、消波工被覆堤の場合には、前面消波工の安定についても考慮して、本体の滑動遭遇確率を推定する必要がある。

c) 直立消波堤

$k=2.0$ における直立消波堤の滑動遭遇確率を図-10 に示す。海底勾配が急な $1/10$ の場合、遭遇確率は、設置水深が 5m では他の緩やかな海底勾配の値より少し小さいが、設置水深が 10m になると急に増大し、他の緩勾配の値よりは大きくなる。しかし、それ以上に水深が深くなっても遭遇確率はほとんど変化せず、水深 20m では他の勾配における値とほぼ同じになる。一方、 $1/20$

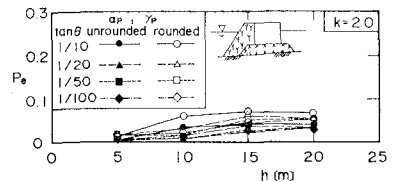


図-9 消波工被覆堤の滑動遭遇確率 ($k=2.0$)

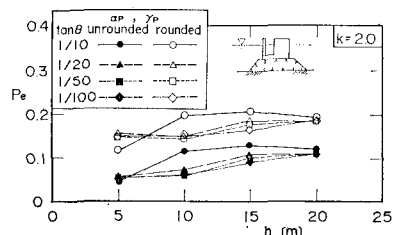


図-10 直立消波堤の滑動遭遇確率 ($k=2.0$)

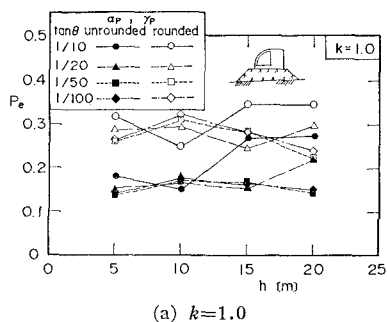
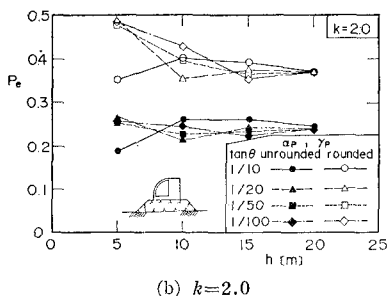
(a) $k=1.0$ (b) $k=2.0$

図-11 曲面スリット堤の滑動遭遇確率

より緩やかな海底勾配では、防波堤の設置水深が深くなるにしたがって、滑動遭遇確率もわずかに増大する傾向を示す。設置水深が 5 m から 20 m に変化すると、滑動遭遇確率は、平均値の偏りおよび変動係数としてそのまの値を用いた場合、0.05 から 0.11、丸めた値を用いると、0.15 から 0.19 に変化する。直立消波堤の安定度は、混成堤と同程度か少しよいといえる。

d) 曲面スリット堤

図-11 は曲面スリット堤の滑動遭遇確率の変化を示したものである。図-11 (a) および (b) は沖波波高の出現確率分布が $k=1.0$ の場合と 2.0 の場合である。図-11 (a) の $k=1.0$ の場合、滑動遭遇確率は、平均値の偏りや変動係数を丸めないで用いた場合には、海底勾配が 1/10 で 0.26 にあるが、他の海底勾配では 0.15 程度である。丸めた値では、海底勾配 1/10 で 0.35、他の海底勾配で 0.25~0.30 である。

図-11 (b) の $k=2.0$ の場合、海底勾配が急な 1/10 の場合は設置水深が 5 m と浅いときに他の海底勾配より小さく、水深が深くなると、大きくなる。一方、海底勾配が 1/20 より緩やかな場合は、水深が浅いときに滑動遭遇確率は高く、水深が深くなるにつれて小さくなる傾向がある。 $k=2.0$ の場合、滑動遭遇確率は $k=1.0$ の場合より 0.1 程度大きく、沖波波高の出現確率分布によって滑動遭遇確率が大きく異なる。

4. あとがき

設計に用いられている波浪変形計算や波力算定式の推

定誤差および摩擦係数のばらつきを調べ、防波堤の滑動遭遇確率を算定した。これによって、現行の設計法で設計した防波堤の滑動遭遇確率の概略値を求めることができたので、今後は、これらの結果の妥当性を防波堤の被災事例から検討するとともに、このような確率的概念を防波堤設計に導入する手法を検討する。

本研究を遂行するに当たって、波浪変形計算や波力の算定誤差の推定においては、日本海洋コンサルタント大堀晃一氏および五洋建設株式会社関本恒浩、鶴飼亮行の両氏の協力を得た。ここに記して、深く感謝する次第である。

参考文献

- 泉宮尊司ら (1986): 回折領域における波浪場の現地観測, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 129-133.
- 磯部雅彦ら (1988): 屈折・回折領域における波浪場の現地観測, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 108-112.
- 運輸省第 2 港湾建設局横浜調査設計事務所 (1986): 捨石マウンドの不陸について, 55 p.
- 合田良実・福森利夫 (1972): 直立堤および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究, 港研報告, 第 11 巻, 第 2 号, pp. 3-45.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 第 12 巻, 第 3 号, pp. 31-69.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港研報告, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 53-75.
- 高山知司 (1989): 信頼性理論による防波堤滑動の安定性に関する検討, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 637-677.
- 高山知司 (1990): 防波堤の滑動安定性に及ぼす海面上昇の影響, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 195-235.
- 高山知司・池田直太・小杉宣史 (1991): 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験, 港研報告, 第 30 巻, 第 1 号.
- 谷本勝利ら (1976): 各種ケーソン式防波堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 246, 38 p.
- 谷本勝利ら (1979): 不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 343-347.
- 谷本勝利ら (1980): 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港研報告, 第 19 巻, 第 4 号, pp. 3-53.
- 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行 (1984): 防波堤直立部に働く不規則波力に関する研究, 港研報告, 第 23 巻, 第 3 号, pp. 47-99.
- 森平倫生・木原 力・堀川 洋 (1978): 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.
- 森平倫生・足立一美 (1979): 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について (第 2 報), 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 446-450.
- (社)日本海洋開発産業協会 (1985): 構造物と地盤の滑り機構に関する実験, 昭和 59 年着底型洋上石炭火力発電システムの研究開発補助事業成果報告書, pp. 187-208.