

防波堤堤体の設計における不確定要因が被災遭遇確率に及ぼす影響

Influence of Uncertain Factor in Breakwater Design to Encounter Probability of Failure

河合弘泰*・平石哲也*・関本恒浩**

Hiroyasu KAWAI, Tetsuya HIRAISHI and Tsunehiro SEKIMOTO

Probabilistic errors are not considered in the present breakwater desing method. Such estimation errors are included in the computation of 1) deep water wave height, 2) wave transformation, 3) wave force on breakwater caisson, and 4) friction between the concrete caisson and rubble mound. The encounter probability of sliding and overturning failure and the expected sliding distance of caisson are mainly determined by these estimation errors as well as the structural type and tidal amplitude. The mean value of the encounter probabilities and expected sliding distance are inversely proportional to the safety factors used in the present breakwater design.

Keywords: uncertain factor, probabilistic design method, encounter probability of failure, expected sliding distance

1. はじめに

現在、防波堤の堤体は、設計沖波と呼ばれる確率波に対して滑動や転倒の安全率が1.2以上となるように設計されている。それに関わらず、台風や冬季風浪などによって堤体が被災する理由としては、設計沖波を超過する確率が全く0ではないこと、設計には不確定要因があることなどが考えられる。

そこで本研究においては、沖波の推定、波浪変形計算、波力の算定、摩擦係数の推定における不確定性が、堤体の被災遭遇確率に及ぼす影響を感度分析によって調べる。また、現状レベルの不確定性がある場合について、安全率と被災遭遇確率との関係を明らかにする。

2. 防波堤が被災する理由

現行設計法では、まず、現地観測データや波浪推算データを用いて沖波の出現確率分布を適当な極値分布関数にあてはめ、再現期間が50年の沖波を「設計沖波」として定める。そして、この設計沖波に対して波浪変形計算を行い、防波堤設置地点における波浪（堤前波）の諸元を求める。さらに、堤体への入射波向を±15degの範囲で危険側に振った波向で波力を計算し、滑動と転倒の両方に対して安全率が1.2以上となるような断面を設計している。したがって、現行設計法によって設計された堤体は、確定論的に計算された設計外力に対して少なくとも2割の余裕がとられている。

ところが、このように余裕をもって設計された堤体であっても、滑動したり転倒したりすることがある。その理由としては、設計沖波を超過する沖波の発生と、設計における不確定性とがある。

(1) 設計沖波を超過する沖波の発生

再現期間 R 年の設計沖波を超過する沖波が供用（耐用）年数 L 年間に於いて発生する確率 P は、次式によって求められる。

$$P=1-(1-1/R)^L \quad (1)$$

防波堤の設計では一般に再現期間が50年の波浪が使われており、供用年数も50年と仮定すると、設計沖波を超過する確率は0.64と大きい。ところが、防波堤の堤体は安全率が1.2以上となるように設計されているので、設計外力の計算が正確であるならば、設計沖波を大きく上回る沖波が発生しないと被災に結びつかない。このような沖波の発生確率は桁違いに小さい。

また、たとえ設計沖波を超過する沖波が発生したとしても、防波堤の設置位置が相対水深 h/H_0 で2.5～3よりも浅い場所であれば、波力の計算に用いる最高波 H_{max} （ $=H_{1/250}$ ）が砕波波高で決まってしまうので、波浪変形計算に誤差がないと仮定すれば、設計堤前波を上回る堤前波は来襲しない。

さらに、設計に用いる潮位は防波堤の安定性にとって最も不利となる潮位であり、朔望平均満潮面であることが多い。潮位が朔望平均満潮面よりも低くなると、浮力を差し引いた堤体重量が増加したり、砕波によって波高が減衰したりするので、堤体の安定性は増す。

したがって、設計沖波を超過する沖波の発生だけでは、全ての被災を説明することはできない。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部（〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

** 正会員 日本海洋コンサルタント株式会社

(2) 設計における不確定要因

防波堤堤体の設計には、表-1に示すような不確定要因がある。

防波堤の代表的な被災原因として「設計波を上回る波浪の発生」をあげることができるが、「沖波の発生確率分布が正確に求められていて、たまたま運悪く設計沖波を超過する沖波が発生した」というよりはむしろ、「限られたデータを用いて極値分布関数に当てはめたために、設計沖波の推定に誤差があった」であることが多い。

また、波浪変形計算、波力算定、摩擦係数には、それぞれ不確定性（偏りやばらつき）がある。実際の波高や波力は波浪変形計算や波力公式によって推定した値よりも平均的には小さく、実際の摩擦係数は設計で使われている値よりも平均的には大きい。したがって、安全率 1.2 で設計された防波堤のもつ真の安全率は、平均的には 1.2 よりも大きくなっている。ただし、波浪変形計算、波力算定、摩擦係数の何れにもばらつきがあるため、安全率が 1.2 未満である場合もある。

表-1 防波堤堤体の設計における不確定要因

分 類	該当する不確定要因 / 偏りやばらつきの性質
有限個数のデータに基づいて確率分布を推定するために生じる統計的不確定性	沖波の推定 極値分布関数へのあてはめ誤差など
計算モデルが実現現象のメカニズムを再現していないことによる不確定性	波浪変形計算（堤前波高の計算） 実際の波高 H_M は、波浪変形計算による波高 H_m に対して平均 $\overline{H_M} = 0.87H_m$ 、標準偏差 $\sigma_M = 0.09H_m$ の正規分布 $p_M(H_M)$ をなす（高山ら, 1991）。
	波力算定（堤体に作用する波力の推定） 実際の波力 P は、波力公式による波力 P_c に対して、混成堤では平均 $\overline{P} = 0.88P_c$ 、標準偏差 $\sigma_P = 0.22P_c$ （河合ら, 1996）、消波工被覆堤では平均 $\overline{P} = 0.84P_c$ 、標準偏差 $\sigma_P = 0.10P_c$ の正規分布 $p_P(P)$ をなす（高山ら, 1991）。
本来的な不確定性（構造材料の物理的性質による変動性）	堤体とマウンドの間の摩擦係数 実際の摩擦係数 f は、設計値 f_d に対して平均 $\overline{f} = 1.06f_d$ 、標準偏差 $\sigma_f = 0.16f_d$ の正規分布 $p_f(f)$ をなす（高山ら, 1991）。
	堤体の自重（コンクリートケーソンと中詰砂の合計） 実際の自重 W は、設計値 W_d に対して平均 $\overline{W} = 1.00W_d$ 、標準偏差 $\sigma_W = 0.018W_d$ の正規分布 $p_W(W)$ をなす（南ら, 1991）
ヒューマンエラーによる不確定性	手計算における計算ミス、コンピュータに入力するデータの間違い

3. 信頼性理論による安全性評価の方法

現行設計法で用いられている安全率では、設計沖波を超過する確率や設計における不確定要因を考慮した防波堤の安全性を厳密に評価することができない。そこで本研究においては、信頼性理論を用いて滑動遭遇確率、期待滑動量、転倒遭遇確率を計算することによって、防波堤の安全性を評価する。

(1) 計算上の仮定

本論文においては、以下に示す仮定に基づいて、防波堤堤体の滑動遭遇確率、期待滑動量、転倒遭遇確率を計算する。計算方法は河合ら (1996) と同様である。

- ① 真の沖波波高 H_R は、極値分布関数によって求めた沖波波高 H_0 に対して平均 $\overline{H_R} = 1.00H_0$ 、標準偏差 $\sigma_R = 0.10H_0$ の正規分布 $p_R(H_R)$ をなす（高山ら, 1991）。
- ② 潮位の発生確率分布 $p_\xi(\xi)$ は、主要 4 分潮を用いて計算する。
- ③ 堤前波高は断面計算の結果に屈折・回折係数を乗じる方法で求め、表-1に示す偏りおよびばらつきを与える。
- ④ 堤体への入射波向は、 $\pm 15\text{deg}$ 危険側補正をせず、波浪変形計算の結果をそのまま使う。波力公式によって計算された波力には、表-1に示す偏りおよびばらつきを与える。
- ⑤ 自重の偏りやばらつきは小さいので無視する。
- ⑥ 摩擦係数は、設計値に対して表-1に示す偏りおよびばらつきを与える。

(2) 滑動遭遇確率

水平波力が摩擦抵抗力を上回った場合に、滑動が起きると仮定する。したがって、ここでいう滑動には、防波

堤としての機能に支障がないような微小な滑動も含む。極値波浪に対する滑動確率 p_s 、この極値波浪が年1回発生すると仮定したときの耐用年数間（50年間）における滑動遭遇確率 P_s は、それぞれ次式により求められる。

$$p_s = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{t_0} p_f(f) p_P(P) p_M(H_M) p_R(H_R) p_o(H_o) p_{\xi}(\xi) df dP dH_M dH_R dH_o d\xi \quad (2)$$

$$P_s = 1 - (1 - p_s)^{50} \quad (3)$$

ここに、 f_0 は水平波力と摩擦抵抗力が等しくなる摩擦係数 f である。

(3) 期待滑動量

耐用年数間における期待滑動量 $\bar{S}$ は次式により求められる。

$$\bar{S} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{t_0} S \cdot p_f(f) p_P(P) p_M(H_M) p_R(H_R) p_o(H_o) p_{\xi}(\xi) df dP dH_M dH_R dH_o d\xi \quad (4)$$

ここに、 S は個々の波に対する滑動量（下迫ら，1994）である。本研究では、防波堤の滑動安定性に影響を及ぼすような擾乱が1年に1回発生し、それぞれの擾乱が2時間継続すると仮定した。

(4) 転倒遭遇確率

波力による転倒モーメントが堤体重量による抵抗モーメントを上回った場合に、転倒が起きると仮定する。極値波浪に対する転倒確率 p_o 、耐用年数間における転倒遭遇確率 P_o は、それぞれ次式により求められる。

$$p_o = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{t_0} p_t(t) p_P(P) p_M(H_M) p_R(H_R) p_o(H_o) p_{\xi}(\xi) dt dP dH_M dH_R dH_o d\xi \quad (5)$$

$$P_o = 1 - (1 - p_o)^{50} \quad (6)$$

ここに、 t_0 は転倒モーメントと抵抗モーメントが等しくなる、堤体の後端から重心までのうでの長さ t である。

4. 不確定要因が被災遭遇確率に及ぼす影響

典型的な波浪条件および防波堤に対して、不確定要因が被災遭遇確率に及ぼす影響を感度分析によって調べた。

(1) 計算条件

沖波の出現確率はWeibull分布（尺度母数 $A=2.0$ ，位置母数 $B=4.05$ ，形状母数 $k=2.0$ ）にしたがうものとした。50年確率波の波高 H_0 は8.0m，周期 T_0 は13.0sである。海底地形は勾配が1/100の直線等深線海岸とした。最大波 $H_{max}(=H_{1/250})$ が砕波の影響を受けない水深30m（相対水深 $h/H_0=3.84$ ）に防波堤Ⅰ，砕波の影響を受ける水深10m（ $h/H_0=1.29$ ）に防波堤Ⅱを，それぞれ海岸線に対して平行に設置するものとした。したがって，波浪は等深線および防波堤に対して直角に入射する。防波堤の構造形式は混成堤とし，滑動安全率がちょうど1.2，転倒安全率が1.2以上，端し圧が概ね70t/m²以下となるように堤体幅とマウンド厚を定めた。

(2) ばらつきによる被災遭遇確率の変化

表-2は，ばらつきの大きさによる被災遭遇確率の変化を示したものである。沖波などの推定における偏りは全ケースについて3章に記した値を与えている。

まず，堤前波が砕波減衰していない防波堤Ⅰについてみると，ばらつきがない場合（ケース①）には滑動遭遇確率，期待滑動量ともにほとんど0である。これは，不確定要因に推定の偏りがあり，滑動安全率が1.2となるように設計した堤体であっても，実際の滑動安全率は1.2よりも大きな値を中心にばらついているためである。沖波推定，波浪変形計算，波力算定，摩擦係数の何れかにばらつきがある場合（ケース②～⑤）と比べて，全項目にばらつきがある場合（ケース⑥）には桁違いに滑動遭遇確率や期待滑動量は大きくなるが，それでも滑動遭遇確率は0.24，期待滑動量は4.2cmに過ぎない。なお，今後の研究や施工技術の進歩によってばらつきを10%低減（ケース⑦）できれば滑動遭遇確率や期待滑動量を半分程度に，50%低減できれば桁違いに安全性を向上できる。このことは「安全率を下げて同程度の安全性が確保できる」ということも意味する。

次に，堤前波が砕波減衰している防波堤Ⅱについてみると，沖波推定にばらつきがあっても波浪変形計算にばらつきがなければ（ケース②），設計堤前波を超過する堤前波は発生せず，滑動も生じないことが分かる。なお，転倒安全率が2.21と大きいため，何れのケースにおいても転倒遭遇確率は非常に小さい。

(3) 潮位差による被災遭遇確率の変化

潮位差の小さな日本海側では潮位が常に設計潮位に近い状態であるのに対し，潮位差の大きな太平洋側では設計潮位よりも潮位が大きく下がる。潮位が下がると堤体に作用する浮力が小さくなり，比較的浅い場所では砕波による波高低減も起きるので，安全性に余裕が生じる。

表-3は潮位差（朔望平均満潮面－朔望平均干潮面）による被災遭遇確率の違いを示したものである。不確定要因の偏りやばらつきは現状レベル（表-2のケース⑥）のものを与えた。沖合の防波堤Ⅰでは，滑動遭遇確率などの値は潮位差によってほとんど変化していない。これに対して防波堤Ⅱでは，潮位差が大きくなるにつれて滑動遭遇確率などの値は小さくなっており，このケースでは，太平洋側の代表的な潮位差である2.0mと日本海側の代表的な潮位差である0.5mとで2倍程度も違いのあることが分かる。

表-2 ばらつきによる被災遭遇確率の変化

ばらつきの与え方	ばらつきの変動係数				防波堤Ⅰ $h/H_0'=3.84$ $h=30\text{m}, F_s=1.2, F_0=1.90$			防波堤Ⅱ $h/H_0'=1.28$ $h=10\text{m}, F_s=1.2, F_0=2.21$		
	沖波	波浪変形計算	波力算定	摩擦係数	滑動遭遇確率 P_s	期待滑動量 $\bar{S}$ (cm)	転倒遭遇確率 P_o	滑動遭遇確率 P_s	期待滑動量 $\bar{S}$ (cm)	転倒遭遇確率 P_o
①全くなし	0	0	0	0	$<10^{-6}$	0.000050	$<10^{-6}$	0	0	0
②沖波のみ	0.10	0	0	0	0.0090	0.0055	0.000016	0	0	0
③波浪変形のみ	0	0.09	0	0	0.0057	0.020	0.000016	$<10^{-6}$	0.11	$<10^{-6}$
④波力算定のみ	0	0	0.22	0	0.023	0.045	0.00014	0.00010	0.00039	$<10^{-6}$
⑤摩擦係数のみ	0	0	0	0.17	0.011	0.0056	$<10^{-6}$	0.0025	$<10^{-6}$	0
⑥全て(現状)	0.10	0.09	0.22	0.17	0.24	4.2	0.0098	0.20	48.	$<10^{-6}$
⑦全て(10%低減)	0.09	0.081	0.195	0.145	0.16	1.8	0.0048	0.092	11.	$<10^{-6}$
⑧全て(50%低減)	0.05	0.045	0.11	0.085	0.013	0.029	0.000043	0.000019	0.000004	$<10^{-6}$

表-3 潮位差による被災遭遇確率の変化

潮位差 (m)	防波堤Ⅰ $h/H_0'=3.84$ $h=30\text{m}, F_s=1.2, F_0=1.90$			防波堤Ⅱ $h/H_0'=1.28$ $h=10\text{m}, F_s=1.2, F_0=2.21$		
	滑動遭遇確率 P_s	期待滑動量 $\bar{S}$ (cm)	転倒遭遇確率 P_o	滑動遭遇確率 P_s	期待滑動量 $\bar{S}$ (cm)	転倒遭遇確率 P_o
0.5	0.25	4.3	0.010	0.39	88.	0.000032
1.0	0.25	4.3	0.010	0.32	73.	0.000007
1.5	0.24	4.3	0.0099	0.26	59.	$<10^{-6}$
2.0	0.24	4.2	0.0098	0.20	48.	$<10^{-6}$
2.5	0.24	4.2	0.0098	0.15	38.	$<10^{-6}$
3.0	0.24	4.2	0.0099	0.12	30.	$<10^{-6}$

表-4 対象とした防波堤の諸元の範囲

沖波の発生確率分布	Weibull分布 (一部はGumbel分布)
設計沖波の波高	2.4 ~ 14.0 m
周期	4.9 ~ 16.0 s
海底勾配	0.001 ~ 0.014
潮位差	0.6 ~ 2.4 m
水深	5.3 ~ 26.1 m
相対水深	0.91 ~ 5.39
マウンド高さ	1.7 ~ 10.2 m
堤体幅	4.5 ~ 25.0 m
摩擦係数	0.6 (一部は0.7)

5. 既設防波堤の被災遭遇確率

現在供用中の混成堤 30 断面および消波工被覆堤 19 断面について、3 章に記した方法によって滑動遭遇確率、期待滑動量、転倒遭遇確率（入射角の補正なし）を計算し、滑動安全率や転倒安全率（現行設計法に従い入射角を ± 15deg 危険側に補正）との関係を調べた。表-4に対象とした防波堤の諸元の範囲を示す。

なお、本論文は、前報（河合ら、1996）の対象断面に 21 断面を追加するとともに、プログラムに改良を加えて再計算を行なった結果を報告するものである。

(1) 滑動遭遇確率

図-1は、滑動安全率 F_s と耐用年数間における滑動遭遇確率 P_s との関係を示したものである。この図から、同じ滑動安全率であっても、防波堤の構造形式によって滑動遭遇確率は異なることが分かる。それぞれの構造形式について、滑動安全率と滑動遭遇確率とは、平均的に次式に示す関係がある。

混成堤：
$$P_s = 10^{(1.45 - 2.05 F_s)} \tag{7a}$$

消波工被覆堤：
$$P_s = 10^{(3.08 - 4.18 F_s)} \tag{7b}$$

滑動安全率 1.2 に対応する平均的な滑動遭遇確率を求めると、混成堤では 0.099、消波工被覆堤では 0.012 である。現行の安全率と同程度の安全性をもつ防波堤を設計するためには、滑動遭遇確率がこれらの値となるように設計すれば良い。但し、ここでいう滑動とは「水平波力が摩擦抵抗力を上回る」という意味である。防波堤としての機能に支障をきたすほどの大きな滑動が起きる確率は、これらの値よりも小さいと考えられる。

混成堤について、潮位差の大きな場所（期望平均満潮面と期望平均干潮面との差が 1m 以上、主として太平洋沿岸）と小さな場所（1m 未満、日本海沿岸）とで滑動遭遇確率を比較すると、潮位差の小さな場所の方が大きくなっており、4 章（表-3）において記した感度分析の結果と同様の結果が得られた。

(2) 期待滑動量

図-2は、滑動に対する安全率 F_s と耐用年数間における期待滑動量 $\bar{S}$ (cm) の関係を示したものである。両者には平均的に次式に示す関係がある。

混成堤：
$$\bar{S} = 10^{(3.52 - 2.67 F_s)} \tag{8a}$$

消波工被覆堤：
$$\bar{S} = 10^{(3.04 - 3.25 F_s)} \tag{8b}$$

この式によれば、安全率 1.2 に対応する期待滑動量は、混成堤で 2.1cm、消波工被覆堤で 0.13cm と小さい。また、混成堤について潮位差の大きい場所と小さい場所とを比較すると、同一の滑動安全率に対して期待滑動量に 1 桁近くの違いのあることが分かる。

(3) 転倒遭遇確率

図-3は、転倒安全率 F_0 と耐用年数間における転倒遭遇確率 P_0 の関係を示したものである。混成堤と消波工被覆堤とに顕著な差はなく、次式に示す関係がある。

$$P_0=10^{(1.16-2.79F_0)} \tag{9}$$

この式によれば、安全率 1.2 に対応する転倒遭遇確率は 0.0064 である。現行防波堤の転倒安全率は 2 よりも大きな値をとることが少なくない。このような防波堤の転倒遭遇確率は極めて小さいことがわかる。

高山ら(1994)は、混成堤について、転倒安全率が 1.2 となる転倒遭遇確率が、滑動安全率が 1.2 となる滑動遭遇確率の 1/30 程度になることを示唆した。今回の計算でも、転倒遭遇確率が滑動遭遇確率の約 1/15 であることがわかった。つまり、現行の安全率は滑動と転倒とで必ずしも同一の安全性を保証していない。但し、堤体が滑動したときと転倒したときとは復旧費用が異なるので、必ずしも滑動遭遇確率と転倒遭遇確率を等しくするような設計をする必要はないと考えられる。

(4) 波向補正の影響

現行設計法では、波浪変形計算によって求められた入射角 θ を $\pm 15\text{deg}$ の範囲で危険側に振った入射角 β で波力を算定し、この波力に対して安全率を計算している。図-4は未補正入射角 θ (deg) と補正済入射角 β (deg) の関係を示したものであり、次式によって波向補正が行なわれている。

$$\beta = \begin{cases} \theta - 15\text{deg} & (15\text{deg} \leq \theta) \\ 0\text{deg} & (\theta < 15\text{deg}) \end{cases} \tag{10}$$

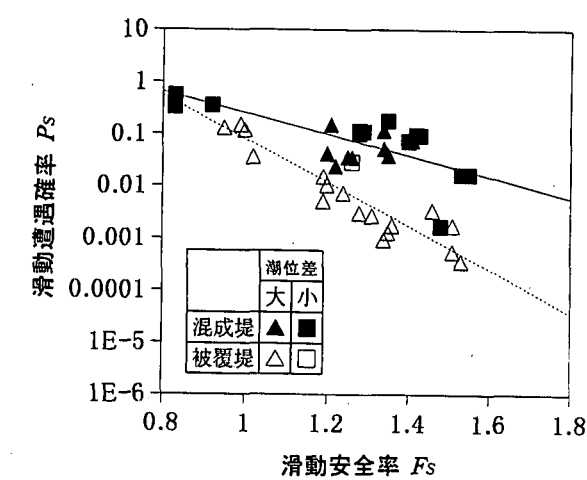


図-1 滑動安全率と滑動遭遇確率の関係

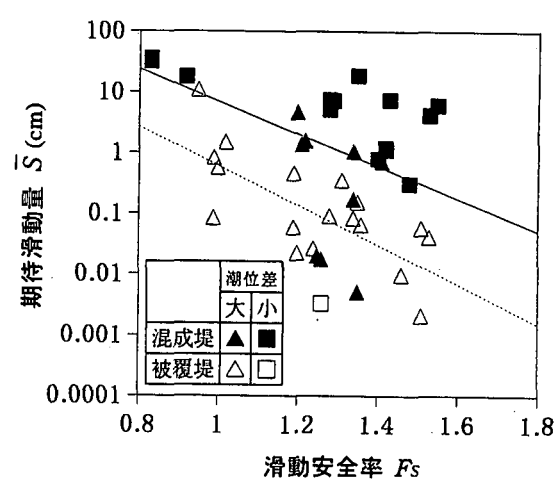


図-2 滑動安全率と期待滑動量の関係

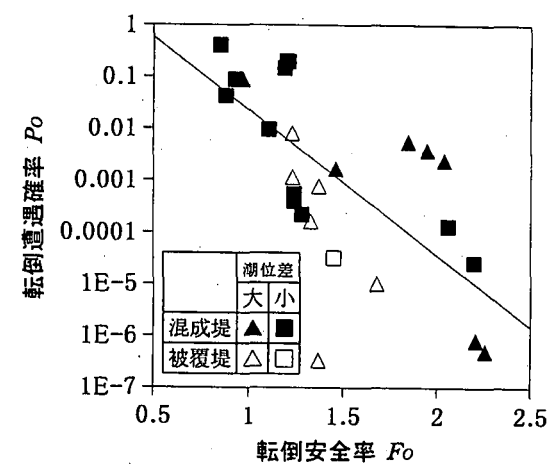


図-3 滑動安全率と転倒遭遇確率の関係

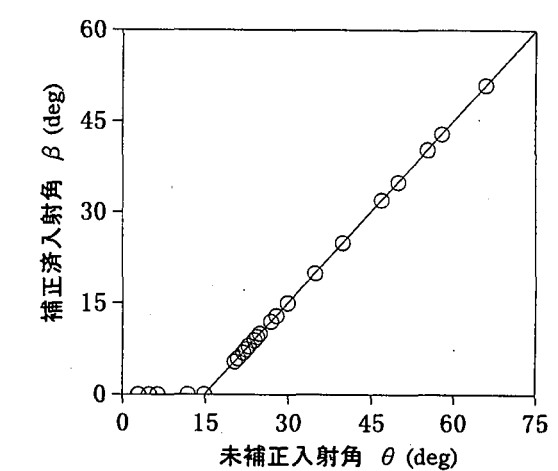


図-4 波向補正

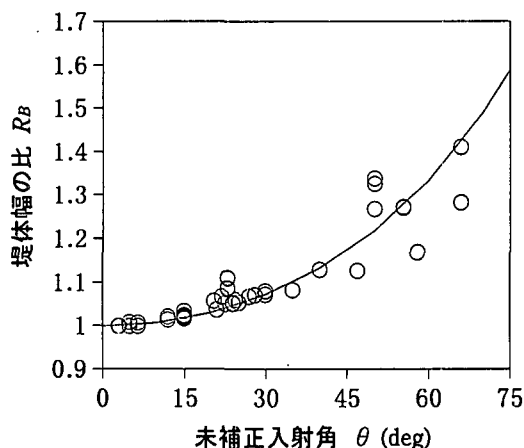


図-5 波向補正による安全率の変化

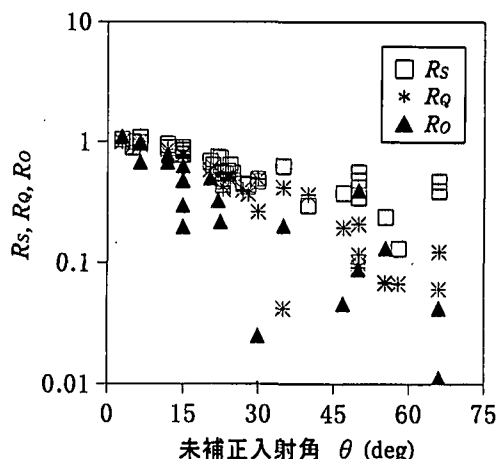


図-6 波向補正による被災遭遇確率の変化

合田式では波圧強度の算定式に入射角の項が含まれているので、未補正入射角 θ に対する波力よりも補正済入射角 β に対する波力の方が大きく算定される。そこで、表-4に示した実在防波堤（補正済入射角 β に対してある滑動安全率をもつ防波堤）を防波堤 B_β 、この防波堤の堤体幅を狭くして未補正入射角 θ に対して防波堤 B_β と同一の滑動安全率をもつようにした防波堤を防波堤 B_θ とする。

図-5は、防波堤 B_β の堤体幅と防波堤 B_θ の堤体幅の比 R_B を示したものである。波向補正によって堤体幅は大きく設計されるが、入射角が大きくなるにつれてその傾向は顕著になる。例えば、未補正入射角 $\theta = 45\text{deg}$ のときに堤体幅の比 R_B は1.2程度であり、堤体の安定性は波向補正によって2割程度も高められている。

図-6は、滑動遭遇確率、期待滑動量、転倒遭遇確率について、防波堤 B_β と防波堤 B_θ における各値の比（順に、 R_s, R_q, R_o ）を示したものである。直入射に近いときには波向補正をしても滑動遭遇確率などの値にあまり変化はないが、入射角が大きいときには波向補正によって滑動遭遇確率などの値が低く抑えられていることが分かる。ただし、このことは「入射角が大きい堤体进行設計するときには、入射角を正確に推定する必要がある」ということも意味する。

6. まとめ

本研究の結論は以下の通りである。

- ①防波堤が被災する理由には、設計沖波を超過する沖波の発生と、設計における不確定要因とがある。多くの場合、後者の理由によって被災しているものと考えられる。
- ②設計における不確定性によって堤体の被災遭遇確率は指数関数的に増加する。逆に言えば、不確定性を低減できれば、安全率を下げて同一の安全性をもつ防波堤を建設することが可能である。
- ③被災遭遇確率は平均的には安全率に反比例する。しかし、同一の安全率であっても、構造形式、潮位差、堤体への入射波向などの条件によって被災遭遇確率は異なる。

参考文献

- 河合弘泰・藤咲秀可・鈴木康正 (1996) : 潮位の発生確率分布と防波堤の安定性について, 海洋開発論文集, Vol.12, pp.261-266.
- 河合弘泰・藤咲秀可・鈴木康正・高山知司 (1996) : 防波堤堤体の被災遭遇確率および期待滑動量, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.836-840.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1994) : 混成防波堤の期待滑動量の計算法, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.756-760.
- 高山知司・池田直太 (1991) : 防波堤の信頼性設計について, 第2回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集, Vol.2, pp.245-252.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰 (1994) : 滑動と転倒による被災確率を考慮した防波堤の経済性設計の検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.1066-1070.
- 土田 孝・湯 怡新 (1996) : 港湾構造物の円形すべり解析における最適な安全率, 港研報告, 第35巻, 第1号, pp.117-146.
- 半沢 稔・高橋重雄・下迫健一郎 (1996) : モンテカルロ法を用いた消波ブロックの期待被災度の計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.796-800.
- 南 兼一郎・春日井康夫 (1991) : 鉄筋コンクリート港湾構造物への限界状態設計法の適用, 港湾技研資料, No.716, 48p.