

防波堤の滑動安定性に及ぼす海面上昇の影響

高山 知 司*

1. ま え が き

大気中の炭酸ガスの濃度が増加し、それによる温室効果で大気温が上昇して、極地の氷が融け、海面が上昇することが懸念されている。1990年に開催された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の作業部会においても、2020年頃には大気温が約1度高くなり、海面が20cm程度上昇し、2070年頃には大気温が1.5～3.5度高くなり、海面が45cm程度上昇すると報告している。今後100年間に110cm程度海面が上昇するというこれまでの研究結果(Barnett, 1984)より小さな上昇量にはなっているが、依然として海面上昇が起こることを予測している。

炭酸ガスの増大による温室効果が台風規模等の気象環境に与える影響については不確定な要素が多く、現状では予測ができるまでに至っていない。また、海面上昇についても、現在提案されている値も今後書き直される可能性がある。しかしながら、程度の差はあれ、将来大気温の上昇で、海面上昇が起きることはかなりの確度で予測されているとみなすことができる。

海面上昇が起ると、水深が増大して、来襲波高が高くなることに加え、構造物の水中重量が低下して抵抗力が小さくなり、構造物の安定性が下がる。それとともに、構造物の天端高が低くなり、越波量や伝達波等が増大して、防災機能が低下する。さらに、波の遡上高が大きくなり、海岸浸食にも影響を与える。このため、海面上昇が構造物の安定性及び防災機能の低下にどの程度の影響を及ぼすか、定量的に推定しておくことは、今後の対策をたてる上で非常に重要となる。

そこで、本論文においては、海面上昇による防波堤の滑動安定性の低下について、信頼性理論を用いて検討を行った。防波堤の安定性の低下を表わす指標としては、耐用年数間における防波堤の滑動遭遇確率と期待滑動回数の変化で示した。

2. 防波堤の滑動遭遇確率と期待滑動回数の推定法

著者が以前行った信頼性理論による防波堤の滑動安定

性の検討(高山, 1989)においては、沖波や波浪変形、波力の算定値の平均的な偏りやばらつきが算定値に依存しないという仮定の下に、高潮や潮位変動を無視して、防波堤の滑動遭遇確率を求めた。しかしながら、波高や波力の偏りやばらつきは算定値に依存すると考えられると同時に、波は満潮位るときだけ来襲するわけではなく、潮位が低いときにも来襲し、その場合には堤体水中重量は増大して、滑動し難くなる。そこで、本解析に当たっては、波高や波力の算定値の偏りやばらつきは算定値に依存するとして解析した。また、高潮や潮位変動の確率分布も考慮できるようにした。

防波堤の耐用年数間における滑動遭遇確率及び期待滑動回数を算定する本解析法の概略の流れ図を図—1に示す。本解析法は、既存の設計法による防波堤の設計と信頼性理論による滑動確率の算定の2つの部分に大きく分けることができる。

(1) 防波堤の設計

波浪や高潮の出現確率分布としては Gumbel 分布や Weibull 分布等の極値分布関数のうち最も適合度のよい分布形を選定する。このようにして求めた波浪及び高潮の出現確率分布を用いて、設定した再現期間 R_p 年に対応する波高 x_{R_p} や高潮偏差 η_{R_p} を次式によって求め、これらを設計に用いる。

$$\left. \begin{aligned} \int_{x_{R_p}}^{\infty} p_0(x_0) dx_0 &= 1.0/qR_p \\ \int_{\eta_{R_p}}^{\infty} p_\eta(\eta) d\eta &= 1.0q_s R_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $p_0(x_0)$ と $p_\eta(\eta)$ は波高と高潮の出現確率密度関数、 q と q_s は出現確率分布を求めるときに用いた波浪と高潮のデータ個数とデータを採用した期間(年)との比である。このようにして求めた x_{R_p} と η_{R_p} を設計沖波波高と高潮偏差として用いる。

この沖波に対して、波浪変形計算を行い、防波堤設置点での有義波高 $x_{1/3}$ と最高波高 $x_{\max}$ を求める。ただし、 $x_{\max}$ としては、碎波する場合には $5x_{1/3}$ だけ沖側の地点での値を用いる。波浪変形計算に用いる堤体前面での設計水深は、基準水深 h_D に高潮偏差 η_{R_p} と満潮位差 ζ_x を加えた値である。設計水位上の防波堤の天端

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長

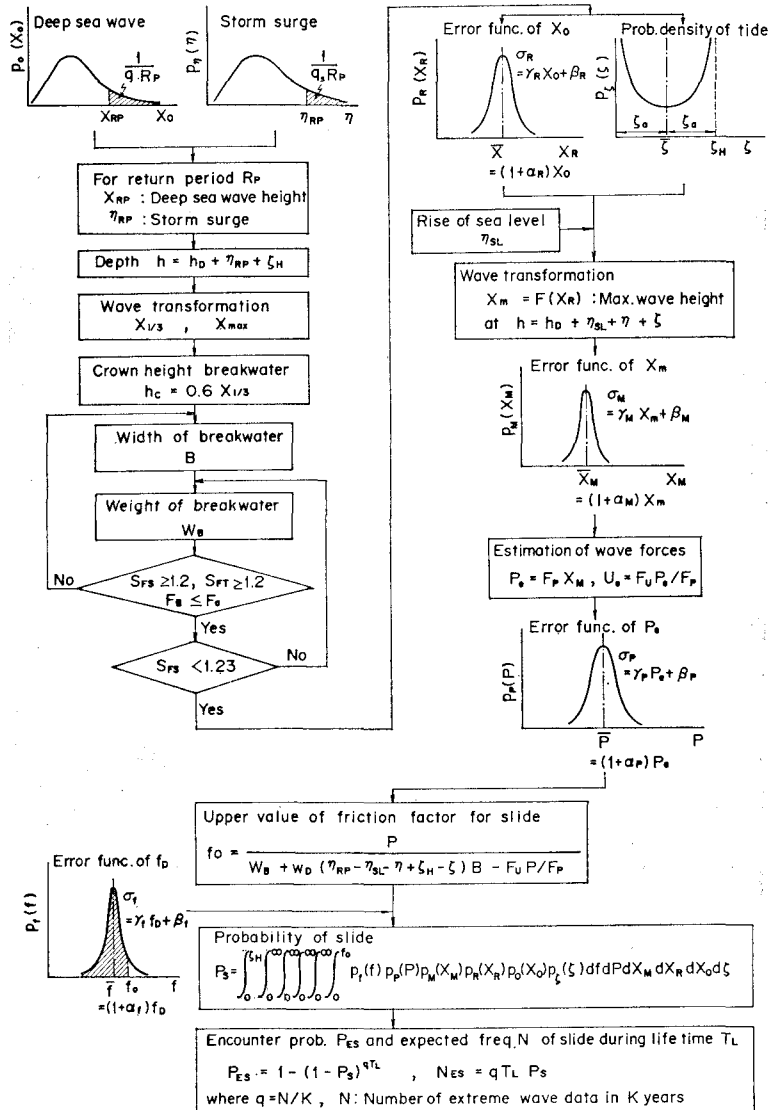


図-1 信頼性理論による防波堤の滑動遭遇確率と期待滑動回数計算フロー

高 h_c は、混成堤であっても消波工被覆堤であっても、 $h_c = 0.6 x_{1/3}$ で求めることを標準としているので、これに従って天端高を求めたが、実際に設定した天端高は、基準水位上の天端高を 50 cm 間隔で丸めた値としている。次に、堤体幅の設定に当っては、初期堤体幅の堤体単位体積重量から堤体の空中重量を求める。合田(1973)の波力公式を用いて、 x_{max} に対する波力を計算し、この波力に対して、滑動安全率 $S_{FS} \geq 1.2$ 、転倒安全率 $S_{FT} \geq 1.2$ 、端趾圧 $F_B \leq F_a$ が満足されているかどうかで判定する。ここに、 F_a は許容端趾圧である。ただし、現行の設計法では、偏心傾斜荷重に対する円弧滑りで判定するように変更されているが、ここでは計算を簡単にするために、端趾圧で考えている。これらの3つの条件が満足されない場合には、堤体幅を 50 cm 毎に、これら

の3条件を満足するまで増大させた。このようにすると、端趾圧で堤体幅が決り、滑動安全率が 1.2 よりはるかに大きくなる場合がある。この場合には堤体重量を過大に設計したことになるので、これを避けるために、実務者の意見を取り入れて、天端の所要高さは堤体にパラペットを設置することで保たせ、 $S_{FS} < 1.23$ を満足するまで堤体重量を低減させた。

(2) 防波堤の滑動確率の算定

前述のようにして設計した堤体に対して、耐用年数間における滑動遭遇確率と滑動回数を信頼性理論を用いて推定した。

波高が大きいときには高潮も大きいと想定されるので、波高と高潮偏差とは連動して生起すると仮定した。沖波波高が x_0 と推定された波は出現確率分布の推定誤

差等によって実際は x_0 からずれた値になることが予想される。そこで、実際に現れる波高 x_R は、平均値を $\bar{x}_R = (1 + \alpha_R)x_0$ として、標準偏差を $\sigma_R = \gamma_R x_0 + \beta_R$ とする次式の正規分布に従って出現すると仮定した。

$$p_R(x_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \exp\left\{-\frac{(x_R - \bar{x}_R)^2}{2\sigma_R^2}\right\} \dots (2)$$

高潮偏差についても同じような推定誤差が入る可能性があるが、その影響は波高ほど大きくはないとして本解析では考慮しなかった。潮位については、低潮位と満潮位の間を正弦的に変動すると仮定して、潮位の発生確率分布を次式のように求めた。

$$p_\zeta(\zeta) = 1/[\pi\zeta_a\sqrt{1 - \{(\zeta/\zeta_a) - 1\}^2}] \quad (0 \leq \zeta \leq \zeta_H) \dots (3)$$

ここに、 ζ は潮位変動、 ζ_H は潮位の全振幅、 ζ_a は潮位の片振幅である。

波高 x_R を与えて、波浪変形計算を行い、防波堤設置点での最高波高 x_m を算定する。このときに、地球温暖化による海面上昇が生じていれば、防波堤の設置水深 h は海面上昇 η_{SL} を考慮して、次式のように与える。

$$h = h_D + \eta_{SL} + \eta + \zeta \dots (4)$$

x_m と算定した最高波高に対して実際に現れる波高 x_M は、沖波波高の場合と同様に平均値を $\bar{x}_M = (1 + \alpha_M)x_m$ として、標準偏差を $\sigma_M = \gamma_M x_m + \beta_M$ とする正規分布に従って出現すると仮定した。

最高波高 x_M を与えて、防波堤に作用する水平波力と揚力を台田の波力公式によって求める。このようにして求めた水平波力 P_e に対して実際に現れる波力 P は、平均値を $\bar{P} = (1 + \alpha_P)P_e$ とし、標準偏差を $\sigma_P = \gamma_P P_e + \beta_P$ とする正規分布に従って出現すると仮定した。水平波力 P が出現したときの揚力 U は、波高に対する水平波力と揚力の比例係数 F_P と F_U を用いて、 $U = F_U P / F_P$ で算定した。

水平波力 P が与えられると、堤体の滑動は摩擦係数 f が次式を満足するときに起こる。

$$f < f_0 = P / \{W_B + w_0(\gamma_{RP} - \eta_{SL} - \eta + \zeta_H - \zeta)B - F_U P / F_P\} \dots (5)$$

ここに、 f_0 は滑動限界の摩擦係数、 W_B は前述の防波堤の設計で求めた、設計水位における堤体の水中重量、 w_0 は海水の単位体積重量である。実際の摩擦係数 f は、ある平均値の周りにばらつくと考えられる。そこで、 f は平均値を $\bar{f} = (1 + \alpha_f)f_D$ とし、標準偏差 $\sigma_f = \gamma_f f_D + \beta_f$ をとする正規分布で生起すると仮定した。ここに、 f_D は設計に用いた摩擦係数である。このように摩擦係数のばらつきを設定すると、図-1中に示す摩擦係数の分布形において、斜線で示した範囲で堤体が滑動することになる。ただし、この解析では堤体の動的挙動は考えていない。

沖波の出現分布に対応した生起確率をもつ波が来襲したときに堤体が滑動する確率 P_S は図-1中に示されている式のように求めることができる。沖波の出現確率分布が K 年中の N 個の波浪データから推定されたとすると、この分布形は年平均 $q = N/K$ 個発生する波浪の分布形を示していることになる。防波堤の耐用年数を T_L とすると、この耐用年数間に qT_L 個の極値波浪が作用することになり、 qT_L 個の極値波浪に対する遭遇確率 P_{ES} は

$$P_{ES} = 1 - (1 - P_S)^{qT_L} \dots (6)$$

また、期待滑動回数 N_{ES} は次式で求まる。

$$N_{ES} = qT_L P_S \dots (7)$$

3. 海面上昇に伴う防波堤の滑動安定性の低下

(1) 計算条件

2.で示した計算フローで耐用年数間における防波堤の遭遇確率や期待滑動回数を求めることができる。しかし、遭遇確率や期待滑動回数を精度よく算定するためには、沖波波高の推定精度、波浪変形計算や波力公式の精度、摩擦係数のばらつきを明らかにしておかなければならない。沖波の極値分布の推定精度については台田(1988)によって研究されているが、それ以外についてはほとんど調べられていない。本論文においては、遭遇確率や滑動回数の値そのものを対象にしているのではなく、将来において海面上昇が生じた場合に、その上昇量がどのように防波堤の安定性を低下させるかを検討しているので、次に示す値をとりあえず採用した。推定値の平均的な偏りはないとして、 $\alpha_R = \alpha_M = \alpha_P = \alpha_f = 0$ 、標準偏差については、 $\beta_R = \beta_M = \beta_P = \beta_f = 0$ とし、変動係数を $\gamma_R = \gamma_M = \gamma_P = \gamma_f = 0.1$ としたものを基本値とした。

計算に用いた沖波の出現分布としては、年最大波を用いて推定した結果、最も適合度のよい分布形が次式のWeibull分布になったと仮定した。

$$p_0(x_0) = 0.32(x_0 - 1.55) \exp[-\{(x_0 - 1.55)/2.5\}^2] \dots (8)$$

再現期間 $R_p = 50$ 年の波を設計波高として求めると、 $x_{Rp} = 6.5$ m となる。沖波の波形勾配は常に 0.035 とした。高潮は発生しないとして計算では考慮しなかった。

防波堤は図-2に示すような混成堤を考え、設置水深やマウンド水深等計算に必要な条件は表-1のように設

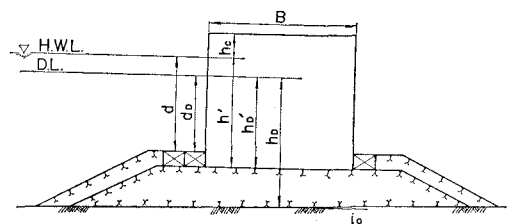


図-2 混成堤の断面と諸元の記号

表-1 計算に用いた防波堤の条件

h_D [m]	h_D' [m]	d_D [m]	h [m]	h' [m]	d [m]
5	3.5	2	6.5	5	3.5
9	7	5.5	10.5	8.5	7
15	11	9.5	16.5	12.5	11

定した。堤体の単位体積重量は、中詰め砂の単位体積重量やコンクリート部分の割合によって異なるが、平均的な値として 2.15 tf/m^3 (21.1 kN/m^3) とした。また、海水の単位体積重量は 1.03 tf/m^3 (10.1 kN/m^3) とした。さらに、許容端趾圧は $F_a = 50 \text{ tf/m}^2$ (490 kN/m^2) とした。

潮位変動としては、 $\xi_H = 1.5 \text{ m}$ ($\xi_a = 0.75 \text{ m}$) とし、計算では出現確率 0.1 毎に 10 区間に分割して、それぞれの区間における出現確率が半分になる潮位を代表潮位とした。また、沖波については 0.5 m 毎に計算した。防波堤の耐用年数は $T_L = 50$ 年とした。海底勾配は一樣と仮定したので、波浪変形計算には、合田(1975)による碎波変形の簡略式を用いた。

(2) 堤体の設置水深と海底勾配の影響

地球の温暖化による海面上昇は、水深の浅い海岸に設置されている防波堤に大きな影響を与えると推測される。そこで、海底勾配 $i_0 = 1/50$ の海岸において $h_D = 5, 9, 15 \text{ m}$ の3地点の混成堤に関して海面上昇の影響を調べた。図-3は、海面が 0 m から 2 m まで上昇するに従って、それぞれの地点における防波堤の滑動遭遇確率と期待滑動回数がどのように変化するかを示したものである。この図からわかるように、 $h_D = 15 \text{ m}$ の地点の防波堤は海面が上昇しても、滑動遭遇確率及び期待滑動回数ともにほとんど変化しない。一方、水深の浅い、 $h_D = 9 \text{ m}$ の地点の防波堤では滑動遭遇確率及び期待滑動回数ともに海面が上昇するにつれて増大しており、滑動遭遇確率は海面上昇が 1.4 m になると、海面上昇がない場合の2倍になる。また、期待滑動回数は、 0.75 m の海面上昇で2倍に増える。さらに水深の浅い、 5 m の地点では、海面上昇に伴う滑動遭遇確率と期待滑動回数は、水深 9 m の場合より大きくなり、特に、期待滑動回数は急激に増大する。このように水深が浅い地点にある防波堤

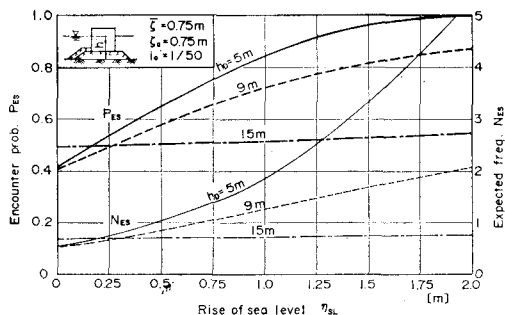


図-3 混成堤の滑動安定性に及ぼす水深の影響

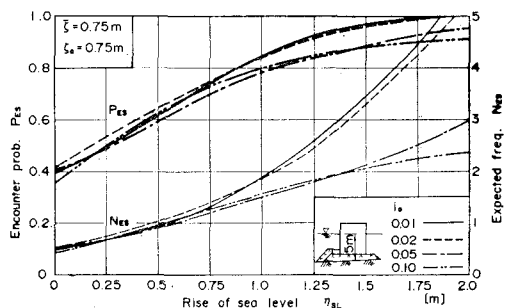


図-4 混成堤の滑動安定性に及ぼす海底勾配の影響

ほど海面上昇によって滑動し易くなる。これは、水深が浅いと碎波が防波堤に作用し、碎波波高は水深の増大とともに大きくなるためである。

図-4は、海底勾配の相違による海面上昇の影響を示したものである。このときの防波堤の設置水深は、海面上昇の影響の強い、 $h_D = 5 \text{ m}$ である。海底勾配による差は海面上昇が 0.75 m まではほとんどなく、これより大きくなると、緩やかな海底勾配にあるほど、防波堤は滑動し易くなる。合田の波力公式に用いる波高は、防波堤設置点における有義波高の5倍だけ沖側に離れた地点での最高波高であるため、海底勾配が急になるほど、最高波高を算定する水深が深くなる。水深が深くなると、海面上昇の影響を受け難くなり、そのため、海面が上昇するに従って、図-4に示すような海底勾配による差が滑動遭遇確率に現れたものと考えられる。

(3) 混成堤と消波工被覆堤との差

混成堤の前面を消波ブロックで被覆した消波工被覆堤が水深の浅い地点にしばしば建設される。このような防波堤と混成堤とでどちらが海面上昇の影響を受け易いかを調べたのが図-5である。対象とした水深は $h_D = 5, 9 \text{ m}$ で、海底勾配は $i_0 = 1/50$ である。海面上昇がない場合は、消波工被覆堤は混成堤より 0.1 程度小さな滑動遭遇確率であるが、海面が上昇していくと、滑動遭遇確率が急激に大きくなる。海面上昇量が $h_D = 5 \text{ m}$ の地点では 0.25 m 、 $h_D = 9 \text{ m}$ の地点では 0.8 m より大きくなると、消波工被覆堤は混成堤より滑動し易くなる。

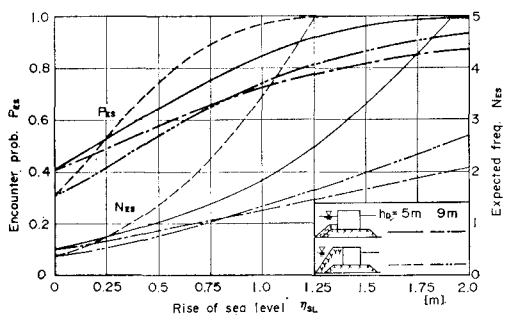


図-5 混成堤と消波工被覆堤の安定性の比較

本解析に用いた合田の波力公式では、混成堤の場合、堤体前面のマウンド水深が波高に対して相対的に浅くなると衝撃的な力が生じ、波力が増大するとして、この衝撃的な力を表す項を導入している。しかし、消波工被覆堤の場合には、前面に設置した消波ブロックの影響でこのような衝撃的な力が現れないため、この衝撃的な力を考慮していない。混成堤と消波工被覆堤との間におけるこのような波力公式の差が滑動遭遇確率の算定に現れ、海面上昇がない場合には消波工被覆堤の滑動遭遇確率が混成堤の場合より少し小さくなり、また、消波工被覆堤が海面上昇によってその滑動安定性を大きく低下させることになったと推測される。

(4) 波高および波力の推算精度の影響

前掲の図-3～5は、波高や波力の推算精度に関して基本値を用いて計算したものである。ここでは、これらの推算精度が変化した場合の遭遇確率の変化について調べた。

図-6は、海底勾配 1/50、水深 9 m の地点に設置された混成堤の滑動遭遇率の変化を示している。基本値に対する滑動遭遇確率の変化は太い実線で示している。沖波や波浪変形、波力の推算精度が基本値より悪く、変動係数がそれぞれ 0.2 である場合、滑動遭遇確率は基本値の場合より大きくなる。波浪変形と波力の推算精度の悪化による影響は両者ともほとんど同じである。海面上昇が 1.0 m 以下では、滑動遭遇確率に対する波浪変形と波力の推算精度の影響は沖波の場合より大きいが、海面上昇が 1.0 m より大きくなって、水深が深くなると、これらの影響はどれも同じになる。また、逆に推算精度が基本値よりよくて、変動係数が 0.05 になると、滑動遭遇確率は下がり、特に、波浪変形と波力の推算精度が向上した場合に大きく下がる。しかし、海面上昇が 1.5 m にもなると、3 者とも同じような効果になる。以上のことから、水深が比較的浅く、砕波が作用するような場合には、沖波の推算精度を上げるより波浪変形及び波力の推算精度を上げることが防波堤の安全設計の面からは重要となる。

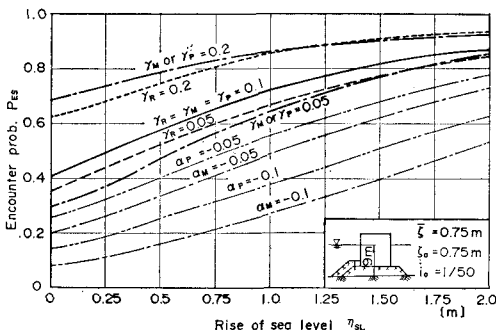


図-6 推算精度による滑動遭遇確率の変化

波浪変形計算や波力の推算値が平均的に見て少し大きめに推定されている場合に、滑動遭遇確率がどの程度低下するか調べてみた。推算値を平均的に 5% ($\alpha_M = \alpha_P = -0.05$) 及び 10% ($\alpha_M = \alpha_P = -0.1$) 大きめに推定していた場合の滑動遭遇確率を図-6中の細線で示している。波浪変形計算あるいは波力が推算値の 5% だけ偏っている場合でも、基本値の場合と比較して、滑動遭遇確率は大きく低下し、 $\alpha_P = -0.05$ で 0.1～0.15、 $\alpha_M = -0.05$ で 0.15～0.2 下がる。 $\alpha_P = -0.05$ の場合でも、推算精度を上げた $\gamma_M = 0.05$ の場合より遭遇確率は小さい。10% も偏らせると、5% の場合の 2 倍程度遭遇確率は下がる。変形計算と波力の推算値が同時に偏っていた場合には相乗効果で、非常に大きく下がるのが推測される。このように推算値が偏っていると、海面上昇が小さいときの滑動遭遇確率の上昇勾配が小さくなり、海面上昇に対する防波堤の安定性が增大する。

4. あとがき

信頼性理論を用いて、耐用年数間における防波堤の滑動遭遇確率や期待滑動回数を算定する手法を提案した。この手法を用いて、地球の温暖化にともなう海面上昇が既存の防波堤の安定性にどのように影響するか検討を行った。それによって得られた結論は以下の通りである。

- 1) 砕波帯内にあって、水深の浅い地点の防波堤ほど海面上昇によって滑動し易くなる。
- 2) 海面上昇による防波堤の安定性の低下は、設置海域の海底勾配には大きく影響されない。
- 3) 混成堤より消波工被覆堤の場合が海面上昇によって急激にその滑動安定性を低下させる。
- 4) 波高や波力を大きめに推定していると、滑動遭遇確率を大きく下げ、海面上昇に対する防波堤の安定性も向上する。

最後に、本研究の遂行に当たり、防波堤の設計方法や中詰め砂の重量等に関して貴重な助言を頂いた運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所 神田勝巳前所長及び港湾技術研究所計画設計基準部設計基準研究室 南兼一郎室長には心から感謝する次第である。

参考文献

- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 12 巻, 3 号, pp. 31～69.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 14 巻, 3 号, pp. 59～106.
- 合田良実 (1988): 極値統計におけるプロットング公式ならびに推定値の信頼区間に関する検討, 港研報告, 27 巻, 2 号, pp. 31～92.
- 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. 673～677.
- Barnett, T. P. (1984): The estimation of 'Global' sea level change: A problem of uniqueness, J. Geophys. Res., 89 (C5), pp. 7980～7988.