

46. 地球温暖化による防波堤の滑動遭遇確率の変化

Variation of sliding failure probability of breakwater due to global warming

河合弘泰*

Hiroyasu KAWAI

ABSTRACT; The sliding safety factor of a breakwater in the deterministic wave and tidal level should be larger than 1.2 in the present design method, but the safety degree may decrease due to the variation of the marine condition in global warming. The sliding failure probability of a breakwater during the life time can be evaluated by a reliability design method. The mean water rising may push up the sliding failure probability only in surf zone, where the incident wave height is proportional to the water depth. On the other hand, assuming the meteorological tide anomaly is related with the offshore wave height, the increase of the offshore wave height raises the sliding failure probability not only in deepwater but also in surf zone.

KEYWORDS; mean sea level rising, breakwater, sliding failure probability, reliability design method

1. はじめに

地球温暖化に伴って、平均海面が上昇したり、台風が強大化する可能性が指摘されている。平均海面が上昇しつつあることは過去の観測から明らかであり、数値シミュレーションによる将来予測もなされている。海面が上昇すると、防波堤に作用する浮力は増加し、さらに砕波帯では波高も増加するので、防波堤の安定性は低下する。一方、台風の強大化については明確な傾向が見い出されていないものの、台風が強大化すれば、沖波波高や高潮偏差が増加して、やはり防波堤の安定性は低下する。そこで、信頼性理論に基づいて防波堤の滑動遭遇確率を試算し、地球温暖化が防波堤の安全性にもたらす影響の特徴について調べる。

2. 地球温暖化

2.1 平均海面の上昇

地球温暖化によって、海水が熱膨張したり、氷河など陸氷が部分的に融解することなどによって、平均海面が上昇すると考えられている。例えば、IPCC の第二次影響評価報告(1995)では、2100 年までに全球平均で 15 ～ 95cm(最確値 50cm)上昇すると予測されている。日本沿岸の平均海面については、村上ら(1992)が長期観測に基づき、中部から北日本にかけて+1.5 ～+1.8(mm/年)、西日本では-1.0(mm/年)の速さで変動したと報告している。宇多ら(1992)もまた、太平洋の沿岸に限ると+3.8(mm/年)、日本海と東シナ海の沿岸では+0.6(mm/年)の速さで変動したと、同様な報告をしている。

2.2 台風の強大化

台風を一種の熱機関と見立てれば、海面水温に比例して強大な台風が発生するとも考えられるが、台風の強風には海面水温を下げて台風の発達を抑制する効果もある。また、台風という現象は年変動が著しいため、

* 運輸省港湾技術研究所水工部 Hydraulic Engineering Division, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport

観測結果をもとに長期トレンドを見出すことは非常に困難である。一方、永井(1997)が日本沿岸における年平均有義波高の経年変化を調べたところ、1980年代は日本海と太平洋の両沿岸で増加傾向にあったが、1990年代に入ってからには特に太平洋で頭打ちとなった。しかしながら、防波堤の被災に結びつくような異常波浪については、その発生数が少なく、統計的な変動性も大きいため、波高が増加傾向にあるかどうかは明らかではない。

表-1 直轄の防波堤の既設函数および被災函数

年 度	混成堤		消波工被覆堤	
	既設函数 (函)	被災函数 (函)	既設函数 (函)	被災函数 (函)
平成元(1989)	8,461	0	6,522	0
平成2(1990)	8,641	13	6,640	2
平成3(1991)	8,809	3	6,742	0
平成4(1992)	8,923	1	6,844	0
平成5(1993)	9,023	13	6,991	0

3. 既設防波堤の安全性

これまで防波堤の設計では、適当な再現期間(一般に 50 年)をもつ確率波浪を「設計波」と定め、これが防波堤に作用したときの滑動安全率が 1.2 以上となるように断面を定めてきた。表-1は、運輸省各港湾建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局が自ら整備した(いわゆる直轄の)防波堤について、既設函数および被災函数(風浪による堤体の滑動または転倒に限る。地震や津波による被害、堤体の上部工や消波工のみの被害、施工途中や暫定断面の被害は除く)を示したものである。調査の対象とした 5 年間では、混成堤 30 函および消波工被覆堤 2 函が被災した。被災の多い年度と少ない年度との差は大きい。年平均の被災確率は混成堤で 7×10^{-4} 、消波工被覆堤で 6×10^{-5} である。また、防波堤の供用年数を 50 年とすれば、被災遭遇確率は混成堤で 3×10^{-2} 、消波工被覆堤で 3×10^{-3} となり、このことは防波堤の安全性が非常に高いことを示している。

4. 信頼性理論に基づく滑動遭遇確率の計算方法

4.1 既往の研究

信頼性理論とは、構造物の設計に含まれる推定誤差や、供用年数間に作用する外力の出現特性を確率論的に考慮して、安全性を評価するものである。その安全性は、安全率ではなく、被災確率や期待変形量によって示される。高山ら(1990,1991)や著者ら(1996,1997)は防波堤の滑動遭遇確率、下迫ら(1998)は期待滑動量について計算を試みており、特に高山(1990)は「砕波帯内で設置水深の浅い防波堤ほど平均海面の上昇によって滑動遭遇確率が著しく増加する」と報告している。但し、この滑動遭遇確率は、個々の年の平均海面に対する滑動確率を供用年数にわたって積分した値ではなく、ある一定の平均海面上昇量を用いて求められた値である。一方、台風の強大化については検討された例がない。

4.2 本研究での仮定

本研究では、平均海面の上昇や台風の強大化が一定の割合で進行する単純なシナリオを仮定し、 i 年目における平均海面の上昇量 δ_i と台風の強大化率 rx_i を次式によって与えるものとする。

$$\delta_i = (i-1) \frac{\delta_{50}}{50} \tag{1}$$

$$rx_i = (i-1) \frac{rx_{50}}{50} \tag{2}$$

ここに、 δ_{50} は 50 年間における平均海面の上昇量、 rx_{50} は 50 年間における台風の強大化率である。

i 年目における沖波波高 X_e の出現確率分布 $pe(X_e)$ は、以下に示す Weibull 分布を仮定する。

$$pe(X_e) = \frac{k_X}{A_{X,i}} \left(\frac{X_e - B_{X,i}}{A_{X,i}} \right)^{k_X-1} \exp \left[- \left(\frac{X_e - B_{X,i}}{A_{X,i}} \right)^{k_X} \right] \tag{3}$$

$$A_{X,i} = A_{X,0}(1+r_{X,i}) \quad (4a)$$

$$B_{X,i} = B_{X,0}(1+r_{X,i}) \quad (4b)$$

ここに、 $A_{X,i}$ および $B_{X,i}$ は i 年目の尺度母数および位置母数であり、 k_X は形状母数で 2.0 とする。また、太平洋や日本海に直接面した海岸を想定し、台風が強大化する前の状態で 50 年確率沖波の波高が 8.0m となるように、 $A_{X,0}=2.0$ 、 $B_{X,0}=4.044$ と仮定する。これらの式が示すように本研究では、台風が強大化して高波浪が出現しやすくなっていく過程を、波高の出現確率分布の母数を変化させることによって便宜的に再現する。

高潮偏差 ξ の出現確率分布 $p_\xi(\xi)$ についても同様に、以下に示す Weibull 分布を考える。

$$p_\xi(\xi) = \frac{k_\xi}{A_{\xi,i}} \left(\frac{\xi - B_{\xi,i}}{A_{\xi,i}} \right)^{k_\xi - 1} \exp \left[- \left(\frac{\xi - B_{\xi,i}}{A_{\xi,i}} \right)^{k_\xi} \right] \quad (5)$$

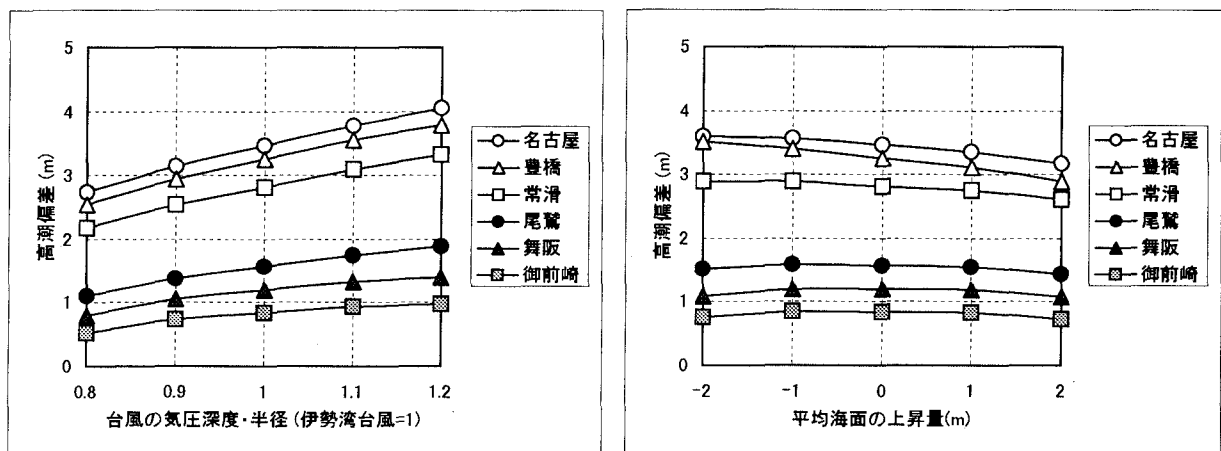
$$A_{\xi,i} = A_{\xi,0}(1+r_{\xi,i}) \quad (6a)$$

$$B_{\xi,i} = B_{\xi,0}(1+r_{\xi,i}) \quad (6b)$$

ここに、 $A_{\xi,i}$ と $B_{\xi,i}$ は i 年目の尺度母数および位置母数であり、 k_ξ は形状母数で 2.0 とする。また、台風が強大化する前の状態で 50 年確率偏差が 0.5m となるように、 $A_{\xi,0}=0.125$ 、 $B_{\xi,0}=0.253$ と仮定する。

以上のように本研究では、台風の強大化によって沖波波高と高潮偏差の両方が増加すると仮定する一方で、平均海面の上昇が高潮偏差に及ぼす影響は小さいものとして無視する。図-1は、一例として伊勢湾台風による、伊勢湾・三河湾の湾奥部(名古屋、豊橋、常滑)と太平洋に直接面した場所(尾鷲、舞阪、御前崎)の高潮偏差の推算値を示す。平均海面が 1m 上昇した場合の高潮偏差の変化は、台風の気圧深度と半径が 1 割変化した場合と比べて非常に小さい。中辻ら(1993)は第二室戸台風に対して大阪湾、磯部ら(1994)は伊勢湾台風を模した台風に対して東京湾の高潮偏差を推算しているが、これらの研究でも、平均海面の上昇による高潮偏差の変化は非常に小さいという結果が得られている。

さらに、天文潮位 ζ には主要な 6 分潮 $M_2, S_2, O_1, K_1, Sa, Saa$ を考慮し、太平洋沿岸では台風シーズン、日本海沿岸では冬季風浪シーズンの出現確率分布 $p_\zeta(\zeta)$ を与える。沖波波高を極値分布関数へのあてはめる際には誤差が避けられないので、極値分布関数から推定した波高を X_e 、真の波高を $X_0=(1+r_0)X_e$ とするとき、変数 r_0 は平均が 0、標準偏差が 0.1 の正規分布 $p_0(r_0)$ をなすと仮定する。また、高山ら(1991)によれば、波浪変形計算による波高を X_{Me} 、真の波高を $X_M=(1+r_M)X_{Me}$ とすると、変数 r_M は平均が -0.13、標準偏差が 0.09 の正規分布 $p_M(r_M)$ をなす。波力公式による波力を P_e 、真の波力を $P=(1+r_P)P_e$ とすると、変数 r_P は平均が -0.12、標準偏差が 0.22 の正規分布 $P_P(r_P)$ をなす。摩擦係数の設計値を f_D 、真の値を $f=(1+r_f)f_D$ とすると、変数 r_f は平均が +0.06、標準偏差が 0.16 の正規分布 $p_f(r_f)$ をなす。



(a) 台風の気圧深度・半径による変化

(b) 平均海面の上昇による変化

図-1 台風の強さや海面上昇による高潮偏差の変化

以上のことを踏まえ、さらに防波堤の供用年数を 50 年と仮定すると、滑動遭遇確率 P_S は次式によって与えられる。

$$P_S = 1 - (1 - p_{S,1})(1 - p_{S,2})(1 - p_{S,3}) \cdots (1 - p_{S,50}) \quad (7)$$

$$p_{S,i} = \iiint \iiint \iiint \varepsilon \{p_{\zeta}(\zeta) p_{\xi}(\xi) p_e(X_e) p_0(r_0) p_M(r_M) p_P(r_P) p_f(r_f)\} dr_f dr_P dr_M dr_0 dX_e d\xi d\zeta \quad (8)$$

ここに、 $p_{S,i}$ は i 年目の年滑動確率である。 ε は被災かどうかを示す値であり、次式によって定義する。

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & (F_S < 1) \\ 0 & (F_S \geq 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$F_S = \text{func}(\zeta, \xi, X_e, r_0, r_M, r_P, r_f, \delta_i, r_{X,i}) \quad (10)$$

すなわち、様々な設計誤差や外力条件に対して滑動安全率 F_S を計算し、その値が 1 未満の場合には「被災」として扱う。但し、ここでいう被災には、防波堤の機能として支障がなく、表-1において被災函数にカウントされないような微小な滑動も含まれる。

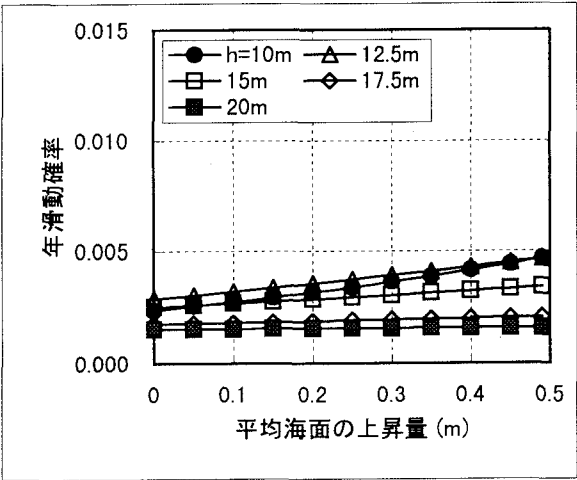
5. 地球温暖化による滑動遭遇確率の変化

本研究では、勾配 1/100 の直線等深線海岸に、海岸線に対して 30deg の角度で設置された混成堤を考える。50 年確率沖波の波高は 8.0m、周期は 13.0s、主波向は海岸線に対して直角とする。また、太平洋沿岸と日本海沿岸の両方を想定し、これらの典型的な天文潮位差として 2.5m と 0.5m を与える。

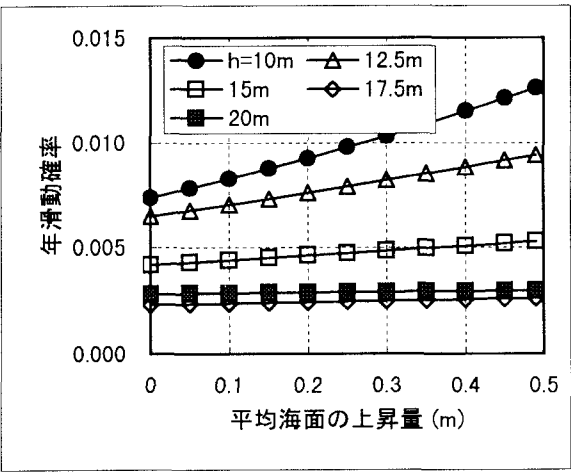
5.1 平均海面の上昇

図-2は平均海面の上昇量と年滑動確率の関係を示す。設置水深 h が 15m 以下の防波堤、すなわち設計波クラスの波浪に対して砕波帯となる防波堤では、海面の上昇によって浮力が増加するだけでなく、入射波高も大きくなるため、防波堤は滑動しやすくなる。この傾向は設置水深が浅いほど顕著であり、設置水深 $h=10\text{m}$ の防波堤の年滑動確率は、0.5m の海面上昇によって約 2 倍に増加する。これに対して設置水深 h が 17.5m 以上の防波堤では、設置水深の増加に伴ってケーソンの高さが高くなるので浮力増大の影響は小さく、また、海面が上昇しても入射波高はそれ以上大きくなることはない。そのため、年滑動確率はほとんど変化しない。

図-3は供用年数 50 年間にわたって積分した滑動遭遇確率を示す。50 年間で平均海面が 0.5m 上昇するシナリオを想定した場合、設置水深 $h=10\text{m}$ の防波堤の滑動遭遇確率は、海面上昇が全くない場合の 1.3 ～ 1.4 倍になる。これに対して設置水深 $h=20\text{m}$ の防波堤では、平均海面の上昇の影響をほとんど受けない。

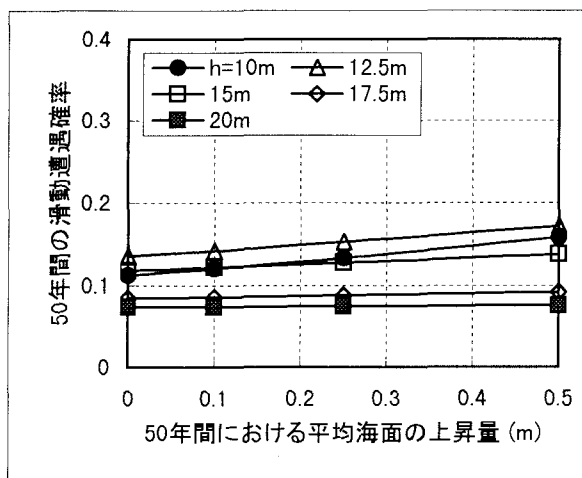


(a) 太平洋沿岸(天文潮差 2.5m)

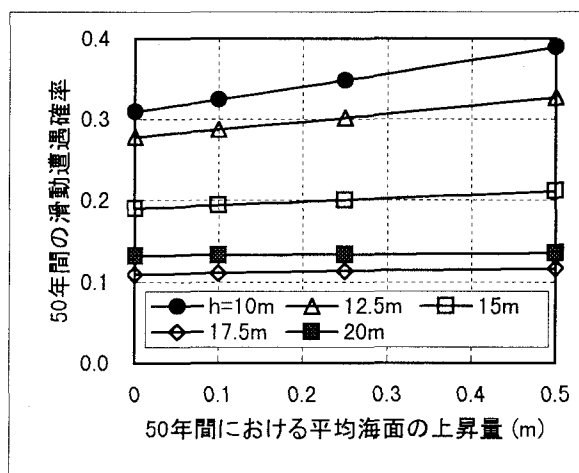


(b) 日本海沿岸(天文潮差 0.5m)

図-2 平均海面の上昇量と年滑動確率の関係

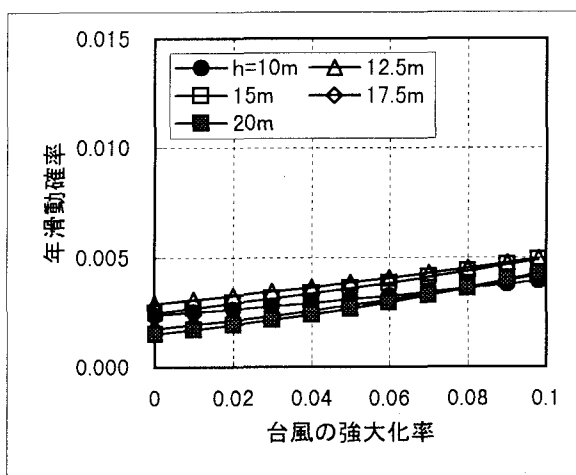


(a) 太平洋沿岸(天文潮差 2.5m)

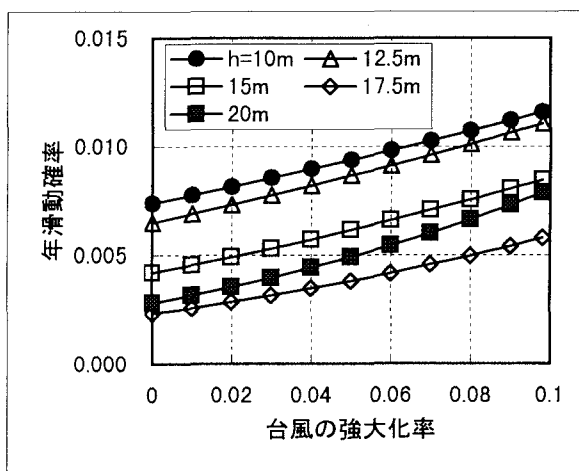


(b) 日本海沿岸(天文潮差 0.5m)

図-3 50年間における平均海面の上昇量と滑動遭遇確率の関係

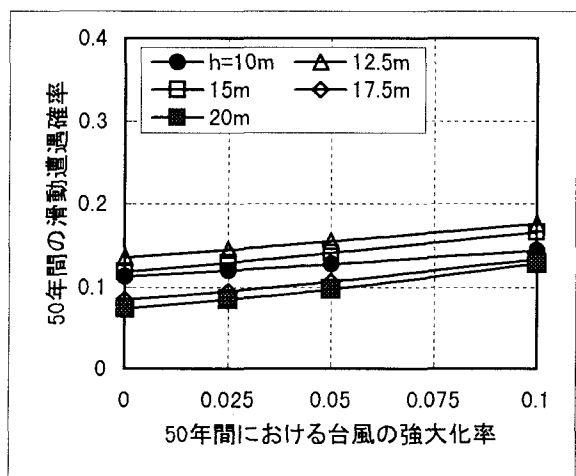


(a) 太平洋沿岸(天文潮差 2.5m)

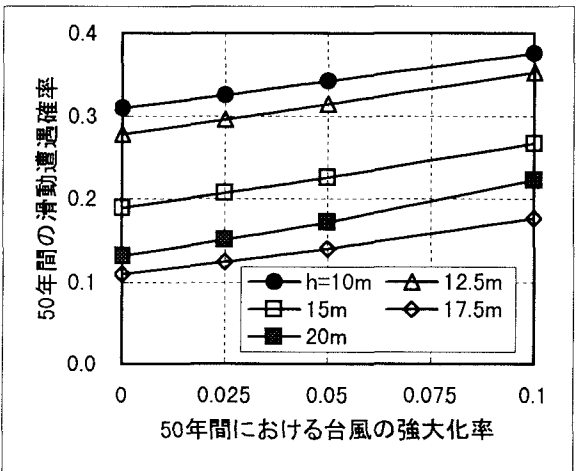


(b) 日本海沿岸(天文潮差 0.5m)

図-4 台風の強大化率と年滑動確率の関係



(a) 太平洋沿岸(天文潮差 2.5m)



(b) 日本海沿岸(天文潮差 0.5m)

図-5 50年間における台風の強大化率と滑動遭遇確率の関係

なお、日本海沿岸では天文潮位差が小さく、常に朔望平均満潮位 H.W.L.に近い潮位である。そのため、日本海沿岸の防波堤の年滑動確率は太平洋沿岸と比べて全体的に大きい。

5.2 台風の強大化

図-4は台風の強大化率と年滑動確率の関係を示す。台風が強大化して沖波波高や高潮偏差が平均で1割増加したとすると、年滑動確率は1.6～2.8倍に増加する。設計波クラスの波浪に対して砕波帯外にある防波堤では、台風の強大化による沖波波高の増大が、防波堤の入射波高の増加に直接つながる。また、砕波帯内に位置する防波堤でも、高潮によって水深が増加すると、防波堤への入射波高は増加する。その結果、砕波帯の内外に関わらず、台風の強大化によって年滑動確率は増加するものと考えられる。

図-5は供用年数50年間にわたって積分した滑動遭遇確率を示す。50年間に沖波波高と高潮偏差が1割増になる速さで台風の強大化が進行した場合の滑動遭遇確率は、台風が全く強大化しない場合の1.2～1.7倍に増加する。

6. まとめ

本研究では、地球温暖化によって平均海面が上昇した場合と、台風の強大化によって沖波波高や高潮偏差が大きくなった場合について、防波堤の滑動遭遇確率の変化を調べた。地球温暖化については不明な点が多く、また滑動遭遇確率の計算方法にも改良の余地があるため、得られた滑動遭遇確率を定量的に評価することはできないが、地球温暖化による影響を定性的にまとめると、以下の通りである。

- ①平均海面が上昇すると、砕波帯内の防波堤では、入射波高が増加するので滑動遭遇確率は増加する。砕波帯外の防波堤では、それ以上に入射波高が増加しないので滑動遭遇確率はほとんど変化しない。
- ②台風が強大化して沖波波高や高潮偏差が増大すると仮定すれば、砕波帯外の防波堤では沖波波高の増大が入射波高の増大に直接結びつき、砕波帯内の防波堤では高潮による水深の増加で入射波高が増加する。したがって、砕波帯の内外に関わらず滑動遭遇確率は増加する。

なお、滑動遭遇確率と定性的には同じような結果が得られると思われるが、期待滑動量についても同様な検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 磯部雅彦・三島英敬・筒井純一(1994)：海面上昇後の東京湾沿岸における高潮浸水の予測計算，第2回地球環境シンポジウム講演会，pp.168-173.
- 宇多高明・伊藤弘之・大谷靖郎(1992)：日本沿岸における1955年以降の海水準変動，海岸工学論文集，第39巻，pp.1021-1025.
- 河合弘泰・藤咲秀可・鈴木康正・高山知司(1996)：既設の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.
- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也(1997)：潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率，港湾技術研究所報告，第36巻，第4号，pp.3-41.
- 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利(1998)：変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案－期待滑動量を用いた信頼性設計法－，海岸工学論文集，第45巻，pp.801-805.
- 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.873-877.
- 高山知司・池田直太(1991)：現行設計法における防波堤の滑動安定性，海岸工学論文集，第38巻，pp.641-645.
- 永井紀彦(1997)：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)による我国沿岸の波浪特性の解明，港湾技研資料，No.863，113p.
- 中辻啓二・村岡浩爾・栗田秀明・山根伸之(1993)：地球温暖化が大阪湾の高潮に及ぼす影響に関する研究，第1回地球環境シンポジウム講演集，pp.209-215.
- 村上和男・山田邦明(1992)：我国沿岸の海面水位の長期変動の特性とその要因，海岸工学論文集，第39巻，pp.1026-1030.
- IPCC (1995)：The IPCC Second Assessment Synthesis of Scientific-Technical Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UN Framework Convention on Climate Change.