

波向の不確定性が 防波堤堤体の滑動遭遇確率に及ぼす影響

EFFECT OF UNCERTAINTY IN WAVE DIRECTION ON SLIDING FAILURE PROBABILITY OF BREAKWATER CAISSON

河合弘泰

Hiroyasu KAWAI

正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官 (〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

The wave direction giving the minimum safety factor for a breakwater caisson is adopted as the design wave direction in the present design method. However, offshore wave direction is varied in itself, and the wave direction estimated by wind observation or wave hindcasting is distributed around the actual wave direction. In this paper, the sliding failure probability of breakwater caisson is computed by reliability design method considering the variation of offshore wave direction. The sliding failure probability depends on the width of the variation. It is important to estimate wave direction exactly especially for the design of deepwater breakwater. On the other hand, it is not so important for the breakwater constructed in surf zone, because the incident wave direction becomes almost normal to the shoreline by wave refraction, and the incident wave height depends mainly on the water depth. Additionally, the multi-directionality of incident waves may reduce the sliding failure probability.

Keywords: Offshore wave direction, reliability design method, sliding failure probability, breakwater caisson

1. はじめに

現行の防波堤の設計では、16 方位毎の確率沖波に対して堤前波の波高や波向を計算し、堤体への作用波力を算定するのが一般的である。つまり、沖波の波向には $\pm 11.25\text{deg}$ の丸め誤差がある。そして、この丸め誤差の前の段階として、風向観測や波浪追算による波向の推定には誤差があり、自然現象としても波向にはばらつきがあると考えられる。さらに、沖波から堤前波に至る波浪変形計算にも若干の誤差はあり、堤前波がもつ多方向性によっても作用波力に変動すると考えられる。しかしながら、このような波向の不確定性そのものの性質や、これらが堤体の安全性に及ぼす影響は、十分に検討されていない。

また、堤体の安全性を表す指標として使われている滑動安全率は、「設計沖波と設計潮位」という一つの危険な条件において、耐力(摩擦抵抗力)と外力(水平波力)の比を示しているに過ぎない。同一の安全率をもつ堤体であっても、設置水深や潮位差、防波

堤の構造形式などが異なれば、被災のしやすさも異なると考えられる。このような違いを安全率によって表すことはできないが、信頼性理論を用いると、防波堤の供用年数間に滑動する確率や、滑動量の期待値を計算することができる。

そこで本研究では、信頼性理論に基づいて堤体の滑動遭遇確率を計算し、波向の不確定性が堤体の安全性に及ぼす影響について、感度分析的に調べた。

2. 対象とする防波堤の設計条件

本研究では、図-1に示すように、海底勾配が 1/100 の直線等深線海岸に、等深線に対して角度 γ で混成堤を設置する場合を考える。そして、朔望平均満潮位 H.W.L. 時の水深(以下では「設置水深 h 」と記す)が 10m および 20m となる堤体について検討する。

これらの堤体の設計沖波(50 年確率波)の波高は 8.0m、周期は 13.0s、波向は α_{0d} とし、設計潮位(高潮の発生を考慮)は H.W.L.+1.0m とする。これらの

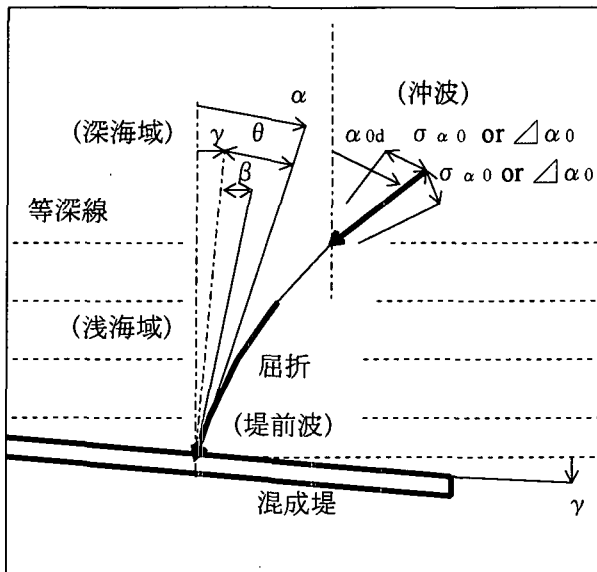
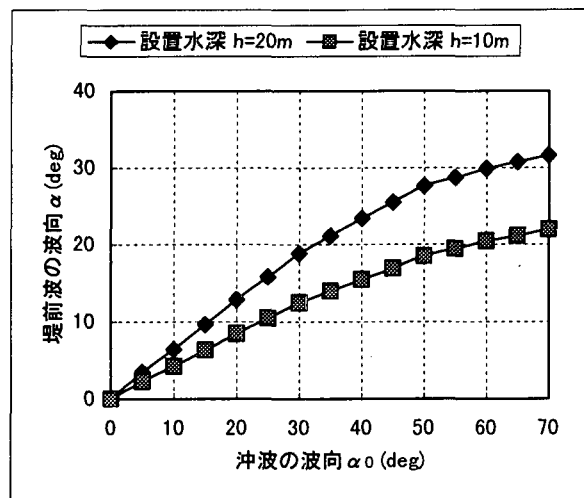
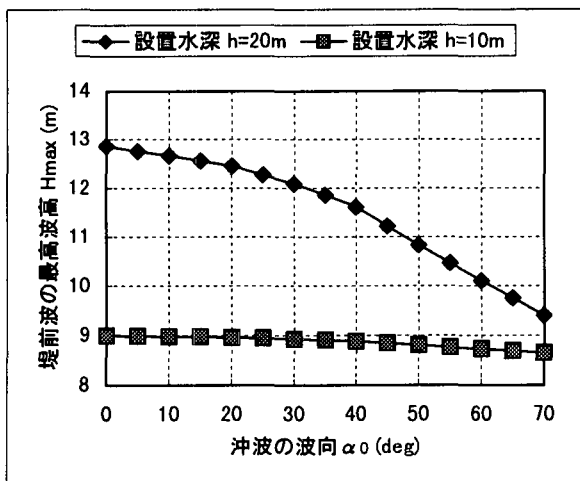


図-1 対象とする防波堤



(a) 波向



(b) 最高波高

図-2 堤前波の波向と最高波高

条件で堤前波の波向 α は、図-2(a)に示すように、沖波の波向 α_0 の $1/2 \sim 1/3$ 程度となる。すなわち、沖波における一方位 (22.5deg) の違いも、堤前波では 10deg 程度にまで縮まる。また、図-2(b)に示すように、堤前波の最高波高 H_{max} は、設置水深 $h=20\text{m}$ の堤体では沖波の波向 (すなわち屈折効果) によって大きく異なるが、設置水深 $h=10\text{m}$ の堤体では碎波の影響が卓越するためにほとんど差がない。

本研究では、図-2(a)に示した入射波向 θ を $\pm 15\text{deg}$ の範囲で危険側に補正した入射角 β と、図-2(b)に示した最高波高 H_{max} に対して、滑動安全率がちょうど 1.2 となるように堤体幅を調整した堤体に対して、滑動遭遇確率を計算する。

3. 信頼性理論に基づく滑動遭遇確率の計算

(1) 信頼性理論に関する既往の研究

信頼性理論とは、構造物の設計における様々な推定誤差や、供用年数間におけ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。

堤体の滑動に対する安全性の評価に信頼性理論を用いる研究も行われており、例えば、高山ほか^{1,2)}や著者ほか^{3~5)}は、個々の擾乱の期間中に発生する最大波高 H_{max} に対して安全率が 1 を切る場合を被災と定義し、防波堤の供用年数間に滑動する確率を計算した。その結果、同一の安全率を持つ堤体であっても、天文潮位差や設置水深 (碎波帯内か碎波帯外か)、防波堤の構造形式 (混成堤か消波工被覆堤か) などの条件によって、滑動遭遇確率は異なることが明らかになった。また、初期建設費や、供用年数間の被災に対する復旧費の期待額を計算し、現行の防波堤の経済性も検討している。さらに、滑動遭遇確率が同じであっても、条件によって堤体の滑動量は異なる。著者ほか^{3,4)}や下迫ほか^{6,7)}は、擾乱中に発生する個々の波に対して堤体の滑動量を求め、これを供用年数間にわたって積分することによって、供用年数間の期待滑動量を計算している。

しかしながら、堤体の安全性を左右する様々な不確定要素の中には、著者ほか⁸⁾が指摘するように、これまでの研究においてほとんど議論されていないものもある。その一つが波向の不確定性である。

(2) 本研究における滑動遭遇確率の計算方法

本研究では、ある1回の擾乱 (年最大波) に対する滑動確率 p_s 、供用年数 (50 年間) の滑動遭遇確率 P_s を、それぞれ次式によって計算する。

$$p_s = \iiint \iiint \iiint \iiint \iiint \iiint \varepsilon \{ p_{\zeta}(\zeta) p_{\xi}(\xi) \cdot p_{\alpha}(\alpha_0) p_e(X_e) p_0(r_0) p_M(r_M) p_P(r_P) \cdot p_f(r_f) \} dr_f dr_P dr_M dr_0 dX_e d\alpha_0 d\xi d\zeta \quad (1a)$$

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

ここに、

$p_{\zeta}(\zeta)$: 天文潮位 ζ の出現確率分布 [太平洋沿岸を想定し、天文潮位差は 1.5m とする。大潮・小潮を再現するための 4 分潮 M_2, S_2, O_1, K_1 に加え、季節変化を再現するための 2 分潮 S_a, S_{aa} も考慮し、台風シーズンの出現確率分布を与える。]

$p_{\xi}(\xi)$: 高潮偏差 ξ の出現確率分布 [50 年確率偏差が 1.0m の Weibull ($k=2.0$) 分布に従う場合を考える。]

$p_{\alpha}(\alpha_0)$: 沖波波向 α_0 の出現確率分布 [設計沖波の波向を中心として、一様分布する場合と正規分布する場合とについて検討する。尚、詳細については後述する。]

$p_e(X_e)$: 沖波波高 X_e の出現確率分布 [太平洋沿岸の典型的な分布として、50 年確率沖波が 8.0m の Weibull ($k=2.0$) 分布を与える。]

$p_0(r_0)$: 沖波波高の推定誤差の分布 [極値分布関数へのあてはめ誤差などを想定したものである。推定した波高を X_e 、真の波高を $X_0=(1+r_0)X_e$ と表すとき、変数 r_0 は正規分布(平均 0, 変動係数 0.1)をなすと仮定する。]

$p_M(r_M)$: 波浪変形計算の誤差の分布 [換算沖波を用いた断面の変形計算による波高を X_{Me} 、真の波高を $X_M=(1+r_M)X_{Me}$ と表すとき、変数 r_M は正規分布 (-0.13, 0.09) をなす。]

$p_P(r_P)$: 波力算定の誤差分布 [衝撃波力係数を用いて算定した一方向波浪の波力を P_e 、これに対応する真の波力を $P=(1+r_P)P_e$ と表すとき、変数 r_P は正規分布 (-0.12, 0.22) をなす。]

$p_f(r_f)$: 摩擦係数のばらつき分布 [設計値を f_0 、真の値を $f=(1+r_f)f_0$ と表すとき、変数 r_f は正規分布 (+0.06, 0.16) をなす。]

である。また、沖波の周期は、設計沖波と波形勾配が同じとなるように、沖波波高に連動して与える。検討の対象とする防波堤の周りの海底地形は単純であるので、屈折計算による堤前波の波向の誤差は小さいものとして無視する。

式(1a)において、 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。

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & (F_s < 1) \\ 0 & (F_s \geq 1) \end{cases} \quad (2a)$$

$$F_s = \text{func}(\zeta, \xi, \alpha_0, X_e, r_0, r_M, r_P, r_f, K_P) \quad (2b)$$

すなわち、防波堤の供用年数間に発生し得る様々な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」とみなす。式(2b)の K_P は、堤前波の多方向性による波力低減率であり、詳細については後述する。

4. 沖波の波向の不確定性と滑動遭遇確率

(1) 沖波の波向の不確定性

現行の設計では、16 方位毎に確率沖波を定め、これらの沖波が発生したときの堤体の滑動安全率をそれぞれ計算して、滑動安全率が最小となる確率沖波を設計沖波と定めるのが一般的である。したがって、沖波の波向には $\pm 11.25\text{deg}$ の丸め誤差がある。

また、16 方位に丸める前の段階で、過去に発生した極値波浪に対して、風向観測や波浪推算モデルによって波向を推定する場合には、ある程度の推定誤差は避けられない。永井ほか⁹⁾などによって方向スペクトルの推算精度が検討されてはいるものの、推定誤差の確率分布を、推定方法や海域特性を踏まえて系統的に整理するところまでは至っていない。

さらに、恐らく沖波の波向は、自然現象として何らかの確率分布を持って出現している。このことも、実際の波向が設計沖波の波向からばらつく一因となる。永井ほか¹⁰⁾は、海象計(超音波ドップラー式波浪計)による波向観測を通じて、常時波浪の波向特性を究明しつつあるが、観測年数がまだ浅いため、設計沖波クラスの高波浪に限定して波向の出現確率分布を議論することは、困難な状況にある。

以上のように、沖波の波向に不確定性のあることは確かであるが、その出現確率分布 $p(\alpha_0)$ については十分に明らかにされていない。そこで本研究では、典型的であると思われる確率分布として、図-1 に示すように、実際に発生する波向 α_0 が設計沖波の波向 α_{0d} を中心として、 $\pm \Delta \alpha_0$ の幅で一様分布をなす場合と、標準偏差 σ_{α_0} の正規分布をなす場合とについて検討する。前者の一様分布は、波向を 16 方位に丸めたときの誤差などを想定したものであり、後者の正規分布は、波向の推定誤差や自然現象としての分布などを想定したものである。

(2) 等深線と平行に設置された堤体の滑動遭遇確率

図-3は、防波堤が等深線と平行に設置された場合 ($\gamma=0\text{deg}$) について、設置水深 $h=20\text{m}$ の堤体の滑動遭遇確率を示す。設計沖波の波向 α_{0d} が $0 \sim 15\text{deg}$ と小さい条件では、沖波の波向のばらつきが大きいほど、堤体に斜めに入射する波浪が出現しやすくなるので、それだけ堤体の滑動遭遇確率は小さくなる。これに対して、設計沖波の波向 α_{0d} が 45deg と大きい条件では、沖波の波向のばらつきが大きいほど、今度は堤体に直入射する波浪が出現しやすくなるので、それだけ滑動遭遇確率は大きくなる。例えば、沖波の波向が $\pm 11.25\text{deg}$ の一様分布をなすだけで、滑動遭遇確率は 0.01 程度変化する。したがって、沖波の波向の不確定性は、設計波クラスの波浪でも碎波しないような、設置水深の深い防波堤の安全性

を考える上で重要となる。

同様に図-4は、設置水深 $h=10\text{m}$ の堤体の滑動遭遇確率を示す。この設置水深では、どのような沖波の波向に対しても、堤前波の波向は等深線に対してほぼ直角であり、最高波高も砕波によって決まる。そのため、沖波の波向にばらつきがあっても、堤体の滑動遭遇確率の変化は小さい。したがって、設計波クラスの波浪に対して砕波帯内となるような、設置水深の浅い防波堤に対しては、沖波の波向の推定にあまり高い精度は要求されない。

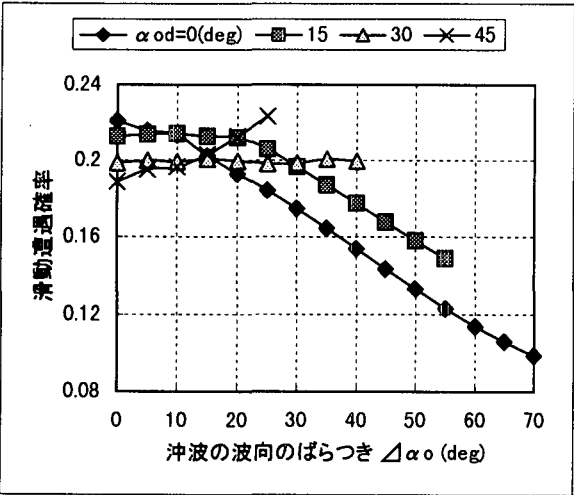
尚、以上のような滑動遭遇確率の変化は、沖波の波向のばらつきが一様分布でも、正規分布でも、定性的には同じになる。 $\pm \Delta \alpha_0$ の一様分布の標準偏差は $0.58 \Delta \alpha_0$ であり、 $\pm \Delta \alpha_0$ の幅を持つ一様分布と、標準偏差が $0.58 \Delta \alpha_0$ の正規分布とを比較すると、滑動遭遇確率に及ぼす影響はほぼ等しい。

(3) 等深線に斜めに設置された堤体の滑動遭遇確率

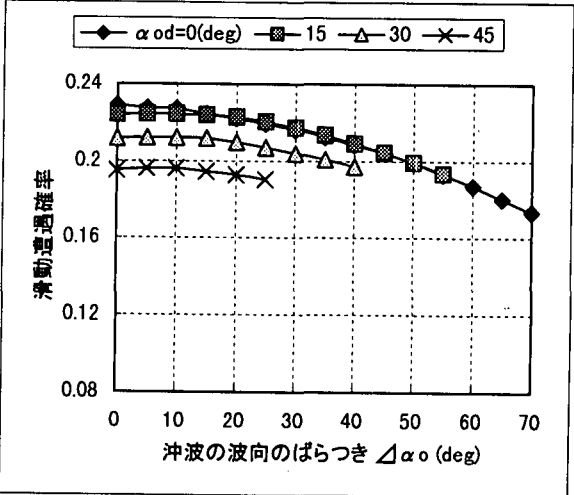
図-5~6は、設計沖波の波向を等深線に直角 ($\alpha_{od}=0\text{deg}$) とし、防波堤の設置角度 γ を変化させた場合の滑動遭遇確率を示す。

まず、設置水深 $h=20\text{m}$ の堤体では、設置角度 γ が 60deg であっても、沖波の波向のばらつきによって滑動遭遇確率は小さくなる。沖波の波向 α_0 が大きい(等深線に対して斜め入射になる)ほど、堤前波の波向は防波堤に対して直入射に近くなるが、図-2 (b) で示したように屈折効果によって最高波高 H_{max} が小さくなるので、堤体に作用する波力としては増加しないのが、その理由である。

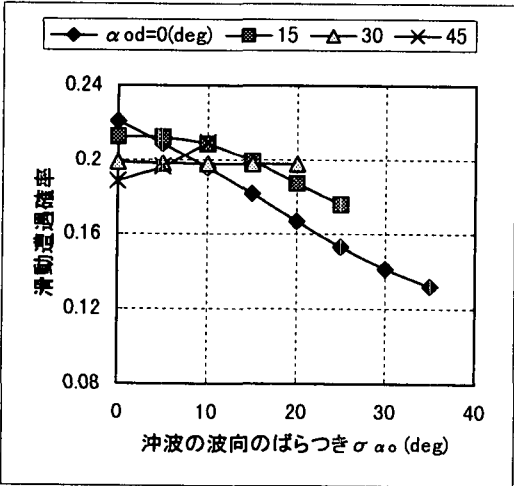
これに対して、設置水深 $h=10\text{m}$ の防波堤では、沖波の波向 α_0 が変化しても最高波高 H_{max} はほとんど変化しないので、堤体に作用する波力は堤体への入射角だけが問題となる。したがって、沖波の波向



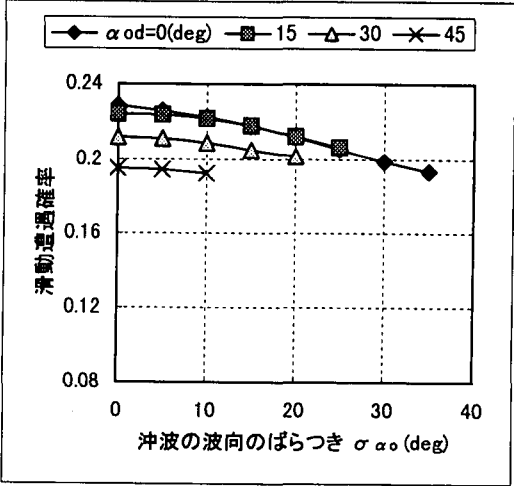
(a) 一様分布の場合



(a) 一様分布の場合



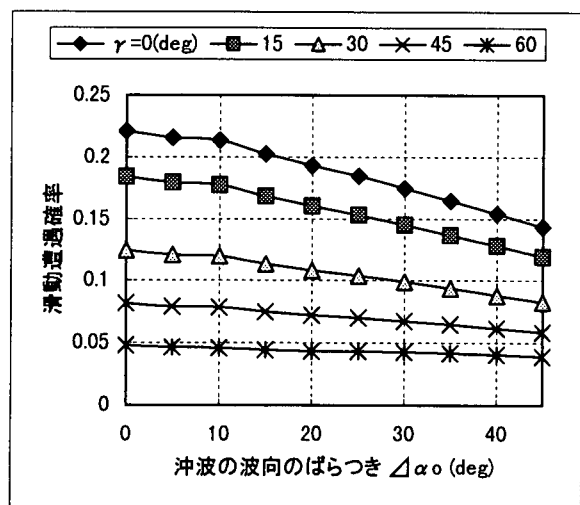
(b) 正規分布の場合



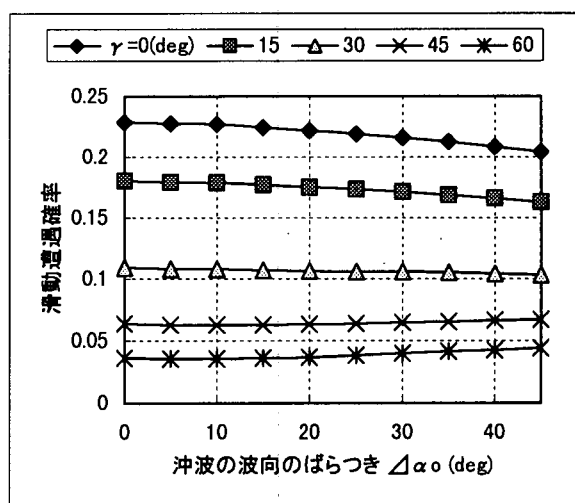
(b) 正規分布の場合

図-3 等深線と平行に設置された堤体の滑動遭遇確率
(設置水深 $h=20\text{m}$)

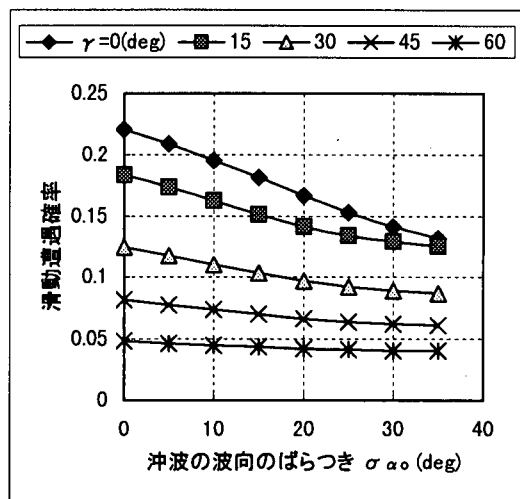
図-4 等深線と平行に設置された堤体の滑動遭遇確率
(設置水深 $h=10\text{m}$)



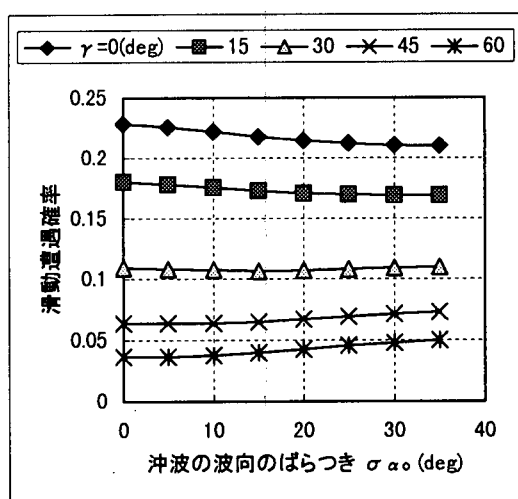
(a) 一様分布の場合



(a) 一様分布の場合



(b) 正規分布の場合



(b) 正規分布の場合

図-5 等深線に斜めに設置された堤体の滑動遭遇確率
(設置水深 $h=20\text{m}$)

図-6 等深線に斜めに設置された堤体の滑動遭遇確率
(設置水深 $h=10\text{m}$)

がばらつくほど、沖波の波向 α_0 が大きく、堤体に直入射に近い堤前波が発生しやすくなるので、滑動遭遇確率は大きくなる。

5. 堤前波の多方向性と滑動遭遇確率

(1) 堤前波の多方向性

現行の設計では、沖波から波の多方向性を考慮して堤前波を計算しているが、堤前波から堤体への作用波力を計算するときには一方向波として扱っている。その代わりに、堤体への入射角を $\pm 15\text{deg}$ の範囲で危険側に振って波力を計算し、堤前波の多方向性に対する安全性の余裕を確保している。合田・常盤¹¹⁾の数値解析によれば、設計最大波に相当する波峰の進行方向のばらつきの標準偏差は、方向集中度 S_{max} が 10 および 50 の多方向波において、 13deg

および 5deg 程度となる。このことは、 $\pm 15\text{deg}$ の波向の補正が概ね妥当であることも示している。

しかしながら、平石ほか¹²⁾の模型実験によれば、堤体に対して主波向が直角の多方向波による最高波力は、堤体に直入射する一方向波による最高波力よりも小さく、方向集中度 S_{max} が 50 以上のときには 0.95 倍程度、25 以下のときには 0.8 ~ 0.9 倍程度になる。模型実験では波数が絞られ、現地海岸でも高波状態が永遠に続くわけではない。「理論的に発生し得る最高の波力」ではなく、「限られた時間内に発生する最高波力の期待値」を考えると、一方向波より多方向波の方が小さく考えられる。

但し、堤体に対して主波向が斜めの多方向波では、主波向よりも直入射に近い波峰が来襲し、一方向波の最高波力よりも大きな最高波力が作用する可能性があるが、このような条件について詳細な模型実験

は行われていない。

そこで本研究では、多方向波による波力が一方向波による波力の $(1-K_P)$ 倍になると考え、波力低減率 K_P が0～0.3である場合について検討する。但し、堤体に斜め入射する場合の波力低減率 K_P については十分に分かっていないので、堤体への入射角が直角に近い条件についてのみ検討する。

(2) 堤前波の多方向性による滑動遭遇確率の変化

図-7は、防波堤が等深線と平行に設置され($\gamma=0$ deg)、設計沖波の波向が等深線に直角($\alpha_0=0$ deg)の場合について、設置水深 $h=20$ mの堤体の滑動遭遇確率を示す。堤前波の多方向性によって波力が10%小さくなるだけで、滑動遭遇確率は1/2程度にまで減少する。また、堤前波の方向集中度 S_{max} が50程度で、波力低減率 K_P が5%程度であっても、滑動遭遇確率は2/3程度になることが分かる。

したがって、前章で述べた沖波の波向の不確定性に加えて、堤前波の多方向性による波力低減も、堤体の安全性を考える上で、非常に重要であることが分かる。

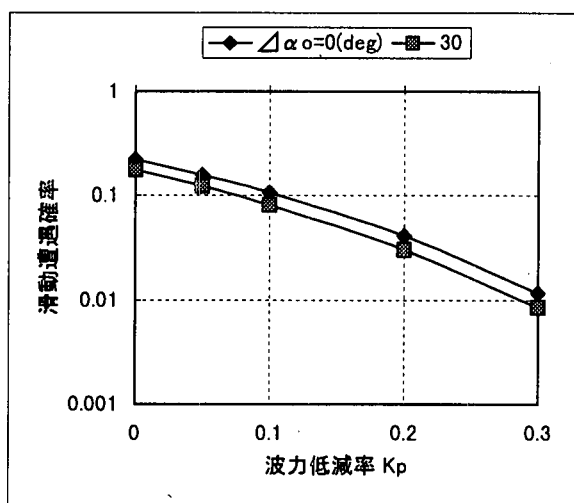


図-7 堤前波の多方向性による滑動遭遇確率の変化

6. まとめ

本論文では、信頼性理論を用いて防波堤の堤体の滑動遭遇確率を計算し、沖波の波向のばらつきや堤前波の多方向性が堤体の安全性に及ぼす影響を調べた。主要な結論は、以下の2つである。

- ①設計波向が直入射に近い防波堤では、波向のばらつきによって滑動遭遇確率は減少する。設計波向が斜め入射の防波堤では、逆に増加する。このような滑動遭遇確率の変化は、設計波クラスの波浪が砕波しないような、設置水深の深い

防波堤において顕著である。また、波向のばらつきを一様分布で与えても、正規分布で与えても、定性的には同じである。

- ②堤前波の多方向性によって最高波力が低減すると、滑動遭遇確率も顕著に小さくなる。

尚、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本研究と同様な検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 高山知司・池田直太：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.641-645，1991.
- 2) 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可：防波堤の信頼性設計に向けて，港湾技研資料，No.785，36p，1994.
- 3) 河合弘泰・平石哲也・関本恒浩：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，海洋開発論文集，vol.13，pp.579-584，1997.
- 4) 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也：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.3-41，1997.
- 5) 河合弘泰・平石哲也：高潮偏差を考慮した防波堤堤体の滑動遭遇確率，海洋開発論文集，vol.14，pp.363-368，1998.
- 6) 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利：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.801-805，1998.
- 7) 下迫健一郎・高橋重雄：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，第37巻，第3号，pp.3-30，1998.
- 8) 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也：信頼性理論による防波堤堤体の設計，確率・統計的意志決定に関するシンポジウム論文集，pp.51-56，1998.
- 9) 永井紀彦・冷水康悦・後藤智明：大水深波浪観測データによる波浪推算法の検証，海岸工学論文集，第37巻，pp.175-179，1990.
- 10) 永井紀彦・清水勝義・橋本典明・太田耕栄・久高将信・小野修平：いわき沖で観測された方向スペクトルの出現特性(第2報)，海岸工学論文集，第42巻，pp.201-205，1995.
- 11) 合田良実・常盤安弘：数値実験に基づく波峯長の統計的性質について，海岸工学論文集，第38巻，pp.141-145，1991.
- 12) 平石哲也・藤咲秀可・工藤 巧：防波堤の作用波力に及ぼす波の多方向性の影響，海岸工学論文集，第45巻，pp.756-760，1998.

(1999. 4. 19受付)