

潮位の発生確率分布と防波堤の安定性について

Occurrence Probability of Tidal Level and Its Effect on Stability of Breakwater

河合弘泰*・藤咲秀可*・鈴木康正*

Hiroyasu Kawai, Hideyoshi Fujisaku and Yasumasa Suzuki

The occurrence probability distributions of astronomical tidal level at 96 ports in Japan are calculated with four major tidal constituents. The distribution shapes are able to be classified into several categories mainly depending on the locations by the cluster analysis. The encounter probabilities of siliding and overturning, and expected sliding quantities of the present breakwaters for the durable years are computed in the probabilistic design theory with the estimated tidal probabilities. The encounter probabilities estimated with four major tidal constituents become smaller than those estimated with a simple cos-shaped tidal change in the shallow water area.

Keywords; (tidal occurrence probability, breakwater, probabilistic design)

1. はじめに

現行設計法の下では、防波堤の堤体は、朔望平均満潮面 H.W.L. (高潮の影響を考慮すべき場所では既往最高潮位 H.H.W.L. など) に対して安全率が 1.2 以上となるように設計されている。しかし、同じ安全率で設計されたとしても、潮位差の小さな場所に設置された防波堤は、潮位が常に設計潮位に近いので被災しやすい。高山ら (1991) は、信頼性理論に基づいて耐用年数間における堤体の滑動遭遇確率を計算し、防波堤の設置水深と沖波波高との比が 2 以下のときにこの傾向は顕著となることを示した。ただし、高山らは、潮位が朔望平均満潮面と朔望平均干潮面との間を単純な cos 波で変化すると仮定し、現実とは異なる潮位の発生確率分布を与えている。また、全国の平均的な防波堤を仮定しており、実際に設置された防波堤をもちいて検討を行っていない。

そこで、本研究においては、日本各地における潮位の発生確率分布の特性を調べるとともに、既に供用中の防波堤数例について、耐用年数間における滑動遭遇確率、転倒遭遇確率、および期待滑動量を計算し、潮位の発生確率分布の影響を検討した。

2. 潮位の計算方法

2.1 考慮する潮位

潮には天文潮と気象潮とがある。天文潮 (天体潮) は、地球と月や太陽との位置関係によって決まる。月や太陽は天球上を規則的に運行するので、任意の時刻における天文潮位はほぼ正確に計算することができる。これに対して気象潮 (高潮) は、低気圧や台風による気圧低下、吹き寄せ、海流の変化、水温や塩分濃度の変化、河川からの流入水など、地球上の様々な要因によって不規則に発生するものであり、過去に遡っての推定や将来にわたっての予測は困難である。

そこで、本研究では天文潮による潮位のみを考慮する。

2.2 天文潮位の計算方法

潮位は分潮とよばれる潮汐成分 (cos 波) が合成されたものと考えることができる。分潮としては周期が約 4 時間のものから 18.6 年におよぶものまで 390 種類のものが知られているが、実用的には主要な 4 分潮のみで十分といわれている。次式は、主要 4 分潮を考えたときの平均海面 M.S.L. を基準とした潮位 η の計算式である。

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^4 f_i H_i \cos \left[V_i + u_i + \phi_i + \omega_i \left(t - \frac{\phi_A}{360} \times 24 \right) - \kappa_i \right] \quad (1)$$

ここに、

i : 分潮の番号 (起潮力は M_2 , K_1 , S_2 , O_1 の順に大きい)

$i=1$: 主太陰半日周期潮 M_2 (月の日周運動によるもので、周期は 12 時間 25 分)

$i=2$: 主太陽半日周期潮 S_2 (太陽の日周運動によるもので、周期は 12 時間 00 分)

$i=3$: 主太陰日周期潮 O_1 (月の日周運動によるもので、周期は 25 時間 59 分)

$i=4$: 日月合成日周期潮 K_1 (太陽と月との位置関係によるもので、周期は 23 時間 56 分)

f_i : 天文常数、平均半潮差の補正関数

* 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)

$$f_1 = 1.0004 - 0.0373 \cos N + 0.0002 \cos 2N$$

$$f_2 = 1$$

$$f_3 = 1.0089 + 0.1871 \cos N - 0.0147 \cos 2N + 0.0014 \cos 3N$$

$$f_4 = 1.0060 + 0.1150 \cos N - 0.0088 \cos 2N + 0.0006 \cos 3N$$

(2)

H_i : 平均半潮差 (cm : 調和定数表によってその地点の値を調べる)

V_i : 天文引数, 位相の補正関数 (deg)

$$V_1 = -2s + 2h$$

$$V_2 = 0$$

$$V_3 = -2s + h + 270$$

$$V_4 = h + 90$$

(3)

u_i : 天文引数, 位相の補正関数 (deg)

$$u_1 = -2.14 \sin N$$

$$u_2 = 0$$

$$u_3 = 10.80 \sin N - 1.34 \sin 2N + 0.19 \sin 3N$$

$$u_4 = -8.86 \sin N + 0.68 \sin 2N - 0.07 \sin 3N$$

(4)

s : 太陽の平均黄経 (deg, 西暦 1900 ~ 2000 年の近似式)

$$s = 277.025 + 129.38481(Y - 1900) + 13.17640(L + \alpha)$$

(5)

h : 太陽の平均黄経 (deg, 西暦 1900 ~ 2000 年の近似式)

$$h = 280.190 - 0.23872(Y - 1900) + 0.98565(L + \alpha)$$

(6)

N : 太陽の昇交点の平均黄経 (deg, 西暦 1900 ~ 2000 年の近似式)

$$N = 259.157 - 19.32818(Y - 1900) - 0.05295(L + \alpha)$$

(7)

Y : 西暦 (yr)

L : その年の 1 月 1 日からの経過日数 (整数, day)

α : $(Y - 1901)/4$ の整数部 (day, うるう年の調整)

ϕ_i : 経度補正のための位相 (deg)

$$\phi_i = p_i \phi_L$$

(8)

p_i : 分潮の波数 (1/day)

$$p_1 = 2, p_2 = 2, p_3 = 1, p_4 = 1$$

ϕ_L : 対象地点 (標準港) の経度 (deg, 東経を+とする)

ω_i : 角速度 (deg/hr)

$$\omega_1 = 28.984104, \omega_2 = 30.000000, \omega_3 = 13.943036, \omega_4 = 15.041069$$

t : 時刻 (hr, $0 \leq t < 24$)

ϕ_A : 対象地点 (標準港) が属する標準子午線の経度 (deg, 東経を+とする)

κ_i : 遅角 (deg : 調和定数表によってその地点の値を調べる)

である。例えば, 1996 年 1 月 23 日 4 時 56 分のとき, $Y=1996, L=22, t=4.93, \alpha=23$ である。なお, 各分潮の平均半潮差や遅角は, 海上保安庁 (1992) または気象庁 (1995) の発行した資料に掲載されている。

ところで, 基本水準面 C.D.L は平均海面から主要 4 分潮の平均半潮差の和だけ下にある。本論文では, 平均海面が 0, 基本水準面が -1 となるように無次元化した潮位 η^* をもちいる。主要 4 分潮の平均半潮差の和 z_0 および無次元潮位 η^* は次式により表される。

$$z_0 = \sum_{i=1}^4 H_i \quad (9)$$

$$\eta^* = \eta / z_0 \quad (10)$$

無次元潮位 η^* が +1 または -1 となるのは, 4 つの分潮の潮位が同時に最高または最低になるときである。したがって, 朔望平均満潮面 H.W.L. の無次元潮位は +1 よりもやや低く, 朔望平均干潮面 L.W.L. の無次元潮位は -1 よりもやや高くなる。

2.3 主要 4 分潮による計算の精度

図-1 は, 1996 年 1 月の八戸を例として, 主要 4 分潮のみで計算した潮位が, 60 分潮まで考慮した潮位に対してどの程度の精度をもっているかを示したものである。上段の主要 4 分潮によって計算した潮位変化は, 中段の 60 分潮による潮位変化とよく一致しており, 主要 4 分潮のみでも満潮・干潮や大潮・小潮の変化を十分に再現することができる。主要 4 分潮による計算の誤差の標準偏差は, 満潮・干潮の発生時刻で 28 分, そのときの潮

位で7cmであり、それぞれ、主要4分潮の中で最も卓越しているM₂潮の周期の約1/27、4分潮の平均潮差の和(=2Z₀、朔望平均満潮面と朔望平均干潮面との差にほぼ等しい)の約1/24に過ぎない。

図-2は、同様に潮位の発生確率分布を比較したものである。主要4分潮のみによる確率分布は60分潮まで考慮したものによく一致している。なお、60分潮まで考慮した確率分布において、無次元潮位 η^* が-1より小さくなる(基本水準面C.D.L.よりも潮位が低くなる)確率は0ではない。この原因としては、主要4分潮以外の分潮を考慮していること、式(2)で定義した天文常数 f が1以上の値をとり得ることが考えられる。

以上のことを踏まえ、本研究では主要4分潮のみを用いて潮位の発生確率分布を計算する。

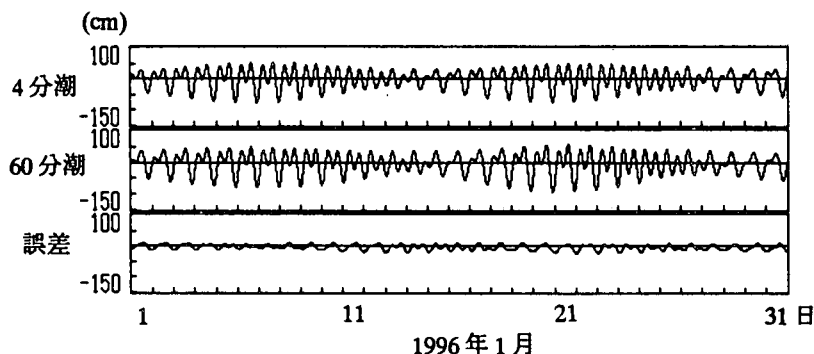


図-1 潮位の計算精度

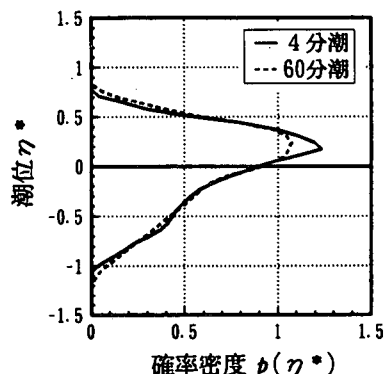


図-2 潮位の発生確率分布の計算精度

3. 潮位の発生確率分布

3.1 日本各地における潮位の発生確率分布

日本全国の96地点を対象として、1950年1月1日0時0分から1999年12月31日23時40まで20分間隔で潮位を計算し、潮位の発生確率分布を求めた。主な地点における1996年1月の潮位変化を図-3に、50年間における潮位の発生確率分布を図-4に示す。日本各地における潮位の経時変化と発生確率分布の特徴をまとめると、以下の通りである。

- ① オホーツク海沿岸：稚内や網走では、1日1回潮が卓越するために潮位の変化は平均海面(無次元潮位 $\eta^*=0$)をはさんでほぼ対称となり、潮位の発生確率分布も平均海面をはさんで対称となる。無次元潮位は-1.0～+1.0の値をとる。
- ② 日本海沿岸：低緯度になるほど1日2回潮が強くなり、日潮不等(1日に2回起きる満潮あるいは干潮の潮位が異なる現象)が顕著となる。そのため、留萌(北海道)より南では、潮位の発生確率分布が平均海面をはさんで非対称となる。無次元潮位の最低、最高はそれぞれ-1.1～-1.0、+0.7～+0.9である。平均海面より潮位が高くなっている確率は0.58～0.60であり、最も発生確率の高い無次元潮位は+0.2～+0.3である。なお、博多は後述のシナ海と同じような分布形である。
- ③ 太平洋沿岸：日本海沿岸と同様、日潮不等のために潮位の発生確率分布は平均海面をはさんで非対称である。しかし、日本海沿岸ほど発生確率は集中しない。なお、東京は東京湾、名古屋は伊勢湾の湾奥に位置しているが、太平洋に直接面した地点とよく似た分布形である。
- ④ 瀬戸内海沿岸：瀬戸内海は一般的に「紀淡海峡、鳴門海峡、豊予海峡、関門海峡で囲まれた範囲」と定義されている。確かに、宇野・高松から松山・下関までは、平均海面のやや上とやや下の2箇所にピークのある分布形である。しかし、神戸や大阪では太平洋に直接面した地点とよく似た分布形である。
- ⑤ シナ海沿岸：シナ海沿岸でも瀬戸内海沿岸と同じような2山の分布形である。しかし、瀬戸内海沿岸と比較して、平均海面よりやや上にある発生確率のピーク値が大きい。
- ⑥ 特殊な場所：函館は太平洋沿岸、青森は瀬戸内海沿岸またはシナ海沿岸と似た分布形である。明石海峡に近い姫路では、1日1回潮が卓越するために平均海面を軸にほぼ対称な分布形である。浜田では、最も出現確率の高い潮位が平均海面より下にある。

3.2 クラスタ分析による確率分布の分類

潮位の発生確率分布は基本的には海域によって異なるが、地理的に近くても周囲と分布形が異なる場所もある。前節において述べたこのような特徴をクラスタ分析法によって統計的に裏付けておく。

クラスタ分析では、多数あるサンプルの中で類似度の高いもの同士から順にまとめていき、最終的に少数個のグループをつくる。このグループのことをクラスタという。本論文においては、96地点を潮位の発生確率分布の類似度によって10個のクラスタにまとめた。クラスタAとクラスタBの類似度 S_{AB} は次式により定義した。

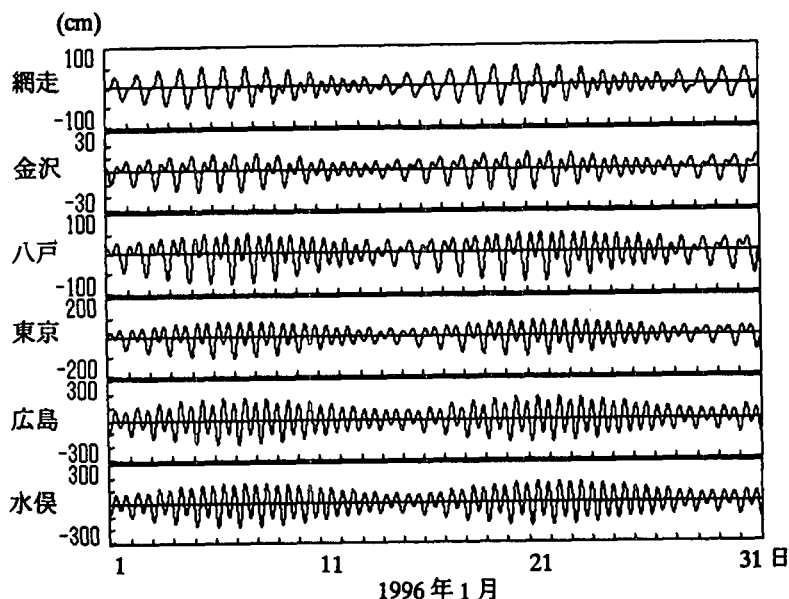


図-3 主な地点における潮位の変化

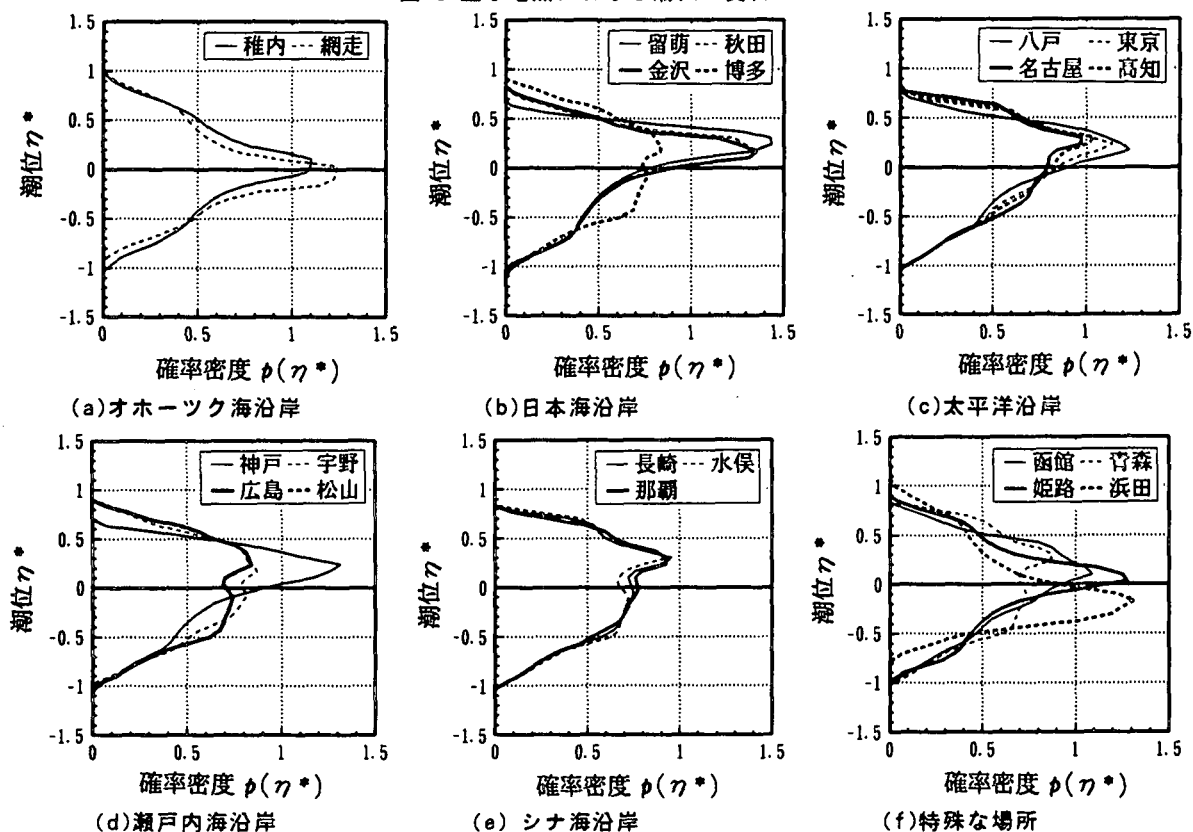


図-4 主な地点における潮位の発生確率分布

$$S_{A,B} = \int \{p_A(\eta^*) - p_B(\eta^*)\}^2 d\eta^* \quad (11)$$

なお、1つのクラスターに複数の地点が含まれるときには、それぞれのクラスターに含まれる地点の組合せで最寄りとなる地点同士の類似度で判断する最短距離法と、平均的な類似度で判断する群平均法とを用いた。2つの方法によって分析したのは、それぞれの方法に一長一短があるからである。

このような方法によって分類した結果が図-5であり、図中に記された同一数字が同一クラスターに属することを示している。まず、日本海沿岸と太平洋沿岸との違いは最短距離法と群平均法との両方に現れている。また、群平均法によれば、同じ太平洋沿岸であっても北海道から九州に向かうにしたがって確率分布の形が変化して行くことが明かである。さらに、稚内、網走、根室、函館、江差、青森、姫路、浜田、西郷(奄岐)などは、地理的に近い周辺の地点と確率分布が大きく異なることがわかる。

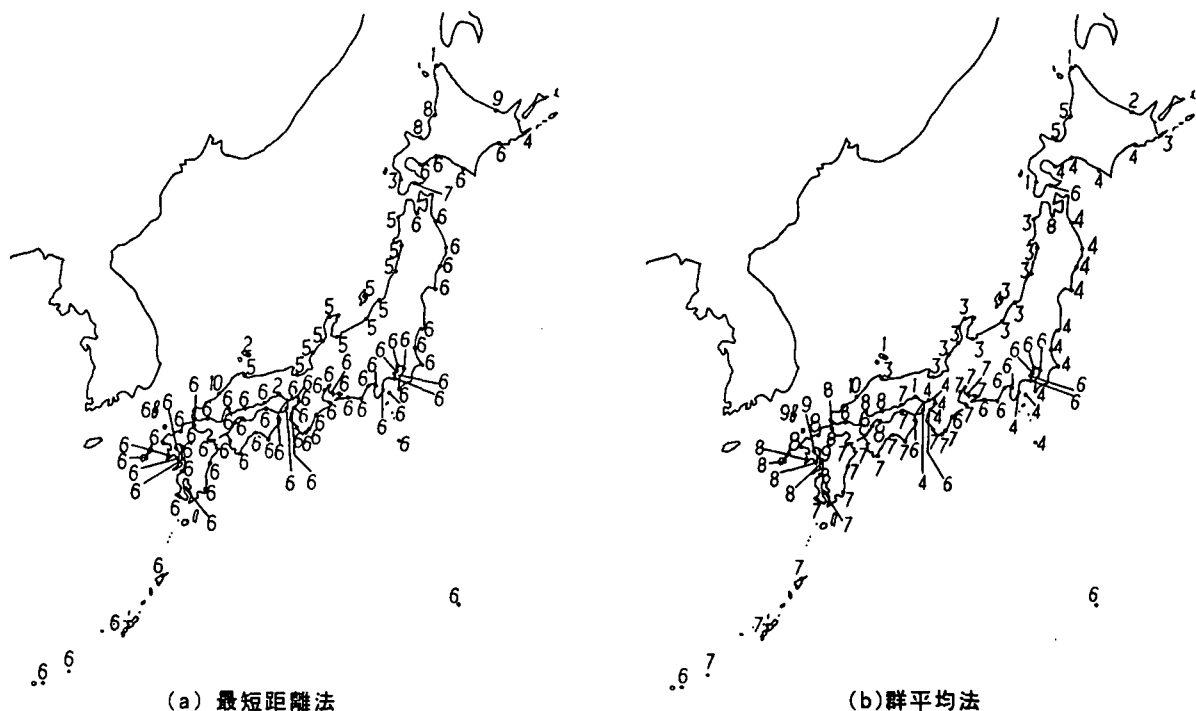


図-5 クラスター分析法による分類結果

4. 潮位と防波堤堤体の安全性

4.1 潮位差による堤体の滑動遭遇確率の変化

高山ら(1991)は、信頼性理論に基づき、耐用年数(50年)間に防波堤堤体が滑動する確率(滑動遭遇確率)を計算した。図-6はその計算結果の一部を引用したものであり、潮位差が小さいほど滑動遭遇確率が大きいことを示している。潮位差の小さな場所では、常に設計潮位に近い潮位であるために堤体の安全性に余裕が少なく、潮位差の大きな場所と比較して堤体が滑動する確率は大きい。このような傾向は、防波堤設置地点における相対水深 h/H_0 が2より小さいときに顕著である。相対水深が2よりも深いところでは、潮位によって堤体の水中重量は変化するが、波高はほとんど変化しない。これに対して、相対水深が2よりも浅いところでは、潮位が低くなると碎波によって波高も小さくなる。

ただし、高山らは、朔望平均満潮面 H.W.L. を最高潮位、朔望平均干潮面 L.W.L. を最低潮位とする単純な cos 波で潮位変化を近似したため、図-7に示すように現実とは異なる潮位の発生確率分布を与えている。また、全国の平均的な防波堤を仮定しており、実際に設置された防波堤に対する検討をしていない。

4.2 潮位の発生確率分布による堤体の安定性の変化

本研究では、現在供用中の混成堤 19 断面、被覆堤 9 断面について、耐用年数間における滑動遭遇確率、転倒遭遇確率、期待滑動量を計算した。転倒遭遇確率の計算には高山ら(1994)、期待滑動量の計算には下迫ら(1994)の方法を用いた。潮位は主要4分潮を考慮して計算し、単純な cos 波によって近似した場合と比較した。なお、表-1に示すように、今回対象とした防波堤の設計条件(確率波の諸元、設置水深、潮位差など)は高山らが仮定した計算条件とよく似たものである。

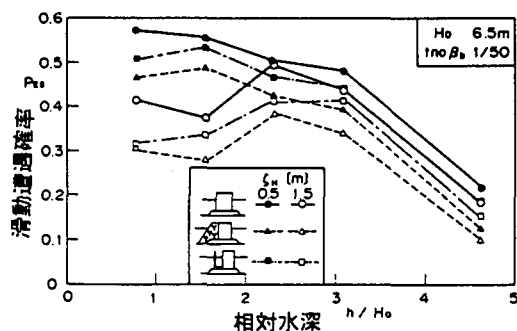


図-6 潮位差と滑動遭遇確率の関係(高山ら, 1991)

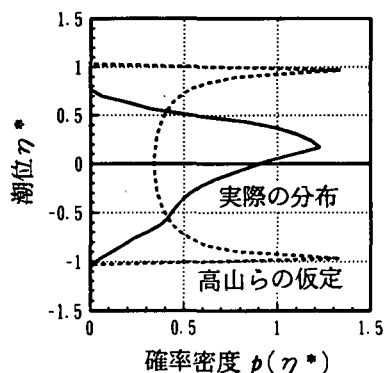


図-7 潮位の発生確率分布の仮定

表-1 計算条件

	高山らの仮定	今回の仮定
防波堤形式	混成堤, 消波工被覆堤, 直立消波堤	混成堤, 消波工被覆堤
海底勾配 $\tan \beta$	0.020	0.001 ~ 0.014
沖波の発生確率分布	Weibull 分布 ($k=2.0, A=2.5, B=1.55$)	その場所の確率分布を与える
50 年確率波の波高 H_0	6.5 m	2.4 ~ 11.4 m
" T_0	10.9 s	4.9 ~ 14.0 s
設置水深 h	5 ~ 30 m	5.3 ~ 26.1 m
相対水深 h/H_0	0.77 ~ 4.62	0.91 ~ 3.77
潮位差 H.W.L.-L.W.L.	0.5, 1.5 m	0.6 ~ 2.4 m
潮位 ζ	H.W.L. と L.W.L. の間を cos 波で与える	主要 4 分潮を考慮

図-8~9は、主要 4 分潮を考慮した場合の滑動遭遇確率、転倒遭遇確率、期待滑動量の値を、単純な cos 波を仮定した場合の計算値でそれぞれ除したものの（順に R_s , R_o , R_q ）を示す。まず、図-8によれば、潮位差の大きな場所でも小さな場所でも、主要 4 分潮を考慮することによって、滑動遭遇確率などの値が平均的に小さくなるのがわかる。これは主として、図-7に示したように、主要 4 分潮を考慮することによって、朔望平均満潮面に近い潮位の発生確率が小さくなるためである。次に、図-9によれば、相対水深が浅いときに滑動遭遇確率などの値が小さくなっている。逆に相対水深が 2 よりも深い場合には、潮位の変化を単純な cos 波で近似しても主要 4 分潮を考慮して計算しても、滑動遭遇確率などの値の変化は小さい。したがって、相対水深が 2 よりも浅い場合に、主要 4 分潮を考慮した潮位の計算が必要である。

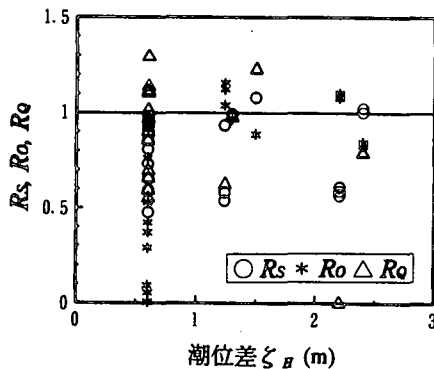


図-8 潮位差による被災確率の変化

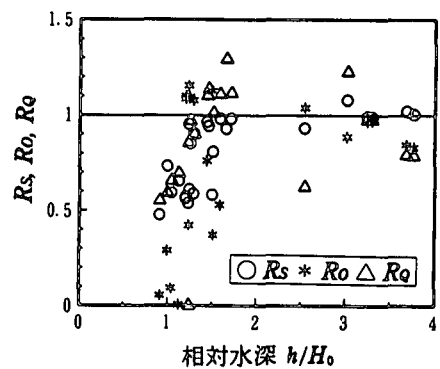


図-9 相対水深による被災確率の変化

5. おわりに

本研究の主要な結論は以下の通りである。

- ① 潮位の発生確率分布は基本的には海域によって異なるが、地理的には近くても周囲と分布形の異なる場所がある。
- ② 設置水深の浅い防波堤の滑動遭遇確率、転倒遭遇確率、期待滑動量は、潮位に主要 4 分潮を用いて計算しなければならない。

本研究では天文潮位のみを考慮した。しかし、内湾では台風来襲時に大きな高潮偏差が記録されていることを考えると、天文潮位に高潮を加えた潮位の発生確率を求め、この発生確率を用いて滑動遭遇確率などの値を計算する必要がある。これらのことを今後の課題としたい。

参考文献

- 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・藤井 久 (1991) : 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討, 港湾技術研究所報告, 第 30 巻, 第 4 号, pp.35-64.
- 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.
- 日本沿岸潮汐調和定数表, 海上保安庁, 平成 4 年 2 月 (1992), 267p.
- 平成 8 年潮位表, 気象庁, 1995, 271p.