地球温暖化による沿岸外力変化を考慮した 防波堤の滑動量解析

辻尾 大樹¹・間瀬 肇²・森 信人³

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）（〒541-0052 大阪市中央区安土町 2-3-13）

E-mail: daiki.tsujio@os.pacific.co.jp

²正会員 京都大学防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

E-mail: mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

E-mail: mori.nobuhito.8a@kyoto-u.ac.jp

本研究では、地球温暖化に伴って変化すると予測される設計供用期間内の外力変化を考慮した防波堤の滑動量解析を行い、沿岸外力特性の変化が防波堤の滑動安定性に及ぼす影響を検討した。地球温暖化に伴う海面上昇や高潮偏差の増大、ならびに来襲波浪の増大を考慮した防波堤の滑動量解析を実施した結果、対象とした3つの沿岸外力のうちで波浪増大の影響が最も大きいことがわかった。また、本研究の設定条件では、地球温暖化を考慮すると期待滑動量が0.2m～1.8m増加し、温暖化を考慮しない場合と比べて60～200%増加した。したがって、今後の防波堤設計において、設計供用期間中の地球温暖化に伴う沿岸外力変化を考慮する必要があること示した。

Key Words : *global warming, breakwater stability, expected sliding distance, sea level rise, extreme condition*

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う海面上昇や台風、高波の強大化が表れているようである（例えば、平石ら¹⁾）。海岸、港湾構造物に対して重要となる地球温暖化によって変化する沿岸外力要因には、海面上昇による水深の増大、台風の強大化等による高潮や波浪の増大があり、海岸構造物の安定性や浸水被害への影響がある。また、海水位と波浪の増大による漂砂傾向の変化によって地形変化等への影響が考えられる。そのため、地球温暖化に伴う気象・海象条件の変化に対する沿岸災害評価の研究が進められており、こうした気象・海象変化に対する海岸・港湾構造物の安定性を照査することが重要となる。

2007年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（（社）日本港湾協会²⁾）では、設計供用期間にその構造物が保持しなければならない性能を規定して、それを満足するように設計する性能設計が採用されている。このような性能設計においては、単にコストを削減するだけでなく、設計条件を上回る高波浪が来襲した場合の構造物被害の程度や、その構造物が被災したことによる人や資産への影響など、総合的に性能を照査するこ

とが必要となる。

こうした背景のもと、設計波としての50年確率波だけではなく、設計供用期間に発生する高波浪を対象として、変形量を考慮した防波堤の設計法確立に向けた研究が進められてきた。下迫・高橋³⁾は、期待滑動量を基本とした性能設計法の確立を目的として、混成防波堤の滑動量算定手法を検討し、実際の設計に用いられた例もある。滑動量を考慮した設計法において、既往の滑動量解析では、設計供用期間中の地球温暖化に伴う外力の発生傾向の変化は考慮されていないが、地球温暖化による外力変化を考慮して、防波堤の安定性を検討した例がいくつかある。

例えば、酒井・岡安⁴⁾は、長期的な外力変化として水位上昇を考慮し、今後50年間の海面水位の上昇を考慮して期待滑動量を解析した結果、23～29年後の水位を想定して設計することが最適な設計となると示した。一方、高木ら⁵⁾は、鹿児島県志布志港を対象として、仮想的に風速を10%増大させて、診断的に風速変化に合わせて波高を増大させ、これに加えて水位上昇を18～59cm見込んで、現在と将来の期待滑動量の変化を検討し、期待滑動量が3倍となる施設があることを示した。

しかし、将来変化の設定は気候変動予測とは別に仮想的に与えているため、前提条件の妥当性に大きな不確実性がある。また、現在から将来への経年的な変化は考慮されておらず、現在と将来の状態のみを対象とした検討であり、設計で重要となる台風による高潮偏差の変化も考慮されていない。

本研究では、地球温暖化に伴って変化すると予測される外力について、最新の温暖化予測の研究成果を取り込み、設計供用期間内で経年的な変化を考慮して、モデル防波堤に対する滑動量解析を行い、外力特性の長期変化が滑動安定性に及ぼす影響を検討する。

2. 検討対象外力と解析手法

(1) 検討対象外力

防波堤の滑動安定性に影響を及ぼす沿岸外力要因には様々あるが、本研究では、a) 地球温暖化に伴う海面上昇、b) 台風の強大化等に伴う高潮偏差の増大、c) 台風の強大化等に伴う来襲波浪の増大を対象とする。

a) 海面上昇

2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル⁹⁾の第4次報告書では、温暖化シナリオとして6種類のシナリオを想定しており、それぞれに対する気温変化の最良の推定値、予測幅と海面水位上昇の予測幅が報告されている。今世紀末の海面水位に関しては、最低でも0.18m、最大で0.59m上昇すると指摘されている。

森ら⁷⁾は、図-1に示すように、CMIP3の結果をもとに、シナリオ・モデル・アンサンブル平均として日本近海の海面水位の将来変化を(0.26m/100年)を計算している。本研究ではこれを設定条件として採用する。

b) 高潮偏差

高潮偏差の将来変化については、高波の条件と同一の気候変動の条件から考えることが望ましいが、高潮は高波よりも台風の経路に鋭敏に依存するため、決定論的に将来変化を推定することは難しい⁸⁾。

このような気候変動に従う台風特性の変化に伴う高潮の変化についての研究は、河合ら^{9) 10) 11)}および安田ら¹²⁾のものが挙げられる。台風および高潮の将来変化については、不確実性が大きく定量的な評価が難しい。例えば、河合らの研究では、橋本ら¹³⁾が示した将来気候下における台風特性の変化に準じて高潮がどのように変化するかを検討している^{9) 10)}。特に、河合ら¹⁰⁾は河合ら⁹⁾の解析データに500年分の台風データを加え、日本近傍を通過する台風データを抽出して高潮推算を行い、東京、名古屋、大阪、広島、鹿児島、熊本を設定し、各地についての高潮偏差の極値分布を算出している。

高潮偏差について、海面上昇と比べて、将来変化予測

図-1 日本近海の海面上昇の予測値：SRES A1B (森ら⁷⁾)

(黒実線：モデル平均、黒破線：平均+標準偏差、その他：各GCMの結果)

の不確実性は大きく、地域に大きく依存するが、本研究では、1つの可能性として、将来の高潮偏差を河合ら¹⁰⁾が予測した大阪地点での極値分布(図-2)を採用した。

c) 来襲波浪

地球温暖化による台風の強大化、極端化によって来襲する波浪特性の変化について、森ら¹⁴⁾はA1Bシナリオに基づく超高解像度全球気候モデルを用いた温暖化予測実験結果をもとに、現在から今世紀末の全球における風速場や波浪場の将来変化の予測を行った。波浪解析にはGCMの海上風を外力としてSWANを用いて予測計算を行い、図-3に示すI～IVの領域に対して、現在と将来の極値分布を示している。

本研究では、来襲波浪として、図-4～図-7に示す、森らの現在気候25年間と今世紀末(2075～2100年)の波浪解析値から得た極大値分布を用いた。波浪の将来変化率による滑動量への影響を把握するため、将来変化率が小さい領域IIと大きい領域IIIを採用した。

森らの結果は、一年を夏季と冬季に分けた極大値資料に基づく極値分布であるので、それぞれの季節における年平均発生数 λ_j を求めた上で年最大値分布を次式で求めた。

$$F(x) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \lambda_j [1 - F_j(x)] \right\} \quad (1)$$

ここに、 $F(x)$ ：年最大値分布の発生確率 x の確率値、 $F_j(x)$ ： j 番目の極大値分布の発生確率 x の確率値、 n ：極大値分布の数、 λ_j ：各季の極大値分布に対応する年平均発生数、である。森らではそれぞれに領域に対して夏季(6ヶ月)と冬季(6ヶ月)の極値分布を求めているた

図-2 大阪港の現在と将来の高潮偏差の極値分布 (河合ら¹⁰⁾)
(太実線：将来分布，細実線：現在分布)

図-5 現在と将来の波高極値分布 (森ら¹⁴⁾, 領域IIの冬季)

図-3 波浪の極値統計解析対象領域 (森ら¹⁴⁾)

図-6 現在と将来の波高極値分布 (森ら¹⁴⁾, 領域IIIの夏季)

図-4 現在と将来の波高極値分布 (森ら¹⁴⁾, 領域IIの夏季)

図-7 現在と将来の波高極値分布 (森ら¹⁴⁾, 領域IIIの冬季)

め, ここでは, $n=2$ である.

(2) 外力変化の設定方法

設計供用期間中の外力は, 基本的に線形増大すると仮定する. 海面上昇については, モデルアンサンブルから平均値として $0.26\text{m}/100$ 年の上昇が予測されているため, 検討対象年に応じて, 年間 0.0026m の海面上昇から L.W.L. を設定し, その後に天文潮位による水位変化を考慮した. ここで天文潮位は将来変化しないと仮定している. また, 現在気候と将来気候における極値分布から算定される高潮偏差と沖波波浪は, 次式のように, 発生年次を考慮して線形補完することで, その年に発生する高潮偏差と沖波波浪を求めた.

$$H(x) = H_1(x) + \frac{y}{Y} [H_2(x) - H_1(x)] \quad (2)$$

ここに, $H(x)$: 年最大値分布の発生確率 x の確率値
 $H_1(x)$: 現在の年最大値分布の発生確率 x の確率値,
 $H_2(x)$: 将来の年最大値分布の発生確率 x の確率値, Y : 将来の基準年 (本研究では 100 年後を対象としているため $Y=100$), y : 検討対象の経過年 (発生年次), である. なお, 沖波波浪の波形勾配は一定で将来変化しないものとし, 求めた波高から周期を算出している.

(3) 検討対象施設の設定条件

ケーソンの性能設計を考える上で, 具体的な諸元を幾つか設定する必要がある. 解析対象とした施設は, 図-8 に示すようなケーソン式混成堤である. 本研究では, 地球温暖化による沿岸外力の変化によって, 滑動安定性がどのように変化するかを検討目的としているため, 現在と将来の波浪が算出されている, 森らが求めた現在気候での波浪条件を基に検討断面を設定した. ここで, 森らの現在気候の波浪条件は, 必ずしも現在の再解析値ではなく, 設定した防波堤断面が現況防波堤よりも比較的大きな断面となっている. しかし, 本研究では, 現在と将来の滑動安定性の相対変化を把握することに主眼を置いているため, 仮想的な断面であるが, このように検討断面を設定した. 設計設置水深による地球温暖化の影響を把握するために, 水深を 7m, 10m, 15m の 3 通りとした. 表-1 に示す計算条件の下, 森らの領域 II および領域 III の現在気候の 50 年確率波を対象として, それぞれの設置水深 (H.W.L.時) で安全率が 1.2 となるように堤体幅を設定した. 防波堤の設計潮位は, 地域によって, 高潮偏差を含めた H.H.W.L.と H.W.L.のみの潮位で設計されており, 本検討では, H.W.L.時で安全率 1.2 となるように設計しており, 高潮偏差を考慮すると安全率が小さくなる. 天端高 h_c は, 現行の港湾基準の標準的な設定法を採用し, それぞれの 50 年確率波高の 0.6 倍となるようにモデ

図-8 計算対象断面図

表-1 計算対象断面の計算条件

項目	設置水深 (h) 毎の値		
	7.0m	10.0m	15.0m
マウンド高水深 (h_b)	5.0m	8.0m	12.0m
設計潮位	H.W.L. : +2.0m		
設計沖波波浪 (領域 II)	波高: 20.0m, 周期: 19.7s		
設計波 (領域 II)	10.0m	12.0m	15.4m
設計沖波波浪 (領域 III)	波高: 13.9m, 周期: 16.4s		
設計波 (領域 III)	8.8m	10.8m	14.2m
海底勾配	1/100		
港外側マウンド幅 (B_M)	4.0m	4.0m	7.0m
単位体積重量	堤体: 22.5 kN/m ³ , 海水: 10.1 kN/m ³		

ル防波堤を設定した. また, 堤体の安定計算において, 本来, 堤体は無筋コンクリート (単位体積重量: 22.6kN/m^3) の上部工, 中詰砂 (湿潤単位体積重量: 18.0kN/m^3) と鉄筋コンクリート (単位体積重量: 24.0kN/m^3) のケーソンから構成され, 堤体重量の算出には, それぞれの体積から詳細な計算が必要である. しかし, 本研究では, 計算の簡略化のため, 堤体を単位体積重量 22.5kN/m^3 となる矩形と仮定し, 堤体重量を算出して, それぞれの堤体幅を算出した. 安定計算に必要なその他の条件は表-1 に示した.

(4) 計算手法

設計供用期間中における防波堤の滑動量解析は, 下迫・高橋³⁾に基づいた高山ら¹⁵⁾の滑動量算定モデルを用いた. 高山らの滑動量算出モデルは, 設計供用期間中に発生する消波ブロックの被災を考慮した天端高の沈下に伴う波力増大を考慮したモデルであるが, 本研究では, ケーソン式混成堤を対象としているため, これによる波力増大は考慮しない. 本研究で用いた計算フローを図-9 に示す. 周期の取扱については, 年1回の沖波波浪を抽出し, 設定した波形勾配から周期を算出する. 個別波の周期については, 平均周期として沖波波浪の波形勾配から求めた周期を適用している.

図-9 計算フロー

図-10 試行回数と期待滑動量の変化

(5) 計算条件

波浪条件の詳細とその他の計算条件は、表-2 および表-3 に示す通りである。年1回、2時間の高波浪を仮定

表-2 計算条件（領域Ⅱ）

項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 20.07m ($\lambda=0.43$) Weibull 分布 $k=1.0, A=4.02, B=7.74$		
沖波波浪 (現在, 冬)	50年確率波浪 10.82m ($\lambda=1.47$) Weibull 分布 $k=1.4, A=1.80, B=5.72$		
沖波波浪 (将来, 夏)	50年確率波浪 24.79m ($\lambda=0.53$) Weibull 分布 $k=1.0, A=5.25, B=7.58$		
沖波波浪 (将来, 冬)	50年確率波浪 10.84m ($\lambda=0.91$) Weibull 分布 $k=1.0, A=1.26, B=6.03$		
波形勾配	0.033		
設置水深 (h)	7m	10m	15m
堤体幅 (B)	24.2m	24.4m	27.9m
天端高 (h_c)	4.2m	5.2m	6.8m
高潮偏差 (現在)	50年確率偏差 2.616m Weibull 分布 $k=1.4, A=0.998, B=0.248$		
高潮偏差 (将来)	50年確率偏差 3.199m Gumbel 分布 $A=0.646, B=0.358$		
水位上昇	0.0026m/yr (0.26m/100yrs)		
継続時間	2時間		
設計供用期間	50年		
繰返し回数	10,000回		

表-3 計算条件（領域Ⅲ）

項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 13.1m ($\lambda=0.14$) Weibull 分布 $k=1.4, A=3.42, B=7.63$		
沖波波浪 (現在, 冬)	50年確率波浪 12.3m ($\lambda=0.77$) Weibull 分布 $k=1.0, A=1.42, B=7.12$		
沖波波浪 (将来, 夏)	50年確率波浪 21.5m ($\lambda=0.42$) Weibull 分布 $k=1.4, A=6.41, B=7.30$		
沖波波浪 (将来, 冬)	50年確率波浪 13.46m ($\lambda=1.16$) FT-II 分布 $k=5.0, A=0.90, B=7.84$		
波形勾配	0.033		
設置水深 (h)	7m	10m	15m
堤体幅 (B)	19.6m	20.3m	23.4m
天端高 (h_c)	3.8m	4.8m	6.4m

※高潮偏差から繰返し回数の条件は表-2 と同じ。

した 50 年間の計算を繰返し計算する。繰返し回数については、ある1ケースについて、繰返し回数を 100 回～10 万回に変化させ、繰返し回数に対する期待滑動量（繰返し試行で求まる 50 年間の累積滑動量の平均値）とその分散の変化を調べ、図-10 に示す。図から 1 万回以降、期待滑動量も分散も変動が収束していることがわかる。10 万回繰返し後の期待滑動量に対して、1 万回での期待滑動量は、2cm (3%) 程度の差はあるが、計算時間との関係から、本研究においては十分な精度と判断し、繰返し回数を 1 万回とした。

表-4 外力環境変化の検討ケース

	条件
Case 1	現在気候
Case 2	海面上昇のみ考慮
Case 3	高潮偏差増大のみ考慮
Case 4	波浪増大のみ考慮
Case 5	全ての外力変化を考慮

図-11 期待滑動量の経年変化例

表-5 期待滑動量と 0.3m 未超過確率の解析結果 (領域Ⅱ)

Case	期待滑動量 (m)			0.3m 未超過確率		
	h=7m	h=10m	h=15m	h=7m	h=10m	h=15m
1	0.77	0.44	0.27	0.83	0.88	0.91
2	0.87	0.49	0.29	0.81	0.87	0.91
3	0.96	0.51	0.29	0.80	0.87	0.91
4	1.00	0.61	0.37	0.79	0.85	0.90
5	1.37	0.76	0.44	0.75	0.82	0.88

表-6 期待滑動量と 0.3m 未超過確率の解析結果 (領域Ⅲ)

Case	期待滑動量 (m)			0.3m 未超過確率		
	h=7m	h=10m	h=15m	h=7m	h=10m	h=15m
1	1.42	0.55	0.25	0.62	0.79	0.89
2	1.60	0.61	0.27	0.58	0.77	0.89
3	1.81	0.64	0.27	0.58	0.76	0.89
4	2.33	1.11	0.63	0.52	0.68	0.80
5	3.23	1.44	0.75	0.43	0.63	0.78

また、計算に用いた沖波波高などの各設計変数の平均値の偏りと変動係数については高山ら¹⁶⁾と同じとした。計算ケースとして、外力変化による影響を把握するために、表-4 に示すように、Case 1：現在気候条件下による検討、Case 2：海面上昇のみ考慮、Case 3：高潮偏差増大

のみ考慮、Case 4：波浪増大のみ考慮、Case 5：海面上昇、高潮偏差および波浪のすべての外力変化を考慮した検討の計5通りを検討する。

以下では、各ケースの将来変化特性を分析し、各外力条件の将来変化が滑動量に与える影響について、分析を行う。

3. 滑動量解析

(1) 滑動量の経年変化例

解析結果の例として、5つの環境変化の検討ケースについて、経過年数とその経過年で発生した滑動量の平均値との関係を図-11 に示す。これは、設置水深が 10m、対象波浪が領域Ⅲでの年次別の平均滑動量（試行毎の値を平均したもの）の解析結果である。図をみると、図-10 でも示したように、年次毎に数cm程度のばらつきは見られるが、特に Case 4 と Case 5 では、地球温暖化による気候変動の影響が進行に伴って、年数が経過するにつれて、平均滑動量が増加している傾向が見られる。また、Case 2 と Case 3 でも僅かであるが、現在気候条件の結果と比べると、経過年数に応じて平均滑動量の差が大きくなっているのがわかり、将来に向かって平均滑動量が増加することがわかる。

(2) 外力環境変化の影響

外力環境変化の影響を把握するために、領域Ⅱと領域Ⅲに対して、それぞれの検討条件下での期待滑動量を求め、領域Ⅱと領域Ⅲの期待滑動量の解析結果をそれぞれ表-5 および表-6 に示す。領域Ⅲにおける水深 10m の場合、Case 1 の現在気候では 50 年間の期待滑動量は 0.55m であるが、外力変化を考慮すると、Case 2 の海面上昇のみでは 0.61m、Case 3 の偏差増大のみでは 0.64m、Case 4 の波浪増大のみでは 1.11m と、海面上昇のみ、高潮偏差増大、波高増大の順で期待滑動量は増大する。さらに、Case 5 の全ての外力の将来変化を考慮した場合の期待滑動量は、1.44m と約 90cm 増加した。こうした傾向は、程度の差はあれ、全ての計算条件に対して見られた。防波堤の滑動量について、あまり大きな変形が生じると、地盤の支持力破壊、転倒等の問題が生じ、このような大変形になる前に補強などの対策を講じることが多いため、通常、滑動量 0.3m をもって破壊と考えることが多く、この破壊が生ずるかどうかの問題となり、設計供用期間中の滑動量の累積値は、工学的にあまり重要とされない。そのため、滑動量 0.3m の破壊確率として、滑動量 0.3m の未超過確率を算出し、表-5 および表-6 に併せて示した。0.3m 未超過確率については、全ての計算条件で、Case1 の現在気候からCase5 の全ての外力の将

図-12 期待滑動量の解析結果 (領域Ⅱ)

図-13 期待滑動量の解析結果 (領域Ⅲ)

図-14 潮位偏差の出現確率分布

来変化を考慮した場合の順に、未超過確率が低減し、破壊確率が大きくなっている傾向が見られ、期待滑動量の増大と同様の傾向が確認された。このため、以後は期待

図-15 設計有義波に対する堤前有義波の未超過確率分布

滑動量の変動を基に考察する。

また、期待滑動量について、それぞれの関係を折れ線グラフで図-12 および図-13 に示す。領域Ⅱと領域Ⅲを比較すると、領域Ⅱに比べて領域Ⅲの波浪は、特に夏季において将来の増大率が大きいいため、期待滑動量についても、波浪増大を考慮した Case 4 と全て影響を考慮した Case 5 において、領域Ⅲの期待滑動量が急激に増加しているのがわかる。そのため、地域特性に依存する波浪の将来変化予測の傾向によって、期待滑動量の変化傾向が大きく変わることがわかった。

期待滑動量に対する設置水深の影響について比較すると、領域Ⅱおよび領域Ⅲを通して、設置水深が 15m, 10m, 7m の順で期待滑動量が増加する傾向が見られた。これについて、下迫・高橋³⁾では、重複波圧による滑動が大きいため、水深が深い方が期待滑動量が大きいと指摘している。本検討が下迫・高橋³⁾の結果と異なる要因を検討するため、まず、潮位偏差の出現確率分布を図-14 に示すように求めた。本検討では、天文潮位をL.W.L.からH.W.L.まで一様に与えており、高潮偏差と天文潮偏差を加えた全潮位偏差は設計潮位の2mを大きく超える割合も多く、H.W.L.で碎波した波浪も高潮位時に碎波せずに堤体に作用し、期待滑動量が大きくなる要因となっていることがわかる。また、領域Ⅲの波浪、Case1 の条件での各設置水深における設計有義波に対する堤前有義波の未超過確率分布を求め、図-15 に示す。沖波の出現確率分布は各水深で同一であるが、堤前有義波では設計有義波を超える確率(図中の H_s/H_d が1を超える確率、 H_s : 堤前有義波、 H_d : 設計波)が異なり、水深 7m で 0.024、水深 10m で 0.015、水深 15m で 0.006 となるため、本計算条件では水深が浅いほど設計超過波高の出現頻度が大かったことがわかる。波力ピーク値は波力算定式により複雑に結びついているが、基本的には波高が大きくなれば波力ピーク値が大きくなるため、設計超過波高の

図-16 設置水深による期待滑動量の変化（領域Ⅱ）

図-17 設置水深による期待滑動量の変化（領域Ⅲ）

出現率が大きくなれば波高が大きくなり、滑動量が大きくなると考える。ただし、これは地球温暖化の傾向というよりは、著者ら¹⁷⁾が指摘するように、沖波極値分布特性と設置水深との間の関係に依存するためである。

(3) 設置水深の影響

設置水深を 7m, 10m, 15m と変化させた場合について、設置水深に対する期待滑動量に加え、現在気候下で算出された期待滑動量に対して地球温暖化を考慮した場合の期待滑動量の増加率を算出した。領域Ⅱと領域Ⅲについて、それぞれ図-16 および図-17 に示す。図の上段には設置水深に対する期待滑動量、下段に設置水深に対する期待滑動量の増加率を示した。

図-16 の将来波浪の増大率が小さい領域Ⅱについては、Case 4 の波浪増大のみを考慮した場合に、水深が深くなると碎波の影響を受けずに大きな波浪が来襲しやすいため、滑動量の増加率は大きくなる。一方、Case 2 の海面上昇のみと Case 3 の高潮偏差の増大のみを考慮した場合は、水深が浅くなると水位上昇の影響を大きく受けるため、滑動量の増加率は大きくなる。また、Case 5 のすべてを考慮した場合は、波浪増大による影響の変動が小さく、水位上昇、高潮偏差増大の影響の変動が大きくなるため、水深増大に伴って増加率が小さくなる。

波浪の変化が大きい領域Ⅲについて、Case 4 の波浪増大のみを考慮した場合は、領域Ⅱと同様に、水深が深くなると碎波の影響を受けずに大きな波浪が来襲しやすいため、滑動量の増加率は大きくなり、Case 2 の海面上昇のみと Case 3 の高潮偏差の増大のみを考慮した場合には、水深が浅くなると水位上昇の影響を大きく受けるため、滑動量の増加率は大きくなる。Case 5 のすべてを考慮した場合は、領域Ⅱとは異なり、波浪増大による影響の効果が相対的に大きいため、水深増大に伴って増加率が大きくなる。

以上から、波浪の将来増大率が大きい領域Ⅲでは、設置水深が深い方が波浪増大の影響を大きく受けて期待滑動量が増加し、波浪の将来増大率が小さい領域Ⅱでは、設置水深が浅い方が水位上昇（海面と高潮偏差）の影響を大きく受けて、期待滑動量が大きくなることがわかった。

(4) 滑動発生確率

滑動量の出現傾向を把握するために、滑動量の発生確率を求めた。滑動量を S として、 $0 < S \leq 0.01m$, $0.01 < S \leq 0.1m$, $0.1 < S \leq 0.3m$, $0.3 < S \leq 1.0m$, $1.0m < S$ の 5 通りの滑動量に対する発生確率を図-18 ～図-23 に示す。波浪増大率の小さい領域Ⅱに比べて、領域Ⅲについては、期待滑動量の増加が顕著な Case 4（波浪増大のみ）と Case 5（全てを考慮した場合）では、比較的小規模な

図-18 滑動量に対する発生確率（領域Ⅱ，設置水深 7m）

図-21 滑動量に対する発生確率（領域Ⅲ，設置水深 7m）

図-19 滑動量に対する発生確率（領域Ⅱ，設置水深 10m）

図-22 滑動量に対する発生確率（領域Ⅲ，設置水深 10m）

図-20 滑動量に対する発生確率（領域Ⅱ，設置水深 15m）

図-23 滑動量に対する発生確率（領域Ⅲ，設置水深 15m）

0.3m 未満の滑動量の発生確率はあまり変わらないが、1.0mを超えるような大規模被災の発生確率は著しく増加

することがわかった。ただし、波高変化の小さい領域Ⅱに関しては、同様の傾向は見られるが、その増加量は小

さい。

滑動量帯の発生確率について、滑動量帯の幅が同一でないため、単純に比較はできないが、基本的には、滑動量の小さいものの発生確率が大きい傾向にあり、滑動量が大きくなると発生確率が小さくなる。しかし、領域Ⅲの設置水深7mは、その傾向とは異なり、滑動量が大きいものの発生確率が大きくなる場合もある。

また、設置水深による発生確率の違いについて、現在気候であっても、領域Ⅱと領域Ⅲともに、水深7mの方が水深15mよりも、1m以上の大規模滑動の発生確率が大きく、地球温暖化による外力を考慮した場合の増加量も水深が浅い方が大きい。これについては、3.(2)にも記したが、著者ら¹⁷⁾が指摘するように、同一の安全率の断面であっても耐波安定性が異なるためである。波浪の極値分布特性と設置水深の関係によって結果が大きく変わるため、設計対象となる現地の波浪条件や設置水深等の設計条件の関係が重要であることがわかった。しかし、沖波極値分布が防波堤の耐波安定性に与える影響については、著者ら¹⁷⁾が指摘しているが、未だに不明な点が多く、さらに設置水深との関係を詳細に議論する必要がある。また、地球温暖化に伴う沿岸外力の変化は不確定要素が多く、今回考慮した沿岸外力の極値変化も一つの予測であり、これ以外の要素は不明である。そのため、地球温暖化に伴う沿岸外力の極値分布に関する各パラメータへの影響については、今後の研究課題としたい。

4. おわりに

本研究では、地球温暖化に伴う海面上昇や高潮偏差の増大ならびに来襲波浪の増大の将来変化を想定し、ケーソン式混成堤の設計供用期間中における外力の将来変化の影響を考慮した滑動量の解析を実施した。得られた滑動量についての将来変化についての主要な知見は、以下の通りである。

- 1) 対象とした3つの沿岸外力では、将来の波浪増大の影響が耐波安定性に最も影響を及ぼす。
- 2) 本研究の計算条件においては、地球温暖化を考慮すると期待滑動量が0.2～1.8m増加し、現在気候における期待滑動量に対して60～200%増加する。
- 3) 防波堤の設置水深が深い場合に、波浪の影響が大きく、浅い場合は海面上昇と高潮偏差による水位上昇の影響が大きくなり、水深に応じて主に寄与する外力が異なる。
- 4) 防波堤の期待滑動量は、設置水深が浅いほど大きくなり、1m以上の大規模滑動の発生確率も設置水深が浅い方が大きくなる。

本解析結果から、滑動を許容した防波堤の設計では、地球温暖化に伴う設計供用期間中の外力変化を考慮する

必要があることがわかった。ただし、本研究の結果は全ての防波堤設計条件に対するものではなく、ある程度条件が限られている。波浪および高潮偏差の将来変化は、地域特性が特に顕著であるため、実際の防波堤設計への活用には個別の条件による検討が必要であり、こうした解析に、本研究で示した方法を用いることができる。

さらに、ここで考慮した外力の将来変化の想定には程度の違いがあるが不確実性が伴い、これらを考慮した研究については、今後の課題としたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、(独)港湾空港技術研究所 河合弘泰 海洋情報研究領域長に高潮の確率偏差に関する解析結果を提供して頂いた。ここに深謝します。また本研究は(財)港湾空港建設技術サービスセンターの研究助成およびThe NSFC Major International Joint Research Project (Grant No. 51010009)による研究の一部であることを付記し、感謝致します。

参考文献

- 1) 平石哲也, 平山克也, 加島寛章, 春尾和人, 宮里一郎: 偶発波浪荷重による被害例とその対策, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.981-985, 2008.
- 2) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 3) 下迫健一郎, 高橋茂雄: 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.
- 4) 酒井和彦, 岡安章夫: 温暖化による海面上昇を考慮した防波堤の信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 686-690, 2004.
- 5) 高木泰士, 柏原英広, 柴山知也: 港湾構造物に及ぼす気候変動の影響とその定量的予測—防波堤を対象として—, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 891-895, 2009.
- 6) IPCC AR4 : IPCC fourth assessment report (AR4), <http://www.ipcc.ch/>, 2007.
- 7) 森 信人, 志村智也, 中條壮大, 安田誠宏, 間瀬 肇: マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp.I_1191-I_1195, 2011.
- 8) Mori, N.: Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics based on Statistical Model, In *Cyclones Formation, Triggers and Control*, Nova Science Publishers, Inc., pp. 249-270, 2012.
- 9) 河合弘泰, 橋本典明, 松浦邦明: 確率台風モデルを用いた地球温暖化後の瀬戸内海における高潮の出現確率分布の推定, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1271-1275, 2006.
- 10) 河合弘泰, 橋本典明, 松浦邦明: 確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 301-305, 2007.
- 11) 河合弘泰, 橋本典明, 山城 賢, 安田誠宏: 確率台風シミュレーションの風場モデルと将来の台風出現特性による確率高潮偏差の変化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No.1, pp. 1256-1260, 2009.

- 12) 安田誠宏, 安藤 圭, 森 信人, 間瀬 肇: 地球温暖化に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 1281-1285, 2009.
 - 13) 橋本典明, 河合泰弘, 松浦邦明: 地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルの導入, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 1221-1225, 2005.
 - 14) 森 信人, 志村智也, 安田誠宏, 間瀬 肇: 地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 1231-1235, 2010.
 - 15) 高山知司, 辻尾大樹, 安田誠宏: 消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 906-910, 2007.
 - 16) 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, 港湾技術研究所資料, No.785, 36p, 1994.
 - 17) 辻尾大樹, 間瀬 肇, 森 信人: 沖波出現分布形と年数回来襲を考慮した防波堤の滑動安定性評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp.L761-L765, 2011.
- (2011.8.29 受付)

PROJECTION OF EXPECTED CAISSON SLIDING DISTANCE CONSIDERING GLOBAL WARMING INFLUENCE

Daiki TSUJIO, Hajime MASE and Nobuhito MORI

This study deals expected sliding of breakwater within a period of service considering effects of climate change due to global warming. The influence of climatological change of sea level rise, storm surge and wave height on the breakwater stability is considered in detail. It is found that the impact of wave height change is the most significant than other components. The effects of climate change at the end of 21st century will increase the sliding distance with range of 0.2-1.8 m and it corresponds to 60-200% change in comparison with no-climate change condition. The influence of climate change for a period of break water service is necessary to be considered.