

# うねり性波浪を考慮した 防波堤の安定性について

福島 純平<sup>1</sup>・橋本 順二<sup>1</sup>・吉本 幸太<sup>1</sup>・鳥居 雅孝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室

(〒750-0025 山口県下関市竹崎町 4-6-1 下関地方合同庁舎 2 階)

近年、国土強靱化に向けた施策の展開と検討が強力に進められている。港湾施設の防波堤の被災に着目すると、従来の設計波とは異なる波高が低くて周期が長いうねり性波浪（以下、うねり）による事例が確認されており、長期的な安定性を確保するため、抜本的方策を講じなければならない重要性が広範な観点において指摘されている。本稿は、うねりを考慮した設計の九州における必要性を明確にするために、志布志港を対象として、うねりに関する①設計波の設定方法、②防波堤の安定性照査に関する検討結果を取りまとめものである。安定性照査の結果においては、従来の設計波と同程度となる被災のリスクが示されたことにより、九州の港湾においてもうねりの影響を考慮した方策を急ぐことの責務を確認した。

**Key Words:** うねり性波浪, 設計波, 統計解析, 防波堤, 安定性照査

## 1. はじめに

### (1) 背景及び目的

近年、自然災害の頻発・激甚化により、これまで想定外としていた自然災害への対応として、国土強靱化に向けた施策の展開と検討が強力に進められている。

一方で、港湾施設の防波堤の被災に着目すると、従来の設計波とは異なる波高が低くて周期が長いうねり性波浪（以下、うねり）による事例が確認されており、長期的な安定性を維持するため、抜本的対策を講じなければならない重要性の指摘が広範になされている。これらを受け、2018年改正の港湾施設の設計基準にも、うねりに対する検討必要性が明確化された。

また、既往の研究によると、平山ら<sup>1)</sup>は、うねりが防波堤に与える影響をシミュレーションすることで、うねりの地域特性を考察し、特に太平洋側の海域である高知港においては、海底地形の地域特性に起因して、うねりが従来の設計波よりも防波堤へ与える影響が大きいことを示している。

しかしながら、九州に位置する港湾を対象とした場合、その地域特性として、実際にうねりを考慮した設計波を導入すべきかはその取扱いは明確ではない。また、うねりの影響を検討するにあたって、うねりによる設計波の設定方法として統一的手法は未だ示されていない。

そこで、本研究は、うねりを考慮した設計の九州における必要性について明確にするため、うねりに関する①設計波の設定方法、②防波堤の安定性照査について検討した。なお、本研究の対象として、九州の中でも特にうねりが卓越する志布志港の防波堤を選定した。

### (2) 従来の設計波（風浪）とうねり

従来の設計波である風浪とは、海域で吹いている風によって生じる波であり、図-1 のように波高が高い特徴がある。一方で、うねりとは、風浪が風の吹かない領域にまで伝わった波である。つまり、志布志港に台風が到達する前あるいは過ぎた後に、遠く離れた海域で台風により発生し、伝播した風浪が志布志港に入ってきたもの

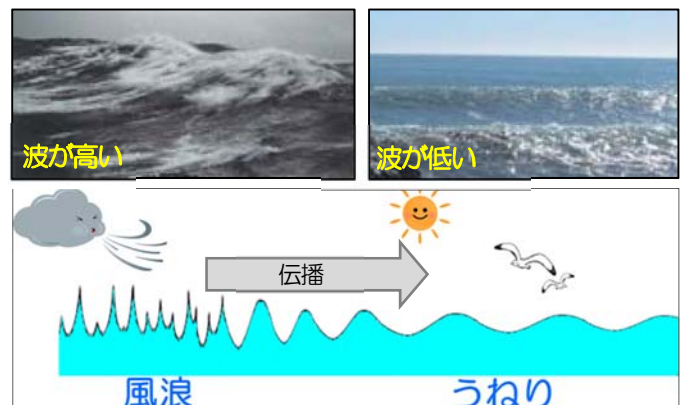


図-1 従来の設計波（風浪）とうねりの違い

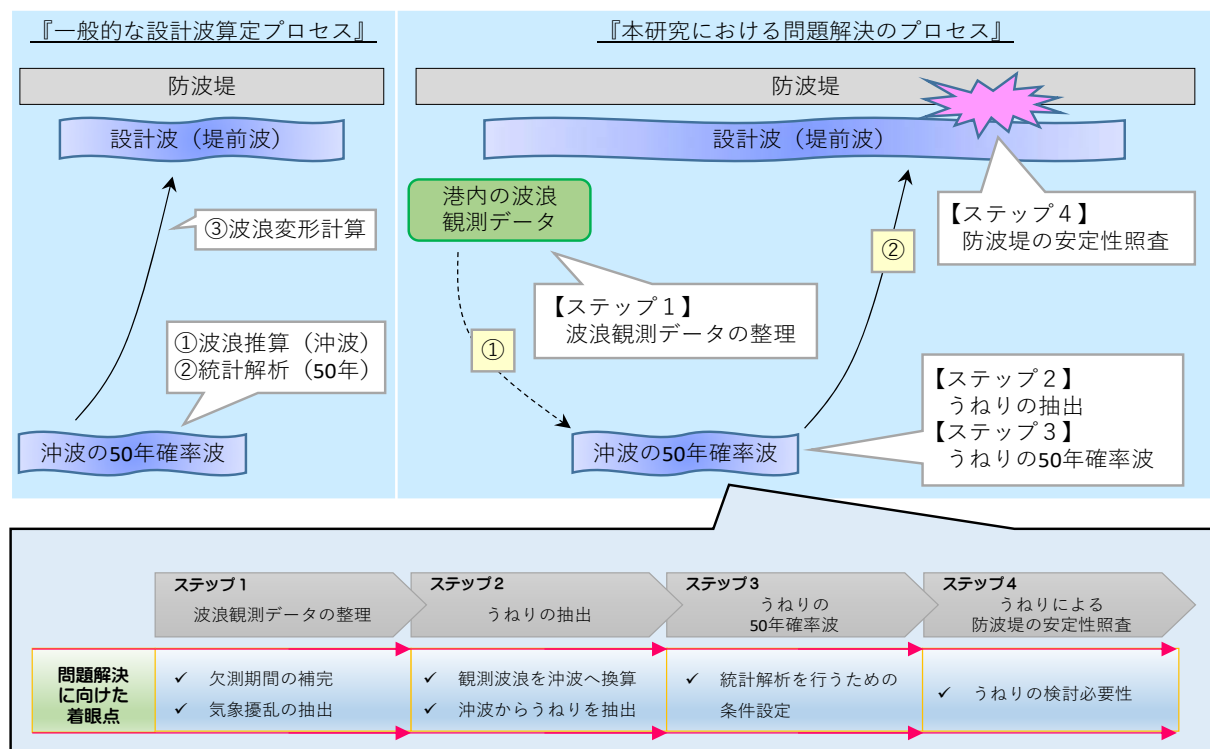


図-2 『本研究における問題解決のプロセス』

である。うねりは減衰しながら伝わるため、図-1のように、穏やかに見えることもあるが、風浪よりも波長や周期が長いために海底の影響を受けて波が高くなりやすい性質もある。なお、本研究で対象とするうねりは、平山ら<sup>9)</sup>の示す「周期8秒以上、波形勾配0.025未満」とした。

### (3) うねりによる設計波の算定方法

波浪は一定の水深より浅くなると海底地形の影響を受けて変化していく特性がある。そのため、一般的な防波堤前面の設計波（堤前波）の算定プロセスとしては、『水深の影響を受けない沖合地点の波浪（以下、沖波）を算出』、次に『沖波から海底地形を考慮した波浪の変形計算（以下、波浪変形計算）により設計波（堤前波）を算出』の2段階で構成される。

具体的なプロセスとしては、図-2に示すように①風のデータから時々刻々とした『沖波』を波浪推算、②統計解析により『沖波』による『50年確率波』を算定、③『50年確率波』に対して、海底地形による波浪の変化を考慮すべく波浪変形計算により防波堤前面の設計波（堤前波）を算出といった流れで検討する。なお、50年確率波とは、施設の供用期間50年間の中で、発生する確率がある波高の高い波浪のことである。これは、過去に発生した波高の高い波浪データを元に統計解析により求められる。

一方で、波浪データが十分に観測されている場合には、実測値を用いた沖波の設定が可能である。志布志港では、港内の波浪データとして、1980年からの観測値があるた

め、うねりの設計波の算定にあたっては、図-2に示すように、①『観測データ』から『沖波』とその『50年確率波』を算出し、②『50年確率波』の波浪変形計算により『設計波（堤前波）』を算出するという手順で行った。なお、①については従来設計波にも適用可能な手法であるが、本研究では、一般的な算定プロセスと異なり、観測値をベースにうねりを算定した場合のケーススタディとしてその内容についても併せて報告する。

以上に示す、本研究における問題解決のプロセスを踏まえ、本稿では、1) 波浪観測データの整理、2) うねりの抽出、3) うねりの50年確率波について各々で明らかになった課題とその解決方法について報告するとともに、最終的な結論である4) うねりによる防波堤の安定性照査についてその結果を考察する。

## 2. 波浪観測データの整理

志布志港では、防波堤から沖合約3kmの地点において、1980年～現在までの波浪観測が行われている。なお、観測地点は、前述した海底地形の影響を受けて波浪が変形する地点に位置する。

本章では、うねりの設計波を算定するにあたって、観測データを使用することとしているが、波浪観測データの整理における課題として明らかになった1) 欠測している期間の補完方法、及び2) うねりの中でも防波堤に影響を与える気象擾乱の抽出方法について報告する。

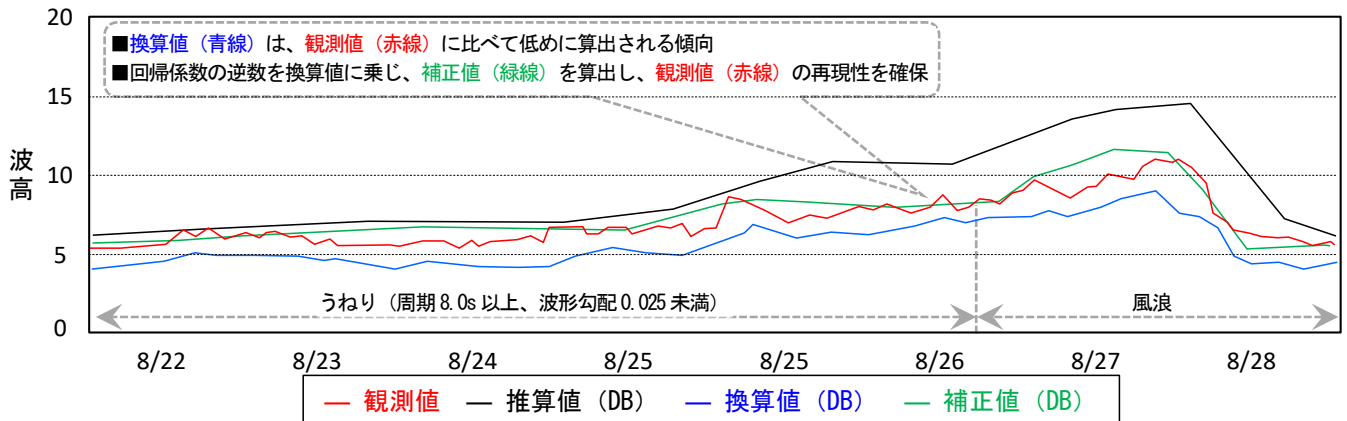


図-3 推算値 (DB) から観測値を再現した結果の例説図

### (1) 欠測期間の補完方法

欠測期間の補完方法として、日本気象協会が保有している既存の沖波地点の波浪推算 DB (以下、DB) の利用可能性を検討した。

前述したとおり DB は、海底地形を考慮せず算定された波であるが、観測データは海底地形の影響を受ける地点に位置する波浪である。また、DB の推算値と観測値はそもそも地点が異なるため、推算値をそのまま観測値の欠測期間に補完することはできない。

そこで、沖波地点である DB の推算値に対して、波浪変形計算を行い観測地点での欠測を補完する方法を検討した。検討にあたっては、補完の再現性を確認すべく図-3 に示すとおり波浪変形計算結果 (以下、換算値) と観測値の比較を行った。その結果、換算値は、観測値に比べて波高が低めに算出される傾向になった。

なお、換算値と観測値の差を解消すべく、補正する係数として換算値から観測値を求めるための回帰係数を算出し、その逆数を換算値に乘じることで、観測値の再現性を確保した。

以上を踏まえ、推算値 (DB) に対して、波浪変形計算及び回帰係数による補正を行い、観測値を再現した結果の例説図を図-3 に示す。図中赤線が観測値、黒線が DB の推算値、緑線が補正值 (波浪変形計算及び回帰係数を考慮) となっており、観測値を精度よく再現できたことが確認できる。なお、前述したとおり、本研究では、周期 8 秒以上、波形勾配 0.025 未満より、図-3 に示すようなイメージでうねりと風浪を区分する。

### (2) 気象擾乱の抽出

本研究では、図-3 のように波高の高い気象擾乱の前後期間から、うねりを抽出後、設計波を算定する。そこで、上述の方法にて欠測期間の補完を含めたすべての観測値から、防波堤の安定性に影響のある気象擾乱を抽出した。抽出基準としては、1980 年以降の各年における最大波高を抽出し、その中で最小となる 2008 年の 2.63m 以上の波高を有している擾乱とした。なお、擾乱の期間設

定としては、国土交通省で構築する波浪観測網で指定される志布志港の高波抽出基準である 1.0m として、図-4 に示すとおり、時系列で波高が 1.0m を超えてから、次に 1.0m を下回るまでを 1 事例とした。その結果、うねりによる設計波算定のベースとなる観測地点での擾乱として、197 ケースを利用可能なデータとして抽出した。

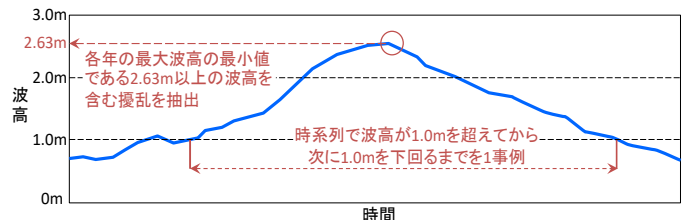


図-4 気象擾乱の抽出 (イメージ図)

## 3. うねりの抽出

設計波の算定においては、前述の図-2 にも示すとおり、沖波の 50 年確率波から波浪変形計算を行うことで、設計波 (堤前波) を算出することになる。特に沖波においては、本研究で対象としているうねりを抽出し、その上で、うねりの中でも波高が大きくなる極大値を波向別に整理し、それらの統計処理により 50 年確率波を算定することになる。

そこで、本章では、次の課題として 1) 抽出した観測地点での擾乱期間における波浪を沖波地点の値へ換算する方法、2) 換算された沖波地点の波浪からうねりを抽出し極大値を整理した内容について報告する。

### (1) 観測地点の波浪を沖波地点へ換算

観測地点の波浪を沖波地点に換算するには、沖波地点での波高、周期、波高が未知となる。そこで本研究では、図-5 に示す手順で観測地点の波浪を沖波へ換算する。

具体的には、①沖波地点 (赤丸) の仮の沖波を作成する。仮の沖波とは、沖波地点における既往の波浪推算

DB（気象庁）から現地で発生すると想定される入射波高（2.0m～14.0m）、入射周期（4.0s～16.0s）、入射波向（NE～WSW）を複数の組み合わせで仮定したものである。次に、②仮の沖波を観測地点（青丸）まで波浪変形計算し、観測地点の波浪を算出。最後に③『算出された観測地点の波浪』を前章で抽出した擾乱期間の観測値と比較し、観測値の波浪に最も近づく（波高、周期、波向の誤差が最小）『算出された観測地点の波浪』の波浪変形計算前の沖波を、観測値に対する沖波と判定した。以上の方法にて、観測値を沖波へ換算した。

## (2) 沖波からうねりを抽出・極大値の整理

次に、換算された沖波地点の波浪からうねりを抽出する。具体的には前述したとおり、波形勾配が 0.025 未満かつ周期が 8.0s 以上に該当する波浪をうねりとした。

さらに、抽出したうねりの中から 50 年確率波を算定するための統計解析に用いるデータとして、気象擾乱 197 ケースを対象に志布志港で発生する E～S の波向別の波高が高くなる極大値を整理した。

## 4. うねりの 50 年確率波算定

前章において 50 年確率波を算定にするにあたっての極大値データを整理した。以降は、極大値のデータから 50 年確率波を統計解析により算出する必要があるが、通常的设计波とは異なるうねりの特性を考慮した統計解析の条件を設定することが課題としてある。

そこで、本章では、統計解析の条件設定として考慮した 1) 波向の重ね合わせ、2) 足切り値の設定、3) 統計解析の結果（従来との比較）について報告する。

### (1) 波向の重ね合わせ

50 年確率波については、波向毎に極大値を統計解析することで、波向毎の 50 年確率波を算定する。その際、従来の方法であれば、例えば、表-1 に示すとおり、SE 方向の極大値を整理する場合、その両隣の方角も合わせて、3 波向の中から、最大値となる波高を SE 方向の極大値として抽出（3 波向の重ね合わせを考慮した極大値の抽出）する。その結果、黄色ハッチングを使用して SE 方向の統計解析を行うこととなる。これは、従来の設計波である風浪は、その場で多方向の風が吹いて発生するため 360 度の波向が発生する可能性があるためであり、安全側の設計として、この方法が採用されている。

一方でうねりは、遠くから伝播して来る波であり、ある一つの対象地点（志布志港）に入ってくるうねりは、対象地点に入って来られる波向のうねりしか発生しないため、対象地点で発生するうねりの方向集中度が高くな

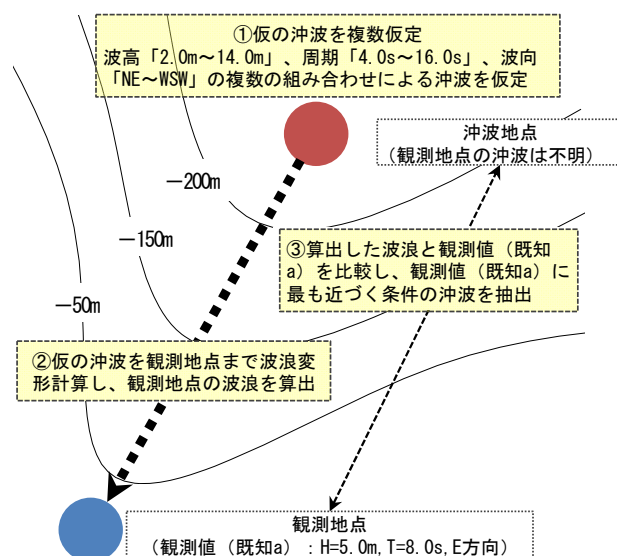


図-5 観測地点の波浪を沖波地点へ換算（イメージ図）

表-1 『3波向の重ね合わせ』を考慮した極大値の抽出例

開始	終了	ESE	SE	SSE
1980/5/12 ～	1980/5/24	4.64	4.60	0.78
1980/9/9 ～	1980/9/12	3.24	3.56	3.13
1980/10/10 ～	1980/10/14	4.49	2.71	1.62
1981/3/12 ～	1981/3/14	—	2.54	—
1981/8/19 ～	1981/8/22	4.34	3.31	—
1981/8/29 ～	1981/9/4	—	3.93	4.88
1981/9/29 ～	1981/10/2	5.53	—	—
1981/10/18 ～	1981/10/23	5.99	4.54	—

赤字：1波向の抽出波高、黄色ハッチング：3波向の抽出波高

3 波向を考慮すると SE の波がほとんど抽出されない

るという特性がある。

また、図-6 に示した志布志港の平均波向の経年変化図（波高 1m 以上）によると、観測される平均波向は SE 方向が支配的であるにも関わらず、表-1 に示すとおり、3 波向で極大値を整理した場合、ESE 方向の波高を抽出している箇所が多く、SE 方向については 2 ケースしか抽出されない。

以上を踏まえると、うねりはその特性として、方向集中度が高い上に、志布志港におけるうねりの実態としても SE 方向に集中することから、3 波向で極大値を整理する方法は 1 波向と比較して、50 年確率波高を必要以上に高めに算定すると考えられる。

そこで、うねりの 50 年確率波の精度をより確保できるものと考え、本研究では、志布志港におけるうねりの特性を考慮して、1 波向で極大値を整理する方法を採用した。

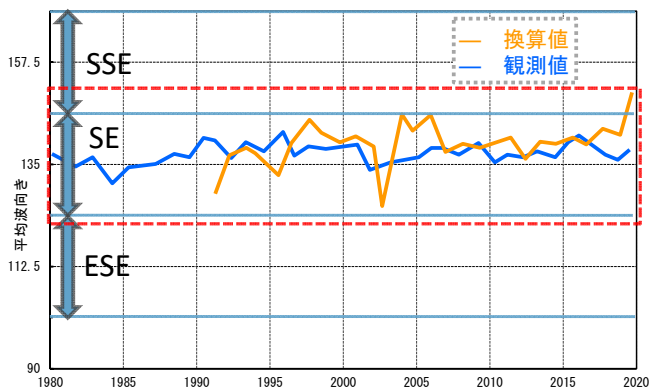


図-6 志布志港の平均波向の経年変化図

## (2) 足切り値の設定

次に1波向で整理された極大値により波向毎に統計解析を行って、50年確立波を算定することになる。従来この統計解析においては、整理された極大値の全てを統計解析に使用することにはならず、志布志港では3m以上の極大値のみを抽出（足切り値3m）していた。

一方、今回の研究対象であるうねりの特性を踏まえた50年確率波の算定について考慮すると、従来の設計波（風浪）と比較してうねりは周期は長い、波高が低くなる特徴がある。そのため、従来の足切り値3mの場合、統計解析に使用する極大値のデータ数が少なくなることに加え、本来残すべき低波高のデータを算定対象から除外し、確率波高を高め設定してしまうという課題があった。

そこで、本研究においては、足切り値の設定として、波向別に、各年における最大波高を抽出し、その中で最小となる値（年最大波高の最小値）を足切り値として、設定することとした。

## (3) 統計解析の結果（従来との比較）

以上に示したように、本研究においては、うねりの特性を考慮した統計解析の条件設定として、波向の重ね合わせを『3方向⇒1方向』、足切り値を『3m⇒年最大波高の最小値』を設定することとした。それらを踏まえて行った統計解析の結果（50年確率波）について、従来の設定条件の結果と比較したものを図-7に示す。

波向として支配的であるSE方向の波高に着目すると、今回の設定条件では10.60m、従来の設定条件では10.84mとなり今回の設定条件は、波高が低めに算定されている。また、SE方向以外の波向でも従来の設定条件に対して0.29m～3.03mと今回の設定条件が低い傾向となった。

この比較結果は、足切り値を3.0mとすると本来残すべき低波高のデータを除外するため、うねり性波浪の確率波高が過大に算定される可能性がある。

しかしながら、うねりの特性を考慮した今回の設定条件とすることで、より精度の高いうねりの50年確率波

を設定できたと評価できる。

また、参考として図-8に従来とうねりの50年確率波の比較を示す。波高は全体的に5～7割程度低くなっている。また、周期はESE～SSEで1～2割程度長くなるが、波向EとSではほぼ同じ周期となった。

うねりは方向集中度が高いため、波向により周期の差が顕著に表れていることが分かる。また、波向によって、確率波高値や周期値の傾向がかなり特徴的である。

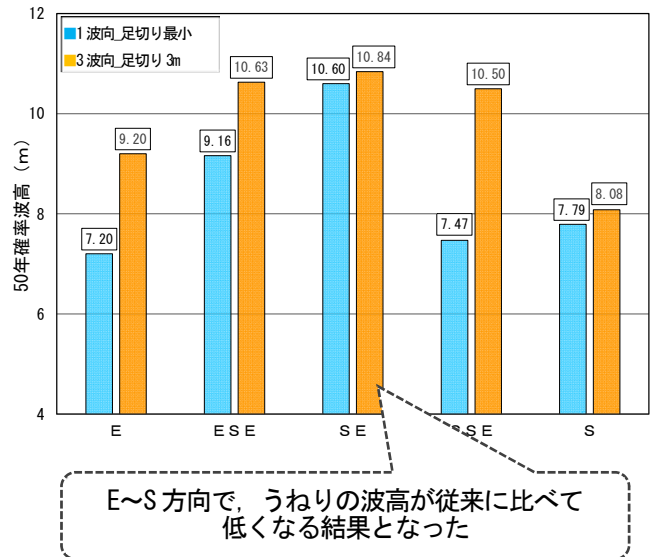
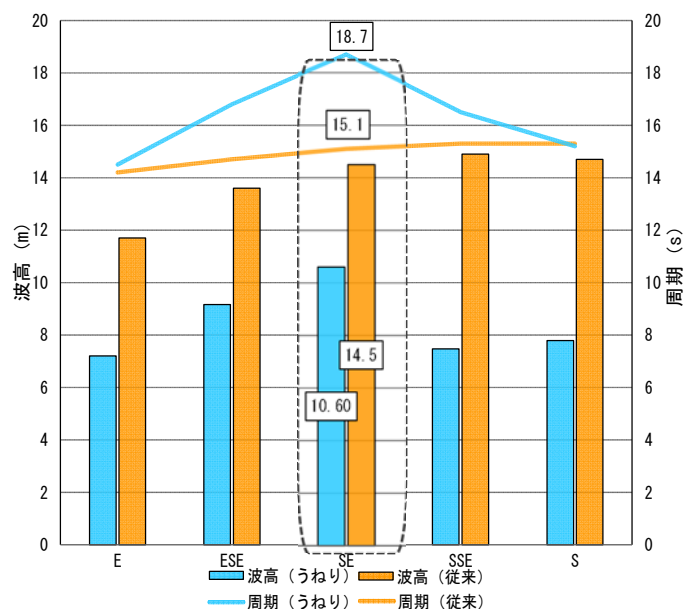


図-7 統計解析の結果（従来との比較）



うねりの波高及び周期は従来と比較し、波高は4.0m程度低くなり、周期は4.0s程度長くなる

図-8 従来とうねりの50年確率波の比較

表-2 従来とうねりの設計波（堤前波）による防波堤の安定性照査の比較結果

うねりは従来の設計波に比べて Hmax が 0.8m 低く、周期は 6.1s 長い

工 区		I - 1		工 区		I - 1	
設計波 (従来)	Hmax (m)	11.6		設計波 (うねり)	Hmax (m)	10.8 (-0.8m)	
	H1/3 (m)	7.7			H1/3 (m)	6.5 (-1.2m)	
	T1/3 (s)	14.0			T1/3 (s)	20.1 (+6.1s)	
潮 位		HWL + 2.4m	LWL ± 0.0m	潮 位		HWL + 2.4m	LWL ± 0.0m
作用耐力比 ≤ 1.0	滑 動	1.06	1.04	作用耐力比 ≤ 1.0	滑 動	1.05	0.97
	転 倒	0.46	0.43		転 倒	0.45	0.40
	基礎の支持力	0.84	0.83		基礎の支持力	0.82	0.77

従来とうねりの滑動の作用耐力比は同等の値となった

## 5. うねりによる防波堤の安定性照査

うねりの 50 年確率波を算定できたことから、図-2 に示すように 50 年確率波に対して、波浪変形計算を行って防波堤前面の設計波（堤前波）を算出後、それにより防波堤の安定性を照査した。

志布志港の防波堤の各工区の堤前波を波向別に算定したところすべての工区において波向 SE における最高波高（堤前波）が最大となったため、うねりによる設計波の波向は SE 方向とした。

また、志布志港の防波堤延長は 4200m と長大であるため、既設断面で滑動安全率が最も小さい断面を対象断面とし、従来とうねりの設計波による安定性照査を行った。

対象断面における従来とうねりの設計波（堤前波）による防波堤の安定性照査の比較結果を表-2 に示す。まず、設計波（堤前波）を比較すると、うねりは従来の設計波に比べて Hmax が 0.8m 低くなっているが、周期が 6.1s 長くなっている。

その設計波を用いた安定性照査結果を示すのが作用耐力比の『滑動』、『転倒』、『基礎の支持力』である。作用耐力比は、構造物の耐力に対して設計波の波圧による作用の比率を示すものであり、1 未満になれば、安定性は確保できていることを示す。

結果として、従来、うねり共に『滑動』で安定性を確保できないことが判明し、特に HWL（最高潮位）時の作用耐力比は、従来が 1.06、うねりが 1.05 となり同等の値となっている。

うねりは波高が低いにも関わらず、安定性を確保できていない結果となっているが、その理由としては、波圧の算定式で説明が可能である。波圧の算定式では、直接的に T（周期）は入力値とはならないが、L（波長）を入力する必要があるが、波長が長くなるほど、波圧が大きくなる算定式となっている。さらに、波長は周期の 2 乗として算出されるため、周期が長いほど、波圧としては大きくなるためである。

以上のように本研究では、安定性が危惧されるデータを所得するに至った。これまで想定外としていた自然災害に対する国土強靱化を図る上では、重要インフラの機能維持の新たな視点として、九州の防波堤においても、うねりの影響を考慮した方策の必要性を確認し、そのための設計手法の確立が急務であることの検討課題を得た。

## 6. おわりに

うねりの影響は、海域の地域特性にも大きく起因すると考えられる。そのため、本研究で得られた課題に対する今後の具体的な検討プロセスとしては、①海域の位置・形状や、発生するうねりの頻度・特徴（波高、周期、波長）等を踏まえ、明確な設計対象海域を設定した上で、②それらの設計対象海域の地域特性に応じたうねりの設計波算定手法の確立を急ぐ必要がある。

本検討で得られた主要な成果は以下の通りである。

### 1) うねりに関する設計波の設定方法

- ・うねりによる 50 年確率波を算出するための統計解析において、うねりの特性を考慮した条件設定として、『波向の重ね合わせ』や『足切り値』について従来と異なる手法を示した。
- ・うねりの設計波を算出するにあたり、1980 年以降の波浪観測データの利用について検討し、欠測期間の補完方法について示した。
- ・うねりの沖波を算出するにあたり、防波堤の前面付近に位置する波浪観測データを沖波へ換算する方法について示した。

### 2) うねりに関する防波堤の安定性照査

- ・従来とうねりの設計波では、同程度となる被災のリスクを示した。

## 参考文献

- 1) 平山克也, 加島寛章, 伍井稔, 成毛辰得: うねりによる高波の発生確率とその他地域特性に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.7, No.2, I\_85-I\_90, 2015.