

志布志港におけるうねり性波浪の検討

本田 浩隆*・鈴木 善光**・服部 俊朗**・山本 修司***・大瀬 信一****・吉本 幸太*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

**** 前 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 副所長

***** 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室 沿岸防災調査官

九州地方整備局管内の志布志港において、うねり性波浪を対象とした50年確率波を算定するとともに従来から用いていた設計波と併せた2種類の沖波諸元により、既設防波堤の安定性を比較検討した。

キーワード：風波、うねり性波浪、50年確率波、安定性照査

1. はじめに

九州地方整備局管内（以下、九州管内と称す）の海域は、毎年発生する台風の経路にあたることから、高波による港湾施設の被災事例が多く報告されている。これまで、九州管内の防波堤等の設計波算定は、風波とうねり性波浪の区別をせずに極大波高を統計処理して算定することが一般的であった。

一方で、2013年の台風26号による鹿島港や2008年の寄り回り波による伏木富山港の港湾施設の被災事例は、うねり性波浪による被災として知られている¹⁾。このようなことから、平成30年技術基準の改訂では、周期が長いうねりに対しても適切に対応するため、波浪の再現期間は、うねりに対しても設定するのがよいとされている。これらを踏まえて、九州管内の港湾において、うねり性波浪に対する既存の防波堤の安定性を検討することとなった。

九州管内の海域は大凡太平洋側、日本海側、東シナ海側に分類できる。対象港湾の選定にあたり、図-1に示す高波高時（高波抽出基準以上）のうねりの出現頻度から、3つの海域の中では、太平洋側のうねりの出現頻度が高くなっており、志布志湾においても60%を超えていることから、志布志港を対象港湾に選定した。

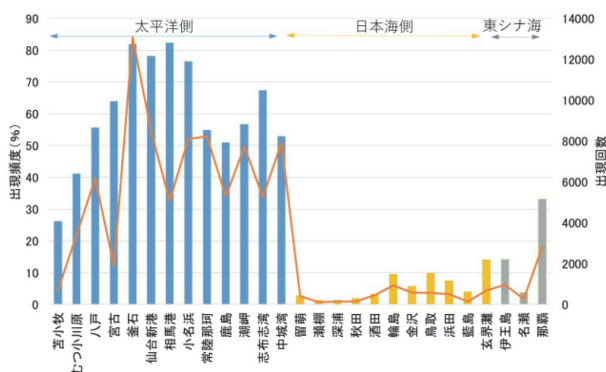


図-1 高波高時（高波抽出基準以上）のうねりの出現頻度²⁾

本稿では、志布志港において、うねり性波浪を対象とした50年確率波を算定するとともに、従来の設計波と併せた2種類の波浪諸元により、既設防波堤の安定性を比較検討した。

2. 検討フロー

検討フローを図-2に示す。

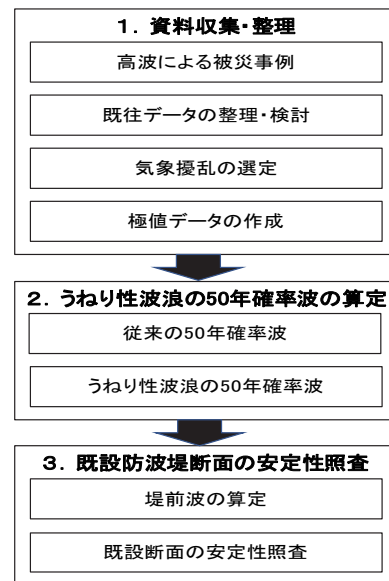


図-2 検討フロー

3. 資料収集・整理

3.1 高波による被災事例

志布志港の災害復旧工事資料から、高波による被災3事例の整理結果や他の地方整備局等でうねり性波浪に関する検討事例を収集・整理した結果をうねり性波浪の設計波の算定に反映させることとした。うねり性波浪の判断基準は、平成30年技術基準のうねり性波浪の定義より、「有義波周期8.0秒以上でかつ波形勾配が

0.025未満のもの」とした。

3.2 気象擾乱の選定

統計期間は、NOWPHAS 観測データ 1980 年～2018 年の 39 年間に志布志港で観測されたうねり性波浪を含む高波事例を抽出した。また、観測データの欠測期間は波浪推算 DB ((一財) 日本気象協会) で補完した。

確率波浪算定は、気象擾乱 197 ケース (観測データ : 175 ケース, 波浪推算 DB:22 ケース) を対象とした。

4. うねり性波浪の 50 年確率波の検討

うねり性波浪による波向別極大値資料の作成, 極値統計による 50 年確率波の算定を行った。

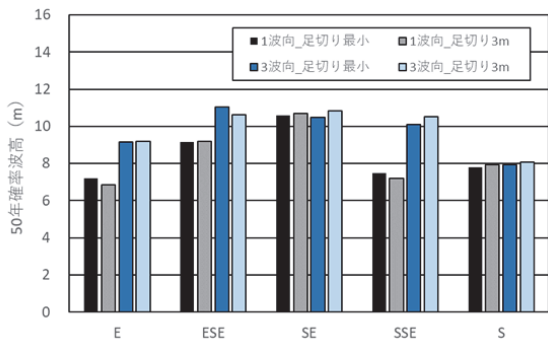
4.1 確率波高の算定

50 年確率波の算定にあたり, 合田法 (修正 P・A 法) による極値統計解析を行った。分布関数は Gumbel 分布 (極値 I 型分布), 極値 II 型分布 ($k=10/4, 10/3, 10/2, 10/1$ の 4 種), Weibull 分布 ($k=0.75, 1.00, 1.40, 2.00$ の 4 種) の計 9 種とした。それぞれの分布関数をあてはめ, 最も適合する分布関数を選定した。

うねり性波浪の確率処理における波向と足切り値の取り扱い, 従来の方法とは異なる次の方法を採用した。

一つ目は主波向の両隣 ($\pm 22.5^\circ$) の波向も含めた 3 波向考慮とせず, 1 波向のみを考慮した。二つ目は足切り値を一定値とせず統計期間の波向別年最大波高の最小値を採用した。

E から S の 5 波向について, 波向と足切り値の取り扱いを変えて確率処理した 50 年確率波高を図-3 に示す。



再観測期間	E	ESE	SE	SSE	S
10年	4.32	7.71	7.78	8.93	6.23
30年	6.29	9.73	9.66	10.99	7.41
50年	7.20	9.16	10.60	7.47	7.79
100年	8.44	9.71	11.97	8.26	8.26

図-3 波向別の 50 年確率波高 (うねり性波浪)

足切り値の取り扱いによる 50 年確率波高は大きな差がみられなかった。一方で, 1 波向で確率処理を行う場

合と 3 波向を考慮する場合では波向 SSE で 3m 程度の差がみられた。また, 1 波向では SE の波高が最も高いのに対して, 3 波向考慮では ESE の波高が最も高くなる結果となった。

4.2 確率波高に対する周期の算定

50 年確率波高に対する周期の算定方法は, 波高と周期の関係を線形近似法 (図-4 橙色) ではなく, 波形勾配でフィッティングさせた方法 (以下, 波形勾配法と称す; 図-4 赤色) を採用した。波向 SE の場合のうねり性波浪の波高と周期の関係を図-4, 波形勾配法における周期の算定結果を表-1 に示す。

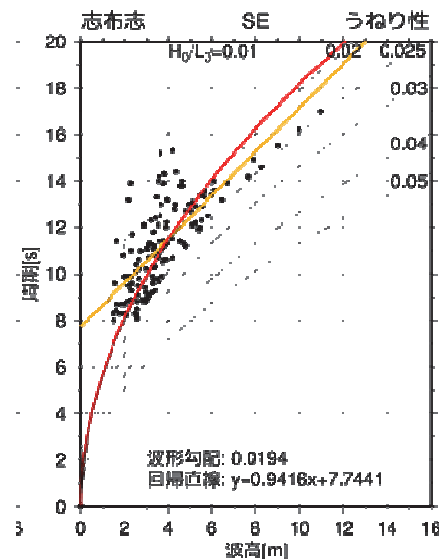


図-4 波高と周期の関係 (波向 SE, 1 波向, 足切り最小)
E から S の 5 波向のうち, SE の周期 18.7 秒が他の波向に比べて 1.9 秒～4.2 秒長い結果であった。

表-1 50 年確率波高に対する周期の算定結果 (波形勾配法)

再現期間	E		ESE		SE		SSE		S	
	H0[m]	T0[s]	H0[m]	T0[s]	H0[m]	T0[s]	H0[m]	T0[s]	H0[m]	T0[s]
10年	4.32	11.2	7.71	16.4	7.78	16.0	8.93	14.7	6.53	13.9
30年	6.29	13.5	9.73	16.3	9.66	17.9	10.99	15.9	7.41	14.9
50年	7.20	14.5	9.16	16.8	10.60	18.7	7.47	16.5	7.79	15.2
100年	8.44	15.7	9.71	17.3	11.97	19.9	8.13	17.2	8.26	16.7

4.3 50 年確率波 (沖波) の従来波とうねり性波浪の比較

波向別に従来の 50 年確率波 (沖波) とうねり性波浪の 50 年確率波 (沖波) の比較した結果を図-5 に示す。従来の 50 年確率波は「九州東海域波浪推算調査報告書 (平成 20 年 3 月)」から整理した 3 地点の沖波の値である。

図-5 より, 従来の 50 年確率波に比較してうねり性波浪の 50 年確率波は, 波高が波向 ESE と SE では 7 割程度, 波向 E では 6 割程度, 波向 SSE と S では 5 割程度と低い。周期は ESE～SSE で 1～2 割程度長くなるが, E と S ではほぼ同じ周期となり, 波向によって確率波高値や周期値の傾向がかなり異なることが確認された。

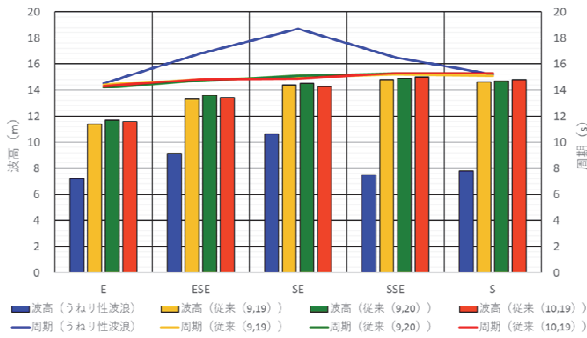


図-5 従来の50年確率波とうねり性波浪の50年確率波の比較 (沖波)

4.4 うねり性波浪の堤前波の算定

うねり性波浪の50年確率波を沖波地点の入射条件とし、志布志港の既設防波堤の各工区の堤前波を波向別に算定した。各工区の中で波高が最大となるポイントを選定し、波向別の最高波高(Hmax)の比較を行った結果を図-6に示す。全工区とも周期が最も長い波向SEにおける堤前波高が最大となることが確認できたため、うねり性波浪による設計波の波向はSEを採用した。

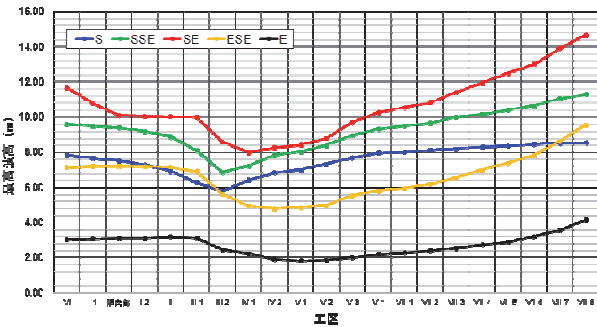


図-6 各工区における波向別の堤前波(最高波高)の比較

5. 既設防波堤断面の安定性照査

5.1 既設断面の整理方法と選定結果

既設防波堤(沖)は、昭和54年3月の港湾計画改訂において、延長2,600m(直線部:2,200m,ハネ部:400m)が決定され、その後、平成5年8月の港湾計画改訂において、延長4,100m(直線部:3,200m,ハネ部:900m)に延伸された。工事が長期に渡っていることや台風による災害が発生していることなどから、設計に用いる沖波も度々見直されている。

また、既設防波堤の各工区は設計時期が異なり安定性の照査方法が技術基準の相違より、設計当時の計算結果をそのまま比較ができない。このため、設計当時の資料を基に全工区とも平成30年技術基準を適用して、【完成時】の作用耐力比を算出し、整理した。

なお、比較検討項目は、滑動、転倒、基礎の支持力、端し圧とし、円弧すべりは波浪とは無関係のため、対象外と

した。

安定性照査に用いる既設断面は、次の2工区の2断面を選定した。①滑動安全率が最も小さい断面は、滑動に対する作用耐力比が最も大きい断面となるI-1工区とした。②基礎の支持力(簡易ビショップ法)が最も小さい断面は、基礎の支持力に対する作用耐力比が最も大きい断面となるV-4工区とした。選定した既設防波堤断面の工区位置を図-7に示す。

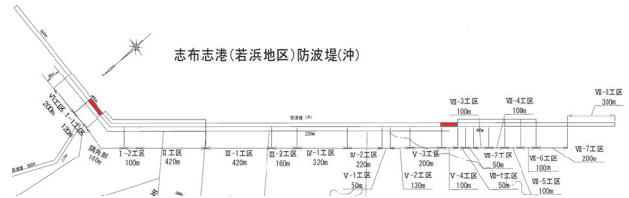


図-7 防波堤の既設断面の選定工区(赤色)

5.2 既設断面の安定性照査結果

うねり性波浪に対するI-1工区とV-4工区の安定性照査結果を表-2,3に示す。I-1工区では、うねり性波浪は、従来の設計波に対してHmaxが0.8m小さくなっているが、周期が6.1秒長くなっている。H.W.L.時の滑動の作用耐力比は従来の設計波1.06に対し、うねり性波浪では1.05とほぼ同じ値になった。

表-2 滑動安全率が最も小さい断面の安定性照査結果【I-1工区】

設計波	I-1				
	(従来設計波)	(うねり性波浪)			
Hmax(m)	11.8*	10.8(-0.8m)*			
H1/3(m)	7.7	6.8(-1.2m)			
T1/3(s)	14.0	20.1(+6.1s)			
β(補正後)(°)	14.0	24.3			
潮位	H.W.L. +2.4m	L.W.L. ±0.0m	H.W.L. +2.4m	L.W.L. ±0.0m	
作用耐力比 ≤1.0	滑動	1.06	1.04	1.05	0.97
	転倒	0.46	0.43	0.45	0.40
	基礎の支持力	0.84	0.83	0.82	0.77
端し圧	P1(kN/m²)	385.0	410.2	376.5	390.8

表-3 基礎の支持力(簡易ビショップ法)が最も小さい断面の安定性照査結果【V-4工区】

設計波	V-4				
	(従来設計波)	(うねり性波浪)			
Hmax(m)	12.7	10.3(-2.3m)*			
H1/3(m)	7.7	5.7(-3.0m)			
T1/3(s)	15.3	19.6(+4.3s)			
β(補正後)(°)	6.5	0.0			
潮位	H.W.L. +2.4m	L.W.L. ±0.0m	H.W.L. +2.4m	L.W.L. ±0.0m	
作用耐力比 ≤1.0	滑動	0.64	0.56	0.58	0.46
	転倒	0.18	0.15	0.15	0.12
	基礎の支持力	0.94	0.96	0.91	0.91
端し圧	P1(kN/m²)	228.0	243.8	220.5	234.9

一方、V-4工区では、うねり性波浪は、従来の設計波に対して周期が4.3秒長くなっているが、 H_{max} の低下量が2.3 mと大きかった。H.W.L.時の滑動の作用耐力比は、従来の設計波0.64に対し、うねり性波浪では0.56と1割程小さかった。また、基礎の支持力についても同様にうねり性波浪の方が5%程小さかった。

5.3 留意事項

表-2のI-1工区の比較検討において、昭和54年に設計された防波堤の滑動について、当時の港湾基準（安全率法）では安全率を満足していたが、平成30年技術基準（部分係数法）では作用耐力比が1以上となり満足しないという結果になった。これは技術基準の変遷過程に伴う新旧基準比較では起こり得る現象であり、現状の既設防波堤が安定している事実から、本結果をもって既設断面の安定性が確保されていないというものではないことに留意する必要がある。

6. 今後の課題及び対処法

うねり性波浪に対する防波堤設計についての今後の課題とその対処法を以下にとりまとめた。

【課題1】九州管内他港湾への適用等

- ① 志布志港において、従来の方法による50年確率の設計波とうねり性波浪が作用した場合の設計波について、2工区を抽出し、堤体の安定性を比較した。その結果、従来の設計波、うねり性波浪ともに作用耐力比がほぼ同じ値になる工区が存在したことから、波浪の条件によっては、従来の設計波よりうねり性波浪の外力が大きくなるケースも考えられた。このようなことから、うねり性波浪の発生頻度の多い九州管内太平洋側の港湾における防波堤の設計にあたっては、必要に応じてうねり性波浪についても検討することが望ましい。
- ② うねり性波浪の算出から安定性照査までの検討フローを作成した。これを活用し、他の事例についても同様の手法で検討することが望ましい。
- ③ 防災減災の対策上、津波や高潮等を含めて護岸の越波も考慮することが望ましい。
- ④ 志布志港では、既設防波堤2工区のみを対象に安定性照査を検討したが、今後港全体で100年確率波等を用いたうねり性波浪の影響、うねり性波浪による護岸や岸壁の越波・浸水被害の影響も検討することが望ましい。

【課題2】うねり性波浪の確率処理

- ① 志布志港において、従来の設計波を算定する際は、3波向の重ね合わせを考慮し、足切り値3 m固定として処理している。しかし、うねり性波浪を対象とする場合、波向きの重ね合わせは行

わず1波向として、足切り値は年最大波高の最小値を標準とし、必要に応じて適切に設定する手法を採用することがよい。

- ② 従来の設計波における周期の算定は、線形近似法を採用していたが、本稿では、うねり性波浪の周期は波形勾配法より算定する方法を採用した。なお、分布形状によっては線形近似法を採用しても問題ない。
- ③ 極値統計解析を行う際、足切り値の設定が結果へ与える影響度合いを事前に検討した方がよい。

【課題3】うねり性波浪の堤前波の周期

従来、風波における堤前波の周期は、変化が小さいことから沖波と同じ周期を設定していた。一方、うねり性波浪の場合、沖波と堤前波の周期の変化を考慮することも検討してみることが望ましい。

【課題4】安定性照査の波浪による水位上昇

うねり性波浪のような長周期の波を対象とする場合、サーフビートやwave set-upによる平均水位の上昇が考えられる。この場合、構造物に作用する浮力が変化するため、今後はこれにも対処する必要があると考える。

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所発注の「令和元年度管内港湾施設技術課題検討業務³⁾」の成果の一部をまとめたものである。業務実施にあたっては、「うねり性波浪検討会（委員長：高山知司京都大学名誉教授）」の委員の皆様及び関係各位から貴重なご意見、ご指導を賜りました。記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高嶋宏・平川将丈・遠藤敏雄・高橋康弘・宇都宮好博・松藤絵理子：うねり性波浪を考慮した設計沖波算定手法について、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 71, No. 2, pp. I_91-I_96, 2015
- 2) 松藤絵理子・高山知司・宮田正史・平山克也・河合弘泰・鈴木善光・宇都宮好博・福永勇介：うねり性波浪を考慮した設計波の設定法について、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 73, No. 2, pp. I_1153-I_1158, 2017
- 3) 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所：令和元年度管内港湾施設技術課題検討業務報告書，令和元年2月