

うねり性波浪による漁港海岸保全施設への影響について

The Impact of Swell on Coastal Protection Facilities at Fishing Ports

岩瀬浩之*・加藤広之**・鈴木勝之***・井上真仁****

Hiroyuki Iwase, Hiroyuki KATO, Katsuyuki SUZUYAMA and Masahito INOUE

* (一財)漁港漁場漁村総合研究所 第1調査研究部 主任研究員

** 元(一財)漁港漁場漁村総合研究所 上級研究員

*** (一財)漁港漁場漁村総合研究所 専門技術員

**** 前水産庁漁港漁場整備部防災漁村課 防災技術専門官

This study discusses the impact of swell on design offshore waves and a method for evaluation of the damage situation of facilities from swell based on the swell generation characteristics shown by wave observation data as well as damage situation of coastal protection facilities in a fishing port area. As a result, we found that the impact of swell on the design offshore waves was comparatively small on the side of the Sea of Japan coast with the exception of a part of Hokuriku, in the three major bays such as Tokyo Bay, Ise Bay and Osaka Bay, and the Seto Inland Sea. In contrast, the impact on the Pacific side is significant, however, the impact thereof was found to be partially reflected in the design offshore waves determined on the basis of the statistical analysis of extreme value including the latest wave observation data. As a result of attempting to reproduce a damage case accompanied with swell, we found the damage conditions were able to be reproduced reasonably by applying the Boussinesq equation and CADMAS-SURF/2D and calculating the wave and flow field in the vicinity of a structure.

Key Words : swell, coastal protection facilities, design offshore waves

1. はじめに

漁港区域内に位置する海岸保全施設の設計は、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」に基づいて行われており、平成30年8月の改訂¹⁾では、「設計波」に対してうねり性波浪の影響も適切に考慮することとなった。この改訂に至った背景には、近年に港湾施設等でうねり性波浪と考えられる施設被災が発生していることが挙げられる²⁾。

漁港区域内に位置する海岸保全施設は、港湾施設のように比較的水深が深い施設に比べ、一般的に水深の浅い海域(砕波帯内)や陸上域に位置することが多い施設であり、うねり性波浪による施設への影響については十分な検討が行われておらず、また被災実態に関する調査例も少ない。

本研究では、波浪観測データから抽出したうねり性波浪特性と漁港区域内の海岸保全施設の被災状況から、うねり性波浪と設計沖波との関係を検討すると共に、うねり性波浪による施設の被災状況を評価するための方法について検討を行った。なお、本研究で扱ううねり性波浪は、平山ら³⁾による「有義波周期8秒以上かつ波形勾配0.025未満」の波浪として定義し、それ以外を風波とした。

2. うねり性波浪による設計沖波への影響

2.1 全国的なうねり性波浪の発生状況

近年における全国的なうねり性波浪の発生状況を把握するため、ナウファスの観測データを用いてうねり性波浪の発生率を整理した。観測データの期間は、それぞれの観測地点で連続観測が開始された時期から2019年までを対象とした。

図-1は、全国のナウファスの観測において、海域毎にうねり性波浪の出現率(観測された全ての波浪のうち、うねり性波浪と定義された波浪の占める割合)を示したものである。太平洋側では、うねり性波浪の発生率は1/3程度である。三大湾や瀬戸内海のような内海ではうねり性波浪の発生率は極めて低い。一方で、日本海側では、全体的にうねり性波浪の発生率が低い傾向にある。

図-2は、全国のナウファスの観測において、高波の抽出基準⁴⁾を用いた高波浪時におけるうねり性波浪の発生率を示したものである。三大湾および瀬戸内海では、高波浪時でもうねり性波浪の発生率は極めて低い傾向にある。高波浪時の日本海側のうねり性波浪の発生率は、10%程度以下とうねり性波浪が占める割合は低い傾向にある。ただし、富山、敦賀でうねり性波浪の出現率が高い傾向にある。一方、高波浪時の太平洋側のうねり性波浪の発生率は40~80%と高い傾向にあった。

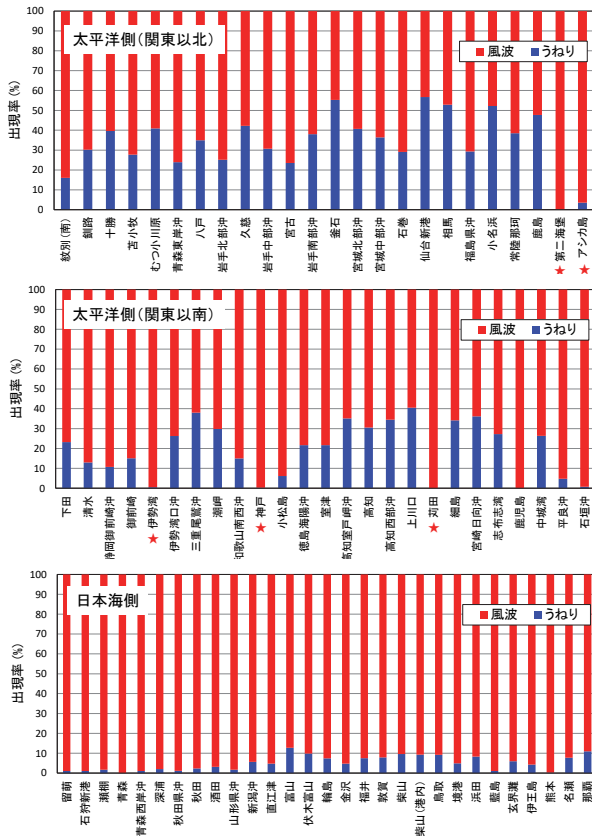


図-1 うねり性波浪の出現率
(★印は三大湾もしくは瀬戸内海に位置する)

漁港の設計沖波の推算には最大有義波高を用いており、近年の高波浪時におけるうねり性波浪の出現率特性は、沖波の見直しによって設計沖波にもその影響がある程度反映されるものと推測される。近年に設計沖波の見直しを行った検討事例^{5)・6)}からも、見直し前の設計沖波よりも波高は大きく、周期も2秒ほど長く推算されることが報告されている。ただし、ここで周期が長くなったのは、設計沖波の見直しに伴い確率波高が高くなったことによる結果(波高と周期の相関関係)である。適切な周期の算出については今後さらなる検討が必要であるが、近年の気象擾乱を含めて設計沖波の見直しを行うことにより、ある程度はうねり性波浪の影響を考慮することができると考えられる。

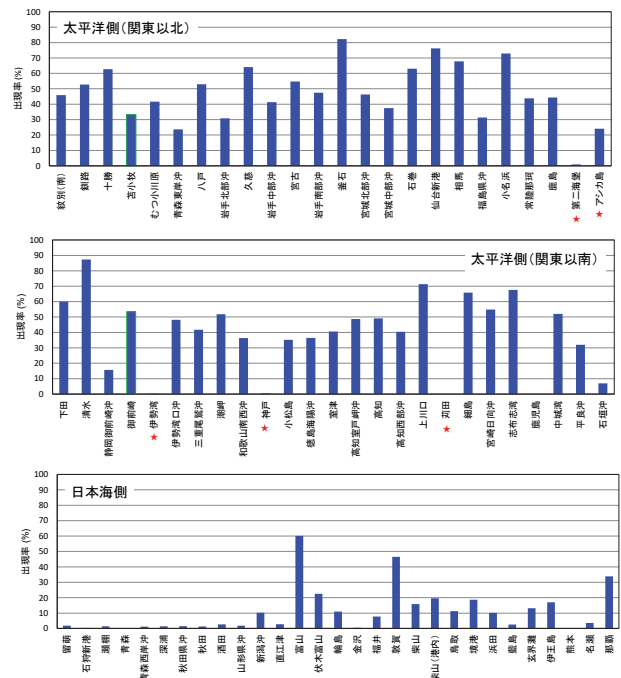


図-2 高波浪時のうねり性波浪の出現率
(★印は三大湾もしくは瀬戸内海に位置する)

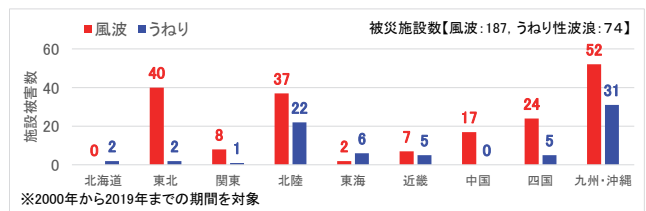


図-3 地方別の漁港海岸保全施設の被災数

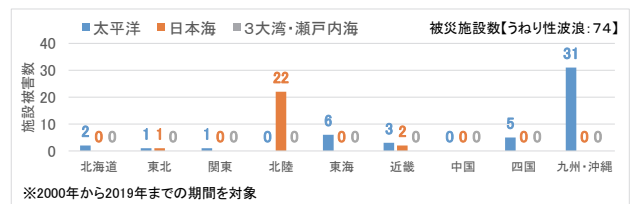


図-4 うねり性波浪による地方別の施設被災数

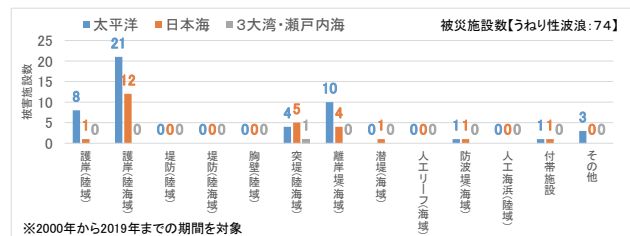


図-5 うねり性波浪による施設種類別の施設被災数

2.2 漁港区域の海岸保全施設被災の調査と実態

漁港区域内に位置する海岸保全施設の高波による被災

実態を把握するため、全国の漁港海岸管理者へアンケートを実施した。アンケートでは、2000年から2019年までの期間で発生した高波による海岸保全施設の被災を対象とし、被災が発生した漁港海岸名、発生時期、施設名および被災内容に対する回答を求めた。アンケート回答は、漁港海岸を有する全国39の都道府県のうち35の都道府県(高波による被災施設261件、うちうねり性波浪による被災施設数は74件)より得られた。被災時の波浪がうねり性波浪であったか否かは、被災時期における対象地点近傍でのナウファス波浪観測データに基づき判定した。なお、うねり性波浪によると判断された被災施設数は、全体の約3割であった。漁港区域に位置する海岸保全施設は、水深が極めて浅い位置や陸上域に位置するため、沖合施設に比べると、うねり性波浪による影響が小さかったものと考えられる。

図-3は、風波およびうねり性波浪による被災施設数を地方別に分類したものである。漁港区域に位置する海岸保全施設の被災の約7割は風波によるものである。また、他の地区に比べ、九州・沖縄(全体の約3割)で被災施設が多いのは、台風勢力が強い状態で来襲することが原因と考えられる。

図-4および図-5は、うねり性波浪による被災を対象とした各海域における地方別および施設種類別の被災数(全74施設)である。図-4から三大湾や瀬戸内海の被災施設はほぼなく、日本海側の被災施設も少ないことがわかる。また、太平洋側でも九州・沖縄以外の地区は被災施設が少ない。図-5から、被災施設種類は、離岸堤(19%)、突堤(14%)および護岸(57%)で施設被災数が多い。これら施設の多くは、洗掘に伴うブロックの沈下や流出が被災要因となっており、うねり性波浪による長い周期が少なからず影響を及ぼしているものと推察できる。

2.3 漁港区域内の海岸保全施設の設計沖波への影響

以上のうねり性波浪の発生率および施設の被災実態の調査結果から、うねり性波浪による設計波への影響を海域毎に考察する。

(1) 三大湾および瀬戸内海

近年の高波浪時でのうねり性波浪の発生率は非常に低く、うねり性波浪による施設の被害も少ないため、うねり性波浪による設計沖波への影響は小さいと考えられる。

(2) 日本海側

近年の高波浪時でのうねり性波浪の発生率は低く、うねり性波浪による施設の被災も少ないため、うねり性波浪による設計沖波への影響は小さいと考えられる。ただし、北陸の一部の地域では、うねり性波浪の発生率が高いため、留意が必要である。

(3) 太平洋側

近年の高波浪時でのうねり性波浪の発生率が高いことから、設計波条件にはうねり性波浪による影響を考慮する必要がある。ただし、最近のデータを含めた設計沖波の見直しの事例では、波高は大きく、周期も長くなる傾向がみられ、うねり性波浪による影響がある程度含まれていると考えることもできる。

3. うねり性波浪による施設被災再現の評価方法

うねり性波浪による海岸保全施設に与える影響を検討するため、施設の被災再現を試みた。ここでは、異なる計算手法を適用してそれぞれブロックの安定質量と打ち上げ高を算定し、実際の条件と比較した。

3.1 モデル地区による検討内容

施設に対する被災再現の評価は、モデル地区を対象に検討を行った。モデル地区は、うねり性波浪により被災を受けた施設を有する地区とし、被害規模、擾乱種類および地域等を考慮して、図-6及び表-1に示す8つの地区を対象とした。なお、太平洋側に位置し、かつ築造時の設計沖波が確認できたモデル地区では、現在の設計沖波の周期が築造時のそれよりも2秒ほど長くなっていることが分かった。



図-6 8つのモデル地区の位置

表-1 8つのモデル地区の被災施設一覧表

漁港海岸名	被災発生日	被災時の気象擾乱	被災施設	被災箇所① (被災形態)	被災箇所② (被災形態)	被災箇所③ (被災形態)
小袖漁港海岸	2015年10月08日	台風23号	護岸(陸域)	被覆ブロック(散乱)	捨石	-
入善漁港海岸	2008年02月24日	日本海低気圧	離岸堤(陸海域)	本体工(散乱)	-	-
曾々木漁港海岸	2002年01月08日	日本海低気圧	護岸(陸海域)	基礎マウンド(散乱)	-	-
下流漁港海岸	2019年10月12日	台風19号	護岸(陸海域)	本体工(崩壊)	天端コクリット(崩壊)	-
穴内漁港海岸	2014年8月8~10日	台風11号	護岸(陸海域)	消波ブロック(散乱)	根固工(決壊)	本体工(決壊)
千石漁港海岸	2012年09月17日	台風16号	護岸(陸域)	本体工(沈下)	本体工(沈下)	-
坊治漁港海岸	2006年09月18日	台風13号	護岸(陸域)	本体工(散乱)	-	-
久松漁港海岸	2003年09月11日	台風14号	護岸(陸海域)	基礎マウンド(散乱)	本体工(転倒)	付帯施設(転倒)

表-2 WRF の計算条件

物理特性	WRFの変数	スキーム
Microphysics	mp	WSM 6-class graupel scheme
Longwave Radiation	ra_lw	r_rtm
Shortwave Radiation	ra_sw	old Goddard shortwave
Surface Layer	sf_sfclay	Revised MM5 Monin-Obukhov
Land-Surface	sf_surface	thermal diffusion
Planetary Boundary Layer	bl_pbl	YSU
Cumulus	cu	Kain-Fritsch

表-3 WAVE WATCHⅢの計算条件

計算条件		設定
方向スペクトル	方向分割数	36 ($\Delta\theta=10.0^\circ$)
	周波数分割数	35 (23.9~0.9s)
風から波へのエネルギー輸送の計算手法		ST4
物理過程	浅水変形	○
	地形性の屈折	○
	海底摩擦	○
	白波砕波	○
	地形性の砕波	×
非線形相互作用		○

表-4 波浪変形計算の計算条件

項目	条件	
計算モデル	エネルギー平衡方程式	ブシネスクモデル
入射スペクトル	ブレットシュナイダー・光易型	エネルギー平衡方程式の結果から抽出した方向スペクトルを接続
方向・周波数分割数	36(方向), 15(周波数)	-
成分波数	-	1024
計算格子間隔[m]	大領域:100m, 小領域:10m	10m
計算時間間隔[s]	-	0.02(= $T_{1/3}$ の1/800以下)
解析波数	-	150波程度
陸域境界条件	無反射条件	対象施設前面は無反射

(1) 波浪推算による沖波の算出

各モデル地区における被災時の沖波算出にあたっては、海上風推算にWRF⁷⁾、波浪推算にWAVE WATCH III⁸⁾を用いて算出した。表-2及び表-3に計算条件を示す。海上風推算の計算領域は波浪推算の計算領域を網羅するように設定し、波浪推算では水深を考慮した計算を行った。水深データとしては、海上保安庁水路部発行の水深データ及びETOPO(1', 2' 格子), GEBCO(30" 格子)等、一般に公開されているデータを用いた。

(2) 波浪変形計算による被災波高の算出

波浪変形の計算には、エネルギー平衡方程式とブシネスクモデル⁹⁾を適用し、得られた設計波高からブロックの必要質量を算定して実際の条件と比較した。表-4に波浪変形計算の計算条件を示す。エネルギー平衡方程式の計算では、沖側境界より沖波波高・周期に対応した標準スペクトル(ブレットシュナイダー・光易型)を入射させた。得られた波浪スペクトル分布はブシネスクモデルにおける沖側境界条件として与えた。潮位条件は近隣の検潮所から被災時刻の潮位を設定した。

(3) 数値波動水路による打上高の算出

越波の発生した3地区においては改良仮想勾配法¹⁰⁾およびCADMAS-SURF/2D¹¹⁾をそれぞれ用いて打ち上げ高を算定し、実際の天端高と比較した。CADMAS-SURF/2Dの計算時のパラメータは、実務計算事例集¹²⁾を参考に設定し、計算

時間は解析に必要となる約100波が取得可能となるよう1500s(助走期間400s)とした。地形条件は、図-7に示すように実際の断面を再現し、護岸パラペットの高さは無限高に設定し、護岸パラペットの直前面の水位から打上高を算出した。また護岸背後に越波升を設置し、計算終了時の越波升の水位から単位時間当たりの越波流量を算出した。また、計算に用いる波浪諸元を設定する事前計算(入射波諸元の合わせ込み)を実施し、沖側の波高・周期が、代表断面の同一地点(沖側位置)のブシネスクモデルの計算から得られる波高・周期とほぼ同じになるようCADMAS-SURF/2Dの入射条件(波の入射位置から入力する波)を調整した。

以下では、モデル地区の代表例として、高知県穴内漁港海岸の海岸保全施設である護岸についての検討結果を示す。図-8および図-9には、穴内漁港海岸を対象とした波浪変形計算の計算領域とエネルギー平衡方程式およびブシネスクモデルによる波高分布図を例示する。

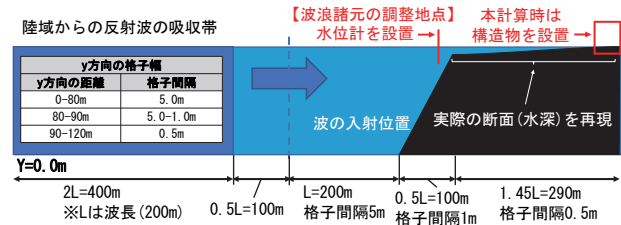


図-7 CADMAS-SURF/2D の計算領域設定

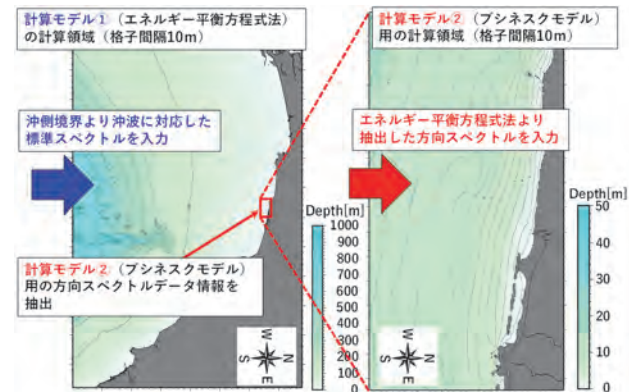


図-8 穴内漁港海岸の波浪変形計算領域

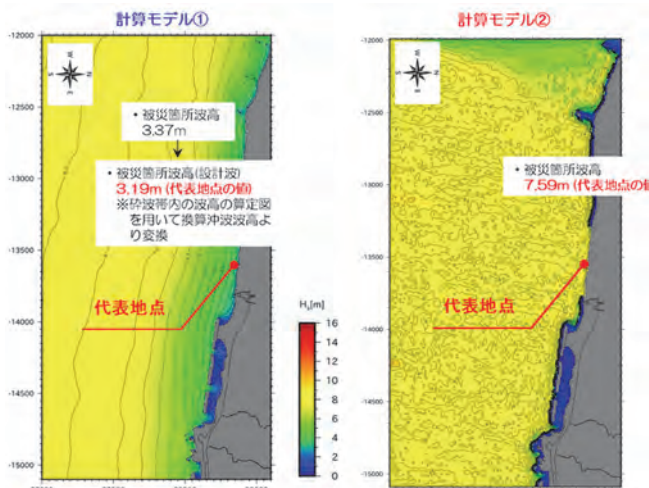


図-9 穴内漁港海岸の波浪変形計算結果(波高分布)

3.2 ブロックの必要質量による被災再現

ブロックの被災事例では2つの計算方法(計算モデル①および②)を適用し、その結果を比較した。計算モデル①ではエネルギー平衡方程式による対象地点での計算結果から換算沖波を求め、合田の波高算定図¹³⁾から前面波高を求めた。一方、計算モデル②では、ブシネスクモデルにより前面波高を直接求めた。それぞれ算出した前面波高より、以下に示すハドソン式からブロック必要質量を算出し、被災時のブロック質量との比較を行った。

$$M = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

ここで、 M はブロック質量、 γ_r はコンクリート密度、 H は設計波高、 N_s はブロックの形状等が決まる定数($N_s^2 = K_b \cot \alpha$)、 S_r はコンクリートの海水に対する比重、 α は法線が水平となす角度である。

波浪変形計算による護岸前面消波ブロック($K_b = 10.0$)の質量を比較した結果を表-5に示す。計算方法①では、ブロック必要質量 3.8 t、計算手法②では、ブロック必要質量 50.9 t となった。被災した既設ブロックの質量が 8.0 t であることから判断すると、計算方法②であれば施設の被災が再現できることを確認した。

3.3 打上高(必要天端高)による被災再現

改良仮想勾配法による打上高の算定においては、エネルギー平衡方程式から換算沖波を使用した。(以下、解析方法①と呼ぶ)一方、CADMAS-SURF/2Dでは、護岸前面水位から直接算定した。(以下、解析方法②と呼ぶ)ここで、解析方法②による打上高の算定にあたっては、一定期間の水位変動から上位 1/10 平均値を打上高として求めて比較した。表-6 に比較結果を示す。解析方法①では、打上高 8.9 m となり、解析手法②では、打上高 11.2 m となった。

被災時における既設護岸は天端高 10.5 m であることから判断すると、計算方法②であれば施設の被災が再現できることを確認した。なお、参考として解析方法②における上位 1/3 平均値、上位 1/20 平均値および最大値は、それぞれ 9.1 m、12.4 m、および 15.5 m であった。

3.4 うねり性波浪による被災再現の評価

表-7 は、全 8 モデル地区における計算モデルと解析方法の被災再現評価の結果を示したものである。

対象としたモデル地区の再現計算では、ブシネスクモデルを用いることによって被災が再現された。鹿児島県坊泊漁港海岸では、ブシネスクモデルによる設計波高の方がエネルギー平衡方程式と換算沖波による設計波高よりも高くなる結果となっていたが、ブロック必要質量では、いずれの計算モデルも既設ブロック質量より小さく算定された。坊泊漁港海岸で被災した施設は、湾奥に位置していることもあり、高潮による海面上昇等の影響も受けていたと考えられる。

越波の被災を受けた 3 地区では、CADMAS-SURF/2D でないと被災再現ができないことが確認できた。なお、入善漁港海岸では、CADMAS-SURF/2D では越波量による評価検討も行い、背後地への被災を再現できるような越波流量であったことも確認した。ただし、対象としたケース数が少ないため、今後はケース数を増やし、これらの計算手法の評価をさらに重ねる必要があると考えられる。また、必要天端高の算定に用いる打ち上げ高の評価方法についてもさらなる検討が必要である。

表-5 穴内漁港海岸の被災再現の判定【計算モデル】

既設	計算モデル① エネルギー平衡方程式				計算モデル② ブシネスクモデル			
	波高 (m)	周期 (m)	ブロック 質量(t)	被災再現	波高 (m)	周期 (m)	ブロック 質量(t)	被災再現
8.0	3.19	11.3	3.8	×	7.59	11.3	50.9	○

表-6 穴内漁港海岸の被災再現の判定【解析方法】

既設	解析方法① 修正仮想勾配法		解析方法② CADMAS-SURF/2D	
	打上高 (m)	被災再現	打上高 (m)	被災再現
10.5	8.9	×	11.2	○

表-7 モデル地区による漁港区域内に位置する海岸保全施設の被災再現の判定一覧

モデル地区			計算モデル		解析手法		
海域	県	漁港海岸	計算モデル① (エネルギー平衡方程式法)	計算モデル② (ブシネスクモデル)	従来解析手法	新しい解析手法	
					打上高	打上高	越波流量
北陸	富山	入善	×	○	×	○	○
東北	岩手	小袖	×	○			
北陸	石川	曾々木	×	○			
東海	静岡	下流	(×)	(○)	×	○	
四国	高知	穴内	×	○	×	○	
九州	長崎	千千石	×	○			
九州	鹿児島	坊泊	×	△			
沖縄	沖縄	久松	(×)	(○)			

※下流および久松の()は洗掘被災のため堤前波高の比較とした

※坊泊の計算モデル②の評価は、さらなる検討の必要のため「△」とした

4. おわりに

漁港区域内に位置する海岸保全施設的设计沖波に対するうねり性波浪の影響としては、北陸の一部を除く日本海側や三大湾および瀬戸内海では小さいことが分かった。一方、太平洋岸ではうねり性波浪の影響が大きい、最近の観測データを含めた设计沖波の見直しにより、ある程度その影響を考慮することもできると考えられる。また、漁港区域内に位置する海岸保全施設に対しては、水深が浅いあるいは陸上域に位置し、うねり性波浪による被災事例は比較的少なかった。

ナウファス観測地点でうねり性波浪と判断された漁港区域に位置する施設被災に対しては、波浪変形計算としてブシネスクモデル、打上高および越波流量の解析手法として、CADMAS-SURF/2D を使用することにより施設被災をより精度良く再現ができることを確認した。

謝辞

本研究は水産庁より発注された「令和2年度海岸保全施設設計等技術検討調査委託事業」の成果としてとりまとめたものです。アンケート調査でご協力を頂きました漁港海岸管理者、調査方法および研究成果についてご指導を頂きました検討会委員(田中仁委員長)および水産庁関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 全国農地海岸保全協会、全国漁港漁場協会、全国海岸協会、日本港湾協会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説、平成30年8月。
- 2) 平山克也、加島寛章：うねり性波浪による越波災害の発生過程の推定とその対策、港湾空港技術研究所報告、No.1270, pp.2-41, 2012。
- 3) 平山克也、加島寛章、伍井稔、成毛辰徳：うねりによる高波の発生確率とその地域特性に関する考察、土木学会論文集B2(海岸工学)、第71巻、pp.85-90, 2015。

- 4) 川口浩二、末廣文一、藤木峻、田村仁：全国港湾海洋波浪観測年報、港湾空港技術研究所資料、No.1357, 123p., 2019。
- 5) 加藤広之、遠藤次郎、古市尚基、不動雅之、井上真仁：日本沿岸における最大有義波高の経年変化と设计沖波への影響に関する考察、土木学会論文集B2(海岸工学)、第75巻、2号、p. I_109-I_114, 2019。
- 6) 岩瀬浩之、加藤広之、田中陽二、鈴山勝之：设计沖波の見直しとその手法に関する福島県の事例について、漁港漁場漁村総合研究所調査研究論文集、No.30, p.29-36, 2020。
- 7) The National Center for Atmospheric Research: WRF-ARW V3, User's Guide, 2017。
- 8) Tolman, H.L: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III Version 1.18, NOAA/NWSNCEP/OMB technical note 166, p.110, 1999。
- 9) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.1036, p.162, 2002。
- 10) 中村充、佐々木泰雄、山田譲二：複合断面における波の打上げに関する研究、第19回海岸工学講演会論文集、p.p.309-312, 1972。
- 11) 沿岸開発技術センター：数値波動水路の研究・開発、沿岸開発技術センターライブラリー、No.12, p.68, 2001。
- 12) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF実務計算事例集、沿岸技術ライブラリーNo.30, 2008。
- 13) 合田良実：浅海域における波浪の破波変形、港湾技術研究所報告、第41巻、第4号、pp.56-106, 1975。