

**海岸保全施設の技術上の基準・同解説
改訂レポート**

海岸保全施設技術研究会

はじめに

昭和 31 年 5 月に制定された海岸法第 14 条には、「築造の基準」が規定されており、その内容の実務的な取扱いについて明確かつ具体的に示すため、同法を所管する農林省、運輸省及び建設省の三省は共同で昭和 33 年 12 月に海岸保全施設築造基準を制定した。同基準の運用についての考え方を示した海岸保全施設築造基準解説が昭和 35 年 1 月に刊行され、これまでに昭和 47 年、昭和 62 年、平成 16 年と 3 回の改訂が行われてきた。平成 16 年の改訂では、平成 11 年の海岸法改正において、同法第 14 条の「築造の基準」が「技術上の基準」と改められ、また、同法第 14 条第 3 項に基づき「主要な海岸保全施設の形状、構造及び位置について、海岸の保全上必要とされる技術上の基準」が「海岸保全施設の技術上の基準を定める省令」として定められたことから、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」として刊行された。

平成 23 年東北地方太平洋沖地震では、地震によって引き起こされた大きな津波により、多くの海岸保全施設が被災した。その原因として、設計規模を超える津波の水流が堤防、胸壁、津波防波堤等を越流した際に、被覆工の被災、裏法尻部や壁体背後の洗掘等により、海岸保全施設の安定性が低下したことや、津波の波圧による作用で壁体が完全に倒壊したこと等が考えられた。この状況を踏まえ、津波が堤防・胸壁・津波防波堤を越えた場合に、それら施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くし、避難時間を稼ぐ等の減災効果を有する施設の整備が必要となったことから、平成 26 年に海岸法が改正され、海岸堤防等の粘り強い構造が位置付けられるとともに、「海岸保全施設の技術上の基準を定める省令」及び「海岸保全施設の技術上の基準について（海岸省庁局長通知）」が改正された。

上記の改正を受け、「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」の改訂を行うため、農林水産省及び国土交通省の関係研究機関の海岸研究者からなる海岸保全施設技術研究会が設置された。研究会では、粘り強い構造の設計等のために改訂すべきポイントに加えて、海岸保全施設の設計に係る最新の知見について議論を行い、この海岸保全施設の技術上の基準・同解説改訂レポートを取り纏めた。

本改訂レポートを踏まえ、基準・同解説の改訂がなされ、堤防・胸壁・津波防波堤の粘り強い構造等の適切な設計とともに、最新の知見に基づく海岸保全施設的设计が進む一助となればと考える。

平成 30 年 8 月 海岸保全施設技術研究会

海岸保全施設技術研究会メンバー

(平成 30 年 3 月 31 日時点)

桐 博英	国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 水利工学研究領域 ユニット長 (沿岸域水理)
佐伯 公康	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ 主任研究員
加藤 史訓	国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室 室長
鮫島 和範	国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 沿岸防災研究室 室長
鈴木 高二朗	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 耐波研究グループ長

I 粘り強い構造に関する基準・同解説の追加のポイント

1. 粘り強い構造について

平成26年度の海岸法改正により、当該堤防の背後地の状況等を考慮して、堤防や胸壁等については、設計高潮位を超える潮位の海水若しくは設計波を超える波浪又は設計津波を超える津波（以下、設計津波を超える津波等）の作用に対して、堤防の損傷等を軽減する機能を有するものとされた。

その機能を有する「粘り強い構造」の基本的な考え方は、施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする、あるいは、全壊（施設が完全に流出した状態）に至る可能性を少しでも減らすといった構造上の工夫を施すことである。

施設の効果粘り強く発揮された場合には、背後地における浸水までの時間を遅らせることにより避難に費やすことができる時間を長くする効果、浸水量が減ることにより浸水面積や浸水深を低減し、浸水被害を軽減する効果等の減災効果が期待される。さらに、施設が全壊に至らず、一部残存した場合には、迅速な復旧が可能となり二次災害のリスクが減る効果や、復旧費用を低減する効果が期待される。

ここでは、「粘り強い構造」に係る構造上の工夫について整理する。

2. 堤防

(1) 被災メカニズム

東北地方太平洋沖地震での津波の越流等による堤防の被災状況の分析結果から、以下のような被災メカニズムが想定されている。

- ・来襲した津波の水流が堤防を越流した後、裏法を流下し流速が速くなった状態で裏法尻部の地面等に衝突することにより洗掘が起これ、これをきっかけに裏法被覆工等の損壊、流失を引き起こす。
- ・津波の水流が堤防を越流する際、天端部、裏法部で高速になることにより、天端被覆工、裏法被覆工の流出や、堤体土の被覆工の隙間からの吸い出しが生じる。
- ・設計津波の水位を超える津波の波圧が作用することにより、波返工の陸側への倒壊等が引き起こされる。また、引き波の波圧の作用による波返工の海側への倒壊等が引き起こされる。

(2) 構造上の工夫

設計津波を超える津波等の作用に対して、所定の性能を規定する天端幅、表法勾配、裏法勾配、根固工の幅及び厚さ、樹林の樹種並びに盛土の幅及び厚さの構造諸元について、堤防の損傷等を軽減する機能を有していることを確認する必要がある。

なお、津波等による被災過程においては、複数の被災形態が複合的に発生することも多いと考えられることから、特定の対策工法のみ限定せず、複数工法の組み合わせを検討することが望ましい。

ただし、堤防形状によっては、堤防の損傷等が軽減される代わりに、背後地の被害が増大する場合もあることに留意する。例えば、表法勾配を緩くすると越波が生じやすくなる場合がある。また、背後地の状況によっては、津波により堤内地に流入した海水の排水能力についても確認する必要がある。

①天端被覆工及び裏法被覆工

津波の水流が海岸堤防等の堤防を越流する際、天端部、裏法部で高速になることにより、天端被覆工、裏法被覆工が流失する被災形態や、波返工を乗り越え落下する水流が天端被覆工に衝突し損傷を引き起こす被災形態に対しては、天端被覆工、裏法被覆工を厚くする工法、部材間（表法被覆工と天端被覆工との間、天端被覆工と裏法被覆工との間を含む）を連結し剥離しにくくする工法等を採用することにより、重量や強度の確保を図るものとする。

津波越流時に法肩では圧力が低下し、場合によっては負圧に至ることもあることから、被覆工が流失しやすくなる。法肩は法肩ブロックのような独立した構

造とせず、天端被覆工と一体化することが望ましい。

コンクリートブロック張被覆式については、設計津波を超える津波等の作用に対して、当該堤防の損傷等を軽減する構造とするため、両端に切り欠きを設けた厚さ50cmのブロックをかみ合わせた裏法被覆工を採用した事例がある。この事例では、かみ合わせ構造にすることでブロックに流体力が大きく生じるような裏法被覆工表面の不陸を生じにくくし、ブロックに穴を設けないことで堤体土の吸い出しを抑制することを意図している。

コンクリート被覆式については、設計津波を超える津波等の作用に対して、当該堤防の損傷等を軽減する構造とするため、天端被覆工及び裏法被覆工の厚さを50cmとし、津波の越流時の弱点となる法肩を被覆するとともに、津波の越流時に堤体内で上昇する圧力を逃がすように天端被覆工に空気孔を設けた事例がある。

②根固工

設計津波を超える津波等の作用に対して、当該堤防の損傷等を軽減する構造とするため、裏法尻に設けられる根固工は、津波の越流等による流体力や洗掘に対して十分な幅と厚さを確保しなければならない。その根固工には、施工性に優れた地盤改良や矢板が用いられた例がある。

地盤改良の幅は越流による裏法尻での圧力上昇範囲と、地盤改良の厚さは洗掘深と関係しており、地盤改良の幅が広いと、裏法を下ってくる津波の流れを地盤に突っ込まない方向（水平方向）に変えて、洗掘深を軽減できることから、地盤改良の幅は既往の模型実験結果等を参考に適切に設定する。また、地盤改良の厚さは、地盤改良体の安定性を確保できるように、想定される洗掘深をふまえて、適切に設定する必要がある。

③波返工

堤防の設計外力を高潮でなく津波とする場合は、波返工が倒壊しやすい構造であることを考慮して、天端まで盛土構造とすることも検討するものとする。波返工を採用する場合には、強い波圧への耐力を向上するために、配筋による補強を施すものとする。

④根留工

設計津波を超える津波等の作用に対して、当該堤防の損傷等を軽減する構造とするため、根留工の幅と根入れを1m程度とした例がある。また、洗掘による根留工の変位を抑制するには、地盤改良等の根固工の併用や、根留工の下に打設する矢板との一体化が効果的である。

⑤樹林及び盛土

堤防と一体的に設置された樹林及び盛土は、津波、高潮等により海水が堤防を越えて侵入した場合の被害を軽減する役割を担う。その役割としては、樹林により越流、越波を減勢すること、盛土が堤防の裏法被覆工等を覆うことによって越流等による流体力が直接作用するまでの時間を稼ぐこと、盛土については、越流等による侵食を樹林の根により遅らせること等が考えられる。樹林の樹種選定においては以下の事項を考慮する必要がある。

- ・ 樹林はその地上部（幹、枝等）により津波等を減勢することから、幹等が太く、また立木密度が高い樹種が望ましい。また、その地下部（根等）により盛土の侵食を低減することから、根が深くまで密に分布する樹種が望ましい。
- ・ 景観及び生態系の観点から、前浜、砂丘等の海岸地形に応じた樹種を選択すること。
- ・ 堤防を越流する津波等の流体力が被覆工等に直接作用しないよう、越流による盛土の侵食を考慮して、十分な幅を確保する。
- ・ 津波による根返りを防止する観点から盛土による生育基盤を造成する場合、クロマツ植栽地の有効土層は1.5m以上確保することが望ましい。
- ・ 盛土は堤体と同様に十分に締固めを行う必要がある。

3. 胸壁

（1）被災メカニズム

東北地方太平洋沖地震での津波による胸壁等の被災状況を分析した結果、胸壁の被災は、津波の波力による滑動及び転倒、堤体周辺の洗掘による支持力喪失、あるいはこれらの複合的な作用により生じたものと考えられる。

（2）構造上の工夫

設計津波を超える津波等の作用に対しては、胸壁の損傷等を軽減する機能が発揮されるよう、洗掘に対して水叩き又は躯体底版の幅を広く取ることや舗装や排水溝を躯体と一体化させること等を検討し、吸出に対して止水矢板の設置や基礎地盤へのセメント注入等を検討することにより、可能な限り、躯体の倒壊を防止又は遅らせるような構造上の工夫を図ることが必要である。

（3）津波波力の算定方法

従来、胸壁に作用する津波の波力は、来襲津波の水位に対して静水圧分布をなすものとして算定することが多かった。しかし、東北地方太平洋沖地震津波によ

る胸壁の被災実態を踏まえた実験的検討の結果、動水圧の影響を考慮した津波の波力は、非越流時（津波が胸壁の天端を越流しない場合）、越流時の各算定式で求められることが明らかとなった。

4. 津波防波堤

（1）被災メカニズム

釜石港及び大船渡港の湾口防波堤は、平成23年東北地方太平洋沖地震での津波によって甚大な被害を被った。また、津波防波堤だけでなく、八戸港北防波堤、相馬港沖防波堤をはじめとして、津波防波堤以外の防波堤も大規模な被災を受けた。これら防波堤の主な被災原因は、津波の波力による直立部の滑動、越流による港内側の基礎マウンドや海底地盤の洗掘による支持力の喪失、あるいはこれらの複合的な作用によるものである。また、基礎マウンド内の浸透流の影響による基礎の安定性の低下の可能性も指摘されている。

（2）機能と構造上の工夫

設計津波を超える津波等の作用に対しては、津波防波堤の損傷等を軽減する機能が発揮されるよう、防波堤の耐津波設計ガイドライン（2015）に従って検討することとし、津波の規模に応じた津波防波堤の破壊形態と構造上の弱点について水理模型実験や数値計算により十分に把握した上で、その弱点部分に付加的な対策を施すことによって、「粘り強い構造」となるように、断面諸元を設定する必要がある。さらに、最新の調査研究や民間を含む技術開発の成果等を確認した上で、破壊要因や弱点箇所に応じた対策案を抽出し、総合的に判断して最適な断面諸元を設定することに留意する必要がある。

Ⅱ 新たな知見に関する基準・同解説の修正のポイント

2. 2. 1 設計高潮位

＜平均海面水位等の長期変動＞

最新の観測値・予測値に更新する必要がある。

○平均海面水位等の長期変動

気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) の第 5 次影響評価報告書によると、全球の平均海面水位は、1901～2010 年に $1.7\pm 0.2\text{mm}/\text{年}$ 、1993～2012 年に $3.2\pm 0.4\text{mm}/\text{年}$ の上昇が観測され、1986～2005 年の平均に比べて約 100 年後の 2081～2100 年の平均は $0.26\sim 0.82\text{m}$ (予測値の標準偏差を含む幅) 高くなると予測されている。気象庁によると、日本沿岸の平均海面水位は、1906～2016 年に明瞭な上昇傾向はなかったが 10～20 年周期の変動はあり、1980 年代以降に限ると上昇傾向にあつて、2016 年は 1960 年以降で最も高かった。この他、久里浜湾で 1961～2014 年に $3.0\text{mm}/\text{年}$ 、唐津港で 1983～2014 年に $4.4\text{mm}/\text{年}$ の上昇も観測されている一方で、酒田港のように平均海面水位の上昇・下降が明確でない地点がある。

将来の平均海面水位を正確に予測することは難しく、今後も潮位観測を継続し、適切な時期に順応的な対応をとることが望ましい。さらに、将来は台風を含む低気圧の強度、経路等の出現特性にも変化をもたらすという指摘があり、それを把握するためにも潮位観測の継続が必要である。

将来の予測に様々な不確定要素があるが、海岸単位で様々な施設の維持管理・更新と気候変動対策を合わせた長期計画を検討した事例がある。

2. 3. 2 設計に用いる波の決定方針

＜うねり設計波の導入＞

これまで十分に考慮されてこなかった、うねりによる高波に対する海岸施設の設計が可能となる。

○設計波

常時の波浪特性は、波浪資料より、月別、季別及び通年の資料について波向別に波高、周期の相関度数分布表として表すことを標準とする。

異常時の波浪特性は、極大波については統計処理を行い、確率波高として表すことを標準とする。また、従来の設計において一般的に考慮されてきた波浪よりも周期が長いうねりに対しても適切に対応するために、うねりによる被害が想定される地域においては、風波とうねりを区別しない従来の確率波高とは別に、同様な統計処理を行ってうねりの確率波高を設定するのがよい。この際には、波

浪のうちおおむね8秒周期以上でかつ波形勾配がおおむね0.025未満のものをうねりとすることができる。なお、極大波については、簡易な統計処理の一つとして、既往最大値をそのまま抽出して採用する場合もある。

○極値波浪の統計処理（変動波浪条件の設定）

設計の対象となる波の波高は、長期間（原則として30年以上）のデータから、極大波についての再現期間に対する確率波高として表すことを標準とする。長期間にわたる観測データを利用できない場合には波浪推算結果を利用することになる。

確率波高の推定資料である極大波とは、ある一つの気象条件において波が発達し、減衰する過程において波高が最大となる時の波（一般に有義波）をいい、サンプリングされた極大波は統計的に互いに独立であるとみなす。確率波高の推定に当たっては、対象期間中において極大波高がある設定値以上のデータの時系列を使う場合と、各年ごとに極大波高の最大値を求め、この毎年最大波のデータを使う場合がある。いずれの場合にも、確率波高の母分布関数は一般的には不明であるので、Gumbel分布、Weibull分布、その他の分布関数をあてはめ、データに最も適合する関数形を見出し、その推定関係式を用いて所要の再現期間（例えば50年、100年等）に対する確率波高を推定する。ただし、うねりの極大波データが著しく少なく、十分な信頼性を有する分布関数を推定できないことが明らかな場合には、うねりに対する確率波高の推定を省略することができる。

なお、こうした推定値の精度は統計処理の方法よりも使用したデータの精度に支配されるものであるから、極大波のデータを波浪推算によって作成する場合には、推算法の適切な選択及び推算結果の実測値に基づいた検証を行うように心掛けるべきである。

確率波高に対応する周期については、確率波高の推定資料である極大波のデータについて波高と周期の関係をプロットし、その相関関係に基づいて適宜決定する。

2. 3. 3 沖波の推算

<気象 GPV と局地気象モデル>

従来の傾度風モデルでは台風風の分布を同心円状に与えてきたが、気象 GPV と局地気象モデルを用いると陸上地形の影響や前線等の複雑な気象現象も表現できる。特に内湾において、風の推算精度が高まり、それが波浪や高潮の推算精度の向上にもつながる。

○気象 GPV と局地気象モデル

日本の気象庁、ヨーロッパ中期予報センター ECMWF、アメリカ環境予測センター NCEP 等では、3次元に配置した計算格子に対して気象の数値計算モデルで、気圧、風速・風向、水蒸気量等の値を計算し、その各格子点における値 GPV (Grid Point Value) を保存している。前述の風の推算の代わりに、この GPV を使用しても良い。ただし、気象の計算で用いた時間および空間解像度が粗い場合には、台風の中心付近等気象の空間的な変化の著しいところで気圧や風が十分に再現されていない場合もある。したがって、気象 GPV を使用するにあたっては、観測値によって精度を検証しておくことが望ましい。さらに、これらの気象 GPV を初期値・境界値として数値モデル(局地気象モデル: MM5 や WRF 等)を用いて気象場を推算する場合もある。局地気象モデルによって対象海域周辺の陸地(標高・土地利用)が気象場に及ぼす影響を考慮した、より細かな時間および空間解像度の気象場を推算(ダウンスケール)することが可能である。この場合も観測値と比較することで、局地気象モデルで得られた気象場の精度を検証しておくことが望ましい。このように局地気象モデルで推算された気象場を用いることで、特に内湾域における波浪や高潮の推算精度の向上が期待される。

2. 3. 4 浅海域における波向、波長及び波高の変化

<砕波限界条件式の修正>

砕波限界の検討精度が向上する。

○浅水変形と砕波

合田は、海底勾配が 1/50 より急な場合にもほぼ妥当な砕波高を与えるよう、 $\tan\beta$ に関わる定数 15 を 11 に低減するように修正した。この修正により、海底勾配が 1/10 のときには砕波指標 H_b/h_b の値が最大 11% 小さくなるが、海底勾配 1/50 では 2% の低減に留まる。

沖合養浜の場合には、沖合でバーが生じ、岸へ向かうほど深くなる地形が出現する。このような地形を逆勾配斜面といい、近似的には砕波変形を考慮しなくて

もよいが、厳密には逆勾配斜面での波高減衰が生じる。逆勾配斜面での波高減衰は、栗山が現地観測で検討し、合田が段階的砕波モデルによる計算法を示している。

2 次元的な地形変化に対応した浅水変形及び砕波変形による波形変化を推定する数値計算法として近年、流体の運動方程式を直接計算する一連のVOF(Volume of Fluid)法が活用されつつある。VOF法は、不規則波への展開や砕波後の波形変化に困難さを伴っているものの、構造物の型式による波形変化や越波の様子を視覚的にとらえるために有用な手法である。砕波直前までの波形を比較的短時間で計算できるものとして境界要素法による数値計算法も活用できる。

2. 3. 5 波力

＜耐波設計への数値計算の導入＞

数値計算による波力の算定により、より精度の高い設計と、労力と費用の低減が可能となる。

2. 3. 5. 1 一般事項＜処理基準＞

○数値計算による波力の算定

近年では、波力の算定に数値計算を用いることも可能になっている。数値計算を実際の設計に用いる場合、現地観測や水理模型実験と比較することにより計算モデルの妥当性を検証すれば、波力の算定が可能となる。数値モデルとしては格子法や粒子法等があり、いずれの計算手法においても衝撃砕波等の複雑な現象に適用する際には、水理模型実験のデータ等で計算結果を検証しておくことが重要である。

2. 3. 5. 2 直立壁に作用する波力

＜重力式護岸でのマウンド透過波対策＞

マウンド透過波による埋立土砂の吸い出し対策の設計が可能となる。

○マウンド透過波圧

護岸では、波浪がケーソン（ブロック）目地部、捨石マウンドや裏込石を透過して、埋立土砂に作用し、埋立土砂の吸い出しを引き起こす場合がある。捨石と埋立土砂はその粒径が大きく異なるため、防砂布や防砂板を設置して埋立土砂が吸い出されないようにする 경우가多いが、マウンド透過波が施工中、供用中に

この防砂布や防砂板に作用して損傷させ、埋立土砂の吸い出しを引き起こす場合がある。埋立土砂を投入すると、捨石マウンドや裏込石内部が密閉されるため、堤体前面にかかる圧力が減衰せずに防砂布や防砂板に作用することから、埋立土砂の土被り厚を十分確保する、若しくは圧抜き工を設けることで防砂布や防砂板がマウンド透過波によって持ち上げられて破壊されることを防ぐことができる。また、防砂布、防砂板の損傷による損傷を防ぐため、適切な強度の防砂布や防砂板とともに、捨石フィルターを用いることが望ましい。

2. 3. 5. 2 直立壁に作用する波力

＜設計潮位が高い場合の波力算定の留意事項＞

不明確だった高潮時の水圧と波圧の算定と不完全消波による衝撃砕波力の算定が可能となる。

○設計潮位が高い場合の波力算定の留意事項

高潮時等の潮位が高い場合には護岸や海岸堤防、胸壁等に高潮等で上昇した水圧と高波による波圧が同時に作用する。したがって、高潮等の水位が堤体背後地盤よりも高い場合には、高潮等の静水圧と相殺する土圧が堤体背後に存在しないため、静水圧と高波による波圧を足し合わせて堤体に作用する水圧を求める。

構造物前面の海底地形やマウンドの影響で波が砕波して作用する場合があるため、構造物に最も不利となる波力は高潮等で潮位が最大となった時点で発生するとは限らない。そのため、干潮時から最高潮位まで潮位を変えて波力を算定することとする。

消波ブロックが前面壁天端まで被覆されていない場合には、高潮等で潮位が上昇することで不完全被覆断面における波力が発生し、パラペットの倒壊に至る場合がある。

高潮等によって潮位が上昇し、越波や越流による波力も大きくなり、堤体背後の舗装等が破壊される場合がある。

地形や構造が複雑な場合には、波力の算定に水理模型実験や数値計算を活用することが望ましい。ただし、数値計算では衝撃砕波力等の算定精度が低い場合があるため、実験データで検証しておくことが重要である。

2. 3. 5. 3 被覆石及びブロックの所要質量

＜離岸堤，潜堤・人工リーフ被覆材の所要質量＞

水理模型実験により潜堤・人工リーフ被覆材の所要質量の算定が可能になる

○離岸堤，潜堤・人工リーフ被覆材の所要質量

潜堤・人工リーフ被覆材にブロックを用いた場合の所要質量については，諏訪らにより安定数 N_s の算定図の標準的な作成方法が示されている。

2. 3. 5. 3 被覆石及びブロックの所要質量

＜流れに対する被覆石及びブロックの所要質量＞

津波による被覆石やブロックの所要質量を算定する際の設計が可能となる。

○流れに対する被覆石及びブロックの所要質量

水の流れに対するマウンド捨石等の被覆材の所要質量は，一般的に適切な水理模型実験，又はイスバッシュ (Isbash) の式によって算定することができる。この式は，米国のC.E.R.C. (海岸工学研究センター) が潮流による洗堀を防止するための捨石質量として示しているものである。

安定質量は，被覆材の形状等によっても変化する。岩崎らは，津波防波堤の開口部潜堤のマウンド被覆材として異形ブロックを用いた場合について二次元定常流による実験を行っており，イスバッシュの定数として1.08を得ている。ただし，イスバッシュの定数はブロック形状毎に異なるため，適切な水理模型実験により定めた値を用いることが望ましい。津波防波堤を越流した水塊に対するマウンド被覆材の安定性については，この式のほか，越流水深に基づく安定質量算定式が使われることがある。

2. 3. 6 越波流量

＜海岸護岸に対する不規則波の越波流量算定式の導入＞

不規則波のうちあげ高と関係づけた，海岸護岸における越波流量の推定が可能となる。

○越波流量とうちあげ高の関係

合田による越波流量算定図は，主として水域に面する護岸を対象としている。一方，間瀬らは，波のうちあげと越波を結びつける越波流量算定式を提案し，IFORMと名付けた。汀線近傍（陸上部を含む）における複断面（複数の勾配を

組み合わせた断面)の堤防・護岸に対する越波流量は、不規則波のうちあげ高を考慮して算定することができる。

なお、玉田らは、世界各国の越波量実験データを集成したCLASHデータセットを用いてIFORMの適用性を検証した結果、IFORMにおける越波流量の推定精度が担保されるのは、傾斜護岸及び直立護岸に対して法先水深波高比 $h_t/H_0' < 3.0$ かつ海底勾配 $\tan\theta > 1/100$ の範囲であることから、わが国の多くの海岸護岸の設置条件を網羅していることを報告している。

2. 3. 7 波のうちあげ高

＜不規則波を対象としたうちあげ高の算定法＞

海浜勾配や堤防の表法勾配等複数の勾配を組合せた複雑な形状の断面においても不規則波を対象としたうちあげ高の算定が可能となる。

○不規則波を対象とした算定法

玉田らは、規則波を対象としたうちあげ高の算定法として広く使われている改良仮想勾配法の考え方を踏襲し、不規則波を対象に、海浜勾配や堤防の表法勾配等複数の勾配を組み合わせた断面に対するうちあげ高の算定式を提案している。

2. 4 津波

＜津波の波力の算定＞

動水圧の影響を考慮した津波の波力は、非越流時、越流時の各算定式で求めることが可能となる。

○津波の波力

堤防等の海岸保全施設に作用する津波の波力には未解明な部分が多く、津波の波高が同じであってもその波形によって波力が大きく異なることが知られている。首藤は、一樣斜面上に作用する波力を、斜面上で砕波しないという仮定の下で理論的に求めている。また、谷本らは、実験によって、直立壁に作用する津波の波圧を求めている。

海岸保全施設に作用する津波の波力を算定する際には、来襲する津波の波形や海岸保全施設の設置水深等に応じて適切な算定式を選定する必要がある。

堤防については、直立堤での遡上津波の反射波高をもとに津波波力を算定している事例、堤防での津波のせり上がりを考慮した津波の高さでの静水圧を採

用した事例があるが、以下に示す防波堤や胸壁に対する算定手順も参考になる。

a) 津波防波堤に作用する津波の波力

防波堤等の直立壁に作用する津波の波圧は、波状段波や越流の発生の有無を考慮して算定するのがよい。算定式としては非越流時の谷本式と修正谷本式、および越流時の静水圧差による算定式を用いる。静水圧差による算定式では、堤体の前面と背面それぞれに静水圧を補正する係数が与えられている。なお、波状段波の発生の有無の判定に用いる海底勾配は、施設周辺の勾配ではなく、波状段波が発達する可能性のある施設より沖側の海底勾配である。また、消波ブロック被覆堤に波状段波が作用する場合には、消波工による津波波力の低減を考慮するため、丸山らの算定式を用いることもできる。

浮力については水没している堤体全体に作用するとして計算し、揚圧力については考慮しない。ただし、パラペットが大きい場合等は、揚圧力が大きくなり、また、越流流速が大きい場合にはケーソン天端部前面側で水塊に遠心力が働いて圧力が低下するため、浮力以上に越流による鉛直下向きの力が小さくなる場合があるので、水理模型実験を行うことが望ましい。

若干越流した状態に静水圧差による算定式を適用する場合は、越流直前の状態に谷本式を適用した場合と比較し、堤体の安定性に対して不利となる方を採用する。

以上に述べた手法のほか、大村らも静水圧に対する補正係数の検討を行っており、参考にできる。

b) 胸壁に働く津波波力

①非越流時の津波波力

胸壁については、越流しない場合の波力算定式として、i) フルード数による津波波力算定法、ii) 津波浸水深による津波波力算定法を挙げている。いずれも水理模型実験結果に合致する数式として示されたものである。

i) フルード数による津波波力算定法

胸壁がない場合の津波遡上シミュレーションにより、進行波の津波水位を算定し、胸壁設置箇所のフルード数により、津波波力を算定する方法である。

ii) 津波浸水深による津波波力算定法

フルード数による算定法 i) では、胸壁を置かない状態で浸水シミュレーションを行い、通過波としての津波の浸水深と流速が必要となる。この際、津波は周期が長いため、特に常流状態では下流側の地形や建築物（粗度）によって胸壁設

置位置の水深や流速が変化し、波力算定に支障を来す場合がある。そのため、浸水シミュレーション実施時には胸壁背後の地形をフラットにし、かつ粗度が無い状態にする必要がある。または、胸壁がある場合の津波遡上シミュレーションにより、胸壁前面の津波浸水深を算定し、浸水深から波力を算定する。波圧作用高さは胸壁設置時の浸水深とする。作用する水圧は静水圧の1.1倍とする。ただし、胸壁基部側では、静水圧を大幅に上回る最大波圧が発生することがある。また、段波砕波が発生する場合等、波圧係数が1.1倍を上回ることに留意する。

②越流時の津波波力

胸壁がある場合の津波遡上シミュレーションを実施し、胸壁前面、背面の津波水位を算定し、その水位を用いて津波波力を算定する。波力の算定にあたっては、水理模型実験、実験で検証された数値シミュレーション、静水圧に波圧係数を乗じた手法により算定することができる。

2. 10. 2 海岸保全施設の耐震性能

＜サイト特性を考慮した地震動の適用＞

サイト特性を考慮した地震動を適用することにより、サイト増幅特性の大きい地点では構造物の耐震性を向上させることで被害を軽減でき、サイト増幅特性の小さい地点では耐震化のための過大な投資を避けることができるので、全体として限られたコストの中で有効に耐震化を進めることができる。

○レベル1地震動

各種設計基準等で、時刻歴波形・設計震度等の形で示されるものである。レベル1地震動の具体的な再現期間は各種設計基準を参照されたい。例えば、設計供用期間が50年の構造物が再現期間75年を上回る地震動に遭遇する確率は50%となる。

一般に地震動に影響を及ぼす要因として重要なのは、震源断層の破壊過程の影響（震源特性）、震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、地震基盤上に存在する堆積層の影響（サイト特性）の三者である。ここに地震基盤とはS波速度が3km/s以上の地層をいう。なかでも堆積層の存在が地震動に及ぼす影響は極めて大きいため、レベル1地震動の設定にあたり、対象地点におけるサイト特性を可能な限り正確に把握することが重要である。ここで、サイト特性としては、工学的基盤面より上方の表層地盤の影響のみならず、工学的基盤面より下方の深層地盤の影響も重要である。従って、工学的基盤面より上方の表層

地盤の調査だけではサイト特性を把握することはできない。むしろ対象地点周辺での地震観測や常時微動観測がサイト特性を評価する上で有用な情報を与える。また、全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性の評価結果が公開されており、対象地点におけるサイト増幅特性の評価にあたり参考となる。

2. 10. 5 設計震度・設計入力地震動・地盤沈下・液状化

<胸壁の設計震度>

サイト特性を考慮した地震動から、胸壁の設計震度算定が可能となる。

○設計震度

設計震度は震度法による設計等において構造物に作用させる静的な力を構造物の重量で除したものである。設計震度を簡便に求める方法としては、地域別震度に地盤種別係数、重要度係数等の補正係数を乗ずる方法がある。地域別震度は、我が国沿岸域を大きく区分し設定されたものであり、工学的基盤における震度に相当する。これに設計対象地点の地盤条件による補正、対象構造物の重要度による補正を行い、対象施設の設計震度が算定される。地域別震度は、設計対象地点が含まれる区分の代表値であり、設計対象地点における地震危険度やサイト特性を直接反映したものとはなっていない。こうした背景から、港湾の施設の技術上の基準・同解説に定義される港湾の施設を対象とする場合には、サイト特性の蓄積が比較的進んでいることにかんがみ、サイト特性を考慮した地震動から構造物の特性を考慮して設計震度を求めることとしている。港湾の施設に該当しない海岸保全施設であっても、サイト特性に関する情報が揃っている場合には、サイト特性を考慮した地震動から、構造物の特性を考慮して設計震度を求めるのが良い。

2. 10. 5 設計震度・設計入力地震動・地盤沈下・液状化

<地震動の継続時間の影響を考慮した液状化判定>

今後予想される南海トラフ巨大地震等では長継続時間地震動の発生が懸念される。これらの長継続時間地震動に対して、地震動の継続時間の影響を考慮した液状化判定を適用することで、海岸保全施設周辺地盤における液状化の発生をよりの確に予測できるようになる。

○液状化

液状化の予測・判定法には、粒度とN値による方法と繰返し三軸試験結果を用

いる方法の 2 種類がある。粒度とN値による方法は簡易な方法で一般的に使用できる。繰返し三軸試験結果を用いる方法はより詳細な方法で、粒度とN値による方法により予測・判定が困難となった場合に用いられるものである。粒度とN値による方法は、地震動の継続時間の影響を適切に考慮できるよう高度化が図られた

2. 10. 5 設計震度・設計入力地震動・地盤沈下・液状化

<詳細動的解析>

今後予想される南海トラフ巨大地震等では長継続時間地震動の発生が懸念される。これらの長継続時間地震動に対して、地震動の継続時間の影響を適切に考慮できる詳細動的解析を用いることで、海岸保全施設の変形量を的確に予測できるようになる。

○液状化

液状化に伴う側方流動については、1995年兵庫県南部地震によって海側へ移動した護岸から100～150m背後まで影響がおよぶことが示されており、護岸背後の施設や埋設管等への影響は無視できない。解析手法としては、地震動の継続時間の影響を適切に考慮するため、一般には詳細動的解析によるのが良い。一方、より簡便な方法として、流動化した砂のせん断剛性をゼロと仮定したモデルや液状化地盤のせん断剛性を液状化安全率 F_L の関数として与えた自重解析（静的な有限要素解析）によって簡易に予測する手法等が提案されている。いずれの手法を採用するかは、個々の解析手法と施設特性（材料や形状）との適合性及び、施設の重要度を考慮し決定する。

3. 1. 6 維持管理

<海岸保全施設維持管理マニュアル（2018）の反映>

予防保全型の維持管理の実施による施設の長寿命化を図る。

○維持管理の概念

維持管理は、点検、評価、予測、対策からなる一連の作業の総称である。設計供用期間を超過する海岸保全施設が急速に増加することが予測されるなか、各施設に必要とされる機能を持続的に発揮していくためには、維持管理に要する費用の縮減や平準化を図りながら、効率的・効果的な維持管理を推進することが重要となる。特に、海岸保全施設の背後地を防護する機能を、長期にわたって効

率的・効果的に確保するためには、予防保全の考え方に基づいた適切な維持管理の実施が重要である。ここで、予防保全とは、海岸保全施設を構成する部位・部材等の性能低下を進展させないことを目的として、所定の防護機能が確保できなくなる前に修繕等を実施する行為である。予防保全型の維持管理を行うことにより期待される効果として、以下のa)～c)があげられる。

- a) 防護機能を確保できる
- b) 大規模な対策等を実施する必要性が小さくなる
- c) 長期的にみると、ライフサイクルコストが縮減できる

なお、海岸保全施設の維持管理に当たっては、以下の特徴を踏まえる必要がある。

- a) 津波・高潮等から背後地を防護する機能の確保が重要であること。この際、環境や利用の観点についても配慮される必要があること。
- b) 施設の変状は、地震、津波、高潮等の発生時に大きく進展すること。また、地形等により変状が進展しやすい箇所があること。
- c) 過去の津波の教訓や気候変動に伴う海面上昇等に対する要求性能が見直され、所定の機能が変更され得ること。

(3) 海岸保全施設の変状連鎖

適切な維持管理のためには、変状連鎖の中で着目すべき主要な変状連鎖を選定し、連鎖の上流側で生じる変状を点検の対象とすることが、効率的かつ効果的な維持管理に繋がる。

(4) 予防保全型維持管理の基本的な考え方

海岸保全施設の予防保全型維持管理を推進するためには、現状における施設の機能を確認した上で、施設を取り巻く環境や利用状況、及び背後地の状況等を考慮しつつ、所定の機能を確保するための点検、評価及び対策の一連の維持管理に関する作業を、予め策定した計画に基づいて実行することが有効である。

海岸保全施設の予防保全型維持管理は、主に以下のa)～d)の4ステップにより構成される。

- a) 点検
- b) 評価
- c) 対策
- d) 記録

(5) 点検

点検は、目的に応じて、初回点検、巡視（パトロール）、臨時点検、定期点検に分類される。

（６）評価

評価は、点検の結果に基づいて実施することを基本とする。評価には、施設の部位・部材の性能について確認される変状の程度を評価する変状ランクの判定と、施設の機能についてその低下を評価する健全度評価がある。その際、将来の変状進行の予測を行うことができれば、適切な対策実施時期を検討することも可能になる。

（７）対策

対策は、評価の結果に基づいて実施することを基本とする。対策は、修繕、改良、更新、応急措置、安全確保措置に分類される。

（８）記録

点検、評価ならびに対策の結果は、利用しやすい形で集積管理しておく必要がある。

（９）設計上の工夫

海岸保全施設の設計に当たっては、当該施設に求められる機能及び性能をどのように維持していくかについての基本的な考え方を検討し、これらに見合うような当初性能の付与を図ることが有効である。維持管理を考慮した設計上の工夫により、将来にかかる維持管理費の縮減や対策等に要する労力の削減が期待される。

3. 5. 2 設計の方針（突堤）

＜ヘッドランドの透過性，平面形状＞ 有すべき機能をふまえた設計が可能となる。

○透過・不透過

ヘッドランドでは、漂砂の制御効果を高めるために、不透過型にすることが望ましい。

○平面形状

突堤を用いたヘッドランドの平面形状は、T型が一般的であるが、波を先端付近で屈折させ、エネルギーを減少させて安定な海浜が得られるようにヘッド部

を弧状にすることもある。

3. 1 1. 2. 4 照査において考慮すべき条件（水門及び樋門）

＜照査において考慮すべき条件＞

港湾における水門の耐震性能照査事例及び水門・陸閘等管理システムガイドラインを反映させ、安全性の向上を図る。

○地震

構造物の安全性については、重要度に応じた地震力を考慮する必要がある、港湾における水門の耐震性能照査事例に耐震性能照査を実施したものがあ

○施設の操作に従事する者の安全

津波又は高潮による災害に対して、水門及び樋門を安全・迅速かつ確実に閉鎖するための設備、体制及び運用に関して、施設の操作に従事する者の安全を確保するため、地域の実情に応じた適切な水門及び樋門の管理システムを構築するのがよい。

3. 1 1. 2. 5 目的達成性能の照査（水門及び樋門）

＜安全のための管理システムと訓練＞

施設の操作に従事する者の安全を確保する。

排水能力を決定する要因は、水門及び樋門の集水能力と水門及び樋門の排水能力であるので、集水性能と排水性能を照査するとともに、津波又は高潮による災害に対して、施設の操作に従事する者が所要の操作を行った後に安全に退避できるような管理システムとし、訓練等の実施により操作・退避ルールの必要に応じた改善を行う。

3. 1 1. 2. 7 その他の機能に関する留意事項（水門及び樋門）

＜その他の機能に関する留意事項＞

水門、樋門の管理体制の確立および遠隔操作化等が必要である。

海岸法第十四条の二において、海岸管理者は操作規則を定めることが義務付けられている（海岸管理者以外の管理者にあつては同法第十四条の三により操

作規程を定める)。水門及び樋門の設置に当たっては、操作に関する規定、施設の操作に従事する者の配置状況、常駐・非常駐待機体制、昼夜における配置の違い等を整理するとともに、海岸保全施設の機能が損なわれた場合や連絡不能時を想定して操作体制を確立しなければならない。また、津波・高潮による災害がいつ発生しても、必要な操作が迅速に行えるように施設の維持管理を行う体制を確立するとともに、水門及び樋門の操作等において、必要な管理橋その他の管理施設の設置を検討するものとする。

津波・高潮による災害に対して水門及び樋門の閉鎖操作が必要となるが、施設の操作に従事する者の安全を確保することが困難な場合においては、自動化又は遠隔操作化により迅速かつ確実に閉鎖できるようにする。

3. 1 1. 3. 6 安全性能の照査（排水機場）

<安全性能の照査>

排水機場上屋の耐津波性を考慮する。

○排水機場の構造

吸水槽の前には、必要に応じて沈砂池を設けるが、その構造は原則として堅固で水密な鉄筋コンクリートとする。また、吐出し水槽を機場の海側に配置することによって、押し寄せた津波を左右に分離し、上屋への直撃を軽減出来るほか、機器搬入口等の開口部は瓦礫等の直撃を減らすため海側に向けない等、経済性に加え安全性を考慮して各施設の配置を決定する。

3. 1 1. 4. 2 設計の方針（陸閘）

<陸閘の設計の考え方について>

新たな構造型式への対応を図る。

○構造型式の選定

陸閘の型式は、安全かつ迅速な開閉を実現できるものを選定する必要がある。型式としては引き戸式、開き戸式、角落し式等がある。最近では、倒伏した扉体を浮力によって起立させ閉扉する型式が開発され、その採用事例もある。また、地中の扉体を上昇させて閉扉する型式等も開発されている。

3. 1 1. 4. 4 照査において考慮すべき条件（陸閘）

<地震力を考慮した設計>

設計津波の前に来襲する地震動によっても操作性能を喪失しない設計を考慮する。

陸閘は、原則として地震力を考慮した設計とする。津波対策として設置される陸閘は、設計津波の前に来襲する地震動によって陸閘の機能が喪失しないことを照査する必要がある。また基礎部が液状化し、本土工に変形が生じゲートが作動しないことを防ぐため、必要に応じて、基礎構造や地盤に対する対策工を施しても良い。

3. 1 1. 4. 5 目的達成性能の照査（陸閘）

<施設の操作に従事する者の安全及び施設の利用者の利便に対する考慮>

既往の諸条件に加えて、操作に従事する者の安全及び利用者の利便についても考慮する。

操作に従事する者の安全を図るには、構造上の配慮のみならず、操作に従事する者への避難喚起の手段の確保、明確な退避ルールの設定等、必要に応じたソフト対策を適切に組み合わせる。さらに、訓練等の実施により、ソフト対策の継続的な改善を図る。

また、陸閘周辺の市民生活及び産業活動の実態を考慮に入れ、危険なく円滑に日常の交通がなされる構造として、利用者の利便と安全を図る。

3. 1 1. 4. 7 その他の機能に関する留意事項（陸閘）

<陸閘にかかる安全性の確保>

設備面、操作体制及び維持管理体制のあらゆる観点で、陸閘の安全性を高める。

陸閘を設置した際には、非常時の操作体制と日常の維持管理体制を確立しなければならない。

海岸法第十四条の二において、陸閘等操作を伴う海岸保全施設について海岸管理者は操作規則を定めることが義務付けられている（海岸管理者以外の管理者にあっては同法第十四条の三により操作規程を定める）。操作規則には操作の基準、操作方法、操作従事者の安全確保の方法、訓練の頻度等が記載される。陸閘の操作体制は、海岸管理者の定める操作規則に則り、非常時の円滑な閉鎖操作

の実現を目指して構築する。海岸管理者、操作従事者らが相互の役割と連絡体制を確認し、閉鎖操作と緊急退避に係るルールを取り決める。

陸閘の機能低下や機能喪失は、発錆、摩耗、変形のような物理・化学現象のみならず、堤体と扉体の隙間へのごみの堆積や、近傍への自動車の放置等によっても起こりうる。そのため、陸閘は、専門知識に基づく点検・整備のみならず日常的な監視・清掃等をも網羅した維持管理を必要とする。陸閘の維持管理における点検項目、維持管理体制等については海岸保全施設維持管理マニュアル(2018)によることができる。

陸閘の設計においては、メンテナンス及び操作の容易性並びに建設コストを考慮し、開口幅が過大にならないよう留意することが望ましい。また、陸閘の施設数が増えると日常の通行の利便性が増す反面、津波・高潮等の非常時における閉鎖操作に必要な人員が増えたり、閉鎖操作に時間を要する。そのため日常時と非常時の双方を勘案して適正な施設数とするのがよい。

3. 1 1. 8 昇降路及び階段

＜避難用通路と照明＞

必要に応じて避難用通路と照明を設けることができる。

津波の来襲するおそれのある堤防、護岸においては、避難用のための階段を適当な間隔で配置するのが望ましく、また必要に応じて避難用にスロープを設ける。さらに、異常時の海水の侵入を防ぐために開口部には陸閘を設置することが望ましい。なお、利用者の安全確保上必要な場合には、照明を設けることがある。

海岸保全施設の技術上の基準・同解説

改訂レポート 策定協力

研究者

井上 徹教 岡田 知也 大村 智宏

加藤 絵万 加藤 史訓 河合 弘泰

川口 浩二 桐 博英 小濱 英司

佐伯 公康 佐々 真志 鮫島 和範

鈴木 高二朗 高川 智博 高橋 英紀

中川 康之 中村 聡志 野津 厚

平山 克也 宮田 正史 森川 嘉之

山路 徹

編集 信田 大祐