

高波に対して粘り強い海岸堤防の構造に関する水理模型実験

福原直樹・竹下哲也・加藤史訓

1. はじめに

2014年の海岸法改正に伴い、「海岸保全施設の技術上の基準を定める省令」において設計規模を超える津波・高潮・波浪に対して海岸堤防の損傷を軽減する機能（粘り強い構造）を確保することが明記された。粘り強い構造が目指すものは、「破壊されない構造」ではなく、堤防が破壊するまでの時間を長くし、全壊の可能性を減らすことで浸水被害の軽減や復旧費用の低減等の減災効果を有することである。

津波を対象とした粘り強い構造については検討が進められており^{1),2)}、実際の堤防工事にも既に活用されている。波浪を対象とした粘り強い構造についても、越波による堤防裏側の洗掘に着目した検討が進められ、複数の構造案が提案されているところである³⁾。一方、堤防表側については、従来から矢板工や根固工等により対策が実施されているが、既往の災害を基に経験的に設計条件を設定しており、設計条件を越える波浪に対しては従来の対策では不十分となる可能性がある。

これらの背景を基に、著者らは、高波浪が作用した際の堤防表側の被災に対する粘り強い構造の検討を進めている。本稿では、設計波相当の波浪を超過する外力条件下における海岸堤防を粘り強くするための対策工（構造）の効果を明らかにすることを目的とした水理模型実験⁴⁾を実施した結果を報告する。

2. 水理模型実験

2.1 水路及び実験の基本条件

水理模型実験は、幅0.6m、高さ1.5m、延長約127.5mの諸元を有する造波装置付二次元水路に縮尺1/30の海岸堤防模型を設置して実施した。海岸堤防模型の前面には勾配1:10及び1:50の移動床（図-1）を、中央粒径0.2mmの珪砂を用いて設け

た。また、堤防表側の洗掘に起因する被災に着目するため、堤防模型裏側は固定床とし、裏側の洗掘を起因とする破壊が生じない構造とした。

海岸堤防模型は、基礎工を有する1:2のり面勾配の構造とした（図-2）。堤防表のり被覆工及び基礎工は、比重2.1のモルタル製とし、堤防盛土内は前面の移動床と同様の材料を用いて模型を製作した。また、堤防模型と水路ガラス面との接地面からの盛土材料の吸出しを抑制するため、図-3のように遮水シートの敷設及びワセリンの塗布を行った上で実験を実施した。

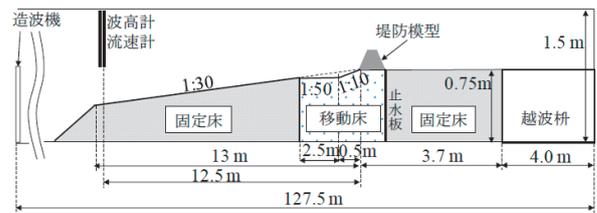


図-1 水路断面図

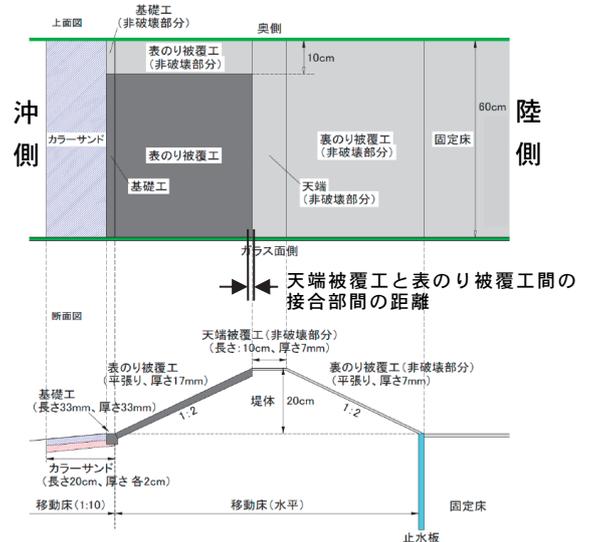


図-2 堤防模型断面図

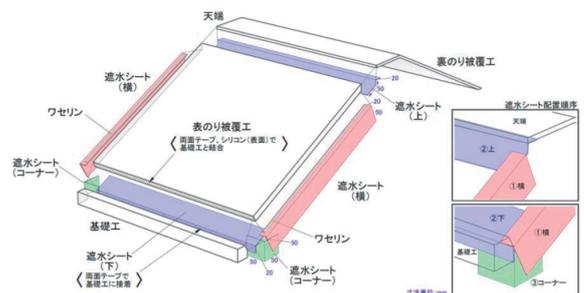


図-3 堤防模型側面の遮水方法

Hydraulic Model Experiments on Coastal Dike Resiliency Against Seaward Scouring Accompanied by Unexpected High Waves

2.2 造波条件と計測項目

実験は、越波流量の時間的変化を考慮するため、海岸事業の費用便益分析指針⁵⁾の外力設定方法を参考とし、越波流量が5段階で変化する条件で、不規則波にて135分間（各波浪条件：27分間）（現地換算にて12時間相当）造波して実施した（図-4及び表-1）。実験時には、各段階の10分及び27分経過後に造波を一時中断し、基礎工前面の移動床の洗掘状況とそれに伴う基礎工の水平移動量、固定している天端被覆工と表のり被覆工の接合部間の距離を計測した。また、併せて堤防模型前面における波高の計測を行うとともに、堤防模型背面に設置した越波柵にて越波量を把握し、各造波条件における越波流量（単位時間・幅の越波量）を算定した。

2.3 対策工の構造条件

実験の構造条件は、従来の洗掘対策として採用実績があるものも含め、小規模な工夫で実施できる構造を念頭に選定し、一般的な構造を1ケース（構造条件0）、矢板工に代表される根入れによって基礎工の変位を抑制する構造（構造条件1.x）を4ケース、養浜等によって洗掘を抑制する構造（構造条件2）を1ケースの計6ケースについて実験を実施した（図-5）。

3. 実験結果

本実験は、1/30縮尺模型であり計測精度に限界があることから、混成堤の滑动量の修復限界における許容値⁶⁾を参考とした上で、天端被覆工と表のり被覆工間の接合部間の距離が3.3mm以上（現地換算値：約0.1m）にて堤防が破壊されたと判定した。各構造条件における接合部間距離の結果一覧を表-2に示す。

3.1 一般的な構造（構造条件0）

第1段階10分経過後の時点で基礎工の移動が確認され、第2段階10分経過後までは僅かに前方へ動く状況が確認された。第2段階12分経過後からは移動速度が増し、第3段階4分経過後で30mm（現地換算0.9m）以上の移動状況となった。図-6に基礎工前面の洗掘の遷移状況を示す。第2段階10分経過時点で、基礎工前面が基礎工底部の深さまで洗掘されているのが分かる。また、その基礎工前面から0.2mの範囲において最も洗掘された箇所の地盤高（以下「洗掘後基礎工近傍地盤高」

という。なお、地盤高は基礎工上面を基準として整理している）の基礎工前面からの水平距離は0.049mであり、基礎工と洗掘後基礎工近傍地盤高間の距離が非常に短いことが確認できる。また、破壊に至った27分経過後時点では、洗掘後基礎工近傍地盤高の基礎工前面からの水平距離は変わ

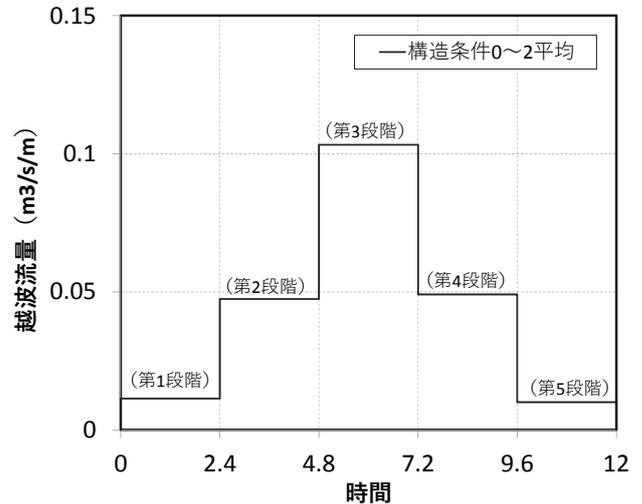


図-4 造波条件（現地換算値）

表-1 造波条件（現地換算値）

目標越波流量	段階	堤前水深 (m)	有義波高 (m)	周期 (s)	越波流量 (m³/s/m)
0.1 m³/s/m	第1,第5	1.65	1.90	7.9	0.0113,0.010
	第2,第4	1.98	2.96	9.0	0.0474,0.0490
	第3	2.31	3.97	10.0	0.1032

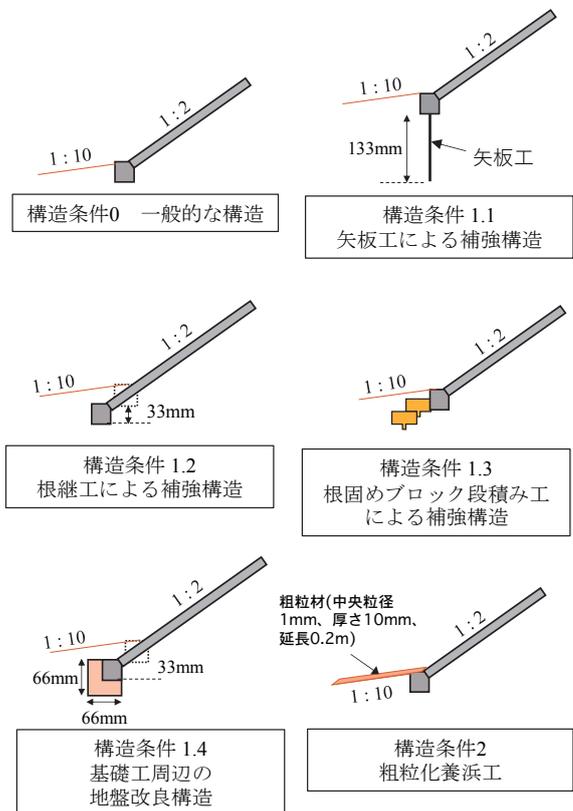


図-5 対策工の構造条件

表-2 各構造条件における天端被覆工と表のり被覆工間の接合部間の距離

構造条件	第1段階		第2段階		第3段階		第4段階		第5段階	
	10分 経過後	27分 経過後								
0	0.5	0.5	2.0	11.0	30.0	---	---	---	---	---
1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.3	0	0	0	0.5	0.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0
1.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※赤文字は3.3mm（現地換算値約0.1m）以上の移動量（単位：mm）

らないものの、その地盤高は基礎工底部以下であった。

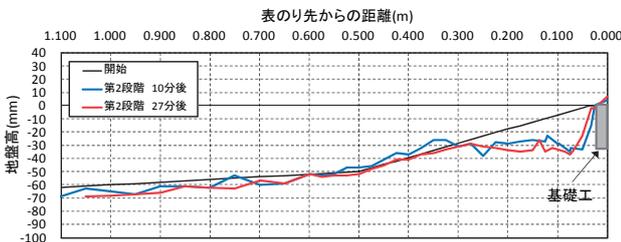


図-6 構造条件0における洗掘状況（第2段階）

3.2 根入れを確保した構造（構造条件1.x）

矢板工による補強構造（構造条件1.1）及び基礎工周辺の地盤改良構造（構造条件1.4）については、基礎工前面あるいは地盤改良部前面の洗掘は進行したものの、基礎工の移動は生じなかった。その洗掘後基礎工近傍地盤高は、矢板工による補強構造で-54mm、地盤改良構造では-68mmであり、地盤改良構造では地盤改良底部の-66mmを下回っていたが、基礎工前面からの水平距離は地盤改良前面から0.091mであり、その点が基礎工の移動が生じた構造条件0との差と考えられる。

一方、根継工による補強構造（構造条件1.2）及び根固めブロック段積み工による補強構造（構造条件1.3）については、破壊の判定にまでは至らないものの、基礎工の移動が確認された。移動が確認された第2段階終了後及び第5段階終了後の洗掘状況を図-7及び図-8に示す。根継工における基礎工前面の地盤高は、第2段階終了時点では基礎工高さの半分程度の位置にあり、第5段階終了時点では基礎工底部以下の洗掘後基礎工近傍地盤高となっている。また、その洗掘後基礎工近傍地盤高の基礎工前面からの水平距離は0.083mであった。根固めブロックにおける洗掘後基礎工近傍地盤高は第5段階終了時点では、根固めブロッ

ク底部以下の深度となったが、根固めブロック前面から0.149mの距離があった。

いずれの構造条件においても、洗掘後基礎工近傍地盤高は最も外力の大きい第3段階経過後よりも、第5段階経過後の方が低くなった。実験の造波時間に対して、粘り強い構造としての根入れ確保は効果的であったが、さらに長い時間の作用によって洗掘が進行すれば、堤防破壊の危険性があることは留意する必要がある。

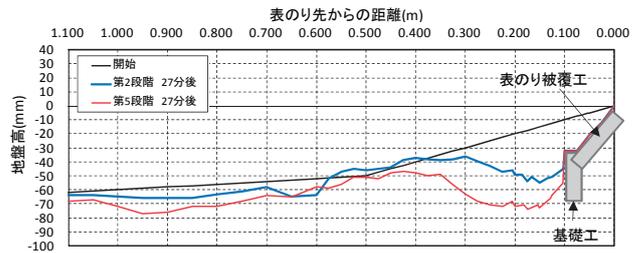


図-7 構造条件1.2における洗掘状況

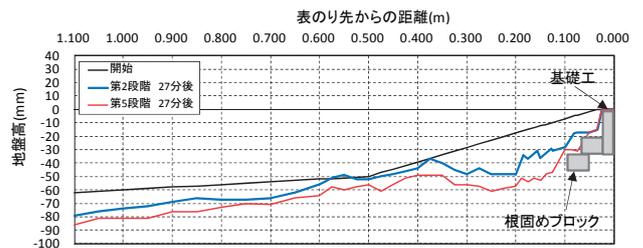


図-8 構造条件1.3における洗掘状況

3.3 洗掘を抑制する構造（構造条件2）

基礎工の移動が生じなかった粗粒化養浜工における洗掘状況を図-9に示す。第5段階終了時点においても、他のケースに比して顕著な洗掘は進行しておらず、基礎工高さの半分程度の洗掘後基礎工近傍地盤高となっている。また、その位置も基礎工前面から0.17mとなっており、距離が他の構造条件に比して長くなっていることが分かる。本実験における造波条件毎のC値の算定結果を表-3に示す。なお、C値とは、堀川ら⁷⁾によって海岸

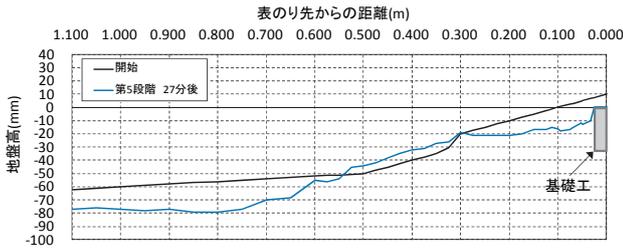


図-9 構造条件2における洗掘状況

表-3 水理模型実験におけるC値

中央粒径 (現地換算)	d ₅₀ =0.2mm		d ₅₀ =1mm	
	(d ₅₀ =6mm)	中間型	(d ₅₀ =30mm)	堆積型
第1,5段階	6.9	中間型	2.4	堆積型
第2,4段階	10.0	侵食型	3.4	堆積型
第3段階	12.4	侵食型	4.2	中間型

地形の侵食、堆積傾向を表す指標として整理されたものであり、式(1)によって定義されている。

$$H_0/L_0 = C(\tan \beta)^{-0.27}(d_{50}/L_0)^{0.67} \quad \text{---式(1)}$$

ここで、H₀：沖波波高、L₀：沖波波長、d₅₀：砂の中央粒径、tan β：海浜勾配であり、実験室の場合、C値が4以下では堆積型、C値が8以上では侵食型、それ以外は中間型とされている。本造波条件では、粗粒材は堆積型～中間型の傾向であることから、顕著な洗掘が生じなかったものと考えられる。

4. まとめ

本稿では、高波に対する粘り強い構造に関する検討の一環として実施した水理模型実験の結果を紹介した。本稿で紹介した構造は、いずれも粘り強い構造としての効果が確認された。また、検討

した構造のうち「矢板工による補強構造」、「基礎工周辺の地盤改良構造」、「粗粒化養浜工」については基礎工の移動が生じておらず、特に効果が高いことが確認された。この結果は、小規模な工夫で粘り強い構造とすることが可能であることを示唆するものである。ただし、1/30縮尺であるため、移動床の底質は現地換算で6mmの中礫に相当することから、粒径が小さい砂浜海岸では、洗掘後の地盤高はさらに低くなる可能性がある。今後は、大規模な水理模型実験等も実施し、引き続き粘り強い構造に関する検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 加藤史訓、諏訪義雄、鳩貝聡、藤田光一：津波の越流に対して粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造検討、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.70、No.1、pp.31～49、2014
- 2) 犬飼一博、栗山康弘、佐藤慎司、加藤史訓、水谷法美、原田賢治、神保正暢、岩佐隆広、福田晃正：駿河海岸における津波越流に対して粘り強い堤防構造に関する実験的研究、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.73、No.2、I_1057～I_1062、2017
- 3) 竹下哲也、加藤史訓、五十嵐竜行、小泉知義、宇多高明：越波に対して粘り強い海岸堤防の構造に関する実験的研究、土木学会論文集B2(海岸工学)、Vol.73、No.2、pp.I_931～I_936、2017
- 4) Tetsuya TAKESHITA, Fuminori KATO, Naoki FUKUHARA, Tatsuyuki IGARASHI, Tomoyoshi KOIZUMI, Takaaki UDA：Experiment on Coastal Dike Resiliency Against Unexpected Wave Overtopping, International Ocean and Polar Engineering Conference, 2018
- 5) 農林水産省、国土交通省：海岸事業の費用便益分析指針(改訂版)、p.38、2004
- 6) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、p.837、2007
- 7) 堀川清司、砂村継夫、近藤浩右：波による二次元海浜変形に関する実験的研究、第21回海岸工学講演会論文集、pp.193～199、1974

福原直樹



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
研究官、博士(工学)
Dr. Naoki FUKUHARA

竹下哲也



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
主任研究官
Tetsuya TAKESHITA

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
長、博士(工学)
Dr. Fuminori KATO