

日本海沿岸地域における海岸保全施設の高潮・津波対策

中央コンサルタンツ株式会社 ○ 出口 颯
中央コンサルタンツ株式会社 岩崎 友彦

論文要旨

本論文は、海浜を有する内陸側の施設である海岸保全施設について、最大クラスの津波に対する耐震、耐津波、高潮対策の検討を行ったものである。動的変形解析 (FLIP) により、水平変位量、鉛直変位量を算出した。防護ライン背後の浸水深を 30 cm未満とすることを目的に、必要な天端高を算出するため津波浸水シミュレーションを繰り返して行った。その上で、越波を許容しない場合、越波を許容する場合、液状化を対策する場合の3案で比較検討を行い越波を許容しない対策を選定した。具体的な対策は、嵩上げと腹付けとし、各断面で安定計算を行った。

キーワード：海岸保全施設、耐震・耐津波・高潮対策、静的安定計算、動的変形解析、津波浸水シミュレーション

まえがき

甚大な被害をもたらした東日本大震災では、計画規模を超える巨大津波によって、沿岸部の市街地が広範囲にわたって浸水するなどの被害が発生した。日本海沿岸部においても、これまで経験したことがない巨大津波が発生しないとは限らない。そのため、最大クラスの津波が発生した場合の津波浸水想定を行った日本海津波防災インフラ整備計画が策定されている。

海岸保全施設は、将来起こる可能性の高い地震に対して、背後の土地や人々を津波や高潮から守るための重要な役割を果たしている。

本論文では、最大クラスの津波による浸水被害の軽減を図るために、防潮堤の耐震、耐津波、高潮対策の検討を行ったものである。

1. 設計対象箇所と現地特性

設計対象箇所の位置図を図-2、現況断面図を図-1 に示す。

設計対象である防潮堤は、湾岸線の入り組んだ地形の奥に位置している。

設計対象である防潮堤の前面は海水浴場として利用されており、利用者が出入りするための開口部が防護ライン上に3箇所設けられている。さらに、区間終点部には河川が横断している。防潮堤の背後は、歩道、道路及び民家が隣接し、歩道は歩行者の通行があり、道路は交通量が多い。

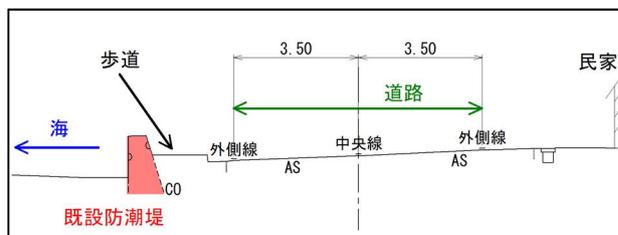


図-1 設計対象の現況断面図

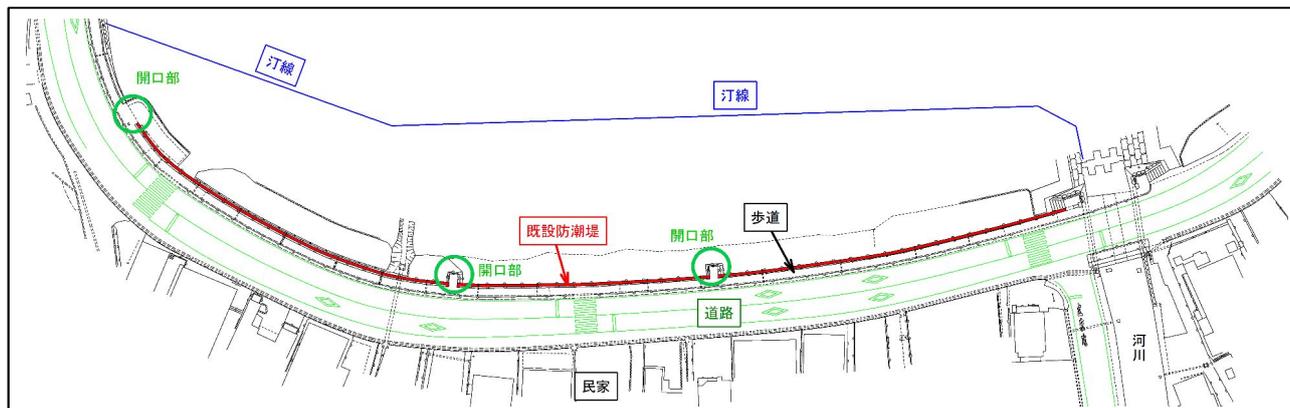


図-2 設計対象箇所の位置図

2. 設計条件

(1) 利用・自然条件

対象施設に対する利用・自然条件を表-1に示す。

表-1 利用・自然条件一覧表

条件項目	条件		
潮位	H. W. L. =T. P. +0.45m		
	L. W. L. =T. P. -0.05m		
	M. L. W. L. =T. P. +0.05m		
高潮高	H. H. W. L. =T. P. +1.20m		
上載荷重		防潮堤背後の水叩き	防潮堤背後の道路
	常時	5kN/m ²	10kN/m ²
	L1地震時	0kN/m ²	5kN/m ²
	L1津波時	0kN/m ²	0kN/m ²
	高潮時	0kN/m ²	0kN/m ²
設計震度	レベル1地震動 0.18		

(2) 地盤条件

ボーリングデータが少なく、区間割の幅が広い為、追加の地質調査を行い、地層状況を補完した。

地盤は図-3の想定縦断面図に示すように盛土層、沖積層、基盤岩の順に分布している。盛土層の下位には沖積層が層厚約2.00~12.50mで分布している。沖積層はAs1-1層, As1-2層, As1-3層, As2層の砂層が主体であり, Ag1層, Ag2層の礫質土と粘性土のAc層が分布している。Ag2層下位には中央部のみに、洪積粘性土のDc層が層厚約0.50m分布しており、基盤岩のSh層は約GL-4.00~-16.50m以深に分布している状況である。最大クラスの津波を引き起こす地震動(レベル2津波を生じさせる地震動)では、動的変形解析(本検討ではFLIPを採用)結果より、過剰間隙水圧が上昇し液状化が発生する状況となる。図-4に想定縦断面図における液状化範囲図を示す。

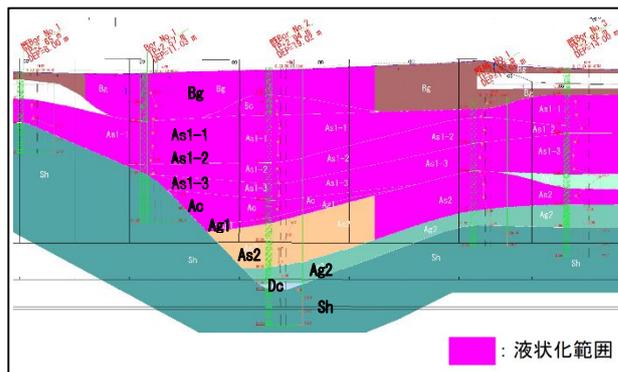


図-4 想定縦断面図における液状化範囲図

(3) 設計許容値

各解析の許容値を表-2に示す。

表-2 設計許容値一覧表

検討ケース	解析手法	許容値		
		滑動	転倒	
常時	静的安定計算	1.2	1.2	
L1地震時		1.0	1.1	
高潮時		1.0	1.1	
L2地震時		動的変形解析(FLIP)	水平変位	鉛直変位
			防潮堤の天端幅	津波浸水シミュレーションと併せて検討
		津波浸水シミュレーション	防潮堤背後地の浸水深を30cm未満とする	

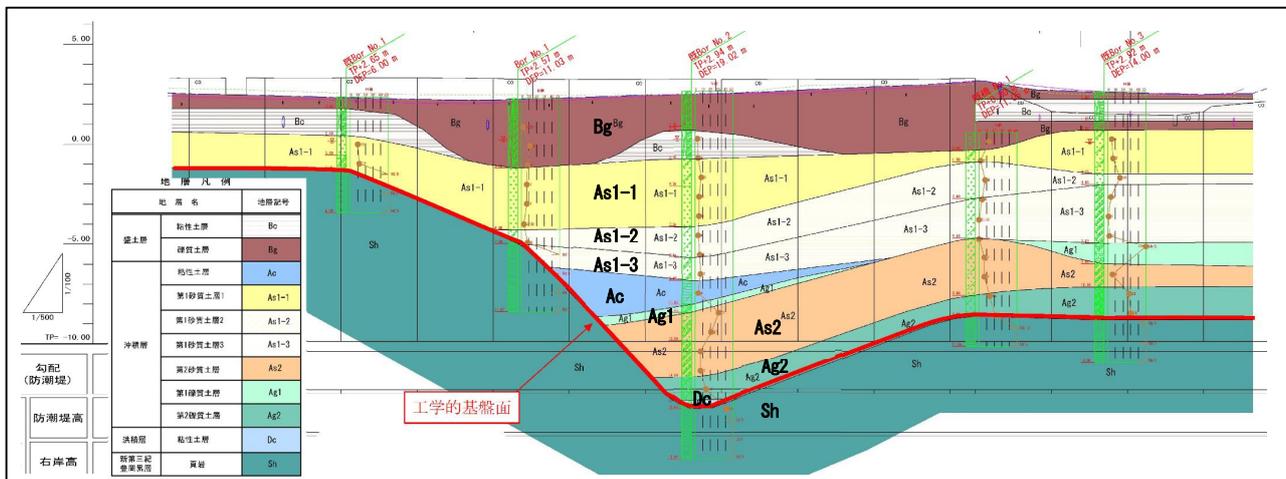


図-3 想定縦断面図

(4) その他制約条件

現地の土地利用の状況から、構造物の対策を検討するうえで、以下の制約を受ける。

- ・防潮堤背後は交通量が多い道路である。
- ・道路背後の民地境界を侵さないこと。
- ・防護ラインの中に河川が横断している。

3. 現況解析

現況断面の安定性の照査及びレベル2地震・津波における現況の変位量(水平,鉛直)の照査を行うため、静的安定計算及び動的変形解析(FLIP)を行った。動的変形解析の結果より、全体的に液状化による沈下が発生するため、沈下量を反映した津波浸水シミュレーションを実施し、レベル2津波による構造物(現況)の沈下後の浸水状況を把握した。

(1) 静的安定計算

設計対象施設は前面に海浜を有する内陸側の施設であり、防潮堤の底面(T.P.+1.95m)が既往最高潮位(T.P.+1.20m)と比較して十分に高い。L1津波水位についてもT.P.+1.70mと底面の高さより低い。高潮時の波高についても波浪の影響を考慮する必要があり、波の遡上によって防潮堤の位置まで高潮時の波浪が襲来するため検討は必要である。しかし、碎波帯より陸側に位置するため、作用外力が十分に小さい。したがって、照査の決定ケースになることはない。L1津波時の照査については、波高を考慮した高潮時の条件よりも水位が低いいため、検討ケースから除外した。現況断面計算の際の作用方向が「海→陸」となる検討ケースは、海側水位が全て防潮堤の底面以下である。したがって、計算における決定ケースになることが無いと言えるため、防潮堤背面の地盤高が最も高い断面を静的安定計算の計算モデルとした。照査検討ケースを表-3、断面計算のイメージ図を図-5、計算結果を表-4に示す。全ての検討ケースで許容値を満足する結果となった。

表-3 照査検討ケース一覧表

検討ケース	作用の方向	作用外力	決定ケースとなる場合の条件	検討の有無
常時	陸→海	土圧	背後の地盤高が高い場合	○
L1地震時	陸→海	土圧,地震力	背後の地盤高が高い場合	○
高潮時	海→陸	波力,水圧,揚圧力	背後の地盤高が低い場合	○
L1津波時	海→陸	波力,水圧,揚圧力	背後の地盤高が低い場合	×

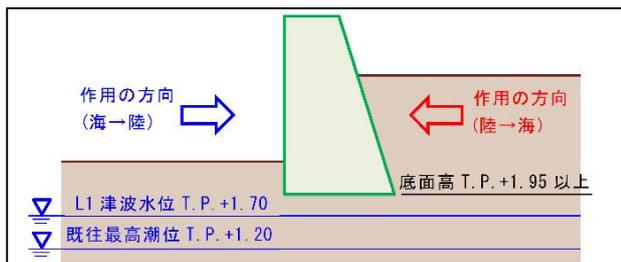


図-5 断面計算のイメージ図

表-4 静的安定計算の現況解析の結果一覧表

解析手法	検討ケース	照査結果					
		滑動		転倒		支持力	
静的安定計算	常時	3.118	1.2	4.851	1.2	56.529	518.883
	L1地震時	1.785	1.0	2.494	1.1	77.684	507.800
	高潮時	82.853	1.0	987.411	1.1	33.255	518.883

(2) 動的変形解析(FLIP)

整理した地盤条件を基に、3つの断面で動的変形解析(FLIP)を行った。残留水平変位が天端幅(0.5m)以上となる場合に、目地部に隙間が生じる。表-5に示すとおり、No.10の断面のみ残留水平変位が0.5mを超える結果となった。No.10の残留変形図を図-6に示す。

表-5 動的変形解析(FLIP)の現況解析の結果一覧表

解析手法	検討ケース	解析断面	残留水平変位		残留鉛直変位
			変位量	判定	変位量
動的変形解析(FLIP)	L2地震時	No.2	0.313m	≤0.50 OK	-0.150m
		No.6	0.476m	≤0.50 OK	-0.408m
		No.10	1.066m	≥0.50 NG	-0.183m

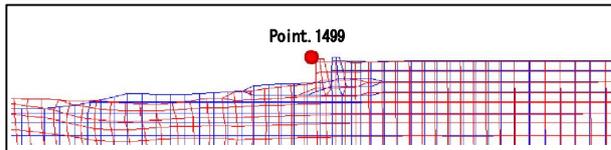


図-6 残留変形図(No.10)

(3) 津波浸水シミュレーション

動的変形解析(FLIP)の結果を踏まえて津波浸水シミュレーションを行った。津波浸水シミュレーションに入力する地盤高は、道路の路線測量結果を用いて、地殻変動量、FLIP解析による鉛直変位量・消散沈下量を差し引いたメッシュを設定した。津波浸水シミュレーションの結果を図-7に示す。防護ラインの中に河川が横断しているため、河川部を開口部として考慮したことで、隣接する河川の上流まで津波が遡上する結果となった。また、液状化により地盤が沈下することから、防潮堤背後の道路の一部と河川周辺の広い範囲で、30cm以上の浸水を確認した。

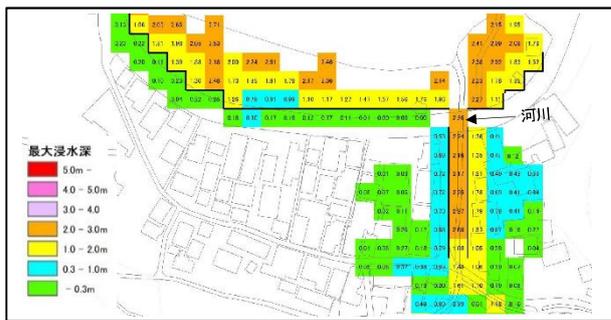


図-7 現況の条件下での津波浸水シミュレーション結果(浸水深)

4. 対策工法の検討

海岸保全施設である防潮堤を津波が越流することによって、防潮堤背後の一部が浸水深 30 cmを超過することを確認した。海岸保全施設の対策として、防潮堤を越波する場合は背面の水叩き部を補強する必要がある。また、浸水深を減少させるため、防潮堤の天端を嵩上げする必要があるが、整備目標を踏まえると完全に越流を阻止する必要はない。さらに、越流は液状化による沈下が原因であるため、液状化対策の地盤改良を行うことで、越流を防ぐことが可能である。

以上のことを踏まえ、第1案：越波を許容する対策案、第2案：越波を許容しない対策案、第3案：地盤改良を行う案の3つの対策案を抽出した。

第1案：越波を許容する対策案は、嵩上げ+コンクリート前腹付け+水叩き(歩道部)補修を行う案である。最小限の嵩上げを行い、地震動により目地ずれが発生する箇所には天端幅を確保するため、コンクリート前腹付けを行う。津波が越流するため、該当する区間の水叩き(歩道部)を補強する。

第2案：越波を許容しない対策案は、嵩上げ+コンクリート前腹付けを行う案である。津波水位以上の高さまで嵩上げを行い、防潮堤の上部からの越流を許容しない。目地ずれが発生する箇所にはコンクリート前腹付けを行う。

第3案：地盤改良を行う案は、液状化を抑制することで、

津波の越流を防ぐ。

各対策案の概要及び比較表を表-6に示す。本検討では、経済性が優位となる「第2案：越波を許容しない対策案(嵩上げ+コンクリート前腹付け(残留水平変位が 50 cmを超える区間のみ))」を対策工法とした。

5. 対策後の検証

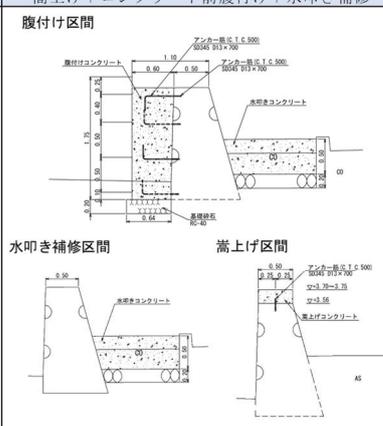
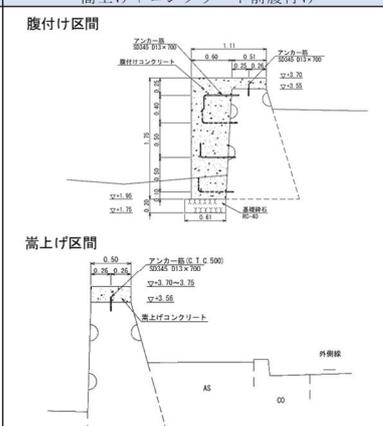
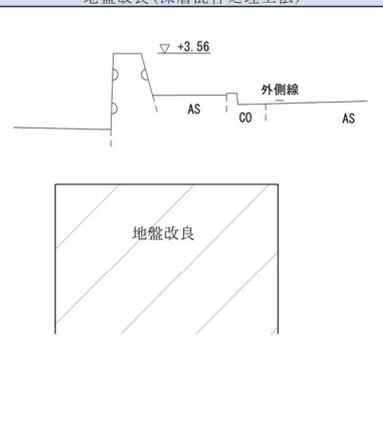
(1) 静的安定計算

対策後の断面で静的安定計算を行った。現況解析と同様に、対策後の照査検討ケースを常時、L1地震動、高潮時とした。対策断面は対策工法で選定した嵩上げ、腹付けを行う範囲で最も背面地盤高が高い位置での計算を行うものとした。計算結果を表-7に示す。全ての検討ケースで許容値を満足する結果となった。

表-7 静的安定計算の対策後の結果一覧表

解析手法	検討ケース	照査結果					
		滑動		転倒		支持力	
静的安定計算	常時	5.038	1.2	12.268	1.2	52.079	45.934
		滑動		転倒		支持力	
	L1地震時	2.258	1.0	4.551	1.1	74.449	60.762
		滑動		転倒		支持力	
	高潮時	645.487	1.0	5966.58	1.1	31.908	35.093
		滑動		転倒		支持力	

表-6 対策案の比較表

	第1案:越波を許容する対策案 嵩上げ+コンクリート前腹付け+水叩き補修	第2案:越波を許容しない対策案 嵩上げ+コンクリート前腹付け	第3案:地盤改良を行う案 地盤改良(深層混合処理工法)			
断面図						
工法概要	既設構造物の高さは現状維持し、水平変位が生じる箇所では腹付けを行う構造。腹付けに伴い、捨石による基礎の構築を行う。防潮堤の背面に津波が越流するため、水叩きコンクリートの打換えを行う。	既設構造物をかさ上げし、津波の越流を防止するとともに、水平変位が生じる箇所では腹付けを行う構造。腹付けに伴い、捨石による基礎の構築を行う。	液状化対策として、地盤改良を実施する。液状化を防ぐことにより、防潮堤の沈下及び背後地の沈下が抑制され、越波及び浸水の両面に効果がある。			
環境保全及び周辺景観	・海水等への環境にはほとんど影響しない。	◎ 防潮堤の天端高が高くなるため、眺望が悪くなる。 ◎ 海水等への環境にはほとんど影響しない。	△ 海浜部を地盤改良する必要があるため、固化材等が流出する可能性がある。 △ 景観への影響はない。			
維持管理性	◎ コンクリート構造のため、維持管理性に優れる。	◎ コンクリート構造のため、維持管理性に優れる。	○ 永久構造物のため、維持管理性に優れる。			
施工性	○ 水叩きの補修時、歩道の通行を規制する必要がある。 ○ 施工機械が小規模である。	◎ 施工機械が小規模である。 ◎ 全ての工種が防潮堤の前面から施工可能で、施工性に優れる。	× 施工機械が大規模である。 × 防潮堤背面の施工範囲が広く、車道の規制が必要である。			
経済性	工種	金額(千円)	工種	金額(千円)	工種	金額(千円)
	腹付工	1,344	腹付工	1,344	深層混合処理工法	1,411,507
	水叩き	3,140	嵩上げ工	1,340	撤去	548
	嵩上げ工	259	掘削	9	掘削	65
	撤去	507			復旧	978
	掘削	20				
	合計	5,270	合計	2,693	合計	1,413,097
	比率	1.96	比率	1.00	比率	524.75
総合評価	経済性が第2案に劣るため、選定しない。 △	経済性が第1案より優れるため、選定した。 ○	施工性、経済性共に最も劣るため、選定しない。 ×			

(2) 動的変形解析 (FLIP)

選定した対策案の第2案：越波を許容しない対策案について、対策工法を実施した後に各断面が耐震要求性能を満足するかを確認するため、動的変形解析 (FLIP) より検証を行った。対策断面は現況解析に用いた断面を基本とした。No. 2, No. 6 の断面は嵩上げのみの対策とし、No. 10 の断面は現況解析より、残留水平変位が 0.5m を超える結果であったため、嵩上げ、腹付けの対策とした。腹付け後の天端幅は 1.10m とした。対策後の解析結果一覧表を表-8 に示す。

全ての対策断面で、水平変位を満足している結果となった。

表-8 動的変形解析 (FLIP) の対策後の解析結果一覧表

解析手法	検討ケース		照査結果			
	L2 地震時	L2 津波時	解析断面	残留水平変位	残留鉛直変位	
動的変形解析 (FLIP)			No. 2	0.374m	≦0.50	-0.133m
			No. 6	0.485m	≦0.50	-0.415m
			No. 10	1.041m	≦1.10	-0.194m

(3) 津波浸水シミュレーション

選定した対策案の第2案：越波を許容しない対策案について、対策後の防潮堤により津波が背後に越流しないことを確認するため、津波浸水シミュレーションを行った。現況解析と同様に、津波浸水シミュレーションに入力する地盤高は、道路の路線測量結果を用いて、地殻変動量、FLIP 解析による鉛直変位量及び消散沈下量を差し引いたメッシュを設定した。

防護ライン上に3箇所の開口部がある。その内の2箇所は歩行者の通行のみであり、乗り越し階段を設置する方針のため、津波浸水シミュレーションでは開口部を閉じた状態で解析を行った。残りの1箇所は車両の進入が想定されており、対策方針は未定であったため、開口部を考慮した。

津波浸水シミュレーションの結果を図-8 に示す。越波を許容しないが、対策を行わない開口部からの津波の浸入を確認した。しかし、防潮堤背後の道路の浸水深が 30 cm 未満であることを確認した。

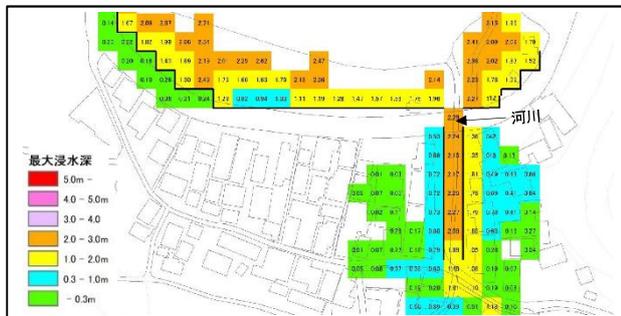


図-8 対策後の条件での津波浸水シミュレーション結果(浸水深)

6. まとめと今後の課題

日本海沿岸部における最大クラスの津波に対し、浸水深を 30 cm 未満にすることを目標に対策案を選定した。防護ライン上の開口部を残置していた場合でも、整備目標を達成していることがわかった。

今後の課題として、車両の進入が想定される開口部1箇所の対策を進める必要がある。

あとがき

近年、能登半島地震のように想定外の災害が発生し、甚大な被害が予想される。その中で、海岸保全施設の耐震対策は、災害時における道路の通行止め時間の短縮や、交通機能の確保に繋がると考えている。

最後に、本業務の遂行や論文の執筆にあたり、ご指導、ご協力をいただきました関係者各位に感謝の意を示します。

参考文献 (または引用文献)

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上・下), 社団法人日本港湾協会, H30. 5, pp. 694
- 2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上・下), 社団法人日本港湾協会, H30. 5, pp. 448~464
- 3) 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, 全国漁港漁場協会, H30. 8, pp. 2-126
- 4) 道路土工 擁壁工指針, 社団法人 日本道路協会, H24. 7, pp. 53