『近畿地方整備局研究発表会』優秀賞

第Ⅰ部門

グラウンドアンカーの維持管理を踏まえた設計手法の検討

辰巳　恵理

近畿地方整備局　港湾空港部　港湾事業企画課　（〒650-0024兵庫県神戸市中央区海岸通29番地）

本論文は，神戸港ポートアイランド（第2期）地区岸壁（-16m）（PC-15E～17）において耐震改良のため採用したグラウンドアンカー工法について，維持管理における計測データより得られた現象を基に新たな設計手法を検討したものである．改良後のアンカーでは，張力変動が確認されたが，当初設計では張力変動の影響が十分考慮されていない．本検討では工法の力学特性を整理し，残存張力が地震応答に線形的影響を与えること，地震の繰り返し作用により張力・変形が累積することを解析により定量的に示した．これらを踏まえ，残存張力を設計パラメータとする性能照査体系や張力管理の考え方を提示し，合理的耐震設計の方向性を示す．

キーワード　グラウンドアンカー工法，耐震強化岸壁，地震時応答解析，維持管理，設計手法

1. はじめに

神戸港ポートアイランド（第2期）地区岸壁（-16m）（PC-15E～17）は，水深-16m，岸壁延長1,150mの施設であり，阪神港における基幹的なコンテナターミナルである．本施設の位置図を図-1に示す．



図-1　本施設位置図

本施設は，大規模地震発生後も国際海上コンテナなどの幹線貨物輸送機能を維持することを目的とし，「耐震強化施設（特定（幹線貨物輸送対応））」に位置付けられており，2009年には，船舶の大型化に対応するための水深-16mへの増深化に併せ，「グラウンドアンカー工法」による耐震改良を行っている．

ここで「グラウンドアンカー工法」は，既設ケーソン上部から斜め下部方向にグラウンドアンカーを設置し，ケーソン上部に接合して滑動抵抗力等を増大させるものである．本施設のグラウンドアンカーは頭部，引張り部，アンカー体で構成され，洪積砂礫層（Dg1）へアンカー体を10m定着させた全長83.2mの構造体である．施設の断面図を図-2に示す．

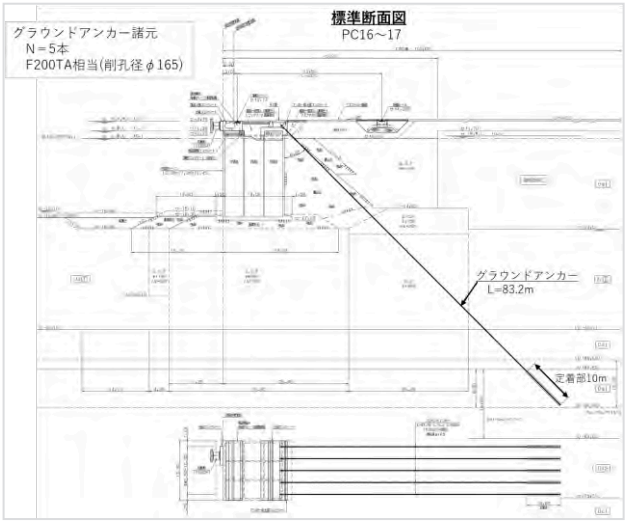


図-2　施設の断面図（PC-16.17）

耐震改良後の2011年1月以降，本施設では継続的な残存張力の計測を通じたアンカーの張力管理を実施しているが，気温や潮位に伴う季節性の短期変動に加え，地盤

沈下による長期的な張力低下が確認されているところである．

本検討は，耐震強化岸壁の信頼性向上を目的に，グラウンドアンカーの残存張力の変動が本施設の耐震性能に与える影響について2次元地震時応答解析（FLIP）を用い，解明する．また，本工法の地震動作用時の力学的特性を体系的に整理した上でアンカーの残存張力に着目した性能規定の見直しも含めた合理的な設計手法及び耐震強化岸壁として被災直後の利用可否判断方法を提案するものである．

2. アンカー張力計測データの整理と要因分析

(1) アンカーの張力の計測

2011年1月にグラウンドアンカーが設置されて以降，現在まで継続的に張力測定を実施している．2011年2月から2022年3月までの張力計測結果を整理し，同時期の気温，潮位，波高，地震，降水量のデータを整理した．データ整理の結果より，張力の変動を確認したところ、季節性の周期的な短期変動と継続的な長期変動があることが判明した．（図-3）

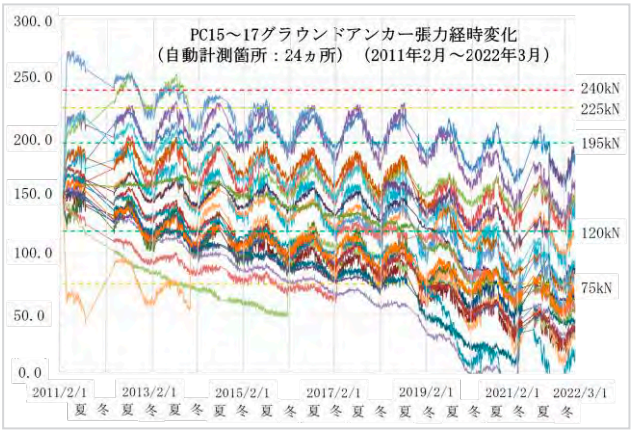


図-3　残存張力計測結果

(2) 残存張力の短期変動要因

グラウンドアンカーの残存張力の季節的な変化の要因を明確にするため，残存張力と各事象（気温，潮位，波高，降水量）との相関関係を時系列及び散布図により比較分析し，関係性が高い事象を季節的な変化の要因として抽出した．その結果，残存張力は「気温」，「潮位」との間に強い相関があることが分かった．残存張力と気温・潮位の関係を示した時系列及び散布図を図-4に示す．残存張力の変動は年周期20kNの変動幅であり，長期的に増減が生じるものではないため，張力調整は不要なレベルであるが，耐震性の確保も踏まえた管理基準値の設定にあたっては，20kNの短期変動幅を考慮した値の設定が必要だと考えられる．

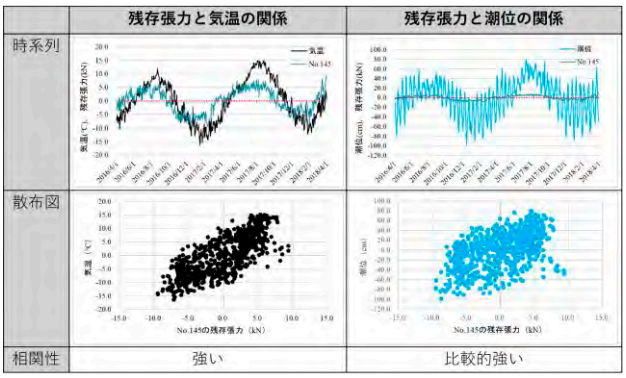


図-4　残存張力と気温・潮位の関係

(3) 残存張力の長期変動要因

グラウンドアンカーの残存張力の長期的変動要因を明確にするため，残存張力と地盤沈下との関係を整理した．ケーソンのアンカー張力と，近傍の測量結果（a-1地点の地表面標高）の関係を図-5，図-6に示す．

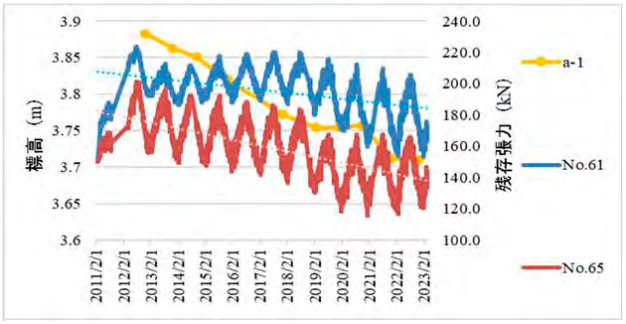


図-5　残存張力と標高の関係

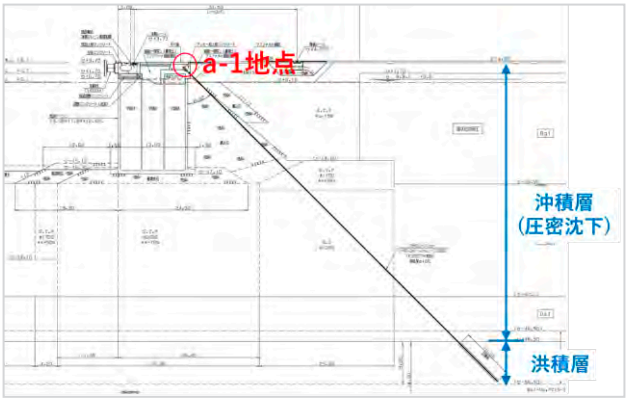


図-6　測量点（a-1地点）位置図

アンカー張力の長期的な変動現象と地表面標高の変化（ケーソンの沈下量）の間には高い相関があることを確認した．また，年間10kNの張力低下が継続的に発生している．この現象は沖積層の圧密沈下に伴い張力低下が生じたものである．耐震性の確保を踏まえた管理基準値の設定にあたっては，10kN/年の長期変動幅を考慮した値の設定が必要である．長期変動における継続的な張力低下に対する対応は，本施設の耐震性能確保の上で設計，

維持管理段階での課題となる．本施設のグラウンドアンカー工法の設計では，アンカーが一定の張力を保持し，地震時のケーソンの滑動等に対して抵抗することを前提とするものであるが，本施設の張力計測を通じ，地盤沈下よるアンカー張力の変動が確認，さらには中小地震の繰り返し作用後の周辺地盤の沈下に伴う張力の変動が予測されるため，その影響を設計，維持管理において考慮する必要が生じた．

3. アンカーの残存張力の変動が施設の性能に与える影響について

(1) 地震の繰り返し作用の影響

地震の繰り返し作用が施設に及ぼす影響を解明するため，2次元地震時応答解析（FLIP）で本施設の地震時の挙動等を再現した．地震時には，初期緊張されたアンカーで補強されたケーソンの変位に伴い，アンカーが伸びることで機能が発揮され，ケーソンには残留変形，アンカーには残留張力が発生する．その後，2回目の地震動が作用すると，最初の地震動による残留変形・残留張力が初期条件となり，2回目の地震動による残留変形・残留張力が累積する結果となった．

ここで，L1地震動及びL2地震動に対する2次元地震応答解析（FLIP）よりアンカーの地震前の残存張力とケーソンの残留変形量の相関性について検討を行い，地震の繰り返し作用が施設に及ぼす影響について把握した．なお検討は，当該岸壁が保有すべき耐震性の性能規定と関係する「岸壁法線の残留変形（水平・鉛直・傾斜角）」，「ケーソンの底面反力」，「ケーソン基礎のレールスパンの間の相対変形（水平・鉛直）」、「アンカー発生張力（最大値・最小値）」の項目で行った．

検討の結果，以下2点の知見が得られた．

① L1地震動及びL2地震動ともに，地震前の残存張力と地震後のケーソンの残留変形には高い相関があり，一次関係（線形関係）が強い（図-7、図-8）

② L1地震動及びL2地震動作用後において，岸壁全体の変形程度により，アンカーに一定以上の残存張力が発生し，地震が繰り返し作用する場合，その残存張力が蓄積する（図-9）

これらを受け，要求性能が「使用性」であるL1地震動の作用に対しても，余震等の地震の繰り返し作用の影響を考慮した場合，アンカーに残存張力が累積することとなる．したがって，要求性能を満足し，本施設を継続して使用するためには，発生するアンカー残存張力に基づくケーソンの底版部材の耐力評価及び維持管理段階でのアンカーの適正な張力管理が必要となる．

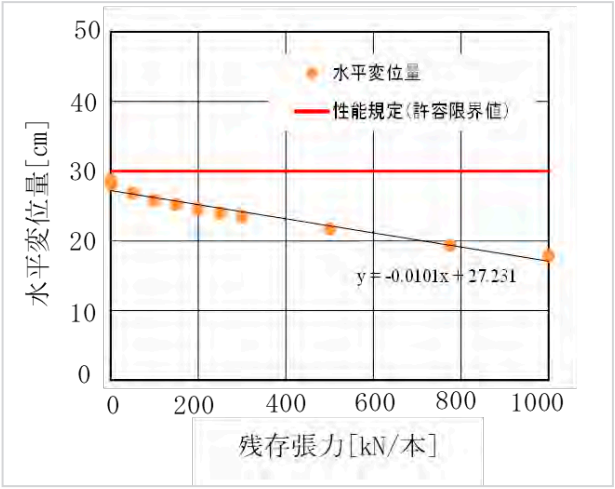


図-7　L1地震時の残存張力とケーソン変位量の関係

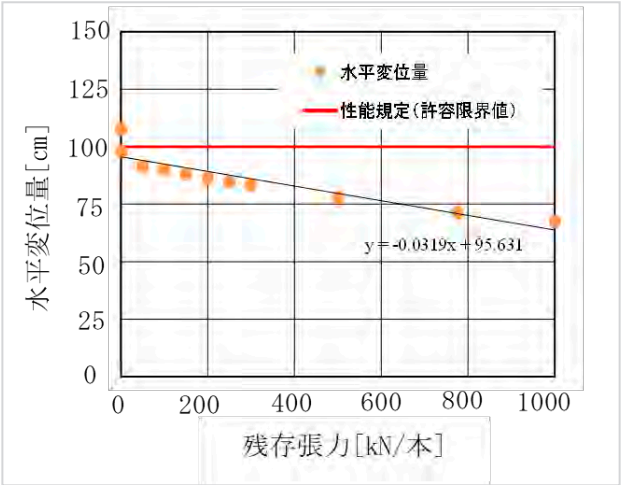


図-8　L2地震時の残存張力とケーソン変位量の関係

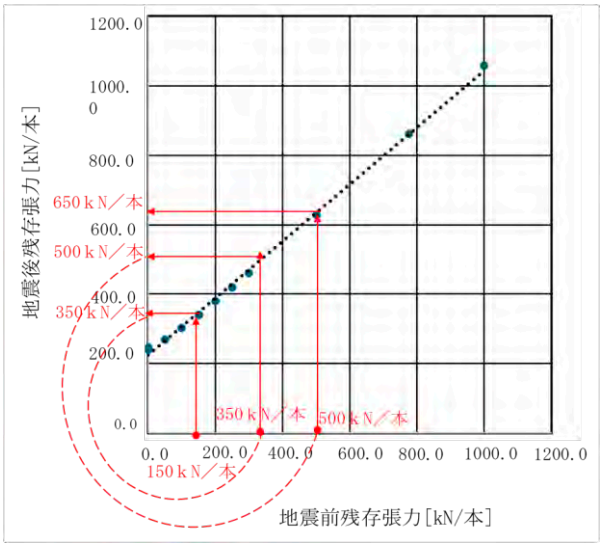


図-9　地震前と地震後の残存張力の関係

(2) グラウンドアンカー工法の特性及び当初設計の課題

長年の張力計測の結果では，アンカーの残存張力は気温と潮位による季節的な短期変動に加え，地盤沈下による長期的な変動に起因した累積的な張力増加が確認されている．また，2次元地震応答解析（FLIP）による地震

時の挙動等の再現を行った結果，地震の繰り返し作用により残存張力が蓄積することが知見として得られている．

しかしながら，本施設の耐震改良に用いるグラウンドアンカー工法の当初設計では震度法を用い，地震作用時に不足する耐力に対し，必要となるアンカー張力を照査用震度から設定した静的な水平力とのつり合いから算出し，設置本数，規格を決定している．ここで震度法は，アンカーの張力増加，残存張力の蓄積が発生しない（作用後は作用前の状態に回復する）ことを前提とした設計手法であり，地震の繰り返し作用時など施設に起こり得る本検討で判明した事象は考慮されていない．したがって，本施設のような港湾構造物において耐震性の確保を目的とし，グラウンドアンカー工法を採用する場合は，地震の繰り返し作用によりその残留張力が蓄積する等の特性を考慮し，その影響を評価できる2次元地震応答解析（FLIP等）の動的解析を用い，照査する必要がある．

4. 照査項目，性能規定を含む設計手法及び管理基準値の見直し

(1) 照査項目及び性能規定値の見直しにおける留意事項

本施設は，「耐震強化施設（特定（幹線貨物輸送対応））」であることから，設計に際し，グラウンドアンカー工法の特性を考慮した照査項目，さらには「使用性」及び「修復性」の要求性能に対応した性能規定値の設定が必要となる．

前章で述べたとおり，本施設の当初設計では，重力式岸壁の照査手法を準用し，震度法によりケーソンの「滑動，転倒，支持力」の性能規定値を満足するアンカーの設置本数，規格を設定している．そのため，アンカー部材には，初期に導入した一定の張力が発生している前提からその部材に関する照査項目及び性能規定値は定めていない．しかしながら，本工法では，地震の繰り返し作用によりアンカー部材に残留張力が蓄積することから，初期に導入した一定以上の張力が発生することを前提とした照査項目及び性能規定値を設定する必要がある．また，偶発状態となるL2地震作用後においても，本格復旧までの短期間内ではあるが，軽微な余震の作用も踏まえた照査項目及び性能規定値を設定することとした．

(2) 照査項目及び性能規定値の見直し

前項の留意点を踏まえ、重力式岸壁の照査項目を基本に，アンカー部材に関する照査項目と地震動の繰り返し作用及び余震に対する照査項目を付加し，性能規定値を見直した．一覧を表−１に示す．

表−1　設計状態及び性能規定の見直し結果（※：当初設計時との相違点）

要求性能	設計状態			照査項目	性能規定値
	状態	主たる作用	従たる作用		
使用性	永続	自重	水圧、載荷重	円弧すべり	耐力作用比1.0以上
		土圧	自重、水圧、載荷重	壁体の滑動、転倒、基礎地盤の支持力	
				アンカー破壊※	許容引張り荷重以下
				アンカーの定着※	許容引抜き力以下
				アンカーの残存張力※	許容引張り荷重未満 (ケーソン底版耐力未満)
	変動	L1地震動 ※繰り返し作用含む	自重、土圧、水圧、載荷重	壁体の滑動、転倒、基礎地盤の支持力	耐力作用比1.0以上 (岸壁天端の許容変位量：Da＝10cm)
				アンカー破壊※	許容引張り荷重以下
				アンカーの定着※	許容引抜き力以下
				アンカーの残存張力※	許容引張り荷重未満 (ケーソン底版耐力未満)
修復性	偶発	L2地震動	自重、土圧、水圧、載荷重	法線の変形	・残存変位量：100cm未満 ・残留傾斜角：3° 未満
				エプロンの変形	・ケーソン背後段差：0.3m以内
				アンカー破壊※	許容引張り荷重以下
				アンカーの定着※	極限引抜き力以下
				アンカーの残存張力※	許容引張り荷重未満 (ケーソン底版耐力未満)
	偶発 発災後※	余震(L1地震動未満)※	自重、土圧、水圧、載荷重※	アンカー破壊※	許容引張り荷重以下
				アンカーの定着※	極限引抜き力以下
				アンカーの残存張力※	許容引張り加重未満 (ケーソン底版耐力未満)

永続状態においては，円弧すべりや，ケーソンの滑動，転倒及び基礎地盤の支持力の照査項目に対する性能規定値に加え，アンカー部材の健全性の確保の点から，アンカー破壊，アンカーの定着，アンカーの残存張力の照査項目に対し，許容引張り荷重以下，作用する許容引抜き力以下及び許容引張り荷重未満（ケーソン底版耐力未満）の性能規定値を追加した．また，変動状態に対して，基本的な照査項目は，永続状態に同じであるが，地震発生後の継続した岸壁利用(使用性)の観点から，アンカーの残存張力が当該岸壁の健全性に及ぼす影響について配慮する必要があることを特記事項として追加した．また，L1地震動の作用によりアンカーに残存張力が発生した後，L1相当の地震動が繰り返し作用する状態においてもアンカーが破断しない等，上述にある照査項目と性能規定値を設定し，照査を行うこととした．ここで繰り返し作用するL1相当の地震動がアンカーの張力等へ及ぼす影響については，2次元地震応答解析（FLIP等）の動的解析による照査結果に基づき，確認することとした．
偶発状態に対しては，偶発作用（L2地震動）後，本格復旧（2年程度を想定）までの期間における「暫定供用」を想定するが，本期間中においても，軽微な余震（L1相当未満の地震動）に対し，構造上支障が生じない性能を保有するものとする．なお，性能照査は，変動状態同様，2次元地震応答解析（FLIP等）の動的解析による照査結果を基本とする．

(3) 管理基準値の見直し

前項において，地震発生後の継続した岸壁利用(使用性)の観点から，アンカーの残存張力が当該岸壁の健全性に及ぼす影響について配慮する必要があると記したが，設計段階での2次元地震応答解析（FLIP）の動的解析による照査結果に基づき，維持管理段階でのアンカー張力の管理基準値を設定，見直しを行った．初期導入張力（地震前張力）と地震後の張力の関係から設定するが，アンカー張力の変動要因による変動にも留意し，設定，見直しを行った．ここで，管理基準値の考え方について，図-10に示す．

初期張力の管理基準値は，岸壁の耐震性能の向上（変形抑制効果），また地震後に発生（残存）し得るアンカー張力が底版耐力へ及ぼす影響も考慮し，現行のまま「150kN/本」とする．アンカー張力の下限値については，地震前のアンカー張力が0kN/本となる場合，地震作用後の変形が性能規定値を超過することが確認されている．そのため，地盤沈下による1年間の減少幅（10kN/本程度）、季節的な増減幅（20kN/本程度）を考慮した「30kN/本（10kN/本＋20kN/本）」を下限値とした．

またアンカー張力の上限値は，常時におけるケーソン床版耐力から決まるアンカー張力を超過しないように管理する必要がある．そのため，常時におけるケーソン底版部耐力の限界値である「250kN/本」を基準とし，季節的な変動幅に配慮して，「230kN/本（250kN/本－20kN/本）」を上限値とした．

加えて，残存張力の変動要因が明確になり，閾値の精度が向上したことから，現行の評価基準，健全性調査の実施基準を緩和するとともに，点検頻度を低くした．これらを含めた管理基準値の見直し内容を図-11に示す．

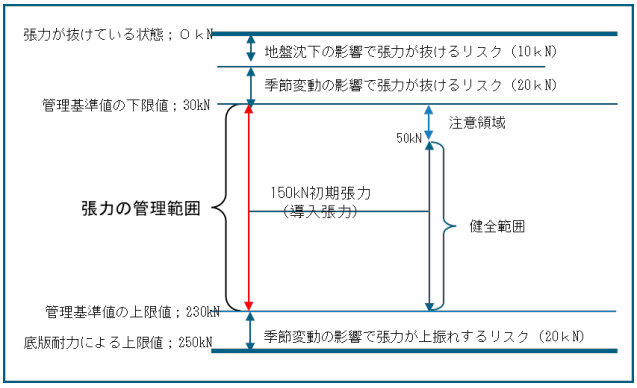


図-10　アンカー張力の管理基準値の考え方

	現行		見直し	
項目	点検内容	評価	点検内容	評価
残存張力	0kN	Ⅰ	30kN未満	Ⅰ
	0kN以上75kN未満	Ⅱ	30kN以上120kN未満	経過観察
	75kN以上120kN未満	Ⅲ		
	120kN以上195kN未満	健全	120kN以上180kN未満	健全
	195kN以上225kN未満	Ⅲ	180kN以上230kN未満	経過観察
	225kN以上240kN未満	Ⅱ		
	240kN以上	Ⅰ	230kN以上	Ⅰ
健全性調査の実施基準	Ⅰ:1つ以上　または Ⅱ:2つ以上　または Ⅲ以上:3つ以上		Ⅰ:1つ以上	
点検回数	手動:3ヶ月に1回 自動:月1回データ整理		手動:年1回 自動:月1回データ整理	
備考 Ⅰ:アンカーの健全性に重大な問題があることが明らか、または可能性が高い Ⅱ:近いうちに健全性に重大な問題が生じる可能性が高い Ⅲ:現時点では大きな問題ではないが、いずれ重大な問題に移行する可能性がある				

図-11　管理基準値の見直し

5. まとめおよび今後の展望

本検討は，継続的な計測で把握されたグラウンドアンカー張力の周期的な変動や長期的な低下の要因分析とともに得られた知見に基づき，性能規定を含む設計手法及び管理基準値の見直しを行ったものである．また本検討に加え，地震被災時の残存張力と変位量の関係を算出し，施設の利用可否判断を行うための閾値を設定した．これに基づき、地震被災時，迅速に本施設の利用可否判断を行うことが可能となり，耐震強化岸壁としての使用可否

判断を踏まえた維持管理方法を検討の上，維持管理計画書の改訂を行った．

これらの成果は，今後，同様の耐震改良を行う他の施設の維持管理計画の見直し，及び新たに施設整備・設計を行う施設においても活用が図れるものと考える．

謝辞：本検討を遂行するにあたり，ご指導とご助言を賜りました菅野高弘先生(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 フェロー)及び水谷崇亮先生(国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部 港湾新技術研究官)に深く感謝申し上げます．また，本検討にご協力いただいた関係者の皆様に深く感謝いたします．