

境港外港地区防波堤整備事業

－中間土地盤の設計せん断強度の適切な評価による建設コスト削減事例－

The Construction Project of Breakwater in Sakai Port

- Example of Construction Cost Reduction by Evaluation on Design Strength of Intermediate Soil -

| | | |
|------|-----------------|-------------------------|
| 笹岡実也 | Jitsuya SASAOKA | (中国地方整備局 境港湾・空港整備事務所) |
| 君島伸治 | Shinji KIMIJIMA | (中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所) |
| 石田慶一 | Keiichi ISHIDA | ((株)井木組) |
| 森脇桂二 | Keiji MORIWAKI | (美保テクノス(株)) |
| 北出圭介 | Keisuke KITADE | (中電技術コンサルタント(株)) |

鳥取県の西部、弓ヶ浜半島の北端に位置する境港は、自然条件に恵まれ波穏やかな良港として古くから知られ、境水道に面した内港地区を中心に繁栄してきた。戦後の復興を経て昭和40年代から大水深岸壁や広いふ頭用地を確保するべく、日本海側に向けた外港地区での港湾施設整備を展開している。外港地区での港湾利用にあたり、冬期風浪や台風等により発生する高波浪に対し、港内の静穏度を確保する必要があるため、延長4,150mの防波堤整備事業を進めている。

本工事報告は防波堤整備事業の概要と、現在整備中の防波堤延長区間120mについて、既設防波堤から見直した中間土地盤の設計せん断強度の適切な評価により地盤改良が不要となり建設コストが削減できたことに着目し、検討内容および整備状況について報告するものである。

キーワード：防波堤，地盤改良，堆積層，中間土層

(IGC : H07, K12)

1. はじめに

境港が位置する境港市は三方を中海、日本海、境水道に囲まれ、境港は北に位置する島根半島の恩恵により波穏やかな良港として古くから知られている。江戸時代から綿や鉄の移出で栄え、いわゆる千石船の往来でもにぎわった¹⁾。明治の開港後は阪神、山陽、九州の各経済圏からほぼ等距離にあり、北東アジアにも近い立地条件を生かし大陸貿易が急増、1927(昭和2)年に山陰地方貨物集積要地として第二種重要港湾の一つに指定、1951(昭和26)年に港湾法施行令により重要港湾に指定された。

港湾施設は境水道に沿った内港地区を中心に配置されていたが、船舶の大型化や貨物量の増大に伴い大水深岸壁の整備が必要となり、1968(昭和43)年から日本海側に面した外港昭和南地区の整備に着手し、1981(昭和56)年に石油ドルフィン、1984(昭和59)年には水深13m岸壁と水深10m岸壁が完成した。大水深岸壁の整備以前の状況として写真-1に、整備後の現在の状況を写真-2に示す。

平成に入り1995(平成7)年に輸入促進地域計画(境港FAZ計画)の承認を国から受けたことを契機に、中国と韓国を結ぶ二つの定期コンテナ航路が開設、1996(平成8)年に大規模地震発生時等の緊急物資輸送を担う水深7.5m

岸壁(耐震)が完成、2004(平成16)年に山陰地方で初めての国際コンテナターミナルの供用が開始された。

更に2016(平成28)年に、外港中野地区に主に境港の

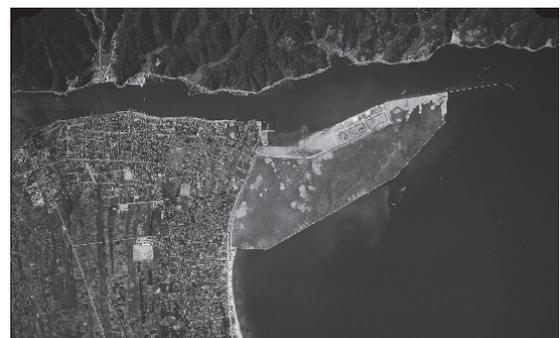


写真-1 昭和42年頃の境港(出典：国土地理院)



写真-2 現在の境港と周辺地域

大宗貨物である原木を取り扱う水深 12m の国際物流ターミナルが完成すると同時に、外港竹内南地区では新たな海上港湾物流を形成するとともに、近年寄港が急増している大型クルーズ船にも対応する水深 10m の貨客船ターミナルの整備が進められている。

以上のように近年の境港の港湾施設整備は日本海沿岸を南方向に展開しており、境港湾・空港整備事務所では港内静穏度を確保するため、延長 4,150m に及ぶ防波堤整備を進めており、ここではその整備状況を報告する。

2. 外港地区防波堤整備事業の概要

外港地区防波堤事業の概要を以下に示す。

- ・実施箇所：鳥取県境港市
- ・主な事業の諸元：防波堤、岸壁（水深 13m）、岸壁（水深 10m）、岸壁（7.5m）（耐震）、石油ドルフィン（水深 7.5m）
- ・事業期間：昭和 43 年度～平成 31 年度（予定）
- ・総事業費：458 億円



写真-3 境港の港湾施設整備状況

3. 事業の特徴

3.1 施設延長

本事業は昭和 43 年度から 50 年の長期間に渡り実施されているが、新たに整備された岸壁や埋め立て地を冬期風浪などから守るため、それらの整備順を追って防波堤の延長も伸びてきている。写真-3 に示す防波堤延長区間 120m については、2011（平成 23）年から工事に着手し、現在も事業中の区間である。

3.2 土質条件

境港が位置する弓ヶ浜半島は、日野川などからの土砂供給により堆積・形成されたと考えられており、堆積年代の

異なる地層が複雑に重なる互層となっている。整備する防波堤は弓ヶ浜海岸線から約 1km 沖に位置し、防波堤延長区間は図-1 に示すとおり互層であるとともに砂質とシルトが混ざり合う「中間土」が上層に存在することが確認された。

3.3 断面形状

防波堤延長区間の構造断面検討にあたり、この中間土の評価をいかに行うかが課題とされ、広島大学大学院工学研究院の土田教授のご支援を賜りつつ、防波堤の構造安定解析を行い、在来地盤中において周囲を拘束された状態の中間土の強度を適切に評価し、延長区間においてはこれまで必要とされてきた地盤改良を行わない断面を提案し、現地施工する運びとなった。

図-2 に示す断面は、海底地盤改良を伴う既設防波堤のものである。延長区間においては、図-3 に示すとおり海底地盤改良を伴わない断面で工事を実施しており、地盤改良を行ってきた既設防波堤と比べ建設費用を 10%以上節減することができた²⁾。

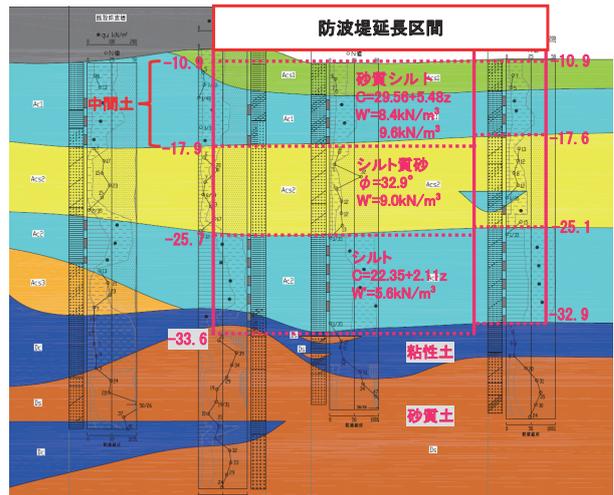


図-1 防波堤整備箇所の土質の概要

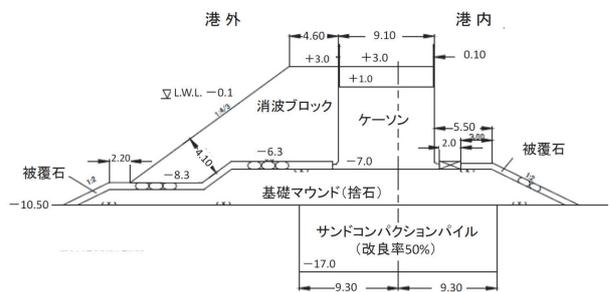


図-2 海底地盤改良を行った既設防波堤

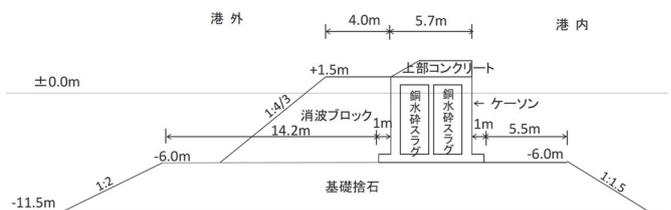


図-3 海底地盤改良を行わない防波堤延長区間

ここで、重力式防波堤の基礎地盤の設計は、港湾基準に示されている性能規定³⁾より、永続状態時の円弧すべり、変動状態時（波浪時）の支持力不足（偏心傾斜荷重による円弧すべり）による破壊の生じる危険性が限界値以下であることを照査した。図-4に基礎地盤の設計の流れを示す。

基礎地盤設計のための地盤定数は、単位体積重量、粘着力及び内部摩擦角であり、土質調査結果より設定した。ここで、土質調査結果より性能照査に用いる地盤定数を設定する際は、港湾基準に示されている「性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則」⁴⁾に基づき、地盤定数のばらつきやデータ数による補正係数を考慮している。

次に、本施設における設計の主な特徴を2つあげる。1つは、基礎地盤は粘性土地盤であるが上部のD.L.-10.9m～D.L.-17.6mの土層が中間土の性質を有していたことである。本防波堤の既設部では、この中間土を粘性土として、強度を一軸圧縮強度によって評価していた。この中間土で土層の強度不足のため、図-2のようにサンドコンパクションパイル工法で中間土である上部土層の地盤改良を行った後に、マウンドとケーソンを設置していた。本施設では、設計に先だって行われた土質調査において、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験による簡易CU試験を併用した強度評価⁵⁾を採用した。強度特性の評価結果については後述する。

2つ目の特徴は、当防波堤の構造形式を上部斜面堤としたことである。上部斜面堤は、波力が上部斜面に作用することで、波力を水平方向と鉛直下向き方向に分散する。鉛直下向きの波力による荷重により摩擦抵抗力を増大させて堤体の安定性向上を図ることができるが、底面反力が大きくなり、変動状態（波浪時）における偏心傾斜荷重の検討で不利になる場合がある。中間土の強度を設定するに当たり、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験による簡易CU試験を併用した強度評価⁵⁾を採用したことで、 q_u 法では基礎地盤の強度を著しく過小評価することになるのが確認出来、簡易CU試験による強度を採用した。このように中間土の強度評価を見直したことで、波圧時に中間土に作用する偏心傾斜荷重に対する地盤の耐力が向上し、作用する波圧時の安定性に十分余裕があることが分かった。すなわち、断面幅を大きくすることで、底面反力の荷重分散幅も大きくして地盤に作用する偏心傾斜荷重の低減を図っていたが、地盤の耐力が向上したことで、偏心傾斜荷重による安定性も向上し断面幅を縮小できた。さらに、永続状態についても安定性が向上した。

参考までに、同一深度における一軸圧縮試験と簡易CU試験の応力ひずみ曲線を図-5に比較して示す。中間土の試料は、簡易CU試験において圧縮ひずみとともに軸差応力の増加が続いているが、一軸圧縮ひずみでは軸ひずみ3～4%までは強度が増加するが、その後の強度増加が見られない。一方、下部粘性土層の試料では、簡易CU試験の強度は一軸圧縮強度よりもやや大きく破壊ひずみも小さいが、その差は30%程度である。次に、設計せん断強度を一軸圧縮試験と簡易CU試験を併用する方法を用い、簡易

CU試験の75%である $0.75s_{u(SCU)}$ として決定した結果を図-6に示す。図中には一軸圧縮強度 q_u の1/2の平均値を設計せん断強度としたときの結果も比較のため示している。

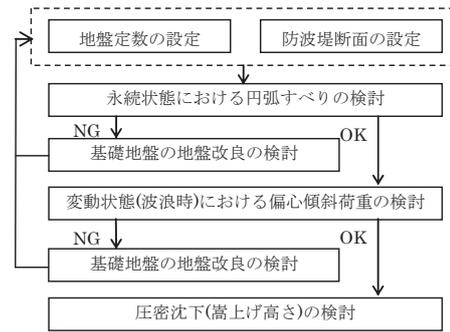


図-4 防波堤基礎地盤の設計の流れ

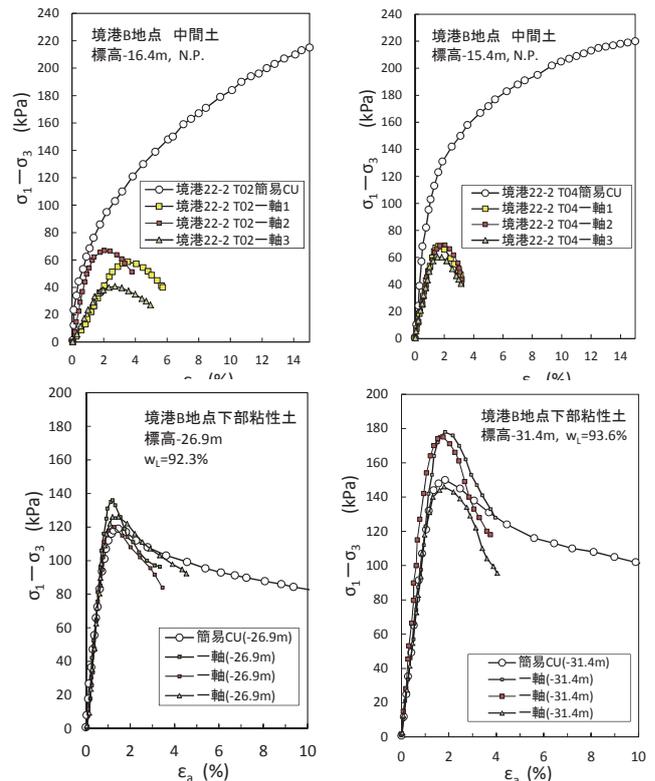


図-5 簡易CU試験と一軸圧縮試験における応力ひずみ曲線（B地点：防波堤延長区間120m）²⁾

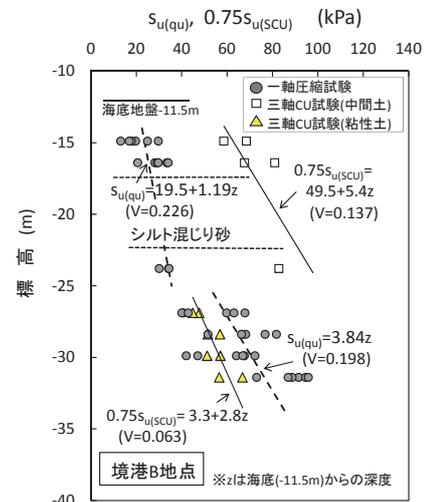


図-6 せん断強度の平均（B地点：防波堤延長区間120m）²⁾

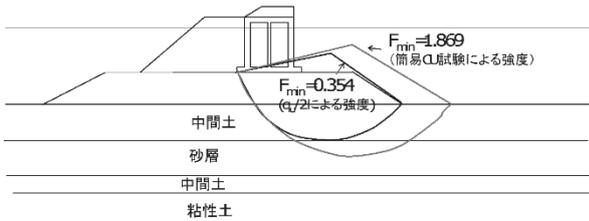


図-7 永続状態における円弧すべりの比較²⁾

図に示すように、上部中間土層については $0.75s_u(s_{CU})$ は一軸圧縮強度の平均の2倍以上となっている。

また、 q_u 法による強度と簡易 CU 試験による強度の円弧すべりの結果図を図-7 に示す。基礎地盤の地盤改良を行うことなく永続状態の円弧すべりの安定性を満足できたことがわかる。

なお、本節の詳細は土田らの文献²⁾を参考にされたい。

4. 工事の施工と現況

4.1 基礎捨石マウンドの余盛り

施工に先立ち最終沈下量（約 50 年）を見込んだ基礎捨石マウンドの余盛り量を設定している。防波堤延長区間においては既設防波堤の沈下状況も鑑み、計算で求められた最終沈下量 80cm に対して 50cm の余盛りを行うこととした。

4.2 基礎捨石マウンドの施工手順

基礎捨石マウンドは、余盛りも含めて約 6m の厚みとなったが、そのうち約 4m を先行投入し、沈下を早期に発生させ防波堤設置後の沈下量の抑制を図っている。基礎捨石の先行投入は 2012（平成 24）年 4 月から 5 月に延長全区間について行い、ケーソン据付直前に据付区間の完成投入と本均しを行う計画としており、これまでの施工は同年 7 月に 4 函、2013（平成 25）年 7 月に 3 函、2015（平成 27）年 9 月に 3 函行っている。

4.3 現地施工

4.3.1 基礎捨石マウンド

基礎捨石マウンドで使用した石材は、島根県隠岐郡隠岐の島町の比重 2.5 以上の硬石で、粒径は（10～200kg/個）である。捨石は、石材運搬船から直接投入とし、投入管理は潜水士が石材運搬船上でレッド管理を行った。投入中は、石の粒度がかたよらないよう注意しながら投入した。捨石投入状況を写真-4、5 に示す。捨石本均しは、潜水士（船）にて鋼製定規を使用し、表面に大石（100～200kg/個）を組み合わせて張り詰め、その隙間には（10～50kg/個）を目潰しに充填し、緩みのないよう堅固に仕上げた。

4.3.2 ケーソン据付

ケーソン（397t/函）は、写真-6 に示すように大型起重

機船を用いて製作ヤードから吊り出し、据付場所まで曳航・据付（チルホール併用）を行った。据付に先立ちケーソンに異常がないことを確認し吊上げ直後は、底版部に付着物が無いことを確認した。据付直前にケーソン漏水有無の確認を行い、その後、ケーソン隔室の水頭差を 1m 以内とするよう注水した。また、据付時は据付済みケーソンとの接触防止としてケーソン同士の接触面となる港外側及び港内側の水上部と水中部（フーチング部）に緩衝材を設置し損傷防止を図った。ケーソン据付直後は構造上最も不安定な状態となるため速やかに根固方塊を順次据付けた。尚、現場は米子鬼太郎空港が隣接しているため航空制限があり、大阪航空局及び航空自衛隊美保基地と協議のうえ、ケーソン据付一連作業において、大型起重機船の作業区域及びシアーストップ高に作業限界値を設定し全作業員に周知徹底し作業を進捗させた。

4.3.3 中詰材投入

中詰材は銅水砕スラグを採用しており、製造会社はパンパシフィック・カッパー株式会社佐賀関製錬所（所在地：大分県大分市大字佐賀関）である。銅水砕スラグの規格は有害な物質を含まない単位体積重量 23kN/m^3 （湿潤飽和状態）以上である。中詰材は、写真-7 に示すように石材運搬船から直接投入とし、投入中はレッドで中詰材の高さ管理を行い、投入時は隔室内からの濁水が流失しないよう注意した。濁り拡散防止対策として水質汚濁防止枠を使用し、写真-8 に示すようにケーソン隔室内からの濁水を水中ポンプで水質汚濁防止枠内に流入させた。また、中詰材は、ケーソンに偏荷重が生じ不等沈下しないようケーソン中心を目標に投入し、人力による中詰均しを行った。中詰完了後、蓋コンクリート打設のため、台船に積込んだ生コンバケットを曳船で所定の場所まで曳航し、生コン打設用のクレーン付台船に台船を接舷させ、クレーン付台船で生コンを速やかに打設した。

4.3.4 上部コンクリート打設

上部コンクリートに用いた生コンは、打設数量が少ないこともありコンクリートミキサー船は使用せず、生コン工場からの供給とし、上部工型枠組立完了後、アジテーター車から生コンバケットに直接入れてラフタークレーンで台船に積込み、所定の場所まで曳航し、写真-9 に示すようにクレーン付台船に台船を接舷させクレーン付台船で生コンを打設した。打設時期が暑中であること、並びに、現場が沖合であることから運搬時の養生や練り混ぜから打設完了までの時間管理を慎重に行った。まず、生コン工場と打合せを密にしてアジテーター車 1 台毎に打設時間の管理を行うこととし、海上運搬時間を短縮するため、台船は 2 隻を投入した。積み込み運搬時の養生として生コンバケットの上に養生シートを設置し海上運搬することで生コンの急激なスランプ低下を防いだ。生コン打設にあたっては、上部工重量増加に伴うケーソンの傾きを抑制するため、ケーソン据付高さの高い箇所から打設し、ケーソン本体が極力水平となる打設順序とした。なお、上部コンクリートの構造は、ケーソン 1 函当り延長方向に 2 分割する



写真-4 捨石投入状況 1



写真-5 捨石投入状況 2



写真-6 ケーソン据付状況



写真-7 中詰材投入状況



写真-8 ケーソン隔室内排水状況



写真-9 上部コンクリート打設状況



写真-10 現在の状況 (2017年5月撮影)

ものであり、波圧低減のため、港外側は1:1の勾配を持った斜面形状であった。

4.4 ケーソン据付後の動態観測

ケーソン据付開始から現在まで約5年を経過している。現在の状況は写真-10の通りである。また、ケーソン据付位置の平面図を図-8に、2017(平成29)年5月に行ったケーソンの動態観測結果を図-9に示している。なお、据付時期は、No.1~No.4のケーソン、No.5~No.7のケーソン、No.8~No.10のケーソンで異なるため計測時期や累積日数も異なっている。観測結果によると各ケーソンの高さは、据付時にはDL+2.0m程度であったが、据付から1,700日以上経過しているNo.1からNo.4のケーソンは約60cm、据付から1,300日程度のNo.5からNo.7は約50cm、600日程度のNo.8からNo.10は約30cmの沈下がそれぞれ観測された。

観測された沈下は、上部中間土層と下部粘性土層の圧密沈下であると考えられる。設計では、圧密係数の大きい上部中間土層では即時沈下に近く、下部粘性土層はゆっくりと圧密沈下すると予測され、予測沈下量は5年間(1826

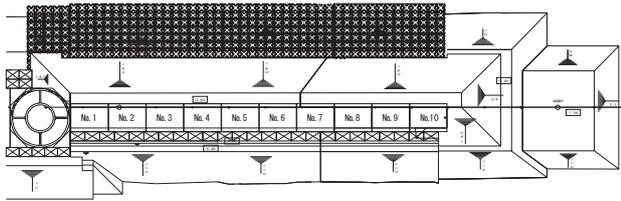


図-8 ケーソン据付位置平面図

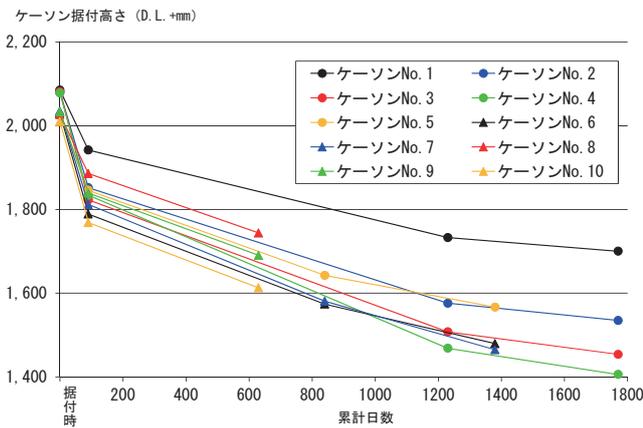


図-9 据付後の沈下量累積グラフ

日)で70cm程度であった。観測値にはばらつきがあるが、ほぼ予測沈下量に近い値となっている。

なお、ケーソンの傾きは据付時には約0.05度であったが、今回の観測では約0.1度と若干の増加が見られたが、ほぼ水平な状態を保っている。

5. まとめと今後の予定

今回の工事では、砂質土と粘性土の中間土について強度評価を見直しし、地盤改良を不要とするなど、従来の断面に比べて建設費用の10%以上の節減に成功している。工事の実施にあたっては、従来の構造と同様な作業が可能であることが確認され、据付後の動態観測においても健全な状態が確認されている。

現在の事業計画ではケーソン据付が3函残っており、この工事についても本報告と同様な実施を計画しており、外港竹内南地区で進められる貨客船ターミナル整備と歩道を合わせ境港の港湾物流機能向上を図っていくこととしている。

謝辞

本事業の実施にあたっては、中間土の適切な評価を行ううえで広島大学大学院工学研究院の土田教授にご教示頂くとともに、現地の施工にあたっては、鳥取県漁業協同組合をはじめ、地元の方々に多大なるご協力を頂いた。本誌面をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 境港今と昔、境港市、昭和59年3月。
- 2) 土田孝、今村俊博：防波堤建設工事における中間土地盤の設計強度の評価、地盤工学ジャーナル、Vol.8, No.1, pp1-14, 2013。
- 3) 港湾の技術上の基準・同解説(平成19年7月)、社団法人日本港湾協会、p.822, 2007。
- 4) 港湾の技術上の基準・同解説(平成19年7月)、社団法人日本港湾協会、pp.294-295, 2007。
- 5) 土田孝、水上純一、及川研、森好生：一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法、港湾技術研究所報告、第28巻第3号、1989。

(2017年6月19日 受付)