

国際沿岸技術研究所の活動について（2024 年度）

横田 弘*・平石 哲也**・佐藤 昌宏***

* （一財）沿岸技術研究センター 参与 国際沿岸技術研究所長

** （一財）沿岸技術研究センター 参与

*** （一財）沿岸技術研究センター 主席研究員

本稿では、2024 年度（令和 6 年度）に実施した、港湾に関する ISO 国際規格の制定動向等の情報収集、SATREPS における総合研究の実施、および海外の基準類における基礎地盤の支持力評価についての概要を報告する。

キーワード：ISO, 国際規格, SATREPS, 災害リスクの軽減, 基礎地盤の支持力評価

1. はじめに

我が国の港湾を取り巻く情勢は、東南アジアをはじめとする新興市場の拡大と生産拠点の南下、アジアのクルーズ市場の急成長、一帯一路構想等の交通戦略、パナマ運河や北極海航路の利用拡大等、貿易および物流の両面で大きく変化し続けている。また、デジタル・トランスフォーメーションによる生産性の向上や脱炭素化等のグローバルな環境への対応もますます重要になっている。

2022 年 4 月に国土交通省が策定した令和 8 年までを計画期間とする「第 5 期技術基本計画」において、戦略的に取り組むべき 6 つの重点分野の技術研究開発や技術基準の策定等が示されている。また、これらを推進する仕組みとしての横断的施策の一つに、我が国の技術の強みを活かした国際展開が挙げられており、国土交通省インフラシステム海外展開行動計画とも相まって、当センターにおいても業務遂行における国際的な視点がますます重要となっている。

これらを受けて当センターでは、既存施設の改良、大規模地震や高潮災害に対する施設の強靱化、産業副産物の利活用、大規模橋梁の建設、維持管理における新技術の適用、洋上風力発電設備などの技術課題に取り組んでいる。国際沿岸技術研究所では、上述の課題の中で、特に技術基準等の国際標準化に関わる諸課題の検討、港湾建設・維持管理技術の海外展開に資するための活動を推進している。

本稿では、国際沿岸技術研究所の 2024 年度における活動の概要を報告するが、研究所組織としての包括的な取り組みは行わなかった。一方で、ISO における国際規格の動向調査、SATREPS 北中米太平洋沿岸における巨大地震・津波複合災害リスク軽減に向けた総合研究、基礎地盤の支持力評価法の比較を行ったので、これらの概要について報告する。

2. 国際規格の動向

国際標準化機構（ISO：International Organization for Standardization）は各種の国際規格を策定している。また、日本が 1995 年に批准した TBT 協定では、国内規格の制定にあたっては国内規格と国際規格の整合性を図ることなどが求められている。そのため、港湾技術基準をはじめとする各種規格の策定にあたっては国際規格の策定状況に注意を払う必要がある。

本稿では、2025 年 3 月に土木学会 ISO 対応特別委員会が発行した土木 ISO ジャーナル¹⁾等から、2024 年度に発行された規格および現在開発中の ISO 規格のうち、センターに関する主要な規格の状況について抽出して紹介する。なお、本稿で用いている略号の定義・意味は次のとおりである。

TMB：技術管理評議会（Technical Management Board）
 TC：専門委員会（Technical Committee）
 WG (Working Group)：作業グループ
 AHG：アドホック（特設）グループ（Ad Hoc Group）
 PWI：予備業務項目（Preliminary Work Item）
 NP：新業務項目提案（New work item Proposal）
 AWI：承認業務項目（Approved Work Item）
 WD：作業原案（Working Draft）
 CD：委員会原案（Committee Draft）
 DIS：国際規格案（Draft International Standard）
 FDIS：最終国際規格案（Final Draft International Standard）
 DTS：技術仕様書案（Draft Technical Specification）
 TS：技術仕様書（Technical Specification）
 TR：技術報告書（Technical Report）
 SR：定期見直し（Systematic Review）
 Amd：修正（Amendment）

2.1 構造物の設計

構造物の設計の基本に関しては、ISO/TC 98（Bases for design of structures）において規格化の検討が行われており、一般社団法人建築・住宅国際機構が国内審議団体を務めている。

現在、ISO/WD TR 21259（ISO 23618 に基づく免震

設計例)の開発が日本の主導で進められている。ISO/CD 4354 (構造物への風作用)は, SR 投票を受けて改定することとなり, 検討の結果改定案が NP 登録され, CD 段階に進んでいる。ISO/AWI 23469 (地盤基礎構造物への地震作用)は, 2005 年発行の同規格の改定が日本の主導で進められている。ISO/PWI 3010 (構造物への地震作用)は, SR を受けての改定が本格的に始まる状況である。また, 津波作用に関する規格化の検討が国内の WG (主査: 富田教授・名古屋大学) で進められており, まもなく PWI として登録される予定である。その他, 主に建築物を対象とする規格の改定が進められている。

2.2 地盤工学

ISO/TC 182 (Geotechnics), TC 190 (Soil quality), TC 221 (Geosynthetics) では, 地盤分野の規格化の検討が行われており, 公益社団法人地盤工学会が国内審議団体を務めている。

(1) 地盤工学

地盤工学に関しては, ISO 22476-16 (地盤調査と試験法—原位置試験—第 16 部: 孔内せん断試験; 2024 年 10 月) が新たに発行された。

ISO/DIS 16383-1 (地盤調査と試験法—岩石の室内試験—第 1 部: 含水比の測定), ISO/WD 16383-2 (同一第 2 部: かさ密度の測定), ISO/WD 16383-3 (同一第 3 部: 一軸圧縮強度と変形性の測定), ISO/AWI 16383-4 (同一第 4 部: 平坦な岩石表面の摩擦角の測定), ISO/AWI 17892-13 (地盤調査と試験法—土の室内試験—第 13 部: 土, 硬い土及び軟岩の膨張試験—単一の試験片を使用した繰返し法の手順), ISO/CD 18674-6 (同一現場計測による地盤工学的モニタリング—第 6 部: 沈下の測定: 水圧沈下システム), ISO/FDIS 18674-7 (同一第 7 部: ひずみの測定: ひずみゲージ), ISO/CD 18674-9 (同一第 9 部: 測地学的手段による変位の測定), ISO/DIS 22477-6 (同一地盤構造物の試験法—第 6 部: 鉄筋挿入工とロックボルトの載荷試験) の開発が進められている。

(2) 地盤環境

ISO 8259 (土の品質—汚染された土および土系材料からの有機および無機汚染物質のバイオアクセシビリティ; 2024 年 7 月), ISO 11074 (同一用語; 2025 年 3 月), ISO 11277:2020/Amd 1 (同一無機質土の粒径分布の定量—ふるい分けおよび沈降による方法—修正 1; 2024 年 6 月), ISO 13536 (同一 pH=8.1 に緩衝された塩化バリウム溶液を使用した潜在的な陽イオン交換容量と交換可能な陽イオンの測定), ISO 17126 (同一土の植物相に対する汚染物質の影響の測定—レタス苗の出芽に関するスクリーニング試験; 2024 年 10 月), ISO 18187 (同一 *Arthrobacter globiformis*

のデヒドロゲナーゼ活性を使用した固体サンプルの接触試験; 2024 年 5 月), ISO 23611-2 (同一土の無脊椎動物のサンプリング—第 2 部: 微小節足動物のサンプリングと抽出), ISO 23611-5 (同一第 5 部: 土の大型無脊椎動物のサンプリングと抽出; 2024 年 8 月), ISO 24212 (汚染現場に適用される修復技術; 2024 年 9 月) が新たに, あるいは既存規格の改定版として発行された。

上記に加えて, 地盤環境等に関係する化学・生物学的観点等からの多数の規格が審議されているが, 詳細は省略する。

(3) ジオシンセティック

ジオテキスタイル, ジオメンブレンおよびジオシンセティック関連製品は, 防砂シートや遮水シートなどとして港湾でも多用されており, 今後とも国際規格の動向に注目する必要がある。

ISO 10319 (ジオシンセティックス—広幅引張試験; 2024 年 10 月), ISO 12957-2 (同一摩擦特性の測定—第 2 部: 傾斜試験; 2024 年 12 月), ISO 13428 (同一衝撃に対するジオシンセティックスの防護能力測定; 2024 年 10 月), ISO/TR 18228-5 (ジオシンセティックスを用いた設計—第 5 部: 安定化; 2025 年 1 月), ISO/TR 18228-10 (同一第 10 部: アスファルト舗装; 2024 年 5 月), ISO 13426-2 (ジオテキスタイルおよびその関連製品—剥離強度—第 2 部: ジオコンボジット; 2024 年 6 月) ISO 13431 (同一引張クリープおよびクリープ破断特性の測定; 2024 年 8 月) が新たに, あるいは既存規格等の改定版として発行された。

上記に加えて, ISO/DIS 12236 (ジオシンセティックス—静的貫入試験 (CBR 法)) 等の規格開発が進められている。

2.3 コンクリート工学

コンクリート, 鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートに関しては, ISO/TC 71 (Concrete, Reinforced Concrete and Prestressed Concrete) において規格化の検討が行われており, 公益社団法人日本コンクリート工学会が国内審議団体を務めている。

(1) 試験方法

ISO/CD 23945-2 (吹付けコンクリートの試験方法—第 2 部: フレッシュおよび硬化コンクリートの試料採取) および ISO/CD 23945-3 (同一第 3 部: 圧縮強度の測定方法) の開発が進められている。加えて ISO 1920-3 (コンクリートの試験方法—第 3 部: 供試体の作製と養生の方法) 他 8 規格の改定が検討されている。

(2) 製造・施工

ISO 12439 (コンクリート用練混ぜ水) は改定が進められ, 2025 年 3 月に発行された。また, ISO/DIS

18985 (コンクリート用再生骨材), ISO/DTS 21056 (再生骨材コンクリート仕様, 性能及び生産に関する追加規定とガイダンス), ISO/PRF 22965-1 (コンクリート第1部:仕様書作成方法), ISO/DIS 22965-2 (同一第2部:構成材料の仕様並びにコンクリートの製造及び適合性)の開発が進められている。

(3) 設計および性能規定

ISO 19338 (構造物用コンクリート設計基準の性能要求基準)はSRを受けた改定が終了し, 2025年3月に発行された。また, ISO 16521 (コンクリート充填鋼管複合構造の設計)が2024年9月に新たに発行された。現在, この規格に基づく設計事例 (ISO/DTR 25439)の作成が進められている。

ISO/AWI 22556 (コンクリート造建物の性能照査型簡易耐風設計法)の開発が, また, ISO/CD 18407 (水道用PCタンクの簡易設計法)の改定が日本主導で, さらにISO/AWI 28841 (コンクリート造建物の簡易耐震診断・耐震補強法)の改定が進められている。ISO 18408 (壁式鉄筋コンクリート造建築物の簡易構造設計)はSRを受けた改定が検討されている。

(4) 非鉄補強材料

ISO 19044 (繊維補強セメント複合材料の試験方法一切欠き梁による荷重-変位曲線)は改定が終了し, 2024年12月に発行された。

ISO/DIS 10406-4 (FRPによるコンクリートの補強-試験方法-第4部:FRPグリッド), ISO/CD 13180-1 (ひずみ硬化型セメント系複合材料の直接引張試験法), ISO/DIS 13182 (繊維補強セメント複合材に用いる合成短繊維の規格), ISO/AWI 13197 (FRPによるコンクリート構造物の補強-FRP棒材及びFRPグリッドの仕様)の規格開発が進められている。

ISO/DIS 10406-1 (FRPによるコンクリートの補強-試験方法-第1部:FRP棒材), ISO/DIS 10406-2 (同一第2部:FRPシート), ISO/PWI 18319-1 (コンクリート構造物のための繊維強化ポリマー (FRP) 補強-第1部FRPシートの仕様)は, SRを受けて改定が進められている。また, ISO 10406-3 (FRPによるコンクリートの補強-試験方法-第3部:CFRP帯板)およびISO 21914 (繊維補強セメント系複合材料の試験方法-4点曲げ試験による曲げモーメント-曲率)は, SRを受けて改定が検討されている。

(5) 維持・補修

ISO 16311-1 (コンクリート構造物の維持補修-第1部:一般原則)は改定が終了し, 2024年5月に発行された。ISO/TS 16774-1 (地下コンクリート構造物のひび割れに対する漏水補修材に関する試験方法-第1部:熱的安定性に関する試験方法), ISO/TS 16774-5 (同一第5部:水密性の試験方法), ISO/TS 16774-6 (同一第6部:下地追従性に関する試験方法)も改

定が終了し, 2024年8月に発行された。

ISO/DIS 18726 (コンクリート中の鋼材腐食に対する評価・予防及び補修), ISO/AWI 13117 (火害を受けたコンクリート構造物の診断・補修), ISO/CD TS 18734 (地下構造物におけるエラストマーを用いた防水に関するガイドライン)の開発が進められている。

(6) 環境マネジメント

ISO 13315-2 (コンクリート及びコンクリート構造物の環境マネジメント-第2部:システム境界とインベントリデータ)はSRを受けて改定が進められ, 2025年1月に発行された。

また, ISO/DIS 13315-5 (コンクリート及びコンクリート構造物の環境マネジメント-第5部:コンクリート構造物の施工), ISO/CD 13315-7 (同一第7部:コンクリート構造物の最終段階), ISO/WD 21282-1 (コンクリート及びコンクリート構成材料に固定化した二酸化炭素の評価-第1部:一般原則), ISO/WD 21282-2 (同一第2部:酸分解-逆滴定法), ISO/WD 21282-3 (同一第3部:熱分解-重量測定法),の開発が進められている。また, ISO/AWI 13315-8 (コンクリート及びコンクリート構造物の環境マネジメント-第8部:環境ラベリング)の改定が進められている。

(7) ライフサイクルマネジメント

ISO 22040-2 (コンクリート構造物のライフサイクルマネジメント-第2部:構造計画・設計段階; 2024年5月)およびISO 22040-3 (同一第3部:施工段階; 2025年3月)が新たに発行された。これらはいずれも, 日本が主導して開発を進めてきた規格である。現在ISO 22040-4 (同一第4部:使用段階)の原案作成が国内委員会において進められている。

(8) コンクリート用語

日本から提案したコンクリート用語に関する規格開発としてISO/PWI 25511-1 (コンクリート用語-第1部:用語の分類についての原則)の開発が, TC71直下に設置されたAHGにて進められている。

(9) 非破壊試験法

第29回ISO/TC 71全体会議 (2024年11月22日開催)においてコンクリートおよびコンクリート構造物に適用する非破壊試験方法の規格化を進めることが提案された。議論の結果, 規格の適用範囲, 規格化を行う試験法の選定および規格開発の受け皿となる組織を議論するためのAHGを組織して検討することが同会議において合意された。

2.4 鋼構造

鋼構造に関しては, ISO/TC 167 (Steel and aluminium structures)において規格化の検討が行われており, 一般社団法人日本鋼構造協会が国内審議団体を務めて

いる。

ISO/DIS 18900 (構造用ボルト接合—接合面のすべり係数を求める試験方法), ISO/DIS 18953 (構造用ボルト接合—接合面の被覆に伴うプリテンション損失を測定する試験方法), ISO/DIS 18954 (構造用ボルト接合—ボルトの締付け手順確立のための試験方法), ISO/CD 19998 (構造用ボルト締付けに関する調整—任務と責任), ISO/NP 20895 (耐震鋼構造物に用いる溶接継手の性能) の規格開発が現在進められている。

2.5 港湾およびターミナル

2024 年 9 月開催の TMB 会議における決議 (TMB 決議 87/2024) を受けて, 2025 年 1 月に ISO/TC8/SC27 (Ports and terminals) が新たに設置された (幹事国: 中国)。本分科会における業務範囲 (Scope) 等については今後順次決定されていくことになるが, 現段階では主に次の項目についての ISO 規格開発が計画されている: 港湾およびターミナルの設計指針, 各種ターミナルの運用指針, バース計画・ヤード計画等の策定指針など。

我が国も国内審議団体を組織して, 積極的に関与していく予定であり, 当センターも協力していきたいと考えている。

3. SATREPS 北中米太平洋沿岸における巨大地震・津波複合災害リスク軽減に向けた総合研究

3.1 概要

SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development, 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム) は, 科学技術と外交を連携し相互に発展させる「科学技術外交」の一環として, 地球規模の課題解決を目指す国際共同研究である。当センターでは, 令和 6 年度から, 京都大学防災研究所の「SATREPS 北中米太平洋沿岸における巨大地震・津波複合災害リスク軽減に向けた総合研究 (令和 6 年度～10 年度, 代表中野元太准教授) に参画し, 津波被害軽減技術開発に取り組んでいる。

3.2 対象港湾

令和 6 年 11 月 5 日～14 日に津波リスクの高いメキシコ国太平洋岸およびメキシコシティにあるメキシコ自治大学 (現地カウンターパート) を見学した。プロジェクトの対象サイトであるメキシコのマンサニーヨ港は, 太平洋岸に位置することから, アジアとの重要な貿易窓口となっている。取扱うコンテナ貨物量は年間約 370 万 TEU (2023 年) で, メキシコ国内で最も多く, 中南米地域ではパナマのコロン港とブラジルのサントス港に次ぐ 3 番目の規模となる。

このように重要な港が地震・津波によって被害を受ける場合, 想定される複合災害 (二次災害, 経済被害) は甚大となることが想定され, それを未然に防ぐことが重要となっている。

現地では, マンサニーヨ港湾管理局とも意見交換し, 今後ともプロジェクト活動に協力頂くことを再確認した。また, メキシコは米国市場とも近いことから, メキシコに進出した多くの日本企業がマンサニーヨ港を利用しており, このような日本企業を抱えるメキシコ日本商工会議所とも意見交換を行った。図-1 にマンサニーヨ港の位置を, また図-2 に現況港形を示す。



図-1 マンサニーヨ港の位置

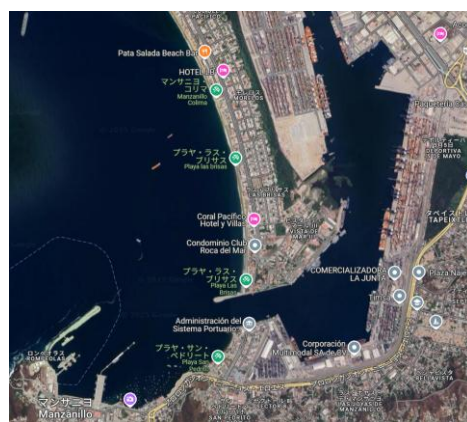


図-2 マンサニーヨ港の現況港形

3.3 提案技術

大規模な津波対策技術として幅 200 m の港口部に可動型の津波防波堤を設置できるのではないかと, という基本構想を提案した。これは, 流起式可動型津波防波堤と呼ばれ, フィン形式のフローターが常時は海底に沈んでいて, 津波による早い流速を受けた時にフィンが立ち上がって水路を閉鎖するものである。動力は必要とせず, 全く自然に立ち上がり, 津波が引き波になった時点で反対側からの流れでも立ち上がり, 港内からのコンテナや家屋の外海への流出を防ぐことができる。図-3 に流起式可動型津波防波堤の

イメージを示す。

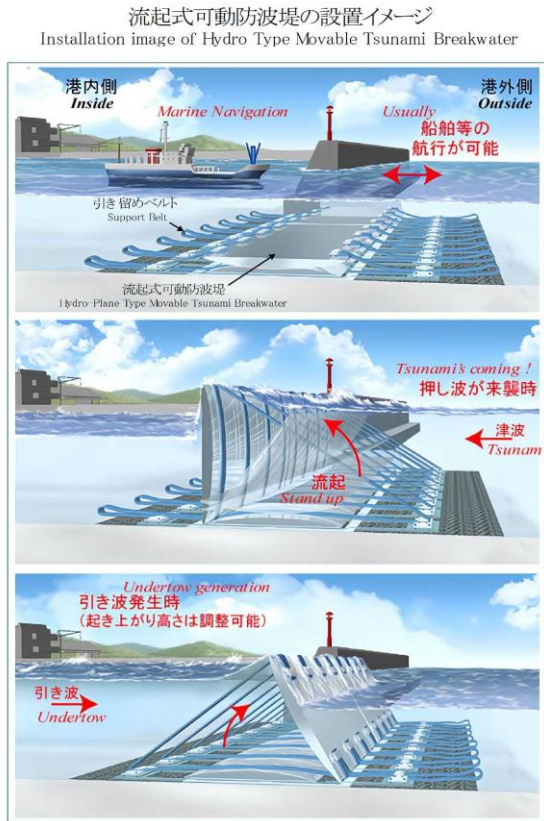


図-3 流起式可動型津波防波堤のイメージ

3.4 今後の予定

令和 7 年度以降は、外力レベルに対応でき、廉価で設置できる小型防潮堤やカウンターウェイトブロック等を考案していく予定である。

4. 国内外の基礎地盤の支持力評価方法

4.1 概要

重力式港湾構造物（ケーソン式防波堤）の支持力評価方法について、日本の方法（簡易ビショップ法）と海外での支持力計算式（Eurocode 7）を示した上で例題を用いた比較を行い、両手法による相違点や設計断面に及ぼす影響を確認する。

4.2 支持力評価方法

(1) 簡易ビショップ法

日本では、重力式構造物の基礎地盤に作用する偏心傾斜した作用に対する支持力の検討は、簡易ビショップ (Bishop) 法による円弧すべり解析によって行うことができる。部分係数の一般的な値を表-1 に示す。

表-1 簡易ビショップ法を用いる際の調整係数 m

	係船岸等	防波堤
永続状態	1.2 以上	—
レベル 1 地震動に関する変動状態	1.0 以上	—
波浪に関する変動状態	—	1.0 以上

日本では、偏心傾斜した力が作用する場合に対しては簡易ビショップ法による円弧すべり解析が用いられている。すべり面の始点は、図-4 に示すように、荷重の着力点に対して近い方の基礎の端と対称の点とする。この場合、壁体底面への鉛直方向の作用は、壁体底面前趾とすべり面の始点の間に作用する等分布荷重に換算する。水平力は壁体底面に作用させる。ただし、地震動作用時の計算に際しては、マウンドおよび地盤には地震動による作用を考慮しないものとする。

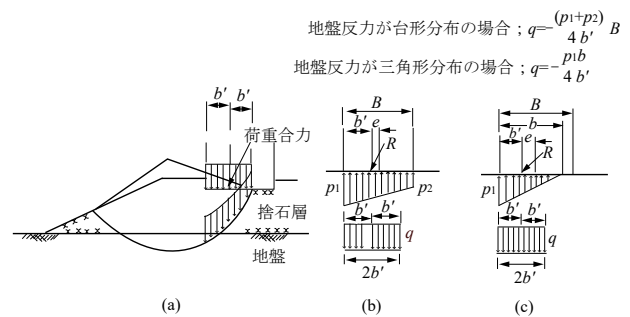


図-4 偏心傾斜した作用の支持力解析

日本において、捨石の強度定数を正確に推定するには相似粒度の試料を用いた三軸圧縮試験を実施することが望ましいとされている。一方、強度試験を行わない場合には、一般に用いられている通常の捨石に対する標準的な強度定数として粘着力 $c_D=20$ kN/m²、せん断抵抗角 $\phi_D=35^\circ$ の値が特性値として用いられている。

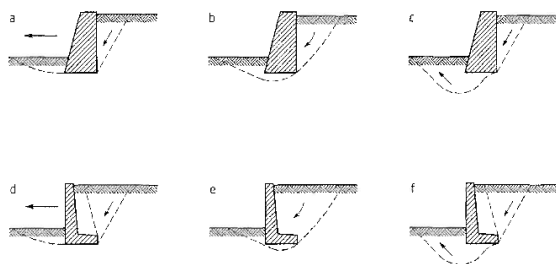
一般に、基礎地盤の ϕ_D については、これまでの被災例の逆解析結果や、多くの場合偏心傾斜した作用の支持力が永続状態ではなく波浪や地震動などの動的な作用に対して性能照査上問題となることを考題して、一般に、以下の値が特性値として用いられている。

N 値が 10 未満の砂質土地盤： $\phi_D=40^\circ$

N 値が 10 以上の砂質土地盤： $\phi_D=45^\circ$

(2) BS EN 1997-1 (Eurocode 7)

重力式岸壁の安定性照査に用いられる、BS EN 1997-1, Eurocode 7. Geotechnical design - Part 1: General rules に示される方法を以下に示す。図-5 に基礎破壊モードの例を示す。

図-5 重力式擁壁の基礎破壊に関する限界モード例²⁾

設計において、壁体の支持力は、 $V_d < R_d$ を満たすことを照査する必要がある。ここで、 V_d は基礎の重量、裏込め材の重量、載荷重、土圧、水圧、壁体に加わる係留荷重や地震荷重などの合計値とする。一方、 R_d はこれらの荷重に対して基礎が抵抗する設計支持力である。

支持力の照査に加えて、基礎沈下量の推定とその許容値以内であることを照査する必要がある。BS EN 1997-1 の付属書 D.3²⁾では、支持力係数 (N_c, N_q, N_r)、基礎傾斜係数 (b_c, b_q, b_r)、形状係数 (s_c, s_q, s_r)、荷重傾斜係数 (i_c, i_q, i_r) を考慮した設計支持力 R/A' の算定式が図-6 に示すように提示されている。

BS EN 1997-1 の式は、Meyerhof³⁾の古典的な支持力式に準拠しており、基礎傾斜係数や荷重傾斜係数など、各種の係数が追加されてきた⁴⁻⁷⁾。さらに、BS 8004 では、深さ係数 (d_c, d_q, d_r)、地表面傾斜係数 (g_c, g_q, g_r)、剛性係数 (r_c, r_q, r_r) が追加されており、詳細かつ精緻な算定式へと発展している⁸⁾。

一方で、BS EN 1997-1 や BS 8004 の支持力公式は、二層地盤への適用例が提示されていない点、また粘土地盤の強度増加を考慮することができない点に特徴があり、これらは簡易ビショッブ法と異なる点である。

4.3 例題を用いた支持力算定式の特徴比較

(1) 検討条件

比較計算を行うにあたり、港湾構造物設計事例集(ケーソン式防波堤、波浪時)に示すケーソン幅、荷重作用(鉛直合力)を共通条件として設定した。また、単純な感度分析を行うため、BS EN 1997-1 は「設計支持力の全抵抗力に関する特性値(R_k)／全鉛直力の特性値(V_k)」を評価指標とし、簡易ビショッブ法は「安全率=全抵抗力／全作用力」を指標として評価した。

(2) 検討ケース

<CASE 1> (図-7)

- ・ 地盤条件： 水平・単層地盤

地盤パラメータは $\phi_0=30, 35, 40, 45^\circ$ および $c_D=20$ kN/m^2 と $\phi_0=35^\circ$ (簡易ビショッブのみ) の 5 種類

D.3 Undrained conditions

(1) The design bearing resistance may be calculated from:

$$R/A' = (\pi+2) c_u b_c s_c i_c + q$$

with the dimensionless factors for:

— the inclination of the foundation base: $b_c = 1 - 2\alpha / (\pi + 2)$;

— the shape of the foundation:

$$s_c = 1 + 0.2 (B'/L'), \text{ for a rectangular shape;} \\ s_c = 1.2, \text{ for a square or circular shape.}$$

— the inclination of the load, caused by a horizontal load H :

$$i_c = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A' c_u}} \right)$$

with $H \leq A' c_u$.

D.4 Drained conditions

(1) The design bearing resistance may be calculated from:

$$R/A' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0.5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

with the design values of dimensionless factors for:

— the bearing resistance:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 (45 + \phi'/2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \phi', \text{ where } \delta \geq \phi'/2 \text{ (rough base)}$$

— the inclination of the foundation base:

$$b_c = b_q = (1 - b_\gamma) / (N_c \tan \phi')$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \phi')^2$$

— the shape of foundation:

$$s_q = 1 + (B'/L') \sin \phi', \text{ for a rectangular shape;}$$

$$s_q = 1 + \sin \phi', \text{ for a square or circular shape;}$$

— $s_\gamma = 1 - 0.3 (B'/L')$, for a rectangular shape;

$$s_\gamma = 0.7, \text{ for a square or circular shape}$$

— $s_c = (s_q N_q - 1) / (N_q - 1)$ for rectangular, square or circular shape;

— the inclination of the load, caused by a horizontal load H :

$$i_c = i_q = (1 - i_\gamma) / (N_c \tan \phi');$$

$$i_q = [1 - H/(V + A' c' \cot \phi')]^{m_1};$$

$$i_\gamma = [1 - H/(V + A' c' \cot \phi')]^{m_2+1}.$$

where:

$$m = m_B = [2 + (B'/L')][1 + (B'/L')] \text{ when } H \text{ acts in the direction of } B';$$

$$m = m_L = [2 + (L'/B')][1 + (L'/B')] \text{ when } H \text{ acts in the direction of } L'.$$

In cases where the horizontal load component acts in a direction forming an angle θ with the direction of L' , m may be calculated by:

$$m = m_0 = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta.$$

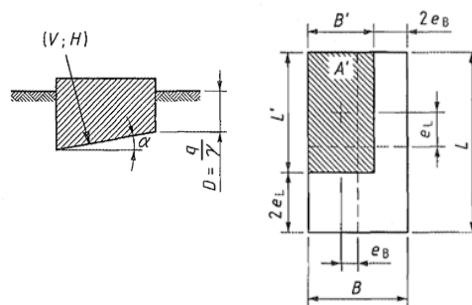


図-6 BS EN 1997-1 での設計支持力の算定式

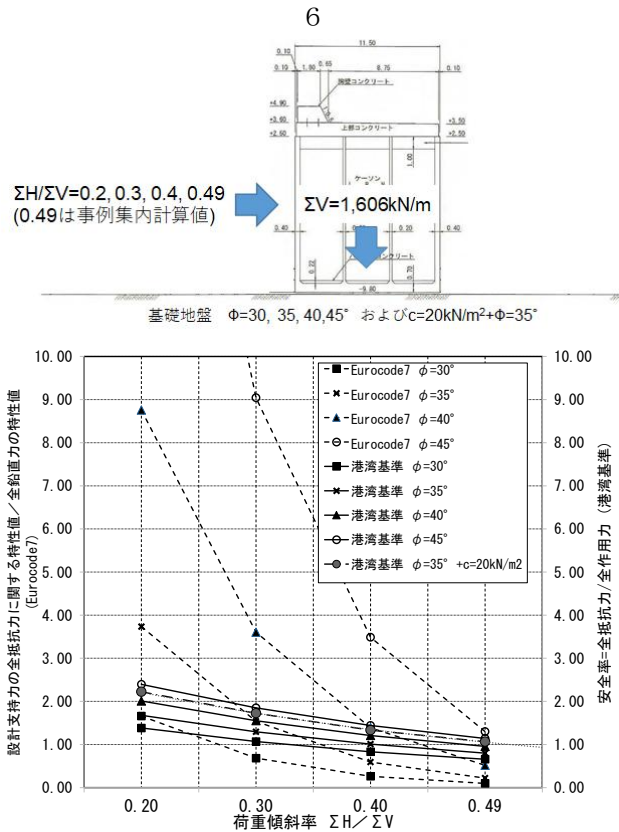


図-7 CASE 1 の検討構造と検討結果

- ・ 係数：部分係数や調整係数(波圧作用時)は、本来各種基準に準拠して設定すべきであるが、ここではすべて 1.0 に設定し、支持力公式自体の感度を単純に評価
- ・ 外力：水平力を変化させ、荷重傾斜率を調整し、 $\Sigma H/\Sigma V=0.20, 0.30, 0.40, 0.49$ の 4 種類に設定
- ・ 地盤条件：二層地盤(捨石マウンド考慮)で、地盤パラメータは $\phi_b=35^\circ$ 、捨石マウンド $\phi_d=40^\circ$ なお、BS EN 1997-1 では二層地盤を評価できないため、基礎地盤の支持力は、荷重分散を考慮
- ・ 係数：部分係数や調整係数(波圧作用時)は、CASE 1 と同様にすべて 1.0 に設定
- ・ 外力：水平力を変化させ、荷重傾斜率を調整し、 $\Sigma H/\Sigma V=0.20, 0.30, 0.40, 0.49$ の 4 種類に設定

(3) 検討結果

CASE 1 では、BS EN 1997-1 式を用いた場合に、荷重傾斜率が大きくなると設計支持力の全抵抗力に関する特性値/全鉛直力の特性値は極端に低下する。また、内部摩擦角が大きくなる程、急激に低下しやすい傾向がある。

CASE 2 では、BS EN 1997-1 式では、CASE 1 同様、荷重傾斜率が大きくなると極端に設計支持力の全抵抗力に関する特性値/全鉛直力の特性値は低下する。

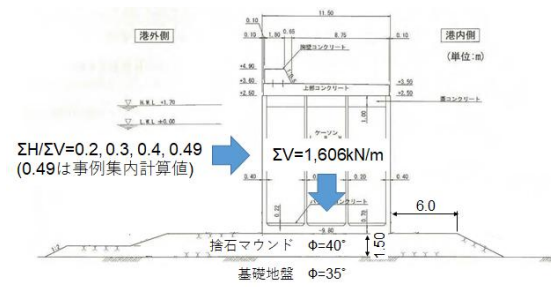


図-8 CASE 2 の検討構造と検討結果

本検討は特性値ベースの評価であるため、絶対値の単純比較は必ずしも適切ではない。しかし、計算結果からは、BS EN 1997-1 が港湾構造物に見られる大きな荷重傾斜率に対して適用限界を有する可能性が示唆される。

(4) 簡易ビショップ法の海外展開への考察

偏心傾斜荷重に対する基礎支持力の照査は、日本では簡易ビショップ法が一般的である。一方、海外では BS EN 1997-1 や BS 8004 のほか、許容鉛直支持力を限界値とする照査手法や FEM 解析が多く用いられている。

海外における許容鉛直支持力を限界値とする照査手法は、一層地盤に適用する支持力公式に基づくこと、また基礎地盤上に捨石マウンドが存在する断面に対しては適用限界がある。この点を踏まえると、捨石マウンド上基礎の照査は、簡易ビショップ法の適用が有効と考えられる。ただし、以下に留意して総合的に判断する必要がある。

- ・ 見かけの粘着力の設定：三軸圧縮試験結果のうち、比較的安全側の値を採用している点に留意する。
- ・ 石材の強度特性：簡易ビショップ法は、日本国内の代表的な石材については十分な検証結果があるが、捨石の岩質や産地によって強度が異なるため、沖縄地方や海外産の特殊な石材を扱う場合には注意を要する。

- ・ 砂質土に対する評価：簡易ビショップ法は、修正フェレニウス法に比べ、砂のせん断抵抗力を大きく評価する傾向がある。そのため、せん断力と直応力の比を補正する手法⁹⁾などの検討が必要となる。

謝辞

国内外の基礎地盤の支持力評価方法は、国土交通省国土技術政策総合研究所発注の港湾施設の海外設計実務調査・比較設計検討業務の一部を取りまとめたものである。本検討の遂行に際し、株式会社日本港湾コンサルタントの山本良氏には多大なるご協力を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会技術推進機構：土木 ISO ジャーナル, Vol.36, 2025.
- 2) BS EN 1997-1, Eurocode 7. Geotechnical design - Part 1: General rules, pp. 63,106,158,159.
- 3) Meyerhof, G. G. The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, *Géotechnique*, Volume 2, Issue 4, 1951.
- 4) Meyerhof, G. G. The Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1953.
- 5) Meyerhof, G. G. Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, 1963.
- 6) Brinch Hansen, J. A. Revised and extended formula for bearing capacity, Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute Copenhagen, 1970.
- 7) Muhs, H. and Weiss K, Investigation of the ultimate load-bearing capacity and settlement behavior of flat-founded individual foundations in uniform noncohesive soil, German Research Society for Soil Mechanics, Berlin, ISSUE 69, 1971.
- 8) Poulos, H. G., Carter, J. P. and Small, J. C. Foundations and retaining structures – research and practice, *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4, pp. 2527–2606, 2001.
- 9) 土田孝, 引屋敷英人, 水野健太, 福原哲夫：分割法円弧すべり解析における新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol.40, No.1, 2001.