

新港湾基準に準拠した大水深 耐震強化岸壁の性能設計

PERFORMANCE BASED DESIGN OF A DEEPWATER AND HIGH SEISMIC
RESISTANT QUAY WALL IN CONFORMITY WITH THE NEW TECHNICAL
STANDARD FOR PORT AND HARBOR FACILITIES

諸星 一信¹・渡部 昌治²・清宮 理³・宮田 正史⁴・
北澤 壯介⁵・伊庭 智生⁶

Kazunobu MOROHOSHI, Masaharu WATANABE, Osamu KIYOMIYA,
Masafumi MIYATA, Sosuke KITAZAWA and Tomoo IBA

¹正会員 工修 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

²関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

³フェロー 工博 早稲田大学教授 (〒169-8555 新宿区大久保3-4-1)

⁴正会員 工修 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 工修 前 沿岸技術研究センター 理事 (〒102-0092 千代田区隼町3-16)

⁶正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ (株) 国土保全技術本部 港湾部 技術次長
(〒206-8550 多摩市関戸1-7-5)

A system of performance-based design was introduced to the new technical standard for port and harbor facilities, revised in April 2007. The new standard allows greater flexibility of design while requires more advanced technical knowledge to designers. As an example, a high seismic resistant quay wall at Yokohama Port is designed in conformity with the new technical standard, examining a concrete method to specify performance requirement for quay walls..

Key Words : Performance based design, high seismic resistant quay wall, performance requirement

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準(以下新基準という)が平成19年4月に改正され, 性能設計体系の導入や耐震強化施設の考え方が変更された。これにより設計の自由度が向上した一方で, 用いる性能照査手法や許容される変形の限界値等の設定については, 設計者により高度な判断が求められることとなった。本研究では, 新基準に基づいた設計の一例として横浜港の耐震強化岸壁を取り上げ, 地震時挙動を明らかにするとともに性能規定との関係を示し, 具体的な耐震性能照査手法を提案する。

2. 基準改正の概要と設計上の課題¹⁾

(1) 基準改正の概要

今回の基準改正は, 全面的な性能規定化, 耐震設計法の変更, 施工及び維持管理の位置付け及び基準適合性確認制度の導入などを含み, 港湾構造物の設計法を根本的かつ大幅に変更するものである。

性能規定化により, 新基準では施設が保有すべき「性能」(要求性能)とこれを照査する要件である「性能規定」のみを規定し, 数値や計算手法等の具体的な仕様は規定されず, 性能を照査する過程で設計者が用いる手法は設計者の判断に委ねられた。新基準の規定に従って施設(構造物)の性能を照査できる技術としては, 作用や構造物の性能の不確定性を考慮できる方法によることとされ, 実務に対応可能なレベル1信頼性設計法(部分係数法)が, 参考資料として提示されている。

設計入力地震動の考え方も根本的に変更され, 震源特性・伝播特性・対象地点周辺の地盤特性(サイト特性)を考慮して得られる工学的基盤における

地震動の時刻歴波形をもとに、表層地盤や構造物の特性を考慮して設計に用いる地震動を算定する方法が採用された。レベル1地震動は「再現期間を75年とする地震動」とすることを標準とし、レベル2地震動は、「当該地点において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの」と定義された。また耐震強化施設はその目的等に応じて、1) 特定(緊急物資輸送対応)、2) 特定(幹線貨物輸送対応)、3) 標準(緊急物資輸送対応)の3つに分類された。

(2) 新基準における耐震設計の流れ

新基準においては、設計者は基準に定められている主要な性能規定以外に、設計対象施設の置かれる状況等を踏まえて、独自の性能規定についても適切に定める必要がある。また性能照査手法についても自らの判断でこれを定める必要がある。

また、構造物に作用する外力等は永続・変動・偶発の各作用に分類され、これらに対して構造物が要求性能を満たしているか性能照査することになる。性能照査に当たって作用の組み合わせは永続・変動・偶発の各設計状態として設定され、一般には永続→変動→偶発の各状態の順に照査を行う。岸壁の設計では、レベル1地震動の作用は変動状態に分類され、必ず行われることとなっており、時刻歴地震動であるレベル1地震動を構造形式ごとに異なる一定の手法で照査用震度に換算して照査に用いる。またレベル2地震動に対する照査は耐震強化施設が必要となり、構造形式によって異なるが一般的には動的作用を考慮できる非線形有効応力有限要素解析や応答変位法等により照査を行うことになる。

(3) 設計上の課題

新基準に準拠した大水深コンテナ耐震強化岸壁の実施設設計事例はこれまでになく、以下の点が課題である。

- 課題 1：岸壁の構造上及び利用上の特性を踏まえた具体的な性能規定の設定事例が乏しいこと。
- 課題 2：性能規定を満たす具体的な性能照査手法が提案されていないこと。
- 課題 3：レベル2地震動作用時の構造物の挙動特性が不明であること。

3. 新基準における性能規定設定および照査

(1) 対象施設の概要

関東地方整備局は、新基準に基づく大水深コンテナ耐震強化岸壁の実施設設計を、全国で初めて横浜港南本牧地区 MC-3 岸壁(図-1)において行った。計画

水深は 16m 以上で世界最大級の施設である。現地は 27~30m 程度の大水深海域で、基盤層(土丹層)上部の軟弱層の厚さは 2~20m と大きく変化する(図-2)。

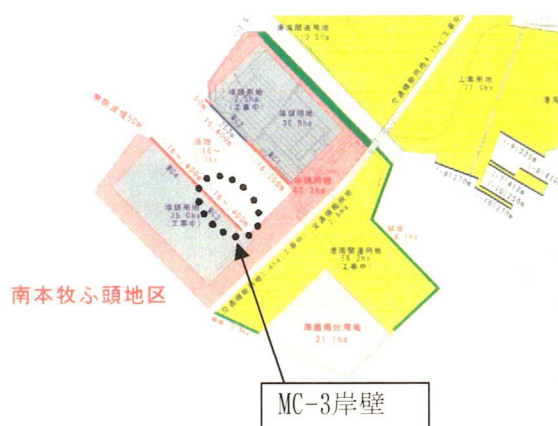


図-1 岸壁位置図

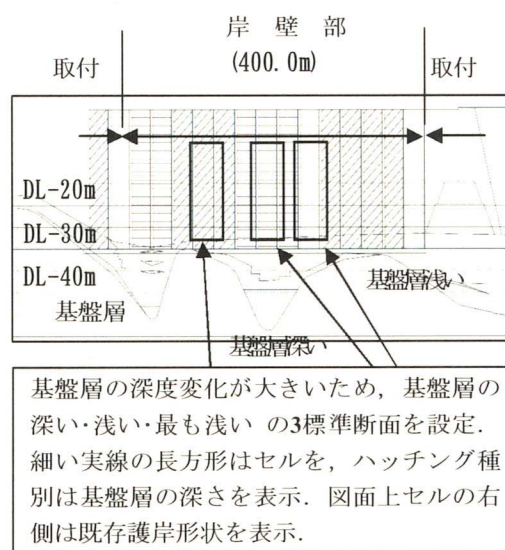


図-2 現地地盤の状況

(2) 設計入力地震動の設定

設計に当たってまず新基準に準拠した手法を用いて設計地震動を算出した。具体的には、港湾地域強震観測網、横浜市高密度強震計ネットワークの観測記録及び常時微動観測結果から、南本牧地点におけるサイト増幅特性を評価し、それに基づいた地震動を設定した(図-3)。レベル2地震動は1923年関東地震を想定しており、加速度は最大で約430gal、継続時間は90秒程度と強大なものとなった。

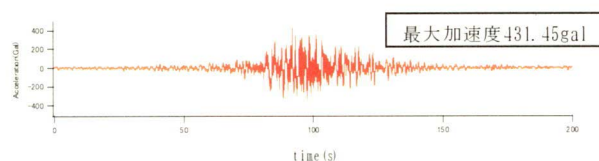


図-3 算出した地震動

(3) 性能規定の設定

本岸壁は耐震強化岸壁「特定（幹線貨物輸送対応）」に分類され、その要求性能はレベル2地震動の作用後において、構造的な安定が保たれ、速やか（短期間の後）に、船舶の利用及び幹線貨物の荷役を行うことができること（修復性）である。

本岸壁の特性や兵庫県南部地震における神戸港の被害状況等から以下の性能規定を考慮した。

1) クレーンレール・基礎について

1995年兵庫県南部地震による神戸港の荷役機械の被害状況をみると、軽微なものは脚部の部品の交換程度の損傷で済んでいるが、重度なものでは脚部材の座屈等の損傷に至っており、損傷の要因はレールスパンの開きによる損傷、脱輪による部品の破損であった²⁾。クレーンの脚部材の損傷は、部材の座屈に直結し、部材交換等長期間の補修に結びつきやすいので避けるべきであるが、走行装置の部品交換は予備部品や交換用機器の常備により短期間の修理が可能と思われる。

表-1に既存の免震クレーンの変形性能を示す。免震装置の許容変形量は50～60cm、構造部分が対応可能な変形量は30～50cmとなっている。両者の和をとって、クレーンレールスパンの許容変形量は、免震装置の許容変形量と構造部分の弾性内に収まる変形量の合計として、概ね100cmとした。（図-4）

表-1 免震クレーン変形性能例

メーカー	免震部分	構造部分
A社	60cm	40cm
B社	60cm	30cm
C社	50cm	30cm
D社	50cm	50cm

なお地震後の荷役再開の際には、海陸レールともに常時保守管理用限界内³⁾に回復させる必要があるので、そのための補修を比較的簡易にかつ短期間で行う必要がある。具体的には図-5の通り、前

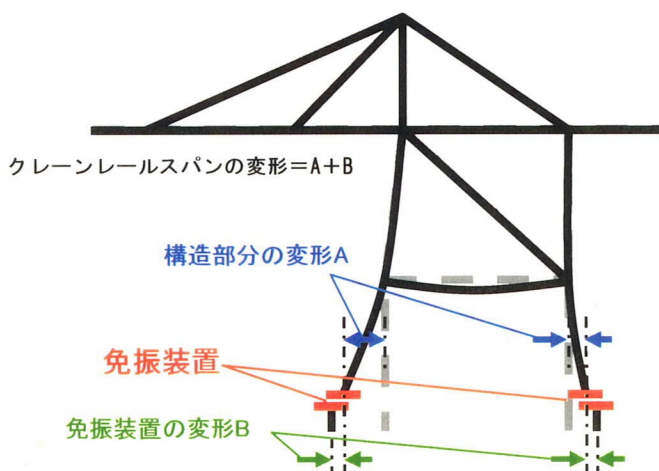


図-4 クレーンレールスパンの変形量評価についての考え方

もってレール溝やレール下に設置するベースプレートに変形を吸収するための余裕代を設けておき、レールが変形した際の交換用レールや交換用資機材を準備しておくこととした。

また補修に要する期間については、クレーンレールの敷き直しを行った事例から、工事が可能な期間として概ね1週間程度とした。

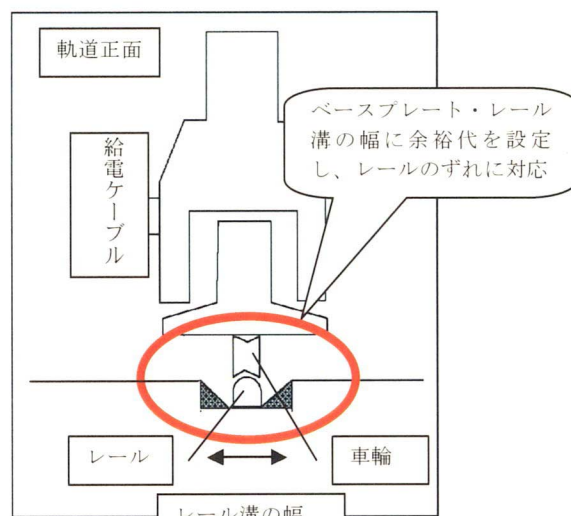


図-5 早期復旧のための余裕代

2) 岸壁の変形量と法線の出入り

本岸壁は基盤層の起伏が激しい軟弱地盤上の耐震強化岸壁で、区間によって地震時の変形量が大きく異なることが予想される。このため変形が最も大きい一部の区間の制約を岸壁全体に適用すると、結果として過大設計となる可能性がある。また、兵庫県南部地震の直後には水平変位が2.7mであっても緊急使用された岸壁が存在し、岸壁の最大変位量はその利用可能度の指標となりにくいこと及び利用可能度と法線の凹凸変位量には関係が見受けられることが報告されている⁴⁾。このため、性能規定の設定にあたっては、既往の被災事例報告等を参考とし、実際に施設供用が可能であった範囲などを確認することを重視した。また岸壁本体の補修には長期間を要するため、構造安定性の確保を前提に残留変形量と法線の出入り量で性能を規定することとし、補修期間については検討しなかった。

a) 残留変形量

以下の3事例について検討した。

①図-6⁵⁾は兵庫県南部地震発生後の港湾施設の残留水平変形量と暫定供用施設の配置を示したものである。六甲・ポートアイランド地区では岸壁水平変形量が160～500cmの箇所でも暫定供用を行っており、構造体が安定して船舶が接岸可能であれば早期の機能回復が可能であることがわかる。

②また震災直後の緊急物資海上輸送に多く使用された新港突堤地区においては、岸壁変形量が100cm以上(最も大きい場合は200cm以上)の施設にも緊急用

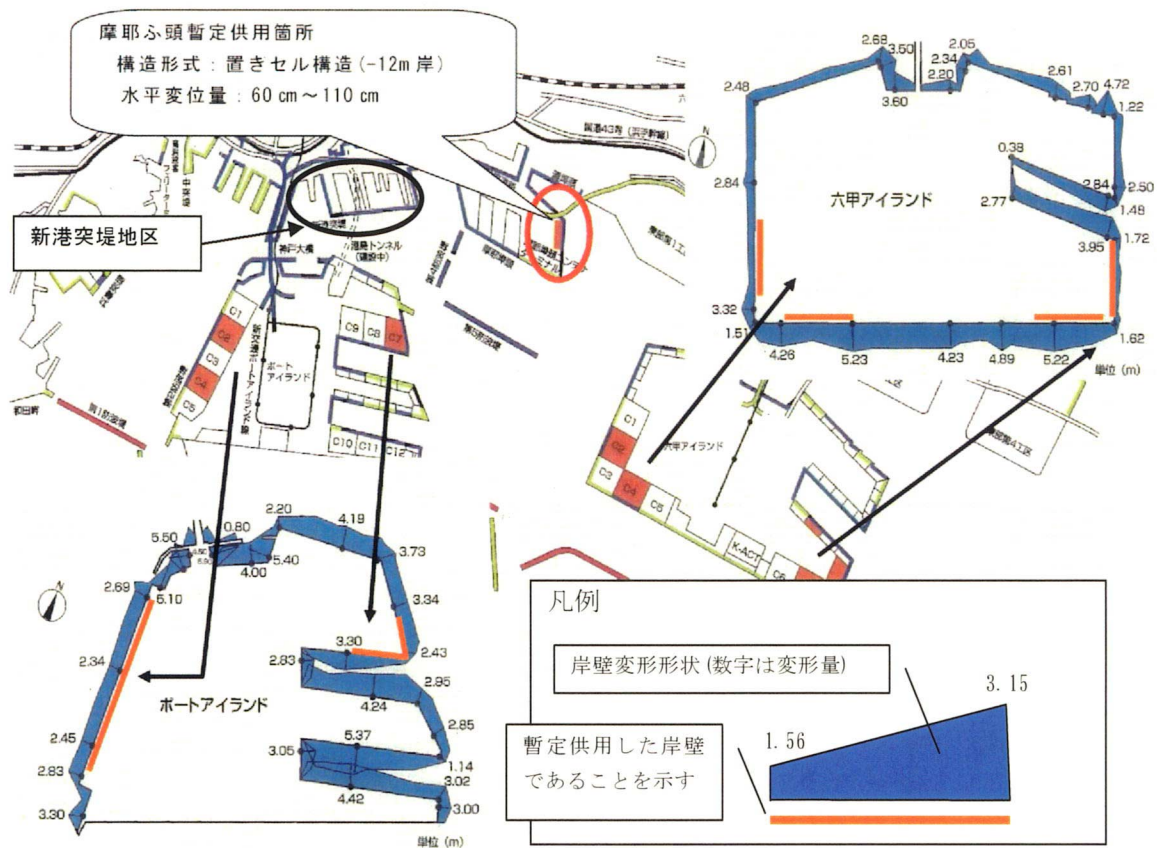


図-6 兵庫県南部地震発生後の港湾施設の変形量と暫定供用施設の配置

船舶が係留されていたことが報じられている⁶⁾。
③さらに摩耶ふ頭地区に設置されていた鋼板セル構造の事例⁷⁾によれば、

岸壁水深：-10.0m～12.0m

岸壁法線変位：100cm～400cm程度

背後地盤沈下：50cm～100cm程度

構造体の損傷：アーク・継手とも損傷は確認されておらず、構造体は損傷していない。

これらの事例から本岸壁では、構造体が安定性を保ちかつ船舶の接岸が可能であれば、残留変形量が一般的に設定されることが多い許容値である100cmを超える場合でも許容することとした。

b) 法線の出入り

岸壁法線の出入り量はそれを直接想定するのは困難である⁴⁾。一方本岸壁は、軟弱地盤層厚が法線上で大きく異なるため、工区分けを行い基盤層の深い断面と浅い断面を選定して計3断面で設計を行うこととしており、その際に算出される変位量はそれぞれ異なっている。この最大値と最小値の差をもって、出入り量と考えることとした。

本岸壁の対象船舶は10万DWT級であり、船長は350mである。地震時に法線の凹凸が生じて、それによるはらみ出し量が防舷材の変形吸収量以下であれば、船舶の利用は可能である(図-7)。防舷材の高さは類似岸壁の事例では110cm、変形吸収量は46.5%で約50cmであった。このため性能規定として

は、法線のはらみ出し量を約50cm以内に抑えることとした。

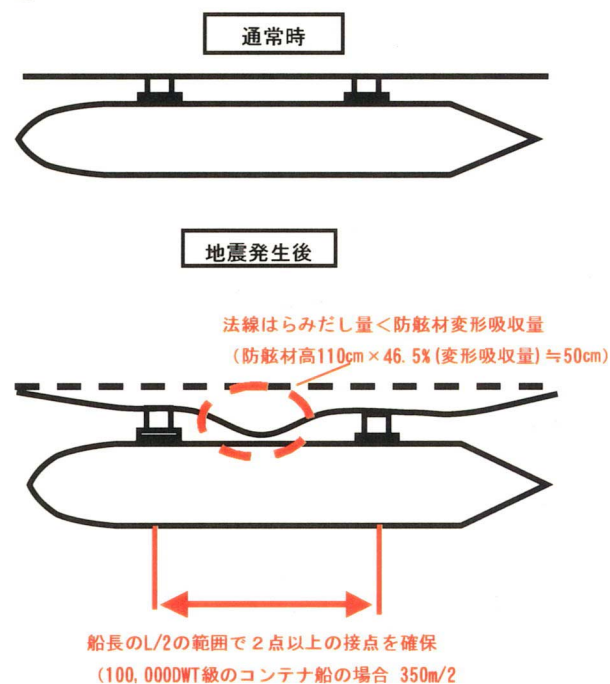


図-7 法線のはらみ出し量についての考え方

なお、本岸壁は神戸港の被災事例に比べて水深や施設規模が大きく異なるため、別途数値解析により計算モデルの検証や部材の損傷限界の確認等を行う

こととした⁸⁾。

3) まとめ

- ・ガントリークレーンのレールスパン変形量については、免震クレーンの使用を前提とし、許容変形量を概ね 100cm とする。またレール溝に変形吸収用の余裕代を設ける等の対策を講じ、1 週間程度での補修を可能とする。
- ・岸壁の残留変形量については、構造体が安定性を保ち、かつ船舶の接岸が可能であることを規定する。具体的には、法制方向の相対的はらみ出し量を約 50cm 以内とする。

(4) 性能の照査および構造断面の決定

1) 設計の基本方針の設定

レベル2地震動が強大で、これに対する構造物の挙動特性が不明であったため、本格的な設計作業に入る前に、レベル1地震動に対応する仮定断面(照査用震度0.18)にレベル2地震動が作用した際の残留変形を試算し、変形量や変形モードを分析して、設計上の技術課題とその対応策を検討し基本的な方針を策定した。断面の構造形式はSCPで地盤改良したハイブリッドケーソンとし、2次元地震応答解析のプログラムはFLIP⁹⁾を用いた。レベル2地震動に対する残留変位は、埋立土及び構造物下部の砂質土層の液状化を考慮したケースでは9mに達した。(表-2)

表-2 変形量計算結果(数値の符号- は、水平は海側、鉛直は沈下方向の意味)

位置	残留変位 (m)		最大変位(m)	
	水平	鉛直	水平	鉛直
岸壁天端	-9.091	-2.610	-9.091	-2.610
岸壁底面	-7.007	-2.610	-7.007	-2.610

変形モード(図-8)をみると、海底面付近のSCP改良地盤が変形しており、捨石部も変形してケーソンの回転モードの変形を大きくしている。また、基盤層とSCP改良層の間に未改良で残されている軟弱層が大きく変形している。

この結果を踏まえ、以下の通り設計の基本方針

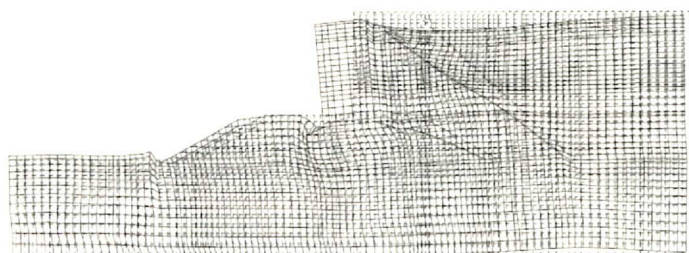


図-8 変形モード図(試験検討断面:レベル1地震動(照査用震度0.18)に対応する断面にレベル2地震動を作用させた結果)

を設定した。

- ・地震時はマウンドの変形が支配的であり、これを最小限にする。
- ・改良地盤の下に軟弱地盤があるとその部分の変形が大きくなるため、基盤層まで地盤改良する。またその強度を適正に設定する。
- ・レベル2地震動作用時に変形量が極めて大きくなる可能性があることを踏まえ、二次元有限要素法FLIPを使用して変形量を計算し、レベル2地震作用時の変形量に留意しながら照査を行う。

2) 構造選定の結果

検討対象としたのは、重力式構造としてRCケーソン、HB(ハイブリッド)ケーソン、HBL(ハイブリッドL型)ケーソンの3種類、根入れ構造として鋼板セル、ニューマチックケーソン、鋼管矢板の3種類、栈橋構造として直杭式横栈橋、斜め組杭式栈橋、ジャケット式栈橋の3種類、合計9種類である。これらについて設計震度 $K_h=0.25$ として1次選定を行った後に、RCケーソン式、HBLケーソン式、鋼板セル式、斜め組杭式栈橋の4形式について、レベル2地震動に対する変形照査まで行う2次選定を行った。鋼板セル形式については、菅野らの提唱した方法¹⁰⁾でモデル化した。その結果、鋼板セル式とハイブリッドL型式の両者が、耐震強化施設としてのはらみ出し及びレールスパンの開きで規定される性能規定を満足し、かつ所定の工期を満足した。ケーソン式は工期を満足せず、斜め組杭式は断面が成立しなかった。この両者を比較した結果、経済性や施工性、地震時の変形形状の検討から鋼板セル式を最適構造形式に選定した。

最終段階として以下の通り最適断面を設定した(図-9)。

- ・地盤改良方式は変形量の抑制のためセル直下をCDM改良とする。
- ・経済性・施工性の観点から、改良地盤にセルを直接設置する方式とする。
- ・経済性と安定性の観点からセルの直径を24.5m、セル前面の盛石の天端高さを-20mとする。

上記の断面諸元は永続状態及びレベル1地震動に対する変動状態に基づいて算定された最適値であり、レベル2地震動による変形照査では残留変形量は基盤層深さの違いにより約1.5~1.7m、法線の相対はらみ出し量約20cm、レールスパンの最大開き51cmとなり、性能規定を満たす断面であることを確認した。なお、

図-9の断面の変形照査等の結果は別報⁹⁾にて詳細を報告している。

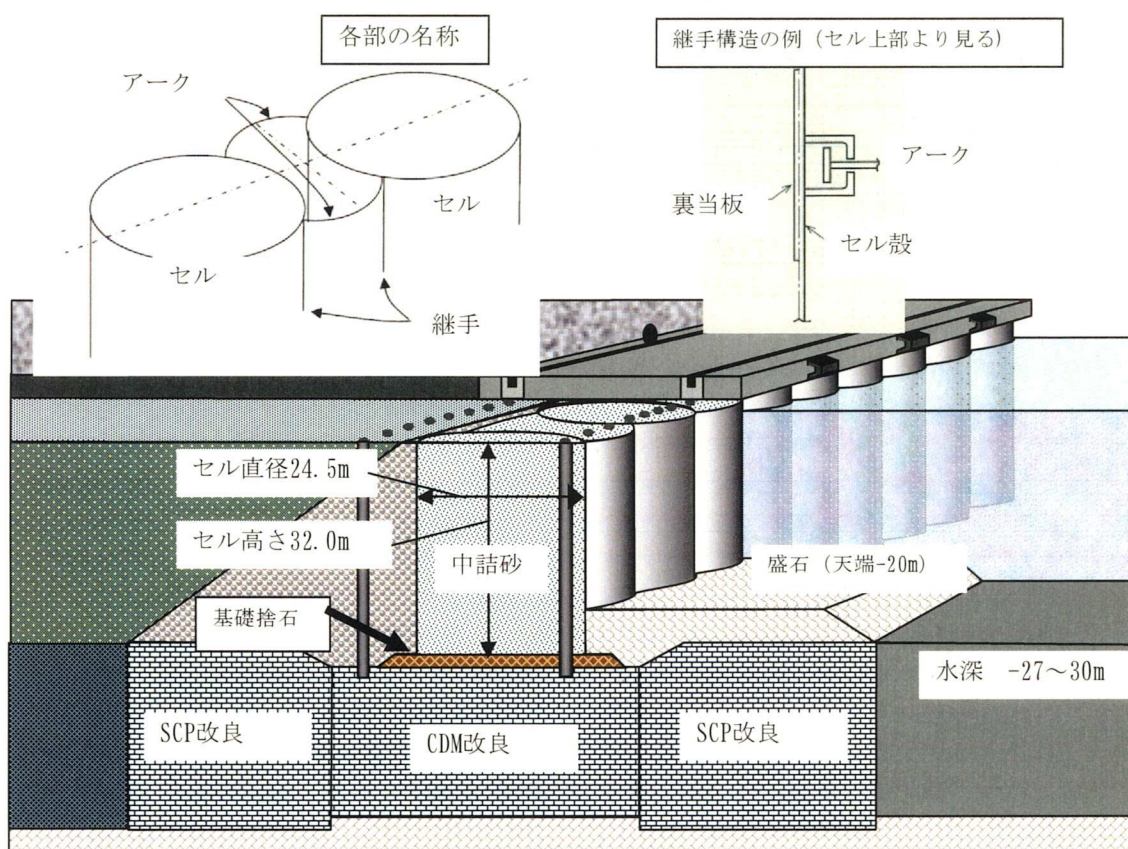


図-9 選定された鋼板セル構造

4. 主要な結論

本研究では、新基準に準拠した大水深耐震強化岸壁の性能設計に関する実務上の課題を整理し、クレーンレールスパンの開きや被災後の船舶接岸性及び残留変形量の軽減方法など、具体的な性能規定及び断面諸元設定法を提案した。さらに、提案手法を横浜港MC-3岸壁の設計に適用した事例を示した。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 2) 稲富隆昌他：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料 No. 857，pp. 1618-1629，1997。
- 3) 井合進他：港湾構造物の耐震性能照査型設定体系について，港湾空港技術研究所資料 No. 1018，pp. 30，2002。
- 4) 一井康二，高橋宏直，中本 隆，赤倉康寛：地震時における重力式岸壁の変形量の評価，第10回日本地震工学シンポジウム，k-4，pp. 3242-3243，1998。
- 5) 運輸省第三港湾建設局，震災復興建設部：神戸港震災復興誌，1998，pp. 15-29。
- 6) 高橋宏直，中本隆，吉村藤謙：兵庫県南部地震時の震災直後における海上輸送モードの対応状況に関する分析，港湾技研資料 No. 861，pp. 10-30，1997。
- 7) 稲富隆昌他：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料 No. 857，pp. 237-242，1997。
- 8) 諸星一信，小濱 英司，渡部 昌治，清宮 理，山本修司，佐藤 成：大型セル式岸壁の地震時の挙動に関する数値解析，海洋開発論文集，第24巻，2008(投稿中)。
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56, 1990。
- 10) 菅野高弘，北村卓也，森田年一，由井洋三：鋼板セルの地震時挙動に関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム，E-3，pp. 1867-1872，1998。