大型鋼板セル岸壁の耐震設計における数値解析及び模型実験の適用

Application of Numerical Analysis and Model Experiment on Seismic Design of Large Steel Celltype Quay Wall

諸星一信¹・小濱英司²・渡部昌治³・清宮理⁴・菅野高弘⁵・宮田正史⁶・山本修司⁷・佐藤成⁸ Kazunobu MOROHOSHI, Eiji KOHAMA, Masaharu WATANABE, Osamu KIYOMIYA,

Takahiro SUGANO, Masafumi MIYATA, Syuuji YAMAMOTO and Shigeru SATO

The construction of a high seismic resistant quay, MC-3 began in February 2008 at Minami-Honmoku Pier of Yokohama Port. The large steel celltype quay with 24. 5m in diameter and 32m in height is designed in conformity with the new technical standard for port and harbor structures revised in April 2007. Deformation and damage of structures must be evaluated accurately, based on performance-based design introduced to the new standard. Two- and three-dimensional finite element analyses and model shake table tests are conducted in this study, to evaluate performance of the quay during L2 earthquake.

1. はじめに

横浜港南本牧ふ頭MC-3岸壁は、鋼板セルを用いた世 界最大級の耐震強化岸壁であり、平成20年2月に現地着 工されている.この設計には、平成19年4月に改正され た港湾基準(以下,新基準という)が全国で初めて適用 された.

新基準で導入された性能設計を行う場合,地震時の構 造体の変形量及び損傷程度を精度よく評価する必要があ る.本検討では数値解析及び模型振動実験を行い,これ らの結果を比較検討して本岸壁の性能照査を行うもので ある.

2. 設計の概要

(1) 設計条件および選定断面

設計対象である横浜港南本牧地区MC-3岸壁は新基準 に基づいて初めて設計された大水深コンテナ耐震強化岸 壁であり,計画水深16m以上の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) 上部の深さが大きく変化し(図-1),基盤層の上部には 軟弱層が堆積している.このため岸壁法線方向に地震時 の変形量が異なると考えられ,図に示す3断面で設計検

1正会員 2正会員 3 4フェロー	工修 工博 工博	橫浜港湾空港技術調查事務所 所長 橫浜港湾空港技術調查事務所 設計室長 橫浜港湾空港技術調查事務所 環境課 早稲田大学教授
5 正 会 員	工博	(独)港湾空港技術研究所 地震防災研究領 域長
6 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
7 正 会 員	博士 (工学	沿岸技術研究センター 理事)
8 正 会 員	工修	パシフィックコンサルタンツ(株) 交通事 業本部 構造部

討を行っている.

新基準では、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」と定義される.新 基準に準拠した手法で算定したレベル2地震動は最大加 速度430gal,継続時間92sと強大なものである.これを 用いた経済性検討の結果、CDMにより改良した地盤上 に鋼板セルを設置する方式が選定された(図-2)(諸星 ら、2008a).

(2) 性能照査の流れ

本施設は耐震強化岸壁「特定(幹線貨物輸送対応)」 に分類され、要求性能としてレベル2地震動後の構造的 安定と速やかな荷役の再開が求められる。新基準では施 設が保有すべき「性能」のみを規定し、数値や計算手法



図-1 現地地盤の状況 (破線部を3次元計算でモデル化)



図-2 選定された鋼板セル構造

等の具体的な仕様は規定されていない.

本岸壁の設計では、レベル2地震動作用後の水平方向 の残留変形量を評価して、地震後のガントリークレーン 被災安全性や岸壁への船舶接岸性を照査(諸星ら, 2008a)するとともに、セル本体や継手に作用する応力 の評価による構造安定性の確認のため、応答変位法に基 づいた3次元静的解析を行った。

本施設は世界最大級の鋼板セル式岸壁であり、変形量 の推定精度が、構造安定性の評価に際して極めて重要と 考えられるが、新基準に準拠した設計実務において、こ うした計算を行った事例はない.このため本研究ではさ らに模型振動実験を行い、数値解析結果と比較検討して、 構造物の安定性について総合的に照査を行った.

3. 数値解析の概要

(1) 2次元有効応力解析

鋼板セル岸壁を, 菅野らの提唱したモデル(菅野ら, 1998;長尾ら, 2004;住谷ら, 2006;長尾ら, 2006)を 用いて梁部材と中詰め土及びジョイント要素によってモ デル化した(図-3).梁①はセル本体及びアーク部の奥 行き1m当たりの堤体中心軸周りの曲げ剛性の1/2の曲げ 剛性を有する梁部材であり,背後土圧による曲げ等に対 して抵抗する.梁②はセル本体及びアーク部の奥行き1 m当たりの断面積に対する軸剛性と,十分小さな曲げ剛 性を有する梁部材であり,上載荷重をはじめとする圧縮 等に抵抗する.また,梁③は梁①~梁②~梁①を連結し, 十分小さな軸剛性と,十分剛な曲げ剛性を有する梁部材 であり,セルとしての挙動の一体性の確保の機能を担う.

解析に用いるレベル2地震動は,新基準に準拠して設定した関東地震(1923年, Mg7.9)の再来を想定したものである.また解析に用いたプログラムはFLIP(laiら, 1990)である.現地は支持層の深さが大きく異なるため代表的な3断面について計算を行った(図-1).

(2) 3次元静的解析

鋼板セル体の設計では、常時の中詰土圧や腐食代等を 考慮してセルの板厚を決定するのが一般的である(日本 港湾協会,2007)が、レベル2地震動作用時の鋼板セル に作用する応力を評価した事例は存在しない.このため 今回新たに,設計業務に適用可能な手法として,応答変 位法に基づいた3次元弾塑性静的解析を行った.





具体的には、設計区間の中で基盤層の深い部分と浅い



部分を含み,かつその変化が最も大きいと考えられる延 長90mの区間(図-1の破線内)を図-4の通りモデル化した.

セル殻・アークは厚肉四辺形シェル要素(材質はセル 殻がSM490 (σ y=315N/mm²),アークがSS400 (σ y=235 N/mm²)), 中詰砂はソリッド要素(N値=10相当), 継 手にはバイリニア型非線形2節点バネ(3並進バネ+1回 転バネ)を用いた.継手の鉛直方向は摩擦型の上限値を 有する継手特性を設定し、バネ値kz=1200MN/m²、バネ 反力の上限値は、水平軸方向引張時 $\tau_{max} = \mu \sigma_x (\mu =$ 0.6, σ_x :水平軸方向反力), τ_{max} を超える場合バネ値K を初期勾配の1/1000とした.その他の物性値等について は文献(諸星ら,2008b)を参照されたい。施工中の応力 状態を再現するため、本計算前には施工状態に対応して 要素の増設と荷重の作用(初期応力解析)を行った。セ ルと中詰めの間には引張りに抵抗しないバネ要素をおき, 施工手順の順にセル本体・中詰め・アーク・アーク中詰 めの自重を作用させた後に背後埋立による土圧を直接作 用させた.次に,前面および背面地盤を線形バネでモデ ル化し、FLIPにおけるセルの変位と加速度を抽出して 底面を含めたバネ先に強制変位として入力し、同時に慣 性力も作用させることで構造物の応答を求めた.計算ケー スは以下の3ケースである。

case1:基盤層が深い地盤と最も浅い地盤での岸壁天端の 水平変位の差が最大となる時点

case2:岸壁天端の水平変位が最大となる時点 case3:残留変形時点

4. 模型実験の概要

模型実験としては1G重力場および遠心力場において 加振を行い,変位,応力及びひずみを計測した.1G場 実験(竹信ら,2008a)は2次元解析の変形量を確認する ことを目的とし,遠心場実験(竹信ら,2008b)は現場 と同様の大きな応力を模型で再現できることから,変形 だけでなく,3次元解析の結果算出されたセル体の応力 を確認することも目的とした.1G場実験の模型縮尺は1/ 30,遠心場実験の模型縮尺は1/100(機器の制約から50G 場で載荷して1G場での相似則を適用)である.模型製 作に当たっては施工段階の応力状態を再現するため,施 工時と同様のステップで模型製作を行った.

5. 性能照査の結果及び考察

表-1 各解析・実験における変形量等の比較

解析区分	岸壁天端残留	岸壁天端残留	残留傾斜
	水平変形量	鉛直変形量	角
2次元解析	1.65m	0. 52m	1.80°
3 次元解析	1. 29m	0. 42m	1.46°
16 場模型実験	1. 35 m	0. 25m	1. 31°
遠心載荷実験	1.61m	0. 35m	1. 52°



図-5 残留変形量比較図

(1) 護岸の変形メカニズム・変形量

性能照査に最も重要である岸壁天端の残留水平変形量 は実験と解析のどの結果においても1.5m程度であった. また,鉛直方向残留変形量は比率ではややばらつきが大 きいが絶対値でみるとその差は30cm以内にとどまった (表-1,図-5).

このことから, FLIP を用いた2次元動的解析を性能 照査に用いることにより各種の手法より安全側に構造諸 元を設定できる.

次にレベル2地震時の構造物の変形メカニズムを明ら かにするため、レベル2地震動作用中に発生するせん断 応力・ひずみを2次元解析によって時刻歴で追跡した. 図-6、7は基盤層が深い断面における地震動作用中の変 位が最大となる時点での変形,せん断応力でmac及びせん 断ひずみ 7 macを示す.これを見ると、セル本体は現行設 計法で想定されている通り(住谷ら,2006 日本港湾協 会,2007)剛体的な挙動を示すことが分かる.またせん 断応力は前趾・後趾直下のCDM改良体に集中しており、 かつ、FLIPでは応力-ひずみ関係を双曲線として地盤の 非線形性を考慮しているが、CDM改良体に発生してい るひずみはわずかであることから、セル本体はCDM改 良体により支持され安定していることが分かる.また、 せん断ひずみはセル下端付近の中詰め土と前趾および後 趾付近の盛石・捨石・裏込石に集中し、中詰め土のせん



図-6 変形および τ max分布図(単位:KN/m²)



図-7 変形および γ max分布図(t=109.40s)

断変形はセル本体と前面盛石で抑制されることが明らか となった.

(2) セル体・継手の応力照査

図-8は3次元解析におけるセルに作用する周方向及び 鉛直方向応力を示した図である.応力の値は概ねcase2 で大きい.周方向応力は海側上部で引張,基部で圧縮, 陸側上部で圧縮,基部で引張であり、鉛直方向応力は海 側で圧縮,陸側で引張である.またセル陸側基部で一部 降伏を超える応力が計算されている.





この影響を検討するため、相当塑性ひずみを計算した ところ(図-9)、塑性化するのは基部の一部であるとと もに、大きさは最大で0.4%程度であり、構造全体の安 定に影響を及ぼさないと判断された.またアークに作用 する応力は、傾向はセルと同様で大きさはセルより小さ く、問題となるような応力は計算されなかった.

また継手部分には最大で46mmの変位が生じる (case1)が,作用応力は鋼板応力換算値で最大59N/mm² と降伏強度に比較して小さく,継手の結合が解けるよう な状態ではなかった.上記より,3次元静的計算によれ ば地震時の構造体の安定には問題のないことが示された.

(3) 遠心載荷実験と3次元解析の結果比較

遠心載荷実験と3次元解析のcase2(最大変位発生時)



について、地震の作用によるセル体応力の増分を比較した(図-10). セル海側周方向応力は概ね整合しているが、 その他では全体的に実験の応力が小さく、海側・陸側と もに基部で差が大きい. 特にセル陸側周方向では、解析 では一部降伏を超える引張応力が発生していたが、実験 では基部も圧縮であり絶対値も小さい. また海側鉛直方 向応力では、-26m付近で引張応力が発生している.



これらの原因について以下の通り考察した. 図-7をみ

ると、2次元解析ではセルの基部の三角形の領域、特に 前趾および後趾周辺でせん断ひずみが大きい. 図-11に 中詰め土のせん断剛性の分布を示す.2次元解析でのせ ん断剛性は変位最大時の τ_{max} を γ_{max} で除したものであり、 3次元解析では深さ方向に一様な値である.

2次元解析では、拘束圧の増大とともに剛性は大きく なり、ひずみの増大とともに剛性が低下するという地盤 の基本的な力学的性質を考慮しているため、中詰め土の 深い部分ではひずみが大きいためにせん断剛性は小さく なる.模型実験における地盤挙動も2次元解析と同様で あると考えられることから、実験と3次元解析における 応力の差は中詰め土の特性の差が原因と考えられる.例 えば3次元解析の中詰め土の剛性は実験より大きく、セ ルの変位に対して実験より強く抵抗したためセル陸側基 部の周方向応力が実験結果よりも大きくなったと考えら れる.

また鉛直方向応力は,頭部(地表部)で海側,陸側と もに0なので,セルと地盤の摩擦によって応力が発生し ていることがわかる.3次元解析では荷重を静的に載荷 しているが,実験では動的に作用する等,セルと地盤の 境界での荷重特性は異なり,摩擦は解析ほど発揮されな いと考えられる.このため実験では,セル基部における 鉛直応力が解析に比べて小さくなったと考えられる.



図-11 2次元・3次元解析におけるせん断剛性分布

このように、3次元解析と模型実験では物性や条件が 異なるため結果に差異が生じ、解析による応力値は実験 に比べて大きくなった.実現象でどのような応力が作用 するかは、地震時の現地観測等に待つ他はなく、数値解 析・模型実験ともに誤差を含むものと思われるが、性能 照査の手段としては数値解析の結果は安全側の結果を与 えることがわかる.こうした状況を総合的に考慮し、常 時土圧等から定まったセル及びアークの部材板圧の性能 照査には、本数値解析が適用可能であることが判った. また継手の応力は、直接模型実験による検証は出来ない が、セル本体に作用する応力が模型実験結果の方が小さ いことから考えて、上記と同様に適用可能と考えた.

6. まとめ

世界最大級の鋼板セル構造のレベル2地震動作用時の性 能照査について上記の見当から以下の点が明らかとなっ た.

- ① 実務設計において初めて、菅野らの提唱したモデル により鋼板セル構造をモデル化し、2次元有効応力解 析により水平方向残留変形量を評価するとともに、模 型実験によりその精度を検証して性能評価に適用可能 であることを示した。
- ② レベル2地震動作用時にセル体及び継手に作用する 応力等を、実務設計において始めて応答変位法に基づ いた3次元静的解析により評価し、模型実験によりそ の結果を検証して性能照査に適用可能であることを示 した。
- ③ 上記を総合して、世界最大級の鋼板セル構造の設計 手法を確立し、新基準に基づいた性能設計を行うこと が可能となった。

今後の課題は、地震時に実構造物に作用する応力を現 地計測等を通じて解明していくことが挙げられる.

参考文献

- 菅野高弘・北村卓也・森田年一・由井洋三(1998):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.
- 住谷圭一・長尾毅(2006):セル式岸壁の根入れが耐震性能 に与える影響に関する研究,国土技術政策総合研究所資料 No.352.
- 長尾毅・北村卓也(2004):セル式岸壁の最適断面設定手法 に関する研究,海洋開発論文集 第20巻, pp203-208.
- 長尾毅・北村卓也 (2006): セル式岸壁のレベル1信頼性設計 法,海洋開発論文集 第21巻, pp.755-760.
- 日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.1072-1073.
- 諸星一信・渡部昌治・清宮理・宮田正史・北澤壯介・伊庭智 生(2008a):新港湾基準に準拠した大水深耐震強化岸壁 の性能設計,海洋開発論文集 第24巻, pp.177-182.
- 諸星一信・小濱英司・渡部昌治・清宮理・山本修司・佐藤成 (2008b):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, pp.207-212.
- Iai.S, Matsunaga.Y and Kameoka.T (1990): Strainspace plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbor Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp.27-56.
- 竹信正寛・菅野高弘・諸星一信,鈴木貴志(2008a(投稿中)): 置きセル式係船岸の地震時挙動に関する1G場水中振動台 実験,第43回地盤工学研究発表会.
- 竹信正寛・菅野高弘・諸星一信,鈴木貴志(2008b(投稿中)): セル式係船岸の地震時挙動に関する遠心力場模型振動実 験,第63回土木学会年次学術講演会。