

根入れ式鋼板セル構造による耐震強化岸壁の建設

High Earthquake Resistant Quay Wall of Embedded Steel-Plate Cell Structure

松永康男*・木村 博*・橋爪浩二**・星加 嗣**・松田 章***・湯川雅之***

Yasuo Matsunaga, Hiroshi Kimura, Koji Hashitsume, Tsuguru Hoshika, Akira Matsuda, Masayuki Yukawa

A -12m deep quay wall at Shinko-east area is one of the 17 high earthquake resistant quay walls constructed in the port of Kobe for the restoration of the damage by the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. An embedded steel-plate cell configuration is applied to this quay wall as a high earthquake resistant quay wall for the first time. This structure has following properties : ① shorter construction time, ② no seabed improvement, ③ higher earthquake resistance, etc. This paper presents some topics in design, construction and seismic characteristics of the steel-plate cell structure.

keyword : Quay Wall, Embedded Steel-Plate Cell, High Earthquake Resistance, Earthquake Restoration

1. はじめに

1995年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震により甚大な被害を受けた神戸港では、「地震に強い港湾」を目指した港湾整備の考え方の下、神戸港復興の一環として耐震強化岸壁を全17バース整備することが「神戸港復興計画」により示された¹⁾。これらの耐震強化岸壁は、被災施設の復旧に際して高度な耐震補強を施すことにより、従前の設計震度0.15~0.18を設計震度0.25に引き上げて整備されたものであり、その整備・配置にあたっては、荷役形態による岸壁の機能分類、地区毎の分散化、復旧施設の被災状況、復旧構造形式の多様化等の各種制約条件に十分配慮している²⁾。

ここでは、神戸港に配備される耐震強化岸壁の中で、新港東地区第6~第8突堤の再開発を兼ね、旧突堤間を震災ガレキや復旧工事発生土の処分地として利用するために整備される新港東地区-12m岸壁について報告する。

2. 構造形式

新港東地区-12m岸壁は、図-1に示すように新港東地区の旧突堤間を埋め立て、その前面に新設される施設であるが、岸壁背後を震災ガレキ等の処分地として利用することを念頭に置き、以下の点に配慮して構造形式を選定する必要があった。

- ①突堤間を締め切るための岸壁部の建設を先行する。
- ②同処分地の容量を最大限確保し、本工事の発生土を最小限にとどめる。
- ③構造形式の多様化に配慮し、耐震強化岸壁としての耐震性を十分に確保する。
- ④航路・海域などに与える影響を考慮し、海上作業時間の短縮に努める。

以上の点に鑑み、重力式ケーソン構造や控え杭式矢板構造等、各種構造形式の比較検討を行った結果、当該岸壁構造としては、円筒形の鋼板セルを海底地盤に直接打設し、中詰土を鋼板セル内に投入することで岸壁を築造する「根入れ式鋼板セル構造」が最も適していると判断され、同構造形式が耐震強化岸壁として初めて採用された。

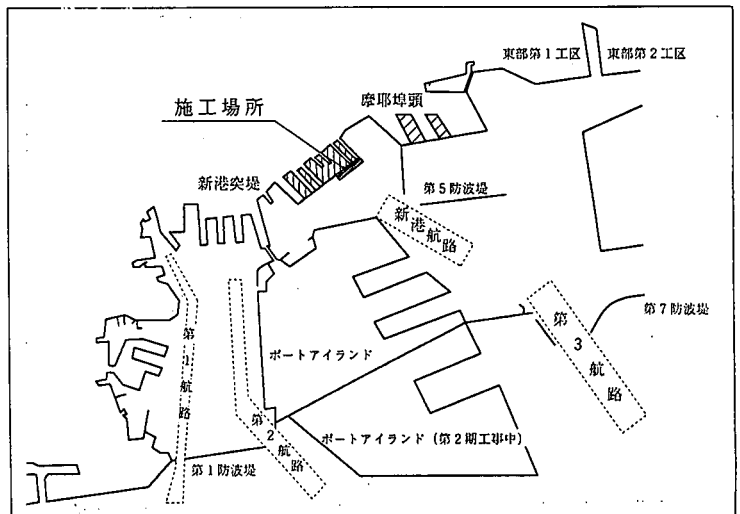


図-1 新港東地区-12m岸壁位置図

* 正会員 前 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部

** 正会員 りんかい建設株式会社 神戸新港作業所

*** 正会員 住友金属工業株式会社 土木・橋梁技術部 (〒100 東京都千代田区大手町1-1-3)

根入れ式鋼板セル構造の特徴は以下の通りである。

- ①岸壁部の早期建設および背後埋立域の早期確保が可能。
- ②海上作業時間が短く、航路などへ与える影響が少ない。
- ③根入れ式であるため、地盤改良を必要とせず、工事発生土がない。
- ④重力式構造に根入れ式機能を併せ持つため、優れた耐震性を有する。

以下に、耐震強化岸壁（設計震度0.25）として初めて根入れ式鋼板セル構造を採用した新港東地区 -12m岸壁の設計、施工および耐震性の評価について記述する。

3. 岸壁構造

新港東地区 -12m岸壁は、延長 480m、取付け部約 115m、計画水深 -12m、設計震度0.25の耐震強化岸壁である。標準断面図を図-2 に示す。本岸壁では、直径20m、高さ19m（打設深さ -17m）、板厚10mmの鋼板セルが計25函用いられ、鋼板セル相互の間は、鋼板を円弧状に製作したアーク（半径5.97m、高さ19m（打設深さ -17m）、板厚9mm、計48枚）でつなぎ、鋼板セルおよびアーク内部に中詰材を投入することにより連続壁体が構築されている。施工現場の地盤は、粘性土層と砂質土層が互層となっているが、地盤改良は行わず -16.5m以深の砂質土層に直接鋼板セルを打設し十分な安定性を確保した。

本岸壁の構造上の主な特徴を以下に示す。

①中詰材・裏埋材

液状化対策を考慮し、中詰材および裏埋材に石材を用いた。中詰材には砂岩ずりを用い、裏埋材はセルの後方28.7mを裏埋管理区域（液状化対策範囲）とし、岸壁部の建設を先行するため裏込石（1～200kg/個）および裏埋材（雑石）を投入した。

②上部コンクリート

工期短縮の観点から、上部コンクリートを大型のプレキャストブロック（長さ約22～33m）とした。上載荷重および上部コンクリートの重量は下層に場所打ちされた調整コンクリートを介して鋼板セルおよびアーク本体に支持させる構造とした。鋼板セルおよびアークの上端部には支圧板および補強板を溶接し、鉛直荷重に対して十分な強度を有する構造とした。

③防食工

供用期間内における耐震強化岸壁としての機能を完全なものとするため、セル殻前面を全て防食コンクリート（厚さ25cm以上）で被覆した。防食コンクリートは、型枠への側圧低減を考慮し、水中不

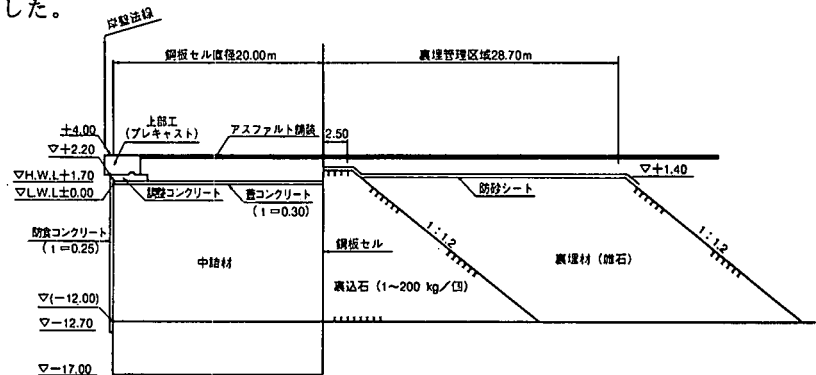


図-2 標準断面図

分離性軽量コンクリートを用いるとともに、コールドジョイントを防止した段階打設方式により打設し、スタッドジョーブルおよび鉄筋で鋼板セルおよびアークと一体化した。

4. 設計概要

(1) 設計条件

設計は、港湾の施設の技術上の基準および道路橋示方書に準拠し行った。設計条件は、表-1 の通りである。

表-1 設計条件

設計水深	-12.7m	現地地盤条件	
潮位	H. W. L. +1.70m	▽-12.7m(設計水深)	
	L. W. L. ±0.00m	粘性土	$\gamma' = 0.5 \text{ tf/m}^3$
	R. W. L. +1.10m	▽-14.0m	$c = 0.4 \text{ z tf/m}^2$ (z=0 at -12.0m)
埋立天端	+4.00m	砂質土	$\gamma' = 1.0 \text{ tf/m}^3$
設計震度	Kh 0.25	▽-16.0m	$\phi = 35^\circ$
	Kv 0.00	有機質土	$\gamma' = 1.0 \text{ tf/m}^3$
上載荷重	常時 2.0 tf/m ²	▽-16.5m	$\phi = 30^\circ$
	地震時 1.0 tf/m ²	砂質土	$\gamma' = 1.0 \text{ tf/m}^3$
耐用年数	50年		$\phi = 35^\circ$

(2) 設計概要

根入れ式鋼板セル構造は根入れ部を持つ重力式構造物であり、設計の流れは図-3 に示すとおりである³⁾。

1) 耐震設計

設計震度 $K_h=0.25$ とし設計した。中詰材、裏込石は液状化対策として石材を用い、それぞれ $\phi=30$ 度、 $\phi=40$ 度とした。

2) 上部工

上部工は、プレキャスト化した上部ブロックおよび調整コンクリートから構成され、鋼板セルおよびアークに支持されるものとした。上部ブロックは想定される上載荷重に対してFEM解析を行い、十分な強度を有する構造とした。さらに、土圧および牽引力等の外力に対しても十分な安定性を保つことおよび吊り上げ時の荷重に対して十分強度を有する構造とした。

調整コンクリートは上部ブロックを支持し、鋼板セルおよびアークに確実に荷重を伝達する構造とした。

3) 腐食対策

根入れ式鋼板セル構造の防食対策は、セル天端～L.W.L.-1.0mまでを防食コンクリートで被覆し、L.W.L.-1.0m～海底面までを電気防食とする場合が多い。しかし、本岸壁は耐震強化岸壁であることを鑑み、耐用期間内(50年)における鋼板の防食をより完全なものとするため、セル・アークの露出面全てを防食コンクリートで被覆した。ただし、防食コンクリートの損傷(5%)を考慮して、海底土中部を含む海側の鋼板に対して電気防食(50年)を併用した。防食電流密度は、防食コンクリート部で $15\text{mA}/\text{m}^2$ 、海底土中部で $30\text{mA}/\text{m}^2$ とした。

4) 鋼板の板厚

中詰材の内部土圧により発生するフープテンションに対し十分な板厚を確保した。鋼板セルは、鋼板表裏で各々 $0.02\text{mm}/\text{年}$ の腐食速度を考慮して 10mm とした(計算上の必要板厚は 9.12mm)。アーク部の必要板厚は約 6mm となったが打設時の必要板厚から 9mm とした。

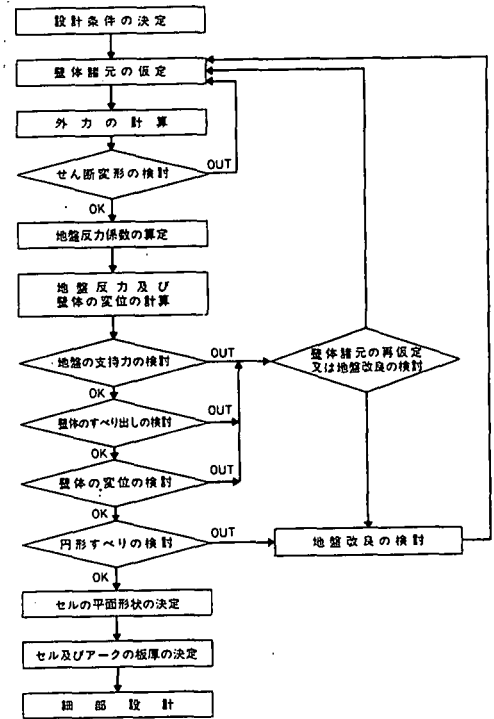


図-3 設計フロー図

5. 施工内容

(1) 鋼板セルの製作

鋼板セルおよびアークは和歌山市内の製作ヤードで製作し、台船(セル用4000t、アーク用3000t)にて神戸港まで運搬した。鋼板セルは4分割に縦割りした1/4円弧セルブロックを定盤・曲台上で製作し、大組台上で4枚のセルブロックを建て込み・溶接し円筒状の鋼板セルを製作した。アークはセルブロック同様、定盤・曲台上で製作した(図-4)。

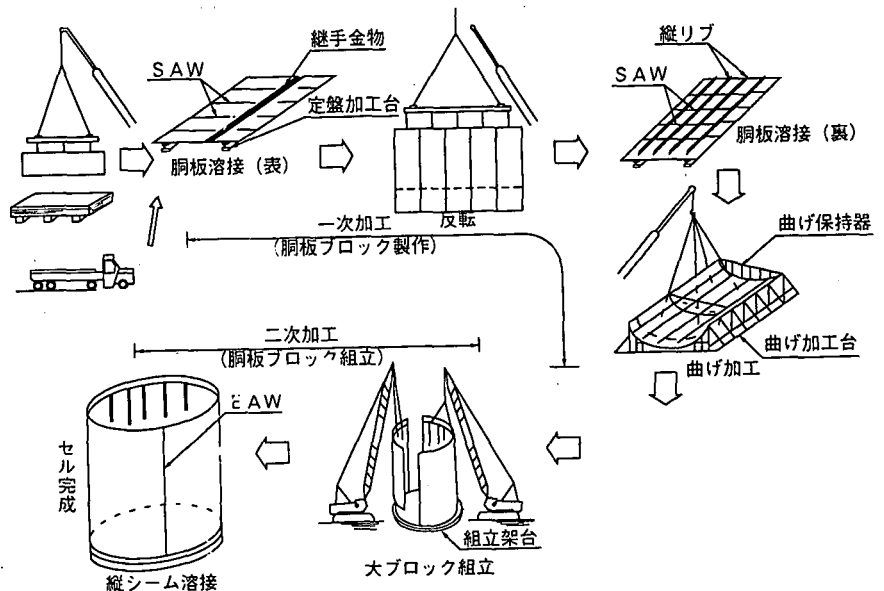


図-4 鋼板セルの製作概要

(2) 鋼板セルの施工

1) 概要

鋼板セルの施工フローを図-5 に示す。鋼板セルは起重機船を用い一気に打設し、打設後すぐに中詰材を投入することにより構造上の安定を図り、セル間にはアークを打設し、中詰材を投入することにより連続壁体を形成している。その後、鋼板セルとアークの継手処理を施し、蓋コンクリート、防食工、裏込工、上部工等の施工を行い岸壁を構築している。以下に各工種について記述する。

2) 打設工

セルおよびアークの打設はベースリングにパイプロハンマー（セル10台、アーク3台）を取り付けた打設装置を起重機船に機装し、パイプロハンマーの同調運転により一気に打設した。起重機船は鋼板セルの打設に1300t吊り、アークの打設に200t吊りを用いた。打設工程は、鋼板セルが1函/日、アークが4枚/日であった（写真-1）。

3) 中詰工

中詰材には淡路島産の砂岩ずり（0～100mm）を用い、全てリクレーマー船（2000t/h）で投入した。中詰材の投入は鋼板セルを打設した日のうちに全体の約6割を投入することにより、セル全体の短期安定性を確保した（写真-2）。蓋コンクリートは、中詰材の安定後ミキサ船（90m³/h）により海上より打設した。施工目地には樹脂発泡体（t=10mm）を用いた。

4) 継手処理工

継手処理はアーク部の中詰材の流出防止や止水性を高める目的で実施するものであり、中詰材投入後、袋詰めモルタルを施工した。さらに、アーク中詰材投入時の中詰材の流出防止対策として継手部中詰め側に防砂板（ゴム製）を取り付けた（図-6）。

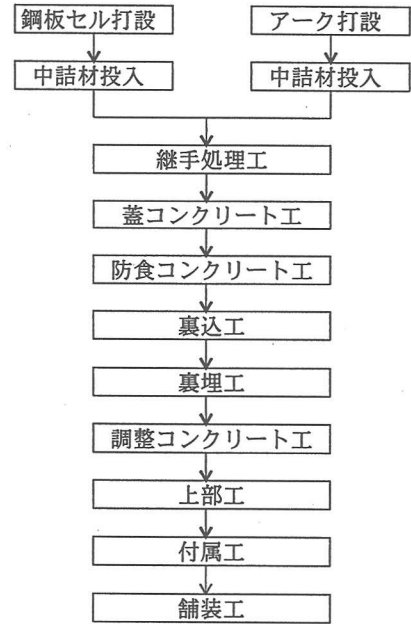


図-5 施工フロー図

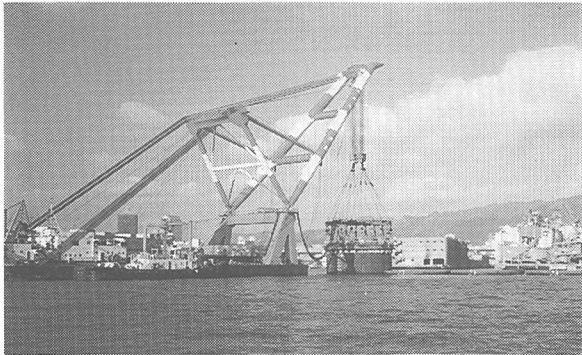


写真-1 鋼板セルの打設



写真-2 中詰材投入

5) 防食コンクリート工

防食対策として、海底面（-12.7m）～セル天端（+2.0m）までの鋼板の露出面全てを防食コンクリートで被覆した。コンクリートは、型枠に作用する側圧を極力低減させるため水中不分離性軽量コンクリート（密度約1.75t/m³）を使用した。配合表および単位量を表-2、表-3に示す。型枠は鋼製曲面型枠とし、セル用型枠はアーク本体から反力を、アーク用型枠は先行して施工されるセル防食コンクリート本体から反力を取る構造とした。

防食コンクリートは、ミキサ船（パッチ式1.50m³）を用い、型枠中央に配置されたトレミー管により打設した。今回使用する水中不分離性軽量コンクリートに関しては事前に試験施工を実施し、その流動性および側圧の経時変化などを十分に把握した上で本工事を行った。以下に試験施工により得られた主な知見を示す。

○流動性：打設直後から約20時間後までのコンクリート上面の経時変化を図-7に示す。コンクリートが自重によりほぼ水平（勾配約1/375）になっており、高い流動性が確認された。

○側圧の経時変化：上段（高さ1.7m）および下段（高さ0.3m）における側圧の経時変化を図-8に示す。コンクリートの打設高さは1層目が約1.6m、2層目が約2.6mである。打設直後には、コンクリート部を密度1.75t/m³の液体と仮定した計算値とほぼ等しい側圧が作用しているが、凝結が始まる約5時間後から側圧の

表-2 配合表

圧縮強度	24N/mm ²
粗骨材最大寸法	20mm
水・セメント比	50%
空気量	4.5%以下
細骨材率	40%
スランプフロー	60±5.0cm

表-3 単位量(1m³あたり)

水	270kg
セメント	566kg
細骨材	378kg
粗骨材	498kg
不分離剤	3.25kg
流動化剤	13ℓ

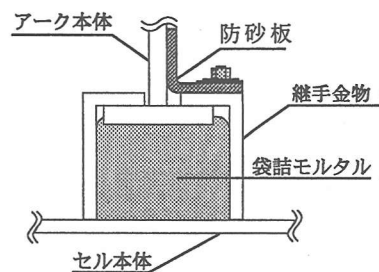


図-6 継手部の構造

低下が始まり、約14時間後には半分程度になることが確認された。図中1層目打設後の側圧の低下は水位の低下によるものである。

本工事では、型枠に発生する張力が許容耐荷力を越えないように、また、打ち継ぎ目にコールドジョイント等の不良箇所が発生しないように十分配慮し、コンクリートを打設した。コンクリートの打ち上げ高さおよび打設の時間間隔は、試験施工で確認された側圧の低下特性を考慮して設定し、鋼板セル部は5層、アーキ部は7層の段階打設を実施した。図-9に鋼板セルの場合のコンクリートの打上げ高さで発生側圧の管理図を示す。コンクリート打設中全てにおいて、側圧が限界値以内になるよう計画した。

最初のセルおよびアーキの防食コンクリート打設に際しては、より安全を期するため、側圧および水平方向応力度を計測し、型枠に作用している張力を予測しつつ打設した。その結果、いずれの場合も側圧の低下傾向が認められるとともに、限界値を超えることなく打設が完了した(写真-3)。

6) 上部工

上部工の自重および上載荷重は全て鋼板セルおよびアーキで支持する構造であるため、鋼板セルおよびアーキには補強リブを溶接した。補強リブの形状は、中詰砕石が80cm沈下した状態を想定して決定した(図-10)。

調整コンクリートは所定の形状に現場打ちした。埋立て側には上部荷重を鋼板セルに伝えるためH形鋼(H-414×405×18×28)を埋設した。上面には凸部を設け上部プレキャストブロックの凹部と嵌合した。

上部プレキャストブロックは、高さ約1.8m、幅3.0m、長さ22m～33mであり、1体当たりの重量は約285t～430tである。プレキャストブロックの製作は、鋼板セル背後の裏埋

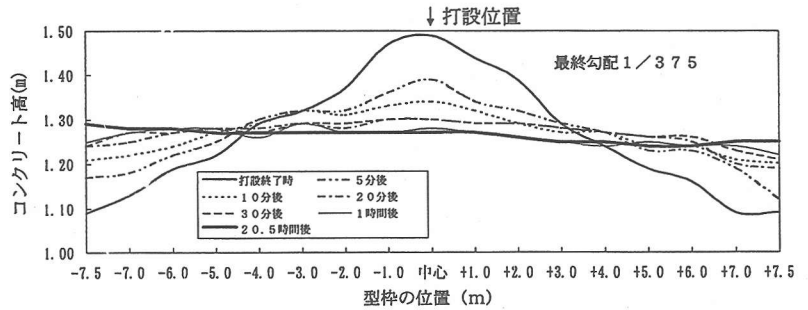


図-7 コンクリート天端の経時変化

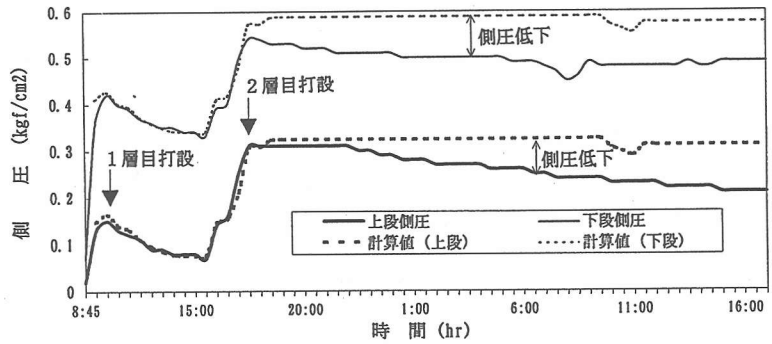


図-8 防食コンクリート側圧の経時変化

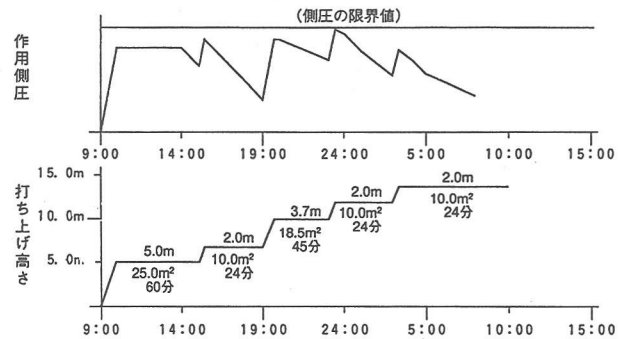


図-9 コンクリートの打上げ高さで発生側圧の関係

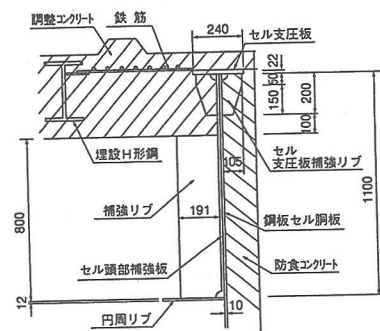


図-10 鋼板セル上部補強

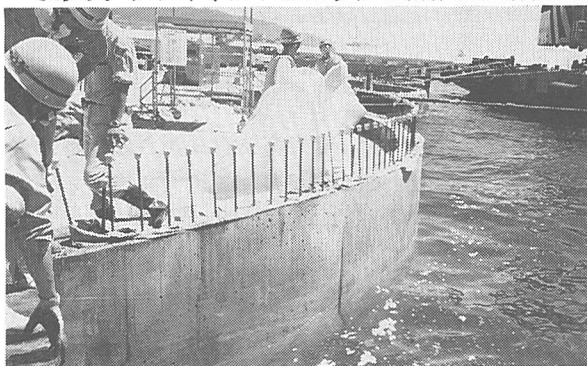


写真-3 防食コンクリート



写真-4 上部工の据付

部で行い、1500 t 起重機船で一括据え付けを行った（写真-4）。

端部の鋼板セルであるNO. 1セルおよび NO. 25セルの上部工は形状が異形であるため場所打ちコンクリートとし、一部上載荷重を鋼管杭で支持している。

6. 本岸壁の耐震性評価²⁾

本岸壁の耐震性の検証手法としては、1G場における模型振動実験および有効応力解析手法に基づく数値シミュレーション（2次元有効応力解析プログラムFLIPを使用）により行った。検証に際して用いた入力地震波は、1995年兵庫県南部地震時のポートアイランドでの鉛直アレー記録（神戸市観測）のK.P.-28m地点の加速度記録を用いた。

(1) 振動模型実験

実験では、縮尺1/20の鋼板セル3函、アーチ2組を長さ4.0m、幅3.3m、高さ2.0mの振動箱内に設置し、基礎地盤に砂、裏込石に砕石6号、埋立土にまさ土を用いて模型を作成し、長さ15m、幅15m、深さ2mの大型水槽底に設置された直径5.5mの円形3次元水中振動台により加振した。

実験結果より実構造物に換算した変形量は、法線直角方向に63.6cm、鉛直方向に27.1cmであり、十分小さな値であることが確認できた。

(2) 数値シミュレーション

数値シミュレーションの解析結果（残留変形量）を図-11に示す。解析結果より残留変形量は法線直角方向に54cm、鉛直方向に17cmであり、模型振動実験の結果と同等な値が得られた。

以上、模型振動実験の結果および数値シミュレーションの解析結果より本岸壁の耐震性は非常に良好であることが確認できた。

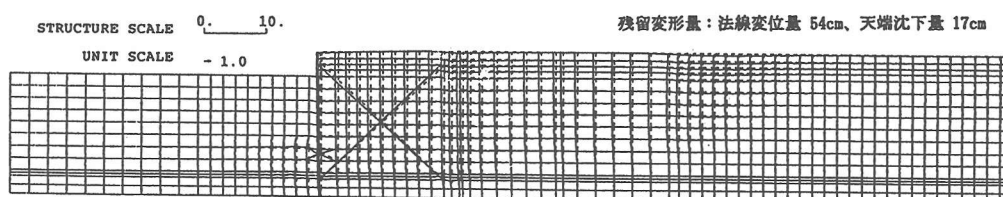


図-11 数値シミュレーション解析結果(残留変形量)

7. まとめ

根入れ式鋼板セル構造による本岸壁の建設工事では、約5ヶ月という短期間で岸壁部の工事を概ね完了し、突堤間の締め切りおよびガレキなどの処分地の確保が可能となった。また、約1年半の工期で岸壁の建設が完了し、大水深および船舶の幅輻する海域での施工性、安全性および品質面で有効な成果が得られた。さらに、本岸壁の耐震性については、1G場での模型振動実験および有効応力解析による検証の結果、兵庫県南部地震クラスの地震動においても非常に優れた耐震性を有していることが確認された。

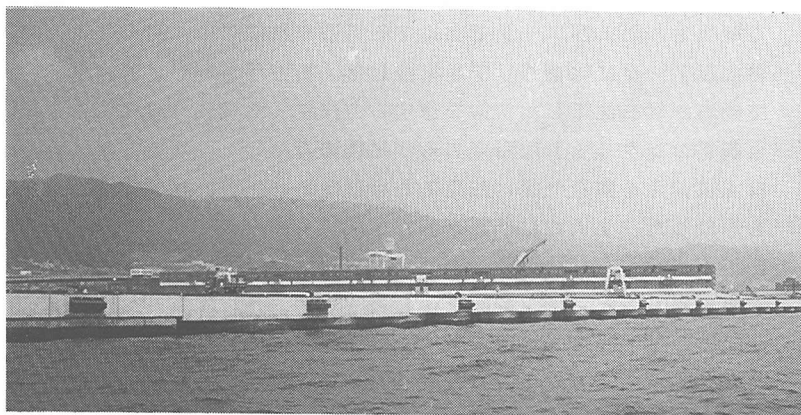


写真-5 新港東地区 -12m岸壁完成写真

謝辞：本報告をまとめるにあたり、模型振動実験に関しては港湾技術研究所、菅野高弘室長からご指導を受け、数値シミュレーションは港湾技術研究所、井合進室長からご指導を頂いた。ここに深甚なる謝意を表する。

(参考文献)

- 1) 神戸港復興計画委員会：神戸港復興計画委員会報告書、平成7年4月
- 2) 松永ほか：神戸港震災復興における耐震強化岸壁の設計・施工、第13回港湾技術報告会報告概要集、(財)沿岸開発技術研究センター、pp.171-194、1996年11月
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：根入れ式鋼板セル設計指針、昭和60年10月