

重力式（ケーソン）係船岸の耐震補強事例の設計と施工

(株)大林組 正会員 佐村維要
 日鉄鉱コンサルタント(株) 正会員 石原邦彦
 日鉄鉱業(株) 正会員 長野哲夫
 (株)大林組 正会員 中村 泰

1. はじめに

本事例は、高知県須崎市に在る日鉄鉱業株式会社鳥形山鉱業所において、昭和46年に建設された石灰石積出し用のケーソンを用いた重力式係船岸を既設岸壁前面に直杭式横棧橋を構築する事により、耐震補強を行った事例の設計と施工について報告するものである。

当岸壁は、建設以来25年以上経過し、対象船舶の増大と経年劣化により、補強・更新する必要が生じていた。本事例は、これらの状況に対応するため、バース前面水深をDL-10mからDL-12mに増大し（ただし、今回工事では水深の増大は行わず、将来計画として設計のみ対応した）、合わせて既設岸壁の耐震性能と耐波性能の強化を図る目的で、既設ケーソン岸壁前面に直杭式横棧橋構造のバースを増設すると共に、直杭式横棧橋の下部海面を利用して、既設岸壁前面を根固め被覆マウンドにより耐震補強を行ったものである。

尚、本報告ではシンポジウムの主旨に鑑み、耐波設計については概略のみを述べるにとどめ、主として耐震補強を中心に報告する事とする。

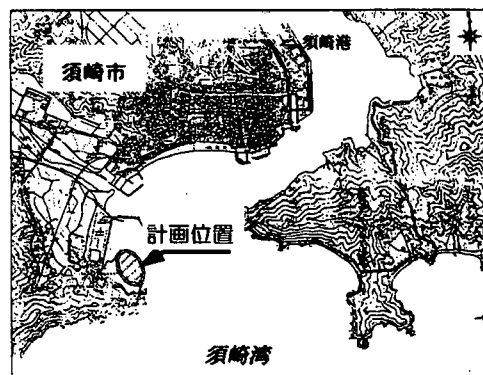


図-1 位置図

2. 対象施設の概要

対象施設は、図-1に示す様に、高知県須崎港に位置し、現行水深DL-10m、延長270mの石灰石積出し用バースである。既設岸壁の構造は、海底面に敷設された基礎捨石マウンド上に、コンクリートケーソンを設置し、背面を埋立てた重力式係船岸である。これに対して、更新後の岸壁構造は、基礎構造として外径φ1,200mmの厚肉鋼管杭を既設岸壁に平行に打設し、上部工は鉄筋コンクリート梁スラブ構造の直杭式横棧橋構造である。図-2に更新後の岸壁の標準断面を、図-3に平面図を示す。

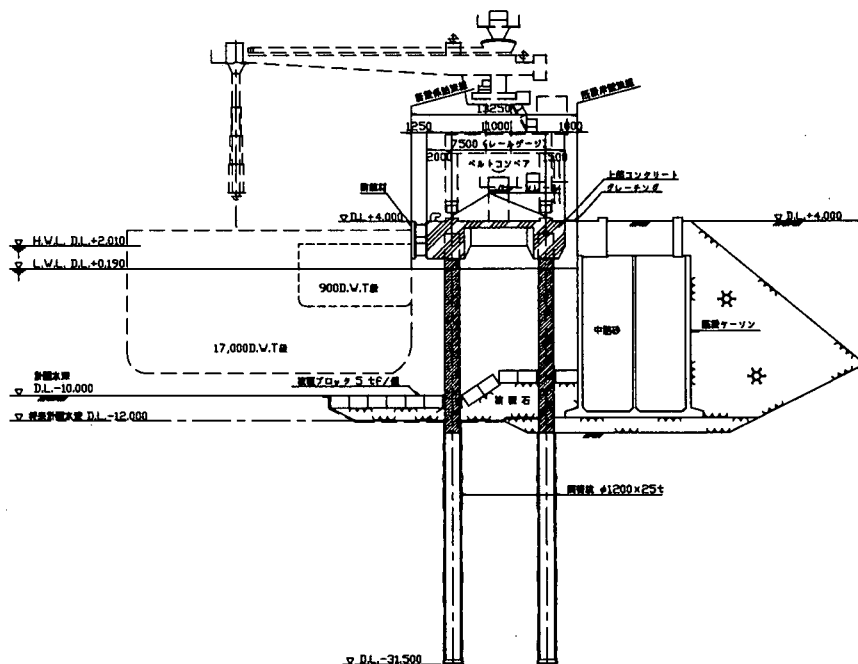


図-2 係船岸標準断面図

建設地点の土質は、図-4に示す様に、DL-35m付近に基盤層である中生代に生成した粗粒砂岩層が存在し、その上部を密な砂礫層

キーワード；ケーソン、岸壁、鋼管杭、横棧橋、地震応答解析

連絡先；住所 東京都港区港南2-15-2、電話 03-5247-8638、Fax 03-5247-8639

が海底まで覆っている。砂礫層は海底面下DL-25m程度まではN値が20~50程度であり、DL-25m以深はおおむねN値が50以上となっている。

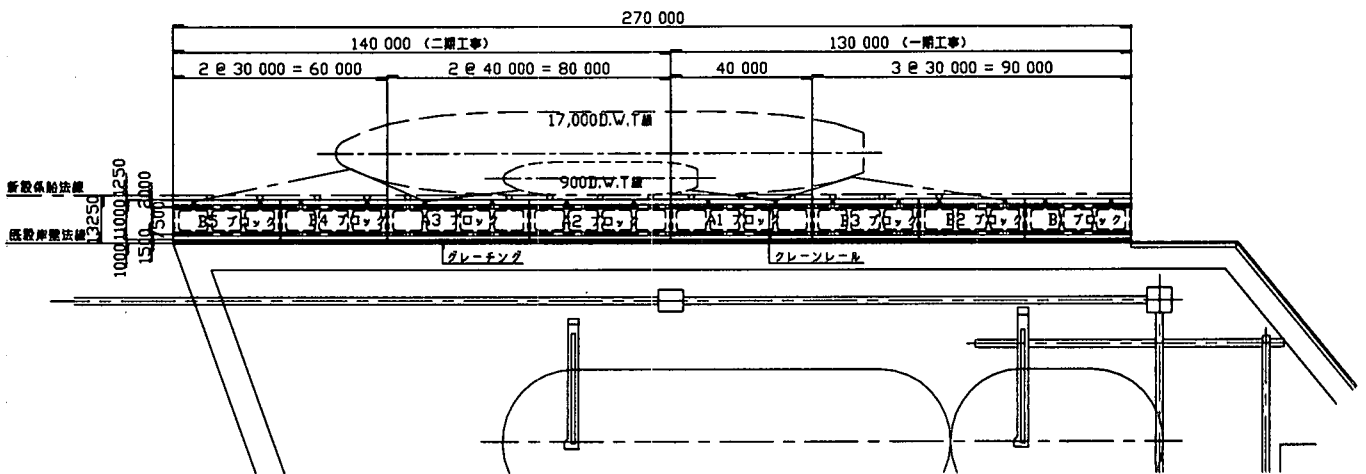


図-3 係船岸平面図

3. 補強工法の選定

3.1 補強工法の選定条件

補強工法を選定するにあたっては、以下の設計・施工上の選定条件を満足する必要があった。

- ① 通常の営業行為である船舶荷役作業を中断することなく工事を施工できること。
- ② 現行の 17,000DWT級から最大 23,000DWT級の船舶が接岸可能なように、既設岸壁直前で水深をDL-10mからDL-12mに増大することが可能であること。
- ③ 礫質地盤に適合した工法であること。
- ④ 既設岸壁直前での近接施工であり、既設岸壁に有害な影響を与えないこと。
- ⑤ 2年以内に完成すること。

3.2 補強工法の比較検討

上記条件を満足するため、表-1の通り10案について比較検討した。

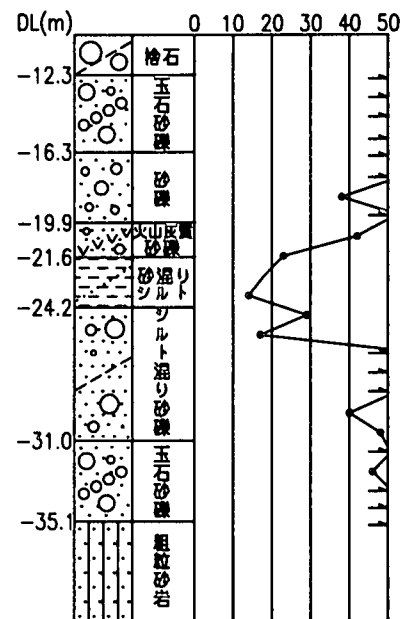


図-4 土層断面図

表-1 補強工法の比較

番号	名称	係船岸形式	基礎構造	備考
①	鋼管杭式デタッチドピア (狭幅) 案	デタッチドピア	鋼管杭	
②	鋼管杭式デタッチドピア (広幅) 案	デタッチドピア	鋼管杭	
③	ケーソン式沖出し連続デタッチドピア案	デタッチドピア	ケーソン	
④	ケーソン式沖出しデタッチドピア案	デタッチドピア	ケーソン	
⑤	ケーソン式岸壁隣接デタッチドピア案	デタッチドピア	ケーソン	
⑥	ケーソン式岸壁案	直立岸壁	ケーソン	既設岸壁構造
⑦	プレハブ鋼矢板セル式岸壁案	直立岸壁	鋼矢板セル	
⑧	鋼管矢板控式岸壁案	直立岸壁	鋼管矢板	
⑨	二重鋼管矢板式岸壁案	直立岸壁	鋼管矢板	
⑩	鋼管杭式横棧橋案	横棧橋	鋼管杭	採用案

このうち、工程上、公有水面埋立を伴わないもの、岸壁前面の船舶回頭水域の制限より、なるべく沖出し距離が小さいもの、既設ケーソン構造補強の必要のないもの及び従来の実績等より、上表のうち、

⑤ケーソン式岸壁隣接デタッチドピア案 (図-5)

⑩鋼管杭式横棧橋案 (図-2 参照)

について、詳細比較検討した。既設岸壁は海底面より直接礫層が存在すること等より、ケーソン構造が採用されていたが、

- ①近年の杭打工法の技術革新により、厚肉鋼管杭とパイプロフォンサー工法等を採用することによって、礫質地盤に確実にかつ経済的に基礎杭を打設することが可能になったこと。
- ②船舶荷役作業を継続しながらの工事であると共に急速・分割施工が可能であること。
- ③構造物の固有周期を長くし、直下型地震に対応できること。
- ④沖出し距離を若干小さくできること。
- ⑤新たに近接地でケーソンヤードを確保する必要がないこと。

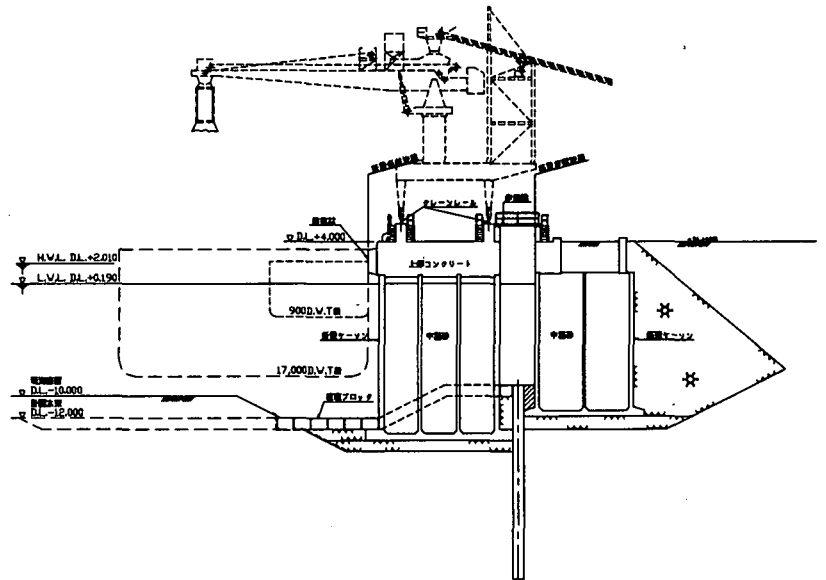


図-5 ケーソン式岸壁隣接デタッチドピア案

等から、工期・工費ともやや有利である直杭式横棧橋案を採用した。

4. 補強構造の設計

4.1 補強構造設計の考え方

本バースの補強設計にあたっては、前述の比較検討結果より鋼管杭式横棧橋形式を採用し、基礎構造は、シップロダー基礎も兼用して、岸壁法線直角方向に2列の直杭式鋼管杭基礎とした。上部構造は、プレキャスト化も検討したが、製作ヤード、クレーン吊能力、荒天時の作業性等を考慮して場所打ち鉄筋コンクリート梁スラブ構造とした。

工事施工中荷役作業を中断することができないため、棧橋全長を8ブロックに分割、全延長を一期工事、二期工事と2分割して施工し、一期工事施工中は既設バースを荷役作業に使用し、二期工事施工中は一期工事完成バースを使用することにより施工中の荷役作業に対応した。表-2に主な設計条件を示す。

表-2 主な設計条件

岸壁諸元	岸壁形式 鋼管杭式横棧橋 (更新後)	
	計画天端高	DL+4.0mm
計画水深	DL-10.0m (将来 12.0m)	
対象船舶	最大	24,000DWT級 満載喫水 10.8m (将来)
	通常	17,000DWT級 満載喫水 8.4m
潮位	朔望平均満潮面	H.W.L DL+2.01m
	東京湾平均海面	T.P DL+1.225m
	朔望平均干潮面	L.W.L DL+0.19m
	工事基準面	DL±0.0
設計波浪 (沖波)	沖波波高	Ho=10.9m
	周期	To=14.0m
設計震度	静的水平震度 kh=0.10	
主な上載荷重	シップロダー	2,000T/H 自重約 250t
	ベルトコンベア	2,000T/H B=1.050m

4.2 耐震設計の考え方

当該構造物は、港湾施設であり、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(平成元年 日本港湾協会)に準拠して耐震設計を行った。

地震力は静的震度法によることとし、設計水平震度は同基準に従って、 $k_h=0.10$ と設定した。基礎杭は、上部工(シップロダー含む)慣性力による曲げ応力及び鉛直反力に耐え得るよう外径 1,200mm、肉厚 $t=25\text{mm}$ とした。

着工前に兵庫県南部地震が発生したため、可能な限りその知見を反映することとした。特に同地震時神戸港においては、ケーソンを用いた重力式岸壁に甚大な被害(1m を超える大変位及び沈下)が生じたが、杭式栈橋については被害が少なかった。

そこで、基礎杭用根固めブロックを利用して、既設ケーソン前面に被覆根固めマウンドを設置することにより、既設岸壁の滑動抵抗を増大し、大変形を防止することとした。又、新設栈橋の法線直角方向梁については、当初設計時、既設栈橋に接する構造であったが、新設栈橋と旧岸壁間を 1m 離隔し、可動式グレーチングを設置することで構造形式の異なる新旧岸壁間の地震時変位を吸収できる構造とすると共に、万一、設計想定外地震が発生し、既設岸壁が大変形した場合も、新設栈橋の被害が最小になる様配慮した。

4.3 耐波設計の考え方

当建設地点は、須崎湾口にあり、台風時等太平洋の外海で発生した長周期の波が湾内に進入するという特徴を持っている。従って、構造物を設計するにあたっては波の主方向に対して耐波設計を行う必要があった。対象構造物に作用する設計波は、波の周波数及び方向性について不規則性を考慮した不規則による波の変形解析を行い、来襲波の諸元を設定、構造物に作用する波力を算定して耐波設計を行った。

耐波性能を向上させるための設計のポイントは以下の通りである。

- ① 栈橋の 1 ブロック長を 30~40m と長大化し、不規則な波力の平均化を図った。
- ② 厚肉 ($t=25\text{mm}$) 鋼管杭を用いることにより、極力杭径を小さくし、杭本体に作用する波力の低減を図った。
- ③ 既設岸壁前面(新設栈橋下面)に、従来 1t 被覆石であったものを 5t 被覆ブロックに変更し、耐波性能を向上させた。

4.4 基礎構造設計の考え方

本構造物は、外力として地震力や波力など水平力が卓越するが、当該地点の地盤は海底面より N 値が 50 以上の礫質地盤であるため、施工機械等の条件より、斜杭構造の採用は困難であり、直杭構造であっても通常の打込工法では施工が不可能であった。

そこで、直杭式の厚肉鋼管杭(直径 1,200mm、肉厚 25mm)を採用し、ロックオーガーにより先行削孔、杭を建込み内部にセメントミルクを注入し、支持力を確保するために、最終 1m 程度は油圧ハンマにより打撃することとした(一期工事)。

又、二期工事においては、当時日本では実績がなかったが、工程上有利であったバイプロフォンサー工法を採用した。バイプロフォンサーはフランスで開発された世界最大級低周波油圧バイプロハンマであり、当時フランスより導入した第一号機であり、既設岸壁に悪影響を与えることなく、礫質地盤に直接杭を打設することが可能であった。

当時バイプロフォンサーによる国内での基礎杭を打設した実績がなく、従来の動的支持力公式を用いた打込管理方法が適用できないため、杭の打撃試験を実施し、波動理論を用いて打込み時の貫入抵抗を求め、これから杭の静的支持力を評価する管理手法を採用し、所定の杭の支持力を確認した。尚、最終打止めは一期工事と同様、油圧ハンマによる打撃を行い、従来の方法でも支持力をチェック・確認した。

5. 補強断面の耐震性能の照査

5.1 耐震性能照査

補強断面について、地震時の変形形態及び変形量を解析し、耐震性能の照査を行った。照査は、運輸省港湾研究所で開発、一般公開された「液状化による被害予測プログラム^{FLIP}(以下^{FLIP}と記す)」を用いて時刻歴動的解析を行った。^{FLIP}の特徴は、有効応力に基づく解析であり、従来の全応力解析では考慮できなかった

た過剰間隙水圧による地盤の復元力特性や減衰特性を表現でき、液状化現象を伴う残留変形等を合理的に予測できる点である。

5.2 入力地震動及び照査モデル

入力地震動は、十勝沖地震における八戸基盤波形、宮城県沖地震における大船渡基盤波形及び兵庫県南部地震におけるポートアイランド基盤波形の3波形とし、基盤入力加速度は設計静的地震動より100Galに調整したものを用いた(図-6)。

図-7に解析モデルを示す。解析ではケーソン、栈橋については線形要素、土層については双曲線モデルによる非線形要素とする。

5.3 解析結果

解析結果のうち、変位図を図-8に過剰間隙水圧の分布を図-9に、結果を取りまとめたものを表-3、図-10に示す。これによると基盤加速度100Galでは、発生応力、残留変形共小さく静的解析と同様である。また、既設ケーソン背面においても、過剰間隙水圧比が0.9未満となっており、液状化は発生しないことが確認されている。

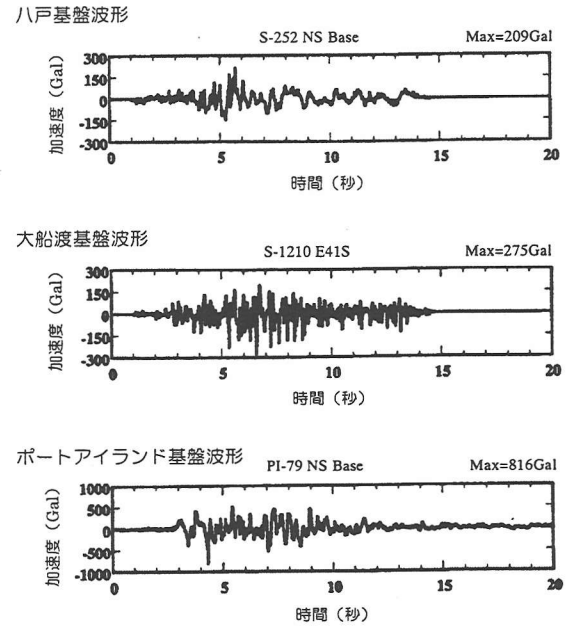


図-6 基盤入力地震動

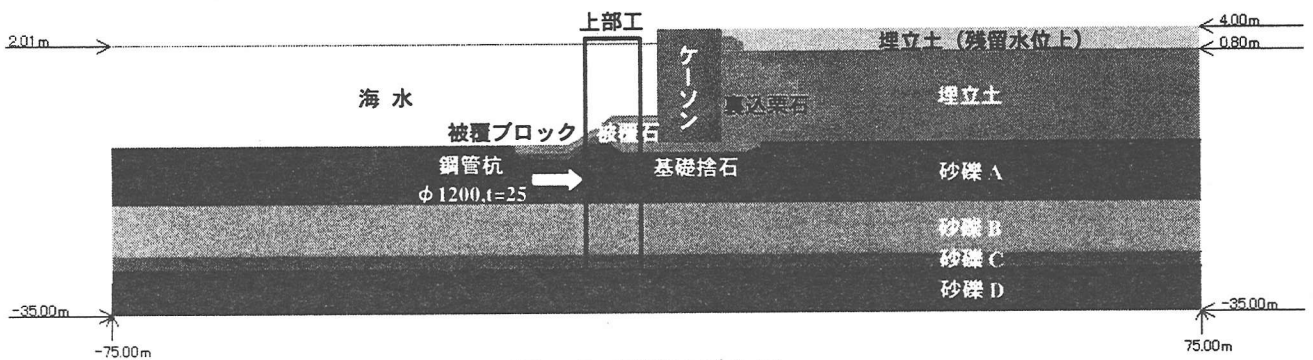


図-7 解析モデル図

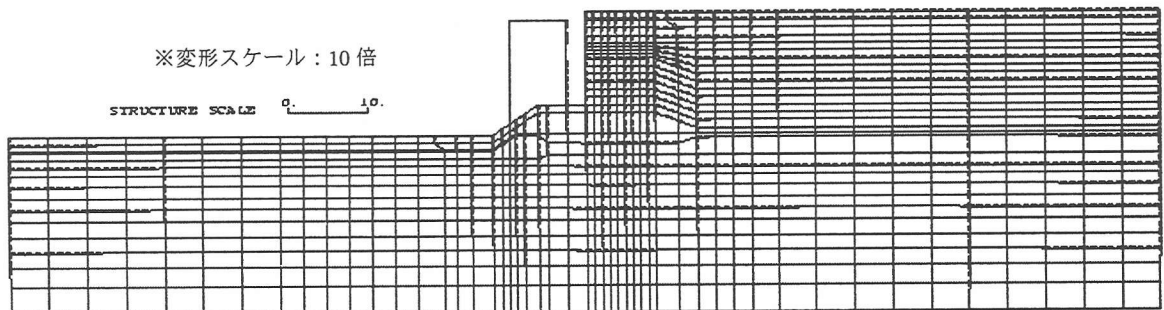


図-8 変形図 (PI-79 NS Base)

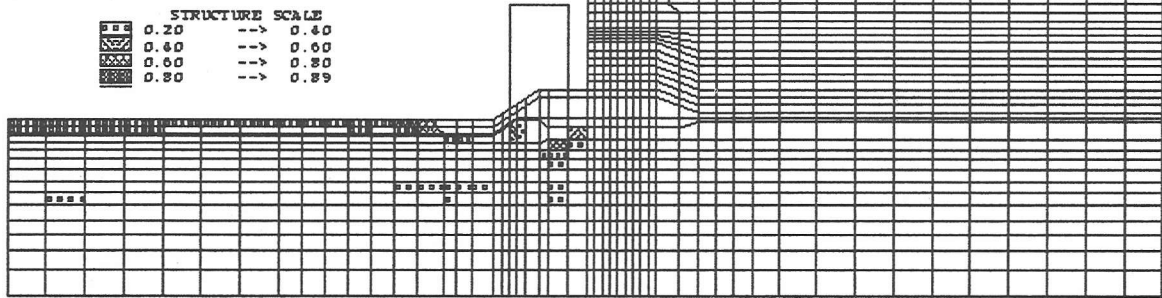


図-9 過剰間隙水圧比分布図 (PI-79 NS Base)

表-3 結果一覧表

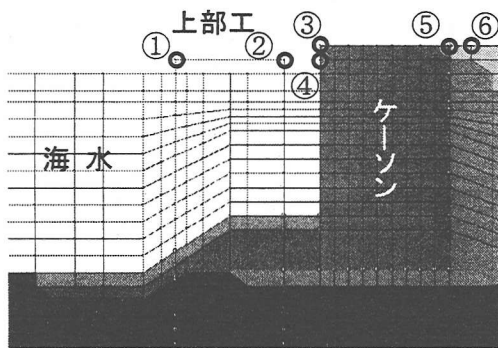


図-10 着目節点図

変位			(単位:m)		
ケース			CASE1	CASE2	CASE3
地震波			十勝沖地震	宮城県沖地震	兵庫県南部地震
			S-252 NS Base	S-1210 E41S	PI-79 NS Base
最大加速度			100Gal		
節点			加振後	加振後	加振後
上部工 (栈橋部)	①	水平変位	-0.023	-0.014	-0.017
		鉛直変位	-0.001	-0.001	-0.001
	②	水平変位	-0.023	-0.014	-0.017
		鉛直変位	-0.001	-0.001	-0.001
ケーソン	③	水平変位	-0.027	-0.018	-0.021
		鉛直変位	-0.009	-0.007	-0.007
	④	水平変位	-0.027	-0.017	-0.021
		鉛直変位	-0.009	-0.007	-0.007
地盤	⑤	水平変位	-0.027	-0.018	-0.021
		鉛直変位	-0.026	-0.019	-0.020
	⑥	水平変位	-0.028	-0.018	-0.021
		鉛直変位	-0.023	-0.017	-0.018

※水平変位の、-は左方向、+は右方向への変位。鉛直変位は、-は下方向、+は上方向への変位。

加速度 (単位:Gal)

ケース			CASE1	CASE2	CASE3
地震波			十勝沖地震	宮城県沖地震	兵庫県南部地震
			S-252 NS Base	S-1210 E41S	PI-79 NS Base
最大加速度			100Gal		
節点			時間最大値	時間最大値	時間最大値
上部工 (栈橋部)	①	水平	334.2	264.6	417.6
		②	水平	334.1	264.5
ケーソン	③	水平	177.4	170.0	161.3
		④	水平	172.8	156.6
地盤	⑤	水平	177.3	170.0	161.1
		⑥	水平	176.7	163.5

※時間最大加速度は、絶対値。

6. 補強構造の施工

6.1 施工順序

補強工事(土木工事)の施工順序を図-11に、完成状況を写真-1に、上部コンクリート及び基礎杭の施工状況を写真-2, 3に示す。本工事での施工上の主な留意点は以下の通りであった。

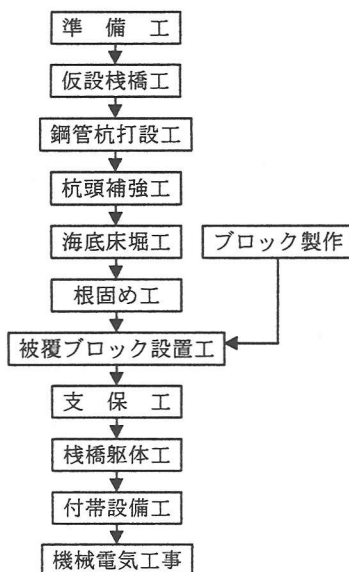


図-11 施工順序図

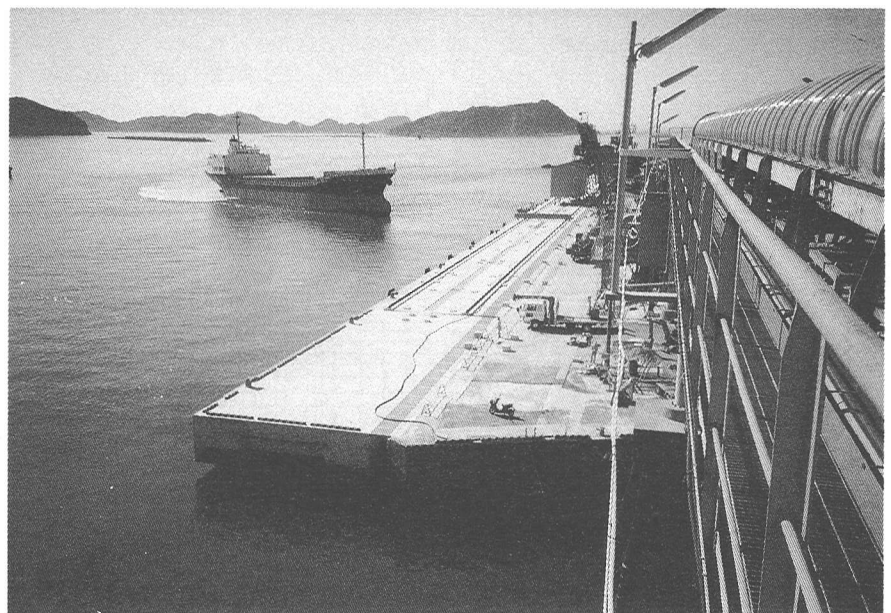


写真-1 完成写真

① 操業稼働中の工場内の工事であり、工事に隣接して船積荷役作業が行われており、又、土木工事完了後引き続いて行われる機械・電気工事（シップロダー、ベルトコンベア等）等との工程の調整・管理に配慮する必要があった。

② 太平洋上に面した湾口での工事であり、特に春・夏期の波浪による影響に配慮する必要があった。

③ 既設岸壁直前での近接工事であり、これらに有害な影響を与えない施工法を選定する必要があった。

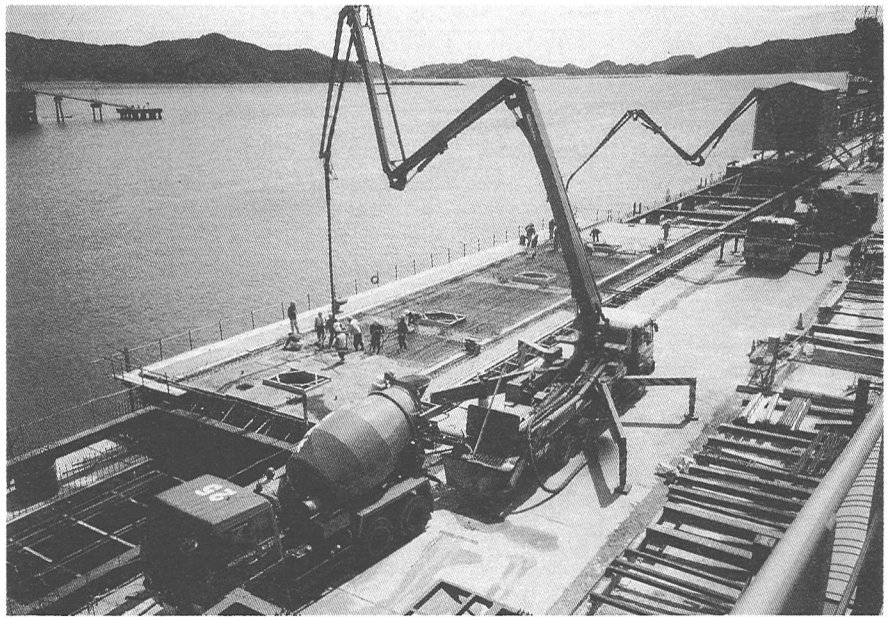


写真-2 上部コンクリート打設状況

④ 周辺は好漁場であり、杭打ち工事等の海上工事において、海洋汚染防止を図る必要があった。

6. 2 基礎杭の施工

当地点の地盤は、海底よりN値 50 を超える礫質地盤であったため、一期工事においては、内径 1,300mm のケーシングパイプを使用したロックオーガーにより削孔、鋼管杭を建て込み、最終長 1.5m程度を油圧ハンマーにより打撃、杭の支持力を確認して施工した。

二期工事においては、当時海外で実績があった、低周波油圧バイブロハンマーを使用したバイブロフォンサー工法を導入、実施した。一期工事と同じく油圧ハンマーにて最終打撃を行い杭の支持力を確認した。図-12 にバイブロフォンサー工法のフローチャートを示す。

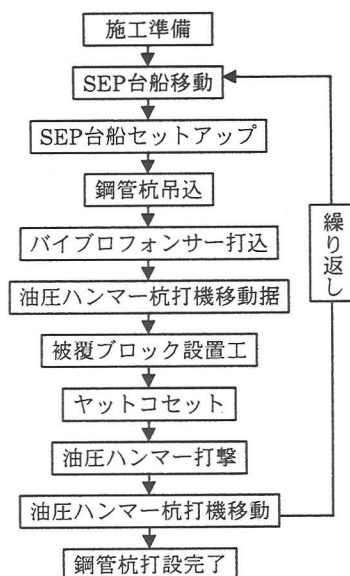


図-12 バイブロフォンサー工法フロー

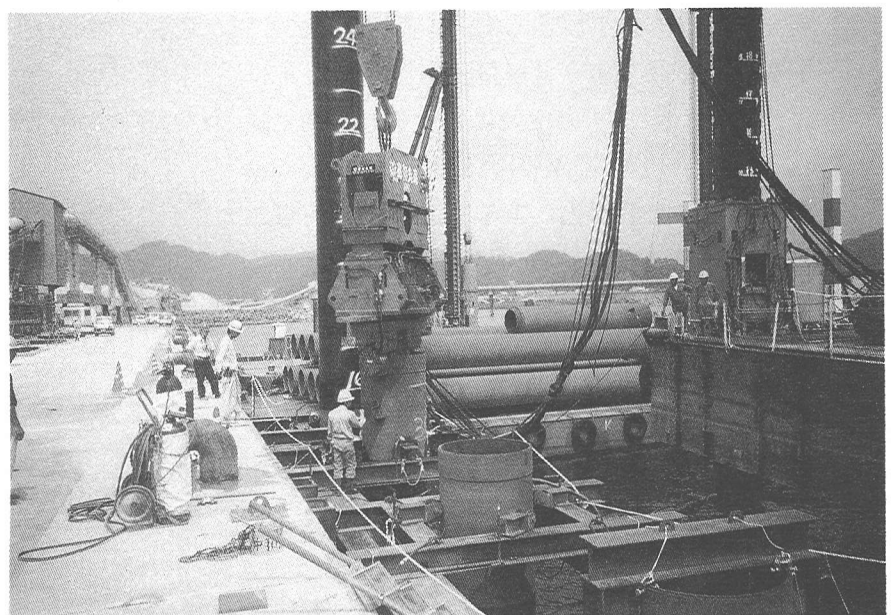


写真-3 杭打機設置状況

6. 3 施工工程

当工事においては、上記設計・施工の考え方に基づいて綿密な工程管理のもと工事を実施し、所定の2年間で本バースの更新工事を完了することができた。図-13 に実施工程表を示す。

工種	平成7年												平成8年												平成9年						
	6月	7	8	9	10	11	12	1月	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1月	2	3	4	5	6	7月					
準備工	(1期工事)													(2期工事)													後片付				
仮設棧橋工				解体																											
鋼管杭打設工(杭頭含)																															
床堀・根固め工																															
被覆ブロック製作設置工			製作											製作																	
支保工																															
棧橋躯体工(8'ブロック)																															
付帯設備・レール基礎工																															

図-13 実施工程表

7. あとがき

本事例は、稼働中のパースの耐震補強工事の事例であり、設計・施工上の理由から係船岸形式を重力式から直杭式横棧橋形式へ変更したものである。これは、既設岸壁建設当時は不可能であった地盤への杭打ち工事が新技術の開発によって可能になったためでもある。このような形式の変更を伴った岸壁の更新例は阪神・淡路大震災における神戸港の復旧事例にも採用されている。

本事例が、港湾施設をはじめとする今後のインフラストラクチャーの維持、リニューアル技術の発展の一助となることを期待する。

最後に、本稿を執筆するにあたり、日鉄鉱業株式会社鳥形山鉱業所の関係者の方々、株式会社大林組工事関係者の方々はじめ多数の方に御世話になりました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 喜多, 崎本他: バイプロハンマとインパクトハンマによる打撃挙動の比較, 第32回地盤工学研究発表会, 平成9年度発表講演集 P1619~1620
- 2) 崎本, 喜多他: バイプロハンマにより施工された鋼管杭のセットアップについて, 第32回地盤工学研究発表会, 平成9年度発表講演集 P1621~1622
- 3) 井合, 松永他: ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第4号, 1990
- 4) 森田, 井合他: 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法, 港研資料 No. 869
- 5) 港湾構造物設計事例集(上巻)第1編係留施設, 第16章耐震強化岸壁の変形照査, (財)沿岸開発技術センター, 1999