

鋼管杭とプレキャストブロックの一体連結構造による岸壁の復旧

Application of a composite pier structure by steel piles and precast concrete blocks to the restoration of a damaged quay wall in the port of Kobe

松永康男*・木村 博*・平野 功**・角谷竜二**・高木健司***・岡 幸夫****

Yasuo Matsunaga, Hiroshi Kimura, Isao Hirano, Ryuji Kakutani, Kenji Takaki, Yukio Oka

A new type of pier, which is composed of a composite structure by steel piles and precast concrete blocks, is applied to the restoration work of a damaged quay wall at Shinko Pier No. 5 in the port of Kobe by the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. The new pier has an impermeable wall at backside for earth retaining and a permeable wall at seaside for dissipating reflected waves. This type of pier, which has the characteristics of high earthquake-proof, high resistance to erosion and rapid execution at sea, can be constructed in relatively small forwarding width in front of the damaged quay.

Keywords : piled pier, precast concrete block, composite structure, earthquake restoration

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震で被災した神戸港の復興計画においては、市街地復興との連携を考慮して図-1に示すように新港東地区の第5突堤から第8突堤の間と、摩耶埠頭の第1突堤からコンテナターミナルの間を瓦礫で埋め立てる計画となった。この計画は、地震で発生した瓦礫の処理と併せて陳腐化した施設の再開発を同時に行うもので、突堤間を埋め立てることにより、利用しやすい岸壁と新たなスペースを確保し、岸壁の稼働率の向上を図るものである。新港東地区の岸壁の復旧では、被災施設前面に重力式構造の岸壁を新たに築造することとなったが、西側にあたる第5突堤の-10m岸壁（延長420m）の復旧では、被災程度が大きく、かつ岸壁背後に上屋が近接して被災岸壁の撤去が困難であったこと、また前面水域確保の観点から前出し量の小さな構造型式により復旧する必要があった。このため、復旧構造としては、「鋼管杭とプレキャストブロックの一体連結構造（PBS工法：Piles and Blocks Structure）」を採用した。以下では、本構造による岸壁復旧の設計・施工について紹介する。

2. 岸壁の被災状況と復旧方針

今回の地震での新港第5突堤岸壁西側の被災形態は、ケーソンが0.3m～2.5m海側に移動し、その背後が沈下・陥没した。また、最大+4.5°前傾し、0.3m～0.6mの沈下が伴っている¹⁾。

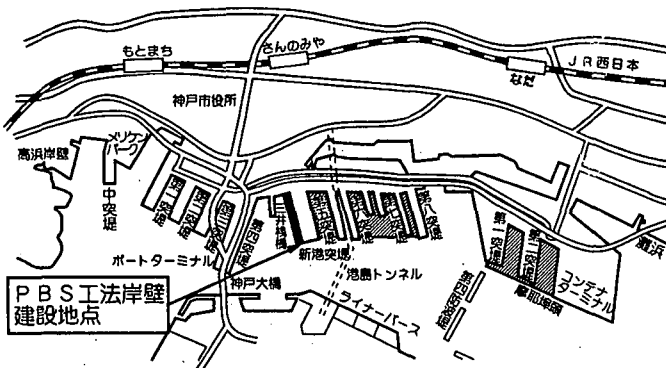


図-1 神戸港新港東地区の復興計画

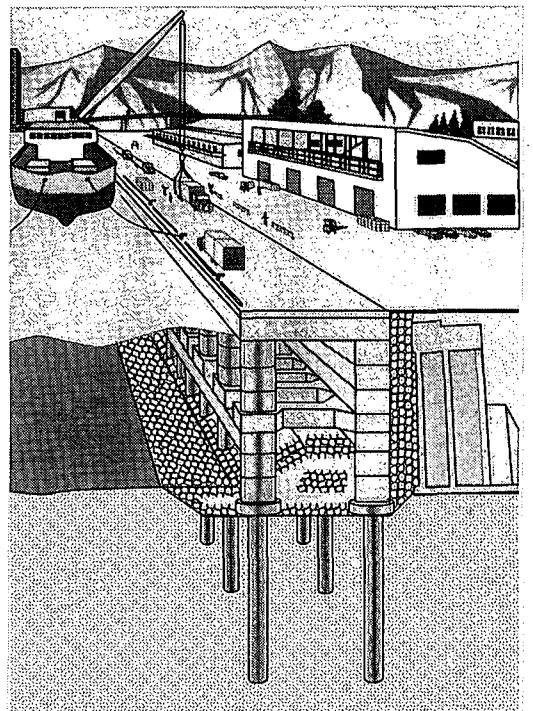


図-2 PBS工法による岸壁復旧イメージ図

* 正会員 前 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部

** 非会員 東洋建設株式会社 大阪本店

*** 正会員 飛島建設株式会社 大阪支店

**** 正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 (270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

本岸壁では、旧岸壁法線より約10m背後に上屋があり、また、岸壁の対岸の三井桟橋までの距離は約150mと水域が狭い。岸壁の復旧においては、前面水域の制約から、岸壁法線の前出し量を小さく抑えるとともに岸壁の耐震強化の観点から構造形式の多様化を配慮する必要があった。このため、復旧工法としては、重力式岸壁よりも前出し量が小さく、重力式岸壁に対する地盤改良や矢板式岸壁に対する控え工などを必要とせず、杭とプレキャストブロックで土留め機能を有する岸壁を構築できるPBS工法を採用した(図-2, 3)。

3. PBS工法による新型岸壁

PBS工法は、鋼管杭とプレキャストブロックを組み合わせることで一体化し、海中に梁材を有する杭基礎ラーメン構造を構築する工法である。

本工法の岸壁構造の実績としては、大阪府堺泉北港の-12m岸壁²⁾があるが、この岸壁はL型ブロック護岸とPBS工法による杭式横桟橋を組み合わせたものであり、PBS構造物は係留・接岸機能のみで土留めとしての機能は有していない。

これに対し、今回の新型岸壁は、図-2に示すようにプレキャストブロックの組み合わせにより、陸側杭列は土留めのための不透過壁、海側の杭列は透過壁になっている。本工法による新型岸壁の特徴は次のとおりである。

- ①鋼管杭にプレキャストブロックをはめ込んで積み重ね、PC鋼棒で緊張後、充填コンクリートで一体化を図っている。
- ②鋼管杭とブロックの一体構造であるため、杭式よりも剛性が高く、重力式よりも軽量で、耐震性も高い。
- ③構造体のほとんどがプレキャスト部材で構築されるため、短期間で施工可能である。
- ④陸側に不透過壁、海側に透過壁を有する低反射構造の岸壁の築造が可能である。
- ⑤鋼管杭がコンクリートで覆われているため防食性が非常に高い。

4. 岸壁の設計

4.1 設計条件

新港第5突堤に新設する岸壁の計画条件、自然条件、および荷重条件を表-1に示す。

4.2 構造概要

今回のPBS工法による岸壁は、図-4に示すように陸側と海側の2列各々3本、計6本の鋼管杭を38個のプレキャストブロックで連結した平面寸法12m×12mのユニットにより構成される。このユニットが法線方向に35個並んで、延長420mの岸壁となる。なお、プレキャストブロックの種類と形状を表-2に示す。

図-5に示すように、杭に通したブロックを鉛直方向に配置したPC鋼棒で緊張した後、杭・ブロック間の隙間を中詰めコンクリートで充填して一体化する。

陸側杭列はブロックを組み合わせた土留め壁と

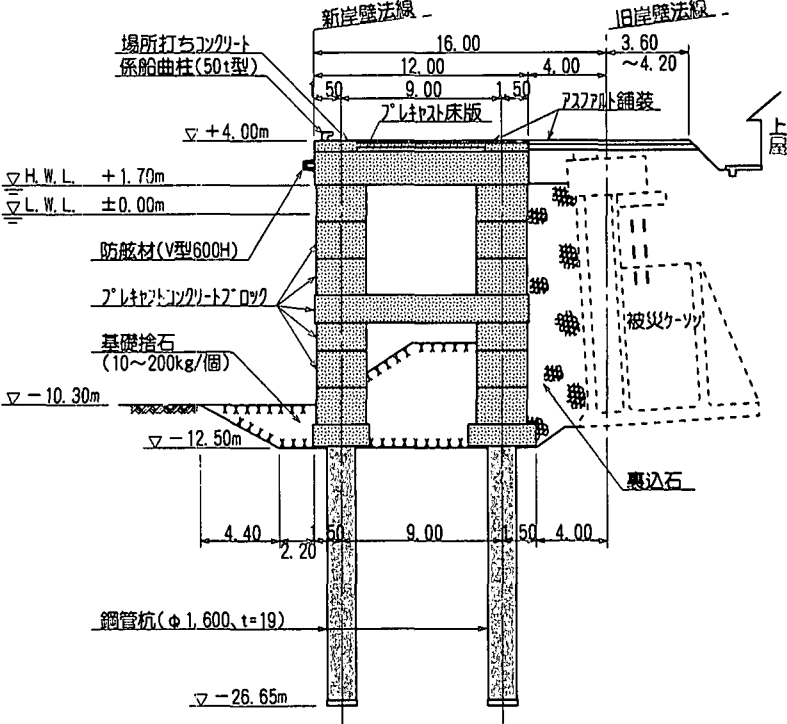


図-3 新港第5突堤岸壁復旧断面図

表-1 設計条件

計画条件	自然条件
計画水深: -10.0m	潮位: H.H.W.L. +3.7m
設計水深: -10.30m	H.W.L. +1.7m
天端高: +4.0m	L.W.L. ±0.0m
対象船舶: 10,000DWT	R.W.L. +1.1m
耐用年数: 50年	設計震度:
	設計水平震度 0.2
	波浪条件:
	異常時の波浪 $H_{1/3}=1.7m$
	土質条件:
	海底面下約10mまでは砂質土N=21~38、その下約13mまでは砂質土と粘土の互層N=14~41、支持層はN=50の砂質土
荷重条件	
上載荷重: 常時 2.0tf/m ²	
地震時 1.0tf/m ²	
活荷重: フォークリフト	
FD420Z5(20t吊)	
船舶接岸時の牽引力	
50tf(曲柱)	

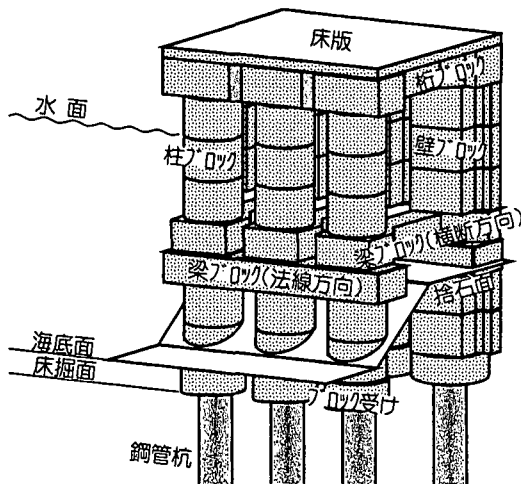


図-4 ユニットの鳥瞰図

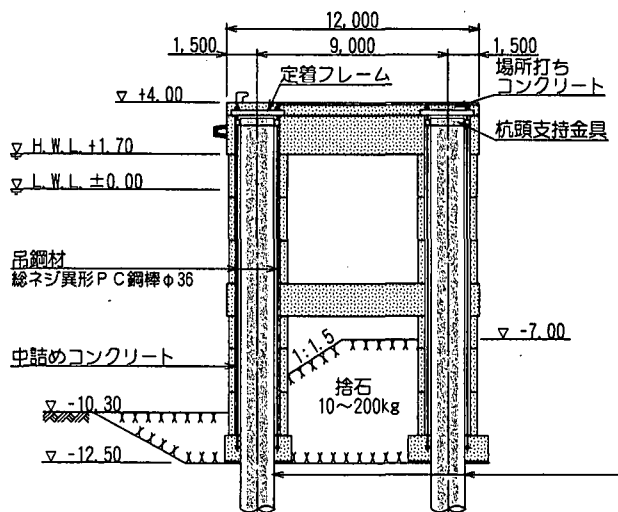


図-5 P B S工法岸壁構造図

なっており、その前面に受働抵抗を増加させるため捨て石を投入している。

今回の岸壁は、従来のP B S工法の適用例と比べて次のような構造的特徴を有する。

(1) 杭の大口径化とブロックの大型化

従来のP B S工法では、杭径はφ500mm～φ1000mmのものが用いられていたが、今回は岸壁の前出し量ができるだけ小さくするとともに、背面土圧にも抵抗するために杭2列構造でφ1600mmの大口径杭を用いた。

杭の大口径化に伴ないブロックも大型化した。それにより施工機械、船舶も大型化するが、ブロックの製作、運搬、据付等の個数が減少するため施工の急速化に有効である。そのためブロック1個の質量を最大100tまで大型化した。

(2) 梁部材のSRC構造化

プレキャストブロックはRC構造を基本にしているが、岸壁法線直角方向の梁部材となるブロック（表-2中の梁ブロックB₂、桁ブロックG₁、G₂）については、地震時土圧による荷重を支えるため断面耐力の大きいSRC構造にした。そのため断面が比較的小さくでき、他のブロックと同様にブロックの質量は100t以下となった。また、鉄骨は工場製作が可能のため、RC構造に比べて現場での鉄筋組立作業が省力化された。

(3) 床版のプレキャスト化

上部工の床版は、P B S構造（杭にブロックをはめ込んで一体化した構造）とは異なる部分であり、従来、場所打ちコンクリートで施工されることが多かったが、今回の設計では床版の一部をプレキャスト化し、底型枠の組立作業を省けるようにした。

4. 3 構造計算モデル

構造計算は、杭とプレキャストブロックを一体としたラーメン構造で解析した。モデル化に当たっては、杭ピッチを単位奥行幅とし、岸壁法線直角方向、岸壁法線方向に対して検討した（図-6）。

表-2 プレキャストブロックの種類

ブロック名称	形状 (縦×横×高さ) (mm)	1ユニット 当り 個数	35ユニット 当り 個数	コンクリート量 (㎡/個)	質量 (t/個)	平面形状
ブロック受けA ₁	(直径)×(高さ) 3200×1200	3	105	6.91	17	
ブロック受けA ₂	(直径)×(高さ) 3800×1200	3	105	10.94	27	
柱ブロック C	(直径)×(高さ) 2800×2000	15	525	4.71	11	
壁ブロック W	2800×11950×2000	5	175	32.58	76	
梁ブロック B ₁	2800×11950×1500	2	70	33.08	83	
梁ブロック B ₂	3950×12000×1500 (3000)	3	105	31.63	83	
桁ブロック G ₁	3675×12000×1800	2	70	35.39	90	
桁ブロック G ₂	3400×12000×1800	1	35	32.86	84	
床版ブロックS ₁	3300×7200×250	2	70	5.54	13	
床版ブロックS ₂	1645×7200×250	2	70	2.76	7	
合計	—	38	1330	—	—	—

設計地盤面はプレキャストブロック下端 (-12.5m) とし、これ以深に地盤パネを考慮した。背面土圧は既設構造物を無視し、 $\phi=35^\circ$ の砂質土として算定した。また、背面土圧に抵抗するため土留め壁前面に捨石を投入しており、この捨石による受働土圧係数を考慮した土圧分布を設定した。

4. 4 安定検討

基礎については、杭の支持力、地盤の円弧すべり、および側方流動に対する安定検討を行った。円弧すべりに関しては、完成後の常時、地震時のほかに、施工時に岸壁前面を約2.5m床掘りするため、この状態での安定検討を行った。陸側土留め壁は、土留め機能を確保するため、地震時の主働土圧と受働土圧のバランスする深度まで根入れしており（図-6）、背面盛土（裏込め）による側方流動に対しては粘性土の粘着力と層厚、裏込めの重量等に着目した側方流動の判定法³⁾に基づき検討を行った。

また、構造部材については、各荷重ケースに対する構造解析結果に基づき断面照査等を行った。

5. 岸壁の施工

5. 1 施工概要

PBS工法による岸壁の主要な工事数量を表-3に示す。施工は、ブロックの製作・仮置の陸上工事と、岸壁構築に関する海上工事に大きくわかれ、全体の工期は約14ヶ月である。海上工事の施工要領は図-7に示すとおりであり、施工計画面で特に留意した事項を以下に示す。

(1)ブロック製作ヤードの確保

プレキャストブロックによる海上工事の急速施工性の特徴を生かすためにも、現場のブロック据付工程に影響を与えないように大量のブロックを先行して製作する必要がある。ブロック製作ヤードは据付場所の近傍で作業船が接岸できる岸壁の背後地が望ましいが、神戸港近辺で適用可能なヤードが震災のため少なくなっていたため岸壁建設地点から約45km離れた淡路島津名町の埋立地、約67,000㎡を使用することにした。

(2)施工の急速化

施工の急速化を図るために、鋼管杭打設においては、300t吊級のクロークレーンを搭載した、スパッド付台船、自己昇降式作業台船をそれぞれ1船団用いて、420mの施工延長を2分割して施工した。また、ブロック据付には全旋回式起重機船（350t吊）を2船団投入して短期施工を図った。

(3)狭隘な水域での施工への配慮

対岸の三井桟橋との距離が約150mと狭く、施工時に一般船の航行を妨げないようにするため、アンカー等による占有面積が小さくなるよう鋼管杭打設時にはスパッド固定により、また、ブロック据付時には、全旋回式起重機船を岸壁法線に平行に接舷した。また、岸壁使用者との連絡調整に特に配慮し、作業区域周辺に監視船を配置した。

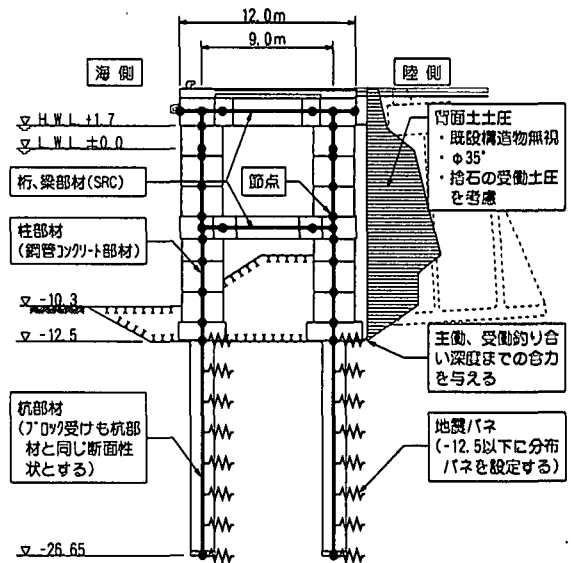


図-6 構造解析モデル図

表-3 主要な工事数量

工 種	工 事 細 目	数 量
床掘工	床掘	19343㎡
鋼管杭工	鋼管杭 ($\phi 1600\text{mm}$, $t=19\text{mm}$, $L=30\text{m}$)	210本
ブロック製作工	ブロック受け (22~33tf/個)	210個
据付工	柱、壁、梁、桁ブロック (11~90tf/個)	980個
	床版ブロック (7~13tf/個)	140個
中詰めコンクリート工	中詰めコンクリート	6233㎡
捨石工	捨石	20406㎡
裏込工	裏込石	14486㎡
舗装工	床版舗装	3564㎡
	エプロン舗装	3047㎡

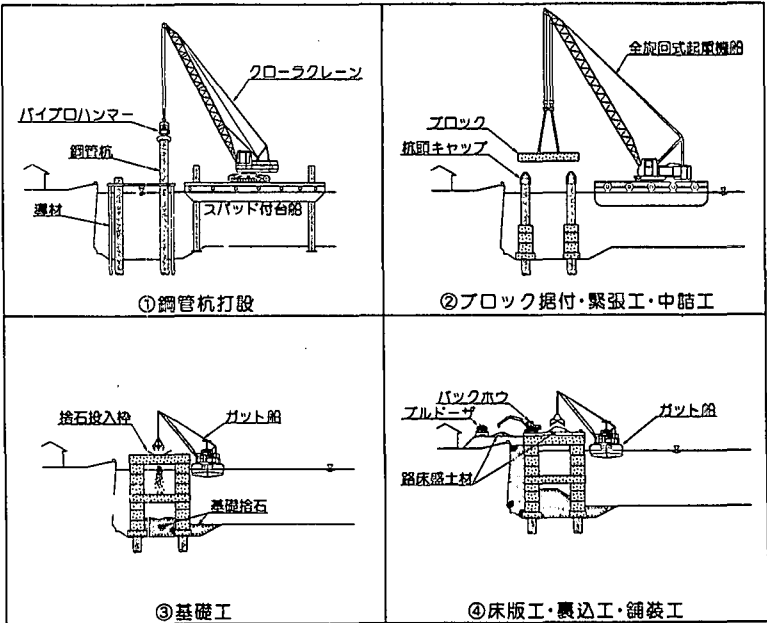


図-7 施工要領図



写真-1 補強枠を取付けたブロック受け



写真-2 プレキャストブロックの据付

5. 2 プレキャストブロックの製作

プレキャストブロックの製作に当っては、高さの精度(+20mm, -10mm)、上下面の平坦性、穴間隔精度の確保に特に配慮した。そのため、H形鋼を碎石舗装したヤードに敷き、鋼製の底型枠を設置する一方、側面型枠としてブロックの設計高に合わせた鋼製型枠を準備し、その天端でコンクリートを仕上げれば設計高になるよう計画した。

5. 3 ブロック受けの組立

ブロック受け(表-2参照)に、PC鋼棒、柱鉄筋、フープ筋、および杭頭支持金具を組み立てる作業は、ヤード内に組立足場を設置して行った。ブロック受けの組立全高は16.5mと高く、そのままでは自立性に問題があるため山形鋼による補強枠で自立させ、仮置き、運搬、据付を行った(写真-1)。また、ブロック受けの据付後補強枠を回収し再び転用した。

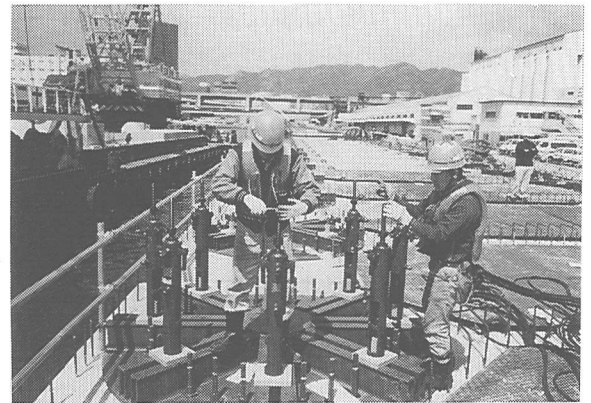


写真-3 PC鋼材の緊張状況

5. 4 鋼管杭の打設

本工法では鋼管杭の打設後、穴の開いたプレキャストブロックを杭に通して構造物を構築するため、杭の打設精度には充分配慮する必要がある。今回の許容範囲は杭頭中心位置±5cm杭の傾斜1/300であり、杭打設においては、H形鋼による導材と定規を使用して精度確保を図った。

5. 5 プレキャストブロックの据付

ブロック受けの据付後、プレキャストブロック据付時の杭頭部PC鋼棒の保護と鋼管杭にブロック穴を呼びこむガイドとして据付キャップを杭頭にセットし、柱、壁、梁、桁ブロックは、起重機船一航海で1ユニット分の運搬・据付を行った(写真-2)。なお、ブロック接触面には潜水土により水中不分離性セメントペーストを目地材として塗布した。

5. 6 緊張工、水中コンクリートによるブロックの中詰め

プレキャストブロック据付の終わったユニットに対して、柱6本(PC鋼棒8本/柱1本)を2本ずつ16台のセンターホールジャッキで、6tf→17tfの2段階で緊張力を導入した(写真-3、図-8)。

緊張の終わったユニットはコンクリートミキサー船により順次ブロックと杭の間に中詰めコンクリート(水中コンクリート)を

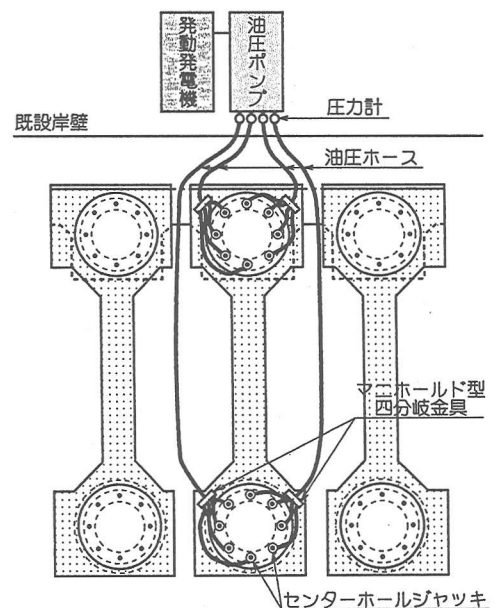


図-8 PC鋼材の緊張装置配置図

表-4 中詰めコンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	呼び強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	空気量 (%)
20(25)	18	30	50以下	370以上	4.5



写真-4 床版ブロックの据付

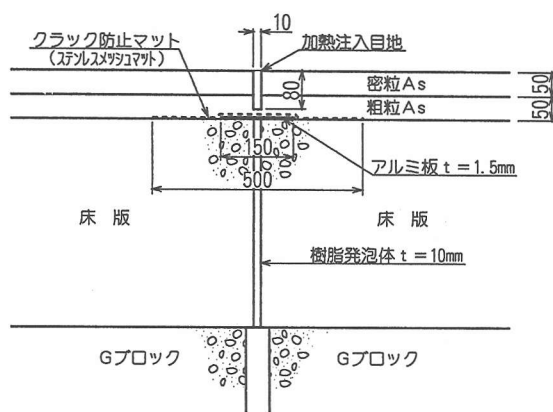


図-9 床版舗装ユニット間の目地

打設した。中詰めコンクリートの配合を表-4に示す。

5. 7 床版の据付およびコンクリート打設

中詰めコンクリートの打設が完了したユニットに対して、桁ブロック間を場所打ちコンクリートで結合し、次に桁の開口部から堤体内に捨石を投入した。これらの作業が完了したユニットについて写真-4に示すように桁ブロック天端の開口部に、全床版厚40cmの内の25cm分をプレキャスト化して製作した床版ブロックを据付けた。その後、鉄筋および側面型枠を組み立てて、床版場所打ちコンクリートを施工した。

床版の一部をプレキャスト化したことにより、支保工なしでの施工が可能となり工程短縮に大きな効果があった。

5. 8 舗装工

既設岸壁とP B S岸壁の間に裏込石を投入した後、岸壁背面の路床盛土および路盤工を施工し、次に床版部および背面部のアスファルト舗装を実施した。P B S岸壁は、12m毎の独立したユニットが連続した構造となっており、外力に対して別々の挙動をするため、床版舗装の各ユニット間に埋設ジョイントを併用した加熱注入目地を設けた(図-9)。

6. まとめ

新港東地区のP B S工法による岸壁復旧工事は、早期復旧をめざした計画どおり、約1年あまりの工期で完了した(写真-5)。本工事の結果をとりまとめると次のようになる。

- ①鋼管杭とプレキャストブロックの組み合わせにより陸側杭列を土留めのための不透過壁、海側杭列を消波機能を有する透過壁にした。
- ②大口径杭(φ1600mm程度)と大型ブロック(最大質量100t/個)を用いることにより、被災岸壁の復旧と同時に前面水域の確保に配慮した前出し量の小さい岸壁を構築した。
- ③梁部材にS R C構造部材を用いることにより、部材のスリム化を図った。
- ④杭基礎ラーメン構造体となる岸壁は、地盤改良が不要であり、杭式栈橋よりも剛性が高く、重力式ケーソンよりも軽量で、耐震性も高い。
- ⑤岸壁の建設地点が狭い水域にあっても、鋼管杭打設、ブロック据付等の作業の施工性、安全性等が保たれ、航行船舶への支障が少なく施工の急速化が図られた。
- ⑥杭構造とプレキャスト施工の特徴を生かした本工法による岸壁の築造は、災害復旧はもとより、港湾施設の整備・拡張にも充分適用可能と考えられる。

参考文献

- 1) 稲富隆昌ほか (1997): 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, 1762p.
- 2) 松本英隆 (1990): 堺泉北港のP B S工法による-12m岸壁工事, 第7回港湾技術報告会報告概要集, 沿岸開発技術研究センター, pp. 25~36.
- 3) 春日井康夫ほか(1992): 地盤の側方流動による港湾施設の変形予測, 港湾技研資料, No.726, 47p.