

プレキャストフォームケーソン製作工法（PFC工法）の開発 —防波堤ケーソン製作工事への適用—

舟橋 政司

佐藤 文則

横沢 和夫

上田 達哉^{*1}三輪 俊彦^{*1}関口 信一郎^{*2}

要 旨

港湾用ケーソンの製作を対象に、高耐久性埋設型枠（SEEDフォーム）、RCプレキャスト埋設型枠、突起付きH形鋼および流動コンクリートを使用することで、フローティングドック（FD）上での作業の大幅な簡略化および工期短縮を可能としたプレキャストフォームケーソン製作工法（PFC工法）を開発した。

外壁表面でのひび割れ幅を許容ひび割れ幅以下とするように、突起付きH形鋼の配置間隔とひび割れ幅の関係を把握し、突起付きH形鋼の最大間隔をH形鋼フランジ幅の10倍以下とした。また、狭隘な埋設型枠間の充填に用いた流動コンクリートは、普通コンクリートと同程度の側圧で優れた充填性を有することが確認された。そして、PFC工法を実際の直立防波堤ケーソン製作に適用した結果、FD上での工程が在来工法の約半分に短縮できた。

本報告は、PFC工法の開発経緯と実施工への適用結果を報告したものである。

キーワード 港湾用ケーソン／高耐久性埋設型枠／流動コンクリート／防波堤／複合構造

目 次

- | | |
|-------------------------------------|-------------------|
| 1. はじめに | 4. 直立ケーソンの実施工 |
| 2. プレキャストフォームケーソン製作工法
（PFC工法）の概要 | 5. 斜面斜切ケーソンへの適用事例 |
| 3. 設計、施工上の課題の検討 | 6. まとめ |

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION METHOD FOR CAISSON BREAKWATERS USING PRECAST FORMS

—APPLYING PFC CONSTRUCTION METHOD TO CAISSON BREAKWATERS—

Masashi FUNAHASHI	Fuminori SATO
Kazuo YOKOZAWA	Tatsuya UEDA
Toshihiko MIWA	Shinichiro SEKIGUCHI

Synopsis:

Precast Form Caisson construction method (PFC construction method) for constructing caissons used in marine area, which enables it to dramatically reduce the period of works on the floating doc, was developed by using highly durable permanent formworks (SEED forms), reinforced concrete permanent formworks, embossed H-section steel and moderately fluid concrete. Less than ten times of flange width of H-section steel was adopted as the interval of embossed H-section steel to control the width of cracks on the concrete surface.

This paper describes that development of PFC construction method and the results of applying PFC construction method to caisson breakwaters.

* 1 本店 土木本部 土木設計部 * 2 北海道開発局

1. はじめに

近年、土木工事における熟練労働者の減少と高齢化が取りざたされており、港湾工事においても同様に、熟練工不足や就業者の高齢化が懸念されている。

また、現在の社会情勢から、今後新たな社会資本整備を行うためには可能な限りのコスト縮減が求められる。港湾あるいは漁港等で防波堤や岸壁に用いられるケーソン（以下、港湾用ケーソンと称する）をフローティングドック(FD)上で製作する場合には、工期の短縮がFDの使用期間を短くすることになり、コストの縮減につながると考えられる。

そこで、北海道開発局と共同で港湾用ケーソンを対象に、プレキャスト埋設型枠と鋼材を使用して、ケーソン製作の省力化と大幅な工期短縮を図ったプレキャストフォームケーソン製作工法（PFC工法）を開発した。

本報告は、プレキャストフォームケーソン製作工法の開発経緯と、苫小牧港東港での本工法による防波堤ケーソン製作工事の施工結果について報告するものである。また、PFC工法を、より形状が複雑な斜面スリット防波堤ケーソンへ適用した事例についても紹介する。

2. プレキャストフォームケーソン製作工法

（PFC工法）の概要

2.1 使用材料

プレキャストフォームケーソンの概念図を図-1に示す。プレキャストフォームケーソンの製作に使用する主な材料は、ケーソンの外壁外面に用いる高耐久性埋設型枠、中詰め室の内型枠に使用するRCプレキャスト埋設型枠、外壁の鉛直鉄筋の代わりに用いる突起付きH形鋼および埋設型枠間を充填する流動コンクリートである。

高耐久性埋設型枠（SEEDフォーム）は、水セメント比30%のモルタルにステンレスファイバーを体積比で1.5%混入して補強した厚さ50mmのモルタル版である。また、RCプレキャスト埋設型枠は隔壁用の鉄筋を内部に配筋した厚さ75mmの鉄筋コンクリート板であり、ともに本体構造の一部をなしている。そして、突起付きH形鋼はH形鋼のフランジにコンクリートとの付着を確保するために圧延時に横節形の突起を設けたものである。

また、埋設型枠で挟まれた外壁・隔壁部の充填に用いる流動コンクリートは、分離低減型高性能減水剤を使用した、簡易な締固めで高い充填性が得られるコンクリートであり、高流動コンクリートよりも経済的なコンクリートである。

2.2 PFC工法による防波堤ケーソンの製作概要

PFC工法の特徴は以下の通りである。

- (1) プレキャストフォームケーソン製作の作業は、工場での作業、陸上(製作ヤード)作業およびFD上作業に

分類される。

- (2) 工場で作成された高耐久性埋設型枠、RCプレキャスト埋設型枠および加工された突起付きH形鋼は、工程に合わせて必要な時期に製作ヤードへ搬入される。
- (3) 陸上で高耐久性埋設型枠、RCプレキャスト埋設型枠を組み立てて、仮置きしておく。
- (4) 外壁の水平鉄筋は、大組みされた高耐久性埋設型枠に陸上で取り付けておく。
- (5) FD係留後に組み立てた高耐久性埋設型枠、RCプレキャスト埋設型枠をFD上で積み重ねてケーソンを製作する。

プレキャストフォームケーソン製作の施工手順を図-2に、FD上の作業を図-3に示す。

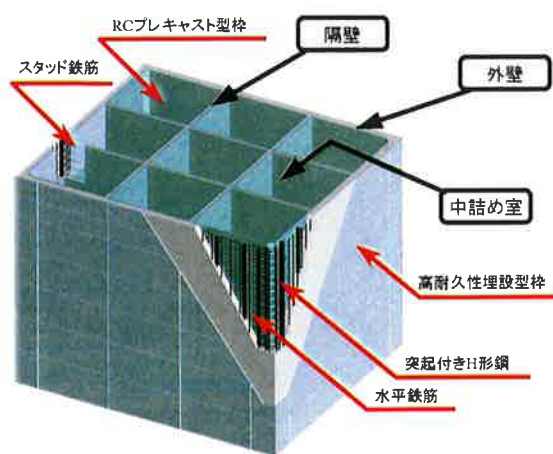


図-1 プレキャストフォームケーソンの概念図

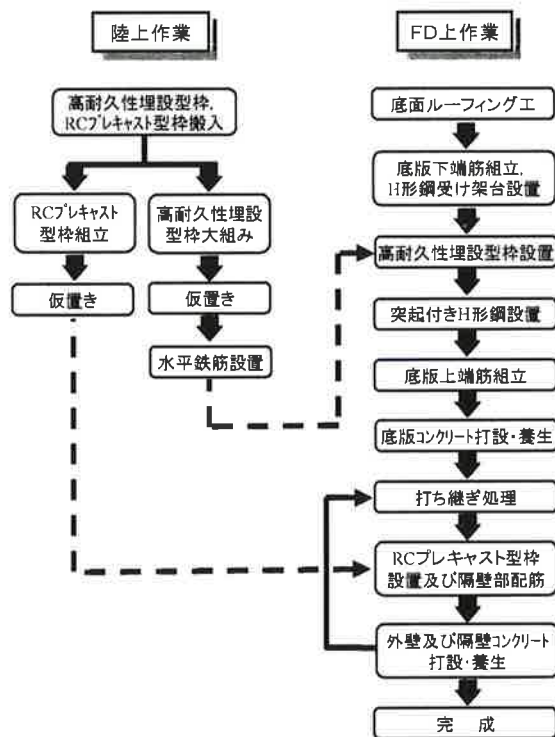


図-2 PFC工法の施工フロー

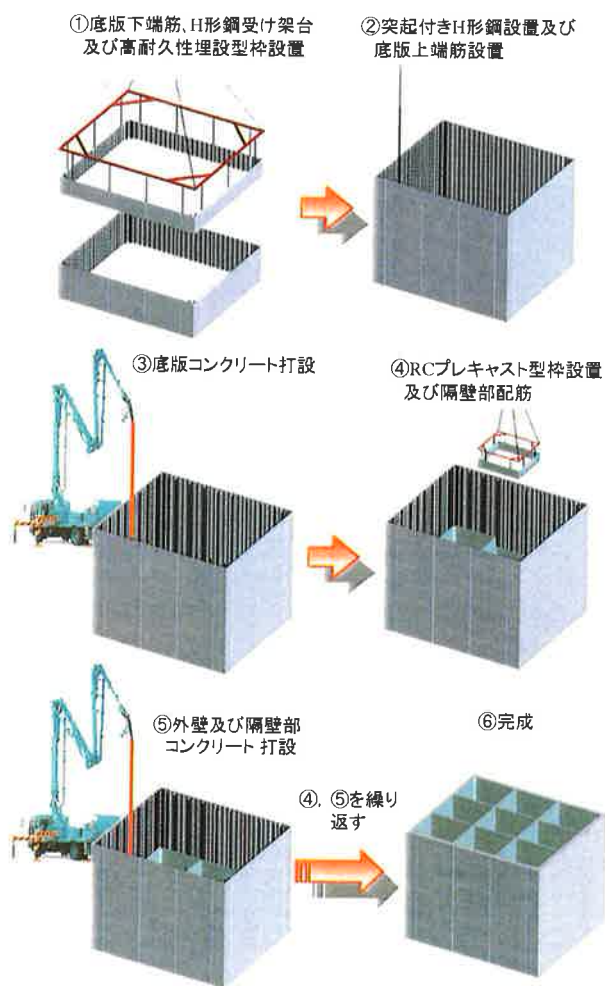


図-3 PFC工法の施工手順

高耐久性埋設型枠を引張側に配置すると、ひび割れ幅が60%に低減できることが明らかとなっている³⁾。そこで、高耐久性埋設型枠を取り付けた場合の最大ひび割れ幅を算定すると、表-2の(B)欄に示すようにH形鋼間隔がフランジ幅の10倍(CASE-1)でも許容ひび割れ幅を満足するものと考えられる。

したがって、本工法では、外壁部に高耐久性埋設型枠を使用することを前提に、突起付きH形鋼の最大の間隔はH形鋼フランジ幅の10倍以下で設計するものとした。

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	H形鋼の中心間隔①	①/フランジ幅	試験体の幅
CASE-1	1000mm	10	2000mm
CASE-2	800mm	8	1600mm
CASE-3	600mm	6	1200mm
CASE-4	400mm	4	800mm

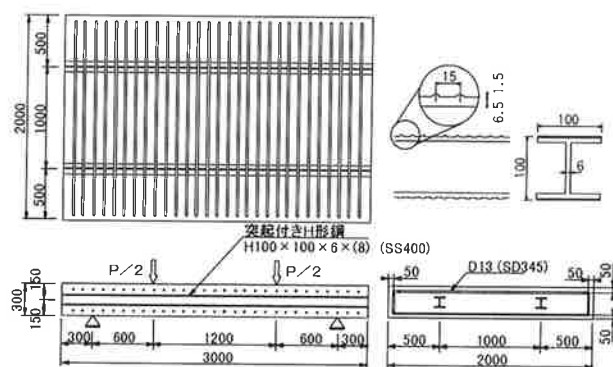


図-4 試験体の形状・寸法(CASE-1の例)

3. 設計、施工上の課題の検討

3.1 突起付きH形鋼の最大間隔

外壁の鉛直鉄筋の代わりに突起付きH形鋼を用いる場合、鉄筋に比べて断面積の大きい鋼材に置換するため、H形鋼の間隔が広がる。その場合、ひび割れが分散しにくくなるため、ひび割れ幅が拡大し、耐久性に影響を及ぼす可能性があることが懸念された。

また、プレキャストフォームケースンの設計をする上では、突起付きH形鋼の許容される最大間隔を把握する必要があった。そこで、表-1および図-4に示すような、突起付きH形鋼の間隔をパラメータとした鉄骨コンクリート版(SC版)を製作し、曲げ載荷試験を行った。

その結果、表-2の(A)欄に示すように、突起付きH形鋼の間隔が大きくなるほど、中心軸線上での最大ひび割れ幅が大きくなっている。

コンクリート標準示方書²⁾の「特に厳しい腐食性環境」下での許容ひび割れ幅の規定を基に、許容ひび割れ幅を0.35mm【 $0.0035C=0.0035 \times 100=0.35\text{mm}(C:\text{かぶり})$ 】とすると、H形鋼間隔がフランジ幅の6倍までは、この許容ひび割れ幅を満足している。

既往の実験結果で、ステンレスファイバーで補強した

表-2 SC版試験体の最大ひび割れ幅

実験ケース	SC版試験体 (A)		高耐久性埋設型枠を取り付けた場合(算定値) (B)	
	H形鋼位置	中心軸線上	H形鋼位置	中心軸線上
CASE-1	0.31mm (0.93)	0.51mm (1.56)	0.19mm (0.93)	0.31mm (1.56)
CASE-2	0.36mm (1.06)	0.41mm (1.25)	0.21mm (1.06)	0.25mm (1.25)
CASE-3	0.32mm (0.96)	0.34mm (1.02)	0.19mm (0.96)	0.20mm (1.02)
CASE-4	0.34mm (1.00)	0.33mm (1.00)	0.20mm (1.00)	0.20mm (1.00)

ひび割れ幅はH形鋼下フランジが許容引張応力度 $140\text{N}/\text{mm}^2$ 時の値。

()内の数字は、CASE-4に対する比率を示す。

3.2 埋設型枠間への確実なコンクリートの充填

4章で述べる対象のケースン(長さ14m×幅12m×高さ11m)を在来工法で施工した場合、コンクリート打設回数は底版コンクリートを含めて4回となる。この時、現場でのコンクリートの打設回数を減らすことが、FD上での工期を短縮することとなる。そこで、底版コンクリートを1回、外壁・隔壁部コンクリートを2回で打設することとした。その場合、外壁・隔壁部の1回の打設高さは約5mとなる。

また、壁厚450mmの外壁部の充填コンクリート部の厚さは325mmとなる。しかも、外壁内には150mmの突起付きH形鋼がある。一方、隔壁部は厚さ250mmであ

り、RCプレキャスト埋設型枠の厚みを除くと、100mmの厚さに充填コンクリートを打設しなければならない。

プレキャスト型枠で挟まれた部分にコンクリートを打設する場合、充填状況の確認が困難となる。しかも、型枠の幅が狭く、打設高さが高い。高流動コンクリートを使用すれば、確実な充填が確保できるが、側圧に対する補強が必要となることと、材料コストがかなり高くなる等の課題がある。

したがって、外壁・隔壁部に用いるコンクリートは、普通コンクリートよりも流動性・充填性がよく、高流動コンクリートよりも安価な、しかも簡易な締固めで高い充填性が得られるコンクリートが望ましい。

そこで、分離低減型高性能減水剤を使用することで、単位セメント量を抑制しながら、流動性、充填性を確保できる流動コンクリート⁴⁾を使用した。また、図-5に示す隔壁部を模擬した壁状の型枠を用いて、充填性の確認試験を行った⁵⁾。

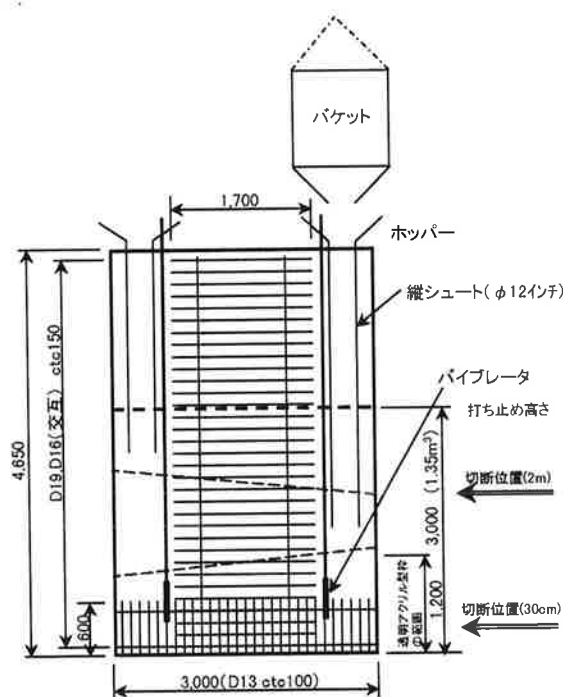


図-5 コンクリートの充填確認試験

その結果、直接締固めを行っていない鉄筋周辺にも十分コンクリートが充填されており、コア採取による圧縮強度も、締固めの有無で大差はない(有: 36.7N/mm², 無: 34.6N/mm²)ことが認められた。また、型枠に作用する最大側圧は 2.5m 打上り時の 0.037N/mm²(液圧 0.059 N/mm²)と普通コンクリートを振動締固めした場合の 0.039 N/mm² (2.0m 打上り時)と同等であった。

4. 直立ケーソンの実施工

4.1 苫小牧港東港区内B防波堤ケーソンの概要

苫小牧港東港で施工したプレキャストフォームケーソンの形状・寸法は、図-6に示すように、長さ 14m×幅 12m

×高さ 11m の直方体であり、質量は 1209ton である。また、沈設時に砂が投入される中詰め室は 9 マスである。主要使用材料を表-3に示す。

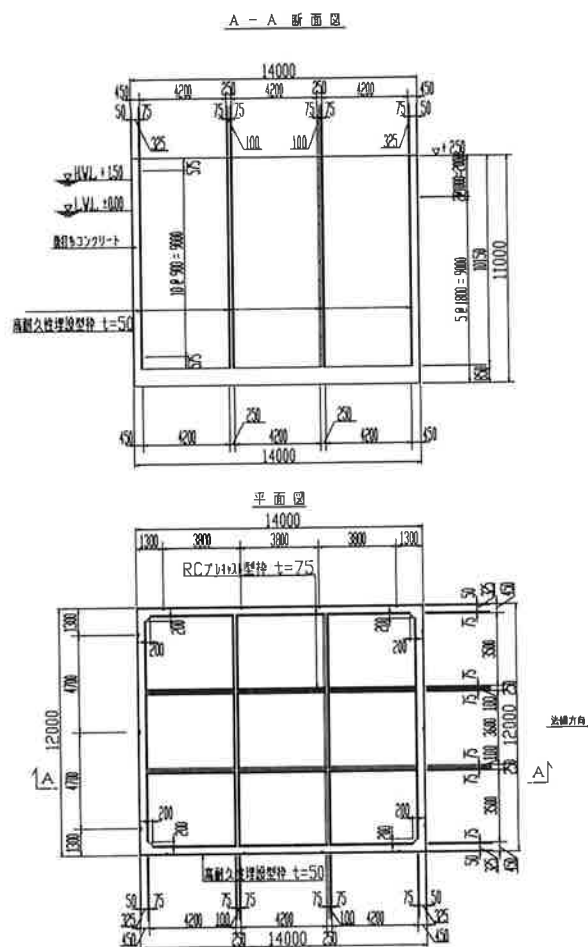


図-6 苫小牧港東港区内B防波堤ケーソン

表-3 主要使用材料

名称	数量	仕様
高耐久性埋設型枠	572 m ²	厚さ50mm, 【材齢14日】曲げ強度7.85N/mm ² , 圧縮強度70N/mm ² (設計上24N/mm ²), H=1800mm×5段, H=1000mm×2段
RC7桁プレキャスト型枠	1,417 m ²	厚さ75mm, 【材齢14日】曲げ強度4.5N/mm ² , 圧縮強度35N/mm ² (設計上24N/mm ²), H=900mm×10段, H=575mm×2段
突起付きH形鋼	15.0 ton	SM490A, H=150×158×7×10, 突起高さ1.5mm, 突起ピッチ15mm, L=10.7m-38本, L=3.65m-14本
流動コンクリート	217.0 m ³	設計基準強度24N/mm ² , Gmax20mm, スランプフロー500±100mm

4.2 工場でのプレキャスト部材製作

高耐久性埋設型枠製作の型枠内に所要のインサートをセットし、オムニミキサで混練したステンレスファイバー混入モルタルを打設した。

一方、RCプレキャスト埋設型枠は、粗骨材最大寸法 20mm のコンクリートを使用して製造した。

また、高耐久性埋設型枠、RCプレキャスト埋設型枠ともに、常圧蒸気養生を行い、打ち継ぎ面は、充填コンクリートとの付着を確保するために、高圧洗浄水により目荒し処理を行った。

4.3 陸上でのプレキャスト型枠の組立

(1) 高耐久性埋設型枠の組立

高耐久性埋設型枠は、コーナーパネル 4 枚、平パネル 10 枚で 14m×12m の大きさに大組みした（写真-1 参照）。1 段の高さは、1800mm（5 段）および 1000mm（2 段）である。

高耐久性埋設型枠の組立ヤードは、レベル調整した組立架台を各パネルのジョイント部に配置した（図-7 参照）。組立架台には、パネルの鉛直性および型枠の直線性を調整できるように、上下にジャッキが付いている。また、パネル両端のリブ（高さ 50mm）にボルトを通しパネル同士を連結した。各鉛直目地部には止水ゴムを取付けてある。

高耐久性埋設型枠の組立には、クローラークレーン（60ton）を使用し、大組みした高耐久性埋設型枠は、レベルを保持して仮置きした。仮置き中に高耐久性埋設型枠の内面に、外壁の水平鉄筋を取り付けておく。

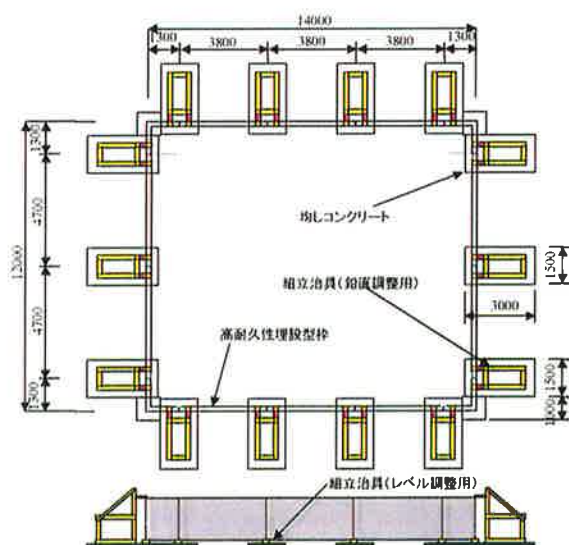


図-7 高耐久性埋設型枠組立装置



写真-1 高耐久性埋設型枠組立て状況

(2) RCプレキャスト埋設型枠の組立

RCプレキャスト埋設型枠は、RCプレキャスト埋設型枠組立架台（図-8 参照）を使用し、平パネル 4 枚をボックス状に組み立てた（写真-2 参照）。ボックスの数は合

計 108 個で、高さは標準部で 900mm（90 個）、最下段および最上段では 575mm（18 個）である。この高さはFD付属のクレーンでの吊り込みを考え、ボックスの質量が 3ton 未満になるように設定した。

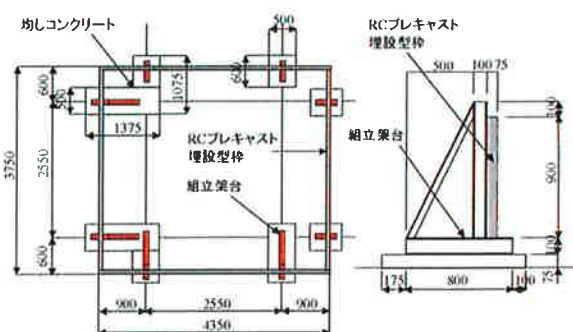


図-8 RCプレキャスト埋設型枠組立装置



写真-2 RCプレキャスト埋設型枠組立て状況

4.4 FD上でのケーソンの製作

(1) 底版下端筋およびH形鋼受け架台設置

FD上にルーフィングシートを敷設した後、底版の下端筋を配筋し、その上に突起付きH形鋼を建て込むための受け架台を設置した。

(2) 高耐久性埋設型枠の設置

大組みした高耐久性埋設型枠をFD上に設置するために、専用の吊り治具を使用し、吊り治具と各ジョイント部の全てのジョイント部にレバブロックを取り付け、水平に吊り上げられるようにした。

FD上への設置には、陸上からトラッククレーン（500ton）を使用して行った（写真-3 参照）。高耐久性埋設型枠の水平目地には止水ゴムを取り付け、エポキシ樹脂で上下の埋設型枠を接着した。

(3) 突起付きH形鋼・底版上端筋設置および底版コンクリート打設

突起付きH形鋼を受け架台にボルトで締結し、中段では高耐久性埋設型枠のインサートを利用し、上段では外足場を利用して固定した（写真-4 参照）。

その後、底版の上端筋を配筋し、陸上に配置したポンプ車により、スランプ 12cm の普通コンクリートで底版(850mm 厚)を打設した。



写真-3 高耐久性埋設型枠設置状況



写真-4 突起付きH形鋼設置状況

(4) RCプレキャスト埋設型枠の設置

外壁・隔壁部のコンクリートは2回に分けて打設するため、まずRCプレキャスト埋設型枠を9マス×6段分(575mm×1段, 900mm×5段)=54個設置した(写真-5参照)。FDに付属のクレーンを用いてボックスを設置し、高耐久性埋設型枠あるいは隣接するRCプレキャスト埋設型枠とセパレータで固定した。また、内足場は、RCプレキャスト埋設型枠の上昇に合わせて移動可能なものとした。



写真-5 RCプレキャスト埋設型枠設置状況

(5) 外壁・隔壁部コンクリート打設

外壁・隔壁部には表-4に示す流動コンクリートを使用し、1リフト目は高さ約4.8mを、打ち上がり高さ1m/hr以下として、外壁、隔壁の順で打設した。打設には陸上に配置したポンプ車を用い、配管の先端にホース(φ8インチ)を取付けて壁内に挿入して行った。コンクリート打設後、打継ぎ処理剤を散布した。

2リフト目についても(4)および(5)(打設高さ約5.2m, 写真-6参照)の作業を繰り返して、プレキャストフォームケーソン製作を完了した(写真-7参照)。

なお、外壁と隔壁交差部のH形鋼フランジ内側や隔壁交差部の鉄筋位置に、高さ方向に1mピッチで熱電対を設置し、コンクリート打設中に計測を行った。その結果、充填が困難な場所にも確実に充填されていることが確認された。

表-4 外壁・隔壁部コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	単位 粗骨材 絶対容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)							高性能 減水剤	空気量 調整剤
				W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G			
20	500± 100	4.5± 1.5	0.310	43	55	155	360	1003	837	C× 0.90%		適量



写真-6 流動コンクリート打設状況



写真-7 防波堤ケーソンの完成

4.5 工期

なお、今回の実施工におけるFD上での実稼働工程(養生を含め24日)を表-5に示す。

また、暦日では26日で製作できており、在来工法による暦日50.6日(積算上)の約半分であった。

表-5 プレキャストフォームケーソン製作実工程

工 種	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ルーフィング・外足場、他																									
底版鉄筋工																									
H形鋼受け架台設置																									
突起付きH形鋼設置																									
高耐久性埋設型枠設置																									
RGプレキャスト型枠設置																									
コンクリート工																									
打継処理・養生																									
進水・仮置き																									

5. 斜面スリットケーソンへの適用事例

5.1 斜面スリットケーソン防波堤の概要

斜面スリットケーソン防波堤とは、直立スリットケーソン防波堤の消波機能と上部斜面堤の高い安定性能の特徴を取り入れた大水深・高波浪の海域に適用する北海道開発局で考案された新形式防波堤である(図-9 参照)⑥。

スリット間隔や遊水室の幅を適切に選定することにより、優れた安定性と消波性能を得ることができる。

斜面スリットケーソン防波堤への作用波圧の基本概念を図-10に示す。その特徴は以下の通りである。

- ①波が斜面に作用することによって波力の一部が鉛直力として働くため、安定性に対する抵抗力が増大する。
- ②斜面の傾斜角度、スリットの開口率や間隔を適切に選定することにより、高い消波性能や反射性能を得ることができる。
- ③水面上にケーソン幅が小さく、前面が傾斜した構造を呈していることから、景観上優位な構造物であると考えられる。
- ④従来の消波ブロック被覆堤に比べ水面の占有面積を小さくでき、堤体前面海域の有効利用が可能となる。

5.2 PFC工法による斜面スリットケーソン製作

PFC工法を用いた場合の斜面スリットケーソンの構造概念図を図-11に示す。北海道福島漁港外東防波堤に用いる斜面スリットケーソンは、長さ15.0m×幅9.8m×高さ8.5m(図-12 参照)であり、FD上で2函同時製作した(質量923.5ton/函)。表-6に主要使用材料、写真8～10にPFC工法による施工状況を示す。

表-6 主要使用材料(2函分)

名 称	数 量	仕 様
高耐久性埋設型枠	1,720 m ²	厚さ50mm, 【材齢14日】曲げ強度7.85N/mm ² , 圧縮強度70N/mm ² (設計上24N/mm ²)
RGプレキャスト型枠	706 m ²	厚さ75mm, 【材齢14日】曲げ強度4.5N/mm ² , 圧縮強度35N/mm ² (設計上24N/mm ²)
突起付きH形鋼	18.0 ton	SM490A, H-150×159×8×10, 突起高さ1.5mm, 突起ピッチ15mm
普通H形鋼	18.8 ton	SM400, H-250×250×9×14-10.8ton, H-350×350×12×19-4.6ton, H-200×200×8×12-3.4ton
流動コンクリート	367.0 m ³	設計基準強度24N/mm ² , Gmax20mm, スランプロ-500±100mm

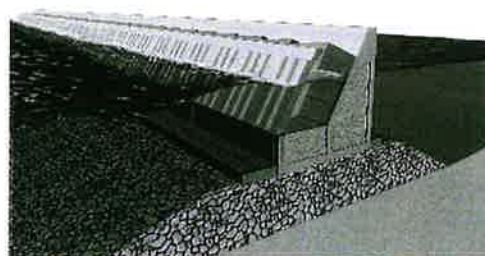


図-9 斜面スリットケーソン防波堤の概念図

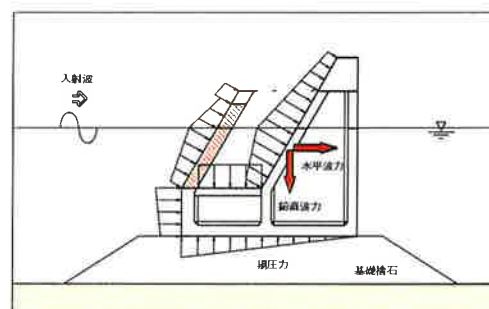


図-10 斜面スリットケーソン防波堤への作用波圧の基本概念

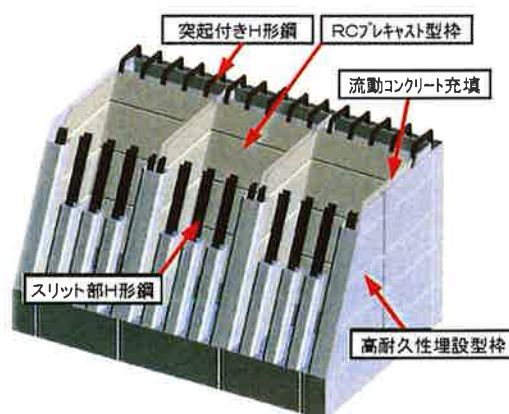


図-11 斜面スリットケーソンの構造概念図

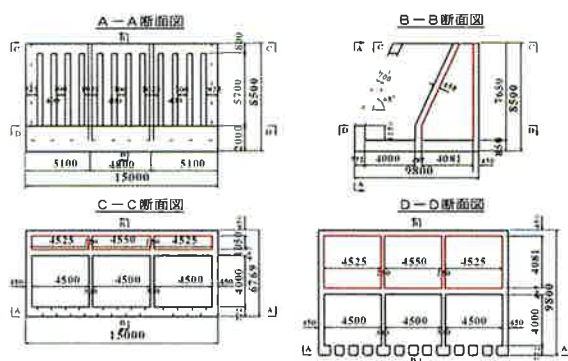


図-12 福島漁港外東防波堤ケーソン



写真-8 RCプレキャスト埋設型枠設置状況



写真-9 遊水室背面突起付きH形鋼設置状況



写真-10 遊水室高耐久性埋設型枠設置状況

6. まとめ

- (1) PFC工法の突起付きH形鋼の最大間隔は、H形鋼フランジ幅の10倍以下とすることが適当である。
- (2) 分離低減型高性能減水剤を用いた流動コンクリートを使用することにより、H形鋼フランジ内側や厚さ100mmの隔壁充填部の鉄筋周りにもコンクリートが確実に充填できた。
- (3) 流動コンクリートを用いることで、本構造形式の外壁・隔壁部を5m程度の高さで打設することが可能であると考えられる。
- (4) PFC工法を直立防波堤ケーソンに適用した場合、FD上での工期は、在来工法の約半分であった。
- (5) 形状が複雑な斜面スリット防波堤ケーソンの製作においても、PFC工法の適用が可能であることが実証された。

今回の直立ケーソンは1函のみの製作であり、コスト削減効果が十分に発揮できなかった。今後、大量に製作することにより、十分にメリットが得るものとする。

謝辞：本工法については、北海道開発局の新構造形式ケーソン製作工法開発検討委員会(委員長：佐伯浩北海道大学教授)の中で討議され、貴重なご意見を頂きましたことを厚く御礼申し上げます。

また、共同開発者として、実験等のご協力を頂いた川崎製鉄(株)の皆様、実施工時の計測、施工実態調査にあたり、多大なご尽力を頂きました北海道(支)奥村貞樹氏、石塚幸成氏、関口建司氏に、末筆ながら謝意を表します。

参考文献

- 1)大久保浩弥,芥川博昭,舟橋政司,小原孝之：突起付きH形鋼の配置間隔がSC板部材の耐荷性能およびひび割れ性状に及ぼす影響,土木学会第54回年次学術講演会, pp.794-795, 1999.9
- 2)(社)土木学会,「コンクリート標準示方書 設計編」, pp.87-88, 1996
- 3)河野一徳,篠田佳男,長崎利哉,大久保浩弥：突起付きH鋼を用いた鉄骨コンクリート梁部材のひび割れおよび変形状,土木学会第50回年次学術講演会, pp.870-871, 1995.9
- 4)柳澤太一,中島良光,舟橋政司,渡部正：分離低減型高性能AE減水剤を用いたコンクリートの材料分離抵抗性および締固め特性に関する検討,土木学会第53回年次学術講演会, pp.390-391, 1998.10
- 5)舟橋政司,渡部正,柳澤太一：分離低減型高性能AE減水剤を用いたコンクリートの施工性試験,土木学会第53回年次学術講演会, pp.400-401, 1998.10
- 6)関口信一郎,妹尾英世,中内勲：斜面スリット堤の開発,海と港, No.17, 1999