

PCパネルによる港湾用ケーソンの設計および施工

DESIGN AND EXECUTION OF HARBOR CAISSONS USING PC PANELS

清宮 理¹・横田 弘²・小沢 大造³・口田 登⁴・北澤 壯介⁵・斉藤 亮一⁶

Osamu KIYOMIYA・Hiroshi YOKOTA・Noboru KUCHITA・Taizou KOZAWA・Sousuke KITAZAWA・Ryouichi SAITOU

¹フェロー 早稲田大学教授 土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 51号館16階)

²正会員 運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所長 (〒231-0003 神奈川県横浜市中区北仲通5-57 横浜第二合同庁舎)

⁴正会員 運輸省第二港湾建設局 京浜港湾工事事務所長 (〒221-0054 神奈川県横浜市神奈川区山内町1-2)

⁵正会員 財団法人 沿岸開発技術研究センター 第一調査部長 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16 住友半蔵門ビル6階)

⁶ 財団法人 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16 住友半蔵門ビル6階)

Connection of panels is an important aspect of the design of panel-assembly harbor caissons. PC cables are exclusively installed in the joints and the details concerning the connection such as groove shape, interval etc. should be carefully designed as simple as possible. The strength and aperture of the connecting parts were studied. The quantity of PC installed and the locations of the joints were set so that fully compressive force acts at the connection. The mechanical properties of the joint under various limit states have been confirmed by loading tests.

During the application of this technique to a prototype caisson, possible measure was taken to improve panel manufacturing and assembly precision and it was confirmed that the manufacturing precision of this technique is equal to or superior to that of conventional caissons. Panel manufacturing, panel assembly, and grout injection times were also measured to evaluate the effect of this technique on reduction of construction time.

Key words: panel caisson, PC cable, groove shape, loading test, grout injection, execution time reduction

1. はじめに

防波堤や岸壁ではRCケーソンが多く採用されているが、構造および形状などに様々な工夫がみられるものの、製作方法自体はあまり変化していないのが現状である。そこで、ケーソン製作の省力化と工期短縮を目的にPCパネル工法による港湾用ケーソンの開発を行った。

このPCパネル工法を採用するにあたって、設計および施工上の課題を抽出し、接合目地部の力学的性状を明らかにするために縦目地部および横目地部について模型載荷実験を行った。ここでは、縦目地部の実験、および本工法を横須賀港の岸壁用ケーソン（暫定時は波除堤）に適用した事例について報告する。

2. PCパネル工法の概要

本工法は、ケーソンの側壁、隔壁を複数のプレキャストコンクリート版（工場製作）に分割製作し、それらを現場で組み立てた後、プレストレスを与えて一体化する工法である。

その特徴は以下とおりである。

- ①底版およびフーチングは現地ヤードにて製作し、プレキャストコンクリート版の側壁および隔壁

を建て込み、スリーブ継手およびプレストレスを用いて一体化する。

- ②場所打ちコンクリート製の底版およびフーチングは通常の鉄筋コンクリートであるが、応力的に必要であれば、ポストテンション法により法線直角方向にプレストレスを与えることも可能である。

- ③プレキャストコンクリート版の側壁および隔壁は力学的な条件、施工性、搬送性を考慮し分割する。

- ④側壁－側壁間、隔壁－隔壁間の接合目地（以下縦目地）は、ウェットジョイント工法とし、目地部に特殊セメント系無収縮モルタルを注入した後、PC鋼材の緊張にて接合する。

- ⑤底版－側壁、底版－隔壁間の接合目地（以下横目地）は、スリーブ継手を用いて接合し、目地部に高強度無収縮モルタルを充填する。

- ⑥隔壁の接合は、側壁と隔壁をT字形に一体化製作し、隔壁中央部で分割されたものをPC鋼材の緊張により接合する。

ケーソンの概要図を図-1に示す。

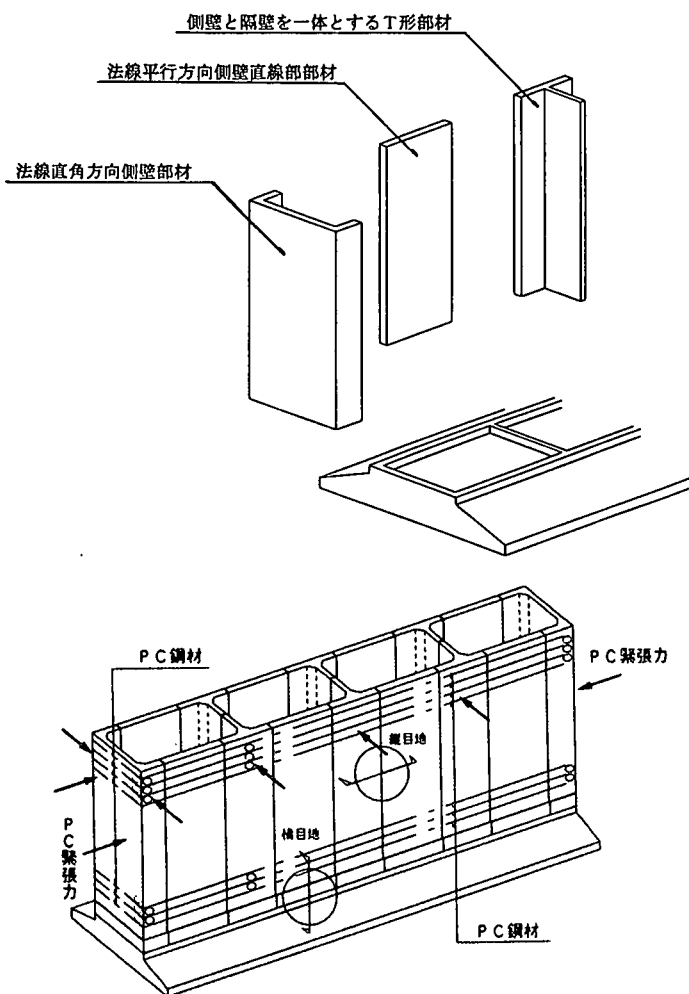


図-1 ケーソン概念図

3. 模型載荷実験

(1) 実験の目的

PCパネル工法では、プレキャストコンクリート版を組み立てる接合目地部が生じるが、現状では接合目地部の構造・諸元・詳細や力学的挙動を明らかにする文献が少なく、接合目地部の力学的な挙動の解明が必要となる。

接合目地部の必要条件は、強度が十分に確保されていること、使用時にコンクリート部分を圧縮応力状態にし、ひび割れを発生させない断面力の小さな箇所に配置すること、耐久性および止水性が優れていること、施工性に優れていること、経済性に優れていることなどが挙げられる。

これらの技術的課題に対して、接合目地部(縦目地)の模型載荷実験を行い解明を試みた。この実験は、プレキャスト部材の接合目地部が構造上の弱点となる可能性のあることや、プレストレストコンクリート港湾構造物の設計に限界状態設計法を用いることから、使用限界状態でのひび割れ発生状況、終局限界状態での耐力、破壊モードなどの力学的性能を確認することとし、接合目地部の実用化にあたっての可能性を検討する。特徴としては、プレストレス導入量の影響、接合部の目地断面の大きさの違いによる影響を明らか

にするものとし、ひび割れ幅、曲げ強度、せん断強度の3点に着目した。

図-1に示すプレキャストコンクリートの接合部の目地の形状と施工性の検討を踏まえ、図-2に示す接合目地部の形状を案出し載荷実験を行った。

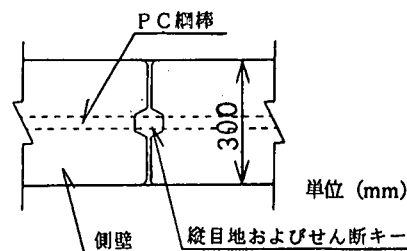


図-2 側壁間接合目地部図(縦目地)

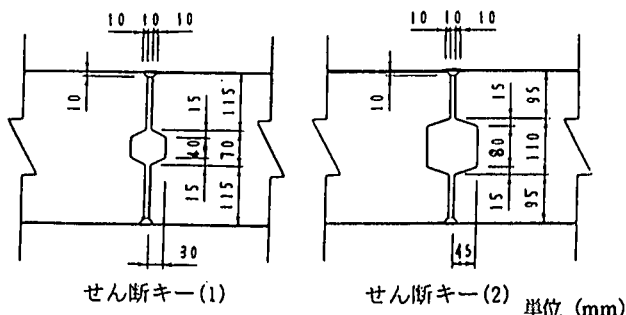


図-3 目地構造図

(2) 試験体および使用材料

試験体は、図-2に示すような縦目地の接合目地部を取り出し、図-3に示すように原寸大の寸法とした。また、試験体は、曲げ試験用が3体、せん断試験用が2種類のせん断キー形状に対して各3体の合計9体とした。目地部の充填には、セメント系充填材を使用した。また、コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 とし、部材軸方向にはプレストレスを与えた。図-4に試験体の配筋形状、表-1に試験体一覧、表-2, 3に材料試験結果を示す。

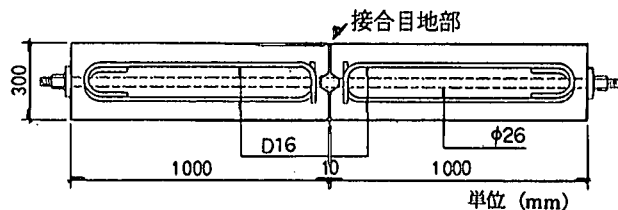


図-4 試験体の概要

表-1 試験体一覧

試験体種類	縦目地		
試験体名	VM-1~3	VS-1~3	VS-4~6
試験体形状(mm)	300×300×(1000+10+1000)		
せん断キーの大きさ(mm)	40/70/30	40/70/30	80/110/45
プレストレスによるコンクリートの応力度(N/mm^2)	VM-1→1.0 VM-2→2.0 VM-3→3.5	VS-1, 4→1.0 VS-2, 5→2.0 VS-3, 6→3.5	

表－2 コンクリートおよび充填材の圧縮強度(N/mm²)

試験体名	VM-1～3	VS-1～3	VS-4～6
コンクリートの圧縮強度	49.2	52.6	52.6
充填材の圧縮強度	55.8	62.1	68.1

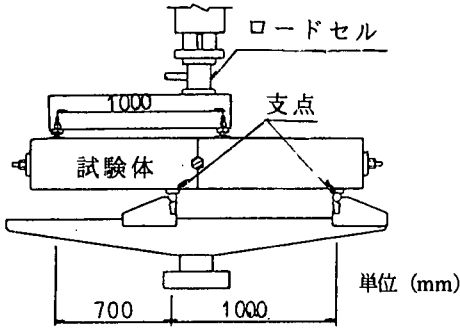
注) 平均値を示す

表－3 鋼材の力学的特性 (N/mm²)

		降伏点	引張強さ
鉄筋 (SD345) (3本の平均値)	D16	388	563
P C 鋼棒 (試験体1本の値)	φ26	1153	1261

(3) 載荷および計測方法

曲げ載荷試験は、試験体を単純支持し、接合目地部に純曲げモーメントを加えた。純曲げ区間は試験体中央部 300mm 幅である。また、せん断試験は図-5 に示すように接合目地部の両側 150mm 位置を支持および載荷点とした。



図－5 せん断試験の概要

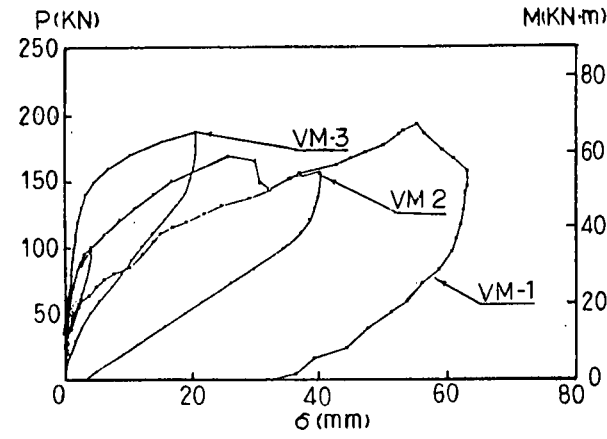
載荷履歴は、単調載荷とし、曲げ試験体では曲げひび割れが発生するまで載荷し、除荷後終局耐力までの2サイクルとした。縦目地のせん断試験では、終局までの単調載荷とした。なお、載荷方法は荷重制御とした。実験中は、荷重、主要点の変位、目開き量、コンクリートのひずみを測定した。

(4) 載荷試験結果

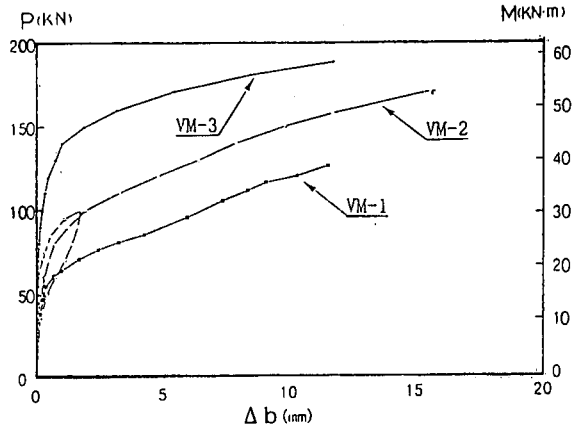
a) 破壊経過と荷重－変位関係

① 曲げ試験

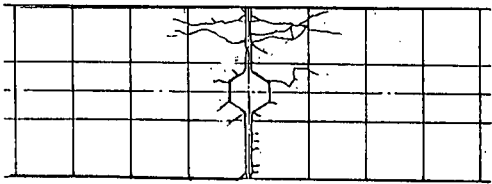
荷重(P)-たわみ曲線(δ)は図-6 に示すように部材降伏まではほぼ弾性で、Py (部材としての降伏耐力) から第2勾配、さらに終局時の第3勾配へと移行した。プレストレス導入力の高いもののほど降伏荷重 Py が高くなった。しかしながら、Pu(終局耐力)は3体ともほぼ同程度の値を示した。図-7 の目地部の荷重－目開き関係は、接合目地部の目開き計測のパイ型変位計が、初目開きとして観測し得る目開き 0.05mm を示すまでに、VM-1 で 28.0kN、VM-2 で 46.8kN、VM-3 で 58.8kN の荷重となった。図-8 に最終ひび割れ状況(VM-3)を示す。



図－6 荷重－変位の関係 (測定位置・支間中央)



図－7 目地部の荷重－目開き関係



図－8 最終ひび割れ状況(VM-3)

②せん断試験

図-9 に示すように VS-1、VS-2 では、終局せん断耐力の6割から7割で、目地部が滑るような動きがあり (a～b 区間)、載荷開始から中間の滑り点 (a 点) までほぼ弾性、b～c 区間では初期の弾性より剛性を低下させながら c 点に至り、c 点以降は P C 鋼棒にせん断力が移行し耐力を維持したまま変位が増加した。終局状態はせん断キーを含んだ接合目地部全体のせん断破壊であった。VS-4～6 の試験体のせん断キー隅角部から 45° 方向にひび割れが発生した荷重は 128～245kN で、VS-1～3 の 157～265kN に比較して若干せん断耐力が低下した。VS-4 では、VS-1、VS-2 と同じように最大荷重の約5割ですべりが生じた。VS-5、VS-6 では階段状に母材コンクリートが少しずつ破壊されているように見えた。終局状態はせん断キー周辺の母材コンクリート部のせん断破壊であった。図-10 に最終ひび割れ状況 (VS-3、6) を示す。

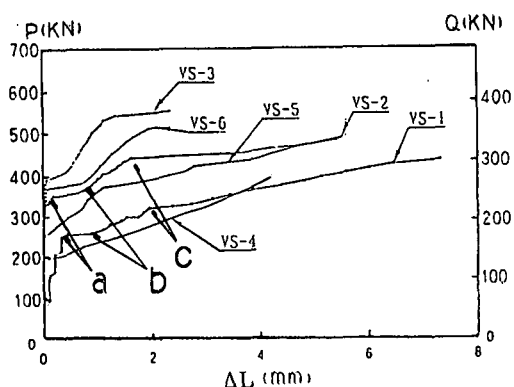
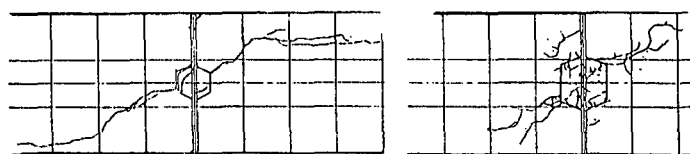


図-9 荷重-変位の関係 (測定位置: 目地部)



VS-3

VS-6

図-10 最終ひび割れ状況

②せん断試験

図-13にVS-3試験体についての上側, 中央, 下側および想定せん断破壊面の位置における荷重-ひずみ関係を示す。P=380kN付近までは弾性的なひずみの挙動を示し, それ以後, 図-10に示したようにせん断キー隅角部から45°方向にせん断ひび割れが発生した。

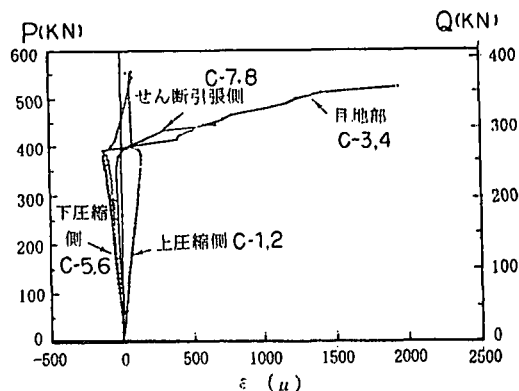


図-13 コンクリートの荷重-ひずみ関係

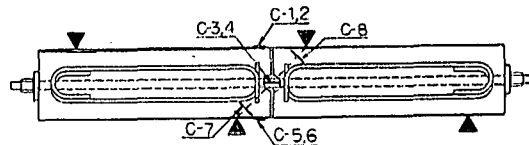


図-14 せん断試験体ひずみ測定位置

b) ひずみ分布

① 曲げ試験

図-11に試験体上側(圧縮側), 中央(目地部), 下側(引張側)のひずみゲージ取り付け位置(C-1~6)における荷重-ひずみ関係を示す。

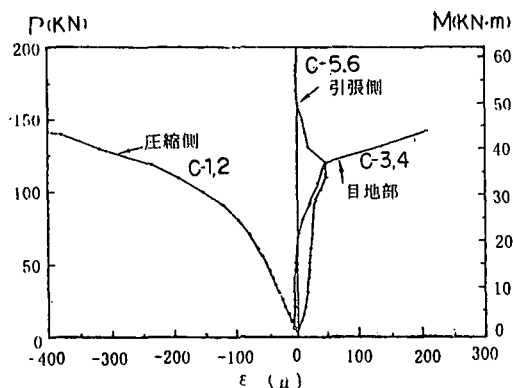


図-11 コンクリートの荷重-ひずみ関係

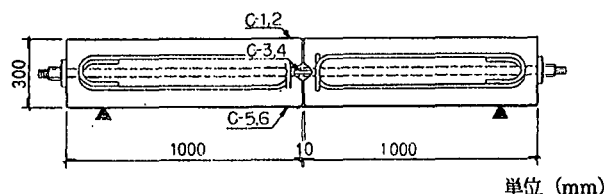


図-12 曲げ試験体ひずみ測定位置

圧縮側については, 荷重の増加に伴い P=90kN 付近までは弾性的な挙動を示すが, 引張側では載荷荷重 P=90kN 付近まで顕著なひずみの増加は見られず, P=115kN ではせん断キー隅角部の上からひび割れが発生した時点より, ひずみが減少した。また, それと同時に目地部のひずみは著しい増加となった。

(5) 載荷試験結果の検討

P C パネル工法の接合目地部模型による曲げとせん断に関する載荷試験により以下のことが判明した。

曲げ試験では, 目地部で曲げひび割れの発生後, ひび割れはほぼ目地に集中し終局時に圧縮縁のコンクリートが圧縮破壊した。荷重-変位関係によると, 2.0N/mm²以上のプレストレスを導入した VM-2, VM-3 の試験体では, 終局耐力の5割以上の荷重に対しても弾性域をもつ良好な変形性能を示し, 十分な靱性を接合目地部は保持していた。また, プレストレス量が増加すると終局強度も若干増加したが, 逆に靱性は低下した。目地部の開きはプレストレス量が導入されコンクリートに圧縮域が残っていれば, ゼロまたは非常に小さい値であった。また, 表-4に示すように, コンクリート標準示方書¹⁾にしたがって算出した終局曲げ耐力の計算値に対して実験値は1.15~1.20倍の値であった。

せん断試験では, 支点より斜めひび割れとせん断キー一部の角にひび割れが生じ, 終局時には, せん断キーの小さい試験体では部材全体のせん断破壊となり, せん断キーの大きいものはせん断キーの外側コンクリートの圧壊で破壊した。また, 表-5に示すように, せん断キーの小さい VS-1~3 のせん断耐力については, 道路橋示方書²⁾のプレキャストブロック継目部のせん断耐力式で $\mu=0.5$ とした計算値と実験値がほぼ同程度の値であった。

表一 4 曲げ耐力の計算値と実験値の比較

試験体名	計算値 cLMu (kN・m)	実験値 expMu (kN・m)	expMu/ cLMu
VM-1	46.0	53.1	1.15
VM-2	48.9	57.6	1.18
VM-3	53.0	63.8	1.20

表一 5 セン断耐力の計算値と実験値の比較

試験体名	計算値 cLQu (kN)	実験値 expQu (kN)	expQu/ cLQu
VS-1	177.3	163.6	0.92
VS-2	224.4	231.3	1.03
VS-3	300.8	266.3	0.86
VS-4	219.0	128.6	0.59
VS-5	267.5	177.2	0.66
VS-6	342.0	253.8	0.74

4. PC パネルケーソンの製作

(1)基本設計

a)設計条件

①利用条件

- ・計画水深：-5.5m(波除堤, 将来岸壁施設となる)
- ・天端高：上部工天端+3.5m, ケーソン天端+2.5m
- ・上載荷重：常時 $q=20\text{kN/m}^2$, 地震時 $q'=10\text{kN/m}^2$

②自然条件

- ・海底水深：-13.0m
- ・設計震度： $K_H=0.20$
- ・設計潮位：H.W.L +2.00m, L.W.L ±0.00m
- ・設計波高：

	終局限界状態	使用限界状態
設計波高 H_D	3.64m	1.40m
有義波高 $H_{1/3}$	2.02m	0.80m
周期 T	6.80sec	4.00sec
入射角 β	0°	0°

③材料条件

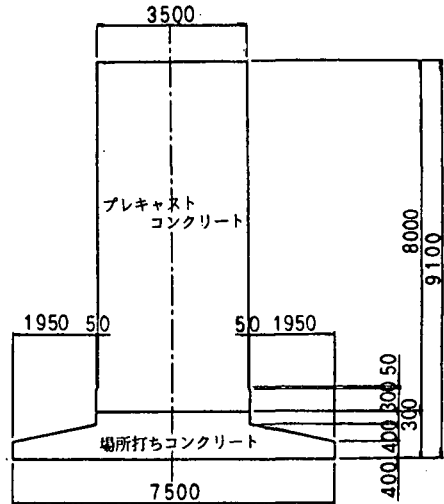
- ・単位体積重量：プレストレストコンクリート $\gamma=24.5\text{kN/m}^3$
鉄筋コンクリート $\gamma=24.0\text{kN/m}^3$
- ・コンクリートの設計基準強度：プレストレストコンクリート $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$
鉄筋コンクリート $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$
- ・PC 鋼材降伏強度：PC 綱より線 $f_{pyk}=1570\text{N/mm}^2$
PC 綱棒 $f_{pyk}=785\text{N/mm}^2$

b)安定計算結果

表一 6 安定計算結果表

荷重状態		完成状態			
		常時		地震時	
		上載荷重 有	上載荷重 無	上載荷重 有	上載荷重 無
安定 計算 結果	安全率				
	滑動	2.77>1.2	2.43>1.2	1.04>1.0	1.01>1.0
	転倒	4.87>1.2	4.27>1.2	1.71>1.1	1.68>1.1
	底版反力				
	P1(kN/m ²)	114.9	111.3	280.8	269.7
	P2(kN/m ²)	118.6	93.3	0.0	0.0
	b(m)	7.50	7.50	6.06	5.91

c)構造諸元



図一 15 ケーソンの断面図

(2)細部設計

a)断面力の計算

断面力の計算は、通常のRCケーソンと同様の方法で行うものとした。側壁については、荷重状態および構造状態を考慮し四辺固定版とし、隔壁については三辺固定一辺自由版とした。

b)ケーソン側壁下部の補強

フーチングの付け根部分(側壁全面)に発生するモーメントにより、フーチング下部には引張力、上側には圧縮力が生じる。この圧縮力が側壁に作用するものと考えこれに対する補強検討を行った。

c)縦目地位置とプレストレス量

本構造はプレキャスト部材を組立て、プレストレスによって一体化を図る構造であるため、側壁と側壁および隔壁と隔壁の接合目地部(縦目地)では鉄筋が不連続となる。この縦目地に曲げモーメントによるひび割れが発生しないこと、さらに法線方向引張鉄筋の定着を考慮し、適切かつ経済的なプレストレス量を次に示す方針により設定するものとした。

鉄筋が不連続となる状態においても、接合目地部は連続して配筋する場合と同等の力学的性能が確保できるように、接合目地部の位置は、部材の曲げモーメント(Mmax)の反曲点付近^{3) 4)}とした。図-16に示すように、プレストレス量は、接合目地部付近を定着範囲とする引張鉄筋に対し、その定着範囲のコンクリートの応力状態を常に圧縮域とするプレストレス量と実験により得られた 2.0N/mm²以上の比較により設定した。

法線直角方向隔壁の縦目地部については、側壁との抜け出しによる引張力を制御する必要があるため、使用限界状態における抜け出しによる引張力をプレストレスで全て受け持たせるものとし、終局限界状態における抜け出しによる引張力はPC鋼材の設計降伏耐力以下となるようにした。

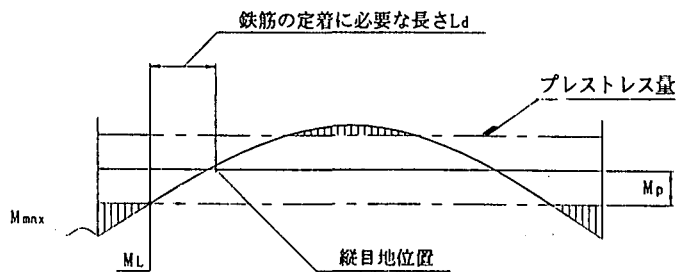


図-16 曲げモーメントとプレストレスト量

(3) 施工法

施工の流れを図-17 に示す。施工の基本作業および手順は、従来のケーソンと変わらないが、PCパネル工法の特徴的な工種として、まず接合目地部（縦、横目地部）について、間隔を2 cm以内としているが実際の仕上げ精度は3 mm程度となるため、縦目地は後続作業のPC鋼材挿入を考慮しプレキャスト版の工場製作および現場組立に慎重を期す必要があった。

特に、鉛直鉄筋の組立は、図-18 に示す底版からの

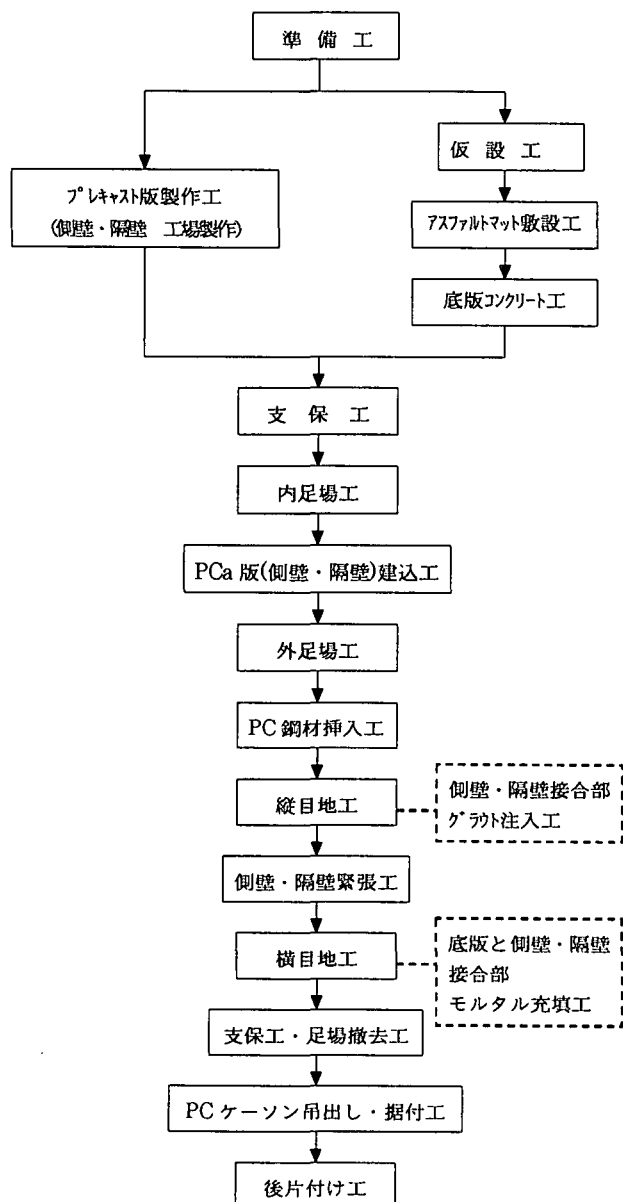


図-17 施工フロー

鉛直鉄筋とプレキャスト部材の継ぎ手位置との施工許容誤差が3 mm以内であることから、その鉄筋の固定には精度が必要となり事前に鋼製の架台などを使用したため複雑となった。また、縦、横目地部のグラウト注入は高流動材を使用し、充填完了の確認をするためパイプなどの確認孔を設置した。結果はどちらも良好であったが、今後は接合目地間隔を広く緩和することにより施工性の向上や経済的なグラウト材料の使用が可能となり、さらに改善が期待できる。

そのほかの特徴的な工種として、プレキャスト版を取り付け時に固定する支保工やプレストレスの導入作業などがあったが概ね順調に施工を終えることができた。作業工程日数については、従来のケーソン製作日数の8割程度であった。全体的には、さらに工夫や改善の余地があるが、今後実績および経験を積むことにより、省力化、工期短縮および建設費の縮減にはかなり有効と思われる。

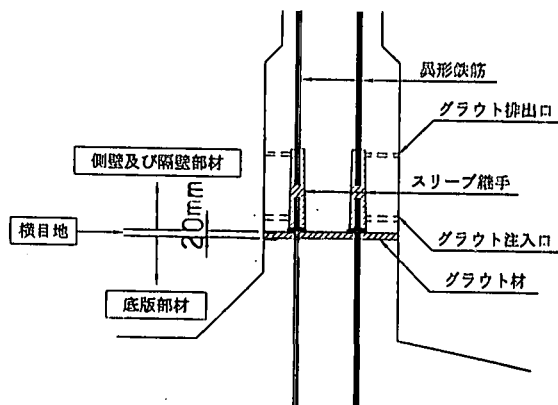


図-18 側壁・底版間接合部

5. あとがき

今回採用した接合目地部は載荷試験により十分な耐力と変形性状を有していることが確認され、所定の終局限界状態、使用限界状態を満足していた。また、PCパネル工法の開発によって従来の鉄筋コンクリートケーソンより、部材を工場で製作することで、施工の省力化および工期短縮の実現とあわせ建設費の縮減が可能となった。今後、施工面において前述したさらなる省力化効果などを総合的に勘案すれば、より魅力的な工法とすることが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書（土木学会 1996 年版）
- 2) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編（日本道路協会 1996 年版）
- 3) プレストレストコンクリート港湾構造物設計マニュアル（運輸省港湾局 昭和 62 年 3 月）
- 4) プレストレストコンクリート工法設計施工指針（土木学会 1991 年版）