

角島大橋の設計と施工

広田 隆行^{*1}・二宮 純^{*2}・寺下 諭吉^{*3}・河辺 真一^{*4}

1. はじめに

角島大橋は、山口県の北西端に位置する角島と本土とを結ぶ離島架橋であり、平成5年に着工した。

角島は、現在人口千人余り、豊かな自然環境に恵まれ、西長門海岸県立自然公園の中核をなしている。1日7便就航している町営渡船が、島への唯一の交通手段であり、架橋については早くから検討されてきた。しかし、日本海に面した海域における2km近い架橋計画には、冬季波浪に代表される厳しい現場条件と工事規模の大きさが障害となって、事業着手まで多くの歳月を要した。

この厳しい現場条件下で工事を進めるには、現場施工工期の短縮が不可欠であり、設計に当たりプレキャスト化施工を多く採用した。同時に、透明度最大18mとい

う美しい海域での架橋工事においては、水質汚濁の防止が重要な命題であるが、プレキャスト化施工の採用により、環境への影響を大きく軽減することが可能となった。

本橋で採用したプレキャスト化施工のうちPC構造のものは、上部工で採用した架設桁によるプレキャストセグメント張出し架設工法と、下部工で採用したPCウェル工法である。以下、これらの設計と施工について報告する。

2. 工事概要

工事名：角島大橋橋りょう整備工事

工事場所：山口県豊浦郡豊北町大字神田～角島（図-1 および図-2）

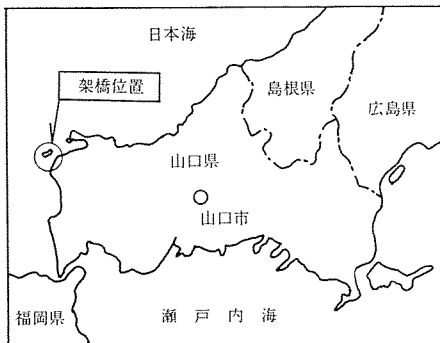


図-1 位置図

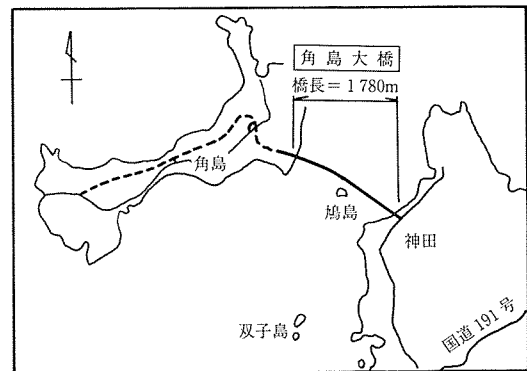


図-2 架橋ルート図



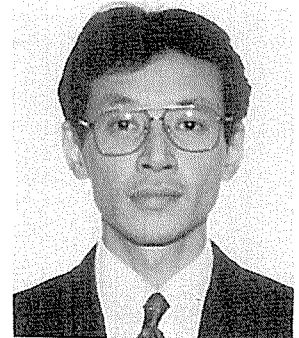
*1 Takayuki HIROTA
山口県豊田土木事務所



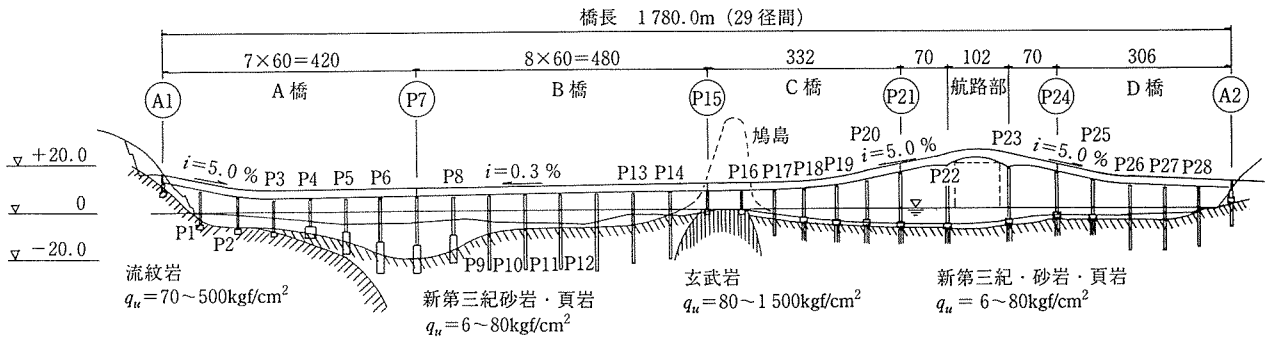
*2 Makoto NINOMIYA
山口県豊田土木事務所



*3 Yukichi TERASHITA
八千代エンジニアリング(株)



*4 Shin-ichi KAWABE
八千代エンジニアリング(株)



下部工番号	下部工形式	基礎形式	下部工番号	下部工形式	基礎形式
A1	逆T式橋台	直接基礎	P9~P14	円柱式橋脚	PC ウェル基礎
A2	〃	深礎杭基礎	P15~P16	〃	直接基礎 (一括吊込み)
P1~P3	円柱式橋脚	直接基礎	P17	〃	PC ウェル基礎
P4	〃	オープンケーソン基礎	P18~P25	〃	鋼製水中フーチング基礎
P5~P8	〃	ニューマチックケーソン基礎	P26~P28	〃	PC ウェル基礎

図-3 支持地盤の状況と下部工基礎形式

橋 長 : 1 780 m
 幅 員 : 6.5 m (2車線, 歩道なし)
 設計荷重 : B 活荷重
 設計震度 : 橋軸方向 0.11, 0.14
 橋軸直角方向 0.14, 0.18

設計波 : 最大波高 9.04 m 周期 14.8 秒
 上部工 :
 一般部 5~8 径間連続 PC 箱桁橋 $L=1\,538\text{ m}$
 (プレキャストセグメント張出し架設工法)
 航路部 3 径間連続鋼床版箱桁橋 $L=242\text{ m}$
 下部工 : 逆T式橋台 2基
 円柱式橋脚 28基 (支持地盤の状況および基礎形式は、図-3のとおり。)
 完成予想図を写真-1, 写真-2 に示す。



写真-1 完成予想 (上空から)

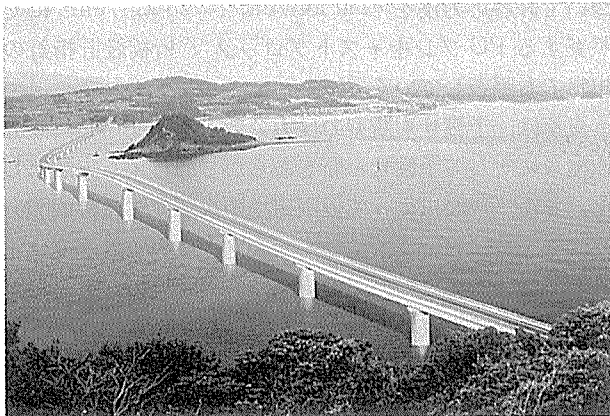


写真-2 完成予想 (角島から)

3. 上部工の設計

3.1 概 要

上部工の形式は、PC 箱桁形式、PC ポストテンション T 桁形式および鋼箱桁形式等について比較検討を行ったが、構造的、施工性、経済性および維持管理面から PC 箱桁形式を採用することとした。

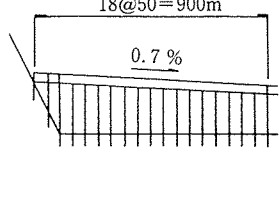
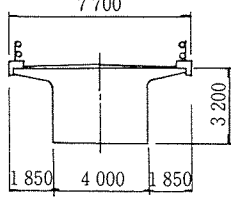
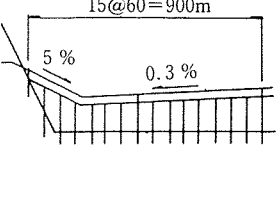
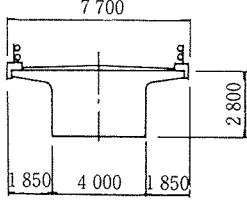
架設工法は、工事延長が長く、波浪の厳しい現場条件を考慮して、以下の項目を架設工法選定の基本として選定することとした。

- ① 海上作業を最小限にする工法とする。
- ② 年間を通じて作業を続けられる工法とする。

これらの条件から、縦断線形に対して自由度の高いセグメント工法と、曲率を一定とする必要のある押出し工法の比較検討を詳細に行った結果、架設桁によるプレキャストセグメント張出し架設工法の支間 60 m 案が橋脚数も少なく、上部工・下部工総合して経済的となった (表-1)。

航路部分は鋼床版箱桁形式としたが、これは大ブロック架設を行うことが可能であり、航路に対する影響が最も少ないことから決定したものであり、経済性において

表-1 PC 桁施工法比較表

構造図	PC 押し出し工法		PC セグメント工法	
	側面図	主桁断面	側面図	主桁断面
				
構造特性	桁高がプレキャストセグメント工法より高く、自重増の影響から下部工規模が大きくなる。中間ベントを施工できないので支間 50 m が限度。		橋脚上からの張出し施工であり、連続径間数を自由に選定できるプレキャストセグメント桁であり、桁高の低減、橋脚規模の低減により支間 60 m が可能。	
施工性	桁製作ヤードで場所打ち桁を製作し順次送出し施工を行う。押し出し施工延長が 900 m 程度あり、橋脚ごとに人員配置が必要である。施工実績では最大延長となる。		桁製作ヤードでセグメント桁を製作しトレーラにより架設地点まで運搬、ブロックガーター架設を行う。サイクル施工が可能で施工性がよい。	
経済性	支間 50 m 押し出し施工 PC 箱桁 1.01		支間 50 m PC セグメント桁 1.05	支間 60 m PC セグメント桁 1.00
評価	△		△	○

も優れていた。

3.2 桁断面

桁断面は重量の軽減を目的に最小な部材厚さとした。このため連続ケーブル（桁の下側に配置する主ケーブル）を 1 列配置としてウェブ厚さを小さくした（図-4）。

3.3 設計基準値および材料強度

1) コンクリート

表-2 コンクリート強度

		(kgf/cm ²)
		主 桁
設計基準強度		400
プレストレス導入時圧縮強度		310
許容曲げ圧縮応力度	導入直後	180
	設計荷重時	140
許容曲げ引張応力度	導入直後	-15
	設計荷重時	0
許容せん断応力度		設計荷重時 5.5
許容斜引張応力度		せん断に対して 10
終局荷重時平均せん断応力度の最大値		53
コンクリートの付着応力度		20
ヤング係数		3.1×10 ⁵

2) 鉄 筋

使用材質	SD 295 A
降伏点応力度	$\sigma_{sy}=3\ 000\ \text{kgf/cm}^2$
許容引張応力度	床版 $\sigma_{sa}=1\ 400\ \text{”}$
	その他 $\sigma_{sa}=1\ 400\ \text{”}$

3) PC 鋼材

PC 鋼より線	SWPR 7 A および SWPR 7 B
PC 鋼 棒	SBPR 930/1080

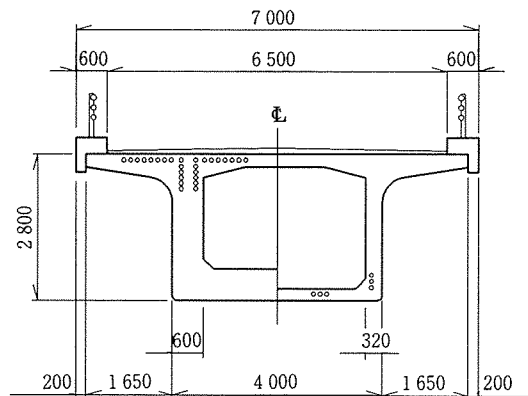


図-4 桁断面

3.4 設 計

本橋は、海上橋であることを考慮して、設計荷重時における部材応力度は、引張を発生させないフルプレストレス設計とした。

また、プレキャストセグメントの継ぎ目部における照査は、死荷重＋静荷重＋活荷重×1.7における応力度について許容応力度を+140 kgf/cm²、-25 kgf/cm²にて照査する PC プレキャストブロック T 桁橋設計指針の規定でも照査している。

支承は、予備せん断型の反力分散支承を使用し、設計伸縮量に対して予備せん断をあらかじめ与える方法とした。また、架設に従って仮固定を順次解放する計画であり、施工時において予備せん断の向きや大きさが変化するが、この影響についても支承で考慮することとして、橋脚に架設時の収縮影響が生じない設計とした。

セグメント最大長さは、2.5 m、最大重量は約 40 t とした。

また、本土側から 2 連分の設計が完了した段階で設計

活荷重の変更が生じたことから、これまでの TL-20 の設計から B 活荷重の設計に修正設計を行ったが、その影響は比較的少なく、連続鋼材が本数の部分変更、張出し鋼材が 7 S 12.7 から 8 S 12.7 への変更、鉄筋についても床版鉄筋で D 16 から D 19、スターラップ配置の変更程度で、桁断面の変更は基本的に不要であった。

4. 下部工の設計

4.1 概要

本橋の下部工には、合計 10 基の PC ウェル円柱式橋脚を採用している。支持地盤は、すべて新生代第三紀の頁岩と砂岩の互層からなる軟岩層（一軸圧縮強度 $q_u = 6 \sim 80 \text{ kgf/cm}^2$ ）である。

このような岩盤に施工することから、施工機械は建設省土木研究所にて開発された遊星駆動型の掘削機械を使用する前提で設計を行った。

表-3 に示すとおり、PC ウェルはニューマチックケーソン工法および鋼管ウェル工法と比較すると工費、工期の面ですぐれており、積極的に採用したが、図-5 のとおり設計条件を満足する橋脚は限定された。

また、波浪解析を実施し、基礎資料として日本海（山陰沿岸）沖波調査報告書¹⁾を使用して、地形や海底状況を考慮した現地波浪を推算し、100 年確率の波浪を設計波とした。

施工時波浪については、10 年確率の統計処理を行って各橋脚位置の波浪を推算し、施工計画や施工栈台の高さ等の設計に使用した。

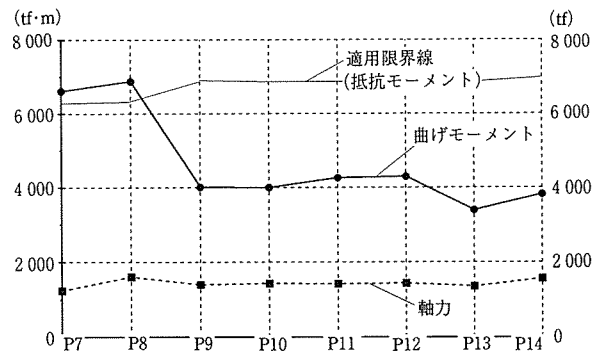


図-5 橋脚断面力と PC ウェル適用限界との関係

4.2 PC ウェル断面

PC ウェルは、PC ウェル工法研究会の PC ウェル工法技術基準（案）²⁾に示されている $\phi 4.0 \text{ m}$ の断面に対して壁厚を 8 cm 厚い 50 cm で計画を行った。これは、部材断面をできるだけ厚くしせん断強度を増加させ

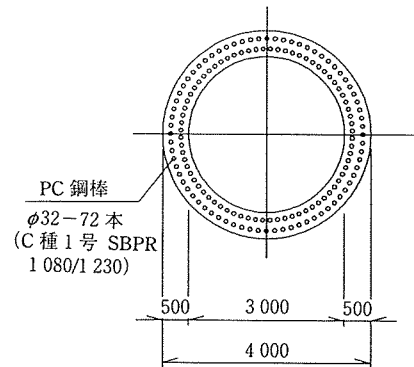


図-6 PC ウェルセグメント断面

表-3 橋脚基礎工法比較表

	第①案 PC ウェル形式	第②案 ニューマチックケーソン形式	第③案 鋼管矢板基礎形式
構造図			
構造特性	比較的柔軟なケーソンと杭の中間的な基礎構造である。 $\beta_L < 1$ からケーソン基礎として設計を行う。	支持地盤軟岩であり、地盤に確実に支持される構造となる。 水深があり、吊込みケーソン構造形式が可能。	弾塑性構造体として設計を行う。
施工性	軟岩部は、遊星駆動型掘削機により掘削沈設を行うが、局所的な転石および硬い軟岩層が存在した場合は施工時間を要する。 施工精度が非常によい。 施工工期 5 カ月	潜函作業を伴い、労務管理等設備規模がかかるが、工程管理がよい。 施工精度は、PC ウェル形式に比較してピアケーソン施工となることから多少劣る。 施工工期 8 カ月	局部的に硬い軟岩層では施工不可となる事態が生じる。 施工工期 10 カ月
環境その他	海洋汚濁の問題は少ない。	海洋汚濁の問題は少ない。	施工時の油飛散防止により海洋汚濁の問題がある。
経済性	1.00	2.00	1.83
評価	◎	○	△

ることを目的としたもので、掘削機械を考えた最大厚さ（最小内空断面）としたものである。セグメント断面を図-6に示す。

また、PC ウェル設置箇所の海底地盤面に礫が存在していることから、礫によるウェル躯体浸食の防止工として、海底付近のウェル表面を防舷材ゴム製の防護工で被覆することとした。

4.3 設計基準値および材料強度

表-4 コンクリート強度

	(kgf/cm ²)	
	長期	短期
コンクリート強度	700	
許容曲げ圧縮応力度	190	300
許容軸圧縮応力度	155	250
許容曲げ引張応力度	0	—
40 ≤ σ_{ce} < 70	—	-30
70 ≤ σ_{ce}	—	-50
許容せん断応力度	8.5	12.7
ヤング係数	3.6 × 10 ⁵	

4.4 設 計

PC ウェル基礎の設計は、杭として設計する方法とケーソンとして設計する方法があるが、 $\beta_L < 1$ であることからケーソン基礎として断面力の算出を行った。

PC ウェルは、基礎のケーソン部分から橋脚躯体まで一体の構造となっているため、橋脚躯体と基礎の区分が明確ではない構造形式となっている。

設計区分は、図-7により区分した。基礎部分についてはパースシャルプレストレス部材とし、橋脚躯体は海上橋という状況を考慮してフルプレストレス部材とした。

また、橋脚躯体は、平成2年度の道路橋耐震設計基準の橋脚における地震時保有耐力照査にならって、脆性的な破壊が生じないことを照査した。この照査は、プレストレスによる応力を初期ひずみとして部材に与え、RC円管断面としてRC充実橋脚部材の破壊性状の値を使

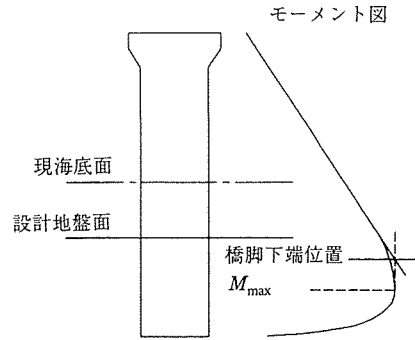


図-7 PC ウェル橋脚設計区分

用して計算を行った。

土木研究所の施設を利用して類似部材の繰返し載荷試験も行われているが、RC部材に対してPC部材は十分な靱性がある結果が得られている^{3),4)}。

5. 上部工の施工

5.1 施工状況

PC箱桁橋のうち本土側の900m区間について平成6年秋に発注し、この区間は平成9年度末に完成する予定である。

平成7年11月現在、プレキャストセグメントの製作を先行しながら、架設桁による張出し架設を開始した状況である。製作、架設ともに通年施工を予定しているが、柱頭部等には作業船施工となる部分があり、これらは波浪の激しい冬季を避けて施工する。

5.2 製作

プレキャストセグメントの製作は、架橋地点から500m離れた場所で行っている。図-8に、製作ヤードの配置状況を示す。なお面積は、7200m²である。

ヤードは借地した水田を造成したものであるが、地山地盤が軟弱であることから、製作台の不等沈下を防止する目的で、基礎工としてH杭を施工した。

ロングラインのマッチキャスト方式で製作している

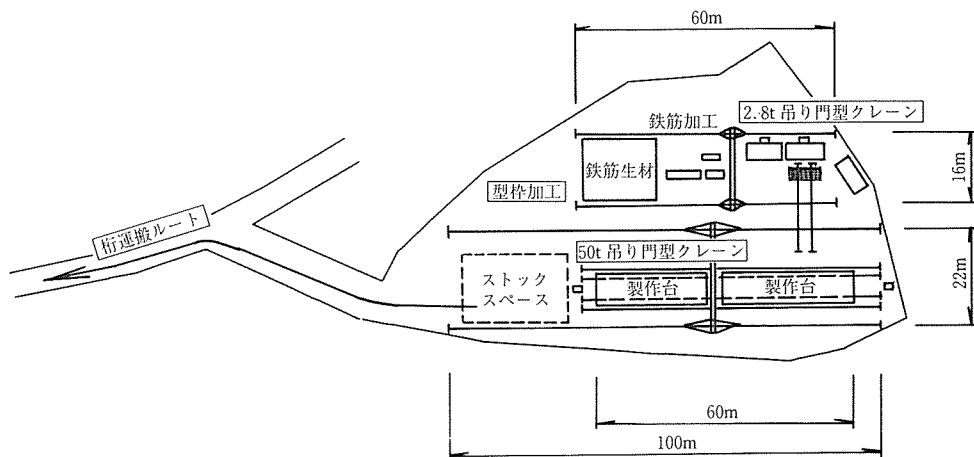


図-8 製作ヤード配置図

が、製作台は橋軸方向6 m 間隔でジャッキにより高さ調節可能な構造としている。これにより、縦断線形および上げ越し量の精度管理の向上を図っている。製作台上の底面型枠として、ステンレス製フォームを使用している。

側面型枠は、大型型枠を製作しスライドフォームとして使用している。この大型型枠の表面は、厚さ4 mm のステンレス板構造としている。内面および端面は、一般型枠を使用している。スライドフォームは、製作台に沿って設置した軌道上を移動し、高さはジャッキによって調整できる構造としている。

鉄筋は、2.8 t 吊り門型クレーンの軌条内で事前に組み立て、プレファブ化した状態で型枠内に吊り込むことにより、工程の短縮を図っている(写真-3)。

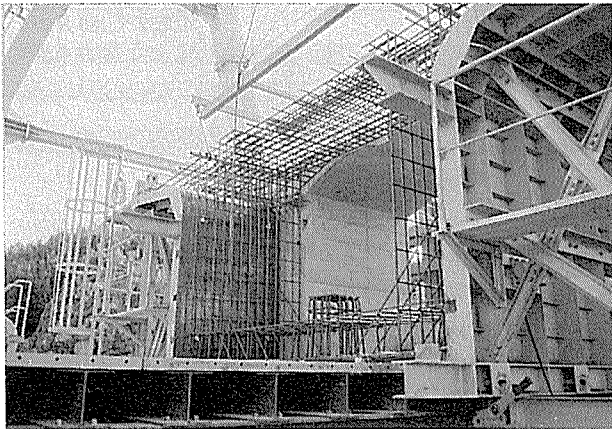


写真-3 鉄筋の型枠内への吊込み

5.3 運搬・仮置き

セグメントは、製作が完了したのから順次切り離し、50 t 吊り門型クレーンによりストックスペースに移動する。セグメントは、架設工程上かなりの量の先行製作が必要となるので、架橋地点への運搬ルート内となる道路公園予定地の仮置きヤードを設け、最大60個(約3支間分)の仮置きを行う(写真-4)。



写真-4 仮置き



写真-5 トレーラによる運搬

運搬は、製作ヤードから仮置きヤード、仮置きヤードから架橋地点の架設桁までの間をトレーラにより行う(写真-5)。

5.4 柱頭部

橋脚頭部における上部工は、柱頭部として4 m 区間を、現場打ちで製作している。本支承および仮支承を設置後、鉄筋、型枠ともに現場で組み立て、コンクリートを打設する。施工精度を最も必要とする部分であり、この部分にはプレキャスト化施工を採用していない。

仮支承は、撤去時の作業性を向上させる目的で鋼製とした。撤去は、ガス切断により行う予定である。

本支承である反力分散支承の予備せん断量は、現在架設中の7 径間連続桁においては、表-5 に示すとおり最大120 mm となっている。

表-5 ゴム支承の予備せん断量

橋台・橋脚番号	せん断量 (mm)
A 1	-21
P 1	+14
P 2	+36
P 3	+53
P 4	+74
P 5	+96
P 6	+120
P 7	+119

(+が終点(A・2)方向へのせん断)

5.5 架設

架設桁は、表-6 および写真-6 に示すトラス構造のものを採用している。架設工程が開始直後の段階(写真-7)であり、架設桁に係る報告は今後の機会に行いたい。

表-6 架設桁諸元

総延長	151 m
総重量	407 t
適応支間長	53~64 m
定格荷重	52 t
運搬速度	3 m/分
架設桁の移動	駆動装置を有する2基のベントにより架設桁を支持し1 m/分の速度で移動を行う。



写真-6 架設桁による架設

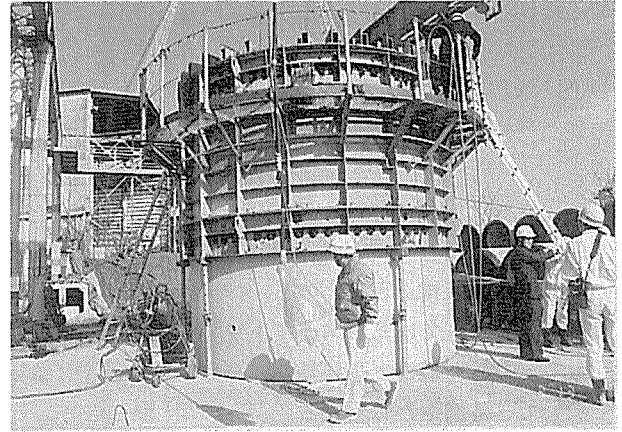


写真-8 ショートライン方式による PC ウェルセグメントの製作



写真-7 架設桁全景

6. 下部工の施工

6.1 施工状況

10 基の PC ウェル基礎形式の橋脚は、平成 6 年および 7 年に 2 基ずつ施工し、今後も引き続き毎年 2 基施工する予定である。平成 7 年の施工実績では、PC ウェルの現場施工工期は約 3 カ月であり、同時に施工したニューマチックケーソン基礎橋脚よりも 2 カ月短く、プレキャスト化の効果が現れている。

6.2 製作

PC ウェルセグメントは、マッチキャスト方式により製作した。先行セグメントの上に後続セグメントを重ねて製作するショートライン方式を採用している（写真-8）。

図-9 に示すとおり、セグメントには、PC 鋼棒を挿入する直径 43 mm のシース孔があり、下端に PC 鋼棒の接続箇所用の拡幅部、上端に定着用のアンカープレートを設置している。シース孔は、ビニール管で被覆した鋼管により箱抜きしており、シース管なしの構造となっている。

セグメント接合面は、コンクリート打設後のコテ均し

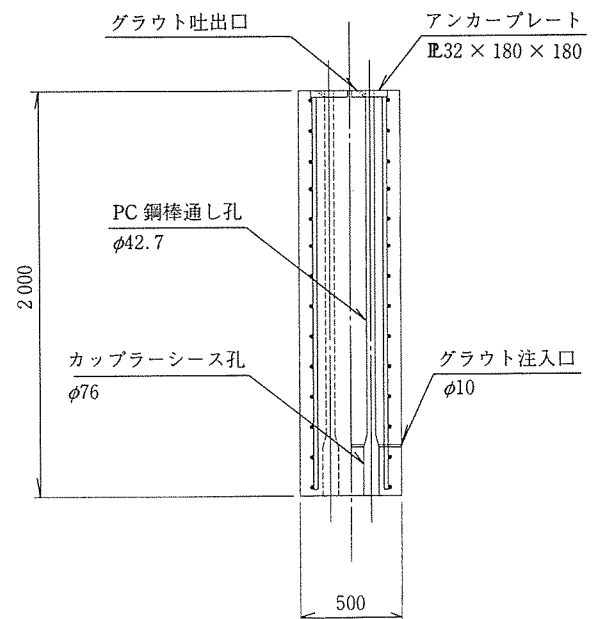


図-9 PC ウェル断面図

による仕上げとなるため、接合面上のアンカープレートの水平性の厳密な確保は容易ではない。しかし、アンカープレートの水平性のわずかな誤差が、PC 鋼棒の設置時のトラブルに直接影響するため、接合面の仕上げに細心の注意を要した。

6.3 構築

構築は、1 セグメントごとに接合、緊張およびグラウトを行い、その後圧入沈設するという工程の繰返し作業である。

接合は、海上足場上のクローラクレーンによりセグメントを吊り込み、接合面に設けた 3 個の鋼製ガイドキーにより位置決めをする。PC 鋼棒をシース孔内に挿入し、接着剤を接合面に塗布し接合する（写真-9）。

吊込み時に使用する 3 箇所の吊穴に設置する鋼管には、防錆のためステンレス材を使用した。

接合後速やかに緊張を行う。緊張は3台のジャッキにより、3本ずつ同時緊張を行った(写真-10)。

緊張完了後、グラウトを行う。写真-11のとおり、セグメント下部の注入口から注入し、セグメント天端のアンカープレートの吐出口からグラウト材が流出することにより確認する。グラウト材の逆流を防止するため、注入口にはゴム製の弁を設置した。

平成6年の施工においては、グラウト中に注入口付近が詰まって注入不能となるケースが若干生じたため、平

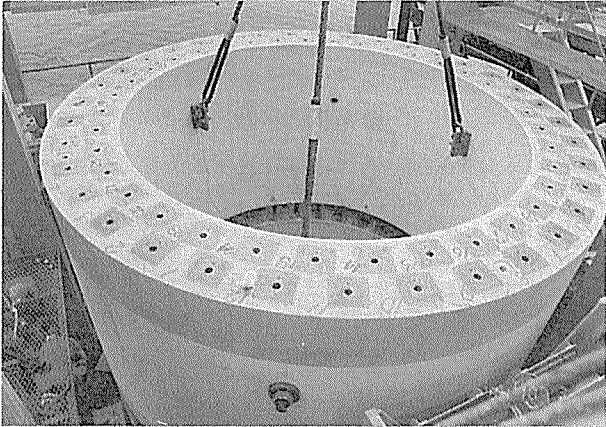


写真-9 接合面

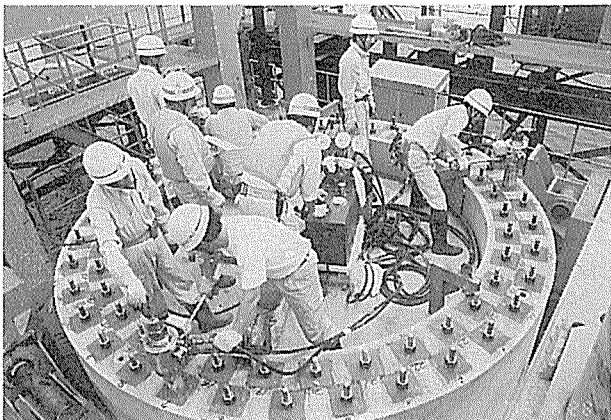


写真-10 緊張作業

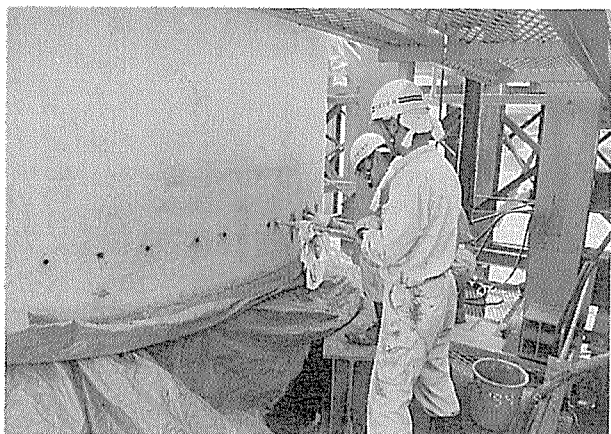


写真-11 グラウト作業

成7年施工については、注入口の内径を増すなどの改良を行い、良好な結果を得た。なお、注入不能となったものについては、アンカープレートの吐出口からエポキシ樹脂製のグラウト材の注入を行った。

6.4 掘削

掘削する地層は、海底面から約1~5 m程度の砂層と、その下の約11~13 mの堆積岩からなる軟岩層である。

PCウェル工法技術基準(案)では、砂層についてはハンマーグラブによる掘削、軟岩層については遊星駆動型掘削機を使用したリバース工法が標準工法とされている。

実際の施工では、砂層についてクローラクレーンに装着したハンマーグラブによる掘削を行い、順調に施工できた(写真-12)。

軟岩層については、当初は遊星駆動型掘削機を使用したリバース工法を採用した(写真-13)。

しかしながら、図-10に示すとおり、汚水を循環させるためにウェル内の水位を海面よりもかなり高くする必要があり、底盤から逸水が生じれば海洋汚濁に直結することとなる。種々検討を行った結果、ウェル内の水位は常に海面と同一とし、軟岩層についてもハンマグラブに

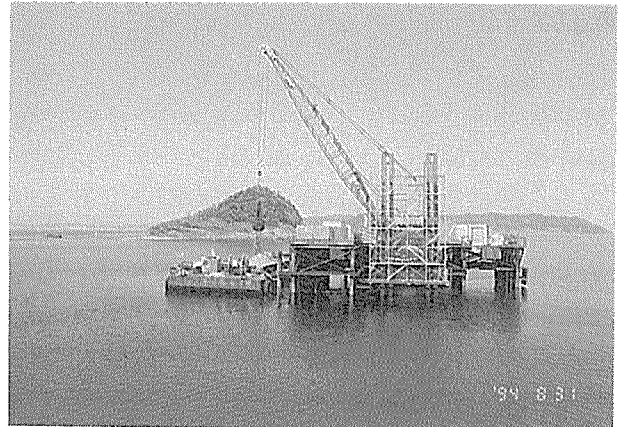


写真-12 掘削作業

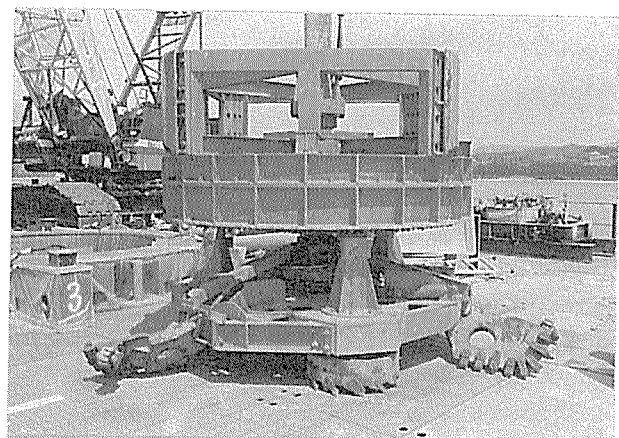


写真-13 遊星駆動型掘削機を使用したリバース工法

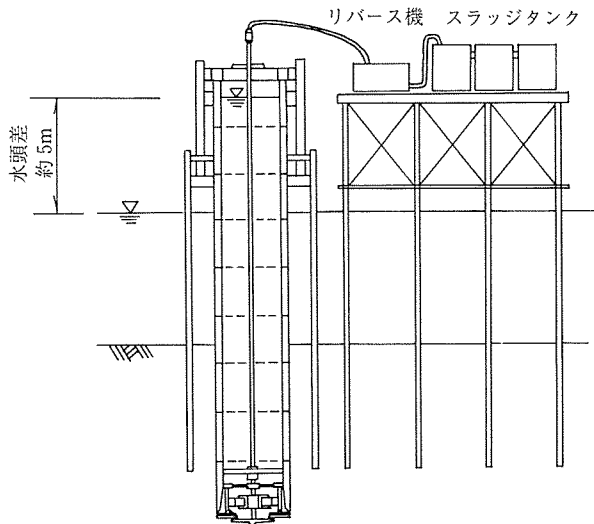


図-10 リバース工法施工状況

より掘削を行い、掘削困難となった場合および着底時の最終掘削時のみ遊星駆動型拡底掘削機を用いることとした。

軟岩層の掘削をハンマグラブで行うと、掘削工自体の効率は低下するが、掘削機の設置撤去作業が省かれる等の要素が加わり、全体のサイクルタイムはほぼ同一であった。

7. おわりに

本架橋工事は、現在下部工のすべてと上部工 900 m 区間が発注済みとなり、工事の最盛期を迎えたところである。今回報告したプレキャストセグメントを使用した上部工、下部工ともに、さらに3~4年の施工期間を残している。今後も安全かつ順調な工事の遂行を図り、21世紀のスタートに開通を間に合わせるべく努力を続けていきたい。

最後に、本橋の設計および施工に当たり、これまでに多大なご指導をいただいた関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本海（山陰沿岸）沖波調査報告書，（財）漁港漁村建設技術研究所，平成4年3月
- 2) PC ウェル工法技術基準（案），PC ウェル工法研究会，平成4年6月
- 3) 中井，中野，高木，久保：プレキャスト中空 PRC 橋脚の地震時変形性能に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, 1994
- 4) 久保，高木，中井：中空円環断面プレキャスト橋脚（PRC 構造）の変形性能に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，49, v-397, 1994

【1995年12月4日受付】