

高橋脚上の二層 PC 箱桁橋の設計・施工（与島高架橋）

加 島 聰*
 村 瀬 佐太美**
 富 田 大 造†
 佐々木 雅 敏††

1. まえがき

与島高架橋は、児島一坂出ルート海峡部約 9 km のほぼ中央に位置する与島を、南北に縦貫する橋長 717 m の PC 高架橋である（写真—1 参照）。

本橋は、本州側で与島橋（曲弦トラス橋）と、四国側で南北備讃瀬戸大橋（吊橋）と接続する。また国際航路上に位置する南北備讃瀬戸大橋の桁下高 65 m を確保すべく縦断線形をすりつけたため、最大地上高 79 m と極めて高い橋脚を有する大規模な高架橋である。

本橋の上部工は、二層構造をなし、上層が道路桁、下層が鉄道桁で構成されている（図—1 参照）。

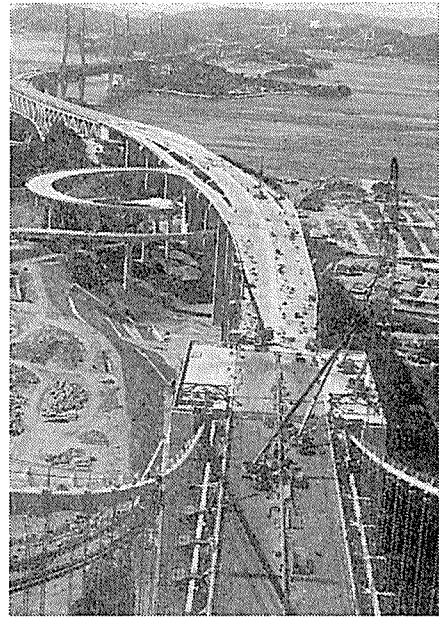
また道路桁の平面線形は、 $R=1300$ m の円曲線と sin 低減曲線で構成され、本線主桁からは、与島西側に建設中である与島パーキングエリア（上下線一体形式、駐車台数約 310 台）に接続するランプ橋が分岐するため幅員変化が必要となり、複雑な平面形状を呈している。

本報は、与島高架橋の設計・施工のうち、主に上部工 PC 桁に着目し、その特徴を中心に報告するものである。

2. 設 計

2.1 構造上の特徴

本橋は、次の特徴を有している。



写真—1 与島高架橋全景（昭和 62 年 7 月）

- 1) 橋脚は、最大高さ 79 m（6 P）、脚柱厚 4.0 m の非常にスレンダーな鉄骨鉄筋コンクリート構造である。
- 2) 本州側 4 径間と四国側 7 径間にはさまれる 4 P 橋脚は、道路桁と鉄道桁の間にランプ（四国方面 ON ランプ）が立体交差する構造であり、双方の幅員および建築限界をクリアするため、図—2 に示す



* Satoshi KASHIMA
 本州四国連絡橋公団垂水工
 事事務所長



** Satami MURASE
 本州四国連絡橋公団坂出工
 事事務所第三工事長



† Daizo TOMITA
 本州四国連絡橋公団坂出工
 事事務所第三工事代理



†† Masatoshi SASAKI
 本州四国連絡橋公団技術管
 理課

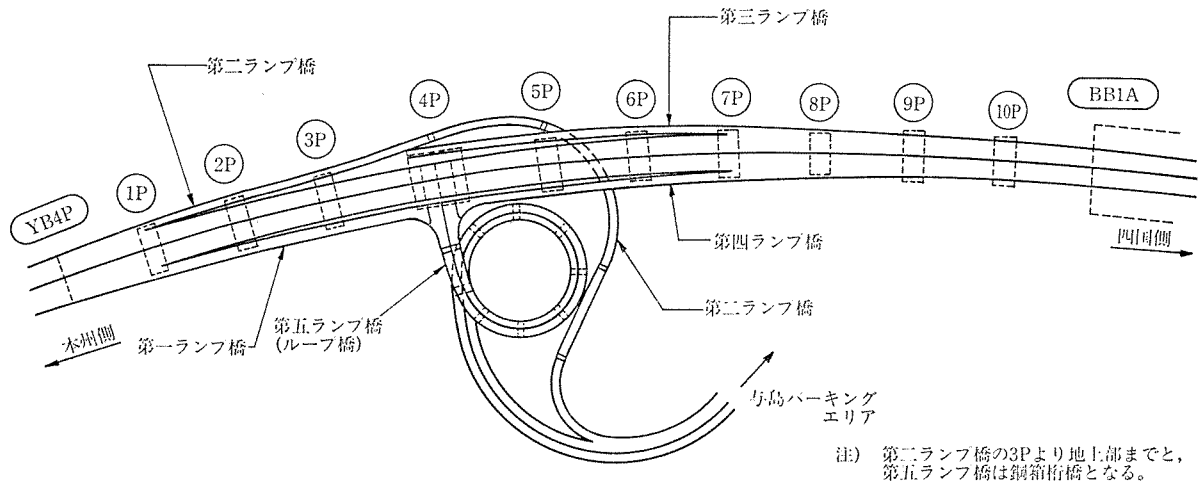
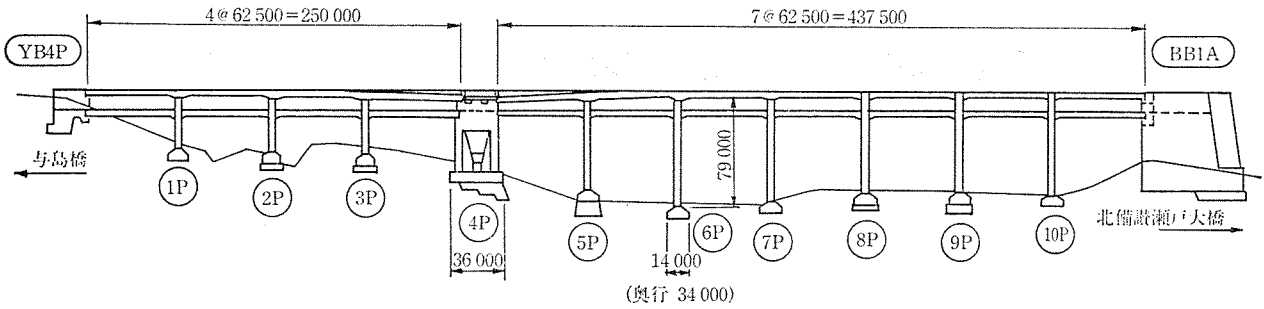


図-1 与島高架橋一般図

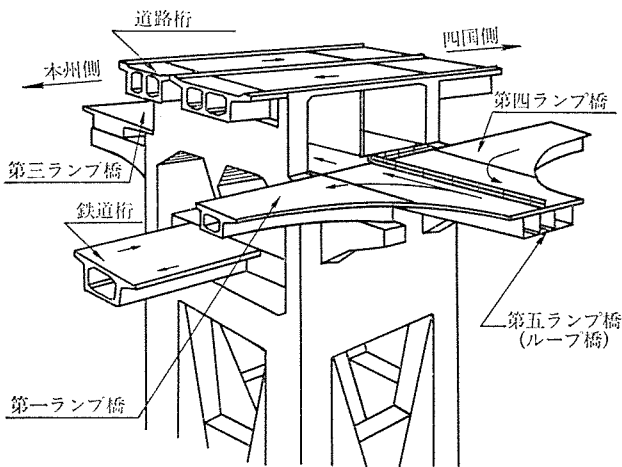


図-2 4P 構造図

3層構造となっている。

- 3) 下層の鉄道桁は、前後にマッシュな橋台 (YB 4 P, 4 P, BB 1 A) を有するため、1点集中固定式連続桁とし、可動支承部には、落橋防止として鋼角ストッパーを採用した。
- 4) 上層の道路桁は、耐震性、走行性等から、橋脚と主桁が剛結した連続立体ラーメン構造を採用した。
- 5) 道路桁の主桁は、ランプの派生に伴い幅員および床版スパンが複雑に変化するため、箱桁は主桁本数が増えるマルチセル構造となっている。本線主桁

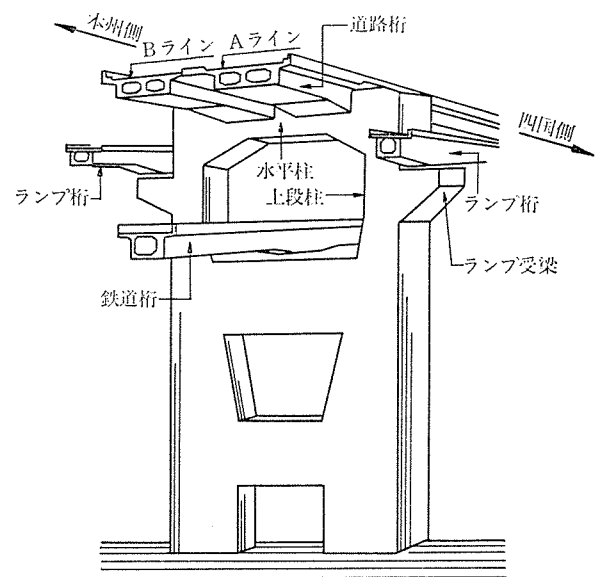


図-3 与島高架橋各部の名称

は、標準幅員区間で2室2箱桁、拡幅区間で2~5室箱桁まで変化している。

これら各部の名称を図-3に示す。

2.2 設計条件および主要材料

本橋の全体構造系を図-4に、設計条件を表-1に、主要材料を表-2に示す。

2.3 下部工の設計

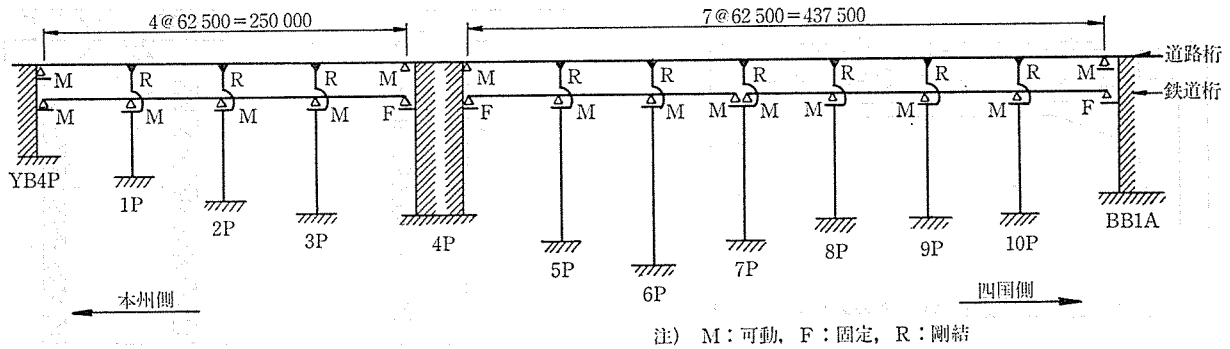


図-4 与島高架橋の全体構造系

表-1 設計条件

区分	鉄道部	道路部
事項		
支間	4 @ 62.5 m 2連 3 @ 62.5 m 1連	4 @ 62.5 m 1連 7 @ 62.5 m 1連
規格	在来線.....複線 新幹線.....複線 ※暫定施工として在来線のみを施工し、将来新幹線を併設できるように配慮している。	第1種第2級.....4車線
活荷重	在来線：KS-16 新幹線：KS-16, N-18, P-19	TL-20, TT-43
設計震度	橋軸方向 $K_H=0.19, 0.20$ 直角方向 $K_H=0.27$	橋軸方向 4 径間 $K_H=0.17$ 7 径間 $K_H=0.08$ 直角方向 $K_H=0.19$ ※耐震設計は、修正震度法に加えて動的解析（スペクトル応答解析）を行った。
衝撃係数	$i=0.193$ （暫定時のみ）	$i=10/(25+L)$
材料強度	コンクリート 主桁 $\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2$ 鉄筋 SD 35	コンクリート 上段柱 $\sigma_{ck}=300\text{kg/cm}^2$ 水平梁 } $\sigma_{ck}=400\text{kg/cm}^2$ 主桁 } 鉄筋 SD 30, SD 35

表-2 主要材料

区分	下部工	上部工	
		鉄道部	道路部 (注)
事項			
コンクリート	115 500 m ³	10 500 m ³	30 600 m ³
鉄筋	10 700 t	900 t	5 500 t
鉄骨	4 900 t	—	600 t
PC 鋼材	—	680 t	1 600 t

注) 道路部には上段柱、水平梁を含む

本橋の基礎形式は、良質の花崗岩が地表近くに分布するので直接基礎形式を採用した。

橋脚形式は、橋軸方向には橋脚厚を極力薄くした長周期系構造が必要であること、また橋軸方向には地震時列車走行性の面から変形の少ない構造形式が必要であること、さらに経済性、美観等を考慮して、2層～3層のラーメン橋脚を採用した。また高橋脚で非常にスレンダーなため、耐震設計は、修正震度法に加えて動的解析（スペクトル応答解析）も実施し照査を行った。橋脚構造

は、耐震性、施工性、安全性を考慮した結果、鉄骨鉄筋コンクリート構造を採用した。

設計計算は、鉄骨を鉄筋に換算して従来の RC 部材と同方式で行った。さらに鉄道受梁のように、梁高に比べ相対的に短いスパンの部材についてはディープビームとして設計し、ラーメン隅角部、フーチング部においては、FEM 解析による設計照査も行った。

2.4 鉄道桁の設計

鉄道桁は、PC 連続箱桁橋であり、ディビダーク工法によって張出し施工を行うため、架設時と完成時では構造系が段階的に変化する。このため、コンクリートのクリープ・乾燥収縮等による不静定力等を詳細に計算するために、各施工段階および完成時の構造条件、荷重条件を考慮して断面力を算出し、構造解析を行った。

支承は、剛な橋台に一点固定で、各橋脚上では橋軸方向の水平力を拘束しないローラ支承を用い、落橋防止装置として可動鋼角ストッパーを用いる設計とした。この可動鋼角ストッパーは、設計水平力が 1 000 t を超え、従来に例をみない大型のものである。したがって、大型鋼角ストッパーの設計で採用した粘性抵抗力の確認試験を行い、設計の妥当性を確認した。

2.5 道路桁の設計

道路桁は、前述のように本線 4 車線に加え、ランプによる拡幅があるので、桁総重量が鉄道桁に比べて非常に大きくなり、それに伴い地震時による慣性力も大きくなった。この大きな地震時慣性力に対処するため、道路桁では、橋軸方向には剛な橋台から拘束を解放し、橋脚と主桁を剛結した長周期系構造の立体ラーメン構造を採用した。

一方、橋軸直角方向には道路桁と水平梁を剛結する構造形式となっているため、上段柱、水平梁は、曲げおよびせん断のほか大きな振りモーメントを受けることになった（図-5 参照）。この合成応力の分布を把握することは、水平梁の設計においてもたいへん重要である。よって設計に先立ち、FEM 解析により水平梁の内部応力の状態を調べ、さらに 1/10 模型による載荷実験を行

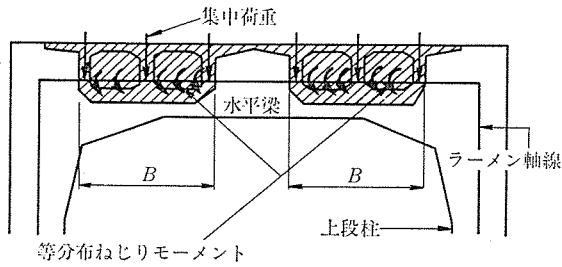


図-5 道路桁上段柱，水平梁の捩りモーメント

うことにより，次のような設計手法の妥当性を確認した。

- 1) 水平梁は，ねじりモーメントに対して，地震時を含む設計荷重状態におけるひび割れの発生を制限するためにプレストレストコンクリート構造とする。
- 2) 終局荷重状態においては，プレストレスの影響を無視した鉄筋コンクリート部材として設計する。
- 3) ラーメン隅角部については，2次元 FEM 解析を行い，発生する引張力に対して鉄筋を配置する。

3. 施工

3.1 施工概要

昭和58年3月着工した与島高架橋工事は，61年3月に鉄道桁が竣工し，62年7月には道路桁の連結が完了した。今後は橋面工事が主体となる。表-3に上部工の概略工程表を示す。

鉄道桁は，側径間を除くすべての橋脚(1~3P, 5~10P)で張出し施工を行った。また桁下高さが比較的高い側径間(BB1A, 4P)は，仮支柱を有する逆張出しで施工を行った。

道路桁は，完成している鉄道桁上を資材搬入路として利用し，順次張出し架設を進めた。また道路桁の側径間部(YB 4P, 4P)においても逆張出し施工を行ったが，以下の理由から仮支柱を用いずに直接橋台に反力を受け持たせる工法を採用した。

- 1) 仮支柱は，既に完成した鉄道桁を跨ぐ門型構造を形成するため，横梁スパンは15.6mと長くなり，剛性の大きい大断面の部材が必要となる。よって鉄

表-3 鉄道桁・道路桁の施工工程表

区分	年度	昭和59年度	昭和60年度	昭和61年度	昭和62年度
本州側 (4径間)		鉄道桁			
			道路桁		
四国側 (7径間)			鉄道桁		
			道路桁		

注) 破線は橋面工

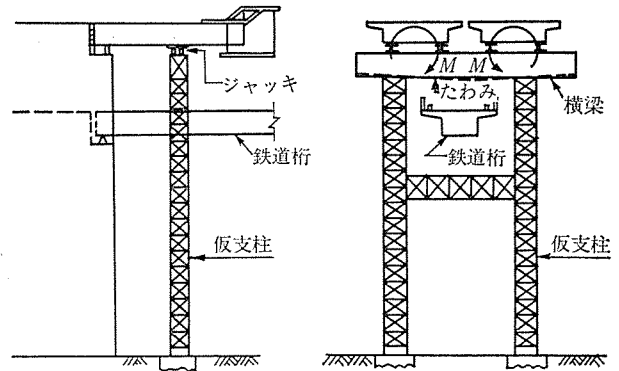


図-6 採用されなかった仮支柱を有する逆張出し施工図

道桁上の工事車輛の通行等に問題があり，施工工期にも影響を及ぼす(図-6)。

- 2) 逆張出し架設中は，仮支柱の受ける反力が打設ブロック毎に変化する。よって，横梁のたわみによる支点沈下と主桁の捩り反力が大きくなることが予想され，ジャッキによる反力の調整が困難となる。

3.2 橋脚の施工 (写真-2, 図-7 参照)

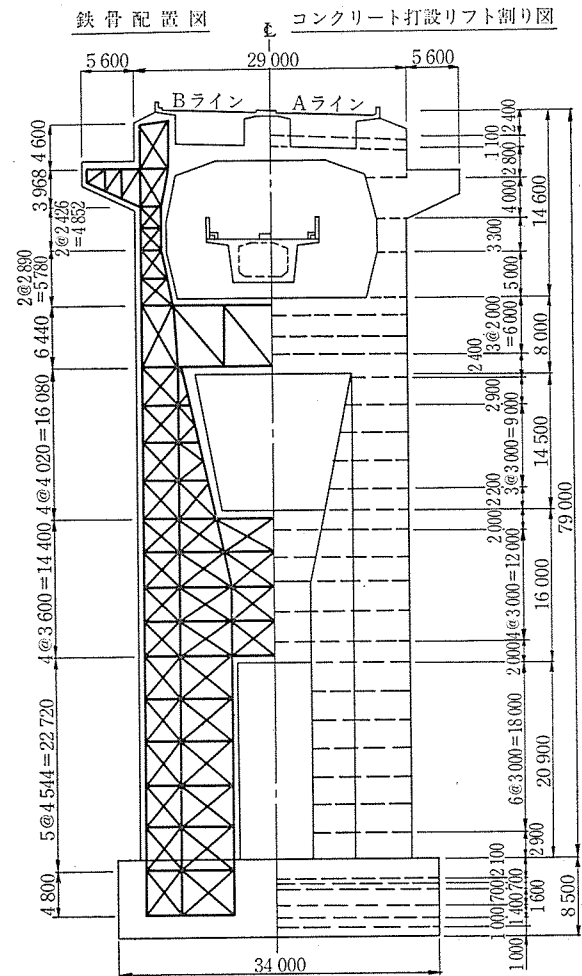
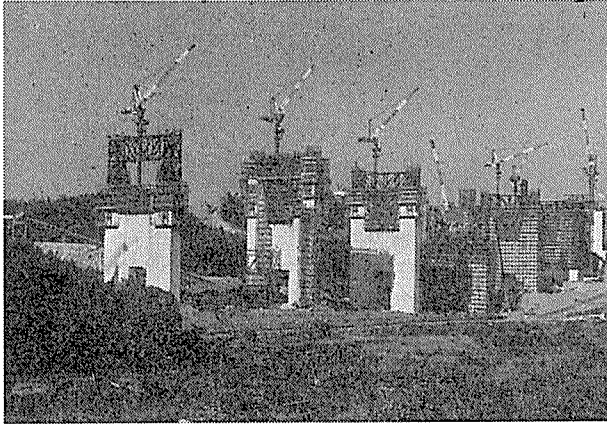


図-7 橋脚一般図(6P)



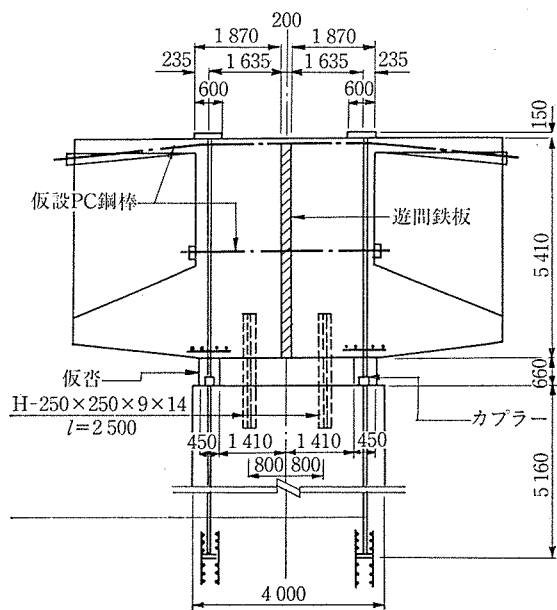
写真—2 鉄骨鉄筋コンクリート橋脚施工
(昭和59年11月)

橋脚は、非常に高く、橋軸方向厚も薄くスレンダーであるため、高い鉛直精度が要求された。そのため躯体施工時の定規となる鉄骨の製作精度は厳しく、トラス橋に準じた製作精度基準とし、現場における組立精度を確保するため、仮組立ても行った。各節の倒れおよび構造物全体の倒れは、 $H/1000$ または $H/2500+10\text{ mm}$ 以下に調整した。鉄筋の組立ては、鉄骨を定規にして正規の位置にセットした。コンクリート打設はマスコンクリートであるため、温度応力を考慮し、1回の打設高を低くおさえ、フーチング部は1m、柱部は3m、梁部は2mリフトを標準とし、夏期は、コンクリートの打込み温度を下げるため、約5°Cの冷却水を練りませ水として使用した。

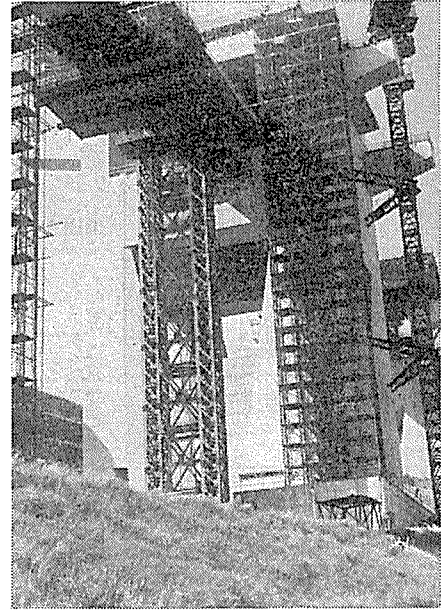
3.3 鉄道桁の施工

(1) 柱頭部の施工

7Pは、鉄道桁の可動部であり、前後の桁とも連続桁



図—8 7Pの柱頭部施工



写真—3 鉄道桁の逆張出し施工
(昭和60年10月)

の端部となる。このため、橋脚前後の側径間上部工の施工は、オールステーキング工法と前後の桁を仮連結した張出し施工について比較した結果、経済性に優れた張出し施工を採用した。この張出し施工は前後の桁を一体化するため、図—8のように前後の桁の間にマルチセル断面の鉄板を挟み込み、そのすきまに無収縮モルタルを充填し、前後の桁をPC鋼棒で仮連結した。

コンクリート打設は、地上からの配管により圧送したが、ポンプ車と打設位置との高低差が40~60mと大きいため、事前に予備実験を行い品質確認をした後、コンクリートに流動化剤を添加し行った。

(2) 張出し架設部の施工

張出し架設部の施工は、2主桁中型ワーゲン(能力200t・m)で行った。施工ブロック長は2.5mおよび3.0mで、標準工程は8日であった。

(3) 側径間部の施工(写真—3参照)

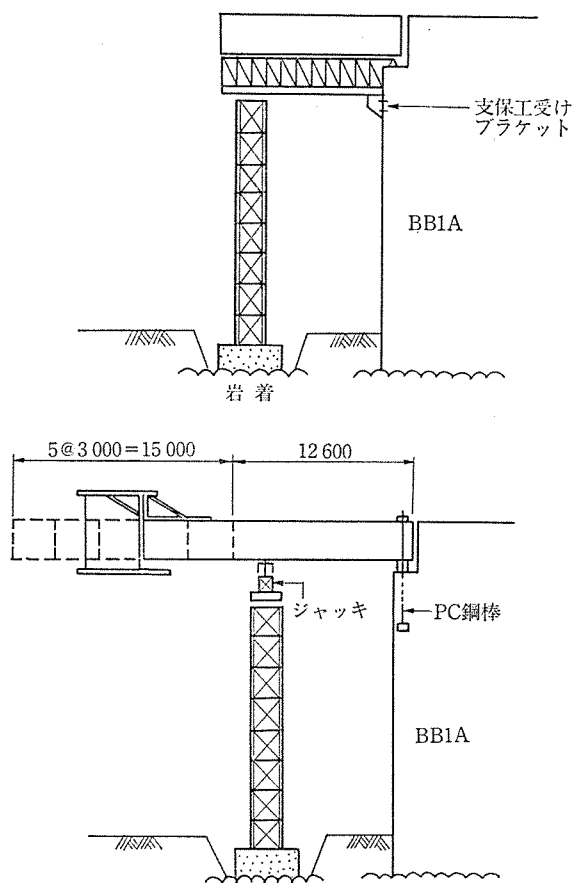
鉄道桁では、4PおよびBB1A側の連続桁側径間で、マシブな橋台があることを生かして橋台側から仮支柱を用いた逆張出し施工を行った。施工要領を図—9に示す。

3.4 道路桁の施工

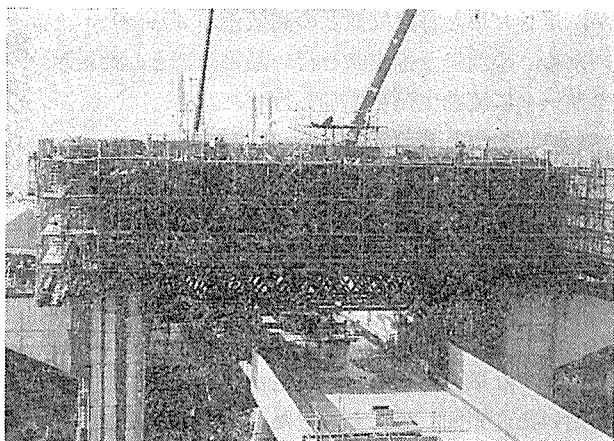
(1) 水平梁、上段柱の施工(写真—4参照)

水平梁は、張出し施工中に生じる大きなアンバランスモーメントによる振りを受けるため、クラックの発生を抑制できるPC構造とした。PC工は、水平梁の断面が大きいので、1本当りの緊張力が大きく定着がネジ式で確実であるSEE工法(F270)で行った(図—10参照)。

型枠は、床版をメタルフォームとし、他はすべて木製



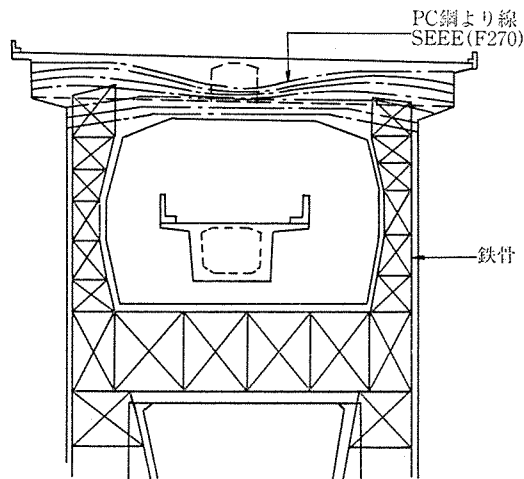
図—9 鉄道桁における仮支柱を有する逆張り出し施工



写真—4 道路桁水平梁の施工（昭和 61 年 8 月）

型枠を使用した。水平梁は投影面積も広く、コンクリート打設中に新旧コンクリートの打継面にコールドジョイントが発生し易いため、コンクリート打設は高さ 50 cm の層打ちを行って対処した。

また、1 リフト当り 1 日に打設可能なボリュームを 200~300 m³ とし、全体を 3 リフトに分けて打設した。コンクリートは、早強コンクリート ($\sigma_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2$) を用いたが、鉄筋、PC 鋼材等が密に配置されているこ



図—10 道路桁柱頭部の構造

とから、コンクリートに流動化剤を添加してワーカビリティを改善し、空隙、ジャンカ等の抑制に努めた。打設は鉄道桁上にポンプ車を配置し行った。

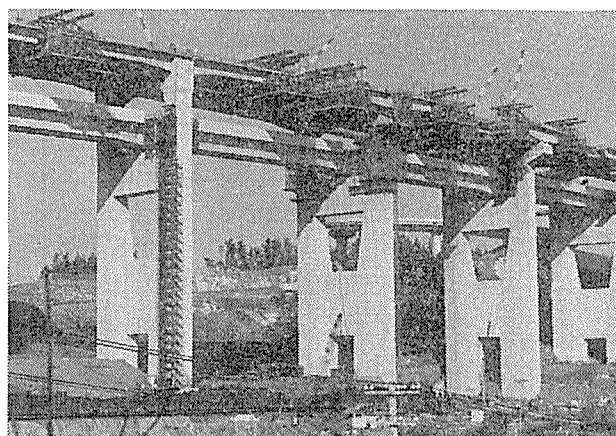
次に、水平梁を経て大きな振りモーメントを受ける上段柱は鉄骨鉄筋コンクリート構造であり、鉄骨の外側には、D 51 の鉄筋を 125 mm ピッチ 2 段で配置した。

上段柱の施工の特徴は、次のとおりである。

- 1) 主鉄筋は、極太径の D 51 であるため、鉄筋継手は、機械継手としてスクイズジョイント（スリーブ圧着工法）を使用し、確実な接続を行った。
- 2) 上段柱の高さが約 12.5 m であり、コンクリート打設は、打設量と施工の容易さ、締固めの確実さを考慮して 3 リフトの層打ちとした（一層の最大高さ 5 m）。打継面は、打設してから 24 時間後に高圧水で洗浄し、表面を粗にして、新旧コンクリートの一体化を図った。またコンクリートの供給は、地上から配管された 6 インチの圧送管により最高 60 m を圧送した。

(2) 道路桁の張り出し施工（写真—5 参照）

本高架橋は、橋脚数が 10 脚あり、本線上り、下りお



写真—5 道路桁の張り出し施工（昭和 62 年 2 月）

表—4 張出し架設の標準工程 (3主桁×2基)

種別	II	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ワーゲン移動, 据付け		■											
型枠組立			■	■		■			■				
鉄筋組立				■				■					
鋼棒組立					■	■	■	■					
コンクリート打設									■				
養生										■	■	■	
緊張													■

計12日

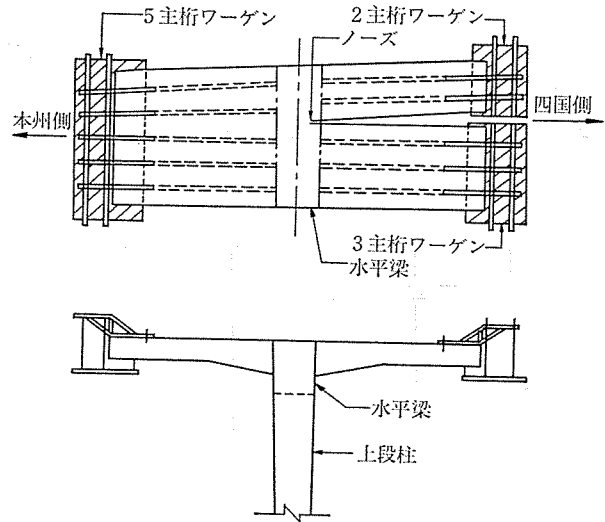
よびランプを含めた本高架橋の張出し施工箇所数は61箇所にもなり、ワーゲンの転用計画が重要となる。転用計画は全体工期を十分に考慮し、基本的に4径間側から7径間側への転用を図った。

ワーゲンは、中型ワーゲン(能力200tm)を使用し、柱頭部付近(桁高変化部)では、1ブロック長2.5m、一般部では4.0mに分割して施工を行った。

表—4に標準のワーゲンの基本サイクルを示す。

主桁コンクリート(スランプ±1.5cm)は、鉄道桁上に配置したポンプ車によりポンプ打設し、1ブロック平均30~40m³を打設した。各ブロックの端面には凝結遅延剤を使用し、脱型後ジェット水により端面を粗にして次のブロックとの一体化を図った。

PC鋼棒の緊張作業はコンクリート強度発現が $\sigma=260$

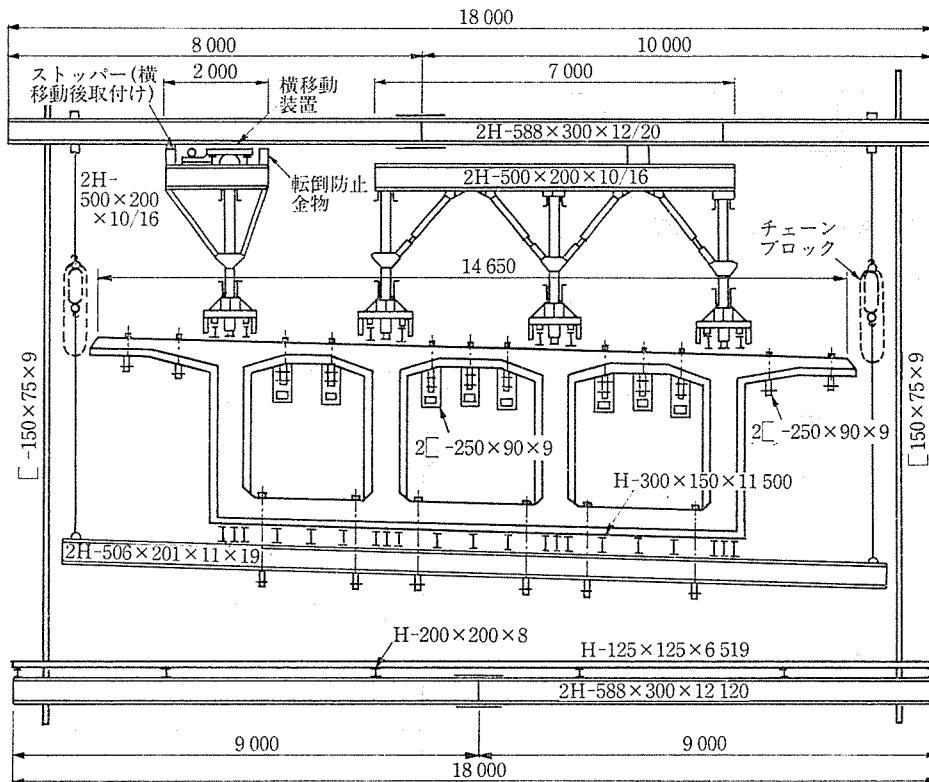


図—12 1P張出し施工図

kg/cm²以上で実施した。

与島高架橋のワーゲン施工には次に挙げる特徴がある。

- 1) ランプの派生に伴い、YB 4P~1P, 7P~BB 1A間においては幅員が大きく変化しており、ワーゲンの主構間隔を横方向に移動させなければならない。そのため、横移動装置が必要であり、歯車と電動モーターにより移動する特殊ワーゲンを採用した(図—11)。高架橋全体に使用したワーゲンの種類は、



図—11 4主桁特殊ワーゲン

その主桁数に応じて、2主桁用、3主桁用、4主桁用（特殊）、5主桁用（特殊）およびその組合せである。

2) ランプのノーズ部となる 7P でのワーゲン施工

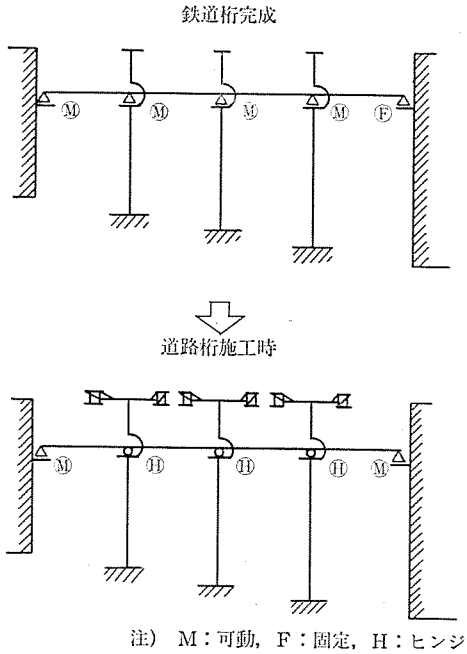


図-13 鋼角ストッパーによる支承条件の変化

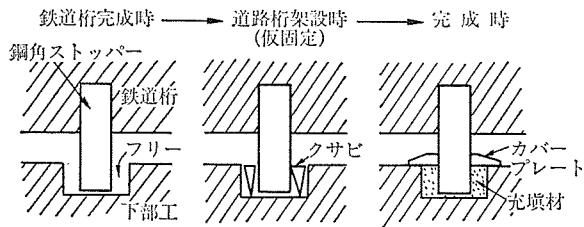


図-14 ストッパーの仮固定方法

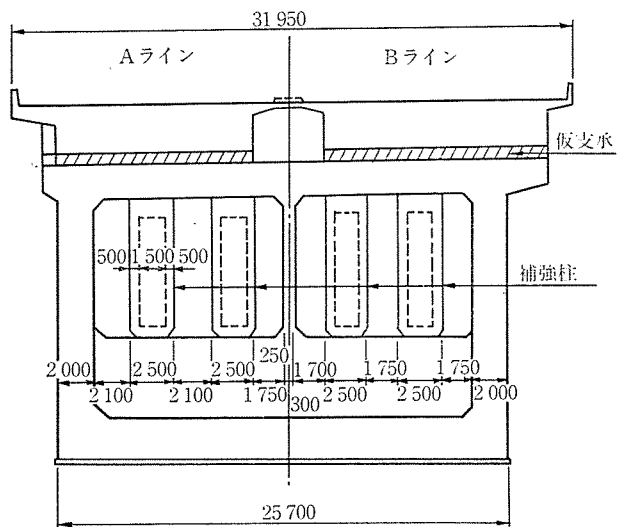
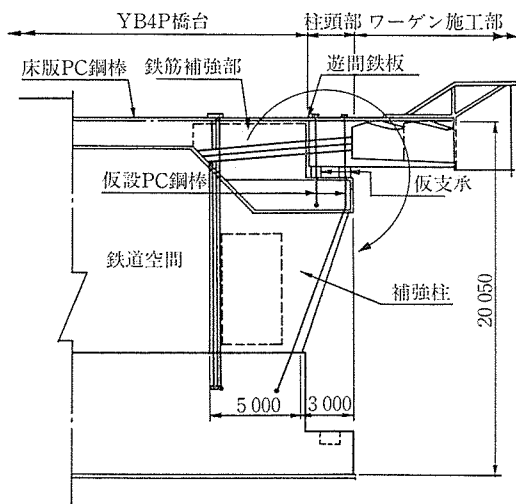


図-15 YB 4P 逆張出し施工

はバランスして張り出していく両側の主桁形状が異なる。図-12 に示すように、右側は5主桁（特殊）ワーゲンで張り出し、左側は本線部とランプ部と同時に張り出す3主桁+2主桁ワーゲンにより、両側のバランスを考慮した方法で張出し施工を行った。

3) 道路桁ワーゲン施工時には、鉄道桁に設置してある鋼角ストッパー仮固定を行い、一時的に鉄道桁の支承条件を変えて橋梁全体の剛性を高め、橋脚付根に働く架設途中の曲げモーメントを軽減した（図-13）。

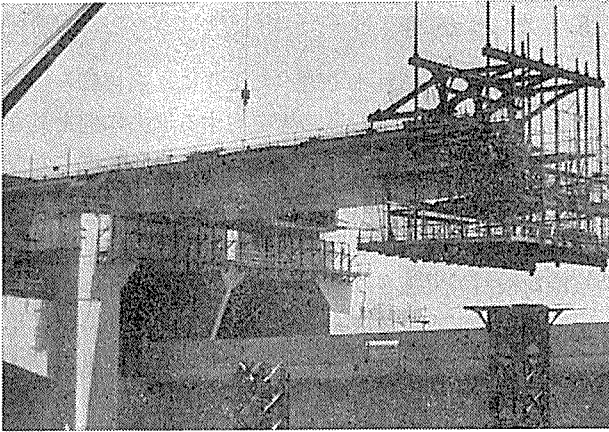
仮固定の方法は、図-14 に示す要領で行った。鉄道桁完成時に可動となるストッパーは、道路桁架設時にストッパー箱部に鋼製クサビを挿入することにより固定した。道路桁完成後、クサビは脊座空間を利用して、センターホールジャッキにより引き抜き、クサビ撤去後、設計要求品質のポリオレフィン系充填材（20°C にて粘度 1000 ポアーズ）を充填し、カバープレートにより隠ぺいした。

(3) 道路桁における逆張出し施工（写真-6 参照）

YB 4P, 4P 道路桁側径間は、仮支柱を用いずに橋台側から直接ワーゲンにて張出し施工を行う逆張出し施工を行った。

YB 4P 橋台と主桁の接続部（柱頭部）は、鉛直力、水平力、曲げモーメント、振りモーメント等を集中的に受ける。したがって、主桁柱頭部と橋台を一体化させるために次に挙げる補強を行った。

1) 図-15 のように、主桁の曲げモーメントが道路桁受梁には振りモーメントとして作用する。そこで YB 4P 躯体の鉄道空間に、仮設 PC 鋼棒を配置した。これは、場所打ちコンクリートの補強柱を配置することにより、この振りモーメントを低減する

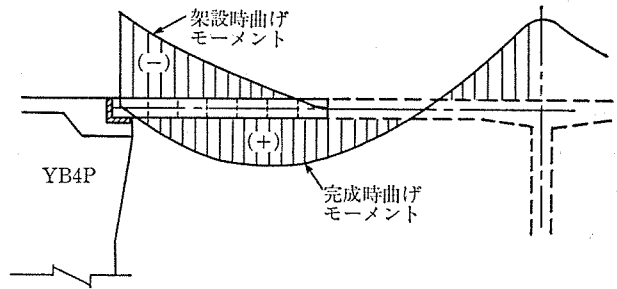


写真—6 道路桁の逆張出し施工 (4P)
(昭和 61 年 6 月)

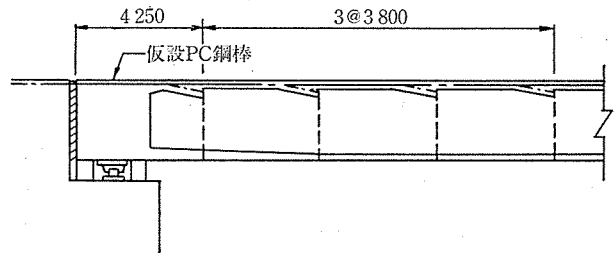
ばかりでなく、鉛直力による受梁の曲げモーメントおよびたわみも低減できるものである。

2) 逆張出し施工において、架設中は、完成時と曲げモーメントが異なるため (図—16)、上床版側に仮設鋼棒が必要となる。この仮設鋼棒は、架設後のプレストレス開放を容易にするため、定着部を各ブロックの床版の下方に設けた (図—17)。

4P の逆張出しは、4P 橋脚を挟んで左右同時に張り出し、橋脚のアンバランスモーメントを低減できるように施工を行った。桁と橋脚の遊間には 7P 橋脚の鉄道桁の張出し同様に鉄板を挟み、仮設 PC 鋼棒は、前後の主桁を連結できるように、主桁・遊間鉄板・4P 躯体・遊間鉄板・主桁のシステムで緊結した。またこの時、道路桁受梁には、4P 逆張出しと同様に、主桁の曲げモーメントが振りモーメントとして作用するため、本線スラブとランプスラブ



図—16 逆張出し施工の曲げモーメント図



図—17 仮設 PC 鋼棒の配置

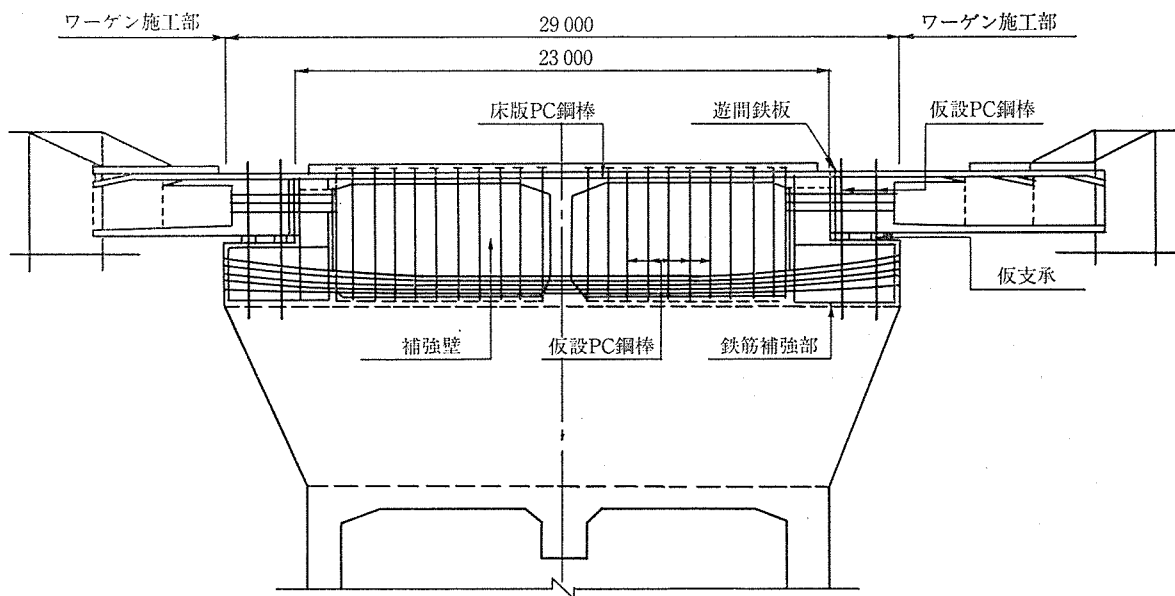
の間に補強壁を設置し、縦方向、横方向、鉛直方向の仮設 PC 鋼棒でプレストレスを導入することにより解消した。なお主桁の柱頭部、遊間鉄板は YB 4P と同様である (図—18)。

このような数々の補強を要した逆張出し施工は、心配された主桁のたわみもなく、無事工事を完了した。

4. その他

4.1 景観上の配慮

本橋は、瀬戸内海国立公園第三種特別地域および普通地域内を通過すること、西側にある与島パーキングエリアおよび休憩施設等から本橋全体が展望できることなど



図—18 4P 逆張出し施工

から景観についても配慮した。

橋脚形状については、美観を考慮に入れてハンチを付けたスレンダーなラーメン橋脚とし、排水管についても島内から見える箇所については極力桁内を通すよむ工夫し、桁外に配置される排水管と橋脚に沿って配置される排水管については橋体コンクリートと色合せを行った。

4.2 維持管理上の配慮

本橋は、維持管理を少なくさせる目的で、橋脚には鉄骨鉄筋コンクリート構造、上部工には多径間連続ラーメン構造を採用している。これらにより地震時における耐荷力を高め、粘り強さを確保するとともに、伸縮継手、支承等の低減および走行性の向上を図っている。

細部においては、島内高架橋であるため、直接潮風の影響を受ける部分について塩害対策を考慮し、橋脚は100 mm、PC 桁は外面 50 mm、内面 30 mm のかぶりを確保した。また、コンクリートの骨材においても含有塩分を厳しく管理した。供用後の管理については、管理用通路を各橋脚に取り付け、次の配慮を行った。

- 1) 道路桁における点検補修は、供用後、鉄道上の作業となるため道路橋面上から昇降できる設備を設けた。
- 2) 本橋は、主桁内に排水装置、電気設備を内蔵しているため、各桁マンホールへ至る通路を確保すべく管理用通路を計画した。
- 3) 主桁下面、床版下面においても必要に応じて点検補修が可能であるように、吊足場を支持できるインサートアンカーをあらかじめ桁内に埋め込んだ。

5. あとがき

与島高架橋は、これまで述べたように、高橋脚と鉄道桁および幅員変化に富む道路桁を有する過去に例を見ない橋梁形式になっている。そのため施工を考慮した設計、各種確認実験、設計の意図を現地で正確に具現するための施工法の工夫、などについて長期にわたり綿密かつ複雑な検討が実施されてきた。

現在、橋体工事はほぼ完了し、昭和 63 年 4 月の供用および開業に向けて橋面工事、軌道工事等が順調に進捗している。

この与島高架橋の実績がこれからのコンクリート構造物に対して少しでも参考になれば幸いである。

最後に本高架橋の設計、施工に携わられた関係者各位のご尽力に対し、ここに深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 本四公団第二建設局設計課：PC 高架橋水平梁剛結部設計法の検討，昭和 57 年 3 月
- 2) 加島 聡，森谷俊美：与島高架橋の設計，本四技報，1983-7
- 3) 加島 聡，佐々木雅敏，徳永剛平：SRC 橋脚 (1)，コンクリート工学，1984.11
- 4) 加島 聡，森谷俊美，佐々木雅敏：本四橋“与島高架橋”高架橋脚耐震模型実験，橋梁，1984.11
- 5) 村瀬佐太美，富田大造，上水流弘，川上明彦：与島高架橋 (PC 上部工) の設計と施工，橋梁，1986.2
- 6) 多田一正，富田大造：与島高架橋上部工の施工，コンクリート工学，1986.4
- 7) 加島 聡，村瀬佐太美，富田大造，上水流弘：与島高架橋の施工，セメントコンクリート，No. 474，Aug. 1986
- 8) 村瀬佐太美，富田大造：与島高架橋の施工，本四技報，1987.4

【昭和 62 年 7 月 20 日受付】

◀刊行物案内▶

PC 定着工法

(1982 年改訂版)

本書は、現在我が国において多く用いられている PC 定着工法 19 種についてとりあげ、それぞれの工法の概要、構造、施工法、特長、注意事項などを解説したものであります。

設計者、施工者の利用とともに教育用テキストなどにも広く使用できることと思います。

また付録として PC 鋼材一覧表 (改訂版) 等を添付してあります。

ご希望の方は代金を添え (現金書留かまたは郵便振替東京 7-62774) プレストレストコンクリート技術協会宛お申し込みください。

体 裁：B5判 94 頁

定 価：2,800 円 (会員特価 2,500 円) 送 料：350 円