

## 連絡誘導路栈橋部 PC 複合ジャケット構造の施工

連絡誘導路工区 ○ 大野 茂則 松本 省吾  
(株)大林組 竹田 宣典 橋本 学

キーワード：長期耐久性能、リブ付き二重管杭頭構造、高流動コンクリート、海上コンクリート、横行型エレクションガーダー、急速施工

### 1. まえがき

連絡誘導路栈橋部は海面から床版までの高さが約7m～10mと低く、波浪の影響を受けるため上部工に鋼製主桁+カバープレートという構造を用いることができない。よって、技術提案段階ではRCフラットスラブ形式とした。また連絡誘導路は供用時に航空機が頻繁に走行する重要構造物であり、劣化時の補修工事により空港の運用を制限することは許されないため、100年間のLCCを考慮した耐久性が求められた。しかし、RCフラットスラブでは床版厚が1mのマスコンとなり、温度ひび割れ防止コストが高額となる上、コンクリート養生期間が長くなり工期遅延リスクが大きくなる。よって実施設計の段階で、ひび割れを許容しない構造かつ急速大規模施工が可能なPC梁スラブ構造へ変更した。

下部構造が鋼製ジャケット、上部構造がPC床版という世界でも初めてのPC複合ジャケット構造の栈橋を建設するにあたり高流動コンクリートを使った新しい杭頭剛結構造を提案するとともに、大幅員に対応したPC部材用のエレクション（架設桁）ガーダーを開発し、急速施工を実現した。

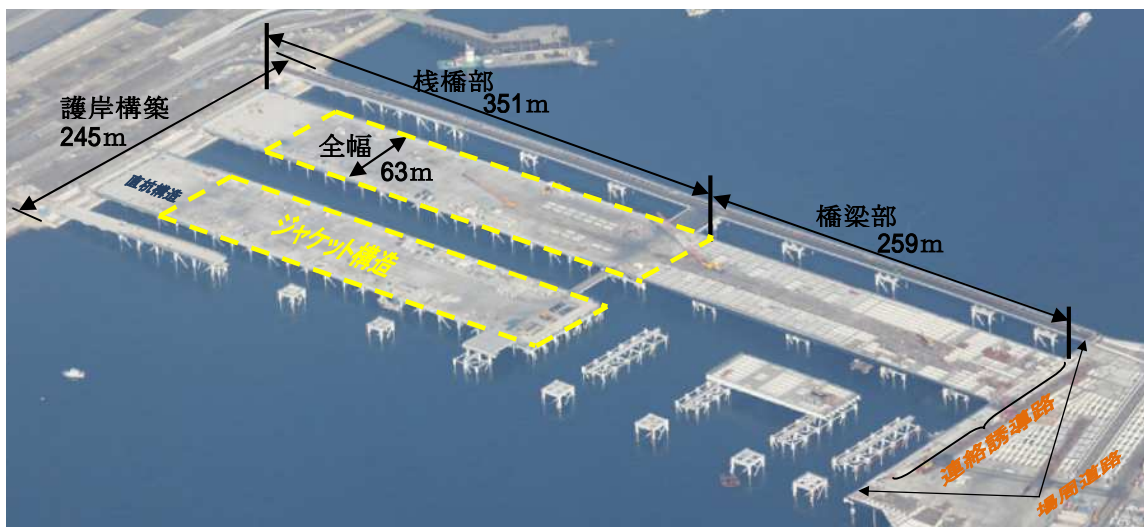


写真-1 連絡誘導路全景

### 2. 工事概要

工事内容	東京国際空港の発着能力を増強する目的で新滑走路を沖合に建設する。新滑走路と供用中の空港を結ぶ連絡誘導路は“栈橋部”と“橋梁部”で構成され、栈橋部(延長 350.46m)の床版構造はプレキャストPCコンクリート梁スラブとし、耐久性の向上と急速施工を図った。床版(L=7.82m,W=2.08m,t=0.62m:1,812枚)はJIS工場、受梁(L=14m,W=2.5m,H=1.6m:372本)は臨海ヤードで製作。海上運搬し架設した後、連結コンクリートを打設、ケーブルを緊張しプレストレスにより一体化させる。
主要工種・数量	<ul style="list-style-type: none"> <li>護岸工事：SCP工(3,038本)、砂置換工(26万m<sup>3</sup>)、橋台工(杭84本、コンクリート3,500m<sup>3</sup>)、護岸構築(鋼管矢板117本)</li> <li>栈橋・橋梁下部工事：鋼管杭打設工(512本)、ジャケット据付工(32基)</li> <li>栈橋・橋梁上部工事：連絡誘導路栈橋部(44,158m<sup>2</sup>)、同橋梁部(18,232m<sup>2</sup>)、場周道路栈橋部(2,847m<sup>2</sup>)、同橋梁部(7,883m<sup>2</sup>)</li> </ul>

### 3. PC梁スラブの施工方法

44,000 m<sup>2</sup>の梁・床版を1年半の短工期で構築する大規模・急速施工である。栈橋は仮設ヤードの確保や物資・労務の供給が容易な陸上側から施工するのが一般的であるが、工期を短縮するために陸上護岸工事と並行して沖側から施工を開始した。その結果、PCa部材を含めた膨大な量の資材を海上運搬で供給することとなった。施工は大きく分けて先行部と一般部および直杭部に分かれる。先行部は図-1に示すように起重機船を使用してジャケット上にPCa部材を据付ける。一般部および直杭部は図-2のように先行部で構築済の床版上に、荷揚用クレーン、受梁架設ガーター、床版架設機などの揚重機を設置し、これらを使用してPCa受梁をジャケット上および鋼管杭上に据付ける。コンクリートの供給は主にコンクリートプラント船を使用する。急速施工に対応してPCa受梁は下部構造の上に設置するだけのシンプルな構造とした。現場打ちコンクリート部分は全体コンクリート量の22%で、図-3に示す受梁-受梁間の連結部（赤色部）、床版間詰部（黄色部）、桁間詰（青色部）および図-4で示す受梁と下部工との剛結コンクリートのみとし、海上作業の省力化、工程遅延リスクの低減を図った。

**先行3スパン部(受梁・床版架設, 間詰めコン打設)**

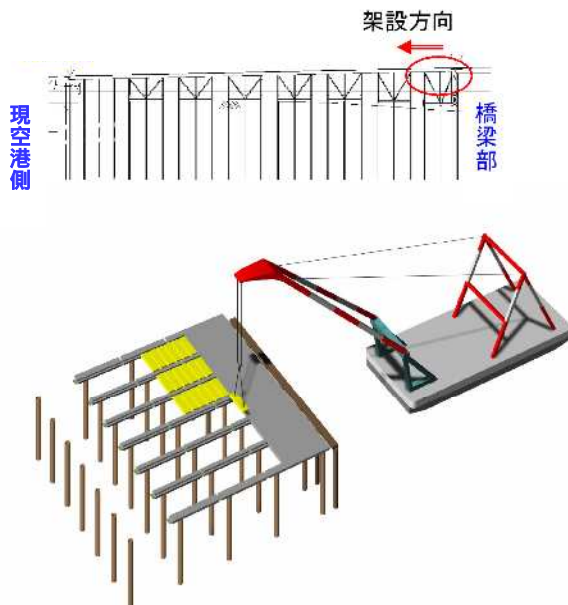


図-1 先行部の起重機船架設

**一般部、直杭部(受梁・床版の2径間架設)**

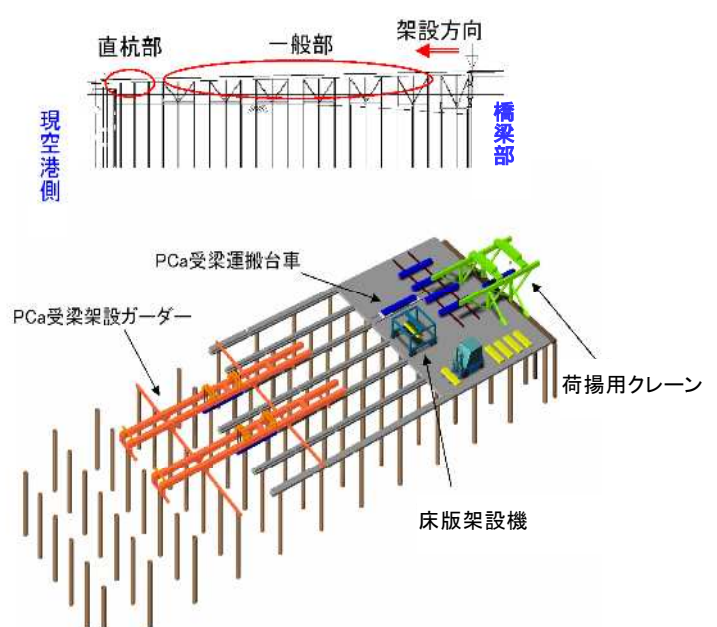


図-2 一般部、直杭部のガーター架設

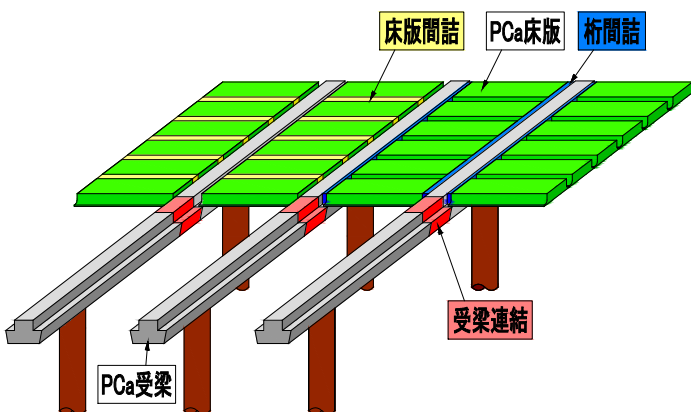


図-3 現場打ちコンクリート部分図

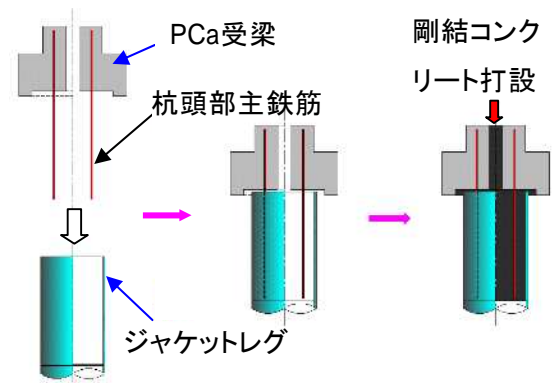


図-4 剛結コンクリート図

## 4. 技術上の課題

### (1) 100年耐用の海洋構造物におけるコンクリートの要求性能

海上大気中のコンクリートの最大の劣化因子はコンクリート表面に付着して内部へ浸透する飛来塩分であり、内部鉄筋位置での塩分量が鋼材腐食発生限界濃度（ $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ）に達すれば鉄筋が腐食して劣化が進行する。当該PC構造物は耐久性照査により純かぶり70mmでエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる設計となった。PCa部材の製作ならびに現地海上作業について以下の課題が挙げられる。①材料選定：エポキシ樹脂塗装鉄筋加工時の塗装損傷や紫外線劣化リスクの低減、乾燥収縮ひび割れ対策およびアルカリ骨材反応に対するリスク回避、②型枠・コンクリート養生計画：コンクリート中に残る仮設物（セパ、スパーサー）に起因する劣化リスクの低減およびマスコンクリートとなるPCa部材の温度ひび割れに対する養生計画、③コンクリート製造計画：高強度および高流動コンクリートの実績がないプラント船での品質管理。

### (2) 受梁設置誤差

#### 受梁－受梁間の連結部鉄筋継手

受梁は図-3において赤色で表示した1mの連結部で隣接の受梁と一体化する。橋軸方向のD22～D25の主筋は重ね継手長が長くなり、狭い空間では適用できないため機械継手とした。機械継手は隣接する受梁に20mm程度の相対誤差があれば施工が困難となる。特に起重機船での据付においては吊荷の揺動による据付精度の低下が懸念されたため、誤差の少ない施工方法が必要となった。

#### 下部工杭頭部とPCa受梁の剛結部分

一般部ではPCa受梁を所定の設置位置に正確に設置しても、下部工設置許容誤差が125mmもあるため、これを吸収できる機能が必要である。合わせて100年の耐久性性能を保証するためには、無塗装鉄筋表面における塩化物イオン濃度の発錆限界から定まる鉄筋かぶり170mmを確保する構造の検討が必要となった。

直杭部は杭打設の許容誤差に対する調整代が小さい受梁構造であり、その対策が必要となった。

### (3) 剛結部コンクリートの要求性能

杭頭剛結コンクリートは逆打コンクリートとなる上、下部工の施工精度によってはバイブレータが届かない狭隘な部分への充填性能が必要で、従来のコンクリートではブリーディングやジャンカが発生するため使用できない、そこでコンクリートプラント船で製造可能な高流動コンクリートの計画が不可欠となった。また、護岸付近の直杭部は陸上から打設可能なため、市中プラントからの調達で工費削減を図った。しかし、増粘剤を使用する高流動コンクリートのため、バッチ毎にミキサー清掃が必要なことが問題となった。型枠についても材質、設置方法に入念な計画が必要とされた。

### (4) 大きな横移動量、足場のない場所での受梁設置作業

本工事は63mの幅員を持つ栈橋である。一般的な方法では、架設ガーダーで抱え込んだPC桁を縦移動させた後、橋脚上に設置した横取装置にのせて所定の位置まで横移動し、ジャッキを用いて据え付ける。自動車または鉄道橋への適用事例が多いため、その横移動量は10～15m程度である。今回は過去に事例のない航空機用であるため、幅員（橋軸直角）方向への横移動量は30mを超える。また、ジャケットの構造上、設置箇所は独立したレグ上で、横取装置を用いることができないうえ、梁重量も120t超/本の重量梁という厳しい条件である。よって大幅員、急速施工に対応した新しいエレクションガーダーの開発が不可欠となった。

## 5. 課題に対する解決策

### 5-1 100年耐用の海洋構造物における品質管理

#### (1) 材料選定

エポキシ塗装鉄筋は発錆原因である塩分、酸素、水分の遮断に有効な材料であるが、鉄筋加工時、塗装にひび割れが生じる場合がある。原因の一つとして折曲部分にヘゲと呼ばれる鋼材表面の剥離が発生し、塗装を損傷するケースがあり、その発生頻度はミルメーカーによって異なる。よって、事前に「エポキシ樹脂塗装鉄筋の曲げ試験」(JSCE-E 515-2003)を行なって良好な材料を選定した。またエポキシ塗装は紫外線に弱く、暴露実験の結果から耐候性については約3ヶ月が目安とされている。一方PCa部材は製作後、最長6ヶ月屋外にストックするので紫外線遮断効果の高い日除けシートを掛けるなどして劣化を防いだ。

乾燥収縮の少ない密実なコンクリートとしてひび割れ発生を抑制するため、所要のワーカビリティ(スランプ12cm)の範囲で高性能AE減水剤を使用して単位水量を極力小さくすると共に、収縮補償のため膨張材(20kg/m<sup>3</sup>)を添加した。水セメント比は耐久性照査により決定した40%以下とした。また、常に水分が供給される海洋コンクリートはアルカリ骨材反応に対するリスクが比較的大きいため、コンクリート骨材選定はコンクリートプラント工場へ出向き、骨材を採取してアルカリ骨材反応性試験(化学法:JIS A 1145-2001)を行うとともに、良質産地であることの確認を行い、リスクを有している工場を使用しないこととした。

## (2) 型枠・コンクリート養生計画

型枠セパレーター(型枠の締付けに用いる鋼棒)を使用する場合は、セパ自体と型枠解体後のPコン孔に残るセパ軸にエポキシ塗装による防錆処理が必要となる。またPコン孔に無収縮モルタルを充填するなど、作業員の技量に頼る作業が多いため、打設時のコンクリート側圧を型枠自体の剛性で受け持つ型枠を使用してセパレーター自体を不用とし、セパレーター起因の劣化やコストアップリスクを回避した。

b) かぶりの確保のために鉄筋取付けタイプのモルタル製スペーサーを採用した。大規模な面積で使用するためその使用個数は約1万個に上る。モルタル製品の骨材がアルカリ骨材反応に対して無害であることをアルカリシリカ反応性試験(化学法)により事前確認した。

c) 部材厚が2mを超えるコンクリート部材であるため、温度ひび割れに解析により養生計画を立案した。

## (3) コンクリート製造計画

現場打ちの海上コンクリートはコンクリートプラント船を使用して製造するが、設計基準強度が50N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートの製造実績がないため、変動係数を10%、割増係数を1.2と安全側に設定した。実績として変動係数は7.3%となり、想定内の範囲でプラントを管理した。

## 5-2 受梁設置誤差

### (1) 受梁-受梁間の連結部鉄筋継手

起重機船による架設は当初懸念していた通り、船体から吊位置までの距離が長い場合ため気象が平穏である場合でも船体の動揺により常に30cm前後は上下に揺れる状態であり、3~4cmのセット誤差が生じる事を覚悟

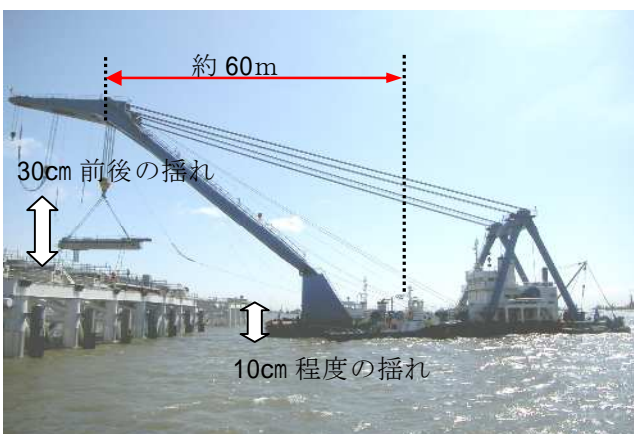


写真-2 起重機船(400t吊)による受梁架設

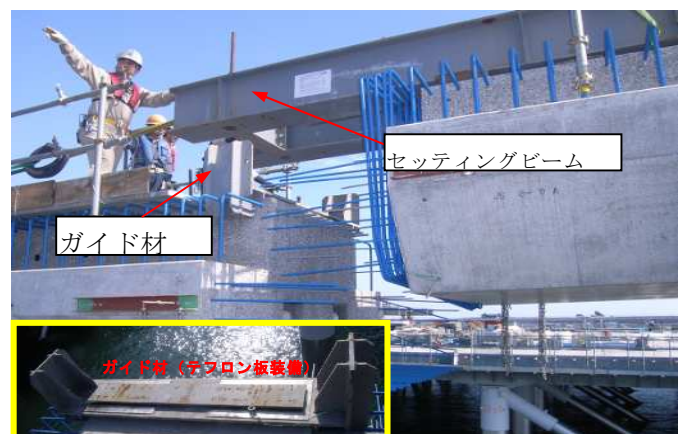


写真-3 ガイド材を利用した受梁架設

しなければならなかった（写真-2）。そこで梁天端に設置しているセッティングビームが所定の位置に据付くよう、あらかじめ既設置梁にガイド材を装着（写真-3）すると共に、万一セット誤差が生じても対応できるように、ガイド材上に摩擦の少ないテフロン板を置き、爪付きジャッキを操作してスライドさせ、誤差（60mm以内まで）を解消する対策を講じた。

（2） 下部工杭頭部とPCa受梁の剛結部分

一般部においてはジャケット天端が受梁底面に埋め込まれる構造（杭頭結合方法B）となっているため、受梁底面に切欠きを設けている。切欠きは下部工ジャケットの設置誤差を吸収できる大きさとした。今、下部工の設置誤差が図-5のように水平方向125mm、鉛直方向25mmの最大誤差が生じてしまった場合、図中のA部分は杭頭鉄筋が杭頭鋼管に接近し、鉄筋かぶりが減少するが、B部分にコンクリートが充填されれば無塗装鉄筋の防食距離の下限値である170mmが確保できる構造とした。

5-3 剛結部の高流動コンクリートの計画と実施

前項で述べたように、一般部においては図-6に示す最小41mmの隙間を乗り越えて斜線部分を密実に充填し、設定した防食距離を確保する。この部分に不具合があると数十年後には杭頭鉄筋が浸透した塩化物のため発錆。膨張し、内部腐食型のひび割れがコンクリートに生じることになる。直杭部の杭頭構造は図-7のように杭先端の1500mmを受梁側に挿入する「リブ付き二重管接合構造」である。鋼管杭の打設精度を誤差50mm以下で管理した時、壁面間は60mmであるが、互いのリブ高さ（9.0+2.512mm）を考慮すると48mmの間隙となる。この隙間を1500mm自由落下させた上で充填し、受梁と杭とを一体化させる。以上のように杭頭結合部はその防食性と曲げ耐力を保証するためこれらの非常に狭隘な空間をコンクリートで充填できるかが構造成立の必要条件であった。他工区とコンクリートプラント船を共有したため粗骨材の最大寸法は20mmという不利な条件となったが、充填性に優れる高流動コンクリート（併用系）を計画し、下記に示す要求性能項目を室内試験練で確認した。

（1） 自己充填性能（スランプフロー $67.5 \pm 7.5$ cm）：所要のスランプフローを得ると共に、流動性保持性能も考慮して高性能AE減水剤を粉体量の2.2%とした。また、材料分離抵抗性を付加するための増粘剤を $0.2\text{kg}/\text{m}^3$ 添加した。

（2） 逆打コンクリートとしての性能（ノンブリーディング・膨張性能）：打ち込んだコンクリートと受梁の下面の界面に隙間が生じると上部構造からの荷重が円滑に下部構造に伝達されない状態となる。そこで増粘剤の副次的効果でブリーディングを防止し、アルミニウム粉末を $0.4\text{kg}/\text{m}^3$ 添加してコンクリートを膨

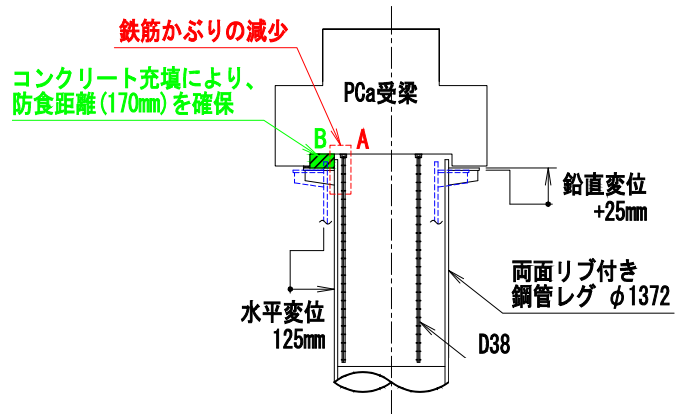


図-5 ジャケット出来形誤差最大時

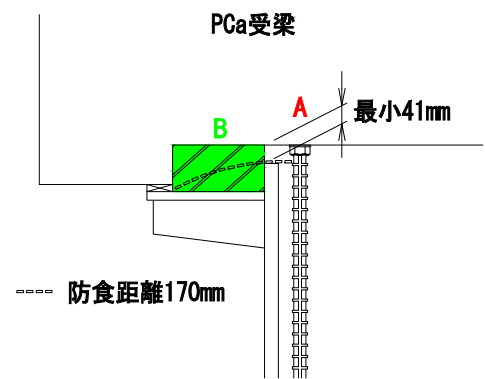


図-6 A部, B部拡大図

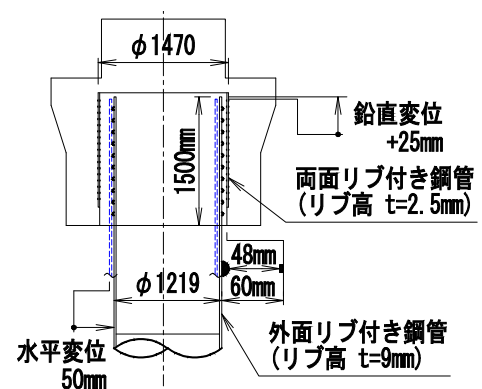


図-7 直杭部打設誤差最大時

張（自由膨張率 0.5%）させ、界面でのコンクリートの密着を狙った。しかし市中の既存プラントでこれを添加した場合、ミキサー内部に付着する混和剤（増粘剤、アルミニウム粉末）の残さを清掃する手間が生じる問題があったため、混和剤をプラント添加とせずアジテータ車に現場で添加する実験を行ないミキサー練と同等の性状が得られることを確認し、陸上部から打設可能な直杭部に適用した。

現場への適用は、一般部および直杭部の実物大模型を製作し、コンクリートプラント船で製造した高流動コンクリートを使って打設実験を行い、充填性能が十分に発揮されたことを確認して決定した。

打設実験での確認事項：受梁下面の隅部で余剰空気が抜けずに空気溜まりができ、充填を阻害する可能性があったので、図-8 で示すように模型に空気孔を各種ピッチで設置した。打設実験後のコンクリートコア抜きの結果、狭隘部への充填が確認できた（写真-4）。また空気孔の最適間隔は 800 mm 以下であることが判明した。次に直杭部の「リブ付き二重管接合構造」モデルへの実物大打設実験では、木製枠で再現したリブ鋼管の隙間に高流動コンクリートを流し込み、硬化後、木製枠ごと切断した。実験モデルは型枠組み立て誤差により隙間がより厳しい 40 mm となったが、写真-5 に示すようにリブ周囲のコンクリート充填状況や粗骨材の分布状況が良好であった。また、一般部の高流動コンクリートに使用した型枠については、バックアップ材

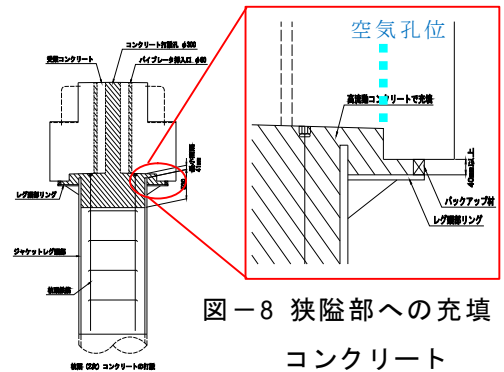


図-8 狭隘部への充填  
コンクリート



写真-4 コア採取状況

について、バックアップ材（発泡ウレタン）を縦方向に 60% 圧縮することで十分コンクリートの側圧に耐え得ることも証明し、実施工に反映させた。

バックアップ材については先行部施工時において不具合が生じたため、以下に対応策と共に紹介しておく。写真-6 に示すようにバックアップ材の設置を行ったが、前述の写真-2 のように受梁設置時の動揺が激しく、ほぼ半数の箇所受梁下面がバックアップ材に接触して変形、あるいは転倒・脱落した。そこで代わりにエアーフエンスを設置した（写真-7）。この結果、コンクリート漏出は全く起こらず。良



写真-5 二重管隙間充填状況

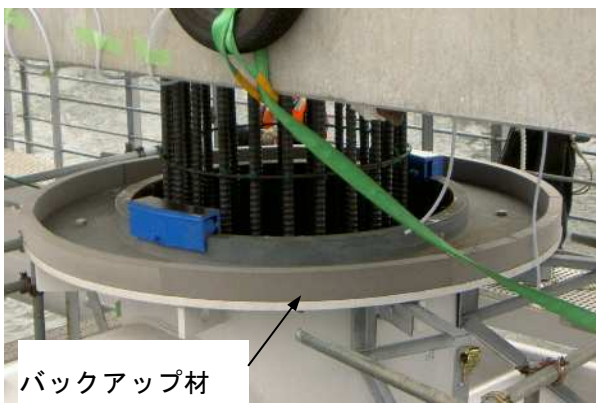


写真-6 高流動型枠（発泡ウレタン）設置



写真-7 エアーフエンス解体後状況(囲みは設置状況)

好な結果が得られた。

#### 5-4 エレクション（架設桁）ガーダーの開発

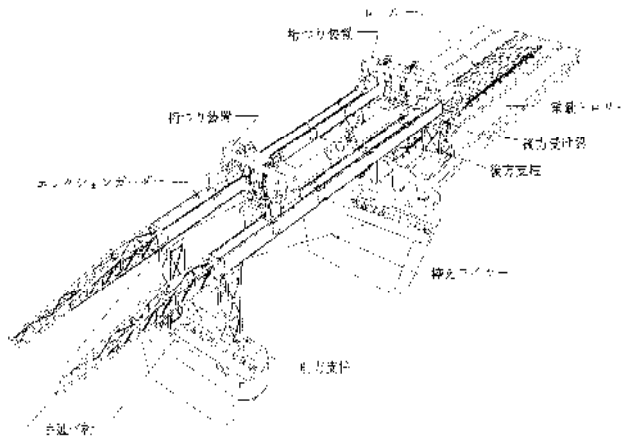


図-9 道路橋などのエレクションガーダー架設状況図

一般的には図-9に示す通り、引き出し軌道で供給したPC桁をエレクションガーダー上で移動する桁吊り装置を使って吊り上げ、2組のエレクションガーダー間に抱き込んで縦移動させた後、橋脚上に設置した横取装置にのせて所定の位置まで横移動し、ジャッキを用いて据え付ける。今回の場合、橋脚天端のようにフラットな桁掛かりがなく、横取装置の設置が不可能であった。よって、栈橋の全幅以上の70m級の専用横梁を用い、PC桁を吊り込んだままのエレクションガーダーを横方向に大移動させる

過去に例を見ないガーダーを開発した。ここでガーダーの構成、移動ステップを説明する。

##### (1) ガーダーの構成

横梁（72m）はジャケット頭部に設置するR1（前方）横梁と設置済み受梁上に設置するR2（後方）横梁があり、PC桁を吊り込んだエレクションガーダーはこの横梁を軌条として横移動する。両横梁を前方に送るためにエレクションガーダーの先端にサポート横梁、後部にR3横梁を装備している。

横梁とエレクションガーダーが交差する箇所には支持台があり、それぞれR1支持台、R2支持台と呼ぶ。エレクションガーダー上には横梁またはPC桁を吊り上げるための吊り上げ台車を2基搭載している。ガーダーは2セット用意した。図-10、写真-8に架設ガーダーの構成を示す。

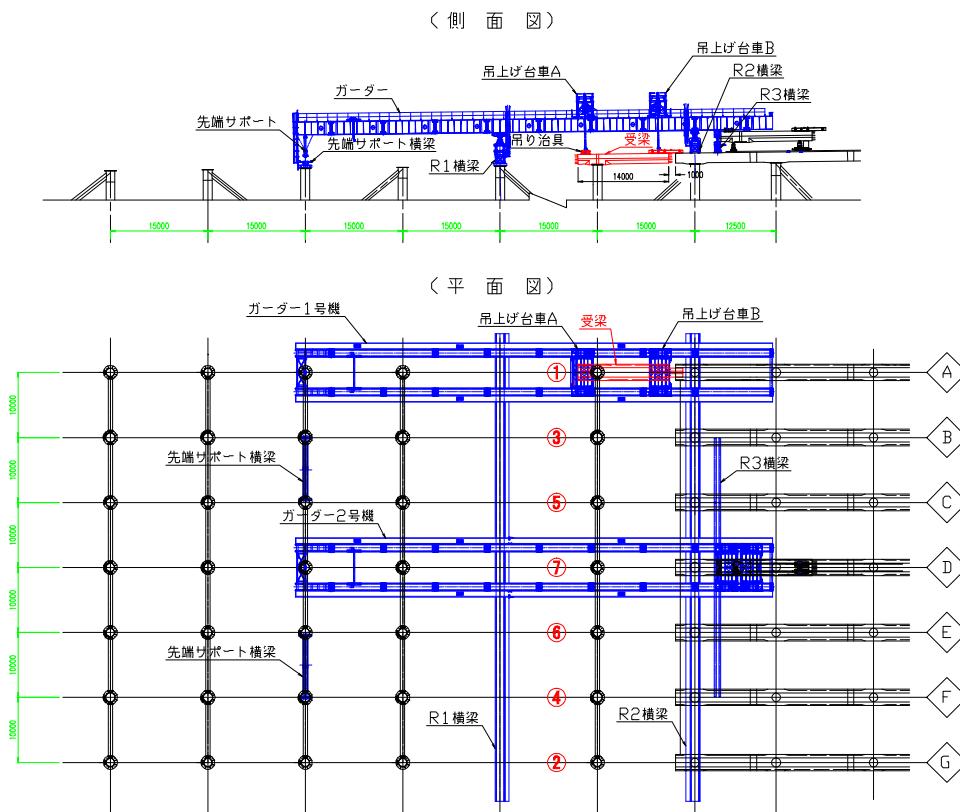


図-10 架設ガーダー構成 側面図、平面図

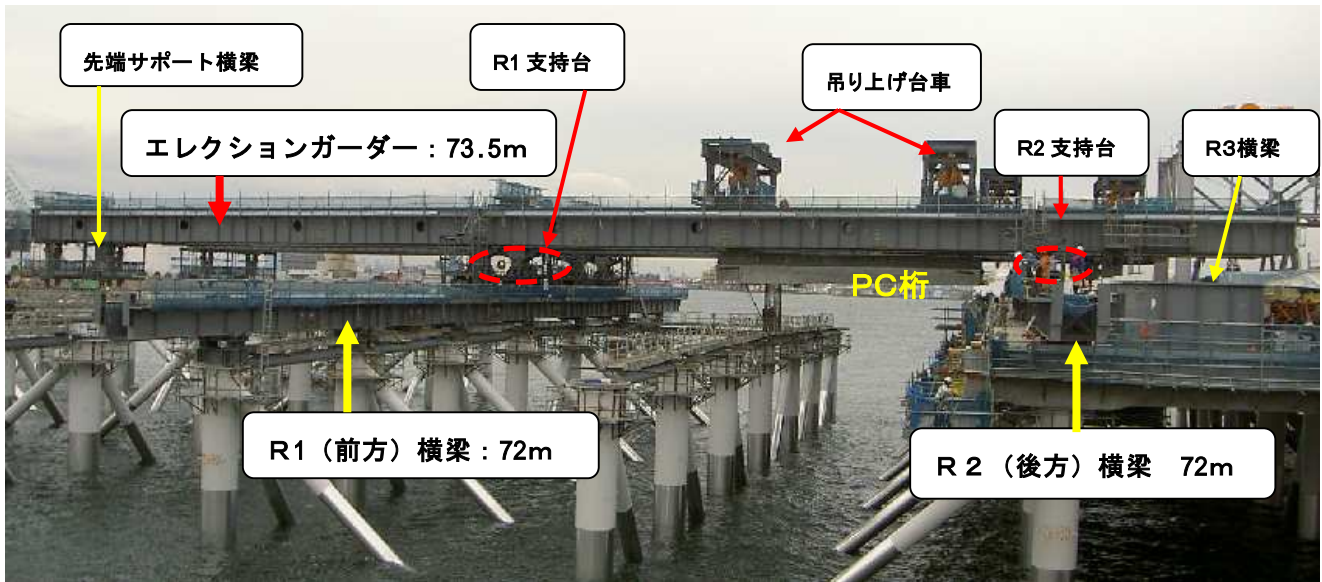


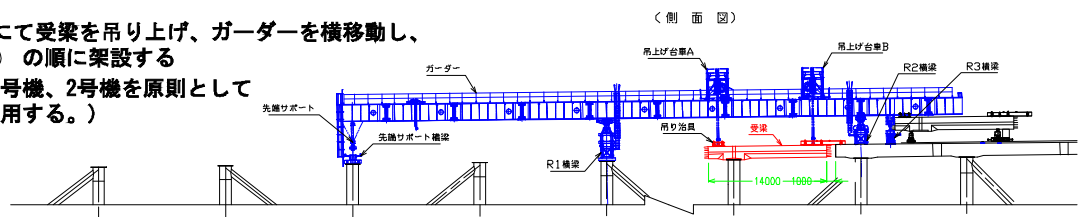
写真-8 エレクションガーダーの構成

(2) エレクションガーダーの移動ステップ

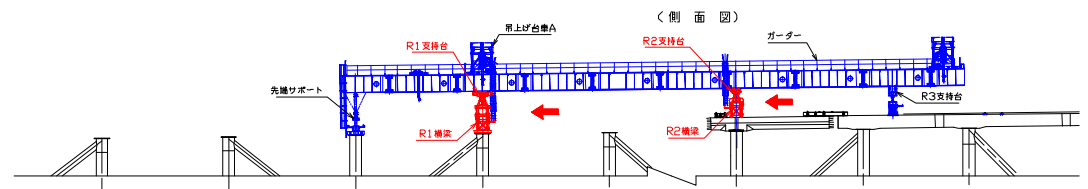
下図にガーダーの移動ステップ図を示す。

1. 1 径間目受梁を架設

- 吊上げ台車にて受梁を吊り上げ、ガーダーを横移動し、①～⑦の順に架設する  
(ガーダー1号機、2号機を原則として交互に使用する。)



2. 2 基のガーダーを先端サポートおよびR3支持台で支持し、R1支持台とR1横梁を吊り上げ台車にて前方へ移動する。その後、R2についても同様に移動する。



3. 2 径間目受梁を架設

- 吊上げ台車にて受梁を吊り込みガーダーを横移動し、①～⑦の順に架設する。(1径間目と同様)

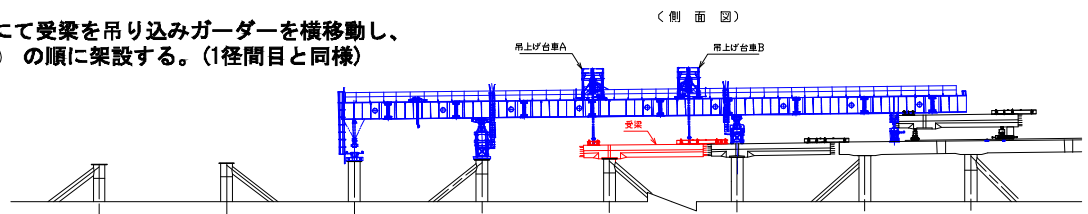


図-11 エレクションガーダー移動ステップ図 (その1)

1と3のステップでは、支持台下部の電動車輪(写真-9)によって受梁を吊り込んだエレクションガーダーが横方向(幅員方向)へ移動している。一方、支持台上部の電動車輪はステップ4にて縦方向(橋軸方向)にガーダーを送り出すために使用する。支持台は内蔵の油圧ジャッキで高さを上下することで、ガーダー重量の支持-解放を繰り返す。

2.のステップでは、1,2号機のガーダーを先端サポートと後部のR3横梁で固定し、横梁(72m、6



4 t) と支持台 (32 t) を前方へ送る。ガーダーの構造耐力は、荷重条件が最も厳しいこの時の状態で設計している。ガーダーを1セットとした場合、ガーダー重量が増し、かつ安定性が低下する恐れがあった。ガーダーの経済設計、横梁移動時の安全性、日当たり架設本数の向上による急速施工を検討し、全体最適のために2セットとした。

図-11 の1～3ステップにより2径間の受梁架設が完了した後、受梁間の連結部鉄筋を組み、緊張ケーブルを挿入・接続した後、型枠を組み立て、コンクリートを打設する。養生後、プレストレスを導入、シース内グラウトを完了してPC構造とした後、下図に示す4～6のステップで次施工ロットの受梁架設準備を行う。

架設ガーダーによる受梁架設は1施工ロットあたり7本の架設作業を2回繰り返すことになるが、第1ステップ：受梁架設7本を2日、第2ステップ

R1, R2横梁移動2日、第3ステップ：受梁架設7本を2日、第4～6ステップ：ガーダー移動を3日というペースで施工することができ、工期短縮に大きく貢献した。

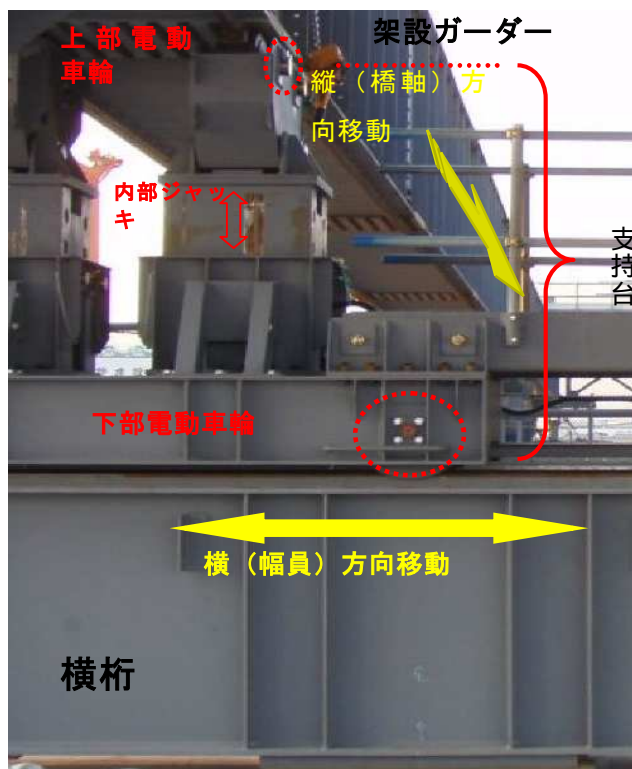
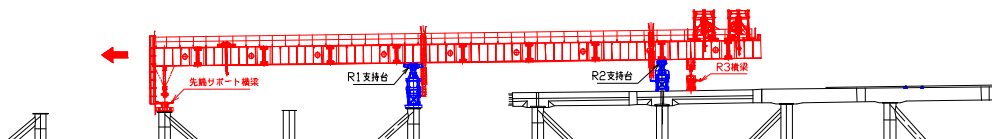
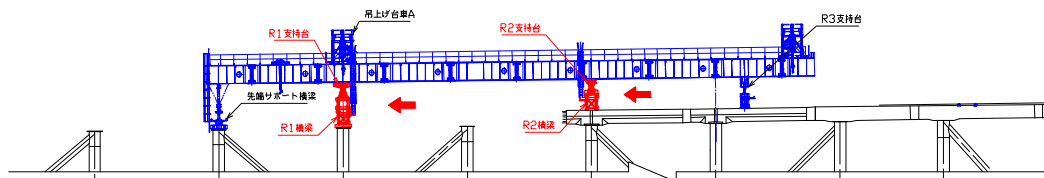


写真-9 支持台の構造

4. ガーダーで先端サポートおよびR3支持台を吊上げ、R1、R2支持台の上部電動ローラーでガーダーを前方に送り出す。



5. 2基のガーダーを先端サポートおよびR3支持台で支持し、R2支持台とR2横梁を吊り上げ、台車にて前方へ移動する。その後、R1についても同様に移動する。



6. ステップ4と同様に、ガーダーで先端サポート横梁およびR3を吊上げ、R1、R2支持台の電動ローラーにてガーダーを1径間(15m)前方に送り出す。(ステップ1に戻る)

(側面図)

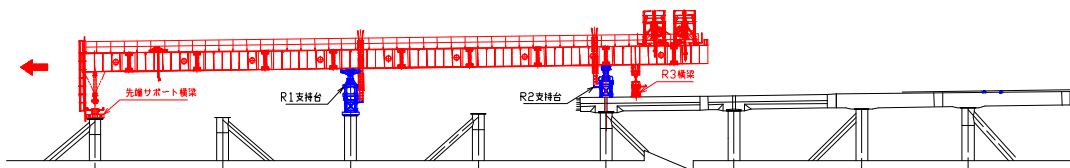


図-12 エレクションガーダー移動ステップ図 (その2)

## 6.まとめ

100年耐用の重要構造物として、材料の選定、取り扱い、耐久性の照査など、現在の知見から潜在的リスクを極力排除し、実施工に反映することができた。CP船で製造したコンクリートの変動係数は7%程度で想定以下であった。高流動コンクリートについては、実物大実験により充填性能を確認しつつ、海上CP船、市中プラントの両方で製造管理ノウハウを蓄積することができた。全工期を通じてコンクリートに関する不具合等はなく、良好な管理状況であった。また、横移動量の大きい大型のエレクションガーダーが計画通り機能するかどうかは、急速大規模施工の成否を握るカギであったが、当初予定工程を十分満足する結果を得た。設計・施工一括受注＋維持管理という工事の請負者として、設計思想と現場施工の不整合を防ぎ高品質な長期耐用海洋構造物を施工することができた。