

中部国際空港連絡鉄道橋の設計・施工 —設計耐用年数 100 年を目指した海上橋—

川口 興二郎*1・石田 喜洋*2・加藤 一志*3・南雲 広幸*4

1. はじめに

中部国際空港連絡鉄道は、名古屋市南部の知多半島常滑市沖合いの伊勢湾海上に国際ハブ空港として建設が進められている中部国際空港へのアクセス鉄道として整備されることとなった。図-1に架橋位置図を示す。常滑駅から空港駅(仮称)の路線延長4.3 kmのうち、海上を渡海する延長約1.1 kmの区間については最大支間長100 mの3径間+4径間2連で構成される合計3連のPC連続箱桁ラーメン橋(以下、海上橋)が採用され、急速施工を目指してプレキャストセグメント工法により上部工の製作・架設を行った。

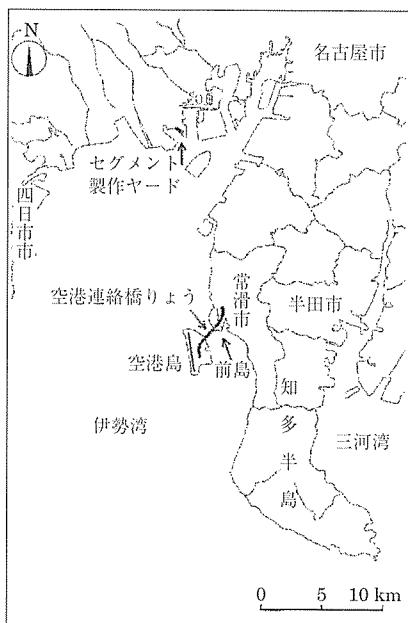


図-1 架橋位置図

また、本橋の架設にあたって技術検討委員会(委員長：田邊名古屋大学教授)を設置し、海上橋としての耐久性等の審議を行った。

本報告は、耐久性向上策を含む設計・施工の概要について述べるものである。

2. 橋梁概要

2.1 工事概要

海上橋の工事概要を以下に示す。図-2に橋梁一般図を示す。

工事名 : 中空連鉄, 空港連絡 B (東) 他, (西) 他
 発注者 : 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 名古屋建設局
 工期 : 2001年3月15日~2004年1月31日(東工区)
 2001年3月15日~2004年1月14日(西工区)
 構造形式: 3径間連続 PC 箱桁ラーメン橋, 4径間連続 PC 箱桁ラーメン橋 2 連
 橋長 : $95\text{ m} + 2@100\text{ m} = 295\text{ m}$, $4@100 = 400\text{ m}$,
 $3@100 + 81 = 381\text{ m}$
 全長 : 1076 m
 幅員 : 9.46 m

海上橋の基礎は12基のうち10基が鋼管矢板井筒式基礎, P2とP3の2基が直接基礎である。また、橋脚についてはP2, P5, P9, P13の4橋脚が可動構造となっており、その他の橋脚は上下部一体のラーメン構造となっている。

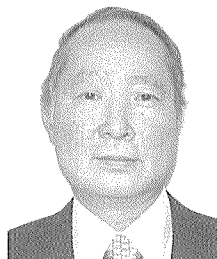
海上橋の上部工は、急速施工を目的にプレキャストセグメント工法にて施工した。プレキャストセグメントは、架設地点である常滑沖より約40 km はなれた名古屋港内の弥富埠頭にて製作を行い、台船にて海上運搬し架設を行った。

架設は柱頭部を場所打ち施工を行った後、エレクションノーズにより張出し架設を行う。P2およびP13橋脚部の側径間部については、支保工を海上部に構築した後、セグ



*1 Koujiro KAWAGUCHI

中部国際空港連絡鉄道(株)
常務取締役



*2 Yoshihiro ISHIDA

鉄道運輸機構 鉄道建設本部
名古屋建設局 上席専門役



*3 Kazushi KATO

大成・間・徳倉・ピーエス三
菱特定建設工事共同企業体
所長



*4 Hiroyuki NAGUMO

鹿島・飛鳥・名工・オリエン
タル特定建設工事共同企業体
工事課長

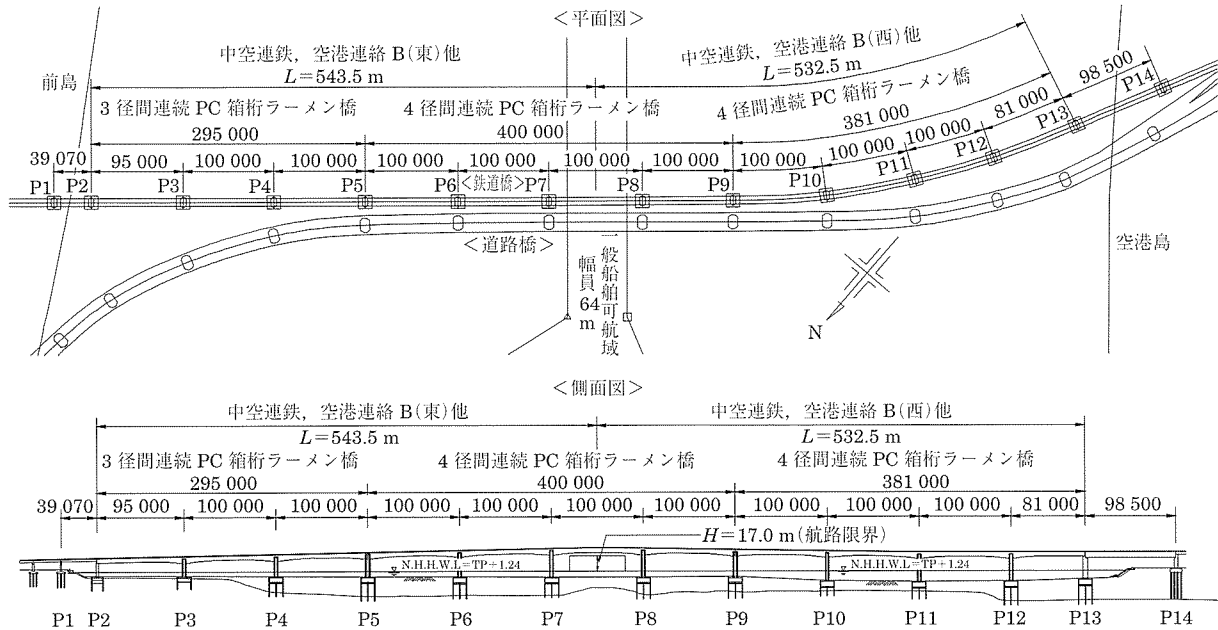
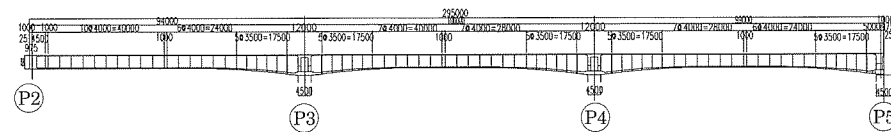
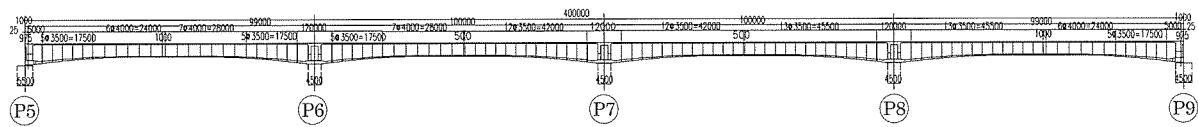


図 - 2 橋梁一般図

P2-P5 径間



P5-P9 径間



P9-P13 径間

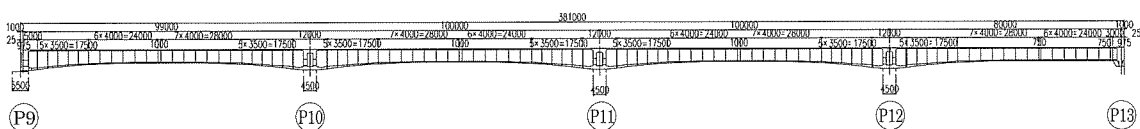


図 - 3 構造一般図

メントを支保工上に設置し張出し部先端および橋脚端部との間に間詰コンクリートを打設、プレストレスを導入して閉合架設を行った。

2.2 構造概要

海上橋は3径間連続PC箱桁ラーメン橋が1連、4径間連続PCラーメン橋が2連の合計3連で構成されている。桁高は柱頭部において7.0mであり径間中央部で4.5mの変断面箱桁である。図-3に3橋の構造一般図を示す。

セグメントのブロック長は、使用する揚重機・架設機材の能力により決定されるが、本橋においては最大吊上げ能力を1500kNに設定した。主桁高が7.0mから4.5mと変化する変断面構造であることから、セグメント長は3.5mと4.0mの2種類とした。

主ケーブルは、内・外併用方式であり、内外ケーブルの比率は、支間割に起因するアンバランスモーメントと後死荷重および活荷重に対して外ケーブルにて対処するように

決定している。

海上橋に使用した主な材料を以下に示す。

- ① セグメントには設計基準強度 $f'_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ の高強度コンクリートを使用した。
- ② 主ケーブルは、内ケーブルに12S15.2 (SWPR7BL)、外ケーブルは19S15.2 (SWPR7BL)を使用した。
- ③ 床版横締め鋼材は、ポストテンション方式とし、1S21.8のプレグラウトタイプとした。

3. 耐久性照査

3.1 概要

本橋梁は、海上橋であり橋脚については海中および飛沫帯に、また上部工は海上大気中に設置される。このため、構造物は「特に厳しい腐食性環境」に暴露されることとなる。

このような厳しい環境下においても設計耐用年数100年

間にわたり、コンクリート構造物としての所要の性能を確保できるよう、耐久性について設計照査を行った。

3.2 照査項目

本橋梁は、塩害に対する対策がもっとも重要な照査項目である。このため、下部工および上部工の鉄筋かぶりとコンクリートの仕様に着目し以下の項目の照査を行った。

- ① 中性化
- ② 塩化物イオンの浸入に伴う鋼材腐食
- ③ 施工時におけるひび割れ
- ④ アルカリ骨材反応

3.3 照査結果

(1) 中性化

かぶりのうち、中性化の残量が 25 mm となる年数をもって照査を行った結果、塩害対策で決定したかぶりを確保することにより設計耐用期間（100 年間）においてコンクリート構造物の全部位について中性化の問題はないものと判断した。表 - 1 に照査結果一覧表を示す。

(2) 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査
構造物ごとの設計耐用期間（100 年間）における鋼材位

置での塩化物イオン濃度を表 - 1 に示す。海中橋脚の飛沫帯においては、高炉セメントを使用してコンクリート表面を打放し面とした場合には、5 kg/m³ を超過する予測値となった。このため、第 1 種防食法に加えて第 2 種防食法を併用することにより、現状の設計（かぶり 100 mm）を尊重しつつ、耐久性の向上を目指すこととした。選定した第 2 種防食法は、ポリマー含浸コンクリートの埋設型枠を平均潮位面より上方に 7 m、下方に 3 m の計 10 m の範囲に設置することとした。

(3) 施工時におけるひび割れ照査

構造物の耐久性確保には、橋脚（頂版・く体）の施工段階で有害なひび割れを発生させないことが肝要である。そこで、高炉セメントと低熱ポルトランドセメントの 2 種類のセメントを使用した場合の温度応力解析を行い、最適なセメントの選定とひび割れ発生予測を実施し、単位セメント量は 330 kg/m³、W/C は 45 % とした場合の照査結果を表 - 2 に示す。低熱ポルトランドセメントを使用することにより、発生する温度応力が高炉セメントの 1/2 程度に低減できひび割れ抑制効果が顕著であることが明らかとなった。

表 - 1 耐久性の照査（中性化・塩害）

構造物名	検討部材名称	建設位置	仕 様			中性化の照査	塩害の照査		耐久性の判定	
			セメント	W/C	かぶり(mm)		照査結果	C ₀ Kg/m ³		照査結果 Kg/m ³
					上部	下部				
P2 ~ P13 橋脚	橋脚く体	飛沫帯	高炉 B	45%以下	100	1348 年	13.0	5.12	塩害劣化の懸念が高い。	
	橋脚く体 (樹脂埋設型枠)	飛沫帯 (MWL + 7.0 m まで)	高炉 B	45%以下	100	省略		0.67	温度ひび割れの発生が懸念される。	
	橋脚く体 (樹脂埋設型枠)	飛沫帯 (MWL + 7.0 m まで)	低熱	45%以下	100	省略		0.71		
	橋脚く体 (頭部)	海上大気中 (MWL + 7.0 m 以上)	高炉 B	45%以下	100	省略	3.8	1.48	温度ひび割れの発生が懸念される。	
	橋脚く体 (頭部)	海上大気中 (MWL + 7.0 m 以上)	低熱	45%以下	100	省略		2.53		
PC ラーメン橋 (P2 ~ P13)	桁 (鉄筋かぶり)	海上大気中	早強	38%以下	70	∞ 年	2.0	1.40	PC 鋼材への塩害の心配なし。	
	95				1.05					
コンクリート高らん	RC 壁	海上大気中	普通	45%以下	50	213 年	2.0	1.94		

中性化の照査：かぶりのうち、中性化の残量が 25 ミリとなる年数
 塩害の照査：設計耐用年数（100 年）における、鋼材表面（帯鉄筋）位置の塩化物イオン濃度
 ：現地で実施されたケースを示す。

表 - 2 橋脚（頂版・く体）の温度応力解析結果

セメント	部 材	最大温度 (°C) (材齢)	温度降下 (°C) (材齢)	部 位	最大応力度 (Kg/cm ²)	最小ひび割れ指数	ひび割れの発生状況	ひび割れ幅の最大値 (mm)
高炉セメント	頂 版	68.9 (5.5 日)	38.4 (90 日)	内部	16.7	1.0	内外部温度差により表面・貫通ひび割れ	
				表面	27.3	0.7		
	1 ロッド	81.7 (4.0 日)	61.4 (90 日)	内部	38.6	0.7	2 ロット打設後、表面になかわれ発生率 95 %、貫通ひび割れの可能性あり	0.22
				表面	44.7	0.6		
	2 ロッド	79.8 (4.5 日)	57.7 (90 日)	内部	27.0	1.1	3 ロット打設後、表面になかわれ発生率 84 %、貫通ひび割れの可能性あり	0.19
				表面	33.5	0.7		
低 熱	頂 版	56.9 (10 日)	28.9 (90 日)	内部	16.6	1.4	表面ひび割れのみ 養生方法により改善可能	
				表面	15.2	0.9		
	1 ロッド	69.4 (7.5 日)	49.5 (90 日)	内部	23.9	1.2	2 ロット打設後、表面になかわれ発生率 65 %、貫通ひび割れの可能性小	0.15
				表面	22.9	0.9		
	2 ロッド	67.3 (8 日)	45.9 (90 日)	内部	15.2	2.2	3 ロット打設後、表面になかわれ発生率 25 %、貫通ひび割れの可能性なし	0.09
				表面	16.5	1.2		

実施工において、橋脚く体1ロットおよび2ロットの施工時にコンクリート温度の計測を行った。計測値は、1ロット、2ロットのいずれも最高温度は数値解析よりも低く、温度履歴の傾向も同様の傾向を示していることより、想定したひび割れ抑制効果が発揮されていると考えられる。図-4に温度計測位置を、図-5に温度履歴を示す。

(4) アルカリ骨材反応

橋脚に使用するコンクリートはコンクリートプラント船

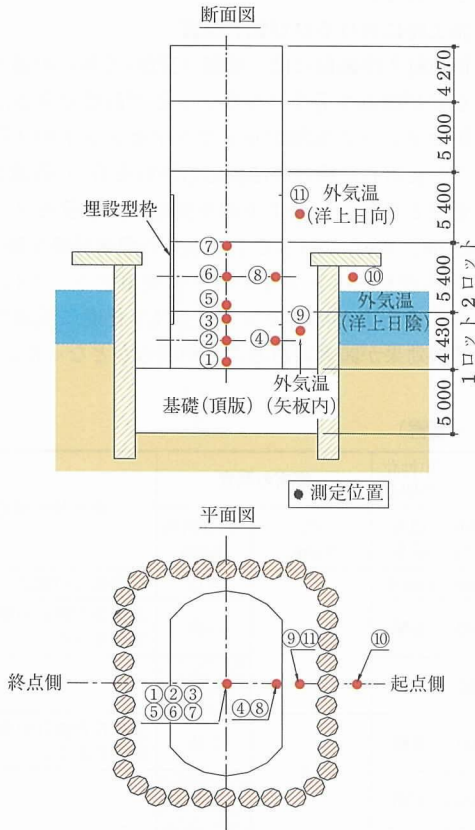


図-4 温度計測位置

にて製造することとしたが、使用する骨材については良好なものを安定して供給されるように生産地を限定し骨材の品質確保につとめた。アルカリ骨材反応に関する照査については、以下の手順で検討を進め、いずれの項目においても骨材は無害と判断された。

- ・供給される予定の骨材の限定と専門家による現地調査
- ・一般のアルカリ骨材反応性試験の実施
- ・専門家による目視調査、X線回析および偏向顕微鏡分析

3.4 上部工の耐久性確保

上部工は、海中橋脚と比較し設置される環境条件は緩いものの、上部工を含めた構造系全体として設計耐用期間100年間にわたり所要の性能を確保する必要がある。

そこで、上部工の構造特性に応じた耐久性向上策を導入することにした。

(1) セグメントと場所打ち部との接合面

セグメント相互の接合面は接着剤を塗布して水密性を確保できるがセグメントと場所打ち部の接着剤を使用できない箇所に対しては、水分等の浸入による劣化を防止するため、接合面にはアクリルゴム系の局部防水工を塗布した。

- ・柱頭部と基準セグメント間の間詰コンクリート部は負曲げ領域であるため、スラブ上面に塗布
- ・中央閉合部の正曲げ領域については、桁の全外周面に塗布

(2) 橋面の全面防水工

橋面より橋体内への塩化物イオンの浸入による劣化防止のために上記の局部防水に重ね塗りする全面防水工（アクリルゴム系）を塗布した（図-6参照）。

(3) 上床版横締めケーブル

横方向PC鋼材は、グラウト不良等を防止する目的でプレグラウトタイプとした。

(4) 内ケーブルシース

プレキャストセグメント工法による本橋ではセグメント

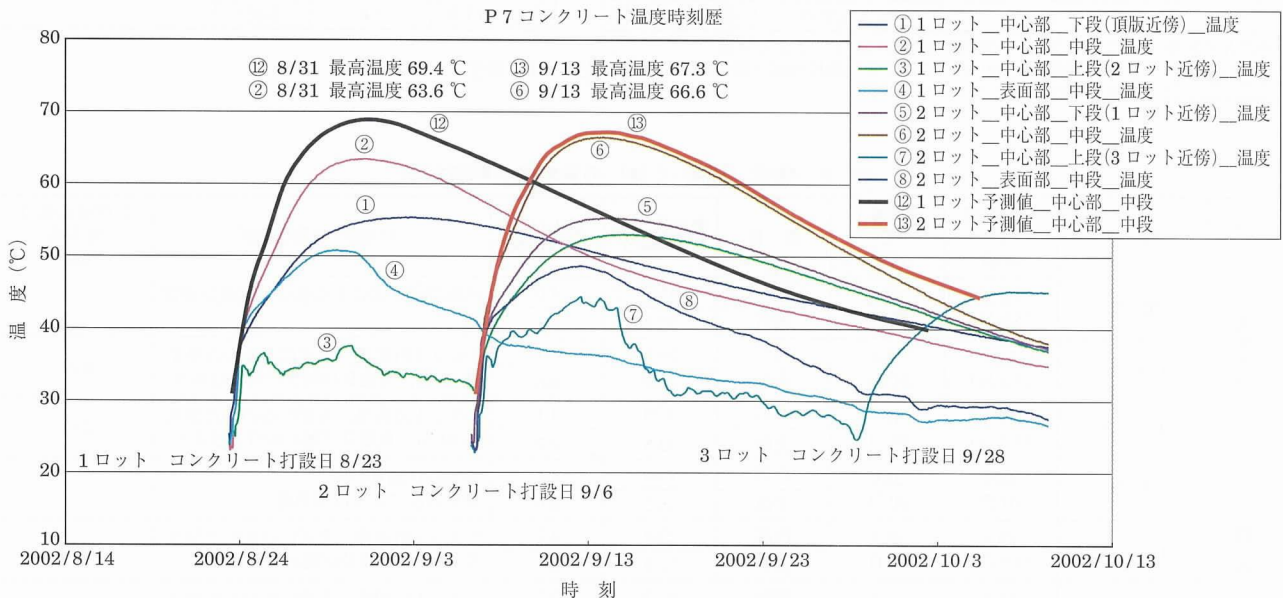


図-5 コンクリート温度履歴

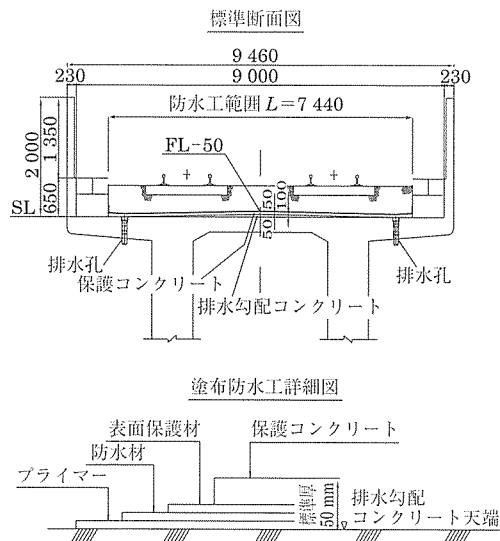


図 - 6 橋面防水仕様

製作後の仮置きが長期に及ぶことによる発錆防止や附着性能の向上を目的に内ケーブルシースにポリエチレンシースを採用した。

4. 設計概要

4.1 設計条件

軌道構造 : バラスト軌道

列車荷重 : M-17 (複線)

図 - 7 に主桁断面図を示す。

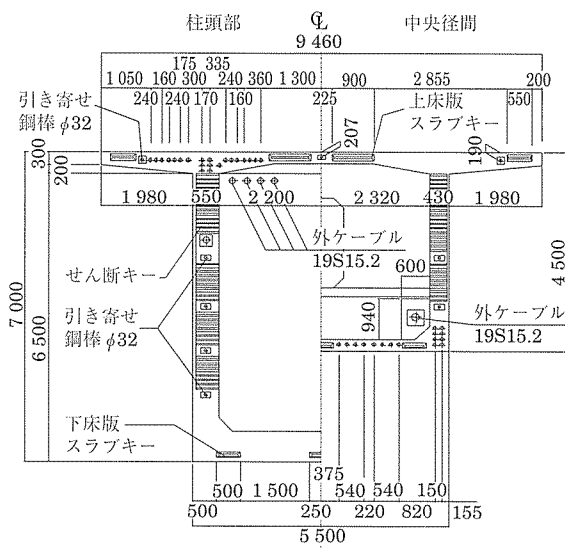


図 - 7 主桁断面図

4.2 PC 鋼材配置

主ケーブルシステムは、内・外併用方式とし、セグメント橋特有の引寄せ鋼材は部材断面内への配置としている。

内ケーブルに 12 S 15.2 mm, 外ケーブルには 19 S 15.2 mm を採用し、変動荷重時におけるセグメント目地の応力制限値 1.0 N/mm² (圧縮) を制御している。

海上橋は航路上を横架するため、併設される道路橋と橋脚位置を揃えることとし、常滑側と空港島側の護岸付近を除いて均等に 100 m の径間割りとする事とした。そのため側径間・中央径間ともに同じ支間長となり、柱頭部の断面力はかなりのアンバランスとなり、必要 PC 鋼材量は側径間側で決定される。効率的なケーブル配置を目標に、その差分を外ケーブルで対応することとし、側径間だけに連続外ケーブルを配置した。

引寄せ鋼材として PC 鋼棒 φ32 を用い、接着・鋼棒緊張時のセグメント目地は 0.2 N/mm² 程度の圧縮状態を確保している。本橋においては、変断面であるため下床版への配置は避け、上床版・腹部にバランスよく配置した。

4.4 下床版腹圧力の検討

桁高変化を伴う変断面構造のため、下床版に配置された PC 鋼材により底版を下側へ押す腹圧力が生じる。このため、横方向計算による曲げの検討とはべつに、腹圧力によるシース間の斜め引張り応力を起点とした引き裂きに対する検討を加えることとした。なお、応力解析には、2次元有限要素法を用い、シース間に発生する引張応力がコンクリートの引張強度以下となることを確認する。解析の結果、引張応力度は引張強度に達しないことが確認されたが、コンクリートの剥離に対する補強として引裂き防止用中止め筋を配置した。(図 - 8 参照)。

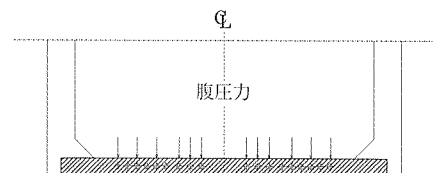


図 - 8 検討断面図

5. 施工概要

5.1 セグメント製作

(1) 概要

セグメント (総数 250 個) の製作は、名古屋港内の弥富埠頭にて行った。セグメントの製作方法には、既設セグメントの端面を新規セグメントの端型枠として順次 1 個ずつ製作するショートラインマッチキャスト方式と片側張出し長分を製作台上で並べて製作するロングラインマッチキャスト方式とがある。本橋のセグメント製作は、橋梁の平面線形の違いから始点方 (常滑側) の直線区間については、ロングラインマッチキャスト方式 (セグメント数 126 個) で、終点方 (空港側) についてはほとんどの区間において平面曲線を有しているため、製作設備の効率化よりショートラインマッチキャスト方式 (セグメント数 124 個) で施工を行なった。

製作されたセグメントは、埠頭より架設のために積出しされるまで仮置きヤードにトランスファークレーン (定格 1,500 kN) にて運搬され仮置きされる。図 - 9 に各方式の製作手順図を示す。また、写真 - 1 ~ 2 にショートラインマ

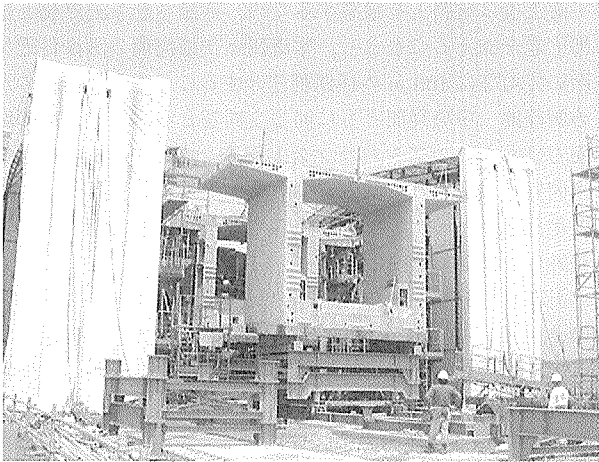


写真-1 セグメント製作状況
(ショートラインマッチキャスト方式)

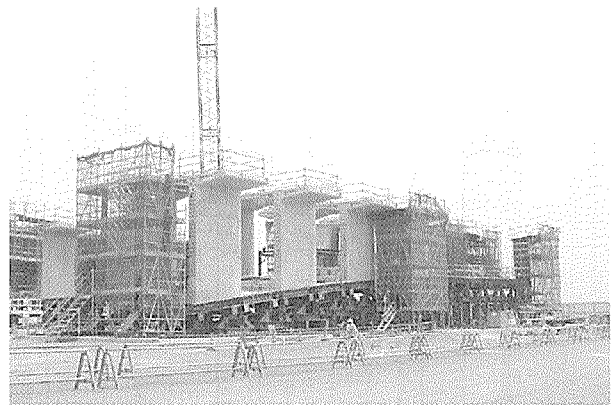
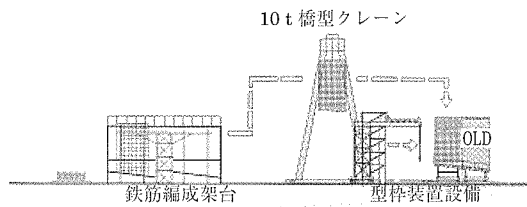


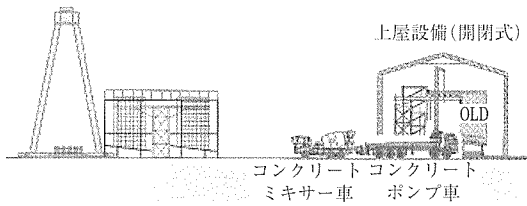
写真-2 セグメント製作状況
(ロングラインマッチキャスト方式)

■ ショートライン・マッチキャスト方式(西工区)

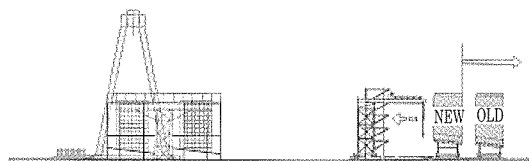
- ① OLD・型枠セット, 鉄筋組立, 吊り込み, PC工
 ・主方向 PC 工は, シース, 定着具のみ配置。
 床版横締めは PC 鋼材(プレグラウト鋼材)を配置。



- ② コンクリート打設, 養生, 床版横締め PC 鋼材緊張
 ・コンクリート打設後, 所定の強度発現を確認した後
 床版横締め PC 鋼材を緊張する。

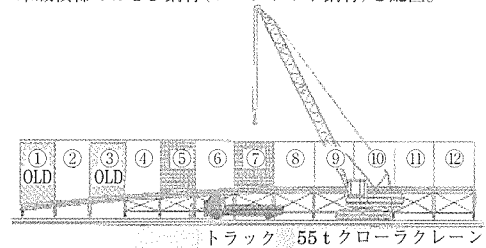


- ③ 型枠脱型, OLD 切り離し, 移動

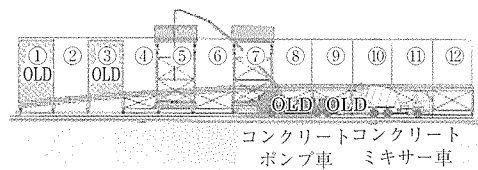


■ ロングライン・マッチキャスト方式(東工区)

- ① 型枠セット, 鉄筋組立, PC工
 ・主方向 PC 工は, シース, 定着具のみ配置。
 床版横締めは PC 鋼材(プレグラウト鋼材)を配置。



- ② コンクリート打設, 養生, 床版横締め PC 鋼材緊張
 ・コンクリート打設後, 所定の強度発現を確認した後
 床版横締め PC 鋼材を緊張する。



- ③ 型枠脱型, 切り離し, 移動 ⇒ 仮置場へ



図-9 セグメント製作手順図



写真-3 トランスファークレーン

ッチキャストおよびロングラインマッチキャスト方式によるセグメントの製作状況を、さらに写真-3にセグメント運搬用のトランスファークレーンの稼動状況を示す。

(2) 製作管理

1) ロングラインマッチキャスト方式

① 平面線形の管理方法

平面線形が直線であるため、平面線形は製作台のセット時に底版型枠を張出し全長について設定する。

② 縦断線形の管理方法

- ・ 先行セグメントのコンクリート打設後、各セグメントの天端高さを測定し、相互のセグメントの相対的な実測高さを確認する。
- ・ 上記の測定の結果、計画値と大きく外れる部分については後行セグメントの製作開始前に製作台の高さ調整を行う。

2) ショートラインマッチキャスト方式

セグメントの線形変化は、新設セグメントの構造中心線をつねに測量軸線に一致させ、既設セグメントの後部を水平・鉛直にシフトさせて対応した。製作管理のための計測点配置は、図-10に示すように既設セグメントに6点、新設セグメントに6点の合計12点とし、光波測量計を用いて3次元計測を行った。

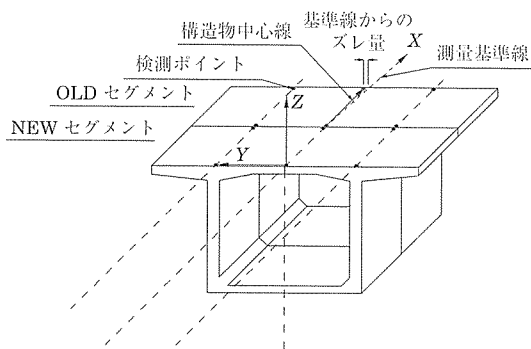


図-10 製作管理検測点配置図
(ショートラインマッチキャスト方式)

製作の途中で生じた誤差については、次セグメントの製作の際に今までに生じた誤差が小さくなるように線形のシフト量を再調整し既設セグメントの位置調整をジャッキを使用して行った。

5.2 セグメント架設

(1) 概要

トランスファークレーンにて仮置きヤードより埠頭の積出しエリアに出荷されたセグメントは、フローティングクレーン船(3000kN)により台船に積込み、架設地である常滑沖に運搬される。台船のセグメント運搬時間は片道約3時間を要した。

セグメントの架設方法は、エレクションノーズを用いた一般的な張出し架設と、航路部を跨ぐ径間を含む張出し部については特殊エレクションノーズによる張出し架設を、また、側径間部については海上に支保工を構築し、支保工上で架設を行った。

以下に一般部の張出し架設と特殊エレクションノーズによる張出し架設について概説する。

(2) 一般部における張出し架設

張出し架設を行う10橋脚のうち8橋脚においては一般的なエレクションノーズを用いての張出し架設を実施した。

写真-4に架設状況を示す。

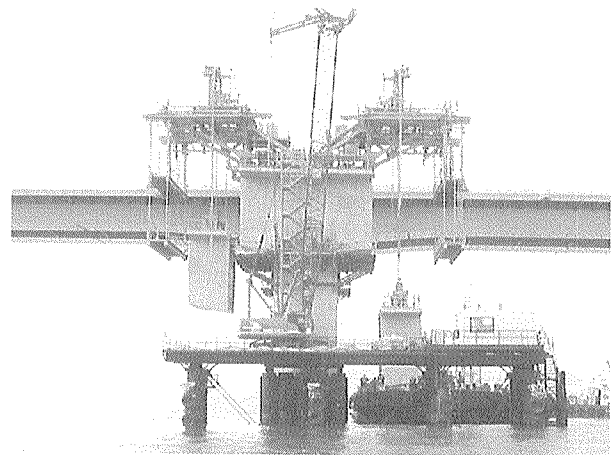


写真-4 一般部における張出し架設

(3) 特殊エレクションノーズによる航路部張出し架設

P7-8間は一般船舶可航区域となっており架設地点の直下にセグメント運搬台船を繫留できない。そのためP8およびP7橋脚からの張出し架設は、写真-5に示す特殊エレクションノーズを用いて実施した。すなわち、航路と反対の張出し側よりセグメントを特殊エレクションノーズにより吊上げ、自分のフレーム下においてセグメントの橋面移動用運搬台車に一旦仮置きをする。この運搬台車を自走させてセグメントを航路部の張出し先端まで橋面上を移動させる。そこで、改めて航路直上のエレクションノーズを用いて橋面上からセグメントを架設するという方法を採用した。

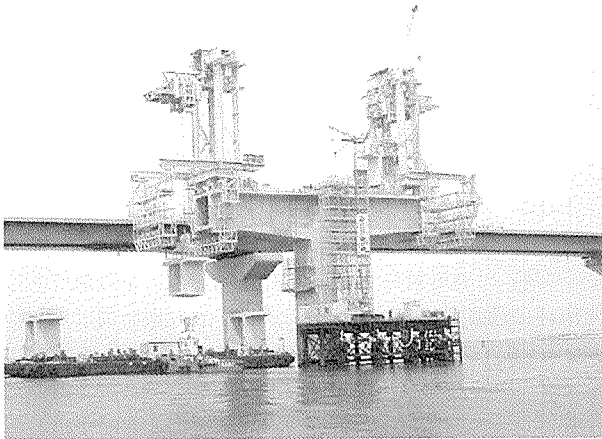


写真-5 特殊エレクションノーズによる架設

6. 擬似橋脚

海上橋の橋脚表面は「特に厳しい腐食性環境」に曝されることとなるが、このような環境下においても設計耐用年数100年にわたりコンクリート構造物として機能低下が生じないように構造を計画している。しかしながら、経年変化の進行度の不確定性や、また、定期点検が容易でないことより橋脚の経年的な変化を陸上よりモニタリングできるよう、海上橋の構造部位と構造上の特性を同じにした壁体を海岸線の陸上側に位置するP1橋脚のフーチング上に設置した。

擬似橋脚・擬似高欄は4体あり、それぞれセメントの種類、鉄筋被覆の有無、埋設型枠の使用の有無を実構造物と同様に設定し対比できるようにしている。また、後日の利便性を考慮し必要な情報を記載した表示板を取付けている。なお、設置位置は、汀線からの水平距離が15mであり、平均海水面からの鉛直高さに換算すると約6mに相当する量の塩化物イオンの供給が見込まれる地点であり、海上橋の橋脚と同等の腐食性環境である。

この擬似橋脚は、海上橋の健全性の確認や維持管理の目安となることのほかに、コンクリート工学に関わっている研究者の研究素材として活用されることについても、門戸を広げたいと考えている。図-11に擬似橋脚の構造概略図を示す。

7. あとがき

平成15年10月にケーブル緊張をもって橋体工が終了し、同年12月には保護コンクリートの打設を完了して、軌道工事への引渡しを行なった(写真-6)。平成13年9月に着手してから27ヶ月の短期間にて工事を完了することができた。急速施工を前提とする中で、海上橋ということできざまな耐久性向上策を適用して耐久性の確保を実施した。本橋を設計・施工するにあたり貴重なご意見、ご助言をいただいた名古屋大学田邊忠顯教授を委員長とする海上橋技術検討委員会の各委員(名古屋工業大学梅原秀哲教授、岐阜大学竹内伝史教授、愛知工業大学森野奎二教授)ならびに関係者に感謝の意を表します。

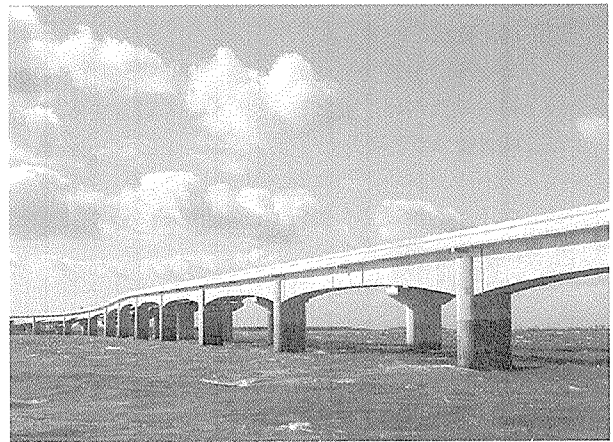


写真-6 海上橋完成写真

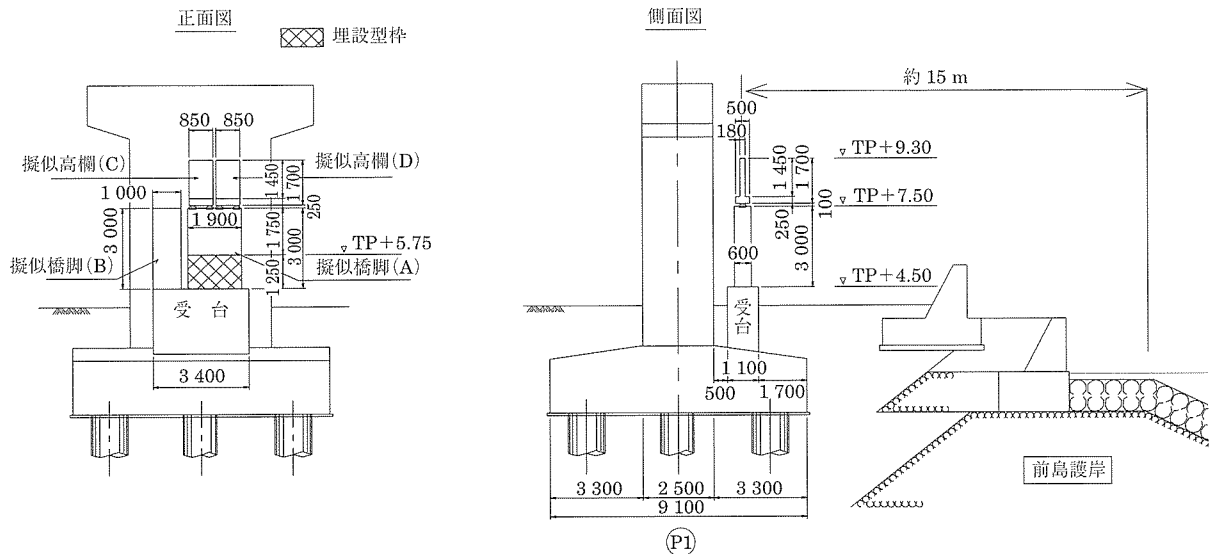
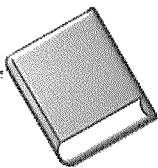


図-11 擬似橋脚構造概略図

参考文献

- 1) 中部国際空港連絡鉄道橋(株)：普通鉄道構造規則の実施細則(建造物)，平成 11 年 12 月
- 2) 中部国際空港連絡鉄道橋(株)：空港連絡線設計基準(土木編)，平成 11 年 12 月
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)，平成 12 年 6 月
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)，平成 11 年 10 月
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，平成 11 年 10 月
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]—耐久性照査型—，平成 12 年 1 月
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001 年 1 月
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002 年 3 月
- 9) 社団法人日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，昭和 59 年 2 月
- 10) 鉄道・運輸機構：土木工事標準示方書，平成 8 年 12 月

【2003 年 12 月 25 日受付】



●刊行物案内

- PC斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準(案)
- PC吊床版橋設計施工規準(案)
- PC橋の耐久性向上マニュアル

(平成12年11月)

頒布価格：3点セット 会員特価 6 000 円〈非会員価格 7 200 円〉(送料はいづれも 600 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会