

アンバランスな支間を有する3径間連続ラーメン箱桁の設計・施工

—大滝根川橋—

東北支店	PC 工事部	久保木栄
技術本部	土木技術第一部	大山博明
東北支店	PC 工事部	遠藤靖
東北支店	技術部	大沼礼亨

概要：大滝根川橋は、磐越自動車道の4車線化に伴い船引三春IC～小野ICの大滝根川上に架設される、橋長304.4mの橋梁である。構造形式はPC3径間連続ラーメン箱桁(桁長199.1m)とPRC4径間連続2主版桁橋(桁長104.8m)の2連で構成される。本橋の設計・施工に際し、①PC3径間連続ラーメン箱桁部の支間構成(74.600m+70.400m+52.250m)がアンバランスなため、施工条件に留意して設計を行う必要がある事、②12月～3月まで冬期はグラウト施工が不可能であるため架設内ケーブルの防錆に留意する必要がある事、③架設内ケーブルのPCグラウトの施工管理に留意する必要がある事、が考えられた。そこで本橋では、①アンバランスモーメントに対して移動作業車荷重以外のカウンターウェイトを必要としない施工ステップ及び桁高の検討、②冬期間に施工する架設内ケーブルの防錆対策として砂付き樹脂被覆PC鋼材の適用を検討しその定着具・PC鋼材に関する性能確認試験の実施、③新しいグラウトの管理手法による施工管理、等の対策を講じた。

Key Words：ラーメン箱桁, アンバランス, PC鋼材性能確認試験, PCグラウト

1. はじめに

1.1 架橋位置および地形的特性

大滝根川橋は、東北横断自動車道(磐越自動車道)いわき新潟線の4車線化工事(図-1および図-2に示す)に伴い、福島県田村市船引町大字春山において、1級河川大滝根川を横過する位置に計画された大滝根川橋2期線：橋長304.4m(1期線：橋長294.8m)の橋梁である。構造形式は図-3に示すとおりPC3径間連続ラーメン箱桁(桁長199.1m)とPRC4径間連続2主版桁橋(桁長104.8m)として、東日本高速道路株式会社(旧日本道路公団)郡山工事事務所より平成16年10月に発注された。架橋位置は、東北地方の阿武隈山地の西端付近で、船引三春ICの東方約1.3km付近の大滝根川を横断するところにある。地形特性は、①標高約390m～410mの比較的急な山腹斜面に段丘斜面をなしており、特に河川が大きく蛇行している地形である、②大滝根川右岸(A1橋台全面)は山腹斜面となっており、河川の攻撃斜面にあたるため斜面後退が想定される、③大滝根川左岸は土砂が堆積した比較的平坦地があり山腹斜面へと続く地形である。今回施工する大滝根川を横過するPC3径間連続ラーメン箱桁部のA1～P1径間は、1期線に比べ5m程長い。以上の自然制約条件が、上部工施工において設計・施工方法を検討する要因となった。



久保木栄



大山博明



遠藤靖



大沼礼亨



図-1 東日本高速道路株式会社
平成18年度新規開通予定区間
(東日本高速道路株式会社ホームページより)



図-2 大滝根川橋架橋地点地図

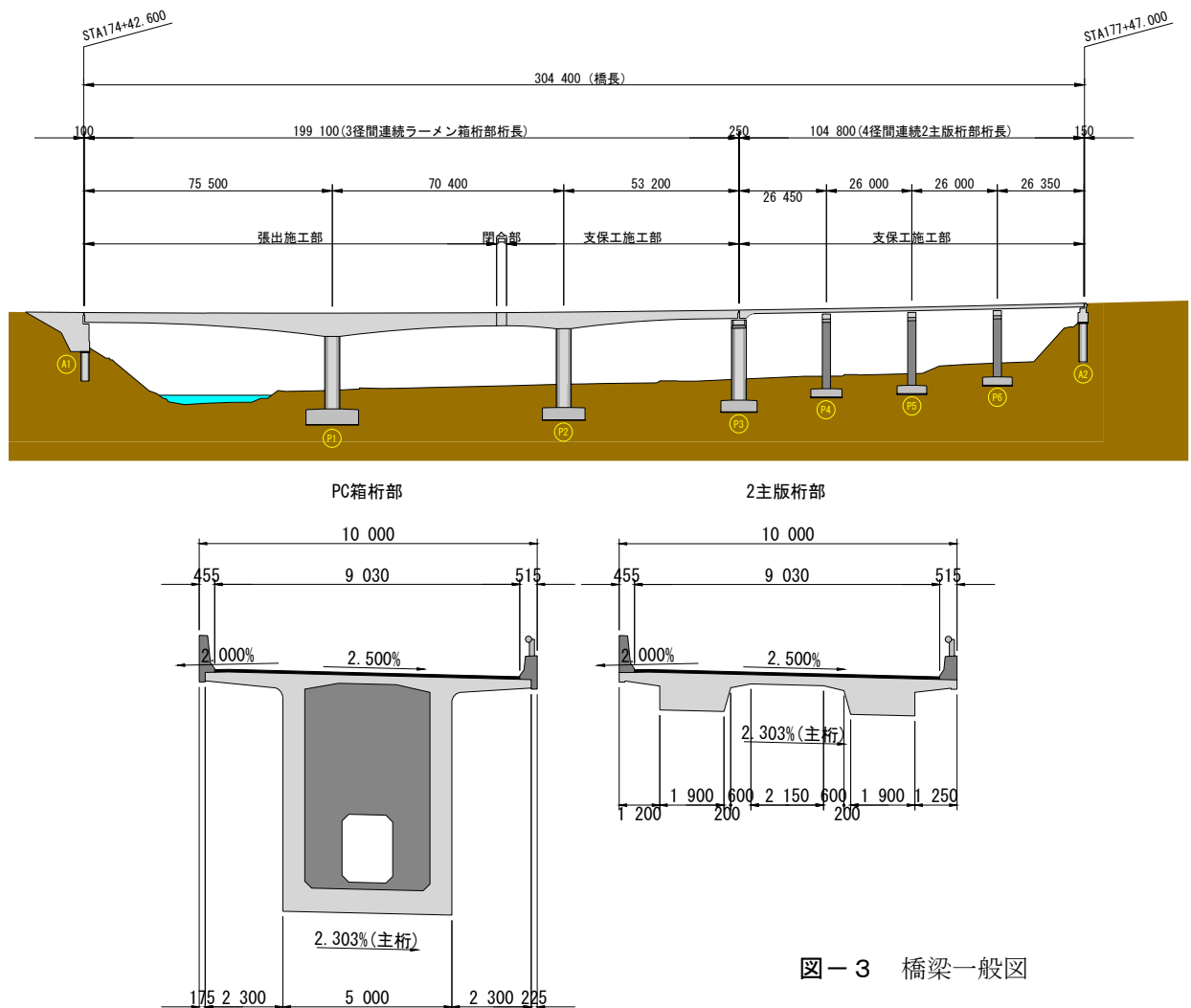


図-3 橋梁一般図

1.2 発注時基本設計と着目点

大滝根川橋の発注時基本設計は、①構造計算は、全外ケーブル方式として設計を行っていたが、将来的に内外併用ケーブル方式としても施工が行えるよう配慮した部材断面となっていた。②架設方式は、大滝根川が少量の降雨ですぐに増水すること、河川平面が大きく湾曲しているため流水方向が斜面に向かうことから、河川部においては支保工施工を行わないこととし、A1よりP1～P2径間の支間中央部までは張出施工、残りの部分を支保工施工することとした。③P1橋脚からの張出架設中に発生するアンバランスモーメントを解消することを目的として、中央径間張出架設先端部に、カウンターウェイト(512tf)を載荷する。

尚、着目すべき点はPC3径間連続ラーメン箱桁についてであるため、PRC4径間連続2主版桁部については論じない事とする。

2. 橋梁概要

2.1 工事概要および橋梁概要

橋梁概要を表-1に、本橋の主要材料を表-2に示す。橋梁概要については、基本設計からの変更はなく、また主要材料の数量は、詳細設計後の数量である。工事概要は以下の通りであり、施工前の状況を写真-1および写真-2に示す。

- 工事名 : 磐越自動車道 大滝根川橋(PC上部工)工事
- 発注者 : 東日本高速道路株式会社(旧日本道路公団) 郡山工事事務所
- 施工者 : 株式会社ピーエス三菱(単独)
- 工事場所 : 福島県田村市船引町大字春山地内
- 工期 : 平成16年10月15日～平成19年2月1日



写真-1 施工前全景(A1側より)



写真-2 施工前全景(A2側より)

表-1 橋梁概要

橋長・桁長	橋長 L=304.400m, 桁長 L=199.100m
道路規格	第1種第3級B規格
活荷重	B活荷重
構造形式	3径間連続PCラーメン箱桁橋
支間	74.600m+70.400m+52.250m
有効幅員	9.030m
斜角	90° 00' 00"
横断勾配	2.000% / \ 2.500%
縦断勾配	1.600% \ / 3.950%
平面線形	A=500m～R=6000m～A=800m

表-2 主要材料

コンクリート	脚頭部 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$: $V=90.5\text{m}^3$
	$\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$: $V=71.3\text{m}^3$
	柱頭部 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$: $V=348.1\text{m}^3$
	張出架設部 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$: $V=1086.7\text{m}^3$
	固定支保工部 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$: $V=492.1\text{m}^3$
型枠	$A=6105.2\text{m}^2$
鉄筋	$w=489.6\text{ton}$
PC鋼材	SWPR7BN 19S15.2 : $w=49.1\text{ton}$
	SWPR7BN(L) 12S15.2 : $w=20.1\text{ton}$
	SWPR19L 1S21.8 : $w=6.9\text{ton}$

図-4 に、詳細設計結果に基づいて作成した工事計画工程表を示す。

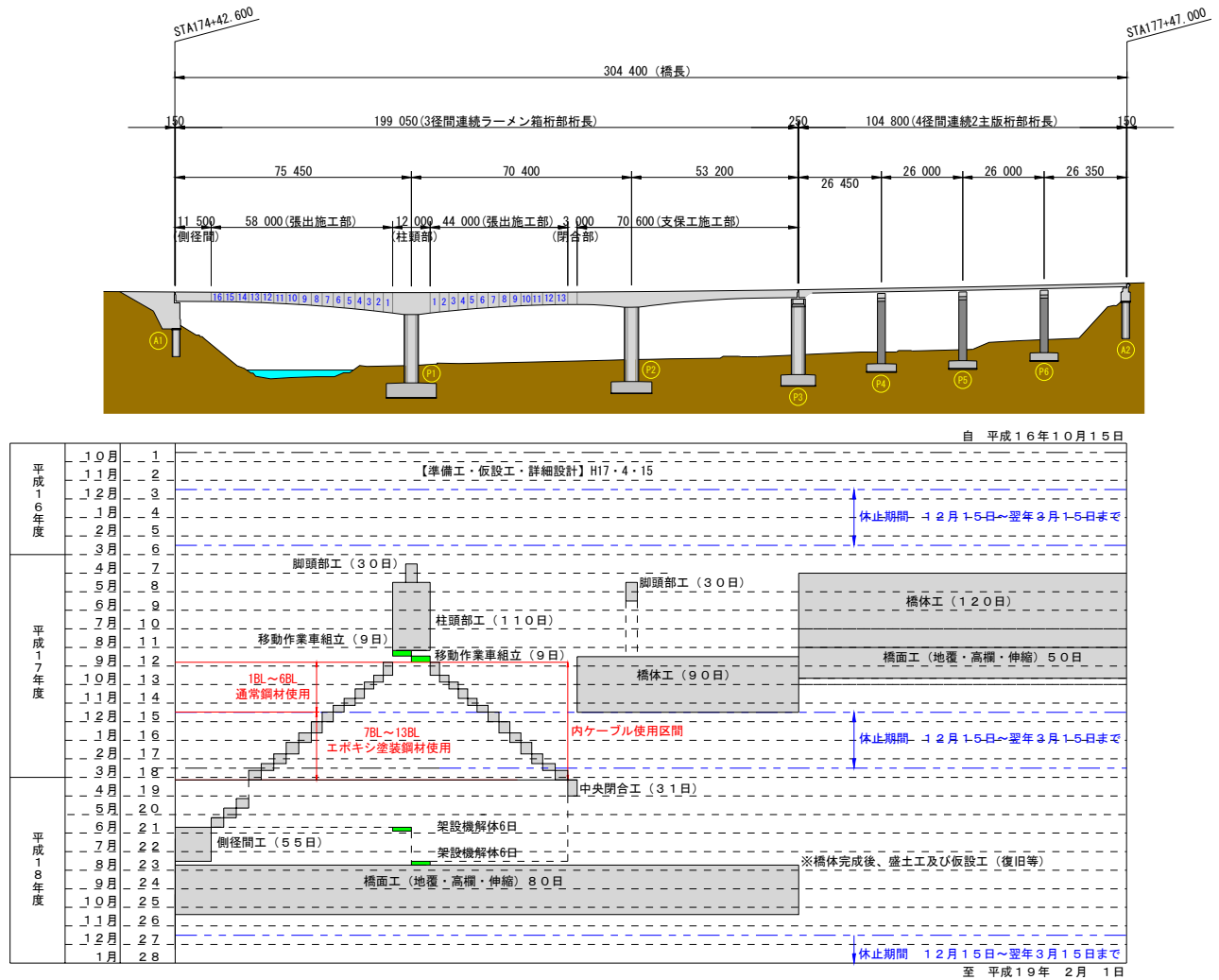


図-4 工事計画工程表

発注時の制約条件としては、毎年12月15日～3月15日までの冬期期間(図-4 中青字部分)は、3径間連続PCラーメン箱桁部張出施工以外の施工が禁止されている。また、張出架設ケーブルについては、冬期期間(図-4 中赤字部分)グラウト施工が不可能であるため、その部位についてはエポキシ樹枝塗装PC鋼材を使用する。

3. 設計・施工上の問題点

3.1 支間構成によって発生するアンバランスの影響

本橋の設計上の問題点は、支間構成が74.600m+70.400m+52.250mとなっており、P1橋脚からの張出架設では、P1橋脚の左右の径間が不等径間であるため、施工時にアンバランスモーメントが発生することである。その対処策として基本設計においては、中央径間張出先端位置にカウンターウェイトを載荷する計画となっていた。しかしそのカウンターウェイト重量は512tf(5021kN)必要であり、鉄板5×20(厚さ20mm、重量約1.6tf(16kN))に換算すると約300枚となる。この計画による問題点は、①カウンターウェイトをウェブ上に載荷すると、局所的にウェブにせん断力が発生し、必要部材厚では許容値を満足しない、②橋面上に鉄板を積み上げた際、鉄板の積み上げ高さは約6.000mとなることから、隣接する1期線を走行するドライバーに対し大きな威圧感を与える懸念がある、ことであった。そこで実施詳細設計ではこの計画を見直し、現実的なカウンターウェイト重量(移動作業車重量程度)に対し、諸条件を満足する施工ステップの計画、および必要部材厚の検討を行う必要があった。

3.2 架設内ケーブルに対する防錆対策

発注時基本設計において PC ケーブルの方式は、全外ケーブル方式にて設計されていた。しかし詳細設計において、全外ケーブル方式と内外ケーブル併用方式とのコスト比較から、内外ケーブル併用方式を採用することとした。その際、本橋の架設位置は寒冷地であり、日平均気温が 5°C 以下となる日が 12 月上旬から 3 月下旬までであるため、その期間内はグラウト施工が不可能となる。従って、約 4 ヶ月間のグラウト施工不可能時期における架設内ケーブルの防錆対策を、実施詳細設計段階から検討する必要があった。

3.3 架設内ケーブルに対するグラウト計画

本橋において計画された架設内ケーブルのグラウトについては、「構造物施工管理要領(平成 16 年 4 月・日本道路公団)」に準じて計画を立案する必要があった。

4. 設計・施工上問題点への対処

4.1 支間構成によって発生するアンバランスへの対処

4.1.1 施工ステップの変更

アンバランスモーメント解消のための対処として、施工ステップを変更して検討を行った。検討ケースを図-5 に示す。

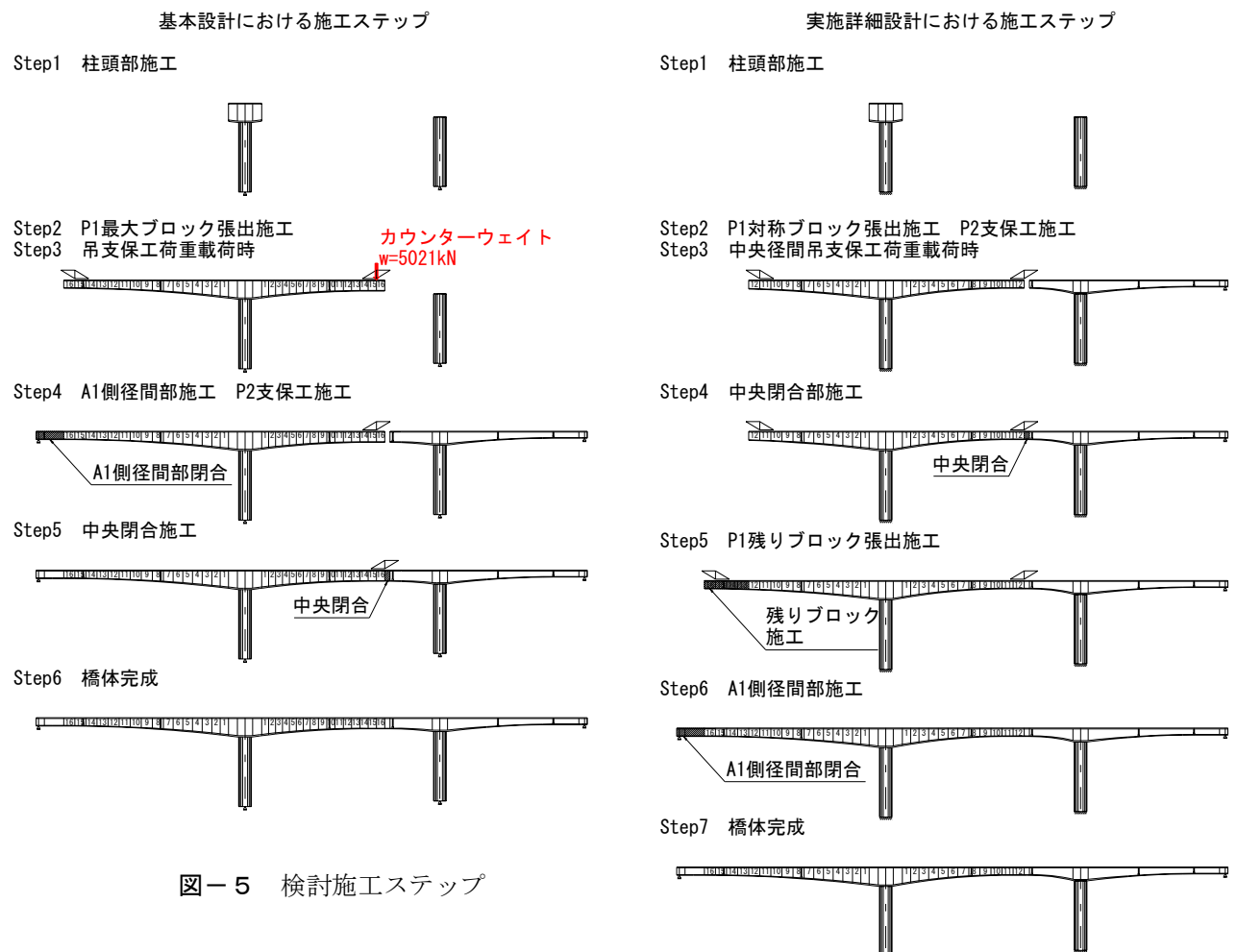


図-5 検討施工ステップ

基本設計は、図-5左に示すとおり、P1張出架設部を張出架設し、次にA1側径間部を施工、最後に中央閉合を施工するステップである。このステップでは、張出架設時中央径間側にカウンターウェイトが必要となる。それに対し実施詳細設計のステップは、図-5右に示すとおり、P1張出架設部を対称ブロックまで張出架設し、中央閉合を先行させて、最後にA1側の残りの張出ブロックおよびA1側径間部を施工するステップとした。基本設計ではA1側のアンバランス分のブロックの施工によって発生するアンバランスモーメント

トをカウンターウェイトで抑えているのに対して、実施設計では P1～中央径間～P2 によって構成される門の形状でアンバランスモーメントを抑える。このように施工ステップを変更することで、カウンターウェイトは移動作業車荷重程度に抑えることが可能と考えた。

4.1.2 中央径間桁高の変更

図-5右に示す施工ステップによって、カウンターウェイトを移動作業車荷重程度に抑えるためには、P1～中央径間～P2によって構成される門の剛度が必要となる。P1およびP2については、施工済みであるため、断面形状の変更は不可能であった。よって、中央径間の最小桁高をトライアルし、適切な桁高を求めた。検討桁高の合成応力度を図-6に示す。

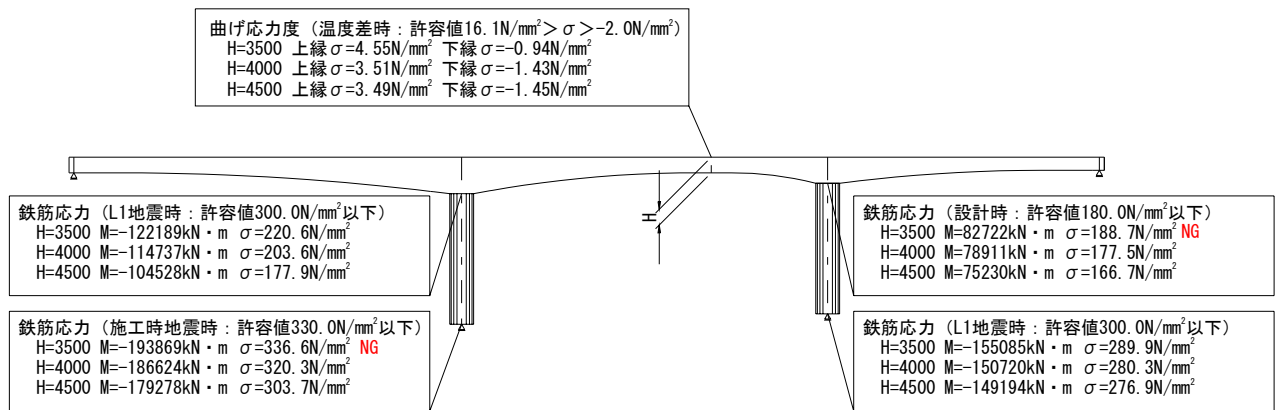


図-6 桁高による応力度の比較

よって図-5右に示す施工ステップにおいて、中央径間の桁高の最適化を行った結果、以下の事が言える。

① 桁高 H=3500mm の場合は、P1 橋脚下端で鉄筋応力度が許容値を満足しない。この部位については施工済みであり、補強を行うとなると非常にコストがかかることから、桁高 H=3500mm は採用できない。

② 桁高 H=4000mm および桁高 H=4500mm の場合については、双方とも鉄筋応力度ならびにコンクリート応力度は許容値を満足している。しかし施工数量では、表-3に示すとおり、コンクリート体積が H=4000mm の方が少なく、PC 鋼材量は H=4000mm でも H=4500mm でも変わらない。

表-3 各桁高の概略数量

項目		単位	H=3500	H=4000	H=4500	
コンクリート体積		m ³	1879.9	1896.2	1912.7	
PC 鋼材	内ケール	質量	kg	20101	20101	20101
		本数	本	28	28	28
	外ケール	質量	kg	52238	49101	49106
		本数	本	36	34	34

4.1.3 検討結果による結論

以上の結果より、図-5右に示す施工ステップで、中央径間の桁高を H=4000mm とすることによって、中央径間側のカウンターウェイトを移動作業車荷重程度に抑えることができたため、実施工においては、このプロポーショナルで施工を行うこととした。

4.2 架設内ケーブルに対する防錆対策

4.2.1 架設内ケーブル採用の経緯

全外ケーブル方式による概略検討結果と内外併用ケーブル方式による概略検討結果を表-4に示す。検討結果より全外ケーブルについては、架設ケーブルが全て突起定着となるため、内外ケーブル併用方式に比べコンクリート体積が多い。

従って、内外ケーブル併用方式の方が、全外ケーブル方式よりも安価となることから、内外ケーブル併用方式を採用することとした。

表-4 ケーブル方式の違いによる概算数量比較表

項目		単位	全外	内外	数量差
			①	②	②-①
コンクリート	張出架設部	m ³	1354.4	1189.3	-165.1
	支保工架設部	m ³	661.5	641.5	-20.0
PC 鋼材引張	19S15.2	kgf	75714	45974	-29740.0
	12S15.2	kgf	0	19622	19622.0

4.2.2 架設内ケーブルの発錆の可能性とその対策

架設内ケーブルのグラウトは、日平均気温が 5℃を下回るとグラウトの施工が不可能となり、日平均気温が 5℃を上回る時期までグラウト施工を待つ事となる。その間の約 4 ヶ月間について、緊張された架設内ケーブルがシース内で発錆し、その品質を損ねる可能性があった。そこで表-5に示す防錆対策を考え、比較検討した。

表-5 架設内ケーブルに対する防錆対策

対策	案1	案2	案3
	一次防せいPC鋼材の使用	乾燥空気の循環	エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の使用
利点	PC 鋼材工場出荷時に一次防せい材を塗布するため、施工が容易である。	PC 鋼材に細工を施す必要がないため、PC 鋼材が裸線の状態であり、グラウトとの付着性について、既往の実験及び施工の結果より、問題がない。	非常に厳しい腐食性環境に対して施工実績が多く、高い耐食性を有する。
問題	一次防せい鋼材は PC 鋼材挿入後 1 ヶ月程度、錆の発生を抑えることを目的に PC 鋼材表面に防錆剤を塗布したものである。本橋においては、4ヶ月間グラウト注入出来ないことから、防錆効果に問題がある。	海外の基準によれば、湿度40%未満の高乾燥状態とした場合においても、PC 鋼材挿入からグラウトを行う迄の期間は40日とされており、PC 鋼材が緊張された状態においては、緊張後グラウトを行う迄の期間は約2週間とされている。	エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材表面にケイ砂を埋め込んだタイプのケーブルを使用するが、弾性係数の比較的小さいエポキシ樹脂の被膜が中間に存在するため、セメントグラウトとの付着に対して問題がある。
採否	△	×	○

各種防錆対策の比較・検討の結果、グラウト施工不可能期間に使用する PC 鋼材を、エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とすることが、最も防錆効果があると考えた。

4.2.3 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材に関する性能確認試験

表-5に示した通り、エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材は、非常に厳しい腐食性環境に対しても、発錆に対して非常に高い耐久性をもっている。しかし、通常のエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の表面は非常に滑らかで、弾性係数の比較的小さいエポキシ樹脂の被膜が中間に存在するため、PC グラウトとの付着について問題があった。そこで本橋の架設内ケーブルには、エポキシ樹脂の表面にケイ砂を埋め込んだタイプの PC 鋼材、すなわち砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を使用することとした。しかし、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材について、①「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法 (JSCE-E 503-1999)」に準拠した砂付きエポキシ樹

脂塗装 PC 鋼材とコンクリートならびに定着具との性能確認試験を行った実績がなかったこと、②「構造物施工管理要領(平成 16 年 4 月・日本道路公団)」に示す腐食抵抗性試験ならびに③付着性能試験について、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の実験実績がなかったことから、その各種性能を確認する事を目的として試験を行った。

① 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とコンクリートならびに定着具との性能確認試験

JSCE-E 503-1999 に準拠し、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とコンクリートならびに定着具との性能確認試験を行った。供試体図を図-7に、载荷試験方法図を図-8に示す。

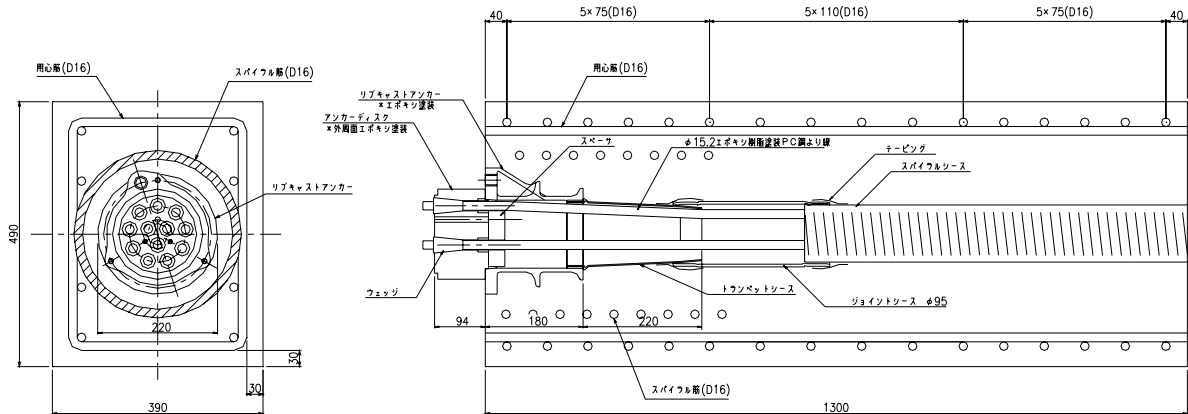


図-7 供試体図

定着具とコンクリートを組み合わせた時の性能を確認する試験は、所定の緊張力下でコンクリートに過度なひび割れが発生しないことを確認するものである。

また、定着具と PC 鋼材を組み合わせた時の性能を確認する試験は、定着具に砂付きエポキシ塗装 PC 鋼

より線を定着した場合の定着効率(载荷最大荷重の緊張材の規格引張荷重に対する割合)を確認するものである。定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験の判定は、許容引張荷重(=規格降伏点荷重の 90%)载荷時に、コンクリート試験体のひび割れ幅が 0.1mm 以下であること、緊張材の規格引張荷重(Pu)载荷時、コンクリート供試体が破壊しないこととし、定着具と PC 鋼材を組み合わせた時の性能試験の判定は、定着具の定着効率が緊張材の規格引張荷重の 95%以上であることとした。表-6・表-7・写真-3・写真-4にその試験結果および状況写真を示す。

試験結果は、いずれも判定に対し合格であった。

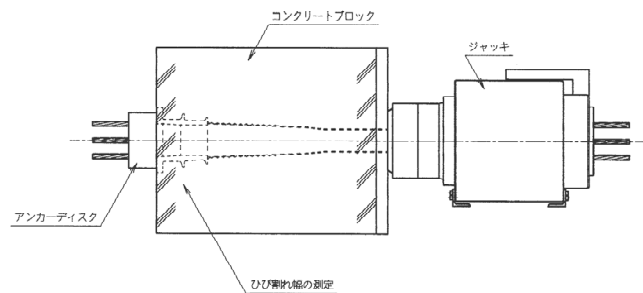


図-8 载荷試験方法図

表-6 定着具をコンクリートと組み合わせた性能試験

载荷段階	緊張力(kN)	ひび割れ幅(mm)		
		上面	右側面	左側面
0.1Pu	312.2	—	—	—
0.5Pu	1566.0	—	0.025	0.050
0.7Pu	2192.4	0.025 以下	0.050	0.050
0.9Py	2397.6	0.025	0.100	0.100

表-7 定着具と PC 鋼材を組み合わせた性能試験

载荷段階	载荷荷重 (kN)	定着効率(%)
0.10 Pu	313.2	10.0
0.50 Pu	1566.0	50.0
0.70 Pu	2192.4	70.0
0.90 Py	2397.6	76.6
1.00 Py	2664.0	85.1
0.95 Pu	2975.4	95.0
Max	3012.2	96.2

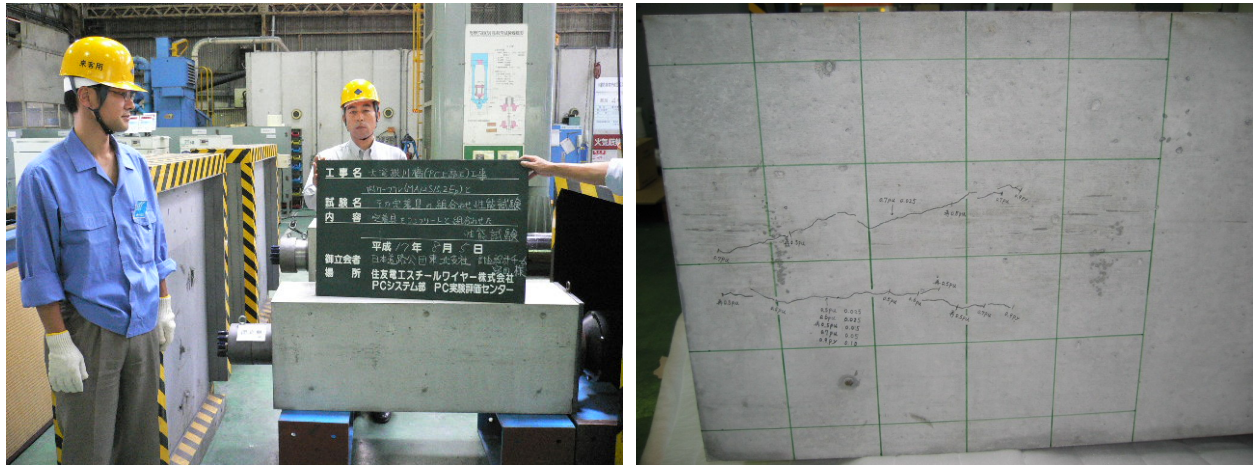


写真-3 定着具とコンクリートを組み合わせた性能試験状況(0.9Py時)



写真-4 定着具とPC鋼材を組み合わせた性能試験状況(Max時)

② 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の腐食抵抗性試験

「構造物施工管理要領(平成16年4月・日本道路公団)」に準拠し、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の塗膜が、ポリエチレンシース内で擦れながら挿入される際に損傷し、その耐久性を損なわないことを確認する腐食抵抗性試験を行った。試験概要図を図-9に示す。

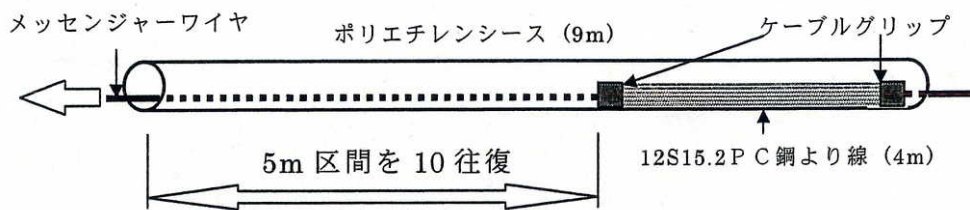


図-9 試験概要図

試験には内径φ80mm、長さ9mのポリエチレンシースを用い、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を9mに切断したものを12本束ね、両端をケーブルグリップで固定し使用した。砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材にまんべんなく水をかけた後、ポリエチレンシースに挿入しメッセンジャーワイヤーなどを用いてシース内を10往復させた。PC 鋼より線の中央部から、50cm程度の砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材12本をサンプルとして切り出し、温度40℃、湿度80%の恒温恒湿装置に入れて約4ヶ月放置し、腐食の状況を確認した。判定基準は、恒温恒湿装置におよそ4ヶ月(16週448日)放置された試験サンプルが有害な錆の発生を起していないこととした。写真-5～写真-8に試験結果写真を示す。試験結果は、4ヶ月恒温恒湿装置に放置したPC 鋼材は有害な錆を発生しておらず、判定に対し合格であった。



写真-5 供試体



写真-6 恒温恒湿装置放置前供試体



写真-7 恒温恒湿装置

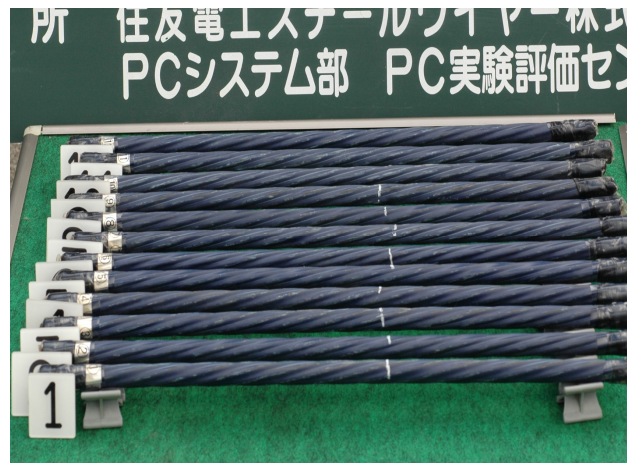


写真-8 4ヶ月放置後供試体

③ 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の付着性能試験

「構造物施工管理要領(平成16年4月・日本道路公団)」に準拠し、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材とグラウトおよびコンクリートとの付着性能を確認する付着性能試験を行った。供試体図を図-10に、載荷試験概略図を図-11に示す。

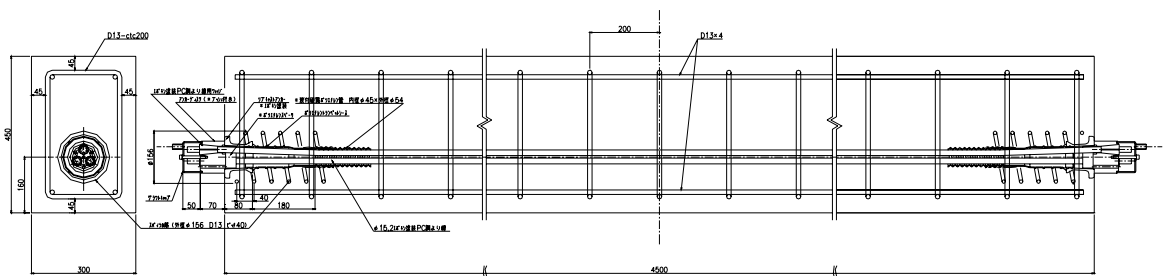


図-10 供試体図

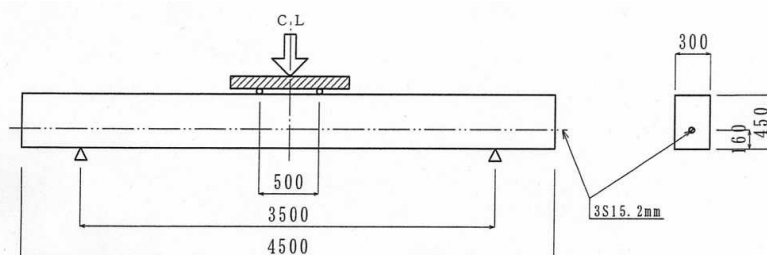


図-11 載荷試験概略図

試験体は、PC 鋼より線に普通 PC 鋼より線を使用したものと、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を使用したものとの 2 体を作成した。PC 鋼より線は 3S15.2、PE シースは内径 45mm のものを使用した。判定基準は、曲げ破壊荷重の実測値が、道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編(平成 14 年 3 月・(社)日本道路協会)により算出される設計耐力値を上回ること、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を使用した試験体のひび割れ分散性が、通常の PC 鋼材を使用した供試体と比較し(比較の指標は、ひび割れ本数が 1 割以上少なくないこと、ひび割れ間隔の総和が 1 割以上大きくないこと目安とする)、大きく変わらないこととした。写真-9～写真-11 に供試体の載荷前状況写真および載荷完了後写真を示す。



写真-9 供試体載荷状況



写真-10 供試体載荷完了 (通常)



写真-11 供試体載荷完了 (エポキシ)

試験結果として、図-12 にひび割れ発生前の荷重 100kN 時の支間中央のひずみ分布図を示す。

支間中央断面ひずみ分布(100kN時)

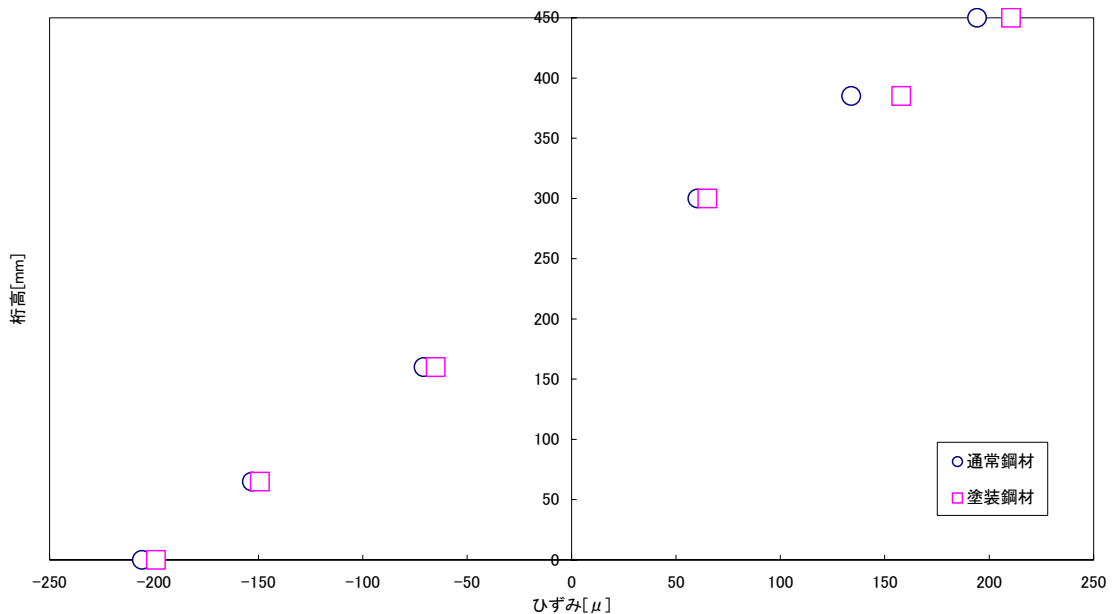


図-12 支間中央断面ひずみ分布図

通常鋼材を用いた供試体も砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体も、ほぼ同様のひずみ分布となった。従って、ひび割れ発生前の弾性体としての挙動は、ほぼ同等であると考えられる。また、図-13 に荷重-たわみ曲線図を示す。

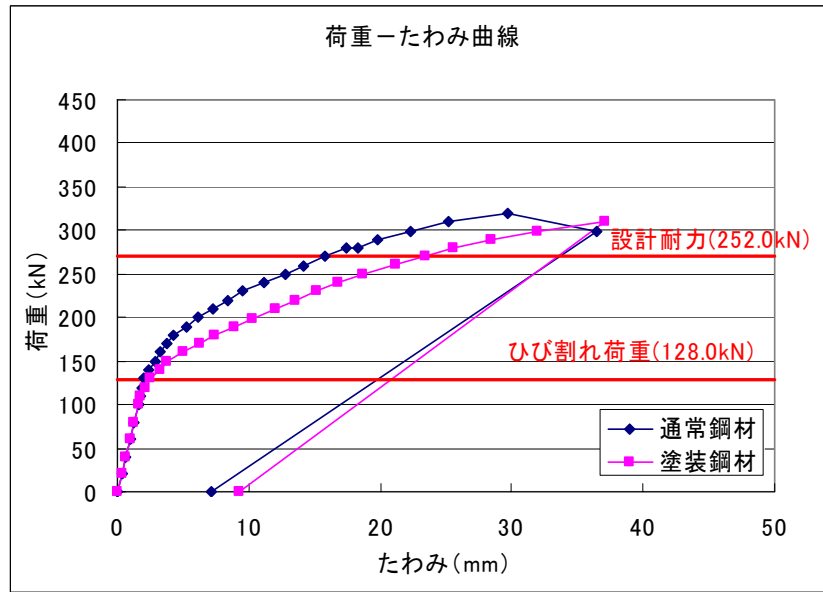


図-13 供試体の荷重-たわみ曲線図

破壊形態は、両供試体とも供試体上縁の曲げ圧縮破壊であった。破壊荷重は通常鋼材を用いた供試体が 327 kN、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体が 312.7 kN とほぼ同等で、曲げ破壊荷重の実測値が、コンクリートの圧縮強度は実測値、鋼材については規格値を用いて、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編(平成 14 年 3 月・(社)日本道路協会)の式により算出された設計耐力値 (252.0kN) を上回った。

また、図-14 にひび割れ図、写真-12 及び写真-13 にひび割れ状況写真を示す。

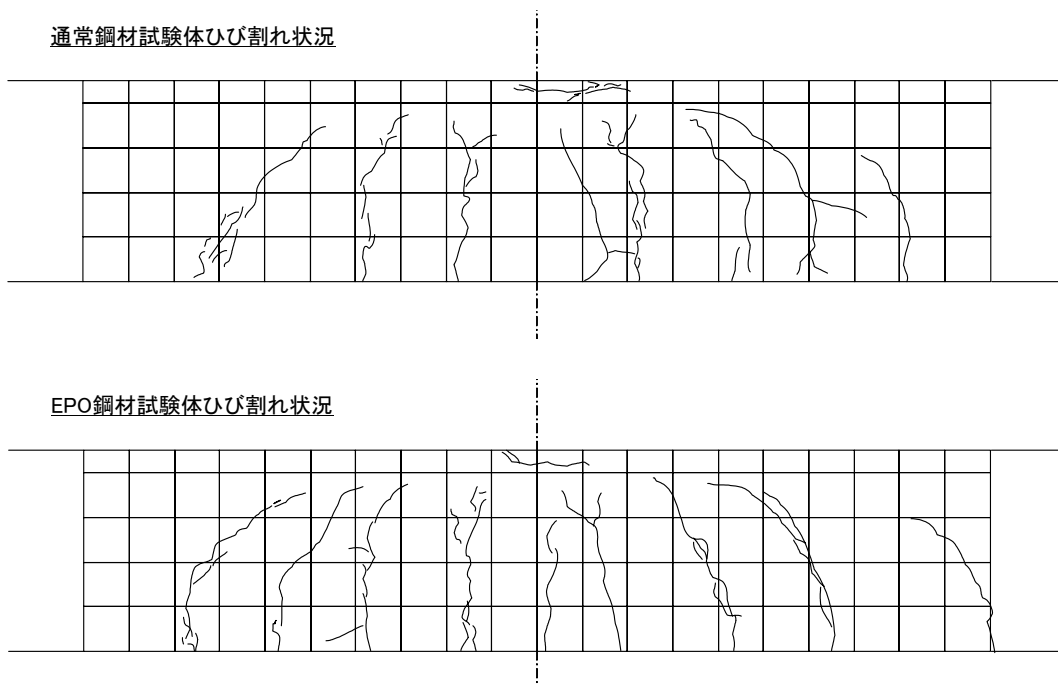


図-14 ひび割れ図

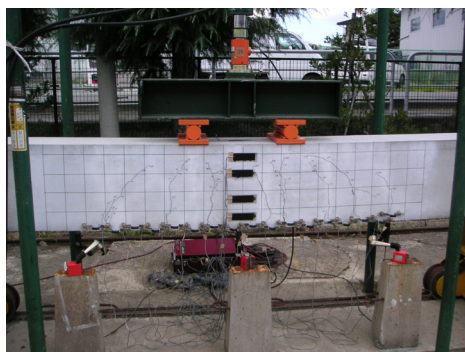


写真-12 ひび割れ状況 (通常)



写真-13 ひび割れ状況 (エポキシ)

ひび割れ荷重は通常鋼材を用いた供試体が 137kN, 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体が 110kN であった。ひび割れ発生予想荷重 128kN に比べ、塗装鋼材を用いた供試体が 18kN 程度下回ったが、これは供試体が短く、くさびのセット量のバラツキの影響によりプレストレス量がばらついたためと考えられる。しかしひび割れ本数は、通常鋼材を用いた供試体が 8 本, 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体が 9 本と、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体の方が 1 本多く、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を使用した試験体のひび割れ分散性が、通常の PC 鋼より線を使用した試験体と比較して良いことを示した。またひび割れ間隔の総和の平均値は、通常鋼材を用いた供試体が 1517.5mm, 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体が 1794.5mm であり、明らかに砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を用いた供試体のひび割れの方が、分散して発生していることがわかる。これは、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の表面にケイ砂を散布して付着性状を改善していることにより、通常の鋼材よりコンクリートとよく付着しているためと考えられる。

4.2.4 架設内ケーブルの選定に関する結論

各種試験の結果を以下にまとめる

① 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の性能確認試験

定着具とコンクリートを組み合わせた性能確認試験では、許容引張荷重(=規格降伏点荷重の 90%)載荷時に、コンクリート試験体に発生した最大ひび割れ幅は 0.1mm であった。また緊張材の規格引張荷重 (P_u) 載荷時、コンクリート供試体は破壊しない事を確認した。

また、定着具と PC 鋼材を組み合わせた性能確認試験では、定着具の定着効率が、緊張材の規格引張荷重の 95%以上になった事を確認した。

② 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の腐食抵抗性試験

恒温恒湿装置におよそ 4 ヶ月(16 週 448 日)放置された試験サンプルが、有害な錆の発生(ウェスで軽く拭き取っても取れない錆)を起こしていないことを確認した。

③ 砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の付着性能試験

道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編(平成 14 年 3 月・(社)日本道路協会)により算出される設計耐力値は 252.0kN であるのに対し、エポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の耐力の実測値は 312.7kN となり、設計耐力値を上回った。また、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材を使用した試験体のひび割れ分散性については、通常の PC 鋼材を使用した供試体でのひび割れ発生数は 8 本であるのに対し、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材は 9 本であった。

各種試験の結果は、「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法 (JSCE-E 503-1999)」並びに「構造物施工管理要領(平成 16 年 4 月・日本道路公団)」の各基準を満たしたため、架設内ケーブルに使用しても問題がないと判断した。

4.3 架設内ケーブルに対する PC グラウトの計画

4.3.1 新しい PC グラウトの管理手法

本橋における PC グラウトは、「構造物施工管理要領(平成 16 年 4 月・日本道路公団)」に示す手法を用いて管理することとした。新しい PC グラウトの品質管理フローを、図-15 に示す。

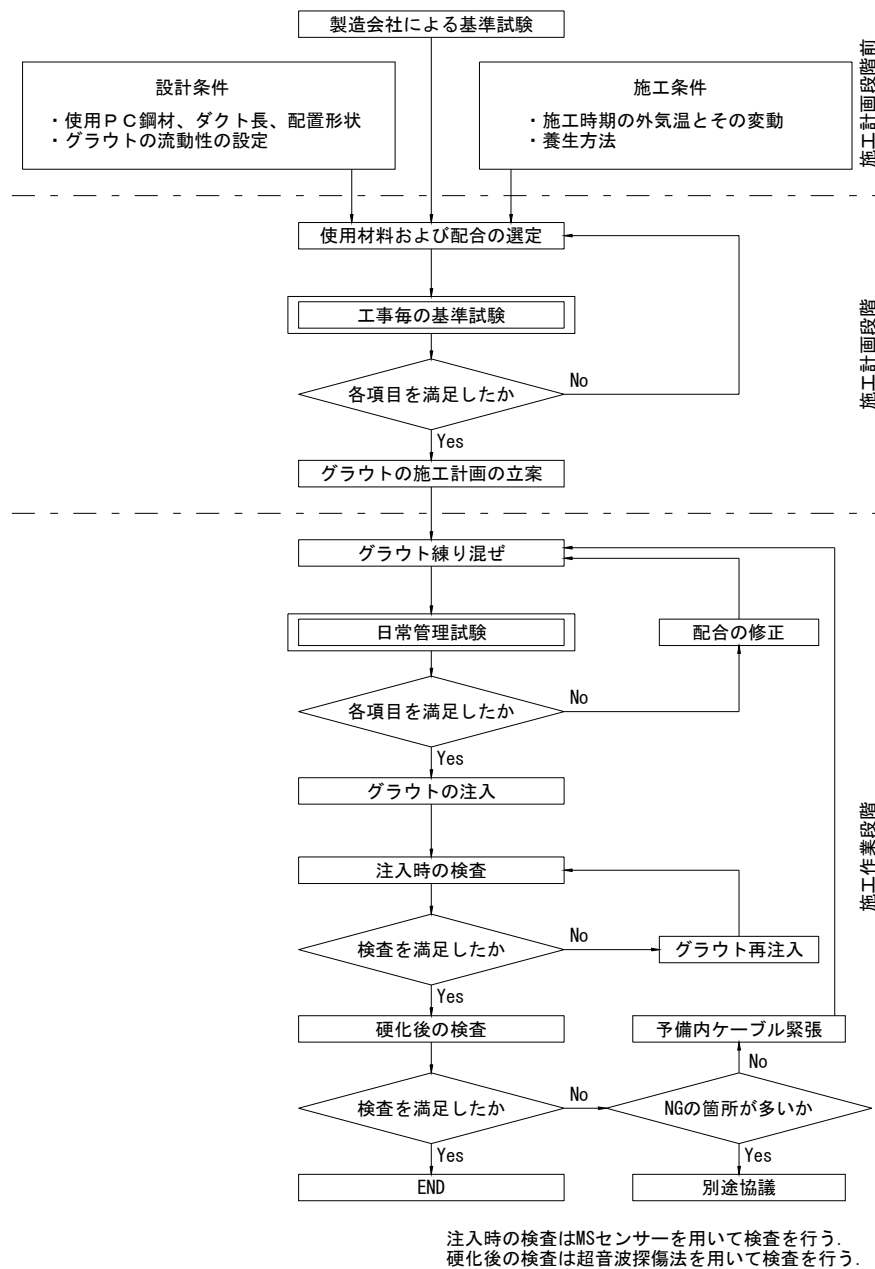


図-15 品質管理フロー

4.3.2 実施詳細設計段階での配慮事項

実施詳細設計段階で、PC グラウトに対して配慮した事項は、特にケーブル配置およびシースである。以下に、実施詳細設計段階で配慮すべき事項を述べる。

- ① ケーブルが 2 段以上配置されていると、硬化後における充てん確認検査において、現状の非破壊検査手法では PC グラウトの充てん確認が困難である。またウェブ上の床版部には、移動作業車固定用のアンカーが配置されると共に、移動作業車が設置される。従ってケーブルは、ウェブ上を除く床版内に 1 段に配置することとした。ケーブル配置は間隔 125mm 以上、深さ 200mm 以内としている。これは PC グラウト施工後にコンクリート表面から行う非破壊検査の精度が、ケーブルの配置間隔及び深さに影響を受けるためである。

- ② 注入実験結果より、ケーブルの鉛直方向の配置角度は 10° 以下の場合において、PC グラウトの粘性に関わらず充填されることが確認されているので、ケーブルの鉛直方向の最大配置角度を 10° 以下に設定することとした。ケーブルの鉛直方向の配置角度には、縦断線形の影響と定着角度を考慮する必要がある。
- ③ シースは、水密性・耐腐食性等の耐久性と共に、施工時荷重に対する耐荷性・可とう性・摩擦抵抗性・PC グラウト充填性等の特性や品質が確認された非金属性のものを使用するものとした。非金属製シースの材料特性については、現在のところ高密度ポリエチレンに対してのみ確認されており、その他の材料を使用する場合は、「構造物施工管理要領(平成 16 年 4 月・日本道路公団)」に示す所要の特性・品質を有することを確認しなければならない。また PC グラウト充てん検査用のセンサーを取り付けるジョイントシースも、同様に非金属製を使用するものとした。

4.3.3 セメント種類および混和剤種類の決定

セメント種類の選定に際し、JIS R 5120 に適合する普通ポルトランドセメントを用いる場合は、平成 15 年 11 月の JIS 改正により塩化物イオン含有量の規定値量が 0.02% 以下から 0.035% 以下に改訂されているが、現行諸基準グラウトの総量規制値を $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下にする必要があった。なお、現在(社)プレストレスト技術協会で腐食試験を行い、改正後の JIS 対応セメントでも概ね問題ないという見解を得ている。本橋梁では試験練りの結果、普通ポルトランドセメントを使用しても $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下になることを確認しているため、セメントとして普通ポルトランドセメントを使用し、管理規格値も $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

また混和剤の選定に当たり、本橋では図-16 に示すとおり、P1 柱頭部付近に下サグの最下点がある。この最下点である P1 柱頭部付近よりグラウトの注入を行うため、ほとんどが登り勾配の PC グラウト注入になるが、定着部の 4.000m 程度手前の位置より、角度にして 1° 程度であるが曲下がりになっており、下りの勾配となるため先流れによる空隙が懸念される。そのため本橋では、先流れによる空隙を防止するため高粘性型の混和剤を使用することとした。

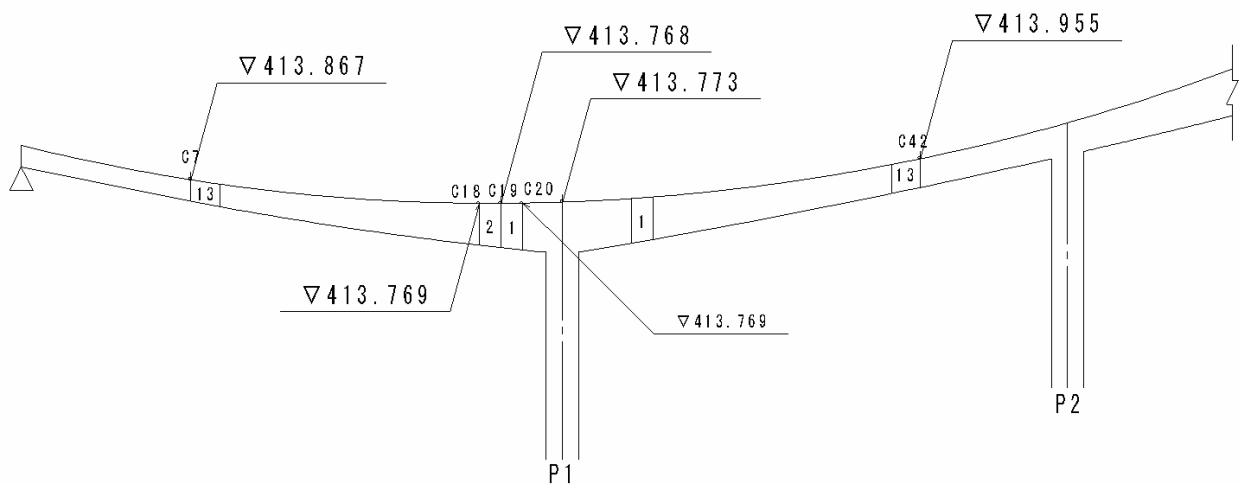


図-16 張出架設による上げ越しを考慮した主桁天端の高さ図

4.3.4 注入圧力の算定

本橋における PC グラウト注入圧力の計算結果を、表-8に示す。

PC グラウト注入圧力算定時の仮定条件は、以下の通りである。

- ① ダクト径は 80mm とする。
- ② ダクト長は 60.0m, 注入流量は毎分 10 リットルと仮定し、各場所におけるグラウトの注入圧力がそれぞれの許容圧力以下となるようにトライアル計算する。

表-8 グラウト注入圧力の計算

ダクト・管路	内径	長さ	単位長	注入圧力 (Mpa)		備考
	(mm)	(m)	当り圧力	全長	累計	
排出ホース	19.0	1.0	0.059	0.059	0.059	
ダクト	80.0	60.0	0.008	0.480	0.539	
注入グラウトホース	19.0	1.0	0.059	0.059	0.598	<Pmax= 0.6 Mpa
ポンプホース	25.4	30.0	0.022	0.660	1.258	
Σ P				1.258		<Pmax= 2.0 Mpa

計算上は、60.0m までのケーブルにおいてはステップバイステップ方式による注入を必要としないが、ステップバイステップ方式の採用の有無に関わらず、20.0m 以下に 1 箇所、中間注入口を設けステップバイステップ方式の注入作業にも対応できるように計画した。

4.3.5 PC グラウト注入に関する計画

注入圧力計算結果より、60.0m までのケーブルについては図-17, 60.0m を超えるケーブルについては図-18に示すとおり、PC グラウトの注入方法を計画した。

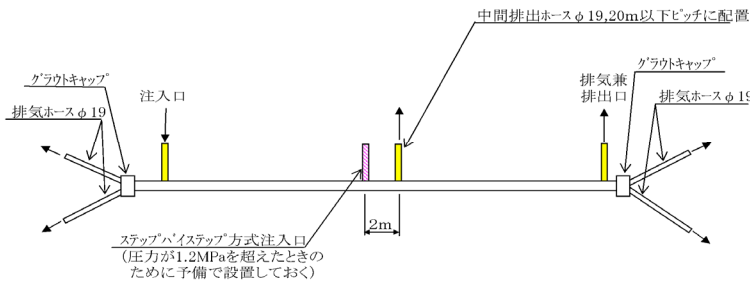


図-17 ステップバイステップ方式を必要としない PC グラウト注入図

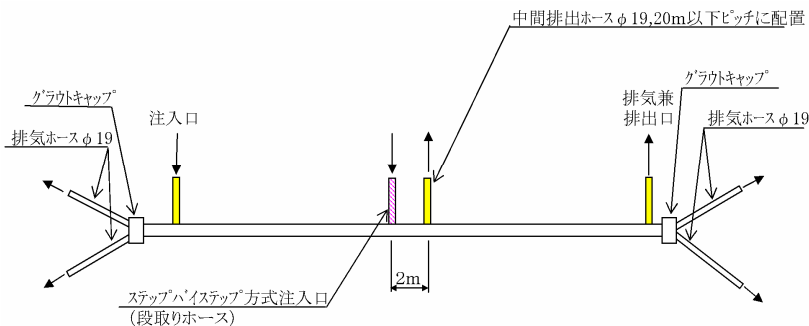
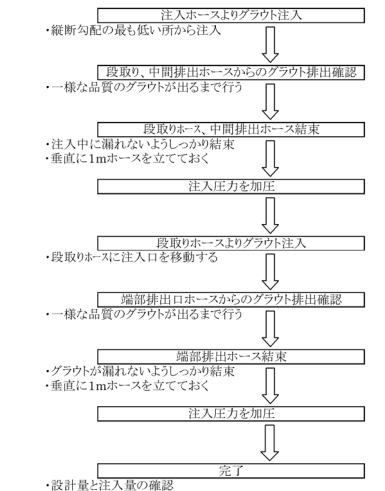
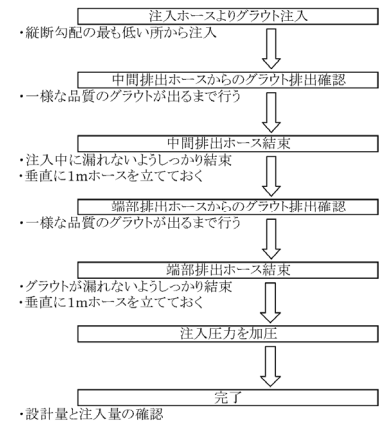


図-18 ステップバイステップ方式を必要とする PC グラウト注入図



4.3.6 高張力状態にある砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材防錆効果の確認

砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の無緊張力状態における耐食性については、4.2 において確認した。しかし PC 鋼材が高張力状態である場合、PC 鋼材が発錆しやすい事が懸念された。そこで、PC グラウト施工が不可能と考えられる時期において、本橋に使用した砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材に緊張力を与えた簡易供試体を作成し、それをグラウト施工不可能期間橋面に暴露して、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の発錆の有無及びその状況を確認する事とした。試験供試体図を図-19 に、試験供試体写真を写真-14 に示す。

また試験は比較のため、一次防せい PC 鋼材および通常 PC 鋼材も同時に行うこととした。

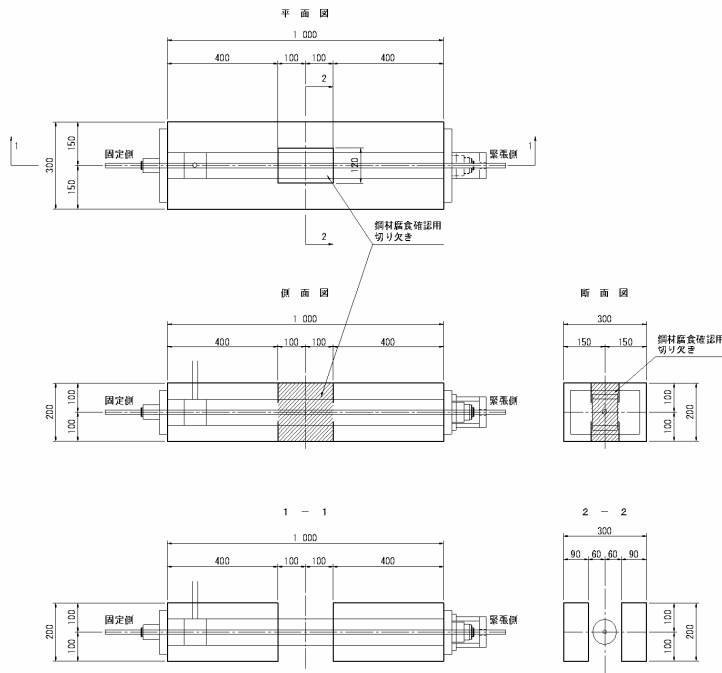


図-19 橋面暴露試験供試体図

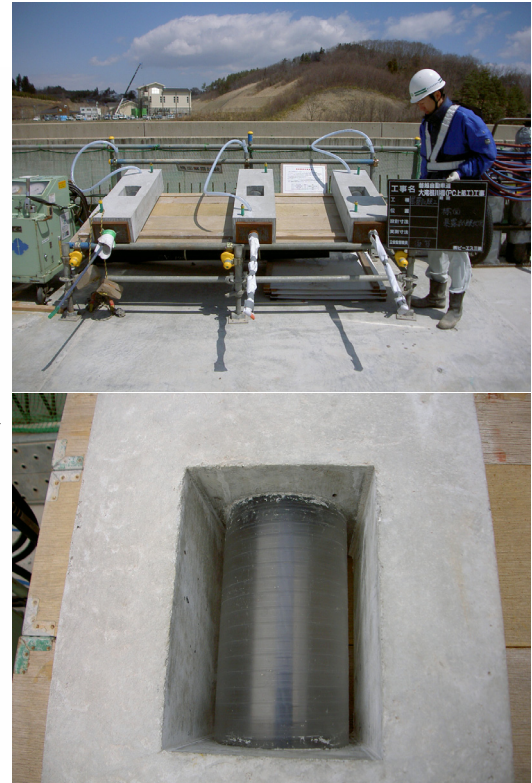


写真-14 橋面暴露試験供試体

上記確認試験を行った結果、以下の事が確認できた。

- ① PC 鋼材の発錆状況について、写真-15～写真-17 に示すとおりシース内の鋼材については 3 者とも発錆が見られなかった。但し、一次防せい PC 鋼材および通常 PC 鋼材については、両者とも PC 鋼材に塗布された防錆材ならびに製造段階の油分特有のつやがみられなかった。これは、暴露試験中に防錆材ならびに製造段階の油分が揮発したためと考えられる。本橋の試験においては、外部からの水分・湿度の進入がなかったこと等から発錆しなかったものの、別途悪い環境条件下においては、発錆する可能性があることを示唆していると考えられる。



写真-15 試験結果(エポキシ)



写真-16 試験結果(一次防錆)

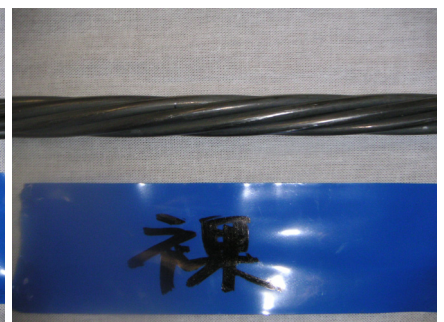


写真-17 試験結果(通常)

②定着具近傍における PC 鋼材および定着具の発錆状況について、写真-18～写真-20に示すとおり定着具については、3者とも、ウェスで拭き取っても取ることの出来ない錆が発生していた。これは、スリーブに防錆処置を行っていなかったため、約3ヶ月間外気へ暴露したことによる発錆と考えられるが、実施工上、内ケーブル定着具は、張出架設サイクル日数程度の暴露状態であるため問題が無いと考えられる。また外気暴露部 PC 鋼材について、砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材については全く発錆が見られなかったが、一次防せい PC 鋼材ならびに通常 PC 鋼材については発錆が見られた。砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材の外気暴露部は、エポキシ樹脂の皮膜が PC 鋼材部分を外気と接触させないため、本試験の暴露期間では発錆しなかったものと考えられる。一方、一次防せい PC 鋼材の外気暴露部については、防錆材の皮膜層が PC 鋼材部分を外気と接触させないため防錆効果がある。しかしながら、防錆材は水溶性であるため、雨水等によって防錆材が洗い流された後については、発錆しそれが進行したものとする。同様に通常 PC 鋼材も、製造段階の油分が皮膜層を作るため防錆効果があるが、この皮膜層が雨水等による洗い流しを受けた後は、発錆しそれが進行したものとする。腐食の程度は、一次防せい鋼材に比較して、普通 PC 鋼材の方が激しかった。



写真-18 試験結果(エポキシ)



写真-19 試験結果(一次防錆)



写真-20 試験結果(通常)

以上の結果より、次の事がわかった。

- ①砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材は、3ヶ月程度の暴露期間であれば、完全に PC 鋼材に対する発錆を抑制することができる。
- ②一次防せい PC 鋼材は、シース内に水分や湿度が供給されない環境を構築することで、約3ヶ月間 PC 鋼材に対する発錆を抑制することが可能である。
- ③普通 PC 鋼材についても同様に、シース内に水分や湿度が供給されない環境を構築することができれば、約3ヶ月間 PC 鋼材に対する発錆を抑制できるが、万一水分及び湿度がシース内に供給されてしまうと、錆の進行状況が一次防せい PC 鋼材よりも早い。

よって、本橋に使用した砂付きエポキシ樹脂塗装 PC 鋼材は、冬期期間にシース内で腐食していないと判断した。

4.3.7 PC グラウトの充てんの確認方法

注入時の PC グラウト充てんの確認は MS センサーを、PC グラウト硬化後の充てんの確認は超音波探傷試験を行うこととした。

- ①MS センサーおよびその確認状況を写真-21～写真-23に示す。結果は全て充てんが確認された。

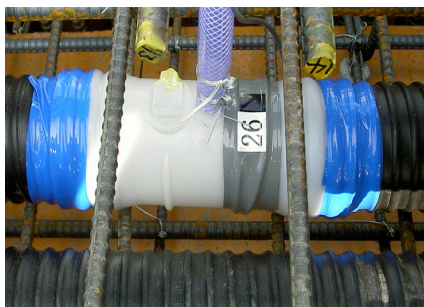


写真-21 MS センサー

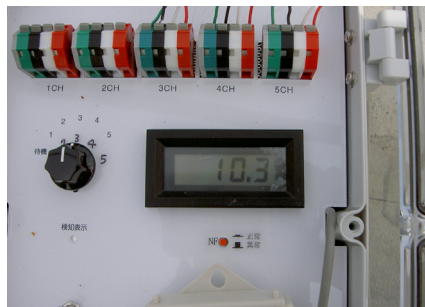


写真-22 注入前検測値

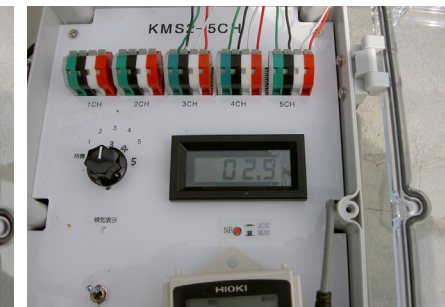


写真-23 注入後検測値

②超音波探傷試験の試験フローを図-20に、状況を写真-24～写真-26に、解析結果例を図-21～図-22示す。結果は検測位置全てで充てんが確認された。

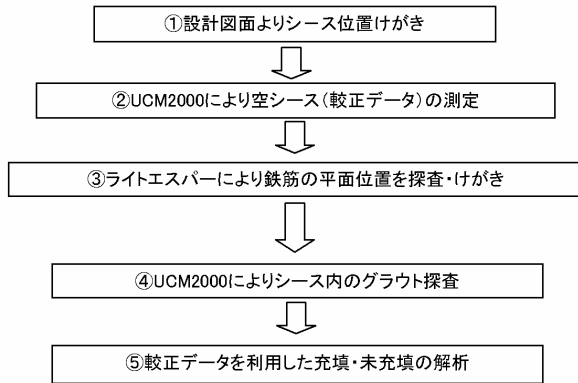


図-20 超音波探傷試験フロー

写真-24 計測機械
左：広帯域超音波装置
右：地中探査レーダー（鉄筋探査用）



写真-25 超音波探傷試験状況

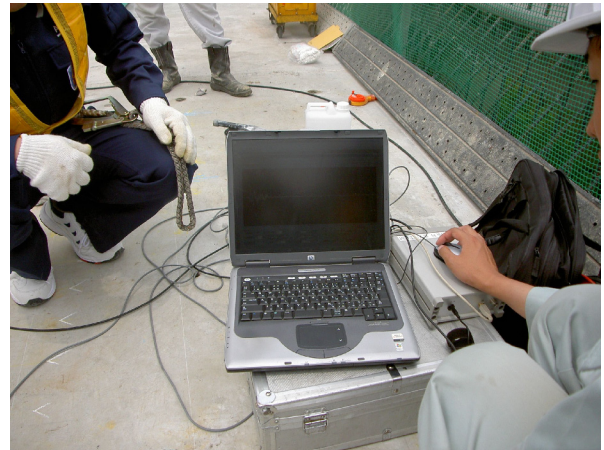


写真-26 超音波探傷試験状況

計測データ名：貯蓄測点2

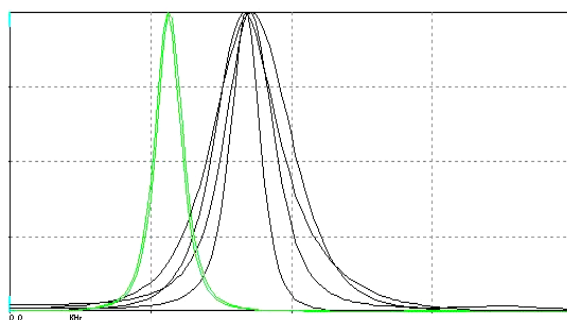


図-21 解析スペクトル (例)



図-22 解析結果画像 (例)

※本橋における解析スペクトル並びに解析結果画像は、現在解析中で、本報告の期限には間に合わないので解析結果例を掲載することとする。

4.3.8 PC グラウトの計画に対する結論

所々の計画および施工・検査を行った結果、PC グラウトは適切に充てんされ、その充てん状況を定量的に評価できた。

5. まとめ

本橋は、平成18年5月現在、中央閉合・架設内ケーブルPCグラウトを完了し、A1側のアンバランス分の張出施工に入っているところである。現在の状況を写真-27および写真-28に示す。



写真-27 現状(A2側より)



写真-28 現状(下流側より)

本論を、以下の通りまとめる。

- ① アンバランスな支間を有する3径間連続PCラーメン箱桁橋は、施工ステップや桁高の変更により、カウンターウェイトを移動作業車以外に設置することなく設計および施工することができた。このことは、施工工程が守られ、不具合が確認されていないこと、1期線のドライバーに対して威圧感を与える施工になっていないことから、現段階では適当な設計・施工であったと評価している。
- ② 寒冷地におけるPCグラウト施工が不可能な時期が工程内に存在する場合、架設内ケーブルの防錆対策として、本橋では砂付きエポキシ樹脂塗装PC鋼材を使用した。砂付きエポキシ樹脂塗装PC鋼材に関しては、PC鋼材・定着具とコンクリートの組み合わせ性能確認試験、腐食抵抗性試験、付着性能試験を実施し、各々基準を満足した。また、砂付きエポキシ樹脂塗装PC鋼材を高張力状態で約4ヶ月間放置しても、錆が発生していないことを確認した。よって、架設内ケーブルに砂付きエポキシ樹脂塗装PC鋼材を使用することは、PCグラウト施工が不可能な時期における防錆効果について、適当であったと評価できる。しかしながら砂付きエポキシ樹脂塗装PC鋼材と同時に橋面に暴露した一次防せいPC鋼材も、シーズ内に水分や湿気が発生していない条件のもとで使用が可能である事も、同時に確認できた。従って今後、同地区で本橋の様な施工を行う際には、架設内ケーブルに一次防せいPC鋼材を使用することも視野にいれて設計・施工するべきと考える。
- ③ 実施詳細設計段階からPCグラウトの管理を視野に入れて設計を行うことで、適切にPCグラウトを注入することができた。また、PCグラウトの充てん検査を行うことで、PCグラウトが確実に充てんされていることを定量的に評価できた。

今後、本橋の様な支間構成の橋梁が発注された際に、本報告が少しでも参考となれば幸いである。

謝辞

本橋の実施詳細設計ならびに施工において、東日本高速道路株式会社(旧日本道路公団)東北支社建設事業部(旧構造技術課)および郡山工事事務所の方々の多大なご支援をいただいている。また、各種PC鋼材試験に関しては、住友電工スチールワイヤー株式会社のご支援を頂いた。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (I~V)，平成14年3月
- 2) 日本道路公団：設計要領第二集橋梁建設編，平成10年7月
- 3) 日本道路公団：構造物施工管理要領，平成16年4月
- 4) 土木学会：PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(JSCE E-503)，1999