

# 耐候性鋼材を用いた波形鋼板ウェブ橋の設計・施工

## －刈屋橋－

|      |        |      |
|------|--------|------|
| 大阪支店 | PC 工事部 | 露原智  |
| 大阪支店 | PC 工事部 | 田口靖雄 |
| 大阪支店 | 技術部    | 小林仁  |
| 大阪支店 | 技術部    | 大橋康雄 |

**概要：**刈屋橋は、高知自動車道四車線化に伴う橋梁工事であり、新宮 IC（愛媛県）と大豊 IC（高知県）の中間付近に位置する橋梁である。本橋は刈屋橋北（PC5 径間連続波形鋼板ウェブ箱桁橋）と刈屋橋南（PRC8 径間連続 2 主版桁橋）の 2 連からなる橋梁である。刈屋橋北は促進処理を施した耐候性鋼材を使用し、鋼板同士の接合に高力ボルト接合を採用している。本橋の設計・施工にあたり、箱桁柱頭部のひび割れが懸念されたため温度応力解析を行い検討した。また、刈屋橋北は内外併用ケーブルとしたため、グラウトに関する実験を行った。

**Key Words：**耐候性鋼材，高力ボルト接合，温度応力解析

### 1. はじめに

刈屋橋北（波形鋼板ウェブ箱桁橋）の構造上の特徴としては以下の点が挙げられる。

- ①維持管理コストの低減，隣接供用線（耐候性鋼材を使用した鋼板桁）との調和を目的とし，波形鋼板に促進処理を施した耐候性鋼材を使用。
  - ②波形鋼板同士の接合に経済性，施工性を考慮し高力ボルト接合を採用。
- また，架設ケーブルに内ケーブルを採用したためグラウトに関する試験を行った。

本稿ではこれらの報告を行うとともに，箱桁柱頭部の温度応力解析を行いひび割れ対策を検討したため併せて報告する。

### 2. 工事概要

本橋の工事概要を以下に示す。また，橋梁一般図を図－1 に示す。

工 事 名：高知自動車道（四車線化）刈屋橋（PC 上部工）工事  
発 注 者：西日本高速道路株式会社 四国支社 高知工事事務所  
工事場所：高知県長岡郡大豊町大字立川上名～下名  
施 工：(株)ピーエス三菱・(株)SNC 特定建設工事共同企業体  
工 期：平成 16 年 10 月 22 日～平成 19 年 4 月 9 日



露原智



田口靖雄



小林仁



大橋康雄

構造形式 : 刈屋橋北 PC5 径間連続波形鋼板ウェブ箱桁橋  
 刈屋橋南 PRC8 径間連続 2 主版桁橋

施工方法 : 刈屋橋北 張出し施工 刈屋橋南 固定式支保工施工

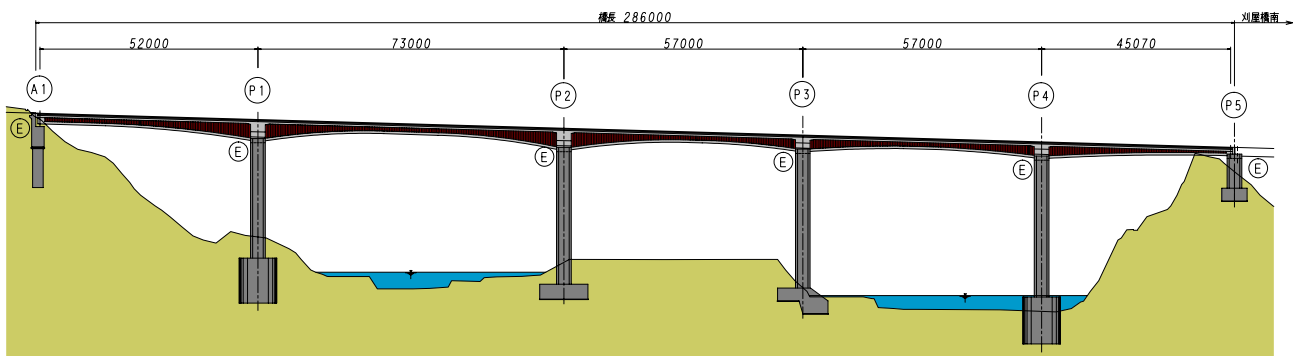
橋 長 : 517.080m (刈屋橋北 286.000m 刈屋橋南 231.080m)

支 間 長 : 刈屋橋北 52.005m + 73.008m + 2@57.006m + 45.075m (構造中心線上)  
 刈屋橋南 28.823m + 6@29.503m + 23.901m (構造中心線上)

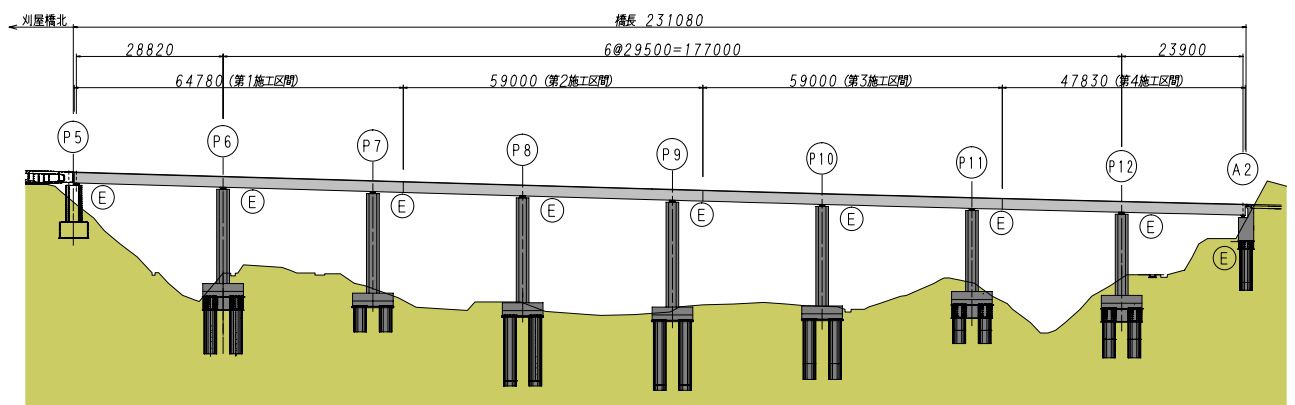
有効幅員 : 9.010m (非常駐車帯部 10.760m)

線 形 : 平面線形 R=1100m~A=500m  
 縦断勾配 i=2.800% (下り) ~VCL=400m~i=0.993% (下り)  
 横断勾配 i=4.000%~3.331%

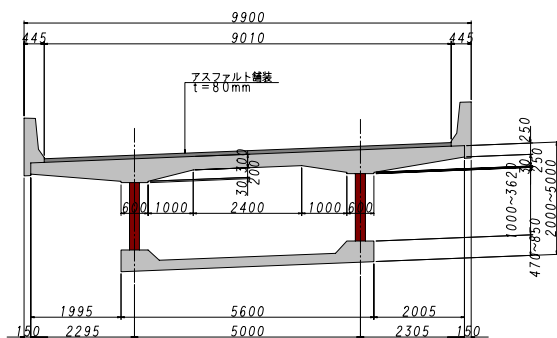
斜 角 : 90° 00' 00"



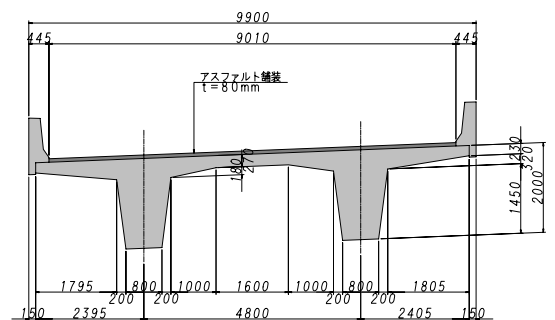
刈屋橋北



刈屋橋南



刈屋橋北



刈屋橋南

図-1 橋梁一般図

### 3. 構造上の特徴

#### 3.1 耐候性鋼材の使用

##### 3.1.1 耐候性鋼材とは

耐候性鋼材とは、普通鋼材に銅 (Cu)、クロム (Cr)、ニッケル (Ni)、モリブデン (Mo) を添加することにより、溶接性などの所要特性を損なうことなく耐候性を向上させたものであり、基本的には普通鋼材と同様の性質をもつ。そのため耐候性鋼材を大気中に暴露しておくと同様にさびが発生する。しかし、耐候性鋼材は乾湿を繰り返していくうちに鋼材表面に Cu、Cr、Ni などが濃縮された暗褐色の緻密なさび層が形成されていく。この緻密なさび層が一般的に安定化さび層と呼ばれるものである。この安定化さび層が鋼材表面からの水や酸素の透過を防ぎ、その後の鋼材の腐食作用を抑制する働きをもつものであり塗装を施さなくとも使用できる鋼材である。

耐候性鋼材は大気中に含まれる硫酸化合物、窒素化合物といった大気汚染物質や塩分の影響を受ける。とくに塩分の影響を受けやすく、年間平均の飛来塩分量として 0.05mdd (mgNaCl/day·dm<sup>2</sup>) 以上の地点に使用することは望ましくないとされている。

##### 3.1.2 架橋地点の環境

高知自動車道 (川之江～大豊間、1992 年供用) は路線として無塗装の耐候性鋼材が全面的に採用されている。供用開始前の飛来塩分調査結果では、表-1 に示すように基準値 (0.05mdd 以下) を満足していたが、その後の追跡調査では一部悪性さびの発生が報告されている<sup>2) 3)</sup>。

表-1 飛来塩分濃度

| 橋梁名         | 橋梁形式          | 経過年数 | NaCl (mdd) | 海岸までの距離 |
|-------------|---------------|------|------------|---------|
| 野竹橋         | 鋼 3,2 径間連続板桁  | 8 年  | 0.045      | 北 13km  |
| 刈屋橋(本橋の隣接橋) | 鋼 3, 3 径間連続板桁 | 8 年  | 0.029      | 北 20km  |
| 川口第一橋       | 鋼 5 径間連続板桁    | 9 年  | 0.014      | 南北 28km |

この悪性さびは、①漏水・排水の影響、②架橋地点の地形的要因、③並列橋梁からの冬期の凍結防止剤散布による影響等が原因と推察されている。

また、架橋地点は上記の影響以外は環境が非常にマイルドであり、腐食速度が遅いことも併せて報告されている。

##### 3.1.3 刈屋橋北への適用にあたって

刈屋橋北では、維持管理コストの低減、写真-1 に示す隣接供用線 (耐候性鋼材を使用した鋼板桁) との調和を目的とし、耐候性鋼材を使用した。

ただし、本橋での採用にあたっては、

- ・架橋地点の環境がマイルドで腐食速度が遅いため、安定化さび層が形成されにくい。
- ・隣接橋梁が本橋よりも低い位置にあるため、冬期に散布される凍結防止剤が車両の走行により巻き上げられ、局部的な悪性さびを発生させる危険性がある。

が懸念されたため、鋼板外面に促進処理を施した耐候性鋼材を採用した。



写真-1 隣接供用線

本橋梁で採用した促進処理剤の特徴は以下の通りである。

- ① 裸仕様では十数年かかると言われている保護性さびを、数年で直接生成する。
- ② 裸仕様耐候性鋼材の飛来塩分適用範囲外地域 (0.05mmd~0.40mmd) での適用が可能。
- ③ 初期の赤さび、流れさびを抑制できる。

その他の部位 (鋼板内面, ボルト接触面) の塗装仕様は構造物施工管理要領 (日本道路公団, 平成16年4月) に準拠した。本橋での波形鋼板の塗装仕様を図-2に示す。

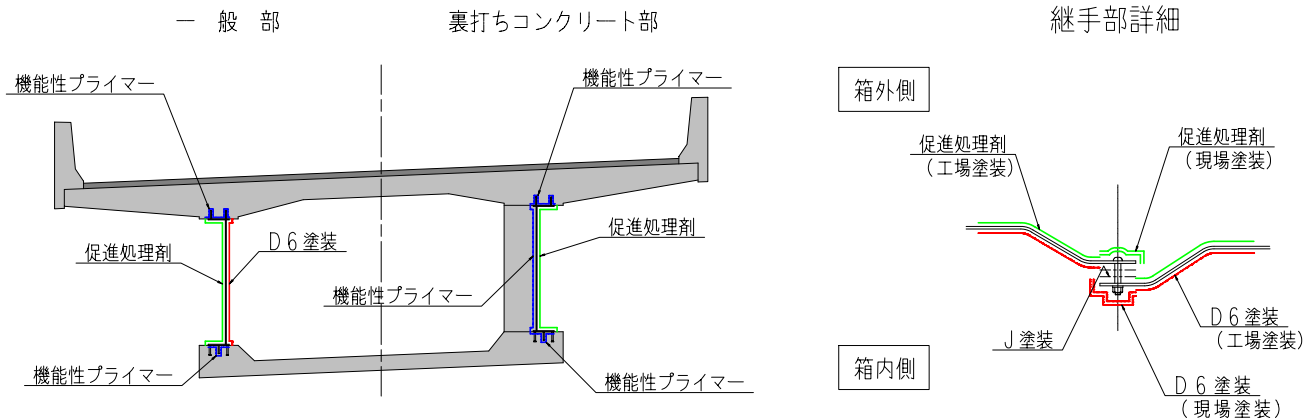


図-2 塗装塗り区分図

## 3.2 高力ボルト接合

### 3.2.1 高力ボルト接合採用について

近年、張出し施工される波形鋼板ウェブPC橋では、鋼板同士の継手に施工時の高さ調整が容易な重ねすみ肉溶接が多く用いられている。しかし、一面摩擦高力ボルト接合の方が経済的であり (本工事における試算では溶接継手の6割程度)、有資格者や熟練工を必要とせず、溶接検査も不要であり施工性に優れるため、本橋では高力ボルト接合を採用した。写真-2に高力ボルト接合状況を示す。

施工時の高さ調整については、張出し長が最大 35.200m と短く上げ越し量が少ないこと、M22のボルトに対してボルト孔径を 26.5mm とすることにより高さ調整代を大きくとることにより、問題なく施工できると判断した。

一面摩擦高力ボルト接合とした場合、波形鋼板の接合部において軸線のずれが生じるため、ボルトの張力変動が予想されるが、既往の研究<sup>4)</sup>によりその安全性は確認されており、本橋における採用は問題ないと判断した。



写真-2 高力ボルト接合状況

## 4. 柱頭部温度解析

### 4.1 解析条件

柱頭部は幅 (橋軸直角方向) 5.600m, 横桁厚 (橋軸方向) 3.500m, 高さ (最大) 5.000m のマスコンクリートとなり温度ひび割れの発生が予想されるため温度応力解析を行った。以下に解析条件を示すとともに、表-2に打設条件、図-3に解析モデルを示す。

対象は P2 横桁とした。比較的外気温が低い時期の施工となるため保温養生 (打設後3日間15℃保持)



を行った。また、ひび割れの発生を抑制するため、外ケーブルの偏向管を利用したエアークーリング（偏向管を通気可能とし、コンプレッサー等により定期的に排気を行うことにより、内部の温度上昇を抑制する）を実施した。

セメントの種類 : 早強ポルトランドセメント  
 単位セメント量 : 340kg/m<sup>2</sup>  
 比 熱 : 1.30kJ/kg°C  
 熱 伝 導 率 : 2.7W/m°C  
 線 膨 張 係 数 : 10μ/°C  
 ポアソン比 : 0.1667

表-2 打設条件

|                     | 打設日    | 外気温    |
|---------------------|--------|--------|
| 第1リフト<br>(人道孔上まで)   | 11月1日  | 13.0°C |
| 第2リフト<br>(上床版付け根まで) | 11月15日 | 11.0°C |
| 第3リフト<br>(上床版)      | 12月1日  | 8.0°C  |

注) 外気温は理科年表 平成15年(高知県高知市)による。

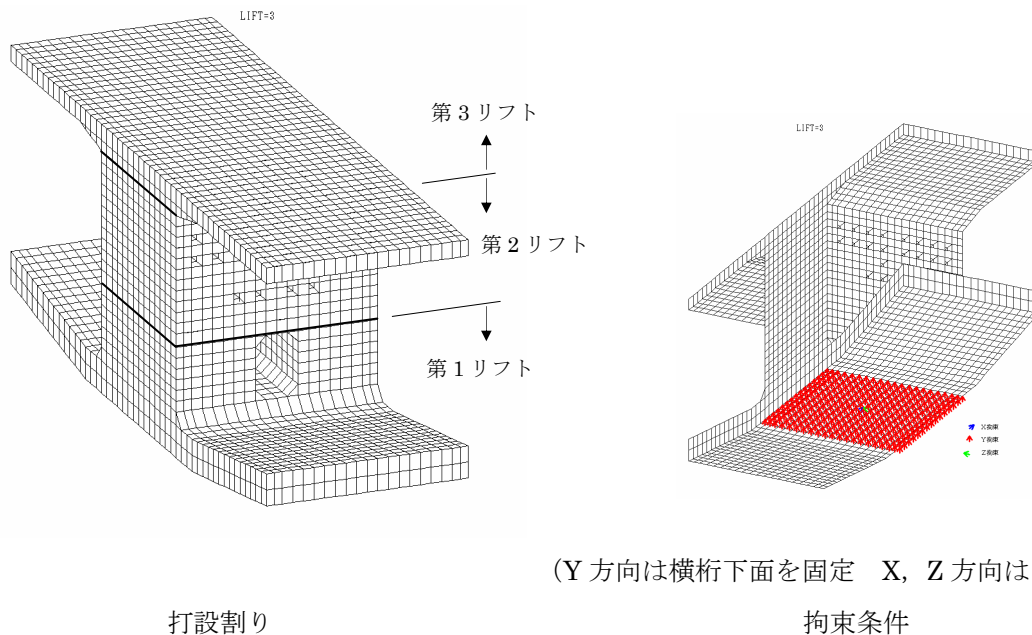


図-3 解析モデル

#### 4.1.2 解析結果

図-5にひび割れ指数等高図を示す。比較のため、無対策の場合、保温養生のみの場合も示す。ここで、ひび割れ指数とはコンクリートの引張強度と発生最大主応力度の比のことであり、ひび割れ発生確率を表す指標のことである。図-4に安全係数とひび割れ発生確率の関係を示す。ここで、安全係数とひび割れ指数は同義である。ひび割れ指数の数値が高いほどひび割れの発生確率が低くなり、一般的に1.75以上であればひび割れの発生を防止できるとされている。

格点番号①は保温養生を実施することにより、ひび割れ指数を大きくすることができた。格点番号②は保温養生を実施してもほとんど効果がなかったが、エアークーリングを実施することにより、ひび割れ指数を1.75以上とでき、ひび割れの発生確率を大きく低減することができた。格点番号③についてはエアークーリングを実施してもひび割れ指数は小さく(0.64)ひび割れの発生確率は高いと言える。この部位については対策を講じる必要がある。

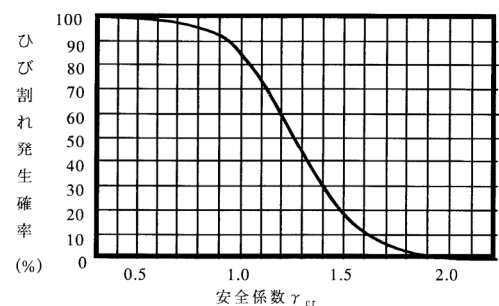


図-4 安全係数とひび割れ発生確率

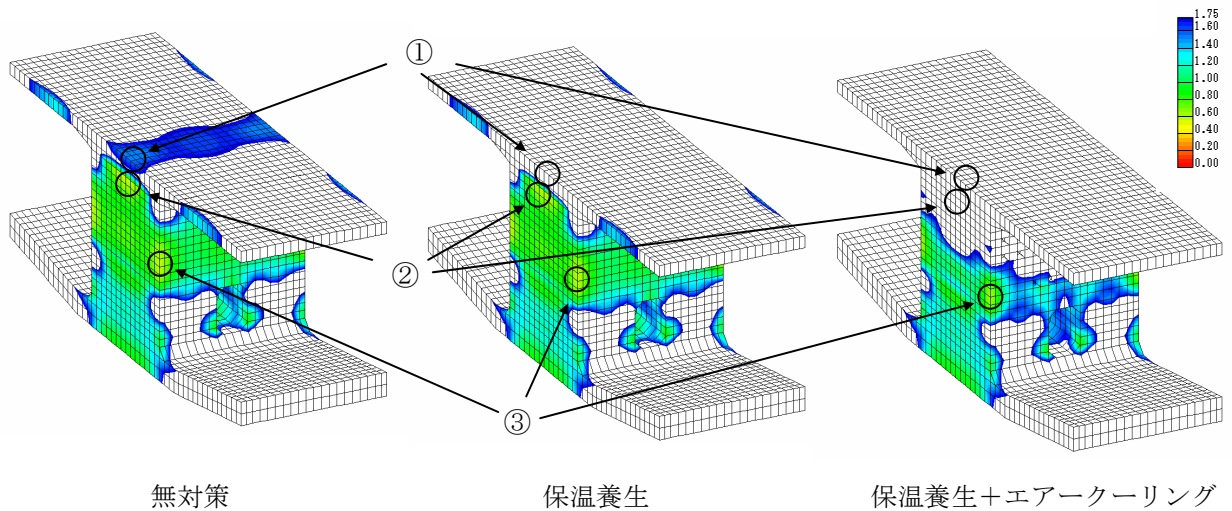


図-5 ひび割れ指数

図-6および図-7に保温養生+エアークーリングを実施した場合の格点番号③に着目したひび割れ指数と最大主応力の等高図および時刻歴を示す。ひび割れ指数、応力ともにピーク値を示すのは当該ロット打設から1日後であり、その後急激に低下し応力は4日後にはほぼ消滅する。また、ひび割れ指数が小さい値を示すのは表面のみである。

既に配置されている鉄筋 (D19@125mm×3 段) で有害でないひび割れ幅 (0.20mm 以下) に制御できることが確認できたため、別途、補強鉄筋の追加は行わなかった。

なお、打設後に目視確認を行った結果ひび割れの発生は確認されなかった。

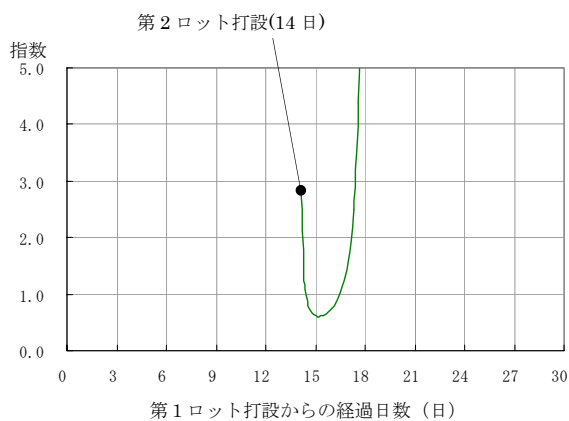
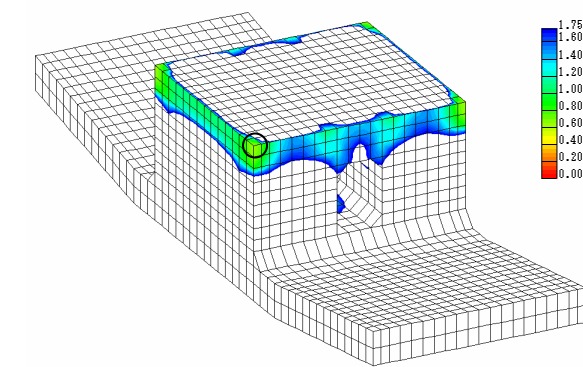


図-6 ひび割れ指数

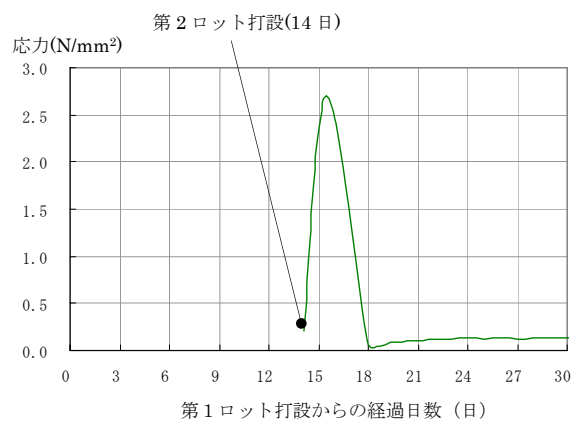
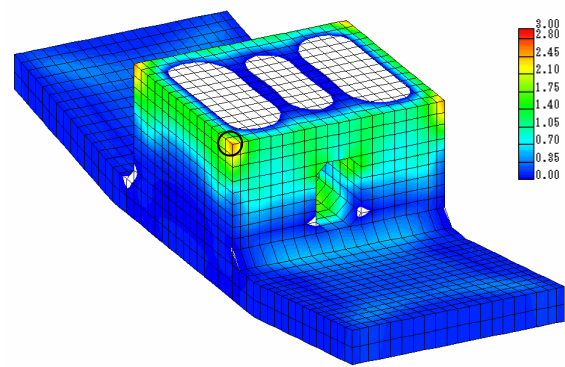


図-7 最大主応力

## 5. グラウトに関する試験

### 5.1 MSセンサー動作確認試験

#### 5.1.1 MSセンサーとは

MSセンサー（写真-3）とはセンサー部に熱電対とヒーターを組み合わせたもので、グラウト施工中の充填度を確認するセンサーである。その測定原理は以下の通りである。

センサー周囲の物質が変化すると、物質によって熱伝導率が異なるので、ヒーターから放熱される熱量が変化しそれをセンサー内の温度変化として検知する。これを電圧の変化として出力することで、周囲の物質の判別を行う。

例えば、センサーの周囲が空気の場合はグラウトに比べて熱を伝えにくいいため、ヒーターが発する熱はあまり発散されない。このとき近くにある熱電対①は、ヒーターの発熱の影響をうけて検知温度が高くなり、ヒーターの温度の影響を受けない熱電対②の検知温度との差が大きくなって出力電圧が高くなる。一方センサーの周囲がグラウトの場合は空気に比べて熱を伝えやすいため、ヒーターの熱はグラウトに発散されて熱電対①の検知温度は低くなり熱電対②の検知温度との差が小さくなることにより、出力電圧が低くなる。

7mV以上の電圧が測定された場合は空気、5mV以下の電圧が測定された場合はグラウトと判定できる。

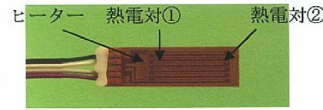


写真-3 MSセンサー

#### 5.1.2 試験概要

本工事ではグラウト充填確認のために、充填中はMSセンサーを用いての充填確認を、硬化後は非破壊検査による確認を行う。そこでグラウト実施前に先立ち現地にてMSセンサーの動作確認試験を実施したため、ここで報告を行う。試験状況を写真-4に示す。

注入供試体を図-8に示す。供試体はL=5.0mとし3ケーブル製作した。シース内の環境を実構造物に近づけるため、定着具、PC鋼材（12S15.2mm）、MSセンサーを配置し、PCケーブルはあらかじめ緊張力を与えておいた。供試体1および供試体2には実施工と同配合のグラウトを注入した。供試体3は多量の水を加えたもの（JPロート流下時間 5.1秒）を注入した。



写真-4 試験状況

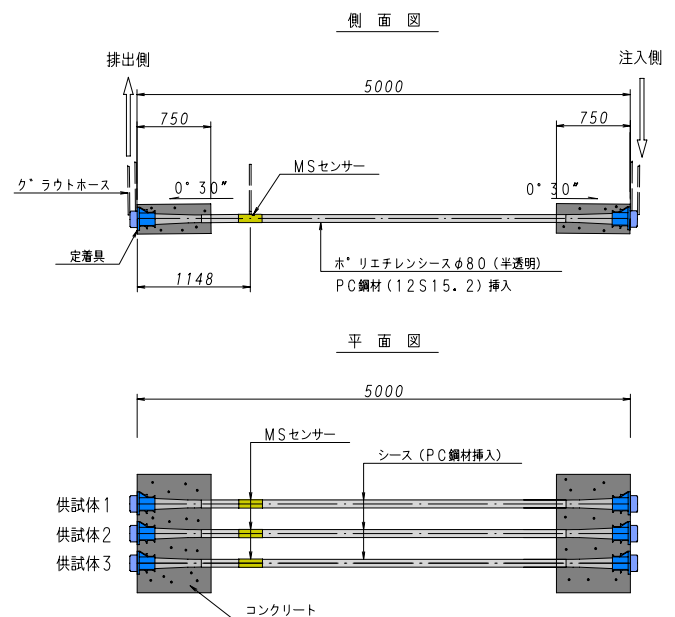


図-8 注入供試体



### 5.1.2 試験結果

試験結果を図-9に示し、以下に試験結果を列挙する。

- ① 注入前の電圧は安定時で9.7mV程度であった。
- ② 供試体1および供試体2はグラウトがセンサー通過後、0.4mVまで低下しその後上昇し2.3mV程度で安定した。これは充填判定基準となる5.0mV以下である。
- ③ 供試体3についても②と同様、グラウトの充填を示す5mV以下となった。
- ④ 供試体に振動を与えると電圧が低下する。
- ⑤ 電圧が安定してもグラウト漏れ(シースのジョイント部から漏れる程度)が起こると電圧が上昇する。

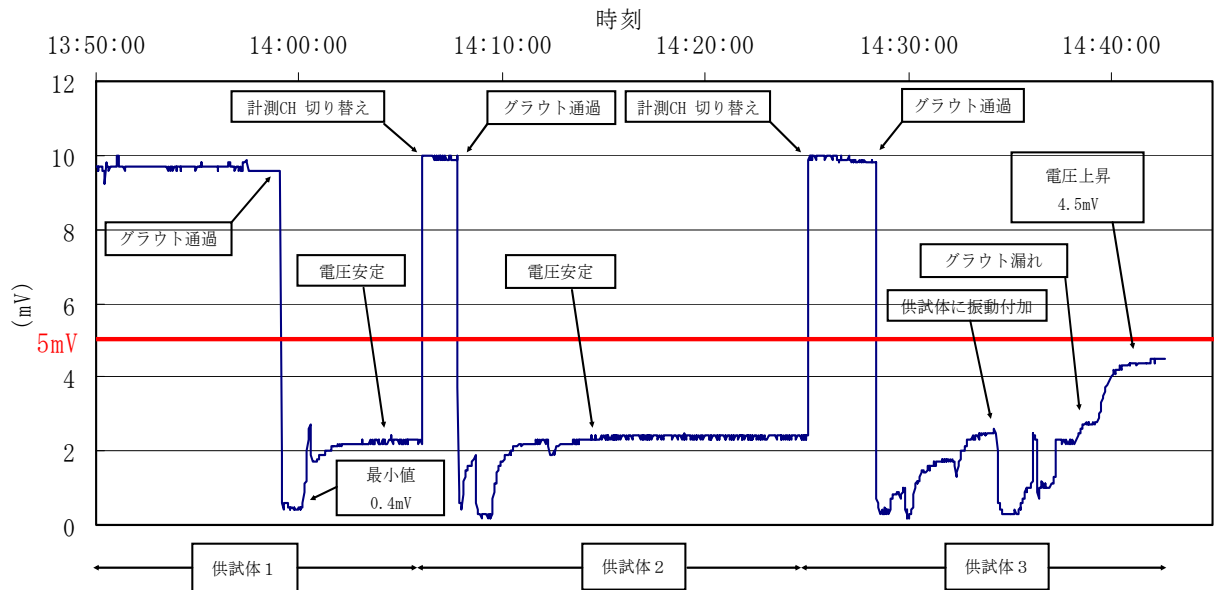


図-9 MSセンサー計測結果

実施工と同条件下で行った試験の結果、グラウトの通過とともにセンサーは精度よく瞬時に反応することが確認できた。また、グラウト漏れがあった場合は電圧に変化が生じるため、異常の発見が容易に行えることもわかった。

## 5.2 一次防錆鋼材暴露試験

### 5.2.1 試験概要

グラウト注入作業はPCケーブル緊張後すみやかに行うのが原則である。しかし、本橋梁の架橋地点は冬期において日平均気温が5℃以下となる日が多い寒冷な地域であるため、温度管理上冬期のグラウト作業は困難である。したがって、PCケーブルにあらかじめ防錆剤を塗布した鋼材(一次防錆鋼材)を使用することとした。

本試験は実際に使用する一次防錆鋼材の防錆効果を確認するために、実橋と同一条件化で暴露試験を行いPCケーブルの発錆状況を確認したものである。

試験体は、断面150mm×150mm、長さ1000mmのコンクリートに、内径45mmのポリエチレンシースを配置し、シース内に一次防錆されたPC鋼材(7本より15.2mm)を1本通したものを3体製作した。なお、比較として防錆処理を施していない裸鋼線を挿入したものを3体製作した。暴露試験状況を写真-5に、使用した防錆剤の仕様を表-3に示す。

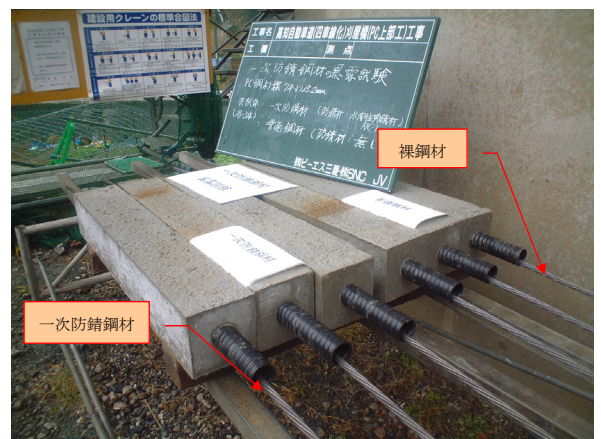


写真-5 暴露試験状況



表-3 防錆剤の性状および成分

| 性状                           |          |
|------------------------------|----------|
| 被膜性状                         | 透明薄膜油状   |
| 原液外観                         | 透明黄色褐色液体 |
| 引火点(°C)                      | 99以上     |
| 流動点(°C)                      | -9       |
| 密度(g/cm <sup>3</sup> )       | 0.91     |
| 動粘度(mm <sup>2</sup> /s,40°C) | 16       |
| 湿潤試験(時間)※1                   | 720以上    |
| 標準防錆期間                       | 屋内半年以上   |

| 成分         |             |
|------------|-------------|
| 精製鉱油       | 70-80 質量%   |
| 添加物        | 20-30 質量%   |
| 水溶解有害イオン※2 | 20 μg/ml 以下 |

※1 JIS K 2246<sup>1994</sup>に示された、温度 49°C、  
相対湿度 95%の湿潤状態における発錆度。

※2 PC 鋼材の遅れ破壊を促進させる塩素イオン、  
硫酸イオン、硝酸イオン、チオシアン酸イオン  
を指す

試験期間は実橋の暴露期間と同一とし、ケーブルが雨などにより濡れた場合を想定し一度水につけたものを挿入した。また、実物と環境を合わせるためシース端部はスポンジおよびシール材にて密封する。

一次防錆鋼材についても、実施工で使用するものと同質のもの（あらかじめ鋼材メーカーにて防錆剤を入れた水槽に PC 鋼材を浸漬し乾燥させたもの）とした。

### 5.2.2 試験結果

暴露後4ヶ月経過した供試体を写真-6に示す。普通鋼材は暴露開始2ヶ月後に浮きさびの発生が確認されたが、一次防錆鋼材にはさびの発生は確認されなかった。



一次防錆鋼材



普通鋼材

写真-6 試験結果

この試験結果と併せて現場では実際の PC 鋼材をファイバースコープにて目視確認を行い、PC 鋼材にさびが発生していないことを確認してグラウト注入を行う予定である。

## 6. まとめ

波形鋼板ウェブ箱桁橋は数多く建設されておりその技術についても確立されてきている。本工事では維持管理コストの低減を目的とし耐候性鋼材を採用した。しかし、本稿で述べたように裸仕様では架橋地点の環境によっては悪性さびの発生が懸念されるため、本工事で採用したような薬剤塗布（安定化処理または促進処理）が有効な手段となり得るのでは考える。ただし、その有効性については経時観察が必要であり今後とも追跡調査が必要である。

ボルト接合の採用は経済的メリットがあり、また、本橋のように張出し長が短ければ施工誤差も少ないため施工性も向上すると思われる。ただし、溶接接合に比べると現場調整代が少ないため、その採用にあつ

ては橋梁規模、現場条件等を勘案し慎重に検討する必要がある。

柱頭部のマスコンクリートは偏向管を利用することによりひび割れの発生なく施工することができた。

グラウト充填は、材料、注入方法、充填確認試験等様々な提案がなされているがその技術は確立していないのが実情である。したがって、本工事で行ったように試験等を実施し、その有効性の確認が必要であると考ええる。

写真-7に現在（5月初旬）の現場状況を示す。本工事は現在も施工中であり、今後も様々な検討、試験を行い高品質な構造物の建設を目指したいと考える。



写真-7 現場状況

## 謝辞

本橋の設計、施工では、西日本高速道路株式会社四国支社および高知工事事務所大豊工事区の方々の多大なご支援をいただき、関係各位に心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 建設省土木研究所・鋼材倶楽部・日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX) , 1993
- 2) 縦山好幸・嵯峨正信・藤田尚：四国における無塗装耐候性鋼材橋梁の現状と問題点，ハイウェイ技術，No.16, pp.160-167, 2000.4
- 3) 縦山好幸・嵯峨正信・藤田尚・広岡秀司・三浦正純：高知自動車道における無塗装耐候性橋梁の現状と課題，橋梁と基礎，pp.19-24, 2000.5
- 4) 東田典雅・金田和男・清水俊一・中井聖棋：ツインパーフォボンドリブ接合および高力ボルト接合を採用した橋梁の実橋載荷実験，第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.631-636, 2005.11