

# 合成構造フーチングへの中流動コンクリートの適用検証

(株)大林組 正会員○谷田部勝博 正会員 森 正 浩 正会員 兼丸 隆裕  
首都高速道路(株) 正会員 伊 原 茂 中野 博文 正会員 徳見 敏夫

## 1. はじめに

現在、首都高速中央環状線の板橋・熊野町ジャンクション間では、渋滞緩和などの機能強化を目的として、ラケット型橋脚の上下層を3車線から4車線に拡幅する工事に着手している。供用しながら拡幅を行うため、既設のSRC橋脚を挟み込むように両側に新設の鋼製橋脚を建て、支承を新設側に受け替えてから既設橋脚を撤去するサンドイッチ工法を採用している<sup>1)</sup>。

新設の鋼製橋脚とフーチングの接合は、アンカーフレームを用いることが一般的であるが、土被りなどの制約から、橋脚基部に鋼製格子部材を剛結し、新設フーチング内に埋め込んで既設フーチングと一体化させる合成構造フーチング方式を開発した(図-1、図-2)。

鋼製格子部材は、I型断面の鋼材を格子状に組み合わせたものであり、ウェブやフランジに作用する支圧力によって橋脚からの力をフーチングに伝達する。このため、鋼製格子部材を取り囲むコンクリートの品質や充填性が重要となることから、2リフト目のコンクリートに中流動コンクリートの適用を検討することとした。

また、1・2リフトともにマスコンクリート部材であり、既設フーチングの拘束を受ける構造であるため、温度ひび割れに対する検討が必要であった。

本稿では、このような特徴を有する合成構造フーチングへ適用するコンクリートについて、使用材料・配合を検討し、実物大実験による充填性と3次元FEM温度応力解析によるひび割れ抑制効果を検証した結果について述べる。

## 2. 合成構造フーチング構築時の問題点

都市高速道路の改良となる本工事において、合成構造フーチングを構築する際に、以下に示す問題点が考えられた。

### (1) 普通コンクリートの使用

鋼製格子部材を埋設する2リフト目のコンクリートは、鋼製格子部材の交差部に空気溜まりが発生しやすい

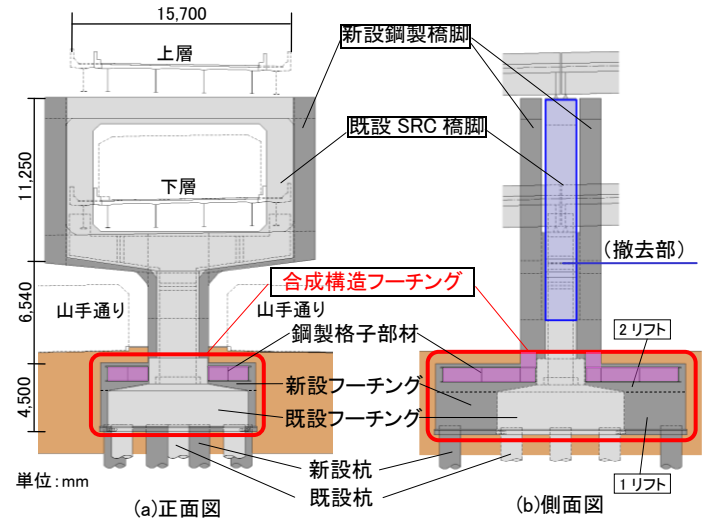


図-1 橋脚および基礎の構造一般図

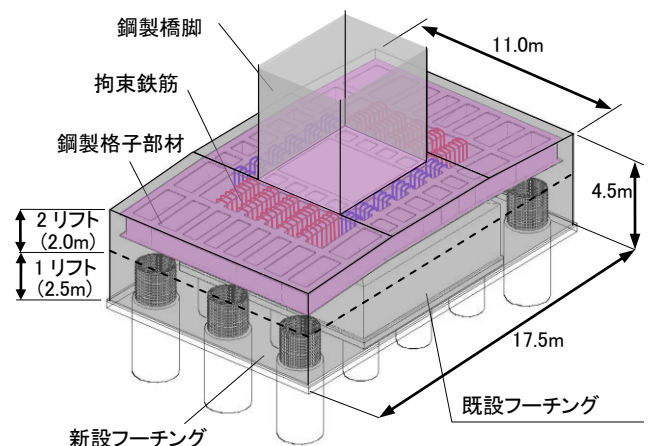


図-2 合成構造フーチングの概要

く(図-3)、また、既設橋脚の周囲では鋼製格子部材とのクリアランスが130mm(最小は添接板部で62mm)と狭いため、流動性をスランプで管理する一般的なコンクリート(以下、普通コンクリートと称す)を使用した場合には充填不良が発生する可能性が高い。

さらに、ブリーディングの発生により、コンクリートと鋼製格子部材のフランジ下面やウェブ表面において、コンクリートとの付着力の低下が考えられる(図-3)。

## (2) 構造上の特徴

合成構造フーチングはマスコンクリートであるため、温度ひび割れの発生が懸念された。また、既設フーチングや鋼製格子部材が拘束体となり、拘束ひび割れの発生も予想される（1、2 リフト共通）。

## (3) 施工条件

2 リフト目の打設では、打込箇所が鋼製格子部材により大小 50 余りの区画に仕切られているため、コンクリート打設時のホース筒先の移動には時間を要する。さらに、首都高速道路の高架橋下に位置する山手通りの中央分離帯での施工となることから、作業スペースの幅や高さが制限され、生コンの搬入や打設作業の効率低下が見込まれる。このような施工条件の制約から、コンクリート打重ね時間間隔が 2 時間を超える可能性がある。

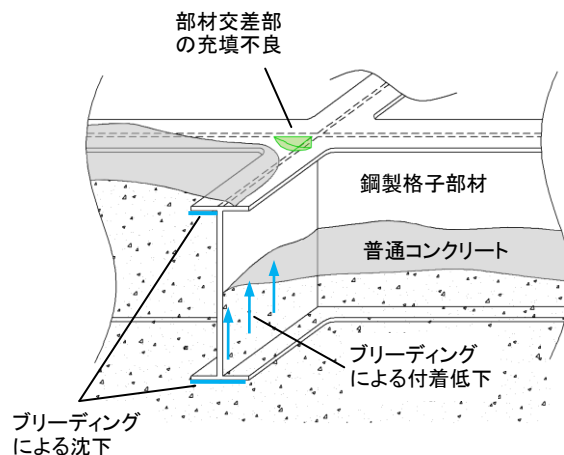


図-3 プリーディングに起因する問題点

表-1 プリーディング率の比較

| 主成分         | ホリエーテル系 | ホリカルボン酸コポリマー | ホリカルボン酸エーテル系 | ホリカルボン酸系 |
|-------------|---------|--------------|--------------|----------|
| ブリーディング率(%) | 0.4     | 2.6          | 1.4          | 0.6      |

セメント:高炉 B 種 単位セメント量:390kg/m<sup>3</sup> W/C:44.9%

## 3. コンクリートの配合選定

### 3.1 1 リフト目コンクリート

1 リフト目のコンクリートは、一般的な RC 部材と同様であるため、流動性についてはスランプ 8cm で施工可能と判断した。ただし、マスコンクリートであることによる温度ひび割れ対策や、既設フーチングの拘束に対する拘束ひび割れ対策が必要であると判断し、セメントに低発熱・収縮抑制型高炉セメント (MKC TYPE III, 以下 MKC) を使用し、低添加型の石灰系膨張材を併せて使用することとした。

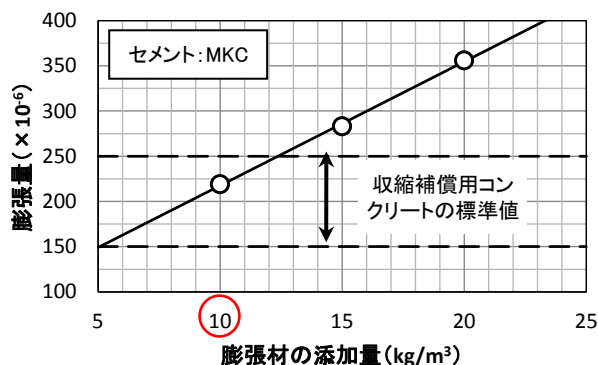


図-4 膨張材添加量と膨張量の関係

### 3.2 2 リフト目コンクリート

コンクリートの充填性の改善には高流動コンクリートを選定する方法があるが、高流動コンクリートの場合、単位粉体量が通常 500kg/m<sup>3</sup> 以上となり、マスコンクリートとなる合成構造フーチングでは温度ひび割れ発生のリスクが高まる。このため、本合成構造フーチングでは高周波バイブレータによる締固めが可能であることを考慮して、2 リフト目に使用するコンクリートには、流動性を確保しつつ、単位粉体量の少ない中流動コンクリートを選定することとした。

中流動コンクリートは、流動性と材料分離抵抗性を高めるために粉体量を増加させる「粉体系」と、混和剤として増粘剤を添加する「増粘剤系」の 2 種類に大別される。本工事では、温度ひび割れ対策として、単位粉体量の増加を最小限とするため、増粘剤系により

表-2 中流動コンクリートの性能

| 項目            | 目標性能                        | 測定結果                    |
|---------------|-----------------------------|-------------------------|
| スランプフロー       | 42.5±7.5cm                  | 平均 49cm                 |
| 空気量           | 4.5±1.5%                    | 4.7%                    |
| U 型充填高さ(障害なし) | 280mm 以上                    | 338mm                   |
| 膨張量           | 150~250(×10 <sup>-6</sup> ) | 219(×10 <sup>-6</sup> ) |
| ブリーディング率      | 普通コンクリートの 1/2 程度、目標 2.5% 以下 | 1.97%                   |

表-3 コンクリートの配合

| 種別    | W/B (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |      |       |       |
|-------|---------|---------|-------------------------|-----|----|-----|------|-------|-------|
|       |         |         | W                       | B   |    | S   | G    | Ad    | VA    |
|       |         |         |                         | C   | Ex |     |      |       |       |
| 普通    | 54.0    | 45.7    | 163                     | 302 | 0  | 830 | 1017 | 3.020 | —     |
| 1 リフト | 54.0    | 45.6    | 163                     | 292 | 10 | 825 | 1017 | 3.322 | —     |
| 2 リフト | 50.0    | 52.6    | 175                     | 340 | 10 | 914 | 850  | —     | 4.375 |

普通:27-8-20BB B:結合材 C:普通は高炉 B 種、1・2 リフトは MKC  
Ex:膨張材 Ad:AE 減水剤 VA:増粘型高性能 AE 減水剤

配合設計を行うこととした。使用する増粘剤は、高性能 AE 減水剤に増粘成分を添加した一液型とした（以下、増粘型高性能 AE 減水剤）。増粘型高性能 AE 減水剤は、複数の製品が販売されているため、最もブリーディング率の小さいポリエーテル系の増粘型高性能 AE 減水剤を選定した（表-1）。

温度ひび割れ対策としては、1 リフトと同様にセメントに MKC を採用し、石灰系膨張材を使用することとした。MKC のような低発熱系のセメントは強度発現が遅いため、膨張材を標準的な添加量で使用すると過膨張を引き起こす可能性がある。そこで、添加量の異なる 3 配合について膨張量試験を行い、コンクリート標準示方書に定める収縮補償用コンクリートの膨張量の標準値に従って添加量を  $10\text{kg/m}^3$  とした。図-4 に膨張量試験の結果を示す。

中流動コンクリートの目標性能と測定結果を表-2 に示す。目標性能は、文献 2) を参考に試し練りを行い決定した。また、打重ね時間間隔の限界値を確認するため、プロクター貫入試験を行った。その結果、 $0.1\text{N/mm}^2$  の貫入抵抗値を示すのが 7.5 時間後であり、打重ね時間間隔を十分確保できることが確認できた。コンクリートの配合を表-3 に示す。

#### 4. 中流動コンクリートの充填性の検証

中流動コンクリートの適用にあたり、鋼製格子部材の交差部や既設橋脚周りの狭隙部に確実に充填できることを確認するため、鋼製格子部材の寸法と同じ実物大規模の模型を用いて充填実験を実施した（図-5、写真-1、写真-2）。鋼製格子部材のフランジ部分と実験模型の外周型枠材には、コンクリートの充填状況を観察できるようにアクリル板を使用した。さらに、コンクリートの硬化後模型をワイヤーソーにより切断し、その切断面を観察してコンクリートの流動やバイブレータによる過度の締固めによる材料分離のないことを確認した。

打込みは 1 層 50cm の 3 層打設とし、高周波バイブレータによる締固めは 1 回につき 10 秒程度とした。鋼製格子部材の交差部にはフランジに直径 10mm のエア抜き孔を設け、空気溜りを防止する構造とした。コンクリート硬化後、ワイヤーソーにより模型を切断してコンクリートの充填状況や粗骨材の分布を確認した。

実験の結果、鋼製格子部材の交差部（写真-3）や既

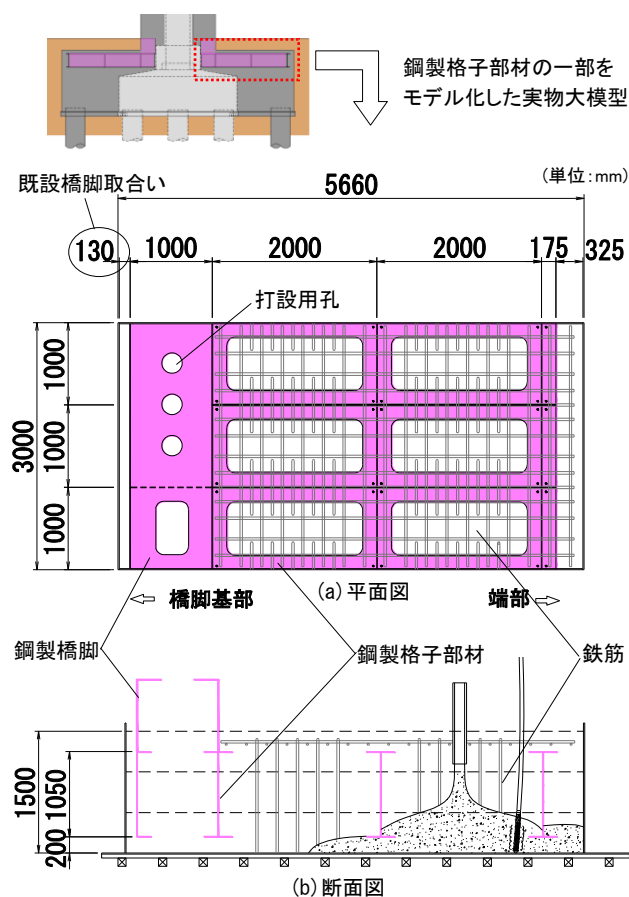


図-5 充填実験概要



写真-1 充填実験模型



写真-2 充填実験状況(厚さ 130mm)  
(既設橋脚周囲のモデル化)



設橋脚周りを模擬した厚さ 130mm の狭隙部にコンクリートは確実に充填されていた。切断面を高さ方向に 3 分割して粗骨材の分布割合（面積比）を測定した結果、各層とも粗骨材体積の割合と同等の分布割合を示しており、材料分離の無い均質なコンクリートを打設できることが確認できた（図-6）。また、鋼製格子部材のフランジ下面に気泡痕が確認されたが、ブリーディングによる沈下はなく充填性は良好であった。

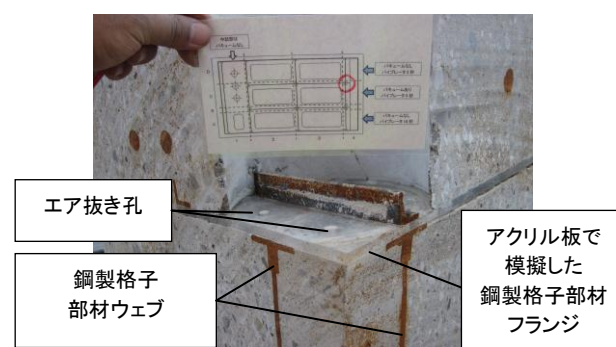


写真-3 部材交差部の充填状況

## 5. 温度ひび割れ抑制効果の検証

### 5.1 熱物性値

中流動コンクリートの適用によって、普通コンクリートに対して、単位結合材量は  $48\text{kg/m}^3$  増えることとなった（表-3 の普通と 2 リフトの C+Ex を比較）。そこで、セメントを MKC に変更し、温度ひび割れを抑制することとし、その効果を 3 次元 FEM による温度応力解析で検証することとした。

温度応力解析に用いる設計用値には、一般的なセメントを用いる場合は、コンクリート標準示方書やマスコンクリートひび割れ制御指針など（以下、示方書等）に示される値を用いるが、MKC のような特殊なセメントを使用する場合には、セメントメーカーが示している技術資料<sup>3)</sup>を用いる。しかしながら、使用する骨材や配合により実際のコンクリートの設計用値は、示方書等やメーカー技術資料から得られる予測値と異なる場合がある。そこで、実構造物のひび割れ検討を実施するにあたって、前章で述べた実物大模型での充填性確認試験の際にコンクリート温度とひずみを測定し、逆解析により実施工時のコンクリートのより正確な設計用値を取得することとした。図-7 にコンクリート温度とひずみの計測位置を示す。このほか、コンクリート打設日から材齢 14 日まで、外気温の測定も実施した。

図-8 に代表として測点 A の温度履歴と解析結果を示し、表-4 に最高温度と最高温度時の材齢の比較を示す。示方書等に示される設計用値や、メーカー技術資料に示される値を用いた予測値（黒実線）に比べ、実測値（青破線）は最高温度が  $3.9^\circ\text{C}$  高く、最高温度到達材齢が 0.25 日（6 時間）早かった。コンクリート温度低下時の傾きに大きな差異がないことから、型枠材の境界条件は妥当であると言える。さらに最高温度を実測値に近づけるため、逆解析を実施した結果が修正値（赤破線）である。最高温度は実測値より  $0.5^\circ\text{C}$  高く、最高

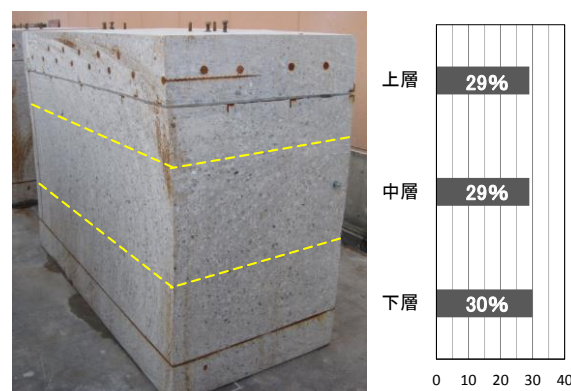


図-6 高さ方向の粗骨材の分布状況(%)  
(各層 50cm, 配合上の粗骨材容積:  $0.315\text{m}^3/\text{m}^3$ )

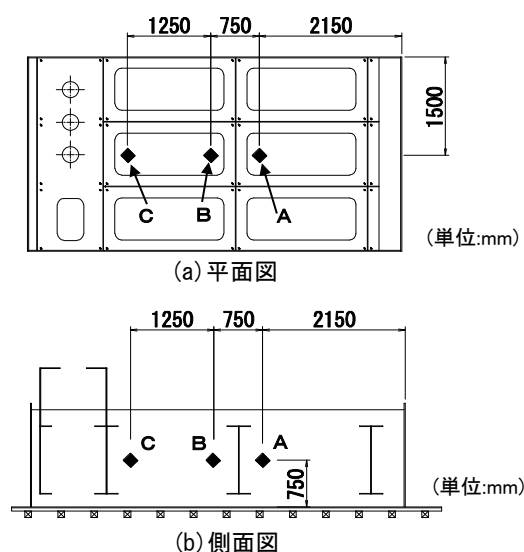


図-7 計測位置図

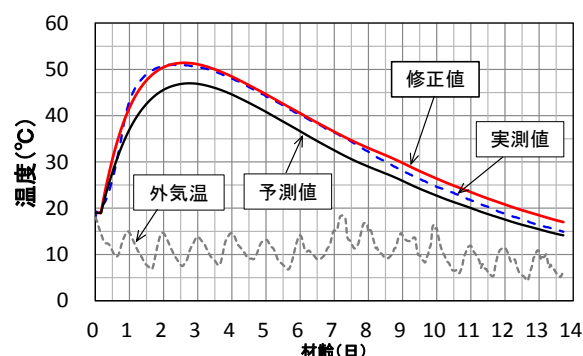


図-8 コンクリート温度履歴図(A点)

温度到達時の材齢との差は 0.08 日（約 2 時間）となり、実測値をほぼ反映している。当初解析に用いた設計用値（予測値）と逆解析により得られた設計用値（修正値）の比較を表-5 に示す。

5.2 線膨張係数

図-9 にコンクリート温度の変化量と実ひずみの関係を示す。測点 A～C の計測値から、最小二乗法により近似した式の傾きが各測点での線膨張係数である。測点 A が 50 μ ほどひずみの値が小さいが、近似式の傾きは 6.5 ～ 7.0 とほぼ等しい値を示していた。線膨張係数は、使用する粗骨材の種類の影響を受けることが知られている。今回は石灰石砕石を使用しており、この影響により一般値より小さい値になったと思われる。実構造物の温度ひび割れ検討を行う際には、3 点の平均値ではなく、安全側の 7 μ /℃を採用することとした（表-5）。

5.3 実構造物の温度ひび割れの予測

表-5 に示す、コンクリートの実配合から得られた設計用値を用いて、3 次元 FEM 温度応力解析により、実施工時のひび割れ抑制効果を検証した。比較として、高炉セメント B 種を用いた場合についても検証した。解析に用いた 1/4 モデルを図-10 に示す。

(1)コンクリート温度

コンクリートの最高温度分布を図-11 に示す。高炉セメント B 種を用いた普通コンクリートでは、躯体中心部の最高温度はおよそ 70℃であったが、MKC にセメントを変更した中流動コンクリート（2 リフト）では、単位結合材量が 48kg/m<sup>3</sup> 多くなったにもかかわらず最高温度は 63℃であり、7℃の低減が可能であった。

1 リフトについては、同じ単位結合材量で MKC に変更することで最高温度を 14℃低減することができた。

(2)最小ひび割れ指数

最小ひび割れ指数の分布図を図-12 に示す。高炉セメント B 種を用いた場合、2 リフトのコンクリート中心部の最小ひび割れ指数が 0.5 程度であったものが、2.05 以上となり、温度応力による有害なひび割れはコンクリート内部にほぼ発生しないことが確認できた。

1 リフトについては、高炉セメント B 種を用いた場合は、0.3 程度のひび割れ指数が 1.64 以上に改善された。特に新設フーチングの部材厚 500mm の部分（図-12 の a 部）については、既設フーチングの拘束が大きく作用

表-4 解析結果と実測値の比較(温度)

| 種別  | 最高温度(℃) | 最高温度時材齢(日) |
|-----|---------|------------|
| 予測値 | 47.0    | 2.75       |
| 実測値 | 50.9    | 2.50       |
| 修正値 | 51.4    | 2.58       |

表-5 コンクリートの設計用値の比較

| 項目             | 予測値   | 修正値   | 備考             |
|----------------|-------|-------|----------------|
| 比熱(kj/kg℃)     | 1.15  | 1.20  | 一般値: 1.05～1.26 |
| 熱伝導率(W/m℃)     | 2.7   | 2.7   | 一般値: 2.6～2.8   |
| 断熱温度上昇量(℃)     | 40.48 | 40.48 | メーカー技術資料       |
| 断熱温度上昇速度に関する係数 | 0.722 | 1.05  | メーカー技術資料       |
| 発熱開始材齢(日)      | 0.167 | 0.167 | メーカー技術資料       |
| 線膨張係数(μ/℃)     | 10    | 7     | 一般値: 10(8～14)  |

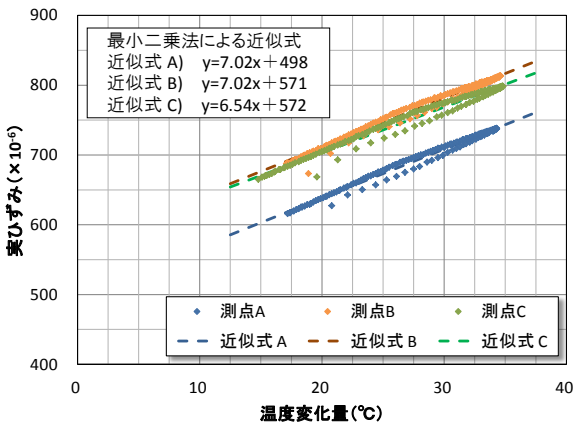


図-9 コンクリート温度変化量とひずみの関係（線膨張係数）

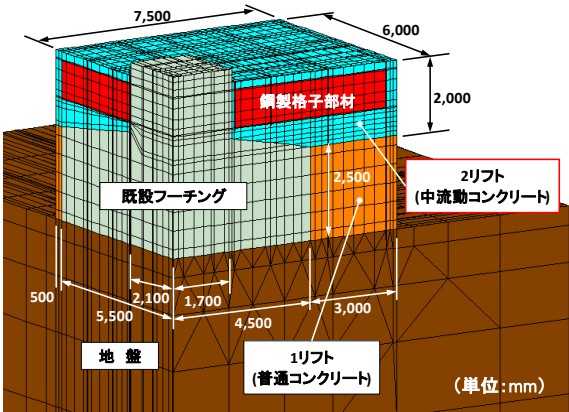


図-10 実構造物の解析モデル(1/4 モデル)

するが、膨張材の添加により引張応力が緩和され指数が大きく改善されている。

表面部分については、ひび割れ指数 1.0 程度の部分があるが、保温養生などの対策をすることで改善可能であると考える。

6. まとめ

鋼製格子部材を用いた合成構造フーチングという新しい構造形式の構築物を施工するにあたって、これま

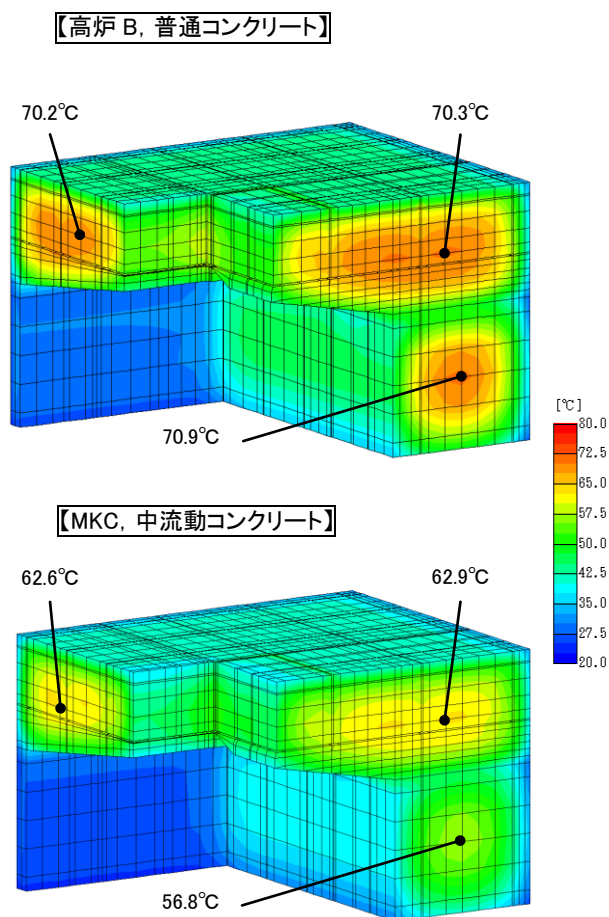


図-11 解析結果(最高温度)

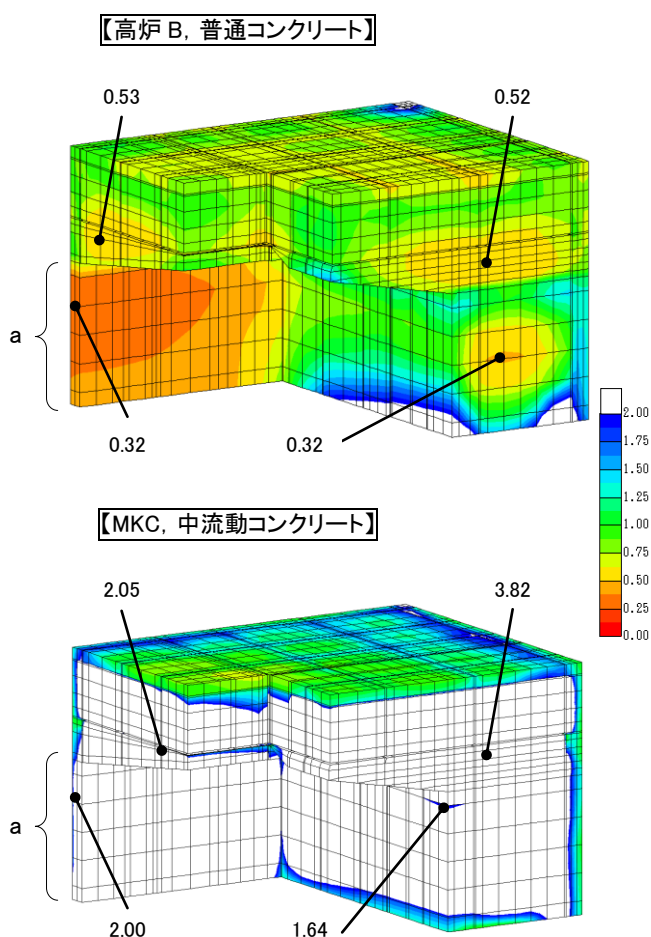


図-12 解析結果(最小ひび割れ指数)

で一般的な RC 構造物では使用実績の少ない中流動コンクリートの適用を含めて、材料・配合の選定、実物大モデルを用いた充填実験、3次元 FEM 温度応力解析による温度ひび割れ検討により検証した。

検証により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) スランプフロー $42.5 \pm 7.5$ cmの中流動コンクリートは、流動性と材料分離抵抗性を兼ね備えており、厚さ60mm程度の狭隘な部分にも軽微な締固めで充填可能である。
- 2) 増粘型の高性能 AE 減水剤を用いた中流動コンクリートは、ブリーディングが2%程度と少ない。
- 3) 中流動コンクリートとすることで単位結合材量は若干増えるが、増粘型の高性能 AE 減水剤を使用することで増加分を最小限とすることができる。また、セメント種類の変更や膨張材の利用などの対策をとることで、ひび割れ指数は大幅に改善可能である。
- 4) 増粘型の高性能 AE 減水剤を使用した中流動コンクリートは、凝結が遅いため打重ね時間間隔を長く取

ることが可能である。

- 5) 低発熱型の高炉セメントと膨張材を併用することにより、既設フーチングによる拘束ひび割れを抑制できる。

本検討において上記のような知見を得ることができ、低発熱型のセメントや膨張材の使用、およびそれらを併用した中流動コンクリートが、合成構造フーチングに適したコンクリートであることが確認できた。

#### 参考文献

- 1) 村上裕真, 中野博文, 伊原茂, 仲田宇史: 板橋・熊野町ジャンクション間改良工事における合成構造フーチングの構造概要, 第 68 回土木学会年次学術講演会, 平成 25 年 9 月
- 2) 東日本高速道路(株)ほか: トンネル施工管理要領(中流動コンクリート編), 平成 24 年 7 月
- 3) (株)デイ・シイ: MKC TYPEⅢ 低発熱・収縮抑制型高炉セメント技術資料, 平成 23 年 8 月