

# 混和材を用いたコンクリートの 温度ひび割れに関する検討

河金 甲\*1・小林 崇\*2・長谷川 剛\*3・中村 英佑\*4

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートをプレストレストコンクリート橋に適用する場合を対象として、温度ひび割れに関する各種検討を行った。混和材を用いたコンクリートの温度応力解析に用いる物性値を示すとともに、マスコンクリートの高温履歴を模擬した拘束試験を行い、ひび割れ指数によって温度ひび割れ発生リスクを評価できることを確認した。さらに、FEM解析を用いた温度応力推定方法の検討を行い、混和材を用いたコンクリートの温度応力は有効ヤング係数法を用いた既存の解析手法でおおむね推定できることや高温履歴の影響を考慮した物性値を用いることで推定精度が向上することなどを明らかにし、膨張材の温度応力低減効果の評価方法についても考察した。

キーワード：混和材、プレストレストコンクリート橋、温度ひび割れ、膨張材

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート橋（以下、PC橋という）の耐久性向上や環境負荷低減を目的として、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で置換したコンクリートの積極的な活用が望まれている。一方、このようなコンクリートの特性は十分には明らかにされておらず、実用化を進めるうえで課題となっていた。そこで、筆者らの所属する（国研）土木研究所と（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会は、「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究委員会（平成23～27年度）」を設置し、「混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）」<sup>1)</sup>（以下、マニュアル（案）という）を発刊した。

PC橋に用いるコンクリートは単位セメント量が多くなる傾向にあり、マスコンクリート部材ではセメントの水和発熱に起因した温度ひび割れ発生リスクが高い。さらに、PC橋に用いるコンクリートの水結合材比は小さく、温度応力への自己収縮の影響を無視できない場合が多い。自己収縮ひずみは、高炉スラグ微粉末を用いると増大することや、マスコンクリートの水和発熱に起因した温度履歴（以下、高温履歴という）を与えると、混和材の有無によらず最大収縮ひずみが大きくなるとともにその進展速度が速まることが明らかとなっている<sup>2)</sup>。コンクリートの温度ひび割れ発生リスクを評価するにあたり、コンクリートの温度変化、高温履歴の影響を考慮した自己収縮の挙動に加えて、クリープによる応力緩和、ヤング係数の発現等の影響を適切に考慮して、若材齢時のコンクリートに発生する応力を推定する必要がある。しかしながら、混和材を用いたコンクリートの温度応力推定手法は必ずしも明確ではなかった。

以上の背景を踏まえ、マニュアル（案）では、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートを使用した場合の温度ひび割れに関する具体的な検討方法を示した。本報では、マニュアル（案）作成に向けた検討のなかから、温度応力解析に用いるコンクリート物性値、拘束試験による温度ひび割れ抵抗性の検討、FEM解析による温度応力の推定と膨張材の応力低減効果の評価について、これまで報告した成果<sup>2)~7)</sup>に新たな知見を加えて報告する。

## 2. 温度応力解析に用いるコンクリート物性値

### 2.1 概要

本報やマニュアル（案）では、表-1に示す早強ポルトランドセメントと混和材の組合せを標準とした。混和材の置換率は、施工実績なども参考として、PC橋施工時に初期材齢においてもプレストレス導入強度を確保できるよう、高炉スラグ微粉末4000で30%、高炉スラグ微粉末6000で50%、フライアッシュⅡ種で20%とした。

温度応力解析の推定精度向上のためには、実際の工事に用いるコンクリートの物性値を用いて解析することが望ましいが、すべての工事ごとにこれらを実測するのは困難である。マニュアル（案）では各種実験<sup>2)~5)</sup>を行って温度応力解析に用いる物性値を検討し、これらの実験結果に基

表-1 標準とする結合材の組合せ

| 記号   | セメントの種類      | 混和材の種類       | 混和材の置換率<br>(質量%) |
|------|--------------|--------------|------------------|
| B430 | 早強ポルトランドセメント | 高炉スラグ微粉末4000 | 30               |
| B650 |              | 高炉スラグ微粉末6000 | 50               |
| F20  |              | フライアッシュⅡ種    | 20               |

\*1 Hajime KAWAKANE：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*2 Shu KOBAYASHI：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*3 Tsuyoshi HASEGAWA：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*4 Eisuke NAKAMURA：国立研究開発法人土木研究所

づき、圧縮強度発現、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ、それぞれに対して次節以降に示す推定式を提案した。なお、表 - 1 の結合材の組合せを用いた場合、クリープ係数、圧縮強度と引張強度およびヤング係数の関係、熱膨張係数に混和材の使用による影響は小さいことが確認されている<sup>1,8)</sup>。

2.2 圧縮強度発現

混和材を用いたコンクリートの圧縮強度発現は、練上り温度 10 ~ 30℃ の範囲かつ有効材齢 28 日程度までであれば有効材齢を用いた単一の式で評価が可能であった<sup>2)</sup>。さらに、後述する図 - 2 の一例のように、表 - 1 に示す結合材の組合せにおいて早強ポルトランドセメント単味（以下、早強単味という）の場合に近似した強度発現性を示したことから、マスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>9)</sup>（以下、JCI 指針という）やコンクリート標準示方書<sup>10)</sup> の早強単味のコンクリートの評価式をもとに、単位結合材量に関して混和材の初期強度発現への寄与率を加味した式(1)に示す修正評価式を提案した<sup>1)</sup>。

$$f'_c(t') = \frac{t' - S_f}{a + b(t' - S_f)} f'_c(i) \quad (1)$$

ここに、 $f'_c(t')$ ：有効材齢  $t'$  日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_c(i)$ ：基準材齢  $i$  日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $i$ ：設計基準強度の基準材齢 (日)、 $a, b$ ：結合材の組合せおよび基準材齢に応じた定数、 $S_f$ ：結合材の組合せに応じた硬化原点に対応する有効材齢 (日) である (表 - 2, 3)。

2.3 断熱温度上昇量

後述する図 - 3 の一例からも確認できるように、混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇量は、強度発現が同程度の早強単味のコンクリートとおおむね相似となった<sup>3,4)</sup>。このことから、早強単味のコンクリートの推定式<sup>10)</sup>をもとに単位結合材量に関する混和材の断熱温度上昇特性への寄与率を加味し、式(2)に表 - 4 に示した断熱温度上昇特性の値を用いることを提案した<sup>1)</sup>。

$$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-rt}) \quad (2)$$

ここに、 $Q(t)$ ：材齢  $t$  日における断熱温度上昇量 (℃)、 $Q_\infty$ ：終局断熱温度上昇量 (℃)、 $r$ ：温度上昇速度に関する定数、 $t$ ：材齢 (日) である。

ただし、表 - 4 に示した混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性の値 ( $Q_\infty, r$ ) は、早強単味のコンクリートの断熱温度上昇特性に近似しており、安全側の検討としては断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率  $k_T$  を 1.0 とすることが望ましいと考えられる。また、単位セメント量が 400 kg/m<sup>3</sup> を超える場合は、 $Q_\infty$  は単位セメント量の一次式で推定される値よりも小さくなることが指摘されていることを踏まえて<sup>11)</sup>、 $Q_\infty$  については、文献 11) で示されている単位セメント量の累乗式を混和材の寄与率を加味して改良した式(3)を用いて求めることとした<sup>1)</sup>。

$$Q_\infty = 1.49 B_T^{0.63} \quad (3)$$

ここに、 $B_T$ ：断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材料 (kg/m<sup>3</sup>) である (表 - 4)。

表 - 2 圧縮強度の推定式

| 結合材の組合せ | 基準材齢 $i$ (日) | $f'_c(i) = p_1 + p_2 (B_s/W)$ |       | $B_s = C + k_s SCM$ |
|---------|--------------|-------------------------------|-------|---------------------|
|         |              | $p_1$                         | $p_2$ | $k_s$               |
| B430    | 28           | - 14.9                        | 30.9  | 0.40                |
| B650    |              |                               |       | 0.63                |
| F20     |              |                               |       | 0.17                |

$C$ ：単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $B_s$ ：強度発現特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $250 \leq B_s \leq 600$  kg/m<sup>3</sup>、 $SCM$ ：単位混和材量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $k_s$ ：強度発現特性に関する混和材の寄与率

表 - 3 圧縮強度発現式の各定数

| 結合材の組合せ | $a = \alpha_1 + \beta_1 (B_s/W)$ |           | $b = \alpha_2 + \beta_2 (B_s/W)$ |           | $S_f$ (日) |
|---------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------|
|         | $\alpha_1$                       | $\beta_1$ | $\alpha_2$                       | $\beta_2$ |           |
| B430    | 439                              | - 1.19    | 0.841                            | 0.0428    | 0.30      |
| B650    |                                  |           |                                  |           |           |
| F20     |                                  |           |                                  |           |           |

表 - 4 断熱温度上昇特性の値

| 結合材の組合せ | $Q_\infty = a + b \times T_a$ | $r = g + h \times T_a$    | $B_T = C + k_T SCM$  |
|---------|-------------------------------|---------------------------|----------------------|
| B430    | $a = 15.9 + 0.135 B_T$        | $g = -0.601 + 0.0031 B_T$ | $k_T = 0.8 \sim 1.0$ |
| B650    | $b = -0.106$                  | $h = 0.0989$              | $k_T = 0.9 \sim 1.0$ |
| F20     | $+0.0000257 B_T$              | $-0.0000688 B_T$          | $k_T = 0.9 \sim 1.0$ |

$T_a$ ：打込み時の温度 (℃)、 $C$ ：単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $250 \leq C \leq 400$  kg/m<sup>3</sup>、 $B_T$ ：断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $250 \leq B_T \leq 600$  kg/m<sup>3</sup>、 $SCM$ ：単位混和材量 (kg/m<sup>3</sup>)、 $k_T$ ：断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率

表 - 5 自己収縮ひずみ推定式における各係数

| 結合材の組合せ | 式(4)                     | 式(5)                       | 式(6)                        |
|---------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| B430    | $\beta = 1.0, t_s = 0.2$ | $c_1 = 2\,350, c_2 = -5.8$ | $\epsilon'_{as\infty} = 80$ |
| B650    |                          |                            |                             |
| F20     | $\beta = 1.2, t_s = 0.2$ | $c_1 = 3\,070, c_2 = -7.2$ | $\epsilon'_{as\infty} = 50$ |

2.4 自己収縮ひずみ

混和材を用いたコンクリートでは、後述する図 - 4 や図 - 10 の例のように、早強単味と比較して自己収縮ひずみの経時変化が生じる時期、増加速度、最大値が異なるとともに、高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみの増加速度が 20℃ 一定の場合と比較して有効材齢で整理しても大幅に速まった<sup>2,5)</sup>。したがって、これらの実験結果および既往のデータに基づいて現在使用されている予測式<sup>9,10)</sup>に改良を加えた式(4)～式(8)を提案した<sup>1)</sup>。

$$\epsilon_{ag} = -\beta \epsilon'_{as\infty} \left[ 1 - \exp \left\{ -a (t' - t_s)^b \right\} \right] \quad (4)$$

$$\epsilon'_{as\infty} = c_1 \exp \left\{ c_2 \left( \frac{W}{B} \right) \right\} + \epsilon'_{asT} \quad (5)$$

$$\epsilon'_{asT} = \epsilon'_{asT\infty} \left[ 1 - \exp \left\{ -1.2 \times 10^{-6} (T_{\max} - 20)^4 \right\} \right] \quad (6)$$

$$a = 3.7 \times \exp \left\{ -6.8 \left( \frac{W}{B} \right) \right\} (0.030 T_{\max} + 0.40) \quad (7)$$

$$b = 0.25 \times \exp \left\{ 2.5 \left( \frac{W}{B} \right) \right\} (0.0025 T_{\max} + 0.95) \quad (8)$$

ここに、 $\epsilon_{ag}$ ：自己収縮ひずみの推定値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\epsilon'_{as\infty}$ ：自己収縮ひずみの最終値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\beta$ ：配合補正係数、 $t'$ ：有効材齢 (日)、 $t_s$ ：凝結の始発 (日)、 $c_1, c_2$ ：係数、 $W$ ：

単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $B$ : 単位結合材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\varepsilon'_{asT}$ : 高温履歴による自己収縮ひずみの増加量 ( $\times 10^{-6}$ ),  $\varepsilon'_{asT_{\infty}}$ : 高温履歴による自己収縮ひずみの増加量の最終値 ( $\times 10^{-6}$ ),  $T_{\text{max}}$ : 温度解析によって求めるコンクリートの最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a, b$ : 自己収縮の進行特性を表す係数である (表 - 5)。これらの自己収縮ひずみの推定式の適用範囲は,  $35 \leq W/B \leq 55 \%$ ,  $20 \leq T_{\text{max}} \leq 90^{\circ}\text{C}$  とする。

### 3. 拘束試験による温度ひび割れ抵抗性の検討

#### 3.1 概要

混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性を, マスコンクリートの高温履歴を模擬したコンクリート供試体の拘束試験を行って検討した。さらに, 膨張材による温度ひび割れ抑制効果も併せて検討した。

#### 3.2 実験方法

##### (1) コンクリートの配合

検討に用いたコンクリートの配合を表 - 6 に示す。設計基準強度  $40 \text{ N}/\text{mm}^2$  の現場打ち PC 桁を想定し, 材齢 3 日でプレストレス導入強度  $30 \text{ N}/\text{mm}^2$  が確保できるように, 表 - 1 に示した各結合材の組合せにおける配合を決定した。早強ポルトランドセメントのみを用いた配合は水結合材比を 40% とし (H40), これをベースに水結合材比を 35% とした混和材を用いた 3 配合 (H35B430, H35B650, H35F20) と文献 2) で自己収縮がもっとも大きくなった H35B650 にひび割れ抑制対策として膨張材を  $20 \text{ kg}/\text{m}^3$  混和した H35B650EX を検討に用いた。

##### (2) 供試体

供試体は拘束供試体と無拘束供試体を製作した。供試体の形状を図 - 1 に, 実験の実施状況を写真 - 1 に示す。拘束供試体では, 文献 12) を参考に 2 種類の拘束用鋼材を用いた。異形鉄筋 (D32, ゲージ貼付部断面積  $701 \text{ mm}^2$ , ヤング係数  $202 \text{ kN}/\text{mm}^2$ ) を用いて主に高温履歴を受けた自己収縮に起因する拘束応力を測定し, 熱膨張係数の小さいインバー鋼材 ( $\phi 30$ , ゲージ貼付部断面積  $599 \text{ mm}^2$ , ヤング係数  $136 \text{ kN}/\text{mm}^2$ , 熱膨張係数  $0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) を用いて自己収縮と温度変化に起因する拘束応力を測定した。各拘束用鋼材の長さ方向中央部にひずみゲージを貼付し, 鋼材とコンクリートの力の釣り合いからコンクリート応力を算出した<sup>13)</sup>。一方, 無拘束供試体では, 埋込型ひずみ計を供試体中心部に設置してコンクリートのひずみを測定した。これらの供試体では, マスコンクリートの高温履歴を模擬するため, 厚さ  $200 \text{ mm}$  の発泡スチロール製 (発泡倍率 90 倍) の型枠にコンクリートを打込み, 直ちに封緘状態として測定を開始した。

#### 3.3 実験結果

##### (1) コンクリート特性

圧縮強度発現の推移を図 - 2 に, コンクリート温度, 自己収縮ひずみの推移の一例を図 - 3, 4 にそれぞれ示す。図 - 2 では, JASS 5 T-606 に準拠して発泡スチロール製の容器で簡易断熱養生を行った円柱供試体 ( $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ ) を用い, 11 材齢 (終結直後, 注水から 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 28 日) で測定した値を JCI 指針の圧縮強度発現

表 - 6 コンクリートの配合

| 配合名       | W/B (%) | 置換率 (%) | 単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |                            |     |    |     | S   | G   |
|-----------|---------|---------|--------------------------------|----------------------------|-----|----|-----|-----|-----|
|           |         |         | W                              | $B = H + B4 + B6 + EX + F$ |     |    |     |     |     |
|           |         |         |                                | H                          | B4  | B6 | EX  |     |     |
| H40       | 40      | 0       | 413                            | -                          | -   | -  | -   | 758 | 968 |
| H35B430   | 35      | 30      | 330                            | 141                        | -   | -  | -   | 700 |     |
| H35B650   |         | 50      | 236                            | -                          | 236 | -  | -   | 695 |     |
| H35B650EX |         | 50      | 226                            | -                          | 226 | 20 | -   | 696 |     |
| H35F20    | 20      | 377     | -                              | -                          | -   | 94 | 682 |     |     |

H: 早強ポルトランドセメント, B4: 高炉スラグ微粉末 4 000, B6: 高炉スラグ微粉末 6 000, EX: 石灰系膨張材, F: フライアッシュ II 種, S: 細骨材 (静岡県掛川産陸砂), G: 粗骨材 (茨城県笠間産碎石)  
 ※スランプ  $12 \pm 2.5 \text{ cm}$ , 空気量  $4.5 \pm 1.5 \%$  を確保するため, 高性能 AE 減水剤と空気連行剤を使用

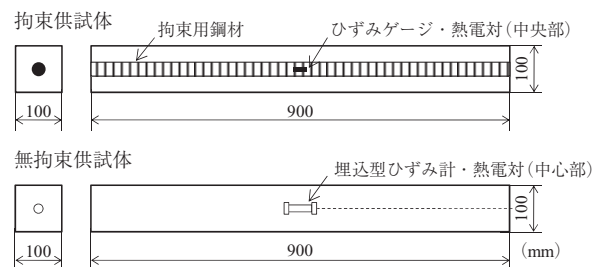
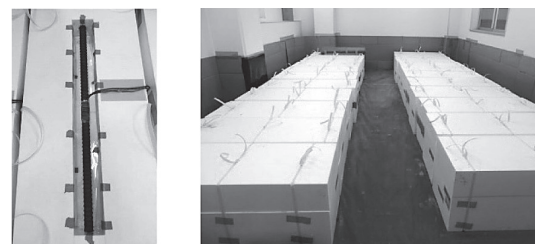


図 - 1 拘束供試体と無拘束供試体の形状



(1) 打込み前の状況 (2) 測定時の状況

写真 - 1 実験の実施状況

式で回帰分析した結果を示す。なお, 拘束供試体と簡易断熱養生を行った円柱供試体の最高温度は同程度であった。

混和材を用いた場合の水結合材比を早強単味に対して 5% 小さくした結果, H35F20 では圧縮強度が若干小さくなったものの, コンクリートの圧縮強度発現や温度履歴に混和材を用いた影響はほとんどみられなかった。一方, 図 - 4 から, H40 との比較において, 自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末を用いると大きくなり, 粉末度が高く混和材置換率の大きい H35B650 ではその増大が顕著なることを確認できる。

##### (2) 拘束応力

拘束応力の推移を図 - 5 に示す。材齢 7 日の拘束応力は, 異形鉄筋を用いた場合とインバー鋼材を用いた場合のいずれにおいても, H40 と比較すると, H35F20 で同程度, H35B430 と H35B650 で大きく, 特に H35B650 では突出して大きくなった。このような拘束応力の大小関係は自己収縮ひずみの傾向とおおむね一致した。一方, H35B650EX

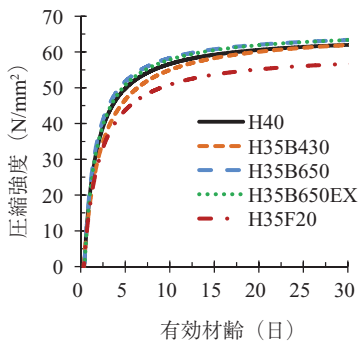


図 - 2 圧縮強度の発現

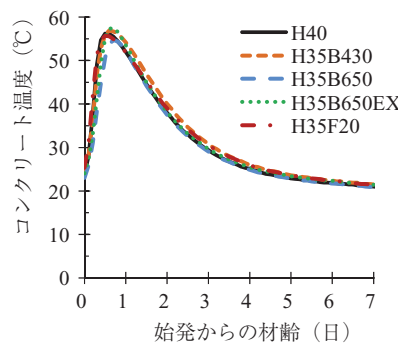


図 - 3 コンクリート温度 (拘束供試体, 異形鉄筋)

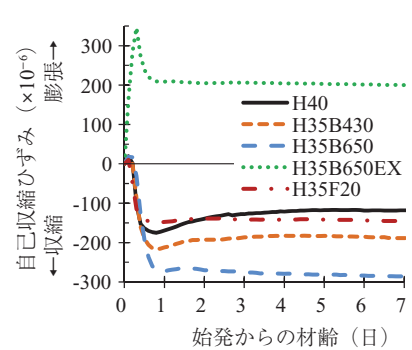
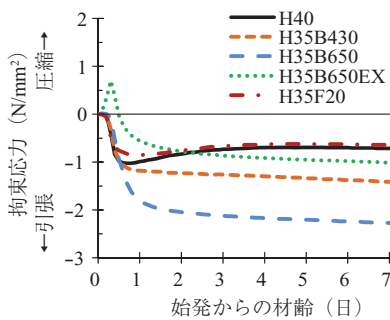
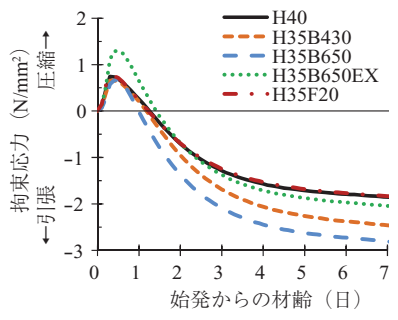


図 - 4 自己収縮ひずみ (無拘束供試体)



(1) 異形鉄筋



(2) インバー鋼材

図 - 5 拘束応力

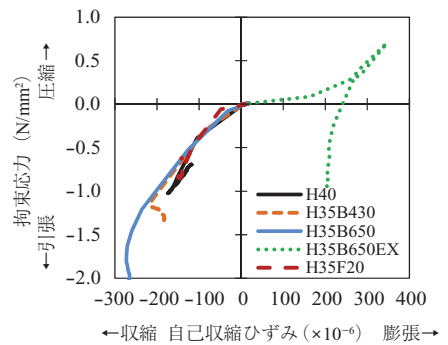


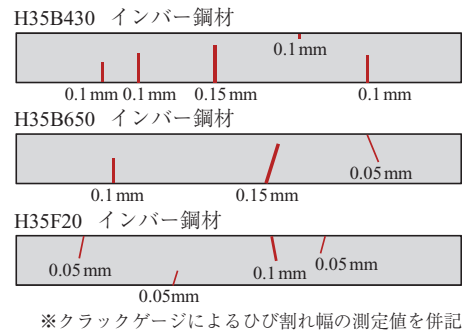
図 - 6 拘束応力と自己収縮ひずみ (異形鉄筋)

の拘束応力は材齢7日ではH40と同程度となり、膨張材の使用による拘束応力の低減効果が認められた。

次に、異形鉄筋を用いた場合の拘束応力と自己収縮ひずみの関係を図 - 6 に示す。H35B650EX以外の供試体では、混和材の使用の有無にかかわらず、自己収縮ひずみと拘束応力の関係の勾配がおおむね等しく、自己収縮ひずみの進展とともに拘束応力が増加した。図 - 4 の自己収縮ひずみは、材齢7日の値が各配合で異なるものの増加開始時の材齢や増加時の勾配はおおむね一致していた。このことを踏まえると、混和材の使用の有無にかかわらず、若材齢時のクリープによる応力緩和の影響は同程度であったと考えられる。一方、H35B650EXでは、始発直後に膨張ひずみが急速に増大したが(図 - 4)、それに伴う圧縮応力の増加は必ずしも比例していないことが認められた(図 - 6)。

(3) ひび割れ発生状況とひび割れ指数

材齢91日に2本以上のひび割れが供試体上面に確認された3体の供試体のひび割れ発生状況を図 - 7 に、材齢91日までのひび割れ指数の最小値を図 - 8 に示す。ひび割れ指数は、コンクリートの拘束応力を割裂引張強度で除して求めた。割裂引張強度は、図 - 2 の各配合の圧縮強度発現から、JCI 指針に示される圧縮強度と割裂引張強度の関係式を用いて求めた。発泡スチロール製の型枠を用いたため、ひび割れ発生材齢を目視で特定することは困難であったが、インバー鋼材を用いた供試体のうち、H35B430では材齢61日、H35B650では材齢57日、H35F20では材齢73日に鋼材ひずみが大幅に変動したため、これらの時点でのひび割れ指数を示した。他の拘束供試体は、材齢



※クラックゲージによるひび割れ幅の測定値を併記

図 - 7 供試体上面のひび割れ発生状況

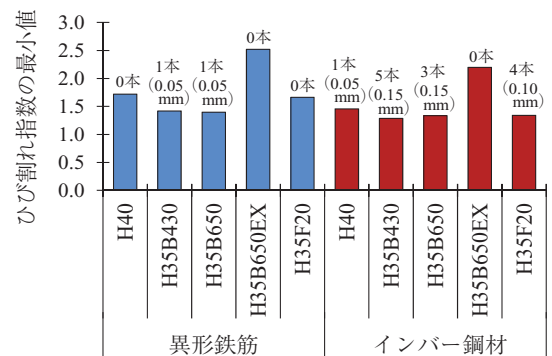


図 - 8 ひび割れ指数の最小値

91日のひび割れ指数が最小となったため、この値を示した。図 - 8 には各供試体に発生したひび割れ本数と最大ひび割れ幅も図示している。

鋼材ひずみが大幅に変動した前述の3体では、図 - 7、

8に示すように他の供試体と比較して最大ひび割れ幅が大きく、ひび割れ本数も多くなった。インバー鋼材を用いたH40と比較すると、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650では自己収縮ひずみの増大に伴い拘束応力が大きかったこと、フライアッシュを用いたH35F20では拘束応力がH40と同等であるものの、図-2より圧縮強度が他より若干小さいことから推測すると引張強度が小さかったことがひび割れ増加の理由として考えられる。さらに、ひび割れ発生状況とひび割れ指数はおおむね対応している。これらを踏まえると、コンクリートの拘束応力と割裂引張強度を考慮して求めたひび割れ指数によって混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ発生リスクを評価できると考えられる。

一方、H35B650EXではひび割れの発生は認められず、自己収縮ひずみの大きい高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートにおいても膨張材の併用によって、ひび割れ発生リスクを低減できることを確認できた。

#### 4. FEM解析による温度応力の推定と膨張材の温度応力低減効果の評価

##### 4.1 概要

コンクリートの温度応力を有限要素法(FEM)を用いて推定する場合、2章で示したようなコンクリートの物性値に加え、クリープによる応力緩和の影響を適切に設定することが解析精度を確保するうえで重要となる。クリープによる応力緩和は、各解析ステップのクリープ係数を用いて厳密に考慮する手法があるものの<sup>14)</sup>、若材齢時のクリープ挙動は複雑であり、実用的な観点からJCI指針では最高温度に達する前後の材齢について与えた一定の低減係数をヤング係数に乗じる簡便な有効ヤング係数法により考慮している。そこで、混和材を用いたコンクリートの温度応力推定に対するJCI指針の有効ヤング係数法の適用性を、前章の拘束試験で得られた結果とFEM解析結果とを比較することにより検討した。さらに、ひび割れ抑制対策として膨張材を併用して温度応力低減を図った場合の応力推定手法についても考察した。

##### 4.2 解析方法

###### (1) 解析モデル

コンクリート温度応力解析プログラムを用いた3次元FEM解析により、温度変化と自己収縮に起因した拘束応力を求めた。解析モデルを図-9に示す。解析対象である拘束供試体の対称性を考慮して1/8モデルとし、拘束用鋼材は3次元要素によって断面積が実測値と同一となるようモデル化した。

###### (2) 解析に用いた物性値

解析に用いたコンクリートの物性値を表-7に示す。ここでは混和材を用いたコンクリートの拘束応力を推定する際の有効ヤング係数法の適用性を検討することを目的とし、各供試体の温度履歴やコンクリートの物性値は、ポアソン比以外は実測値に基づいた。クリープによる応力緩和の影響は、JCI指針に準拠した有効ヤング係数法を用いて評価した。自己収縮ひずみは、高温履歴下のひずみの増加

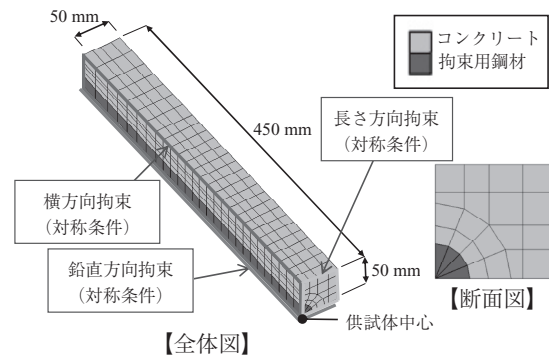


図-9 解析モデル

表-7 解析に用いたコンクリート物性値

| コンクリート温度          | 供試体中央位置における実測値  |
|-------------------|---|
| 圧縮強度 $f'_c(t')$   | 実測値を用いてJCI指針式の係数を回帰   |
| ヤング係数 $E_c(t')$   | 実測値を用いてJCI指針式の係数を回帰   |
| 有効ヤング係数 $E_e(t')$ | $E_e(t') = \varphi_e(t') E_c(t')$<br>(最高温度時まで $\varphi_e(t') = 0.42$ , 最高温度に達する有効材齢+1日以降 $\varphi_e(t') = 0.65$ ) |
| 自己収縮ひずみ           | 無拘束供試体の実測値<br>(A) 高温履歴考慮, (B) 20℃一定   |
| 熱膨張係数             | 各配合の実測値 <sup>6)</sup>   |
| ポアソン比             | 0.2   |

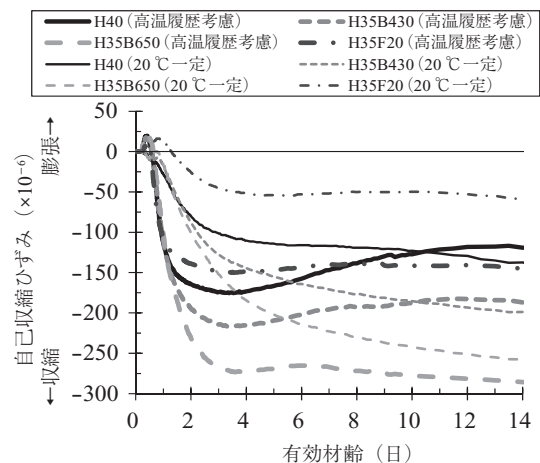


図-10 自己収縮ひずみの経時変化

挙動の考慮が拘束応力の推定精度に与える影響を検討するため、拘束供試体と同一養生である発泡スチロール製の型枠を用いて高温履歴を与えた自己収縮ひずみ(以下、高温履歴考慮という)と、JCI試験法<sup>15)</sup>に準拠して20℃一定の環境下で封緘養生した角柱供試体(100×100×400mm)の自己収縮ひずみ(以下、20℃一定という)を解析に用いた。図-10に示すように、高温履歴を受けた場合の自己収縮ひずみは、20℃一定の場合と比較して、最大値が大きくなるとともに増加速度が有効材齢で整理しても速まることを確認できる。

なお、鋼材のヤング係数は実測値を用い、熱膨張係数は異形鉄筋で  $10.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、インバー鋼材で  $0.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  とし、ポアソン比はどちらの鋼材も0.3とした。

###### (3) 解析に用いた膨張ひずみ

膨張材を用いた場合の拘束応力の推定には膨張ひずみの設定やクリープによる応力緩和の考慮方法が重要となる。

ここでは、クリープによる応力緩和は JCI 指針に準拠した有効ヤング係数法を用いて考慮し、膨張ひずみの設定方法を変化させた場合の応力推定精度を検討した。

検討ケースは表 - 8 の 4 種類とした。「無拘束膨張」では、H35B650EX の無拘束供試体で得られたひずみ、「拘束 φ 11 膨張」では、JIS A 6202 附属書 2 を参考に PC 鋼棒 (φ 11) を用いた拘束供試体 (100 × 100 × 900 mm) に解析対象の拘束供試体と同一の簡易断熱養生を行った供試体で得られたひずみを用いた。「収縮 + JIS 膨張」と「収縮 + JCI 膨張式」では、JIS A 6202 附属書 2 に準拠して標準養生を行った H35B650EX の膨張ひずみ (JIS 膨張) あるいは JCI 指針の早強単味の膨張ひずみの近似式 (JCI 膨張式) を用い、これらには自己収縮の影響を含んでいないため、H35B650 の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみを重ね合わせたひずみを用いた。各検討ケースの膨張ひずみの経時変化を図 - 11 に示す。

4.3 解析結果

(1) 応力推定結果と自己収縮の高温履歴考慮の影響

FEM 解析の結果、コンクリートと鋼材の境界部および長さ方向端部を除くと長さ方向のコンクリート応力はおおむね一様に分布したため、供試体中央断面のコンクリート表面の長さ方向の応力を平均して実験結果と比較した。

膨張材を用いない 4 配合において、高温履歴考慮の自己収縮ひずみを用いた場合と 20℃ 一定の自己収縮ひずみを用いた場合の解析値を実測値と比較して図 - 12, 13 に示す。拘束供試体と同一養生の高温履歴考慮の場合に着目すると、異形鉄筋とインバー鋼材を用いた場合のいずれにおいても、解析値はおおむね拘束応力の実測値を評価できた。したがって、混和材を用いたコンクリートにおいても自己

収縮と温度変化による拘束応力は、コンクリートの物性値が把握できていれば JCI 指針の有効ヤング係数法に基づいた既存の応力解析手法によっておおむね推定できると考えられる。

次に、自己収縮ひずみの高温履歴の考慮の有無が温度解析結果に及ぼす影響を考察する。自己収縮応力が卓越する図 - 12 でみられるように、混和材の有無によらず若材齢

表 - 8 膨張材効果の検討ケース

| ケース          | 自己収縮ひずみ                                  | 膨張材効果                            |
|--------------|--|----------------------------------|
| 無拘束膨張        | 無拘束供試体<br>【H35B650EX (簡易断熱)】             |                                  |
| 拘束 φ 11 膨張   | 拘束供試体 (PC 鋼棒 φ 11)<br>【H35B650EX (簡易断熱)】 |                                  |
| 収縮 + JIS 膨張  | 無拘束供試体<br>【H35B650 (簡易断熱)】               | JIS A 6202<br>【H35B650EX (標準養生)】 |
| 収縮 + JCI 膨張式 | 無拘束供試体<br>【H35B650 (簡易断熱)】               | JCI 指針膨張<br>ひずみ近似式<br>【早強】       |

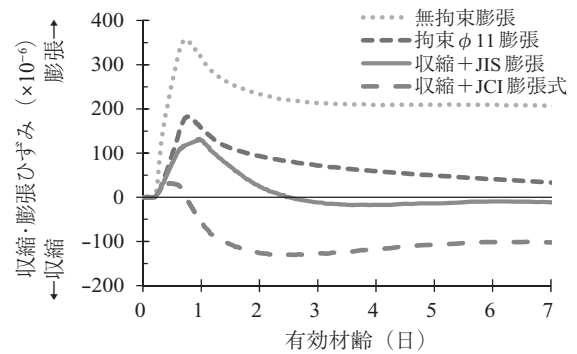


図 - 11 解析に用いた膨張ひずみの経時変化

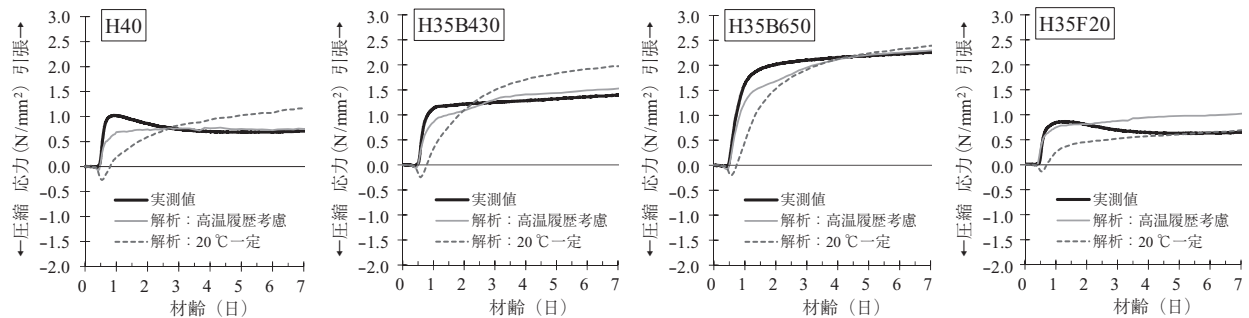


図 - 12 実測値と解析値の比較 (異形鉄筋, 膨張材を用いない場合)

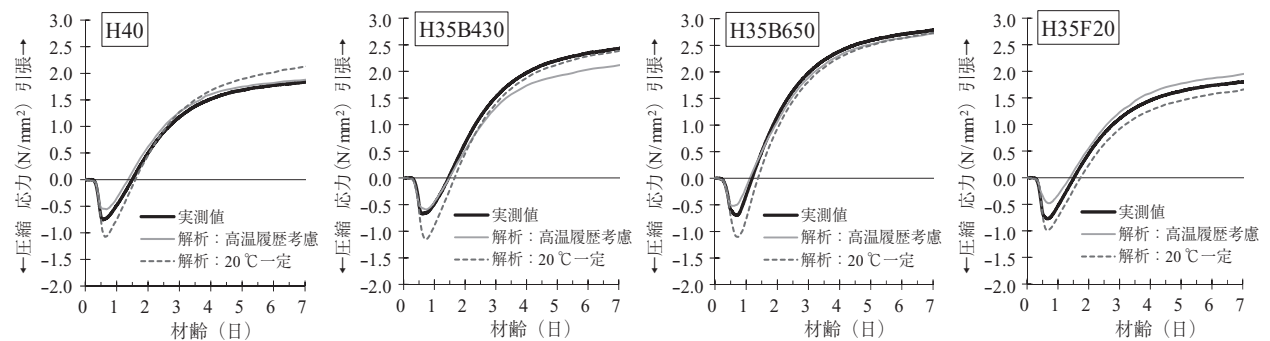


図 - 13 実測値と解析値の比較 (インバー鋼材, 膨張材を用いない場合)

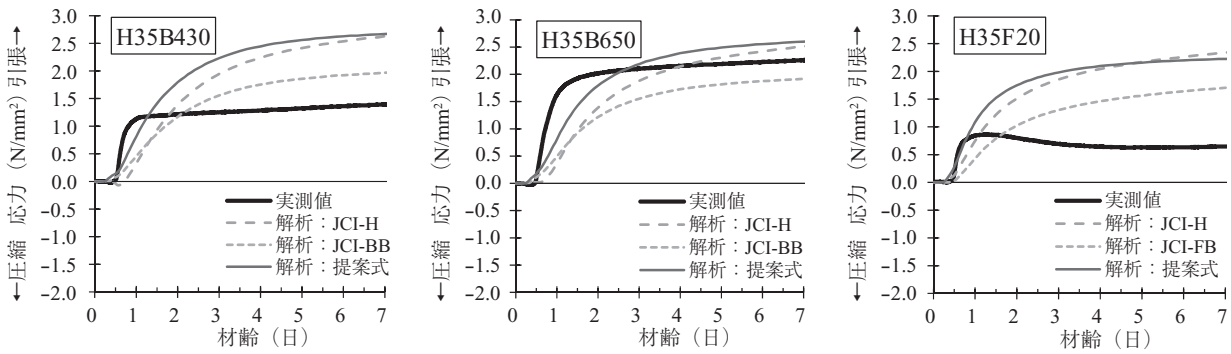


図 - 14 各推定式を用いた場合の拘束応力推定 (異形鉄筋, 膨張材を用いない場合)

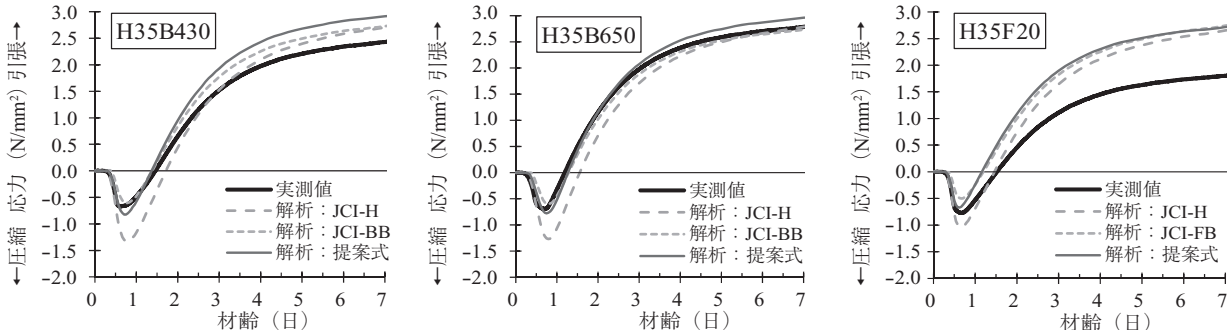


図 - 15 各推定式を用いた場合の拘束応力推定 (インバー鋼材, 膨張材を用いない場合)

時に生じる引張応力の推定精度は明らかに 20℃ 一定より高温履歴考慮の方が向上した。若材齢時のコンクリートの引張強度は小さく、ひび割れ発生リスクの評価に引張応力の推定精度が与える影響は大きい。このため、自己収縮が無視できないマスコンクリート部材において温度ひび割れ解析を行う場合には、自己収縮ひずみの高温履歴の影響を考慮することが重要と考えられる。

(2) 提案式を用いた温度応力推定

2章で示した圧縮強度発現と自己収縮ひずみ推定の提案式を用いた場合の温度応力推定精度を、JCI 指針の早強ポルトランドセメント (JCI-H)、高炉セメント B 種 (JCI-BB)、フライアッシュセメント B 種 (JCI-FB) の各推定式を用いた場合と比較した。なお、コンクリートの温度履歴は、断熱温度上昇量の他にも熱伝達条件等、影響要因が多いため、今回の検討においては各供試体の実測値を用いた。

膨張材を用いない 3 配合において、各推定式を用いた場合の解析結果を図 - 14, 15 に示す。異形鉄筋の場合に顕著にみられるように、材齢 1 日程度までの拘束応力の推定精度は、提案式を用いることで向上することが分かる。材齢 7 日の引張応力に着目すると、H35B650 の場合、既存の推定式では実測値を過小評価する場合もみられるが、提案式を用いると同等以上となった。一方、H35B430 と H35F20 の場合、提案式を用いても実測値を明らかに過大評価した。この要因として、自己収縮ひずみ推定式の提案に用いたデータでは、B650 と比較して B430 の自己収縮ひずみは若干小さい程度であり<sup>5)</sup>、表 - 5 では両者の推定式の各係数を同一としたが、図 - 4 に示すように今回の試験では H35B650 と比較して H35B430 の自己収縮ひずみが明らかに小さくなったことが挙げられる。H35F20 では、

フライアッシュの化学特性によっては自己収縮ひずみが変動するおそれがあること<sup>16)</sup>を考慮し、自己収縮ひずみ推定式の係数を安全側に設定したこと<sup>1)</sup>が影響したと考えられる。

このように、提案式を用いると、既存の推定式と比べて若材齢時の応力推定精度が向上すること、混和材の品質のばらつきを考慮しているため引張応力を過大評価する傾向にあるものの、自己収縮ひずみが最も大きい H35B650 も含めて最大引張応力を安全側に評価できることを確認できた。

(3) 膨張材を用いた場合の応力低減効果の評価

膨張材を用いた H35B650EX において、表 - 8 の 4 ケースの膨張ひずみを用いた解析結果を実測値と比較して図 - 16 に示す。「無拘束膨張」のケースに着目すると、異形鉄筋とインバー鋼材を用いた場合のいずれにおいても若材齢時の圧縮応力を過大評価し、引張側に応力が推移しても解析値は実測値より小さく、ひび割れ発生に対して危険側の評価を与えた。膨張コンクリートの拘束応力推定において、温度上昇時のヤング係数の低減係数は、JCI 指針の値より小さく設定する必要があることが指摘されている<sup>17)</sup>。同様に、H35B650EX の無拘束の膨張ひずみと JCI 指針の低減係数の値を組み合わせると膨張材の効果を過大評価すると考えられる。一方、図 - 16 の他の 3 ケースの比較では、異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力どちらも「収縮 + JIS 膨張」のケースが若材齢時からの応力の経時変化をもっとも適切に評価できた。これと比較すると若材齢時の推定精度は劣るものの「拘束φ 11 膨張」と「収縮 + JCI 膨張式」のケースも、材齢 2 日以降はほぼ拘束応力を評価でき、材齢 7 日の最大引張応力は「収縮 + JIS 膨張」と同程度となった。

これらの結果から、JCI 指針の有効ヤング係数法を用いて、高炉スラグ微粉末 6000 に膨張材を併用した場合の応力低減効果を評価する際、無拘束供試体で得られた膨張材を用いない場合の自己収縮ひずみと JIS A 6202 附属書 2 の試験で得られた膨張ひずみを重ね合わせたひずみを用いることでおおむね評価できると考えられる。また、PC 鋼棒 (φ 11) を用いて高温履歴を与えた供試体のひずみ、あるいは膨張材を用いない場合の無拘束供試体の自己収縮ひずみと JCI 指針の算定式で得られる膨張ひずみを重ね合わせたひずみを用いても比較的精度よく膨張材の効果を評価できると考えられる。

## 5. おわりに

本報では、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートを PC 橋に適用する場合を対象に、温度応力解析に用いる物性値を示すとともに、マスコンクリートの高温履歴を模擬した拘束試験を行い、今回対象としたコンクリートにおいても、既存の手法と同様にひび割れ指数によって温度ひび割れ発生リスクを評価できることを確認した。FEM 解析を用いた拘束応力推定に関しては、混和材を用いたコンクリートにおいても、コンクリートの物性値が把握できていれば、自己収縮の影響を考慮した温度応力は有効ヤング係数法を用いた既存の解析手法でおおむね推定できることが分かった。また、混和材の使用の有無によらず、自己収縮ひずみの高温履歴を考慮することによって温度応力の解析精度が向上した。さらに、FEM 解析による膨張材の応力低減効果についても、既存の手法や算定式を用いてほぼ評価できることが明らかとなった。

なお、本報やマニュアル (案) で示した混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れに関する知見は、配合などがざられた範囲で得られた結果に基づいたものであるため、今後データを蓄積して、さらなる信頼性向上に努める必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) (国研) 土木研究所, (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (II) - 混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル (案) -, 共同研究報告書第 472 号, 2016.
- 2) 石井 豪, 中村英佑, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響, 第 23 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.59-64, 2014.
- 3) 長谷川剛, 北野勇一, 石井 豪, 中村英佑: 混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性について, 第 24 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.507-510, 2015.
- 4) 北野勇一, 長谷川剛, 石井 豪, 中村英佑: 混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇量の予測, 第 24 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.511-514, 2015.
- 5) 北野勇一, 鈴木雅博, 石井 豪, 中村英佑: 混和材利用早強コンクリートの自己収縮特性とその予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.355-360, 2015.
- 6) 中村英佑, 鈴木雅博, 石井 豪, 古賀裕久: 混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する実験的研究, 第 24 回

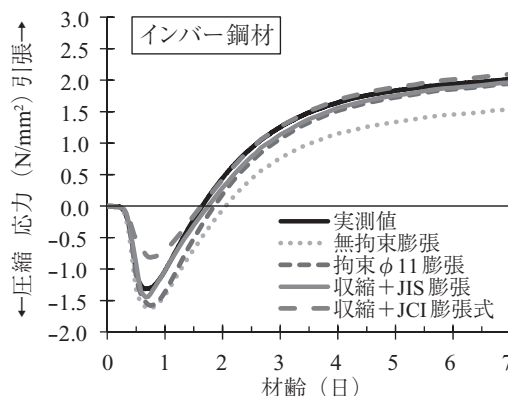
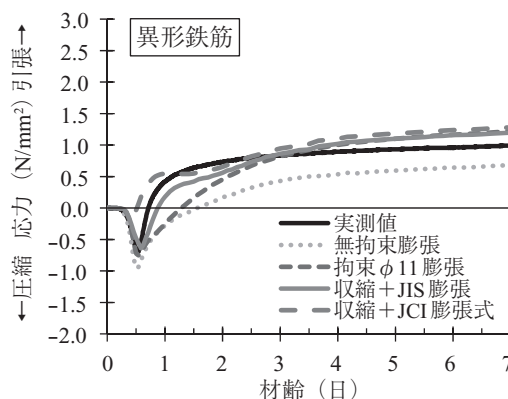


図 - 16 膨張材を用いた場合の拘束応力推定

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.515-520, 2015.

- 7) 河金 甲, 中村英佑, 鈴木雅博, 石井 豪: 混和材を用いたコンクリートの初期応力推定に関する検討, 第 24 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.521-526, 2015.
- 8) 中村英佑, 石井 豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.3, pp.54-60, 2014.
- 9) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.
- 10) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.
- 11) 国土交通省土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書 - 現場打ち高強度コンクリート施工マニュアル (案) -, 共同研究報告書第 266 号, pp.119-122, 2001.
- 12) 佐藤重一, 河野広隆, 渡辺博志, 丁 海文: 現場打ち高強度コンクリートの初期ひび割れに関する検討, 第 10 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.551-556, 2000.
- 13) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集, pp.459-461, 2004.
- 14) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書, pp.269-271, 2006.
- 15) 日本コンクリート工学協会: (仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法, 超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), pp.209-210, 1994.
- 16) 堀田智明, 名和豊春: モルタル硬化体の自己収縮に及ぼすフライアッシュ品質の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.165-170, 2002.
- 17) 三谷裕二, 谷村 充, 松本健一, 佐竹紳也: マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1295-1300, 2006.

[2016 年 10 月 26 日受付]