

## 論文 混和材を用いた PC 構造物の初期ひび割れ抵抗性

河金 甲<sup>\*1</sup>・小林 崇<sup>\*2</sup>・長谷川 剛<sup>\*3</sup>・鈴木 雅博<sup>\*1</sup>

**要旨：**早強ポルトランドセメントとフライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を組み合わせたコンクリートを PC 構造物に適用した場合の初期ひび割れ抵抗性を、圧縮強度発現と温度履歴が異なる自己収縮ひずみの実験値を用いた FEM 解析により検討した。PC 箱桁橋の柱頭部と張出部において検討した結果、柱頭部のウェブでは混和材の有無や自己収縮ひずみの高温履歴考慮がひび割れ指数に及ぼす影響が小さいが、より部材が薄い張出部の上床版や内部拘束が卓越する柱頭部の横桁表面においては、自己収縮ひずみの高温履歴を考慮すると、混和材の有無によらず自己収縮によるひび割れ指数の低下が顕著になることなどが確認された。

**キーワード：**混和材，早強ポルトランドセメント，PC 構造物，初期ひび割れ抵抗性，自己収縮

## 1. はじめに

産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートは、環境負荷を低減させるだけでなく耐久性に優れることはよく知られている。フライアッシュや高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは PC 構造物へも採用されつつあるが、今後、PC 構造物のライフサイクルにわたる低炭素化を一層図る観点より、さらなる有効利用が求められてくるものと考えられる。この場合、PC 構造物の施工において早期のプレストレス導入強度確保が必要な場合が多く、早強ポルトランドセメントと混和材の組み合わせが想定される。

一方、高炉セメント B 種を用いた場合、普通ポルトランドセメント等を用いた場合より自己収縮ひずみが大きくなることが明らかとなっている<sup>1)</sup>。さらに、高温履歴を受けるとセメントの種類に関係なく自己収縮ひずみが増大する傾向があることが指摘され、自己収縮ひずみ予測式には高温履歴の影響が考慮されている<sup>2)</sup>。このような高炉スラグ微粉末の使用や高温履歴が自己収縮ひずみに及ぼす影響は、早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせたコンクリートにおいても同様に生じることを既往の実験で確認した<sup>3)</sup>。

混和材をセメントの一部として置換すると、自己収縮ひずみの増大に加えて初期強度発現の遅れ等、PC 構造物の品質確保に重要な初期ひび割れ抵抗性に影響を与える可能性があると考えられる。しかしながら、混和材の使用が PC 構造物の初期ひび割れ抵抗性へ及ぼす影響について十分なデータが蓄積されていないのが現状である。そこで、既往の実験<sup>3)</sup>で得られたデータを元に、PC 構造物に混和材を用いた場合の初期ひび割れ抵抗性およびこれへの自己収縮ひずみの高温履歴考慮の影響を FEM 解析により検討した。

2. 早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせたコンクリートの特性<sup>3)</sup>

## 2.1 コンクリートの配合

検討に用いるコンクリートの配合を表-1 に示す。設計基準強度は 40N/mm<sup>2</sup> とし、材齢 3 日でプレストレス導入強度 30N/mm<sup>2</sup> が確保できるよう配合を決定した。早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 は水結合材比を 40% とし、これをベースに混和材を用いた 3 配合のコンクリートを検討に用いた。これまでの実績から結合材に対する混和材利用率は、H35F20 はフライアッシュ II 種を 20%、H35B430 は高炉スラグ微粉末 4000 を 30%、H35B650 は高炉スラグ微粉末 6000 を 50% とした。なお、強度発現が H40 と同等となるよう、混和材を用いた場合の水結合材比は全て 35% とした。

## 2.2 コンクリートの特性

上記 4 配合のコンクリートの圧縮強度と自己収縮ひずみの推移を図-1 と図-2 にそれぞれ示す。自己収縮ひずみは、温度履歴の異なる小型供試体 (100×100×400mm) と厚さ 200mm の発泡スチロールにより全面を覆って簡易的な断熱を行ったマスブロック (400×400×400mm) を用いて測定した。供試体中央に設置した埋込

表-1 コンクリート配合

| 配合名     | 水結合材比 W/B | 混和材利用率 | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |     |     |     |
|---------|-----------|--------|--------------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|
|         |           |        | W                        | HPC | FA | B4  | B6  | S   | G   |
| H40     | 40%       | 0%     | 165                      | 413 | -  | -   | -   | 758 | 968 |
| H35F20  | 35%       | 20%    |                          | 377 | 94 | -   | -   | 682 |     |
| H35B430 |           | 30%    |                          | 330 | -  | 141 | -   | 700 |     |
| H35B650 |           | 50%    |                          | 236 | -  | -   | 236 | 695 |     |

HPC：早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm<sup>3</sup>，比表面積4580cm<sup>2</sup>/g)，

FA：フライアッシュ II 種(密度2.08g/cm<sup>3</sup>，比表面積3810cm<sup>2</sup>/g)，

B4：高炉スラグ微粉末4000(密度2.89g/cm<sup>3</sup>，比表面積3810cm<sup>2</sup>/g)，

B6：高炉スラグ微粉末6000(密度2.91g/cm<sup>3</sup>，比表面積6170cm<sup>2</sup>/g)，

S：細骨材，G：粗骨材

\*1 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 博(工) (正会員)

\*2 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 (正会員)

\*3 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会

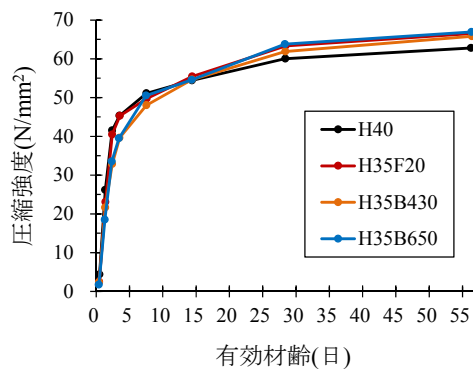


図-1 圧縮強度の推移

型ひずみ計（標点距離 100mm）を用いて測定したひずみから、材齢 56 日以降に小型供試体を用いて測定した熱膨張係数を全材齢に適用して温度ひずみを補正した。

全ての供試体の練上がり温度は 20℃とし、圧縮強度測定用の供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）と小型供試体は 20℃の室内で封かん養生とした。混和材を用いた配合は W/B を 5%低減させたことにより、自己収縮ひずみ測定用供試体のコンクリートの温度履歴に混和材の有無の影響はほとんどみられず、最高温度は小型供試体が 25℃程度、マスブロックが 82℃程度であった。なお、有効材齢<sup>2)</sup>はそれぞれの供試体の実験値を用いて算出した。

図-1 より圧縮強度は有効材齢 7 日でほぼ同程度になり、その後は混和材を用いた配合は H40 の強度を上回っている。有効材齢 7 日までの強度発現は高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 は、H40 および H35F20 と比較して遅く、このような強度発現の違いが初期ひび割れ抵抗性に影響する可能性があると考えられる。

図-2 に示した自己収縮ひずみの推移をみると、全ての配合で小型供試体よりもマスブロックの方が自己収縮ひずみの増加速度が早く、また最大値も大きくなっており、高温履歴の影響が確認できる。配合間の比較では、H40 を基準にすると、自己収縮ひずみの最大値は H35F20 の場合は小さいが、H35B430 と H35B650 の場合は明らかに大きい。なお、H40 と H35B430 のマスブロックにおける自己収縮ひずみ有効材齢 7 日を過ぎて減少した理由は解明できていないが、検討には補正せずに用いた。

一方、初期ひび割れ抵抗性に及ぼす要因の中で、今回の配合では、熱膨張係数、クリープ係数、弾性係数は同程度であった<sup>3,4)</sup>。また、早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせた場合の圧縮強度と引張強度との関係も混和材を用いない場合とほぼ同等との報告もある<sup>5)</sup>。

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析対象

コンクリート温度応力解析プログラム（ASTEAMACS）を用いて 3 次元 FEM 解析による PC 構造物の初期ひび

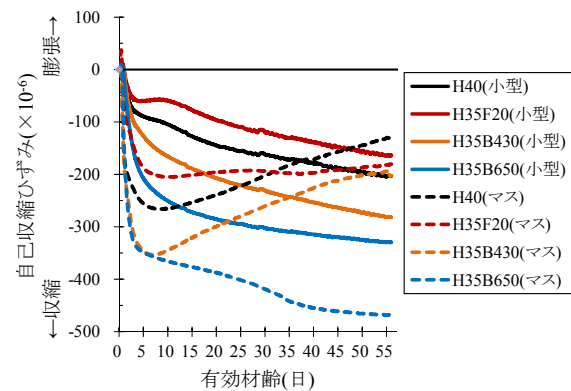
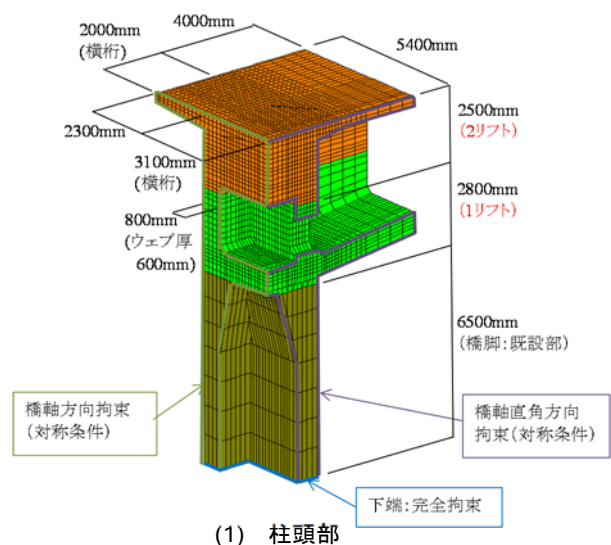
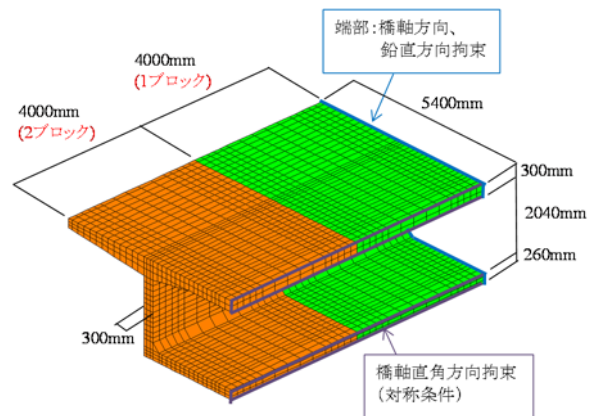


図-2 自己収縮ひずみの推移



(1) 柱頭部



(2) 張出部

図-3 解析モデル

割れ抵抗性の検討を行った。解析モデルを図-3 に示す。解析対象は、片持張出架設により施工する PC 箱桁橋の柱頭部と張出部とした。

柱頭部はマスコンクリートとなるため、温度応力が卓越する場合を想定している。2 リフトにわけてコンクリート打込みを行い、打込み間隔は 16 日間とした。一方、部材が柱頭部と比較すると薄い張出部は、自己収縮が卓越する場合を想定している。1 ブロックと 2 ブロックの打込み間隔は 10 日間とした。解析は、最後のコンクリー

表-2 検討ケース

| シリーズ | 配合                                              | 圧縮強度    | 自己収縮                             | 外気温 (°C)                | 熱膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C) |
|------|-------------------------------------------------|---------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| (A)  | (1)H40<br>(2)H35F20<br>(3)H35B430<br>(4)H35B650 | 各配合の実験値 | 各配合の実験値<br>(1)小型供試体<br>(2)マスブロック | 20                      | 10                            |
| (B)  | (1)H40<br>(2)H35B650                            | 各配合の実験値 | 各配合の実験値<br>(1)小型供試体<br>(2)マスブロック | (1)10<br>(2)20<br>(3)30 | 10                            |
| (C)  | (1)H40<br>(2)H35B650                            | 各配合の実験値 | 各配合の実験値<br>(1)小型供試体<br>(2)マスブロック | 20                      | (1) 8<br>(2)10<br>(3)12       |

表-3 コンクリート物性値

| 圧縮強度        | 各配合の実験値                                                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 引張強度        | $0.13f_c'^{0.85}$ (f'圧縮強度の実験値)                                                                             |
| 有効ヤング係数     | $\phi_e \times 6.3 \times 10^3 f_c'^{0.45}$<br>(ピーク温度時まで $\phi_e=0.42$ , 最高温度に達する有効材齢+1日以降 $\phi_e=0.65$ ) |
| 熱伝導率        | 2.7 W/m°C                                                                                                  |
| 比熱          | 1.15 KJ/kg°C                                                                                               |
| 密度          | 2400 kg/m <sup>3</sup>                                                                                     |
| 断熱温度上昇量     | 示方書準拠(H40配合)                                                                                               |
| ポアソン比       | 0.2                                                                                                        |
| 乾燥収縮        | 考慮しない                                                                                                      |
| 自己収縮        | 各配合の実験値                                                                                                    |
| コンクリート打込み温度 | 外気温+5°C                                                                                                    |

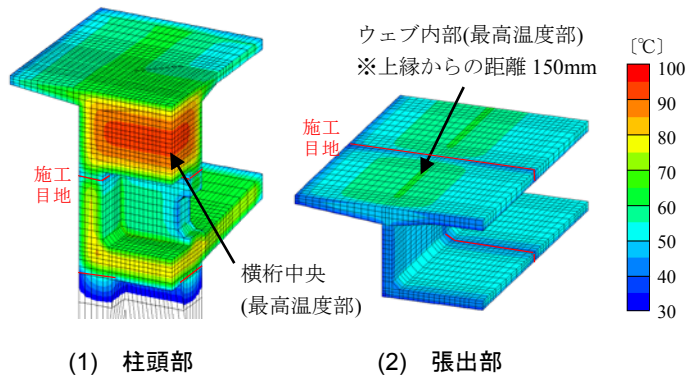


図-4 最高温度分布 (外気温 20°C)

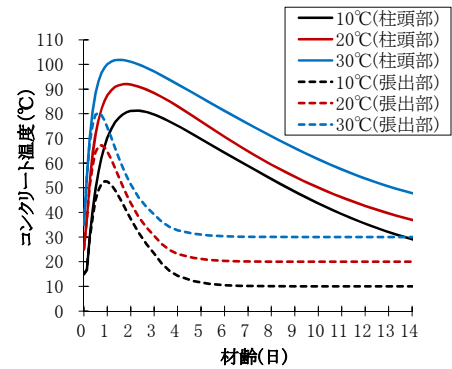


図-5 コンクリート温度履歴 (最高温度部)

ト打込み後、材齢 28 日まで行った。

### 3.2 検討ケース

検討ケースの一覧を表-2 に示す。全ての検討において、自己収縮の高温履歴考慮の影響を確認するため小型供試体とマスブロックそれぞれの自己収縮ひずみの実験値を用いて比較した。

シリーズ(A)は今回の配合で混和材使用の影響がみられた各配合の圧縮強度と自己収縮ひずみの実験値を用いて、混和材の有無がひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討した。シリーズ(B)では外気温、シリーズ(C)では熱膨張係数それぞれが変動した場合において、混和材の有無による影響度を検討した。今回の配合では熱膨張係数に差がみられなかったが、高炉セメント B 種では一般的な  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ではなく  $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  を標準としていること<sup>2)</sup>、骨材の影響によるばらつきが大きく  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  以下となる場合もあること<sup>1)</sup>を考慮し、熱膨張係数の変動も検討ケースとして追加した。シリーズ(B)とシリーズ(C)は混和材を用いない H40 と自己収縮が最も大きかった高炉スラグ微粉末を用いた H35B650 により検討を行った。

### 3.3 解析条件

解析に用いたコンクリートの物性値を表-3 に示す。混和材使用の影響が顕著にみられた圧縮強度発現と自己収縮ひずみの違いがひび割れ抵抗性に及ぼす影響に着目するため、これら以外の物性値は、H40 配合におけるコンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に準拠した設計値で同一とした。

熱伝達率は、養生マットは  $5\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 、木製型枠は  $8\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 、鋼製型枠(張出部に使用)は  $14\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 、コンクリート露出面は  $13\text{W}/\text{m}^2\text{C}$  とした。なお、養生期間は、柱頭部は 7 日間、張出部は 3 日間とした。

## 4. 解析結果

### 4.1 コンクリート温度

図-4 に外気温 20°C における柱頭部と張出部のコンクリート最高温度分布を示す。柱頭部では横桁中央、張出部では上縁から 150mm のウェブ内部が最高温度部となった。シリーズ(B)の検討における、外気温 10°C、20°C、30°C と変化させた場合の最高温度部の打込み直後からの温度履歴を図-5 に示す。外気温 20°C 時の最高温度は、柱頭部では 92°C、張出部では 67°C であった。これをマスブロックのコンクリート最高温度と比べると、柱頭部では 10°C 程度高く、張出部では 15°C 程度低い。外気温を変化させるとさらにその差は大きく場合もあるが、現段階では温度履歴と自己収縮ひずみのデータが蓄積されていないため、マスブロックの自己収縮ひずみをそのまま用いて温度履歴考慮の影響を検討する。

### 4.2 ひび割れ指数

#### (1) 検討箇所

ひび割れ抵抗性は、式(1)に示すひび割れ指数( $I_{cr}(t)$ )により考察した。

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t)/\sigma_t(t) \quad (1)$$

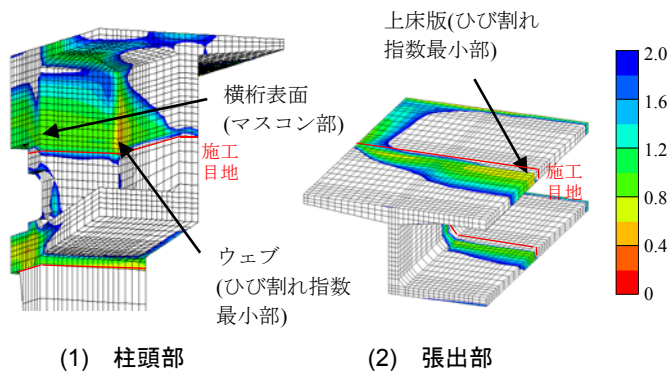


図-6 最小ひび割れ指数分布 (H35B650(マスブロック))

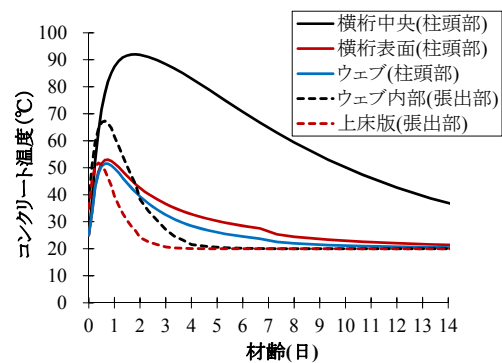


図-7 コンクリート温度履歴  
(ひび割れ指数検討箇所、外気温 20℃)

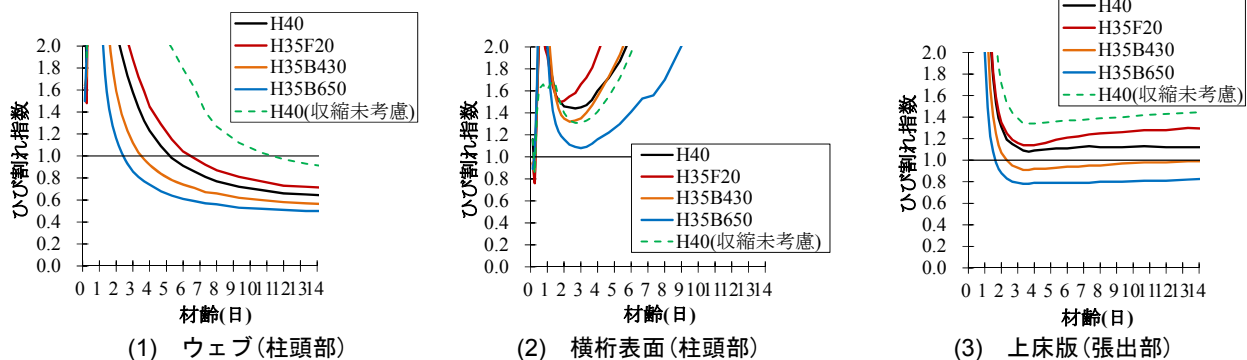


図-8 ひび割れ指数の推移 (自己収縮：小型供試体)

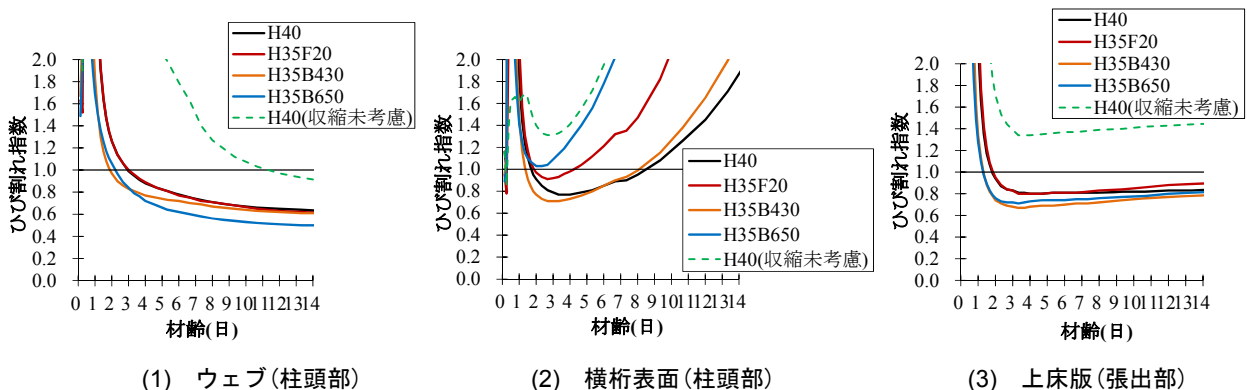


図-9 ひび割れ指数の推移 (自己収縮：マスブロック)

ここで、 $f_{tk}(t)$ ：材齢  $t$  日におけるコンクリート引張強度、 $\sigma_t(t)$ ：材齢  $t$  日におけるコンクリート最大主引張応力度、である。ひび割れ指数が小さいことは、ひび割れが発生しやすいことを示す。

図-6 に最小ひび割れ指数分布の一例として、シリーズ(A)におけるマスブロックの自己収縮ひずみを用いた場合の H35B650 の結果を示す。この図に示すように全てのケースで柱頭部では横桁付近のウェブ、張出部では上床版の上縁においてひび割れ指数は最小となった。さらにマスコンとなっている柱頭部において図-6(1)に示すように横桁表面のひび割れ指数も小さかった。このため、図-6 に示した 3 点においてひび割れ指数を比較することにした。これら 3 点と図-4 で示した最高温度部での外気温 20℃ の場合の温度履歴を併せて図-7 に示す。柱

頭部では 40℃、張出部では 16℃と柱頭部の方が最小ひび割れ指数部と中心部との温度差は大きい。

## (2) 混和材の影響 (シリーズ(A))

図-8 に小型供試体から得られた 20℃一定のときの自己収縮ひずみを用いた場合 (以下、20℃一定)、図-9 にマスブロックから得られた高温履歴を考慮した自己収縮ひずみを用いた場合 (以下、高温履歴考慮)、それぞれのひび割れ指数の推移を示す。図中には、自己収縮の影響を検討するため H40 の自己収縮未考慮の場合 (以下、収縮未考慮) の結果も併せて示している。

ひび割れ指数が最小となった柱頭部のウェブと張出部の上床版は、収縮未考慮の場合の推移や図-7 の温度履歴からもわかるように温度降下に伴い (柱頭部では材齢 1～5 日、張出部では材齢 1～3 日)、ひび割れ指数が低



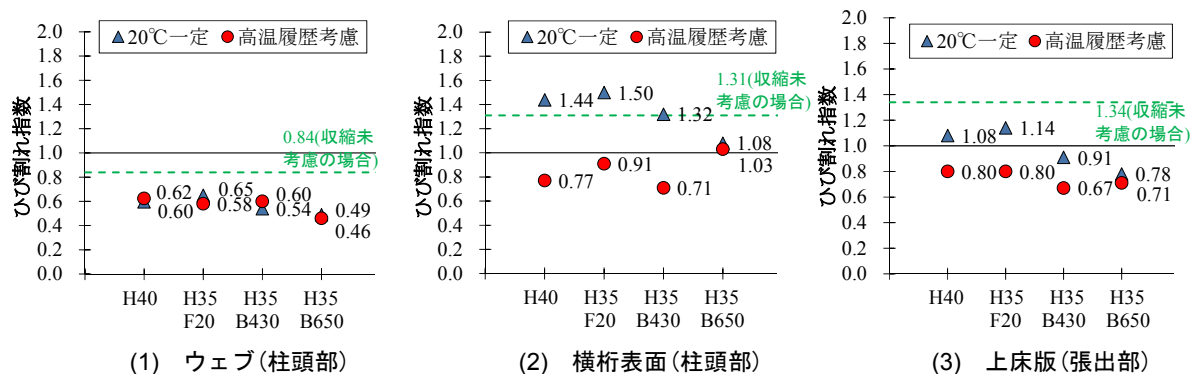


図-10 最小ひび割れ指数の比較 (シリーズ(A))

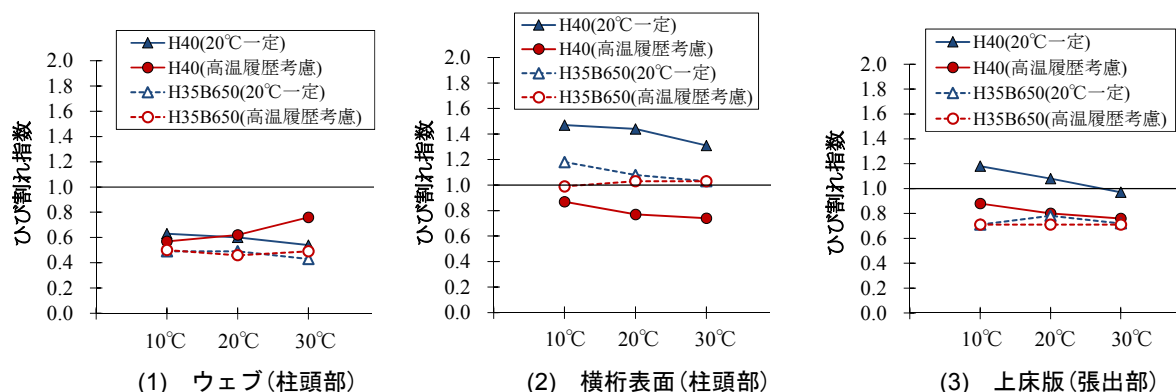


図-11 最小ひび割れ指数の比較 (シリーズ(B))

下した。コンクリート温度が低下するまでひび割れ指数の低下が継続していることから、これらの箇所においては既設部の外部拘束が卓越していると考えられる。

一方、マスコンとなった柱頭部の横桁表面においては、材齢 0.5 日以前は温度上昇時、材齢 3 日までは温度降下時の急激な温度変化に伴い、ひび割れ指数が低下している。しかし、これらの低下はすぐに増加に転じた。この検討箇所は既設部に近いため外部拘束の影響もあるが、ひび割れ指数の低下は一時的なものであり、内部拘束の方が卓越していると考えられる。

それぞれの最小ひび割れ指数の比較を図-10 に示す。なお、図-8(2)と図-9(2)の材齢 0.5 日以前でみられる温度上昇時の一時的なひび割れ指数の低下は、コンクリート引張強度が極めて小さい段階で生じたものであり、発生応力も小さく部材への影響は少ないと考えられるので、検討からは除いた。

ひび割れ指数が最小であった箇所に着目すると、部材厚は柱頭部のウェブが 600mm、張出部の上床版が 300mm と 2 倍異なり、図-10(1)と図-10(3)から両者の収縮未考慮の場合のひび割れ指数の差も 0.50 と柱頭部のウェブの方が温度応力によるひび割れ指数低下の影響が大きい。温度応力の影響が大きい柱頭部のウェブでは、各配合において 20°C 一定と高温履歴考慮の結果にほとんど差がみられなかった。配合間で比較すると、自己収縮が

大きかった高炉スラグ微粉末を用いた配合でも、H40 と比較すると、H35B430 が平均 0.05、H35B650 が平均 0.14 の低下で収まっている。このように、図-2 では、小型供試体とマスブロックの自己収縮ひずみの進行速度や大きさは異なるものの、柱頭部のウェブにおける最小ひび割れ指数の差は小さかった。しかし、温度応力が小さく自己収縮が卓越すると考えられる張出部上床版においては、20°C 一定と高温履歴考慮のひび割れ指数に明確な差が認められ、高温履歴考慮の場合は混和材の有無によらず自己収縮によるひび割れ指数の低下が顕著にみられた。さらに、20°C 一定では配合間の差も顕著になる一方、高温履歴考慮では最大でも差は 0.13 と小さく傾向が異なる。これらの結果より、張出部上床版のような部材が薄く温度応力が小さい部材では、自己収縮の高温履歴考慮がひび割れ抵抗性の評価に影響することがわかる。

一方、図-10(2)の内部拘束が卓越する柱頭部の横桁表面では、20°C 一定の場合のひび割れ指数が、収縮未考慮の場合に対して大きいものもみられる。さらに、高温履歴考慮の場合は最も自己収縮ひずみが大きい H35B650 が他の 3 配合よりひび割れ指数が大きくなった。これらは、内部の高温部において自己収縮が進行し、結果として内外のひずみ差が減少したことが一因として考えられる。このように内部拘束が卓越する場合は、ひび割れ指数が改善される場合もある。ただし、高温履歴考慮の自

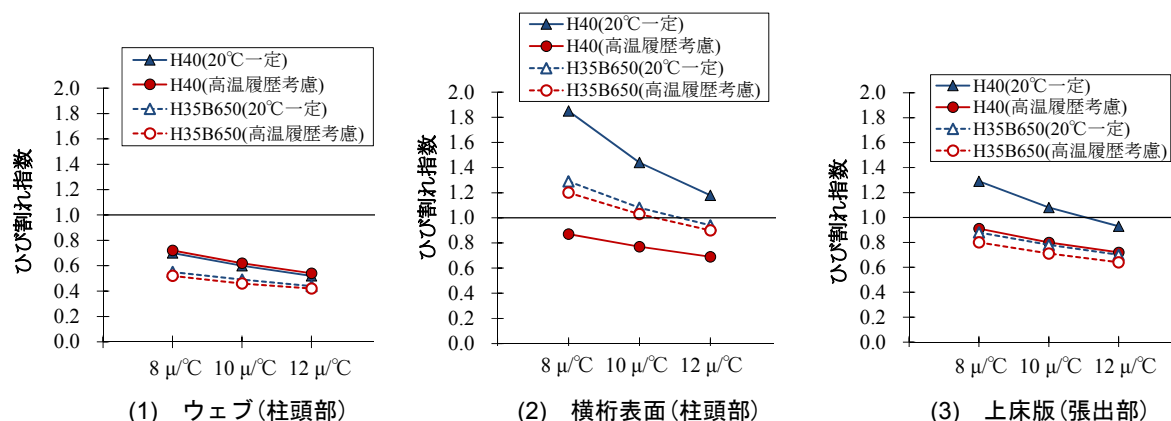


図-12 最小ひび割れ指数の比較 (シリーズ(C))

己収縮ひずみを用いると、明らかに収縮未考慮の場合よりひび割れ指数が小さくなった。

### (3) 外気温の影響 (シリーズ(B))

外気温を変化させた場合の最小ひび割れ指数の比較を図-11に示す。H40の場合、図-11(1)の柱頭部のウェブの高温履歴考慮を除くと、検討位置にかかわらず外気温の増加に伴いひび割れ指数が低下する傾向がみられる。一方、H35B650の場合、図-11(2)の柱頭部の横桁表面の20°C一定はH40と同様の傾向がみられるものの、他の5ケースは外気温が変動してもひび割れ指数はほとんど変化しなかった。このように、混和材の有無により外気温の影響が異なる可能性があり、高炉スラグ微粉末を用いた場合は最小ひび割れ指数に及ぼす外気温の影響は小さい傾向がみられた。

### (4) 熱膨張係数の影響 (シリーズ(C))

熱膨張係数を変化させた場合の最小ひび割れ指数の比較を図-12に示す。この図に示すように、全てのケースにおいて熱膨張係数が大きくなるとひび割れ指数が低下した。H40の20°C一定の場合がより顕著になる傾向があるものの、総じて熱膨張係数が増加することによるひび割れ指数の影響は高炉スラグ微粉末の使用や自己収縮ひずみの高温履歴考慮にかかわらず同程度であった。

## 5. まとめ

早強ポルトランドセメントと混和材を組み合わせたコンクリートのひび割れ抵抗性を、PC箱桁橋の柱頭部と張出部において検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 外部拘束が卓越する部材において、部材が厚い柱頭部のウェブでは混和材の有無や自己収縮ひずみの高温履歴考慮がひび割れ指数に及ぼす影響は小さかった。一方、部材が薄い張出部の上床版においては、自己収縮ひずみの高温履歴考慮がひび割れ指数に及ぼす影響が顕著にみられた。

- (2) 内部拘束が卓越する柱頭部の横桁表面において、自己収縮ひずみを考慮するとひび割れ指数が改善される場合がみられた。ただし、高温履歴を受けた自己収縮ひずみを用いると自己収縮を考慮しない場合よりひび割れ指数は低下した。

- (3) ひび割れ指数に及ぼす外気温の影響は、高炉スラグ微粉末を用いた場合に小さくなる傾向がみられた。

- (4) 熱膨張係数の変動に対するひび割れ指数の影響に高炉スラグ微粉末の使用や自己収縮ひずみの高温履歴考慮の影響はみられなかった。

なお、本研究は、(独)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ほか国内7機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施したものである。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]，2013.3
- 2) 日本コンクリート工学会：マスコンのひび割れ制御指針 2008，2008.11
- 3) 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，プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集，pp.59-64，2014.10
- 4) 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. 54-60，2014.5
- 5) 舟橋政司，白根勇二，荻野正貴，中村英佑：低炭素型のコンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，pp. 232-237，2014.7