

# 論文 各種の結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性およびその向上策に関する基礎研究

呉 承寧<sup>\*1</sup>・俵 道和<sup>\*2</sup>・佐藤秀哉<sup>\*3</sup>・尼子大輔<sup>\*4</sup>

**要旨**：本文は、各種の結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性およびその向上策を検討するために、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントおよび早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を混合した結合材をそれぞれ用いたコンクリートの自由収縮と拘束収縮試験を行い、拘束ひび割れの発生とひび割れ指数およびクリープ特性との関係を検討し、さらに、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮低減と拘束ひび割れ抵抗性の向上策として湿潤養生期間、膨張材、収縮低減剤、収縮低減タイプA E減水剤、塗布型収縮低減剤および吸水性樹脂の効果を調べたものである。

**キーワード**：結合材の種類、自由収縮、拘束収縮、拘束ひび割れ、収縮低減方法

## 1. はじめに

近年、地球環境負荷低減を目的としてセメントおよびコンクリートに産業副産物である高炉スラグ微粉末の使用は増える傾向にある。さらに、高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、ポルトランドセメント単味を用いたコンクリートに比べ、比較的高い塩化物イオン浸透抵抗性およびアルカリ骨材反応の抑制効果があるため、コンクリート構造物耐久性の向上にも適用されている。しかし、高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、自己収縮が比較的大きく、ひび割れが発生しやすいとの指摘もある<sup>1), 2), 3)</sup>。

コンクリートの収縮によるひび割れの発生は、コンクリートの自己収縮だけではなく、コンクリートの乾燥収縮とクリープとの関係もある。本文は、高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮ひび割れの発生原因の解明と改善策を検討するために、各種の結合材を用いたコンクリートにおいて、自由収縮ひずみ、拘束収縮ひずみ、拘束ひび割れ発生時の引張強度と静弾性係数を測定し、**図-1**に示す概念のように、拘束ひび割れ発生時のひび割れ指数とクリープひずみを算出し、ひび割れ抵抗性との関係を検討した。さらに、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮低減と拘束ひび割れ抵抗性の向上策として湿潤養生期間、膨張材、収縮低減剤、収縮低減タイプA E減水剤、塗布型収縮低減剤および吸水性樹脂の効果を調べた。

本研究に用いた結合材は、高炉セメント B 種の他に、一般的に広く使われている普通ポルトランドセメントおよびプレストレストコンクリート構造物に使われている早強ポルトランドセメント、さらに、プレストレス

トコンクリート構造物の塩害対策として使われている、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50% 置換した結合材である。

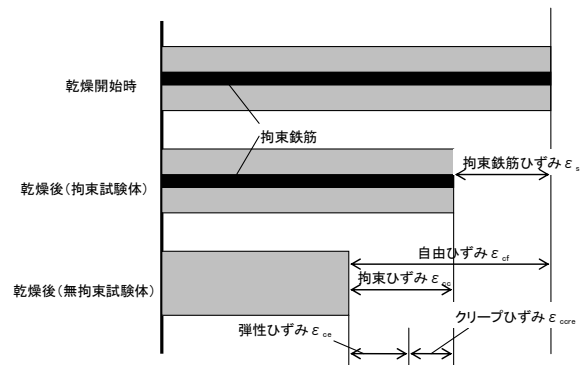


図-1 各ひずみの概念<sup>4)</sup>

## 2. 試験の概要

### 2.1 使用材料

結合材は、高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、および 50% 早強ポルトランドセメントと 50% 高炉スラグ微粉末を混合した結合材である。

これらの結合材、骨材および減水剤などの使用材料の成分と物性を**表-1**に示す。

また、コンクリートのひび割れ抵抗性の向上策に使用された膨張材、収縮低減剤、収縮低減タイプA E減水剤、塗布型収縮低減剤および吸水性樹脂、拘束供試体に使われた拘束鉄筋の成分と物性をも**表-1**に示す。

\*1 愛知工業大学 都市環境学科教授 博士 (工学) (正会員)  
 \*2 オリエンタル白石 (株) 技術研究所研究員 工修 (正会員)  
 \*3 オリエンタル白石 (株) 東京支店施工技術部課長  
 \*4 オリエンタル白石 (株) 福岡支店施工技術部係長

表-1 使用材料

材料名	成分・物性	記号
普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm <sup>3</sup>	N
早強ポルトランドセメント	密度=3.14 g/cm <sup>3</sup>	H
高炉セメント B種	密度=3.04 g/cm <sup>3</sup>	BB
高炉スラグ微粉末	比表面積=5760cm <sup>2</sup> /g, 密度=2.91g/cm <sup>3</sup> , SO <sub>3</sub> =3.12%	BFS
細骨材	砕砂, F.M.=2.77, 密度=2.66 g/cm <sup>3</sup>	S
粗骨材	2005 砕石, 密度=2.66 g/cm <sup>3</sup>	G
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	SP
膨張材	石灰系, 密度=3.15 g/cm <sup>3</sup>	E
収縮低減剤	低級アルコール系	SR
収縮タイプ AE 減水剤	リグニンとポリカルボン酸複合系	LS
塗布型収縮減水剤	低級アルコール系	CS
吸水性樹脂	変性アクリル系架橋重合体粉末, 吸水倍率=193 倍	Poly
拘束鉄筋	D22, SD345	

2.2 コンクリートの配合

本試験に、使用したコンクリートの示方配合は、表-2 に示すように、水結合材比、単位水量および細骨材率を一定とし、結合材の種類だけ変えたものである。

表-2 コンクリートの示方配合

配合	セメントの種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				水 W	セメント C	混和材	高炉スラグ微粉末 BFS	細骨材 S	粗骨材 G	収縮低減剤	減水剤
N	普通	37	42	165	446	0	0	725	1001	0	2.230
H	早強			165	446	0	0	724	1000	0	2.230
BB	高炉			165	446	0	0	719	992	0	2.230
BFS	早強			165	223	0	223	718	991	0	1.784
BFS-E				165	203	E=20	223	718	991	0	1.784
BFS-SR				165	223	0	223	718	991	6	1.561
BFS-LS				165	223	0	223	718	991	0	6.243
BFS-Poly				165	223	Poly=0.2	223	718	991	0	1.784

2.3 試験項目

(1) コンクリートの自由収縮ひずみ

コンクリートの自由収縮ひずみは、100×100×400mm 角柱供試体を用いて JIS 1129-3 に準拠してダイヤルゲージで測定した。但し、供試体は材齢 24 時間で脱型後に 20℃の水中に材齢 7 日まで養生し、基長を測定し、温度 20℃、相対湿度 60%の室内で保管した。

(2) コンクリートの拘束収縮ひずみ

温度 20℃、相対湿度 60%の室内に保管された、図-2 に示す 100×100×1000mm 角柱のコンクリート供試体に埋め込まれた D22 異型鉄筋のひずみを測定し、コンクリートの自由ひずみから鉄筋ひずみを引いて、コンクリートの拘束収縮ひずみを算出した。

(3) コンクリートの拘束引張応力

拘束供試体中の拘束鉄筋ひずみを測定し、鉄筋に発生している圧縮力を算出し、この圧縮力からコンクリートに発生している引張応力を算出し、コンクリートに鉄筋拘束により発生する引張応力を算出した。

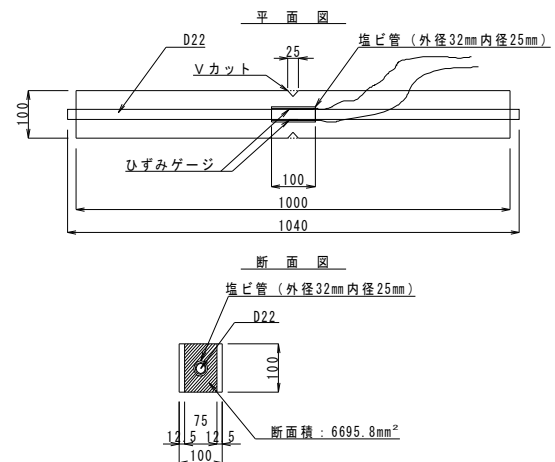


図-2 鉄筋拘束供試体

#### (4) コンクリートの引張強度

拘束供試体のコンクリートにひび割れが発生した時、拘束供試体と同じ養生方法で養生した直径 100mm 高さ 200mm の円柱供試体を用いて JIS A 1113 に準拠して割裂引張試験を行い、コンクリートの引張強度を測定した。

#### (5) コンクリートの圧縮強度と静弾性係数

拘束供試体のコンクリートにひび割れが発生した時、拘束供試体と同じ養生方法で養生した直径 100mm 高さ 200mm の円柱供試体を用いて JIS A 1108 と JIS A 1149 に準拠してコンクリートの圧縮と静弾性係数を測定した。

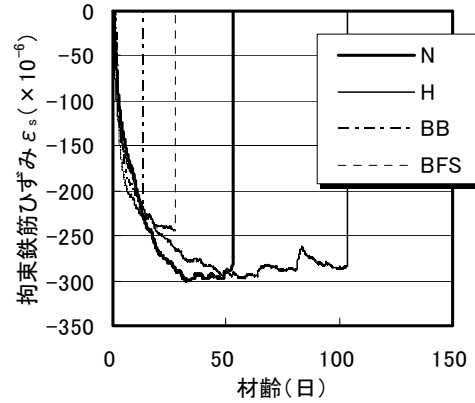


図-4 各拘束供試体の拘束鉄筋ひずみ

### 3. 試験の結果

#### 3.1 各種コンクリートの自由収縮

各種コンクリートの自由収縮ひずみを図-3 に示す。この図より、各種のコンクリートの材齢 180 日までの自由収縮ひずみは、結合材の種類によって異なり、BB コンクリート>N コンクリート>H コンクリートと BFS コンクリートの順になっていることが分かる。

#### 3.2 拘束ひび割れの発生時期

コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を検討するために、各種のコンクリートにおいて 3 本の拘束供試体を用いて、拘束鉄筋のひずみ変化を測定した。同じコンクリートを用いても、拘束供試体にひび割れの発生時期が異なり、そのため、本研究は同じコンクリートを用いた拘束供試体において第 2 番目にひび割れが発生した供試体を代表とした。

図-4 には、各種コンクリートの拘束供試体の拘束鉄筋ひずみを示す。この図より、拘束鉄筋のひずみが急にプラス方向に変化する時点はコンクリートにひび割れが発生した時点と考えられる。この図により、BB 拘束供試体は最も早くひび割れが発生し、その後、BFS 拘束供試体、N 拘束供試体、H 拘束供試体の順序にひび割れが発生した。各拘束供試体のひび割れの発生材齢は、BB

拘束供試体では 13 日、BFS 拘束供試体では 27 日、N 拘束供試体では 53 日、H 拘束供試体では 103 日であった。

材齢 13 日に BB 拘束供試体にひび割れが発生した時、各種のコンクリートの自由収縮ひずみに大きな差はなかったことから、拘束供試体のひび割れの発生は、コンクリートの収縮ひずみ以外に、コンクリートの静弾性係数、クリープおよび引張強度などの他の物性との関係があると考えられる。

#### 3.3 ひび割れ発生時のひび割れ指数

コンクリートのひび割れ発生の確率は、一般的に式(1)に表すひび割れ指数で推測することができるが、ひび割れ指数が低いほどひび割れ発生の確率が高いと言われている<sup>5)</sup>。

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_{ct}(t) \quad (1)$$

ここに、 $I_{cr}(t)$  : ひび割れ指数、 $f_t(t)$  : 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{ct}(t)$  : 材齢 t 日におけるコンクリートの最大主引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)。

各拘束供試体のコンクリートに、ひび割れ発生時の引張応力度を拘束鉄筋のひずみから算出し、その結果を図

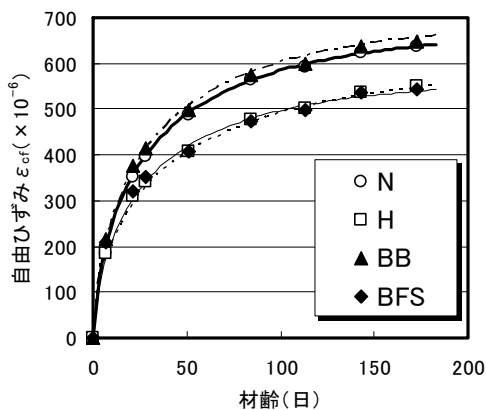


図-3 コンクリートの自由収縮ひずみ

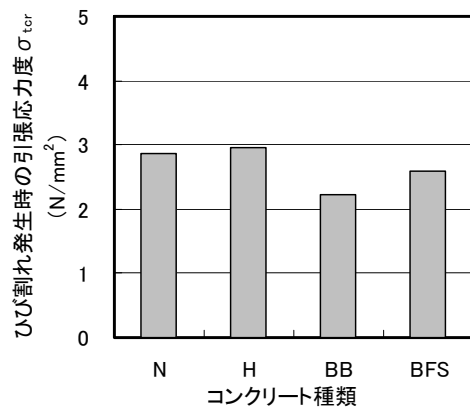
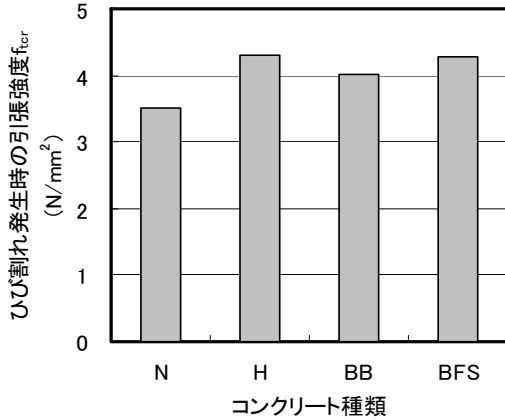


図-5 ひび割れ発生時の引張応力度

－5 に示す。

また、各拘束供試体のひび割れ発生時のコンクリート引張強度は、拘束供試体と同じ方法で養生された円柱供試体の割裂引張強度試験で測定され、その結果を図－6 に示す。

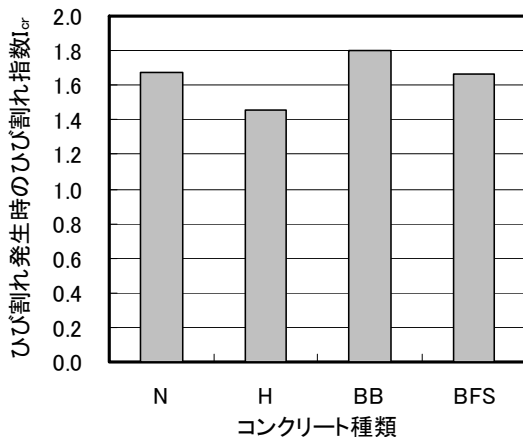


図－6 ひび割れ発生時コンクリート引張強度

これらの引張強度および引張応力度を用いて、式(1)で各拘束供試体にひび割れ発生時のコンクリートのひび割れ指数を算出することができ、その結果を図－7 に示す。

図－7 より、ひび割れ発生時にコンクリートのひび割れ指数は、BB コンクリート>BFS コンクリート>H コンクリート>N コンクリートの順になっていることが分かる。

高炉セメントを用いた BB コンクリートおよび高炉スラグ微粉末を用いた BFS コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた N コンクリートまたは早強ポルトランドセメントを用いた H コンクリートに比べ、同等以上のひび割れ指数でひび割れが発生した。このことから、高炉セメントを用いた BB コンクリートおよび高炉スラグ微粉末を用いた BFS コンクリートは、ひび割れが発生



図－7 ひび割れ発生時のひび割れ指数

しやすいことを示唆している。

### 3.4 ひび割れ発生までのクリープひずみ

コンクリートの拘束ひび割れの発生時期はコンクリートのクリープにも影響され、拘束供試体のコンクリートのクリープが収縮により発生した引張応力度を緩和させ、ひび割れの発生時期を遅らせることが考えられる。

本研究で、ひび割れの発生まで、拘束供試体のコンクリートに発生したクリープひずみを算出するために、下記の仮定で行った。

- 1) コンクリートの弾性ひずみ  $\epsilon_{cc}(t_{cr})$  = ひび割れ発生時コンクリートの引張応力度  $\sigma_{ct}(t_{cr})$  / コンクリートの静弾性係数  $E_c$
- 2) コンクリートのクリープひずみ  $\epsilon_{cre}(t_{cr})$  = 拘束ひずみ  $\epsilon_{cc}(t_{cr})$  - 弾性ひずみ  $\epsilon_{ce}(t_{cr})$

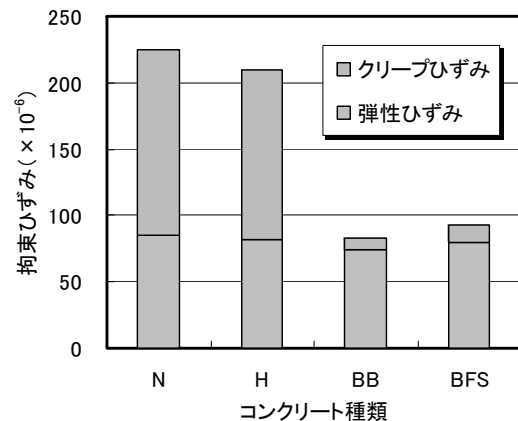
ひび割れ発生時コンクリートの引張応力度は式(2)の算出値である。また、コンクリートの静弾性係数は拘束供試体と同一条件で養生されたテストピースの実測値であり、拘束ひずみはコンクリートの自由ひずみから拘束鉄筋ひずみを引いた値である。

$$\sigma_{ct}(t_{cr}) = \epsilon_s(t_{cr}) \times E_s \times A_s / A_c \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{ct}(t_{cr})$  : ひび割れ発生時のコンクリート引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\epsilon_s(t_{cr})$  : ひび割れ発生時の拘束鉄筋ひずみ、 $E_s$  : 拘束鉄筋の静弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_s$  は拘束鉄筋の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $A_c$  : コンクリートの断面積(mm<sup>2</sup>)。

各拘束供試体のひび割れ発生時のコンクリートの弾性ひずみとクリープひずみを表－3 と図－8 に示す。

図－8 より、ポルトランドセメント単味を用いた N コン



図－8 ひび割れ発生までのクリープひずみ

表-3 弾性ひずみとクリープひずみの算定

配合	自由ひずみ $\varepsilon_{ct}(t_{cr})$ ( $\times 10^{-6}$ )	拘束鉄筋 ひずみ $\varepsilon_s(t_{cr})$ ( $\times 10^{-6}$ )	拘束ひずみ $\varepsilon_{cc}(t_{cr})$ ( $\times 10^{-6}$ )	引張応力度 $\sigma_{ct}(t_{cr})$ (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性ひずみ $\varepsilon_{ce}(t_{cr})$ ( $\times 10^{-6}$ )	クリープひずみ $\varepsilon_{cre}(t_{cr})$ ( $\times 10^{-6}$ )
N	499	274	225	2.88	33800	85	140
H	495	285	210	2.95	35800	82	128
BB	297	214	83	2.23	29900	74	9
BFS	337	244	93	2.58	32600	79	14

クリートとHコンクリートは、拘束供試体にひび割れ発生まで、大きなクリープひずみが発生し、これによってコンクリートの拘束収縮で発生した引張応力度の増加を緩和し、ひび割れの発生時期を遅らせたと推測できる。

一方、BBコンクリートまたはBFSコンクリートは、拘束供試体のひび割れ発生までのクリープひずみが比較的小さいため、コンクリートの拘束収縮で発生した引張応力度に対するクリープの緩和効果が比較的小さく、ひび割れ発生時期が比較早かったと考えられる。

この拘束供試体のコンクリートに発生したクリープひずみの差が各種のコンクリートの拘束供試体でひび割れの発生時期が大きく異なる原因の一つと考えられる。

### 3.5 収縮ひび割れ抵抗性の向上策

本研究では、BFSコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を向上するために、表-4示す向上策を採用し、それらの効果を自由収縮試験および拘束収縮試験で確認した。

それぞれの向上策を講じたBFSコンクリートの自由収縮試験の結果を図-9に示す。この図からBFSコンクリ

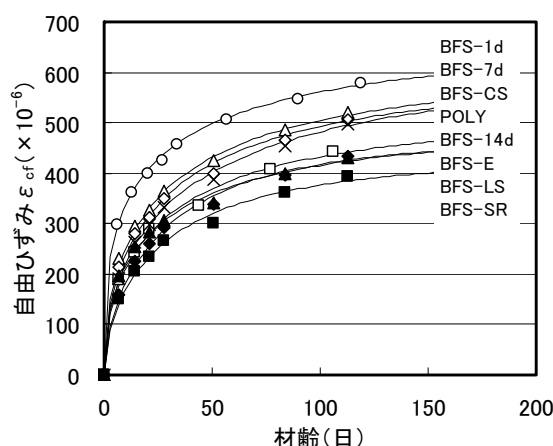


図-9 向上策を講じたBFSコンクリートの自由収縮

ートの自由収縮に対して、各向上策の収縮低減効果は、収縮低減剤の混入(BFS-SR) > 収縮低減タイプAE減水剤の混入(BFS-LS)または膨張材の混入(BFS-E) > 湿潤養生14日間(BFS-14d) > 吸水性樹脂の混入(BFS-Poly) > 収縮低減剤の表面塗布(BFS-CS) > 水中養生7日間(BFS-7d)の順であることが分かる。

BFSコンクリートのひび割れ抵抗性の各向上策の効果を調べるために、各向上策を講じたBFSコンクリートの拘束供試体の拘束鉄筋ひずみを測定し、ひび割れの発生時期を調べた。その結果を図-10に示す。

図-10より、1日間湿潤養生したBFSコンクリートの拘束供試体(BFS-1d)でのひび割れが発生した材齢は27日であった。湿潤養生期間を7日間に延ばした場合は、拘束供試体(BFS-7d)にひび割れが発生した材齢が103日であった。さらに、湿潤養生期間を14日間に延ばした場合は、拘束供試体(BFS-14d)に材齢120日までひび割れが発生しなかった。これらの結果から、BFSコンクリートの収縮ひび割れの抵抗性を向上するために、湿潤養生期間の延長は有効であることを示唆した。

表-4 収縮ひび割れ抵抗性の向上策

改善策	記号	効果
コンクリートに膨張材の混入	E	膨張による収縮補償
コンクリートに収縮低減剤の混入	SR	収縮低減
コンクリートに収縮低減タイプAE減水剤の混入	LS	同上
コンクリート表面に収縮低減剤を塗布	CS	表面収縮の低減
コンクリートに吸水性樹脂の混入	Poly	コンクリート内部で水を供給
コンクリートの湿潤養生7日間または14日間	7d 14d	初期乾燥防止

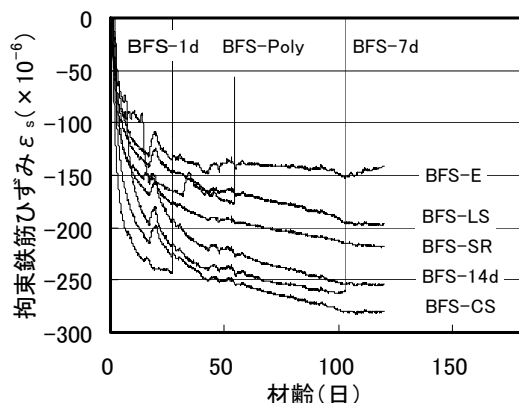


図-10 向上策を施した供試体の拘束鉄筋ひずみ

また、BFS コンクリートに膨張材の添加 (BFS-E)、収縮低減タイプ A E 減水剤の使用 (BFS-LS)、および収縮低減剤の使用 (BFS-SR) によって、拘束鉄筋ひずみが小さく、コンクリートに発生する引張応力度が小さくなることで、何れの拘束供試体も材齢 120 日までひび割れが発生しなかった。

しかし、吸水性樹脂を混入した BFS コンクリートの拘束供試体 (BFS-Poly) は材齢 54 日にひび割れが発生した。この結果から、吸水性樹脂混入の効果は限定的であることが明らかになった。

さらに、脱型直後に、BFS コンクリート拘束供試体の表面に収縮低減剤を塗布することで、拘束供試体 (BFS-CS) は材齢 120 日までひび割れが発生しなかったことから、収縮低減剤の塗布は有効であることが確認された。

#### 4. まとめ

本研究の試験範囲内で以下のことが分かった。

- 1) 高炉セメントを用いたコンクリートは、早強また

は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べ、自由収縮は大きく、拘束供試体のひび割れ発生時期は早い。

- 2) 高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントを混合した結合材を用いたコンクリートは、早強または普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べ、自由収縮が大きくないが、拘束供試体のひび割れ発生時期は早い。
- 3) 高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、拘束ひび割れ発生までのクリープひずみが比較的小さい。これが早期にひび割れ発生の原因の一つと考えられる。
- 4) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上策として、1 週間以上の湿潤養生、膨張材、収縮低減タイプ A E 減水剤、および収縮低減剤の使用、コンクリート表面に収縮低減剤を塗布することは有効である。

#### 参考文献

- 1) 田澤栄一ほか：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響，土木学会論文集，No.502/V-24，pp.43-52，1994
- 2) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.22-45，1996
- 3) 三浦智弥ほか：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，コンクリート工学論文集，Vol.17，No.1，pp.359-364，1995
- 4) 日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書，pp.216-217，2010
- 5) 土木学会，コンクリート標準示方書，pp.180-181，2007