

# 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの 鉄筋拘束下での収縮変形挙動に与える混和材および骨材量の影響

## The Influence of Mineral Admixture or Volume of Aggregate on Shrinkage Behavior under Reinforcement Restraint of the Concrete with High-Early Strength Portland Cement

技術研究所 佐々木 亘 SASAKI WATARU  
技術研究所 石澤 正大 KOKUZAWA MASAHIRO  
技術研究所 藪 哲義 DAI AKIYOSHI  
技術研究所 谷口 秀明 TANIGUCHI HIDEAKI

PC 上部工で多用される早強ポルトランドセメントを用いた圧縮強度の特性値が 40 N/mm<sup>2</sup> 程度のコンクリートのひび割れ抵抗性に関する検討の一環として、混和材の使用や骨材量の変化が乾燥環境下での鉄筋拘束試験における変形挙動に与える影響について検討を行った。その結果、1) 無拘束の乾燥収縮ひずみに与える混和材の影響は小さいこと、2) ひび割れ発生材齢は単位粗骨材絶対容積の増加によって大きくなり、有効弾性係数の変化が寄与している可能性があること、3) フライアッシュを用いた場合には、圧縮強度、ひび割れ発生材齢、有効弾性係数の経時変化およびひび割れ発生時のクリープ係数に与える配合変化の影響が小さくなることなどがわかった。

キーワード：混和材、単位ペースト絶対容積、有効弾性係数、クリープ係数

This paper describes a study of the influence of mineral admixture or volume of aggregate on shrinkage behavior under reinforcement restraint of the concrete with high-early strength portland cement in order to investigate the crack resistance behavior of concrete for PC members with design strength of about 40 N/mm<sup>2</sup>. As a result, the followings were obtained; 1) the influence of mineral admixture on drying shrinkage of unconstrained concrete was small, 2) the age at occurrence of a crack became longer with absolute volume of unit coarse aggregate, and there had been a possibility of influence of changing the effective elastic modulus, 3) with the case of using fly-ash, the influence of mix proportion of concrete was small on compressive strength, age of cracking occurs, aging of effective elastic modulus and creep coefficient at occurrence of a crack.

**Key Words:** Mineral Admixture, Absolute Volume of Unit Cement Paste, Effective Elastic Modulus, Creep Coefficient

### 1. はじめに

コンクリート構造物を長期的に供用するためには、ひび割れの発生を抑制し、発生後にはその幅を制御することが重要である。最近では、天然骨材の品質低下に起因するコンクリートの収縮ひずみの増加とそれに伴うひび割れの発生が問題となり、学協会において様々な議論がなされた<sup>1)</sup>。一方、コンクリート構造物の高耐久化を目的としてコンクリート自体にも様々な性能が要求され、例えば高流動コンクリートや短繊維補強コンクリートの

ように、多様な材料や配合のコンクリートが従来にも増して使用されるようになってきている。特に短繊維補強コンクリートでは、その特徴である引張特性を評価する上で、コンクリートのひび割れ発生強度が重要な特性値の一つとなっている<sup>2)</sup>。また、二酸化炭素排出量削減に対する意識の高まりなどもあり、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き換えたコンクリートの検討が活発に行われており、RC 構造物だけでなく PC 構造物も対象とした実用化に向けた取り組み<sup>3)</sup>がなされている。このようなコンクリートの配

表-1 使用材料

| 材料    |          | 種類, 物性など  | 記号        |
|-------|----------|---|-----------|
| 水     |          | 水道水   | <i>W</i>  |
| 結合材   | セメント     | 早強ポルトランドセメント (密度 3.13 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4610 cm <sup>2</sup> /g)   | <i>C</i>  |
|       | シリカフェーム  | エジプト産 (密度 2.25 g/cm <sup>3</sup> , BET 比表面積 15.0 m <sup>2</sup> /g)   | <i>SF</i> |
|       | 高炉スラグ微粉末 | 密度 2.91 g/cm <sup>3</sup> , ブレーン比表面積 6,300 cm <sup>2</sup> /g, せっこう添加なし   | <i>BF</i> |
|       | フライアッシュ  | JIS II 種灰 (密度 2.19 g/cm <sup>3</sup> , ブレーン比表面積 3,880 cm <sup>2</sup> /g)                                       | <i>FA</i> |
| 細骨材   |          | 山砂 (表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.90%) と 砕砂 (硬質砂岩, 表乾密度 2.61 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.68%) を容積割合 4:6 で混合 | <i>S</i>  |
| 粗骨材   |          | 砕石 2005 (硬質砂岩, 密度 2.64 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.96%)   | <i>G</i>  |
| 化学混和剤 |          | 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)  | <i>SP</i> |
|       |          | AE 剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)  | <i>AE</i> |

表-2 コンクリートの配合

| 記号       | 水結合材比<br><i>W/B</i><br>[%] | モルタル<br>細骨材<br>容積比<br><i>s/m</i><br>[%] | 細骨材<br>率<br><i>s/a</i><br>[%] | 空気<br>量<br>[%] | 単位<br>ペースト<br>絶対容積<br>$V_G$<br>[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 単位<br>粗骨材<br>絶対容積<br>$V_G$<br>[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | 単位量 [kg/m <sup>3</sup> ] |          |           |           |           |          |          |           | <i>SP</i><br>[C×%] | 空気量<br>(実測)<br>[%] |
|----------|----------------------------|---|-------------------------------|----------------|--|---|--------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|--------------------|--------------------|
|          |                            |   |                               |                |  |   | <i>W</i>                 | <i>B</i> |           |           |           | <i>S</i> | <i>G</i> | <i>SP</i> |                    |                    |
|          |                            |   |                               |                |  |   |                          | <i>C</i> | <i>SF</i> | <i>BF</i> | <i>FA</i> |          |          |           |                    |                    |
| H40G375  | 40.0                       | 45.3                                    | 43.0                          | 4.5            | 0.297  | 0.375   | 165                      | 413      | 413       | -         | -         | -        | 740      | 990       | 0.70               | 4.7                |
| H40G300  |                            | 45.3                                    | 51.4                          | 4.5            | 0.338  | 0.300   | 188                      | 470      | 470       | -         | -         | -        | 828      | 792       | 0.60               | 5.2                |
| H40G200  |                            | 45.4                                    | 64.5                          | 4.5            | 0.392  | 0.200   | 218                      | 545      | 545       | -         | -         | -        | 949      | 528       | 0.60               | 4.8                |
| H40G0    |                            | 45.3                                    | 100                           | 4.5            | 0.502  | 0.000   | 279                      | 698      | 698       | -         | -         | -        | 1185     | 0         | 0.60               | 4.7                |
| H40G0-2  |                            | 55.2                                    | 100                           | 4.5            | 0.403  | 0.000   | 224                      | 560      | 560       | -         | -         | -        | 1443     | 0         | 0.60               | 4.5                |
| SF10G375 |                            | 44.5                                    | 42.6                          | 4.5            | 0.302  | 0.375   | 165                      | 413      | 371       | 41        | -         | -        | 727      | 990       | 0.80               | 5.0                |
| BF50G375 |                            | 44.5                                    | 42.6                          | 4.5            | 0.302  | 0.375   | 165                      | 413      | 206       | -         | 206       | -        | 727      | 990       | 0.50               | 3.1                |
| FA30G375 |                            | 42.6                                    | 41.5                          | 4.5            | 0.314  | 0.375   | 165                      | 413      | 289       | -         | -         | 124      | 695      | 990       | 0.50               | 3.8                |
| SF10G0   |                            | 44.4                                    | 100                           | 4.5            | 0.511  | 0.000   | 279                      | 698      | 628       | 70        | -         | -        | 1161     | 0         | 0.80               | 5.5                |
| BF50G0   |                            | 44.5                                    | 100                           | 4.5            | 0.510  | 0.000   | 279                      | 698      | 349       | -         | 349       | -        | 1163     | 0         | 0.50               | 5.5                |
| FA30G0   |                            | 42.6                                    | 100                           | 4.5            | 0.529  | 0.000   | 278                      | 695      | 487       | -         | -         | 209      | 1114     | 0         | 0.45               | 5.3                |

合や材料の変化がひび割れ発生抵抗性に与える影響を把握することは、コンクリート構造物の高耐久化に資するものとして重要であると考えられる。

このような背景のもと筆者らは、PC 上部工で多用される、圧縮強度の特性値が 40 N/mm<sup>2</sup> 程度で早強ポルトランドセメントを使ったコンクリートをベースとし、骨材量の変化や混和材の使用がひび割れ抵抗性に与える影響について検討を行っている<sup>4)6)</sup>。本稿は、乾燥環境下で行った鉄筋拘束試験における収縮変形挙動に与える混和材や骨材量の影響について検討したものである。

## 2. 実験概要

### (1) コンクリートの条件

使用材料を表-1、コンクリートの配合を表-2 に示す。基準となる配合である H40G375 は PC 上部工で多用される圧縮強度の特性値が 40 N/mm<sup>2</sup> 程度のコンクリートを想定したものであり、水結合材比 (*W/B*) を 40% とし、結合材には早強ポルトランドセメントを用いた。単位水量は 165 kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材絶対容積は 0.375 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> であ

る。H40G300, H40G200, および H40G0 では、H40G375 に対してモルタル細骨材容積比 (*s/m*,  $m = w + c + s$ ) を一定とし、単位粗骨材絶対容積 ( $V_G$ ) を変化させた。H40G300, H40G200 および H40G0 の  $V_G$  は、それぞれ 0.300 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 0.200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> および 0.000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> である。H40G300 は高流動コンクリート, H40G200 は短繊維補強コンクリートで想定される  $V_G$  としている。H40G0-2 は、H40G0 と同様に  $V_G$  を 0.000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> としたモルタル配合であるが、細骨材量の影響を検討するため *s/m* を 10% 程度増加させ、単位ペースト絶対容積を H40G200 と同程度としたものである。

SF10G375, BF50G375 および FA30G375 は、H40G375 に対してセメントの一部をそれぞれシリカフェーム、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュで置換したものである。置換率は、既往の研究<sup>7)8)</sup>を参考に、それぞれ、10%, 50%, 30% とした。さらに、それぞれの配合について *W/B* および *s/m* が同一で  $V_G$  を 0.000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> としたモルタル配合を設定し、粗骨材の影響を確認することとした。高性能 AE 減水剤の使用量は、配合によって大きな差が生じないように材料分離を生じない範囲での最低限の調整

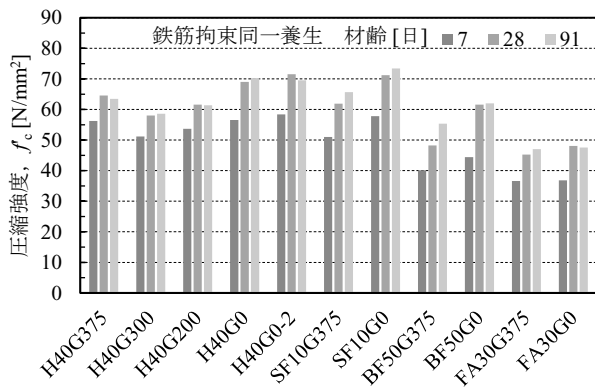


図-1 圧縮強度（鉄筋拘束同一養生）

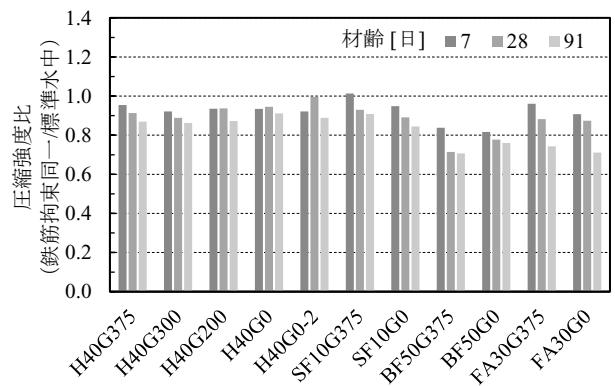


図-2 圧縮強度比

に留めた。空気量は AE 剤により調整した。

以下、各配合については表-2 に記載した記号で呼ぶこととし、図中の凡例等で配合要因について結合材の種類毎に総称する場合には、骨材量に抛らず H40, SF10, BF50 および FA30 と称することとする。

## (2) 供試体の作製

コンクリートの練混ぜは公称容量 100 リットルの強制二軸ミキサにより行なった。粗骨材を除く材料によるモルタル練りを 90 秒行ない、その後、粗骨材を使用するコンクリート配合では粗骨材を投入しさらに 90 秒の練混ぜを行った。練混ぜが終了しフレッシュ性状を確認した後、ただちに供試体の作製を行った。

## (3) 測定項目

### a) 力学特性

力学特性の確認は、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、静弾性係数試験 (JIS A 1149) および割裂引張強度試験 (JIS A 1113) によって行った。割裂引張強度試験ではひび割れ発生強度の測定も併せて行った。測定方法は UFC 指針<sup>2)</sup>に示される方法に準拠し、供試体端面にひずみゲージを貼り付け、計測されたひずみの変化が不連続になった点<sup>3)</sup>をひび割れ発生強度とした。

供試体は  $\phi 100 \times 200$  mm の円柱供試体であり、養生方法は標準水中養生および後述する鉄筋拘束試験と同様の養生（以下、鉄筋拘束同一養生と呼ぶ）とした。鉄筋拘束同一養生は打込み直後から材齢 7 日までは 20℃封緘養生とし、材齢 7 日以降は温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室に存置した。測定は材齢 7 日、28 日、91 日を基本とし、一部の条件では材齢 14 日でも割裂引張強度試験を実施した。

### b) 収縮ひずみおよび鉄筋拘束試験による収縮応力

コンクリートの収縮を鉄筋に拘束させる鉄筋拘束試験を実施し、収縮応力の測定を行った。鉄筋拘束試験は JCI

「コンクリートの自己収縮応力測定方法」<sup>10)</sup>を参考に、 $100 \times 100 \times 1500$  mm の角柱供試体の断面中央に D32 鉄筋を配置した。鉄筋の長さ方向の中央 300 mm の範囲で節、リブを取り除いたうえでテフロンシートを二重に巻き付け、コンクリートとの付着を生じないようにした。鉄筋中央部のひずみを測定し、コンクリートの収縮により生じる応力を算定した。打込み直後から温度 20℃湿度 60%の恒温恒湿室に存置し、材齢 7 日まではポリエステルフィルムにより封緘状態、材齢 7 日で脱型した後は 6 面乾燥状態とした。供試体数は 2 体とした。

また、 $100 \times 100 \times 400$  mm の角柱供試体を用いて、鉄筋拘束同一養生における自由収縮ひずみの測定を行った。自由収縮ひずみの測定は、JCI「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」<sup>11)</sup>を参考に、供試体中心部に設置した埋込みひずみ計により行った。供試体数は 2 体とした。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 圧縮強度

図-1 に鉄筋拘束同一養生における配合毎の圧縮強度の測定結果を示す。いずれの配合においても材齢 28 日以降の強度増進が小さくなっているが、これは、材齢 7 日以降は乾燥環境下にあるためと考えられる。既報で示したように、圧縮強度は  $V_G$  の影響が支配的<sup>4)</sup>となるが、シリカフェームや高炉スラグ微粉末を用いた場合にはコンクリート配合とモルタル配合の差異が早強ポルトランドセメント単味の場合に比べてより大きくなるのに対して、フライアッシュを用いた場合には明確な差異がみられなかった。図-2 は鉄筋拘束同一養生による圧縮強度を標準水中養生との比の値 (圧縮強度比) で示したものである。これによると圧縮強度比に与える  $V_G$  や単位ペースト絶対容積の影響は小さく、また、シリカフェームの影響も小さい。一方、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの材齢 91 日では圧縮強度比が小さくなっており、乾燥によっ

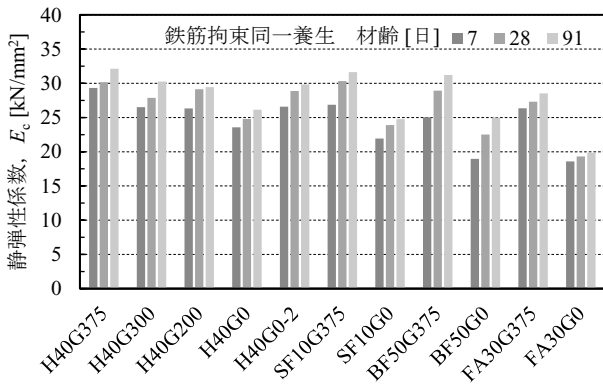


図-3 静弾性係数（鉄筋拘束同一養生）

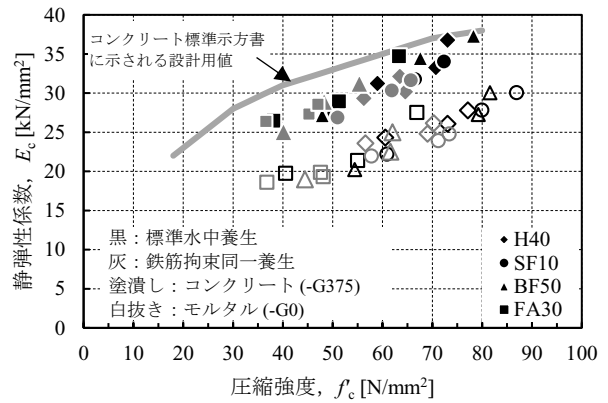


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

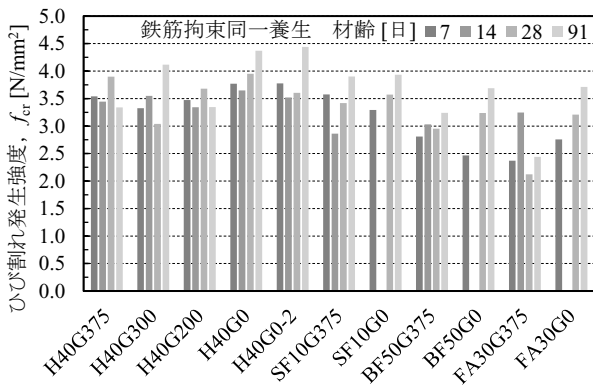


図-5 ひび割れ発生強度（鉄筋拘束同一養生）

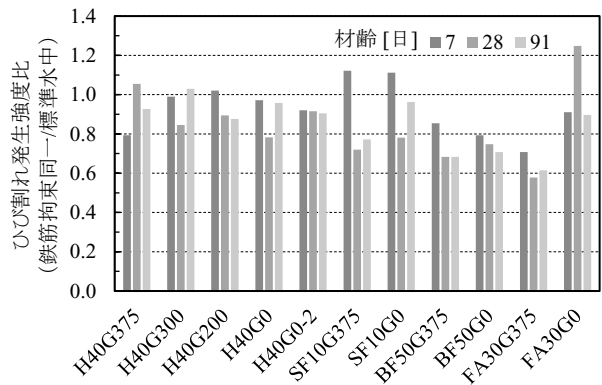


図-6 ひび割れ発生強度比

て圧縮強度発現の停滞が大きくなることわかる。

## (2) 静弾性係数

図-3 に鉄筋拘束同一養生における静弾性係数の測定結果を示す。本実験で使用した材料では、静弾性係数は単位ペースト絶対容積の影響が大きいことを報告しており<sup>4)</sup>、この図から、混和材を用いた場合も同様の傾向にあることがわかる。一般に静弾性係数は圧縮強度との関係として示されることが多い。図-4 は既報<sup>5)</sup>でも示したものであり、図中にはコンクリート標準示方書<sup>12)</sup>に示される不静定力の計算に用いる圧縮強度とヤング係数の関係式から求められる値を併せて示している。単位ペースト絶対容積が同程度の配合で比較すれば、養生方法や混和材が圧縮強度と静弾性係数の関係に与える影響は小さい。

## (3) ひび割れ発生強度

図-5 に鉄筋拘束同一養生におけるひび割れ発生強度の測定結果を示す。全体的な傾向としては圧縮強度と同様であり、ひび割れ発生強度は単位ペースト絶対容積の大きいモルタル配合で大きく、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使った配合で小さい。一方、圧縮強度のよ

うに必ずしも材齢の経過に伴って大きい値にはなっておらず、圧縮強度の増進と同じように強度が発現するわけでは無いことがわかる。これは、既報<sup>4)</sup>で報告している割裂引張強度自体の特性であるとともに、ひび割れ発生の判定は供試体表面に貼り付けたひずみゲージによって行うため、表面の乾燥状態等の影響を敏感に受けるためであると考えられる。

図-6 は鉄筋拘束同一養生によるひび割れ発生強度を標準水中養生との比の値（ひび割れ発生強度比）で示したものである。図-2 に示した圧縮強度比と比べてばらつきの大きいことが明らかであり、乾燥をはじめとする種々の要因の影響に敏感であると考えられる。そのような状況ではあるが、シリカフェームを用いた SF10G375 および SF10G0 については、図-2 に示した圧縮強度比では早単味の H40 シリーズと比べてシリカフェームの影響は確認されなかったのに対し、図-6 のひび割れ発生強度比では、材齢の経過とともに H40 シリーズと比べて小さな値となる傾向にあるようである。ひび割れ発生強度が乾燥により低下する原因のひとつとして、断面内での不均一な収縮応力の発生<sup>13)</sup>が挙げられるが、シリカフェームの使用によってマトリクスが緻密になり、不均一な収縮応力の発生が顕著になった可能性が考えられる。

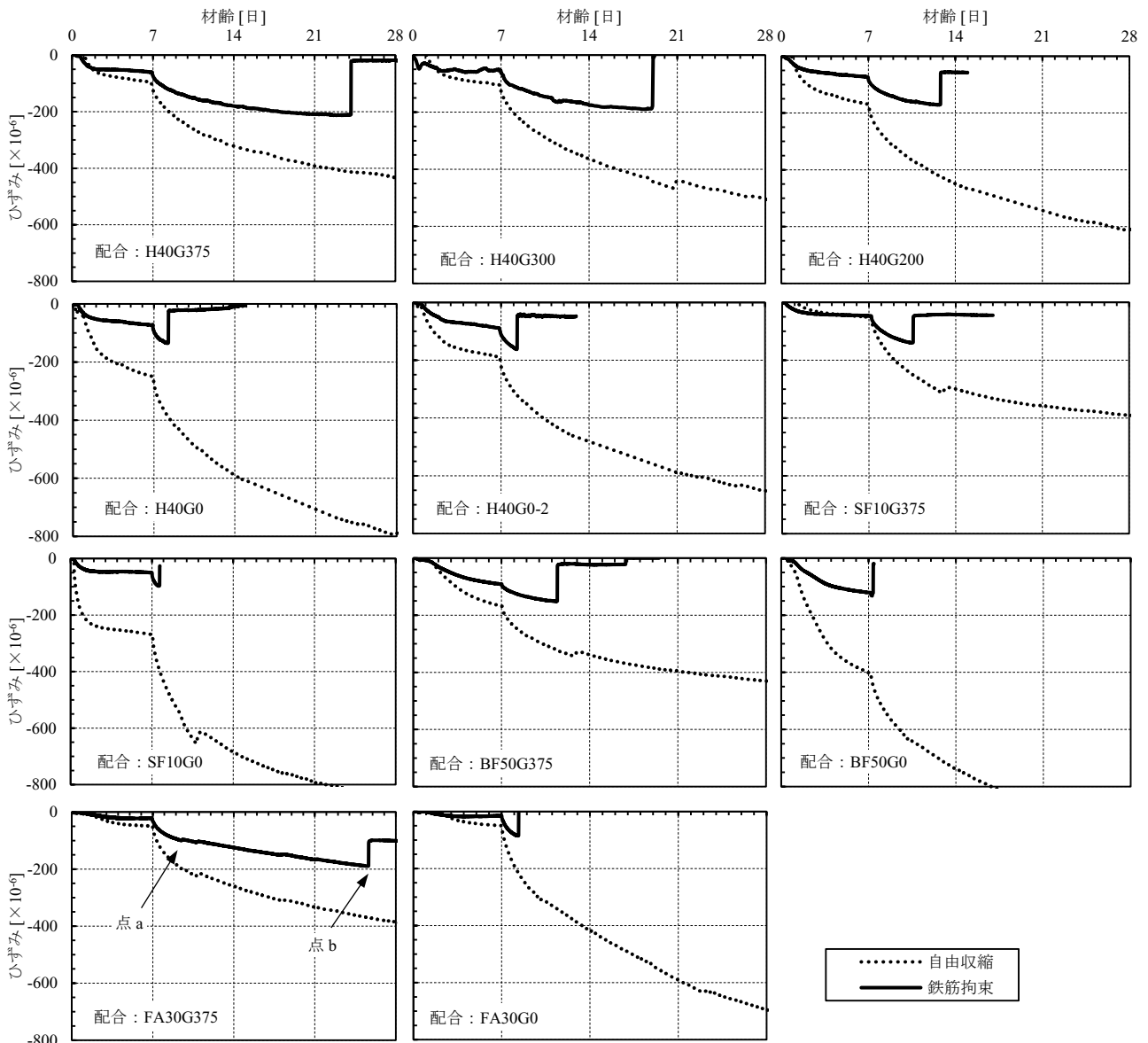


図-7 鉄筋拘束および自由収縮ひずみの測定結果の一例

#### (4) 鉄筋拘束および自由収縮ひずみ

##### a) 測定結果

図-7に測定結果の一例を示す。ここでは収縮を負として示している。材齢7日までは封緘状態であるため発生したひずみは自己収縮によるものであり、その後は乾燥収縮が生じることによりひずみが増大している。鉄筋拘束試験では鉄筋がコンクリートの収縮を拘束することによって自由収縮ひずみに比べ小さなひずみとなるが、この差が鉄筋が収縮を拘束することによりコンクリートに生じている引張ひずみであると考えられる。コンクリートにひび割れが生じると、例えばH40G375の材齢24日付近に見られるようにひずみが急変する。本実験においては、すべての供試体で材齢7日以降にひび割れが発生した。

配合FA30G375においては、図中に示した点bにおいて明確なひずみの急変が現れたが、点aにおいてもその前後で収縮挙動が変化しており、目視では確認はできなかったもののひび割れの発生が疑われる。後述する引張応力の経時変化を調べると点aにおいて引張応力が急変していることが確認されたため、既報<sup>9)</sup>ではFA30G375は点bにおいてひび割れが発生したものとしたが、本稿におけるこれ以降の議論では、FA30G375は点aにおいてひび割れが発生したものとして進めることとする。

##### b) 自由収縮ひずみ

図-8に単位ペースト絶対容積と材齢7日および182日の自由収縮ひずみの関係を示す。前項の通り、材齢7日は乾燥開始材齢であり、ここでの自由収縮ひずみは自己収縮ひずみである。

図-8に示したH40シリーズの結果より、単位ペースト

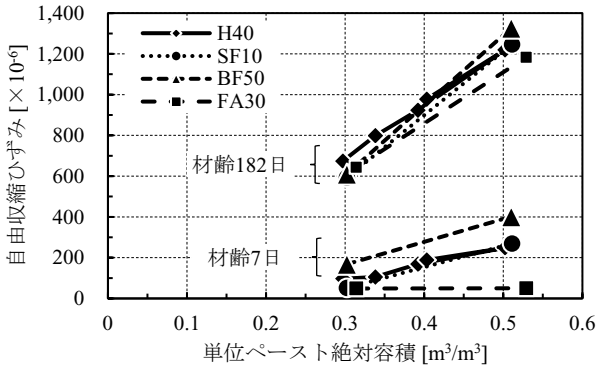


図-8 単位ペースト絶対容積と自由収縮ひずみの関係

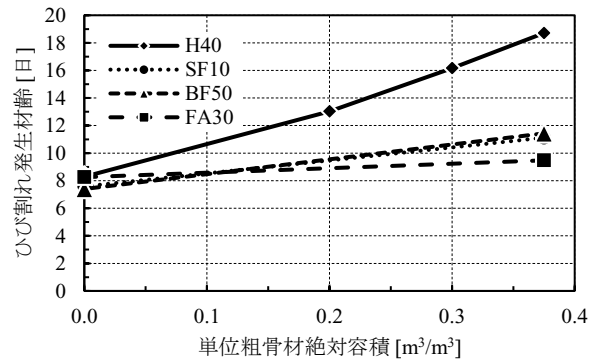


図-9 単位粗骨材絶対容積とひび割れ発生材齢の関係

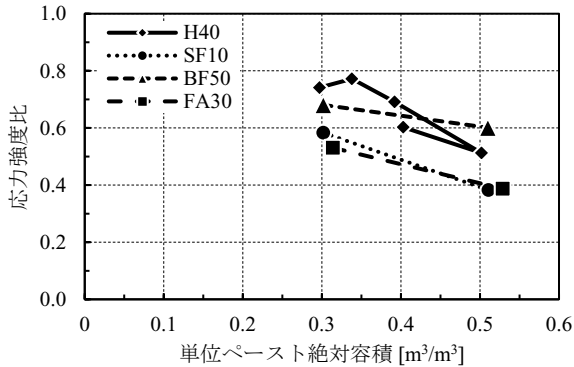


図-10 単位ペースト絶対容積と応力強度比の関係

絶対容積が大きくなるほど収縮ひずみも大きくなること  
がわかる。単位ペースト絶対容積が 0.4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 前後に 2  
点プロットされているが、単位ペースト絶対容積 0.392  
m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> が  $V_G = 0.200$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> のコンクリート配合である  
H40G200, 単位ペースト絶対容積 0.403 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> がモルタル  
配合の H40G0-2 である。これらの収縮ひずみが同程度で  
あることから、本実験で用いた材料においては、収縮ひ  
ずみに与える影響は単位ペースト絶対容積が支配的であり、  
細骨材率の影響は小さいことがわかる。この傾向は、  
静弾性係数においても同様であることを報告している 4)。

混和材を使用した場合でも、単位ペースト絶対容積が  
大きくなるほど収縮ひずみも大きくなる点は同様である  
が、材齢 7 日の収縮ひずみには混和材の影響が確認でき  
る。すなわち、高炉スラグ微粉末を用いると収縮ひずみ  
が大きくなり、フライアッシュを用いると収縮ひずみが  
小さい。材齢 7 日までの収縮ひずみは先述の通り自己収  
縮ひずみであるので、高炉スラグ微粉末を用いると自己  
収縮が大きく、フライアッシュを用いると自己収縮が小  
さくなることを示している。一方、材齢 182 日の収縮ひ  
ずみでは混和材による差異はほとんどみられなくなった。  
初期の自己収縮に差異があっても、乾燥収縮が進んだ状  
態では、収縮ひずみに与える混和材の影響は小さくなっ  
た。

c) ひび割れ発生時の変形挙動

図-9 に単位粗骨材絶対容積とひび割れが発生した材  
齢の関係を示す。単位粗骨材絶対容積が 0 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, す  
なわちモルタルでは、ひび割れ発生材齢は混和材の使用や  
種類によらずほぼ同時期であり、単位粗骨材絶対容積が  
大きくなるほどひび割れ発生材齢も大きくなった。ただ  
し、単位粗骨材絶対容積の増加に伴うひび割れ発生材齢  
の増加の程度は、早強単味に比べて混和材を使用した場  
合には小さかった。

図-10 に単位ペースト絶対容積と応力強度比の関係を  
示す。応力強度比はひび割れ発生時の拘束応力とひび割  
れ発生強度の比であり、ひび割れ発生強度については、  
図-9 よりひび割れ発生材齢は材齢 7~28 日の間にあるこ  
と、図-5 より各配合で材齢 7 日から材齢 28 日の間でひ  
び割れ発生強度に大きな変化はないことから、応力強度  
比の算出に用いるひび割れ発生強度として材齢 7 から 28  
日の試験値を平均したものをを用いた。

図-10 より、混和材の使用の有無によらず、単位ペ  
ースト絶対容積が大きくなると応力強度比が小さくなる傾  
向にあることがわかる。混和材に着目すると、高炉スラ  
グ微粉末を用いた BF50G375 では早強ポルトランドセメ  
ント単味の H40G375 と同程度であるが、シリカフェーム  
を用いた SF10G375 およびフライアッシュを用いた  
FA30G375 では全体的に応力強度比が小さく、モルタル  
配合では、拘束応力がひび割れ発生強度の 4 割程度に達  
した時点でひび割れが発生する結果となった。

図-7 に示したように鉄筋拘束による収縮ひずみは拘  
束の無い自由収縮ひずみに比べて小さくなるが、この収  
縮ひずみの差が鉄筋の拘束により生じた引張りひずみ（有  
効ひずみ）と考えられる。拘束応力をこの有効ひずみで  
除すことで求めた有効弾性係数の経時変化の一例を図  
-11 に示す。収縮ひずみの小さい若材齢では、有効弾性  
係数のばらつきが非常に大きくなり、精度にも問題があ  
ると考えられるため、図-11 では初期材齢のデータは省

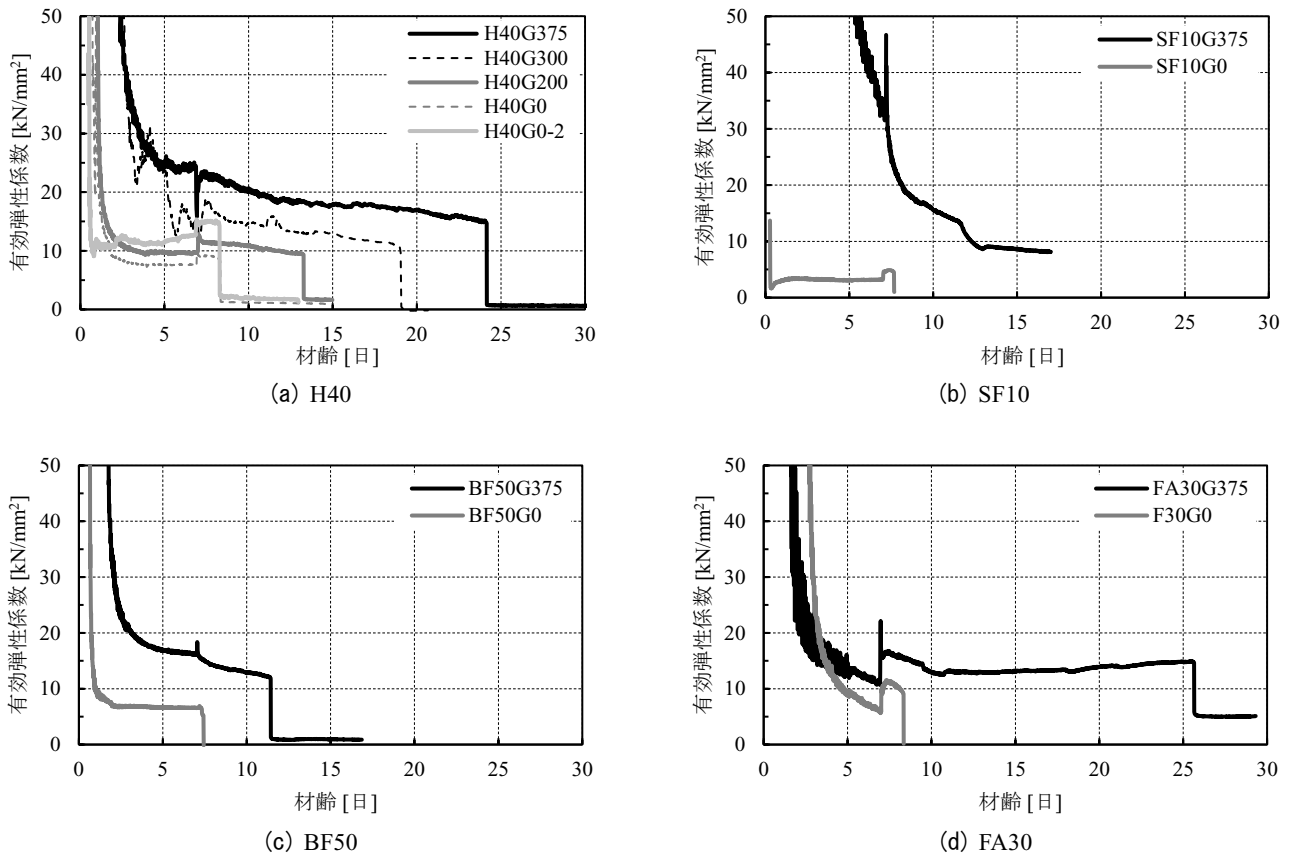


図-11 有効弾性係数の経時変化の一例

略し、有効弾性係数の変化が安定的になったと考えられる材齢以降のデータを示した。

図-11 より、全体的な傾向として、初期に高い値を示したのち、材齢の経過とともに減少していく様子が確認できる。フライアッシュを用いたものを除いて、モルタル配合、すなわち単位粗骨材絶対容積の小さい配合ほど有効弾性係数の低下が急激に生じていることがわかる。このことが、図-9 に示したひび割れ発生材齢と関係がある可能性がある。すなわち、有効弾性係数の低下が早いほど、ひび割れの発生も早くなる可能性が考えられる。フライアッシュを用いた配合では、モルタルとコンクリートで有効弾性係数の低下時期および速度の差異が小さいが、ひび割れ発生材齢も同程度となっていることと符合する。

図-12 は下記の式(1)によって求めたひび割れ発生時のクリープ係数を示したものである。

$$\phi = \frac{E_c}{E_e} - 1 \quad (1)$$

ここで、 $\phi$ :クリープ係数、 $E_c$ :静弾性係数 [kN/mm<sup>2</sup>]、 $E_e$ :有効弾性係数 [kN/mm<sup>2</sup>]

静弾性係数は、図-3 より材齢 7 日から材齢 28 日で大きな変化はないとして、材齢 7 日と材齢 28 日の試験値を平均した値を用いた。なお、有効弾性係数の経時変化に

配合毎の傾向がみられることから、クリープ係数の経時変化を調べることも有用な情報が得られる可能性が考えられるが、本実験では材齢 7 日以前に静弾性係数の測定を行っていないため、クリープ係数の算定はひび割れ発生時のみとした。

図-12 に示した通り、ひび割れ発生時のクリープ係数は単位ペースト絶対容積が大きいほど大きくなった。単位ペースト絶対容積が 0.3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 程度のコンクリート配合では混和材の有無に抛らずクリープ係数は 1.0 程度であるが、モルタル配合でのクリープ係数はシリカフェーム、高炉スラグ微粉末、早強ポルトランドセメント単味、フライアッシュの順で大きくなった。フライアッシュを用いた場合には単位ペースト絶対容積の変化に伴うクリープ係数の変化が小さくなっており、圧縮強度やひび割れ発生材齢、有効弾性係数の経時変化と同様に、フライアッシュを用いた場合のみ配合変化の影響が小さい結果となった。また、早強ポルトランドセメント単味の結果において単位ペースト絶対容積が 0.4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 前後にプロットされる H40G200 および H40G0-2 は、静弾性係数や収縮ひずみでは同程度の値であったがクリープ係数は異なる結果となった。さらに、H40G0-2 は単位ペースト絶対容積 0.502 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> の H40G0 と比べても小さいクリープ係数となっている。H40G0 と H40G0-2 は、圧縮強度<sup>4)</sup>

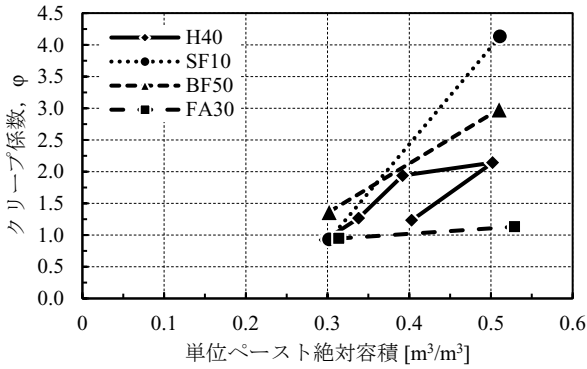


図-12 単位ペースト絶対容積とクリープ係数の関係

や図-9 に示したひび割れ発生材齢では差異がみられなかったが、クリープ係数ではこれらとも異なる傾向となった。H40G200 と H40G0-2 を比べると、単位ペースト絶対容積が同程度、言い換えると単位骨材絶対容積が同程度であっても、骨材の表面積が大きく異なる。H40G0 と H40G0-2 を比べると、ともにモルタルであるが H40G0-2 は細骨材が多くその表面積も大きい。したがって、クリープ係数には骨材量だけでなく、粒度や粒度分布の影響も大きい可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの骨材量の変化や混和材の使用がひび割れ抵抗性に与える影響のうち、鉄筋拘束試験における変形挙動について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 拘束の無い供試体で測定した自由収縮ひずみにおいては、初期の自己収縮ひずみでは混和材の影響がみられるが、乾燥収縮が進んだ後の自由収縮ひずみでは混和材の影響はほとんど見られなくなる。
- ② ひび割れ発生時の応力強度比は、単位ペースト絶対容積が大きくなるほど小さくなり、また、シリカフェュームやフライアッシュの使用によっても小さくなった。
- ③ ひび割れ発生材齢は単位粗骨材絶対容積の増加によって大きくなり、有効弾性係数の経時変化が寄与している可能性が見出された。
- ④ ひび割れ発生時のクリープ係数は単位ペースト絶対容積が大きくなるほど大きくなる傾向にあり、単位ペースト絶対容積が大きい場合に混和材の影響が生じるとともに、骨材の粒度や粒度分布も影響を与えている可能性が確認された。
- ⑤ フライアッシュを用いた場合には、圧縮強度、ひび割れ発生材齢、有効弾性係数の経時変化およびひび割れ発生時のクリープ係数に与える配合変化の影響が小さくなった。

#### 参考文献

- 1) 例えば、日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮問題とその対応一委員会報告書，2010.3
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004.9
- 3) (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)－，2016.1
- 4) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典：乾燥を受ける早強コンクリートのひび割れ抵抗性に影響を与える配合要因に関する検討，三井住友建設技術開発センター報告，No. 12, pp. 41-46, 2014.
- 5) 佐々木亘，谷口秀明，石澤正大，樋口正典：早強コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に与える混和材ならびに骨材量の影響，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. 527-532, 2015.10
- 6) 佐々木亘，石澤正大，谷口秀明，樋口正典：コンクリートのひび割れ発生強度に影響を与える要因に関する実験的検討，第25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. 409-414, 2016.10
- 7) 佐々木亘，芦塚憲一郎，出口宗浩，谷口秀明：高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, pp. 277-282, 2013.7
- 8) 斯波明宏，谷口秀明，樋口正典：早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートに関する実験的研究，第22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. 509-514, 2013.10
- 9) 佐々木亘，谷口秀明，樋口正典，宮川豊章：短繊維補強コンクリートのひび割れ発生強度に与える養生方法の影響，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集，第13巻，pp. 33-40, 2013.11
- 10) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，2002.9
- 11) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリートの研究委員会(II)，pp. 209-210, 1994.5
- 12) 土木学会：2012年版コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013.3
- 13) 宮沢伸吾，田澤栄一：セメント系材料の曲げ強度に及ぼす不均一な乾燥収縮応力の影響，土木学会論文集，第426号/V-14, pp. 121-129, 1991.2