

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760348

研究課題名(和文) コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期推定試験方法に関する研究

研究課題名(英文) Rapid test of drying shrinkage strain of concrete

研究代表者

藤井 隆史 (Fujii, Takashi)

岡山大学・環境生命科学研究科・准教授

研究者番号：10537236

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートの乾燥収縮ひずみ試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、180日以上測定を行う試験が一般に行われている。本研究では、実験室および生コンクリート工場のプラントで製造された種々のコンクリートを対象に、100×100×400mmの角柱供試体を用いて182日目に測定される値を、短い期間で推定する方法を検討した。その結果、50×100mmのコア供試体を用いた場合には、乾燥期間42日における乾燥収縮ひずみが、100×100×400mmの供試体の乾燥期間の180日の乾燥収縮ひずみに相当することを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：In general, as for test of drying shrinkage of concrete, 100 by 100 by 400mm prism specimen is used, and test period is more than 180 days. In this study, the method to estimate a drying shrinkage value measured using a 100 by 100 by 400mm prism test specimens at the 182 days in the period when it had a short. Various kinds of concrete made in laboratory or in ready mixed concrete factory are used in this study. As a result, it is shown that the drying shrinkage strain measured by core test specimen of 50 by 100mm at 42 days was equivalent the drying shrinkage strain measured by prism specimen of 100 by 100 by 400mm at 182days.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 乾燥収縮ひずみ 早期推定試験 コア供試体 拡散理論 スラグ骨材 特殊混和材 骨材の岩種

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリート構造物にひび割れを生じさせる原因の一つである。コンクリート構造物にひび割れが生じることで、コンクリート構造物内部の鉄筋が腐食し、膨脹することで、コンクリート構造物に重大な欠陥をもたらす恐れがある。コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測するために種々の予測式が提案されている。しかし、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、使用するセメント、混和材料、骨材の産地や種類の影響、配合の影響などを受けるため、正確に予測することは困難である。また、近年では、骨材事情の変化で、これまで想定されていた範囲を大きく上回る乾燥収縮ひずみが生じるコンクリートもある。和歌山県橋本市の垂井高架橋に代表されるように、乾燥収縮ひずみが原因の一つと思われる不具合も発生してきている。

コンクリートの乾燥収縮ひずみの試験方法は、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」附属書A(参考)「モルタルおよびコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」による方法が一般的に行われている。この方法は、コンクリートであれば、7日間水中養生を行った100×100×400mmの角柱供試体を用い、温度が20±2℃で相対湿度が60±5%の恒温恒湿度室で測定が行われる。しかし、試験には6ヶ月以上の時間を要するため、短期間で乾燥収縮ひずみの試験値を予測する方法が必要とされている。

2. 研究の目的

コンクリート構造物に用いられるコンクリートの乾燥収縮ひずみについて、日本建築学会では、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009 にて、建築用コンクリートにおける乾燥収縮率は、特記がない場合、計画供用期間の級が超長期および長期では 8×10^{-4} 以下と規定している。また、土木学会コンクリート標準示方書では、設計の照査に用いるコンクリートの乾燥収縮ひずみは、使用するコンクリートの収縮ひずみの試験値や既往の資料や実験をもとに定めることを原則としている。すなわち、土木構造物においても建築構造物においても、実際に用いるコンクリートの乾燥収縮ひずみの値をあらかじめ把握しておく必要がある。従って、各レディーミクストコンクリート工場では、製造しているコンクリートの乾燥収縮ひずみを測定し、いつでも提出できるように準備しておく必要がある。本研究では、1～2ヵ月程度で半年後の試験結果を推定する方法の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 本研究で提案する手法

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリート中の水分の移動によって生じる現象

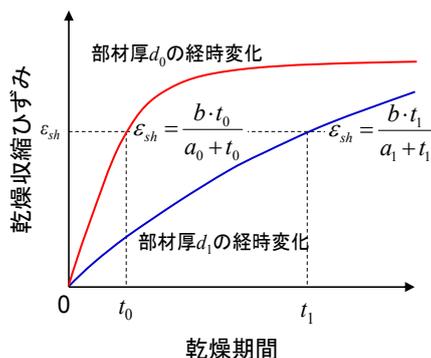


図1 部材厚が異なる供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化

である。コンクリート中の水分が拡散理論に従って移動するとすれば、寸法の異なる供試体で、その乾燥収縮ひずみが同じ大きさになるまでの時間は、供試体の断面の厚さの二乗にはほぼ比例する。すなわち、図1に示すように、部材厚 d_0 の供試体の乾燥期間 t_0 における乾燥収縮ひずみと、部材厚 d_1 の供試体の乾燥期間 t_1 における乾燥収縮ひずみが等しくなるとすれば、以下の関係が成り立つ。

$$t_0 = \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^2 \cdot t_1 \quad (1)$$

部材厚 d_0 および d_1 の供試体における乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項が、それぞれ、 a_0 および a_1 であると、部材厚 d_0 および d_1 の供試体の乾燥収縮ひずみが、それぞれ、式(2)および式(3)で表されるとする。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{b \cdot t}{a_0 + t} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{b \cdot t}{a_1 + t} \quad (3)$$

部材厚 d_0 の供試体の乾燥期間 t_0 における乾燥収縮ひずみと、部材厚 d_1 の供試体の乾燥期間 t_1 における乾燥収縮ひずみが等しくなることから、以下の関係が成り立つ。

$$a_1 = \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 \cdot a_0 \quad (4)$$

100×100×400mmの角柱供試体を用いるJIS A 1129に従い求めた乾燥収縮ひずみの経時変化を回帰した、乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項 a および乾燥収縮ひずみの最終値 b を用いれば、部材厚 d の供試体の乾燥収縮ひずみは、次式によって表される。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{b \cdot t}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot a + t} \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t)$ は、乾燥期間 t (日)における乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)で、 d は、供試体の厚さ(mm)である。

乾燥収縮ひずみの経時変化が式(5)に従う

とすれば、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体で乾燥期間 182 日 (26 週) に測定される乾燥収縮ひずみの大きさは、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体であれば、 $182 \text{日} \times (50 \text{mm}/100 \text{mm})^2$ から乾燥期間 45 日の値とほぼ一致することになる。本研究では、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の供試体で測定される乾燥期間 6 週 (42 日) の値から、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体で乾燥期間 182 日 (26 週) に測定される乾燥収縮ひずみの値を推定可能であるか否かを、実際に乾燥収縮ひずみを測定することで検証する。

(2) 使用したコンクリート

① 実験室で作製したコンクリート

実験室で作製したコンクリートでは、普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメント、高炉セメント B 種を用いたコンクリート、結合材に質量比で 15% のフライアッシュを用いたコンクリートを作製し、実験に用いた。

骨材には、硬質砂岩を使用し、安山岩、粘板岩、石灰岩の各砕砂および碎石を用いたコンクリートも作製し、実験に用いた。また、JIS に規格化されている高炉スラグ骨材を用いたコンクリートを用いた実験も行った。

② 生コンクリート工場プラントで製造されたコンクリート

生コンクリート工場で実際に製造、出荷されているコンクリートを実験に用いた。実験には、主に土木工事で用いられることの多い「普通 24-8-20BB」と呼ばれる高炉セメント B 種を用いたコンクリートと、主に住宅工事などの建築工事に用いられることの多い「普通 27-18-20N」と呼ばれる普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの 2 種類の配合を用いた。

(3) 乾燥収縮ひずみの測定方法

はじめに、型枠を用いて $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ および $150 \times 150 \times 530 \text{mm}$ の角柱供試体を作製した。供試体は、打設後 24 時間型枠内で養生し、脱型後直ちに、水中養生を材齢 3 日まで行った。材齢 4 日に、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体からコアドリルを用い、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ および $\phi 75 \times 150 \text{mm}$ の円柱供試体を作製した。乾燥収縮ひずみの測定に用いた $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ と $\phi 75 \times 150 \text{mm}$ の円柱供試体および $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ と $150 \times 150 \times 530 \text{mm}$ の角柱供試体には、乾燥収縮ひずみを測定するための測定用ゲージを貼り付け、材齢 7 日まで、温度が $20 \pm 2^\circ \text{C}$ で相対湿度が 95% 以上の湿潤の環境が保たれた、底面に水を張った密閉容器内に保管した。円柱供試体の上面および底面は、エポキシ樹脂で封かんし、側面のみを乾燥状態とした。

$\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体の長さ変化の測定には、図-1 に示すリニアゲージ (検長: 100mm , 最小目盛り: $5/10,000 \text{mm}$) を用いた。また、 $\phi 75 \times 150 \text{mm}$ の円柱供試体の長さ変化の測定には、検長が 150mm で、最小目盛りが $1/1,000 \text{mm}$ のリニアゲージを用いた。



図2 リニアゲージと円柱供試体

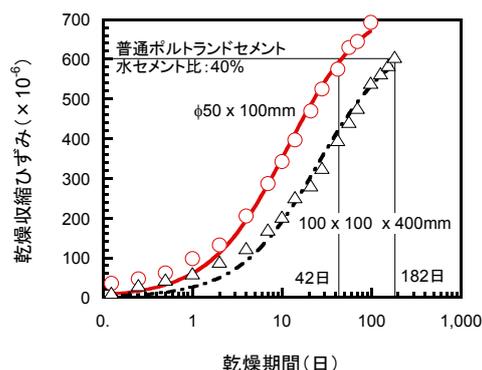


図3 普通セメントを用いたコンクリート (水セメント比 40%, 単位水量 $175 \text{kg}/\text{m}^3$)

$100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ および $150 \times 150 \times 530 \text{mm}$ の角柱供試体の長さ変化は、JIS A 1129-2: 2001 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計 (検長: 250mm , 最小目盛り: $1/1,000 \text{mm}$) を用いて測定した。なお、乾燥収縮ひずみの測定に用いた $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体数は、2 本で、その他の供試体の供試体数は、1 本ずつである。 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ および $150 \times 150 \times 530 \text{mm}$ の角柱供試体の乾燥収縮ひずみは、打設面およびその反対面を除く 2 面のそれぞれ 2 か所で変位の測定を行った。なお、乾燥収縮ひずみの測定は、温度が $20 \pm 2^\circ \text{C}$ で、相対湿度が $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿度室内で行った。

4. 研究成果

(1) 実験室で作製したコンクリート

① セメントの影響

図 3 は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比が 40% のコンクリートの $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ のコア供試体で測定した乾燥収縮ひずみと $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体で測定した乾燥収縮ひずみを比較示したものである。供試体の寸法が小さくなるにつれて、コンクリートの乾燥収縮ひずみが早期に増加することが分かる。また、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ のコア供試体における乾燥期間が 42 日の乾燥収縮ひずみが、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体における乾燥期間が 182 日での乾燥収縮ひずみの値とほぼ同じであることが分かる。図 4、図 5 および図 6 は、それぞれ、早強、中庸熱および低熱の各ポルトランドセメント

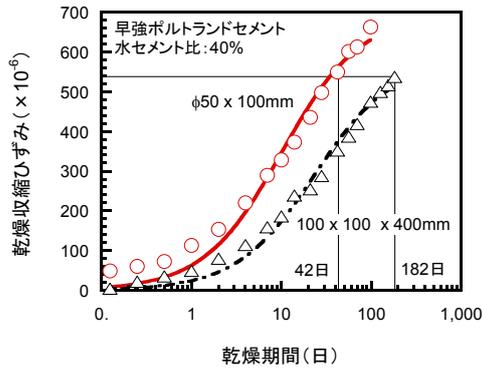


図4 早強セメントを用いたコンクリート (水セメント比 40%, 単位水量 175kg/m³)

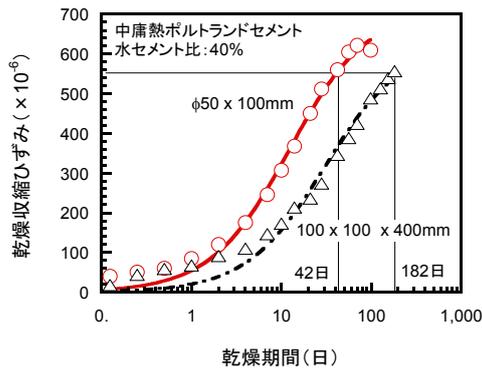


図5 中庸熱セメントを用いたコンクリート (水セメント比 40%, 単位水量 175kg/m³)

を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。いずれのセメントを用いた場合にも、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみが、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値とほぼ同じであることが分かる。

図7は、高炉セメントB種を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。いずれの高炉セメントを用いた場合にも、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみは、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値よりやや小さな値を示していることが分かる。一方、図8は、結合材の一部にフライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。フライアッシュを用いたコンクリートでは、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみが、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値とほぼ同じであることが分かる。

②骨材の影響

図9、図10および図11は、それぞれ、骨材に石灰岩、安山岩および粘板岩の砕砂および碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。いずれの岩種の骨材を用いた場合にも、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみが、100×100×400mmの角柱供試体にお

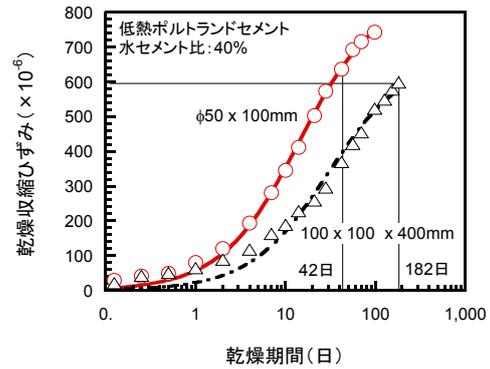


図6 低熱セメントを用いたコンクリート (水セメント比 40%, 単位水量 175kg/m³)

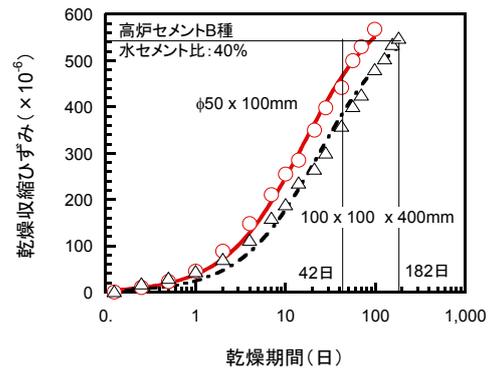


図7 高炉セメントB種を用いたコンクリート (水セメント比 40%, 単位水量 175kg/m³)

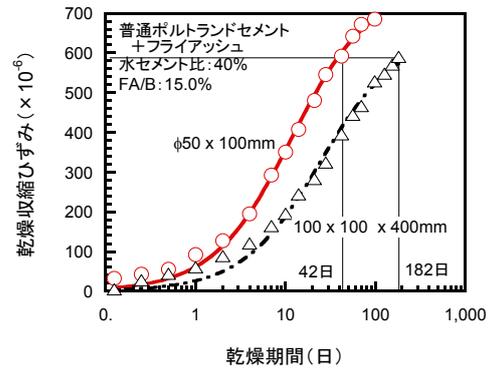


図8 フライアッシュを用いたコンクリート (水セメント比 40%, 単位水量 175kg/m³)

る乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値とほぼ同じであることが分かる。

③スラグ骨材を用いたコンクリート

図12は、細骨材に高炉水砕スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。高炉水砕スラグ細骨材を用いた場合にも、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみが、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値とほぼ同じであることが分かる。

(2) 生コンクリート工場プラントで製造されたコンクリート

図13および図14は、それぞれ、ある地域にある7つのレディーミクストコンクリート工場で製造されている「普通 24-8-20BB」お

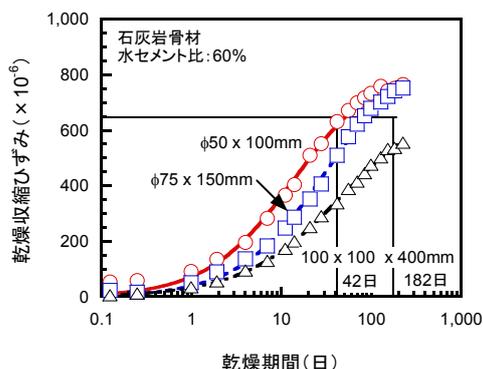


図9 石灰岩骨材を用いたコンクリート (水セメント比 60%, 単位水量 175kg/m³)

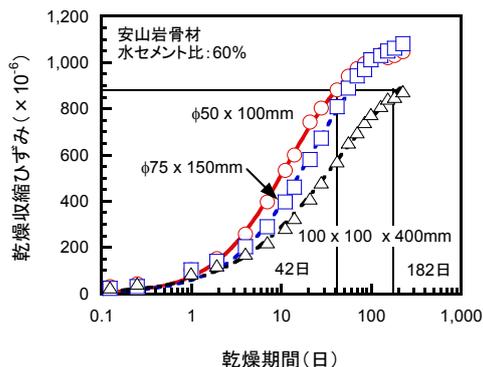


図10 安山岩骨材を用いたコンクリート (水セメント比 60%, 単位水量 175kg/m³)

よび「普通 27-18-20N」のコンクリートのφ50×100mmの円柱供試体で測定された乾燥期間42日における乾燥収縮ひずみに対する100×100×400mmの角柱供試体で182日に測定された乾燥収縮ひずみの比を示したものである。呼び方が「普通 24-8-20BB」のコンクリートの場合、0.82 から 1.23 の範囲にあることが分かる。また、呼び方が「普通 27-18-20N」のコンクリートでは、全て、0.93 から 1.09 の範囲にある。

図15は、速硬性混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。速硬性混和材を用いたコンクリートでも、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみが、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値とほぼ同じであることが分かる。

(3) 本手法の精度

本研究で実験を行ったすべてのコンクリートについて、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみは、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値の関係を図16に示す。一部に例外はあるものの、φ50×100mmのコア供試体における乾燥期間が42日の乾燥収縮ひずみは、100×100×400mmの角柱供試体における乾燥期間が182日での乾燥収縮ひずみの値は±20%程度の範囲にあることが分かる。

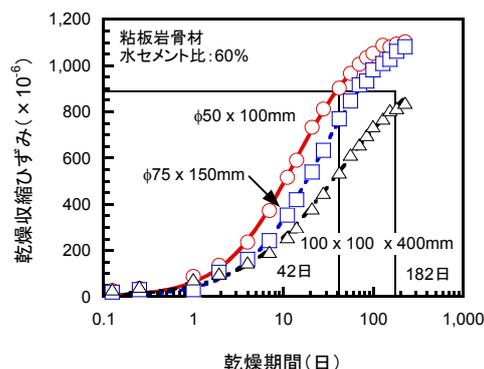


図11 粘板岩骨材を用いたコンクリート (水セメント比 60%, 単位水量 175kg/m³)

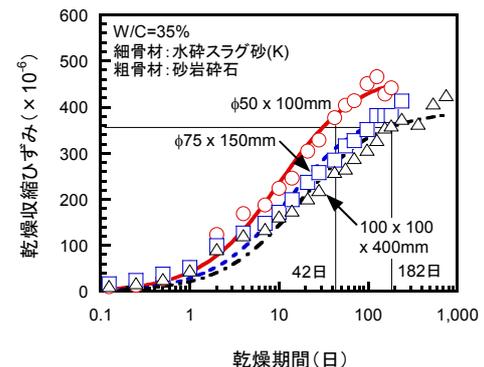


図12 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート (水セメント比 35%, 単位水量 175kg/m³)

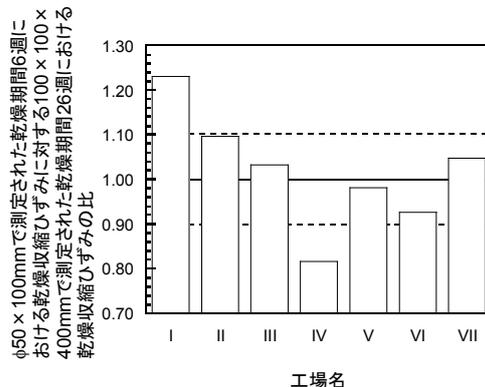


図13 「普通 24-8-20BB」のコンクリート

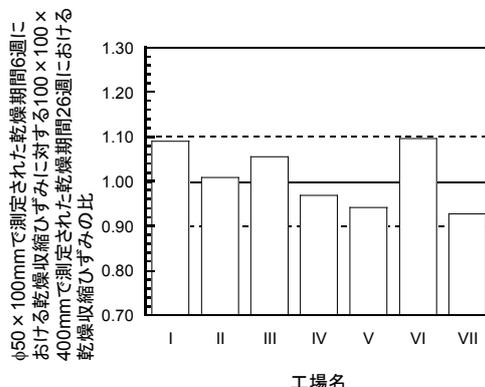


図14 「普通 27-18-20N」のコンクリート

本研究では、研究代表者の周辺で入手可能な材料について実験を行った。一部、スラグ

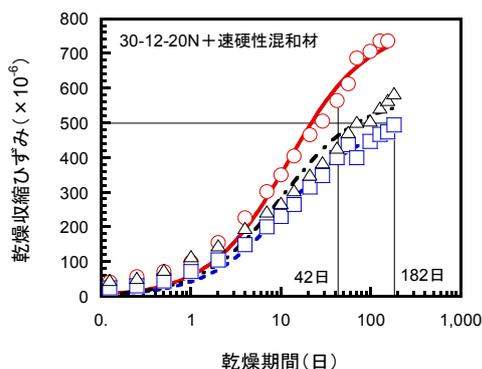


図 15 速硬性混和材を用いたコンクリート

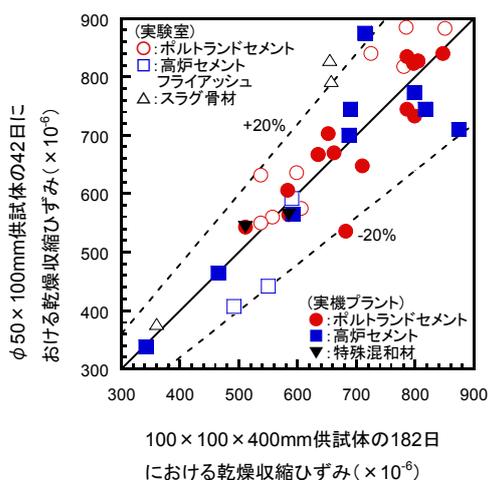


図 16 本手法の精度

骨材などでは、幾分差の大きい結果のものもある。全国的な観点で見た場合、使用される材料、とくに骨材については、種類や岩種、産地によってその性質はまちまちであり、同じ岩種であっても、コンクリートにした場合の乾燥収縮ひずみは異なる。今後は、今回実験した材料以外の材料を全国各地で試験するとともに、研究代表者以外の研究者、技術者によって実験が行われ、本手法の妥当性を検討していくことが望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① 綾野克紀, 藤井隆史: コンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値に養生時の温度履歴が与える影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 査読有, 70 巻 4 号, 2014 年 (頁 428~440), DOI:10.2208/jscejmcs.70.428
- ② 藤井隆史, 大石幸紀, 沖花智之, 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす養生時の温度履歴の影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 36 巻 1 号, 2014 年, (頁 490~495)
- ③ 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研

究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 査読有, 69 巻 4 号, 2013 年 (頁 421~437), DOI:10.2208/jscejmcs.69.421

- ④ 小林仁, 先本勉, 藤井隆史, 綾野克紀, 宮川豊章: 乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 査読有, 69 巻 4 号, 2013 年 (頁 377~389), DOI:10.2208/jscejmcs.69.377
- ⑤ 鳴川拓志, 森上廣茂, 寺石文雄, 藤井隆史, 綾野克紀: 速硬性混和材を用いたコンクリートの生コンクリート工場での実用化に関する研究, 第 17 回 (2013 年) 生コン技術大会研究発表論文集, 査読有, 2013 年, (頁 7~12)

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 大石幸紀, 沖花智之, 藤井隆史, 綾野克紀: 養生中の温度履歴がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 09 月 10 日~2014 年 09 月 12 日, 大阪大学豊中キャンパス
- ② 大石幸紀, 沖花智之, 藤井隆史, 綾野克紀: 養生中の温度履歴がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, 第 66 回土木学会中国支部研究発表会, 2014 年 05 月 31 日, 松江工業高等専門学校
- ③ 藤井隆史, 長嶋聡, 綾野克紀: 養生時の温度がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013 年 09 月 04 日~2013 年 09 月 06 日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス
- ④ 藤井隆史, 長嶋聡, 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす養生時の温度の影響, 第 65 回土木学会中国支部研究発表会, 2013 年 05 月 25 日, 鳥取大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 隆史 (FUJII TAKASHI)

国立大学法人岡山大学・大学院環境生命科学

研究科・准教授

研究者番号: 10537236

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし