

論文 レディーミクストコンクリート工場における簡易乾燥収縮試験方法 および予測手法に関する研究

山田 一徳*1・佐藤 良恵*1・中村 士郎*2・小田部 裕一*2

要旨: 筆者らは、これまでに大規模な空調設備を必要とせず、塩飽和溶液を用いた簡易的な方法により恒湿環境を供給する簡易恒湿槽を用いた乾燥収縮試験方法を提案してきた¹⁾。今回、この試験方法を、実際にレディーミクストコンクリート工場で適用させた。その結果、乾燥開始初期における調湿槽内湿度が高くなるという問題が発生した。そこで、湿度補正を行うことにより、JIS A 1129による方法（以下、JIS法という）と同等の結果が得られることが分かった。また、簡易乾燥収縮で得られた短期間のひずみデータより乾燥材齢 182 日の乾燥収縮ひずみの予測値を示した。その結果、JIS法の測定値と概ね一致した。

キーワード: コンクリート, 乾燥収縮, 恒湿環境, 塩飽和溶液, 湿度補正, 早期予測

1. はじめに

コンクリート構造物における乾燥収縮ひび割れは、構造物の美観を損ねるとともに、耐久性を大きく低下させる。

最近の情勢として、日本建築学会 JASS5 (2009 年度版) には、長期供用級および超長期供用級に区分されるコンクリートの乾燥収縮ひずみの上限値 (8×10^{-4}) が記載された。また、土木学会のコンクリート標準示方書・設計編 (2007 年版) には、収縮ひずみの具体的な設計値 (1200×10^{-6}) が示されている。このため、コンクリートの乾燥収縮ひずみが着目され、コンクリート製造者は、出荷するコンクリートの乾燥収縮ひずみを把握しておく必要がある。

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129 に準拠して、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿環境下で行う必要がある。しかしながら、レディーミクストコンクリート工場において恒温恒湿室のような空調設備を所有しているところは少ない。

そこで、本研究では、既報の簡易な機器、装置により実施可能な簡易乾燥収縮試験法¹⁾をレディーミクストコンクリート工場で実施し、JIS法の乾燥収縮試験の測定値と比較した。更に、JIS法におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみを精度よく再現する方法および短期データから乾燥材齢 182 日の乾燥収縮ひずみを予測する方法について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの調合および使用材料

表-1 にコンクリートの調合および使用した材料の一覧を示す。本実験では、計 15 調合について、簡易乾燥

収縮試験および JIS 法による乾燥収縮試験を実施した。試験に使用したコンクリートは、レディーミクストコンクリート工場の試験室ミキサまたは実機のミキサを用いて練り混ぜ、供試体を作製した。

2.2 試験項目および試験方法

(1) 簡易乾燥収縮試験

表-2 に簡易乾燥収縮試験の概要、写真-1 に簡易乾燥収縮試験に用いた試験装置一式を示す。通常、乾燥収縮試験は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿環境下で実施されるが、簡易乾燥収縮試験においても、これら値を管理条件とした。簡易乾燥収縮試験方法は、2 種類の塩飽和溶液を使用して調湿した小型容器内にひずみ測定用のゲージを埋込んだ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱試験体 3 本を設置・乾燥させ、乾燥中のコンクリートの長さ変化を測定するものである。また、今回実験に用いた調湿容器は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の温度条件を満足するため、レディーミクストコンクリート工場の養生水槽に 3/4 程度浸漬させた。また、調湿槽内の温度と湿度を、温湿度計にて 1 時間間隔で計測を行った。

図-1 に示すように、乾燥収縮ひずみの測定は、供試体作製時にあらかじめ埋込んだひずみゲージを用いた。埋込みひずみゲージには、低弾性の防水ゲージ（基長 120mm）を使用した。供試体は、打設後 1 日で脱型し、材齢 7 日の乾燥開始まで 20°C の水中養生を行った。表-3 に、簡易乾燥収縮試験における測定期間、調湿槽内の温度および湿度の計測の有無を示す。ケース 6,7,10 は、温度湿度計の自動計測不具合により、温度および湿度を測定することができなかった。

(2) JIS 法の乾燥収縮試験

本実験では、簡易乾燥収縮試験で得られた測定値を JIS

*1 住友大阪セメント（株） セメント・コンクリート研究所（正会員）

*2 住友大阪セメント（株） セメント・コンクリート研究所 博(工)（正会員）

表-1 調査および使用材料

ケース	配合	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	細骨材	粗骨材	混和剤種類
1	普通 30 18 20 N	48.2	185	砕砂 68% 陸砂 32%	安山岩	AE 減水剤
2	普通 24 12 20 BB	54.8	162	砕砂 68% 陸砂 32%	安山岩	
3	普通 30 18 20 N	46	184	海砂	結晶片岩 70% 石灰石 30%	
4	普通 30 18 20 N	46	184	海砂	角閃岩 50% 石灰石 50%	
5	普通 30 18 20 N	49	184	海砂	玄武岩	
6	普通 30 18 20 N	49	184	海砂	結晶片岩 30% 石灰石 70%	
7	普通 30 18 20 N	49	184	海砂	結晶片岩 70% 石灰石 30%	
8	普通 30 18 20 N	49	183	海砂	角閃岩 70% 石灰石 30%	
9	普通 30 18 20 N	46	184	海砂	角閃岩	
10	普通 30 18 20 N	49	184	海砂	石灰岩	
11	普通 30 18 20 N	48.5	176	陸砂 65% 砕砂 35%	安山岩	
12	普通 30 18 20 N	50.4	179	砕砂 70% 陸砂 30%	砂岩碎石	
13	普通 30 18 20 N	50.3	178	砕砂 70% 陸砂 30%	砂岩碎石	
14	普通 30 18 20 N	49.5	179	砕砂 65% 陸砂 35%	砂岩碎石	
15	普通 30 18 20 N	50.3	184	陸砂	砂岩碎石	

表-2 簡易乾燥収縮試験方法の概要

試験条件	JIS 法 (JIS A 1129)	簡易乾燥収縮試験方法
供試体個数	3 個	同左
供試体寸法	100×100×400mm 角柱供試体	直径 100mm×高さ 200mm 円柱供試体
脱型時期	成形後約 24 時間 で脱型	同左
初期養生	材齢 7 日まで 20±2℃水中養生	同左
試験開始材 齢	材齢 7 日	同左
供試体 保存条件	恒温恒湿試験室 室温 20±2℃ 相対湿度 60±5%	小型、簡易な調湿槽 温湿度条件は同左
供試体の 測定方法	コンパレータ法、 コンタクトゲー ジ法、ダイヤルゲ ージ法	埋込みひずみゲージ
質量変化率	行う	行わない
測定材 齢 (日)	0,7,28,56,91,182	データロガーによる自動 測定

表-3 測定期間、温度および湿度の計測の有無

ケース	測定期間 (日)	温度	湿度
1	182	○	○
2	182	○	○
3	28	○	○
4	28	○	○
5	28	○	○
6	28	—*	—*
7	28	—*	—*
8	28	○	○
9	28	○	○
10	28	—*	—*
11	28	○	○
12	61	○	○
13	28	○	○
14	96	○	○
15	29	○	○

*1 自動計測不具合

法と比較するため、簡易乾燥収縮試験に用いた同一バッチのコンクリートを用いて JIS A 1129 に準拠した乾燥収縮試験を実施した。なお、測定方法は、コンタクトゲージ法とした。

3. 実験結果

3.1 調湿槽内の温度および湿度

図-2 はケース 1~5, ケース 8,9 およびケース 11~15 の 1 日ごとの調湿槽内温度の平均値、最大値および最小値を示したものである。調湿槽内の温度は、最大で 24.8℃、下限で 17℃まで上昇および下降が見られたが、概ね調湿槽内の温度は 20±2℃の範囲内にあり安定した状態であった。図-3 は、調湿槽内の温度が安定しなかったケースにおける調湿槽内温度、養生水槽温度および養生室内温度の一例(ケース 11)を示したものである。同図より、養生水槽温度は安定した状態であるが、養生室内温度が不安定な状態である。つまり、調湿槽が養生水槽上面から 1/4 程度外気に露出しているため、養生室温度等に影

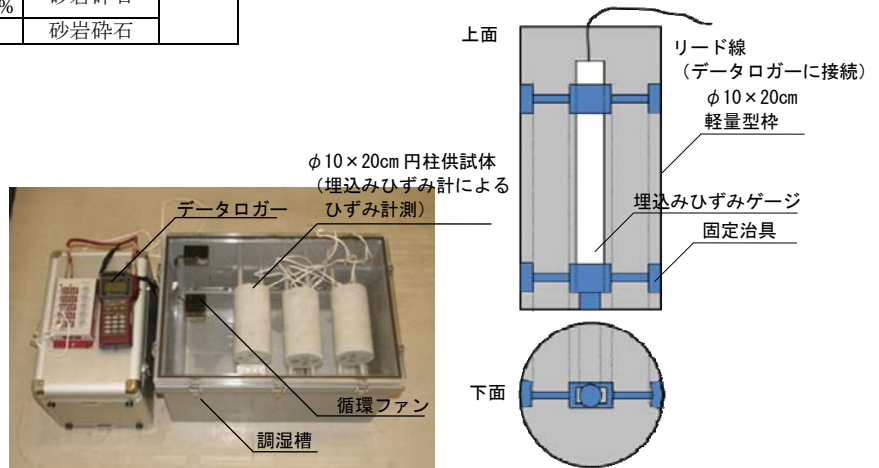


写真-1 簡易乾燥収縮に用いる試験機器 図-1 ひずみ測定方法

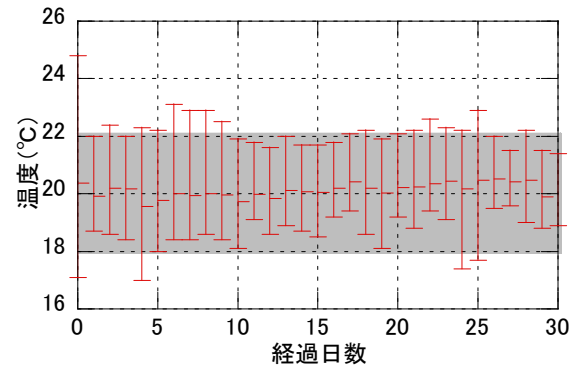


図-2 調湿槽内温度の結果

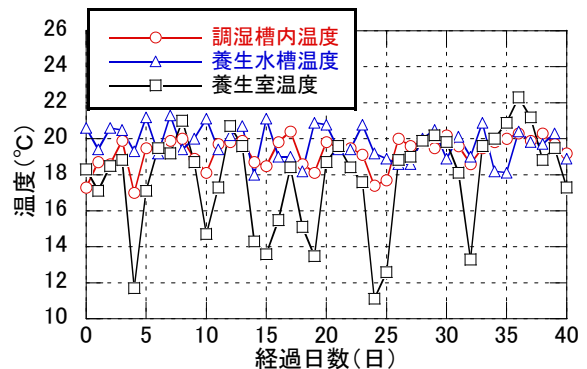


図-3 温度測定結果(ケース 11)

響されやすい。このことが原因で、調湿槽内温度が不安定になるケースがあった。今後、調湿槽上面に断熱機能を施す方法の検討が必要である。

図-4 はケース 1~5, ケース 8, 9 およびケース 11~15 の 1 日ごとの調湿槽内湿度の平均値, 最大値および最小値を示したものである。同図より, 調湿槽内の湿度は, 平均値では乾燥開始から 6 日以降 65% 下回り, 以降は 60 ± 5% を満足した。しかし, 最大値と最小値から分かるように一部のケースの調湿槽湿度は, 60 ± 5% を満足しなかった。特に, 乾燥材齢初期はコンクリートの逸散水分が大きくなるため, 湿度が不安定な状態になった。

3.2 乾燥収縮ひずみ

図-5 に, 7, 28, 182 日における簡易乾燥収縮試験および JIS 法により得られた乾燥収縮ひずみの関係を示す。

閑田らは, 供試体形状の違いにより, 乾燥収縮ひずみの補正値を提案している²⁾。本試験においても提案された方法により補正を行った。これにより, 簡易乾燥収縮試験で得られた測定値が, 図中に引いた 45 度の斜線よりも下に位置するケースが多く認められた。これは, 図-4 に示すように, 乾燥材齢初期の調湿槽内湿度がコンクリートから逸散水分によって高くなるためと推察される。したがって, 乾燥開始初期の湿度が簡易乾燥収縮試験の測定値に与える影響を考慮する必要がある。そこで, 簡易乾燥収縮試験で得られた測定値に湿度補正を加えることとした。

4. 相対湿度の変動を考慮した補正方法

4.1 補正方針

簡易乾燥収縮試験における相対湿度の変動を考慮した補正を以下に示す方針に基づいて行った。

- (1) 既往の代表的な乾燥収縮予測式^{3),4),5),6)}では, 相対湿度がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を表-4 に記載の示す式で示している。また, 寺西らはこれら式のうち CEB-FIP-1990 式・Bazant 式の妥当性を報告している⁷⁾。そこで, 本研究においても上記 2 式に基づいて湿度の補正を行うこととした。
- (2) 本補正は, 高湿度時の補正式であるため, 相対湿度が 60 ± 5% を超えるとき行うこととした。
- (3) 図-4 より, 相対湿度の平均値が乾燥材齢 5 日まで 60 ± 5% を超えているため, 本補正は 5 日単位で行うこととした。

4.2 補正方法

補正は (1) ~ (3) に示す以下の方法により行った。

- (1) 5 日単位の平均湿度を求め, 式(1)より湿度補正値を求める。

$$5(n-1) \leq t \leq 5n \text{ の場合 } (n=1,2,3\cdots)$$

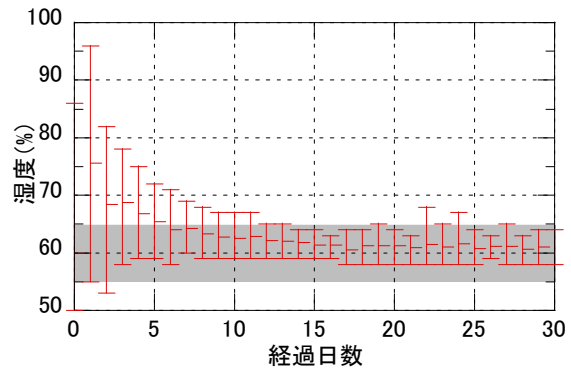


図-4 調湿槽内湿度の結果

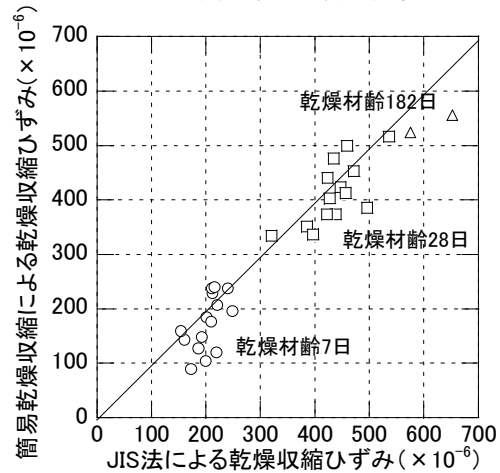


図-5 乾燥収縮試験結果

表-4 既往の予測式における相対湿度の影響を表す項

予測式	CEB-FIP-1990 式 ³⁾ および Bazant 式 ⁴⁾	Gardner 式 ⁵⁾	土木学会 高強度式 ⁶⁾
相対湿度の影響を表す項 (h:相対湿度(%))	$1 - \left(\frac{h}{100}\right)^3$	$1 - 1.18 \left(\frac{h}{100}\right)^3$	$1 - \frac{h}{100}$

$$\alpha_n = \left[1.28 \times \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \right]^{-1} \quad (1)$$

ここに, t : 乾燥材齢(日)

α_n : 湿度補正係数

h : 5 日間の平均湿度 (%)

- (2) 5 日単位の平均湿度が 60 ± 5% を外れた区間のみ図-6 に示すような補正を行う。

$0 \leq t \leq 5$ の場合 ($n=1,2,3\cdots$)

$$\varepsilon_2(t) = \alpha_n \times \varepsilon_1(t) \quad (2)$$

$t > 5$

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_2(t-1) + \alpha_n \times \{\varepsilon_1(t) - \varepsilon_1(t-1)\} \quad (3)$$

ここに, $\varepsilon_1(t)$: 乾燥材齢 t 日の簡易乾燥収縮で得られたひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_2(t)$: 乾燥材齢 t 日における補正ひずみ

($\times 10^{-6}$)

- (3) 平均湿度が所定の範囲にある場合は, 図-7 に示すように, 以下の式を用いて最終補正分を加算もしくは減算する。

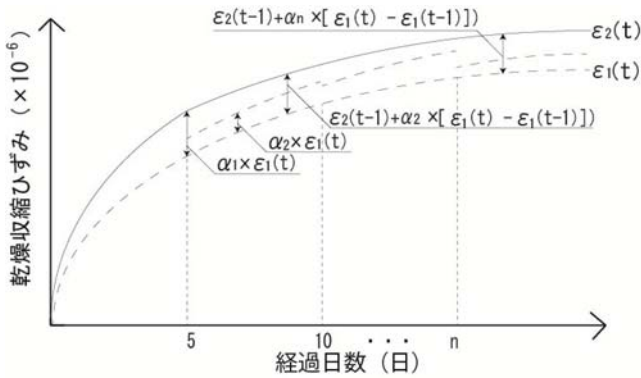


図-6 湿度 60±5%を外れた区間の補正方法

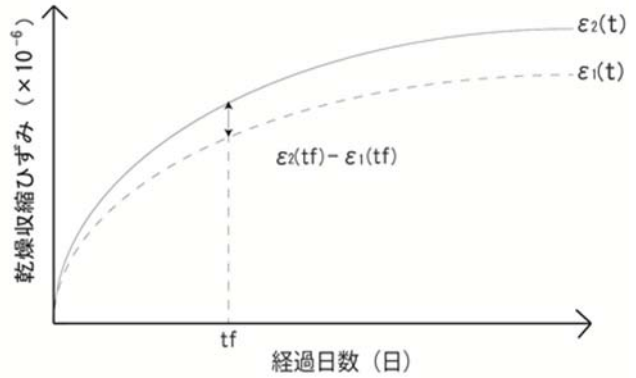


図-7 平均湿度が所定の範囲内にある場合

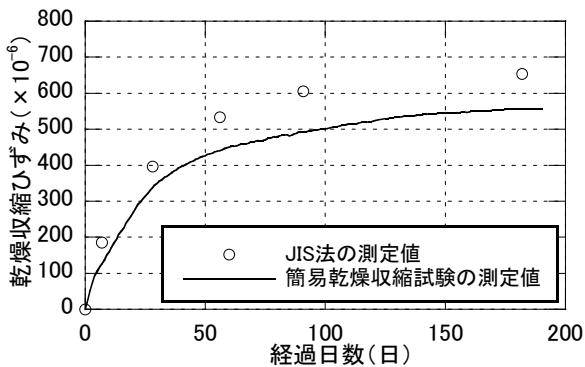


図-8 補正前の乾燥収縮ひずみ (ケース1)

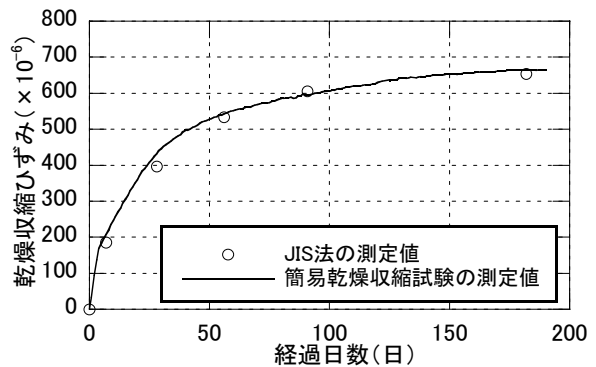


図-9 補正後の乾燥収縮ひずみ (ケース1)

$t > t_f$ の場合

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_2(t) + \{\varepsilon_2(t_f) - \varepsilon_1(t_f)\} \quad (4)$$

ここに、 t_f : 補正を加えた最終材齢(日)

4.3 補正結果

図-8 に、湿度補正を行う前の乾燥収縮試験の経時変化の例を示し (ケース 1)、図-9 に前項の補正方法に基づき求めた乾燥収縮試験の経時変化の例を示す (ケース 1)。これより、補正後の簡易乾燥収縮によるひずみの補正値は、JIS 法の測定値と概ね一致した。また、図-10 に、すべてのケースに対して湿度補正を行った簡易乾燥収縮試験結果と JIS 法の測定結果を示す。乾燥材齢 28 日の時点における簡易乾燥収縮試験で得られた値と JIS 法の値の誤差平均は補正前で 41×10^{-6} であり、補正後は 21×10^{-6} である。同図より、補正前の図-5 と比較すると、各ケースとも補正を行うことにより JIS 法の値と概ね一致している。これらのことから、簡易乾燥収縮で得られた乾燥収縮ひずみを湿度補正すれば、JIS 法の値を概ね再現できることが分かった。

5. 長期乾燥収縮ひずみの予測手法の検討

5.1 検討内容および予測手法

図-9 の一例より、簡易乾燥収縮試験で得られた乾燥収縮ひずみは、湿度補正を行えば、乾燥材齢に関わらず JIS 法の値をほぼ再現することができた。さらに、簡易

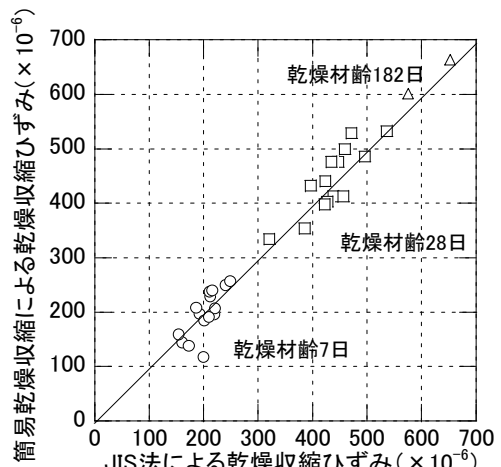


図-10 補正後の乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験の測定回数の上昇率を上げるため、比較的短期間に得られたひずみの連続データから乾燥材齢 182 日のひずみを予測することを試みた。

乾燥材齢 28~96 日で終了したケース 3~15 について補正ひずみを用いて、乾燥材齢 182 日の乾燥収縮ひずみの予測手法について検討した。

乾燥収縮の予測には、次の手法を用いた。

日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)」に記載されている式(5)を用いて図-11 の例 (ケース 3) に示すように近似曲線を求め、乾燥材齢 182 日の乾燥収縮ひずみの予測を試み

た。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh\infty} \times \left(\frac{t}{\alpha + t} \right)^\beta \quad (5)$$

ここに、 t ：乾燥材齢(日)

$\varepsilon_{sh}(t)$ ：材齢 t 日における乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{sh\infty}$ ：最終収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

α, β ：乾燥収縮の進行速度に関わる係数

なお、最終収縮ひずみ $\varepsilon_{sh\infty}$ が発散するような場合(例えば、乾燥開始から 28 日間の測定値が直線的に変化するようなケース等)には、筆者らのこれまでの検討を踏まえて⁸⁾、 α を式(6)で算出した。

$$\alpha = \left(\frac{W/C}{40} \right)^{0.4} \times (0.05Q_s + 0.085Q_G) \times 22.2^{9.5W} \quad (6)$$

ここに、 W/C ：水セメント比(%)

Q_s ：細骨材の吸水率(%)

Q_G ：粗骨材の吸水率(%)

W ：単位水量(t/m^3)

5.2 予測結果

図-12 に、簡易乾燥収縮試験で得られたデータに湿度補正を加え、さらに、短期間のデータ(乾燥材齢 28 日～91 日)から求めた材齢 182 日における乾燥収縮ひずみの予測値を示す。同図より、予測値と JIS 法の測定値を比較するとその差は最大でも 82×10^{-6} である。また、これら差の平均は 38×10^{-6} である。

以上より、本手法は、レディーミクストコンクリート工場で簡易的に乾燥収縮ひずみを測定する手法として、JIS 法の測定値を再現するに耐え得る精度である。

6. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥材齢初期の調湿槽内湿度は、コンクリートの逸散水分によって高くなる。現時点では、初期の湿度を安定させることは困難であり、簡易乾燥収縮試験で得られるひずみの値は、JIS 法の値と異なるケースがある。
- (2) 簡易乾燥収縮試験で得られた乾燥収縮ひずみを、湿度の測定データを基に補正することにより、JIS 法の測定値を概ね再現できる。
- (3) 湿度補正後の短期間におけるひずみデータから、長期の乾燥収縮ひずみを予測することが可能であり、その予測値は簡易法として実用に耐え得る精度であった。

参考文献

- 1) 中村士郎, 松崎一郎, 金塚美喜男, 今本啓一: 簡易乾燥収縮試験法に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.7

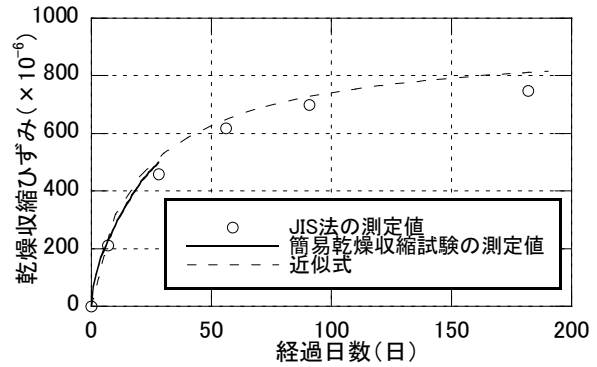


図-11 補正後の乾燥収縮試験結果

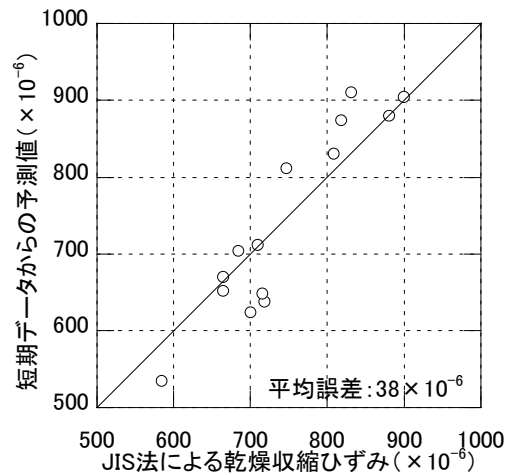


図-12 乾燥材齢 182 日における乾燥収縮予測結果

- 2) 閑田徹志, 百瀬晴基, 今本啓一, 三橋博三: 乾燥収縮試験法の省力化に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 628, pp. 851-857, 2008.6
- 3) CEB-FIP:Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, pp.57-58, 1990
- 4) Z.P.Bazant and S.Baweja:Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3, Materials and Structures, Vol.28, pp.357-365, 1995
- 5) N.J.Gardner:Design Provisions for Shrinkage and Creep of Concrete, ACI SP-194, pp.101-133, 200.8
- 6) 土木学会:コンクリート標準示方書 構造性能照査編, pp.30-34, 2002.4
- 7) 寺西浩司, 佐藤嘉昭:複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.602, pp.21-28, 2006.4
- 8) 小田部裕一, 中村士郎:乾燥収縮ひずみの発現における経時変化特性に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.303-308, 2011.

