

コンクリートの収縮に及ぼす要因およびその予測方法に関する検討

オリエンタル白石(株) 技術研究所 正会員 工修 ○俵 道和
オリエンタル白石(株) 技術研究所 正会員 工博 呉 承寧

In order to discuss the influence of materials and mixture proportions of concrete on the shrinkages, drying shrinkages of twelve kinds of concrete and autogenous shrinkages of ten kinds of concrete, which were made by different materials, were measured. And the methods for predicting the long-term shrinkages of concrete according to measured results at early age were discussed also because the prediction was necessary to construction projects. Comparing the predicted results to measured results, it is known that error range of the predicting drying shrinkage with JSCE or AIJ formula is 0 to +25% and error range of the predicting autogenous shrinkage with JSCE formula is -15% to +25%.

Key words : Drying shrinkage, Autogenous shrinkage

1. はじめに

コンクリートの収縮は、構造物周辺の温度・湿度、部材断面形状・寸法、コンクリートの配合のほか、骨材の性質、セメント・混和材の種類、コンクリートの締固め、養生条件等種々の要因によって影響を受ける。また、収縮にも自己収縮や乾燥収縮があり、これらの要因が収縮に与える影響について様々な検討が行なわれている。コンクリートのひび割れ制御を目的として、土木・建築両学会ではコンクリートの乾燥収縮ひずみの規定化あるいはこれに向けた検討が進められている。2007年制定土木学会標準示方書[設計編]¹⁾では収縮ひずみの規定値として、JIS A 1129 試験 (10×10×40cm 試験体, 水中養生7日後, 6ヶ月乾燥条件) で、 1000×10^{-6} が提示された。また、建築学会では JASS5 (2009年版)²⁾の改定に伴い、乾燥収縮率は計画供用期間の級が超長期および長期では 8×10^{-4} 以下と規定された。今後、これらの乾燥収縮ひずみの規定化を受け、実際の工事において短期間の測定値から長期の乾燥収縮ひずみを精度良く予測する必要性が高まってくるものと考えられる。

よって本研究では、プレストレストコンクリート橋梁上部工に使用する配合について、自己収縮および乾燥収縮におよぼす配合および材料に関する要因について個別に検討を行なった。また、実際の工事を想定し約6ヶ月間を要す収縮ひずみの結果判定を早期に行うことを目的として、短期(4週)の収縮ひずみの測定結果から長期(26週)の収縮ひずみの予測方法について検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類

本研究では、プレストレストコンクリート橋梁上部工に使用する配合について検討を行なった。試験体の配合種類を表-1に示す。使用したセメントの種類はすべて早強ポルトランドセメントであり、設計基準強度が30~50MPa、実強度が51.3~78.1 MPa、ヤング係数が29.7~44.7 GPa、水セメント比が32.5~46.0%および単位水量が140~171kg/m³の配合について検討を行なった。乾燥収縮12配合、自己収縮10配合について測定を行った。

2.2 試験方法

(1) 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-3『モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法 第3部: ダイ

表-1 試験体の配合種類

配合 No.	試験種類		岩種		骨材吸水率 (%)		W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位 β -量 (m ³ /m ³)
	乾燥収縮	自己収縮	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材				
①	○	○	海砂	角閃岩	1.60	0.64	40.0	41.5	163	0.293
②	○	○	結晶片岩	結晶片岩	1.70	1.82	38.2	44.0	150	0.275
③*	○	○	結晶片岩	結晶片岩	2.16	2.60	35.4	44.0	150	0.290
④	○	○	陸砂	砂岩	2.04	0.59	44.5	37.5	162	0.278
⑤*	○	○	陸砂	砂岩	2.04	0.59	32.5	31.8	170	0.344
⑥	○	○	山砂	硬質砂岩	1.75	0.79	40.0	41.5	170	0.305
⑦	○	○	山砂	硬質砂岩	1.91	0.70	40.0	42.9	170	0.305
⑧	○	-	石灰石	石灰石	0.56	0.24	34.8	42.0	140	0.274
⑨*	○	-	火成岩	火成岩	1.25	0.96	34.0	41.0	145	0.287
⑩*	○	-	硬質砂岩	硬質砂岩	1.73	0.57	39.0	38.7	171	0.310
⑪	○	-	硬質砂岩	硬質砂岩	0.67	0.95	40.0	43.0	155	0.279
⑫	○	-	硬質砂岩	硬質砂岩	0.70	0.99	40.0	39.0	165	0.297
⑬	-	○	石灰石	石灰石	1.15	0.31	46.0	42.4	147	0.249
⑭	-	○	斑レイ岩	閃緑岩	2.33	0.47	41.0	43.4	165	0.293
⑮	-	○	石灰石	硬質砂岩	1.40	0.45	38.0	44.0	162	0.298

※混和材として高炉スラグ微粉末 (6000 ブレーン) をセメントの50%置換

『ヤルゲージ方法』に準じて行った。試験体は成形翌日に脱型し、材齢7日まで標準水中養生した後に基長を測定し、それ以降恒温恒湿室 (温度 20°C, 湿度 60%) に保管し試験材齢毎に長さ測定を行った。

(2) 自己収縮

脱型以前の自己収縮ひずみの測定は、日本コンクリート工学協会規準『セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法 (改訂版 2002)』³⁾に準じて行った。試験体作製時に、JIS A 6204 附属書 1『コンクリートの凝結時間試験方法』に準じて凝結試験を行い、コンクリートの始発時間を基準としてレーザー変位計を用いて材齢1日までの長さ変化を測定する。脱型以前の長さ測定方法を図-1に示す。材齢1日後、脱型した後、試験体をアルミテープでシールし、JIS A 1129-3『モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法 第3部：ダイヤルゲージ方法』に準じて長さ測定を行い、それ以降恒温恒湿室 (温度 20°C, 湿度 60%) に保管し試験材齢毎に長さ測定を行った。

3. 試験結果

3.1 長さ変化率

コンクリート収縮性状を図-2に示す。平成8年のコンクリート標準示方書[設計編]⁴⁾では、図-2に示される①が乾燥収縮、②が自己収縮と定義されている。本文では、今回実施した乾燥収縮試験に準拠した試験方法によって測定された結果は③で示される部分であるため、③で示される乾燥開始以降の全収縮

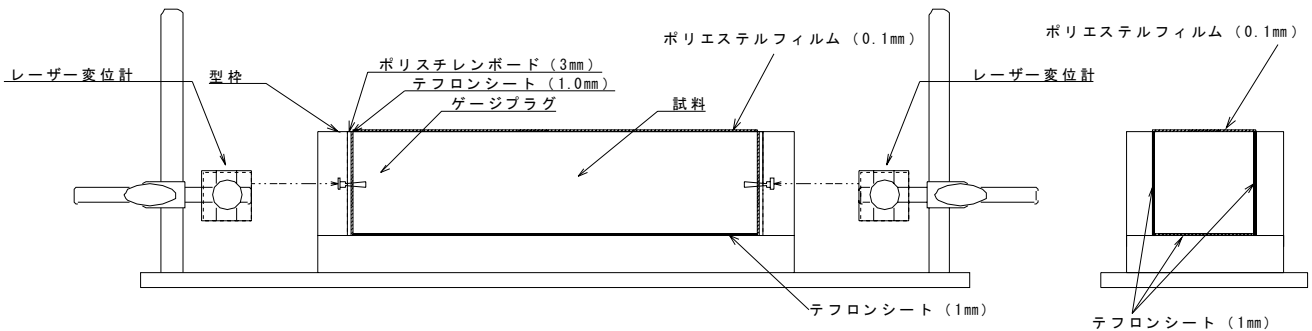


図-1 自己収縮長さ測定 (脱型以前の測定方法)

を乾燥収縮(材齢7日以降の乾燥による収縮+水和収縮),
②で示される部分を自己収縮(凝結始発から乾燥を伴わない水和収縮)と定義した。

乾燥収縮による長さ変化率を図-3, 自己収縮による長さ変化率を図-4に示す。材齢26週までの乾燥収縮ひずみは $273\sim 774\times 10^{-6}$ であり, いずれの試験体も 800×10^{-6} を超過するものは認められなかった。材齢26週までの自己収縮ひずみは $209\sim 490\times 10^{-6}$ を示した。乾燥収縮ひずみは材齢26週以降も増加傾向が見られるが, 自己収縮ひずみは材齢8週程度まで増加傾向を示すが, 材齢26週ではほぼ収束していることが確認できる。

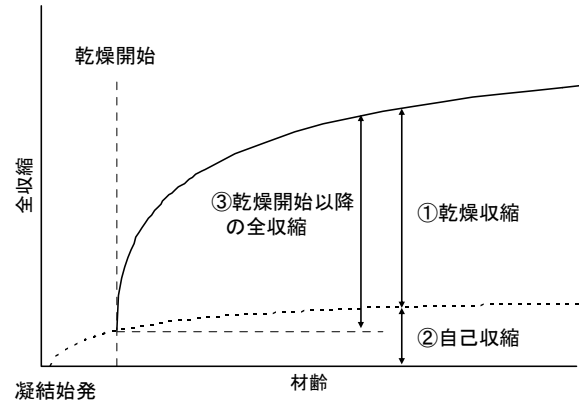


図-2 コンクリートの収縮性状

3.2 単位水量と長さ変化率の関係

2007年制定土木学会コンクリート標準示方書では, 乾燥収縮について単位水量をパラメーターとして予測する方法が提案されている。図-5に単位水量と材齢26週乾燥収縮長さ変化率実測値との関係を示す。乾燥収縮の要因は, セメントペースト中のセメント水和による水分の消費と, 水和に起因しない余剰水の乾燥にあるため, 今回の試験結果からも単位水量との相関関係が確認された。

3.3 水セメント比と長さ変化率の関係

2007年制定土木学会コンクリート標準示方書では, 自己収縮について水セメント比をパラメーターとして予測する方法が提案されている。図-6に水セメント比と材齢26週自己収縮長さ変化率実測値との関係を示す。自己収縮は, セメントペースト中のセメント水和による水分の消費により生じるため, 自己収縮は水セメント比との相関関係が確認された。

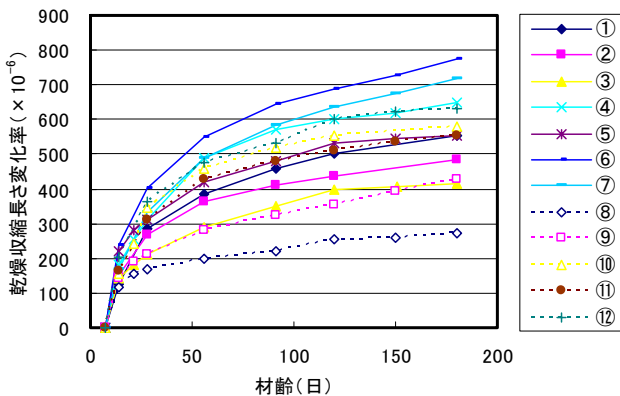


図-3 材齢と乾燥収縮長さ変化率の関係

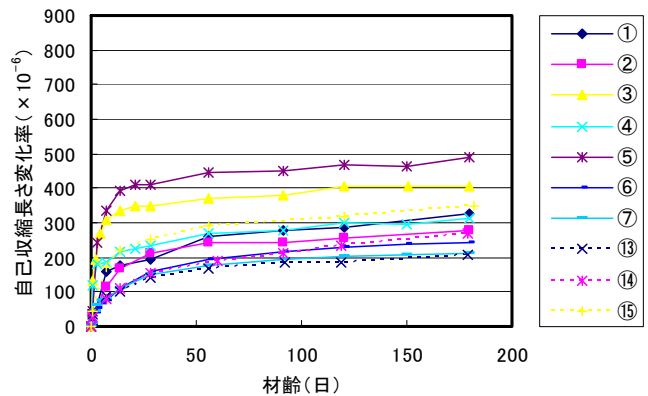


図-4 材齢と自己収縮長さ変化率の関係

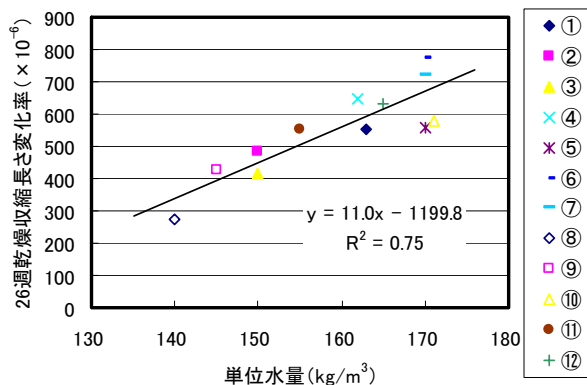


図-5 単位水量と26週乾燥収縮の関係

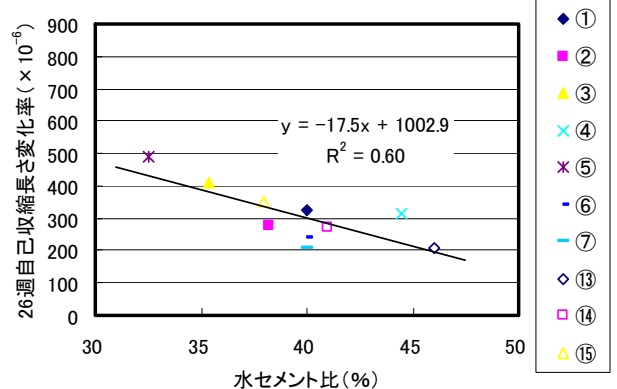


図-6 水セメント比と26週自己収縮の関係

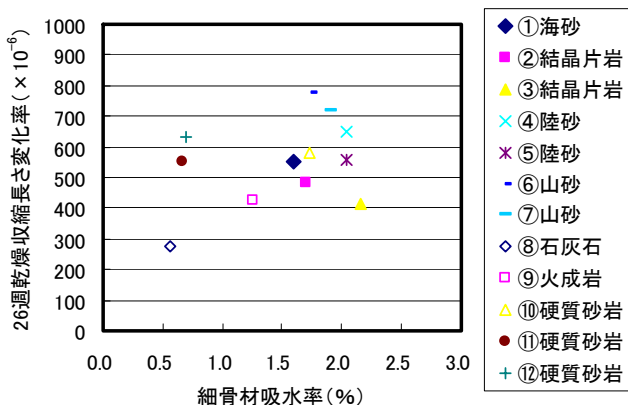


図-7 細骨材吸水率と26週乾燥収縮の関係

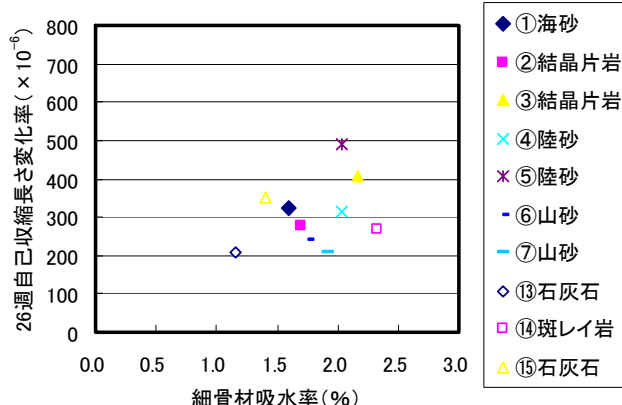


図-8 細骨材吸水率と26週自己収縮の関係

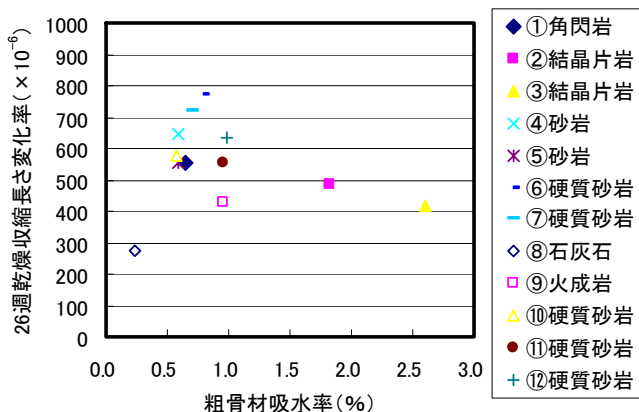


図-9 粗骨材吸水率と26週乾燥収縮の関係

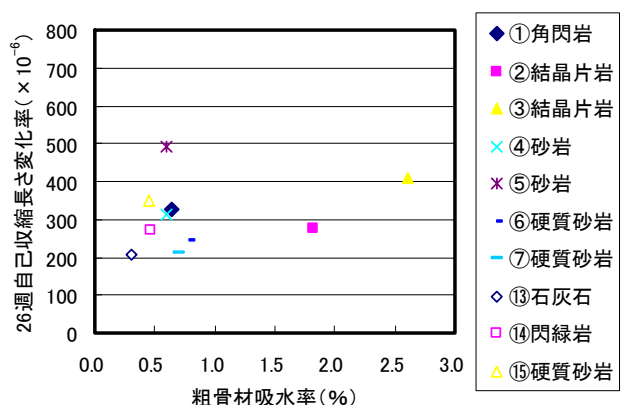


図-10 粗骨材吸水率と26週自己収縮の関係

3.4 骨材吸水率と長さ変化率の関係

細骨材吸水率と材齢 26 週乾燥収縮および自己収縮との関係を図-7, 8に示す。細骨材の吸水率と乾燥収縮の関係は、吸水率が大きくなるにつれて乾燥収縮も大きくなる傾向が確認された。細骨材の吸水率が同じ場合は、例えば 2.0%前後では山砂、陸砂が硬質砂岩の砕砂に比べて乾燥収縮が大きくなる傾向が見られた。配合⑧の石灰石細骨材を用いた場合、骨材の吸水率が小さく乾燥収縮も最も小さくなった。自己収縮と細骨材吸水率の関係は、吸水率が大きくなるにつれて自己収縮も大きくなる傾向が見られるものの、岩種の違いによる顕著な影響は確認されなかった。

粗骨材の吸水率と材齢 26 週乾燥収縮および自己収縮との関係を図-9, 10に示す。粗骨材の吸水率は 0.5~1.0%の範囲が多く存在しているが、粗骨材の吸水率が大きくなっても乾燥収縮および自己収縮に及ぼす影響は確認されなかった。これより、乾燥収縮および自己収縮に及ぼす骨材の吸水率の影響は、粗骨材より細骨材の吸水率による影響があることが確認された。

4. 収縮ひずみの早期判定方法

4.1 乾燥収縮予測方法

乾燥収縮および自己収縮の予測方法として2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]に提案されている。乾燥収縮予測式を式(1)に示す。本試験では、式(1)の係数として相対湿度60%、体積表面積比25mm、乾燥開始材齢7日を設定している。これを式(1)に代入すると、乾燥収縮は図-11に示すように、単位水量を変数として表される。これより、単位水量が小さくなるにつれて計算値より実測値が小さくなる傾向が確認された。

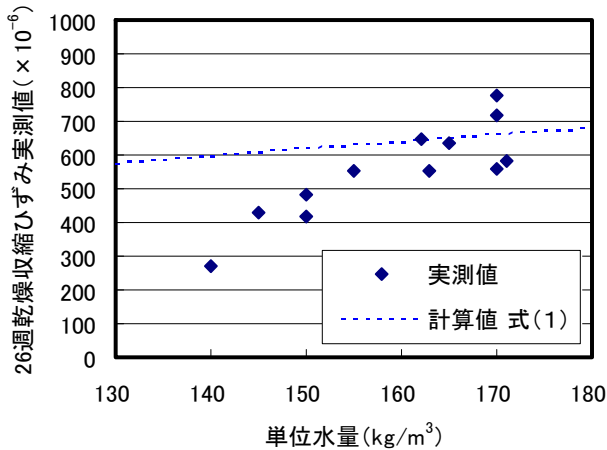


図-1-1 乾燥収縮計算値と実測値の比較

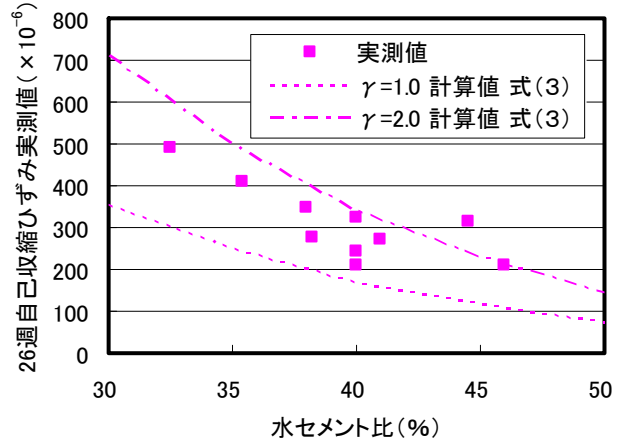


図-1-2 自己収縮計算値と実測値の比較

土木学会の規定に従って長さ変化率を測定する場合、測定期間として6ヶ月が必要である。実施工の際に、試験練りから現場施工までの期間として材齢6ヶ月の測定期間を設けるのは現実的に難しいのが現状である。上記のような現状から、短期の測定値から長期の収縮ひずみを精度良く予測する手法の確立が望まれている。そこで、土木学会および建築学会から提案されている式を用いて短期(4週)の実測値から長期の予測値の推定を行った。乾燥収縮の長期ひずみ予測方法として土木学会式¹⁾および建築学会式²⁾の2種類について検討を行なった。土木学会式の予測には式(1)を用いた。材齢4週の乾燥収縮ひずみ実測値を $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ に代入し、乾燥開始材齢 t_0 を7日、乾燥中の材齢 t を4週として収縮ひずみの最終値 ϵ'_{sh} を算定した。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \left[1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\} \right] \cdot \epsilon'_{sh} \quad \text{式(1)}$$

$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5 \left[\log_e \left(\frac{V/S}{10} \right) \right]^2$$

ここに、 ϵ'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

RH: 相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

W: 単位水量 (kg/m^3) ($130\text{kg/m}^3 \leq W \leq 230\text{kg/m}^3$)

V/S: 体積表面積比 (mm) ($25\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$)

t_0 および t : 乾燥開始時および乾燥中のコンクリート有効材齢 (日)

建築学会では、式(2)に示される早期判定式が提案されている。今回は短期の実測値から長期の予測値の推定を行うため、式(2)に示される係数 α_4 を用いて、材齢4週の実測値から材齢26週の乾燥収縮を予測した。

$$\epsilon_{sh}^{est} = \alpha_i \times \epsilon_{sh}^i \quad \text{式(2)}$$

ここに、 ϵ_{sh}^{est} : 乾燥期間26週における乾燥収縮率の推定値

ϵ_{sh}^i : 乾燥期間 i 週における乾燥収縮率 (i は4, 8, 13のいずれか)

α_i : 推定係数 ($\alpha_4 = 2.11, \alpha_8 = 1.49, \alpha_{13} = 1.21$)

乾燥収縮について土木学会式による材齢26週の実測値と予測値の比較を図-1-3に示し、建築学会式による比較を図-1-4に示す。その結果、土木学会式による結果は、材齢26週実測値との誤差が0~+25%の範囲であった。これは、土木学会の予測値は最終値を予測するための式であるため、実測値より予測値が大きくなったと考えられる。建築学会式による予測値は、予測する材齢が4週の場合の誤差は0~+20%の範囲であり、土木学会式より高い精度を示した。

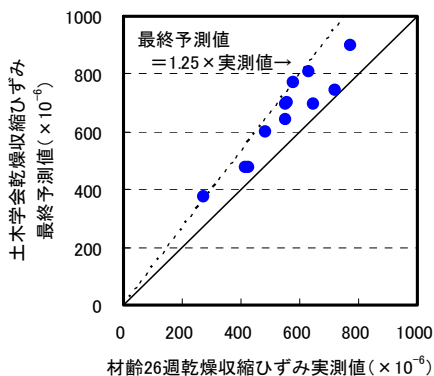


図-13 土木学会実測値と予測値の比較

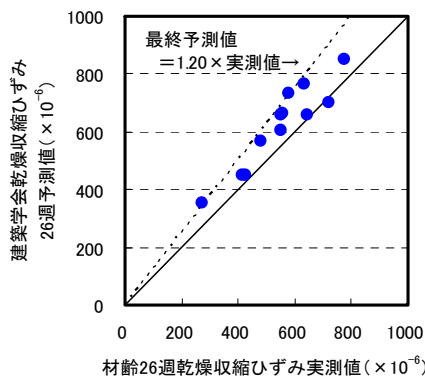


図-14 建築学会実測値と予測値の比較

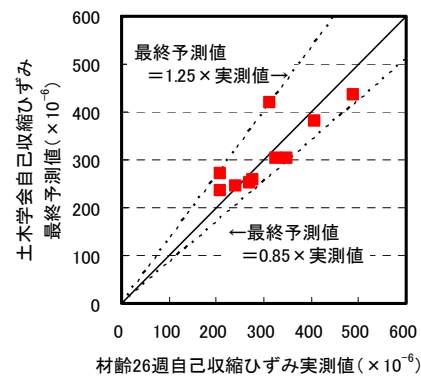


図-15 土木学会実測値と予測値の比較

4.2 自己収縮予測方法

土木学会¹⁾から提案されている自己収縮予測式を式(3)に示す。

$$\epsilon'_{as}(t) = \gamma \epsilon'_{as\infty} \left[1 - \exp\{-a(t-t_s)^b\} \right] \quad \text{式(3)}$$

ここに、 $\epsilon'_{as}(t)$: 凝結の始発から材齢 t までのコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

γ : セメントおよび混和材の種類を表す係数 (普通ポルトランドセメントのみを用いる場合1.0)

$\epsilon'_{as\infty}$: 自己収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$) , $\epsilon'_{as\infty} = 3070 \exp\{-7.2(W/C)\}$, W/C : 水セメント比

t_s : 凝結の始発 (日) , a, b : 自己収縮の進行特性を表す係数

計算値に使用した凝結の始発時間は、今回試験を行った配合の平均値 0.26 日と設定した。自己収縮計算値と実測値の比較を図-12に示す。セメント種類および混和材の種類の影響を表す係数 γ を1.0と2.0とした計算値を同図に示しているが、普通ポルトランドセメントを使用する場合は $\gamma=1.0$ であり、本試験では早強ポルトランドセメントを使用しているため γ が1.0~2.0の間を示したものと考えられる。

自己収縮に関しても、乾燥収縮同様に短期の実測値から長期の予測値の推定を行った。式(3)に示される計算式を使用し、材齢4週の自己収縮ひずみ実測値を $\epsilon'_{as}(t)$ に代入し、自己収縮ひずみの最終値 $\epsilon'_{as\infty}$ を算定した。自己収縮について実測値と予測値の比較を図-15に示す。その結果、材齢4週実測値から予測した自己収縮ひずみの最終予測値と材齢26週実測値との誤差は-15~+25%であった。

本試験では様々な骨材種類の配合について自己収縮および乾燥収縮の測定を行ったが、骨材の種類が違って、短期の実測値から長期の測定値を推定することが可能であった。

5. まとめ

- (1) 乾燥収縮は単位水量との相関があり、自己収縮は水セメント比との相関が確認された。
- (2) 骨材の吸水率が乾燥収縮および自己収縮に及ぼす影響は、粗骨材の吸水率より細骨材の吸水率による影響が確認され、細骨材の吸水率が大きいほど、乾燥収縮が大きくなる傾向が確認された。
- (3) 短期の実測値から長期の乾燥収縮ひずみを予測した結果、土木学会式の誤差は0~+25%、建築学会式の誤差は0~+20%であり、建築学会式が高い精度を示した。
- (4) 短期の実測値から長期の自己収縮ひずみを予測した結果、土木学会式の誤差は-15~+25%であった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], pp.45-49, 2007
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.355-357, 2009
- 3) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集, pp.455-458, 2004.4
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], pp.26-28, 1996