

論文 混合セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式のセメント係数について

渡邊 裕輝*1・石川 雅美*2・石川 嘉崇*3

要旨：本研究は、JCI TC911 委員会¹⁾より提案されている乾燥収縮ひずみの予測式を湿度一定の条件下で実験を行った石川ら²⁾の研究成果を基に評価した。すなわち同式中において用いられているセメント係数の値について、これまで示されていなかった混合セメントに対する値を求めるとともに、収縮ひずみの進行速度を調整するパラメータを導入した。さらに、実際のコンクリート構造物の環境に適応させるため、湿度が変化する条件下での収縮試験を行い、同提案式を増分型に修正し、湿度変化に対応した予測が可能であることを確認した。

キーワード：フライアッシュ、混合セメント、乾燥収縮ひずみ、乾燥収縮予測式、自由収縮試験、

1. はじめに

ここ数年の解析技術の発展により、コンクリートの乾燥収縮や自己収縮による応力についても温度応力と同様に具体的な数値的予測が可能となった。しかしながら、コンクリート中の相対湿度の変化とそれに伴う収縮ひずみ、すなわち乾燥収縮ひずみとの一般的な関係については、JCI-TC911 委員会¹⁾が提案している予測式など散見されるにすぎない。同予測式は、JCMAC3 などの FEM 解析コードにも組み込まれ、乾燥収縮ひずみの算出に使用されているが、その入力パラメータであるセメント係数については、普通および早強セメントのみ推奨値が示され、混合セメントに関しては、その具体的な値が示されていないのが現状である。

そこで本研究では、石川ら²⁾が各種混合セメントを用いて行った温度・湿度一定条件下での収縮試験結果に対して、JCI-TC911 委員会の予測式を当てはめ、混合セメントに対するセメント係数の値を求めた。また、乾燥収縮ひずみの進行速度を調整するパラメータを導入し、各種混和材の添加量の違いが最終的な収縮ひずみ値や収縮ひずみの進行速度の及ぼす影響を、具体的なパラメータの値で再評価した。

さらに、実際のコンクリート構造物は周囲の相対湿度が変動する環境下におかれるため、周囲の湿度が変動する環境下での乾燥収縮試験を行った。この湿度変動下での試験結果に対しても JCI-TC911 委員会予測式が対応できるよう、同式を増分型に修正し検討を行った。加えて、同一配合で細骨材のみを変えた試験体の自由収縮試験を行い、その結果から湿度変化の影響および細骨材の影響を検討した。

2. JCI TC911¹⁾ 乾燥収縮ひずみ予測式の概要

JCI TC911 委員会は相対湿度とコンクリートの乾燥収縮について以下の式を提案している。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{sh\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値 (μ)

β : 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項

t : コンクリートの材齢 (日)

t_0 : 乾燥開始時材齢 (日)

$$\varepsilon_{sh\infty} = \frac{\varepsilon_{sh\rho}}{1 + \varphi \cdot t_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sh\rho} = \frac{\alpha \cdot (1 - h) \cdot W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} \quad (3)$$

ここに、 φ : 回帰分析によって求める係数

α : セメントの種類により異なる係数
(普通 $\alpha = 11$, 早強 $\alpha = 15$)

h : 周囲の相対湿度 (as decimal)

W : 単位水量 (kg/m^3)

$f'_c(28)$: 28 日圧縮強度 (MPa)

$$\beta = \frac{4 \cdot W \cdot \sqrt{V/S}}{100 + 0.7 \cdot t_0} \quad (4)$$

$$\varphi = 10^{-4} \{15 \cdot \exp(0.007 \cdot f'_c(28)) + 0.25 \cdot W\} \quad (5)$$

ここに、 $\sqrt{V/S}$: 体積表面積比 (mm)

*1 東北学院大学 工学部環境建設工学科 (学生会員)

*2 東北学院大学 工学部環境建設工学科教授 (正会員)

*3 電源開発 茅ヶ崎研究所 上席研究員 博士(工学) (正会員)

表-1 石川ら²⁾の実験の配合表

記号	W/B(%)	s/a(%)	単位質量(kg/m ³)									
			W	OPC	BB	FA	S	G1	G2	空気量(%)	混和剤(%)	スランプ(cm)
N	50	46.7	175	350	-	-	822	474	473	4.1	0.75	19.5
FA10	50	46.7	175	315	-	35	817	471	470	4.7	0.50	19.5
FA20	50	46.7	175	280	-	70	811	468	467	5.0	0.50	19.5
FA30	50	46.7	175	245	-	105	806	465	463	4.8	0.50	20.0
BBF20	50	46.7	175	168	112	70	807	466	464	4.8	0.50	19.5
FA10(外)	50	46.7	175	350	-	70	740	474	473	4.7	0.50	20.5

3. 乾燥収縮ひずみ JCI-TC911 委員会予測式の評価(湿度一定時)

JCI-TC911 委員会予測式¹⁾の妥当性を確認するため、石川ら²⁾の収縮試験結果と比較する。石川ら²⁾は、相対湿度 60%、温度 20℃として一定環境下で 100×100×400mm の試験体の収縮試験を行った。試験体の配合を表-1、予測式に用いた各数値を表-2 に示す(乾燥開始材齢および 28 日圧縮強度は文献²⁾による)。ここではまず、セメント係数 $\alpha=11$ として計算した。図-1 に TC911 予測式と実験との比較を示す。この図から、各時刻における乾燥収縮ひずみの経時変化の傾きに差異が見られ、BBF20 以外のセメントに対して、予測式の収縮ひずみ量は実験

値よりも小さめの値となっている。従って、これらの結果より、混合セメントに対して普通セメントの推奨値を用いることは当然のことながら実用的でないと思われる。

TC911 の予測式の特性として、 α 値はグラフの最終値の大きさを定めるパラメータである。すなわち、 α の値が大きいほど乾燥収縮ひずみの最終値は大きくなる。また式の傾き(乾燥収縮の進行速度)を制御するために、式(4)における W にかかる定数である“4”を“ γ ”とおいてこれをパラメータとする。この γ の値が大きいほど乾燥収縮の進行速度が遅いといえる。それらの値をセメントやその他の要因により異なる係数として改めて予測式を立ててみることにした。

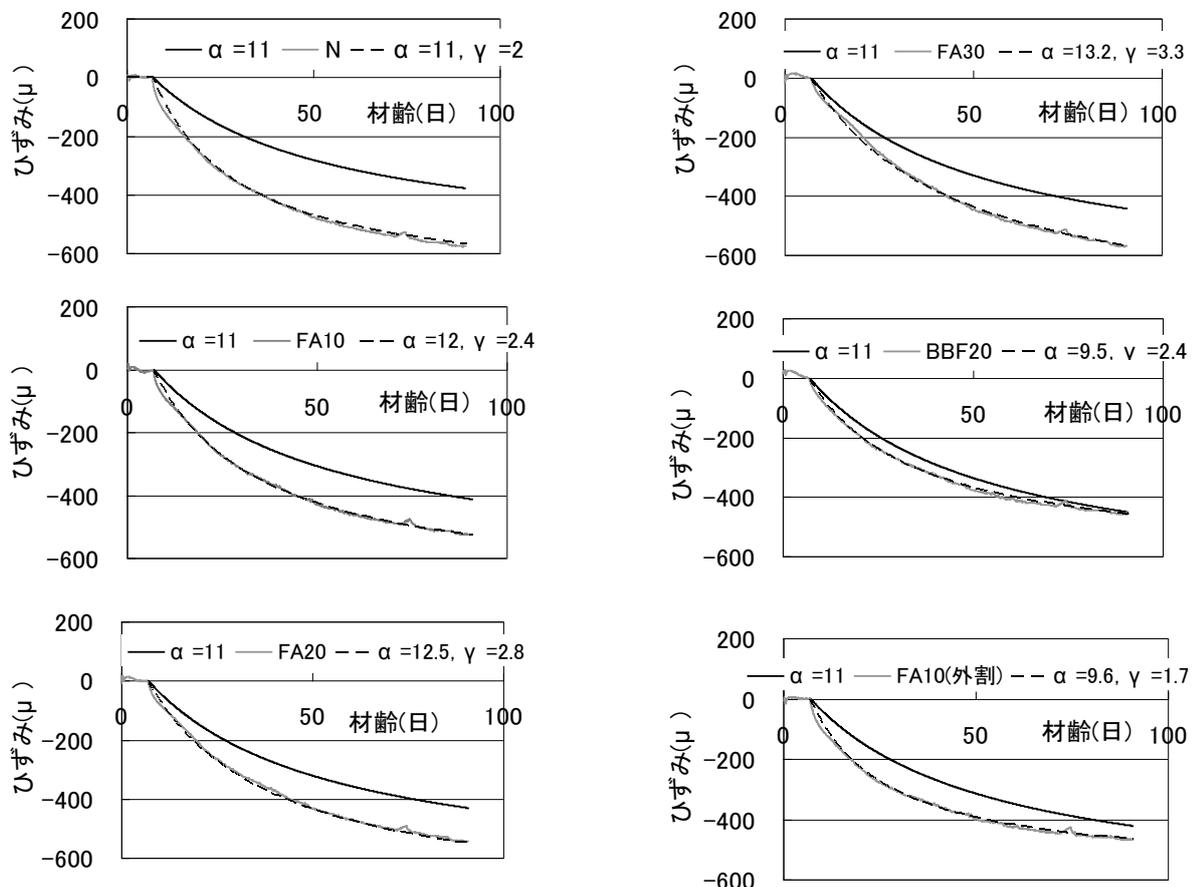


図-1 石川ら²⁾の実験結果と TC911 提案式との比較

表-2 予測式(TC911)に用いたコンクリートごとの各数値

	乾燥開始 材齢(日)	28日強度 (N/mm ²)	単位水量 (kg/m ³)	体積表面積 比(mm)	セメント係 数α	平均湿度 (100%)
N	7	46.2	175	50	11	0.6
FA10	7	39.1	175	50	11	0.6
FA20	7	33.8	175	50	11	0.6
FA30	7	29.1	175	50	11	0.6
BBF20	7	25.2	175	50	11	0.6
FA10(外割)	7	36.6	175	50	11	0.6

すなわち、

$$\beta = \frac{\gamma \cdot W \cdot \sqrt{V/S}}{100 + 0.7 \cdot t_0} \quad (6)$$

上式よりα, γの値を定めることより, αの値から乾燥収縮ひずみの最終値を, また, γの値から乾燥収縮ひずみの傾き(乾燥収縮の進行速度)を推定することができる。式(6)においてγおよびαの値を近似して計算したものを図-1に示す。また, 各試験体のα, γの値を表-3に示す。

この比較結果よりフライアッシュ置換率が高くなるほど乾燥収縮ひずみの進行速度を支配するγの値と, 最終値を支配するαの値はともに大きくなることから乾燥収縮ひずみの傾きが小さくなり, 逆に乾燥収縮の最終値が大きくなっていることが分かる。

フライアッシュを高炉セメントに置換したBBF20は, 普通セメントに対してαの値が小さいため乾燥収縮ひずみの最終値が小さいと言える。また, γの値が大きいことから, 乾燥収縮ひずみの傾きを抑制できており, 高炉セメントにフライアッシュを置換することによる乾燥収縮低減の効果があると考えられる。

フライアッシュを外割置換することでひずみの最終値は低減しているものの, 乾燥収縮ひずみの傾きが大きいことが分かる。

4. 乾燥収縮ひずみ予測式の評価(湿度変化時)

4.1 乾燥収縮ひずみの湿度変化時における計算方法の提案

JCI TC911 委員会予測式は, 一定の湿度環境下での乾燥収縮ひずみを算出するものである。そこで, 湿度が変化した場合についても対応できるように同式を増分型で表す。湿度変化時の乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh}(t_N, t_0)$ の計算式を式(7)により定義する。

ここに, t_i ; i ステップ時の材齢(日)
 $h(t_i)$; 時刻 t_i における相対湿度(%)

表-3 各種コンクリートのα, γの値

	セメント係数α	γ
N	13.5	2
FA10	12.0	2.4
FA20	12.5	2.8
FA30	13.2	3.3
BBF20	9.5	2.4
FA10(外割)	9.6	1.7

$$\begin{aligned} \epsilon_{sh}(t_N, t_0) &= \sum_{i=1}^N \{ \epsilon_{sh}(t_i, t_0) - \epsilon_{sh}(t_{i-1}, t_0) \} \\ \epsilon_{sh}(t_i, t_0) &= \frac{\epsilon_{sh\alpha t_i} \cdot (t_i - t_0)}{\beta + (t_i - t_0)} \\ \left\{ \begin{aligned} \beta &= \frac{\gamma \cdot W \cdot \sqrt{V/S}}{100 + 0.7 \cdot t_0} \\ \epsilon_{sh\alpha t_i} &= \frac{\epsilon_{sh\alpha t_i}}{1 + \varphi \cdot t_0} \\ \epsilon_{sh\alpha t_i} &= \frac{\alpha \{1 - h(t_i)\} W}{1 + 150 \cdot \exp\left(-\frac{500}{f'_{C(28)}}\right)} \\ \varphi &= 10^{-4} \{15 \cdot \exp(0.07 \cdot f'_{C(28)}) + 0.25 \cdot W\} \end{aligned} \right. \quad (7) \end{aligned}$$

4.2 本実験結果との比較

石川ら²⁾が行った実験と同様の実験を周囲の相対湿度を変化させた環境下で実施した。本実験のコンクリートの水準は, 普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート(N コンクリート), フライアッシュを混和材として20%内割置換したコンクリート(FA20 コンクリート), 高炉スラグを混和材として40%内割置換したコンクリート(BB40 コンクリート), 高炉セメントにさらにフライアッシュを20%内割置換したコンクリート(BBF20 コンクリート)

ト)とした。本実験の使用材料表を表-4 に、配合計算表を表-5 に示す。

試験体の大きさは100mm×100mm×400mmとした。試験体中央部にモールドゲージを埋め、材齢7日まで湿潤養生の後脱型し、脱型後、上下面を乾燥面とし封緘面にはアルミテープを貼り、湿度の変化する環境下において、計91日間ひずみの測定を続けた。試験体の概要を図-2 に示す。また、図-3 に収縮ひずみ測定期間中の湿度の履歴を示す。

表-4 使用材料表

使用材料	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
普通ポルトランドセメント (OPC)	3.16	-
フライアッシュ, IS II 種灰 (FA)	2.24	-
高炉スラグ微粉末 (BB)	2.89	-
細骨材: 硬質砂岩砕砂	2.63	1.29
細骨材: 砂(仙台市実沢産)	2.62	4.50
粗骨材: 細目 (G1) (上山市浦要産)	2.66	1.52
粗骨材: 粗目 (G2)	2.66	1.52
混和剤: ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤		-

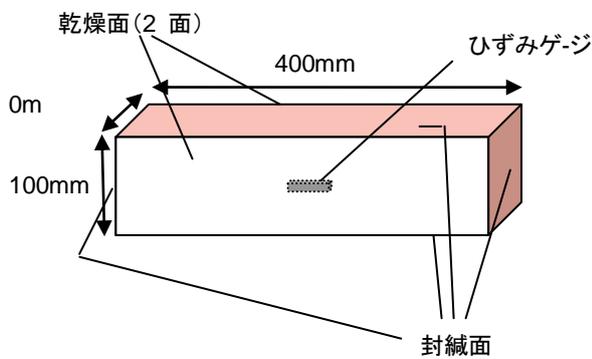


図-2 試験体

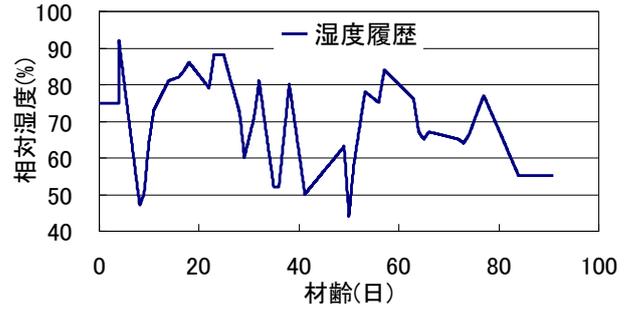


図-3 湿度履歴

4.1 において示した式(7)を用いて計算した収縮ひずみと本実験結果とを比較したものを図-3～図-8 に示す。また、これらのグラフでTC911 提案式に用いたパラメータ α , γ を表-6 にまとめて示す。

図-4 は、普通セメントを用いた本実験の結果を相対湿度一定の条件下での実験結果に対して求めた α , γ の値 ($\alpha=13.5$, $\gamma=2$) を用いて TC911 提案式より算出した収縮ひずみを比較したものである。両者は粗骨材以外は同一の材料を使用している。この図より、湿度を変化させた場合の比較では TC911 予測式は材齢91日の時点でおおよそ 80μ 程度小さい値を示す結果となった。

図-5 は図-4 と同様にフライアッシュ 20%を内割置換した試験についての比較である。この場合には両者はおおよそ 20μ 程度の差異が認められるものの、良好な対応を示している。TC911 を式(7)のように増分型に修正することにより周辺湿度の変化に追従した履歴を示すことが確認された。また、周辺湿度が変化した場合でも、湿度一定の条件下で定めた α , γ の値を用いることで多少の差異は認められるものの、傾向としては概ね実験結果を表しうると考えられる。

図-6 は図-4 で示した試験体に対して、細骨材を変えて実験を行ったものとの比較である。この図から、91日時点で約 100μ の差異を生じているものの、湿度変化に対応したひずみの進行を示していることがわかる。

表-5 本実験の配合表

記号	W/B(%)	s/a(%)	単位質量(kg/m ³)									
			W	OPC	BB	FA	S	G1	G2	空気量 (%)	混和剤(%)	スランプ(cm)
N*	50	46.7	175	350	-	-	816	377	565	1.0	0.75	19.5
FA20*	50	46.7	175	280	-	70	805	372	557	4.3	0.50	20.6
N	50	46.7	175	350	-	-	816	377	565	1.4	0.75	19.3
FA20	50	46.7	175	245	-	70	805	372	557	1.2	0.50	22.0
BB40	50	46.7	175	210	140	-	811	374	562	1.9	0.50	21.0
BBF20	50	46.7	175	168	112	70	801	370	554	0.8	0.50	23.2

N*, FA20*は石川ら²⁾の実験と同一の細骨材を使用, BB と FA は石川ら²⁾の実験と同一の混和材を使用

表-6 TC911 提案式増減型に用いたパラメータ

	乾燥開始材齢(日)	28日強度(N/mm ²)	単位水量(kg/m ³)	体積表面積比(mm)	セメント係数 α	γ
N*	7	33.8	175	50	13.5	2
N	7	41.3	175	50	13.5	2
FA20*	7	30.7	175	50	12.5	2.8
FA20	7	30.7	175	50	12.5	2.8
BB40	7	27.8	175	50	14.0	3.7
BBF20	7	27.5	175	50	11.2	3

*は石川ら²⁾の実験と同一の細骨材使用

図-7は図-5で示した試験体に対して、細骨材を変えて実験を行ったものとの比較である。この図から、両者は91日時点でのひずみおよび傾きについて良好な対応を示していることがわかる。

図-8は高炉スラグ微粉末を普通セメントに40%内割置換した高炉セメントを用いて行った実験との比較である。 α の値(N: $\alpha=13.5$, BB40: $\alpha=14$)からNコンクリートより乾燥収縮ひずみの最終値が大きく、 γ の値から(N: $\gamma=2$, BB40: $\gamma=3.7$)ひずみの進行速度が遅いことが分かる。

これより高炉スラグを40%内割置換することで乾燥収縮が大きくなると考えられる。

図-9は図-8で示した試験体に対して、さらにフライアッシュを20%内割置換して行った実験とTC911提案式とを比較したものである。BB40と比較して α , γ の値(BB40: $\alpha=14$, $\gamma=3.7$, BBF20: $\alpha=11.2$, $\gamma=3$)は共に小さいことから、ひずみの進行速度が若干速いものの、乾燥収縮は小さいと考えられる。

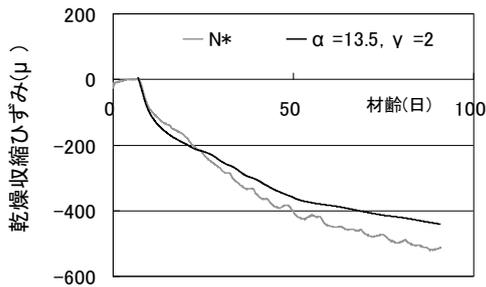


図-4 TC911 予測式増分型との比較(N*)

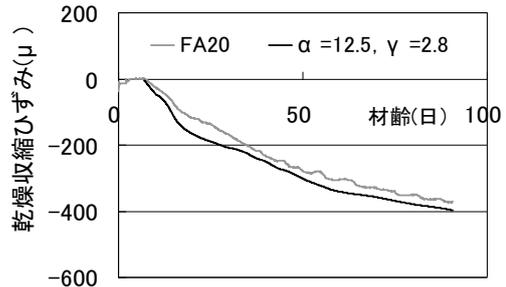


図-7 TC911 予測式増分型との比較(FA20)

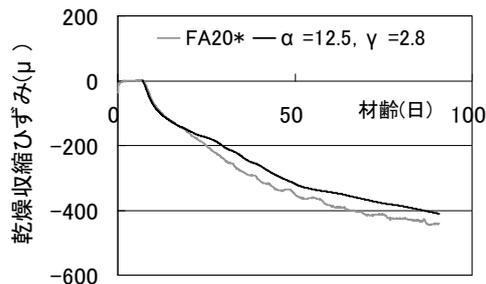


図-5 TC911 予測式増分型との比較(FA20*)

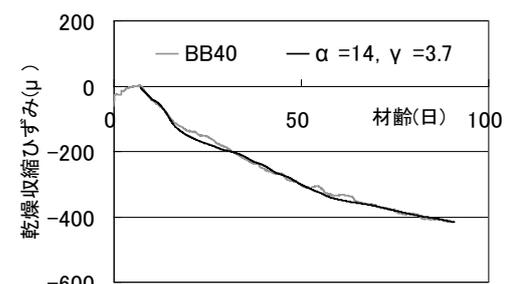


図-8 TC911 予測式増分型との比較(BB40)

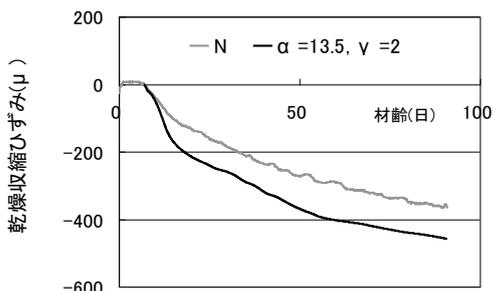


図-6 TC911 予測式増分型との比較(N)

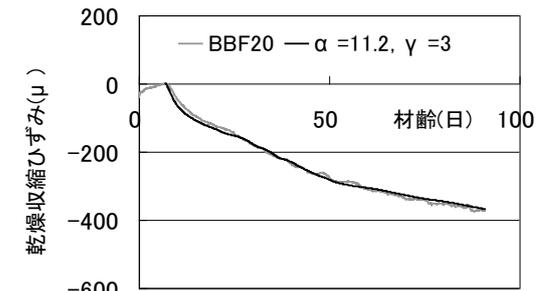


図-9 TC911 予測式増分型との比較(BBF20)

5. 細骨材による影響の検討

細骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響について検討する。図-10～図-13は、いずれも本研究において湿度変動下で行った試験体で、石川ら²⁾の実験と同配合のもの(N*, FA20*)と細骨材のみを変えたもの(N, FA20)およびそれぞれにそれに対してTC911提案式を合わせたものである。これらの図から、 α の値(N*: $\alpha=15.7$ に対してN: $\alpha=12$, FA20*: $\alpha=13$ に対してFA20: $\alpha=11.8$)は硬質砂岩砕砂に対して山砂を用いたほうが小さいことが分かる。そのため、乾燥収縮ひずみの最終値は、硬質砂岩砕砂に対して山砂を用いた方が小さいと言える。また、 γ の値(N*: $\gamma=2.1$ に対してN: $\gamma=3.1$, FA20*: $\gamma=2.4$ に対してFA20: $\gamma=3.1$)は硬質砂岩砕砂に対して山砂を用いたほうが大きい。そのため、乾燥収縮の進行速度は、硬質砂岩砕砂に対して山砂を用いた方が遅いと言える。

これらの違いは、表-4に示す吸水率に起因すると思われる。両者の違いを α , γ を用いて定量的に評価できることが明らかとなった。

6. まとめ

- (1) 湿度・温度ともに一定の条件下で行われ各種混合セメントを用いた収縮試験結果に対して、JCI-TC911委員会予測式を近似させることで、同式中のパラメータであるセメント係数 α の値を算出した。さらに同式中の定数を変数とし、収縮ひずみの進行を調整するパラメータ γ とした。
- (2) 湿度一定条件を仮定したJCI-TC911委員会予測式を、湿度が変化した場合での対応で可能なように、これを増分型に修正した。
- (3) 湿度が変動する条件下(44%~92%)で各種混合セメントの収縮試験を行い、これに対して増分型のJCI-TC911委員会予測式を適用した。その結果、普通セメントを除いた各種混合セメントについては、湿度変動下でも湿度一定のもとで算出した α と γ の値と同じ値を用いても、その収縮ひずみ履歴を表しうることを確認した。
- (4) 普通コンクリートにフライアッシュを置換することで収縮ひずみ低減の効果がある。また、高炉セメントにフライアッシュを置換することでも同様の効果があることを α , γ を用いて定量的に確認した。
- (5) 細骨材の種類により乾燥収縮ひずみに影響を与えることについても(4)と同様に定量的に確認した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート協会コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形研究委員会報告書, pp. 101-121, 2001

- 2) 石川 嘉崇, 安田 幸弘: コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関するフライアッシュ混和の影響, コンクリート工学年次論文集, 2011.7

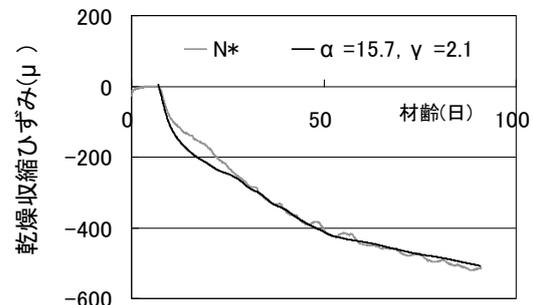


図-10 本実験(N*)とTC911予測式との比較

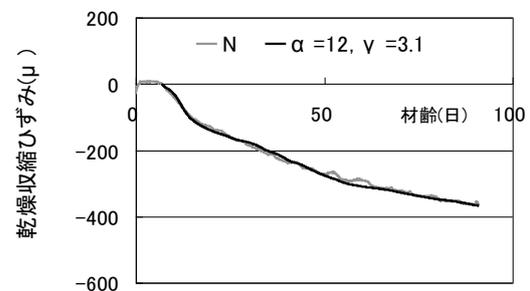


図-11 本実験(N)とTC911予測式との比較

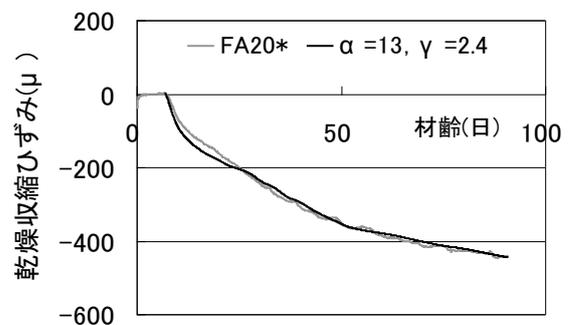


図-12 本実験(FA20*)とTC911予測式との比較

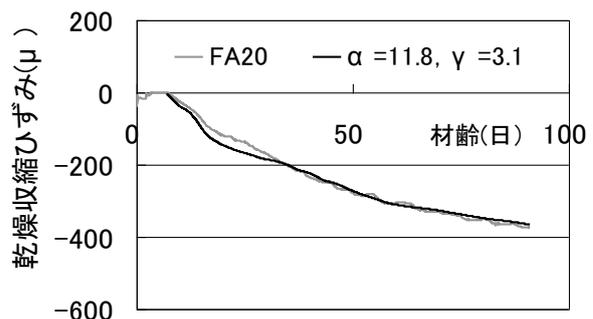


図-13 本実験(FA20)とTC911予測式との比較