

論文 コンクリートの乾燥収縮に及ぼす相対湿度の影響

三谷 裕二^{*1}・石井 祐輔^{*2}・谷村 充^{*3}

要旨：物性の異なる粗骨材を用いた普通コンクリート、および膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートについて、種々の相対湿度における乾燥収縮ひずみを実験的に把握し、乾燥収縮特性に及ぼす相対湿度の影響について検討した。その結果、いずれのコンクリートにおいても、相対湿度が低くなるほど乾燥収縮ひずみが明確に大きくなり、乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係は概ね一義的な曲線式で評価できる可能性があることを示した。さらに、相対湿度によらず、コンクリートの乾燥収縮が、粗骨材の乾燥収縮と高い相関関係にあること、複合モデルを用いて概ね良い精度で予測できることを検証した。

キーワード：乾燥収縮, 相対湿度, 粗骨材, 膨張材, 収縮低減剤, 複合モデル

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高耐久化の観点から、収縮ひび割れ制御への要求が高まり、土木学会¹⁾や日本建築学会²⁾の規準・指針では、コンクリートの乾燥収縮量に規定値を設けるなど、従来よりも踏み込んだ取扱いがなされている。

一方、より合理的な収縮ひび割れ制御を行うために、構造物に発生するひび割れを正確に予測する検討が進められている。最近では、コンクリート部材の収縮が外的に拘束されることで生じる外部拘束応力だけではなく、コンクリート部材内の相対湿度分布を考慮し、表層部と内部の乾燥収縮ひずみ差によって生じる内部拘束応力を含めた形で、部材の応力分布を解析的に評価する方法が提案されている^{3) 4)}。この種の解析精度を高める上では、相対湿度とコンクリートの乾燥収縮特性の関係を明確にすることが必要であるが、乾燥収縮に関する既往の実験データのほとんどが相対湿度60%の条件下における結果であり、異なる相対湿度での検討事例^{5) 6)}はそれほど多くないのが実状である。

そこで本研究では、物性の異なる粗骨材を用いた普通コンクリート、および膨張材・収縮低減剤を用いたコンクリートについて、種々の相対湿度下における乾燥収縮ひずみを実験的に把握し、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす相対湿度の影響を検討した。また、コンクリートの乾燥収縮と粗骨材の乾燥収縮との関連性、および複合モデルの適用性について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および実験水準

表-1に使用材料を示す。セメントには、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた。また、

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	N	普通ポルトランドセメント／ 密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3310cm ² /g
	BB	高炉セメントB種／ 密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3880cm ² /g
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材／ 密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3450cm ² /g
収縮低減剤	SRA	低級アルコールアルキレンオキシド付加物
細骨材	S	山砂／表乾密度：2.58g/cm ³ ，吸水率：1.86%
粗骨材 (碎石 2005)	G1	硬質砂岩／表乾密度：2.61 g/cm ³ ，吸水率：1.77%，実積率：61.1%
	G2	硬質砂岩／表乾密度：2.72 g/cm ³ ，吸水率：0.94%，実積率：58.7%
	G3	硬質砂岩／表乾密度：2.73 g/cm ³ ，吸水率：0.55%，実積率：60.1%
	G4	石灰石／表乾密度：2.70 g/cm ³ ，吸水率：0.32%，実積率：64.8%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤／ポリカルボキシル酸エーテル系
	AE	空気量調整剤

表-2 実験水準

配(調)合名	粗骨材種類	セメント種類	使用量 (kg/m ³)	
			EX*	SRA**
N1	G1	N	—	—
N2	G2			
N3	G3			
N4	G4			
BB1	G1	BB	—	—
BB2	G2			
BB3	G3			
BB4	G4			
NE1	G1	N	20	—
NE2	G2			
NE3	G3			
BBE2	G2	BB	—	6
NS1	G1	N		
NS2	G2			
NS3	G3			
BBS2	G2	BB		

* セメントに内割りで混和

**単位水量の一部として添加

*1 太平洋セメント（株） 中央研究所 工修（正会員）

*2 太平洋セメント（株） 中央研究所 工修

*3 太平洋セメント（株） 中央研究所 博士(工学)（正会員）

乾燥収縮のレベルが異なるコンクリートで相対湿度の影響を評価するため、粗骨材には、コンクリートの乾燥収縮ひずみ (JIS A 1129) があらかじめ確認されている⁷⁾ 3種類の硬質砂岩砕石および1種類の石灰石砕石を用いた。膨張材には低添加型石灰系膨張材 (市販品)、収縮低減剤には主成分が低級アルコールアルキレンオキシド付加物のタイプ (市販品) を用いた。

表-2にコンクリートの実験水準を示す。検討したコンクリートは、セメント2種類 (N, BB) と粗骨材4種類 (G1, G2, G3, G4) を単独で組み合わせたコンクリート (以下、普通コンクリート)、およびNとG1, G2, G3, BBとG2を組み合わせたものに膨張材、収縮低減剤を使用したコンクリートの合計16配(調)合とした。

コンクリートの配(調)合条件は、単位水量 170kg/m^3 、水/(セメント+膨張材)比 50%、単位粗骨材かさ容積 $0.57\text{m}^3/\text{m}^3$ 、目標スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ とし、所定のスランプ、空気量になるように、高性能AE減水剤、AE助剤の添加量を調整した。

コンクリートの練混ぜは 20°C 、R.H.80%の試験室内で行い、練混ぜ手順は「材料投入 (G+S+C+EX)→空練り30秒→注水 (W+SRA+SP+AE)→練混ぜ120秒→排出」とした。

2.2 実験項目および実験方法

本検討では、温度 20°C 、相対湿度 40, 60, 80, 90% (以下、R.H.40, 60, 80, 90%) の条件下で、コンクリートおよび粗骨材の乾燥収縮ひずみを測定した。

2.2.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、無拘束試験体 (寸法: $100\times 100\times 400\text{mm}$) の中心部に設置した埋込型ひずみ計 (見かけの弾性係数: 40N/mm^2) を用いて測定した。試験体は、材齢1日で脱型した後、材齢7日まで 20°C ・水中で養生し、それ以降は、 20°C ・所定の相対湿度に制御された恒温恒湿槽内で養生した。本検討では、材齢7日以降の収縮ひずみを乾燥収縮ひずみとし、乾燥期間182日 (6か月) まで測定した。

2.2.2 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

粗骨材の乾燥収縮ひずみは既往の文献^{8) 9)}を参考に、粗骨材自体にひずみゲージを直接貼付する方法で測定した。すなわち、各粗骨材について、寸法 $15\sim 20\text{mm}$ の粗骨材粒を任意に15個選び、表面の研削、下地処理を行った後、ひずみゲージ (検長: 2mm) の貼付、防水処理を行った。測定環境は、7日間 20°C ・水中に浸漬した後、14日間 20°C ・所定の相対湿度の恒温恒湿槽内で保存した。水中保存7日時点を開始点として、所定の相対湿度下におけるひずみの変化量を測定し、15個の平均値を各粗骨材の乾燥収縮ひずみとした。なお、全ての相対湿度に対して、同一のサンプル (15個) を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

図-1、図-2に、NおよびBBを用いた普通コンクリートの各相対湿度下における乾燥収縮ひずみ (収縮をーで表示) の経時変化を示す。

一般的な乾燥収縮試験 (JIS A 1129) と養生条件が同一となる R.H.60%における乾燥収縮ひずみは、乾燥期間182日において、N1が約 1240×10^{-6} 、N2が約 1050×10^{-6} 、N3が約 730×10^{-6} 、N4が約 600×10^{-6} であり、粗骨材の種類によって最大で 650×10^{-6} 程度の差があった。

相対湿度の影響を見ると、いずれの配(調)合においても、相対湿度が低くなるほどコンクリートの乾燥収縮が大きくなった。また、粗骨材の違いによるコンクリートの乾燥収縮の大小関係 ($G1>G2>G3>G4$) は、相対湿度が異なる場合でも変化しなかった。

図-3、図-4に、膨張材を混和したコンクリートおよび収縮低減剤を添加したコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。

膨張材/収縮低減剤を使用したコンクリートの異なる相対湿度下における乾燥収縮は、普通コンクリートの場合と同様に、湿度が低くなるほど大きくなり、粗骨材の種類による大小関係 ($G1>G2>G3$) も変わらない結果であった。

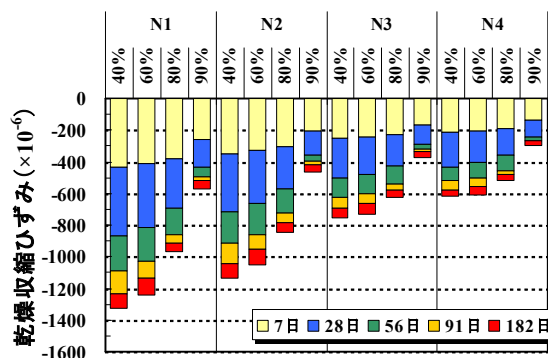


図-1 普通コンクリートの乾燥収縮ひずみ (N)

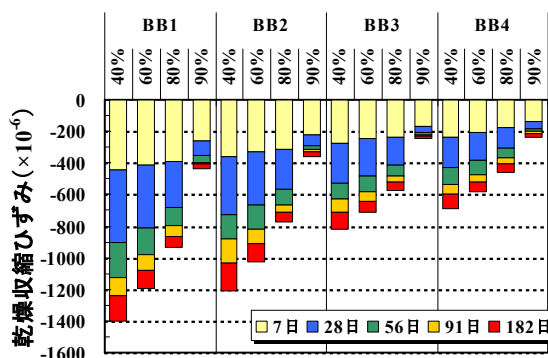


図-2 普通コンクリートの乾燥収縮ひずみ (BB)

図-5に、N を用いたコンクリートの乾燥収縮と BB を用いたコンクリートの乾燥収縮の関係（乾燥期間 182 日）を示す。両者の差は、粗骨材の種類や膨張材・収縮低減剤の有無によらず、乾燥収縮ひずみが 600×10^{-6} 程度以上となる R.H.40~80%下において、概ね $\pm 10\%$ の範囲であった。これは、既往の研究^{10), 11)}で示されている R.H.60%下での乾燥収縮ひずみにおけるセメント種類の影響範囲と同程度の結果であった。

図-6、図-7は、膨張材/収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮と普通コンクリートの乾燥収縮の関係（乾燥期間 182 日）を示したものである。

膨張材による収縮低減率は、概ね 0~10%の範囲内であり、相対湿度、粗骨材やセメントの種類の違いによる明確な傾向は見られなかった。

一方、収縮低減剤の場合、R.H.90%下では明確な収縮低減が見られなかったものの、普通コンクリートの乾燥収縮ひずみが約 600×10^{-6} 以上となる R.H.40~80%下での収縮低減率は約 10~20%であり、相対湿度によって収縮低減率が異なる結果であった。この点については、収縮低減剤の作用機構などの観点から、より詳細に検討する必要がある。

図-8は、普通コンクリートの乾燥収縮（乾燥期間 182 日）と相対湿度の関係について、R.H.60%下の乾燥収縮ひずみに対する比で示したものである。粗骨材やセメントの種類によらず、両者には上に凸の曲線関係が認めら

れる。R.H.60%に対する R.H.40%, 80%, 90%の収縮比は、N を用いたコンクリートでは 1.02~1.08, 0.78~0.85, 0.44~0.52, BB を用いたコンクリートでは 1.15~1.18, 0.76~0.81, 0.35~0.42 であり、粗骨材の違いによる差は 10%以内であった。また、N と BB を比較すると、R.H.40%では BB の方が大きく、R.H.80%, 90%では N の方が大

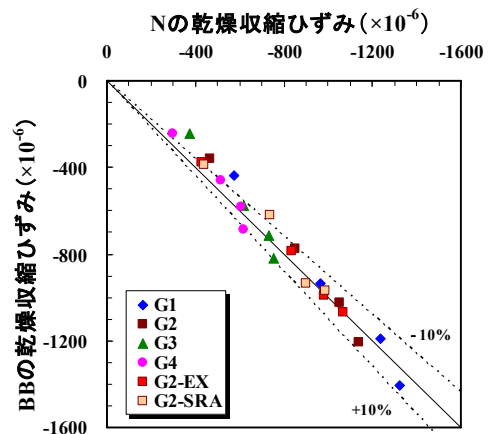


図-5 セメント種類が乾燥収縮に及ぼす影響

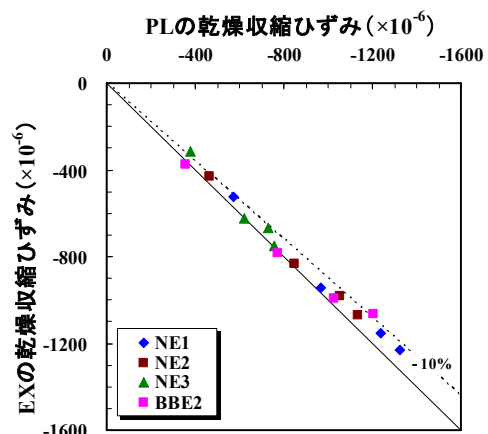


図-6 膨張材混和コンクリート(EX)と普通コンクリート(PL)の乾燥収縮ひずみ関係

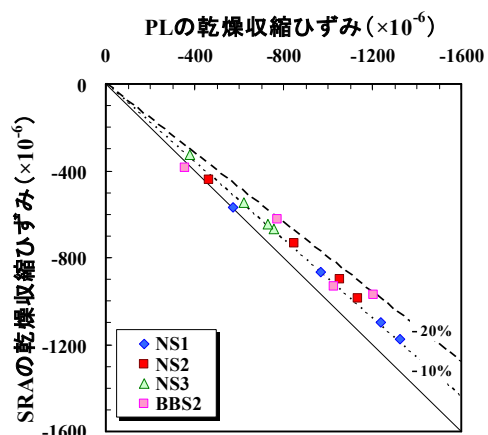


図-7 収縮低減剤添加コンクリート(SRA)と普通コンクリート(PL)の乾燥収縮ひずみ関係

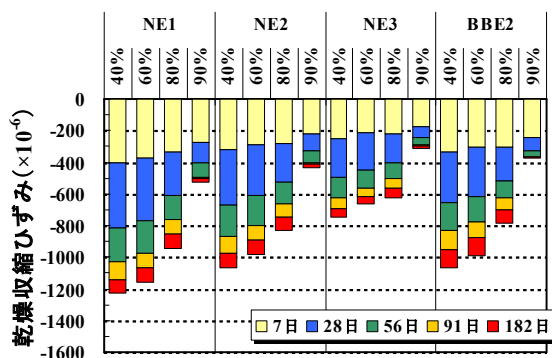


図-3 膨張材混和コンクリートの乾燥収縮ひずみ

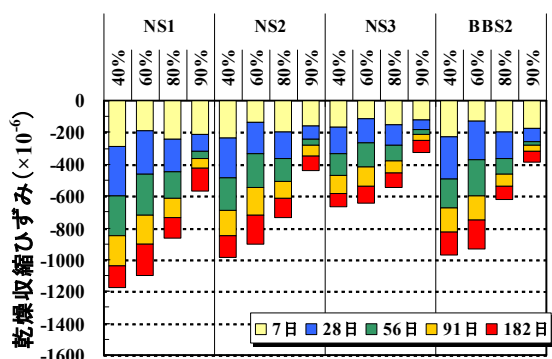


図-4 収縮低減剤添加コンクリートの乾燥収縮ひずみ

きくなっているものの、その差は概ね 10%の範囲内であった。

図中には、実験結果に基づく回帰曲線、および土木学会¹²⁾、CEB-FIP¹³⁾が提示している収縮予測式における相対湿度の影響を表す項(表-3)に基づく回帰曲線を併記しているが、本回帰式は CEB-FIP 式と近い関係にあった。

図-9、図-10 に、膨張材/収縮低減剤を使用したコンクリートについて、R.H.60%に対する収縮比と相対湿度の関係を示す。両者の関係および粗骨材やセメントの種類による差は、普通コンクリートの場合と同様の傾向が認められた。図中には、それぞれのコンクリートについて、実験結果に基づく回帰式を併記しているが、普通コンクリートの回帰式と大差ない結果であった。

以上の結果より、相対湿度がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は、粗骨材やセメントの種類、膨張材・収縮低減剤の有無によらず、概ね一義的に評価できる可能性があると考えられる。

3.2 コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

図-11 に、種々の相対湿度下における粗骨材の乾燥収縮ひずみを示す。全ての粗骨材において、相対湿度が低いほど乾燥収縮は明確に大きくなった。また、粗骨材の種類で比較すると、相対湿度にかかわらず、 $G1 > G2 > G3 > G4$ の順に大きくなっており、コンクリートの乾燥収縮の大小関係と対応していた。とりわけ、石灰石骨材 G4 の乾燥収縮ひずみは、R.H.40%で約 30×10^{-6} 、R.H.90%では 5×10^{-6} 以下であり、硬質砂岩砕石 G1~G3 と比較して顕著に小さかった。

図-12 に、粗骨材の乾燥収縮と相対湿度の関係について、R.H.60%下の乾燥収縮ひずみとの比を示す。コンクリートの場合と同様に、両者には上に凸の曲線関係が認められるものの、粗骨材の種類による差は20%以上あり、コンクリートの場合より大きい傾向が認められた。

図-13 は、普通コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。両者には相対湿度別に高い相関性が認められる。R.H.60%の条件下において同様の結果が既に報告されており^{7), 14)}、本検討では、相対湿度が異なる場合でも、両者に良好な直線関係があることが確認できた。図中には、相対湿度ごとの回帰直線を併記しているが、相対湿度が低いほど、粗骨材のひずみ変化量とコンクリートのひずみ変化量が近づく傾向が認められる。

3.3 複合モデルの適用性

3.3.1 複合モデルによる予測

種々の相対湿度下における普通コンクリートの乾燥収縮ひずみ(乾燥期間 182 日)について、複合モデルを

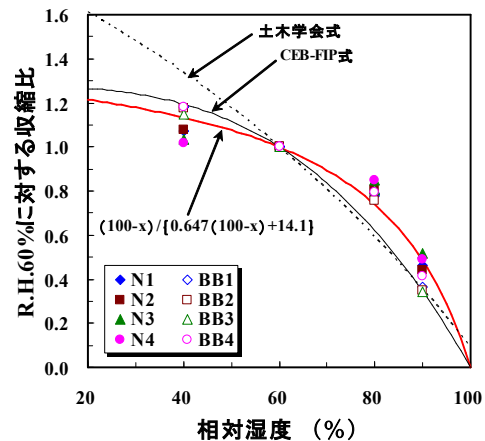


図-8 普通コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

表-3 収縮予測式における相対湿度の影響を表す項

土木学会式	$1 - (RH/100)^3$ を収縮ひずみに乗じる
CEB-FIP 式	$78[1 - \exp(RH/100)]$ を収縮ひずみに加える($\times 10^{-5}$)

※ RH: 相対湿度 (%)

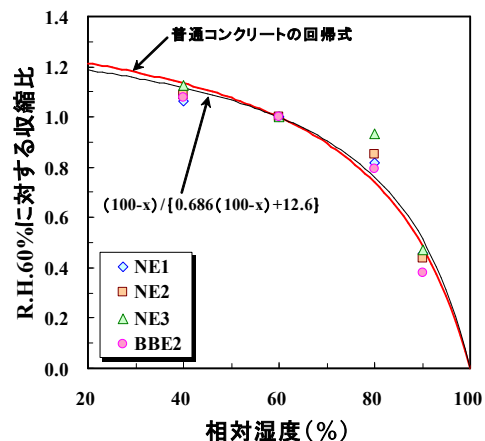


図-9 膨張材混和コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

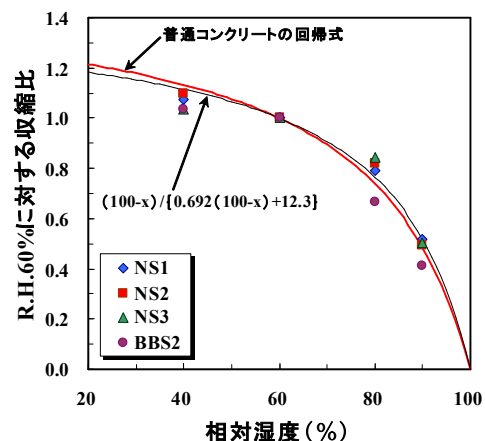


図-10 収縮低減剤添加コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

用いて予測を行った。予測には、岸谷ら¹⁵⁾が構築した2相モデルに基づく(1)式を用いた。予測式中のモルタル(普通コンクリートのモルタル部分の配(調)合)の乾燥収縮ひずみ、ヤング係数、および粗骨材のヤング係数には実測値(表-4、表-5、表-6)を用いた。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \frac{[1 - (1 - mn)V_g][n + 1 - (n - 1)V_g]}{n + 1 + (n - 1)V_g} \quad (1)$$

ここに、 ε_c 、 ε_m ：コンクリートの乾燥収縮ひずみ、モルタルの乾燥収縮ひずみ、 m ：粗骨材とモルタルの乾燥収縮ひずみ比(粗骨材の乾燥収縮ひずみ/モルタルの乾燥収縮ひずみ)、 n ：粗骨材とモルタルのヤング係数比(粗骨材のヤング係数/モルタルのヤング係数)、 V_g ：粗骨材体積比

3.3.2 予測値と実験値の比較

図-14に複合モデルによる予測値と実験値の関係を示す。N、BBいずれのコンクリートにおいても、予測値は実験値と概ね対応しており、両者の差は±20%程度の範囲内であった。これより、異なる相対湿度下においても、複合モデルに基づく予測式によってコンクリートの

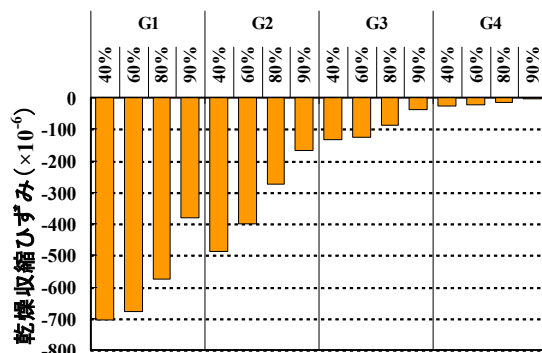


図-11 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

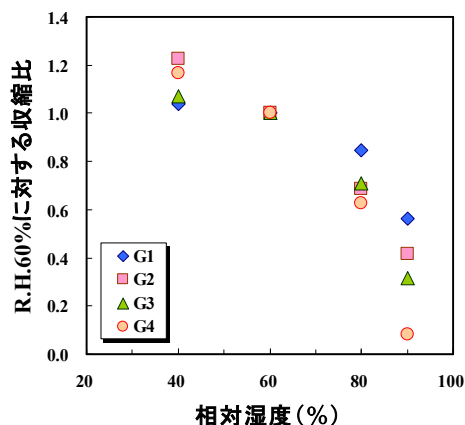


図-12 粗骨材の乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

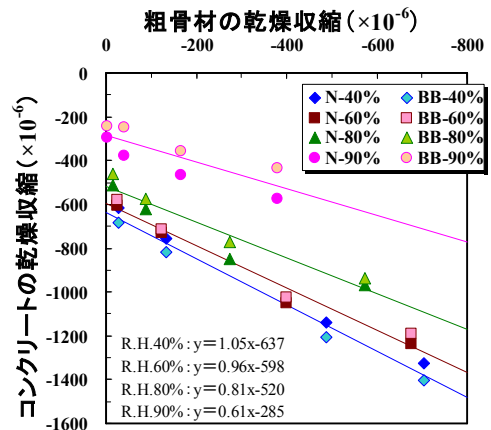


図-13 コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

表-4 モルタルの乾燥収縮

	モルタルの乾燥収縮ひずみ※ (×10 ⁻⁶)			
	R.H.40%	R.H.60%	R.H.80%	R.H.90%
N	-1759	-1634	-1283	-700
BB	-1603	-1449	-964	-471

※ 寸法 40×40×160mm 試験体の中央に設置した埋込型ひずみゲージを用いて測定(乾燥期間:182日)。養生条件はコンクリート試験体と同一。

表-5 モルタルのヤング係数

	モルタルのヤング係数※ (kN/mm ²)			
	R.H.40%	R.H.60%	R.H.80%	R.H.90%
N	19.6	20.9	21.3	22.8
BB	18.4	19.7	20.0	21.7

※ 寸法 φ50×100mm 試験体の圧縮載荷時「応力-ひずみ」の割線静弾性係数(試験材齢28日)。養生条件はコンクリート試験体と同一。

表-6 粗骨材のヤング係数⁷⁾

粗骨材のヤング係数※ (kN/mm ²)			
G1	G2	G3	G4
44.7	58.5	81.1	78.1

※ 母岩から採取したコア(φ32×64mm)の圧縮載荷時「応力-ひずみ」の割線静弾性係数。

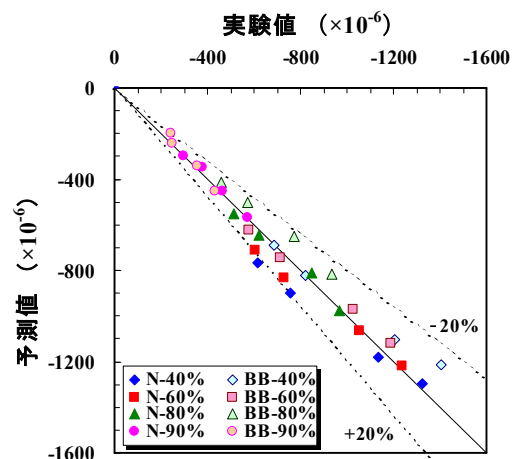


図-14 複合モデルによる予測値と実験値の関係

乾燥収縮ひずみを概ね良い精度で予測できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、種々の相対湿度下においてコンクリートの乾燥収縮ひずみを測定し、相対湿度の影響を検討するとともに、粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係性や複合モデルに基づく予測値との対応について評価した。以下に得られた知見をまとめて示す。

- (1) 粗骨材やセメントの種類、および膨張材・収縮低減剤の有無にかかわらず、相対湿度が低くなるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる。
- (2) コンクリートの乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係は、概ね一義的な曲線式で評価できる可能性がある。
- (3) 相対湿度によらず、コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の乾燥収縮ひずみは良好な直線関係にあり、相対湿度が低いほど、粗骨材のひずみ変化量とコンクリートのひずみ変化量が近づく傾向がある。
- (4) 複合モデル（2相モデル）に基づく予測式により、コンクリートの乾燥収縮ひずみを±20%程度の精度で予測することができた。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.201-204，2008.3
- 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 2009，pp.9-14，2009.2
- 3) 竈橋忍，伊藤祐樹，堀部謙，森本博昭：コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.441-446，2002
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書，pp.127-132，2012.8
- 5) 前田弘美，梶田佳寛，杉山央，岩井信彰，松本範義：コンクリートの乾燥収縮試験における湿度条件の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.1143-1144，1995
- 6) 寺西浩司，半坂昌広，竹内毅典：コンクリートの乾燥収縮に対する外的要因の影響（その2. 相対湿度の影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.311-312，2004.8
- 7) 兵頭彦次，谷村充，杉山真悟，佐藤良一：骨材のヤング係数・乾燥収縮に基づくコンクリートの乾燥収縮評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.479-484，2011
- 8) 兵頭彦次，井坂幸俊，谷村充，佐藤良一：コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす粗骨材物性および収縮低減材料の影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.377-382，2010
- 9) 日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書，pp.195-201，2012.8
- 10) セメント協会：耐久性専門委員会ひびわれ分科会報告 H-23（コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討），pp.16-23，1992
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，pp.82-83，2010
- 12) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.45-49，2008.3
- 13) CEB-FIP：Model Code 1990，Comite Euro-International du Beton，pp.57-58，1990
- 14) 独立行政法人土木研究所：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究，土木研究所資料，第4199号，pp.37-38，2011
- 15) 岸谷孝一，馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346，pp.30-40，1975.12