

論文 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

兵頭 彦次^{*1}・谷村 充^{*2}・杉山 真悟^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：粗骨材のヤング係数、乾燥収縮ひずみが、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について検討した。粗骨材のヤング係数と乾燥収縮ひずみを説明変数とした重回帰式によって、コンクリートの乾燥収縮ひずみをよく評価でき、両物性値を同時に考慮することの合理性が示された。粗骨材自体の乾燥収縮ひずみは、堆積岩と火成岩で異なる傾向を示した。また、複合モデルを用いたパラメータスタディから、コンクリートの乾燥収縮ひずみへの影響度は、乾燥収縮ひずみのほうがヤング係数よりも大きいことが示された。

キーワード：乾燥収縮、骨材物性、複合モデル、予測式、パラメータスタディ

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質向上の観点から収縮ひび割れ制御の関心が高まってきている。土木学会「2007 年制定コンクリート標準示方書」¹⁾や日本建築学会「建築工事標準仕様書・解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009」²⁾では、最近、コンクリートの収縮に関する取扱いを大幅に見直した。

コンクリートの収縮に影響を与える要因は多岐にわたるが、骨材の種類や性質によってコンクリートの乾燥収縮ひずみが大幅に異なることが再認識されてきている。乾燥収縮の主要因はセメントペーストの収縮であるが、骨材はそれに抵抗するという役割から、密実で変形抵抗性に優れるものがコンクリートの乾燥収縮を小さくすると考えられ、骨材のヤング係数は重要なパラメータと考えられる。また、骨材はそれ自体が収縮することにより、コンクリートの収縮特性にも影響を与えることが指摘³⁾されており、より問題を複雑化している。

本稿では、粗骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみ

がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について、実験的に評価するとともに複合モデルを用いたパラメータスタディによって影響度評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料・コンクリートの配(調)合

表-1に、実験に用いた骨材の種類およびコンクリートの配(調)合条件を示す。セメントには、普通ポルトランドセメントを用いた。粗骨材は、火成岩系の碎石を9種類、堆積岩系の碎石を12種類、陸砂利2種類の合計23種類を用いた。火成岩は玄武岩3種類、安山岩3種類、流紋岩2種類、斑レイ岩1種類、堆積岩は石灰石4種類、硬質砂岩6種類、凝灰岩1種類、粘板岩1種類である。コンクリート試験は、安山岩、玄武岩、凝灰岩の各1種類を除いた計20水準で検討を行った。コンクリートの配(調)合は、単位水量が168～182kg/m³、水セメント比(W/C)が46.8～54.3%の範囲である。

表-1 骨材の種類およびコンクリートの配(調)合条件

種類	粗骨材					細骨材		コンクリート	
	岩種		記号	試料数	吸水率 (%)	記号	試料数	単位水量 (kg/m ³)	W/C (%)
	大分類	小分類							
碎石 (2005)	火成岩	玄武岩	GB	3	0.42～1.99	S1/S2	2	168～182	46.8～54.3
		安山岩	GA	3	2.13～2.47	S2	2		
		流紋岩	GR	2	0.65～1.10	S2	2		
		斑レイ岩	GG1	1	0.44	S2	1		
	堆積岩	石灰石	GL	4	0.41～0.63	S2/S3	4		
		硬質砂岩	GS1	6	0.55～1.88	S2/S3	6		
		凝灰岩	GT	1	0.54	—	—		
		粘板岩	GS2	1	0.84	S2	1		
	陸砂利(最大寸法 20mm)		GG2	2	1.04～1.06	S4/S5	2		

S1：陸砂+石灰石砕砂(吸水率：1.98%)，S2：海砂+砂岩砕砂(吸水率：1.20%)，S3：山砂+砂岩砕砂(吸水率：2.07%)，S4：陸砂(吸水率：1.68%)，S5：陸砂(吸水率：1.22%)

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 工修

*4 広島大学大学院 工学研究院 教授 工博 (正会員)

2.2 実験方法

(1) 骨材物性試験

・骨材の吸湿率

コンクリートや骨材の乾燥収縮ひずみに関係する骨材の物性値として、骨材の比表面積^{3), 4)}をはじめ、吸湿率⁵⁾や相対湿度 60%での質量減少率⁶⁾、気乾含水率⁷⁾などが提案されている。本検討では、細・粗骨材を対象に吸湿率の測定を行った。試験方法は、105℃-24 時間炉乾燥した絶乾状態の骨材を 20℃-99R.H.%の恒温恒湿槽で 24 時間保管し、含水率を測定した。

・粗骨材のヤング係数

粗骨材のヤング係数は、破碎前の母岩から採取したφ 32×64mm のコア (n=3) にひずみゲージ (ゲージ長：30mm) を貼り付け、圧縮載荷時の応力-ひずみ曲線から求めた割線弾性係数を用いた。割線弾性係数は、最大荷重の 1/3 相当応力と縦ひずみ 50×10^{-6} 時の応力を直線で結んだ線分のこう配とした。

・粗骨材の乾燥収縮ひずみ

粗骨材の乾燥収縮ひずみは、粗骨材自体にひずみゲージ (ゲージ長：2mm) を 1 枚貼り付けて測定した。粗骨材の長径が 15mm 程度以上のものを任意に 5 個選び、試験に用いた。ひずみゲージの貼付け手法は、まず下地処理として粗骨材の一部を滑面処理し、ポリエステル系接着剤を塗布した。その後、ひずみゲージを貼り付け、さらに、防水のためブチルゴム系のコーティング剤で被覆し

た。ひずみ測定環境は、7 日間 20℃水中で保管し、以後、12 日間 20℃-60R.H.%で保管した。本検討では、水中保管 7 日時点起点とし、それ以降のひずみ変化量を骨材自体の乾燥収縮ひずみと定義した。同様のサイクルの 2 回行い、その平均値を用いた。符号は、収縮側を負とする。

(2) コンクリート試験

コンクリートの試験は長さ変化試験を実施した。供試体には、寸法 100×100×400mm の角柱を用い、JIS A 1129-2 (モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部：コンタクトゲージ方法) および附属書 A (参考) に準じて長さ変化を測定した。符号は、収縮側を負とする。

3 実験結果

3.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

図-1 に、乾燥期間とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を示す。乾燥収縮ひずみは粗骨材の種類によって異なり、乾燥期間 6 か月で $-501 \times 10^{-6} \sim -1036 \times 10^{-6}$ の範囲であった。岩種別にみると、火成岩の場合の乾燥収縮ひずみは $-509 \times 10^{-6} \sim -820 \times 10^{-6}$ の範囲であり、最小が斑レイ岩、最大が安山岩を用いたものであった。ただし、同じ安山岩であっても乾燥収縮ひずみは 200×10^{-6} 程度異なった。石灰石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、絶対値、分布範囲ともに小さく $-501 \times 10^{-6} \sim -590 \times 10^{-6}$ で

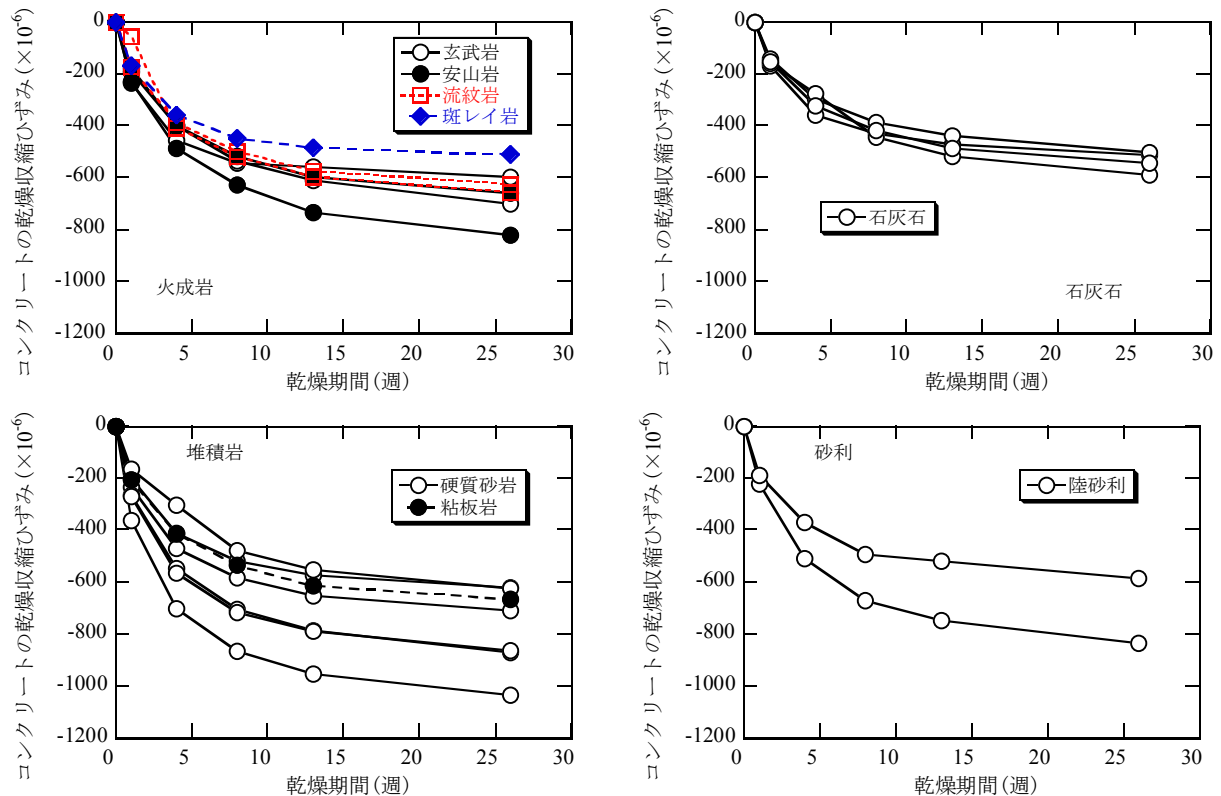


図-1 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

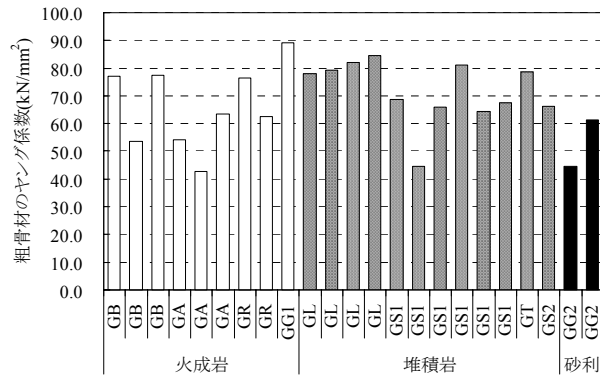


図-2 粗骨材のヤング係数

あった。一方、硬質砂岩を用いた場合の乾燥収縮ひずみは $-623 \times 10^{-6} \sim -1036 \times 10^{-6}$ と、試料によって大きく異なる結果であった。

3.2 粗骨材のヤング係数

図-2 に、粗骨材のヤング係数を示す。粗骨材のヤング係数は、 $42.7 \sim 89.2 \text{ kN/mm}^2$ の範囲であった。岩種別に見ると、火成岩は $42.7 \text{ kN/mm}^2 \sim 89.2 \text{ kN/mm}^2$ 、堆積岩は $44.7 \text{ kN/mm}^2 \sim 84.4 \text{ kN/mm}^2$ であり、両者の分布範囲はほぼ同等であった。岩種の小分類でみると、石灰石のヤング係数が $79.3 \sim 84.4 \text{ kN/mm}^2$ と試料によらず大きい傾向が認められた。

図-3 に、粗骨材のヤング係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を示す。粗骨材のヤング係数が小さい範囲ではバラツキが大きい、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、粗骨材のヤング係数が大きくなるとともにおおむね小さくなる傾向を示した。粗骨材の変形抵抗性の向上に応じてセメントペーストの収縮を拘束する効果が卓越しているものと考えられる。

骨材のヤング係数を表す指標としては、吸水率による実験式が提案されており⁸⁾、本検討でも、両者の関係を累乗関数で最小二乗回帰した(図-4)。同図より、回帰曲線は岩種によらずおおむね適合した。また、既往の実験式⁸⁾ともほぼ一致することが確認された。

3.3 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

図-5 に、粗骨材の乾燥収縮ひずみを示す。粗骨材の乾燥収縮ひずみの範囲は $4 \sim -464 \times 10^{-6}$ であった。岩種別にみると、火成岩が $-50 \times 10^{-6} \sim -224 \times 10^{-6}$ 、堆積岩が $4 \sim -464 \times 10^{-6}$ であり、堆積岩のほうが広範囲に分布する傾向であった。岩種の小分類で比較すると、石灰石の乾燥収縮ひずみは $4 \sim -56 \times 10^{-6}$ と小さい値を示す一方で、硬質砂岩の乾燥収縮ひずみは $-142 \times 10^{-6} \sim -464 \times 10^{-6}$ と、比較的大きく、広い範囲に分布する結果であった。

図-6 に、粗骨材の乾燥収縮ひずみとコンクリートの乾

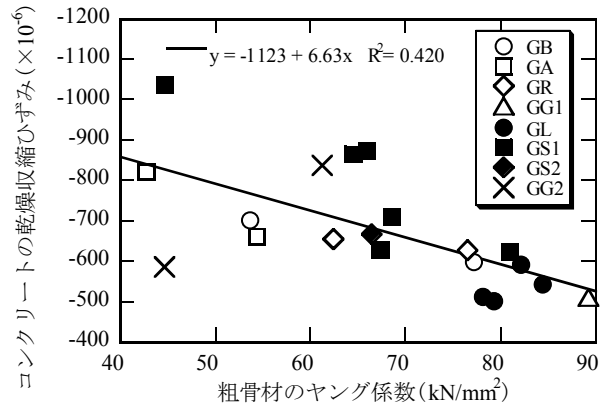


図-3 粗骨材のヤング係数とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

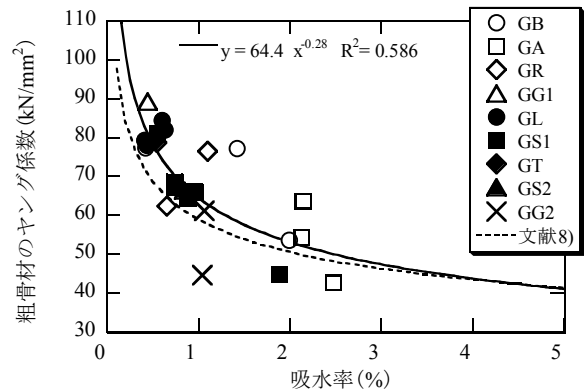


図-4 粗骨材のヤング係数と吸水率の関係

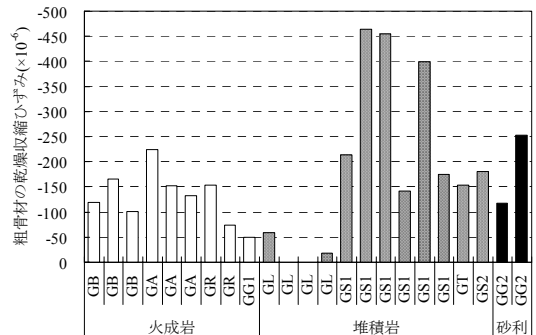


図-5 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

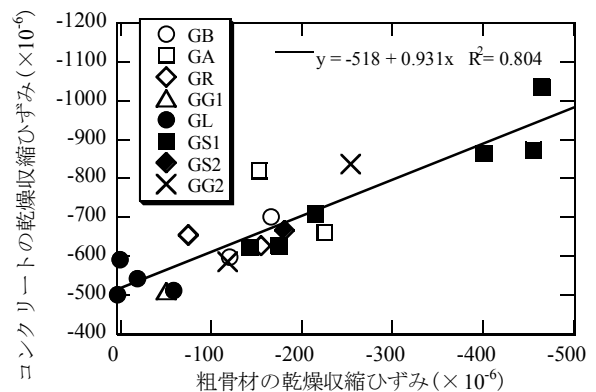


図-6 粗骨材とコンクリートの乾燥収縮ひずみ

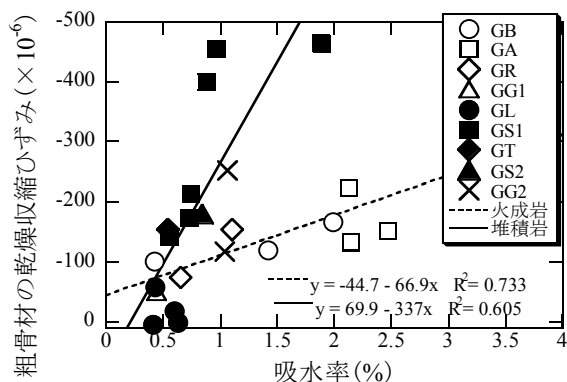


図-7 吸水率と粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

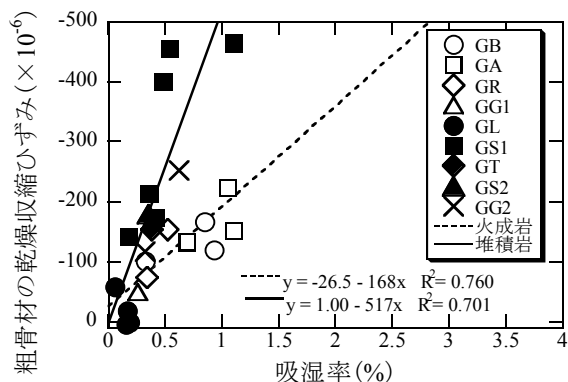


図-8 吸湿率と粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係

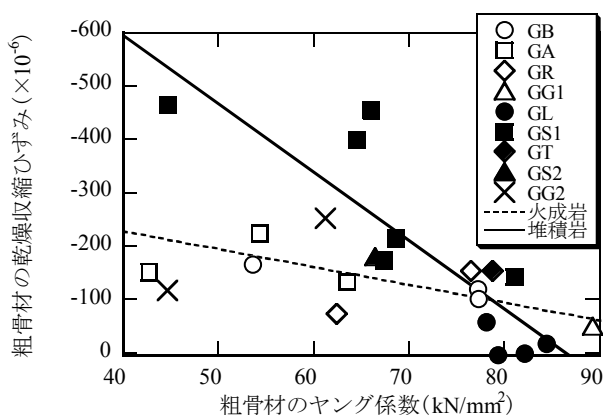


図-9 粗骨材のヤング係数と乾燥収縮ひずみの関係

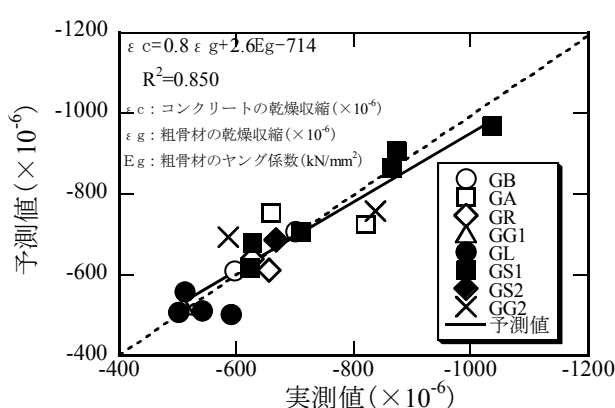


図-10 重回帰式による予測

乾燥収縮ひずみの関係を示す。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、粗骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなるほど大きくなる傾向を示し、両者の相関は高かった。

図-7 に、吸水率と粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係を示す。吸水率が大きくなるとともに粗骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が認められる。ただし、堆積岩と火成岩では異なった傾向を示し、堆積岩は吸水率の変化に対する粗骨材の乾燥収縮ひずみの変化が大きい傾向であった。それぞれの回帰直線は比較的高い相関性を示した。図-8 に、吸湿率と粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係を示す。両者の関係は、吸水率の場合よりも相関性が高くなる傾向であった。また、陸砂利(GG2)についてもほぼ堆積岩の回帰直線と一致した。しかし、堆積岩と火成岩で傾向が異なることについては、吸水率の場合と同様である。この原因については、両岩種で内部の空隙構造の違いが影響した可能性などが考えられるが、明確な原因推定には至っていない。なお、堆積岩と火成岩とでは水蒸気吸着率とコンクリートの乾燥収縮の関係が異なる傾向を示す⁹⁾ことが報告されている。水蒸気吸着率が原理的に骨材の乾燥収縮との関係性が高いと考えると、本結果と同様の傾向を示すものと捉えられる。より詳細に研究を進めメカニズムに則った統一的な指標の構築が望まれる。

3.4 粗骨材のヤング係数および乾燥収縮の影響度

図-9 に、粗骨材のヤング係数と粗骨材の乾燥収縮ひずみの関係を示す。粗骨材の乾燥収縮ひずみは、ヤング係数が小さいものほど大きくなる傾向が認められた。ただし、堆積岩と火成岩で傾向が異なり、堆積岩のほうがヤング係数の低下にともなう乾燥収縮ひずみの増加が大きくなった。

図-10 に、粗骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみを説明変数、コンクリートの乾燥収縮ひずみを目的変数とした重回帰式による予測結果を示す。単位水量、W/C 等の配(調)合や細骨材の岩種が異なるものが混在した結果ではあるが、予測値は実測値をよく表現できており、コンクリートの乾燥収縮において両物性値を同時に考慮することの合理性が認められる。

同式によれば、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、粗骨材のヤング係数 10kN/mm²あたり 26×10⁻⁶程度、乾燥収縮ひずみ 100×10⁻⁶あたり 80×10⁻⁶程度変化することになる。本検討で用いた骨材のヤング係数および乾燥収縮の最大-最小差は、40kN/mm²程度および 450×10⁻⁶程度である。それに応じたコンクリートの乾燥収縮ひずみの変化は、それぞれ 110×10⁻⁶、360×10⁻⁶程度と計算され、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は、骨材の乾燥収縮ひずみのほうが相対的に大きい結果となった。

4 複合モデルによるコンクリートの乾燥収縮評価

4.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測

骨材のヤング係数、乾燥収縮ひずみを用いた複合モデルによって乾燥期間 6 か月におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測を行った。予測には、式(1)、(2)に示す寺西らが構築した 3 相モデル¹⁰⁾を用いた。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_p \frac{1 - (1 - m_s n_s) V_s - (1 - m_g n_g) V_g}{n_c} \quad (1)$$

$$n_c = 1 + \frac{2(n_s - 1)V_s}{n_s + 1 - (n_s - 1)(V_s + V_g)} + \frac{2(n_g - 1)V_g}{n_g + 1 - (n_g - 1)(V_s + V_g)} \quad (2)$$

ここで、 ε_c 、 ε_p ：コンクリート、セメントペーストの乾燥収縮ひずみ、 m_s 、 m_g ：細・粗骨材とセメントペーストの収縮ひずみ比、 n_s 、 n_g ：細・粗骨材とセメントペーストのヤング係数比、 V_s 、 V_g ：細・粗骨材体積比

セメントペーストのヤング係数および乾燥収縮ひずみについては、既存の関係式¹⁰⁾を用いて求めた(ヤング係数：15.1 kN/mm²～16.8kN/mm²，乾燥期間 6 か月の収縮量：3233×10⁻⁶～3650×10⁻⁶)。粗骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみは実測値を用いた。細骨材については、粗骨材の関係性が適用できると仮定し、ヤング係数は図-4 に示した回帰式から求めた(S1：53.2 kN/mm²，S2：61.2 kN/mm²，S3：52.5kN/mm²，S4：55.7kN/mm²，S5：60.9kN/mm²)。乾燥収縮ひずみは、図-7 の堆積岩の回帰式(S1：597×10⁻⁶，S2：333×10⁻⁶，S3：628×10⁻⁶，S4：496×10⁻⁶，S5：341×10⁻⁶)および図-8 の堆積岩の回帰式(S1：212×10⁻⁶，S2：191×10⁻⁶，S3：323×10⁻⁶，S4：232×10⁻⁶，S5：154×10⁻⁶)より求めた。

図-11 に、実測値と予測値の関係を示す。いずれの方法においても、概ね予測値は実測値の傾向を評価できている。吸水率に基づき予測した場合には、予測値が実測値を大きく見積る傾向が認められたが、吸湿率による予測値は概ね±100×10⁻⁶程度の範囲であり、一定の精度を有することが確認された。ただし本結果は、細骨材の影響を無視した重回帰式(図-10)の結果と比べて、必ずしも明確な精度向上には至っていない。精度向上を図る上で

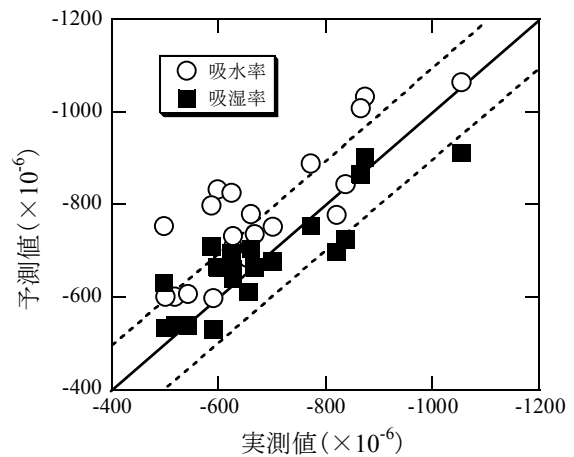


図-11 複合モデルによる予測

は、細骨材物性の設定手法あるいは細骨材のコンクリートの乾燥収縮への影響程度について、さらに検討する必要があると考えられる。

4.2 骨材のヤング係数および乾燥収縮の影響度評価

コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす骨材のヤング係数および乾燥収縮ひずみの影響度を評価するために、複合モデルを用いたパラメータスタディを行った。

骨材のヤング係数は、図-4 および図中の回帰式より、骨材の吸水率が JIS 規格内であれば約 40kN/mm²以上を満たすと考えられる。また最大値は概ね 100kN/mm²程度とみなしても良いと考えられる。一方、骨材の乾燥収縮ひずみについては、骨材のヤング係数の最小値が前記のとおり 40kN/mm²であれば、図-9 の堆積岩の回帰線から、-600×10⁻⁶程度が最大値として想定される。これらの物性値に基づき、表-2 に示す 4 ケースについて検討を行った。

図-12 に、骨材のヤング係数の変化が及ぼす影響を示す。ケース①、②ともに、骨材のヤング係数が 40kN/mm²程度以下になるとコンクリートの乾燥収縮ひずみが急激に大きくなる傾向を示した。一方、それ以上の範囲では、骨材のヤング係数の変化が及ぼす影響は比較的小さく、100kN/mm²までの最大変化量は-230～-90×10⁻⁶程度であった。図-13 に、骨材の乾燥収縮ひずみの変化が及ぼす影響を示す。骨材の乾燥収縮ひずみが増加すると、

表-2 複合モデルを用いたパラメータスタディ

ケース		①	②	③	④
配(調)合 パラメータ	単位水量 (kg/m ³)	170			
	水セメント比 (%)	50			
	細骨材率 (%)	45.8			
骨材パラメータ	細骨材の乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_s (\times 10^{-6})$	0	-600	0～-600	
	粗骨材の乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_g (\times 10^{-6})$				
	細骨材のヤング係数 $E_s (\text{kN/mm}^2)$	10～100		40	100
	粗骨材のヤング係数 $E_g (\text{kN/mm}^2)$				

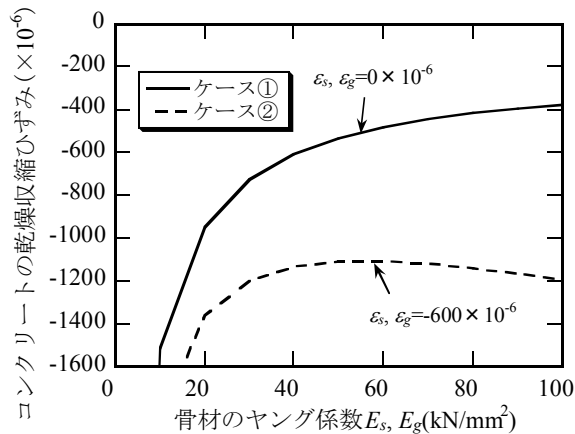


図-12 骨材のヤング係数の影響度

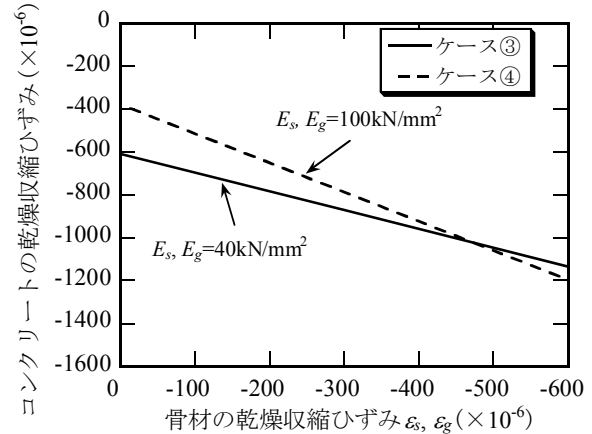


図-13 骨材の乾燥収縮ひずみの影響度

コンクリートの乾燥収縮ひずみは直線的に増加する傾向を示した。粗骨材の乾燥収縮ひずみが小さい領域では、ヤング係数が大きい骨材の方がコンクリートの乾燥収縮が小さい。一方、粗骨材の乾燥収縮ひずみの増加に対する変化割合は、骨材のヤング係数が大きいほうが大きく、ケース③の場合-530×10⁻⁶程度、ケース④の場合-820×10⁻⁶程度コンクリートの乾燥収縮ひずみが増加した。

複合モデルを用いて、骨材が及ぼすコンクリートの乾燥収縮ひずみへの影響度をパラメータスタディした結果、前述の重回帰式と同様に骨材の乾燥収縮ひずみのほうがヤング係数より影響が大きくなることが示された。その影響割合は、骨材の乾燥収縮ひずみが、ヤング係数の2～9倍程度と試算された。

5. まとめ

本検討の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 粗骨材のヤング係数と乾燥収縮ひずみを用いた重回帰式は、コンクリートの乾燥収縮ひずみを最もよく評価し、両物性値を同時に考慮することの合理性が示された。
- (2) 粗骨材の乾燥収縮ひずみと吸水率、吸水率との関係は堆積岩と火成岩で異なる傾向を示した。
- (3) 複合モデルによって、一定の精度で実測値を予測できた。
- (4) 複合モデルを用いたパラメータスタディの結果、コンクリートの乾燥収縮ひずみへの影響度は、骨材の乾燥収縮ひずみのほうがヤング係数よりも大きくなること示された。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008.3
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009，2009.2
- 3) 後藤幸正，藤原忠志：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集，No.247，pp.97-108，1976
- 4) 今本啓一，石井寿美江，荒井正直：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響，日本建築学会論文集構造系論文集，No.606，pp.9-14，2006.8
- 5) 藤原忠志：低品質の粗骨材を用いたコンクリートの諸性質，セメント・コンクリート，No.481，pp.8-15，1987.3
- 6) 中村秀三，酒井英司：各種砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，A-1 材料施工，pp.431-432，2006.9
- 7) 田中博一，橋田浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.553-558，2009.7
- 8) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，上田賢司：コンクリートのヤング係数の推定式，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.601-606，1999.7
- 9) 片平博，渡辺博志：骨材がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響の簡易推定法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.97-606102，2009.7
- 10) 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，-3 相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮-，日本建築学会構造系論文集，No.602，pp.21-28，2006.4