

論文 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響

兵頭 彦次^{*1}・谷村 充^{*2}・藤田 仁^{*3}・番地 成朋^{*4}

要旨：本研究では、石灰石骨材が乾燥収縮に与える影響を系統的に把握することを目的とし、W/C=50%の普通コンクリートレベルで、3種類のセメントと2種類の硬質砂岩碎石を用い、石灰石砕砂および碎石を組み合わせた場合について基礎的な評価を行った。その結果、セメント種類の影響は粗骨材種類の影響に比べ非常に小さかった。石灰石砕砂を置換した場合の影響については明確な傾向が認められなかったのに対し、石灰石碎石はその置換率に比例して乾燥収縮ひずみが小さくなった。また、コンクリートの静弾性係数あるいは質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係は概ね直線関係を示した。

キーワード：乾燥収縮, 石灰石骨材, 骨材種類, 静弾性係数, 普通コンクリート

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質確保の観点から収縮ひび割れ制御の要求が高まってきている。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、そのひとつに骨材の影響が古くから知られている。骨材は、セメントペーストの収縮を拘束し、コンクリートとしての乾燥収縮を見かけ上小さくする¹⁾。そのため、コンクリート中に占める骨材の割合が乾燥収縮抑制において重要な項目とされてきた。しかしながら最近では、骨材の種類や性質によってコンクリートの乾燥収縮が大幅に異なることが再認識されてきている。このようななか、石灰石骨材はコンクリートの乾燥収縮を比較的小さくする骨材として認められており²⁾、有効な収縮抑制材料となることが期待されている。

本研究では、石灰石骨材が乾燥収縮に与える影響を系統的に把握することを目的とし、W/C=50%の普通コンクリートレベルで、3種類のセメントと2種類の硬質砂岩碎石を用い、石灰石砕砂および碎石を置換した場合について基礎的な評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に、使用材料を示す。セメントには市販の普通ポルトランドセメント(N)、中庸熱ポルトランドセメント(M)および高炉セメントB種(BB)の3種類を用いた。細骨材には、砂岩砕砂(S1)、山砂(S2)および石灰石砕砂(SL)を用いた。粗骨材には、石灰石碎石(GL)および2種類の硬質砂岩碎石(GS1, GS2)を使用した。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤およびロジン系の AE 剤を使用した。

表-1 使用材料

材料	種類
セメント	N：普通ポルトランドセメント
	M：中庸熱ポルトランドセメント
	BB：高炉セメントB種
細骨材	S1：砂岩砕砂
	S2：山砂
	SL：石灰石砕砂
粗骨材	GL：石灰石碎石
	GS1：硬質砂岩碎石
	GS2：硬質砂岩碎石
高性能 AE 減水剤	SP：ポリカルボン酸系
AE 剤	AE：ロジン系

表-2 細骨材の物理的性質

物理的性質	S1	S2	SL
表乾密度(g/cm ³)	2.62	2.58	2.67
吸水率(%)	1.34	3.17	1.55
実積率(%)	65.5	68.2	69.0
粗粒率	2.99	2.15	3.06

表-3 粗骨材の物理的性質

物理的性質	GL	GS1	GS2
表乾密度(g/cm ³)	2.70	2.66	2.61
吸水率(%)	0.44	0.74	1.77
実積率(%)	64.1	60.8	61.1
粗粒率	6.70	6.26	6.56
最大寸法(mm)	20	20	20
微粒分量(%)	0.37	0.10	0.74
安定性(%)	1.7	2.5	18.7
静弾性係数(kN/mm ²)	78.1	72.8	21.7

*1 太平洋セメント（株） 中央研究所技術企画部 副主任研究員（正会員）

*2 太平洋セメント（株） 中央研究所技術企画部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*3 太平洋セメント（株） 中央研究所技術企画部 副主任研究員 工修（正会員）

*4 太平洋セメント（株） 中央研究所技術企画部 研究員 工修（正会員）

2.2 骨材の性質

表－2 および表－3 に、細・粗骨材の物理的性質をそれぞれ示す。粗骨材の静弾性係数は、破碎前の母岩からφ32×64mmのコアを採取し、岩の試験・調査方法の基準³⁾「岩石の一軸圧縮試験方法」に準じて測定した結果である(n=3 本)。骨材の物理的性質で特徴的なこととして、GS2は他の2種類の粗骨材と比べJIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験」による質量損失率が非常に大きく、静弾性係数が著しく小さいことが挙げられる(図－1)。

表－4 に、粗骨材の化学分析値を示す。GLはCaCO₃が全体の96.2%を占めていた。一方、GS1とGS2は、SiO₂が約70%を占めており、両者の化学組成はほぼ同様であった。

2.3 コンクリートの調(配)合条件

表－5 に、コンクリートの調(配)合の条件を示す。水セメント比W/Cは50%、単位水量は170kg/m³、単位粗骨材かさ容積は0.57m³/m³で一定とし、高性能AE減水剤およびAE剤を用いてスランブを18±2.5cm、空気量を4.5±1.5%となるよう調整した。実験水準は、セメントおよび粗骨材種類の影響評価として、N、M、BBの3種類のセメントと、GL、GS1、GS2を単独で使用する組合せを設定した。またSLの影響を評価するために、Nを使用し、細骨材体積に対するSL置換率を25%、50%とし、GL、GS1を単独使用する組合せを設定した。GLの影響を評価するものとして、Nを使用し、GS1およびGS2にGLを体積で33%、67%置換した組合せを設定した。いずれの検討についても、細骨材はS1とS2を体積比で6:4で組み合わせた混合砂を基本とした。

2.4 試験方法

(1) 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度および静弾性係数試験用供試体の寸法は、φ

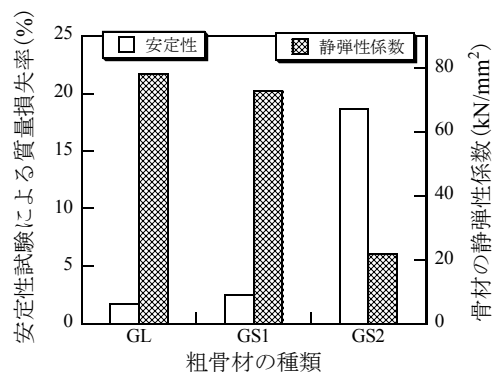
100×200mmとし、養生は20℃水中養生とした。試験方法は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」およびJIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。なお、静弾性係数試験のひずみ測定器にはコンプレッソメータを用いた。

(2) 乾燥収縮試験

測定方法は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ試験方法(コンタクトゲージ法)」に準じた。乾燥収縮試験用供試体は、100×100×400mmの角柱供試体とした。供試体は、材齢24時間まで20℃-80%R.H.の室内で養生し、脱型した後20℃水中養生を行った。材齢7日から20℃-60%R.H.の恒温恒湿室に静置し、長さ変化を測定した。

(3) 乾燥収縮ひび割れ試験

試験方法は、JIS A 1151「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」に準じ、Nに3種類の粗骨材を単独で使した場合を対象に、収縮ひび割れ発生材齢を測定した。養生方法は、20℃-80%R.H.の室内で材齢7日まで湿布養生し、脱型した後、20℃-60%R.H.の室内で乾燥養生した。供試体数は1調(配)合あたり3本とした。



図－1 粗骨材の特徴的な物理的性質

表－4 粗骨材の化学組成 (%)

粗骨材種類	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CO ₂	SO ₃	P ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	その他
GL	1.50	51.8	0.44	0.20	44.4	0.05	0.02	1.38	0.02	0.06	0.13
GS1	68.3	4.27	14.4	3.72	-	0.55	0.12	1.42	3.23	3.37	0.68
GS2	68.3	3.03	14.9	5.30	-	0.20	0.12	1.74	3.10	2.50	0.83

表－5 コンクリート調(配)合の条件

検討因子	W/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	目標値		セメント 種類	細骨材		粗骨材	
				スランブ (cm)	空気量 (%)		種類	SL 置換率(%)	種類	GL 置換率(%)
セメント・粗骨材種類	50	170	0.57	18±2.5	4.5±1.5	N/M/BB	S1+S2	—	GL/GS1/GS2	—
石灰岩砕砂						N	(S1+S2)+SL	25, 50	GL/GS1	0, 100
石灰岩碎石						N	S1+S2	—	GL/GS1/GS2	0, 33, 67, 100

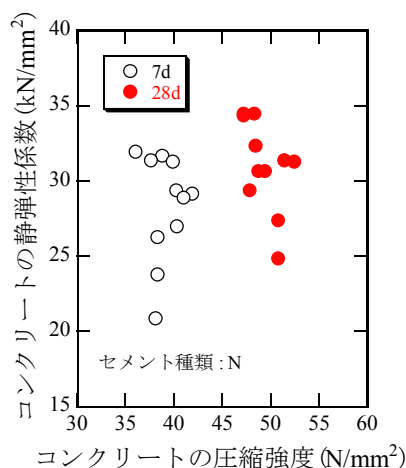


図-2 コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係

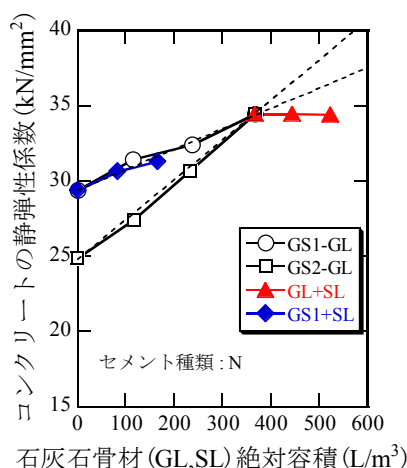


図-3 石灰石骨材絶対容積とコンクリートの静弾性係数との関係

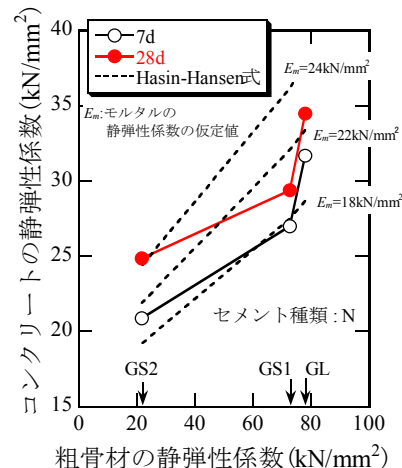


図-4 粗骨材とコンクリートの静弾性係数の関係

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数試験結果

図-2 に、N を用いた全ての水準の圧縮強度と静弾性係数の関係を材齢 7 日、28 日についてそれぞれ示す。圧縮強度の範囲は材齢 7 日で $36.0 \sim 41.9 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 28 日で $47.2 \sim 52.4 \text{ N/mm}^2$ であった。最大値に対する最小値の比率は、それぞれ 85%、90% 程度であった。一方、静弾性係数の範囲は材齢 7 日で $20.9 \sim 32.0 \text{ kN/mm}^2$ 、材齢 28 日で $24.9 \sim 34.5 \text{ kN/mm}^2$ であった。最小値は最大値に対しそれぞれ 65%、72% 程度であり、圧縮強度と比べ骨材の種類による影響が大きい傾向であった。

石灰石骨材を使用すると、コンクリートの静弾性係数がその他の天然骨材を用いた場合よりも大きくなる⁴⁾ことが知られている。図-3 に、コンクリート中の石灰石骨材(SL および GL)の絶対容積と材齢 28 日の静弾性係数との関係を示す。砂岩碎石に石灰石碎石を置換した場合(図中 GS1-GL, GS2-GL)および粗骨材が砂岩碎石で細骨材を石灰石砕砂で置換していった場合(図中 GS1+SL)、コンクリートの静弾性係数は石灰石骨材の絶対容積の増加にともなってほぼ直線的に大きくなった。一方、粗骨材が石灰石碎石で細骨材を石灰石砕砂で置換していった場合(図中 GL+SL)、静弾性係数の変化はほとんど認められなかった。

図-4 に、粗骨材の静弾性係数とコンクリートの静弾性係数の関係を示す。また、複合理論に基づく静弾性係数モデルである Hasin-Hansen 式⁵⁾(式(1))を用いて試算した結果を併記する。

$$E_c = \frac{\{E_a/E_m + 1 + (E_a/E_m - 1)V_a\}}{\{E_a/E_m + 1 - (E_a/E_m - 1)V_a\}} \quad (1)$$

ここに、 E_c 、 E_a 、 E_m ：コンクリート、粗骨材およびモルタルの静弾性係数、 V_a ：粗骨材体積率

なお本検討では、モルタルの静弾性係数が未知のため、これを 18、22、 $26 \text{ kN/mm}^2 (=E_m)$ と仮定した 3 つの結果を示す。コンクリートの静弾性係数の実測値は、粗骨材の静弾性係数が大きくなるとともに大きくなる傾向を示した。試算結果も同様の傾向を示したが、実測値との適合性は E_m の仮定値によらず良いとはいえなかった。この理由としては、粗骨材の違いによってモルタルの静弾性係数が異なった、あるいはブリーディング等の調(配)合の影響を受けてモルタル骨材間の一体性が骨材毎に異なっていることなどが考えられるが、これについてはより詳細な検討が必要と考えられる。

3.2 乾燥収縮試験結果

(1) セメント・粗骨材種類の影響

図-5 に、セメントおよび粗骨材種類別の乾燥収縮ひずみと乾燥材齢の関係を示す。なお、符号はマイナスを収縮とする。同図より、セメントの種類が乾燥収縮ひずみに与える影響は、骨材と比べるとかなり小さいことがわかる。骨材種類別の乾燥収縮ひずみ量は、 $GS2 > GS1 > GL$ の順で大きくなり、乾燥期間 91 日における骨材間の差は、セメント種類によらずそれぞれ $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ 程度であった。一方、セメント間の差は、GL, GS1, GS2 でそれぞれ、40、50、 55×10^{-6} 程度であり、N を基準とした収縮比率で示すと 93~108%の範囲であった。本検討では乾燥収縮が大幅に変化する骨材を用いたが、既往の研究結果⁶⁾と同様にセメント種類の影響は±10%の範囲内であった。なお、セメント間のひずみ量の大小関係は、骨材毎にそれぞれ異なっており、明確な傾向は認められなかった。

ひずみの進行速度は、セメントおよび粗骨材種類によ

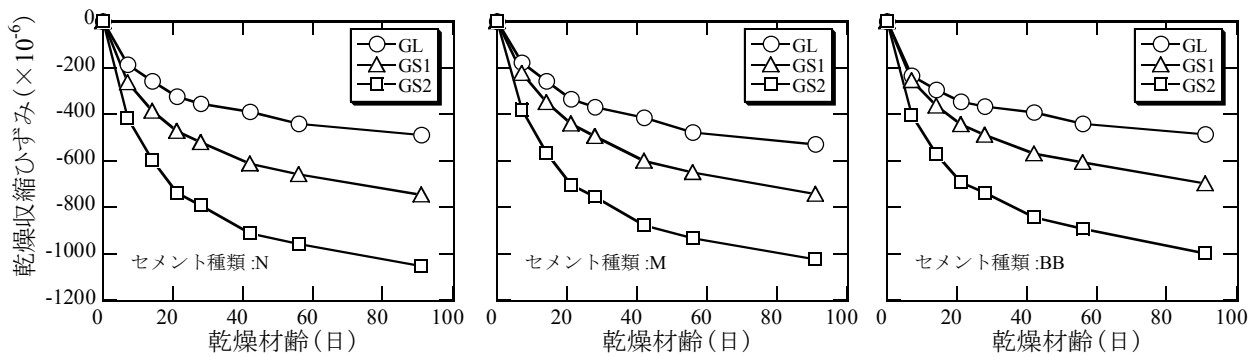


図-5 セメント・粗骨材種類別の乾燥収縮ひずみ

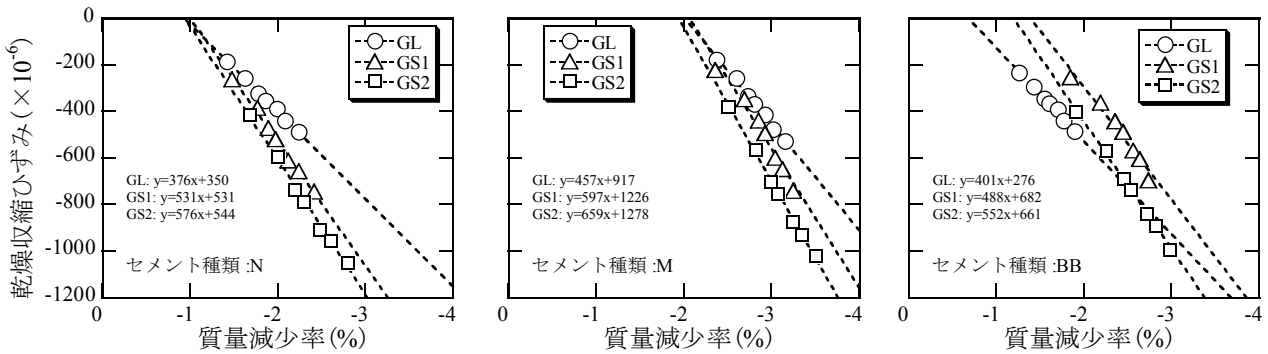


図-6 セメント・粗骨材種類別の質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

らずほぼ同等であったが、例外として BB と GL を組み合わせた場合、材齢 28 日程度までの早期の段階に進行速度が大きくなることが確認された。

図-6 に、粗骨材種類別の乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係をセメント種類毎に示す。また、乾燥材齢 7 日以降の両者の関係が、材料の種類によらずほぼ直線と見なせたため、これを直線回帰した結果を併記する。なお質量減少率の符号は、マイナスを質量減少とする。回帰線の傾きはセメントの種類によらず $GS2 > GS1 > GL$ の順に大きくなり、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きいものほど質量減少率あたりのひずみ変化量が大きくなった。

次に、回帰線を外挿した X 軸との交点を見ると、N, M では、骨材の種類によらずほぼ同一の値を示し、それぞれ 1.0%, 2.0% 程度となった。この交点は、収縮に関与しない粗大な空隙からの水の逸散分と考えられ、初期の空隙構造は骨材種類にかかわらずセメント毎にほぼ同等であったと予想される。一方、BB と GL を組み合わせた場合異なる傾向を示した。すなわち、GS1, GS2 との組合せに比べ GL の場合、X 軸との交点が大幅に小さい値となった。BB は、石灰石微粉末が共存する場合、早期のセメントの水和反応率が促進される⁷⁾ことが確認されており、本検討では粗骨材であるが、同様な現象が生じ、早期に緻密な空隙構造を形成した可能性が考えられる。これは、同組合せで収縮進行速度が大きかった前述の結果を示唆するものと考えられる。

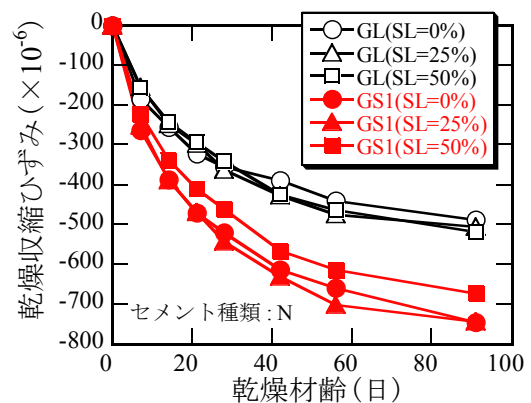


図-7 石灰石砕砂 (SL) が乾燥収縮ひずみに与える影響

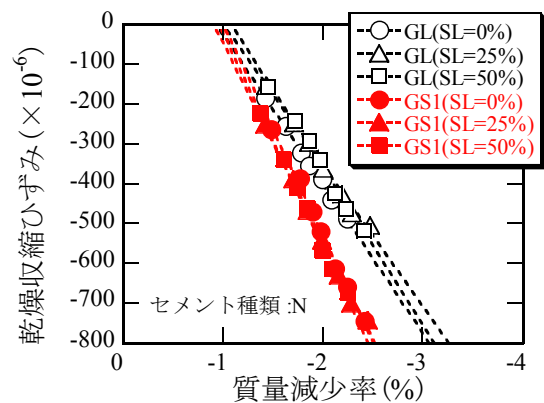


図-8 石灰石砕砂 (SL) が質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係に与える影響

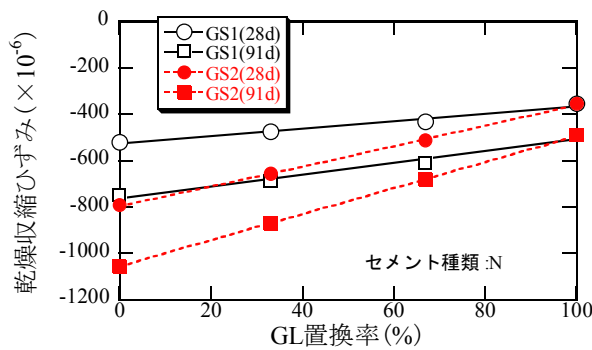


図-9 石灰碎石 (GL) 置換率と乾燥収縮ひずみの関係

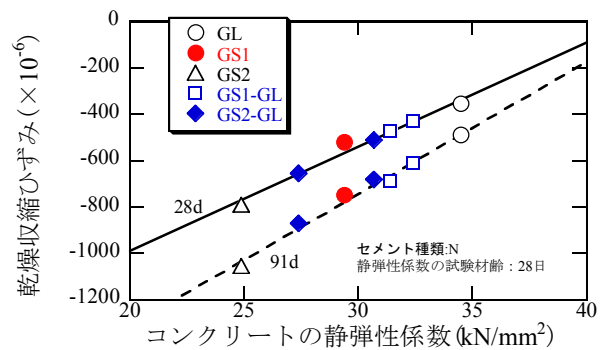


図-10 静弾性係数と乾燥収縮ひずみの関係

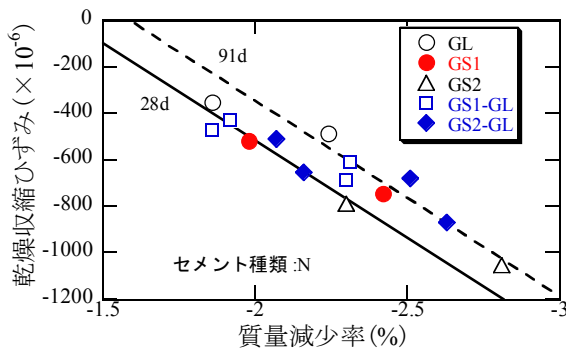


図-11 同一材齢での質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

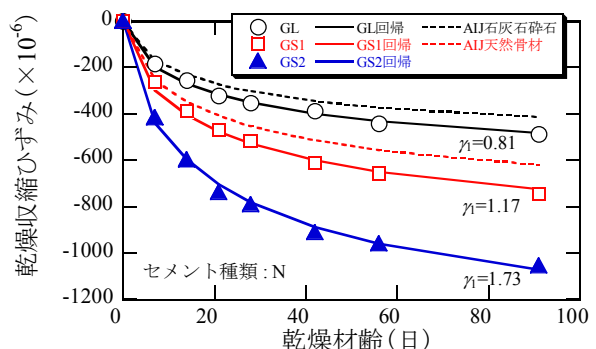


図-12 回帰結果と実測値の比較

(2) 石灰石砕砂の影響

図-7 に、粗骨材 GL、GS1 を単独で用い、細骨材に SL を 0%、25%、50%置換した場合の乾燥収縮ひずみと材齢の関係を示す。粗骨材が GL の場合、SL の置換率にかかわらず乾燥収縮ひずみの変化はほとんどなかった。一方、粗骨材が GS1 の場合、SL 置換率の増加とともに乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が認められ、組み合わせる粗骨材の種類によって異なる傾向を示した。質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係(図-8)を見ると、SL を置換することによる影響は、粗骨材と比べると非常に小さい。石灰石砕砂を置換することによって一定の収縮低減効果が得られるとの報告⁸⁾もあるが、本検討の範囲では、明確な傾向が認められなかった。

(3) 石灰石砕石の影響

図-9 に、GS1 あるいは GS2 に GL を置換していった場合の乾燥収縮ひずみと GL 置換率の関係を、乾燥材齢 28 日、91 日についてそれぞれ示す。同図より、粗骨材種類にかかわらず GL 置換率の増加にともなって、乾燥収縮ひずみが直線的に小さくなっていることがわかる。

図-10 に、材齢 28 日のコンクリートの静弾性係数と乾燥収縮ひずみの関係を粗骨材の種類別に示す。両者の関係には良い直線関係が認められ、静弾性係数が増加するとともに乾燥収縮ひずみは小さくなった。ただし骨材の種類によっては、コンクリートの静弾性係数と乾燥収縮の相関性は低い場合がある⁹⁾ことも報告されており、広範なデータから検証する必要があると考えられる。

表-6 回帰計算から算出した係数 γ_1

骨材の種類	γ_1	R^2
石灰石砕石(AIJ 式)	0.7	—
天然骨材(AIJ 式)	1.0	—
GL	0.81	0.996
GS1	1.17	0.994
GS2	1.73	0.997

図-11 に、乾燥材齢 28 日および 91 日における質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。質量減少率が増加するとともに乾燥収縮ひずみは大きくなり、両者には概ね直線的な関係が認められた。同図は、粗骨材の種類によってコンクリートからの水分逸散量に変化し、またそれに応じて乾燥収縮ひずみが増加することを示しており、骨材自体の乾燥による収縮¹⁰⁾の影響を示唆するものであると考えられる。

本検討で用いた粗骨材が、乾燥収縮に与える影響について、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)・同解説」²⁾に示される予測式(AIJ 式)(式(2))によって評価した。具体的には、同式中の骨材の種類によって定まる係数 γ_1 を未知数として、最小二乗法で実測値を回帰した。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = kt_0^{-0.08} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \left(\frac{(t - t_0)}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4 \cdot (V/S)^{-0.18}} \right\} \quad (2)$$

$$k = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$$

ここに、 W ：単位水量($=170\text{kg/m}^3$)、 C ：単位セメント量(340kg/m^3)、 G ：単位粗骨材量($922\sim 990\text{kg/m}^3$)、 h 相対湿度(60%)、 V/S ：体積表面積比(25mm)、 γ_1 ：骨材の種類によって定まる係数(未知数)、 γ_2 ：セメントの種類によって定まる係数($=1.0$)、 γ_3 ：混和剤の種類によって定まる係数($=1.0$)

図-12 に、AIJ 式で回帰した結果と実測値の比較を、表-6 に回帰計算から算出した係数 γ_1 および決定係数 R^2 の一覧を示す。骨材の種類によらず決定係数 R^2 は高い値を示しており、AIJ 式によって回帰した結果はよく実測値を再現できた。石灰石碎石(GL)の場合、算出した係数 γ_1 は0.81であり、AIJ 式に示される係数0.7と比較的近い値であった。一方、天然骨材の場合、AIJ 式に示される係数が1.0に対し、GS1、GS2はそれぞれ1.17、1.73であり、粗骨材の種類によっては値が大幅に異なった。

3.3 乾燥ひび割れ試験結果

図-13 に、GL、GS1、GS2を単独で用いた場合のひび割れ発生材齢を供試体毎に示す。なお、乾燥材齢が30日までの結果である。ひび割れ発生材齢は、乾燥収縮ひずみが多いものほど早くなる結果であった。すなわち、GS2を使用した場合のひび割れ発生材齢が最も早く、3本の平均で4.9日(変動係数：8.25%)、次いでGS1が平均で17.1日(変動係数：14.5%)であった。GLを用いた場合は試験期間内ではひび割れを発生せず、拘束下におけるひび割れ抵抗性の向上が確認された。

4. まとめ

本研究では、石灰石骨材が乾燥収縮に与える影響を系統的に把握することを目的とし、 $W/C=50\%$ の普通コンクリートを対象に、普通・中庸熱・高炉B種セメントと2種類の砂岩碎石を用い、石灰石骨材を組み合わせた場合の基礎的な評価を行った。本検討の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 粗骨材が乾燥収縮に与える影響は、その種類によって $200\sim 300\times 10^{-6}$ 程度の差異を示した。一方、セメント間のひずみ差は $40\sim 55\times 10^{-6}$ 程度であり、セメントの種類が乾燥収縮に与える影響は相対的に小さかった。
- (2) 石灰石砕砂を細骨材に置換することによる乾燥収縮への影響については、明確な傾向を認めることができなかった。
- (3) 石灰石碎石を砂岩碎石に置換すると、その置換率に比例して乾燥収縮ひずみが小さくなった。
- (4) 乾燥収縮ひずみは、コンクリートの静弾性係数あるいは質量減少率とほぼ直線の関係を示した。

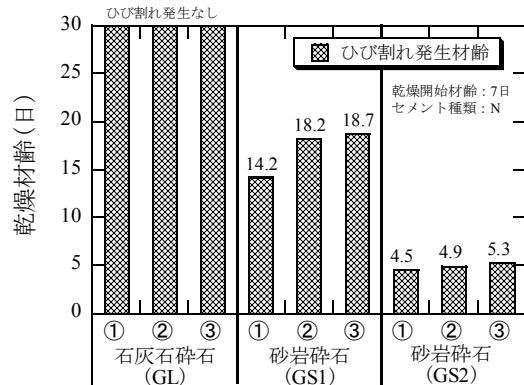


図-13 粗骨材の種類とひび割れ発生材齢

- (5) 石灰石碎石を用いた場合、その他の砂岩碎石を用いた場合と比べ、ひび割れ発生材齢が長期化し、拘束下におけるひび割れ抵抗性の向上が確認された。

参考文献

- 1) 三浦尚訳：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，2004
- 2) 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)・同解説，2006
- 3) 社団法人地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書，2003
- 4) 石灰石鉱業協会：石灰石骨材とコンクリート，2005
- 5) 川上英男：粗骨材コンクリートの静弾性係数評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.203-308，2002
- 6) 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，1992
- 7) 佐川孝広，名和豊春：高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.93-98，2007
- 8) 小澤貴史，西田朗，橋田浩：コンクリートの乾燥収縮率早期推定方法の提案とその適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.591-596，2007
- 9) 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，日本建築学会構造系論文集，第605号，pp.9-14，2006
- 10) 後藤幸正，藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響，土木学会論文報告集，第286号，pp.125-137，1979