

論文 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

田中 博一*1・橋田 浩*2

要旨: 骨材の種類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。その結果、骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は非常に大きいこと、細骨材、粗骨材ともに石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は約 400×10^{-6} になること、粗骨材の方が細骨材よりコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は大きいこと、石灰石砕砂と山砂とを混合して使用した場合、石灰石砕砂の混合割合が大きくなるほど乾燥収縮は小さくなること、石灰石粗骨材の乾燥収縮ひずみは著しく小さいこと、骨材比表面積あるいは骨材気乾含水率などの骨材特性からコンクリートの乾燥収縮特性をある程度評価できること、などを明らかにした。

キーワード: 乾燥収縮, 骨材, 石灰石, 混合砂, 比表面積, 気乾含水率

1. はじめに

従来、コンクリートの乾燥収縮ひずみは単位水量と相関が高いとされてきたが、最近、実構造物のひび割れ発生事例などから、骨材の影響が無視できないことが指摘されている^{例え 1)}。骨材の体積は細骨材および粗骨材をあわせるとコンクリート中の約 7 割を占めているため、骨材の特性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は大きいものと考えられる。既往の報告^{例え 2)}では、石灰石骨材を用いた場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向があることが報告され、筆者らは石灰石骨材自身の乾燥収縮ひずみが小さいことから石灰石骨材を用いたコンクリートが小さくなることを明らかにしている³⁾。しかし、骨材の特性が乾燥収縮に及ぼす影響については十分に明らかにされていないのが現状である。骨材の特性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を明らかにし、骨材の特性に応じて乾燥収縮ひび割れを制御する方法を確立することは非常に重要である。

そこで、本研究では、乾燥収縮ひび割れを制御する方法を確立するための基礎的な資料を得ることを目的とし、細骨材および粗骨材の種類が乾燥収縮に及ぼす影響を定量的に把握するとともに、粗骨材の乾燥収縮ひずみ、骨材の気乾含水率や比表面積などの骨材特性とコンクリートの乾燥収縮との関係について検討した。

2 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

2.1 使用材料と調合

使用材料を表-1 に、シリーズ 1 の調合を表-2 に、シリーズ 2 の調合を表-3 に示す。シリーズ 1 は、細骨材に石灰石砕砂を用いて粗骨材の種類を変えた 4 ケースおよび細骨材に山砂を用いて粗骨材の種類を変えた 2 ケースの計 6 ケースとした。シリーズ 2 は、粗骨材は石灰石砕砂とし、細骨材は石灰石砕砂と山砂の混合砂とし、石灰

石砕砂の混合割合を体積比で 100%, 75%, 50%, 25%, 0%とした計 5 ケースとした。骨材の影響を検討するために各シリーズの骨材の単位容積は一定とした。各シリーズの目標スランプは 18cm とし、水セメント比、空気量、単位水量および細骨材率は一定とした。

2.2 試験項目

試験項目を表-4 に示す。試験体はコンクリート打設後 1 日で脱型した。圧縮強度、ヤング係数試験体は測定材齢まで 20°C の水中で養生した。乾燥収縮試験体は材齢 7 日まで 20°C の水中養生を行った後、20±1°C、60±5%RH の恒温恒湿室内に静置した。乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129 のコンタクトゲージ法により測定した。

2.3 結果及び考察

(1) 圧縮強度

圧縮強度およびヤング係数の試験結果を表-5、表-6 に示す。圧縮強度、ヤング係数については、各シリーズとも、骨材の種類により大きな差は認められなかった。

(2) 乾燥収縮

シリーズ 1 の乾燥収縮試験結果を図-1 に示す。乾燥

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	LS	石灰石砕砂, 表乾密度 2.67g/cm ³ 吸水率 1.27%, F.M. 2.80
	YS	山砂, 表乾密度 2.62g/cm ³ 吸水率 1.73%, F.M. 2.94
粗骨材	LG	石灰石砕石, 表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.26%
	HG	硬質砂岩砕石, 表乾密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.56%
	GG	花崗岩砕石, 表乾密度 2.69g/cm ³ 吸水率 0.59%
	RG	流紋岩砕石, 表乾密度 2.62g/cm ³ 吸水率 1.12%
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

*1 清水建設 (株) 技術研究所生産技術センター 副主任研究員 工修 (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所生産技術センター 上席研究員 工博 (正会員)

表-2 調合 (シリーズ 1)

記号	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	
LS-LG	50	4.5	45.0	165	330	818	1018	
LS-HG							999	
LS-GG							1014	
LS-RG							988	
YS-LG							808	1018
YS-HG							808	999

表-3 調合 (シリーズ 2)

記号	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	LS	YS	G
LS100-YS0	50	4.5	45.0	165	330	818	—	1018
LS75-YS25						618	202	
LS50-YS50						412	404	
LS25-YS75						206	606	
LS0-YS100						—	808	
						—	808	

収縮ひずみは、細骨材および粗骨材ともに石灰石を用いた LS-LG が最小となり、細骨材に山砂、粗骨材に硬質砂岩碎石を用いた YS-HG が最大となった。LS-LG と YS-HG の差は乾燥期間 182 日において約 250×10^{-6} となり、既往の研究⁴⁾と同様に骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は大きい結果となった。乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみは、LS-LG で約 400×10^{-6} となり、YS-HG と比較して約 40% 小さくなり、レディーミクストコンクリートの石灰石碎石を除いた全国平均値 (約 740×10^{-6})⁵⁾と比較して約 45%と著しく小さくなった。粗骨材の種類が同じで細骨材の種類が異なる LS-LG と YS-LG および LS-HG と YS-HG を比較すると、粗骨材の種類によらず、石灰石碎石は山砂と比較して約 50×10^{-6} 小さくなった。細骨材の種類が同じで粗骨材の種類が異なる LS-LG と LS-HG および YS-LG と YS-HG を比較すると、細骨材の種類によらず、石灰石碎石は硬質砂岩と比較して約 180×10^{-6} 小さくなった。したがって、本研究の範囲では、粗骨材の方が細骨材よりもコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響が大きいものと考えられる。これは、粗骨材の方が細骨材よりセメントペーストの乾燥収縮を拘束する効果が大きいためと考えられる。シリーズ 2 の乾燥収縮試験結果を図-2 に示す。石灰石碎石と山砂を混合した場合、石灰石碎石の混合割合が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向が認められたが、その差は乾燥期間 182 日において約 45×10^{-6} であり、本研究の範囲では大きな差は認められなかった。

3 骨材特性がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

3.1 使用骨材

表-4 試験項目

試験項目	試験方法	試験体寸法 (mm)	期間, 材齢(日)
圧縮強度	JIS A 1108	$\phi 100 \times 200$	7, 28, 91
ヤング係数	JIS A 1149	$\phi 100 \times 200$	7, 28, 91
乾燥収縮	JIS A 1129	$100 \times 100 \times 400$	182

表-5 圧縮強度, ヤング係数試験結果 (シリーズ 1)

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)		
	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日
LS-LG	31.0	42.1	49.7	34.0	35.5	37.5
LS-HG	32.0	44.2	53.2	29.2	35.5	34.5
LS-GG	32.2	43.7	51.8	28.1	29.3	32.5
LS-RG	33.1	45.1	53.8	30.0	34.1	34.7
YS-LG	29.8	39.6	47.7	30.8	34.7	35.7
YS-HG	30.3	41.0	48.9	28.1	32.7	35.7

表-6 圧縮強度, ヤング係数試験結果 (シリーズ 2)

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)		
	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日
LS100-YS0	31.0	42.1	49.7	34.0	35.5	37.5
LS75-YS25	28.1	38.5	46.2	29.9	33.0	34.6
LS50-YS0	28.4	38.7	46.4	29.2	33.4	35.1
LS25-YS75	30.6	41.1	48.6	31.7	36.5	35.5
LS0-YS100	29.8	39.6	47.7	30.8	34.7	35.7

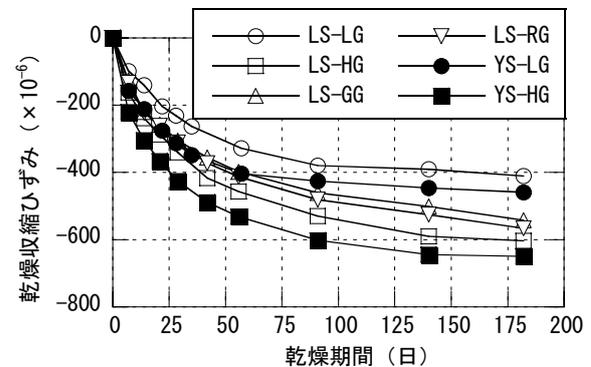


図-1 乾燥収縮ひずみ測定結果 (シリーズ 1)

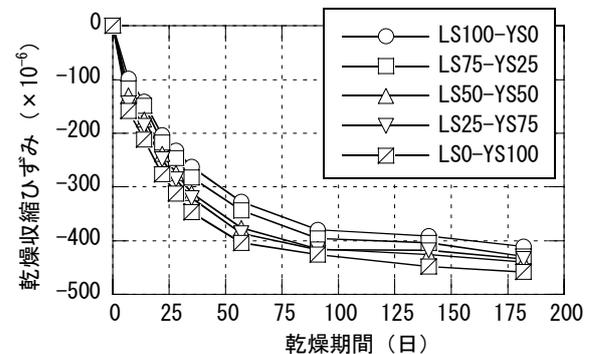


図-2 乾燥収縮ひずみ測定結果 (シリーズ 2)

使用骨材は、表-1 の骨材の他に表-7 に示す骨材を加えた細骨材 2 種類および粗骨材 12 種類の計 14 種類とした。細骨材は山砂と石灰砕砂の 2 種類、粗骨材は産地の異なる 3 種類の硬質砂岩砕石、花崗岩、流紋岩および産地の異なる 7 種類の石灰石砕石の計 12 種類とした。

3.2 試験項目

(1) 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

粗骨材の乾燥収縮は骨材表面に 2mm のひずみゲージを貼付けた粗骨材を 7 日間程度水中に浸漬させた後、恒温恒湿室 (20℃, 60%RH) に静置してひずみを測定した 1 ケースにつき 5 個の試料を測定し平均値を算出した。

(2) 骨材の気乾含水率

表乾状態にした骨材を計量 (細骨材約 1kg, 粗骨材約 2kg) した後、質量減少が平衡するまで恒温恒湿室内 (20℃, 60%RH) に静置した。最後に、105℃下で絶乾質量を測定し、次式より含水率を算出し、恒温恒湿室内で一定となった含水率を骨材の気乾含水率とした。1 ケースにつき 3 回測定して平均した。

$$\text{含水率}(\%) = (W_t - W_z) / W_z \times 100$$

ここで、 W_t : 乾燥期間 T における質量 (g), W_z : 絶乾質量 (g)

(3) 骨材の比表面積

骨材比表面積は、細骨材および粗骨材ともに吸着質を水蒸気とした B. E. T. 一点法⁶⁾ により測定した。調湿剤には、 CaCl_2 (理論値 R. H. 32.5%) を用いた。なお、骨材比表面積は細骨材 2 種類 (YS, LS), 粗骨材 7 種類 (HG, GG, RG, LG, LG (2), LG (3), LG (4)) について測定した。

3.3 結果及び考察

(1) 粗骨材の乾燥収縮

粗骨材のひずみの測定結果の一例を図-3 に示す。粗骨材は、水中においては吸水することにより膨張し 7 日間程度ではほぼ一定値となった。水中でのひずみが一定となった後、コンクリートの乾燥収縮の測定条件と同じ環境下 (20℃, 60%RH) で乾燥させた。乾燥開始 7 日程度後、粗骨材のひずみはほぼ一定値となった。

乾燥開始時とほぼ一定になった乾燥期間 7 日後のひずみの差を粗骨材の乾燥収縮ひずみとして算出した結果を図-4 に示す。粗骨材の乾燥収縮ひずみは、骨材の種類により大きく異なり、硬質砂岩砕石 (HG) は産地により大きな差が認められ 150~350×10⁻⁶ 程度、花崗岩砕石 (GG) は 60×10⁻⁶ 程度、流紋岩砕石 (RG) は 300×10⁻⁶ 程度となった。一方、石灰石砕石 (LG) は産地によらず他の粗骨材と比較しても非常に小さくなる結果となり、7 種類の石灰石砕石の平均値は 10×10⁻⁶ 程度となった。

(2) 骨材の気乾含水率

骨材の含水率の経時変化の一例を図-5 に示す。骨材の含水率は、骨材の種類によらず、乾燥期間 1 日で急激に

表-7 骨材の種類

種類		記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
粗骨材	硬質砂岩砕石	HG (2)	2.70	0.72
		HG (3)	2.65	0.54
	石灰石砕石	LG (2)	2.70	0.22
		LG (3)	2.70	0.59
		LG (4)	2.71	0.25
		LG (5)	2.70	0.29
		LG (6)	2.70	0.27
LG (7)	2.70	0.45		

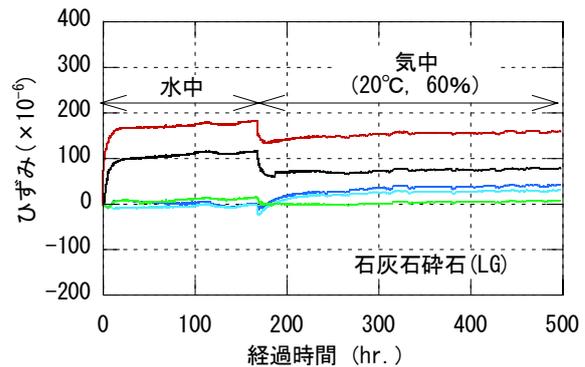
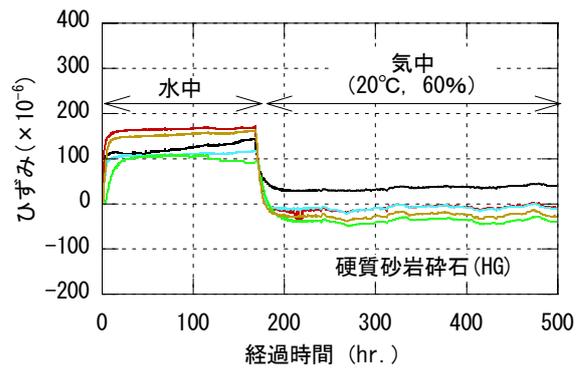


図-3 粗骨材のひずみ測定例

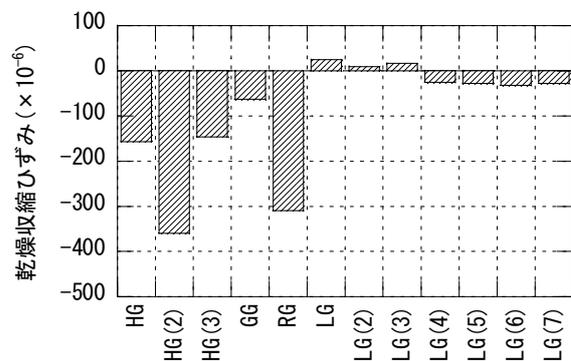


図-4 粗骨材の乾燥収縮ひずみ

小さくなり、その後はほぼ一定となった。含水率がほぼ一定になった骨材の含水率を気乾含水率として図-6 に示す。骨材の気乾含水率は、骨材の種類により大きな差が認められ、流紋岩砕石 (RG) が約 0.4%, 山砂 (YS),

硬質砂岩 (HG) および花崗岩碎石 (GG) が 0.1%~0.25% 程度となった。一方、石灰石骨材の気乾含水率は、細骨材および粗骨材ともに、他の骨材より著しく小さくなり、0.04%以下となった。20°C、60%RH の環境下では、平衡状態において石灰石骨材以外については内部に水分が存在しているが、石灰石骨材については内部に存在するほぼすべての水分が蒸発すると考えられる。これは、骨材の種類により内部の細孔構造が異なるためと考えられ、石灰石骨材は比較的大きな細孔空隙の割合が多いため、内部の水分が蒸発しやすいものと考えられる。

(3) 骨材の比表面積

骨材の比表面積の測定結果を図-7 に示す。細骨材および粗骨材ともに、石灰石骨材の比表面積は、他の骨材と比較して著しく小さい結果となった。

骨材の比表面積と気乾含水率との関係を図-8 に示す。山砂 (YS) を除いて、骨材の比表面積と気乾含水率との関係は相関性が高く、比表面積が大きくなるほど、ほぼ直線的に気乾含水率は大きくなる傾向が認められた。山砂 (YS) は比表面積は大きい、気乾含水率が他の骨材の傾向と比較して小さくなる結果となった。

(4) 骨材特性と粗骨材の乾燥収縮との関係

骨材の比表面積と粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係を図-9 に示す。骨材の比表面積と粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係は相関性が高く、骨材の比表面積が大きくなるほど、粗骨材の乾燥収縮が大きくなる傾向が認められた。これは、比表面積が大きな骨材ほど、骨材内部の水分が蒸発する際に物理的表面エネルギーの変化が大きくなるためと考えられる⁷⁾。石灰石骨材は比較的大きな細孔空隙の割合が多く、骨材内部の水分が蒸発する際の物理的表面エネルギーの変化が小さいため、骨材自身の乾燥収縮が小さくなると考えられる。これは、粗骨材乾燥収縮ひずみ、骨材気乾含水率の結果の傾向と一致する。

骨材の気乾含水率と粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係を図-10 に示す。骨材の比表面積と同様に骨材の気乾含水率と粗骨材の乾燥収縮ひずみとの関係は相関性が高く、骨材の気乾含水率が大きくなるほど、粗骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。

(5) 骨材特性とコンクリートの乾燥収縮との関係

粗骨材の乾燥収縮ひずみと乾燥期間 182 日のコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を図-11 に示す。流紋岩 (RG) を除いて、粗骨材の乾燥収縮ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係は相関性が高く、粗骨材の乾燥収縮ひずみが大きくなると、コンクリートの乾燥収縮が大きくなる傾向が認められた。したがって、粗骨材の乾燥収縮特性がコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響は大きいものと考えられる。流紋岩 (RG) は粗骨材収縮ひずみ、比表面積が大きいにもかかわらず、コンク

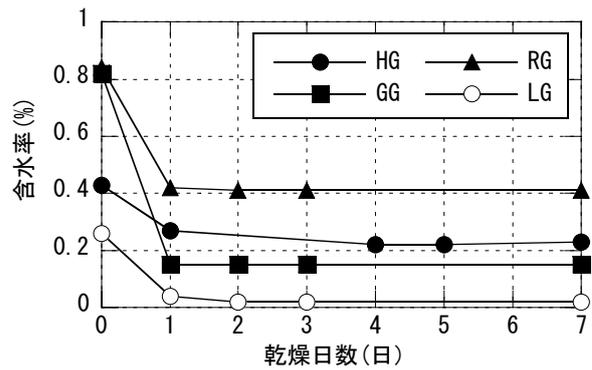


図-5 骨材の含水率の測定例

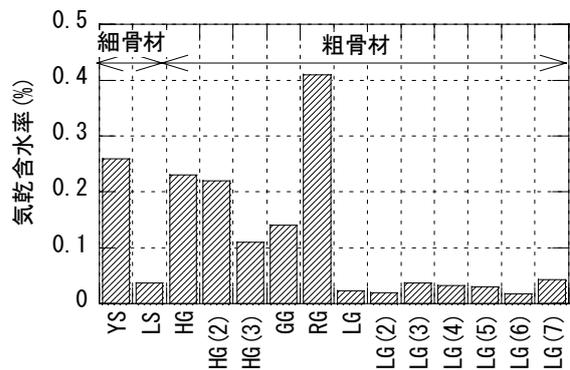


図-6 骨材の気乾含水率

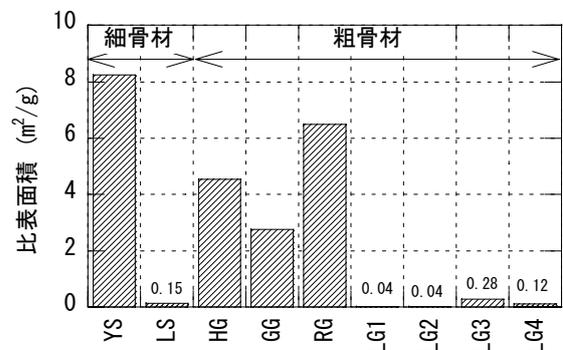


図-7 骨材の比表面積

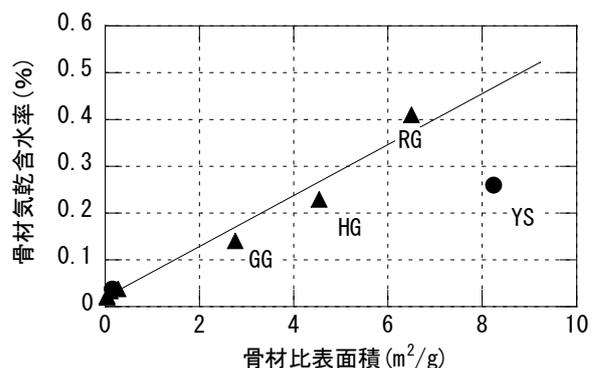


図-8 骨材比表面積と骨材気乾含水率との関係

リートの乾燥収縮ひずみは花崗岩 (GG) を同等になった。この理由については現状では不明であり、さらに検討が必要である。

骨材の比表面積と乾燥期間 182 日のコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係を図-12 に示す。なお、骨材の比表面積は細骨材、粗骨材の比表面積を合せた骨材全体の比表面積であり、式(1)、(2)および(3)より算出した。

$$A_{Total} = \frac{S_{D1} \times A_{S1} + S_{D2} \times A_{S2} + G_D \times A_G}{S_{D1} + S_{D2} + G_D} \quad (1)$$

$$S_{D1} = \frac{S_{S1}}{(1 + W_{S1}/100)} \quad S_{D2} = \frac{S_{S2}}{(1 + W_{S2}/100)} \quad (2)$$

$$G_D = \frac{G_S}{(1 + W_G/100)} \quad (3)$$

ここで、 S_{D1} 、 S_{D2} 、 G_D ：細骨材 1、2 および粗骨材の絶乾質量 (g/m^3)、 S_{S1} 、 S_{S2} 、 G_S ：細骨材 1、2 および粗骨材の表乾質量 (g/m^3)、 W_{S1} 、 W_{S2} 、 W_G ：細骨材 1、2 および粗骨材の吸水率 (%)、 A_{S1} 、 A_{S2} 、 A_G ：細骨材 1、2 および粗骨材の比表面積 (m^2/g)

比表面積が大きくなるほど、コンクリートの乾燥収縮は大きくなる傾向が認められた。しかし、石灰石砕砂と山砂を混合した場合、山砂の混合割合が大きくなると比表面積が大きくなるが、コンクリートの乾燥収縮は同等となった。本研究で使用した山砂 (YS) の場合、比表面積は大きいコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響が小さい可能性が考えられる。

骨材のヤング係数および骨材の乾燥収縮ひずみなどの骨材の特性を考慮したコンクリートの乾燥収縮の代表的な複合モデルに式(4)の馬場式⁸⁾がある。馬場式を用いて本研究で評価したコンクリート乾燥収縮ひずみを試算した。

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = \frac{[1 - (1 - mn)V_a][n + 1 - (n - 1)V_a]}{n + 1 + (n - 1)V_a} \quad (4)$$

$$n = E_a/E_p \quad m = \epsilon_a/\epsilon_p \quad (5)$$

ここで、 ϵ_c 、 ϵ_p ：コンクリートおよびセメントペーストの乾燥収縮ひずみ、 E_a 、 E_p ：骨材およびセメントペーストのヤング係数 (kN/mm^2)、 V_a ：骨材体積比

粗骨材の乾燥収縮ひずみは図-4 に示した実測値を用いた。細骨材の乾燥収縮ひずみは、図-9 および図-10 に示した近似式を用いて骨材の比表面積および骨材の気乾含水率から算出した。セメントペーストの乾燥収縮ひずみは既往の報告⁹⁾を参考にし、普通ポルトランドセメント、W/C50%の場合で 3000×10^{-6} とした。セメントペーストのヤング係数は既往の研究¹⁰⁾から、普通ポルトラン

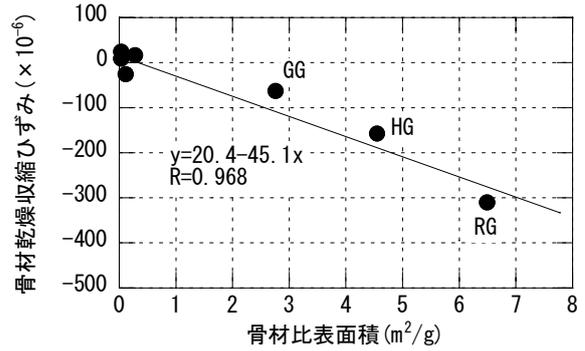


図-9 骨材比表面積と粗骨材乾燥収縮ひずみとの関係

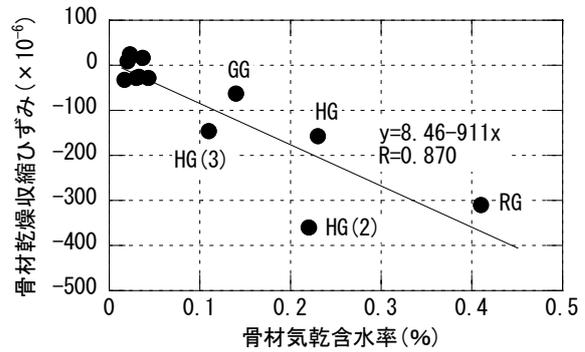


図-10 骨材気乾含水率と粗骨材乾燥収縮ひずみの関係

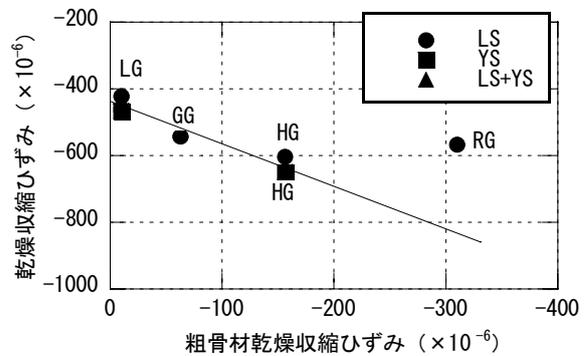


図-11 粗骨材の乾燥収縮ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみとの関係

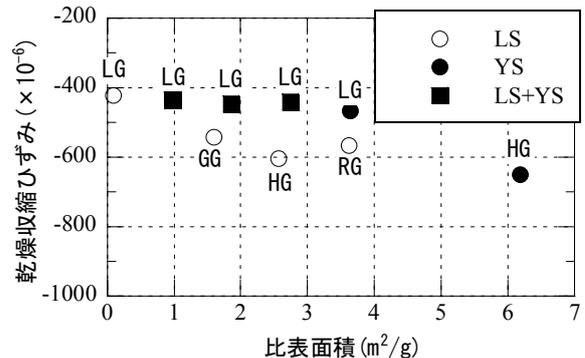


図-12 骨材全体の比表面積と乾燥収縮ひずみの関係

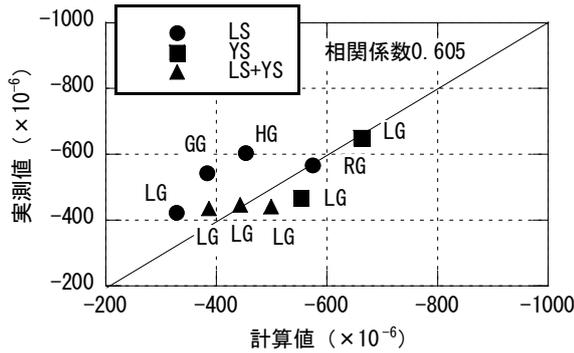


図-13 乾燥収縮ひずみの計算値と実測値との比較
(細骨材の乾燥収縮ひずみ：比表面積から算出した場合)

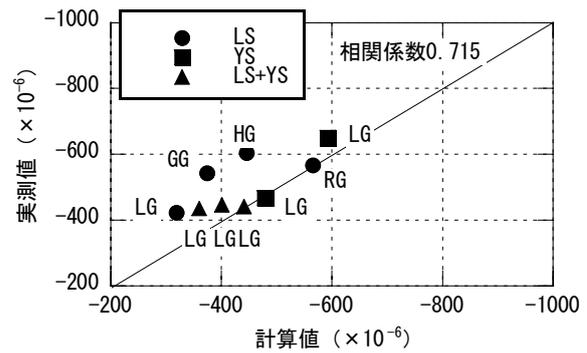


図-14 乾燥収縮ひずみの計算値と実測値との比較
(細骨材の乾燥収縮ひずみ：気乾含水率から算出した場合)

ドセメント，W/C 50%，材齢 28 日として算出し 13.3kN/mm²とした。骨材のヤング係数は細骨材，粗骨材の吸水率から各骨材のヤング係数を算出¹⁰⁾し，各骨材の体積比に応じて骨材全体のヤング係数を求めた。

馬場式より算出したコンクリートの乾燥収縮ひずみの計算値と実測値との関係を図-13 および図-14 に示す。細骨材の乾燥収縮ひずみを骨材の比表面積から算出した場合，計算値と実測値の相関係数は 0.605 となり，その差は平均で約 30×10^{-6} ，最大 (LS-GG) で約 160×10^{-6} であった。

一方，細骨材の乾燥収縮ひずみを骨材の気乾含水率から算出した場合，計算値と実測値の相関係数は 0.715 となり，その差は平均で約 66×10^{-6} で，最大 (LS-GG) で約 170×10^{-6} であった。

以上より，馬場式により骨材の気乾含水率，比表面積を用いてコンクリートの乾燥収縮特性をある程度評価できるものと考えられる。しかし，細骨材の乾燥収縮ひずみの設定については，本研究の範囲では 2 種類の細骨材のみで評価していることから，今後，データの蓄積などによりさらに検討する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮及ぼす影響は大きく，細骨材，粗骨材ともに石灰石を用いた場合の乾燥収縮ひずみが最小となり，約 400×10^{-6} であった。
- (2) 粗骨材の方が細骨材よりコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響が大きい。
- (3) 石灰石砕砂と山砂を混合した場合，石灰石砕砂の混合割合が大きくなるほど，乾燥収縮は小さくなる傾向がある。

- (4) 石灰石粗骨材の乾燥収縮ひずみは著しく小さい。
- (5) 流紋岩粗骨材の乾燥収縮ひずみは比較的大きいが，コンクリートの乾燥収縮ひずみは比較的小さい。
- (6) 骨材の気乾含水率あるいは比表面積からコンクリートの乾燥収縮特性をある程度評価できる。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年版コンクリート標準示方書改定資料，コンクリートライブラリー129，pp.15-17，2007
- 2) 岩清水隆，米澤敏男，井上和政，松本竹史：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材品質の影響に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.1079-1080，1998.11
- 3) H. Tanaka, H.Hashida : Effect of limestone as aggregate on reducing drying shrinkage of concrete, SHRINKAGE AND DURABILITY MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, Vol.2, pp.877-883, 2008.9
- 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，日本建築学会構造系論文集，第 606 号，pp.9-14，2006.8
- 5) 吉兼亨：乾燥収縮ひずみの規制へのレディミクストコンクリート業界の対応，コンクリート工学，Vol.46，No.11，pp.3-8，2008.11
- 6) K. Imamoto, M. Arai : Simplified evaluation of shrinkage aggregate based on BET surface area using water vapor, Journal of Advanced Concrete Technology, pp.69-75, Vol.6, No.1, 2008.2
- 7) 後藤幸正，藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文集，第 247 号，pp.97-108，1976.3
- 8) 岸谷孝一，馬場明生：建設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
- 9) 今本啓一：比表面積と細孔量に基づくセメント系材料の収縮挙動に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.603-608，2007
- 10) 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報告集，Vol.21，No.2，pp.601-606，1999