

石灰石骨材がコンクリートの強度および乾燥収縮特性に及ぼす影響

井上真澄* Carlos Aquino** 三浦弘明** 岡本享久***

Influence of Limestone Aggregate on Strength and Drying Shrinkage of Concrete

by

Masumi INOUE*, Carlos AQUINO**, Hiroaki MIURA** and Takahisa OKAMOTO***

The main objective of this study is to clarify the influence of limestone aggregate on strength and drying shrinkage of concrete. Three kinds of limestone aggregates from different regions of Japan were used. The specimens were mixed with fine or coarse limestone and sandstone. As a result, the strengths and modulus of elasticity of concretes with limestone were larger than those of sandstone concretes. The drying shrinkage of concrete with fine or coarse limestone aggregate decreased clearly regardless of the region of production. Furthermore, the volume change of limestone aggregate in water and drying condition was quite smaller than that of sandstone aggregate. It is thought that the main cause of the reduction of drying shrinkage in concretes with limestone is the volume change of the aggregate itself.

Key words: Limestone aggregate, Drying shrinkage, Strength, Modulus of elasticity, Pore size distribution

1 緒 言

近年、コンクリート構造物の品質確保の観点から、乾燥収縮などによって生じるコンクリートのひび割れ制御への要求が高まりつつある。2007年に土木学会より刊行された「コンクリート標準示方書設計編」¹⁾では、コンクリートの乾燥収縮ひずみの標準値を 1200×10^{-6} (自己収縮: 200×10^{-6} を含む) としている。また、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造の収縮ひび割れ対策指針・同解説」²⁾では、コンクリートの乾燥収縮ひずみ 800×10^{-6} を標準とすることが明記されている。

一般に、コンクリートの乾燥収縮は、配合条件と密接な関係があり、単位水量の上限値の規定は、乾燥収縮の低減を目的の一つとしている。しかし、最近では、骨材の種類(岩種)や品質がコンクリートの乾燥収縮に大きな影響を及ぼすことが広く認識されつつある。

一方、石灰石骨材を用いたコンクリートは、乾燥収縮が小さくなるのが数多くの研究者から報告^{例え 3)}されており、石灰石骨材の使用は乾燥収縮の低減に有効な方法といえる。しかし、その乾燥収縮低減効果は、石灰石の産地や置換対象が細骨材と粗骨材とでは異なる可能性がある。また、骨材によるコンクリートの乾燥収縮低減メカニズムについては、骨材単体の乾燥収縮や比表面積に着目した研究^{4),5)}などが行われているが、未だ石灰石骨材については十分に解明されていないのが現状である。

以上のような背景を踏まえ本研究では、石灰石骨材がコンクリートの強度および乾燥収縮に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、産地の異なる3種類の石灰石骨材を使用して、これを細骨材および粗骨材に置換したコンクリートの強度特性と乾燥収縮特性について実験的検討を行った。

2 実験概要

2・1 使用材料

実験に使用した石灰石骨材は、我が国の石灰石鉱床分布⁶⁾をもとに産地の異なる3種類を選定した。比較用骨材としては、硬質砂岩砕砂および同砕石を使用した。Table 1に石灰石の物理的性質を、Table 2にその化学成分を示す。いずれの石灰石も酸化カルシウム(CaO)の含有量が51.9~54.7%(CaCO₃: 92.6~97.6%)と高純度のものである。石灰石骨材の物理的性質は、硬質砂岩と比較した場合、細・粗骨材とも表乾密度が大きく、また吸水率は小さい。その他、セメントには普通ポルトランドセメント[C](密度: 3.16g/cm³, 比表面積 3300cm²/g)を、混和剤にはAE減水剤[Ad₁](主成分: リグニンスルホン酸塩とポリオール複合体)とAE助剤[Ad₂](主成分: アルキルアリルスルホン酸塩)を使用した。

2・2 コンクリートの配合

Table 3にコンクリートの示方配合を示す。配合は、骨材の影響を把握するために、水セメント比は55%、単位水量は175kg/m³、細骨材率は46.0%で一定とした。No.1

+ 原稿受理 平成 年 月 日 Received

* 正 会 員 北見工業大学工学部社会環境工学科 〒090-8507 北見市公園町, Dept. of Civil and Environmental Eng., Kitami Inst. of Tech., Koencho, Kitami, 090-8507

** 非 会 員 立命館大学院理工学研究科 〒525-8577 草津市野路東, Graduate School of Sci. and Eng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

*** 正 会 員 立命館大学理工学部環境システム工学科 〒525-8577 草津市野路東, Dept. of Environmental Systems Eng., Ritsumeikan Univ., Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

Table 1 Mechanical properties of aggregates

	Symbol	Specific gravity (g/cm ³)	Water absorption (%)	Fineness Modulus	400kN Crushing value (%)
Fine aggregate [S]	SN	2.65	1.84	2.79	
	SL1	2.67	0.99	2.72	
	SL2	2.74	0.87	2.75	
	SL3	2.67	1.17	2.85	
Coarse Aggregate [G]	GN	2.66	1.30	6.75	10.4
	GL1	2.71	0.31	6.61	19.8
	GL2	2.77	0.81	6.39	15.6
	GL3	2.70	0.34	6.72	20.9

Table 2 Chemical components of limestone aggregates

Type	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅
1	54.7	0.68	0.26	0.017	0.066	0.000
2	51.9	1.74	3.28	0.150	0.080	0.017
3	52.5	0.46	4.15	0.065	0.119	0.005

Table 4 Test items

Test	JIS	Size of specimen
Slump	JIS A 1101	—
Air	JIS A 1128	—
Compressive strength	JIS A 1108	φ 100×200mm
Modulus of rupture	JIS A 1106	100×100×400mm
Tensile strength	JIS A 1113	φ 150×150mm
Modulus of elasticity	JIS A 1149	φ 100×200mm
Drying shrinkage	JIS A 1129-2	100×100×400mm
Pore size distribution	—	5×5×5mm

は、硬質砂岩砕砂 (SN) と硬質砂岩砕石 (GN) を使用した。No.2~No.4 は産地の異なる石灰石砕砂 (SL1~SL3) と硬質砂岩砕石 (GN) を、No.5~No.7 は硬質砂岩砕砂 (SN) と産地の異なる石灰石砕石 (GL1~GL3) を使用した。No.8 は、石灰石砕砂 (SL3) と石灰石砕石 (GL3) を両方使用した。目標スランプは 8±2cm、目標空気量は 5±1%とし、AE 減水剤と AE 助剤の添加量により調整した。

2・3 試験項目および試験方法

Table 4 に試験項目を示す。フレッシュコンクリートのスランプおよび空気量は JIS に準拠して行った。コンクリート供試体は、打設後、材齢 1 日で脱型し、所定の試験材齢 (7, 28, 91 日) まで水中養生 (20±1℃) を行った。硬化コンクリートの各種試験は、JIS に準拠して行った。

Table 3 Mix proportions of concrete

No.	Symbol	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)				Ad ₁ (ml/m ³)	Ad ₂ (ml/m ³)	Slump (cm)	Air (%)
				W	C	S	G				
1	SN-GN	55	46.0	165	300	838	987	1050	2400	7.5	5.8
2	SL1-GN					848	987	300	900	8.0	4.5
3	SL2-GN					870	987	300	900	8.0	4.9
4	SL3-GN					848	987	300	1200	9.0	3.8
5	SN-GL1					838	1010	600	900	8.0	6.5
6	SN-GL2					838	1036	1200	780	8.5	4.9
7	SN-GL3					838	1006	600	900	7.0	4.9
8	SL3-GL3					848	1006	150	300	9.5	2.8

Note; Ad₂ is 1% solution

コンクリートの乾燥収縮試験は、100×100×400mm の供試体を材齢 7 日まで標準水中養生した後、20±1℃、RH60±5%の環境下で実施した。乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129 のコンタクトゲージ法で行った。

コンクリートの細孔径分布の測定は、水銀圧入法により行った。供試体は、打設時にコンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルを用いて作製した。これを所定の材齢 (7, 28, 91 日) まで養生し、供試体の中央部から 5mm 角程度になるように切り出し、測定用試料とした。また、切り出した試料をアセトンにより水和停止して真空乾燥後、試験に供した。試験は、各要因に対して 2 試料で測定し、その平均値を算出した。

その他、骨材粒子単体の乾燥収縮を測定するため、骨材表面に 2 軸ひずみゲージを貼り付けた粗骨材を 7 日間水中に浸漬した後、20±1℃、RH60±5%の環境下に静置してひずみの経時変化を測定した。なお、骨材の吸水によるひずみゲージ裏面からの湿気の浸透を防ぐため、ひずみゲージ貼り付け箇所に接着剤を塗布して、硬化後にひずみゲージを貼り付けた。さらに、ひずみゲージを防水するため、ひずみゲージ表面をコーティング剤にて被覆した。骨材 1 種類に対して 5 試料で測定し、その平均値を算出した。

3 実験結果および考察

3・1 コンクリートの強度および弾性係数

Fig.1 に各種強度および静弾性係数の結果を示す。石灰石骨材を用いたコンクリートは、その産地によって若干の変動はあるものの、砂岩砕砂と砂岩砕石を用いた比較用コンクリートよりも全体的に強度が高くなる傾向を示している。材齢 28 日の圧縮強度で約 1.0~1.1 倍、同引張強度で約 1.1~1.2 倍の強度増加を示した。また、曲げ強度では約 1.1~1.4 倍、静弾性係数では 1.1~1.3 倍と強度増加率が若干高い結果となった。一般に石灰石骨材を用いたコンクリートは骨材とペーストとの付着が良いことから強度の発現が良好であるとの報告⁷⁾があり、本実験結果もそれらと類似した傾向を示した。特に、曲げ強度での強度増進が顕著であるとの報告⁸⁾もあるが、本実験においても曲げ強度の強度増加率は高く、石灰石骨材とペーストとの付着の影響が顕著に現れたと推察される。

置換方法の違いによる影響は、曲げ強度において粗骨材置換した場合に強度が幾分高くなっているが、他の強

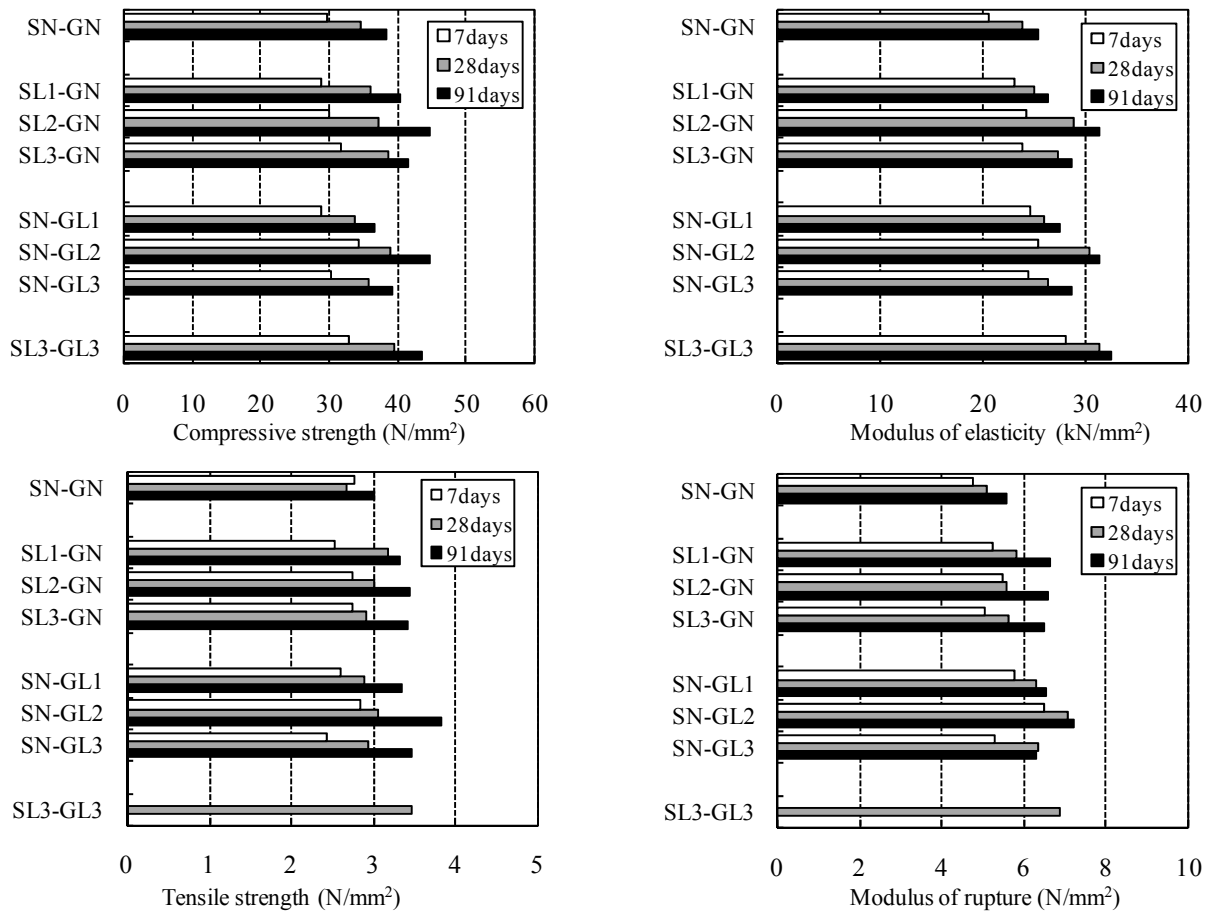


Fig.1 Strengths and modulus of elasticity

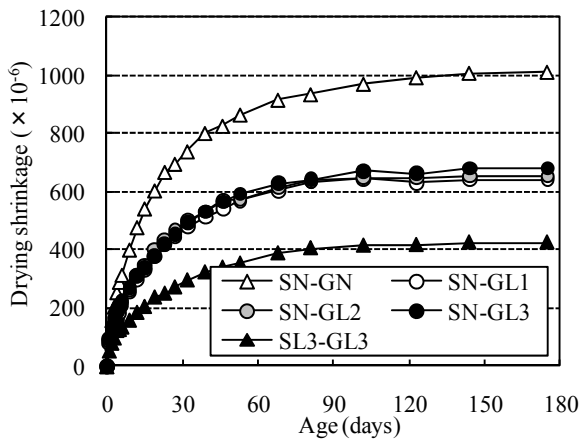


Fig.2 Drying shrinkage of concrete by using limestone coarse aggregate

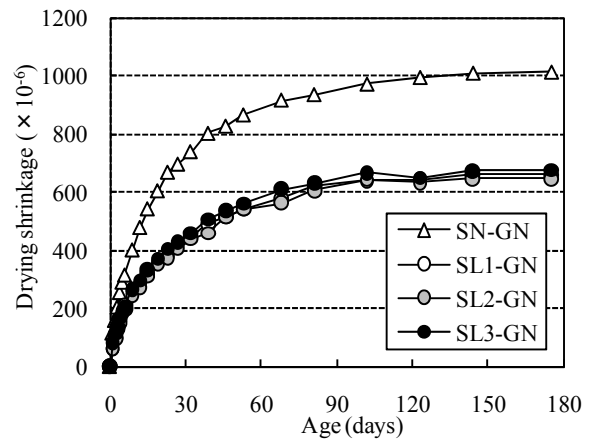


Fig.3 Drying shrinkage of concrete by using limestone fine aggregate

度および静弾性係数については大きな差異は観察されずほぼ同程度の強度を発現している。一方、石灰石骨材を細・粗骨材に全置換したコンクリートは、各種強度および静弾性係数とも最も大きな値を示した。

石灰石骨材の種類に着目すると、細骨材置換および粗骨材置換ともに、石灰石骨材 Type2 を使用した場合に各種強度、静弾性係数が大きくなる傾向を示している。これは、Table 2 の密度や破砕値などの物性値が示すように、Type2 は他の石灰石よりも骨材強度に優れることが原因と考えられる。

3・2 乾燥収縮ひずみの経時変化

Fig.2 に石灰石砕石を置換したコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。石灰石砕石を用いたコンクリートは、石灰石の種類に関わらずコンクリートの乾燥収縮が約 35%低減された。

Fig.3 に石灰石砕砂を置換したコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。石灰石砕砂を用いたコンクリートは、石灰石砕石の場合と同様、石灰石の種類に関わらずコンクリートの乾燥収縮が低減された。既往の報告では、石灰石砕砂による乾燥収縮の低減効果について、

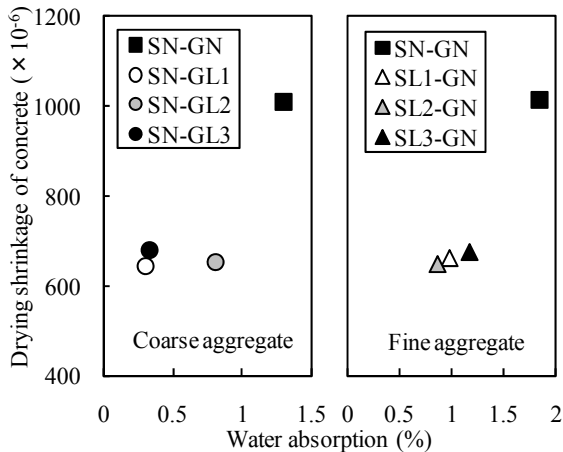


Fig.4 Relationship between drying shrinkage of concrete and water absorption

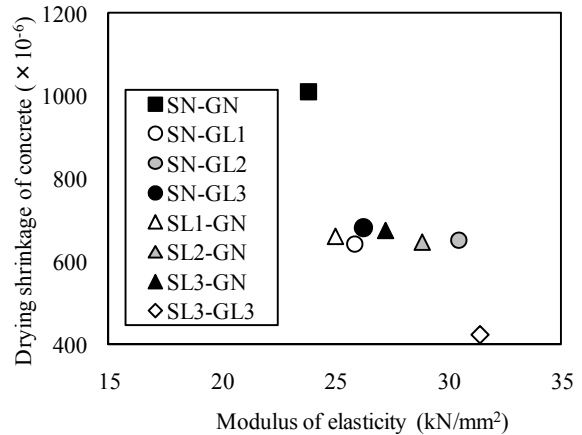


Fig.5 Relationship between drying shrinkage of concrete and modulus of elasticity

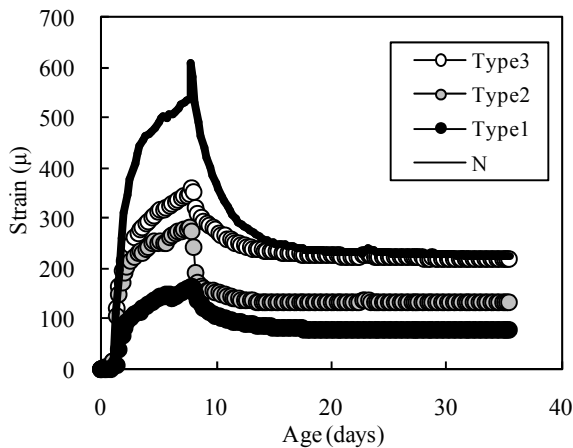


Fig.6 Volume change of aggregate

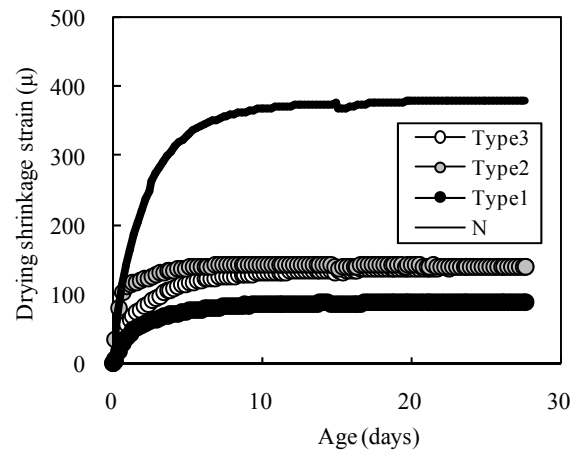


Fig.7 Drying shrinkage of aggregate

明確な傾向が認められないという報告⁹⁾や、低減効果はあるがその効果は石灰石砕石に比較して小さいなどの報告¹⁰⁾がある。本研究では、石灰石砕砂を細骨材に全置換したコンクリートを研究対象としているが、乾燥日数6ヶ月時点で約35%低減しており、石灰石砕石を置換した場合と同様に明確な収縮低減効果が確認された。

Fig.2にはType3の石灰石砕砂と石灰石砕石を両方したデータも示す。細・粗骨材に石灰石骨材を使用することにより、砂岩砕砂・砕石を使用したコンクリートに対して約46%乾燥収縮が低減された。

このように石灰石の産地や細・粗骨材の違いがコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は比較的小さく、石灰石砕砂および石灰石砕石を使用することにより、コンクリートの乾燥収縮を低減することが可能である。

3・3 乾燥収縮に及ぼす各種要因の影響

一般にコンクリートの乾燥収縮に影響する要因と考えられる骨材の吸水率とコンクリートの弾性係数との関係をFig.4およびFig.5に示す。吸水率については、全体として骨材の吸水率が小さいほどコンクリートの乾燥収縮が小さくなる傾向は読み取れるが、石灰石骨材を使用した場合に限ってみると、その相関は高いとは言え

ない。同様に弾性係数との関係についても、コンクリートの弾性係数が大きい場合に、コンクリートの乾燥収縮も低減する傾向にあるが、石灰石骨材を用いたコンクリートだけに着目した場合には、弾性係数との相関性は低い。したがって、骨材の吸水率やコンクリートの弾性係数だけでは、石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮の予測は困難と考えられる。

3・4 石灰石骨材の収縮特性の影響

コンクリートの乾燥収縮の要因の一つとして、近年骨材単体の収縮特性の影響が指摘されている^{4),11),12)}。本研究では、乾湿の変化に伴う石灰石骨材(15~20mm)の容積変化の経時的に測定した。Fig.6に水中養生から乾燥養生を通じた全経時変化を示す。骨材は全種類において、水中養生時に吸水膨張した。砂岩砕石の場合にその膨張量が最も大きく、次いでType3>Type2>Type1の順であった。Fig.7には湿潤状態(乾燥開始点)を基準とした骨材の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。骨材の乾燥収縮ひずみは乾燥開始後1週間程度でほぼ一定値を推移している。乾燥日数28日の時点で、砂岩砕石は乾燥収縮ひずみが約380μを示しているのに対して、石灰石砕石のひずみ量はその1/3程度であり、乾燥に伴う容積変化が

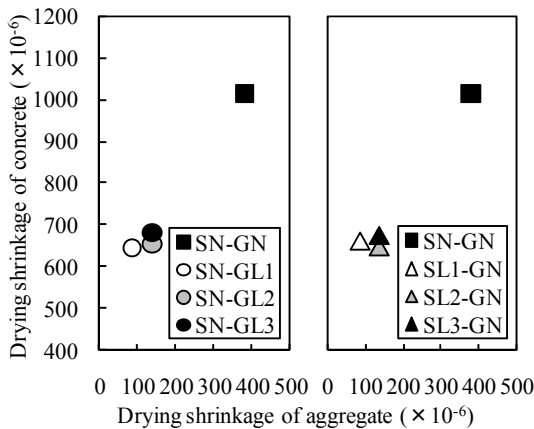


Fig.8 Relationship between drying shrinkage of concrete and aggregate

非常に小さいことがわかる。

Fig.8に各骨材の乾燥収縮ひずみ（乾燥日数28日）とコンクリートの乾燥収縮ひずみ（乾燥日数180日）の関係を示す。データの範囲に偏りがあるため、一概に相関性についての考察は難しい。しかし、骨材単体の乾燥収縮ひずみが小さい石灰石骨材を使用した場合、コンクリートの乾燥収縮も小さくなる傾向が認められた。石灰石骨材以外の岩種を対象とした既報告^{4),11)}においても、骨材単体の乾燥収縮が小さい骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮は小さくなる傾向を示しており、石灰石骨材単体の容積変化の影響が、コンクリートの乾燥収縮に直接影響を及ぼしていることが示唆される。

砂岩砕石と石灰石砕石の各単体の乾燥収縮に着目すると、そのひずみ差は約240~290 μ であるのに対して、コンクリートとしての差は約330~360 μ であった。その差は比較的小さいものであり、石灰石骨材単体の収縮低減量がコンクリートにおける収縮低減量の大部分を占めていると推察される。その他、コンクリートの乾燥収縮に影響ある要因としては、曲げ強度での強度増加率が大きくなったように骨材とペースト間の付着性が良好であること⁷⁾や骨材によるモルタルの容積変化を拘束効

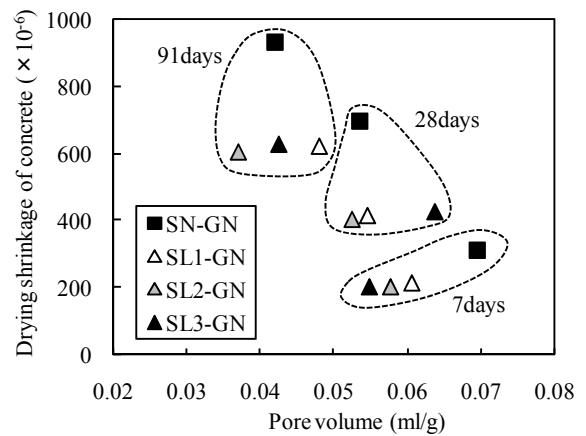


Fig.10 Relationship between drying shrinkage of concrete and pore volume (30-2000nm)

果も無視できない。しかし、石灰石砕石によるコンクリートの乾燥収縮の低減は、石灰石骨材単体の乾燥収縮が小さいことが主要因であると考えられる。

3・5 石灰石砕砂の影響

本研究では、石灰石砕砂の使用による乾燥収縮の低減効果は、石灰石砕石と同様に確認された。石灰石砕砂による低減効果は、コンクリート中の粗骨材の除いたモルタル部分の収縮量が直接的に影響していると考えられる。そこで、モルタル硬化体の細孔構造への影響を把握するため、石灰石砕砂を用いたコンクリートをウェットクリーニングして得られたモルタル試料について細孔径分布の測定を行った。Fig.9に各材齢における細孔径分布を示す。乾燥収縮に寄与する毛細管空隙の直径については、直径30~2000nmの毛細管空隙の寄与が大きいとの報告がある¹³⁾。Fig.10には各乾燥日数における30~2000nmの細孔量とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係を示す。石灰石骨材を用いたコンクリートでは、骨材界面においてカルシウムカーボアルミネート等の水和物が生成されることにより、細孔量が少なくなるとの報告¹⁴⁾がある。材齢7日においては、石灰石砕砂を用いた場合に細孔量が少なくなっているが、28日と91日

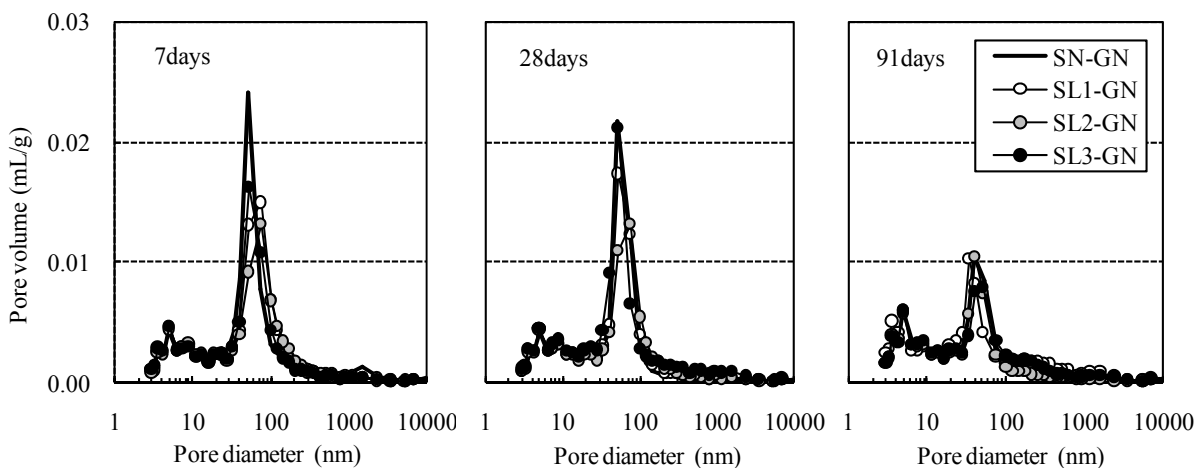


Fig.9 Pore size distribution

では石灰石砕砂の場合の方が逆に細孔量が多くなるケースもある。石灰石砕砂間で比較をした場合でも、乾燥収縮は同程度にもかかわらず、細孔量には大きな差異があり、石灰石砕砂によるモルタルの細孔構造への明確な相関は認められなかった。

このように、本実験の結果だけでは石灰石砕砂によるモルタル硬化体の細孔構造への影響を明確にすることは難しいが、石灰石砕砂によるモルタル硬化体の細孔構造の変化よりも、前述の石灰石骨材単体の収縮量が小さいことがコンクリートの乾燥収縮低減に強く関係していると推察される。

4 結 言

本研究では、石灰石骨材がコンクリートの強度および乾燥収縮特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、産地の異なる3種類の石灰石骨材を使用して、これを細骨材および粗骨材に置換したコンクリートの強度特性と乾燥収縮特性について実験的検討を行った。本研究の範囲で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 石灰石骨材を用いたコンクリートは、同一水セメント比でも硬質砂岩骨材を使用したものに比較して各種強度および弾性係数が増加する傾向を示した。特に、曲げ強度および弾性係数での増加率が顕著であった。
- (2) 石灰石骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響は大きく、細骨材および粗骨材に全置換した場合には硬質砂岩骨材を使用した場合に比べ、約46%の低減効果が認められた。
- (3) 石灰石骨材の産地や細・粗骨材の違いがコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は比較的小さく、石灰石砕砂および石灰石砕石を使用することにより、コンクリートの乾燥収縮が低減された。
- (4) 石灰石骨材は乾湿の変化に伴う容積変化が小さく、乾燥時の収縮ひずみ量は硬質砂岩骨材の約1/3であった。石灰石骨材によるコンクリートの乾燥収縮の低減は、石灰石骨材単体の容積変化が小さいことが強く関係していると考えられる。

本研究を実施するにあたりご協力いただいた太平洋セメント(株)小川彰一氏に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Japan Society of Civil Engineering, "Standard Specifications for Concrete Structures -2007, Design"(2007).
- 2) Architectural Institute of Japan, "Recommendations for Practice of Crack Control in Reinforced Concrete Buildings (Design and Construction)"(2006).
- 3) H. Hyodo, M. Tanimura, H. Fujita and S. Banchi, "Influence of Limestone Aggregate on Shrinkage Properties of Concrete", Proceedings of the Japan

- Concrete Institute, Vol.31, No.1, pp.571-576 (2009).
- 4) M. Kasuya, K. Hiwatashi, H. Takada and H. Morimoto, "Properties of Drying Shrinkage of Aggregate for Concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.31, No.1, pp.559-563 (2009).
- 5) K. Imamoto, S. Ishii and M. Arai, "Drying Shrinkage Properties of Concretes with Several Kinds of Aggregates and the Influence of Specific Surface Areas of the Aggregates", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, No.606, pp.9-14 (2006).
- 6) S. Kawada, "Limestone Resource in Japan", Ceramic Data Book 1982", pp.93 (1982) the Industrial products technology Association.
- 7) Limestone Association of Japan, "Limestone Aggregate and Concrete"(2005).
- 8) A. Obatake, M. Turuta and H. Nakamura, "The Strength Characteristic of Concrete Using Crushed Lime Stone Aggregate", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No.1, pp.93-99 (2004).
- 9) T. Ozawa, A. Nishida and H. Hashida, "Early Evaluation Method for Drying Shrinkage of Concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.29, No.1, pp.591-596 (2007).
- 10) H. Hyodo, H. Fujita, M. Tanimura and S. Banchi, "Part 2. Evaluation of Drying Shrinkage Properties on Concrete Using Limestone Aggregate", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, A-1 Materials and Construction, pp.269-270 (2009).
- 11) K. Tatematsu, M. Arai, T. Iwashimizu, Y. Kimura, H. Urano, K. Imamoto and R. Motoki, "Experimental Study on Drying Shrinkage and Pore Size Distribution of Aggregate in Kansai Area", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, No.549, pp.1-6 (2001).
- 12) H. Tanaka and H. Hashida, "Influence of Aggregate Type on Drying Shrinkage of Concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.31, No.1, pp.553-558 (2009).
- 13) H. Uchikawa, S. Hanehara and D. Sawaki, "Structure Change of Hardened Mortar by Drying", 3rd NCB International Seminar (New Dehli India), Vol.4, pp.IV-1-12 (1991).
- 14) Japan Cement Association, "A Study on Limestone Aggregate Concrete", Report of the Technical Committee of Concrete, F-46 (1994)