

論文 微粒分が多い石灰石骨材を用いたコンクリートの配合と物性

大西 利勝*1・井上 正一*2・黒田 保*3

要旨: 石灰石骨材は粉化しやすい特徴があり、輸送中および積卸し工程において磨砕され微粒分量が増えて、局部的に多くなることもある。一方、石灰石微粉末は混和材料として使用実績が多く、フレッシュコンクリートの性状を改善すると言われている。そこで、JIS の上限値の 2 倍を超える範囲まで微粒分量を含む石灰石骨材を用いたコンクリートに対して、その配合設計、フレッシュ性状、硬化後の力学特性、乾燥収縮、凍結融解抵抗性を中心に検討した。その結果、適正な配合設計を行えば、JIS の上限値の 2 倍程度までの微粒分量であれば、骨材中の微粒分量はコンクリートの物性に悪影響を及ぼさないことが明らかになった。

キーワード: 石灰石骨材, 微粒分, 配合, ブリーディング, 強度, 乾燥収縮, 凍結融解抵抗性

1. はじめに

骨材の不足やコンクリートの乾燥収縮あるいはアルカリ骨材反応に関する問題に対処するため、コンクリートに石灰石骨材を使用する生コン工場が増えている。また、石灰石骨材は大量にかつ長距離輸送され、船舶への積み込み前後の積卸し工程数が多くなるため、石灰石表面が磨砕され微粒分量が多くなる傾向にある。ちなみに、中国地方整備局が中国地区の生コン工場を対象に石灰石細骨材中の微粒分量を調査した結果によれば、微粒分量は最大 24.6%にも達していた。

このような状況の中、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」が 2009 年に改正され、微粒分量の上限値は、粗骨材に対し 3%から 5%に、細骨材に対しては 7%から 9%に緩和された。一方、粉体系高流動コンクリートには、石灰石骨材の微粒分とほぼ同品質の石灰石微粉末が多量に含まれており、これまでに多くの使用実績がある。

そこで、本研究では、JIS の上限値をはるかに超える微粒分量を含む石灰石骨材を用いたコンクリートを対象とした。コンクリートに含まれる微粒分量が、配合設計、適正な配合設計に基づいて作製したコンクリートのフレッシュ性状、硬化後の力学特性、乾燥収縮、凍結融解性抵抗性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に、使用材料を、表-2 に、微粒分量が搬入された状態の骨材の物理的性質を、表-3 に、石灰石骨材に含まれる微粒分と微粒分量調整に用いた石灰石微粉末の物理的性質を示す。表-2 より、石灰石細・粗骨材はともに JIS の品質基準を満たすこと、石灰石粗骨材は

BS 規格による 400kN 破砕値が普通砕石に比べて大きく、破砕しやすい特徴がある。砕石の微粒分が砕砂のそれよりもやや細かいのは、砕砂の微粒分はクラッシャーによる破砕工程で発生したものがほとんどであるのに対して、砕石中のそれは輸送工程で骨材同士が磨砕されて発

表-1 使用材料

材料	種類・産地・主成分
セメント	高炉セメント B 種 (密度: 3.04 g/cm ³)
細骨材	Y 県産石灰石砕砂
	普通砂: 陸砂と砕砂の混合砂
粗骨材	Y 県産石灰石砕石
	普通砕石: 安山岩砕石
微粒分量調整用粉体	O 社製石灰石微粉末
化学混和剤	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸系) AE 助剤 (アルキルエーテル系)
練混ぜ水	上水道水

表-2 骨材の物理的性質

骨材	種類	物理的性質						
		表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	粒形判定実積率 (%)	400kN 破砕値 (%)	微粒分量 (%)
細骨材	普通砂 ¹⁾	2.67	2.64	1.36	2.88	57.0	-	3.9
	石灰石砕砂	2.68	2.67	2.61	2.51	56.1	-	2.2
粗骨材	普通砕石 ²⁾	2.75	2.73	0.61	6.79	57.3	9.7	0.0
	石灰石砕石	2.68	2.67	0.55	6.41	59.7	22.3	2.6
細骨材の品質基準 ³⁾		-	≥2.50	≤3.5	-	≥54	-	≤9.0
粗骨材の品質基準 ³⁾		-	≥2.50	≤3.0	-	≥56	-	≤3.0 ⁴⁾

1) 砕砂と陸砂の混合砂, 2) 安山岩砕石, 3) JIS A 5005
4) 砕石の粒形判定実積率が 58% 以上の場合 5.0% まで緩和してもよい

表-3 石灰石骨材の微粒分と微粒分量調整用石灰石微粉末の物理的性質

種類	密度 (g/cm ³)	ブレーン比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)
石灰石砕砂中の微粒分	2.68	5070	15.7
石灰石砕石中の微粒分	2.68	6720	12.7
調整用石灰石微粉末	2.68	5100	15.5

*1 宇部興産株式会社 技術開発研究所 コンクリート研究グループリーダー 工修 (正会員)

*2 鳥取大学 大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 鳥取大学 大学院 工学研究科准教授 工博 (正会員)

生する細かなものが多くなるためと推察される。

2.2 コンクリートの種類と配合

表-4に、コンクリートの種類と骨材の組合せを示す。コンクリートの種類は粗・細骨材ともに普通骨材を用いたNコンクリート（以下Nと表記）、細骨材には普通砂を、粗骨材には石灰石を用いたNLコンクリート（以下NLと表記）、粗・細骨材とも石灰石を用いたLLコンクリート（以下LLと表記）の3種類とした。なお、石灰石微粒分量は、NLにおいては石灰石粗骨材の2.6（搬入時の状態）、7.0、12.0、16.0%の4水準を、LLにおいては石灰石細骨材と石灰石粗骨材に対して、それぞれ2.2と2.6%（搬入時の状態）、JISの上限値の9.0と5.0%、JISの上限値の2倍の18.0と10.0%の3水準とした。この場合、石灰石粗骨材および石灰石細骨材に含まれる石灰石微粒分量は搬入時の石灰石骨材を用い、微粒分の不足は石灰石微粉末を添加することにより調整した。

2.3 配合条件

水セメント比は45、55、65%の3水準（ただし、NL16は55%のみ）を設定し、スランブは8.0±1.5cm、空気量は4.5±0.5%とした。なお、細骨材率は3.1節で決定された最適s/aとし、AE減水剤添加率は全ての配合において一定（単位セメント量×0.25%）とした。

2.4 コンクリートの練混ぜ方法および試験方法

コンクリートの練混ぜは、容量50ℓの二軸強制練りミキサを用い、セメント、細骨材および粗骨材を投入して30秒間空練りを行った。その後、水および混和剤を投入して90秒間練り混ぜた。

練混ぜを完了したコンクリートに対して、フレッシュ状態での試験としてスランブ、空気量、ブリーディング、凝結試験を、硬化後の試験として圧縮強度、乾燥収縮および凍結融解試験を行った。なお、スランブ試験はJIS A 1101に、空気量試験は、JIS A 1128に、ブリーディング試験はJIS A 1123に、圧縮強度試験はJIS A 1108に従って行った。

乾燥収縮試験はJIS A 1129-2:2001「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法 第2部：コンタクトゲージ方法」に従って行った。供試体には10×10×40cmの角柱を用い、材齢1日で脱型し、20±1℃の水中にて養生し、材齢7日より20±1℃、湿度60±5%の恒温恒湿室に静置して乾燥した。

凍結融解試験は、JIS A 1148:2001「コンクリートの凍結融解試験方法（A法）」に従って行った。

3. 実験結果および考察

3.1 石灰石骨材中の微粒分量が配合におよぼす影響

(1) 最適細骨材率（最適s/a）

図-1に、単位水量(W)を一定、スランブ8.0±1.5cm、

表-4 コンクリートの種類と骨材の組合せ

コンクリートの種類	記号	骨材種類・微粒分量			
		細骨材		粗骨材	
普通コンクリート	N			普通碎石	0%
石灰石コンクリート (NL)	NL3	普通砂	3.9%	石灰碎石	2.6%
	NL7				7.0%
	NL12				12.0%
	NL16				16.0%
石灰石コンクリート (LL)	LL0	石灰砕砂	2.2%	石灰碎石	2.6%
	LL1				9.0%
	LL2	18.0%	10.0%		

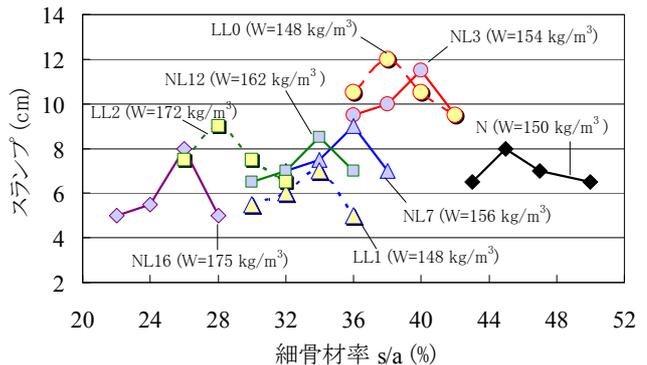


図-1 コンクリートの最適細骨材率 (W/C : 55%)

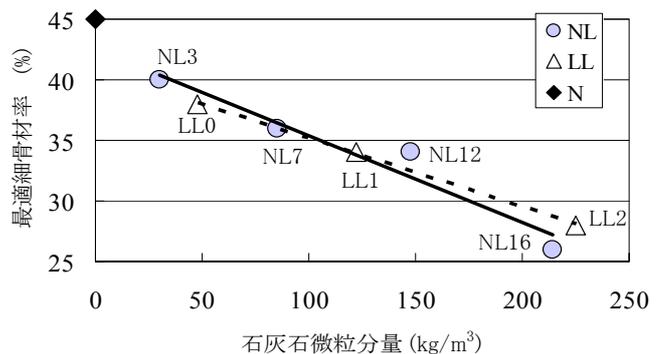


図-2 石灰石微粒分量と最適細骨材率 (W/C : 55%)

表-5 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				AE 減水剤 (C×%)		
			W	C	S			G	
					普通砂	石灰砕砂		普通碎石	石灰碎石
N	45	43	154	342	790	-	1079	-	
	55	45	150	273	859	-	1082	-	
	65	47	150	231	915	-	1063	-	
NL3	45	38	152	338	702	-	-	1150	
	55	40	148	269	767	-	-	1155	
	65	42	148	228	821	-	-	1138	
NL7	45	34	154	342	625	-	-	1218	
	55	36	154	280	681	-	-	1216	
	65	38	152	234	737	-	-	1206	
NL12	45	32	166	369	570	-	-	1217	
	55	34	160	291	635	-	-	1237	
	65	36	160	246	686	-	-	1225	
NL16	55	26	175	318	469	-	-	1339	
	45	36	144	320	-	681	-	1210	
	55	38	142	258	-	741	-	1210	
LL0	65	40	142	218	-	794	-	1192	
	45	32	154	342	-	590	-	1255	
	55	34	152	276	-	649	-	1260	
LL1	65	36	152	234	-	701	-	1245	
	45	26	174	387	-	456	-	1297	
	55	28	170	309	-	513	-	1319	
LL2	65	30	170	262	-	562	-	1311	

空気量 $4.5 \pm 0.5\%$ のもとで、 s/a のみを変化させた場合に得られるスランブを示す。なお、微粒分量が異なる石灰石骨材を用いた場合の骨材量とは、石灰石細・粗骨材に対してそれぞれの骨材に含まれる微粒分量を加えたものを細骨材量、粗骨材量として整理している。図-1より、いずれのコンクリートにおいてもスランブの挙動は上に凸な形状を呈し、同一単位水量に対してスランブが最大となる s/a (最適 s/a) が存在することがわかる。

図-2は、図-1の結果に基づき、水セメント比55%のコンクリートに対して、骨材中に含まれる石灰石微粒分量と最適細骨材率との関係を示したものである。図より、NLおよびLLの最適細骨材率は、Nよりも小さいこと、石灰石微粒分量の増加に伴って小さくなること、がわかる。

以下の試験においては、水セメント比55%以外の任意の水セメント比における最適細骨材率は土木学会のコンクリート示方書の考え方、すなわち、 $W/C=5\%$ の増減に対して s/a を1%増減させるという考え方に基づき、下式より決定される $(s/a)_{W/C}$ の値を用いた。

$$(s/a)_{W/C} = (s/a)_{W/C=55} + 1 / (W/C - 55) \quad (1)$$

ここに、 $(s/a)_{W/C=55}$ は、実験によって決定した水セメント比55%における最適細骨材率(図-1の値)である。

スランブ $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 0.5\%$ 、最適 s/a のもとで試練りによって決定されたコンクリートの示方配合を表-5示す。

(2) 単位水量および AE 助剤量

図-3に、微粒分量と単位水量との関係を示す。NLおよびLLにおける単位水量は、細骨材の種類は異なるが、いずれのコンクリートも石灰石微粒分量が 10kg/m^3 増加するごとに 1.5kg/m^3 ほど増加し、JIS規格値の2倍の微粒分量を含む場合でも、中国地区の生コン工場における単位水量の平均値 169kg/m^3 とほぼ同等の 170kg/m^3 程度に抑えられた。また、微粒分量が 100kg/m^3 以下では、LLはN、NLよりも単位水量が若干少なくなった。

図-4に、空気量4.5%を得るために必要なAE助剤量とコンクリートの骨材中に含まれる石灰石微粒分量との関係を示す。NLおよびLLにおけるAE助剤量はいずれも骨材中に含まれる微粒分量の増加に伴って増加すること、細・粗骨材ともに石灰石を用いたLLにおけるAE助剤量は細骨材に普通砂を用いたNLよりも少なく、微粒分量の増加に伴い、両者の差は大きくなること、がわかる。これは、表-3より明らかのように、石灰石砕砂中の微粒分のブレン比表面積は石灰石砕砂中のそれよりも大きく、混和剤を多く吸着することなどから、同一微粒分量においてはNLのAE助剤量がLLよりも多くなったと考えられる。なお、石灰石微粉末が多いNL16およびLL2についてもAE助剤量は0.005%以下で標準的

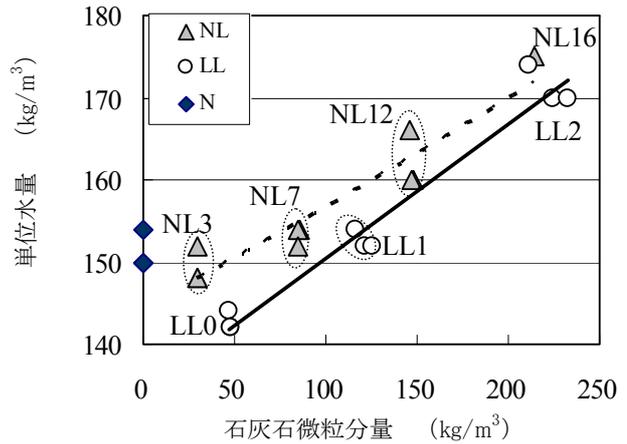


図-3 石灰石微粒分量と単位水量との関係

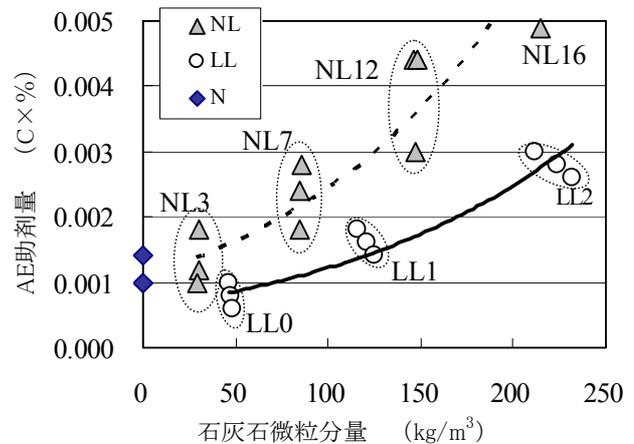


図-4 石灰石微粒分量と AE 助剤との関係

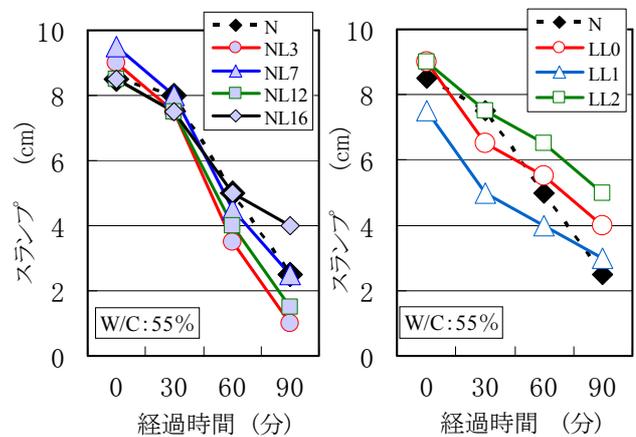


図-5 スランブの経時変化

な使用量の範囲内であり、問題ないといえる。

3.2 フレッシュコンクリートの性状

(1) スランブの経時変化

図-5に、水セメント比55%のコンクリートにおけるスランブの経時変化を示す。NL16の60分以降のスランブロスが小さくなった例外を除けば、NLとNのスランブの経時変化は同等とみなせる。また、LLのスランブロスはNのそれと同等ないしはやや小さいといえる。

以上の結果を総合判断すると、石灰石骨材中の微粒分

はスランプの経時変化にほとんど影響を及ぼさず、スランプロスに関しては、微粒分量が NL においては 16% 程度まで、LL では JIS の 2 倍程度までは普通コンクリートと同等に取り扱えるといえる。

(2) ブリーディング

図-6 に、各種コンクリートのブリーディング量を、図-7 に、水/粉体（セメント+微粒分）比とブリーディング量との関係を示す。図-6 より、同一水セメント比においては、NL、LL のブリーディング量は微粒分量が増えるに伴って減少すること、LL のブリーディング量は水セメント比の増加に伴って大きくなった。なお、いずれのコンクリートも材料分離に対する JASS 5 の水密コンクリートの基準値の $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下を満足した。

一方、ブリーディングが少なすぎると打込み面のコテ仕上げ性の低下やプラスチックひび割れの発生が懸念される。既往の床板施工による知見から、1 時間あたりの蒸発量が $1.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ ($0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$) 程度になると初期乾燥ひび割れの危険性が高くなると報告されている¹⁾。図-7 より、NL、LL のブリーディング量は水/粉体比が小さくなると減少するが、水粉体比が 0.35 以下になると $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となり、コテ仕上げの時期や打込み面を湿润状態に保つ等の配慮が必要といえる。

(3) 凝結時間

図-8 に、石灰石微粒分量と凝結時間との関係を示す。始発時間および終結時間は、NL、LL とともに石灰石微粒分量の増加に伴って短縮した。この凝結時間の短縮は NL よりも LL の方が大きい。既往の研究によれば、石灰石微粉末量が多くなると、カリシウムアルミネートの反応が促進し、さらにエーライトの反応も促進する²⁾ とある。また、高炉セメント中の高炉スラグ微粉末も石灰石微粉末により反応が促進される³⁾ との報告もあり、これらの事実に従えば石灰石微粉末が水和反応を促進し、凝結時間が短くなったと解釈できる。

3.3 硬化コンクリートの強度特性

(1) 圧縮強度

図-9 に、材齢と圧縮強度との関係を、図-10 にセメント水比と 28 日圧縮強度との関係を示す。また、表-6 には、材齢 91 日における N の圧縮強度に対する各コンクリートの圧縮強度比を示す。図-9 より、材齢 28 日までの NL の圧縮強度は N のそれよりも大きいこと、材齢 28 日から 91 日までの NL の強度増進は N のそれよりも小さいもの、材齢 91 日における NL の圧縮強度は N と同等で、石灰石粗骨材中に含まれる石灰石微粒分量は圧縮強度にほとんど影響を及ぼしていないといえる。同様の傾向は LL の圧縮強度にも見られ、材齢 28 日までの LL の圧縮強度は N のそれよりも大きく、材齢 28 日から 91 日の強度増進は N のそれよりも小さくなった。

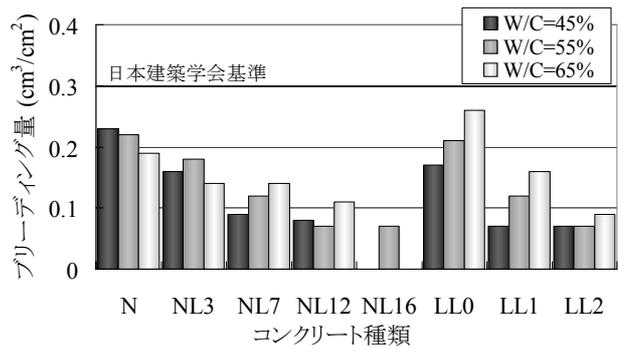


図-6 ブリーディング量

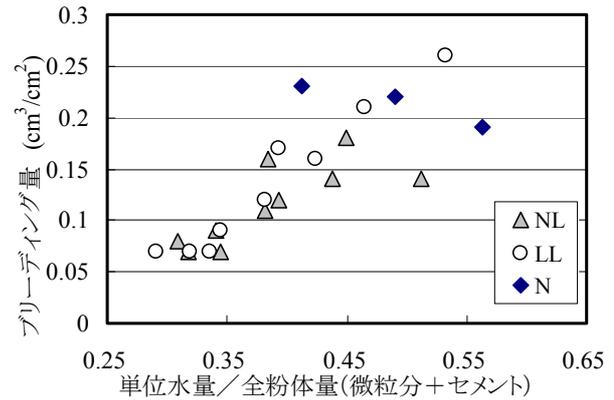


図-7 ブリーディング量と水粉体比との関係

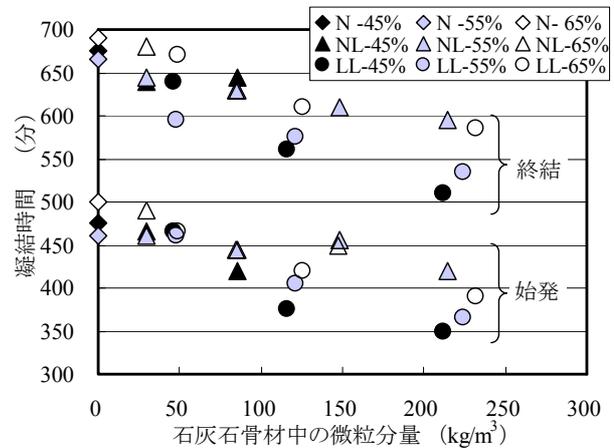


図-8 石灰石微粒分量と凝結時間との関係

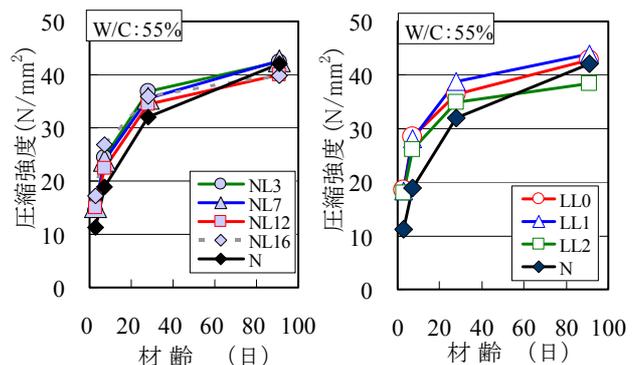


図-9 材齢と圧縮強度との関係

以上の結果を総括すると、石灰石骨材を使用したコンクリートにおいては材齢 28 日までの強度、特に初期材齢における強度の発現が大きいといえる。これは、石灰石微粒分による物理的な充填効果および高炉セメント中の高炉スラグ微粉末との反応が促進されたことなどによると考えられる。この初期強度増進効果は NL では石灰石微粒分が多いほど大きく、LL においては石灰石微粒分量の影響はほとんど認められなかった。なお、材齢 91 日における強度は LL2 のみ N を下回ったもの、それ以外コンクリートは N と同等であった。

図-10 より、石灰石骨材を使用したコンクリートの 28 日圧縮強度とセメント水比との間には普通コンクリートと同様に線形関係があること、セメント水比の増加に伴う圧縮強度の増加は、NL においては N とほぼ等しいが、LL においては N より小さいこと、がわかる。また、LL の圧縮強度の優位性はセメント水比 1.54 における N との比較からわかるように、低セメント水比においてより顕著に現れることがわかる。さらには表-6 より、同一水セメント比において N を基準として表した NL および LL の材齢 91 日の圧縮強度比は水セメント比が大きいほど大きくなるが、一方で水セメント比 45% では LL の圧縮強度比はすべて 1.0 を下回った。

(2) 応力-ひずみ関係および静弾性係数

図-11 に、材齢 28 日における圧縮応力-ひずみ関係を、図-12 に、圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。図-11 より、NL および LL の応力-ひずみ関係の傾きは N のそれよりもやや大きくなった。一般に、コンクリートに荷重が作用すると、比較的小さな応力においても骨材とペーストの界面に微細なひび割れが発生することなどによって応力-ひずみ関係線は曲線形状を呈する。石灰石骨材を使用したコンクリートは骨材とペーストの界面が普通骨材を使用したコンクリートよりも緻密化するとされており、弱点となる界面が改善されたこと、さらに石灰石は安山岩に比べて弾性係数が大きいことから応力-ひずみ曲線の直線部分が長くなり、かつ傾きも大きくなったと考えられる。

図-12 より、NL の 1/3 割線弾性係数（以下、弾性係数と称する）は N のそれと同等となり、LL の弾性係数は N のそれより大きくなった。また、いずれの弾性係数も土木学会標準示方書に規定された予測式（圧縮強度から弾性係数を予測する式）を上回り、普通骨材を使用した N よりも大きくなった。なお、石灰石微粒分量が弾性係数に及ぼす影響は小さいといえる。

3.4 乾燥収縮

図-13 に、1 例として、水セメント比 55% のコンクリートに対して行った乾燥収縮試験の結果を、図-14 には、乾燥期間 6 ヶ月における各コンクリートの乾燥収縮

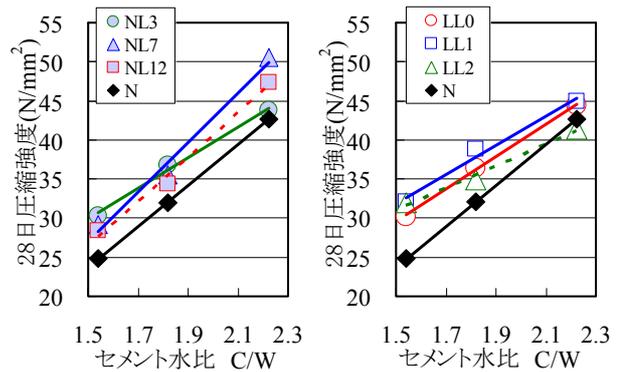


図-10 セメント水比と 28 日圧縮強度との関係

表-6 材齢 91 日における各コンクリートの圧縮強度比

W/C (%)	N	NL3	NL7	NL12	NL16	LL0	LL1	LL2
45	1.00	0.98	1.11	1.04	—	0.99	0.89	0.83
55	1.00	1.01	1.01	1.01	0.95	1.01	1.04	0.91
65	1.00	1.15	1.08	1.05	—	1.08	1.12	1.07

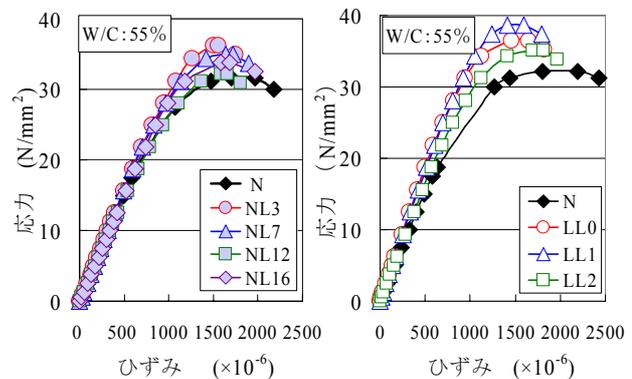


図-11 応力-ひずみの関係（材齢 28 日）

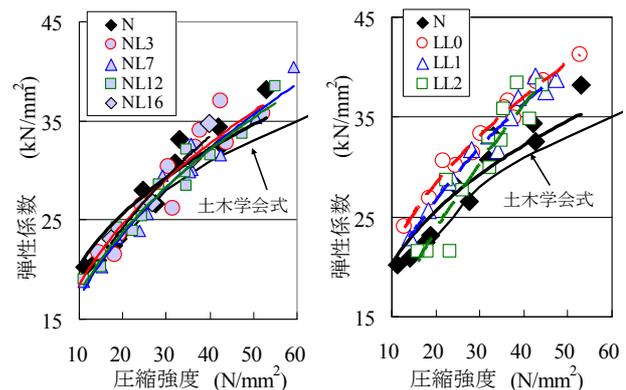


図-12 圧縮強度と弾性係数との関係

ひずみを示す。図-14 より、水セメント比が同一の場合、乾燥期間 6 ヶ月におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみは LL < NL < N の順に小さくなっており、石灰石を使用したコンクリートの乾燥収縮は普通骨材を使用したコンクリートのそれよりも小さくなった。また、石灰石微

粒分量が乾燥収縮に及ぼす影響は小さく、NL および LL の微粒分量の増加に伴う乾燥収縮の増分はごくわずかであった。これは微粒分量が増加すると単位水量が増加し、乾燥収縮は増大するが、一方で石灰石微粒分の場合には乾燥収縮を低減する効果があり、これらが相殺された結果と考える。

3.5 凍結融解抵抗性

図-15 に、凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係を示す。水セメント比 55% の場合、NL では NL12 および NL7 の相対動弾性係数は NL3 のそれよりも大きく、LL では LL2 の相対動弾性係数は LL0 および LL1 のそれよりも大きく、石灰石骨材中の微粒分量が多くなると凍結融解抵抗性が向上する結果となった。微粒分が多くなると、ブリーディング量が減少し、材料分離抵抗性の大きいコンクリートが得られる。その結果、骨材の界面、特に下面の欠陥が減少し、凍結融解抵抗性が向上したものと推察される。

4. まとめ

- (1) 配合に関しては、最適 s/a のもとの製造した NL および LL において所要スランプを得るために必要な単位水量および同一空気量を得るための AE 助剤量は、いずれも石灰石骨材中の微粒分量が増加するに伴って増加させる必要がある。
- (2) フレッシュコンクリートに関しては、石灰石骨材を用いた NL および LL のスランプロスは、普通コンクリートと同等ないしはやや小さい。NL、LL のブリーディング量は、水セメント比が同一の場合においては微粒分量が増えるに伴って減少すること、LL のブリーディング量は水セメント比の増加に伴って大きくなる。また、凝結時間は NL、LL とともに微粒分の増加に伴い早くなった。
- (3) 硬化コンクリートに関しては、水セメント比が同一の場合における NL および LL の圧縮強度は、材齢 28 日までは普通骨材を用いた N のそれよりも大きいこと、NL および LL の材齢 28 日から 91 日に至るまでの強度増加は N のそれよりも小さいことが明らかになった。また、NL の静弾性係数は、同一圧縮強度における N のそれと同等となり、LL の静弾性係数は、N のそれよりもやや大きく、石灰石骨材中に含まれる微粒分量が弾性係数に及ぼす影響は小さい。
- (4) NL および LL の乾燥収縮は普通骨材を使用した N のそれより小さく、微粒分量の影響は小さい。
- (5) NL および LL の凍結融解抵抗性は石灰石微粒分量が多くなると向上する。

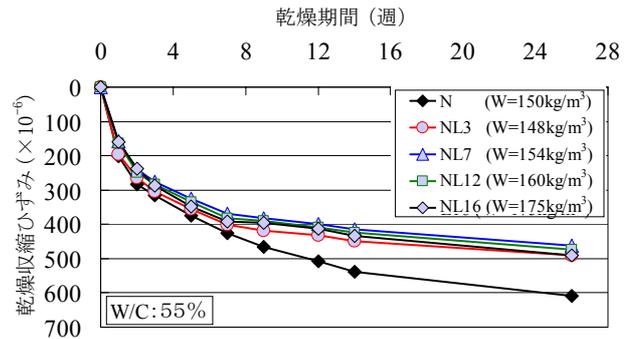


図-13 NL コンクリートの乾燥収縮試験結果

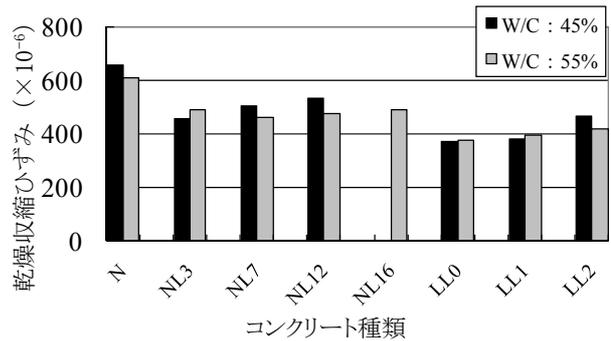


図-14 各コンクリートの乾燥収縮ひずみ (6ヶ月)

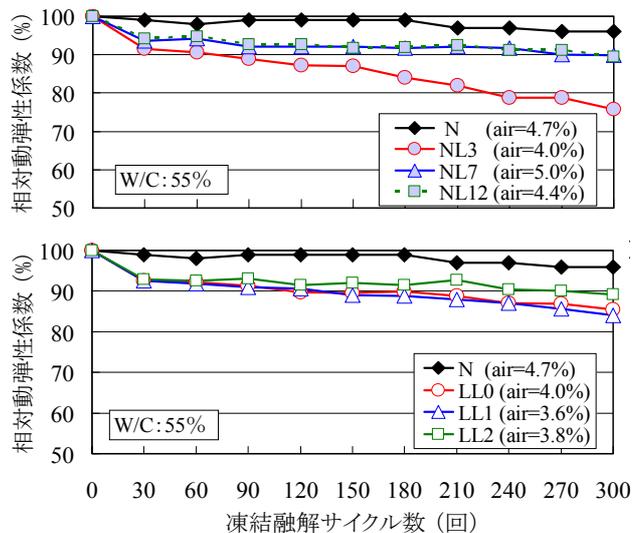


図-15 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係

参考文献

- 1) 戸川一夫, 中本純次: コンクリートの初期収縮ひび割れと水分蒸発速度との関係, セメント技術年報, Vol.28, pp.314-317, 1974
- 2) 李琮揆, 大場陽子, 坂井悦郎: 石灰石微粉末を多量添加した $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 系の水和反応, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.2, pp.13-18, 1998
- 3) 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集, Vol.29, No.1, pp.93-98, 2007