

論文 微粒分が多い石灰石骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮と耐凍害性

大西 利勝^{*1}・井上 正一^{*2}・黒田 保^{*3}・藤田 龍二^{*4}

要旨：微粒分量が多い石灰石骨材を使用したコンクリートとして、細・粗骨材とも普通骨材を使用した N コンクリートに対して、粗骨材のみに石灰石を使用した NL コンクリート、細骨材のみに石灰石を使用した LN コンクリートおよび細・粗骨材とも石灰石を使用した LL コンクリートの 3 種類を取り上げ、これらコンクリートの適性配合を決定し、乾燥収縮および凍結融解抵抗性を中心に検討した。その結果、石灰石骨材の使用は乾燥収縮を小さくし、微粒分量は乾燥収縮にほとんど影響を及ぼさないこと、石灰石骨材、特に粗骨材の使用は凍結融解抵抗性を小さくするが、微粒分量が増えると性能が向上すること、などが明らかとなった。

キーワード：石灰石、骨材、微粒分、ブリーディング、乾燥収縮、凍結融解抵抗性

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮あるいはアルカリ骨材反応問題への対応策として、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、船舶やトラックへの積み込み・積卸しの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。

このような状況の中、コンクリート用砕石および砕砂の JIS A 5005 が 2009 年に改正され、微粒分量の上限値が緩和された。汎用強度の比較的貧配合のコンクリートを製造する場合には砕砂の微粒分がある程度多い方がフレッシュ性状が良くなることが知られている。また、砕石工場では砕石および砕砂の製造工程で発生する微粉の処理が課題となっており、微粒分量の上限値がさらに緩和されると資源の有効利用および廃棄物の削減につながる。最近では微粒分が多い骨材を使用したコンクリートに関する研究が多くなっている¹⁾。

そこで、骨材中に含まれる石灰石微粒分量が JIS 上限値の 2 倍までの範囲を対象とする石灰石骨材を用いた水セメント比 65～45%のコンクリートを対象に、石灰石を細骨材に用いるか、粗骨材に用いるかの骨材種類の相違ならびに石灰石骨材中に含まれる微粒分量が、配合設計に及ぼす影響および適正な配合設計に基づいて作製したコンクリートの乾燥収縮および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

使用材料を表-1 に、搬入された状態の骨材の物理的

性質を表-2 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表-3 に示す。石灰石細・粗骨材のいずれも JIS の品質基準を満たすものである。砕石の微粒分が砕砂のそれよりもやや

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

骨材の種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	粒径判定 実績率 (%)	微粒 分量 (%)
細骨材					
普通砂	2.64	1.30	2.63	57	3.9
石灰砕砂 ^{*1}	2.67	0.65	2.28	56.8	5.4
石灰砕砂 ^{*2}	2.67	0.61	2.51	56.1	2.2
砕砂 JIS 規格	≥2.50	≤3.0	-	≥54	≤9.0
粗骨材					
普通砕石	2.73	0.61	6.79	57.3	0.0
石灰砕石	2.67	0.55	6.41	59.7	2.6
砕石 JIS 規格	≥2.50	≤3.0	-	≥56	≤5.0

*1: LN に使用, *2: NL, LL に使用

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 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)

*4 国土交通省 中国地方整備局 中国技術事務所

細かいのは、碎石の場合は、輸送工程で骨材同士が磨砕されて発生する細かな微粒分が含まれるためと推察される。

2.2 コンクリートの種類と配合

コンクリートの種類と骨材の組合せを表-4 に示す。コンクリートの種類は①細骨材には普通砂を、粗骨材には石灰石を使用した NL コンクリート(以下 NL と表記)、②細骨材には石灰石を、粗骨材には安山岩(普通骨材)を使用した LN コンクリート(以下 LN と表記)、③粗・細骨材とも石灰石を使用した LL コンクリート(以下 LL と表記)、④粗・細骨材ともに普通骨材を使用した N コンクリート(以下 N と表記)、の4種類とした。なお、石灰石微粒分量は、NL においては石灰石碎石の 2.6、7.0、12.0、16.0%の4水準、LN においては石灰石砕砂の 5.4、9.0、18.0%の3水準、LL においては石灰石砕砂と石灰石碎石に対して、それぞれ 2.2 と 2.6%、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、石灰石砕砂および石灰石碎石に含まれる石灰石微粒分量は搬入時の状態の石灰石骨材に石灰石微粉末を添加することにより調整した。水セメント比は 45、55、65%の3水準(ただし NL16 は 55%のみ)とし、スランプは $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ とし、空気量は $4.5 \pm 0.5\%$ とした。細骨材率は最適細骨材率とし、AE 減水剤添加率は単位セメント量 $\times 0.25\%$ (標準添加率)と一定とした。

2.3 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手順は、容量 50ℓ の強制練りミキサーを用い、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後、水および混和剤を投入して 90 秒間練り混ぜることとした。

練混ぜを完了したコンクリートは練り板上で均一になるように練り返した後、試験に供した。フレッシュ状態においてスランプ、空気量、ブリーディングを測定し、硬化後において圧縮強度、乾燥収縮および凍結融解の各試験を行った。なお、スランプ試験は 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」に従った。供試体には $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱を用い、材齢 1 日で脱型した後 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中にて養生した。材齢 7 日で水中から取り出し、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室にて乾燥を開始した。

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)」に従った。供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱を用い、28 日間標準水中養生を行った後、試験に供した。

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)	N	普通砂	3.9%	普通碎石	0%
石灰石コンクリート (NL)	NL2.6			石灰石碎石	2.6%
	NL7				7.0%
	NL12				12.0%
	NL16			石灰石碎石	16.0%
石灰石コンクリート (LN)	LN5.4	石灰石砕砂	5.4%	普通碎石	0%
	LN9		9.0%		
	LN18		18.0%		
石灰石コンクリート (LL)	L○		2.2%	石灰石碎石	2.6%
	L①		9.0%		5.0%
	L②		18.0%		10.0%

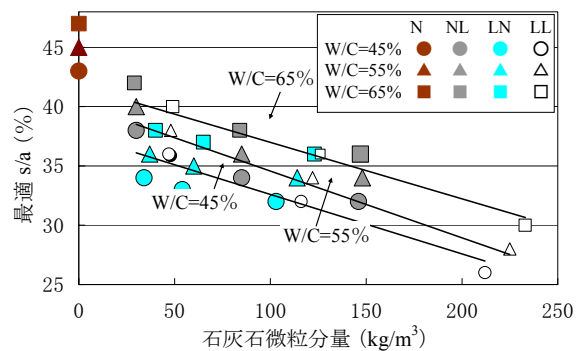


図-1 石灰石微粒分量と最適細骨材率との関係

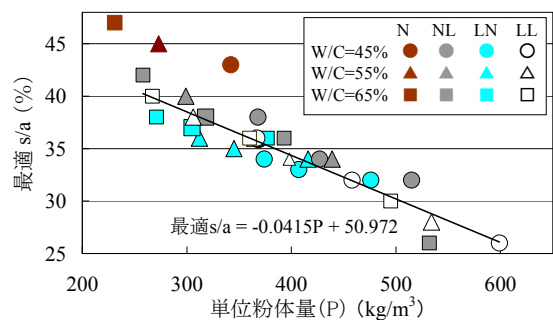


図-2 単位粉体量 (P) と最適細骨材率との関係

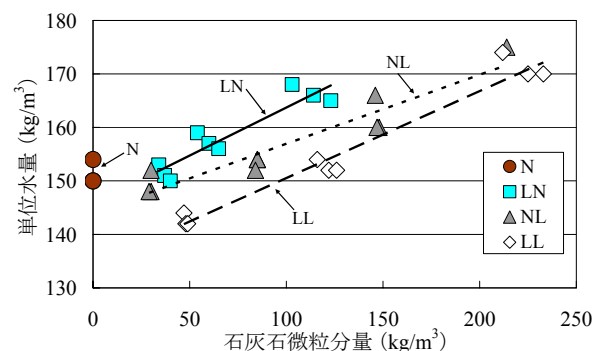


図-3 石灰石微粒分量と単位水量との関係

表-5 コンクリートの配合および強度

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (C×%)	材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S		G				
					普通	石灰石	普通	石灰石			
N	45	43	154	342	782	-	1071	-	0.25	1.4	42.7
	55	45	150	273	850	-	1074	-		1.0	32.0
	65	47	150	231	905	-	1055	-		1.0	24.8
NL2.6	45	38	152	338	702	-	-	1150		1.8	43.8
	55	40	148	269	767	-	-	1155		1.2	36.8
	65	42	148	228	821	-	-	1138		1.0	30.4
NL7	45	34	154	342	625	-	-	1218		2.8	50.6
	55	36	154	280	681	-	-	1216		2.4	35.5
	65	38	152	234	737	-	-	1206		1.8	29.2
NL12	45	32	166	369	570	-	-	1217		4.4	47.4
	55	34	160	291	635	-	-	1237		3.4	34.4
	65	36	160	246	686	-	-	1225		2.3	28.4
NL16	55	26	175	318	469	-	-	1339		4.9	35.9
LN5.4	45	34	153	340	-	631	1253	-		1.2	35.1
	55	36	151	275	-	691	1256	-		1.0	32.2
	65	38	150	231	-	745	1243	-		0.8	28.4
LN9	45	33	159	353	-	603	1252	-		1.7	33.4
	55	35	157	285	-	663	1259	-		1.5	31.2
	65	37	156	240	-	717	1247	-		1.3	27.4
LN18	45	32	168	373	-	572	1242	-		2.7	33.2
	55	34	166	302	-	631	1252	-		2.5	32.3
	65	36	165	254	-	684	1243	-		2.3	28.4
L○	45	36	144	320	-	684	-	1210		1.0	44.4
	55	38	142	258	-	745	-	1210		0.8	36.5
	65	40	142	218	-	798	-	1192		0.6	30.2
L①	45	32	154	342	-	593	-	1255		1.8	45.0
	55	34	152	276	-	652	-	1260		1.6	38.8
	65	36	152	234	-	704	-	1245		1.4	32.1
L②	45	26	174	387	-	458	-	1297		3.0	41.4
	55	28	170	309	-	515	-	1319		2.8	34.9
	65	30	170	262	-	564	-	1311		2.6	32.0

3. 実験結果および考察

3.1 配合における最適細骨材率および単位水量

(1) 最適細骨材率（最適 s/a）

各配合ごとに単位水量を一定とし細骨材率のみを変化させて、スランプが最大となる最適細骨材率を決定した。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図-1 に示す。最適細骨材率は水セメント比が同一の場合、石灰石骨材を使用したコンクリートはいずれも微粒分量の増加に伴って直線的に小さくなった。また、微粒分量が同一の場合、最適細骨材率は水セメント比の5%の増減に対して2%程度増減することが明らかとなった。

単位粉体量（セメントと骨材中の微粒分量の和）と最適細骨材率との関係を図-2 に示す。図より水セメント比および石灰石骨材の種類に関係なく、プロット点はほぼ1本の直線に近似できた。このことは今回の検討範囲では配合設計における最適細骨材率は単位粉体量を把握することにより概ね予測できることを示唆している。

(2) 単位水量

石灰石微粒分量と同一スランプ(8cm)を得るための単位水量との関係を図-3 に示す。石灰石骨材を用いたコンクリートの単位水量は石灰石骨材の種類が同一の場合、石灰石微粒分量の増加に伴い、単位水量は直線的に増大した。この場合直線の傾きはNLはやや小さいが、全体的には骨材の種類によらず等しく、LNおよびLLに比べて小さくなった。水セメント比および石灰石微粒分量が同一の条件で比較すると、単位水量はLNが最も多く、次にNL、LLが最も少なくなった。

3.2 配合、圧縮強度およびフレッシュ性状

(1) 配合および28日圧縮強度

配合および圧縮強度を表-5 に示す。同一水セメント比におけるNL、LLの圧縮強度はNのそれよりも大きく、細骨材のみに石灰石を用いたLNの圧縮強度は水セメント比45%においてNよりも小さくなった。

(2) ブリーディング

ブリーディング率と石灰石微粒分量との関係を図-4

に示す。粗骨材に石灰石を用いた NL および LL のブリーディング率は石灰石微粒分量の増加に伴って低下するが、LN のそれは微粒分量の影響を受けず、さらに微粒分量が 100kg/m^3 を超えた範囲では、NL および LL よりも大きくなった。

3.3 乾燥収縮

(1) 骨材の種類および組合せの影響

LN, NL, LL コンクリートの乾燥期間 6 ヶ月における乾燥収縮を図-5 に示す。石灰石骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は、いずれも N コンクリートのそれよりも小さく、粗骨材に石灰石を使用した NL および細骨材に石灰石を使用した LN はほぼ同等で、細・粗骨材ともに石灰石を使用した LL は最も小さくなった。乾燥収縮の N との差を比較すると、石灰石は細骨材および粗骨材のそれぞれに乾燥収縮低減効果があり、細・粗骨材の両方に石灰石を使用すると、その効果は大きくなった。

(2) 水セメント比(W/C)および石灰石微粒分量の影響

水セメント比を 45, 55, 65% と変化させたコンクリートの乾燥期間 6 ヶ月後の乾燥収縮と石灰石微粉末量との関係を図-6 に示す。また、石灰石骨材の種類が同一の場合、石灰石微粒分量の増加は乾燥収縮をやや増加させる程度で、ほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

乾燥期間 6 ヶ月後の乾燥収縮ひずみと単位ペースト容積（セメント、骨材中の微粒分、および水の絶対容積の和）との関係を図-7 に示す。石灰石骨材の種類が同一の場合、乾燥収縮ひずみとペースト容積との間には正の相関がある。このことは、石灰石微粒分量が増えることにより単位水量が増加し、その結果、ペースト容積が増大して乾燥収縮を大きくする効果がより大きく現れたためと推察される。なお、同一ペースト容積における乾燥収縮は、いずれの石灰石骨材を使用したコンクリートも N より小さく、LL は最も小さくなった。また、NL および LL の傾きが N や LN のそれより小さいのは、ペースト部分の乾燥収縮を骨材が拘束すると考えると、石灰石の弾性係数が普通骨材（安山岩）よりも大きく、さらに粗骨材の方が細骨材よりコンクリート中の容積比率が高いことに起因するものと考えられる。

(3) 示方書照査式の予測値との比較

コンクリート標準示方書〔設計編〕においては収縮の照査式として、次式 (1) を用いてもよいとしている。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = -\left[1 - \exp\left\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\right\}\right] \varepsilon'_{sh} \quad (1)$$

ここに、

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78 \left[1 - \exp(RH/100)\right] + 38 \log_e W - 5 \left[\log_e (V/S)/10\right]^2$$

ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: 材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

RH : 相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

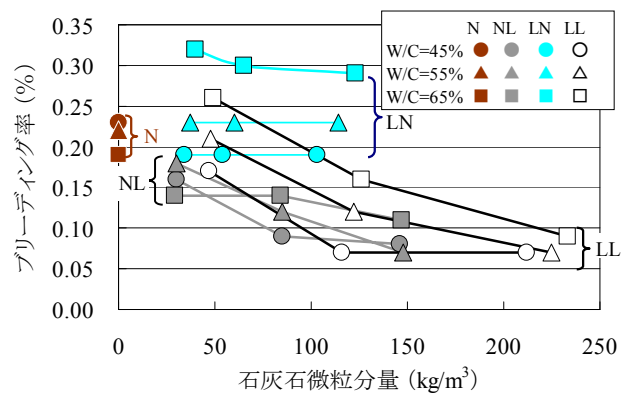


図-4 石灰石微粒量とブリーディング量

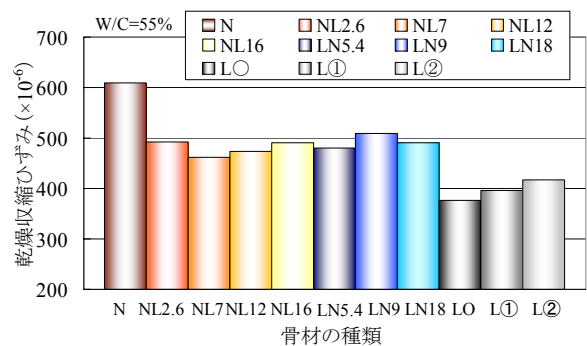


図-5 乾燥期間 6 ヶ月の乾燥収縮ひずみ

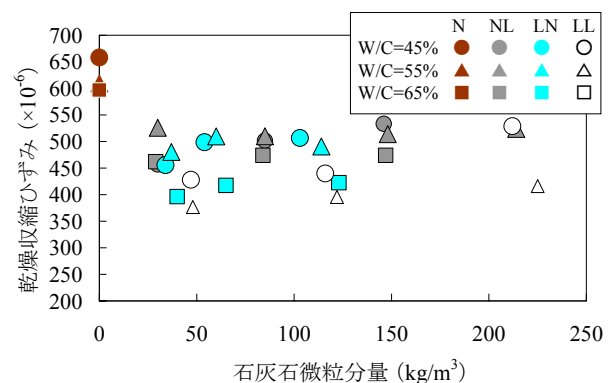


図-6 石灰石微粒分量と 6 ヶ月後の乾燥収縮ひずみ

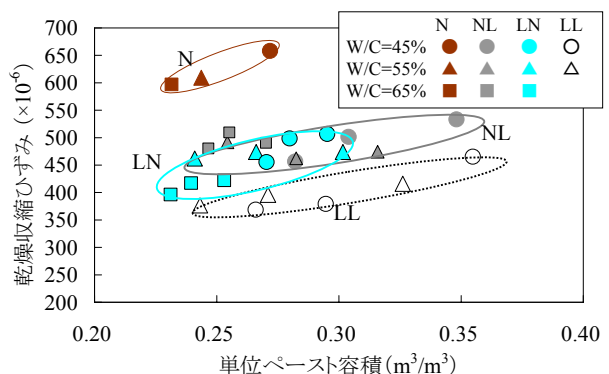


図-7 単位ペースト容積と 6 ヶ月後の乾燥収縮ひずみ

W : 単位水量 (kg/m^3) ($130 \leq W \leq 230$)

V : 体積 (mm^3), S : 外気に接する表面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比(mm) ($100\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$)

t_0 : 乾燥開始材齢, t : 乾燥中の有効材齢(日)

図-8 は、式(1)より求めた予測値と乾燥収縮ひずみの実験値との関係を示したもので、図より、NL の乾燥収縮ひずみの実験値は予測値と概ね一致すること、一方、LN および LL の乾燥収縮ひずみの実験値は予測値よりも小さくなること、さらに石灰石を用いたコンクリートは、石灰石微粒分量の多少が乾燥収縮ひずみに影響を及ぼしていないこと、がわかる。

以上のことより、石灰石骨材を使用したコンクリートは乾燥収縮ひずみの実験値が予測値よりも小さくなること、特に細骨材に石灰石砕砂を用いた場合にその傾向は顕著となった。

3.4 凍結融解抵抗性

(1) 骨材の種類および組合せの影響

水セメント比 65%の LN, NL および LL のサイクル数と相対動弾性係数を図-9 に、サイクル数と質量減少率を図-10 に示す。石灰石骨材を使用したコンクリート相対動弾性係数は、いずれも石灰石微粒分量の増加に伴って大きくなるが、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。一方、質量減少率は微粒分量の増加に伴って小さくなり、特に微粒分量の多い NL12 および L②の質量減少は N よりもわずかながら小さくなった。この原因としては、石灰石の線膨張係数が $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と、他の骨材の $7 \sim 8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ よりもかなり小さいことが考えられる。すなわち、千歩らの研究によると、石灰石は安山岩などに比べて線膨張係数が小さいため、粗骨材とモルタルとの線膨張係数の差によって生じる微視的温度応力が耐凍害性の低下に影響している²⁾という事実

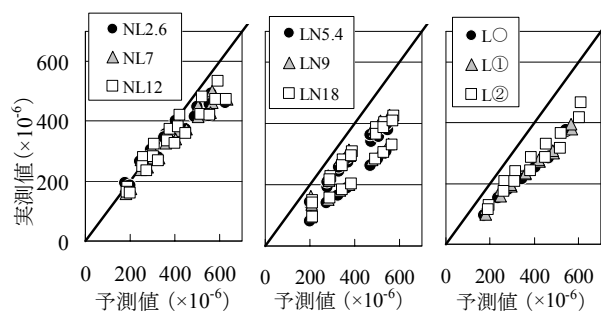


図-8 乾燥収縮ひずみの予測値と実験値

によると考える。今回の結果から、粗骨材に安山岩粗骨材を使用した LN の相対動弾性係数は、この粗骨材とモルタルの線膨張係数の差によって生じる微視的温度応力が小さいために NL や LL のそれよりも大きく、N と同程度の値になったと推察される。なお、石灰石粗骨材を使用した NL および LL の相対動弾性係数が微粒分の増加によって改善されたのは、図-4 のようにブリーディングが減少することに加え、石灰石微粒分が増えたモルタルと石灰石粗骨材との線膨張係数差が小さくなったことも一因と考える。

(2) 石灰石微粒分量の影響

300 サイクル時点の相対動弾性係数と石灰石微粒分量との関係を図-11 に、300 サイクル時点の質量減少率と石灰石微粒分量との関係を図-12 に示す。図-11 より、NL12 の水セメント比 65%を除く NL, LL の相対動弾性係数は、N のそれよりも小さいが、石灰石微粒分量を増加すると大きくなった。また、NL, LL の相対動弾性係数は、石灰石微粒分量が同一の場合には、水セメント比 55%よりも水セメント比 65%において大きく、凍結融解抵抗性は水セメント比を小さくすることによっても大きくできることがわかる。

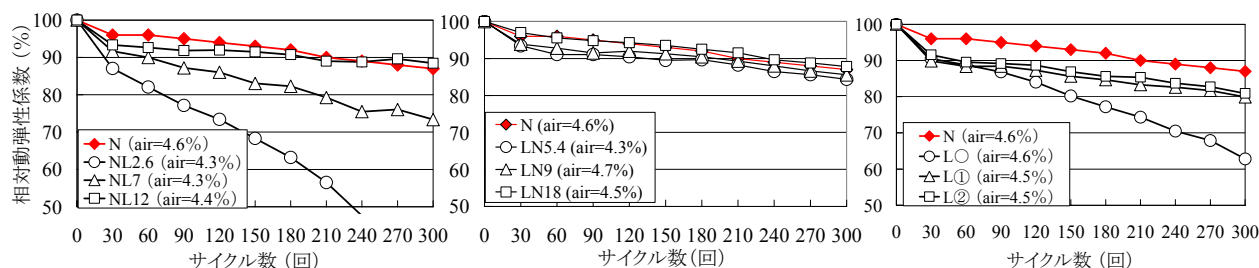


図-9 サイクル数と相対動弾性係数 (W/C : 65%)

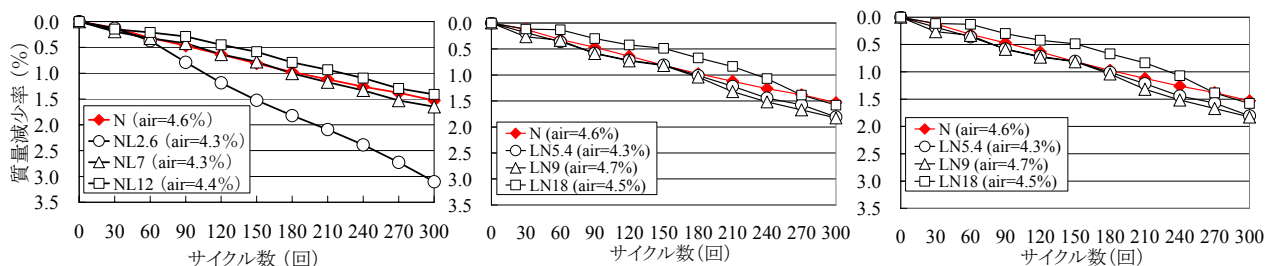


図-10 サイクル数と質量減少率 (W/C : 65%)

図-12 より, NL, LL の水セメント比 55 %における質量減少率は, 石灰石微粒分量の多少によらず, ほぼ一定で, かつ N のそれと同等である。一方, 水セメント比 65 %における NL, LL の質量減少量は, 石灰石微粒分量が 100 kg/m^3 以下であれば N のそれよりも大きい, 100 kg/m^3 以上では石灰石微粒分量の増加に伴って小さくなる。このことより, 石灰石微粒分量は 100 kg/m^3 以上を確保することが望ましいといえる。以上の結果より, 石灰石骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は普通骨材を用いたコンクリートのそれよりも小さくなるが, 水セメント比を小さくすること, 微粒分量を多くすることで改善される。

鎌田によれば, 細孔中の水の凍結温度と凍結水量の関係からゲル孔を含め, 半径数十 nm 以下の細孔中の水は凍結融解試験の温度条件では凍結しない³⁾。また, 既往の研究では, 石灰石微粉末を細骨材置換した場合, 全細孔量は変化しないが, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の大きな結晶が成長するスペースが物理的に充填され, 100nm 以上の細孔が減り $6\sim 100\text{nm}$ の小さな細孔が増えるとの報告があり⁴⁾, 微粒分量が多くなると, 粗大な細孔が減少し凍結融解抵抗性が改善されたと考えられる。

(3) 単位粉体量と凍結融解抵抗性

セメント量および骨材中の微粒分量を合わせた単位粉体量と 300 サイクル時点の相対動弾性係数の関係 (NL, LL) を図-13 に示す。300 サイクル時点で相対動弾性係数 80%以上を確保するためには, 水セメント比 55%の場合は単位粉体量を 300kg/m^3 以上, 水セメント比 65%の場合は 350kg/m^3 以上とする必要がある。

4. まとめ

JIS の上限値の 2 倍程度までの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, スランブ 8cm , 水セメント比 45~65%の配合条件で乾燥収縮と凍結融解抵抗性を中心に検討した結果, 以下の知見を得た。

- (1)乾燥収縮は, 石灰石骨材を粗骨材または細骨材に用いても普通骨材を用いた場合よりも小さく, 粗・細骨材の両方に用いるとさらに小さくなった。また, 骨材中に含まれる石灰石微粒分量が JIS の上限値の 2 倍程度までの範囲では乾燥収縮に及ぼす影響は小さかった。
- (2)凍結融解抵抗性は, 石灰石骨材を粗骨材に使用したコンクリートは, 微粒分が少ない場合に普通骨材を使用したコンクリートに比べて劣る傾向が認められたが, 微粒分量を増やすことによって改善できた。これは, ブリーディングが減少する効果, 微粒分の物理的充填により細孔径が小さくなる効果および粗骨材とモルタルとの線膨張係数の差が小さくなる効果などによるものと考えられる。

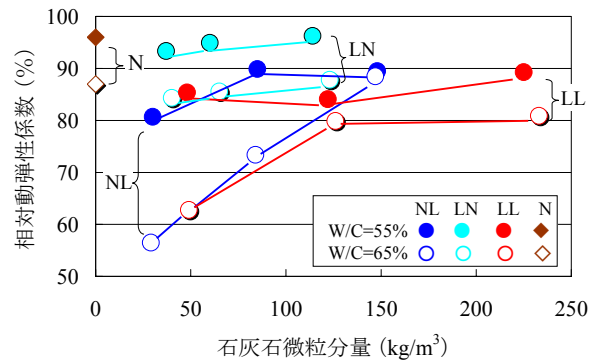


図-11 石灰石微粒分量と 300 サイクル時点の相対動弾性係数との関係

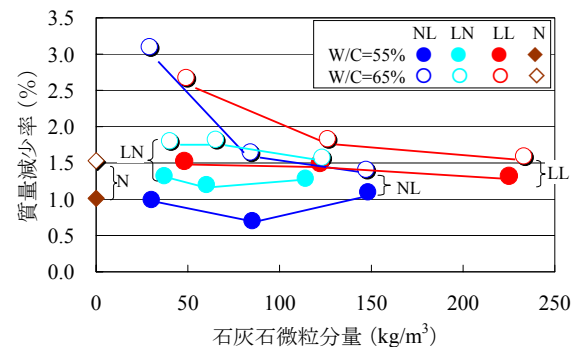


図-12 石灰石微粒分量と 300 サイクル時点の質量減少率との関係

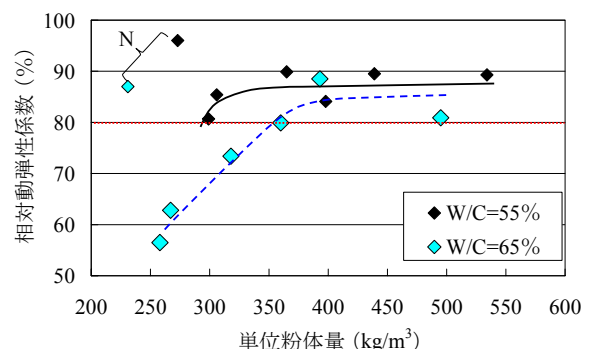


図-13 単位粉体量と 300 サイクル時点の相対動弾性係数との関係 (NL, LL)

参考文献

- 1)大西利勝, 井上正一, 黒田保: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp143-148, (2011)
- 2)千歩修ほか: コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.787-792 (2000)
- 3)鎌田英治: 凍結融解抵抗性 (耐凍害性), コンクリート工学, Vol.22, No.3, pp.38-46, 1984
- 4)Hiroshi Uchikawa: Influence of Microstructure on the Physical Properties of Concrete Prepared by Substituting Mineral Powder for Part of Fine Aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.1, pp.101-111, 1996