論文　Al を含む石灰石微粉末の添加によるセメント硬化体の圧縮強度および透気性向上効果

太田　健司[*1]・吉田　亮[*2]・齊藤　和秀[*3]・梅原　秀哲[*4]

要旨：石灰石微粉末の添加量や化学組成の違いがセメント硬化体の物性に与える影響について検討を行った。石灰石微粉末の添加量を増加させることで圧縮強度，透気性は向上する結果となった。また，材齢 91 日まで乾燥環境に曝した供試体では石灰石微粉末に含まれる Al 量の増加に伴い，圧縮強度の増加や透気係数が抑制される結果が得られた。

キーワード：石灰石微粉末，輝緑岩，石粉，透気性，乾燥収縮，養生

1. はじめに

天然骨材の枯渇に伴う砕石や砕砂への移行により，全国で大量の石粉が発生している [1)]。これに伴い，コンクリート用砕石粉に関する JIS 規格の改定が行われ，石粉の利用を促進する取組みが見られる。しかし現状は，豊橋市の採石工場において約 100t/日の石灰石微粉末が副生産され，有効な利用が見い出されず，そのほとんどが廃棄処分されている。

既往の研究では，石灰石微粉末の添加により乾燥収縮が低減されることが報告されている [2)]。また，石灰石微粉末の添加量の増加に伴い，ひび割れの発生を遅らせるなど，ひび割れ抵抗性の向上に対しても効果があるとの報告もある [3)]。そして，圧縮強度については，石灰石微粉末を細骨材に対して置換した場合，置換量の増加に伴って強度が増加することも報告されている。特に，材齢初期での強度発現効果が顕著になると述べられている [4)]。そのほかに石灰石微粉末と高炉セメントを併用することで，高炉スラグの反応を促進させる効果についても言及されている [5)]。

本研究では，豊橋市の採石工場で廃棄される石灰石微粉末の有効利用を目指し，乾燥収縮や各種物質移動抵抗性など，コンクリートの耐久性に関する各種物性の評価を行うことを目的とした。また，この石灰石微粉末は Al が JIS の推奨値よりも少し多く含まれており，Al の含有量が圧縮強度や透気性などコンクリートの物性に与える影響についても検討を行った。そのほか，石灰石微粉末の細骨材に対する置換率の違いが圧縮強度や透気性に及ぼす影響についてもモルタルを用いて検討を行った。

2. 実験概要

本研究では，シリーズ 1 でコンクリート供試体を用いて実験を行い，シリーズ 2 ではモルタル供試体を用いて実験を行った。

シリーズ 1 の実験については，Al の含有量の異なる石灰石微粉末や輝緑岩微粉末など化学組成の異なる石粉を細骨材の 100 kg/m^3 置換で用い，石粉の化学組成の相違による乾燥収縮や圧縮強度，透気性など硬化物性への影響について検討を行った。

シリーズ 2 では，Al を含む豊橋市産の石灰石微粉末および Al を多量に含む輝緑岩微粉末の置換率を変化させたモルタル供試体において，フレッシュ性状と上記硬化物性について検討を行った。

2.1 シリーズ 1：コンクリート供試体

(1) 使用材料と配合

供試体は普通ポルトランドセメント，水道水，大井川水系産陸砂，岡崎産硬質砂岩砕石(G_{max}=20 mm)，福山産高炉スラグ細骨材を使用し作製した。また，高性能 AE 減水剤，消泡剤，増粘剤(C×0.2%)を添加した。

石粉は細骨材の 100 kg/m^3 で置換した。それぞれ Al の含有量や $CaCO_3$ の純度が異なる副産物石灰石微粉末，市販石灰石微粉末，$CaCO_3$ 試薬の 3 種類の石灰石微粉末と Al や Mg を多量に含む輝緑岩微粉末を用いた。そのほか，高炉スラグ細骨材と副産物石灰石微粉末を組合せた配合も設定した。配合とフレッシュ性状を**表－1**，使用材料を**表－2**，石粉の化学組成を**表－3** に示す。

(2) 長さ変化試験

100×100×400 mm の角柱供試体を各 2 本作製し，測定は JIS A 1129-3 に準拠して行った。供試体は，材齢 7 日まで封緘養生し，脱型直後に基長を測定した。以降，温度 20±3℃，湿度 60±5%の室内で材齢 52 週まで乾燥収縮の測定を行った。

*1 名古屋工業大学大学院　創成シミュレーション工学専攻　(学生会員)
*2 名古屋工業大学大学院　社会工学専攻　助教　(正会員)
*3 竹本油脂株式会社第三事業部　研究開発部　グループリーダー　(正会員)
*4 名古屋工業大学大学院　創成シミュレーション工学専攻　教授　(正会員)

表－1　配合とフレッシュコンクリートの性状

供試体種別	供試体種類	W/C (%)	単位量(kg/m^3)												C.T (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	BS	LSP1	LSP2	LSP3	KP	G	SP	消泡剤	増粘剤			
N	基準(non add)	50	155	310	857	-	-	-	-	-	1053	2.3	3.1	0.6	20.0	8.0	2.3
N-LSP1	副産物石灰石微粉末				761	-	100	-	-	-		2.8			20.0	9.0	2.1
N-LSP2	市販石灰石微粉末				761	-	-	100	-	-		2.8			20.0	9.5	2.2
N-LSP3	$CaCO_3$試薬				761	-	-	-	100	-		2.8			20.0	8.0	2.3
N-KP	輝緑岩微粉末				769	-	-	-	-	100		3.8			20.0	6.0	2.6
BS	高炉スラグ細骨材	50	155	310	-	917	-	-	-	-	1053	7.9	3.1	0.6	-	-	-
BS-LSP1	高炉スラグ細骨材+副産物石灰石微粉末				-	814	100	-	-	-		6.1			-	-	-

S：陸砂 BS：高炉スラグ細骨材　LSP1：副産物石灰石微粉末 LSP2：市販石灰石微粉末 LSP3：$CaCO_3$試薬 KP：輝緑岩微粉末 SP：高性能AE減水剤

(3) 圧縮強度試験

φ100×200 mm の円柱供試体を作製し，打設から 24 時間後に脱型し，それぞれ標準養生と気中養生(温度 20±3℃，湿度 60±5%)を行った。試験は JIS A 1108-2006 に準拠し，材齢 28 日と材齢 91 日で測定を行った。

(4) 透気試験

φ100×50 mm の円盤供試体を作製し，打設から 24 時間後に脱型し，温度 20±3℃，湿度 60±5%の室内で気中養生を行った。試験は材齢 28 日と材齢 91 日で行い，負荷圧力は 0.2 MPa とし，水上置換法により透気量の測定を行った。

2.2 シリーズ 2：モルタル供試体

(1) 使用材料と配合

供試体は普通ポルトランドセメント，水道水，瀬戸産砕砂(密度 2.65 g/cm^3)を使用し作製した。配合は質量比でセメントと細骨材を 1：3 とし，水セメント比を 50%とした。

石粉は細骨材の一部で置換し，Al を含有する副産物石灰石微粉末(LSP1)，Al や Mg を多量に含む輝緑岩微粉末(KP)，そのほかには砂岩の砕石微粉末(CSP)を用いた。砕石微粉末は砕砂を 75 μm 以下となるように振動ふるい機を用いて調整し，密度に関しては未測定である。石粉の置換率は豊橋市産石灰石微粉末を用いた配合では，細骨材に対しそれぞれ 1%，5%，10%，20%，30%の 5 水準で置換した配合，輝緑岩微粉末を用いた配合では 1%，10%の 2 水準で置換した配合，砕石微粉末を用いた配合では 10%で置換した配合でそれぞれ供試体を作製した。そのほかに，比較対照として石粉を置換しない普通モルタルとセメントペーストについても作製した。供試体種別と石粉の置換率の一覧を**表－4** に示す。

(2) ブリーディング試験

練上がり直後のフレッシュモルタルを使い捨て計量カップ(底部φ84 mm，上部φ100 mm，高さ 119 mm，容量 500 ml，PP 製)に 500 g 採取し，簡易的にモルタルのブリーディング試験を行った。

(3) モルタルフロー試験

フロー値の測定は JIS R 5201 に規定されているフローコーンを用いて 15 打フローとした。

表－2　使用材料

記号	名称	密度 (g/cm^3)	含水率 (%)
C	普通ポルトランドセメント	3.16	-
W	水道水	-	-
S	大井川水系産陸砂	2.59	2.06
BS	福山産高炉スラグ細骨材	2.77	0.39
G	岡崎産硬質砂岩砕石(Gmax=20mm)	2.66	-
LSP1	副産物石灰石微粉末	2.72	0.65
LSP2	市販石灰石微粉末	2.71	0.48
LSP3	$CaCO_3$試薬	2.70	0.50
KP	副産物輝緑岩	2.95	4.71

表－3　石粉の化学組成

記号	種類	純度(%)		
		$CaCO_3$	MgO	Al_2O_3
LSP1	副産物石灰石微粉末	90.0	2.5	2.8
LSP2	市販石灰石微粉末	95.0	3.0	0.5
LSP3	$CaCO_3$試薬	99.9	0.0	0.0
KP	輝緑岩微粉末	13.0	12.4	22.0

表－4　供試体種別（石粉の置換率）

供試体種別	水セメント比 W/C (%)	石灰石微粉末 LSP/S (%)	砕石微粉末 CSP/S (%)	輝緑岩微粉末 KP/S (%)
ペースト	50	-	-	-
N		-	-	-
LSP1%		1	-	-
LSP5%		5	-	-
LSP10%		10	-	-
LSP20%		20	-	-
LSP30%		30	-	-
CSP10%		-	10	-
KP1%		-	-	1
KP10%		-	-	10

(4) 圧縮強度試験

φ50×100 mm の円柱供試体を作製し，打設から 24 時間後に脱型し，標準養生を行った供試体と材齢 7 日まで封緘養生を行い，その後，気中養生(温度 20±3℃，湿度 60±5%)を行った供試体の 2 種類を比較した。試験は JIS A 1108-2006 に準拠し，　材齢 7 日と材齢 14 日において測定を行った。

(5) 透気試験

φ50×10 mm の円盤供試体を作製し，材齢 7 日まで封緘養生を行い，その後，温度 20±3℃，湿度 60±5%の室内で気中養生を行った。試験は材齢 14 日で測定し，負荷圧力を 0.2 MPa とし，水上置換法により透気量の測定を行った。

3. 実験結果と考察(シリーズ１：コンクリート供試体)

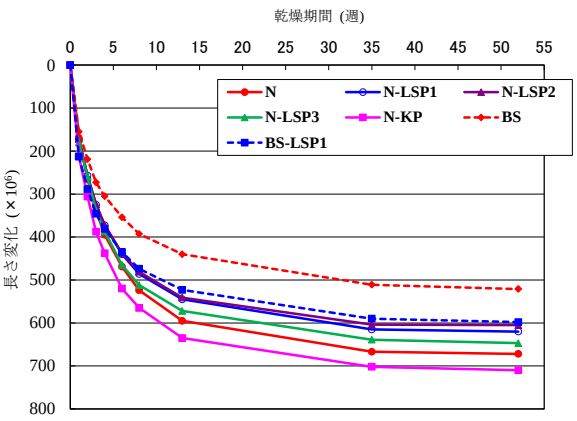
3.1 石灰石微粉末の添加が乾燥収縮低減に及ぼす効果

図－1 に乾燥収縮試験結果を示す。石灰石微粉末を用いた N-LSP1，N-LSP2 は N と比較して，材齢 52 週において 50～65 μ程度(およそ 10%程度)，収縮量が低減している。また，高炉スラグ細骨材を用いた供試体 BS，BS-LSP1 は N と比較して，それぞれ 150 μ，75 μ程度(10～20%程度)，収縮量が小さくなっている。これらの結果からは，石灰石微粉末の添加が収縮低減効果に及ぼす影響については顕著な差があるとは言えない。ただし，本実験では通常の乾燥収縮試験とは養生条件が異なり，一週間の封緘養生後に基長をとり，測定を開始した。そのため，標準養生を行った場合よりも収縮量が全体的に小さく，結果として石灰石微粉末添加の影響も小さく現れていると考えられる。したがって，僅かではあるが，上記の石灰石微粉末を添加した供試体で収縮量の低減が観察された結果には，石灰石微粉末添加による乾燥収縮低減効果が期待される。

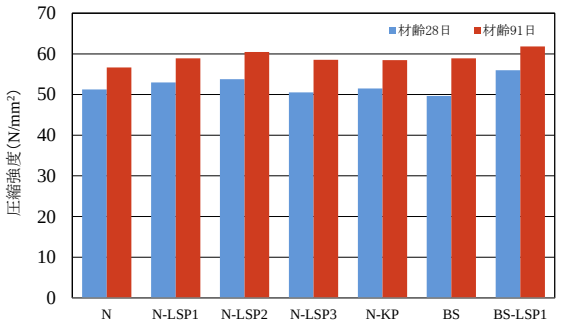
3.2 石灰石微粉末添加が強度発現に及ぼす影響

図－2 に標準養生を行った供試体，**図－3** に気中養生を行った供試体の圧縮強度試験結果を示す。**図－2** から，材齢 28 日，91 日ともに石灰石微粉末を添加することで，N より若干の強度増加が確認できるものの，どれもほぼ同程度の圧縮強度が発現されていることがわかる。このことは，水中養生を行うことで，どの供試体においても乾燥の影響を受けることなく，セメントの水和が同様に進行したことを示している。高炉スラグ細骨材を用いた BS と BS-LSP1 を比較すると，材齢 28 日では高炉スラグ細骨材と石灰石微粉末を組合せることで 10%以上の強度増加が見られる。これは，石灰石微粉末の添加によって高炉スラグの潜在水硬性が促進されたことによるものと考えられる。材齢 91 日においても強度増加は確認されるが，材齢 28 日ほど顕著な差ではないことから，特に材齢初期での反応が促進されると考えられる。

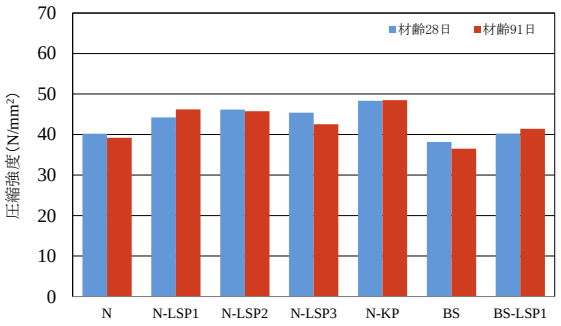
一方，**図－3** を見ると，標準養生を行った供試体と比較して，気中養生を行った供試体では，材齢 28 日で全体的に圧縮強度が 10 N/mm^2 程度小さくなっている。ただし，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加により，気中養生を行った供試体では，N よりも圧縮強度が 10～20%程度増加している。高炉スラグ細骨材を用いた供試体についても，石灰石微粉末を添加することにより，若干の強度増加が見られる。また，材齢 28 日と材齢 91 日の圧縮強度を比較すると，誤差の範囲に含まれる差異ではあるが，LSP1 および KP を添加したものについて極僅かな強度増加が確認され，それ以外では僅かに低下するものもある。これは，乾燥によってセメントの水和が阻害されることや，乾燥収縮によるマイクロクラックの影響が



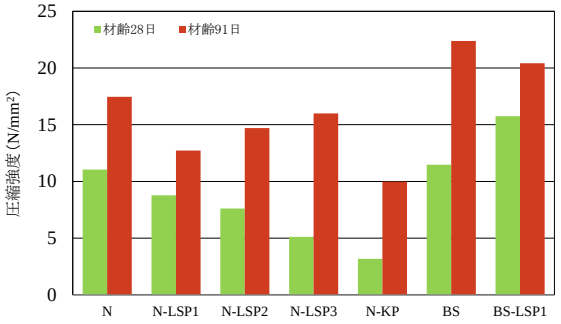
図－1　乾燥収縮（コンクリート供試体，封緘養生）



図－2　圧縮強度（コンクリート供試体，標準養生）



図－3　圧縮強度（コンクリート供試体，気中養生）



図－4　標準養生と気中養生の圧縮強度差

要因であると推察される。

養生の違いによる圧縮強度の差を比較する。**図－4** に標準養生を行った供試体と気中養生を行った供試体の圧縮強度差を材齢ごとに示す。材齢 28 日，91 日でともに

石灰石微粉末や輝緑岩微粉末を添加したすべての供試体でNよりも，標準養生と気中養生の圧縮強度差が小さくなっていることが確認できる。特に輝緑岩微粉末を添加した供試体でこの傾向が顕著である。これらの結果は，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加により乾燥環境下においても圧縮強度の低下が緩和されることを示しており，圧縮強度において，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加には乾燥に対する抵抗性を付与する可能性があることを示唆している。

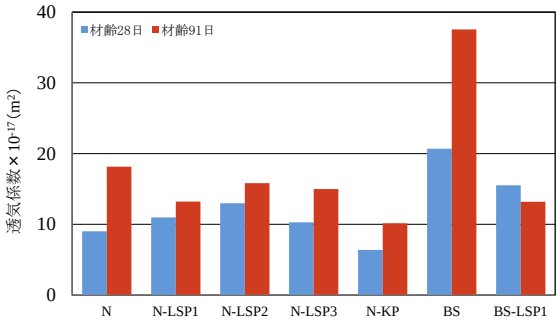
また，**図－4** における圧縮強度の差を材齢の進行について見てみると，N-LSP1，N-LSP2，N-LSP3の供試体で材齢 28 日と材齢 91 日における圧縮強度の差が逆の傾向を示しており，材齢 91 日における傾向は石灰石微粉末に含有される Al 量と同様な傾向を示している。乾燥による影響は材齢 91 日の傾向において，より顕著に現れているが，Al を含有するものの方が乾燥に対し圧縮強度の低下は小さくなっている。

3.3 透気性における石灰石微粉末添加の影響

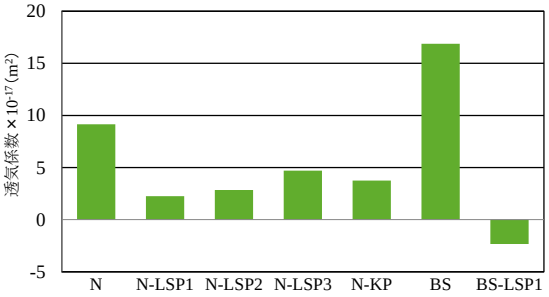
図－5に透気試験結果を示す。材齢28日では，石灰石微粉末を添加した供試体 N-LSP1，N-LSP2，N-LSP3 の透気係数はNと比較して，若干大きくなる傾向が見られる。輝緑岩微粉末を添加した供試体 N-KP ではNよりも透気係数が若干小さくなっている。材齢 91 日については，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末を添加したすべての供試体でNよりも，透気係数が小さくなっている。高炉スラグ細骨材を用いた供試体 BS と BS-LSP1 を比較すると，材齢 28 日，91 日ともに石灰石微粉末と高炉スラグ細骨材を組合せることにより透気係数の減少が確認できる。

材齢 28 日から材齢 91 日における材齢の進行による透気係数の変化を比較する。透気係数の差分を示した**図－6** を見ると，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末を添加したすべての供試体で，N よりも透気係数の差が小さくなっていることがわかる。透気係数の大小関係は対数表示により評価されるべきであり，この結果は顕著な差とは言えないが，乾燥材齢が進行しても，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加が透気係数の増加を抑制することを示している。この結果は，前述の圧縮強度と同様，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加により，透気性においても乾燥に対する抵抗性が付与される可能性を示唆している。

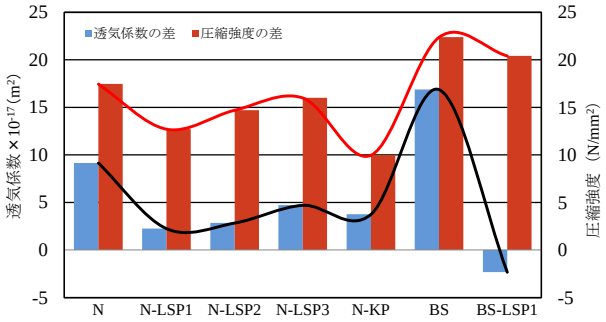
Al の含有量による影響を見てみる。**図－5** の各材齢の透気係数では，輝緑岩微粉末を用いた供試体 N-KP が最小となるが，材齢の進行による透気係数の差を比較した**図－6** では，N-LSP1 が最小となっている。このことから，Al を多量に含む輝緑岩微粉末の添加は，特に材齢初期で透気係数を抑制し，$CaCO_3$ を主体とし Al を少量含有する石灰石微粉末(LSP1，豊橋市産)の添加は長期材齢において良い効果が発揮されると考える。同様の傾向は，圧縮強度においても確認できる。



図－5　透気係数（コンクリート供試体）



図－6　材齢の進行による透気係数の変化



図－7　石粉の添加による乾燥抵抗性
（圧縮強度差，透気係数差）

3.4 強度および透気試験結果に観察される石灰石微粉末の添加による乾燥抵抗性向上効果

ここでは前節の 3.2，3.3 に挙げた圧縮強度と透気性における乾燥抵抗性の傾向について合わせて検討する。**図－7** に標準養生と気中養生の圧縮強度差(**図－4** の材齢 91 日)と材齢の進行による透気係数の差(**図－6**)を合わせて比較する。圧縮強度と透気係数において各供試体の大小関係を比較すると，両者の大小関係には同様な傾向が見られる。両者で同様な傾向が得られたことは，Al を少量含有する石灰石微粉末の添加により乾燥に対する抵抗性が付与することの裏付けになると考えられる。

ただし，Al，Mg を多量に含む輝緑岩微粉末の添加は乾燥収縮を大きくすることからも，石灰石微粉末に含まれる Al が多くなることは好ましくないと考えられる。

石灰石微粉末中に含有される少量の Al により生成される水和物の化学組成と硬化物性に与える影響について，今後詳細な検討が必要である。

4. 実験結果と考察(シリーズ 2：モルタル供試体)

4.1 石灰石微粉末の添加率を変化させたモルタルのフレッシュ性状

シリーズ 1(コンクリート供試体)の結果には，Al を少量含む豊橋市産の石灰石微粉末の添加により乾燥に対する抵抗性が付与することが示唆された。そこでシリーズ 2 ではモルタル供試体を用い，上記石灰石微粉末の添加率の違いが圧縮強度，透気性に及ぼす影響について検討を行った。

表－5 にフレッシュ性状の試験結果を示し，**図－8** にモルタルフロー試験の結果を示す。まず，ブリーディング試験の結果について見てみる。ブリーディング試験に関してはペーストと N 以外の供試体ではブリーディング水は確認されなかった。このことから，石灰石微粉末などの石粉の添加にはブリーディングの抑制効果があることが確認される。

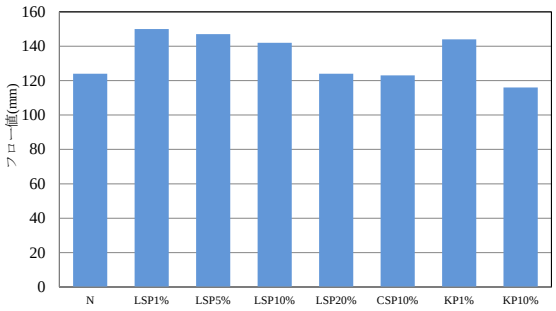
図－8 から，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加率が増加するとともにモルタルフロー値は低下することがわかる。しかし，石灰石微粉末の置換率が 1～10%，輝緑岩微粉末の置換率が 1%までは N よりもフロー値が大きくなっており，流動性の改善効果があると考えられる。また，石灰石微粉末の置換率が 20%程度まで増加しても N と同程度のフロー値を示しており，N と同等の流動性が得られる結果となっている。ペーストについてはフローテーブルに収まらない状態であり，LSP30%についてはフレッシュ性状が非常にバサバサした状態であったことから両者の測定は行っていない。

4.2 石灰石微粉末の添加量の違いがモルタルの圧縮強度に及ぼす影響

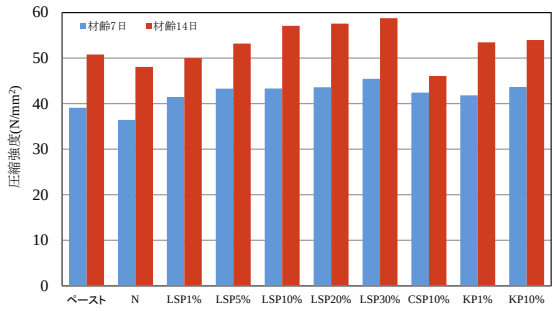
図－9 に標準養生を行った供試体，**図－10** に封緘養生を行った供試体の圧縮強度試験結果を示す。**図－9** の材齢 7 日，14 日における圧縮強度では，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末を添加した供試体 LSP，KP において，N よりも顕著な増加が見られる。これは石粉を添加したことで，初期の水和反応の促進，ブリーディング抑制による遷移帯の減少などが起きた影響と考えられる。材齢 14 日の結果を見てみると，石灰石微粉末の添加量の増加に伴って強度が増加しているが，石灰石微粉末の置換率が 10%以上になると，置換率が 1～10%までにおける強度の増加率と比較して緩やかな増加となっている。このことから，石灰石微粉末の添加による強度増加は置換率が 10%程度までが最も効果的であると考えられる。砕石微粉末を用いた供試体 CSP については，N に比べ若干の強度増加に留まっている。

表－5　モルタルのフレッシュ性状

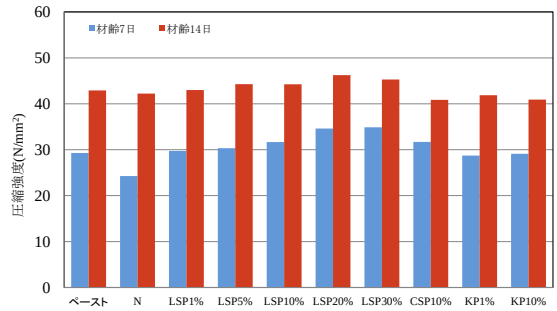
配合	モルタルフロー (mm)	ブリーディング水量 (g)
ペースト	-	14.1
N	130-118	1.1
LSP1%	156-143	0
LSP5%	147-147	0
LSP10%	144-140	0
LSP20%	125-122	0
LSP30%	-	0
CSP10%	122-124	0
KP1%	145-142	0
KP10%	118-114	0



図－8　モルタルフロー



図－9　圧縮強度（モルタル供試体，標準養生）



図－10　圧縮強度（モルタル供試体，封緘養生）

図－10 の封緘養生を行った供試体においても材齢 7 日で，石灰石微粉末や輝緑岩微粉末の添加により，標準養生を行った供試体と同様に，N よりも圧縮強度が増加する傾向を示している。ただし，材齢 14 日では，石灰石微粉末を添加した供試体の圧縮強度の増加は，材齢 7 日における強度増加よりも小さくなっている。また，材齢 14 日における砕石微粉末や輝緑岩微粉末を添加した供試体 CSP，KP では，封緘養生を行うと N よりも圧縮強度が同程度か若干小さくなる結果となっている。

4.3 石灰石微粉末の添加量の違いによる透気性への影響

図－11 に透気試験結果を示す。**図－11** から，石灰石微粉末などの石粉を添加することで透気係数が小さくなることを確認できる。この傾向は，コンクリート供試体の材齢 28 日の傾向(**図－5**)と逆の傾向である。コンクリート供試体ではブリーディングの影響を排除するために増粘剤を使用しているのに対し，モルタル供試体では増粘剤を使用していないため，モルタル供試体の透気試験ではブリーディングの影響が表れ，両者の結果において逆の傾向が示されたと考えられる。

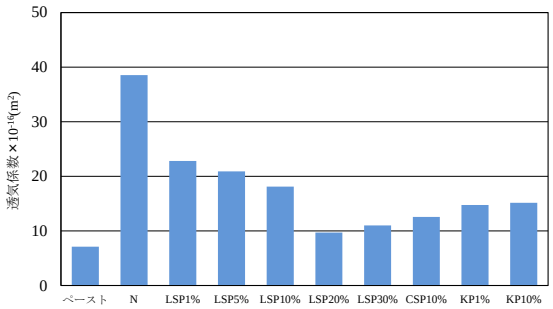
石灰石微粉末の置換率の違いによる影響について見てみる。石灰石微粉末の置換率が増加すると透気係数は減少する。なかでも，置換率が 20%において透気係数が最小となり，置換率が 30%では透気係数が若干増加する傾向が確認できる。この傾向は，封緘養生を行った供試体の材齢 14 日における圧縮強度と同様の傾向である。また，輝緑岩微粉末を添加した供試体 KP では置換率が増加しても同程度の透気係数を示している。しかし，石灰石微粉末を使用した同置換率の供試体と比較すると，KP1%と KP10%のどちらにおいても透気係数は抑制されていることがわかる。これはコンクリート供試体と同様な傾向であり，輝緑岩微粉末に含有される Al が透気係数を抑制する効果のある生成物を生成しているとも考えられる。

5. まとめ

本研究では，Al を含有する石灰石微粉末を細骨材の 100 kg/m^3 で置換を行ったコンクリートの乾燥収縮や圧縮強度，透気性について検討を行った。また，石灰石微粉末の細骨材に対する置換率を変化させたモルタルを用いて，置換率の相違が圧縮強度，透気性に及ぼす影響についても検討を行った。

Al を含有する石灰石微粉末を添加したコンクリートでは，乾燥収縮を数 10μ 程度(10%程度)低減し，乾燥環境下における圧縮強度低下の緩和や透気係数の増加を抑制させる効果が確認された。このことは，石粉に含まれる Al などにより生成されるモノカーボネートやヘミカーボネートなどの生成物による影響とも考えられる。今後は水和物の特定と，その水和物がコンクリートの物性にどのように影響するかを詳細な検討により明らかとしたい。

一方，石灰石微粉末の置換率を変化させたモルタル供試体では，石灰石微粉末の置換率の増加に伴って圧縮強度が増加する結果を得た。しかし，置換率が 10%以上の領域においては圧縮強度の増加率が緩やかになる結果となった。また，透気試験では置換率が 20%で透気係数を最も抑制する結果となった。ただし，石灰石微粉末の置換率の増加に伴い，モルタルフローなどのフレッシュ性状も低下することから石灰石微粉末の置換率は 10～20%程度が最も効果的であると考えられる。



図－11　透気係数（モルタル供試体，材齢 14 日）

上記の結果が得られた要因には，粉体の添加によって，ブリーディングが抑制され遷移帯が縮小されることやセメント粒子間の充填効果など物理的な要因と，石灰石微粉末に含有される少量の Al による生成物の影響など化学的な要因が考えられる。今後，生成物の化学的分析や空隙構造の分析により詳細な検討を行う。

謝辞

本研究は，豊橋市が施行する「新事業創出等支援事業」に係る研究助成と中部採石工業株式会社の助成を受けて実施しました。また，竹本油脂株式会社 小林竜平氏，中部採石工業株式会社 牧宗一郎氏，名古屋工業大学 鵜飼貴史氏，山崎浩行氏には実験の実施にあたり多くの御協力を頂きました。ここに記し深く感謝します。

参考文献

1) 辻幸和，真野孝次，友澤史紀，山本和成：コンクリート用砕石粉の品質の実態に関する調査研究，コンクリート工学，Vol.48，No.3，pp.15-22，2010.3
2) 国府勝郎，兼安真司，黒済世雄：鉱物微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮とひび割れ性状，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.620-625，1995
3) 平田隆祥，竹田宣典，十河茂幸：石灰石微粉末がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響に関する基礎研究，土木学会第 48 回年次学術講演会，pp.438-439, 1993
4) 平田隆祥，三浦律彦，十河茂幸：石灰石微粉末を紛体の増量材として使用したコンクリートの強度特性について，セメント・コンクリート論文集，No.51, pp.352-357, 1997
5) 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