

論文 副産物石灰石微粉末を外割添加したコンクリートのブリーディング性状および各種硬化物性の関係

太田 健司^{*1}・吉田 亮^{*2}・齊藤 和秀^{*3}・吉澤 千秋^{*4}

要旨：石灰石微粉末の添加がフレッシュ性状や硬化物性に与える影響について検討を行った。石灰石微粉末を添加すると既往研究と同様にブリーディングは抑制された。そして、ブリーディングを抑制することで透気性や電気伝導性など物質移動抵抗性の低下を防ぐ結果が得られた。また、石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末を組合せることにより、強度増加や乾燥収縮低減など硬化物性が向上した。これは、既往研究に報告される石灰石微粉末による高炉スラグ微粉末の反応促進が与える効果と考えられる。

キーワード：石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ細骨材, ブリーディング, 物質移動抵抗性

1. はじめに

天然骨材の枯渇に伴う碎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⁾。この問題に対し、コンクリート用砕石粉に関する JIS 規格の改定が行われるなど、石粉の利用を促進する取組みが見られる。しかし現状では、例えば豊橋市の採石工場において約 60 t/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。

また、工場や駐車場などの土間コンクリートではひび割れの発生が多く、その要因として施工不良の影響のみならず乾燥収縮による影響も考えられる。乾燥収縮の対策として膨張材の使用なども挙げられるが、収縮低減効果のある高炉スラグ細骨材²⁾を使用することで初期コストの低減や環境負荷低減につながると考えられる。しかし、高炉スラグ細骨材を使用することにより、ブリーディング量増加などフレッシュ性状の低下が懸念される。

既往の研究では、石灰石微粉末を細骨材に対して置換した場合、置換量の増加に伴いブリーディング率が低減されることも報告されている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⁾。また、石灰石微粉末の添加により、材齢初期においてエーライトの反応が促進すること⁵⁾、C₃A と反応してヘミカーボネートやモノカーボネートなどのカーボネート系水和物を生成することが報告されている⁶⁾。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、高炉スラグ微粉末の反応を促進させる効果についても言及されている^{7, 8)}。

本研究では、豊橋市の採石工場で廃棄される AI を微

量に含有する石灰石微粉末の有効利用を目指し、石灰石微粉末の添加がブリーディングに与える影響や硬化物性に与える影響について検討を行うとともに、ブリーディング抑制が物質移動抵抗性など硬化物性に及ぼす影響についても検討を行った。そのほか、土間コンクリートの乾燥収縮対策として、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの流動性向上およびブリーディング抑制などフレッシュ性状を改善する目的で石灰石微粉末を添加した配合について、生コンプラントにおいて実機練り供試体を作製し同様に検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、試験室で練混ぜを行い作製した試験室練りシリーズと、実用化の検討を行うため生コンプラントの実機により練混ぜを行った実機練りシリーズを用いてそれぞれ実験を行った。

試験室練りシリーズ：試験室で作製したコンクリート供試体の実験については、豊橋市産石灰石微粉末を細骨材に対して内割で置換を行い、置換量の違いがフレッシュ性状に及ぼす影響や圧縮強度、乾燥収縮など硬化物性への影響について検討を行った。

実機練りシリーズ：実機練り供試体では、石灰砕砂、川砂などの天然骨材や高炉スラグ細骨材に豊橋市産石灰石微粉末を添加したコンクリートのブリーディング抑制が透気性や電気伝導性などの物質移動抵抗性に与える影響について検討を行った。

2.1 試験室練りシリーズ

(1) 使用材料と配合

供試体は普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末(比表面積 4000 cm²/g, 石膏無し)、水道水、大井川水系

*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 JFE ミネラル株式会社 技術サービス部 部長 工博 (正会員)

表－1 配合とフレッシュコンクリートの性状(試験室練りシリーズ)

供試体 種別	W/B (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)									スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T (℃)
			C	BFS	W	OS	BS	LSP	OG	SP1	消泡剤			
N	60	60	275		165	858		-	1048	2.75	1.4	9.9	1.9	19.8
NL25		835				25		1.38		7.0		1.7	19.6	
NL50		812				50		1.38		6.6		1.7	19.5	
NL100		763				100		2.75		9.8		1.8	20.0	
N-BS		60				-	912	-		2.75		-	19.0	
N-BS-L100		44					811	100		2.75		-	19.3	
N-BS-L200		35					710	200		3.85		6.5	2.8	19.5
B		60	151	124		848		-		2.20		10.7	1.6	19.4
BL25		825				25		1.38		7.0		1.9	19.6	
BL50		802				50		1.93		9.4		1.9	19.5	
BL100		753				100		2.20		8.4		1.7	19.7	
B-BS		60				-	901	-		2.20		-	-	-
B-BS-L100		44					800	100		2.20		3.1	-	20.0
B-BS-L200		35					699	200		4.13		7.7	2.6	20.0

BFS：高炉スラグ微粉末(石膏無し) BS：高炉スラグ細骨材 LSP：豊橋市産石灰石微粉末

産陸砂，福山産高炉スラグ細骨材，豊橋市産石灰石微粉末(比表面積 2800 cm²/g)，岡崎産硬質砂岩碎石(G_{max}=20 mm)，高機能型のAE減水剤，消泡剤を使用し作製した。

高炉スラグ微粉末は高炉セメント B 種を想定し，セメントに対して内割で 45%置換した。石灰石微粉末は細骨材の一部として置換し，大井川産細骨材に対しては，置換量を 25，50，100 kg/m³の 3 水準とした。一方，高炉スラグ細骨材に対しては置換量を 100，200 kg/m³の 2 水準とした。配合とフレッシュ性状を表－1，使用材料を表－2 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コンクリートをφ150×300 mm のブリキ製の円筒型枠に採取し，測定は JIS A 1123 に準拠して行った。

(3) 細骨材の実積率試験

細骨材に対する石灰石微粉末の置換量をコンクリート供試体の配合と同一として細骨材の実績率を測定した。試験は JIS A 1104 に準拠して行った。

(4) 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 8 週まで乾燥収縮の測定を行った。

(5) 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，標準養生を行った供試体と材齢 7 日まで封緘養生した後，各測定材齢まで温度 20±3℃，湿度 60±5%の室内で気中養生を行った供試体の 2 種類とした。試験は JIS A 1108-2006 に準拠し，材齢 7 日と材齢 28 日で測定を行った。

2.2 実機練りシリーズ

(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，豊橋市産石灰砕砂，天竜川産川砂，福山産高炉スラグ細骨材，

表－2 使用材料(試験室練りシリーズ)

記号	名称	密度 (g/cm ³)
C	普通ポルトランドセメント	3.15
BFS	高炉スラグ微粉末	2.91
W	水道水	-
OS	大井川水系産陸砂	2.57
BS	福山産高炉スラグ細骨材	2.73
LSP	豊橋市産石灰石微粉末	2.72
OG	岡崎産硬質砂岩砕石	2.66
SP1	高機能タイプAE減水剤	-

豊橋市産石灰石微粉末，豊橋市産石灰砕石(G_{max}=20 mm)，AE 減水剤を使用し作製した。

石灰石微粉末は水粉体比が 50%となるように細骨材に対して内割置換を行い，練混ぜは生コンプラントの実機を用いて行った。配合とフレッシュ性状を表－3，使用材料を表－4 に示す。

(2) 簡易ブリーディング試験

試験は試験室練り供試体と同じであり，試験開始からおよそ 2 時間程度まで測定を行った。

(3) 長さ変化試験

試験は試験室練り供試体と同じである。

(4) 圧縮強度試験

φ100×200 mm の円柱供試体を作製し，材齢 7 日まで封緘養生した後，各測定材齢まで室内曝露養生(養生期間は 8 月～11 月)を行った。試験は JIS A 1108-2006 に準拠し，材齢 7，28，91 日で測定を行った。

(5) 透気試験

φ100×50 mm の円盤供試体を作製し，材齢 7 日まで封緘養生した後，各測定材齢まで室内曝露養生を行った。試験は材齢 28 日と材齢 91 日で行い，負荷圧力を 0.2 MPa とし，水上置換により透気量の測定を行った。

(6) 電気伝導率試験

φ100×50 mm の円盤供試体を作製し，材齢 7 日まで封緘養生した後，各測定材齢まで室内曝露養生を行った。試験は材齢 28 日と材齢 91 日で行い，JSCE-G 571-2003 に準拠し，電気泳動法により測定を行った。直流電源装

表-3 配合とフレッシュコンクリートの性状(実機練りシリーズ)

供試体 種別	W/C (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)								スランブ (cm)	空気量 (%)	C.T (℃)		
			W	C	LS	TS	BS	LSP	LG	SP2					
LS	60	-	177	295	881	-	-	-	959	2.66	18.0	5.0	32.0		
TS					-	838	-	-	986	2.66	16.0	4.1	32.0		
TS-LSP		50			-	781	-	59	986	2.66	17.0	4.5	31.0		
BS-TS-LSP					-	403	425	59	959	3.25	16.5	5.0	31.0		
BS-LS-LSP					438	-	453	5	959	2.66	15.5	5.7	31.0		

LS:豊橋市産石灰砕砂 TS:天竜川産川砂 BS:福山産高炉スラグ細骨材 LSP:豊橋市産石灰石微粉末

置を用いて供試体に 30 V の電圧を負荷した後、試験開始 15 分後の電流値の測定を行い、式(1)により電気伝導率 σ の算出を行った。

$$\sigma (\mu \text{ S/cm}) = (I \times L) / (V \times A) \quad (1)$$

ここに、I：電流の測定値(A)

L：供試体厚さ(cm)

V：試験時の電圧(V)

A：供試体断面積(cm²)

3. 実験結果と考察(試験室練りシリーズ)

3.1 石灰石微粉末の添加がブリーディング抑制に及ぼす影響

図-1 にブリーディング試験結果を示す。既往の研究と同様に、天然骨材、高炉スラグ細骨材のどちらにおいても石灰石微粉末の添加量増加に伴い、ブリーディング量は低減している。ただし、結合材の一部に高炉スラグ微粉末を使用し、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた配合については、同様な傾向は見られなかった。

3.2 石灰石微粉末添加が細骨材の実績率に及ぼす影響

図-2 に細骨材の実績率試験の結果を示す。細骨材に対する石灰石微粉末の置換量増加に伴い、天然骨材、高炉スラグ細骨材の両者で実績率は増加している。石灰石微粉末の添加により、細骨材中の微粒分が増加し細骨材粒子間を埋める間詰効果により空隙が減少したため実績率も増加したと考えられる。

3.3 石灰石微粉末添加による細骨材の実績率増加がブリーディング量に与える影響

ここでは、ブリーディング量と細骨材の実績率との関係について検討を行う。図-3 にブリーディング量と細骨材の実績率の関係を示す。図-3 において、ブリーディング量と細骨材の実績率に相関関係が確認できる。石灰石微粉末の添加が物理的に細骨材粒子間の空隙を充填する間詰効果により、水みちとなる余剰水の上昇経路を遮断し、ブリーディングが抑制されたと考えられる。なお、結合材の一部に高炉スラグ微粉末、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた配合については、B-BS において練上がり直後のフレッシュコンクリートに著しいこわばりが確認されたことなどからブリーディング量が正しく測定

表-4 使用材料(実機練りシリーズ)

記号	名称	密度 (g/cm ³)
C	普通ポルトランドセメント	3.16
W	水道水	-
LS	豊橋市産石灰砕砂	2.67
TS	天竜川産川砂	2.62
BS	福山産高炉スラグ細骨材	2.76
LSP	豊橋市産石灰石微粉末	2.72
LG	豊橋市産石灰砕石	2.70
SP2	AE減水剤	-

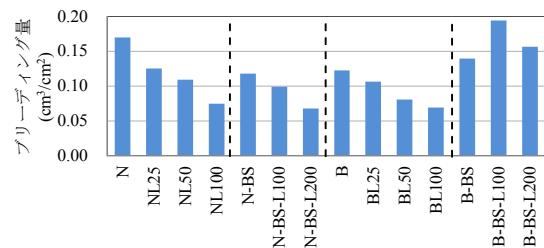


図-1 ブリーディング量(試験室練り供試体)

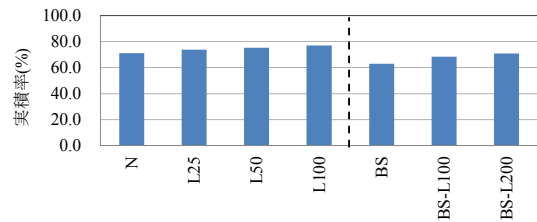


図-2 細骨材の実績率

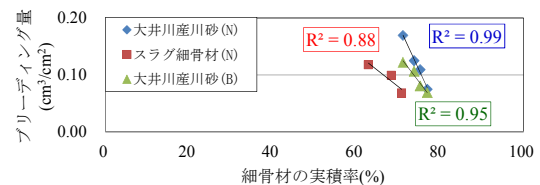


図-3 ブリーディング量と細骨材の実績率の関係

できていないと考えられる。そのため、図-3 における検討からは除外した。

3.4 石灰石微粉末添加が強度発現に与える影響

図-4 に標準養生を行った供試体、図-5 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-4 から、材齢 7 日において、結合材種、細骨材種に関わらず石灰石微粉末の添加により、初期強度が増加していることがわかる。既往研究に報告されているように、石灰石微粉末添加は材齢初期のセメントの水和反応を促進していることが本研究の試験結果からも窺える。石灰石微粉末添

加による強度増加は高炉スラグ細骨材を用いた供試体でより顕著に見られることから、細骨材の実績率増加に伴う充填効果や微粒分増加によって細骨材のかみ合わせが改善されたことによると考えられる。つぎに、材齢 28 日について見てみると、結合材に普通セメント、細骨材に天然骨材を使用した供試体では、石灰石微粉末添加による強度増加は見られない。しかし、高炉スラグ微粉末を用いた全ての供試体で、石灰石微粉末の添加により強度増加が見られる。既往研究では、石灰石微粉末の添加により、高炉スラグ微粉末の反応が促進されていると報告されているが、本研究の試験結果では、反応促進が硬化物性へ与える影響が見られたと考えている。

一方、図-5 から、気中養生を行った供試体について見てみると、材齢 7 日、28 日ともに石灰石微粉末の添加により標準養生と同様な傾向が見られる。水和の進行が抑制される乾燥環境下においても、石灰石微粉末の添加により高炉スラグ微粉末の反応が促進していると考えられる。

3.5 石灰石微粉末の添加が乾燥収縮に与える影響

図-6 に普通セメントを用いた供試体の乾燥収縮試験結果を、図-7 に結合材として高炉セメント B 種を想定した供試体の乾燥収縮試験結果を示す。図-6、図-7 から、天然骨材を用いた供試体と高炉スラグ細骨材を用いた供試体を比較すると、高炉スラグ細骨材を用いることでおよそ 200 μ 程度、収縮量が低減していることがわかる。

つぎに、石灰石微粉末の添加が乾燥収縮に与える影響について見てみる。図-6 から、結合材に普通セメントを用いた供試体では、石灰石微粉末の添加により収縮量が若干大きくなっていることがわかる。これは、石灰石微粉末の添加によりブリーディングが抑制されることで、実質の水セメント比が石灰石微粉末無添加の供試体よりも最大で 5%程度高くなったことに起因すると考えられる。

一方、図-7 では、結合材の一部に高炉スラグ微粉末を使用した供試体では、前述のように石灰石微粉末添加により実質の水セメント比は若干増加しているにもかかわらず、収縮量に差は見られない。前掲した既往研究では、石灰石微粉末の添加が物理的な間詰効果のみならず、普通セメントおよび高炉スラグ微粉末の水和反応促進など化学的に影響を与えることが報告されているが、本研究では前述の強度試験および乾燥収縮試験においてその影響が確認されたと考えている。

4. 実験結果と考察(実機練りシリーズ)

4.1 簡易ブリーディング試験結果

図-8 に簡易ブリーディング試験結果を示す。TS と

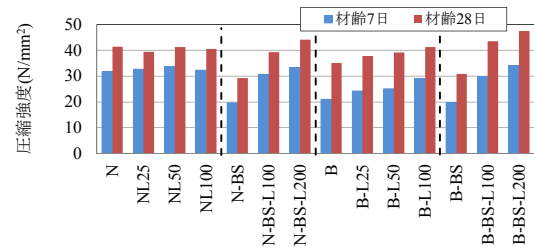


図-4 圧縮強度(試験室練りシリーズ, 標準養生)

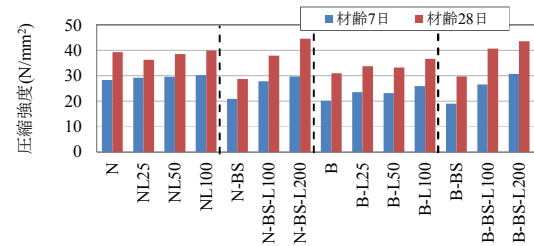


図-5 圧縮強度(試験室練りシリーズ, 気中養生)

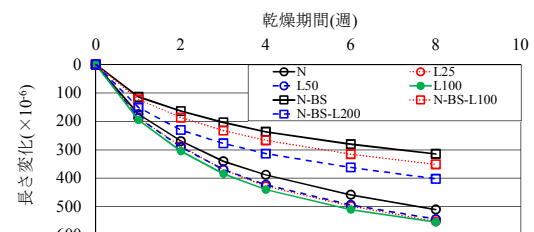


図-6 乾燥収縮(普通セメント)

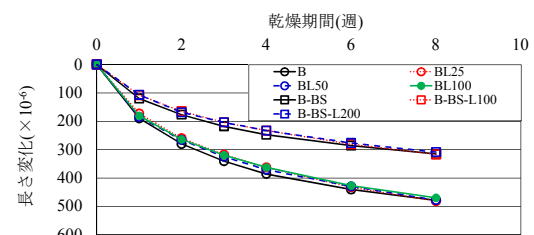


図-7 乾燥収縮(高炉スラグ微粉末内割置換)

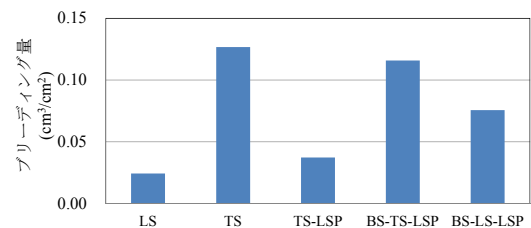


図-8 ブリーディング量(実機練りシリーズ)

TS-LSP を比較すると、石灰石微粉末の添加によりブリーディング量が大きく低減している。LS についても TS より大きく低減しているが、これは細骨材質量の 12%の微粒分が含まれており、前述同様の抑制効果が現れたと考えられる。高炉スラグ細骨材を用いた配合においても、石灰石微粉末の添加により TS よりもブリーディング量が抑制されている。

4.2 石灰石微粉末の添加が乾燥環境下での強度発現に及ぼす影響

図-9 に室内曝露養生を行った供試体の圧縮強度試験結果を示す。TS と TS-LSP を比較すると、石灰石微粉末の添加によるブリーディングの抑制により、実質の水セメント比が若干増加しているにも関わらず、材齢 7 日における初期の強度増加が確認される。これは、石灰石微粉末添加により初期の水和反応が促進されたことによるものと考えられる。

材齢 91 日について見てみると、TS を除くすべての供試体で極僅かではあるが圧縮強度が増加していることがわかる。LS についても多くの微粒分を含んでいることから、石灰石微粉末の添加により長期間の乾燥環境下においても圧縮強度が増進するという、既往の研究⁹⁾と同様な傾向が確認された。このことから、石灰石微粉末の添加により乾燥の影響を受けやすい実構造物において、強度低下を抑制することが期待される。

4.3 乾燥収縮試験結果

図-10 に乾燥収縮試験結果を示す。高炉スラグ細骨材を用いることで、若干ではあるが天然骨材よりも収縮量が低減している。このことから実構造物においても、高炉スラグ細骨材を用いることで乾燥収縮を低減することができると考えられる。一方、天然骨材を用いた供試体においては、TS よりも TS-LSP で収縮量が若干大きくなっている。これは、試験室練り供試体と同様、石灰石微粉末添加によるブリーディングの抑制から実質の水セメント比が若干増加したことに起因していると考えられる。

4.4 石灰石微粉末の添加が乾燥環境下での透気性に及ぼす影響

図-11 に室内曝露養生を行った供試体の透気試験結果を示す。TS と LS, TS-LSP を比較すると、材齢 28 日、91 日ともに石灰石微粉末の添加により透気係数は抑制されている。この傾向は、試験室練り供試体と同様の結果となっている。一方、高炉スラグ細骨材を用いた供試体については、TS と同程度の透気係数を示している。

4.5 石灰石微粉末の添加が乾燥環境下での電気伝導率に及ぼす影響

図-12 に室内曝露養生を行った供試体の電気伝導率試験結果を示す。TS と TS-LSP を比較すると、材齢 28 日、91 日ともに石灰石微粉末の添加により電気伝導率は抑制されている。一方、高炉スラグ細骨材を用いた供試体では、材齢の進行に伴い電気伝導率は抑制されており、材齢 91 日では、TS よりも抑制される結果となっている。これは、材齢の進行に伴い、高炉スラグ細骨材の潜在水硬性が促進されたことに起因すると考えられる。

4.6 石灰石微粉末添加によるブリーディング抑制が物質移動抵抗性に及ぼす影響

前節までの結果から、石灰石微粉末の添加により透気係数の抑制や電気伝導率の抑制が確認された。このこと

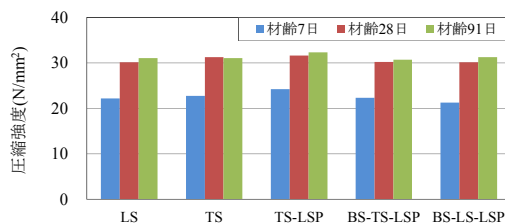


図-9 圧縮強度(実機練りシリーズ)

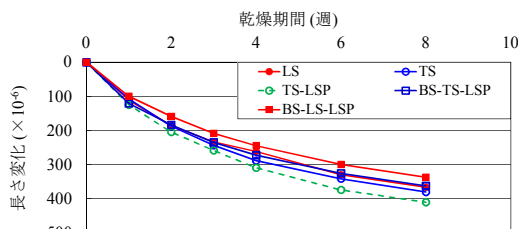


図-10 乾燥収縮(実機練りシリーズ)

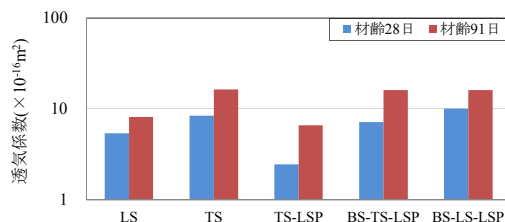


図-11 透気係数(実機練りシリーズ)

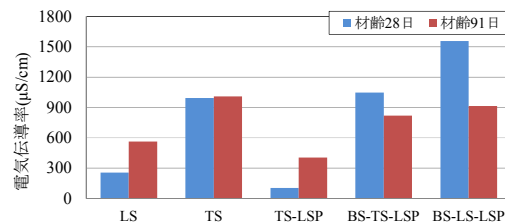


図-12 電気伝導率(実機練りシリーズ)

から、石灰石微粉末の添加によりコンクリートの耐久性に影響を及ぼすと考えられる物質移動抵抗性の低下を抑制できることが示唆された。そこで、本研究では石灰石微粉末の添加が物質移動抵抗性の向上に及ぼす影響について考察する。

コンクリート供試体では、ブリーディングにより硬化体内部に気体やイオンなど、物質の移動経路となり得る水みちが形成されることが考えられる。しかし、石灰石微粉末の添加によりブリーディングを抑制することで、水みちの形成が防止され物質移動抵抗性が向上していると推察される。そのため、ここではブリーディング量と物質移動抵抗性の関係について検討する。図-13 にブリーディング量と材齢 91 日における透気係数の関係を、図-14 にブリーディング量と材齢 91 日における電気伝導率の関係を示す。図-13、図-14 において、ブリーディング量と物質移動抵抗性の間には相関関係が確認できる。この結果は、石灰石微粉末の添加によるブリーディングの抑制が、物質透過性の抑制に寄与することを示唆して

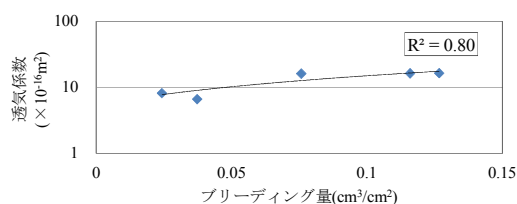


図-13 ブリーディングと透気係数の関係

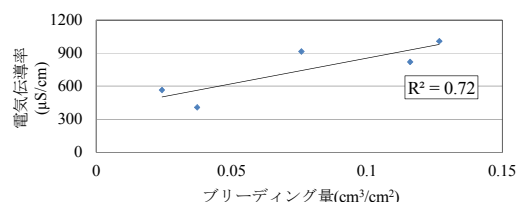


図-14 ブリーディングと電気伝導率の関係

いる。石灰石微粉末の添加によりブリーディングを抑制することで、実質の水セメント比を若干増加させ、セメント粒子間に形成されるキャピラリー空隙を増大させると考えられる。しかし、透気性や電気伝導性などの物質移動抵抗性に対しては、水セメント比の増加による硬化体組織内部の空隙変化よりも、ブリーディング水が供試体表面に浮上する際に、硬化体内部に連続して形成すると考えられる水みちの方が大きく関与していると推察される。以上のことから、石灰石微粉末の添加によるブリーディング抑制は、ブリーディングを引き起こす余剰水を硬化体内部に分散させることにより、水みちの形成を抑止できるため、物質移動抵抗性の低下を抑制することができると考えられる。

5. まとめ

本研究では、石灰石微粉末を細骨材の一部と置換したコンクリートのブリーディング抑制効果や乾燥収縮、圧縮強度および物質移動抵抗性などの硬化物性について検討を行った。

石灰石微粉末の添加により、細骨材の実積率は増加しブリーディングの抑制効果が認められ、ブリーディング量と細骨材の実積率の間には高い相関が確認された。これは、石灰石微粉末の添加による細骨材粒子間の空隙が充填される間詰効果など物理的影響によるものと考えられる。

一方、硬化物性については、石灰石微粉末の添加が透気係数や電気伝導率など物質移動抵抗性の低下を抑制する効果が確認された。これは、石灰石微粉末を添加することで前述の間詰効果により細骨材粒子間が密にパッキングされることで水みちとなる余剰水の上昇経路を断ち、余剰水を硬化体内部に分散させることで、物質移動抵抗性の低下が抑制されたと考えられる。

また、石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末を組合せた供試体では、石灰石微粉末添加によるブリーディング抑制

により実質の水セメント比が増加しているにも関わらず収縮量に差が見られないこと、両者を組合せた供試体のみ強度増加が見られることなど、石灰石微粉末添加により高炉スラグ微粉末の反応を促進する化学的影響も認められた。

謝辞

須山建設(株)、浜松生コン(株)、竹本油脂(株) 野田貴寛氏、中部採石工業(株) 牧宗一郎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致します。

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) 齊藤和秀, 吉澤千秋, 吉田亮, 梅原秀哲: 収縮低減剤と高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, 2013(掲載予定)
- 3) 鶴田昌宏, 小嶋明, 中村秀三: 細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.99-104, 2004
- 4) 平田隆祥, 三浦律彦, 十河茂幸: 石灰石微粉末を粉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) 久我比呂氏, 浅賀喜与志: ポルトランドセメントの水和反応に及ぼす無機質微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.62-67, 1996
- 6) 李琮揆, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機: 石灰石微粉末を多量に添加した $C_3A-CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 系の水和反応, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.13-18, 1998
- 7) S.Hoshino, K.Yamada and H.Hirano: XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.357-367, 2006
- 8) 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
- 9) 太田健司, 吉田亮, 齊藤和秀, 梅原秀哲: AI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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1918-1923, 2012