

論文 石灰石微粉末および鉍物質混和材を混合使用したコンクリートの特性に関する研究

李 建哲*1・李 文煥*2・朴 祚範*3・柳 得鉉*4

要旨：本研究では、石灰石微粉末に対するコンクリート用混和材としての活用可能性を検討するため、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末などの鉍物質混和材との混合使用の特性を実験的に検討した。その結果、石灰石微粉末の粉末度別置換率と流動性の関係は、高炉スラグ微粉末に置換した場合、スランプ値が増加したが、フライアッシュの場合、類似または若干減少した。また、圧縮強度は石灰石微粉末の置換率が増加するほど低下し、鉍物質混和材と混合使用する場合、フライアッシュを混入した試料は、初期強度が大きい傾向を示すが、長期材齢では高炉スラグ微粉末を混入した試料の方が大きくなった。

キーワード：石灰石微粉末、鉍物質混和材料、粉末度、強度発現

1. はじめに

現在コンクリートは、その量的成長より多様な用途で活用するため、各種混和材料と混合使用するのが一般的になっている。そこで、これからのコンクリート技術動向は、特集な現場における適用または、性能改選などを目的とした多様な混和材料の開発が期待される。

すでに、産業副産物を加工した高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどは、コンクリート用混和材として使用されて多くの研究の報告があり、コンクリート施工現場においても一般的に使うようになった。また、これはこらからもセメント代替材として需要の増加が予想される。

このような鉍物質混和材とは違い、天然岩石を粉砕した石灰石微粉末は、コンクリート硬化体の内部で化学反応ほとんどなく、強度発現がほぼないため、混和材として使用実績が少ない。

しかし、石灰石微粉末をコンクリート用の混和材として使用する場合、流動性改善、ブリデ

ィング低減、水和熱減少などの効果が報告されている¹⁾。また、石灰石微粉末は、韓国において豊富に埋蔵されているため、コンクリート用の混和材料として使用すると経済的である。

本研究では、石灰石微粉末をコンクリート用混和材として活用するため、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュと混合して使用する方法について検討した。また、その混和材については、粉末度の差による影響について検討した。

2. 石灰石微粉末の特性

本研究では、韓国江原道で生産された石灰石微粉末を対象とした。写真—1に、その生産工程を示す。まず、石山における石灰石の採鉉後、移動して1次破碎、2次粉砕を通じて用途に合わせてそれぞれの粒度および粉末度を持つ製品として生産する。

石灰石微粉末は、加工方法と粉砕程度によって焼成用、中炭用、脱流用、工業用、農業用な

*1 韓国建設技術研究院 建築都市研究部 PD 研究員 工博 (正会員)

*2 韓国建設技術研究院 建築都市研究部 前任研究員 工博 (正会員)

*3 有進企業 (株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*4 有進企業 (株) 技術研究所 所長 工博 (正会員)

ど、多様な用途と使用される。また、各々の用度によって粉末度が違うため、本実験では一般範囲である粉末度 $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以下で生産されたものをコンクリート用混和材として適用した。

3. 実験概要

3.1 実験計画

本研究の実験の要因と水準を表—1に、コンクリートの調合を表—2に示す。基準調合は、W/Bを52%、目標スランプを $180\pm 25\text{mm}$ 、目標空気量を $4.5\pm 1.5\%$ とし、シリーズIでは高炉スラグ微粉末を結合材に対する体積比で40%を置換したものを、シリーズIIでは同じくフライアッシュを20%置換したものとした。

また、石灰石微粉末の置換率は、高炉スラグ微粉末に置換する場合、その体積比で10%、20%、30%の3水準とし、フライアッシュに置換する場合は、粉体量を高炉スラグ微粉末と同様にするため、20%、40%、60%の3水準とした。

さらに、以上に対して粉末度が2800、3300、 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 級の3種類にそれぞれ適用した。

3.2 使用材料

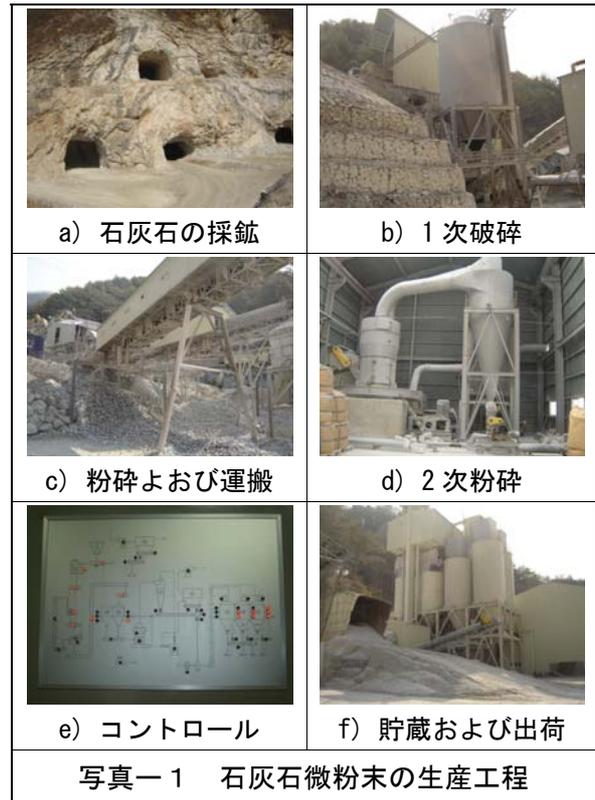
表—3に、本実験で用いた使用材料を示す。実験に用いた全ての材料は韓国産を用いており、KS(韓国産業規格)に合格したものを使用した。

ただ、石灰石微粉の基礎品質試験はJCIの石灰石微粉末品質規格(案)を準じたが、一部化学成分はJCI規格(案)を満足していないものもある。

3.3 試験方法

フレッシュコンクリートにおいては、スランプ試験および空気量の測定を行った。また、硬化コンクリートでは、3日、7日、28日、91日材齢において圧縮強度を測定した。

試験方法は、全て韓国にKS規格に準じて行った。



写真—1 石灰石微粉末の生産工程

表—1 実験の要因と水準

要因		水準	
W/B (%)	1	52	
目標スランプ (mm)	1	180 ± 25	
目標空気量 (%)	1	4.5 ± 1.5	
混和材の種類	3	. 高炉スラグ微粉末 (BS) . フライアッシュ (FA) . 石灰石微粉末 (LSP)	
石灰石微粉末の粉末度 (cm^2/g)	3	. 2, 800 . 3, 300 . 4, 000	
混和材置換率 (%)	基準調合	2	. BS/B=40 . FA/B=20
	LSP/BS	3	10, 20, 30
	LSP/FA	3	20, 40, 60

表—2 コンクリートの調合

シリーズ	W/B (%)	s/a (%)	BS/B (%)	FA/B (%)	LSP/BS (%)	LSP/FA (%)	単位質量 (kg/cm^3)									
							W	C	BS	FA	LSP	S	G	Ad		
I-BS0	52	48	40	0	0	0	173	199	122	0	0	855	922	1.60		
I-BS10					10		173	199	110		11	855	922	1.60		
I-BS20					20		173	199	98		23	855	922	1.59		
I-BS30					30		173	199	85		34	855	922	1.59		
II-FA0			0	20	0	0	0	0	173	265	0	46	0	855	922	1.55
II-FA20						20			173	265		37	11	855	922	1.57
II-FA40						40			173	265		28	23	855	922	1.58
II-FA60						60			173	265		18	34	855	922	1.59

表一 3 使用材料

材料	種類	性質				
セメント	OPC	密度: 3.15g/cm ³ , 粉末度: 3,390cm ² /g				
細骨材	韓国産	表乾密度: 2.58g/cm ³ , 粗粒率: 2.72, 実積率: 61.9%, 吸水率: 0.70%				
粗骨材	韓国産	表乾密度: 2.62g/cm ³ , 粗粒率: 6.93, 実積率: 58.7%, 吸水率: 0.78%				
混和材	BS	密度: 2.9g/cm ³ , 粉末度: 4,421cm ² /g, 強熱減量: 0.31%, 活性度指数(91日): 117%, MgO: 5.32%, SO ₃ : 2.40%				
	FA	密度: 2.19g/cm ³ , 粉末度: 3653cm ² /g, 強熱減量: 3.9%, 活性度指数(91日): 95.2%, SiO ₂ : 51.1%				
	LSP (cm ² /g)	2800 (2,902)	圧縮強度比 (%)	7日	120	CaCO ₃ : 94.12%, MgO: 0.86%, SO ₃ : 1.72%, Al ₂ O ₃ : 1.37%
				28日	104	
7日				125		
28日				110		
3,300 (3,470)	7日	133				
	28日	121				
4,000 (4,229)	7日	133				
	28日	121				
混和剤	AE 減水剤(標準)	ナフタリン系				

4. 試験結果および考察

4.1 流動性

図一 1 は、石灰石微粉末の置換率とスランプ値の関係である。

高炉スラグ微粉末に石灰石微粉末を置換した場合、その置換率が増加するほどスランプ値が若干増加する。また、粉末度による違いは、明らかな差は見られなく、BS2800のみがほかの試料に比べて若干低下する。

フライアッシュに置換した場合、置換率の増加に対して類似または若干低下する。これは、石灰石微粉末はフライアッシュより高炉スラグ微粉末に混合使用すると流動性改善効果があることを示唆する。

4.2 空気量

図一 2 は、石灰石の微粉末置換率と空気量との関係を示したものである。

高炉スラグ微粉末に置換した場合、置換率および粉末度の増加による差は少ない。

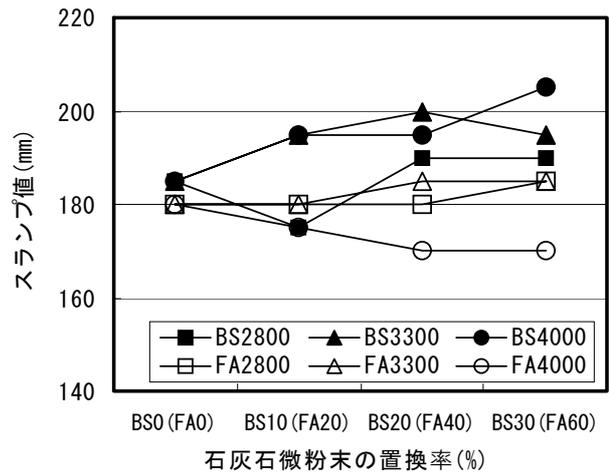
フライアッシュに置換した場合、基準調合より高い値を示す。これは、石灰石微粉末の置換率により空気量を減少させるフライアッシュの未燃炭素粉による影響と考えられる。

4.3 圧縮強度

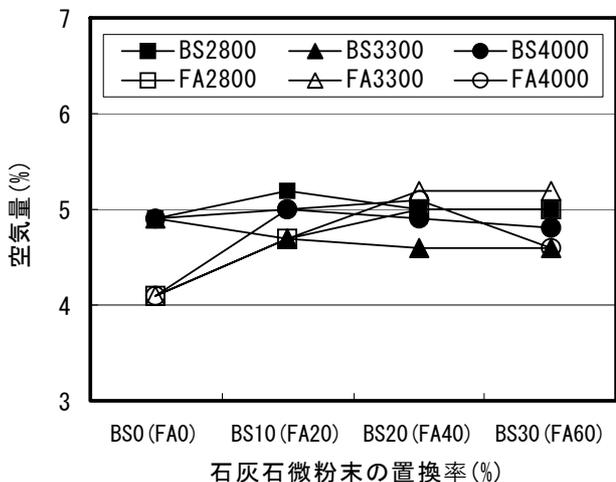
(1) 圧縮強度

図一 3 に、石灰石微粉末の置換率と圧縮強度の関係を示す。

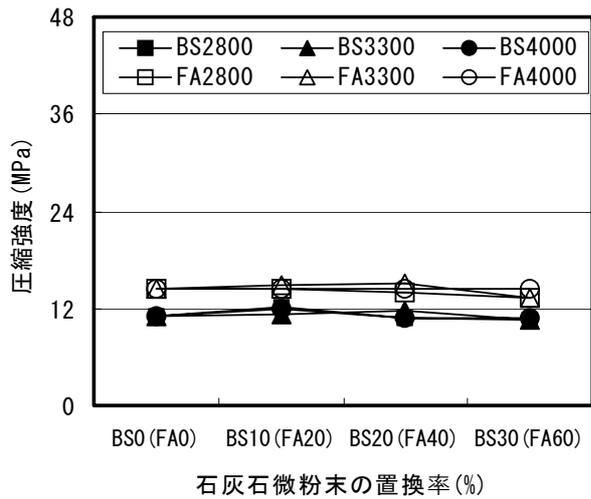
全般に石灰石微粉末の置換率が増加するほど、材齢が経過するほど圧縮強度が低下する傾向を示す。また、粉末度によってはほとんど差が現れてない。材齢 3 日と 7 日の初期材齢において石灰石微粉末の置換率による差があまり現れてない。ただ、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの使用量が異なる、すなわちフライアッシュを使用した調合が高炉スラグ微粉末を使用した調合より単位セメント量が相対的高いため、フライアッシュを使用した調合の方が炉スラグ微粉末を使用した調合より高い強度発現するこ



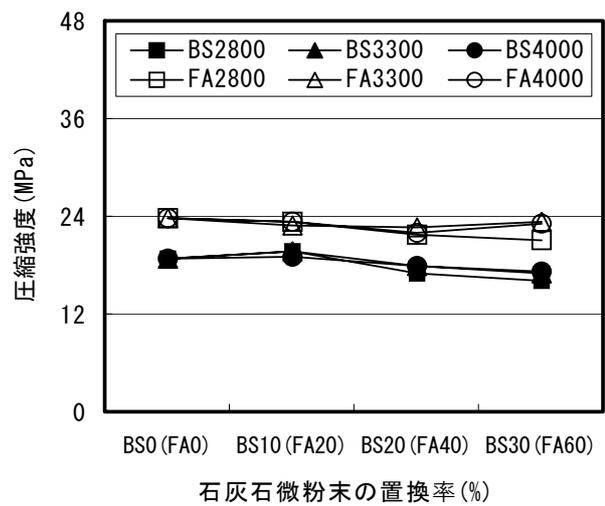
図一 1 石灰石微粉末置換率とスランプ値の関係



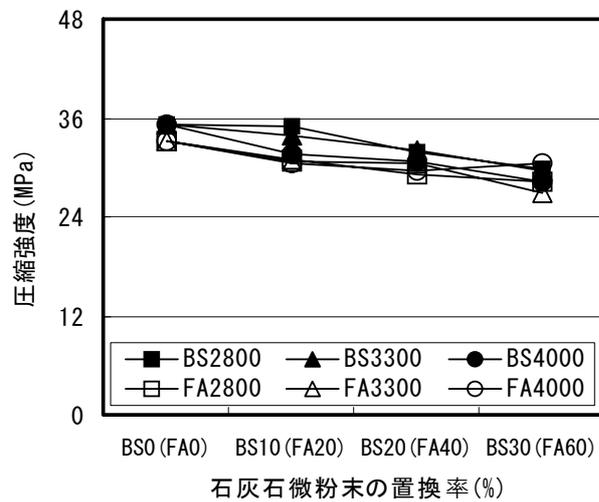
図一 2 石灰石微粉末置換率と空気量との関係



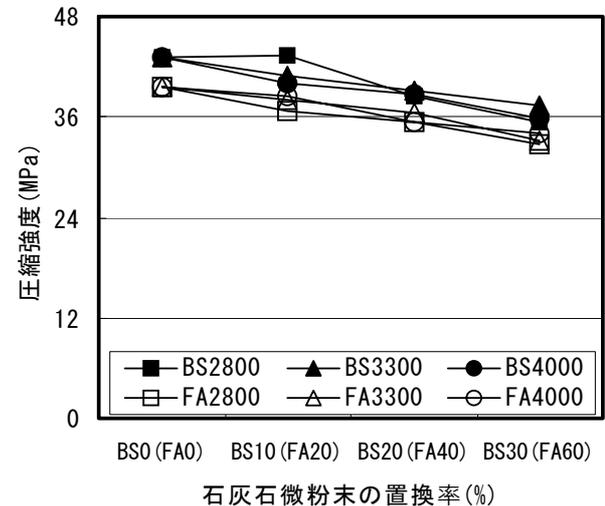
a) 材齢 3 日



b) 材齢 7 日



c) 材齢 28 日



d) 材齢 91 日

図-3 石灰石微粉末の置換率と材齢別圧縮強度の関係

とが予想される。

材齢 28 日では、圧縮強度が高炉スラグ微粉末を使用した全調合においては 28.2~35.3 MPa、フライアッシュの場合は 27.0~33.2MPa の範囲である。

実験において用いた石灰石微粉末の絶対使用量は、高炉スラグ微粉末、フライアッシュともに同一であるため、石灰石微粉末の効果より鉱物質混和材の置換率と水和特性により、圧縮強度に影響を及ぼすと考えられる。

材齢 91 日では、32.8~43.3 MPa の範囲となり、

石灰石微粉末をフライアッシュより高炉スラグ微粉末に置換して用いた場合が約 8-10% 程度高い強度を示した。

図-4 は、材齢と圧縮強度の関係である。本実験の範囲では、初期材齢ではフライアッシュを使用した試料の方が高炉スラグ微粉末を使用した試料より明らかに高い強度を示すが、材齢が経過することによって、材齢 28 日および 91 日では高炉スラグ微粉末を使用した試料の強度が大きくなる。これは、コンクリートの単位セメント量の差と混和材の影響によるものと考えられる。

フライアッシュを混入した試料は初期強度が大きい傾向を示すが、材齢経過に対してポズラン反応の差により高炉スラグ微粉末と逆転する傾向を示している。

(2) 基準調合に対する強度発現率

図-5に、基準調合に対する各調合の強度発現率を示す。図からわかるように、本実験で用いた鉱物質混和材に関わらず、全体的に石灰石微粉末が増加するほど、圧縮強度発現率が減少する傾向である。これは、相対的に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの使用量が減少し、その代わりポズラン反応が減少したためであると考えられる。それ以外に、材齢増加による基準調合の強度が高くなり、石灰石微粉末を使用したコンクリートの強度発現率が減少したことも挙げられる。

また、これは高炉スラグ微粉末の場合は、多少減少する傾向であり、フライアッシュの場合、一部の試料で若干増加する傾向を示した。

(3) 石灰石微粉末の使用量と圧縮強度

図-6は、石灰石微粉末の使用量と材齢91日の圧縮強度の関係である。

石灰石微粉末を高炉スラグ微粉末に置換した場合、石灰石微粉末の粉末度とは関係なく全ての調合において強度が低下した。また、その減少傾向は、石灰石微粉末の使用量が増加するほど大きくなった。全体的に石灰石微粉末の使用量と圧縮強度の相関関係は、約0.97となり高い信頼水準を示した。

また、フライアッシュに置換した場合も石灰石微粉末の使用量の増加によって圧縮強度が低下する傾向を示した。しかし、高炉スラグ微粉末を置換した場合調合より強度低下が少ない。

5. まとめ

コンクリート用混和材として石灰石微粉末の適用性を評価するため、鉱物質混和材である高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの代替材として粉末度別3つの石灰石微粉末を用いて実験した結果は次のようになる。

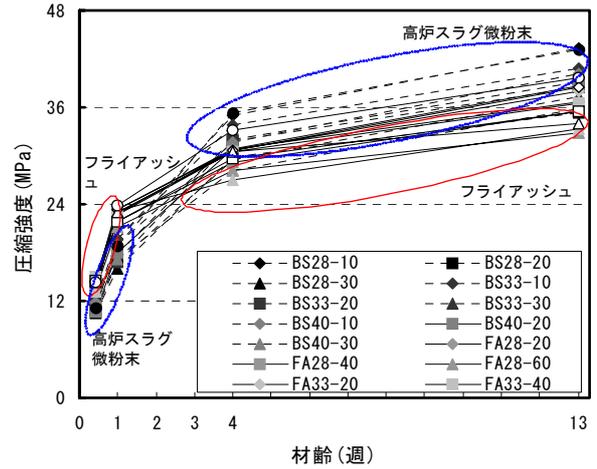
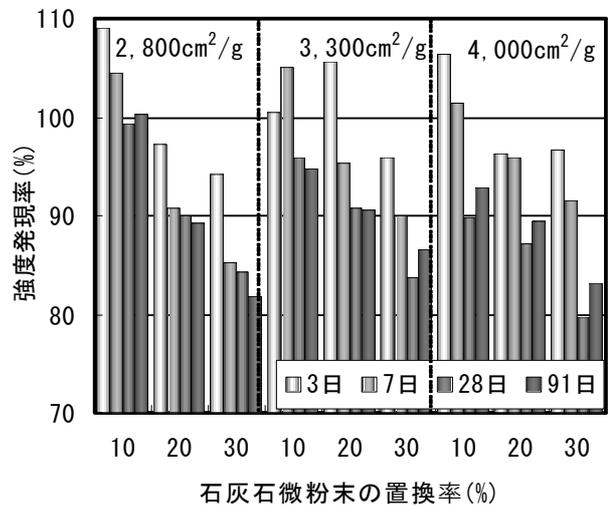
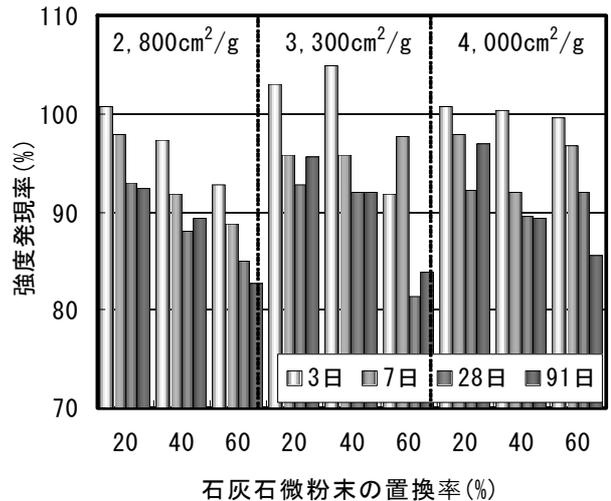


図-4 石灰石微粉末置換率と圧縮強度の関係



a) 高炉スラグ微粉末



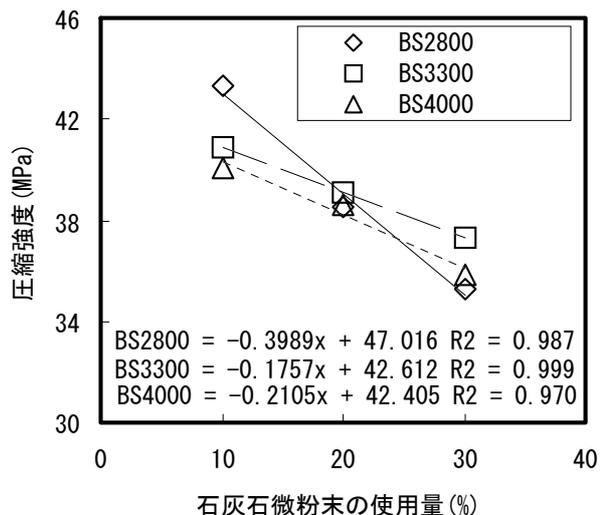
b) フライアッシュ

図-5 石灰石微粉末の置換率と強度発現率の関係

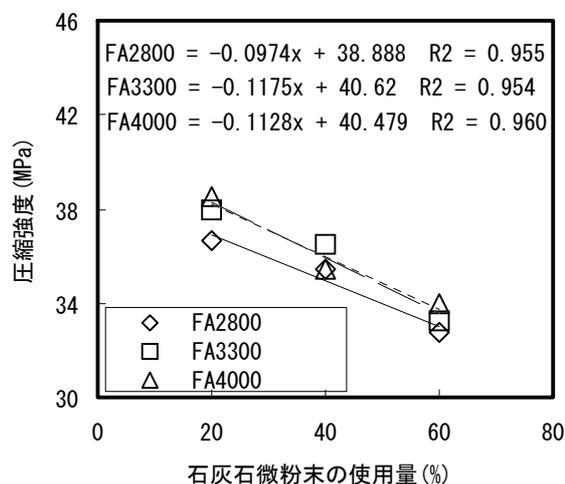
- 1) 石灰石微粉末の粉末度別置換率とスランプ値の関係は、高炉スラグ微粉末に置換した場合、スランプ値が増加したが、フライアッシュの場合、類似または若干減少した。また、空気量は高炉スラグ微粉末に置換した場合、良好な性状を示した。
- 2) コンクリートの圧縮強度は石灰石微粉末の置換率が増加するほど、材齢が経過するほど圧縮強度が低下する傾向を示した。また、粉末度によってはほとんど差が現れてない。また、フライアッシュを混入した試料は、初期強度が大きい傾向を示すが、材齢経過に対してポゾラン反応の差により高炉スラグ微粉末と逆転する傾向を示した。
- 3) 鉱物質混和材と石灰石微粉末を混合使用する場合、石灰石微粉末の使用量が増加し、鉱物質混和材の使用量が相対的に減少したため、コンクリートの強度発現率は、材齢経過によって減少した。また、石灰石微粉末の粉末度変化による強度発現率はほぼない。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム，石灰石微粉末研究委員会報告書論文集，JCI-C44. pp. 39-44, 1998.
- 2) Wenzhong Zhu, John C. Gibbs: *Use of Different Lime -stone and Chalk Powders in Self-Compacting Concrete*, Cement and Concrete Research, 35(8), pp. 1457-1462, 2005.
- 3) V. Bonavetti, H. Donza, V. Rahhal, E. Irassar: *Influence of Initial Curing on the Properties of Concrete Containing Limestone Blended Cement*, Cement and Concrete Research, 30(5), pp. 703-708, 2000.
- 4) 佃誠太郎, 岸利治, Hamed M.M.Salem: モルタル・コンクリートの諸特性に及ぼる石灰石微粉末の物理的影響, コンクリート工学年



a) 高炉スラグ微粉末



b) フライアッシュ

図—6 石灰石微粉末の置換率と圧縮強度の関係

次論文報告集, 22(2). pp. 211-216.

- 5) 岩城一郎, 日向哲朗, 三浦尚: 石灰石微粉末を添加したコンクリートの強度発現性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 19(1). pp. 265-270, 1997.