

# 石灰石微粉末を添加したコンクリートの基本特性

桜田 良治・丸山 久一<sup>1</sup>・下山 善秀<sup>2</sup>  
宮口 英雄<sup>3</sup>・戸田 崇<sup>4</sup>

## Mechanical Properties of Concrete containing Limestone Fine Powder

Ryoji SAKURADA, Kyu-ichi MARUYAMA, Yoshihide SHIMOYAMA  
Hideo MIYAGUCHI and Takashi TODA

(1997年11月28日受理)

Crushed limestones enjoy an increasing demand as concrete aggregates due to the current shortage of natural aggregates. The manufacture of crushed stones in itself simultaneously yields a large quantity of stone powder as a by-product. The limestone fine powder therefore begins to be used for controlling the fluidity of high-performance concrete and for minimizing the often harmful consequences of bleeding or segregation of concrete.

In this study, emphasis is given to the effect of replacement content of limestone fine powder on strength of hardened concrete and on bleeding of cement paste. The results suggest that the compressive and splitting tensile strengths of concrete are reduced with the increase in the content of the powder. However, this strength degradation is less marked in the concrete specimens containing limestone fine powder up to 5 percent by weight. It was also clear that the limestone fine powder in cement paste could make apparent specific surface area of cement flocks increase to almost 30 percent as compared with plain cement paste.

### 1. 序 論

川砂利などのコンクリー用天然骨材資源の枯渇により、石灰石の骨材としての需要が増加してきている。わが国における石灰石の骨材利用は、昭和40年代に始まって以来まだ30年足らずで、その歴史は欧米に比べて浅い。しかしながら、平成7年度の出荷量は6,000万tに達し、このうちコンクリート用骨材として約3,300万t使用されるなど年々その需要は増加している。

石灰石骨材を用いたコンクリートは、砂岩や安山岩などの普通骨材に比べて強度の発現性状が良好である。これには石灰石骨材の表面とセメント水和物との親和力が他の骨材に比べて強く、骨材とモルタル界面組織の緻密化が図られるためである<sup>1),2),3)</sup>。さらに、コンクリート構造物解体後の石灰石骨材はセ

メントの原料として再利用することも可能になるなど、環境に配慮した建設材料としても注目されている<sup>4)</sup>。しかしながら、石灰岩破碎時に多量の碎石粉が排出されるため、その有効利用の拡大に迫られている。石灰石微粉末はCaCO<sub>3</sub>を主成分としており、これをコンクリートに添加すると、ワーカビリティの改善やブリージングの低減などの効果が期待できる。このため、既に高流動コンクリートにおける流動性の改善や材料分離抵抗性の増大などを目的として、石灰石微粉末を新たな混和材として使用するケースが増えている。しかし、配合として粉体量を増した場合に、セメントと骨材との界面付着力の減少がコンクリート強度に及ぼす影響や、フレッシュコンクリートのワーカビリティに与える効果については十分に解明されていない。

そこで本研究では、セメントの一部を北海道峯朗鉱山産の石灰石微粉末で置換した場合の、コンクリートの強度特性および材料分離特性について調べた。また粉体置換による強度低下の一つの改善方法

<sup>1</sup> 長岡技術科学大学 <sup>2</sup> 日本セメント(株)

<sup>3</sup> (株)シビルエンジニアーズ <sup>4</sup> 宮地建設工業(株)

表1 石灰石微粉末の物理特性

Specific gravity	2.70 (3.16)
Blaine specific surface	4660 cm <sup>2</sup> /g (3300)
Finer than	
600 μm	100 %
150 μm	93.6 %
75 μm	81.8 %
Moisture content	0.30 %

( ) : Ordinary Portland Cement

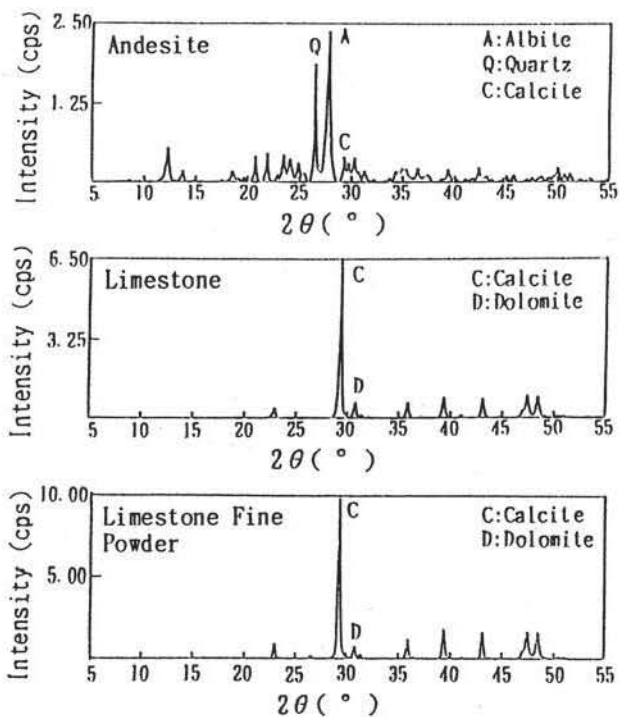


図1 骨材および石灰石微粉末のX線回折図

としてSEC工法(分割混練)<sup>5)</sup>の適用の可能性についても検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料

本実験に使用した材料の特性を以下に示す。

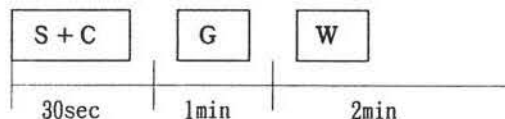
- (1) セメント: 普通ポルトランドセメント(比重3.16, 比表面積3,300 cm<sup>2</sup>/g)。
- (2) 骨材: 粗骨材は秋田県西木村産の安山岩碎石(比重2.68, 吸水率1.24%, 最大寸法15 mm), 細骨材は秋田県能代市産の陸砂(比重2.54, 吸水率3.30%)を使用。
- (3) 碎石粉: 石灰石微粉末(北海道峯朗鉱山産<sup>6)</sup>, 物性値 表1)
- (4) 混和剤: AE減水剤(主成分: リグニンスルホ

表2 コンクリートの配合

L/B (%)	W/B	Ingredient Content (kg/m <sup>3</sup> )					AE
		Binder		Water	F. Agr	C. Agr	
		Cement	L. P.				
0	0.60	283	0	170	800	952	0.708
5	0.60	269	14	170	799	951	0.708
10	0.60	255	28	170	799	950	0.708
15	0.60	241	42	170	798	949	0.708

L. P.: Limestone Powder

### Conventional Mixing Method



### SEC Method

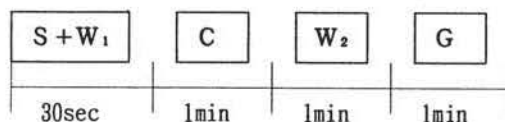


図2 コンクリートの混練方式

ン酸化合物)

実験に使用した安山岩碎石, 石灰石微粉末, およびその母岩である石灰石のX線回折結果を図1に示す。図1より, 安山岩碎石に含有される主な鉱物は, 石英, 輝石と若干の方解石よりなる。石灰石は, その主な鉱物成分は方解石で, これに若干の苦灰石が含有される。石灰石微粉末の主成分は母岩の成分と殆ど同じで, 方解石を主体としてこれに微量の苦灰石成分が認められる。

### 2.2 配合および混練方法

本実験の配合は表2に示すように, 水結合材比を60%, 単位水量を170 kg, 細骨材率を47%として, スランプ8 cm, 空気量7%とし, AE減水剤は結合材量の0.25%添加した。石灰石微粉末のセメントとの置換率(重量比)を0%, 5%, 10%, 15%の4水準とした。

混練方法としては, 混練水の一括投入による従来混練法とSEC混練法(モルタル先練り方式)によった(図2)。SEC混練では, 始めにセメントと砂, 水とが最も強く吸着するキャピラリー状態となるのに必要な水(1次水)を砂に添加し30秒間混練後に, セメントを加えてさらに1分間練り混ぜた。その後, 所要のワーカビリティを得るのに必要な水(2次水)を加えて1分間練り混ぜた後に, 粗骨材を加えてさらに1分間練り混ぜた。

石灰石微粉末を添加したコンクリートの基本特性

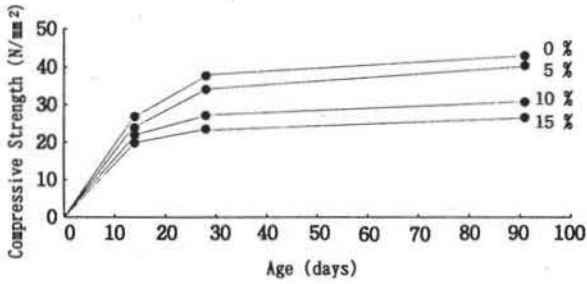


図3 圧縮強度の材齢に伴う変化

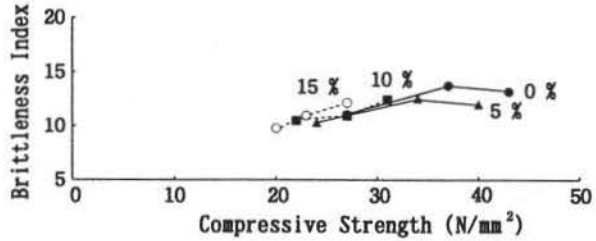


図5 圧縮強度と脆度係数の関係

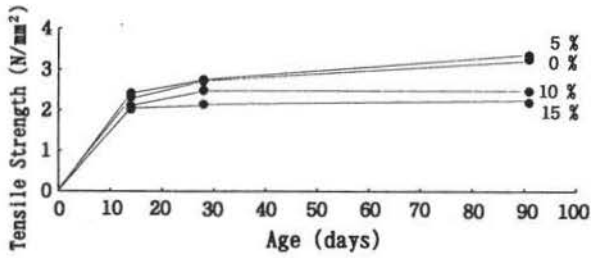


図4 引張強度の材齢に伴う変化

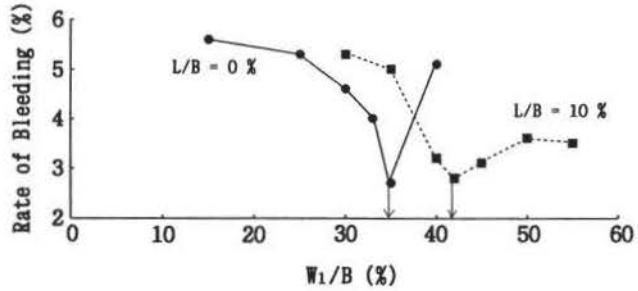


図6 W<sub>1</sub>/Bによるブリージング率の変化

2.3 ブリージング試験

石灰石微粉末のセメントとの置換率が0%と10%のセメントペーストについて、水結合材比を変えて(W/B = 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00)ブリージング試験を行った。セメントペーストの練り混ぜにはモルタルミキサーを使用し、2分間粉体混合した後水を追加して、再度2分間練り混ぜた。練り混ぜたセメントペースト1000 ccを直ちにメスシリンダー(1000 cc)に投入した後に、1時間までは10分間隔で、その後は30分間隔で3時間まで、ブリージングした水頭をノギスで測定した。ブリージング速度は、浸出水量の経時変化がほぼ直線関係を維持する、90分までのブリージングデータから算出した。

2.4 供試体寸法及び養生条件

圧縮強度および引張強度試験体の寸法はφ10 cm×20 cmで、打設後24時間湿空養生し、脱型してから各材齢まで20°Cの水中で標準養生した。

3. 実験結果

3.1 硬化コンクリートの強度特性

材齢に伴う圧縮強度および引張強度の試験結果を図3、図4に示す。図3より、配合中の石灰石微粉末が増すにつれて強度は低下する傾向にある。これは石灰石微粉末の置換率が10%以上になると、骨材とモルタルとの界面領域での付着強度の増大効果よ

りも、不活性な粉体量の増加による水和反応の阻害によるためと考えられる。引張強度についても圧縮強度と同様の傾向がみられるが(図4)、圧縮強度よりも粉体置換による強度低下は少ない傾向にある。

このような、圧縮強度および引張強度に及ぼす粉体置換の影響を脆度係数により比較した(図5)。

図5より、石灰石微粉末の置換率が10%以上の場合、脆度係数は無置換の場合より大きくなり、圧縮強度の伸びに対する引張強度の伸びはあまり期待できないことが判る。一方、5%置換した場合は無置換の場合とほぼ同じ脆度係数を示し、5%程度の置換では強度に及ぼす影響に有意な差はないといえる。

このような粉体置換による強度低下分を、混練法の違いによりどの程度改善できるか比較検討した。

SEC混練における最適一次混練水量は、1次水の結合材に対する比(1次水結合材比)を変化させてコンクリートのブリージング試験を行い、ブリージング率が最小となる1次水結合材比により決定した(図6)。この結果から、各配合の1次水結合材比(W<sub>1</sub>/B)には最適値が存在し、最適1次水結合材比は無置換ではW<sub>1</sub>/B = 35%、置換率が10%ではW<sub>1</sub>/B = 42%前後である。また、セメントを粉体置換した場合には、ブリージング曲線は右側に移動することより、最適1次水結合材比は増加することが推測される。

そこで、SEC混練(分割混練)した場合の材齢91

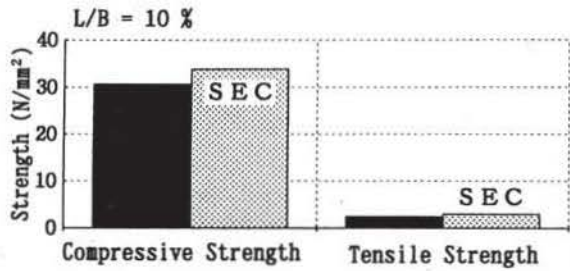


図7 混練法の違いによる強度特性

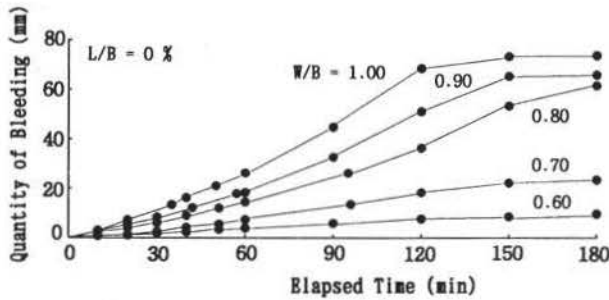


図8 ブリージング量の経時変化 (置換率0%)

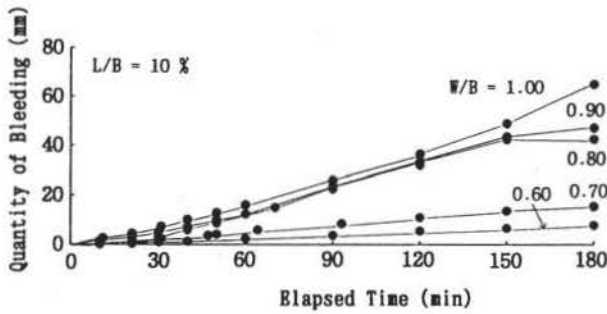


図9 ブリージング量の経時変化 (置換率10%)

日における圧縮強度および引張強度特性を従来混練によった場合と比較し図7に示す。図7より、SEC混練によった場合は従来の混練り法に比べて少しではあるが強度の増加が期待できる。すなわち、コンクリート製造時の入念な水管理を施すだけでも、ある程度コンクリート強度の改善が図れるものと考えられる。

### 3.2 コンクリートの材料分離特性

プレーンペーストおよび石灰石微粉末で10%置換したセメントペーストのブリージング試験結果をそれぞれ図8、図9に示す。これより、水結合材比が増すにつれてブリージング量は大きくなるが、石灰石微粉末をセメントと10%置換した場合には、3時間経過時のブリージング量は置換しない場合より全体として少なくなる傾向にある。

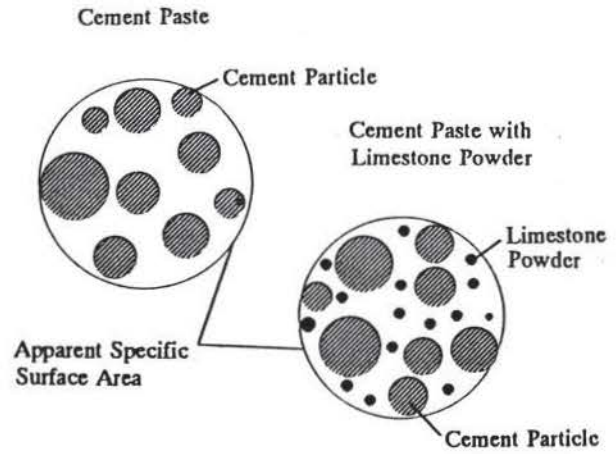


図10 セメントペーストの凝集体モデル

このようなセメント粒子凝集体のブリージング挙動は、T.C. Powers<sup>7)</sup>の浸透モデルにより容易に説明できる。このモデルは、Kozeny-Carmanの浸透モデルを基に、セメントペーストのブリージング挙動をセメント粒子と水の比重差による浸透流と仮定して定めたもので、セメント粒子凝集体の外側の表面積を見かけの比表面積、凝集体中に取り込まれた水を非移動水分としている(図10)。

$$Q = \frac{C}{\kappa_c \sigma_{ap}^2} \left[ \frac{\epsilon}{1-\epsilon} - \alpha \right]^3 (1-\epsilon)^2 \quad (1)$$

ここに、

$$C = \frac{(\rho_c - \rho_f)g}{\eta}$$

Q : 浸透速度

$\rho_c$  : セメントの密度

$\rho_f$  : 水の密度

g : 重力加速度

$\eta$  : 水の粘性係数

$\epsilon$  : ペーストの単位容積中の水の絶対容積

$\kappa_c$  : Carman 定数

$\sigma_{ap}$  : セメントの見かけの比表面積

式(1)を式(2)のように変形すると、すなわち浸透速度をセメントの絶対容積で割った値と、水の絶対容積に対するセメントの絶対容積の関係から、セメント凝集体の見かけの比表面積  $\sigma_{ap}$  と非移動水分比  $\alpha$  を求めることができる。

$$\left[ \frac{Q}{(1-\epsilon)^2} \right]^{1/3} = \left[ \frac{C}{\kappa_c \sigma_{ap}^2} \right]^{1/3} \left[ \frac{\epsilon}{1-\epsilon} - \alpha \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{ap}^2 = \frac{C}{\kappa_c (\text{slope})^3} \quad (3)$$

式(2)の  $[Q/(1-\epsilon)^2]^{1/3}$  と  $\epsilon/(1-\epsilon)$  の関係には、ほぼ直線関係が認められる(図11)。この傾き (slope)

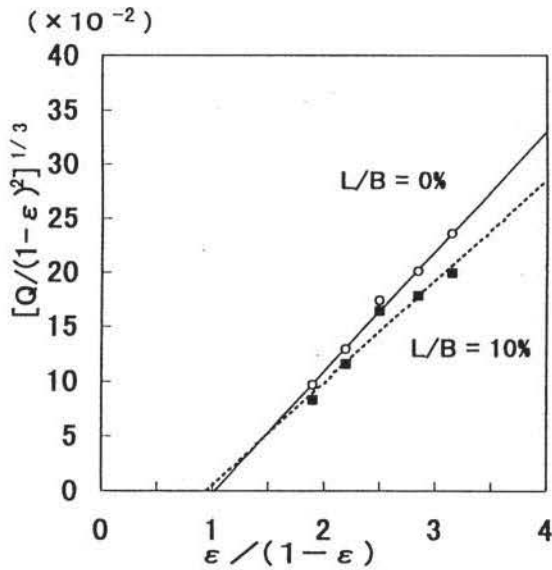


図11 水セメント容積比による浸透速度の変化

が小さいほど、セメント凝集体の見かけの比表面積  $\sigma_{ap}$  は大きくなり、また X 軸との切片が大きいほど、非移動水分比  $\alpha$  は大きいということになる。

式(2), (3)において、セメントの密度  $\rho_c = 3.16 \text{ g/cm}^3$ , 水の密度  $\rho_t = 1.00 \text{ g/cm}^3$ , 水の粘性係数  $\eta = 0.01002 \text{ poises}$ , カルマン定数  $\kappa_c = 5.00$ , 重力加速度  $g = 980.6 \text{ cm/sec}^2$  の計算条件により比表面積  $\sigma_{ap}$  および非移動水分比  $\alpha$  を算定すると、表3のようになる。これより、セメントの一部を石灰石微粉末で10%置換することによって、見かけの比表面積をおよそ28%増大させるとともに、凝集体中に取り込まれる非移動水分を約2%解放できることになる。

すなわち、石灰石微粉末の添加は、フレッシュコンクリートのブリージングを抑えるとともに、セメント粒子の分散性を向上させる効果がある。

#### 4. 結 論

セメントの一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの強度特性および材料分離特性について検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 石灰石微粉末の置換率が増すにつれて、圧縮強度および引張強度は低下傾向にある。5%の置換率では、無置換のものに比べてその強度に有意な差はない。

表3 見かけの比表面積・非移動水分比の計算結果

Paste	$\alpha$	$\sigma_{ap}$ ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )
Plain Paste	1.019	5583
Paste containing Limestone Powder	0.946	7127

(2) 石灰石微粉末の置換率が10%以上になると、骨材とモルタルとの界面組織の緻密化による強度の増大効果よりも、置換による単位セメント量の減少の影響が大きくなる。

(3) SEC 混練 (モルタル先練り方式) によった場合は、従来の混練法に比べて粉体置換による強度の低下分をある程度補填可能である。

(4) 粉体置換によるブリージング挙動を、T.C. Powers の浸透モデルにより検討した。その結果、セメントを石灰石微粉末で置換することによりブリージング水量を減らすことができる。さらに、セメント粒子凝集体の見かけの比表面積を無置換の場合に比べておよそ28%増加させるとともに、凝集体中に取り込まれる非移動水分を約2%解放できる。

#### 参考文献

- 1) 桜田良治, 下山善秀, 佐藤 満, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, 226-227 (1997)
- 2) 小林孝一, 服部篤志, 宮川豊章, 藤井 学, 第49回セメント技術大会講演集, 490-495 (1995)
- 3) 王 鉄成, 長岡誠一, 中野錦一, 第49回セメント技術大会講演集, 646-651 (1995)
- 4) 友澤史紀, セメント・コンクリート, No. 578, 1-8 (1995)
- 5) 扇 啓祐, 入矢桂史郎, 新村 亮, 三浦律彦, 井山信義, セメント・コンクリート, No. 492, 26-35 (1988)
- 6) 川村信人, 田近 淳, 川村寿郎, 加藤幸弘, 地団研専報, 第31号, 17-32 (1986)
- 7) Treval C. Powers, The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc., 604-652 (1968)