

# 論文 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

岩城一郎\*1・日向哲朗\*2・三浦尚\*3

要旨：石灰石微粉末を添加したコンクリート構造物の強度発現性を調査するため、石灰石微粉末を添加したモルタル供試体を作製し、5℃及び20℃一定封かん養生を行い、各材齢で圧縮強度を測定した。その結果、セメントに外割で石灰石微粉末を使用し、その分を細骨材に置換した場合、同一水セメント比のプレーンな配合と比較して低温下で強度が増加し、5℃一定養生と20℃一定養生で同程度の強度発現を示した。また、セメントに内割で石灰石微粉末を置換した場合にも5℃一定養生で良好な強度発現を示し、低温下での強度発現を改善する上で有効な置換率が存在することが明らかになった。

キーワード：石灰石微粉末, 強度発現性, 寒冷地, 封かん養生, 高流動コンクリート

## 1. はじめに

近年、高流動コンクリートの実用化に伴い、コンクリート用混和材として石灰石微粉末を使用する例が増えてきた。石灰石微粉末を混和材として使用する場合、材料分離抵抗性の改善、ブリーディングの低減、水和熱の抑制といった効果が期待できるが、最近特に、材齢初期におけるコンクリート強度の増加が注目されてきており、多くの研究成果が報告されている[1,2]。しかしながら、これらの研究は、標準水中養生で行ったものがほとんどで、寒冷地の現場に対応した養生条件で行った研究は数少ない。その中で日向、三浦らの研究[3]では20℃及び5℃一定封かん養生を行った高流動コンクリートの強度発現性を比較し、石灰石微粉末の添加が、低温下での強度発現に有効である可能性を示唆している。ただし、その結果はただ1つの配合について確認されたものであり、石灰石微粉末の置換率による影響等については触れられていない。

以上のことから、本研究では、寒冷地においてコンクリートが施工される場合を想定し、養生温度や石灰石微粉末の置換率の違いがコンクリートの強度発現に及ぼす影響について検討することを目的とした。セメントに外割で石灰石微粉末を使用し、その分を細骨材に置換した外割シリーズとセメントに内割で石灰石微粉末を置換した内割シリーズについて、 $\phi 5 \times 10$ cmのモルタル円柱供試体を作製し、20℃一定、及び5℃一定の2つの条件で封かん養生を行った。そして、材齢1, 2, 4, 8, 13週で圧縮強度を測定し、各配合の強度発現の違いを比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

表-1に実験に使用した材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、石灰石微粉末は比重2.70、比表面積 $3410\text{cm}^2/\text{g}$ のものを用いた。石灰石微粉末の成分を表-2に示す。細骨材は宮城県大和町産の山砂を使用した。高性能減水剤はナフタリンスルホン酸系のものを、高性能AE減水剤はポリカルボン酸系のものを使用した。

\*1 東北大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

\*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻

\*3 東北大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

配合は、セメントに外割で石灰石微粉末を使用し、その分を細骨材に置換した外割シリーズとセメントに内割で石灰石微粉末を置換した内割シリーズに大別される。各配合を表-3、表-4に示す。

外割シリーズは、石灰石微粉末の添加が低温養生を行ったコンクリートの強度発現に及ぼす影響を調べるためのものである。表中に示す通り、水セメント比50%及び70%の基本配合に対して、水粉体比が30%になるまで石灰石微粉末を添加した。ただし、水セメント比50%、水粉体比30%のモルタルは、流動性をほとんど示さず、そのままでは打設が困難であったため、練り上がり時のモルタルフローが水セメント比50%のプレーンな配合と同じになるように高性能減水剤を添加した。

内割シリーズは、石灰石微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを想定したもので、低温下におけるコンクリートの強度発現性を改善する上で、有効な石灰石微粉末の置換率を選定することを目的とした。この場合、水粉体比は30%一定とし、石灰石微粉末の置換率を0%から80%まで変化させた。モルタル供試体の配合は、高流動コンクリートの配合から粗骨材を取り除くことにより設定し、混和剤は各配合のコンシステンシーがほぼ一定となるように高性能AE減水剤を用いて調整した。また、置換率40%の配合についてはモルタル供試体との比較を行うため、表中の配合に従って、実際に高流動コンクリートを打設した。

表-1 使用材料および配合

|                  |   |
|------------------|---|
| セメント             | 普通ポルトランドセメント<br>比重3.15 比表面積3290cm <sup>2</sup> /g |
| 石灰石微粉末           | 比重2.70 比表面積3410cm <sup>2</sup> /g                 |
| 細骨材              | 宮城県大和町産山砂 比重2.53                                  |
| 高性能減水剤 (Ad1)     | ナフタリンスルホン酸<br>ホルマリン高縮合物塩                          |
| 高性能 AE 減水剤 (Ad2) | ポリカルボン酸エーテル系と<br>架橋ポリマーの複合体                       |

表-2 石灰石微粉末の成分

|        |                  |       |                                |                                |
|--------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|
| CaO    | SiO <sub>2</sub> | MgO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 55.12% | 0.35%            | 0.21% | 0.14%                          | 0.12%                          |

表-3 外割シリーズの配合表

| W/C (%) | W/(C+Ls) (%) | 質量比 |   |       |       | Ad1<br>(C+Ls)×% |
|---------|--------------|-----|---|-------|-------|-----------------|
|         |              | W   | C | Ls    | S     |                 |
| 50      | 50           | 0.5 | 1 | 0     | 2.5   | 0               |
|         | 30           |     |   | 0.667 | 1.875 | 0.8             |
| 70      | 70           | 0.7 | 1 | 0     | 2.75  | 0               |
|         | 50           |     |   | 0.4   | 2.375 | 0               |
|         | 30           |     |   | 1.333 | 1.501 | 0               |

表-4 内割シリーズの配合表

| Ls/(C+Ls) (%) | W/(C+Ls) (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     | Ad2<br>((C+Ls)×%) |
|---------------|--------------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|
|               |              |         |         | W                        | C   | Ls  | S   | G   |                   |
| 0             | 30           | 30      | 51.1    | 168                      | 560 | 0   | 820 | 887 | 2.6               |
| 10            |              | 33      | 50.9    |                          | 504 | 56  | 812 | 887 | 1.8               |
| 30            |              | 43      | 50.4    |                          | 392 | 168 | 797 | 887 | 1.55              |
| 40            |              | 50      | 50.2    |                          | 336 | 224 | 790 | 887 | 1.55              |
| 60            |              | 75      | 49.7    |                          | 224 | 336 | 775 | 887 | 1.55              |
| 80            |              | 150     | 49.2    |                          | 112 | 448 | 760 | 887 | 1.4               |

## 2.2 実験方法

本研究は、石灰石微粉末を添加したコンクリート構造物の強度発現性を調査するため、モルタル供試体を用いて実験を行った。その理由は、(1)コンクリート供試体はモルタル供試体と比べ、養生温度のコントロールが難しいこと、(2)実験室の低温養生槽のスペースが限られているため、全ての実験シリーズをコンクリート供試体で行うことが困難なこと、(3)骨材が良質で、材料分離やブリーディング等の悪影響がない場合には、コンクリート供試体とモルタル供試体の強度発現性に致命的な違いがあるとは思われないことによる。

モルタルは、容量10ℓの強制練りミキサに、セメント、石灰石微粉末、細骨材を投入し30秒間空練りを行い、練混ぜ水投入後30秒間練混ぜた後20秒間休止し、その間に練り鉢の表面等に付着したモルタルをかき落とし、さらに120秒間練混ぜた。練混ぜ後、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱型枠に打設し、標準的な養生温度である $20^\circ\text{C}$ 一定と、寒冷地での日平均気温を想定した温度である $5^\circ\text{C}$ 一定条件の恒温槽にそれぞれ静置した。養生方法については、寒冷地における現場の状況を考慮し、封かん養生を採用した。その理由は、これまでの研究から、寒冷地でコンクリートを施工する場合、気中養生では十分な強度が得られないことが明らかになっており、また実際の施工で常に水中養生を行うことは難しいと考えられるためである。キャッピングは打設の翌日に行い、脱型はその翌日に行った。脱型後は、供試体を食品包装用ラップフィルム及びチャック付きポリエチレン袋で二重に密封し、水分の出入りを遮断した。圧縮強度は材齢1, 2, 4, 8, 13週で測定した。

高流動コンクリートは、容量50ℓのパン型強制練りミキサに、セメント、石灰石微粉末、細骨材を投入し30秒間空練りを行い、混和剤を含む練混ぜ水投入後60秒間練った後、粗骨材を投入し、さらに120秒間練混ぜた。コンクリートは $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱型枠に打設し、モルタル供試体と同一条件で養生及び圧縮強度試験を行い、両者の強度発現性を比較した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 外割シリーズ

図-1に水セメント比50%、図-2に水セメント比70%の基本配合に対して石灰石微粉末を外割添加したモルタル供試体の圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。図-1より、 $20^\circ\text{C}$ 一定養生では、石灰石微粉末を添加した配合と同一水セメント比のプレーンな配合とでほぼ同じ強度発現を示しているのに対して、 $5^\circ\text{C}$ 一定養生では、石灰石微粉末の添加により、プレーンな配合の圧縮強度を大きく上回る傾向を示した。 $5^\circ\text{C}$ 一定養生における石灰石微粉末の添加による圧縮強度の増加傾向は図-2においてさらに顕著に現れており、石灰石微粉末の添加に伴い、低温下で強度が大きく増加することが

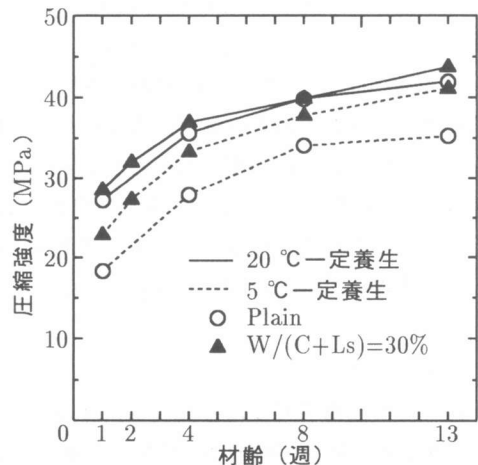


図-1 W/C=50%の圧縮強度

明らかになった。

既往の研究によると、石灰石微粉末を外割添加した場合、水セメント比の等しいプレーンな配合と比較して材齢初期では強度が増加するものの、材齢28日ではほとんど差がないことが報告されている[1,2]。本研究では、図-2の20℃一定養生で石灰石微粉末を水粉体比50%まで添加した配合については同様の傾向が認められた。しかし、石灰石微粉末を水粉体比30%まで添加した配合については、材齢4週以降においてもプレーンな配合の圧縮強度を上回る結果となった。

図-3は外割シリーズの各材齢における強度発現率を示したものである。ここで強度発現率とは、各配合における20℃一定養生を行った供試体の圧縮強度を100%とし、同一材齢における5℃一定養生を行った供試体の圧縮強度を百分率で表したものである。図より、強度発現率は各配合とも材齢が進むにつれて増加する傾向を示す。そして、石灰石微粉末の添加により、強度発現率が顕著に増加し、水粉体比30%まで石灰石微粉末を添加した場合、材齢4週以降で強度発現率は90%を超える値を示している。つまり、石灰石微粉末を水粉体比30%まで添加した場合、5℃一定養生においても20℃一定養生と同程度の強度発現が期待

できる結果となった。過去の研究によると、不活性な物質である石灰石微粉末がコンクリート強度の増進に及ぼす要因として、石灰石微粉末のフィラー効果や分散効果を挙げているものが多い[4, 5]。しかしながら、これらの効果が、常温と比べ、低温下においてより顕著に現れるとは考えにくいと、石灰石微粉末が、低温下でより活発に、セメントの水和反応と関わっている可能性もあると考えられる。この点については、更なる実験により確認する必要がある。

### 3.2 内割シリーズ

図-4に内割置換を行った各配合に対する20℃一定養生と5℃一定養生の圧縮強度試験結果を示す。図より、置換率の増加に伴い、圧縮強度が減少する傾向にあることがわかる。このことは、セメントの一部を不活性な石灰石微粉末と置換することにより水セメント比が高くなるため当然の結果と考えられる。しかし、5℃一定養生の置換率10%の配合については、材齢4週以降で5℃一定養生の置換率0%の強度を上回っている。この理由は、前述の石灰石微粉末の添加に

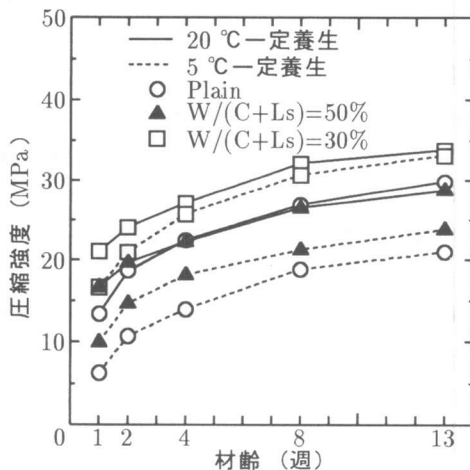


図-2 W/C=70%の圧縮強度

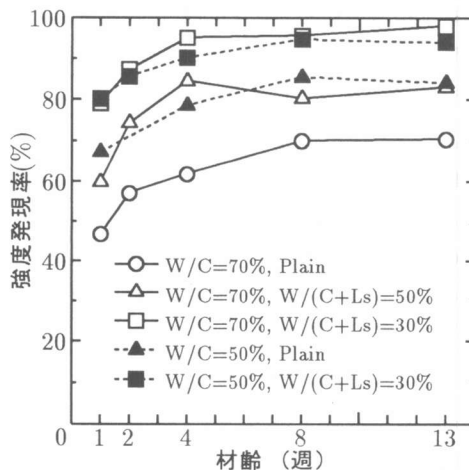


図-3 外割シリーズの強度発現率

よる低温下における強度増加が、水セメント比の増加による強度低下を上回った結果であると考えられる。また、20℃一定養生と5℃一定養生の強度発現を比較すると、石灰石微粉末を混和していない置換率0%の配合については20℃一定養生と5℃一定養生の強度に顕著な差が見られるものの、石灰石微粉末を混和した配合については両者の差が明らかに小さくなっており、置換率10%から40%の配合については材齢8週までに5℃一定養生の強度が20℃一定養生の強度とほぼ同じか若干上回る結果となった。

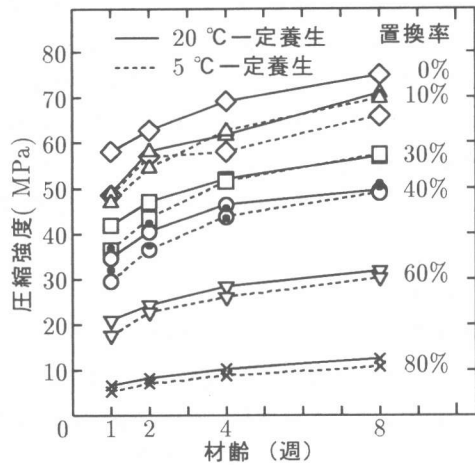


図-4 内割シリーズの圧縮強度

一般に、プレーンな配合のコンクリート

を低温下で湿潤養生した場合、長期にわたって強度が増進し、標準養生を行ったコンクリート強度に近づいていくことが予想されるが、本研究で行った封かん養生は、湿潤養生に比べて強度発現が緩慢であるにもかかわらず、比較的早い材齢で低温養生を行った供試体の圧縮強度が20℃一定養生の強度に追いつく結果となった。この結果からも、石灰石微粉末が低温下における強度の増加に貢献していることがうかがえる。また、図-4中に示す中実のマルは、石灰石微粉末の置換率40%の高流動コンクリートを打設し、圧縮強度を測定したものであるが、同じ置換率のモルタル供試体の圧縮強度（白抜きマル）と比較すると、両者の強度発現性はほとんど同じであることがわかる。

図-5は、石灰石微粉末の内割置換率と外割シリーズの項で定義した強度発現率との関係を示したものである。図より、置換率10%から40%の配合は、材齢4週以降で95%を超える高い強度発現率を示しており、5℃一定養生において20℃一定養生と同等の強度発現が得られることを表している。特に、置換率10%の配合では、材齢1週から100%に近い強度発現率を示しており、寒冷地でコンクリート施工を行う場合に問題となる材齢初期における強度低下を改善する上で有効な結果となった。反対に、置換率0%、及び80%の配合については、材齢の経過に伴う強度発現率の増加は見られず、頭打ちの傾向を示している。図-4

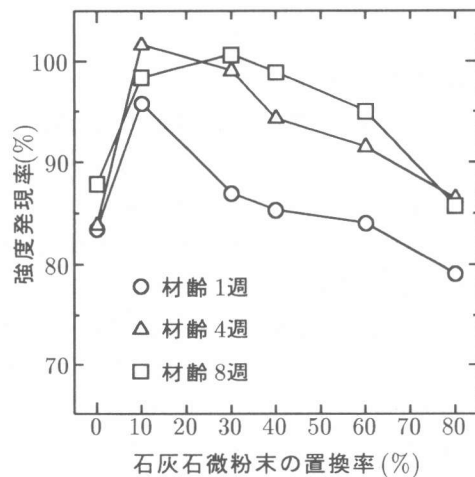


図-5 内割シリーズの強度発現率

4を見ると、置換率0%では、5℃一定養生と20℃一定養生の圧縮強度の差が他の配合に比べて明らかに大きく、材齢が進んでもその差はほぼ横這いであることがわかる。一方、置換率80%については、5℃一定養生と20℃一定養生の強度差は小さいものの、強度の絶対値も小さいため、

強度発現率で表した場合に、小さな値を示す結果となった。

内割シリーズの実験結果より、5°C一定封かん養生を行った場合、置換率10%から40%で、低温下において優れた強度発現性を示すことが確認されたが、これらの配合の材齢4週でのモルタル圧縮強度に着目すると、40 (MPa) から60 (MPa) の値を示している。従って、石灰石微粉末を内割置換した高流動コンクリートは、低温環境下においても、普通強度のコンクリートから高強度コンクリートまでの幅広い範囲で優れた強度発現性が期待できる結果となった。

#### 4. 結論

本研究により得られた結果を以下に示す。

1. セメントに外割で石灰石微粉末を使用し、その分を細骨材と置換したモルタル供試体の圧縮強度を測定した結果、石灰石微粉末の添加に伴い、同一水セメント比のプレーンな配合と比較して低温下での強度が顕著に増加し、水粉体比30%まで石灰石微粉末を添加することにより5°C一定養生においても20°C一定養生と同程度の強度発現が期待できる結果となった。
2. 実際の高流動コンクリートを想定し、水粉体比30%一定の条件下でセメントに内割で石灰石微粉末を置換した場合、置換率10%から40%の範囲で、低温下において優れた強度発現を示した。従って、石灰石微粉末を混和した高流動コンクリートは寒冷地においても幅広い適用が期待できる結果となった。

本研究は、普通ポルトランドセメントと石灰石微粉末の組み合わせに限定して考察を行ったものである。しかし、石灰石微粉末の低温下での強度発現は、セメントの種類によっても変わってくるものと思われる。また、養生温度をさらに下げたときの強度発現性についても興味深い点であり、今後さらに検討を進めて行く必要がある。

#### 参考文献

- [1] 横内 静二, 福留 和人, 坂本 守, 喜多 達夫: 石灰石粉を混入したコンクリートの基礎特性, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15, No.1, pp.333-338, 1993.6
- [2] 小林 孝一, 服部 篤史, 宮川 豊章, 藤井 學: 石灰石微粉末の混和がセメントの初期水和に与える影響, セメント・コンクリート論文集 No.50, pp.570-575, 1996
- [3] 日向 哲朗, 三浦 尚, 鈴木 一利: 寒冷地における高流動コンクリートの強度発現に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集 No.50, pp.520-523, 1996
- [4] Soroka, I., Stern, N.: Calcareous Fillers and the Compressive Strength of Portland Cement, Cement and Concrete Research, Vol.6, pp.367-376, 1976
- [5] Soroka, I., Setter, N.: The Effect of Fillers on Strength of Cement Mortars, Cement and Concrete Research, Vol.7, pp.449-456, 1977
- [6] 坂井 悦郎, 中川 晃次, 三原 敏夫, 大門 正機: フィラーセメント, わかりやすいセメント科学, (社)セメント協会, 1993