

副産物石灰石微粉末を添加したコンクリートの物性向上機構と実構造への適応

学籍番号 23413517 氏名 太田 健司
指導教員 梅原 秀哲 教授

1 はじめに

天然骨材の枯渇に伴い、砕石や砕砂への移行から全国で大量の石粉が発生している。この問題に対し、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、豊橋市の採石工場で、約60 t/日の石灰石微粉末が副生産され、そのほとんどが廃棄処分されている。

本研究では、豊橋市の採石工場で廃棄されAIを微量含有する副産物石灰石微粉末の有効利用を目指すことを目的として、石灰石微粉末の添加がコンクリートの各種物性に与える影響について検討を行った。

2 実験概要

供試体は普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末（石膏無）、水道水、大井川産陸砂、福山産高炉スラグ細骨材、豊橋市産石灰石微粉末、岡崎産硬質砂岩砕石、AE減水剤、消泡剤を使用し作製した。配合およびフレッシュ性状を表1に、使用材料を表2に示す。

試験は、細骨材の実績率試験（JIS A 1104）、スランプ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）、ブリーディング試験（JIS A 1123）、圧縮強度試験（JIS A 1108）、長さ変化試験（JIS A 1129-3）、透気試験、電気伝導率試験を行った。その他、セメントペースト試料を用いて、X線回折と走査型電子顕微鏡（SEM）により水和生成物の変化について観察した。

3 石灰石微粉末の添加が強度、収縮、水和反応に与える影響（化学的側面）

石灰石微粉末を添加したコンクリートの試験結果を表1、図1に、SEMにより観察された画像を写真1に示す。石灰石微粉末の添加により、ブリーディ

ング量が抑制されていることがわかる。また、細骨材の実績率が增加している。圧縮強度においては、石灰石微粉末を添加した供試体で初期強度の増加（材齢7日）が確認される。これは、既往研究で示されるように石灰石微粉末の添加により、普通ポルトランドセメント中のC₃Aの材齢初期の水和反応促進に起因すると考えられる。また、材齢28日、91日について見てみると、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では、石灰石微粉末の添加により圧縮強度が増加していることがわかる。これは、石灰石微粉末の添加により、高炉スラグ微粉末の反応を促進している効果によるものと考えられる。乾燥収縮では、普通セメントを用いた供試体において、石灰石微粉末の添加により収縮量が増加している。これは、ブリーディングが抑制され、実質の水セメント比が数%程度高くなった影響によるものと考えられる。一方、高炉スラグ微粉末を用いた供試体については、石灰石微粉末の添加により水セメント比が増加しているにも関わらず、収縮量の増加は認められない。これは、上記の圧縮強度と同様に、石灰石微粉末の添加による高炉スラグ微粉末の反応促進効果が乾燥収縮においても観察されたと考えられる。X線回折およびSEMを用いて石灰石微粉末の添加による硬化体組織の変化を検証すると、SEMの画像では、石灰石微粉末の添加により、材齢初期の水和物の生成量増加など、セメントの水和反応促進効果が確認される。また、X線回折では石灰石微粉末の添加により、ヘミカーボネートやモノカーボネートなどカーボネート系水和物が生成していることがわかる。前述した石灰石微粉末添加による圧縮強度の増加やその他の硬化物性向上効果は、水和反応の促進やカーボネー

表1 配合とフレッシュ性状

| 供試体 種別 | W/B (%) | W/P (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | | C.T. (°C) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | Bq (cm ³ /cm ²) | 細骨材の 実績率(%) |
|-----------|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|----|------|------|------|--------------|--------------|------------|---|----------------|
| | | | C | BFS | W | S | BS | LSP | G | SP | | | | | |
| N | 60 | 275 | - | 858 | - | - | - | 2.75 | - | 19.8 | 9.9 | 1.9 | 0.17 | 71.2 | |
| NL25 | 55 | - | - | 835 | - | 25 | - | 1.38 | - | 19.6 | 7.0 | 1.7 | 0.13 | 73.8 | |
| NL50 | 51 | - | - | 812 | - | 50 | - | 1.38 | - | 19.5 | 6.6 | 1.7 | 0.11 | 75.3 | |
| NL100 | 44 | - | - | 763 | - | 100 | - | 2.75 | - | 20.0 | 9.8 | 1.8 | 0.07 | 77.0 | |
| N-BS | 60 | - | - | - | 912 | - | - | 2.75 | - | 19.0 | - | - | 0.12 | 62.9 | |
| N-BS-L100 | 44 | - | - | - | 811 | 100 | - | 2.75 | - | 19.3 | - | - | 0.10 | 68.4 | |
| N-BS-L200 | 35 | - | - | - | 710 | 200 | - | 3.85 | - | 19.5 | 6.5 | 2.8 | 0.07 | 70.9 | |
| B | 60 | 165 | - | 848 | - | - | - | 2.20 | 1048 | 19.4 | 10.7 | 1.6 | 0.12 | 71.2 | |
| BL25 | 55 | - | - | 825 | - | 25 | - | 1.38 | - | 19.6 | 7.0 | 1.9 | 0.11 | 73.8 | |
| BL50 | 51 | - | - | 802 | - | 50 | - | 1.93 | - | 19.5 | 9.4 | 1.9 | 0.08 | 75.3 | |
| BL100 | 44 | - | - | 753 | - | 100 | - | 2.20 | - | 19.7 | 8.4 | 1.7 | 0.07 | 77.0 | |
| B-BS | 60 | 151 | 124 | - | 901 | - | - | 2.20 | - | - | - | - | 0.14 | 62.9 | |
| B-BS-L100 | 44 | - | - | - | 800 | 100 | - | 2.20 | - | 20.0 | 3.1 | - | 0.19 | 68.4 | |
| B-BS-L200 | 35 | - | - | - | 699 | 200 | - | 4.13 | - | 20.0 | 7.7 | 2.6 | 0.16 | 70.9 | |

表2 使用材料

| 名称 | 密度 (g/cm ³) | 備考 |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|
| 普通ポルトランドセメント | 3.15 | |
| 高炉スラグ微粉末 | 2.91 | 比表面積4000 cm ² /g |
| 水道水 | - | |
| 大井川水系産陸砂 | 2.57 | |
| 福山産高炉スラグ細骨材 | 2.73 | |
| 豊橋市産石灰石微粉末 | 2.72 | 比表面積2800 cm ² /g |
| 岡崎産硬質砂岩砕石 | 2.66 | |
| 高機能タイプAE減水剤 | - | |

ト系水和物の生成などに起因していると考えられる
4 石灰石微粉末の添加が物質移動抵抗性に与える影響（物理的側面）

透気試験結果を見てみると、石灰石微粉末の添加により、材齢 28 日、91 日ともに透気係数は抑制されていることがわかる。電気伝導率においても、透気試験と同様の傾向が認められる。既往研究においても石灰石微粉末添加によるブリーディング抑制効果は明らかだが、ここでは、ブリーディングの抑制が硬化物性に与える影響について検討する。ブリーディング量と物質移動抵抗性の関係について見てみると、両者には相関関係が確認でき、ブリーディングを抑制することで物質移動抵抗性は向上していることがわかる。ブリーディング抑制機構を考えるために、ブリーディング量と細骨材の実績率の関係を見てみると、両者には高い相関関係が認められる。これらの結果からは、石灰石微粉末の添加により、物理的に細骨材粒子間の空隙を充填する間詰効果が現れ、水みちとなり得る余剰水の上昇経路を遮断し分散させることで、ブリーディングが抑制されるという機構が推察される。石灰石微粉末の添加によるブリーディング抑制が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の形成を防止することで、物質移動抵抗性が向上したと考えられる。

5 石灰石微粉末を添加したコンクリートの実構造への適応検討

実構造物への適応性を検討するため、実機練りにより作製した供試体の各種試験を実施した。その結果、ブリーディングの抑制や圧縮強度の増加、物質移動抵抗性の向上など良好な結果が得られた。そして、現場において実施工を行い（写真2）、施工方法の検討も行った。今後も、ひび割れの経過観察を通して実構造への適応性の検討を継続していく。

6 まとめ

石灰石微粉末を添加したコンクリートの各種物性について検討した。その結果、細骨材の実績率が增加することによりブリーディングが抑制され、物質移動抵抗性の向上が確認された。石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末の共存により、収縮量増加の抑制など高炉スラグ微粉末の反応促進効果も確認された。また、実機練りおよび実施工で良好な結果が得られており、実構造への適応は可能であると考えられる。

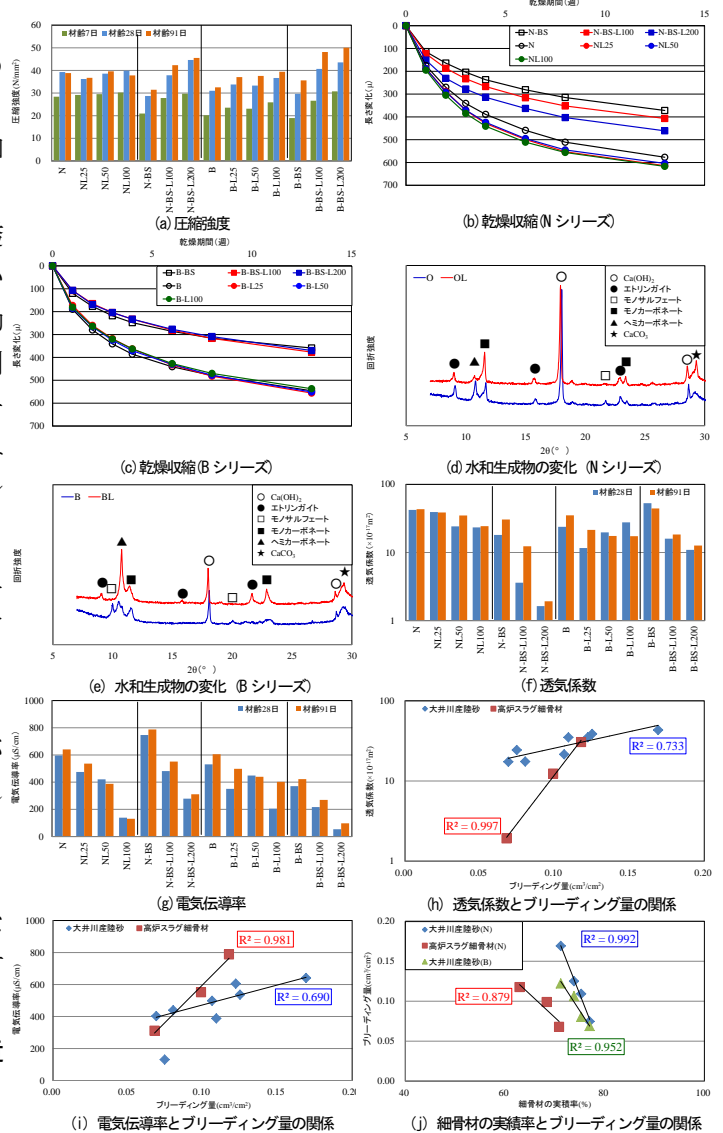


図 1 石灰石微粉末を添加したコンクリートの特性

- (a) 石灰石微粉末の添加により、材齢初期の強度は増加する。石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末の共存により、材齢 28 日以降も強度は増加する。
- (b) 石灰石微粉末の添加により、収縮量は微増した。
- (c) 石灰石微粉末と高炉スラグ微粉末の共存により収縮が低減した。
- (d) (e) 石灰石微粉末の添加により、カーボネート系水和物が生成している。
- (f) (g) 石灰石微粉末の添加により、透気係数および電気伝導率は抑制される。
- (h) (i) 透気係数、電気伝導率ともにブリーディング量と相関関係が認められる。
- (j) 細骨材の実績率とブリーディング量の間には高い相関関係が認められる。

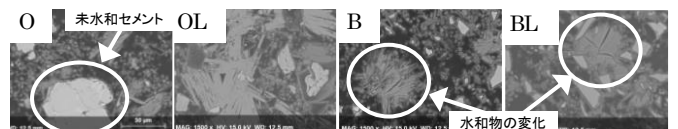


写真 1 SEM により観察される水和生成物の変化（1500 倍）

石灰石微粉末の添加により、OL と BL ともに水和生成物量が増加している。石灰石微粉末の添加により、水和生成物の変化を確認した (BL)。



写真 2 実構造への適応検討（土間コンクリート：700 m²）