

論文 モルタル・コンクリートの諸特性に及ぼす石灰石微粉末の物理的影響

佃 誠太郎*1・岸 利治*2・Hamed M.M.Salem*3

要旨：モルタル・コンクリートに石灰石微粉末を添加した場合の硬化後品質に及ぼす物理的影響を明らかにするために、等温平衡状態における乾燥・湿潤過程での飽和度履歴特性を実験的に求めるとともに、RC 部材の一軸引張試験を石灰石微粉末を添加したコンクリート、普通コンクリート、自己充填コンクリートの 3 体の供試体について実施した。その結果、空隙構造に対しては充填効果と水和阻害の 2 つの影響があること、および、部材レベルでは局所ブリーディングの影響が緩和される可能性があることを確認した。

キーワード：石灰石微粉末、水和促進効果、ブリーディング、一軸引張試験、鉄筋ひずみ

1. はじめに

自己充填コンクリート (SCC) では、高い流動性と材料分離抵抗性を実現させるために、低い水粉体比と高い単位粉体量とする必要がある。粉体にセメントを用いた場合、低水セメント比ゆえに必然的に高強度となるが、SCC にとっては必ずしも高い強度は要求されない。また、比較的大断面を有する構造物に SCC を使用する場合には、高い単位セメント量ゆえに、温度ひび割れ制御の観点から温度上昇量が問題となることも多い。そこで近年、SCC において結合材の置き換え材料として、石灰石微粉末を用いることが多くなってきた¹⁾。石灰石微粉末を用いることによって、少量の高性能 AE 減水剤の使用で所要の流動性と良好な材料分離抵抗性を達成することができると共に、結合材の一部が不活性な材料で置き換わることにより、コンクリートの発熱量を低減することができるからである。そして、SCC における石灰石微粉末の使用例が増えるのに伴い、フレッシュ性状や発熱特性以外の材料特性 (耐久性能、力学性能) についても試験結果と共に論じられるようになってきた。

石灰石微粉末は粒子表面近傍を除いて、基本

的には反応を生じないと考えられるため、コンクリートの材料特性に及ぼす影響は微粒子としての物理的な効果といえる。ただし、基準となるコンクリートに対する石灰石微粉末の混入方法には、配合上、水粉体 (石灰石微粉末を含む) 比を一定として結合材の一部を置換する内割方法と、結合材量を一定としたまま主に細骨材の一部を置換する外割方法の 2 種類があり、いずれの混入方法を用いるかによって、コンクリートの材料特性の変化は異なることになる。実際に、石灰石微粉末の効用に関して、一見相反する表現がなされることも多く、その役割について統一的な見解が示されているとはいいがたい。このように、モルタル・コンクリートの諸性状に及ぼす石灰石微粉末の物理的影響に関する包括的な認識を確立するためには、石灰石微粉末の混入方法として外割置換を採用した系統立てた検討が不可欠である。

石灰石微粉末がコンクリートにもたらす物理的な影響としては、まず、強度・水和に及ぼす鉱物微粉末効果が上げられる¹⁾。これは、石灰石微粉末表面も水和生成物の析出サイトとして機能することにより、水和物の析出速度を促進

* 1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

* 2 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 博 (工) (正会員)

* 3 Cairo University, Assistant Professor (東京大学客員研究員) 博 (工) (正会員)

すると共に、セメント粒子表面の水和生成層の厚さが軽減され、未反応粒子近傍での拡散抵抗が緩和されるためと説明されている。このように、石灰石微粉末が結合材の反応速度に与える影響については明らかとなってきたが、最終的に結合材の水和率がほぼ同一レベルに達した際、空隙構造における影響については、未だ不明な部分も多い。そこで、高水セメント比の場合と共に、低水セメント比の配合でも敢えて外割置換によって石灰石微粉末を多量に混入し、乾燥・湿潤過程における等温平衡状態での飽和度を測定することにより、水和促進以外の影響を把握することを試みた。また、石灰石微粉末はブリーディングの抑制に効果があることが知られており、マトリックスにおける空隙構造の変化以外にも、骨材周りや鉄筋近傍での局所ブリーディングを抑制することによる部材レベルでの影響も考えられる。そこで、ブリーディング低減効果が鉄筋の付着特性改善に与える影響をRC部材の一軸引張試験によって検討した。

2. 石灰石微粉末の置換方法の影響と水分逸散および乾燥収縮挙動に関する既往の検討

石灰石微粉末に粉体としての役割を求めるSCCでは内割置換を採用することが多く、コンクリートの強度や空隙構造に対する影響が大きい水結合材比が大きく変化することになる。したがって、SCCにおける石灰石微粉末の混入に伴う材料特性の変化は、現象としては石灰石微粉末の混入に伴って表れるが、機構としては水結合材比の変化によってもたらされると捕らえるべきである。一方、鉱物微粉末効果を論じる過去の研究では、石灰石微粉末は外割置換によって使用することが多かった。石灰石微粉末を外割置換で使用した場合、フレッシュ性状は大きく異なることになるが、実質的に水結合材比は一定に保たれるので、耐久性や力学性能に及ぼす石灰石微粉末の効果を検討するには適した混入方法と言える。

そこで田村は、W/C72%のモルタル供試体を



図-1 石灰石微粉末の置換方法

用いて、配合における細骨材の量と水セメント比を一定として石灰石微粉末を混入し、所定の環境下における逸散水量と乾燥収縮ひずみを測定した²⁾。したがって、石灰石微粉末を含む水粉体比は変化しており、実験では水粉体比が72%、55%、30%となるように石灰石微粉末を混入している。図-1に、内割置換と外割置換の概念と共に、田村の用いた石灰石微粉末の混入方法を示す。田村の混入方法は一般的な外割置換とは異なるが、水セメント比が一定に保たれており、石灰石微粉末が空隙構造に及ぼす影響を、より直接的に検討することを意図した研究といえる。そして、水分の逸散と乾燥収縮がほぼ平衡に達した時点で比較した結果、単位セメントペースト量当たり正規化した逸散水量と乾燥収縮ひずみは水粉体比が55%の配合において最小となり、空隙構造が最も緻密になる石灰石微粉末の最適混入量(率)が存在すると結論付けている。

以上の指摘は大変興味深いものであるが、打設後1~2週間の若材齢から乾燥を開始しており、水和促進という意味での鉱物微粉末効果の影響を排除していないこと、また、完全な外割置換でないためにセメントペースト量変動し、セメントペーストに対する細骨材の割合も石灰石微粉末の混入と共に増加するので両者の影響を明確に分離できないことなどの課題が残り、空隙構造に及ぼす石灰石微粉末の影響を断定的に論じるには十分でない。そこで、本研究では、セメントペースト量を一定とした外割置換を行うと共に、鉱物微粉末効果によるセメント水和率の相違をできるだけ排除するよう、促進養生を実施することとした。

表-1 ヒステリシス試験のモルタルの配合

No.	W/C	W/P	単位量 (kg/m ³)				L置換率
			W	C	L	S	
50-1	50	50.0	367	734	0	1080	0%
50-2	50	36.6	367	734	270	810	25%
50-3	50	28.8	367	734	540	540	50%
50-4	50	23.8	367	734	810	270	75%
30-1	30	30.0	294	980	0	1080	0%
30-2	30	23.5	294	980	270	810	25%
30-3	30	19.3	294	980	540	540	50%
30-4	30	16.4	294	980	810	270	75%

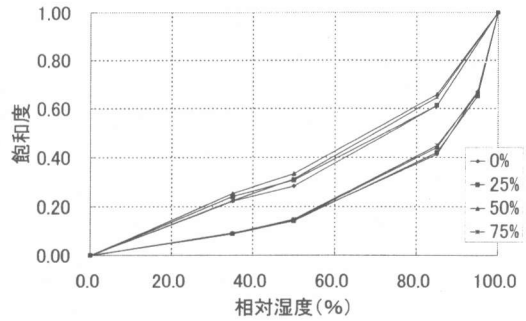
3. 等温平衡状態での含水率測定手法を用いた空隙構造に及ぼす石灰石微粉末の影響評価

3.1 ヒステリシス試験の特長

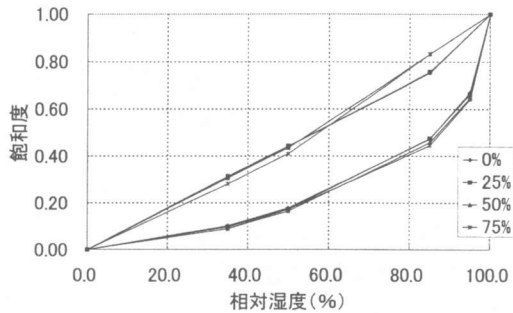
コンクリートの空隙構造を調べるために古くから用いられている試験方法に水銀圧入法がある。水銀圧入法は高压により水銀をコンクリートの空隙内に強制的に押し込み、その注入量から空隙構造を調べるものである。しかし、水銀圧入法にはいくつかの問題点があり、空隙構造のインクボトル効果により注入注出の際の水銀の挙動が理屈通りにはならないことや注入圧力で空隙構造を破壊することなどが指摘されている。これらの問題は充填媒体が液体である以上、回避できないものであり、気体として移動する充填媒体を用いることが空隙構造評価の鍵を握るものと考えられる。そこで、本研究では、乾燥・湿潤過程における等温平衡状態での飽和度を測定して（ヒステリシス試験）、モルタルの空隙構造を評価することを試みた。平衡に達するまでに時間を要するという欠点はあるが、水蒸気として空隙内を移動するので空隙を破壊することが無く、湿潤過程においてインクボトル効果を回避できる点は、多孔質材料の空隙構造評価に望ましい特長である。セメント系材料中における水の存在形態としては凝縮水・吸着水・層間水などの異なる形態が考えられるので、単に熱力学平衡を考慮した空隙径の絶対評価には克服すべき課題も多いが、空隙構造を反映した相対的な評価には十分利用することができる。

3.2 実験概要

実験に使用したモルタルの配合を表-1に示



a) 等温履歴曲線 (W/C=50%)



b) 等温履歴曲線 (W/C=30%)

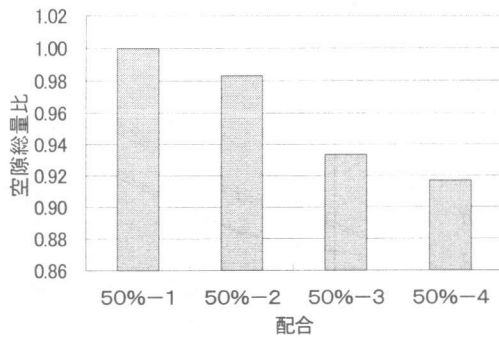
図-2 等温平衡状態における飽和度曲線

す。W/Cは50%と30%とし、プレーン配合(50-1, 30-1)に対して細骨材の一部を石灰石微粉末で25%, 50%, 75%重量置換した。打設して1日封緘養生し、7日間20℃で水中養生した後、水温を50℃程度に上げて水中養生を4日行い、セメントの水和反応を促進させるよう努めた。養生後、供試体をおよそ1cm程度の小片に粉砕し、次の手順でモルタルを乾燥及び湿潤させた。なお、湿潤及び乾燥は、温度25℃一定で行った。

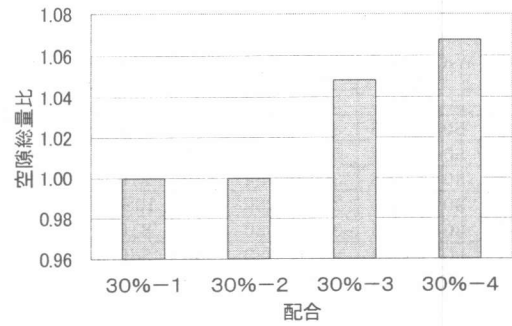
乾燥過程

1) 水中養生終了後に粉砕し、試料の表面が乾かないうちに（相対湿度100%、飽和度100%とみなす）、表面に付着している水分をふき取って重量を測定する。

2) 相対湿度を85%→50%→35%と順次変化した恒温恒湿槽中に試料を投入する。試料はそれぞれの環境下で2日程度保った後、重量を測



a) W/C=50%



b) W/C=30%

図-3 全空隙中に比較的大きな空隙が占める割合の変化(基準配合で正規化)

定する。

3) その後4日間の真空乾燥(相対湿度0%,飽和度0%とみなす)を行い,重量を測定する。

湿潤過程

1) 乾燥過程同様,相対湿度を35%→50%→85%→95%の順に上昇させ,重量変化を測定する。

3.3 実験結果および考察

結果を図-2に示す。等温履歴曲線を含む空隙構造情報の包括的な解釈については,今後検討を進める必要があるが,石灰石微粉末(ブレン比表面積 $7000\text{cm}^2/\text{g}$)の平均粒径が $1.6\mu\text{m}$ 程度であることから,比較的大きな空隙に対する影響が卓越するものと考え,今回は湿潤過程における相対湿度85%の飽和度に着目した検討を行った。ちなみに,相対湿度85%の平衡状態において凝縮水で満たされる最大空隙径は 6.5nm 程度である。飽和度は,全空隙中の液状水が占める割合を表すので,(1-飽和度)は,液状水が存在しない比較的大きな空隙の割合を表すことになる。そこで,石灰石微粉末を含まない基準配合における湿潤過程相対湿度85%の(1-飽和度)の値によって,石灰石微粉末の外割置換率を変えた試料の(1-飽和度)の値を正規化することを試みた。これにより,全空隙中で比較的大きな空隙が占める割合が,石灰石微粉末の混入によってどのように影響を受けるかを比較することができる。

基準配合における比較的大きな空隙の割合(1-

飽和度)を1とした時の,各配合における割合(空隙総量比)を図-3に示す。これより,W/C=50%では石灰石微粉末を添加することによって比較的大きな空隙の割合が減る一方,W/C=30%では逆に増える傾向にあることがわかる。50%という相対的に高い水セメント比では石灰石微粉末の物理的充填(空間分割)効果が表れたのに対して,30%という低い水セメント比では石灰石微粉末表面に物理的(あるいは一部,化学的)に吸着される水分がセメントの水和阻害をもたらすほどに多くなるためと考えられる。この結果を元に田村の研究²⁾を振りかえると,空隙構造を緻密化する最適な石灰石微粉末混入量(率)が存在するのは,石灰石微粉末による物理的な充填効果と水 and 阻害の異なる機構の重ね合わせによるものと考えられる。なお,本実験では促進養生した供試体を使用したが,水和水度の相違が完全には排除されていない可能性もあることを付記しておく。

4 引張試験

4.1 実験概要

練混ぜ時にコンクリートに石灰石微粉末を添加するとブリーディングが低減されることが数多く報告されている¹⁾。そこで,前章で論じた石灰石微粉末がマトリックスの空隙構造に及ぼす影響に加えて,局所ブリーディングが低減されることによる構造特性への影響を確認する目

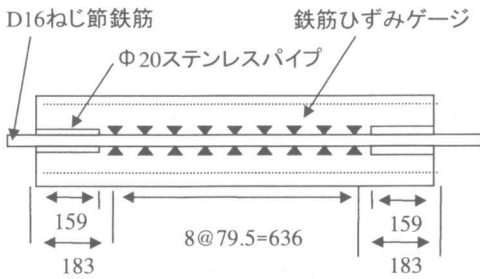


図-4
引張供試体の概要
(上)と断面図(右)

的で鉄筋コンクリート円柱の引張試験を実施した。鉄筋回りのコンクリートの品質を反映していると考えられる鉄筋とコンクリートの付着応力発生状況は、鉄筋のひずみ分布より確かめることができる。なお、普通コンクリートと石灰石微粉末添加コンクリート、さらにブリーディングをほとんど生じない SCC の3種類を比較検討することとした。

4. 2 使用材料及び形状寸法

実験に用いたコンクリート柱の概要を図-4に示す。コンクリートの断面は円形とし、直径は15cmとした。主鉄筋は公称直径15.9mm(=Dとする)のねじ鉄筋(D16)を用いた。材料試験による弾性係数は $1.92 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、降伏強度は 355 N/mm^2 である。供試体の形状は円筒形とし、断面の中央に鉄筋を埋めこんだ。鉄筋の付着長は全ての供試体において682mm(40D+46mm)とした。供試体両端での圧縮荷重が一部に集中しないように、ステンレスパイプを利用して長さ10D(鉄筋径の10倍)の非付着区間を設けた。

使用したコンクリートの配合及び引張強度を表-2に示す。普通コンクリートの配合に対し細骨材と20%置換して石灰石微粉末添加コンクリートとした。

表-2 コンクリートの配合
単位量(kg/m³)

No	W/C	W	C	L	S	G	SP
1	55	182	331	0	813	954	0
2	55	182	331	170	650	954	2
3	25.7	191	742	0	671	781	16.3

L:石灰石微粉末

- 1: 普通コンクリート
(引張強度: 341[N/cm²])
- 2: 石灰石微粉末添加コンクリート
- 3: 自己充填コンクリート
(引張強度: 644[N/cm²])

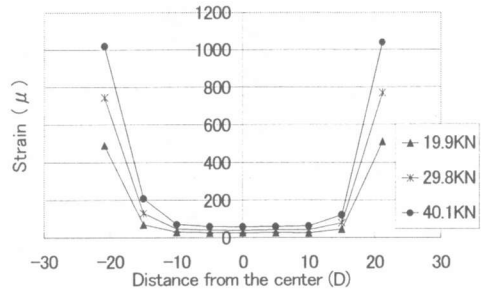


図-5 鉄筋のひずみ分布の一例(SCC)

打設は鉄筋軸を鉛直にした状態で行った。供試体外周部付近にステンレスパイプで設けた筒状孔が鉄筋軸と平行に貫通しており、载荷時に低い荷重での引張ひび割れを防止するため、PC鋼棒を通し、人力でナットを締めてプレストレスをかけた。ステンレスパイプ外周にはグリースを塗り、コンクリートとの付着を除いた。

4. 3 計測項目及び载荷方法

鉄筋のひずみは図-4に示す個所に貼りつけたひずみゲージで測定した。ひずみゲージの間隔は5Dとし、鉄筋表裏両面に貼りつけ、各測定値の平均値をその個所の鉄筋ひずみとした。载荷方法は供試体を万能試験機内に垂直に設置し、载荷速度は6kN/min程度とした。なお、载荷試験中に鉄筋は降伏強度に達していない。

4. 4 実験結果および考察

SCCの鉄筋ひずみの分布状況を図-5に示す。それぞれほぼ20kN, 30kN, 40kNの軸力がかかっている時点で測定された鉄筋ひずみをプロットした。グラフでは供試体中央から上部をマイナスとした。局所付着応力は鉄筋からコンクリ

ートへ伝達される鉄筋の表面積当たりの力と定義されるが、鉄筋の弾性範囲内では、ひずみ分布曲線の勾配に比例する³⁾。従ってある区間の直線の傾きが大きい場合、その区間において平均付着応力が大きいということになる。一般にコンクリート強度が大きいほど付着応力は強い。

各コンクリートの鉄筋ひずみ分布を鉄筋付着区間の上端と下端を0としてそれぞれ中央部分までプロットしたグラフを図6-1, 2, 3に示す。比較のため軸力がほぼ40KNに達したときの結果を用いた。なお、打設時に生じた鉄筋ひずみゲージ位置のずれを試験終了後に全供試体を分解して調査、補正したので各近傍する点どうしでわずかに左右している。

普通コンクリート供試体(図6-1)では、鉄筋のひずみが下部の方が上部より小さく、直線の傾きは大きい。これは施工不良の影響により上部のコンクリートの品質が下部に比べて相対的に落ちたためと考えられる。当初はコンクリートの品質の偏りは無く、局所ブリーディングの影響により供試体下部において鉄筋ひずみが大きくなると思っていたが、それ以上に品質のばらつきが大きくなったものと考えられる。

一方、石灰石微粉末混和コンクリート供試体(図6-2)では、上下部の差は小さく、SCC(図6-3)に類似した傾向を示している。今回の実験は、かなり限られた条件であるが石灰石微粉末添加による局所ブリーディングの抑制効果が表れたものと考えられる。

5. まとめ

等温平衡状態におけるヒステリシス試験およびコンクリート柱の一軸引張試験を行い、石灰石微粉末の添加がモルタル・コンクリートの特性に及ぼす物理的影響について検討した。その結果、空隙構造に対しては、充填効果と水和阻害の2つの影響があること、また部材レベルでは局所ブリーディングの影響が緩和される可能性があることが確認された。

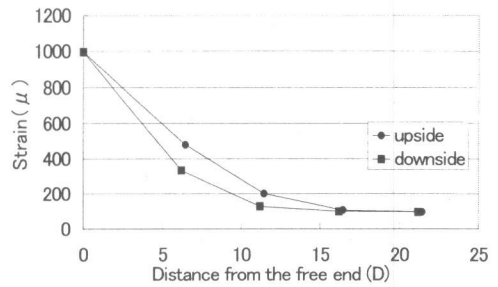


図6-1 上部と下部の鉄筋ひずみ分布比較 (普通コンクリート)

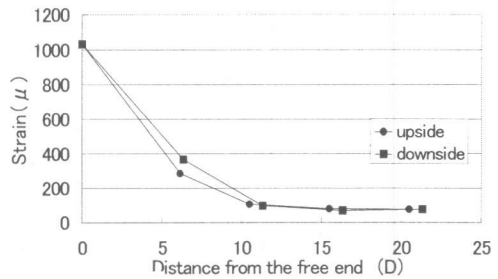


図6-2 上部と下部の鉄筋ひずみ分布比較 (石灰石微粉末添加)

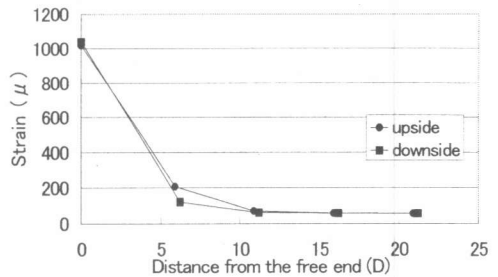


図6-3 上部と下部の鉄筋ひずみ分布比較 (SCC)

参考文献

- 1) 石灰石微粉末研究委員会：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委員会報告集論文集，日本コンクリート工学協会，pp.14，1998.5
- 2) 田村勇：石灰石微粉末を混和した高 W/C コンクリート空隙および乾燥収縮特性，東京大学卒業論文，1999.3.
- 3) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線型解析と構成則，技報堂出版，pp.106，1991.5