

骨材の混入にともなうモルタルの電気伝導特性の変化

金沢大学 学生員 柴山 舞

金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートはセメントペーストと骨材から成る 2 相複合材料であり、セメントペーストと比較すると、骨材の混入にともない工学的性能は大きく変化している。それらのうち、コンクリートの耐久性に関わる物質移動特性への影響については、移動経路の変化やペーストの希釈効果、遷移帯の導入などの観点から検討が進められているが、骨材を混入することによる物質移動特性の変化のメカニズムは明らかではない。

本研究では、骨材量を変化させたモルタル中の骨材粒子の空間構造を明らかにし、その特徴と電気伝導率の関係から、骨材が物質移動経路に及ぼす影響について検討することを目的とする。

2. 実験概要

(1) 供試体の作製および画像の取得

普通ポルトランドセメントと手取川産の川砂を使用して、JIS R 5201 に従って、水セメント比が 0.50 のモルタル供試体(直径 100mm, 高さ 200mm)を作製した。打設後 24 時間にて脱型し、その後所定材齢まで 20℃ の水中養生を行った。なお、セメント:骨材比は C:S=1:1, 1:2, 1:3 とした。また、比較用として、同じ水セメント比のセメントペースト供試体も作製した。

(2) 電気伝導率の測定

材齢 7, 28, 91 日にて供試体中央部から直径 100mm, 高さ約 50mm の円盤型試料を切り出し、ASTM C 1202 に準じて電気泳動法を行った。直流電源により 30V の電圧を負荷した後、15 分後の電流値を測定し、式(1)より電気伝導率 σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) を得た。

$$\sigma = (IL)/(VA) \quad (1)$$

ここに、I は電流値(amps)、L は供試体長さ(cm)、V は電圧値(V)、A は供試体の投影面積(cm^2)である。

(3) 画像取得方法

材齢 28 日において供試体中央部から 40mm×40mm×10mm 程度の試料を切り出し、耐水研磨紙を用いて、表面を注意深く研磨し、デジタルカメラを用いて画像を取得した。なお、観察倍率は 2.6~2.7 倍(1 画素:11.61 μm ~12.12 μm)とした。得られた 2 次元断面画像から骨

材のエッジを抽出し、骨材部分の画像を再現することにより 2 値画像を取得した。

(4) 2 点相関関数

2 点相関関数とは、ある長さ r の線分を画像上に落としたとき、その両端が同一相上に載る確率関数である。線分の両端の座標を x_i, x_j ($r = |x_j - x_i|$) とするとき、2 点相関関数は式(2)のように定義される。

$$S_2^{(S)}(r) = E[1(x_i \in P) \times 1(x_j \in P)] \quad (2)$$

ここに、 S は着目相(骨材相)であり、 $1(\cdot)$ は指示関数を意味する。 $(\cdot)$ 中の条件が正のときは 1、そうでない場合は 0 を与える。また、 $E[\]$ は期待値を表わす。2 点相関関数値の初期勾配は単位体積当たりの表面積(比表面積 S_V)に関係し、式(3)より骨材粒子の比表面積 S_V を求めた。

$$\left. \frac{d}{dr} S_2^{(S)}(r) \right|_{r=0} = -\frac{1}{4} S_V \quad (3)$$

また、取得した骨材相の体積率 $S_2^{(S)}(0)=V_S$ 、およびその比表面積 S_V を用いて、平均の骨材間距離である平均自由行程 λ を式(4)に基づいて算出した。

$$\lambda = \frac{4(1-S_2^{(S)}(0))}{S_V} \quad (4)$$

(5) 接触分布関数[1]

接触分布関数 $H_1(r)$ とは、セメントペースト相中の任意の点から距離 r 以内に骨材粒子が存在する確率である。本研究においては、2 値画像上のセメントペースト相中にランダムに点を落とし、その点から骨材粒子表面までの最短距離を求め、接触分布関数を計算した。

3. 結果および考察

図-1 は材齢の進行にともなう電気伝導率の変化を示したものである。モルタル、およびセメントペーストのいずれの配合についても、電気伝導率は材齢とともに低下する。セメントの水和反応が進行し、伝導相である飽和毛細管空隙量およびその連続性が減少したことを示している。一方、同材齢について比較すると、骨材量の多いモルタルの方が電気伝導率は小さく、さらに、減少の程度は、単純に骨材による希釈を考慮した値よりも小さい。

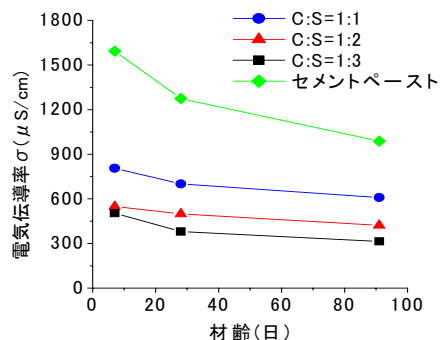


図-1 材齢の進行にともなう
電気伝導率の変化

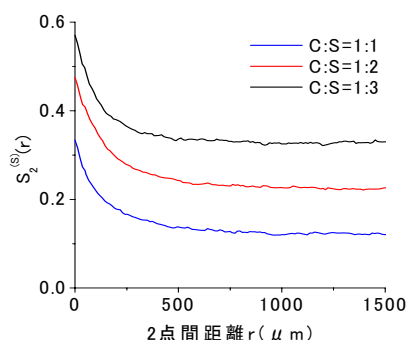


図-2 骨材相の 2 点相関関数
(材齢 28 日)

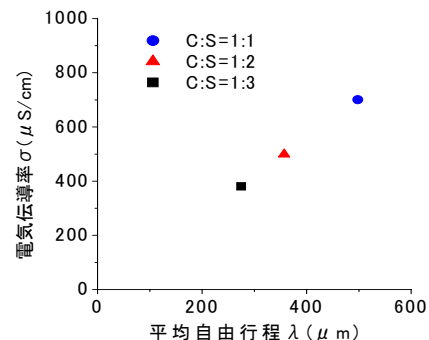


図-3 平均自由行程と電気
伝導率の関係(材齢 28 日)

図-2 は材齢 28 日における骨材相の 2 点相関関数を示したものである。C:S=1:1 に比べ、C:S=1:2, 1:3 の方が構造距離が短くなる傾向が認められ、骨材量の増加にともない、骨材がより小さな範囲に凝集した空間構造単位で存在することがわかる。骨材の量および分布により、その補集合空間としてのセメントペーストの空間構造が決定されることを考慮すると、骨材量が増すにつれてセメントペーストが少なくなると同時に、構造単位も小さくなっていくことを示している。

図-3 は材齢 28 日における平均自由行程 λ と電気伝導率の関係を示したものである。平均自由行程と電気伝導率の間には直線的な関係が存在し、骨材粒子間のセメントペースト相が厚いほど伝導率は大きい。

表-1 は各配合の骨材の比表面積 S_V と、厚さ $20\mu\text{m}$ を仮定して求めた遷移帯(ITZ)の体積率(V_{ITZ})、および骨材相の体積率(V_S)を示したものである。骨材量を増大させても遷移帯体積にはほとんど変化はなく、その体積率は高々12%程度であり、3次元空間におけるパーコレーション閾値(約16%)よりも小さい。しかし、骨材粒子と遷移帯体積をあわせて考えると、明らかにパーコレーション閾値を超え、さらに C:S=1:2 および 1:3 においては、2次元的なパーコレーション閾値(約45%)よりも大きい。

図-4 は骨材粒子に関する接触分布関数を示したものであり、C:S=1:3 は他の 2 配合に比べて収束距離が短く、セメントペーストのどの位置においても距離 $90\mu\text{m}$ 以内には必ず骨材表面が存在する。ここでも、遷移帯として一般的な厚さを $20\mu\text{m}$ 程度と考えた場合、C:S=1:3 のモルタルの方が遷移帯体積は大きく C:S=1:1 の約 1.5 倍となる。

一般に骨材を混入した場合、その表面の遷移帯が連結することにより物質移動性が増加すると考えられている[2]。しかし、本研究においては、遷移帯が存在す

表-1 骨材の比表面積と遷移帯、骨材相の体積率

C:S	1:1	1:2	1:3
$S_V(\text{mm}^2/\text{mm}^3)$	5.47	5.78	6.05
$V_{ITZ}(\%)$	11	12	12
$V_S(\%)$	33	47	57

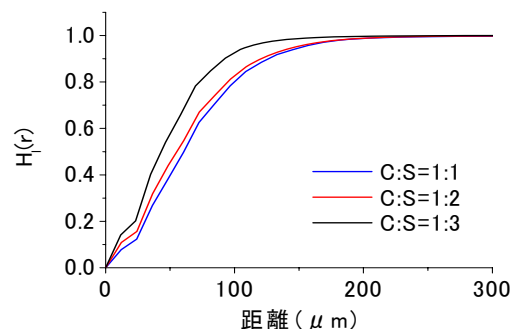


図-4 接触分布関数(材齢 28 日)

るならば、明らかにパーコレーションを生じていると考えられる、骨材量が多くセメントペースト相の薄い配合ほど電気伝導率は低く、連続した伝導経路が存在する確率は小さい。このことから、骨材の混入によって均一な厚さの遷移帯が骨材表面近傍に導入され、それらが連結して連続経路を形成しているとは考えにくい。これより、モルタル中の物質移動経路の連続性は、骨材界面の影響を受けないバルク(bulk)セメントペースト相中の経路の連続性によって決定づけられ、セメントペースト体積の大きいものほど、その経路の連続する確率が高く、伝導率が大きくなると考えられる。

4. 結論

物質移動特性は毛細管空隙の量および連続経路に依存するが、モルタルの電気伝導率の変化と骨材空間特性の対応から、物質移動にかかわる連続経路の存在は、遷移帯よりは、セメントペースト相により決定づけられることが示唆された。

参考文献[1] Stoyan, D. et al., WILEY, 1995. [2] Winslow, D. P. et al., Cem Con Res, Vol.24, pp.25-37, 1994.