

けい酸塩系表面含浸材によるセメントペーストの表層硬度の増大メカニズム

金沢大学 学生会員 ○渡辺 晋吾

金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

表面含浸工法の適切に設計・施工するためには、使用する表面含浸材の性能を事前に把握しておくことが前提となる。表面含浸材の効果は例えば JSCE-K571 に従い、含浸供試体と含浸を行わない原状供試体の物性を比較することにより評価される。含浸材による主要な効果の一つである表層硬度の増大も、原状供試体との比較により容易に判定しうるが、その増大の程度を改質メカニズムと直接関連付けて定量的に理解することは難しい。

本研究においては、反応型けい酸塩系表面含浸材を塗布したセメントペーストの表層硬度の増大メカニズムを明らかにすることを目的とし、微小硬度の増大をゲル空隙比の変化として評価することについて論ずる。

2. 実験概要

(1) セメントペースト供試体の作製

普通ポルトランドセメントを用いて、JIS R 5201 に準じて水セメント比が 0.5 のセメントペースト円柱供試体(直径 10mm, 高さ 200mm)を作製した。打ち込み後 1 日にて脱型し、水中養生(20℃)を行った。材齢 7 日にて、供試体中央部から直径 10mm, 高さ 25mm および 50mm の円板状供試体を切り出し、湿空養生(相対湿度 80%)を行った。湿空養生期間 7 日(材齢 14 日)にて製造業者の仕様に従ってけい酸塩系表面含浸材(密度:1.2g/cm³, けい酸ナトリウム-カリウム系)を所定量塗布した。塗布完了後、所定の材齢まで再び湿空養生を継続した。また、比較のために同様の養生条件で表面含浸材を塗布しない供試体および水中養生を継続した供試体も作製した。

(2) 微小硬度試験

養生期間 14,28 および 91 日(供試体の材齢 28,42 および 91 日)にて供試体の中央部から約 20×20mm の試料を含浸深さ方向に切り出した。耐水研磨紙を用いて断面を研磨し、JIS Z 2244 に準じて微小硬度試験(ビッカース硬度)を行った。押し込み荷重は 0.098N とし、ビッカース圧子の押し込み位置を含浸深さ方

向に変化させて測定を行った。

(3) 反射電子像の取得および画像解析

材齢 28,42 および 91 日にて供試体から試料を切り出し、反射電子像観察試料を作製した。観察倍率 500 倍にて研磨面の反射電子像を取得した。1 画像は 1148 × 1000 画素からなり、1 画素当たりの寸法は約 0.22μm である。取り込んだ反射電子像に対してグレースケールに基づく 2 値化処理を施し、未水和セメントおよび毛細管空隙を抽出した。また、求めた粗大毛細管空隙を面積の等しい円に置換し、それらを円相当径の順に並べ替えて粗大毛細管空隙径分布を求めた。

(4) Powers モデルによる構成相の推定

反射電子像中の未水和セメント体積率から水和度を求め、Powers の水和反応モデルを適用して水和反応生成物量および全毛細管空隙量を求めた。水和反応生成物中のゲル空隙の空隙率は 0.28 とし、ゲル空隙と水和反応生成物固体相が一体となってセメントゲルを構成するとした。Powers モデルにより生成されたセメントゲル体積を求め、全体積から未水和セメントおよびセメントゲルを差し引くことによって全毛細管空隙を求めた。全毛細管空隙から画像解析によって求めた粗大毛細管空隙を差し引いた残りの空隙は分解能以下の空隙であり、これを微細毛細管空隙とした。

(5) 表面含浸材による充填効果の評価

測定した微小硬度の値に Feldman ら¹⁾が求めた微小硬度(Hv)-圧縮強度(f'c)の関係を適用し、圧縮強度を推定した。この圧縮強度から、渡辺ら²⁾の圧縮強度(f'c)-ゲル空隙比(X)関係によりゲル空隙比を計算した。以上の手順を図-1 に示す。(4)にて求めた構成相割合と本法により求めたゲル空隙比を比較し、その差を表面含浸により充填された空隙量とした。

3. 結果と考察

図-2 に表面含浸材塗布供試体の微小硬度試験結果

キーワード 表面含浸材, 反射電子像, 微小硬度, 細孔径分布, Powers モデル

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学自然科学研究科社会基盤工学専攻 TEL 076-264-6373

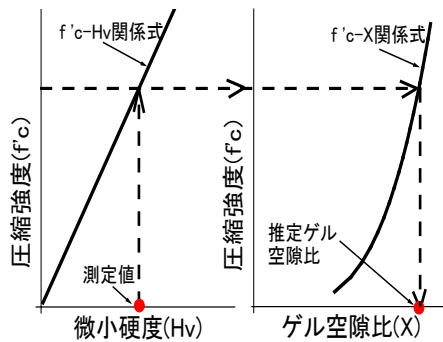


図-1 微小硬度からの
ゲル空隙比の求め方

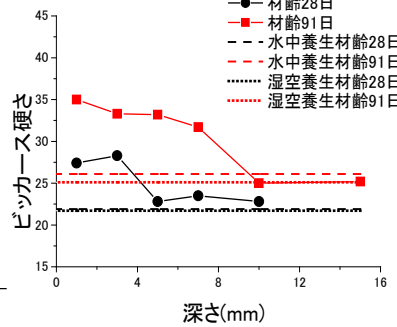


図-2 微小硬度試験結果

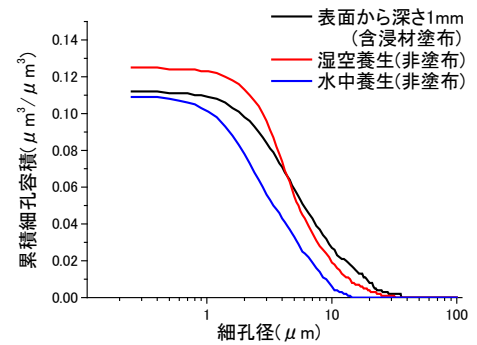


図-3 細孔径分布(材齢 28 日)

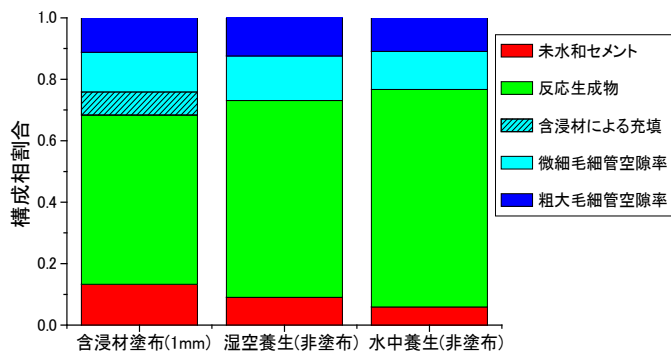


図-4 セメントペーストの構成相割合

を示す。図中破線は水中養生を、図中点線は湿空養生を行ったセメントペーストのバルクセメントペースト部(表面からの影響を受けないと考えられる箇所)のそれぞれの微小硬度である。表層部に近いほどビッカース硬さが大きく、また、内部に向かうにつれて値は減少し、変化が小さくなる傾向が認められる。硬度の変化が小さくなる値は、同じ材齢の含浸材を塗布せず湿空養生のみを行った供試体のバルクセメントペースト部の値とほぼ同程度となっている。材齢の進行に伴い、バルクセメントペースト部よりも大きな微小硬度を示す範囲が拡大しており、材齢 91 日においては約 10mm までの深さにおいて高い値を示すようになる。これは表面含浸材の反応による C-S-H の生成によって、組織の緻密化がこの範囲で進行したためと考えられる。

図-3 は画像解析により求めた粗大毛細管空隙径分布を示したものである。同様の湿空養生にも関わらず、表面含浸材塗布供試体は非塗布の供試体に比べおよそ 4μm 以下の空隙の減少がみられる。また、水中養生を行った場合は、粗大毛細管空隙の範囲内で 2μm 以下の空隙も存在するが、表面含浸材を塗布した場合には 2μm 以下の空隙はほとんど存在しない。

よって本研究に使用したけい酸塩系表面含浸材による空隙構造の変化に関しては、粗大毛細管空隙の中でも相対的に径の小さい側の空隙が充填されていくと考えられる。

図-4 は材齢 28 日の表面含浸材を塗布した供試体、塗布せず湿空養生を継続した供試体および水中養生供試体に関して、画像解析により求めた水和度と Powers の水和反応モデルを組み合わせ求めた硬化体構成相割合を比較したものである。水和度は、水中養生の供試体が最も高く、次いで湿空養生、含浸材塗布供試体の順になっている。そのため含浸材塗布供試体で生成されたセメントゲル量は最も少ない。これにもかかわらず含浸材塗布供試体の微小硬度は大きく、局所的な圧縮強度は高いことになる。図中斜線にて示した微細毛細管空隙量は、測定された微小硬度に対応するゲル空隙比となるために充填されるべき空隙量を示している。粗大毛細管空隙率は実測されているため、結果として、表面含浸材は図に示すように微細毛細管空隙を減少していることになる。また、この空隙の充填量を水和度に換算すると約 10%の増加として評価される。

4. 結論

けい酸塩系表面含浸材の反応による表面硬さの増大は比較的径の小さい毛細管空隙量の減少によりもたらされていると考えられる。また、この減少量はゲル空隙比から水和度に換算すると、約 10%の水和度の増加に相当することが推察された。

参考文献

- 1) Feldman ほか : Cement and Concrete Research, Vol.15, No.6, pp.943-952 (1985)
- 2) 渡辺曉央ほか : コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.539-544 (2003)