論文 2,3の超吸水性ポリマーを内部養生材として使用したモルタルの自 こ収縮挙動の比較

横田 光一郎*1·五十嵐 心一*2

要旨:製造方法および吸水能の異なる複数の超吸水性ポリマー(SAP)を内部養生材として用いたモルタル の自己収縮低減効果をSAP粒子の空間分布と関連づけながら評価した。その結果,SAPの空間分布が同程度 であっても自己収縮低減効果には相違が生じ,SAP粒子の特性により自己収縮挙動は左右されることが明ら かとなった。また,SAP粒子の特性として粒子径に着目し,SAPを分級して用いたところ,大きな粒子を用 いた方がより収縮低減効果が得られ,SAPの吸水能の寸法依存性が自己収縮挙動に影響を及ぼすようである。 キーワード:超吸水性ポリマー,自己収縮,内部養生,空間分布

1. 序論

構造物の長大化にともない,高強度コンクリートが広 く用いられるようになっている。しかし,高強度コンク リートは水結合材比が小さく,また,シリカフュームを 混和材として使用することなどにより,自己収縮が生じ やすい。自己収縮が拘束されることにより生じるひび割 れは、コンクリートの劣化因子の経路となり、コンクリ ートの耐久性を低下させる要因となりうる。このため, 自己収縮を抑制するための合理的手法の確立が必要とさ れ、収縮低減剤の開発や内部養生法が試みられている。

内部養生法は、保水性粒子をコンクリート中に配置す ることにより、内部から水分を供給し、自己乾燥の低減 効果を得ようとするものである。内部養生材としては軽 量骨材¹⁾,再生骨材²⁾,廃瓦³⁾など吸水性の高い材料の使 用が検討されている。例えば,加藤ら¹⁾の研究によると, 飽水状態の軽量骨材を使用することにより、自己収縮が 抑制され、優れた内部養生効果が得られるとしている。 柘植ら²⁾は,吸水率の異なる再生骨材を用いたコンクリ ートの自己収縮を検討し,水セメント比および再生骨材 の置換率が大きくなるほど自己収縮が低下され、吸水率 の大きい再生骨材ほど自己収縮低減効果が得られると報 告している。また、鈴木ら³⁾は、廃瓦を粗骨材の一部に 使用した超高強度コンクリートの圧縮強度発現や収縮ひ ずみおよび拘束応力に関する研究を行っている。廃瓦を 内部養生材として使用することにより, 収縮ひずみと拘 東応力は低減され、材齢1日以降のひずみの経時変化は 廃瓦置換率によって異なることを明らかにしている。こ のように、内部養生材の含水状態や骨材との置換率の相 違によって、自己収縮抑制効果は大きく異なり、内部養 生材の吸水性は重要な影響因子となる。

それらの高吸水性の材料の中でも、特に高い吸水性を 有するのが超吸水性ポリマー(Super Absorbent Polymer: SAP) である。SAP は自重の数十倍から数百倍ほどの吸 水能力を有する高分子材料であり、吸水膨張してゲル状 になり、Jensen ら⁴⁾はコンクリート用に開発された SAP が内部養生材として有用であることを示している。

SAP の主な製造方法は、水溶液重合法と懸濁重合法の 2 つがある⁵。水溶液重合法では、得られた重合物を粉 砕して作製するので、不規則形状の粉末や粒状の SAP が 得られる。それに対して、懸濁重合法は界面活性剤や保 護コロイドを使用して、モノマーを溶媒に懸濁させる方 法であり、小さな球状の SAP 粒子が生成される。このよ うに SAP は粒子径や形状が製造方法によって異なり、内 部養生材としての性能にも影響を与える可能性がある。

本研究では、製造方法の異なる SAP をモルタルに混入 し、その内部養生効果の相違を自己収縮特性の変化によ り評価する。また、SAP の分布状況を空間統計量によっ て評価し、内部養生効果の相違を空間構造と関連づけな がら論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには普通ボルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³,比表面積:3310cm²/g)を使用し,混和材とし てシリカフューム(密度:2.20g/cm³)を用いた。細骨材 には珪砂(密度:2.62 g/cm³,吸水率:0.40%,最大骨材寸 法:5mm)を使用し,ポリカルボン酸エーテル系の高性 能減水剤を使用した。内部養生材として用いた3種類の SAPを図-1に示す。SAP-Aは水溶液重合法により製造 され,粒子形状は不規則な粒状であり,1mmを超えるよ うな粗大な粒子も含んでいる。一方,SAP-BおよびSAP-C はともに懸濁重合法により製造されたものであり,球状 粒子となっているが,SAP-Cは界面活性剤が多く付着し ているために凝集体を形成している。

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員) *2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)



吸水前の SAP((a) SAP-A, (b) SAP-B, (c) SAP-C) 図-1

1mm

2.2 モルタルの配合

水結合材比は 0.28, 空気量を 4.0% とし, JIS R 5201 に 準じてモルタルを練り混ぜた。なお、シリカフューム置 換率はセメント質量に対して9.4%, SAPの添加量を0.3% とした。使用した SAP は、アルカリ性の細孔溶液の吸水 能が SAP の質量に対して, それぞれ SAP-A: 10g/g, SAP-B: 13.3g/g, SAP-C: 13g/g として提供されたもので あり,この分の水を余分に加えた。この水は練り混ぜ中 にすべて SAP が吸水し、水結合材比は変化しないとして 配合設計を行った。なお、練り混ぜにおいて SAP は結合 材とともに空練りした後に、注水を行った。使用したモ ルタルの配合を表-1 に示す。ここに、単位水量中には SAP が吸収する水を含んでいる。

2.3 SAP の粒度分布

図-1 に示した顕微鏡画像を用い、画像解析法により 分散や凝集を問わず、観察された粒子クラスターとして の円相当径を求めた⁶。観察倍率は40倍とし、それぞれ 1000 個程度の粒子を繰返し計測した。

2.4 圧縮強度試験

JIS R 5201 に準じて、40mm×40mm×160mm のモルタル 供試体を作製し, 密封養生を行った。所定材齢にて試験 を実施し、SAP を混入しない供試体との比較を行った。 2.5 長さ変化試験

ASTM C 1698-09⁷⁾に従って、ポリエチレン製のコルゲ ートチューブ(直径:約30mm,長さ:約420mm)内にモ ルタルを注ぎ、長さ変化測定用供試体とした。これを 20℃の恒温室にて水平に静置し、図-2 に示した長さ変

		表一 モルダルの配合					
使用	W/B	単位量 (kg/m ³)					
SAP		С	SF	W	S	SP	SAP
無	0.28	684	64	209	1290	11.3	_
А	0.28	684	64	230	1239	11.3	2.05
В	0.28	684	64	237	1222	9.9	2.05
С	0.28	684	64	236	1221	11.3	2.05
cp,古姓代法·少刘							~~~~~

エルタルの配合

SP:局性能减水剤

化測定装置を用いて,供試体の長さ変化を継続的に測定 した。予備試験にて別途、セメントペーストの凝結試験 を行い、始発時を自己収縮の始点とした。

2.6 画像取得と SAP 粒子の抽出方法

(1) 空隙画像の取得方法

2.4 で作製した供試体から材齢 90 日にて厚さ 10mm 程 度の板状試料を切り出した。切断面を研磨し, エタノー ルに浸漬して内部水と置換した。真空乾燥した試料に対 して,赤色染料含有エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の 硬化後に再び研磨を行い、空隙のみを染色した試料を作 製した。この試料をスキャナーで読み込み、研磨面のカ ラー画像を解像度 1200dpi で取得した。1 画像は 1652× 1653 画素からなり、1 画素は 21.2µm に相当する。画像 解析ソフトウェアを用いて染色部を抽出し、これを SAP およびその他の空隙を抽出した2値画像とした。

(2) SAP 粒子の抽出

SAP 粒子の空間分布を得るためには、(1)の抽出画像か ら SAP 粒子の染色部のみを抽出する必要があるが、スキ ャナー画像中における染色部の幾何学的特徴から識別す ることはできない。そのため、本研究では以下のような 統計的手法により, SAP 粒子の抽出を試みた⁸⁾。

SAP 無混入供試体において(1)の方法により、気泡の抽 出画像を取得する。抽出された気泡の面積率とその円相 当径を求め、空隙径分布を得る。また、SAP 粒子を含む 供試体の抽出画像においても同様に算出する。それぞれ の粒径範囲を100µmの刻み幅で分割し、その幅の中で気 泡の占める個数割合に相当する粒子を, SAP 混入供試体



図-2 長さ変化測定装置

から無作為に除去した。これを各粒径範囲にて繰り返し、 残された染色部を SAP 粒子を抽出した画像とした。

2.7 SAP の空間分布の評価

(1) 2 点相関関数 9)

2 点相関関数とは、画像上にランダムに落とした線分の両端が、同一相に載る確率関数である。ここでは、着目相である SAP に相当する空隙を P とし、任意の点 $(x_i = 1,2)$ に関して次のような指示関数 $I(x_i)$ を定義する。

$$I(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{x}_i \in P) \\ 0 & (\mathbf{x}_i \notin P) \end{cases}$$
(1)

 $\mathbf{x}_i \in P$ である確率を $P\{I(\mathbf{x}_i) = 1\}$ と書くことにすると,任意の線分rの両端 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ が同一相に載るということは,同時確率 $P\{I(\mathbf{x}_1) = 1, I(\mathbf{x}_2) = 1\}$ で与えられ,これより2点相関関数 $S_2^{(P)}(r)$ は式(2)で定義される。

$$S_2^{(P)}(r) = \left\langle I(\mathbf{x}_1) \cdot I(\mathbf{x}_2) \right\rangle$$

= $P\{I(\mathbf{x}_1) = 1, I(\mathbf{x}_2) = 1\}$ (2)

ここに、 $r = |\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1|$ であり、〈〉は期待値を表す。また、 2 点相関関数はr = 0にて着目相の体積率を表し、距離と ともに低下し、理論上では体積率の自乗値に収束する。 関数値が初めに収束した距離を構造距離とし、2 点の相 関性がポアッソン分布より大きな正の相関を示す。

本研究においては、2 点相関関数を求めるため、放射 線テンプレートを用いた⁹。抽出した SAP 粒子の 2 値画 像に対し、任意の位置に所定の長さを持ったテンプレー トを載せ、原点と各方向の放射線の先端が SAP 粒子上に 載るか否かを判定した。この操作を画像上の複数の箇所 で総点数が 10000 点となるまで繰り返した。放射線の長 さを 0 から最大 350 画素まで変化させ、それぞれの距離 に対応する 2 点相関関数を求めた。

(2) 最近傍距離関数

最近傍距離関数は任意の点 $x_i \in X$ から距離r離れた 位置に最近傍点 $x_j \in X(i \neq j)$ が存在する確率を求める関 数であり、式(3)により求められる。

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N} 1(s_i \le r) \cdot 1(s_i \le b) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^{N} 1(s_i \le b_i) \cdot w(s_i)}$$
(3)

ここに、 s_i は最近傍距離、 b_i は各点 x_i から画像縁までの 最短距離である。また、 $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、 前述の s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面 積の逆数である。観察視野Wの辺長をx、yとすると、 式(4)により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1}$$
(4)

(3) 接触分布関数

接触分布関数は, 点過程 X = {x_i; i = 1,...,n} が与えられ たとき, 画像内の任意の点 u ∈ W \ X から最も近い点過 程の点 $x_i \in X$ までの距離に関する確率関数であり、その 定義を式(5)に示す。

$$\hat{H}(r) = P\{N(b(u, r) > 0\}$$
(5)

ここに, b(u,r)は点uを中心とする半径rの円であり, N(B)は領域 $B \subset W$ 中にあるXの点の数である。

本研究においては、SAP 表面を点過程の点の集合とみなし、SAP 粒子をSとして画像上にランダムに点 $u \notin S$ を落とす。その点から SAP 表面までの最短距離をそれぞれについて求め、接触分布関数とした。

2.8 SAP の吸水能試験

メスシリンダー法¹⁰⁾を用いて, SAP の吸水能試験を行った。本試験方法では吸水前後の実積率は等しいことを 仮定し,式(6)によって吸水率*K*を求めた。

$$K = \frac{\rho_{water}}{\rho_{SAP}} \left(\frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{m_1}{m_2} - 1 \right)$$
(6)

ここに, ho_{SAP} :吸水前の SAP の密度(g/cm³)

 ρ_{water} :水の密度(g/cm³)

*m*₁:基準とする体積まで緩詰した SAP 質量(g)

*m*₂: 吸水前の SAP の質量(g)

V₁:基準体積(本研究では 100cm³)

V₂: 吸水後に沈降したときの SAP 体積(cm³)

3. 結果および考察

3.1 SAP の粒度分布

図-3は顕微鏡画像の SAP 粒子の円相当径に基づく粒 度分布を示したものである。SAP-A は図-1 からも明ら かなように大きな粒子を含むため、平均径 (D₅₀)が 900µm と大きく、最も範囲の広い粒度分布を持つ。それに対し て、SAP-B は粒度分布の範囲が狭く、平均径が 350µm と 小さい。また、SAP-C は平均径が 500µm 程度であるが、 表面に界面活性剤が付着した凝集体であるため、実際の 粒子径より大きく測定されている。

3.2 圧縮強度

図-4 は、密封養生を行ったモルタルの圧縮強度を示 したものである。SAP を混入したモルタル間には、大き な強度差は認められないが、無混入のモルタルと比較す





ると15%程度の強度低下がみられた。これは SAP を混入 したことにより,粗大な空隙が増加したためと考えられ る。これらの SAP 混入モルタルにおいて,吸水後の SAP の体積率は 2~3%程度であり,空隙 1%につき 5%の強度 低下という一般的な傾向¹¹⁾が,この場合にも認められる。 また,SAP に付着した界面活性剤は空気を連行する効果 を持つため¹²⁾,これによる強度低下も要因と考えられる。 ここで,SAP の混入により水和度が増し,空隙連行によ る強度低下を補うことが指摘されている¹³⁾が,そのよう な傾向は全く認められない。

3.3 SAP の種類による自己収縮低減効果の相違

図-5は、SAP 混入モルタルの長さ変化試験結果を示 したものである。凝結始発時を始点とした場合(図-5(a)), SAP の混入により,自己収縮ひずみが低減され, 初期収縮後に一旦膨張する挙動が認められた。中でも SAP-A 使用モルタルが大きく膨張したが,その後の収縮 挙動は SAP-B 使用モルタルと同様の傾向を示した。これ らに対して,SAP-C 使用モルタルは初期の膨張は小さい が,自己収縮ひずみが最も小さい結果となった。長さ変 化について,膨張終了時を始点とした結果を示す(図-5(b))¹⁴⁾。SAP-C 使用モルタルの自己収縮ひずみが小さく なり,SAP-A および SAP-B 使用モルタルとの差は拡大す る。すなわち,SAP-A および SAP-B 使用モルタルは,変 形が拘束された場合の収縮ひずみの拘束量が大きくなり, ひび割れ発生の危険性がより高いことを示している¹⁴⁾。

図-6 は, SAP 粒子表面を点過程の点とみなして求め た接触分布関数を示したものである。SAP-B と SAP-C の 接触分布関数は、ほぼ一致することから、同様の空間分 布であったことになり、また、マトリックス内のいずれ の点もSAP粒子から2mm以下の距離内にある。さらに、 SAP-Cは凝集体であったのに同様の空間分布を示すこと から、SAPは練り混ぜ過程にて適切に分散していたと考 えられる。一方、SAP-Aは大きな粒子を含むために、全 体として粒子個数は少なくなる。このため、接触分布関 数の収束距離が若干大きくなっているが、関数分布に大 きな差はなく、マトリックスのいずれの点も近傍のSAP 粒子から2.5mm以内にあることがわかる。

図-6より,いずれの SAP を用いた場合も,吸水膨張 後の SAP 体積は 3%と同程度で,このときの空間分布に も大きな差はないにもかかわらず,自己収縮ひずみの抑 制効果には差が認められた(図-5)。このことは,自己収 縮挙動の変化の原因として,SAP 自身の水分供給特性に 相違があり,これによって収縮挙動が影響を受けること を示すと考えられる¹⁵。

3.4 SAP の粒子径による自己収縮特性の相違

上述の結果より,内部貯水量および内部貯水槽として の SAP 粒子の空間分布に大きな相違が認められないに もかかわらず、自己収縮挙動には相違が認められた。 Bentz ら¹⁶は、内部養生を凍結融解作用における気泡間 隔係数による保護領域の概念によって説明している。こ の保護領域の概念が成り立つとすると、SAP をより小さ い粒子でマトリックス中に多数分散させ、マトリックス 全体への水分供給を可能とした場合、自己収縮を抑制す る効果が得られることになる。一方, Zhutovsky ら¹⁵⁾は, 粒子間隔に基づいて内部貯水粒子を配置させる保護領域 の概念は、自己収縮抑制には成り立たないとし、内部養 生材の粒子寸法により水分供給能が異なるとしている。 そこで、より微細な粒子を多数分散させた場合の効果の 評価を行うために、最も広い粒度分布を持つ SAP-A を乾 燥状態にて 300μm でふるい分けしたものを使用して,同 様の配合にて供試体を作製し、試験を行った。

図-7に SAP-A を分級して使用したときの長さ変化試 験結果を示す。小径の SAP-A を使用したモルタルの自己



収縮挙動には膨張が認められないが,大径の SAP-A を使 用した場合は,膨張が生じた。Zhutovsky ら¹⁵⁾が指摘し たように,粒子径の大きい SAP を使用したモルタルの方 が,自己収縮低減効果は大きくなっており,明らかに SAP の粒度に対する依存性が認められる。

図-8は、SAP 粒子の重心点に関する最近傍距離関数 を示したものである。図中の破線は、点が完全ランダム 分布を示す場合の最近傍距離関数を表している。300µm 以下の短い距離での関数値は、どちらの場合でも破線に 比べて小さいことから、ランダム分布よりも規則的な分 布をしているといえる。それ以降の距離での関数は、破 線よりもやや大きい値を示し、ランダム分布よりも集中 的な分布をしている。さらに、収束距離に近づくと再び ランダムに分散した分布をしていることを表している。 また、粒径が大きい SAP-A の収束距離は 2.5mm 程度で あるのに対し、粒径の小さい SAP-A では 1.6mm 程度の 距離で収束している。

図-9 は、接触分布関数を頻度分布として示したもの である。粒径の大きい SAP-A の場合、マトリックス内の 任意の点から 600µm 程度離れた距離に SAP 表面が存在 する確率が高い。それに対し、粒径が小さい SAP-A の場 合は粒子数が多くなるため、より短い 400µm 程度の距離 に SAP 表面が存在する確率が高くなっている。すなわち、 マトリックスは SAP からより近い距離にて水分供給を 受けられる環境にあったことになる。

図-10 は, SAP 粒子の 2 点相関関数を示したものである。SAP の分散性を特徴づける関数の収束距離は,小径



図-7 分級した SAP を使用したモルタルの長さ変化



のSAP-Aでは700µm程度であるのに対し,大径のSAP-A では2mm程度まで増大している。このことからも,大 径のSAP-Aを用いた場合の空間構造単位は約3倍程度に 拡大することが理解される。さらに,関数の初期値は大 径のSAP-Aを用いた方が若干大きい。このことはSAP-A の吸水能が粒子径により異なりうることを示唆する。

以上の結果より,大径粒子を用いた方は SAP 粒子間隔 が実際の距離としても小径粒子の場合よりも明らかに大 きく,マトリックスの各点は数百 µm のオーダーで SAP からより遠くに位置しうる。すなわち,大径の粒子を用 いて自己収縮を抑制するためには,数百 µm レベルの距 離までの給水が必要であるが,これは Bentz らがシミュ レーションにより示した移動距離 200µm よりもかなり 大きい。これにもかかわらず,自己収縮がより効果的に 低減されており,これまで提案されている単純な内部貯 水と給水のメカニズムから説明することは不可能である。

3.5 SAP 吸水能の相違

表-2 は、簡便に吸水能を比較することを目的とした メスシリンダー法により求めた SAP-A の吸水能を示し たものである。水道水を用いた結果であるため、アルカ リ性の細孔溶液の場合より著しく大きくなる¹⁰⁰が、明ら かに粒子径の小さい方が吸水能は低い。これらのことを 考えあわせると同じ内部貯水量として配合設計され、同 様の空間配置が再現されているにもかかわらず、自己収 縮挙動が異なるのは小径の SAP 粒子の吸水能が低いこ とに関連することが考えられる。すなわち、吸水能の低 い小径粒子が多数存在することにより内部貯水は減少し、



表-2 SAP の吸水能

	吸水能 (g/g)		
SAP-A	310		
SAP-A(300µm 未満)	270		
SAP-A(300µm 以上)	340		

またその一方で、その分の水が十分に貯水されなかった としても、周囲のマトリックスの実質的な水結合材比の 増大は高々2~3%と小さい。よって、結果として低水結 合材比のまま内部貯水量が小さくなり、自己収縮抑制効 果に差を生じたと考えられる。換言すれば、SAP 粒子の 間隔に基づく取り扱いの前提でありかつ内部貯水の一般 的な仮定である、SAP 粒子の一様な吸水能について再考 の余地があり、また同時にコンクリート用 SAP 自体のさ らなる性能改善の必要性を示しているといえる。

4. 結論

製造方法および粒度の異なる SAP を混入したモルタ ルの自己収縮特性に関して, SAP の空間分布と関連づけ て評価を行った。本研究にて得られた結果は以下のとお りである。

- (1) SAP を混入した場合,内部養生による強度の増加は 認められず,吸水膨張した SAP の体積率相当の強度 低下が生じる。
- (2) 吸水後の SAP 体積および空間分布が同程度であっ ても, SAP 自身の水分供給特性に相違があり,自己 収縮低減効果に影響を及ぼす。
- (3) 同一のSAPを分級して使用した場合、大径粒子ほど 優れた自己収縮低減効果を有している。このことは、 SAPの吸水能の相違を示唆し、小径粒子の内部貯水 槽としての機能は小さいことが考えられる。

謝辞

本研究の一部は RILEM TC225-SAP の共通試験として 実施され、実験の遂行にあたり助言を賜りました大分工 業高等専門学校,一宮一夫教授に謝意を表します。また、 本研究の実施にあたり日本学術振興会,科学研究費補助 金(基盤研究(c),課題番号 21560482,研究代表者:五十 嵐心一)の交付を受けた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 加籐俊充,五十嵐心一,川村満紀:軽量骨材による 内部養生が高強度コンクリートの内部組織形成に 及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.26, No.1, pp.675-680, 2004

究,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.423-424, 2001

- 3) 鈴木雅博,丸山一平,川畑智亮,佐藤良一:廃瓦粗 骨材を用いた超高強度コンクリートの変形と拘束 応力に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.651-656, 2007
- Jensen, O.M. and Hansen. P. F : Water-entrained cement based materials I .Principles and theoretical background, Cement and Concrete Research , Vol.31, No.4, pp.647-654, 2001
- 5) 田中誠,大津隆之,角岡正弘,高岸徹,圓藤紀代司: 基礎高分子工業化学,朝倉書店,2003
- 6) 吉川育太郎:粒度測定技術-粉体工学研究会編,日刊 工業新聞社,1976
- ASTM C1698-09 : Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar, 2009
- 第金延明,五十嵐心一,小池祐輝:空間分布特性から見た超吸水性ポリマーの内部養生効果,コンクリート工学年次論文集,Vol.32, No.1, pp.449-454, 2010
- Coker, D.A. and Torquato, S : Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics, Vol.77, No.12, pp.6087-6099, 1995
- Jensen, O.M. : Water absorption of surperabsorbent polymers in a cementitious environment, Advances in Construction Materials through Science and Engineering, RILEM PRO 79, pp.22-35, 2011
- 11) Mindess, S. and Young, J.F: Concrete, Prentice-Hall, 1981
- Laustsen, S. : Engineered Air-Entrainment of Cement, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2011
- Jensen, O.M. and Hansen, P.F : Water-entrained cement-based materials II .Experimental observations, Cement and Concrete Research, Vol.32, No.6, pp.973-978, 2002
- 14) Kovler, K. and Bentur, A. : Efficiency of internal curing with water-saturated lightweight aggregates in terms of autogenous shrinkage reduction, Volume change of Handening Concrete: Testing and Mitigation, (eds.Jensen, O.M., Lura, P. and Kovler, K.), RILEM, PRO52, pp.107-115, 2006
- 15) Zhutovsky, S., Kovler, K. and Bentur, A.: Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes, Cement and Concrete Research, Vol.41, No.9, pp.981-986, 2011
- 16) Bentz, D. P. and Snyder, K. A.: Protected paste volume in concrete, Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.11, pp.1863-1867, 1999