論文　骨材粒子が超吸水性ポリマーの凝集性に及ぼす影響

横田　光一郎[*1]・五十嵐　心一[*2]

要旨：骨材量および最大骨材寸法の異なるモルタルおよびコンクリート中のランダム場としてのセメントペーストマトリックスの空間構造を空間統計量により評価した。また，骨材量および最大骨材寸法がセメントペーストマトリックス中に分散した超吸水性ポリマーの空間配置に及ぼす影響を点過程統計量を用いて評価した。その結果，セメントペーストマトリックスの幾何学的特徴は骨材量により変化するが，最大骨材寸法による影響は小さいことが示された。また，骨材量および骨材寸法が大きいほどSAP粒子の配置が制限され，凝集した配置となりうることが示された。

キーワード：超吸水性ポリマー，点過程，間引き過程，K関数，L関数，骨材粒子

1. はじめに

高強度コンクリートの自己収縮を低減する手法の一つに内部養生法がある。この手法はコンクリートの練混ぜ時に内部養生材を混入することにより，水和反応に必要な水分を内部養生材から供給することで自己収縮を低減させる手法である。したがって，内部養生材は保水性に優れている必要があり，軽量骨材や再生骨材，廃瓦などの吸水性の高い材料を用いた研究が進められてきた[1~3]。一方，欧米では非常に高い吸水性能を有する超吸水性ポリマー（Superabsorbent Polymers：SAP）を内部養生材として使用することに大きな関心が寄せられている[4]。SAPは自重の数十倍から数百倍の吸水能を持っており，練混ぜ中の短時間に吸水膨張する高分子材料である。いずれの内部養生材を用いた場合でも，自己収縮低減などの求められる性能を発揮するためには，適切な寸法の内部養生粒子を断面内に適量配置させることが前提となる。

内部養生材は基本的に多孔質な材料であり，必要以上の混入は力学特性の低下をもたらしかねない。よって，それらの内部養生材を用いたコンクリートの配合設計においては，必要量はその水セメント比にて理論上到達し得る水和度時の水和収縮量と内部養生材の吸水能から計算される。この場合，吸水した内部養生材の内部貯水量のみが考慮され，内部養生材の空間配置は考慮されていない。しかし，代表的な内部養生材である軽量骨材とSAPを例に挙げると分かるように，両者の分布は大きく異なる。軽量骨材はコンクリート中にてランダムに配置しうるが，SAPは骨材粒子間のセメントペーストマトリックス中にのみ存在が可能である。よって，SAPの分布はより制限された状態でなされることになり，結果として内部養生効果は内部養生材の空間配置や粒子寸法により強く影響を受けることになると予想される。

著者らはモルタル中における SAP 粒子の分散性の評価を行い，SAP粒子はセメントペースト供試体中ではランダムに分散するが，骨材粒子の存在によってその分布が制限されるようになると分布に凝集性が現れることを点過程統計量によって定量的に示した[5]。また，小径のSAP粒子ほどモルタル中の骨材粒子間の限られたセメントペーストマトリックス中に凝集して分布する傾向があることも指摘している[5]。コンクリートの適切な内部養生効果を得るためには，セメントペーストマトリックス中にランダムに分散した配置となることが前提であり，それを実現するためには，SAPの粒度とそれが存在できるセメントペーストマトリックス空間領域との対応を明確にしておく必要がある。

本研究においては骨材量を変化させたモルタルおよび骨材寸法の異なるコンクリートのセメントペーストマトリックスのランダム場としての空間構造を空間統計量を用いて評価した。さらに，そのモルタルおよびコンクリート中にSAP粒子を混入し，骨材量および骨材寸法の違いが SAP 粒子の空間分布に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体作製

結合材として普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm^3，比表面積：3310cm^2/g）およびシリカフューム（密度：2.20g/cm^3）を使用した。骨材は川砂（表乾密度：2.61g/cm^3，吸水率：2.14%），最大骨材寸法=25mm（表乾密度：2.58g/cm^3，吸水率:1.86%）および最大骨材寸法=10mm（表乾密度：2.59g/cm^3，吸水率:2.12%）の川砂利を用いた。混和剤としてポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。また，用いたSAPは逆相懸濁重合法により製造された球状粒子であり，吸水前のSAPを**図－1**に示す。このコンクリート用SAPの乾燥状態での平

*1 金沢大学大学院　自然科学研究科環境デザイン学専攻　(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)

均径は 200μm 程度，絶乾密度は 1.25g/cm^3 であり，コンクリート中での吸水能は 13g/g として提供されたものである。JIS R 5201 に従って，水結合材比が 0.28 のモルタル供試体（C：S＝1：1 および 1：1.72）とコンクリート供試体を作製した。また，SAP 混入供試体として乾燥状態の SAP をセメント質量に対して 0.3%混入し，SAP の吸水能に相当する水量を練混ぜ水に加え，骨材量が SAP 混入により変化しないように配合を調整した。配合を一覧にして**表－1** に示す。練混ぜは結合材および骨材，SAP を混ぜ合わせた後，水を加えてさらに練混ぜた。また，比較用としてセメントペースト供試体も作製した。材齢 1 日にて脱型し，材齢 14 日まで水中養生を継続した。

2.2 試料作製および画像取得 [6)]

養生終了後，各供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し切断面の研磨を行った。試料の乾燥後，断面のカラー画像を市販のスキャナーを用いて取得した。このときの解像度は 1200dpi とし，1 画素は 21.2μm に相当する。取得した断面のカラー画像では，骨材色が多様であることやセメントペースト相と同色の骨材が存在するため，グレースケールに基づく単純な 2 値化では識別が困難な場合がある。そこで，試料断面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液を噴霧し，セメントペースト相を呈色させ，骨材相との識別が可能な状態にし，新たに断面画像を取得した。また，セメントペースト相中の粗大な空隙および気泡や SAP 粒子を抽出するために，同試料断面を黒色ペンで丁寧に塗り潰し，乾燥後に白色の粉末（本研究では澱粉を使用）を空隙に充填し [7)]，余分な粉末を取り除いた後に断面画像を取得した。取得した 3 枚の画像の座標位置を画像解析ソフトを用いて調節した後，断面画像をそれぞれ青成分，緑成分，赤成分の画像に変換し，これらの画像を重ね合わせることにより構成相抽出のためのカラー画像を得た。

2.3 画像解析による構成相の抽出

図－2 に 2.2 にて得たカラー画像およびその画像を解析することにより得られた骨材相，空隙および SAP 粒子の 2 値化画像を示す。このカラー画像の明度および RGB の 3 成分に対して閾値を設定することにより，各構成相の 2 値化画像を取得した。なお，SAP 粒子の 2 値化画像の取得に関しては，SAP の混入は周囲のセメントペーストマトリックスの空隙径分布に影響を及ぼさないと仮定したうえで，SAP 無混入および SAP 混入供試体の SAP および粗大な空隙の 2 値化画像から円相当径分布を算出し，統計的手法により気泡に相当する粒子を粒径 100μm ごとにランダムに除去して取得した [8)]。

2.4 空間構造の評価

2 次元平面内にてランダムに連続した領域として存在するセメントペースト相の幾何学的な特徴を評価するために以下の手法を用いた。

(1) 2 点相関関数 [9,10)]

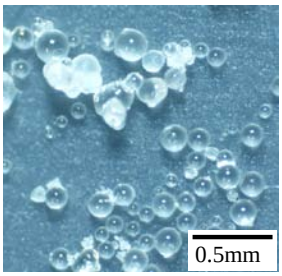
2 点相関関数 S(r)とは画像上にランダムに落とした線分の両端が同一相上に載る確率関数である。モルタルおよびコンクリート断面中のセメントペースト相を P とするとき，任意の長さの線分の両端 $\boldsymbol{x}_i$(i=1,2)に関して式(1)のような指示関数 I($\boldsymbol{x}_i$)を定義する。

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

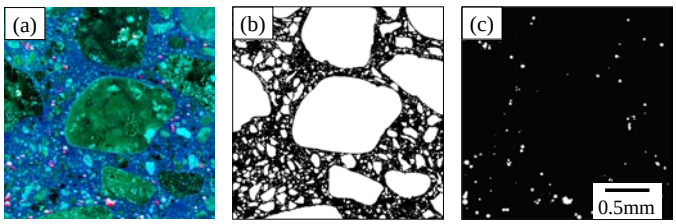
点 $\boldsymbol{x}_i$ が着目相であるセメントペースト相(P)上にある確率を P{I($\boldsymbol{x}_i$)=1}と書くことにすると，任意の距離 r 離れ

表－1　示方配合

配合名	W/B	Gmax(mm)	s/a(%)	Air(%)	単位量(kg/m^3) C	SF	W	S	G	SP	SAP
M1	0.28	5	100	－	958	96	285	958	0	9.6	0
M1-SAP	0.28	5	100	－	892	89	301	958	0	9.6	2.70
M2	0.28	5	100	－	761	76	222	1309	0	12.2	0
M2-SAP	0.28	5	100	－	719	72	238	1309	0	12.2	2.14
C1	0.28	10	43	4.5	473	47	140	716	941	6.5	0
C1-SAP	0.28	10	43	4.5	448	45	149	716	941	6.2	1.34
C2	0.28	25	43	4.5	473	47	141	716	936	5.2	0
C2-SAP	0.28	25	43	4.5	448	45	150	716	936	4.9	1.34
CP	0.28	－	－	－	1511	151	452	0	0	13.6	0
CP-SAP	0.28	－	－	－	1409	141	475	0	0	12.7	4.23



図－1　乾燥状態の SAP



図－2　断面のカラー画像および 2 値化画像の例
（(a)疑似カラー画像，(b)骨材粒子の 2 値化画像，(c)空隙の 2 値化画像）

た 2 点 $\boldsymbol{x}_1$，$\boldsymbol{x}_2$ が同一相上にあることにより，2 点相関関数は式(2)のように定義される。

$$\begin{aligned} S(r) &= \langle I(\boldsymbol{x}_1)I(\boldsymbol{x}_2)\rangle \\ &= P\{I(\boldsymbol{x}_1)=1, I(\boldsymbol{x}_2)=1\} \end{aligned} \tag{2}$$

ここに〈 〉は期待値を意味し，｜$\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2$｜= r である。また，2 点相関関数の初期値は着目相の面積率を示す。

(2) 2 点間直線経路相関関数 [9,10]

画像上に落とした線分全体が同一相上に載る確率を求めた関数である。この関数は直線的な連続経路の有無とその距離を強く反映した関数であり，その定義は式(3)のように定義される。

$$\begin{aligned} S_L(r) &= \langle I(\boldsymbol{x}_1)\cdots I(\boldsymbol{x}_j)\cdots I(\boldsymbol{x}_n)\rangle \\ &= P\{I(\boldsymbol{x}_1)=1,\cdots,I(\boldsymbol{x}_j)=1,\cdots,I(\boldsymbol{x}_n)=1\} \end{aligned} \tag{3}$$

ここに，点 $\boldsymbol{x}_j$ は始点 $\boldsymbol{x}_1$，終点 $\boldsymbol{x}_n$ を結ぶ直線上の点であり，｜$\boldsymbol{x}_n-\boldsymbol{x}_1$｜= r である。

(3) 平均自由行程

2 点相関関数の初期勾配は比表面積と関係があり，式(4)により比表面積 S_v を求めた。

$$\frac{d}{dr}S(r)\Big|_{r=0} = -\frac{1}{4}S_v \tag{4}$$

さらに骨材の体積率 V_v および比表面積 S_v を用いて，骨材粒子間距離である平均自由行程 d を式(5)より求めた [11]。

$$d = \frac{4(1-V_v)}{S_v} \tag{5}$$

2.5 SAP 粒子の分散性の評価

(1) K 関数

SAP 粒子の分散性を評価するために，点過程統計量の一つである K 関数を用いた。K 関数は観察領域中の点 $\boldsymbol{x}_i$ に関して，距離を変数としてその分布パターンを定量化するものである。また，K 関数は任意の点から半径 r 以内に存在する他の点個数の期待値を反映する。点密度 λ で正規化されているため，点の個数にかかわらず，凝集性の有無を判定することができる。SAP 粒子の 2 値化画像に対して，個々の SAP 粒子をその重心点 $\boldsymbol{x}_i$ で代表させ，これを点過程 X={$\boldsymbol{x}_i$｜i=1,2,…,n}とみなし，この点過程 X に対して式(6)により K 関数を求めた。

$$K(r) = \frac{1}{\lambda^2}\sum_{i\neq j}\frac{\mathbf{1}(|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_j|\le r)}{s(|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_j|)} \tag{6}$$

ここに $\mathbf{1}$(・)は(・)が真であるときに 1，偽のときは 0 を返す関数である。また，s($\boldsymbol{x}$)はエッジ補正の項であり式(7)で与えられる。

$$s(\boldsymbol{x}) = ab-(2a+2b-x)x/\pi \tag{7}$$

ここに，a,b は観察領域の辺長を表す。また，算出された K 関数を式(8)により L 関数に変換した。

$$L(r) = \sqrt{K(r)/\pi} \tag{8}$$

(2) 間引き過程としての K 関数

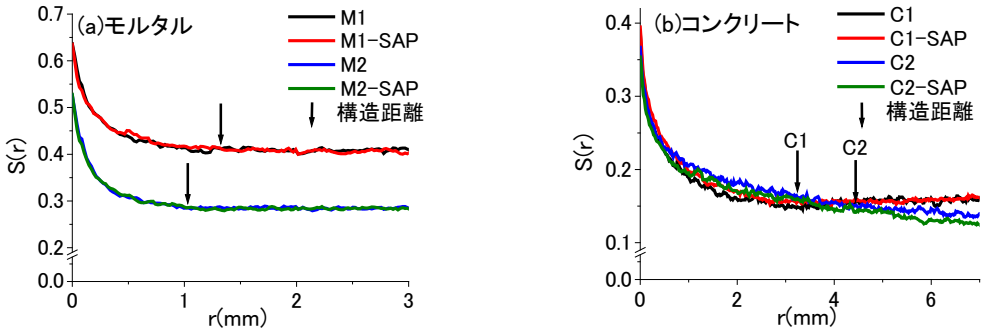
骨材を含まないセメントペースト供試体中に SAP を分散させたときの分布を点過程 X_b とし，その K 関数 K_b を(1)の手順に従って求めた。また，コンクリート供試体中のセメントペースト相を P とし，その断面内での SAP の分布を点過程 X_P とする。コンクリート中のセメントペースト相の分布はランダムであると考えると，セメントペースト供試体中の SAP の分布のうち骨材位置にある点が間引かれ，セメントペースト相上にある点が残った結果がコンクリート中での SAP の分布であると考えることができれば，$X_P = X_b \cap P$ と表される。この場合の SAP の K 関数 K_P は，コンクリート中のセメントペースト領域全体の幾何学的特徴を表す 2 点相関関数 S(r)およびセメントペースト供試体中の SAP の K 関数 K_b を用い，式(9)により与えられる [12]。

$$K_P(r) = \frac{1}{p^2}\int_0^r S(x)dK_b(x) \tag{9}$$

ここに p はコンクリートおよびモルタル供試体中のセメントペースト相の面積率を表す。

(3) L 関数の有意性検定

コンクリートおよびモルタル中に観察された SAP 粒子から点密度を求めた。解析対象と同じ領域内に点密度から決定される点を二項点過程としてランダムに発生させ，このときの L 関数を求めた。以上の二項点過程シミュレーションと L 関数の評価を 200 回繰り返し，L 関数の 95%信頼区間を決定した。



図－3　セメントペーストマトリックスの 2 点相関関数

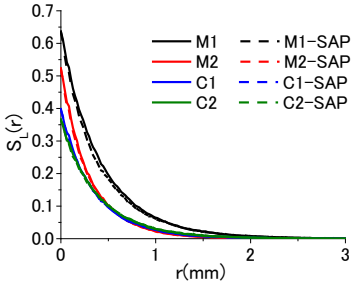
3. 結果および考察

3.1 セメントペースト領域の幾何学的特徴

図－3 はモルタルおよびコンクリート中のセメントペーストマトリックスの 2 点相関関数を示したものである。いずれも SAP 混入の有無による変化は認められず，SAP を混入してもセメントペーストマトリックスの空間構造には影響を及ぼさないことを示している。2 点相関関数の正の相関性を有する範囲である構造距離はモルタルの場合では 1mm 程度までの範囲であるのに対し，コンクリートでは 3～4mm 程度と，配合内での特徴的な寸法である最大骨材寸法ほどの差異は認められない。

図－4 はモルタルおよびコンクリート中のセメントペーストマトリックスの 2 点間直線経路相関関数を示したものである。骨材量の少ない M1 では，距離が 2mm を超えるとセメントペースト領域が連続して存在する確率はほとんどなく，骨材量が多い M2 では 1.5mm 程度とさらに短くなっている。一方，コンクリートの関数分布は骨材量の多いモルタル配合 M2 と同様であるが，セメントペースト領域の直線的な連続性には最大骨材寸法による相違は認められない。したがって，コンクリート中のセメントペーストマトリックスの連続性には，骨材寸法よりも骨材量が大きく影響を及ぼすといえる。また，2 点相関関数と同様に，SAP 混入によるセメントペーストマトリックスの空間構造への影響は認められない。

表－2 は骨材粒子の 2 点相関関数から得た比表面積および平均自由行程と骨材粒子を球と仮定して粒度分布および配合から算出した理論値を一覧にして示したものである。骨材体積率の画像解析値は理論値よりも若干小さい値が得られている。これは，微小な骨材粒子が断面に現れにくいことや最小画素寸法よりも小さい骨材断面は識別できないことが影響したと考えられる。これにより骨材の比表面積の解析値も理論値を下回り，細骨材量の多い M2 のモルタルにおいて低下した割合が大きくなっている。また，骨材粒子間の距離を反映する平均自由行程も理論値よりも 100μm 程度大きな値として現れているが，配合間の大小関係は理論値と画像解析値は一致している。骨材寸法の異なるコンクリート間も大きな差異はないことから，骨材量が同じであれば最大骨材寸法がセメントペーストマトリックス領域の幾何学的な特徴に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方，SAP を混入しても平均自由行程に大きな変化は認められない。よって，SAP を混入したとしてもセメントペースト領域の形成への影響はほとんどなく，セメントペーストのランダム場は骨材によって決定づけられていることが確認できる。



図－4　セメントペースト相の 2 点間直線経路相関関数

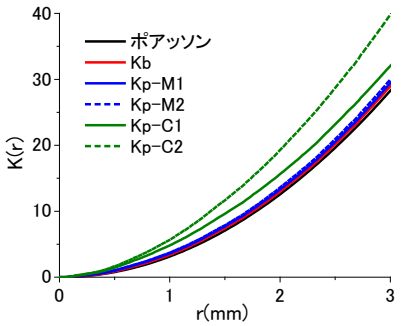
3.2 SAP 粒子の空間配置

図－5 はセメントペースト供試体中の SAP 粒子の K 関数(K_b)とその間引き過程として求めた K 関数(K_p)を示し

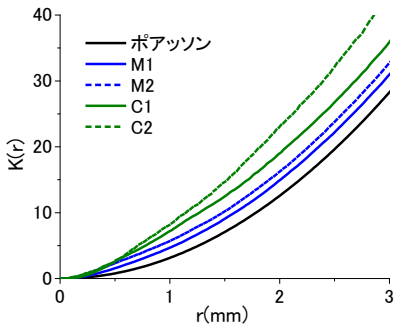
表－2　骨材の比表面積と平均自由行程

	M1	M1-SAP	M2	M2-SAP	C1	C1-SAP	C2	C2-SAP
骨材体積率 Vv	0.363	0.364	0.479	0.486	0.611	0.605	0.633	0.637
	(0.367)		(0.502)		(0.638)		(0.638)	
比表面積 Sv($\mu m^2/\mu m^3$)	0.0040	0.0041	0.0046	0.047	0.0028	0.0029	0.0026	0.0026
	(0.0045)		(0.0062)		(0.0035)		(0.0033)	
平均自由行程 d(μm)	659	624	459	443	522	554	556	555
	(556)		(321)		(414)		(442)	

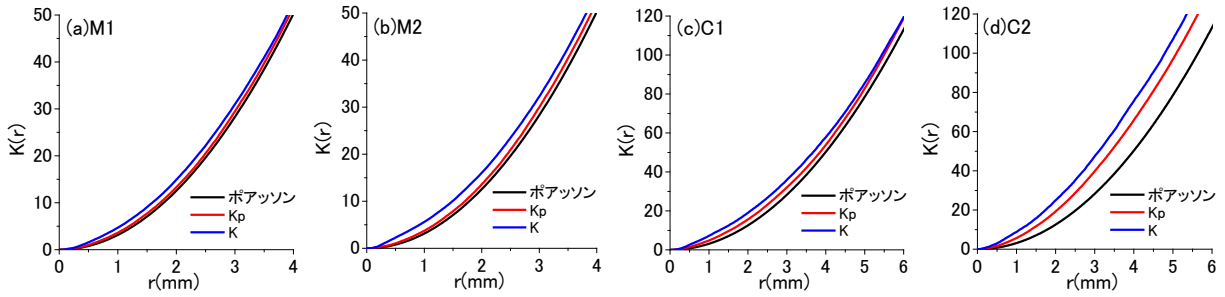
()は球仮定により算出した理論値



図－5　セメントペースト供試体中の SAP の K 関数とその間引き過程としての SAP の K 関数



図－6　実際のモルタルおよびコンクリート供試体中の SAP の K 関数



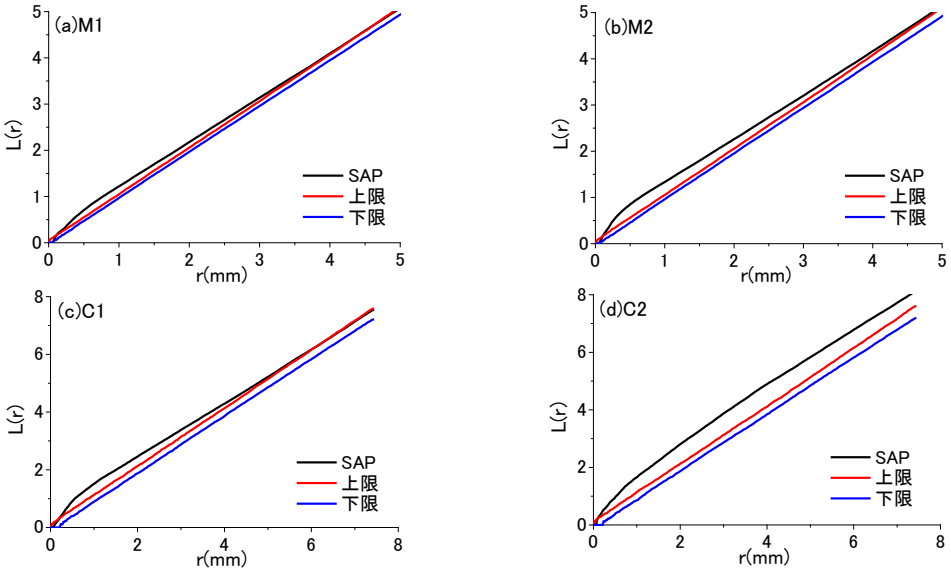
図－7　実際の SAP の K 関数と間引き過程の SAP の K 関数(Kp)の比較

たものである。セメントペースト供試体中の SAP 粒子の K 関数(K_b)はポアッソン分布の K 関数とほぼ一致していることから，ランダムな配置であるといえる。これから骨材位置の SAP を間引いた過程として評価すると，骨材量が多くなるほど関数値が大きくなっており，骨材粒子の存在による制限が強くなることを示している。また，骨材量が同じ場合でも最大骨材寸法が大きくなると，K 関数は凝集側へと大きく移動しており SAP 粒子の分布はより強く制限される。SAP 粒子が骨材による単純な間引きを受けるだけならば，実際のモルタルおよびコンクリート供試体中における SAP の K 関数はこれらの K 関数と一致すると考えられる。

図－6 は実際のモルタルおよびコンクリート供試体に分散した SAP 粒子の K 関数を示したものである。骨材量の少ないモルタル M1 が最も関数値が小さく，骨材量が多く，かつ最大骨材寸法が大きい配合ほど関数値が大きくなる傾向が認められる。これは**図－5** に示した間引き過程としての SAP 粒子の K 関数と同様の傾向にある。

図－7 は間引き過程としての SAP の K 関数(K_p)と実際のモルタルおよびコンクリート供試体中での K 関数を配合ごとに比較して示したものである。いずれの配合も，間引き過程として算出した K 関数(K_p)よりも実際のモルタルおよびコンクリート供試体中の SAP の K 関数の方が 0.2mm 程度の距離から大きくなっており，実際の SAP 粒子がより強い凝集性を持っていることになる。骨材量の異なるモルタル間で比較すると，骨材量の少ない M1 の方が凝集の程度は小さく，3.5mm を超えると間引き過程の K 関数とほぼ一致する。しかし，骨材量の多い M2 では 4mm を超えても一致せず，より長い距離にわたって凝集性を有した配置となっている。一方，最大骨材寸法の異なるコンクリート間では，実際の K 関数と間引き過程の K 関数(K_p)との差異は，骨材寸法が大きい C2 の方が大きくなっており，骨材寸法が大きいほど単純な間引き以上に SAP 粒子の分布が強く制限されている。

図－8 は実際のモルタルおよびコンクリート供試体中の SAP 粒子の空間配置を L 関数によって評価し，また，シミュレーションにより求めた二項点過程のランダム配置の 95%信頼区間を配合ごとに示したものである。いずれの配合においても L 関数は 95%信頼区間の上限を超えており，SAP 粒子分布を定常ポアッソン過程とする仮説は棄却されることになる。骨材量の少ない M1 では L 関数は 3mm 程度で信頼区間の上限値と一致するのに対し，



図－8　SAP 粒子の L 関数およびシミュレーションによる有意性検定

M2 では 4mm 程度と凝集範囲が若干長くなる。骨材量が多くなると凝集範囲とその程度は若干大きくなるがその差は小さいようである。一方，最大骨材寸法の異なるコンクリート間で比較すると, 骨材寸法の小さい C1 では L 関数は 5mm を超えると信頼区間内にある。しかし，骨材寸法の大きい C2 では 7mm を超えても L 関数は信頼区間内に入ることはなく，SAP 粒子が非常に強い凝集性を有した配置であると判断される。最大骨材寸法によるセメントペースト領域の空間構造にはほとんど差がないにもかかわらず，SAP 粒子の凝集性には大きな差が生じる結果となっている。この要因として，数 mm 程度の短い距離範囲では粒子数の多い細骨材の影響が大きく，粗大骨材寸法が異なってもセメントペースト領域の空間構造には大きな差が生じなかったことが挙げられる。一方，SAP 粒子は観察視野の大きな部分を占める粗大な骨材粒子の存在によって分布が制限され，さらにはセメントペーストマトリックスの構造距離内に偏在しやすいため [5], 結果として構造距離の大きなコンクリートにて局所的に凝集する傾向が強く現れたものと考えられる。

4. 結論

本研究では骨材量および最大骨材寸法の異なるモルタルおよびコンクリートのセメントペースト領域の空間構造の相違を空間統計量を用いて定量的に評価した。また，そのセメントペースト領域中に分散している SAP に着目し, 骨材量および最大骨材寸法が SAP 粒子の凝集性空間配置に及ぼす影響を比較した。本研究において得られた結果は以下のとおりである。

(1) モルタルにおけるセメントペーストマトリックスが正の相関を有する構造距離は，骨材量が多くなると短くなる。また，構造距離はコンクリートの最大骨材寸法によって異なるが，モルタルよりも数 mm 程度大きい。

(2) セメントペーストマトリックスが直線的に連続性して存在する確率は骨材量により変化するが，最大骨材寸法が異なっても変化はしない。

(3) SAP 粒子の混入は, セメントペーストマトリックスの連続性や骨材粒子間の平均距離には大きな影響を及ぼさない。

(4) セメントペースト供試体中の SAP はほぼランダムに分散した配置となるのに対し，間引き過程として評価するとモルタルやコンクリート中では凝集した配置となる。また SAP は骨材量や最大骨材寸法が大きいほど，より凝集性を有した配置をとる。

(5) モルタルやコンクリート供試体中の SAP 粒子の分布は，骨材による単純な間引き以上に制限される。

(6) モルタルおよびコンクリート中の SAP の凝集の程度を定常ポアッソン過程とする帰無仮説は棄却されることがシミュレーションにより示された。

謝辞

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）の交付を受けた。ここに記し，謝意を表す。

参考文献

1) Cusson, D. and Hoogeveen, T.: Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking, Cement and Concrete Research, Vol.38, No.6, pp.757-765, 2008

2) 柘植佐代子，山田和夫：再生骨材を用いた低水セメント比再生コンクリートの自己収縮特性，日本建築学会東海支部研究報告集，Vol.40，pp.61-64，2002

3) 温品達也，清木祥平，中川信矢，佐藤良一：廃瓦の内部養生によるフライアッシュ混入コンクリートの性能向上に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.241-246，2009

4) Mechtcherine, V. and Reinhardt, H. W.: Application of Superabsorbent Polymers(SAP) in Concrete Construction, RILEM State-of-the-Art Report, 2011

5) 横田光一郎，五十嵐心一：モルタル中の骨材が SAP 粒子の空間分布に及ぼす影響，セメント技術大会講演要旨，Vol.67，pp.350-351，2013

6) 横田光一郎，五十嵐心一：RGB 情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1759-1764，2013

7) Peterson, K. W. et al.: Hardened Concrete Air Void Analysis with a Flatbed Scanner, Transportation Research Record 1775, No.01-3389, pp.36-43, 2001

8) 荒金延明，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

9) Torquado, S. and Stell, G.: Microstructure of two-phase random media .I. the n-point probability function, Journal of Chemical Physics, Vol.77, No.4, pp.2071-2077, 1982

10) Cocker, D. A. and Torquado, S.: Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics, Vol.77, No.12, pp.6087-6099 ,1995

11) Russ, J. C. and Dehoft, R. T.: Practical stereology, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2000

12) Stoyan, D. et al: Stochastic Geometry and Its Applications, Wiley, 1995