

# 論文 コンクリートの空隙特性と高周波静電容量の相関に関する検討

福山 智子<sup>\*1</sup>・野田 貴之<sup>\*2</sup>・長谷川 拓哉<sup>\*3</sup>・千歩 修<sup>\*4</sup>

**要旨:** RC 構造物の鉄筋健全性診断に広く用いられている電気化学的測定手法は、鉄筋の腐食状態だけでなくコンクリートの電気化学特性の影響をも受けてしまい、腐食実態と診断結果が一致しない場合が散見される。本研究では、診断結果の不一致の原因となるコンクリートの電気化学特性と空隙構造の相関に着目し、コンクリートの空隙特性に関する指標と静電容量の相関を比較することで空隙特性が静電容量におよぼす影響について検討し、0.07 μm 以下のインクボトル空隙が静電容量に影響することを確認した。

**キーワード:** 吸水試験, 水銀圧入法, 含水率, 静電容量, 空隙構造, インクボトル, 連続空隙

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価では、鉄筋の健全性を診断するため電気化学的測定手法が広く用いられている。しかし、この手法はコンクリート表面から電気信号を印加しその応答により内部の鉄筋の状態を診断する非破壊検査であるため、鉄筋の腐食状態だけでなくコンクリートの電気化学特性の影響をも受けてしまい、腐食実態と診断結果が一致しない場合が間々見受けられる。

これまでにも、コンクリートの電気化学的特性については検討が行われており、特にコンクリートの比抵抗(電気伝導性)とコンクリートの緻密性(空隙率など)とは相関が高いことなどが報告されている(例えば1)~4)。また、セメント硬化体や骨材界面の空隙の構造を微小なキャパシタ(容量成分を指す)とみなしモデル化する検討も行われている(例えば5)。

筆者らは、診断結果の不一致の理由を定量的に解明するために、既往の研究を踏まえ、コンクリートの空隙特性と電気化学特性の相関に着目し検討を進めている。これまでの検討の結果、交流インピーダンス法適用時のコンクリートの周波数特性が、コンクリートの 0.1 μm 以下の空隙特性によりある程度説明可能であることを見出し、コンクリート中の微小なキャパシタの重ね合わせモデル構築の可能性を示した<sup>6)</sup>。

ここで、一對の平行平板導体に蓄えることができる電荷は、平板の面積と平板間距離、平板間の誘電体の誘電率で決まるといえる。コンクリートを微小なキャパシタの重ね合わせ回路とみなした場合、コンクリートの静電容量(容量の大きさを指す)の大きさは空隙構造や遷移帯の形状(キャパシタにおける平板の面積, 平板間距離)と、セメント硬化体や細孔溶液の誘電率によって決まると考えられる。

本研究では、コンクリートの空隙特性に関する指標を

水銀圧入法により定量し、この指標と静電容量の相関を比較することで空隙特性が静電容量におよぼす影響の大きさについて検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

表-1 は、本研究で対象としたコンクリート試験体の調査および基礎性状を示したものである。この調査を基にφ100×200mm のシリンダ型試験体を作製した。打込み1日後に脱型し、75日間の水中養生を行った。

図-1 は、上記のシリンダ型試験体の分析の進め方を示したものである。各調査につき1本のシリンダを約20mmの厚さに湿式でカットし、このうち中央部の2枚(図-1中①②)を実験に供することとした。

表-1 調査および基礎性状

記号	W/C [%]	s/a [%]	単位水量 [kg/m <sup>3</sup> ]	絶対容積 [L/m <sup>3</sup> ]			単位質量 [kg/m <sup>3</sup> ]			AE 剤 [C × %]	空気量 [%]	スランプ [cm]	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
				C	S	G	C	S	G				
40-2	40	45.3	180	142	298	360	450	801	961	0	1.3	15.5	46.3
40-4		43.5	180	142	278	360	450	747	961	0.006	5.0	19.5	32.1
50-2	50	47.5	180	114	326	360	360	877	961	0	2.1	19.0	32.3
50-3		46.8	180	114	316	360	360	850	961	0.003	3.4	21.5	28.1
50-4		46.0	180	114	306	360	360	823	961	0.006	4.4	22.0	27.4
50-5		45.1	180	114	296	360	360	796	961	0.005	5.2	22.5	21.5
60-2		60	48.9	180	95	345	360	300	928	961	0	2.0	19.5
60-4	47.5		180	95	325	360	300	874	961	0.005	4.1	22.5	19.6

C: 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>), S: 錦岡産陸砂(表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.25%, 粗粒率 2.30), G: 常盤産砕石(表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.43%), AE 剤: アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

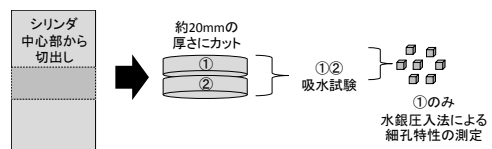


図-1 分析の進め方

\*1 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門  
 \*2 北海道大学大学院工学院建築都市空間デザイン専攻  
 \*3 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門  
 \*4 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門

助教 博士(工学) (正会員)  
 大学院生 (正会員)  
 准教授 博士(工学) (正会員)  
 教授 工学博士 (正会員)

## 2.2 吸水試験・静電容量測定概要

本試験は、JIS A 1404「建築用セメント防水剤の試験方法」の吸水試験の項目を参考にして行った。

吸水面のみを開放してアルミテープによりシーリングを施し、50℃の乾燥炉で恒量となるまで乾燥した。その後恒量になった試験体を20℃、60%RHの恒温室内にてデシケーター内に静置・冷却し、これを初期状態とした。

材齢89日後に20℃恒温室内にて吸水を開始し、吸水開始時から所定の時間ごとに各試験体の質量と静電容量を測定した。静電容量の測定には市販の高周波(20MHz)容量式コンクリート・モルタル水分計を用い、吸水面に電極を接触させて表面から約10mmの深さの静電容量を測定対象とする機器設定とした。電極の大きさは5×50mm、電極間隔は約22mmであった。測定値は、静電容量が大きくなるほど大きい値をとる機器固有のカウント値である。

## 2.3 水銀圧入試験概要

JIS R 1655「ファインセラミックスの水銀圧入法による成形体気孔径分布試験方法」を参考にして水銀圧入試験を行った。対象とする試験体は、図-1で示す①の試験体である。吸水試験完了後にこれらを5mm角に破碎した上でモルタル分を取り出し、材齢150日時にアセトンに24時間浸漬して水和を停止した。その後、20℃環境下にて6時間真空で保存し試験に供した。

水銀圧入過程は2シリーズとし、シリーズ1では、一般的な空隙径分布を得るための水銀加圧曲線に加えて、減圧曲線を測定した。これにより、減圧時の水銀の残留量を測定し空隙の連続性の概要を評価することが可能<sup>7)</sup>となる。414MPaまで順次加圧後、加圧時と逆順の圧力で減圧する過程とした。シリーズ2では、表-2に示すステップで加圧と減圧を繰り返すサイクルとした。この規則的な圧入過程により、コンクリートの微細構造に含まれる連続キャピラリー空隙網とインクボトル構造の情報をそれぞれ得ることを目的とする<sup>8)-10)</sup>。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 吸水特性と静電容量の関係

図-2は、試験体40-2①と40-4①の吸水特性を例として示したものである。すべての試験体について、 $\sqrt{t} = 136$ 時点での質量含水率を線形補間により求め、これを各試験体の吸水特性に関する指標 $P_{136}$ と定義した。別途、体積含水率を求め、質量含水率と体積含水率で傾向が同じであることを確認している。

図-3は、図-2と同様に試験体40-2①と40-4①の質量含水率と静電容量カウント値の関係を例として示したものである。質量含水率の増加に伴い、静電容量も増加している様子が確認できる。各試験体について同様の図

を作成し、これらの関係を直線で近似してその直線の傾きをGと定義した。コンクリートの空隙を擬似キャパシタとみなした場合、平板面積(空隙比表面積との相関が期待される)や平板間距離(空隙径との相関が期待される)は空隙の幾何学的特性によって決定されるが、Gは空隙内に水分が侵入している状態における静電容量の増分を表していることから、含水量の増加に伴う誘電率の変化の他、水の移動経路の差異に伴う異なる容量の微小キャパシタの生成、これらの直列・並列の連結に関する情報を包含した指標であると考えられる。また、 $\sqrt{t} = 0$ 時点でのカウント値を「初期静電容量」と定義した。これは、吸水前の静電容量であるため、セメント硬化体自体の静電容量を反映していると考えられる。ただし、試験体の乾燥は50℃で行われているため、微細な空隙内に吸着した水分の影響は除去できていない可能性がある。

表-2 シリーズ2水銀圧入サイクル

圧入ステップ	圧入圧力 [MPa] (空隙径 [ $\mu\text{m}$ ])
1	0 (-) → 4 (0.3)
2	0.3 (1.8) → 13 (0.1)
3	0.3 (1.8) → 20 (0.07)
4	0.3 (1.8) → 60 (0.03)
5	0.3 (1.8) → 73 (0.02)
6	0.3 (1.8) → 138 (0.01)
7	0.3 (1.8) → 207 (0.007)
8	0.3 (1.8) → 276 (0.005)
9	0.3 (1.8) → 414 (0.003)
10	0.3 (1.8) → 414 (0.003)

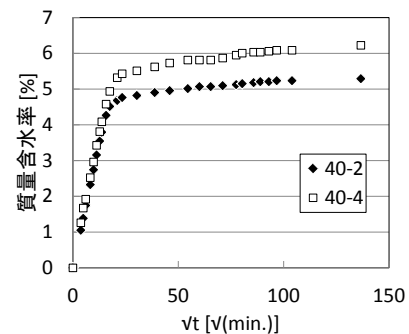


図-2 時間と質量含水率の関係の例

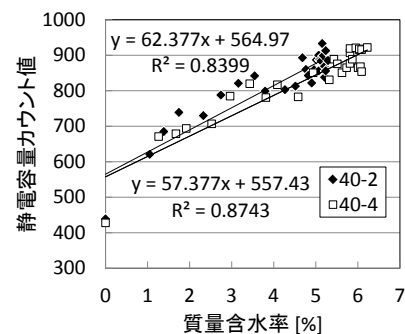


図-3 質量含水率と静電容量の関係の例

### 3.2 試験体の空隙特性

図-4は、シリーズ1の圧入過程により求めた積算細孔径分布の例(試験体40-2①, 40-4①)を示したものである。加圧過程の始点と減圧過程の終点で示している細孔容積にかい離があり、インクボトル型の空隙や不連続空隙の存在が示唆された。また、同様に作図した他の試験体の分布から、W/C、空気量の差異による異なる加減圧過程が得られた。

図-5は、シリーズ2のサイクルにより段階的に圧力を上昇させた場合の積算細孔径分布の例(試験体40-4①)を、グラデーション(ステップ毎の推移)で示したものである。各ステップ間のいずれの最大圧力に応じた繰返しにおいても、減圧時と再加圧時の過程が一致しないヒステリシス挙動が観測され、水銀がインクボトル空隙にトラップされている様子が見て取れた<sup>8)</sup>。各ステップの0.3MPa時の積算細孔容積の差分をとることで空隙内部にトラップされた水銀量を求め、これをインクボトル型空隙や不連続空隙(以下、インクボトル)と定義した。

図-6は、図-5に示す各繰返し過程の圧入原点を0.3MPaに統一したものである。既往の研究<sup>8)</sup>と同様に、各加圧過程の終盤においてそれぞれのステップ固有の挙動を示しているが、それ以前は共通の圧入過程をたどっていることが確認できた。本研究では、この曲線のうち圧入過程初期の重複部分を連続空隙とみなし、この区間で圧入された水銀量を求めて連続空隙容積に関する指標とした。

### 3.3 吸水試験・水銀圧入試験により得られた指標と空気量の関係

図-7は、(i)吸水試験により求めた指標 $P_{136}$ と空気量、(ii)積算細孔容積と空気量、(iii)積算細孔比表面積と空気量の関係を示したものである。 $P_{136}$ と空気量の間に明確な相関は見られない。これは、空気量の測定値が、水分移動可能な連続空隙だけでなく独立気泡も含んでおり、また $\sqrt{t} = 136$ 時点ではすべての空隙が飽水していない

ためであると考えられる。積算細孔容積と空気量の関係についても同様に独立気泡の存在が示唆されるが、空隙への強制的な水銀の圧入のため、ある程度の相関が得られたものと考えられる。積算比表面積については、空隙の形状が単純円筒でないためこのような結果となったものと考えられる。

### 3.4 吸水試験・水銀圧入試験により得られた指標と初期静電容量の関係

図-8は、初期静電容量と各種指標との関係を示したものである。初期静電容量は、吸水前の静電容量であるため、セメント硬化体自体の静電容量や形状特性を反映しているものと予想される。しかし、図(iii)からわかるように、積算比表面積が増加するほど静電容量が減少しており、仮に空隙の壁面をキャパシタの平板と考えた場合、静電容量の原理から逆転した結果となっている。これについては、現時点で2つの要因を想定している。1つは、静電容量の測定をコンクリート試験体で行い、空隙特性の測定はモルタル試験体で行ったため、骨材や界面の影響を考慮できていない点である。もう1点は、空気とコンクリートの誘電率の大きさの違いの問題であり、比表面積の増加による平板面積の増大よりも、空隙量増加に伴う誘電率の低下の作用が大きいためだと推察されるが、これらに関してはより詳細な検討が必要である。

図-9は、Gと各種指標との関係を示したものである。Gは空隙内に水分が侵入している状態における静電容量の増分を表している。静電容量の増加は、含水量の変化に伴う誘電率の変化の他、水の移動経路の差異に伴って異なる容量のキャパシタが生成・連結されている状態を反映した指標であると考えられる。しかし、図からわかるように、 $P_{136}$ 、積算細孔容積、積算細孔比表面積のいずれの指標との関係においても、明確な相関は認められない。これは、これら3つの指標が空隙に関する情報を積算して表しており、空隙の形状に関する情報が平均化され欠落したためであると考えられる。

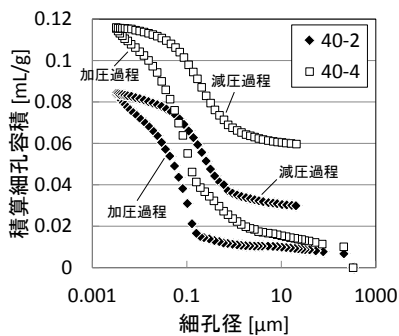


図-4 シリーズ1:  
積算細孔径分布例

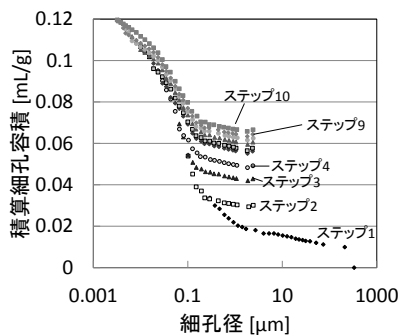


図-5 シリーズ2:  
各ステップにおける細孔容積分布例  
(試験体40-4①)

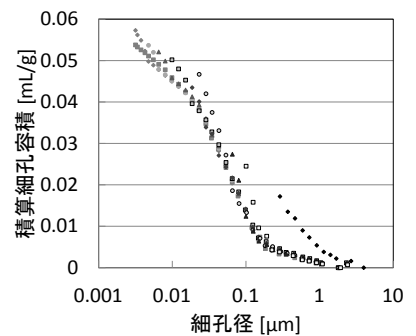


図-6 シリーズ2:  
圧入原点0.3 [MPa]の細孔容積分布例  
(試験体40-4①)

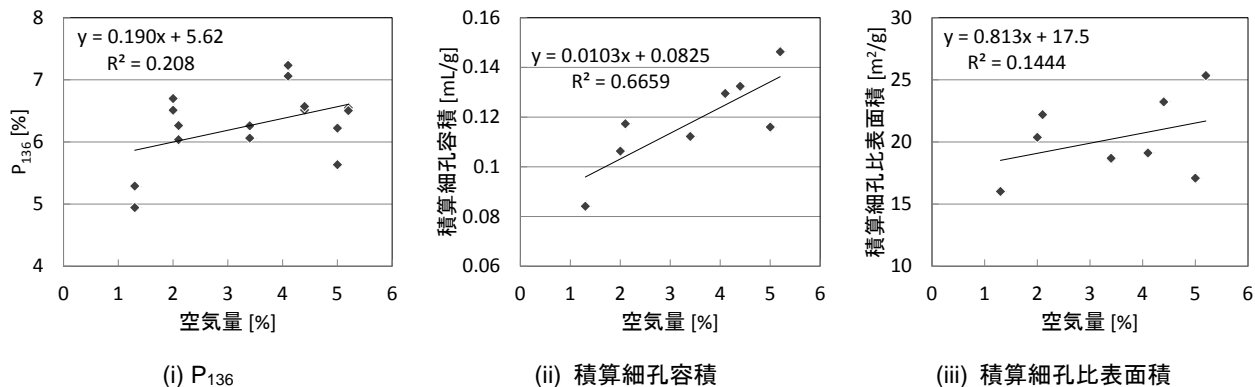


図-7 吸水試験・水銀圧入試験により得られた指標と空気量の関係

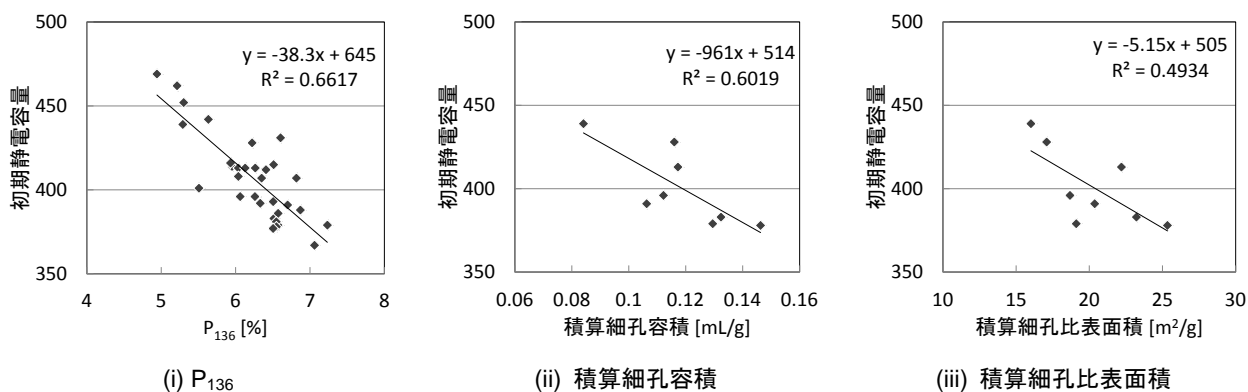


図-8 吸水試験・水銀圧入試験により得られた指標と初期静電容量の関係

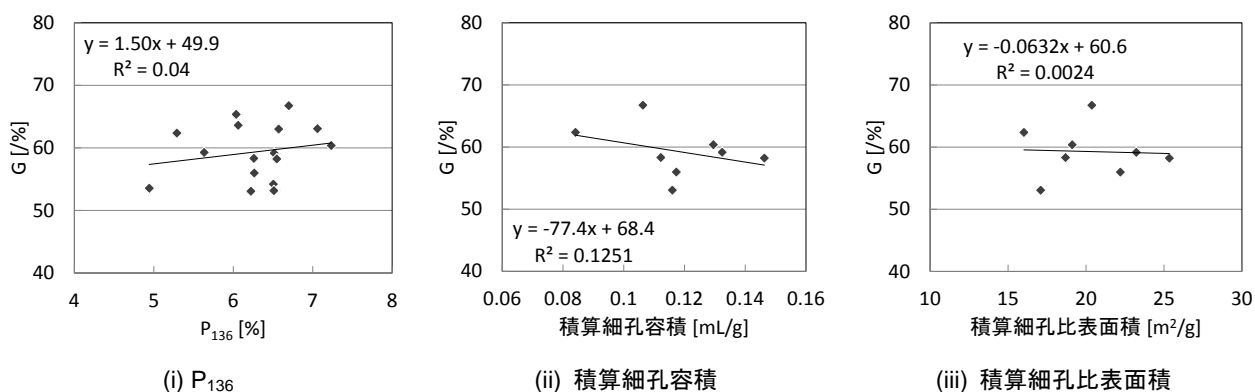


図-9 吸水試験・水銀圧入試験により得られた指標とGの関係

### 3.5 空隙特性と静電容量に関する指標間の相関に関する検討

筆者らの既往の研究により、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の空隙の特性がコンクリートの周波数特性（印加した電気信号に対する応答信号のずれ）に影響している可能性が指摘されている<sup>6)</sup>。コンクリートの周波数特性は、内在するキャパシタの容量によって決まる。ゆえに、キャパシタに関する指標（初期静電容量、G）と空隙の特性に関する指標（インクボトル容積、連続空隙容積）の相関を確認することで、本研究の目的である空隙特性が静電容量におよぼす影響の定量化を行う。

#### 3.5.1 初期静電容量との関係

図-10は、シリーズ2の各圧入過程により求めたイン

クボトル容積（図中◆I）、連続空隙容積（図中□C）と初期静電容量の関係の一部を示したものである。ステップ1→2では、原理上Cの算定はできないため記載していない。これらの結果より、インクボトル容積と初期静電容量の間に明確な相関は確認されなかった。連続空隙容積との間には一部で相関（決定係数0.6程度）が確認されたが、原因については明らかではない。本報の実験では、吸水試験に供した試験体がコンクリートであったのに対し、水銀圧入試験に用いられた試験体がコンクリートを破碎して取り出したモルタル部分であったため、骨材自体や界面の空隙構造について考慮することができない。また、初期静電容量測定時には、試験体に含まれているセメント硬化体や骨材が乾燥した状態であったため試験

体の電気抵抗が高く、仮に電極が骨材に接触していた場合の電圧印加時の経路などを想定することも困難であり、測定結果が微細構造を反映しているのか不明である。本実験の結果を適切に考察するためには、ペーストのみ、

モルタルのみの静電容量の情報が必要となる。以上より、本実験の範囲では図-10の結果の解釈が困難であるため、次項で示す水分存在下の試験体の挙動に関する考察を主に行うこととする。

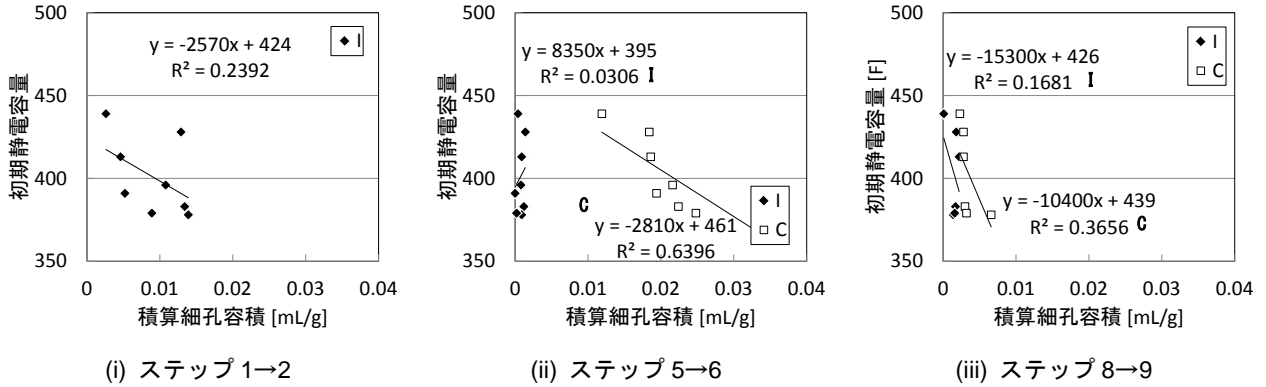


図-10 各圧入ステップにおけるインクボトル容積、連続空隙容積と初期静電容量の関係の例

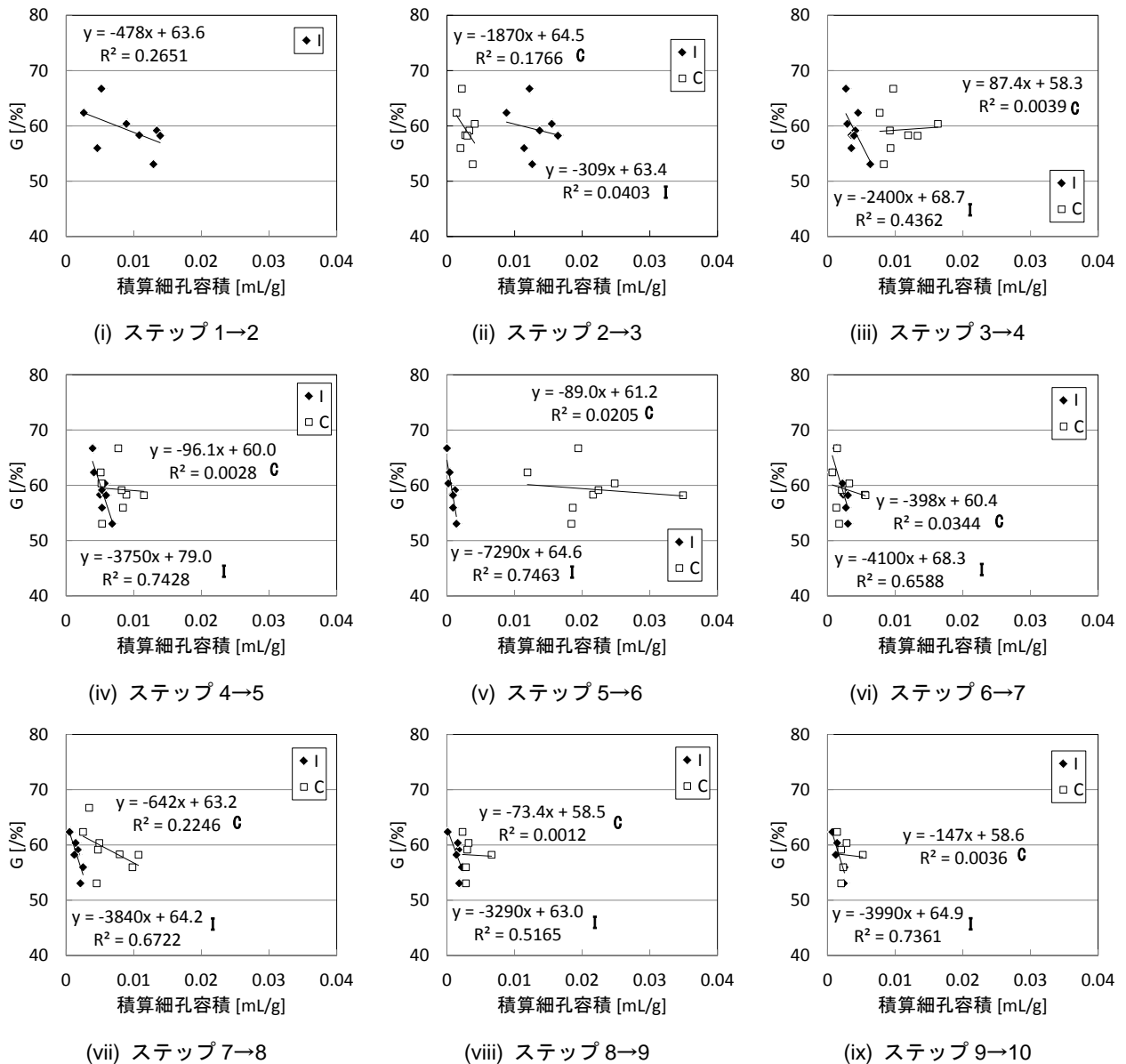


図-11 各圧入ステップにおけるインクボトル容積、連続空隙容積とGの関係

### 3.5.2 質量含水率の増分に対する静電容量の増分Gとの関係

図-11は、図-10と同様に、シリーズ2の各圧入過程により求めたインクボトル容積(図中◆I)、連続空隙容積(図中□C)とGの関係を示したものである。ステップ4以降のインクボトル容積とGの間にはある程度の負の相関(決定係数0.6以上)が確認された。この相関は、ステップ1(0.3μm)→2(0.1μm)、ステップ2(0.1μm)→3(0.07μm)では決定係数0.3未満と小さい。ステップ3以降では傾きも決定係数も増大している。このことから、0.07μm以下の空隙(インクボトル)が静電容量になんらかの影響を及ぼしていることが確認できる。この結果は、筆者らの既往の研究<sup>9)</sup>における0.1μm以下の空隙特性が静電容量に影響するという仮説を補強するものと考えられる。

ここで、インクボトル空隙では相関が得られ、連続空隙ではそれほど相関が得られなかった理由として以下の要因を想定しており、今後検証を行う予定である。

- 1) 小径の空隙壁面への水分の吸着: 微細な空隙壁面に水分が吸着することでエネルギー的に拘束され、水分内の分極が小さくなる可能性が考えられる。
- 2) 細孔中の溶液の導電性: 空隙中の溶液は電解質が溶け込んだものであることが想定できる。0.07μm以下のような小径の空隙では、電解質溶液の存在により平板間が連結され通常の導体のようにふるまったのではないかと考えられる。空隙の連続性CとGの相関がみられなかった理由として、連続した空隙内に導電性物質が満たされたためにキャパシタではなくレジスタとしてのふるまったのではないかと予想される。
- 3) 分極速度の影響: 本研究では20MHzの高周波容量式水分計を用いているため、コンクリート内部のキャパシタの分極速度が追い付かず、分極が不完全であるために見かけの誘電率が低下した可能性が考えられる。
- 4) 骨材とその遷移帯の影響。

#### 4. まとめ

コンクリートの静電容量にコンクリートの幾何学的空隙特性が及ぼす影響についての検討を行った。その結果、以下が明らかになった。

- 1) 0.07μm以下のインクボトル空隙が静電容量に影響していることが確認でき、筆者らの既往の研究における0.1μm以下の空隙特性が静電容量に影響するという仮説を補強する結果が得られた。
- 2) 静電容量と空隙構造の相関を今後より詳細に検討するためのパラメータとして、「空隙の連続性とその連続量」を抽出することができた。また、骨材自体やそ

の界面の影響も考慮する必要があると考えられる。

#### 謝辞

東京大学大学院工学系研究科の野口貴文教授・北垣亮馬講師の特段のご配慮により、本研究での水銀圧入装置の使用を許可いただきました。また、JSPS 科研費若手研究(A) 26709038 の助成を受けて本実験を実施いたしました。ここに記して深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 関博, 宮田克二, 北峯博司, 金子雄一: 比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察, 土木学会論文集, No.451, pp.49-57, 1992
- 2) 胡桃沢清文, 名和豊春: いくつかの手法による硬化セメントペーストの空隙構造の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.532-537, 2012
- 3) 胡桃沢清文, 名和豊春: 高炉スラグペーストの電気伝導性による塩分浸透性と微細構造評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, pp.127-134, 2012
- 4) Sant, G., et al.: Capillary porosity depercolation in cement-based materials: Measurement techniques and factors which influence their interpretation, Cement and Concrete Research, Vol.41, pp.854-864, 2011
- 5) Koleva, D. A., et al.: Correlation of microstructure, electrical properties and electrochemical phenomena in reinforced mortar. Breakdown to multi-phase interface structures. Part I: Microstructural observations and electrical properties, Materials Characterization, Vol.59, pp.290-300, 2008
- 6) 福山智子, 野田貴之, 長谷川拓哉, 千歩修, 白石聖, 兼松学, 今本啓一, 野口貴文: 軍艦島構造物群の劣化調査その16: 鉄筋コンクリート構造物の周波数特性とコンクリート細孔構造間の相関に関する検討, 日本建築学会, pp.1153-1154, 2014
- 7) 橋本勝文, 横田弘: 凍結融解作用を受けたモルタルの水銀圧入法による空隙構造評価, 材料, Vol.62, No.8, pp.486-491, 2013
- 8) 吉田亮, 岸利治: 水銀圧入過程における内部空気泡の関与と水銀圧入の有効圧力範囲に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.60, pp.68-75, 2006
- 9) 岸利治, 吉田亮: 硬化セメントペーストが内包する複数のインクボトル幾何構造に関する研究, 生産研究, Vol.60, No.5, pp.126-129, 2008
- 10) 吉田亮, 岸利治: 水銀の漸次繰返し圧入による空隙の連続性抽出と有効圧力範囲に関する研究, 生産研究, Vol.60, No.5, pp.122-125, 2008