

論文 フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性の定量的評価方法の考案

菱刈 智也*1・小林 孝一*2・高木 雄介*3

要旨: 水分センサを用いて、フレッシュコンクリート加振中の内部での電気伝導度 (EC) の分布を測定することにより、材料分離抵抗性を定量的に評価する手法を考案した。円筒容器に充填したフレッシュコンクリートの加振中の上部と下部での EC を測定すると、加振時間に伴って上下の EC の差が大きくなる傾向を捉えることができ、材料分離しやすい配合ほど、その差は大きくなる傾向が掴めた。さらに、下部の EC 変化量を用いて評価を行うことによって、材料分離抵抗性の大きさを定量的に評価することができる可能性が示された。また、材料分離が起こらない適切な加振時間を把握することにも利用することができると思われる。

キーワード: 中流動コンクリート, フレッシュコンクリート性状, 材料分離抵抗性, 電気伝導度

1. はじめに

施工時に締固めを必要としない高流動コンクリートが開発されて、およそ 30 年が経過した。さらに近年は、土木分野では補助的に締固め作業を行うのみでよい中流動コンクリートの標準化も進められつつある。コンクリートが高い自己充填性を持つためには、高い流動性と材料分離抵抗性の両者が達成される必要があるが、コンクリートの分離抵抗性を評価する試験方法については、これまでに様々な研究がなされてきた。現在は経験者による目視での判断で評価する場合が多く、定量的な評価方法の提案には至っていない。

そこで、現場でも容易に測定することができるような容器・水分センサを用いて、コンクリート中の電気伝導度 (以下、EC) の変化を把握することで、分離抵抗性の評価として使えるのではないかと考えた。これにより、材料分離抵抗性を数値的に評価することができ、締固め不足や、材料分離による欠陥を無くし、コンクリートの品質向上へとつながると考える。

本研究では、水分センサを用いて、加振中のフレッシュコンクリート内部での EC の変化を測定することにより、材料分離抵抗性を定量的に評価する手法の開発・検討を行った。また、既存の簡易的な評価手法である、円筒貫入試験¹⁾、ふるい分離試験²⁾も同時に行い、試験による材料分離の評価のしやすさ、精度の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験に用いた材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に示す。材料分離に影響する配合要因をそれぞれ変化させた 12 種類の配合で、各試験方法を実施した。

2.2 伝導度測定試験

伝導度測定試験は、市販の土壌水分センサを用いて実施した。この水分センサは土壌用の体積含水率、EC、温度の測定が可能であるが、本実験では EC のみを評価に用いた。測定に用いる容器とその寸法を図-1 に示す。公称径Φ200mm の塩ビ管を用いて作成しており、容器内には 12L のフレッシュコンクリートが入る。側面には水分センサを差し込むために、上部・中部・下部の 3 箇所穴を空けた。また、測定後に下部の粗骨材量を計測するために、底面から 80mm のところで容器を分断できるようにしている。

試験手順については、円筒容器にコンクリートを打ち

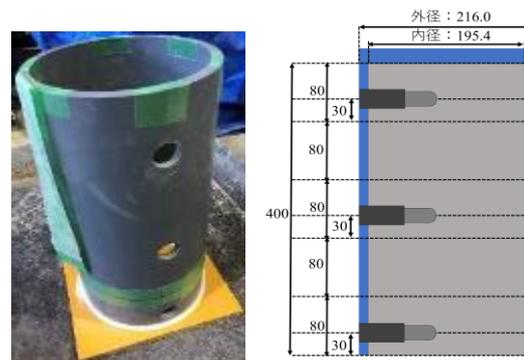


図-1 測定容器と寸法 (mm)

表-1 使用材料

水 (W)	水道水
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm ³
細骨材 (S)	川砂 (揖斐川産), 表乾密度 2.59 g/cm ³
粗骨材 (G)	川砂利 (揖斐川産), Gmax25mm, 表乾密度 2.61 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
AE 減水剤	リグニン系
AE 剤 (AE)	アルキルエーテル系

*1 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 (学生会員)

*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 西松建設株式会社 技術研究所土木技術グループ 博士 (工学) (正会員)

表-2 配合表・性状試験結果

試験要因	配合名	W/C	s/a	kg/m ³				SP (C×%)	AE (C×%)	空気量	SL ※3 (cm)	SLF ※3 (cm)	目視での 分離傾向 ※2					
				W	C	S	G											
W/C ↓	37-55-1	0.37	0.55	165	441	926	764	1.2	—	2.2%	23.5	44.8	大					
s/a ↓	40-50-1	0.40	0.50	170	425	842	848	1.0	—	0.7%	22.0	51.4	過大					
s/a ↓ +Air	40-50-2							0.8	0.004	5.7%	22.0	41.3	大					
SLF ↓	40-55-1		0.55			170	425	926	764	0.9	—	1.8%	21.5	38.1	小			
Base	40-55-2									1.1	—	2.4%	20.5	38.2	中			
SLF ↑	40-55-3									1.3	—	1.3%	22.5	42.4	中			
+Air	40-55-4									1.1	0.005	5.3%	23.5	44.3	大			
++Air	40-55-5									0.8	0.008	11.0%	24.0	45.0	大			
※1	40-55-6									0.5(※1)	0.002	3.7%	6.0	—	過小			
s/a ↑	40-60-1									0.60	1010	679	1.2	—	1.6%	21.5	41.8	小
W/C ↑	43-55-1									0.43	0.55	175	410	926	764	1.0	—	1.3%
W/C ↑ ↑ +Air	60-55-1	0.60	0.55	199	332	926	764	0.8	0.004	3.8%	—	48.8	過大					

※1 40-55-6はAE減水剤を使用する，振動締固めの必要なコンクリート。

※2 T-ポストスランブ試験³⁾で試料上面の円形の変化を目視で確認し，過小～過大の5段階で判定した材料分離傾向の大きさを示した。

※3 SL：スランブ，SLF：スランブフロー

込んだ後，コンクリートにΦ23mmの棒状パイプレータを挿し込み，60秒間振動締固めを行いながらセンサによる測定を行った。結果は1秒毎にPCに記録される。測定後，容器上部および下部からΦ200mm×80mmの円柱容器分のコンクリートを採取する。その後，採取した試料から5mmふるい上で粗骨材を洗い出し，乾燥させた後，粗骨材質量の測定を行う。採取に用いた円柱容器体積中の配合上の粗骨材量を加振前の粗骨材量とし，それに対する加振後の粗骨材量の割合を求めた。

2.3 円筒貫入試験

円筒貫入試験¹⁾は，Φ150×300mmのモールド缶にコンクリート試料を締め固めずに充填する。その後，円筒貫入計を試料中に鏝部分まで3秒で挿入し，10秒静置した後，3秒かけて引き抜く(図-2)。その後，円筒内底面からのモルタルの高さを流入モルタル値として計測し，各配合3回ずつ実施し，評価を行った。

2.4 打撃ふるい分離試験

打撃ふるい分離試験は，参考文献2)のふるい分離試験を参考にし，これにフローテーブルでの打撃を加えて実施する方法とした。まず容器の中に1L程度のコンクリート試料を採取し，採取した質量を計測する。その試料を5mmふるい全体に均等に流し込み，ふるいを通過したモルタル質量を計測する。その後，フローテーブルの上に乗せて，フローテーブルにて打撃を10回，30回，50回与え(図-3)，ふるいを通過したモルタル質量をそれぞれ計測する。評価には式(1)で求められるモルタル採取率を用いた。本試験では，打撃回数の増加が材料分離に与える影響を調べることを目的として，10回，30回，50回打撃を与えたときのモルタル採取率についても検討し，各配合3回ずつ実施した。

$$X_{m,n} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

$X_{m,n}$ ：n回打撃後のモルタル採取率(%)

m_1 ：打撃後ふるいを通過したモルタル分の質量

m_2 ：落下前のコンクリート試料中に存在する調合上のモルタル分の質量

3 実験結果および考察

3.1 水分センサの性能確認

コンクリートの伝導度に対する水分センサの適用性を確認することを目的として，水分センサの性能確認試験



図-2 円筒貫入試験状況



図-3 打撃ふるい分離試験状況

を行った。W/Cを変化させたセメントペーストに対して、細骨材や粗骨材を順次添加して、体積当たりの骨材量が計測値に与える影響を検討した。配合中のペーストの体積の割合とECの関係を図-4に示す。配合中のペーストの体積の割合に対してECが強い相関関係を示すことを確認した。

伝導度は液体等の導電体中の電気の流れやすさを示す指標であり、コンクリート中であればセメントペーストが主な導電体であると考えられる。本センサは一定領域内の伝導度を測定しているため、センサ周囲の骨材量や空気量などのセメントペースト以外の体積が増減することによって計測値に影響を及ぼす。

また、W/Cの40%と60%では若干値が異なる傾向にあるため、本来はW/Cの影響をある程度加味する補正を行う必要がある。空気量も同様に、ECの測定結果に大きな影響を与えることは確認しているが、センサの性能試験時においては測定を行っておらず、空気量による伝導度の補正を行っていない。

混和剤自身の添加が伝導度に及ぼす影響は、高性能AE減水剤では軽微であり、AE剤に関しては殆ど伝導度に変化がないことを確認しており、実際のコンクリートに使用する程度の添加量であれば、影響はないものとして考えた。

3.2 伝導度測定試験

1) EC変化量

伝導度測定試験により得られた各配合のECの推移を示したグラフを図-5に示す。本試験では上・中・下段において計測を行っているが、各配合の差が捉えやすい上・下段について図示した。

上部のECは下部と比較して大きく上下に変動し、安定したデータを取りづらい傾向にあった。これは、容器上部付近は、上昇する空気がセンサ近傍を通過することによる影響や、最上部からの骨材沈下などによる様々な影響を受けやすいためであることが考えられた。そのため、本稿の伝導度測定試験における評価には比較的値の安定した下部のECの変化量を用いることとした。コンクリート中のセメントペーストを介してECを測定しているため、加振によりECが変化する要因としては、主に以下の2点が考えられる。1つ目は、パイプレータでの加振により骨材が沈降し、センサ周囲の骨材量が変化することである。ペーストと比較して骨材の伝導度が低いため、センサ周囲の骨材量が増加するほどECは減少し、骨材量が減少した領域では、セメントペーストが増加するためECは増加する。2つ目は、加振により空気が上昇し、センサ周囲の空気量が変化することである。空気は伝導度が著しく低いため、センサ周囲の空気量が増

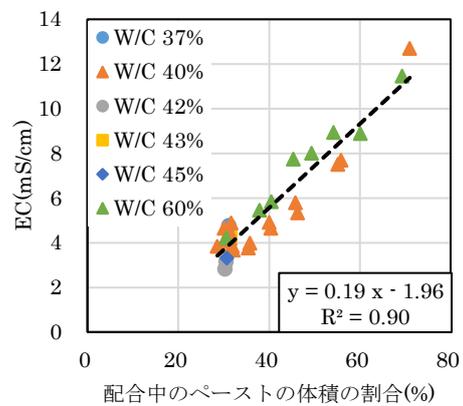


図-4 水分センサの性能評価試験結果

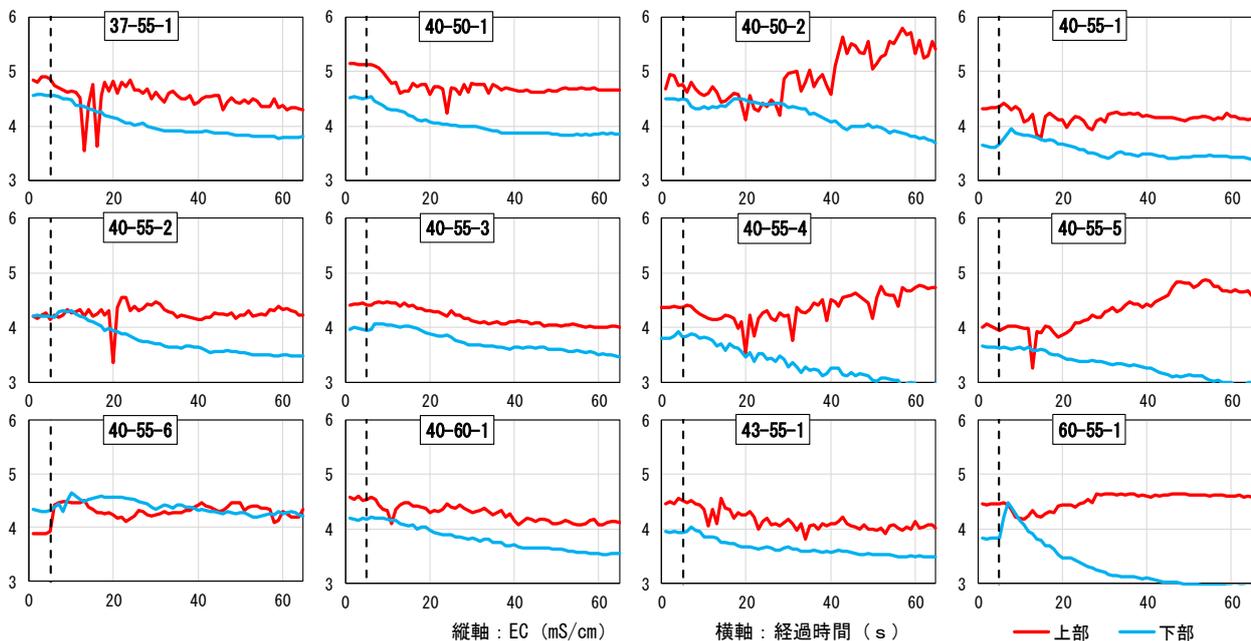


図-5 ECの測定結果 (垂直の黒点線は、加振開始時点を表す)

加するほど EC は小さくなる。ペーストの伝導度が最も高く、上記 2 点の影響により、センサ周辺のペーストが多くなるほど EC は大きくなる。

2) 骨材沈下量

図-6 に伝導度測定試験後に採取した各配合の上部と下部の粗骨材の変化割合を示したグラフを示す。図-6 より、下部の粗骨材の変化割合は、空気量が多かった 40-50-2, 40-55-4, 40-55-5, 60-55-1 の 4 つの配合の値が大きくなっている。これらの配合の内、40-50-2 は、同配合であり、空気量のみが異なる 40-50-1 よりもスランブフローが小さいにもかかわらず、粗骨材変化量は大きくなっている。したがって、スランブやスランブフローのみでは加振による粗骨材の分離、沈降を評価できないということになる。

3) 伝導度と材料分離の関係

60-55-1 は W/C を 60% に設定し、著しい分離を示した配合である。図-5 に示すように、この配合では加振直後から EC の上下差が著しく大きくなった。また、図-6 に示すように、60-55-1 は多くの骨材が下部に沈降しており、粗骨材が多く沈降したことで、EC の上下差が大きくなったと考えられる。

40-55-4 においても加振直後から EC の上下差が大きくなった。また、下部の粗骨材変化割合も大きな数値となっており、T-ポストスランブ試験においても材料分離傾向が大であると判断されている。

上部の EC が増加しているのは空気の上昇による影響が大きいことが考えられる。AE 剤を添加し、空気量を増加させた配合は図-5 に示すように上部の伝導率の上昇が顕著になり、加振後の下部の骨材の割合も多い傾向にある。これは、加振によってセメントペースト中に連行された微細な空気が上昇する際に、ペーストとともに上昇し、EC が上昇することが考えられる。他配合と比較して空気量が多かった 40-50-2, 40-55-4, 40-55-5, 60-55-1 において、上部の EC の増加傾向が確認できたことから

空気による影響が大きいことが考えられる。その他の配合の上部の EC は、加振 60 秒後まで横ばいもしくは緩やかに減少する傾向を示した。これは、上部のセンサの中心が、充填したコンクリート試料上面から 50mm 下の位置に設置されているため、最上部からの骨材の沈下による EC の低下が、下部からの空気の上昇による EC の上昇により相殺されることで EC が大きく変化しなかったと考えられる。下部の EC が減少しているのは、コンクリート中の空気の上昇による EC の上昇よりも、上部からの骨材の沈下に伴う EC の低下のほうが上回っているためであると考えられる。

一方、最も固練りでスランブが 6cm の 40-55-6 は 60 秒加振後も上下の EC の差が開かず、上部と下部の両方の EC が横ばいとなった。また、下部の粗骨材変化割合は、全配合の中で 2 番目に小さくなった。材料分離抵抗性が大きく、加振してもモルタルと骨材の一体性が崩れず、粗骨材が移動しなかったことにより、EC が変化しなかったと考えられる。

4) EC による定量的評価

各配合の下部の EC を平滑化したグラフを図-7 に示す。横軸の加振時間については、初期のコンクリート中の空隙の締め固まりによるデータの変動を考慮し、加振 2 秒後の値を原点としてグラフを作成した。左図には、加振

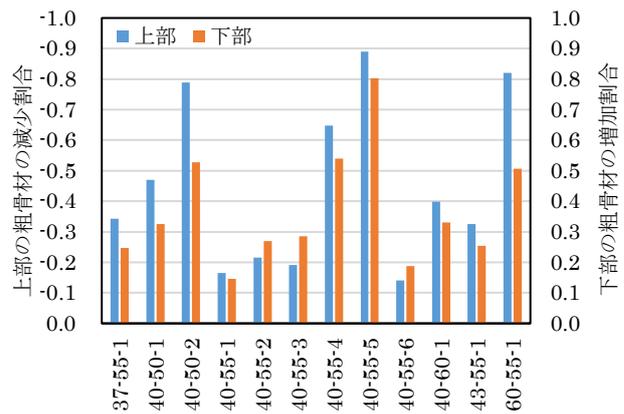


図-6 粗骨材変化割合

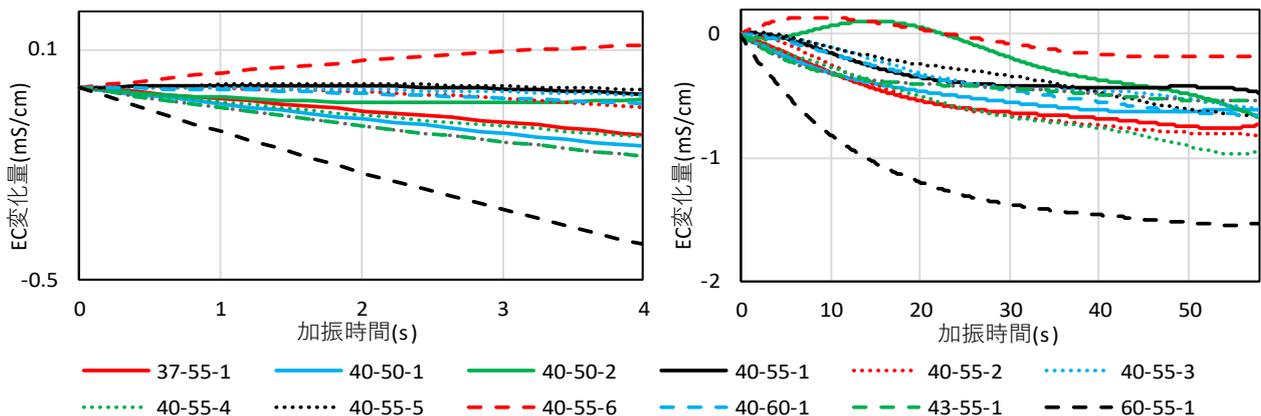


図-7 下部の EC 変化量の近似曲線

2秒後から6秒後までのEC変化量を、右図には、参考までに同グラフの加振2秒後から加振60秒後までのEC変化量を示している。図-7より、最も材料分離しやすい配合である60-55-1の曲線は、加振後早い段階で大きく減少し、一般的な締固め時間である5秒の時点で他配合と比較して最もECの減少量が大きかった。また、加振時間5秒時のECの減少量が60-55-1の次に大きい値を示した43-55-1、40-50-1、40-55-4、37-55-1は、いずれもT-ポストスランブ試験で材料分離傾向が過大もしくは大と判断された配合であり、EC変化量の値によって、材料分離抵抗性を捉えることができる可能性が確認できた。ECの変化を近似した数式から、ある加振時間におけるECを読み取ることで、定量的な評価を行うことができ、さらなるデータの蓄積により、分離限界となる値の選定を行える可能性も考えられた。ただし、40-55-4と40-55-5は他配合と比較して下部のECの初期値が小さくなっており、空気量が増加したことで流動性が高い配合であったため、円筒容器にコンクリートを打ち込んだ時に既に材料分離が起こり始めていたことが考えられる。そのため、加振中のECの「変化量」で傾向を捉えると、EC変化量が小さくなったと考えられる。

また、T-ポストスランブ試験で材料分離傾向が過小～中と判断された配合である40-55-1、40-55-2、40-55-3、40-55-6、40-60-1は、加振5秒後においてもグラフが横ばいになっており、ECがほぼ一定の値を保っていることがわかる。これは、加振5秒後までに、コンクリート内部の骨材の分布に大きな変化がなく、内部の性状が変化していないことを示していると考えられる。一方、分離抵抗性が小さい配合については、加振5秒後までの間に、ECが減少傾向を示しており、内部で骨材の沈下が起こり始めてしまっていることが考えられる。加振中におけるコンクリート内部のEC変化量の分布を把握することで、内部での粗骨材とペーストとの分離状況を把握することができ、これによって材料分離が起こらない適切なバイブレータでの加振時間を把握することができることも期待できる。

3.3 円筒貫入試験

実験によって得られた各配合の流入モルタル量の大きさを図-8に示す。T-ポストスランブ試験で材料分離傾向が過大と判断された40-50-1、60-55-1は流入モルタル量が著しく大きくなっている。一方、過小もしくは小と判断された40-55-1、40-55-6は流入モルタル量が小さくなっており、材料分離抵抗性の大きさを的確に評価できている傾向が確認できた。3回の試験の結果のばらつきが著しく大きな配合はなく、安定したデータが得られた。しかし、スランブが6cmの40-55-6においては、モルタルが3回の平均で0.7mmしか流入せず、普通コンクリー

トレベルのコンクリートを評価することは難しいといえる。また、T-ポストスランブ試験では材料分離傾向が小と判定された40-60-1が他配合と比較して流入モルタル量が比較的高い値を示した。40-60-1は全配合の中で最も配合上の粗骨材の量が少ない配合である。円筒貫入試験は、Φ150×300mmのモールド缶にコンクリート試料を充填して試験を実施する。粗骨材の量が少ないと、円筒貫入計を試料中に挿入した際に貫入計周辺に接触するモルタル量が多くなる。それにより、モルタルが流入しやすくなり比較的高い流入モルタル量が計測されたことが考えられる。円筒貫入試験はコンクリート中のモルタルの粘性と流動性により数値が大きく影響するが、配合上の粗骨材の量により数値が影響される可能性がある。

3.4 打撃ふるい分離試験

試験によって得られた各配合のモルタル採取率の大きさを図-9に示す。T-ポストスランブ試験で材料分離傾向が過大と判断された40-50-1、60-55-1はモルタル採取率が大きくなっている。一方、過小もしくは小と判断された40-55-1と40-55-6と40-60-1のモルタル採取率が小さくなっており、材料分離抵抗性の大きさを的確に評価できている傾向が確認できた。また、10回打撃時には最大

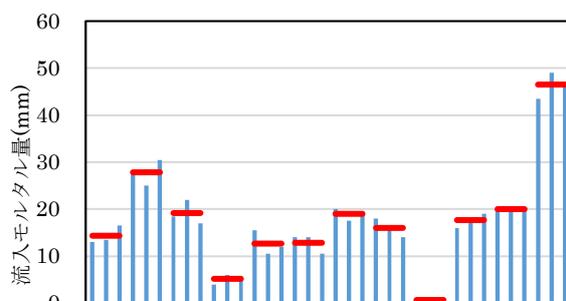


図-8 円筒貫入試験結果
(水平線は3回の試験の平均値)

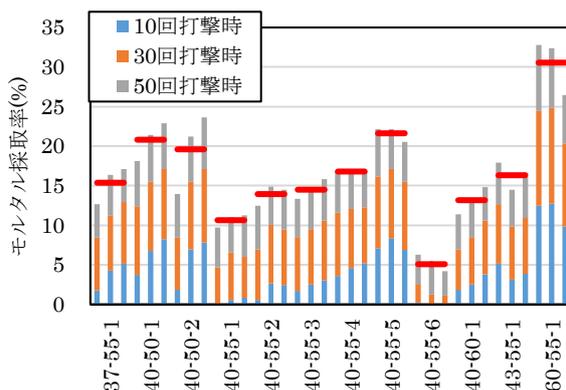


図-9 打撃ふるい分離試験結果
(水平線は3回の試験の平均値)

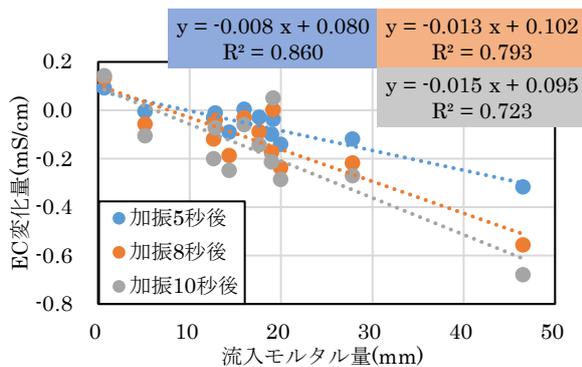


図-10 EC 変化量と流入モルタル量の関係

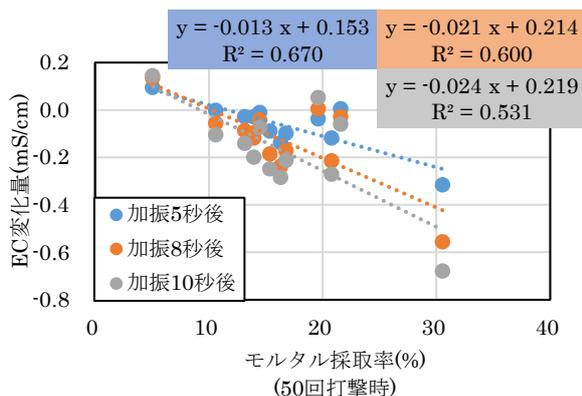


図-11 EC 変化量とモルタル採取率の関係

でも 40-55-6 と 60-55-1 の間で 11.6%の差しか生じていなかったが、打撃回数を増やすことで、落下するモルタル量の差が大きくなり、50 回打撃時においては、最大で 40-55-6 と 60-55-1 の間で 25.5%の差が生じた。打撃回数を増やすごとに各配合内でのデータのばらつきが小さくなることが確認できた。

3.5 相関関係

一般的な締め時間である加振 5 秒後、8 秒後、10 秒後の EC 変化量と流入モルタル量との関係を図-10 に、50 回打撃時のモルタル採取率との関係を図-11 に示す。流入モルタル量との間には高い相関関係が示され、モルタル採取率との間にも比較的高い相関関係が示された。なお、後者については他の打撃回数でも同様の関係が得られている。また、どちらも加振時間が少ない EC 変化量の数値との相関関係ほど高い相関を示すことが確認された。試験において、円筒貫入試験や打撃ふるい分離試験は外部からそれほど大きなエネルギーを与えていないため、パイプレータでの加振によって与えられるエネルギーが小さい初期段階の EC との相関が高くなったことが考えられた。

4. 今後の展望

今回提案した EC によりコンクリートの材料分離抵抗性を評価する手法は、これまで実績のある他の評価方法と同等の評価結果が得られる、極めて簡便かつ迅速に実施が可能な手法であり、時間経過とともに多数のデータが取得できて定量的な評価が可能となることが特徴である。今後、この手法の信頼性を高めて実用化するためには、空気量と骨材量のそれぞれが EC に与える影響について、さらに検討を加える必要があると考えられる。また、W/C も EC に影響する可能性が認められるため、このことを考慮することについても検討が必要であると考える。

5. 結論

本研究では、水分センサを用いて、フレッシュコンクリート加振中の内部での EC の分布を測定することにより、材料分離抵抗性を定量的に評価する手法の開発・検討を行った。また、既存の評価手法である、円筒貫入試験、打撃ふるい分離試験も同時に行い、試験による材料分離評価のしやすさ、精度を検討した。その結果、以下のような結果を得た。

- 1) 円筒容器に充填したフレッシュコンクリートの加振中の上部と下部での EC の分布を測定すると、加振時間に伴って、上下の EC の差が大きくなっていく傾向が見られ、材料分離抵抗性が小さい配合は、上下の EC の差が大きくなる傾向が確認された。
- 2) 材料分離が小さい配合ほど、下部のセンサの EC 変化量が小さくなる傾向が見られ、材料分離の大きさを定量的に評価することができる可能性が示された。
- 3) 加振中のコンクリート内部の EC 変化量の分布を把握することで、内部での分離状況を把握することができ、材料分離が起こらない適切な加振時間を把握することができる可能性が示された。

参考文献

- 1) 高流動コンクリートの材料・調査・製造・施工指針 (案)・同解説, 日本建築学会, p.140, 1997.1
- 2) Testing fresh concrete part11 self-compacting concrete Sieve segregation test, EN 12350-11, 2010
- 3) 丸屋剛, 梁俊, 坂本淳, 宇治公隆: 締めエネルギーの観点から見たフレッシュコンクリートの品質および施工性能の評価, コンクリート工学, 51 巻 4 号, pp.319-326, 2013.4