

論文 フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性の電気伝導率を用いた定量的な評価

菱刈 智也*1・高木 雄介*2・小林 孝一*3

要旨：加振中のフレッシュコンクリート内部での電気伝導率（EC）の変化量から、材料分離抵抗性を定量的に評価する新たな方法を提案する。円筒容器に充填したフレッシュコンクリートの上下部の EC をバイブレータにて加振しながら計測した。計測した EC 変化量から推定した加振後の下部の粗骨材質量とその実測値との相対誤差の平均は 10%となり、EC 変化量から加振後の粗骨材残存率を推定できた。加振による EC 変化量から粗骨材残存率の変化割合を推定し、加振前から粗骨材残存率が 30%変化するまでに何秒間の加振を要したかを確認することで、適切な加振時間の範囲を定量的に評価することができる。

キーワード：締固めを必要とする高流動コンクリート、フレッシュ性状、材料分離、電気伝導率

1. はじめに

近年、構造物内の鉄筋量の増加や、作業員の減少に伴い、“締固めを必要とする高流動コンクリート”の使用が増加している。今後、様々な締固めが困難な箇所への適用が期待されているが、過剰な締固めによって材料分離を引き起こす可能性が懸念される。

土木学会「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会（358 委員会）」では、材料分離抵抗性を評価するのに有効な試験方法として「粗骨材の沈下量評価試験」と「触感による評価試験」の 2 つを提案している¹⁾。しかし、前者は洗い出しに手間と時間を要すること、後者は技術者の経験度によって結果が左右されてしまう点において課題がある。片平らは簡易に加振後の粗骨材残存率（加振前の粗骨材質量に対する加振後の粗骨材質量の比）を求める方法として、エアメータに採取した試料の空気量と質量を測定し、粗骨材残存率を推定する方法を考案している²⁾が、その結果を評価するための判定基準の確立には至っていない。

著者らはこれまで加振に伴うコンクリートの電気伝導率（以下、EC）の変化を用いて、コンクリート内の材料分布状況の変化、すなわち材料分離抵抗性を評価することを試みてきた。材料分離の発生をリアルタイムで定量的に評価することが、締固め不足や、材料分離による欠陥の発生を無くし、コンクリートの品質向上へとつながると考える。筆者らの既報³⁾では、EC 変化量を用いることで材料分離抵抗性を評価できる傾向を確認した。そして既報⁴⁾では、具体的な EC 測定値の活用方法を見出した。EC が測定初期値から 7%変化するまでの経過時間を評価に活用する方法であり、この方法による評価と目視判断、円筒貫入試験による試験結果との整合性が高

い結果となった。しかし、その検討過程においては、目視判断を基準として検討を行っており、定性的な要素が含まれていた。

そこで本研究では、358 委員会と同様に、締固めによる粗骨材の沈降を直接的に評価している粗骨材残存率を基準として、EC 変化量との関係を見直した。その上で、EC 変化量から粗骨材残存率を推定することによって材料分離抵抗性を簡易かつ定量的に評価するという、新たな EC の活用方法を提案する。まず、既報⁴⁾のデータについて、粗骨材残存率を基準として EC 変化量との関係を見直した結果を 3 章に示す。次に、EC 変化量を用いて材料分離抵抗性を評価する方法の提案と、その確立に向けて検討した結果を 4 章と 5 章に示す。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料、表-2 に本試験で使用した配合を示す。使用材料と Series 1 の配合は、既報⁴⁾において使用した材料と配合であり、配合 40-55-2 をベースとし、W/C、s/a、空気量、スランプフロー（以下、SLF）を変化させた配合について、各種試験を行っていた。

2.2 EC 測定試験⁴⁾

測定に用いる容器、寸法および概要を図-1 に示す。EC 測定試験は、市販の土壤用水分センサを用いて実施した。センサの計測可能範囲は図中のハッチング部分で、上方向に 5cm、下方向に 3cm の楕円筒領域を計測している。測定容器は公称径 $\Phi 200\text{mm}$ の塩ビ管を用いて作製しており、容器内には 12L のフレッシュコンクリートが入る。その側面に水分センサを差し込むために、上部・下部の 2 箇所に穴を開けた。また、測定後に下部の粗骨材量を

*1 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 環境社会基盤工学専攻（学生会員）

*2 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）

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博士（工学）（正会員）

表-1 使用材料⁴⁾

記号	使用材料	物性値ほか
W	水	上水道水
C	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³
S	川砂(揖斐川産)	表乾密度 2.59g/cm ³
G	川砂利(揖斐川産)2505	表乾密度 2.61g/cm ³
SP	高性能 AE 減水剤 標準形(I種)	ポリカルボン酸系化合物 リグニンスルホン酸塩
AE	AE 剤	アルキルエーテル系

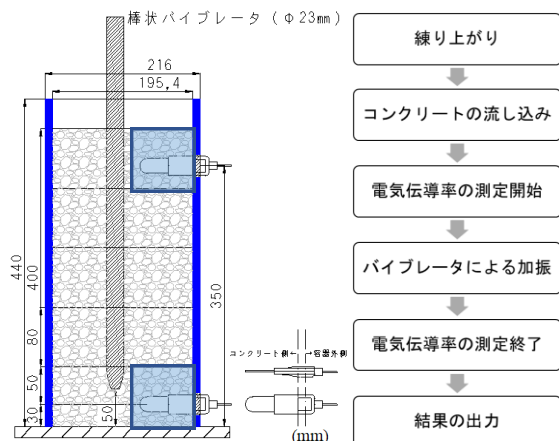


図-1 測定容器および EC の測定フロー⁴⁾

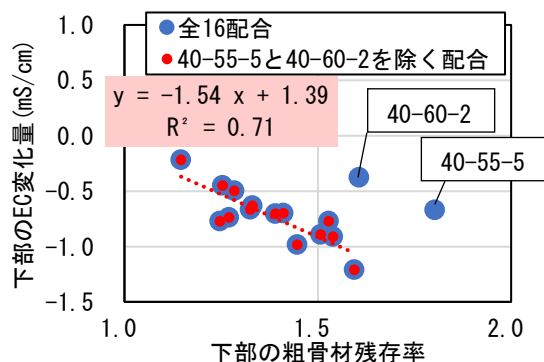


図-2 下部の粗骨材残存率と下部の EC 変化量の関係

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。

円筒容器にコンクリートを打ち込んだ後、Φ23mm、振動数 235-285Hz の棒状バイブレータを、試験容器内の底面から 5cm の高さまで挿入し、60 秒間振動締めを行いながらセンサにより EC の測定を行った。結果は 1 秒毎に PC に記録される。また、加振後の粗骨材量の計測を目的として、加振終了後に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した。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った。配合表から算出される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。

3. 粗骨材残存率を基準とした EC 変化量との関係

まずは既報 4) の結果について、加振前の粗骨材質量に対する加振 60 秒後の粗骨材質量の比である粗骨材残存率を基準として、EC 変化量との関係について再検討を行なう。既報 4) において、容器上部の EC 変化は主に空気量と、容器下部の EC 変化は試料の粘性と強い関係があることが明らかになっているので、以下、下部の EC 変化量に着目して検討を進める。Series 1 の配合について、図-2 に下部の粗骨材残存率と下部の EC 変化量の関係を示す。なお加振前の粗骨材質量は、配合表から算出して求めた理論値を用いている。

図-2 において、2 配合を除くと、加振後の下部の粗骨材残存率と下部の EC 変化量の間には強い相関関係がみられる。除外した 40-55-5 と 40-60-2 の 2 配合においては、EC 変化量に対して、粗骨材残存率が著しく上回っている。要因は明確ではないが、試料充填時に粗骨材の沈降が生じていた可能性が 1 つの要因として考えられる。これより、下部の EC 変化量を用いることによって、加

表-2 配合表・性状試験結果 (本試験)

実験シリーズ	試験要因	配合名	W/C	s/a	単体量 (kg/m ³)				SP (C×%)	AE (C×%)	Air (%)	SLF (mm)
					W	C	S	G				
Series 1 ⁴⁾	W/C↓	37-55-1	0.37	0.55	165	441	926	764	1.2	—	2.2	450
	W/C↓+Air	37-55-2							1.3	0.004	3.8	470
	s/a↓	40-50-1	0.50	170	425	926	764	1.0	—	0.7	515	
	s/a↓+Air	40-50-2						0.8	0.004	5.7	415	
	SLF↓	40-55-1	0.55	170	425	926	764	0.9	—	1.8	380	
	Base	40-55-2						1.1	—	2.4	380	
	SLF↑	40-55-3	0.55	170	425	926	764	1.3	—	1.3	425	
	+Air	40-55-4						1.1	0.005	5.3	445	
	++Air	40-55-5	0.60	170	425	926	764	0.8	0.008	11.0	450	
	最良	40-55-7						1.05	0.0055	4.4	415	
	s/a↑	40-60-1	0.60	170	425	926	764	1.2	—	1.6	420	
	s/a↑+Air	40-60-2						1.3	0.005	5.1	465	
	W/C↑	43-55-1	0.43	0.55	175	410	926	764	1.0	—	1.3	395
	W/C↑+Air	43-55-2							1.2	0.004	3.6	575
	W/C↑↑	60-55-1	0.60	0.55	199	332	926	764	0.9	—	1.9	430
	W/C↑↑+Air	60-55-2							0.8	0.004	3.8	490

表-3 配合表 (予備試験)

No.	粗骨材 体積割合 (%)	W/C 40%					W/C 60%						
		kg/m ³				C×%		kg/m ³				C×%	
		W	C	S	G	SP	AE	W	C	S	G	SP	AE
1	0	245	613	1335	0	1.1	—	287	479	1336	0	0.8	0.004
2	5	232	581	1265	131			272	454	1266	131		
3	10	219	549	1195	261			257	429	1196	261		
4	15	207	517	1126	392			242	404	1126	392		
5	20	194	484	1056	522			227	379	1056	522		
6	25	181	452	986	653			212	353	986	653		
7	29	170	425	926	764			199	332	926	764		
8	35	155	388	846	914			182	303	846	914		
9	40	142	356	776	1044			167	278	776	1044		
10	45	130	324	706	1175			152	253	706	1175		
11	50	117	292	636	1305			137	228	636	1305		
12	55	104	260	566	1436			122	203	566	1436		

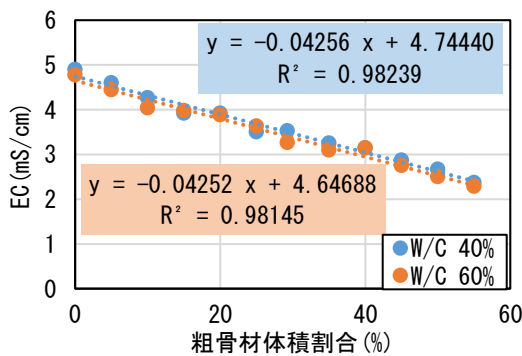


図-3 粗骨材体積割合と EC の関係 (予備試験)

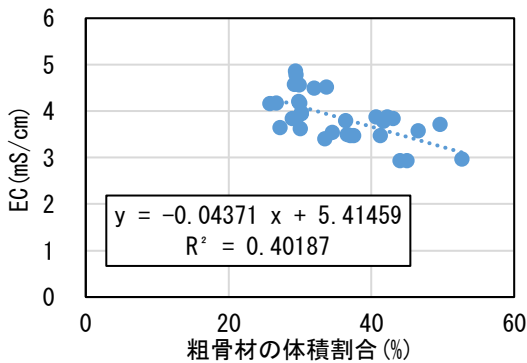


図-4 粗骨材体積割合と EC の関係 (Series 1)

振による粗骨材の沈降によって生じる材料分離の度合いを評価できると考えた。

そこで、4章からは、下部の EC 変化量を用いて材料分離抵抗性を評価する方法の確立に向けて検討を行なう。

4. 材料分離抵抗性の評価方法の提案

4.1 提案する評価方法の手順

以下に EC 測定試験の結果から材料分離抵抗性を定量的に評価する方法の手順を提案する。手順④に示した 30%という判定基準の値は、358 委員会でも考察された案¹⁾に基づく。

① 加振に伴う EC 変化量を測定する。

- ② 測定した EC 変化量から、加振に伴う粗骨材体積の変化割合を推定する。
- ③ 推定した粗骨材体積の変化割合から、加振後の粗骨材残存率を算出する。
- ④ 粗骨材残存率が 30%変化するまでに、加振を何秒間要したかを確認する。
- ⑤ 確認した加振時間が標準的な加振時間 (5~15 秒) を超えていれば、材料分離抵抗性に問題がないと判断する。

4.2 EC 変化量と粗骨材体積割合の関係

4.1 節で示した評価を可能とするためには、手順②において、EC 変化量から粗骨材体積の変化割合を推定する必要がある。そのため、粗骨材体積割合と EC との関係を、予備試験を実施して求めることとした。

4.2.1 予備試験方法

予備試験に使用した配合を表-3 に示す。粗骨材体積割合を 0~55%の 12 水準とし、40%と 60%の 2 種類の W/C で試験を行った。粗骨材量の影響のみに着目するため、同一 W/C の配合同士では水、セメント、細骨材の比率は固定した。ミキサーで練り混ぜた後、本試験で用いた測定容器の下部 80mm に、試料を加振なしで充填し、下部センサを用いて、試料を充填してから 5 秒後に表示された EC を記録した。

4.2.2 予備試験結果

予備試験結果を図-3 に示す。粗骨材体積割合と EC には強い相関関係があり、粗骨材体積割合が 1%増加すると、EC は約 0.04mS/cm 減少する。W/C が 40%と 60%で EC に差が生じていないが、山田らによる、W/C が 100%未満の範囲では W/C の EC への影響は小さい⁵⁾との結果から裏付けられる。

また、Series 1 の全 16 配合について、加振前と加振 60 秒後の 2 時点における粗骨材体積割合と EC との関係を図-4 に示す。なお、加振前の粗骨材体積割合は、配合表から算出して求めた理論値である。また、加振前の EC は、

試料を充填してから加振開始するまでの5秒間のECの平均値を用いた。各配合間で絶対値にバラつきはあるものの、図-4の近似線の傾きは図-3の近似線の傾きと近い。よって、EC変化量を図-3の傾き0.0425で除するこ

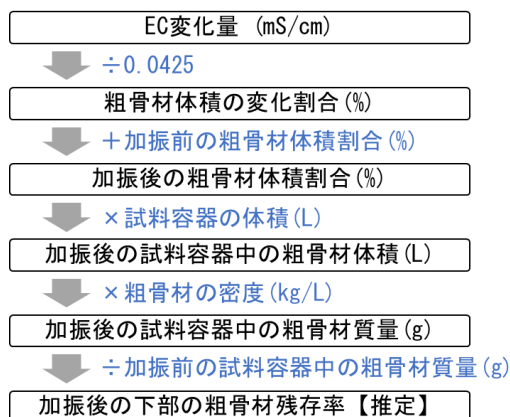


図-5 加振後の粗骨材残存率を推定する計算のフロー

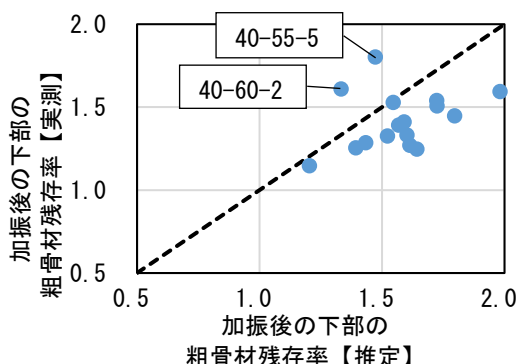


図-6 推定値と実測値の関係 (Series 1)

表-4 粗骨材残存率の推定値と実測値 (Series 1)

配合名	推定値		実測値		推定値と実測値の差(g)	相対誤差(%)
	加振後の粗骨材質量(g)	加振後の粗骨材残存率	加振後の粗骨材質量(g)	加振後の粗骨材残存率		
37-55-1	3007	1.64	2283	1.25	724	32
37-55-2	3290	1.80	2649	1.45	221	24
40-50-1	3098	1.52	2696	1.33	402	15
40-50-2	3145	1.55	3107	1.53	38	1
40-55-1	2204	1.20	2100	1.15	105	5
40-55-2	2955	1.61	2326	1.27	628	27
40-55-3	2625	1.43	2353	1.28	272	12
40-55-4	3156	1.72	2819	1.54	337	12
40-55-5	2698	1.47	3301	1.80	-603	-18
40-55-7	2872	1.57	2547	1.39	112	13
40-60-1	2606	1.60	2168	1.33	439	20
40-60-2	2169	1.33	2617	1.61	-155	-17
43-55-1	2551	1.39	2296	1.25	256	11
43-55-2	3628	1.98	2920	1.59	245	24
60-55-1	2913	1.59	2585	1.41	113	13
60-55-2	3159	1.72	2761	1.51	398	14

とで粗骨材体積の変化割合を推定できると考え、図-5に示した計算のフローでEC変化量から加振後の粗骨材残存率を推定することとした。

4.3 予備試験結果の活用

Series 1の全16配合について、図-5に示した計算のフローで推定した加振後の下部の粗骨材残存率と、実際に粗骨材を洗い出して計測した実測値との関係を図-6に示す。点線上では推定値と実測値が一致していることになる。また、推定した数値を表-4に示す。表-4の相対誤差は、推定値と実測値の差を、加振後の粗骨材質量の実測値で除して求めた割合であり、全16配合の相対誤差の絶対値の平均は16%であった。

図-6と表-4より、40-55-5と40-60-2を除く14配合において、推定値が実測値より上回る傾向がみられた。これは、粗骨材の移動以外の他の要因がECをさらに減少させているためであると考えた。4.2.1項で記述した予備試験では、モルタル内での材料分離の影響は微小と仮定し、加振による粗骨材の移動だけに着目して試験を行っていた。しかし、既報4)においては、加振時間が60秒とかなり長時間であり、容器下部付近の試料のモルタル内でも材料分離が生じ、粗骨材だけではなく、モルタル中の細骨材も下部容器に沈降してしまうことにより、EC減少量が大きくなったと考えた。

しかし、実際の施工において、モルタル内でも材料分離が著しく生じてしまうような加振を行なうことは起こりえないと考え、次章では加振時間を15秒に減らして2.2節と同様の試験を行なうことにした。

5. 評価方法の確立に向けた検討

5章では、加振時間をモルタルと粗骨材の分離だけに着目できると考えられる15秒に減らして試験を行い、加振後の下部の粗骨材残存率の推定値と実測値の関係を調べる。このことで、現実的な加振時間の場合に、4.1節で提案した評価方法が適用可能であるのかについて明らかにする。配合は、表-5のSeries 2の配合を用いた。配合40-55-1をベースとし、表-2のSeries 1と同様に、W/C, s/a, SLFを変化させたものであり、使用材料はSeries 1と同じである。

5.1 下部の粗骨材残存率とEC変化量の関係

図-7にSeries 2の全8配合の加振中のECの変化、図-8に加振による粗骨材量の変化率を示す。なお、40-55-3, 60-55, 60-50の3配合においては、スランプフロー試験後にコンクリート試料外周に自由水が確認され、材料分離傾向が確認された。図-7より、各配合において異なったグラフ形状が得られており、60-55や60-50については、加振15秒時点で下部のECが明確な減少傾向を示していることがわかる。図-8の37-55と60-55の比較より、

表-5 配合表・性状試験結果（本試験）

実験 シリーズ	試験要因	配合名	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)	AE (C×%)	Air (%)	SLF (mm)
					W	C	S	G				
Series 2	Base	40-55-1	0.40	0.55	170	425	926	764	1.1	0.006	2.0	485
	SLF ↓	40-55-2	0.40	0.55	170	425	926	764	0.9	0.002	2.2	348
	SLF ↑	40-55-3							1.3		0.5	605
	W/C ↓	37-55	0.37	0.55	165	441	926	764	1.3	0.005	3.4	558
	W/C ↑	60-55	0.60						199		332	0.8
	s/a ↓	40-50	0.40	0.50	170	425	842	848	0.9	0.003	2.4	408
	s/a ↑	40-60		0.60			1010	679	1.3	0.004	3.1	494
	著しく分離	60-50	0.60	0.50	199	332	842	848	0.8	0.005	1.5	633

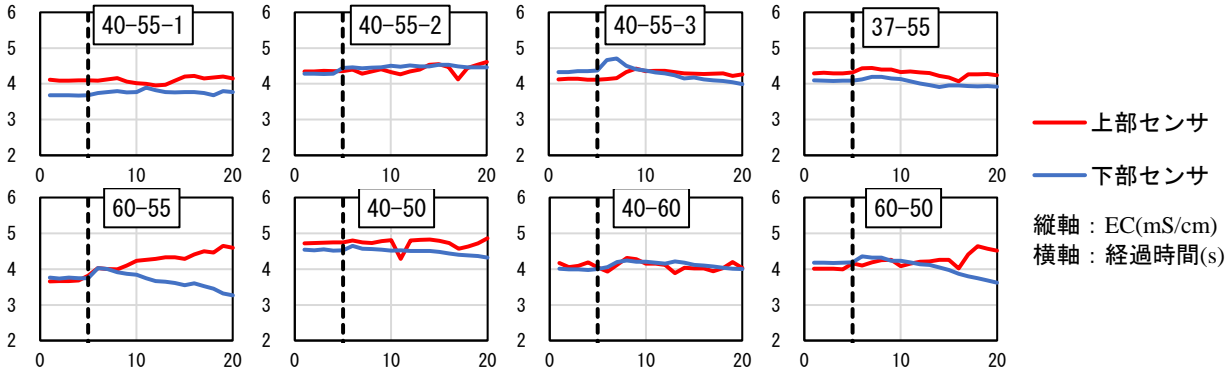


図-7 ECの推移（垂直の黒点線は、加振開始時点を表す）

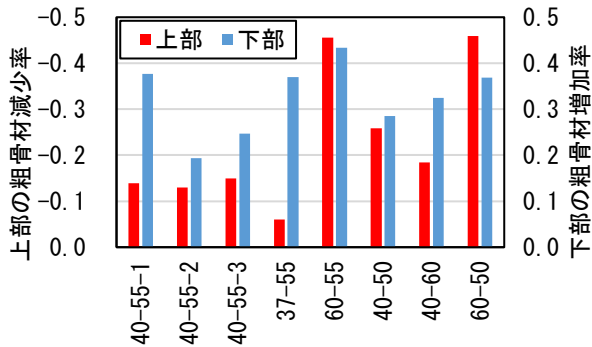


図-8 加振による粗骨材量の変化率（=粗骨材残存率-1.0）

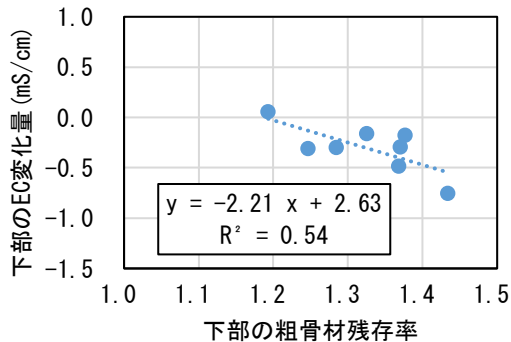


図-9 粗骨材残存率とEC変化量との関係

W/C が大きいほど粗骨材変化率が大きくなっていることがわかる。また 40-50 と 40-60 の比較より、s/a が大きいほど上部の粗骨材減少率は小さくなっているが、下部

の粗骨材増加率は大きくなっていることがわかる。40-60 は 40-50 より SP 剤を 0.4 (C×%) だけ多く添加したことで流動性が増加したことが原因だと考える。

図-9 に下部の粗骨材残存率と下部の EC 変化量との間には相関関係がみられたが、加振時間が異なるため、決定係数も異なる。

5.2 加振後の粗骨材残存率の推定値と実測値の関係

次に、4.3 節と同様に、加振後の下部の粗骨材残存率の推定値と実測値の関係を図-10 と表-6 に示す。表-6 の相対誤差の絶対値は、全 8 配合の平均が 10% となった。図-6 と図-10 を比較すると、加振時間 15 秒における結果（図-10）は、加振時間 60 秒（図-6）と比較して、推定値が実測値を上回ることがなく、相対誤差の平均も 6% 減少した。加振時間 60 秒の結果において推定値が実測値を上回っていたのは、4.3 節で記述したように、加振過多によってモルタル内でも材料分離が生じていた可能性が考えられた。また加振が 15 秒以内であれば、モルタルと粗骨材の分離だけに着目し、4.1 節で提案した評価方法が適用できると考える。

5.3 評価方法の適用

実際に 4.1 節で提案した評価方法で、Series 2 の全 8 配合に対して、下部の粗骨材残存率が 30% 増加するまでに、何秒間の加振を要していたか確認した結果を表-7 に示す。参考のために 20% 増加するまでに要した加振時間についても示す。“-” と示されているのは、加振 15 秒以内

では該当の粗骨材残存率 (20%と 30%の増加) に達していなかったことを示す。

加振後の粗骨材残存率の実測値が大きく、かつコンクリート試料外周に自由水が確認された配合である 60-55 と 60-50 については、加振 15 秒以内に粗骨材残存率が 30%増加まで達したと判定されていることが分かり、材料分離抵抗性を定量的に評価できる可能性がある。

現段階では限定的な材料を用いての検討である。特に、粗骨材の種類が変わると、図-3 で示した予備試験結果における、粗骨材体積割合と EC の関係式の傾きが変化する可能性が考えられる。よって、様々な種類の粗骨材を用いて事前に試験を行い、粗骨材体積割合と EC の関係を明らかにすることで、提案した評価方法はより正確な

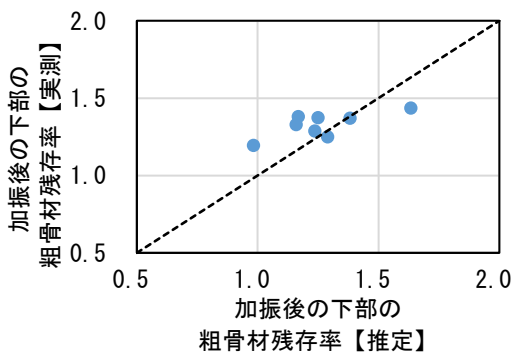


図-10 推定値と実測値の関係 (Series 2)

表-6 推定値と実測値 (Series 2)

配合名	推定値		実測値		推定値と実測値の差 (g)	相対誤差 (%)
	加振後の粗骨材質量(g)	加振後の粗骨材残存率	加振後の粗骨材質量(g)	加振後の粗骨材残存率		
40-55-1	2143	1.17	2523	1.38	-380	-15
40-55-2	1800	0.98	2186	1.19	-386	-18
40-55-3	2366	1.29	2284	1.25	82	4
37-55	2290	1.25	2510	1.37	-220	-9
60-55	2998	1.64	2627	1.43	370	14
40-50	2519	1.24	2612	1.28	-93	-4
40-60	1890	1.16	2157	1.33	-267	-12
60-50	2813	1.38	2783	1.37	31	1

表-7 粗骨材残存率が〇%変化するまでに要した加振時間 (s)

配合名	粗骨材残存率変化割合	
	20%	30%
40-55-1	-	-
40-55-2	-	-
40-55-3	13	-
37-55	7	-
60-55	5	8
40-50	14	-
40-60	-	-
60-50	11	14

ものとなる。

6. 結論

本試験は、EC を用いて、締固めを必要とする高流動コンクリートの材料分離抵抗性を定量的に評価する方法の提案を目的とした。著者らの既報 4)のデータについて、粗骨材残存率を基準として EC 変化量との関係を見直すことにより、新たな評価方法を見出し、その結果、本研究で検討した範囲からは以下のような知見を得た。

1. 容器内下部の粗骨材残存率と下部の EC 変化量には相関関係があり、下部の EC 変化量を用いることで、加振による粗骨材の沈降によって生じる材料分離の度合いを評価できる。
2. 粗骨材体積割合と EC には強い相関関係があり、粗骨材体積割合が 1%増加すると、EC は約 0.04mS/cm 減少する傾向が確認できた。
3. 加振 15 秒後における下部の粗骨材質量の推定値と実測値の相対誤差の平均は 10%となり、EC 変化量から加振後の粗骨材残存率を推定することができる。
4. 加振による EC 変化量から粗骨材残存率の変化割合を推定し、粗骨材残存率が 30%変化するまでに何秒間の加振を要したかを確かめることで、材料分離抵抗性を定量的に評価することができる。

参考文献

- 1) 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会 (358 委員会) 委員会報告書、コンクリート技術シリーズ、No.123、土木学会、pp.IV-88、2020.5
- 2) 片平博、古賀裕介：締固めを必要とする高流動コンクリートにおける粗骨材の沈下量評価試験方法に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、No.1、2021
- 3) 菱刈智也、小林孝一、高木雄介：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.1、2020
- 4) 高木雄介、菱刈智也、小林孝一：電気伝導率を用いた材料分離抵抗性評価手法の考案、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、No.1、2021
- 5) 山田勉、伊代田岳史：交流インピーダンス測定によるフレッシュコンクリートの均質性評価法の検討、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 21 巻、2021.10