

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の定量的な評価方法の提案

維持管理工学研究室 菱刈智也

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、一方、流動性を高められたコンクリートであるために、過剰な締固めによって材料分離を引き起こす可能性も懸念される。

そこで、材料分離抵抗性の評価方法を検討することを目的の1つとして、土木学会では「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）」が設立された。358委員会では、「粗骨材の沈下量評価試験」を基準試験として、既存の様々な試験方法の結果との比較を行い、材料分離抵抗性を評価するため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つの試験方法が提案された¹⁾。しかし、前者は洗い出しに手間と時間を要する点、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が課題である。

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より簡易でかつ定量的に評価する試験方法を提案するため、コンクリート中の電気伝導率（以下、EC）の加振に伴う変化を把握することで、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の評価として使えるのではないかと考えた。材料分離抵抗性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。

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。Series 1 の配合は、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。Series 2 の配合は、配合 40-55-1 をベースとし、Series 1 と同様に、W/C、s/a、SLF を変化させた。

2.2 EC 測定試験

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示している。測定容器は公称径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・下部の2箇所穴を開けた。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 の位置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、試験容器内に棒状パイプレータを挿入し、60 秒間振動締固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

表-1 使用材料

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

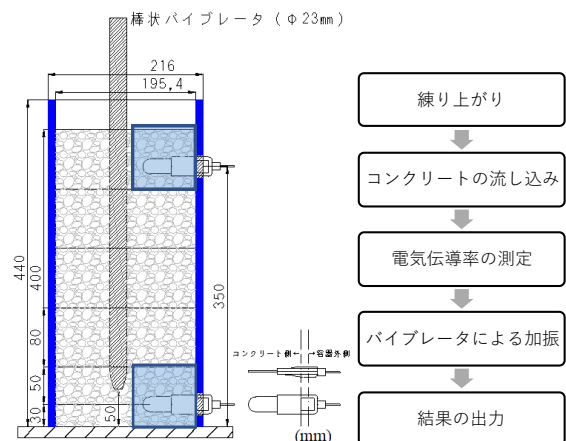


図-1 測定容器および測定フロー

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	kg/m ³				SP (C×%)	AE (C×%)	Air (%)	SLF (mm)			
					W	C	S	G							
Series 1	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	0.40	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							0.9	—	1.8	380			
	Base	40-55-2							1.1	—	2.4	380			
	SLF↑	40-55-3							1.3	—	1.3	425			
	+Air	40-55-4							1.1	0.005	5.3	445			
	++Air	40-55-5							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	1010	679	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	199	332	926	764	0.9	—	1.9	430					
W/C↑↑+Air	60-55-2						0.8	0.004	3.8	490					
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		1.7	586			
	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				

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 Series 1 の配合を用いて試験を行った結果について、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 変化量との関係について検討を行なう。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、容器下部の EC の変化は、加振に伴う粗骨材の移動による影響を強く受けていることがわかる。これより、下部の EC 変化量を用いることによって、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 委員会で考察された案りに基づく。

- 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。

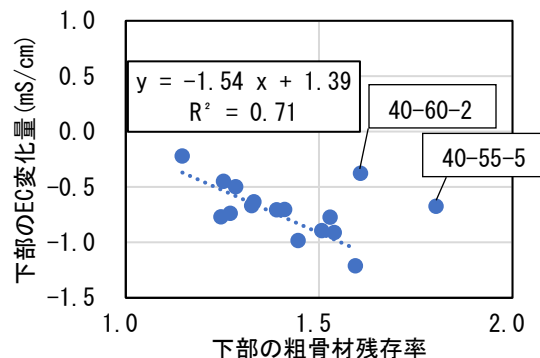


図-2 下部の粗骨材残存率と下部の EC 変化量との関係

- 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、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

予備試験で使用した配合は、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 0.04mS/cm 減少する。

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

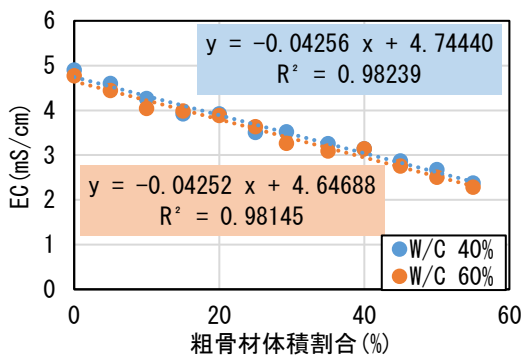


図-3 粗骨材体積割合と EC の関係 (予備試験)

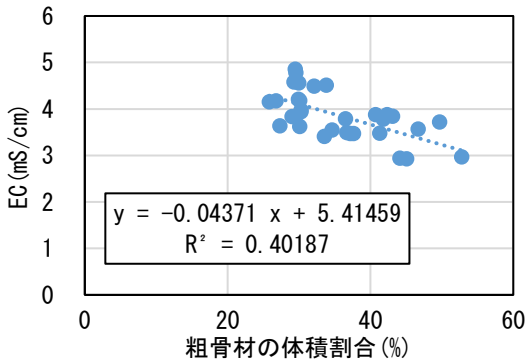


図-4 粗骨材体積割合と EC の関係 (Series 1)

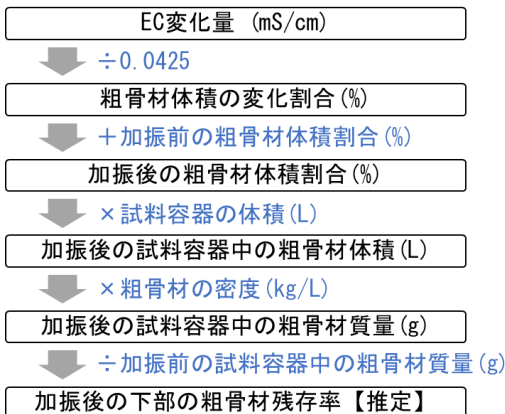


図-5 加振後の粗骨材残存率を推定する計算のフロー

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-3 に示す。表-3 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

表-3 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

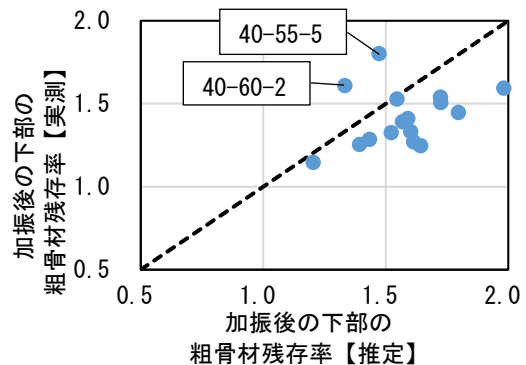


図-6 推定値と実測値の関係 (Series 1)

誤差の絶対値の平均は16%であった。

表-3と図-6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、Series 1の配合を用いたEC測定試験においては、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た。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-2のSeries 2の配合を用いた。

5.1 加振後の粗骨材残存率の推定値と実測値の関係

加振後の下部の粗骨材残存率の推定値と実測値の関

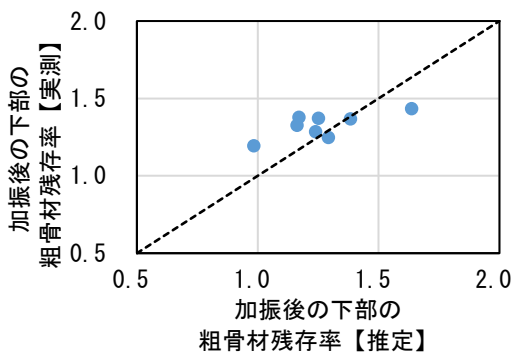


図-7 推定値と実測値の関係 (Series 2)

表-4 粗骨材残存率が○%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

係を図-7に示す。相対誤差の絶対値は、全8配合の平均で10%となり、高い精度で推定することができた。図-6と図-7を比較すると、加振時間15秒における結果(図-7)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。

5.2 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-4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、かつスランプフロー測定時に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。

6. 結論

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高い精度で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認することで、材料分離抵抗性を定量的に評価することができる。

7. 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、2020.5