

論文 電気伝導率を用いた材料分離抵抗性評価手法の考案

高木 雄介*1・菱刈 智也*2・小林 孝一*3

要旨：伝導率センサを用いて、加振中のフレッシュコンクリート内部での電気伝導率（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上下部での EC をパイプレータにて加振しながら計測し、EC の変化率が設定値に達した際の加振時間によって材料分離抵抗性の評価を行った。これらの評価値と目視判断、円筒貫入試験による試験結果との整合性が高く、本評価手法で材料分離抵抗性を加振中にリアルタイムで判断することが可能であると考え。

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、電気伝導率

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。構造物内の鉄筋量の増加や、作業員の減少に伴い、より省力化を目指したコンクリートの使用が増加している。さらには、土木分野において補助的な締固めのみを必要とする高流動コンクリートの使用も増加している。ただし、このような高い流動性を持つコンクリートは、製造に当たっての品質管理に高い技術力が必要となり、流動性の確保、さらには材料分離抵抗性の検討も必要となる。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¹⁾²⁾³⁾。しかし、締固めを必要としない高流動コンクリートを対象とした試験方法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。

本研究は、補助的な締固めのみを必要とする高流動コンクリートに対する試験として、小型で持ち運びが容易で、かつ少人数で評価できる手法の開発を目的とした。センサ周辺のコンクリート中の電気伝導率（以下、EC）の変化を把握することで、コンクリート内の材料分布状況、すなわち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、材料分離抵抗性をリアルタイムで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。

2. 試験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料、表-2 に本試験で使用した配合を示す。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、各種試験を行った。なお“配合 40-55-6”のみは AE 減水

剤を使用した低スランプの配合で、参考としてデータを採取した。“経時①”および“経時②”については、練り上がり時、60 分、120 分静置後に練り返しを行い、同様の試験を行った。

2.2 目視判断

スランプ試験後のコンクリートの状態を、主に以下の 3 項目に着目し、経験者 2 人が協議の上、4 段階（×、△、○、◎）で判断を行った。

- i) コンクリート試料外周に自由水が確認される
- ii) コンクリート試料の崩れ、または粘性が過大
- iii) コンクリート試料において粗骨材がくっきりと浮き出る

×：施工するには適さないコンクリート

△：上記項目の 2 つ、または 1 つ過度な状態が確認される

○：上記項目の 1 つが確認されるが、過度な状態ではない

◎：問題がないコンクリート

2.3 円筒貫入試験

各配合において、試料を練り混ぜ後、円筒貫入試験を建築学会の指針⁴⁾に基づいて行った。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、

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 FM:2.80
G	川砂利(揖斐川産)	表乾密度 2.61g/cm ³ FM:6.95 Gmax: 25mm
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

*1 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）

*2 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）

*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-2 配合表・性状試験結果

	配合名	W/C	s/a	kg/m ³				SP (C×%)	AE (C×%)	Air (%)	SLF (mm)	目視 試験	流入モルタル 値(mm)
				W	C	S	G						
W/C↓	37-55-1	0.37	0.55	165	441	926	764	1.2	—	2.2	450	△	14.3
W/C↓+Air	37-55-2							1.3	0.004	3.8	470	○	19.7
s/a↓	40-50-1	0.40	0.50	170	425	842	848	1.0	—	0.7	515	○	27.8
s/a↓+Air	40-50-2							0.8	0.004	5.7	415	○	19.2
SLF↓	40-55-1		0.55			926	764	0.9	—	1.8	380	×	5.2
Base	40-55-2							1.1	—	2.4	380	△	12.7
SLF↑	40-55-3							1.3	—	1.3	425	△	12.8
+Air	40-55-4							1.1	0.005	5.3	445	○	19.0
++Air	40-55-5							0.8	0.008	11.0	450	◎	16.0
SL↓	40-55-6							0.5	0.002	3.7	(SL:6cm)	—	0.7
最良	40-55-7							1.05	0.0055	4.4	415	◎	13.3
s/a↑	40-60-1		0.60			1010	679	1.2	—	1.6	420	○	17.7
s/a↑+Air	40-60-2							1.3	0.005	5.1	465	△	21.2
W/C↑	43-55-1	0.43	0.55	175	410	926	764	1.0	—	1.3	395	△	20.0
W/C↑+Air	43-55-2							1.2	0.004	3.6	575	×	31.2
W/C↑↑	60-55-1	0.60	199	332	926	764	0.9	—	1.9	490	×	46.5	
W/C↑↑+Air	60-55-2						0.8	0.004	3.8	430	×	56.7	
経時 0 分	経時① (40-55)	0.40	0.55	170	425	926	764	1.2	0.005	5.4	610	△	29.5
経時 60 分										5.6	440	○	21.3
経時 120 分										6.2	330	◎	16.2
経時 0 分	経時② (50-48)	0.50	0.48	175	350	835	905	1.0	0.002	1.1	615	×	44.0
経時 60 分										1.9	575	×	47.7
経時 120 分										2.8	465	△	40.3



図-1 円筒貫入試験状況

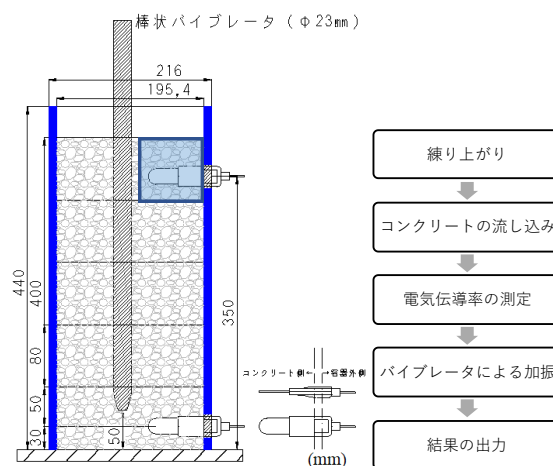


図-2 測定容器および測定フロー

10 秒静置した後、3 秒かけて引き抜く（図-1）。その後、貫入計内の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。一般的にモルタル流入量が30mm程度で分離限界とされており、20±10mmが良好であると判断した。

2.4 EC 測定試験

測定に用いる容器、寸法および概要を図-2に示す。EC 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、本実験では主に、ECを評価に用いた。また、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おり、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箇所に穴を開けた。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のところを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、試験容器内に底面から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

乾燥させた後、粗骨材質量の測定を行う。配合表から産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. 試験結果

3.1 セメントペーストと EC の関係

試験容器下部 80mm および下部センサを用いて、水セメント比 40% のセメントペーストに対し、粗・細骨材を何回かに分けて加え、その各段階で EC の計測を行った。体積当たりのセメントペースト割合（図中 V_p ）を減少させた際の EC を図-3 に示す。試験材料は表-1 の材料を用いた。

図のように、伝導体であるセメントペーストの体積が減少、すなわち体積中の骨材の量が増加することによって EC が減少する。これにより、コンクリート内の骨材の動きを EC で捉えることができると考え、分離の発生にともなう材料のばらつきを評価することとした。

また、本試験で使用した混和剤の添加による EC への

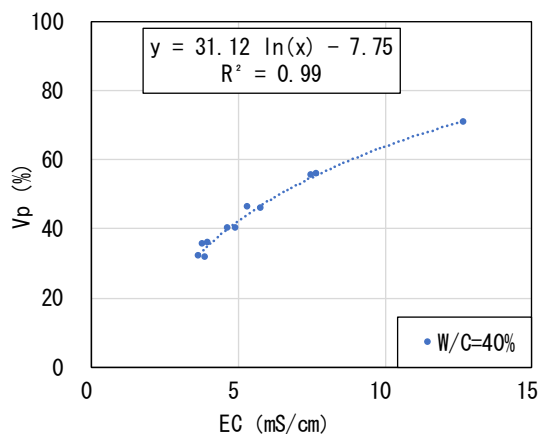


図-3 セメントペーストと EC の関係

影響は軽微であったため、実際のコンクリートに使用する程度の添加量であれば無視できるものとする。

3.2 時間経過による EC の変化

図-4 に注水後の経過時間と水分中の EC の変化を示す。粗骨材の沈降による伝導率の変化が起これないように、コンクリートを容器下部 80mm まで流し込み、注水から約 5 時間まで計測を行った。

縦軸である水分中の EC は、測定開始時を初期値とした EC 変化率と、本センサで同時に測定を行っている水分の変化率との比を示す。

水分中の EC の変化において経過時間 50 分から 250 分程度に、右上がりとなった後、右下がりのグラフとなる。三坂ら⁴⁾によると、電気抵抗の接水から約 2 時間までの減少は、 C_3S 等の水への反応溶解の影響であり、イオン濃度が高くなることで電気が流れやすくなる。そのため、EC が増加し、傾きが大きくなったものとする。その後は水和反応によって EC の低下を確認した。

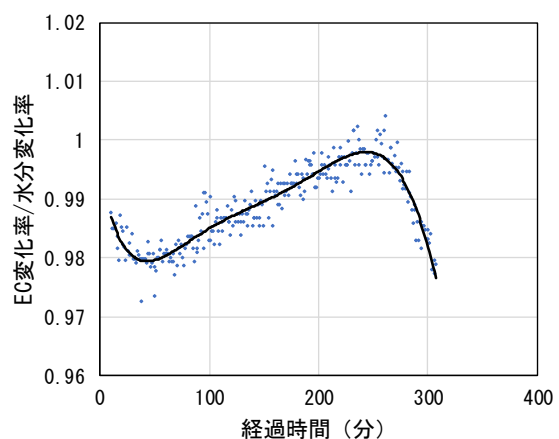


図-4 経過時間と水分中の EC 変化の関係

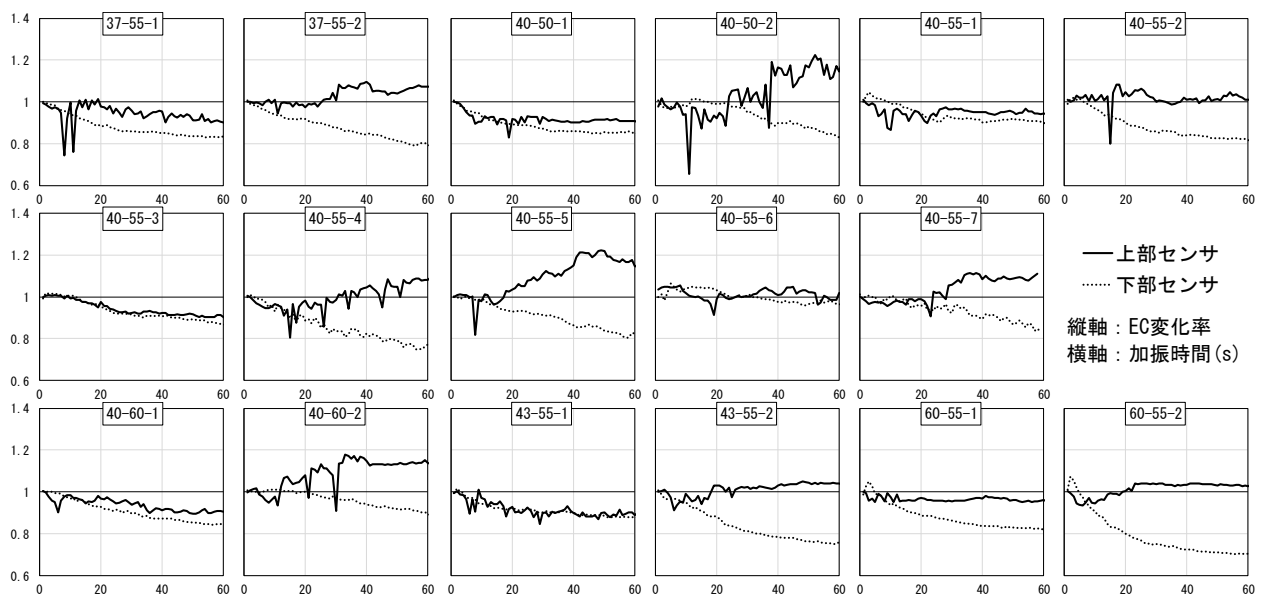
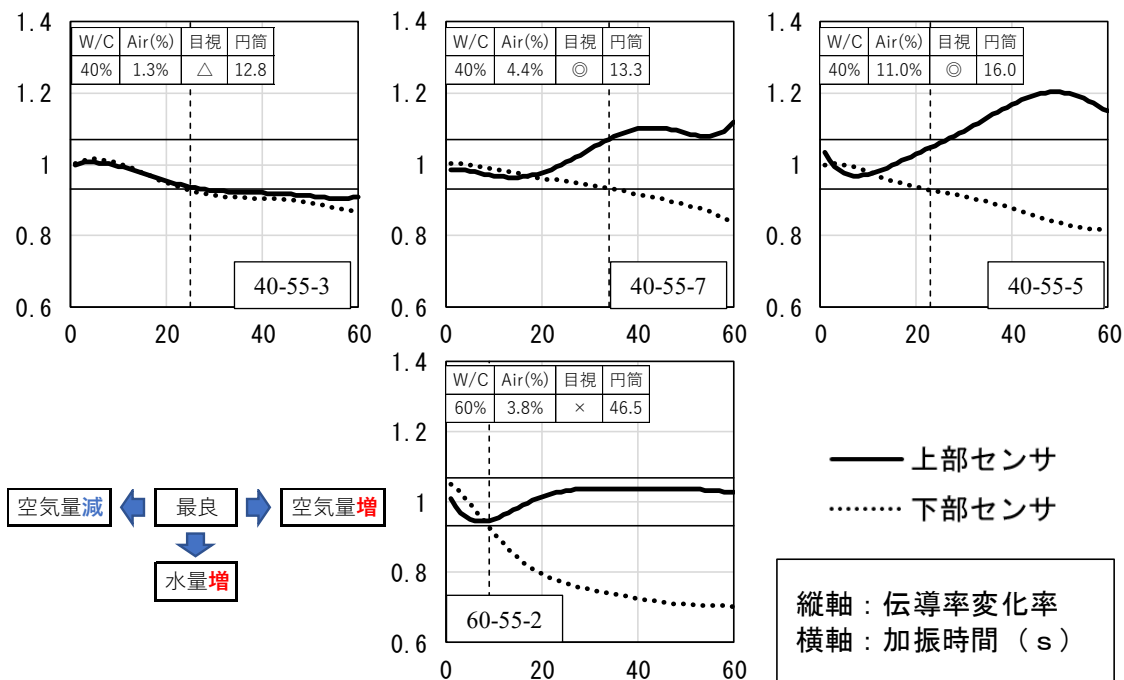


図-5 EC 測定結果



これらのことから、EC 測定時点での水和反応状況によって値が変化するため、以降の試験結果は初期値とした EC からの変化割合として表示。

3.3 各配合の EC 測定結果

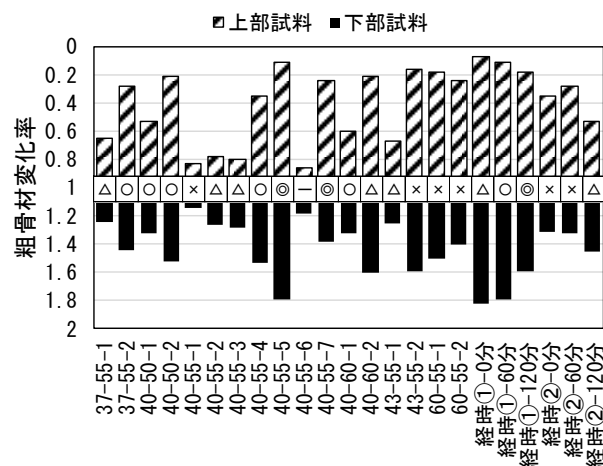
図-5 に各配合の EC 測定結果、図-6 に試験結果から 6 次関数の近似曲線を求め、グラフを平滑化した代表的な配合を示す。

各配合においてそれぞれ異なったグラフ形状が得られ、コンクリートの配合、性状によって EC の変化のしやすさが異なることが確認した。また、上部と下部のグラフの形状はそれぞれ異なる性質を表しており、次のように考えた。

i) 容器上部の EC 変化

容器上部の EC の変化は主に空気量に起因すると考えられる。例えば、図-6 に示す“40-55-3”，“40-55-7”，“40-55-5”の配合においては、材料の配分は同じであり、空気量をそれぞれ変化させている。空気量が増加するとともに上部の EC は、加振 10 秒辺りから急激に上昇を示す傾向にある。空気は電気を通しにくい材料のため、ペースト中に多量に存在すると EC は低下すると考えられるが、一方、試験時の加振の影響により、試料内の空気が下部から上部まで上昇することにより、上部の骨材が相対的に沈降しやすくなる。そのため、伝導体であるセメントペーストの体積が増加し EC が上昇を示した。

図-7 に EC 測定試験後の上、下部の試料を採取し、骨材を洗い出した結果を示す。上記のように空気量が最も多い“40-55-5”配合において、試験後の上部の粗骨材量は、配合値の 10%程度であり、下部は 180%に達する。同



様に、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ 程度の他の配合においても連行空気を導入しなかった配合と比較して、高い値となっており、AE 剤を用いて微細な空気を混入させた場合、長時間加振した際の粗骨材の移動に大きく寄与していることが分かる。

これらのことから上部の EC 変化率は空気量と関係があり、目安である $4.5 \pm 1.5\%$ の空気量を有す配合においては、最大 EC 変化率で 1.1~1.2 程度を示しており、1 に満たない配合においては、空気量が過少である可能性がある。

ii) 容器下部の EC 変化

一方で、容器下部の EC の変化は、試料の粘性に影響されるものと考えられる。

図-6 に示す単位水量を増加させた配合“60-55-2”と目

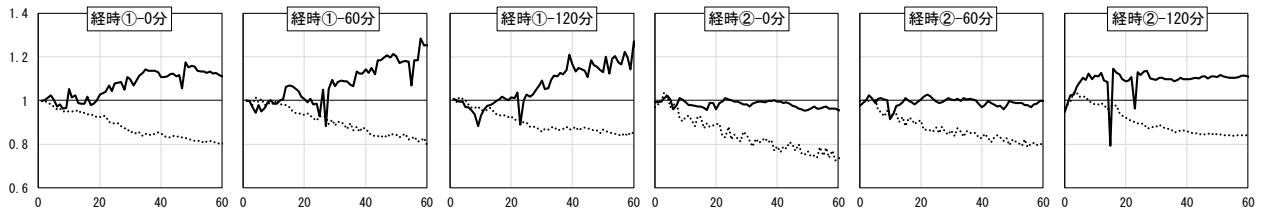


図-8 EC 測定結果—経時変化配合 (縦軸: EC 変化率 横軸: 加振時間 (s))

視で試料の性状が最も良好だと判断した“40-55-7”を比較すると、“60-55-2”では加振直後から急激な EC の低下が確認された。これは、単位水量を増加させたことによってペーストの粘性が低下し、粗骨材が沈降しやすい配合であるため、加振したことによって急激に骨材が沈降したものと考えられる。

図-7 の試験結果は試料の採取量が少ないためばらつきが大きいかとも考えられるが、これらの 2 配合においては下部の粗骨材変化率に大きな差はない。W/C が異なることによる EC の若干の差は考えられるが、急激な変化は骨材の沈降によるものだと考えた。他にも、最も SLF の大きい“43-55-2”においても、加振 20 秒地点で下部の EC 変化率が 0.9 を下回り、分離が生じていることを示している。一方で、s/a を増加させ、粘性を増した“40-60-2”では加振 60 秒後であっても、EC 変化率は 0.9 程度となっている。

パイプレータで締固める従来のコンクリート配合の“40-55-6”においては、上部、下部ともに EC の変化に、上記のような傾向を確認することができなかった。試験後の骨材変化量の観点からも、骨材が大きく沈降することではなく、EC を計測することは可能であるが、他の SLF で管理するコンクリートとは異なり、本試験の適用外だと判断した。

3.4 こわばりによる EC の変化

図-8 に“経時①”および“経時②”の配合における EC の変化について示す。コンクリートは時間が経過することによって、セメント粒子の凝集に伴い、コンクリートの流動性が一時的に低下するこわばりと称される現象が発生する。これによって表-2 の各配合の性状でも示したように、時間が経過することによって、スランプフローが低下する。

3.3 節に示したように、上部の EC は空気量に、下部は、粘性が影響している。表-2 の性状試験結果からも、練り上がり直後より 120 分経過した試料の方が、粘性が増加することによる若干の空気量の増加が確認された。そのため、上部の EC は増加傾向にあり、下部の EC は減少傾向にある。これは“経時①”および“経時②”どちらの配合でも確認することができた。また、下部の変化については、どちらの配合においても大きな差はなく、

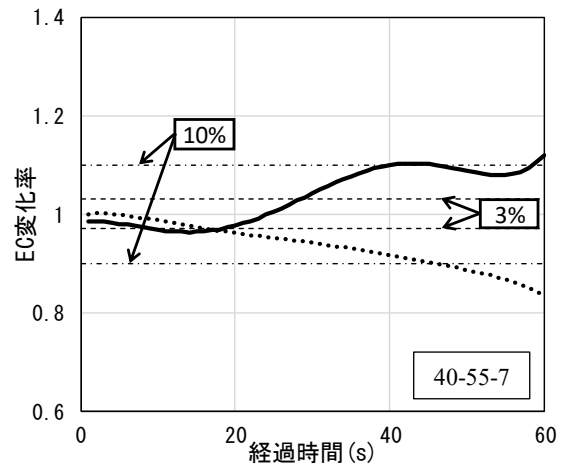


図-9 EC 変化点参考図

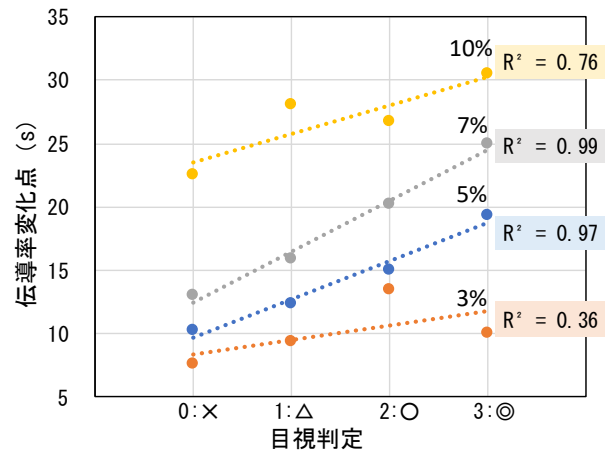


図-10 EC 変化点と目視判断の関係

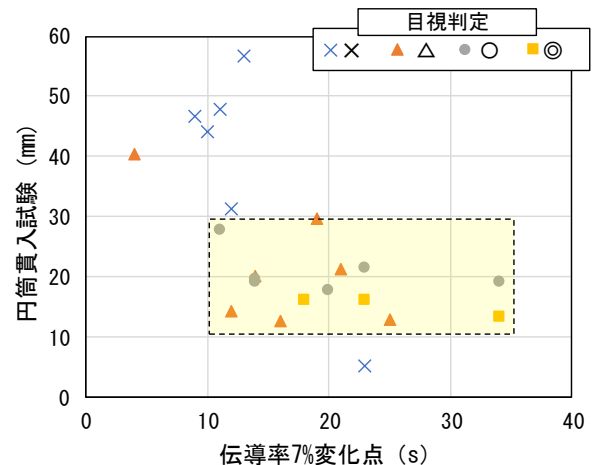


図-11 EC 変化点と円筒貫入試験との関係

表-3 EC 変化点と目視判断の目安

目視判断	×	△	○	◎
EC7% 変化点(s)	13	16	20	25

粘性以外の要素も影響を及ぼしている可能性もあり、さらなる検討が必要であると考ええる。

4. 試験結果の活用

3.3 節で示したように、材料分離が確認される配合においては、加振初期段階での EC の変化が激しい。そのため、EC の変化率が一定値に収束する時間について関係性を検討した。

図-9 に参考図として配合“40-55-7”における 3%変化点および 10%変化点を示す。上部または下部の EC 変化率が 3%, 5%, 7%, 10%の 4 つの設定値に達した際の経過時間を変化点とした。目視試験結果を×が 0 点, △1 点, ○2 点, ◎3 点と数値化し、変化点との関係を図-10 に示す。上記 4 つの設定値の中で目視判断結果と最も相関が高かった 7%の設定値を用いて検討することとした。

図-11 に EC7%変化点と円筒貫入試験の結果の関係を示すが、図中の記号はそれぞれ目視試験結果を表している。一般的な円筒貫入試験の分離限界とされる 30mm から 10mm 程度までの値 (20±10mm 程度) を良好であると判断し、その範囲を図中にハッチングして示した。円筒貫入試験と目視試験を比較すると、目視結果が良好な配合は、円筒貫入試験の結果がこの範囲に収まっていることが多く、定説通りとなった。

また、EC7%変化点は目視判断が良好になるにつれて大きな値を示す傾向にある。EC の変化点をそれぞれ平均すると表-3 となり、これらの値を用いて、材料分離の抵抗性を判断できると考えた。所定の性状を確保しながら、上記のように EC の変化率で管理することによって、材料分離抵抗性の判断材料になると考える。

しかし、現段階では限定的な材料を用いての検討である。本研究は多くのデータによって成り立つ判定基準であるため、今後とも多種多様の材料、配合を用いて検討を行うことで、より正確な判定方法となる。

5. 結論

本試験は、フレッシュコンクリート内部の電気伝導率

(EC) の変化を測定することにより、材料分離抵抗性を加振中にリアルタイムで定量的に評価する手法の考案を目的とした。筆者らの既往の研究⁵⁾よりも具体的な EC 測定値の活用方法が見いだされ、その結果以下のような知見を得られた。

1. コンクリートの注水からの経過時間によって伝導率が変化し、伝導率によって水和状況の確認することが可能であるといえる。
2. コンクリートの配合、性状によって EC の変化のしやすさが異なることが確認した。また、上部と下部のグラフ形状ではそれぞれ異なる性質を表しており、上部では主に空気量、下部では粘性が大きく寄与していることが確認された。
3. 練り上がり直後のコンクリートよりも 120 分経過した試料の方が、上部の EC が増加し、下部の EC が緩やかになる傾向にある。こわばりによって粘性が増加し、それによる空気量の増加の影響だと考えられる。
4. 伝導率 EC が、測定初期値から 7%変化した経過時間において、目視判断、円筒貫入試験との整合性が良好であり、これらの値が一つの指標になると考える。
5. 伝導率測定試験の判断基準として、EC 測定初期値からの変化率が 7%に達した際の経過時間が 25 秒以上であれば、非常に良好なコンクリートだと判断することができる。

参考文献

- 1) 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説, 日本建築学会, p.140, 1997.1
- 2) 日本工業標準調査会: 日本工業規格, JISA1159 コンクリートの J リングフロー試験方法, 2018.1
- 3) Testing fresh concrete part11 self-compacting concrete Sieve segregation test, EN 12350-11(2010)
- 4) 三坂岳広, 太田真帆, 伊代田岳史: まだ固まらないコンクリートの水和反応が直流四電極法で測定される電気抵抗に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017
- 5) 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