

# 小型電気伝導率計を用いたフレッシュコンクリートの材料分離抵抗性試験装置の開発

## Development of material separability evaluation device for fresh concrete using a small electric conductivity meter

高木 雄介\*

小林 孝一\*\*

Yusuke Takagi

Koichi Kobayashi

### 要 約

小型の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 をバイブ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られる。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. コンクリートと電気伝導率の関係
- § 3. 材料分離評価試験
- § 4. 実験結果
- § 5. 実現場に向けた試験装置の開発
- § 6. まとめ

### § 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。コンクリートの材料分離とは、局所的に骨材が集中することや、水分が移動し、コンクリートが不均一になることを示しており、強度や耐久性、水密性の低下につながり、コンクリートの品質低下となる大きな要因のひとつとなる。材料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<sup>1,2)</sup>。しかし、流動性の高い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。

\* 技術研究所土木技術グループ

\*\* 岐阜大学工学部教授

本研究は、補助的な締固め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. コンクリートと電気伝導率の関係

#### 2-1 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。本試験は、市販の土壤用水分センサを用いて実施した。この水分センサは土壤の体積含水率、EC、温度の測定が可能であるが、本実験では主に、EC をフレッシュコンクリートの評価に用いた。また、センサの計測可能領域は図中のハッチング部分で示しており、上方向に 5 cm、下方向に 3 cm の楕円筒領域を計測している。測定容器は公称径  $\phi 200$  mm の塩ビ管を用いて作成しており、センサでの計測は 1 秒毎に行っている。

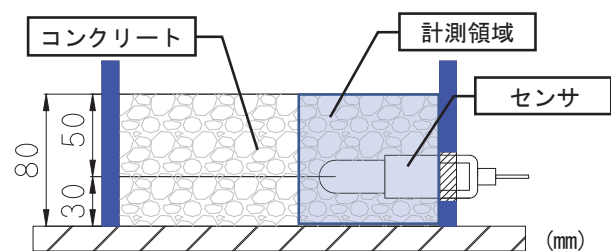


図-1 EC 測定容器

2-2 セメントとECの関係

一般的にECは溶液中のイオンと密接な関係にあるため、使用されているセメントが異なる場合について検討が必要であると考えられる。

そこで、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントB種を用い、水道水に対してセメントを添加し、十分に攪拌後、ECの計測を行った。

図-2に示す測定結果より、セメント種類を変化させると、ECは異なる値を示した。W/C100%以下の値については溶液の粘度が増加し、計測が十分に行えない状態にあったが、傾向として、高炉セメントB種では普通セメントと比較して2/3程度の伝導率となった。

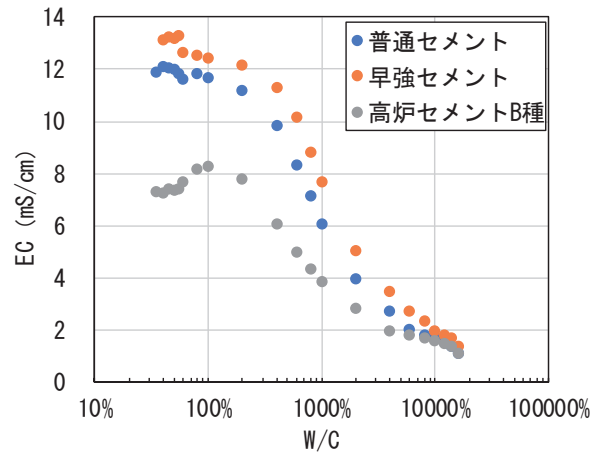


図-2 セメント種類による伝導率の差

2-3 コンクリートとECの関係

図-1に示す試験容器を用いて、水セメント比40%のセメントペーストに対し、粗・細骨材を数回に分けて添加し、各段階でのECの計測を行った。体積当たりのセメントペースト割合(Vp)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、材料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、図-2に示すように、一般的にコンクリートとして使用される範囲のW/Cでは、W/Cによる伝導率の差は小さい。図-3にはW/C40, 60%での試験結果を示しているが、大きな差は見られないため、W/CによるECの補正は不要であると考えられる。

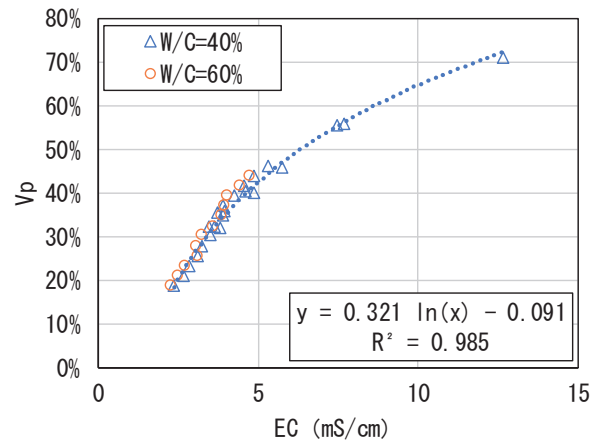


図-3 セメントペースト割合とECの関係

表-1 使用材料および物性

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 <sup>3</sup>
S	川砂(揖斐川産)	表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> FM:2.80
G	川砂利(揖斐川産)	表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> FM:6.95 Gmax: 25mm
SP	高性能 AE 減水剤 標準形(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

本試験で使用した混和剤の添加によるECへの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。

2-4 時間経過によるECの変化

W/C40%のコンクリートを粗骨材の沈降によるECの変化が起こらないように、コンクリートを高さ80mmまで流し込み、注水から約5時間まで計測を行った。図-4に注水後の経過時間と水分中のECの変化を示す。

水分中のECの変化とは、経過時間によって水合が進行し、導電体であるセメントペースト内の水が減少するため、同状態での評価ができない。そのため、本センサで同時に計測を行っている水分率の変化でECを除き、セメントペースト当たりの電気の流れやすさとした。

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。既報<sup>3,4)</sup>によると、電気抵抗の接水から約60~240分までの減少は、C<sub>3</sub>S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。その後は水合反応によってセメントペースト内の水

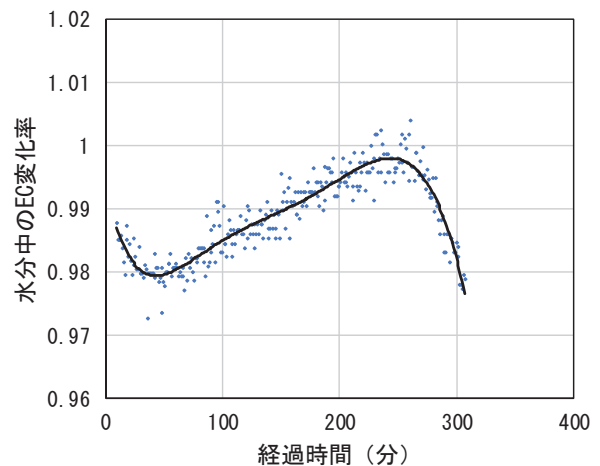


図-4 経過時間によるECの変化

表一 配合表・性状試験結果

	配合名	W/C	s/a	kg/m <sup>3</sup>				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	926	764	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							0.9	—	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
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			0.9	—	1.9	490	×	46.5
W/C↑↑+Air	60-55-2							0.8	0.004	3.8	430	×	56.7

が消費され、電気が流れにくくなったと推察される。

これらのことから、セメント種類や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す。

### § 3. 材料分離評価試験

#### 3-1 試験概要

##### (1) 使用材料

表一に本試験で使用した配合を示す。使用材料に関しては表一に示したものと同様の材料を使用した。

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。

##### (2) 目視判断試験

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

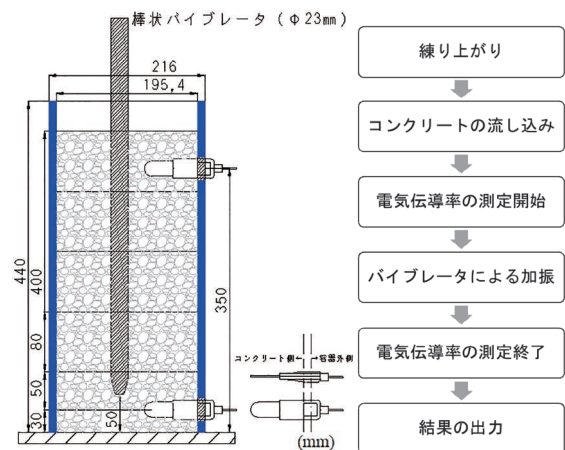
- ×：施工するには適さないコンクリート
- △：上記項目の2つ、または1つ過度な状態が確認される
- ：上記項目の1つが確認されるが、過度な状態ではない
- ◎：問題がないコンクリート

##### (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<sup>1)</sup>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



写真一 円筒貫入試験状況



図一 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（写真一）。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。

(4) 加振時 EC 変化率試験

測定に用いる容器、寸法および概要を図-5 に示す。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 箇所穴を空けた。

円筒容器にコンクリートを打ち込んだ後、φ23 mm、振動数 235-285 Hz の棒状バイブレータを、試験容器内に底面から 5 cm の高さまで挿入し、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。

§ 4. 実験結果

4-1 各配合の EC 測定結果

図-6 に各配合の EC 測定結果を示す。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。

(1) 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、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し、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 が上昇を示したと考えられる。

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。

(2) 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、加振によって急激に骨材が沈降したのと考えられる。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、大きな分離が生じていると考えられる。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。

バイブ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を計測しているが、骨材が大きく沈降することはなく、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。

4-2 試験結果の活用

前述したように、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 の変化が激しい傾向にある。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-7 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。また、図は試験結果から 6 次関数の近似曲線を求め、グラフを平滑化したものである。上部または下部の EC 変化率が 3%、5%、7%、10%

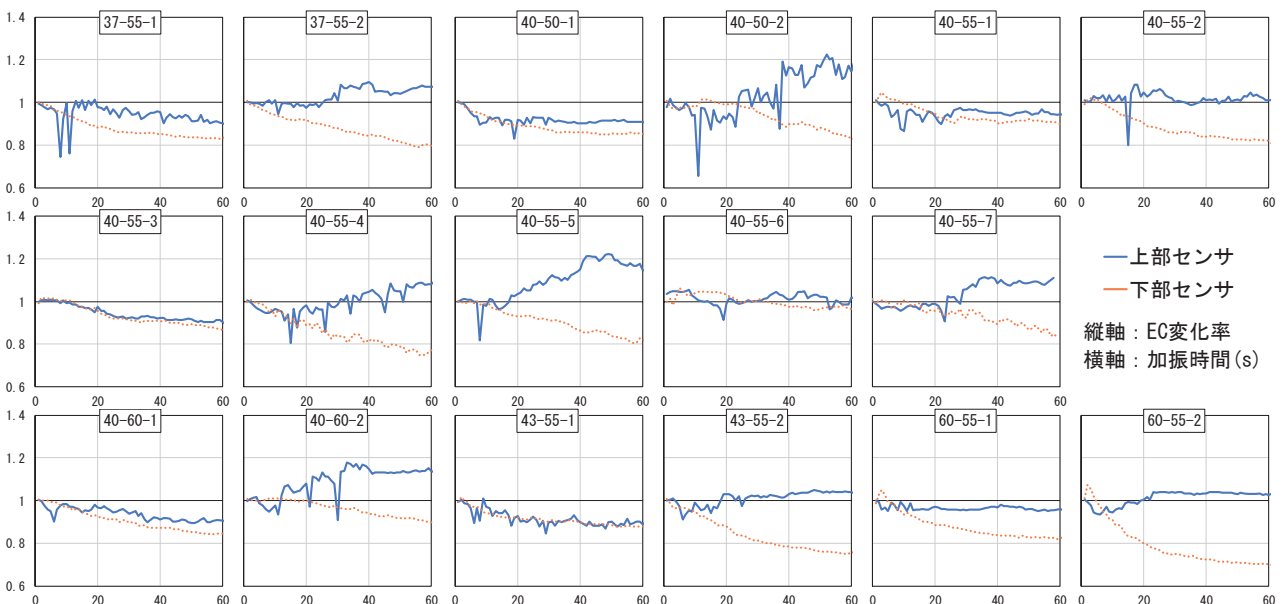
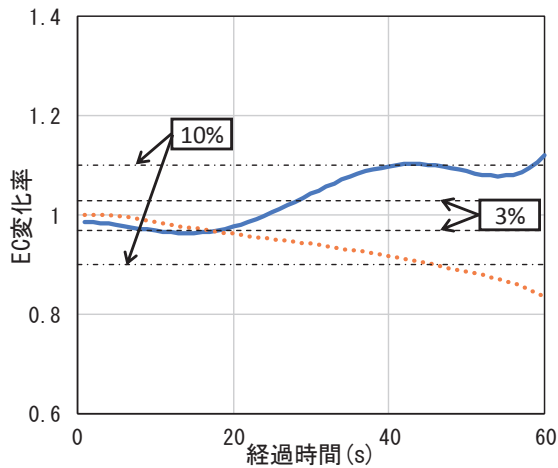
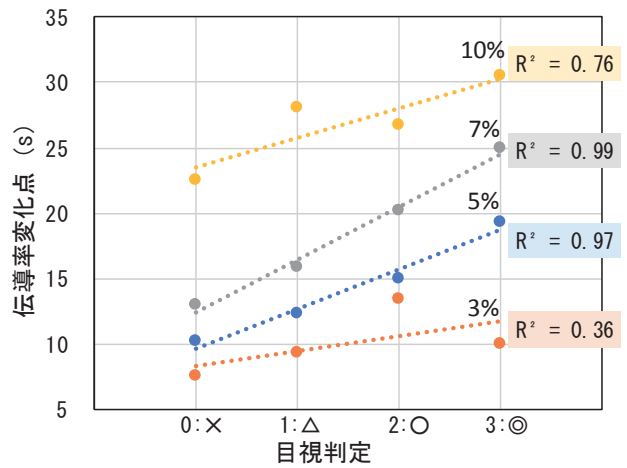


図-6 EC 測定結果



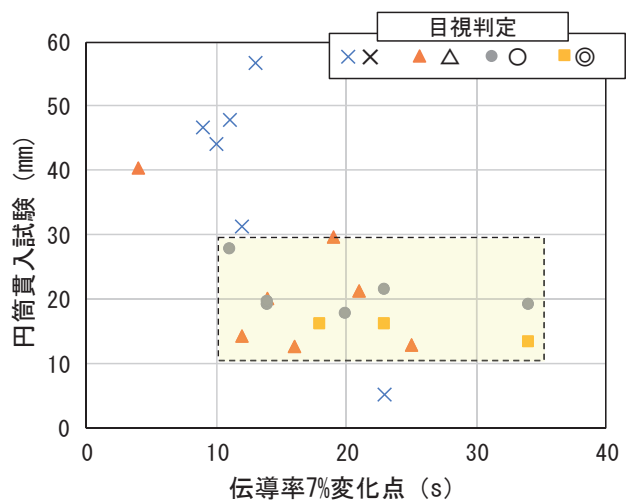
図一7 EC 変化点参考図



図一8 EC 変化点と目視判断の関係

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一8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。

図一9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。



図一9 EC 変化点と円筒貫入試験との関係

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一3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。

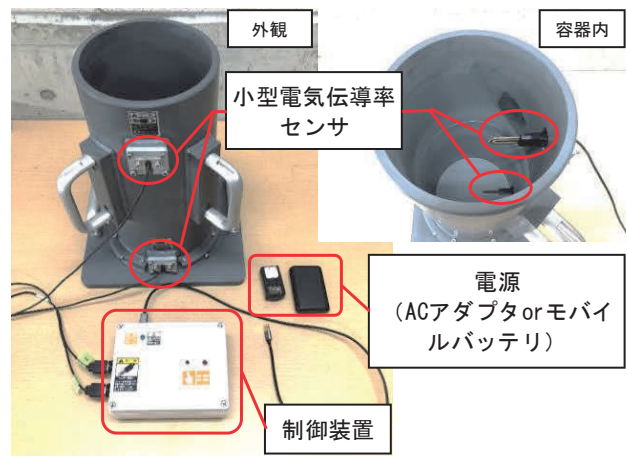
表一3 EC 変化点と目視判断の目安

目視判断	×	△	○	◎
EC7% 変化点(s)	13	16	20	25

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, 今後とも多種多様な材料, 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. 実現場に向けた試験装置の開発

上記の試験方法を打設現場でも容易に計測することが出来るように, 作業性を考慮した重量(5kg程度), サイズ(高さ450mm)とし, 現場内の必要な場所に持ち運び, 測定ができ, 市販のモバイルバッテリーによる計測も可能とした試験装置を開発した(写真一2, 3)。



写真一2 試験装置写真

また, 本試験装置では, 手元の携帯端末と制御装置部(写真一3内①)をWi-Fi接続することで, ワイヤレスでリアルタイムにデータ確認することを可能とした。前述した評価基準により, 計測したデータを瞬時に出力・評価することが可能である(図一10)。

§6. まとめ

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、材料分離抵抗性をリアルタイムで定量的に評価する手法の開発を目的とした。その結果、以下のような知見、成果が得られた。

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 複雑な作業を必要とせず, 作業員 1 名で材料投入から試験完了まで 2 分程度で結果を出力することが可能である手法, 試験装置を開発した。
5. 本試験装置では, 携帯端末と制御装置部を Wi-Fi 接続することで, 手元でリアルタイムにデータ確認を可能とした。

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) 村上 拓, 阿保 寿朗, 伊代田 岳史: コンクリートの新たな凝結管理手法の有効性に関する検討, 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 11 巻, pp. 87-92, 2011, 10
- 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) 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



写真-3 現場での試験風景

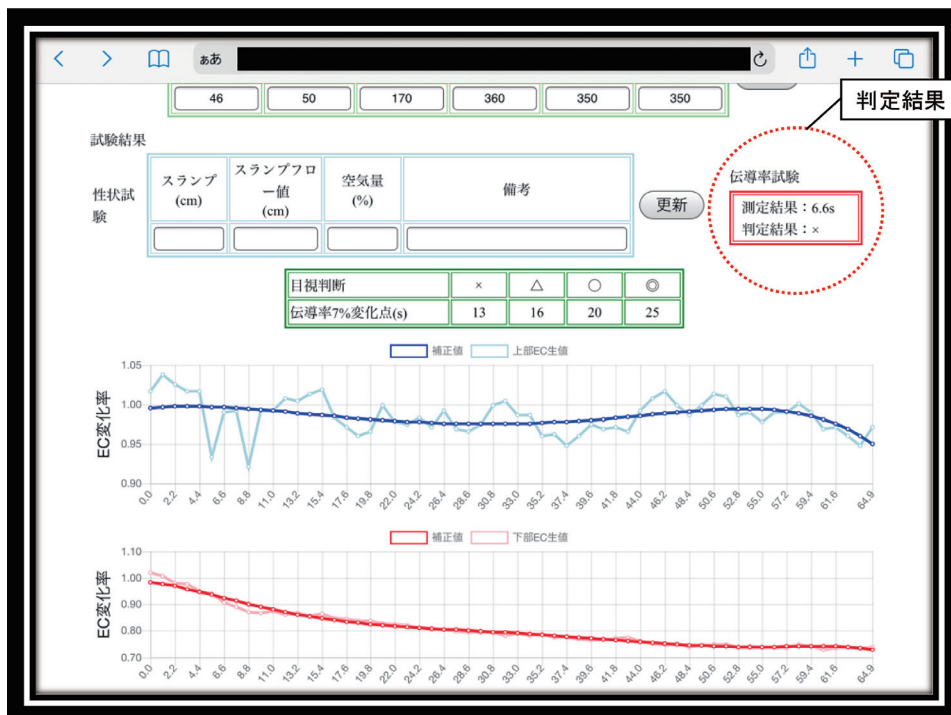


図-10 出力画面