

論文

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

山田 勉*1, 伊代田 岳史*2

Study on Uniformity Evaluation of Fresh Concrete by the AC Impedance Measurements

Tsutomu YAMADA*1 and Takeshi IYODA*2

要旨: コンクリート打込み時の充填管理に交流インピーダンス測定が利用されつつある。一方でコンクリート配合が異なるとインピーダンスも変化するが、その要因は明らかになっていない。そこで、様々な配合を用いてフレッシュコンクリートのインピーダンスに及ぼす要因を調査・分析した。その結果、単位体積あたりのセメントペースト体積、細骨材率の影響が大きいと考えられた。この考察に基づき、圧送または打込み時における骨材混合割合の計画配合からのずれをインピーダンスによってリアルタイムに推定する方法を検討した。

キーワード: フレッシュコンクリート, 交流, インピーダンス, 骨材混合割合, 均質性

1. はじめに

コンクリート打込み時の充填管理に交流インピーダンス測定を利用したシート状センサを開発し、山岳トンネルの覆工コンクリート天端部に適用している¹⁾。このシート状センサは、コンクリート、ブリーディング水および空気のインピーダンスが段階的に異なる値を示すことを利用して閾値を設定し、それぞれの識別を行っている。このようにコンクリートの充填管理を行う場合は、十分な精度を確保できる。しかし、コンクリートのインピーダンスは配合によって変化する。その要因として使用材料、セメント接水後の経過時間、温度、および配合等が考えられる。三坂ら²⁾は直流四電極法を用いてまだ固まらないセメントペーストの電気抵抗を測定し、セメント種類、セメント接水後の経過時間等の影響を調査した。その結果、電気抵抗はセメント種類によって異なるが接水から約2時間で最小値を示したことから、C3S等の水への反応溶解に影響を受け、Ca²⁺等のイオン濃度が高くなったと考察している。また、渋谷ら³⁾は導電率計を用いて練混ぜ直後からコンクリートの導電率を測定し、温度が高いほど導電率のピーク値が大きく、ピーク後の傾きが急になると報告している。

本研究では、ほとんど検討例がない配合の影響を調査することとした。調査対象は、セメントペースト・セメントミルク(以下、ペースト)、モルタル、

ペーストに粗骨材を混和した特殊配合、およびコンクリートとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)、細骨材は山砂(表乾密度2.56g/cm³, 吸水率2.48%)、粗骨材は砕石(表乾密度2.64g/cm³, 吸水率0.72%, 最大寸法20mm)、化学混和剤はリグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩、ポリカルボン酸系化合物から成るAE減水剤を用いた。なお、化学混和剤はコンクリートに使用した。これらの材料を20°Cの恒温室に保管し、常に一定温度に保持した。また、水は20°Cに調整された水道水を使用した。

表-1に計画配合と体積構成比を示す。ペーストは水セメント比を20~100,000%の範囲で変化させたPシリーズを設定した。モルタルはペースト体積一定のM1シリーズ(水セメント比40~70%)、ペースト体積変化のM2シリーズ(細骨材セメント質量比2~3, 水セメント比50%)とM3シリーズ(細骨材セメント質量比1~5, 水セメント比55%)の3種類の配合を設定した。ペーストに粗骨材を混和した特殊配合は、ペースト体積変化のPG1シリーズ(粗骨材セメント質量比1~3, 水セメント比40%)とPG2シリーズ(粗骨材セメント質量比1~3, 水セメント比55%)を設定した。コンクリートは、ペースト体積

*1 戸田建設(株) 土木技術統轄部土木技術推進部 部長

*2 芝浦工業大学工学部先進国際課程 教授

表-1 計画配合と体積構成比

記号	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)				体積構成比
				W	C	S	G	
P-1	20	-	0.0	387	1935	0	0	ベースト(W/C=20~100,000%) P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-6 P-7 P-8 P-9 P-10
P-2	30	-	0.0	486	1620	0	0	
P-3	40	-	0.0	558	1395	0	0	
P-4	50	-	0.0	612	1224	0	0	
P-5	60	-	0.0	654	1090	0	0	
P-6	70	-	0.0	689	984	0	0	
P-7	100	-	0.0	759	759	0	0	
P-8	1,000	-	0.0	969	97	0	0	
P-9	10,000	-	0.0	997	10	0	0	
P-10	100,000	-	0.0	1000	1	0	0	
M1-1	40	100.0	1.7	273	683	1195	0	モルタル(ペースト体積一定, W/C=40~70%) M1-1 M1-2 M1-3 M1-4
M1-2	50	100.0	2.0	299	598	1195	0	
M1-3	60	100.0	2.2	320	533	1195	0	
M1-4	70	100.0	2.5	336	480	1195	0	
M2-1	50	100.0	3.0	241	482	1440	0	モルタル(ペースト体積変化, S/C=2~3, W/C=50%) M2-1 M2-2 M2-3
M2-2	50	100.0	2.5	267	534	1331	0	
M2-3	50	100.0	2.0	299	598	1195	0	
M3-1	55	100.0	5.0	186	338	1695	0	モルタル(ペースト体積変化, S/C=1~5, W/C=55%) M3-1 M3-2 M3-3
M3-2	55	100.0	3.0	258	469	1405	0	
M3-3	55	100.0	1.0	418	760	758	0	
PG1-1	40	0.0	0.0	206	515	0	1544	ベースト+粗骨材(ペースト体積変化, G/C=1~3, W/C=40%) PG1-1 PG1-2 PG1-3
PG1-2	40	0.0	0.0	259	648	0	1296	
PG1-3	40	0.0	0.0	349	873	0	874	
PG2-1	55	0.0	0.0	263	478	0	1434	ベースト+粗骨材(ペースト体積変化, G/C=1~3, W/C=55%) PG2-1 PG2-2 PG2-3
PG2-2	55	0.0	0.0	324	589	0	1177	
PG2-3	55	0.0	0.0	422	767	0	766	
C1-1	58	33.6	3.1	126	217	663	1354	コンクリート(ペースト体積変化, s/a=33.6~72.1%, W/C=58%) C1-1 C1-2 C1-3 C1-4 C1-5
C1-2	58	41.5	3.1	148	255	778	1130	
C1-3	58	50.6	3.1	170	293	896	903	
C1-4	58	60.7	3.1	192	331	1014	676	
C1-5	58	72.1	3.1	214	369	1129	451	
C2-1	55	30.0	1.6	175	318	522	1254	コンクリート(ペースト体積一定, s/a=30~70%, W/C=55%) C2-1 C2-2 C2-3 C2-4 C2-5
C2-2	55	40.0	2.2	175	318	696	1074	
C2-3	55	50.0	2.7	175	318	870	895	
C2-4	55	60.0	3.3	175	318	1044	715	
C2-5	55	70.0	3.8	175	318	1216	536	
C3-1	50	47.6	2.2	185	370	796	903	C3-1

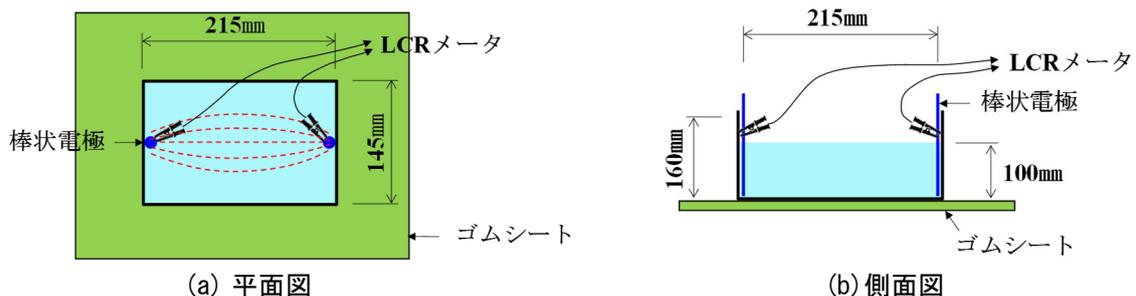


図-1 実験概要

変化の C1 シリーズ (水セメント比 58%), ペースト体積一定の C2 シリーズ (水セメント比 55%), 水中コンクリート配合の C3 シリーズの 3 種類の配合を設定した。

2.2 実験方法

図-1 に実験概要を示す。絶縁用のゴムシート上にプラスチック製容器 (幅 145mm×215mm, 高さ 160mm) を置き, 容器の短辺中央, 鉛直方向に棒状電極 (SUS304, φ3.0mm) を各 1 本配置した。各試料の投入深さは 100mm で統一した。各配合を練り混ぜ, 上記容器に投入後, 木槌で適度に叩きを行って静置し, 接水から 15 分後に LCR メータ (HIOKI 製, IM3536, 基本確度±0.05% rdg.) を用いて, 両電極間に交流電圧を印可しインピーダンスを測定した。

3. 実験結果

3.1 測定周波数の影響

物質のインピーダンスは測定周波数によって変化する。交流インピーダンス法による比抵抗測定の研究例においては, 電解質溶液と電極の間に生じる分極に起因して周波数が低いほどインピーダンス, 位

相差が大きくなることや位相差が小さいほど理論値に近い値を示すこと等から, 位相差ができる限り小さい周波数で測定することが重要とされている⁴⁾。そのため, 本研究では全ての試料に対し, 周波数を 5Hz~1MHz の範囲で変化させながらインピーダンスと位相角を測定した。なお, 測定信号レベルは 5Vrms とした。

インピーダンスと位相角の測定例として, P シリーズ, M2 シリーズ, C2 シリーズの水セメント比 50~55% の各 1 配合について, インピーダンスと位相角の測定結果をそれぞれ図-2, 図-3 に示す。インピーダンスは周波数 1kHz 未満で比較的变化が大きいが, それより高周波側では変化が小さい。位相角は 10kHz~100kHz 付近で 0deg になっている。そこで, 以降の実験結果は, 周波数 10kHz のときのインピーダンスを用いて整理することとした。なお, 測定値の変動係数は, C1 シリーズのペースト体積が小さい配合を除けば 5.6~7.4% であった (C1-1 は 17.8%)。

3.2 水セメント比の影響

水セメント比のインピーダンスへの影響を調査するために, 水セメント比を変数とした P, M1 シリー

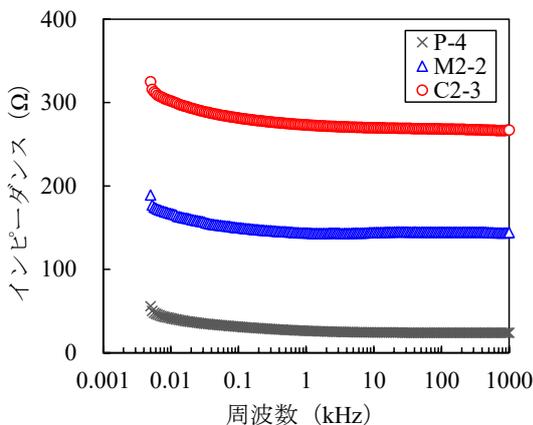


図-2 周波数とインピーダンスの関係

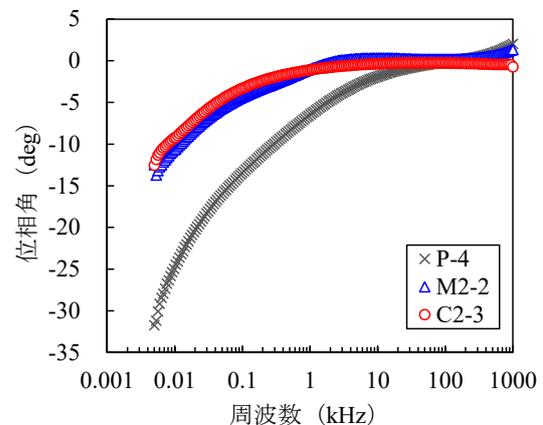


図-3 周波数と位相角の関係

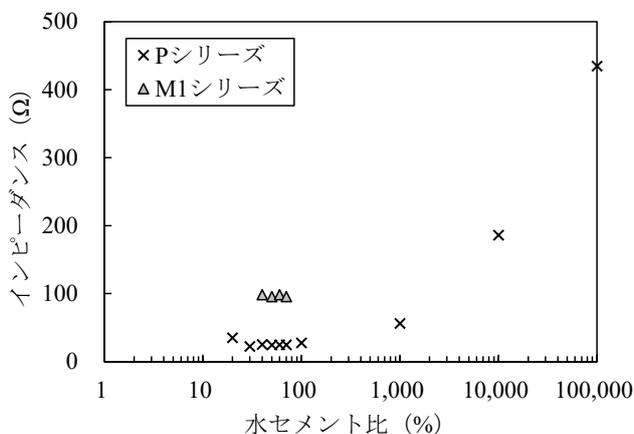


図-4 水セメント比とインピーダンスの関係 (P, M1 シリーズ)

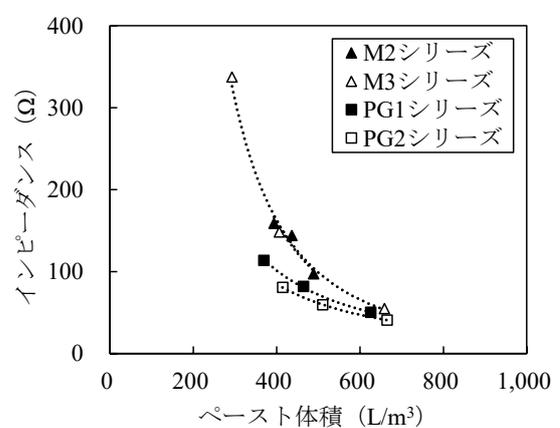


図-5 ペースト体積とインピーダンスの関係 (M2, M3, PG1, PG2 シリーズ)

ズのインピーダンスを比較した。それぞれのシリーズでペースト体積は一定である。図-4 に水セメント比とインピーダンスの関係を示す。P シリーズは水セメント比 100%未満でインピーダンスが一定となった。また、M1 シリーズにおいてもインピーダンスが一定となった。ペーストに骨材が混和された状態でもペースト体積が一定であれば、P シリーズと同様に水セメント比が変化してもインピーダンスは変化しない。結果として、水セメント比および単位水量はインピーダンスと相関が弱いと考えられた。

3.3 ペースト体積の影響

ペースト体積のインピーダンスへの影響を調査するために、ペースト体積を変数（すなわち、骨材体積を変数）とした M2, M3, PG1, PG2 シリーズのインピーダンスを比較した。図-5 にペースト体積とインピーダンスの関係を示す。すべてのシリーズでペースト体積が増大するとインピーダンスが減少する負の相関が得られた。ペースト体積が小さいと相対的に電気絶縁性の骨材体積が大きく、多数の骨材粒子が密に分布しイオン泳動が阻害されるが、ペースト体積が大きいとイオン泳動は容易になると推定される。つまり、電気絶縁性の骨材の分布状況によってイオン泳動の容易さに差異が生じることで、インピーダンスが変化すると考えられた。なお、最もインピーダンスが変化した M3 シリーズでは、ペースト体積が小さいほど空気量が大きく (0.6~13.2%)、インピーダンスの相対差を増大させた可能性がある。

また、細骨材を混和した M2, M3 シリーズと粗骨材を混和した PG1, PG2 シリーズを比較すると、ペースト体積が同じ（すなわち、骨材体積も同じ）にもかかわらず M2, M3 シリーズのインピーダンスがより大きくなった。つまり、骨材体積ではなく、細骨材と粗骨材の違いがインピーダンスに影響を及ぼすことになる。細骨材と粗骨材の両方を混和するコンクリートでは、細骨材率がインピーダンスに影響を及ぼすと考えられた。

3.4 細骨材率の影響

細骨材率のインピーダンスへの影響を調査するために、細骨材率を変数とした C1, C2 シリーズのインピーダンスを比較した。C1 シリーズはペースト体積変化、C2 シリーズはペースト体積一定の配合である。

図-6 にペースト体積とインピーダンスの関係を示す。C1 シリーズはペースト体積の増大とともにインピーダンスが減少し、M2, M3 シリーズ等と同様の傾向を示した。

図-7 に細骨材率とインピーダンスの関係を示す。C2 シリーズは、インピーダンス変化量が 52Ω と比

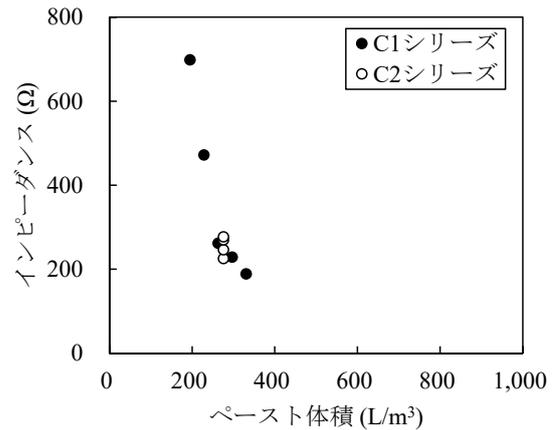


図-6 ペースト体積とインピーダンスの関係 (C1, C2 シリーズ)

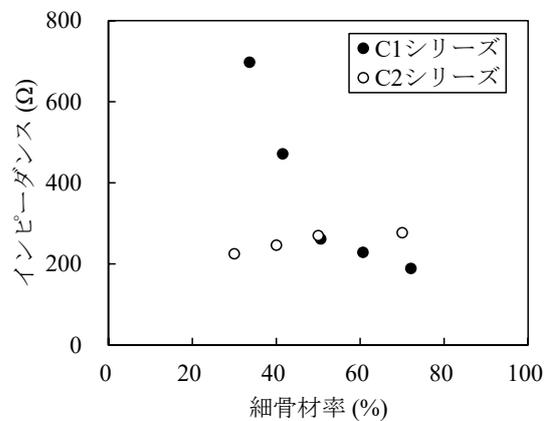


図-7 細骨材率とインピーダンスの関係 (C1, C2 シリーズ)

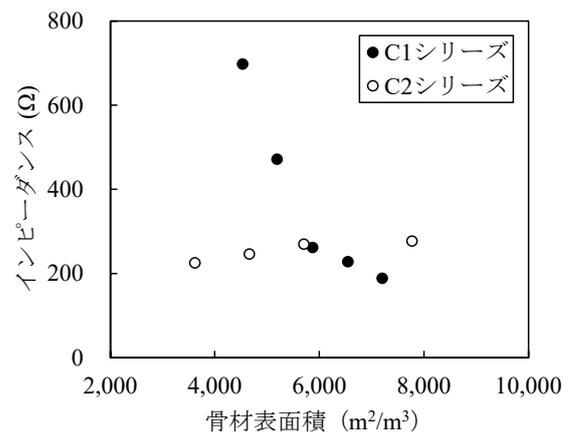


図-8 骨材表面積とインピーダンスの関係 (C1, C2 シリーズ)

較的小さいが、細骨材率の増大とともにインピーダンスが増大した。C1 シリーズと C2 シリーズは正負逆の相関が見られる。細骨材率だけの影響の C2 シリーズの変化に対し、ペースト体積と細骨材率双方の影響を含む C1 シリーズの変化は 10 倍程度大きい。これらのことから、ペースト体積と細骨材率は

互いに打ち消し合う方向にインピーダンスに影響を及ぼすが、細骨材率の影響度はペースト体積より小さいと考えられる。なお、インピーダンスが大きく変化した C1 シリーズでは、ペースト体積または細骨材率と空気量 (2.0~5.3%, C1-3 が最大) の相関性は認められず、この範囲の空気量がコンクリートのインピーダンスへ及ぼす影響は小さいと考えられた。

3.5 骨材表面積の影響

最後に、細骨材率がインピーダンスに及ぼす要因を検討する。図-5 において骨材体積が同じでも PG1, PG2 シリーズより M2, M3 シリーズのインピーダンスが大きいことから、細骨材と粗骨材の違いとして比表面積に着目した。比表面積の大きい細骨材が増えると単位体積あたりの骨材表面積の総計 (以下、骨材表面積) が増大することになる。図-8 に骨材表面積とインピーダンスの関係を示す。骨材表面積は、細骨材と粗骨材の粒形を球状と仮定し粒度分布からそれぞれの比表面積を算出し、単位量を乗じ合算して求めた。しかし、細骨材率とインピーダンスの関係に近く、新たな知見は得られない。

そこで、骨材表面との相互作用によってペースト、液相、またはイオンが拘束されると考え、図-9 に示すとおり骨材表面周囲にイオン泳動に寄与しない吸着ペースト膜 (厚さ α) の存在を仮定した。細骨材率が増大すると骨材表面積も増大し、イオン泳動に寄与しない吸着ペースト体積も増大するため、イオン泳動に有効なペースト体積 (以下、有効ペースト体積) が減じられ、インピーダンスが減少する傾向となる。つまり、ペースト体積から吸着ペースト膜の体積を差し引いたペースト体積がイオン泳動に有効と考えた。ここに、その体積を有効ペースト体積 V_{eff} とし、式(1)に示す。

$$V_{eff} = V_P - \alpha \cdot A_{S+G} \quad (1)$$

ただし、 V_{eff} : 有効ペースト体積 (L/m^3), V_P : ペースト体積 (L/m^3), α : 定数 (mm), A_{S+G} : 骨材表面積 (m^2/m^3)。

表-1 の配合のうち、骨材が混和された全ての配合について、図-10 にペースト体積とインピーダンスの関係 (両軸対数)、図-11 に有効ペースト体積とインピーダンスの関係 (両軸対数) を示す。式(1)の α は、水溶液中の微粒子表面に形成される nm オーダーの電気二重層⁵⁾から μm オーダーの水膜 (拘束水)⁶⁾までの厚さを想定して様々な値を代入し、最もばらつきが小さくなる値として $0.005mm (=5\mu m)$ を求めた。この値は、桜井⁶⁾により算出されたモルタル中の細骨材表面が拘束する水膜の厚さとほぼ一致した。水溶液中のイオンは水和により水分子を引き付けている⁷⁾ことから、イオンが水とともに骨材表面

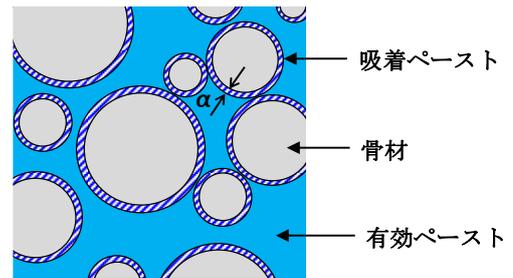


図-9 有効ペーストの概念

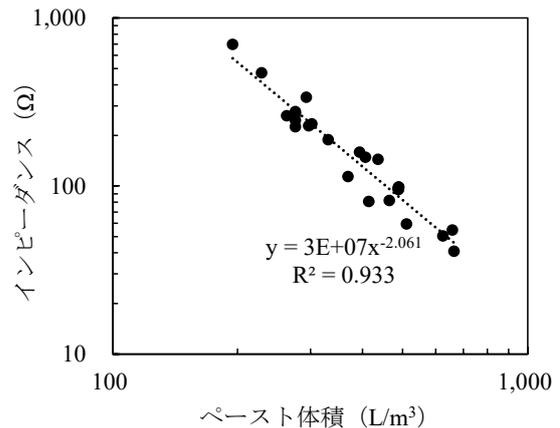


図-10 ペースト体積とインピーダンスの関係 (P シリーズを除く全配合)

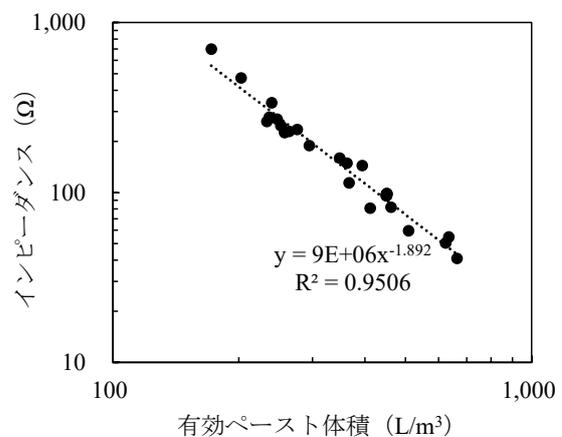


図-11 有効ペースト体積とインピーダンスの関係 (P シリーズを除く全配合)

に拘束されている可能性があると考えられた。図-10 と図-11 のとおり、ペースト体積と有効ペースト体積の双方ともにインピーダンスを関数で表現可能だが、有効ペースト体積を採用することで、決定係数は 0.933 から 0.951 へ高まり、より高い精度でインピーダンスの予測が可能と考えられた。

4. 均質性評価法の提案

図-12 に前述の有効ペースト体積とインピーダンスの関係を用いたコンクリートの均質性評価法のイメージを示す。表-1 の C1-3 を現場で使用する場合

を想定する。初めに、C1-3 の計画配合と骨材の粒度分布をもとにペースト体積と骨材表面積を算出し、式(1)を用いて有効ペースト体積を求める ($V_{eff}=233L/m^3$)。次に、C1-3 を圧送または打込み中に粗骨材体積が計画配合から 50%増加 (C1-1 に相当) または 50%減少 (C1-5 に相当) したときを材料分離の上方・下方管理限界と仮定し、式(1)を用いて有効ペースト体積を求める ($V_{eff}=295, 172L/m^3$)。これらの有効ペースト体積を図-12 の関数に代入してそれぞれのインピーダンス予測値を求め、中心値 315Ω, 上方管理限界値 559Ω, 下方管理限界値 202Ω と設定する。ただし、図-12 の関数は使用材料が異なる毎にキャリブレーションが必要である。圧送または打込み時、コンクリートのインピーダンスを常時測定し、中心値との差から計画の骨材混合割合からのずれ (材料分離程度) をリアルタイムに推定する。

このような新たな均質性評価法に基づき、管理限界に達する前に均質性を保つための施工方法の改善を行うことで、良質なコンクリート構造物を提供できると考える。また、圧送または打込み時のインピーダンスを測定し、維持管理に向けた初期品質データとして記録することが重要と考える。

5. まとめ

本研究では、ペースト、モルタル、ペーストに粗骨材を混和した特殊配合、およびコンクリートの様々な配合についてインピーダンスを測定し、以下の知見を得た。

- (1) コンクリートに用いられる水セメント比の範囲では、ペーストのインピーダンスは水セメント比または単位水量の影響を受けない。
- (2) モルタルおよびコンクリートのインピーダンスは、骨材の混和によって変化するペースト体積の変化に最も影響を受ける。
- (3) コンクリートのインピーダンスは細骨材率の影響を受ける。ただし、その影響度はペースト体積の変化より小さい。細骨材率がインピーダンスに影響を及ぼす要因として、骨材表面に吸着したペースト膜が影響を及ぼしている可能性がある。
- (4) ペースト体積から骨材表面に吸着したペースト膜の体積を差し引いた有効ペースト体積を用いてインピーダンスを精度よく予測できる可能性がある。

今後は、異なるセメントや骨材等を用いたときの有効ペースト体積とインピーダンスの関係の確認、コンクリート圧送または打込み時のインピーダンス測定方法、材料分離程度の表現方法等の検討を進め、均質性評価法を具現化する予定である。

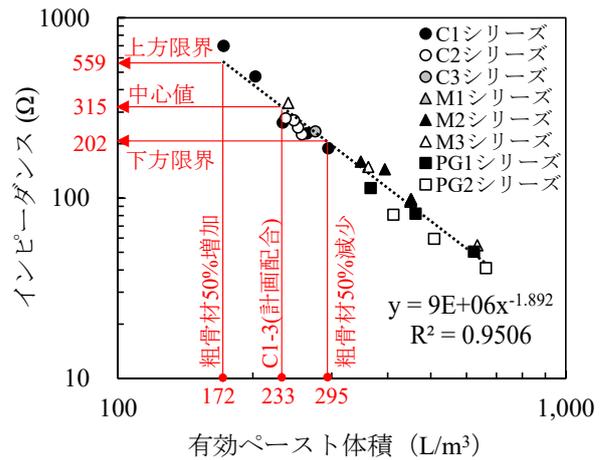


図-12 均質性評価法のイメージ

謝辞

本研究は、元芝浦工業大学八代うらら氏ならびに芝浦工業大学大学院坂井一貴氏と共同で実施した。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 山田勉, 海野雄士, 伊代田岳史: フレッシュコンクリートの電気的特性と振動伝播特性を利用した充填と締め固め振動の検知に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 935-940, 2020.
- 2) 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, pp. 505-510, 2017.
- 3) 渋谷俊貴, 三坂岳広, 槇島修, 伊代田岳史: 導電率を用いたコンクリートの若材齢の強度の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 399-404, 2018.
- 4) 畠田健太郎, 林為人, 後藤忠徳, 廣瀬丈洋, 谷川亘, 濱田洋平, 多田井修: 交流インピーダンス法を用いた比抵抗測定の精度および地質試料における有効性の検討実験, JAMSTEC Report of Research and Development, Volume 20, pp. 41-50, 2015.
- 5) 北隅優希: 電気二重層と反応拡散層の理論に基づく電気分析化学の新展開, 分析化学, Vol. 67, No. 7, pp. 387-395, 2018.
- 6) 桜井邦昭: 材料分離抵抗性と流動性を適切に考慮できるコンクリートの配合設計法の開発, 長岡技術科学大学博士論文, 2014.
- 7) 阿部文一: 水溶液中のイオンと電気伝導率, 化学と教育, 57 巻 12 号, pp. 562-565, 2009.