論文 定量的な材料分離判定に向けた電気抵抗センサの開発

Development of an electrical resistance sensor for quantitative material separation determination

○八尋 瑠奈^{*1}・山田 勉^{*2}・伊代田 岳史^{*3} Runa YAHIRO, Tsutomu YAMADA and Takeshi IYODA

要旨:コンクリートはその材料特性により,運搬や打込み,締固め時には材料分離を生じる恐れ がある.しかし,材料分離の定量的な評価方法はない.そこで,著者らはフレッシュコンクリー トのインピーダンスから材料分離を評価する手法を考案し,ペースト体積がインピーダンスに与 える影響が大きいことが明らかとなった.この手法を用いた分離,充填,締固めを評価するセン サを開発し,実構造物への適用可能性について検討を行った.その結果,打ち込み中の材料分離 の程度をリアルタイムに可視化することができた.

キーワード: インピーダンス, フレッシュコンクリート, 材料分離, 均質性評価

1. はじめに

従来、土木構造物に用いるコンクリートのスランプ は 8cm が標準であり流動性の高いコンクリートは使用 されることが少なかったが、2017年、流動性を高めた コンクリートの活用検討委員会により「流動性を高め た現場打コンクリートの活用に関するガイドライン」1) が策定され、このガイドラインを基本として鉄筋コン クリート構造物においてスランプ値の標準は 12cm に 変更となった. しかし流動性を高めたコンクリートを 製造する際には、単純に単位水量や化学混和剤を増加 させてスランプを高めると, 運搬や打込み等の作業中 に材料分離を生じる恐れがある.また,打込み時にはコ ンクリート投入時の鉄筋との衝突による材料分離や過 密配筋による充填不足が懸念されている. これまでに 振動センサ²⁾を用いた充填および, 締固めの評価がされ てきたが,材料分離の評価はスランプ試験における試 料形状の観察や、荷下ろし時にアジテータ車の排出シ ュートを流動する様子の目視など定性的な評価に留ま っており、定量的な評価がされていないのが現状であ る. 材料分離に関する既往の研究 34)ではフレッシュコ ンクリートのインピーダンスを計測することで材料分 離の程度を評価できる可能性があることが示唆されて いる. そこで本検討ではフレッシュコンクリートのイ ンピーダンスに及ぼす影響因子とその影響度を検討す ると共に、材料分離・充填・締固めを評価する均質性評 価センサの開発を試み、実構造物での適用可能性につ いて検討を行った.

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻
*2 戸田建設株式会社 土木技術統括本部
*3 芝浦工業大学 工学部先進国際課程(兼任土木工学科)

単位量 (kg/m3) W/C s/a (%) S/C (-) 記号 (%) G P-1 P-2 P-3 P-4 P-5 P-7 M1-1 1.7 M1-2 M1-3 2.2 M1-4 2.5 M2-1 M2-2 2.5 M2-3 M3-1 M3-2 M3-3 PG1-1 PG1-2 PG1-3 PG2-1 PG2-2 PG2-3 C1-1 33.6 3.1 41.5 C1-2 3.1 C1-3 50.6 3.1 C1-4 60.7 3.1 C1-5 72.1 3.1 C2-1 1.6 C2-2 C2-3 2.7 C2-4 3.3 3.8 C2-5

表-1 計画配合

2. インピーダンス測定による材料分離判定

47.6

2.1 試験概要

C3-1

本検討において作製した試料の計画配合を表-1 に示 す. 材料分離はコンクリートの構成材料の分布が不均

Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology Civil Engineering Technique Management Department, Toda Corp. Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology ーとなる現象を指すことから,計画配合からの変化と 捉え,様々なシリーズの配合を計画した.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) を使用した.ペースト,モルタル,ペーストに粗骨材を 混和した配合および,コンクリートを試作した.ペース トは水セメント比を 20%~100%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を一定 とした M1 シリーズ, ペースト体積を変化させ M2 シ リーズ(細骨材セメント質量比2~3,水セメント比50%) 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 種類を設定した.ペーストに粗骨材を混 和した配合は PG1 シリーズ(粗骨材セメント質量比1 ~3, 水セメント比 40%), PG2 シリーズ(粗骨材セメ ント質量比1~3、水セメント比55%)の2種類を設定 し、何れもペースト体積を変化させた. コンクリートは ペースト体積を変化させた Cl シリーズ,ペースト体積 を一定とした C2 シリーズ,水中コンクリート配合の C3 シリーズの3 種類を設定した.

2.2 試験方法

図-1 にインピーダンスの測定方法を示す. 絶縁用ゴムシート状にプラスティック製容器(幅 145mm× 215mm,高さ 160mm)を置き,棒状電極(φ3.0mm, SUS304)を容器の短辺中央,鉛直方向に試料を挟み込 むように各1本配置した.各試料の投入高さは100mm で統一した.セメント接水から15分後にLCRメータ を用いて,測定信号レベル 5Vms を印可し電極間のイ ンピーダンスを測定した.

2.3 試験結果と考察

(1) コンクリート内部の電気の流れ

コンクリートの構成材料のうち固相(骨材)は電気を 通さない絶縁材料であることから,液相(水またはペー スト)に電気が流れインピーダンスに影響を及ぼすと 考えられる.まず,水,ペーストのどちらがインピーダ ンスに影響を与えるかを検討した.図-2にPシリーズ, M1シリーズの単位水量とインピーダンスの関係を示 す.同一シリーズでインピーダンスを比較すると単位 水量によらずインピーダンスはほぼ一定となり,イン ピーダンスの変化は単位水量で説明することは難しい ことが分かる.水またはペーストの各シリーズにおい てペースト体積が一定でありインピーダンスも一定に なったこと踏まえるとフレッシュコンクリートを流れ る電流は水ではなくセメントも含んだペーストを媒体 として流れていると推察される.

(2) ペースト体積の影響

(1) よりコンクリートの構成材料のうちペースト部



0 200 400 600 800 1,000 ペースト体積 (1/m3)

図-3 ペースト体積とインピーダンスの関係

分に電気が流れていることが示唆されたことから、ペースト体積のインピーダンスへの影響度の検討を行った. 図-3 にペースト体積とインピーダンスの関係を示す.ペースト体積を変化させた Cl シリーズとペースト体積一定の C2 シリーズに注目すると、C2 シリーズのインピーダンスは同程度であったのに対し、Cl シリーズでは負の相関が確認された.また、全配合においても

ペースト体積とインピーダンスの関係には負の相関が 認められ,骨材の種類や量により多少ばらつきが生じ ており若干の影響を受けると考えられるが,ペースト 体積による影響が大きいことが示唆された.

(3) インピーダンスの予測

図-4 にペースト体積とインピーダンスの関係を両軸 対数で示す.両者の関係はペースト体積の増加に伴い インピーダンスが減少する直線関係が認められた.ペ ースト体積の増加つまり骨材の体積が減少するとイン ピーダンスが減少し,逆に骨材の体積が増加するとイ ンピーダンスが増加しており,構成材料の別によらず 一定の関係が得られた.したがって,計画配合のペース ト体積を変数とした関数によってインピーダンスの予 測が可能であり,測定値の予測値からのずれ幅より,材 料分離の程度を推定することができると示唆された.

3. 均質性評価に向けたセンサの開発

3.1 センサの仕様

2章の結果より、ペースト体積とインピーダンスの関 係から材料分離を検知することができる可能性が得ら れた.この関係を利用し,充填検知,締固め検知を含む コンクリートの均質性を評価するセンサの検討を行っ た. 充填と締固めの評価はできるが材料分離の評価は できないことや埋設するとセンサ部が断面欠損となる ことなど既存センサの問題点を考慮し、新たなセンサ は1つのセンサで材料分離,充填,締固めを評価する ことが可能であり、小さく薄い仕様を検討した.建設現 場では LCR メータのような精密測定機器を用いてイン ピーダンスを出力することは困難であるため、簡易的 に電圧に代替して計測し、無次元データに変換した電 圧デジタル信号を出力する.これにより、材料分離と充 填を検知する. また振動等のエネルギーを与えること で電圧を発生する圧電効果を利用し、同シートに圧電 素子を配置することで締固め振動を検知し振動累積時 間を出力する. センサの仕様を図-5 に示す. 板状電極 をシート表面、圧電帯を裏面に配置することでコンパ クトなセンサとした.

3.2 材料分離検知の性能

図-6 に電圧デジタル信号の測定方法を示す.図-1 と 同様の条件で棒状電極の代わりにセンサの電極を底部 から高さ 50 mm の側面に設置し,表-1 の C1 シリー ズの電圧デジタル信号を測定した。図-7 にペースト体 積と電圧デジタル信号の関係を示す.電圧デジタル信 号は2章で示した LCR メータで測定したインピーダン ス同様に右肩下がりの直線的な関係となった.したが ってインピーダンス測定と同様に,電圧デジタル信号 の測定により材料分離評価が可能であると考えられる.



図-4 ペースト体積とインピーダンスの関係 (両軸対数)



図-5 センサの仕様



図-7 ペースト体積と電圧デジタル信号の関係



図-8 均質性評価実証実験の概要

3.3 均質性評価の実現可能性

このセンサを用いて均質性評価検証実験を行った. その概要を図-8 に示す.実験には,小型の木製型枠(幅 200mm×200mm,高さ1,00mm)を使用し,型枠底部から 5 100mmと800mmの高さの側面にセンサを設置した. 表-1 の C1-3 の配合で作製した試料を型枠底部から 900mmの高さまで投入した後,棒状バイブレータを挿 入し,連続して1分間の振動を4回に分けて与え,電 圧デジタル信号および,振動累積時間を連続的に取得 した.その後,上部と下部からそれぞれ200mmの範囲 の試料を取り出し,空気量試験および,ウェットスクリ ーニング後に細骨材率とペースト体積の測定を実施し た.

図-9 に電圧デジタル信号および、振動累積時間の経 時変化を示す. 電極がペーストと接触している面積が 増加すると電圧デジタル信号は減少していく. 電圧デ ジタル信号が 350 程度のとき電極が完全にペーストに 覆われている状態であり、経過時間0~1分では下部セ ンサは 420 程度であることから、ほとんどペーストに 覆われているが充填しきれていないと考えられ、上下 部センサで豆板状態に近い電圧デジタル信号となって いると推察される。 締固めが開始される経過時間 4 分 までは上下部センサは同程度の電圧デジタル信号とな っており,充填状態に近いと考えられる.経過時間4分 以降は締固めが過度に繰り返され、上部センサは電圧 デジタル信号が徐々に低下し, 逆に下部センサは徐々 に上昇していることが分かる.これらのことから、上下 部の電圧デジタル信号の差は材料分離を示していると 考えられる.



図-9 電圧デジタル信号,振動累積時間の経時異変化

表-2 空気量試験とウェットスクリーニングの結果

種別	空気量 (%)	細骨材率 (%)	ペースト体積 (1/m ³)			
上部	6.5	72.8	442			
下部	2.5	39.1	249			

表-2 に空気量試験とウェットスクリーニングの結果 を示す.加振後の空気量,細骨材率,ペースト体積は下 部に比較し上部が大きくなっていることが分かる.上 部では加振によって空気泡やペーストが集まっている ことが目視によっても認められ,下部の空気やペース トが上部に移動したことが考えられる.経時変化のモ ニタリングによって材料分離の有無やその程度を推定 できることが示唆された.

4. 実構造物への適用性

4.1 試験概要

3章では、材料分離、充填、締固めを評価するセンサ を考案し、均質性評価の可能性について検討した.使用 したセンサを対象構造物や部位ごとに適した形状とし て、パッチ型センサ、シート状センサ⁵⁹⁰、点電極セン サを開発した.本章では、シート状センサを壁状鉄筋コ ンクリート構造物へ適用し、室内試験との整合性や均 質性評価の実現可能性、外観への影響等を確認する.シ ート状センサは11の検知部を備えた長尺のシート形状 であり、配線をシート基材の接着側へすべて集約した ため、多数の検知部を備えているのにも関わらず従来 のセンサに比べてセンサの設置作業が容易になるとい う利点考えられる.

表-3 に使用するコンクリートの計画配合を示す. セ メントは高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm³), 細骨材 は細砂 (S1, 表乾密度 2.65 g/cm³) と砂 (S2, 表乾密度 2.59 g/cm³), 粗骨材は砕石 (表乾密度 2.70 g/cm³, 最大 寸法 20mm)を用いた. 図-10 に壁状鉄筋コンクリート 構造物の側面図を示す. 打込み範囲下端, 延長 10m の 範囲の木製型枠内面にシート状センサを設置した.打 込み中は材料分離・充填検知部が出力する電圧デジタ ル信号と締固め検知部が出力する振動累積時間を連続 的に計測した.壁厚が小さい場合には型枠建込み後に 貼り付け可能であり,接合箇所から取り出し可能であ った.また断線は認められず,センサ取り付け後のコン クリート表面には取り付け痕は残るが美観への影響は 小さいと考えられる.

4.2 試験結果と考察

図-11 に全検知部の電圧デジタル信号の経時変化を 示す. コンクリートが検知部に接触する前は、いずれの 検知部でも600~700程度の電圧デジタル信号を示して いることが分かる.これは断線検知用のカーボンの電 圧デジタル信号である.また,コンクリートに接触する と200前後の値まで急激な低下が認められた.図-12に 電圧デジタル信号と振動累積時間の関係を示す.紙面 の関係上,一部の検知部の結果のみを掲載する.電圧デ ジタル信号の降下後,振動累積時間が上昇したことが わかる. つまり、コンクリートが打ち込まれた後、棒状 バイブレータよる加振が可視化されている. 多くの検 知部で振動付与前は電圧デジタル信号が300~500程度 を示している一方で、加振後は200程度まで低下した. 既往の文献 のより電気抵抗は電極面積に反比例するこ とが報告されており、 電圧デジタル信号が低下する過 程では電極にコンクリートが部分的に接触している状 態であり、電圧デジタル信号が 200 程度になったとき では電極が完全にコンクリートで満たされていること を表していると考えられる. つまり, 電圧デジタル信号 の変化は電極と接触程度や締固めによる粗骨材分布の 変化を示しており鉄筋の影響は小さいと考えられる. したがって、 電圧デジタル信号を経時的に計測するこ とによって実構造物におけるコンクリートの充填の様

子を可視化することができた. さらに, 検知部がコンク リートで満たされた後, 振動累積時間の上昇に連動し た電圧デジタル信号の変化が認められ, 振動を付与し たことによりコンクリート中の粗骨材分布が変動して いることが推察された.

このセンサを用いてレディーミクストコンクリート 工場で事前に電圧デジタル信号を測定し、配合と電圧 デジタル信号の関係を把握し、打込み時にリアルタイ ムに連続的に測定することで打込み開始時からの変化 から建設現場における品質モニタリングが実現可能で あると考えられる.

5. まとめ

 コンクリート内部を流れる電流はペースト体積の 影響を受け、ペースト体積とインピーダンスの関

表--3 計画配合

	記号	セメントの 種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m3)				
						W	С	S1	S2	G
	C7-1	BB	51.9	44.1	2.5	165	318	400	391	1034



図-12 電圧デジタル信号と振動累積時間の関係

係から材料分離の程度を評価することができるこ とが示唆された.

- (2) 1 つのセンサに電圧デジタル信号を検知する電極 と振動を検知する圧電素子を配置することにより 材料分離,充填,締固めを検知し、均質性を評価 可能なセンサを開発した.
- (3) 開発したセンサを実構造物への適用可能性を検討 し、電圧デジタル信号を経時的に計測することに

JSNDI

よって実構造物におけるコンクリートの充填の様 子を可視化することができた.

参考文献

- 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会: 流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関 するガイドライン,2017.3
- 金子稔,坂井孝,安田正雪,末岡英二:振動を利用 したコンクリート充填検知システムに関する基礎 実験,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.1, pp.1527-1532,2002
- 3) 小野 博宣, 櫻井 正章, 伊藤 和幸: フレッシュコ ンクリートの材料分離と比抵抗特性, コンクリー ト工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 677-682, 1995

- 4) 山田勉,海野雄士,伊代田岳史:フレッシュコンク リートの電気特性と振動伝播特性を利用した充填 と締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
- 5) 山田勉, 中林雅昭, 二宮伸二, 海野雄士, 桑田拓弥, 金澤彰裕: 超薄型センサを用いた覆エコンクリー ト天端部の面的な充填・締固め判定手法の開発, 土 木学会第72回年次学術講演会, CS14-026, pp.51-52, 2017
- 6) 二宮伸二,中林雅昭,山田勉,海野雄士,桑田拓弥, 金澤彰裕:覆エコンクリート天端部用超薄型シー ト状センサの実用化,土木学会第73回年次学術講 演会,VI-086, pp.171-172, 2018
- 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