

芝 浦 工 業 大 学
博 士 学 位 論 文

電气的特性に基づいたコンクリート施工時の
品質モニタリング方法の考案

令和4年3月

山田 勉

目 次

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	コンクリートの製造・運搬時の問題点と現状の対応	1
1.1.2	コンクリート打込み時の問題点と現状の対応	2
1.2	研究の目的	6
1.3	本論文の構成	7
	参考文献	10
2	既往の研究	12
2.1	はじめに	12
2.2	フレッシュコンクリートのモニタリングセンサ	13
2.2.1	電気抵抗センサ	13
2.2.2	電圧印可センサ	15
2.2.3	静電容量センサ	15
2.2.4	光学センサ	16
2.2.5	振動センサ	17
2.3	均質なコンクリートの電気的特性	18
2.4	不均質なコンクリートの電気的特性	19
2.5	コンクリートの電気的特性の変化	21
2.6	電極条件	23
2.6.1	電極配置と測定ケーブル接続方法の影響	23
2.6.2	電極配置と鉄筋の影響	26
2.7	まとめ	27
	参考文献	30
3	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	32
3.1	はじめに	32
3.2	測定条件	33
3.3	電流媒体の検討	36
3.3.1	水とペーストの比較	36
3.3.2	化学混和剤添加率の影響	37
3.4	骨材の混和による影響検討	38
3.4.1	ペーストとモルタルとコンクリートの比較	38
3.4.2	空気量の影響	38
3.4.3	ペースト体積の影響	39
3.4.4	細骨材率の影響	40
3.4.5	骨材表面積の影響	41
3.4.6	有効ペースト体積の立案と検証	42

3.5	均質性評価理論.....	45
3.6	まとめ	47
	参考文献	48
4	建設現場への適用を考慮した電極間隔と電極面積.....	49
4.1	はじめに	49
4.2	電極間隔の影響.....	50
4.3	電極面積の影響.....	52
4.4	電極間隔と電極面積の関係.....	56
4.5	まとめ	61
	参考文献	61
5	実構造物モニタリング手法の考案.....	62
5.1	はじめに	62
5.2	センサ開発の方向性.....	62
5.3	検知原理	64
5.3.1	材料分離・充填の検知原理.....	64
5.3.2	締固め振動の検知原理.....	65
5.4	プロトタイプの試作.....	66
5.4.1	材料分離検知の性能.....	67
5.4.2	充填検知の性能.....	69
5.4.3	締固め振動検知の性能.....	71
5.4.4	均質性評価の実現可能性.....	75
5.4.5	温度と経過時間の影響.....	78
5.5	適用部位に応じたセンサ開発.....	81
5.5.1	パッチ型センサ.....	81
5.5.2	シート状センサ.....	82
5.5.3	点電極センサ.....	85
5.6	まとめ	87
	参考文献	89
6	実構造物への適用性確認試験.....	90
6.1	はじめに	90
6.2	壁状鉄筋コンクリート構造物.....	90
6.3	覆工コンクリート天端部.....	93
6.4	まとめ	97
	参考文献	98
7	建設現場における品質モニタリングシステム.....	99
7.1	品質モニタリング手法.....	99
7.2	建設現場の概要.....	100

7.3	実施エシミュレーション.....	102
7.3.1	ペースト体積と電圧デジタル信号の関係の事前把握.....	102
7.3.2	運搬後の材料分離程度の評価.....	104
7.3.3	打込み時における材料分離兆候の監視.....	105
7.4	検証結果.....	109
	参考文献.....	109
8	結論.....	111
8.1	結論.....	111
8.2	今後の展開.....	113
	謝辞.....	114
	付録.....	116

1 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 コンクリートの製造・運搬時の問題点と現状の対応

従来、土木構造物に用いるコンクリートのスランプは8 cmが標準であった。これは、1967年（昭和42年）制定の土木学会コンクリート標準示方書で目安として示されたスランプ5～12.5 cmの平均値に由来する¹⁾。当時はコンクリート用化学混和剤が普及しておらず、スランプは水やセメントの単位量で調整せざるを得なかったため、流動性の低いコンクリートが流動性の高いコンクリートよりも品質に優れるとの認識があった。この考え方は、土木技術者の中で化学混和剤が普及した今日まで受け継がれてきたといえる。

1995年1月17日に阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震以降、各機関の耐震基準が改訂され²⁾、土木構造物ではせん断補強鉄筋や中間帯鉄筋等の量が増大した。また、コンクリートの高強度化に伴う断面の縮小や複雑な形状の構造物の増加等も相まって、コンクリートの充填不足等の品質不具合や現場打ちコンクリートの生産性の低下が懸念されていた。そこで、構造物に応じて適切なスランプを選定することを目的に、2007年に「施工性能に基づくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」³⁾やコンクリート標準示方書〔施工編〕において「打込みの最小スランプ」が提示された。しかしながら、発注者によってスランプ8 cmと定められた仕様を施工者が12 cmや15 cm等へ変更するのは容易ではなく、依然としてスランプ8 cmのコンクリートが使用されてきた。そのため、施工者がコンクリート製造者に対して「スランプの上限要求」なる不思議な慣習が後を絶たなかった⁴⁾。

そして近年のi-Constructionに代表される生産性向上への機運の高まりを受けて、ようやく現場打ちコンクリートについても変革の時が訪れた。2017年3月には、流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会によって「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」¹⁾（以下、ガイドラインという）が策定された。2017年4月には、国土交通省大臣官房技術調査課から各地方整備局等に対し、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は、スランプ値は12 cmとすることを標準とし、コンクリート標準示方書〔施工編〕の「最小スランプの目安」等に基づき変更が必要と認められる場合は設計変更の対象とする通知が発出された⁵⁾。これに従い、今後は従来よりも流動性の高いコンクリートの使用が進み、充填性や生産性が向上するものと期待される。

一方で、ガイドラインでは、流動性を高めたコンクリートを製造する際に想定される不適切な配合として、材料分離抵抗性を得るための検討を適切に行わず、単純にコンクリートの単位水量を増やしたり、化学混和剤の使用量を不適切に増加させたりしてスランプを増大させると、コンクリート中のセメントペーストの粘性が不足し、運搬や打込み等の作業中に材料分離が生じるおそれがある¹⁾としている。この問題に対してガイドラインでは、材料分離抵抗性に劣るものを見分ける手法として、スランプ試験中の試料形状の観察、ブリーディング試験、および簡易ブリーディング試験が紹介されている。また、スランプが5～15 cmの範囲のコンクリートを対象として、スランプ試験後の試料に木槌でスランプ板を叩くこ

とで振動を与え、コンクリート試料上面の円形縁の有無を確認する方法^{6),7)}も考案されている。しかしながら、いずれの試験方法も材料分離抵抗性を評価するものであり、材料分離の有無あるいはその程度を評価する方法ではない。また、コンクリートの荷卸し時にアジテータ車の排出シュートを流動する様子を目視観察して材料分離抵抗性あるいは材料分離の有無を評価する場合もあるが、経験に基づく定性的な評価であり、評価者の熟練度によって評価のばらつきは大きい。

1.1.2 コンクリート打込み時の問題点と現状の対応

一般に、鉄筋コンクリート構造物のコンクリート打込み時は、圧送ホースを鉄筋に当たらないように型枠内へ挿入し、吐出口からの自由落下高さを1.5m以下⁸⁾としている。ところが、1.1.1項で述べたように兵庫県南部地震以降、土木構造物では鉄筋量が増大し、圧送ホースの挿入さえ難しい場合がある。そのため、型枠内へコンクリートを投入する際、**写真-1.1**のように一時的に一部の鉄筋を片側に寄せて圧送ホースの挿入スペースを確保している。しかしながら、人が入れない下方では圧送ホースが十分に挿入できず、コンクリートが自由落下したときに鉄筋に衝突して材料分離を引き起こす場合がある。また、過密な鉄筋配置によりコンクリートの流動が阻害され、かぶり側にコンクリートが十分に行き渡らずに空洞や豆板が生じる場合がある。

さらに、型枠内でコンクリートが流動する際、材料分離が生じている懸念がある。鉄筋コンクリート構造物においては、打ち込んだコンクリートは型枠内で横移動させてはならない⁸⁾、または型枠内で分離が生じやすくなる横流しをできるだけ避け目的の位置に近づけて打ち込む⁹⁾としているが、土木・建築系施工管理者等へのアンケート結果によれば、コンクリート圧送ホース吐出口の移動距離はスランブ18cmのとき、0～5m（土木系施工管理者）または5～10m（建築系施工管理者）との回答が最も多かった¹⁰⁾。また、棒状バイブレータを用いた締固め時間の目安は一般には1箇所あたり5～15秒⁸⁾とされているが、次々に打ち込まれるコンクリートに対し適切な締固め時間を判断するのは難しく、熟練工の経験に頼るところが大きい。締固め不足は豆板の発生、過度な締固めは粗骨材の沈降等を引き起こす。型枠内へ打ち込まれたコンクリートは、その品質について目視による定性的な評価しかできず、仮に材料分離が生じていたとしても見過ごされる可能性がある。型枠の取外し後に目視で容易に見つけられる豆板等の品質不具合が発生しない限り事後の処置はほとんど行われない。

これらの鉄筋コンクリート構造物の施工に関する問題に対して一般的に行われる対策は、前述の**写真-1.1**の圧送ホース挿入口の設置、**写真-1.2**の棒状バイブレータにカラーテープを巻いて挿入深さを管理する方法、**写真-1.3**の型枠バイブレータの使用等である。**写真-1.4**に示す透明型枠を使用し目視による定性的な評価を容易にする工夫が実施される事例があるが、高コストとなることから限定的な採用になっている。また、コンクリートの充填・締固めを検知するセンサを鉄筋等に設置して打込み時にモニタリングする事例がある。充填を検知するセンサには、電極間の放電過程の変化を利用する方法¹¹⁾、ケーブル間の静電容

量の変化を利用する方法¹²⁾, およびダイオード端子間の光検出を利用する方法¹³⁾ 等がある. 充填および締固め双方を検知するセンサには, 圧電セラミックス製の振動デバイスを利用する方法¹⁴⁾ がある. しかしながら, ケーブル状のセンサを除きこれらのセンサは数 mm〜数 cm の大きさがあるため, 鉄筋コンクリート構造物では断面欠損となることや型枠に設置するとセンサとケーブルがコンクリート表面に露出するといった問題があった. いずれにせよ, 材料分離は評価できない.

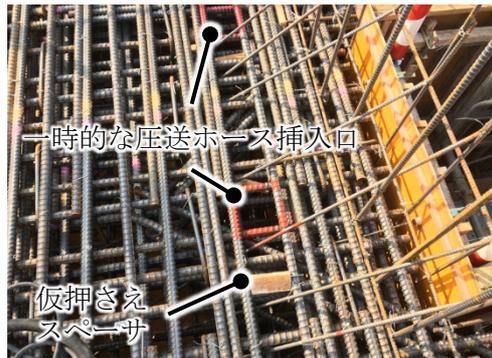


写真-1.1 圧送ホース挿入口

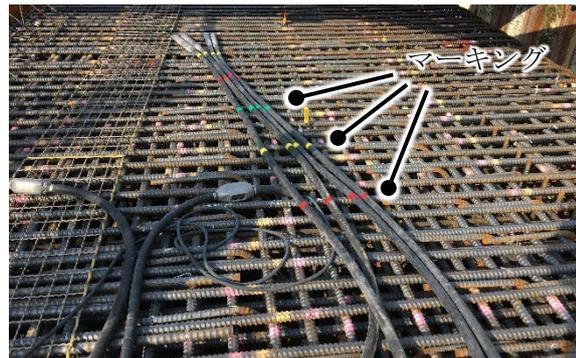


写真-1.2 棒状バイブレータへのマーキング



写真-1.3 型枠バイブレータの使用



写真-1.4 透明型枠

山岳トンネルの覆工コンクリートは, 図-1.1 の施工手順で, 掘削したトンネル坑内に鋼製支保工, 吹付けコンクリート, および防水シートを順次施工後, 図-1.2 のセントル (アーチ状移動式型枠) を所定の位置に設置し, 防水シートとセントル面板の間にコンクリートを打ち込んで構築する. 写真-1.5 に覆工コンクリート施工状況を示す.

側壁および肩部においては, セントルに設けられた写真-1.6 の検査窓を利用し, 写真-1.7 の側壁部打込み状況に示すように狭隘な施工条件であるものの鉄筋コンクリート構造物と同様に目視で状況を確認しながら打込みおよび締固めを行う. 一方, 天端部 (アーチ部) では, 検査窓を閉じて写真-1.8 に示す吹上げ口 (原則として既設側の 1 箇所のみを使用) から圧入するため, 打ち込まれるコンクリートの状態を目視確認できない中で, 最長で吹上げ口から妻型枠までの約 10 m を流動させるという特殊な施工となる.

このような天端部の施工条件では、第一に材料分離が懸念される。そのため、模擬型枠を用いた品質確認試験や品質向上対策の検討が行われた事例^{15),16)}、連続式RI（ラジオアイソトープ）法¹⁷⁾により打ち込まれるコンクリートの単位水量を全量測定した事例があるが、型枠内に打ち込まれたコンクリートの材料分離を評価する方法は存在しない。

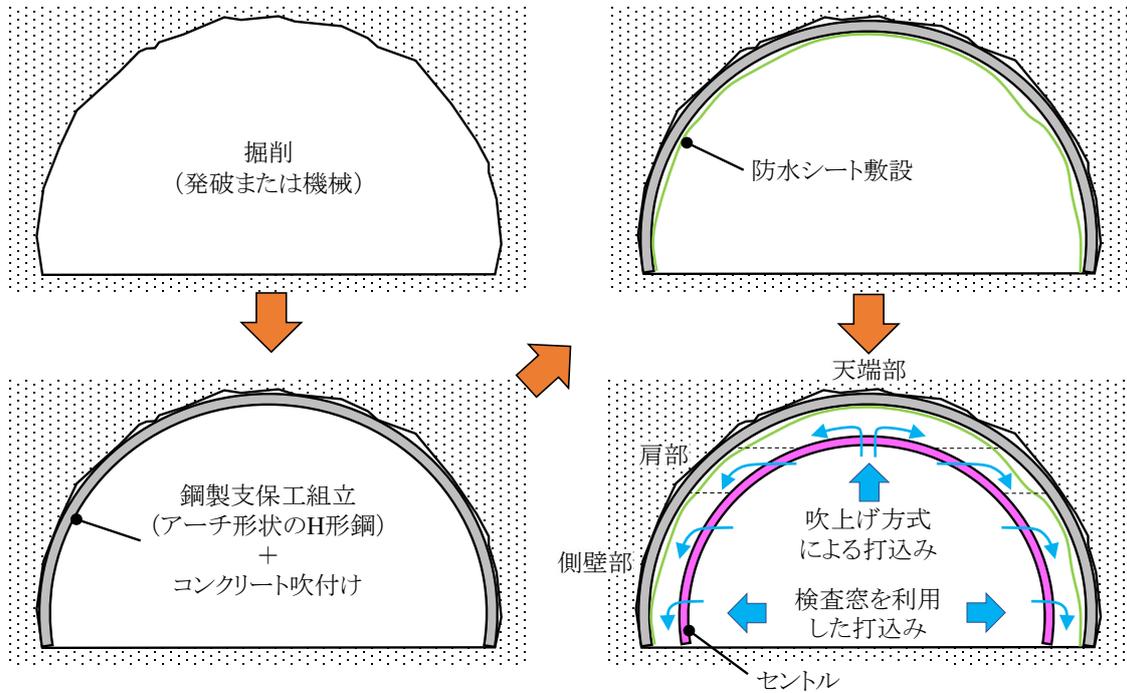


図-1.1 山岳トンネルの施工手順

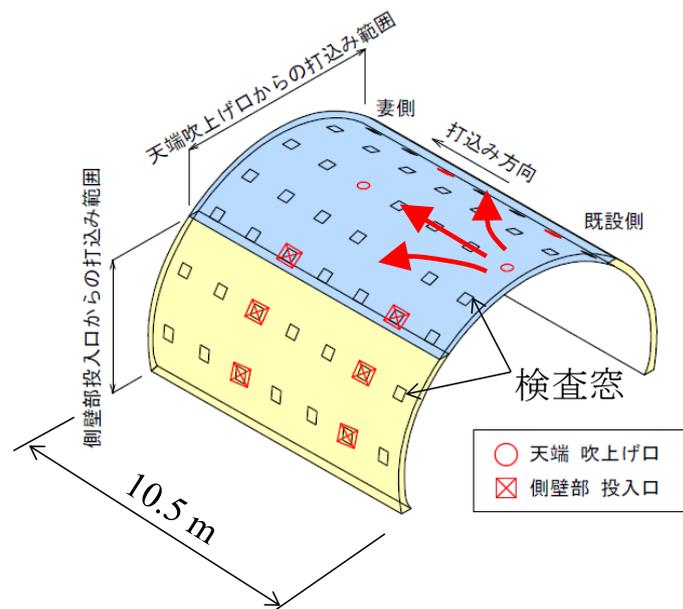


図-1.2 セントル（アーチ状移動式型枠）の構造



写真-1.5 覆工コンクリート施工状況



写真-1.6 検査窓



写真-1.7 側壁部打込み状況



写真-1.8 吹上げ口



写真-1.9 ブリーディング水の流出状況



写真-1.10 天端引抜バイブレータ

第二に不可視部での打込みのため充填と締固め完了の確認ができず、天端部背面に空洞発生、ブリーディング水の巻込みによる脆弱部の形成、コールドジョイントの発生等が懸念される。天端部の充填完了はコンクリートの予定数量と実施数量の比較、写真-1.9 に示す妻型枠（通常、木矢板）隙間からのブリーディング水やモルタルの流出程度等から判断している。なお、ブリーディング水の排出対策として、妻型枠に穴開き型枠を使用する場合がある。天端部の締固めは、写真-1.10 の天端引抜き式バイブレータ（あらかじめ天端部に水平に設置し、充填後に加振しながら電動で引き抜くバイブレータ）等の天端部に特化した特殊バイブレータを用いる事例が増えているが、所定のスピードで引き抜く等の対応にならざるを得ず、十分な振動が覆工コンクリート天端部背面まで伝播したか否かは確認できない。

このような背景から、材料分離には対応できないものの天端部の施工時にコンクリートの充填・締固めを検知するセンサが利用される事例が多くなっている。対象となるセンサは鉄筋コンクリート構造物に用いられるセンサと同様であるが、主に充填管理にケーブル間の静電容量の変化を利用する方法¹²⁾ または照度を利用する方法¹⁸⁾、充填・締固め管理に圧電セラミックス製の振動デバイスを利用する方法¹⁴⁾ 等が用いられている。しかしながら、打上がり高さまたは特定点の充填・締固めの評価であり、天端部の打込みスパン全長（例えば、10.5 m）を監視するには、天端部の防水シートに多数のセンサを線状または面状に設置する必要があった。さらに、センサから分析機器まで信号を送るためのケーブルを並列多重に配線・固定する煩雑な作業が必要となる等の問題もあった。このため、天端部の打込みスパン全長を監視するようなセンサ配置は行われていないのが実情である。

1.2 研究の目的

表-1.1 に 1.1 節で述べた問題点と現状の対応を整理した。1.1.1 項では、従来よりも流動性を高めたコンクリートの使用が進むことが期待される中で、不適切な配合によって運搬等の作業中に材料分離が生じるおそれがあるが、材料分離を評価する方法がない現状を述べた。1.1.2 項では、コンクリート打込み時の問題点として、鉄筋コンクリート構造物においてはコンクリート投入時の鉄筋との衝突による材料分離、過密な鉄筋配置に起因したかぶり側へのコンクリートの回り込み不足による空洞や豆板、およびコンクリート流動時の材料分離の発生が懸念されるものの、センサによるモニタリングは限定的で材料分離を評価できない現状を述べた。また、覆工コンクリート天端部の打込みは目視確認が困難かつ約 10 m の流動となるため、材料分離、空洞、脆弱部形成、コールドジョイント等の発生が懸念され、センサを用いてモニタリングする事例が増えているが局所的な対応であり材料分離を評価できない現状を述べた。

本研究の目的は、これらの問題に対して、活用が進みつつあるセンサを用いたモニタリングに着目し、材料分離程度を可視化する方法を確立するとともに従来の充填・締固め検知センサの課題を解決し、あらゆるコンクリート構造物におけるコンクリート施工時の品質モニタリング方法を提示することである。そこで、従来の充填・締固め検知センサ、イオン伝導体の電気伝導率測定方法、実構造物に適用可能な養生終了時期判定手法¹⁹⁾ 等を参考に、

フレッシュコンクリートの材料分離、充填、締固めを評価するための品質特性として電気的特性に着目して研究を進めることとした。

表-1.1 問題点と現状の対応

種別	製造・運搬	打込み	
		鉄筋コンクリート構造物	覆工コンクリート天端部
問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 単位水量の増大や化学混和剤の不適切使用に起因した材料分離 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 横移動によるモルタルの先流れ ・ 鉄筋との衝突による粗骨材の飛散 ・ 締固め不足による豆板発生 ・ 過度な締固めによる粗骨材の沈降 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 約 10m の流動による材料分離 ・ 不可視部での充填不良(空洞発生) ・ 多量のブリーディング水の巻込みによる脆弱部形成
現状の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試し練りで分離状態の目視判定やタッピング試験等の定性的な評価 ・ 荷卸し時のシュートを流れるコンクリートの目視確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 目視による材料分離の定性的な評価 ・ 圧送ホース挿入口の設置 ・ 透明型枠の使用 ・ 棒状バイブレータへのマーキング ・ 型枠バイブレータの使用 ・ 鉄筋にモニタリングセンサの設置 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 材料分離の評価方法なし ・ 連続式 RI コンクリート水分計の使用 ・ 妻型枠に穴開き型枠の使用 ・ 防水シート天端にモニタリングセンサの設置

1.3 本論文の構成

図-1.3 に本論文の構成を示す。各章の記述内容は次のとおりである。

「1 序論」では、研究の背景としてコンクリートの製造・運搬時の問題点、鉄筋コンクリート構造物と山岳トンネルの覆工コンクリート天端部の打込み時における問題点を提起し、研究の目的がフレッシュコンクリートの材料分離、充填、締固めを評価する品質モニタリング方法を提示することとした。

「2 既往の研究」では、フレッシュコンクリートのモニタリングセンサ、均質なコンクリートの電気的特性、不均質なコンクリートの電気的特性、コンクリートの電気的特性の変化、および電極条件について、既往の研究の調査結果を取りまとめた。そして、材料分離と充填を評価するのに適した電気的特性として、交流電源を用いて測定されるインピーダンスを選定した。また、締固め程度を評価する方法として、圧電材料を検討することとした。

「3 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」では、様々な配合を用いて、材料分離と充填を評価するための電気的特性として 2 章で選定したインピーダンスを測定し、インピーダンスが変化する要因を調査・分析した。その結果、最も影響度の

大きい影響因子を特定した。さらに、コンクリートの配合から求められる2種類の影響因子を考慮した関係式によって、影響度の低い影響因子に起因したわずかなインピーダンス変化を説明できることを明らかにした。

「**4 建設現場への適用を考慮した電極間隔と電極面積**」では、電極間隔と電極面積がインピーダンスへ及ぼす影響を調査・分析し、建設現場での測定に適した電極間隔と電極面積の条件を提示した。

「**5 実構造物モニタリング手法の考案**」では、建設現場で使用するセンサを開発するにあたり、その方向性を設定した。そして、2種類の検知原理を採用したプロトタイプを用いて、様々な配合を対象に試験を行いその性能を確認した。さらに、室内試験により均質性評価の実現可能性の確認、温度と経過時間の影響調査を実施した。最後に、建設現場においてモニタリングに適したセンサとして、パッチ型センサとシート状センサと点電極センサを考案した。

「**6 実構造物への適用性確認試験**」では、5章で考案したシート状センサを壁状鉄筋コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部のコンクリート打込み時に適用し、材料分離等の評価が実現可能であることを示すとともに、建設現場へ適用するときの改善点や留意点を明らかにした。

「**7 建設現場における品質モニタリングシステム**」では、建設現場における品質モニタリング手法を提示した。5章で開発したセンサを用いてあらかじめ実施するレディーミクストコンクリート工場での測定、打込み当日に実施する荷卸し場所と圧送ホース吐出口における測定、打込み場所における連続測定から成る品質モニタリングを実施し、実施工をシミュレーションした。

「**8 結論**」では、各章の成果を取りまとめるとともに、本研究で考案した品質モニタリングシステムの適用範囲を示した。さらに、今後の展開としてより合理的な方法への転換、適用可能なコンクリート種類の拡大、長距離圧送時の圧送管内の材料分離程度の推定への抱負を述べた。

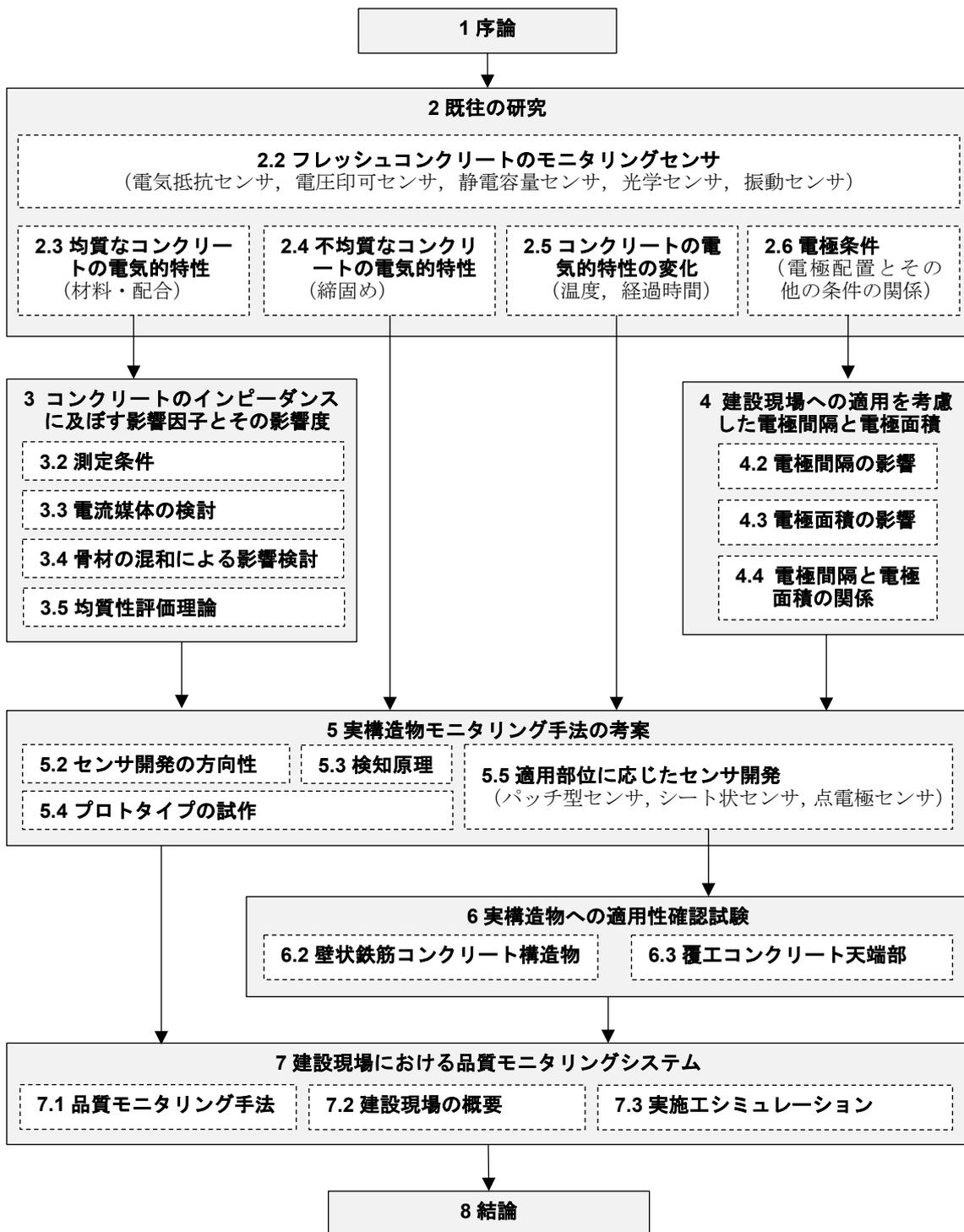


図-1.3 本論文の構成

参考文献

- 1) 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.
- 2) 丸山 久一：耐震基準の変遷：土木コンクリート構造物，コンクリート工学，Vol. 41，No. 5，pp.4-10，2003.
- 3) 土木学会：施工性能に基づくコンクリートの配合設計・施工指針（案），2007.
- 4) 吉兼 亨，高田 浩夫，畑中 重光：打込みの最小スランブと生コン品質基準のグレード分けについての意見交換，コンクリート工学，Vol. 51，No. 7，pp. 563-570，2013.
- 5) 大臣官房技術調査課 建設システム管理企画室長：現場打ちの鉄筋コンクリート構造物におけるスランブ値の設定等について，国技建管第 13 号，2017.
- 6) 梁 俊，丸屋 剛，坂本 淳：コンクリートの分離抵抗性の簡易な定量評価方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp.1174-1179，2012.
- 7) 梁 俊，高橋 幸一，皆川 浩，丸屋 剛，綾野 克紀：スランブ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験における支持条件の違いが測定結果に与える影響，土木学会第 71 回年次学術講演会，pp. 649-650，2016.
- 8) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，pp. 118-122，2018.
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 [JASS5] 鉄筋コンクリート工事，pp. 227-280，2018.
- 10) 柳井 修司，近松 竜一，石川 雄康，河野 広隆：コンクリートポンプ工法における施工の計画と実状に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 2，pp. 253-258 ，2008.
- 11) 平田 隆祥，十河 茂幸：電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 1，pp. 69-74，1996.
- 12) 藤倉 裕介：静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化過程の水分量評価と施工時の品質管理手法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp. 1336-1341，2012.
- 13) 坂井 吾郎，万木 正弘，坂田 昇，岩城 実：品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 17，No. 1，pp. 233-238，1995.
- 14) 佐野 清史，安田 正雪，高橋 宏治，坂井 孝，金子 稔：振動を利用したコンクリートの打込み・締固め検知システムに関する基礎実験，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-424，pp. 847-848，2003.
- 15) 小池 悟，小野里 みどり，諸澤 正毅，野間 康隆，多寶 徹：覆工コンクリート天端部の品質に関する実験的検討，安藤ハザマ研究年報，Vol. 5，2017.
- 16) 椎名 貴快，佐藤 幸三，高橋 雅，金丸 信一：覆工コンクリートの天端充てん性と品質の向上への実験取り組み，西松建設技報，Vol. 35，2012.
- 17) 国土交通省：レディーミクストコンクリート単位水量測定要領（案），2004.
- 18) 滝波 真澄，熊谷 幸樹，筒井 隆規，渡邊 博，小西 裕之，平間 昭信，松田 浩朗，桃

木 昌平：覆工コンクリート打設高さの見える化と締固め作業の自動化，とびしま技報，No. 66，pp. 1-4，2018.

- 19) 三坂 岳広：電気抵抗による養生終了時期判定手法の提案，芝浦工業大学博士学位論文，2019.

2 既往の研究

2.1 はじめに

第一に、様々なコンクリート構造物を対象に、コンクリートの運搬時の材料分離、打込み時の充填、打上がり高さ、および締固めをモニタリングする様々なセンサについて、検出信号の種類、構造、センサ形態等を調査した。この調査結果をもとに、鉄筋コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部に最適なモニタリング方法を考案するにあたって、基本となる電気的特性の種類やセンサ形態等の検討の参考とした。

第二に、均質なコンクリートの電気的特性として、フレッシュコンクリートの電気的特性に及ぼす影響因子とその影響度に関する既往の研究を調査した。コンクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材および化学混和剤等で構成される複合材料であり、セメントだけでも普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメント等、多くの種類が使われている。これらを組み合わせたコンクリートの配合には、水セメント比、単位水量、細骨材率および化学混和剤添加率等、電気的特性に及ぼすと考えられる多くの影響因子が存在する。しかし、未だ影響因子とその影響度は明らかになっていない。表-2.1は考え得る影響因子と既往の研究の関係であり、本研究で検討すべき影響因子を整理したものである。

第三に、不均質なコンクリートの電気的特性として、打込みや締固めの影響により粗骨材分布が変化、すなわち材料分離したときの電気的特性に及ぼす影響について既往の研究を調査した。今後、前述の材料・配合が電気的特性に及ぼす影響を解明できれば、材料分離は所定の計画配合から粗骨材の多いあるいは少ない配合への変動と捉え、電気的特性に基づくモニタリングの実現可能性が高まる。

第四に、コンクリートの電気的特性の変化として、温度と経過時間の影響について既往の研究を調査した。コンクリートは季節によって温度が変化し¹⁾、コンクリートの電気的特性に影響を及ぼす。金属の電気抵抗は温度の上昇に伴って大きくなる²⁾。一方、水溶液の電気伝導率(溶液の電気の伝わりやすさ、溶液の電気抵抗の逆数)は水温が高くなるとその値は大きくなる³⁾。同じ導体でも金属と水溶液では電気抵抗と温度の関係が逆となる。フレッシュコンクリートは水溶液と同様の電気抵抗の変化が想定され、温度補正の必要性について検討する必要がある。また、セメントと水の接水からの経過時間についても既往の研究を調査した。コンクリートの製造時、セメントに水が加えられるとセメントからイオンが溶出し、時間の経過とともにその量が増大する。レディーミクストコンクリート工場から建設現場までの運搬時間は、建設現場の位置や周辺の交通事情等の様々な条件によって変動する。黒田ら⁴⁾は都市部に立地する5つの建設現場からデリバリーシートを入手し、レディーミクストコンクリートの運搬時間の目安を試算した。練混ぜから打込み終了までの限度が120分のとき、運搬時間の平均値の目安は約62分、最小値の目安は約46分であった。練混ぜから打込み終了までの限度が90分のとき、運搬時間の平均値の目安は42分、最小値の目安は約31分であった。この目安時間は限定的な調査例ではあるものの、これを参考にすれば、

建設現場に到着したコンクリートは、接水から 30～60 分程度経過している場合が多いと考えられる。また、練混ぜから打終わりまでの時間は、外気温が 25℃以下のときで 2 時間以内、25℃を超えるときで 1.5 時間以内を標準としている⁹⁾。したがって、建設現場での荷卸し時の経過時間 30～60 分程度から、打終わりの限度の経過時間 120 分までがとくに重要な時間帯である。そこで、この時間帯における電気的特性の変動に関する情報を整理した。

最後に、電極条件の影響について、電極配置と測定ケーブル接続方法、電極配置と鉄筋の影響を調査し、建設現場において電気的特性をモニタリングするときの電極形状・配置の参考とした。

表-2.1 影響因子に関する調査対象

分類	影響因子
均質なコンクリートの電気的特性	セメントの種類
	水セメント比
	単位水量
	セメントペースト体積
	空気量
	細骨材率
	単位粗骨材量
	化学混和剤添加率
不均質なコンクリートの電気的特性	締固め
コンクリートの電気的特性の変化	温度
	経過時間
電極条件	電極配置と測定ケーブル接続方法
	電極配置と鉄筋

2.2 フレッシュコンクリートのモニタリングセンサ

2.2.1 電気抵抗センサ

阿部ら⁹⁾は、形状が複雑で鉄筋や設備関連の埋設物が多い構造物等におけるコンクリートの充填保証を目的に、電気伝導性を利用した計測法を採用した。隣青銅板を電極として、電極間に微弱の交流電圧を印可しておき、この電極間にフレッシュコンクリートが触れると電気回路が形成され電流が流れる仕組みとし、電流の大きさにより充填状況を判定する。また、コンクリート打込み時に検知部分が不導体である空気から導体であるブリーディング水、コンクリート等に置き換わる際の抵抗値の変化から充填状況を判定する。実験により、周波数は 900 Hz、電圧は 7 Vrms とした。特徴的な工夫は、図-2.1 のとおり、検知ポイントに計測センサ、その近傍で確実に良質なコンクリートを検出できる位置に校正センサを設置する 2 センサ方式を採用していることにある。充填状況は校正センサによる抵抗値の経時変化（空気→ブリーディング水→コンクリート）と計測センサでの抵抗値の経時変化を相

対比較することにより確認するとしている。

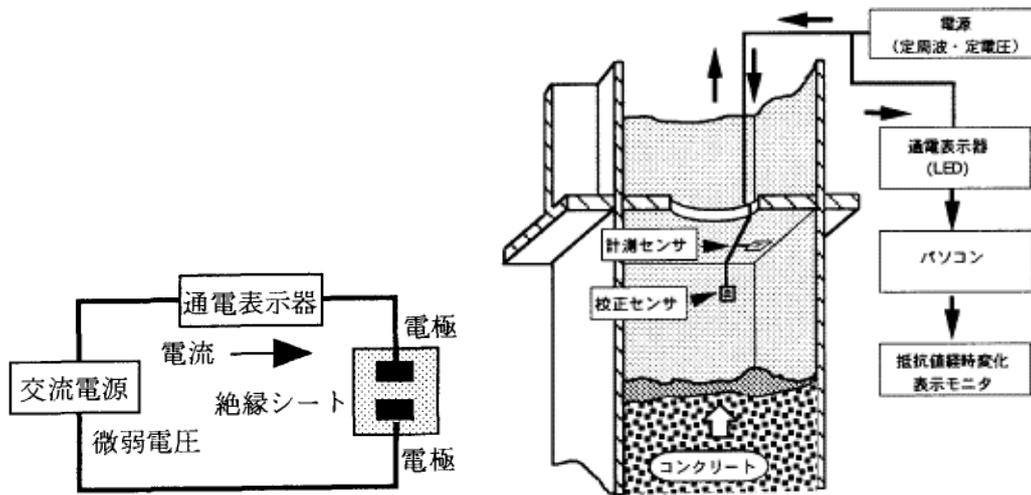


図-2.1 システム概要⁶⁾

中山ら⁷⁾は、管内を流れるフレッシュコンクリートの圧送性能をポンプ圧送現場で定量的に計測することを目的に、コンクリートの電気抵抗測定システムを提案した。図-2.2に示す圧送実験装置を用いて、圧送中における粗骨材とモルタルの容積比とコンクリートの電気抵抗には強い相関性が認められたが、管内流動状況は直接目視できるわけではなく、計測されている電気抵抗のメカニズムも明らかでない。そこで、FEMによる電気伝導シミュレーションを行い、粗骨材とモルタルの容積比と電気抵抗性の関係をシミュレートできること等を報告している。

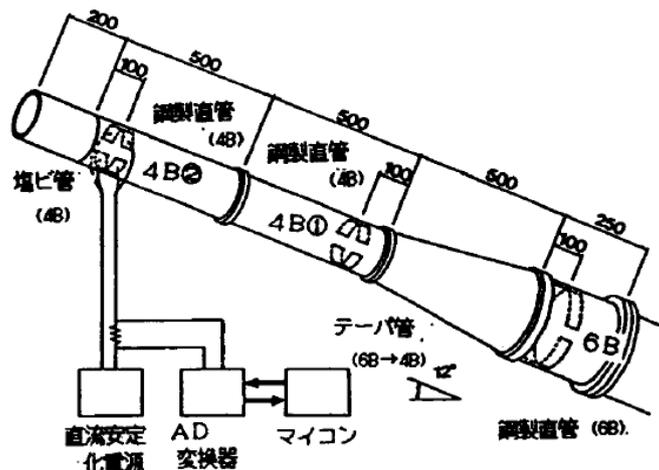


図-2.2 圧送実験装置⁷⁾

2.2.2 電圧印可センサ

平田ら⁸⁾は、高流動コンクリートや鋼管内充填コンクリート等の普及に伴い、直接目視でコンクリートの充填状況を確認することが困難な場合を対象に、電圧値から電極間のフレッシュコンクリートを識別する方法を考案した。図-2.3の測定方法でフレッシュコンクリート中に挿入した電極間に、一定時間だけ低電圧を加えて電極間を充電し、続いて一定時間が経過した後に電極間に残留した電圧を測定する。この方法により、水、ブリーディング水、およびコンクリートを容易に識別できる。計測に最適で極力小さい電極の条件は、放電制御用抵抗値 $2\text{ k}\Omega$ 、電極長さ 10 mm 、幅 10 mm 程度であると報告している。

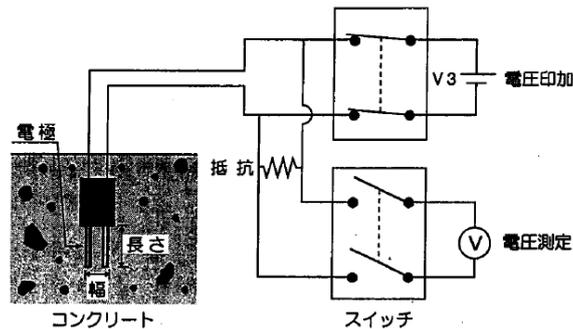


図-2.3 測定方法⁸⁾

2.2.3 静電容量センサ

藤倉⁹⁾は、高品質なコンクリート構造物を施工することを目的に、計測センサーケーブルの静電容量の変化からコンクリートの打込み状況を把握するとともに、硬化過程における強度や含水率の推定を行う手法を提案している。図-2.4 (a)の何も充填されていない状態では静電容量の合計値は 14 F 、(b)のフレッシュコンクリートが約半分打ち込まれた状態で 646 F 、打込み完了後は 1120 F となり、静電容量と打込み高さの関係はおおよそ比例関係であるとしている。また、(c)の硬化コンクリートで 840 F となり、低下量は消費、逸散により減少した水分であるとしている。

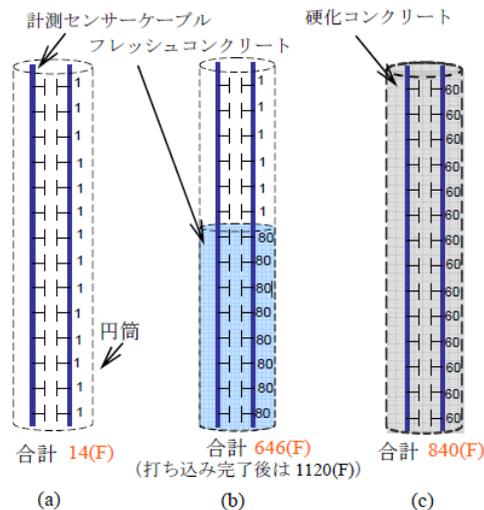


図-2.4 計測原理の概要⁹⁾

蘇ら¹⁰⁾は、帯状の長いセンサを型枠（せき板）の内側表面に設置することによって、コンクリートの充填状況に加えて、豆板の発生を検知することを目的に、2本の長い電極線を櫛目状に配置した仕様の帯状濡れセンサを考案した。電極間の静電容量を測定し、比誘電率の変化からフレッシュコンクリート中の水を検知して、センサに接するコンクリートの状態を計測する。図-2.5の青線と黒線で示す配線間で静電容量を計測する仕組みである。試験で用いたセンサ形態は、幅18mm、長さ480mm、厚み1.5mmであった。

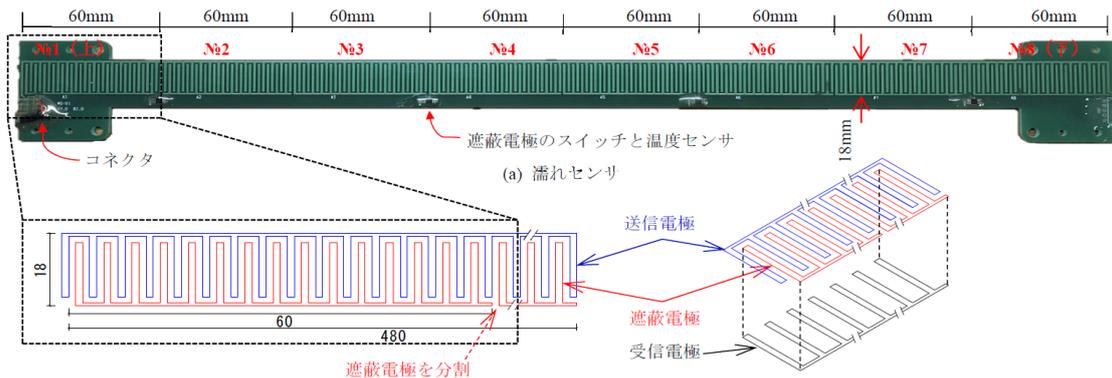


図-2.5 濡れセンサの概要¹⁰⁾

2.2.4 光学センサ

坂井ら¹¹⁾は、高流動コンクリートを適用した構造物の品質保証を目的に、図-2.6に示すとおり光学式センサと静電容量式センサの2種類の埋込み式センサを組み合わせる実構造物においてコンクリートの充填性を確認した。光学式センサは、発光ダイオード（発光部）と検出フォトダイオード（検出部）の2つの端子が15mmの間隔を介して構成されており、この端子間にコンクリートが充填されると検出部で光が検出されなくなり充填完了の信号を発する。また、静電容量センサは、検出部が一定間隔を隔てた2つの導体（電線）により構成され、この導体間の静電容量がコンクリートに埋め込まれた部分の高さに比例して増加することを利用し、コンクリートの打上がり高さを連続的に測定する。

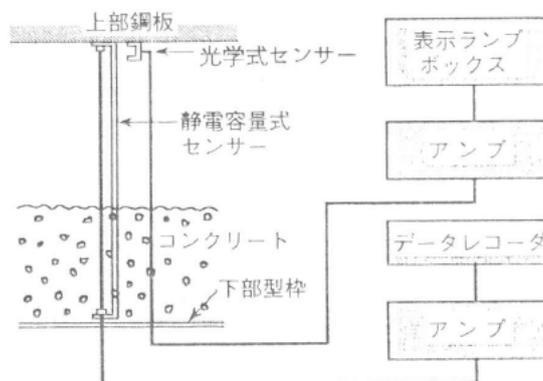


図-2.6 センサ設置状況¹¹⁾

滝波ら¹²⁾は、山岳トンネルの覆工コンクリート打込み時の高さ管理を目的に、照度センサとLED照明をセントル型枠に埋め込み、コンクリートの有無を照度で判別して可視化するセンサを開発した。写真-2.1の照度センサはCdS（硫化カドミウム）セルと呼ばれるもので、光の量に従って電気抵抗値が変化するCdSの性質を利用して、セルに流れる電流の変化を読み取って照度を検知する。照度センサの横に設置するLED照明は、自動車のヘッドライトにも使用されているハイルーメンバルブを使用し、防水シートに反射した光を照度センサで検知するのに十分な光量を備えている。

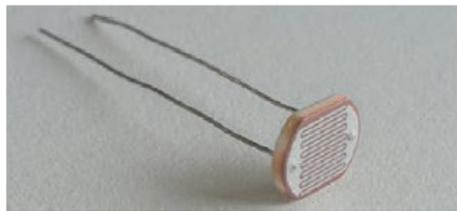


写真-2.1 照度センサ (Cds セル) 12)

2.2.5 振動センサ

金子ら¹³⁾、佐野ら¹⁴⁾は、未充填部が発生しやすい過密配筋や狭隘箇所、充填状況の目視確認が困難な水中部等の打込みにおいて、充填確認の容易な検査方法を確立することを目的に、圧電セラミックスで製作した写真-2.2に示す小型の振動デバイスを開発した。振動デバイスに周波数が時間とともに変化してゆく信号を加えて振動デバイスの周波数特性を検出することによって、振動デバイスに接するものが空気、水、コンクリートのいずれかであるのかを判定する。また、振動デバイスに振動加速度計測の電気回路を付加し、振動締固め時の振動加速度を測定し、振動加速度の大きさと振動締固め時間からコンクリートの密実性を判別する。この振動デバイスは充填検知だけでなく、締固め検知も可能であることが特長である。

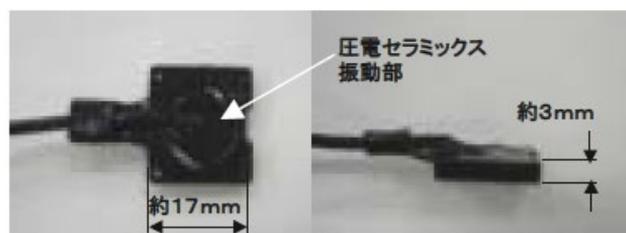


写真-2.2 振動デバイス 14)

2.3 均質なコンクリートの電気的特性

平田ら⁸⁾は、温度の異なる地下水と水道水の出カ電圧値から、温度が高くなると出力電圧値が増加したため、温度が高くなることで水の電気伝導度が増加したと考察している。また、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの出力電圧値を比較した。図-2.7 に示すように普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの出力電圧値が最も大きく、低熱ポルトランドセメントの場合が最も小さい値を示したことから、水和初期におけるカルシウムイオン量等の違いによる影響であると考察している。また、ブリーディング水の出カ電圧値は、セメントの種類にかかわらずコンクリートより大きな値となり、ブリーディング水は単位容積中のイオン量が多いことが理由として述べられている。

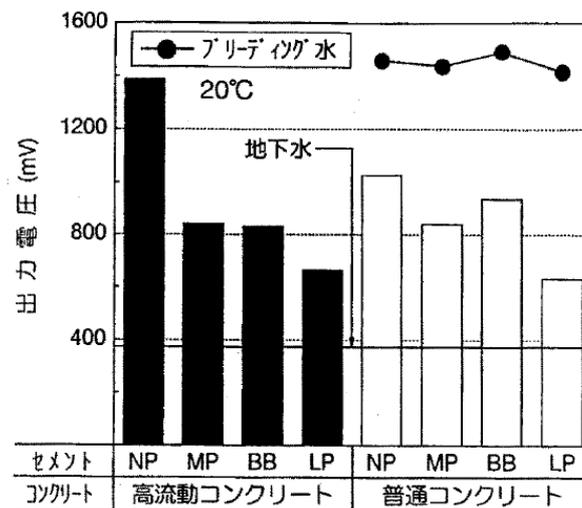


図-2.7 セメント種類の違いによる各種材料の出カ電圧⁸⁾

Obla ら¹⁵⁾は、アジテータ車で運搬されたレディーミクストコンクリートの配合を建設現場において評価する目的で電気抵抗の利用を試みた。測定機器はカナダ Giatec 社製の SmartBox (交流インピーダンス法、測定周波数 10 kHz、ワイヤレスデータ転送) を使用した。ここで、SmartBox はフレッシュコンクリートの含水量モニタリング、コンクリートの凝結・硬化時間の予測、養生時間の管理等に使用される測定機器として既に我が国でも導入・使用されている。写真-2.3 は SmartBox とフレッシュコンクリートの電気抵抗を測定する装置全体である。円柱供試体 ($\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) にフレッシュコンクリートを詰め込み、電極棒 2 極を挿入し、測定電圧と印可電流から電気抵抗を計算する。図-2.8 の水セメント比とフレッシュコンクリートの電気抵抗の関係のとおり、フレッシュコンクリートの電気抵抗は、基本的に水セメント比と相関がないと報告している。図-2.9 は、電気伝導率 (電気抵抗の逆数) と単位体積あたりのセメント、水、セメントペースト体積の関係である。この測定結果やほかの検討結果から判断して、測定されたフレッシュコンクリートの電気抵抗はセメントペースト量、おそらくはセメントペースト体積で説明できると報告している。



写真-2.3 SmartBox と電気抵抗測定装置¹⁵⁾

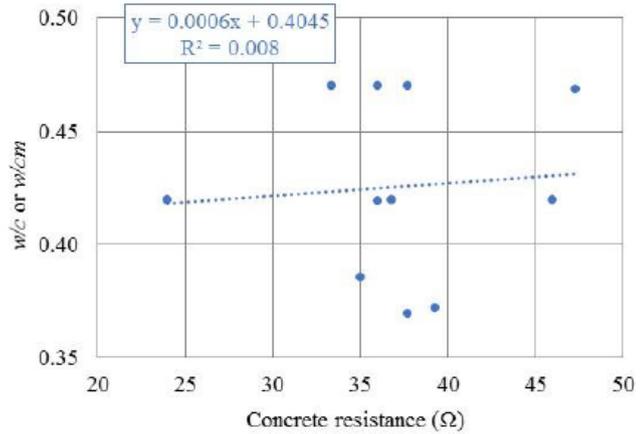


図-2.8 水セメント比とフレッシュコンクリートの電気抵抗の関係¹⁵⁾

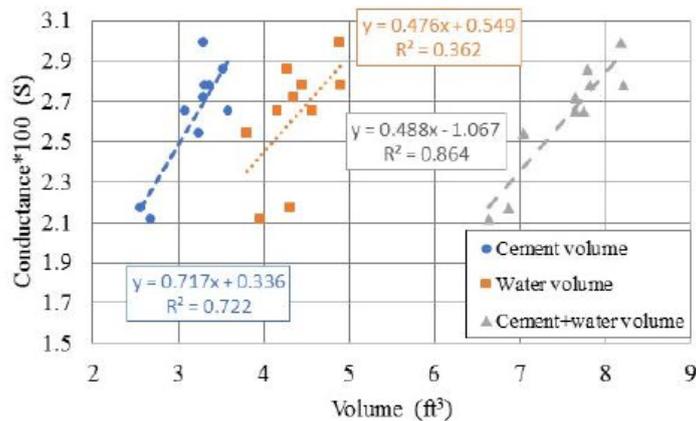


図-2.9 電気伝導率と単位体積あたりのセメント，水，セメントペースト体積の関係¹⁵⁾

2.4 不均質なコンクリートの電気的特性

小野ら¹⁶⁾は、コンクリート打込み直後のコンクリートの型枠内各々の位置における品質の違いについて、型枠内に付置した電極の電気抵抗を測定しその比抵抗換算値により間接的な推量を試みた。電気抵抗測定は LCR メータを使用した。正方形断面の柱状型枠（150×150×820 mm）と長方形断面（250×90×820 mm）の壁状型枠のそれぞれに対向する内面 2面にステンレス製電極（SUS304、厚さ 0.3 mm、150×60 mm または 50×60 mm）を縦方向 5 段に取り付けた。コンクリートは 5 層に分け突き棒で充填した後、テーブルバイブレータで所定時間（30、60、120 秒）の振動を与えた。図-2.10 に示すとおり比抵抗値は下部層が最も高く上層部になるにつれて低い値となった。各層の洗い試験の結果、下層部～中層部で粗骨材の占有率が 50～55%と変化し、セメントペースト量が体積比で 10%程度と他の部位に比べ少なかった。比抵抗値に最も影響を及ぼすのは、容積中に占める粗骨材量であり、その次の因子はセメントペースト量であると考察している。以上により、振動締固めコンクリ

ートにおいて同一型枠内の粗骨材の移動量を電気抵抗においておおむね推定できると報告している。

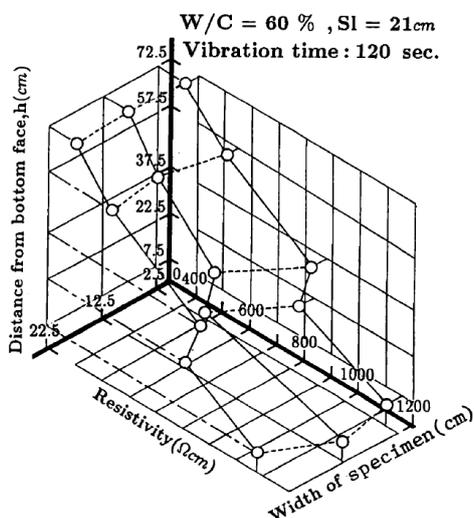


図-2.10 電極位置と比抵抗の関係¹⁶⁾

高木ら¹⁷⁾は、締固めを必要としない高流動コンクリートを対象に、電気伝導率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試行した。測定機器として、電気伝導率が測定可能な市販の土壌水分センサを用いた。図-2.11は、円筒容器（φ100 mm×200 mm）に水セメント比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、その各段階で電気伝導率を測定したときのセメントペースト体積と電気伝導率の関係である。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電気伝導率が減少することから、コンクリート内の骨材の動きを電気伝導率で捉えることができると考え、分離の発生に伴う材料のばらつきを評価した。なお、混和剤の添加による電気伝導率への影響は軽微であり、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としている。上記円筒容器にコンクリートを投入後、棒状バイブレータを挿入し、60秒間振動締固めを行いながら電気伝導率の測定を行った。図-2.12は代表的な測定結果である。測定開始時を初期値とした電気伝導率変化率において、容器上部と下部で異なる傾向を示した。上部は主に空気量、下部では粘性が大きく寄与しているとしている。そして、電気伝導率の変化率は材料分離抵抗性の判断材料になるとしている。

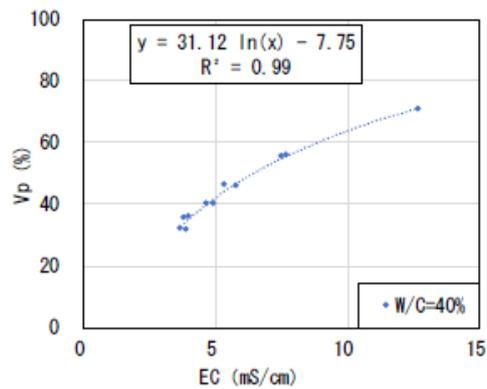


図-2.11 セメントペースト体積と電気伝導率の関係¹⁷⁾

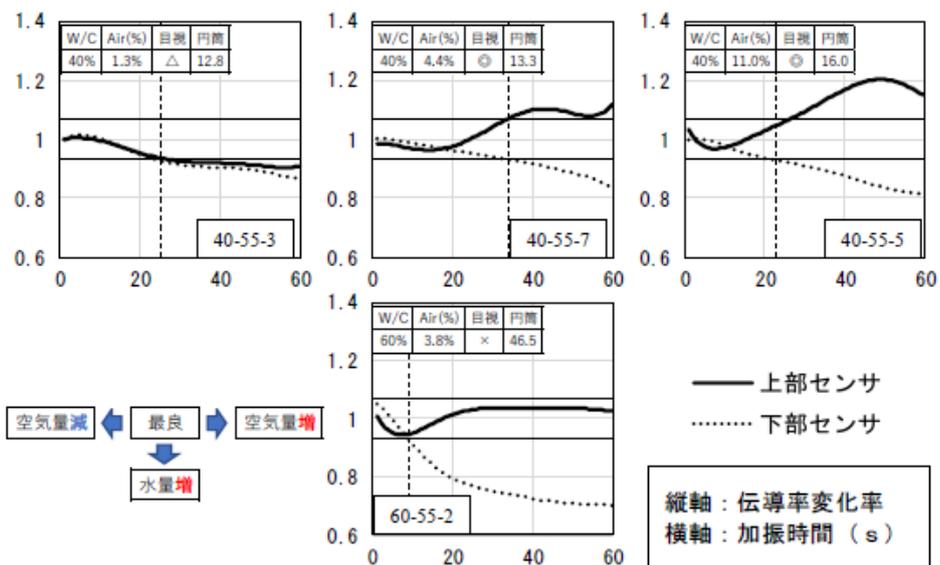


図-2.12 代表的な電気伝導率測定結果¹⁷⁾

2.5 コンクリートの電気的特性の変化

渋谷ら¹⁸⁾は、導電率から圧縮強度を推定する目的で、雰囲気温度 5℃、20℃、35℃におけるコンクリートの導電率の経時変化を測定した。セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種、測定機器は交流 2 電極法の導電率計を用いた。図-2.13 は、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種における導電率の経時変化である。普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種ともに雰囲気温度が高いほど、コンクリートの導電率のピーク値は大きく、ピーク後の傾きは急になった。また、高炉セメント B 種では、導電率のピークとなる時期は雰囲気温度が高いほど早くなったことを報告している。

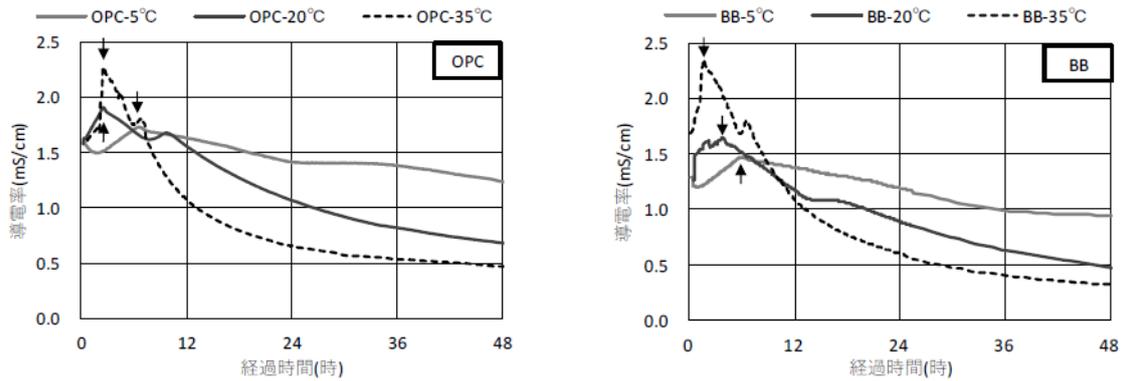


図-2.13 導電率の経時変化¹⁸⁾

村上ら¹⁹⁾は、電気伝導率のピークに影響を与える要因を調査することを目的に、単位水量と水セメント比を変化させた配合とセメント種類を変化させた配合について、電気伝導率の経時変化を測定した。分離型プローブを付帯するデジタル導電率計 (CD-4302) を用いて、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の型枠にコンクリートを打ち込んだ後、プローブを上面から一定の高さ (7 cm) に差し込み、5 分に 1 回の頻度で電気伝導率を測定した。

図-2.14 は、単位水量を変化させたときの電気伝導率の経時変化を水セメント比毎に示したものである。電気伝導率のピークが発生する時間は、水セメント比毎にほぼ等しく (2~4 時間程度に分布)、単位水量が大きくなるほど電気伝導率の値は大きくなるとしている。

図-2.15 は、単位水量と単位セメント量が一定でセメント種類を変化させた配合を用いて電気伝導率を測定した結果である。電気伝導率のピーク時間は、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントの順で現れた。そして、このピーク時間は一般に知られているセメント種類の凝結が開始する時間と一致していることを報告している。

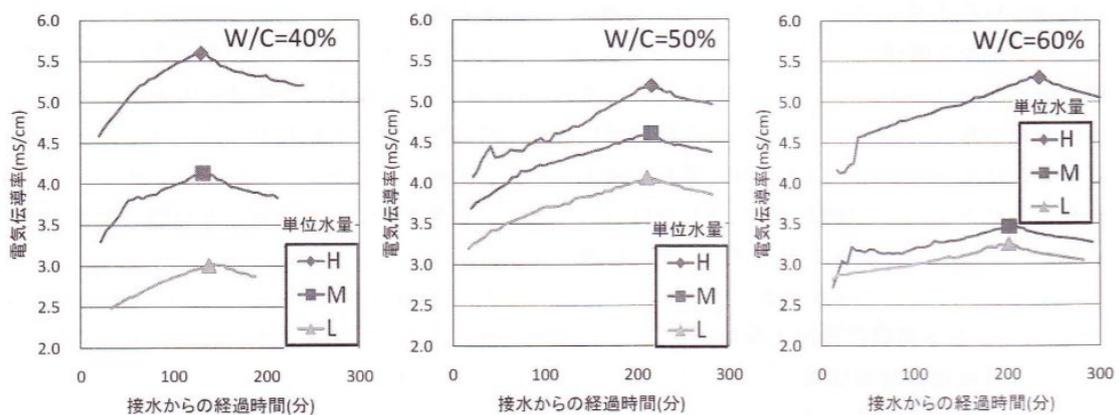


図-2.14 電気伝導率の経時変化 (水セメント比別)¹⁹⁾

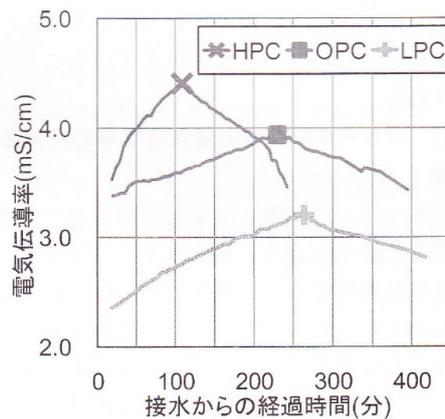


図-2.15 電気伝導率の経時変化（セメント種類別）¹⁹⁾

三坂ら²⁰⁾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。図-2.16に示すように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。

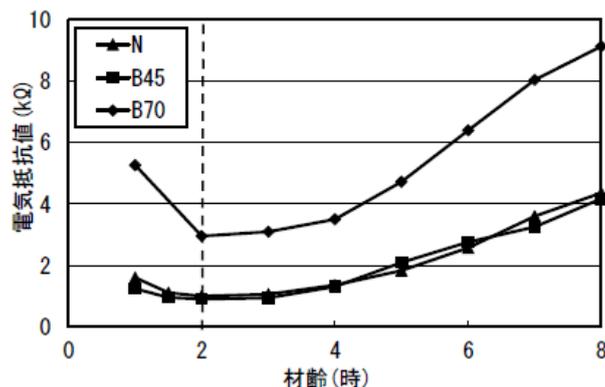


図-2.16 電気抵抗値と材齢の関係²⁰⁾

2.6 電極条件

2.6.1 電極配置と測定ケーブル接続方法の影響

水畑ら²¹⁾は、試料に対する電極の配置として2端子法と4端子法があり、2端子法では、電流を流す電流端子と電圧を測定する電圧端子の役割を一つの電極が兼ねているため、電極における分極の影響を完全に除去することはできないものの、セル・電極の構造を単純にすることができるため、交流を用いた測定法の発達と共に広く普及していると報告している。また、4端子法では、電流端子と電圧端子とが分離され、電圧端子には高インピーダンスの電圧測定装置が接続されるため、電圧端子に流れる電流はごくわずかであり、電極における分極の影響をほとんど無視できるとしている。表-2.2に2端子法と4端子法の比較を整理している。

表-2.2 2端子法と4端子法の比較²¹⁾

	2端子法	4端子法
等価回路模式図		
特徴・長所	<ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンスが容易。 ・構造が簡単のため安価なものが多い。 ・粘性の高い試料やコロイド溶液などへの使用には適している。 ・電気伝導率の低い試料の測定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・いかなる電気伝導率領域においても電流-電位応答が線形である。 ・キャリブレーション測定と電気伝導率測定における電気伝導率領域が異なっても良い。 ・フローセルでも浸漬セルでも適用可能。 ・高い電気伝導率を有する試料には理想的。 ・電気伝導率が低い試料においては、浮遊容量の効果が補償されれば使用可能。
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・電場効果が生じるため電極は容器の中心部に配置する必要がある。 ・電気伝導率の高い試料の場合分極の影響を無視できない。 ・電気伝導率のキャリブレーションにおいては2桁程度異なる伝導度を有する試料を2種類程度用いて行うことが望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・4端子とも試料と接する（浸漬される）必要があるため、微少試料においては適していない。（3~4cmの電極間距離が必要）

インピーダンス測定には、インピーダンスアナライザや LCR メータが用いられている。一般的には6つのインピーダンス測定方法が用いられており、ブリッジ法、共振法、I-V法、RFI-V法、ネットワーク解析法、自動平衡ブリッジ法である。適用する周波数範囲によって使い分けられている²²⁾。ここでは、最近のインピーダンス測定器に広く使われている自動平衡ブリッジ法で被測定試料（以下、DUT：Device Under Test という）のインピーダンスを測定する場合の測定ケーブルの接続方法を整理する。

表-2.3に測定ケーブルの接続方法を示す。2端子法は最も簡易的な接続方法であるが、導線インダクタンス、導線抵抗、および2つの導線間の浮遊容量等の測定誤差要因が大きい。3端子法は同軸ケーブルを採用して浮遊容量の影響を減らしているが、低インピーダンス測定範囲は改善されない。4端子法は測定器の信号電流ケーブルと電圧検出ケーブルが独立しているため測定ケーブルの残留インピーダンスの影響を減らしているが、導線間の浮遊容量の影響が残り、高インピーダンス測定範囲が制限される。5端子法は3端子法と4端子法を組み合わせたもので、測定範囲を広げているが、ケーブル間の誘導結合の問題が残る。4端子対法は測定ケーブルの内部導体を流れる電流とシールド導体を流れる電流が同じ大きさで逆向きに流れるので、内部導体の電流が発生する磁界をシールド導体の電流による磁界で打ち消す。したがって、測定ケーブルの外に磁界が発生しないので、電圧検出ケーブルと信号電流ケーブルとの誘導結合がない。これにより、低インピーダンス測定範囲を1Ω以下まで拡大できる²²⁾。

表-2.3 測定ケーブルの接続方法^{22), 23)}

接続方法	回路構成	特徴
2 端子法		<ul style="list-style-type: none"> 最も簡易的な接続方法 導線インダクタンス, 導線抵抗, 2つの導線間の浮遊容量を含む. $100\ \Omega < Z_{DUT} < 10\ \text{k}\Omega$
3 端子法		<ul style="list-style-type: none"> 同軸ケーブルを採用 低インピーダンス測定範囲は測定ケーブルの残留インピーダンスが存在
4 端子法		<ul style="list-style-type: none"> 信号電流と電圧検出のケーブルが独立 導線間の浮遊容量により, 高インピーダンス測定範囲は制限される. Z_{DUT} が非常に低い場合は大きな信号電流が流れ, 電圧検出ケーブルとの誘導結合で測定誤差が生じる. $10\ \text{m}\Omega < Z_{DUT} < 10\ \text{k}\Omega$
5 端子法		<ul style="list-style-type: none"> 3 端子法と 4 端子法の組合せ 4 本の同軸ケーブル ケーブル間の誘導結合の問題が残る. $10\ \text{m}\Omega < Z_{DUT} < 100\ \text{M}\Omega$
4 端子対法		<ul style="list-style-type: none"> 測定ケーブルの内部導体とシールド導体を流れる電流が同じ大ききで逆向きに流れ, 電圧検出ケーブルと信号電流ケーブルとの誘導結合が生じない. $1\ \text{m}\Omega < Z_{DUT} < 100\ \text{M}\Omega$

2.6.2 電極配置と鉄筋の影響

皆川ら²⁴⁾は、硬化コンクリートを対象に、鉄筋が4プローブ法による電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響の原因とその程度を実験的に明らかにした。図-2.17は電気抵抗率比とかぶりと電極間隔の比(c/a , c :かぶり, a :電極間隔)の関係である。鉄筋軸方向に対して電極を並行に設置した場合と直角に設置した場合、逆の傾向になっている。つまり、どの方向に電極を設置しても鉄筋の影響を受ける可能性があり、その程度はかぶりと電極間隔に影響していることがわかる。図-2.18はプローブ法測定時の供試体内部の等電位分布である。電極間隔がかぶりより大きいとき($c/a=3.75$)、電極を鉄筋軸方向に対して直角に設置した場合(右下図)では、鉄筋の影響をほとんど受けず無鉄筋供試体と同等の等電位分布である。一方で、並行に設置した場合(右上図)では、鉄筋の影響を受けて鉄筋以深では電位差が小さくなり、電流線は鉄筋を通る位置になると推定される。

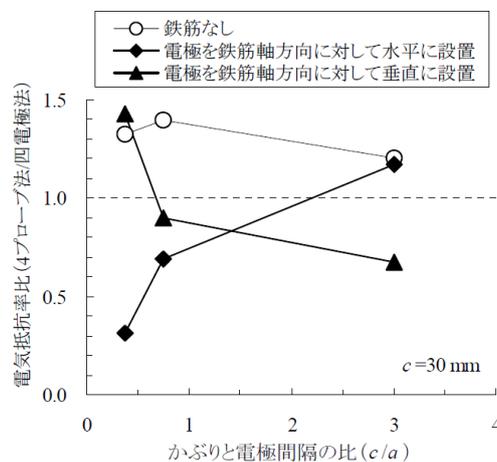


図-2.17 電気抵抗率比とかぶりと電極間隔の比の関係²⁴⁾

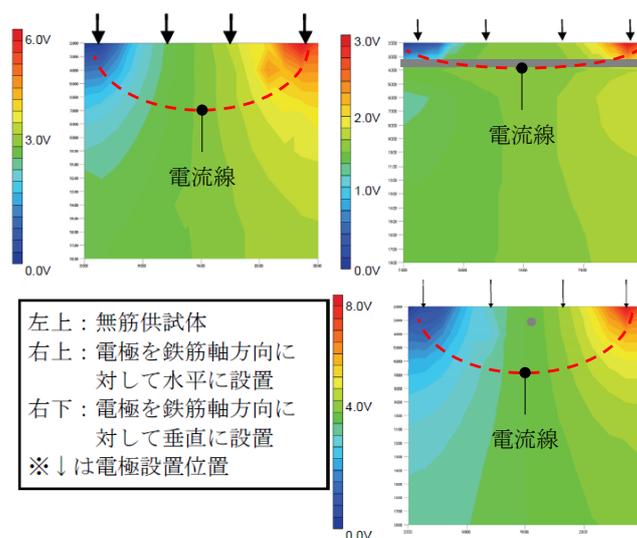


図-2.18 供試体内部の等電位分布 ($a=8$ cm)²⁴⁾ に加筆

2.7 まとめ

本研究で対象とする施工時の品質モニタリング方法に求める性能は、第一に材料分離程度の推定である。第二に、コンクリートの充填（ブリーディング水との識別を含む）を検知することである。第三に、パイプレータにより付与された振動を捉えて締固め程度を推定することである。2.2節ではフレッシュコンクリートのモニタリングセンサに関する既往の研究を調査した。調査結果のうち、上記3性能について製品化されたセンサに関する知見を表-2.4に整理した。検知の可否欄のうち、「材料分離」は骨材分布の推定、「充填」はコンクリートの検知かつブリーディング水とコンクリートの識別、「締固め」はパイプレータ振動の検知の可否をそれぞれ示している。○は検知可、△は条件付き検知可、×は検知不可を表す。

表-2.4 製品化されたフレッシュコンクリートのモニタリングセンサ

センサの種類	検出データ	センサ形態	検知の可否*		
			材料分離	充填	締固め
電気抵抗センサ	インピーダンス（交流）	2枚の燐青銅板電極 (35×35×0.5 mm)	検討段階	○	×
		2枚の棒状電極 (22×39×11 mm)	検討段階	△	×
電圧印可センサ	残留電圧（直流）	2本の板状電極 (12×21×3.5 mm)	×	○	×
振動センサ	振動周波数特性（充填）	圧電セラミックス (17×17×3 mm)	×	○	○
	振動加速度（締固め）				

* 検知欄の説明

- ・ 記号 : ○ 検知可, △ 条件付き検知可, × 検知不可
- ・ 材料分離 : 骨材分布の推定
- ・ 充填 : コンクリートの検知かつブリーディング水とコンクリートの識別
- ・ 締固め : パイプレータ振動の検知

「材料分離」はいずれのセンサも検知不可または検討段階である。中山ら⁷⁾による電気抵抗で粗骨材とモルタルの容積比の関係をシミュレートした研究例、小野ら¹⁶⁾による電気抵抗で粗骨材の移動量を推定した研究例、高木ら¹⁷⁾による電気伝導率（電気抵抗の逆数）の変化率で材料分離程度を推定した研究例があり、電気抵抗センサには材料分離を評価できる可能性があると考えられる。「充填」はいずれのセンサも検知可または条件付き検知可である。条件付き検知可となった電気抵抗センサの1つはブリーディング水の検知機能を有していないが、原理的には可能と考えられる。「締固め」は振動センサのみ検知可である。

したがって、「材料分離」と「充填」は電気抵抗センサの原理が適していると考えた。なお、電気抵抗センサの検出データとして交流電源を用いたインピーダンスと直流電源を用いた電気抵抗が考えられるが、交流法を用いたイオン伝導体の電気伝導率測定は交流発振

回路の進歩とともに発達し広く普及した物性測定法²¹⁾であり、イオン伝導体といえるフレッシュコンクリートについても交流電源を用いたインピーダンスによる評価が適切と考えた。「締固め」は振動センサに関する知見を参考に検討を進めることとした。

本研究では施工時の品質モニタリング方法に求める性能として「材料分離」と「充填」と「締固め」としたが、「充填」と「締固め」については既存のセンサで実現されており、本研究では「材料分離」の評価方法を確立することがコアとなる。そこで、2.3節では均質なコンクリートであることを前提にしたときの材料・配合が及ぼす電気的特性への影響、2.4節では締固め等によって粗骨材分布が変化し不均質なコンクリートとなったときの電気的特性の変化、2.5節では温度や経過時間が及ぼす電気的特性への影響、および電極条件が電気的特性の測定結果へ及ぼす影響に関して既往の研究を調査した。得られた知見を表-2.5に整理し、以下にまとめる。

- (1) 均質なコンクリートの電気的特性（材料・配合の影響）がセメント種類によって変化することは既知であり、セメントペースト体積と単位粗骨材量が比較的影響度の大きい影響因子と考えられる。
- (2) 不均質なコンクリートの電気的特性（締固めの影響）の変化は、粗骨材の沈降が大きく影響し電気的特性によりその変化を追跡できる可能性がある。
- (3) コンクリートの電気的特性は、温度と経過時間で変化し配合等によっても異なるため、補正について検討する必要がある。
- (4) 電極条件として、建設現場でのモニタリングには極力小さい電極形状が好ましく、2端子法は分極影響を受けるが簡易的で適用しやすく、電極配置とかぶりによっては鉄筋の影響を受ける可能性がある。なお、電極配置とかぶりの知見は硬化コンクリートを対象にした実験から得られたものである。フレッシュコンクリートは硬化コンクリートよりも電気抵抗が小さく導体であるため、硬化コンクリートよりは鉄筋の影響が小さいと考えられるが、電流線を意識した電極幅と設置が必要と考えられる。

表-2.5 フレッシュコンクリートの電気的特性

分類	影響因子	文献における報告内容
均質な場合の特性	セメントの種類	<ul style="list-style-type: none"> 出力電圧は OPC, MPC または BB, LPC の順で大きい⁸⁾. 電気伝導率のピーク時間は HPC, OPC, LPC の順で現れる¹⁹⁾.
	水セメント比	<ul style="list-style-type: none"> 電気抵抗は水セメント比と相関がない¹⁵⁾.
	単位水量	<ul style="list-style-type: none"> 単位水量が大きいほど電気伝導率が大きい¹⁹⁾.
	セメントペースト体積	<ul style="list-style-type: none"> 電気抵抗はセメントペースト体積で説明できる¹⁵⁾. 比抵抗にはセメントペースト量が 2 番目に影響を及ぼす¹⁶⁾. セメントペースト体積が減少することで電気伝導率が減少する¹⁷⁾.
	空気量	<ul style="list-style-type: none"> 空気量は電気伝導率に影響する¹⁷⁾.
	細骨材率	<ul style="list-style-type: none"> 文献なし
	単位粗骨材量	<ul style="list-style-type: none"> 比抵抗に最も影響を及ぼすのは容積中に占める粗骨材量である¹⁶⁾. 単位粗骨材量が増加することで電気伝導率が減少する¹⁷⁾.
	化学混和剤添加率	<ul style="list-style-type: none"> 混和剤の添加による電気伝導率への影響は軽微である¹⁷⁾.
不均質な場合の特性	締固め	<ul style="list-style-type: none"> 加振による粗骨材の沈降で伝導体であるセメントペースト体積が上部で増加, 下部で減少し電気伝導率が変化する¹⁷⁾. 加振により上部は空気量, 下部は粘性が電気伝導率の変化に大きく寄与する¹⁷⁾.
特性の変化	経過時間	<ul style="list-style-type: none"> 電気伝導率が最大値となる時間は 2~4 時間程度¹⁹⁾. 電気抵抗は接水から 2 時間で最小値を示す²⁰⁾.
	温度	<ul style="list-style-type: none"> 雰囲気温度が高いほど導電率のピーク値は大きい¹⁸⁾.
電極条件	測定方法	<ul style="list-style-type: none"> 計測に最適で極力小さい電極条件は長さ 10 mm, 幅 10 mm 程度⁸⁾. 2 端子法はセル・電極の構造が単純で普及しているが分極の影響がある. 4 端子法は分極の影響をほとんど無視できる²¹⁾. 2 端子法から 4 端子対法まで被測定試料のインピーダンスによって使い分けられる^{22), 23)}.
	鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> どの方向に電極を設置しても鉄筋の影響を受ける可能性があり, その程度はかぶりと電極間隔に影響する²⁴⁾.

参考文献

- 1) 鬼頭 直希, 溝渕 利明, 小島 正朗, 寺本 篤史: 実態調査に基づくコンクリートの打込み温度と外気温との関係に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 299-304, 2021.
- 2) 全日本ネオン協会: ネオンサインの知識と実務, pp. 12-14, 2000.
- 3) 羽毛田 靖: 電気伝導率計の原理と応用, 分析の原理 25, 電気化学②, JAIMA SEASON 2013 Summer, 2013.
- 4) 黒田 泰弘, 辻埜 真人, 西田 朗: デリバリーシートによる運搬時間, 待ち時間および打込み終了までの時間の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1312-1317, 2012.
- 5) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書 [施工編], pp. 108-109, 2018.
- 6) 阿部 保彦, 平井 淳一, 柿崎 正義: 電気伝導性を利用したコンクリート充填検知システムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第4号, 15-18, pp. 15-18, 1997.
- 7) 中山 新一, 橋本 親典, 丸山 久一, 清水 敬二: 管内を流れるフレッシュコンクリートの電気抵抗に関するシミュレーションモデルの研究, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp. 973-978, 1990.
- 8) 平田 隆祥, 十河 茂幸: 電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 69-74, 1996.
- 9) 藤倉 裕介: 静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化過程の水分量評価と施工時の品質管理手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1336-1341, 2012.
- 10) 蘇 振東, 大久保 孝昭, 寺本 篤史, 鬼塚 雅嗣, 松本 賢二郎, 上原 誠: コンクリートの充填と表面に生じる豆板を検知できる帯状濡れセンサシステムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第26巻, 第64号, pp. 851-856, 2020.
- 11) 坂井 吾郎, 万木 正弘, 坂田 昇, 岩城 実: 品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 233-238, 1995.
- 12) 滝波 真澄, 熊谷 幸樹, 筒井 隆規, 渡邊 博, 小西 裕之, 平間 昭信, 松田 浩朗, 桃木 昌平: 覆工コンクリート打設高さの見える化と締固め作業の自動化, とびしま技報, No. 66, pp. 1-4, 2018.
- 13) 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.
- 14) 佐野 清史, 安田 正雪, 高橋 宏治, 坂井 孝, 金子 稔: 振動を利用したコンクリートの打込み・締固め検知システムに関する基礎実験, 土木学会第58回年次学術講演会, V-424, pp. 847-848, 2003.
- 15) K. Obla, R. Hong, S. Sherman, D.P. Bentz, and S.Z. Jones: Relating the Electrical Resistance of Fresh Concrete to Mixture Proportions, Advances in Civil Engineering Materials, Vol.7 (1), pp.

71-86, 2018.

- 16) 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.
- 17) 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, pp. 766-771, 2021.
- 18) 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.
- 19) 村上 拓, 阿保 寿郎, 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.
- 20) 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.
- 21) 水畑 穰, 雨澤 浩史:インピーダンス法 (2) 電気伝導率測定的手段として, Electrochemistry, 74 巻, 5 号, pp. 417-422, 2006.
- 22) Agilent Technologies:インピーダンス測定ハンドブックーインピーダンス測定とその応用ー, 2003.
- 23) HIOKI E.E. CORPORATION:インピーダンス測定の手引き, 第 1 版, 2017.
- 24) 皆川 浩, 齊藤 佑貴, 榎原 彩野, 久田 真, 江澤 一明, 酒井 正和, 立神 久雄, 市川 聖芳:鉄筋が 4 プローブ法による電気抵抗率の測定値に及ぼす影響, 土木学会第 64 回 年次学術講演会, V-206, 2009.

3 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

3.1 はじめに

2章の既往の研究からの知見を参考に、コンクリートの材料分離と充填を評価するのに適した電気的特性として、交流電源を用いて測定されるインピーダンスを第一候補とした。3章では、とくに材料分離の評価方法を確立するため、材料分離は計画配合からの配合変化と捉え、コンクリートのインピーダンスに及ぼす影響因子として検討すべき対象を表-3.1のとおり選定し、セメントペースト（以下、ペーストという）、モルタルおよびコンクリート等の様々な配合を対象としてその影響度を検討した。なお、コンクリートは土木構造物に一般的に用いられる範囲のスランプ8~21 cmを検討対象として中庸のスランプを想定して試験配合を設定した。また、各配合とも均質であることを前提とした。

既往の研究では、電気抵抗、電気伝導率、比抵抗等への影響度が小さいとされた影響因子についても交流インピーダンスで同様の傾向であるか確認する。また、比較的影響度が高いとされるペースト体積については、多様な方向性から検討を行う。

なお、影響因子の検討の前に測定周波数について調査・検討する。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¹⁾。そのため、誤差が小さい測定周波数をあらかじめ選定することとした。

表-3.1 検討対象とした影響因子

配合に関する影響因子	検討対象とした理由
化学混和剤添加率	影響度が小さいと想定されるが、多くの配合に関連する。
水セメント比	影響度が小さいと想定されるが、主要なパラメータである。
単位水量	影響度が大きいと想定され、主要なパラメータである。
空気量	加振させたときの電気伝導率への影響が報告されている。
ペースト体積／単位粗骨材量	影響度が大きいとの複数の報告がある。単位粗骨材量も影響度が大きいとの報告があるが、ペースト体積と表裏一体のため電気伝導体であるペースト体積のみの検討とした。
細骨材率	ペースト体積とインピーダンスの関係において、細骨材と粗骨材の混和バランスによって近似曲線にギャップが認められたため、追加検討した。
骨材表面積	
有効ペースト体積	

3.2 測定条件

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3 ），細骨材は山砂（表乾密度 2.56 g/cm^3 ，吸水率 2.48% ），粗骨材は碎石（表乾密度 2.64 g/cm^3 ，吸水率 0.72% ，最大寸法 20 mm ），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のみに混和した．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-3.2 に計画配合と体積構成比を示す．調査対象は，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とした．ペーストは水セメント比を $20 \sim 100,000 \%$ 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 $40 \sim 70 \%$ ），ペースト体積変化の M2 シリーズ（細骨材セメント質量比 $2 \sim 3$ ，水セメント比 50% ）と M3 シリーズ（細骨材セメント質量比 $1 \sim 5$ ，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 $1 \sim 3$ ，水セメント比 40% ）と PG2 シリーズ（粗骨材セメント質量比 $1 \sim 3$ ，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．これらの配合のうち，はじめに構成材料がシンプルなペーストのインピーダンス測定結果から影響度の低い影響因子を除外しながら，骨材を混和する配合に移行してインピーダンス測定を行い影響度の大きい影響因子を絞り込むこととした．

図-3.1 にインピーダンス測定方法を示す．絶縁用のゴムシート上にプラスチック製容器（幅 $145 \text{ mm} \times 215 \text{ mm}$ ，高さ 160 mm ）を置き，棒状電極（ $\phi 3.0 \text{ mm}$ ，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 100 mm で統一した．各配合を練り混ぜ，上記容器に投入後，木槌等で適度に叩きを行って静置し，セメント接水から 15 分後に LCR メータ（HIOKI 製，IM3536，基本確度 $\pm 0.05\% \text{ rdg.}$ ）を用いて，測定信号レベル 5 V_{rms} を印可し電極間のインピーダンスを測定した．

表-3.2 計画配合と体積構成比

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)				体積構成比
					W	C	S	G	
P-1	N	20	-	0.0	387	1935	0	0	ペースト (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	N	30	-	0.0	486	1620	0	0	
P-3	N	40	-	0.0	558	1395	0	0	
P-4	N	50	-	0.0	612	1224	0	0	
P-5	N	60	-	0.0	654	1090	0	0	
P-6	N	70	-	0.0	689	984	0	0	
P-7	N	100	-	0.0	759	759	0	0	
P-8	N	1,000	-	0.0	969	97	0	0	
P-9	N	10,000	-	0.0	997	10	0	0	
P-10	N	100,000	-	0.0	1000	1	0	0	
M1-1	N	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	N	50	100.0	2.0	299	598	1195	0	
M1-3	N	60	100.0	2.2	320	533	1195	0	
M1-4	N	70	100.0	2.5	336	480	1195	0	
M2-1	N	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	N	50	100.0	2.5	267	534	1331	0	
M2-3	N	50	100.0	2.0	299	598	1195	0	
M3-1	N	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	N	55	100.0	3.0	258	469	1405	0	
M3-3	N	55	100.0	1.0	418	760	758	0	
PG1-1	N	40	0.0	0.0	206	515	0	1544	ペースト+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	N	40	0.0	0.0	259	648	0	1296	
PG1-3	N	40	0.0	0.0	349	873	0	874	
PG2-1	N	55	0.0	0.0	263	478	0	1434	ペースト+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	N	55	0.0	0.0	324	589	0	1177	
PG2-3	N	55	0.0	0.0	422	767	0	766	
C1-1	N	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	N	58	41.5	3.1	148	255	778	1130	
C1-3	N	58	50.6	3.1	170	293	896	903	
C1-4	N	58	60.7	3.1	192	331	1014	676	
C1-5	N	58	72.1	3.1	214	369	1129	451	
C2-1	N	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	N	55	40.0	2.2	175	318	696	1074	
C2-3	N	55	50.0	2.7	175	318	870	895	
C2-4	N	55	60.0	3.3	175	318	1044	715	
C2-5	N	55	70.0	3.8	175	318	1216	536	
C3-1	N	50	47.6	2.2	185	370	796	903	C3-1

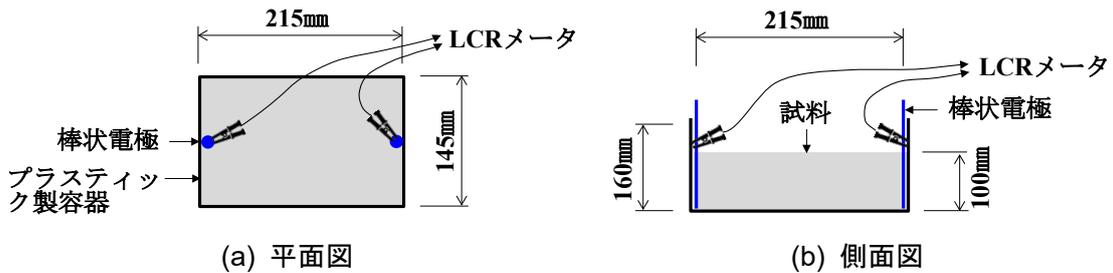


図-3.1 インピーダンス測定方法

3章で実施した試験では全ての試料に対し、測定周波数を5 Hz～1 MHzの範囲で変化させながらインピーダンスと位相角を連続測定した。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シリーズのうち、土木構造物に採用されることの多い水セメント比50～55%の各1配合を代表例として、測定周波数とインピーダンスの関係を図-3.2、測定周波数と位相角の関係を図-3.3に示す。インピーダンスは測定周波数1 kHz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10 kHz～100 kHz付近で0 degになっている。そこで、以降の試験結果は測定周波数10 kHzのときのインピーダンスを用いて整理することとした。

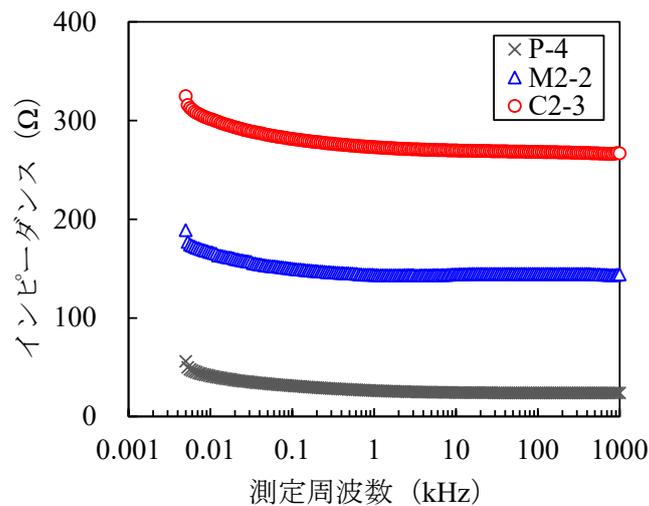


図-3.2 測定周波数とインピーダンスの関係

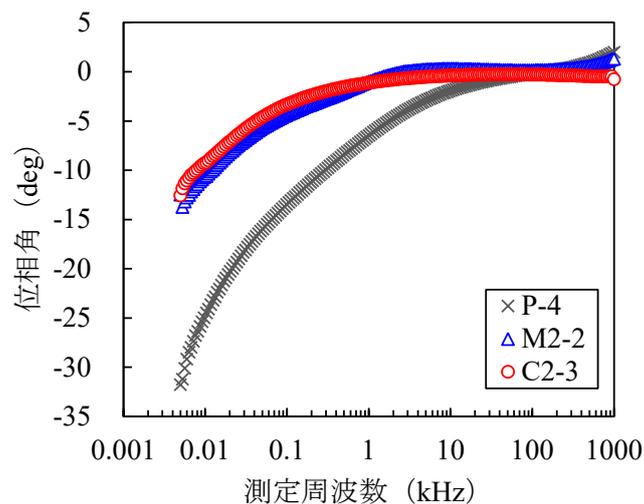


図-3.3 測定周波数と位相角の関係

3.3 電流媒体の検討

3.3.1 水とペーストの比較

図-3.4 はコンクリート中を流れる電流のイメージである。固相（骨材）は絶縁材料であるため、電流は導体である液相を流れる。液相としては水またはペーストが考えられる。ここでは、水またはペーストのどちらかを電流の媒体とみなすことができるかを検討する。

表-3.2 の配合のうちペーストの単位水量を変化させた P シリーズのインピーダンスを測定した。図-3.5 に P シリーズの単位水量とインピーダンスの関係を示す。水が大半を占める配合では、単位水量の増大とともにインピーダンスが急速に増大したが、通常のコンクリートに用いられる水セメント比の配合では、単位水量にかかわらずインピーダンスは一定となった。P シリーズはペースト体積が一定であることから、電流が流れる液相は水（単位水量）よりペースト（ペースト体積）と考えるのが合理的である。

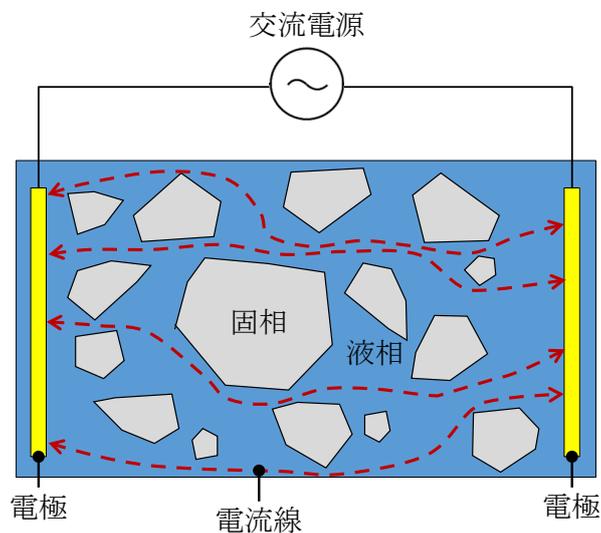


図-3.4 試料中の電流のイメージ

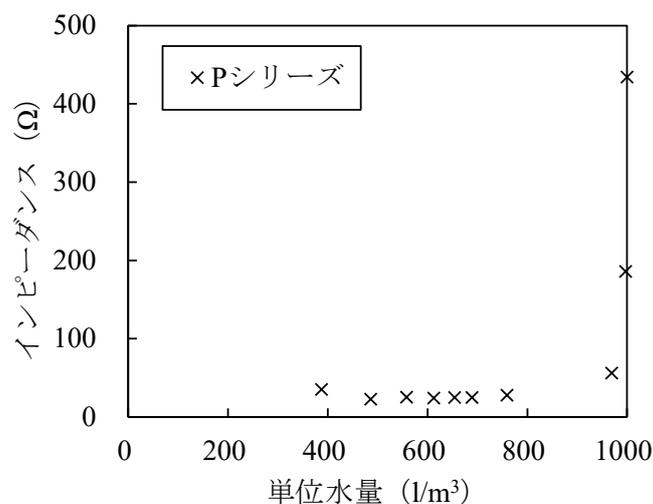


図-3.5 単位水量とインピーダンスの関係 (P シリーズ)

3.3.2 化学混和剤添加率の影響

次に、電流の媒体と考えられるペーストに化学混和剤を添加したときの影響を検討する。表-3.2 の配合のうち化学混和剤を添加しない P-4 と、セメント質量の 1% の化学混和剤を添加した P-4AD について、測定周波数とインピーダンスの関係を図-3.6 に示す。測定周波数 10 kHz 未満においては、P-4AD のインピーダンスがわずかに大きい。測定周波数 10 kHz 以上ではほぼ同程度であった。図-3.7 は P-4 と P-4AD に関する測定周波数と位相角の関係である。全域の周波数で位相角はほぼ一致した。インピーダンスおよび位相角はともに化学混和剤の添加の有無でほとんど変わらないことから、モルタルやコンクリート等においても同様に化学混和剤の添加の影響は小さいと考えられる。この結果は、高木ら²⁾が実施したペーストの電気伝導率測定において、化学混和剤（アルキルエーテル系）の添加による電気伝導率への影響は軽微で、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とした結果と整合する。

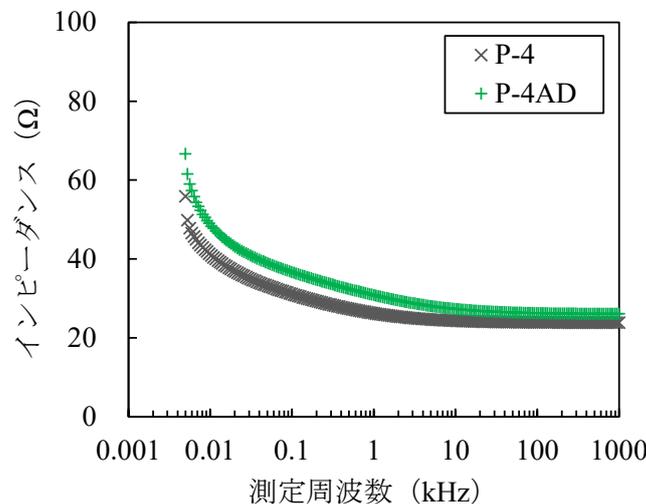


図-3.6 測定周波数とインピーダンスの関係

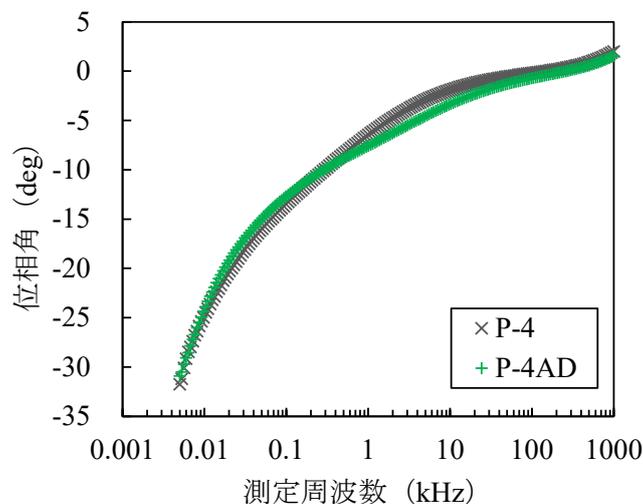


図-3.7 測定周波数と位相角の関係

3.4 骨材の混和による影響検討

3.4.1 ペーストとモルタルとコンクリートの比較

ペーストに骨材が混和されたときのインピーダンスに及ぼす影響を検討する。表-3.2 の配合のうち、ペーストの水セメント比を変化させた P シリーズ(水セメント比 100%以下)、ペースト体積が一定で水セメント比を変化させたモルタルの M1 シリーズ、ペースト体積がほぼ同じで水セメント比の異なるコンクリートの C1-3 と C2-3 のインピーダンスを比較した。

図-3.8 に水セメント比とインピーダンスの関係を示す。インピーダンスはペーストが最も小さく、ペーストが骨材によって置換される体積が大きくなるに従い、モルタル、コンクリートの順にインピーダンスが増大した。つまり、インピーダンスは電流の媒体と考えられるペースト体積に大きく依存していると考えられる。

ここで、ペースト、モルタル、およびコンクリートで同じ水セメント比のとき異なるインピーダンスを示した。つまり、水セメント比ではインピーダンスの変化を説明できず、水セメント比はインピーダンスと相関が低いと考えられた。Obla ら³⁾によれば、電気抵抗は基本的に水セメント比と相関がないと報告しており、今回の考察と整合する。

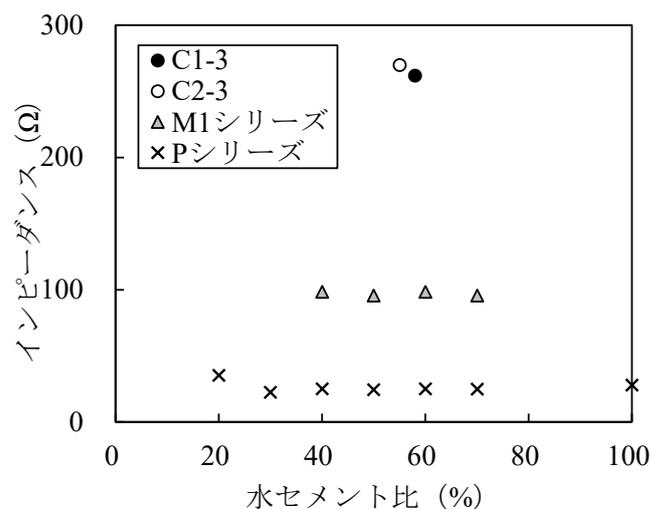


図-3.8 水セメント比とインピーダンスの関係

3.4.2 空気量の影響

表-3.2 の配合のうち、M3 シリーズ、C1 シリーズ、C2 シリーズの空気量とインピーダンスの関係を図-3.9 に示す。均質なコンクリートであることを前提とした場合、空気量はインピーダンスと相関が低いと考えられる。

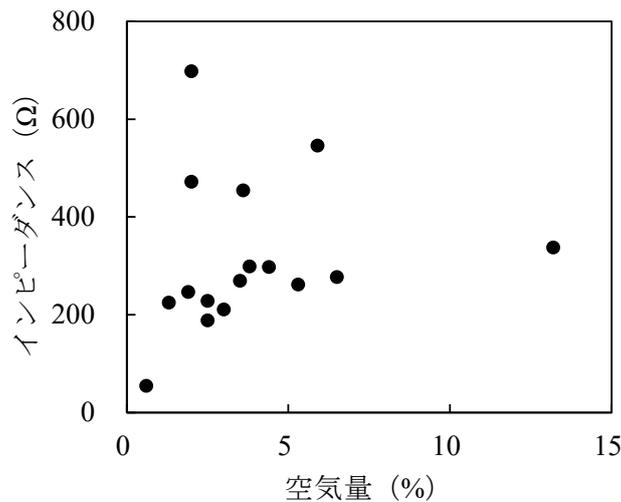


図-3.9 空気量とインピーダンスの関係

3.4.3 ペースト体積の影響

2章の既往の研究および3.4.1項から影響度が大きいと考えられるペースト体積のインピーダンスへの影響を調査する。表-3.2の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-3.10にペースト体積とインピーダンスの関係を示す。すべての配合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。この結果は高木ら²⁾とOblaら³⁾の報告内容と整合する。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電流すなわち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。

しかしながら、ペーストに細骨材を混和したM2, M3シリーズの近似曲線とペーストに粗骨材を混和したPG1, PG2シリーズの近似曲線を比較するとギャップが存在する。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はPG1, PG2のインピーダンスより大きい。つまり、骨材体積ではなく、骨材の種類の違いがインピーダンスに影響を及ぼしたことになる。

図-3.11にC1~C3, M1~M3シリーズのペースト体積とインピーダンスの関係を示す。図-3.10と同様に、C1~C3シリーズの近似曲線とM1~M3シリーズの近似曲線にギャップを確認できる。C1~C3シリーズとM1~M3シリーズのペースト体積が同じとき、異なるのは粗骨材の存在であり、細骨材と粗骨材の混合割合がインピーダンスに影響を及ぼしていると考えられた。したがって、細骨材と粗骨材の両方を混和するコンクリート同士の比較では、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。

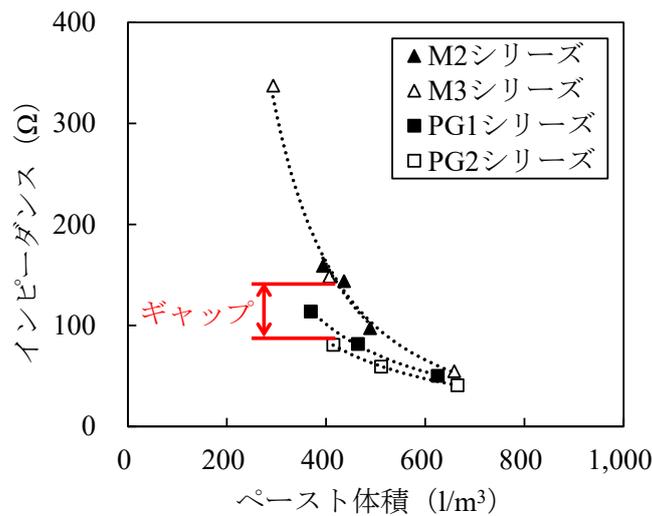


図-3.10 ペースト体積とインピーダンスの関係 (M2, M3, PG1, PG2 シリーズ)

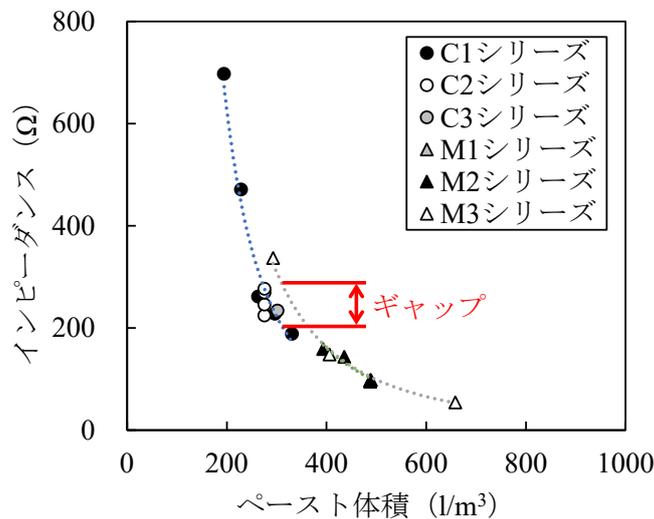


図-3.11 ペースト体積とインピーダンスの関係 (C1~C3, M1~M3 シリーズ)

3.4.4 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、表-3.2 の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-3.12 に細骨材率とインピーダンスの関係を示す。C1 シリーズは細骨材率の増大に伴い急激にインピーダンスが減少する負の相関がある。C2 シリーズは、インピーダンスの最大値と最小値の差が 52Ω と比較的小さいが、細骨材率の増大に伴いインピーダンスが増大する正の相関がある。C1 シリーズと C2 シリーズは正負逆の相関が見られ、細骨材率ではインピーダンスの変化を説明できない。なお、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。したがって、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。

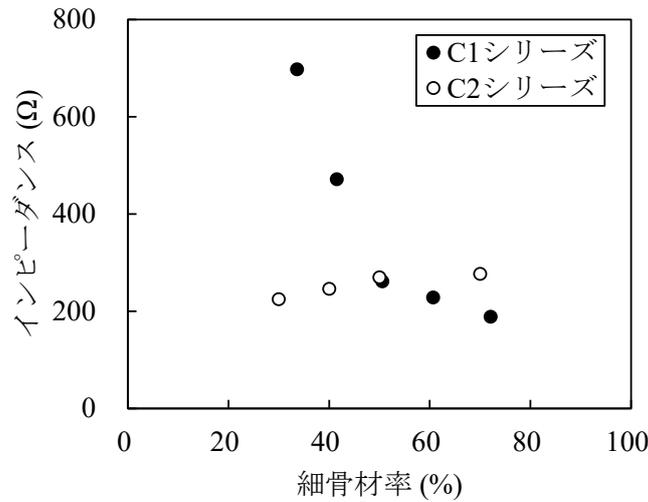


図-3.12 細骨材率とインピーダンスの関係 (C1, C2 シリーズ)

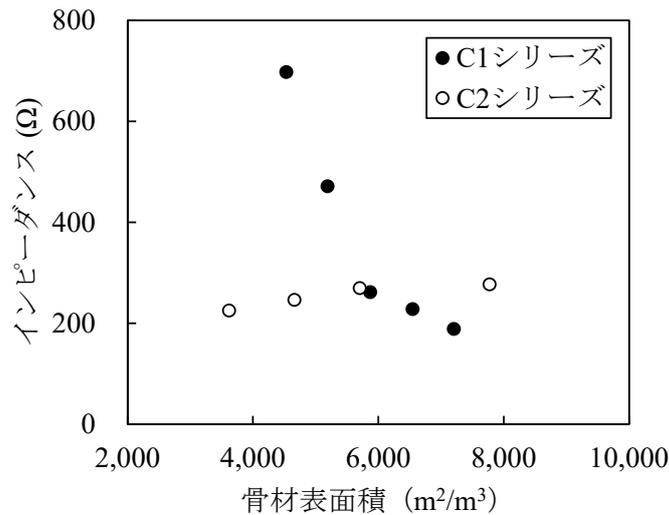
3.4.5 骨材表面積の影響

そこで、細骨材率がインピーダンスに影響を及ぼす要因を検討する。図-3.10 および図-3.11 において各配合シリーズの近似曲線にギャップを生じさせているのは細骨材と粗骨材の混合割合であり、細骨材と粗骨材の大きな違いは比表面積である。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、骨材表面積という）が増大することになる。図-3.13 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径を球状と仮定し粒度分布から、細骨材の比表面積 $63 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、粗骨材の比表面積 $2.8 \text{ cm}^2/\text{g}$ を算出し、式 (3.1) に従い各配合の単位量を乗じ合算して求めた。

$$A_{S+G} = (S_S \cdot M_S + S_G \cdot M_G) \cdot 10^{-1} \quad (3.1)$$

- ここに、 A_{S+G} : 骨材表面積 (m^2/m^3)
 S_S : 細骨材の比表面積 (cm^2/g)
 S_G : 粗骨材の比表面積 (cm^2/g)
 M_S : 細骨材の単位量 (kg/m^3)
 M_G : 粗骨材の単位量 (kg/m^3)

骨材表面積とインピーダンスの関係は、細骨材率とインピーダンスの関係に近い。C1 シリーズと C2 シリーズは正負逆の相関が見られ、骨材表面積だけではインピーダンスの変化を説明できない。ペースト体積と骨材表面積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、骨材表面積の影響度はペースト体積より小さいと考えられる。



-3.13 骨材表面積とインピーダンスの関係 (C1, C2 シリーズ)

3.4.6 有効ペースト体積の立案と検証

インピーダンスはペースト体積によって大きく変化していることから、ペースト体積は主要な影響因子であり、インピーダンスの変化をペースト体積の変化でおおむね説明できる。一方で、細骨材率または骨材表面積がわずかにペースト体積とは逆方向の影響を及ぼしている。影響度の大きいペースト体積を軸に考えれば、細骨材率または骨材表面積に起因してペースト体積を減じる因子が存在している。そこで、骨材表面との相互作用によってペーストが拘束されると考え、図-3.14 に示すように骨材表面周囲にイオン泳動に寄与しない拘束ペースト膜 (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拘束ペースト膜の体積も増大するため、イオン泳動に有効な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、ペースト体積から拘束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⁴⁾。ここに、その体積を有効ペースト体積 V_{eff} と定義し、式 (3.2) に表す。

$$V_{eff} = V_P - \alpha \cdot A_{S+G} \quad (3.2)$$

ここに、 V_{eff} : 有効ペースト体積 (l/m³)
 V_P : ペースト体積 (l/m³)
 α : 拘束ペースト膜厚 (mm)
 A_{S+G} : 骨材表面積 (m²/m³)

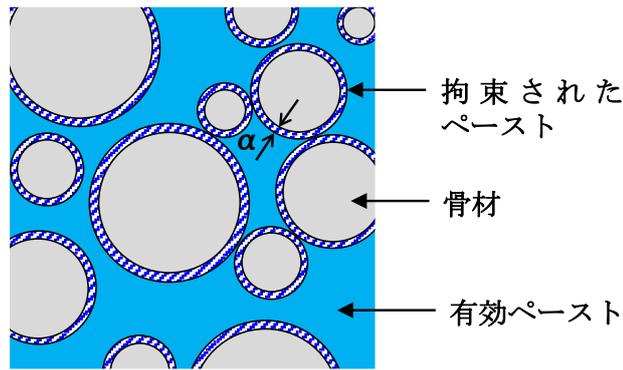


図-3.14 有効ペーストの概念

図-3.15 に M2, M3, PG1, PG2 シリーズの有効ペースト体積とインピーダンスの関係, 図-3.16 に C1~C3 シリーズ, M1~M3 シリーズの有効ペースト体積とインピーダンスの関係を示す. 図-3.10 と図-3.11 において各近似曲線に存在したギャップが小さくなっている. 式 (3.2) 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 0.005 mm ($=5\ \mu\text{m}$) を求めた. この値は, 桜井⁶⁾ により算出されたセメントが拘束する水膜厚さ ($5\sim 7\ \mu\text{m}$ 程度), 山下ら⁷⁾ により算出された細骨材が拘束する水膜厚さ ($7.4\ \mu\text{m}$) 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⁸⁾ ことから, イオンが水とともに骨材表面に拘束されている可能性がある.

表-3.2 の配合のうち, 骨材が混和されたすべての配合 (P シリーズを除くすべての配合) について, 図-3.17 にペースト体積とインピーダンスの関係 (両軸対数), 図-3.18 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. 双方ともに直線的な関係が得られ, ペースト体積または有効ペーストを変数とした関数でインピーダンスの予測が可能である. さらに, 有効ペースト体積を採用することで, 細骨材率または骨材表面積の違いによるわずかなインピーダンスの変化も反映できる.

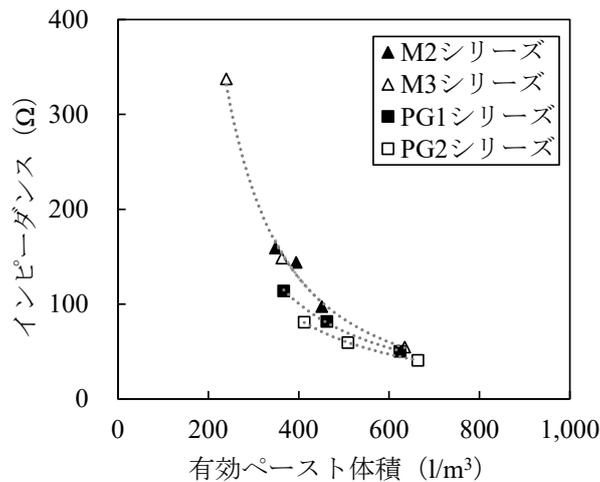


図-3.15 有効ペースト体積とインピーダンスの関係 (M2, M3, PG1, PG2 シリーズ)

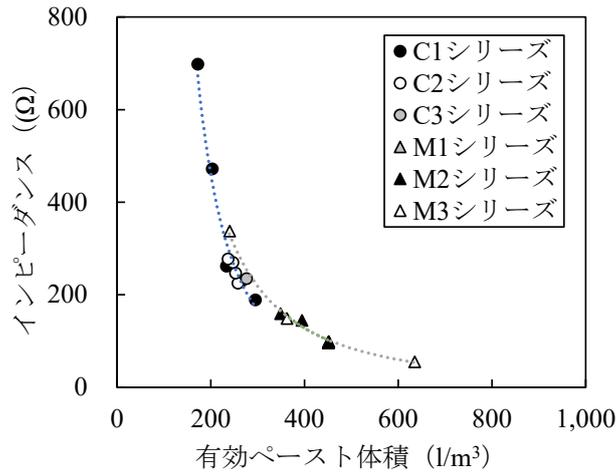


図-3.16 有効ペースト体積とインピーダンスの関係 (C1~C3, M1~M3 シリーズ)

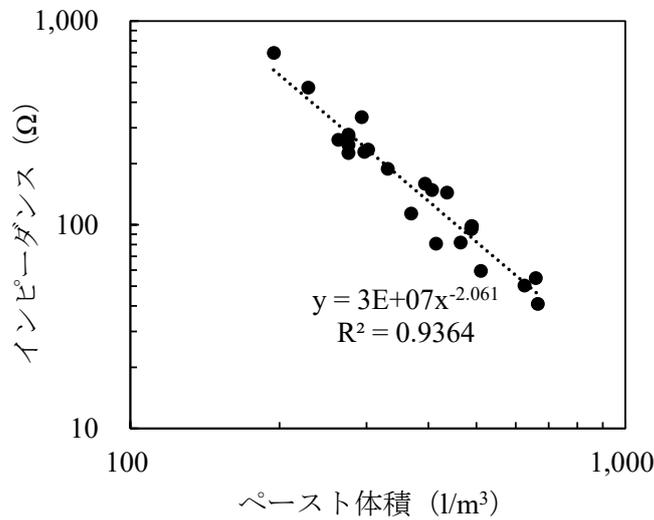


図-3.17 ペースト体積とインピーダンスの関係 (P シリーズを除く全配合)

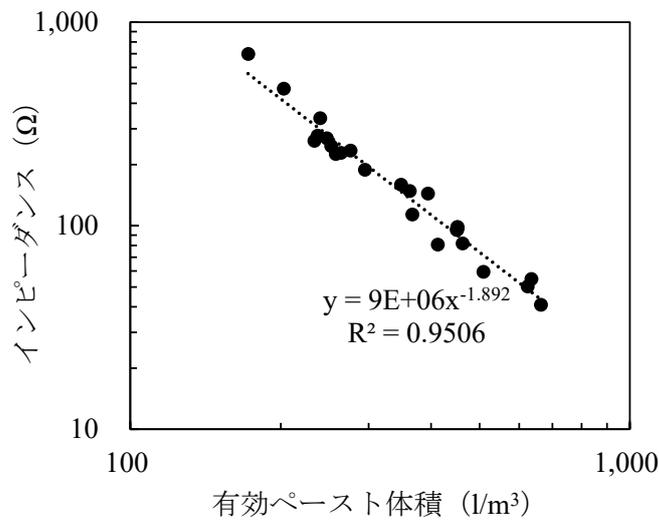


図-3.18 有効ペースト体積とインピーダンスの関係 (P シリーズを除く全配合)

3.5 均質性評価理論

ここでは、温度や骨材の粒度分布が変わらず、精密測定機器を用いた理想的な条件の室内での実験において成立した有効ペースト体積とインピーダンスの関係を利用したときの均質性評価理論を整理する。図-3.19に有効ペースト体積に基づく管理限界値の設定方法、図-3.20に室内実験結果から想定される均質性評価方法の手順を示す。仮に表-3.2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 V_P と骨材表面積 A_{S+G} を算出し、式(3.2)を用いて有効ペースト体積 V_{eff} を求める($V_{eff}=233\text{ l/m}^3$)。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(3.2)を用いて有効ペースト体積 V_{eff} を求める($V_{eff}=172\text{ l/m}^3$, 295 l/m^3)。これらの有効ペースト体積 V_{eff} を式(3.3)に代入してそれぞれのインピーダンス予測値 Z_{20} を求め、中心値 $315\ \Omega$ 、上方管理限界値 $559\ \Omega$ 、下方管理限界値 $202\ \Omega$ を設定する。以上の計算結果を表-3.3に整理する。ただし、式(3.3)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。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方法に基づき、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、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。なお、ここで提示した有効ペースト体積を用いた均質性評価方法は、温度が一定に保たれた実験室内で常に同一の粒度分布の骨材を使用して製造した各種配合を対象に、精密測定機器(LCRメータ)を用いてインピーダンスを測定した結果から、わずかな変化も考慮して導き出したものである。条件が異なる建設現場に適用するにあたっては測定機器も含めた検討が必要である。

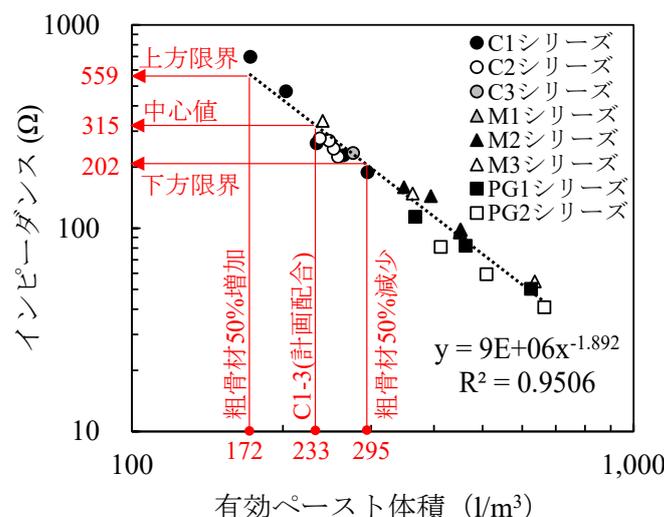


図-3.19 有効ペースト体積に基づく管理限界値の設定方法

$$\begin{aligned}
 Z_{20} &= 9.492 \times 10^6 \times V_{eff}^{-1.892} \\
 &= 9.492 \times 10^6 \times (V_P - \alpha \cdot A_{S+G})^{-1.892}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

ここに、 Z_{20} : 基準温度 20 °Cのときのインピーダンス予測値 (Ω)
 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 : 拘束ペースト膜厚 (mm)
 A_{S+G} : 骨材表面積 (m^2/m^3)

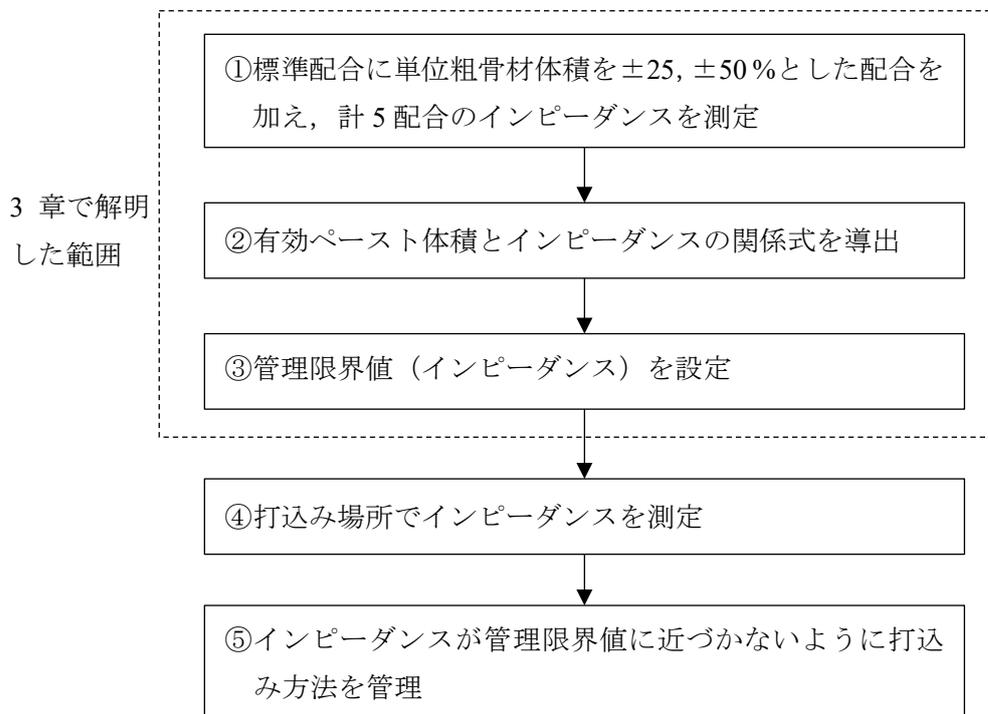


図-3.20 室内実験結果から想定される均質性評価方法の手順

表-3.3 インピーダンス予測値の計算結果

配合 No.	V_P (l/m^3)	A_{S+G} (m^2/m^3)	V_{eff} (l/m^3)	Z_{20} (Ω)
C1-1	195	4,532	172	559
C1-3	263	5,867	233	315
C1-5	331	7,203	295	202

3.6 まとめ

3章では、2章の既往の研究に基づきあらかじめ検討対象とする影響因子を絞り込み、試験に供する配合を設定した。そして、温度が一定に保たれた室内で常に同一の粒度分布の骨材を使用して試料を製造し、精密測定機器（LCR メータ）を用いてインピーダンスを測定した。表-3.4 にインピーダンスに及ぼす影響因子の影響度について得られた知見とインピーダンス予測への反映方針を整理した。ただし、インピーダンス予測方法を建設現場へ適用するにあたっては、測定機器も含めた検討が必要である。得られた成果を以下にまとめる。

- (1) フレッシュコンクリートのインピーダンスは、ペースト体積の変化に最も影響を受ける。インピーダンスの変化はペースト体積の変化でおおむね説明できる。
- (2) フレッシュコンクリートのインピーダンスは、細骨材率または骨材表面積の影響も受けるが、その影響度はペースト体積に比べてわずかである。細骨材率または骨材表面積がインピーダンスに影響を及ぼす要因として、骨材表面に拘束されたペースト膜が影響を及ぼしている可能性がある。
- (3) ペースト体積から骨材表面に拘束されたペースト膜の体積を差し引いて求める有効ペースト体積を採用すれば、細骨材率または骨材表面積によるわずかなインピーダンス変化も予測できる可能性がある。

表-3.4 インピーダンスに及ぼす影響因子の影響度について得られた知見とインピーダンス予測への反映方針

影響因子	影響度とインピーダンス予測への反映方針
化学混和剤添加率	影響度は無視できる。インピーダンス予測へは考慮しない。
水セメント比	影響度は無視できる。インピーダンス予測へは考慮しない。
単位水量	影響度は比較的大きいが、単位水量ではインピーダンス変化を説明できないためインピーダンス予測へは考慮しない。
空気量	過度な加振によって上方へ空気が集まる場合は影響度が大きいと考えられるが、一般的に行われる締固めの範囲では影響度が小さいと考え、インピーダンス予測へは考慮しない。
ペースト体積	影響度が最も大きい。インピーダンス予測の主軸とする。
細骨材率	影響度は小さい。細骨材率ではインピーダンス変化を説明できないためインピーダンス予測へは考慮しない。
骨材表面積	影響度は小さい。骨材表面積だけではインピーダンス変化を説明できないが、骨材表面積に拘束ペースト膜厚を乗じた体積をインピーダンス予測へ使用する。
有効ペースト体積	影響度が最も大きいペースト体積を軸に、細骨材率または骨材表面積のわずかな影響度もインピーダンス予測に考慮する場合に使用する。ペースト体積から拘束ペースト膜体積を減じて算出する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, pp. 766-771, 2021.
- 3) K. Obla, R. Hong, S. Sherman, D.P. Bentz, and S.Z. Jones: Relating the Electrical Resistance of Fresh Concrete to Mixture Proportions, Advances in Civil Engineering Materials, Vol.7 (1), pp. 71-86, 2018.
- 4) 山田 勉, 伊代田 岳史 : 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, 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 21 巻, 2021.
- 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) 山下 彩, 桜井 邦昭, 平田 隆祥 : 細骨材表面が拘束する水量の算定方法に関する基礎的研究, 大林組技術研究所報, No. 81, 2017.
- 8) 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.

4 建設現場への適用を考慮した電極間隔と電極面積

4.1 はじめに

3章でのインピーダンス測定では、図-4.1のように容器内の試料を挟み込むように電極を配置し、試料全体に電流線が分布していたと考えられる。しかしながら、建設現場においては図-4.2に示すとおり鉄筋コンクリート構造物では型枠、覆工コンクリート天端部では防水シート等の平面上に電極を配置することになり、電流線が分布する範囲は図-4.3のように電極が設置される面に対して垂直方向へ広く分布していると考えられる。一般に、同じ電解液等の導体であれば、式(4.1)のとおりに電気抵抗は電極間隔に比例し電極面積に反比例することが知られているが、建設現場においてコンクリートの均質性を評価するにあたり、電極間隔と電極面積がどの程度影響を及ぼしているか確認する必要がある。また、建設現場に電極を用いたセンサを適用するには、センサ設置の容易さ、型枠取外し後の美観、鉄筋の影響等を考慮するとセンサを可能な限り小さくする必要がある。そのため、本章では電極間隔と電極面積がインピーダンスの測定結果に及ぼす影響を調査し、建設現場に用いるセンサ開発の条件を把握することとした。

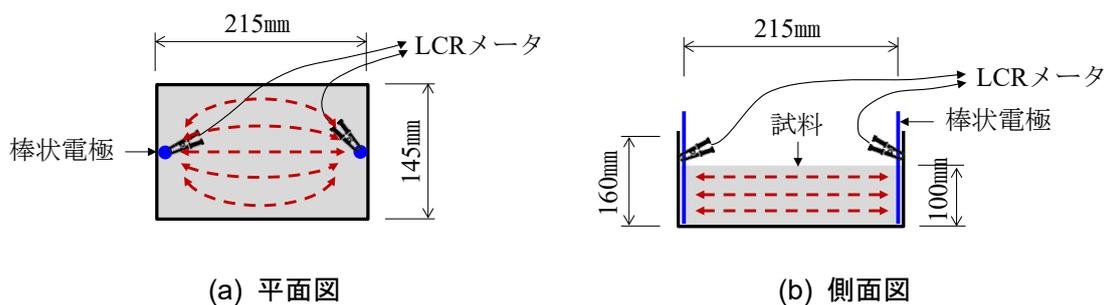


図-4.1 容器内における電流線の分布イメージ

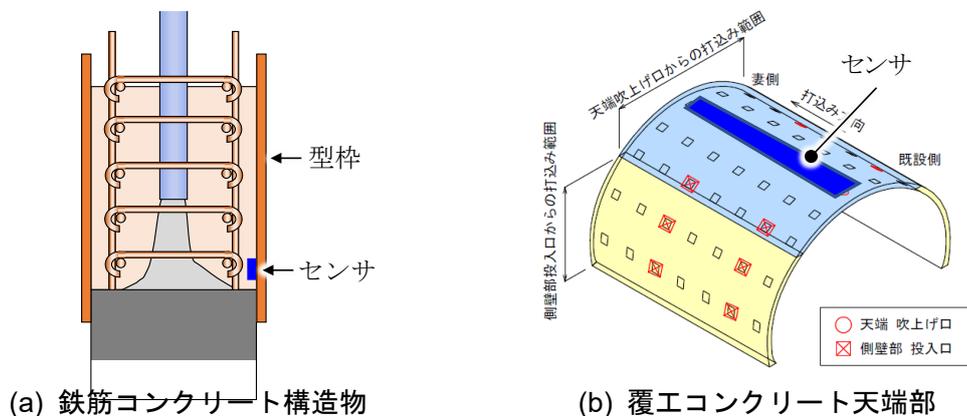


図-4.2 実構造物におけるセンサを用いたモニタリング方法

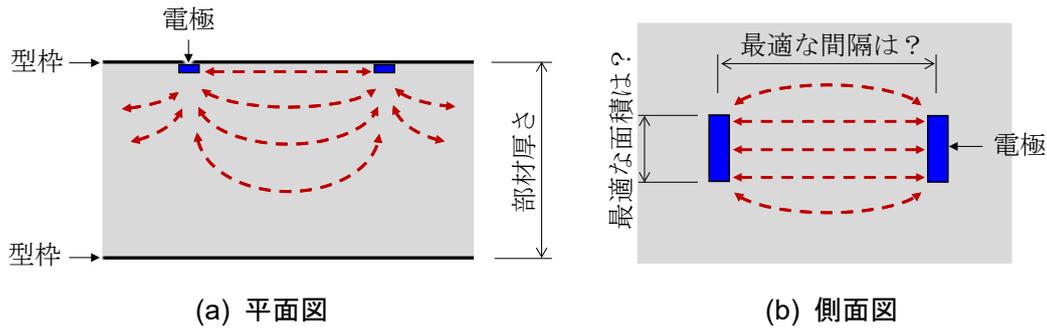


図-4.3 建設現場における電流線の分布イメージ

$$R = \gamma \cdot \frac{d}{A} \quad (4.1)$$

- ここに、 R : 電気抵抗 (Ω)
 γ : 抵抗率 ($\Omega \cdot \text{m}$)
 d : 電極間隔 (m)
 A : 電極面積 (m^2)

4.2 電極間隔の影響

配合毎のインピーダンスの差を認識しやすい電極間隔を見出すために、電極間隔を変数としてインピーダンスを測定した。測定対象は表-4.1 のコンクリート（表-3.2 の C-1, C1-3, C1-5 と同じ配合）とした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3 ），細骨材は山砂（表乾密度 2.56 g/cm^3 ），粗骨材は砕石（表乾密度 2.64 g/cm^3 ，最大寸法 20 mm），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。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。

図-4.4～図-4.6 にインピーダンス測定方法を示す。プラスチック製容器（幅 145 mm × 215 mm，高さ 160 mm）の底面に 2 本の棒状電極（ $\phi 3.0 \text{ mm}$ ，SUS304）を 30 mm，90 mm，150 mm の間隔で水平に設置した。各配合を練り混ぜ，接水から 15 分後に上記容器に高さ 100 mm までコンクリートを投入し，LCR メータ（HIOKI 製，IM3536，基本確度 $\pm 0.05\% \text{ rdg.}$ ）を用いてインピーダンスを測定した。印可する測定信号レベルは 5 Vrms とした。

図-4.7 に電極間隔とインピーダンスの関係を示す。いずれのコンクリート配合においても式 (4.1) のとおり電極間隔に比例してインピーダンスが増加する直線的な関係が得られた。C1-3 と C1-5 の傾きに比べて C1-1 の傾きが大きいので，電極間隔が大きいほど C1-1 のインピーダンスは他の配合に比べて大きな差となって表れるが，電極間隔 30 mm であっても配合毎のインピーダンス差を観察するには十分と考えられる。

表-4.1 計画配合と体積構成比

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単体量 (kg/m ³)				体積構成比
					W	C	S	G	
C1-1	N	58	33.6	3.1	126	217	663	1354	C1-1
C1-3	N	58	50.6	3.1	170	293	896	903	C1-3
C1-5	N	58	72.1	3.1	214	369	1129	451	C1-5

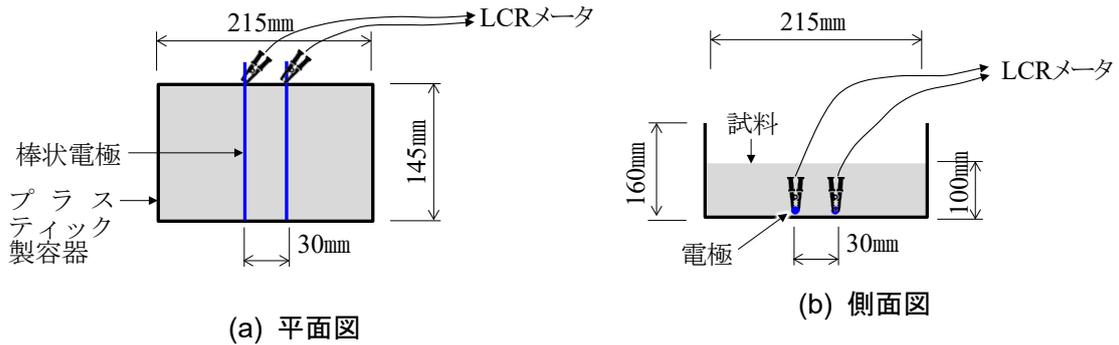


図-4.4 インピーダンス測定方法（電極間隔 30mm）

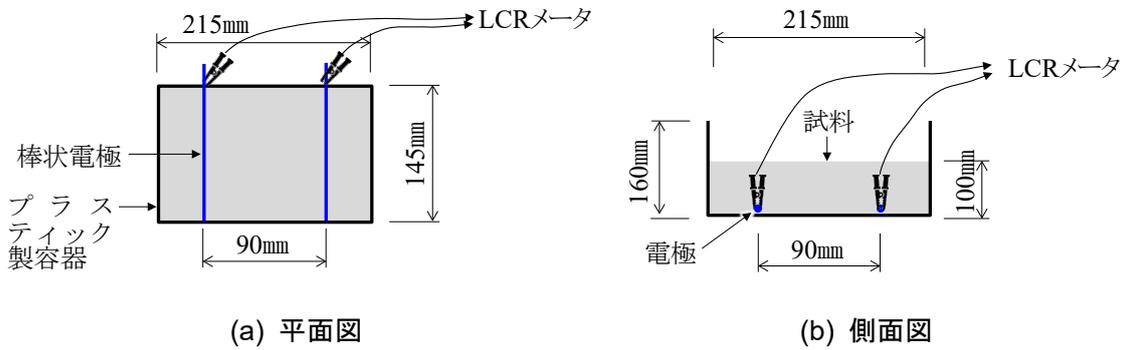


図-4.5 インピーダンス測定方法（電極間隔 90mm）

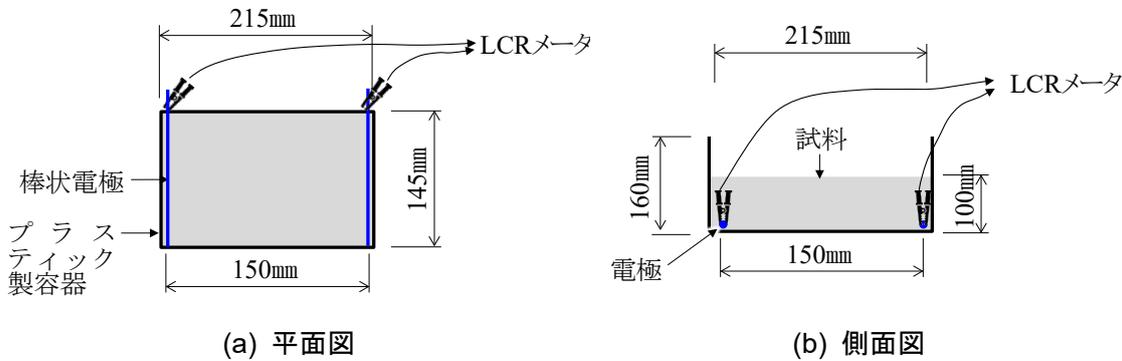


図-4.6 インピーダンス測定方法（電極間隔 150mm）

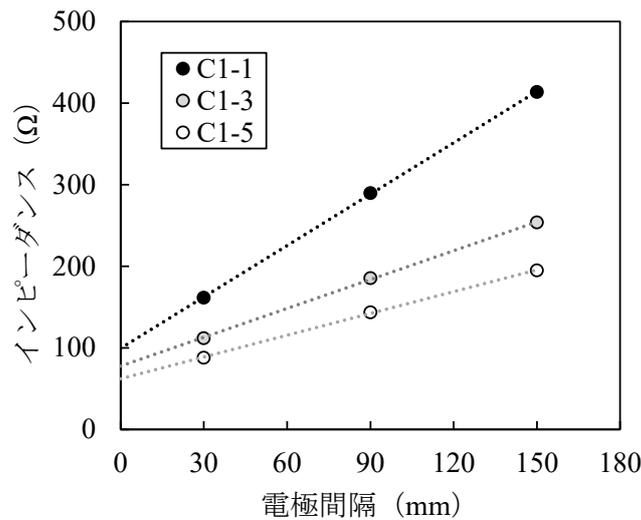
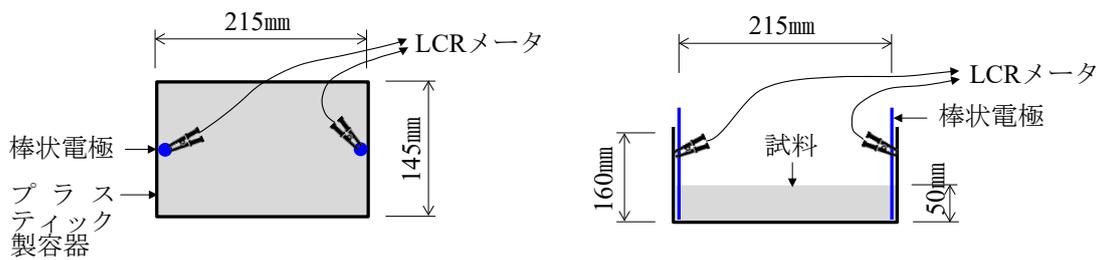


図-4.7 電極間隔とインピーダンスの関係

4.3 電極面積の影響

配合毎のインピーダンスの差を認識しやすい電極面積を見出すために、電極面積を変数としてインピーダンスを測定した。測定対象は表-4.1 のコンクリートとした。図-4.8～図-4.11 にインピーダンス測定方法を示す。プラスチック製容器（幅 145 mm×215 mm，高さ 160 mm）の側面に棒状電極（φ3.0 mm，SUS304）と板状電極（幅 50 mm，厚さ 1.0 mm，SUS304）を鉛直に設置した。板状電極は裏面を絶縁テープで被覆して使用した。各配合を練り混ぜ、接水から 15 分後に上記容器に投入を開始し、試料高さ 50 mm，100 mm のとき，LCR メータ（HIOKI 製，IM3536，基本確度±0.05% rdg.）を用いてインピーダンスを測定した。印可する測定信号レベルは 5 Vrms とした。

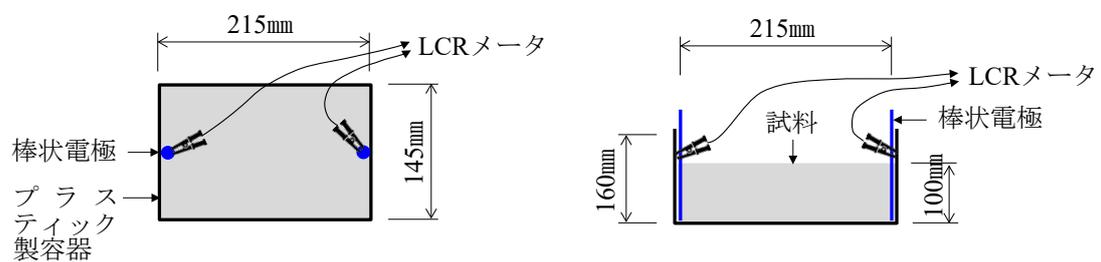
図-4.12 に電極面積とインピーダンスの関係を示す。インピーダンスは式 (4.1) のとおり電極面積に反比例する結果となり、いずれの電極面積においても C1-1～C1-5 の配合でインピーダンスに差が生じた。したがって、電極面積は比較的小さい 500 mm² 程度でも評価可能と考えられる。とくに粗骨材が多い配合（C1-1）は標準の配合（C1-3）に対して明らかに大きいインピーダンスとなったことから、粗骨材の局所的な集中は評価が容易である。



(a) 平面図

(b) 側面図

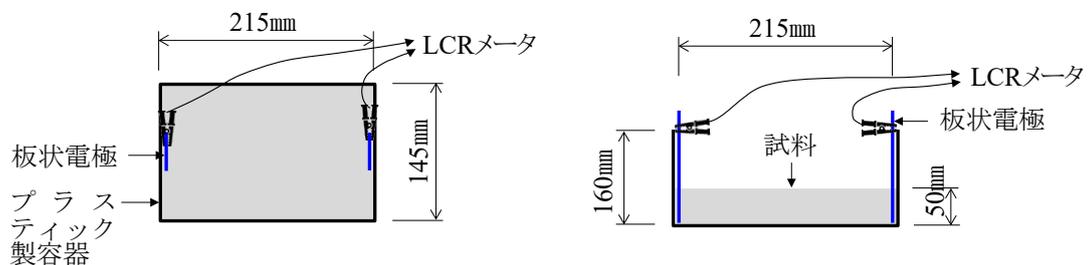
図-4.8 インピーダンス測定方法（棒状電極，試料高さ 50mm）



(a) 平面図

(b) 側面図

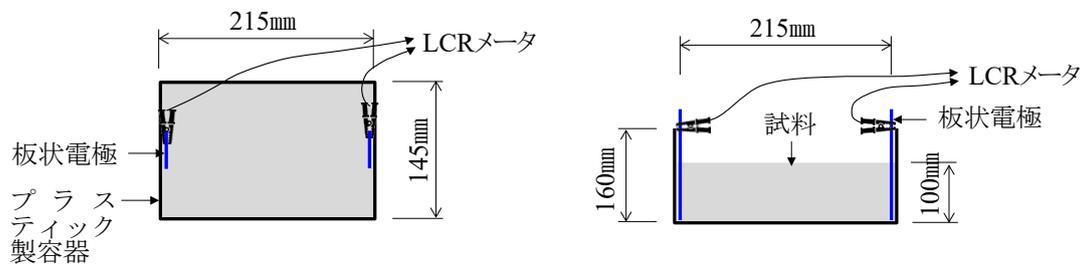
図-4.9 インピーダンス測定方法（棒状電極，試料高さ 100mm）



(a) 平面図

(b) 側面図

図-4.10 インピーダンス測定方法（板状電極，試料高さ 50mm）



(a) 平面図

(b) 側面図

図-4.11 インピーダンス測定方法（板状電極，試料高さ 100mm）

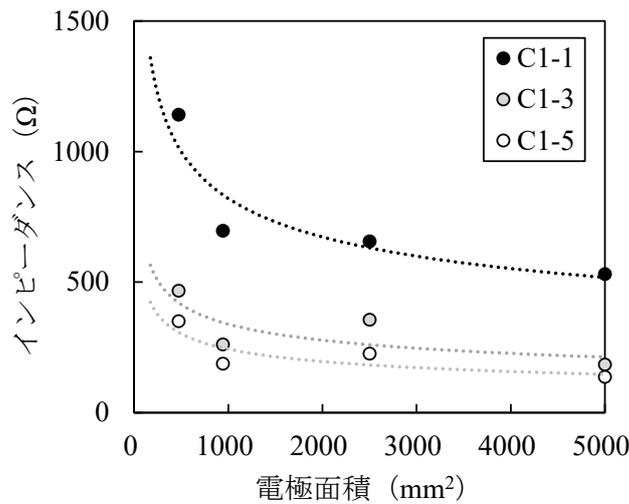


図-4.12 電極面積とインピーダンスの関係

次に、プラスチック製容器（幅 145 mm×215 mm，高さ 160 mm）の側面に図-4.13 に示すとおり小型の板状電極（幅 10 mm×28 mm，電極中心間隔 20 mm，電極面積 280 mm²）を縦と横に配置し，表-4.2 のペーストを段階的に投入して電極がペーストで徐々に覆われていく様子を模擬した．印可する測定信号レベルは 5 Vrms とした．なお，小型の板状電極は試料に埋設されるため，電極にケーブルを接続して回路に取り込み，電極間のインピーダンスに代えて電圧計で電圧を測定した．電極間の電圧は印可電圧を 10 ビット（1,024）で分割したときの相対値として変換した無次元データ（以下，電圧デジタル信号という）として出力した．

図-4.14 に電極横配置のときの電極面積と電圧デジタル信号の関係を示す．ペーストに接触した電極面積が増えるに従い，電圧デジタル信号は電極面積に反比例して小さくなった．この関係は図-4.12 と同様である．図-4.15 に電極横配置のときの電極面積と電圧デジタル信号の関係を示す．下方の電極にペーストが接触しても電極間がペーストで満たされない限り，電圧デジタル信号に変化は生じなかった．電極間がペーストで満たされた後は図-4.12 と同様に電極面積が増えるに従い電圧デジタル信号が反比例して低下する結果となった．このように，基本的にはコンクリート等の導体が電極に触れる面積によってインピーダンス（電圧デジタル信号）が決定されるが，電極がコンクリート等の導体によって充填されていく方向によってはインピーダンス（電圧デジタル信号）が急激に変化する場合がある．

表-4.2 計画配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)	
			W	C
P-4	N	50	612	1224

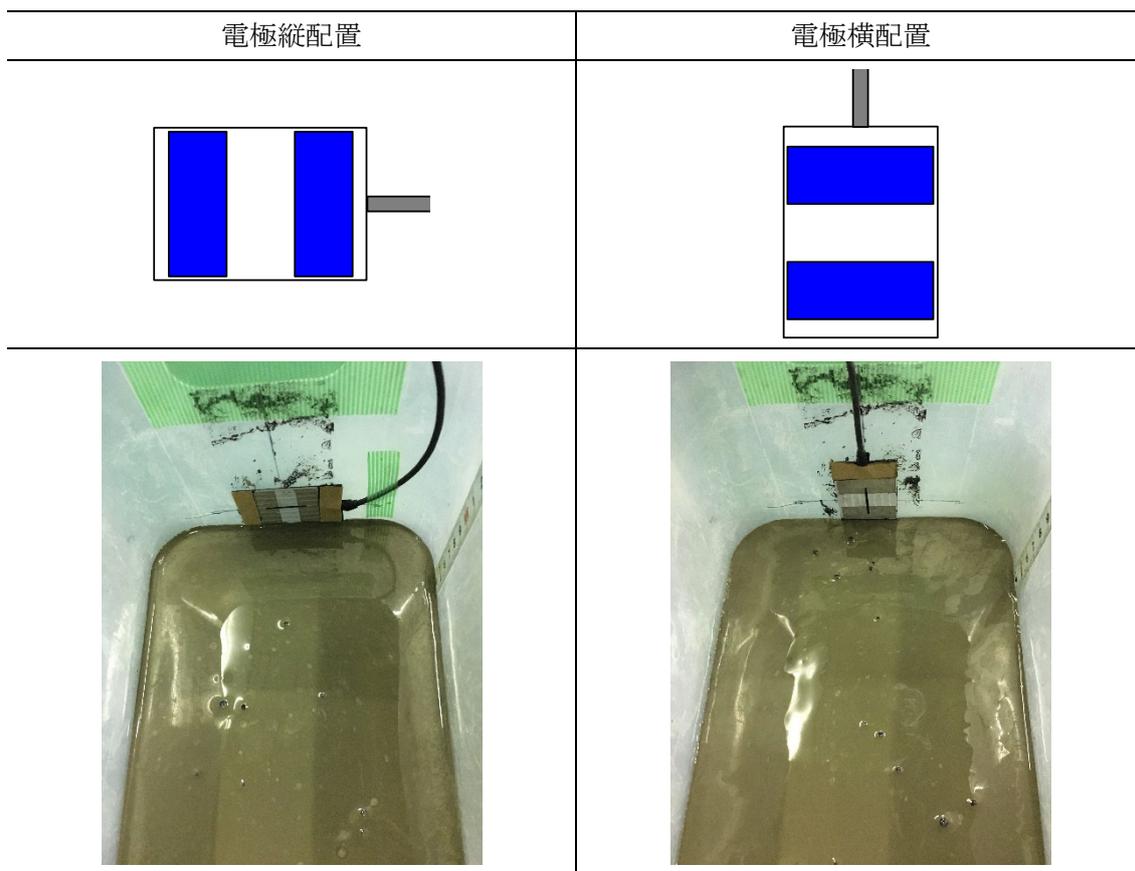


図-4.13 小型板状電極の配置方向とペーストとの接触状況

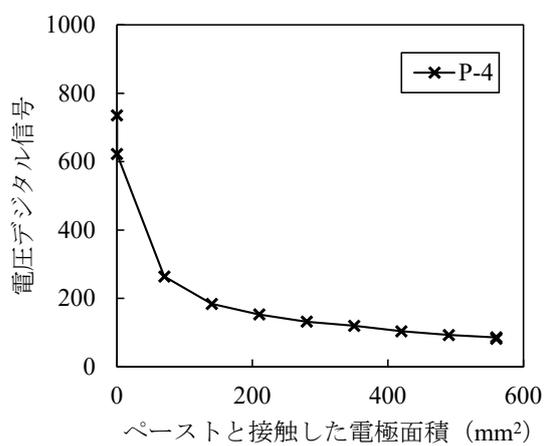


図-4.14 電極面積と電圧デジタル信号の関係（電極縦配置）

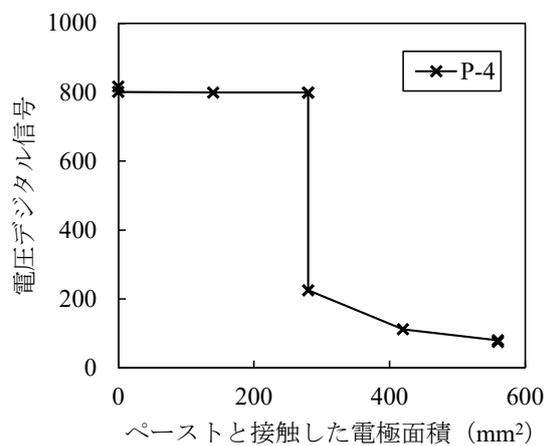


図-4.15 電極面積と電圧デジタル信号の関係（電極横配置）

4.4 電極間隔と電極面積の関係

4.2 節および 4.3 節の結果をもとに電極間隔 30 mm 以下、電極面積 500 mm²程度としたとき、材料分離を捉える可能性を確認する。図-4.16 に示すとおりプラスチック製容器（幅 145 mm×215 mm、高さ 160 mm）の底面に小型の板状電極（幅 10 mm×28 mm、電極中心間隔 20 mm、電極面積 280 mm²）と棒状電極（φ3.0 mm、電極間隔 30 mm、電極面積 1,366 mm²）を設置し、表-4.1 のコンクリートを高さ 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 mm まで順次投入し、その都度振動を加えたうえで電圧デジタル信号またはインピーダンスを測定した。印可する測定信号レベルは 5 V_{rms} とした。

図-4.17 に小型の板状電極で測定した試料高さと電圧デジタル信号の関係を示す。小型の板状電極では全ての配合において試料高さ 10 mm から 20 mm までは電圧デジタル信号が低下したが、その後は上昇に転じた。これは振動付与によって粗骨材が沈降し、板状電極周囲で粗骨材が徐々に密になり、図-4.19 のように電流の経路が大きく屈曲²⁾あるいは減少したことが原因と考えられる。1 対の板状電極の大きさが粗骨材の最大寸法（20 mm）に近いことから、粗骨材の集中の影響が顕著に表れたと考えられる。

図-4.18 に棒状電極で測定した試料高さとインピーダンスの関係を示す。棒状電極では試料高さ 20 mm 以上でもインピーダンスは減少し続け、試料高さ 100 mm 程度で一定となった。これは図-4.19 のように容器の全幅にわたって電極が存在するため電流経路が限定的とならず、電流線の屈曲あるいは減少の影響が比較的小さくなったと考えられる。

以上の試験結果より、電極間隔 30 mm、電極面積 500 mm²以下と電極を小さくしても材料分離、とくに粗骨材の集中を評価できる可能性を見出せた。

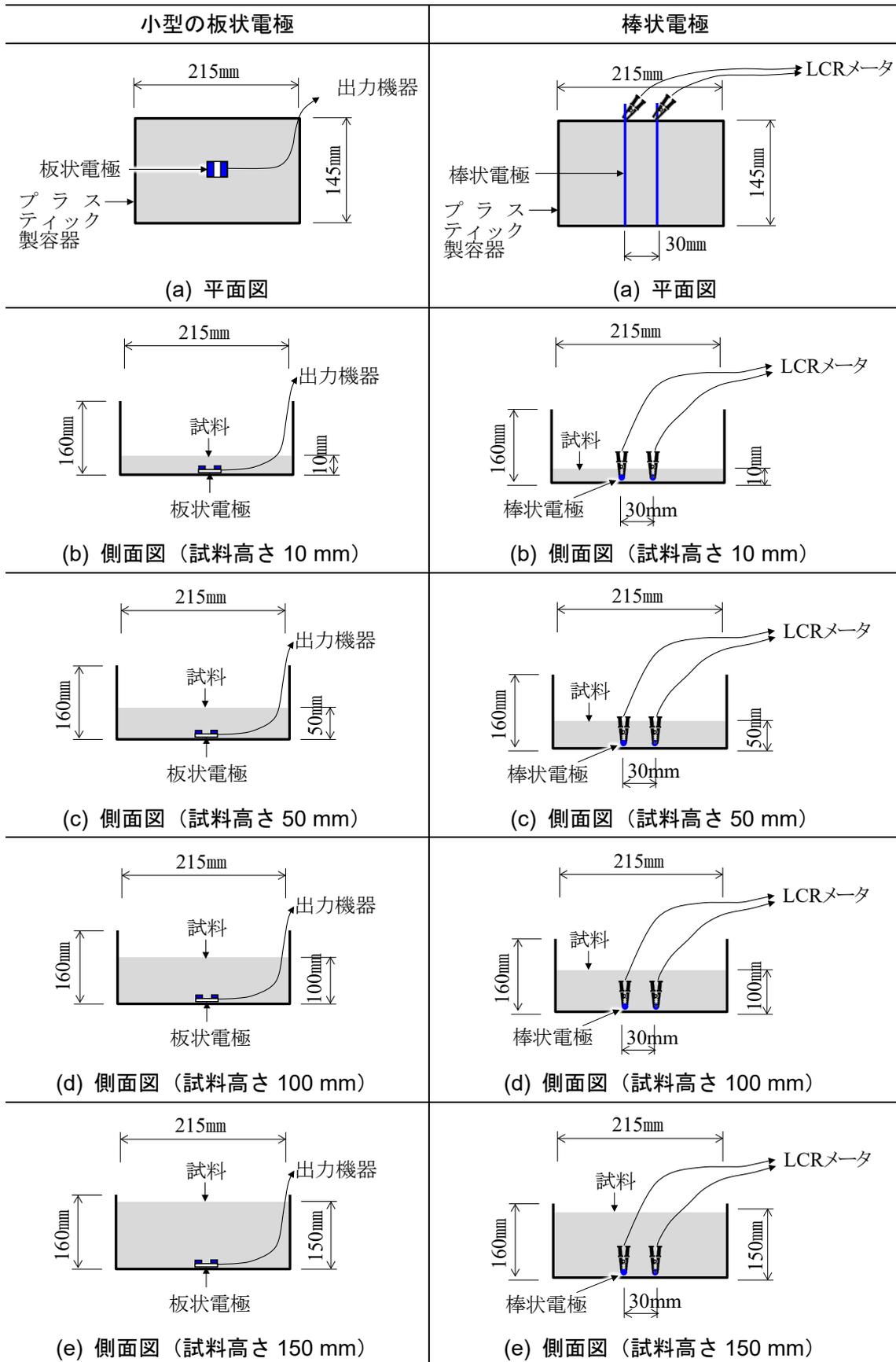


図-4.16 電極の設置方法

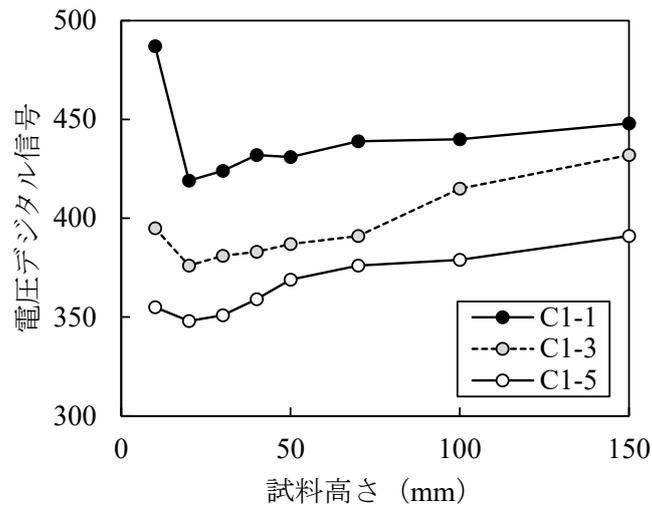


図-4.17 試料高さと電圧デジタル信号の関係（小型の板状電極）

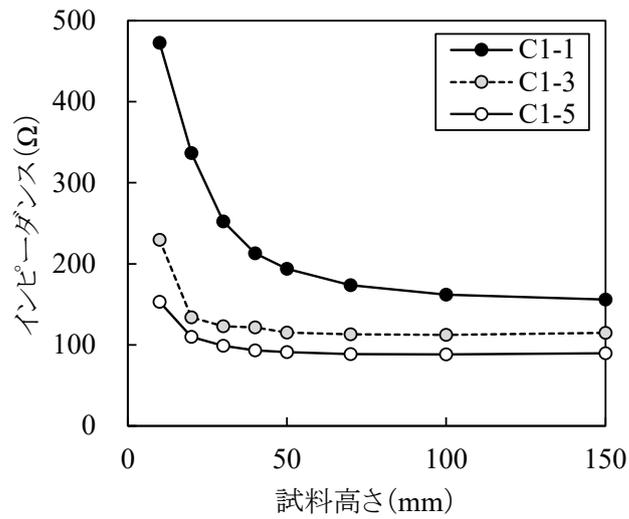


図-4.18 試料高さとインピーダンスの関係（棒状電極）

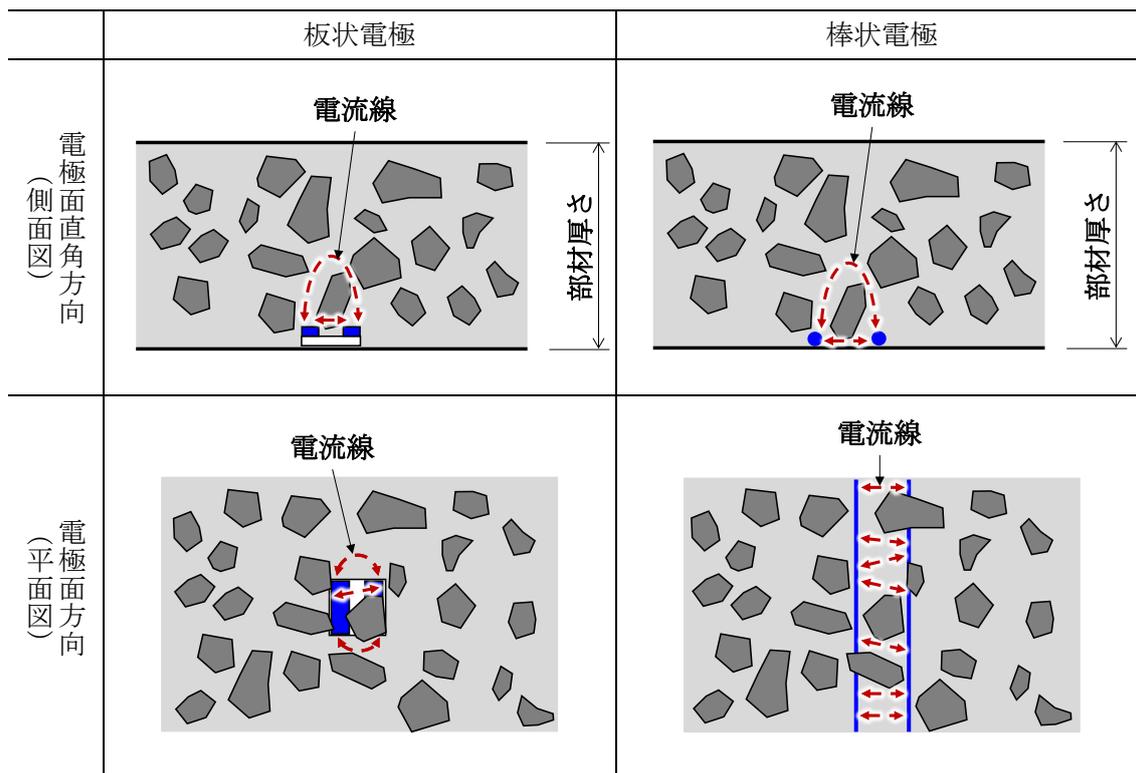


図-4.19 電流線のイメージ

次に、電極面積をさらに小さくしたときの材料分離の評価の可能性を確認する。写真-4.1に試験容器を示す。ポリ塩化ビニル管（ $\phi 100\text{ mm}$ ）を鉛直に静置し、底面から 50 mm の高さの側面に孔を開け、棒状電極（ $\phi 1.2\text{ mm}$, SUS304）を挿入して内面から 1 mm 突出させて固定した。つまりコンクリートと電極が点で接触する状態とした。コンクリートと接触可能な電極面積は 5 mm^2 である。

表-4.3 にコンクリートの計画配合を示す。セメントは早強ポルトランドセメント（密度 3.14 g/cm^3 ）、細骨材は砕砂（表乾密度 2.60 g/cm^3 ）、粗骨材は砕石（表乾密度 2.70 g/cm^3 , 最大寸法 20 mm ）、化学混和剤はリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体の AE 減水剤を用いた。図-4.20 の順序でコンクリートを底面から高さ $150, 250, 450, 650, 850\text{ mm}$ まで投入し、その都度突き棒と木槌で締固めを行ってからインピーダンスを測定した。インピーダンス測定には LCR メータ（三和電気計器製, LCR700, 最高確度 $\pm (0.3\% \text{ rdg.} + 3 \text{ dgt.})$ ）を用い、測定周波数 10 kHz , 信号レベル 0.63 Vrms とした。

図-4.21 に試料高さとインピーダンスの関係を示す。インピーダンスは試料高さが大きくなるに従って上昇を続け、試料高さ 450 mm 以降は緩やかとなった。この傾向は下層への粗骨材の沈降による電流経路の大きな屈曲の影響と考えられ、試料高さが大きくなるにしたがい、粗骨材がより沈降していったことを捉えていると考えられる。坂井ら³⁾と白石ら⁴⁾の研究においても同様の点電極を用いたフレッシュコンクリートの電気抵抗測定により材料分離を評価できる可能性があるとしている。したがって、電極面積が 5 mm^2 と極端に小さい点電極であっても粗骨材分布の変化を捉えられる可能性がある。

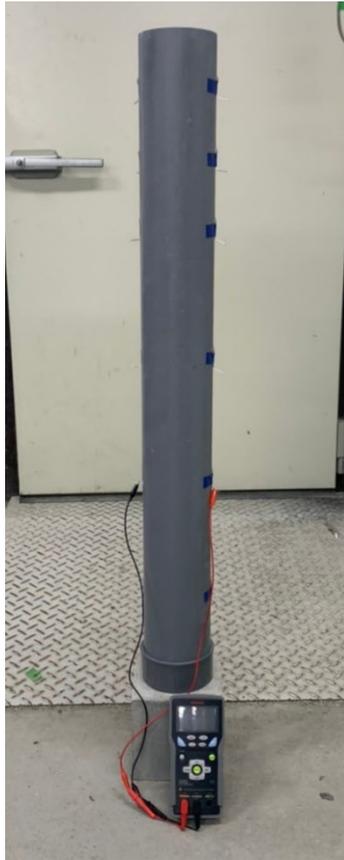


写真-4.1 試験容器

表-4.3 計画配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
C4-1	H	42.7	46.0	2.0	170	398	795	969

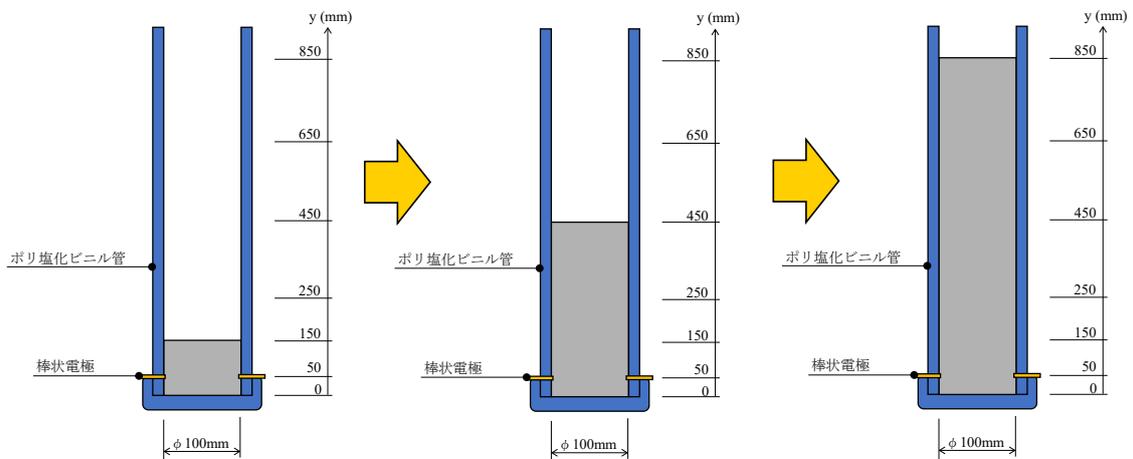


図-4.20 コンクリート打込み順序

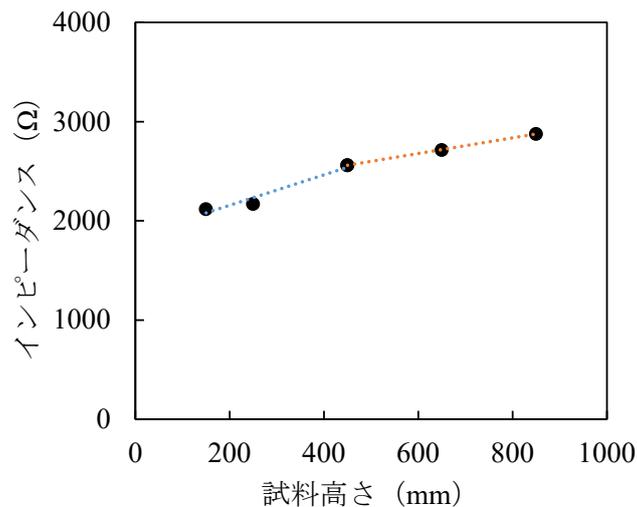


図-4.21 試料高さとインピーダンスの関係（点電極）

4.5 まとめ

4章では、建設現場に電極を用いたセンサを適用するにあたって、センサ設置の容易さ、型枠取外し後の美観、鉄筋の影響等を考慮して可能な限り小さいセンサを要件として、電極間隔、電極面積、および電極間隔と電極面積の関係について検討し、以下の知見を得た。ただし、最大寸法 20 mm の粗骨材を用いたコンクリートのインピーダンス測定結果から得た知見であり、粗骨材の最大寸法が異なれば適切な電極条件が変わる可能性がある。

- (1) 1 対の板状電極の電極間隔を 30 mm 以下、電極面積を 500 mm² 以下としたとき、材料分離、とくに粗骨材の集中を評価できる可能性が高い。
- (2) 電極面積が 5 mm² と極端に小さい点電極であっても粗骨材分布の変化を捉えられる可能性がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 皆川 浩，久田 真，榎原 彩野，齊藤 佑貴，市川 聖芳，井上 浩男：コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol. 66，No. 1，pp. 119-131，2010.
- 3) 坂井 一貴，八代 うらら，山田 勉，伊代田 岳史：フレッシュコンクリートの電気抵抗値に影響を及ぼす因子の解明，第 48 回土木学会関東支部技術研究発表会，2021.
- 4) 白石 真由奈，八代 うらら，山田 勉，伊代田 岳史：電気抵抗を用いたフレッシュコンクリートの材料分離評価法の開発，第 75 回セメント技術大会，pp.58-59，2021.

5 実構造物モニタリング手法の考案

5.1 はじめに

3章の室内試験では細骨材および粗骨材の粒度分布を不変とし、その混合割合(細骨材率)を変化させた配合を用いて材料分離状態を再現した。そして、フレッシュコンクリートのインピーダンスの主要な影響因子はペースト体積であり、インピーダンスの変化をおおむね説明できることを明らかにした。さらに、細骨材率または骨材表面積の変化によるわずかなインピーダンスの変化も反映する場合、骨材の粒度分布を用いて算出される有効ペースト体積がインピーダンス予測に適していることを理論的に証明した。これらの関係を用いれば、コンクリート打込み時に横移動によるモルタルの先流れや締固めによる骨材の沈降等の材料分離が生じている状況を推定、すなわち粗骨材の均質性を評価できる可能性がある。

しかしながら、実際に建設現場で生じている材料分離は細骨材率だけでなく、細骨材および粗骨材の粒度分布も変化していると考えられる。したがって、建設現場においては粒度分布に関連しない品質特性に基づく管理が好ましい。建設現場を想定した場合、粒度分布と無関係かつフレッシュコンクリートのインピーダンスと相関性の高いペースト体積を品質特性として用いることとする。

本章では、ペースト体積とインピーダンスの関係に基づき、フレッシュコンクリートの均質性評価方法(充填検知と締固め振動検知を含む)を提示する。さらに、4章において整理した電極間隔と電極面積を踏まえて、建設現場に均質性評価方法を適用するために最適なセンサを提示する。

5.2 センサ開発の方向性

建設現場におけるLCRメータを用いたインピーダンス測定は、LCRメータが精密測定機器であること、アプリケーションの操作に習熟している必要があること、測定箇所数が限られること、測定対象の部材を挟み込むような電極配置が困難であること等を考慮すると現実的ではない。そのため、2章で整理したフレッシュコンクリートのモニタリングセンサを参考に、建設現場でインピーダンスを容易に測定可能な方法を考案する。表-5.1に新たなセンサの仕様を示す。

図-5.1に鉄筋コンクリート構造物における品質モニタリング推奨部位の例を示す。擁壁の壁下端ではモルタルの先流れや豆板等、壁の打込みの1層上方では骨材の沈降やコールドジョイント等、底版と基礎杭の交差部等の過密な鉄筋配置では未充填等が懸念される。また、擁壁のほか、柱・壁・梁から成る鉄筋コンクリート構造物においても柱の下端や柱と梁の交差部等で同様の品質不具合が懸念される。モニタリングセンサとしては、これらの対象部位において、材料分離、充填、および締固めをリアルタイムに評価できること、型枠取外後にコンクリート表面の美観を損なわないことが求められる。

図-5.2に覆工コンクリートにおける品質モニタリング推奨部位を示す。検査窓と妻型枠を閉じた後は目視不可となるうえ、吹上げ口1箇所からの約10mを流動させる特殊な打込

みとなる天端部では、材料分離のほか、天端部背面に空洞発生やブリーディング水の巻込みによる脆弱部形成、締固め不足によるコールドジョイント等の品質不具合が懸念される。モニタリングセンサとしては、打込みスパン全長（例えば、10.5 m）にわたって天端部の材料分離、充填、および締固めをリアルタイムに評価できること、多数の検知部を容易に設置できること、埋設した場合に力学的な弱部とならないことが求められる。なお、充填については、天端部背面に空気の滞留や多量のブリーディング水の集積が想定されるため、空気、ブリーディング水およびコンクリートの3種類の識別が必要となる。

表-5.1 新たなセンサの仕様

項目	既存センサの問題点	新たなセンサの仕様
検知性能	・ 充填と締固めは評価できるが材料分離の評価は検討段階.	・ 材料分離, 充填, 締固めを全て評価できる.
センサ形状	・ 埋設するとセンサ部が断面欠損となる.	・ 極力小さく薄い. ・ コンクリートの美観を損なわない.
センサ取付け	鉄筋コンクリート構造物	・ コンクリート表面にセンサやケーブルが露出するため型枠に取り付けられない.
	覆工コンクリート天端部	・ 検知部毎にケーブルを配線するため広範囲への取付けは現実的でない.

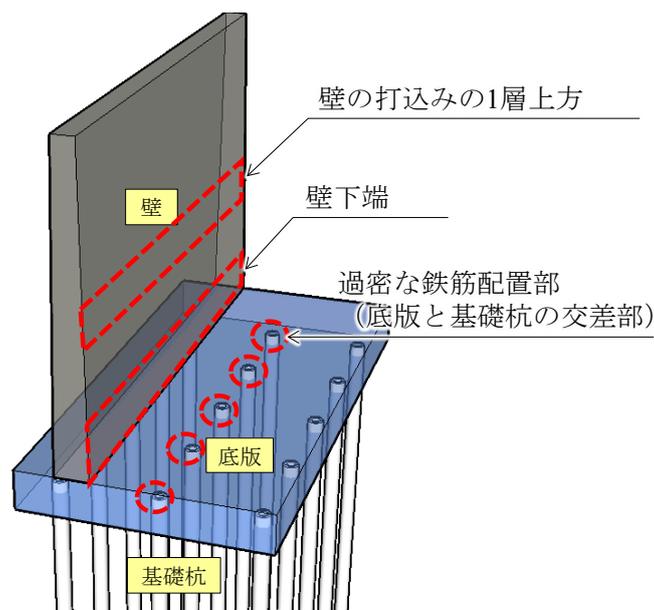


図-5.1 鉄筋コンクリート構造物における品質モニタリング推奨部位の例

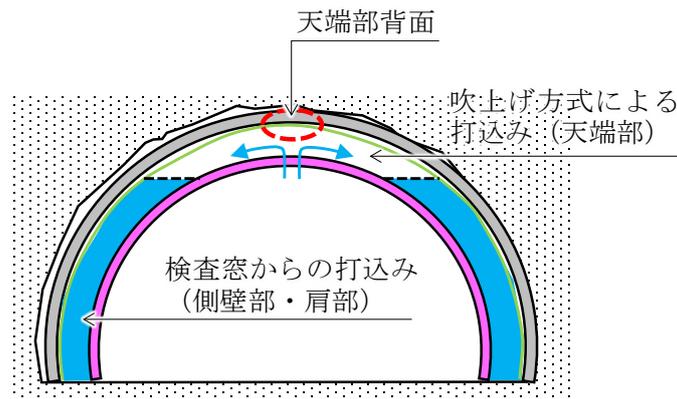


図-5.2 覆工コンクリートにおける品質モニタリング推奨部位

5.3 検知原理

5.3.1 材料分離・充填の検知原理

図-5.3 に材料分離・充填検知部のブロック図を示す。材料分離・充填検知部は並列配置した 2 つの板状電極で構成する。打込み中のコンクリートの粗骨材分布や電極間が空気からコンクリートへ満たされていく様子を電極間のインピーダンスの変化として捉えようとするものである。

建設現場においては 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のは困難なため、図-5.3 のブロック図に示すとおり簡易的に電圧に代替して測定する。はじめに、電極に基準抵抗 Z_2 を直列接続する。電極間のインピーダンス Z_1 と基準抵抗 Z_2 の直列回路に電圧 E を印可したとき、電気抵抗の大きさに比例して電圧が分配されることを利用し、式 (5.1) を用いて電極間の電圧 V_1 を測定する。基準抵抗 Z_2 の大きさは、電極間のインピーダンス Z_1 を想定し、電極間の電圧 V_1 が適切な大きさと測定できるまで様々な大きさの基準抵抗 Z_2 を試行して決定する。なお、アナログ信号はプログラム上でデータとして取り扱えないことから、電極間の電圧 V_1 は印可電圧 E を 10 ビット (1,024) で分割したときの相対値として変換した無次元データ (以下、電圧デジタル信号という) として出力する。

$$V_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot E \quad (5.1)$$

ここに、 V_1 : 電極間の電圧 (V)

E : 印可電圧 (V)

Z_1 : 電極間のインピーダンス (Ω)

Z_2 : 基準抵抗 (Ω)

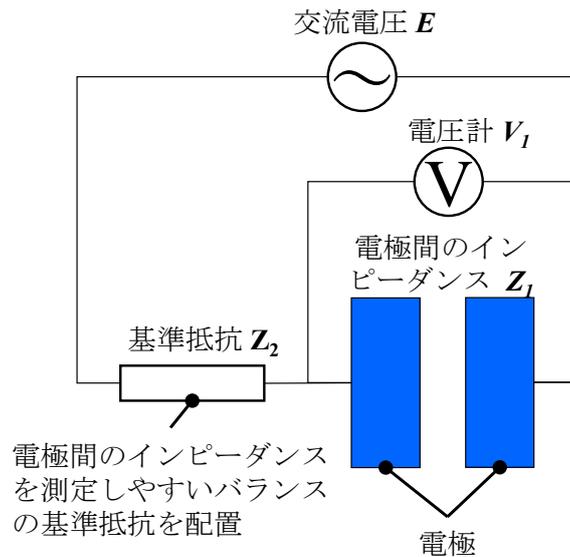


図-5.3 材料分離・充填検知部のブロック図

5.3.2 締固め振動の検知原理

コンクリートの締固めに用いる棒状バイブレータの周波数には 200～240 Hz 程度の高周波が用いられている。棒状バイブレータからの振動がフレッシュコンクリート中を伝播しても周波数はほとんど変化しないが振幅は減衰する¹⁾ため、このような特徴を有する締固めに有効な振動を捉える必要がある。

図-5.4 に締固め振動検知部のブロック図を示す。締固め振動検知部は、図-5.5 に示す圧電体の機能のうち、振動等の機械的エネルギーを与えることで電圧（電氣的エネルギー）を発生するという圧電効果を利用する。圧電膜を薄膜電極で挟んだ圧電素子を締固め振動検知部として用い、バイブレータ振動部から発振された振動を捉えて電圧を発生させ、その周波数と振幅をもとに締固め程度の目安として、振動累積時間を出力する。

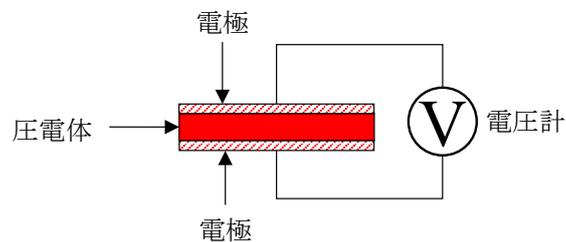


図-5.4 締固め振動検知部のブロック図

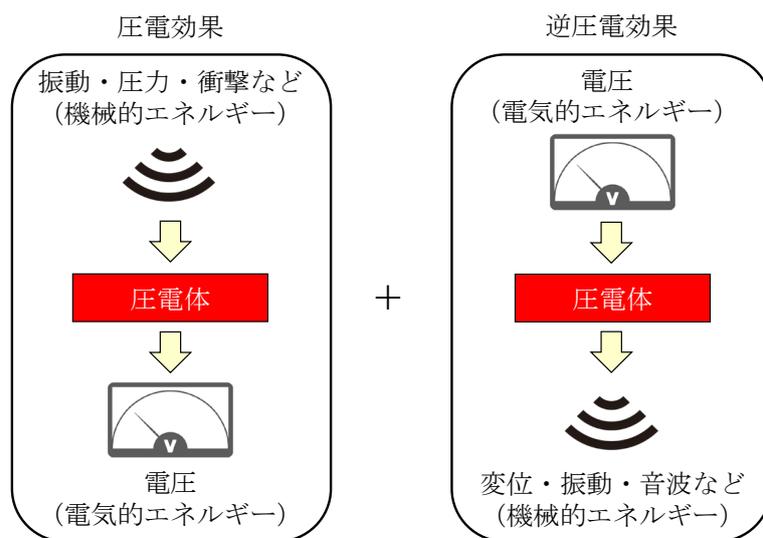


図-5.5 圧電体の機能

5.4 プロトタイプの試作

5.3 節で示した2種類の検知原理を用いて、建設現場に適用するためのセンサのプロトタイプ（以下、プロトタイプという）を試作した。表-5.1のセンサ形状に整理したとおり、断面欠損とならないように極力小さく薄いこと、コンクリート表面の美観を損なわないことを念頭に置いてセンサ形状を設計した。

写真-5.1にプロトタイプの形態、図-5.6にセンサ断面図を示す。厚さ0.1mm程度のシート基材の両面を利用し、一方の面（コンクリートと接する側）に材料分離・充填検知部、他方の面（接着側）に締めめ振動検知部と配線をそれぞれ配置した。各検知部および配線は、ペースト塗布またはスプレーコーティング²⁾等の薄膜技術によりシート基材上に厚さ0.01mmオーダーで形成されている。配線は、シート基材の接着側へ全て集約し、接着層兼絶縁層（厚さ0.4mm）で被覆している。



写真-5.1 プロトタイプの形態

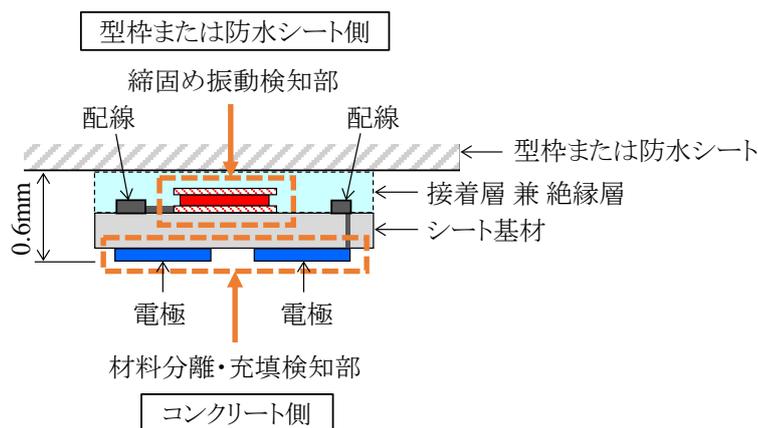


図-5.6 センサ断面図

5.4.1 材料分離検知の性能

プロトタイプを用いて材料分離評価について検証を行った。表-5.2 に計画配合と体積構成比を示す。C1-3 を標準配合とし、単位粗骨材体積を±25、±50 %とした配合を加え、計5配合とした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm³），細骨材は山砂（表乾密度 2.56 g/cm³），粗骨材は碎石（表乾密度 2.64 g/cm³，最大寸法 20 mm），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。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。水は 20 °C に調整された水道水を使用した。

図-5.7 にプロトタイプによる電圧デジタル信号測定方法，図-5.8 に LCR メータ（HIOKI 製，IM3536，基本確度±0.05% rdg.）によるインピーダンス測定方法を示す。インピーダンスは比較用データとした。プロトタイプはプラスチック製容器（幅 145 mm×215 mm，高さ 160 mm）の短辺側面の底面から 50 mm の高さに検知部を 1 箇所，LCR メータの電極は同容器の短辺側面に鉛直方向に棒状電極（φ3.0 mm，SUS304）を各 1 本配置した。各配合を練り混ぜ，セメントの接水から 15 分経過後，容器に高さ 100 mm までコンクリートを投入し，適度に叩きを行ってからプロトタイプと LCR メータを用いて電圧デジタル信号とインピーダンスをそれぞれ測定した。印可する測定信号レベルは 5 Vrms とした。

表-5.2 計画配合と体積構成比

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)				体積構成比
					W	C	S	G	
C1-1	N	58	33.6	3.1	126	217	663	1354	
C1-2	N	58	41.5	3.1	148	255	778	1130	
C1-3	N	58	50.6	3.1	170	293	896	903	
C1-4	N	58	60.7	3.1	192	331	1014	676	
C1-5	N	58	72.1	3.1	214	369	1129	451	

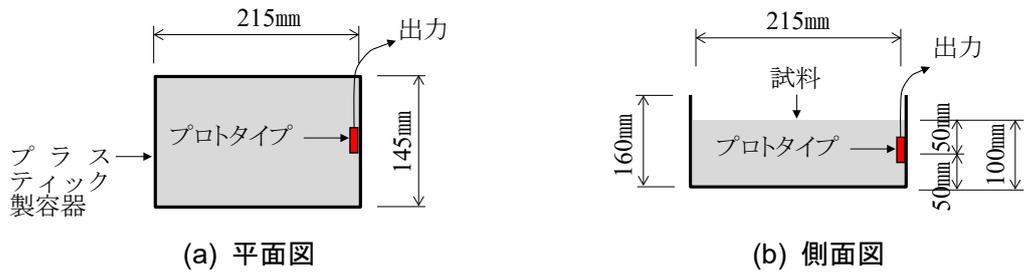


図-5.7 電圧デジタル信号測定方法（プロトタイプ）

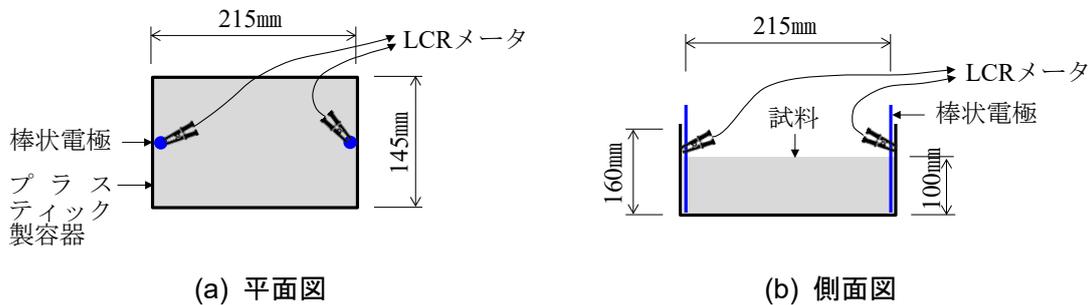


図-5.8 インピーダンス測定方法（LCRメータ）

図-5.9 にプロトタイプを用いて測定したペースト体積と電圧デジタル信号の関係、図-5.10 に LCR メータを用いて測定したペースト体積とインピーダンスの関係を示す。プロトタイプで測定した電圧デジタル信号は、LCR メータで測定したインピーダンスと同様に右肩下がりの直線的な関係となった。したがって、LCR メータを用いたインピーダンス測定と同様に、プロトタイプを用いた電圧デジタル信号の測定によって材料分離評価が可能と考えられる。

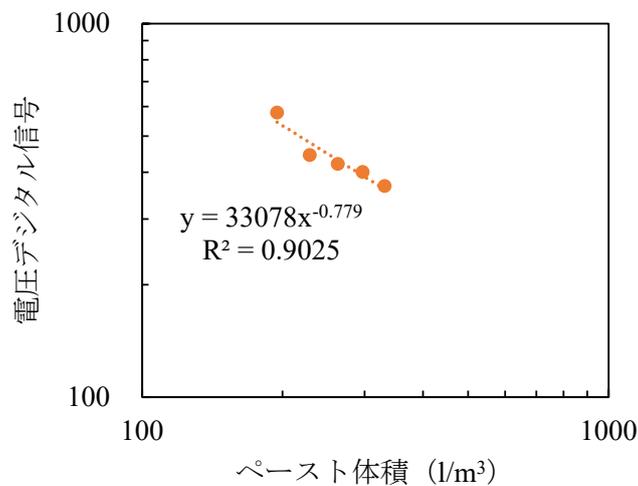


図-5.9 ペースト体積と電圧デジタル信号の関係（プロトタイプ）

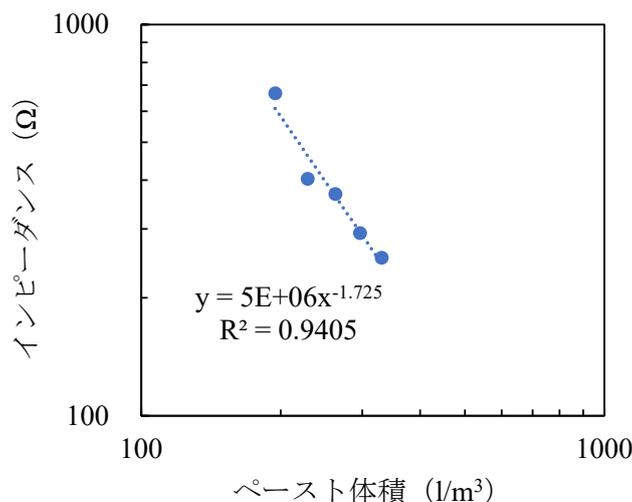


図-5.10 ペースト体積とインピーダンスの関係 (LCR メータ)

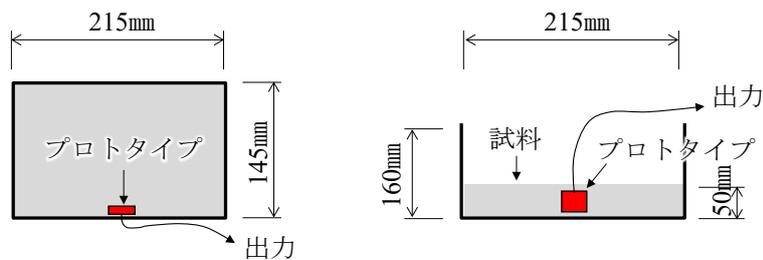
5.4.2 充填検知の性能

次に、プロトタイプを用いて充填評価について検証を行った。表-5.3 に計画配合と体積構成比を示す。使用材料はコンクリートを除き前述の材料分離評価の検証に用いたものと同じである。コンクリートはレディーミクストコンクリート工場で製造したものを使用した。ブリーディング水の水セメント比は採取可能な範囲とした。

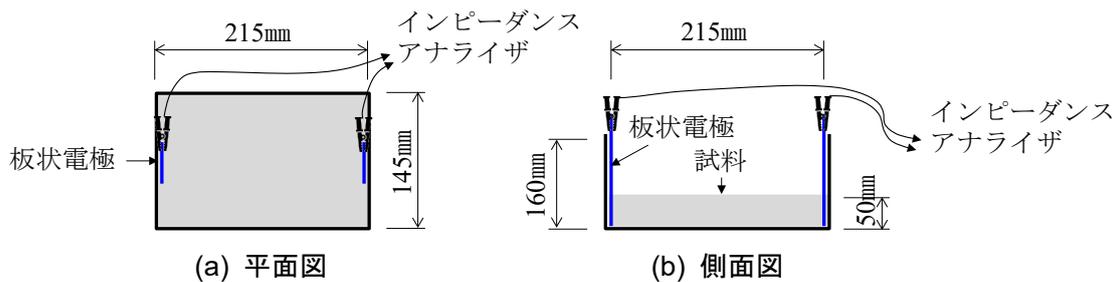
図-5.11 にプロトタイプによる電圧デジタル信号測定方法、図-5.12 にインピーダンスアナライザ (HIOKI 製, IM3570, 基本確度±0.08% rdg.) によるインピーダンス測定方法を示す。インピーダンスは比較用データとした。プロトタイプはプラスチック製容器 (幅 145 mm×215 mm, 高さ 160 mm) の長辺側面の底面から 25 mm の高さに検知部を 1 箇所、インピーダンスアナライザの電極は同容器の短辺側面の鉛直方向に板状電極 (幅 50 mm, 厚さ 1.0 mm, SUS304) を各 1 枚配置した。各配合ともセメントの接水から 60 分経過後、容器に高さ 50 mm までコンクリートを投入し、適度に叩きを行ってからプロトタイプとインピーダンスアナライザを用いて電圧デジタル信号とインピーダンスをそれぞれ測定した。印可する測定信号レベルは 5 Vrms とした。なお、試料高さはブリーディング水の採取可能な量に合わせて統一した。

表-5.3 計画配合と体積構成比

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)				体積構成比
					W	C*	S	G	
B1-1	N	50.0	-	-	612	1224	0	0	B1-1
B2-2	N	55.0	-	-	635	1154	0	0	B1-2
B2-3	N	60.0	-	-	654	1090	0	0	B1-3
B2-4	N	70.0	-	-	689	984	0	0	B1-4
B1-5	N	100.0	-	-	759	759	0	0	B1-5
M4-1	N	30.0	100.0	2.5	179	596	1503	0	M4-1
M4-2	N	40.0	100.0	2.5	224	561	1416	0	M4-2
M4-3	N	50.0	100.0	2.5	265	530	1336	0	M4-3
M4-4	N	55.0	100.0	2.5	284	516	1300	0	M4-4
M4-5	N	60.0	100.0	2.5	301	502	1267	0	M4-5
M4-6	N	70.0	100.0	2.5	334	477	1203	0	M4-6
M4-7	N	100.0	100.0	2.5	415	415	1047	0	M4-7
C5-1	BB	68.3	48.4	3.5	173	253	879	982	C5-1
C5-2	BB	63.8	47.5	3.2	173	271	855	990	C5-2
C5-3	BB	58.2	46.4	2.8	174	299	824	996	C5-3



(a) 平面図 (b) 側面図
 図-5.11 電圧デジタル信号測定方法 (プロトタイプ)



(a) 平面図 (b) 側面図
 図-5.12 インピーダンス測定方法 (インピーダンスアナライザ)

図-5.13 にプロトタイプを用いて測定した電圧デジタル信号, 図-5.14 にインピーダンスアナライザを用いて測定したインピーダンスを示す. 一般的に使用される水セメント比で比較しやすいように横軸は水セメント比とした. 双方とも試料の種類毎に段階的に異なる値を示し, 大きい値の順ではコンクリート, モルタル, ブリーディング水となった. なお, 空気の値は図示していないが, 電圧デジタル信号は 930 でコンクリートの約 3.2~3.8 倍, インピーダンスは 480 MΩ でコンクリートの 106 倍であった. これらの結果は, 空気, プリ

ーディング水およびコンクリートを識別するための閾値設定が可能であることを示している。

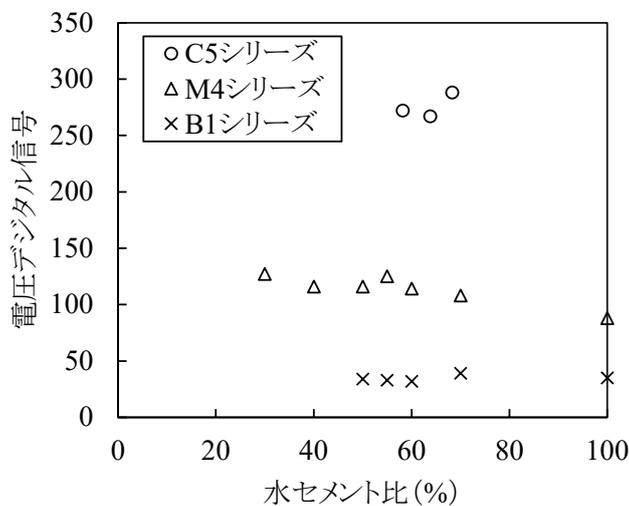


図-5.13 電圧デジタル信号の測定結果（プロトタイプ）

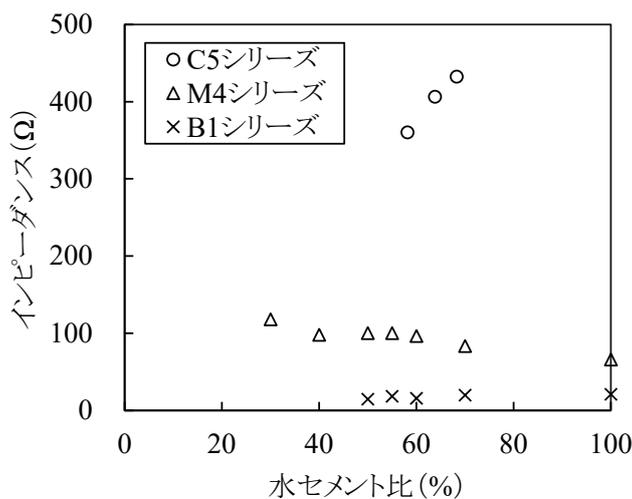


図-5.14 インピーダンスの測定結果（インピーダンスアナライザ）

5.4.3 締固め振動検知の性能

写真-5.2 に小型型枠を用いた振動試験状況を示す。小型木製型枠（幅 300×300 mm，高さ 500 mm）の高さ 400 mm の位置に棒状バイブレータ挿入孔付きの蓋を設置し，その下側に防水シート（厚さ 0.8 mm）を敷設し，覆工コンクリート天端部を簡易的に模擬した。振動測定に用いるプロトタイプは防水シートに貼り付けた。表-5.3 のモルタルの配合 M4-5 を小型木製型枠に投入後，棒状バイブレータ（振動部直径φ52 mm，インバータ出力周波数 200 Hz に設定）を挿入・加振し伝播する振動を測定した。

図-5.15 にプロトタイプの締固め振動検知部が出力した電圧の波形を示す。あらかじめ設

定した棒状バイブレータの周波数である約 200 Hz（周期 5.0 ms）の波形が確認された。したがって、プロトタイプにより棒状バイブレータの振動を捉えられる可能性があると考えられた。なお、プロトタイプによる出力電圧の周波数は、200 Hz 付近以外にも離散的に複数確認された。これらの周波数は、棒状バイブレータ振動部の内蔵モータや周辺の電子機器等に起因する電磁ノイズと推定された。そこで、フィルタの設定により電磁ノイズ低減を図ることとした。

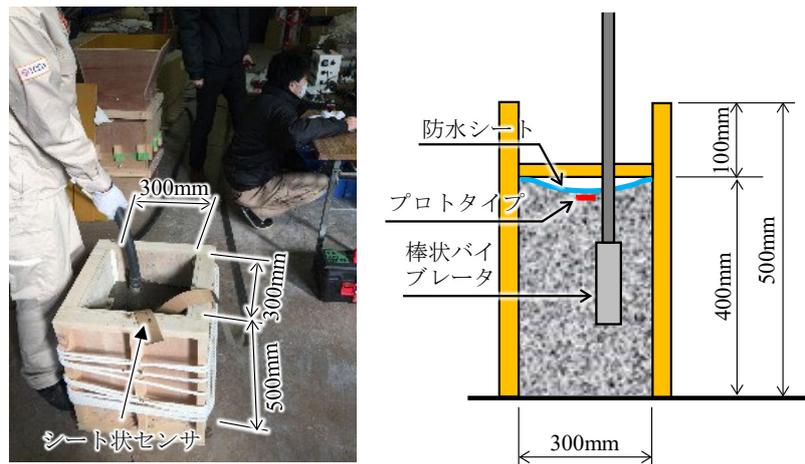


写真-5.2 小型木製型枠を用いた振動試験の概要

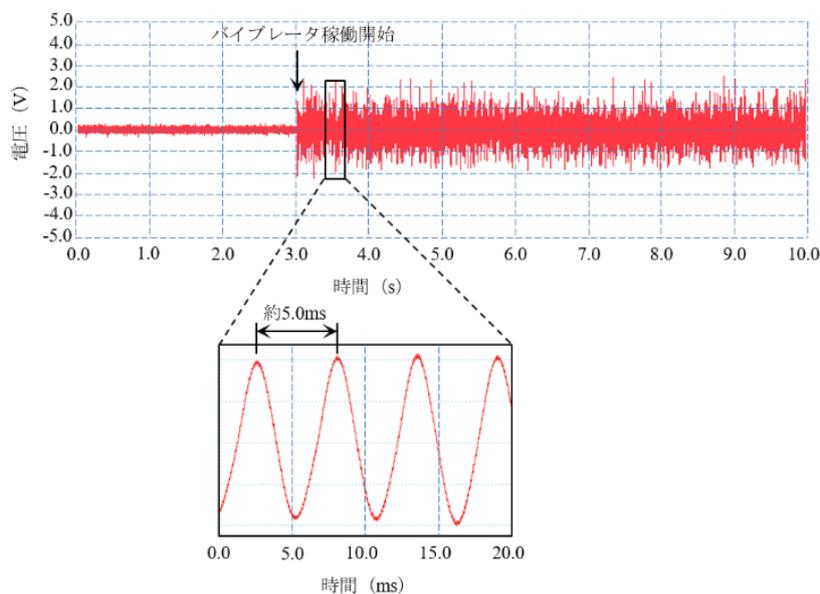


図-5.15 モルタル中の振動伝播

写真-5.3 にモックアップ試験の概要を示す。長尺の木製型枠（幅 400 mm，高さ 500 mm，長さ 10.5 m）の内側の側面に防水シート（厚さ 0.8 mm）と透水性緩衝材（厚さ 3 mm）を敷設した。壁状コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部の双方を実規模で模擬したも

のである。振動測定に用いるプロトタイプの締固め振動検知部の大きさは長辺 60 mm×短辺 10 mm とし、側面の防水シートの中間高さ付近に全 11 箇所設置した。

表-5.4 に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 3.04 g/cm³) を使用した。細骨材は砕砂 (S1, 表乾密度 2.58 g/cm³) と石灰砕砂 (S2, 表乾密度 2.67 g/cm³) と細目砂 (S3, 表乾密度 2.58 g/cm³)、粗骨材は最大寸法 20 mm とし碎石 (G1, 表乾密度 2.62 g/cm³) と石灰碎石 (G2, 表乾密度 2.69 g/cm³) を混合して使用した。化学混和剤はポリカルボン酸系化合物とリグニンスルホン酸塩および変性ポリオールを主成分とする AE 減水剤を使用した。

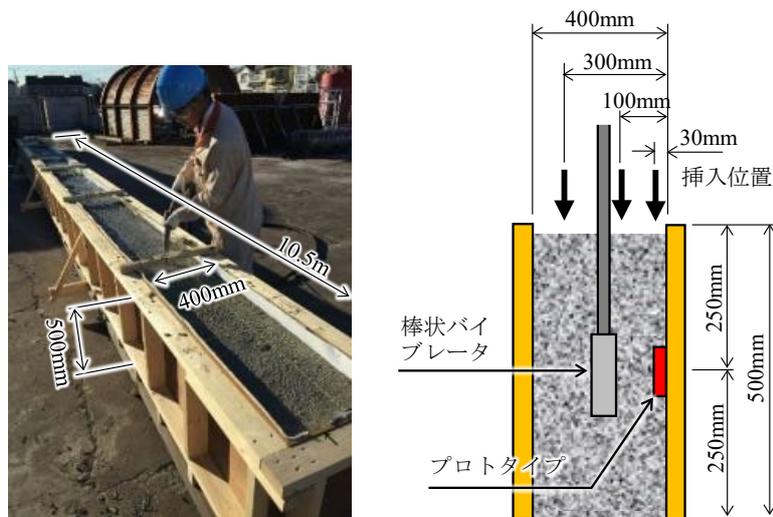


写真-5.3 モックアップ試験の概要

表-5.4 計画配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単用量 (kg/m ³)						
					W	C	S1	S2	S3	G1	G2
C6-1	BB	56.0	47.4	1.4	172	308	416	172	250	659	290

コンクリートを木製型枠に投入後、棒状バイブレータ（振動部直径φ52 mm、インバータの出力周波数 200 Hz に設定）の挿入位置を順次変えて加振し、各締固め振動検知部へ伝播する振動を測定した。図-5.16～図-5.18 に棒状バイブレータ中心部と締固め振動検知部との離隔が 30 mm, 100 mm, 300 mm のときにプロトタイプの締固め振動検知部が出力した電圧の波形を示す。いずれの離隔においても出力電圧の周波数は約 180 Hz（周期 5.5～5.6 ms）であり、離隔による低下は認められなかった。振動部の周波数（200 Hz）と比べて低下したのは、振動部内の偏心錘の高速回転によって生じる振動部の回転運動がコンクリートの抵抗を受け、角速度が低下したことが原因と考えられる。また、離隔が大きくなるにしたがい、電圧振幅は減衰した。モックアップ試験の結果を受けて、コンクリート中を伝播する振動を捉えられる締固め振動検知部の仕様として、アスペクト比（長辺/短辺）1.4 および面積 875

mm²とした。なお、小型木製型枠を用いた試験と同様に出力電圧の周波数は複数確認されたが、離隔による電圧振幅の減衰が認められない周波数帯や振動部の周波数よりも大きい周波数帯は電磁ノイズ等の考慮すべきでないものと考えられる。

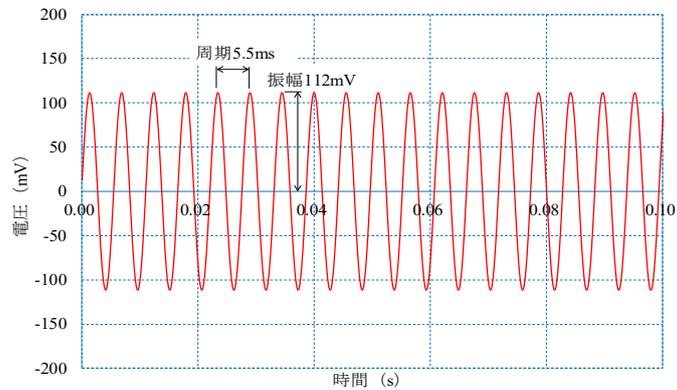


図-5.16 コンクリート中の振動伝播（離隔 30 mm）

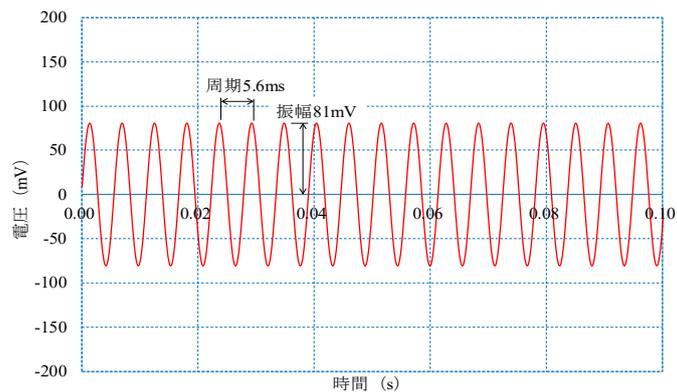


図-5.17 コンクリート中の振動伝播（離隔 100 mm）

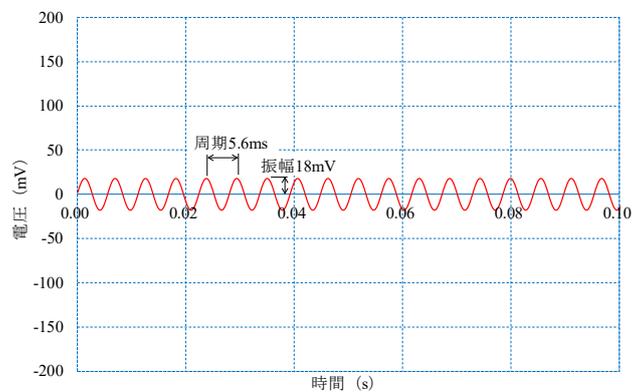


図-5.18 コンクリート中の振動伝播（離隔 300 mm）

5.4.4 均質性評価の実現可能性

図-5.19 に木製型枠を用いた振動試験概要を示す。型枠寸法は幅 200×200 mm、高さ 1,000 mm とした。写真-5.4 に型枠全景、写真-5.5 にプロトタイプを設置状況を示す。型枠底部から 100 mm と 800 mm の高さの側面にプロトタイプを設置した。表-5.2 の C1-3 を型枠底部から 900 mm の高さまで投入後、棒状バイブレータを挿入し連続して 1 分程度の振動を 4 回に分けて付与し、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、上部と下部それぞれ高さ 200 mm の範囲のコンクリートを取り出して、空気量試験、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。なお、型枠は空気量試験とウェットスクリーニング用にコンクリートを取り出しやすくするために下部 200 mm、上部 200 mm が切り離せるように加工した。

写真-5.6 に振動試験状況、写真-5.7 に振動付与後の上部の状況を示す。上部では振動付与の影響で空気泡やペーストが集まっている状況を目視で確認できる。図-5.20 に振動累積時間の経時変化、図-5.21 に電圧デジタル信号の経時変化を示す。経過時間 0～1 分のとき、上下部センサでは豆板状態に近い電圧デジタル信号となっている。その後、締め固めが開始される経過時間 4 分までは上下部センサともに同程度の電圧デジタル信号で落ち着いており、充填状態に近い。経過時間 4 分以降は締め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、下部センサは徐々に上昇した。この上下部センサの電圧デジタル信号の乖離は材料分離が生じていることを示している。

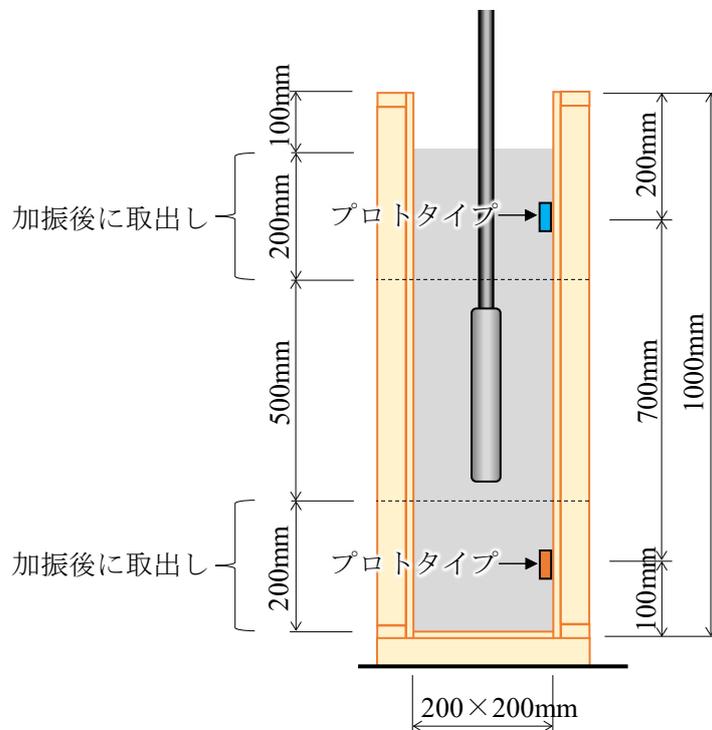


図-5.19 木製型枠を用いた振動試験概要



写真-5.4 型枠全景



写真-5.5 プロトタイプの設置状況



写真-5.6 振動試験状況



写真-5.7 振動付与後の上部の状況

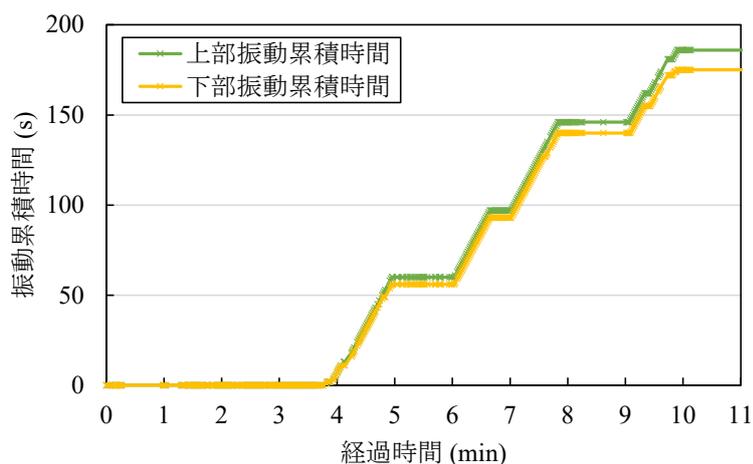


図-5.20 振動累積時間の経時変化

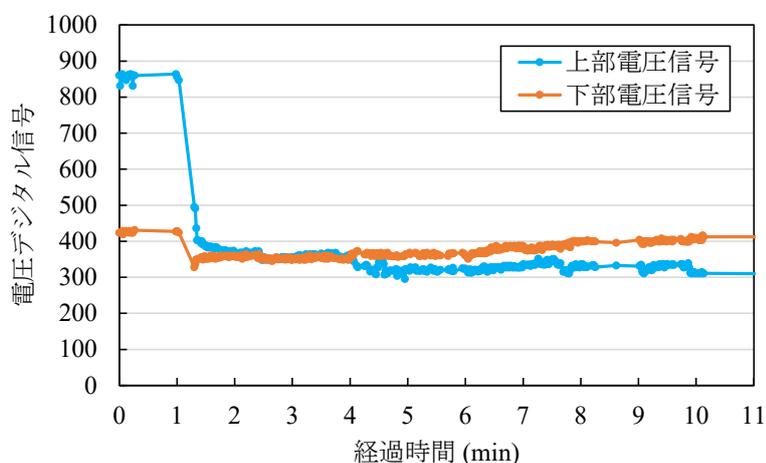


図-5.21 電圧デジタル信号の経時変化

表-5.5 に空気量試験とウェットスクリーニングの結果を示す。加振後の空気量は上部の目視観察どおり、振動付与により下部の空気が上部へ移動していた。細骨材率とペースト体積はともに大きく変動した。過度に振動を加えたため、加振前後のペースト体積の変化はC1シリーズのペースト体積変化より大きくなったが、電圧デジタル信号の経時変化をモニタリングすることで材料分離の有無やその程度を推定できると考えられる。

表-5.5 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 (l/m ³)
上部	6.5	72.8	442
下部	2.5	39.1	249

5.4.5 温度と経過時間の影響

3章の室内試験では、一定のコンクリート温度とセメント接水後の経過時間を条件にインピーダンスを測定した。しかし、建設現場では季節や時間帯によってコンクリート温度が変わり、レディーミクストコンクリート工場との位置関係によって運搬時間すなわちセメント接水後の経過時間が変わる。3.4節や5.4.1項で示したペースト体積とインピーダンスの関係も厳密に言えば変化する。そこで、本項では温度とセメント接水後の経過時間の影響、それに伴うキャリブレーションの必要性について検討する。

(1) 温度の影響

電気伝導率計では、水溶液に含まれるイオンは温度の状態によりその移動性と解離が増え電気伝導率が増減する³⁾ため、様々な温度の特定水溶液における電気伝導率を事前に定めた温度（通常 25℃）における電気伝導率値に換算している。図-5.22に水溶液の一般的な温度と電気伝導率の関係を示す。温度が上昇すると水溶液の電気伝導率は上昇し、温度あたりの電気伝導率の増加量を温度係数 β としたとき、あらかじめ実験的に求めた温度範囲2点から式(5.2)を用いて β を求める^{3)~6)}。なお、 β は温度領域毎に異なるが、通常2.0%/℃がよく用いられている^{3),4)}。そして、任意の温度 t における電気伝導率の測定値から式(5.3)を用いて基準温度25℃のときの電気伝導率 K_{25} を求める。

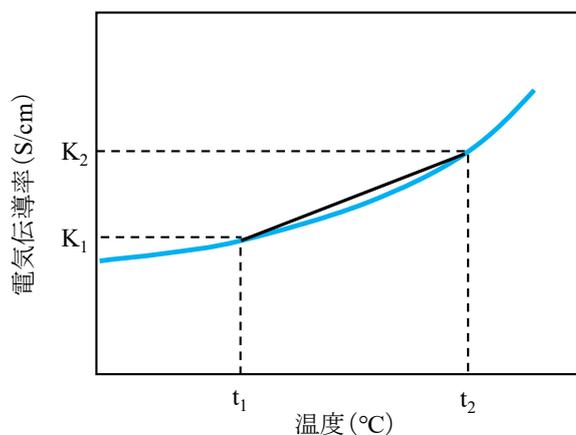


図-5.22 水溶液の一般的な温度と電気伝導率の関係

$$\beta = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{K_2 - K_1}{t_2 - t_1} \quad (5.2)$$

$$K_{25} = \frac{K_t}{1 + \beta(t - 25)} \quad (5.3)$$

ここに、 β : 温度係数 (%/℃)

K_{25} : 基準温度 25℃のときの電気伝導率 (S/cm)

K_t : t ℃のときの電気伝導率 (S/cm)

ここで、表-5.6 のペーストについて、温度とインピーダンスの関係を試験によって求めた。インピーダンスの測定方法は図-5.8 と同様とした。図-5.23 にペーストの温度とインピーダンスの関係を示す。電気伝導率計と同様に温度係数を求め、これまで室内試験で基準温度としていた 20℃のときのインピーダンスを算出可能だが、材料分離（とくに粗骨材の集中）や充填（コンクリートとブリーディング水の識別含む）の評価ではインピーダンスであれば 100 Ω オーダーの変化となるため、温度によるインピーダンスへの影響は無視できるほど小さいと考えられる。

表-5.6 計画配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)	
			W	C
P-5	N	60	654	1090

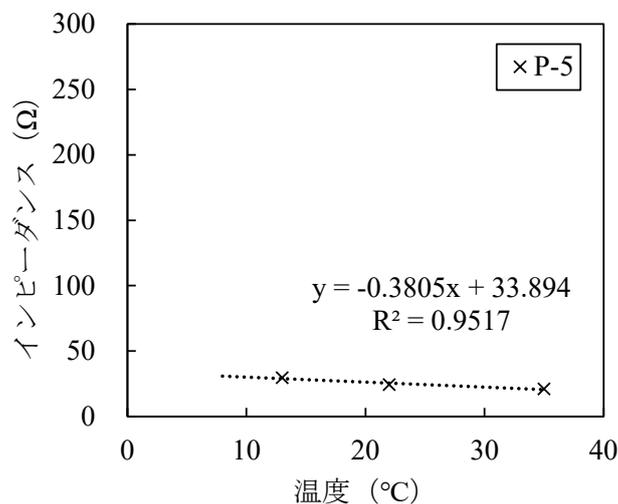


図-5.23 温度とインピーダンスの関係

(2) 経過時間の影響

村上ら⁷⁾によれば、電気伝導率（電気抵抗率の逆数）はセメント接水後から上昇し 130～250 分をピークに下降に転じた。三坂ら⁸⁾によれば、電気抵抗はセメント接水後から下降し約 120 分で上昇に転じた。電気伝導率は電気抵抗率の逆数であるから、変化の傾向としては電気抵抗と逆となる。電気抵抗で表現するならば、セメント接水後はイオンの溶出に伴い電気が流れやすくなり電気抵抗が下降するが、時間が 120～250 分を経過した頃を境に電気抵抗が上昇し始め、凝結、硬化を経て電気抵抗はさらに上昇し、フレッシュコンクリートに比べて電気を通しにくい特性を持つようになる。

図-5.24 に表-3.2 の配合のうち C2-3 のインピーダンスとセメント接水後の経過時間の関係を示す。セメント接水直後のインピーダンスは一時上昇期があるが、その後は既往の研究と整合する変化となった。インピーダンスの底は約 350 分となり、既往の研究の結果より少

し遅いタイミングであった。

練り混ぜてから打ち終わるまでの時間は、外気温が 25℃以下のときで 2 時間以内、25℃を超えるときで 1.5 時間以内を標準とする⁹⁾ ことから、セメント接水後の経過時間については、2 時間までのインピーダンスの経時変化を考慮する必要がある。図-5.25 に C2-3 のセメント接水後の経過時間とインピーダンスの関係（120 分まで）を示す。電気伝導率計の温度補正と同様に時間係数を求め、これまで室内試験で基準時間としていた 15 分のときのインピーダンスを算出可能である。しかし、材料分離（とくに粗骨材の集中）や充填（コンクリートとブリーディング水の識別含む）の評価ではインピーダンスであれば 100 Ω オーダーの変化となるため、経過時間によるインピーダンスへの影響は無視できるほど小さいと考えられる。

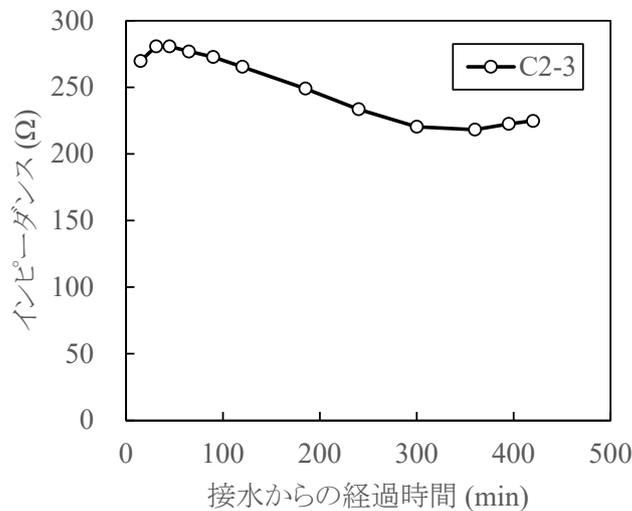


図-5.24 接水からの経過時間とインピーダンスの関係

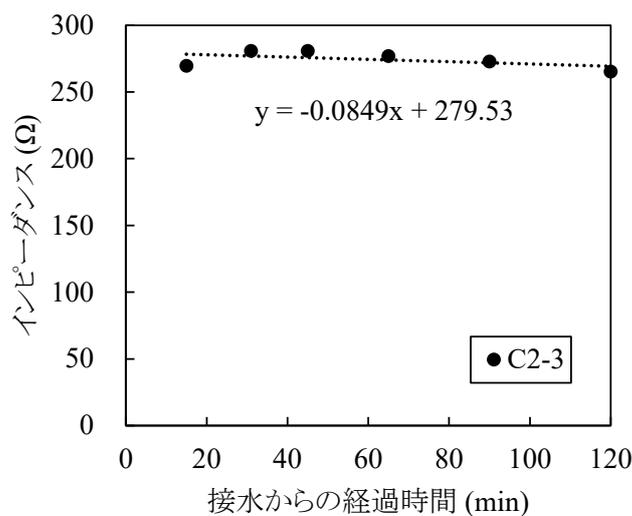


図-5.25 接水からの経過時間とインピーダンスの関係（120 分まで）

5.5 適用部位に応じたセンサ開発

5.5.1 パッチ型センサ

鉄筋コンクリート構造物の過密な鉄筋配置部に最適なセンサとして、写真-5.8 のパッチ型センサを考案した。具体的な適用部位として、図-5.26 の底版と基礎杭の交差部や壁・柱・梁交差部等を想定している。そのほかにコンクリートに埋設される配管や箱抜き（設備や開口等のコンクリートを充填しない範囲に設置する型枠）下部等の空洞が発生しやすい部位への適用も考えられる。これらの部位へ適用するため、プロトタイプを踏襲して極力小さく薄い形状とした。材料分離・充填検知部はシート基材に並列配置した2つの板状電極で構成し、インピーダンスに代えて電圧デジタル信号を出力する。締固め振動検知部は圧電膜を薄膜電極で挟んだ圧電素子で構成し、振動累積時間を出力する。厚さ0.1mm程度のシート基材のコンクリートと接する側に材料分離・充填検知部、その反対側に締固め振動検知部と配線をそれぞれ配置した。

また、レディーミクストコンクリート工場、荷卸し場所、および圧送ホース吐出口（長距離圧送時）において、電圧デジタル信号を取得する場合にも適用できる。写真-5.9 に示すとおり試験容器の側面に設置して使用する。

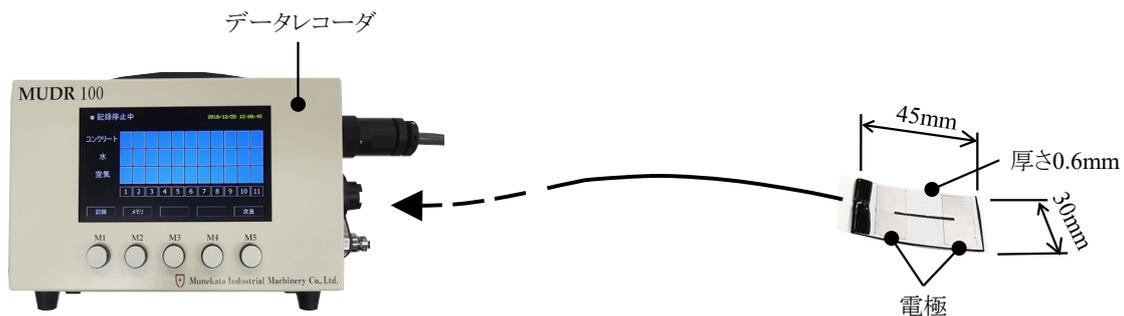


写真-5.8 パッチ型センサの形態

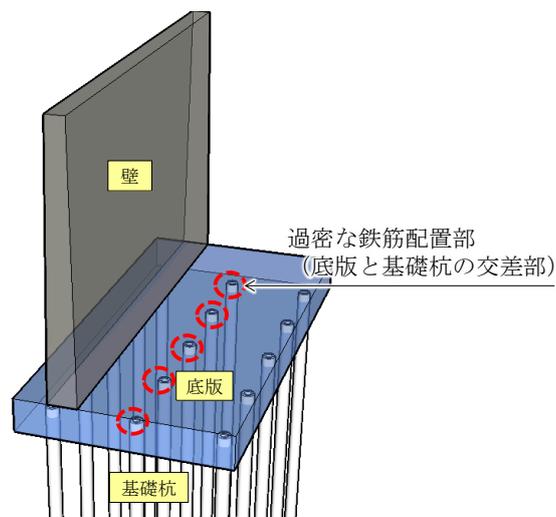


図-5.26 パッチ型センサの最適な適用部位



写真-5.9 パッチ型センサの試験容器への設置状況

5.5.2 シート状センサ

覆工コンクリート天端部に最適なセンサとして、写真-5.10 のシート状センサ^{10)~13)}を考案した。図-5.27 に示す覆工コンクリート天端部の打込みスパン（例えば、10.5 m）全長にわたってモニタリングできるように多数の検知部を備えた長尺のシート状形状とした。なお、取付け方法が限定されるが鉄筋コンクリート構造物への適用も可能である。センサ構造はパッチ型センサと同様で、材料分離・充填検知部はシート基材に並列配置した2つの板状電極で構成し、インピーダンスに代えて電圧デジタル信号を出力する。締固め振動検知部は圧電膜を薄膜電極で挟んだ圧電素子で構成し、振動累積時間を出力する。厚さ0.1 mm程度のシート基材のコンクリートと接する側に材料分離・充填検知部、防水シートに接着する側に締固め振動検知部と配線をそれぞれ配置した。図-5.28 のシート状センサ概要図、図-5.29 のシート状センサ平面図のとおり、パッチ型センサと異なるのは長尺のシート状である点と各検知部をそれぞれ最大11箇所ずつ配置している点である。配線がシート基材の接着側へ全て集約してあるため、多数の検知部を備えているにもかかわらず、従来のセンサに比べてセンサ設置作業が容易になっている。

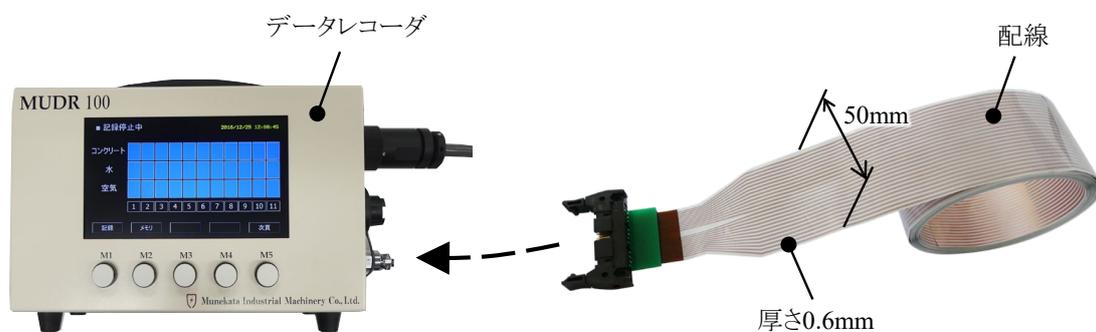


写真-5.10 シート状センサの形態

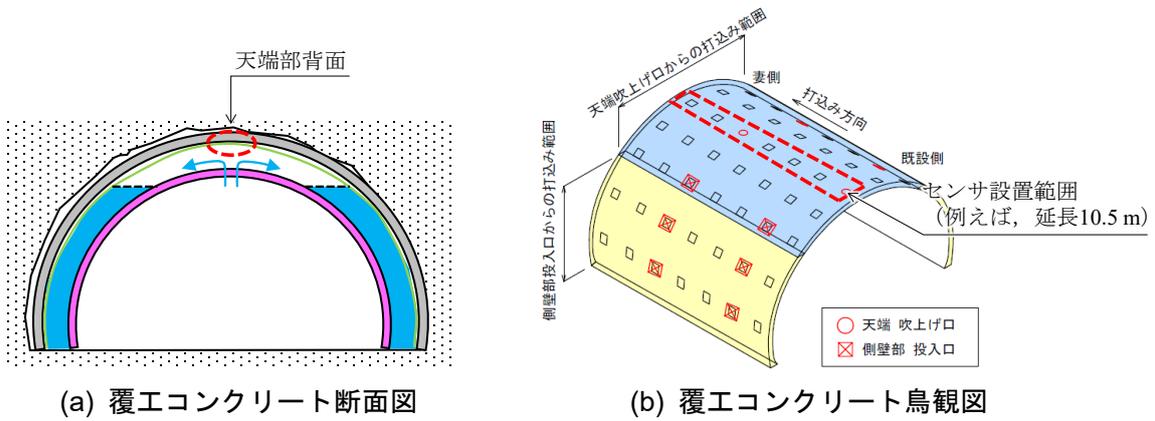


図-5.27 シート状センサの最適な適用部位

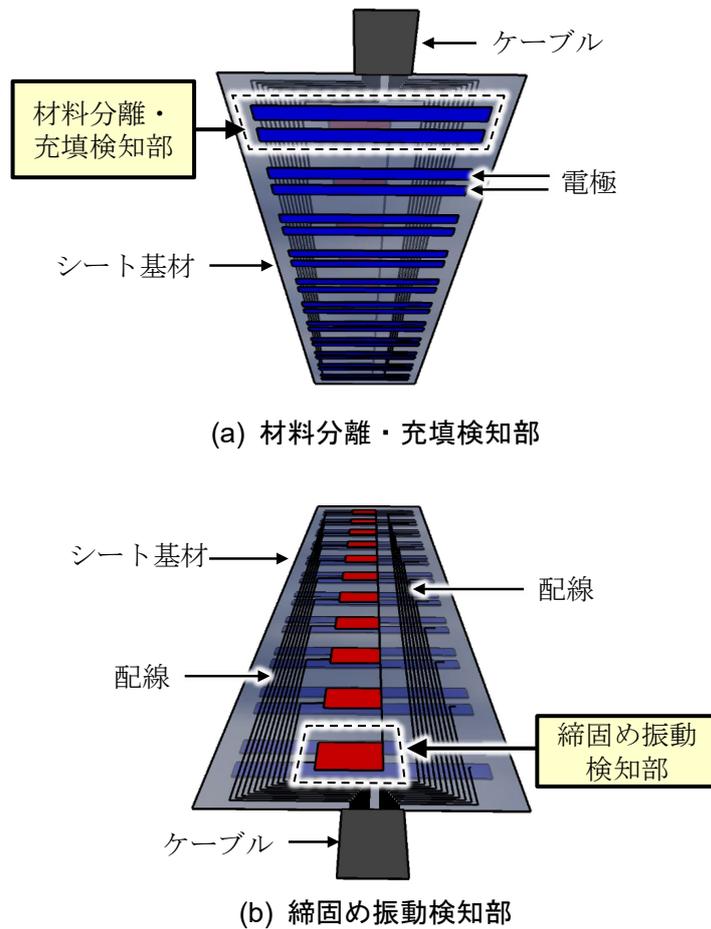


図-5.28 シート状センサ概要図

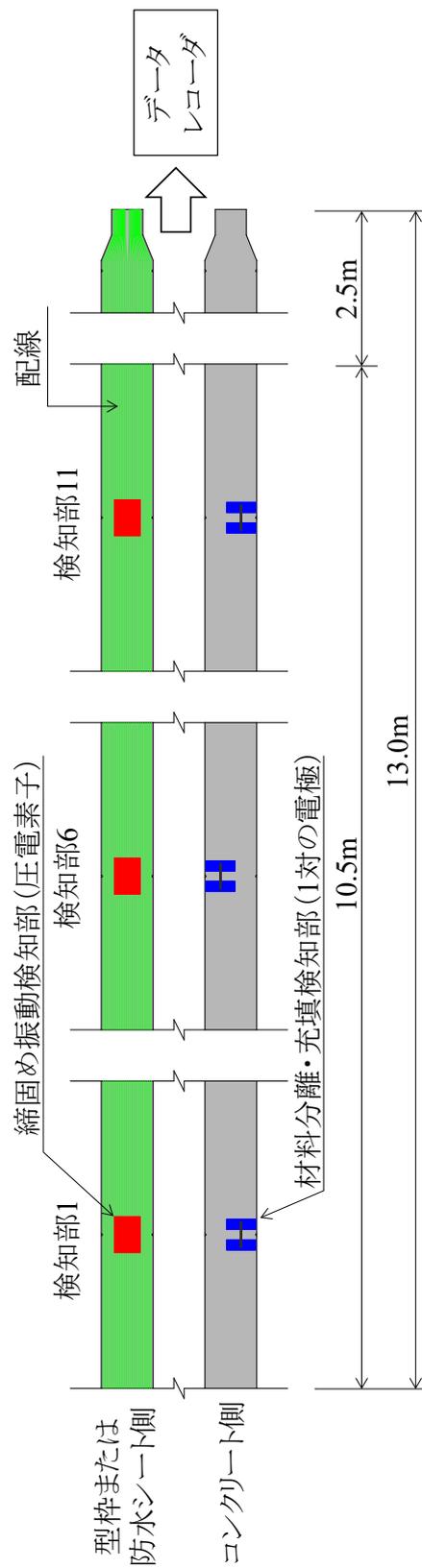


図-5.29 シート状センサ平面図

5.5.3 点電極センサ

鉄筋コンクリート構造物の壁や柱に最適なセンサとして、図-5.30の点電極センサを考案した。図-5.31に示すように壁状鉄筋コンクリート構造物であれば、壁下端や壁の打込み1層上方への取付けを想定している。取付け対象は木製型枠専用とした。センサ構造はパッチ型センサとシート状センサとは異なり、 $\phi 35\text{ mm}$ ×厚さ12 mmの円柱部に材料分離・充填検知部となる1対の点電極を内蔵する。点電極の中心間隔は30 mmとした。測定原理はプロトタイプと同様で、インピーダンスに代えて電圧デジタル信号を出力する。そのほか、締固め振動を検知するセンサ、コンクリートの側圧を検知する圧力センサ、および温度センサ等のセンサも内蔵可能とした。これらのデータは無線で送信されるため配線は不要である。

点電極センサは、木製型枠に $\phi 35\text{ mm}$ の孔を設けた後、各種センサが内蔵してある円柱部を挿入し木ねじ4本で固定する。型枠取外し後のコンクリートにほとんどセンサ痕跡を残さないように型枠内面から突出しない形状とした。

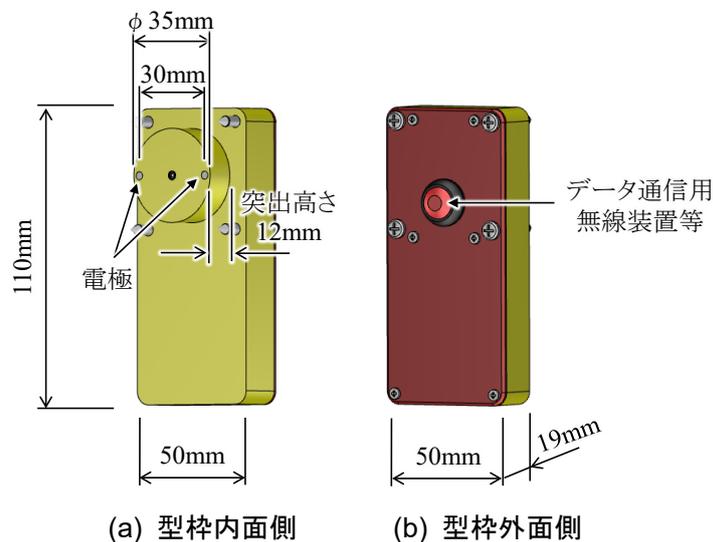


図-5.30 点電極センサの形態

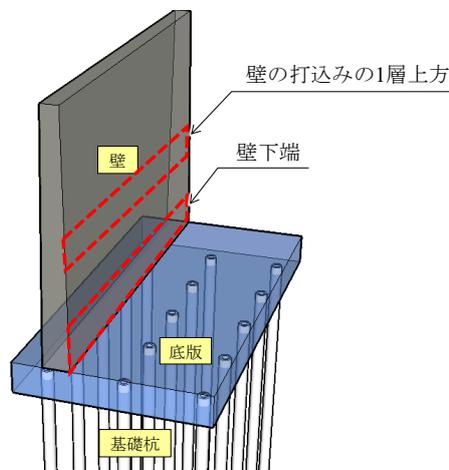


図-5.31 点電極センサの最適な適用部位

点電極センサの材料分離評価についてプロトタイプと同様に表-5.2 の計画配合を用いて検証を行った。図-5.32 に点電極センサによる電圧デジタル信号の測定方法を示す。点電極センサは木製試験容器（厚さ 12 mm，幅 200 mm×200 mm，高さ 200 mm）の側面の底面から 100 mm の高さに配置した。各配合ともセメントの接水から 15 分経過後，容器に高さ 200 mm までコンクリートを投入し，適度に叩きを行ってから点電極センサを用いて電圧デジタル信号を測定した。

図-5.33 にペースト体積と電圧デジタル信号の関係を示す。点電極センサで測定した電圧デジタル信号は，5.4.1 項において同じ計画配合に対して LCR メータで測定した図-5.10 のインピーダンスと同様に右肩下がりの直線的な関係となった。したがって，点電極センサを用いた電圧デジタル信号の測定によって材料分離評価が可能と考えられる。

参考として図-5.34 に電圧デジタル信号と側圧と温度の測定例を示す。電極にコンクリートが接触した後，側圧と温度が上昇している様子をモニタリングできている。側圧は型枠計画時の設計荷重との比較により変形防止に反映できる。温度は積算温度等を利用することで強度を推定し取外し時期の決定に反映できる。このように，材料分離，充填，締固めのほかに有用な情報を提供することでセンサの普及が期待できる。

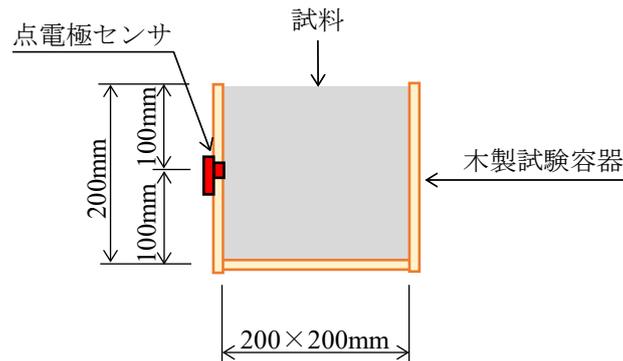


図-5.32 電圧デジタル信号の測定方法（点電極センサ）

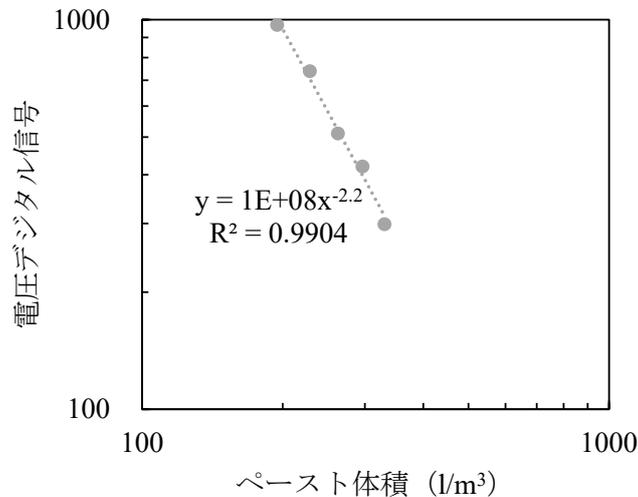


図-5.33 ペースト体積と電圧デジタル信号の関係（点電極センサ）

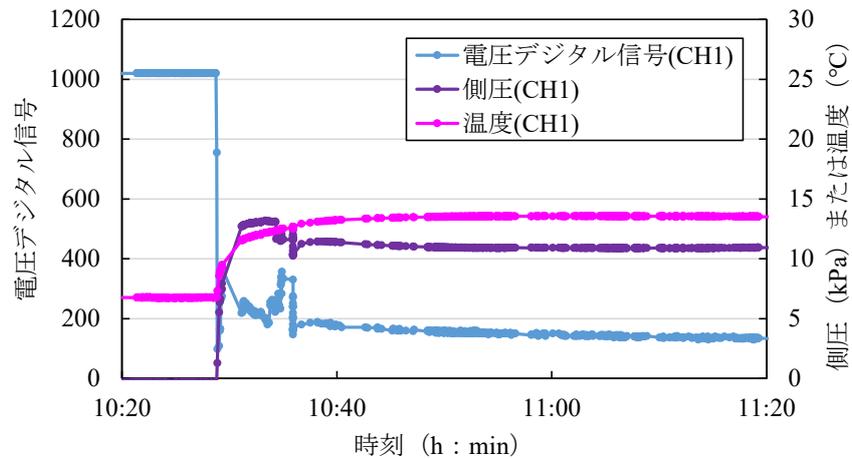


図-5.34 電圧デジタル信号と側圧と温度の測定例

5.6 まとめ

5章では建設現場に均質性評価方法を適用するにあたり、ペースト体積とインピーダンスの関係を利用する方法にシフトした。また、建設現場でのモニタリングに適したセンサを対象部位に応じて3種類開発し、インピーダンスに代えて電圧デジタル信号で均質性評価が可能であることを示した。さらに、温度と経過時間の影響については均質性評価には無視できるほど小さいことから考慮しないとした。5章の成果として、表-5.7に開発したセンサの適用推奨部位を整理した。

表-5.7 開発したセンサの適用推奨部位

部位	懸念される品質不具合	センサの適否*			
		パッチ	シート	点電極	
鉄筋 コンクリート 構造物	壁・柱下端	・ 圧送ホースや棒状バイブレータが最も挿入しにくく、目視が難しい場所のため材料分離や豆板等が発生しやすい。	○ (型枠)	○ (鉄筋)	◎ (型枠)
	壁・柱の打込みの1層上方	・ 打込みの1層の高さはバイブレータの締固め能力を考慮して40～50 cm以下を標準としているが、締固め能力以上の高さを打ち込み、締固め不足となる可能性がある。 ・ 打ち重ねるときは下層に棒状バイブレータを10 cm程度挿入する必要があるが下層に挿入できずコールドジョイントを発生させたり、必要以上に下層に挿入し粗骨材を沈降させたりする可能性がある。	○ (型枠)	○ (鉄筋)	◎ (型枠)
	過密な鉄筋配置部（底版と基礎杭の交差部／壁・柱・梁の交差部）	・ 底版下面鉄筋と基礎杭鉄筋（場所打ち杭）または杭頭補強鉄筋（既成杭）の交差部は過密な鉄筋配置となるため、コンクリートの回り込み不足や締固め不足になりやすい。 ・ 壁・柱・梁交差部も上記同様の品質不具合の可能性がある。	◎	×	×
覆工 コンクリート 天端部	天端部背面	・ 吹上げ口から約10 m流動させるため材料分離が生じる可能性がある。 ・ 検査窓と妻型枠を閉じた後は完全に不可視部となる。充填と締固め完了の確認ができず、天端部背面に空洞、ブリーディング水の巻込みによる脆弱部、コールドジョイント等が発生する可能性がある。	○	◎	×

*センサの適否の説明

- ・ 記号：◎ 最適，○ 可，× 不可
- ・ 型枠：センサ設置場所が型枠であることを示す。
- ・ 鉄筋：センサ設置場所が鉄筋であることを示す。

参考文献

- 1) 岩崎 訓明, 坂本 信義「コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性」土木学会論文集, 第 402 号/V-10, 1989
- 2) スプレーコーティングに関する技術情報 : <https://www.munekata.co.jp/eh/method.html#s01>
(閲覧日 2021 年 9 月 28 日)
- 3) 株式会社ティ・アンド・シー・テクニカル商品開発課: 導電率測定についての基礎知識, 2019.
- 4) 羽毛田 靖: 電気伝導率計の原理と応用, 分析の原理 25, 電気化学②, JAIMA SEASON 2013 Summer, 2013.
- 5) 全日本ネオン協会: ネオンサインの知識と実務, pp. 12-14, 2000.
- 6) ザイレムジャパン: 電気伝導率測定における温度補償について, テクニカル・ガイド, 2019.
- 7) 村上 拓, 阿保 寿郎, 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.
- 8) 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.
- 9) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], pp. 108-109, 2018.
- 10) 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.
- 11) T. Yamada, Y. Umino, and T. Iyoda: Study on Detection of Filling and Compaction Based on Electrical and Vibrational Characteristics of Fresh Concrete, The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2020/2021), “Advanced & Innovative Concrete Technology”, pp. MT26-MT37, 2021.
- 12) 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工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.
- 13) 二宮 伸二, 中林 雅昭, 山田 勉, 海野 雄士, 桑田 拓弥, 金澤 彰裕: 覆工コンクリート天端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.

6 実構造物への適用性確認試験

6.1 はじめに

5章で考案したモニタリングに適した各種センサは、室内試験においてLCRメータ等で測定したインピーダンスに整合する電圧デジタル信号を出力した。本章では、シート状センサ^{1)~4)}を壁状鉄筋コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部へ適用し、実構造物において室内試験との整合性、均質性評価の実現可能性、耐久性等について確認し、建設現場へ適用するときの改善点や留意点を明らかにする。

6.2 壁状鉄筋コンクリート構造物

図-6.1と図-6.2に示す壁状鉄筋コンクリート構造物の打込みロット下端、延長10mの範囲の木製型枠内面にシート状センサ（材料分離・充填検知部11箇所、締固め振動検知部11箇所）を設置した。写真-6.1、写真-6.2にシート状センサの設置状況を示す。シート状センサのコネクタ側は型枠同士の接合部から取り出し、データレコーダに接続した。

表-6.1に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 3.04 g/cm^3 ）、細骨材は砕砂（S1、表乾密度 2.65 g/cm^3 ）と砂（S2、表乾密度 2.59 g/cm^3 ）、粗骨材は砕石（表乾密度 2.70 g/cm^3 、最大寸法 20 mm ）、化学混和剤はポリカルボン酸ポリエーテル系のAE減水剤を用いた。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測定した。

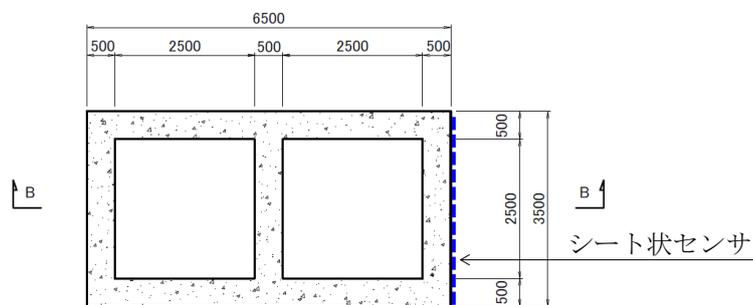


図-6.1 平面図 (A-A 断面)

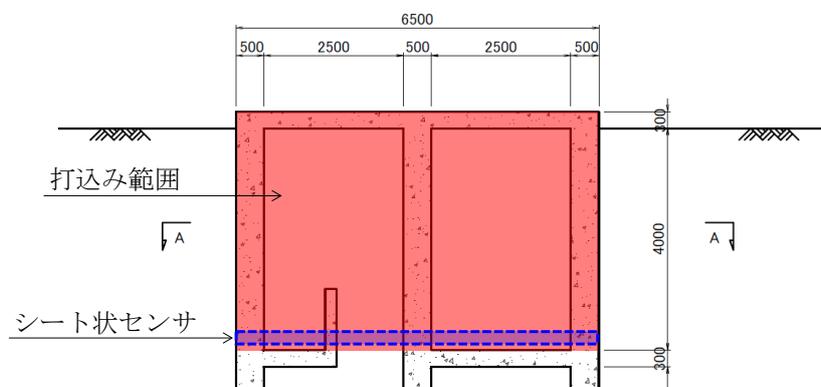


図-6.2 側面図 (B-B 断面)



写真-6.1 シート状センサ設置状況



写真-6.2 シート状センサ取出し部

表-6.1 計画配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S1	S2	G
C7-1	BB	51.9	44.1	2.5	165	318	400	391	1034

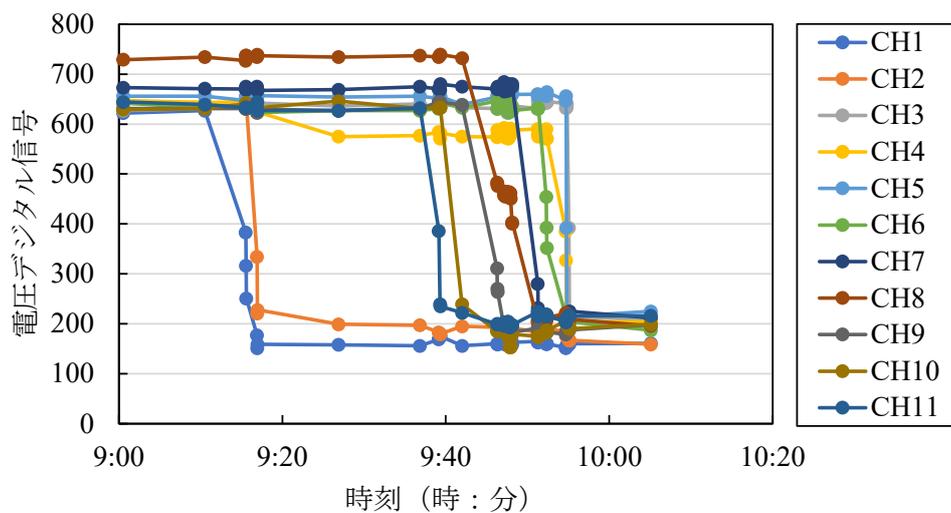


図-6.3 全検知部の電圧デジタル信号の経時変化

図-6.3 にシート状センサの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、断線検知用のカーボンの電圧デジタル信号（600～700 程度）を示しているが、コンクリートに接触すると 200 前後の値まで急激に低下した。

図-6.4～図-6.5 に各検知部における電圧デジタル信号と振動累積時間の関係を示す。いずれの検知部においても電圧デジタル信号の降下後、振動累積時間が上昇した。つまり、コンクリートが打ち込まれた後、棒状バイブレータにより振動が付与されたことが可視化されている。また、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。

たが、振動付与後は 200 程度まで低下した。これは、電気抵抗は電極面積に反比例する⁵⁾ことから、電圧デジタル信号が低下する過程は電極にコンクリートが部分的に接触している状態で、電圧デジタル信号が 200 程度になったとき電極が完全にコンクリートで満たされたことを表していると考えられる。4.3 節の室内試験で明らかにした電極面積と電圧デジタル信号の関係のとおりである。

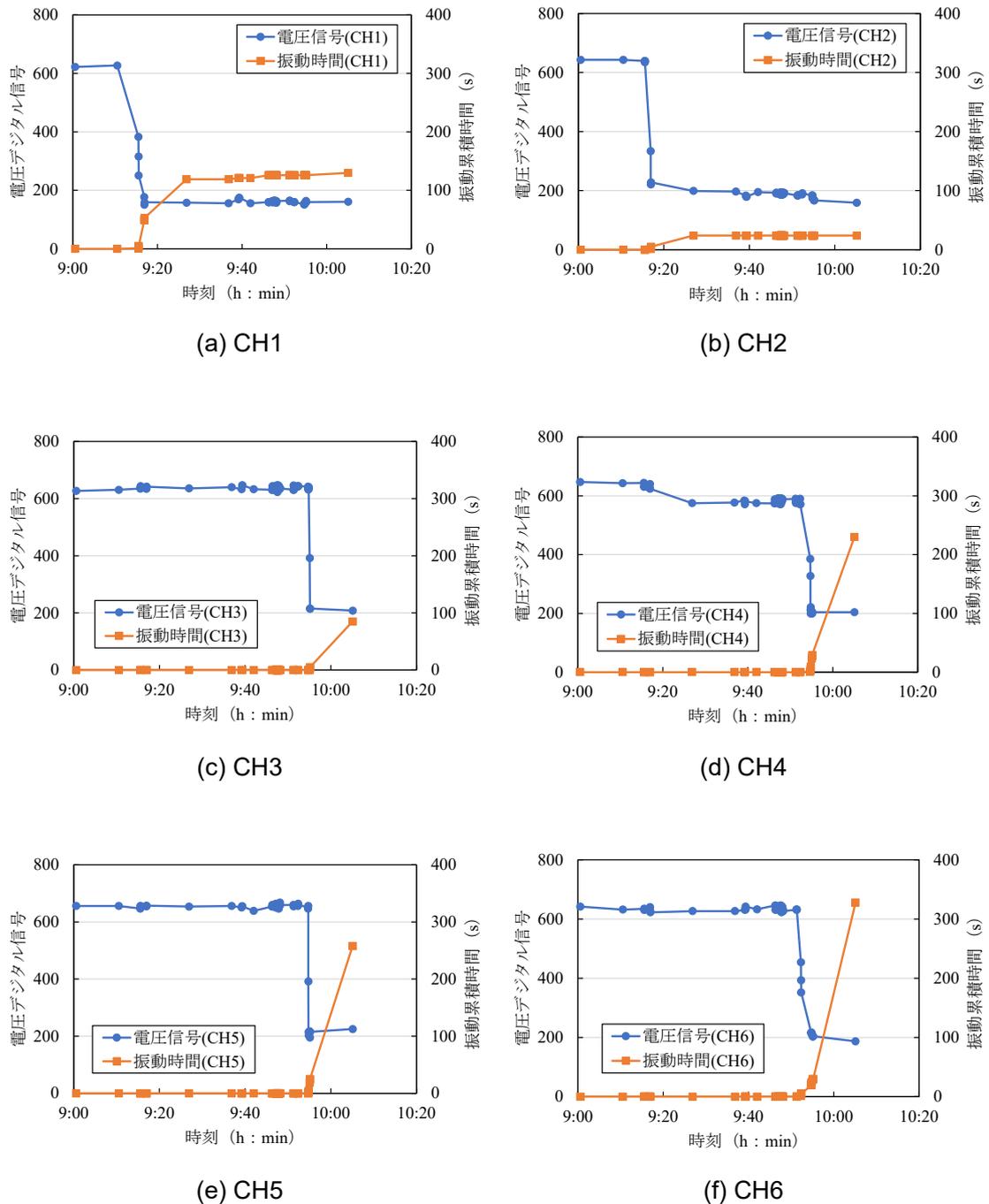
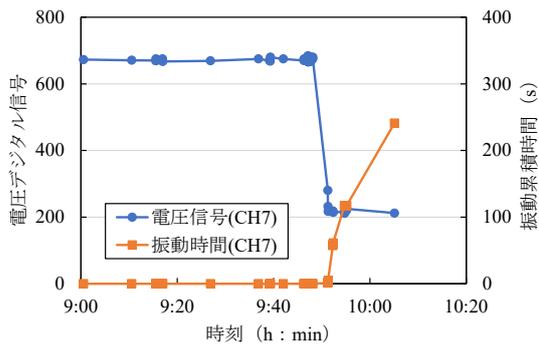
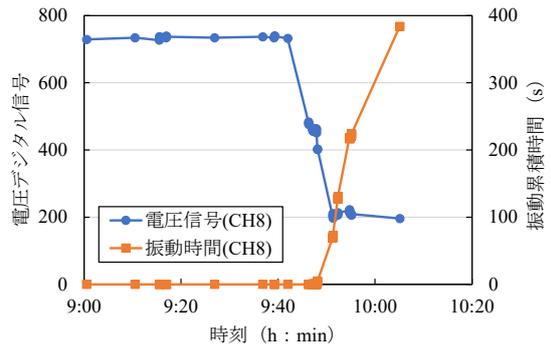


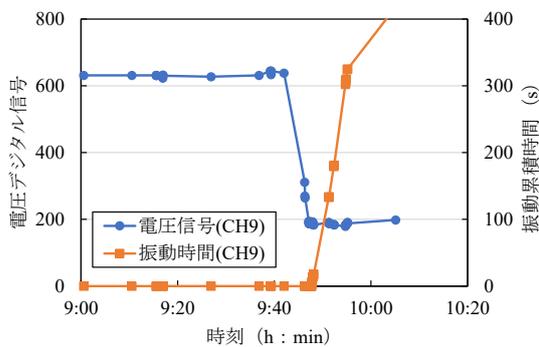
図-6.4 各検知部の電圧デジタル信号と振動累積時間の経時変化 (CH1~CH6)



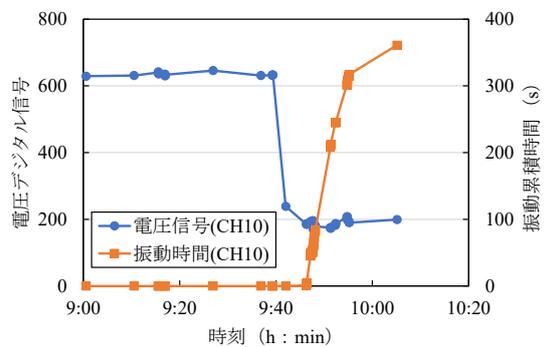
(g) CH7



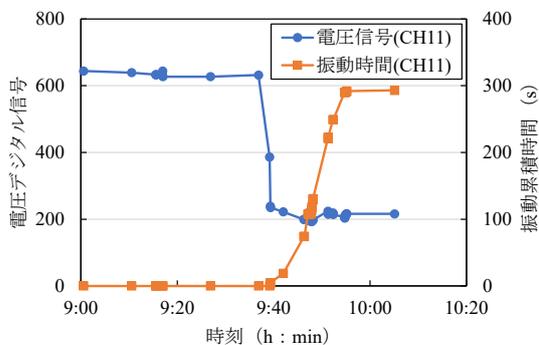
(h) CH8



(i) CH9



(j) CH10



(k) CH11

図-6.5 各検知部の電圧デジタル信号と振動累積時間の経時変化 (CH7~CH11)

6.3 覆工コンクリート天端部

図-6.6 に覆工コンクリート天端部縦断図, 写真-6.3 にシート状センサ設置状況を示す. 打込みスパン 10.5 m 全長にわたって天端部の防水シートにシート状センサ (材料分離・充填検知部 11 箇所) を設置した. 防水シートはコンクリート打込み時の充填圧により背面に押し付けられて馴染むため意図的に弛ませて張り付けられているが, シート状センサは防水シートの弛んだ形状に追従して柔軟な設置ができています. シート状センサのコネクタ側は

防水シートと妻型枠の間から取り出し、データレコーダに接続した。

表-6.2 にコンクリートの計画配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm^3 ），細骨材は陸砂（表乾密度 2.62 g/cm^3 ），粗骨材は碎石（表乾密度 2.62 g/cm^3 ，最大寸法 25 mm ），化学混和剤はポリエーテル系ポリカルボン酸タイプの高性能 AE 減水剤を用いた。側壁部および肩部の打込み終了後，吹上げ方式により天端部にコンクリートを打ち込んだ。打込み中は材料分離・充填検知部からの電圧デジタル信号を連続的に測定した。

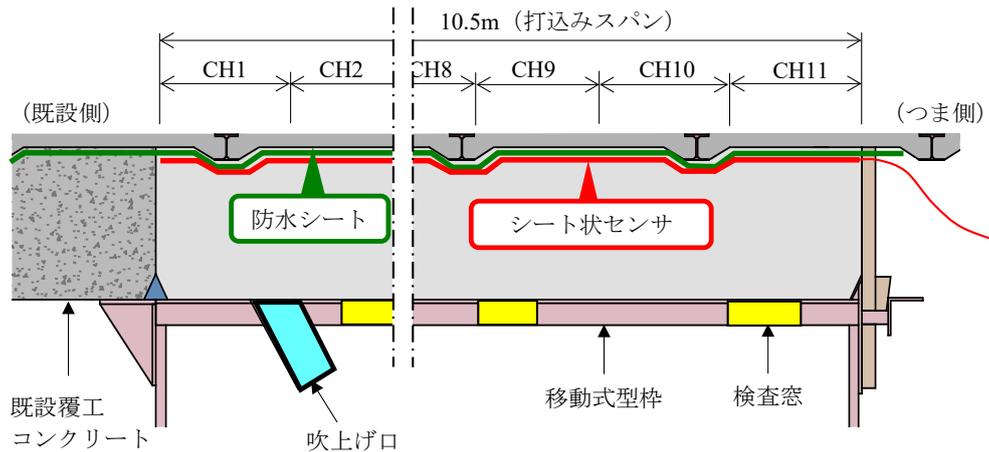


図-6.6 覆工コンクリート天端部縦断図



写真-6.3 シート状センサ設置状況

表-6.2 計画配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m^3)			
					W	C	S	G
C8-1	N	46.1	46.7	2.1	175	380	807	920

図-6.7 にシート状センサの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、断線検知用のカーボンの電圧デジタル信号（900～950 程度）を示しているが、コンクリートに接触後は下降と上昇を繰り返しながら徐々に 400 前後の値に到達した。これは、吹上げ方式により打ち込まれたコンクリートが天端部背面まで到達後、棒状バイブレータにより振動が付与されてコンクリートが沈下した状況が繰り返されている現象を捉えている。電圧デジタル信号が 800 前後のときは、一度電極にコンクリートが接触して沈降し、電極にペースト膜が付着している状態と考えられる。また、電圧デジタル信号が 500～700 程度のときは、電極にコンクリートが部分的に接触している状態と考えられる。電気抵抗は電極面積に反比例することから、電極にコンクリートが接触する面積が増えるほど電圧デジタル信号は低くなり、電極が完全にコンクリートで満たされると 400 前後に到達する。早期に電圧デジタル信号が 400 前後に近づくのは吹上げ口近くの CH1～CH4 であり、最後に妻側の CH11 が約 400 に到達した段階で打込みを終了とした。なお、カーボンとコンクリートの値が 6.2 節の値と異なるのは、開発初期のシート状センサを使用したため仕様が異なることに起因している。

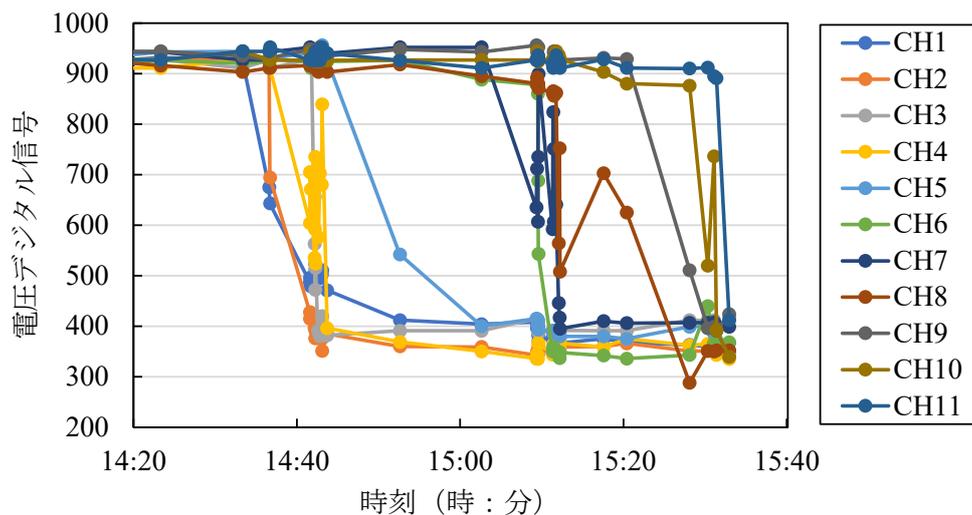
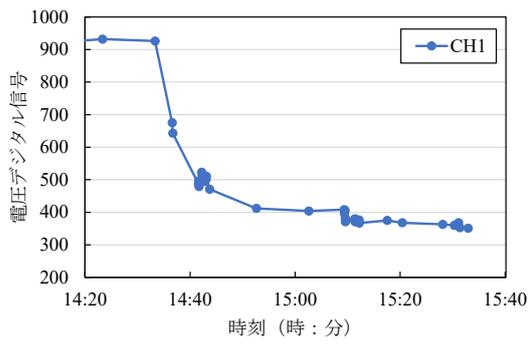
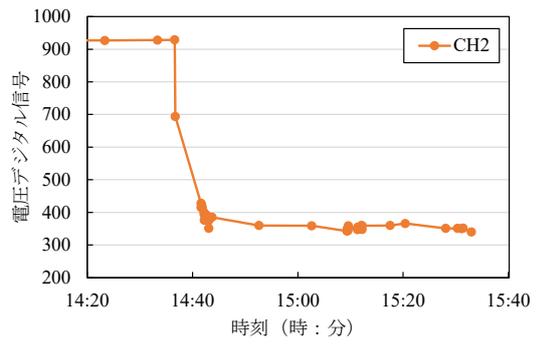


図-6.7 全検知部の電圧デジタル信号の経時変化

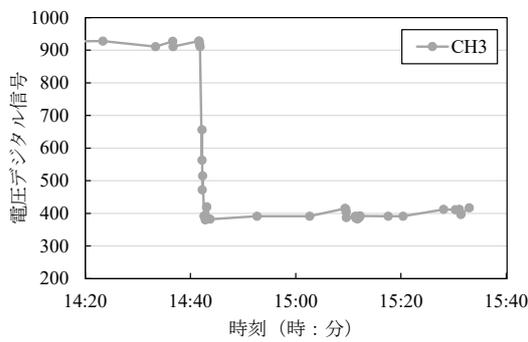
図-6.8 と図-6.9 に各検知部における電圧デジタル信号の経時変化を示す。打込み終了時の電圧デジタル信号は、吹上げ口側（CH1～CH6 平均値 363）より妻側（CH7～CH11 平均値 385）が約 6%高くなった。アジテータ車毎にコンクリートを異なる色で着色し天端部のアジテータ車毎の分布状況を調査した実験例⁶⁾によれば、最後のアジテータ車のコンクリートが吹上げ口側から全長の半分以上まで、最後から 1 台前のアジテータ車のコンクリートが妻側に分布していた。最後の 1 台分のコンクリートは人力による棒状バイブレータでの締固めができなため、粗骨材分布が比較的密でない状態であったため、吹上げ口側の電圧デジタル信号が小さくなった可能性がある。



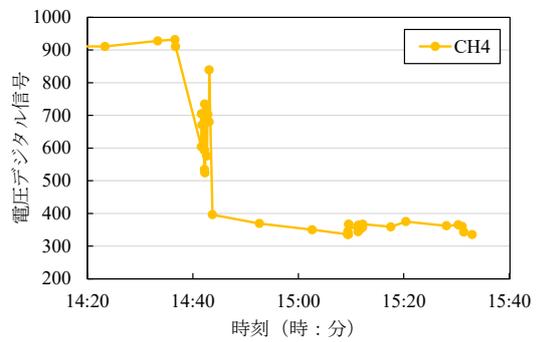
(a) CH1



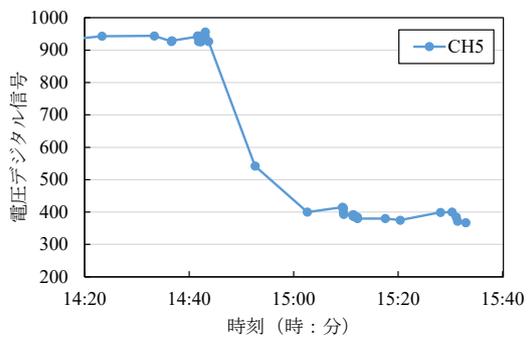
(b) CH2



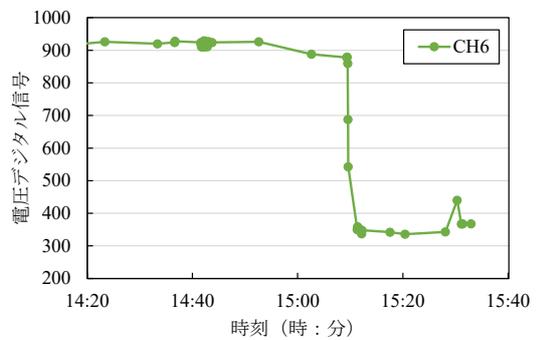
(c) CH3



(d) CH4

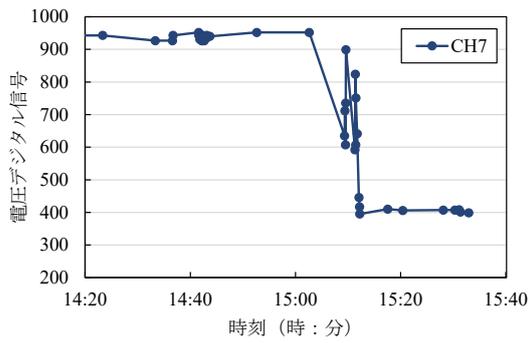


(e) CH5

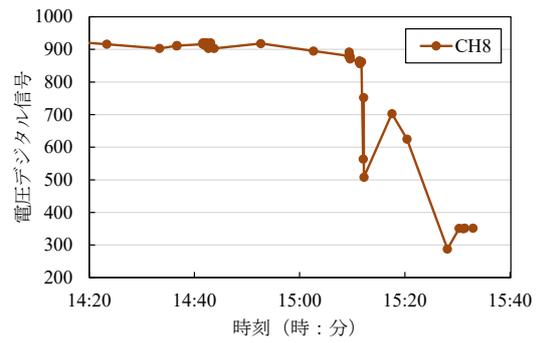


(f) CH6

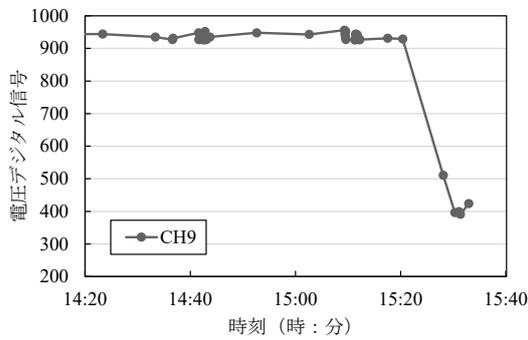
図-6.8 各検知部の電圧デジタル信号の経時変化 (CH1~CH6)



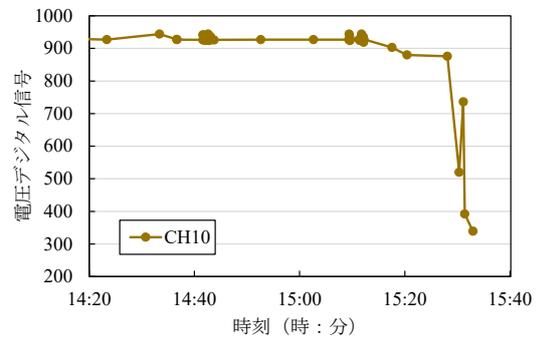
(g) CH7



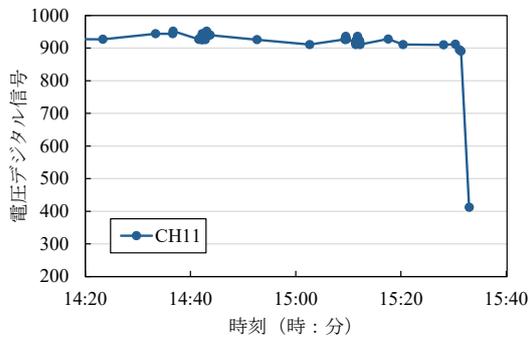
(h) CH8



(i) CH9



(j) CH10



(k) CH11

図-6.9 各検知部の電圧デジタル信号の経時変化 (CH7~CH11)

6.4 まとめ

壁状鉄筋コンクリート構造物においては、コンクリートの充填の様子が電圧デジタル信号の低下によって窺い知ることができた。また、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と連動して電圧デジタル信号の変化が捉えられ、振動付与により粗骨材分布が変動していることが推定できた。一方で、データレコーダでは1秒毎に測定しているものの、いずれかの検知部で測定値に大きな変化がないと10分間毎の記録となる設定とし

ていたため、粗骨材分布の変動を捉えるには粗い設定といえる。均質性評価のためには測定値の記録間隔を短くする必要がある。また、鉄筋の影響は認められなかった。

覆工コンクリート天端部においては、コンクリートの流動の様子が捉えられた。吹上げ口近傍では管理圧力として、例えば 70~90kPa^{6)~8)} 程度を設定することもあり、断線等の損傷を受けないことがセンサに求められるが、全ての検知部で電圧デジタル信号を継続的に出力できた。測定値の記録については壁状鉄筋コンクリート構造物と同様に密な記録が求められる。

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) T. Yamada, Y. Umino, and T. Iyoda: Study on Detection of Filling and Compaction Based on Electrical and Vibrational Characteristics of Fresh Concrete, The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2020/2021), "Advanced & Innovative Concrete Technology", pp. MT26-MT37, 2021.
- 3) 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工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.
- 4) 二宮 伸二, 中林 雅昭, 山田 勉, 海野 雄士, 桑田 拓 弥, 金澤 彰裕: 覆工コンクリート天端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.
- 5) 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.
- 6) 小池 悟, 小野里 みどり, 諸澤 正毅, 野間 康隆, 多寶 徹: 覆工コンクリート天端部の品質に関する実験的検討, 安藤ハザマ研究年報, Vol. 5, 2017.
- 7) 坂口 伸也, 今田 一典, 原 秀利, 松下 博通: トンネル覆工コンクリートの耐久性向上に向けた施工技術の開発, コンクリート工学, 47 巻, 6 号, pp. 52-58, 2009.
- 8) 椎名 貴快, 佐藤 幸三, 高橋 雅, 金丸 信一: 覆工コンクリートの天端充てん性と品質の向上への実験取り組み, 西松建設技報, Vol. 35, 2012.

7 建設現場における品質モニタリングシステム

7.1 品質モニタリング手法

5章では建設現場においてモニタリングに適したセンサを考案し、室内試験でLCRメータを用いて測定したインピーダンスとセンサを用いて測定した電圧デジタル信号が整合することを確認した。6章では壁状鉄筋コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部にシート状センサ^{1)~4)}を適用し、打込み時にリアルタイムの均質性評価が実現可能であることを示した。これらの結果を受けて、7章では5章で開発したセンサを用いてあらかじめレディーミクストコンクリート工場で配合と電圧デジタル信号の関係を把握するとともに、打込み当日には荷卸し場所と圧送ホース吐出口において電圧デジタル信号を測定し、打込み場所における品質モニタリングまでの一連の均質性評価を実施した。図-7.1に建設現場における品質モニタリングのフローを示す。

レディーミクストコンクリート工場では、建設現場で使用予定のコンクリート配合を標準に材料分離を想定して粗骨材を増減させた計5配合の電圧デジタル信号をあらかじめ測定し、ペースト体積と電圧デジタル信号の関係を把握しておく。打込み当日は荷卸し場所と圧送ホース吐出口で電圧デジタル信号を測定し、レディーミクストコンクリート工場ですべて事前測定した値と大きな差異がない(材料分離がない)ことを確認する。なお、圧送ホース吐出口での測定は長距離圧送の場合に限って行うこととする。これらの電圧デジタル信号測定に用いる試験容器は、図-7.2と写真7.1に示すとおり建設現場で材料の入手と製作が容易な木製型枠(厚さ12mm)を使用し、持ち運びが容易な幅200mm×200mm、高さ200mmの内空寸法とした。最後に、打込み場所の型枠等に設置したセンサで打込み時の電圧デジタル信号をリアルタイムに連続測定し、打込み開始時の初期値からの変化で材料分離の兆候を監視する。

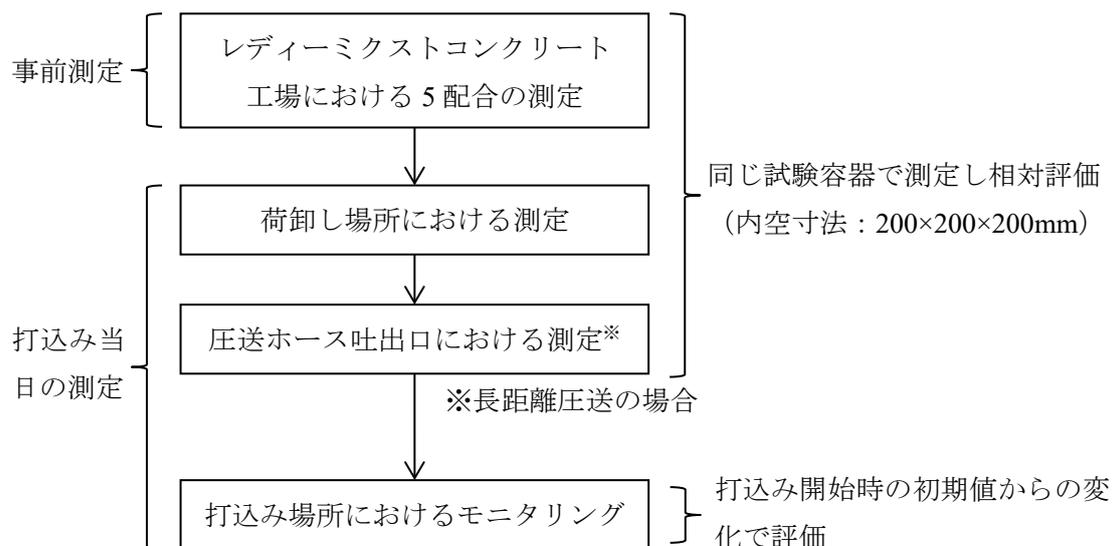


図-7.1 建設現場における品質モニタリングのフロー

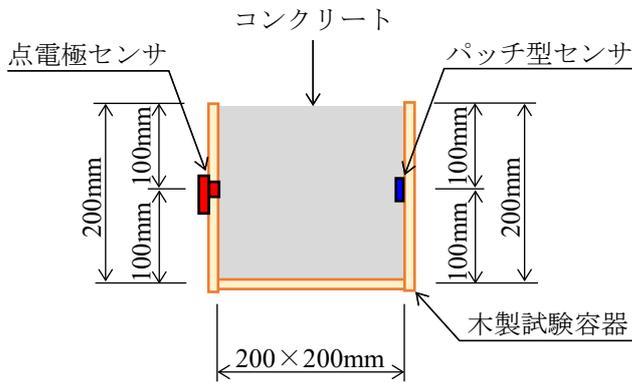


図-7.2 木製試験容器側面図



写真-7.1 測定状況

7.2 建設現場の概要

図-7.3～図-7.7 に考案した品質モニタリングを適用した函渠の構造を示す。函渠は 6.7% の縦断勾配が設定されている。同日に 1 台のコンクリートポンプ車で打ち込む両側の側壁を対象に、側壁①に点電極センサ、側壁②にシート状センサを適用した。点電極センサは打継目から 1,000 mm 上方に計 2 箇所設置した。シート状センサは打継目から 600 mm の高さに縦断勾配に沿って長さ 5 m の範囲に材料分離・充填検知部と締固め検知部をそれぞれ 5 箇所ずつ配置した。なお、レディーミクストコンクリート工場から建設現場までのコンクリートの運搬時間はおおよそ 15～20 分である。

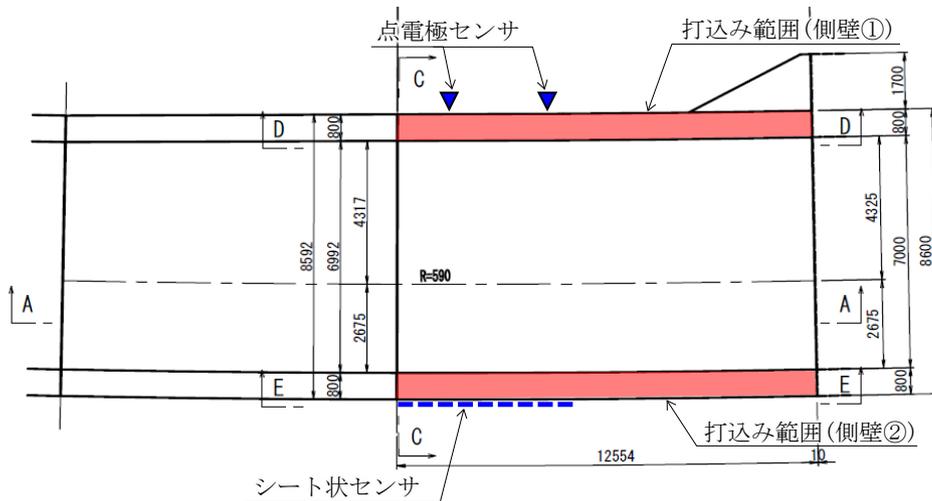


図-7.3 平面図 (B-B 断面)

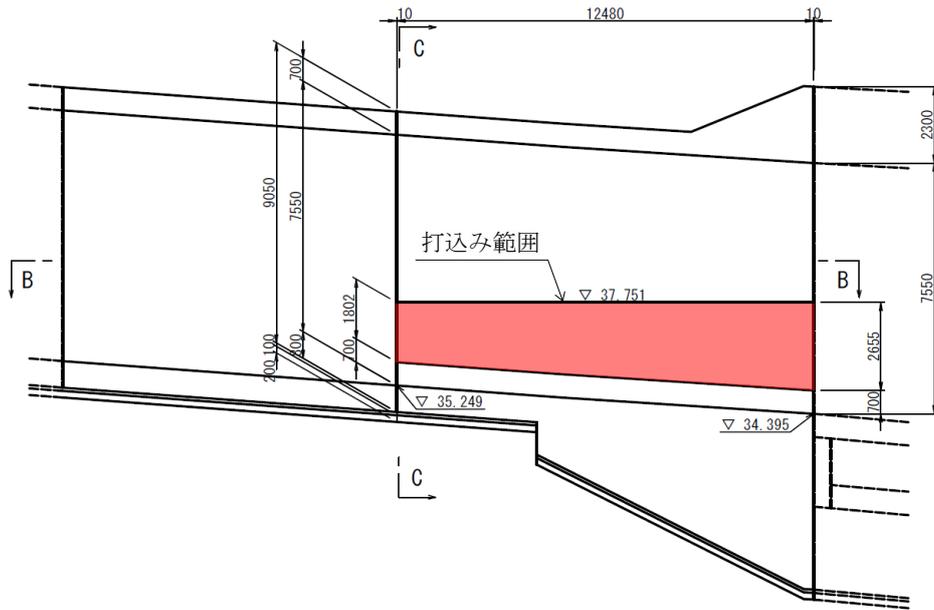


図-7.4 側面図 (A-A 断面)

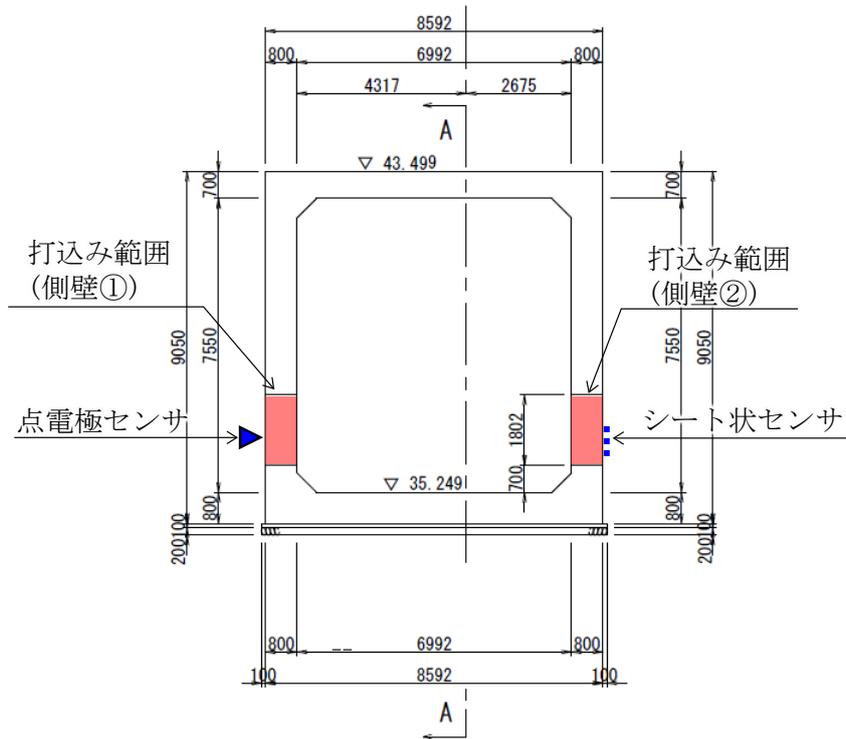


図-7.5 断面図 (C-C 断面)

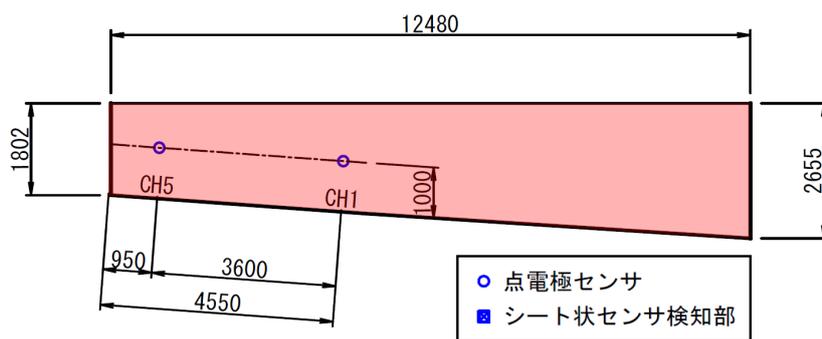


図-7.6 側壁①点電極センサ設置側面図 (D-D 断面)

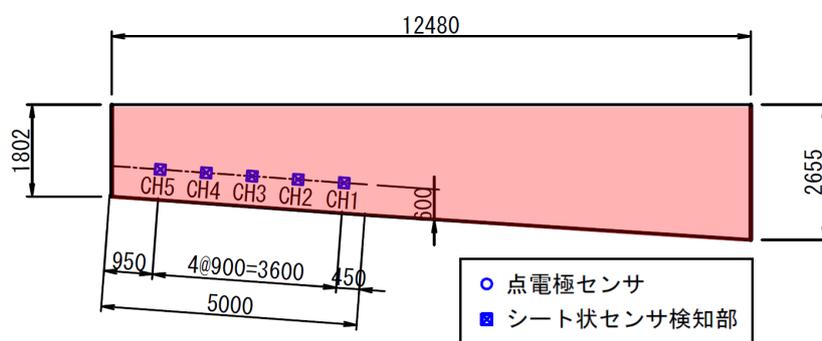


図-7.7 側壁②シート状センサ設置側面図 (E-E 断面)

7.3 実施シミュレーション

7.3.1 ペースト体積と電圧デジタル信号の関係の事前把握

表-7.1 に計画配合と体積構成比を示す。セメントは高炉セメント B 種 (密度 3.04 g/cm^3)，細骨材は砕砂 (表乾密度 2.66 g/cm^3) と山砂 (表乾密度 2.57 g/cm^3)，粗骨材は砕石 (表乾密度 2.66 g/cm^3 ，最大寸法 20 mm)，化学混和剤はリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体の AE 減水剤を用いた。建設現場に適用予定の C9-3 を標準配合とし，単位粗骨材体積を ± 25 ， ± 50 %とした配合を加え，計 5 配合とした。

図-7.8 にパッチ型センサによる電圧デジタル信号の測定結果，図-7.9 に点電極センサによる電圧デジタル信号の測定結果を示す。双方ともにペースト体積とインピーダンスを両軸対数としたとき右肩下りの直線関係が得られた。ペースト体積が小さくなるにしたがい電圧デジタル信号の伸びが大きいため，粗骨材が集中する様子を捉えるのは容易と考えられる。

図-7.10 に参考として LCR メータによるインピーダンスの測定結果を示す。3 章の LCR メータによる測定と同様に棒状電極 ($\phi 3.0 \text{ mm}$ ，SUS304) とプラスチック製容器 (幅 $145 \text{ mm} \times 215 \text{ mm}$ ，高さ 160 mm) を使用した。これは過去のデータとの整合性を確認するために測定したものである。結果として，3 章で明らかにしたペースト体積とインピーダンスの関係と同様に，両軸対数としたとき右肩下りの直線的な関係が得られた。

表-7.1 計画配合と体積構成比

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)					体積構成比	
					W	C	S1	S2	G		
C9-1	BB	49.8	29.3	2.4	172	247	412	176	1436	C9-1	
C9-2	BB	49.8	37.2	2.4	123	295	492	211	1197	C9-2	
C9-3	BB	49.8	46.3	2.4	147	344	573	245	958	C9-3	
C9-4	BB	49.8	56.8	2.4	171	392	653	280	718	C9-4	
C9-5	BB	49.8	68.9	2.4	195	440	734	314	479	C9-5	

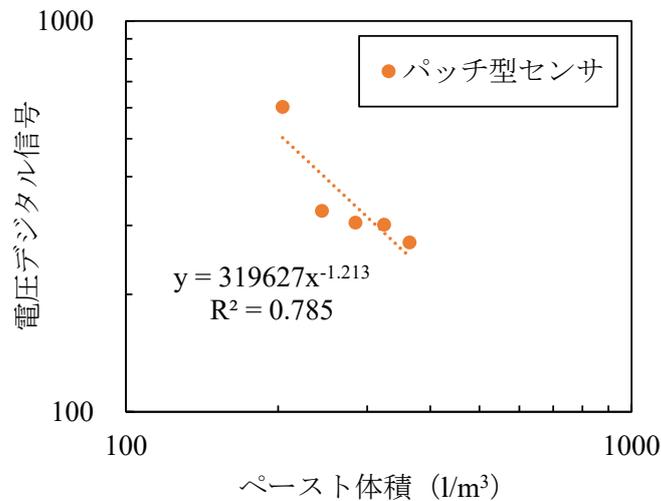


図-7.8 ペースト体積と電圧デジタル信号の関係（パッチ型センサ）

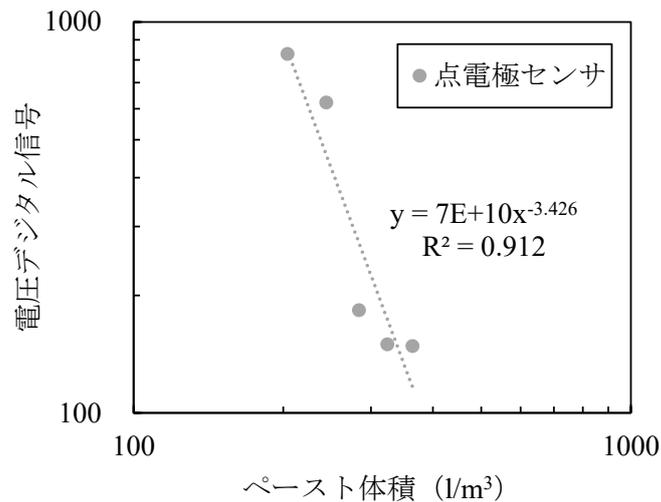


図-7.9 ペースト体積と電圧デジタル信号の関係（点電極センサ）

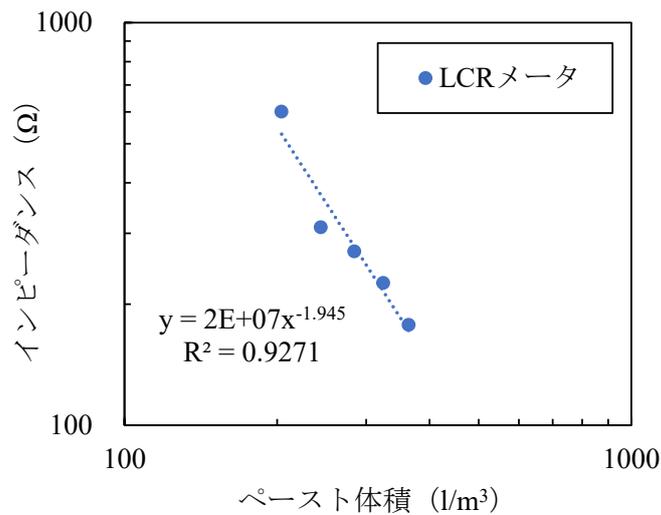


図-7.10 ペースト体積とインピーダンスの関係 (LCRメータ)

7.3.2 運搬後の材料分離程度の評価

写真-7.2 に荷卸し場所、写真-7.3 に電圧デジタル信号の測定状況を示す。測定対象のコンクリート配合は表-7.1 の C9-3 である。図-7.11 にパッチ型センサと点電極センサを用いて測定した運搬後の電圧デジタル信号の変化を示す。荷卸し場所および吐出口のいずれも試験数を 3 としたときの平均値である。パッチ型センサおよび点電極センサの双方であらかじめレディーミクストコンクリート工場において測定した結果と大きな差異は認められなかった。運搬時間が 15~20 分と比較的短く、配管圧送がないことが要因と考えられる。この比較結果から、粗骨材分布は計画配合と同等であり、均質性は損なわれていないと推察した。



写真-7.2 荷卸し場所



写真-7.3 電圧デジタル信号測定状況

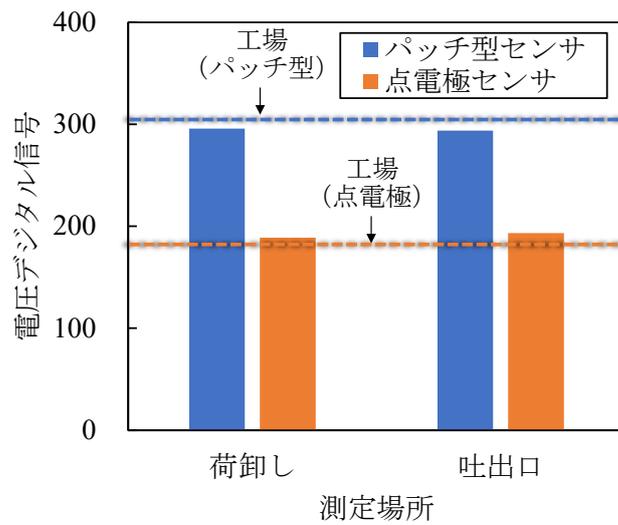


図-7.11 運搬後の電圧デジタル信号の変化

7.3.3 打込み時における材料分離兆候の監視

(1) 点電極センサによる品質モニタリング

写真-7.4 に点電極センサの形態、写真-7.5 に点電極センサの設置状況を示す。設置方法は木製型枠にφ35mmの孔を開けて、4箇所を木ねじで止めるだけであり、シート状センサに比べて容易であった。

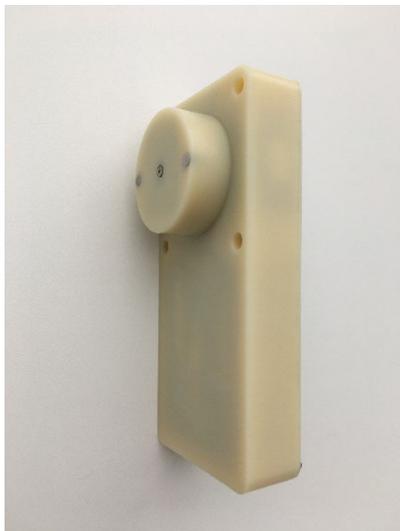


写真-7.4 点電極センサの形態



写真-7.5 点電極センサの設置状況

図-7.12 と図-7.13 に側壁①に設置した点電極センサによる電圧デジタル信号の測定結果を示す。点電極センサには今後締固め振動を検知するセンサの装備を検討しているが、建設現場適用時は装備しなかったため、近傍にシート状センサを設置して締固め振動を測定した。

図-7.12 の側壁① (CH1) では、電圧デジタル信号が急激に低下したコンクリート投入時から振動累積時間が右肩上がりとなった締固め中の時間帯に、電圧デジタル信号が 200～400 程度の範囲で大きく上下した。これは締固め振動によって粗骨材分布が大きく変動したことを示していると考えられる。その後は電圧デジタル信号が 200 弱で落ち着いた。この値はレディーミクストコンクリート工場や荷卸し場所等で測定したときの値に近い。点電極センサは電極面積が小さいため、試験容器の内空寸法（幅 200×200 mm、高さ 200 mm）以下の範囲に電流線が分布していると推察される。その後、新たにコンクリートが投入されたときの締固めにより若干の電圧デジタル信号の低下が見られ、最終的には 150 程度まで低下した。これは振動付与による粗骨材の沈降が生じていることを表していると考えられる。

図-7.13 の側壁① (CH5) では、電圧デジタル信号が急激に低下したコンクリート投入時から振動累積時間が右肩上がりとなった締固め中の時間帯に、電圧デジタル信号が 200 前後で上下した後 400 弱で落ち着き、その後、新たにコンクリートが投入されたときの締固めにより若干の電圧デジタル信号の低下が見られ、最終的に 340 程度となった。電圧デジタル信号が落ち着いた後の振動付与による低下傾向は CH1 と同様だが、レディーミクストコンクリート工場等での値に比べて 150 程度大きな値となったのは粗骨材が比較的多く集まっていたことを示していると考えられる。ただし、コンクリートとしては良好な範囲であると考えられる。

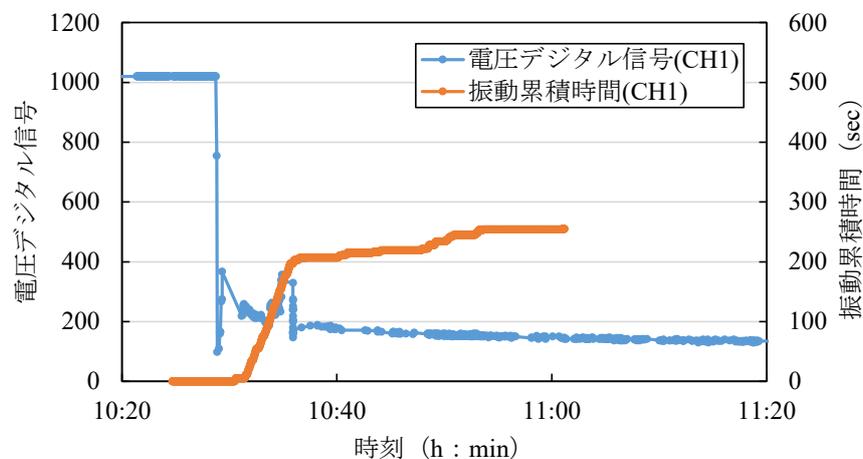


図-7.12 電圧デジタル信号と振動累積時間の経時変化（側壁①，CH1）

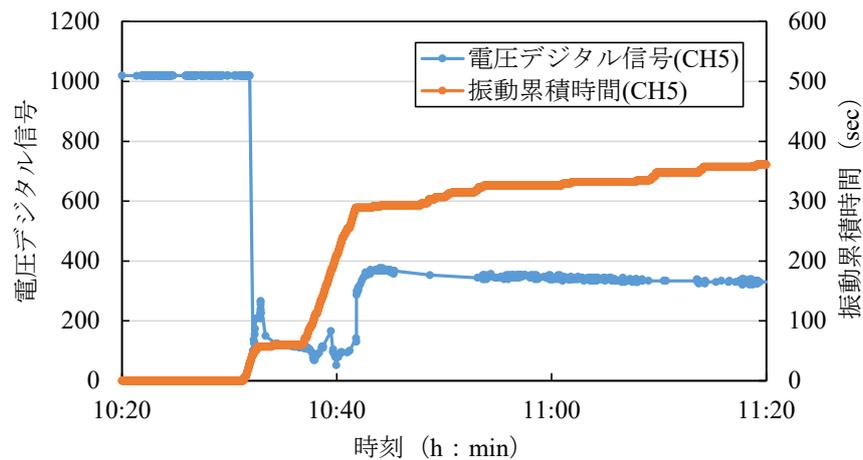


図-7.13 電圧デジタル信号と振動累積時間の経時変化（側壁①，CH5）

(2) シート状センサによる品質モニタリング

写真-7.6 にシート状センサの設置状況，写真-7.7 にシート状センサのコネクタ側の取出し方法を示す。木製型枠を 1 枚ずつ建て込むのと同時にシート状センサを木製型枠に貼り付け，コネクタ側は既設コンクリートとの型枠のラップ部から取り出す方法とした。

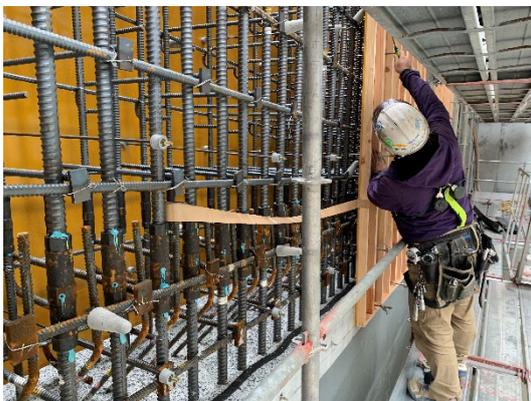


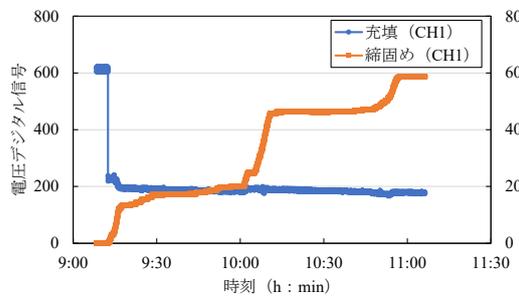
写真-7.6 シート状センサの設置状況



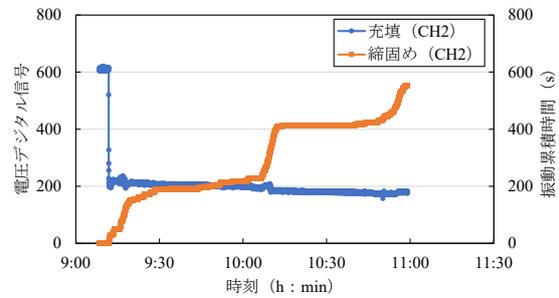
写真-7.7 シート状センサの取出し方法

図-7.14 に側壁②におけるシート状センサの各検知部の電圧デジタル信号と振動累積時間の経時変化を示す。全ての検知部でコンクリートが接触すると電圧デジタル信号が 200 程度となり，最初に振動累積時間が右肩上がりになる締固めの時間において上下に変動した。これは締固め振動により粗骨材分布が変動したことを表していると考えられる。事前のレディーミクストコンクリート工場や荷卸し場所等での測定値（300 程度）より 100 程度小さく，これは測定範囲が拡大したことで電流線が試験容器の内空寸法（幅 200×200 mm，高さ 200 mm）よりも広い範囲に電流線が分布したことが原因と考えられる。その後，2 回目以降の締固めによって電圧デジタル信号が徐々に低下した。粗骨材の沈降によりペースト体積

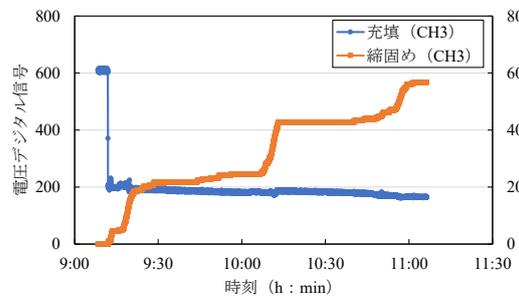
が増加したと考えられる。シート状センサの設置高さが打込みの1層の高さ（40～50 cm 以下が標準）の上方であったことも粗骨材が沈降しやすい条件であったといえる。ただし、この電圧デジタル信号の低下幅はわずかであり品質には問題ないレベルと考えられる。



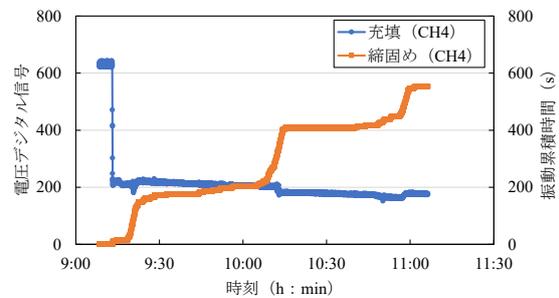
(a) CH1



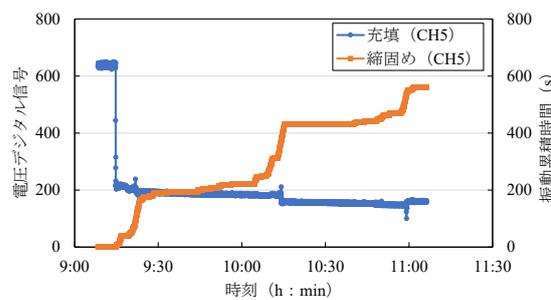
(b) CH2



(c) CH3



(d) CH4



(e) CH5

図-7.14 各検知部の電圧デジタル信号と振動累積時間の経時変化（側壁②）

7.4 検証結果

パッチ型センサと点電極センサを用いた事前のレディーミクストコンクリート工場での測定と打込み当日の運搬後の測定の比較において、大きな変化は認められず運搬による材料分離が生じなかったと考えられる。

点電極センサを用いた打込み時の連続測定では、締固めによる粗骨材のわずかな集中または沈降を捉えていたと考えられる。シート状センサを用いた打込み時の連続測定では、設置高さが打込みの1層の高さの上方であったことから、締固めによる若干の粗骨材の沈降を捉えていたと考えられる。双方のセンサは電極面積やプログラムの影響で鋭敏さが異なるが、粗骨材分布の変化を捉えられていると考えられる。今後は電極面積またはプログラムの調整を行い、同程度の鋭敏さに設定する予定である。

実構造物の施工においては、各種規準書に基づく施工管理や過去の品質不具合から得た教訓等により基本的には適切な品質管理が行われている。本研究で考案した品質モニタリングシステムを適用した建設現場においても適切な品質管理が実施されており、品質モニタリング結果に構造物の品質を低下させる程度の材料分離が生じていることを示す変化は認められなかった。しかし、建設業界では豆板等の品質不具合は頻度が低いながらも未だ発生し続けており、打込み時の横移動や締固めの過不足により目視できない内部の不均質が発生している可能性がある。これらの材料分離に関連する品質不具合は定性的に定義されるものであり、とくに不可視である内部の不均質さがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響は明らかにされていない。したがって、現段階で材料分離を定量的に評価することは困難である。一方で、本研究で考案した品質モニタリングシステムは、これまで不可視であったフレッシュコンクリート内部の骨材分布変化を電圧デジタル信号の変化としてリアルタイムに可視化している。熟練工の経験に頼る部分が大きかったコンクリートの打込み作業に本研究で考案した新たな品質管理手法を加えることで、より適切な施工管理を実現できると考える。

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) T. Yamada, Y. Umino, and T. Iyoda: Study on Detection of Filling and Compaction Based on Electrical and Vibrational Characteristics of Fresh Concrete, The 9th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2020/2021), "Advanced & Innovative Concrete Technology", pp. MT26-MT37, 2021.
- 3) 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工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.
- 4) 二宮 伸二, 中林 雅昭, 山田 勉, 海野 雄士, 桑田 拓弥, 金澤 彰裕: 覆工コンクリー

ト天端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.

8 結論

8.1 結論

近年の i-Construction に代表される生産性向上への機運の高まりを受けて、従来よりも流動性の高いコンクリートの使用が進み、充填性や生産性が向上するものと期待されている。一方で、製造時に材料分離抵抗性を得るための検討を適切に行わないと運搬や打込み等の作業中に材料分離が懸念される。鉄筋コンクリート構造物においては、コンクリート投入時の鉄筋との衝突による材料分離、過密な鉄筋配置に起因する空洞や豆板、および横移動による材料分離の発生が懸念されている。また、覆工コンクリート天端部においては、検査窓と妻型枠を閉じた後の不可視部となる範囲に約 10 m の流動を伴う打込みという特殊な条件のため、材料分離、空洞、ブリーディング水の巻込みに起因した脆弱部、締固め不足によるコールドジョイント等の発生が懸念されている。

このような背景のもと、材料分離、充填、締固めを評価する品質モニタリング方法を検討した。結論として、交流電源を用いたインピーダンス測定から得られる変化から、粗骨材の分布状況を推定できること、コンクリートの充填をブリーディング水と識別して検知できることを示した。また、締固め時にコンクリート中を伝播する振動をもとに変換した電圧により締固め程度を推定できることを示した。これらの方法を建設現場における施工時のモニタリングに適用することで、従来目視確認できなかった品質が電気的特性により可視化される。以下に、本研究の結論として各章で実施した検討内容と得られた知見を整理する。

2章では、フレッシュコンクリートのモニタリングセンサに関する既往の研究を調査した。その結果、電気抵抗センサに粗骨材の分布状況を推定できる可能性が示唆されていた。コンクリートとブリーディング水の識別は電気抵抗センサ、電圧印可センサ、および振動センサが可能であった。バイブレータを加振したときのコンクリート中を伝播する振動を捉えるのは振動センサのみ可能であった。したがって、電気抵抗センサと振動センサに関する知見を参考に検討を進める必要があると考えた。ただし、電気抵抗センサとして、直流電源を用いた電気抵抗を利用する方法と交流電源を利用するインピーダンスがある。本研究ではフレッシュコンクリートを測定対象とするため、イオン伝導体の電気伝導率測定に広く普及した交流電源を用いたインピーダンスによる評価が適切と考えた。

また、均質なコンクリートであることを前提にしたときの材料・配合が及ぼす電気的特性への影響、締固め等によって粗骨材分布が変化し不均質なコンクリートとなったときの電気的特性の変化、温度や経過時間が及ぼす電気的特性への影響、および電極条件が電気的特性の測定結果へ及ぼす影響を調査した。均質なコンクリートの電気的特性（材料・配合の影響）がセメントの違いによって変化することは既知であり、ペースト体積と単位粗骨材量が比較的影響度の大きい影響因子と考えられた。不均質なコンクリートの電気的特性（締固めの影響）の変化は、粗骨材の沈降が大きく影響し電気的特性によりその変化を追跡できる可能性がある。コンクリートの電気的特性は、温度と経過時間で変化し配合等によっても異なるため、補正に関する検討が必要であると考えられた。電極条件として、建設現場でのモニ

タリングには極力小さい電極形状が好ましく、2端子法は分極影響を受けるが簡易的で適用しやすい。また、電極配置とかぶりによっては鉄筋の影響を受ける可能性があるため、電流線を意識した電極幅と設置が必要と考えられた。

3章では、インピーダンスに及ぼす影響因子のうち、配合に関する影響因子の影響度を調査・分析した。インピーダンスと位相角の周波数特性から、測定条件として10 kHzが好ましいと考えた。次に、ペーストのインピーダンス測定結果より、電流が流れる液相は水（単位水量）よりペースト（ペースト体積）とするのが適切と考えた。さらに、ペーストに骨材を混和した様々な配合のインピーダンス測定結果より、コンクリートのインピーダンスはペースト体積の変化に最も影響を受けることを明らかにした。また、コンクリートのインピーダンスは細骨材率または骨材表面積の影響も受けるが、その影響度はペースト体積に比べて小さいことも明らかにした。細骨材率または骨材表面積がインピーダンスに影響を及ぼす要因として、骨材表面に拘束されたペースト膜が影響を及ぼしている可能性があると考えられた。最終的に、ペースト体積から骨材表面に拘束され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れば、細骨材または骨材表面積に起因したわずかなインピーダンス変化も反映できる可能性があると考えられた。

4章では、建設現場に電極を用いたセンサを適用するにあたって、センサ設置の容易さ、型枠取外し後の美観、鉄筋の影響等を考慮して可能な限り小さいセンサを要件として、電極間隔、電極面積、および電極間隔と電極面積の関係について検討した。その結果、1対の電極の間隔を30 mm以下、面積を500 mm²以下としたとき、材料分離、とくに粗骨材の集中を評価できる可能性が高いとの結論を得た。また、電極面積が5 mm²と極端に小さい点電極であっても粗骨材分布の変化を捉えられる可能性があることも明らかとなった。

5章では、建設現場に骨材の分布状況等の評価を目的とした均質性評価方法を適用するにあたり、実際に生じている材料分離は骨材の粒度分布も変化している可能性が高いため粒度分布に依存しないペースト体積とインピーダンスの関係を利用する方法にシフトした。建設現場でのモニタリングに適したセンサ仕様を設定し、プロトタイプを試作した。そのプロトタイプを用いた性能確認試験、振動試験、温度と経過時間に関する試験を経て、適用部位に応じてパッチ型センサ、シート状センサ、点電極センサを開発した。最後に、コンクリート構造物の部位毎に開発した3種類のセンサの適用推奨部位を示した。

6章では、開発したシート状センサを壁状鉄筋コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部の打込み時に適用し、実構造物においておおむね材料分離、充填、締固めを評価できることを確認した。そして材料分離を評価するための改良点を明らかにした。

7章では、3章での室内試験で解明したインピーダンスの変化に及ぼす影響因子とその影響度、4章で設定した電極間隔と面積をもとに5章で開発した各種センサ、それを用いた均質性評価方法を統合し、建設現場における品質モニタリング手法を示した。そして建設現場での実施工シミュレーションとして、開発したセンサを用いてあらかじめ実施するレディーミクストコンクリート工場における電圧デジタル信号の測定、打込み当日に実施する荷卸し場所と圧送ホース吐出口における測定、打込み場所における連続測定から成る均質性

評価を実施した。結論として、これまで不可視であったフレッシュコンクリート内部の骨材分布変化を電圧デジタル信号の変化としてリアルタイムに可視化できた。一方で、材料分離に関連する品質不具合は定性的に定義されるものであり、とくに不可視である内部の不均質さがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響は明らかにされていないため、現段階で材料分離を定量的に評価することは困難である。本研究の成果は、熟練工の経験に頼る部分が大きかったコンクリートの打込み作業に新たな品質管理手法を加え、より適切な施工管理を実現したことにある。本研究が今まで強く関心を持たれてこなかったフレッシュコンクリート内部の均質性に着目する機会を創出し、建設現場における施工管理に一石を投じたと信じたい。そして、この品質モニタリングシステムが品質不具合を未然に防ぐ抑止力として強く作用し、コンクリート構造物の長期耐久性向上に寄与することを期待する。

8.2 今後の展開

本研究で考案した品質モニタリングシステムにより、施工時のコンクリートの均質性評価の実現可能性が高まった。しかし、本研究で用いたコンクリート材料は限られた範囲のものであり、全国のレディーミクストコンクリート工場で製造されるコンクリートに適用するには、7章で示した建設現場における品質モニタリングのフローに基づき、あらかじめ工場や配合毎にペースト体積と電圧デジタル信号の関係を求める必要がある。今のところ、この品質モニタリング方法は容易とはいえないが、この考え方を反映した同様の研究が進み、多くのデータが集まれば、より合理的な方法に転換できる可能性がある。

また、本研究では鉄筋コンクリート構造物と覆工コンクリート天端部の施工時の品質モニタリングを想定してパッチ型センサ、シート状センサ、点電極センサのセンサ形態を設計した。形態は異なるが、センサに取り入れているシステムは同様である。適用範囲はフレッシュコンクリート全般に広がっている。今後は中流動コンクリートや高流動コンクリート等への適用性についても確認していきたい。また、長距離圧送や落下高さのある配管圧送等では材料分離による管内閉塞が常に懸念されており、圧送管内を流れるコンクリートのリアルタイムの均質性評価へのニーズは潜在的に大きいと推察する。今後、圧送管内の粗骨材分布の評価にも取り組んでいきたい。

謝辞

本論文は、私が芝浦工業大学大学院理工学研究科博士（後期）課程地域環境システム専攻在籍中における研究成果を取りまとめたものです。芝浦工業大学工学部先進国際課程 伊代田岳史教授、芝浦工業大学工学部土木工学科 勝木太教授、芝浦工業大学建築学部 濱崎仁教授、芝浦工業大学工学部土木工学科 Michael Ward Henry 准教授、東京理科大学理工学部土木工学科 加藤佳孝教授には、本論文の審査を通して様々なご助言をいただき、本研究を適切な方向へ導いてくださいました。厚く御礼申し上げます。

本論文の主担当指導教員の伊代田岳史教授には、お忙しいにもかかわらず丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ほとんど面識のなかった私に対して、博士（後期）課程入学の相談に研究室へお伺いしたとき真剣に話を聞いていただき、すぐさま入学から卒業までのスケジュール案を提示してくださったことを今でも鮮明に思い出します。実験の報告のときは気が付くと何時間も議論していることが多く、度々貴重なお時間を割いていただきました。また、学会発表や本論文の取りまとめにあたりご指導いただいた内容は私の常識や考え方を大きく変えました。社会人として活動するだけでは得られなかったことと思います。ここに深く感謝を申し上げます。

私が芝浦工業大学の学部生だったころ教鞭をとっておられた芝浦工業大学 菅和利名誉教授には、卒業後、定期的にお会いする機会があり、博士（後期）課程にチャレンジするにあたりいろいろと親身になって相談に乗っていただきました。心より感謝申し上げます。

戸田建設株式会社 浅野均常務執行役員には、私が研究開発していたセンサについて興味を持っていただき、発展性があるからと博士（後期）課程にチャレンジする機会を与えていただきました。ありがとうございました。

同中林雅昭常務執行役員には、同部門に所属していたとき、主業務とほとんど関係のないセンサの研究開発を奨励していただきました。そして「従来にはないセンサが欲しい」という一言を発していただいたおかげで本研究に繋がりました。ありがとうございました。

同請川誠執行役員には、主業務と本研究の狭間で苦しんでいるところ、いろいろとご配慮いただきありがとうございました。

同名古屋支店二宮課長代理と同故門田佳久氏には、センサ発想段階から幾度となく実施した実験まで長期間にわたりお付き合いいただきました。過去、実験がうまくいかず開発をあきらめかけたときもありましたが両名の努力のおかげでここまで来れました。ありがとうございました。

同技術開発センターの皆様には、筑波技術研究所において実験材料の手配や設備予約等でご配慮いただきました。ありがとうございました。

同各支店の作業所の皆様には、実構造物へのセンサ適用にあたり積極的にご協力いただ

きました。ありがとうございました。

ムネカタインダストリアルマシナリー株式会社 海野雄士室長，金澤彰裕セクションリーダー，桑田拓弥セクションリーダー，郡司資孝エンジニアには，センサ仕様の検討・製造・実験にあたり，多大なるご協力をいただきました。実験で失敗する度に新たな改善策を積極的にご提案いただきました。皆様のご協力なしでは本研究へ発展させることはできませんでした。深く感謝を申し上げます。

芝浦工業大学伊代田研究室の2020年度学部生であった八代うらら様には，本研究を1年間共同で実施していただきました。年度前半はコロナ禍の影響でなかなか実験ができませんでした。年度後半に畳みかけるように実験を行っていただきました。相当に頑張り屋であったと感心しています。私が単純な配合のペーストから徐々に複雑なモルタル，コンクリートへと実験を進める中，逆にコンクリートから進めていただき，双方の知見を統合したことで理解が進みました。ありがとうございました。

同大学院生の坂井一貴様，白石真由奈様，名古屋智樹様をはじめ大学院生と学部生の方々には，実験報告や学会発表練習等でお付き合いいただきました。率直な意見も聞けて勉強になりました。また，若い方々と交流していると自分も若返ったようで新鮮な気持ちになりました。ありがとうございました。本来であればもっと研究室に通って各人の研究内容の理解や意見交換をしたかったのですが，コロナ禍で叶いませんでした。

最後に，博士（後期）課程へのチャレンジを様々な面から応援してくれた家族に感謝します。博士（後期）課程への入学を相談したときは反対されると思いましたが，即答で応援するとの返答をしてくれました。自分だけの努力では決して完遂できなかったと思います。

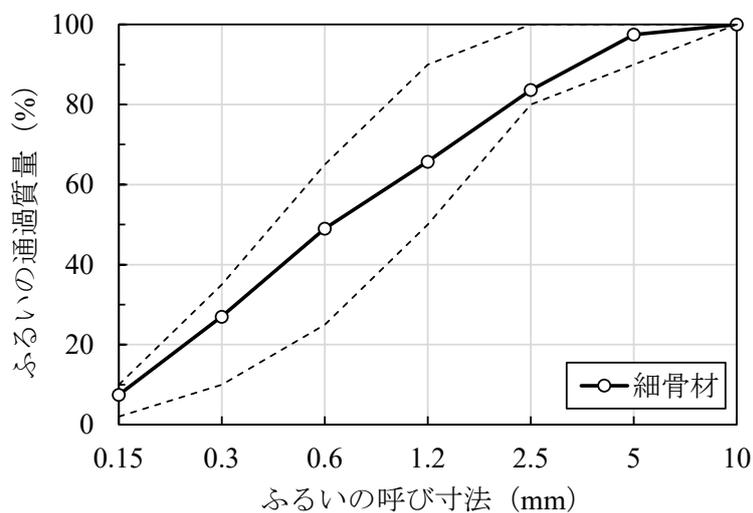
2年間を振り返れば，博士（後期）課程へ入学後から間もなく新型コロナウイルス感染症が蔓延し，想定していた行動がとれずに苦しんだ時期もありました。しかし，上記の皆様の指導，ご協力，ご鞭撻のおかげで実験を進め，本論文を取りまとめられました。ここに記して感謝の意を表します。

2022年3月

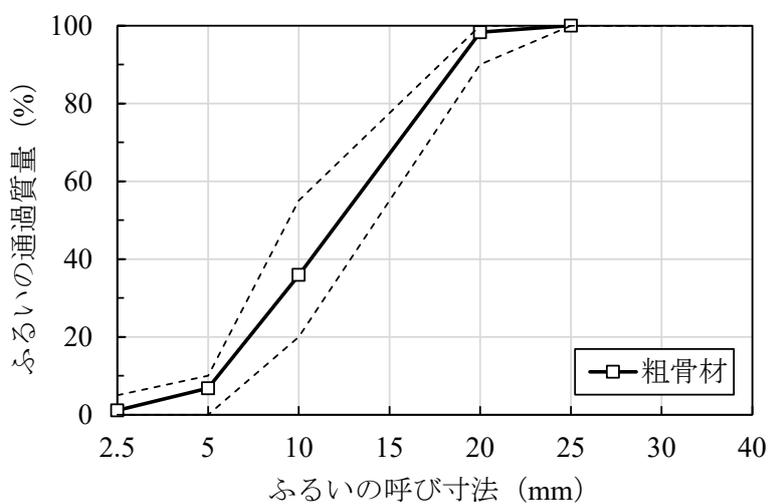
山田 勉

付録

本研究（3章～5章）で使用した骨材について、付録図-1に細骨材の粒度分布、付録図-2に粗骨材の粒度分布を示す。

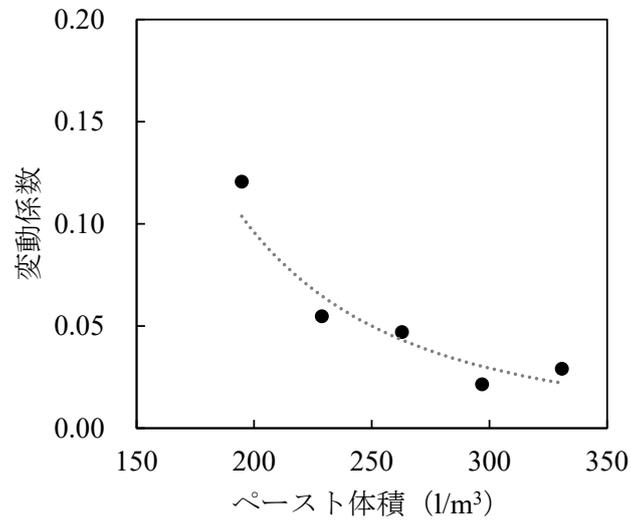


付録図-1 細骨材の粒度分布

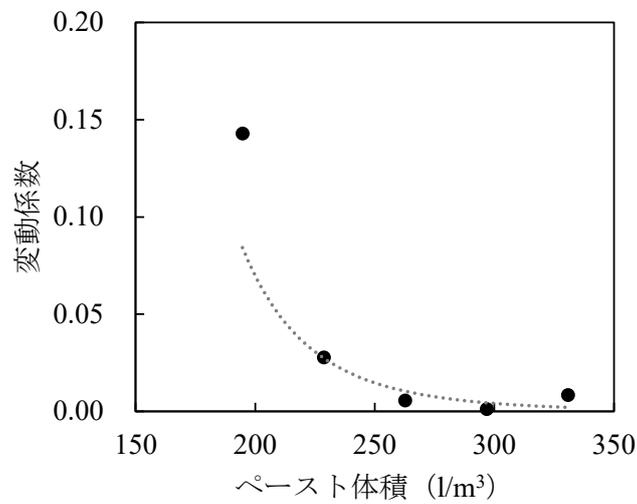


付録図-2 粗骨材の粒度分布

本研究（3章～5章）で使用したコンクリート（C1シリーズ）について、付録図-3にLCRメータを用いて測定したインピーダンスのペースト体積と変動係数の関係、付録図-4にパッチ型センサを用いて測定した電圧デジタル信号のペースト体積と変動係数の関係を示す。



付録図-3 インピーダンスのペースト体積と変動係数の関係



付録図-3 電圧デジタル信号のペースト体積と変動係数の関係

本研究（7章）で使用したコンクリート（C9シリーズ）について、付録写真-1にスランプ試験状況を示す。



(a) C9-1



(b) C9-2



(c) C9-3



(d) C9-4



(e) C9-5

付録写真-1 C9シリーズのスランプ試験状況