

芝 浦 工 業 大 学

博 士 学 位 論 文

電気抵抗による養生終了時期判定手法の提案

平成 31 年 3 月

三坂 岳広

## 目次

1	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	7
1.3	本論文の構成	8
	参考文献	9
2	既往の研究	11
2.1	はじめに	11
2.2	コンクリート構造物の耐久性と品質管理	11
2.3	養生	12
2.3.1	養生が表層コンクリートの空隙構造に及ぼす影響	13
2.3.2	養生が表層コンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響	14
2.4	コンクリート構造物の表層コンクリートの非破壊試験方法	16
2.5	電気抵抗に関する既往の研究	17
	参考文献	19
3	電気抵抗計測方法の構築	22
3.1	はじめに	22
3.2	電気抵抗計測方法の構築	23
3.2.1	型枠内部および養生期間中のコンクリートを計測	23
3.2.2	コンクリート構造物のかぶりコンクリートを直接的に計測	24
3.2.3	任意の位置での計測	24
3.2.4	計測装置および計測方法	24
3.2.5	直流四電極法の提案	25
3.2.6	セメントの水和反応の進行度を計測	26
3.3	まとめ	29
	参考文献	29
4	電気抵抗の影響因子	31
4.1	はじめに	31
4.2	挙動メカニズムの解明	31
4.2.1	実験概要	32
4.2.2	実験結果	34
4.3	配合条件が及ぼす影響	43
4.3.1	実験概要	44
4.3.2	実験結果	46

4.5	まとめ	50
	参考文献	50
5	強度・劣化に対する抵抗性との相関	52
5.1	電気抵抗と強度・劣化に対する抵抗性の関係	52
5.1.1	実験概要	52
5.1.2	実験結果	54
5.2	圧縮強度等と相関がある理由	68
5.2.1	はじめに	68
5.2.2	実験概略	69
5.2.3	実験結果	73
5.3	まとめ	81
	参考文献	83
6	現場適用性の検討および利用の提案	85
6.1	計測精度の検証	85
6.1.1	実験概要	86
6.1.2	実験結果	87
6.2	計測方法の検討	94
6.2.1	養生方法の影響	94
6.2.2	通電深さの検討	96
6.3	現場適用性の検討	98
6.3.1	実験概要	98
6.3.2	試験結果	102
6.4	利用方法の提案	108
6.4.1	トンネル覆工コンクリート	108
6.4.2	プレストレストコンクリート（ポストテンション方式）	111
6.4.3	混和材を用いたコンクリート	112
6.4.4	補修および補強	114
6.5	まとめ	115
	参考文献	115
7	まとめ	118
7.1	適用の範囲	119
7.2	研究の展望	120
	謝辞	122

# 1 はじめに

## 1.1 研究の背景

コンクリート標準示方書〔施工編〕では、コンクリートが、所要の強度、劣化に対する抵抗性、ひび割れ抵抗性、水密性、美観等を確保するためには、セメントの水和反応を十分に進行させる必要があり、打込み後の一定期間はコンクリートを十分な湿潤状態と適切な温度に保ち、かつ有害な作用の影響を受けないようにすることが必要<sup>1)</sup>としており、そのための作業を養生と定義している。しかし、施工者は打込み後の型枠内部のコンクリートの状態を把握することが難しく、型枠内部のコンクリートにおけるセメントの水和反応の進行度、強度および劣化に対する抵抗性を推定することが難しい。また、打込み後の一定期間として湿潤養生期間の標準<sup>1)</sup>が表-1.1のように与えられている。

表-1.1 湿潤養生期間の標準<sup>1)</sup>

日平均気温	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種
15℃以上	3日	5日	7日
10℃以上	4日	7日	9日
5℃以上	5日	9日	12日

湿潤養生期間の標準は日平均気温とセメントの種類のみで定められている。しかし、水セメント比等の配合条件、混和剤や混和材等の使用材料、マスコンクリートに代表される構造物の寸法や形状、日射や湿度等の施工環境にも影響を受けると考えられる。また、養生期間は工事の工程および型枠転用性に影響を及ぼす。

コンクリート標準示方書〔施工編〕では、型枠の取り外しにおいて、表-1.2に示す型枠および支保工を取り外してよい時期のコンクリート圧縮強度の参考値<sup>1)</sup>を定めており、コンクリートがその自重および施工期間中に加わる荷重を受けるのに必要な強度に達するまでは、取り外してはならないとされている。

表-1.2 型枠および支保工を取り外してよい時期のコンクリート圧縮強度の参考値<sup>1)</sup>

部材面の種類	例	コンクリートの圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )
厚い部材の鉛直または鉛直に近い面、傾いた上面、小さいアーチの外側面	フーチングの側面	3.5
薄い部材の鉛直または鉛直に近い面、45°より急な傾きの下面、小さいアーチの内側面	柱、壁、はりの側面	5.0
橋、建物等のスラブおよびはり、45°より緩い傾きの下面	スラブ、はりの底面、アーチの内側面	14.0

この型枠および支保工を取り外してよい時期のコンクリートの圧縮強度を確認するためには、型枠内部のコンクリートの圧縮強度を評価する必要がある。しかし、型枠内部のコンクリートの圧縮強度を推定することは難しく、実際にはコンクリートの受入れ検査時に管理用円柱供試体を作製し、現場封かん養生を行ったものに対して圧縮強度試験を行うことで確認している。圧縮強度試験を行う試験機等は現場にあることが少なく、供試体を試験場に運搬して試験を行う必要があり、手間を要する。また、実構造物のコンクリートの圧縮強度と現場封かん養生を行った供試体の圧縮強度は、水和発熱、温度環境の相違、打込み時間の差異の影響を受け、部材や場所ごとに異なることが想像できる。構造物コンクリートの強度を直接的に計測するには、構造物からコア供試体を採取して圧縮強度試験を行い確認する方法がある。しかし、コア供試体を施工時の各工程で構造物の主要部材から採取することは、構造物の損傷や鉄筋の切断、その補修など多くの問題があり、また試験に労力と時間が掛かるため実際にはほぼ使われていない。

実際の現場で適用頻度の高い養生手段は、型枠面において型枠存置による水分逸散抑制養生、打設面においてブルーシート等を用いたシート・フィルム被膜養生である。また、現場の湿潤養生期間は、コンクリート標準示方書〔施工編〕に記載されている湿潤養生期間の標準(表-1.1)に記載されている湿潤養生期間の標準を遵守するのが一般的である。さらに、支保工の取外しに関しては、型枠内のコンクリートの圧縮強度を推定することが難しく、技術者の経験で十分に強度が発現していると判断した時点で数量を減ずるおよび取り外しを行っている。

以下に筆者が経験した養生期間に関する疑問について記載する。写真-1.1 に道路拡幅のために横梁コンクリートを新設した工事の橋横梁拡幅部を示す。拡幅する横梁は高速道路の橋脚であり、河川内に位置する。この橋横梁拡幅部のコンクリートの打ち込みは、高速道路に通行規制をすること、河川内からの作業が難しい状況であった。



写真-1.1 橋横梁拡幅部

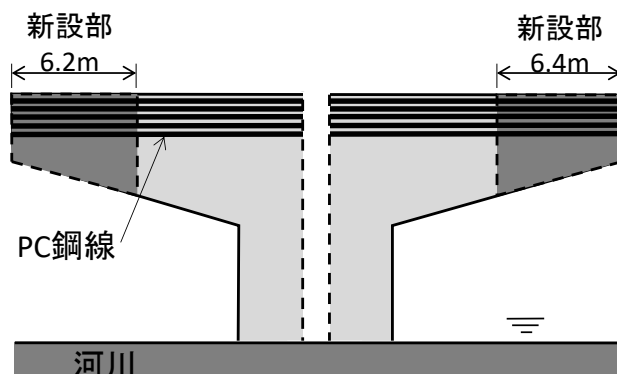


図-1.1 橋横梁拡幅部の概略

そのため、河川の護岸からコンクリートを長距離で圧送することとなり、使用するコンクリートを粉体系高流動コンクリートに変更した。図-1.1 に橋横梁拡幅部の概略を示す。横梁部はプレストレストコンクリートのため、変更前の配合のセメントには早強ポルトランドセメントを使用しており、PC 鋼線を緊張するため緊張前にコンクリートの圧縮強度の確認をコア採取して行った。

表-1.3 にコンクリートの計画配合を示す。変更前のコンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用した水セメント比が 49%の一般的なコンクリートなのに対し、変更後のコンクリートは、水セメント比が 35%まで小さくなったため、単位セメント量が膨張材を含めると 486 kg/m<sup>3</sup>に増加した。

表-1.3 コンクリートの計画配合

	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤の種類
						W	OPC	膨張材	S	G	
変更前	早強	49	43	15	4.5	172	313	20	728	1024	AE 減水剤
変更後	普通	35	53	60×60	3.0	170	466	20	821	821	高性能 AE 減水剤

図-1.2 に実際の工程の概略を示す。コンクリートは打込み後に材齢 7 日まで型枠存置により封かん養生を行った。これは、表-1.1 に示した湿潤養生期間の標準に準拠し、日平均気温が 10℃以上、セメントの種類が普通ポルトランドセメントの条件より設定されたものである。型枠存置による封かん養生を材齢 7 日まで実施したため、コア採取による圧縮強度の確認や PC 鋼線の挿入作業は、材齢 7 日から行われた。

表-1.2 に各種圧縮強度を示す。材齢 7 日で採取したコア供試体の圧縮強度は、60.1N/mm<sup>2</sup>であった。これは、橋横梁コンクリートに設計上で必要な強度より大きく設定されている変更前のコンクリートの呼び強度の 2 倍の値であり、PC 鋼線の緊張に必要な圧縮強度の 6 倍の値となる。したがって、構造体コンクリートの圧縮強度は、材齢 7 日の時点で要求される

圧縮強度の規定を十分に満たしていたことになる。

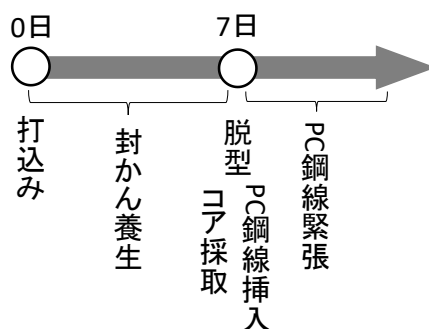


図-1.2 実際の工程の概略

表-1.2 各種圧縮強度

	材齢	圧縮強度
コア供試体の圧縮強度	7日	60.1N/mm <sup>2</sup>
変更前の呼び強度	28日	30N/mm <sup>2</sup>
PC鋼線の緊張に必要な圧縮強度	—	10 N/mm <sup>2</sup>

コンクリートの劣化に対する抵抗性は水セメント比に大きく影響を受け、水セメント比が小さくなる場合、劣化に対する抵抗性は大きくなることが知られている。今回の事例の場合、コンクリートが変更されたことにより水セメント比が49%から35%に変更されており、使用したコンクリートは、コンクリート構造物に必要な耐久性においても十分な余裕があると考えられる。以上の事柄を考慮すると、湿潤養生期間を材齢7日より短縮できた可能性があり、今回の事例の場合ではPC鋼線の挿入や緊張の作業を早期に開始できた可能性がある。しかし、実際の現場では、コンクリート標準示方書〔施工編〕に記載されている湿潤養生期間の標準を遵守した。

この理由として、2つのことが挙げられる。まず、型枠内部のコンクリートの強度や劣化に対する抵抗性に関する情報を得る方法が無いことが挙げられる。このため、養生期間中である型枠内部のコンクリートの状態が不明であるために養生の終了を判断することが難しく、規定の日数を遵守するしか方法が無いことが考えられる。また、型枠内部のコンクリートが強度および劣化に対する抵抗性が確保されたことを現場の監理技術者や発注者に証明できる方法が無いことが挙げられる。仮に構造体コンクリートが十分な強度や耐久性を保有していても、そのことを現場監理技術者や発注者に証明する方法が無く、現場監理技術者が早期に養生を終了する判断ができないことが考えられる。

一方、コンクリート構造物の劣化に対する抵抗性は、かぶりコンクリートの品質が大きく影響する<sup>2)</sup>とされている。図-1.1は鉄筋コンクリート構造物の概略である。劣化因子である塩化物イオンや二酸化炭素等は外部環境からコンクリート内部に浸透し、結果として鉄

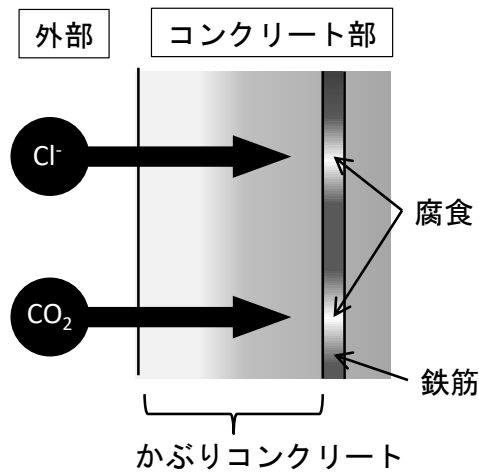


図-1.1 コンクリート構造物の概略

筋を腐食させる。したがって、これら劣化因子の侵入経路であるかぶりコンクリートを緻密化させることでコンクリート構造物の劣化に対する抵抗性は向上すると考えられる。

コンクリート構造物のかぶりコンクリートの品質は、設計、材料、施工等の様々な要因に影響を受ける。特に施工要因に関しては、施工環境、使用資機材、工法、施工者の技量等の様々なものに影響を受けるため定量的に評価することが難しく、その妥当性が施工後に問われることも無いのが一般的である。また、この施工要因の中でも養生は表層品質に大きく影響を及ぼす<sup>3,4)</sup>ことが知られており、養生を適切に行うことにより劣化因子の侵入経路であるかぶりコンクリートの品質を向上し、劣化に対する抵抗性を確保することが重要である。実構造物において設計で設定した特性値が確保されているかどうかは明確でなく、施工時または竣工時において、その品質が確保されているかどうかの検査は行われていないのが実情である<sup>5)</sup>。

近年、実構造物の表層コンクリートの品質を非破壊検査で評価する手法として表層透気試験<sup>6)</sup> (Torrent 法) や表面吸水試験<sup>7)</sup> (SWAT) 等が提案され、実際の現場でも表層コン



写真-1.1 表層透気試験および表面吸水試験の試験状況



クリートの品質を評価した事例が報告されている<sup>8,9,10</sup>など。写真-1.1 に表層透気試験および緻密性等の品質を評価でき、品質の程度を“優，良，一般，劣，極劣”の5段階で評価することができる。しかしながらどちらの試験方法も測定結果がコンクリートの含水率に影響を受けるため、脱型直後、養生期間中および養生終了時に試験をし、表層コンクリートの品質を評価することは難しい。したがって、型枠存置期間および養生期間中にコンクリートの圧縮強度や劣化に対する抵抗性を予測することは困難であり、表層コンクリートの品質は養生終了後にコンクリートが乾燥してから評価されるのが現状である。

現在、実際の工事現場の竣工検査でこれらの非破壊試験を行い、表層コンクリートの品質を検査することが提案<sup>11)</sup>されている。仮に竣工検査でこれら非破壊検査の評価が“極劣”だった場合、施工者は竣工検査後に再び養生を行っても表層コンクリートの品質を向上させることは難しく、竣工検査後に足場を組みなおし、表面含浸材の塗布や表面被覆工法等を実施する必要があると予想される。

これまでのコンクリートの品質管理は、圧縮強度に重点がおかれ、劣化に対する抵抗性（中性化抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性など）の確認は、配合表の水セメント比の確認を行うことが一般的であった。また、圧縮強度の管理・検査についても、実構造物のコンクリートを評価するのではなく、水中養生および現場封かん養生を行った円柱供試体による間接的な試験方法が採用されており、実構造物コンクリートの強度の確認は、国土交通省の微破壊・非破壊試験による強度推定の試行がされるようになったものの未だに一般的ではない。構造物コンクリートの劣化に対する抵抗性の確認方法は、表層透気試験や表面吸水試験等の様々な方法が提案されているが、現在でも水セメント比の制限などで対応しているのが現実である。

コンクリート標準示方書 2017 制定 [設計編] において設計では、構造物の用途・機能を果たすために要求性能を設定し、その要求性能を満足されていることを照査する<sup>12)</sup>とされている。この耐久性に関わる照査では鉄筋腐食に関わる照査が行われ、コンクリートの水分浸透速度係数、中性化速度係数、塩化物イオン拡散係数の物質移動抵抗性を設定して照査を行い、構造物の耐久性が確保されていることを確認する。コンクリート構造物の劣化に対する抵抗性は、施工の中でも特に養生に影響を受けるため、この設計で設定された物質移動抵抗性を満たす養生を行うことが理想と考えられる。

以上を考慮すると型枠内部および養生期間中の硬化過程のコンクリートにおいて、コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼすかぶりコンクリートを直接的に計測し、圧縮強度や劣化に対する抵抗性を推定する手法が必要と考えた。また、この手法により型枠内部および養生期間中のコンクリートの圧縮強度や劣化に対する抵抗性を推定することで、型枠および支保工の取外しや養生の継続および終了を判断することも可能と考えられる。提案する手法を養生終了時期判定手法と称する。

この養生終了時期判定手法を用い、型枠内部および養生終了時のコンクリートの強度や劣化に対する抵抗性を推定することで、脱型作業の安全性の確保、コンクリート構造物の作

業荷重や乾燥収縮によるひび割れ発生の抑制，コンクリート構造物の長寿命化が図れるだけでなく，施工者が発注者に対して適切な養生を施したとの証明が可能になると考えられる。

養生終了時期判定手法を提案するにあたって以下の事柄が必要と考えた。

養生終了時期判定に要求されること

- ・セメントの水和反応の進行度を計測できること
- ・型枠内部および養生期間中のコンクリートの強度および劣化に対する抵抗性が評価できること
- ・コンクリート構造物に要求される劣化に対する抵抗性から養生終了時期を判断できること

計測方法に要求されること

- ・型枠内部および養生期間中のコンクリートを計測できること
- ・コンクリート構造物のかぶりコンクリートを直接的に計測できること
- ・施工環境や構造物の形状を反映するため，任意の位置で計測ができること
- ・実際の現場で計測できること

## 1.2 研究の目的

図-1.2 にコンクリート工事の概略を示す。コンクリートは型枠に打設後に養生される。養生期間中の型枠内部のコンクリートの状態を評価できれば，材齢 28 日や竣工検査時に必要な強度や劣化に対する抵抗性を満足するまで養生を継続することや，養生の終了を判断することが可能になると考えられる。

型枠内部にある実構造物のコンクリートの強度や劣化に対する抵抗性を評価することは難しい。しかし，型枠内部のコンクリートの強度や劣化に対する抵抗性が推定できれば，適

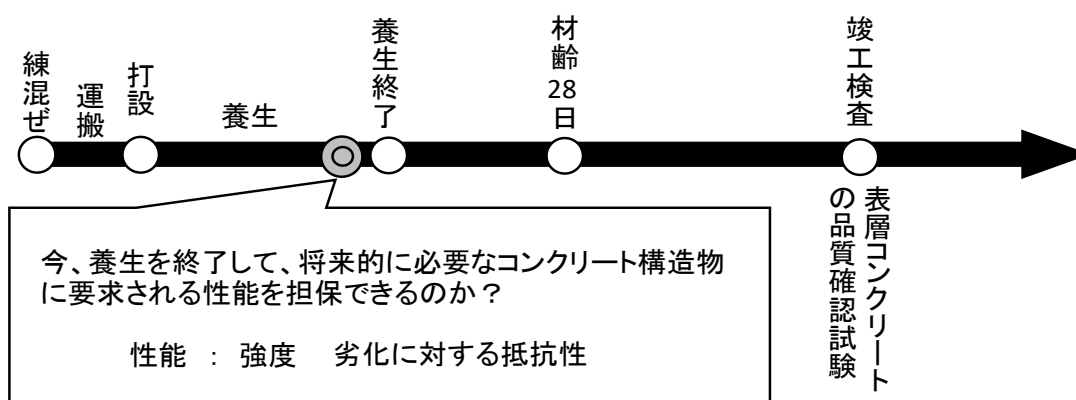


図-1.2 コンクリート工事の概略

切な養生の終了時期の判断，型枠および支保工の取外しの判断が可能となる。また，経時的に型枠内部のコンクリートの状態を把握することで，養生終了が工程を遅らせないように給熱養生等を行う判断も可能になると考えられる。

以下に型枠内部のコンクリートの状態を把握する利点を記載する。

型枠内部のコンクリートの状態を把握する利点

- ・型枠を脱型する作業の安全性の向上
- ・支保工および型枠転用性の向上
- ・作業荷重や振動等によるひび割れ発生の防止
- ・乾燥収縮ひび割れの発生の抑制
- ・かぶりコンクリートの品質の確保

本研究の目的は，型枠内部および養生期間中のまだ固まらないコンクリートの状態を把握し，養生終了時期判定手法を提案することである。また，本手法により養生を評価することで施工者が発注者に養生の妥当性を証明できる記録を作成することも可能と考えられる。

### 1.3 本論文の構成

本研究では，電気抵抗による養生終了時期判定手法の提案を主目的とした。そのために電気抵抗の計測方法を考案し，計測される電気抵抗がコンクリートのどのような性質に影響を受けるかを明らかにした。

計測されるコンクリートの電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性との相関を確認し，この相関が配合条件や使用材料に受ける影響についても検討した。さらに，強度および劣化に対する抵抗性と相関がある理由について考察した。

最後に電気抵抗の計測精度について検討した後に実際の現場で電気抵抗の計測を行い，本手法の現場適用性について検討し，本手法が有用と考えられる工種や場所について記載した。

以下に本論文の構成と概略を説明し，図-1.3 に論文の構成を示す。

「第1章 はじめに」では，研究の背景と目的について説明し，本論文の構成について概説した。

「第2章 既往の研究」では，コンクリート構造物の品質管理について記載した後に養生についてまとめ，養生が表層コンクリートの空隙構造や物質移動抵抗性に及ぼす影響について記載した。また，コンクリート構造物の表層コンクリートの非破壊検査と非破壊検査手法の中でも電気抵抗の計測手法やその用途について紹介をした。

「第3章 電気抵抗の計測方法の構築」では，提案する電気抵抗の計測方法について説明した。その後，提案する方法で計測された電気抵抗が水和反応の進行度を評価できるか検討を行った内容について記載した。

「第4章 電気抵抗の影響因子」では、計測される電気抵抗がコンクリートのどのような性質に影響を受けるのかを明らかにした。そのために電気抵抗が経時的に変化する理由、配合条件に受ける影響を明らかにした内容について記載した。

「第5章 強度・劣化に対する抵抗性との相関」では、計測される電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性の関係について明らかにし、この相関が配合および使用材料に受ける影響についても検討を加えた。また、電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性に相関がある理由についても検討を行い考察した。

「第6章 現場適用性および利用」では、計測される電気抵抗のばらつきについて検討した後、実際の現場で電気抵抗の計測を行い、提案する本手法の現場適用性の確認を行った内容について記載した。さらに、これまでの結果を考慮して本手法が有用と考えられる工種や場所について記載した。

「第7章 まとめ」では、これまでの結果についてまとめ、最後に本手法の有効性について記載し本論文の結びとした。

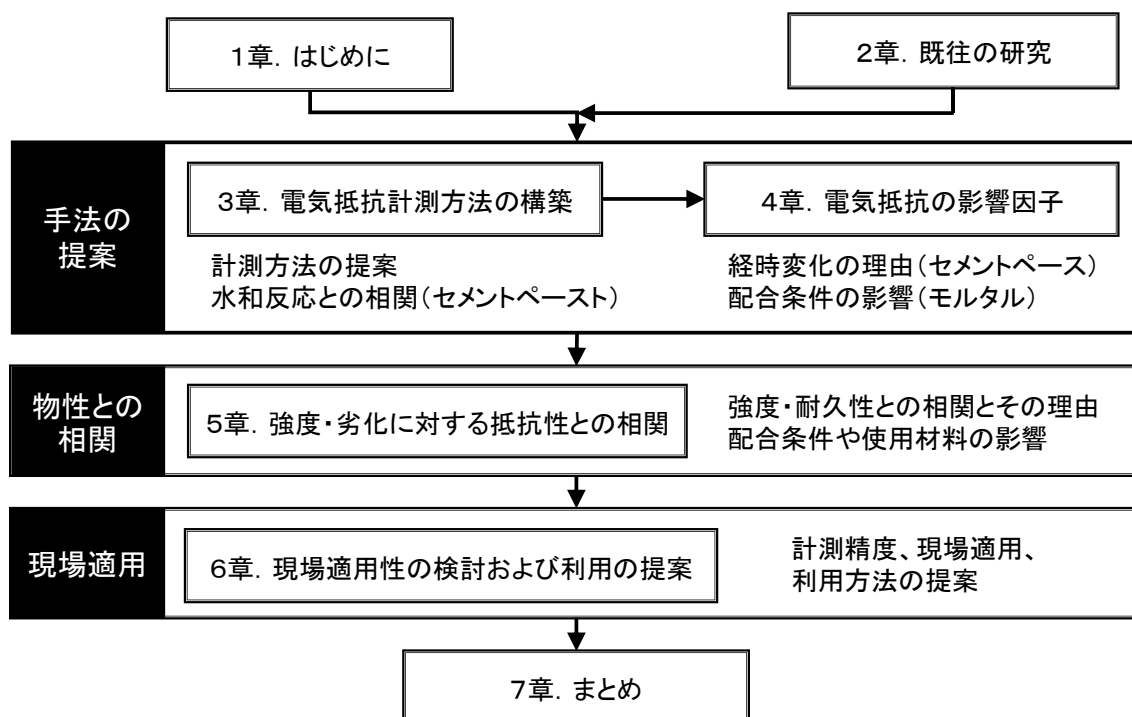


図-1.3 論文の構成

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編]，土木学会，pp.124-128，2017.3
- 2) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会（JSCE335委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.97，pp.81-91，2012.7

- 3) 岡崎慎一郎, 八木翼, 岸利治, 矢島哲司: 養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, V-60, pp.227-234, 2006.2
- 4) 伊代田岳史, 檀康弘, 川端雄一郎, 濱田秀則: 高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008.7
- 5) 土木学会: 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ No.97, pp.19-60, 2012.7
- 6) 早川健司, 水上翔太, 加藤佳孝: 表面透気試験による構造物かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.65, No.4, pp.385-398, 2012
- 7) 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.3
- 8) 家辺麻里子, 秋山仁志, 蔵重勲, 岸利治: 表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.7
- 9) 半井健一郎, 蔵重勲, 岸利治: 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム, コンクリート工学, Vol.51, No.2, pp.153-158, 2013.2
- 10) 石澤正大, 斯波明宏, 藤岡泰輔, 樋口正典: 壁構造物の施工方法がコンクリートの表層品質に及ぼす影響, プレストレスト工学会シンポジウム論文集, No.24, pp.627-630, 2015.10
- 11) 土木学会: 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ No.97, 2012.7
- 12) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, pp.1-4, 2018.3

## 2 既往の研究

### 2.1 はじめに

この章では、コンクリート構造物の耐久性と品質管理の規定と現状について記載した後、本研究で扱う養生、その養生に影響を受けるコンクリート構造物の耐久性および表層品質について記載した。また、養生の評価で用いる電気抵抗の計測に着目し、既往の研究を整理した。

### 2.2 コンクリート構造物の耐久性と品質管理

耐久性はコンクリート標準示方書〔設計編〕で構造物が設計耐用期間にわたり安全性、使用性、および復旧性を保持する性能<sup>1)</sup>と定義されている。また、コンクリート構造物の耐久性とは、気象作用、化学的侵食作用、物理的摩耗作用、その他の劣化作用などに抵抗し、構造物に要求される性能を長期間にわたって発揮する能力<sup>1)</sup>とされている。

国土交通省では、公共構造物の品質を確保するために、法令に則り発注した構造物の品質管理、検査を実施している。法令に基づく管理・検査の現状の主な流れは、施工中、請負者は施工管理を行い、発注者は監督する。発注者は完成後に検査を行い、引き渡しを受ける。国土交通省は、監督・検査（契約上の責任）と、受注者の技術の向上や教育・指導等を図るために重要な変化点で実施する技術検査（中間技術検査）（技術上の責任）を行っている。ここでは、工事实施状況の検査、出来形の検査、品質の検査が実際されている。公共工事の品質確保の促進に関する法律の技術検査は、技術検査に加え、出来ばえの技術検査が実施されている。耐久性に関係する検査である品質の検査は、品質および品質管理に関する各種記録と設計図書との対比が行われている。品質の技術検査は、品質および品質管理の的確さ、出来ばえの技術検査は、仕上げ面、とおり、すり付けなどの程度および全体的な外観について技術的な評価が行われている。いずれの検査においても、現状では、かぶりコンクリートの品質に関する直接的な検査は行われていない<sup>2)</sup>。

1999年のトンネル覆工コンクリートの剥落を契機に、当時の建設省、運輸省および農林水産省は、新設構造物の耐久性向上、既存コンクリート構造物の性能維持を目的に、学識経験者を中心に構成された「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会」を設置し、そこで提言がとりまとめられた。

土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言に基づき国土交通省では、耐久性を確保するために水セメント比の制限（鉄筋コンクリートの場合 55%）、かぶりを確保するためにスパーサ量が決められている。管理・検査では、かぶり、単位水量、ひび割れ調査、テストハンマーによる強度推定などが挙げられ、既に国土交通省の品質検査システムの品質管理基準に反映されている<sup>2)</sup>。表-2.1に提言と国土交通省の対応を示す。コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、かぶりコンクリートの耐久性（緻密性や物質移動抵抗性等）を確保することが重要とされている。このかぶりコンクリートの品質に大きく影響を及ぼす施工要因に養生が挙げられる。この施工要因である養生は、定量化することが難しい。

表-2.1 提言と国土交通省の対応<sup>2)</sup>

追加された 管理・検査	国交省の対応	
	通達年月	試験方法
W/Cの制限	2001. 3	配合の確認
スパーサ量		目視
強度管理		リバウンドハンマー
変状把握		目視
単位水量確認	2003. 10	10種類の試験方法
配筋・かぶり	2005. 5	レーダ, 電磁誘導
強度管理・検査	2006. 9	非破壊 3種 微破壊 2種

### 2.3 養生

型枠に打込まれた後、コンクリートが有する本来の性能を発揮するためには、打込み終了直後から適切な養生を行わなければならない。コンクリートの養生における基本原則は、①水和反応が進行している期間はコンクリートに十分な水を供給すること、②温度が著しく高く、あるいは低くならない（凍結させない）ようにすること、③日射や風が当たることでコンクリート表面から急速な乾燥が進まないようにすること、④所定の圧縮強度に達する前にコンクリートに振動や外力を作用させないことである。

2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕には、養生の種類、対象、方法および具体的な手段として表-2.2<sup>3)</sup>が示されている。

表-2.2 養生の種類、対象、方法および具体的な手段<sup>3)</sup>

種類	対象	方法	具体的な手段
湿潤状態に保つ	コンクリート全般	給水	湛水, 散水, 養生マット等
		水分逸散抑制	せき板存置, シート・フィルム被膜, 膜養生剤等
温度を制御する	暑中コンクリート	昇温抑制	散水, 日覆い等
	寒中コンクリート	給熱	電熱マット, ジェットヒータ等
		保温	断熱性の高いせき板, 断熱材等
	マスコンクリート	冷却	パイプクーリング等
		保温	断熱性の高いせき板, 断熱材等
工場製品	給熱	蒸気, オートクレーブ等	
有害な作用に対して保護する	コンクリート全般	防護	防護シート, せき板存置等
	海洋コンクリート	遮断	せき板存置等

### 2.3.1 養生が表層コンクリートの空隙構造に及ぼす影響

図-2.1 は養生方法による空隙構造の変化をコンクリートの深さごとに計測した結果である<sup>4)</sup>。水中養生あるいは封かん養生のような水分の分布がある程度一定の養生方法では、均質な組織構造が形成されるが、気中養生では水分の分布が一定ではなくなり、深さ方向の不均質化が現れている。

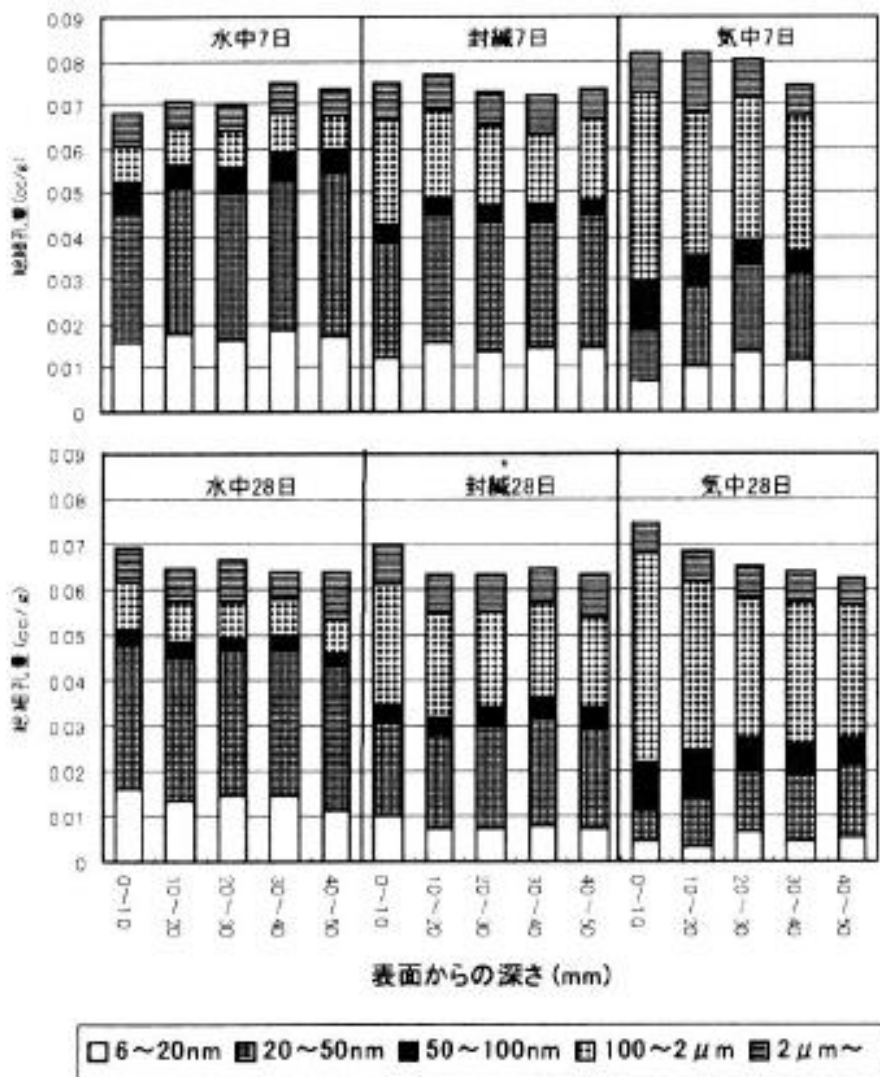


図-2.1 養生方法による空隙構造の変化<sup>4)</sup>

図-2.2 は湿潤養生後の乾燥による深さ方向の空隙構造の不均質化を示した例である。水中養生3日、5日、7日、封かん養生7日の細孔構造と、その後、28日まで20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で乾燥を受けたコンクリートの深さ方向の空隙構造の変化を示している。乾燥前の深さ方向に均質な空隙構造は乾燥を受けることにより、養生方法、養生期間に



関わらず表面からの深さによって空隙構造が変化しており，乾燥を受けることによって総細孔量は減少するものの，表層部では 50nm 以上の大きな空隙の増加がみられる．この増加は，水和の阻害による不均質化だけでは説明できない表層部の空隙構造の変化であり，その原因として表層部のマイクロクラックの存在を挙げている．また，不均質化の範囲は，コンクリートの材料，配合，養生方法等によって異なるが，約 30mm 以内が顕著になるとしている<sup>5)</sup>．このように初期養生期間が長いほど不均質化の影響は少なくなっており，初期養生を行うことの重要性が確認できる．

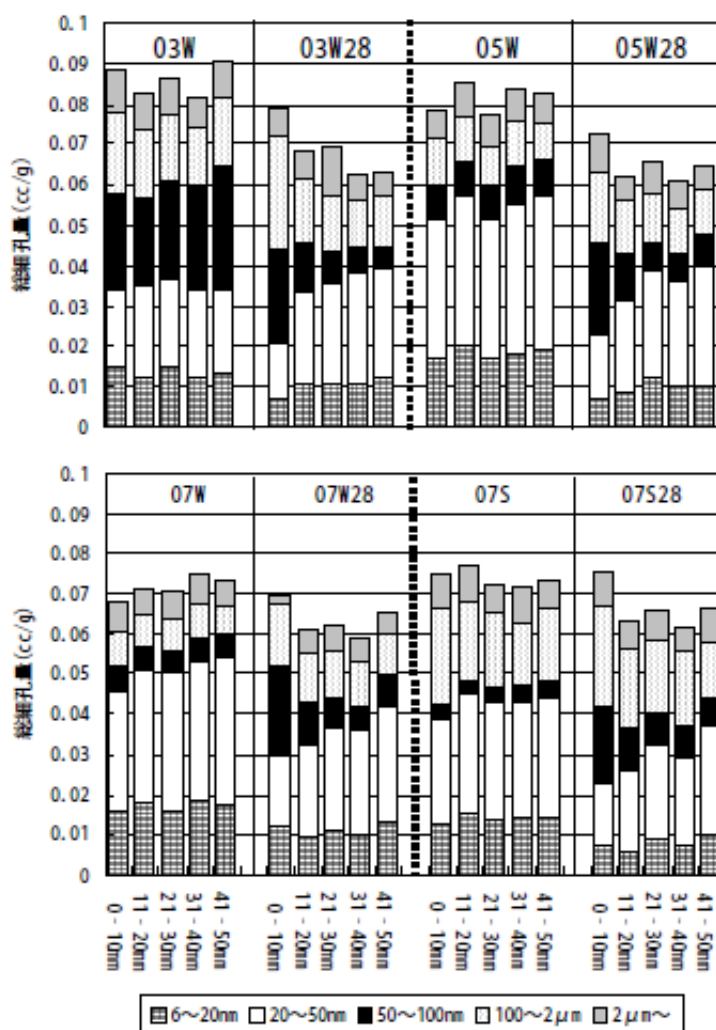


図-2.2 乾燥による空隙構造の不均質化<sup>5)</sup>

### 2.3.2 養生が表層コンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響

岡崎らは<sup>6)</sup>，養生の良否が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響が等価であるかの疑問から，養生方法の相違が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度を定量的に確認し，養生が強度に及ぼす影響に対し，劣化に対する抵抗性に関わる物質移動抵抗性に及ぼす影響は大き

いと指摘している。図-2.3 に示すように、水和率が同程度であれば圧縮強度は養生の相違に関わらずほぼ一致しており、養生の相違による影響を受けた空隙の連続性などの形態因子の相違には、ほとんど影響を受けないと考察している。一方、吸水係数、透気係数における物質移動抵抗性では、圧縮強度、水和率が同等でも、養生の相違による差異が極めて大きく、養生の相違が物質の移動経路となる連続空隙の形成状況に多大な影響を与えることを示唆しており、良好な養生が行われたことが保証されない限り、強度を物質移動抵抗性の指標とみなすことは適切でないと指摘している。

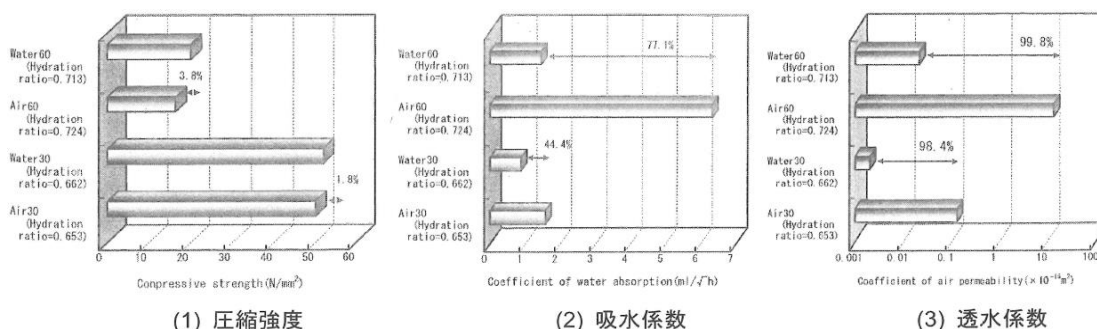


図-2.3 水和率一定での養生との関係<sup>6)</sup>

横塚らは<sup>7)</sup>、若材齢時の乾燥および炭酸化がセメント硬化体の酸素拡散係数の深度分布に及ぼす影響を検討しており、図-2.4 のように表層部の酸素拡散係数が大きく、細孔構造も粗大化することを示している。この程度は高炉スラグ微粉末 [BFS] の有無によって異なり、BFS を用いた場合には、乾燥および炭酸化による物質移動抵抗性の低下が、より深部まで及ぶことを示しており、BFS の利用にあたって、初期に十分に養生して、物質移動抵

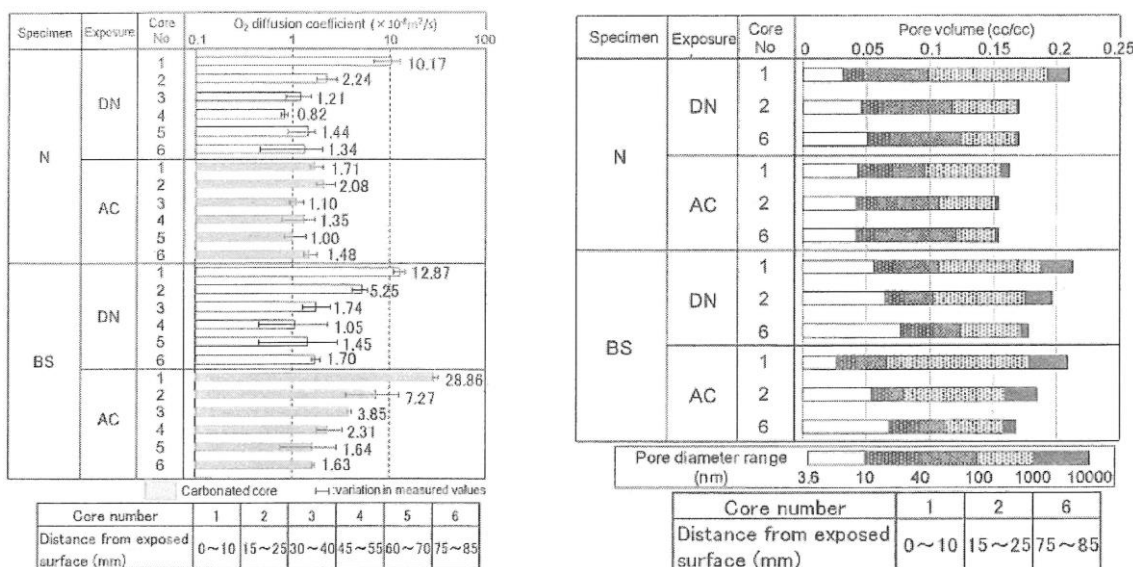


図-2.4 酸素拡散係数と細孔構造の深度分布<sup>7)</sup>

抗性を増加させることが重要であることを改めて示している。

## 2.4 コンクリート構造物の表層コンクリートの非破壊試験方法

表-2.3<sup>2)</sup> にコンクリート構造物の表層品質を主に非破壊で検査，診断する技術について，

表-2.3 表層コンクリートの測定手法とその概略<sup>2)</sup>

方法	概要
表層透気試験（Torrent 法）	コンクリート表層を減圧した上で，圧力の戻り方から表層における透気性を調べることにより，表層品質を評価する。側面からの空気の巻き込みを防ぐために二重チャンバーを採用している。
表層透気試験（シール法）	コンクリート表層を減圧し，チャンバー内の圧力および透気流量が定常に至った時の表層品質を透気係数により評価する。透気係数の算出に必要な透気領域を明確化させるために，コンクリート表面近傍を撤去可能な材料で事前にシールする。
表面吸水試験（SWAT）	コンクリート表面から水を与え，吸水速度および吸水速度の時間変化から吸水性を調べることにより，表層品質を評価する。
散水試験	コンクリート表面に少量の水を与え，その後の表面色の変化や鉛直面を硫化した水の流下距離の計測を繰返し行うことにより，表面品質を評価する。
電気抵抗率試験	コンクリート表層の電気抵抗を調べることにより，表層品質を評価する
リバウンドハンマー試験	コンクリート表面の反発硬度を調べることにより，表層品質を評価する
超音波試験（透過法）	コンクリートを透過する超音波の伝搬速度を調べることにより，表層から躯体内部を含めたコンクリートの品質を評価する。
超音波試験（土研法）	コンクリート表層の深さ報告の超音波伝搬速度を推定することにより，表層品質を評価する。
衝撃弾性波（接触時間）試験	コンクリート表面を小型のハンマーで打撃した時のハンマーとコンクリート表面との接触時間を測定することにより，表層品質を評価する。
コンクリート表面の目視評価	コンクリート表面の性状を目視にて評価することにより，表層品質の管理に用いる。

方法と概略を記載する。これらの方法の中でも表層透気試験 (Torrent 法) および表面吸水試験 (SWAT) は、近年、実際のコンクリート構造物での計測結果が報告<sup>8,9,10</sup>など) されている。表層コンクリートの非破壊試験方法の中には、電気抵抗率試験がある。

## 2.5 電気抵抗に関する既往の研究

電気抵抗の測定方法は比較的簡便かつ短時間であり、測定方法によっては非破壊で結果を得ることができる。電気抵抗は塩化物イオン拡散係数と相関があり、鋼材腐食にコンクリートの電気抵抗が直接的に関与することからコンクリートの電気抵抗に基づく塩害に関する品質および性能評価試験や評価指数が提案されている<sup>例えば 11~25</sup>。電気抵抗の計測方法は表-2.4<sup>2)</sup>に示すように電極の設置方法によって種々の方法が存在する。本論文では、4プローブ法を参考に考案した方法を用いた。適用に関しての留意点などは4プローブ法と同様と考えられる。本論文では、使用した電気抵抗の計測方法を直流四電極法と記載し、参考にした方法を4プローブ法と記載する。

4プローブ法は非破壊で実構造物に適用可能な電気抵抗率計測試験である。この方法は岩石学や地盤工学でも広く用いられており、Wenner法、四電極法、四探針法などとも呼ばれる。この方法は海外においても規格化の動きがあり、特にAASHTO Designation: TP 95-11, Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetrationでは、コンクリートの遮塩性能に着目した供試体あるいはコア供試体による品質管理手法のひとつとして既に規格化されている。

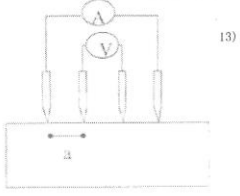
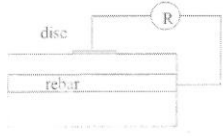
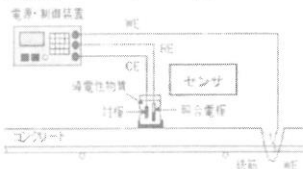
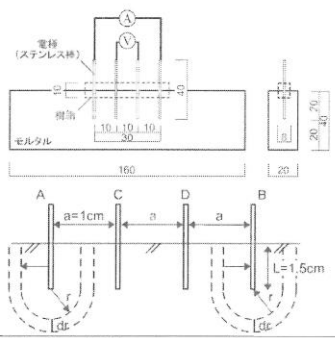
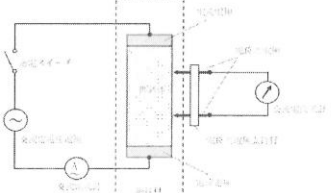
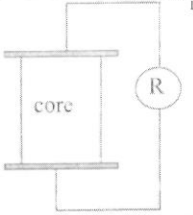
日本においては、土木学会基準に「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K 562-2008)」<sup>26)</sup>が制定されていた。この基準はコンクリート構造物の劣化に対する電気化学的防食工法や断面修復工法などの補修、および補強に使用する断面修復材の体積抵抗率について、特に四電極法により室内試験で測定する方法について規定している。なお、硬化コンクリートに対しても基準(案)は適用可能であるが、硬化コンクリートに絶縁材料が塗布又は積層されている場合には、適用できない。近年、「四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法(案)(JSCE-G 581-2018)」が制定され、より適用範囲が広がった。四電極法は原理が単純で、コンクリート工学以外の分野においても実績が豊富であるため、コンクリート構造物計測用の装置が既に市販されている。

4プローブ法では、等間隔に並んだ4つの電極を測定対称面に押し当て、外側に配置される電流電極から交流電流を印加し、測定対象に流した交流電流と電位差電極間の電位差の測定値と式2.1を用いて電気抵抗率が評価される。

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{V}{I} \quad (\text{式 2.1})$$

ここに、 $\rho$ : 電気抵抗率 ( $\Omega\text{m}$ )、 $L$ : 電極間隔 (m)、 $V$ : 電位差電極間の電位差 (V)、 $I$ : 供試体に流れる電流 (A)

表-2.4 電気抵抗率試験の例<sup>2)</sup>

名称	概要図	評価方法・評価式	適用に際しての留意点など
4プローブ法		$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$ <p><math>\rho</math>: 電気抵抗率 (<math>\Omega \cdot m</math>), <math>a</math>: 電極間隔 (m), <math>V</math>: 電位差電極間の電位差 (V), <math>I</math>: 供試体に流れる電流 (A).</p>	本節 3.6.2 にて詳細を示す. 本法方法は, Wenner 法, 四電極法, 四探針法などとも呼称されている.
対極法	一電極法 <sup>13)</sup> 	$\rho = k \cdot R_{(disc-bar)}$ <p><math>\rho</math>: 電気抵抗率 (<math>\Omega \cdot m</math>), <math>k</math>: 電極の大きさ, かぶり, 鉄筋間隔や鉄筋径によって決まるセル定数 (m), <math>R_{(disc-bar)}</math>: 表面に設置した電極と内部鉄筋との間で計測される抵抗 (<math>\Omega</math>).</p>	コンクリートが乾燥していると, コンクリート表面に設置する電極の電解質溶液がコンクリートへ流入し, 測定値に影響を及ぼす可能性がある. 交流インピーダンス法で測定する場合, 同時に鉄筋の分極抵抗および腐食速度を評価できる機種もある.
	交流インピーダンス法 <sup>14)</sup> 	左図の回路に種々の異なる周波数の微小な交流電圧を負荷し, 高周波数領域において収束した抵抗値をコンクリートの電気抵抗とする. なお, この電気抵抗を電気抵抗率に換算する場合は, 一電極法と同様の考え方で換算係数 $k$ を用いる必要がある.	
埋設電極法	角柱供試体に適用した例 <sup>15)</sup> 	$\rho = \pi \cdot \frac{L}{\log \frac{2(a+L)}{2a+L}} \cdot \frac{\Delta\phi}{I}$ <p><math>\rho</math>: 電気抵抗率 (<math>\Omega \cdot m</math>), <math>a</math>: 電極間隔 (m), <math>L</math>: 電極の埋め込み深さ (m), <math>\Delta\phi</math>: 電位差電極間 (CD) の電位差 (V), <math>I</math>: 電極 AB 間を流れる電流 (A).</p>	電極棒をあらかじめ設置しておく必要があり, 測定位置は電極棒の設置位置に限定される.
四電極法	土木学会規準 JSCE-K562 <sup>16)</sup> 	$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L}$ <p><math>\rho</math>: 電気抵抗率 (<math>\Omega \cdot m</math>), <math>V</math>: 電位差電極間の電位差 (V), <math>I</math>: 供試体に流れる電流 (A), <math>A</math>: 供試体の断面積 (<math>m^2</math>), <math>L</math>: 電位差電極間の距離 (m).</p>	測定対象は供試体, もしくは, 実構造物から採取したコア試料である. 4プローブ法とは電流電極の設置条件が異なる.
二電極法		$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{S}{L}$ <p><math>\rho</math>: 電気抵抗率 (<math>\Omega \cdot m</math>), <math>V</math>: 電極間の電位差 (V), <math>I</math>: 供試体に流れる電流 (A), <math>S</math>: 電流の流れる断面積 (<math>m^2</math>), <math>L</math>: 両通電極間の距離 (m).</p>	測定対象は供試体, もしくは, 実構造物から採取したコア試料である. 四電極法と比較して, 乾燥した供試体に適用するのは不向きである.

ここで評価される電気抵抗率は体積抵抗とも呼ばれ、コンクリート表層部が測定範囲となる。この測定範囲は電極間隔に応じて変化し、一般的には電極間隔が広ければ、測定範囲はより深部の部位も含むことになる。しかし、4プローブ法により電流を流した時、任意断面における電流密度分布は測定対象が均質体であっても一様にはならない。このため、測定範囲を厳密に規定することは難しい<sup>2)</sup>。

4 プローブ法はコアを採取することなく非破壊かつ短時間でコンクリートの電気抵抗率を計測できるため、他の方法と比較して多点での測定が可能である。しかし、電極の幾何学的条件（寸法や間隔など）や測定対象の寸法、コンクリート中鋼材の有無、コンクリートの含水状態、温度、電解質量、中性化の有無、骨材の最大寸法、ひび割れの有無などの影響を受けることが知られている。したがって、異なる条件（測定時期、供用環境、試験機など）で4プローブ法により得られた結果を比較する場合、これらの影響要因を整理する必要がある。4プローブ法の測定値の分解能は使用する電流計や電位差計に依存し、同一条件下において測定した場合の再現性も比較的が高い<sup>2)</sup>。

コンクリートは空隙水中に存在するイオンが主たる導電媒体であると考えられるため、一般的に温度が高ければ電気抵抗率は小さくなる<sup>27)</sup>。これは測定誤差ではなく、物理値そのものが変化すると捉えるべきものであるが、異なる温度条件で測定した電気抵抗率から空隙構造を相対評価する場合などには、測定値の温度補正が必要になる。補正方法はRILEMに電気抵抗率の温度依存性が見掛け上アレニウス則に従うことを利用したもの<sup>24)</sup>などがあり、佐藤らの研究<sup>28)</sup>で温度補正方法が示されている。

電極間隔が骨材の最大寸法の1.5倍より狭くなると測定値の標準偏差は大きくなる<sup>29)</sup>。また、その平均値は真値と比較して過大に評価される<sup>30)</sup>。電極間隔が広がると標準偏差が小さくなる理由としては、電流が流れる領域が広がるためにその領域内の骨材の存在感が希薄になる<sup>29)</sup>。骨材が存在する部分では電流および電位差分布が局所的に理想的な分布から乖離し、骨材寸法と比較して電極間隔が狭くなると、この局所的な分布を計測してしまう<sup>30)</sup>などと考察されている。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，土木学会，pp.5-8，2017.3
- 2) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.97，2012.7
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会，2017.3
- 4) 郭度連，宇治公隆，国府勝郎，上野敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，No.718/V-57，pp.59-68，2002.11
- 5) 郭度連，宇治公隆，国府勝郎，上野敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.711-716，2002.7

- 6) 岡崎慎一郎, 八木翼, 岸利治, 矢島哲司: 養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.227-234, 2006
- 7) 横塚清規, 李春鶴, 半井健一郎: 若材齢時の炭酸化がセメント硬化体の酸素拡散係数の深度分布に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.370-376, 2010
- 8) 松永武則, 松尾栄治, 井上和音, 原聡一郎: 長期間供用された港湾コンクリートの非破壊試験による耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1969-1974, 2017.7
- 9) 椎名貴快, 田中徹, 小池晶子, 中村英祐: 暑中環境下での高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの基本特性と施工品質評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.157-162, 2017.7
- 10) 白岩誠史, 栗原浩彦, 三沢良太, 谷口翔: 部分パイプクーリングおよびシート吸引方式給水養生による坑口付近覆工コンクリートの劣化抑制
- 11) Garboczi, J., E.: Permeability, diffusivity, and Microstructural Parameters: A Critical Review, Cement and Concrete Research, Vol.20, No.5, pp.591-601, 1990
- 12) Andrade, C.: Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements, Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp.724-742, 1993
- 13) Streicher, P. E. and Alexander, M. G.: A chloride Conduction Test for Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.6, pp.1284-1294, 1995
- 14) Bamforth, P. B.: The Derivation of Input data for Modelling Chloride Ingress from Eight Years UK Coastal Exposure Trials, Magazine of Concrete Research, Vol.51 pp.84-96 1996.
- 15) Shi, M., Chen, A. and Sun, J.: Determination of chloride diffusivity in concrete by AC impedance Spectroscopy, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.7, pp.1111-1115 1999
- 16) 鹿島ら: コンクリートの電気抵抗率による耐久性評価の基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.895-900, 1999.7
- 17) McCarter, J., M., Starrs, G., Chrisp, T., M.: Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1395-1400, 2000
- 18) Andrade C.: Model for Prediction Reinforced Concrete Service Life Based on Electrical Resistivity, IBRACON Materials Journal, Vol.1, No.1, pp.61-65, 2005
- 19) Sengul, O., Gjorv, E., O.: Electrical Resistivity Measurements for Quality Control during Concrete Construction, ACI materials Journal, Vol.105, No.6, pp.541-547, 2008
- 20) Sengul, O., Gjorv, E., O.: Electrical Resistivity Measurements for Quality Control during Concrete Construction, ACI materials Journal, Vol.105, No.6, pp.541-547, 2008
- 21) 皆川浩, 久田真, 榎原彩野, 斎藤祐貴, 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

- 22)K. R. Gowers and S. G. Millard : Measurement of concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, ACI Materials Journal/ Sep.-Oct. 1999, Title no. 96-M66, pp.536-541, 1999
- 23)Presale-Moreno, F. J. et al.: Surface resistivity profiles on marine substructures to assess concrete permeability, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Concrete under Severe Conditions, Vol.1, pp227-235, 2010
- 24)Polder, R. et al., RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, 'Test methods for on site measurement of resistivity of concrete'. Materials and Structures Vol. 33, pp.603-611, 2000.12
- 25)中村英佑, 古賀裕久, 鈴木聡, 渡辺博志 : 5年間暴露したコンクリートのひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.871-876, 2013.7
- 26)土木学会基準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)」の制定, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.3, pp427-434, 2008.7, pp.427-434, 2008.7
- 27)齋藤祐貴, 植村翔太, 皆川浩, 久田真 : 海洋干満帯に暴露したコンクリート大型試験体の電気抵抗塩化物イオン拡散係数の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.875-880, 2011.7
- 28)佐藤道生, 酒井隆行, 皆川浩, 久田真 : 比抵抗に着目したコンクリートの長期耐久性モニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.785-790, 2011.7
- 29)K. R. Gowers and S. G. Millard: Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, ACA Materials Journal/ Sep.-Oct. 1999, Title no. 96-M66, pp.536-541, 1999
- 30)皆川浩, 齋藤祐樹, 榎原彩野, 久田真 : 電極の設置条件が4プローブ法による体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響についての基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1087-1092, 2009.7
- 31)土木学会:コンクリート標準示方書[基準編]土木学会基準および関連規準, pp.-437-445, 2018



### 3 電気抵抗計測方法の構築

#### 3.1 はじめに

実構造物に適用可能な養生終了時期判定手法を考案するために電気抵抗の計測に着目した。2.5 電気抵抗に関する既往の研究に記載した電気抵抗の計測方法の中でも4プローブ法を参考にし、実構造物の計測やかぶりコンクリートを直接的に計測できる方法について検討した。

一般的に使用されている4プローブ法による電気抵抗は、コンクリート表面の電気抵抗を計測することによって、その腐食性および鉄筋の腐食進行のしやすさについて評価する方法<sup>1)</sup>であり、主に硬化後のコンクリートの非破壊試験として用いられている。そのためフレッシュコンクリートや養生期間中のコンクリートの計測事例は少なく、計測される電気抵抗がどのような傾向を示すか明らかになっていない。また、考案する直流四電極法で計測される電気抵抗は、コンクリートのどのような性質に影響を受けるのかも明らかになっていない。

本研究で提案する計測方法を直流四電極法と称し、一般的に用いられている非破壊試験でコンクリート表面に電極を接触させて計測する方法を4プローブ法(Wenner法とも呼ばれる)と称する。本研究では、電極を用いた電気抵抗の計測に着目した。コンクリートの電気抵抗の計測は、比較的簡便かつ短時間で計測が可能であり一般的にコンクリート構造物の内部における鉄筋の腐食環境の評価に使用<sup>1)</sup>されている。

計測される電気抵抗は、主にコンクリートの含水量や塩化物含有量などの影響を包括した特性値<sup>1)</sup>とされている。また、電気抵抗の計測はコンクリートの含水率の計測でも使用されており、一般的に電気抵抗の大きい乾燥したコンクリート中では鋼材の腐食は生じないが、抵抗の小さい湿潤なコンクリート中では腐食が生じやすいことが知られている。皆川らは、4プローブ法により計測された電気抵抗がコンクリートの含水率の分布に影響を受ける<sup>2)</sup>ことを明らかにしている。一方、電気抵抗からコンクリートの緻密性を評価する研究も行われており、関らの研究では塩分浸透深さと比抵抗には比較的良好な相関性が認められ、比抵抗に基づく緻密性の評価が可能<sup>3)</sup>としている。

図-3.1に電気抵抗の変化のイメージを示す。打設直後のコンクリートはフレッシュコンクリートであり、コンクリート内に含まれている水量は多い。しかし、コンクリートは材齢の進行に伴って水和反応が進行し、コンクリート内に含まれる水量が減少する。この水和反応による水の消費を電気抵抗で評価できると考えた。

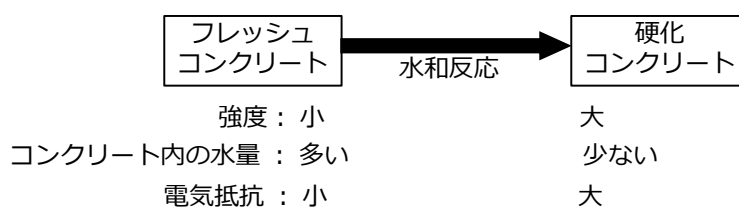


図-3.1 電気抵抗の変化のイメージ

### 3.2 電気抵抗計測方法の構築

図-3.2 に養生の主な影響因子を示す。養生は水和反応に影響を受け、配合条件、使用材料、温度に影響を受ける。養生終了時期判定手法は、水和反応進行度を評価できる手法である必要がある。また、配合条件・使用材料を養生期間に反映できる必要、任意の位置で計測できる必要があると考えられる。

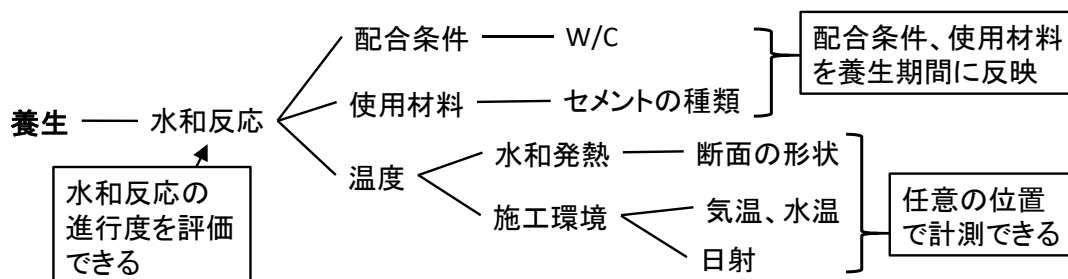


図-3.2 養生の影響因子

#### 3.2.1 型枠内部および養生期間中のコンクリートを計測

型枠内部にあるコンクリートのかぶり部分を任意の位置で計測するため、型枠に電極を設置することを考えた。図-3.3 に電極を用いた電気抵抗の計測方法の概略を示す。型枠にΦ5mm程度の穴を開けて4本の電極を設置する。電極は型枠に固定し、コンクリートを打ち込みで動かさないようにする。その後、コンクリートを打設することで電極をかぶりコンクリートに埋設する。電極を型枠に設置し電極をコンクリートに埋め込むことで、型枠の外

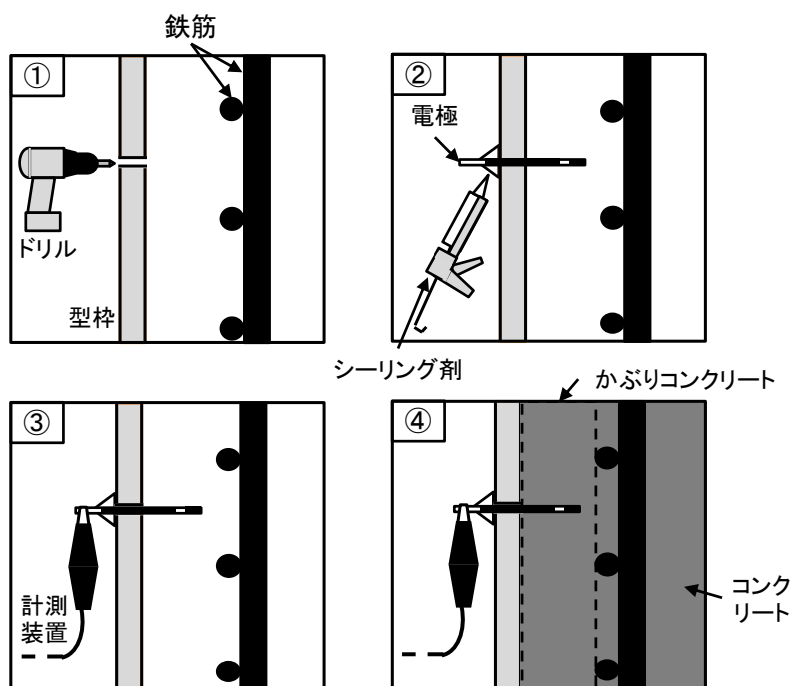


図-3.3 電極を用いた電気抵抗計測法の概略

から内部のコンクリートの電気抵抗を計測することが可能と考えた。

### 3.2.2 コンクリート構造物のかぶりコンクリートを直接的に計測

図-3.4 に使用する電極の概略を示す。電極は $\Phi 2.6\text{mm}$  の鉄の針金を使用し、電極の表面を伸縮チューブで覆うことにより通電部を設けている。通電部は $2\text{mm}$  とした。通電部の位置は、通電深さを変化させることで電極の任意の位置に設けることができる。今回の計測条件では $30\text{mm}$  とした。電極は型枠にコーキング等で固定されており、型枠表面にある針金に計測装置を接続することで実構造物のかぶりコンクリート部分を直接的に計測できる。このように電極に通電部を設けて型枠に設置することでコンクリート構造物のかぶり部分を直接的に計測することが可能となった。

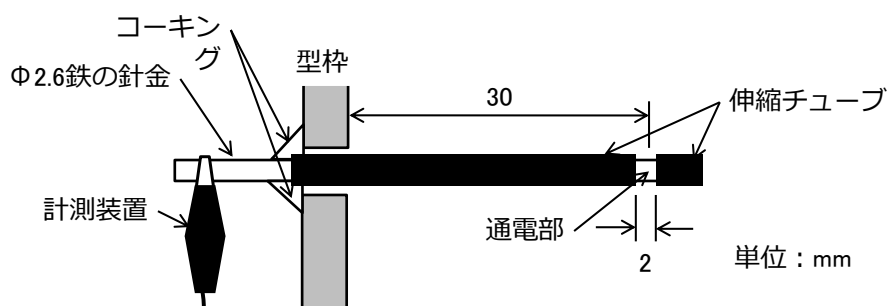


図-3.4 電極を用いた電気抵抗計測法の概略

### 3.2.3 任意の位置での計測

本手法は、型枠に穴を開けて電極を設置し、電気抵抗の計測を行う。したがって、型枠面近傍なら任意の位置で計測することが可能である。これにより同一のコンクリートを打設した場合においてもコンクリート構造物内で外気温や日射等の施工環境、構造物の断面等の構造物の形状等によって変化する水和反応の進行度を電気抵抗から評価できると考えられる。

### 3.2.4 計測装置および計測方法

2018年度制定コンクリート標準示方書〔基準編〕に四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法（案）（JSCE-G 581-2018）<sup>4)</sup> が定められた。提案する直流四電極法は、試験方法の B 法と類似しているものの計測装置および計測方法が異なる。一般的に用いられている交流インピーダンス法は、入力周波数毎に測定値を検討できることが特徴であるが、その分、測定装置や測定結果の解釈が複雑化する傾向がある<sup>5)</sup>。

提案する方法は直流のパルス波を用いて電気抵抗の計測を行うこととした。コンクリート標準示方書〔基準編〕に定められている方法や一般的な 4 プローブ法では交流を用いている。直流パルス波を用いた理由としては、交流発生装置が比較的大型で高価なことが挙げ

られる。そのため直流を選択し、コンクリートの帯電現象を防止するためにパルス波を使用した。直流で4プローブ法を用いた計測では、露口らの研究<sup>5)</sup>が挙げられる。

図-3.5に計測に使用したパルス波と計測条件の概略を示す。パルス周期は50msであり、パルス幅は25msとした。したがって、1秒間に20回ほど電圧がかかることになる。右側の図は計測される電気抵抗の波形のイメージである。電気抵抗の計測は、図中④の範囲で電流を計測し、積分をして算出している。電極金属には、電気抵抗の計測精度を確保するために白金等を使用するのが理想的はあるが、型枠に電極を設置後にコンクリートを打ち込んでも変形しない強度を持つことや、安価でどこでも手に入る材料であることを考慮し、鉄やステンレスの針金を使用した。

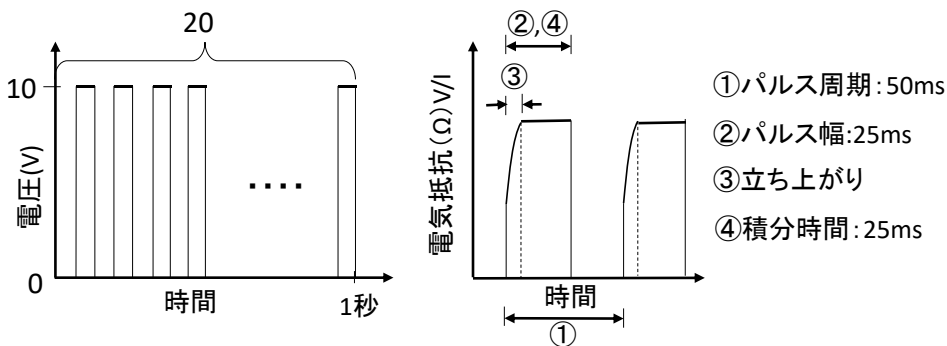


図-3.5 パルス波の計測条件の概略

上記の直流四電極法による電気抵抗の計測条件は、簡易で安価に計測するための条件である。したがって、一般的な交流を用いた計測方法と比較して、計測される電気抵抗が帯電現象等の影響、電極金属の抵抗による影響、通電部の加工精度の影響等を受けると考えられる。電気抵抗の計測精度に関しては、6章に記載する。

### 3.2.5 直流四電極法の提案

上記の事柄を考慮して計測方法を提案する。図-3.6に提案する直流四電極法の概略を示

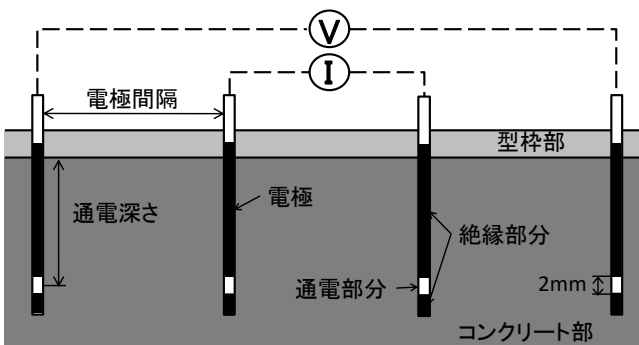


図-3.6 直流四電極法の概略

表-3.1 直流四電極法の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V(パルス波)
電極間隔	50mm
電極直径	φ2.6mm
通電深さ	50mm
電極金属	ステンレスの針金

し、表-3.1 に直流四電極法の計測条件を示す。計測方法は実際の現場での計測を想定し、安価で簡易な方法とした。外側の電極に 10V のパルス波を印加し、内側の電極で電流を計測する。電極間隔は 2.5 で記載したように電極間の粗骨材の分布等に影響を受けるため、粗骨材の最大寸法 20mm の 2 倍以上の 50mm とした。通電深さは電極間隔と同様の値の 50mm とした。現場でコンクリート構造物を簡易に計測するために、電極には、ステンレスの針金を用いた。

### 3.2.6 セメントの水和反応の進行度を計測

表-3.2 に 4 プローブ法によって得られたコンクリートの比抵抗による鋼材腐食性評価の例<sup>1)</sup>を示す。実構造物の鋼材腐食性評価では、5000~20000Ωcm 程度の範囲で電気抵抗の値を評価している。一方、皆川らの研究<sup>2)</sup>では、含水状態によりモルタルやコンクリートの電気抵抗率が数百倍になることが明らかとなっており、計測される電気抵抗はコンクリートの含水状態に強く影響を受けると考えられる。

表-3.2 コンクリートの比抵抗による鋼材腐食性評価の例<sup>1)</sup>

Cavalier and Vassie		Taylor Woodrow Res. lab		武若および小林	
比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性
>12000	微候なし	>20000	なし	>10000	小さい
5000~12000	危険性あり	10000~20000	小さい	5000~10000	不確定
		5000~10000	大きい		
<5000	確実	<5000	非常に大	<5000	大きい

(注)測定方法はいずれも四点電極法(Wenner法)による (単位:Ωcm)

4 プローブ法を応用し電気抵抗を計測することでセメントの水和反応によって変化する含水状態を評価し、フレッシュコンクリートから硬化コンクリートに変化する際の水和反応の進行を評価し、養生終了時期判定手法に用いることを考えた。そこで、電気抵抗と結合水率を計測し、両者の関係について検討を行った。

#### (1) 実験概要

表-3.3 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[OPC]に置換率 50%で高炉スラグ微粉末[BFS]を用いた高炉セメント B 種[BB]を用いた。配

表-3.3 コンクリートの計画配合

略号	セメントの種類	W/B (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	OPC	BFS	S	G
20°C, 35°C, 45°C	BB	50	46	12.0	4.5	170	170	170	811	850

合は、水結合材比が 50%で単位水量が  $170\text{kg/m}^3$  の一般的なコンクリートである。水和反応の進行度を変化させるために練り上がり温度および養生温度を  $20^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$  に変化させた供試体を作製し、電気抵抗の計測を行った。電気抵抗の計測方法は、3.2.5 に記載した方法とした。また、表-3.4 の配合条件でセメントペーストを作製し、コンクリートと同様の温度環境で練り上がり温度と養生温度を調整し、強熱減量試験を行って結合水率を求めた。

表-3.4 セメントペーストの配合条件

略号	セメント種類	BFS 置換率 (%)	W/B (%)
$20^\circ\text{C}$ , $35^\circ\text{C}$ , $45^\circ\text{C}$	BB	50	50

電気抵抗計測用供試体の概略を図-3.7 に示す。供試体は  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の角柱供試体とし、型枠側面に電極を設置した。電気抵抗の計測条件や計測方法は、3.2.4 および 3.2.5 に記載した方法とした。供試体の養生方法は、封かん養生期間中に供試体のすべての面をエポキシ樹脂で覆い、水分の蒸発を防止した。

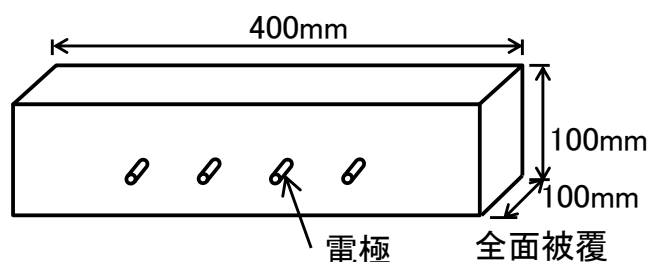


図-3.7 電気抵抗計測用供試体の概略

強熱減量試験による結合水率は、各試料を  $700^\circ\text{C}$  で加熱した場合の質量減少量から算出した。加熱温度を  $700^\circ\text{C}$  とすることで BFS がガラス相から結晶化することを防止した。

図-3.8 に電気抵抗の測定結果を示す。測定結果は温度補正を行っていない値である。電気抵抗の値は、材齢の進行に伴って大きくなった。これは、電気抵抗が水和反応の進行に伴って減少する水量の変化に影響を受けるためと考えられる。また、温度について着目してみると、温度が高いほど電気抵抗は大きな値を示した。これは、水和反応に温度依存性があることに起因していると考えられ、温度が高い方が水和反応の進行が速く、コンクリート内の水分が早期に減少することが考えられる。

図-3.9 に結合水率の測定結果を示す。結果から結合水率は材齢の進行に伴って 22%程度で一定となるが、結合水率の初期材齢の増加は温度が高いほど速くなった。

図-3.10 に結合水率と電気抵抗の測定結果を示す。電気抵抗と結合水率の関係は、温度によらず一つの対数近似曲線で概ね近似された。既往の研究<sup>6)</sup>では計測される電気抵抗は温

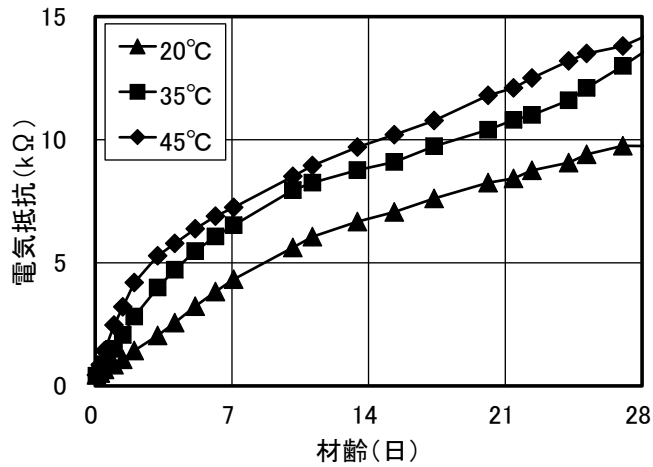


図-3.8 電気抵抗の測定結果

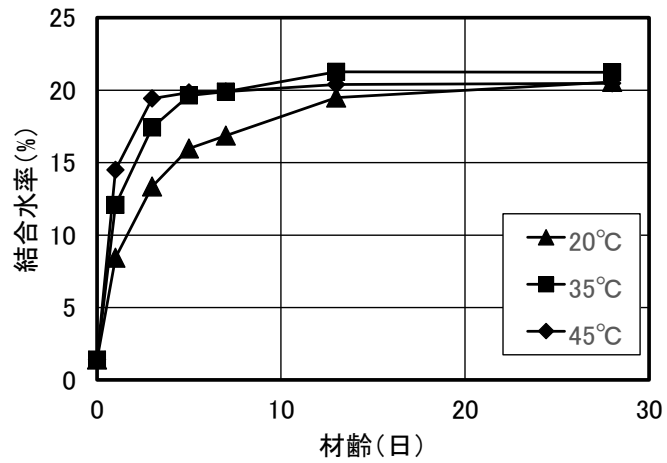


図-3.9 結合水率の測定結果

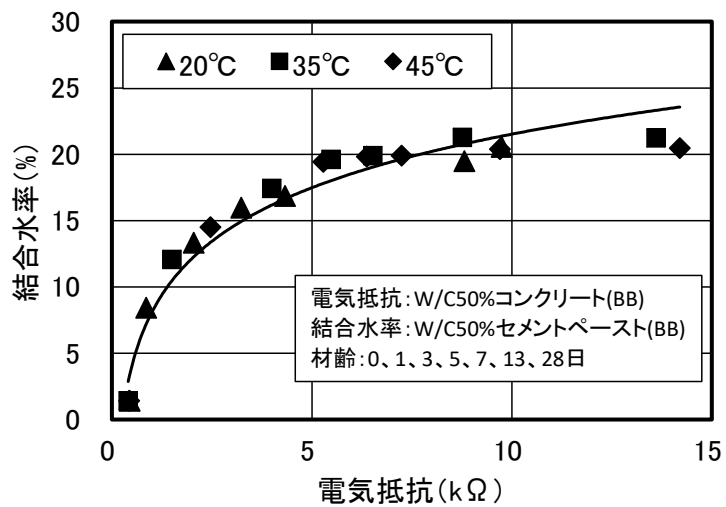


図-3.10 結合水率の測定結果

度によって変化するため、温度で補正する必要があるとされている。しかし、本研究の範囲では、温度補正を行っていない電気抵抗の値を用いても相関が確認された。したがって、電気抵抗は水和反応の進行度に影響を受け、計測される電気抵抗から水和反応の進行度を評価できると考えられる。電気抵抗の温度補正の方法に関しては、RILEMに電気抵抗率の温度依存性が見掛け上アレニウス則に従うことを利用したもの<sup>7)</sup>などがあり、佐藤らの研究<sup>6)</sup>で温度補正方法が示されている。

### 3.3 まとめ

3章では4プローブ法を参考とし、実際の現場でも簡易で安価に型枠内部のまだ固まらないコンクリートの計測ができるように計測方法を改良した。そして、直流四電極法による電気抵抗の計測方法を提案した。また、提案した直流四電極法を用いた電気抵抗をもちいて、コンクリートの水和反応の進行を評価できるか検討を行った。結果として、電気抵抗が結合水率と相関があることが明らかとなった。

提案する電極を用いた直流四電極法による電気抵抗の計測により、型枠内部のまだ固まらないかぶり部分のコンクリートの水和反応の進行度を評価できる可能性がある。

- (1) 電極を型枠に設置し電極をコンクリートに埋め込むことで、型枠の外から内部の電気抵抗を計測することができた。
- (2) 電極に通電部を設けることでコンクリート構造物のかぶり部分を直接的に計測することが可能となった。
- (3) 電極を型枠に設置することで任意の位置のかぶりコンクリートの電気抵抗が計測可能となった。
- (4) 計測される電気抵抗は結合水率と相関があることを明らかにし、電気抵抗を計測することで水和反応の進行度を評価できる可能性を示した。

以降では、提案した直流四電極法による電気抵抗の計測を用いて養生終了時期判定手法の構築を行う。4章では電気抵抗の影響因子について検討し、計測される電気抵抗が経時変化する理由について検討を行った。また、計測される電気抵抗が配合条件に受ける影響についても検討を行った。

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術' 18 [基礎編]，日本コンクリート工学会，pp.198-199，2018.2
- 2) 皆川浩，矢野貴行，久田真：乾燥により生じた含水率分布が4プローブ法により計測されるコンクリートの電気抵抗率に及ぼす影響，Vol.35，No.1，pp.1111-1116，2013.7
- 3) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実



- 験的一考察, 土木学会論文集, No.451, V-17, pp.49-57, 1992.8
- 4) 2018 年度制定コンクリート標準示方書 [基準編] 土木学会基準および関連規準, 土木学会, pp.437-445, 2018.10
  - 5) 露口雄次, 町田篤彦: 直流比抵抗法を用いた RC 好悪臍物の内部推定に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.641-656, 2006.10
  - 6) 佐藤道生, 酒井隆行, 皆川浩, 久田真: 比抵抗に着目したコンクリートの長期耐久性モニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.785-790, 2011.7
  - 7) Polder, R. et al., RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, 'Test methods for on site measurement of resistivity of concrete'. Materials and Structures Vol. 33, pp.603-611, 2000.12

## 4 電気抵抗の影響因子

### 4.1 はじめに

3章において型枠内部のコンクリートの電気抵抗の計測方法を提案した。また、計測された電気抵抗と結合水率に相関があり、電気抵抗を計測することで水和反応の進行度を評価できる可能性が示された。

この章では、モルタルやセメントペーストを用いた実験により、計測される電気抵抗の経時変化の挙動について検討する「挙動メカニズムの解明」と配合条件の変化が電気抵抗に及ぼす影響について検討した「配合条件が及ぼす影響」の2つの検討を行った。

### 4.2 挙動メカニズムの解明

OPCを用い、水セメント比が55%で単位水量が172 kg/m<sup>3</sup>の一般的なコンクリートの電気抵抗を計測した際に、接水後3時間程度で電気抵抗が最小値を示す傾向が確認された。

図-4.1に電気抵抗の計測結果を示す。印加電圧は1Vで1分毎に経時的に電気抵抗を測定した結果である。横軸の時間は打込みからの時間となっている。

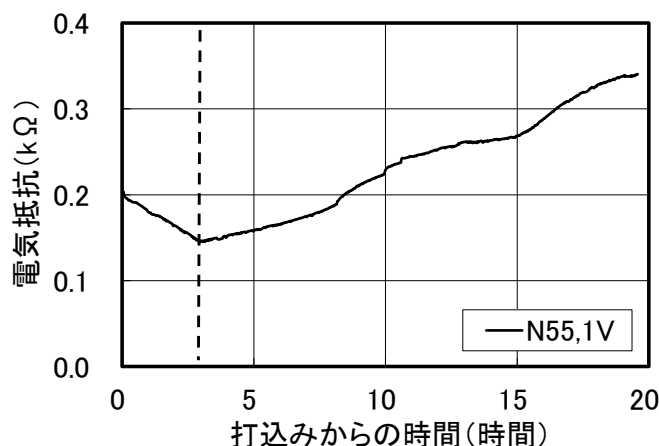


図-4.1 電気抵抗の計測結果

既往の研究<sup>1,2)</sup>では、フレッシュコンクリートの電気伝導率を経時的に測定すると、接水から2~4時間程度で電気伝導率が最大値を示す現象が確認されている。また、この接水から電気伝導率が最大値を迎えるまでの時間から凝結の進行を捉えることができる<sup>3,4)</sup>とされ、この時間を把握することは、現場の外気温の変化に応じた許容打重ね時間の設定に有効としている。

この電気伝導率が最大値を示す現象が電気伝導率の逆数である電気抵抗でも確認されたと考えられる。また、この電気抵抗が最小値（電気伝導率では最大値）を示す現象の原因については、明らかになっていない。電気抵抗が最小値を示す時間は、接水から2~4時間程度であり、既往の研究<sup>3,4)</sup>からも凝結の進行と相関があるとされている。したがって、電気抵抗が最小値を示す現象は、コンクリートの水和反応に影響を受けていると予測される。

直流四電極法によって計測される電気抵抗が接水から2~4時間程度で最小値を示す現象の原因を明らかにすることで、電気抵抗がコンクリートのどのような性質に影響を受けるかを明らかにする。電気抵抗は水和反応の進行に影響を受けると予測されるため、電気抵抗と水和反応の進行の関係について検討を行う。

#### 4.2.1 実験概要

実験はセメントの種類を変化させたセメントペーストを用いた。試験はコンダクションカロリメーターによる発熱速度、示差熱重量試験による  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  生成量、強熱減量試験による結合水率およびイオンクロマトグラフィーによる  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 濃度および電気抵抗の測定を行った。水和反応の進行と電気抵抗の変化を比較し、両者の関係性について検討した。

##### (1) 直流四電極法による電気抵抗測定

表-4.1 に電気抵抗の計測条件を示す。本研究では接水から6時間程度までの電気抵抗が小さい若材齢のセメントペーストの計測をするため、印加電圧に1Vのパルス波を用いた。

表-4.1 電気抵抗の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	1V (パルス波)
電極間隔	40mm
電極直径	φ3.0mm
通電深さ	30mm
電極の種類	アルミの針金

##### (2) 使用材料および配合

使用材料は、OPC(密度  $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ , 粉末度  $3240\text{cm}^2/\text{g}$ )と、OPCにBFS(密度  $2.89\text{g}/\text{cm}^3$ , 粉末度  $4410\text{cm}^2/\text{g}$ )を45%置換したセメント [B45] と70%置換した [B70] の3種類とした。セメントペーストの配合条件と略号を表-4.2に示す。水結合材比は50%で一定とした。BFS置換率の異なるセメントを用いることで水和反応の進行度等を変化させた。

表-4.2 セメントペーストの配合条件

セメント種類	BFS 置換率 (%)	W/B (%)	略号
OPC	0	50	N
	45		B45
	70		B70

(3) 電気抵抗計測用供試体および養生条件

図-4.2 に電気抵抗測定用供試体の概略を示す。供試体はセメントペーストの材料分離を防止するため  $60 \times 60 \times 300\text{mm}$  の小型の角柱供試体とした。電極は供試体側面に設置し、電極設置位置は、供試体側面の中央とした。供試体はすべて表面を被覆し、水分の逸散を防止した。

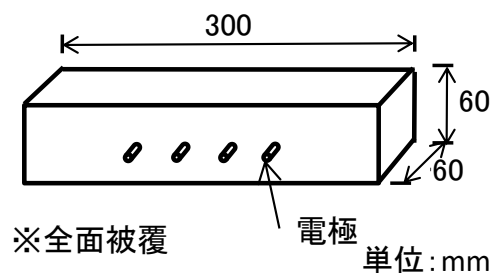


図-4.2 電気抵抗測定用供試体の概略

(4) セメントペーストの分析試料の作製方法

コンダクションカロリメーターによる水和発熱速度の測定は、各種セメントと水を2分間攪拌した直後から測定を開始し、接水からの時間で発熱速度を整理した。強熱減量試験による結合水率は、各試料を  $750^\circ\text{C}$  で加熱した場合の質量減少量から算出した。加熱温度を  $750^\circ\text{C}$  とすることで BFS がガラス相から結晶化することを防止した。示差熱重量試験は、各試料を  $\text{N}_2$  フロー環境下で昇温速度を  $20^\circ\text{C}/\text{分}$  とし、 $1000^\circ\text{C}$  まで加熱した。イオンクロマトグラフィーは、陽イオンの定量計測を行った。

強熱減量試験、示差熱重量試験、イオンクロマトグラフィーに用いた試料の作製方法を図-4.3 に示す。各材齢のセメントペーストは、遠心分離と吸引ろ過を行って液体と固体を分離した。得られた液体は、5C のろ紙を用いてろ過を行い、純水で100倍に希釈したもの

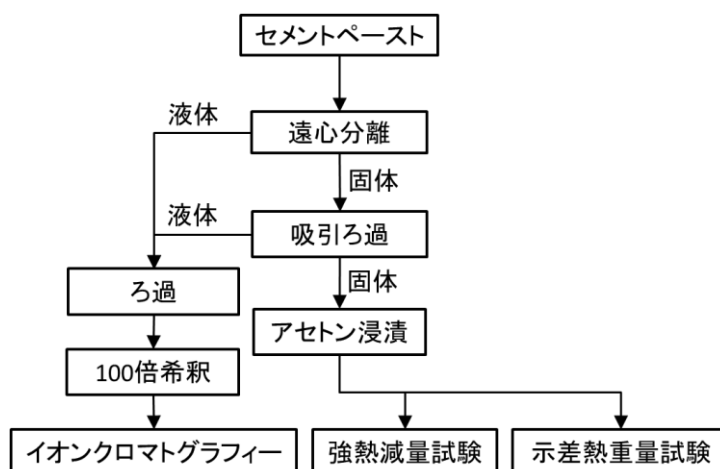


図-4.3 計測試料の作製方法

イオンクロマトグラフィーに用いた。固体はアセトンに浸漬をして水和反応を停止させたものを用い、強熱減量試験および示差熱重量試験を行った。

#### 4.2.2 実験結果

##### (1) 電気抵抗の測定結果

電気抵抗の測定結果を図-4.4 に示す。各セメントペーストの電気抵抗は、接水から減少し、接水から約2時間程度で最小値を示した。その後、電気抵抗は材齢の進行に伴って増加した。この傾向は、既往の研究<sup>1,2)</sup>の電気伝導率と同様の傾向である。

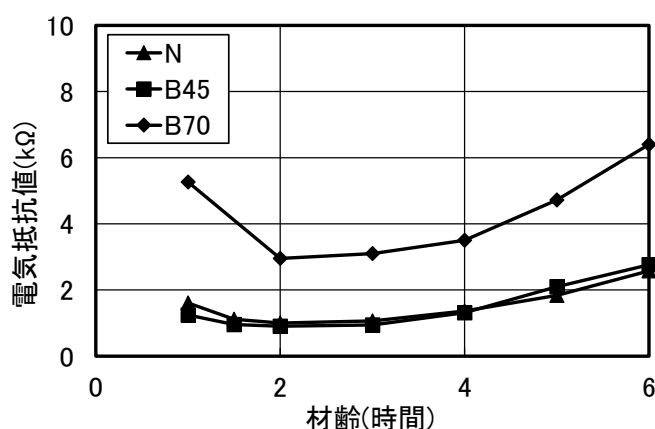


図-4.4 電気抵抗の測定結果

##### (2) 水和発熱と電気抵抗の関係

図-4.5 に各セメントペーストの水和発熱をコンダクションカロリメーターで測定した結果を示す。BFS 置換率の変化により発熱速度に差異が認められた。発熱速度の結果は一般的に最初の反応である第1段階(図中①)、誘導期の第2段階(図中②)、加速期の第3段階(図中③)、減速期の第4段階(図中④)に分けることができる。

図-4.6~8 に電気抵抗と発熱速度の関係を示す。図中の矢印が電気抵抗と発熱速度の最小値を示している。発熱速度曲線の形状と電気抵抗の形状に相関が認められ、電気抵抗および発熱速度の最小値となる接水からの時間は、若干の時間的なずれがあるが、概ね一致している。したがって、電気抵抗は水和反応と関係があると考えられる。

発熱速度の最初の反応である第1段階は、 $C_3S$  や  $SO_4^{2-}$  の溶解反応<sup>5)</sup> である。接水直後の電気抵抗は、発熱速度と同様に減少する傾向を示した。したがって、電気抵抗の減少は  $C_3S$  等からイオンが水に溶解することによって電気が流れやすい状況となることに起因していると考えられる。

発熱速度の誘導期である第2段階は、反応速度が極めて小さくなり、液相中の  $Ca(OH)_2$  濃度がゆっくりと上昇する。誘導期の終わりには水和物と液相の平衡が成立しなくなり、急速な反応が再開させる<sup>5)</sup>。電気抵抗が最小値を示す材齢と、発熱速度が最小値を示す時間は、

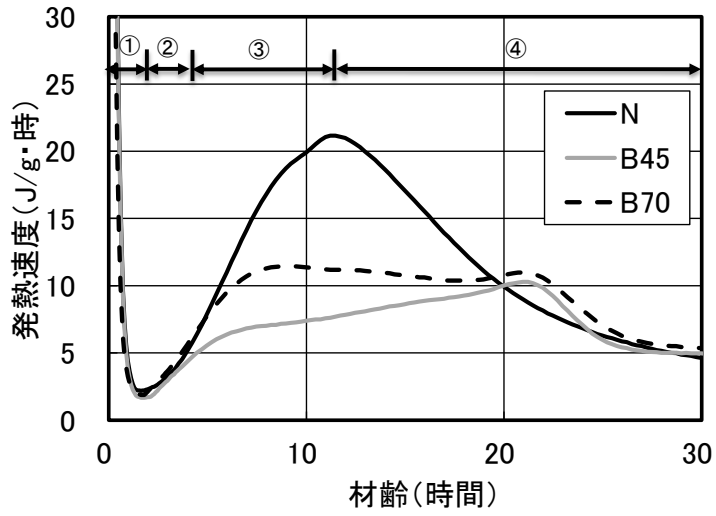


図-4.5 発熱速度の測定結果

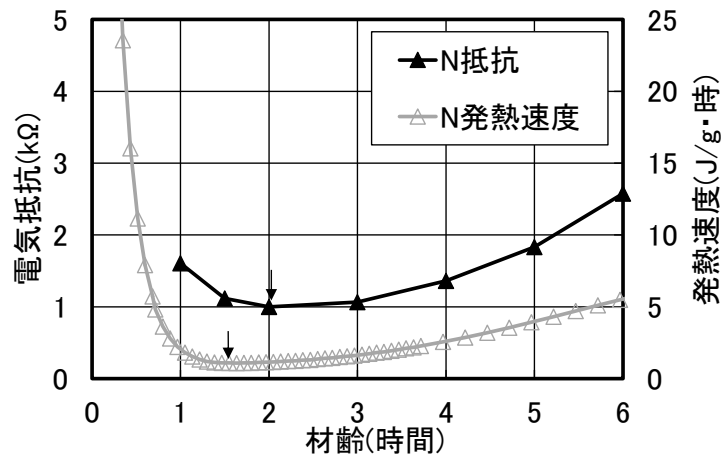


図-4.6 電気抵抗と発熱速度の経時変化 (N)

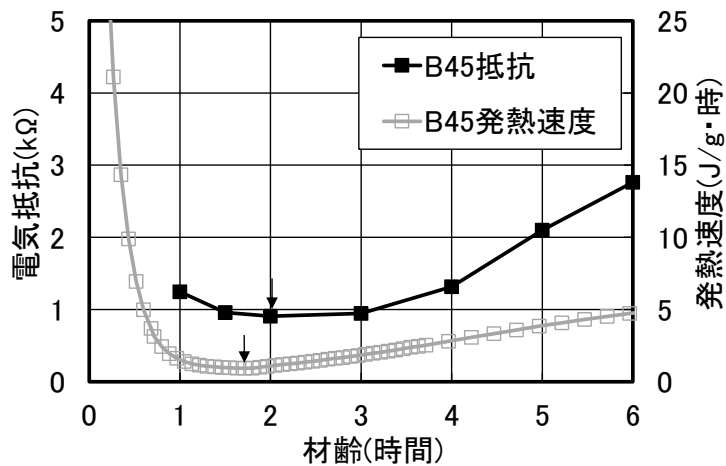


図-4.7 電気抵抗と発熱速度の経時変化 (B45)

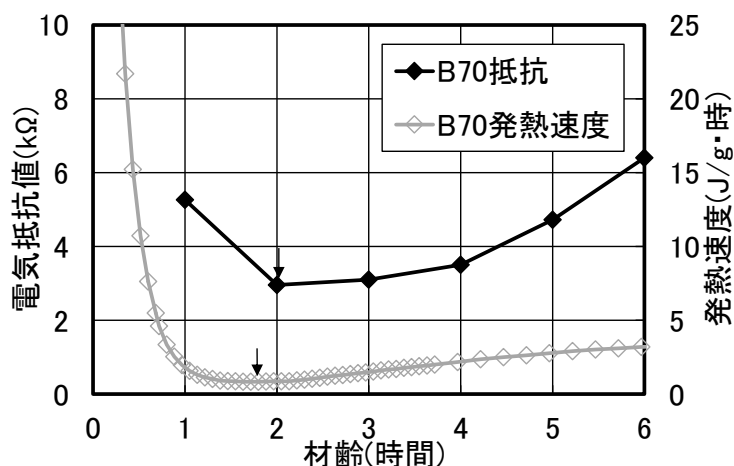


図-4.8 電気抵抗と発熱速度の経時変化 (B70)

ほぼ同じである。したがって、電気抵抗の最小値を示す時間は、発熱速度の誘導期を捉えていると考えられる。

加速期の第3段階は、第2段階の終わりに再開された水和反応が急速に進行する時期であり、生成する水和物は安定なC-S-Hである<sup>5)</sup>。加速期の電気抵抗は、発熱速度の増加と共に大きくなっており、再開されて急速に進行する水和反応に影響を受けていると考えられる。電気抵抗が増加する原因としては、水和反応によりセメントペースト内の水が消費され、電気が流れにくい状況になったことが挙げられる。

### (3) $\text{Ca}^{2+}$ イオン濃度が電気抵抗に及ぼす影響

コンダクションカロリメーターの試験結果より、接水から1~2時間程度の若材齢で電気抵抗が減少する傾向の原因は、 $\text{C}_3\text{S}$ 等から $\text{Ca}^{2+}$ 等の水への溶解反応を捉えていると考えられた。したがって、セメントペースト中の液相を遠心分離後にろ過したものに対し、イオンクロマトグラフィーを実施し $\text{Ca}^{2+}$ 濃度と $\text{K}^+$ 濃度について検討した。

図-4.9に $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の接水からの経時変化を示す。BFSの添加によらず $\text{Ca}^{2+}$ 濃度は接水後に増加し、減少する傾向を示した。また、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が最大となる時間は、BFSの置換率が大きくなるほど早くなった。BFSは接水後に液相中の $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ を固定し、石灰および石こう飽水比を低下し、間隙質の水和を促進する。そのため、BFSの添加は $\text{C}_3\text{S}$ からの $\text{Ca}^{2+}$ の溶解を活発にし、置換率の大きいセメントペーストほど $\text{Ca}^{2+}$ 濃度のピーク時間が早くなったと考えられる。Nは、 $\text{C}_3\text{S}$ が接水後すぐに $\text{Ca}^{2+}$ を溶解し、C-S-Hと平衡となる。C-S-Hは $\text{C}_3\text{S}$ 表面に析出して層をつくるため、 $\text{C}_3\text{S}$ の溶解を妨げ、反応速度を小さくする。そのためNは、B45やB70と比較して $\text{Ca}^{2+}$ のピークが遅れたものと考えられる。

図-4.10~12にセメントペーストの電気抵抗と $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の関係を示す。使用したセメントの種類によらず電気抵抗が最小値を示す時間と $\text{Ca}^{2+}$ 濃度が最大となる時間はほぼ一致している。一方、電気抵抗と $\text{K}^+$ 濃度との相関についても確認をしたが、良い相関は得られなかった。

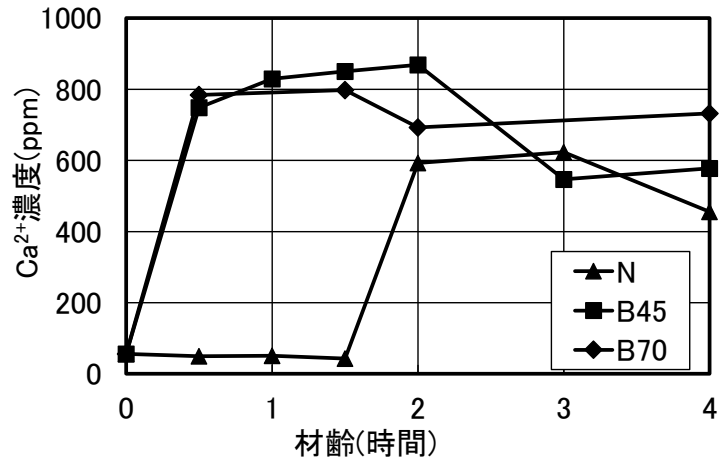


図-4.9 Ca<sup>2+</sup>濃度の経時変化

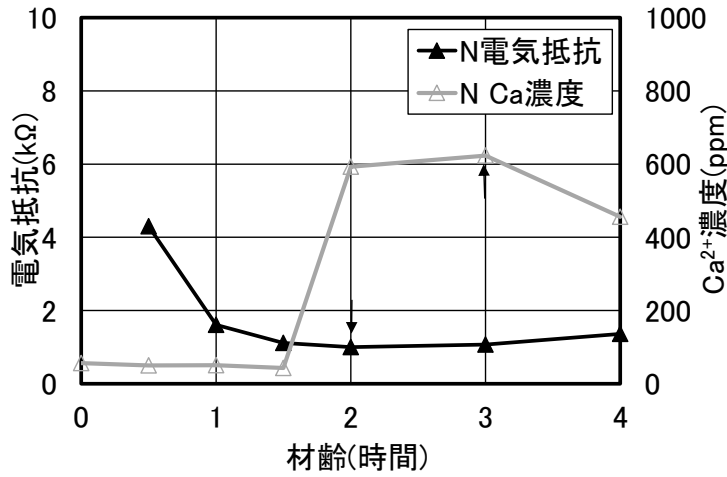


図-4.10 電気抵抗と Ca<sup>2+</sup>濃度の経時変化 (N)

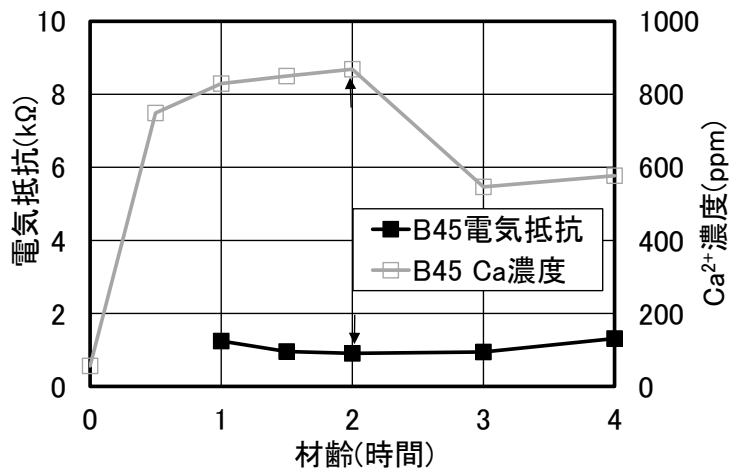


図-4.11 電気抵抗と Ca<sup>2+</sup>濃度の経時変化 (B45)



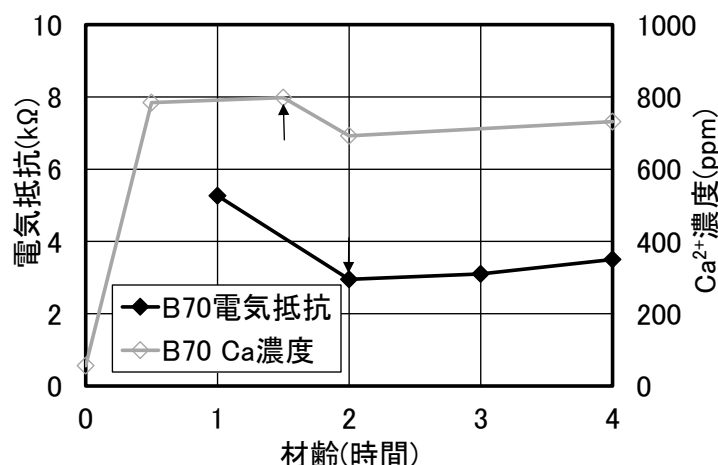


図-4.12 電気抵抗と  $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の経時変化 (B70)

接水から2~3時間程度の若材齢で電気抵抗が最小値を示す原因として、セメントや混和材の液相へのイオンの溶出と固定が影響していると考えられ、特に電気抵抗の低下は  $\text{Ca}^{2+}$  のイオンの溶出による影響が大きいと考えられる。以上から、接水から約2時間程度で確認される電気抵抗の低下は、 $\text{C}_3\text{S}$ 等からのイオンの溶解反応により液相中の  $\text{Ca}^{2+}$ 等のイオン濃度が高くなることで電気が流れやすくなることに起因すると考えられる<sup>6)</sup>。

#### (4) 水酸化カルシウム量が電気抵抗に及ぼす影響

コンダクションカロリメーターおよび強熱減量試験の試験結果より、接水から約2時間以降の電気抵抗の増加は、水和反応による水の消費により電気が流れにくくなることに起因していると考えられた。そこでセメントの主な水和生成物である水酸化カルシウム [CH] と電気抵抗にも相関があると考え、セメントペーストの示差熱重量試験を行い、水酸化カルシウム [CH] の生成量と電気抵抗の比較をした。

図-4.13に各種セメントの示差熱重量試験から算出したCH量を示す。試験は接水から1時間毎に水和反応を停止した試料を用いて行った。しかし、0~2時間の若材齢の示差熱重量試験結果においてDTAより明確な脱水反応を確認することができなかった。原因として若材齢の試料ではCHの生成量が少ないことが原因と考えられる。本実験の範囲内で接水から6時間までのCH生成量においてNとB45に明確な差異は確認できなかった。B70に関しては、OPCの量が少ないことにより  $\text{Ca}^{2+}$ 等のイオン量が少ないのでCHの生成量が少ないことが考えられる。

図-4.14~16に電気抵抗とCH生成量の関係を示す。接水から約2時間以降の電気抵抗は、CHの生成量が増加するに伴って大きくなる。また、図-4.17にCH生成量と電気抵抗の関係を示す。電気抵抗とCH量の間に関係が見取れ、相関も良い結果が得られた。結合水率と電気抵抗の関係も考慮すると電気抵抗の接水から約2時間以降の増加は、CHに代表される水和生成物の生成に影響を受ける。したがって、接水から約2時間以降の電気抵抗の増加は、水和反応による水の消費によってコンクリートに電気が流れにくくなるこ

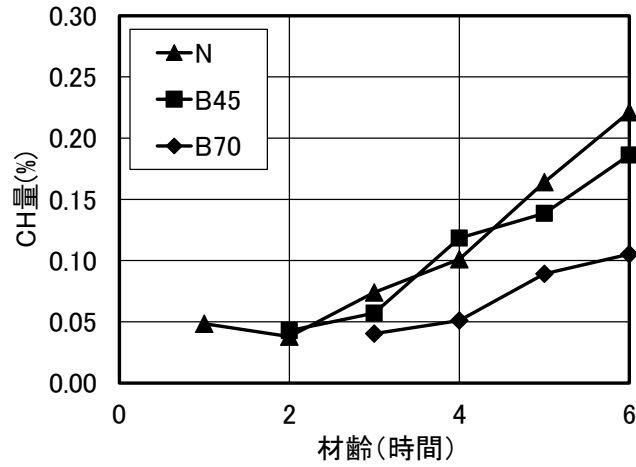


図-4.13 CH量の測定結果

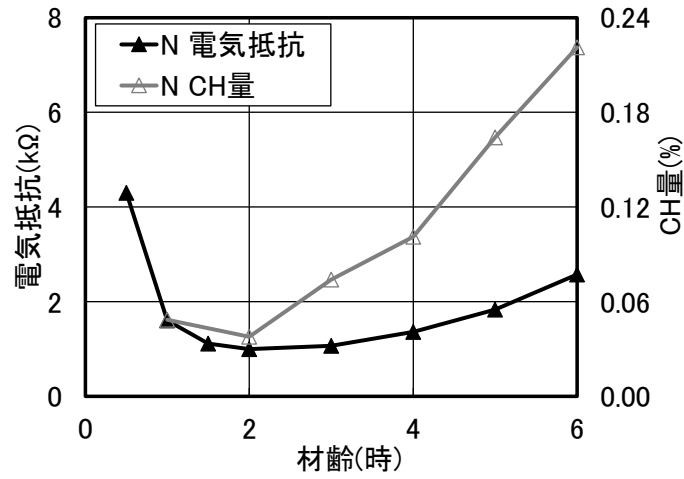


図-4.14 電気抵抗とCH量の経時変化 (N)

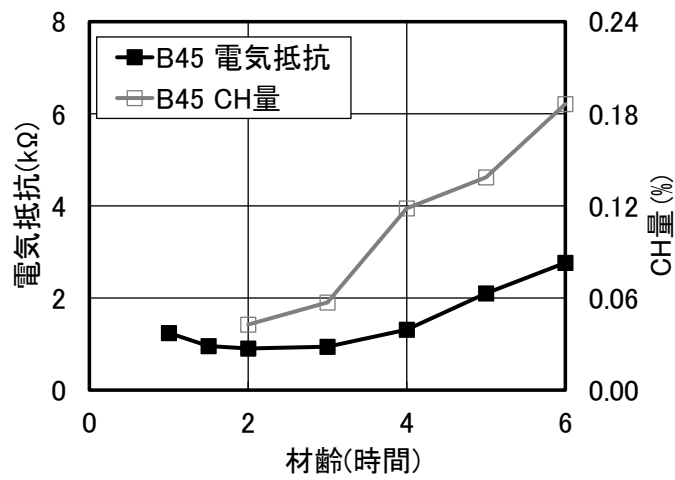


図-4.15 電気抵抗とCH量の経時変化 (B45)

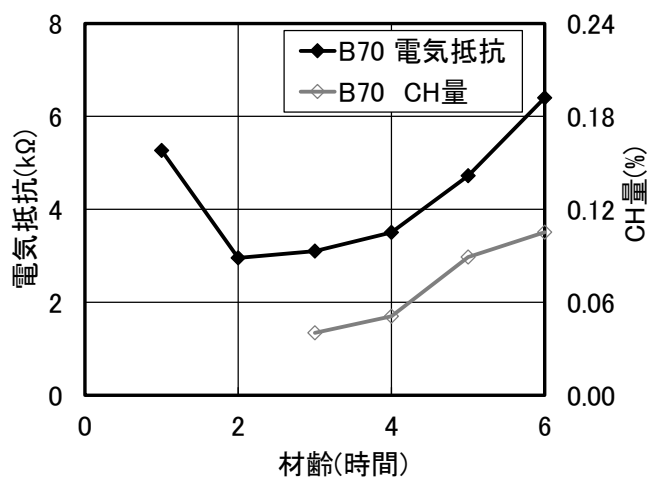


図-4.16 電気抵抗とCH量の経時変化 (B70)

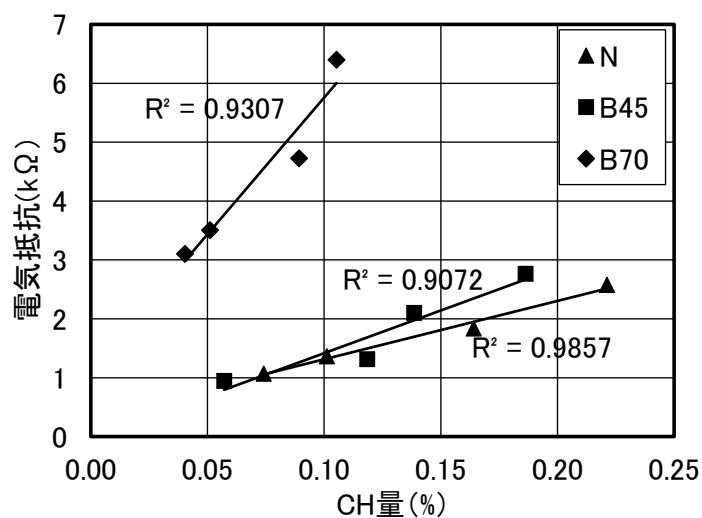


図-4.17 電気抵抗とCH量の関係

とに起因していると考えられる。

(5) 結合水率が電気抵抗に及ぼす影響

コンダクションカロリメーターの試験結果より接水から約 2 時間以降の電気抵抗の増加傾向は、水和反応による水の消費により電気が流れにくくなることに起因していると考えられた。したがって、セメントペーストの強熱減量試験を行い、結合水率と電気抵抗の関係を確認した。図-4.18 に強熱減量試験により算出した結合水率を示す。各材齢の結合水率は、N, B45, B70 の順に小さくなっている。これは、BFS の置換率が影響していると考えられ、BFS の置換率が大きくなるほど結合水率が小さくなっている。この傾向は既往の研究<sup>6)</sup>と同様である。また、各セメントの接水から 2 時間以降の結合水率は、時間の経過と共に大きくなった。強熱減量試験結果から得られる電気抵抗と結合水率の経時変化を図-4.19~21 に示す。図より接水から約 2 時間以降の電気抵抗と結合水率は、増加する傾向を

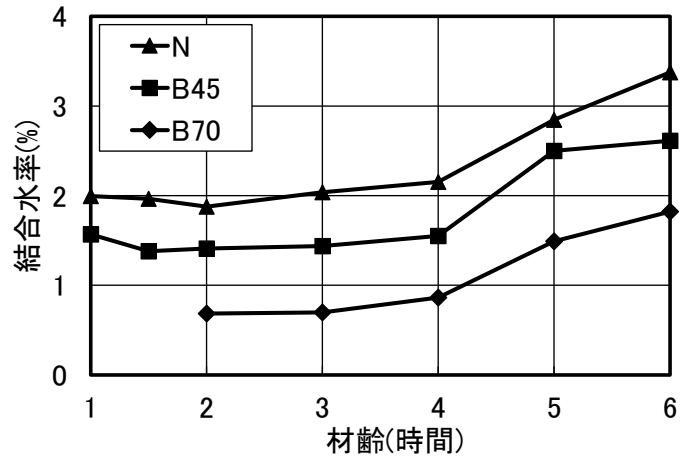


図-4.18 結合水率の測定結果

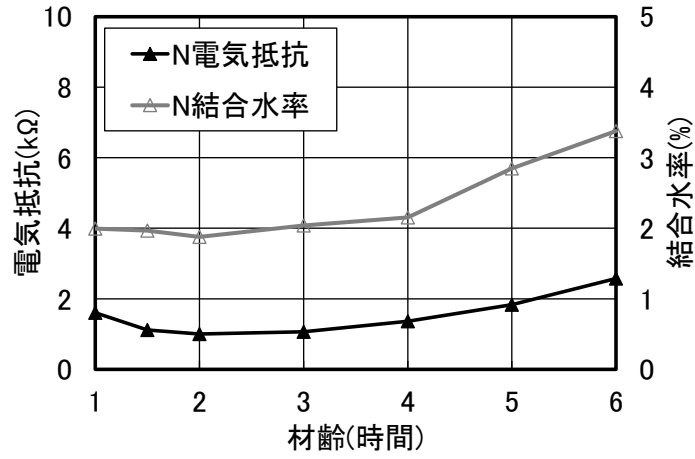


図-4.19 電気抵抗と結合水率の経時変化 (N)

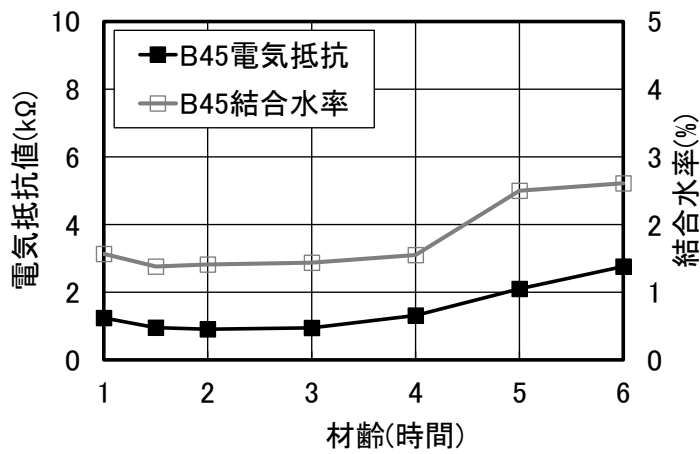


図-4.20 電気抵抗と結合水率の経時変化 (B45)

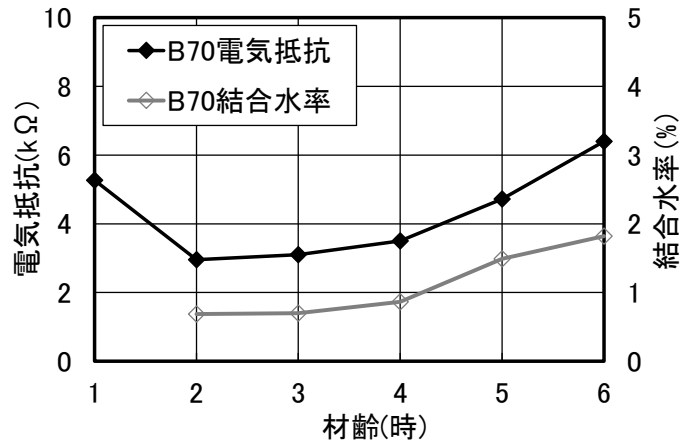


図-4.21 電気抵抗と結合水率の測定結果 (B70)

示した。

図-4.22 に接水後 2 時間以降の電気抵抗と結合水率の関係を示す。電気抵抗と結合水率は BFS 置換率ごとに異なる関係を示したものの直線関係を示し、高い相関がある。したがって、接水から約 2 時間以降の電気抵抗の増加は、水和反応に影響を受けると考えられ、水和反応による水の消費により電気抵抗が大きくなると考えられる<sup>7,8,9)</sup>。

BFS 置換率が異なるセメントペーストの電気抵抗と CH および結合水率の関係は、共に相関があるものの置換率で異なる傾向を示した。この原因については、5 章で検討する。

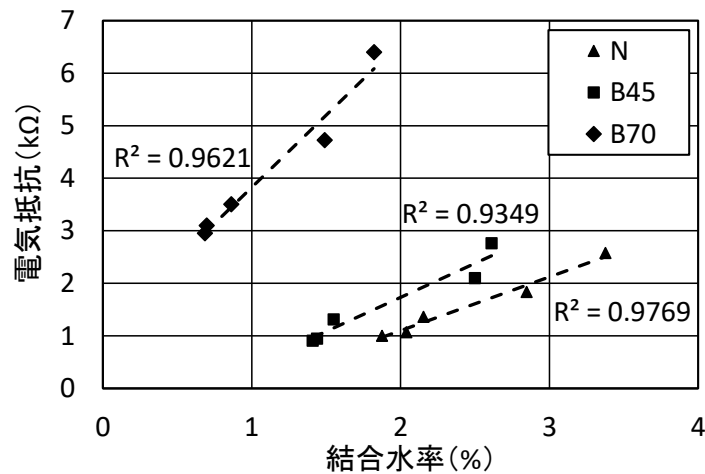


図-4.22 電気抵抗と結合水率の関係

図-3.10 では材齢 28 日までの長期間において計測される電気抵抗と結合水率の間で対数近似曲線での相関が認められた。図-4.17 および図-4.22 では CH 量および結合水率と電気抵抗の間に直線関係が確認された理由として、接水から 2~6 時間の短時間だったことが挙げられる。この結果から電気抵抗は水和の進行を評価しており、電気抵抗の測定結果から結

含水率等の水和の進行を推定できる可能性がある。

以上の結果を整理したものを図-4.23に示す。結果として電気抵抗はセメントの水和反応に影響を受け、 $\text{Ca}^{2+}$ 等のイオンの溶解反応、セメントの水和反応による水分の消費に影響を受ける。接水から2~4時間までは、イオンの溶解により電気が流れやすくなることで電気抵抗が減少し、2~4時間以降は水和反応による水分の消費で水分量が減少するために電気が流れにくくなり、電気抵抗が増加すると考えられる。電気抵抗はコンクリート内の水を評価しており、セメントの溶解反応による $\text{Ca}^{2+}$ イオン濃度の変化や水和反応による水の消費に影響を受けると考えられる。

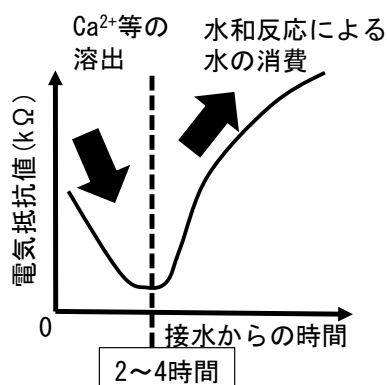


図 4.23 電気抵抗の挙動のイメージ

#### 4.3 配合条件が及ぼす影響

電気抵抗に関する既往の研究は、コンクリート内部にある鉄筋の腐食環境を評価するものが多く、硬化コンクリートに対象としたものが一般的である。したがって、フレッシュコンクリートの配合条件の影響を対象とした研究は少ない。

電気抵抗が粗骨材の量等に影響を受けることは、2章の既往の研究に記載した。図-4.24にコンクリート中の電気の移動イメージを示す。コンクリート内を流れる電流は、基本的に不導体（絶縁体）である粗骨材部分では無く、モルタル部分を流れると考えられる。電気抵抗は水和反応の進行による水分の消費を評価していると考えられるため、水セメント比等の配合条件に影響を受けると考えられる。コンクリートの配合条件が直流四電極法による電気抵抗に及ぼす影響を明らかにするためにモルタルの配合条件が電気抵抗に及ぼす影響について検討した。

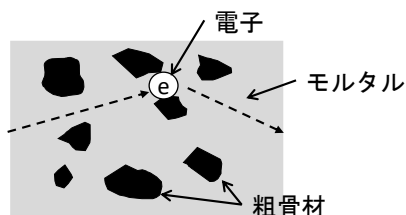


図-4.24 コンクリート中の電子の移動イメージ



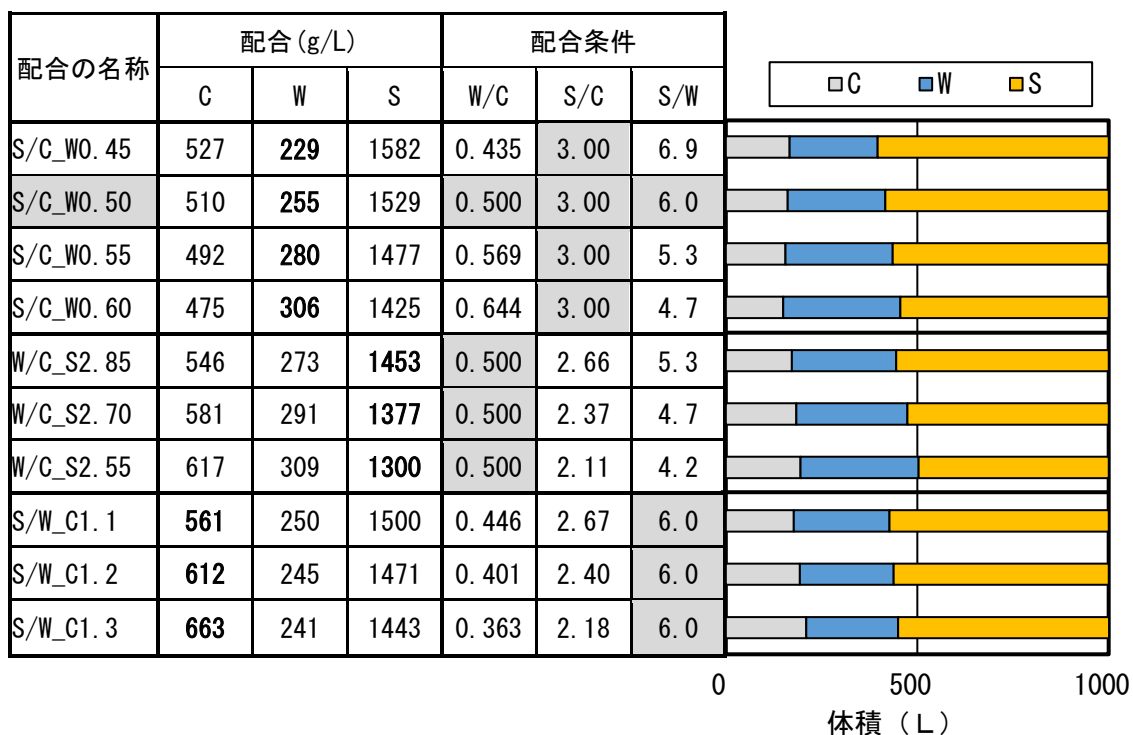


図-4.28 モルタルの配合と体積 (比率一定)

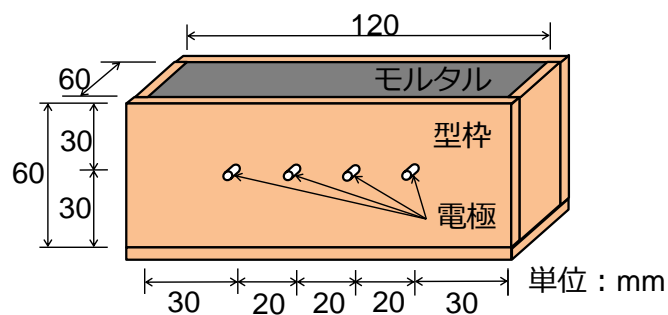


図-4.29 試験体の概略

表-4.3 電気抵抗の計測条件

要因	水準
印加電圧	1V (パルス波)
電極間隔	20mm
電極直径	φ2.6mm
通電深さ	30mm
電極の種類	ステンレスの針金

表-4.3 に電気抵抗の計測条件を示す。印加電圧はフレッシュコンクリートの計測で電気抵抗が小さいため 1V のパルス波を使用した。電極間隔は計測対象がモルタルで粗骨材の影



響を受けないので狭くし、20mmとした。通電深さは試験体中心の30mmとし、電極はステンレスの針金を使用した。

#### 4.3.2 実験結果

図-4.30 に一例として単位セメント量が一定で S/W を変化させたモルタルの電気抵抗の測定結果を示す。横軸の経過時間は、接水からの時間である。各配合の電気抵抗は時間の進行に伴って減少している。また、経過時間 100 分程度で電気抵抗が増加傾向を示しているものもある。この傾向は 3 章に記載したようにセメントからの溶解反応により  $\text{Ca}^{2+}$  等が溶出することと水和反応による水の消費に起因していると考えられる。打設直後の電気抵抗は、C\_S/W4.5 で大きくなっているが、30~100 分までの電気抵抗は、S/W の増加に伴って大きくなる傾向が得られた。打設直後の電気抵抗の変化は練混ぜによる巻き込み空気の上昇や材料分離に伴うブリーディング水の上昇に影響を受けると考えられる。

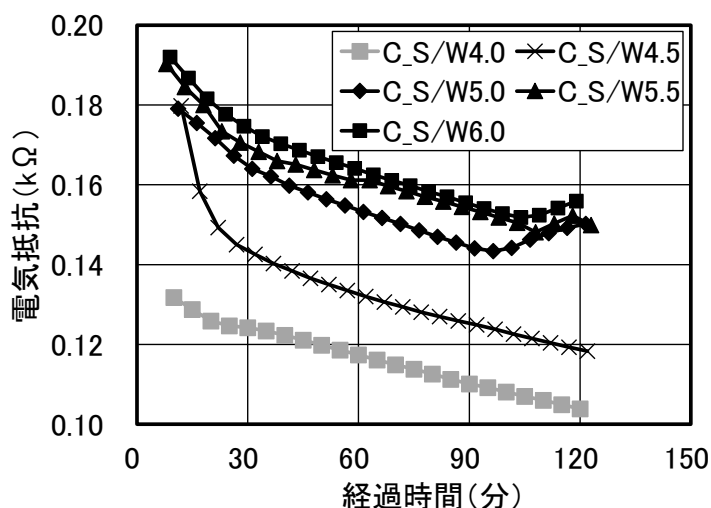


図-4.30 電気抵抗の測定結果

図-4.31 に電気抵抗と S/W の関係を示す。使用した電気抵抗の値は、100 分のデータとした。100 分を選択した理由としては、4.2 挙動メカニズムより電気抵抗が最小値を示す時間がコンダクションカロリメーターによって計測される発熱速度の小さい第 2 段階（誘導期）にあたり、セメントの溶解反応がほぼ終了し、発熱速度の大きくなる第 3 段階（加速期）の前と考えられ、打設直後の材料分離によるブリーディング等の影響が少なくなり比較的安定した電気抵抗の値が得られると考えたためである。図から単位セメント量を一定とし、S/W を変化させた配合の電気抵抗は、S/W が増加するほど大きな値を示し、正の相関が認められた。図中の近似曲線はすべての配合の電気抵抗の値を近似したもので、相関係数も比較的大きな値を示した。

図-4.32 に S/C と電気抵抗の関係を示す。図から特に相関は認められない。電気抵抗が

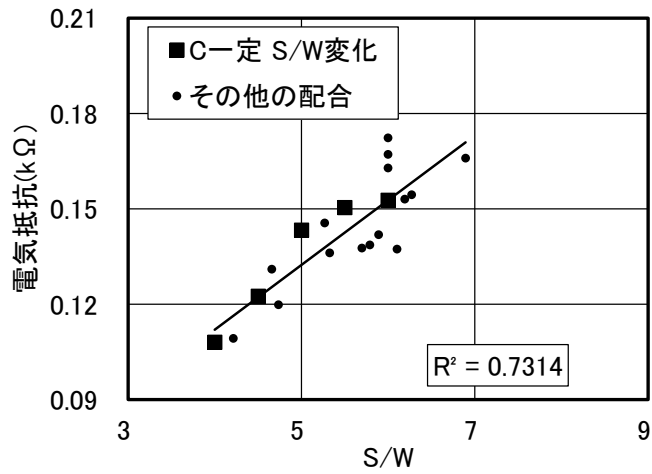


図-4.31 S/W と電気抵抗の関係

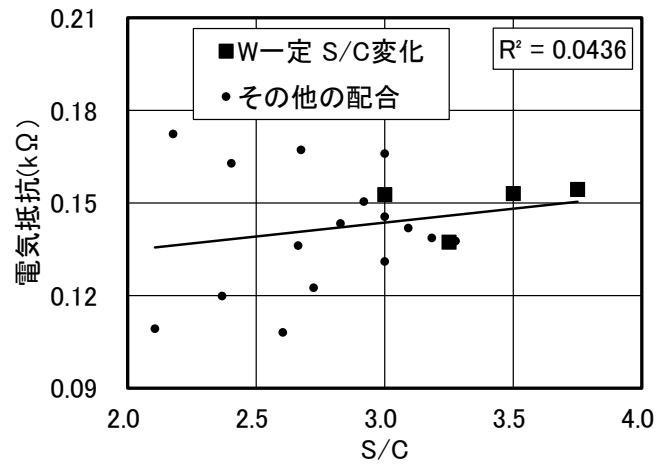


図-4.32 S/C と電気抵抗の関係

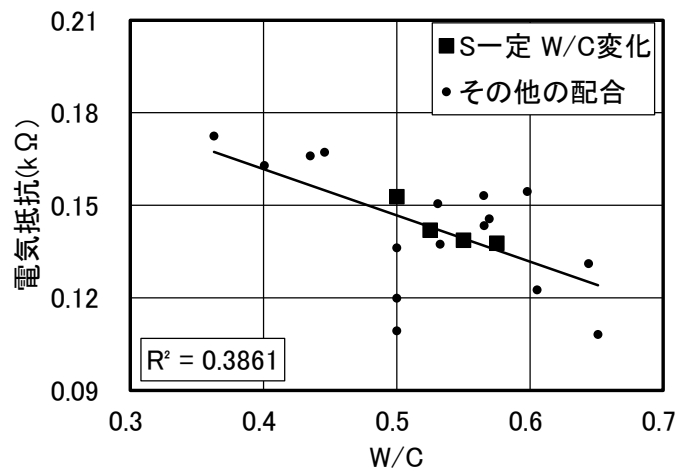


図-4.33 水セメント比と電気抵抗の関係

S/Cに受ける影響は小さいと考えられる。図-4.33に水セメント比と電気抵抗の関係を示す。単位細骨材量を一定とし水セメント比を変化させた電気抵抗の値には負の相関が認められ、全ての配合の電気抵抗の近似曲線も負の相関が認められる。したがって、電気抵抗に水セメント比は影響を及ぼすと考えられるが、S/Wと電気抵抗の関係と比較すると相関係数も低い。

図-4.34に単位セメント量と電気抵抗の関係を示す。図から電気抵抗と単位セメント量は相関が認められない。図-4.35に電気抵抗と単位水量の関係を示す。電気抵抗と単位水量に負の相関が認められる。また、他の図と比較しても相関係数が大きく、相関が良いことが分かる。この傾向はS/C一定で単位水量を変化させた配合と同様の傾向を示しており、電気抵抗は単位水量に影響を受ける。電気抵抗は単位水量が増加すると減少しており、この原因としてモルタルの使用材料の中で導体である水の量が増えることで電気が流れやすくなる

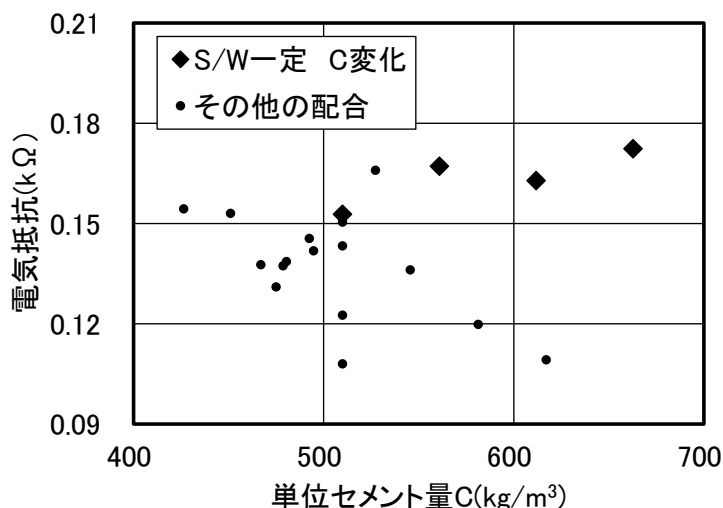


図-4.34 電気抵抗と単位セメント量の関係

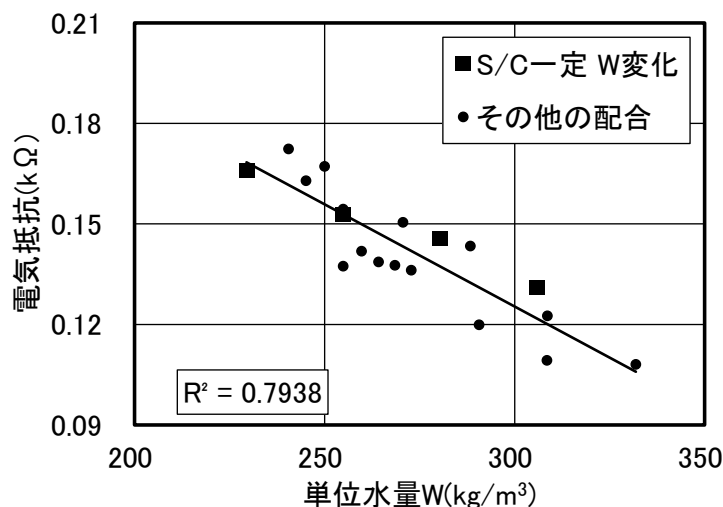


図-4.35 電気抵抗と単位水量の関係

ことに起因すると考えられる。

図-4.36 に電気抵抗と単位細骨材量の関係を示す。電気抵抗と単位細骨材量に正の相関が認められる。この傾向は水セメント比が一定で単位細骨材量を変化させた配合のものと同様の傾向を示しており、電気抵抗は単位細骨材量に影響を受ける。電気抵抗は単位細骨材量が増加すると増加しており、この原因としてモルタルの使用材料の中で不動態（絶縁体）である細骨材の量が増えることで電気が流れにくくなることに起因すると考えられる。しかし、近似直線の相関係数は 0.48 程度と他の条件と比較すると低い。したがって、単位細骨材量は電気抵抗に影響を及ぼすが、その影響は他の配合条件に比較して小さいと考えられる。

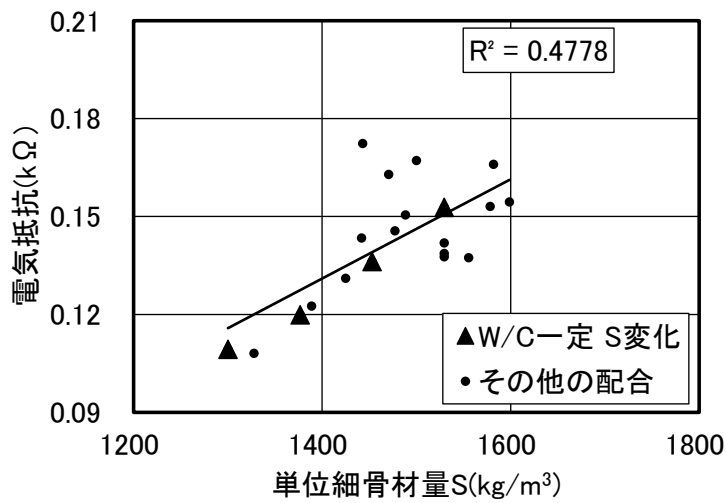


図-4.36 電気抵抗と単位細骨材量の関係

以上の結果から電気抵抗は単位水量、 $S/W$ 、単位細骨材量に影響を受け、特に単位水量と  $S/W$  で良い相関が認められた。電気抵抗は導体である水の量に影響を受け、配合条件の単位水量に強く影響を受ける。さらに不動態（絶縁体）である単位細骨材量にも影響を受け、水と細骨材の比率である  $S/W$  にも影響を受けると考えられる。また、単位セメント量が電気抵抗に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-4.37 に  $S/W$  と電気抵抗の関係のイメージを示す。 $S/W$  が大きくなることで配合中の細骨材量が増え、電子が流れにくくなることにより電気抵抗が大きくなると考えられる<sup>10)</sup>。

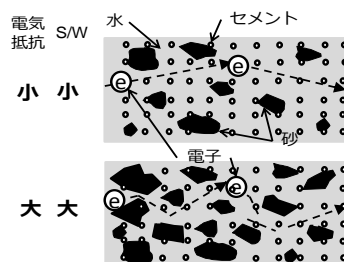


図-4.37  $S/W$  と電気抵抗の関係のイメージ

#### 4.5 まとめ

4章では、直流四電極法により計測される電気抵抗に影響を与える影響因子について検討した。

4.2 では計測される電気抵抗が接水後 2~4 時間程度で最小値を示す現象について原因を検討した。電気抵抗が最小値を示す時間は、コンダクションカロリメーターで測定される発熱速度の誘導期である第 2 段階の時間とほぼ一致することが明らかとなった。

電気抵抗はセメントの水和反応に影響を受け、セメントの  $\text{Ca}^{2+}$ 等のイオンの溶解反応、セメントの水和反応による水分の消費に影響を受ける。接水から 2~4 時間までは、イオンの溶解により電気が流れやすくなることで電気抵抗が減少し、2~4 時間以降は水和反応による水分の消費で水分量が減少するために電気が流れにくくなり、電気抵抗が増加することが考えられる。

接水から約 2~4 時間以降の電気抵抗は水酸化カルシウム量と相関があることが明らかとなった。これは、3章の電気抵抗と結合水率に相関があることの理由の 1 つになると考えられ、電気抵抗を計測することで水和反応の進行を評価できる可能性を示すと考えられる。

4.3 配合条件が及ぼす影響では、モルタルの配合を変化させて電気抵抗の計測を行い、電気抵抗が配合条件の単位水量、細骨材と水の比率である S/W に影響を受け、特に単位水量が電気抵抗に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。この結果は、コンクリートの配合条件における電気抵抗の影響を推定できるだけでなく、電気抵抗がコンクリート内部の水量に大きく影響を受けると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 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強度の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018
- 2) 槇島修, 寺澤正人, 川里麻莉子, 伊代田岳史: コンクリート構造物の導電率測定による躯体内の強度発現の推定法に関する基礎的研究, 土木学会第 69 回年次学術講演会
- 3) 村上拡, 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, p.87-92, 2011.10
- 4) 村上拡, 阿保寿郎, 伊代田岳史: 電気伝導率を用いた新たな凝結管理手法の提案, 土木学会第 66 回年次学術講演会, VI-354, pp.707-708, 2011.9
- 5) セメント協会: わかりやすいセメント化学, セメント協会, pp.37-45, 2014.3
- 6) 原沢蓉子, 亀山敬宏, 伊代田岳史: 消費水分量に着目した高炉セメントの水和反応解明に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.67-72, 2015.7
- 7) 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計測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, 2017.7

- 8) Takehiro Misaka, Takeshi Iyoda : PROPOSAL for EVALUATING THE CURING EFFECT of CONCRETE WITH VARIOUS CURING METHODS USING ELECTRICAL RESISTANCE, The 8th Asia and Pacific Young Researchers and Graduate Symposium, 2017.9
- 9) 三坂岳広, 伊代田岳史 : 電気抵抗を用いた各種養生方法による養生効果評価手法の提案, 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, Vo.17, pp.453-458, 2017.10
- 10) 三坂岳広, 伊代田岳史 : 電気抵抗に影響を及ぼす配合条件の検討および断面修復材の練混ぜ時の単位水量の管理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1275-1280, 2018.7

## 5 強度・劣化に対する抵抗性との相関

3章の結果より、型枠内部のまだ固まらないコンクリートの電気抵抗の計測方法を提案した。また、4章の結果より計測される電気抵抗の影響因子が明らかとなった。

本章では、電気抵抗の計測により養生終了時期を判断するために、配合条件や使用材料を変化させたコンクリート供試体を作製し、計測される電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性との相関について検討し、その相関が配合条件や使用材料によってどのように変化するかについて考察する。その後、計測される電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性と相関がある理由について検討する。

### 5.1 電気抵抗と強度・劣化に対する抵抗性の関係

#### 5.1.1 実験概要

試験項目は電気抵抗の計測、圧縮強度試験、促進中性化試験とした。電気抵抗の計測で使用する供試体は、3.2.6 で使用した供試体と同様とし、100×100×400 mmの角柱供試体を用いた。

##### (1) 配合および養生条件

供試体に使用したコンクリートの計画配合を表-5.1に示す。配合は水結合材比を45、55、65%と変化させた。セメントの種類は、OPCと高炉セメントB種[BB]およびC種[BC]とした。BFSの置換率は、BBで40%、BCで70%である。単位水量は、すべての配合で172kg/m<sup>3</sup>で一定とした。

表-5.1 コンクリートの計画配合

略号	セメントの種類	W/B (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	OPC	BFS	S	G
N45	OPC	45	46	12.0	4.5	172	382	—	808	971
N55		55	48				313	—	869	968
N65		65	50				265	—	928	949
BB	BB	55	48				188	125	868	965
BC	BC		50				92	219	903	927

図-5.1に養生方法の概略(圧縮強度試験用)を示す。すべての供試体の型枠は、材齢1日に脱型した。供試体の養生期間は1、3、5、7、28、91日に設定し、養生終了時に圧縮強度を測定した。また、各養生期間の供試体の材齢28日および材齢91日でも圧縮強度を測定した。促進中性化試験で使用した供試体の養生は、封かん養生期間を1、3、5、7、28日とした。

養生 期間	材齢 (日)											
	0	1	・	3	・	5	・	7	~	28	~	91
1日	■	■ 圧	□	□	□	□	□	□	□	■ 圧	□	■ 圧
3日	■	■	■	■ 圧	□	□	□	□	□	■ 圧	□	■ 圧
5日	■	■	■	■	■	■ 圧	□	□	□	■ 圧	□	■ 圧
7日	■	■	■	■	■	■	■	■ 圧	□	■ 圧	□	■ 圧
28日	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■ 圧	□	■ 圧
91日	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■ 圧

■ : 封かん養生 (20°C)                      □ : 屋内暴露 (20°C, RH60%)  
 ■ : 脱型    圧 : 圧縮強度試験

図-5.1 養生方法の概略 (圧縮強度試験用)

(2) 電気抵抗の計測条件

表-5.2 に電気抵抗の計測条件を示す。電極間隔は 40mm, 電極直径は  $\Phi 3.0$  mm, 通電深さは 30 mm, 電極には鉄の針金を使用した。

表-5.2 電気抵抗の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V (パルス波)
電極間隔	40mm
電極直径	$\phi 3.0$ mm
通電深さ	30mm
電極金属	鉄の針金

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108:2018 に準拠して行い,  $\Phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を用いた。圧縮強度試験の試験材齢は, 型枠脱型時, 材齢 28 日および 91 日とし, 各養生を行った供試体の脱型時強度, 材齢 28 日の圧縮強度, 長期材齢である 91 日強度を求めた。

(4) 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153:2012 に準拠して行い, 供試体に  $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱供試体を用いて中性化深さ測定面以外をアルミテープで覆い二酸化炭素の侵入を防いだ。また, 測定面は各種養生期間中にラップフィルムで覆うことにより, 封かん養生とした。各封かん養生期間の供試体は, 材齢 56 日まで恒温恒湿室 (温度:  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 相対湿度:  $60 \pm$



5%) の中に静置して乾燥させ、供試体の含水状態を統一した。促進中性化の開始材齢は、材齢 56 日とした。試験結果は、促進材齢 28 日の中性化深さから算出した中性化速度係数で結果を示した。

### 5.1.2 実験結果

直流四電極法を用いた養生終了時期判定手法を提案するために養生終了時の電気抵抗と圧縮強度および中性化速度係数の関係について検討を行った。

#### (1) 電気抵抗の計測結果

図-5.2 に水セメント比ごとの電気抵抗の測定結果を示し、図-5.3 に BFS 置換率ごとの封かん養生期間中の電気抵抗計測結果を示す。どちらの結果も供試体は封かん養生期間中に計測を行ったものである。電気抵抗は材齢の進行に伴って増加する傾向を示し、若材齢でその増加量は大きく、材齢の進行に伴って増加量は小さくなっていった。この傾向は 3 章の結果と同様である。

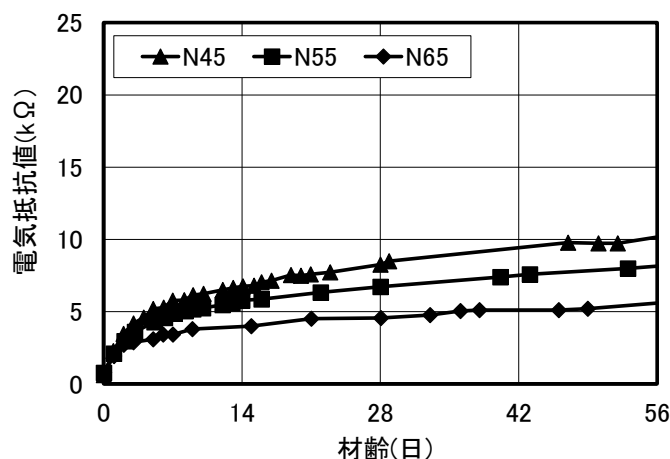


図-5.2 電気抵抗 (水セメント比)

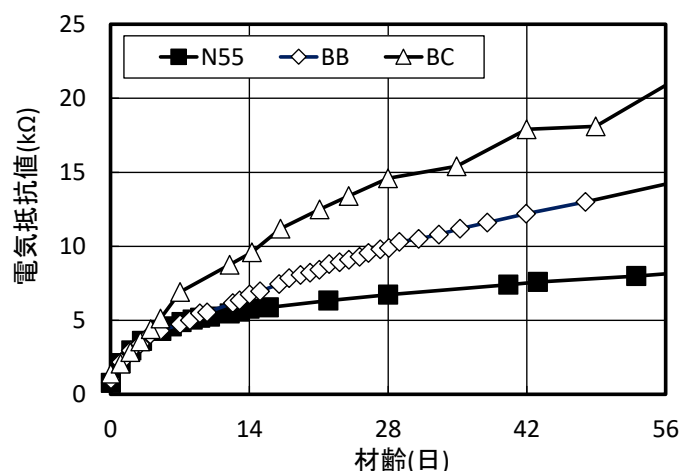


図-5.3 電気抵抗 (BFS 置換率)

水セメント比に着目すると材齢 3 日までの若材齢で同様の値を示していたが、材齢の進行に伴って水セメント比の小さいものほど電気抵抗の値が大きくなった。この原因として、コンクリートの単位水量は各水セメント比で一定となっており、水セメント比の小さなコンクリートほどセメントの使用量が多く、水セメント比の小さなものほど水和反応に使用される水の量が多くなる。水セメント比の小さなコンクリートは、材齢の進行に伴って水和反応による水の消費で内部の水分量が少なくなるため電気抵抗が大きな値を示したと考えられる。また、水セメント比の小さいコンクリートほど水和反応によりセメント硬化体組織が緻密化する。この緻密化により空隙の連続性が低下することで電気が流れにくくなり、電気抵抗が大きくなることも考えられる。

BFS 置換率に着目すると電気抵抗は材齢 3 日程度まで同程度の値を示しているが、材齢の進行に伴って異なる値を示し、BFS 置換率が大きなものほど電気抵抗の値が大きくなった。

佐藤らの既往の研究<sup>1)</sup>では、フライアッシュを用いたコンクリートとモルタルで電気抵抗率の計測を行い、同様の傾向を確認している。また、計測される電気抵抗の値が大きくなること理由として、フライアッシュを使用したコンクリート中の細孔溶液のイオン強度が低下することにより電気抵抗率が大きくなるとしている。また、高炉セメントを用いた場合に水和反応による水分消費量が OPC と比較すると大きくなる<sup>2)</sup>ことが影響を及ぼした可能性や、BB を用いたコンクリートは OPC を用いたものと比較して緻密なセメント硬化体組織を形成する<sup>3)</sup>ため、空隙の連続性が低下することなどが考えられる。

## (2) 圧縮強度試験および促進中性化試験結果

図-5.4~図-5.6 に水セメント比ごとの供試体の圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は、水セメント比で大きさが異なるものの養生期間に影響を受け、養生期間が短いほど材齢 91 日の長期強度が低下した。特に 1 日養生の圧縮強度は小さな値を示し、材齢 28 日および 91

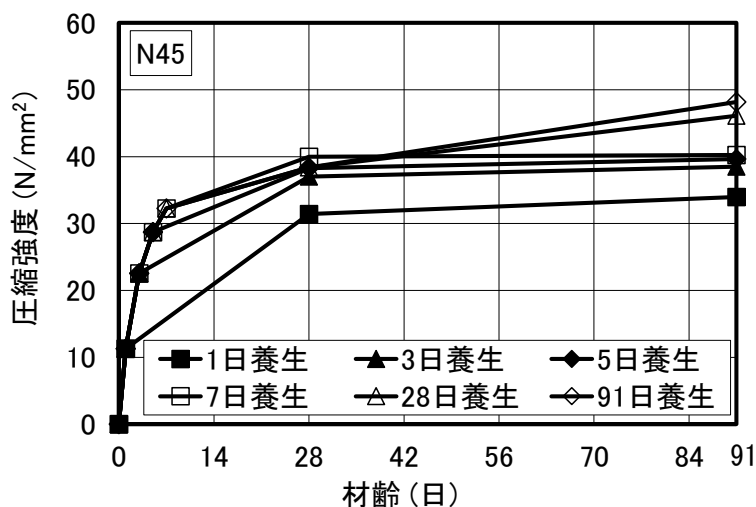


図-5.4 圧縮強度試験結果 (N45)

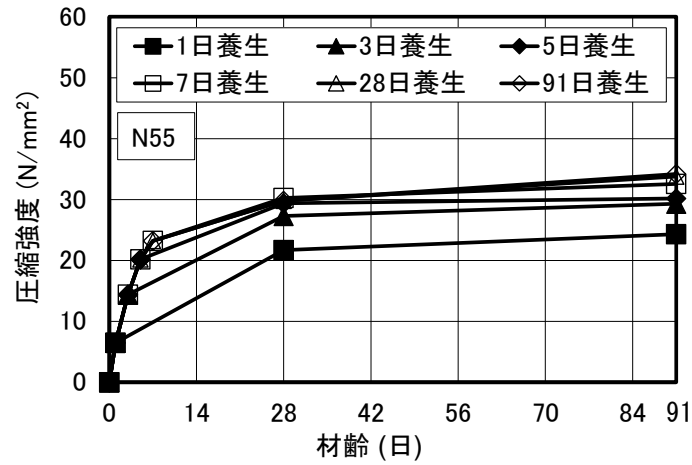


図-5.5 圧縮強度試験結果 (N55)

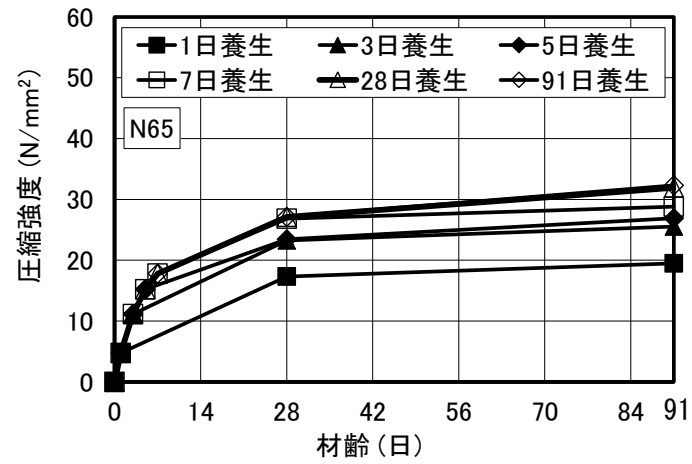


図-5.6 圧縮強度試験結果 (N65)

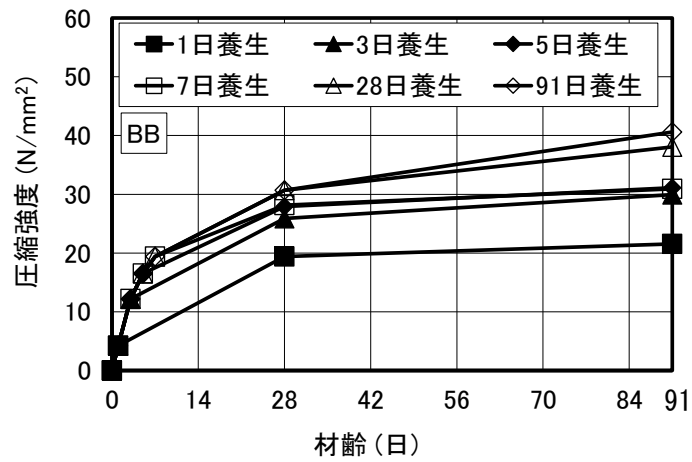


図-5.7 圧縮強度試験結果 (BB)

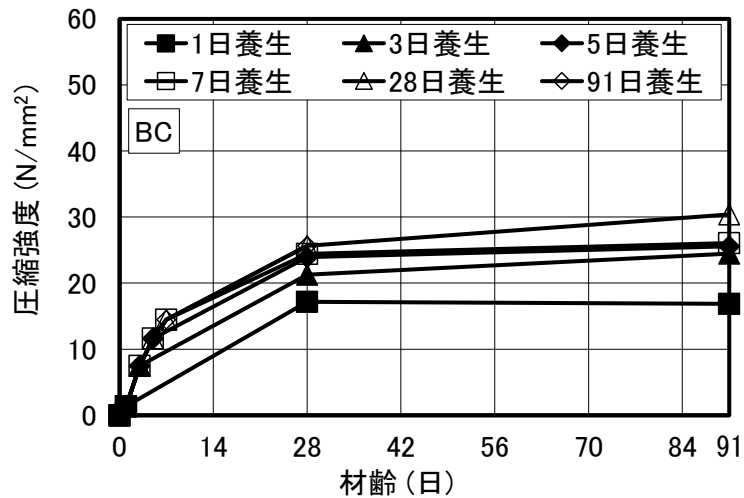


図-5.8 圧縮強度試験結果 (BC)

日の長期強度も小さくなり、既往の研究<sup>4)</sup>と同様の傾向を示した。

コンクリートの圧縮強度の発現は、養生期間に依存し、外部環境への水分の逸散により水分が不足した場合に水和反応が阻害されるため、圧縮強度が低下したと考えられる。また、この圧縮強度の低下は、材齢91日でも確認され、長期強度にも影響を及ぼした。

図-5.7および図-5.8にBFS置換率ごとの圧縮強度を示す。圧縮強度はBFSの置換率により大きさが異なるものの養生期間に影響を受け、養生期間が短いほど材齢91日の長期強度が低下した。BCの1日養生の圧縮強度は同じ水結合材比の圧縮強度の中で最も小さな値を示した。

図-5.9に水セメント比ごとの中性化速度係数を示し、図-5.10にBFS置換率ごとの中性化速度係数を示す。中性化速度係数は、促進材齢4週の促進中性化試験結果から算出され

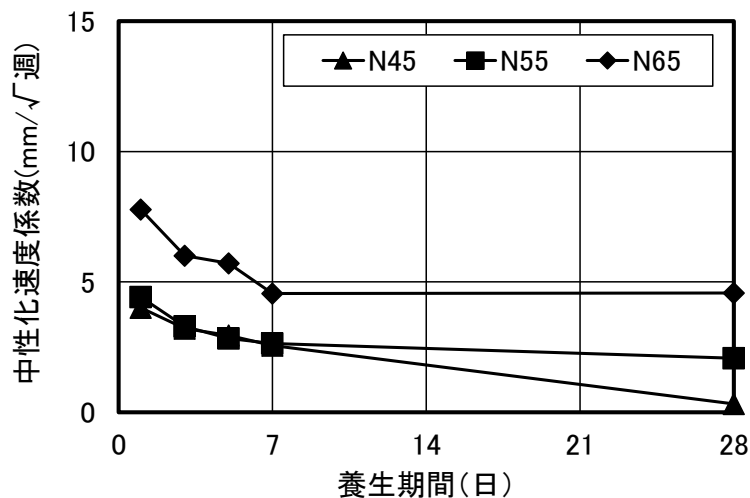


図-5.9 中性化速度係数 (水セメント比)

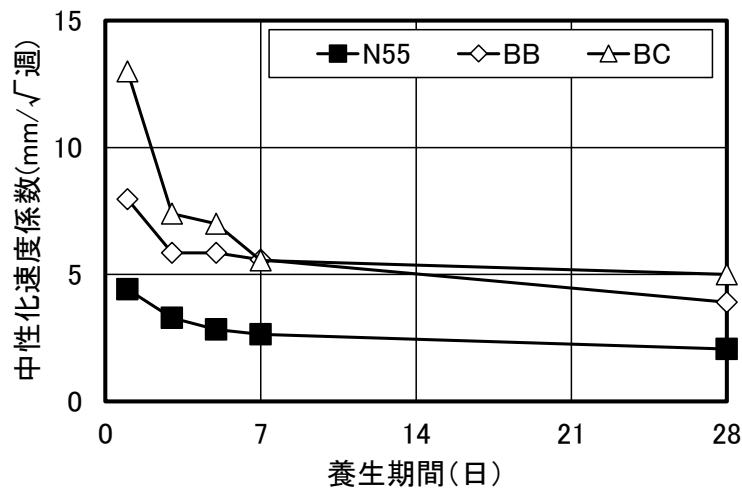


図-5.10 中性化速度係数 (BFS 置換率)

たものである。中性化速度係数は養生期間が短くなると大きな値を示し、中性化抵抗性が低くなった。水セメント比に着目すると水セメント比が大きなものほど中性化速度係数が大きくなり、中性化抵抗性が低い結果となった。BFS 置換率に着目すると BFS の置換率が大きくなるほど中性化速度係数は大きくなり、一般的な結果となった。また、中性化速度係数は養生期間が短くなるほど大きな値を示し、養生期間 1 日の値は大きな値を示した。特に BC に関しては、全体的に中性化速度係数が大きく、N55 の 2 倍程度の値となっている。さらに、BC の養生期間が中性化速度係数に与える影響も大きくなった。

養生期間が圧縮強度や中性化速度係数に及ぼす影響は、養生期間が短いとコンクリート中の水分の逸散による乾燥により、表層コンクリートの水和反応が阻害されたことが原因と考えられる。BFS の置換率が大きくなると中性化速度係数が大きくなる傾向については、既往の研究<sup>5)</sup>より、セメント量が減少することにより水酸化カルシウム量が減少すること、C-S-H の C/S 比が低下して水和生成物に変化すること等が原因として挙げられる。BB や BC が養生期間の影響を強く受けることは、既往の研究<sup>6,7)</sup>でも同様の傾向が得られている。原因としては、N55 と比較して若材齢水和反応が遅く、セメント硬化体組織が緻密化する前に乾燥による水和反応の阻害を受けたことなどが挙げられる。

### (3) 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係

養生の終了を判断するためには、養生終了時に計測される電気抵抗からコンクリートの圧縮強度等の物性値を推定できる必要がある。

図-5.11 に N55 の養生終了時期の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。図-5.5 の養生終了時の圧縮強度を縦軸とし、図-5.2 の電気抵抗を横軸とした。これにより養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係を作成した。図から養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係に相関が認められ、線形関係を示した。したがって、養生終了時の電気抵抗を得ることで養生終了時の圧縮強度を推定できる可能性<sup>8,9,10,11)</sup>がある。この結果は、実構造物の電

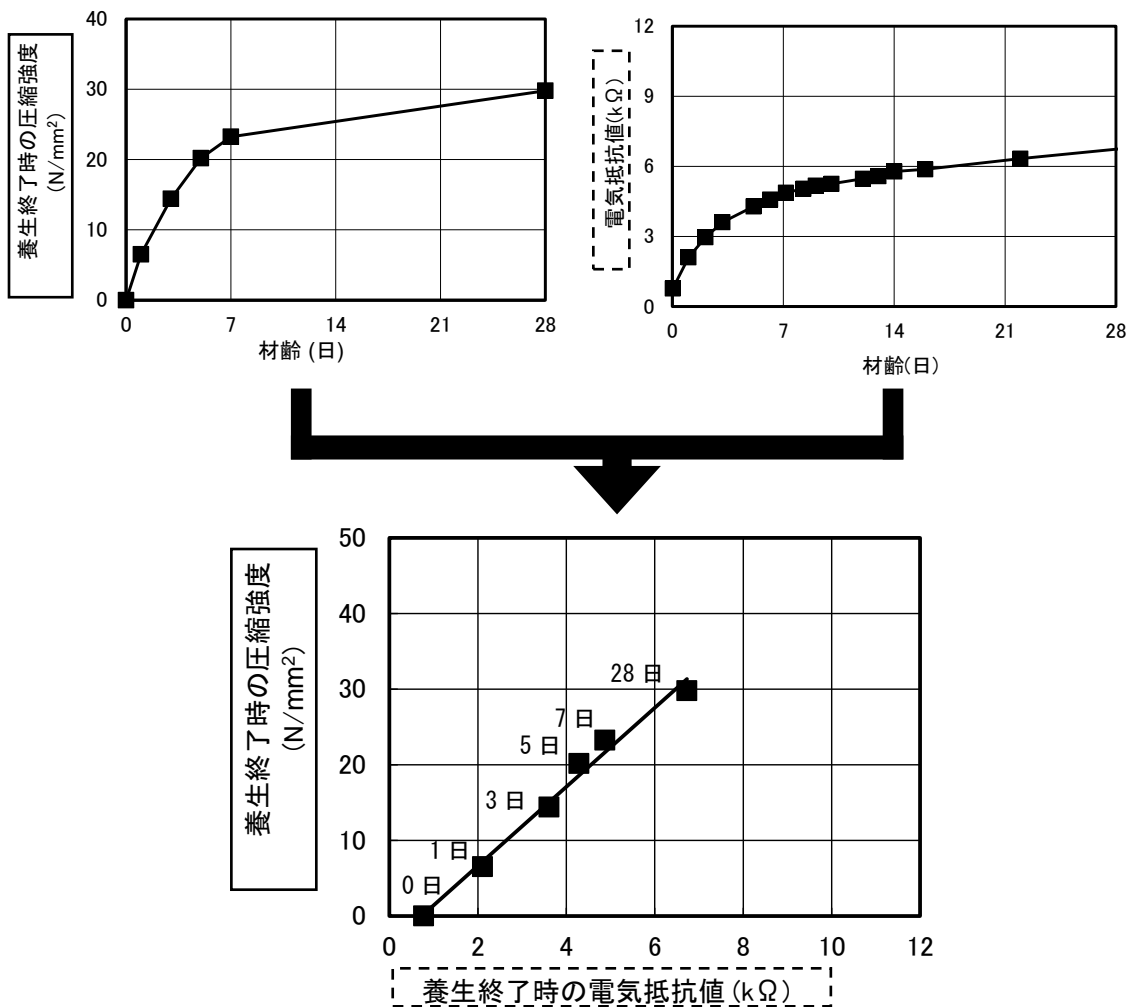


図-5.11 養生終了時期の圧縮強度と電気抵抗の関係 (N55)

電気抵抗を計測することで、型枠内部で養生期間中のコンクリートの圧縮強度を推定できる可能性を示しており、型枠および支保工の取り外しの判断等に使用できる可能性がある。

養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係が水セメント比や BFS 置換率の変化でどのように変化するかについて検討を加えた。水セメント比の異なるコンクリートの養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-5.12 に示す。図から養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗との間に相関関係が認められ、水セメント比の異なるコンクリートでもほぼ同じ傾きの一本の直線関係を示している<sup>9,10,11)</sup>。

4.3 配合条件が及ぼす影響では、計測される電気抵抗は単位水量に影響を受けることが明らかとなっている。今回の実験で用いた水セメント比の異なるコンクリートの単位水量は、 $172 kg/m^3$  で一定となっている。したがって、この結果は、養生期間中のコンクリートの電気抵抗を測定することにより、単位水量が一定の条件ならば、水セメント比の大小によらず電気抵抗計測時の強度が推定できると考えられる。

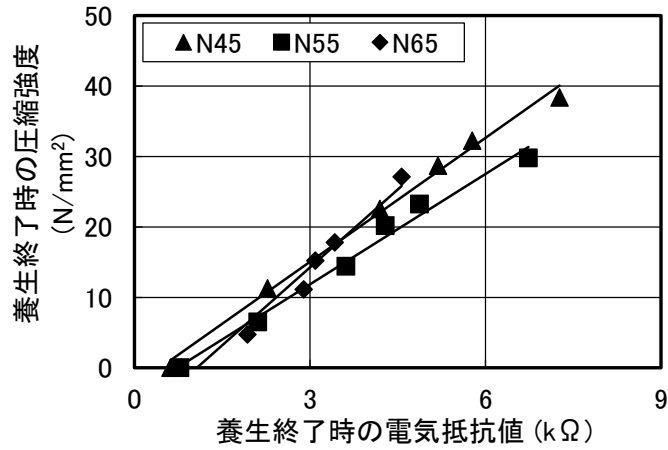


図-5.12 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係（水セメント比）

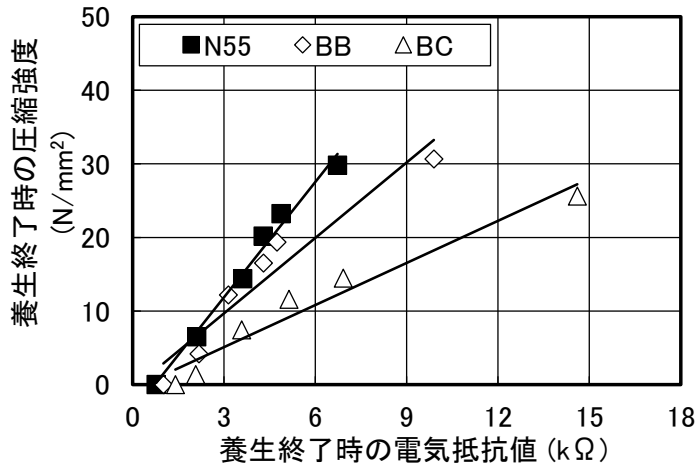


図-5.13 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係（BFS 置換率）

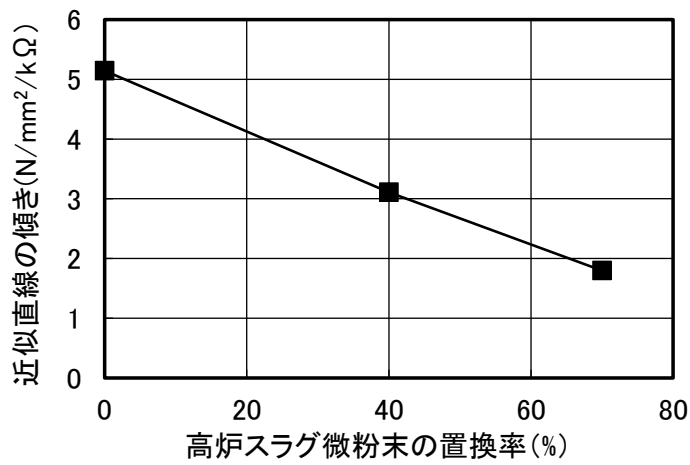


図-5.14 近似直線の傾き（BFS 置換率）

BFS 置換率が異なるコンクリートの養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-5.13 に示す。電気抵抗と養生終了時の圧縮強度の関係は、BFS の置換率ごとに異なる傾向を示したものの直線関係を示した<sup>9,10,11)</sup>。これらの結果は直流四電極法による電気抵抗を用いることで電気抵抗から圧縮強度を推定できる可能性を示している。これは、計測される電気抵抗から圧縮強度を推定することで、表-1.2 のコンクリート標準示方書[施工編]に記載されている型枠および支保工を取り外してよい時期のコンクリート圧縮強度の参考値を用いて、型枠および支保工を取り外す判断ができる可能性がある。また、養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係は、BFS 置換率によって近似直線の傾きが異なる事が明らかになった。

近似直線の傾き (BFS 置換率) を図-5.14 に示す。近似直線の傾きは、置換率の増加に伴って減少しており、線形関係を示している。この結果から、BFS の置換率が異なるセメントを使用しても養生終了時の圧縮強度推定式を概ね作成できる可能性が示された。

#### (4) 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

養生の終了を判断するためには、実構造物のコンクリートにおける材齢 28 日の圧縮強度が設計強度を満たしていることを推定できることが理想である。したがって、養生終了時に計測される電気抵抗から材齢 28 日の圧縮強度を推定することを試みた。先ほどの図-5.11 と同様の作成手順で材齢 28 日の圧縮強度と電気抵抗の関係を作成した。また、材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係が、配合条件や使用材料により、どのように変化するのかについて検討を行った。

図-5.15 に N55 の材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。養生終了時の電気抵抗が大きいほど材齢 28 日の圧縮強度が大きくなり、養生終了時の電気抵抗と材齢 28 日の圧縮強度の間に相関関係が認められた。

この図を用いることにより、実際の現場において養生終了時の電気抵抗を計測することで、養生終了後に温度 20℃、相対湿度 60%の環境でコンクリートが乾燥した際に将来的に発現すると予測される材齢 28 日の圧縮強度を推定できる可能性が示された<sup>9,10,11)</sup>。この結

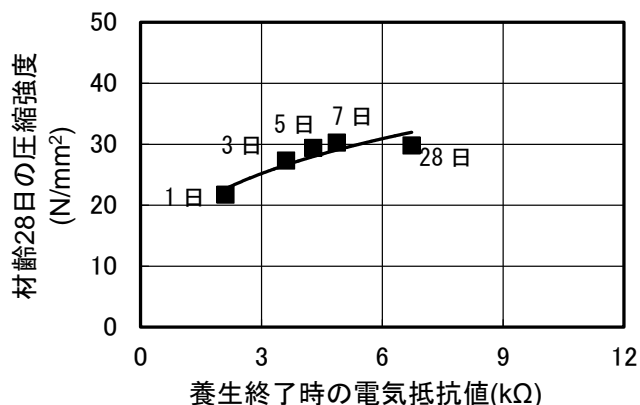


図-5.15 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係 (N55)



果は、実構造物のコンクリートに要求される材齢 28 日の圧縮強度から養生の終了を判断できる可能性を示している。

図-5.16 に材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係（水セメント比）を示し、図-5.17 に材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係（BFS 置換率）を示す。どちらの図も養生終了時の電気抵抗と材齢 28 日の圧縮強度の間に相関関係が認められた。

水セメント比に着目すると、各近似曲線は水セメント比ごとに異なる傾向を示した。したがって、材齢 28 日の圧縮強度を推定するためには、水セメント比ごとに検量線を作成する必要があると考えられる。BFS 置換率に着目すると置換率が大きくなるほど近似曲線が右下側に移動した。したがって、材齢 28 日の圧縮強度を推定するためには、BFS 置換率ごとに検量線を作成する必要があると考えられる。

このように材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を得ることで、材齢 28 日の圧縮強度から養生終了時の電気抵抗を設定することで、養生終了時期の判定ができる

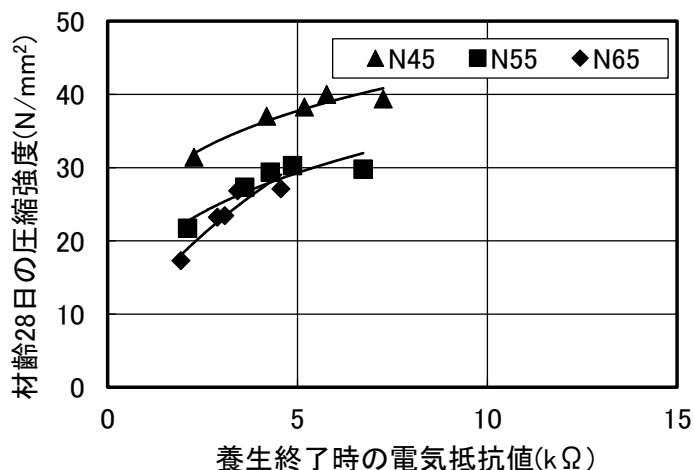


図-5.16 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係（水セメント比）

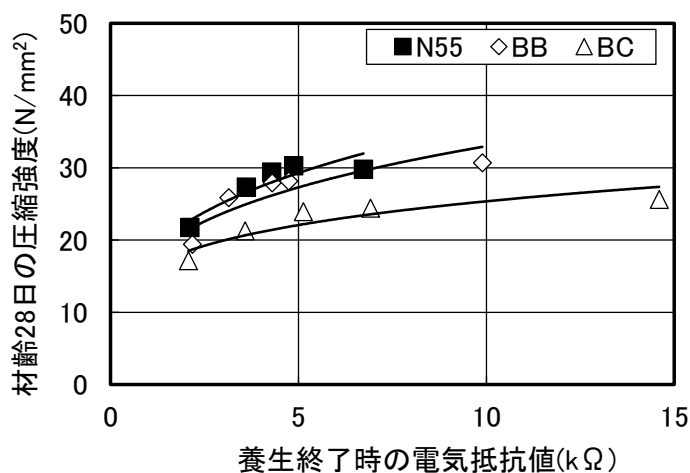


図-5.17 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係（BFS 置換率）

可能性がある。

図-5.18 に図-5.16 の累乗近似曲線の係数と指数（水セメント比）を示し、図-5.19 に図-5.17 の累乗近似曲線の係数と指数（BFS 置換率）を示す。これらの図を用いることで、水セメント比や BFS の置換率が異なるコンクリートにおいても、累乗近似曲線の係数および指数を概ね推定でき、材齢 28 日の圧縮強度と電気抵抗の関係を推定できる可能性が示された。

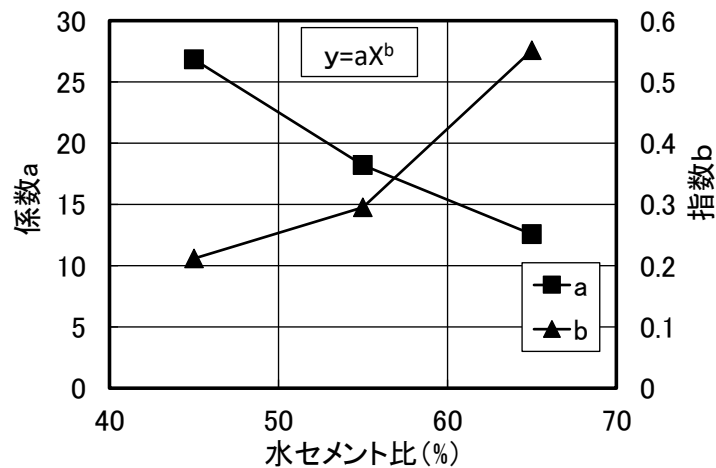


図-5.18 累乗近似曲線の係数および指数（水セメント比）

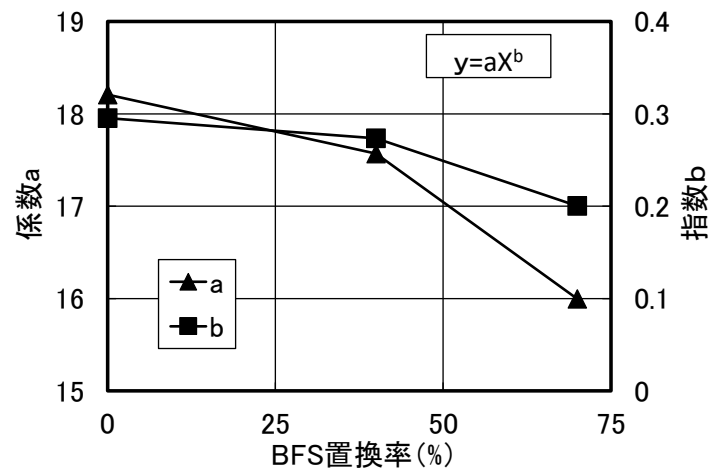


図-5.19 累乗近似曲線の係数および指数（BFS 置換率）

#### (5) 材齢 91 日の圧縮強度と電気抵抗の関係

構造物のコンクリートの最終的な強度を把握できれば、供用後に補修や補強を行う際の構造解析や補修材料の選定等で有用なデータになると考えられる。また、養生の終了を判断するためには、実構造物のコンクリートの最終的な強度が推定でき、構造物コンクリートに要求される圧縮強度が担保されたことが確認できた方が良い。

先ほどの図-5.11と同様の作成手順で材齢91日の圧縮強度と電気抵抗の関係を作成した。図-5.20にN55の材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。図から材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗に概ね相関が認められた<sup>9,10,11)</sup>。したがって、養生終了時の電気抵抗を得ることで、養生終了後に温度20℃、相対湿度60%の環境でコンクリートが乾燥した際に将来的に発現すると予測される材齢91日の圧縮強度を推定できる可能性が示された。

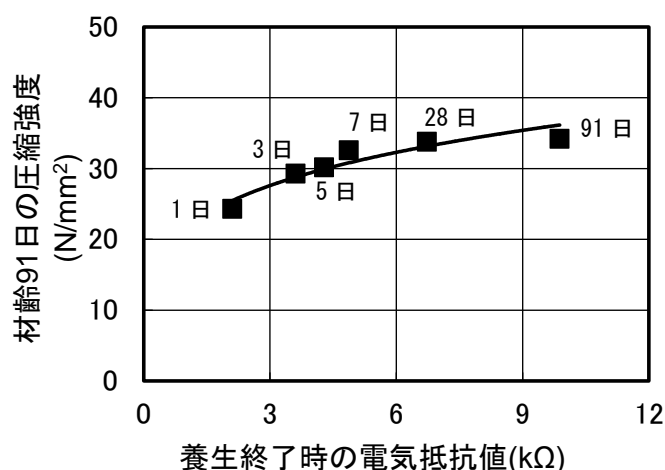


図-5.20 材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係 (N55)

上記の材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係が、水セメント比やBFS置換率により、どのように変化するのかについて検討を行った。

材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係(水セメント比)を図-5.21に示し、材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係(BFS置換率)を図-5.22に示す。ど

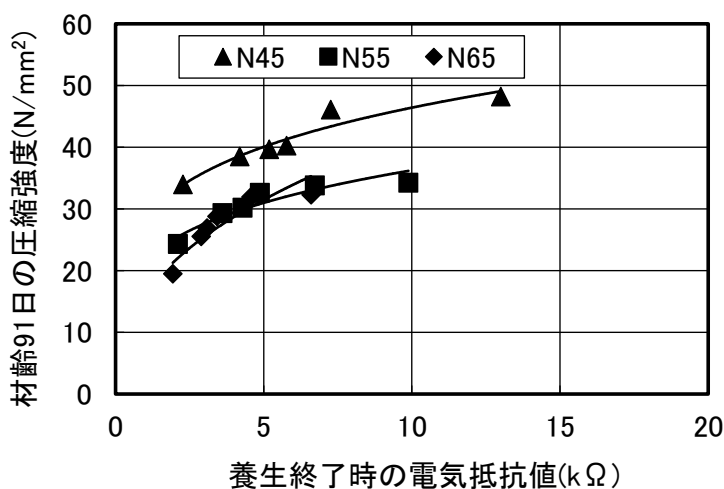


図-5.21 材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係(水セメント比)

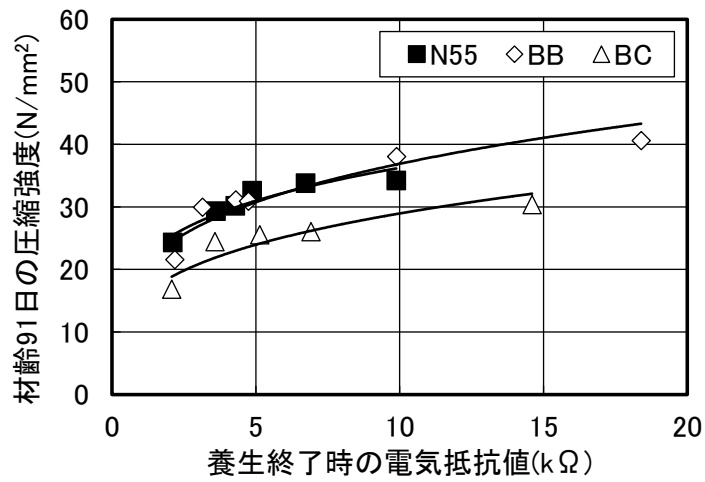


図-5.22 材齢91日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係 (BFS置換率)

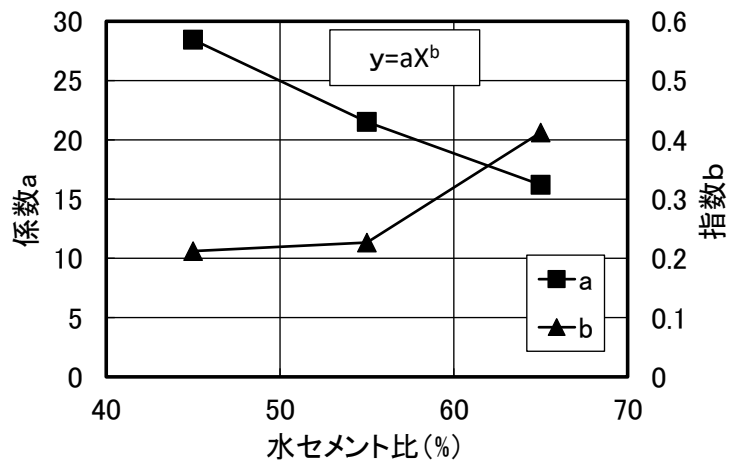


図-5.23 累積近似曲線の係数および指数 (水セメント比)

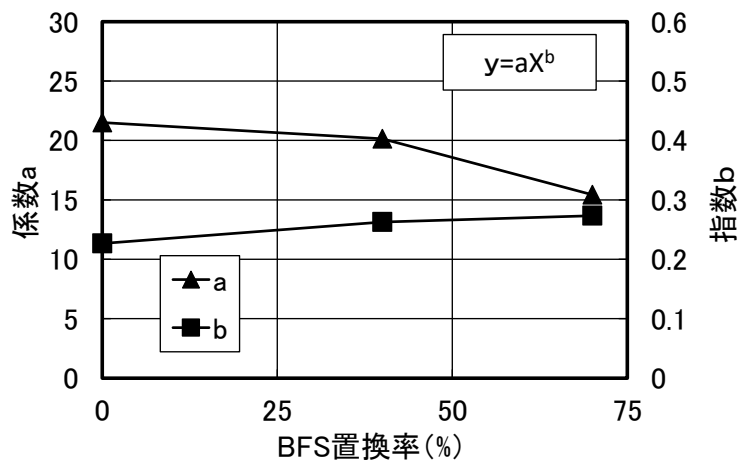


図-5.24 累積近似曲線の係数および指数 (BFS置換率)

これらの図も養生終了時の電気抵抗値が大きくなるほど材齢 91 日の圧縮強度が大きくなっており、養生終了時の電気抵抗と材齢 91 日の圧縮強度の間に相関関係が認められた<sup>9,10,11)</sup>。

この図を用いることにより、コンクリート構造物に要求される長期強度から養生終了時の電気抵抗を設定することで、養生終了時期の判定ができる可能性がある。

図-5.23 に図-5.21 の累乗近似曲線の係数および指数（水セメント比）を示し、図-5.24 に図-5.22 の累乗近似曲線の係数および指数（BFS 置換率）を示す。これらの図を用いることで、水セメント比や BFS の置換率が異なるコンクリートにおいても、材齢 91 日の圧縮強度と電気抵抗の関係を概ね推定できる可能性が示された。

養生終了時の電気抵抗と各種圧縮強度には相関関係があり、その関係式は、水セメント比や BFS 置換率が変化しても、概ね推定をすることが可能と考えられる。

#### (6) 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係

2 章に記載したように養生が強度に及ぼす影響に対し、耐久性に関わる物質移動抵抗性に及ぼす影響は大きいとされている。したがって、養生終了の判断において中性化速度係数等の劣化に対する抵抗性を把握することができれば、設計で設定された耐久性を確保することに役立つと考えられる。

先ほどの図-5.11 と同様の作成手順で中性化速度係数と電気抵抗の関係を作成した。図-5.25 に中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。図から中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗に相関関係が認められ、養生終了時の電気抵抗が大きくなると中性化速度係数が小さくなる傾向が確認できる。この図を用いることにより、養生期間中の電気抵抗を計測することで、中性化速度係数を推定できる可能性がある<sup>9,10,11)</sup>。また、コンクリート構造物に要求される中性化速度係数から養生終了時の電気抵抗を設定することで、養生終了時期の判定ができる可能性がある。

中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係が、配合条件や使用材料により、どのように変化するのかについて検討を行った。

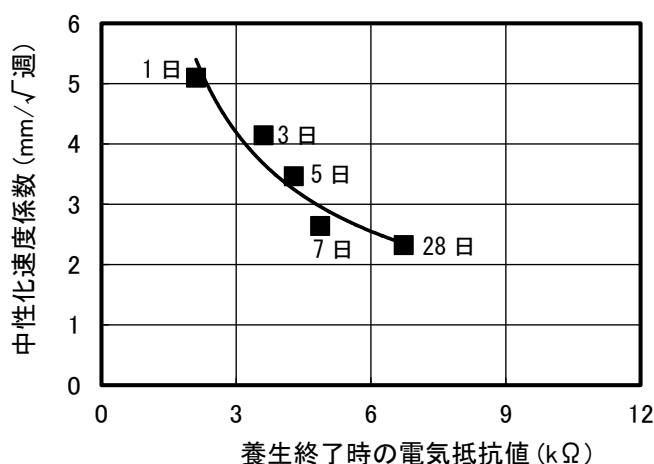


図-5.25 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗

図-5.26 に中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係（水セメント比）を示し、図-5.27 に中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係（BFS 置換率）を示す。図から中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗に相関関係が認められ、養生終了時の電気抵抗が大きくなると中性化速度係数が小さくなる傾向が確認できる。この図を用いることにより、養生期間中の電気抵抗を計測することで、中性化速度係数を推定できる可能性がある<sup>9,10,11)</sup>。また、コンクリート構造物に要求される中性化速度係数から養生終了時の電気抵抗を設定することで、養生終了時期の判定ができる可能性がある。

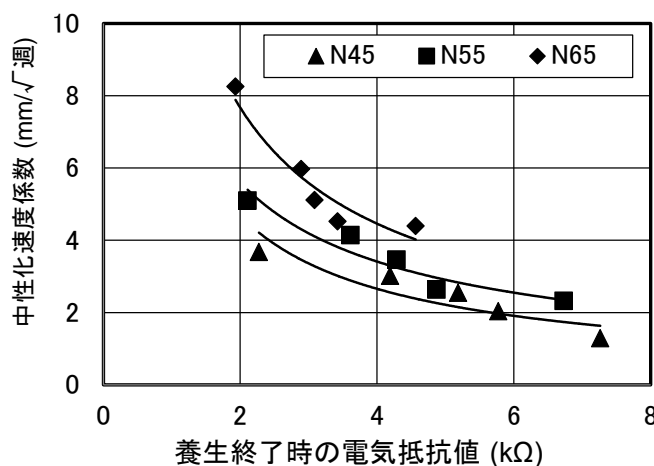


図-5.26 中性化速度係数と養生終了時の圧縮強度（水セメント比）

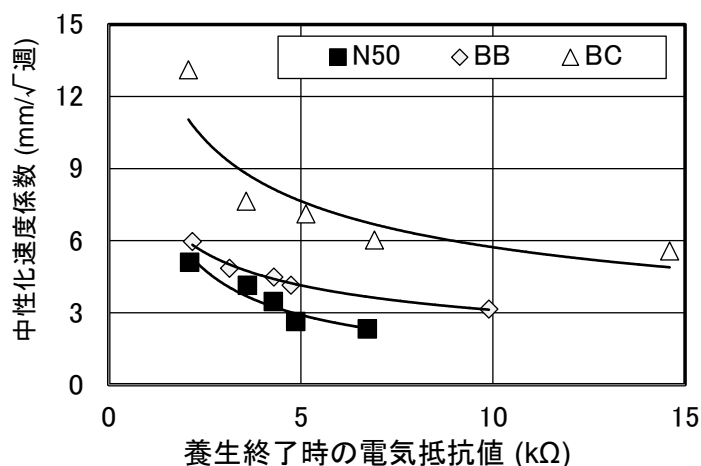


図-5.27 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係（BFS 置換率）

図-5.28 に累乗近似曲線の係数および指数（水セメント比）を示し、図-5.29 に累乗近似曲線の係数および指数（BFS 置換率）を示す。これらの図を用いることで、水セメント比や BFS の置換率が異なるコンクリートにおいても、中性化速度係数と電気抵抗の関係式を概ね推定できる可能性が示された。電気抵抗と各種強度および中性化速度係数の関係は、配

合条件や使用材料によって変化する。また、この関係の変化は概ね推定をすることが可能である。

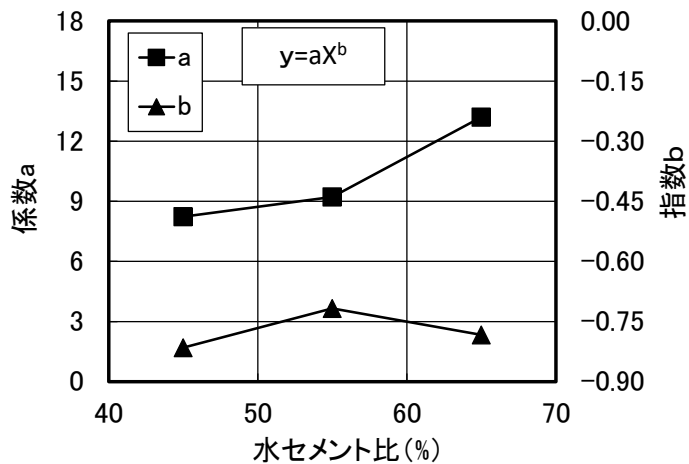


図-5.28 累積近似曲線の係数および指数（セメントの種類）

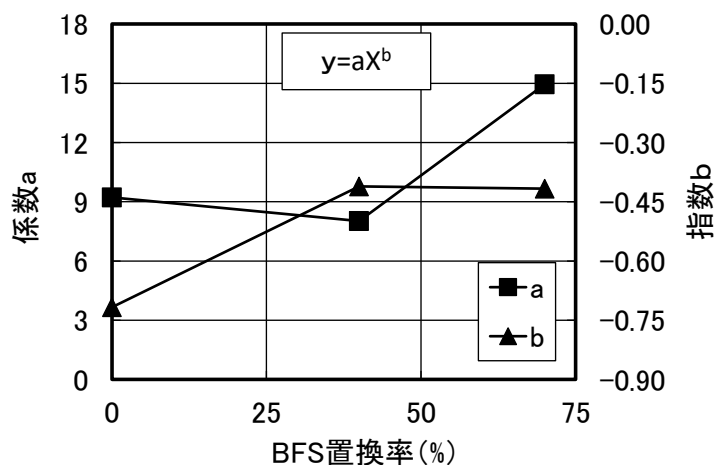


図-5.29 累積近似曲線の係数および指数（BFS 置換率）

## 5.2 圧縮強度等と相関がある理由

### 5.2.1 はじめに

5.1 で直流四電極法によって計測される電気抵抗からコンクリートの圧縮強度や中性化速度係数を推定できる可能性を示した。しかし、計測された電気抵抗の値がコンクリートの圧縮強度や中性化速度係数と相関がある理由が明らかになっておらず、未解明な点が多い。コンクリートの圧縮強度はセメント硬化体の緻密性に影響を受けると考えられ、空隙率に依存すると考えられる。物質移動抵抗性についても同様に空隙率の影響を受けると考えられる。

4章の結果からコンクリートの電気抵抗は、コンクリート内部の空隙に存在する水分を媒体として電子が移動することを評価していると考えられる。したがって、コンクリート内部の水分に着目した。

ここでは電気抵抗と圧縮強度および物質移動抵抗性の関係を確認した後に、コンクリート内部の水和反応や乾燥によって変化する空隙および水分と電気抵抗の関係を明らかにし、計測される電気抵抗が圧縮強度および物質移動抵抗性を推定できる理由について考察する。

## 5.2.2 実験概略

試験項目は圧縮強度試験、透水試験、空隙率の計測、質量試験および電気抵抗計測とし、電気抵抗と強度の関係を明らかにした後、電気抵抗と空隙および水量の関係を明らかにする。さらに、物質移動抵抗性と電気抵抗の関係についても検討を行った。

### (1) 使用材料および供試体の概略

表-5.2 にコンクリートの計画配合を示す。水セメント比を変化させることでセメント硬化体の緻密性を変化させた。また、4.5 で確認された BFS の置換による電気抵抗の変化について検討するため、セメントに試製 BB を用いた配合とした。

表-5.2 コンクリートの計画配合

略号	セメントの種類	W/B (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	OPC	BFS	S	G
N40	OPC	40	48	12.0	4.5	173	433	-	778	941
N50		50				170	340		816	988
N60		60				160	267		856	1040
BB50	BB	50				170	170	170	811	981

### (2) 直流四電極法による電気抵抗計測

直流四電極法の計測条件を表-5.3 に示す。電極間隔は 50mm、通電深さを 50mm とし、電極にはステンレスの針金を使用した。この計測条件は 3 章と同様である。

表-5.3 直流四電極法の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V (パルス波)
電極間隔	50mm
通電深さ	50mm
電極直径	Φ 2.6mm
電極金属	ステンレスの針金



### (3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用い、試験材齢は材齢1, 3, 7, 28日とした。供試体の養生条件は恒温恒湿室（温度： $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相対湿度： $60 \pm 5\%$ ）の中で試験材齢まで型枠を保持し、封かん養生とした。その他の試験条件はJISに準拠して行った。

### (4) 透水量試験

圧縮強度試験の供試体と同様の養生を施した供試体に対し、表面含浸材試験方法（案）（JSCE-K571-2013）に記載されている透水量試験B法を行った。供試体は $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ の立方体の供試体とし、圧縮強度試験の供試体と同様の養生後に脱型を行い、恒温恒湿室で乾燥させた。透水量試験は、質量計測試験で恒温恒湿室に暴露した供試体が乾燥し恒量となった後で開始した。試験期間は1週間とし、1週間の透水量で結果を整理した。その他の条件は土木学会基準に準拠した。図-5.24に透水試験B法の概略を示す。

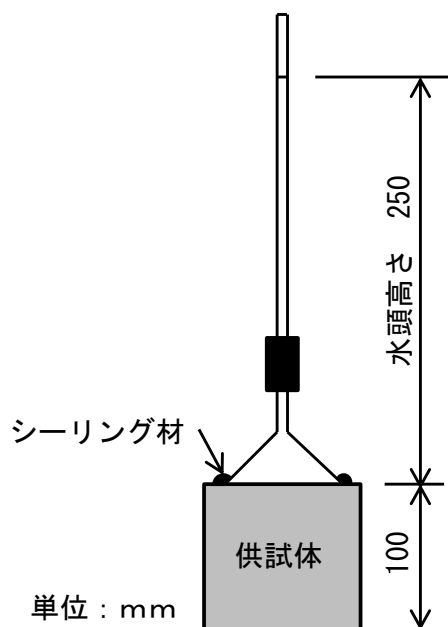


図-5.24 透水試験B法の概略

### (5) 空隙率の計測（アルキメデス法）

コンクリート内部の空隙率をアルキメデス法により求めた。アルキメデス法による空隙率試験方法の概略を以下に記す。空隙率は3つの試料の平均値から算出した。

#### 空隙率の計測方法

- ①圧縮強度試験後の試験片から寸法 $20 \times 20 \times 20\text{mm}$ 程度の試料を150g程度採取する。
- ②採取した試料は直ちにアセトンに浸漬し、真空脱気を行い、水和停止させる。この時、試料の水分でアセトンの濃度が低下するため、1時間の真空脱気後にアセトンを交換し、再度、1時間の真空脱気を行う。

- ③水和停止した試料は急激な温度変化によるクラックの発生を防止するため、40℃の乾燥炉に1日間静置した後、105℃の乾燥炉に6日間静置し、絶乾重量を計測する。
- ④絶乾状態の試料を水に浸漬させ、真空ポンプで3時間ほど真空脱気を行う。
- ⑤吸水後の試料は表面から水分をふき取り、表面乾燥飽水状態とし飽水質量を計測する。
- ⑥飽水質量計測後の試料でピクノメータを用いて水中重量を計測する。

空隙率は以下の式から算出した。

$$\text{空隙率(\%)} = \frac{\text{飽水質量(g)} - \text{絶乾質量(g)}}{\text{飽水質量(g)} - \text{水中質量(g)}} \times 100 \quad (\text{式 5.1})$$

#### (6) 質量計測

コンクリート内部の水分量を計測するために液状水量と含水量を求め、空隙中の水分量について検討するため、飽水度を求めた。液状水量は恒温恒湿室（温度 20±1℃，相対湿度 60±5%）の環境で逸散できる水分量と定義し、含水量は 105℃の乾燥炉で逸散できる水分量と定義した。以下に液状水量と含水量の計算式を示す。

$$\text{液状水量(g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{初期質量(g)} - \text{恒量質量(g)}}{(\text{飽水質量(g)} - \text{水中質量(g)})/\rho_w} \quad (\text{式 5.2})$$

$$\text{含水量(g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{初期質量(g)} - \text{絶乾質量(g)}}{(\text{飽水質量(g)} - \text{水中質量(g)})/\rho_w} \quad (\text{式 5.3})$$

$$\text{飽水度(\%)} = \frac{\text{初期質量(g)} - \text{絶乾質量(g)}}{\text{飽水質量(g)} - \text{絶乾質量(g)}} \times 100 \quad (\text{式 5.4})$$

ここに、 $\rho_w$ ：水の密度(g/cm<sup>3</sup>)

恒量質量は恒温恒湿室で恒量となった質量とした。図-5.25 に質量計測用の供試体の概略を示す。計測に用いた供試体は小型で表面積の大きいΦ100×50mm の円柱供試体とした。既往の研究<sup>13,14,15)</sup>では、養生により含水状態の変化する範囲は表面から25mm程度とされている。この供試体は厚さが50mmであり、供試体全体が外部環境の影響を受ける。したが

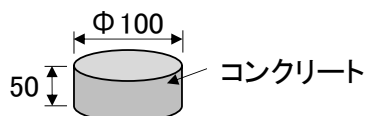


図-5.25 質量計測用の供試体の概略

って、この供試体は外部環境への水分の逸散量が大きく、その速度も早いかぶりコンクリートを模擬したコンクリートと考えることができる。

図-5.26 に質量変化率の計測結果の一例を示す。乾燥期間中は質量を恒量となるまで経時的に計測した。恒量の判断は、1日の質量減少が質量変化率で0.1%を下回る時とした。試料は材齢3日で脱型を行い、その後、恒温恒湿室の環境に暴露した。結果として材齢26日で恒量質量を得た。その後、試料は105°Cの乾燥炉内に暴露し、材齢33日で絶乾質量を得た。その後、試料を水に浸漬後に真空ポンプで吸引して飽水処理を行い、飽水質量を得た。飽水処理方法は真空ポンプによる吸引を1時間ほど行い、2時間ほど真空状態を保持した。飽水処理後の供試体は、大気圧で3時間ほど静置し、表面乾燥飽水状態として飽水質量を計測し、その後、水中質量を計測した。

液状水は恒温恒湿室の環境で逸散できる水和に使われていない水と考えた。図-5.27 に各

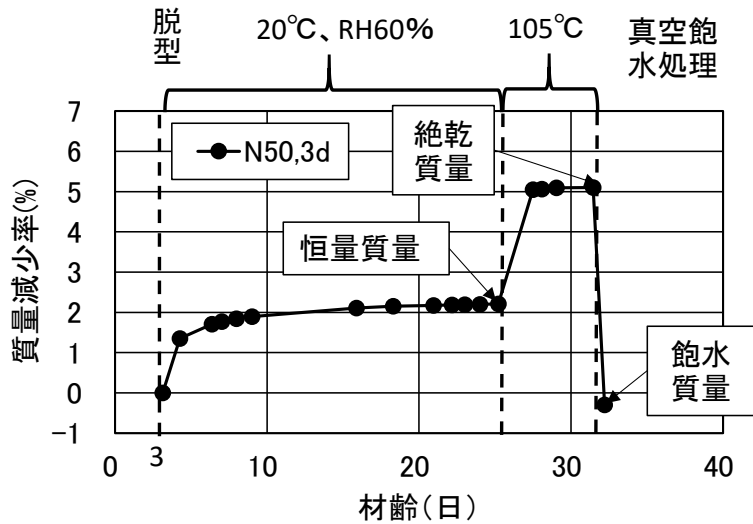


図-5.26 質量変化率の測定結果 (N50, 3日脱型)

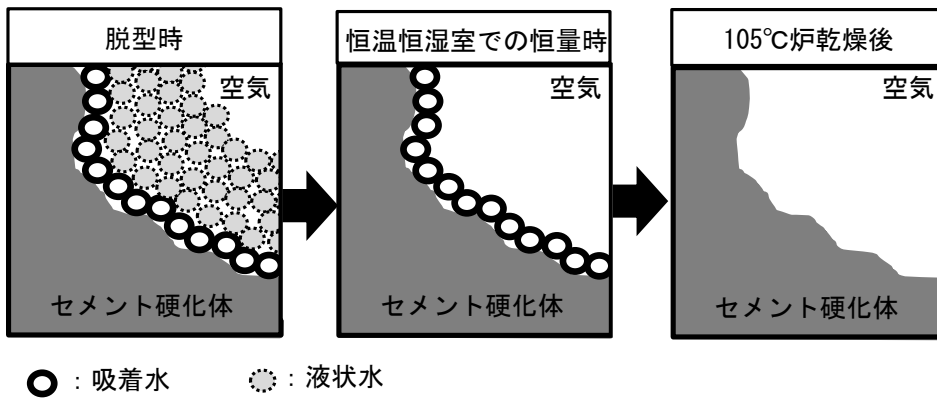


図-5.27 コンクリート内の水のイメージ

種実験環境でのコンクリート内の水のイメージを示す。脱型時は空隙内に多量の水と空気がある状態と考えられる。その水は、水和生成物に吸着している吸着水と液状水に分けられると考えた。実験条件の恒温恒湿室での恒量質量時は、液状水が水分逸散により無くなり、吸着水のみが空隙内に残っている状態と考えた。その後の 105°C 乾燥炉の環境では、セメント硬化体部分の水和生成物に吸着していた吸着水も水分逸散により無くなった状態と考えた。

### 5.2.3 実験結果

#### (1) 各試験結果

図-5.28 に圧縮強度試験結果を示す。N40, N50, N60 の圧縮強度は水セメント比が小さいほど大きくなり、BB50 は N50 と比較して強度発現が遅くなる一般的な傾向が得られた。

図-5.29 に空隙率の計測結果を示す。空隙率は材齢の進行に伴って減少した。また水セメ

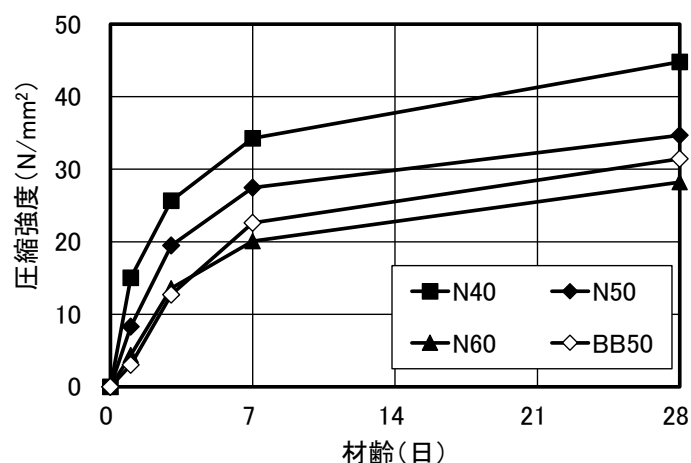


図-5.28 圧縮強度試験結果

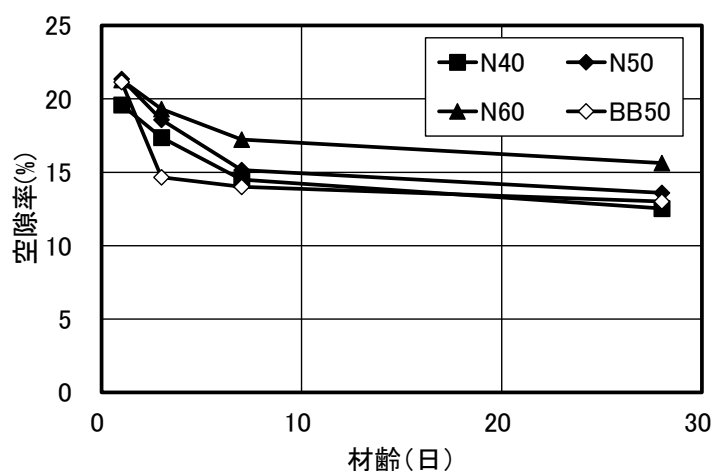


図-5.29 空隙率の測定結果

ント比に着目すると水セメント比が小さいものほど空隙率が小さくなっている。BB50 は N50 と比較して、材齢 1 日で明確な差異が認められないが、材齢の進行に伴って空隙率が減少する傾向を示した。

図-5.30 に圧縮強度と空隙率の関係を示す。圧縮強度と空隙率に概ね負の相関が認められた。圧縮強度は、コンクリートの緻密性に関する空隙率に影響を受けた。N40, N50, N60 の水セメント比に着目すると、水セメント比によらずほぼ一直線上に位置した。一方、N50 と BB50 について比較すると水結合材比が同じにも関わらず BB50 の方が同じ圧縮強度でも空隙率が小さくなった。高炉セメントを用いたコンクリートは OPC を用いたものと比較して緻密なセメント硬化体組織を形成する<sup>14)</sup>ことが知られている。N50 と BB50 の差異は、セメントの種類によってセメント硬化体組織の緻密性が異なることに起因していると考えられる。

図-5.31 に N50 の透水量試験結果を示す。凡例の後ろの数字は型枠存置による封かん養

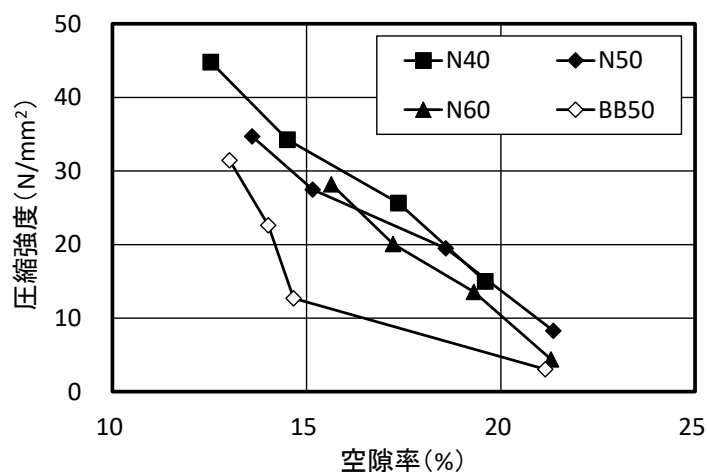


図-5.30 圧縮強度と空隙率の関係

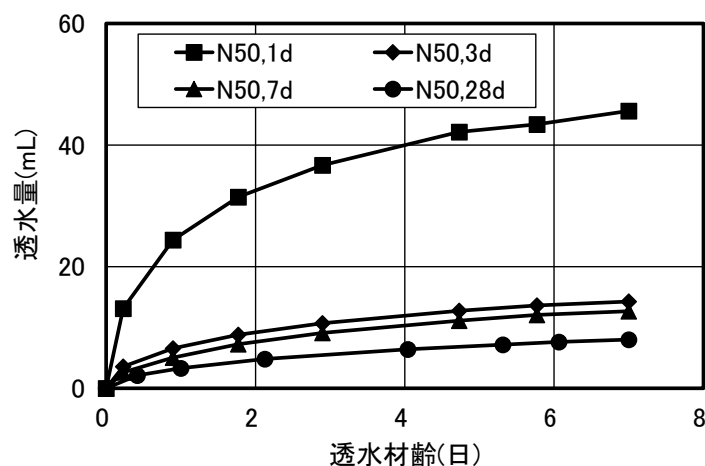


図-5.31 透水量試験結果 (N50)

生を終了した材齢となっている。図から養生期間が短いほど透水量が多くなっており、特に材齢 1 日で養生を終了したものの透水量は極端に大きくなっており、物質移動抵抗性が低い結果となった。その他の供試体に関しても同様の傾向をした。

図-5.32 に透水量と養生期間を示す。物質移動抵抗性を表す透水量は養生期間に強く影響を受け、養生期間が短いと透水量が大きくなり、特に養生期間 1 日の透水量は極端に大きな値を示した。水セメント比に着目すると、透水量は水セメント比に強く影響を受け、水セメント比が大きい供試体ほど透水量が大きくなった。また、N50 と BB50 のセメントの種類について比較すると、養生期間 1 日から 3 日で BB50 の透水量が大きくなっているが、7 日以降の結果に明確な差異は認められなかった。

図-5.33 に N50 の質量減少率を示す。凡例の後ろの数字は養生期間を表している。型枠存置による封かん養生期間が長いものほど最終的な質量減少率も小さくなり、質量減少速

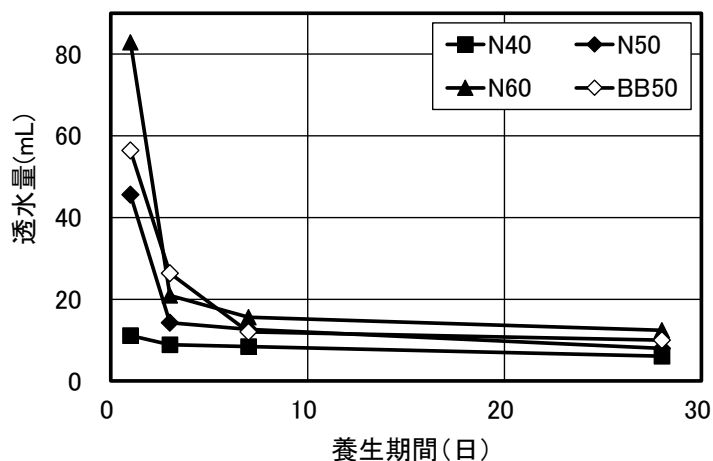


図-5.32 透水量と養生期間の関係

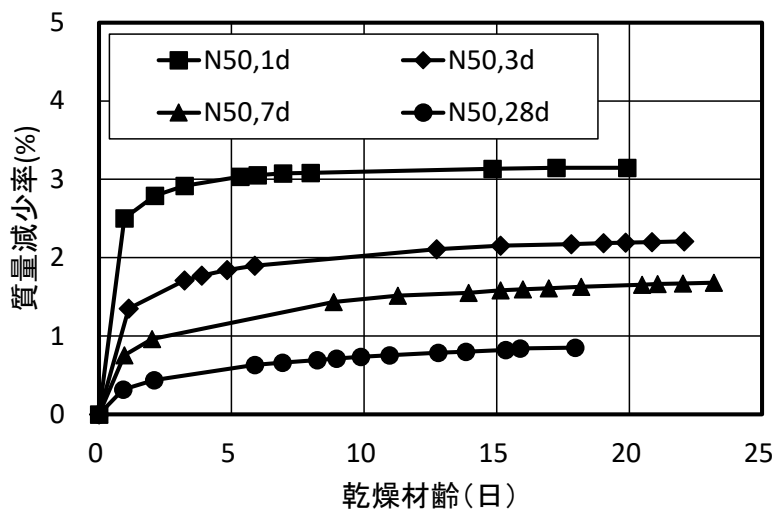


図-5.33 質量減少率 (N50)

度も遅くなった。この原因として養生期間が長いほど供試体内部の水分が水和反応に使用されて減少すること、養生期間が長いほどコンクリートが緻密化し、水分の逸散を抑制したことが考えられる。その他の配合の質量減少率も同様の傾向を示した。この恒温恒湿室での恒量質量から液状水量を求め、供試体をこの後、105℃の乾燥炉で乾燥した際の絶乾質量から含水率を求めた。

図-5.34 に 105℃の乾燥炉による絶乾質量から算出した含水量の測定結果を示し、図-5.35 に恒温恒湿室での恒量質量より算出した液状水量を示す。図から含水量および液状水量は材齢の進行に伴って減少した。これはコンクリート内の水分が水和反応で使用されてコンクリート内部から逸散できなくなるためと考えられる。BB50 は含水量と液状水量でその他の配合との位置関係が変化した。これは、OPC と高炉セメントのコンクリートにおいて、乾燥環境によって逸散できる水分の量が異なることになる。

図-5.36 に N50 の含水量と液状水量を示す。含水量と液状水量を比較すると、含水量の

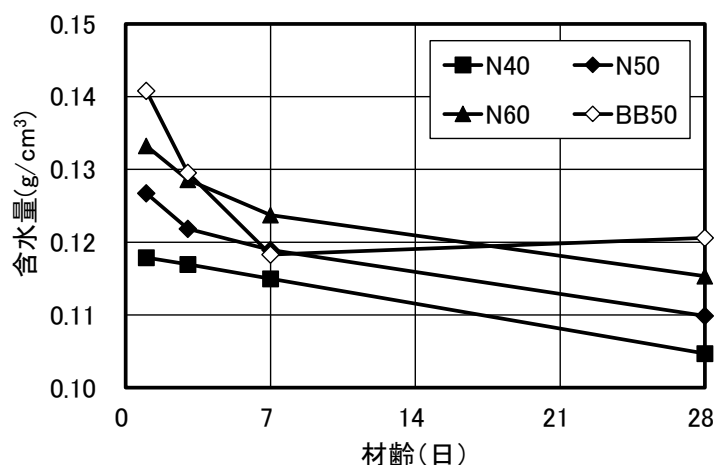


図-5.34 含水量の測定結果

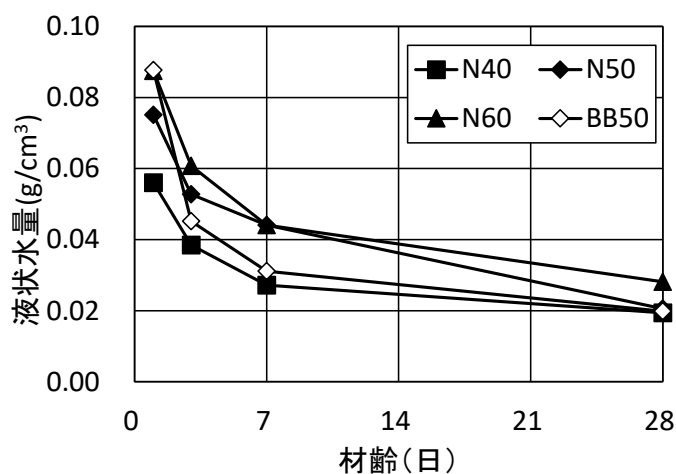


図-5.35 液状水量の測定結果

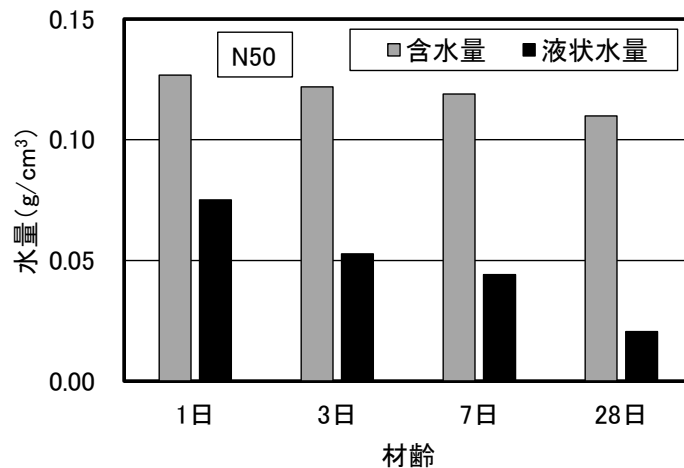


図-5.36 含水量と液状水量

方が液状水量より逸散した水量が大きな値を示しているが、各材齢による水量の差異は液状水量の方が大きい。この傾向は他の配合でも同様であった。したがって、材齢によって変化するコンクリート内の水分を評価するなら液状水量を用いた方が良いと考えられる。

セメントを構成する主要な化合物と  $C_3S$  と  $C_2S$  が挙げられ、 $C_3S$  と  $C_2S$  はともに水和反応によって  $C-S-H$  と水酸化カルシウムを生成する。いずれもセメント硬化体の骨格を形成する重要な水和生成物である<sup>16)</sup>。既往の研究<sup>17)</sup>において水和物の脱水は  $50^{\circ}C$  付近においても開始しており、エトリンガイトやモノサルフェートの結合水の脱水や、全水和生成物の半分以上を占める  $C-S-H$  の結晶水は  $100^{\circ}C$  付近までで半分近く脱水されることが報告されている。これら結合水および結晶水の脱水が含水量の材齢による差を小さくした可能性が考えられる。

図-5.37 に飽水度の測定結果を示す。飽水度は材齢の進行によって変化せず、概ね一定の値を示した。水和反応の進行により空隙量が減少しても水和反応によって水分も消費され

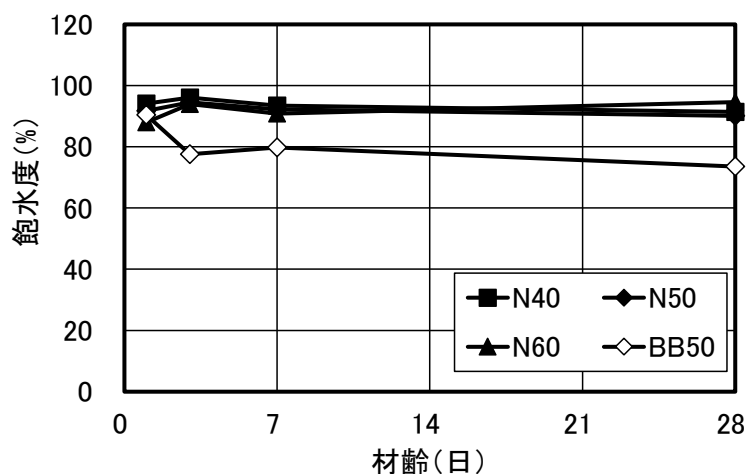


図-5.37 飽水度の測定結果



るため、空隙中にある水分の量は、材齢が進行しても一定になったと考えられる。

(2) 電気抵抗と各試験結果の関係

図-5.38 に電気抵抗の測定結果を示す。電気抵抗は材齢の進行に伴って増加した。水セメント比に着目すると水セメント比が大きくなると電気抵抗が大きくなった。また、BB50 に関しては他の配合と比較して電気抵抗が大きくなった。この傾向は4章と同様である。

以下の図の横軸の電気抵抗は養生終了時の電気抵抗とした。図-5.39 に養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係を示す。養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の間に相関が認められた。5章では水セメント比が異なっても脱型時の圧縮強度と脱型時の電気抵抗に相関があり、水セメント比によらず1本の近似直線となった。しかし、今回の結果は水セメント比ごとに直線の傾きが同程度であるものの直線のy切片が異なる傾向を示した。この

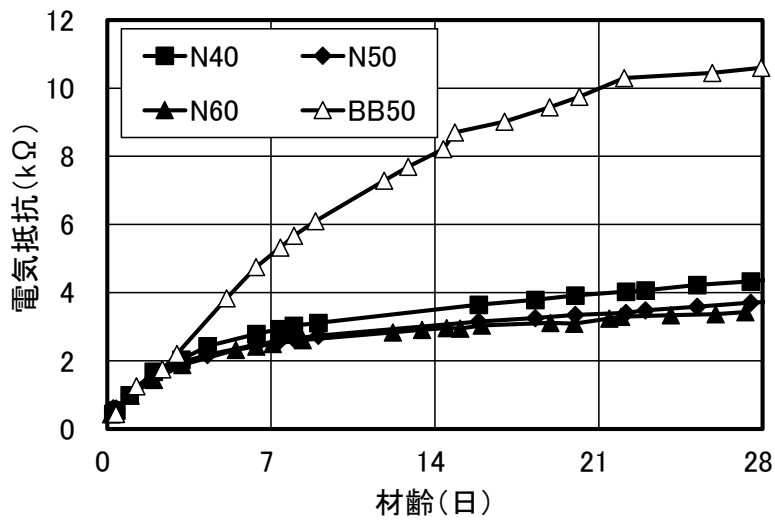


図-5.38 電気抵抗の測定結果

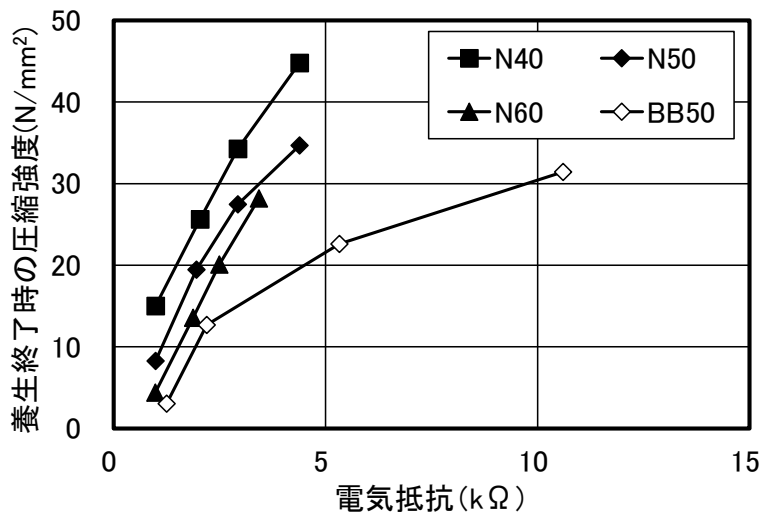


図-5.39 養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

原因は、4.3 配合条件が及ぼす影響に記載したように単位水量が異なることに起因していると考えられる。N50 と BB50 を比較すると近似直線の傾きが異なる傾向を示した。この傾向は4章の傾向と同様となった。

図-5.40 に透水量と電気抵抗の関係を示す。図から透水量と電気抵抗に相関関係が認められ、養生終了時の電気抵抗から透水量が推定できる可能性がある。N50 と BB50 を比較すると、BB50 は同じ電気抵抗でも透水量が大きい。これは、BB50 の電気抵抗の値が大きいことに起因していると考えられる。養生終了時の電気抵抗を計測することで物質移動抵抗性である透水量が推定できる可能性が示された。

図-5.41 に空隙率と電気抵抗の関係を示す。空隙率と圧縮強度の間に負の相関関係が認められた。この空隙率と電気抵抗の関係は OPC を用いた供試体は同様の傾向を示しているのに対し、BB50 に関しては異なる傾向を示した。

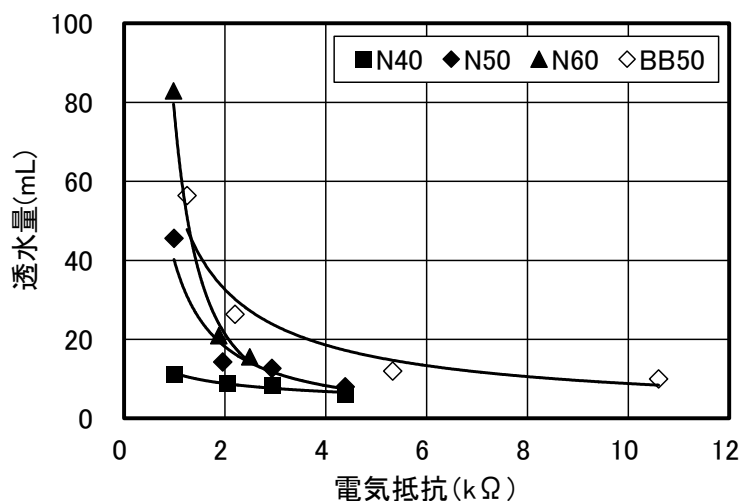


図-5.40 透水量と養生終了時の電気抵抗の関係

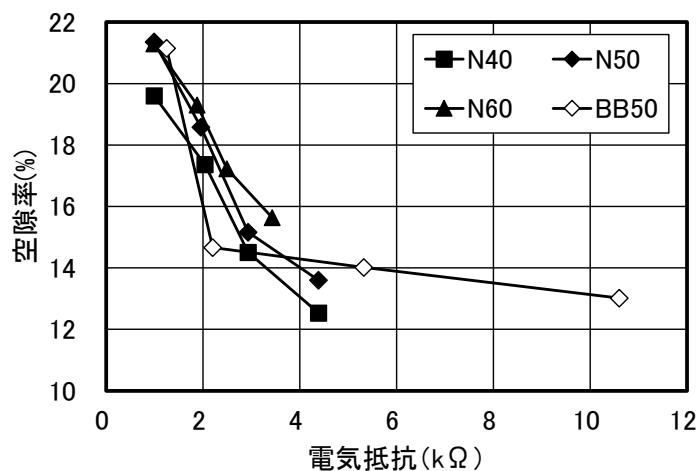


図-5.41 空隙率と電気抵抗の関係

空隙率はコンクリートの緻密性を表している。電気抵抗はコンクリート中の空隙と相関があることから、電気抵抗から圧縮強度を推定できると考えられる。しかし、コンクリートの電気抵抗は、コンクリートの構成材料の導体部分を流れていると考えられ、その計測原理として空隙を直接的に評価していると考えにくい。そこでコンクリート内の水と電気抵抗の関係について確認する。

図-5.42 に含水量と電気抵抗の関係を示し、図-5.43 に液状水量と電気抵抗の関係を示す。含水量および液状水量と電気抵抗の間に負の相関が認められた。材齢の進行で水和反応によってコンクリート内の水が消費され、含水量および液状水量が低下することで電気が流れにくくなり、電気抵抗が大きくなると考えられる。

含水量と液状水量を比較したところ、N40、N50、N60 および BB50 の傾向が若干異なり、電気抵抗は含水量より液状水量と相関が良いと考えられる。BB50 の傾向が含水量と液状水量で異なる理由として、BB50 は BFS の使用により水和生成物の組成が異なることが

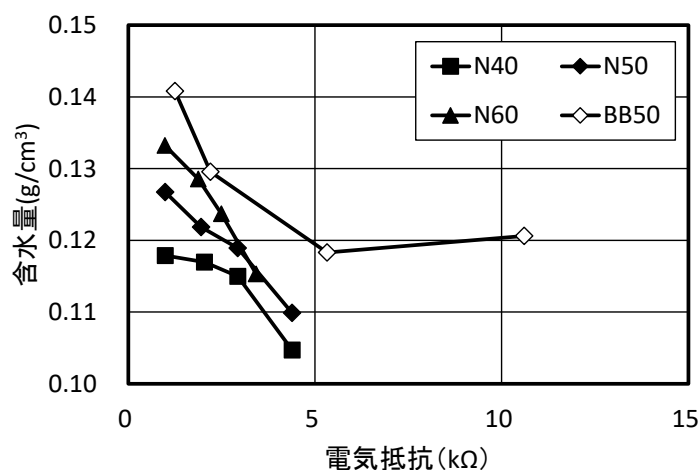


図-5.42 含水量と電気抵抗の関係

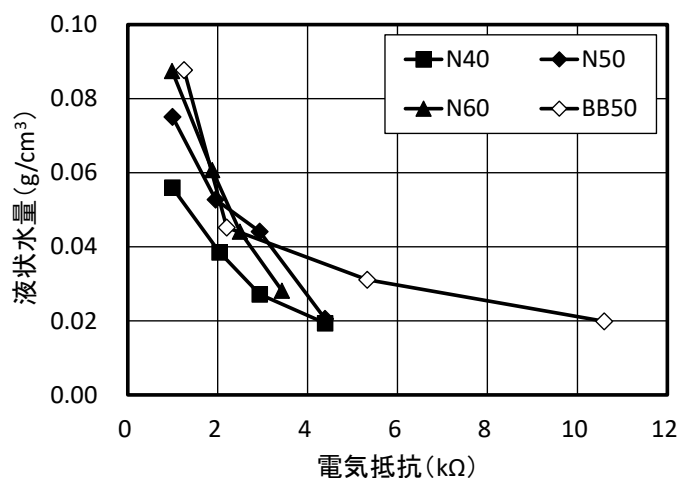


図-5.43 液状水量と電気抵抗の関係

挙げられる。高炉セメントを用いた場合、C-S-Hの保有するゲル水量の割合がOPCを用いた場合と比較して多く<sup>18,19,20)</sup>、このゲル水等からの脱水が含水量を算出する際に使用した105°Cの絶乾質量と恒温恒湿室の恒量質量で異なること等が考えられる。

コンクリートの電気抵抗は、配合条件やセメントの種類が異なるコンクリートでもコンクリート内の水分量を評価しており、特に水和に使用されていない水分量である液状水量と相関があることが確認された。

図-5.44に電気抵抗と液状水量を空隙率で除したものを示す。液状水量を空隙率で除したものと電気抵抗に負の相関が認められる。液状水量を空隙率で除したものは空隙中の液状水量をあらわしている。電気抵抗は空隙中の液状水量と相関があり、空隙中の液状水量が減少すると電気抵抗が大きくなると考えられる。

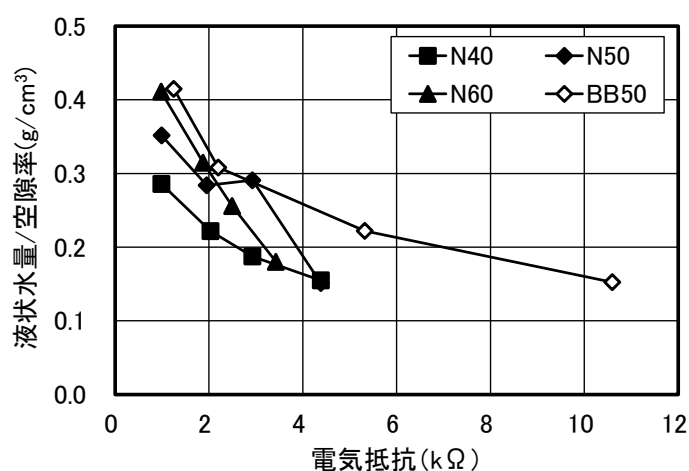


図-5.44 液状水量／空隙率と電気抵抗の関係

既往の研究でフライアッシュを混和したモルタルで細孔溶液のイオン強度と電気抵抗の関係を確認したところ、初期材齢で細孔溶液のイオン強度と比抵抗は正比例関係にあり、材齢14日以降はポゾラン反応による比抵抗の増加が顕著である<sup>21)</sup>とされている。また、伊藤らの既往の研究においてBFSでOPCを置換した場合、結合材中のOPC割合の減少に伴いpHが僅かに減少<sup>22)</sup>するとされている。BB50が他の配合の結果と異なる傾向を示した理由として、BFSを用いた場合にOPCの使用量が減少すること、BFSが潜在水性により反応し、結果として細孔溶液のイオン強度が低下することで電気抵抗が大きくなった可能性がある。

### 5.3 まとめ

5章では、直流四電極法によって計測される電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性の関係について検討し、その関係に配合条件や使用材料が及ぼす影響について検討した。また、計測される電気抵抗が圧縮強度等と相関がある理由についても検討を行った。

### 5.1 電気抵抗と強度・劣化に対する抵抗性の関係で得られた結果を以下に挙げる。

- (1) コンクリートの電気抵抗は W/C の影響を受け、材齢の進行に伴って W/C が小さいものほど大きくなった。
- (2) コンクリートの電気抵抗は BFS 置換率に影響を受け、材齢の進行に伴って BFS 置換率が大きいものほど大きくなった。
- (3) 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗に相関が認められた。これにより、電気抵抗の計測を行うことで養生終了時の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (4) 養生終了時の電気抵抗と圧縮強度の関係は、水セメント比の異なるコンクリートでもほぼ同じ傾きを示した。
- (5) 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗に相関が認められた。これにより、電気抵抗の測定を行うことで材齢 28 日の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (6) 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係は、水セメント比および BFS 置換率が異なるコンクリートにおいても相関が得られた。
- (7) 材齢 91 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗に相関が認められた。これにより、電気抵抗の測定を行うことで材齢 91 日の圧縮強度を推定できる可能性がある。
- (8) 材齢 91 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係は、水セメント比および BFS 置換率が異なるコンクリートにおいても相関が得られた。
- (9) 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗に相関が認められた。これにより、電気抵抗の測定を行うことで中性化速度係数を推定できる可能性がある。
- (10) 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係は、水セメント比および BFS 置換率が異なるコンクリートにおいても相関が得られた。

各物性値と電気抵抗の相関は、水セメント比や BFS 置換率で異なる相関を示した。そこで、水セメント比および BFS 置換率が異なった場に電気抵抗の値から強度および劣化に対する抵抗性を推定する検量線の係数の変化を明らかにした。これにより、水セメント比や BFS 置換率が異なるコンクリートにおいても、概ね強度および劣化に対する抵抗性を推定できると考えられる。

5.2 圧縮強度等と電気抵抗に相関がある理由で得られた結果から考察を行う。図-5.45 に電気抵抗と圧縮強度の関係のイメージを示す。電気抵抗が液状水量を評価しており、圧縮強度は空隙量に影響を受ける。水和反応の進行によって液状水量と空隙量が減少する。この時、飽水度は一定なので空隙量と液状水量の比率は一定となる。結果として圧縮強度の増加と電気抵抗の増加に相関が認められると考えられる。電気抵抗で圧縮強度が推定できる理由は、電気抵抗がコンクリート内の空隙中にある液状水量を評価しており、飽水度が一定（封かん養生）の条件で水和反応による液状水量の減少が空隙量の減少と比例することに起因していると考えられる。

BFS を用いたコンクリートに関しては、上記の理由だけで電気抵抗の増加を説明するのが難しく、既往の研究<sup>21)</sup>のようにイオン強度の低下が電気抵抗の値を大きくしている可能性がある。

以上より、直流四電極法により計測される電気抵抗が圧縮強度および中性化速度係数と相関がある理由が明らかとなった。

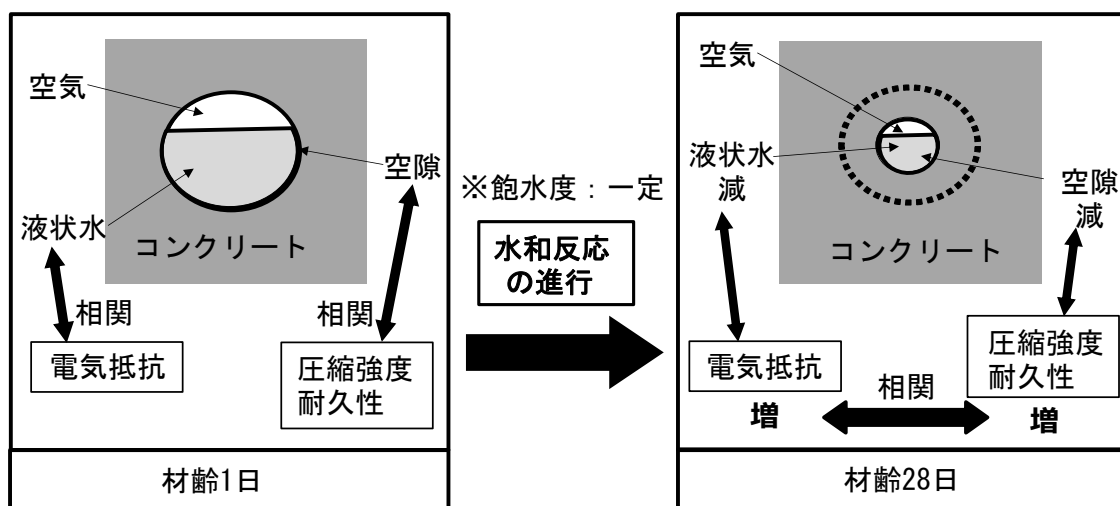


図-5.45 電気抵抗と圧縮強度の関係のイメージ

#### 参考文献

- 1) 佐藤道生, 酒井隆行, 皆川浩, 久田真: フライアッシュを混和したコンクリート及びモルタルの比抵抗の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.7
- 2) 原沢蓉子, 亀山敬宏, 伊代田岳史: 消費水分量に着目した高炉セメントの水和反応解明に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015.7
- 3) 郭度連, 國府勝朗, 李昌洙, 李誉東: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの内部組織の形成に及ぼす置換率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.783-788, 2004.7
- 4) 笠井芳夫: コンクリート総覧, 技術書院, pp.357, 1998.6
- 5) 伊藤孝文, 伊代田岳史: 混和材料を高置換したセメントにおける中性化進行メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.637-642, 2017.7
- 6) 水野博貴, 末木博, 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末高置換セメントを用いたコンクリートの炭酸化進行に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.579-584, 2018.7
- 7) 中村絢也, 伊代田岳史, 後藤誠史: 高炉セメント硬化体の実環境および促進環境における炭酸化進行メカニズムの考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.585-590, 2018.7
- 8) 豊村恵理, 上原菜津葵, 伊代田岳史: 直流比抵抗を用いたコンクリートの養生終了タイ

- ミング判断手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1348-1353, 2012.7
- 9) 三坂岳広, 原沢蓉子, 伊代田岳史: 直流四電極法による養生終了時期判定方法の確立および現場適用性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1606-1611, 2014.7
  - 10) T. Misaka, T. Iyoda : Study on curing of concrete by the end time judgment of the DC specific resistance, SCMT3 (Kyoto), e-313, 2013.8
  - 11) 一ツ柳陸, 三坂 岳広, 伊代田 岳史: 電気抵抗値を用いた養生期間内における強度・耐久性の推定手法の一提案, 土木学会関東支部技術研究発表会, Vol.40, V-56, pp.2013.3
  - 12) 原沢蓉子, 三坂岳広, 一ツ柳陸, 伊代田岳史: 電気抵抗値を用いた養生期間内における強度推定手法の一提案, 土木学会年次学術講演会, No.68, pp.771-772, 3013.9
  - 13) 井ノ口公寛, 豊村恵理, 伊代田岳史: 高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響, 日本コンクリート工学会, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, pp69-74, 2011
  - 14) 郭度連, 宇治公隆, 国府勝朗, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集, No.718/V-57, pp.59-68, 2002.11
  - 15) 郭度連, 宇治公隆, 国府勝郎, 上野敦: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002.7
  - 16) 小林一輔, 和泉意登志, 出頭圭三, 睦好宏史: 図解コンクリート辞典, オーム社, pp.54-56, 2001
  - 17) セメント協会: セメント硬化体研究委員会報告書, セメント協会, pp.273-290, 2001
  - 18) 坂井悦郎, 井元晴丈, 大門正機: 高炉セメント硬化体の相組成と強度発現性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.135-140, 2004.7
  - 19) 原沢蓉子, 亀山敬宏, 伊代田岳史: 消費水分量に着目した高炉セメントの水和反応解明に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015.7
  - 20) 佐川孝弘, 石田哲也, Yao Luan, 名和豊春: 高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.311-324, 2010
  - 21) 佐藤道生, 酒井隆行, 皆川浩, 久田真: フライアッシュを混和したコンクリート及びモルタルの比抵抗の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.7
  - 22) 伊藤孝文, 伊代田岳史: 混和材料を高置換したセメントにおける中性化進行メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.637-642, 2017.7

## 6 現場適用性の検討および利用の提案

3章で直流四電極法を用いた電気抵抗の計測方法を提案し、4章で計測される電気抵抗がコンクリートのどのような性質に影響を受けるかを明らかにした。また、5章では強度および劣化に対する抵抗性と電気抵抗に相関があることを明らかにし、そのそうかんがある理由についても明らかにした。これらの結果から直流四電極法による電気抵抗の計測で養生終了時期の判定できる可能性があると考えられる。

本手法は現場の実構造物で計測することを想定して考案したが、その現場適用性について検討していない。そこで、6.1 計測精度の検証で養生終了時の電気抵抗から推定される圧縮強度の推定精度について検討を行った。その後、6.2 現場適用性の検討で実際の現場のコンクリート構造物で電気抵抗の計測を行い、型枠内部のコンクリートの状態を評価した結果について記載する。そして、6.3 養生終了時期判定手法の利用方法の提案では、これまでの結果を考慮して、本手法の活用方法について提案する。

### 6.1 計測精度の検証

5章では、電気抵抗の値から圧縮強度や中性化速度係数を推定した。これらコンクリートの物性値と電気抵抗の相関関係を利用して推定するためには、計測される電気抵抗の値の精度について検討する必要がある。

図-6.1 はセメントに OPC を用いたコンクリートの養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係である。凡例は水セメント比と単位水量の値となっている。電気抵抗の計測条件は、全て同様である。凡例の N55 170①～④は、同一のコンクリートで4箇所計測を行った結果である。

図から各配合条件の養生終了時の圧縮強度と電気抵抗は直線関係を示している。しかし、各近似直線の傾きは同様と考えられるが、直線の y 軸切片は異なるように見える。4.3 で電

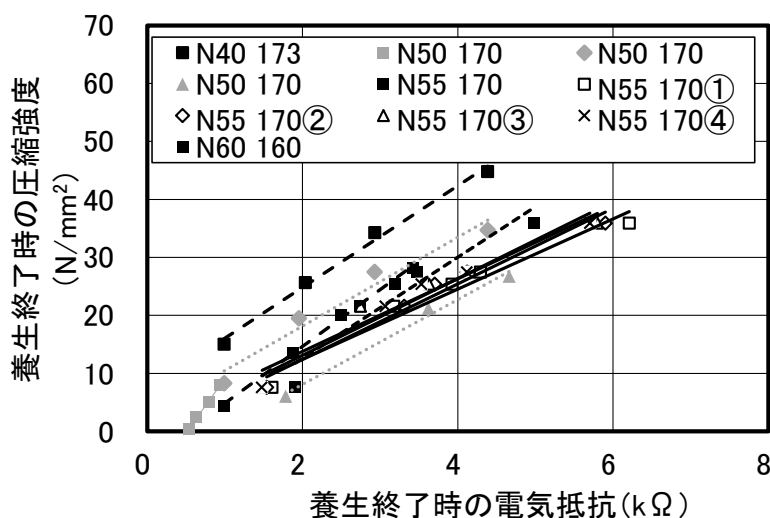


図-6.1 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係



電気抵抗は配合条件の単位水量に影響を受けることが明らかとなったが、単位水量で電気抵抗の値を補正しても一直線上に近似することは難しいと考えられる。また、N55 170①～④の同一のコンクリートで4箇所の電気抵抗の測定を行ったものの電気抵抗は、電気抵抗の値が最大で0.5kΩほど異なる。図中の直線の傾きは7.4N/mm<sup>2</sup>/kΩ程度であり、電気抵抗の値が0.5kΩほど変化すると推定される圧縮強度は3.7N/mm<sup>2</sup>ほど変化することになる。型枠内部のコンクリートの圧縮強度を推定するためには、計測される電気抵抗の計測精度について確認する必要があると考えられる。

### 6.1.1 実験概要

同一のコンクリートを用いた供試体に多数の電極を設置し、電気抵抗の多点での計測を経時的に行った。そして、同時に行った圧縮強度試験の結果と比較し、圧縮強度の推定精度について検討を行う。

試験項目は電気抵抗の計測および圧縮強度試験とし、養生終了時の電気抵抗と圧縮強度の関係について検討を行った。圧縮強度試験の試験材齢は、1, 3, 7, 28日とし、供試体の養生条件は封かん養生とした。圧縮強度試験の試験方法はJIS A 1108:2018に準拠し、供試体3本の試験結果から平均圧縮強度を求めた。

表-6.1にコンクリートの配合を示す。配合は水セメント比が50%でOPCを用いた一般的なコンクリートとした。表-6.2に電気抵抗の計測条件を示す。電極間隔および通電深さは50mmとし、電極にはステンレスの針金を使用した。計測方法は3章および5.2と同様の方法である。

図-6.1に電気抵抗計測用供試体の概略を示す。電気抵抗計測用の供試体は、150×150×530mmの角柱供試体とし、供試体の側面に電極を設置し、図中①、②、③のように隣接す

表-6.1 コンクリートの計画配合

略号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						W	OPC	S	G
N50	OPC	50	46	12.0	4.5	170	340	816	988

表-6.2 電気抵抗の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V (パルス波)
電極間隔	50mm
電極直径	φ2.6mm
通電深さ	50mm
電極の種類	ステンレスの針金

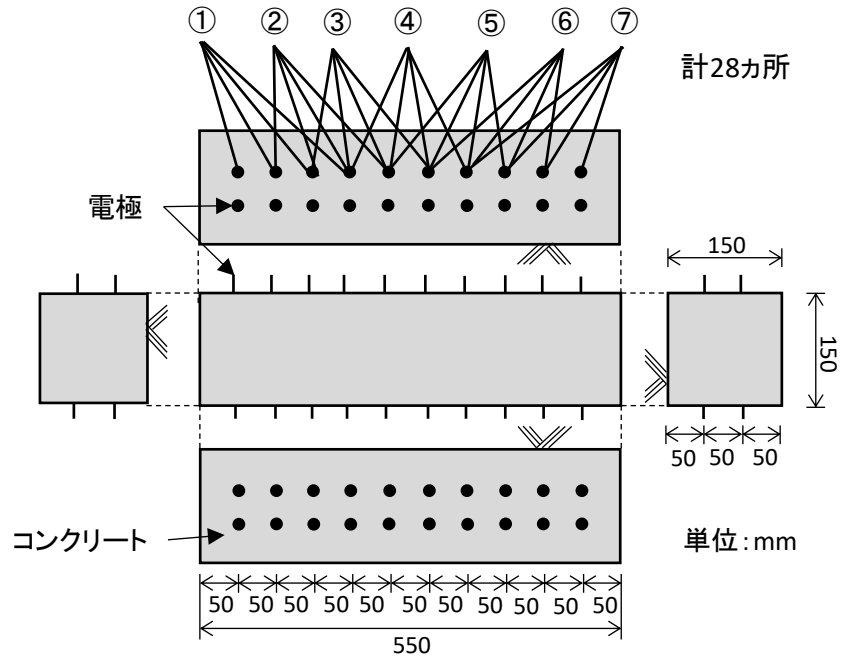


図-6.1 電気抵抗の計測条件

る4本の電極を用いて、計28箇所電気抵抗の計測を行った。供試体は恒温恒湿室（温度： $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相対湿度： $60\pm 5\%$ ）の中に静置し、供試体全体を封かんした。

### 6.1.2 実験結果

図-6.2 に電気抵抗の測定結果を示す。横軸は計測箇所となっている。計測箇所の③に関しては、接水から6時間で電気抵抗が他の計測箇所の結果と比較して極端に大きな値を示した。また、この傾向は材齢が進行しても同様であった。この原因として電極の通電部にエ

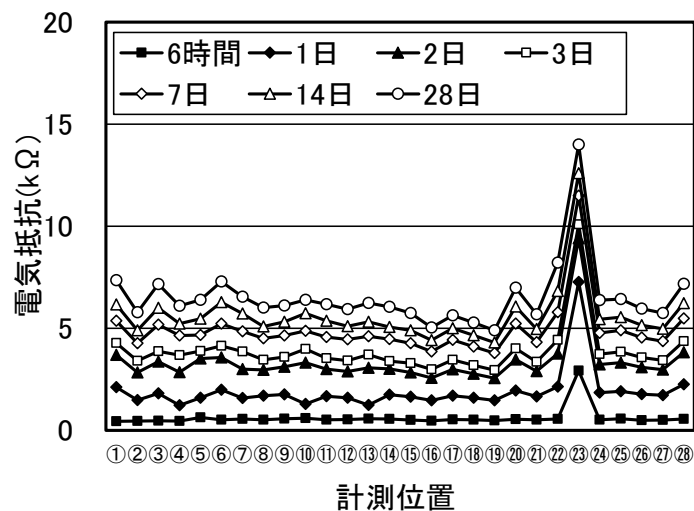


図-6.2 電気抵抗の測定結果

ントラップトエアがあり、正常に計測できなかつたこと、コンクリートを型枠に打込む際に電極が変形したことにより正常に計測できなかつたこと、コンクリートの充填不良などが考えられる。計測箇所③の結果は、エラー値と考え、以降のデータ整理においてもデータを除外して考察をしする。

接水から 6 時間の電気抵抗の測定結果は、計測箇所ごとに電気抵抗の値に大きなばらつきは確認できなかつた。しかし、材齢 1 日以降の電気抵抗の測定結果は、計測箇所ごとに若干異なる値を示している。

材齢 2 日で比較的に大きな値を示している計測箇所は、材齢が進行しても電気抵抗の値が大きく、計測箇所ごとの電気抵抗の大小関係は、材齢が進行しても同様の傾向を示した。

図-6.3 に電気抵抗の経時変化を示す。図中の凡例は、27 箇所の測定結果の電気抵抗の平均値を示したものである。電気抵抗は材齢の進行とともに大きな値を示し、3 章の結果と同様の傾向を示した。図中に 27 箇所の測定結果の電気抵抗の最大値と最小値を併記した。材齢の進行に伴って電気抵抗の値が大きくなると平均値に対する最大値および最小値のばらつきが大きくなった。

図-6.4 に標準偏差の経時変化を示す。図は 27 箇所の測定結果の標準偏差を示したものである。電気抵抗の標準偏差は材齢の進行に伴って大きくなった。電気抵抗が材齢の進行に伴って値が大きくなるにつれて標準偏差は大きくなると考えられる。この傾向は圧縮強度も同様であり、強度の増加に伴って標準偏差が増加することが一般的に知られている。

図-6.5 に電気抵抗の変動率を示す。変動係数は計測場所の異なる 27 箇所の計測結果から求めたものである。電気抵抗の変動係数は若材齢でばらつきがあるもの材齢が進行しても 0.11 程度で一定と考えられ、電気抵抗の平均値に対するばらつきが材齢の進行に伴って大きくなるのは、計測される電気抵抗の値が大きくなるためと考えられる。

図-6.6 に電気抵抗の正規確率プロットを示す。正規確率プロットは、データの分布が正規分布を示しているかを判断するものである。図中の線は 1 : 1 の関係であり、この線上に

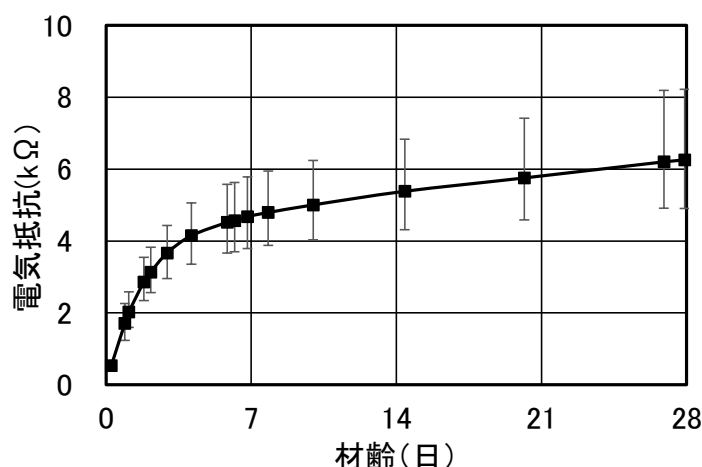


図-6.3 電気抵抗の経時変化

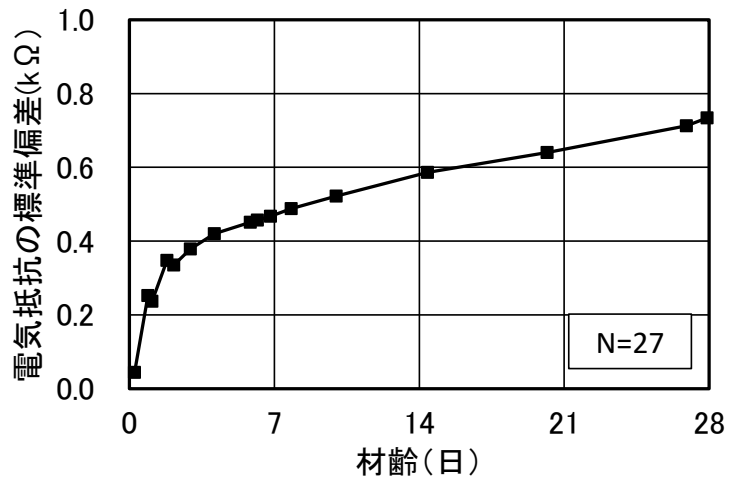


図-6.4 標準偏差の経時変化

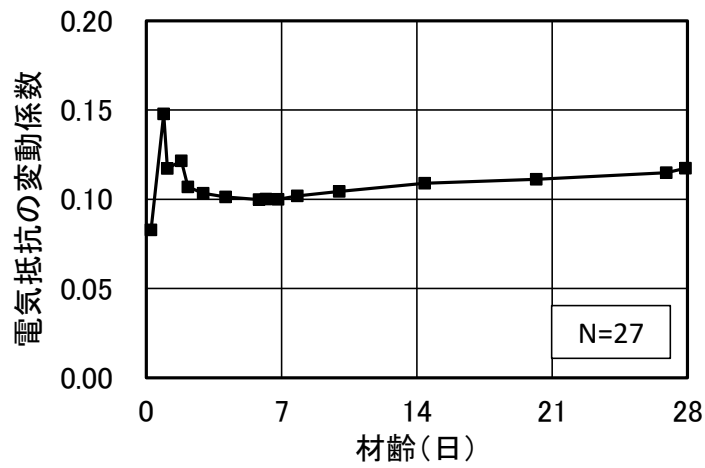


図-6.5 変動係数の経時変化

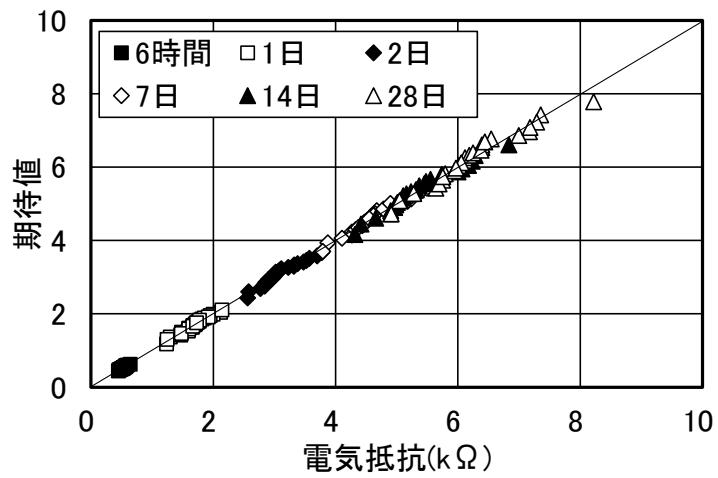


図-6.6 正規確率プロット

プロットされる場合には、正規分布を示していることを表している。使用した電気抵抗の値は、接水から6時間、1日、2日、7日、14日、28日の6つの材齢とし、各材齢に対して27個の測定結果を示している。したがって、全データ数は162個である。図から全ての材齢の電気抵抗は、1:1の線上の下方に位置するものが散見され、電気抵抗の値が大きい側にばらつく傾向があるが、概ね1:1の線上にプロットされており、正規分布を示していることが分かる。

電気抵抗の測定結果のばらつきは、計測箇所ごとの大小関係が材齢によってあまり変化しないこと、標準偏差が材齢の進行に伴って大きくなるものの変動係数は同様の値を示すことから、計測装置および計測方法の精度の影響より、計測箇所の影響が大きいと考えられる。電気抵抗のばらつきに影響を及ぼす要因としては、電極通電部間の骨材の分布状況、電極の通電部の加工精度、電極間隔の誤差などの計測箇所によるものが考えられる。

図-6.7に骨材分布のイメージを示す。電極の間隔は50mmだが、電流の流れる電極通電部の最短距離は、図中の点線のように骨材の分布により50mmより大きくなる。電流経路である電極通電部の最短距離が長いほど計測される電気抵抗の値は、大きくなると考えられる。また、計測は内側の電極で行っており、図中の点線が内側計測電極の通電部より距離が離れることにより計測される電気抵抗が大きくなると考えられる。

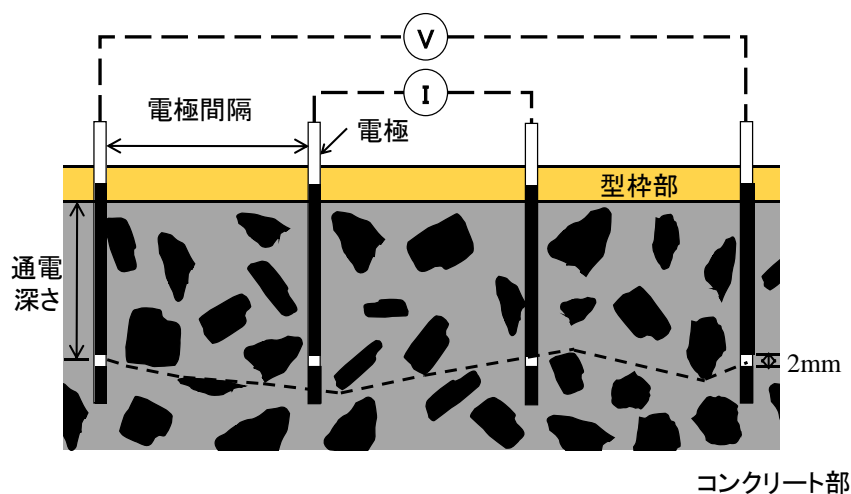


図-6.7 骨材分布のイメージ

図-6.8に電気抵抗と圧縮強度の関係を示す。凡例は平均値を示し、27箇所での電気抵抗の最大値と最小値を示す。圧縮強度電気抵抗のばらつきが大きく、電気抵抗から推定される圧縮強度の推定誤差が大きいと考えられる。電気抵抗の測定結果のばらつきは正規分布を示しており、ばらつきが大きい。ばらつきを抑制するために圧縮強度試験と同様に3つの結果の平均値で結果を整理する。27箇所の電気抵抗の計測結果を3つの結果の平均値で整理した。サンプル数は、 $_{27}C_3$ となり2925個となる。

図-6.9~12に各材齢の分布を示す。どの図も概ね正規分布を示している。

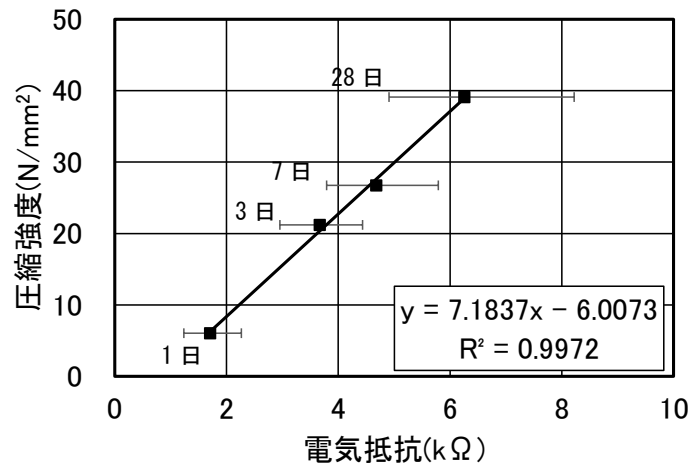


図-6.8 圧縮強度と電気抵抗の関係（最大および最小値）

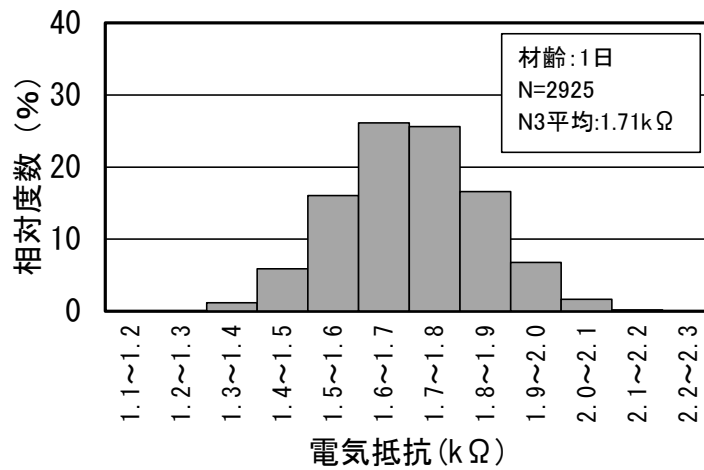


図-6.9 電気抵抗の分布（材齢1日）

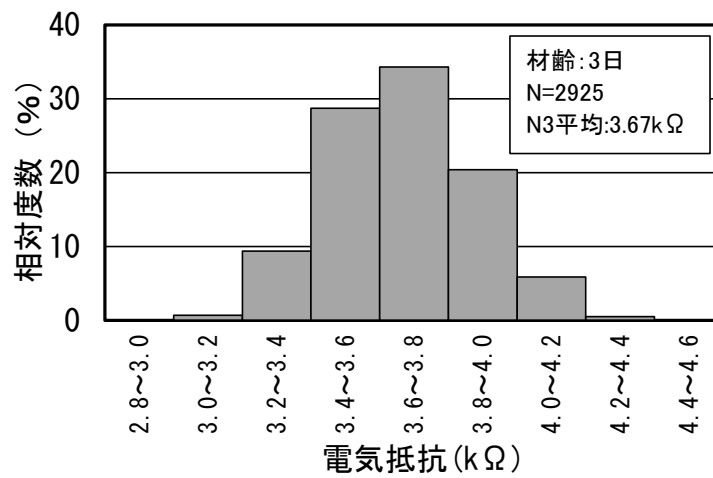


図-6.10 電気抵抗の分布（材齢3日）

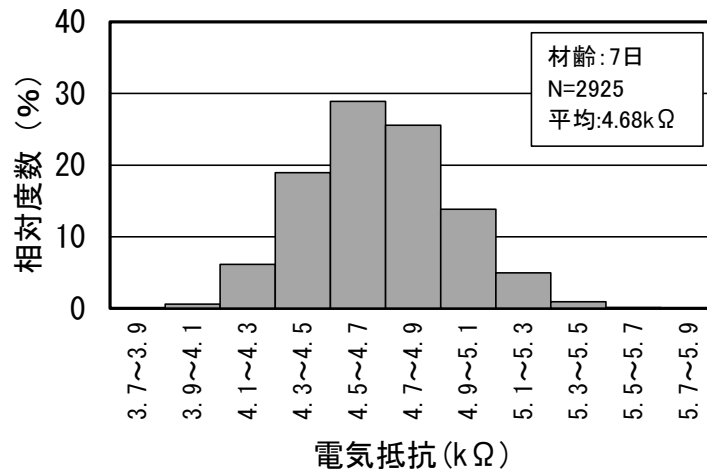


図-6.11 電気抵抗の分布 (材齢 7 日)

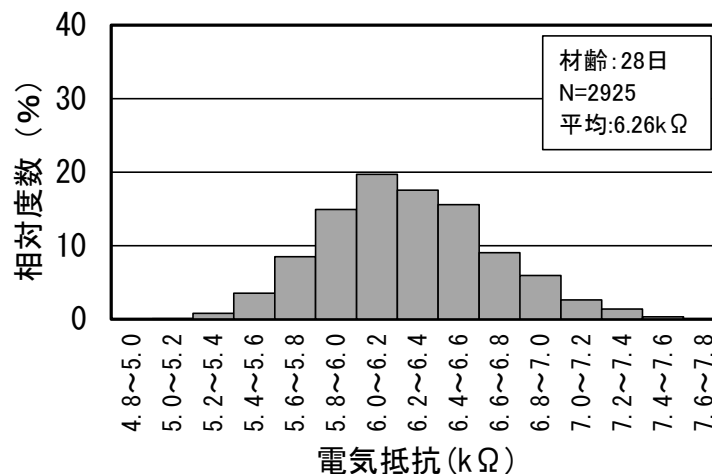


図-6.12 電気抵抗の分布 (材齢 28 日)

図-6.13 に圧縮強度と電気抵抗の関係を示す。電気抵抗のばらつきが圧縮強度と同様に概ね正規分布を示すことが確認されたので、圧縮強度と電気抵抗の関係の電気抵抗を 3 箇所  
の平均とし、95%信頼区間を示す。材齢の進行に伴って 95%信頼区間も大きくなる。コン  
クリート標準示方書 [施工編] に記載されている湿潤養生期間の標準の最大日数は、混合セ  
メント B 種および日平均気温 5°C 以上の条件でも 12 日であり、本手法を養生終了時期の判  
定に用いるならば、電気抵抗から圧縮強度の推定を行えると考えられる。

平成 29 年度全国統一品質管理監査<sup>1)</sup>による検査対象の 2605 工場の強度比（呼び強度値  
に対する試験値の割合）の平均値が 1.33 となり、割増し係数の平均が 1.33 と考えることが  
できる。また、以下の式を用いて割増し係数の平均から変動係数を算出すると 14.3%とな  
る。したがって、2605 工場の一般的な材齢 28 日の 3 本平均の圧縮強度の変動係数は 14.3%  
と推定される。

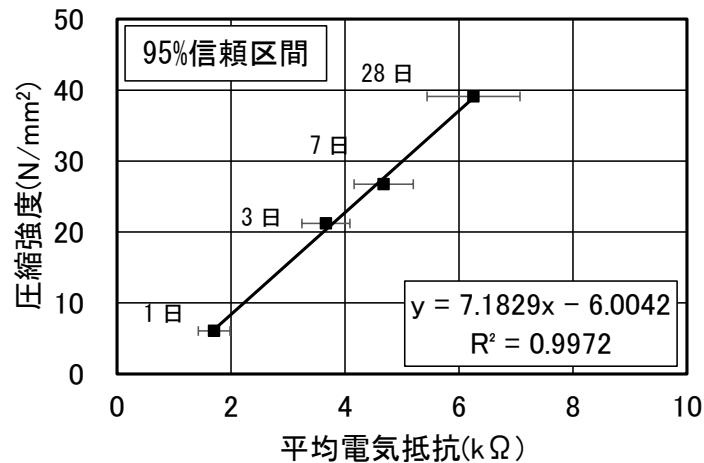


図-6.13 圧縮強度と電気抵抗の関係 (95%信頼区間)

$$\alpha = \frac{0.85}{1 - \frac{3V}{100}} \quad (\text{式 4.1})$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{3V}{100\sqrt{3}}} \quad (\text{式 4.2})$$

ここに、 $\alpha$  : 割増し係数,  $V$  : 変動係数(%)  
 割増し係数は2つの式の大きい値を示す方とする。

表-6.3 に3箇所 の平均値の電気抵抗の変動係数を示す。表から材齢28日の変動係数は6.52%であり、全国統一品質管理検査による割増し係数から算出した変動係数14.3%より十分に小さく、図-6.2で示したエラー値があったことを考慮しても電気抵抗から圧縮強度を推定することに大きな問題は無いと考えられる。

表-6.3 3箇所 の平均値の電気抵抗の変動係数

	材齢 (日)			
	1	3	7	28
変動係数 (%)	8.19	5.74	5.55	6.52

電気抵抗から圧縮強度を推定する場合、推定される圧縮強度が実際のものより大きく推定された場合に型枠および支保工の取外しや養生終了の判断をすることには、問題があると考えられる。そこで実際に本手法を用いて養生の終了を判断する場合には、安全係数を設ける必要がある。

安全係数の例として生コンクリート工場で使用している式4.1および式4.2を用い、変動係数が最も大きい材齢1日の8.19を用いて算出すると安全係数は1.17となる。



図-6.14 に電気抵抗計測のイメージを示す。電極 6 本を設置することで隣接する 4 本の電極で 3 箇所での計測を行うことができる。この 3 箇所での計測された電気抵抗に安全係数を掛けて強度および劣化に対する抵抗性を推定することで、実際の現場でコンクリート構造物の養生終了時期を推定できると考えられる。

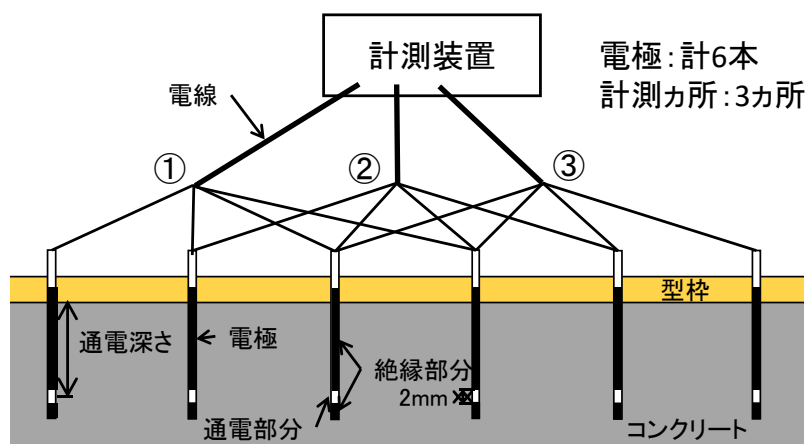


図-6.14 電気抵抗計測のイメージ

## 6.2 計測方法の検討

本手法を実際の現場で適用するためには、計測方法について検討をし、計測条件を決める必要がある。

実際のコンクリート構造物には、様々な養生方法が用いられる。その各種養生が電気抵抗におよぼす影響について検討した。

直流四電極法による電気抵抗は、4.3 および 5.2 で記載したようにコンクリート内部の水分量を評価していると考えられる。したがって、様々な養生方法によってコンクリートの含水状態が変化した場合、電気抵抗の値は水和反応の進行度を評価することが難しいと考えられる。そこで通電深さを変化させたコンクリートの電気抵抗を計測し、その養生の影響範囲について確認した。

### 6.2.1 養生方法の影響

通電深さの異なるコンクリートの電気抵抗は、水和反応の進行による水の消費の他に、脱型後の水分逸散による含水量の変化を捉えていると考えられる。また、表層からの通電深さ 30 mm までの電気抵抗は、脱型後の環境に影響を受けていた。この結果は、既往の研究<sup>2)</sup>の表層コンクリートの品質が養生に影響を受ける範囲と同様である。

電気抵抗が養生方法に受ける影響を明らかにするため、様々な養生を行ったコンクリートで電気抵抗の計測を行った。表-6.4 にコンクリートの計画配合を示す。使用したコンクリートはセメントに OPC を用いた一般的なコンクリートである。図-6.38 に電気抵抗計測用供試体の概略を示す。供試体側面に電極を設置し、電極設置面には様々な養生を実施した。

表-6.4 コンクリートの計画配合

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
OPC	55	48	12.0	4.5	175	318	815	960

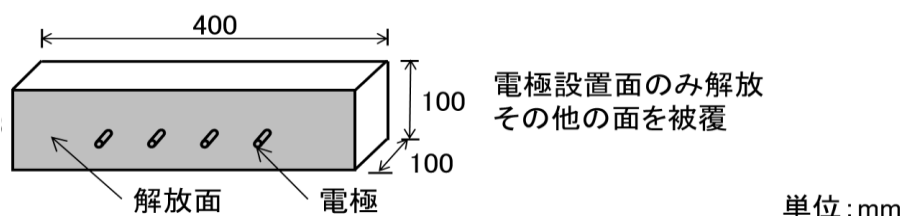


図-6.15 電気抵抗計測用供試体の概略

実施した養生方法を図-6.16 に示す。温度環境は各養生条件とも 20℃で一定とした。供試体は材齢 1 日で脱型を行い、各種養生を実施した。塗膜剤は、有機—無機複合型ポリマーを主成分とする塗膜養生剤を脱型後に塗布し、RH60%と同様の条件に供試体を暴露した。電気抵抗の計測条件を表-6.5 に示す。通電深さは養生の影響を受けるように 30 mmとした。

	材齢			
	0 日	1 日	...	28 日
RH60%	打設	脱型	RH60%	
RH80%			RH80%	
型枠存置			型枠存置	
水中			水中養生	
塗膜剤		塗膜剤塗布	RH60%	

図-6.16 養生方法の概略

表-6.5 電気抵抗の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V (パルス波)
電極間隔	40mm
電極直径	φ 3.0mm
通電深さ	30mm
電極金属	鉄の針金

図-6.17 に電気抵抗の測定結果を示す。電極の通電部は 30mm であり、計測される電気抵抗は、30mm 部分のコンクリートの含水状態に影響を受けると考えられる。各養生の電気抵抗は、材齢 1 日の脱型まで大きな差がない。しかし、脱型後の材齢の進行にともなって養生条件による差異が大きくなった。材齢 28 日の電気抵抗は、水中、型枠存置、塗膜剤、RH80%、RH60%の順に大きくなった。これは、各種養生環境による水分の逸散や水中養生による給水を評価していると考えられる。

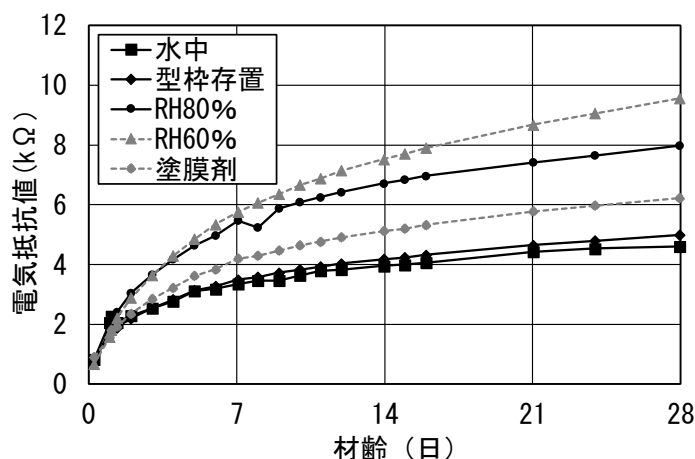


図-6.17 養生方法の概略

電気抵抗は、電極の通電深さが 30 mm 以下だと養生環境に影響を受けると考えられる。これは、提案する養生終了時期判定手法において電気抵抗から圧縮強度や耐久性を推定する際に影響をおよぼすと考えられる。

実際のコンクリート構造物に型枠存置による封かん養生を実施する場合、表層からの距離毎のコンクリートの含水状態は、概ね一定と考えられる。しかし、その他の養生を実施し、表層コンクリートの含水状態が変化した場合、電気抵抗の値は変化すると考えられる。

本手法で計測される電気抵抗の値は、水和反応による水の消費を評価しているため、圧縮強度や劣化に対する抵抗性と相関があると考えられる。したがって、計測される電気抵抗は養生環境によるコンクリートの含水量の変化に影響を受けないことが望ましい。次節では、電気抵抗が養生方法による影響を受ける範囲について検討を行い、実際の現場で電気抵抗を計測する際の計測条件を決める。

### 6.2.2 通電深さの検討

表-6.7 にコンクリートの計画配合を示す。コンクリートは OPC を用いた一般的なものである。図-6.18 に電気抵抗計測用供試体の概略を示す。電極は供試体側面に設置されており、電極に記載されている数字は、通電深さを表している。表-6.8 に電気抵抗の計測条件を示す。電極の通電深さは 5~70 mm に変化させた。

表-6.7 コンクリートの計画配合

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
OPC	55	50	12.0	4.5	174	316	906	923

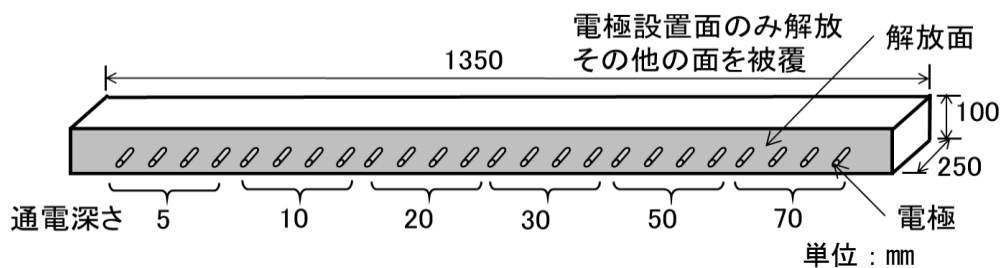


図-6.18 電気抵抗計測用供試体の概略

表-6.8 電気抵抗の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V (パルス波)
電極間隔	40mm
電極直径	φ 3.0mm
通電深さ	5, 10, 20, 30, 50, 70mm
電極金属	鉄の針金

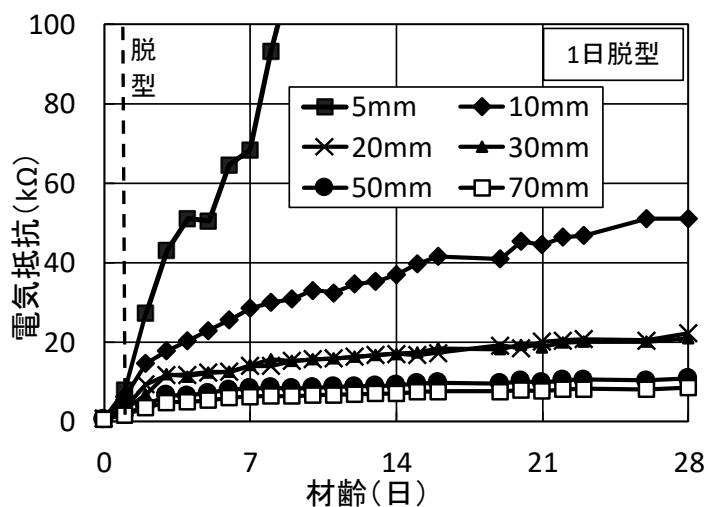


図-6.19 電気抵抗の測定結果 (1日脱型)

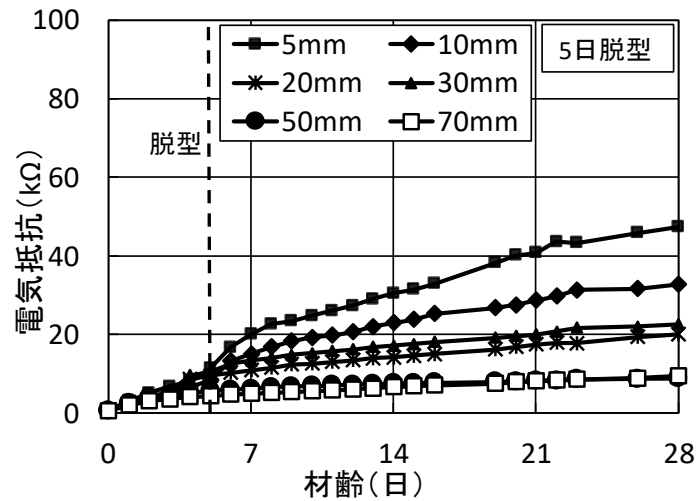


図-6.20 電気抵抗の測定結果 (5日脱型)

図-6.19 に材齢 1 日で脱型を行い、恒温恒湿室（温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，湿度  $60 \pm 5\%$ ）に暴露した供試体の電気抵抗の測定結果を示し，図-6.20 に材齢 5 日で脱型を行い，恒温恒湿室に暴露した供試体の電気抵抗の測定結果を示す．凡例は通電深さを示している．脱型前の電気抵抗は，通電深さによらず同様の値を示している．しかし，脱型後の各通電深さの電気抵抗は，通電深さ 20mm，30mm で結果が逆になるものがあるものの，通電深さが小さいものほど大きくなった．また，通電深さ 5mm の表面に近い電気抵抗は，脱型直後に電気抵抗が大きく増加しているのに対し，通電深さ 50 および 70mm の電気抵抗に大きな変化が認められない．脱型日に着目すると，材齢 5 日で脱型を行ったものの電気抵抗は，材齢 1 日に対して脱型後の電気抵抗の増加が小さくなっている．これは材齢の進行にともなってセメント硬化体組織が緻密化し，コンクリート内部の水分が逸散する速度が遅くなったためと考えられる<sup>3)</sup>．

### 6.3 現場適用性の検討

提案した養生終了時期判定手法は，型枠内部のコンクリートの状態を評価でき，計測された電気抵抗から現在の圧縮強度を推定でき，養生終了時の電気抵抗から材齢 28 日の圧縮強度，材齢 91 日の圧縮強度，中性化速度係数，透水量が推定できる可能性が示された．本手法を実際の現場で用いて実構造物のコンクリートで計測を行うことにより，本手法の現場適用性の検討を行う．

#### 6.3.1 実験概要

図-6.21 に現場計測のフローを示す．本実験では，試験練りと現場の 2 回の計測を行った．まず，生コンクリート工場の試験室で施工前に行われた試験練りの際に，実際の現場に使用するコンクリートを用いて供試体を作製し，電気抵抗の計測，圧縮強度試験，促進中性

化試験を行った。試験練りで電気抵抗と各種物性値との相関式を得る。そのため、材齢 91 日の圧縮強度を推定する場合には 91 日、促進材齢 4 週の中性化深さから中性化速度係数を

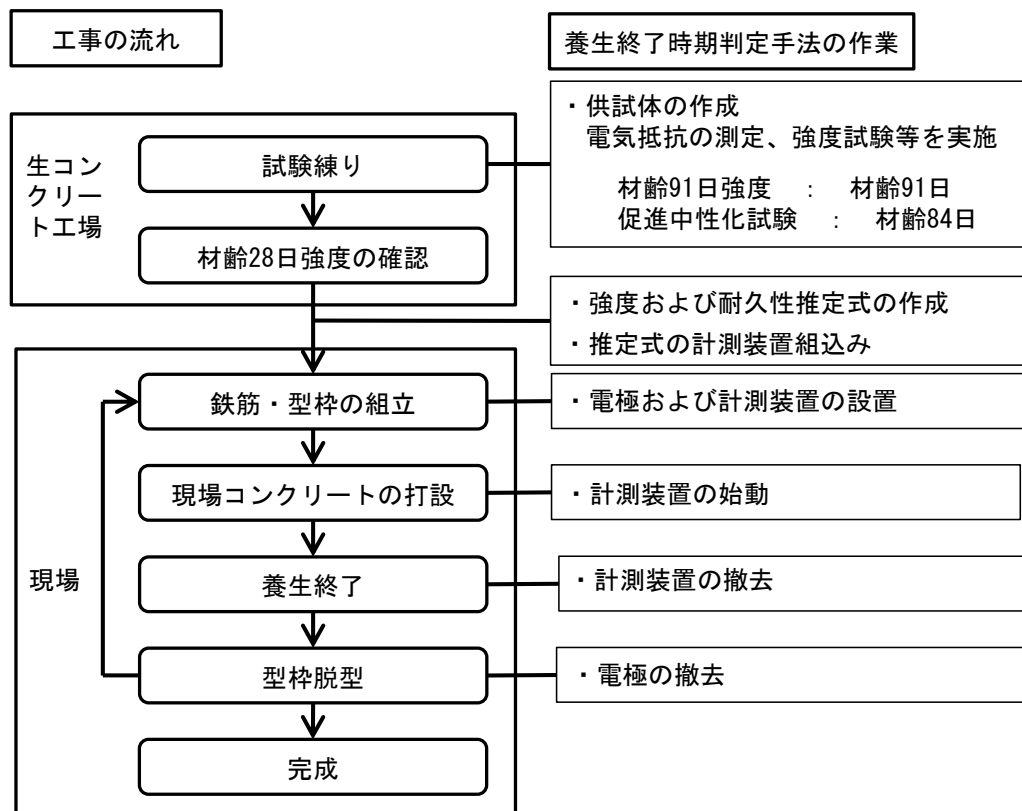


図-6.21 現場計測のフロー



写真-6.1 逆T型擁壁の外観

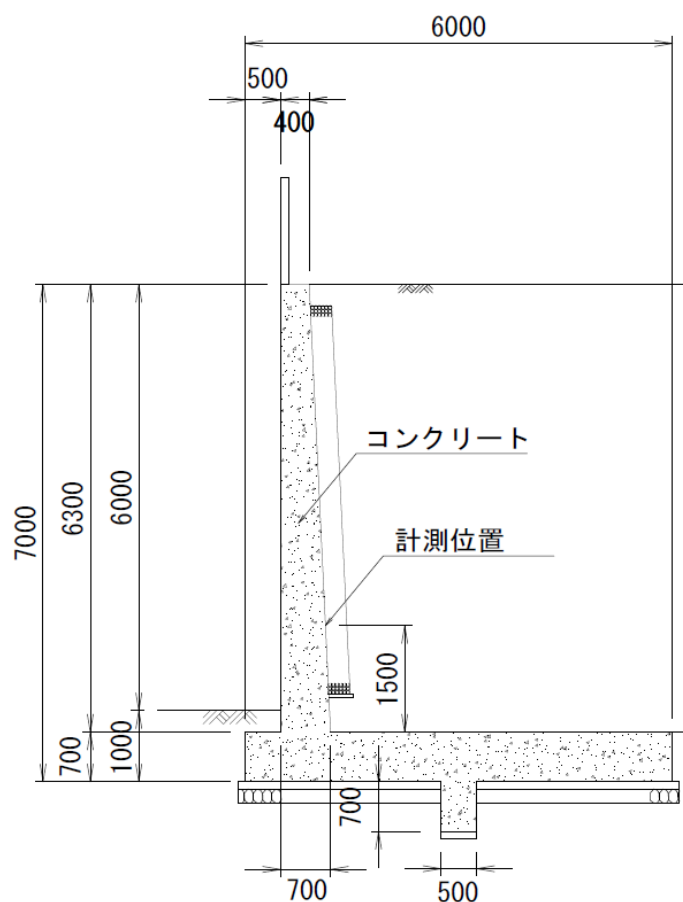


図-6.22 逆 T 型擁壁の概略

得るためには 84 日が必要となる。今回の実験では、養生終了時の圧縮強度、材齢 28 日の圧縮強度、中性化速度係数を推定する。

生コンクリート工場の出荷するコンクリートの種類は、呼び強度やセメントの種類で異なるものの基本的に種類が限られている。コンクリートの種類ごとに電気抵抗と各種物性値の相関式を作成しておけば、基本的に配合条件や使用材料は大きく変化しないため、得られた関係式の転用は可能と考えられる。

次に現場の実構造物に電極を設置し計測を行った。計測を行った場所は、東京都町田市の工事現場であり、屋外で作製される逆 T 型擁壁に電極を設置して測定を行った。逆 T 型擁壁の外観と概略を写真-6.1 および図-6.22 に示す。計測位置は図中に示す擁壁縦壁とした。

試験練りでは、5 章で記載したように電気抵抗と圧縮強度および中性化速度係数の関係式を作成し、その関係式を用いて実際の現場で計測した電気抵抗から現場実構造物の圧縮強度および中性化速度係数を推定する。

圧縮強度試験の方法は JIS A 1108:2018 に準拠して行った。促進中性化試験の試験方法は JIS A 1153:2012 に準拠して行い、供試体は 100×100×400mm の角柱供試体を用い、中性化深さ測定面以外をアルミテープで覆い二酸化炭素の侵入を防いだ。また、測定面は各

種養生期間中にラップフィルムで覆うことにより，封かん養生とした．供試体の前養生は，各種養生を終了後，温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相対湿度  $60 \pm 5\%$  の環境で材齢 56 日まで静置した．中性化速度係数は，促進材齢 4 週の中性化深さから算出した．電気抵抗の計測は 5 章と同様とし，コンクリートの打設直後から経時的に計測を行っている．

(1) 直流四電極法による電気抵抗計測

直流四電極法の概略を図-6.23 に示し，表-6.9 に電気抵抗の計測条件を示す．電極の金属は，ステンレスを使用した．ステンレスを使用した理由は，実構造物のコンクリートの表面を錆汁等で汚さないためである．計測条件は，3 章，5.2，6.1 と同様の方法である．写真-6.2 に電気抵抗の計測状況を示す．

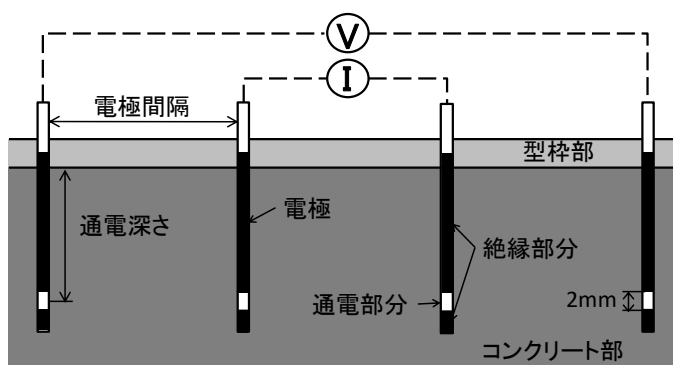


表-6.9 電気抵抗の計測条件

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	10V (パルス波)
電極間隔	50mm
電極直径	$\phi 2.6\text{mm}$
通電深さ	50mm
電極金属	ステンレスの針金

図-6.23 直流四電極法の概略



写真-6.2 電気抵抗の計測状況

(2) 配合および供試体

供試体に使用したコンクリートの配合を表-6.10 に示す．表中のスランプと空気量は実測値である．配合は生コン工場で作製され，27-12-20N で表記される一般的なコンクリートで



ある。

図-6.24 に試験練りの際の養生方法の概略（圧縮強度試験用）を示す。すべての供試体の型枠は、材齢 1 日で脱型した。供試体の養生期間は 1, 3, 7, 28 に設定し、養生終了時およ

表-6.10 コンクリートの配合

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G		
OPC	54	45	172	317	812	989	13.5	5.5

養生期間	材齢 (日)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	~	28
1 日	■	■ 圧								
3 日	■	■	■	■ 圧						
7 日	■	■	■	■	■	■	■	■ 圧		
28 日	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■ 圧

■ : 封かん養生 (20℃)

□ : 屋内暴露 (20℃, RH60%)

— : 脱型

圧 : 圧縮強度試験

図-6.24 養生方法の概略（圧縮強度試験用）

び材齢 28 日に圧縮強度を測定した。促進中性化試験で使用した供試体の封かん養生期間も圧縮強度試験と同様とした。また、実際の現場では実構造物の圧縮強度を確認するため、現場封かん養生を実構造物と同じ期間で行い、その後、材齢 28 日まで現場環境に暴露した供試体も作製した。実構造物の型枠脱型は、材齢 6 日で行った。

試験練りで作製した電気抵抗計測用供試体は、5 章と同様とした。

### 6.3.2 試験結果

#### (1) 試験練り

図-6.25 に試験練りの際の電気抵抗の測定結果を示す。電気抵抗は材齢の進行に伴って大きくなり、3 章や 5 章の結果と同様の傾向を示した。

養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-6.26 示す。以降の結果は 4.3 電気抵抗の推定精度の検証に記載にたように 3 箇所平均では無く、1 箇所の計測結果を示したものである。また、安全率は考慮せずに電気抵抗で実構造物の圧縮強度や中性化速度係数を推定することとした。

図中の養生終了時の圧縮強度は、圧縮強度の小さいものから順に材齢 1 日、3 日、7 日、

28日まで封かん養生を行ったものである。3 および 5 章の結果と同様に養生終了時の圧縮強度と電気抵抗に直線関係が認められた。

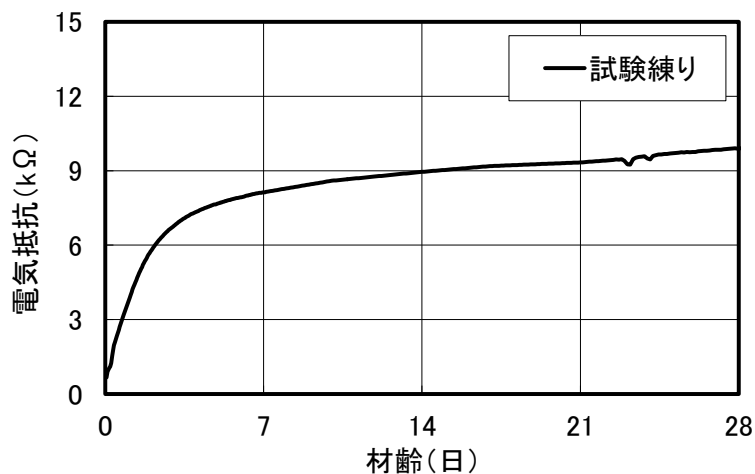


図-6.25 電気抵抗計の測定結果（試験練り）

材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を図-6.27 に示す。図中の材齢 28 日の圧縮強度試験結果は、圧縮強度の小さいものから順に材齢 1 日、3 日、7 日、28 日まで封かん養生を行った供試体のものである。この結果も 3 および 5 章と同様の傾向を示している。

中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係を図-6.28 に示す。中性化速度係数の大きいものから順に材齢 1 日、3 日、7 日、28 日まで封かん養生を行った供試体から算出した結果である。この結果も 3 および 5 章と同様の傾向を示した。

図-6.26~28 は 5 章等で行った試験結果と同様の傾向を示しており、電極の間隔、通電深さ、電極の金属を変えても同様の傾向を得ることができた。この図-6.26~28 を用いて

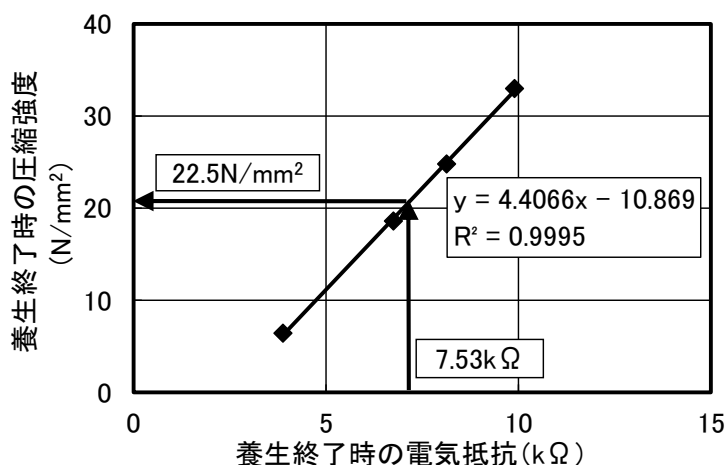


図-6.26 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係

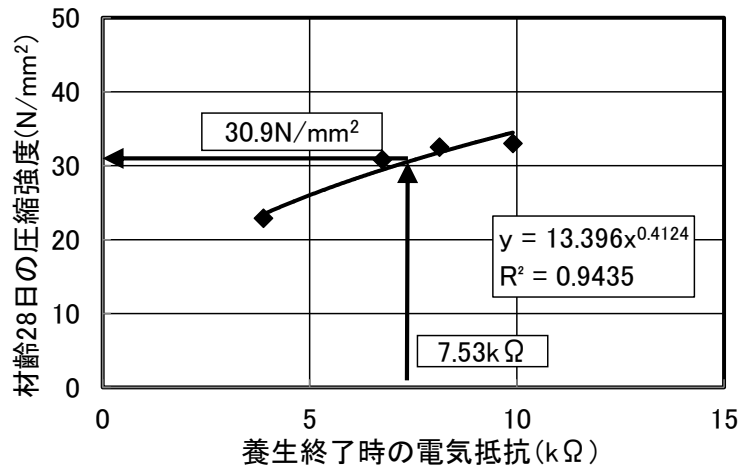


図-6.27 材齢28日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

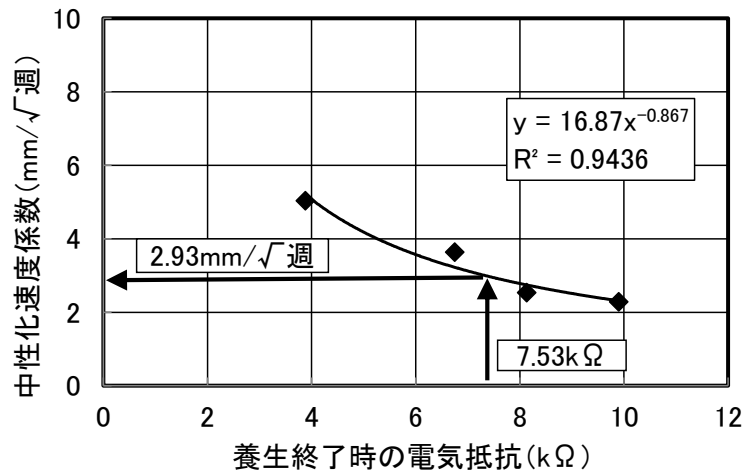


図-6.28 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係

実際の現場の逆 T 型擁壁のコンクリートの電気抵抗から圧縮強度や中性化速度係数を推定する。

## (2) 現場計測

試験練りで作製した供試体を恒温恒湿室内（温度： $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相対湿度： $60 \pm 5\%$ ）で計測した電気抵抗と，実際に現場の逆 T 型擁壁で計測した電気抵抗の計測結果を図-6.29 に示す。試験練りの電気抵抗と現場計測の電気抵抗は，練混ぜ直後に差は認められなかった。しかし，電気抵抗は，材齢の進行に伴って試験練りで計測された値より現場計測の値が小さい値を示した。

現場計測での電気抵抗と外気温を図-6.30 に示す。現場計測時の外気温は，平均気温が  $16.0^\circ\text{C}$  となっており，試験練りの気温  $20^\circ\text{C}$  より低い。したがって，試験練りと現場計測での

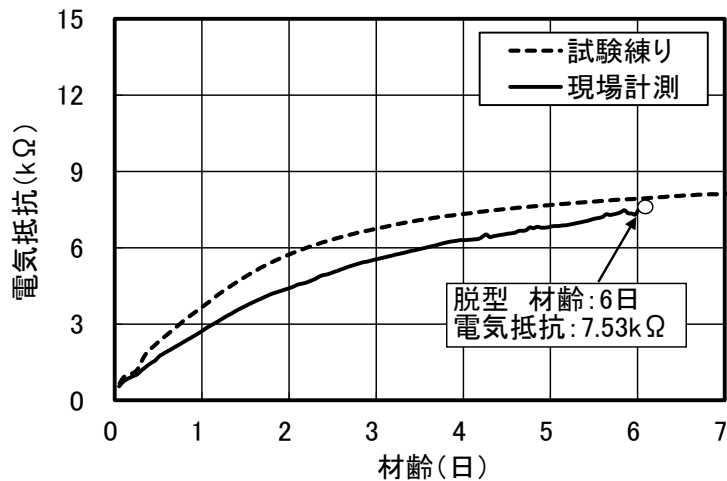


図-6.29 電気抵抗の計測結果（試験練りおよび現場）

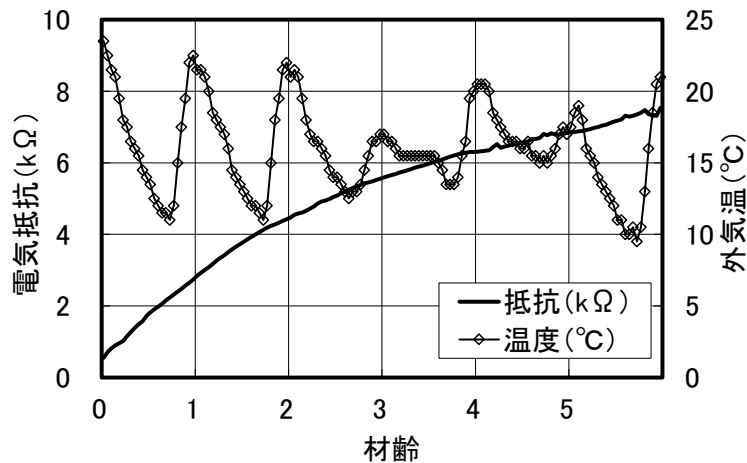


図-6.30 電気抵抗と外気温の関係

電気抵抗の差異の原因として、計測される電気抵抗が温度環境による水和反応の進行度の違いに影響を受けたことが考えられる。これは、温度等の現場状況によって左右されるコンクリートの水和反応の進行度を反映した結果と考えられ、本手法の有用性を示すものと考えられる。

現場の逆 T 型擁壁は、材齢 6 日に脱型されたことにより養生が終了した。養生終了時の電気抵抗値は 7.53kΩ となり、圧縮強度や中性化速度計数は、図-6.26～6.28 内の矢印のように算出される。これらの結果から、実際の現場でコンクリート構造物を対象に電気抵抗が計測可能なことを確認した<sup>4.5)</sup>。また、この現場の逆 T 型擁壁は、十分な強度と中性化抵抗性があると推定される。

現場でコンクリートを打設する際に供試体を採取し、現場封かん養生を実構造物と同様の材齢 6 日まで行い、その後、現場環境で暴露した供試体の材齢 28 日圧縮強度は、31.8N/mm<sup>2</sup>であった。また、本手法で推定された材齢 28 日の圧縮強度の 30.9N/mm<sup>2</sup>であった。これら

の結果から現場封かん養生の供試体と推定強度は、同程度の圧縮強度が得られており、本手法を用いて実構造物の強度を推定することで、外気温などの施工環境を反映した強度の推定ができると考えられる。

本手法を用いれば、試験練りの際に電気抵抗と各物性値の関係をj得ることで、養生を終了するタイミングを決定できると考えられる。以下でその方法について説明する。

図-6.31に養生終了時の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。仮に実際の現場で型枠脱型時の圧縮強度が、コンクリート標準示方書〔施工編〕の型枠および支保工を取り外してよい時期のコンクリートの圧縮強度であたえられている14 N/mm<sup>2</sup>より大きい15N/mm<sup>2</sup>と設定すれば、養生終了時の電気抵抗は5.9kΩとなる。したがって、現場で電気抵抗の計測を行い、電気抵抗の値が5.9kΩを超えれば養生を終了して良いことになる。図-6.29の現場での電気抵抗で確認すると実構造物では、4日程度の養生で養生終了時の圧縮強度を満足したと推定される。

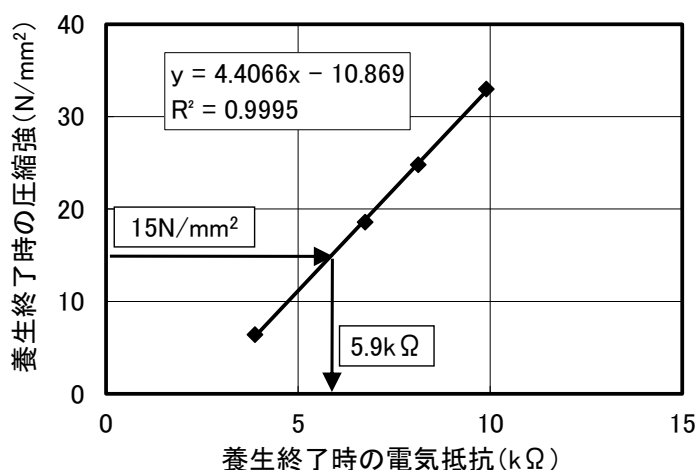


図-6.31 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係

図-6.32に材齢28日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。この現場逆T型擁壁の設計基準強度は24N/mm<sup>2</sup>であり、コンクリートの呼び強度は27N/mm<sup>2</sup>であった。仮に現場での管理強度を27N/mm<sup>2</sup>とした場合、養生終了時の電気抵抗の値は5.5kΩ以上となり、図-6.29の現場での電気抵抗で確認すると3日程度の養生で満足することになる。コンクリート標準示方書〔施工編〕に準拠した湿潤養生期間は5日である。直流四電極法による養生終了時期判定手法を用いれば、この材齢28日の管理圧縮強度27N/mm<sup>2</sup>を満足するために3日程度の養生で良いと判断される。仮にこのコンクリート構造物の養生終了時期の設定を材齢28日の圧縮強度のみとした場合、結果として養生期間を短縮でき、施工期間の短縮や型枠転用性の向上などの生産性向上に結びつくと考えられる。

図-6.33に中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係を示す。同様に、コンクリート構造物に要求される劣化に対する抵抗性である中性化速度係数を3.5mm√週以下としたい

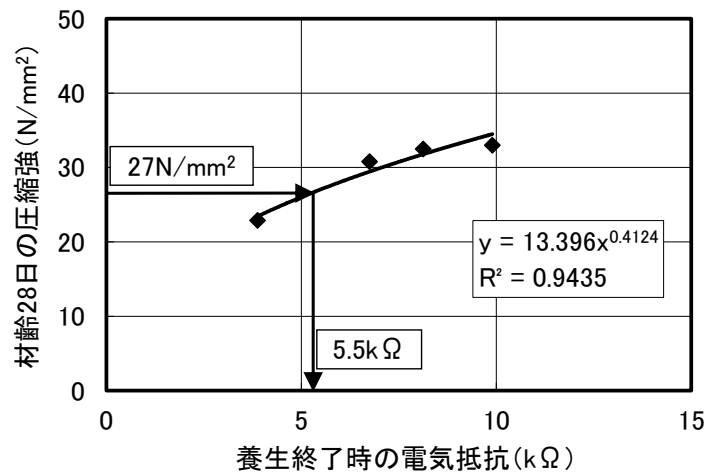


図-6.32 材齢 28 日の圧縮強度と養生終了時の電気抵抗の関係

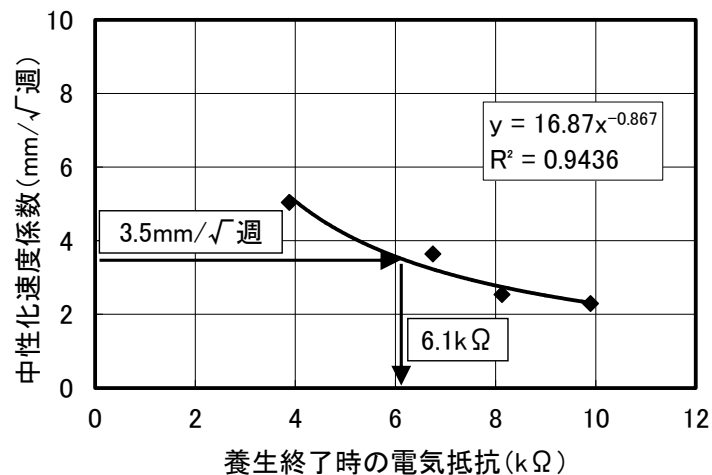


図-6.33 中性化速度係数と養生終了時の電気抵抗の関係

場合，養生終了時の電気抵抗は 6.1kΩ 以上とすれば良く，コンクリート構造物に要求される耐久性から養生終了時期を設定することも可能となる．これは，耐久性照査設計の設定に対して適切な養生終了時期を判断する手法として利用できると考えられる．

前述のように材齢 28 日の圧縮強度を 27N/mm<sup>2</sup> を養生終了のタイミングに設定すると必要な養生終了時の電気抵抗は 5.5kΩ となる．この電気抵抗の値を中性化速度係数に当てはめると推定される中性化速度係数は 4mm/√週程度と比較的に大きな値となる．養生の終了時期は，強度だけでは無く，中性化等の耐久性から定めることが必要と考えられる．

電気抵抗は 3 章や 5.2 で記載したように水和反応の進行度を評価していると考えられ，養生の終了時期をセメントの水和反応の進行度から判断できると考えられる．また，本手法は実際の現場で計測でき，本手法を用いることによりコンクリート構造物に要求される強度や耐久性から養生終了を判断することが可能と考えられる．さらに，コンクリート構造物の耐久性から養生終了時期を判断できる可能性がある．

現場でコンクリート構造物のかぶりコンクリートを直接的に計測し，コンクリート構造

物の強度や耐久性を推定することができた。これにより任意の位置で計測を行うことにより、計測場所ごとの施工環境や構造物の形状等を反映した強度や劣化に対する抵抗性の推定をすることができる。また、電気抵抗を計測することで、適切な養生を行った記録を残すことも可能と考えられる。

#### 6.4 利用方法の提案

本手法はトンネル覆工コンクリート、ポストテンション方式のプレストレストレストコンクリート、混和材を用いたコンクリート、補修および補強等で利用できると考えられる。

本手法は型枠および支保工の取外しで必要となるコンクリートの強度の把握だけでなく、高い耐久性が求められる場所において、その劣化に対する抵抗性が確保されていることを確認するためにも利用できると考えられる。以下に性能別で利用が考えられるものを列挙する。

- 凍害抵抗性 : 防波堤の上部工、河川の護岸コンクリート、寒冷地の水の溜まる場所
- 塩害抵抗性 : 飛まつ帯
- 水密性 : ダム、水理構造物などの水圧がかかる部分
- 耐摩耗性 : ダム越流部など

##### 6.4.1 トンネル覆工コンクリート

トンネル覆工コンクリートの施工は、打込みサイクルが1日または2日に1サイクルで、脱型時間が12～16時間<sup>6)</sup>となっている。

トンネル覆工コンクリートの強度は、現場封かん養生を行った供試体の圧縮強度で確認する。しかし、全ての打込みで脱型時の圧縮強度を確認することはなく、試験により型枠保持時間を決めて型枠脱型を行っている。

トンネル覆工コンクリートは、打込み翌日に脱型するサイクルが一般的であり、一般の屋外コンクリート構造物の養生条件と異なる点が特徴である<sup>7)</sup>。トンネルコンクリート施工指針(案)においても、覆工コンクリートは、一般的に脱型が早いために型枠存置による十分な養生効果は期待できない。しかしながら、トンネル内は、坑口付近を除いて温度が安定しており、湿度も高い状態になっている。また、覆工コンクリートは、背面が地山に接しており、外気に露出しているのは一面のみである。日照作用も無く風等の影響もほとんど受けない。このような状態が確保されるトンネル内は、湿潤状態に保たれているとみなせるので、一般には、特に付加的な養生は行っていない。<sup>7)</sup>と記述されている。また、コンクリートの水和熱や気温変化に起因する温度収縮ならびに乾燥収縮による変形が拘束される場合にひび割れが生じやすいので、対策を検討する必要がある<sup>8)</sup>との記載もあり、覆工コンクリートに発生するひび割れの内、温度収縮ならびに乾燥収縮による変形が拘束されることが主な原因で生じるひび割れパターンを図-6.34に示している。

これらパターン①～④のひび割れは、温度収縮や乾燥収縮に伴って生ずるものである。

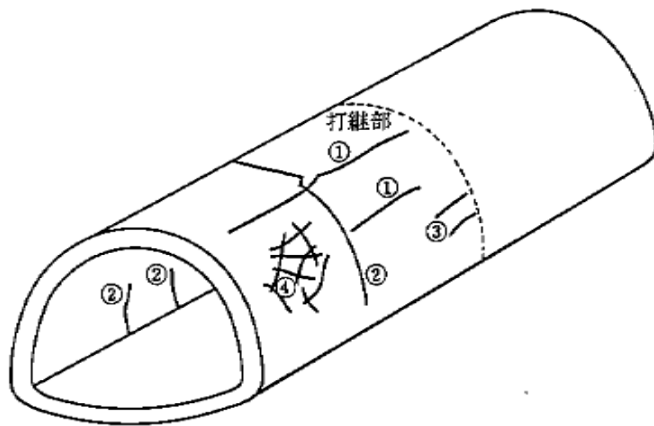


図-6.34 材料・環境に起因するひび割れパターン<sup>8)</sup>

覆工コンクリートは、トンネル軸報告と周方向のいずれにおいても断面の厚さに比べて延長が長く、また、全長にわたって外周面は吹付けコンクリートあるいはセグメントに接しているため、コンクリート自体の変形が拘束されやすい構造になっている。乾燥収縮によるひび割れは、コンクリートの引張強度の発現と乾燥による収縮応力の程度に影響を受けるため、トンネル覆工コンクリートも湿潤養生を適切に行い、引張強度が大きくなってから乾燥の影響を受けることで乾燥収縮ひび割れを抑制できると考えられる。

図-6.35 に半月状ひび割れの発生イメージを示す。この半月状ひび割れは、移動式型枠(センター)を設置する際に先打ちコンクリート側ラップ部の過度な押付けにより発生するとされている。このひび割れは半月状ひび割れとなりやすく、トンネルセンターで発生することから、はく落による第三者被害が問題となる。

本手法を用いて先打ちコンクリートの強度の発現状況を把握することで半月状ひび割れの発生を抑制できる可能性がある。

近年、施工環境の改善目的で換気設備の能力を大きくする傾向があり、今後もその傾向は加速していくものと考えられる。このような施工条件の変化を受ける中で、覆工コンクリー

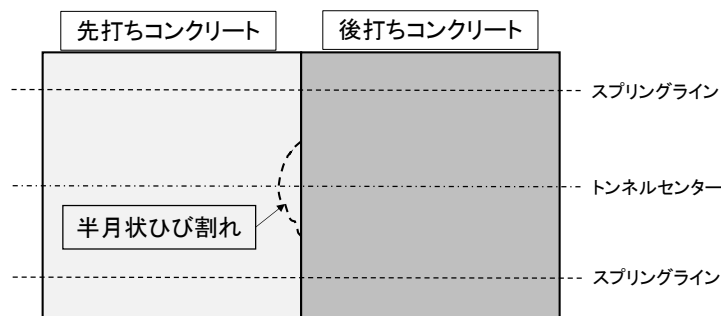


図-6.35 半月状ひび割れの発生イメージ (平面図)



ト表面に比較的初期段階で乾燥収縮ひび割れと考えられるひび割れが観察されており、トンネル内の施工環境が必ずしも養生不要が許容されるようなはないと考えられる。

図-6.36<sup>9)</sup> はトンネル覆工コンクリートの打込み中のセントル内部の温度環境を測定した結果である。コンクリートの打込みは8時頃に開始し、セントルのスプリングライン (SL) にコンクリートが到達した時間は11時頃、肩に到達したのは13時頃、天端に到達したのは16時頃となる。最初に打ち込まれたコンクリートと最後に打ち込まれたコンクリートには8時間の差があることになる。また、セントル内部の温度である養生温度は、打込み時にコンクリート温度の影響を受けて差異が小さくなったと考えられるが、SL、肩、天端の順に大きくなっている。打設した翌日には、セントルの天端とSLで10℃程度も環境温度が異なっている。したがって、トンネル覆工コンクリートのSL部のコンクリートは天端部と比較して、型枠保持時間が5時間程度長くなるものの、養生環境は天端に対して10℃程度低い環境となる。

トンネル坑内の温度環境は、外気温や地山の温度だけでなく、換気装置の稼働状況や能力、貫通の有無<sup>10,11)</sup>等に影響を受けるとされ、さらに坑内でのダンプトラックやバックホー等の重機の排気や廃熱、坑内照明の発熱、吹付けコンクリートやインバートコンクリート等からの水和発熱も影響すると考えられる。これらの熱が坑内上部に溜まるため、坑内上下方向で温度差が生じると考えられる。したがって、早期に脱型されることの多いトンネル覆工コンクリートの強度の発現状況を打設日毎や部分毎に把握することは、ひび割れ発生抑制や作業の安全を守るうえでも必要と考えられる。

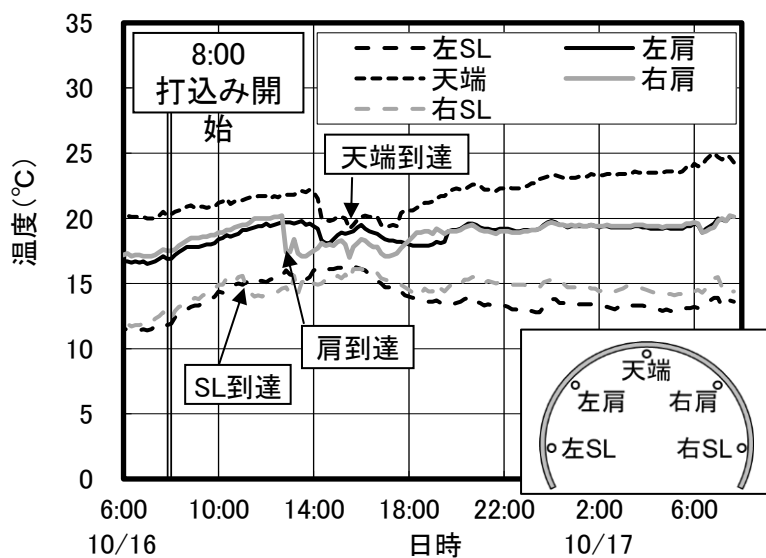


図-6.36 セントル内部の温度計測結果<sup>9)</sup>

図-6.37 に電気抵抗の計測位置案を示す。一般的にコンクリートは坑口側から切羽側に向かって打ち込まれる。したがって、最初に打ち込まれる坑口側の下部、最後に打ち込ま

れる切羽側の吹き上げ口の計測を行うことで、トンネル覆工コンクリートの養生温度によって変化する強度発現の状況进行评估することができると考えられる。また、切羽側の下部の位置のコンクリートは、下部に打ち込まれるコンクリートの中で最も遅くに打設され、養生温度が低い環境の位置となり、コンクリートが坑内上下方向の温度差の影響を大きく受けた場合に最も強度発現が遅くなると予測される位置である。切羽側の天端部はセントル設置の際に力がかかる部分であり、ひび割れの発生しやすい場所である。また、養生温度は比較的に高くなると考えられるものの打込み時期が最後になるため、強度の発現状況を確認することで半月状ひび割れの発生を抑制できると考えられる。

電気抵抗を用いてトンネル覆工コンクリートの強度発現状況を把握することで、ひび割れ発生の抑制や作業の安全性を確保するだけでなく、型枠の脱型時間が遅れると予測される場合には、給熱養生を実施する等の対策をとることも可能である。また、本手法で強度を推定して給熱養生等を行うことで、セントル等の型枠の転用を2日から1日にするなど生産性を向上できる可能性もある。

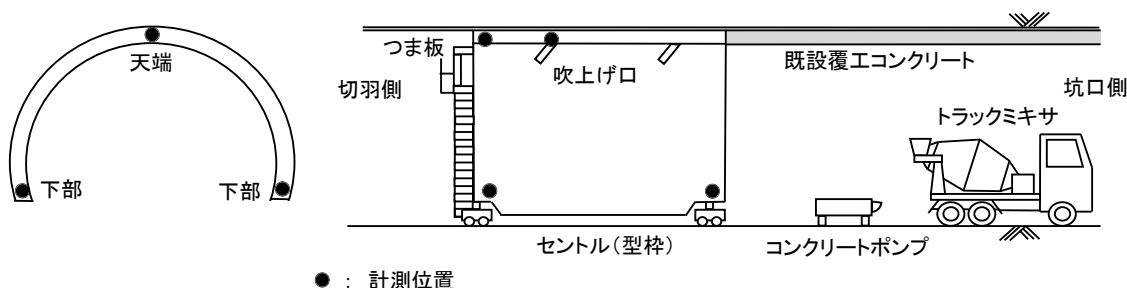


図-6.37 トンネル覆工コンクリートの電気抵抗の計測位置案

#### 6.4.2 プレストレストコンクリート（ポストテンション方式）

プレストレストコンクリートは、長スパン構造でたわみ制限などを受ける場合や、耐久性を必要とする場合に用いられる。建築でも長スパン梁・床スラブが前者の例であり、橋梁では両者の必要性から桁、スラブなどに用いられる。また、水タンク、地上式 LNG タンク、各種サイロ、原子炉格納容器などの容器構造物にも、止水性や気密性保持という機能上の要求からプレストレストコンクリートが用いられている<sup>12)</sup>。

プレストレストコンクリートのポストテンション方式は、プレストレストコンクリート工法設計施工指針に設計基準強度として  $30\text{N/mm}^2$  以上のコンクリートを用いることを原則としており、緊張材の定着部に一般に大きい支圧応力が生じる<sup>13)</sup>としている。したがって、PC 鋼材等の緊張材を緊張させる際、コンクリートが緊張力に耐えられるように所要の強度に達しているかを確認する必要がある。

図-6.38 に定着部付近の応力分布を示す。定着部付近には、緊張材に垂直な方向の引張応力 (図中①)、各定着体間の緊張材に垂直な方向の引張応力 (図中②)、またはぐう角部の引

張応力（図中③）などが生じる<sup>13)</sup>。したがって、図中の引張応力の働く部分は強度発現が十分でない場合、PC 鋼材等の緊張材を緊張させる際にひび割れが発生する恐れがある。また、定着部は図のように特に鉄筋量が多い。

近年、通行車両の規制緩和により設計活荷重が大型化した。また、橋梁規模の長大化により自重が増加する傾向にある。さらに、度重なる震災の影響により耐震性能の高度化している。これにより、プレストレストコンクリートは、PC 鋼材および鉄筋量が増加する傾向にある。また、定着部は桁端部であり、外気温の影響を受けやすいと考えられる。また、定着部は熱伝導率の高い鉄筋が多く、打設中のコンクリートが外気温や日射等の影響を大きく受けると考えられる。

電気抵抗の計測は任意の位置の強度を推定できるため、PC 鋼材等を緊張させる前に定着部の強度を確認することで、ひび割れの発生防止に結びつくと考えられる。

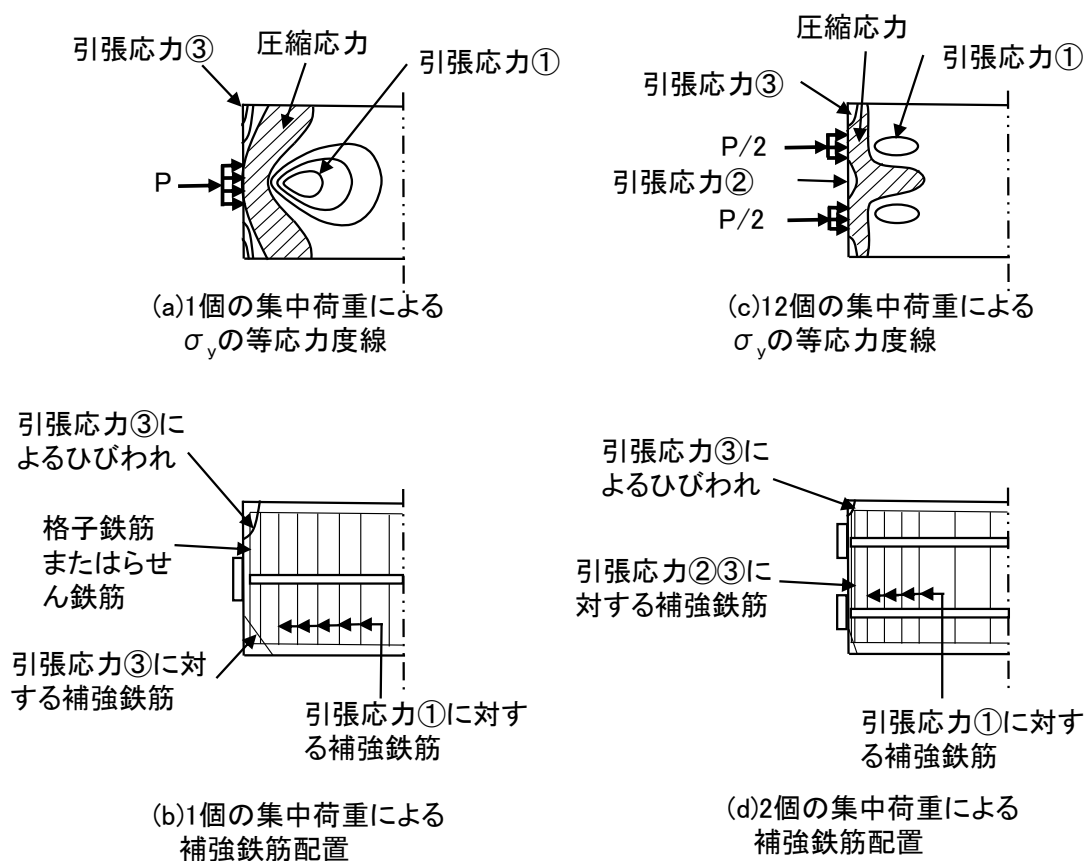


図-6.38 定着部付近の応力分布状況<sup>13)</sup>

### 6.4.3 混和材を用いたコンクリート

建設業界では産業副産物の有効利用が求められており、混和材で置換した混合セメントの利用が求められている。さらに近年では、CO<sub>2</sub>の排出抑制等の環境負荷低減の観点から混

和材で高置換したコンクリートの研究開発が行われている<sup>14,15,16)</sup>。

混和材の中でもセメントの置換率を高く設定できる BFS を例にすると、BFS でセメントを置換したコンクリートは、CO<sub>2</sub> の削減、塩害抵抗性の向上、ASR の抑制、水和発熱の抑制などの利点がある一方で、初期強度の低下することが一般的に知られており、中性化抵抗性の低下<sup>16,17,18)</sup>などの注意点も挙げられている。

初期強度の低下に対しては、本手法を用いて型枠内部のコンクリートの強度を把握することで、型枠を脱型する際の作業の安全性の向上、作業荷重や振動等によるひび割れ発生の防止、乾燥収縮ひび割れの発生の抑制が可能と考えられる。以下では、BFS を用いたコンクリートの中性化抵抗性について説明する。

表-6.11 にコンクリートの計画配合を示す。配合は水結合材比が 50%，細骨材率が 46%，単位水量が 165 kg/m<sup>3</sup> で統一している。各配合の BFS 置換率は 50，60，70，80% となっている。

図-6.39 に供試体の養生条件を示す。供試体は材齢 1 日で脱型後に各種養生を行い、恒温恒湿室（温度：20±1℃，相対湿度：60±5%）の環境で 1 週間ほど静置し、含水状態を調整した。その後、雨掛かりがなく直射日光が当たらない屋外環境に 4 週間ほど静置し、その後、促進中性化試験を行った。

促進中性化試験の試験条件は、JIS A 1153:2012 に準拠し、促進材齢 0,1,4,8,13,26 週で中性化深さを計測し、各材齢の中性化深さから中性化速度係数を算出した。

表-6.11 コンクリートの計画配合

略号	W/B (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	OPC	BFS	S	G
OPC	50	46	12.0	4.5	165	330	-	826	1000
B50						165	165	821	993
B60						132	198	820	992
B70						99	231	819	990
B80						66	264	818	989

	材齢													
	0	1日	1週	2週	～	4週	5週	6週	7週	～	9週	～	11週	
養生無し	打設	型枠 存置	恒温恒湿室	屋外暴露				促進環境						
封かん1w			封かん	恒温恒湿室	屋外暴露				促進環境					
水中1w			水中	恒温恒湿室	屋外暴露				促進環境					
水中4w			水中			恒温恒湿室	屋外暴露				促進環境			
水中6w			水中						恒温恒湿室	屋外暴露			促進環境	

図-6.39 供試体の養生条件

図-6.40 に中性化速度係数と BFS 置換率の関係を示す。図中の凡例は養生条件である。中性化速度係数は BFS 置換率の増加に伴って大きくなった<sup>19)</sup>。この傾向は既往の研究<sup>20,21)</sup>と同様の傾向である。各養生条件に着目すると、OPC を用いたコンクリートの中性化速度係数は、養生条件によって中性化速度係数に大きな差異が認められない。しかし、BFS を用いたコンクリートの中性化速度係数は養生条件によって異なり、養生無しの中性化速度係数が大きく、水中 4w や水中 6w の中性化速度係数が小さくなった。このように BFS を用いたコンクリートを使用する場合、中性化抵抗性は養生条件に大きく影響を受ける。また、養生条件が中性化速度係数にあたる影響は、BFS 置換率が大きくなるほど顕著である。この傾向は既往の研究<sup>14,15,16)</sup>よりフライアッシュを使用したコンクリートでも同様の傾向を示しており、混和材を用いたコンクリートは、耐久性を確保するために適切な養生を行う必要がある。

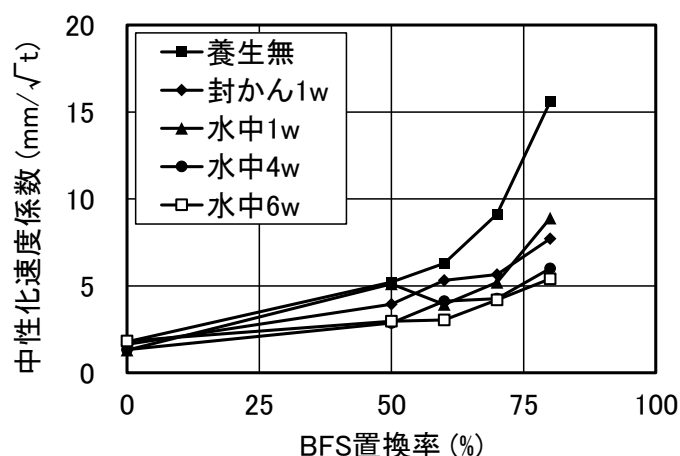


図-6.40 中性化速度係数と BFS 置換率の関係<sup>20)</sup>

電気抵抗を用いて型枠内部の混合セメントを用いたコンクリートを評価することにより、適切な養生を行うことが可能と考えられる。また、施工者は本手法を用いることで適切な養生を行った記録を残すことが可能になる。

混和材を用いたおよび高置換したセメントを用いる場合には、強度だけではなく劣化に対する抵抗性で養生終了時期を判断することで適切な養生を行うことができ、高耐久なコンクリート構造物を作製できると考えられる。

#### 6.4.4 補修および補強

高度成長期に建設された多くのコンクリート構造物が老朽化しており、多くの構造物が劣化の問題を抱えている。現在、これら劣化の対策として補修および補強が行われている。この補修および補強においてコンクリートの劣化部や剥離部を除去し、断面修復材で補修および補強をすることが一般的に行われている。

この断面修復材での補修および補強では、コンクリート構造物の供用を制限しながらの作業が行われる場合もあるため、断面修復材を打込み後に強度や劣化に対する抵抗性が確保できれば早期に型枠および支保工の除去を行いたい場合が多い。

本手法の電気抵抗の計測は、ポリマーを含む断面修復材でも計測が可能であることが確認されている<sup>22,23)</sup>。本手法を用いて型枠内部の断面修復材の強度や劣化に対する抵抗性を確認することで、型枠および支保工の除去作業の安全性を確保することが可能であり、給熱養生等を用いることにより早期の供用制限の解除も可能になると考えられる。

## 6.5 まとめ

6章では、提案する養生終了時期判定手法を実際の現場で使用するため、電気抵抗の計測精度について検討を行った後に、実際の現場のコンクリート構造物で直流四電極法による電気抵抗の計測を行った。また、得られた結果から本手法の利用が見込まれる場面や工種について記載した。

6.1 計測精度の検証では、計測される電気抵抗にはばらつきが認められた。この電気抵抗のばらつきは、強度や耐久性を推定するには大きいと考えられた。そのため、電気抵抗の計測を3箇所で行い、3箇所の平均値を用いることを提案した。この平均電気抵抗のばらつきは、概ね正規分布を示すことが明らかとなり、強度の推定に適用できると考えられる。また、電気抵抗から推定される強度および劣化に対する抵抗性が、実際のコンクリート構造物のものより大きく推定されると養生終了の判断が早くなり危険側になるので、電気抵抗に安全率を付与することを提案し、その方法を記載した。

6.2 現場適用性の検討では実際の現場で電気抵抗の計測を行い、計測される電気抵抗値から養生終了時、材齢28日の圧縮強度および中性化速度係数を推定できることを示した。また、推定された材齢28日の圧縮強度は、現場封かん養生を行いコンクリート構造物と同時期に養生を終了し現場環境で暴露した供試体の材齢28日の圧縮強度と同程度となった。提案する養生終了時期判定手法は、実際の工事現場でも適用が可能と考えられる。

6.3 利用方法の提案では、養生終了時期判定手法が有用と考えられる場面について示した後、例としてトンネル覆工コンクリートの養生、プレストレストコンクリートの強度の把握、混和材を用いたコンクリートの養生等を挙げ、その利用方法等について説明し、本手法の有用性について説明をした。

6.4 適用範囲では、直流四電極法で計測される電気抵抗は、コンクリート内部の水量を評価しているため、水分の逸散や供給の無い封かん養生の場合に本手法が適用できることについて説明した。

## 参考文献

- 1) 全国生コンクリート品質管理監査会議:平成29年度全国統一品質管理監査結果の概要,  
<http://www.hinkankaigi.jp/pdf/h29-gaiyou.pdf> (最終検索日:2019/1/9)

- 2) 郭度連, 宇治公隆, 国府勝郎, 上野敦: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002.7
- 3) 三坂岳広, 伊代田岳史: 直流四電極法を用いた各種養生方法による表層コンクリートの含水状態評価手法の提案, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, Vol.6, pp.195-200, 2018.8
- 4) 三坂岳広, 太田真帆, 伊代田岳史: 直流四電極法による養生終了時期判定手法の現場適用性および計測方法の検討, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, Vol.5, pp.123-126, 2015.7
- 5) 三坂岳広, 原沢蓉子, 伊代田岳史: 直流四電極法による養生終了時期判定方法の確立および現場適用性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.7
- 6) 小林一輔: コンクリート実務便覧, オーム社, pp.429-433, 2004.12
- 7) 小林一輔: コンクリート実務便覧, オーム社, pp.9-10, 2004.12
- 8) 土木学会: トンネルコンクリート施工指針(案), コンクリートライブラリー102, pp.40-41, 2001.1
- 9) 宇野洋志城, 京免継彦, 桑原嗣, 小泉直人: T-JUDG(積算温度管理による脱型時期判定)システムの開発と現場導入, 佐藤工業技術研究所報, No.36, pp.1-8, 2011
- 10) 壹岐直之, 須貝亮, 山田祐二, 吉武勇: プラスチックフィルムを用いた覆工コンクリートの養生試験, トンネルと地下, Vol.40, No.12, pp.873-879, 2009.12
- 11) 村上順菜, 辻田陽一, 二村憲太郎, 伊代田岳史: 覆工コンクリートにおける脱型時期および養生手法が表層品質に与える影響, 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16巻, pp.67-72, 2016.10
- 12) 小林一輔: コンクリート実務便覧, オーム社, pp.9-10, 2004.12
- 13) 土木学会: プレストレストコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリー, No.66, pp.8-10, 1991.3
- 14) 鍵本広之, 菊池浩一郎, 佐藤道生, 長瀧重義: フライアッシュ置換率を60%まで高めたダムコンクリートの諸性状, 土木学会論文集, No.781, V-66, pp.45-56, 2005.2
- 15) 舟橋政司, 白根勇二, 萩野正貴, 中村英佑: 低炭素型コンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.232-237, 2017.7
- 16) 黄光律, 野口貴文, 友澤史紀: フライアッシュを大量混和したコンクリートの中酸化特性に及ぼすポゾラン反応の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.531, pp.7-14, 2000.5
- 17) 長滝重義, 大賀宏行, 佐伯竜彦: コンクリートの中酸化深さの予測, セメント技術情報, No.41, pp.343-346, 1987
- 18) 下屋敷朋千, 鹿毛忠継, 棚野博之, 濱崎仁, 古賀純子, 土屋直子: コンクリートの中酸化に及ぼすコンクリート用混和材料の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.271-272, 2014.9
- 19) 三坂岳広, 末木博, 伊代田岳史: 高炉コンクリートの炭酸化が物質移動抵抗性に与える

- 影響, セメント技術大会講演要旨, No.72, pp.248-249, 2018
- 20) 三坂岳広, 末木博, 伊代田岳史: 養生が高炉スラグコンクリートの中性化速度係数に及ぼす影響: 土木学会年次学術講演会, V-083, pp.165-166, 2018.8
  - 21) 水野博貴, 末木博, 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末高置換セメントを用いたコンクリートの炭酸化進行に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, 2018.7
  - 22) 三坂岳広, 伊代田岳史: 電気抵抗に影響を及ぼす配合条件の検討および断面修復材の練混ぜ時の単位水量の管理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.1275-1280, 2018.7
  - 23) 内藤英晴, 守屋進, 川俣考治, 皆川浩: 各種セメント系断面修復材の電気抵抗率に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008.7



## 7 まとめ

本研究では提案する直流四電極法による電気抵抗を用いて型枠内部のコンクリートの電気抵抗を簡易で安価に計測し、強度や劣化に対する抵抗性を推定することで、養生終了時期を判定する手法を提案した。現在、現場のコンクリート構造物の強度や劣化に対する抵抗性を推定できる手法はなく、型枠内部のコンクリートの強度および劣化に対する抵抗性を推定できれば、コンクリート構造物に適切な養生を行えるだけでなく、型枠および支保工の転用性を向上でき、作業荷重や乾燥収縮等によるひび割れ発生の抑制も可能になると考えられる。以下に各章で得られた知見について記載する。

3章では、型枠内部のかぶりコンクリートの電気抵抗の計測方法を提案し、提案する方法で電気抵抗の計測を行い、計測される電気抵抗がコンクリートの水和反応の進行度を評価できるかについて検討した。その結果、提案した手法によって計測された電気抵抗と結合水率に相関関係が認められた。これにより、直流四電極法による電気抵抗の計測方法を提案した。

4章では、本手法によって計測された電気抵抗がコンクリートのどのような性質に影響を受けるかを明らかにした。挙動メカニズムの解明では水和反応と電気抵抗の経時変化について検討した。結果から電気抵抗はコンクリート内の水のイオン量や水量を評価していると考えられ、セメントと水の溶解反応によって増加する  $\text{Ca}^{2+}$ 等のイオン濃度、水和反応の進行によって減少する水量に影響を受けることを明らかにした。また、配合条件が及ぼす影響では、モルタルの配合が変化した場合に電気抵抗がどのように変化するのか検討した。結果として、計測される電気抵抗は配合条件に影響を受け、特に単位水量に影響を受けることを明らかにした。これらの結果から直流四電極法による電気抵抗が養生終了時期判定に適用できる可能性を示した。

5章では、電気抵抗と圧縮強度および劣化に対する抵抗性の関係について検討し、養生終了時の電気抵抗から圧縮強度および劣化に対する抵抗性が推定できる可能性を示した。養生終了時の電気抵抗の計測によって推定できるのは、養生終了時の圧縮強度だけでなく材齢 28 日の圧縮強度、材齢 91 日の圧縮強度、中性化速度係数であり、養生終了時の電気抵抗からコンクリートが将来的にもつ圧縮強度や劣化に対する抵抗性を推定できると考えられる。これは、実構造物の型枠および支保工の取外し時期の判断等に使用できるだけではなく、施工期間中にかかる作業荷重などを検討するためにも活用できる可能性がある。コンクリートが将来的にもつ圧縮強度や中性化速度係数を推定できることは、設計で設定された強度や劣化に対する抵抗性を満足するために必要であり、適切な養生を行うことが可能となる。また、養生に時間がかかると判断される場合、給熱養生を行う等の対策を行うことも可能となる。水セメント比や BFS 置換率が異なるコンクリートについても検討を行い、これら条件が電気抵抗から強度および劣化に対する抵抗性を推定する検量線におよぼす影響を明らかにした。また、計測された電気抵抗と強度および劣化に対する抵抗性に相関がある理由についても検討を行った。結果として、電気抵抗はコンクリート内にある空隙中の水量

を評価していると考えられ、コンクリートの水和反応による水の消費を評価していると考えられた。また、BFSを用いたコンクリートの電気抵抗の経時変化は、空隙と水量の関係だけでは説明が難しく、細孔溶液中のイオン強度が電気抵抗に影響していると考えられた。以上の結果から提案する養生終了時期判定手法でコンクリートの強度および劣化に対する抵抗性を推定できる可能性を示し、強度および劣化に対する抵抗性を推定できる理由についても明らかにした。

6章では、提案する手法を実際の現場に適用するため、電気抵抗の計測精度について検討した。結果から計測される電気抵抗はばらつきがあり、電気抵抗から強度や劣化に対する抵抗性を推定するには、ばらつきが大きいと考えられた。そこで電気抵抗の値を3箇所の計測結果の平均値にすることで、強度や劣化に対する抵抗性を推定することを提案し、圧縮強度を推定するのに十分な計測精度を確保した。本手法を実際の現場で用いるために養生方法が電気抵抗におよぼす影響とその影響範囲について検討を行った。結果として電気抵抗で水和反応の進行度を評価するためには、電極の通電深さを30 mm以上に設定する必要があることが明らかとなった。実際の現場で試験練りの際に電気抵抗と圧縮強度および中性化速度係数の検量線を作成し、現場の実構造物で計測した電気抵抗から圧縮強度と中性化速度係数の推定を行った。結果として実構造物の強度および劣化に対する抵抗性を推定することができた。また、現場封かん養生を実構造物と同じ期間行った供試体と本手法による推定強度を比較したところ、良い推定精度が得られた。これにより、提案する養生終了時期判定手法を用いて実際の現場のコンクリート構造物の強度および劣化に対する抵抗性を推定できることを明らかにした。また、この方法の適用範囲について説明をした後、利用場所や活用方法を提案し、本手法の有用性について説明した。

以下の本手法の適用の範囲、研究の展望について記載し結びとする。

## 7.1 適用の範囲

提案する養生終了時期判定手法の特徴は、電極に一般に販売されている針金を用い、型枠に小さな穴を開けて電極を設置し、小型で安価な計測装置を用いて計測することにある。3.2 電気抵抗の計測方法の構築で記載したように本手法の電気抵抗の計測方法は、直流電源を使用し、パルス波を用いている。また、電極に関しても針金を簡易に加工したものである。したがって、土木学会基準の「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K 562-2008)」で計測される電気抵抗等とは、計測精度や影響要因とその程度も異なると考えられ、あまり精緻な計測ができていないと考えられる。したがって、計測される電気抵抗から結合水率等を厳密に推定することは難しいと考えられる。しかし、実際の現場で簡易で安価にコンクリート構造物の強度および劣化に対する抵抗性を推定するためには、提案する計測手法の方が優れていると考えられる。

提案した養生終了時期判定手法は、現場で養生期間中のコンクリート構造物の強度および劣化に対する抵抗性を推定することが可能と考えられる。しかし、本手法の適用が難しい

と考えられる場面もあると考えられるので以下に記載する。

本手法はコンクリートの電気抵抗を用いるため、計測装置を設置する電極部分に水があると電気抵抗の計測を行うことが難しい。したがって、電極部分が雨などによって水に濡れた場合は計測が難しい。また、水中や土中での電気抵抗の計測も難しいと考えられる。また、本手法は電気抵抗の計測を行うため、計測される電気抵抗は計測場所の迷走電流に影響を受けると考えられる。したがって、電車軌条、溶接作業等に影響を受けるため、計測が難しいと考えられる。

## 7.2 研究の展望

現在、ICT を建設現場に導入することが検討されており、国土交通省においては、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指す新しい取組である **i-Construction** を進めている。本手法は施工要因の養生を数値化するものであり、**CIM** 等の情報と統合することで、施工記録の作成、ひび割れ等の不具合原因の推定、維持管理の際に使用するデータ等に利用できると考えられる。

本研究の 4.2 挙動メカニズムの解明において、コンクリートの電気抵抗は、セメントからのイオンの溶解反応や水和反応による水の消費に影響を受けることを明らかにした。これは、電気抵抗を用いてコンクリートの水和反応を評価できる可能性を示していると考えられる。電気抵抗をもちいてコンクリートの水和反応が評価できれば、コンクリートの強度および劣化に対する抵抗性の推定だけではなく、様々な事柄に応用できる可能性があると考えられる。例えとしては、各種遅延剤や促進剤の添加による水和反応の進行度の評価、打重ねの判断、コンクリート打設面の適切な締固め時期およびコテ仕上げ時期の判断等が挙げられる。

本手法の電気抵抗の計測は現場適用性を重視し、簡易で安価な手法としたため、電極や計測方法に誤差要因が多く、電気抵抗の計測精度は高くないと考えられる。計測される電気抵抗の計測精度や影響要因について検討をし、電気抵抗を用いて水和反応を適切に評価することができれば、本手法を打重ねの判断、コテ仕上げ時期の判断等に活用でき、本手法のさらなる活用や **i-Construction** の可能性が広がるだけでなく、コンクリートの電気化学的計測の可能性も広がると考えられる。

本手法は電気抵抗により型枠内部のコンクリートの水和反応の進行度を評価することが特徴である。一方、養生期間中のコンクリートの水和反応の進行度に大きく影響をおよぼすものは、コンクリート温度であると考えられる。本論文では、3.2.6 で電気抵抗と水和反応の進行度について相関を示し、6.3 では実際の現場環境で電気抵抗から強度を推定し、良い精度が得られている。しかし、現場の養生期間中の平均気温が 16℃であり、実験室で強度や劣化に対する抵抗性の検量線を作成した温度環境である 20℃と大きく変わらない。そのため、検討が十分とは言えないと考えられる。今後は日平均気温が 5℃程度の低温環境や、35℃程度の高温環境でも電気抵抗の計測を行い、本手法を用いて強度や劣化に対する抵抗

性を推定できることを確認する必要がある。また、日平均気温は 20℃であっても気温の変動が大きい場合についても検討を行う必要があると考えられる。

本手法により計測される電気抵抗は、コンクリート内部の水分量に大きく影響を受けると考えられる。本手法で強度や劣化に対する抵抗性を推定する検量線は、Φ100×200 の円柱供試体や 100×100×40mm の角柱供試体を用いて作製しており、ブリーディング現象の影響を大きく受けていない。一方、実際の現場のコンクリート構造物には高さがあり、ブリーディング現象により上部と下部でコンクリートの水量が異なる可能性がある。本手法の計測をコンクリート構造物の高さの異なる場所で計測を行い、計測される電気抵抗がブリーディング現象に受ける影響について確認をする必要がある。

本手法によって計測される電気抵抗は、コンクリート内部の水のイオン強度に影響を受けると考えられる。したがって、混和剤の種類に影響を受ける可能性があり、流動化剤等の現場で添加される混和剤によって電気抵抗の値が変化する可能性がある。この混和剤の影響についても確認をする必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり，終始多大なご指導ご鞭撻を賜りました芝浦工業大学 教授 伊代田岳史 先生に心より感謝いたします。私が伊代田先生に初めてお会いしたのは，総合建設業の技術研究所に配属された直後のコンクリートの知識も少ない入社 3 年目の若手社員の頃でした。知識と経験不足の私に学会発表や様々な人とお会いする機会を与えていただきました。企業で働く研究者として進むべき道と目標を与えてくれたのは，伊代田先生でした。また，研究だけではなく仕事のやりかた，物事の見方から考え方に至るまで，様々な事柄をご指導していただきました。私が伊代田研究室に所属した後も研究の指導だけではなく，学生との接し方や指導方法，業界の現状と進むべき方向性などについてお話をさせていただいたことは，貴重な経験になりました。今，思い出しても様々な事柄で伊代田先生にご迷惑をおかけする事ばかりだったと思います。厚く御礼申し上げます。

芝浦工業大学 教授 勝木太 先生，芝浦工業大学 教授 濱崎仁 先生，芝浦工業大学 教授 稲積真哉 先生，東京理科大学 教授 加藤佳孝 先生には，本論文の審査をお引き受けいただき，研究に関する貴重なご意見やご指導をいただきました。また，芝浦工業大学 非常勤講師 前原聡 先生には，伊代田研究室で博士後期課程を修了した先輩として，何かとご心配していただき，温かいお言葉をいただきました。厚く御礼申し上げます。東京理科大学 助教 江口康平 先生にも合同研究成果報告会等で研究についてお教えいただきました。北海道大学 准教授 Michael HENRY 先生，東京大学 助教 酒井雄也 先生には，国際会議の英語発表で困惑している私を補助してくれました。厚く御礼申し上げます。東京理科大学 非常勤講師 西村次男 先生には，様々な先生方の武勇伝をお教えいただき，研究者のあり方をお教えいただきました。元東京大学生産技術研究所 技術専門職員 星野富夫 先生には，学会等でお会いする度に実験のやり方や注意事項についてお教えいただきました。

受委託研究および共同研究の関係で伊代田研究室にお越しになられていた企業の方々には，私の研究に関して貴重な意見をいただきました。深く感謝いたします。BASF (株) 杉山知己氏，前田建設工業 (株) 白根勇二氏，電気化学工業 (株) 伊藤慎也氏，(株) 東京テクノ 松田信広氏，飛島建設 (株) 槇島修氏，川里麻莉子氏，西武建設 (株) 二村憲太郎氏，村上順菜氏，太平洋セメント (株) 杉山彰徳氏，エクセン (株) 岡本敏道氏には，研究を通して様々な知識を私に与えてくれました。

伊代田研究室の修士として在籍された伊藤孝文君，太田真帆さん，田籠滉貴君，末木博君，水野博貴君，中西縁さん，ABDULKAREEM ABDULKADEER ABDULLAHI 君，Lazarus Lemi Chacha Costa 君，中村絢也君，荒木萌さんには，研究および研究室生活において多大な御助力を賜りました。皆様の御助力が無くして博士後期課程の修了は無かったと思ひ

ます。皆さんが実験や行事の準備や片付けを先回りしてやってくれたことで、どれだけ助けられたかわかりません。厚く御礼申し上げます。太田さんが私の事を考えて色々と調整をしてくれたことを察しています。伊藤君は良く先生と修士や学部生の間を取り持ち、研究室の運営をスムーズにしたと思います。また、研究に関するコメントも当を得たもので驚かされます。田籠君は嫌な顔一つせずに夜遅くまで手伝ってくれました。末木君には実験器具の修理等を良く一緒にやってもらいました。水野君には何かと時間のかかる行事の準備や研究室の運営などをしてもらいました。中西さんには行事の段取りを率先してやってもらいました。何かと手がまわらない私は皆さんに本当に助けられました。ABDULKAREEM ABDULKADEER ABDULLAHI 君の一生懸命に実験をする姿は、美しかったです。Lazarus Lemi Chacha Costa 君の国に帰って祖国を発展させたいという熱い思いには、驚きました。中村君の何でも楽しんでやる姿勢は研究室に良い雰囲気をもたらしたと思います。荒木さんの真面目な行動は修士の学生の鏡だと思います。

八代目伊代田研究室の学部生である吉成健吾君、今井巧君、南宏達君、中川大樹君、森嘉一君には御世話になりました。吉成君の実験結果で一喜一憂している一生懸命な姿は、美しいものでした。今井君とは拝島に行って雪の中でコンクリートを打設しました。本当に寒くて大変だったと思います。南君は学部生にして査読付き論文に投稿しようとした姿には、驚きました。中川君の研究は難しかったと思います。良く纏めたと思います。森君のひたすら実験をやり続ける根性には感心しました。

九代目伊代田研究室の学部生である蟻川駿太君、牛久保実梨さん、浴陸真君、柿沼拓実君、渋谷俊貴君、中村真人君、平岡理彩子さんには、お世話になりました。蟻川君は常に面白い事を言い、研究室の雰囲気を盛り上げてくれました。あの反射的に面白い事を言える能力が私も欲しいです。牛久保さんには研究室の雰囲気を和ませる特殊能力があったと思います。浴君が夜な夜な実験を頑張った後の姿を今も思い出します。柿沼君が頭を抱えてPCに向かう姿は美しいものでした。渋谷君とは一緒に実験をし、一緒に査読付き論文を執筆しました。渋谷君を見ていると大学生の頃の自分に喝をいれてやりたいと思います。中村君とは良く研究の話をして、2人で頭を悩ませました。納得するまで折れない中村君の姿勢は尊敬します。平岡さんは、研究室の運営のために多大な労力を割いてもらったと思います。最後にももらったアルバムも素晴らしいものでした。

十代目伊代田研究室の学部生である澁谷亜香里さん、落合ひなさん、宮崎幹太君、秋元隼人君、大塚朝陽君、小笠原拓海君、酒部昭禎君、笹本将虎君、深澤英将君には、実験や論文等の執筆で忙しくしていた私を助けてくれました。何かと行事の多い伊代田研究室で行事の手伝いを率先してやってもらいました。大塚君は私を見ると声をかけてくれて「何か手伝います」と言ってくれました。感謝しています。小笠原君、酒部君、笹本君とは喫煙所で良

くプライベートな話をしました。実験や論文執筆等で疲れた時に良い気分転換ができました。

勝木研究室の学生や東京理科大学の加藤研究室の学生などここに名前の挙げられなかった方が数多くいます。多くのご協力をいただいた皆様に深く感謝いたします。

最後に博士後期課程への挑戦という私の我が儘を陰で支え続けてくれた妻 祐紀と娘椿に厚く御礼を申し上げます。あまり家事もしない私に不満も口にせず、私を支え続けてくれた妻には、これから先の人生で頭が上がらないと思います。紙面で表現できないほど感謝しています。また、私の顔を見ると何でも「バイバイ」と言っていた娘の姿が忘れられません。これからはもっと遊ぶ時間を作ります。勝手な父を許してください。また、父 敏明、母 道子と義母 幸子に心から御礼申し上げます。家計への援助だけではなく、育児と仕事で疲れた妻への援助があったから、私は博士後期課程で頑張ることができました。また、いつも夕食に招待してくれ、私にあまりできていない親孝行をしてくれた兄 和彦と義姉香里にも厚く御礼を申し上げます。博士後期課程に挑戦したいことを兄に話したとき、応援すると言ってくれたことを生涯忘れません。

本論文は多くの方々の御助力と御指導をお借りして作成することができました。皆君に頂いた君々な御助力を無駄にしないように、これからも精進してまいります。ここに心からの感謝の意を表しまして、謝辞といたします。

平成 31 年 1 月 10 日