

報告 電気抵抗値によるコンクリート硬化判定技術の検討

Study on hardening of concrete by electrical resistance value

○太田 真帆^{*1}・伊代田 岳史^{*2}

Maho OTA, Takeshi IYODA

要旨：構造物の性能はコンクリートの打設状態によって、大きく左右される。そのため、著者等は打込みから硬化後まで連続的にコンクリートの状態を計測する方法として四電極法を検討している。硬化後において四電極法から得た電気抵抗値は圧縮強度や中性化速度と相関があると報告した。そこで、本研究は硬化前において電気抵抗値の計測を行った。その結果、電気抵抗値は水和反応と関係があることがわかり硬化判定の可能性が示唆出来た。

キーワード：四電極法、凝結、水和発熱、電気伝導率

1. はじめに

コンクリート構造物は安全で耐久性に優れたものを建設する必要がある。また、同時に経済的に建設することも求められている。そのため、施工管理が重要となってくる。施工管理において、コンクリートは受け入れ時に品質検査として、スランプ、空気量試験が実施されている。しかし、これらの試験の基準を満たしていても、施工による不具合が豆板やコールドジョイントなどが初期欠陥を引き起こす。また、養生不足が生じると、水和反応が適切に行われずコンクリート構造物は必要な性能を満足することができない。よって、構造物が所要性能を満足するためには、打設後からコンクリートを連続的に計測でき、型枠脱型時期や湿潤養生の時期を適切に判定するために水和反応を捉えられる試験方法が望まれている。水和反応を捉えることは早期の施工不良を発見することができ経済的に施工も可能となる。

現在型枠内でのコンクリートの状態やセメントの水和反応を連続的に捉える方法は確立していない。構造物の状態の評価は、硬化後においては非破壊で構造物を検査する方法としてトレント法や表面吸水試験が提案されている。一方、硬化前においては把握する手法がない。

施工不良のひとつとして挙げられる、コールドジョイントはすでに打込まれたものに、打重ねる場合に一体とならなかったところと定義されている。発生する要因は打重ねのタイミングや打継ぎ時の処理不足が挙げられる。前者の打重ねタイミングの対策として標準

示方書には、打重ね許容時間は練り混ぜから 1.5~2 時間以内と推奨されているのみである。コンクリートの凝結時間はセメントの水和反応速度に左右されるため、セメント種や混和材または温度などに影響される。そのため、施工環境が大きく異なる現場では、打重ね許容時間だけではコールドジョイントを回避することは難しいと考える。

そこで、著者等はコンクリートの状態を簡易的に非破壊で検査する方法として四電極法を用いて評価することを提案している。四電極法とはコンクリートに直接電極を差し込み電気を流し、得られる電気抵抗値からコンクリートの状態を評価する方法である。既往の研究にて硬化後において計測される電気抵抗値は、圧縮強度や中性化速度係数と相関があることが報告¹⁾している。しかし、打設後から硬化するまでの間の電気抵抗値を計測した研究は少なく、電気抵抗値が示す挙動やコンクリートとの関係性はわかっていない。一方で、電気抵抗値の逆数といわれている電気伝導率においては硬化前の研究がされている。打設後から計測した電気伝導率は凝結時間と相関があることが報告²⁾されている。そこで、硬化前の電気抵抗値を計測し電気伝導率の挙動と関係があるならば、電気抵抗値においても凝結時間と関係があることが考えられ、四電極法を用いることで連続的にコンクリートの状態を打設後から、硬化後まで評価することが可能となる。

以上のことより、本研究は四電極法を用いて打設後から終結までの電気抵抗値の測定を行った。得られた結果から電気抵抗値と凝結時間の関係を確認した。

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

Div. of Architecture and Civil Engineering, SHIBAURA Institute of Technology

*2 芝浦工業大学

工学部土木工学科 准教授

Dept. of Civil Engineering, SHIBAURA Institute of Technology

表-1 コンクリート計画配合

セメント 種類	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)				スランプ(cm)	空気量(%)
			W	C	S	G		
N	30	48	168	560	755	859	20.0	6.3
	50			336	843	959	11.5	4.6
	65			258	873	994	15.0	5

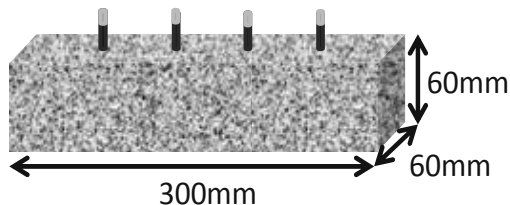


図-1 四電極供試体概要図

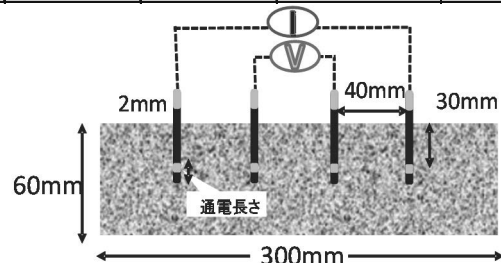


図-2 四電極法概要図

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

コンクリートの計画配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(N)を使用した。W/C30では材料分離を防止するために、高性能AE減水剤を使用した。図-1, 2に四電極法の概要図を示す。供試体の作成は60×60×300mmの角柱型枠に電極を設置してコンクリートの打設を行った。電極にはφ3mmのアルミニウムを使用し、乾燥の影響を防ぐために電極を深さ表層から30mmのところ埋め込み、電極間隔40mm、通電長さ2mmとした。

2.2 四電極法による電気抵抗値の測定

電気抵抗値の測定は直流電源装置の四電極法により行い打設直後から終結まで行った。直流電源装置を用いた四電極法による計測は、交流電源装置と比べて小型であり、また電力変換率が高いため実構造物における計測時に信頼性が高いと考える。一方、直流電流では帯電の恐れがあるため、帯電を防ぐためにパルス波を用いて計測を行った。印可電圧の影響も考えるために、1Vと10Vでの計測を行った。四電極法によって測定される電気抵抗値は通常、電極間隔、通電長さなどの影響を受けるため比抵抗値に換算し評価するが、比抵抗値への換算式はコンクリートの外部から電極を押し当て、測定する4プローブ法や電極をすべて通電部にした埋設電極法のため、本研究では利用できない。よって、本研究では比抵抗値を算出せずに、電気抵抗値を用いて評価する。

2.3 電気伝導率の測定

電気抵抗値と凝結時間の関係をみるために電気伝導率の測定を電気抵抗値の測定と同配合のもので行った。

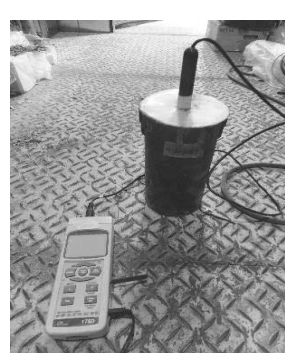


写真-1 電気伝導率測定風景

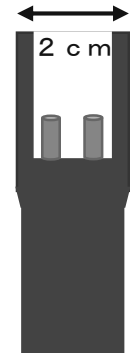


図-3 電気伝導率計概要図

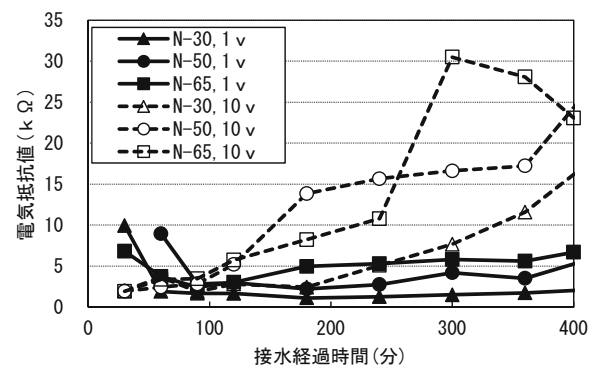


図-4 コンクリートによる電気抵抗値

電気伝導率の測定風景を写真-1に示す。電気伝導率の測定にはφ100×200mmの円柱供試体を使用し、四電極法と同様の表層から深さ30mmの所に図-3に示すφ2cmの電気伝導率計を埋め込み計測を行った。

2.4 プロクター貫入試験

電気抵抗値と凝結時間の関係をみるためにプロクター貫入試験を行った。試験に用いた配合は表-1のものをウェットスクリーニングしたものを用いて行った。

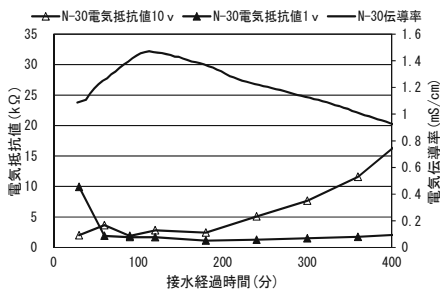


図-5 N30 電気伝導率と電気抵抗値

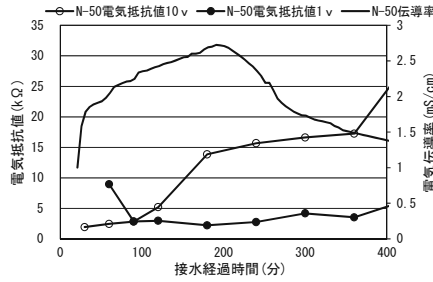


図-6 N50 電気伝導率と電気抵抗値

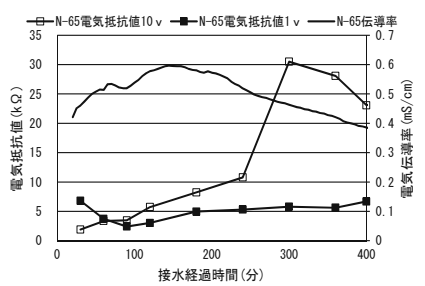


図-7 N65 電気伝導率と電気抵抗値

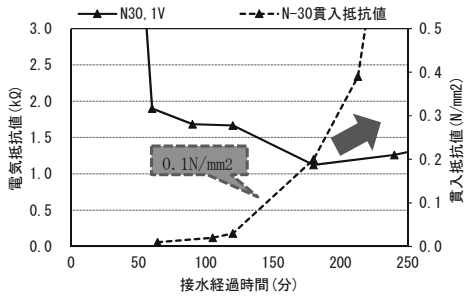


図-8 N30 貫入抵抗値と電気抵抗値

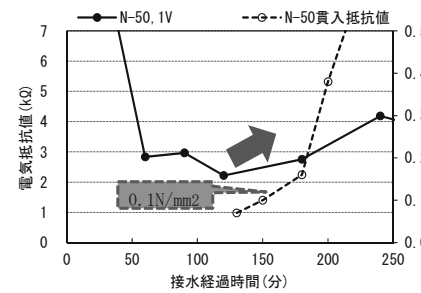


図-9 N50 貫入抵抗値と電気抵抗値

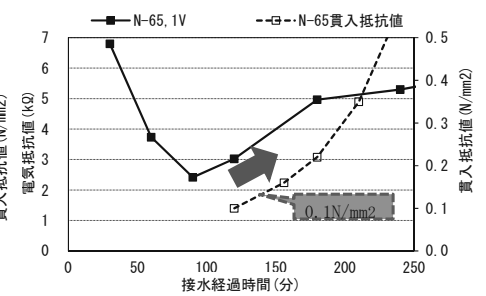


図-10 N65 貫入抵抗値と電気抵抗値

3. 実験結果

3.1 電気抵抗値測定

電気抵抗値の測定結果を図-4に示す。電気抵抗値はW/Cによらず、接水後減少していきその後、増加する挙動を示した。電気抵抗値が減少する挙動は接水から120分までの間のみであった。

測定電圧は電気抵抗値が減少する時間において10Vよりも1Vの方が細かく挙動の変化を捉えることができた。このことより、10Vでは電気が流れやすく過電圧になってしまっていることが要因なのではないかと考える。

3.2 電気伝導率測定と電気抵抗値の関係

電気伝導率の測定結果を図-5, 6, 7に示す。電気伝導率の挙動は既往の研究²⁾同様に接水後増加しその後減少する挙動をした。電気伝導率が最も増加する時間と電気抵抗値が最も増加する時間はW/C30においては同時刻であったが、W/C50,65においては30分前後ピーク時間がずれた。これは、電気抵抗値の測定においては電極の設置間隔から電流が流れる距離は12cmであり、およそ供試体内全体に電流をかけて計測するが、電気伝導率の測定は電極がφ2cm内の電気伝導率計内に設置されているため、電流が流れる距離が短い。そのため、電気伝導率の測定において骨材の混入はない。よって、電気抵抗値の計測において骨材が電気伝導路を阻害したことが電気抵抗値と電気伝導率のピーク時間を生じさせたのではないかと考える。

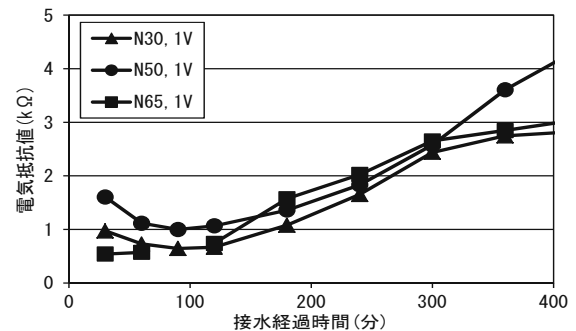


図-11 セメントペーストによる電気抵抗値

3.3 貫入抵抗値と電気抵抗値

貫入抵抗値と電気抵抗値の関係を図-8, 9, 10に示す。W/C50,65においては、電気抵抗値が増加する挙動時に貫入抵抗値はおおむね0.1N/mm²を示した。この値は既往の研究²⁾よりコールドジョイントの発生下限のタイミングとしており、電気伝導率においては減少する挙動時に0.1N/mm²を示す。硬化前において電気抵抗値は凝結時間と関係があり、打重ねの指標となることがいえる。

4. 電気抵抗値の挙動要因の解明

次にW/Cによらず、計測した電気抵抗値が減少し増加した挙動の要因を解明することを目的とした。電気抵抗値の挙動は3.2.3の結果より凝結時間と関係があった。凝結の進行は即ち、水和反応の進行であると考え、挙動要因の解明にあたり初期における水和反応と電気抵抗値の関係をみることにした。水和反応の進行を捉えるためコンダクションカロリーメー

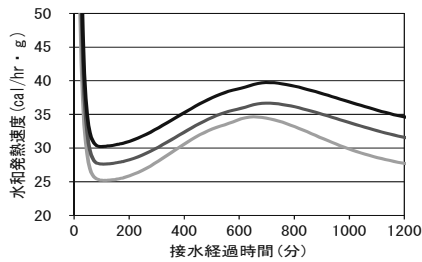


図-12 水和発熱測定結果

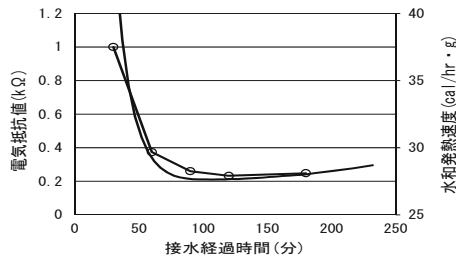


図-14 N50 水和発熱と電気抵抗値

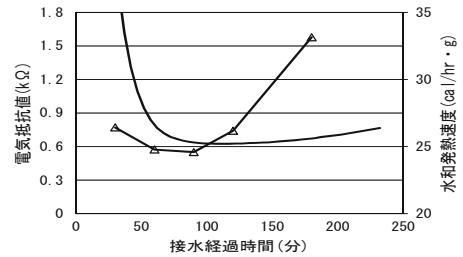


図-13 M30 水和発熱と電気抵抗値

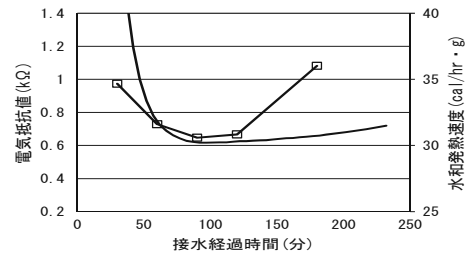


図-15 水和発熱と電気抵抗値

ターを用いて水和発熱の計測を行い電気抵抗値との関係を見ることにした。しかし、コンダクションカロリメーターの試験はセメントペーストで行う必要がある。そこで、まず初めにセメントペーストによる電気抵抗値の測定を行い挙動を確認することとした。確認後にコンダクションカロリメーターを用いて水和発熱速度を計測し、水和反応と電気抵抗値の関係をみた。

4.1 セメントペーストによる電気抵抗値の測定

セメントペーストの供試体を打設し、電気抵抗値の測定を行った。用いた供試体はコンクリート同様の型枠を用いて行った。

セメントペーストによる電気抵抗値の測定結果を図-11に示す。セメントペーストの供試体もコンクリートと同様にW/Cによらず接水後減少しその後増加した。コンクリートの測定結果と比較して、挙動の変化時間は変わらないが電気抵抗値は小さい値を示したことから、電気抵抗値の値は骨材によって影響されることがいえる。

4.2 水和発熱速度の計測と電気抵抗値の関係

コンダクションカロリメーターから得られる水和発熱速度は時間の経過とともに挙動が変動する。本研究では接水後1分間攪拌してから計測した。水和発熱の測定結果を図-12に示す。水和発熱はW/Cによらず、接水後120分あたりで一度減少し、その後増加する挙動を示した。水和発熱速度において、接水後減少する挙動は主にカルシウムイオンなどの溶出を捉えているのではないかと考えられており、その後増加する挙動は水和生成物の生成を捉えているのではないかとされている。そこで、得られた水和発熱速度の測定結果と電気抵抗値との挙動の関係を確認し、挙動要因の分

析結果を図-13, 14, 15に示す。水和発熱が最も減少する時間と電気抵抗値が最も減少する時間がW/Cによらずほぼ一致し、またほぼ同時刻であった。このことより、電気抵抗値の挙動は水和反応を捉えていることがいえる。さらに、水和発熱の挙動要因から電気抵抗値の減少する挙動はセメント内のイオンの溶出を捉えていると考えられ、イオンの増加により電気が通りやすくなったと推測される。一方、増加する挙動は、水和反応によりイオンが消費され水和物が生成したことを捉えているのではないかと考察する。

6. まとめ

- 1) 若材齢時において、電気抵抗値は接水後増加し、その後減少する挙動を示す。
- 2) 電気抵抗値の挙動は水和反応と関係がある。
- 3) 電気抵抗値の減少挙動と増加挙動の要因はコンクリート内のイオンの溶出、消費と関係がある。
- 4) 電気抵抗値の増加挙動は貫入抵抗値と相関がある。

参考文献

- 1) 伊代田岳史：養生終了のタイミングを推測する手法の一提案，コンクリートテクノ 6月号，Vol133, No6, p29-35, 2014
- 2) 白川順菜ほか：コンクリートの凝結に伴う電気伝導率の特性と影響因子の検討，第38回土木学会関東支部技術大会発表会講演概要集