

報告 直流四電極法による養生終了時期判定手法の現場適用および計測方法の検討

Study on the applicability of curing completion time determination method using DC four probe electrical method and measuring method

○三坂 岳広*1・太田 真帆*2・伊代田 岳史*3
Takehiro MISAKA, Maho OTA, Takeshi IYODAKAI

要旨：筆者らは、型枠内部のコンクリートの性状を評価でき養生終了時期を判定する手法が必要と考え、直流四電極法による電気抵抗を用いて養生終了時期を判定する手法を考案した。本論文は、本手法を実現現場で使用し、現場適用性を検討した結果について報告する。また、電気抵抗の影響を及ぼすと考えられる鉄筋位置の影響について検討を行った。本手法は実現現場でも適用可能であり、電気抵抗は鉄筋位置の影響を受けることを明らかにした。

キーワード：四電極法，抵抗，養生，耐久性，水和反応

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の主な劣化現象である塩害や中性化は、塩化物イオンや炭酸ガスがコンクリート表面から内部に浸透することにより起こる。また、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化およびライフサイクルコストの低減を図るためには、劣化因子が外部環境からコンクリート内部へ浸透および拡散するのを抑制するため、表層コンクリートを緻密な構造にする必要がある。

コンクリート標準示方書〔施工編〕の養生に関する記載には、湿潤期間の標準¹⁾を日数で示している。この日数は、日平均気温とセメントの種類によって定められている。表層コンクリートの品質は、配合条件のみならず施工状況によっても影響を受ける^{2,3)}とされている。また、鉄筋コンクリート構造物に耐久性は、セメントの種類や日平均気温の他に、かぶりの大きさ、W/Cなどに影響を受けると考えられる。また、湿潤養生期間についても日射や湿度などの施工環境および構造物の断面などに影響を受け、コンクリート構造物の部分ごとに異なることが考えられる。

実際の現場では、一般的に型枠存置による封かん養生を行っている。また、養生による表層コンクリートの品質向上に関する取組みは、様々な方法が提案されている⁴⁾。さらに、表層コンクリートの品質を評価する手法として表層透気試験⁵⁾（トレント法）や透水試

験⁵⁾などの方法が提案されている。しかし、これらの方法はコンクリートの含水率に影響を受け、若材齢のコンクリートに対して評価を行うことは難しいとされている。

筆者らは、直流四電極法によりコンクリートの電気抵抗を計測することにより養生終了時期を判定する手法⁶⁾を考案した。本手法の特徴は、電極を型枠に設置してからコンクリートを打設することにより、コンクリート内部に電極を埋め込むことにある。これにより、養生期間中のコンクリートに対して電気抵抗を経時的に計測することが可能となる。計測された電気抵抗は、各材齢の圧縮強度や中性化速度係数などと相関関係が認められており、この関係性を用いることによりまだ型枠内で養生されているコンクリートの性状を評価することができる。これにより、計測結果から適切な養生終了時期が判断できる。例えば型枠脱型時に必要な強度が確保できているかの確認ができるだけでなく、材齢28日の強度が不足すると判断された場合に養生の継続を判断することが可能となる。また、鉄筋コンクリート構造物に必要な耐久性から、十分な養生がなされたと判断された場合には、養生を早期に終了することで施工の合理化が可能と考えられる。

本手法を現場で使用するには、計測される電気抵抗に影響を及ぼすと考えられる各種要因と影響の程度を明らかにする必要がある。本研究は、直流四電極法に

*1 佐藤工業（株） 技術研究所

*2 芝浦工業大学大学院 土木工学科

*3 芝浦工業大学 土木工学科

Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co.,Ltd

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

Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

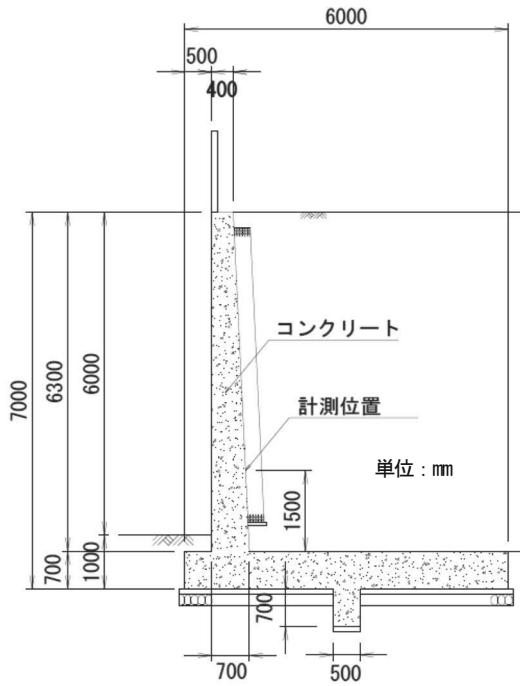


図-2 逆T型擁壁

より計測される電気抵抗の現場適用性を検討すると共に電気抵抗に影響を及ぼす各種要因を明らかにする。

2. 実験方法

レディーミクストコンクリート工場の試験練りで、供試体を作成したシリーズ A, 実験室で計測を行ったシリーズ B, 現場の実構造物で計測を行ったシリーズ C, という3種類の試験を行った。シリーズ A ではシリーズ C で実際に使用するコンクリートで供試体を作製し、圧縮強度及び中性化速度係数と電気抵抗の関係式を作成する。圧縮強度試験および促進中性化試験の方法は、JIS に準拠して行った。

実構造物の鉄筋コンクリートで電気抵抗を測定する場合、鉄筋が計測される電気抵抗に影響を及ぼすと考えられる。これは、本手法を現場適用するために確認をしておく必要がある。シリーズ B は、恒温恒湿室(温度 20±2℃, 湿度 60±5%) の中で図-1 の試験体を作成し、電極と鉄筋の距離が電気抵抗に及ぼす影響を評価する。シリーズ C は、東京都町田市の現場屋外で作製される逆 T 型擁壁で実際に測定を行った。シリーズ C の逆 T 型擁壁の概略を図-2 に示す。計測位置は図中に示す擁壁縦壁とした。電気抵抗の測定は、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。

2.1 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-3 に示す。本計測方法の特徴は、コンクリート内部に埋め込まれる電極の表面を絶縁体で覆うこと

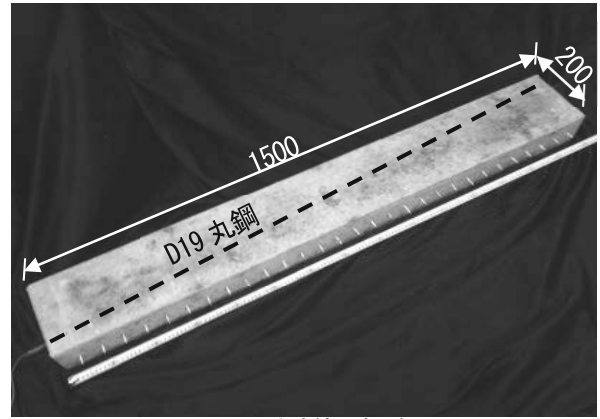


図-1 試験体の概略

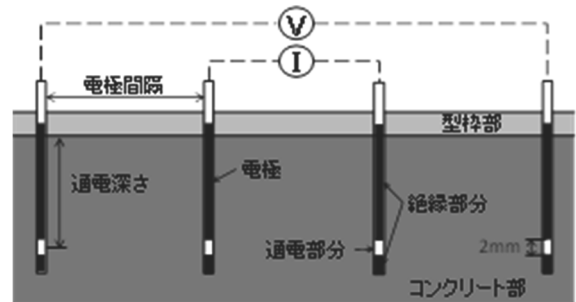


図-3 四電極法の概略

表-1 電気抵抗の計測条件

印加電圧	10Vパルス波
電極間隔	50mm
通電深さ	50mm
電極金属	ステンレス

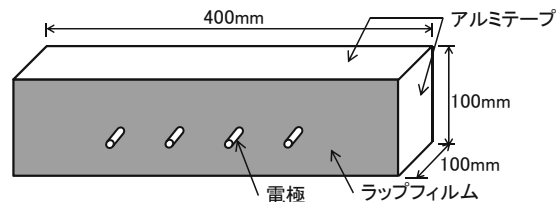


図-4 電気抵抗計測用供試体の概略

養生期間	材齢(日)						
	0	1	3	7	~	28	
1日		圧					圧
3日			圧				圧
7日				圧			圧
28日							圧

■：封かん養生(20℃) □：屋内暴露(20℃,60%RH)
 圧：圧縮強度試験 - - -：脱型

図-5 養生方法(シリーズ A, 圧縮強度試験用)

表-2 配合

	セメント種類	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	Ad
シリーズA,B	N	13.5	54	5.5	45	172	317	812	989	3.17
シリーズC		12.0	55	4.5	45	170	309	807	1005	4.02

により通電部を設けることである。これにより通電深さを変化させ、コンクリート表面からの距離ごとの電気抵抗計測が可能となる。表-1 に電気抵抗の計測条件を記す。直流電源を使用した理由として、交流電源と比較して計測装置が小型で安価なことが挙げられる。また、パルス波を使用することで帯電現象を防止している。図-4 に電気抵抗を計測した供試体の概略を示す。電極は供試体側面に設置している。

2.2 配合および養生方法

供試体に使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。シリーズ A およびシリーズ C の配合は、工場で製造され、27-12-20N で表記される一般的なコンクリートで使用材料も同じである。図-5 に養生方法の概略（シリーズ A、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 日に設定し、養生終了時に圧縮強度を測定している。促進中性化試験の供試体の養生も同様に行い、材齢 56 日から促進中性化槽に入れている。シリーズ B は、試験体を恒温恒湿室内に静置し、型枠存置のまま打設面をラップフィルムで覆い、封かん養生を行いながら計測を行った。

3. 実験結果

3.1 シリーズ A

シリーズ A で作製した供試体の電気抵抗の測定結果を図-6 に示す。電気抵抗は材齢の進行に伴って大きくなっていることがわかる。表-3 に圧縮強度試験結果と促進材齢 4 週の中性化深さから求めた中性化速度係数を示す。この関係を用いて図-7~9 を作成した。

3.2 シリーズ B

図-10 に鉄筋と電極の距離のイメージを示す。図のように計測位置で鉄筋に近い電極通電部からの距離で計測結果を整理した。結果を図-11 に示す。図から、材齢 1 日の計測結果は、鉄筋との距離に影響を受けていない。しかし、材齢 3 日になりコンクリートの水和反応が進行し、全体的に電気抵抗が大きくなると電極と鉄筋の距離が近い方が電気抵抗が大きくなっている。計測される電気抵抗は、電極と鉄筋の距離が電気抵抗に影響を及ぼすだけでなく、その影響が材齢によって変化することがわかった。今回の計測条件の範囲では、

表-3 シリーズ A の試験結果

	養生終了時の電気抵抗 (kΩ)	養生終了時の圧縮強度 (N/mm ²)	材齢28日の圧縮強度 (N/mm ²)	中性化速度係数 (mm/√週)
1日養生	3.88	6.42	22.9	5.04
3日養生	6.75	18.6	30.8	3.64
7日養生	8.13	24.8	32.5	2.54
28日養生	9.90	33.0	33.0	2.29

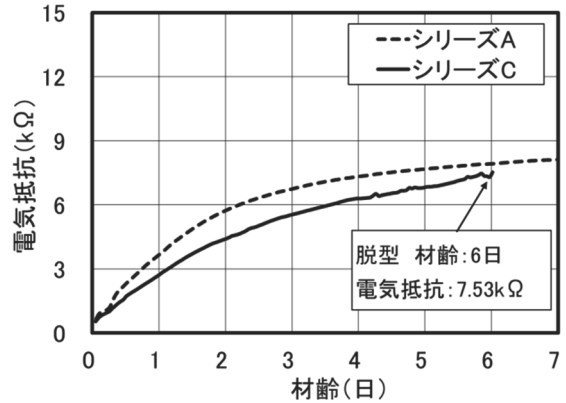


図-6 電気抵抗の測定結果

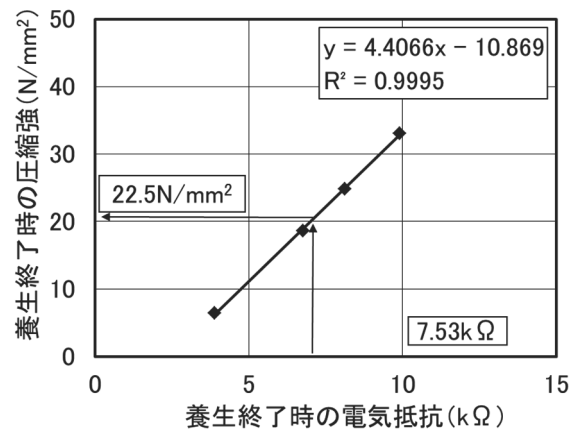


図-7 養生終了時の圧縮強度と抵抗の関係

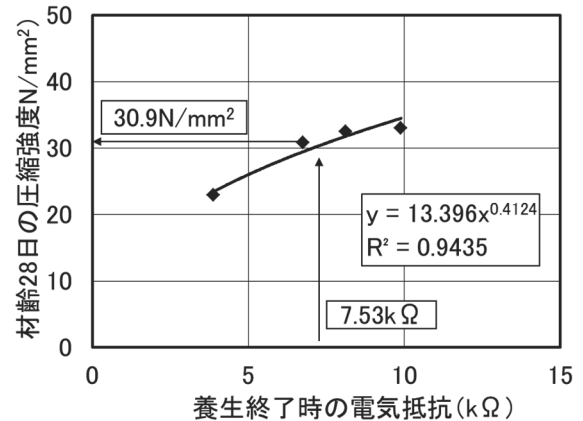


図-8 材齢 28 日の圧縮強度と抵抗の関係

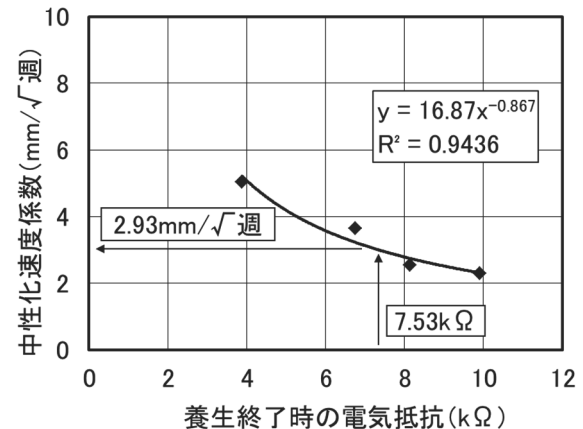


図-9 中性化速度係数と抵抗の関係

4本の電極間隔である50mmより鉄筋の距離が近い場合には、電気抵抗が鉄筋の影響を受けているように思われる。しかし、本試験体の厚さが100mmであり、電極通電部から型枠までの距離も50mmである。電気抵抗が型枠の影響も受けていると考えられる。電気抵抗が鉄筋との距離に受ける影響範囲を明らかにするためには、試験体の寸法を大きくして、経時的に計測を行う必要があると考えられる。

シリーズCの実際の現場計測の際は、電極通電部が鉄筋から50mm以上離れるように電極を設置して計測を行うこととした。

3.3 シリーズC

実現場の逆T型擁壁で計測した電気抵抗の計測結果を図-6に示す。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シリーズAで計測された値より現場計測の値の方が小さい値を示した。現場計測時の外気温は、平均気温が16.0℃であり、シリーズAより低い。したがって、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と考えられる。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、本手法の有効性を示すものと考えられる。

この逆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-7~9内の矢印のように算出される。本計測と同時に同じコンクリートで作製した現場封かん養生の供試体で型枠脱型時の圧縮強度を求めたところ23.8N/mm²であり、四電極法による電気抵抗で比較的良い精度の圧縮強度を推定できた。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。

4. おわりに

以下に本実験で得られた結果を列挙する。

- 1) 計測される電気抵抗は、電極と鉄筋の距離に影響を受け、その影響は材齢によって変化する。
- 2) 四電極法による電気抵抗の測定は、実際の現場の鉄筋コンクリートでも計測が可能である。
- 3) 四電極法による電気抵抗値で型枠脱型時の圧縮強度を推定できた。

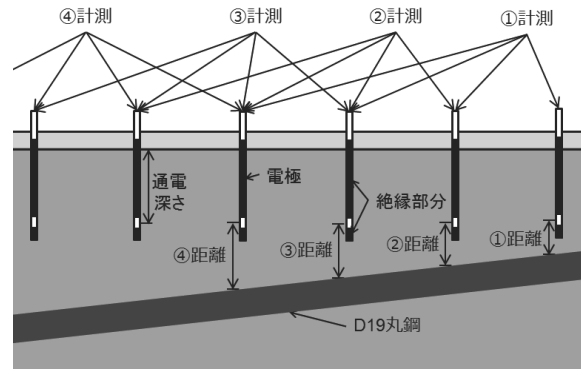


図-10 鉄筋と電極との距離の概略

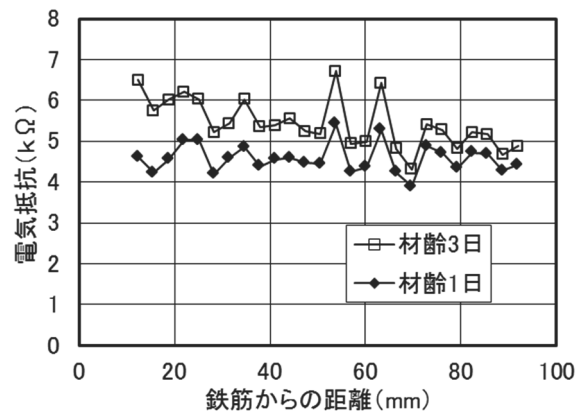


図-11 電気抵抗と鉄筋からの距離の関係

参考文献

- 1) 土木学会：2012年度制定コンクリート標準示方書[施工編]，土木学会，2013.3
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 古川幸則，塩崎修男，白井考昌：シート吸引方式による覆工コンクリート浸水養生システムの開発，土木学会第65回年次学術講演会，VI-017，pp.33-34，2014.9
- 5) 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，土木学会 pp.137-155，2012.7
- 6) 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判定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