

論文 計測される電気抵抗が強度及び耐久性と相関がある原因の解明

三坂 岳広*1・伊代田 岳史*2

要旨: これまでの著者らの研究よりコンクリートの電気抵抗から圧縮強度および中性化速度係数が推定できる可能性が示された。しかし、推定できる原因については明らかになっていない。本研究では、電気抵抗と空隙および水量の関係に着目し、電気抵抗が強度および劣化に対する抵抗性質と相関がある理由について検討した。結果として電気抵抗が液状水量と相関があることを明らかにし、電気抵抗から強度等を推定できる理由を明らかにした。

キーワード: 四電極法, 電気抵抗, 空隙率, 含水率, 飽水度

1. はじめに

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¹⁾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強度や劣化に対する抵抗性を直接的に知ることが難しく、上記の打込み後の一定期間は、コンクリート標準示方書[施工編]で与えられている湿潤養生期間の標準¹⁾で与えられた日数を遵守しているのが現実である。この湿潤養生期間の標準は、日平均気温とセメントの種類で日数が示されているものの水セメント比等の配合条件、日射等の施工環境、水和発熱等にも影響を受けると考えられる。したがって、場所や部材ごとに適切な養生期間が異なることが考えられる。

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、適切な養生の終了時期を決めること、型枠および支保工の取外しの判断が可能となり、型枠を脱型する際の作業の安全性の向上、支保工および型枠転用性の向上、作業荷重等によるひび割れ発生の防止、乾燥収縮ひび割れの発生抑制、表層コンクリートの品質の確保等の利点があると考えられる。

筆者らは電気抵抗の計測に着目し、型枠に電極を設置することで型枠の外から型枠内部のコンクリートの電気抵抗を計測し、型枠内部のコンクリートの強度や劣化に対する抵抗性を推定する手法を提案^{2,3)}した。これは、計測される電気抵抗と圧縮強度および中性化速度係数に相関関係が認められたことを利用している。また、この手

法は既に実際の現場で計測を行い、養生終了時期の判定に適用できる可能性があることを確認している。通電部を設けた電極を型枠に設置することにより、型枠の外から内部のかぶりコンクリートの電気抵抗を計測できる。この養生終了時期判定手法を用いて電気抵抗の計測を行った。

既往の研究より、電気抵抗の逆数である導電率の比が水和に使用された水分を計測しており、間接的に空隙を測定していることから、導電率比は圧縮強度と相関性がある⁴⁾としている。しかし、本手法で計測される電気抵抗の結果も同様に間接的に空隙を計測できるのかが明らかになっておらず、比で計測結果を整理すると相関が認められる原因についても未解明である。

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、空隙が影響すると考えられる。一方、既往の研究^{5,6,7)}においてコンクリートの電気抵抗は、単位水量や含水率等の水量に影響を受けることが明らかとなっている。これ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ためと考えられる。したがって、コンクリート内部の水分と空隙に着目した。

本研究は筆者らの提案する養生終了時期判定手法の電気抵抗の計測方法を用いて、電気抵抗から強度および中性化速度係数と相関がある理由について検討したものである。電気抵抗と圧縮強度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を推定できる理由について検討した。

2. 実験概要

実験項目は圧縮強度試験、電気抵抗計測、空隙率計測、

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科地域環境システム専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 電気抵抗の計測方法

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
電極の金属	ステンレスの針金

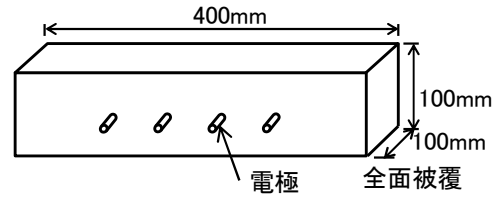


図-1 電気抵抗測定用供試体の概略

質量変化計測とし、電気抵抗と強度および物質移動抵抗性の関係を確認した後に電気抵抗と空隙および水量の関係进行明らかにする。圧縮強度試験の試験方法は JIS A 1108:2018 に準拠して行った。試験材齢は、1, 3, 7, 28 日とした。空隙率は圧縮強度試験後の試験片を用いてアルキメデス法により求めた。

2.1 直流四電極法による電気抵抗測定

表-1 に電気抵抗の計測条件を記す。電極は型枠に設置され、その後、コンクリートを打込むことにより内部に埋め込んだ^{2,3)}。また、電極は表面を絶縁体で覆うことにより 2mm の通電部を設けている。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セメントペーストの帯電現象を防止している。

2.2 供試体および養生条件

図-1 に電気抵抗測定用供試体の概略を示す。供試体は 100×100×400mm の角柱供試体とした。図中の電極は、供試体側面に設置し、電気抵抗の計測位置は、供試体の中央とした。供試体は脱型後に全ての面をエポキシ樹脂で覆い、封かん養生とした。

2.3 質量変化試験

コンクリート内部の水分量を計測するために層間水量と吸着水量を求め、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°C, 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°C の乾燥炉で逸散できる水分量と定義した。また、飽水度についても検討した。液状水量, 含水量, 飽水度の計算式を示す。恒量質量は恒温恒湿室で恒量となった質量とした。質量計測用供試

$$\text{液状水量}(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{\text{初期質量}(\text{g}) - \text{恒量質量}(\text{g})}{(\text{飽水質量}(\text{g}) - \text{水中質量}(\text{g}))/\rho_w} \quad (1)$$

$$\text{含水量}(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{\text{初期質量}(\text{g}) - \text{絶乾質量}(\text{g})}{(\text{飽水質量}(\text{g}) - \text{水中質量}(\text{g}))/\rho_w} \quad (2)$$

$$\text{飽水度}(\%) = \frac{\text{初期質量}(\text{g}) - \text{絶乾質量}(\text{g})}{\text{飽水質量}(\text{g}) - \text{絶乾質量}(\text{g})} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 ρ_w : 水の密度(g/cm^3)

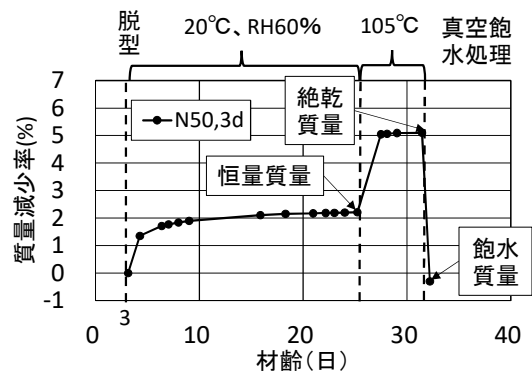


図-2 質量変化試験結果

体の寸法は、小型で表面積の大きいΦ100×50mmとした。この供試体は、供試体全面から外部環境の影響を受ける。したがって、この供試体は外部環境への水分の逸散が大きく速いかぶりコンクリートを模擬したものと考えることができる。図-2 に計測結果の一例を示す。供試体は3日で脱型を行い、初期質量を計測した。その後、供試体は、恒温恒湿室(温度 20±1°C, 相対湿度 : 60±5%) の環境で恒量質量となるまで乾燥させた。恒量の判断は、1日の質量変化率が 0.1%以下とした。恒量質量を計測後は、105°Cの乾燥炉に供試体を移して乾燥させ、絶乾質量

表-2 コンクリートの計画配合と略号

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 ³)			
						W	OPC	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

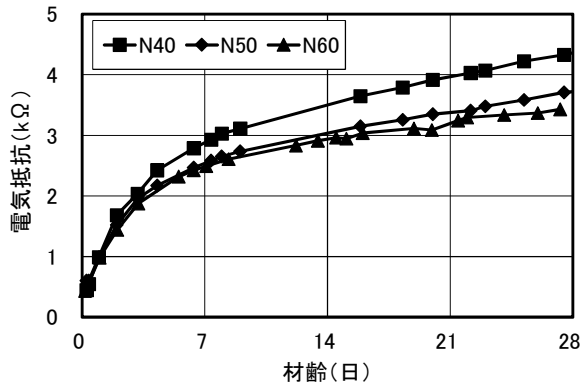


図-3 電気抵抗の測定結果

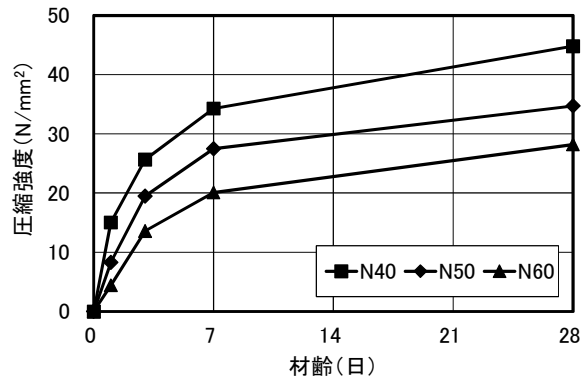


図-4 圧縮強度試験の結果

を計測した。さらに、絶乾質量計測後の供試体は真空ポンプを用いて真空飽水処理を行い、飽水質量を得た。

2.4 使用材料および配合

使用材料は、普通ポルトランドセメント [OPC] (密度 3.16g/cm³, 粉末度 3240cm²/g) と、粗骨材 (砂岩碎石, 密度 2.70g/cm³) と細骨材 (山砂と砕砂の混合砂, 密度 2.62g/cm³) とした。使用したコンクリートの計画配合と略号を表-2 に示す。水セメント比を変化させることでセメント硬化体の空隙を変化させた。

3. 試験結果

3.1 電気抵抗の測定結果

図-3 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、材齢 3 日までは同様の値を示しているのに対し、材齢の進行に伴って水セメント比が小さくなると電気抵抗が大きくなり、既往の研究^{2,3)}と同様の傾向を示した。

図-4 に圧縮強度試験の結果を示す。圧縮強度は、材齢の進行に伴って増加し、水セメント比が小さいコンクリートほど圧縮強度が大きくなり、一般的な結果と同様となった。

図-5 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電気抵抗の間に線形関係が認められ、既往の研究^{2,3)}と同様の傾向を示した。既往の研究では、水セメント比が異なるコンクリートでも 1 つの直線で近似ができたが、本実験では水セメント比ごとに異なる傾向を示している。この原因として単位水量が配合ごとに異なることが挙げられ、同一の圧縮強度でも単位水量の多い N40 の電気抵抗が小さくなったと考えられる。

図-6 にアルキメデス法により求めた空隙率を示す。空隙率は材齢の進行に伴って減少した。水セメント比に着目すると水セメント比が小さなものほど空隙率が小さくなった。この傾向は、材齢による水和反応の進行や水セメント比による緻密性の変化を捉えていると考えられ

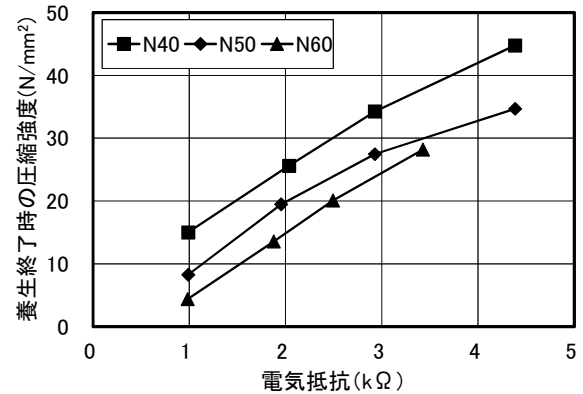


図-5 養生終了時の圧縮強度と電気抵抗の関係

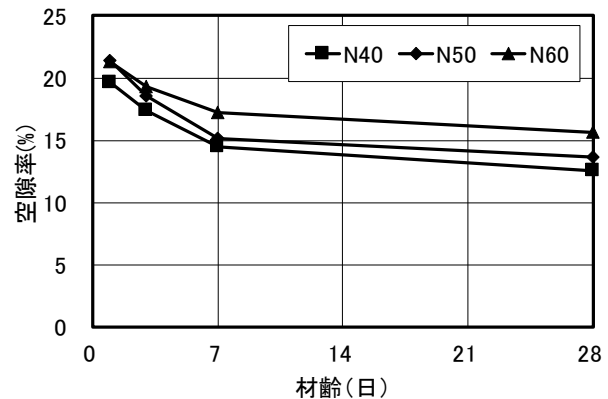


図-6 空隙率試験の結果

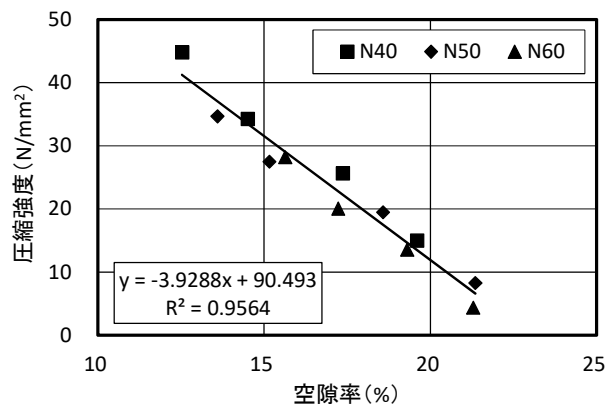


図-7 圧縮強度と空隙率の関係

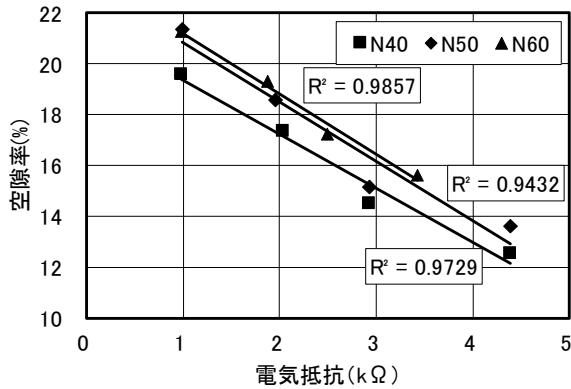


図-8 空隙率と電気抵抗の関係

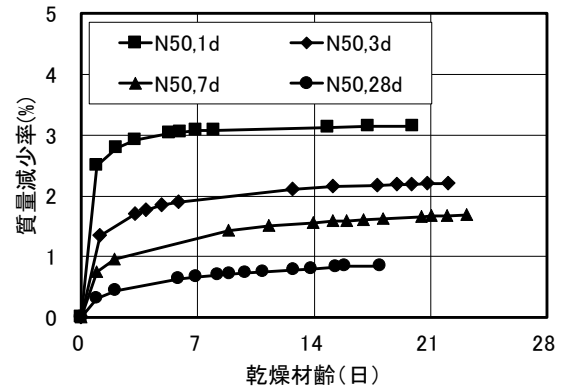


図-9 質量減少率 (N50)

る。

図-7 に圧縮強度と空隙率の関係を示す。図から水セメント比によらず圧縮強度と空隙率の間に直線関係が認められた。したがって、圧縮強度はコンクリートの緻密性に影響を受ける空隙率に依存する。

図-8 空隙率と電気抵抗の関係を示す。空隙率と電気抵抗の間に負の相関関係が認められた。

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、既往の研究^{2,3)}のように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-9 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。乾燥環境は恒温恒湿室内（温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ ）である。

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、水分が逸散しにくいことが影響したと考えられる。その他の供試体についても同様の傾向を示した。

図-10 に恒温恒湿室での恒量質量より算出した液状水量を示し、図-11 に 105°C 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す。図から液状水量および含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。

図-12 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、含水量の方が液状水量より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り、液状水量は含水量と比較して養生期間の影響を大

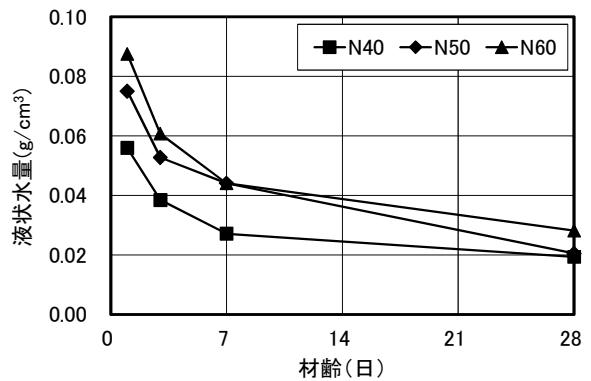


図-10 液状水量の測定結果

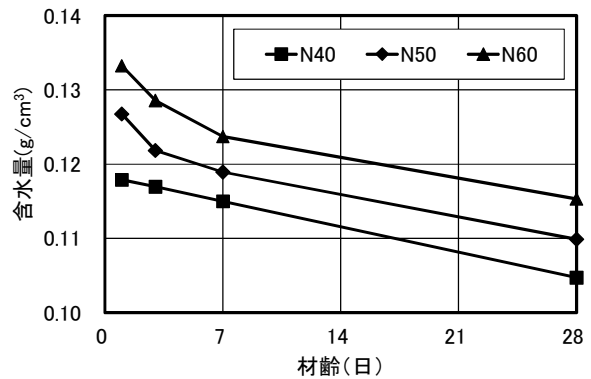


図-11 含水量の測定結果

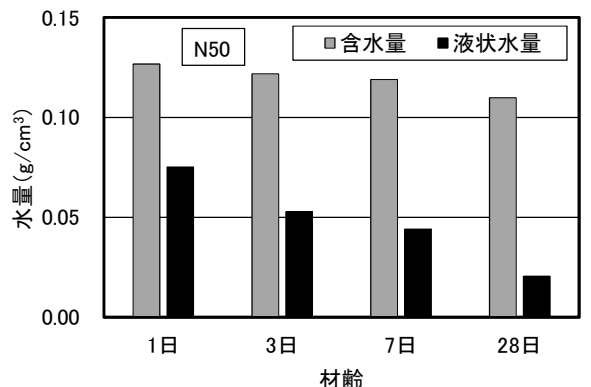


図-12 含水量の測定結果

大きく受けると考えられる。

既往の研究⁸⁾において水和物の脱水は 50℃付近においても開始しており、エトリング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℃付近までで半分近く脱水されることが報告されている。含水量の計測では、これら結合水および結晶水の脱水が材齢による差を小さくした可能性が考えられる。また、コンクリート内の電気の流れる部分である水分量を評価するなら、液状水量を用いた方が相関の得られる可能性が高いと考えられる。以降の結果は液状水量に着目をして整理した。

図-13 に液状水量と電気抵抗の関係を示す。コンクリートの電気抵抗は、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。また、水セメント比に着目すると、N60 が下方に位置している。

電気抵抗は、空隙率と液状水量に相関があることが明らかになった。そこで、空隙内の水の占める割合である飽水度に着目してみた。図-14 に飽水度の測定結果を示す。飽水度は式(3)を用いて算出している。飽水度は材齢の進行によって大きく変化せず、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るため、封かん養生を行ったコンクリートの空隙中にある水分の量は、材齢が進行しても大きく変化しないと考えられる。

液状水はコンクリート中の空隙内に存在すると考えられる。そこで液状水量を空隙率で除したものと相関を確認した。

図-15 に液状水量/空隙率と電気抵抗の関係を示す。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、空隙に占める水分量の割合を表している。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り、概ね一本の近似曲線となる。これは、水セメント比によって空隙率が変化しても空隙内

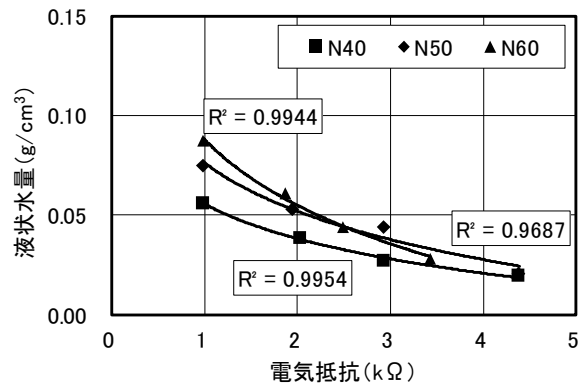


図-13 液状水量と電気抵抗の関係

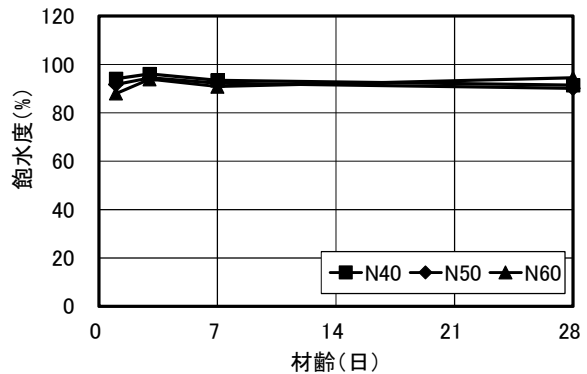


図-14 飽水度の測定結果

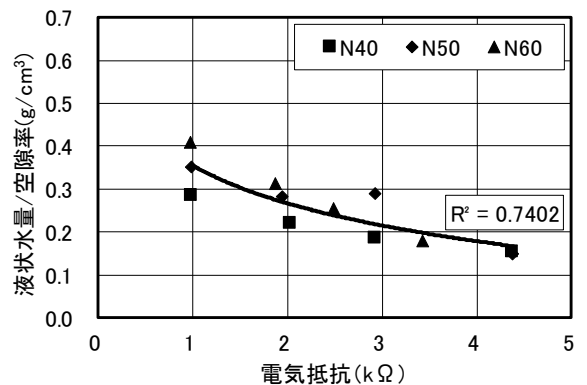


図-15 液状水量/空隙率と電気抵抗の関係

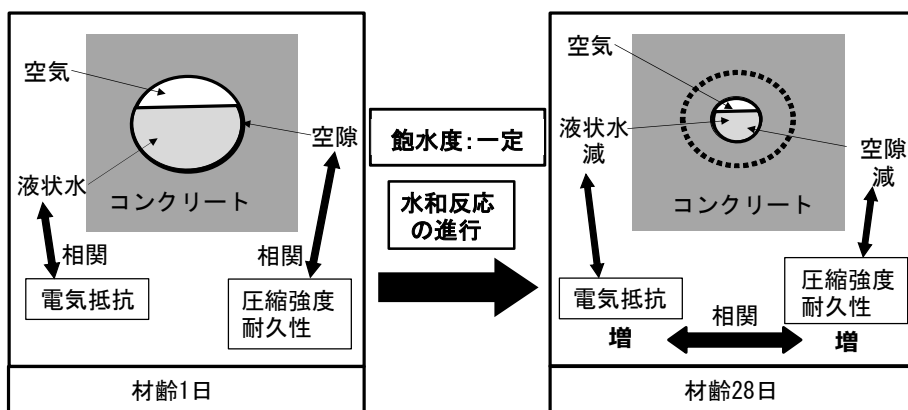


図-16 電気抵抗と圧縮強度の関係のイメージ

を占める水の量が一定であることを電気抵抗が評価しているためだと考えられる。

図-16 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。以上より、既往の研究^{2,3)}の計測された電気抵抗が圧縮強度と相関がある理由が明らかとなった。

4. まとめ

既往の研究^{2,3)}により確認された直流四電極法により計測される電気抵抗が、圧縮強度や耐久性と相関がある理由について検討を行った。結果として電気抵抗はコンクリート内の液状水量を評価しており、飽水度が一定の条件ならば水和による液状水の減少は、空隙の減少を意味するため、電気抵抗と強度の間に相関関係があると考えられる。以下に得られた結果を記載する。

- (1) 空隙率と封かん養生中の電気抵抗の間に相関関係が認められた。この空隙率と電気抵抗の関係は水セメント比に影響を受けず概ね1本の近似直線となった。
- (2) 液状水量と電気抵抗の間に水セメント比によらず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、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。電気抵抗は、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。
- (3) 封かん養生を行ったコンクリートの飽水度は材齢の進行によって大きく変化せず、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るため、コンクリートの空隙中にある水分の量は、材齢が進行しても大きく変化しないと考えられる。
- (4) 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。

以上の結果から、直流四電極法による電気抵抗で強度および耐久性を推定することの妥当性が示された。既往の研究⁵⁾では、電気抵抗の逆数である導電率を比にすることで本研究と同様の傾向が得られていた。本研究で用いた電気抵抗の計測では、電気抵抗の値が液状水量/空隙率と相関がある。この理由については、今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会，pp.124-128，2018.3
- 2) 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
- 3) 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，pp.123-126，2015.7
- 4) 伊藤孝文，伊代田岳史：電気伝導率計を用いた圧縮強度推定メカニズムの検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vo.16，pp.227-232，2016.10
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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