

# 養生終了のタイミングを推測する 手法の一提案

伊代田 岳史

## 1. はじめに

コンクリート構造物を長寿命化させるためにはさまざまなことが必要となるが、その中でも施工における養生は、コンクリートの一生を左右するほど重要なものである。そもそもフレッシュな状態で打込まれたコンクリートは、配（調）合で設計された水とセメントが水和反応をすることで硬化し、所要の強度・耐久性を発揮する。しかしながら、打込まれた後のコンクリートにおいて養生を怠ると、水和反応を継続することができない場合<sup>1)</sup>がある。たとえば、適切な温度を保たない場合には、セメントの水和反応が著しく遅延してしまうことから、初期強度を得られない。一方、高温での打込みや水和熱によりコンクリートが高温状態になれば、水和反応が著しく促進されることも知られており、長期強度不足に陥る可能性もある。また、適切な水分を保持しないまま、乾燥環境に曝されると水和反応に必要な水分が逸散してしまい、反応を継続できないことも考えられる。当然、荷重がかかったり、水和阻害がおこったりすれば、適切な反応が継続されず、コンクリートとして成立しないことも考えられる。

養生を怠ったことにより、水和反応を継続できなくなると、初期におけるひび割れや強度不足などが散見

されるようになる。現場においては、強度不足は構造上大きな問題となるため、十分な注意が払われている。その強度不足の原因の多くは、水和不足による粗大空隙の残存が挙げられる。この粗大な空隙の残存やひび割れについては、注意は払うものの、なかなか現実的な対策はとられにくい。その背景として、養生の重要性についての理解は進んでいるが、コストや工期などの問題を考慮すると実務的には実施されにくいことがある。このような初期のひび割れや空隙の残存は、表層（かぶり）コンクリートに多大な影響を与える<sup>2)</sup>。そのため、コンクリート構造物の耐久性低下<sup>3), 4)</sup>に結びつく可能性が高い。

しかしながら、どの程度の養生を実施したら、強度や耐久性が十分に確保できるのかは、なかなか議論が進まない。目安となる湿潤養生期間は、土木学会のコンクリート標準示方書ならびに日本建築学会のJASS5などに示されているものの、温度と大まかなセメント種類のみのカテゴリーであり、他の要因を考慮した場合には、過剰であったり不足したりとすることも考えられる。

そこでここでは、型枠の中にあるコンクリートが現在、どの程度の強度・耐久性を保持しているかを推測する方法を考案することを試みた。その具体的な方法を次から解説する。

筆者：（いよだ・たけし）芝浦工業大学 土木工学科  
マテリアルデザイン研究室 准教授

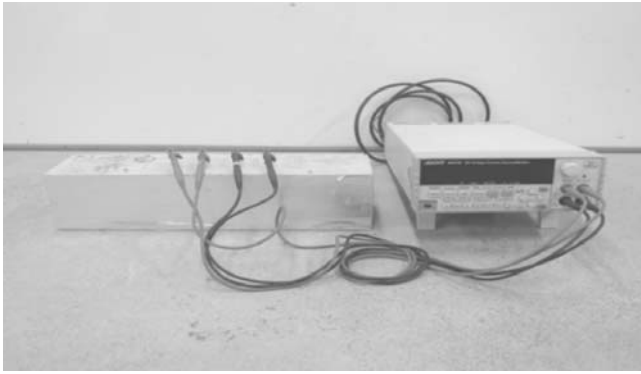


写真-1 四電極法測定装置

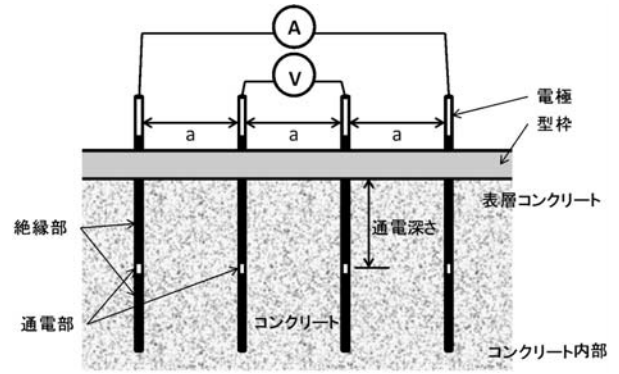


図-1 四電極法概要図

## 2. 養生終了判定の計測手法の提案

養生の終了時期はさまざまな考えが存在する。型枠をはずすことができる強度があれば十分であるとの考えや、所要の強度を確保できたとき、耐久性を確保できたとき、ひび割れが発生しない状態になったときなどさまざまである。ここでは、十分な水和が進行することが重要であると考えたため、型枠の中にある間に将来の強度や耐久性が推測できれば養生を定量化できると考え、その手法を考案することとした。そのため、コンクリート内部の水分が水和に使用される前に逸散しないよう、水和に利用されていることを把握することが重要であると考えた。水分の把握には電気抵抗の利用<sup>5)~9)</sup>が有効であることが分かっている。そこで、型枠内のコンクリート中の電気抵抗を経時的に計測できるシステムを構築することを考案した。

電気抵抗の計測には、四電極を用いた測定方法を応用することとした。空隙内に水分が多量に存在する場合には、抵抗値が小さく計測され、水和や水分逸散等で水分が減少していくと抵抗は大きくなる。このとき、型枠をはずさない状態で保持することにより、水分が外部に逸散しないと仮定すれば、水和によりコンクリート中の水分が消費されるにつれ、硬化し空隙内の水分が減少するために、抵抗値が徐々に大きくなっていく。電気抵抗の測定において四電極測定手法として用いた機材を写真-1にその概要を図-1に示す。印加電圧15Vで印加電流を30mAに固定し、コンクリート中の抵抗値を計測する。電気抵抗の測定は直流電流を用いた。その理由として、計測機器が交流電流を用いた計

測機器に比べ小型であり電圧発生装置と計測装置が一台で可能であることから現場計測に応用可能であると考えたためである。しかしながら直流電流はコンクリート中への帯電が考えられ、数値が安定しないという問題が生じることから、パルス波を利用することで帯電を抑制した。

電気抵抗の計測に用いた電極は、基本的に埋め殺しになることが想定されるため、実現場への適用も考慮し、低価格で実現できるよう、ステンレス製の針金を用いることとした。また、電気抵抗を測定する表面からの位置(深さ)をコントロールすることで、表面からの深さ位置における水和の進行を捉え、養生の十分さを検討することを考えた。そこで、埋め込んだ電極の一部分だけを開放し、通電できる箇所を確保し、それ以外の位置では通電を遮蔽した。そのため電極に収縮チューブを用いて通電部分を作製することとした。通電部分は2mmとした。

## 3. 実証実験

### 3.1 通電位置における電気抵抗の挙動

#### (1) 計測概要

計測用の試験体の概念図を図-2に示す。電気抵抗の端子(電極)間は50mmとし、乾燥や養生の影響範囲を計測するために、電気抵抗の測定位置を通電部のみとするように、測定深さを5, 10, 20, 30, 50, 70mmとして計測した。また表-1に示すようにコンクリートはW/C55%の普通ポルトランドセメント(N)と高炉セメントB種(BB)を用いたコンクリートを打込みし、試験体の二側面を型枠存置期間が終了した時点

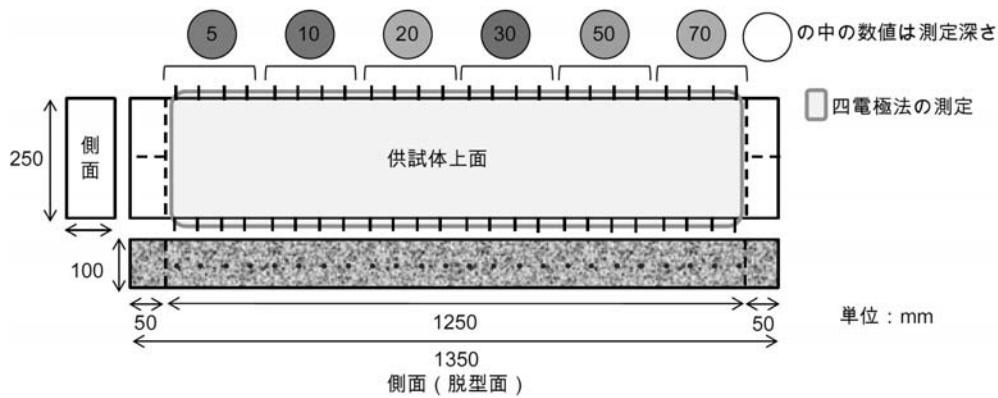


図-2 コンクリート試験体の緒元

表-1 コンクリートの配合と養生期間

セメント種	W/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	型枠存置期間 (日)				
			1	3	5	7	28
N, BB	55	174					

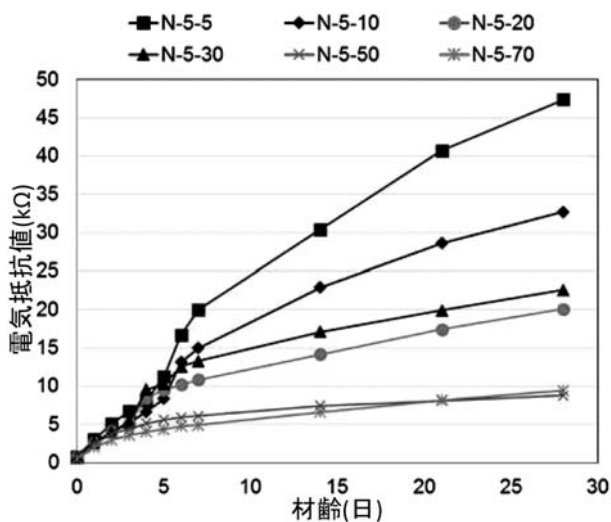


図-3 深さ位置における比抵抗測定結果

で順次脱型することで養生終了とした。型枠存置期間は1, 3, 5, 7, 28日と設定した。なお、試験結果の符合として「セメント種-型枠存置期間-計測深さ」の順で記載している。

### (2) 計測結果

計測した電気抵抗の計測結果のうち、一例としてNコンクリートの型枠存置期間5日における各深さ位置での計測結果を図-3に示す。脱型までの期間(5日間)はどの深さ位置においても同等の電気抵抗を示しているが、脱型後には、表層に近い抵抗ほど数値が急激に大きくなっていることがわかる。これは乾燥に伴いコンクリート中の水分が逸散することで抵抗値が上昇したものと考えられる。一方、50, 70mm位置では抵抗値は徐々に大きくなるものの、急激な変化は認めら

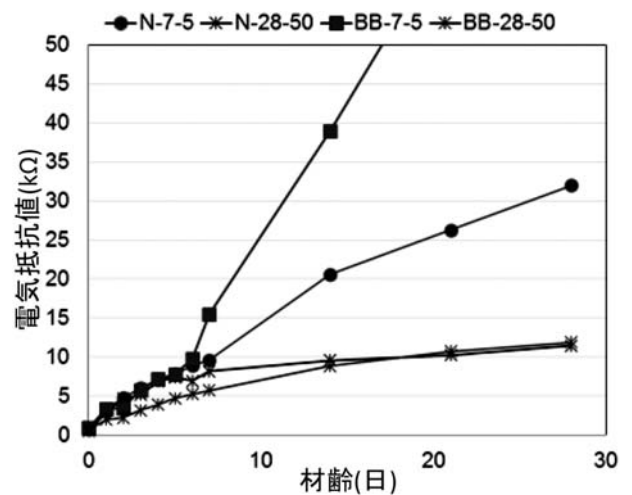


図-4 NとBBの比抵抗測定結果比較

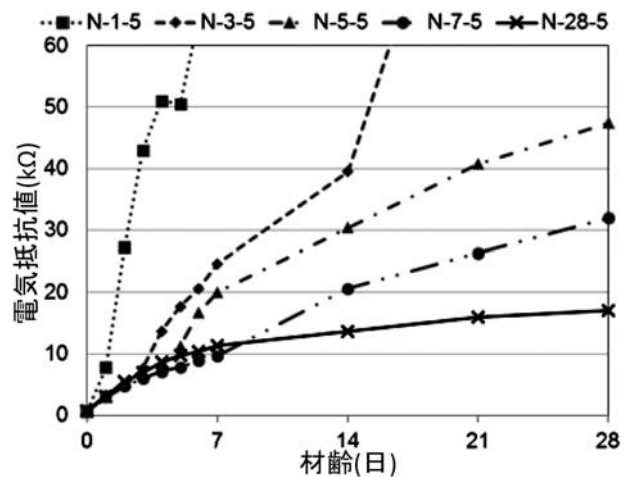


図-5 型枠存置期間ごとの比抵抗測定結果

れない。これは水和の進行により水分が内部で消費されることで抵抗値は上昇するが、表面からの水分逸散による影響は受けていないといえる。この傾向はBBを用いたコンクリートでも確かめられた。次に図-4はNとBBの測定結果を比較したものであり、それぞれ型枠存置期間7日と28日を比較したものである。これより28日脱型で深さ50mm位置であればNとBBには

表-2 コンクリートの配合

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	BFS	FA	S	G
N	45	46	172	382	0	0	808	971
	55	48		313	0	0	869	968
	65	50		265	0	0	928	949
BB		48		188	125	0	868	965
BC	55	50		92	219	0	903	927
FB		50		250	0	63	896	919

大差がないことがわかる。一方、表層 5 mm 位置では BBの方が周囲の乾燥の影響を顕著に受けていることが分かる。さらに図-5は型枠存置期間の異なるNコンクリートの表層 5 mmの電気抵抗値を整理したものである。脱型直後から急激な抵抗値の上昇が認められ、その傾向は型枠存置期間が短いものほど顕著に表れることがわかる。一方で型枠存置期間中の抵抗値はほとんど同程度であることから、型枠内でのコンクリートの抵抗は一定値を示すことがわかる。この傾向もBBコンクリートにおいて同様であった。

これにより電極を設置した測定深さを変化させることで目的とする表層からの位置での電気抵抗の計測をすることができることがわかった。また、養生や周囲環境が大きく影響する範囲は、表層から20~30mm程度までであること、養生についての判断をするためにはこの周辺で電気抵抗を測定することが重要であることがわかった。

### 3.2 電気抵抗とコンクリート強度・耐久性との関連

#### (1) 計測概要

コンクリートの配合は表-2に示すように単位水量を一定とし、W/C およびセメント種類を変化させることで、電気抵抗値に与える影響について検討した。図-6に電気抵抗値測定用の供試体概要図を示す。100×100×400mmの角柱供試体に電極を設置してコンクリートを打設した。試験体の大きさを考慮して電極間を40mmとし、電気抵抗の測定位置は、3.1節を考慮し、かぶりコンクリートを計測し乾燥の影響を著しく受けない位置として30mmとした。試験体は翌日脱型し、測定面をラップ、測定面以外をアルミテープで覆うことで水分の逸散を防いだ。打設および養生は温度 20℃、相対湿度 60%の環境下で行った。電気抵抗の計測は

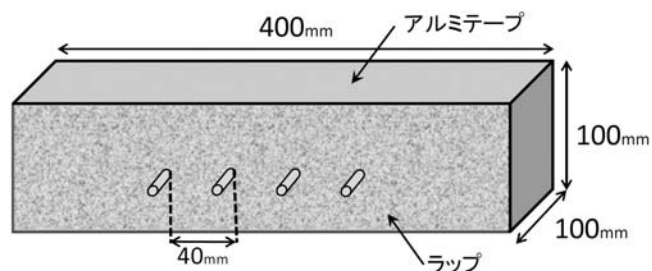


図-6 供試体概要図

材齢56日までとした。

一方、圧縮強度試験用の供試体はJISに基づき作製し、型枠存置期間を養生期間とした。養生期間は1, 3, 5, 7, 28日と設定し、各養生期間の脱型時における圧縮強度を脱型強度とした。また、各養生期間終了後に脱型し、温度20℃、相対湿度60%の環境下で気中暴露した後に28日圧縮強度を測定した。同様のコンクリートを用い、100×100×400mmの角柱試験体を用いて促進中性化試験（JISに準拠：温度20℃、湿度RH60%、CO<sub>2</sub>濃度5%）を実施した。各養生期間終了後、材齢56日まで大気中で乾燥をした後、4週間促進を行い中性化深さを測定した。

以上の結果を用いて、得られた電気抵抗値と脱型時の圧縮強度、脱型後気中養生した28日での圧縮強度、脱型後からの中性化進行との関係性を検討し、電気抵抗値からそれぞれの物性値を推測できるシステムの基礎を作成する。

#### (2) 計測結果

図-7にW/Cを変化させた場合の材齢経過に伴う電気抵抗値の変化を示す。材齢3日までは抵抗値に大きな差は見られないが、材齢経過に伴いW/Cが小さいほど抵抗値は大きくなり、その差は次第に大きくなった。これは、単位水量が一定のため、W/Cが小さいほどセメント量が増加し、水和反応に用いられる水分が多くなることで、コンクリート内の水分量が減ったためと考えられる。図-8にセメント種類を変化させた場合の材齢経過に伴う電気抵抗値の変化を示す。材齢4日まではN, BBおよびBCの抵抗値はほぼ同程度となったが、材齢経過に伴いBB, BCの抵抗値はNより大きくなった。また、高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど抵抗値は大きな値となった。一方、

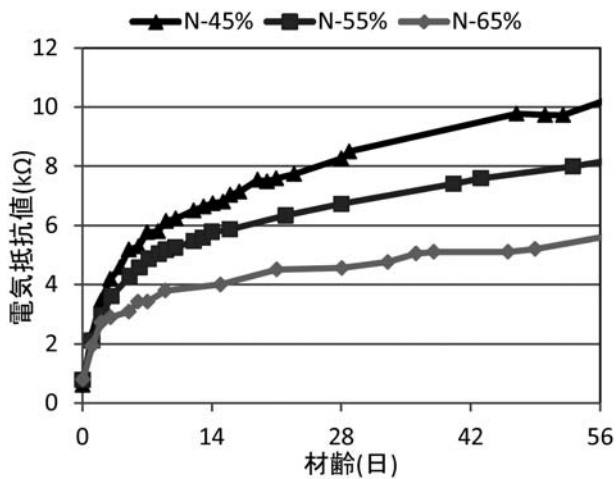


図-7 W/Cと電気抵抗値の関係

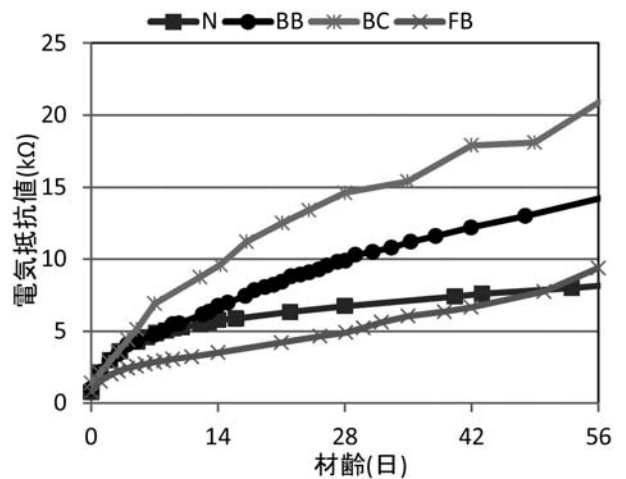


図-8 混和材混入と電気抵抗値の関係

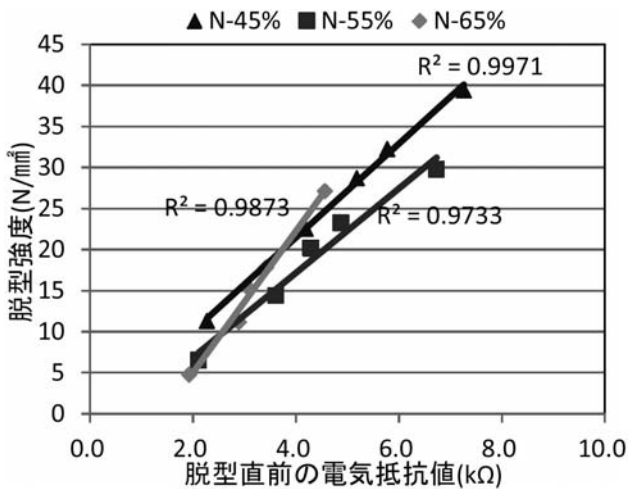


図-9 W/Cの異なるコンクリートの電気抵抗値と脱型強度の関係

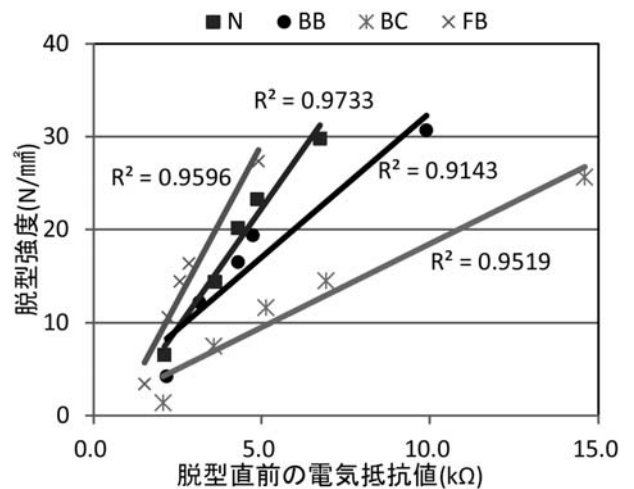


図-10 混和材の混入の影響

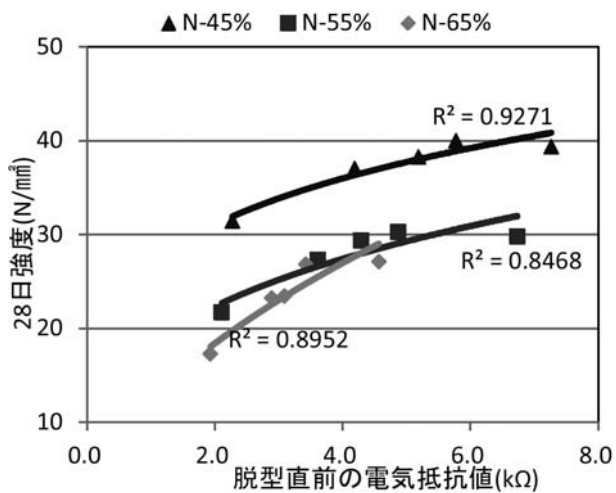


図-11 脱型直前電気抵抗値と28日強度

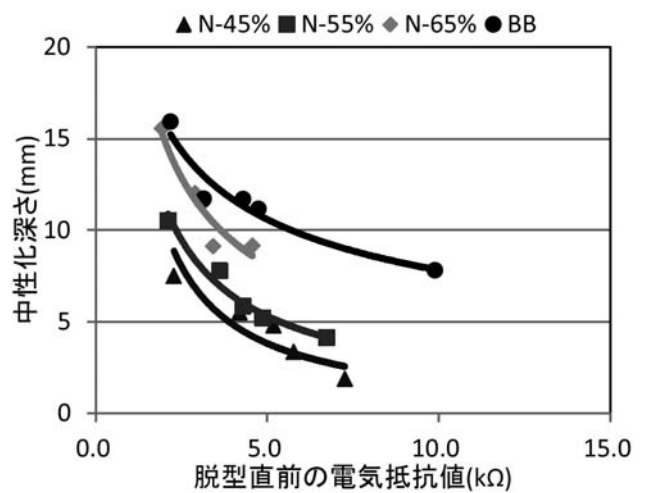


図-12 脱型直前電気抵抗値と中性化深さ

FBでは初期の抵抗値が小さくなった。これは、水和反応するセメント量が少なくなったためと考えられる。

### (3) 計測結果と諸物性との関係

図-9 および図-10に脱型直前の電気抵抗値と脱型強度の結果を示す。電気抵抗値の増加に伴い、脱型強

度は増加する傾向を示し、いずれの配合においても、脱型直前の電気抵抗値と脱型強度には相関関係が認められた。図-9よりW/Cが変化した場合でも本研究の範囲ではその傾きはほぼ同程度であった。また図-10より高炉スラグ微粉末を置換した場合は、置換率が

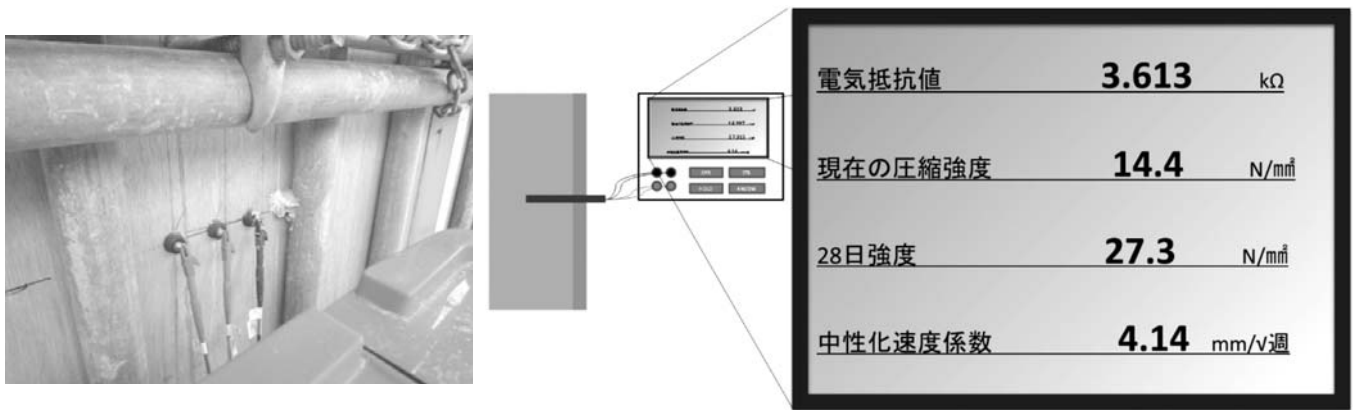


図-13 測定結果の表示イメージ図

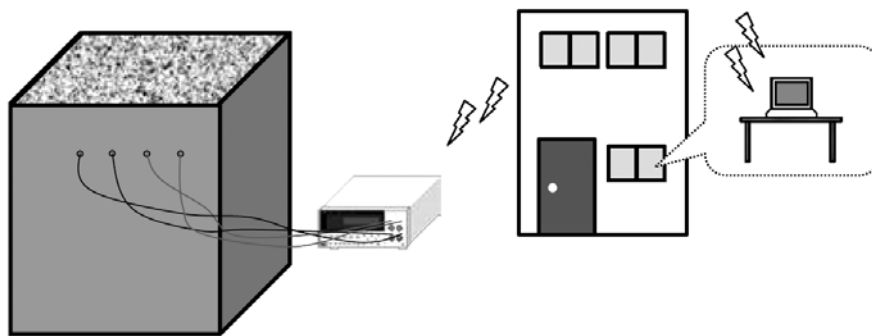


図-14 現場構造物の養生管理・施工・維持管理を遠隔地にてモニタリングするイメージ

大きくなるにつれて直線の傾きが小さくなる傾向がみられる結果となった。図-11に脱型直前の電気抵抗値と28日強度の関係を示す。W/Cおよびセメント種類を変化させた場合において、電気抵抗値の増加に伴い、28日強度は増加する傾向を示した。W/C55%に比べ65%は脱型直前の電気抵抗値の増加は小さいが28日強度は同程度を示した。これらには相関関係が認められ、このことから、電気抵抗値を測定することで養生期間内に強度を推定できる可能性が示唆された。図-12に脱型直前の電気抵抗値と促進4週における中性化深さの関係を示す。電気抵抗値の増加に伴い、中性化深さは小さくなる傾向を示し、脱型直前の電気抵抗値と中性化深さには相関関係が認められた。配合の違いにより、脱型直前の電気抵抗値が同じ場合でも、中性化深さには大きな差がみられた。

このことから、電気抵抗値を測定することで養生期間内に型枠内において強度・耐久性を推定できる可能性が示唆された。

#### 4. 養生終了タイミングの推測システムの考案

以上の計測方法を組み合わせることにより、型枠に前もって電極をセッティングしておき、コンクリートを打込んでから経時的に計測を行うことで型枠内のコンクリートの様子をモニタリング可能になると考える。そのイメージ図を図-13に示す。このように、現地において、型枠を取り外すことなくコンクリートの養生状態、コンクリートの水和状況をモニタリング可能となり、さらに現地において、型枠内のコンクリートの現在の強度、今型枠を外した場合の28日の強度、中性化速度係数などを推測することが可能となる。

今後、更なる改良を加えることで無人自動計測や無線ネットワークの構築により、現場にスタッフがなくても、図-14のイメージのように現場事務所や技術研究所等でリアルタイムに監視可能となるシステムを構築できると考えられる。これにより、養生期間の短縮・延長の指示や構造物の維持管理に資する養生状態の保存、データ蓄積などが可能となり、今まで未解明

であった施工における養生の定量化が可能になると考えている。

### 【謝 辞】

本研究の一部は2012年度前田記念工学振興財団の研究助成をいただいたことを付記する。また、研究の実施に当たり、実験では芝浦工業大学卒業生の上原菜津葵君、一ツ柳陸君、取りまとめには芝浦工業大学大学院生の原沢蓉子氏の協力を得た。加えて、本研究は佐藤工業株式会社の三坂岳広氏と共同で実施しているものであることを付記する。

### 【参考文献】

- 1) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響, 土木学会論文集V-59, pp.17-26, 2003
- 2) 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, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.97, 2012
- 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, V60/227-234, 2006
- 4) 檀康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集E, Vol. 65, No. 4, pp.431-441, 2009
- 5) 鹿島孝之, 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹: コンクリートの電気抵抗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, Vol21, No.2, 1999
- 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, pp785-790, 2011
- 7) 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No. 1, pp1348-1353, 2012
- 8) T.Iyoda, E.Toyomura: Study on the Prediction of Curing Period for meeting required Concrete Durability, The 5th ACF International conference 2012 (Pattaya)
- 9) T.Misaka, T.Iyoda: Study on curing of concrete by the end time judgment of the DC specific resistance, SCMT3 (Kyoto), 2013