

# 論文 電気抵抗値を用いた養生期間・型枠脱型時期推定手法の検討

太田 真帆\*1・伊代田 岳史\*2

**要旨:** コンクリート構造物には所要の強度,耐久性,水密性などの性能が要求される。そのため施工工程において,所要の性能を満足するための養生期間や型枠脱型時期を適切に判断することが可能な試験方法が望まれている。本研究は W/C およびセメント種類を変化させたコンクリートの電気抵抗値の測定および異なる養生期間における強度試験及び中性化試験を行った。その結果から電気抵抗値と水和反応との関連性を把握し,電気抵抗値を用いて異なる養生期間・型枠脱型時期における強度・耐久性を推定する手法を考案する。

**キーワード:** 四電極法, 電気抵抗値, 養生, 脱型

## 1. はじめに

中性化や塩害は,二酸化炭素や塩化物イオンがコンクリート表面から侵入することで発生する。コンクリート表面から劣化因子の侵入を防ぐためには,かぶりを緻密化する必要がある。緻密化するためには養生を十分にを行い水和反応を促す必要がある。養生によって湿潤状態を保つことで,水和反応に必要な水分量を確保することができ,かぶり部の緻密性は向上する。一方で,養生が不足すると,水分の逸散により十分な水和反応が起こらず,空隙が多くなり劣化因子の侵入が容易になる。

コンクリート標準示方書[施工編]において,セメント種類及び日平均気温に応じて湿潤養生期間の標準値が示されている。しかし,所定の期間湿潤養生を行っていても,構造物が所要の性能を保持しているかは不明である。現場によって打込み環境は異なるため,コンクリート構造物の性能の発現は周囲の環境や使用材料により異なり養生期間を一律に定めるのは困難だと考える。そのため,打込んだコンクリートの状態を把握する方法が必要となる。しかし,現在コンクリートの状態を硬化前から硬化後に至るまで継続的に把握する方法はない。

そこで,著者等<sup>1)</sup>は非破壊でコンクリートの状

態を継続的に検査する方法としてコンクリート内に通電範囲を固定した電極を埋め込み,外部から継続的に電圧をかけ,電気抵抗値を測定し,コンクリートの状態を推定する手法を提案している。用いる電極は4本とし四電極法により,精度を確保することとしている。測定される電気抵抗値は,物質中の電気の流れにくさを表し,水分の影響を大きく受けることが知られている。そのため,水和反応により消費される水分量が電気抵抗値に影響を与えることが既往の研究<sup>2)</sup>より報告されている。このことから,水分逸散のない状態におけるコンクリートの電気抵抗値は,水和反応に用いられていない残存している水分に影響を受けることが考えられる。この電気抵抗値に影響を及ぼすと考えられる事象として測定方法,配合,周囲の環境が挙げられる。測定方法,周囲の環境においては既往の研究<sup>3)</sup>が多く存在するが,配合が及ぼす影響についての研究が少ない。

そこで,本研究は W/C および,セメント種類を変化させることで,電気抵抗値に及ぼす影響を把握した。また,異なる養生期間における強度試験,促進中性化試験を行い,その結果を用いて電気抵抗値との関係を確認した。得られた結果から,養生期間内に強度・耐久性を推定する手法

\*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

\*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科准教授 (正会員)

表-1 コンクリートの計画配合

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

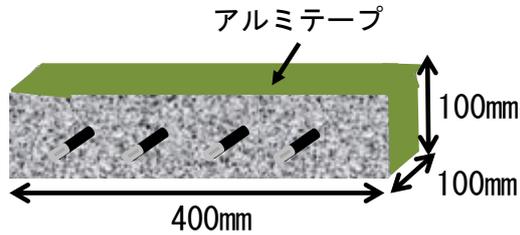


図-1 四電極法正面図

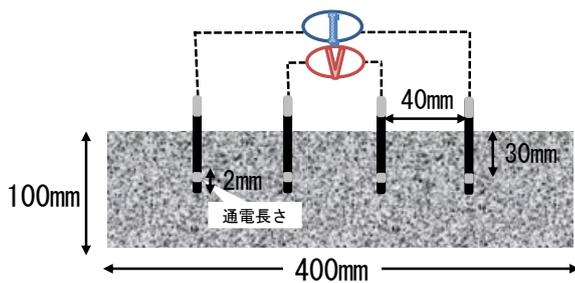


図-2 四電極法断面図

表-2 異なる養生期間における圧縮強度工程表

養生期間	材齢(日)							
	0	1	3	5	7	.....	28	
1日	打設	脱型	圧縮	気中曝露 (20°C, RH60%)				圧縮強度
3日		脱型	圧縮					
5日		脱型	圧縮					
7日		脱型	圧縮					
28日		脱型						

を検討することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 電気抵抗値の測定

#### (1) 供試体諸元

コンクリートの計画配合を表-1に示す。単体量を一定とし、W/C およびセメント種類を変化させた。図-1に供試体の概要図を示す。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込んだ。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。養生期間は1,3,5,7,28日とした。各養生期間終了後にラップを外し、一面解放を行った。打込み、養生は温度20°C、相対湿度60%の環境下で行った。

#### (2) 電気抵抗値の測定

図-2に示すように電気抵抗値の測定は四電極法を用いて行った。電気抵抗値の測定は温度20°C、相対湿度60%の環境下で行った。電極は表層から深さ30mmに埋込み、通電長さを2mm

と固定し、電極を供試体側面の中央に40mmの間隔で一列に設置して電気抵抗値の測定を行った。電気抵抗値の測定は直流電源装置を用いて行った。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。印加電圧は10Vとした。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した。

### 2.2 強度・耐久性試験

#### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の工程を表-2に示す。圧縮強度用の供試体は型枠存置期間を養生期間とした各

養生期間(1,3,5,7,28日)の脱型時における圧縮強度を測定し、脱型時強度とした。また、各養生期間終了後、温度20℃、相対湿度60%環境下で気中暴露した後、28日強度を測定した。

### (2) 中性化促進試験

中性化促進試験の供試体翌日脱型を行い、脱型後は測定面以外をアルミテープで覆うことで二酸化炭素の侵入を防ぎ、養生期間内は測定面をラップで覆うことで封緘養生とした。養生期間は1,3,5,7,28日とした。各養生期間終了後、温度20℃、相対湿度60%の環境下で材齢28日まで静置した。中性化の促進条件は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5 \pm 0.2\%$ とした。中性化深さの測定は促進4,6,8,12週に行った。測定の際に、鮮明な赤紫色に着色した部分までを中性化深さとした。

## 3. 試験結果

### 3.1 電気抵抗値の測定結果

#### (1) W/C の影響

図-3にW/Cを45%,55%,65%と変化させた場合の材齢経過に伴う電気抵抗値の測定結果を示す。材齢3日までは電気抵抗値に大きな差は見られなかったが、材齢経過に伴い差は大きくなった。W/Cが小さいほど電気抵抗値は大きくなった。これは、単位水量一定であるためW/Cが小さいほどセメント量が増え、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だと考えられる。このことより、既往の研究<sup>1)</sup>同様に電気抵抗値はコンクリート内の残存水分量に影響されることが確認できた。

#### (2) セメント種の影響

図-4にW/C55%、単位水量が一定でセメント種を変化させた場合の材齢経過に伴う電気抵抗値の測定結果を示す。高炉スラグ微粉末が混入された場合、材齢4日まではN, BB および BC の電気抵抗値に大きな差は見られなかったが、材齢経過に伴いBB, BCの電気抵抗値はNより大きくなり、置換率が高くなるほど電気抵抗値

は大きくなった。これは、単位水量が一定とされていることからNと比較してBB, BCではセメントの水和反応に用いられる水の消費形態が異なるため、電気抵抗値の増加挙動が異なっただのではないかと考える。高炉スラグ微粉末は長期において水分の消費が大きいと考察する。

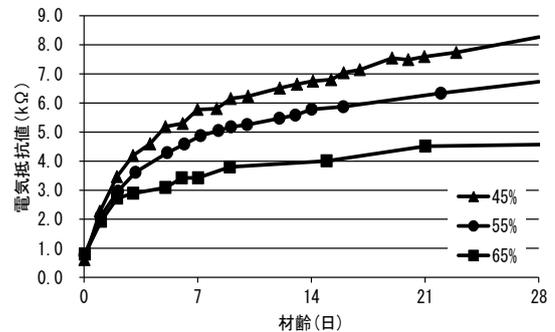


図-3 W/Cと電気抵抗値の関係

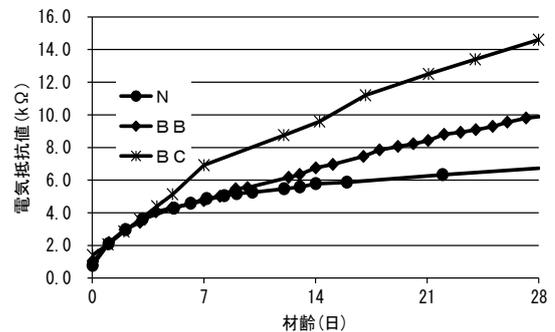


図-4 セメント種と電気抵抗値の関係

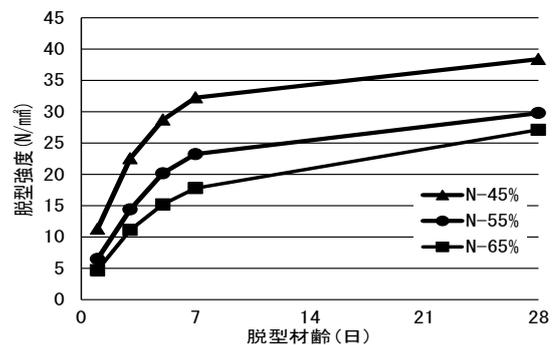


図-5 W/Cを変化させた脱型強度

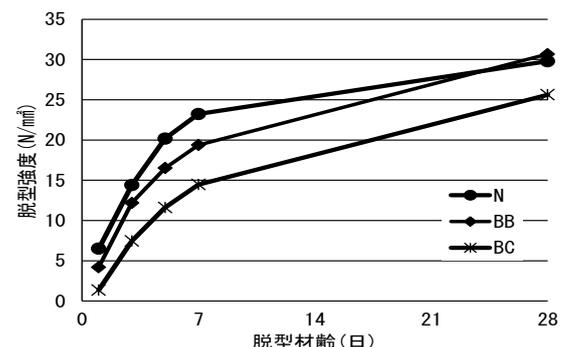


図-6 セメント種を変化させた脱型強度

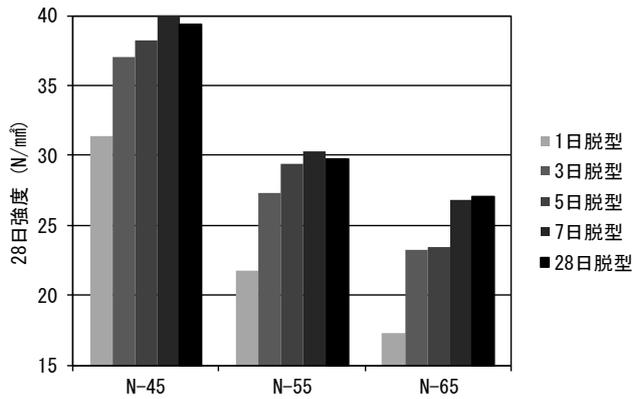


図-7 W/Cを変化させた28日強度

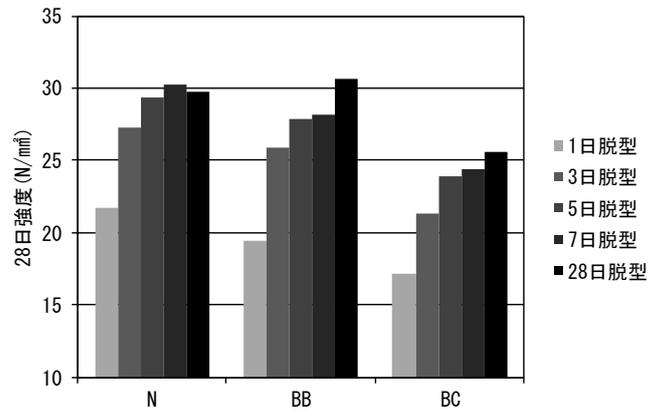


図-8 セメント種を変化させた28日強度

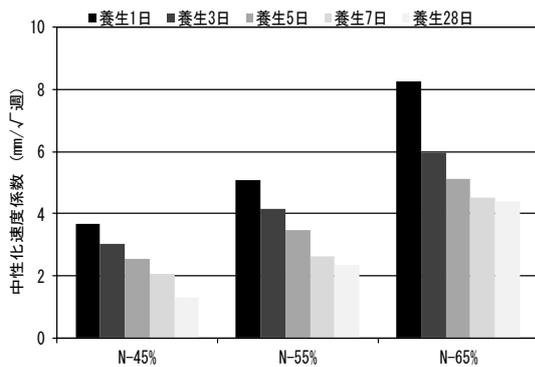
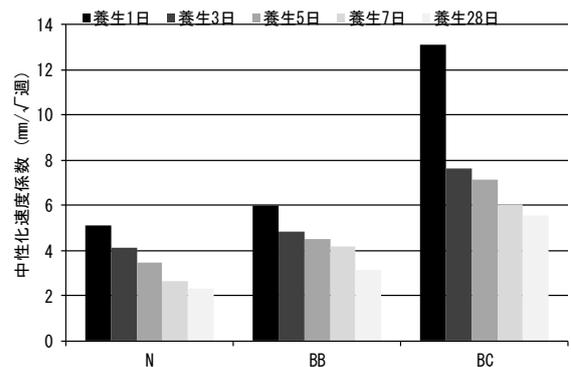


図-9 養生日数と中性化速度係数の関係



### 3.2 圧縮強度試験結果

#### (1) W/Cの違いによる測定結果

図-5にW/Cを変化させ脱型強度の関係を示す。W/Cが小さくなるにつれて脱型強度は大きくなった。型枠存置期間が長くなるにつれて脱型強度は大きくなった。これは、脱型後大気中に静置しているため水分逸散が起こり、水和反応に必要な水分が確保できなかったためではないのかと考える。

#### (2) セメント種の違い

図-6に異なるセメント種の型枠強度の関係を示す。高炉スラグ微粉末が多いものほど脱型強度は小さくなった。しかし、BBにおいては28日強度はNよりも大きくなった。

配合によらず、脱型材齢の長期化に伴う脱型強度の増加は同じ傾向が見られた。

#### (3) 養生期間と28日強度の関係

図-7にW/Cを変化させた型枠存置期間と28日強度の関係を示す。型枠存置期間が長くなるにつれて、28日強度は大きくなった。しかし、

7日脱型と28日脱型において強度の差は大きく表れなかった。このことから、水分供給のない状態においては、材齢7日以降水和反応は大きくは進行していないと考えられる。

図-8にセメント種を変化させた型枠存置期間と28日強度の関係を示す。高炉スラグ微粉末を置換させたものは、脱型7日と脱型28日にも強度の差が見られた。これは、高炉スラグ微粉末はセメントと比較して、水和反応の進行速度が遅いため、水分供給のない状態においても水和反応が進行しているためと考える。

### 3.3 中性化促進試験測定結果

図-9に中性化促進測定から得られた結果より算出した中性化速度係数と養生日数の関係を示す。養生期間が長いほど中性化速度係数は小さくなった。これは、養生期間が長いほど水和反応が進み、コンクリートの表面の緻密性が増したためと考えられる。

図-10よりW/Cを変化させた場合、W/Cが小さいほど中性化速度係数は小さくなった。また、

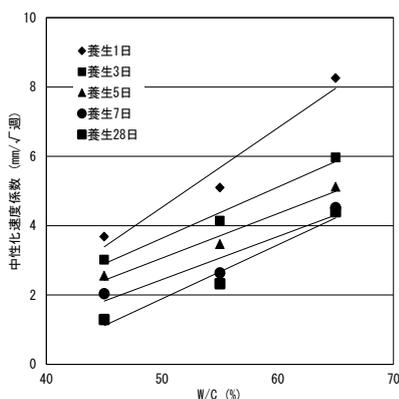


図-10 W/C と中性化速度係数

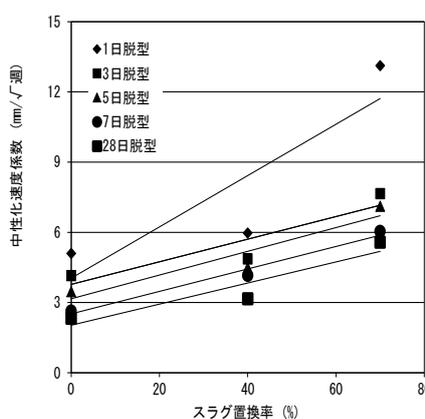


図-11 セメント種と中性化速度係数

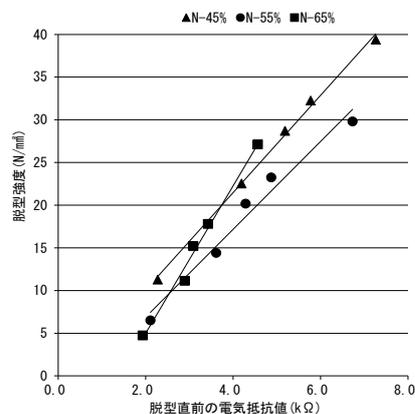


図-12 脱型強度と電気抵抗値

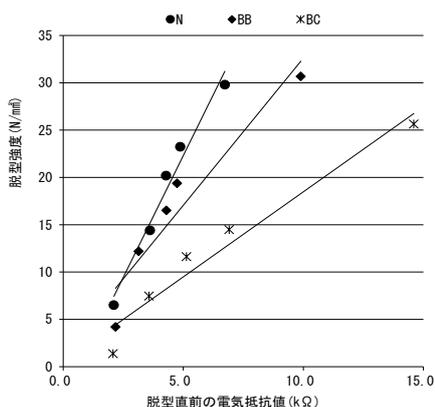


図-13 脱型強度と電気抵抗値

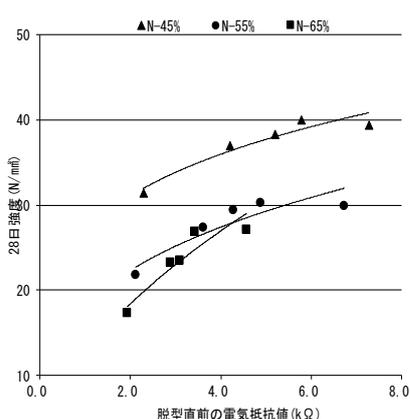


図-14 28日強度と電気抵抗値

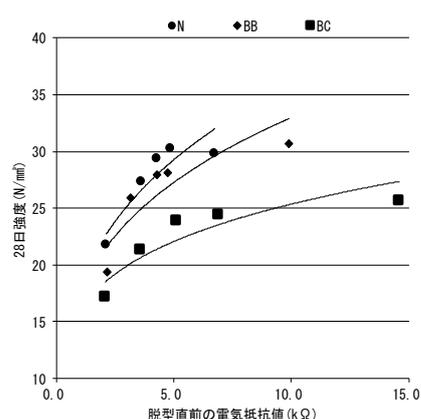


図-15 28日強度と電気抵抗値

W/C が大きくなるほど、養生日数 7 日と 28 日の差が縮まった。これは、単位水量が一定のため W/C が大きくなるほどセメント量が減少することから、材齢 7 日から 28 日までの間で水和反応を起こすセメント量が減少したためと考えられる。

また図-11 より、高炉スラグ微粉末の置換率が高いものほど、中性化速度係数は大きくなった。

### 3.4 電気抵抗値と強度の関係

#### (1) 脱型強度と電気抵抗値の関係

図-12, 13 に脱型直前の電気抵抗値と脱型強度との関係を示す。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、脱型直前の電気抵抗値と脱型強度には高い相関が認められた。図-12 より W/C を変化させた場合、傾きの大きな差は見られなかったが図-13 においてセメント種を変えた場合、高炉スラグ微粉末が多いほ

ど直線の傾きが小さくなる傾向が見られた。

#### (2) 28日強度と電気抵抗値の関係

図-14, 15 に脱型直前の電気抵抗値と 28 日強度の関係を示す。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、電気抵抗値と 28 日強度には相関関係が認められた。図-15 より、W/C を変化させた場合、W/C55% に比べて 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。

図-15 より、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど脱型直前の電気抵抗値は大きくなるが、28 日強度は小さくなる傾向が見られた。

### 3.5 電気抵抗値と耐久性の関係

図-16, 17 に脱型直前の電気抵抗値と中性化速度係数の関係を示す。電気抵抗値が増加するに伴い、中性化速度係数は減少する傾向を示し、脱型直前の電気抵抗値が同じ場合でも、W/C やセメント種類の違いにより中性化速度係数には大きな差が見られた。

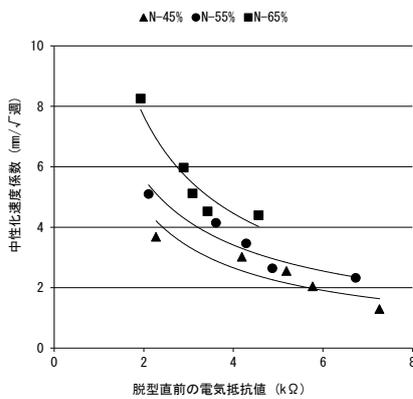


図-16 脱型直前の電気抵抗値と中性化速度係数

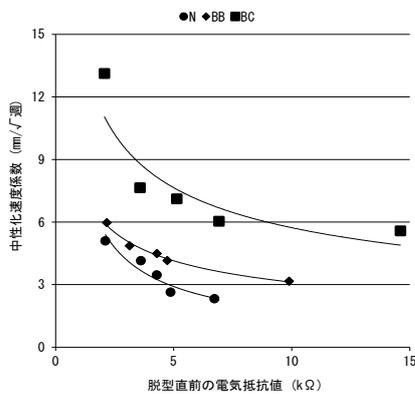


図-17 脱型直前の電気抵抗値と中性化速度係数

#### 4. 四電極法の活用展開案

3章の実験結果より、電気抵抗値はコンクリートの内の残存水分量を捉えていることが確認でき、特に封緘状態または、乾燥の影響が少ない位置では、水和反応の進行を捉えていると考えられる。また、電気抵抗値と脱型時強度との相関関係が認められた。加えて、脱型した供試体を乾燥環境または中性化環境に暴露した時の28日強度及び中性化速度も相関が認められたことより、電気抵抗値を計測すれば現在のコンクリートを推測することが可能である。

今まで型枠内のコンクリートを推定することは難しかったが、電気抵抗値の測定することで模式図-18のようなシステムにより簡易的に型枠内のコンクリートを推測できると言える。これは、遠隔地からもモニタリング可能にすることで、将来的には打込まれているコンクリートを集中的に管理し、周囲の温度や湿度条件を加味した最適養生終了タイミングのモニタリングにも応用可能と考えている。

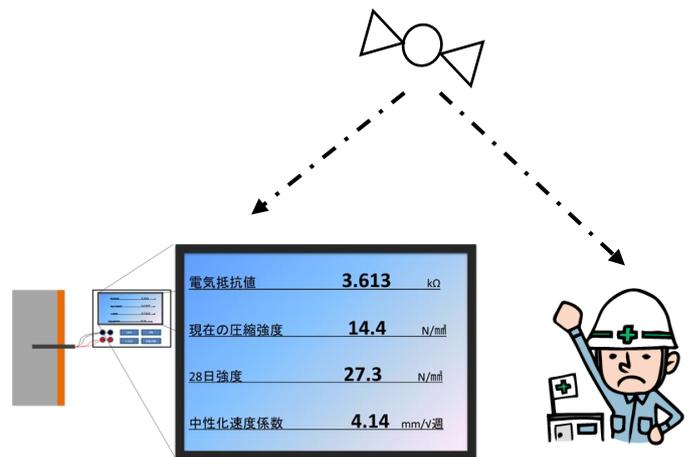


図-18 モニタリングシステムの模式図

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に記す。

- 1) 電気抵抗値は W/C に影響を受け、W/C が小さいほど電気抵抗値は大きくなった。
- 2) 電気抵抗値は高炉スラグ微粉末の混入により影響を受け、置換率が高いほど電気抵抗値は大きくなった。
- 3) 配合によらず、電気抵抗値が大きくなるにつれて強度も大きくなり相関性が見られた。
- 4) 電気抵抗値と耐久性には相関関係がみられた。電気抵抗値が同じ場合でも中性化速度係数には大きな差が見られた。
- 5) 電気抵抗値と強度・耐久性に相関関係が示されたことから、電気抵抗値を測定することで養生期間内に強度・耐久性を推定できる可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 豊村恵理ほか：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
- 2) 親本俊憲ほか：モルタルの電気抵抗特性に関する電気化学検討，コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No1, pp. 907-912, 2005
- 3) 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，2014