

# 論文 導電率を用いたコンクリートの若材齢の強度の推定

渋谷 俊貴\*1・三坂 岳広\*2・槇島 修\*3・伊代田 岳史\*4

**要旨:** コンクリートの脱型時に若材齢のコンクリートの強度を推定することにより、施工の合理化や省力化が可能と考えられる。既往の研究では、コンクリートの導電率と圧縮強度に相関があると報告されている。しかし、若材齢のコンクリートの強度における検討は未だなされていない。本研究では、導電率が計測している対象を明確にしたうえで異なる雰囲気温度等により強度発現を変化させたコンクリートの導電率と若材齢の圧縮強度の関係について検討した。結果として、強度発現を変化させたコンクリートの導電率と若材齢の圧縮強度には相関がみられ、導電率から若材齢の圧縮強度を推定できる可能性が示された。

**キーワード:** 導電率, 電気伝導率, 若材齢, 圧縮強度, 脱型, 水和発熱速度

## 1. はじめに

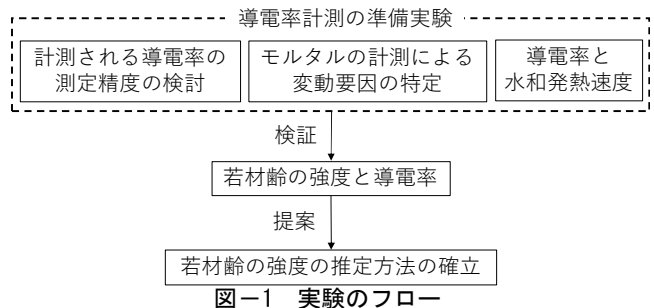
コンクリートの脱型は、コンクリートが所要の強度に達してから行う必要がある。コンクリート標準示方書[施工編]によると、各部材の脱型強度の参考値は表-1のように記載されている。しかしながら、実際の現場では所要の強度を常に確認することが難しいため、強度発現に余裕をもった時間で脱型時期を判断している。また、コンクリートの脱型の可否を判断するためには、現場で作製した供試体を試験所へ運搬し、圧縮強度試験を行うことで確認している。そこで、型枠内のコンクリートの強度をリアルタイムに計測して脱型時期を決定できれば、合理的な施工が可能となり、施工の省力化に繋がると考えられる。

筆者らは非破壊かつ簡易にコンクリートの強度を推定する手法の一つとして、コンクリートの導電率（電気伝導率）に着目した。既往の研究<sup>2)</sup>では、コンクリートの導電率と圧縮強度には相関があると報告している。しかしながら、若材齢における圧縮強度と導電率の関係は検討されていない。

本研究では、若材齢をまだ強度が十分に発現していない初期の材齢と定義し、導電率を用いてコンクリートの若材齢の圧縮強度を推定することを目的とした。そのために、以下に示す4つの実験を行った。図-1に実験のフローを示す。まず、計測される導電率から圧縮強度を推定するため、導電率の測定精度について検討する。次に、様々な配合のモルタルから導電率の変動要因の特定を図る。次に、硬化促進剤を用いたコンクリートを作製し、計測される導電率が硬化促進剤による水和反応の変化を捉えられるかについても検討する。次に、強度発現を変化させるために、異なるセメント種類と雰囲気温度のコンクリートを作製し、若材齢のコンクリートの強度

表-1 型枠および支保工を取り外してもよい時期のコンクリート圧縮強度の参考値<sup>1)</sup>

部材面の種類	例	コンクリートの圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
厚い部材の鉛直または鉛直に近い面, 傾いた上面, 小さいアーチの外側面	フーチングの側面	3.5
薄い部材の鉛直または鉛直に近い面, 45°より急な傾きの下面, 小さいアーチの内側面	柱, 壁, はりの側面	5.0
橋, 建物等のスラブおよびはり, 45°より緩い傾きの下面	スラブ, はりの底面, アーチの内側面	14.0



と導電率の関係を検討した。そして最後に、実際に計測された導電率を用いて若材齢のコンクリートの強度を推定した。

## 2. 導電率測定のための準備実験

### 2.1 計測される導電率の測定精度の検討

#### (1) 実験概要

導電率は、物質の電気の通りやすさを表す指標であり、イオンが多く存在する電解質溶液の導電率は高いことから、主に水質調査や塩分濃度の測定に使用される。写真-1に本研究に用いた交流2電極法の導電率計を示す。

\*1 元芝浦工業大学 工学部土木工学科 (正会員)

\*2 芝浦工業大学大学院 地域環境システム専攻 (学生会員)

\*3 飛鳥建設(株) 技術研究所 (正会員)

\*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

セメント水和物の導電率は時間の経過とともにセメントからのイオンの溶出に伴って変化することが確認されている<sup>3)</sup>。導電率の計測精度の確認のため、導電率測定を試料として、経時的な導電率の変化が小さくなるようセメントを高炉スラグ微粉末に置き換えたモルタルを使用した。測定方法は、練り上がり直後のモルタルをプローブの先端に入れ、計測した後に洗浄した。これを32回繰り返して行い、計測値のばらつきを評価することとした。ただし、32回の計測に約3時間の測定時間を要するため、プローブを2つ用い、一方のプローブではモルタルの経時変化を測定し、導電率の変化分を加減することで時間による導電率の変動を補正した。

## (2) 実験結果及び考察

図-2 に実験結果を示す。ここで示す値は時間に伴う変動を測定開始時点の導電率に補正したものである。平均値は0.33mS/cm、標準偏差は0.021mS/cm、変動係数は6.61%程度と小さいものであった。本研究の対象であるコンクリートの導電率は、大きなものでおよそ2.4mS/cmであり、これと比較して変動係数6.61%の導電率は比較的高い測定精度を有することが確認された。以上の結果より、本研究で計測される導電率は、信頼性の高いものであると考えられる。

## 2.2 モルタルの計測による導電率の変動要因の特定

### (1) 実験概要

導電率は電気の流れやすさの指標であり、コンクリート中の単位水量等の構成材料の割合に影響を受けると考えられる。そこで、配合条件による導電率の変動要因について検討した。図-3 にモルタルの体積構成割合を示す。使用したモルタルの配合は、一定の水セメント比(以下W/C)50%として細骨材量を変化させたケースと、一定の細骨材セメント比(以下S/C)3.0とした場合の単位水量を変化させたケースで検討した。セメントに普通ポルトランドセメントを用い、表乾状態で密度2.62g/cm<sup>3</sup>の細骨材を用いた。

導電率の計測方法は、図-4 のようにプローブにφ50mm×100mmの型枠を固定し、型枠にモルタルを入れ、接水から60分後にモルタルが示す導電率で評価した。なお、モルタルの乾燥による導電率への影響を防ぐため、型枠をビニールフィルムで覆った。

### (2) 実験結果及び考察

図-5 に単位細骨材量と導電率の関係、図-6 に単位水量と導電率の関係を示す。導電率は、同一のW/Cにおいて単位細骨材量が増加すると減少し、同一のS/Cにおいて単位水量が増加すると増加することが分かる。これらの結果より、導電率は、セメントから溶出したイオンを含む水の導電性と細骨材が抵抗となる両者の影響を評価しているものと考えられる。



写真-1 導電率計

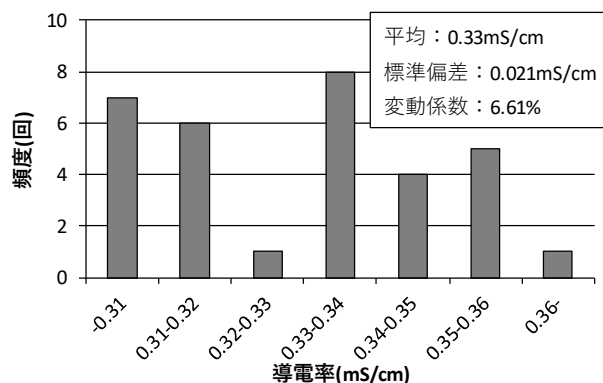


図-2 導電率の測定精度の検討結果

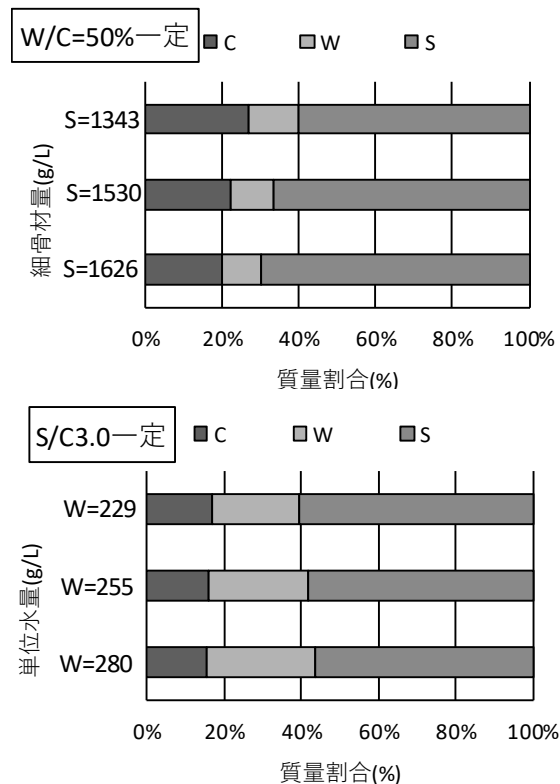


図-3 モルタルの体積構成割合

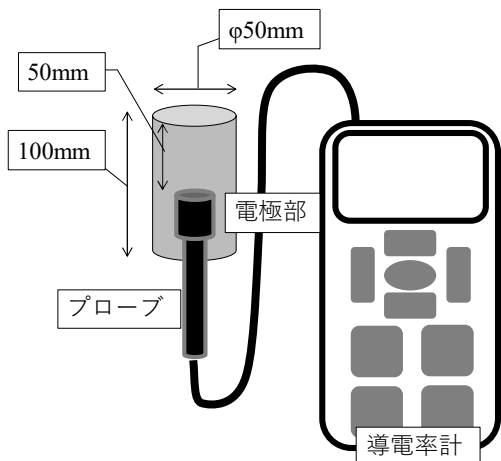


図-4 導電率測定の概略図

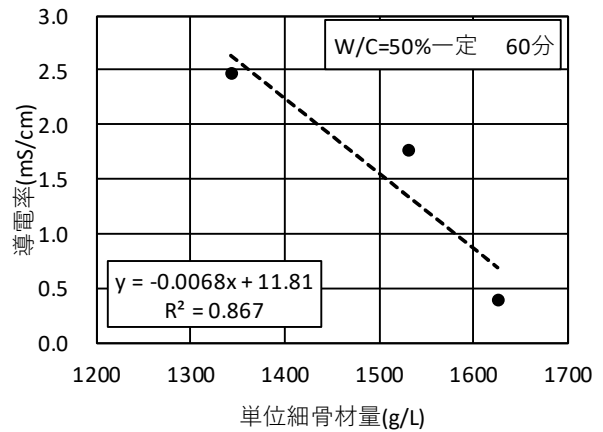


図-5 単位細骨材量と導電率

### 2.3 導電率と水和発熱速度

#### (1) 実験概要

表-2 に本研究で使用したコンクリートの計画配合を示す。A シリーズでは、水和の進行を変化させるために、硬化促進剤を添加し、添加率をセメントの質量に対して 0%及び 4%とした。表乾状態で骨材の密度は、細骨材が 2.62g/cm<sup>3</sup>、粗骨材が 2.70g/cm<sup>3</sup>である。

次に、試験方法について示す。図-7 に本研究で用いた導電率測定装置の概略図を示す。図のように円柱供試体の内部にプローブを埋め込んだ。プローブの電極部がブリーディング現象の影響を受けないように、電極部は上向きとした。また、粗骨材が電極部に入ること、計測される導電率に影響を与えないよう、プローブには 5mm のふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを入れた。さらに、導電率が乾燥の影響により変化することを防ぐために、プローブを表面から 50mm の位置に埋め込んだ。導電率は材齢 24 時間まで 5 分間隔で計測し、以降材齢 28 日まで 1 時間間隔で計測した。

水和反応の進行度を評価するためにコンダクションカロリメータを用いて水和発熱速度を測定した。試料はウェットスクリーニングしたモルタルとした。

#### (2) 実験結果及び考察

図-8 上部に A シリーズの導電率の測定結果を示す。経過時間は接水からの時間とした。コンクリートの導電率はおよそ 2 時間後にピーク（図中矢印）を迎え、その後、減少する傾向が得られた。既往の研究<sup>3)</sup>より、接水から導電率が上昇する傾向は、セメントの溶解反応の影響を受けている。また、導電率がピークを示した後に減少する傾向は、水和反応の進行により水分が消費されるため、電気が通りにくくなったことが要因と考えられる。材齢 18 時間までは、硬化促進剤の影響で A-4%の導電率が大きくなった。しかし、A-0%と A-4%の導電率は材齢 18 時間以降で大きな差異が認められない。また、A-4%では A-0%に比べて、導電率のピーク時間がわずかに早ま

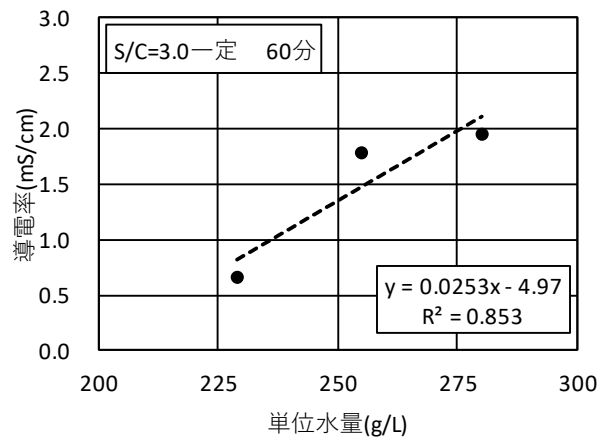


図-6 単位水量と導電率

表-2 A シリーズのコンクリートの計画配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				促進剤添加率(%)
			W	C	S	G	
A-0%	50	48	175	349	840	938	0
A-4%							4

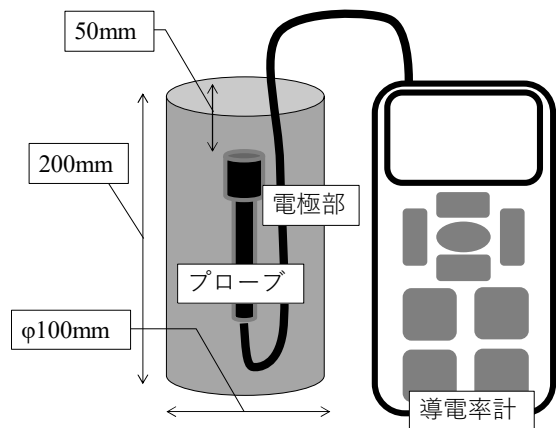


図-7 導電率測定装置の概略図

った。

次に、導電率と水和発熱速度の関係を図-8 に示す。

C<sup>3</sup>クリップボード [セメント化学編]<sup>4)</sup>によると、一般的に初期の発熱速度は4段階に区分される。

水和初期 (図中①) では、セメントの溶解によりカルシウムイオンが溶出する。既往の研究<sup>3)</sup>では接水から2時間ほどでカルシウムイオンの濃度が上昇すると報告されている。導電率はイオンの溶出に伴って電気が流れやすくなるため、増加傾向を示す。

誘導期 (図中②) では、水和速度は極めて小さくなる。

加速期 (図中③) では、反応が活発になり、C-S-Hの生成及びセメントの硬化が起こる。導電率はセメントの反応による水分の消費によって減少する。また、イオンの動きが活発になり、導電率はわずかに上昇する。これは、発熱速度のピークにおいて、セメントの発熱量は大きくなることの影響と考えられる。

減速期 (図中④) では、反応が緩やかに低下していく。

硬化促進剤を用いた A-4%の水和発熱の停滞期の時期と、導電率のピークの時期はほぼ一致した。また、水和発熱が最大となる時期と、導電率のピーク後の変曲点の時期もおおよそ一致した。この傾向は他の配合でも確認されている。以上から、計測される導電率の経時変化は水和反応の進行を捉えていると考えられる。

## 2.4 検討結果

計測されるモルタルの導電率は、変動係数が6.61%とばらつきが少なく、高い精度で測定可能であることを確認した。また、導電率は配合条件の単位水量に影響を受け、単位水量の増加に伴って導電率は増加傾向を示す。

一方で、骨材は通電の阻害要因となる可能性が示唆された。このことから、コンクリートの計測においてはウェットスクリーニングを行ったモルタルを用いて、粗骨材の混入を防ぐ必要があることが分かった。また、計測される導電率の経時変化は水和反応の進行を示していると考えられ、硬化促進剤の添加による水和反応の変化も評価できることが確認された。

## 3. 若材齢のコンクリートの強度と導電率の関係

### 3.1 使用材料及び試験体諸元

圧縮強度と導電率の関係を検証するため設定したコンクリートの配合と養生条件を、表-3に示す。セメントの種類は普通ポルトランドセメント (以下 OPC)及び、高炉セメント B種 (以下 BB)とした。また、コンクリートの強度発現を変化させるために雰囲気温度を5℃、20℃、35℃とした。ここで行う試験を OPC 及び BB シリーズと称する。

### 3.2 試験方法

#### (1) 圧縮強度試験

試験方法は、「コンクリート圧縮強度試験(JIS A 1108-

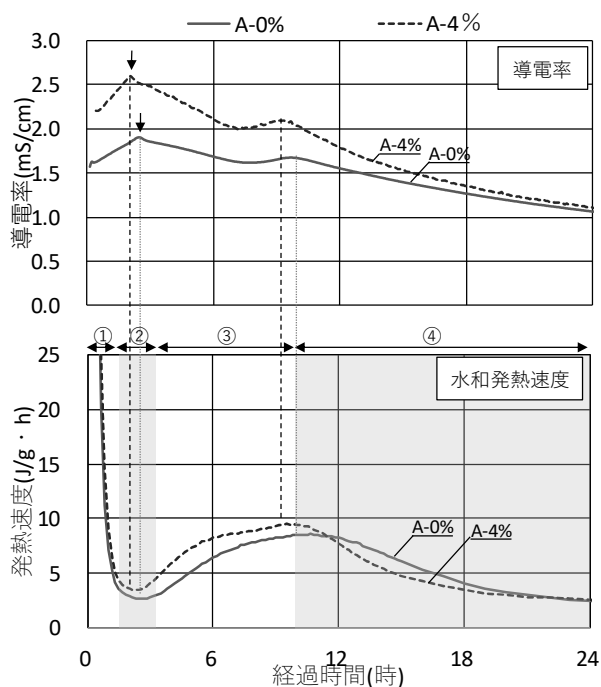


図-8 導電率と水和発熱速度

表-3 OPC 及び BB シリーズのコンクリート計画配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				養生温度 (°C)
			W	C	S	G	
OPC-5°C	50	48	175	349	840	938	5
OPC-20°C							20
OPC-35°C							35
BB-5°C	50	48	175	349	837	931	5
BB-20°C							20
BB-35°C							35

2006)に準拠して行った。養生方法は試験材齢まで各雰囲気温度で型枠存置による封かん養生とした。試験材齢は OPC シリーズで 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 時間及び 3, 28 日とし、BB シリーズで 6, 12, 15, 18, 24 時間及び 3, 28 日とした。また、強度発現の遅い OPC-5°Cは材齢 18, 21, 24, 27, 30 時間、BB-5°Cは材齢 21, 24 時間で試験を行った。

#### (2) 導電率測定

A シリーズと同様に、OPC 及び BB シリーズでも同様の方法で導電率を測定した。

### 3.3 実験結果及び考察

図-9, 10に OPC 及び BB シリーズの圧縮強度試験の結果を示す。圧縮強度が 5.0N/mm<sup>2</sup>となる時間は、OPC-35°Cと BB-35°Cではおよそ 12 時間、OPC-20°Cでは 18 時間、BB-20°Cでは 24 時間であった。OPC, BB シリーズとも雰囲気温度の違いにより強度発現に差が確認できた。

次に、OPC 及び BB シリーズの導電率の結果を図-11, 12に示す。図中の矢印は導電率のピーク時期を示す。

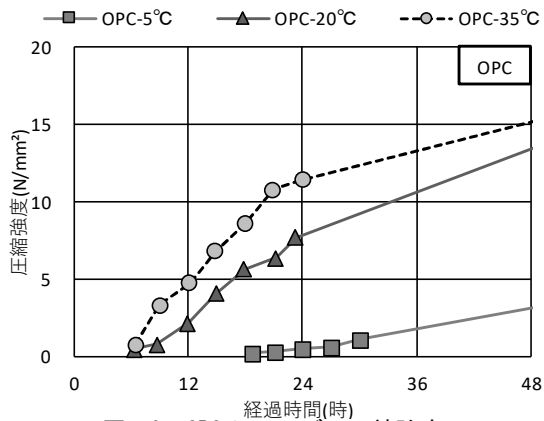


図-9 OPCシリーズの圧縮強度

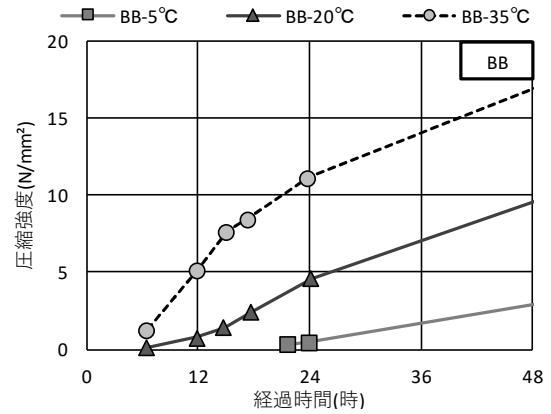


図-10 BBシリーズの圧縮強度

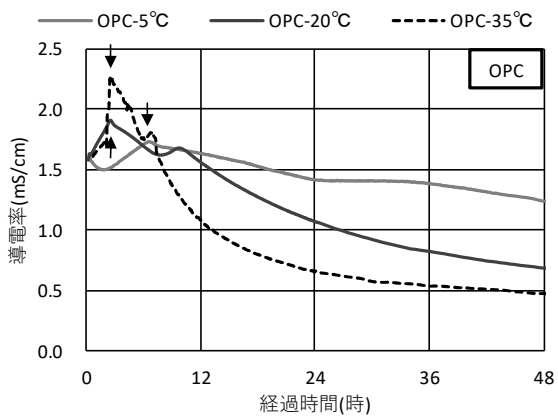


図-11 OPCシリーズの導電率

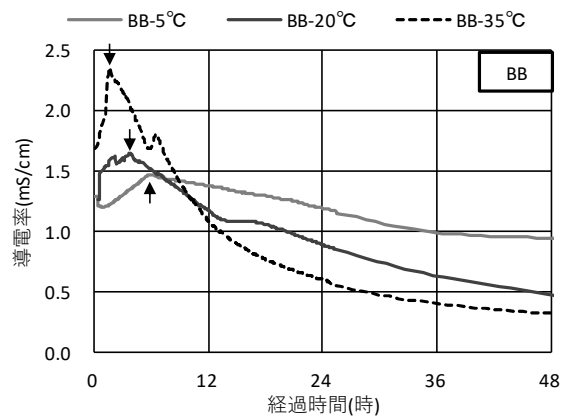


図-12 BBシリーズの導電率

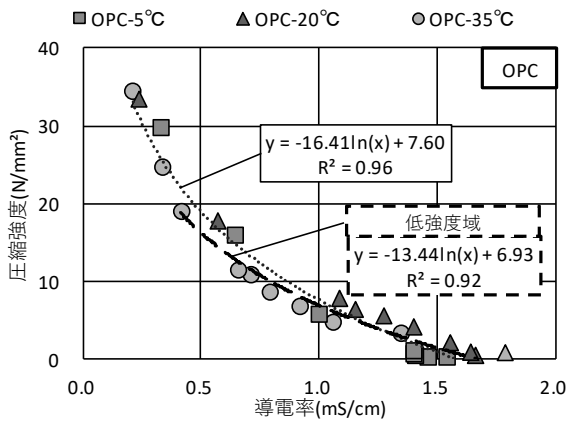


図-13 OPCシリーズの導電率と圧縮強度

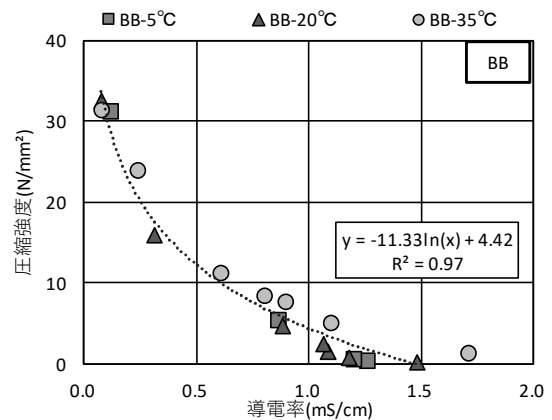


図-14 BBシリーズの導電率と圧縮強度

OPC, BBシリーズともに雰囲気温度が高いほど、コンクリートの導電率のピーク値は大きく、ピーク後の傾きは急になった。また、BBシリーズでは、導電率のピークとなる時期は雰囲気温度が高いほど早くなった。

さらに、OPC, BBシリーズの導電率と圧縮強度の関係を図-13, 14に示す。図中の曲線は、全ての試験結果から算出した対数近似曲線を示している。図-13より、OPCシリーズの導電率と圧縮強度は異なる雰囲気温度でも、同一の相関関係を有している。また、図-14より、

BBシリーズではOPCシリーズと同様、導電率と圧縮強度は同一の相関関係を有することを確認した。

#### 4. 若材齢のコンクリートの強度の推定方法の確立

これまでの試験結果をもとに若材齢におけるコンクリートの強度の推定のために、OPCシリーズにおける材齢3日以内の導電率から圧縮強度を推定する曲線を算出した。推定式を式(1)に示す。

$$y = -13.44 \ln(x) + 6.93 \quad (1)$$

ここに、y:圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

x:導電率 (mS/cm)

ここで、異なる温度環境においても運用可能かを検討するために、前述の表-3の OPC コンクリートと、同様の配合のコンクリートを用いて強度推定を検証した。検証に使用したコンクリートの雰囲気温度は 28℃とした。表-1のように示方書で求められる強度である 3.5N/mm<sup>2</sup>、5.0N/mm<sup>2</sup>、及び 14.0N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を発現する時間を式(1)より推測したところ、それぞれ材齢 11.8 時間、14.0 時間及び 40.0 時間となったため、その時間で圧縮強度試験を行った。図-15 に試験結果を示す。確認実験で行った実強度はすべて、推定強度よりも高い値を示し、安全側となった。実強度と推定強度に差が生じた理由として、若材齢のコンクリートの圧縮強度のばらつきが挙げられる。本研究では、同材齢に対して供試体 3 本の平均値から圧縮強度を算出したが、若材齢において最大 1.5N/mm<sup>2</sup>のばらつきを確認した。今後、強度推定精度のさらなる向上が必要であると考えられる。

## 5. 結論

本研究で得られた成果を示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末を用いてモルタルの導電率のばらつきを調査したところ、変動係数は 6.61%と小さく、信頼性の高い評価が可能である。
- (2) 導電率のピークとなる時期は、コンダクションカロリメータで確認できる発熱速度の誘導期とほぼ等しく、また、導電率が変曲する時期は、発熱速度の加速期の終わりの時期とほぼ等しい。
- (3) 雰囲気温度が高いほど、コンクリートの導電率のピーク値は大きくなり、ピーク後の傾きは急になる。
- (4) OPC コンクリートにおける導電率と圧縮強度の関係は、雰囲気温度によらずほぼ同一の相関関係を有し、雰囲気温度が変化しても導電率から圧縮強度を推定できる。また、BB コンクリートにおいても同様の結果となった。
- (5) OPC コンクリートを対象に、導電率から圧縮強度の推定をしたところ、実強度は推定強度よりも高い値を示すことが確認された。

これらの結果から、導電率は水和反応の進行度を評価しており、既往の研究<sup>5)</sup>で報告されているコンクリート

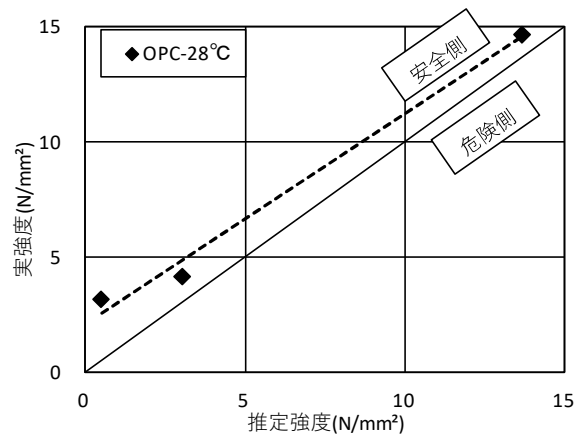


図-15 OPC-28℃の推定強度と実強度

中の水分と相関があることを確認した。これらのことから、コンクリートの硬化による水分の消費、つまり、水和の進行に伴う圧縮強度の増加を、導電率の減少程度によって予測できる可能性があるものと考えられる。

## 参考文献

- (1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.152，2012
- (2) 槇島修ほか，コンクリートの構造物の導電率測定による躯体内の強度発現の測定法に関する基礎的研究，土木学会第 69 回年次学術講演会，V-032，pp.441-442，2014
- (3) 三坂岳広ほか，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測定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，Vol19，No1，2017
- (4) セメント協会：C<sup>3</sup> クリップボード [セメント化学編]，pp.37，2008
- (5) 太田真帆ほか，電気伝導率計を用いた圧縮強度推定のメカニズムの検討，第 70 回セメント技術大会講演要旨，pp.172-173，2016
- (6) 川里麻莉子，槇島修，モルタルおよび電解質を用いた導電率による凝結評価に関する一考察，土木学会第 72 回年次学術講演集，V-527，pp.1053-1054，2017
- (7) 伊藤孝文，伊代田岳史，電気伝導率を用いた圧縮強度推定のメカニズムの検討，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第 16 巻，pp.227-232，2016