

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

伊藤 孝文*1, 伊代田 岳史*2

Study on the Mechanism of Estimating Compressive Strength Using Electric Conductivity

Takafumi ITO*1, Takeshi IYODA*2

要旨: 構造物の強度や耐久性にはコンクリートの脱型時期が大きく影響をすることが知られている。しかし、打ち込まれた型枠内のコンクリートの状態をモニタリングする手法は現在確立されていない。そこで、著者等は電気伝導率計を用いて非破壊でモニタリングする手法を提案し、計測される導電率により型枠内の圧縮強度発現の推定が可能であることを示した。本研究では、圧縮強度の推定が可能であるメカニズムの要因分析を行ったところ、導電率比と空隙中の液状水分量との両者に相関があった。このことより、導電率は間接的に空隙量を計測していることを表しており、このことから圧縮強度が推定できると考える。

キーワード: 電気伝導率, 水分量, 圧縮強度, 空隙

1. はじめに

コンクリート構造物を施工する際は型枠の脱枠タイミングや養生日数の管理は非常に重要である。強度発現が不十分な状態での脱枠は構造上の弱点となるひび割れや欠けが発生する危険性が増加する。そのため、コンクリートの打設から型枠の脱枠及び養生終了時までの一連の強度発現を把握することは、コンクリートの品質管理の上で非常に重要である。

現在、コンクリート型枠の脱枠時期や養生終了のタイミングの判断は品質管理用の供試体を用いて圧縮強度試験を行っている。しかし、品質管理用の供試体は躯体のコンクリートに比べ周囲の温度や湿度などの環境要因の影響を受けやすいことから、躯体中のコンクリートの圧縮強度と差異を生じる。つまり、品質管理用の供試体では、躯体中のコンクリートの圧縮強度を正しく測定できていない可能性がある。

近年、著者らは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電気的特性に注目したり。また、四電極法で得られる電気抵抗値の逆数である導電率を利用して躯体内のコンクリートの強度発現を推定する研究も併せて行われている²⁾。しかし、コンクリートの強度と電気的特性に相関があるという研究報告がされている一方で、その計測している対象の詳細については未解明な点が多く、このことに対する研究は少ない。そこで、このコンクリートの圧縮強度と導電率の相関性の要因の分析を

表-1 コンクリートの計画配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	OPC	BFS	S	G
N-1	30	48	170	567	-	768	850
N-2	50			340	-	830	955
N-3	65			262	-	890	986
B-1	50		170	170	833	948	
B-2	50		165	99	231	861	954

行った。

本研究では、前提として電気伝導率計がコンクリート内部の空隙に存在する水分のイオンを媒体として計測していると考え、コンクリート内部の水分とその水分が存在する空隙に着目した。実験の手順としては導電率と圧縮強度を測定するための供試体を作製し、本実験で使用したコンクリートが既往の研究²⁾通りの相関関係があるかを確認後、メカニズムの検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び試験体諸元

表-1 に本研究で使用したコンクリートの配合を示す。W/C によるメカニズムの違いを把握するために、N シリーズでは W/C を 30,50,65% と設定した。B シリーズにおいては、混和材料の添加量によるメカニズムの違いを把握するために、B-1 は高炉スラグ部粉末(BFS)を 50%、B-2 は 70% をセメントにそれぞれ内割で置換した。また、使用した骨材の密度は

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程

*2 芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授

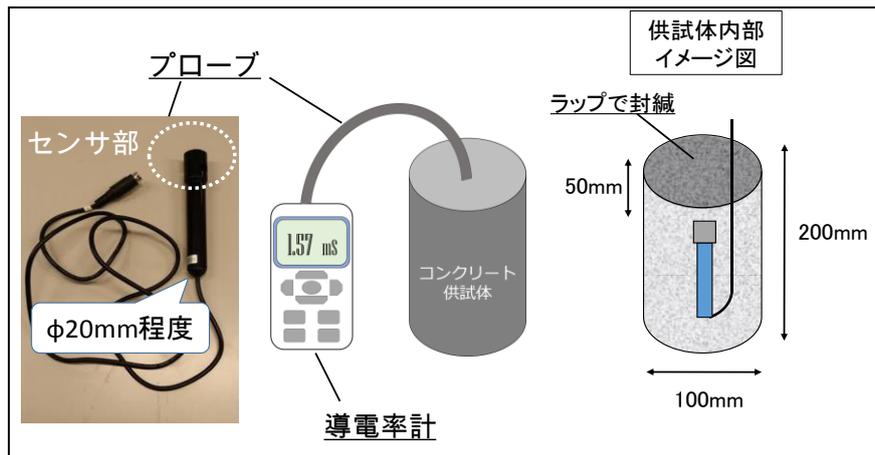


図-1 導電率測定の概略図

細骨材が 2.64g/cm^3 、粗骨材が 2.70g/cm^3 である。

2.2 試験方法

(1) 圧縮強度試験

$\phi 100 \times 200\text{mm}$ の供試体を材齢まで脱型せずに恒温恒湿室(20°C , $\text{RH}60\%$)で封緘養生を行い、「コンクリート圧縮強度試験(JIS A 1108-2006)」に準拠しコンクリートの圧縮試験を行った。強度の計測は強度のばらつきを考慮し、3本のデータの平均から算出した。材齢は1,3,7,28,91日とし、B-2のみ1.8,3,7,28日とした。

(2) 導電率測定試験

導電率とは物質の電気の通りやすさを表す指標であり、値が大きいほど電気が通りやすく、値が小さいほど電気が通りづらいことを表している。図-1に導電率の測定の概要を示す。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用し、表面からの乾燥の影響を防ぐために表層から50mmの位置に電気伝導率計を設置し計測を行った。供試体は打込み後に封緘し恒温恒湿室で静置した。供試体のN数はN=1である。

測定した導電率の結果の一例を図-2に示す。経過時間0分は機械による測定開始の時刻を表し、練混ぜ時の接水から15分後程度を示している。打込みしてからおよそ100分後にピークが現れ、その後は減少している。ピークを迎える速さは配合によって異なるが、明確なピークを一度迎えてから減少するのがコンクリートの導電率の特徴と言える。この導電率のピークを迎える時間は凝結のタイミングや水と反応の初期段階におけるイオンの溶出を捉えているという研究報告もされている^{3,4)}。

しかし、電気伝導率計の種類や個体差、電気伝導率計のセンサの寸法や供試体に埋め込む位置とセンサ部の骨材分布状態の違いから、異なる電気伝導率計で測定された導電率の値には大きな差異がある。しかし、経過時間からピークまでの増加比やピーク

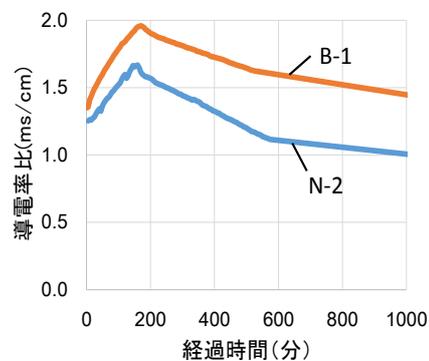


図-2 コンクリートの導電率履歴

からの減少比は同様の傾向を示すため、時間毎の導電率の値を導電率のピーク値に対する比率で整理することにより、電気伝導率計の誤差を補正できることが既往の研究で報告されている²⁾。そこで、本研究では既往の研究を参考にし、時間毎の導電率の値を導電率のピーク値に対する比率で表した(以下、導電率比とする)。導電率比の計算方法を式(1)に示す。

$$\text{導電率比}(\%) = \frac{\text{生導電率値}(\text{mS/cm})}{\text{導電率ピーク値}(\text{mS/cm})} \quad (1)$$

(3) 空隙率計測試験(アルキメデス法)

ここでは、水分は空隙中に存在すると考え、コンクリート供試体の空隙率を測定した。測定方法は以下に示すアルキメデス法で行った。空隙率の算出方法を式(2)に示す。供試体のN数はN=1である。

- ① 圧縮試験後の試験片を採取し、アセトンに浸せき後、真空脱気を行い水和停止させる。
- ② 急激な温度上昇によるクラックを防ぐために、 105°C の乾燥炉に入れる前に 40°C の乾燥炉で1日静置後、 105°C の乾燥炉に6日間静置させた試料の質量を計測し、これを絶乾質量とし

た。

- ③ 絶乾状態にした試料をビーカーに入れ水で満たし、真空ポンプで1時間給水させ、そのまま更に1時間真空状態で保持した。その後、供試体表面から水分をふき取り質量を計測し、これを飽水質量とした。その後、ピクノメーターを用いて水中質量を計測した。

$$\text{空隙率}(\%) = \frac{\text{飽水質量}(g) - \text{絶乾質量}(g)}{\text{飽水質量}(g) - \text{水中質量}(g)} \times 100 \quad (2)$$

(4) 質量計測試験

コンクリート内部の水分状態に着目するために、供試体の質量を随時計測することにより質量減少量からコンクリート内部の水分の逸散量を求めた。φ100×50mmの寸法の供試体を用いて、圧縮強度と同様の材齢まで脱型せずに恒温恒湿室で養生し、脱型直後から随時供試体の質量を恒量になるまで恒温恒湿室で計測した。本投稿では、3日連続で前日との質量の差が1g以内の減少量であった時に恒量とした。恒温恒湿室(20°C, RH60%)のようなRH60%環境下で逸散する水分は脱型時に供試体が所持している水和に使われていない水分である。この水分を液状水とする。この液状水を配合毎に比較するために、単位体積当たりの水分量を算出しこの水分量を液状水量とした。液状水量の計算方法を式(3)に示す。また、恒量質量を計測後の供試体を105°Cの乾燥炉に静置後、恒量に達した際の絶乾質量から含水量も算出した。含水量の算出式を(4)に示す。供試体のN数はN=1である。

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

$$\text{含水量}(g/cm^3) = \frac{\text{初期質量}(g) - \text{絶乾質量}(g)}{(\text{飽水質量}(g) - \text{水中質量}(g)) / \rho_w} \quad (4)$$

ただし、 ρ_w : 水の密度 (g/cm³)

3. 試験結果及び考察

3.1 圧縮強度

図-3に各配合の圧縮強度試験の結果を示す。W/C30%のN-1は材齢初期の段階から他の配合と比較して強度発現していることが分かる。また、BFSを70%置換したB-2は材齢初期の強度発現が他の配合に比べて遅れていることが分かる。

3.2 空隙率

図-4に各配合の空隙率の結果を示す。また、図-5に空隙率と圧縮強度の関係を示す。空隙率の減少に伴い圧縮強度が増加していることが確認できる。また、図-4においてN-1とN-3でW/Cが大きく異なる

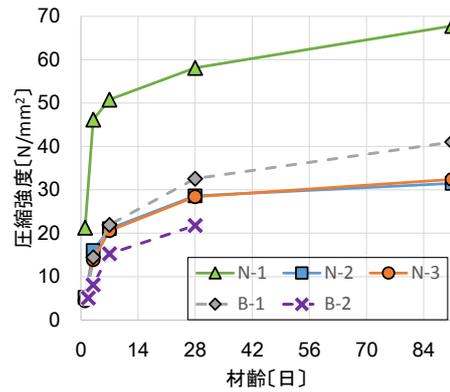


図-3 圧縮強度

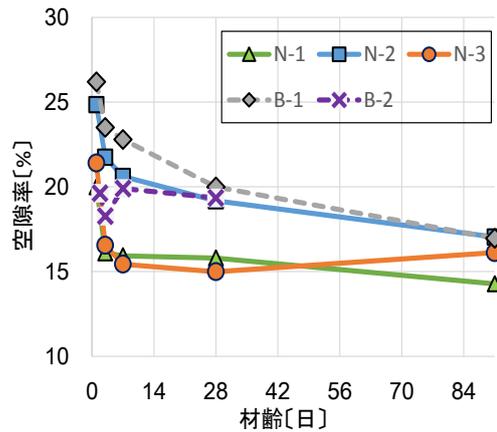


図-4 空隙率

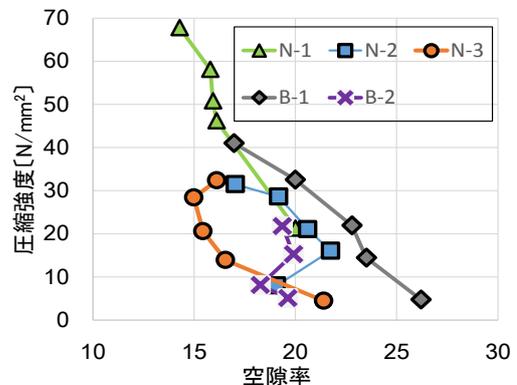


図-5 空隙率と圧縮強度

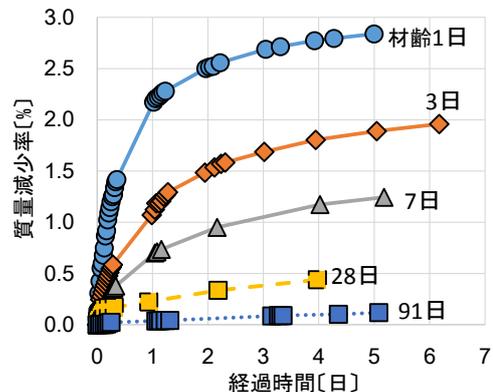


図-6 質量減少率 (N-2)

るにも関わらず空隙率の変化が類似している要因については現在考察を行っている。

3.3 質量減少量

図-6に一例としてN-2の質量減少量を示す。型枠存置の期間が長いほど質量減少率は小さくなり、質量減少の勾配も緩やかになった。これは材齢が経過するに伴い供試体が所持する水分が水和反応に使用され、所持する水分量が減少したためと考えられる。

図-7に質量減少率から算出した液状水量を示す。いずれの配合においても材齢が経過するにつれて液状水量が減少し収束していることが分かる。また、低W/CのN-1は初期から他の配合に比べて液状水量が少ないことも確認できる。一方で、いずれの配合においても初期から材齢7日までの液状水量の減少の傾きが同程度であることから、初期材齢の液状水の減少傾向はW/Cや混和材の有無に寄らないことが分かる。

3.4 導電率比

図-8に各配合の導電率測定試験の結果を示す。前述した通り、配合毎にピークを迎える早さは異なるが、概ね100~200分程度で一度ピークを迎えてから減少していることが確認できる。

3.5 導電率比と圧縮強度

図-9に導電率比と圧縮強度の関係を示す。導電率比が大きいほど若材齢の点であることを表している。既往の研究の通り、材齢と共に導電率比が減少すると圧縮強度が反比例的に増加した。しかし、低W/CのN-1とBFSを70%置換したB-2は他の3配合と比較して別の傾向があることが確認できる。合と比較して別の相関があることが確認できる。そこで、その二つを除いた3配合とN-1とB-2の相関関係を図-10に示す。このように、N-1とB-2は他の3配合と別の相関関係があると考えられる。

3.6 導電率比とコンクリート内部の水分量

3.5より、本研究で作製したコンクリートでも、導電率比と圧縮強度に相関性があることが確認できた。そこで、導電率比はコンクリート内部の水分のイオンを媒体としておりと考え、ここでは導電率比とコンクリート内部の液状水量及び含水量との関係を示す。図-11に導電率比と液状水量の関係を示す。材齢の経過、つまり導電率比の減少に伴い液状水量が直線的に減少していることが確認できる。また、この傾向は配合に寄らず一様であること、及び図-10で別の相関を示した低W/CのN-1は液状水量が小さく、BFSを70%置換したB-2は液状水量が多いことが分かる。

図-12に導電率比と含水量の関係を示す。ここでも導電率比の減少に伴い含水量が緩やかに減少してい

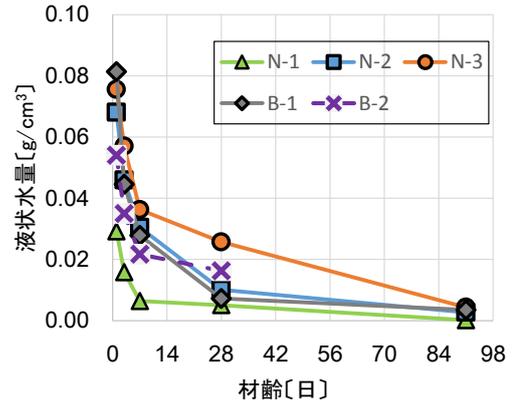


図-7 液状水量

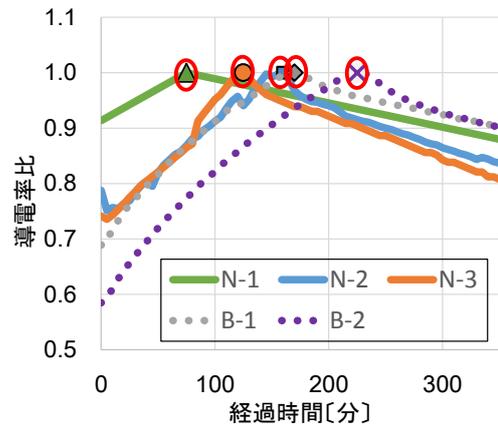


図-8 導電率比

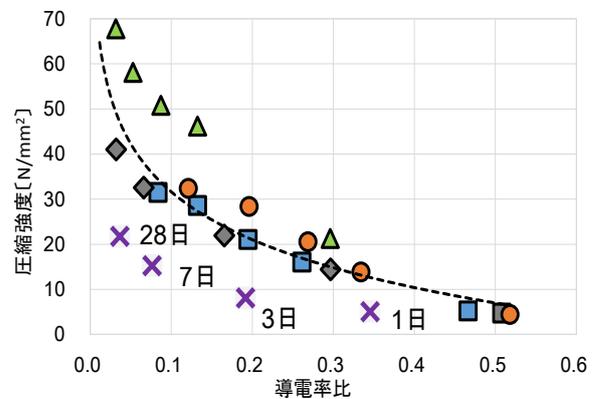


図-9 導電率比と圧縮強度 (全配合)

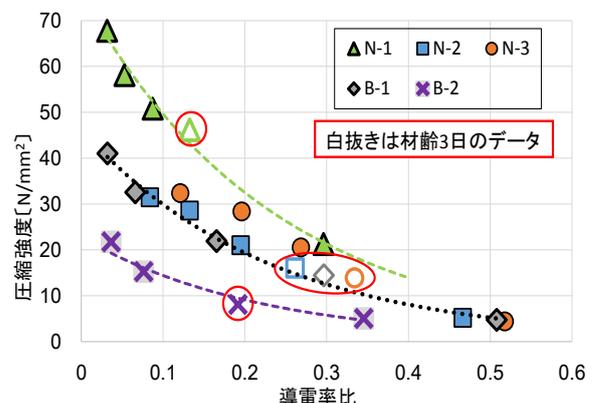


図-10 導電率比と圧縮強度 (配合別)

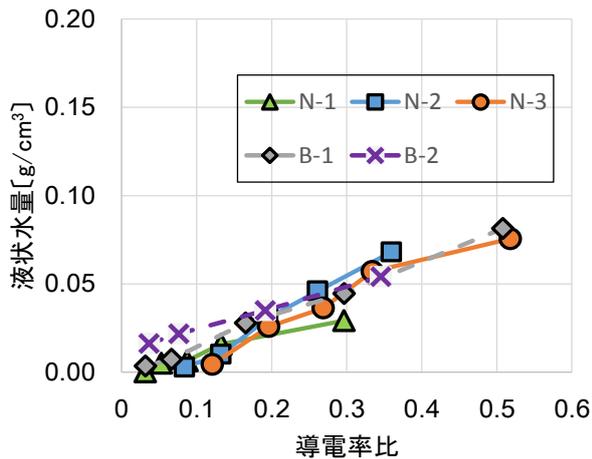


図-11 導電率比と液状水量

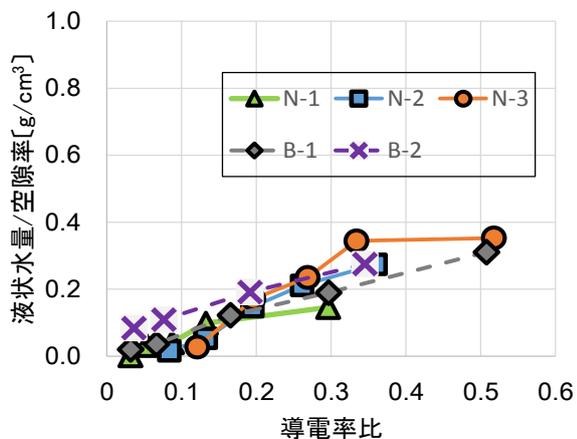


図-13 導電率比と液状水量/空隙率

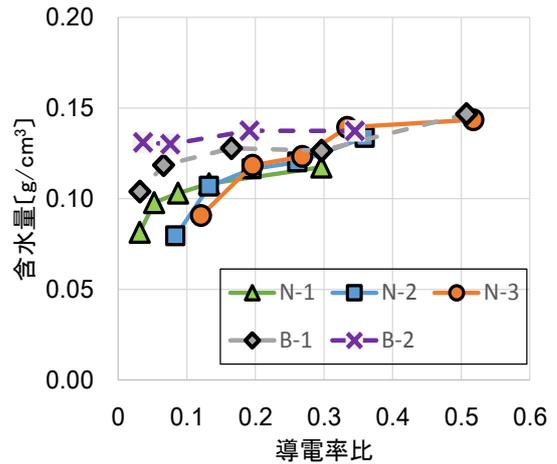


図-12 導電率比と含水量

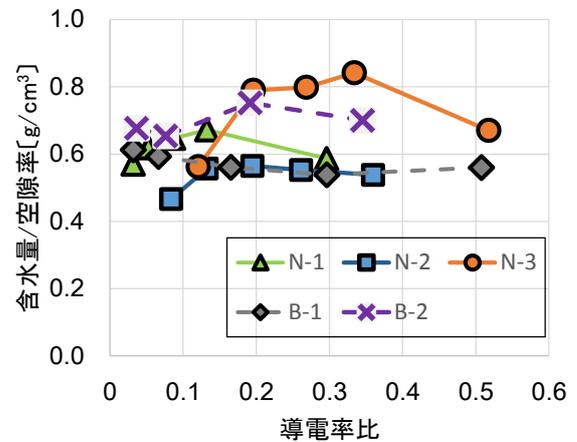


図-14 導電率比と含水量/空隙率

ることが確認できるが、図-11の液状水量よりも相関性が低いことが分かる。液状水量と含水量で相関性に違いが発生した要因として、含水率で105℃で絶乾にした際に逸散した水分は液状水のみではなく、コンクリートの水和物に付着したいわゆる吸着水も含まれている。このことから導電率比はコンクリート内部の水分状態を捉えており、特に水和に使われていない液状水を計測していると考えられる。

3.7 コンクリート内部の水分量と空隙率

3.6の結果から、導電率計はコンクリート中の水分を計測しており、特に水和に使われていない液状水量と相関があることが確認できた。しかし、導電率が計測している液状水量と圧縮強度の関係性が解明できたわけではない。そこで、圧縮強度と相関がある空隙、特に空隙中の水分割合と導電率比の関係に着目した。

図-13に導電率比と液状水量を空隙率で除した値の関係を示す。図-11と同様に材齢の経過、つまり導電率比の減少に伴い空隙中の液状水量が直線的に減少していることが確認できる。

図-14に導電率比と含水量を空隙率で除した値の

関係を示す。図-12とは異なり、材齢の経過、つまり導電率比の減少に伴い空隙中の含水量は変化しないことが確認できる。これは、材齢の経過に伴い空隙が少なくなっていく過程で空隙中の水分量も一樣な割合で減少していることを表している。

図-13, 14から、導電率計は空隙中の水和に使われない水分を計測しており、コンクリート全体の含水量とは関係性が低いことが確認できた。導電率計が空隙中の水分を媒体として計測しているということは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と考えられる。一方で、一部別の相関を示す配合が存在することも確認でき、その要因の解明は今後の検討課題である。

ここで低W/CのN-1やBFSを高置換したB-2が別の相関を示した原因について考察する。電気の通りやすさを表す導電率はコンクリートで測定する場合、コンクリート中の水分のイオンの濃度に依存する。また、コンクリート中に存在する水はエーライト(C₃S)やビーライト(C₂S)から溶出されるカルシウムイオン(Ca²⁺)が支配的であると考えられる。材齢3日の導電率比に注目すると、N-1やB-2の導電率

比が他の配合に比べて小さな値を示している。この原因として、N-1 では他の配合に比べて W/C が低く、所持している水分が少ないため導電率比が低くなったと考えられる。また、N-1 では3.3 で示したように空隙率が低いため他の配合に比べ強度が高く、同一の導電率比においてもグラフが上方にシフトしたことによって、異なる傾向を示したと考えられる。一方、B-2 では BFS を高置換したため、W/C が50%でも他の配合に比べカルシウムイオンの総量が低いため、導電率比が低くなったと考えられる。また、BFS を高置換しているため他の配合に比べ強度が低く、異なる傾向を示したと考えられる。

これらの詳細な原因については、今後追加実験で詳細な検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) コンクリートの導電率は打込みしてから100～200分でピークを迎え、その後減少する。また、W/Cが低い配合や混和材料の添加率が多い配合ではピークの時間が異なる。
- 2) 導電率比と圧縮強度に相関性は見られたが、その関係は配合毎で異なった。特に、導電率のピーク

が他と異なる配合のコンクリートでその傾向が確認できた。

- 3) 導電率計は空隙中の水和に使われない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と考えられる。

参考文献

- 1) 原沢蓉子, 三坂岳広, 一ツ柳陸, 伊代田岳史: 電気抵抗値を用いた養生期間における強度推定手法の一提案, 土木学会第68回年次学術講演会, V-386, pp.771-772, 2013
- 2) 槇島修, 寺沢正人, 川里麻莉子, 伊代田岳史: コンクリート構造物の導電率による躯体内部の強度発現の推定法に関する基礎的研究, 第69回土木学会, V-032, pp.63-64, 2014
- 3) 村上拓, 阿保寿郎, 伊代田岳史: コンクリートの新たな凝結管理手法の有効性に関する検討, 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書第11巻, pp.87-92, 2011
- 4) 太田真帆, 伊代田岳史: 硬化前のコンクリートにおける電気抵抗値の挙動要因の分析, 第69回セメント技術大会講演要旨 pp.174-175, 2015