

# 論文 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

豊村 恵理<sup>\*1</sup>・上原 菜津葵<sup>\*2</sup>・伊代田 岳史<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリートの劣化因子の侵入経路である表層コンクリートの品質は養生の良否によって左右されることは多く知られている。近年、養生による表層コンクリートの品質を直接的に測定する手法が提案されているが、型枠存置期間内にその推定をする手法はまだない。そこで本研究は、水和反応や乾燥の影響を評価できる比抵抗をコンクリートが型枠内にある状態から四電極法により計測する手法の検討を行った。また表層から深さ位置ごとに計測することで養生や乾燥の影響範囲を特定することを目的とした。さらに得られた比抵抗と物質移動抵抗性との関係から要求性能を満足する養生終了タイミングの判断基準の検討を行なった。

**キーワード:** 四電極法, 比抵抗, 養生条件, 真空吸水試験

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長期耐用化およびライフサイクルコストを低減させるためには、外部環境からの水や二酸化炭素、塩化物イオンなどの侵入を低減させる必要がある。劣化因子の侵入は、表層コンクリート品質に大きく左右され、その品質は配合要因だけでなく、施工要因である養生の影響を受けることは多く知られている<sup>1,2)</sup>。土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕<sup>3)</sup>では、打込み後の一定期間は硬化に必要な温度および湿度に保ち、有害な作用の影響を受けない方法を定め、コンクリートが所要の品質を確保できるよう、セメント種類ごとに温度に対する養生期間が定められている。その一例として15℃以上の場合、普通ポルトランドセメントで5日、高炉スラグ微粉末等の混和材を使用した混合セメントB種では7日と定められている。このようにセメント種類ごとのみに一義的に定められた示方書の湿潤養生期間では材料要因や施工要因によって異なった条件においても同一の養生を行う必要があることになるが、性能照査型設計においては要求性能を満足する場合には施工の効率化等も考えることができるため、これらの条件に応じた最適な養生終了タイミングを判定することも重要となると考える。もっとも簡易に行える水分逸散を防ぐ方法として型枠存置があげられる。しかしながら脱型の規定は現在強度で10N/mm<sup>2</sup>を発現したか否かにかかっており、直接的に耐久性で判断することはされていない。そこで、型枠内にコンクリートが存在する状況で経時的に変化するコンクリートの品質を簡易的に推定でき、型枠存置による水分逸散を防ぐことで将来的な表層コンクリートの品質が推定できれば、表層コンクリート

の品質確保または向上に資する技術として提供可能であると考える。

現在、表層品質を直接的に測定する手法として現場透気試験や透水試験が提案されているが、いずれも脱枠して数日から数カ月後に測定することとなり、型枠存置期間内での推定は困難である。また、それぞれの試験にはコンクリート内部の水分量がその結果に大きく左右することが知られているため、四電極法によるコンクリートの比抵抗測定値から、含水率を測定して耐久性を判断する方法が検討されている<sup>4)</sup>。四電極法はコンクリート中の内部水分状態の把握に用いられ、水分が多く電気の通り易いと、比抵抗の値は小さくなる。一方、水和反応や乾燥の影響を受けることによって水分が減少すると電気が通りにくく、値が大きくなる<sup>5)</sup>。この手法の多くは交流電源発生装置で行われているが、その理由として交流比抵抗はコンクリートに対する帯電量が少なく、直流比抵抗と比べて精確な値を得ることができる<sup>6)</sup>ためである。一方で、装置が大きく高価なものが多く、現場測定を行って水分状態を把握することが困難である。そこで本研究では、現場における養生終了タイミング判断手法の提案を目的とし、装置が小型な直流比抵抗を用いて、様々な要因がコンクリートの比抵抗に及ぼす影響の検討を行った。

試験はセメント種類の異なるコンクリートを養生期間変動させて表層から深さ毎に比抵抗の測定を行うと共に真空吸水試験を行った。真空吸水試験<sup>7)</sup>は、コア試料を用いて、深さ方向の物質移動抵抗性の測定が行える手法であり、比抵抗と真空吸面積率で相関関係を把握することで、比抵抗を用いた養生による影響の判断手法の検討を行った。

\*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

\*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

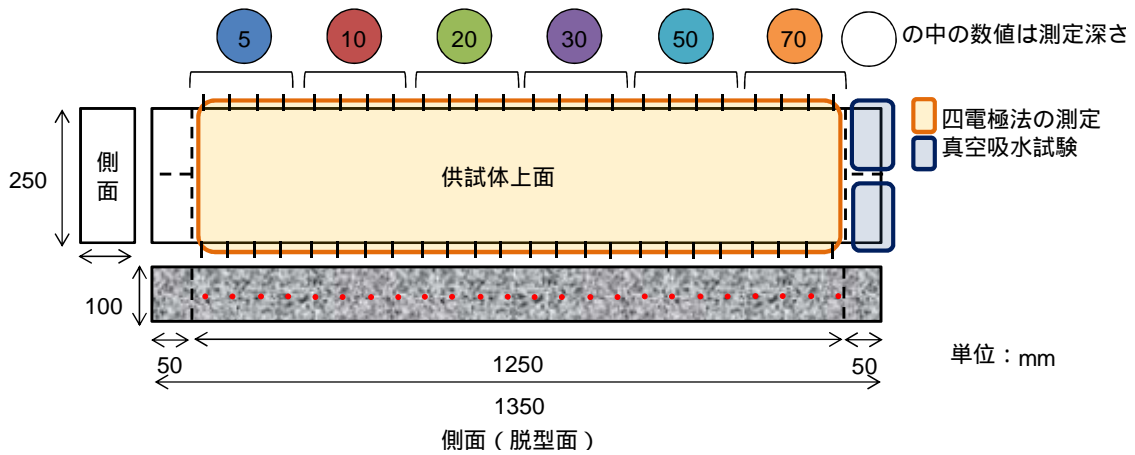


図-1 供試体諸元

表-1 配合表

セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						SL (cm)	Air (%)
			W	OPC	BFS	S	G			
N	55	50	174	316	-	906	923	14.0	4.6	
BB		51		158	158	920	900	14.0	4.0	

表-2 養生条件

養生期間 (脱型時期)	材齢(日)						
	0	1	3	5	7	...	28
1日	打設	脱型					
3日							
5日							
7日							
28日	型枠存置(20, 60%)						

## 2. 実験概要

### 2.1 配合および養生条件

配合を表-1に示す。配合はセメント種類を普通ポルトランドセメント(以後Nと示す)、高炉セメントB種(以後BBと示す)の2種類とし、水セメント比、単位水量を同一とした角柱供試体(H100×W1350×L250mm)を作製した。養生条件は表-2に示すように、型枠存置は水分の逸散がない封緘養生として養生期間を、1、3、5、7、28日で側面(H100×W1350)を脱型した。

供試体諸元を図-1に示す。外部環境の影響を排除するために、コンクリートの打設及び養生は20℃、RH60%の環境下で行った。両端50mmは真空吸水試験に、中心部は比抵抗の測定に供した。

### 2.2 四電極法による比抵抗の測定

本試験で用いる直流電流をコンクリートに流し続けると帯電現象によって抵抗が大きくなる可能性がある。そこで、パルス波を使用することで帯電を抑制した。四電極法(4プローブ法)による測定概念図を図-2に示す。4本の電極の外側に定電圧(15V)を印加し、供試体を流れる電流と内側の電極間(50mm)の電位差を測定し、比抵抗(kΩ・m)を測定した。比抵抗の測定深さは表層部から5、10、20、30、50、70mmとした。測定深さは電極の通電位置以外に収縮チューブを

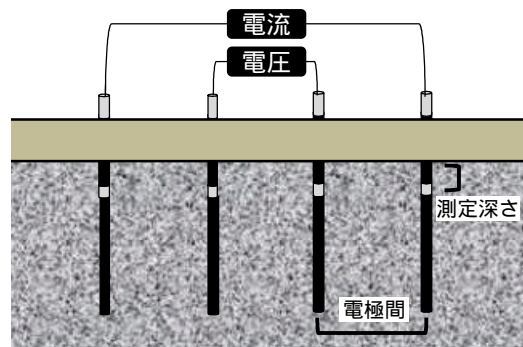


図-2 四電極法(4プローブ法)測定概念図

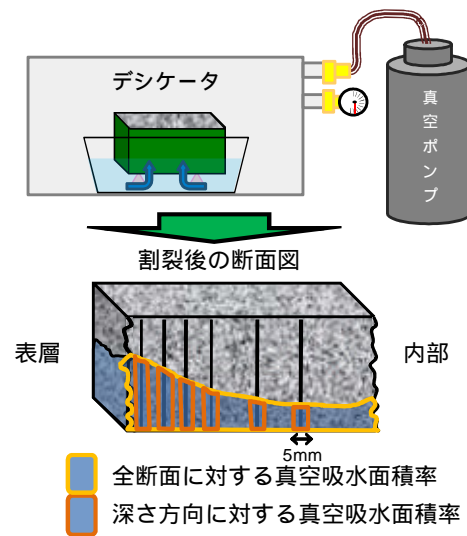


図-3 真空吸水試験概念図

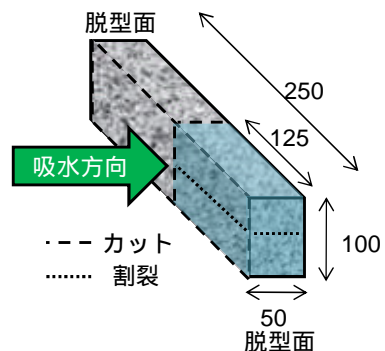


図-4 真空吸水試験体概要

巻きつけることで絶縁し、深さを調節した測定は打設直後から材齢 28 日まで行った。

### 2.3 真空吸水試験

真空吸水試験の概要と割裂後の試験体断面の一例を図-3、試験体概要を図-4 に示す。材齢 28 日において比抵抗の測定が終了後、コンクリートカッターで試験体 (H100×W50×L125mm) を切り出し、前処理として 40℃ の乾燥炉で 5 日間乾燥させ、内部水分を逸散させた。試験は試験体側面からの水の浸入を防ぐため、両側面にアルミテープを張り、水を試験体の 20mm まで張ったバットに浸し、デシケーターに設置した。その後、デシケーター内を真空ポンプで 1 時間吸引した後、2 時間真空を保持し、試験体を割裂して水の吸い上げられた領域と試験前後の重量変化を確認した。本研究においては、全断面積に対する吸水面積割合を画像解析で算出し、真空吸水面積率と定義した。また、比抵抗の測定深さと同位置において 5mm 幅で真空吸水面積率を算出し、深さ方向の影響を確認した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 四電極法による比抵抗

#### (1) 表層からの深さが比抵抗に与える影響

N の養生期間 7 日における表層からの通電深さが異なる比抵抗と材齢の関係を図-5 に示す。どの深さにおいても、材齢の経過に伴い比抵抗が増加する傾向を示し、養生期間中である材齢 7 日までほぼ同様な挙動を示した。脱型後 (点線部以降) は表層部近くで比抵抗が大きく増加した。表層から 50、70mm の位置の測定点は脱型後急激な比抵抗の増加が見られないため、乾燥による影響を受けないと考えられる。

図-6 に N の材齢 28 日における各養生期間の表層からの測定深さと比抵抗の関係を示す。いずれの養生期間においても、表層から内部に行くにつれ比抵抗が小さくなる傾向を示した。養生 5、7 日は表層付近で比抵抗

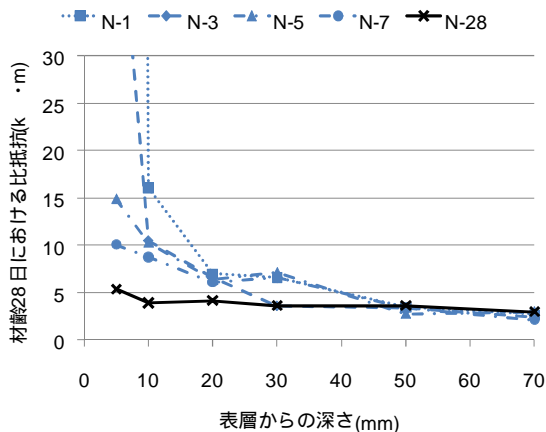


図-6 養生期間と深さ方向に関する比抵抗の関係

抗の増加がみられるが、深さ 30mm で養生 28 日と同程度となった。養生 1、3 日は深さ 5mm において比抵抗がそれぞれ 634 kΩ・m、51 kΩ・m となり乾燥による影響を大きく受けると考えられる。また深さ 50mm で養生 28 日と同程度となり乾燥を受ける影響範囲も大きい。このことから、養生期間によらず乾燥による影響は表層から 50mm 程度であると考えられる。

#### (2) 水和反応が比抵抗に与える影響

N と BB の比抵抗と材齢の関係を図-7 に示す。図は乾燥の影響を排除するため、深さ 50mm の値を用いた。N は初期材齢で比抵抗が急激に増加し、その後傾きは収束する傾向を示した。一方 BB の比抵抗は、材齢の増加に伴い初期から一定の傾きで増加する傾向を示した。これは、N の方が BB に比べ水和の進行が早く、材齢の初期において水を消費するためと考えられる。しかしながら、本実験においては BB の水和反応は収束しておらず、今後水和および空隙組織の変化に伴い比抵抗が増加する可能性が示唆された。

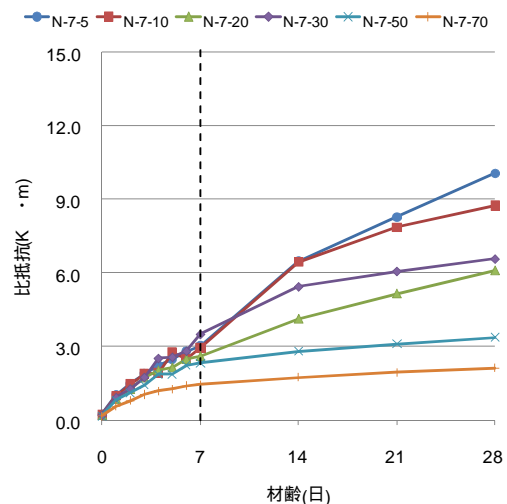


図-5 表層からの深さと比抵抗の関係

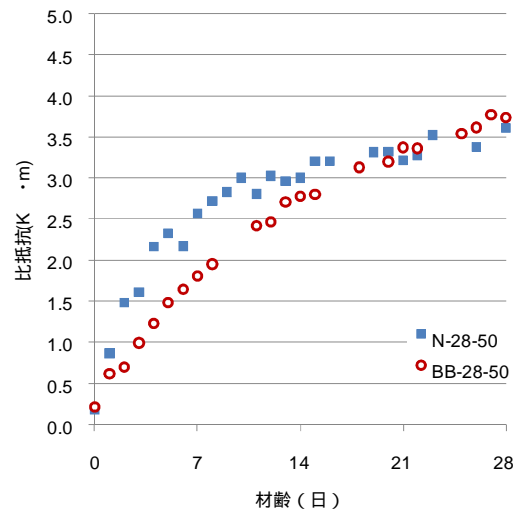


図-7 水和反応に伴う材齢と比抵抗の関係

### (3)乾燥が比抵抗に与える影響

図-8にNにおける養生期間の相違が比抵抗に与える影響を示す。図は乾燥の影響を顕著に受ける深さ5mmの値を用いた。封緘養生を28日行ったものに比べて、1, 3, 5, 7日間養生を行ったものは、養生終了後、乾燥に伴い急激に比抵抗が増加した。乾燥に伴う傾きは、養生期間の増加に伴い、傾きが小さくなる傾向を示した。これは、養生期間が増加することによって、水和反応が進行し、空隙組織が緻密化したため、乾燥の影響による水分の逸散を抑制したと考えられる。

次に、養生期間が異なった試験体が同一期間乾燥した場合の比抵抗の変化を算出した。これは、養生の異なるコンクリートの乾燥に対する抵抗性を比抵抗で計測する目的である。そこで、養生終了時点での比抵抗を基準として、そこからの変化量を比抵抗変化量として図-9, 10示す。図よりN, BB共に養生後の乾燥期間の増加に伴って比抵抗変化量が増加する傾向を示し

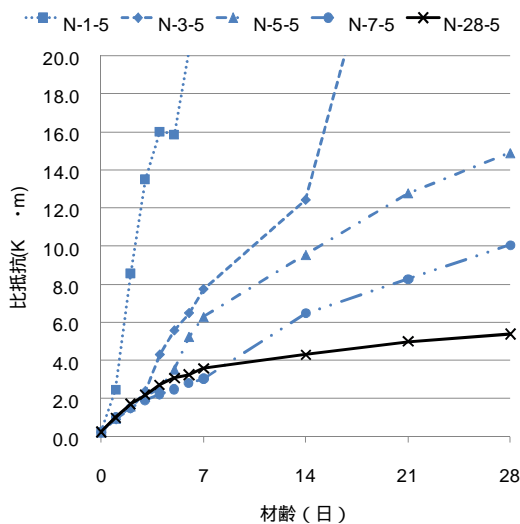


図-8 養生期間の相違が比抵抗に及ぼす影響 (N)

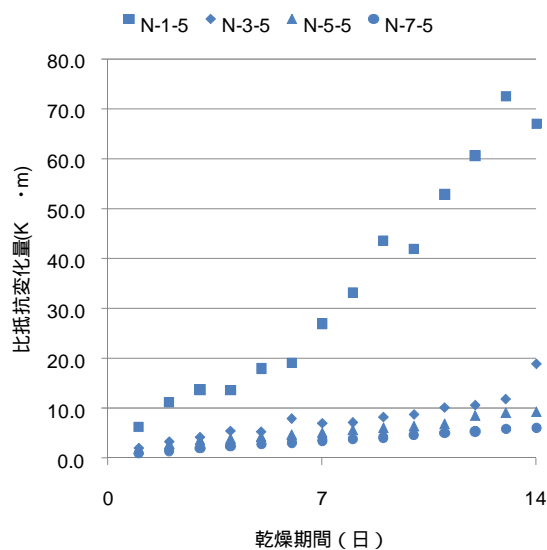


図-9 養生終了からの比抵抗変化量の関係 (N)

た。養生1日は養生3,5,7日と比べ、変化量が顕著に大きくなるため、養生期間を3日以上とすることで、乾燥の影響による比抵抗の増加を極端に小さくできると考えられる。また、BBはNと比べ全体的に比抵抗変化量が大きい傾向を示し、養生1日は比抵抗変化量80kΩ・mを遥かに超えた値となった。BBはNと同様の養生期間を行った場合でも乾燥による影響を大きく受けると考えられる。

### 3.2 真空吸水試験

#### (1)全断面に対する真空吸水面積率

真空吸水試験の全断面に対する真空吸水試験結果の例を図-11に示す。乾燥の影響により表層付近で吸水量が大きくなり、真空吸水面積が大きくなる。試験の結果を図-12に示す。N, BB共に、養生1日は他のものと比べて極端に真空吸水面積率が大きくなった。これは、養生期間が短かったため、水和反応が十分に進行せず、その後の乾燥による影響も大きくなったためと考えられる。Nは養生期間の増加に伴い、真空吸水面積率が低下する傾向を示した。BBは養生期間によらず真空吸水面積率は概ね同程度であり、養生期間の増加に伴う真空吸水面積率の減少は見られなかった。

#### (2)深さに対する真空吸水面積率

図-13にNの表層からの深さ方向ごとの真空吸水面積率の関係を示す。養生期間の増加に伴い、表層付近の真空吸水面積率が低下する傾向を示し、深さ50mm程度でほぼ同等の値に収束した。養生1日は養生3,5,7,28日と比べ大きくなり、深さ70mmにおいても真空吸水面積率は収束しなかった。これは、3.2(1)同様に十分に水和反応が進行せず脱型されたため、その後の乾燥による影響を大きく受け、表層と内部で大きく差が生じた。養生7日においてはほぼ直線状となり、

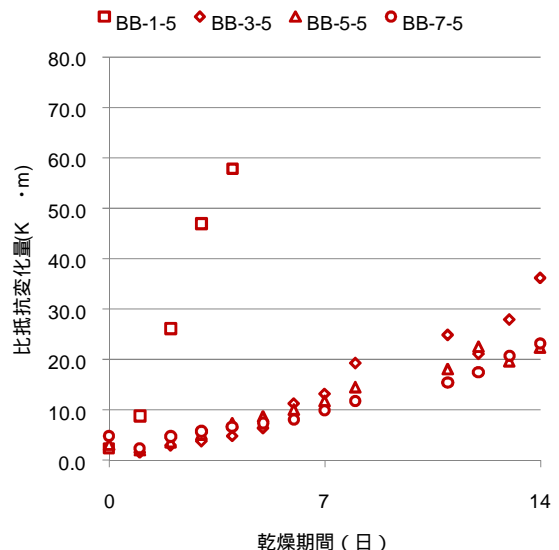


図-10 養生終了からの比抵抗変化量の関係 (BB)

養生 28 日とほぼ同等の傾向を示し、表層と内部で差がなくなり空隙組織が一様になったと考えられる。

### 3.3 四電極法と真空吸水試験の関係

#### (1) 材齢 28 日比抵抗と真空吸水面積率の関係

ここで、吸水することによって物質移動抵抗性を評価している真空吸水試験と、四電極法による比抵抗の値の比較を行うため、材齢 28 日の比抵抗と全断面に対する真空吸水面積率を調査する。3.2(1)より養生期間の増加によって真空吸水面積率は低下し、乾燥の影響を大きく受ける。最初に図-14 は乾燥の影響を大きく受ける深さ 5mm の比抵抗の値を用いた。比抵抗の増加に伴い、真空吸水面積率は増加する傾向を示した。しかしながら、養生 1 日は深さ 5mm で乾燥の影響を大きく受け、比抵抗が顕著に大きくなった。そのため、他の養生期間において真空吸水率との比較検討が正確に行えていないと考えられる。そこで、図-15 に深さ 10mm における比抵抗と真空吸水面積率の関係を示す。図-14 同様、N、BB 共に比抵抗の増加に伴い真空吸水面積率が増加し、比抵抗と真空吸水面積率が比例関係を示した。養生期間が短いとき、水和の進行が十分でないうちから乾燥を受けることによって比抵抗が増加するため、空隙組織が粗雑になり、真空吸水面積率も大きくなったと考えられる。また、養生 28 日では両セメント種類においてはほぼ同等の値を示すが、養生期間が短くなるにつれ、BB は比抵抗が大きくなった。これは BB が N と比べ、養生不足によって水和反応が不十分になると乾燥の影響を大きく受け易いためと考えられる。このように、比抵抗の値で物質移動抵抗性が評価できる可能性が示唆された。

#### (2) 養生終了直前比抵抗と真空吸水面積率の関係

次に、養生終了タイミングの推定判断を行うため、養生終了直前における比抵抗と真空吸水面積率の比較を行う。ここで、養生影響を受ける範囲の品質低下を

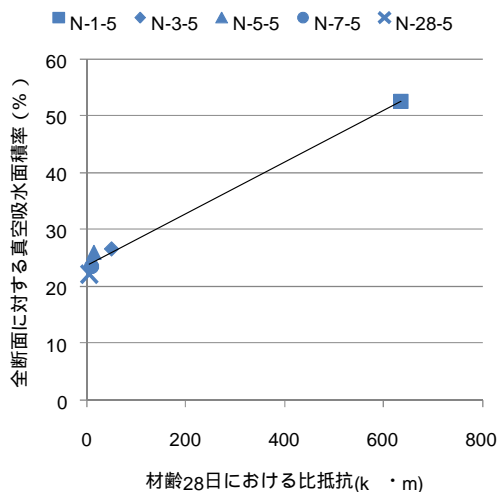


図-14 比抵抗と深さ真空吸水面積率の関係 (5mm)

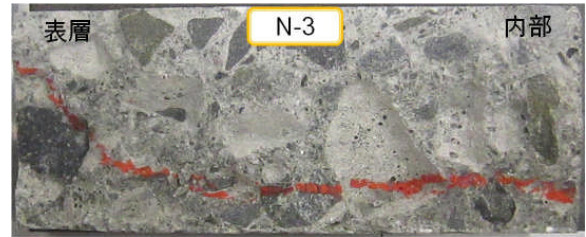


図-11 真空吸水試験結果例

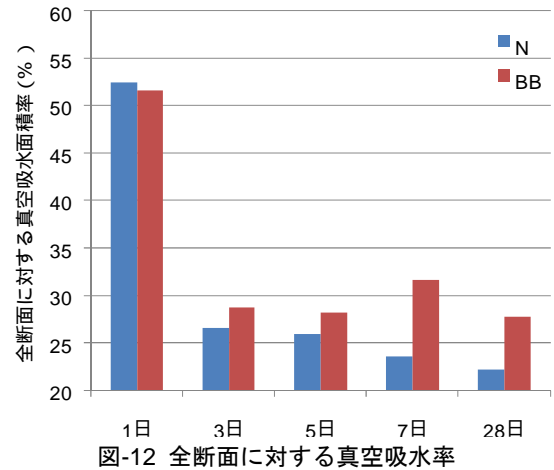


図-12 全断面に対する真空吸水率

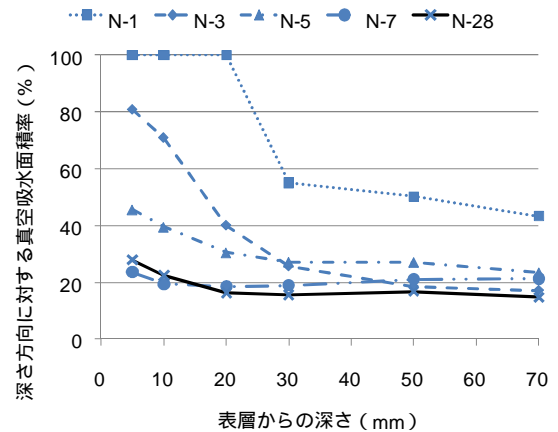


図-13 深さ方向に対する真空吸水面積率

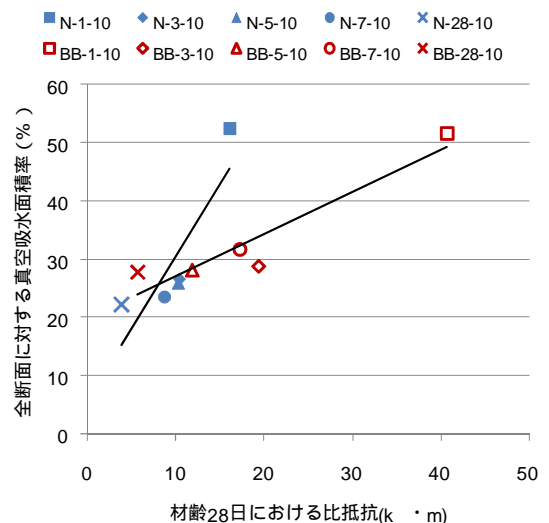


図-15 比抵抗と真空吸水面積率の関係 (10mm)



防ぐことによって耐久性が確保できると考えられるため、3.1(1)より養生の影響範囲は養生期間によらず50mm程度であるため、真空吸水面積の全断面を表層から50mmまでとして真空吸水面積率を算出した。算出した50mmまでの真空吸水面積率と養生終了直前の比抵抗の関係を図-16に示す。図の比抵抗の値は水和の進行を捉えるために深さ50mmの値を用いた。N、BB共に養生終了直前の比抵抗が増加すると、真空吸水面積率は低下する傾向を示し、真空吸水面積率は養生1日で極端に大きな値となったが養生1,3日間の比抵抗の差は小さくなった。脱型後、コンクリートが乾燥の影響大きく受けないためには養生中に $2\text{k}\cdot\text{m}$ を上回る必要があると考えられ、養生期間中の比抵抗を用いることによって、材齢経過後の物質移動抵抗性が評価できる可能性が示唆された。

本試験では、比抵抗を用いた耐久性判断手法の提案として、真空吸水試験を用いて物質移動抵抗性ととの比較検討を行った。また、現場測定方法としてはコンクリート打設時に型枠に電極を設置し、脱型時に測定される比抵抗を基に耐久性を推定する。得られた耐久性と要求される性能の関係によって脱型の可否を判断し、養生終了タイミングの判定する施工手段として検討を行っていく予定である。今後は透気性や中性化、塩害等に対する種々の耐久性ととの検討を行っていく予定である。

#### 4. 結論

本実験で得られた結果を以下に示す

- 1) 本試験による配合において、Nは養生を7日行くと、表層から30mm程度まで乾燥の影響を受けるが50mm以降は影響を受けない。
- 2) 水和反応によって比抵抗が増加する場合、Nは初期で急激に増加し、その後傾きは小さくなる。BBは初期から一定の傾きで増加する。
- 3) 表層部に近い程、乾燥の影響によって比抵抗は急激に増加する。
- 4) 同一養生期間においてもBBはNと比べて乾燥の影響を受けやすく、比抵抗の値が大きくなる。また、養生を3日以上行うことで乾燥による影響を顕著に小さくすることができる。
- 5) 真空吸水面積率は養生期間の増加に伴い低下する。深さ方向に関しても、養生期間の増加に伴い表層付近で真空吸水面積率が低下した。
- 6) 比抵抗と真空吸水面積率には相関関係があり、比抵抗を求めることで、耐久性の評価、養生終了タイミング推定ができる可能性が示唆された。
- 7) 今後、中性化や塩害等の様々な耐久性ととの比較を

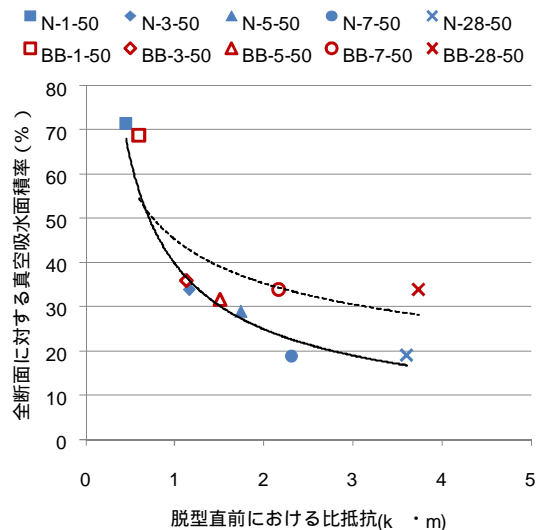


図-16 養生終了直後の比抵抗と真空吸水面積率の関係

行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 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, V 60/227-234, 2006
- 2) 井ノ口公寛, 豊村恵理, 伊代田岳史: 高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響, 日本コンクリート工学会, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, pp69-pp74, 2011
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], 2007
- 4) 下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性性能評価に関する簡易試験法の開発, 日本非破壊検査協同シンポジウム, コンクリート構造物への非破壊検査の展開, pp291-pp296, 2006
- 5) 川俣孝治, 守屋進, 内藤英晴, 皆川浩: セメント系材料の電気抵抗率測定方法に関する基礎的研究, コンクリート工学論文報告集, Vol.26, No.1, 2004
- 6) 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, コンクリート工学論文報告集, Vol.21, No.2, 1999
- 7) 松崎晋一朗, 鈴木肇, 伊代田岳史: 養生期間がコンクリート表層から深さ方向への吸水性に与える影響, 第64回土木学会全国大会, V-580, pp1159-pp1160, 2010