

論文 脱型時期の違いがコンクリートの乾燥と品質に及ぼす影響に関する実験的検討

佐藤 幸恵*1・丸山 一平*2・伊代田 岳史*3・檀 康弘*4

要旨: 近年, 低発熱系セメントや各種産業副産物からなる混和材およびセメントを用いる場合が増加しているが, それらの結合材を使用したコンクリートは, 普通ポルトランドセメントとは異なる強度発現特性を有し, 特に, 材齢初期の養生条件が品質に大きく影響を及ぼすと考えられる。本研究では, 各種結合材を用いたコンクリートの型枠脱型時期を変化させ, 強度発現性, 透水性, 中性化抵抗性, 内部の含水率分布について検討を行った。その結果, 結合材種類と養生期間により, 強度発現, 透水性, 中性化抵抗性は大きく異なることを明らかにし, 乾燥による影響を受ける深さは表面部から概ね 5cm 程度であることを示した。

キーワード: 脱型時期, 結合材, 強度発現, 湿潤養生

1. はじめに

近年, 地球環境問題の観点から産業副産物からなる混和材やセメントをコンクリートへ利用することの重要性が高まりつつある。また, マスコンクリートや高強度コンクリートには低発熱系のセメントを用いることが多く, 最近では建築分野における中庸熱ポルトランドセメントの使用量が増加している。これらの結合材は, 普通ポルトランドセメントとは鉱物組成が異なり, 強度発現特性や養生条件が強度発現に及ぼす影響も異なる傾向を示す。また, コンクリートの組織形成や強度発現は, 養生中の温度や水分の条件の影響を受けるが, 特に産業副産物からなる結合材や低熱系のセメントを用いるコンクリートでは, 強度発現が普通ポルトランドセメントに比べて遅いため, 組織が十分に緻密化しないうちに乾燥条件下に置いた場合, 養生条件に影響を大きく受け, 脱型時期などの違いが強度発現に大きな差を及ぼすと考えられる。これらのことは主にかぶりコンクリートのような表層部の鉄筋を保護する性能が必要とされる部分に影響を及ぼすが, 養生方法や養生期間に関して, 実際の建築物のコンクリート工事に適用できるような定量的な知見は不足しており, せき板脱型時期やその後の養生方法とコンクリートの組織形成, 強度発現, 耐久性などの関係は明らかになっていない。筆者らは, これまで, 結合材や化学混和剤の違いによる強度発現特性の違いや中性化抵抗性および乾燥収縮について検討してきた¹⁾²⁾。その結果, 脱型時期を変化させ, 異なる湿潤養生条件下におかれたコンクリートの中性化速度係数と同一の養生を行ったφ10×20cmの円柱供試体圧縮強度の間には高い相関性が認められることを示した。

本報では, 脱型時期が中性化抵抗性などの物質浸透性に及ぼす影響について, 真空下での透水実験を行い検討した。また, コンクリートが乾燥を受けた場合, 水セメント比により異なるが, 表面から概ね 5cm 程度まで乾燥の影響を受けるとの研究報告³⁾を基に, φ10×20cmの円柱供試体を用いてかぶりコンクリートの品質を評価する手法を提案すべく, 検討を行ってきたが, 本報では各種結合材を用いて脱型時期を変化させた場合のコンクリート内部の含水率分布に及ぼす影響について検討を行った。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
結合材種類	普通ポルトランドセメント(N) 中庸熱ポルトランドセメント(M) 低熱ポルトランドセメント(L) エコセメント(E) 普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末(B)
水結合材比	55%
BS添加率	42.5%
脱型時期	中性化・透水:1日, 7日, 28日 含水率:1日, 3日, 7日, 28日

表-2 使用材料の品質

セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³ 中庸熱ポルトランドセメント 密度3.21g/cm ³ 低熱ポルトランドセメント 密度3.22g/cm ³ エコセメント 密度3.15g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末 密度2.88g/cm ³
細骨材	鬼怒川産川砂 表乾密度2.58g/cm ³ 吸水率2.72%, F.M.2.64
粗骨材	山梨産碎石 表乾密度 2.71g/cm ³
混和剤	AE剤(アルキルエーテル系) AE減水剤(リグニンスルホン酸系)

*1 東京大学大学院 工学系研究科 博士(工学) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 新日鐵高炉セメント 技術開発センター 博士(工学) (正会員)

*4 新日鐵高炉セメント 技術開発センター (正会員)

表-3 計画調合およびフレッシュ性状

	セメント種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (S/a)%	単位水量	質量(kg/m ³)			化学混和剤 Ad1	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
					セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材					粗骨材
中性化試験用	N	55	45.3	186	338	-	774	981	C*0.25%	16.0	4.5	22.0
	M	55	45.3	186	338	-	776	984	C*0.25%	17.5	3.0	21.0
	L	55	45.0	186	338	-	768	1008	C*0.25%	20.5	3.0	19.0
	B	55	45.3	186	195	144	769	975	C*0.25%	14.0	3.9	21.0
	E	55	45.1	186	338	-	768	1004	C*0.25%	18.5	4.0	19.0
透水・含水率実験用	N	55	45.0	186	338		766	1005	C*0.25%	20.0	4.7	18.3
	M	55	45.0	186	338		767	1007	C*0.25%	20.5	4.3	18.5
	L	55	45.2	186	338		776	984	C*0.25%	22.0	4.5	20.0
	B	55	45.0	186	195	144	761	998	C*0.25%	20.0	4.4	18.0
	E	55	45.2	186	338		773	981	C*0.25%	20.0	4.2	18.5

2.実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1 に、実験の要因と水準を、表-2 に使用材料の品質を示す。使用した結合材は、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、エコセメント、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 42.5%置換したものの 5 種類を用いた。水セメント比（水結合材比）は 55%一定とし、脱型時期は 1, 3, 7, 28 日とした。表-3 に計画調合とフレッシュ性状の結果を示す。

2.2 試験項目

(1)中性化促進試験

脱型時期は、材齢 1, 7, 28 日とし、材齢 28 日まで水中養生した供試体とともに 28 日間気中養生を行った後、CO₂ 5%, R.H. 60%の条件下で促進し、所定の材齢で JIS A 1152 に従って測定した。脱型材齢 1, 7, 28 日ついて、材齢 28 日で圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。

(2)真空透水試験

脱型時期を 1, 7, 28 日とし、気中養生した円柱供試体を材齢 28 日に約 3cm 厚にスライスし、直後にアセトンに浸漬した後、40°Cに設定した乾燥炉で 48 時間乾燥させ、供試体側面をエポキシ樹脂でシールしたものを供試体とした。試験は、図-1 に示すように、供試体を下面 1cm まで水に浸漬させた状態でデシケータ内に静置し、真空ポンプで吸引し、デシケータ内を減圧させて供試体に強制的に吸水させる方法とした。真空ポンプによる減圧時間は、デシケータに接続した圧力計が-0.1MPa を示した時から 10 分間とし、その後デシケータ部のコックを閉じて減圧状態を保持した後、1 時間経過後に供試体を取り出し、割裂して断面の透水深さを計測し、供試体割裂断面の透水面積を算出した。また、このときの試験前後の質量変化、すなわち供試体の吸水量も計測した。

(3)質量変化

各供試体（φ10×20cm）について脱型時から気中養生

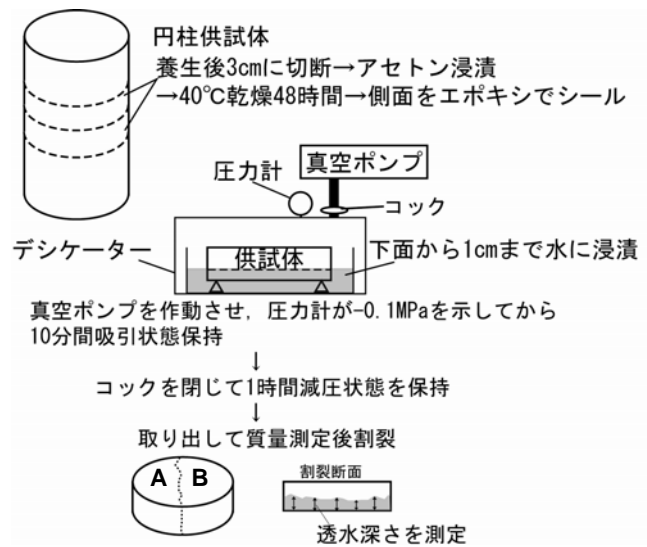


図-1 真空透水試験模式図

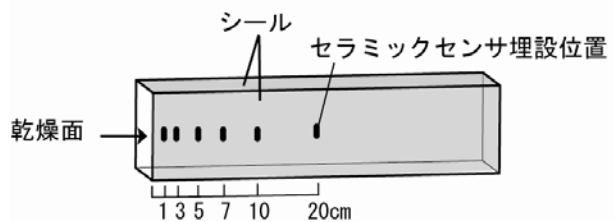


図-2 含水率分布測定用供試体図

中の水分逸散状態を把握するために、質量変化を継続的に測定した。

(4)含水率分布試験

20°Cの一定温度条件化において、10×10×40cmの角柱供試体に、湯浅ら³⁾による日大式セラミックセンサを供試体表層から 1, 3, 5, 7, 10, 20cm の位置に埋設し、周囲をシールして打込み後からの電気抵抗の経時変化を測定した（図-2）。なお、センサは、個体差を考慮して、同一ロットで作製したものをを用いて検討した。

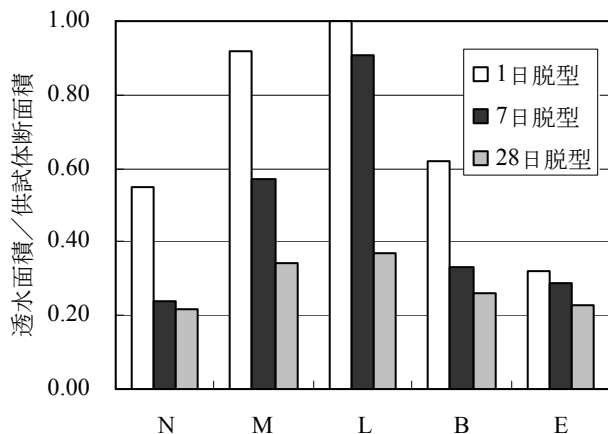


図-3 透水面積比

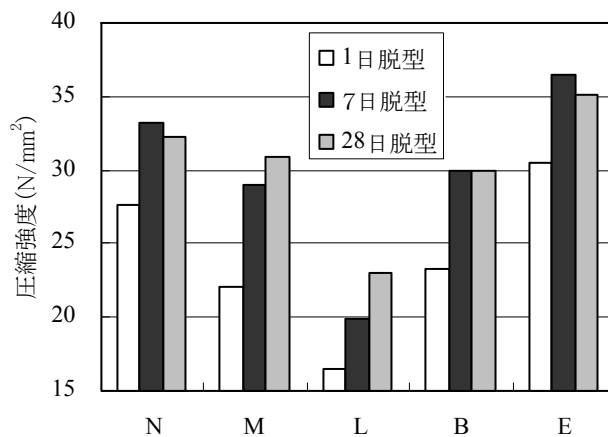
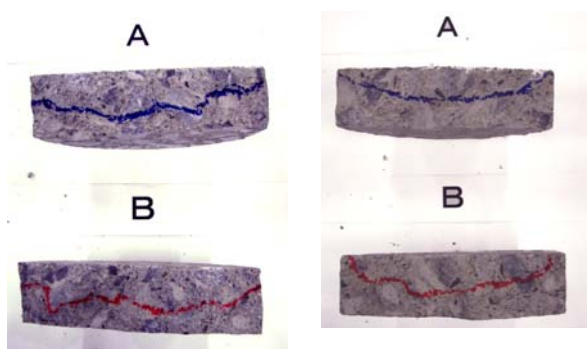


図-4 材齢 28 日圧縮強度



普通ポルトランドセメント 普通ポルトランドセメント
+高炉スラグ微粉末

写真-1 真空透水試験結果の例 (1日脱型)

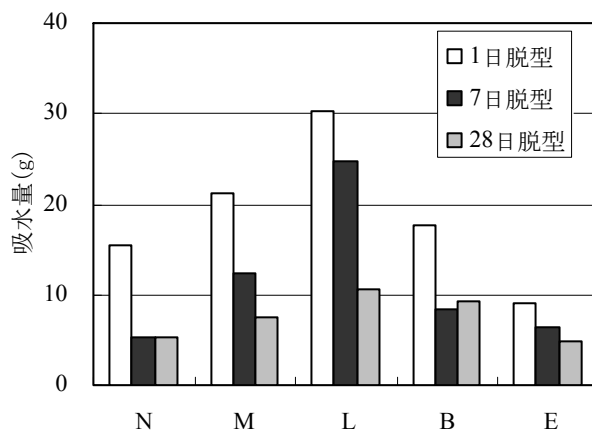


図-5 吸水量

3.実験結果および考察

3.1 真空透水試験

図-3 に結合材別の供試体割断面面積に対する透水面積の比を示す。また、割断面の一例を写真-1 に示す。

いずれの結合材においても、脱型材齢が早いほど、透水面積比は大きくなり、低熱系の結合材ほど養生期間による差異が顕著に現れた。脱型材齢が早いほど、写真-1 に示すように、供試体側面に相当する部分の透水深さが大きくなる傾向がみられ、乾燥によるコンクリート内部の物質浸透に関する不均質性が目視により確認できた。低熱ポルトランドセメントでは、1日脱型において、真空透水の結果、供試体上面まで水が達したため、透水面積比を1とした。高炉スラグ微粉末を使用した場合は、1日脱型の場合は低熱ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントに次いで透水面積比が大きくなったが、7日間以上養生した場合には、普通ポルトランドセメントやエコセメントと同等の値を示した。同一の養生をした円柱供試体の材齢 28 日における圧縮強度を図-4 に、真空透水前後の吸水量を図-5 に示す。圧縮強度は結合材にかかわらず、湿潤養生期間が長いほど高い強度を示したが、普通ポルトランドセメントとエコセメントで7日脱型の方が材齢 28 日脱型よりも強度が高く

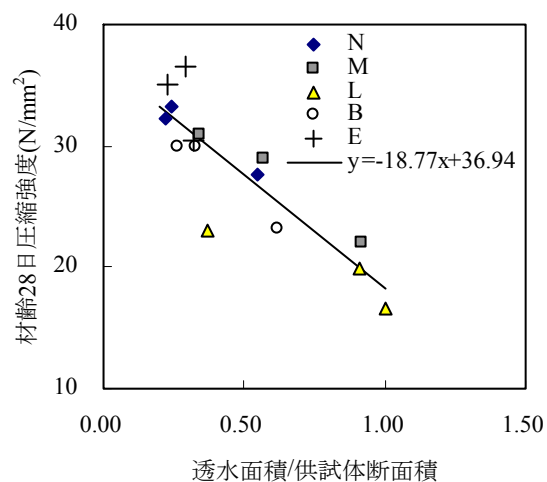


図-6 透水面積比と圧縮強度の関係

なっており、乾燥による一時的な強度上昇があったものと推察される。吸水量は、図-5 より透水面積比の関係とほぼ同様の結果が得られたが、脱型材齢による差は透水面積比の方が明確に現れたので、以後、透水面積比を用いて考察することとした。

圧縮強度と透水面積比の関係を図-6 に示す。図より、透水面積比と圧縮強度の関係は、W/C(B)55%においては、結合材種類に関わらず直線的な関係を示し、今回の真空透水試験によって湿潤養生条件による組織の緻密化が

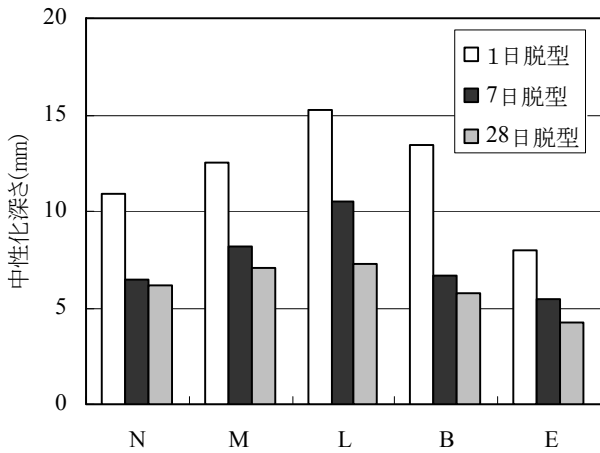


図-7 中性化深さ (促進材齢 1 週)

コンクリートの圧縮強度に大きく影響を及ぼしていることを示すことができた。

3.2 中性化促進試験

中性化促進材齢 1 週における中性化深さの結果を図-7 に示す。促進材齢 1 週時点での中性化深さは、1 日脱型でみると、中庸熟ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用した場合において、図-3 で得られた透水面積比の傾向と比較して逆転する結果となったが、全体的にはほぼ同様の傾向を示した。筆者らは、既報において、普通ポルトランドセメント、中庸熟ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用した場合の 3 種類の結合材を用いたコンクリートの脱型時期を変化させた場合の中性化速度係数と圧縮強度との間に高い相関性があることを示しており²⁾、中性化抵抗性-圧縮強度、圧縮強度-透水面積比が高い相関性を持ち、円柱供試体を用いて物質の浸透性などに関するコンクリートの品質を評価できると考えられる。

促進材齢 1 週時点での中性化深さと透水面積比の関係を図-8 に示す。図より、結合材によらず、透水面積比との間に相関性が認められた。

3.3 質量変化

脱型時から材齢 28 日までの円柱供試体の質量減少量の経時変化を図-9 に示す。単位水量一定の調合条件で練り混ぜた円柱供試体の乾燥による水分の蒸散は、低熟ポルトランドセメント、中庸熟ポルトランドセメントの低熟系セメントが大きく、組織の緻密化が普通ポルトランドセメントなどに比べて遅く、自由水が比較的多く存在する状態であったと推察される。次いでエコセメントの質量減少量が多くなった。他の結合材では、質量減少の大きいものほど、透水面積が大きく、圧縮強度は低くなる傾向があったが、エコセメントの場合は、質量減少量が多いにもかかわらず他の結合材に比べて透水面積および吸水量は小さく、圧縮強度は高い傾向がみられ、エコセメントにおける組織形成過程での水分の残存状

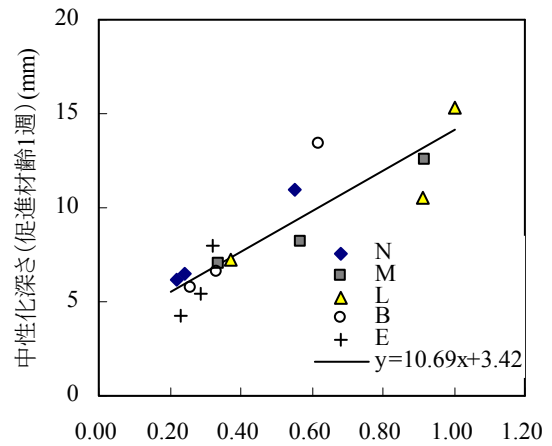


図-8 透水面積比と中性化深さの関係

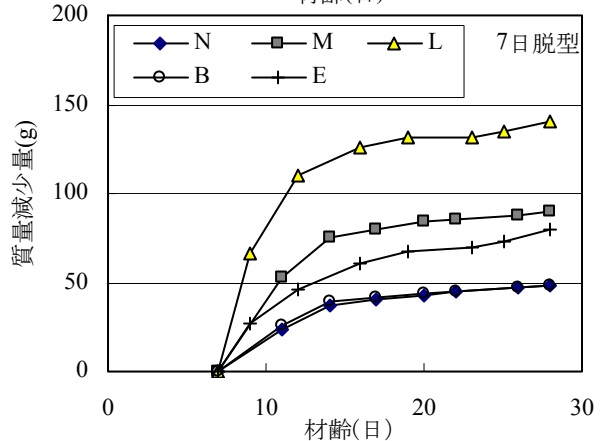
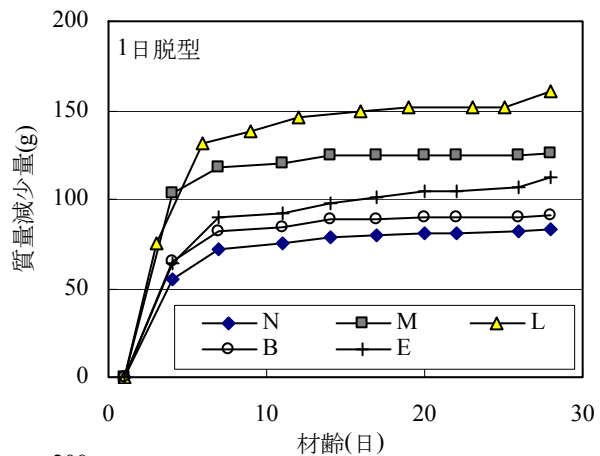


図-9 質量減少の経時変化

態が異なることが予想される。高炉スラグ微粉末を使用した場合については、質量減少は普通ポルトランドセメントとほとんど差がなかったが、1 日脱型の場合の透水面積及び吸水量が大きくなり、圧縮強度も低くなった。このことから、高炉スラグ微粉末を用いた場合は、コンクリートの品質は材齢 1 日などのごく初期の養生条件に敏感であるが、適切な湿潤養生期間をとることにより、普通ポルトランドセメントと同様の品質を得られると考えられる。

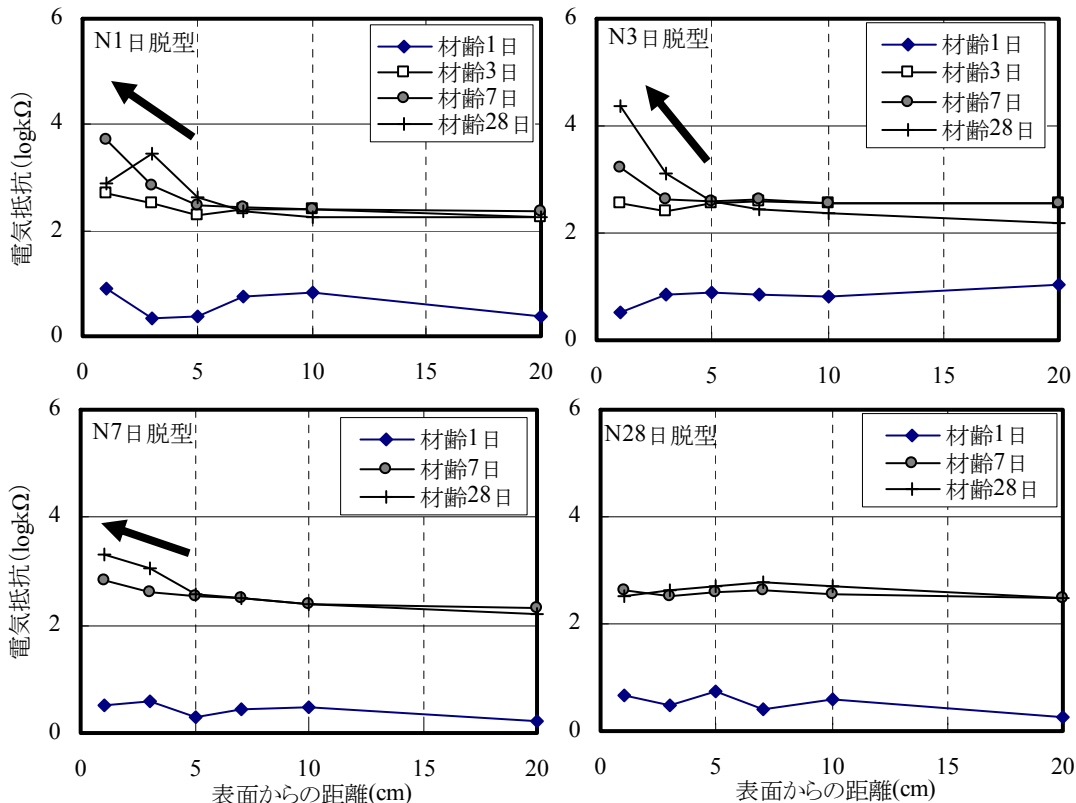


図-10 電気抵抗の分布と経時変化（普通ポルトランドセメントの場合）

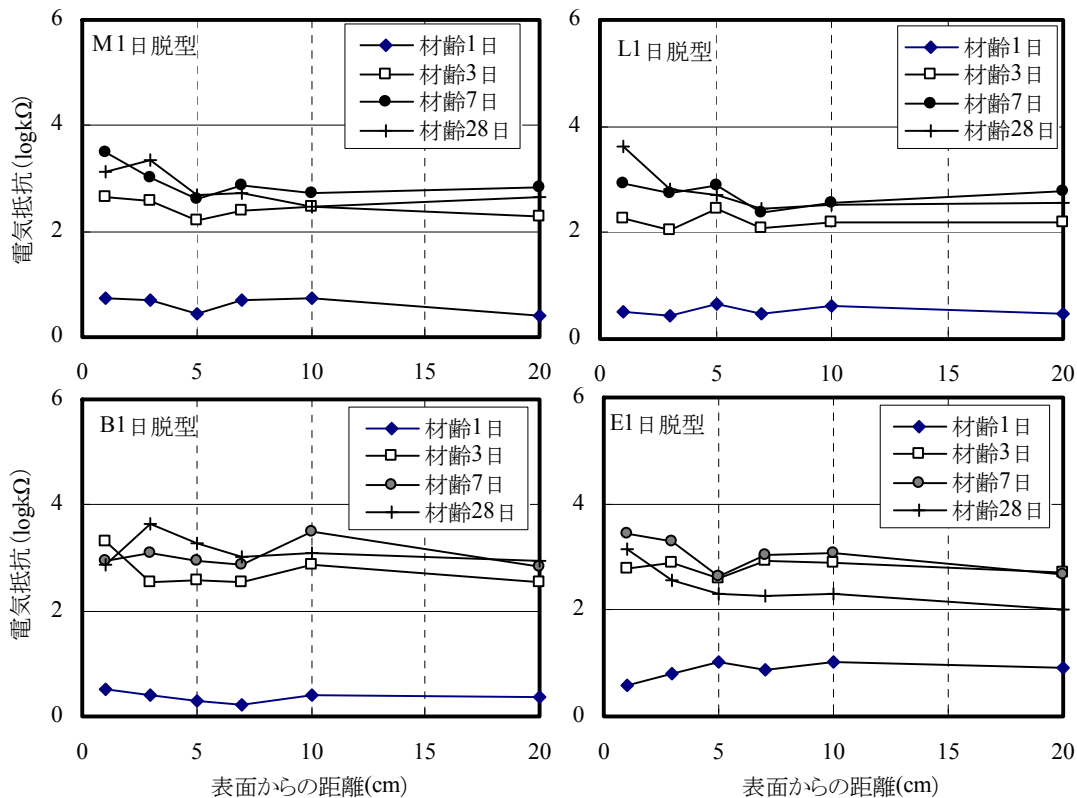


図-11 電気抵抗の分布と経時変化（脱型材齢1日）

3.4 含水率分布

図-10 に日大式セラミックセンサを埋設し、普通ポルトランドセメントの場合について、供試体内部の電気抵抗の分布と経時変化を示す。また、図-11 に、各結合材

における脱型1日の場合の電気抵抗の分布と経時変化を示す。含水率と電気抵抗の関係は、今回のように温度条件が一定の場合、含水率が高いほど電気抵抗が小さく、含水率が低いほど電気抵抗が大きくなる傾向を示す³⁾。

この関係をもとに考察すると、図-10より、脱型により乾燥条件下におかれると、表面部に近い位置で電気抵抗が大きくなり、乾燥の影響を受けていることがわかる。28日脱型では、材齢28日までの間は封かん状態であるため、供試体中の電気抵抗値の上昇は水和の進行に伴う自由水の消費によるものであると考えられ、この28日脱型の抵抗値を用いることにより、水和による影響を考慮した抵抗値の評価が可能であると考えられる。また、28日脱型供試体においては、材齢1日時点での電気抵抗分布はばらついたが、材齢が進行すると、供試体中の電気抵抗値のばらつきが小さくなり、今回用いたセラミックセンサによる電気抵抗測定は、ある程度水和が進行した状態のコンクリートにおいて、センサ自体の個体差の影響が少ない状態で比較できる手法であると考えられる。

各脱型材齢の供試体中の電気抵抗分布を28日脱型の抵抗値と比較すると、1、3、7日に脱型したいずれの供試体においても、表面から5cm以下の部分が乾燥の影響を受けていると考えられる。このことから、鉄筋コンクリート構造物のかぶりに相当するほぼすべての部分が乾燥による影響を受けると推察される。結合材で比較すると、図-11から、1日脱型の場合、材齢28日までの電気抵抗分布と経時変化はいずれの結合材においても表面から5cm程度までの部分で電気抵抗が高くなる傾向がみられた。今回はW/C(B)を一定としているため、異なる水セメント比（水結合材比）では乾燥の影響範囲が変わる可能性があるが、W/C(B)55%で材齢1日脱型した場合は、表面から概ね5cm程度が脱型による乾燥の影響を受けると考えられ、湯浅らによる既往の研究報告と類似する傾向を得た。

4.まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲において、脱型時期を変化させた供試体を用いたコンクリートの真空条件下における透水性は、脱型時期が早いほど大きく透水し、また、強度発現の遅い低熱系のセメントほど大きく透水することが明らかとなった。高炉スラグ微粉末を用いた場合は、1日脱型では透水が大きい、7日以降の脱型では、普通ポルトランドセメントと同等の結果を得た。また、透水面積比は、同一の養生条件の円柱供試体強度と高い相関性が認められた。
- (2) 真空透水試験における結果を物質浸透性の観点から検討する目的で、促進材齢1週における中性化深さとの比較を行った結果、透水面積比と高い相関性があることが確認され、真空透水試験を用いた耐久性能評価の可能性を示唆した。
- (3) 乾燥による供試体内部の含水率分布は、電気抵抗の分布と経時変化の傾向から、W/C(B)55%のコンクリートでは、1日脱型の場合、結合材にかかわらず概ね表面部から5cm程度までが乾燥による影響を受ける範囲であることを示した。

参考文献

- 1) 佐藤幸恵，丸山一平，榊田佳寛：脱型時期がコンクリートの品質に及ぼす影響，日本コンクリート工学協会年次論文集，Vol.29，pp.795-800，2007.7
- 2) 佐藤幸恵，丸山一平：脱型時期がかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響に関する実験的検討，セメント・コンクリート論文集，No.61，pp.282-288，2008.3
- 3) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの内部から表層にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，第509号，pp.9-16，1998