

論文 脱型材齢や曝露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価

蔵重 勲^{*1}・廣永 道彦^{*2}

要旨: 竣工時品質に基づいたコンクリート構造物の耐久性能検証システムの導入を視野に入れ、各種非破壊試験方法の竣工検査への適用性について基礎実験的評価を実施した。脱型材齢やその後の曝露環境といった養生条件を影響因子として各種コンクリート供試体を作製し、強度特性評価として実績豊富なテストハンマー試験、ならびに物質移動抵抗性の評価手段として期待される表層透気試験を用いて、表層品質の評価を試みた。さらに、圧縮強度や曲げ強度などの強度特性、および耐久性指標として中性化抵抗性を測定し、それぞれ表層品質の非破壊評価値と比較することで各々非破壊試験方法の適用性を調べた。

キーワード: 耐久性, 表層品質, 養生, 非破壊試験, テストハンマー試験, 表層透気試験, 中性化抵抗性

1. はじめに

一般に、コンクリート構造物の耐久性は、炭酸ガス、塩化物イオン、水分、酸素といった腐食因子より鉄筋を防護するためのかぶりの厚さおよびその品質（以降、表層品質とする）の影響を多大に受ける。表層品質は、施工時の諸要因に左右され、とりわけ養生の良否のインパクトが大きいことが認知されている。しかし実際には、かぶりの品質不良に起因した構造物の耐久性不足問題が報告されるなど、同様の事例が少なくないことは、近年この問題に係わる研究や技術開発が活発であることから推察される。このような現状に対して、養生の管理・検査を確実に実施し、対処することが重要であることは言うまでもないが、施工されたコンクリートの品質そのものを評価し、構造物の耐久性をより直接的に確認する方法論についても議論が活発化してきている。竣工時の検査に資するコンクリートの品質試験技術を整え、それを施工された構造物の表層品質評価に適用し、その結果に基づいて構造物が保有する耐久性を検証する包括的なシステム整備の必要性が指摘されている^{1),2)}。

コンクリート標準示方書〔施工編：検査標準〕8.4 節「構造物中のコンクリートの検査」³⁾で示されるように、従前、コンクリート受入れ時に採取した供試体を用いた試験やテストハンマー試験による非破壊評価によって、主として圧縮強度を対象に品質の検査が実施されてきた。このような従来の検査方法が、コンクリート品質に及ぼす養生の影響をどの程度捕捉できるのか、把握する必要があるものと考えられる。既往の研究では、圧縮強度に及ぼす養生の影響については網羅的な検討が実施されており参考になるが^{4)~7)}、非破壊試験によって評価された品質との対応を整理した例はあまり見当たらない。そこで、本研究ではまず適用実績が豊富なテストハ

ンマー試験に着目し、脱型材齢およびその後の曝露環境といった養生条件を影響因子として強度特性との関連を調べた。特に早期脱型後、低湿度雰囲気へ曝露される場合は、コンクリート表面からの水分逸散が水和反応の阻害を招き、表層品質を大きく低下させ、結果として構造物の耐久性に悪影響を及ぼす可能性がある。

これらの影響評価では、品質の低下度とともに、どの程度の領域まで影響が及んでいるかの把握も重要と考えられる。これに対し、湯浅らは乾燥を受けたコンクリート内部の含水率分布や空隙構造の不均質性について詳細に検討を加えている⁸⁾。一方、施工環境を模擬した現場養生評価や養生条件の影響評価基礎実験においては、円柱供試体の圧縮強度試験などが採用されることがあるが、表層から内部までの平均的な品質を評価するこのような方法では、表層品質の低下度や耐久性への影響を過小評価する可能性も考えられる。以上の観点から、養生が表層品質に及ぼす影響をより敏感に評価可能と考えられる曲げ強度試験も実施し、圧縮強度およびテストハンマー試験によって測定される反発度と比較した（実験シリーズ I）。曲げ強度はコンクリート表層の引張強度とも関連があり、近年ひび割れ抑制が社会問題化している中で、養生がコンクリート表層のひび割れ抵抗性に及ぼす影響の解明について有用な指標となる可能性も期待される。

他方、構造物の耐久性を左右するコンクリートの物質移動抵抗性を非破壊評価する方法として有用なものに透気試験がある⁹⁾。種々の方法が提案されているが、近年 RILEM にて竣工検査への適用性評価がなされ¹⁰⁾、欧州を中心に実用化に向けた検討が引き続き進められている。本研究ではその検討の中で比較的信頼性の高い評価が可能で方法と判定された Torrent 法表層透気試験に

*1 (財)電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所バックエンド研究センター 上席研究員 (正会員)

着目し、脱型材齢およびその後の曝露環境が異なる各種コンクリート供試体に適用した（実験シリーズⅡ）。

これらの実験・分析から、コンクリート構造物の竣工検査に対する、各種非破壊試験の有用性を比較検討した。

2. 実験シリーズⅠ：養生条件が強度特性に及ぼす影響

2.1 実験概要

表-1 に示すように、普通ポルトランドセメント用いて水セメント比 50%のコンクリートを混練し、圧縮強度、静・動弾性係数測定用に $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 円柱供試体、曲げ強度測定用に $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ 角柱供試体、反発度測定用に $15 \times 15 \times 53 \text{cm}$ 角柱供試体をそれぞれ作製した。また、脱型材齢は図-1 に示す 2 条件を設定し、上記供試体種類の全てに適用した。さらに、脱型後については水分・湿度条件の異なる 3 種類の環境を設定し、供試体を曝露した。条件設定においては、コンクリート標準示方書 [施工編] において、 15°C 以上の日平均気温下における普通ポルトランドセメントコンクリートに対する湿潤養生期間の標準が 5 日とされていることを参考に、また早期脱型の影響を把握することを目的に脱型材齢を 1 日および 5 日とした。脱型後の曝露環境は、我が国の平均的な大気湿度とされる 60%RH を基本に、より多湿な条件として湿度 98% 以上の湿空雰囲気、ならびに圧縮試験供試体の標準養生として一般的に採用される材齢 28 日までの水中養生を設定し、比較した。なお、図-1 中の供試体略号は「脱型材齢-曝露環境」を示しており、以降、実験結果の説明および考察においてはこれらを用いることとする。

材齢 28 日に行った圧縮強度、静・動弾性係数、曲げ強度の測定については、JIS で定められた方法に準拠した。また、テストハンマー試験については土木学会規準 JSCE-G504-2007 の方法に従って実施した。反発度の測定は $15 \times 15 \times 53 \text{cm}$ 角柱供試体の打設面を上端とした両側面（ $15 \times 53 \text{cm}$ 面）を対象に、床上に定置した状態で鉛直方向に打撃し、打撃方向補正を行って基準反発度を求めた。

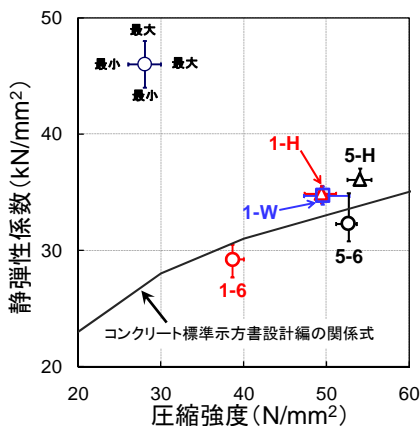


図-2 脱型材齢および曝露環境が圧縮強度と静弾性係数に及ぼす影響

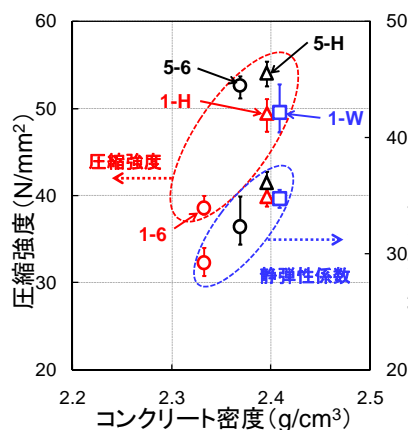


図-3 コンクリート密度と圧縮強度ならびに静弾性係数の関係

表-1 コンクリート供試体の配合

W/C (%)	s/a (%)	Ac (ml/kg-C)	Unit Content (kg/m ³)				Slump (cm)	Air (%)
			W	C	S	G		
50	48	3.0	165	330	859	956	7.5	5.7

Ac: AE 減水剤添加率, W: 水 (AE 減水剤含む), C: 普通ポルトランドセメント, S: 陸砂, G: 砕石

略号	脱型材齢および曝露環境 (20°C)	測定項目	
1-6	60%RH	圧縮強度 静弾性係数 動弾性係数 曲げ強度 反発度	
1-H	湿空 (98%RH 以上)		
1-W	水中		
5-6	60%RH		
5-H	湿空		
打設脱型		測定	
1日		5日	28日
			材齢

図-1 供試体の養生条件および測定項目 (実験シリーズⅠ)

打設、曝露、測定 of いずれの実験作業も気温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の条件下で実施した。

2.2 実験結果および考察

脱型材齢およびその後の曝露環境を変化させた各供試体について、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2 にまとめた。図中には、平均値のプロット表示とともに最大・最小値を線で示し、測定値のばらつきを把握できるようにした。コンクリート標準示方書 [施工編] では、 15°C 以上の環境に対して普通ポルトランドセメントコンクリートの湿潤養生期間の標準を 5 日間としているが、材齢 5 日に脱型し 60%RH 雰囲気中に曝露した 5-6 供試体は、材齢 28 日において圧縮強度 53N/mm^2 程度、静弾性係数 32kN/mm^2 程度であり、両者の関係は示方書設計編で示される関係式にほぼ従った。また、同材齢に脱型後、湿空環境に曝露した 5-H 供試体は、圧縮強度、静弾性係数ともに 5-6 供試体を上回る結果となった。一方、材齢 1 日に脱型後、60%RH 環境に曝露した 1-6 供試体の圧縮強度は、5-6 供試体に比べ 3 割近く低下し、静弾性係数も

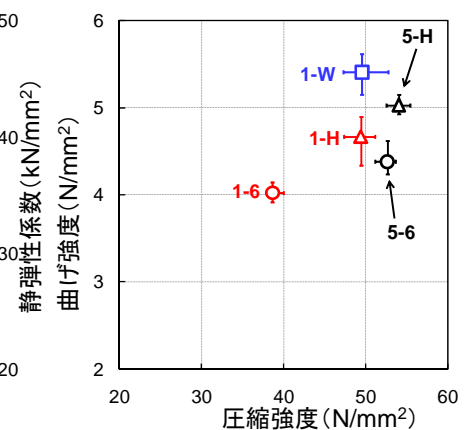


図-4 脱型材齢および曝露環境が圧縮強度と曲げ強度に及ぼす影響

小さくなった。しかし、材齢1日で脱型したもののでも水中や湿空雰囲気に曝露した1-Wおよび1-H供試体では、圧縮強度の低下量は小さい結果となった。なお、圧縮強度試験に際しては供試体の飽水あるいは乾燥といった前処理は、水和の進行や硬化体組織の損傷を生ずることを懸念し、行っていない。よって、1-W供試体等では含水の影響により、圧縮強度が見かけ上低く測定された可能性もある。

これら圧縮強度および静弾性係数をコンクリートの強度試験時における見掛けのかさ密度と比較すると図-3のようになる。早期脱型後、乾燥環境へ曝露されることで密度が低下するほど、両測定値も小さくなる傾向が見られ、若材齢における供試体表面からの水分逸散が水和反応を阻害し、強度低下を招くことが定量的に示された。さらに、圧縮強度と曲げ強度の関係を整理したものを図-4に示す。材齢1日に脱型後、60%RH 雰囲気に曝露した1-6供試体は、曲げ強度も低下することが確かめられ、各供試体の結果を総体的に見ると、圧縮強度が低いほど、曲げ強度が小さくなる傾向が認められた。

以上のような脱型時期およびその後の曝露環境によって変化する強度特性を基準反発度と比較し、テストハンマー試験による表層品質の非破壊評価の可能性を検討した。図-5は基準反発度と圧縮強度の関係であるが、圧縮強度が低い供試体ほど、基準反発度も小さくなる傾向が確かめられた。また、材齢1日で脱型し水中養生を施した1-W供試体の基準反発度は、近年提案されている各種推定式（土研式、谷口らの式、森濱の式、ス波らの式）で算出される圧縮強度と近い値を示したが、気中あるいは湿空環境に曝露した供試体、特に早期に乾燥環境に曝露された1-6供試体では、各種推定式によって算出される圧縮強度よりも大きな値を示した。これは、圧縮強度試験がφ10×20cm 供試体の平均的品質を評価しているものであるのに対し、テストハンマー試験で得られる基準反発度は脱型時期や曝露環境によってより敏感

に変化したコンクリート表層の品質を捉えていることが理由として考えられる。

テストハンマー試験は、ブランジャーの打撃による反発度を評価する衝撃現象を対象としていることから、コンクリートの圧縮強度よりも弾性係数との相関が強いものと推察される。そこで、図-6に基準反発度と静弾性係数ならびに動弾性係数の関係を整理した結果、それぞれ強い正の相関が認められた。さらに、基準反発度と曲げ強度の関係を図-7にまとめた。曲げ強度試験では、供試体下端の最大引張応力度を評価するといった測定の原理上、圧縮強度試験と比較してコンクリートの表層品質をより鋭敏に評価できる可能性がある。同図を見ても、基準反発度が大きくなるほど、曲げ強度が高くなる傾向が認められ、圧縮強度との対応よりも強い相関があることが明らかとなった。

2.3 まとめ

ごく早期に脱型されたコンクリート供試体が乾燥雰囲気に曝されることで生じる強度特性値の低下など、養生条件が品質に及ぼす影響をテストハンマー試験といったコンクリート表面からの非破壊試験によって検知可能なことが分かった。コンクリート構造物の品質検査に当たっては、例えば、実際に施工されたコンクリートの基準反発度を、打設したコンクリートと同じものを用いて示方書で示される標準養生条件あるいは契約協会で定めた養生方法等で作製した供試体と比較することで、施工の良否を判定するといった方法論が挙げられる。構造物中のコンクリート品質のばらつきの判定方法、ならびに適切な供試体の形状・寸法や検査時期の設定など課題も山積するが、今後より広範な条件の実験に基づき、その有用性について評価検討していきたい。また、基準反発度は曲げ強度との相関が強く、収縮特性評価と併せたコンクリート表層のひび割れ抵抗性評価への適用検討も今後期待される。

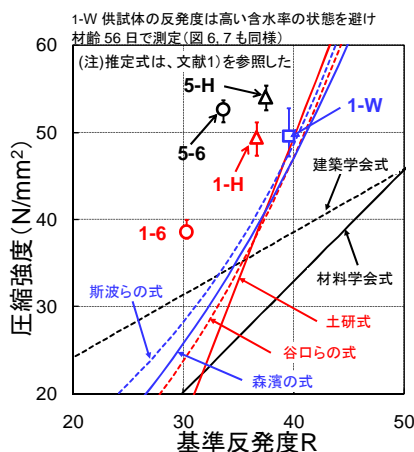


図-5 基準反発度と圧縮強度の関係

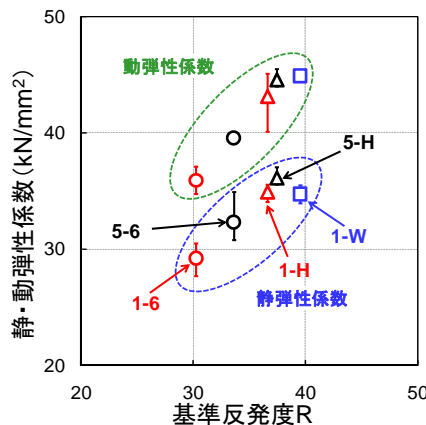


図-6 基準反発度と弾性係数の関係

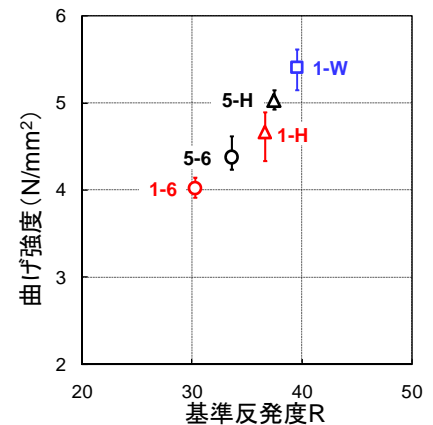


図-7 基準反発度と曲げ強度の関係

3. 実験シリーズⅡ：養生条件が表層透気性に及ぼす影響

3.1 実験概要

実験に使用したコンクリート供試体の配合は実験シリーズⅠ（表-1）と同様であるが、コンクリート表層の透気係数や反発度に及ぼす養生条件の影響をより詳細に調べるため、脱型材齢および曝露環境の設定条件を図-8のとおり増加した。供試体は、反発度および表層透気係数の測定用に 15x15x53cm 角柱供試体を、促進中性化試験用に 10x10x40cm 角柱供試体を作製した。所定の材齢で脱型後、材齢 56 日までそれぞれの環境に曝露し、材齢 56, 91 日において非破壊試験を実施した。反発度の測定方法はシリーズⅠと同様であり、表層透気試験は Torrent 法¹¹⁾を採用し、含水の影響を考慮するため Wenner 法（四電極法）によって電気抵抗率の測定も併せて行った。測定箇所はテストハンマー試験と同様である。さらに、材齢 91 日より促進中性化試験（20℃、60%RH、CO₂5%）を実施し、その結果を非破壊評価値と対比した。

3.2 実験結果および考察

示方書施工編では、普通ポルトランドセメントコンクリートの湿潤養生期間として、15℃以上の環境で5日間を標準としている。図-9に示す材齢5日に脱型した供試体の表層透気係数は、本実験で設定したいずれの環境に曝露した場合でも、材齢91日で0.08x10⁻¹⁶m²程度となった。一方、我が国の一般的な湿度レベルとされる60%RH雰囲気中に曝露した供試体において、脱型時期の影響を比較したものが図-10になる。材齢1日において脱型した供試体では5日や14日に脱型した場合と比べ、透気係数が1オーダー大きくなってしまっている。本実験の条件範囲内ではあるが、示方書で標準とされる湿潤養生期間が、コンクリート表層の透気抵抗性確保の観点において一定の根拠を持ったものと判断できる結果を得た。

さらに、材齢1日で脱型した供試体に着目し、脱型後の曝露環境の影響を図-11で整理したところ、湿空や水中の比較的水分供給が豊富な条件では、材齢5日に脱型

略号	脱型材齢および曝露環境 (20℃)		測定項目
1-4	型 枠 存 置	40%RH	反発度 表層透気係数 電気抵抗率 中性化深さ
1-4H			
1-6		60%RH	
1-H		湿空 (98%RH 以上)	
1-W		水 中	
5-4		40%RH	
5-6		60%RH	
5-H		湿 空	
14-6		60%RH	

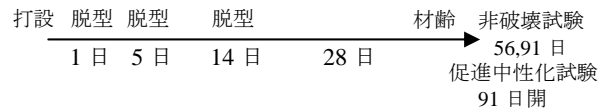


図-8 供試体の養生条件および測定項目(実験シリーズⅡ)

した供試体と同等の表層透気係数が得られることが分かった。また、材齢1日で脱型後、材齢28日まで40%RHに曝露された供試体でも、その後湿空雰囲気に置かれることによって表層透気係数が低下し、表層品質が改善されることが明らかとなった(1-4H供試体)。

以上より、材齢がごく初期の脱型が必ずしも有害なわけではなく、脱型後のコンクリート中水分の逸散防止対策、あるいは水分を十分に供給するなどの養生を適切に行えば、所要の表層透気性が得られることが確かめられた。なお、測定された電気抵抗率はいずれの供試体も10kΩcm以上であり、Torrentらが提案するノモグラムによる透気性のグレード評価¹²⁾においては、電気抵抗率に基づいたコンクリート中水分の影響補正を必要としない範囲にあった。

図-12~14は、テストハンマー試験で得られた基準反発度と表層透気係数をそれぞれの供試体で比較したものである。材齢5日に脱型した供試体はいずれの環境に曝露した場合も、同等な基準反発度および表層透気係数が得られることが分かった。一方、材齢1日に脱型後、

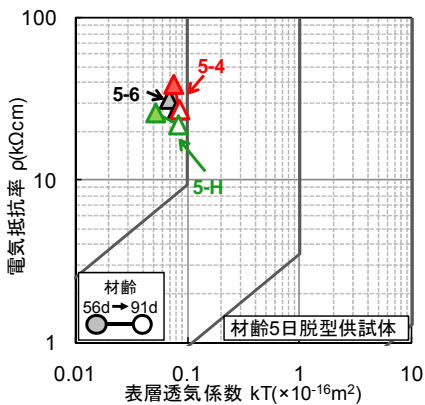


図-9 材齢5日に脱型した供試体の表層透気係数と電気抵抗率の関係

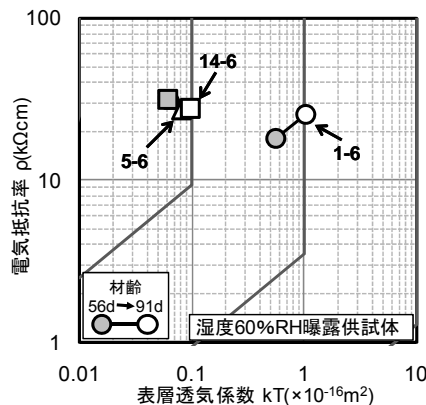


図-10 脱型材齢が表層透気係数と電気抵抗率の関係に及ぼす影響

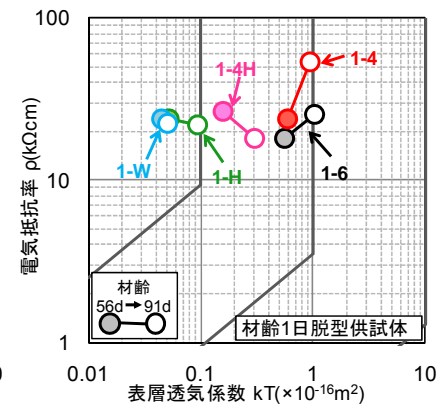


図-11 曝露環境が表層透気係数と電気抵抗率の関係に及ぼす影響

60%RHの雰囲気暴露した供試体では、5日脱型に比べ表層透気係数、基準反発度ともに大きく低下することが確かめられた。また、材齢1日で脱型後、40%RHの雰囲気暴露された供試体でも、その後湿空環境に置かれることによって表層透気係数はある程度低下するが、基準反発度の増加はわずかであることが明らかとなった。図-15は、これら基準反発度と表層透気係数の関係を、全供試体の材齢91日における測定結果についてまとめて示したものである。それぞれ水セメント比50%の同一フレッシュコンクリートから作製した供試体であるが、脱型材齢や暴露環境によって基準反発度に最大10程度、また表層透気係数に10倍以上の開きが出た。これらの測定結果を総体的に捉えると、基準反発度が高いほど表層透気係数が小さくなる相関関係が見られるが、脱型材齢や暴露環境の条件によって各々特徴的な変化を示す傾向が認められ、コンクリート表層の強度特性および物質移動抵抗性をそれぞれテストハンマー試験、表層透気試験といった非破壊試験によって多軸評価することの意義が見出された。

非破壊試験による表層品質の評価値と中性化抵抗性の対応を調べるために行った促進中性化試験の結果を図-16に示す。横軸は促進中性化期間の平方根を示して

おり、 \sqrt{t} 則に従えば直線的に中性化深さは増加することになる。1-6 供試体に着目すると、表層透気性の非破壊評価値から推察されるとおり比較的中性化が進展しており、中性化が深部に及ぶにつれてその増加割合が低下する傾向が明らかとなった。これは、乾燥雰囲気への暴露による品質の低下領域と対応するものであり、1-6 供試体では、20mm 以上の中性化深さの増加割合が他の供試体と同等であることから、15~20mm 程度の深さまで乾燥の影響が及んでいるものと推定される。

図-17は各促進期間における中性化深さの測定値を表層透気係数と比較した結果であり、両者は強い正の相関関係にあることが明らかとなった。養生の良否に左右されるコンクリート表層の品質を、施工後段階において非破壊評価できる可能性が示された。より厳密な中性化抵抗性の評価には、表層透気試験で測定される物質移動抵抗性のみならず、コンクリート中のPortlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 含有量等の水和化合物に関連する情報も必要となることから、より広範な供試体条件での検討が求められる。

他方、図-18でテストハンマー試験によって測定された基準反発度と中性化深さの関係を整理した結果、両者に線形関係が認められた。これは、本実験範囲内で、表層の強度特性に及ぼす脱型材齢やその後の暴露環境の

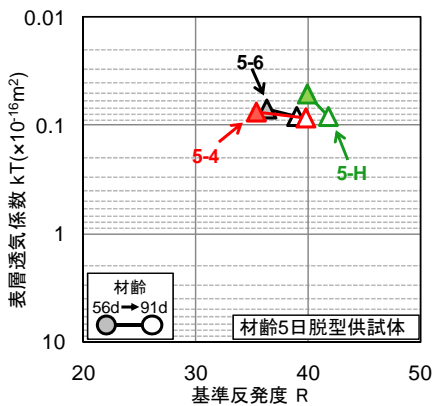


図-12 材齢5日に脱型した供試体の基準反発度と表層透気係数の関係

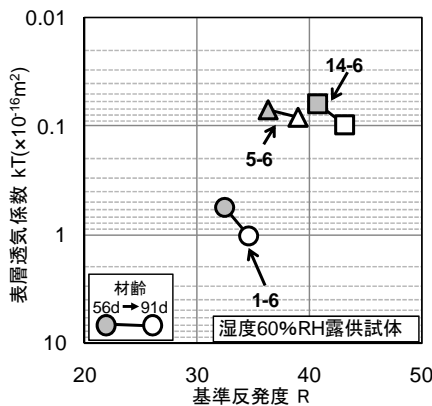


図-13 脱型材齢が基準反発度と表層透気係数の関係に及ぼす影響

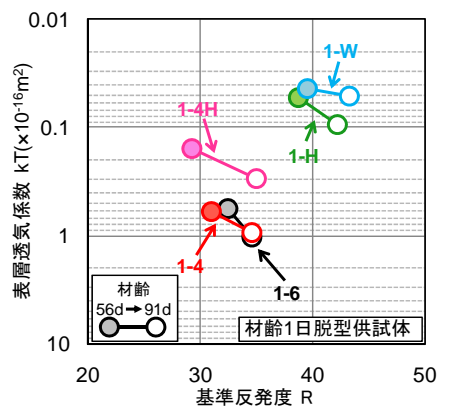


図-14 暴露環境が基準反発度と表層透気係数の関係に及ぼす影響

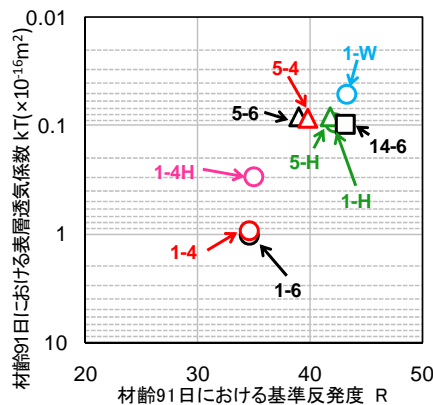


図-15 材齢91日における基準反発度と表層透気係数の関係

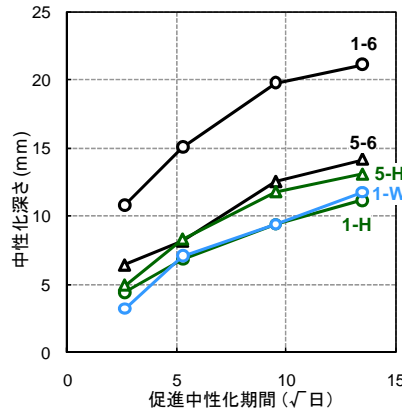


図-16 促進期間の平方根と中性化深さの関係

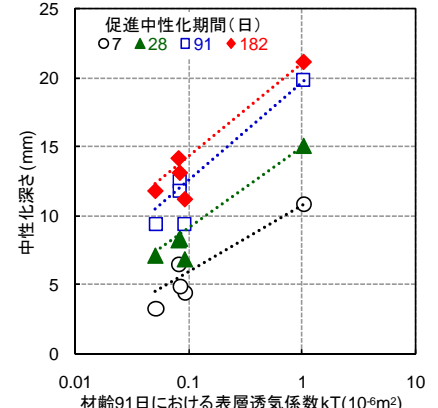


図-17 材齢91日における表層透気係数と中性化深さの関係

影響が、表層透気性に及ぼすものと同等であったと捉えることが出来る。強度特性評価を対象とした非破壊試験であるテストハンマー試験においても、ある程度中性化抵抗性の良否を判定できる可能性が示されたが、今後その方法や適用可能範囲を明確にしていく必要がある。

3.3 まとめ

テストハンマー試験で測定される基準反発度、ならびに Torrent 法表層透気試験によって得られる透気係数を用いることで、養生の良否に左右されるコンクリートの表層品質を、それぞれの測定原理に応じて評価可能であることが明らかとなった。今後は、より広範な材料、配合、養生条件などに対して実験を行い、検査手法としての適用性をより詳細に明らかにしていきたい。特に、Torrent 法表層透気試験に関しては、測定される透気係数が Torrent らの提案するノモグラムで水分の影響を無視できる電気抵抗率の範囲にあっても、材齢の経過とともに増大する傾向が認められた。この点に関しては、若材齢コンクリートに含まれる水分が透気現象に及ぼす影響を解明し、補正方法や試験の実施時期など同試験の竣工検査への適用方法について議論していきたいと考えている¹³⁾。

謝 辞

本研究は、土木学会コンクリート委員会 335 委員会「構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（委員長：東京大学生産技術研究所岸利治教授）」、および 216 委員会「歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会（委員長同上）」の活動に関連し実施したものです。これらの委員会における情報交換、様々な議論で得られました知見、頂きましたご意見・ご助言は、本研究を推進する上で非常に有益であり、有難いものでした。関係各位に深く感謝申し上げます。

また、本論文の一部内容は、国土交通省建設技術研究開発費補助金（実用化研究開発：コンクリート構造物長寿命化に資する品質保証／性能照査統合システムの開発、代表申請者：東京大学石田哲也准教授）の助成を得て実施した研究の成果であることを付記致します。

参考文献

- 1) 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書、土木学会コンクリート技術シリーズ 80, 2008
- 2) 歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会（216 委員会）成果報告書、土木学会コンクリート技術シリーズ 87, 2009
- 3) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, pp.218-219, 2008.3
- 4) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集, No.718/V-57, pp.59-68, 2002.11

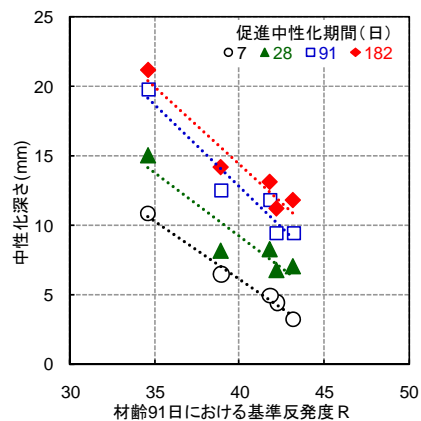


図-18 材齢 91 日における基準反発度と中性化深さの関係

- 5) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.17-26, 2003.5
- 6) 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, No.60, pp.227-234, 2006
- 7) 佐藤幸恵, 丸山一平, 梶田佳寛: 脱型時期がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.1, pp.795-800, 2007.7
- 8) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率, 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, 1998.7
- 9) 今本啓一, 下沢和幸, 山崎順二, 二村誠二: 実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.44, No.2, pp.31-38, 2006.2
- 10) R.J. Torrent and L. Fernandez Luco: RILEM Report 40 Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 189-NEC: 'Non-destructive Evaluation of the Concrete Cover', 2007
- 11) R.J. Torrent, "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", Materials and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992
- 12) R.J. Torrent and G. Frenzer, "A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete", Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992, 1995
- 13) 蔵重勲, 廣永道彦, 松田芳範, 岸利治: 放射性廃棄物処分施設におけるセメント系材料の品質検査システムの構築 (その 1) -コンクリート表層の反発度ならびに透気性の非破壊評価-, 電力中央研究所報告, 研究報告 N08081, 2009.8