

論文 中規模柱試験体を対象とした非破壊評価による表層品質の要因分析

蔵重 勲^{*1}・西田 孝弘^{*1}・秋山 仁志^{*2}・岸 利治^{*3}

要旨：かぶり厚とともに耐久性を確保する上で重要なコンクリート表層の品質に着目し、中規模柱試験体を実環境において作製・曝露し、各種施工因子の影響を表層透気試験や反発度試験によって非破壊評価した。表層品質に及ぼす養生の影響は、セメント種類や呼び強度、ならびに打設時季の条件によって大きな差異を示し、生コンへの大量加水による表層品質の悪化も表層透気試験によって検知可能であることが分かった。また、柱試験体の高さによる品質の差異や非破壊試験結果の材齢推移に関する実測データに基づき、表層透気試験や反発度試験を施工後の品質検査に適用する際の課題を挙げ考察した。

キーワード：表層品質, 非破壊試験, 透気性, 反発度, 配合, 養生

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の維持管理時代へと入った昨今、新設とくに重要構造物に対してはメンテナンスフリーを志向した耐久性の確保が重要視されている。一方、コンクリート構造物の耐久性は、かぶりの厚さとともにその品質（以降、表層品質）に依存し、ヒューマンファクターが関与する施工の良否に左右され易いことが知られている。この様な背景から、施工後に非破壊試験を用いて品質を評価し、所要の耐久性を検証するといった検査方法論が国内外で検討されている^{1)~3)}。他方、施工後に把握された品質データは、構造物の初期情報として合理的な維持管理計画の策定に有効活用されることが期待できる。このような動きに関連した研究は過去多数見られるが、そのほとんどは温湿度環境が制御され、比較的小型の供試体を用いるといった室内実験を対象にしたものであり^{例えは4),5)}、実施工を想定したレディーミスクストコンクリートの使用、ならびにポンプ圧送や振動締固めによる施工、また比較的大きな寸法の試験体を用いた実験的検討はあまり見当たらない。以上より、中規模柱試験体を実環境において作製・曝露し、各種施工因子の影響を表層透気試験や反発度試験によって非破壊評価した。本論文は、その結果に基づいた表層品質の要因分析、ならびに品質検査への非破壊試験の適用に関する課題について考察を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 中規模柱試験体の概要

図-1は、中規模柱試験体 20 本からなる全長 18m 近くの RC ラーメン模擬高架橋であり、千葉市において作製・曝露されているものである。柱試験体は上部をスラブで覆われており、基礎上面からスラブ下面までの柱試験体の高さは 2350mm であり、断面は 300mm×400mm の矩形となっている。柱試験体の作製にはレディーミスクストコンクリートを用い、ポンプ圧送にて打込み、振動締固めを行った。なお、これらの施工手順はコンクリート標準示方書施工編の施工標準に準拠した。

2.2 柱試験体の種類と要因分析の項目

図-2は、中規模柱試験体の打設時季と配置を示したものである。柱試験体群は南北 2 列に配置され、東側の N,S6~10 の柱試験体 10 本は 2010 年 3 月 4 日の冬季（材



図-1 中規模柱試験体の外観(左手前が南方向)

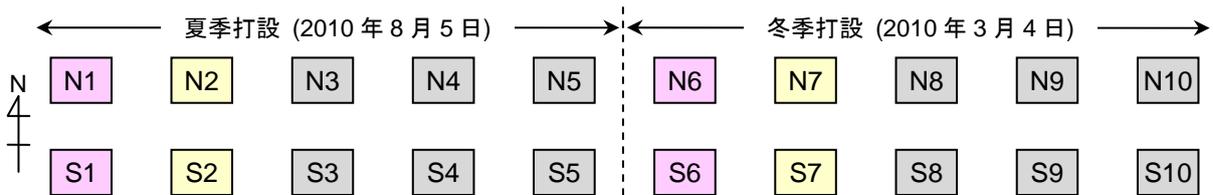


図-2 中規模柱試験体の打設時季と配置

*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 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 博士後期過程 修士(工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

齢 28 日までの日平均気温 3.8~16.7℃) に打設し、西側の柱試験体は同年 8 月 5 日の夏季 (同 26.5~30.9℃) に打設したものである。表-1 に示すように、配合や養生条件の組み合わせが異なる 10 種類の水準を設定し、冬季・夏季打設それぞれにおいて柱試験体を作製した。

コンクリートの配合は、表-2 に示すとおり普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種を用いた呼び強度 24 の条件に加え、呼び強度 60 の高強度コンクリートも設定した。養生については、湿潤養生期間の標準に従った標準養生と材齢 1 日における早期脱型の対比を行い、配合 N24 の柱試験体についてはフィルム被覆による密封養生や、養生マットに逐次水を供給する給水養生の条件も設定した。さらに、配合 N24 のコンクリートに約 20kg/m³ の水を打設直前に加えた試験体も作製した。

表-3 は、表層品質に及ぼす要因を分析するために定めた各種柱試験体の対比軸である。配合、早期脱型、養生追加、南北位置、加水、高さ位置について、打設時季の影響も含めて分析しようとするものである。

2.3 表層品質の非破壊評価方法

中性化抵抗性や塩化物イオン拡散性といった耐久性指標との相関が認められている表層透気係数を非破壊評価指標とし、Torrent 法によって測定した^{3),6)}。試験装置は初期圧制御型を用い、試験回数は測定箇所につき 1 回とした。これに併せ、表層透気係数評価における水分の影響を把握するため電気抵抗率を測定した。四電極法 (Wenner 法、電極間隔 50mm) によって、同一箇所 4 回の測定結果を平均することにより求めた。また、強度特性評価として実績の豊富な反発度試験を行った。土木学会規準 JSCE-G 504-2007 を参考に、一箇所につき 9 点の測定値を平均し評価した。測定箇所は、各柱試験体の上部 (高さ約 1900mm)、中部 (約 1300mm)、下部 (約 800mm) の東西南北各面に対し 1 点とし、柱試験体 1 本につき計 12 点である。測定は、材齢 2 ヶ月より 6 ヶ月まで毎月行った。なお、非破壊試験の実施に当たっては、原則として降雨の影響がない日時を選択するようにした。

表-1 柱試験体の配合と養生条件

| 柱番号 | | 配合 | 養生条件 | 脱型材齢(日) | |
|-----|----|-------|--------|---------|----|
| 冬季 | 夏季 | | | 冬季 | 夏季 |
| N6 | N1 | N60 | 標準養生 | 7 | 5 |
| S6 | S1 | | 早期脱型 | 1 | |
| N7 | N2 | BB24 | 標準養生 | 9 | 7 |
| S7 | S2 | | 早期脱型 | 1 | |
| N8 | N3 | N24 | 密封養生*2 | 7 | 5 |
| S8 | S3 | | 早期脱型 | 1 | |
| N9 | N4 | | 標準養生 | 7 | 5 |
| S9 | S4 | | 給水養生*2 | 1 | |
| N10 | N5 | N24*1 | 標準養生 | 7 | 5 |
| S10 | S5 | | | | |

*1: 約 20kg/m³ 加水, *2: 脱型後材齢 28 日まで養生

表-2 コンクリートの配合*1 およびフレッシュ性状

| 配合 | セメント | 呼び強度 | スランブ(cm)*2 | | 空気量 (%) | |
|------|------|------|------------|------|---------|-----|
| | | | 冬季 | 夏季 | 冬季 | 夏季 |
| N24 | 普通 | 24 | 13.0 | 13.0 | 4.7 | 4.5 |
| BB24 | 高炉 B | | 14.5 | 16.0 | 5.1 | 5.6 |
| N60 | 普通 | 60 | 59.5 | 57.5 | 4.5 | 4.9 |

*1: 粗骨材最大寸法 20mm, *2: 配合 N60 はスランブフロー

表-3 要因分析の項目と対比する柱試験体の番号

| 要因分析項目 | 対比柱番号 | |
|---------------|--------------|-------------|
| | 冬季打設 | 夏季打設 |
| 1. 配合による品質の相違 | N9-N7-N6 | N4-N2-N1 |
| 2. 早期脱型の影響 | N9-S8 | N4-S3 |
| | N7-S7 | N2-S2 |
| | N6-S6 | N1-S1 |
| 3. 養生の追加効果 | N9-N8-N10 | N4-N3-N5 |
| 4. 南北位置の対比 | N9-S9 | N4-S4 |
| 5. 加水の影響 | S9-S10 | S4-S5 |
| 6. 高さによる品質の差異 | N9-N7-N6-S10 | N4-N2-N1-S5 |

3. 表層品質の要因分析

3.1 配合による品質の相違

図-3 は、配合による表層品質の相違を示したものである。なお、これ以降示す非破壊試験結果は、原則として降雨の影響等が比較的少ない面 (北側柱では南面, 南側柱では北面) の高さ中部について、材齢 3 ヶ月における測定値を用いて比較することとし、部位や材齢による差

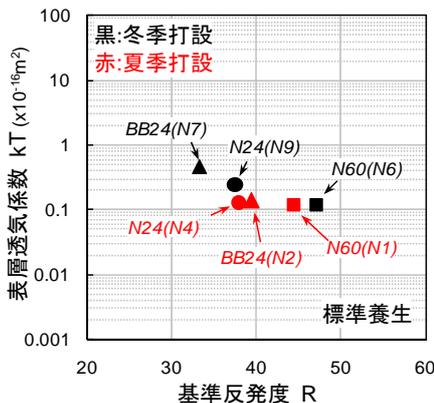


図-3 配合による表層透気係数および基準反発度の相違

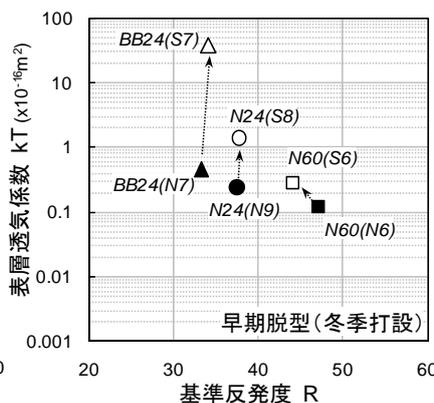


図-4 早期脱型が表層透気係数や基準反発度に及ぼす影響 (冬季打設)

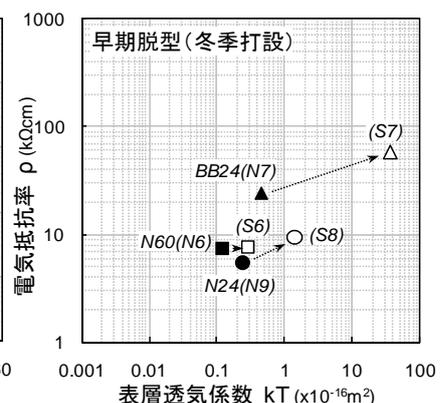


図-5 脱型材齢が表層透気係数と電気抵抗率の関係に及ぼす影響

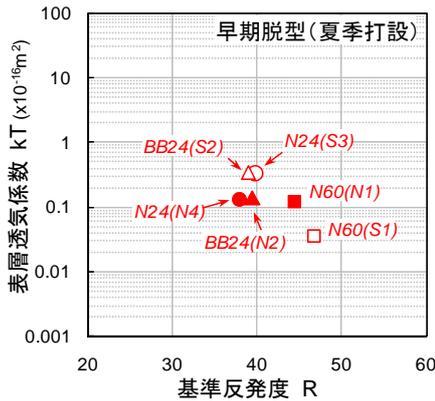


図-6 早期脱型が表層透気係数や基準反発度に及ぼす影響 (夏季打設)

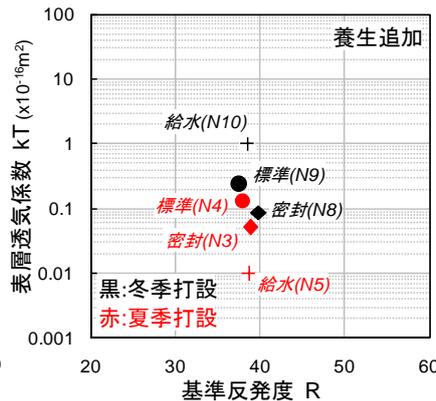


図-7 養生追加が表層透気係数や基準反発度に与える効果

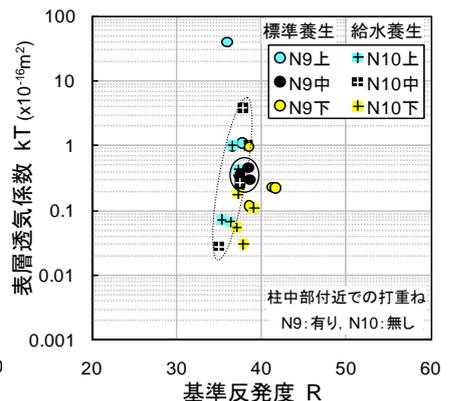


図-8 打重ねが表層透気係数や基準反発度に及ぼす影響

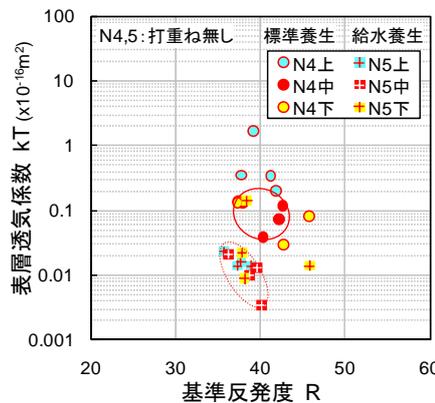


図-9 給水養生が表層透気係数や基準反発度に与える効果

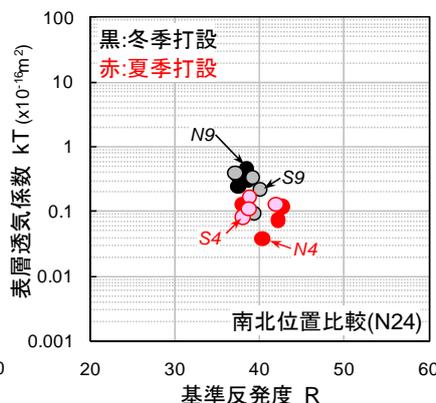


図-10 南北に位置する柱試験体における表層透気係数や基準反発度の対比

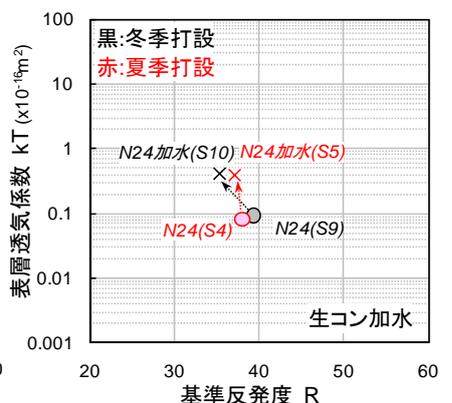


図-11 生コン加水が表層透気係数や基準反発度に及ぼす影響

異については後述する。基準反発度は、明らかに呼び強度の高い N60 で高く、夏季打設では同等な値を示した N24, BB24 は、冬季打設では BB24 が劣る結果となった。表層透気係数については、夏季打設でほぼ同等の値を示したのに対し、冬季打設では N60, N24, BB24 の順に大きくなる傾向が認められ、BB24 の硬化反応の温度依存性など、打設時季が表層品質に及ぼす影響が示唆された。

3.2 早期脱型の影響

図-4 に、冬季打設における早期脱型が表層品質に及ぼす影響をまとめた。材齢 1 日といったごく早期に脱型した場合、基準反発度の低下は顕著ではないのに対し、表層透気係数の悪化は明瞭であった。特に BB24 ではその増大幅が大きく、N60 は比較的小さかった。これらの早期脱型による表層透気性の悪化は、図-5 の電気抵抗率の差異が示すように、材齢初期にコンクリート表面より水分が逸散し、十分な硬化が阻害されたことに起因する。一方、図-6 に示すように、夏季打設の場合、早期脱型による表層透気係数の悪化幅は BB24 で明らかに小さくなっており、前述のとおり温度依存性の影響が確認できる。なお、N60 では相反する傾向が見られるが、これは品質に基づく測定結果のばらつきに起因するものと考えられ、この点については後述する。

3.3 養生の追加効果

図-7 は、密封養生と給水養生の効果を比較したものである。夏季打設の結果に着目すると、標準養生に対する表層透気係数の低減効果は、密封養生に比べて給水養生で大きいことが明らかとなった。これは、養生追加による表層品質の向上、ならびに水分逸散の抑制を捉えた結果と考えられる。また、基準反発度の上昇幅は小さい結果となった。一方、冬季打設では、給水養生の効果が認められないが、これは柱試験体の全非破壊試験結果をまとめた図-8 のとおり、N10 試験体においては高さ 1300mm 付近で打重ねが行われており、その部位の品質のばらつきに起因したものと考えられる (冬季打設では原則 2 層打ち、N10 試験体のみ 3 層)。図-9 に示すように、打重ねの無い夏季打設の N5 試験体を見れば、給水養生の効果がはっきりと表れていることが分かる。

3.4 南北位置の対比

図-10 は、高さ中部の全方角面の測定結果を用いて、柱試験体の南北位置による表層品質の差異を比較したものである。本実験の範囲内では、柱試験体の南北位置や柱面の方角が表層品質に及ぼす有意な影響は認められなかった。ただし、長期的には降雨や日射の影響が現れてくる可能性があるため、追跡調査を実施している。

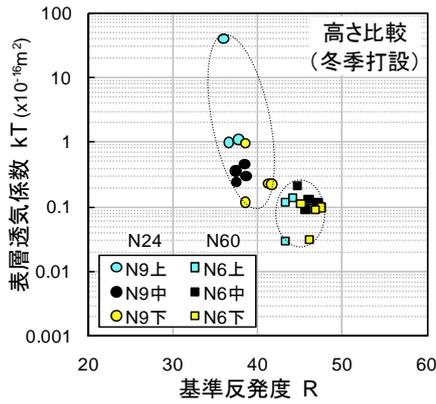


図-12 高さによる品質の差異に及ぼす呼び強度の影響 (冬季打設)

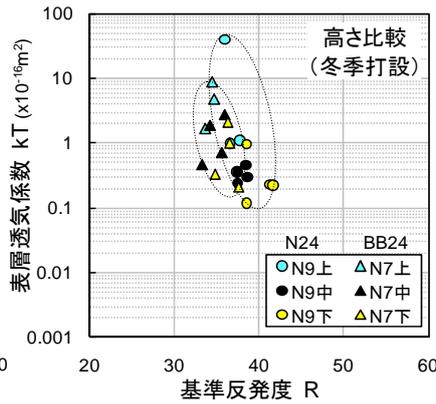


図-13 高さによる品質の差異に及ぼすセメント種類の影響 (冬季打設)

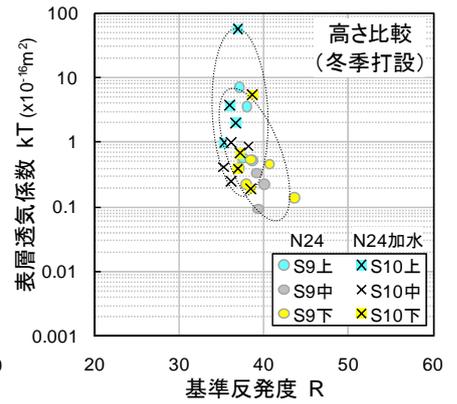


図-14 高さによる品質の差異に及ぼす生コン加水の影響 (冬季打設)

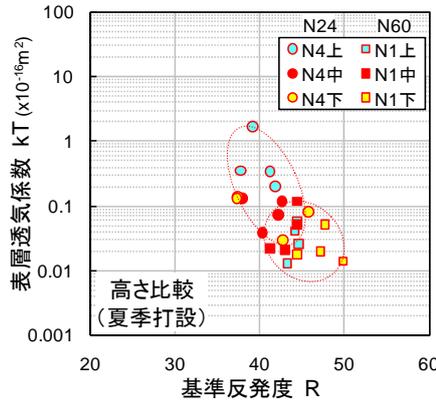


図-15 高さによる品質の差異に及ぼす呼び強度の影響 (夏季打設)

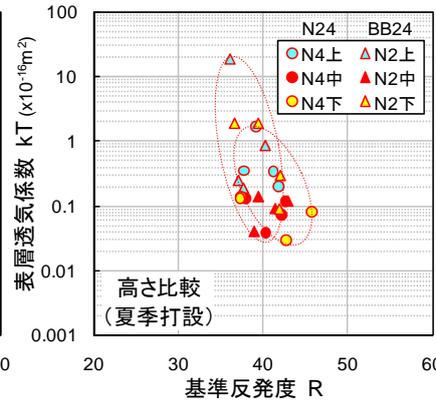


図-16 高さによる品質の差異に及ぼすセメント種類の影響 (夏季打設)

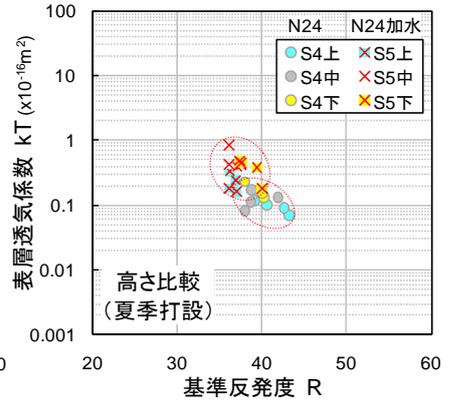


図-17 高さによる品質の差異に及ぼす生コン加水の影響 (夏季打設)

3.5 生コン加水の影響

図-11 は、生コンに加水した場合の試験結果を示したものである。基準反発度に比べ表層透気係数はその影響が大きく、約 20kg/m^3 の加水による表層品質の悪化を表層透気試験によって検知できることが明らかとなった。

3.6 高さによる品質の違い

図-12 は、冬季に打設した配合 N24 および N60 の柱試験体について、高さによる非破壊試験結果の差異を比較したものである。水セメント比が低く、セメント量の多い N60 では、表層透気係数や基準反発度の高さによる違いが比較的小さかった。一方、N24 の場合、柱試験体上部で表層透気係数が大きくなり易く、基準反発度も低下する傾向が認められた。このような品質の差異に対しては、コンクリートの材料分離、ブリーディング、硬化反応時の圧縮応力、あるいは部位による乾燥速度の違いなどの影響要因が挙げられるが、図-12 の結果対比からは材料分離やブリーディングの影響が大きいことが示唆される。

図-13 は、高さによる品質の差異に及ぼすセメント種類の影響を示したものである。高炉セメント B 種を用いたコンクリートでも同様に、柱試験体の上部になるほど表層透気係数や基準反発度が悪化するという結果が得られた。

図-14 は、配合 N24 のコンクリートに加水をした場合の品質差異を示した非破壊試験結果である。加水した場合、柱試験体全体の品質が悪化するとともに、高さによる品質の差異が大きくなっており、コンクリートへの加水が材料分離抵抗性の悪化やブリーディングの増大を招き、表層品質に悪影響を及ぼす危険性を認識できる。また、図-11 で示したように、加水の影響は基準反発度には比較的鈍感であり、表層透気係数の変化に顕著に表れることが、これらの試験結果から明らかとなった。

一方、これら高さによる品質差異の比較を、夏季打設柱試験体について行ったものが図-15~17 である。図-15、16 より、冬季打設と同様に上部になるほど表層品質が悪化する傾向がうかがえるが、高さによる品質差の大小は、打設時季と同一な因果関係を明示するものではなかった。すなわち、コンクリートのフレッシュ性状を左右する打設時季も少なからず影響があると考えられるが、これ以上にコンクリートの打込みや振動締固めの施工要因の影響が支配的であったことが推察される。

図-17 では、夏季に打設した加水コンクリートの高さによる品質差異を示したものであるが、冬季打設と比較し明らかに小さいことが分かる。これは、 25°C 以上の外気温環境においてスランプロスを生じたコンクリートに加水したことから、材料分離やブリーディングが比較

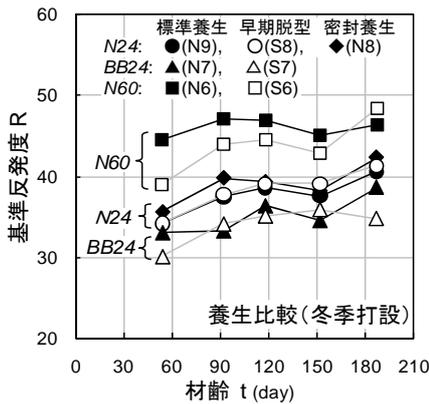


図-18 養生条件が異なる柱試験体の基準反発度の材齢推移

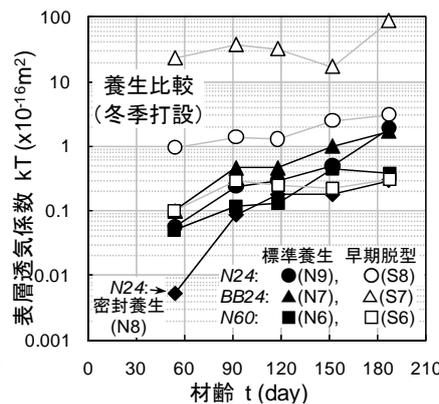


図-19 養生条件が異なる柱試験体の表層透気係数の材齢推移

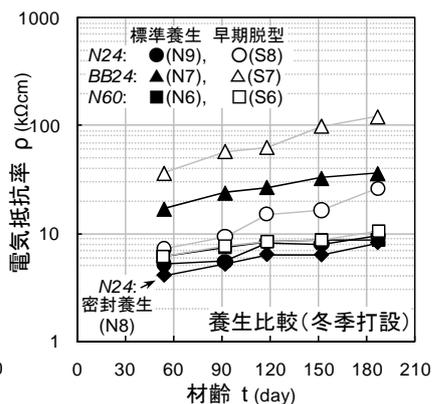


図-20 養生条件が異なる柱試験体の電気抵抗率の材齢推移

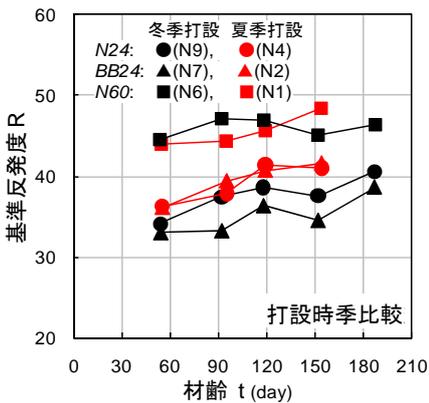


図-21 打設時季が異なる柱試験体の基準反発度の材齢推移

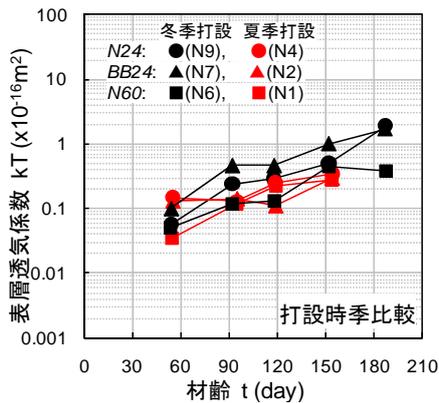


図-22 打設時季が異なる柱試験体の表層透気係数の材齢推移

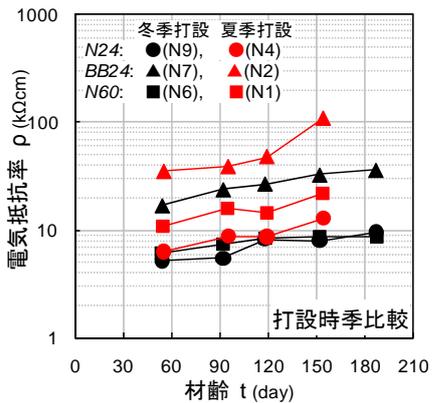


図-23 打設時季が異なる柱試験体の電気抵抗率の材齢推移

的少ない条件にあったためと考えられる。しかし、このような場合でも、生コンクリートへの加水によって表層品質が悪化することは試験結果が示すとおりである。

4. 施工後品質検査への非破壊試験の適用に関する課題

4.1 非破壊試験結果の材齢推移

これまで材齢3ヶ月における非破壊試験結果に着目し分析してきたが、ここでは試験結果の材齢推移を分析し、品質検査の適切な実施時期などについて考察した。

図-18は、基準反発度の材齢推移について、養生条件が異なる柱試験体の試験結果を比較したものである。なお、図-18～23に示す結果は、降雨の影響等が比較的少ない面（北側柱では南面、南側柱では北面）の高さ中部の測定値である。いずれの配合の柱試験体でも、材齢3ヶ月程度までは増加傾向にある基準反発度が、それ以降は横ばいの傾向を示し、コンクリート表層での硬化反応が鈍化している様子が分かる。また、養生条件の影響については、複数の材齢の試験結果を総体的に見ればその傾向は読み取れるものの、単一材齢での結果だけでは必ずしも養生条件による表層品質の変化を検知・評価できるとは言えないことが明らかとなった。

図-19は、表層透気係数の材齢推移である。どの柱試験体においても表層透気係数は材齢とともに増加して

いる。これは、コンクリートからの水分逸散による透気経路の領域拡大に起因するものであり⁵⁾、図-20に示す電気抵抗率の上昇傾向によっても確認できる。他方、表層透気係数の材齢推移に及ぼす養生条件の影響に着目すると、どの材齢においても早期脱型の影響や密封養生の効果がはっきりと表れており、施工後の品質検査に有用な指標となり得るものと考えられる。しかし、養生条件の違いによる非破壊試験結果の差異程度は、材齢時期によって異なることに注意が必要である。

図-21～23は、配合N24, 60, BB24の柱試験体を対象に、各種非破壊試験結果の材齢推移について打設時季の比較を行ったものである。非破壊試験結果の材齢推移傾向は同様であるが、コンクリートの硬化速度や水分逸散などを左右する温湿度条件の打設時季による相違の影響は、品質の差異を捉える非破壊試験結果の絶対値に強く表れることが分かった。

以上より、施工後の品質検査に当たっては、非破壊試験結果の材齢による変化や打設時季によるコンクリート品質の違いなどを鑑み、非破壊試験の合理的な実施時期の設定、ならびに適切な検査判定基準の策定に関する議論が重要であり、そのためには根拠となる豊富な実験・調査データが必要であると考えられる。

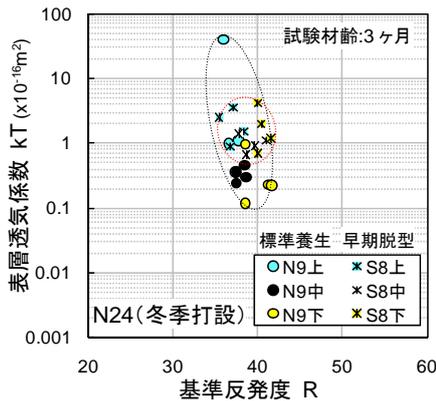


図-24 養生条件が異なる柱試験体の表層品質のばらつき (配合 N24)

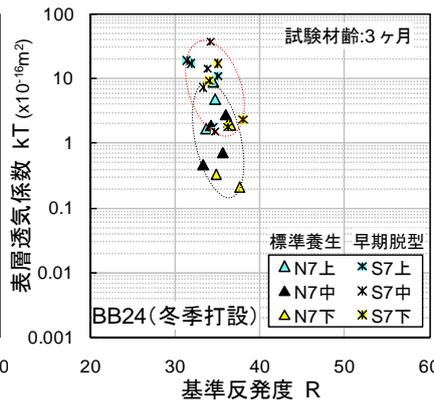


図-25 養生条件が異なる柱試験体の表層品質のばらつき (配合 BB24)

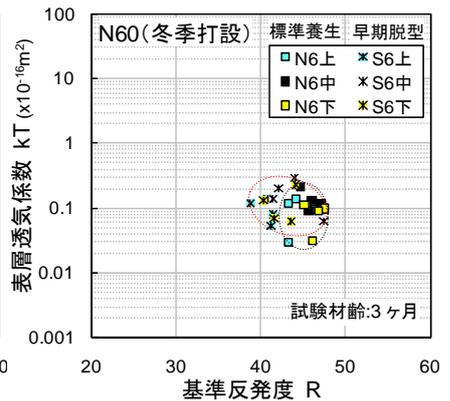


図-26 養生条件が異なる柱試験体の表層品質のばらつき (配合 N60)

4.2 部材内の品質のばらつきを考慮した評価方法

3.2 節において早期脱型による表層品質低下について非破壊試験による検知可能性を示し、3.6 節では同一柱試験体内での品質のばらつきに基づく非破壊試験結果の差異についても言及した。ここでは、これらを考慮しながら、早期脱型などの施工上の要因が表層品質に及ぼす影響の評価方法について考察し、施工後の品質検査における課題を示した。

図-24～26 は、柱部材としての品質評価について考察するために、標準養生および早期脱型を行った各配合の柱試験体を対象に、全ての表層透気係数と基準反発度の測定結果を示したものである。測定結果を総体的に見れば、早期脱型による表層品質の低下に対して、表層透気試験によって検知・評価可能なことが分かる。しかし、前述のとおり、高さ位置や打重ねなどの影響により同一柱部材においても品質のばらつきが生まれ、結果として非破壊評価値の差異につながっており、単一測定点での非破壊試験では養生の良否について必ずしも妥当な評価ができない可能性も指摘される。

以上より、実構造物に対する品質評価においては、部材中の品質のばらつきを考慮し、可能な限り複数の測定結果を取得し、それらの適切な評価に基づいて行われることが必要と考えられる。

5. まとめ

実環境において製造・曝露した中規模柱試験体を対象に行った一連の実験から、表層透気試験などの非破壊試験が配合や養生などによって変化する表層品質の評価に有用であり、施工後品質検査に活用できる可能性を示すと同時に、非破壊試験の実施時期や品質のばらつきに対する評価方法などの課題を抽出した。一方、諸要因によって変動し、部材内でばらつきを生ずる表層品質を、施工後の早い段階で把握しておくことは、その後の維持管理計画の合理化にとっても有効と考えられた。

謝 辞

中規模柱試験体を含む RC ラーメン模擬高架橋の製作では、東日本旅客鉄道(株)松田芳範氏、小林薫氏、および住友大阪セメント(株)の関係各位の御協力を頂きました。ここに記しまして深甚の謝意を表します。また、RC ラーメン模擬高架橋は、鉄道・運輸機構 基礎研究制度の研究プロジェクト(平成 21 年度採択課題 耐久性能検証技術の構築を柱とした RC 構造物群の合理的維持管理体系へのパラダイムシフト, 課題番号 2009-1, 代表者: 岸利治)により作製したこと、ならびに、本論文の一部内容は、2009 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)実構造物調査によるかぶり品質の実態把握と耐久性照査設計/竣工検査体系の高次融合, 課題番号 21246069, 代表者: 岸利治)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) 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
- 4) 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
- 5) 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)ー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ー, 電力中央研究所報告, 研究報告 N08081, 2009.8
- 6) 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