

15.3 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査に関する研究(2)

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）、
技術開発調整監付（寒地技術推進室）

研究担当者：島多昭典、三原慎弘、嶋田久俊、内藤 勲
吉田 行、遠藤裕丈、水田真紀
近藤晴義、渡辺淳、鈴木哲

【要旨】

本研究は、性能規定に対応した各種性能を長期に亘り保持する品質を確保するため、受け取り時に評価する検査方法と適切な施工標準を確立するものである。更にそれらの技術が活用され、現場での新技術の活用促進および構造物の品質向上が図られることで、長寿命化およびライフサイクルコストの縮減に寄与するものである。平成 26 年度は、出来上がりコンクリートの品質評価システムの提案に向け実施した品質検査技術として、表面吸水試験の適用性について検討した。その結果、表面吸水試験により湿潤養生期間が異なるコンクリートの品質を評価することが可能であり、コンクリート表面品質の比較的簡易な評価試験として適用性があることを示した。また、非破壊試験に及ぼす含水率の影響について検討し、実構造物への適用に当たっての課題や留意すべき事項を整理した。また、過年度の試験結果を整理して、コンクリート構造物が養生終了後すぐに厳しい凍・塩害環境下に曝される場合、材齢初期の凍害を防ぐ養生方法として、湿潤養生を十分に行った後、さらにコンクリートの含水率を低下させてから開放することを提案（養生方法選定フロー（案））した。

キーワード：性能規定、施工、品質管理、検査、養生

1. はじめに

現状のコンクリート構造物の検査は、各施工段階における材料やコンクリートの検査と、受け取り時には、出来型、表面の目視検査や強度試験等が行われているが、出来上がりコンクリートそのものの耐久性等の各種性能を直接的に検査する方法は確立されていない。一方、コンクリート構造物への要求性能の多様化に伴い、打込み、締固め、養生等の施工に起因したコンクリートの不具合に関する現場技術相談が非常に多くなっている。このため、受け取り検査時の各種性能を担保した品質検査等の充実や性能規定に対応した多様なコンクリートへの施工標準（養生方法等）の確立が強く求められている。

本研究では、竣工時における出来上がりコンクリートの耐久性等の品質を適切に検査できる検査方法を含めた品質評価システムの提案とともに、品質を確保するための施工性、施工方法、養生方法等に関する施工マニュアルを提案することを目的としている。耐寒材料チームでは、平成 26 年度は、出来上がりコンクリートの品質評価システムの提案に向けた品質検査の検討として、表面吸水試験の適用性について検討するとと

もに、各種非破壊試験に及ぼすコンクリートの含水率の影響に関する検討を行った。また、寒冷期施工時における材齢初期の凍害を防止するための養生方法について検討した。

2. コンクリートの配合と使用材料

後述する各試験で使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。配合条件は、過年度まで検討してきた水セメント比 50%を中心として、40%、60%についても検討を行い、単位水量は一定とした。セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3,320cm²/g、以下、普通セメント(N)と記述）と高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm³、比表面積 3,760cm²/g、以下、高炉セメント(B)と記述）の 2 種類を用いた。細

表-1 コンクリートの配合

| セメントの種類 | 水セメント比 W/C(%) | 細骨材率 s/a(%) | 単位量 (kg/m ³) | | | AE 減水剤 (C×%) | AE剤 (C×%) | スランプ (cm) | |
|---------|---------------|-------------|--------------------------|--------|-------|--------------|-----------|-----------|------|
| | | | 水 W | セメント C | 粗骨材 G | | | | |
| N | 40 | 42 | 145 | 290 | 779 | 1077 | 0.31 | 0.0018 | 10.1 |
| | 50 | 44 | | | 843 | 1074 | 0.25 | 0.0013 | 9.6 |
| | 60 | 46 | | | 900 | 1057 | 0.30 | 0.0008 | 8.5 |
| B | 40 | 42 | | | 775 | 1072 | 0.25 | 0.0045 | 8.2 |
| | 50 | 44 | | | 840 | 1070 | 0.20 | 0.0038 | 10.1 |
| | 60 | 46 | | | 898 | 1055 | 0.20 | 0.0033 | 9.3 |

骨材は、苫小牧樽前産の除塩された海砂（密度 2.67g/cm³、吸水率 0.87%、粗粒率 2.85）を、粗骨材は、小樽見晴産砕石（密度 2.67g/cm³、吸水率 1.80%、粗骨材最大寸法 25mm）を用いた。また、スランブと空気量を調整するために、AE 減水剤（リグニンスルホン酸塩系）と AE 剤（樹脂酸塩系）を用いた。目標スランブおよび目標空気量は、土木構造物で一般的な 8cm±2.5cm、4.5±1.0%とした。なお、実測のスランブおよび空気量の平均値は表-1 に併記した。

3. 出来上がりコンクリートの品質評価に関する検討

3.1 表面吸水試験の適用性に関する検討

養生条件の相違による出来上がりコンクリートの品質評価方法として、これまで超音波伝播速度測定、透気試験および電気抵抗率測定などの適用性について検討を行ってきた。平成 26 年度は、これらの検査技術に加え、塩害や凍害劣化の主要因となる水の影響の評価手法として、表面吸水試験の適用性について検討を行った。

3.1.1 養生条件と供試体の概要

表-2 にコンクリートの養生条件と吸水試験開始材齢を示す。養生温度は一般的な 20℃と低温養生を想定した 5℃の 2 水準を考慮し、材齢初期の湿潤養生期間は、コンクリート標準示方書施工編に示されている湿潤養生期間の標準¹⁾を考慮して、セメントの種類と養生温度の組合せに応じて 3、5、7、9、12 日からそれぞれ選定するとともに、材齢 28 日まで湿潤養生したケースも加えた。

なお、湿潤養生期間と試験開始材齢が同じものは、湿潤養生直後に試験を行ったケースであり、それらが異なるものは、所定期間湿潤養生した後に試験開始材齢まで各温度とも相対湿度 60±5%に制御された実験室内で気中養生を行った後、材齢 28 日から試験を実施したケースである。湿潤養生は、不織布製の養生マットを水道水で湿らせて供試体を覆う湿布養生とした。

図-1 に吸水試験用供試体の採取・整形方法を示す。吸水試験用の供試体は既往の研究²⁾を参考にして、150×150×530mm の木製型枠にコンクリートを打設し、所定期間湿潤養生を行った。養生は型枠存置のまま打設面を水道水で湿らせた不織布で覆い、湿潤養生期間終了の前日に脱型し、供試体側面からφ100×150mm のコアを採取した。なお、型枠には塗装合板を使用し、コンクリート剥離剤は使用していない。

採取したコアは速やかにコンクリートカッターで厚さ 50mm に 3 分割し、30 分程度試験体表面を自然乾

表-2 養生条件と吸水試験開始材齢

| セメントの種類 | 養生温度 | 湿潤養生期間 | 水セメント比 | 試験開始材齢 |
|--------------|------|-----------------|--------|--------|
| 普通ポルトランドセメント | 20℃ | 3日 | 40% | 3日 |
| | | | 50% | 28日 |
| | | 5日 | 50% | 3日 |
| | | | 60% | 28日 |
| | | | 50% | 5日 |
| | | | 60% | 28日 |
| | | 7日 | 50% | 7日 |
| | | | 50% | 28日 |
| | | 28日 | 40% | 28日 |
| | | | 50% | 28日 |
| | | | 60% | 28日 |
| | | または 高炉セメントB種 | 5℃ | 5日 |
| 50% | 28日 | | | |
| 7日 | 50% | | | 5日 |
| | 60% | | | 28日 |
| | 50% | | | 7日 |
| | 60% | | | 28日 |
| 9日 | 50% | | | 9日 |
| | 50% | | | 28日 |
| 12日 | 50% | | | 12日 |
| | 50% | | | 28日 |
| 28日 | 40% | | | 28日 |
| | 50% | | | 28日 |
| | 60% | 28日 | | |

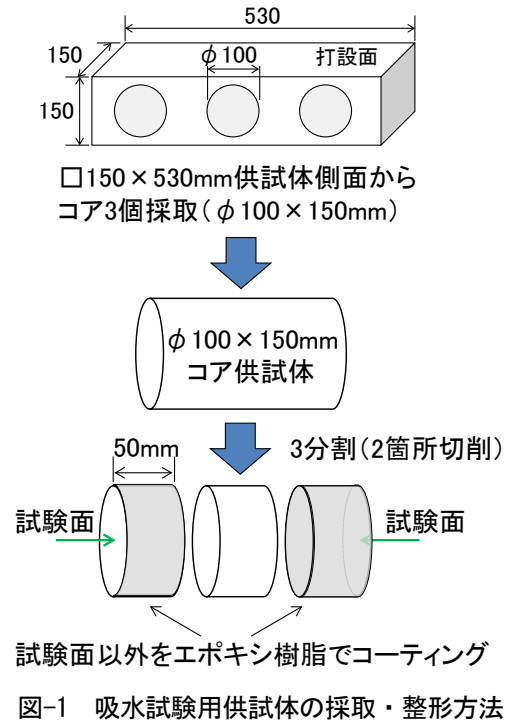


図-1 吸水試験用供試体の採取・整形方法

燥させた後、試験面以外をエポキシ樹脂でシールした。エポキシ樹脂の硬化後、各温度の水中に試験体を浸漬し、所定の湿潤養生期間となる翌日まで吸水させた。

3.1.2 表面吸水試験の概要

図-2に表面吸水試験の概略を示す。吸水面以外をエポキシコーティングした試験体が水中に約2mm浸漬するように静置した。なお、湿潤養生直後の試験体は飽水状態のため、養生終了直後から24時間、各温度の相対湿度60%の環境で自然乾燥させ、その後24時間吸水させた。

所定期間湿潤養生後に材齢28日まで気中養生を行った試験体については、気中養生直後から吸水試験を24時間実施するとともに、既往の研究²⁾を参考に試験前の含水調整も考慮して、24時間の吸水試験後に各温度とも相対湿度60%の環境で24時間自然乾燥させ、再び24時間吸水試験を行った。

吸水および自然乾燥時には、試験開始から1時間おきに6時間後までと24時間後に試験体の質量を0.1g単位まで測定した。

3.1.3 湿潤養生直後の試験体の吸水による質量変化

図-3に湿潤養生直後の試験体を24時間自然乾燥させた後、吸水を開始した試験体の質量変化を示す。なお、凡例の記号と数値表記は左から順に、セメント種類(N、B)、水セメント比(40~60%)、養生温度(20℃、5℃)、湿潤養生期間(3~28日)である。

吸水開始後1時間の質量変化は24時間吸水後の4

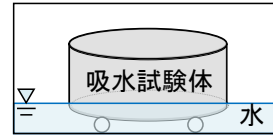


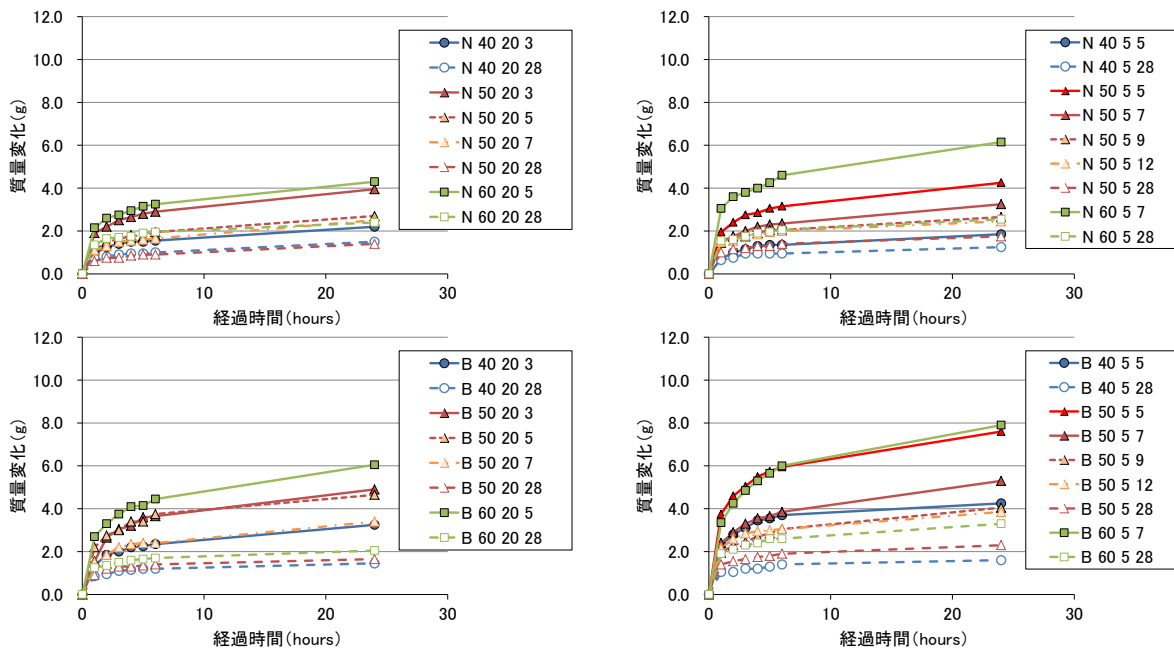
図-2 表面吸水試験の概略

割以上となり、その後も吸水時間の経過とともに増大し、セメントの種類や養生温度によらず、水セメント比が小さく湿潤養生期間が長いほど質量変化は小さいことが確認できる。また、配合が同じであれば、5℃養生の方が20℃養生よりも質量変化が大きく、養生条件が同じであれば高炉セメントは普通セメントより質量変化が大きくなったが、湿潤養生期間が長くなるといずれも差は小さくなることを確認した。

3.1.4 気中養生後の試験体の吸水による質量変化

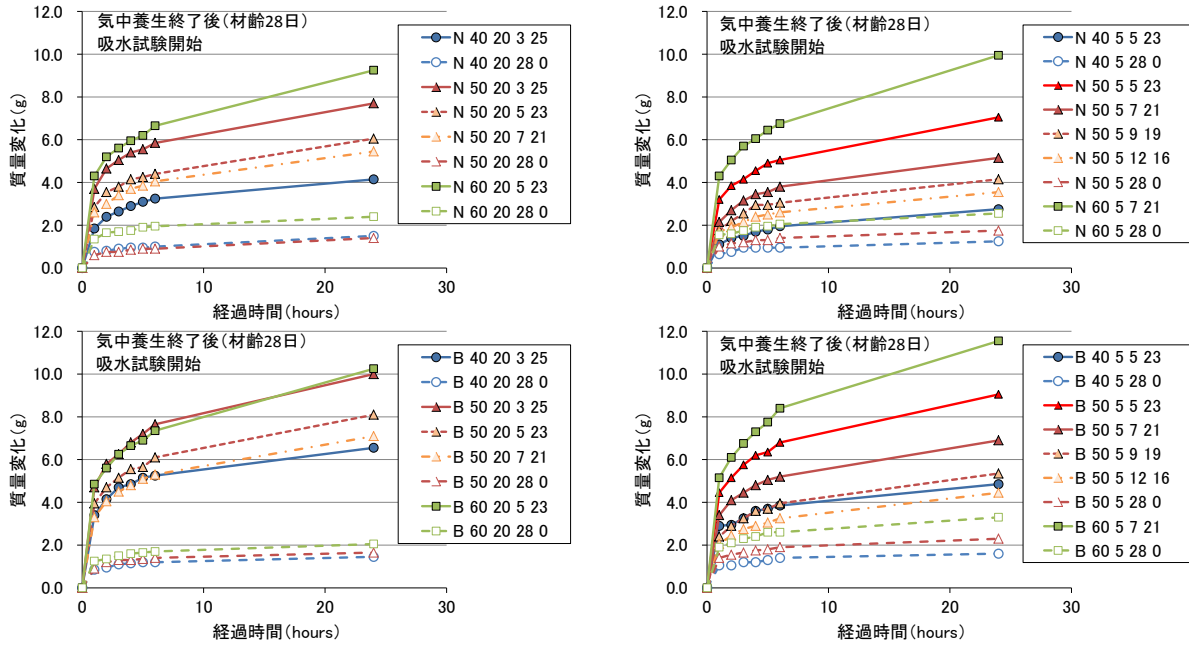
図-4に所定期間湿潤養生後に材齢28日まで気中養生を行い、その後吸水試験を開始した試験体の質量変化を示す。凡例は図-3の表記に加え、末尾に湿潤養生後の気中養生期間を示している。なお、比較のため材齢28日まで湿潤養生し気中養生を行っていないケースも併記している。

前節での試験体よりも乾燥の程度が大きいため、吸水による質量変化は大きいものの、水セメント比、湿潤養生期間およびセメントの種類と質量変化の傾向は同様であった。一方、養生温度では、一部の試験体で5℃養生の方が20℃養生よりも吸水が少ないケースが

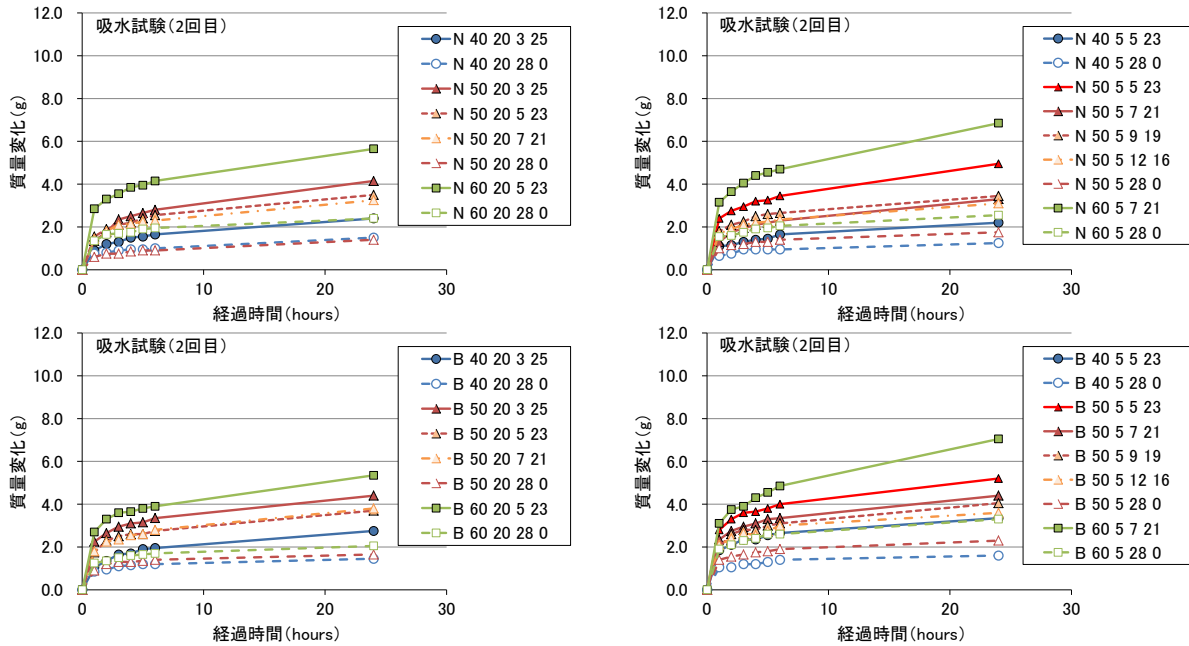


(凡例表記：左からセメントの種類(N,B)、水セメント比(%)、養生温度(20、5℃)、湿潤養生期間(日))

図-3 試験体の質量変化(湿潤養生直後24時間自然乾燥させ吸水開始)



(凡例表記：左からセメントの種類 (N,B)、水セメント比(%)、養生温度 (20、5°C)、湿潤養生期間 (日)、気中養生期間 (日))
図-4 試験体の質量変化 (所定期間湿潤養生後材齢 28 日まで気中養生を行い、その後吸水開始)



(凡例表記：左からセメントの種類 (N,B)、水セメント比(%)、養生温度 (20、5°C)、湿潤養生期間 (日)、気中養生期間 (日))
図-5 試験体の質量変化 (1 回目の吸水試験後に 24 時間自然乾燥させ再度吸水開始)

みられた。これは、5°C養生の方が 20°C養生よりも気中養生中に乾燥しにくく、吸水試験前の含水率が高かったことが影響していると考えられ、既往の研究²⁾においても、試験前の含水状態が吸水量に影響することが報告されている。

図-5 に 1 回目の吸水試験後に 24 時間自然乾燥させ、再度吸水試験 (2 回目) を行った結果を示す。1 回目の

吸水試験に比べて質量変化は小さくなったが、各種条件と質量変化の傾向は同様であり、養生温度の違いについても配合が同じであれば、20°C養生の方が 5°C養生よりも質量変化が小さかった。このことから、吸水試験前の含水状態を適切に調整することにより、コンクリート表層の品質評価が可能になると思われる。

3.1.5 品質評価への適用性評価

(1) 配合、養生条件と吸水量

前節の吸水試験結果と各種要因の比較を容易にするため、吸水面積を考慮した吸水率を算出し評価した。吸水量は式-1²⁾により算出した。

$$I_t = \frac{m}{a \cdot d} \quad (\text{式-1})$$

ここで、 I_t : 時間 t における吸水量(mm)、 m : 吸水開始から時間 t までの間の質量変化(g)、 a : 吸水面積(mm²)、 d : 水の密度(g/mm³)

図-6 に2回目の吸水試験結果から算出した各試験体の吸水量を示す。横軸の日数は湿潤養生期間を示している。いずれの吸水時間においても養生条件や配合の違いにより吸水率が異なる傾向が明確に示され、水セメント比の低減や湿潤養生日数の増加により吸水量が減少する傾向が確認できる。

図-7 に湿潤養生直後に吸水試験を実施した場合と、湿潤養生後に材齢 28 日まで気中養生した後に吸水試験を実施した場合の吸水量を示す。なお、湿潤養生後の吸水量は、湿潤養生終了後に 24 時間自然乾燥させてから測定を行っており、材齢 28 日の吸水量は、気中養生後 24 時間吸水試験を行い、終了後直ちに 24 時間自然乾燥させ、再度吸水試験を行った 2 回目の吸水量である。なお、図-6 と同様に、吸水 6 時間後の値で比較した。普通セメントでは、材齢 28 日の吸水量が少し大きくなる傾向がみられ、気中養生期間の乾燥の影響と推察されるが、両者の差は小さく、全体として表層の品質が気中養生期間では大きく変わらない結果が反映されていると考えられる。

図-8 にコンクリートの表層部と内部から採取した試験体の吸水量を示す。図は水セメント比 50%の材齢 28 日の試験結果を抽出したものである。なお、内部の試料とは、図-1 に示したコア試料を 3 分割したものの真ん中の試料であり、試験体切り出し後、表層試料と同様に 1 面以外をエポキシ樹脂でコーティングし、吸水試験の試験面となる開放面は材齢 28 日までビニールで密閉し封緘することによりコンクリートの内部の状況を再現した。

表層部と内部の吸水量の違いは明確であり、表層部は吸水量が多く、乾燥による品質低下の影響を受けやすいことが確認できた。

図-9 にコンクリート標準示方書施工編に示されている湿潤養生期間の標準とコンクリート表層部の吸水量を示す。図中丸で囲んだ部分のように、各セメントおよび養生温度に対応した湿潤養生期間の標準よりも

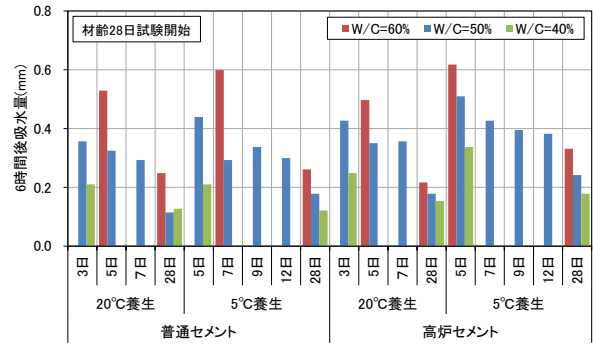


図-6 2 回目の吸水試験結果から算出した各試験体の吸水量

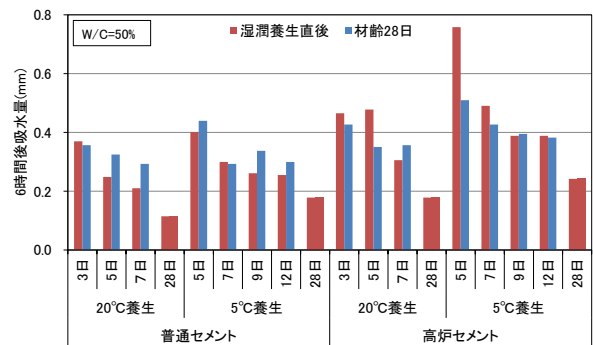


図-7 湿潤養生直後と材齢 28 日で実施した場合の吸水量

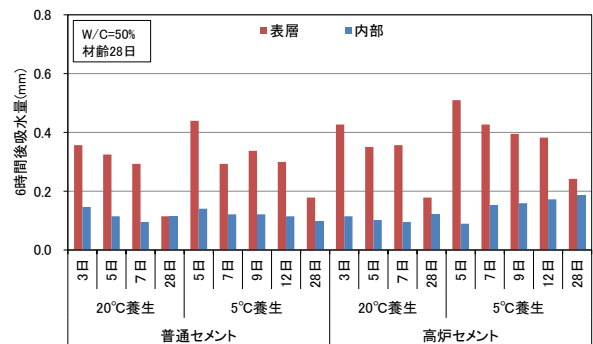


図-8 表層部と内部から採取した試料の吸水量

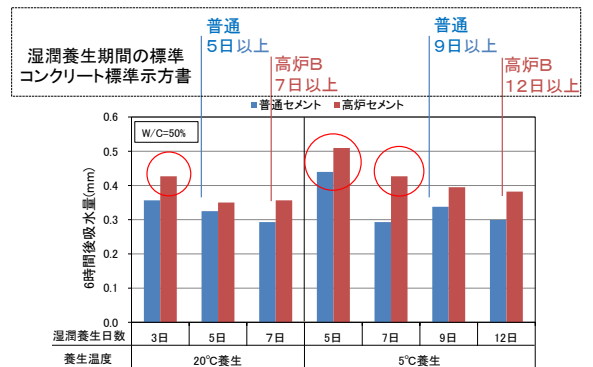


図-9 湿潤養生期間の標準日数と吸水量

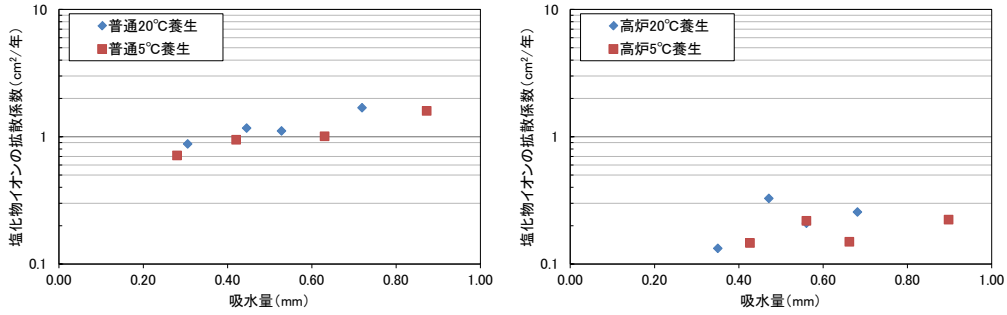


図-10 塩化物イオンの拡散係数と吸水量の関係

短い場合は吸水量が大きくなり、それ以降は変化が小さくなる傾向が確認できる。

(2) 塩化物イオンの拡散係数と吸水量

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、水を介して行われることから、塩化物イオンの浸透は吸水量と相関があると考えられる。そこで、一部の配合および養生条件について、JSCE-G571-2003 電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法(案)に準拠して実効拡散係数を求め、吸水量との関係を調べた。なお、実効拡散係数は土木学会コンクリート標準示方書に基づき見かけの拡散係数に変換して評価した。

図-10 に塩化物イオンの拡散係数と吸水量の関係を示す。普通セメントでは養生温度の違いによらず、吸水量の増加とともに塩化物イオンの拡散係数が大きくなる傾向が確認できる。一方、高炉セメントでは普通セメントよりも拡散係数が小さく、全体としては右肩上がりの傾向はあるものの、あまり明確とはならなかった。これは、高炉セメントでは、塩化物イオンの通りやすさを示す粗大な細孔の量だけでなく、その屈曲度や塩化物イオンの化学的固定などが影響するためそれらの相関が低くなったと推察される。

(3) 細孔容積と吸水量

コンクリートの吸水量とコンクリート表層部の細孔構造の関係を調べるために、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。なお、細孔の測定は、材齢28日で吸水試験用供試体と同じ試料の表層部5mm(開放面)から試料を採取して行った。

図-11 に各コンクリートの細孔容積を示す。耐久性との相関が高い細孔径50nm以上³⁾と以下の領域に分けて表示しているが、水セメント比が小さく湿潤養生期間が長いほど比較的粗大な細孔容積が増加する傾向が確認できる。

図-12 に比較的粗大な細孔容積と吸水量の関係を示す。いずれのセメントにおいても吸水量と細孔容積には高い相関があり、吸水量が多いほど細孔径50nm以上

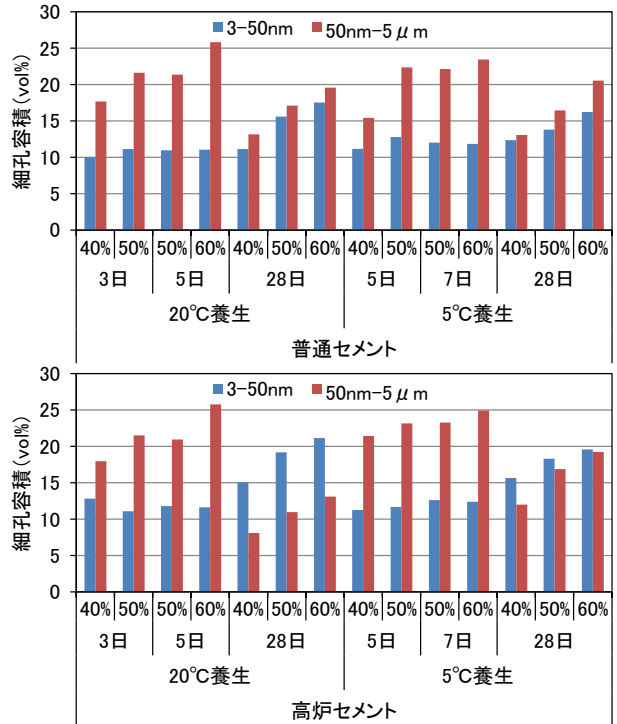


図-11 各コンクリートの細孔容積

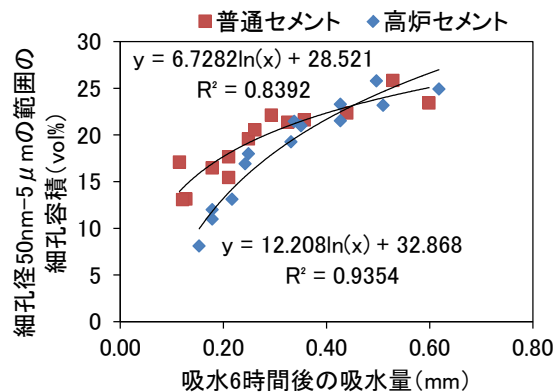


図-12 比較的粗大な細孔容積と吸水量の関係

の比較的粗大な細孔容積が多いことを確認できた。

以上から、本研究で検討した吸水試験は、養生や配合に起因するコンクリートの品質を評価できることが

明らかとなり、品質評価法としての適用性が示された。

3.2 非破壊試験に及ぼす含水率の影響に関する検討

出来上がりコンクリートの品質検査方法として、過年度までに超音波伝播速度測定や電気抵抗率測定などの適用性について検討してきた。その結果、養生が異なるコンクリートの表層品質の違いを相対的に評価することが可能であることを示すとともに、これら非破壊試験から得られる特性値は、いずれもコンクリートの含水率の影響を大きく受けることを明らかにしてきた。このため、非破壊試験に及ぼす含水率の影響について検討を行った。

3.2.1 養生条件と配合

過年度までの検討では、コンクリートの表層品質に及ぼす養生の影響を把握する観点から、湿潤養生期間が短い場合の影響を中心に検討を進めていたため、湿潤養生終了後の気中養生期間におけるセメントの水和の影響を排除できず、乾燥による含水率の変化の影響を直接的に評価することができなかった。このため、ここでは、十分に湿潤養生を行ったコンクリートを用いて、乾燥に伴う質量の変化と非破壊試験の特性値の関係を調べることとし、コンクリートの養生は材齢 56 日まで水中養生を行った。なお、検討したコンクリートは、表-2 に示した水セメント比 50%のみとし、水中養生は 20℃のみとした。また、水中養生後は、温度 20℃、相対湿度 60%に設定した実験室内に静置して測定を行った。

3.2.2 試験概要

(1) 超音波伝播速度測定

供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用い、図-13 のように打設面と型枠底面の両端を乾燥面として開放し、供試体周囲はアルミテープで被覆した。なお、供試体は開放面を横向きに静置して乾燥させた。超音波伝播速度は、打設面から 10mm 刻みに 190mm まで直径方向に透過することにより測定した。測定は水中養生終了後に初期値を測定し、含水率の変化が大きい乾燥初期 (4 日) は 1 日刻みで、その後は乾燥 7、14、21、28 日まで測定した。併せて、供試体の質量変化と静電容量式の表面含水率計により開放面の含水率変化を測定した。なお、試験体の乾燥の影響は打設面の方が型枠底面より大きいと考えられるが、打設面は凹凸があり含水率計が密着しなかったことから、型枠底面でのみ表面含水率を測定した。評価は供試体 3 個の平均で行った。

(2) 電気抵抗率測定 (4 プローブ法)

コンクリートの電気抵抗率は 4 プローブ法 (Wenner

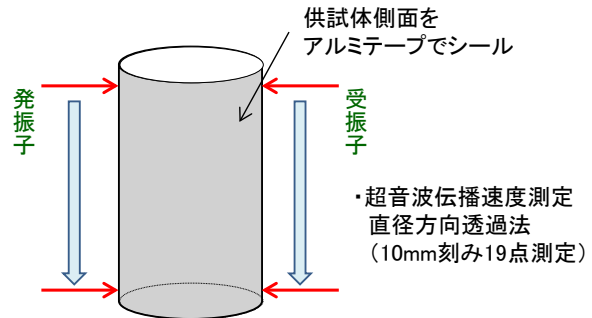


図-13 超音波伝播速度測定用供試体の概要

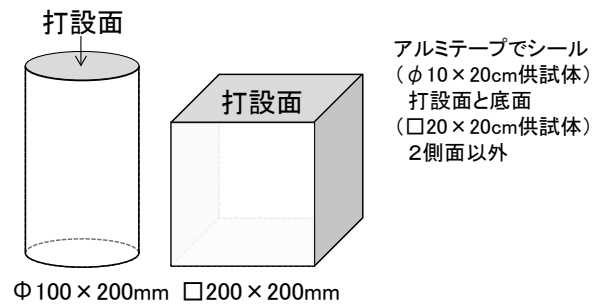


図-14 電気抵抗率測定用供試体の概要

法)⁴⁾により測定した。測定には、AASHTO の規格⁵⁾に適合した市販の表面電気抵抗計を用い、電極の先端には電解質としてゲル状物質 (水 : 塩 : カルボキシメチルセルロース=94 : 3 : 3) を浸透させた導電性スポンジを取り付けた。電極間隔は 50mm 間隔とした。供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体と $200 \times 200 \times 200\text{mm}$ の角柱供試体を用い、図-14 に示すように、円柱供試体は電極を押し当てる関係から、打設面と型枠底面をアルミテープでシールして供試体周囲を開放し、側面の対面する 2 箇所測定した。角柱体供試体は、型枠側面の 2 面を開放、その他 4 面をアルミテープでシールし、開放面の上段 (打設面側)、中段、下段 (型枠底面側) の 3 箇所それぞれ測定した。

3.2.3 超音波伝播速度に及ぼす乾燥の影響

図-15 に円柱供試体の表面含水率および質量変化と乾燥日数の関係を示す。

表面含水率はバラツキが見られるものの、いずれのセメントも乾燥 7 日程度まで急激に低下し、その後はほぼ一定となった。他方、質量変化は乾燥 7 日までの変化は大きい、その後も質量は減少した。このことから、静電容量式の表面含水率計による含水率は、コンクリートの極表層の質量変化を示していると考えられ、この傾向は過年度の試験結果とも一致していた。

なお、高炉セメントの方が普通セメントよりも質量変化が小さいのは、56 日間水中養生を実施したことに

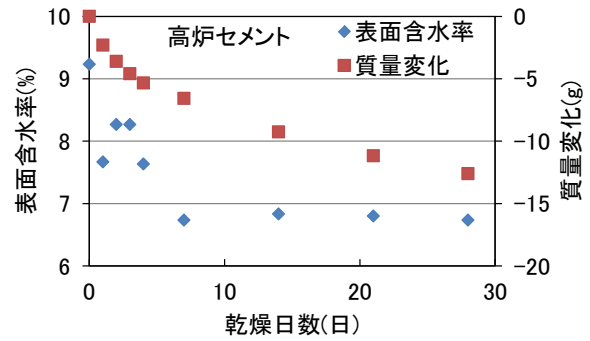
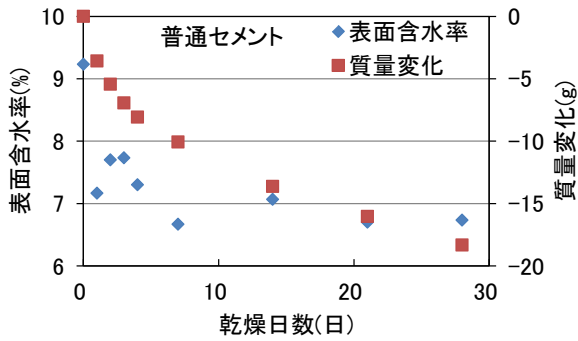


図-15 表面含水率および質量変化と乾燥日数の関係 (超音波測定用供試体)

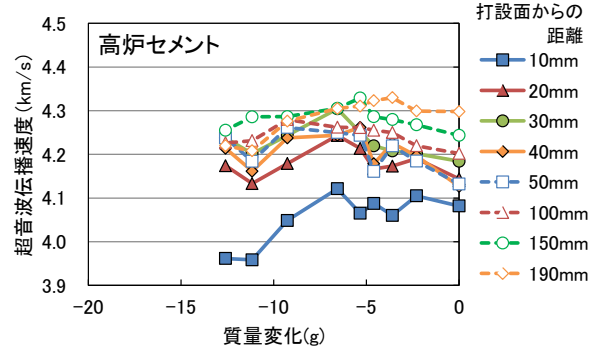
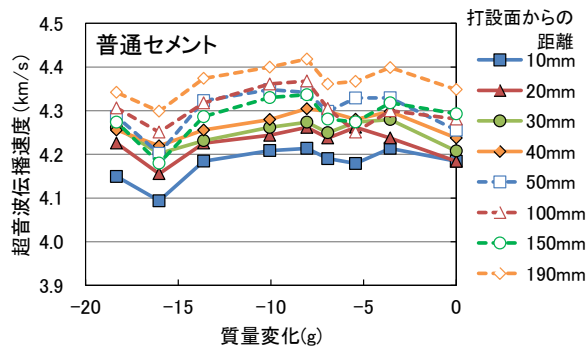


図-16 超音波伝播速度と質量変化の関係

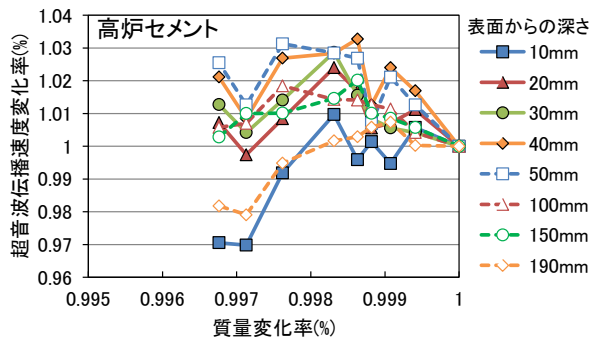
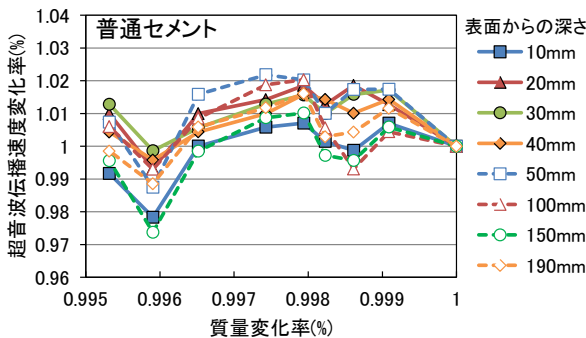


図-17 超音波伝播速度の変化率と質量変化率の関係

より、コンクリートの組織構造が緻密になり、乾燥しにくくなったためと考えられる。湿潤養生期間が短い場合には、この傾向は逆転するため、高炉セメントでは特に養生が重要であるという既知の事実が確認できる。

図-16 に超音波伝播速度と質量変化の関係を示す。凡例は打設面からの距離を示しており、一部抜粋して示している。データにバラツキがあり両者の関係は判然としなかった。一方、供試体の高さ方向では、明らかに打設面に近いほど超音波伝播速度は小さく、これはブリーディングによる高さ方向の品質の違いと考えられる。

含水率の変化による影響が判然としなかったことから、初期値を基準とした各変化率の関係を図-17 に示す。高炉セメントでは特に明確であるが、開放面である両端に近い、深さ 10mm と 190mm は質量が減少すなわち乾燥に伴い超音波伝播速度が低下することが確認できた。しかしながら、供試体ボリュームに対する開放面積が比較的小さく、材齢 56 日まで水中養生を行った供試体の質量変化が測定期間内では小さかったため、含水率の影響を補正するための関係を明示するには至らなかった。

3.2.4 円柱供試体の電気抵抗率に及ぼす乾燥の影響

図-18 に円柱供試体の質量変化と乾燥日数の関係を

示す。超音波用供試体に比べて開放面積が大きい
ため質量変化は大きい、いずれも材齢7日までの
質量減少は大きく、水中養生期間が長いこと
により高炉セメントの方が質量変化は小さ
かった。

図-19 に円柱供試体による電気抵抗率と乾燥日数の
関係を示す。一般的な評価としては、電気抵抗
率が大きいほど品質が高く、特に塩化物イオン
に対する抵抗性が高いとされる。いずれのセメ
ントも乾燥日数の増大とともに電気抵抗率が
増大しているが、供試体は材齢56日まで中
養生後に乾燥させている状況であることを考
慮すると、乾燥により電気抵抗が大きくなっ
たためと考えられる。

図-20 に電気抵抗率の変化量と質量変化率の
関係を示す。いずれも2次関数による近似曲
線を示しているが、電気抵抗率の変化量と質
量変化率は高い相関があり、電気抵抗率は含
水率の影響を大きく受けることを確認した。

3.2.5 角柱供試体の電気抵抗率に及ぼす乾燥の影響

図-21 に角柱供試体の表面含水率および質量
変化と乾燥日数の関係を示す。表面含水率の
変化は質量変化よりも乾燥初期に急激に低下
し、6%程度で収束する傾向を示した。この
傾向は、図-15 に示した超音波用供試体と同
様の傾向である。なお、表面含水率は上段、
中段、下段で測定値に若干開きがあり、打設
面に近い上段ほど値が大きい。ブリーディン
グによる上下の品質の違いを考慮すると、上
部ほど比較的品質は低く含水率の変化が大き
くなると考えられるが、逆の傾向を示した。
一方、測定に使用した表面含水計は、コンク
リートの細孔内の自由水と相関が高く、水和
が進み細孔が緻密なほど見かけ上の含水率は
小さくなる傾向が過年度の試験でも確認され
ている。これによれば、下段ほど品質が高く
見かけ上の含水率が小さくなったことが考え
られる。このように、静電容量式の表面含水
計は、コンクリートの極表層部の水分変化の
影響が高く、測定する部位によっても値が異
なるため、コンクリートの含水率の評価に当
たってはこれらについて留意する必要がある。

図-22 に角柱供試体の電気抵抗率と乾燥日
数の関係を示す。いずれも乾燥日数の増加に
伴い電気抵抗率は増加する傾向を示したが、
円柱供試体よりもその変化は小さかった。こ
れは、供試体ボリュームと開放面積が影響し
ていると考えられる。

また、上段と中段の測定値はほぼ同じだっ
たが、下段の値が大きく、ブリーディング等
による上下方向の品質の違いが示された可
能性があり、上記で下段の含

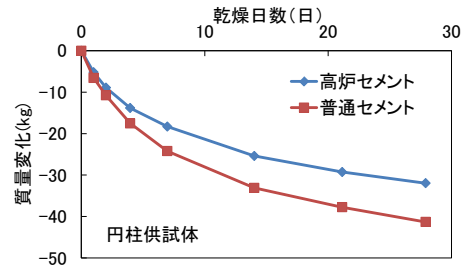


図-18 円柱供試体の質量変化と乾燥日数の関係

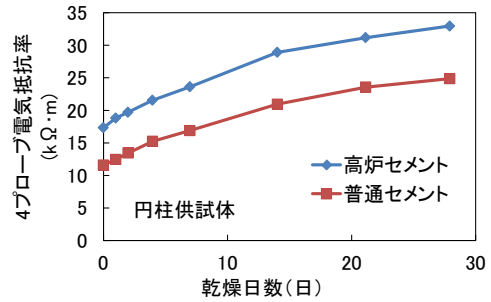


図-19 電気抵抗率と乾燥日数の関係

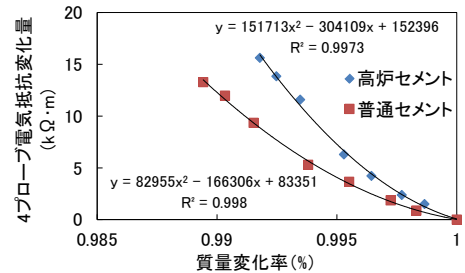


図-20 電気抵抗変化量と質量変化率の関係

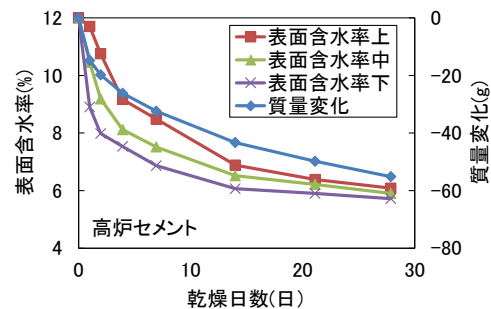
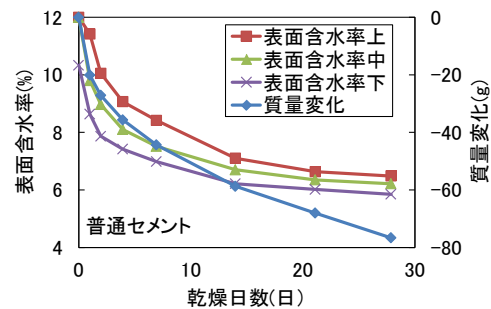


図-21 角柱供試体の表面含水率および質量変化と

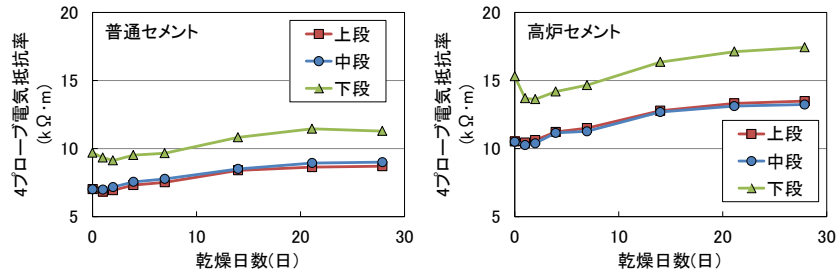


図-22 角柱供試体の電気抵抗率と乾燥日数の関係

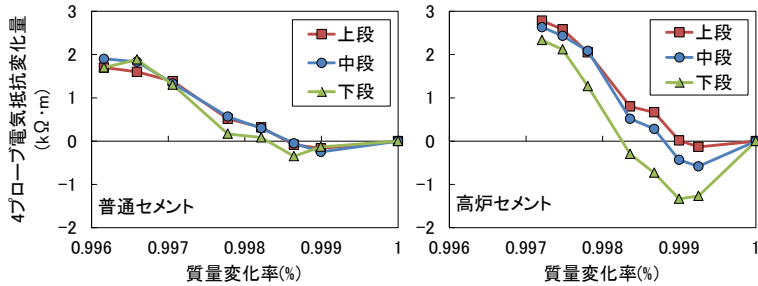


図-23 角柱供試体の電気抵抗率変化量と質量変化率の関係

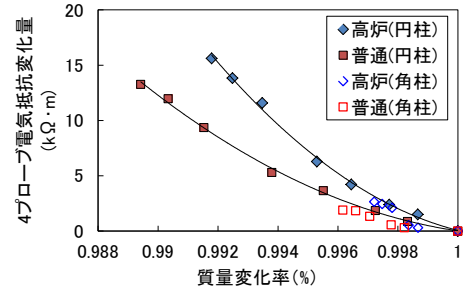


図-24 円柱と角柱供試体による評価

水率が小さくなったことに対する推察とも対応する。このことから、電気抵抗率により相対的な品質の違いを評価できる可能性をあらためて確認することができた。

図-23 に角柱供試体の電気抵抗率変化量と質量変化率の関係を示す。乾燥初期に電気抵抗率が減少したものの、その後は質量の低下、すなわち乾燥により電気抵抗率が増加した。乾燥初期にみられた挙動の原因については特定できなかった。

図-24 は図-20 に示した円柱供試体の関係に角柱供試体中段の結果を加えたものである。角柱供試体の乾燥初期に電気抵抗率が減少したため円柱供試体よりも変化量は低めだが、傾向は概ね一致しており、初期の電気抵抗率の低下原因を解明することにより、形状が異なる場合でも補正して評価できる可能性がある。

以上から、電気抵抗率により相対的にコンクリートの品質を評価することができると考えられるが、実際の構造物のような様々な形状や環境条件が異なる場合に、一様な基準により品質を評価するには、さらにデータを蓄積する必要がある。

3.2.6 非破壊試験の適用性に関するまとめ

以上の結果と過年度までの成果から、非破壊試験である超音波伝播速度測定、電気抵抗率測定および透気試験により、コンクリートの品質を相対的に評価することができると考えられるが、実際の構造物の各種品質または性能を、絶対的な指標により評価するには、

含水率の影響やバラツキを排除する必要がある、さらなるデータの蓄積が必要である。また、試験機器を実環境下で使用する場合、試験機器自体の温度適用範囲が定められており、特に低温環境下での使用は制限が多いため留意する必要がある。また、透気試験や表面含水率測定など、コンクリート表面への密着性が求められる場合には、コンクリート表面の凹凸や形状（丸みを帯びている等）により正確な測定ができないことがあるため、留意する必要がある。

4. 性能規定に対応した施工マニュアルの提案

4.1 養生と物性および耐久性

これまで、性能規定に対応した養生とコンクリートの物性および耐久性について検討してきた。

コンクリートの圧縮強度は、湿潤養生期間が長くなるほど圧縮強度は増加し、湿潤養生の重要性を確認した。特に高炉セメントは養生温度の影響が大きく、低温環境下ではより長い養生が必要なことをあらためて確認することができた。

耐久性については、中性化に対する抵抗性は、圧縮強度と同様、湿潤養生期間が長いほど抑制効果があることを確認した。

一方、塩分浸透抵抗性や凍結融解抵抗性などの耐久性については、これらの性能を評価する試験において水を介するため、性能評価の試験中にも養生の影響を受け、所定期間湿潤養生することにより確保できる耐

久性のレベルを必ずしも示すことはできなかった。しかし、基本的には、湿潤養生期間を長くすることでこれらの性能も向上することを確認した。定性的ではあるが、養生とコンクリートの性能について整理したものが表-3である。なお、中性化や塩害に対する耐久性は、細孔構造などの物理的な性質だけでなく、セメントの種類に起因する化学的作用が影響することに留意する必要がある。

また、凍結融解抵抗性については、表-3にも示したように、凍結融解作用を受ける時のコンクリートの含水率が大きく影響し、図-24 に示した一例（湿潤養生直後に凍結融解試験を開始）のように、湿潤養生期間を長くしただけでは必ずしも耐久性を確保できないことを確認した。

4.2 寒冷期施工時における材齢初期の凍害を防止するための養生方法の提案

前節で示したように、強度、中性化、塩分浸透などは湿潤養生期間の影響を受け、湿潤養生期間を長くしてコンクリートの細孔構造を緻密にすることにより向上することを確認している。一方、凍結融解抵抗性は細孔構造だけでなく、コンクリートの含水率に大きく依存するため、特に寒冷期の施工において、含水率が高い状態で養生終了後直ぐに過酷な環境に曝されると、材齢初期に凍害を受ける可能性が高くなり、長期的な耐久性に大きく影響することとなる。

このため、寒冷期施工における材齢初期の凍害を防止するには、湿潤養生期間を十分に確保した上で、養生を開放するまでにコンクリート表面の含水率を一定程度下げる必要がある。本研究では、これらを考慮し、寒冷期施工時における材齢初期の凍害を防止するための養生方法（案）を提案した。

図-25 は提案した養生方法（案）であるが、コンクリート構造物が曝される状況に応じて養生方法を選定することとした。最初の選定条件は、養生開放直後にコンクリート表面が水で飽和される頻度であり、頻度が低い場合には、土木学会コンクリート標準示方書施工編の寒中コンクリートに示されている養生方法と同様の扱いにすることとした。なお、水で飽和される頻度が高いものの目安は、コンクリート標準示方書設計編の記述を参考に、水路、水槽、橋台、橋脚、擁壁、トンネル覆工等で水面に近く水で飽和される部分、およびこれらの構造物の他、桁、床版等で水面から離れてはいるが、融雪、流水、水しぶき等のため、水で飽和される部分などが相当する。

養生開放直後にコンクリート表面が水で飽和される

表-3 養生条件が異なる場合のコンクリートの性能

| 要求性能 | セメントの種類 | コンクリートの性能 | | | | |
|---------------|---------------|-----------|----|--------|----|---|
| | | 養生温度 | | 湿潤養生期間 | | |
| | | 低温 | 標準 | 短い | 長い | |
| 圧縮強度、静弾性係数 | 普通セメント | △ | ○ | △ | ○ | |
| | 高炉セメント | × | ○ | × | ○ | |
| 耐久性 | 中性化抵抗性 | 普通セメント | △ | ○ | △ | ○ |
| | | 高炉セメント | × | △ | × | △ |
| | 塩分浸透抵抗性 | 普通セメント | △ | ○ | △ | ○ |
| | | 高炉セメント | ○ | ◎ | ○ | ◎ |
| | 凍結融解抵抗性(高含水率) | 普通セメント | △ | ○ | △ | ○ |
| | | 高炉セメント | △ | △ | △ | × |
| 凍結融解抵抗性(低含水率) | 普通セメント | ○ | ◎ | ○ | ◎ | |
| | 高炉セメント | ○ | ○ | ○ | ○ | |

性能: ◎優、○良、△要求性能レベルにより判断、×不良

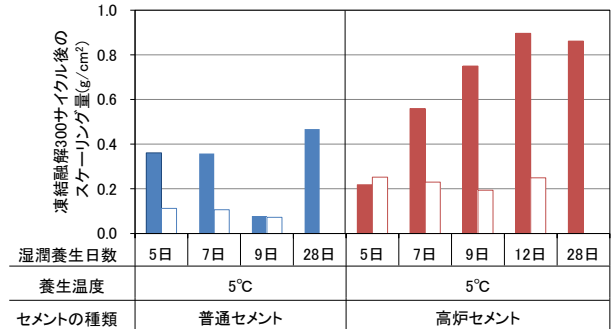


図-24 凍結融解 300 サイクル後のスケールング量 (ASTM C672 に準拠)

頻度が高い場合、次のステップとして、供用時に塩化物が作用する環境か否かで選定することとした。塩化物が作用しない場合、基本的には上記と同様、寒中コンクリートに示されている養生方法と同様の扱いとするが、その場合でもコンクリート強度だけで養生期間を判断せず、コンクリート標準示方書の養生の章に示されている湿潤養生期間の標準を確実に確保することとした。

塩化物が作用する環境は凍害劣化に対して最も過酷な環境となることから、湿潤養生期間を十分に確保した上で、さらに養生囲い内で一定期間気中養生を行い、コンクリート表面の含水率を低下させた後に養生を開放することとした。湿潤養生後の気中養生は、10°C未満の比較的溫度が低い場合には、十分な乾燥が得られずその効果がなくなることが室内実験で確認されていることから、養生温度の目安として10°C以上とし、乾燥期間の目安は10~15日程度とした。また、気中養生中の温度が高すぎると、急激な乾燥による収縮ひび割れの可能性や、養生開放後の温度差による温度ひび割れの影響が懸念されるため、その上限を20°Cとした。

なお、上記で示した乾燥期間の目安は、相対湿度 60 ± 5% に制御された室内での試験結果に基づき提案したものである。このため、気中養生時には、温風などが直接コンクリート表面に当たらないなどの工夫が必

15.3 性能規定に対応したコンクリート構造物の
施工品質管理・検査に関する研究(2)

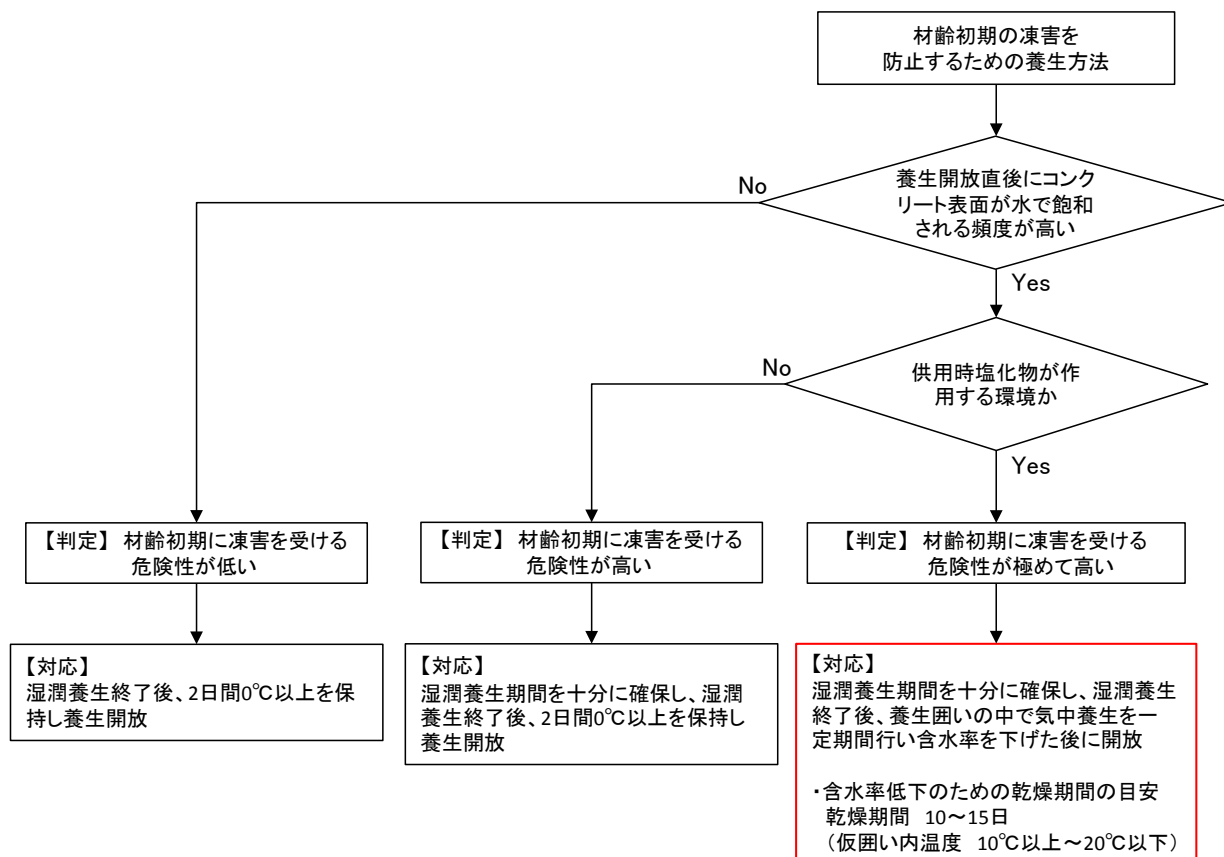


図-25 寒冷期施工時における材齢初期の凍害を防止するための養生方法 (案)

要であるとともに、気中養生中の養生囲い内の湿度が極端に低くなると、急激な乾燥による収縮ひび割れが懸念されるため留意が必要である。

害を防ぐ養生として、湿潤養生を十分に行った後、コンクリートの含水率を低下させてから開放する方法（養生方法選定フロー（案））を提案した。

5. まとめ

出来上がりコンクリートの品質評価システムを提案するための検討として、表面吸水試験と各種非破壊試験の適用性について検討を行った。また、寒冷期施工時における材齢初期の凍害を防止するための養生方法について検討した。これらの成果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 表面吸水試験により、養生や配合に起因するコンクリートの品質を評価できることを確認し、品質評価法としての適用性があることを示した。
- (2) 各種非破壊試験法によりコンクリートの品質を相対的に評価できることを確認するとともに、実際の構造物に適用するための課題や留意事項を整理した。
- (3) コンクリートの品質を高めるには、材齢初期の湿潤養生を十分に行うことの重要性を示すとともに、コンクリート構造物が養生終了後すぐに厳しい凍・塩害環境下に曝される場合の材齢初期の凍

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]、pp.121-125、2013.3
- 2) 古賀裕久、渡辺博志、河野広隆：表面吸水試験を行う試料の含水状態調整について、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集、第14巻、pp.411-416、2014.10
- 3) セメント協会：わかりやすいセメント科学、pp.78-104、1993.3
- 4) 土木学会：土木学会基準として制定が望まれる試験方法の動向ーコンクリートの性能評価を可能とする新しい基準体系とはー、コンクリート技術シリーズ 84、pp.108-113、2009
- 5) American Association of State Highway and Transportation Officials：Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, AASHTO Designation: TP 95-11

A STUDY ON THE PERFORMANCE-BASED QUALITY CONTROL AND INSPECTION METHODS FOR THE CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2014

Research Team : Materials Research Team,

Cold Region Technology Promotion Division

Author : SHIMATA Akinori, MIHARA Norihiro,

SHIMADA Hisatoshi, NAITO Isao,

YOSHIDA Susumu, ENDO Hirotake,

MIZUTA Maki, KONDOU Haruyoshi,

WATANABE Jun, SUZUKI Satoshi

Abstract : The purposes of this study included the establishment of a method to evaluate quality for the long-term performance of various functions after construction, the creation of construction procedure manuals applied to performance-based design, and through such activities, work toward the on-site introduction of new technologies, improved quality of structure and reduced life-cycle cost. In FY2014, in order to propose the inspection methods of the quality of concrete structure, the applicability of surface absorption test was examined. The results showed that the quality of concrete with different wet curing duration was evaluated by using this test, and it was applicable as a quality inspection method of concrete surface. Besides, the influence of water content of concrete on the test results measured by non-destructive tests was examined. From the results, it was confirmed that the test values varied by water content of concrete. And we also suggested points of concern to apply those methods to actual structures. Moreover, considering the test results which were examined previous year, we proposed the curing method of concrete to prevent frost damage at the early material age in winter period.

Key words : performance-based, construction, quality control, inspection, curing