

初期欠陥を模擬したコンクリート供試体の表層品質とスケーリング抵抗性

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 山内 稔
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

コンクリート構造物の長期的な耐久性を確保するには、施工時に生じる初期欠陥を防止し、コンクリートの表層品質を高める必要がある。本研究では、初期欠陥が耐久性に与える影響の把握と表層品質評価手法の提案を目的に、初期欠陥を模擬したコンクリート供試体を用いてスケーリング試験や表層透気試験、表面吸水試験を実施し、初期欠陥防止が長寿命化に繋がること、および非破壊試験による表層品質評価の可能性と課題を確認した。

キーワード：初期欠陥、表層品質、スケーリング、非破壊試験

1. はじめに

今後増大する社会资本ストックの維持管理費軽減の観点から、コンクリート構造物の新設・更新にあたっては、コンクリートの品質向上による高耐久化が喫緊の課題となっている。特に、劣化を助長する塩分、ガス、水分などの劣化因子はコンクリート表層から侵入するため表層品質の確保は極めて重要であるが、施工段階で初期ひび割れや充填不良等の不具合が生じれば劣化因子が侵入しやすくなり、コンクリート構造物の早期劣化の可能性が高まる。このため、国土交通省では、平成29年度からコンクリートの初期欠陥の抑制と表層品質向上を目指す試行工事を全国各地で現場を選定して実施している。

試行工事では、施工上の不具合を防止し、均質かつ密実なコンクリート構造物となるように、施工の基本事項を抽出してまとめた施工状況把握チェックシート¹⁾を用いて施工が適切に行われているかを確認している。併せて、型枠脱型後にコンクリート構造物の表層品質を簡易に把握するために、沈みひび割れ、表面気泡、打重ね線を目安に評価する打重ね状況、型枠継ぎ目のノロ漏れ、砂すじ等を不具合対象としてそれらの状況を目視で点数づけする表層目視評価¹⁾も行われており、改善すべき点があれば次のリフトまたはスパンで対策を講じて改善する取組みが行われている。

他方、品質向上のために施工上留意すべき項目は多岐にわたるが、具体的な品質向上対策や施工時の工夫は現場毎に実施されており、効率的に品質向上を図るにはこれらの体系的な整理が必要である。また、表層目視の評価項目として分類されている沈みひび割れ等の不具合は、冒頭述べたように劣化を助長すると考えられるが、構造物の耐久性にどの程度影響するかについては必ずしも

明らかになっていない。加えて、目視による評価手法は定性的な評価方法であり、評価者の経験等により評価点が異なる可能性があることから、品質向上対策の効果を把握するには原位置における簡易で定量的な品質評価手法の確立が必要である。

本研究では、新設・更新時のコンクリート構造物の施工時における品質向上対策および表層品質評価手法の確立を目的として、初期欠陥が耐久性に与える影響と、表層品質評価試験として表層透気試験や表面吸水試験の適用性について検討した。

2. 耐久性に及ぼす初期欠陥の影響

(1) 模擬供試体の作製

初期欠陥が耐久性に与える影響を把握するために、初期欠陥を模擬した供試体を作製した。初期欠陥として、表面気泡とコールドジョイントを選定した。表面気泡は、コンクリート打込み後の締固め不足や型枠外面からのたたき不足により脱型後の型枠面に残存する不具合である。また、コールドジョイントは、打重ね時間間隔が不適切だったり、打重ね上下層の締固めが不十分で一体化しない場合に生じる不具合である。模擬供試体は、小型供試体と壁供試体の2種類作製した。

図-1に各供試体の型枠形状を示す。小型供試体は、内寸200×300×100mm、壁供試体は、同600×600×100mmの木製型枠（塗装合板使用）を立てて2層に分けてコンクリートを打込み、各層でバイブレータによる締固め

（2層目打込み時には1層目にもラップするようにバイブルエタで締固めを実施）と、型枠面の気泡や空隙を抑制するためにスペーディング処理したものを標準として作製した。なお、スペーディングとは、型枠に打込んだコ

ンクリートとコンクリートに接する型枠側面の間に板状の金ゴテ等を差込み、型枠内面に沿ってコテを上げ下げしながら横移動させる作業であり、これにより供試体表面の気泡や空隙が減少し平滑に仕上がる。表面気泡供試体は、上記の工程からスペーディング処理を省略した。コールドジョイント供試体は、型枠高さの半分（小型供試体15cm、壁供試体30cm）まで標準と同様に打込みと締固めを行った後そのまま放置し、3時間後に再度コンクリートを練り混ぜて1層目上面のブリーディングやレイタンスを除去せずに型枠上面まで打込み作製した。コンクリート打込み後は、打込み面からの乾燥を防ぐためにシートで覆い、国土交通省の道路・河川工事仕様書の湿潤養生期間の標準を参考として、温度20°C、相対湿度60%に設定した実験室内に型枠のまま静置し、普通セメントは5日、高炉セメントは7日で脱型してそのまま実験室に存置した。

コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント）と高炉セメントB種（以下、高炉セメント）の2種類を用い、水セメント比は55%とした。細骨材は苫小牧市樽前産の陸砂（密度2.64g/cm³、吸水率1.47%）を、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（密度2.68g/cm³、吸水率1.66%）を用いた。コンクリートの目標スランプは12.0±2.5cm、空気量は初期欠陥からの劣化に着目するため、空気量不足による凍害が生じにくくように5.0±1.0%に設定した。なお、表-1には実測のスランプと空気量を示しているが、各供試体作製時の練混ぜ4バッチ分の平均値で示している。

（2）スケーリング試験方法

供試体表面の欠陥が耐久性に及ぼす影響を確認するために、ASTM C672に準じてスケーリング試験を実施した。試験は材齢28日に開始し、縦打ちで作製した小型供試体を横倒しにして、図-2に示すように欠陥が生じている型枠面に土手を設けて試験水（3%NaCl水溶液）を湛水し、-18°Cを16時間、23°Cを8時間の1日1サイクルで凍結融解作用を与えた。試験は2供試体で行った。

（3）小型供試体によるスケーリング試験結果

図-3に小型供試体のスケーリング量を2供試体の平均値で示す。なお、凡例は配合記号と供試体表面の状況（初期欠陥の状況）を組み合わせており、CJはコールドジョイントを表している。なお、ASTM C672の試験規格では、凍結融解50サイクルでスケーリング評価を行うが、本研究では初期欠陥の影響がより明確になることを想定し300サイクルまで凍結融解作用を与えた。

既往の研究でも報告されているが²⁾、スケーリング量はセメントの種類により大きく異なり、普通セメントはスケーリング量が極めて少なく、高炉セメントは凍結融解初期に増大したがその後の変化は小さかった。供試体表面の違いによる差は小さいがセメント毎みると、普

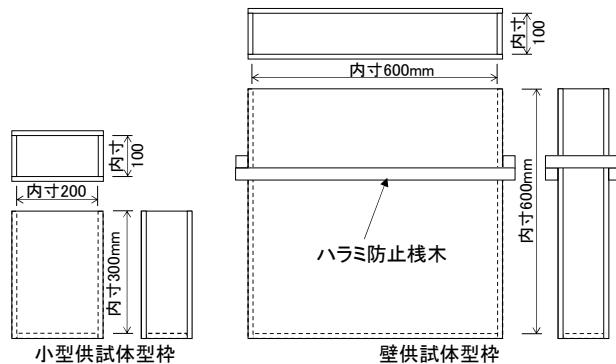


図-1 供試体の型枠形状

表-1 コンクリートの配合

| 配合 (記号) | W/B (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | スランプ (cm) | 空気量 (%) |
|------------|------------|------------|-------------------------|-----|-----|------|-------|--------|--------------|------------|
| | | | C | W | S | G | AE減水剤 | AE助剤 | | |
| N55 | 55 | 45 | 282 | 155 | 839 | 1040 | 0.282 | 0.0127 | 13.0 | 5.3 |
| B55 | | | | | 835 | 1036 | 0.282 | 0.0212 | 13.3 | 5.8 |

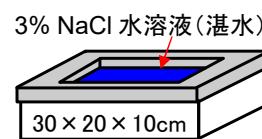


図-2 スケーリング試験供試体

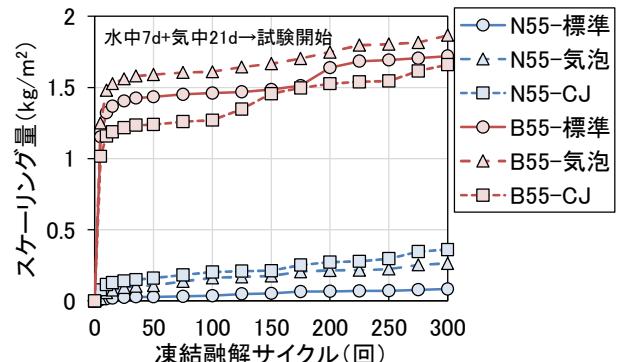


図-3 小型供試体のスケーリング量

通セメントでは、標準のスケーリングが最も少なく、気泡、CJの順に多かった。一方、高炉セメントでは、凍結融解初期からCJが最も少なく、標準、気泡の順に多くなり、CJは凍結融解125サイクルで、標準は200サイクルで一時的に増加傾向がみられたが順位は変わらなかった。

図-4に実際にスケーリング試験を実施した小型供試体の試験開始前、凍結融解50サイクル後および300サイクル後の表面状況の一例を示す。高炉セメントは、最初にスケーリング量を測定した5サイクル時点で表面劣化が大きかったため、初期欠陥の有無による表面剥離の差異を確認できなかったが、スケーリングが少ない普通セメントでは表面劣化に特徴があり、表面気泡が多い供試体は凍結融解作用により気泡周辺から劣化が進行している状況がみられる。また、CJ模擬供試体については、試験開始前の供試体中央高さ部分に線状の跡がみられるもの

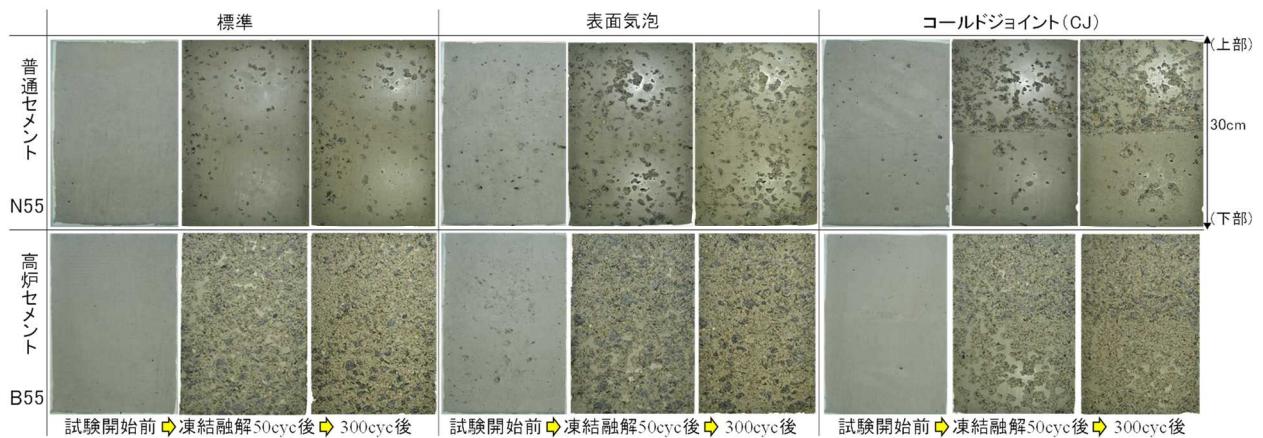


図-4 凍結融解前後の小型供試体表面状況

の明確なコールドジョイントは再現できなかったため、欠陥からの劣化の進行はみられなかつたが、後打ちした上部のコンクリート表面のスケーリング劣化が大きいことが確認できる。これは、2層目を打込む際に1層目のブリーディングやレイタンスを除去しなかつたため、型枠面に沿つて上昇し表面品質が低下した可能性があり、高炉セメント供試体においても、わずかではあるが上下ではなく離程度が異なつていた。なお、凍結融解試験は300サイクルまで実施したが、図-3に示したように各セメントでスケーリング量の変化は小さく、実際の劣化状況も凍結融解300サイクルでは50サイクルよりも多少劣化が進行する程度であり極端な変化は確認できなかつた。

以上から、初期欠陥からスケーリングが誘発する可能性があり、初期欠陥を防止し表層品質を確保することが耐久性の向上につながることを確認できたが、初期欠陥の再現が不十分だったことも影響し、スケーリングへの影響程度は小さかつた。なお、スケーリング試験では塩水を用いているため、スケーリング試験を終えた供試体の塩分浸透量を測定して初期欠陥の有無による差異を今後検証するとともに、実構造物調査を行い、初期欠陥と耐久性の関係を調査する予定である。

3. 表層品質評価手法の検討

前章では初期欠陥が耐久性に及ぼす影響について検討し、表層品質の確保が耐久性向上につながることを一部確認した。一方、冒頭でも述べたように、コンクリートの表層品質を把握する目安として、構造物表面を目視評価して初期欠陥の程度を確認し、表層品質の改善につなげる取り組みが行われている。しかし、見た目では変化が見えなくても表面に近い部分に欠陥が存在していたり、適切な養生が行われていない場合には、目視だけで表層品質を把握するのは困難である。このため、実際の構造物においてコンクリート表層の品質を評価する手法を確立する必要がある。ここでは、最近、実構造物での適用事例が多い、表層透気試験と表面吸水試験に着目し、非

破壊による品質評価の可能性について評価を行つた。

(1) 試験概要

図-1で示した小型供試体と壁供試体を用いて、表層透気試験と表面吸水試験を行つた。なお、小型供試体は、スケーリング供試体と同一ロットのコンクリートで別途作製した2供試体で実施した。

図-5に表層品質評価試験に用いた小型供試体の表面状況を、図-6に壁供試体の表面状況をそれぞれ示す。表面気泡を模擬した供試体は、小型供試体で比較的大きな気泡跡を一部再現できたが、壁供試体ではほとんど再現できなかつた。また、CJを模擬した供試体は、中央高さに線状の境界が確認できたものの明確な継目は特に壁供試体で再現できなかつた。他方、小型供試体の中央高さより上部表面に多数の気泡や色むらが確認された。なお、普通セメントのCJを模擬した壁供試体中央部に四角い白色跡があるが、これは表面吸水試験装置を密着させるためにシーリングした跡が残つたもので初期欠陥ではない。

a) コンクリートの表層透気試験方法

表層透気試験は、写真-1に示すダブルチャンバー法による透気試験（トレント法）を行い、透気係数により評価した。測定位置は、小型供試体は供試体中央で、壁供試体の測定は、高さ20cm毎に上、中、下3ブロックに分け各ブロックの中央で行った。測定は、材齢28日と約3ヶ月後（材齢102日）に行った。なお、透気係数による評価は、初期欠陥の有無による相対評価に加え、透気係数の評価基準として提案されている表-2のグレーディング³⁾を参考に評価した。

b) コンクリートの表面吸水試験方法

表面吸水試験は、小型の供試体でも測定が可能な写真-1に示す試験装置を用いて行った。吸水部の直径は、表面吸水試験として適用事例が多いSWAT法の吸水カップと同じ80mmである。写真中央の吸水部横のボックス内にモータが格納されており、裏面の中央吸水部の両サイドから真空吸引して供試体に本体を密着させた後、吸水部中心からの水頭が300mmとなるように吸水部に接続さ

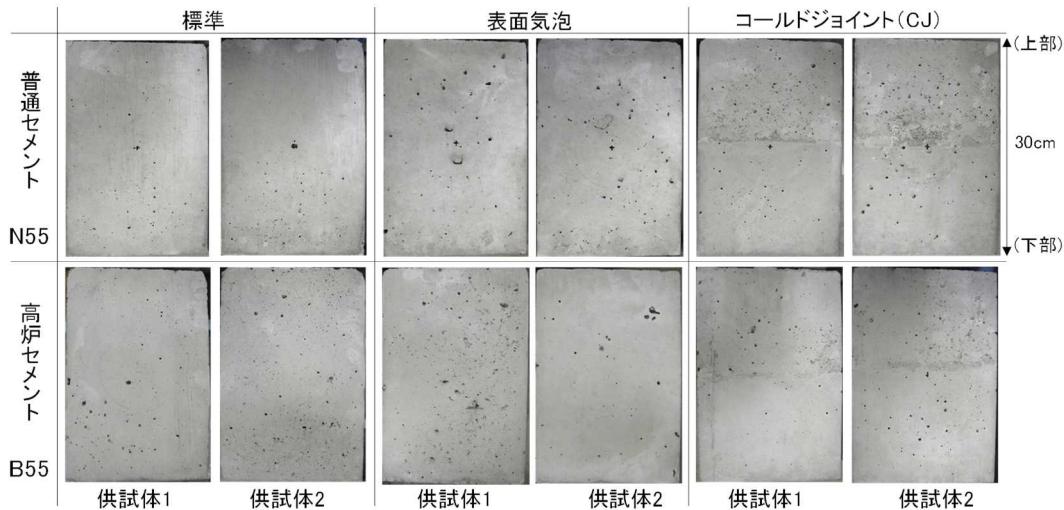


図-5 表層品質評価試験用小型供試体の表面状況

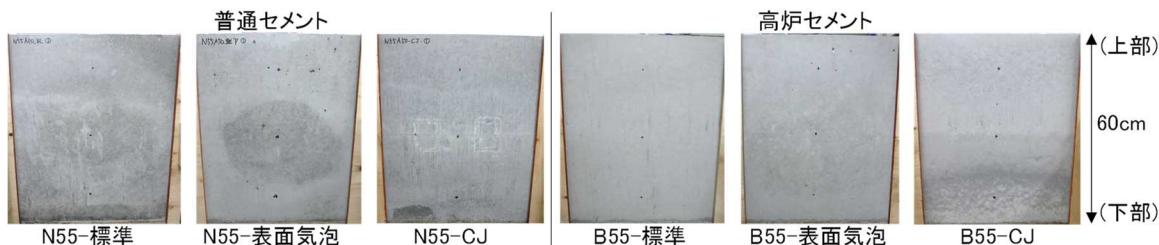


図-6 表層品質評価用壁供試体の表面状況



写真-1 表層透気試験と表面吸水試験の状況

れたシリンダー内の上縁まで注水して計測を開始した。なお、注水はSWATを参考に10秒以内に完了するようにした。計測開始から60秒毎に600秒（10分間）まで水頭の低下を目視で読み取り、水頭の低下量を吸水量として、吸水面積と吸水時間で除した吸水速度により評価した。測定箇所は、小型・壁供試体ともに供試体中央1箇所で実施した。なお、吸水速度による評価は、初期欠陥の有無による相対評価に加え、吸水速度の評価として表-3に示すSWAT法のグレーディングを参考³⁾に評価した。

(2) 各供試体の含水率

表層品質評価にあたり、透気係数や吸水速度は供試体含水率の影響を受けるため、表面含水率が5.5%以下であることを確認して計測することが推奨³⁾されている。このため、各試験を行う前に、高周波容量式のコンクリート水分計により含水率を確認した。図-7に各部位の表面

表-2 透気係数によるグレーディングの目安³⁾

| 評価指標 | 優 | 良 | 一般 | 劣 | 極劣 |
|--|------------|----------|-------|------|--------|
| 表層透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) | 0.001~0.01 | 0.01~0.1 | 0.1~1 | 1~10 | 10~100 |

表-3 表面吸水速度によるグレーディングの目安³⁾

| 表面吸水速度 P_{600} ($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$) | 良 | 一般 | 劣 |
|---|----------|-----------|-------|
| | 0.0~0.25 | 0.25~0.50 | 0.50~ |

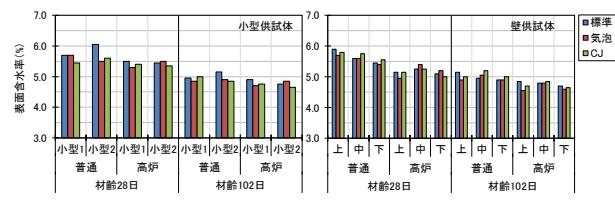


図-7 各部位の表面含水率

含水率を示す。含水率は各測定位置周辺2点で測定した平均値で示している。小型、壁供試体とともに材齢28日における普通セメント供試体で含水率が5.5%を超えたが、それ以外は5.5%以下であり、本研究では含水率による影響は小さいものとして、測定値でそのまま評価した。

(3) 表層透気試験によるコンクリート品質評価

図-8に小型供試体の透気係数を示す。材齢28日では、普通セメント供試体でCJ模擬供試体の透気係数が標準や表面気泡模擬供試体より大きくなり、1供試体は「極劣」

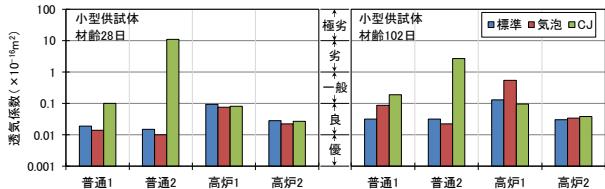


図-8 小型供試体の透気係数

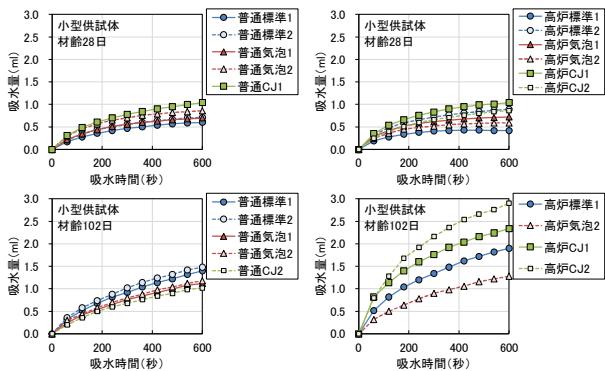


図-10 小型供試体の表面吸水量の経時変化

に相当する評価となった。一方、表面気泡は標準供試体と同程度で、セメントによらず「良」となり、透気性に及ぼす影響は確認できなかった。これに対して、材齢102日では、材齢28日より全体に透気係数は大きくなる傾向があり、「良」から「一般」になるものも確認された。本研究では、含水率が概ね5.5%以下だったことからその影響は小さいものとして評価したが、材齢による透気係数の変化は含水率の影響と考えられる。しかし、初期欠陥の有無による透気係数の大小関係は材齢28日と概ね同様であり、普通セメントのCJ模擬供試体で透気性が大きいことが確認された。

図-9に壁供試体の透気係数を示す。材齢28日よりも102日の透気係数が大きくなる傾向は小型供試体と同様である。初期欠陥の有無では、材齢28日の普通セメントの中段高さで透気係数が高めになったものの、材齢102日の測定では差が無かった。これは、図-6に示したように、壁供試体では想定した初期欠陥の再現が不十分となり供試体毎の品質差が小さかったことが影響したと考えられる。なお、高炉セメントの下段でCJ模擬供試体の透気係数が大きいが、CJは壁供試体の中段高さに生じるよう作製しており直接的な関係はないことから、目視で確認できない不具合が表層付近に生じている可能性を示差していると思われる。

以上から、表層透気試験によりコンクリート表層の品質を一定程度評価可能と考えられ、CJ模擬供試体の一部で透気係数が大きく「劣」評価となり、CJが透気性に影響する可能性が確認されたが、表面気泡模擬供試体は標準との明確な違いがなかった。これは、CJの測定位置が打重ね線上であるのに対し、表面気泡は広く分散しているため供試体により気泡上で直接的に測定できていない

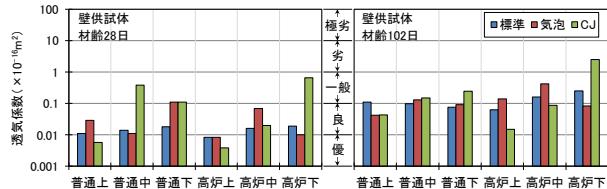


図-9 壁供試体の透気係数

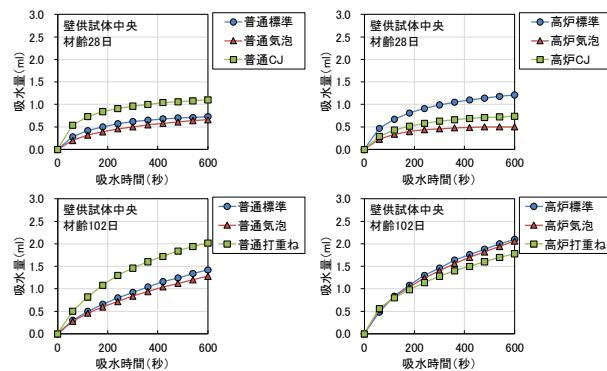


図-11 壁供試体の表面吸水量の経時変化

ことが影響していることが考えられるが、表面気泡が独立したものであれば、透気性に大きく影響しない可能性もあるため、より詳細な検討が必要である。

(4) 表面吸水試験によるコンクリート品質評価

図-10に小型供試体の表面吸水量の経時変化を示す。上図は材齢28日測定、下図は材齢102日の測定値である。なお、試験時に一部供試体で試験装置の密着が低く水漏れがみられたケースについては除外している。材齢28日では、標準供試体の表面吸水量が少なく、表面気泡、CJの順に表面吸水量が増加する傾向がみられた。一方、材齢102日では、材齢28日よりも全体に表面吸水量が増加したが、これは透気係数と同様に供試体の含水率の影響を受けるためと考えられる。また、材齢28日でみられた吸水量の大小の関係ではなく、普通セメントでは順序が逆転し、高炉セメントではCJ模擬供試体の吸水量は多かつたが、表面気泡模擬供試体は標準よりも少なかった。

図-11に壁供試体の表面吸水量の経時変化を示す。材齢28日より材齢102日の吸水量が多いのは壁供試体でも同様である。普通セメント供試体の吸水量は、標準と表面気泡が同程度で、CJ模擬供試体はいずれの材齢においても吸水量は多かつた。他方、高炉セメント供試体は、材齢28日で標準の吸水量が多く、材齢102日では、いずれの供試体も概ね同程度の吸水量となり、初期欠陥の有無による差はみられなかった。

図-12に表面吸水量から算出した各供試体の表面吸水速度を示す。なお、表面吸水速度 ($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$) は、吸水時間600秒後（10分後）のトータル吸水量 (ml) を吸水面積 (m^2) と600秒 (s) で除して算出したものである。含水率の影響が小さい材齢102日に着目すると、CJを模擬

した供試体で吸水速度が大きく「劣」評価となったが、セメントの種類でみると、高炉セメントは小型、壁供試体のいずれも普通セメントに比べ吸水速度は大きかった。これは、コンクリート打込み後、型枠存置のまま湿潤養生を行ったが、脱型後は相対湿度60%の環境下に晒されており、普通セメント供試体も同様ではあるものの、材齢7日程度では高炉セメントの水和が特に乾燥の影響を直接的に受ける供試体表層では十分ではなく、養生による表層品質の影響が表れたものと推察される。

以上から、CJ模擬供試体の一部で吸水速度が大きくなり「劣」評価となることや、養生の影響が大きい高炉セメントコンクリートの吸水速度が普通セメントより大きいことが確認され、表面吸水試験によりコンクリート表層の品質を一定程度評価可能と考えられる。他方、同一供試体の同一測定箇所でも透気係数と吸水速度の評価が必ずしも一致していないケースが確認され、加えて、含水率の影響が大きいと考えられることから、施工後の表層品質評価への適用性については更なる検討が必要である。

4. おわりに

新設・更新時のコンクリート構造物の施工時における品質向上対策および表層品質評価手法の確立を目的として、初期欠陥が耐久性に与える影響と、表層品質評価試験として透気や吸水試験の適用性について検討した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 初期欠陥として表面気泡やコールドジョイントを模擬した供試体により、初期欠陥からスケーリングが誘発される可能性があり、初期欠陥を防止し表層品質を確保することが耐久性の向上につながることを確認した。
- 2) 初期欠陥を模擬した供試体に対して非破壊試験である表層透気試験や表面吸水試験を実施し、透気係数や吸水速度によりコールドジョイントの影響などコンクリート表層の品質を一定程度評価可能なことを

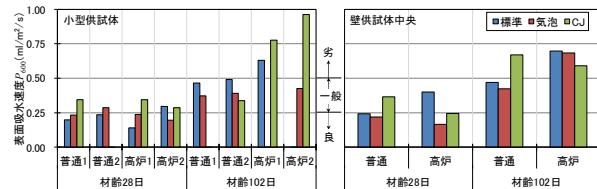


図-12 各供試体の表面吸水速度

確認した。

- 3) 同一供試体の同一測定箇所でも透気係数と吸水速度の評価が必ずしも一致していないケースが確認され、加えて、含水率の影響が大きいと考えられることから、施工後の表層品質評価への適用性については更なる検討が必要である。

今回実施した試験では、初期欠陥がスケーリングの進行に影響があることを一部確認できたものの、初期欠陥の再現が不十分であったため、長期的な影響はほとんど確認できなかった。このことは、初期欠陥の種類や程度により長期的な耐久性に及ぼす影響も異なることを示差していると考えられる。これらの関係を明らかにするには、初期欠陥の種類や程度が異なる供試体の作製や、その違いによる品質を定量的に評価する必要があり、室内試験だけでは限界があるため、実構造物調査も行ってデータを蓄積していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（橋脚、橋台、函渠、擁壁編）2023年改訂版、pp.14-29、2023.3
- 2) 吉田行、安中新太郎：塩化物作用下におけるスケーリング対策と評価試験法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.1、pp.809-814、2019.7
- 3) 国土交通省東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案）（橋脚、橋台、函渠、擁壁編）2023年改訂版、pp.30-39、2023.3