

施工時に生じた初期欠陥がコンクリートのスケーリング抵抗性と表層品質に及ぼす影響

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 稜
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 三原 慎弘

コンクリート施工時に生じた初期欠陥が構造物の耐久性に及ぼす影響度を把握するため、著者らはコールドジョイント等を模擬した供試体を用いてスケーリング試験や表層品質評価試験を実施し、初期欠陥から劣化が誘発される可能性および透気や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できることを確認してきた。本研究では、初期欠陥の種類を追加し、それらが構造物の耐久性や表層品質に及ぼす影響について検討した。

キーワード：コンクリート構造物、初期欠陥、表層品質、耐久性

1. はじめに

北海道のコンクリート構造物は、冬季に低温に晒されることに加え、凍結防止剤散布により海岸部だけでなく内陸部でも塩分が供給される極めて過酷な環境におかれ、凍害や塩害が顕在化している。このため、将来的な維持管理・更新にかかる費用の増大は明白であり、従来の事後保全型維持管理よりも費用縮減が可能となる予防保全型維持管理への転換が図られている。コンクリート構造物の更新あるいは新設にあたっては、建設時にコンクリートそのものの品質を確保・向上することが耐久性確保につながるため、それこそが最大の予防保全となる。これを実現するには、設計段階で照査した性能を満足するように、現場条件を考慮して確実な施工が実現できるように施工計画を策定し、適切に管理しながら施工する必要がある。特に、コンクリートの劣化因子となる塩分、ガス、水分などはコンクリート表面から侵入するため、表層品質の確保は極めて重要であり、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。

橋梁下部工を対象とした試行工事では、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、併せて、型枠脱型後のコンクリート表層の不具合を簡易に把握するために、沈みひび割れ、表面気泡、打重ね状況、型枠継ぎ目のノロ漏れ、砂すじを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²⁾を行い、改善すべき点があれば次のリフトで施工時に対策を講じて改善する取組みが行われている。他方、施工時の工夫や品質向上対策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各不具合に応じた対策の整理が

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、コンクリートの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、目視による表層品質の評価は定性的であり、評価者の経験等により評価点が変わる可能性があることから、品質向上対策等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。

以上を背景として、著者らは、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に、初期欠陥として「表面気泡」と「コールドジョイント」を模擬した供試体を作製し、それらがスケーリング抵抗性に与える影響と、表層品質評価法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を行ってきた³⁾。本研究では、初期欠陥として、新たに「型枠継ぎ目のノロ漏れ」、「豆板」を模擬した供試体を作製し、これらがスケーリング抵抗性と表層品質に及ぼす影響について検討した。

2. スケーリング抵抗性に及ぼす初期欠陥の影響

(1) 模擬供試体の作製

初期欠陥の対象とした「型枠継ぎ目のノロ漏れ」（以下、ノロ漏れと記述）は、コンクリートの打込みや締固め時に、型枠突き合わせ箇所の隙間からセメントペーストやモルタルが流出して、コンクリート表面に砂すじ等が生じる不具合である。「豆板」は、コンクリートの流動性や締固め不足により粗骨材間にセメントペーストやモルタルが充填されず空隙が生じる不具合である。これらを模擬した供試体は、小型と壁型の2種類作製した。

図-1に比較となる標準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、各層で突き棒および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100mmラップするようにバイブレータで締固めを実施）と、型枠面の気泡や空隙を抑制するためにスぺーディング処理したものを標準として作製した。なお、スぺーディングとは、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。

ノロ漏れ供試体は、図-2に示すように、壁面の片側の型枠を分割して中央高さに0.5mm隙間が生じるように組み込み、その上下にハラミ防止用の桟木を設置して、標準と同様の工程で打込みと締固めを行った。

豆板供試体は図-1の型枠を用いた。最初にスランプが小さいコンクリート（後述のN55-1またはB55-1）を練混ぜ、乾燥しないようにコンテナボックスに入れて練り置きした。その間に、標準配合のコンクリートを型枠高さの半分まで標準と同じ工程で打込み、1時間経過後に、2時間以上練り置いたスランプが小さいコンクリートを打ち重ねて作製した。なお、打重ねの際は、下層コンクリートの上面に溜まったブリーディングを除去し、締固めは基本的に突き棒のみとして、天端面のみバイブレータを30mm程度挿入して3秒程度締固めた。また、スぺーディング処理は片側の壁面のみ行った。

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・河川工事仕様書に示されている湿潤養生期間の標準を参考として、温度20℃、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内に存置した。

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2.71g/cm³、吸水率0.77%）を、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（密度2.67g/cm³、吸水率1.76%）を用いた。コンクリートの目標スランプは12.0±2.5cm、目標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いように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、目標スランプ12.0cmについては、各供試体作製時の練混ぜ3バッチ分の平均値で示している。また、N55-1とB55-1の配合は、基準配合のN55とB55よりもAE減水剤添加量を減らしてスランプを小さくした。

(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

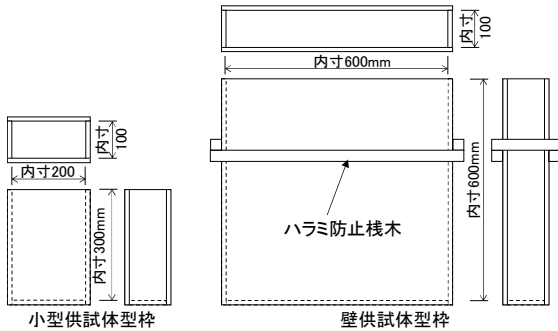


図-1 標準供試体の型枠形状

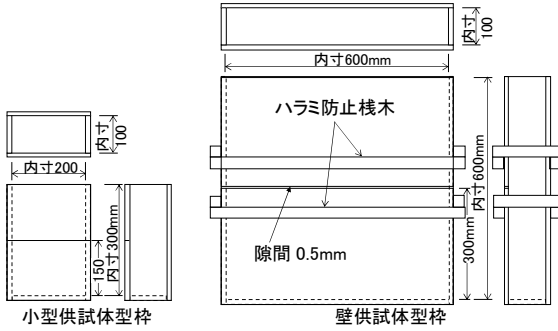


図-2 ノロ漏れ供試体の型枠形状

表-1 コンクリートの配合

配合 (記号)	セメントの種類	W/C (%)	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	普通ポルトランド	55	45	282	155	867	1042	0.4512	0.0085	12.5	4.3				
N55-1						867	1042	0.1128	0.0141	8.8	4.5				
B55	高炉B種					863	1037	0.4512	0.0176	13.8	4.6				
B55-1						835	1036	0.1128	0.0212	9.8	4.7				

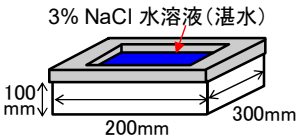


図-3 スケーリング試験供試体

めに、ASTM C672に準じてスケーリング試験を実施した。なお、前述のように普通セメントは5日間、高炉セメントは7日間型枠内で湿潤養生を行い、その後材齢28日まで温度20℃、相対湿度60%に設定した実験室内で気中養生して試験を開始した。試験は、縦打ちで作製した小型供試体を横倒しにして、図-3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℃を16時間、23℃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

ASTM C672の試験規格では、凍結融解50サイクルにおける試験面のスケーリング程度を目視で評価するが、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ることとし、スケーリング量も測定して評価した。

図-4に凍結融解300サイクルまでの小型供試体のスケ

ーリング量を2供試体の平均値で示す。凡例は配合記号と初期欠陥の種類を組み合わせている。既報と同様に²⁾、スケーリング量は初期欠陥の有無によらずセメントの種類により大きく異なった。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50サイクル以降は変化が小さかったが、175サイクル以降増加傾向が見られた。なお、「B55-豆板」については、凍結融解サイクル75サイクルで供試体底面に劣化が生じて水漏れが生じたため以降の測定は中止した。

初期欠陥による影響をセメント別にみると、普通セメントではスケーリング量そのものが小さいため差は小さく、ノロ漏れと標準のスケーリング量は同程度だったが、豆板は標準より幾分多かった。一方、高炉セメントでは、豆板が標準よりスケーリング量が多くなったが、ノロ漏れは標準よりも少なくその影響は確認できなかった。

図-5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。

普通セメントのノロ漏れ供試体は、試験開始前の供試体中央高さに線は確認できるものの実際にはセメントペーストが目詰まりして砂すじ等の不具合はほとんど再現できなかったため、結果として中央線付近からのスケーリングは生じず、標準とノロ漏れに差がなかったと考えられる。これに対して、豆板供試体は、試験開始前の表面状況からは明確な豆板が確認できなかったが、凍結融解50サイクル後は硬練りコンクリートを後打ちした供試

体上層部の剥離程度が大きくなり、供試体上下で劣化に差が見られた。しかし、その後凍結融解サイクルが進行しても大きな劣化は生じなかった。

一方、高炉セメントは、最初にスケーリング量を測定した凍結融解5サイクル時点で表面剥離が大きかったため、初期欠陥の有無による剥離程度の差異は明確ではないが、ノロ漏れ供試体は普通セメントと同様にノロ漏れをほとんど再現できなかったため、供試体中央線付近からの剥離の進行は確認されず、目視では標準供試体とのスケーリング量の差異ほど違いは確認できなかった。また、凍結融解300サイクルではどちらも全面に剥離が進行したが初期欠陥による差異はなかった。これに対して、豆板供試体は、普通セメントと同様に後打ちした供試体上層部の剥離程度が下層部よりも大きい状況を確認できる。写真-1に凍結融解を継続し75サイクル時点で確認された豆板供試体裏面の変状を示す。試験水（塩水）は反対面に湛水して凍結融解を繰り返しているが、表面的には確認できない内部欠陥が存在し、内部から劣化が顕在化したものと考えられる。

以上から、既報²⁾も併せて考察すると、表面気泡やブリーディング水がコンクリート型枠面を上昇するなど極表層部分に欠陥が生じた場合は、そこからスケーリングが誘発される可能性はあるものの、長期的な劣化進行性への影響は比較的小さい。一方、豆板のような欠陥は、表面的な劣化だけでなく大きな劣化につながる可能性があり、初期欠陥の状況（程度）により劣化の程度や長期

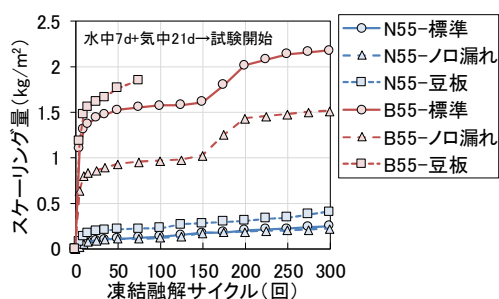


図-4 小型供試体のスケーリング量



写真-1 凍結融解 75 サイクル時点の豆板供試体の変状

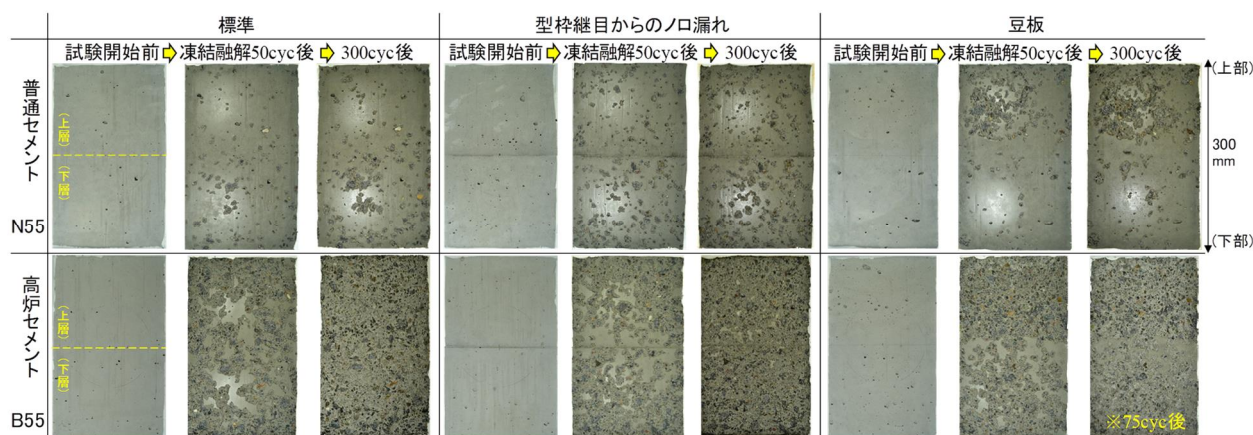


図-5 凍結融解前後の小型供試体表面状況

供用性（耐久性）への影響は異なることを確認した。

なお、今回対象としたスケーリング抵抗性だけでなく塩分浸透性への影響等についても検討が必要であり、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予定である。また、小型供試体では初期欠陥の再現が困難なため、実構造物において初期欠陥と耐久性の関係を調査する必要がある。

3. 表層品質評価手法の検討

前章では初期欠陥がスケーリング抵抗性に及ぼす影響について検討し、初期欠陥の状況（程度）により耐久性への影響は異なり、表面上欠陥が明確でない場合でも大きな劣化につながることを確認した。このため、初期欠陥を防止してコンクリート表層の品質を確保することが重要となるが、見た目では欠陥が確認できなくても表面に近い部分や内部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、目視だけでその品質を把握するのは困難である。このため、ここでは、既報²⁾に続き、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った。

(1) 試験概要

図-1および図-2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った。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-6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-7に壁供試体の表面状況をそれぞれ示す。

ノロ漏れを模擬した供試体は、普通セメントの壁供試体中央高さで砂すじ状の不具合が一部確認できたが、それ以外の供試体は型枠の隙間から流出したペーストが目詰まりして硬化したため、欠陥を再現できなかった。豆板を模擬した供試体は、小型供試体では表面気泡は比較的多いものの大きな欠陥は確認できなかったが、壁供試体は上層部に空隙や大きめの気泡が確認された。

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-2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、壁供試体は、高さ200mm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103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-2に示す試験装置を用いて行った。吸水部の直径は、表

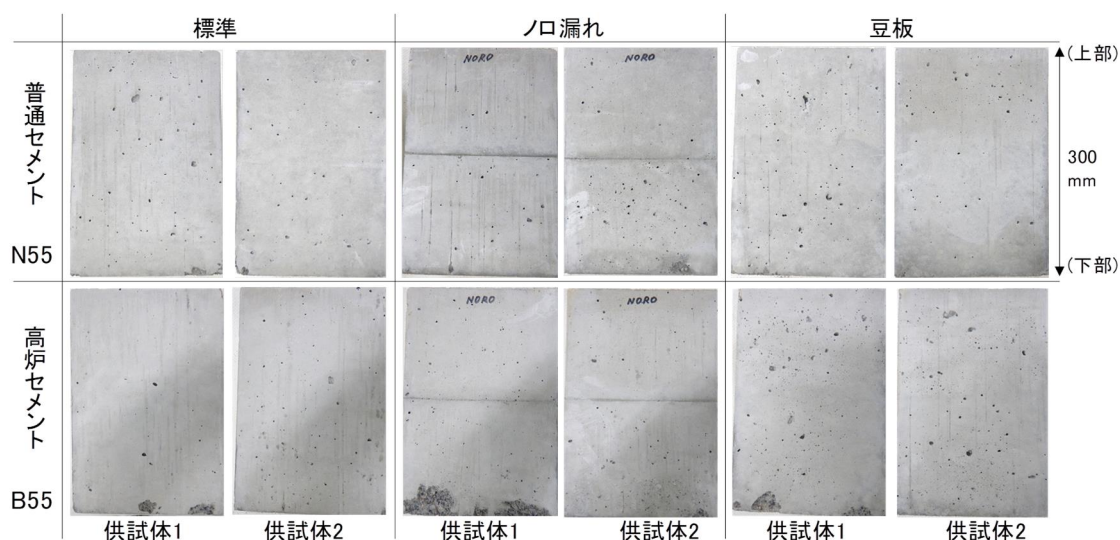


図-6 表層品質評価試験用小型供試体の表面状況

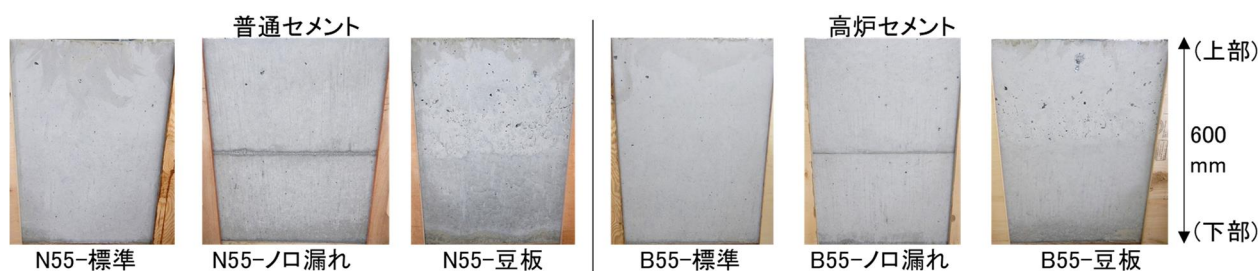


図-7 表層品質評価用壁供試体の表面状況

面吸水試験として適用事例が多いSWAT法⁴⁾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、透気試験と同じ箇所で行った。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、吸水速度の評価基準として表-3に示すSWAT法のグレーディングを参考に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から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-8に各部位の表面含水率を示す。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。材齢28日では、小型、壁供試体ともに含水率が5.5%を超えるものが多かったが、材齢103日ではいずれも5.5%以下だった。

(3) 表層透気試験によるコンクリート品質評価

図-9に各供試体の透気係数を示す。小型供試体について、材齢28日では、ノロ漏れ供試体の透気係数が標準や豆板よりも幾分小さく、普通セメントより高炉セメントの方が透気係数が小さい傾向もみられたが、いずれも「良」から「優」評価であり初期欠陥の影響は確認できなかった。一方、材齢103日では、材齢28日より全体に透気係数は大きくなり、評価が「良」から「一般」あるいは「優」から「良」になるものが多かった。材齢103日の含水率は28日より低く、含水率が測定値に影響したと考えられるが、全体として透気係数の大小関係は材齢28日と概ね同様だった。本検討では、明確な初期欠陥の再現ができなかったことや、吸水試験と比較するために供試体中央部のみで測定したため、豆板供試体のように上層と下層で品質が異なる可能性があるものでも透気性との関係が明確にならなかったと考えられる。

一方、壁供試体では、材齢28日より103日の方が透気係数が大きくなる傾向は小型供試体と同様だった。なお、図-7に示したように、ノロ漏れ供試体の中央高さには、型枠の隙間から流出したペースト等が硬化して突起したり、型枠のはらみにより段差が生じたため、普通セメント供試体は右端の段差が小さい線上で、高炉セメント供試体は中央高さの直上で測定した値である。

初期欠陥の影響については、ノロ漏れは再現が不十分



(a) 表層透気試験



(b) 表面吸水試験

写真-2 表層透気試験と表面吸水試験の状況

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~

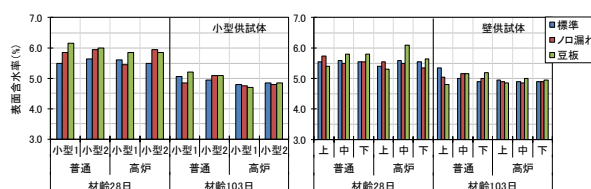
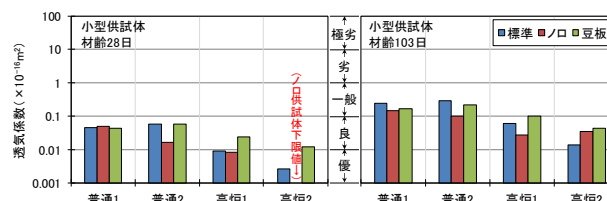
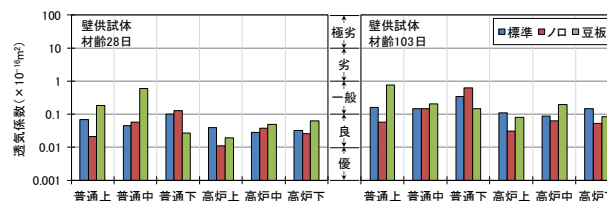


図-8 各部位の表面含水率



(a) 小型供試体



(b) 壁供試体

図-9 各供試体の透気係数

で、右端の線上で測定した普通セメント供試体中段でも標準と差はなく、透気性への影響は確認できなかった。一方、豆板は普通セメント供試体の上段と中段で透気係数がやや大きく、目視できない不具合が生じている可能性が確認されたがその差は小さく、高炉セメント供試体では標準との差はなかった。

以上から、既報²⁾の結果も考慮すれば、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、目視確認できない不具合を検出できる可能性はあるが、初期欠陥の状況により評価は異なると考えられ、

その適用性について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に各供試体の表面吸水速度を示す。全体に材齢28日より材齢103日の方が表面吸水速度は大きい、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。

小型供試体では、高炉セメントのノロ漏れ供試体1が材齢28日で、供試体2が材齢103日で吸水速度が標準よりも大きくなり「劣」評価となった。小型供試体の表面吸水試験は供試体中央の線上で測定しており、本検討では砂すじ等の欠陥は生じなかったものの、供試体に密着させた吸水部内側と外側につながる線を伝って水が滲出したためその影響と考えられる。豆板供試体は、材齢103日の高炉セメント供試体1で標準より吸水速度が大きくなったが、それ以外は概ね標準供試体と同程度以下であり、欠陥の影響は確認できなかった。これは、試験装置の形状から、吸水量を測定できるのが供試体中央部のみのため、透気試験と同様に上層の欠陥の影響を十分に評価できなかったことが考えられる。

一方、壁供試体では、豆板供試体の上部で表面吸水速度が大きく、いずれも「劣」評価となった。図-7に示した表面状況でも硬練りコンクリートを後打ちした上層表面に空隙や大きめの気泡が確認されており、表面吸水速度により、初期欠陥による表層品質の低下をある程度評価できることを確認した。

他方、小型や壁型によらず標準供試体でも「劣」評価となる部位があり、特に材齢103日の測定で多くみられた。本検討で作製した供試体は、コンクリート打込み後型枠存置のまま湿潤養生を普通セメントで5日、高炉セメントで7日行ったが、脱型後は温度20℃、相対湿度60%の環境下に晒されており、コンクリート表層は乾燥の影響を直接的に受けることから、養生条件による影響が表れたものと推察される。

(5) 非破壊による品質評価試験法の適用性

以上から、既報²⁾の結果も考慮すれば、表層透気試験と表面吸水試験により、コンクリートの表層品質や不具合を一定程度評価可能なことを確認した。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おらず、特に、表面吸水速度の方が透気係数より品質が低く評価されるケースが確認された。透気性や吸水性を利用した評価方法では、例えば貫通ひび割れや空隙が連続しているような不具合であれば、同様の傾向として評価されるが、表面ひび割れや空隙が独立して存在するような場合には、透気性は小さくても吸水量は多くなるなど、不具合の状況により検出能力や評価基準が異なる可能性があると考えられる。このため、各試験法の適用範囲について検討する必要がある。なお、室内試験の範囲では、初期欠陥の再現に限界があるため、

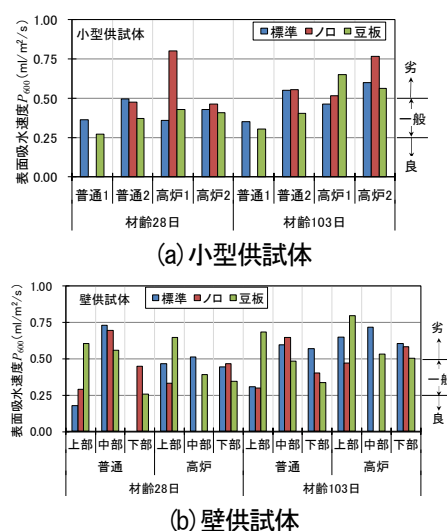


図-10 各供試体の表面吸水速度

実構造物の調査も実施して品質評価方法の適用性を検証する予定である。また、本検討で作製した壁供試体を寒地土木研究所の屋上に暴露し、降雨や積雪、温度変化が伴う実環境下での耐久性に及ぼす初期欠陥の影響や表層品質の把握を行う予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 表面気泡など極表層部分に生じる欠陥はスケーリングを誘発する可能性があるものの、長期的な劣化進行性への影響は比較的小さいが、豆板のように内部につながる欠陥は大きな劣化につながる可能性が高く、初期欠陥の状況により耐久性への影響は異なる。
- 2) 表層透気試験と表面吸水試験により、コンクリートの表層品質や不具合を一定程度評価可能だが、不具合の状況により検出能力や評価基準が異なる可能性があるため、各試験法の適用範囲について検討する必要がある。

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、山内稜、島多昭典：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、第67回（2023年度）北海道開発技術研究発表会論文、安-63（道）、2024.2
- 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
- 4) 井川倫宏、玉岡優児、細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価基準に関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、第29巻、pp.101-109、2018