

# 論文 施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響

白根 勇二<sup>\*1</sup>・舟橋 政司<sup>\*2</sup>・松尾 健二<sup>\*2</sup>

**要旨:** 締固めの有無と養生条件に着目し、施工要因がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響を検討した。その結果、締固めが無い場合、締固め有りに比べて強度が約 50%に低下し、透気係数は約 20 倍となった。また、湿度 95%で養生した場合、標準養生と封緘養生の品質と大きな差は認められなかったが、湿度 60%以下では強度が低下するとともに、透気係数と中性化深さが増大し、表層部の品質低下が顕著となった。さらに、締固めの自動化や噴霧養生を実施した覆工コンクリートの透気係数を測定した結果、全 37 データの平均値は  $0.31 \times 10^{-16} \text{m}^2$  であり、品質のばらつきが少なく、良好な施工が行われていることが裏付けられた。

**キーワード:** 表層品質, 透気係数, 圧縮強度, 中性化深さ, 超音波伝播速度, 締固め, 養生

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性に関わる品質は、コンクリートの使用材料や配合、構造物が置かれる環境条件に因るばかりでなく、施工方法や養生方法の影響も非常に大きいことが広く知られている。

使用材料や配合は、設計段階または施工計画段階において構造性能や耐久性能を考慮して決定され、配合試験報告書や製造の印字記録、受入れ検査によってフレッシュ時のコンクリートの品質が確認されている。しかしながら、コンクリートの施工や養生に関しては、通常、施工計画通りに実施されたかどうかを自主管理に基づいて確認が行われている程度であり、構築されたコンクリート構造物の硬化後の品質そのものを確認するまでには至っていない。現状では、施工条件や養生条件が実構造物の品質に与える影響に関するデータ数は乏しく、データが存在していても実際の施工がどのように行われたか不明な場合も多い。そのため、結果の要因分析やばらつきの把握が困難であるのが実情である。

そこで本研究では、施工条件や養生条件の違いがコンクリート表層部の品質に及ぼす影響を把握するために、室内実験を行った。さらに、施工方法が明らかな実構造物（山岳トンネルの覆工コンクリート）について、室内試験と同様にコンクリート表層部の品質評価を行った。なお、評価指標の1つとして、実構造物でも非破壊でコンクリート表層部の透気係数を求められるダブルチャンバー法（トレント法）<sup>1)</sup>を用いた。

本論文では、これらの検討結果について報告する。

## 2. 締固めの有無が表層部の品質に及ぼす影響

### 2.1 実験概要（締固めの影響）

#### (1) 実験水準

施工条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響

を把握することを目的に、締固めの有無に着目して実験を行った。表-1 に実験水準を示す。V-0 ではバイブレータを用いずに試験体を作製したが、ジャンカが発生しないように木づちで叩きながら打込みを行った。V-1 は1層あたりの打込み高さが 30cm となるように2層に分けてコンクリートを投入した。長手方向の2箇所棒状バイブレータ（φ28mm）を挿入し、1箇所あたり 15 秒間の締固めを行った。

#### (2) コンクリート配合および使用材料

コンクリート配合を表-2 に、使用材料を表-3 に示す。練混ぜには、容量 50 リットルの強制二軸ミキサを用いた。

表-1 実験水準（締固めの影響）

シリーズ	施工方法
V-0	締固め無し (木づちで型枠を叩き)
V-1	締固め有り (棒状バイブレータ φ28mm) 1層高さ : 30cm 締固め時間 : 15秒 挿入間隔 : 30cm間隔

表-2 コンクリート配合（締固めの影響）

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 AE (C×%)
				W	C	S1	S2	G	
55	12	4.5	20	163	296	332	497	1028	0.25

表-3 使用材料（締固めの影響）

種類	産地・仕様
セメントC	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3340cm <sup>2</sup> /g
細骨材1 S1	埼玉県両神産 砕砂 表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 3.03
細骨材2 S2	千葉県君津産 粗目洗砂 表乾密度 2.51g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 2.48
粗骨材 G	埼玉県両神産 砕石 表乾密度 2.73g/cm <sup>3</sup>
AE減水剤 AE	リグニンスルホン酸系

\*1 前田建設工業 (株) テクノロジーセンター 技術研究所 (正会員)

\*2 前田建設工業 (株) テクノロジーセンター 技術研究所 工修 (正会員)

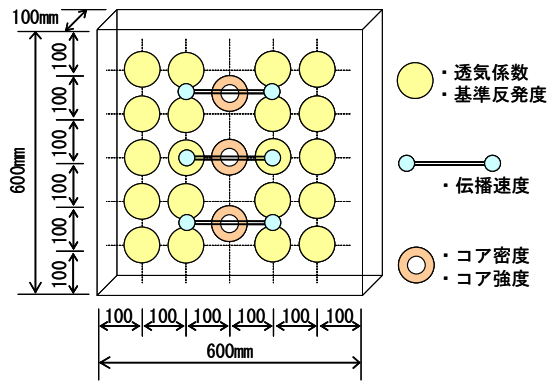


図-1 試験体寸法および測定位置

表-4 測定項目および方法 (締固めの影響)

測定項目	測定方法
透気係数	トレント法による透気試験。測定数：20点。材齢16日、119日。
基準反発度 (テストハンマ)	JSCE-G504に準拠。ただし、測定数は25点。材齢119日。
超音波伝播速度	超音波試験機による表面法 (L=200mm)。測定数：3点。材齢119日。
コア密度	φ50のコアを3本採取し、寸法と重量を測定して算定。材齢119日。
コア圧縮強度	コア密度を測定後、同試料にて実施。材齢119日。

### (3) 試験体の作製および養生

試験体の形状は図-1に示すとおりで、高さ600mm×長さ600mm×厚さ100mmの壁状とし、型枠には鋼製型枠を用いた。コンクリートは型枠上面からスコップを用いて打ち込み、表-1の締固め方法で試験体を作製した。

型枠は翌日脱型し、養生のムラを避けるために、横に倒した状態で材齢14日まで湿布養生を施し、以後、気中養生した。養生温度はいずれも20℃とした。

### (4) 試験方法

表-4に測定項目および測定方法を、図-1に各試験の測定位置を示す。

透気係数はトレント法による透気試験で測定した。トレント法は、コンクリート中への気体の透過しやすさを非破壊で測定するもので、現位置の劣化抵抗性の評価手法として実用化が期待されている<sup>2)</sup>。試験装置は内部と外部の二重チャンバー構造となっており、コンクリート表層の圧力を真空ポンプの吸引によって低下させた後、吸引を停止し、内部チャンバー内の圧力が回復するまでの経時変化から透気係数を算出する。

基準反発度は、JSCE-G504に準拠し、鉛直下向きに打撃し、角度補正を行い、基準反発度を算定した。

超音波伝播速度は、実構造物での適用を考慮して表面法を採用した。

また、透気係数、基準反発度および超音波伝播速度の測定が終了した時点で、V-0とV-1からφ50mmのコアを3本採取し、密度と圧縮強度を測定した。

## 2.2 実験結果 (締固めの影響)

表-5に締固めの有無がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響について検討した各試験結果を示す。

V-0の表面の一部にやや大きな空隙があり、2測点で透気試験を正常に実施できなかったため、V-0の透気係数は18点の平均値とした。締固め有りのV-1と締固め無しのV-0の材齢16日における透気係数は、それぞれ $0.26 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と $1.17 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となり、締固めの有無による品質の差が現れた。材齢119日では両者の差がさらに大きくなり、それぞれ $0.35 \times 10^{-16} \text{m}^2$ と $6.45 \times 10^{-16} \text{m}^2$ で約20倍の差となった。V-0はV-1と比べて空隙が多く存在するばかりでなく、水分が逸散しやすいため水和反応を鈍化させ、組織が緻密化しなかったものと思われる。

また、透気係数と同様に全ての試験結果において、締固めの有無による差が明確に現れ、特にコア強度の差は大きく、V-0はV-1の50%程度となった。基準反発度、超音波伝播速度およびコア密度の比が89%~95%であったのに比べると、非常に顕著である。

表-5 測定結果 (締固めの影響)

		V-0			V-1		
透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )	材齢16日	平均 : 1.17	標準偏差 : 0.56		平均 : 0.26	標準偏差 : 0.21	
	材齢119日	平均 : 6.45	標準偏差 : 2.06		平均 : 0.35	標準偏差 : 0.21	
基準反発度		平均 : 33.5	標準偏差 : 2.74		平均 : 37.1	標準偏差 : 2.33	
超音波伝播速度 (m/sec)		4024	4081	4016	4504	4545	4504
		(平均) 4040			(平均) 4518		
コア密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.24	2.22	2.23	2.35	2.33	2.37
		(平均) 2.23			(平均) 2.35		
コア圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		18.1	21.5	19.4	33.4	36.1	41.9
		19.7			37.1		

## 3. 養生条件が表層部の品質に及ぼす影響

### 3.1 実験概要 (養生条件の影響)

#### (1) 実験水準および養生方法

養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響を把握するために、養生方法や相対湿度に着目して実験を行った。表-6に実験水準と養生サイクルを示す。標準養生以外の条件は、実際のコンクリート構造物が曝される環境を想定し、封緘養生と相対湿度40%、60%、95%の環境とした。

湿度60%の実験は、温湿度管理が自動制御された恒温恒湿室で実施し、湿度95%と湿度40%の実験は、写真-1および写真-2に示す簡易養生室内で実施した。湿度95%の養生室は加湿器を、湿度40%では除湿機と除湿剤を用い、また、両室内とも空気循環を促すため扇風機を設置した。養生室内の温湿度は自動計測にて監視した。湿度40%では、材齢初期において試験体からの水分蒸発

表-6 実験水準および養生サイクル

		養生サイクル			
		1日 脱型	3日	7日	28日
1-1	標準養生		水中養生		湿度60%
2-1	封緘養生		封緘養生		湿度60%
3-1	湿度95%		湿度95%		湿度60%
3-2	湿度95% (7日間)		湿度95%		湿度60%
3-3	湿度95% (3日間)		95%		湿度60%
4-1	湿度60%				湿度60%
5-1	湿度40%		湿度40%		湿度60%



写真-1 湿度 95%制御の養生装置



写真-2 湿度 40%制御の養生装置

によって、一時的に湿度が60~70%を示したが、概ね所定の養生環境下に制御できた。養生温度はいずれも20℃とした。

(2) コンクリートの配合および使用材料

コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-7に、使用材料を表-8に示す。また、レディーミクストコンクリートを使用することで製造時の誤差を取り除いた。

(3) 試験方法

表-9に試験項目および試験方法を示す。圧縮強度試験はコンクリートと、5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを対象とした。モルタルの圧縮強度試験(φ50mm)は、表面からの水分供給や逸散の影響を受ける断面積割合が大きく、養生方法による表層部の品質の差を明確に比較できると考え実施したものである。

表-7 コンクリート配合(養生条件の影響)

W/C (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m³)							
				W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad
55	12	4.5	20	168	306	416	167	250	350	651	3.06

表-8 使用材料(養生条件の影響)

種類	産地・仕様
セメントC	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm³ 比表面積 3340cm²/g
細骨材1 S1	埼玉県上里産 砂 表乾密度 2.62g/cm³ 粗粒率 3.00
細骨材2 S2	埼玉県横瀬産 砕砂 表乾密度 2.68g/cm³ 粗粒率 3.10
細骨材3 S3	千葉県成田産 砂 表乾密度 2.59g/cm³ 粗粒率 1.80
粗骨材 G1	埼玉県小川産 砕石 表乾密度 2.66g/cm³ 実績率60.0%
粗骨材 G2	埼玉県横瀬産 砕石 表乾密度 2.70g/cm³ 実績率60.0%
AE減水剤 Ad	リグニンスルホン酸系

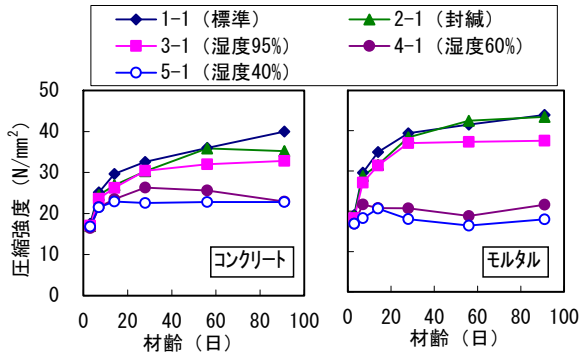
表-9 試験項目および試験方法(養生条件の影響)

試験項目	試験方法	試験体形状 数量
コンクリート 圧縮強度	モルタルは、5mmふるいでコンクリートをウェットスクリーニングした。	φ100×h200 3本/材齢
モルタル 圧縮強度	JIS A 1107に準拠。 材齢 3日, 7日, 14日, 28日, 56日。	φ50×h100 3本/材齢
コンクリート 長さ変化	モルタルは、5mmふるいでコンクリートをウェットスクリーニングした。 埋込み型ひずみ計とデューカカーによる連続計測を行い、脱型直後を初期値とした。 材齢34日に湿度60%環境へ移動させた。 対象水準は、2-1(封緘)、4-1(湿度60%)、5-1(湿度95%)である。	□100×100×400 (2本/水準)
モルタル 長さ変化		□40×40×160 (2本/水準)
透気係数	2.1(4)を参照。測定数 4点/本。 材齢30日、56日。	
基準反発度 (テストハンマ)	2.1(4)を参照。測定数 20点/本。 材齢56日。	□150×150×530 (2本/水準) ※同一試験体
超音波 伝播速度	2.1(4)を参照。測定数 2点/本。 材齢56日。	
促進中性化 深さ	JIS A 1153に準拠。 ただし、養生方法は表-7に従う。 促進材齢 1週, 4週, 13週, 26週。	□100×100×400 (3本/水準)

型枠の脱型は製作翌日に行い、以後、表-6に示す養生サイクルに従い養生した。

3.2 実験結果(養生条件の影響)

図-2および図-3にコンクリートとモルタルの圧縮強度試験結果を示す。図-2より養生方法や湿度によって圧縮強度に差が生じていることがわかる。特に供試体サイズが小さいモルタルは、表面付近の水分移動の影響を大きく受け、湿度60%以下における圧縮強度は、標準養生や封緘養生、湿度95%環境の結果と比べると材齢28日以降は1/2程度に留まっている。また、図-3より初期の湿潤養生(湿度95%)が強度発現に寄与することも明らかであり、材齢28日の圧縮強度は全く養生をしない場合(4-1)と比べ、養生期間7日(3-2)で1.34倍、同28日(3-1)で1.78倍となった。



※材齢28日以降は、全て湿度60%で養生。  
 図-2 養生方法の違いと圧縮強度の関係

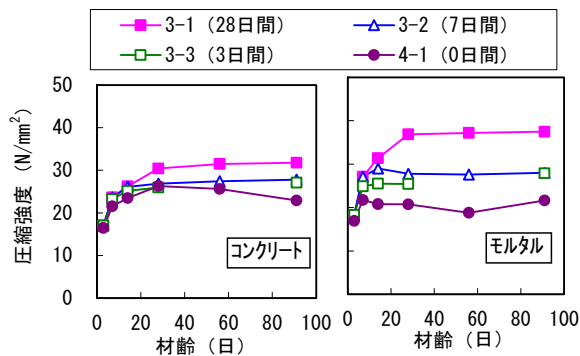


図-3 湿度95%での養生日数と圧縮強度の関係

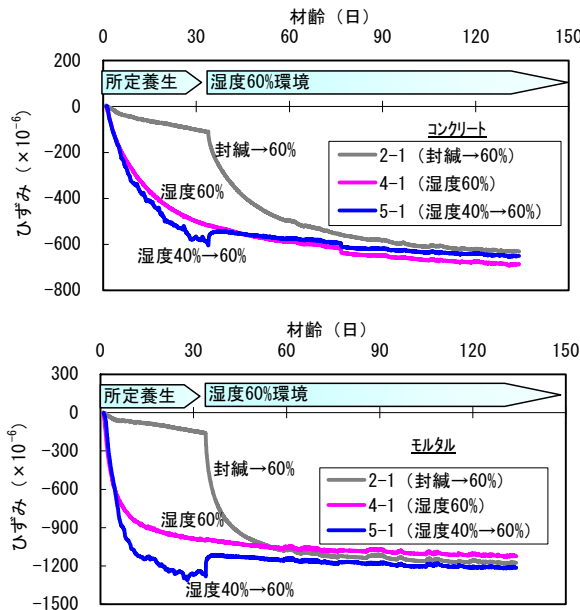


図-4 養生条件の違いによる長さ変化推移

図-4 に長さ変化試験の結果を示す。所定の養生期間中は湿度が低いほど変化量が大きくなっており、ひび割れ抵抗性が低い初期材齢時には養生環境をコントロールし、急激な湿度変化を生じないように配慮して乾燥収縮を低減する必要があることがわかる。また、材齢34日から全ての供試体を湿度60%で養生すると、長期ひずみは最初から湿度60%の環境で養生したケース(4-1)と同等となった。したがって、コンクリートの最終ひずみ量は乾燥履歴の影響をほとんど受けないと考えられる。

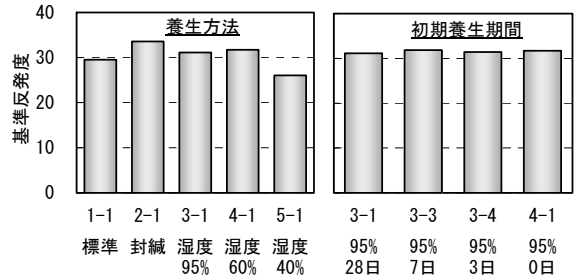


図-5 養生条件と基準反発度の関係(材齢56日)

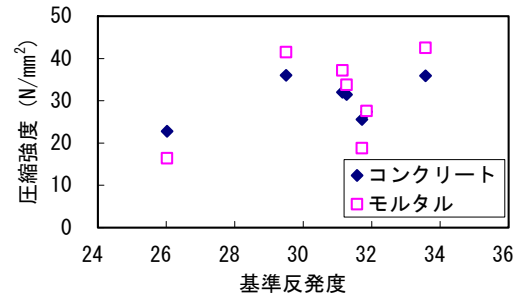


図-6 基準反発度と圧縮強度の関係(材齢56日)

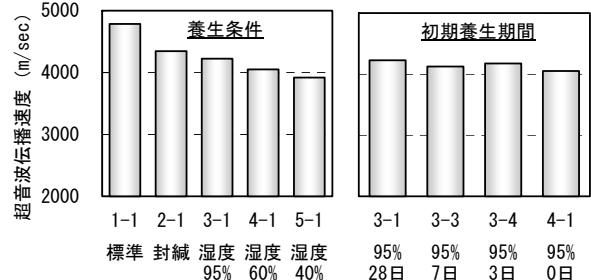


図-7 養生条件と伝播速度の関係(材齢56日)

図-5 に基準反発度の試験結果を、図-6 に基準反発度と圧縮強度の関係を示す。養生方法の比較では、湿度40%で養生したケース(5-1)の基準反発度が低く、圧縮強度と同じ傾向となったが、その他のケースでは圧縮強度との相関は認められなかった。また、養生日数を変化させたケースでも同様に、圧縮強度に見られたような傾向は認められなかった。

図-7 に超音波伝播速度の試験結果を示す。養生方法の比較では、標準養生(1-1)の超音波伝播速度が最も大きく、次いで封緘養生(2-1)で、以降湿度が高いケースから順番(3-1→4-1→5-1)となり、養生状態の良し悪しを反映した傾向となった。また、養生日数を変化させたケースでは、養生方法の傾向ほど明確な差は認められないが、初期養生期間が長いほど大きくなる傾向が認められた。図-8 に超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す。標準養生(1-1)の超音波伝播速度(=4786m/sec)を除くと、両者の関係は線形性が認められる。したがって、コンクリート表層付近の強度を推定する手段として、超音波伝播速度が有効な手段であると考えられる。

図-9 に透気係数の試験結果を示すが、標準養生(1-1)はいずれも  $0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$  であった。透気係数は材齢30



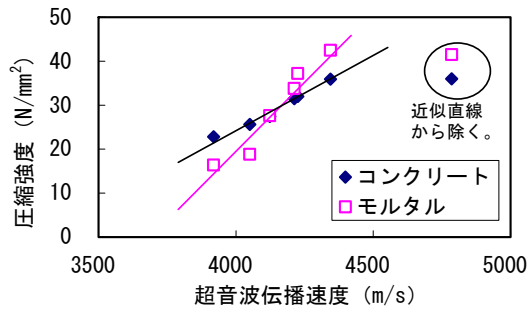


図-8 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

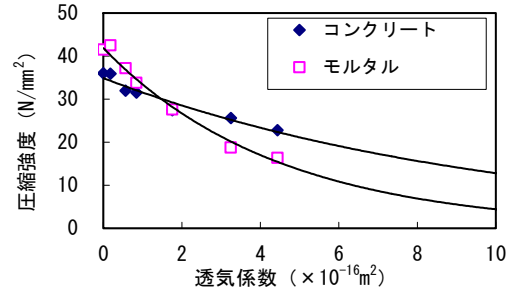


図-10 透気係数と圧縮強度の関係 (材齢 56 日)

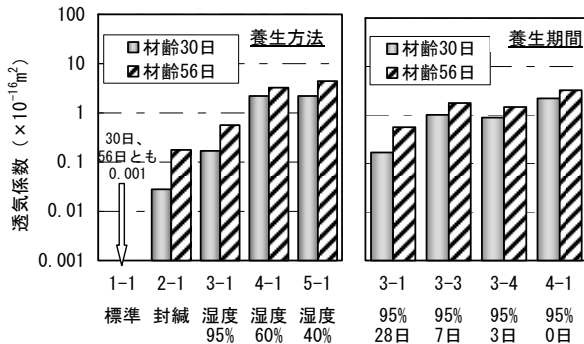


図-9 養生条件と透気係数の関係 (材齢 56 日)

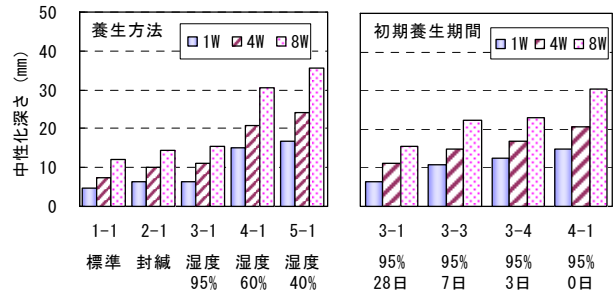


図-11 養生条件と中性化深さの関係

日から 56 日に進むと、若干大きくなる傾向となったが、これはコンクリート中の水分が逸散したためと考えられる。また、湿度が低いほど透気係数は大きな値となり、湿度 60% (4-1) は湿度 95% の約 13 倍となった。養生期間の影響も明確に現れており、養生期間が長いほど透気係数は低く、密実なコンクリートであることが推察できる。また、図-10 は透気係数と圧縮強度の関係を示しているが、両者には高い相関性が認められ、透気試験がコンクリート表層部の品質を評価する指標として非常に有用であると言える。

図-11 に促進中性化試験の結果を示す。湿度 60% 以下で養生した場合は中性化の進行が早く、標準養生の約 3 倍の中性化深さとなった。初期養生期間の影響も顕著で、養生期間が長いほど中性化深さは小さくなる傾向となった。この傾向は、圧縮強度、透気係数、伝播時間と同様の傾向となっており、これらのデータが中性化深さによる耐久性指標と相関性があることがわかる。

#### 4. 覆工コンクリート表層の透気係数

##### 4.1 調査概要

調査を実施したトンネルは内空断面積 90.7m<sup>2</sup> の道路トンネルである。本構造物の施工は、従来から行われている一般的な覆工コンクリートの施工方法とは異なり、表-10 に示す工法を採用している。締固め作業の自動化や、セントル脱型後の噴霧養生 (1 週間) によって、これまで作業が困難であった締固めや養生を確実なものとし、品質向上を図っている。今回の調査対象は一般部の任意ブロックで、測定点数は表-11 に示すとおりであり、覆工コンクリート全体を網羅するように測定位置は、下半部、側壁部、クラウン部、天端部をそれぞれ選定している。Eブロックでは同一ブロック内のばらつきを確認するため、合計 20 点の測定を行った。

測定項目は、透気係数で計測方法は 2.1(4) に記したとおりである。なお、調査にあたりコンクリート中の含水状態を確認するために四電極法による電気抵抗を測定したが、いずれの測定点においても 34kΩcm 以上を示し、

表-10 覆工コンクリートの主な施工方法と概要

項目	施工方法	概要	対象ブロック				
			A	B	C	D	E
締固め (自動化)	浮きパイププレート (側壁からアーチ肩部)	特殊センサがコンクリートを感知し、打込み面上昇に合わせてパイププレートを自動で巻上げ、締め固める。		○	○	○	○
	自動引抜きパイププレート (天端部)	従来、締固めが困難であった天端部を長尺高周波パイププレートを水平に引き抜きながら締め固める。	○	○	○	○	○
打込み	クラウン部の水平圧入充てん	セントル肩部に打設孔を4ヶ所設け、コンクリートを圧入する。	○	○	○	○	○
	天端打込み時の充てん圧力管理	セントル天端部に設置した5ヶ所の圧力センサーでコンクリートの充てんを確認。	○	○	○	○	○
養生	自動噴霧養生	脱型後に移動式養生設備を設置し、約1週間、ミストによる湿潤養生を施す。			○	○	○
	坑内閉塞による外気流入防止	トンネル貫通直前から坑内中央部にバルーンによる隔壁を設け、通風を遮断し、乾燥および急激な冷却を防止する。				○	○

表-11 調査ブロックおよび測定点数

調査ブロック	配合種別	調査時材齢	測定点数	
Aブロック	有筋区間	27-15-20BB	308日	4
Bブロック	無筋区間	21-15-20BB	303日	4
Cブロック	無筋区間	21-15-20BB	281日	3
Dブロック	無筋区間	21-15-20BB	175日	6
Eブロック	無筋区間	21-15-20BB	149日	20

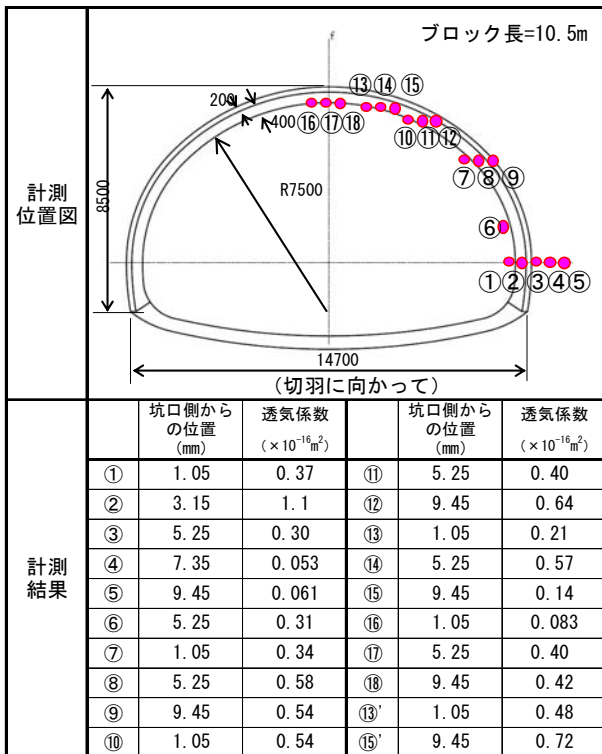
コンクリート中の含水は少ないものと判断した。

4.2 調査結果

表-12に、Eブロックの透気係数測定結果を示す。覆工コンクリートは狭隘な空間での施工のため、施工のムラや材料の変動によって同一ブロック中の透気係数が大きくばらつくと予想されたが、良好な結果が得られ、全面に渡って室内試験の締固めを実施されたケースや、湿度95%環境下で養生したケースの透気係数とほぼ同等となった。表-10に示す施工方法により、適切な打込みや締固め、養生がなされていることが裏付けられたと判断できる。

また、図-12に透気係数全37データのヒストグラムを示す。このデータは自動噴霧養生を実施しなかったブロックも含まれているが、透気係数が大きな部位は確認できなかった。これは、トンネルが貫通する前で坑内が高湿度に保たれていたことや、締固めの自動化により均一な締固めが施されたためと考えられる。

表-12 Eブロックの透気係数測定結果



※⑬'と⑮'は、それぞれ⑬と⑮近傍の色むら部分(濃色部)のデータ。

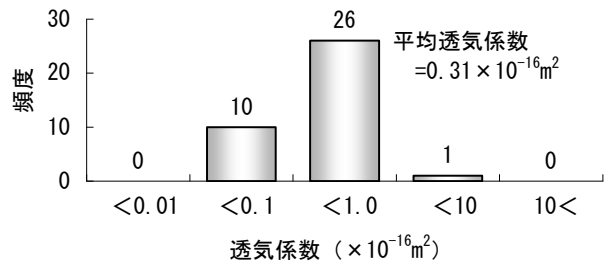


図-12 透気係数のヒストグラム

5. まとめ

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 締固めの有無がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響は大きく、適切な締固めが施されない場合、圧縮強度が小さく、透気係数が大きくなることが明らかになった。
  - (2) 養生条件がコンクリート表層部の品質に与える影響は大きく、湿度60%以下では湿度95%と比べ、モルタル強度(材齢28日)が約50%、透気係数が13倍、中性化深さが3倍となり、耐久性の低下が顕著であった。
  - (3) 湿度95%で養生した場合は標準養生、封緘養生の品質と大きな差は認められなかった。
  - (4) 湿度95%で初期養生を7日間実施すれば、特に養生しない場合よりもモルタル強度は1.34倍に増加するとともに、透気係数も小さくなり、品質の向上が認められた。
  - (5) トレント法で測定した透気係数は圧縮強度や中性化深さと高い相関性が認められ、表層部の品質評価指標として有用性が示された。
  - (6) 覆工コンクリートの透気係数を測定した結果、全37データの平均値は  $0.31 \times 10^{-16} \text{m}^2$  であり、品質のばらつきが少なく、適切な施工や養生が施されれば室内試験と同様の良好な結果が得られることが裏付けられた。
- 今後、実構造物のコンクリート表層部の品質に関するデータを蓄積し、実際の施工条件や養生条件とコンクリートの品質の関係を把握することが求められる。

謝辞：本研究にあたり長岡科学技術大学の阿部浩示郎君にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Torrent,R.:A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site,Mater.&Struct.,Vol.25,No.150,pp.358-365,1992.7
- 2) 今本啓一ほか：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