

実構造物のコンクリート表層部の品質評価方法に関する検討

白根 勇二・舟橋 政司・松尾 健二

Evaluation Method for Quality of Concrete Surface Part on Existing Structures

Yuji SHIRANE, Masashi FUNAHASHI, Kenji MATSUO

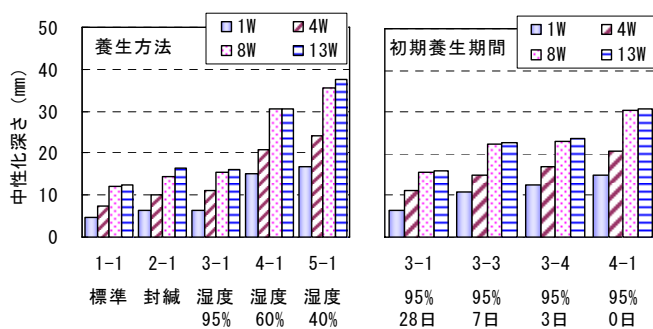


図-1 養生条件と中性化深さの関係

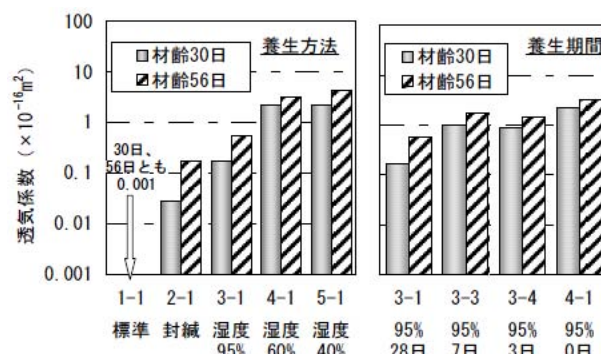


図-2 養生条件と透気係数の関係(材齢 56 日)

研究の目的

コンクリートの耐久性は、設計段階において要求性能を考慮して使用材料や配合条件を決定しているが、計画通りのコンクリートが製造されていることを配合試験報告書や受入れ検査によって間接的に確認しており、構築されたコンクリート構造物の品質を直接確認するまでには至っていない。しかしながら、コンクリート構造物の耐久性は使用材料や配合、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。そこで本研究では、まず締固め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し、次に非破壊法によって実構造物の品質を評価する方法を検討することとした。

技術の説明

まず、締固め条件や養生条件に着目し、締固めの有無や養生方法および期間がコンクリート表層部の強度特性や耐久性能に及ぼす影響について室内試験を実施して検討した。また、非破壊法による実構造物の耐久性能評価方法として、トレント法による透気試験や超音波法の適用性について検証した。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、室内試験と同様に透気試験を実施し、コンクリート表層部の透気係数を測定した。

主な結論

室内試験結果より、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。また、型枠脱型後の養生環境がコンクリート表層部の強度や耐久性に及ぼす影響が大きく、湿度 95%で養生した場合は標準養生と封緘養生の品質とほぼ同等であったが、湿度 60%以下では圧縮強度の低下や中性化の進行が顕著となった。また、トレント法による透気係数と超音波法による伝播速度とこれらの結果を比較すると、高い相関性が認められ、トレント法や超音波法がコンクリート表層部の強度や耐久性に関する品質評価手法として有用であることが示された。

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は、室内試験と同様に良好な結果が得られ、調査対象とした構造物は適切に締固めや養生が実施されていることが示唆された。

実構造物のコンクリート表層部の品質評価方法に関する検討

白 根 勇 二 舟 橋 政 司
松 尾 健 二

要 旨

締固め条件や養生条件に着目し、締固めの有無や養生方法および期間がコンクリート表層部の強度特性や耐久性能に及ぼす影響について室内試験を実施して検討した。また、非破壊法による実構造物の耐久性能評価方法として、トレント法による透気試験や超音波法の適用性について検証した。

その結果、適切な施工が行われない場合、圧縮強度の低下が顕著となった。また、型枠脱型後の養生環境がコンクリート表層部の強度や耐久性に及ぼす影響が大きく、湿度95%で養生した場合は標準養生と封緘養生の品質とほぼ同等であったが、湿度60%以下では圧縮強度の低下や中性化の進行が顕著となった。また、トレント法による透気係数と超音波法による伝播速度とこれらの結果を比較すると、高い相関性が認められ、トレント法や超音波法がコンクリート表層部の品質評価手法として有効であることが示された。

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は、室内試験と同様に良好な結果が得られ、調査対象とした構造物は適切に締固めや養生が実施されていることが示唆された。

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

目 次

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1. はじめに | 4. 養生条件が表層部の品質に及ぼす影響 |
| 2. コンクリート表層部の品質評価方法 | 5. 覆工コンクリート表層部の透気係数 |
| 3. 締固め条件が表層部の品質に及ぼす影響 | 6. まとめ |

EXAMINATION CONCERNING METHODS OF QUALITY EVALUATION OF CONCRETE SURFACE PART ON EXISITING STRUCTURES

Yuji SHIRANE
Kenji MATSUO

Masashi FUNAHASHI

Synopsis:

In order to examine influence of compacting and curing conditions on strength and durability of concrete surface part, laboratory test was carried out. In addition, as methods of quality evaluation of concrete surface part, applicability of TORRENT Air permea tester and ultrasonic pulse test were inspected.

As a result, it was showed that compacting and curing conditions influenced strength and durability of concrete surface part greatly. Also, it suggested that TORRENT Air permea tester and ultrasonic pulse test were useful methods of quality evaluation of concrete surface part.

1. はじめに

コンクリートの最も基本的な要求品質として、施工性（フレッシュ性状）や強度特性、耐久性が挙げられる。通常、施工性は施工段階でスランプ試験、スランプフロー試験、U 型充てん試験などを実施して、使用するコンクリートの状態を直接確認し、施工の可否を判断している。また、強度特性は所定材齢時に管理用供試体の圧縮強度や構造物のテストハンマー強度を測定して、要求性能を満足しているか確認している。

一方、耐久性は設計段階において要求性能を考慮して使用材料や配合条件を決定し、配合試験報告書や製造時の印字記録、受入れ検査によって計画通りのコンクリートが製造されていることを間接的に確認している。しかしながら、耐久性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。施工状況の確認は、自主管理に基づいて施工計画書通りに実施されたか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。また、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ため、結果の要因分析やばらつきの把握が困難である。

そこで本研究では、コンクリート表層部の強度特性および耐久性能に関する品質評価手法を検討することを目的に、まず、施工条件や養生条件が異なるコンクリート試験体を製作して強度試験や耐久性試験を実施した。そして、2 章で説明する非破壊試験によってコンクリート表層部の品質評価を行い、強度試験や耐久性試験の結果と比較し、各品質評価方法の適用性を検証した。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。

本報では、これらの試験結果について報告する。

2. コンクリート表層部の品質評価方法

コンクリート表層部に要求される品質として、強度特性と耐久性能が挙げられる。しかし、強度特性は構造体全体が要求性能を満足する必要がある、表層部の品質のみが重要視されるものではない。一方、耐久性能は物質透過に対する抵抗性を要求されるため、コンクリート表層部の品質が特に重要となる。

また、実構造物への適用を想定した品質評価方法は、構造体を傷めない非破壊試験であること、オンサイトで結果が判定できることが求められる。したがって、本検討におけるコンクリート表層部の品質評価項目として、テストハンマーによる基準反発度、超音波伝播速度、トレント法による透気係数をそれぞれ測定することとした。

各手法の概要は以下のとおりである。

(1) テストハンマーによる基準反発度の測定

本手法は、型枠支保工解体時など新設コンクリート構造物の強度管理や既設コンクリート構造の強度推定などに広く用いられている。表面の凹凸や乾湿状態、打撃角度が測定値に影響を与えるため、測定面の処理や測定値の補正が必要である。本検討では、JSCE-G504 に準拠して測定を実施し、鉛直下向きに打撃して得られた反発度に角度補正を行い、基準反発度を算定する。

(2) 超音波伝播速度の測定

超音波法は発振子と受振子をコンクリートにあて、発振子より発振した超音波を受振子で受振し、この伝播時間からコンクリート強度、ひび割れ深さおよび内部欠陥などを検査するものである。通常、コンクリート強度を検査する場合は、供試体などを用いて両端部に発振子と受振子を設置する対称法が採用される。しかし、実構造物で強度推定する場合は反対側の位置合わせが困難であり、またケーブルが届かないこともあるため現実的な手法ではない。そこで本検討では、実構造による計測を想定して、表面法を採用した。表面法はコンクリートの同一面に発・受振子を設置する手法で、主にひび割れ深さや内部欠陥などの検査に用いられる。

(3) トレント法による透気係数の測定

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、実構造物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。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、コンクリート表層部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。透気係数が小さいほど気密性が良好で、耐久性能も優れている可能性が高い。

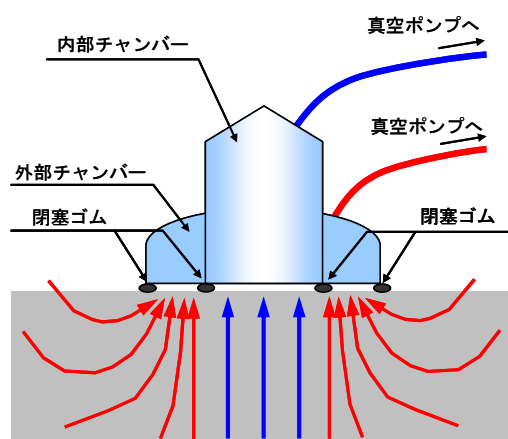


図-1 トレント法による透気係数測定の概略断面図

3. 締固めの条件が表層部の品質に及ぼす影響

3.1 実験概要（締固めの有無の影響）

(1) 試験体の概要

試験体の形状は図-2 に示すように、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。

本実験では、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。試験体は 2 種類で、いずれも型枠上面からスコップを用いてコンクリートを打ち込み、表-1 に示す施工方法に準じて試験体を作製した。V-0 は、パイプレータを用いずに試験体を作製したが、豆板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、各層について棒状パイプレータ（φ28mm）で 2 箇所締固めを行った。締固め時間は 1 箇所あたり 15 秒間とした。

型枠は翌日に脱型し、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、気中養生とした。養生温度はいずれも 20℃とした。

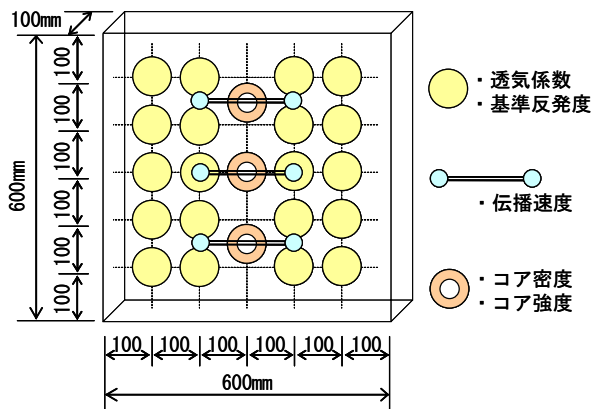


図-2 試験体寸法および測定位置

表-1 実験水準および試験体の作成方法

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 (棒状パイプレータ φ28mm) 1 層高さ : 30cm 締固め時間 : 15秒 挿入間隔 : 30cm間隔

(2) コンクリート配合および使用材料

コンクリートの配合を表-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-2 コンクリート配合（締固めの影響）

W/C (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)					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 ³ 比表面積 3340cm ² /g
細骨材1 S1	埼玉県両神産 砕砂 表乾密度 2.70g/cm ³ 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 ³ 粗粒率 2.48
粗骨材 G	埼玉県両神産 砕石 表乾密度 2.73g/cm ³
AE減水剤 AE	リグニンスルホン酸系

(3) 試験方法

表-4 に測定項目および測定方法を示す。また、図-2 に各試験の測定位置を示す。非破壊検査として、2 章で説明したトレント法による透気係数、テストハンマーによる基準反発度、超音波法による伝播速度について測定した。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、各試験体から φ50mm のコアを 3 本採取し、密度と圧縮強度を測定し、非破壊検査の結果と比較した。

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 (テストハンマー)	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。

3.2 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実施した各試験の結果を示す。

締固めを実施しなかった V-0 のコンクリート表面の一部には、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。したがって、表-5 に示す V-0 の透気係数は 18 点の平均値としている。締固めを実施した V-1 と実施しなかった V-0 の透気係数はそれぞれ、材齢 16 日において $0.26 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 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、締固めを実施した V-0 の気密性が高い結果となった。その後、気中養生を施し、

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。締固めを実施しない場合（V-0）は、締固めを実施した場合（V-1）に比べてコンクリート内部に多くの空隙が存在するばかりでなく、水分が逸散しやすくなっているため水と反応を鈍化させ、組織も緻密化しなかったものと推察される。

また、基準反発度も締固め有り無しとの差が明確に現れ、ばらつきも大きくなった。超音波伝播速度も、締固めをしない場合は約 1 割低い結果となった。

実際のコアを採取し、コアの密度と強度における両ケースの結果を比較すると、各非破壊試験の結果と同様に、締固めしない場合（V-0）の値は低く、特に圧縮強度はほぼ 1/2 の値となった。

以上より、締固めを適切に実施されない場合、強度の低下が顕著となることが確認できた。また、透気係数、基準反発度、超音波伝播速度も同様の傾向となり、締固めが適切に実施されなかった場合の品質評価手法としての可能性が示された。

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^3)		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^2)		18.1	21.5	19.4	33.4	36.1	41.9
		19.7			37.1		

4. 養生条件が表層部の品質に及ぼす影響

4.1 実験概要（養生条件の影響）

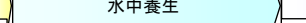
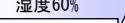
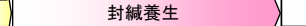
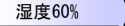
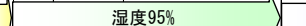
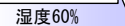
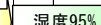
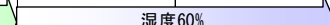
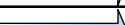
(1) 実験水準および養生方法

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、従来の山岳トンネルの覆工コンクリートの施工サイクルを想定し、材齢 1 日で脱型後、封緘養生と相対湿度 40%、60%、95%の環境で養生を行った。

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%の環境での実験は、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%とした養生室は加湿器を、湿度 40%とした養生室は除湿機と除湿剤を用いて所定の環境にコントロールした。両室内とも空気循環を促すため扇風機を設置してい

る。湿度 40%とした養生室内は、材齢初期において試験体からの水分蒸発が除湿制御を上回り、一時的に湿度が 60～70%を示したが、その後は概ね所定の養生環境下に制御できた。なお、養生温度はいずれも 20℃とした。

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%

※ナンバリングは、左が養生方法、右が養生期間を示している。



写真-1 湿度 95%制御の養生装置

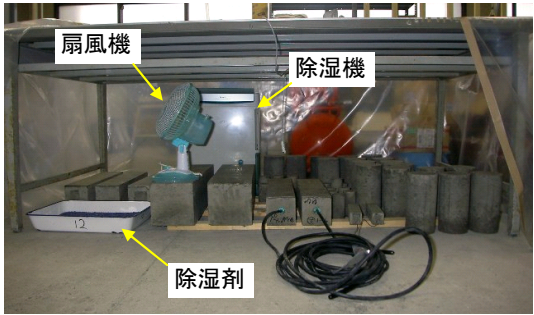


写真-2 湿度 40%制御の養生装置

(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を表-7 に、使用材料を表-8 に示す。レディーミクストコンクリートを使用することで同一品質のコンクリートで各供試体を作製し、製造時のバッチ誤差を取り除いた。受入れ検査時のコンクリートのフレッシュ性状は、スランプが 14.0cm、空気量が 4.5%であり、所定の品質であることを確認した。

表-7 コンクリート配合（養生条件の影響）

W/C (%)	スランフ (cm)	空気量 (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)							
				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/cm ³ 比表面積 3340cm ² /g
細骨材1 S1	埼玉県上里産 砂 表乾密度 2.62g/cm ³ 粗粒率 3.00
細骨材2 S2	埼玉県横瀬産 砕砂 表乾密度 2.68g/cm ³ 粗粒率 3.10
細骨材3 S3	千葉県成田産 砂 表乾密度 2.59g/cm ³ 粗粒率 1.80
粗骨材 G1	埼玉県小川産 砕石 表乾密度 2.66g/cm ³ 実績率60.0%
粗骨材 G2	埼玉県横瀬産 砕石 表乾密度 2.70g/cm ³ 実績率60.0%
AE減水剤 Ad	リグニンスルホン酸系

(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（φ100mm）と、5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタル（φ50mm）を対象とした。また、長さ変化試験も同様に、コンクリート（100mm×100mm×400mm）とモルタル（40mm×40mm×160mm）について実施した。モルタルの圧縮強度試験と長さ変化試験は、供試体寸法を小さくすることによって表面からの水分供給または逸散が多くなり、養生方法の違いによるコンクリート表層部の品質の差を明確にできると考えて実施したものである。

その他の測定項目は、透気係数、テストハンマーによる基準反発度、超音波伝播速度とした。また、耐久性との関係を検討するため促進試験による中性化深さの測定を行った。

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クラ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章を参照。測定数 4点/本。 材齢30日、56日。	
基準反発度 (テストハンマー)	2章を参照。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章を参照。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-6に従う。 促進材齢 1週、4週、13週、26週。	□100×100×400 (3本/水準)

なお、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。

4.2 実験結果（養生条件の影響）

図-3 および図-4 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-3 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 日以降で 1/2 程度に留まっている。また、図-4 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、モルタルの材齢 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。

図-5 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、長期養生を実施した場合でも、コンクリート表面を急激に乾燥させる

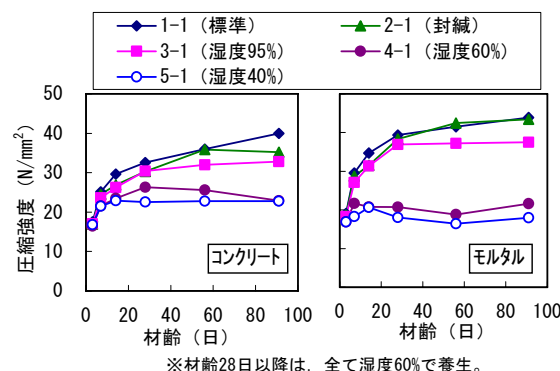


図-3 養生方法の違いと圧縮強度の関係

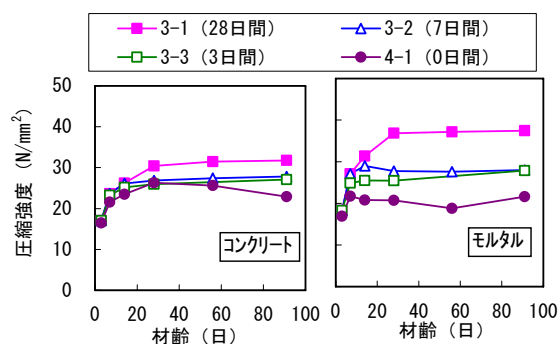


図-4 湿度 95%での養生日数と圧縮強度の関係

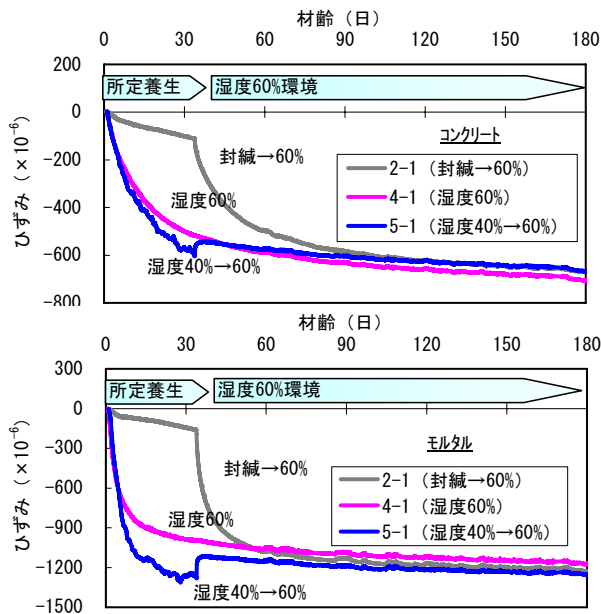


図-5 養生条件の違いによる長さ変化推移

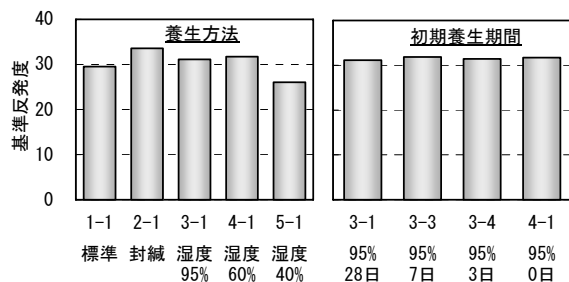


図-6 養生条件と基準反発度の関係 (材齢 56 日)

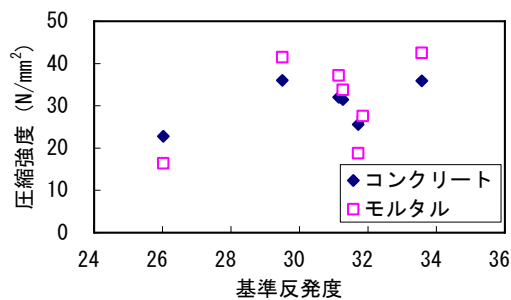


図-7 基準反発度と圧縮強度の関係 (材齢 56 日)

とひび割れが発生する可能性があることを示唆する結果となった。

図-6 に基準反発度の試験結果を示す。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養生方法の違いによる差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い。図-7 に基準反発度と圧縮強度の関係を示すが、全体的には基準反発度が高いほど圧縮強度が高くなる傾向が見られるが、ばらつきが大きいことがわかる。

図-8 に超音波伝播速度の試験結果を示す。養生方法の

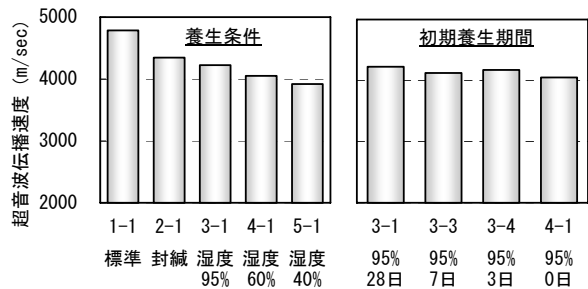


図-8 養生条件と伝播速度の関係 (材齢 56 日)

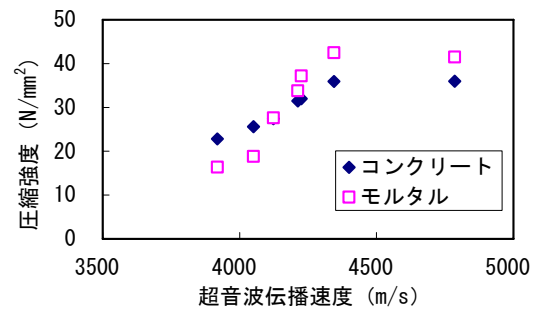


図-9 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

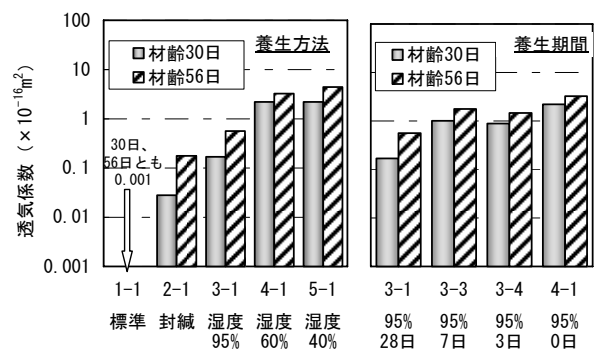


図-10 養生条件と透気係数の関係 (材齢 56 日)

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。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かった。

図-9 に超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す。超音波伝播速度が 4786m/sec 以上になると、超音波伝播速度と圧縮強度の勾配が緩やかになる傾向となったが、両者の関係に相関性が認められた。したがって、コンクリート表層部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-10 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 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-11 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る。透気試験がコンクリート表層部の強度を評価する指標として有効であると言える。

図-12 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、超音波伝播速度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と判断でき、耐久性に対しても非破壊による品質評価が可能であることが示された。

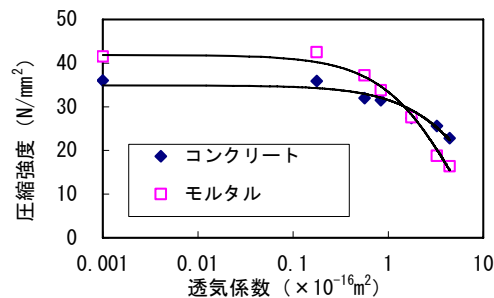


図-11 透気係数と圧縮強度の関係（材齢 56 日）

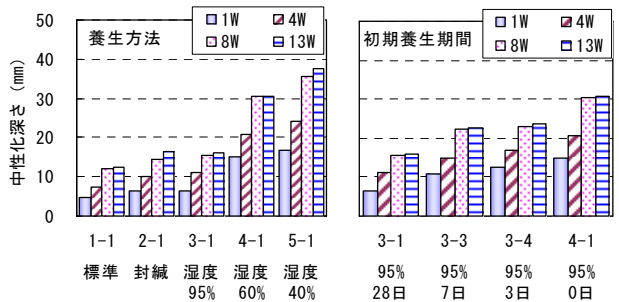


図-12 養生条件と中性化深さの関係

5. 覆工コンクリート表層部の透気係数

5.1 調査概要

調査を実施したトンネルは内空断面積 90.7m² 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とし、計測方法は 2 章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、測定結果からコンクリート中の含水は少ないものと判断した。

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

5.2 調査結果

表-12 に E ブロックの透気係数測定結果を示す。また、図-13 に透気係数の全 37 データに関するヒストグラムを示す。

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ばらつき、大きな値が検出される箇所も多いと予想された。しかし、ほとんどの透気係数は $1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下となり、全データの平均値は $0.31 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となった。この結果は、室内試験の締固めを実施されたケース（表-5）や、湿度 95%環境下で養生したケース（図-10）の透気係数とほぼ同等となっており、同ブロック内の全面または多ブロックに渡って良好な結果が得られた。表-10 に示す施工方法によってコンクリートが適切に打込みや締固め、養

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)	浮きバイブレータ (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バイブレータを自動で巻上げ、締め固める。		○	○	○	○
	自動引抜きバイブレータ (天端部)	従来、締固めが困難であった天端部を長尺高周波バイブレータ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。				○	○

生を実施されたことを裏付けた結果と言える。

なお、図-13 のデータに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

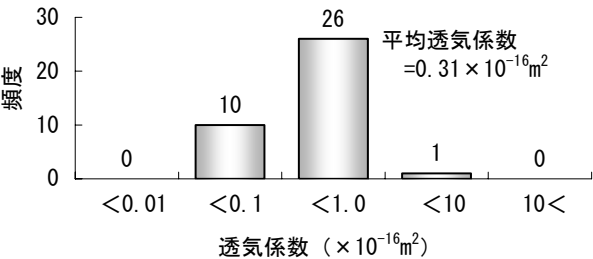
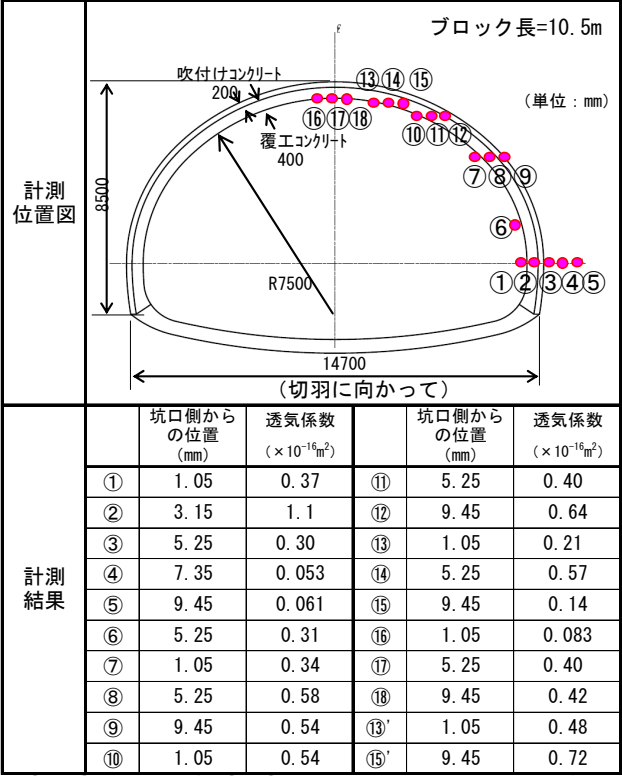


図-13 透気係数のヒストグラム

6. 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について検討した室内試験結果より、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) 養生方法がコンクリート表層部の品質に与える影響について検討した室内試験結果より、養生湿度が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。また、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。
- (3) 養生期間の影響を検討した室内試験結果より、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。
- (4) 養生条件の違いがコンクリートの品質に与える影響について検討した室内試験結果より、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、表層部の強度特性や耐久性能を評価する指標として有効性が示された。
- (5) 実構造物の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 $0.31 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となり、室内試験と同様の良好な結果が得られ、調査対象とした構造物は適切に締固めや養生が実施されていることが示唆された。

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していく予定である。

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