

# 論文 トンネルダクト部覆工コンクリートの施工方法に起因する表面性状の違いが中性化深さに与える影響

來山 泰明\*<sup>1</sup>・吉田 亮\*<sup>2</sup>・梅原 秀哲\*<sup>3</sup>・鷺見 高典\*<sup>4</sup>

**要旨：**本研究では非破壊試験を用いて中性化深さを推定することを目的として、道路トンネル換気ダクト内の覆工コンクリート壁を対象に調査を行った。表面状態が良好な面では、表面水分率試験と反発度試験の結果から中性化深さのグレード分けを行うことができた。打継ぎの上部に存在する「打継帯」で中性化深さが低下する傾向が見られた。これはバイブレーターの使用による材料分離で水セメント比が相対的に低下したことが原因であると考えられる。また、送気ダクトと排気ダクトで中性化の進行に差が見られないことから、劣化進行に与える影響は、供用後の環境作用よりも施工の良し悪しの方が大きいと考えられる。

**キーワード：**トンネル, 換気ダクト, 覆工コンクリート, 非破壊試験, 中性化深さ

## 1. はじめに

従来、コンクリート構造物はその優れた耐久性により、メンテナンスフリーと考えられていた。しかし、この10数年の間に、コンクリート構造物の劣化現象が指摘されることが多くなってきており<sup>1),2),3)</sup>、構造物の維持管理の重要性が認識されている。主な劣化機構としては、ASR<sup>1)</sup>、塩害<sup>2)</sup>、疲労、中性化<sup>3)</sup>、凍害、化学的腐食等が挙げられる。既存コンクリート構造物のLCCの最小化を目指して維持管理を行うためには、定期的な検査などから劣化診断<sup>4),5),6),7)</sup>を行う必要があるが、技術者が減少傾向であることに加えて費用、時間などに制約を受ける現状がある。

これまでに筆者らは、コンクリート橋脚やコンクリート床版の補修時期に合わせて、コンクリートの中性化深さ、コンクリートの塩化物イオン含有量などの調査を行い、劣化の進行状態による現状分析と詳細な点検を含む補修時期を推定してきた<sup>8)</sup>。また、透気試験や吸水試験などコンクリートの品質を評価する現場非破壊検査を行い、中性化と塩害に関する耐久性指標を得てきた<sup>9),10)</sup>。これらの現場調査は、全国の様々なサンプルに対する調査結果をバックデータに使用した耐久性予測式に比べ、構造物の材料など地域特有の諸元や環境を考慮した劣化予測を可能とするために行っている。また、社会資本全般に関する維持管理・更新がクローズアップされつつあり、平成27年には道路法が改正され、道路の点検が義務化された。しかし、実構造物に対する調査実績が多くないことや、施工条件および環境条件の違いによる測定値にバラツキがあることなどの理由から、非破壊試験による実構造物の劣化診断手法が明確になっていないのが現

状である。

上記の背景をもとに本研究では、供用から10年程度経過した都市高速道路のトンネル送・排気ダクト内の覆工コンクリートの劣化状況を非破壊・微破壊試験を用いて調査・分析を行った。コンクリートの初期の品質(施工要因)や換気ファンからの距離に応じた環境作用の違いなどが影響すると考えられるため、それぞれの位置における現在の覆工コンクリート品質の把握を行った。また、供用初期から現在までの品質変化の把握を行い、各種非破壊試験を用いて覆工コンクリートの中性化深さを推定する手法を考案することを本研究の目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 調査概要

本調査は都市高速道路のトンネルの送気・排気ダクト内の覆工コンクリートを対象に実施した。調査構造物諸元を表-1に示す。東山トンネルはウォータータイト構造(非排水防水型)であるため、二次覆工に補強鉄筋が配置されている。そのため、RC構造物と同様の点検調査を

表-1 調査構造物諸元

	上り線	下り線
道路区分	第2種第2級	
トンネルの階級	AA級	
換気方法	集中排気型横流式	
トンネル区間延長(km)	3.2	3.6
天井板設置延長(km)	2.6	2.1
供用年数	13年(平成15年3月供用開始)	
設計速度(km/h)	50	
設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )	24	
使用セメント	高炉セメントB種	
かぶり(mm)	100	
構造	ウォータータイト構造(非排水防水型)	

\*1 名古屋工業大学大学院 創成シミュレーション工学専攻(学生会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 助教 博士(工学)(正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 創成シミュレーション工学専攻 教授 Ph.D.(フェロー)

\*4 名古屋高速道路公社 交通管理部 交通管理課 博士(工学)(正会員)

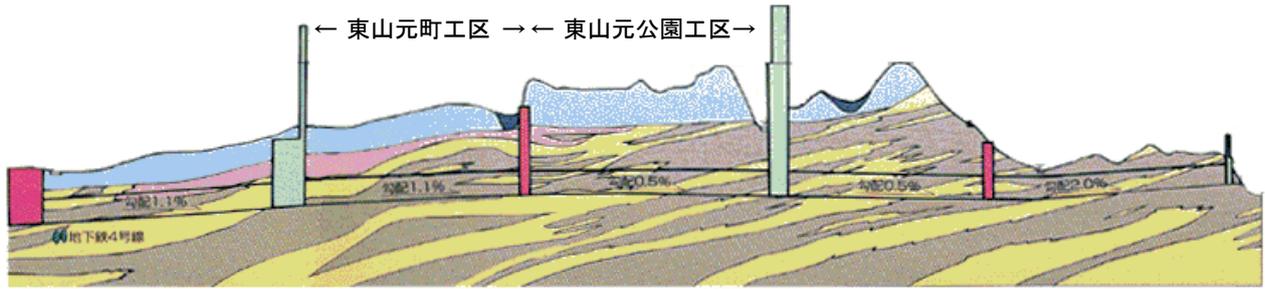


図-1 調査トンネル縦断面図

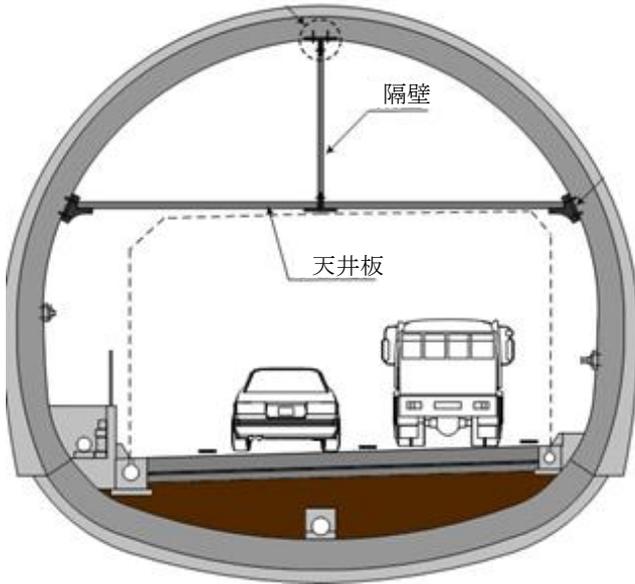


図-2 調査トンネル断面図

行うことで覆工コンクリートの品質評価を行うことが適当であり、中性化深さを把握しておくことが補修時期の推定を行うために重要な要素と考えられる。

調査トンネルの縦断面図を図-1に、断面図を図-2に示す。今回は東山トンネル全長約3.2km(上り線)のうち、東山公園工区と東山元町工区(総延長約1.0km)を調査対象とした。また、調査当日のダクト内の湿度を表-2に示す。調査箇所は以下の目的をもち、目視により選定した。

換気ファンによる風の影響をみるために、天井板から120cmの一定の高さで表面気泡や凹凸、色むらなどのない平滑な面を「良好」な面として選定したものを「沿線方向シリーズ(シリーズ1)」、打継ぎや施工方法の影響をみるために、打継ぎ目などが残る面を「良好でない」面として選定したものを「鉛直方向シリーズ(シリーズ2)」とした。

なお、この天井板は撤去が予定されている。

## 2.2 実験項目

### (1) 表面水分率試験

KETT試験機を用いてコンクリート表層の水分率を測定した。一つの測定位置において20点ずつ測定を行い、平均値を当該位置の表面水分率とした。

### (2) 反発度試験

表-2 調査日のトンネル内湿度

調査実施年・月	R.H.(トンネル内)	調査方向
平成24年	7月	70
	8月	70
	12月	50
平成25年	9月	60
	10月	70
	11月	50
	12月	50
平成26年	1月	50
	11月	50
	12月	40
平成27年	10月	40
	11月	40
	12月	40

シュミットハンマーN(NR)型を用いて、JIS A 1155<sup>11)</sup>に準拠して試験を行った。得られた値から、日本材料学会提案の強度換算式(1)<sup>12)</sup>を用いて推定圧縮強度(F)を算出した。

$$F = -18.0 + 1.27 \times R \quad (1)$$

### (3) 中性化深さ試験(ドリル削孔法)

電動ドリルを用いて覆工コンクリートを削孔し、中性化深さを測定した。ドリル削孔法としては「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化試験方法」が(社)日本非破壊検査協会によって制定されている<sup>13)</sup>が、調査時間の関係上、以下に示すような独自の手法で中性化深さの測定を行った。

まず、測定点を電動ドリルで壁面に対して垂直にゆっくりと削孔する。なお、削孔の深さは、これまでの調査結果から30mm程度とした。削孔後のコンクリート粉を水で完全に洗い流した後、孔の内側に試験液(フェノールフタレイン1%エタノール溶液)を吹き付けた。赤紫色に変色した部分までの深さをノギスを用いて0.1mm単位まで3箇所測定し、平均値を当該箇所の中性化深さとした。削孔跡は、試験終了後にモルタルを充填して修復を行った。

## 3. トンネル沿線方向の測定値分布(シリーズ1)

### 3.1 トンネル沿線方向の測定値分布

トンネル沿線方向について、表面気泡や凹凸、色むらなどのない平滑な表面状態が「良好」と思われる箇所を

表-3 トンネル沿線方向の中性化深さの分布

測定位置		①	②	③	④	⑤	通路	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	平均	
換気塔からの距離(m)		100	200	300	400	500	540	600	700	800	900	1000		
上り線	送気	5.0	4.8	11.5	13.8	14.7	9.7	14.7	17.5	19.0	18.5	13.0	13.3	14.4
	排気	12.5	6.3	11.0	13.7	14.7		21.0	13.0	23.8	19.3	19.7	15.5	
下り線	送気	13.2	14.8	18.9	21.9	20.4		23.7	22.8	19.4	21.2	21.6	19.8	19.7
	排気	22.9	21.6	19.3	22.5	14.3		21.5	19.0	18.2	19.6	17.1	19.6	

表-4 トンネル沿線方向の表面水分率の分布

測定位置		①	②	③	④	⑤	通路	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	平均	
換気塔からの距離(m)		100	200	300	400	500	540	600	700	800	900	1000		
上り線	送気	2.5	2.8	2.5	2.2	2.4	3.4	1.9	2.5	2.3	2.2	2.2	2.3	2.4
	排気	2.6	2.9	2.7	2.8	2.3		2.0	2.6	2.2	2.2	2.1	2.4	
下り線	送気	1.9	2.4	2.3	1.8	1.9		1.9	2.0	2.2	2.3	1.8	2.0	2.0
	排気	1.9	2.3	2.3	1.8	2.3		1.8	2.0	2.1	2.1	1.9	2.0	

表-5 トンネル沿線方向の推定圧縮強度の分布

測定位置		①	②	③	④	⑤	通路	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	平均	
換気塔からの距離(m)		100	200	300	400	500	540	600	700	800	900	1000		
上り線	送気	50.1	41.1	42.6	41.8	41.1	50.0	37.5	43.4	41.2	40.4	40.4	42.0	42.7
	排気	47.4	48.7	46.2	43.9	44.4		41.2	42.9	39.3	40.8	40.1	43.5	
下り線	送気	40.0	53.2	43.6	37.8	40.0		41.2	39.3	43.1	39.2	42.7	42.0	44.1
	排気	41.0	52.3	47.3	44.5	50.1		47.1	42.4	42.5	43.9	50.6	46.2	

表-6 中性化深さの分類

中性化深さ(mm)	0~10	10~18	18~
推定圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	~41	41~47	47~
表面水分率(%)	2.8~	2.2~2.8	~2.2

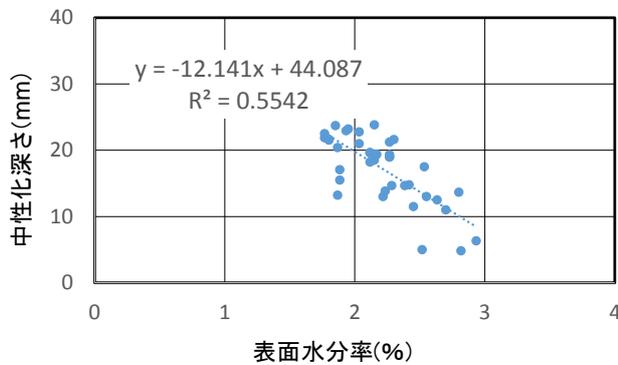


図-3 表面水分率と中性化深さの相関関係

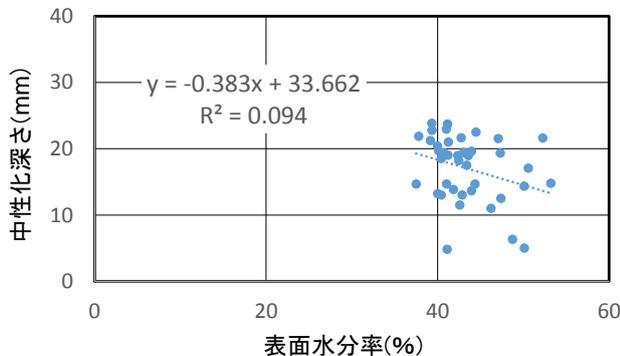


図-4 推定圧縮強度と中性化深さの相関関係

四分位数を境界値として試験結果のグレード分けを行った。その結果を表-6に示しており、表-3から表-6に示した各種非破壊試験結果の色分けは表-6のグレード分けに対応している。上り線、下り線ともに、送気側と排気側の値の平均値に大きな違いは見られない。しかし、上り線と比較して下り線の表層品質が劣っていることが確認できる。これは、脱型時間など施工条件の違いが影響したと考えられる。また、上り線、下り線ともに、換気塔からの距離が離れるほど中性化グレードが高くなる傾向が見られるが、これは距離が遠くなるにつれてダクト内の排ガス濃度が上がるためと考えられる。

本トンネルのかぶり厚は100mmであることから、直ちに中性化が覆工コンクリートの剥落などに悪影響を与えることは考えにくい。

### 3.2 各試験値と中性化深さの相関関係

表面水分率と中性化深さの点をプロットしたものを図-3に示す。寄与率は0.55となり、ある程度の相関関係が認められる。このことから、表面水分率試験によって、ある程度中性化深さの推定を行うことができると考えられる。なお、図-4より推定圧縮強度と中性化深さの寄与率は0.1となり、相関は全く認められなかった。

### 3.3 中性化深さのグレード分け

各種試験結果のうち上り線の送気側の試験結果を、中性化深さ試験の値を基準にしてグレード分けを行なった。

選定して調査を行った。各種試験の結果を表-3から表-6に示す。なお、各種試験結果の第1四分位数と第3

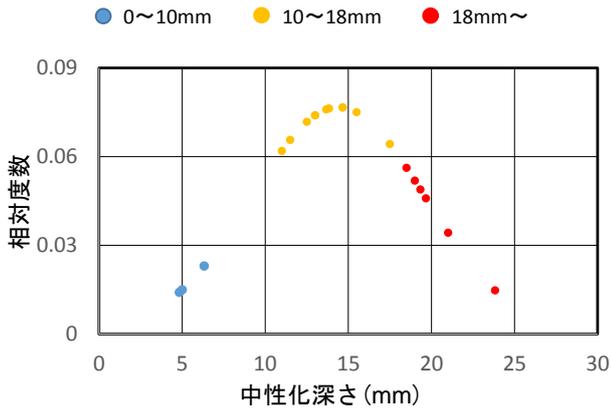


図-5 中性化深さの分布 (沿線方向)

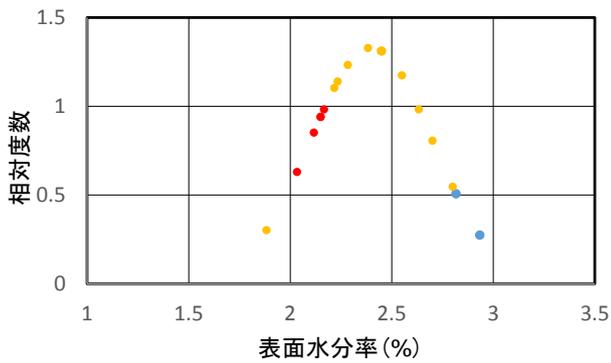


図-6 表面水分率のグレード分け (沿線方向)

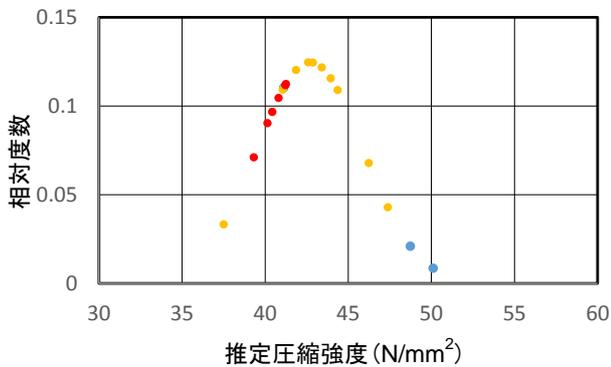


図-7 推定圧縮強度のグレード分け (沿線方向)

中性化深さの第1四分位数, 第3四分位数を境界値として, 対応する表面水分率と推定圧縮強度を相対度数で表した。その結果を図-5~図-7に示す。表面水分率は閾値を2.2%, 2.8%, 推定圧縮強度は閾値を41 N/mm<sup>2</sup>, 47 N/mm<sup>2</sup>として, 各試験値と中性化深さのグレードの並びがほぼ同一傾向になった。

以上のことから, 表面水分率と推定圧縮強度の値から中性化深さのグレードを推定できる可能性が示唆された。

#### 4. トンネル鉛直方向の測定値分布 (シリーズ2)

##### 4.1 測定位置の特徴

施工の影響で表面状態が不均一になったと考えられる箇所を選定して, 表面状態の違いがトンネル鉛直方向の

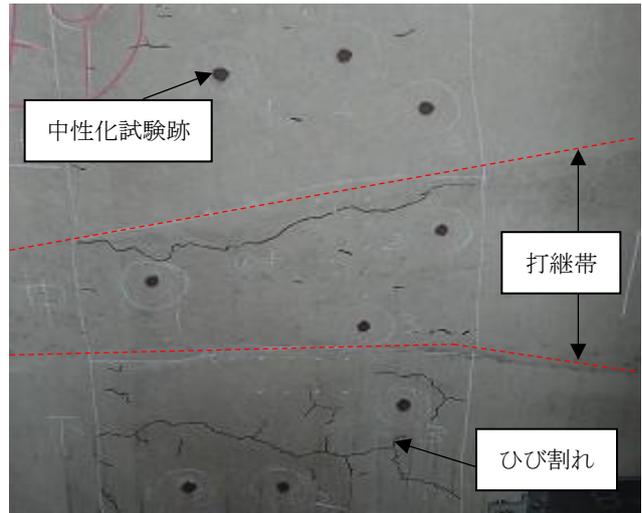


図-8 打継帯が存在する壁面



図-9 打継帯が存在しない壁面

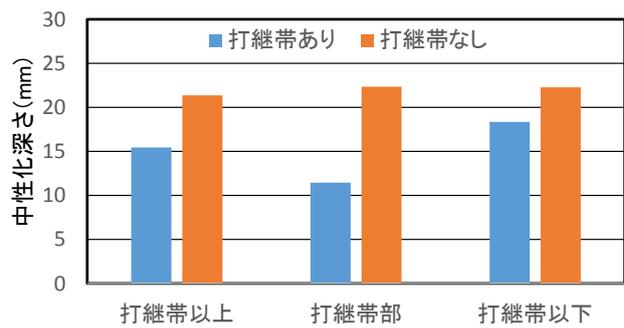


図-10 中性化深さの推移

表層品質の分布に与える影響について調査を行った。打継ぎ高さにおいて, 表面状態に特徴が見られた箇所の写真を図-8, 図-9に示す。図-8に示す写真の中心部分に位置する黒色が比較的濃い部分の下境界が打継ぎ目である。ここに挙げたコンクリート表面に見られる特徴は施工によって生じたと考えられる。パイプレーターの振動によって練り混ぜ水が分離するなどの材料分離が発生したことが, 表面状態の不均一性を生じさせたものと考

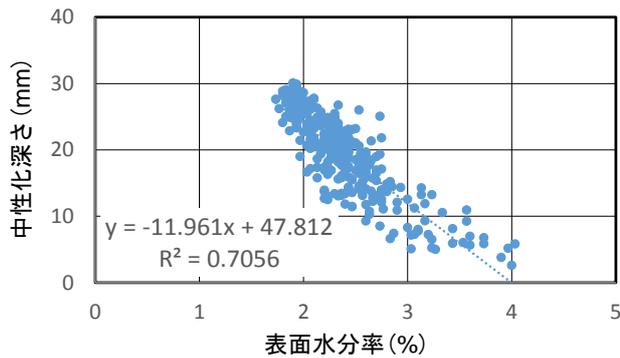


図-11 表面水分率と中性化深さの相関性

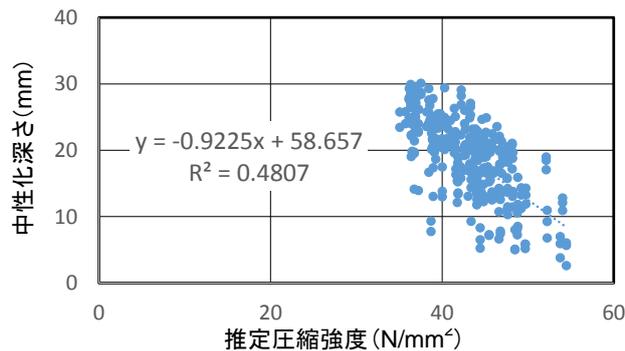


図-12 推定圧縮強度と中性化深さの相関性

えられる。以下では、この部分を「打継帯」と表現する。図-9 はコールドジョイントなどが生じておらず、打継帯も存在しない、表面状態が比較的良好と判断した箇所である。なお、全ての箇所における覆工コンクリートの配合は同じであるが、1 リフトの最下部および最上部に見られる局所的なコンクリート強度の向上、低下を反発度として把握することは難しいことが確認されている<sup>11)</sup>。

また、打継ぎ目の上下で打設方法が異なっている。打継ぎ目より下部のコンクリートは、天井板から約 200 cm の高さのセントルの窓から打設を行い、表面に浮かび出たままのブリーディング水は除去した。打継ぎ目より上部のコンクリートは空隙が残らないようつま部まで完全に充填したという報告がある。

#### 4.2 打継帯周辺の測定値分布

図-8、図-9 と同様の表面状態を示す箇所の中性化深さの平均値を図-10 に示す。打継帯が存在する面では打継帯の部分で中性化深さが低くなる傾向がある。これは、バイブレーターの使用によって僅かながら材料分離が生じ、練り混ぜ水が上部に移動したために相対的にこの部分の水セメント比が低下したためと推測される。打継帯が存在しない面に関しては、表面状態は比較的良好であるにもかかわらず、中性化深さの値が全体的に高くなる傾向にある。打ち継いだコンクリートの流動性が高かったために、バイブレーターをかける時間が短くなり、結果として材料分離が生じにくかったためと推測できる。

#### 4.3 各試験値と中性化深さの相関関係

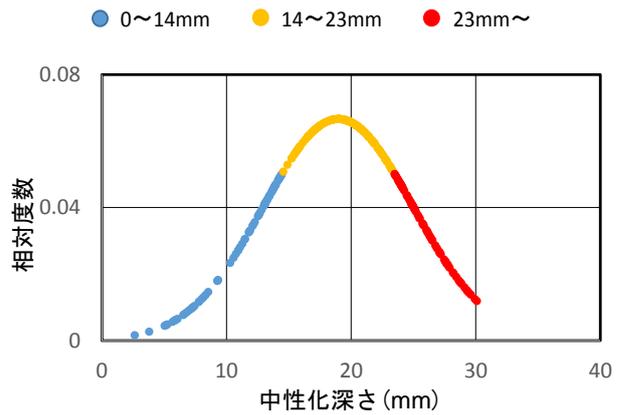


図-13 中性化深さのグレード分け(鉛直方向)

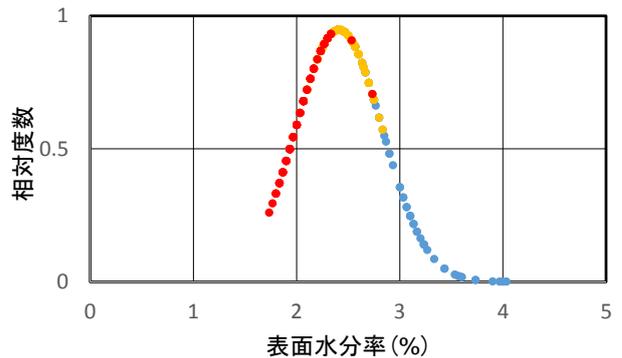


図-14 表面水分率のグレード分け(鉛直方向)

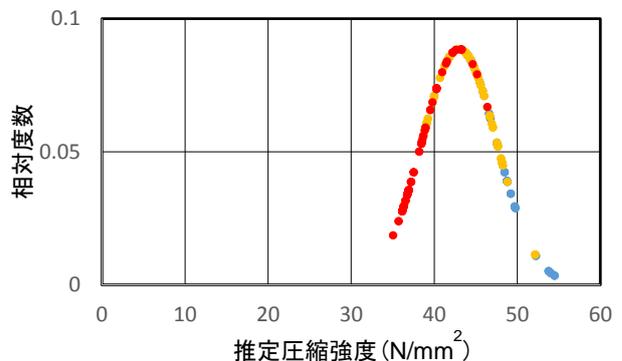


図-15 推定圧縮強度のグレード分け(鉛直方向)

図-11、図-12 に表面水分率と中性化深さ、推定圧縮強度と中性化深さの点をプロットしたものを示す。表面水分率と中性化深さは寄与率 0.71 となり、高い相関が認められるが、推定圧縮強度と中性化深さの相関は寄与率 0.48 程度に留まった。これは、表面状態の影響を受け易いという特徴を持つ反発度試験を、表面状態が良好ではない箇所でも行ったためと考えられる。また、既往の研究で実構造物を対象に調査した結果、コアの圧縮強度においては打継ぎ目の直上で大きく向上し、直下で大きく低下したのに対し、反発度(R)は顕著には変化しなかったことから打継ぎ目の上下では反発度に基づく強度の推定制度が低下する恐れがあることが報告されている<sup>11)</sup>。

#### 4.4 中性化深さのグレード分け

中性化深さの第 1 四分位数、第 3 四分位数を境界値とし

て対応する各試験値をグレード分けしたものを図-13～図-15に示す。その結果、表面水分率は閾値2.2%、2.8%、推定圧縮強度は閾値を43 N/mm<sup>2</sup>、48 N/mm<sup>2</sup>として、各試験値と中性化深さのグレードの並びがほぼ同一傾向となった。表面状態が良好ではないため、トンネル沿線方向における中性化深さの測定値と比較すると大きい値を示している。

以上のことから、表面状態が良好でない箇所でも表面水分率試験によって中性化深さの推定を行うことができると考えられる。推定圧縮強度からの中性化深さの推定には、未だ課題が残る結果となった。

## 5. まとめ

道路トンネルの送・排気ダクトの覆工コンクリートの表層品質を、非破壊試験・微破壊試験を用いて調査した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 送気側と排気側で比較した場合、表層品質に大きな違いは見受けられなかった。しかし、上り線と下り線で比較するとある程度の違いが確認できた。これは、供用後の環境に大きな違いがない構造物の場合、施工条件の違いがコンクリートの表層品質に大きな影響を与える可能性を示唆するものである。
- (2) 表面状態が良好な箇所の測定では、表面水分率試験、反発度試験を用いて中性化深さの推定を行うことができる。
- (3) コンクリートの打継帯の直上では中性化深さ試験値が良化する傾向が見られた。これは、パイプレーターの使用による材料分離が影響していると考えられる。
- (4) 表面状態が良好ではない箇所においても、表面水分率の測定を行うことで、その箇所の中性化深さを推測できる可能性が示唆された。
- (5) 表面水分率試験や反発度試験の非破壊試験で、中性化深さのグレードをある程度推定できる可能性が示唆された。今回調査を行った構造物の調査を今後も継続して行って、コア分析なども含めてデータを蓄積していくとともに、他のコンクリート構造物を含めて調査し、非破壊試験を用いた実構造物の品質評価の定量化について検討していく。

## 参考文献

- 1) 麻田正弘, 上田信二, 鳥居和之: ASR および塩害による劣化状況の事例調査に基づく道路構造物の維持管理計画の提案, 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書, 第13巻, pp.131-138, 2013.11
- 2) 武若耕司, 丸屋剛, 下村匠, 山口明伸, 竹田宣典:

塩害に対するコンクリート構造物の耐久性照査の現状と将来—コンクリート標準示方書への提案に向けて—, コンクリート工学テクニカルレポート, Vol.47, No.11, pp.23-32, 2009.11

- 3) 伊代田岳史, 矢島哲司, 魚本健人: コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.979-984, 1998
- 4) 三井健郎, 米澤敏男, 北川高史, 今城宏三: 反発度法により推定した構造体コンクリート強度に影響する要因の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1651-1656, 2005
- 5) 米澤敏男, 三井健郎, 北川高史, 今城宏三: 反発度法による構造体コンクリート強度推定精度向上技術の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1657-1662, 2005
- 6) 古賀裕久, 渡辺博志, 山田宏: 反発度を利用した硬化コンクリートの品質分布把握について, 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13巻, pp.439-446, 2013.11
- 7) 松橋宏治, 谷村幸裕, 曾我部正道: 実態調査に基づく既設構造物のコンクリート強度分布に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1627-1632, 2006.7
- 8) T.Sumii and H.Umehara: ASSESSMENT OF THE CORROSION TIME OF REINFORCING STEEL BY SALT ATTACK IN THE REINFORCED CONCRETE PIERS, ConMat'09 4th International Conference on Construction Materials, pp.131-136, 2009
- 9) 太田健司, 吉田亮, 鷺見高典, 梅原秀哲, 岸利治: 実構造物コンクリート表層品質に日射が与える影響に関する一考察, 土木学会第66回年次学術講演概要集, V-47, 2012.9
- 10) 谷口拓也, 吉田亮, 鷺見高典, 梅原秀哲: 覆工コンクリートの季節による水分率変化と中性化深さの関係に関する研究, 土木学会第67回年次学術講演会概要集, V-370, 2013.9
- 11) 日本工業規格: コンクリートの反発度の測定方法, JIS A 1155, 2012
- 12) 実施コンクリート強度判定法委員会, シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定法指針(案), 「材料試験」第7巻第59号, pp.426-430
- 13) 日本コンクリート工学協会, コンクリート診断技術03[基礎編], pp.255, 2003
- 14) 温品達也, 渡邊賢三, 柳井修司, 坂田昇, 細田暁: 目視調査に基づくコンクリートの表層品質評価技術, 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13巻, pp.459-466, 2013.11