

論文 地下鉄トンネルコンクリートの中性化速度補正係数に関する一考察

岩波 基*1・新井 泰*2・沢木 大介*3

要旨: 日本国内における地下鉄トンネルは数百 km の延長を有し、10 年後には供用延長の約 50% が経年 50 年を超える。さらに、トンネルの設計耐用期間は概ね 100 年となっており地上構造物より長期間である。そのため、地下鉄トンネルを含むトンネルコンクリートの劣化予測手法の確立は急務である。そこで、本研究では、建設年次が異なる地下鉄 6 駅における改良工事で発生した撤去側壁から試料を採取して中性化深さを測定し、表面の皮膜の効果を明確にするとともにコンクリート標準示方書の推定式の環境作用の程度を表す係数 β_e を 2.8 とすることで地下鉄トンネルに採用できる可能性について言及した。

キーワード: トンネル構造物, 長期材齢コンクリート, 中性化, 中性化速度係数, 配合推定

1. はじめに

一般に地下鉄を含む都市部のトンネルは、地上のコンクリート構造物と比較して、周囲には土水圧が作用していることから、トンネル内面側から地山側までのコンクリートコアサンプリングは基本的に不可能である。そのため、経年に伴う各種物性値のばらつきや化学的性質の変化についてはほとんど明らかになっておらず、鋼構造物を含む地上構造物と比較してマネジメント手法の適用が遅れている。

既往の数少ない地下構造物のコンクリートに関する調査・研究成果としては、横関¹⁾や玉井²⁾による成果があるが、いずれも一つの構造物のみを対象とし、建設年次が異なる複数の地下構造物に関する調査結果を比較するに至っていない。したがって、トンネルコンクリートの耐久性能を担保する手段として、現状はトンネル標準示方書【開削工法】・同解説³⁾で「コンクリートの水セメント比を 50 % 以下とし、鉄筋のかぶりを 30 mm 以上確保すること」と定めているのみで、鋼構造物を含む地上構造物と同様なマネジメント手法の確立に耐えうる基礎データは蓄積が不足している状況にある。

一方、日本国内における都市部の地下鉄トンネルの延長は数百 km あり、それらの点検や補修を日中運行を停止して行うとすると都市機能への影響が甚大であるため、維持管理作業は終電から始発までの限られた時間内に行わざるをえない。そのため、これまでの点検や補修は、変状が著しい箇所、例えばコンクリートの塩害が問題となるような河川横断箇所や建設時の切梁切断箇所などに集中し、その対策方法も限定的であった。反面、凍害やアルカリ骨材反応による変状は大凡見られないことから、筆者らは、地下鉄トンネルコンクリートの変状を評価する指標を中性化に絞り込むとともに、その予測手法の確

立を目的として、建設年次が異なる地下鉄駅 3 駅における改良工事で発生した撤去側壁から内面側から地山側を貫通するコンクリートコアを採取し、中性化に関する分析を行い、中性化速度について検討した結果、地山側の中性化速度は、 \sqrt{t} 則によっているのではなく、止水のためのコールドールによるコーティングの品質で決まり、ほぼ中性化の進行が 90 年供用しても抑えられるものと判断された⁴⁾。また、内面側については、現行のコンクリート標準示方書の方法では必ずしも安全側の設計とされない可能性があり、昭和初期に地上構造物と同様な施工条件で建設された地下鉄トンネル内面側の中性化速度係数は、コンクリート標準示方書における乾燥しやすい環境による算定式で大凡説明できるが、高度成長期に建設された地下鉄トンネルにおける中性化深さはコンクリート標準示方書の算定式を用いた場合よりも大きな値となることが多い可能性が高いことがわかった⁴⁾。そこで本研究では、前述の 3 駅に加えて 3 駅の中性化深さを前回と同様に撤去側壁から内面側・地山側を貫通するコンクリートコアを採取して、中性化に関する分析を行い、既往の検討結果⁴⁾に対する確認と地下鉄トンネルの内面側の中性化速度を推定するための環境作用の程度を表す係数を算定することを試みた。

2. 対象構造物

本論文では、既往の研究⁴⁾で対象とした 80 年間供用されてきた地下鉄道の開削トンネル（以下、地下鉄駅 No. 1）、40 年間供用されてきた地下鉄道開削トンネル（以下、地下鉄駅 No. 2）そして、55 年間供用されてきた地下鉄道開削トンネル（以下、地下鉄駅 No. 3）の 3 箇所に加えて、58 年間供用されてきた地下鉄道開削トンネル（以下、地下鉄駅 No. 4）、49 年間供用されてきた地下鉄

*1 第一工業大学 工学部自然環境工学科教授 博（工）（正会員）

*2 東京地下鉄株式会社 鉄道本部改良建設部 設計課 博（工）

*3 株式会社 太平洋コンサルタント 技術調査室 博（工）（正会員）

道開削トンネル（以下、地下鉄駅 No.5）そして、79 年間供用されてきた地下鉄道開削トンネル（以下、地下鉄駅 No.6）である。なお、コア抜きは湿式で行い、試料は 20℃の湿潤状態でラップして保管した。さらに、対象としたすべてのトンネルの側壁の背面側はコーラールで防水処理されていた。

2.1 地下鉄駅 No. 1

地下鉄駅 No. 1 は、昭和 7 年の開業以降、80 年間供用されてきたものである。この構造物は、地下水位以下にあるため、コンクリートコア（φ100）は、地下 1 階のココース幅工事に伴い撤去された側壁から、漏水やひび割れが無い位置を選び、2 本を採取した。

2.2 地下鉄駅 No. 2

地下鉄駅 No. 2 は、昭和 49 年の開業以降、40 年間供用されてきたものである。この構造物も地下水位以下にあり、コンクリートコア（φ100）は、地下 1 階の連絡通路新設工事に伴い撤去された側壁から、漏水やひび割れが無い位置を選び、2 本を採取した。

2.3 地下鉄駅 No. 3

地下鉄駅 No. 3 は、全線の一部が昭和 36 年に開業して以来、55 年間供用されてきたものである。この構造物も地下水位以下にあり、コンクリートコア（φ150）は、駅部の連絡通路新設工事に伴い撤去された側壁から、健全な位置を選び、試験用を 4 本採取した。

2.4 地下鉄駅 No. 4

地下鉄駅 No. 4 は、昭和 33 年に開業して以来、58 年間供用されてきたものである。コンクリートコア（φ100）は、駅部の改良工事に伴い撤去された側壁から、表面にひび割れがある位置から 3 本、健全な位置から 3 本を採取した。ひび割れは生じていたが、漏水はなく、ひび割れも表面のみで内部は健全であった。

2.5 地下鉄駅 No. 5

地下鉄駅 No. 5 は、全線の東側が昭和 42 年に開業して以来、49 年間供用されてきたものである。コンクリートコアを撤去側壁から φ150 で採取した後、一部がすべて欠損していたので、φ150 のコアから φ100 のコアを健全な位置を選び、3 本採取した。

2.6 地下鉄駅 No. 6

地下鉄駅 No. 6 は、地下鉄駅 No. 1 の延長で、昭和 8 年に開業されて、79 年間供用されてきたものである。この駅は内面側にモルタルを塗り、その上にタイルが隙間無く貼ってあった。このタイルの表面から地山側まで、コンクリートコア（φ100）を 3 本採取した。なお、コンクリートの表面の状態はタイルが貼ってあったため確認できなかった。

3. 調査内容

以下に、前記の各コアを用いて行ったコンクリートの中性化に関する調査内容について述べる。

3.1 中性化深さの測定

トンネルでは地山側と内面側の両方で、測定は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して行った。

3.2 配合推定による水セメント比

全ての構造物で採取した複数箇所の試料について配合推定試験を行った。配合推定試験は、社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定試験に関する共同試験報告」に準拠して行った。

3.3 細孔径容積の測定

全てのトンネルにおいて水銀圧入法を用いて細孔径分布を測定し、全細孔径容積を算出した。地下鉄駅 No. 1 の試料は 2 本から各 1 箇所、No. 2 も 2 本から各 1 箇所、

表-1 中性化深さ（地山側）

駅No.	供用年数	部位名	平均中性化深さ (mm)	標準偏差	全ての中性化深さ測定値(mm)													
					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1	80	No.2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80	No.4	3.3	1.3	3.5	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	0.0				
2	40	大2	4.5	1.9	3.0	6.0	6.5	4.5	7.5	5.5	6.0	6.0	6.5					
	40	中1	5	1.7	2.5	1.5	3.5	3.5	2.5	2.5								
					3.5	3.5	3.5	5.0	5.0	5.0								
40	小1	3.9	0.9	4.0	3.0	2.5	3.0	3.0	4.0	4.0	2.5	4.5						
3	55	No.42	0.8	1.1	1.0	0.5	0.5	0.5	4.5	0.5	0.5	0.5	0.5					
	55	No.43	1.3	0.8	3.0	0.5	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.5	1.0					
					0.5	2.5	1.5	0.5	0.5									
	55	No.47	0.9	0.8	2.0	2.5	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5					
55	No.115	2.2	2.2	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	6.0	6.5	0.5	0.5	3.5					
4	58	No.1	1.1	0.9	2.5	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.0					
	58	No.2	1.1	1.1	3.5	0.5	0.5	0.5	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5					
	58	No.3	2.9	1.5	5.0	4.0	0.5	3.5	0.5	3.5	3.5	3.0	3.0					
	58	No.4	4.4	2.7	3.5	5.0	3.0	3.0	4.5	4.0	0.5	10.5	6.0					
	58	No.5	7.7	4.0	15.5	13.5	4.5	4.5	7.0	6.0	6.5	5.5	6.0					
	58	No.6	4.2	1.7	5.5	4.0	3.0	5.5	6.0	0.5	4.5	4.5	4.0					
5	49	No.8	1.6	1.0	3.0	2.5	0.5	2.0	0.5	0.5	0.5	1.5	2.5					
	49	No.20	0.7	0.3	1.0	0.5	0.5	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5	1.0					
					0.5	0.5	0.5	1.0	1.0									
49	No.36	6.0	4.4	2.0	3.5	2.5	3.0	2.5	2.5	3.0	3.5	4.5						
6	79	1	0.8	1.0	0.5	3.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5					
	79	2	0.9	0.8	2.5	0.5	2.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5					
	79	3	1.8	1.7	4.0	4.5	2.5	0.5	3.0	0.5	0.5	0.5	0.5					

No. 3は4本から各1箇所、No. 4は2本から各1箇所、そして、No. 5も2本から各1箇所を全て中央部で細孔径分布を測定した。No. 6は、No. 1と同時期の施工で、同じ産地と工場の材料を使用していたので、計測が省略されたが、当時は現場練りなので計測すべきであった。

4. 調査結果

4.1 中性化深さの測定結果

中性化深さの測定結果を表-1、2と図-1に示す。地山側の測定結果は、表-1と図-1(a)から分かるように中性化深さがすべて10mm以下であり、ほとんど進行していなかった。

地下鉄駅 No.1の内面側の測定結果は、全体的に中性化深さが20mm~40mmであった。

地下鉄駅 No.2の内面側の中性化深さは20mm~40mmであり、中性化が進行している箇所の数値は供用年数が

約2倍の地下鉄駅 No.1と同程度であった。

地下鉄駅 No.3の内面側の中性化深さは地下鉄駅 No.1およびNo.2よりは小さい値であり、数mm~30mmであった。

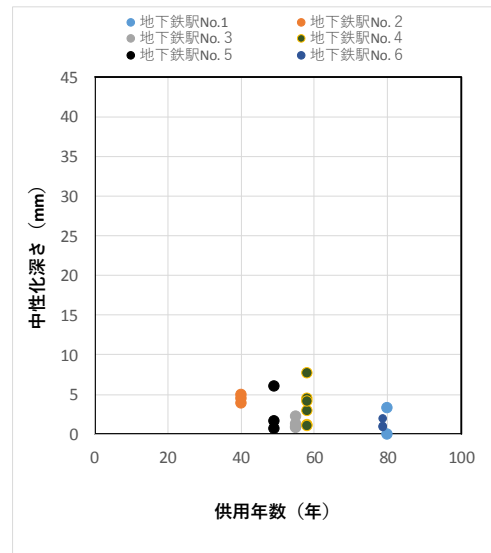
地下鉄駅 No.4の内面側の中性化深さは地下鉄駅 No.2よりはやや大きくなっており、すべて30mm半ばであった。

地下鉄駅 No.5の内面側の中性化深さは他の地下鉄駅と比較して、小さい値で有り、すべて10mm以下の値であった。一方、環境条件が他の駅と大きく異ならないにもかかわらず、測定値に差異があった原因を今後、追加されている他駅の試験結果も吟味し、総合的に判断する予定である。

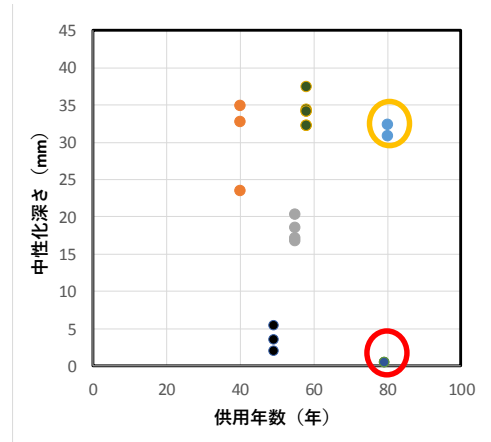
地下鉄駅 No.6の内面側は、タイルとその下のモルタルが健全な状態に有り、モルタルもその下のコンクリートとともに全く中性化していなかった。

表-2 中性化深さ (内面側)

駅No.	供用年数	部位名	平均中性化深	標準偏差	全ての中性化深さ測定値(mm)																				
					41.0	38.0	33.0	32.0	28.5	27.0	31.5	31.0	30.5												
1	80	No.2	32.3	4.2	41.0	38.0	33.0	32.0	28.5	27.0	31.5	31.0	30.5												
					30.5																				
1	80	No.4	30.9	3.5	35.0	32.5	32.5	32.0	32.0	31.5	25.0	24.0	32.0												
					32.0																				
2	40	大1	32.8	2.7	29.5	29.5	31.5	33.5	38.5	34.0	36.0	34.5	34.0												
					30.0	30.0	30.5	32.0	34.5	34.5															
	40	中1	23.5	2.7	24.0	26.0	26.0	26.0	22.5	19.0	19.0	19.5	20.5												
2	40	小1	34.9	3.4	29.5	31.5	31.5	31.5	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0												
					37.0	40.0	40.0	39.5	38.0	37.0															
3	55	No.42	20.3	5.8	26.5	26.0	18.0	24.0	21.5	20.5	24.0	23.5	23.0												
					22.5	12.5	5.5	15.5	20.5																
	55	No.43	18.6	3.5	12.0	19.0	15.0	21.5	21.0	16.5	18.5	22.5	22.0												
					23.5	13.0	17.5	19.0	19.5																
3	55	No.47	16.8	7.6	11.5	13.5	3.0	2.0	23.5	24.0	17.5	22.5	24.5												
					19.5	19.0	25.0	17.5	11.5																
3	55	No.115	17.1	9.6	5.5	4.0	6.0	10.5	11.5	14.5	18.0	30.5	29.0												
					28.5	28.5	24.0	18.5	10.5																
4	58	No.1	34.2	3.8	34.0	37.0	37.0	39.0	37.5	28.0	29.0	32.5	33.5												
					31.5	32.0	33.0	32.0	31.0	34.0	31.0	32.5	33.5												
	58	No.3	34.3	1.6	32.5	34.0	36.5	36.5	35.5	34.0	32.5	34.5	33.0												
					39.5	38.0	35.5	38.0	37.0	38.5	38.5	36.0	35.5												
	58	No.5	32.3	2.9	34.0	33.0	38.0	33.5	30.5	33.0	31.0	29.0	28.5												
					32.0	27.0	33.5	35.0	32.5	35.0	38.5	37.5	36.5												
5	49	No.8	5.5	1.7	4.0	3.5	4.0	9.5	5.5	4.5	4.5	6.0	6.0												
					4.5	4.0	6.0	6.0	8.5																
	49	No.20	2.1	0.5	2.0	3.0	2.0	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0												
5	49	No.36	3.6	3.2	5.0	7.0	7.5	12.0	0.5	0.5	1.5	2.5	1.5												
					2.5	2.0	2.0	3.0	2.5																
6	79	1	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5												
					0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5												
	79	3	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5												



(a) 地山側



(b) 内面側

図-1 中性化深さ (単位 mm)

表－3 配合推定による平均水セメント比

地下鉄駅	平均セメント比(%)
No.1	71
No.2	58
No.3	55
No.4	54
No.5	48
No.6	71

4.2 配合推定による水セメント比の結果

地下鉄駅の No. 1～6 の水セメント比を表－3 に示す。

なお、セメント量の計算に必要なセメントの CaO 含有率は、普通ポルトランドセメントにおける CaO 含有率を 64.5%，強熱減量を 0.6%とそれぞれ仮定し設定した。また、骨材は不溶残分を 95.2%，CaO 含有率を 0.4%，強熱減量を 0.6%と仮定し配合推定を行った。

地下鉄駅 No. 1 と No. 6 の推定結果によると、同一路線で同時期の施工であるため水セメント比が 71%で一致していた。ただし、水セメント比が 70%を超えているという点で、昭和初期の構造物としてはやや単位水量が多いコンクリートを用いていると判断された。

地下鉄駅 No. 2 と No. 3，No. 4 の推定結果では、水セメント比が約 55%であり、ほぼ一般的な配合であると判断された。

No. 5 は 50%以下の 48%であり、この時期のコンクリートとしては小さな値であった。

4.3 細孔径容積の測定結果

表－4 に、コアの内部における試料で細孔径分布を測定した細孔径分布の測定より求めた全細孔径容積を示す。

5 つの地下鉄構造物では全細孔径容積がコンクリートとしては決して大きな値ではない。なお、No. 1 の値が他

表－4 全細孔径容積

試料名	全細孔径容積 (ml/g)	
地下鉄駅No. 1	1	0.1307
	2	0.1336
地下鉄駅No. 2	1	0.1080
	2	0.1115
地下鉄駅No. 3	1	0.1061
	2	0.0962
	3	0.0964
	4	0.1124
地下鉄駅No. 4	No.1	0.0716
	No.2	0.0832
地下鉄駅No. 5	No.1	0.0951
	No.2	0.0676

の駅より大きいのは水セメント比が大きいことに関係していると考えられる。また、前述の通り、No.6 は、工事記録より No.1 と同じ配合であるため計測を行わなかった。

5. 環境作用の程度を表す係数 β_e の算定

2012 年制定コンクリート標準示方書設計編（以下、コンクリート標準示方書とする）の解 2.1.2 式を用いて中性化速度係数から求めた中性化深さの値を推定する場合、乾燥しやすい環境では環境作用の程度を表す係数 β_e を 1.6 としている。ここでは、地下鉄トンネルの中性化深さを解 2.1.2 式で推定する場合に適合する係数 β_e の値を用いて算出し、今回対象とした 6 箇所のトンネルにおける中性化深さを算定する。

5.1 地山側

表－1 と図－1 (a) に示したとおり、地山側の中性化深さはすべてのトンネルで 10mm 以下なので、6 箇所の地下鉄トンネルのように地山側を止水を目的としてコータールでコーティングしている場合には中性化に対する検討は不要であると判断した。しかし、漏水等があり止水層の品質に疑義のある場合等には別途検討が必要であると考えられる。

5.2 内面側

内面側については、地下鉄駅特有の外気温と比較して相対的に高温で、乾燥傾向が見られ、断続的に風の吹く

表－5 β_e の算出

駅No.	実測の中性化深さから推定した中性化速度	コンクリート標準示方書による中性化速度	実測からの推定値 / 示方書の値
地下鉄駅No. 2	5.19	1.65	3.14
	3.72	1.65	2.25
	5.52	1.65	3.34
地下鉄駅No. 3	2.74	1.38	1.98
	2.51	1.38	1.82
	2.27	1.38	1.64
	2.31	1.38	1.67
地下鉄駅No. 4	4.49	1.29	3.48
	4.24	1.29	3.29
	4.51	1.29	3.49
	4.91	1.29	3.81
	4.24	1.29	3.29
地下鉄駅No. 5	4.49	1.29	3.48
	0.78	0.75	1.04
	0.30	0.75	0.39
	0.51	0.75	0.68
平均値			2.82

条件に適合した環境作用の程度を表す係数 β_e を算出する。なお、図-1(b)において赤丸印を付けた No.6 は表面がしているモルタルとタイルによって保護されていて、全く中性化が進んでいなかったため考慮しないこととした。また、No.1は、施工中において道路交通を封鎖して路面覆工なしとしており、地上構造物の施工条件と同程度であると考えられたので図-1(b)に黄丸を付けて No.6 同様考慮しない。

$$\alpha_d = \frac{\text{計測中性化深さ}y}{\sqrt{\text{供用年数}t}} \quad (1)$$

以上より、地下鉄トンネルに適合した環境作用の程度を表す係数 β_e は、表-5に示したとおり地下鉄駅 No.2~No.5の4駅における内面側の中性化深さから式(1)で求めた中性化速度をコンクリート標準示方書の推定値で除した値の平均値から算出した。なお、表-2には、平均値を用いることの妥当性を評価するために全計測値と標準偏差を併記した。これによると試料採取場所ごとにばらつきがあるものの、個々の試料内での計測値のばらつきの程度は小さいと判断できる。したがって、トンネルの管理を行う場合、延長ごとに劣化状況を評価する

表-6 換算中性化深さ

論文駅名	供用年数	水セメント比を54%として換算した中性化深さ
地下鉄駅No.2	40	26
	40	18
	40	27
地下鉄駅No.3	55	19
	55	17
	55	16
	55	16
地下鉄駅No.4	58	34
	58	32
	58	34
	58	37
	58	32
	58	34
地下鉄駅No.5	49	9
	49	4
	49	6

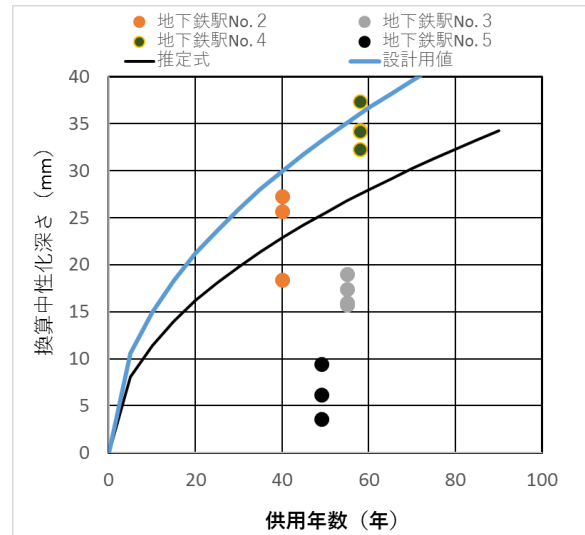


図-2 換算中性深さと推定曲線の比較

現状に照らしても、今回の計測値の平均値に対する環境作用の程度を表す係数 β_e の算定手法は妥当であると考えられる。

以上より、今回検討対象としたコアの中性化深さに関する分析結果における地下鉄トンネルに適合した環境作用の程度を表す係数 β_e は2.8とした。

6. 環境作用の程度を表す係数 β_e の検証

今回 $\beta_e=2.8$ を使用した場合のコンクリート標準示方書解2.1.2式による推定値と測定値を比較して当該 β_e の適用性を確認する。

測定値は水セメント比がトンネルによって異なるため、表-6では全試料の水セメント比を54%として換算した値を示しており、その平均値と推定値を比較したものが図-2である。なお、共通の水セメント比で換算した理由は、中性化深さの傾向を確認するためである。

表-6の値は、供用年数が40~60年間に集まっているので、各駅間で比較すると、地下鉄駅 No.3と No.4の中性化深さは地下鉄駅 No.5の値より3倍以上大きいことが分かる。とくに地下鉄駅 No.4の試料の品質は外観で他のトンネルより明らかに劣っていたため、これについては建設当時の施工方法に起因してコンクリートの品質低下がもたらされた可能性がある。

図-2を見ると地下鉄駅 No.5では推定値を大きく下回ったが、地下鉄駅 No.2~No.4では推定値がほぼ中央部を通り、最大の中性化深さである地下鉄駅 No.4との値の差もそれほど大きくない。また、図-2における地下鉄駅 No.4の最大値は37mmで推定値は28mmであるが、ばらつきを考慮した γ_{cb} の1.15を考慮すれば、設計上問題ない精度であると考えられる。

以上より大きな地下鉄駅 No.4と地下鉄駅 No.5は施工時期が10年程度しか差がないにもかかわらず、中性化

深さに大きな差が生じていたため、今後は、それが何に起因した事象なのかを工事記録やその他の分析結果から明確にする必要がある。

7. 考察

7.1 地山側

地下鉄トンネルの地山側の中性化深さは既往の知見と同様、図-1(a)における地下鉄駅 No.3 と地下鉄駅 No.1 が小さく、地下鉄駅 No.4 が大きい結果となった。即ち、供用年数と中性化深さの値に相関がほとんど見られず、したがって、中性化速度は、 \sqrt{t} 則によっているのではなく、コータルによるコーティングの状態に支配されていると想定できる。今回検討対象としたトンネルは全て地下水位以下に設置されており、地山側の中性化が溶脱によって生じている可能性もあり得る。これを確認するためには、コーティングの品質についても詳細に調査する必要があると考えられる。

7.2 内面側

図-1(b)で示したように地下鉄駅 No.6 では約 80 年供用しているにもかかわらず内面側でも中性化が進んでいない。このことから、地山側と同様に被覆を適切に行えば中性化は生じないと考えられる。この結果から、他のコンクリート構造物についても中性化防止には被覆が効果的であると言える。

図-2を見ると中性化深さが大きい地下鉄駅 No.2 および地下鉄駅 No.4 の測定値と推定値の最大の差が 15mm 程度となっており、今回提案する補正係数 β_e を 2.8 とすることがほぼ妥当であると考えている。設計値に対しても上回る計測値があり、設計上考慮すべき 10mm の余裕もない。しかし、これ以上、補正値を大きくした分地下鉄駅 No.3 や地下鉄駅 No.5 では不経済な設計になる可能性が高い。

したがって、地下鉄トンネルに適合した環境作用の程度を表す係数 β_e を 2.8 とし、コンクリート標準示方書の推定式を用いることで、地下鉄トンネルの内面側の中性化に関する耐久性評価は合理的に行うものとする。それを目的に、地下鉄駅 No.3 や地下鉄駅 No.5 の値が推定値より大幅に小さくなった原因を解明する必要があると考える。

8. まとめ

8.1 地山側の中性化

地下鉄トンネルの地山側の中性化は、トンネル地山側に施される止水層の状態によって決まるという既往の知見は地下鉄駅 6 駅の全ての計測結果から確認できた。一

方で、止水層が万全でない状態の試料が入手できなかったため、地山側に発生する中性化の要因の確定は今後の課題である。

2) 内面側の中性化

昭和初期に建設された地下鉄トンネルであっても内面側に高品質な被覆を施すことで中性化を抑制することが出来る。

また、内面側のコンクリート表面が露出している地下鉄トンネルでは、中性化速度係数をコンクリート標準示方書の式を用いたうえ、地下鉄トンネルの環境作用の程度を表す係数 β_e を 2.8 として求めれば、ほぼ妥当な中性化深さが算出できる。

ただし、中性化の進行が小さいトンネルもある現状をふまえて、地下鉄トンネルの中性化速度への影響因子は温度や湿度^{5),6)}だけでなく別のパラメータにも依存するか否かについて検討する必要がある。そのためには、工事記録はもとより、細孔径分布測定、電子顕微鏡観察、EPMA 分析等の結果も併せて検討し、推定精度の充実を図る予定である。

参考文献

- 1) 横関康祐, 中曾根順一, 柿崎和男, 渡邊賢三: 100 年以上経過した地下コンクリート構造物の耐久性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.251-256, 1998.6
- 2) 玉井 譲: 90 年経過したコンクリート地下柱・基礎の基本物性に関する分析調査, 歴史的構造物の診断・修復に関するシンポジウム 委員会中間報告ならびに論文報告集, pp.61-66, 2006.6
- 3) 2016 年制定 トンネル標準示方書 開削工法・同解説, 土木学会, 2016
- 4) 岩波 基, 新井 泰, 橋口弘明, 沢木大介, 地下鉄トンネルのコンクリートの中性化速度に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, pp.1309-1314, 2017.7
- 5) 魚本健人, 高田良章: コンクリートの中性化速度に及ぼす要因, 土木学会次論文集, N.451/V-17, pp.119-128, 1992.8
- 6) 鄭 載東, 平井和喜, 三橋博三: モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 第 1 巻第 1 号, pp.85-94, 1990.1
- 7) 銀座線工事記録 (復刻版), 東京地下鉄(株), 2005.3