

論文 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

岩波 基^{*1}・新井 泰^{*2}・橋口 弘明^{*3}・沢木 大介^{*4}

要旨: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。反面、トンネルコンクリートは、地上構造物と環境条件が異なるほか、試料採取の困難さから当該予測手法の確立に資する基礎データの蓄積が十分でない。そこで、本研究では、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試料を採取して中性化深さを測定し、コンクリート標準示方書の推定式に基づく推定値との比較を行った。

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

一般に都市部の地下鉄を含むトンネルは、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ほか、作業時間、作業空間等に制約があり、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の蓄積が不足している状況にある。

一方、都市部の地下鉄トンネルの延長は数百 km あり、点検や補修のために日中運行を停止すると都市機能への影響が甚大であるため、維持管理にかかわる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、本研究では地下鉄トンネルの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。なお参考までに、河川の堰の地下コンクリートと道路トンネルのコンクリートについても同様の分析を行い、結果を比較した。

2. 対象構造物

本論文で検討対象としたのは、約 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）、約 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、約 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 箇所である。地下鉄トンネルと比較するために昭和 11 年に建設された新戸相武台トンネルと地盤内にあるコンクリートとして大正 11 年から供用されてきた大河津固定堰（平成 24 年解体）も対象構造物とした。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。

2.1 地下鉄駅 No. 1

地下鉄駅 No. 1 は、昭和 7 年の開業以降、約 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、側壁の背面側はコータールで防水処理されていた。コンクリートコア（φ100）は、地下 1 階のコンコース拡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、試験用 2 本と予備 1 本の合計 3 本採取した。

2.2 地下鉄駅 No. 2

地下鉄駅 No. 2 は、昭和 49 年の開業以降、約 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

*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 東京地下鉄株式会社 鉄道本部改良建設部 第三工事事務所

*4 株式会社 太平洋コンサルタント 技術調査室 博（工）（正会員）

にあり、側壁の背面側はコーラタールで防水処理されていた。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、試験用2本と予備3本の合計5本採取した。

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、約 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なので側壁の背面側はコーラタールで防水処理されていた。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 新戸相武台トンネル

新戸相武台トンネルは、昭和 11 年に建設された神奈川県相模原市の在日米陸軍基地を横断する市道のトンネルで、幅 6.16m、高さ 5.89m の門型ラーメン構造を有する。試料は、24m の改良工事区間のうち、漏水やひび割れが無い中央部と端部から 5m の2箇所について、地下水位以下となる側壁の下端より 1.5m の位置から Φ100 のコアを6本採取した。なお、トンネル全体としてのコンクリートの劣化は見られなかった。

2.5 大河津固定堰

大河津固定堰は、新潟県の信濃川の敷地内にあり、本体部は高さ約 3m、厚さ約 1.8m で延長が 520m のマッシュな無筋コンクリート構造であった。また、環境条件としては河道内で地下水位以下にあったが、周辺地盤は透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度のシルト混じり細砂地盤であり、地下水の流れが遅い地盤内であった。本体部中心でひび割れが無く健全と判断される位置で φ150 のコアを3本採取したが、無筋コンクリートであるがゆえに幅 1mm 超のひび割れが内在し、実際に調査したのは1本のみであった。

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性質に関する調査内容について述べる。併せて、コンクリートの劣化に影響があると考えられている年平均温度と年平均湿度については、計測実績のある都内の地下鉄駅坑内の計測結果を引用した。

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、大河津分水堰の試料では地山と接している面に対してのみで測定した。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 最大骨材寸法の計測と配合推定

全てのトンネル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。なお、大河津固定堰では試

料が1本なので、それについて推定した。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。また、最大骨材寸法は配合推定を行ったコアについて観察し、測定した。

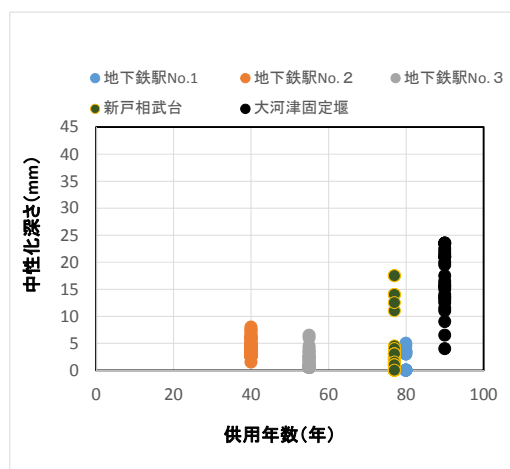
3.3 細孔径容積の測定

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、No. 3は4本から各1箇所、新戸相武台トンネルは2本から各1箇所、そして、大河津固定堰のコアは1本なので1箇所を全て中央部で細孔径分布を測定した。

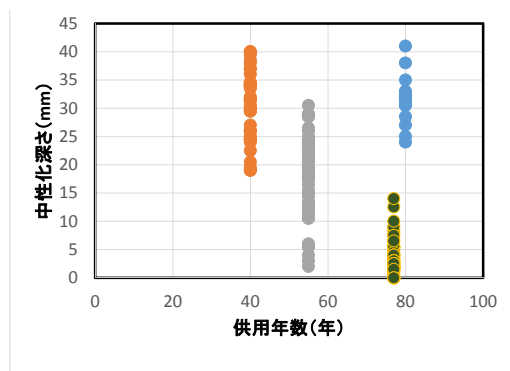
4. 調査結果

4.1 中性化深さの測定結果

中性化深さの測定結果を図-1に示す。なお、コア内でのばらつきも表現するため JISA1152 に準拠せず、地下鉄トンネルの地下鉄駅 No. 1 はコア1本あたり10箇所、No. 2 は15箇所および No. 3 は14箇所、新戸相武台トンネルは1本あたり10箇所そして大河津固定堰は14箇所の地山側計測結果を図-1(a)に、大河津固定堰以外のトンネルの内面側計測結果を図-1(b)に各々示す。



(a) 地山側



(b) 内面側

図-1 中性化深さ (単位 mm)

地下鉄駅 No. 1 の測定結果では、地山側では中性化深さが大きいものでも数 mm であり、ほとんど進行していなかった。これは、地盤と接するトンネルの外面に防水を目的としてコールタールをコーティングしていたためであると考えられる。一方、内面側では、全体的に中性化深さが 20mm～40mm であった。

地下鉄駅 No. 2 の地山側の測定結果では、地下鉄駅 No. 1 と同じく中性化が進んでおらず、中性化深さは小さい値であった。これに対して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では供用年数が約 2 倍の地下鉄駅 No. 1 と同程度であった。

地下鉄駅 No. 3 の地山側の測定結果では、他の 2 駅と同じく中性化が進んでおらず中性化深さは小さかった。内面側の中性化深さは地下鉄駅 No. 1 および No. 2 よりは中性化深さが小さい値であり、数 mm～30mm であった。

新戸相武台トンネルの測定結果では、各地下鉄駅と同様に地山側のほとんどが中性化深さは 0 であったが、一部中性化深さが 10mm～20mm となっている箇所があった。一方、内面側の中性化深さは各地下鉄駅と異なり全て 15mm 以下であった。これは、トンネルの温度がほぼ外気と同じであり、さらに、湿度が常に 70%RH 以上であることが影響しているものと推測される。また、交通量が少ないこともコンクリートの劣化を抑制しているものと思われる。

大河津固定堰の測定結果では、地山側の内面は凹凸があるため、それぞれの測定位置における内面を起点とした値を表示した。大河津固定堰の本体部はマッシブなコンクリートであり、地下水中に長期存在し、コンクリートと地盤が接触していたにもかかわらず、中性化深さは数 mm～20mm となっている。この原因は CO₂ 以外の溶脱現象によるものであると考えられる。

4.2 最大骨材寸法の計測結果と配合推定結果

地下鉄駅の No. 1～3 の最大骨材寸法と配合推定結果を表 1～3 に、新戸相武台トンネルの同様な結果を表 4 に、大河津固定堰の結果を表 5 に各々示す。

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。

表 1 に示した地下鉄駅 No. 1 の推定結果によると、1,2 とともに単位セメント量が 312kg/m³ で、単位水量も 223kg/m³ と 222kg/m³、水セメント比が 72% と 71% であり、ほぼ同じ配合になっていた。ただし、水セメント比が 70% を超えており、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。また、

表 1 地下鉄駅 No. 1 の配合推定結果

No.	単位容積質量 (kg/m ³)	材料単位数 (kg/m ³)			最大骨材寸法 (mm)	水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材		
1	2345	312	223	1810	30mm程度	72
2	2338	312	222	1803		71

表 2 地下鉄駅 No. 2 の配合推定結果

No.	単位容積質量 (kg/m ³)	材料単位数 (kg/m ³)			最大骨材寸法 (mm)	水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材		
1	2342	254	152	1935	30mm程度	60
2	2280	324	177	1779	20mm程度	55

表 3 地下鉄駅 No. 3 の配合推定結果

No.	単位容積質量 (kg/m ³)	材料単位数 (kg/m ³)			最大骨材寸法 (mm)	水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材		
1	2342	257	138	1947	30mm程度	54
2	2334	266	148	1920		56
3	2319	343	181	1796		53
4	2357	274	156	1927		57

表 4 新戸相武台トンネルの配合推定結果

No.	単位容積質量 (kg/m ³)	材料単位数 (kg/m ³)			最大骨材寸法 (mm)	水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材		
1	2405	322	205	1878	30mm程度	64
2	2401	310	202	1891		65

表 5 大河津固定堰の配合推定結果

No.	単位容積質量 (kg/m ³)	材料単位数 (kg/m ³)			最大骨材寸法 (mm)	水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材		
1	2384	126	141	2116	50mm程度	112

最大骨材寸法が 30mm 程度で現在よりやや大きい骨材が使われていたようである。

表 2, 3 に示した地下鉄駅 No. 2 と No. 3 の推定結果では、単位セメント量が約 250kg/m³ から約 350kg/m³、単位水量が 150kg/m³ から 180kg/m³ 程度であり、水セメント比が約 55% であり、単位セメント量が少ない試料が多いが、ほぼ一般的な配合であると判断された。また、全体的に、最大骨材寸法が 30mm 程度で現在よりやや大きかったが、地下鉄駅 No. 2 の試料 1 では他の試料より明確に骨材寸法が小さく、狭隘な施工条件に原因があつてこのようなことが生じたのではないかと推測される。

表 4 に示した新戸相武台トンネルの推定結果は、試

料1が単位セメント量 322kg/m^3 、単位水量 205kg/m^3 、水セメント比64%で、試料2は単位セメント量が 310kg/m^3 、単位水量が 202kg/m^3 、水セメント比が65%になった。

表-5に示した大河津固定堰の推定結果によると、単位セメント量が 126kg/m^3 、単位水量が 141kg/m^3 、水セメント比が112%といった単位セメント量と水セメント比が非常に小さい値となった。

4.3 細孔径容積の測定結果

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表-6に示す。地下鉄の3つ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、新戸相武台トンネルのコンクリートも同程度である。一方、大河津固定堰のコンクリートでは全細孔径容積が 0.15 ml/g を超えていることから、細孔による空隙が多いといえる。

表-6 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
新戸相武台トンネル	No.16	0.0900
	No.18	0.0898
大河津固定堰	内部	0.1519

4.4 年平均温度と年平均湿度の測定結果

地下鉄駅内で計測した日平均温度と日平均湿度から年平均温度と年平均湿度を求めてまとめたものが表-7である。なお、地下鉄駅No.2はNo.1と同じく一日の乗降者数が35000人程度であり、構造も似ているので同様の値とした。新戸相武台トンネルの内部は風通しがよくほぼ外気と条件が同じであることから、アメダスの値を用いた。

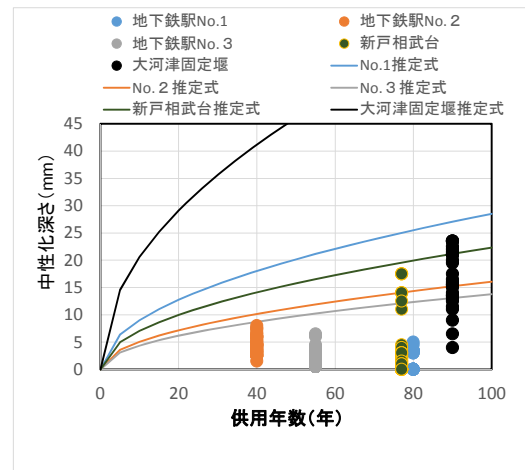
表-7 年平均温度と年平均湿度

	地下鉄駅No.1	地下鉄駅No.2	地下鉄駅No.3	外気中
年平均気温(°C)	25.4		23.9	15.4
年平均湿度(%)	43		50	69

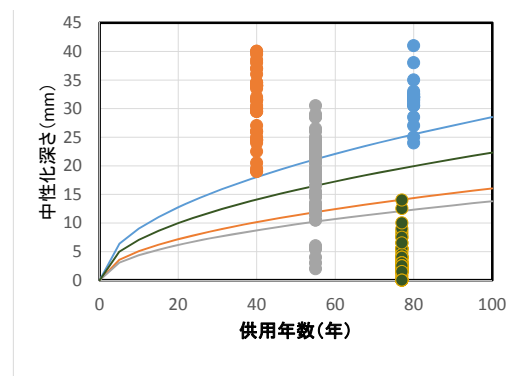
5. 測定値と推定値の比較

今回調査した5箇所の構造物における中性化深さの測定値と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比較した結果を図-2に示す。



(a) 地山側



(b) 内面側

図-2 中性化深さの測定値と推定曲線

5.1 地山側

図-2(a)は、図-1(a)の地山側の中性化深さの測定値とコンクリート標準示方書の推定式で求めた中性化深さの特性値の経時変化グラフを比較して示したものである。なお、中性化深さの推定には、配合推定のW/Cの値を用いた。配合推定の結果にはばらつきを含んでいるが、大河津固定堰を除き、当時の一般的配合から実配合と倍半分の違いがないものと考えて配合推定の値を採用した。

図-2(a)から分かるように全ての構造物で、中性化の測定値がコンクリート標準示方書による推定値より小さいことが確認された。とくに、3つの地下鉄駅では地山側がコータールでコーティングしているため中性化している深さは10mm以下であった。地下鉄駅No.1の測定した最大の値が推定値の1/5程度であったが、地下鉄駅No.2とNo.3は推定値よりやや小さい程度であった。

また、新戸相武台トンネルと大河津固定堰もコンクリートが直接地山と77年および90年間接していたが、中

性化した深さが 25mm 以下であった。このうち、道路トンネルである新戸相武台トンネルでは、中性化の測定値が推定値に近いものがあつた。一方、大河津固定堰では、表-5 に示したように W/C が 112% と異常に大きな値であるため推定値が測定値より大幅に大きな値となつた。

5.2 内面側

地山側と同様に内面側の中性化深さの測定値と推定式で求めた中性化深さの特性値のグラフを図-2 (b) に示す。

地下鉄駅の 3 駅の内面側での中性化深さは、コンクリート標準示方書の推定値を上まわる結果となつた。

地下鉄駅 No. 1 の測定値は、推定値より大きな値となつたが、ばらつきが小さく魚本ら⁴⁾の実験と同様に 40% 以内に収まっている。これに対して、地下鉄駅 No. 2 の測定値の最小値は推定値の約 2 倍であり、最大値では約 4 倍であり、ばらつきも大きかつた。地下鉄駅 No. 3 は No. 2 と同様に最小値が 2mm から最大値が 30mm であり、推定値の約 3 倍であり、ばらつきが大きかつた。

環境条件が外気中に近い新戸相武台トンネルでは、測定値が推定値のほぼ半分以下に分布した。

地下鉄駅の年平均湿度は、全て魚本ら⁴⁾が最も中性化の進行が早くなるとしている 40%RH~60%RH の範囲にある。そこで、コンクリート標準示方書の乾燥しやすい環境の推定式によるグラフと地下鉄駅の測定値の比較結果を図-3 に示す。

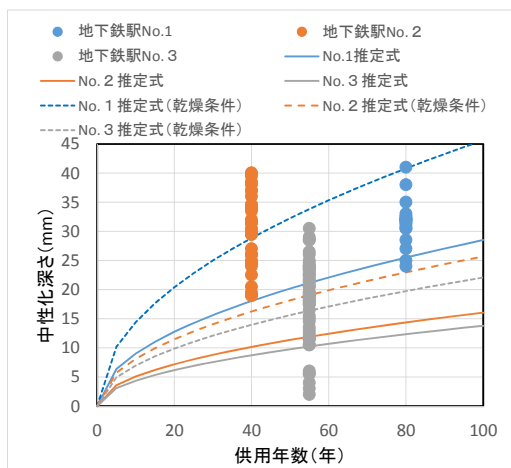


図-3 中性化深さの測定値と推定曲線 (乾燥しやすい環境)

乾燥しやすい環境の推定式では地下鉄駅 No. 1 の測定値が、ほぼ推定値以下となり、設計に用いるのに適切であると考えられた。しかし、地下鉄駅 No. 2 の測定値の最大値は推定値の約 2 倍であり、測定値のばらつきが魚本ら⁴⁾の実験のように 40% 以内に収まっていない。地下鉄駅 No. 3 は推定値が測定値の平均的な値となつた。しかし、ばらつきは大きく、測定値の最大値は推定値の約 2 倍であつた。

6. 考察

6.1 地山側

地下鉄トンネルの地山側の中性化深さは、図-2 (a) から分かるように、供用年数が最も短い地下鉄駅 No. 2 が最も大きい値となり、長く供用している地下鉄駅 No. 1 が最も小さい値となつている。3 事例だけでは確定できないが、地山側の中性化速度は、 \sqrt{t} 則によつていてではなく、コールタールによるコーティングの品質で決まるものと考えられる。また、開削工法で地下鉄駅 No. 2 より新しく建設されたトンネルでは別な止水層が採用されている。そのため、その止水層の品質によつて中性化速度が決まるものと考えられる。さらに、止水層の施工は困難で、完全な止水できない場合も多い。その際には、直接に地山と接している新戸相武台トンネルや大河津固定堰のように中性化が進む可能性がある。しかし、この中性化は二酸化炭素よりも溶脱現象を主とする原因と考えられ、中性化の原因を確定した上で、中性化速度定めることが必要となる。

6.2 内面側

図-3 で示した比較結果から、地下鉄トンネルの内面側の中性化速度係数は、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ではない可能性がある。

そこで、中性化速度係数が測定と推定に差が生じる原因を特定するため、中性化の影響因子である湿度と温度で中性化速度係数を補正した値がコンクリート標準示方書の推定式の値と一致することを確認した上で検討することとした。

湿度の影響を考慮する一例として鄭ら⁵⁾の実験から算出した湿度による中性化速度係数推定式(1),(2)を用い、乾燥しにくい環境となる湿度 70%RH に対する比率から湿度による中性化速度係数の補正係数値 K_H を式(3)で求めることとした。

W/C が約 70% の地下鉄駅 No. 1 では

$$A = -0.001567H^2 + 0.169H - 1.213 \quad (1)$$

W/C が約 55% の地下鉄駅 No. 2 と No. 3 では

$$A = -0.000689H^2 + 0.058H + 0.479 \quad (2)$$

$$K_H = A_{\text{年平均湿度}} / A_{70\%RH} \quad (3)$$

さらに、魚本ら⁴⁾の実験結果を用い、温度による中性化速度係数の補正係数 K_T を式(4)で求める。

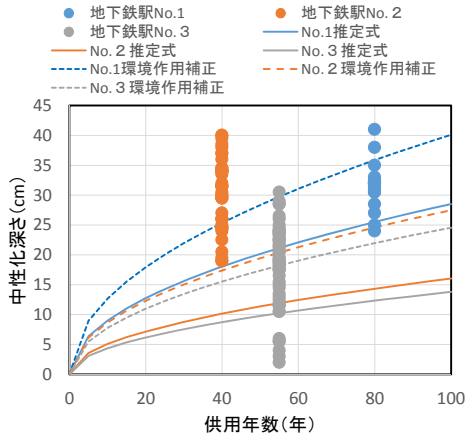
$$K_T = e^{(8.748 - 2563/T)} \quad (4)$$

地下鉄駅 No. 1 から No. 3 のコンクリート配合条件と環境条件における中性化速度係数を求めて表-8 にまとめた。また、湿度と温度の実験結果によつて補正した中性化速度係数を用いた場合の推定値と測定値を比較して図-4 に示す。

コンクリート標準示方書の乾燥しやすい環境におけ

表一八 中性化速度係数の比較

地下鉄駅No.		中性化速度係数：単位 (mm/√年)		
		1	2	3
コンクリート標準示方書 の中性化速度係数	乾燥しにくい環境	2.852	1.605	1.380
	乾燥しやすい環境	4.562	2.568	2.208
温度と湿度の実験結果の一例から補正 した場合		4.010	2.749	2.206



図一四 中性化深さの測定値と推定曲線
(湿度と温度で補正)

る中性化速度係数は、実験により補正した値とほぼ一致し、図一四は図一三とはほぼ同様になった。このことから、鄭ら⁵⁾の実験式の適用範囲が50%RH~70%RHであるため、コンクリート標準示方書の推定式の湿度の適用範囲も50%RH~70%RHと考えられる。

しかし、白川ら⁶⁾の実験では湿度30%RH程度まで中性化速度係数が大きくなっており、湿度30%RH~50%RHのような乾燥状態では中性化速度係数推定式をさらに調査と検討が必要であることが考えられる。

地下鉄駅 No. 1 と No. 2 では環境作用がほぼ同じであるにもかかわらず、測定値から推定される中性化速度係数が大きく異なる。配合推定の結果からも時代的なコンクリート配合の変遷を考へても地下鉄駅 No. 2 の単位セメント量が地下鉄駅 No. 1 より多く、中性化速度係数が小さくなると想定していたが、計測の結果は逆であった。地下鉄駅 No. 1 は日本で初めての地下鉄トンネルで、材料には川砂と川砂利の良質な河川水系のものを厳選し、施工も土留めと躯体との離隔を大きくとり、コンクリート打設は地上を通行止めにして路面覆工を外して地上構造物に近い作業空間を確保し、入念に行われた。これに対して、地下鉄駅 No. 2 と No. 3 の建設は高度成長期で土木構造物が膨大に建てられた時期であり、地下鉄トンネルが重要なインフラ施設ではあっても、通常の碎石や陸産骨材を含んだレディーミクストコンクリートを材料とし、土留めと躯体との離隔が20cm程度と営団地下鉄で

規定されたため、路面覆工や腹起し、切梁、火打ちと型枠の間の狭い空間からコンクリート投入および締め固めを行う施工条件で建設が行われたものと推測される。したがって、地下鉄駅 No. 1 は特別であり、高度成長期から現在までに施工された地下鉄トンネルにおける中性化速度係数の設定は、今後、実構造物から計測した中性化速度係数の結果を基本に定める必要があるものとする。

7. まとめ

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品質によって決まる。また、止水層が健全でない場合に発生する中性化の要因は、溶脱現象等の作用によるもの以外である可能性がある。

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。一方、今回対象とした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のばらつきは、地上構造物における既往の調査結果よりも大きい。したがって高度成長期に建設された地下鉄トンネルの当該係数の算定精度向上には、実構造物の材料、支保工と躯体の離隔等の施工条件、坑内の温度、湿度および風速・風向等の環境作用条件調査結果と中性化深さ計測結果の蓄積が重要であるといえる。

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) 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
- 5) 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
- 6) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生 実: コンクリートの中性化と湿度の関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.723-728, 1996