

論文 長期供用された地下コンクリートの圧縮強度と中性化に関する一考察

山口 哲司^{*1}・岩波 基^{*2}

要旨: 都市トンネルは地下鉄などが数百 km の延長を有し、その多くが 10 年後に全長の約 50% が建設後 50 年を超える。さらに、トンネルの設計耐用期間は 100 年と考えられているため長期耐久性が強く望まれている。そこで、本研究では、構造物基礎、道路トンネル、地下鉄駅 6 駅そして暗渠の地下水以下の側壁から試料を採取して圧縮強度と中性化深さを測定し、コンクリートの強度が供用後 90 年程度までは低下が見られないこととトンネル地山側の中性化は進行しないが、内面側はコンクリート標準示方書の推定式の影響作用の程度を表す係数 β_e を 2.8 で算定した中性化速度で進行することを示した。

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

1. はじめに

現在の日本では、トンネル構造物が供用 50 年を経て、その機能に様々な支障をきたし始めた。そのような状況から、橋梁等を中心とした地上のコンクリート構造物では、コンクリートの耐久性と密接に関連があるコンクリート材料の品質、施工の優劣、供用中の維持管理等に関する情報が集約され、構造物を構成する部材の材料を科学的に評価した調査や研究が多くなされてきた¹⁾²⁾³⁾。その成果により、橋梁分野を中心として地上のコンクリート構造物には科学的マネジメントが導入されてきている。これに対して、トンネルのコンクリートでは、圧縮強度の変化や中性化の進行が明らかになっていないため、マネジメント手法が適用されていない。具体的には、岩波らの土木学会トンネル工学研究委員会ライブラリー⁴⁾⁵⁾および土木学会地下空間委員会ライブラリー⁶⁾に関する部会活動におけるトンネルと同様の環境条件下にある構造物コンクリートの文献調査結果より、地下のコンクリートに関する調査・研究は横関ら⁷⁾や玉井ら⁸⁾によるものなどの他には学術論文は少なく、外部に非公開の学術的にまとまっていない地下鉄銀座線等の報告書が多い。そのため、土木学会トンネル標準示方書開削工法⁹⁾では、コンクリートの水セメント比を 50% 以下とし、30mm 以上のかぶりを確保することでコンクリートの耐久性能が確保できるとしているのが現状である。このようにトンネルのコンクリートの長期的変化に関する研究がほとんど行われてこなかった。

一方、都市部のインフラ施設のトンネルの延長は膨大であるため、全体を詳細に点検し、維持管理を行うと、それに要する費用が莫大なものとなる。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、昨年までに都市部のトンネルのコンクリートの変状を評価する指標を圧縮強度の変化と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 6 駅における改良工事で発生した撤去する側壁の内面側から地山側へ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うことで、地山側の中性化速度は小さいが、内面側については、2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】¹⁰⁾ (以下、コンクリート標準示方書とする)の方法による設計中性化深さの算定値では必ずしも安全側の設計とまらない可能性があることを明らかにした。そして、内面側の中性化速度係数をコンクリート標準示方書¹⁰⁾の(解 3.1.5)式を用いて算出した中性化速度係数を 2.8 倍にすることで、既設トンネル内面の中性化深さの全ての実測値がコンクリート標準示方書¹⁰⁾に準じた設計中性化深さと同等程度以下になったことより、ほぼ推定できることを確認した。しかし、地下構造物コンクリートの劣化は漏水に依る影響が顕著であることが地下鉄銀座線の報告やトンネルの補修事例から知られている。だが、コンクリート標準示方書¹⁰⁾では、漏水によるコンクリートの劣化に対する安全性について、鉄筋の必要かぶりを設計中性化深さの 1.3 倍とすることで担保する方法を採用しているため、ひび割れからの漏水によるコンクリートの劣化深さに関しては言及していない。

そこで、本研究は、地下コンクリートの基本性能となる圧縮強度の経時変化を整理した上で、中性化深さと表面のセメント成分変化を明確にし、現在実施中のひび割れからの漏水によるセメント成分溶脱を評価する試験に生かすべく、長期的な水の影響を確認したものである。

*1 熊谷組 土木設計部 工修 (正会員)

*2 早稲田大学 理工学術院 創造理工学部社会環境工学科 教授 博 (工) (正会員)

2. 対象構造物

本論文で検討対象としたのは、以前に年次大会で化学的分析結果を報告した透水性地盤中に大正 11 年から 90 年供用されてきた大河津固定堰¹¹⁾と難透水性地盤中の道路トンネル新戸相武台トンネルのほかに、鉄道開削トンネルとして供用期間 80 年, 79 年, 58 年, 55 年, 49 年, 40 年間供用されてきた地下鉄の 6 駅そして図面が尺貫法施行以前に作成されたことから 60 年以上供用されたと判断される暗渠等の新たにデータが採取できたものである。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、駅のコンクリートはすべてにおいてトンネルの側壁の背面側がコールタールで防水処理されていたが、その他は、全く止水措置がなされていなかった。また、暗渠については、内側にモルタルの補修された跡が観察された。

3. 調査の内容

3.1 圧縮強度試験

全ての対象構造物について複数個の試料コアで、圧縮強度の測定を行った。測定は JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。なお、試料の長さが直径の 2 倍に満たないものがあったため補正を行っている。

3.2 配合推定

圧縮試験に近い部分から採取した試料について配合推定試験を行った。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」に準拠して実施した。セメント協会 F-18 法では、希塩酸に溶解した Ca を定量してコンクリートの CaO 含有率を求め、これをセメントの CaO 含有率で除すことにより、コンクリート中のセメント量を推定する。また希塩酸に溶解しなかった部分の割合 (insol.) および 600℃における強熱減量 (ig. loss) より、それぞれ骨材量、水量を推定する。なお、セメント量の計算に必要なセメントの CaO 含有率は(社)セメント協会 F-18「硬化コンクリート専門委員会報告」に示された仮定値の 64.5%を使用した。

3.3 中性化深さの測定

トンネル側壁を貫通させて採取したコアの地山側と内面側の両方で測定した。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。なお、アスファルト止水層や補修モルタル、タイルは剥がした後計測した。

3.4 EPMA 分析

トンネル側壁を貫通させて採取したコアの地山側と内面側の両方で試料を作成し、EPMA 分析を行った。本論

文では、Ca および Si について分析を実施し、EPMA 分析は個々のピクセル毎に、酸化物としての含有率 (mass%) を求めることとした。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。

4. 試験結果

4.1 圧縮強度試験結果

力学的試験の結果をまとめたものが表一である。これを見ると大河津固定堰の基礎コンクリートは圧縮強度が 21.7 N/mm²と 22.1 N/mm²であった。また、新戸相武台道路トンネルのコンクリートは圧縮強度が 19.0 N/mm²~46.1 N/mm²であった。星野ら¹²⁾は、明治 30 年代に建造されたコンクリートの圧縮強度が部位によって 10~30 N/mm²程度にばらついていたと報告している。また、明治 27 年に建造され 100 年間水中で供用していたコンクリートの圧縮強度は、横関ら⁷⁾が試験したところ、ばらつきは小さいが平均 13.2 N/mm²であった。それから、鉄筋コンクリート標準示方書 (昭和 6 年)¹³⁾では、水セメント比 55%のコンクリートの強度 σ_{28} を 17.5 N/mm²としている。

表一 圧縮強度試験結果

構造物種類	部位	完成年	供用年数	平均高さ (mm)	平均直径 (mm)	補正圧縮強度 (N/mm ²)
構造物基礎	基礎下面	1922	90	219.0	149.0	21.7
			90	165.0	149.0	22.1
道路トンネル	外側側壁	1936	77	196.6	99.6	19.0
			77	196.9	99.7	43.0
			77	198.6	99.7	36.8
			77	200.1	99.8	38.3
			77	199.6	99.8	27.2
			77	198.3	99.8	46.1
地下鉄駅	外側側壁	1932	80	124.0	100.0	25.6
			80	144.0	100.0	29.5
		1933	79	146.2	100.1	27.6
			79	166.3	100.1	27.2
		1954	79	167.5	100.0	25.1
			58	131.9	99.3	32.6
			58	135.1	99.5	36.7
		1957	58	117.4	99.2	38.5
			55	200.2	99.4	28.0
			55	199.4	99.4	29.1
			55	199.5	99.4	24.1
			55	200.0	99.4	26.7
			55	200.3	99.4	22.6
		1962	49	199.6	99.4	27.8
			49	200.3	99.6	28.8
			49	198.6	99.7	22.3
			49	199.2	99.4	19.8
			49	198.9	99.5	24.1
40	199.0		99.6	32.1		
40	200.0		99.6	36.2		
40	199.0		99.6	30.7		
暗渠	外側側壁	1952	60	129.2	103.9	49.6
			60	151.1	99.5	51.0
			60	176.1	99.7	45.0
			60	190.8	99.6	33.5

4.2 配合推定

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の CaO 含有率を 64.5%，強熱

表一2 配合推定結果

構造物種類	供用年数	単位容積質量 (kg/m ³)	推定材料単位量 (kg/m ³)			推定水セメント比 (%)	
			セメント	水	骨材		
構造物基礎	90	2409	96	125	2188	130	
	90	2384	126	141	2116	112	
道路トンネル	77	2405	322	205	1878	64	
	77	2401	310	202	1891	65	
地下鉄駅	80	2345	312	223	1810	72	
	80	2338	312	222	1803	71	
	58	2337	283	180	1873	64	
	58	2366	343	172	1851	50	
	55	2342	257	138	1947	54	
	55	2334	266	148	1920	56	
	55	2319	343	181	1796	53	
	55	2357	274	156	1927	57	
	49	2322	327	160	1834	49	
	49	2346	299	176	1871	59	
	40	2342	254	152	1935	60	
	40	2280	324	177	1779	55	
	暗渠	60	2402	273	160	1969	59

減量を 0.6%，比重を 3.15 とそれぞれ仮定した。また、骨材は不溶残分を 95.2%，CaO 含有率を 0.4% として強熱減量を 0.6% として推定を行った。

その結果を表一2 に示す。大正 11 年に完成した大河津固定堰では、単位セメント量が 96kg/m³，単位水量が 125kg/m³，水セメント比が 130% と単位セメント量が 126kg/m³，単位水量が 141kg/m³，水セメント比が 112% という推定値になった。

一方、昭和 11 年に建設された新戸相武台道路トンネルでは、単位セメント量が 322kg/m³，単位水量が 205kg/m³，水セメント比が 63.7% と、単位セメント量が 310kg/m³，単位水量が 202kg/m³，水セメント比が 65.2% という推定値になった。そして、昭和 8 年に建設された地下鉄駅では、単位セメント量が 312kg/m³，単位水量が 223kg/m³，水セメント比が 72.0% と、単位セメント量が 312kg/m³，単位水量が 222kg/m³，水セメント比が 71.0% という推定値になった。

大河津固定堰の推定結果は、鉄筋コンクリート標準示方書（昭和 6 年）¹³⁾ では単位セメント量の最小値が 300kg/m³ ということと、推定 W/C の値が異常に大きいことから、この値から強度推定値は妥当でない と判断した。これに対して、新戸相武台トンネルと 1945 年以前に建設された地下鉄駅のコンクリートの推定 W/C の値はやや大きいものもあるが、セメント量が 300kg/m³ 以上あり通常の値である と考える。他の 1950 年以降のトンネルのコンクリートは、推定 W/C の値が 50~64% であり、強度の推定や中性化速度係数算定に用いても妥当であると判断した。

4.3 中性化深さの測定

表一3 は、基礎構造物では下面そしてトンネルでは最も外側の側壁の地盤に接触している面の平均中性化深さ

をまとめたものである。構造物の基礎である大河津固定堰の中性化深さは 19.6mm と 13.8 mm であり、コンクリート標準示方書の推定式で中性化深さを求められる気中のコンクリートと比較すると中性化の進行は小さいと判断される。さらに、表一3 で示すように新戸相武台トンネルの中性化深さは、0.3mm~2.5mm であり、ひとつだけ 12.5mm という値がある。地下鉄駅の地盤と接している面はすべてアスファルト防水層で保護されているため中性化深さの測定結果は、すべて 10mm 以下であり、供用が約 80 年でも最大 3.3mm とほとんど中性化が進行し

表一3 中性化深さ（地盤接触面）

構造物種類	環境条件	供用年数	平均中性化深さ (mm)
構造物基礎	地盤接触面	90	19.6
		90	13.8
道路トンネル	地盤接触面	77	12.5
		77	0.2
		77	1.3
		77	0.3
		77	2.5
		77	0.7
地下鉄駅	側壁地盤接触面 アスファルト防水	80	0.0
		80	3.3
	側壁地盤接触面 アスファルト防水	79	0.8
		79	0.9
	側壁地盤接触面 アスファルト防水	79	1.8
		58	1.6
		58	0.7
	側壁地盤接触面 アスファルト防水	58	6.0
		55	0.8
		55	1.3
	側壁地盤接触面 アスファルト防水	55	0.9
		55	2.2
		49	1.1
		49	1.1
		49	2.9
	側壁地盤接触面 アスファルト防水	49	4.4
		49	7.7
		49	4.2
40		4.5	
40		5.0	
側壁地盤接触面 アスファルト防水	40	3.9	
	60	11.1	
	60	2.8	
	60	18.6	
	60	10.1	
暗渠	地盤接触面	60	17.6
		60	10.8

ていないことがわかる。それらと比較すると暗渠は、土中で酸素の供給がほとんど無いにもかかわらず、構造物基礎と同様に 10mm~20mm の値となっている。

トンネルの最も外側に位置する側壁内側の中性化深さの測定結果を表一4 に示す。

道路トンネル内側の測定値は、地盤に接している面とほぼ同様にすべて 10mm 以下であり、ほとんど進行していなかった。

地下鉄駅内側の面では駅によって中性化深さの計測

結果が大きく異なっていることがわかる。供用年が 80 年程度である二つの駅は、一方は直接コンクリートが空気に触れているため計測結果が 30mm であるが、他方はタイルやモルタルによる保護層があるため 1mm 以下の値であった。供用年数が 58 年の駅では中性化深さが 10mm 以下であるのに、55 年供用の駅は約 20mm、そして、49 年間と 40 年間供用した駅ではすでに 30mm 以上中性化が進んでいる計測結果となった。

暗渠では、酸素と接触する期間が短いことから、地盤と接触している面の値とほぼ同じ程度の中性化深さになったものと考えられる。

表-4 中性化深さ（内側）

構造物種類	環境条件	供用年数	平均中性化深さ (mm)	
道路トンネル	内側	77	7.5	
		77	2.8	
		77	2.4	
		77	5.0	
		77	1.9	
地下鉄駅	内側	80	32.3	
		80	30.9	
	側壁内側 タイル貼付	79	0.5	
		79	0.5	
		79	0.5	
	側壁内側 タイル貼付	79	0.5	
		79	0.5	
		79	0.5	
	内側	58	5.5	
		58	2.1	
	地下鉄駅	内側	58	3.6
			55	20.3
			55	18.6
			55	16.8
		内側	55	17.1
49			34.2	
49			32.3	
49			34.3	
内側	49	37.4		
	49	32.3		
	49	34.2		
内側	40	32.8		
	40	23.5		
	40	34.9		
暗渠	水接触面	60	11.7	
		60	15.8	
		60	12.8	
		60	15.9	
		60	14.5	
		60	11.8	

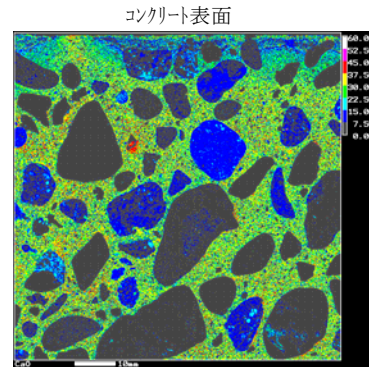
4.4 EPMA 分析

道路トンネル内側のセメントペーストに相当するピクセルのみを選択して表示した結果が図-1 であり、最も古い地下鉄駅の内側のものを図-2 そして最暗渠の内側を図-3 に示す。測定した元素のうち、セメントの主要元素である CaO と SiO₂ の濃度分布を図に示す。

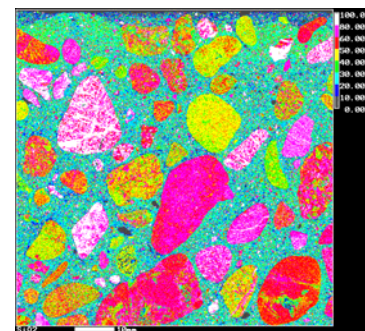
また、結果の記述は骨材については割愛し、セメント

ペーストにおける特徴のみを記す。

図-1 の CaO の濃度は、表面から深さ 10mm 強の領域において、内部より低くなっている。しかし詳細に見る

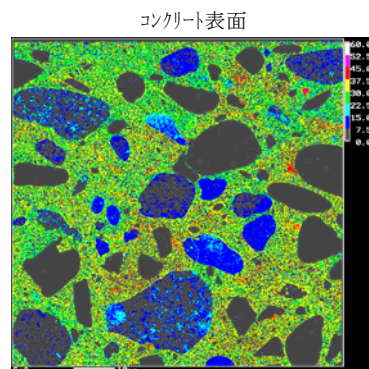


CaO 濃度分布

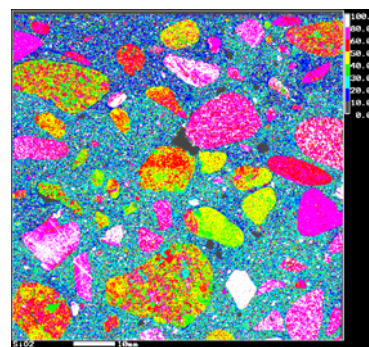


SiO₂ 濃度分布

図-1 EPMA 像（道路トンネル側壁内側）

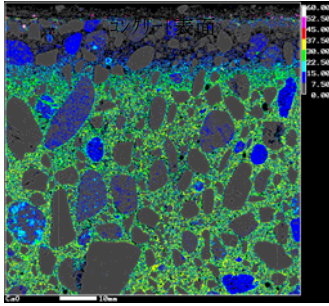


CaO 濃度分布

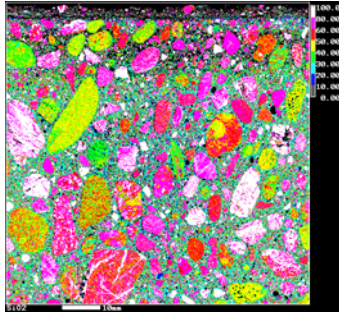


SiO₂ 濃度分布

図-2 EPMA 分析結果（地下鉄駅側壁）



CaO 濃度分布



SiO₂ 濃度分布

図-3 EPMA 分析結果（暗渠側壁内側）

と、ごく表面の数 mm ほどは低くはなっていない。おそらく前者は炭酸化により、後者はセメント分、特に Ca 成分の溶出による結果ではないかと判断される。

SiO₂ は、炭酸化と思われる部分では低く、溶出と思われる部分では高いが、これは CaO の濃度変化により相対的に生じた結果と思われる。

図-2 より内側に近い箇所は、セメントの量がやや少ない可能性がある。また、セメント成分の濃度は不均一であり、特に CaO は赤色で表示される比較的濃度の高い部分と、水色や黄緑色で表示される濃度の低い部分が混在しているように見られる。濃度が低いのは、表面付近や一部の粗骨材の周囲などであり、これらの部分はおそらく炭酸化が生じているものと考えられる。以上の結果は、中性化深さの結果とも矛盾しないものである。

図-3 の領域における CaO の濃度は、内部側と比べて明らかに低くなっていた。この CaO 濃度の低下は、水等の作用により、セメントペーストから Ca 分が溶出したことによると考えられる。図-3 に示す SiO₂ では空隙と判断される非表示の部分（黒色を呈する部分）が多く認められた。このことから Ca の溶出だけでなく、セメントペースト自体の流出も進行したのではないかと判断される。これらが生じた領域は端面から深さ 12~13mm 程度までであり、中性化深さと近い領域であり、水的作用による中性化が進行したと考えられる。

5. 考察

5.1 圧縮強度の長期変動について

表-1 に示した通り既往の研究と比較し、全ての構造

物で測定した結果が要求性能に対して十分な圧縮強度を現在でも有することが確認された。しかし、建設時からの強度変化については不明である。そこで、表-2 の配合推定結果とコンクリート標準示方書 24 年版¹⁴⁾の式(1)、33 年版¹⁵⁾の式(2)により推定した f'_0 および類似工事の施工報告書から推定した f'_d との比をまとめたものを表-5 と図-4 に示す。なお、1958 年に建設が完了しているものは、式(1)を、それ以後に建設されたものは式(2)を用いた。なお、式(1)と式(2)で求めた強度の単位は kgf/cm² であり、表-5 では単位を N/mm² に変えて記載した。

$$f'_0 = -47 + 100 \cdot c/w \quad (1)$$

$$f'_0 = -200 + 250 \cdot c/w \quad (2)$$

表-5 と図-4 から圧縮強度試験結果の値は全て、配

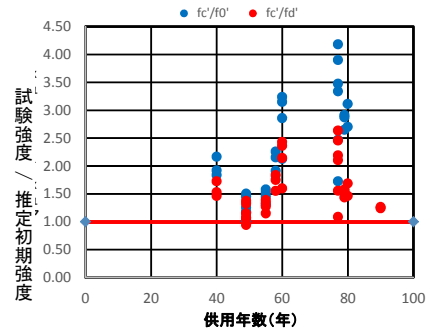


図-4 推定初期強度と現在強度との比較

表-5 推定初期強度と現在強度との比較

構造物種類	供用年数	修正圧縮強度 $f_{c'}$ (N/mm ²)	平均推定水セメント比 (%)	推定圧縮強度 f'_0 (N/mm ²)	f_c'/f'_0	設計圧縮強度 f'_d (N/mm ²)	f_c'/f'_d	
構造物基礎	90	21.7	121	3.6	-	17.5	1.24	
	90	22.1					1.26	
道路トンネル	77	19.0	64.5	11.0	17.5	17.5	1.09	
	77	43.0					3.90	2.46
	77	36.8					3.34	2.10
	77	38.3					3.47	2.19
	77	27.2					2.47	1.55
	77	46.1					4.18	2.63
地下鉄駅	80	25.6	71.5	9.5	17.5	17.5	1.46	
	80	29.5					3.11	1.69
	79	27.6					2.91	1.58
	79	27.2					2.87	1.55
	79	25.1	2.65	1.43				
	58	32.6	57	17.1	21.0	21.0	1.55	
	58	36.7					2.15	1.75
	58	38.5					2.26	1.83
	55	28.0					1.52	1.33
	55	29.1	55	18.5	21.0	21.0	1.39	
	55	24.1					1.31	1.15
	55	26.7					1.45	1.27
	49	22.6					54	19.2
	49	27.8	1.45	1.32				
	49	28.8	1.50	1.37				
	49	22.3	1.16	1.06				
49	19.8	1.03	0.94					
49	24.1	1.26	1.15					
40	32.1	57.5	16.7	21.0	21.0	1.53		
40	36.2					2.16	1.72	
40	30.7					1.84	1.46	
60	49.6					59	15.8	21.0
60	51	3.15	2.43					
60	45	2.86	2.14					
60	33.5	2.13	1.60					

合推定算出した f_0' より大きく最大 4.18 倍, 推定した設計基準強度 f_d' より小さい値は 1 つだけで, その他は大きく最大の比は 2.63 であった。また, 図-4 では供用年数が長いほどその比が大きくなる傾向がみられる。このことから, 90 年程度まで健全な地下のコンクリートは強度低下を生じないものと推測される。

5.2 中性化速度係数について

図-5 の■のプロットからわかるように地面に接しているコンクリートは炭酸化による中性化深さは小さく, EPMA 分析結果からもセメント成分の溶脱量が卓越している可能性がある。

一方, トンネルの場合には, ●で示したようにコンクリート標準示方書で求める中性化速度の 2.8 倍で描いた線の相関係数は 0.74 であり, それらのほぼ平均的な値を示すことがわかる。なお, 前述の通り, 大河津固定堰と地下鉄駅のコンクリートの配合推定で W/C が当時の規準書から考えて大きいものについては, 中性化速度係数の算定には用いておらず, 図-5 における実線で示した推定線は小さめの値となっていることから, 考察に影響がないものとする。

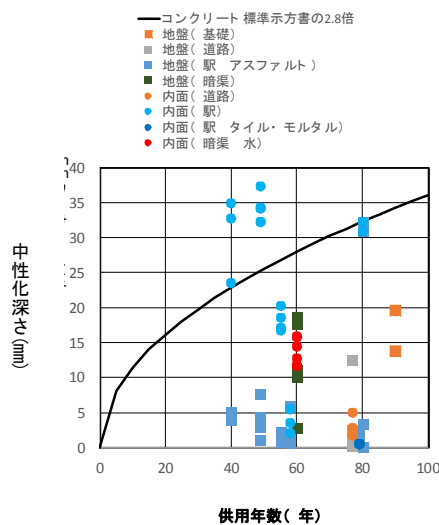


図-5 中性化深さと供用年数

6. 結論

- 地下構造物のコンクリートは, 90 年程度まで健全な強度を維持する可能性が高く, 空気や水の環境作用では少なくとも設計上必要な強度以下まで強度低下が生じない可能性が高い。なお, 流水の場合には別途検討が必要である。
- 岩波らが昨年度の年次大会で報告¹⁶⁾したように, トンネルコンクリートの内側はコンクリート標準示方書で想定している中性化速度係数より大きいことがデータを追加しても確認された。その中性化速度係数はコンクリート標準示方書で対象としている地上構造物の約 3 倍程度である。

参考文献

- 森 弥広, 宇野祐一, 小林一輔: 鉄筋コンクリート貨物船「武智丸」に関する調査報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1939-1944, 2003.6
- 星野富夫ほか: 100 年以上供用されているドックコンクリートの調査・分析事例, 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.67-74, 2006.6
- 熊谷守晃, 星 俊彦, 佐伯 昇, 太田利隆: 50 数年経過したコンクリートの物理, 化学的特性と耐久性, 土木学会論文集, No.686/V-52, pp.41-54, 2001.9
- トンネルライブラリー第 21 号「性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント」, 土木学会, 2009
- トンネルライブラリー第 30 号「トンネルの維持管理の実態と課題」, 土木学会, 2019
- 地下空間・トンネルライブラリー第 1 号「地下構造物のアセットマネジメント」, 土木学会, 2015
- 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
- 玉井 譲ほか: 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
- トンネル標準示方書 開削工法・同解説 2016 年制定, 土木学会, 2016
- [2017 年制定]コンクリート標準示方書(設計編), 土木学会, 2017
- 岩波 基: 90 年供用された地下コンクリートにおける地盤との接触面付近での分析と評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1471-1476, 2013
- 星野富夫, 辻 正哲, 高橋 茂, 魚本健人: 100 年以上供用されているコンクリート構造物の分析と評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.707-712, 2006.
- 昭和六年土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書, 土木学会コンクリート調査会, 1931
- コンクリート標準示方書 昭和 24 年版, 土木学会, 1949
- コンクリート標準示方書 昭和 33 年版, 土木学会, 1958
- 岩波 基, 新井 泰, 沢木大介: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1357-1326, 2018