論文 長期間供用した地中構造物のコンクリートにおける中性化について

岩波 基*1·橋口 弘明*2·新井 泰*3

要旨:トンネルを主とした地中構造物のコンクリートでは,経年に伴う圧縮強度や化学的性質の変化につい て明らかになっていない。そこで,本研究では地中構造物のコンクリートの劣化予測手法等の確立を目的と して,環境条件が異なり比較的長期間にわたって供用されてきた地中構造物からコンクリートコアを採取し, コンクリートの物理的な試験とコンクリート表面部に着目した化学的な分析を行った。なお結果の整理にあ たっては,地盤に接する側(以下,背面側)とその反対側(以下,内面側)の環境の差,あるいは防水工の 有無等が中性化へ与える影響について着目し,本研究で対象とした地中構造物の背面側の中性化深さは,い ずれも 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編による推定値より小さくなることが明らかになった。 キーワード:地中構造物,長期材齢コンクリート,中性化,配合推定,圧縮強度, EPMA

1. はじめに

地上のコンクリート構造物に対して,地中構造物であ るトンネルのコンクリートは、材料のサンプリングが困 難なことから、経年に伴う圧縮強度や化学的性質の変化 について明らかになっておらず,橋梁分野等と比較して マネジメント手法の適用が遅れている。数少ない地中構 造物のコンクリートに関する調査・研究成果としては, 横関ら¹⁾ や玉井²⁾らによる成果があるが,いずれも一つ の構造物についてのみを対象とし、複数の構造物を比較 するに至っていない。したがって,地中構造物のコンク リートについて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、橋梁分野と 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 蓄積は十分とは言い難い状況にある。そこで、本研究で は地下・地中構造物のコンクリートの劣化予測手法の確 立を目的として,環境条件の異なり比較的長期間にわた って供用された4箇所の構造物からコンクリートコアを 採取し、コンクリートの物理的な試験とコンクリート表 面部に着目した化学的な分析を行い、地盤と接している ことの影響や防水工の有無等が中性化へ与える影響につ いて比較検討した。

2. 対象構造物

対象としたのは,地中構造物として大正 11 年から供用 されてきた大河津固定堰(平成 24 年解体),地中構造物 として昭和 11 年に建設された新戸相武台トンネル,約

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科教授 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
*3 東京地下鉄株式会社 鉄道本部改良建設部 設計課 博(工)

80年間供用されてきた地下鉄銀座線開削トンネル(以下, 地下鉄駅(その1)),約40年間供用されてきた地下鉄有 楽町線開削トンネル(以下,地下鉄駅(その2))の4箇 所の構造物である。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。

2.1 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、図 -1のように幅は約520m,延長は河川の流れ方向に水た たきを含めて69mの構造物である。本体部は上流端から 4mの位置にあり、高さ約3m、厚さ約1.8mのマッシブ 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1.0×10³ cm/s 程度のシルト混じり細砂地盤であり、 地下水の流れが速くない地盤内にあった。本研究では、 本体部中心でひび割れが無く健全と判断される位置で りのコアを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、実際に試験用 として活用したのは1本のみであった。



(単位:mm)







2.2 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、図-2のように幅 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 ートの劣化状況および周辺地盤の状況は、目視の範囲で は特記すべき事項はなかった。

2.3 地下鉄駅(その1)

地下鉄駅(その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ルタールで防水 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。コア採取箇所を図-3に示す。

2.4 地下鉄駅 (その2)

地下鉄駅(その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 以下にあり、側壁の背面側はコールタールで防水処理さ れていた。コンクリートコア(ϕ 100)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。コア採取箇所を図-4に示す。



図-3 地下鉄駅(その1)の構造とコア採取箇所





図-4 地下鉄駅(その2)の構造とコア採取箇所

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 化学的性質と圧縮強度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

大河津分水堰の試料では地山と接している面に対して のみ行い,その他の試料では内面側と背面側の両方で測 定した。測定は,JISA1152「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

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。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 力学的性質の評価

評価にあたってはひび割れ等の無い健全なコアを用い て, 圧縮強度測定を行った。

3.4 細孔径分布の測定

大河津固定堰のコアは1本なので、下端部と上部の2 箇所の試料について水銀圧入法を用いて細孔径分布を測 定した。一方,新戸相武台トンネルと地下鉄駅(その1), 地下鉄駅(その2)について、コアの内部における試料 で細孔径分布を測定した。

3.5 電子顕微鏡による観察

セメント水和物の形態や骨材界面の状態把握を目的と して試料から組成像を作成し,細孔の有無と分布等を観 察した。大河津固定堰の試料はコアの下端部から採取し, 新戸相武台トンネルと地下鉄駅(その1),地下鉄駅(そ の2)の試料はコアの内部から採取した。

3.6 EPMA分析

地下鉄(その1),地下鉄駅(その2)のコアで,内面 側に対して各々行った。なお,EPMA分析は電子線マイ クロアナライザーによって対象とした元素の濃度分布を 図化するもので,本研究では,Caについて分析を実施し, EPMA分析は,そのピクセルで酸化物としての含有率 (mass%)を求めることとした。

4. 調査結果

4.1 中性化深さの測定

大河津固定堰の測定結果を表-1 に示す。先端部表面 は凹凸があるため、写真-1 に示すように、最も高い位 置を起点とした計測位置①の値と、それぞれの測定位置 における表面を起点とした計測位置②の値を表示した。 ここでは、表面が平滑でない大河津固定堰のコンクリー ト試料でもできるだけ他の構造物の試料と同じ条件で中 性化深さの値を計測したと考えられる結果を採用するた めに、表面を起点とした計測位置②の値を採用し、平均 値は 13.8 mm とする。



写真-1 中性化深さの測定方法(黄:①,紫:②)

表-1 大河津固定堰中性化深さ

(単位 mm)

計測位置	1	2	3	4	5	6	7	8
1	21.0	21.0	23.5	23.5	23.5	23.5	22.5	21.5
2	12.5	16.0	13.0	15.5	22.0	21.0	16.5	14.0
計測位置	9	10	11	12	13	14	平均	最大
1	20.0	19.5	17.5	15.0	11.0	11.5	19.6	23.5
2	13.5	15.5	13.5	9.0	6.5	4.0	13.8	22.0

新戸相武台トンネルの測定結果を表-2 に示す。中性 化深さの平均値は、気中である内面側では 5.0mm と 1.8mm, 地盤に接している背面側では 0.3mm と 2.5mm で あり、内面側の方がやや大きい。また、内面側でも背面 側でも計測値にはばらつきが見られる。

表-2 新戸相武台トンネル中性化深さ(単位 mm)

***! A	中性化深さ (mm)											
武朴冶	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均	最大
No.16 地盤側	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.5
No.16 内側	6.5	5.5	4.0	4.5	4.0	4.0	4.0	0.0	7.5	10.0	5.0	10.0
No.18 地盤側	1.0	0.5	0.0	1.0	1.0	1.5	1.0	0.0	1.0	0.0	0.7	1.5
No.18 内側	6.5	2.0	2.5	0.0	0.0	2.5	2.5	1.5	0.0	0.0	1.8	6.5

表-3 地下鉄駅(その1)中性化深さ(単位 mm)

計判女		中性化深さ (mm)										
现个行力	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均	最大
No.2 掘削側	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No.2 コンコース側	41.0	38.0	33.0	32.0	28.5	27.0	31.5	31.0	30.5	30.5	32.3	41.0
No.4 掘削側	3.5	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	0.0	3.0	3.3	5.0
No.4 コンコース側	35.0	32.5	32.5	32.0	32.0	31.5	25.0	24.5	32.0	32.0	30.9	35.0

表-4 地下鉄駅(その2)中性化深さ(単位 mm)

次封法平				4	9性化	深さ(m	m)			
貝科但但	1	2	3	4	5	6	7	8	平均	最大
	3.0	6.0	6.5	4.5	7.5	5.5	6.0	6.0		
掘削側	9	10	11	12	13	14	15		4.5	7.5
	6.5	2.5	1.5	3.5	3.5	2.5	2.5			
	1	2	3	4	5	6	7	8	平均	最大
コンコース	29.5	29.5	31.5	33.5	38.5	34.0	36.0	34.5		
側	9	10	11	12	13	14	15		32.8	38.5
	34.0	30.0	30.0	30.5	32.0	34.5	34.5			

地下鉄駅(その1)の測定結果を表-3 に示す。No.2 およびNo.4 ともに,背面側の中性化深さは小さく,とく にNo.2 ではほとんど進行していなかった。これは,躯体 表面が防水を目的としてコールタールでコーティングさ れていたためであると考えられる。一方,内面側の中性

化深さは平均で 32.3mm と 30.9mm とであった。

地下鉄駅(その2)の測定結果を表-4 に示す。地下 鉄駅(その1)と同じく背面側の中性化深さは小さかっ た。これに対して内面側の中性化深さは平均で 32.8mm であり,進行度合は供用年数が約2倍の地下鉄駅(その 1)と同程度であった。

4.2 配合推定

국가 또는 것	単位容積質量	材料	単位量(kg /	m ³)	最大骨材	水セメン
訊科名	(kg / m ³)	セメント	水	骨材	寸法(mm)	(%)
下端部	2409	96	125	2188	50	130
内部	2384	126	141	2116	oUIIII框度	112

表-6 新戸相武台トンネルの配合推定結果

きおい 友	単位容積質量	材料	単位量(kg/	最大骨材	水セメン		
訊料名	(kg / m ³)	セメント	水	骨材	寸法(mm)	(%)	
No.16左	2405	322	205	1878	20	63.7	
No.18右	2401	310	202	1891	30mm住皮	65.2	

表-7 地下鉄駅(その1)の配合推定結果

単位容積質量		材料	単位量(kg /	最大骨材	水セメン	
414	(kg / m^3)	セメント	水	骨材	寸法	(%)
No.2	2345	312	223	1810	20	71.5
No.4	2338	312	222	1803	30mm相皮	71.2

表-8 地下鉄駅(その2)の配合推定結果

きをおい 友	単位容積質量	材料	単位量(kg /	m ³)	最大骨材	水セメン
副小平石	(kg / m^3)	セメント	水	骨材	寸法	(%)
No.1	2342	254	152	1935	00	60
No.2	2280	324	177	1779	20mm 恒度	55

大河津固定堰の配合推定結果を表-5 に,新戸相武台 トンネルの配合推定結果を表-6 に,地下鉄駅(その1) および地下鉄駅(その2)の配合推定結果を表-7,表 -8 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%,比重を 3.15 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-5 に示した大河津固定堰の推定結果によると、下端部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%で、内部では単位セメント量が 126kg/m³、単位水量が 141kg/m³、水セメント比が 112%になった。2つの推定結果とも単位セメント量が非常に小さい値となった。

表-6 に示した新戸相武台トンネルの推定結果による と、No.16 で単位セメント量が 322kg/m³、単位水量が 205kg/m³、水セメント比が 63.7%で、No.18 は単位セメン ト量が 310kg/m³、単位水量が 202kg/m³、水セメント比が 65.2%になった。

表-7に示した地下鉄駅(その1)の推定結果によると、No.2、No.4 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71.5%と71.2%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。

表-8に示した地下鉄駅(その2)の推定結果による と,No.1,No.2 ともに単位セメント量が 254kg/m³ と 324kg/m³,単位水量が 152kg/m³ と 177kg/m³,水セメント 比が 60% と 55% であり,No.1 の単位セメント量が少ない が,ほぼ一般的な配合であると判断された。

4.3 力学的性質

力学的性質のうち, 圧縮強度の試験結果を表-9 に示 す。これによると大河津固定堰の圧縮強度は 21.7 N/mm² と 22.1 N/mm², 新戸相武台トンネルの圧縮強度は 38.3 N/mm²と 27.2 N/mm², 地下鉄駅(その1)の圧縮強度は 24.6 N/mm²と 20.8N/mm²であった。なお,鉄筋コンクリ ート標準示方書(昭和 6 年)⁴⁰において,コンクリート の圧縮強度(σ₂₈)は水セメント比 55%で 17.5N/mm²と規 定されており,横関ら¹⁾による供用期間 100 年の実構造 物では平均 13.2N/mm²であった。これらのコンクリート が一般的な強度であると考えると,それよりも水セメン ト比が大きい今回調査した3構造物に関してはいずれも 建設当時の十分な圧縮強度を維持しているものと判断で きる。一方,これらより経年が短い地下鉄駅(その2) の圧縮強度は 32.1 N/mm²と 30.7N/mm²であり,十分な性 能を有していることが判った。

		平均	平均	最大	補正後
部位名		高さ	直径	荷重	圧縮強度*
			(mm)	(kN)	(N/mm^2)
大河津	下端部	219	149	396	21.7
固定堰	内部	165	149	428	22.1
新戸相武台	No.16	200	99.8	300	38.3
トンネル	No.18	200	100	213	27.2
地下鉄駅	No.2	124	100	216	24.6
(その1)	No.4	144	100	245	20.8
地下鉄駅	No.1	199	99.6	250	32.1
(その2)	No.2	199	100	239	30.7

表-9 圧縮試験結果

4.4 細孔径分布の測定

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容量を表-10に示す。大

表-10 全細孔容積

部位	全細孔容積 (m1/g)	
大河津	下端部	0.1776
固定堰	内部	0.1519
新戸相武台	No.16	0.0900
トンネル	No.18	0.0898
地下鉄駅	No.2	0.1307
(その1)	No.4	0.1336
地下鉄駅	No.1	0.1080
(その2)	No.2	0.1115



写真-2 組成像(大河津固定堰下端部)

河津固定堰のコンクリートでは全細孔容積が 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。 その他の構造物ではコンクリートとしては決して大きな 値ではないといえる。

4.5 電子顕微鏡による観察

大河津固定堰下端部の組成像を写真-2 に、新戸相武 台トンネル No.16 の組成像を写真-3 に示す。両者とも に 100 倍に設定した画像である。一方、地下鉄駅(その 1) No.2 の組成像を写真-4 に、地下鉄駅(その2) No.1 の組成像を写真-5 に示す。地下鉄駅の組成像について は、セメント粒子の状況を観察するために 300 倍に設定 した画像である。

大河津固定堰と新戸相武台トンネルでは、写真-2,3 よりセメント粒子の大きさが100µmを超えるものが存 在している。また、大河津固定堰では100µm超の空隙 も数多く存在している。また新戸相武台トンネルでは、 セメント粒子の色が変わっている部分を含んでおり、未 水和セメントであっても水和が進行しているように見え る。しかし100µm超の空隙は見当たらず、密実に施工 されていることが観察できる。

地下鉄駅(その1)については、写真-4中にセメン ト粒子外周を点線で示した。長径が60~90µmのものが 多く観察され、まれに100µmを超えるものも存在して いるが、いずれも現在のセメント粒子の大きさとして多 い10µm程度と比較して大きい。また、大きな空隙が無 く緻密であることが分かる.さらに骨材周囲にはセメン トペーストがよく行き渡っており、骨材とセメントペー ストの双方が十分に密着している状況がみてとれる。

地下鉄駅(その2)についても**写真**-5 中にセメント 粒子外周を点線で示したが現在のセメント粒子の大きさ に多く見られる $10 \mu m$ 程度と比較して大きかった。また, 大きな空隙が無く, 緻密であり, 骨材とセメントペース トの密着も良好である状況がみてとれる。

4.6 EPMA分析

地下鉄駅(その1) No.2 と地下鉄駅(その2) No.1



写真-3 組成像(新戸相武台トンネル No. 16)



写真-4 組成像(地下鉄駅(その1) No.2)



写真-5 組成像(地下鉄駅(その2) No.1)



図-5 マッピング図(地下鉄駅(その1) No.2)



図-6 マッピング図(地下鉄駅(その2) No.1)

内面側のセメントペーストに相当するピクセルのみを選 択表示した結果のうち、CaO濃度を図-5と図-6に各々 示す。両者とも CaO濃度分布が、表面から深さ 20~30 mm ほどの領域が内部より低い。この領域は、フェノー ルフタレイン法で確認される中性化部分とほぼ一致して いる。また、地下鉄駅(その2)では、内部の CaO濃度 が地下鉄駅(その1)より低い値となっている。

5. 考察

今回調査した4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の解 2.1.2式を用いて中性化深さの特性値の経時変化をプロ ットした結果を図-7に示す。なお、中性化深さの推定 には、配合推定のW/B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、EPMA 等の結果や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。同図から、 本研究で調査した全構造物において地盤と接している背 面側では中性化の進行が当該示方書による推定値より大 幅に小さいことが確認された。とくに、2つの地下鉄駅 では背面側がコールタールでコーティングしているため 中性化はほとんど生じておらず、二酸化炭素の供給が少 なければ中性化はほとんど進行しないと考えられる。こ



図-7 中性化深さの実測と推定曲線

れに対して, 空気と接する内面側に関して, 新戸相武台 トンネルでは推定値の半分程度しか中性化が進行してい なかったが、地下鉄駅(その1)内面側の中性化深さは、 当該示方書による推定値と同程度であった。この理由と して、地下鉄駅内面側は旅客通路となっているため、温 度上昇によって乾燥した状態が生じ、中性化を促進させ る要因が背面側より格段に多く存在していることが考え られる。さらに、供用期間が前記の3例の半分程度であ る地下鉄駅(その2)内面側の中性化深さは,図-7中 の赤丸で示したように当該示方書による推定値の約2倍 であったが、これは配合推定で単位セメント量がやや小 さい値であったことも若干影響し、さらに、図-6の EPMA 分析で内部コンクリートの CaO 濃度が 30~45% と通常のコンクリートよりやや低いことに起因している 可能性がある。なお、力学的性質には問題が無く、電子 顕微鏡の観察でも緻密なコンクリートと判断したが、緻 密さにばらつきがある点については、他の現場の試料と の比較試験等をより、さらに考察が必要であると考える。

6. おわりに

今後,地下鉄駅(その2)のような高度成長期に建設 された構造物の試料についても積極的に収集,分析を進 め,今回の結果の一般性について検討する予定である。

謝 辞

大河津固定堰のデータは、国土交通省北陸地方整備局 信濃川河川事務所の委託を受けて組織した土木学会・大 河津可動堰記録保存検討委員会(委員長:丸山久一 長岡 技術科学大学教授)に関連して提供いただき、新戸相武 台トンネルの試料は、相模原市より提供いただいたもの であることをここに付記し、関係各位に謝意を表する。 また、本論文についてご指導いただいた㈱太平洋コンサ ルタントの沢木大介氏にも謝意を表する次第である。

参考文献

- (構関康祐,中曽根順一,柿崎和男,渡邉賢三:100 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 年が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 2006 年制 定,土木学会,2006
- 4) 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