

長期間供用した地中構造物における コンクリートの品質について

QUALITY OF CONCRETE IN UNDERGROUND STRUCTURES AFTER LONG SERVICE

岩波 基^{1*}・大石 敬司²・新井 泰³・沢木 大介⁴

Motoi IWANAMI ^{1*}, Keiji OISHI ², Yasushi ARAI ³, Tsuyoshi MORIYA ⁴

In the field of tunnel construction changes in the compressive strength and chemical quality of concrete over time remain largely unknown. As part of a broader effort to collect basic data for precisely predicting concrete deterioration in underground tunnels, for this study the authors collected concrete core samples from underground structures that have been in service for a long time, and subjected them to physical tests and chemical analyses. The present paper reports the results of these tests and analyses and makes some consideration about the potential impact on concrete.

Key Words : *underground structures, aged concrete, estimation of mix proportion, compressive strength, EPMA*

1. はじめに

近年、日本では、経年50年超の構造物が加速的に増えており、その機能に支障をきたすものも出始めている。そのような状況であるが、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既往の調査等から集約され、構造物を構成する部材毎に材料を科学的に評価した研究・開発が多くなされてきた^{1)~3)}。その成果は、橋梁分野を中心とした科学的マネジメント手法に反映されてきている。

これに対して、地中構造物であるトンネルのコンクリートでは、材料のサンプリングが困難なことから圧縮強度や化学的な品質の変化が明らかになっていないため、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。具体的には、地中構造物のコンクリートに関する調査・研究は横関ら⁴⁾や玉井ら⁵⁾によるものなどがあるが、ひとつの構造物についてのみ対象とし、複数の構造物を

比較していない。さらに、その他の学術論文はほとんど見あたらない。そのため、コンクリートの耐久性能が確保できる手段として、トンネル標準示方書【開削工法】・同解説⁶⁾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と定めているのみで、橋梁分野に準じたマネジメント手法の適用に耐えうる基礎データの蓄積はこれからの課題となっている。そこで、本論文はトンネルのコンクリートの劣化予測を行うために、基礎データの収集の一環として、環境条件の異なる3箇所でも長期間にわたって供用された構造物からコンクリートコアを採取し、コンクリート表面部に着目した化学的な分析と内部コンクリートの物理的な試験を行い、周辺の地盤や防水方法が中性化や強度低下へ与える影響を調査し比較してまとめたものである。

2. 対象構造物とコアの採取状況

対象とした構造物は、大正11年から透水性地盤中で供

キーワード：地下構造物、長期材齢コンクリート、配合推定、圧縮強度、EPMA

¹正会員 長岡工業高等専門学校教授 環境都市工学科 Professor, Department of Civil Engineering, Nagaoka National College of Technology, (E-mail:miwanami@nagaoka-ct.ac.jp)

²正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部工務部 Tokyo Metro Co.,Ltd

³正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部改良建設部 設計課 Tokyo Metro Co.,Ltd

⁴正会員 株式会社太平洋コンサルタント 解析技術部 解析グループ Instrumental analysis department, Taiheiyo Consultant Co.,Ltd

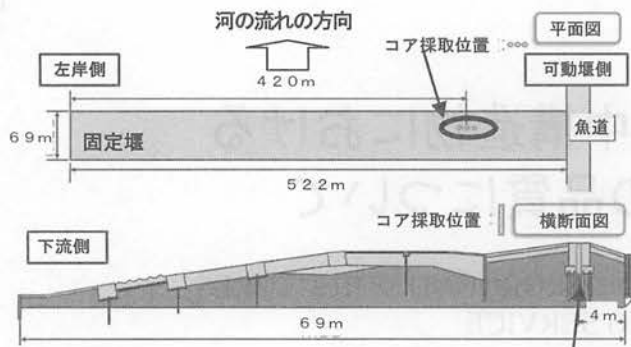


図-1 固定堰の構造概要とコア採取箇所

最下端は地盤に接するコアを使用

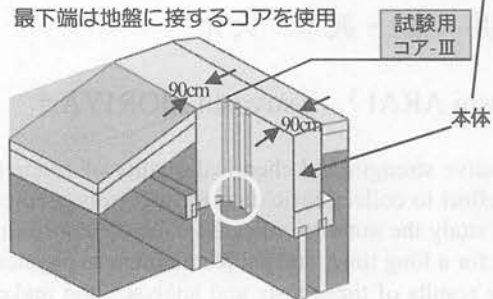
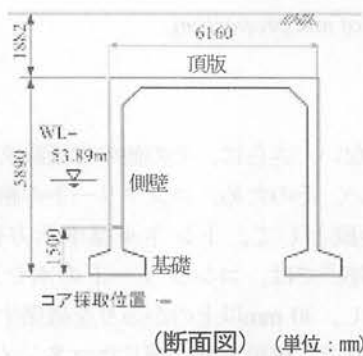


図-2 試験用コア採取の概要



(断面図) (単位: mm)



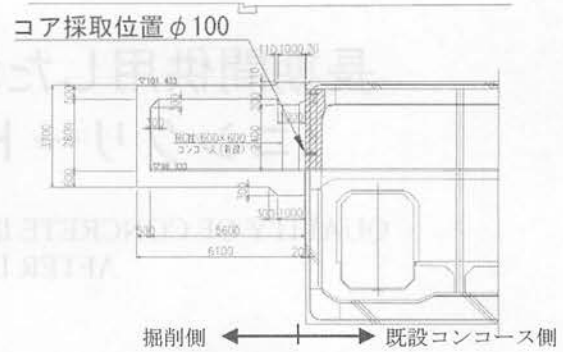
(側面図) (単位: mm)

図-3 新戸相武台トンネルの構造とコア採取箇所

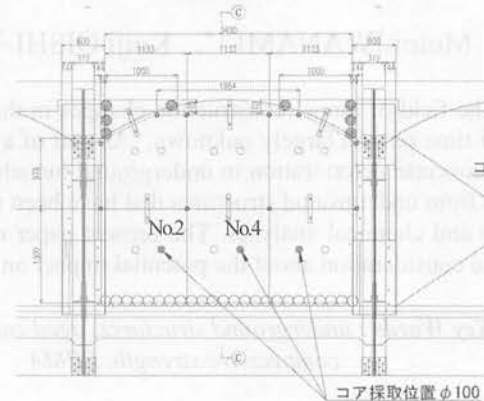
用されてきた大河津固定堰⁷⁾(平成24年解体)と昭和11年に難透水性地盤中に建設された新戸相武台トンネル、透水性地盤中で約80年間供用されてきた地下鉄銀座線開削トンネル(以下、地下鉄駅と称す)の3構造物である。

(1) 大河津固定堰

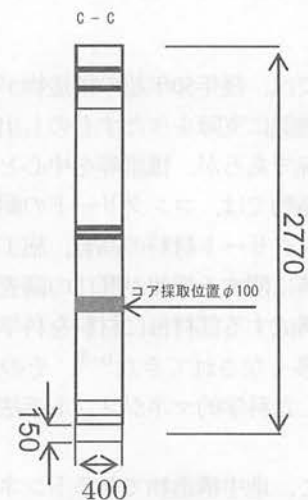
大河津固定堰は、新潟県の信濃川の敷地内にあるが河道から100 m以上離れた位置で試料を採取したため地下構造物と見なした。図-1のように固定堰は幅が約520 m



(駅断面構造) (単位: mm)



(正面図) (単位: mm)



(コア採取位置) (単位: mm)

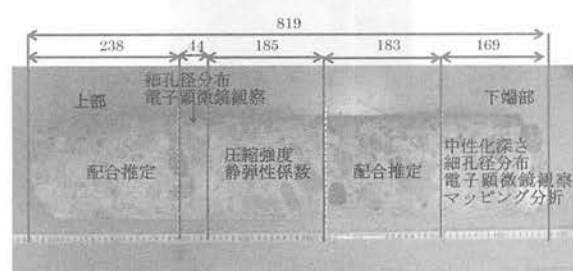
図-4 地下鉄駅の構造とコア採取箇所

であり、水たたきを含めて河川の流れの方向に69 mあって、本体部が上流端から4 mの位置にある高さ約3 mで、厚さ約1.8 mのマッシブな無筋コンクリート構造であった。本体部は、河道内にあり、常に地下水位以下に存在したが、周辺地盤はシルト混じり細砂地盤であり、透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ で地下水の流れが速くない地盤内にあった。この構造物から、図-2の本体の中心でφ150のコアを3本採取した。採取した箇所のコンクリートはひび割れが無く健全と判断される位置を選んだ。しかし、

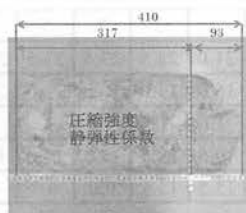
本体は無筋コンクリートで幅1 mm以上あるひび割れが内在していたため、図-2の試験用コアⅢの1本しか良好な状態では採取できなかった。

(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在日米陸軍基地を横断する市道のトンネルであり、図-3のように幅6.16 m、高さ5.89 mの構造である。この側壁の地下水位以下となる下端より1.5 m位置から試料を採取した。トンネル延長方向には今回の工事で対象とした24.0 mの中央と端部から5 mの位置の漏水やひび割れが無い2箇所からコンクリートコアを採取した。なお、トンネルコンクリートの劣化状況および周辺地盤の状況について表面の観察からはトンネル延長方向に目立

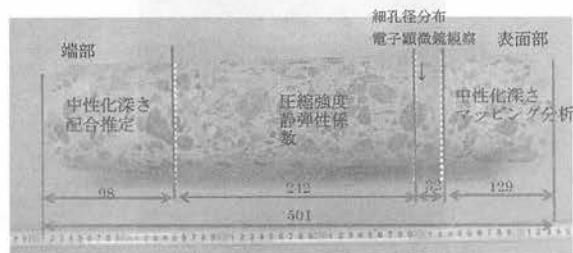


コア下部



コア上部

写真-1 大河津固定堰の各試験に用いた試料の箇所



(No.16)



(No.18)

写真-2 新戸相武台トンネルの各試験に用いた試料の箇所

った変化はなかった。

(3) 地下鉄駅

当該地下鉄駅は、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、砂質土中にあり、側壁の外面をコーラタールで防水処理してあった。コンクリートコア（直径100 mm）は、地下1階のコンコース増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1本の合計3本採取した。コア採取箇所を図-4に示す。

3. 調査内容

以下に、長期間供用した地下コンクリートの品質と強度を明らかにするため行った調査内容について述べる。各試験内容と使用したコアの位置の対応を示したものが写真-1～3である。写真-1が大河津固定堰、写真-2が新戸相武台トンネル、写真-3が地下鉄駅である。

(1) 外観観察

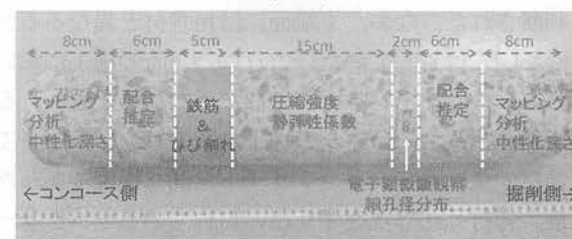
外観観察では、コンクリートの使用骨材とその分布および空隙等の有無について観察するとともに、写真-1～3に示した面で中性化深さを測定した。測定はJIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して行った。

(2) 配合推定

写真-1～3に示したように全ての構造物について複数箇所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



(No.2)



(No.4)

写真-3 地下鉄駅の各試験に用いた試料の箇所

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。

(3) 力学的性質の評価

写真-1～3に示した健全な試験体が取れる箇所において圧縮強度の測定を行った。

(4) 細孔径分布の測定

写真-1から分かるように大河津固定堰のコアでは、下端部と上部を含んで2カ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では、コアの内部における試料で細孔径分布を測定した。

(5) 電子顕微鏡観察

電子顕微鏡観察は、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、細孔の有無と分布等の組成像を作成して、行った。大河津固定堰のコアは、下端部と上部を含んで2カ所から採取した。新戸相武台トンネルと地下鉄駅のコアでは、コアの内部における試料で電子顕微鏡観察を行った。

(6) EPMA分析

大河津固定堰のコアでは下端部の地盤と接している箇所について、新戸相武台トンネルのコアではトンネル内面の表面部について、地下鉄駅のコアではコンコース側の内側と地盤に接している掘削側の両面について各々EPMA分析を行った。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ある。本研究では、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。

4. 調査結果

(1) 外観観察

大河津固定堰コンクリート下端部から採取したコアの外観は、全体的に粗骨材の量が多く、最大骨材寸法は50mm程度であった。外観からは良好なコンクリートであると判断された。なお、下端面には粗骨材と異なる石がいくつか固く付着していた。これは、当時の施工において均しコンクリートを敷いていなかったためと思われる。一方、新戸相武台トンネルと地下鉄駅のコンクリートでは粗骨材の量は現在のコンクリートと同じ程度であったが、最大骨材寸法は現在多く用いられているコンクリートよりやや大きな30mm程度であった。

大河津固定堰の中性化深さ測定時の切断面の様子を写

真-4に、測定結果を表-1に示す。大河津固定堰のコアの

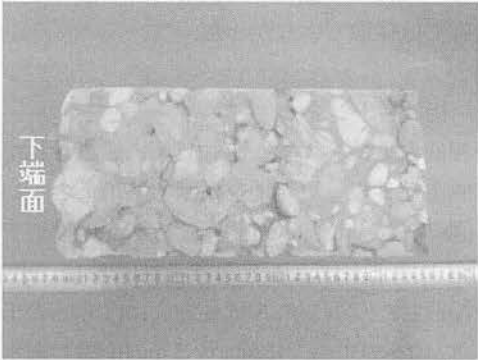


写真-4 大河津固定堰の中性化深さ測定時の切断面の様子

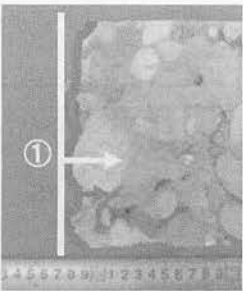


写真-5 中性化深さの測定方法（左：①，右：②）

表-1 大河津固定堰中性化深さ

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

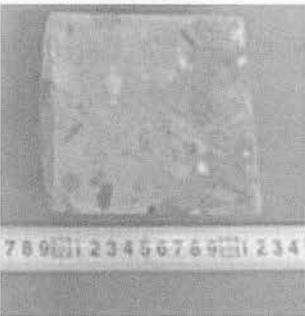


写真-6 新戸相武台トンネルの中性化深さ測定時の切断面の様子（No. 16）

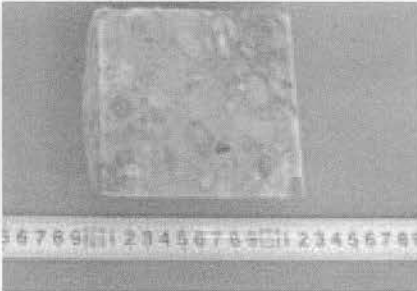


写真-7 新戸相武台トンネルの中性化深さ測定時の切断面の様子（No. 18）

表-2 新戸相武台トンネル中性化深さ

試料名	中性化深さ (mm)										平均	最大
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
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

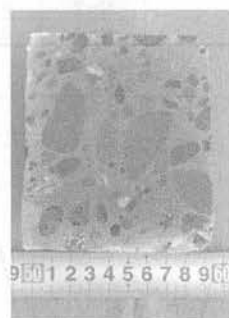


(地盤側)



(内側)

写真-8 地下鉄駅コンコースの中性化深さ測定時の切断面の様子 (No. 2)



(地盤側)



(内側)

写真-9 地下鉄駅コンコースの中性化深さ測定時の切断面の様子 (No. 4)

先端部表面は凹凸があるため、写真-5に示すように、最も高い位置を起点とした値①と、それぞれの測定位置における表面を起点として測定した値②の2つを表示した。いずれの結果も平均値は20 mmに満たない値であり、気中のコンクリートの中性化特性値60 mm程度と比較すると中性化の進行は小さいと判断される。

新戸相武台トンネルの中性化深さ測定時の切断面の様子を写真-6, 7に、計測結果を表-2に示す。中性化深さの平均値は、気中である表面側では5.0 mmと1.8 mm、地盤中の端部では0.3 mmと2.5 mmであり、表面側の方がやや大きい。また、表面側でも地盤中でも中性化深さの値にばらつきがある。しかし、全ての値を通して見ても78年経過している割に中性化はほとんど進んでいないといえる。

地下鉄駅の中性化深さ測定時の切断面の様子を写真-8, 9に、中性化深さ測定結果を表-3に示す。No.2およびNo.4ともに、掘削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、コンコース側の中性化深さは平均で32.3 mmと30.9 mmとなり、現行のコンクリート標準示方書の中性化推定の特性値と同程度である。ただし、最大値は41.0 mmと35.0 mmで特性値をやや超える結果を得た。

表-3 地下鉄駅コンコース中性化深さ

試料名	中性化深さ (mm)										平均	最大
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
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 大河津固定堰分析結果

試料名	ig.loss 1	ig.loss 2	insol.	CaO
下端部	2.2	2.9	88.9	3.1
内部	2.6	3.2	86.7	3.9

表-5 大河津固定堰配合推定結果

試料名	単位容積質量 (kg / m ³)	材料単位量 (kg / m ³)			水セメント 比 (%)
		セメント	水	骨材	
下端部	2409	96	125	2188	130
内部	2384	126	141	2116	112

表-6 新戸相武台トンネル分析結果

試料名	ig.loss 1	ig.loss 2	insol.	CaO
No.16左	5.2	6.2	75.3	9.2
No.18右	5	6	76.3	8.9

表-7 新戸相武台トンネル推定結果

試料名	単位容積質量 (kg / m ³)	材料単位量 (kg / m ³)			水セメント 比 (%)
		セメント	水	骨材	
No.16左	2405	322	205	1878	63.7
No.18右	2401	310	202	1891	65.2

(2) 配合推定

大河津固定堰では、本体コンクリートと地盤が接する面から約25 cmコンクリート内に入った下端部に近い部分および、左右と下のコンクリート表面から約90 cmの距離で本体のほぼ中心部となる部分について配合推定試験を行った。具体的にはセメント協会F-18法に従い、希塩酸に溶解したCaを定量してコンクリートのCaO含有率を求めることにより、コンクリート中のセメント量を推定した。大河津固定堰のコンクリートの分析結果を表-4に、推定した配合を表-5に示す。同様に、新戸相武台トンネルの分析結果を表-6に、推定した配合を表-7に、地下鉄駅の分析結果を表-8に、推定した配合を表-9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 %、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 %、強熱減量を0.6 %として推定を行った。

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96 kg/m³、単位水量が125 kg/m³、水セメント比が130 %で、内部では単位セメント量が126 kg/m³、単位水量が141 kg/m³、水セメント比が112 %になった。2つの推定結果ともセメント量が非常に小さい値となった。

表-7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322 kg/m³、単位水量が205 kg/m³、水セメント比が63.7%で、No.18は単位セメント量が310 kg/m³、単位水量が202 kg/m³、水セメント比が65.2 %になった。

表-8 地下鉄駅分析結果

試料名	ig.loss 1	ig.loss 2	insol.	CaO
No.2	5	5.9	75.5	9.3
No.4	5.1	5.9	75.2	9.3

表-9 地下鉄駅推定結果

試料名	単位容積質量 (kg/m ³)	材料単位量 (kg/m ³)			水セメント比 (%)
		セメント	水	骨材	
No.2	2345	312	223	1810	71.5
No.4	2338	312	222	1803	71.2

表-10 圧縮試験結果

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

表-9に示した地下鉄駅の推定結果によると、No.2、No.4ともに単位セメント量が312 kg/m³で、単位水量も223 kg/m³と222 kg/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、昭和初期の構造物としては水セメント比が70 %を超える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。

(3) 力学的性質の評価

力学的試験のうち圧縮強度の試験結果をまとめたものが表-10である。これを見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、地下鉄駅の圧縮強度は25.6 N/mm²と29.5 N/mm²であった。なお、鉄筋コンクリート標準示方書（昭和6年）⁹⁾においては、コンクリートの圧縮強度(σ_{28})は水セメント比55%で17.5 N/mm²と規定されており、横関ら⁴⁾による100年供用した実構造物の計測では平均13.2 N/mm²であった。このことから、今回対象とした3構造物は全て十分な圧縮強度を維持しているものと推測される。

表-11 全細孔容積

部位名	全細孔容積 (ml/g)
大河津固定堰	下端部 0.1776
	内部 0.1519
新戸相武台トンネル	No.16 0.0900
	No.18 0.0898
地下鉄駅コンコース	No.2 0.1307
	No.4 0.1336

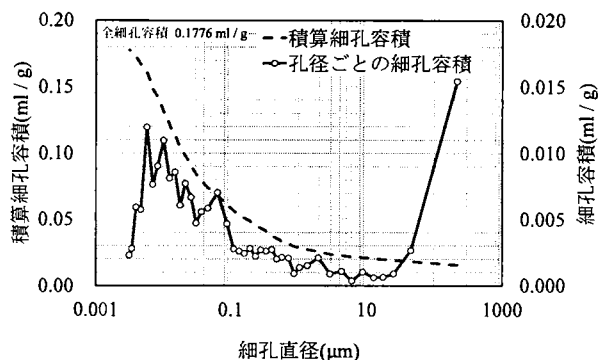


図-5 細孔径分布測定結果（大河津固定堰下端部）

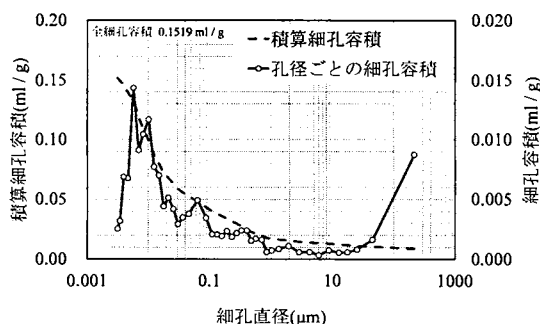


図-6 細孔径分布測定結果（大河津固定堰内部）

(4) 細孔径分布の測定

細孔径分布の測定より求めた全細孔容量を表-11に、3構造物のコンクリートの細孔径分布曲線を図-5～10に

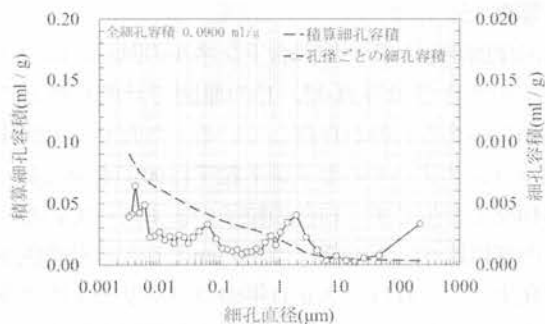


図-7 細孔径分布測定結果（新戸相武台トンネル No. 16）

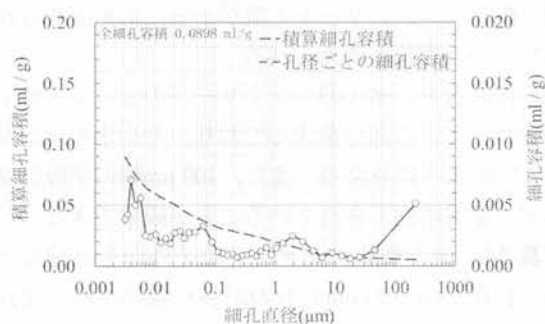


図-8 細孔径分布測定結果（新戸相武台トンネル No. 18）

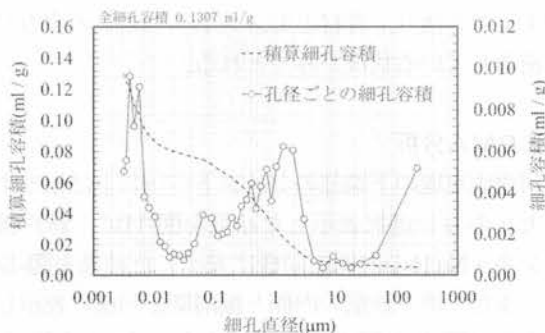


図-9 細孔径分布測定結果（地下鉄駅 No. 2）

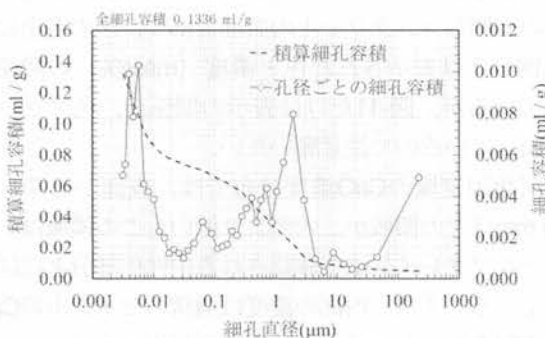


図-10 細孔径分布測定結果（地下鉄駅 No. 4）

示す。

大河津固定堰と新戸相武台トンネル、地下鉄駅の細孔径分布曲線の形状は若干差異があるが、耐久性との影響があるといわれる $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 以上の細孔容積に関しては大きな差がない結果が得られた。一方、表-11に示すように、大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。とくに、図-5から分かるように透水性地盤と接し

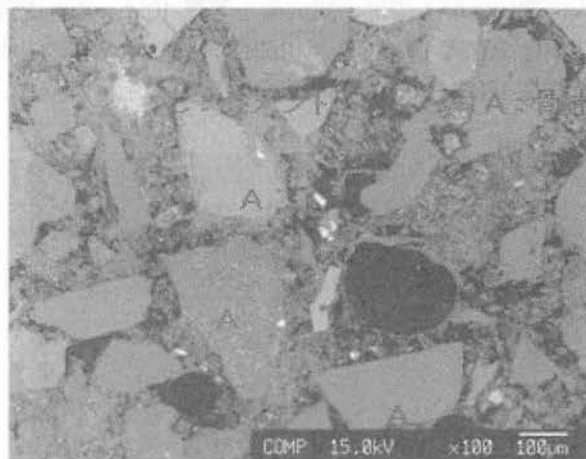


写真-10 組成像（大河津固定堰下端部）

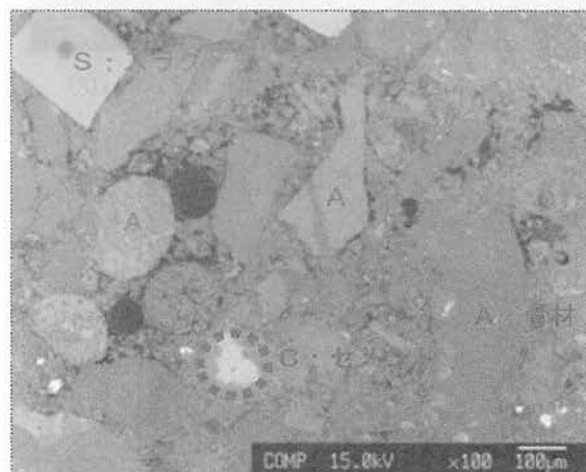


写真-11 組成像（大河津固定堰内部）

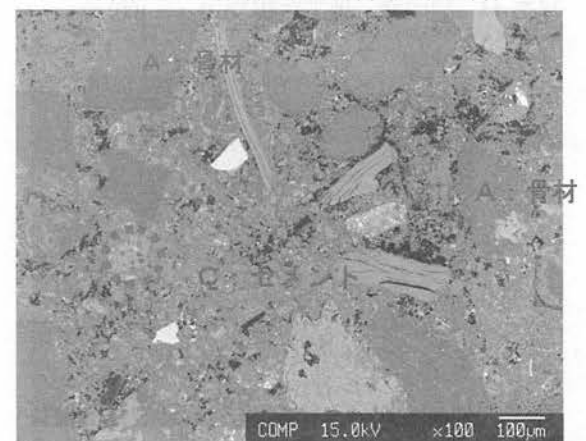


写真-12 組成像（新戸相武台トンネル No.16）

ている大河津固定堰の下端部では100 μm での細孔容積が0.015 ml/gであり比較的大きな細孔があるといえる。これに対して、新戸相武台トンネルと地下鉄駅のコンクリートでは、顕著な特徴は認められず、また全細孔容積も、コンクリートとしては決して大きなものではないといえる。

(5) 電子顕微鏡観察

大河津固定堰下端部の組成像を写真-10に、その内部の組成像を写真-11に、新戸相武台トンネルNo.16の組成像を写真-12に、No.18の組成像を写真-13に示す。一方、

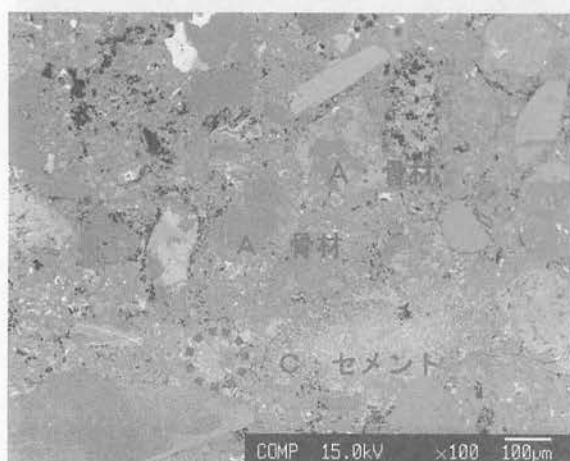


写真-13 組成像 (新戸相武台トンネル No.18)

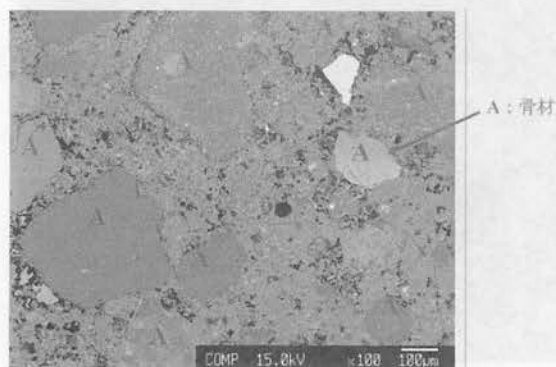


写真-14 組成像 (地下鉄駅 No. 2 (x100))

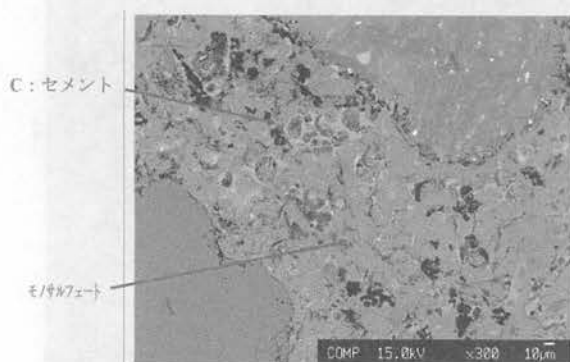


写真-15 組成像 (地下鉄駅 No. 2 (x300))

地下鉄駅では2つの試料に差が無かったためNo.2の組成像を写真-14に示す。なお、いずれも100倍で観察したものである。加えて、地下鉄駅の試料ではセメント粒子を観察するために写真-14の一部を300倍にした組成像として写真-15に示す。

大河津固定堰と新戸相武台トンネルの試料にはセメント粒子の大きさは写真-12, 13の原因で計測したところ100 μm を超えるものが存在している。ただし、大河津固定堰のコンクリートのセメント粒子は90年水中にあって水和反応を生じず、白色の粒子のまま残っている。また、内部に比べて下端部には100 μm より大きな空隙が多く存在する。これは、大正11年のコンクリートのスランブが小さく、セメント分が空隙に十分充填されないことによると推測される。その他に、施工において均しコンクリートが無い場合、突き固めでコンクリートの下の敷砂利が動き、コンクリート下端が十分に締め固められなかったという事象も考えられる。

新戸相武台トンネルのコンクリートのセメント粒子は色が変わっている部分を含んでおり、やや水和反応が進行しているように見える。また、100 μm 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。

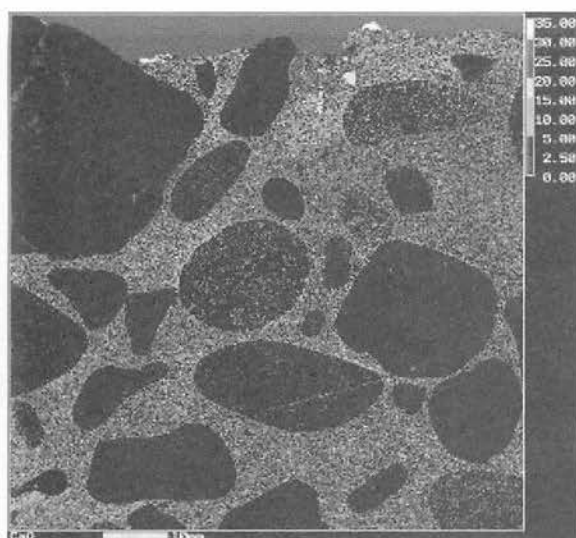
写真-14に地下鉄駅のセメント粒子外周を点線で示したが、長径が60~90 μm のものが多く観察され、まれに100 μm を超えるものもあり、いずれも現行の10 μm のコンクリートと比較して大きい。また、地下鉄駅のコンクリートには、大きな空隙が無く、緻密であることが分かる。さらに、写真-14から骨材周囲にはセメントペーストがよく行き渡り、骨材とセメントペーストの双方が十分に密着している状況がみてとれる。

(6) EPMA分析

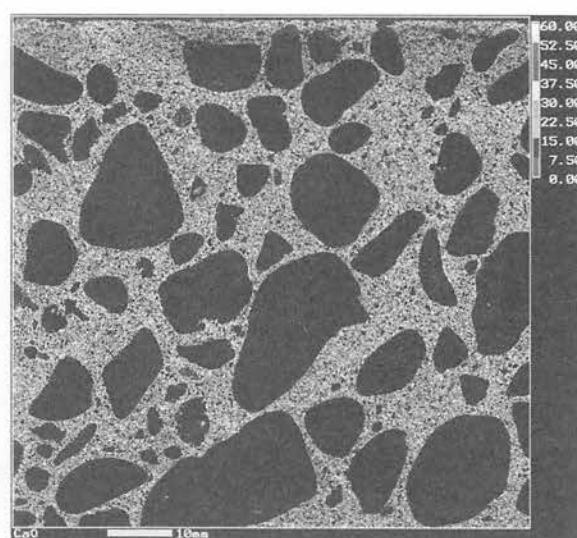
大河津固定堰の下端部のセメントペーストに相当するピクセルのみを選択表示した結果を図-11に、新戸相武台トンネルNo.16の内側を同様に表示した結果を図-12に示す。また、地下鉄駅の内側と掘削側を同様に表示した結果を各々図-13と図-14に示す。なお、全ての図においてCaO濃度とCaO/SiO₂モル比を示している。また、各画像の上側がコンクリートの表面であり、図の右上にある凡例バーは表示された色と濃度 (mass%) の関係を示しているが、図-11だけは表示の関係上、色スケールが異なっているので注意願いたい。

大河津固定堰のCaO濃度分布では、表面から深さ10~15 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、内部の濃度は通常のセメントのCaO含有率64.5%の半分以下である25%以下である。

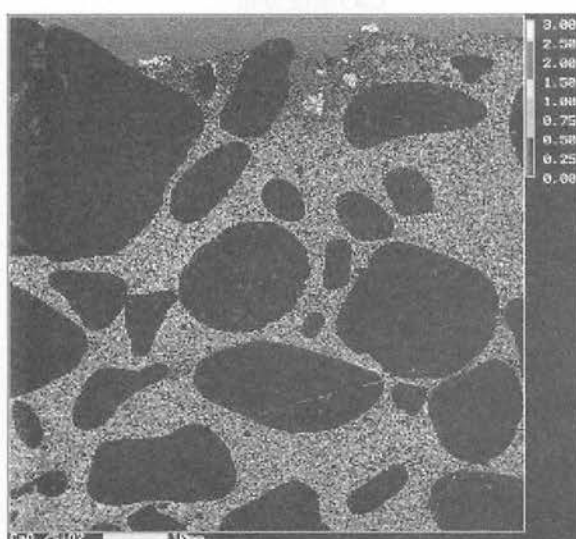
新戸相武台トンネルのCaO濃度分布では、表面から深さ5 mmほどの領域が内部より低く、フェノールフタレ



CaO 濃度分布

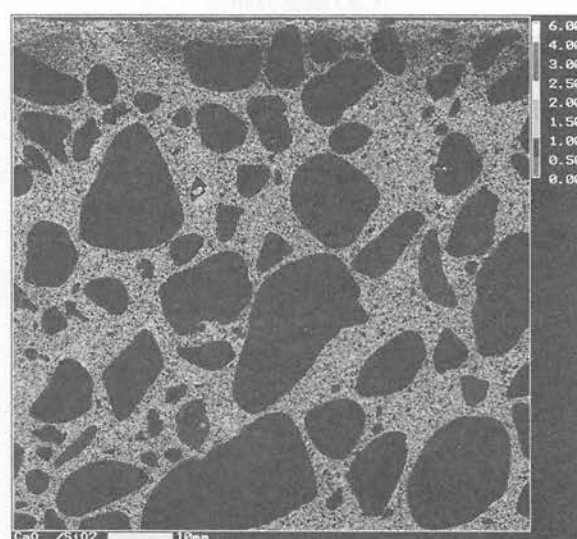


CaO 濃度分布



CaO / SiO₂ モル比

図-11 組成像（大河津固定堰下端部）



CaO / SiO₂ モル比

図-12 組成像（新戸相武台トンネル No. 16）

イン法で確認される中性化部分とほぼ一致している。しかし、内部のCaO濃度は30 %程度以上の値であり、大河津固定堰より高い結果となっている。

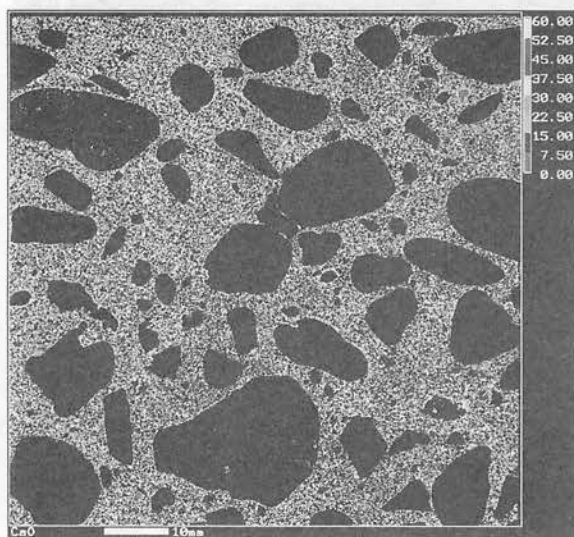
地下鉄駅のCaO濃度分布では、他の構造物に比べて濃度が高く、とくに、地盤側（図-14）の方が内側（図-13）よりやや高い。また、内側は不均質であり、黒色に近く濃く表示される比較的濃度の高い部分と、白色に近く薄い色で表示される濃度の低い部分が見られる。なお、濃度が低いのは、表面付近や一部の粗骨材の周囲などであり、これらの部分はおそらく炭酸化が生じているものと考えられる。これは、大河津固定堰や新戸相武台トンネルのように表面から帯状に炭酸化が生じておらず、水分供給がほとんど無い乾燥した環境で中性化が生じたためと推測される。

CaO / SiO₂ モル比については、大河津固定堰（図-11）では内部の中性化していない部分で1.5に満たない値を

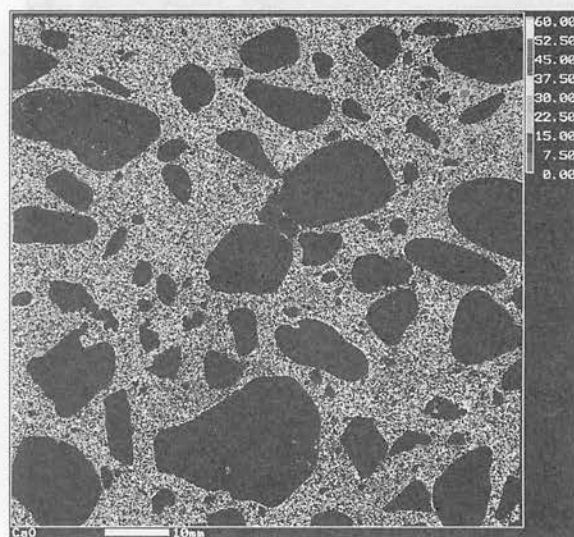
示している。C-S-HのCaO / SiO₂モル比は普通1.4～1.7程度であるので、大河津固定堰の内部はこの値が低い。この結果と、CaO濃度分布において濃度が高い部分でも25%以下であることから、フェノールフタレイン法で中性化とは判断されない領域でも、セメント成分のカルシウムが溶出している可能性があり、配合推定において単位セメント量が非常に少なかった原因がカルシウムの溶出によるものであるとも考えられる。

新戸相武台トンネル（図-12）ではCaO / SiO₂モル比は、内部の中性化していない部分でカラーの原図では1.5以上の値を示しており、C-S-HのCaO / SiO₂モル比と同程度である。なお、CaO濃度分布が全体的に高いことから、セメント成分のカルシウムが溶出していないと推測される。

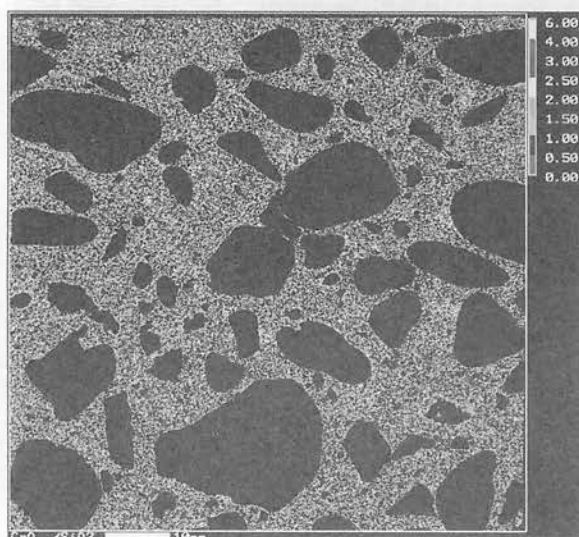
また、地下鉄駅（図-13,14）では全体的にCaO / SiO₂モル比の値は均一に近く、表面付近で特に当該値が低くな



CaO 濃度分布

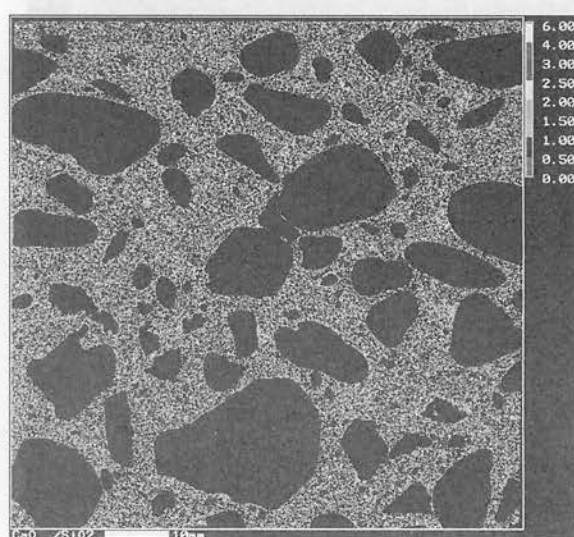


CaO 濃度分布



CaO/SiO₂モル比

図-13 組成像（地下鉄駅 No. 2 内側）



CaO/SiO₂モル比

図-14 組成像（地下鉄駅 No. 2 地盤側）

っているということもないので、水との接触によるセメント分の溶出は生じていないと考えられる。

表-12 容積配合算出結果

試料名	セメント：骨材
下端部	1:20.7
内部	1:15.3

5. 考察

(1) 配合について

大河津固定堰の配合推定では水セメント比が異常に大きい値を示した。そこで、大正期に採用されていたセメントと骨材の容積配合を算出した。その結果を表-12に示す。なお、算出にあたってはセメントの単位容積質量に鉄筋コンクリート標準仕方書（昭和6年）⁸⁾等に記された1500 kg/m³を用い、骨材の単位容積質量は川砂と川砂利の平均的な値として1650 kg/m³と仮定した。

表-12から分かるようにセメントに対して骨材が20.7倍

と15.3倍という値となった。文献⁹⁾によれば、当時の容積配合は、骨材とセメントの比にするとセメント：骨材 = 1：7か、セメントの少ない配合でもセメント：骨材 = 1：9となり、このことから今回推定した値によるセメント量が通常の配合をしたコンクリートよりも少ないことがわかる。なお、横関ら⁴⁾は、水中で100年間供用した表面から1 m程度入った内部のコンクリートの配合がセメント：骨材 = 1：16となっていることを報告している。以上の結果から下端部においても内部においても長期間透水性地盤中でコンクリートを供用した場合には、CaO

が地下水に溶出する可能性がある。また、そのような場合には、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」に準拠した方法の推定だけで打設時の配合を推定することは困難であると考える。

なお、難透水性地盤中に長期間供用した新戸相武台トンネルや透水性地盤中であってもコールタールで防水を施されていた地下鉄駅では、CaOの溶出は見られなかった。

(2) 圧縮強度の変化について

星野¹⁰⁾は、明治30年代に建造されたコンクリート構造物の圧縮強度が部位によって10~30 N/mm²の範囲でばらついていたと報告している。また、横関⁴⁾は明治27年に建造され、100年間水中で供用されていた構造物のコンクリートの圧縮強度に関して、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。さらに、鉄筋コンクリート標準仕方書(昭和6年)⁹⁾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。これらと比較すると今回調査した3構造物は、圧縮強度の低下をほとんど生じていないと考えられる。

なお、大河津固定堰のコンクリートと同程度の水セメント比の場合、西澤¹¹⁾の実験では、十分締め固めても半分程度の強度しか得られていない。これに対して大河津固定堰のコンクリートでは、適正な配合と施工を通じて十分な強度が発現した後、セメントが溶出したことにより強度低下が小さく評価された可能性がある。

(3) 中性化について

「(1) 配合について」の大河津固定堰の項で述べたように、地中構造物のコンクリートの場合には、大気中の二酸化炭素による中性化以外に、透水性地盤中では地下水によるセメント分の溶出が生じることにより、コンクリートのpHがアルカリ性から中性に近づく可能性がある。そのため、透水性地盤では地下鉄駅のようにコールタール等による防水がセメント分の溶出も防いでいるという認識を持つ必要がある。

また、新戸相武台トンネルと地下鉄駅を比較した場合、地下鉄駅コンコース内側の方が中性化の速度が速い結果であった。これは、地下鉄駅内側は通路となっているため、温度や湿度に変化が生じ、中性化を促進させる要因が掘削側より多く存在することが考えられる。

6. 結論

- ① 地下水の中でも、透水性地盤に接するコンクリートでは中性化が生じ、90年間でその深さ15 mm程度で

あった。一方、難透水性地盤に接するコンクリートではほとんど中性化が生じなかった。なお、透水性地盤で生じた中性化の原因は、セメント分の溶出による可能性がある。

- ② 透水性地盤中でも十分な防水を行うと中性化はほぼ防げる。
- ③ 適正な配合と適切な施工で製造し、十分な強度が発現した地下コンクリートは、その後にセメントが溶出しても、強度低下が小さい可能性がある。
- ④ 適正に製造し、十分な維持管理をした地下コンクリートは、80年間以上経過しても強度低下がほとんど生じない。
- ⑤ 透水性地盤内では、厚さ1.8 m、高さ3 mのマッシブなコンクリートの中心部においてもセメントのカルシウムが溶出する可能性がある。
- ⑥ トンネルコンクリートは内部の使用状況によって中性化の速度が異なる。地下鉄駅コンコースのように温度や湿度が変化を生じる場合には、中性化が進行しやすい環境条件となる可能性がある。

7. おわりに

今回、調査したコンクリートは、地盤中において80年以上供用した現在でも、コンクリートの著しい品質低下はなく、地下構造物としての性能を維持していることが確認できた。今後も、多くの試料を採取して同様の分析を行い、周辺地盤条件や防水材の有無、コンクリート材料と施工方法の相違がコンクリートの品質低下に与える影響を定量的に明らかにし、トンネル分野における合理的な設計および維持管理手法の確立を目指したいと考える。

参考文献

- 1) 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
- 2) 星野富夫: 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
- 3) 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
- 4) 横関康祐, 中曽根順一, 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
- 5) 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
- 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 長滝重義監修: コンクリートの長期耐久性[小樽港百年耐久性試験に学ぶ], 技報堂出版, 1995
- 10) 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.
- 11) 西澤賢太郎, 永山 功, 渡辺和男: 単位セメント量が貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.571-576, 1998.