

# 論文 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

岩波 基<sup>\*1</sup>

**要旨:** トンネルのコンクリートにおける早期劣化が社会問題となっているが、トンネルでは供用中の環境条件が明確でないため、中性化も塩害についても劣化の進行速度が明確になっていない。特に、地盤に接する面の劣化状況については全く解明が進んでいないのが現状である。そこで、本研究は、大正 11 年に施工された大河津分水固定堰から約 90 年の供用後に採取したコンクリートを SEM によって観察し、EPMA によって面分析を実施して、地盤に接したコンクリート表面から 15mm 程度の範囲でカルシウムに代表されるセメント成分の溶出が確認された結果を報告するものである。

**キーワード:** 地下構造物, 長期材齢コンクリート, EPMA, 配合推定

## 1. はじめに

日本は 1950 年代後半から高度成長期に入り、トンネルを含めた社会資本整備が積極的に行われ、多くの構造物が建設された。現在のそれらの構造物が供用 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<sup>1),2),3),4),5)</sup>。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（アセットマネジメント等）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、圧縮強度や化学的な品質の変化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、地下のコンクリートに関する調査・研究は横関ら<sup>6)</sup>によるものだけであり、土木学会トンネル標準示方書開削工法<sup>7)</sup>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。

そこで、地下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、常に地下水位の高い地盤内に設置された大正 11 年に竣工の大河津分水固定堰からコンクリートコアを採取し、特に地盤に接した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ったものである。

## 2. 構造物の概要

大河津分水は、写真-1 からわかるように信濃川の屈



写真-1 大河津分水堰の位置<sup>8)</sup>

曲する位置から日本海へ向けて大正 11 年に竣工した人工的に作られた河川である。そして、図-1 のように分水路側に固定堰と可動堰を併設して、通常は可動堰により流量を調節し、洪水のときに可動堰を全開にしても処理しきれない水が固定堰を越えて分水路に流れていく機構となっている。これらの堰は大河津分水が完成した大正 11 年から供用されてきた。

本論文ではこの大河津固定堰を対象として研究を行った。

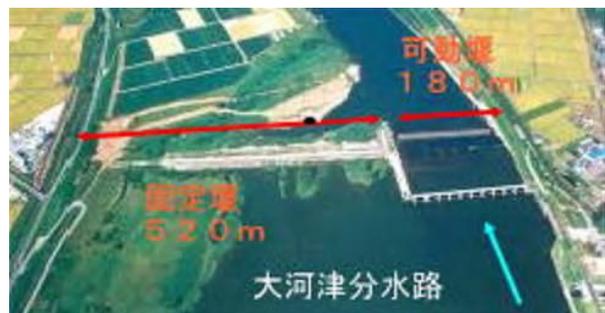


図-1 大河津分水旧固定堰と旧可動堰<sup>9)</sup>

\*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）

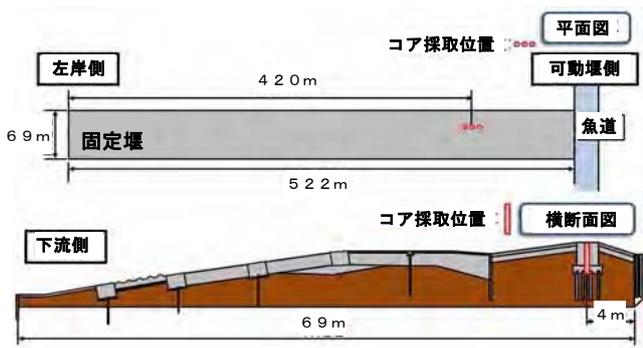


図-2 固定堰の構造概要とコア採取箇所

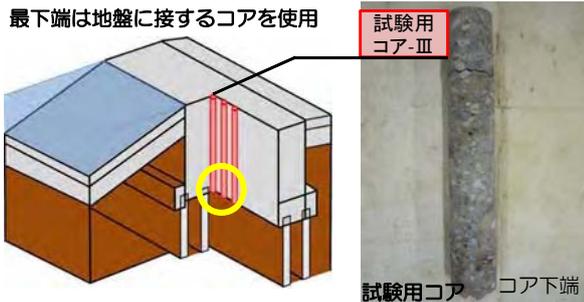


図-3 試験用コア採取の概要

図-2のように固定堰は幅が約520mであり、水たたきを含めて上下流方向に69mあって、本体部が上流端から4mの位置にある高さ約3mで、厚さ約1.8mのマッシュ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 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ で地下水の流れが遅い地盤内にあった。これから、図-2の本体の中心から $\phi 150$ のコアを3本採取した。しかし、無筋コンクリートであるため良好な状況では図-3の試験用コア-IIIの1本しか採取できなかった。

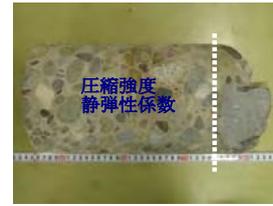
### 3. 調査の内容

#### 3.1 外観観察

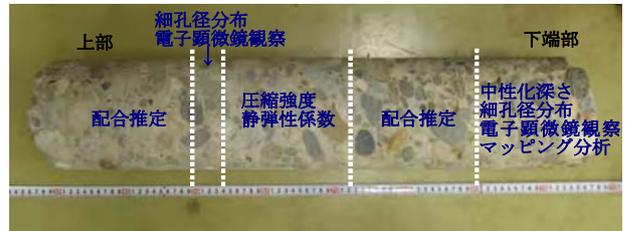
各試験に使用した位置を示したものが写真-2である。外観観察では、コンクリートの使用骨材とその分布および空隙等の有無について観察した。また、下端部の地盤と接している面について中性化深さを測定した。測定はJIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し、14カ所について行った。

#### 3.2 配合推定

写真-2に示したように下端部に近い部分と内部の2カ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。



コア上部



コア下部

写真-2 各試験に用いた試料の箇所

#### 3.3 力学的性質の評価

写真-2に示したコア上部とコア下部の2カ所の試料について圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。

#### 3.4 細孔径分布の測定

写真-2から分かるようにコア下部の下端部と上部の2カ所から採取した試料について水銀圧入法で細孔径分布を測定した。

#### 3.5 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、細孔の有無と分布等の組成像を作成し、詳細な観察をする目的で行った。試料は、コア下部の下端部と上部の2カ所から採取した。

#### 3.6 EPMA分析

写真-2で示した下端部についてEPMA分析を行っ

コア上部



コア下部

写真-3 コンクリートコアの表面状態

た。本論文では、Ca、Si および S 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. 試験結果

##### 4.1 外観観察

図-3 で示した本体コンクリート下端部から採取したコアの外観が写真-3 である。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。



写真-4 中性化深さ測定時の切断面の様子

表-1 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

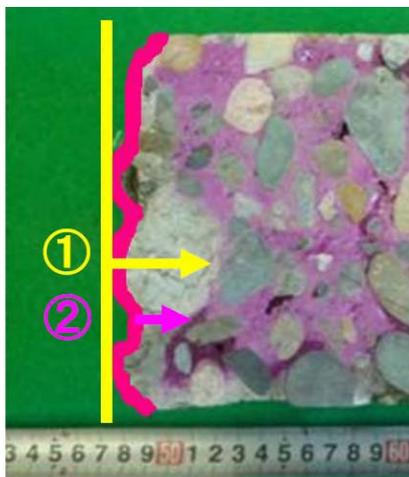


写真-5 中性化深さの測定方法 (左: ①, 右: ②)

測定時の切断面の様子を写真-4 に、結果を表-1 に示す。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と比較すると中性化の進行は小さいと判断される。

##### 4.2 配合推定

本体コンクリートと地盤が接する面から約 25cm 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 90cm の距離で本体のほぼ中心部となる部位について配合推定試験を行った。

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 含有率を求めて、コンクリート中のセメント量を推定した。分析によって求めた値をまとめたものが表-2 あり、推定した配合が表-3 である。なお、セメント量の計算に必要なセメントの CaO 含有率は普通ポルトランドセメントの 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% そして強熱減量を 0.6% として推定を行った。

表-2 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-3 配合推定結果

試料名	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	材料単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			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-4 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

その結果、下端部では単位セメント量が 96kg/m<sup>3</sup>、単位水量が 125kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が 130%で、内部では単位セメント量が 126kg/m<sup>3</sup>、単位水量が 141kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が 112%という推定値になった。2 つの推定結果ともセメント量が非常に少ない値となった。鉄筋コンクリート標準仕方書 (昭和 6 年)<sup>10)</sup>では鉄筋コンクリートの場合であるが、単位セメント量を最低 300kg/m<sup>3</sup>としていることから無筋コンクリートであることを考慮しても推定した単位セメント量が非常に小さい値であることがわかる。さらに、表-3 の推定結果から、大河津分水路

の工事が行われていた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-4に示す。なお、セメントの単位容積質量は鉄筋コンクリート標準仕方書（昭和6年）<sup>10</sup>等に記された  $1500 \text{ kg/m}^3$  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  $1650 \text{ kg/m}^3$  と仮定した。表-4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<sup>11</sup>)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。しかし、横関ら<sup>9</sup>)は、水中で100年間供用した表面から1m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も内部においても CaO が地下水に溶出した可能性があり、この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える。

### 4.3 力学的試験の結果

力学的試験の結果をまとめたものが表-5である。これを見ると圧縮強度が  $21.7 \text{ N/mm}^2$  と  $22.1 \text{ N/mm}^2$  であった。星野ら<sup>12</sup>)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  $10 \sim 30 \text{ N/mm}^2$  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<sup>9</sup>)が試験したところ、ばらつきは小さいが平均  $13.2 \text{ N/mm}^2$  であった。それから、鉄筋コンクリート標準仕方書（昭和6年）<sup>10</sup>)では、水セメント比55%のコンクリートの標準の強度  $\sigma_{28}$  を  $17.5$  としている。

表-5 力学的試験の結果

試料名	平均高さ (mm)	平均直径 (mm)	高さと直径の比	補正係数	最大荷重 (kN)	補正前圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	補正後圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	静弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
上部	219	149	1.47	0.96	396	22.6	21.7	26.2
下部	165	149	1.11	0.90	428	24.6	22.1	30.3

これらと比較してみると、本試料の強度は当時のものとして一般的な圧縮強度を今でも有していると判断される。また、このコンクリートと同程度の水セメント比だと西澤らの実験<sup>13</sup>)では、十分締め固めても半分程度の強度しか得られないことから、当時の地下コンクリートは適正な配合と施工でコンクリートを製造し、十分な強度が発現した後に、セメントが溶出しても強度低下が小さい可能性がある。

### 4.4 細孔径分布

細孔径分布の測定より求めた全細孔容積を表-6に、2つの試料の細孔径分布曲線を図-4および図-5に示す。図-4および図-5より、地盤に接している下端部とコンクリート内の上部の2つの試料において細孔径分布曲線の形状は類似しており、目立った相違はない。ただし下端部の方がやや細孔が多い結果であった。また、一般的なコンクリートより全細孔容積が  $0.15 \text{ ml/g}$  を超えていることから、細孔による空隙が多いといえる。特に、下端部では  $100 \mu\text{m}$  での細孔容積が  $0.015 \text{ ml/g}$  であり比較的大きな細孔があるコンクリートであるといえる。

表-6 細孔径分布測定結果

試料名	全細孔容積 ( $\text{ml/g}$ )
下端部	0.1776
内部	0.1519

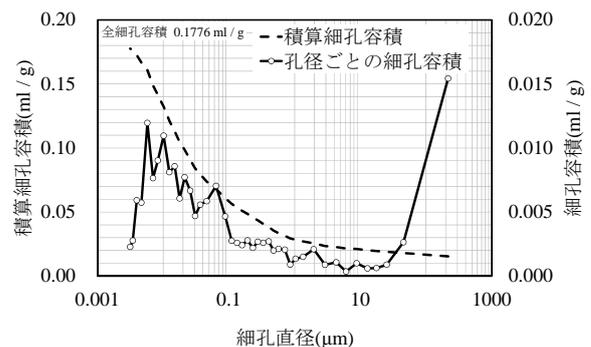


図-4 細孔径分布測定結果（下端部）

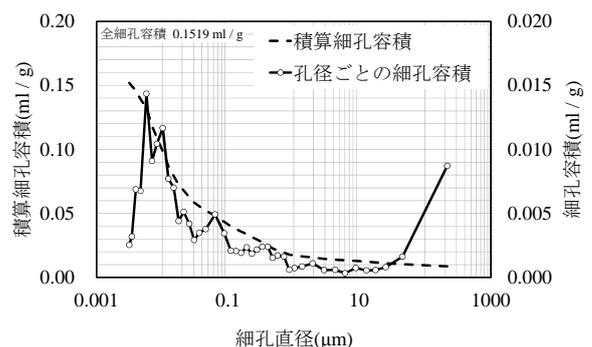


図-5 細孔径分布測定結果（上部）

### 4.5 電子顕微鏡観察

下端部の代表的な観察像を写真-6に、上部の組成像を写真-7に示す。いずれも100倍で観察したものである。

いずれの試料においてもセメント粒子の大きさは  $100 \mu\text{m}$  を超えるものが存在しており、そのセメント粒子が

90年水中にあっても水和反応を生じず、粒子のままだが残っていることが観察できる。また、上部に比べて下部には  $100\mu\text{m}$  より大きな空隙が多く存在する。これは、大正11年のコンクリートスランブが小さく、施工においては均しコンクリートを用いないことや、締め固めがコンクリート下端まで十分に行えなかったことが考えられる。

れなかったため図を割愛した。なお、各画像の上が下端

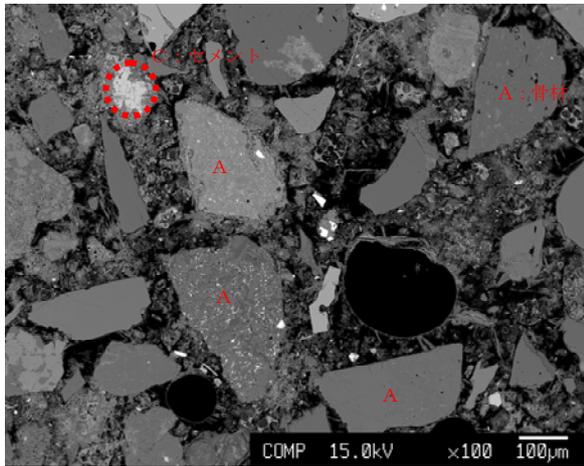


写真-6 組成像 (下端部)

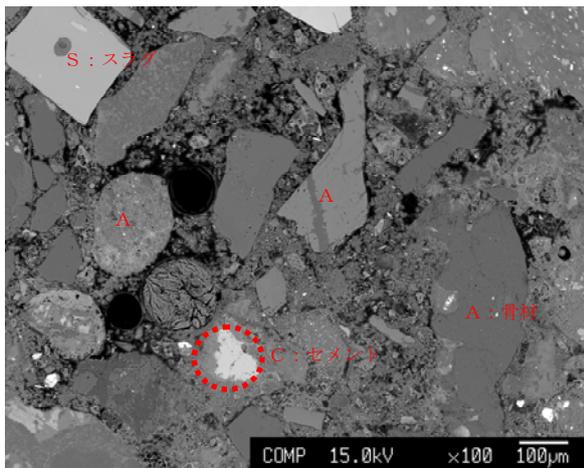
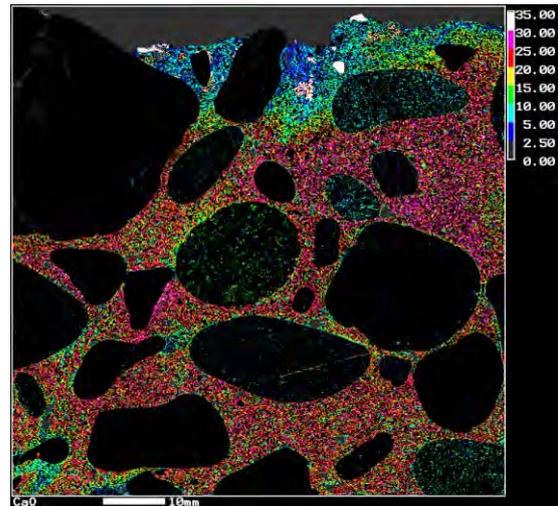


写真-7 組成像 (上部)

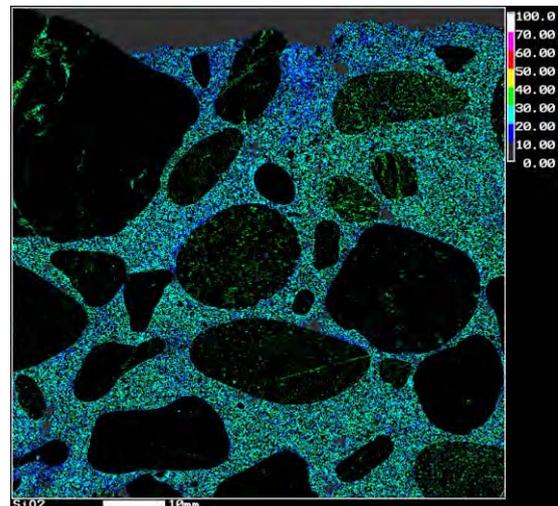
写真-6の下端部は、非常に暗く観察される疎な部分と、比較的明るく観察される密な部分があり、緻密さにムラがある。また、上段の写真では、 $100\mu\text{m}$  程度の空隙も存在しており、細孔径分布測定の結果と同じ傾向であると考えられる。一方、写真-7の上部は下端部と比べると全体的に明るく、先端部より緻密な組織であると判断される。しかし、骨材の周囲などの一部には暗く観察される部分が認められ、骨材とペーストがよく密着しておらず、ペーストの充填性は決して良くない。

#### 4.6 EPMA面分析

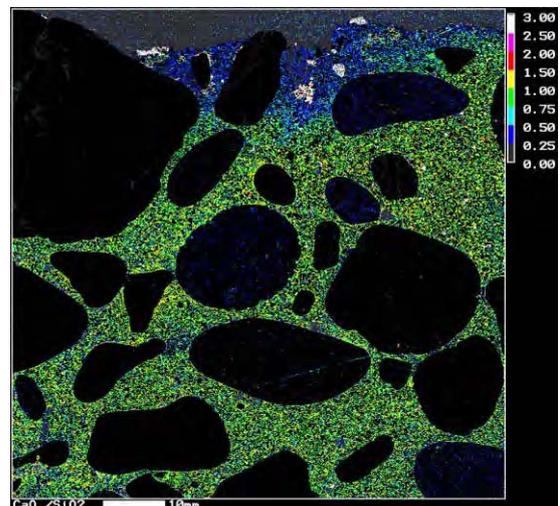
下端部のセメントペーストに相当するピクセルのみを選択して表示した結果が図-6であり、CaOとSiO<sub>2</sub>、CaO/SiO<sub>2</sub>モル比を示し、SO<sub>3</sub>についてはほとんど検出さ



CaO 濃度分布



SiO<sub>2</sub> 濃度分布



CaO / SiO<sub>2</sub> モル比

図-6 組成像 (下端部)

部表面であり、面分析結果の右上にあるカラーバーは表示された色と濃度 (mass%) の関係を示している。

CaO の分布図において、表面から深さ 10~15 mm ほどの領域が、内部より濃度が低いことが確認された。この領域では、SiO<sub>2</sub> の濃度も若干内部より低い。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。

SO<sub>3</sub> の濃度はごく低い濃度で炭酸化による帯状の高濃度部分が認められないが、水中に長期間に存在した本試料では、これだけで炭酸化が生じなかったとは判断できない。したがって、水中では、空気中のコンクリートと異なり、CO<sub>2</sub> と CaO が界面で直接反応するのではなく、セメント成分が溶出した後に、水中で HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等と反応するものと推測している。

CaO / SiO<sub>2</sub> モル比は、中性化していない部分では 1.5 に満たない値である。C-S-H の CaO / SiO<sub>2</sub> モル比は 1.4 ~1.7 程度であるので、本試料の値は低い。また、CaO の分布図において濃度が高い部分でも 30% 以下であり、通常の 65% 程度より低い。これらのことから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ことがカルシウムの溶出によるものであると考えられる。以上のことから、地下中のコンクリートにおける劣化は通常のコンクリートと異なる劣化挙動を示すと推測され、今後のデータ収集が重要であると考えられる。

## 5. おわりに

地下で 90 年間経過した無筋コンクリートについて得られた結論を以下にまとめる。

- ① 流れが速くない地下水の中でも、地盤に接するコンクリートは溶出による中性化は生じ、90 年間でその深さ 15mm 程度であった。しかし、この場合の中性化は空気中で生じる現象とは異なる可能性がある。
- ② 適正な配合と施工で製造し、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。
- ③ 厚さ 1.8m、高さ 3m のマッシュなコンクリートの中心部においても配合推定の結果からセメント成分のうちカルシウムが溶出する可能性が考えられた。

今後は、東京地下鉄から試料の提供を受け、分析したデータを収集していく予定である。

## 謝 辞

本研究は、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、試料を提供いただいたものである。ここに付記し、関係各位に謝意を表す。また、本論文についてご指導をいただいた太平洋コンサルタント 沢木大介氏にも感謝の意を表す次第である。

## 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) 玉井 譲ほか: 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, 歴史的建造物の診断・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) 星野富夫ほか: 100 年以上供用されているコンクリートの調査・分析事例, 歴史的建造物の診断・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
- 4) 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
- 5) 沢木大介, 田中敏嗣, 黒田一郎, 米倉垂州夫: 昭和初期に建造された貯油タンクから採取されたコンクリートの力学的及び化学的性質, Cement Science and Concrete Technology, No.61, pp.390-396, 2007
- 6) 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建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
- 7) 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
- 8) <http://www.hrr.mlit.go.jp/shinano/ohkouzu/nippou/pdf/pdf.pdf> 2013.1.8
- 9) <http://www.hrr.mlit.go.jp/shinano/ohkouzu/tayori/tanken/tanken-6/koteizeki.htm> 2013.1.8
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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建造物の分析と評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.707-712, 2006.
- 13) 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.