

# 論文 長期供用された地下コンクリートにおける地盤の透水性の影響に関する分析と評価

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、トンネルでは環境条件が明確でないため、中性化の劣化の進行速度が明確になっていない。特に、周辺地盤の性質による劣化への影響は全く解明が進んでいない。そこで、本研究は、長期供用した地下コンクリートのうち透水性地盤中の大河津分水固定堰と不透水性地盤中の新戸相武台トンネルから採取したコンクリートを観察し、中性化深さの測定とEPMAによる面分析を実施して、透水性地盤中では22mm程度中性化が生じているのに対して、難透水層地盤中では中性化がほとんど生じないこと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

現在の日本では、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)</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。

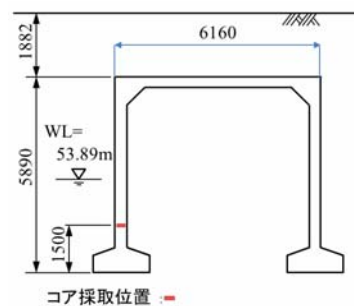
これに対して、トンネルのコンクリートでは、圧縮強度や化学的な品質の変化が明らかになっていないため、マネジメント手法が適用されていない。具体的には、地下のコンクリートに関する調査・研究は横関ら<sup>4)</sup>や玉井ら<sup>5)</sup>によるものなどの他には学術論文は少なく、外部に非公開の学術的にまとまっていない地下鉄銀座線等の報告書が多い。そのため、土木学会トンネル標準示方書開削工法<sup>6)</sup>では、コンクリートの水セメント比を50%以下とし、30mm以上のかぶりを確保することでコンクリートの耐久性能が確保できるとしているのが現状である。このようにトンネルのコンク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、本論文は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、透水性地盤内に長期間設置された構造物と、難透水性地盤中で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、周辺の地盤の中性化や強度低下への影響を計測してまとめたものである。

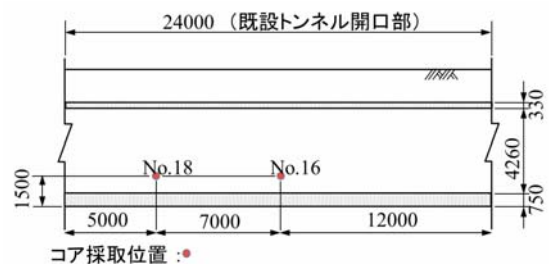
## 2. 対象構造物

透水性地盤中の地下コンクリートとしては大正11年から供用されてきた大河津固定堰<sup>7)</sup>を、難透水地盤中のものとしては新戸相武台トンネルを対象構造物とした。

新戸相武台トンネルは、昭和11年に建設された神奈川



(断面図) (単位: mm)



(側面図) (単位: mm)

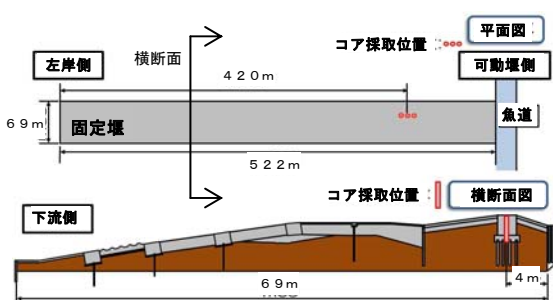


図-1 大河津固定堰の構造とコア採取箇所

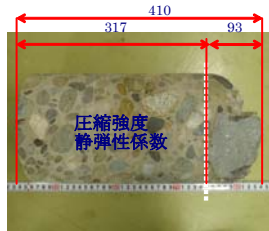
図-2 新戸相武台トンネルの構造とコア採取箇所

\*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)

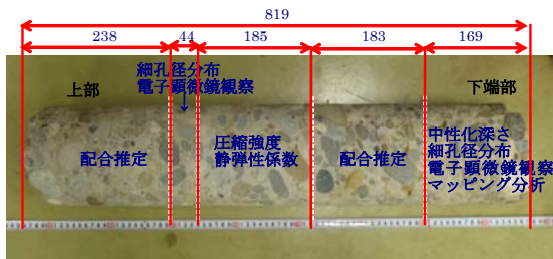
県座間市在日米陸軍基地を横断する市道のトンネルである。トンネル周辺の井戸で計測したところ、地下水は軟水であった。

図-1に示すように大河津固定堰の長さ522mで、高さ約3m、厚さ約1.8mの本体部からコンクリートコアを採取した。本体部は、河道内にあり、常に地下水位以下に存在し、周辺地盤はシルト混じり細砂地盤で、透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ であった。地下水は信濃川の河川水で軟水であった。

図-2のように新戸相武台トンネルは、幅6.16m、高さ5.89mの側壁において、地下水位以下となる下端より1.5m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24.0mの中央と端部から5mの位置の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トンネル延長方向に目立った変化はなかった。



(コア上部) 寸法は mm



(コア下部) 寸法は mm

写真-1 大河津固定堰の各試験に用いた試料の箇所 (コア径は150mm)

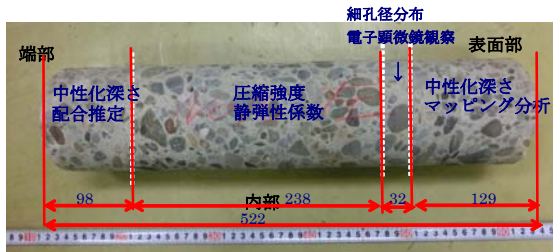


写真-2 新戸相武台トンネルの各試験に用いた試料の箇所 (2本のコア共通) 寸法は mm (コア径は100mm)

### 3. 調査の内容

#### 3.1 外観観察

大河津固定堰の各試験に使用した位置を示したものが写真-1、新戸相武台トンネルのものが写真-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、大河津固定堰では、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。また、新戸相武台トンネルでは、表面部のトンネル内側の面と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」に準拠して行った。

#### 3.2 配合推定

写真-1に示したように大河津固定堰では、下端部に近い部分と内部の2ヵ所から採取した試料について配合推定試験を行った。新戸相武台トンネルでは、写真-2のように端部の地盤に近い箇所で採取した試料について配合試験を行った。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。

#### 3.3 力学的性質の評価

大河津固定堰の試料では写真-1に示したコア上部とコア下部の2ヵ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。新戸相武台トンネルでは、No.16の試料、No.18の試料とも写真-2のようにコアの内部の試料で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-1から分かるように大河津固定堰のコア下部の下端部と上部の2ヵ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。新戸相武台トンネルでは、図-2のNo.16の試料とNo.18の試料とも写真-2のようにコアの内部の試料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。大河津固定堰の試料は、コア下部の下端部と上部の2ヵ所から採取した。新戸相武台トンネルでは、No.16とNo.18とも写真-2のようにコアの内部の試料について電子顕微鏡観察を行った。

#### 3.6 EPMA分析

大河津固定堰では写真-1で示した下端部について、新戸相武台トンネルではトンネル内面の表面部について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。

## 4. 試験結果

### 4.1 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。一方、新戸相武台トンネル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。

表-1は大河津固定堰と新戸相武台トンネルの平均中性化深さをまとめたものである。大河津固定堰の中性化深さの平均値は22mm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-1で示すように新戸相武台トンネルの中性化深さは、気中である表面側が5.0mmと1.9mmであり、地盤中の端部では0.3mmと2.5mmであり、気中の方がやや大きい。しかし、全ての値で78年経過してもあまり中性化が進んでいないといえる。

表-1 中性化深さ

部位名		環境	平均中性化深さ(mm)
大河津固定堰		地盤中	22.0
新戸相武台トンネル	No.16表面部	気中	5.0
	No.16端部	地盤中	0.3
	No.18表面部	気中	1.9
	No.18端部	地盤中	2.5

#### 4.2 配合推定

大河津固定堰の本体コンクリートコアは写真-1に示すように右側が下端であり地盤と接している。そして、写真-1のように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とほぼ中心部となる部位について配合推定試験を行った。また、新戸相武台トンネルでは、ほぼ中心である内部について配合推定試験を行った。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。

その結果のうち分析結果を表-2に配合推定を表-3に示す。大正11年に完成した大河津固定堰では、下端部で

表-2 分析結果

部位名		CaO含有率(%)
大河津固定堰	写真-1での位置	3.1
	内部	3.9
新戸相武台トンネル	図-2におけるコア採取位置	9.2
	No.18	8.9

表-3 配合推定結果

部位名	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		
大河津固定堰	下端部	2409	96	125	2188	130
	内部	2384	126	141	2116	112
新戸相武台トンネル	No.16	2405	322	205	1878	63.7
	No.18	2401	310	202	1891	65.2

の単位セメント量が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。一方、昭和11年に建設された新戸相武台トンネルでは、No.16の試料で単位セメント量が322kg/m<sup>3</sup>、単位水量が205kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が62.7%で、No.18は単位セメント量が310kg/m<sup>3</sup>、単位水量が202kg/m<sup>3</sup>、水セメント比が65.2%という推定値になった。

大河津固定堰の推定結果では、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示方書(昭和6年)<sup>8)</sup>では単位セメント量の最低値が300kg/m<sup>3</sup>ということから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。これに対して、新戸相武台トンネルのコンクリートの推定結果では、セメント量が300kg/m<sup>3</sup>以上あり通常値であると考えられる。

この差異については、水中で100年間供用されたコンクリートのセメント成分が大河津固定堰のコンクリートと同じく極端に少ないことを横関ら<sup>4)</sup>が報告している。

以上の結果から地中に長期間有ったコンクリートについては、その内部においても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られる。

#### 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-4である。これを見ると大河津固定堰のコンクリートは圧縮強度が21.7N/mm<sup>2</sup>と22.1N/mm<sup>2</sup>であった。また、新戸相武台トンネルのコンクリートは圧縮強度が38.3N/mm<sup>2</sup>と27.2N/mm<sup>2</sup>であった。星野ら<sup>9)</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10~30N/mm<sup>2</sup>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>4)</sup>が試験したところ、ばらつきは小さいが平均13.2N/mm<sup>2</sup>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)<sup>8)</sup>では、水セメント比55%のコンクリートの強度 $\sigma_{28}$ を17.5N/mm<sup>2</sup>としている。

大河津固定堰のコンクリートと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>10)</sup>で

表-4 力学的試験の結果

部位名		平均高さ	平均直径	最大荷重	補正後
		(mm)	(mm)	(kN)	圧縮強度*(N/mm <sup>2</sup> )
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

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。これに対して今回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たので、強度低下が小さい可能性がある。一方、戸相武台トンネルのコンクリート強度は当時のものとして一般的なもの以上の圧縮強度を今でも有していると判断できる。

#### 4.4 細孔径分布

細孔径分布の測定より求めた全細孔容量を表-5に、大河津固定堰と新戸相武台トンネルのコンクリートの細孔径分布曲線を図-3~6に示す。大河津固定堰と新戸相武台トンネルの試料において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 μm以上の細孔容積には大きな差がない結果であった。一方、表-5に示すように、大河津固定堰のコンクリートは全細孔容積が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。特に、図-3から分かるように透水性地盤と接している大河津固定堰の下端部では100

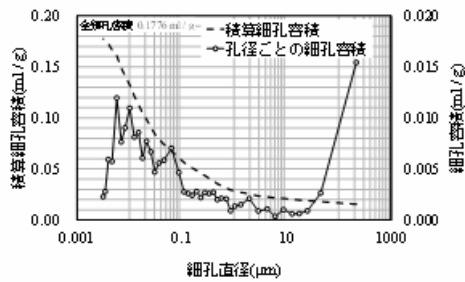


図-3 細孔径分布測定結果（大河津固定堰下端部）

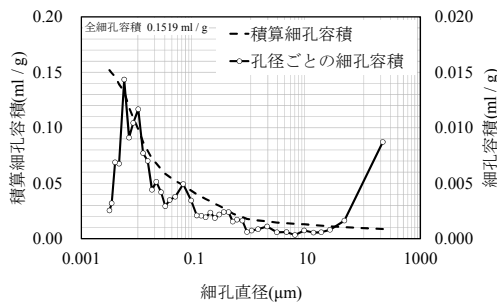


図-4 細孔径分布測定結果（大河津固定堰内部）

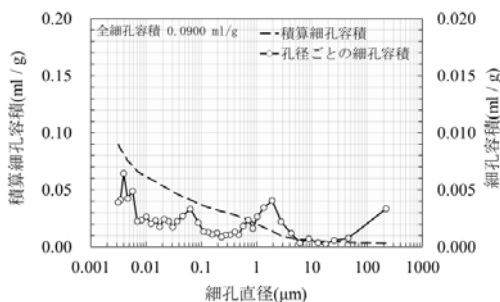


図-5 細孔径分布測定結果（新戸相武台トンネル No. 16）

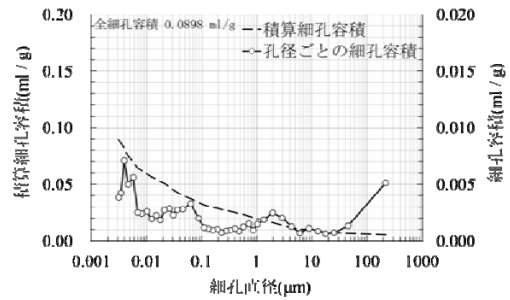


図-6 細孔径分布測定結果（新戸相武台トンネル No. 18）

表-5 細孔径分布計測の結果

部位名		全細孔容積 (ml/g)	
大河津固定堰	写真-1での位置		
	下端部	0.1776	
	内部	0.1519	
新戸相武台トンネル	図-2におけるコア採取位置	No.16	0.0900
		No.18	0.0898

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コンクリートであるといえる。

#### 4.5 電子顕微鏡観察

大河津固定堰下端部の観察像を写真-3に、その内部のそれを写真-4に、新戸相武台トンネル No.16 の観察像を写真-5に、No.18のそれを写真-6に示す。全て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 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年のコンクリートスラブが小さく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ため、突き固めでコンクリートの下の敷砂利が動いた。それで、コンクリート下端が十分に締め固められなかったことも考えられる。

一方、新戸相武台トンネルのコンクリートのセメント粒子の方は色が変わっている部分を含んでおり、やや反

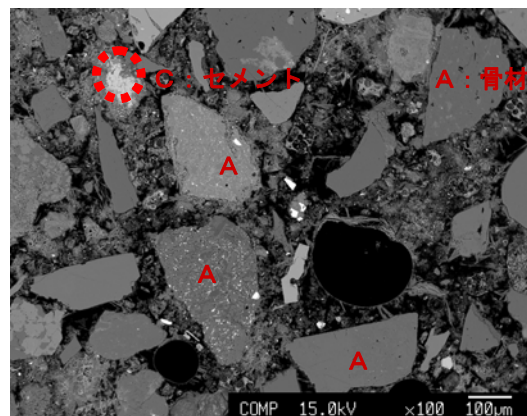


写真-3 組成像（大河津下端部）

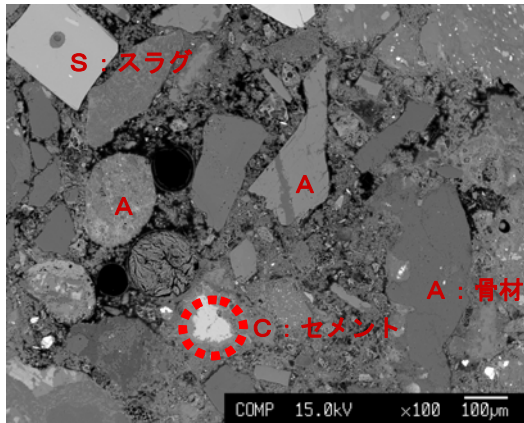


写真-4 組成像 (大河津内部)

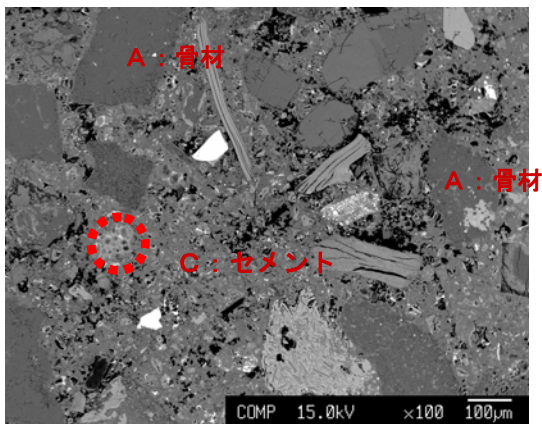


写真-5 組成像 (新戸 No. 16)

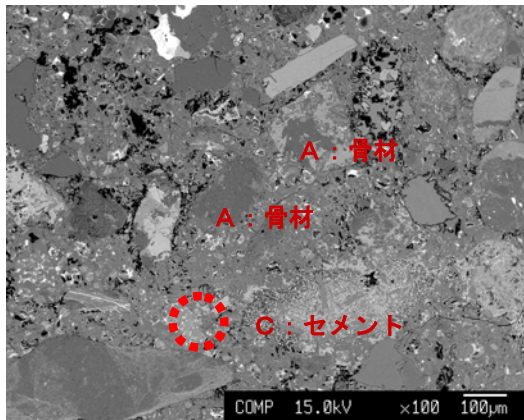
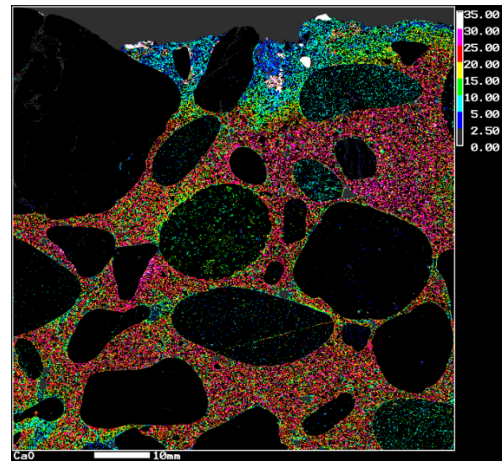


写真-6 組成像 (新戸 No. 18)

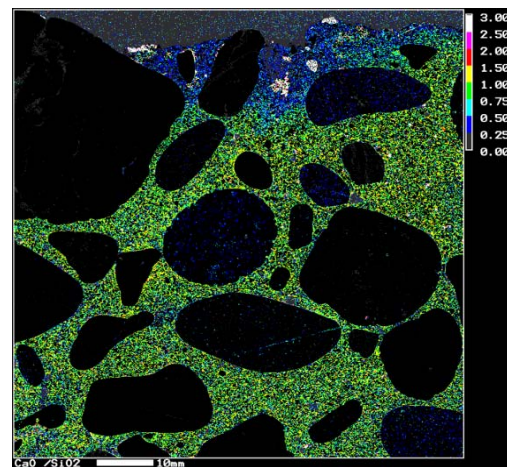
応が進行しているように見える。また、 $100\mu\text{m}$  より大きいような空隙が見えず、密実に施工されていることが観察できる。

#### 4.6 EPMA 面分析

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して表示した結果が図-7 であり、新戸相武台トンネル No.16 の表面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-8 である。両試料の違いが大きかった CaO と CaO / SiO<sub>2</sub> モル比を示す。また、新戸相武台トンネルのうち、より中性化が生じていた No.16 の表面部を示す。なお、各画



CaO 濃度分布



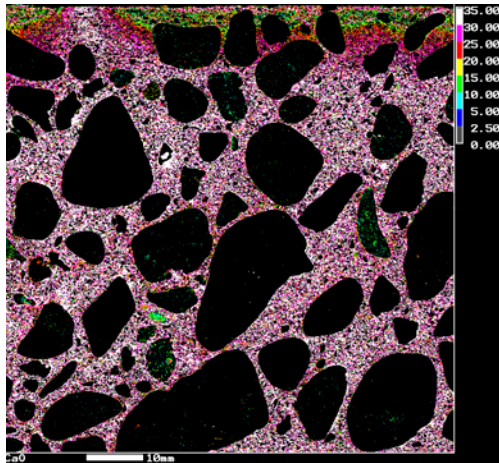
CaO / SiO<sub>2</sub> モル比

図-7 組成像 (大河津固定堰)

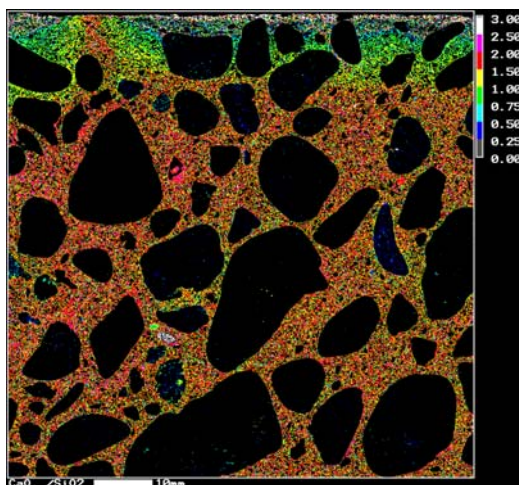
像の上がコンクリートの表面であり、面分析結果の右上にあるカラーバーは表示された色と濃度 (mass%) の関係を示している。

CaO の分布図において、大河津固定堰の図-7 では、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、内部の濃度は普通のセメントの CaO 含有率 64.5 % の半分以下である 25%以下であることが分かる。一方、新戸相武台トンネルの図-8 の CaO 分布図では、表面から深さ 5 mm ほどの領域が、内部より濃度が低く、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。しかし、内部の CaO 濃度は 30%程度以上の値であり、CaO の濃度が大河津固定堰より高い結果となった。

大河津固定堰の図-7 で CaO / SiO<sub>2</sub> モル比は、内部の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、大河津固定堰の内部の試料はこの値が低く、CaO の分布図において濃度が高い部分でも 25%以下であり、通常の 65%程



CaO 濃度分布



CaO / SiO<sub>2</sub> モル比

図-8 組成像 (新戸相武台トンネル)

度より低いことから、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。

これに対して、新戸相武台トンネルの図-8ではCaO / SiO<sub>2</sub> モル比は、内部の中性化していない部分で1.5以上の値であり、C-S-HのCaO / SiO<sub>2</sub> モル比と同程度である。また、新戸相武台トンネルの試料はCaOの分布図で濃度が35%以上の部分では、通常の65%程度であることを確認してある。このことから、難透水層地盤中では、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。

以上のことから、地下中のコンクリートにおける劣化は、周辺地盤の透水性によって差異が生じる可能性があると考えられる。

## 5. おわりに

結論を以下にまとめる。

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22mm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は空気中の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、製造直後に強度発現した地下コンクリートは、90年間透水性地盤内に設置しても強度低下の可能性が小さく、難透水性地盤内では78年経過しても強度低下が生じない。

③透水性地盤内では、厚さ1.8m、高さ3mのマッシュパ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のカルシウムが溶出する可能性がある。

現在は、東京地下鉄から提供された銀座線の試料について分析中で、さらに研究を進めていく予定である。

## 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) 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
- 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
- 5) 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
- 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) 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.
- 10) 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.