

# セメント代用品を使用した覆工コンクリートの劣化に関する研究

Study of Deterioration on Tunnel Lining Concrete Using Cement Substitute Material

上田 洋<sup>1</sup>・西尾壮平<sup>2</sup>・松田芳範<sup>3</sup>

Hiroshi Ueda, Sohei Nishio and Yoshinori Matsuda

<sup>1</sup>正会員 理修 財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:h-ueda@rtri.or.jp

<sup>2</sup>工修 財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>3</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事事務局構造技術センター (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

This paper presents an investigation on deterioration mechanism of a tunnel lining concrete constructed in around 1928. In this tunnel, the surface area of the concrete changed in quality into a powder and became weak. It was found that diatom earth was mixed in the concrete as a cement substitute material. Investigation by using concrete specimens suggested that compressive strength of diatom earth blended concrete declined with carbonation. Study results showed that the tunnel lining concrete was deteriorated by carbonation of diatom earth contained as a cement substitute material.

**Key Words :** tunnel lining concrete, deterioration, carbonation, diatom earth

## 1. はじめに

国内の鉄道トンネルにおいて、覆工材料にコンクリートが適用され始めたのは主に大正時代以降であり<sup>1), 2), 3)</sup>、このように戦前に施工され経年60年以上を有するトンネルは現在でも数多く供用されている。これらのトンネルの覆工コンクリートでは、現在でも健全なものが存在する一方で、コンクリートに浮きやひび割れを生じたり、コンクリートが変質して脆弱になるなどの変状を生じている例も見受けられる。これらの変状のうち、覆工コンクリートが脆弱化するものでは、セメントマトリックスが変質して固結力を失い、コンクリート塊や粗骨材がはく離することも多い。

覆工コンクリートが劣化を生じる原因として、蒸気機関車の煤煙による影響が古くから指摘されているほか<sup>4), 5)</sup>、凍害、有害水の作用などが知られている<sup>6)</sup>。しかし、筆者らが変状を生じた覆工コンクリートの調査を行ったところ、従来から知られている劣化とは異なる種類の劣化事例があることを見出した。

そこで、本論文ではこのような事例を有するトン

ネルを対象として覆工コンクリートの調査を行った結果を述べるとともに、コンクリート試験体を用いた実験を行い、覆工コンクリートの劣化原因を解明した結果について述べる。

## 2. 構造物の調査

### (1) 構造物の概要

調査を行ったトンネルは、1928年に竣工した単線の鉄道トンネルである(表-1)。当該区間は開業時から電化されており、覆工材料は場所打ちコンクリートである。このトンネルでは、覆工コンクリート表面付近のモルタル部分が変質して粉状になっており、コンクリートが点検用のハンマーなどで容易に削り取れる状態である。

なお、本トンネルでは列車運行の安全を図るために、覆工コンクリートのはく落防止対策が講じられている。

### (2) 調査内容

覆工コンクリートの劣化原因を明らかにするため

表-1 調査トンネルの概要

|         |            |
|---------|------------|
| トンネルの種類 | 鉄道トンネル     |
| 単複線の別   | 単 線        |
| トンネル形式  | 馬蹄形        |
| 延 長     | 149m       |
| 勾 配     | Level      |
| 竣功年     | 1928年      |
| 覆工材料    | 場所打ちコンクリート |

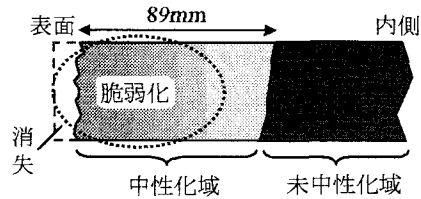


図-1 採取したコアの模式図

に、コンクリートコアを採取して以下の調査を実施した。

- ①コアの外観観察：採取したコアを目視で観察し、劣化状況を調査した。
- ②中性化深さ測定：コアを軸方向に切断し、切断面に1%フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して赤紫色に呈色しない部分の表面からの深さを測定し、中性化深さとした。なお、通常はコアを破断することが望ましいが、今回は破断時にコアが崩壊する恐れがあったことから、切断による方法を用いた。
- ③粉末X線回折分析：コアを粗骨材になるべく含まれないように粉碎して試料を調製し、粉末法による分析を行った。管球にはCuを用いた。
- ④走査型電子顕微鏡による組織観察およびエネルギー分散型X線分析（SEM-EDS）：走査型電子顕微鏡（SEM）を用いてコンクリートの組織を観察するとともに、SEMに付属するエネルギー分散型X線分析装置（EDS）を用いて観察箇所周辺の成分分析を行った。
- ⑤細孔径分布測定：コアのモルタル部分について、粒径が2.5～5mmになるように粉碎した試料2gを調製し、水銀圧入式ポロシメータを用いて、細孔径分布を測定した。

### (3) 調査結果

#### a) コアの外観および中性化深さ

図-1に、コアの外観および中性化域の状態を模式的に示す。コアは表面が欠損しているほか、コアの内空側端部から深さ90mm付近までがやや黄色味を帯びた白色に変色しており、変色域では特に表面付近が脆くなっている。表面の欠損は、コンクリートが脆弱化することによってはく離したために生じたものとみられる。また、変色を生じていない内側のコンクリートでは目立った特徴は認められない。

コアの中性化深さは、最大で89mmであった。コンクリートの経年を73年とすると、中性化速度係数は10.4mm/年と算定される。なお、コアの表面が数

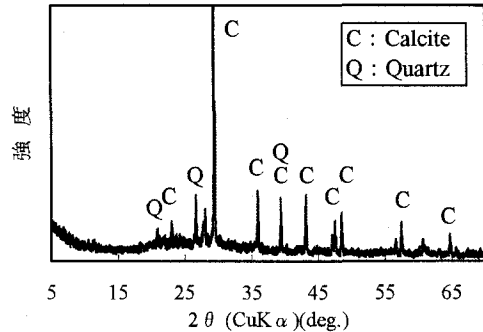


図-2 中性化域の粉末X線回折分析結果

mm程度欠損しているため実際にはこの値よりも若干大きいと推定される。いずれにしても、一般的なコンクリートと比べて中性化の進行が早いと考えられる。また、中性化域は変色域とほぼ一致している。コンクリートは一般に中性化によって変色するが、本コアでは中性化域のうち表面側が脆弱化を生じている点が特徴的である。

#### b) 粉末X線回折分析

図-2に、コアの中性化域から採取した試料の粉末X線回折分析結果を示す。主な回折ピークは、Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) と Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) である。Calciteは、一部の骨材に含まれるほか、コンクリートの中性化に伴って生成するものであり、中性化域で一般的にみられるものである。また、Quartzは骨材に由来するものと考えられる。また、 $2\theta (\text{CuK}\alpha) = 20 \sim 30^\circ$  付近にブロードなピークが認められる。その他には特徴的な回折ピークは認められず、Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) や Ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) などの硫酸塩鉱物も認められない。

#### c) SEMによる観察

採取したコアをSEMによって観察したところ、多くの空隙を有する物質がモルタル部分に観察された。図-3にその一例を示す。この物質は空隙の半径が数～数十μmであり、筒状物質の集合体として観察さ

れる。また、EDSを用いてこの物質周辺の構成成分を測定した結果は図-4に示すとおりで、筒状物質の主成分は $\text{SiO}_2$ であることがわかった。

したがって、このコンクリートには空隙を多く有するシリカ質の物質が混和されていることが示唆される。

#### d) 細孔径分布測定

図-5に、コアの未中性化部分において細孔径分布を測定した結果を示す。図中に“本コンクリート”と記したものが今回調査対象としたコアの測定結果であり、“他のコンクリート”と記したものは大正から昭和初期にかけて建設された他のトンネルから採取したコアの測定結果である。近年施工されたコンクリートではAE減水剤の使用などにより、細孔の状態が昭和初期のコンクリートとは異なることから、比較用のコンクリートも調査対象のコンクリートと年代に近いものとした。

細孔径の分布状態はコンクリートによりそれぞれ異なり、各コンクリートの配合や打設環境の違いなどが影響しているものとみられるが、他のコンクリートと比べて、今回調査を行ったコンクリートでは、 $1\mu\text{m}$ 以下の細孔容積が極めて大きい点が特徴的である。特に、細孔半径が $0.01\mu\text{m}$ 以下の領域で細孔容積が多い傾向がうかがえる。SEMによる観察では数～数十 $\mu\text{m}$ の空隙が観察されたが、細孔径分布の測定結果から $0.01\mu\text{m}$ 以下の微細な空隙も多く有するものと考えられる。

#### (4) 考 察

コンクリートが脆弱化を生じる原因の一つとして酸による劣化があり、鉄道トンネルにおいては酸の発生源として蒸気機関車の煤煙や酸性地下水の作用などがある。今回調査したトンネルは開業時から電化されており蒸気機関車が通過していないことから、煤煙の影響による劣化は生じないが、他の原因による酸劣化の可能性について検討する必要がある。筆者らは、以前にこのような覆工コンクリートの劣化について報告しており<sup>7)</sup>、酸による劣化を生じたコンクリートでは、脆弱な部分と健全な部分との境界付近に褐色の層が生成し、この付近にはFe, Al, Mgの各成分がそれぞれ濃縮した層が形成されることを示している。しかし、今回調査を行ったコアにはこの褐色層は認められない。また、酸により劣化したコンクリートでは、一般に脆弱な部分でGypsumを生成するが、粉末X線回折分析の結果からGypsumの生成も認められない。したがって、本コアは酸による劣化は生じていないものと考えられる。

一方、コンクリートに硫酸イオンが作用すること

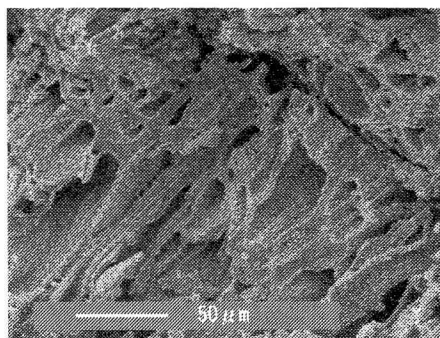


図-3 電子顕微鏡による観察結果

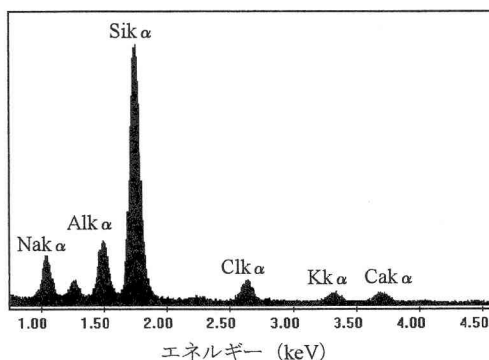


図-4 筒状物質のEDS分析結果

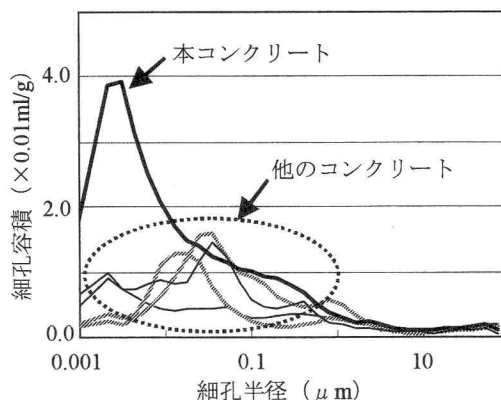


図-5 細孔径分布の測定結果

によっても劣化を生じる。硫酸イオンの作用した覆工コンクリートでは、Ettringiteなどを生成して膨張し、コンクリートにひび割れやはく離を生じたり、コンクリート表面やはく離面に $\text{Na}_2\text{SO}_4$ などの白色生成物が析出したりする<sup>7)</sup>。また、コンクリートに濃度の高い $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液を作用させた実験では、コンクリートがやがて崩壊すると報告されている<sup>8)</sup>。しかし、本コアではGypsum, EttringiteまたはThaumasite

などの硫酸塩鉱物は見られず、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ などの生成物も析出していないことから、硫酸イオンの作用による劣化は生じていないものと考えられる。

したがって、本コアで覆工表面側が脆弱化を生じたのは、酸による劣化や硫酸イオンによる劣化とは異なる劣化原因によるものと判断した。

次に、このコアの特徴について考察する。一般に、コアのモルタル部分を粉砕して得られた微粉を塩酸などの強酸性溶液中で攪拌すると、セメントペーストと一部の細骨材は溶解し、大部分の細骨材が不溶分として得られるが、本コアでは細骨材の他に酸に不溶な物質が存在することがわかった。したがって、このコンクリートにはセメントの他に酸に不溶な粉体が混和されているものと考えられる。また、SEM観察により、空隙の多い物質の存在が確認されたこと、他のトンネルから採取したコンクリートと比べて細孔容積が多いこと、EDS分析により観察された物質の主成分が $\text{SiO}_2$ であることから、このコンクリートには酸に不溶なシリカ質の多孔質物質が混和されているものと判断した。

セメントへの混和材として、今日では水和熱低減などの目的で高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどが混和されているが、大正から昭和初期においては、セメントの節約によるコストダウンなどの目的で火山灰や珪藻土などの混和について研究がなされており、鉄道の分野においても『セメント代用品』としてこれらの混和材についての研究がみられる<sup>9)</sup>。また、文献<sup>10)</sup>ではコンクリートへの珪藻土の混和について、“二割内外ノ費用ヲ節約シ得ベシト云フ”と記されている。珪藻土は主として珪藻の殻からなる軟質岩石または土壌であり<sup>11)</sup>、球状、円筒状、円盤状などさまざまな形態を有し、直径は数十 $\mu\text{m}$ 程度で、その中に1 $\mu\text{m}$ 以下の多くの孔を有するという特徴がある。また、その主成分は $\text{SiO}_2$ である。これらの特徴は今回採取したコアで確認された結果とほぼ合致する。また、珪藻土は $2\theta(\text{CuK}\alpha)=25^\circ$ 付近にブロードなピークを持つほかには明瞭な回折ピークを有しないことから、図-2で明瞭な回折ピークがみられなかったことも一致する。以上の結果から、今回調査を行ったトンネルの覆工コンクリートには珪藻土が混和されているものと推定した。

### 3. コンクリート試験体による検証

#### (1) 実験の概要

コンクリートへの珪藻土の混和が劣化に与える影

表-2 配合の特徴

| 配合比*  | 珪藻土置換率**   | 水結合材比(%)     |
|-------|------------|--------------|
| 1:2:4 | 0,30,50,70 | 65,80        |
|       | 30         | 40,50,90,100 |
| 1:3:6 | 0,30,50,70 | 65           |

\*: 結合材、細骨材、粗骨材の重量比

\*\* : セメント重量に対する珪藻土の置換率（内割）

響について検証するため、コンクリート試験体を作製して実験を行った。

試験体作製に使用した材料は以下のとおりである。

- ・混練水：上水道水
- ・セメント：普通ポルトランドセメント（T社製）
- ・珪藻土：乾燥珪藻土（S社製）
- ・細骨材：静岡県産陸砂および千葉県産山砂
- ・粗骨材：東京都産砂岩砕石

表-2に、使用した配合の特徴を示す。既往の研究<sup>9),12)</sup>から珪藻土を混合したコンクリートの基本配合を、結合材：細骨材：粗骨材の配合比率が1:2:4（重量比）、セメント重量に対する珪藻土の置換率を30%（内割）と想定した。当時のコンクリートは一般に容積配合が用いられていたようであるが、珪藻土を混和したコンクリートについては、“此等の比重はセメントよりも遙に軽く（中略）なるを以て砂と調合する場合にセメントと同様に容積調合を為すは大なる誤を生じ非常に弱き耐力を発生することあり、故に出来得べくんば重量調合を用ゆるか（以下略）”と記されている<sup>9)</sup>ことから、ここでは重量配合を用いることとした。水量については“出来得る限り少量”との表現が用いられ<sup>9)</sup>、明確な値が不明であったため、本研究では水結合材比（W/B）という形式で整理し、試験練り時の状況などからW/B=65%を基本とした。このように想定した基本配合をもとに、配合比率、珪藻土の置換率、水量の影響を検討した。なお、本研究では昭和初期に打設されたコンクリートを模擬しているため、混和剤は使用しないものとした。

試験体の寸法は100×100×400mmの角柱およびφ100×200mmの円柱で、打設から24時間後に脱型し、材齢28日まで水中養生を行ったのち試験に供した。

#### (2) 実験内容

- ①スランブ試験：フレッシュ性状の確認のため、スランブ値を測定した。
- ②圧縮強度試験：硬化したコンクリートの物性を

把握するため、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の試験体を用いて圧縮強度を測定した。

- ③促進中性化試験：作製した試験体を、温度 $30^\circ\text{C}$ 、相対湿度40%、二酸化炭素濃度20%の環境下で促進中性化試験を行った。なお、促進中性化試験は一般に二酸化炭素濃度5%の環境で実施されることが多いが、本研究では中性化後の強度性状を把握するために試験体全体を中性化させる必要があることから、二酸化炭素濃度を20%に設定した。

- ④細孔径分布測定：水銀圧入式ポロシメータを用いて、コンクリートの細孔径分布を測定した。

### (3) 実験結果

図-6に、スランプ値と珪藻土置換率との関係を示す。珪藻土の混和によりスランプ値は著しく低下し、スランプ値5cm程度の流動性を保つためには珪藻土置換率30%の場合で $W/B=80\%$ 以上の水が必要となる。これは、多孔質な珪藻土が多量の水を取り込むことが原因であると考えられる。したがって、AE減水剤などの混和剤を使用していない昭和初期においては、施工性を考慮すると、珪藻土を混合したコンクリートでは $W/B$ が高くなりやすいことがいえる。

図-7に、細孔径分布の測定結果を示す。置換率の増加とともに細孔容積が増加することがわかる。この理由は必ずしも明らかではないが、珪藻土が有する微細な細孔の存在が影響していることが考えられる。調査トンネルから採取したコアについても、配合が異なると考えられるため一概に比較はできないが、珪藻土を混和したコンクリート試験体と似た傾向を示している。

図-8に、促進中性化試験2週間後の中性化深さの比較を示す。珪藻土を混和したコンクリートは、珪藻土を混和していないコンクリートと比べていずれも中性化深さが大きく、中性化の進行しやすいコンクリートであるといえる。また、珪藻土置換率30%で $W/B=65\%$ のコンクリートでは中性化深さの差が珪藻土を混和していないコンクリートと比べて比較的小さいが、 $W/B=100\%$ ではその差が大きくなる。また、 $W/B=65\%$ でも珪藻土置換率が50%になると、同様に中性化深さが大きくなる。したがって、珪藻土置換率が高いコンクリートや水結合材比が高いコンクリートでは中性化の進行が非常に速いことがいえる。これは、珪藻土を混和したコンクリートが多孔質であるために、二酸化炭素が浸透しやすいことによるものと考えている。

図-9に、中性化による圧縮強度の変化を示す。ここで、中性化した試験体とは、養生後に約7ヵ月間

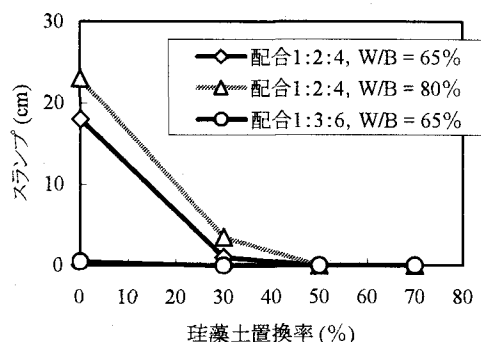


図-6 スランプ値と珪藻土置換率との関係<sup>13)</sup>

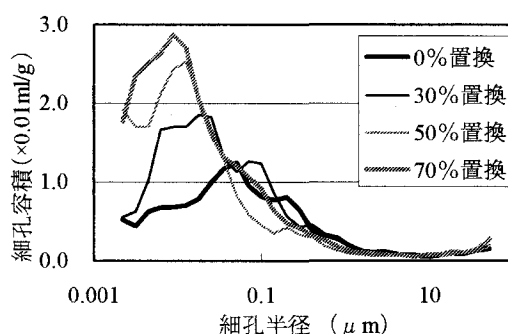


図-7 細孔径分布測定結果<sup>13)</sup>  
(試験体は配合 1:2:4,  $W/B=80\%$ )

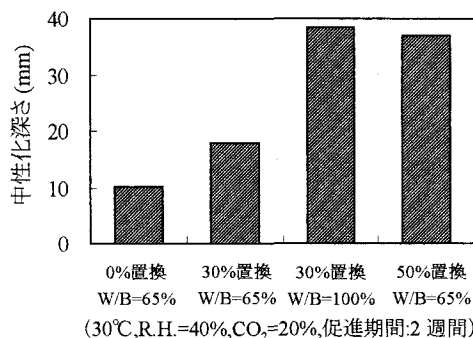


図-8 中性化深さの比較

の促進中性化試験を行い、試験体全面が中性化した状態で測定したものである。また、中性化していない試験体については同期間気中養生を行い、中性化した試験体と材齢を揃えて測定した。珪藻土で置換していない試験体では圧縮強度は $50\text{N/mm}^2$ 以上を有しており、中性化によってわずかながら強度の増進がみられる。中性化による圧縮強度の増進は既往の文献においても認められる<sup>14)</sup>。一方、珪藻土を混和

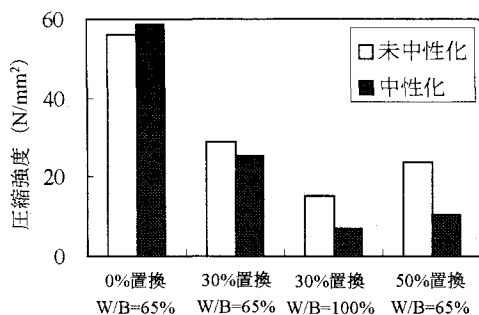


図-9 中性化による圧縮強度の変化

した試験体では、中性化によっていずれも圧縮強度は低下し、特に珪藻土置換率が30%でW/B=100%の試験体および珪藻土置換率が50%の試験体では、中性化によって圧縮強度が未中性化時の50%未満にまで低下している。これは、中性化によりセメントマトリックスが固結力を失ったことによると推測される。これらの結果から、珪藻土を混和したコンクリートでは、中性化を生じることによって圧縮強度が低下し、珪藻土置換率が高いコンクリートや水結合材比が高いコンクリートでは脆弱化を生じやすいことが推定される。

文献<sup>9)</sup>では、“珪藻土は可溶性珪酸を60～80%含み火山灰に比し有効率大なるを以て五割位迄之を混ずることを得べし、然れども珪藻土を混入するときは火山灰に比し凝結力を遅延するの缺點あり”と記されており、セメントの50%程度までは珪藻土で置換することを許容している。また、混合セメントの配合について、文献<sup>10)</sup>では、“一般にコンクリートに石灰、珪藻土、火山灰、スラッグ、珪酸粉末等を混入したるものの実施工事と試験品との耐力の差異は凡て水分の多少に帰因するものである。試験品として施行したるものは水分少なく且つ能く敲き込みを為したるものの成績で、実施工事は流し込みの成績であるからセメントに石灰又は粉末物を混入したるときは使用目的並に方法に適合する試験を為す必要がある。能く広告的に試験所の成績を発表してゐるが是は実施工事とは大邊差異がありますからセメントに混合せんとする場合は大に注意せねばなりません”との記載がみられる。

今回調査を行ったコンクリートの珪藻土置換率や水結合材比は不明であるが、当時の文献で珪藻土置換率を50%程度まで許容する記述がみられること、施工性を持たせるためにW/Bが高くなりやすいこと、実構造物では室内試験よりもW/Bがさらに高くなりやすいことなどを考慮すると、今回調査を行

ったコンクリートにおいても珪藻土置換率が高い、あるいはW/Bが高いコンクリートである可能性は十分に考えられる。このようなコンクリートでは中性化が進行しやすく、また中性化による強度低下が顕著である。したがって、今回調査を行ったトンネルでは、珪藻土を混和したコンクリートが使用され、これが中性化によって強度低下を生じたものと考えられる。特に、コンクリートの表面側では中性化を生じてから長い年月が経過しているため、セメントマトリックスの変質が進み、コンクリートの脆弱化に至ったものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究によって得られた結果は以下のとおりである。

- ①覆工コンクリートが脆弱化する変状を生じたトンネルについて調査した結果、劣化原因として、従来から知られている酸による劣化、硫酸塩鉱物の生成・膨張による劣化とは異なる劣化事例がある。
- ②昭和初期に建設された覆工コンクリートには、セメント代用品として珪藻土が混和されたコンクリートが使用された事例がある。
- ③珪藻土を混和したコンクリートでは、同じ水結合材比の普通コンクリートと比べて中性化の進行が速い。
- ④珪藻土を混和したコンクリートでは、中性化によって圧縮強度が低下し、珪藻土置換率が高い、あるいは水結合材比が高いコンクリートでは圧縮強度が未中性化時の50%未満にまで低下する。
- ⑤覆工コンクリートの劣化原因として、珪藻土を混和したコンクリートがセメント代用品として用いられ、これが中性化することによって脆弱化するものがある。

今後とも、覆工コンクリートの劣化に関する研究を進め、トンネルの維持管理に役立てていくようにしたい。

#### 参考文献

- 1) 那波光雄：鉄道院佐伯線外二線に於ける混凝土の應用，工学会誌，Vol.373，pp.334-337，1914
- 2) 八田嘉明：隧道内ニ於ケル混凝土工事ニ就テ，土木学会誌，Vol.1，No.4，pp.1285-1309，1915
- 3) 八田嘉明：新庄線隧道工事，土木学会誌，Vol.1，

No.6, pp.2133-2244, 1915

- 4) 鉄道院総裁官房研究所：隧道のセメントの硫化，業務研究資料，Vol.6, No.7, pp.173-179, 1918
- 5) 張忠一：コンクリートの腐蝕に就て，業務研究資料，鉄道大臣官房研究所，Vol.16, No.9, pp.1340-1352, 1928
- 6) 例えば，鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル，pp.182-189, 1994
- 7) 上田洋，松田芳範，西尾壮平，佐々木孝彦：トンネル覆工コンクリートの劣化について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.759-764, 2004
- 8) M.Santhanam, M.D.Cohen, J Olek : Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1: Summary of experimental results, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.915-921, 2002
- 9) 長屋修吉：セメントの代用品について，業務研究資料，鉄道院総裁官房研究所，Vol.5, No.6, pp.1235-1248, 1917
- 10) 鶴見一之，草間偉瑳武：土木施工法（訂正7版），丸善，1922
- 11) 地学団体研究会地学辞典編集委員会：地学辞典，平凡社，1973
- 12) 官房研究所第一研究室：珪藻土及石灰モルタル耐伸強度，業務研究資料，鉄道院総裁官房研究所，Vol.4, No.4, pp.737-738, 1916
- 13) 西尾壮平，上田洋，佐々木孝彦，松田芳範：セメントの代用品として珪藻土を混合したコンクリートの性状，第59回セメント技術大会講演要旨，pp.250-251, 2005
- 14) 例えば，上田洋，来海豊：モルタルの力学的特性に及ぼす炭酸化の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.787-792, 1997
- 15) 長屋修吉：コンクリートの話，業務研究資料，鉄道省大臣官房研究所，Vol.13, No.7, pp.651-669, 1925