

論文 トンネル覆工コンクリートの劣化について

上田 洋*1・松田芳範*2・西尾壮平*3・佐々木孝彦*4

要旨: 鉄道トンネルにおける覆工コンクリートの劣化現象を明らかにすることを目的として、複数のトンネルについて現地調査を行うとともにコンクリートコアを採取して分析を行った。その結果、本研究の範囲では、劣化は漏水などから供給される硫酸イオンの作用による硫酸塩劣化と、蒸気機関車の煤煙に含まれる窒素酸化物や硫黄酸化物、あるいは酸性の漏水がコンクリート表面を侵食する酸劣化とがあることを示し、それぞれの劣化メカニズムについて考察を行った。

キーワード: コンクリート, トンネル, 覆工, 酸劣化, 硫酸塩, 化学的侵食, 耐久性

1. はじめに

鉄道トンネルの覆工材料は、明治時代には主にレンガや石材が使用され、大正時代に入ってからコンクリートが急速に普及した。また、コンクリートの導入間もない大正から昭和初期にかけては、コンクリートブロック（ブロック状に作製したコンクリートを積み上げて施工するもの）が一時的な広がりを見せた。戦前に施工されたトンネルの多くが、現在も供用中である。

これらのトンネルは、健全なものが存在する一方で、覆工コンクリートに劣化を生じているものも見受けられる¹⁾。覆工コンクリートの劣化原因は、凍害、有害水の作用、蒸気機関車の煤煙の作用などが挙げられているが、必ずしも体系的にはまとめられておらず、劣化の進行性についても明らかになっていないといえる。

そこで、本論文では主に大正から昭和初期に建設されたコンクリートブロックおよび場所打ちコンクリートのトンネルを対象として、現地調査を行うとともにコンクリートコアを採取して分析を行うことによって、鉄道トンネルにおける覆工コンクリートの劣化現象を明らかにし、トンネルの維持管理に資することを目的とした。

2. 分析方法

試験は、覆工コンクリートに劣化を生じている6個所のトンネルについて、現地調査を行うとともにコンクリートコアを採取して分析を行った。表-1に、試験対象としたトンネルの概要を示す。採取したコアは、以下に示す分析項目から、それぞれの劣化状況に応じて選択した。

コアの外観観察: 採取したコアの外観を目視によって観察し、ひび割れや脆弱化の状況、変色状況などについて調べた。

粉末 X 線回折分析 (XRD): 採取したコアを粉砕して粉末試料を作製し、X 線回折装置を用いて分析を行った。分析は管球に Cu を用い、管電圧を 40kV、管電流を 20mA とした。

蛍光 X 線による成分分析 (XRF): 蛍光 X 線分析装置を用いてセメントペースト中のアルカ

表-1 調査を実施したトンネルの概要

トンネル	竣工年	単複線の別	調査個所の覆工材料*1
A	1937	単線	C
B	1924	単線	CB
C	1927	単線	側壁:C, アーチ:CB
D	1950	単線	C
E	1939	単線	C
F	1923	単線	CB

*1)CB: コンクリートブロック, C: コンクリート

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (コンクリート材料) 理修 (正会員)
 *2 東日本旅客鉄道 (株) 建設工事部構造技術センター (正会員)
 *3 (財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (コンクリート材料) 工修
 *4 (財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (コンクリート材料) 室長 (正会員)

リ・塩素量を測定する手法²⁾を応用し、セメントペースト中に含まれる SO₃ の成分量について分析を行った。

エネルギー分散型 X 線分析 (EDS) : 走査型電子顕微鏡に付属しているエネルギー分散型 X 線分析装置を用いて成分分析を行った。

3. 調査および分析結果

3.1 現地調査

A トンネルは、**図-1**に示すように側壁の一部が切り抜かれた構造で、トンネル内の一部区間では路盤から側壁の高さ 1m 程度までの範囲において、一部に浮きがみられるほか側壁の隅角部にひび割れを生じており、変状個所の周辺では覆工コンクリートの表面に白色生成物の析出がみられる。B トンネルも、覆工コンクリートの一部で浮きや剥離を生じているほか、剥離面には白色生成物が認められる。C,D,F の各トンネルでは、覆工表面は黒色であり、これは蒸気機関車が通過していた頃に発生した煤やトンネル内で生じた塵埃が付着したものであると考えられる。また、漏水の作用などによって付着物が除去された個所では白色や褐色を呈しており、これらの変色個所ではコンクリートが脆弱化を生じている。E トンネルは、以前に覆工表面が洗浄されており、調査時にはその表面は褐色であった。なお、洗浄によって劣化部分を除去した E トンネル以外の各トンネルにおいても、措置が必要な個所に対しては覆工コンクリートの修復や剥落防止対策などが実施され、列車運行の安全が図られている。

3.2 コンクリートコアの外観観察

図-2に、採取したコアの外観を模式化して示す。A トンネルでは変状個所と健全な個所からコアを採取した (以下、それぞれコア A-1, コア A-2 と呼ぶ)。コア A-1 では表面からの深さ 90~110mm 付近に複数のひび割れを生じているほか、深さ 0~90mm の領域においても微細なひび割れが認められる。B トンネルから採取したコア (以下、コア B と呼ぶ) は、表面側

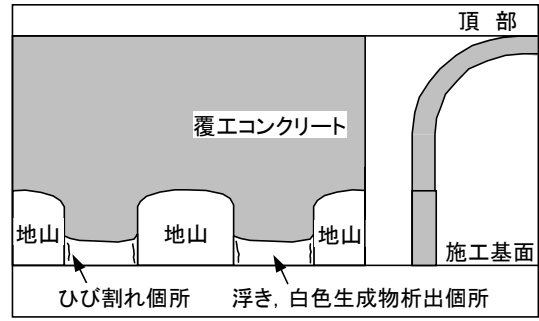


図-1 A トンネルの状況

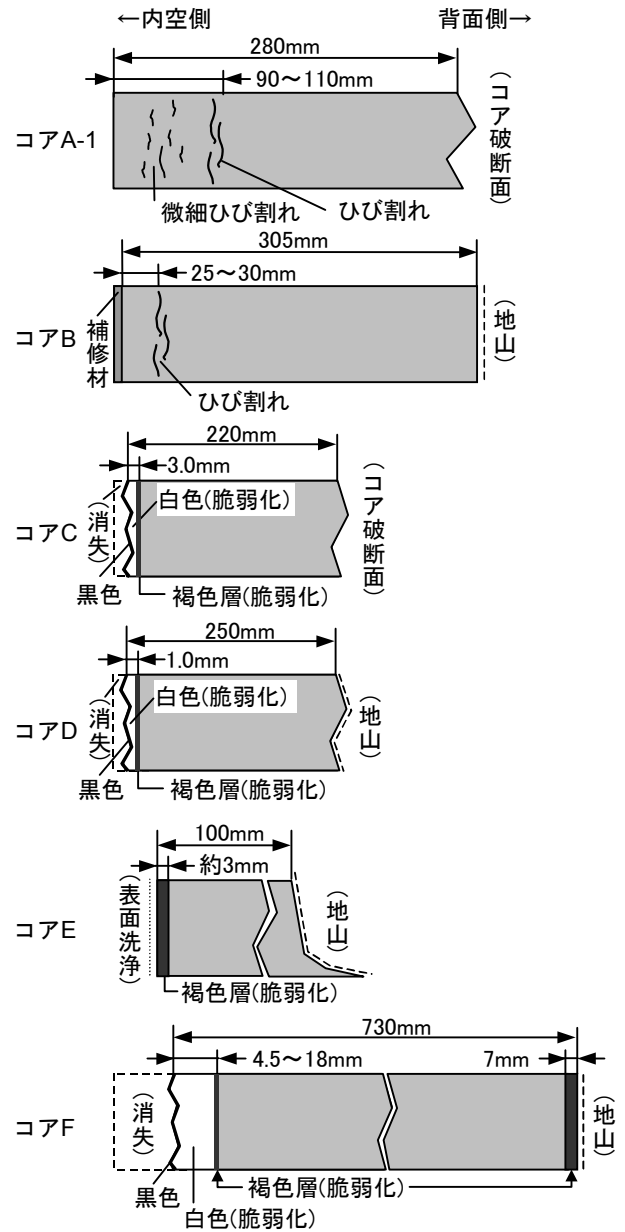


図-2 コアの外観 (模式図)

に補修材が約 15 年前に施工されているが、補修材との界面から深さ 25~30mm 付近にひび割れが認められ、コア A と似た性状を示す。C,D,F の各トンネルから採取したコア (以下、それぞ

れコア C, コア D, コア F と呼ぶ) は, 表面側から黒色, 白色, 褐色の各層がみられるが, 表面の黒色層は付着物であり, 白色および褐色の層がコンクリートの変質によって脆弱化を生じた部分である。これらのコアは, 表面の一部が剥離を生じて消失しているが, 採取個所周辺の状況から判断すると, コア C およびコア D に比較してコア F の剥離深さが大きい。また, コアに残存している白色部分の厚さもコア F で大きい。E トンネルから採取したコア (以下, コア E と呼ぶ) では, 覆工の表面が褐色である。E トンネルも, もともとは C, D, F の各トンネルと同様の状況であったが, 覆工表面の洗浄により, 黒色および白色の部分が除去されたことが推測される。したがって, C, D, E, F の各トンネルにおける覆工コンクリートの変状は, 程度の差はあるものの, 同様の性状を示しているといえる。

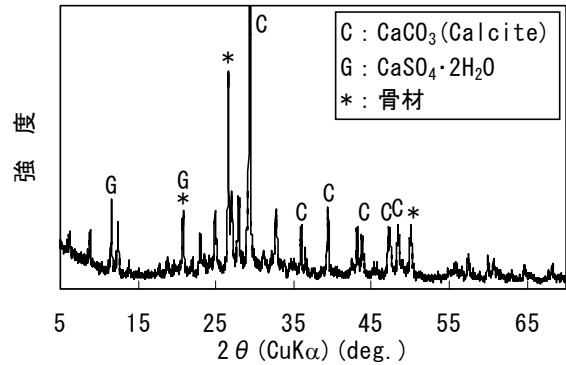
3.3 A, B トンネルの劣化メカニズムの検討

(1) コア A の分析

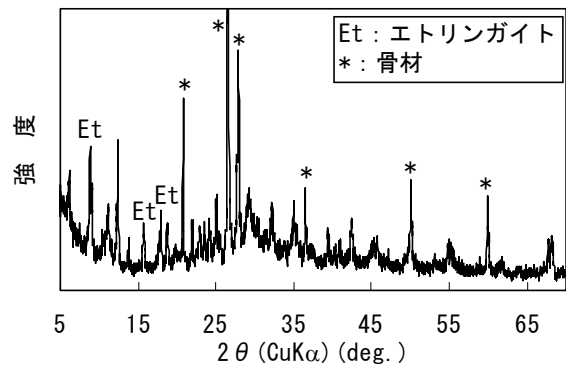
図-3 に, コア A-1 の表面付近およびひび割れの目立つ深さ 100mm 付近について, XRD 分析を行った結果を示す。深さ 100mm 付近ではエトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) の生成がみられる。図-4 に, コア A-1 およびコア A-2 について XRF 分析を用いて SO_3 の分布を測定した結果を示す。表面付近の SO_3 がコア A-2 では少ないのに対しコア A-1 では多く, SO_3 の存在が劣化に影響を与えたことが考えられる。また, 変状個所に析出していた白色生成物を採取し, XRD 分析を行ったところ, 白色生成物は $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ であることがわかった。

(2) コア B の分析

図-5 に, コア B の XRD 分析結果を示す。本コアの中性化深さは 28mm であったため, 深さ 28~42mm のデータは中性化フロントのやや内側に相当するが, この部分でエトリンガイトの生成がみられる。図-6 に, XRF 分析を用いて SO_3 の分布を測定した結果を示す。中性化フロントのやや内側において SO_3 が濃縮していることがわかる。これは, 中性化に伴う細孔溶液



(a) 深さ 0~50mm



(b) 深さ 100~140mm

図-3 コア A-1 の粉末 X 線回折分析結果

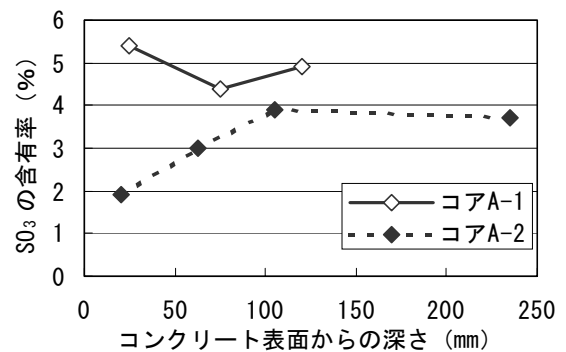
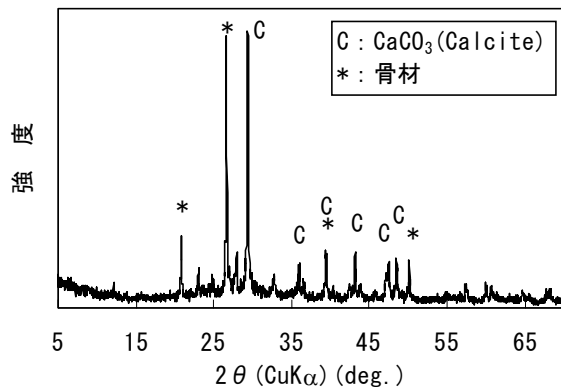
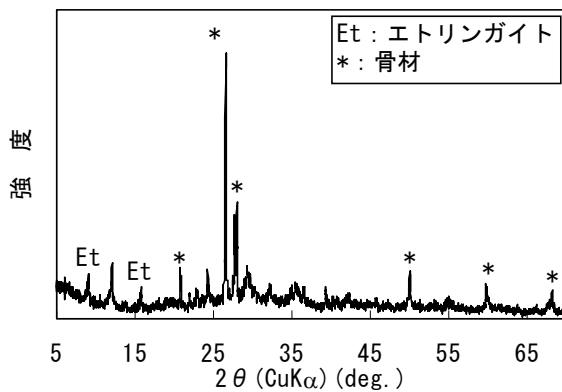


図-4 コア A における SO_3 の分布

の pH 低下によりエトリンガイトが分解して SO_3 が移動し, 中性化フロント付近に濃縮したもので, 中性化による塩化物イオンの濃縮³⁾と類似のメカニズムによると考えられる。また, コンクリート内部ではセメントペースト中の SO_3 が約 2%であった。当時のセメントに含まれる SO_3 は大正 11 年で 1.21%との報告がみられる⁴⁾が, セメントの品質のばらつきや本測定が硬化コンクリートからの推定値であることなどを考慮すると, 本コンクリートに含まれている



(a) 深さ 14~28mm



(b) 深さ 28~42mm

図-5 コア B の粉末 X 線回折分析結果

SO₃ は一般的な値の範囲であると考えられる。したがって、SO₃ は漏水によってコンクリートに作用したものと推定される。

(3) A, B トンネルの劣化メカニズム

各コアの分析結果から、A トンネルおよび B トンネルに生じた劣化は、硫酸塩の作用によるものと考えられる(図-7)。すなわち、漏水などに含まれる硫酸イオンがコンクリートに浸透し、中性化フロント付近に濃縮するとともに一部は表面に析出する。濃縮した硫酸イオンはエトリンガイトを生成して膨張し、中性化フロント付近でひび割れを生じるものといえる。また、中性化の進行とともにひび割れ発生箇所も移動し、その痕跡がコア A-1 の中性化域にみられるような微細ひび割れとして残ったものと考えられる。したがって、今後中性化の進行に伴い、これらのコンクリートは新たな中性化フロント付近で徐々にではあるがひび割れを生じる可能性があると考えられる。なお、A トンネルの側壁において路盤から高さ 1m の範囲で劣化がみ

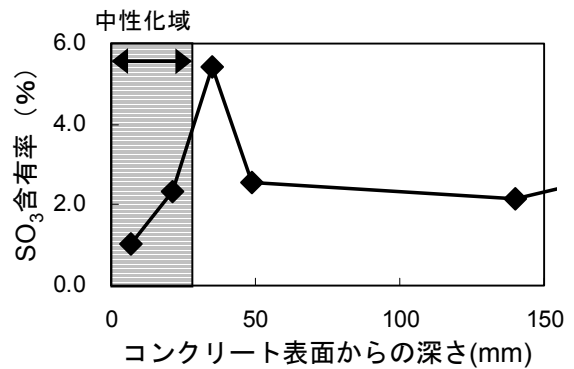


図-6 コア B における SO₃ の分布

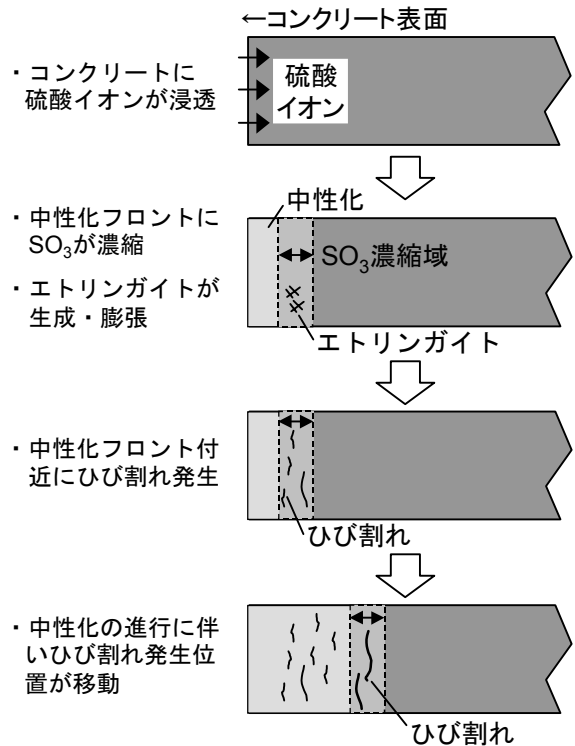


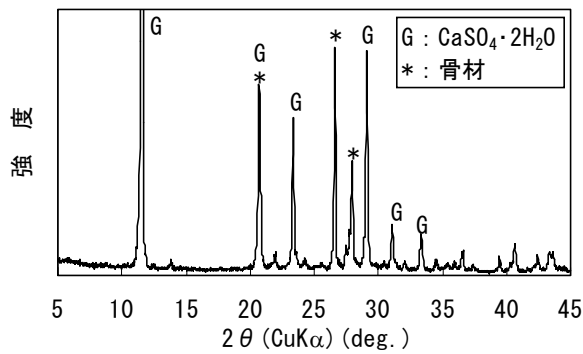
図-7 硫酸塩による劣化メカニズム

られたのは、路盤面付近に作用している硫酸イオンを含む漏水をコンクリートが吸い上げることによって劣化を生じたものと推定される。

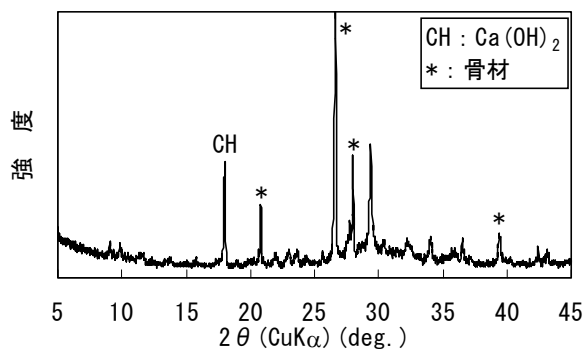
3.4 C~F トンネルの劣化メカニズムの検討

(1) コア C~コア F の分析

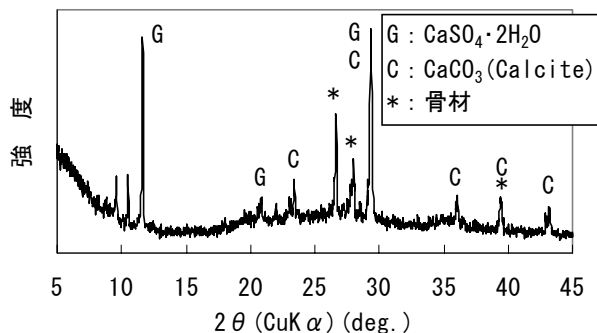
図-8に、代表例としてコア F の XRD 分析結果を示す。脆弱部分では内空側、背面側ともにセッコウの生成がみられる。図-9にコア F の褐色層周辺の EDS 分析結果を示す。褐色層周辺では Fe が多く、濃縮層 (Fe 層) を形成しており、その内側には Al, Mg の濃縮層もみられる。なお、コア C およびコア D でも同様の濃縮層が確認された。筆者らは、酸によって劣化を生じたコンクリートでは脆弱部分と健全な部分



(a) 内空側の脆弱部分



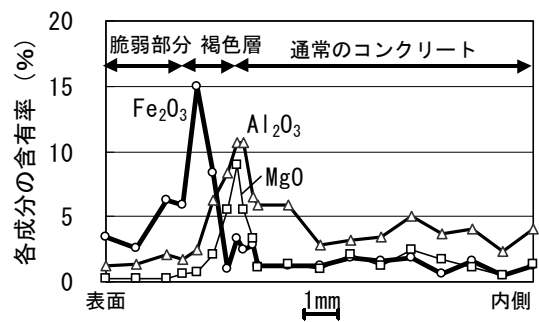
(b) 覆工コンクリート内部



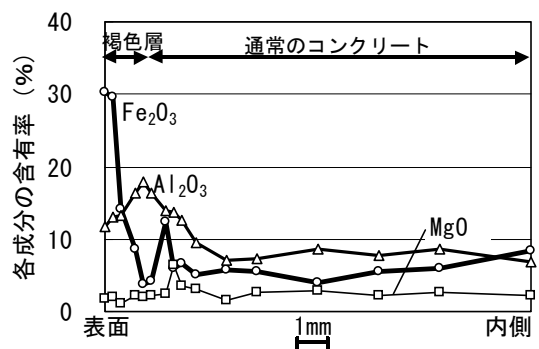
(c) 背面側の脆弱部分

図—8 コア F の粉末 X 線回折分析結果

との境界付近に Fe, Al, Mg の濃縮層 (Fe 層, Al 層, Mg 層) が存在し, これらの層が酸による劣化を示すものであること, また濃縮メカニズムや酸の種類による影響について報告しており^{5) 6)}, 今回分析を行ったコアでも同様な層が認められたことから, これらのコンクリートは酸による劣化を生じたものと判断される。また, 脆弱部分に生じたセッコウは, 酸の作用によってケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) が分解して生成したものと考えられる。このことから, コア F では背面側でも酸の影響を受けていることが推定される。図—10 にコア E の褐色層周辺



図—9 コア F における濃縮層の生成

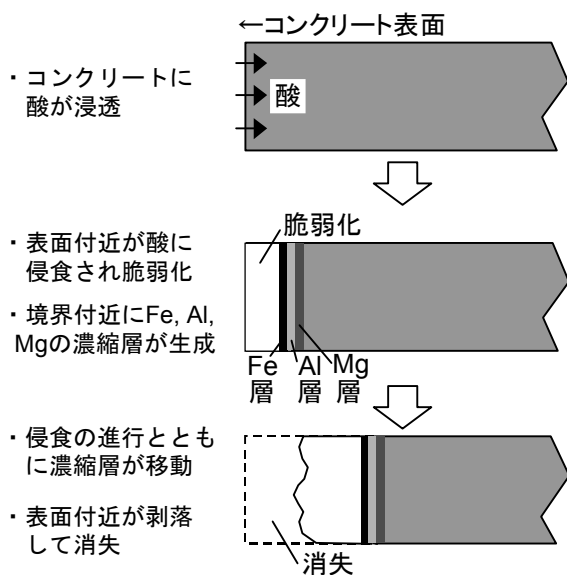


図—10 コア E における濃縮層の生成

について EDS 分析を行った結果を示す。コア E では褐色層が表面にあるが, その内側には Al 層, Mg 層が観察されることから, コア E も酸の作用を受けたと考えられる。コア E では洗浄によって褐色層までの部分が除去されたと考えられ, コア C, D, F と同様の酸劣化を生じていることが裏付けられたといえる。

(2) C~F トンネルの劣化メカニズム

各コアの分析結果から, C~F トンネルに生じた劣化は酸の作用によるものであると考えられる (図—11)。覆工コンクリートに作用する酸としては, 酸性地下水が漏水となって作用した可能性があるほか, 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⁷⁾。煤煙に含まれる成分の種類や量はトンネルの構造や石炭の質などによって異なるが⁸⁾, 窒素酸化物や硫黄酸化物が含まれていることから, これらの成分が煤煙中の水蒸気やトンネル壁面の結露水などに溶解して酸性水となり, 覆工コンクリートに作用したものと考えられる。C トンネルや D トンネルでは, アーチ部の劣化が側壁よりも目立つ傾向にあり, これは煤煙がトンネルの頂部に向



図—11 酸劣化のメカニズム

けて排出されることが原因であると推定される。また、E トンネルは洗浄されているが、劣化が頂部に目立つように見受けられることから、同様に蒸気機関車の煤煙が影響したものと推定される。現在、これらのトンネルでは蒸気機関車が運行されていないことから、今後酸による劣化が進行することはないといえる。なお、F トンネルについても煤煙の影響を受けてはいると考えられるが、脆弱部分の厚さがC,D トンネルよりも厚いこと、同じ線区の別のトンネルと比べても侵食が目立つこと、覆工の背面側も劣化を生じていること、建設時に酸性地下水の湧出がみられたことなどから、蒸気機関車の煤煙による影響の他に、酸性地下水など他の劣化原因が複合して生じていることが考えられる。

なお、覆工コンクリートに脆弱化を生じてても、Fe, Al, Mg などの濃縮層がみられない場合には、蒸気機関車の煤煙など酸劣化によるものとはいえず、別途劣化原因を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) 鉄道トンネルにおける覆工コンクリートの劣化は、本研究の範囲では硫酸塩による劣化を生じているものと、酸による劣化を生じているものとに分けられることがわかった。

(2) 硫酸塩による劣化は、硫酸イオンを含む漏水が覆工コンクリートに作用し、中性化フロント付近に濃縮することによってエトリングサイトを生成するとともに膨張し、ひび割れに至ったものと考えられる。

(3) 酸による劣化は、蒸気機関車の煤煙に含まれる窒素酸化物や硫黄酸化物が水に溶解して酸性となり覆工コンクリートの表面に作用したと考えられる。また、一部のトンネルでは酸性地下水の作用などが複合して覆工表面の脆弱化に至ったと考えられる。

なお、覆工コンクリートの劣化については、今回報告した事例に合致しない例も見受けられるが、これらの劣化原因については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 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.182-189，1994.10
- 2) 立松英信，高田潤：蛍光 X 線法によるアルカリ量・塩素量の推定，土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部，pp.450-451，1990.9
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'01 基礎編，2001.3
- 4) 小野田セメント製造（株）：創業 50 年史，1931.5
- 5) 上田洋，高田潤，立松英信：セメントペーストと酸との反応特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.991-996，1995
- 6) 上田洋，高田潤，立松英信：酸の影響を受けたセメントペーストの劣化メカニズム，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.879-884，1996
- 7) 鉄道院総裁官房研究所：隧道のセメントの硫化，鉄道院総裁官房研究所業務研究資料，Vol.6，No.7，pp.173-179，1918.7
- 8) 松藤元，加藤春雄，神宮寺惣次郎，茂木俊次郎：鉄道トンネルの衛生学的研究 第 6 報 蒸気機関車が通るトンネルの環境条件，鉄道労働科学，Vol.7，pp.1-15，1955.9