

トンネル検査における

スリットカメラの適用とその考察

APPLICABILITY OF SLIT CAMERA SYSTEM FOR RAILWAY TUNNEL INSPECTION AND ITS PROBLEMS

○小野田滋^{*}・菊池保孝^{**}・松下英教^{***}・小寺信行^{***}・谷黒 亘^{****}

Shigeru ONODA, Yasutaka KIKUCHI, Hidenori MATSUTA, Nobuyuki KOTERA, Wataru TANIGURO

In the present practice, a general inspection of railway tunnels relies on walking patrol or simple measurements, but these methods are not efficient nor accurate. To solve these problems, we take continuous pictures of tunnel lining surface by slit camera system, and examine its applicability and utility for railway tunnels. As a result of related experiments, we found that the slit camera system is more efficient for inspecting a railway tunnel aboard a running car, and the pictures obtained provide more exact records of deformation phenomena of the tunnel lining.

Keywords: tunnel inspection, slit camera system, photographic interpretation, railway tunnel

1. まえがき

現在、JR西日本で保守・管理を行っているトンネルは、新幹線、在来線を合わせて総延長665.6km、合計1,061本に達し、中には明治初期に建設された経年100年以上のトンネルも含まれており、その構造もレンガ、石材、コンクリートブロック、場所打ちコンクリート、および漏水防止のための吹付けコンクリートなど多種多様である。こうした既設の鉄道トンネルにおける検査は、定期的に行われる全般検査と、著しい変状が生じた場合や変状の進行が懸念される場合に行われる特別検査とに大別して実施されている。このうち、特別検査については、内空変位計やクラック計など検査機器の発達により定量的な測定・判断が可能となりつつあるが、全般検査は従来より徒歩巡回による目視検査を主体として行われており、定性的評価の域を出なかった。また、照明が充分ではない坑内において微細な変状をすべて把握することは極めて困難な作業で、経験による個人差等により得られる成果も精粗があるなど、必ずしも十分に満足の行く方法ではなかった。

このような背景の下に、より効率的かつ正確にトンネルの変状を把握する手段として、道路舗装面の検査方法として既に実用化が図られているスリットカメラに着目し、鉄道トンネルの検査に応用した場合の適用条件とその問題点について考察を行ったので、ここに報告する。

* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室(前・西日本旅客鉄道㈱)

** 正会員 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 施設部工事課

*** 正会員 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 大阪構造物検査センター

**** (株)パスコ 道路技術センター

2. 撮影方法

2.1 スリットカメラの原理

スリットカメラは、被写体の移動速度とフィルムの送り速度を連動させることにより、被写体の連続画像を得る装置で、図-1に示すようにレンズの後方に設けた隙間（スリット）を通して画像を得ることから、一般に「スリットカメラ」と呼ばれている。被写体の移動速度とフィルムの送り速度との関係は次式で示され、これにより縦横の縮尺が同一比となる画像を得ることが可能となる。

$$V_F = \frac{V_{ob} \times f}{D}$$

ここで、 V_F ：フィルムの送り速度

V_{ob} ：被写体の移動速度（走行速度）

f ：レンズの焦点距離

D ：レンズから被写体までの距離

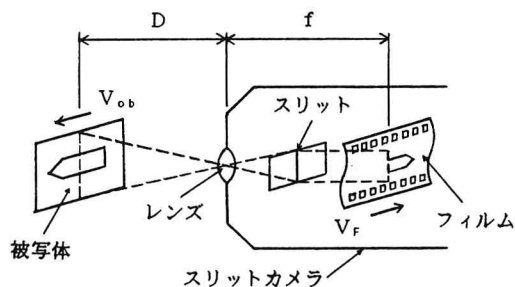


図-1 スリットカメラの原理

今回使用したカメラは、 $f = 14.5\text{mm}$ 、 $V_F = 0 \sim 83.3\text{mm/sec}$ であり、単線断面トンネルでは $D \approx 2900\text{mm}$ に設定しているので、理論上は $V_{ob} \approx 60\text{km/h}$ まで対応が可能である。

2.2 機器構成

図-2は、今回使用したシステムの機器構成を、また写真-1は撮影システムを示したものである。スリットカメラは、保線用台車に固定し、支持架台を移動させることにより、路盤部を含めトンネル覆工面全周の撮影に対応できる構造とした。撮影時に使用する照明にはメタルハライド×6灯を用い、スリットカメラの移動に応じて位置を変えられる構造とした。車両の走行速度は非接触式距離計を用いて検出を行い、コントローラによってフィルムの送り速度と連動させた。これらのシステムは、すべて保線用台車に搭載し、モーターカーの牽引により走行状態で撮影することとした。なおフィルムは、ISO-500相当の35mmカラーネガティブフィルム（長尺）を用いた。

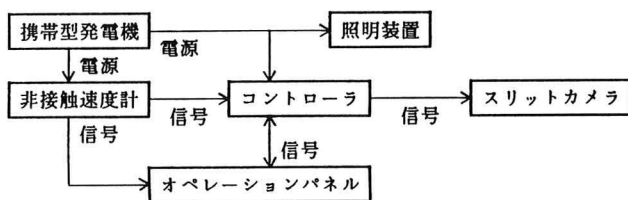


図-2 トンネル検査システムの概要

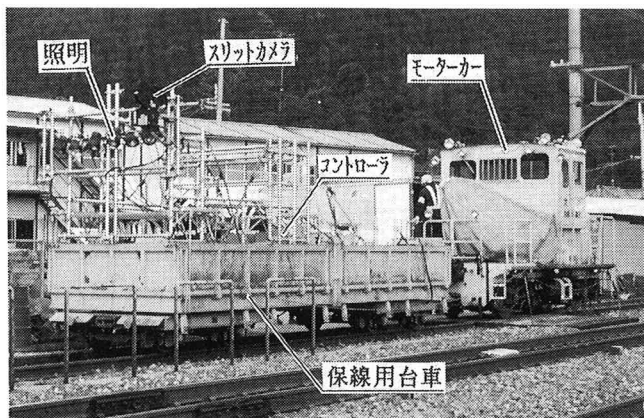


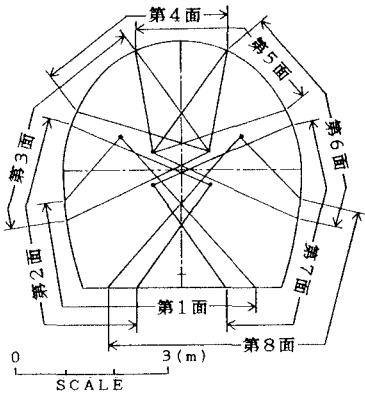
写真-1 トンネル検査システムの編成

2.3 撮影範囲

スリットカメラを用いてトンネル覆工の全周写真を撮影する方法としては、カメラをトンネル円周方向に回転させる方法とトンネル縦断面方向に移動させる方法が考えられる。前者の方法ではトンネル円周方向の画像を展開図のように連続的に捉えることが可能となるが、縦断面方向では不連続となり、カメラ本体を固

定した状態で撮影することになるため、延長の長いトンネルでは撮影効率が悪くなる。一方、後者の方法によれば、トンネル円周方向の連続撮影はできないが、鉄道の特性を生かして走行状態で効率よく撮影することが可能になるため、今回はこの方法によることとした。

図－３は、今回実施した単線断面トンネルにおける撮影範囲の分割方法を示したもので、被写体とカメラとの距離がほぼ一定となるように撮影位置を選択した。なお、１面の有効撮影画角は約80度である。



図－３ 撮影画面の分割例

2.4 撮影速度

スリットカメラによる撮影では、照明の照度、被写体との距離、および絞り値が一定であれば、露出は走行速度に依存することとなる。今回の試験ではモーターカーの性能等を勘案し、30km/hを基本とした。

2.5 調査トンネル

今回、撮影を実施したトンネルは、表－１に示す6トンネルである。

表－１ 撮影対象トンネル

トンネル	断面	建設	構 造		特 記
			アーチ	側 壁	
Aトンネル	単線	1897	B・CB	M	一部改築
Bトンネル	単線	1897	S M	M	
Cトンネル	単線	1897	S M	M	
Dトンネル	単線	1921	C・SM	B・C・SM	一部改築
Eトンネル	単線	1944	C	C・M	
Fトンネル	複線	1972	C	C	

M：石、B：レンガ、C：コンクリート、SM：吹付けモルタル

3. 試験結果

3.1 撮影結果

写真－２は、今回撮影した各撮影面を展開図として合成したものである。トンネルの撮影にあたっては、曲率を持つ被写体を平面上に投影するため、その偏歪性が懸念されたが、合成した写真上で100±20%以内に収まっていた。また、照明の均一性については写真中央部では確保されているものの、周縁部では一部露出不足となる傾向があり、実用化にあたっては、各撮影面をある程度オーバーラップさせながら撮影したり、照明位置を撮影面に応じて調整する機能が必要がある。なお、これらの問題点は、画像処理段階で幾何補正やパッチワークを行うことにより、将来的に解決できるものと考えられる。

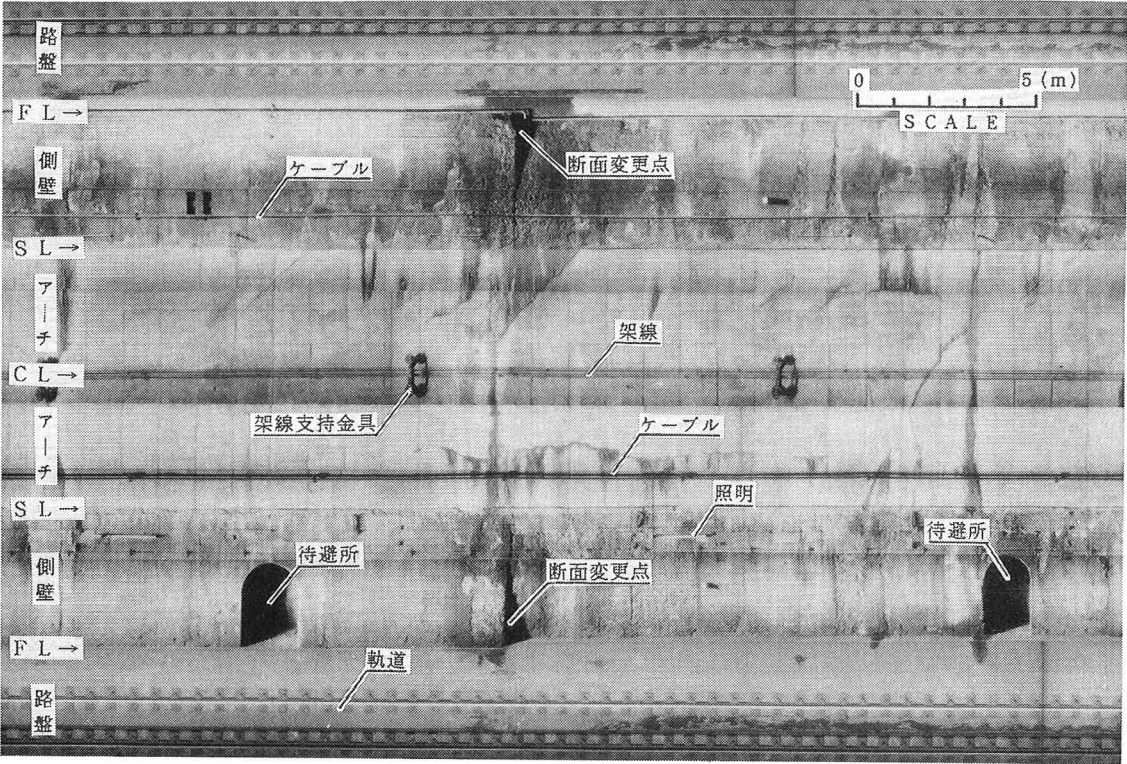
解像力は、使用フィルムの種類、被写体との距離、照明等の諸条件によって異なるが、今回の撮影条件ではテストチャート上で1mm以上の解像力を保証できることが明かとなった。なお、照明の照射角については予備試験の結果より、鉛直に近いものよりも、低角度の方が覆工表面の凹凸による陰影が生じ易いため、立体感のある画像を得ることができ、またハレーションも生じにくいことが明かとなったが、概ね覆工面に対して20～40度の範囲であれば特に問題はないと考えられる。

今回の撮影速度は40km/hまで向上させたが、走行時の車両振動は撮影結果に影響を与えなかった。

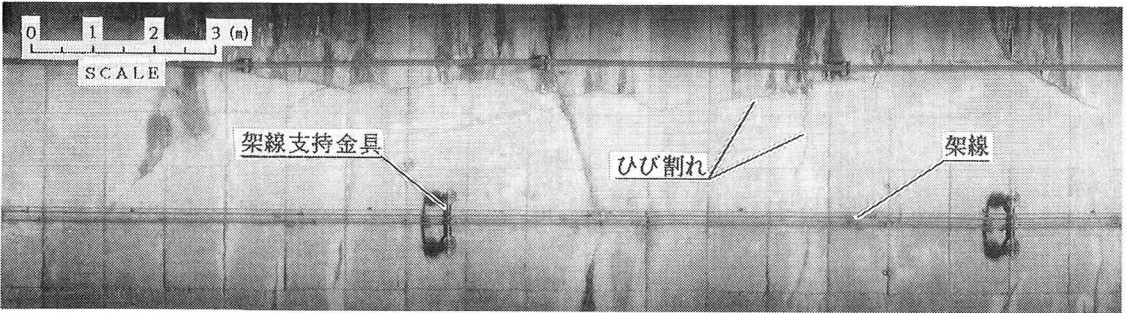
3.2 覆工材料による相違

鉄道トンネルの覆工材料には、冒頭でも述べたように、レンガ、石材、コンクリートブロック、場所打ちコンクリートおよび防水のための吹付けモルタルなどが用いられているが、今回の試験では、これらすべての材料について撮影を実施した。各材料の違いは写真上で明瞭に識別することができるが、それぞれ照明に対する反射率が異なるため、同一露出条件下では、コンクリート系材料は明るく写る傾向が見られた。なお、

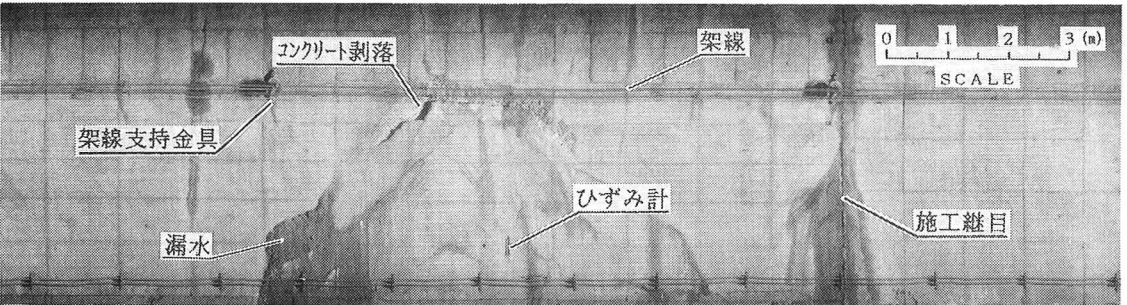
非電化区間のトンネルでは煤煙が覆工表面に付着していると変状が被覆されてしまうため、今後の撮影にあたっては、ウォータージェット等により煤煙を洗い落としておくことが望ましいと考えられる。



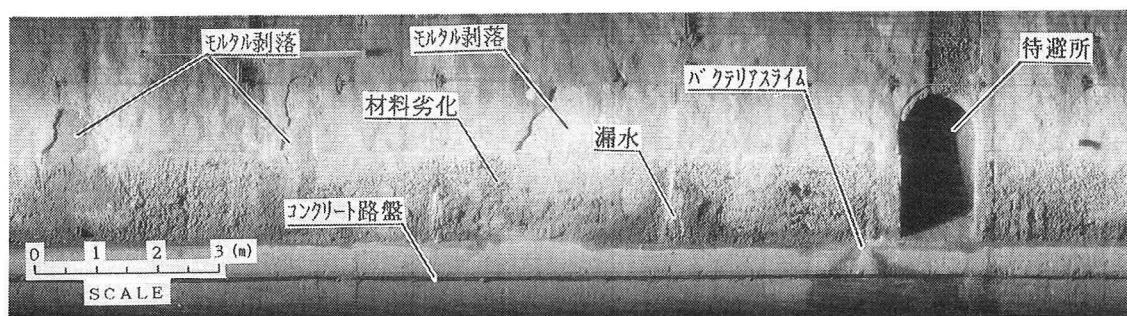
写真－２　Ｅトンネルにおける撮影結果の例（全周合成写真）



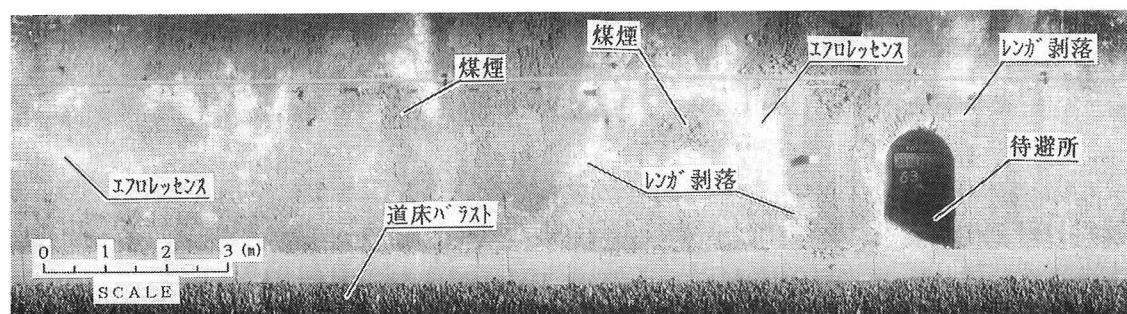
写真－３　Ｅトンネルにおける撮影結果の例（第４面：アーチ天端付近）



写真－４　Ｅトンネルにおける撮影結果の例（第５面：アーチ天端付近）



写真－５ Ｅトンネルにおける撮影結果の例（第２面：側壁）



写真－６ Ｄトンネルにおける撮影結果の例（第７面：側壁）

表－２ スリットカメラの特徴と撮影結果の判読要素

変 状 の 種 類	要 素	目視観察	スリットカメラ	写 真 上 の 判 読 要 素
ひび割れ	幅	○	○	開口性のひび割れは、明瞭なリニアメントとして判読できる。また、光線の照射角度によって見え方が異なる場合がある。
	延長	○	◎	
	深さ	×	×	
目地切れ	幅	○	○	目地に沿って連続的な陰影が見られるため、明瞭に判読できる。ひび割れと同様、光線の照射角によって見え方が異なる場合がある。
	延長	○	◎	
	深さ	×	×	
剥離	範囲	○	◎	剥離部の周縁に明瞭な陰影が認められるため、容易に判読できる。
	深さ	△	△	
はらみ出し	範囲	○	○	コンクリート系の材料では淡い陰影として認識されるが、判読は難しい。また、レンガ材料では、目地の不ぞろいとして認識される場合がある。
	大きさ	△	△	
覆工劣化	範囲	○	◎	コンクリート系の材料では、覆工表面の縮緬状のパターンとして認識される。また、色調がやや黄色っぽく写る傾向がある。
	劣下度	○	△	
目地部溶脱	範囲	○	◎	レンガ、石材、コンクリートブロックにおいて目地部が溶脱している箇所では、目地の陰影が、より強調される。
	劣化度	○	△	
漏水	範囲	○	◎	覆工表面を面的に流下する漏水や滲水は、色調が周辺部より暗くなるため、明瞭に判読できる。また、漏水量が多い場合は、表面が反射して写る場合がある。
	量	△	△	
滴水	位置	○	○	滴水に比べ、現象が瞬間的であるため、明瞭に捉えることが困難であるが、路盤部に付着した水により判断することが可能である。
	量	○	△	
汚損	範囲	○	◎	エフロレッセンスソーダは白く、鉄バクテリアによる汚損は茶褐色を呈するため、色調の違いとして明瞭に判読できる。
	種類	○	◎	
煤煙	範囲	○	◎	漏水の有無等により様々なパターンが見られるが、面的に付着する場合は縮緬状のテクスチャとして、局部的に付着する場合は綿状の斑点として認識される。
	厚さ	○	△	
噴泥	範囲	○	◎	路盤部が変色し、バラストが泥滓化するため、容易に判読が可能である。

◎：把握できる（主に定量的）、○：ある程度把握できる（主に定性的）、△：条件によっては把握できる、×：把握が困難

3.3 トンネル覆工の判読要素

写真－３は、撮影結果の一例としてアーチ部に発達したひび割れを示したもので、トンネル軸方向に発達した水平ひび割れと輪切り方向のひび割れが捉えられている。写真－４は、アーチ天端におけるコンクリートの剥落面を示したもので、剥落部の周縁に明瞭な陰影が認められる。写真－５は、側壁におけるコンクリートの材質劣化を示したもので、劣化部分が漏水で洗い流されて縮緬状になっているのが判る。また、漏水防止のために施工された吹付けモルタルは一部が剥落しており、明瞭な陰影が認められる。写真－６は、レンガ覆工の全面に付着した煤煙およびエフロレッセンスを示したもので、レンガの一部は劣化して剥落している。表－２は、このような撮影結果に基づき、各変状現象ごとに従来の目視検査とスリットカメラの比較、および主な写真上の判読要素の特徴をまとめたものである。

また、変状現象以外に判読できる要素としては、補強・補修箇所（セントル補強、漏水とい、ロックボルトの位置、補修跡、等）、トンネル付帯設備（架線支持金具、ケーブル類、諸標類、待避所、連絡坑、防災設備、通信設備、信号設備、電力設備、排水設備、照明設備等の配置、等）、計測機器類（各種計測機器の配置）、トンネル内軌道設備（道床、マクラギ、スラブマット、レール等の敷設状況）などがあり、変状監視のみならず、これらの諸設備の管理台帳としても利用可能であることが示された。なお、スリットカメラで捉えることが困難な変状現象としては、覆工表面に現れない変状（覆工背面の空洞、巻厚不足、等）、断面変形、等があり、これらについては別の検査手段を用いるなどして補う必要があると考える。

4. 考察

今回の試験結果に基づき、本手法によるトンネル検査の特徴を整理すると、概ね下記ようになる。

- 1) 得られる情報が客観的であり、再現性がある。
- 2) 徒歩巡回に比べ、効率的に調査ができる。
- 3) 定期的に撮影することにより、変状の進行状況を時系列的に把握できる。

また、鉄道においては、レールをガイドウェイとして車両を走行させることとなるため、被写体とカメラの距離を一定に保つことが容易であり、鉄道トンネルが本システムによる検査対象として、より理想的な環境下にあるものと認められる。今後、覆工が曲率を持つことにより生じる歪の補正方法や、撮影断面に応じた最適な照明の配置などについて検討を重ね、鉄道トンネルに適したシステムとして改良を重ねて行きたいと考える。さらに、こうして得られた成果物を有効に活用するためには、今後、画像処理技術を用いた変状の自動判読システムの開発や、得られた成果に基づく変状の評価方法の確立が必要であり、データベースシステムやエキスパートシステム等と組合せたソフト面での検討も併せて進めて行く計画である。

〔参考文献〕

1) 鉄道総合技術研究所編「トンネル補強・補修マニュアル」研友社(1990)／2) 小寺信行“21世紀をめざしたトンネル検査手法の開発”平成3年度総合技術講演会記録概要, 日本鉄道施設協会(1990)／3) 小野田滋“トンネル検査における写真測量・リモートセンシング技術の応用”写真測量とリモートセンシング, Vol. 30, No. 2(1991)／4) 小野田滋、奥野博久、小寺信行、菊池保孝、谷黒亘“スリットカメラによるトンネル覆工調査”土木学会第46回年講第6部(1991)／5) 小寺信行、小野田滋、岩本力造、石原一比古、相馬幸六“スリットカメラを用いた軌道調査とその考察”土木学会第46回年講第4部(1991)／6) 朝倉俊弘、小島芳之、小野田滋“老朽トンネルの調査と対策”地質と調査, No. 49(1991)／7) 石留和雄、小野田滋、谷黒亘“トンネル維持管理における高速・高分解能カメラの適用”第19回日本道路会議論文集(1991)