

デジタル画像計測を用いた道路トンネルの健全性評価に関する研究

半田 兼一^{1*}・大西 有三¹・西山 哲¹・小山 倫史¹・西川 啓一²・下澤 正道³

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²三菱電機株式会社 IT宇宙ソリューション事業部 (〒100-8310 東京都千代田区丸の内2-7-3(東京ビル))

³計測検査株式会社 (〒807-0821 北九州市八幡西区陣原1丁目8番3号)

*E-mail: handa@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

道路トンネルに対する健全性評価手法の確立が求められる中、道路トンネル壁面に生じる変状を効率的に計測・評価することが健全性評価に必要であることが指摘されている。このような背景から、従来の覆工目視検査の代替手法として、低コスト・交通規制を伴わない・客観性に優れるなどの利点を有する走行型の画像計測技術が注目されており、今後ますます導入が進むものと期待される。

本研究では、健全性評価の効率性・客観性をより高めるため、この走行型画像計測技術について実トンネルを用いて検証するとともに、覆工画像から変状（特にひび割れ）を自動検出する手法について画像処理を用いた検討を行った。

Key Words : tunnel ,management, crack, lining, digital image processing

1. はじめに

平成11年6月の山陽新幹線福岡トンネル坑内で起きた剥落事故を契機に、土木構造物の安全性が強く問われることとなり、老朽化が進む日本の社会資本の維持管理の重要性が再確認されることとなった¹⁾。このような背景の下、現在では、社会資本の根幹を成す道路資産の効率的な維持管理が必要とされ、補修等が困難な道路トンネルに対する検討が喫緊の課題となっている。これは、道路トンネルの供用期間の長期化に伴い、老朽化したトンネルが増大している一方で、道路トンネルに対する最終的な健全性評価が専門家の経験的判断に基づいて行なわれており、客観的な基準・手法が存在しないためである。さらに、今後はこのような社会資本整備のための財源が限られていくと考えられるため、限られた財源の中で、計画、設計、施工、維持管理までをトータルに考慮した、すなわちライフサイクルコスト (LCC) を考慮に入れた効率的な道路トンネルの維持管理が求められているといえる。

以上のような背景の下、効率的な道路トンネル維持管理における課題の一つとしてトンネル変状の効率的な計測技術の確立が挙げられている²⁾。これは従来の定期点検（2から5年ごとに実施される目視打音が中心の検査）の改善が必要とされているものである。図-1に現在の

健全性判定のフローチャートを示す。

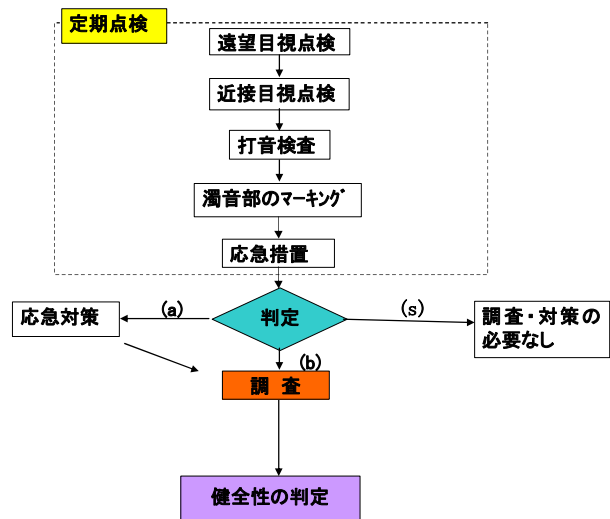


図-1 健全性評価のフローチャート

本研究では、この課題解決の一手法として注目を集める走行型の画像計測技術について実トンネルを用いてその適用性について検証を行った。加えて、更なる効率化を目指して覆工画像から変状を自動検出する手法について画像処理を用いた検討を行った。結論として、走行型画像計測技術の有効性を示すとともに、自動検出の課題について述べる。

2. 走行型画像計測

(1) 現状のトンネル管理の課題整理

既往のトンネル管理者に対する研究調査によれば²⁾、現状の道路トンネルの維持管理の現状と課題として以下のようにまとめることが可能である。

【管理の現状】

- ・ 定期点検（トンネル全長検査）が主である
- ・ 現状の点検手法は目視・打音検査である
- ・ 点検では主に浮き・剥離、ひび割れに着目している
- ・ ひび割れの幅・本数・長さ・形状・位置が重要

【管理の課題（目視打音による定期点検に関して）】

- ・ 点検費用が高い
- ・ 定期点検には交通規制が伴い危険である
- ・ 点検結果の客観性が低い

これらの現状・課題を勘案すると、従来点検（目視検査）の代替手法として画像計測を挙げることができる。これは、画像をカラーで得ることができれば目視と比較して遜色の無い計測結果が期待できるのみならず広域を一挙に俯瞰できるため、目視よりも客観性に優れていると考えられること、さらに、画像はピクセルで構成されるため、ひび割れの本数はもとより、その形状や位置などを計測可能と考えられること、などが画像計測の特徴として挙げることができるからである。

そこで、これらの利点を有する画像計測を、さらに交通規制なしという条件で用いるため、車載化・走行型とし、その性能について調べることとした。

(2) 走行型画像計測技術

図-2に走行型画像計測の概観を、表-1に用いた機材の仕様を示す。

図-2に示されているように、複数個のデジタルビデオカメラを用い、各カメラから得られた画像を合成することで壁面の画像を得ることが可能である。なお、一回の走行により得られる画像はトンネル覆工面片側のみである。つまり、走行方向左側を撮影し、上下往復することにより両面を撮影し、それを合成することでトンネル覆工内全面の撮影画像（トンネル覆工展開画像）が得られる。

また、カメラの両サイドには強力なハロゲンライト照明器を取り付けている。これは、暗いトンネル内において、照明を一定に保つことによって安定した画像を得られるようにするためである。カメラ・照明器取り付け架台、録画装置等の撮影に必要な機材および、電源装置（発電器、ACアダプタ等）の機材はすべて撮影車両(4t車)に搭載している。

なお、表-1にあるように走行速度は時速10km～80kmまで変化させることが可能である。これにより、交通規制をかけない速度において撮影が可能となる。



図-2 走行型画像計測の概観

表-1 走行型レーザ形状計測 装置の仕様

品名		仕様	
撮影	デジタルビデオカメラ 13台	画素数 : 3 CCD 34万画素 (有効画素) 寸法 : 93x112x193mm	重量 : 900g
	照明器 28台	消費電力 : 1KW, 0.5KW 定格電圧 : 100V	寸法 : 290x213x195mm 重量 : 2.3kg
	デジタル録画装置 13台	記録方式 : DV-CAM 記録時間 : 3時間 (max)	寸法 : 221x44x250mm 重量 : 5.8kg
	発電器 1台	出力 : 45kVA/台 重量 : 1,000kg/台	寸法 : 980x1,800x900mm
	ACアダプター 2台	供給電力 : 15A*15 重量 : 50kg	寸法 : 500x500x500mm
撮影車両	4 t 車		
撮影速度		時速10km～80km	

3. 実トンネルでの計測

(1) 実トンネルを用いた計測実験

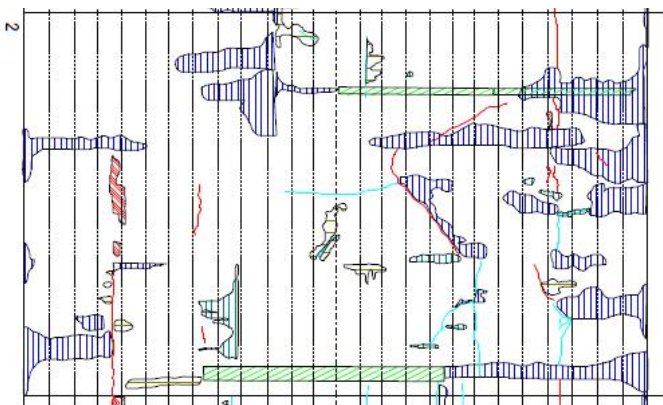
実トンネルにおいて実際に走行型画像計測を行い、その性能評価を行った。ここで性能評価とは、計測画像から必要とされる変状項目の計測が可能かを調べることであり、目視との点検結果との比較により行うこととした。用いたトンネルは背面での地すべり発生のために現在は供用されていないOトンネルであり、総延長は82mである。なお、本トンネルでは画像計測とともに目視・打音による検査も行われている。

図-3に画像計測により得られた計測結果(トンネル壁面展開画像)を、図-4にトンネル壁面展開画像に画像処理を施すことで得られた変状抽出結果(トンネル壁面変状図)を、図-5に目視・打音検査による変状抽出画像をそれぞれ示す。図-4と図-5の変状図を比較することで本手法の性能評価を行った。

図-3から図-4の画像処理は人的に行われており、検出可能な変状項目は凡例のとおりである。なお、本モデルトンネルによる実験は表-1に示される機材仕様で行い、走行速度はトンネル延長が短いため時速10kmで行った。



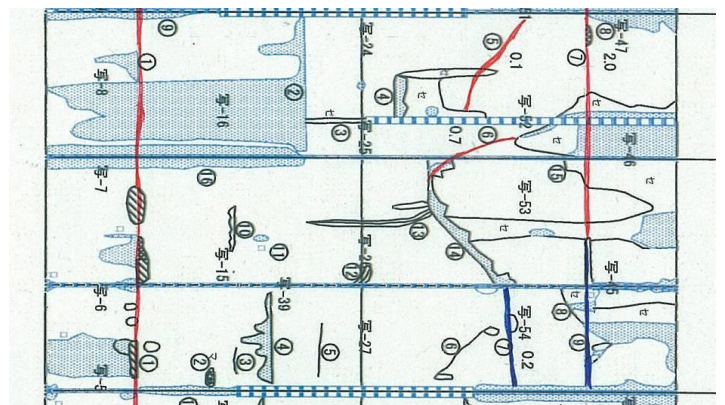
図-3 トンネル壁面展開画像(一部)



凡例

	ひび割れ(0.3mm)未満		漏水跡
	ひび割れ(0.3mm)以上		滞水、氷盤、沈砂
	段差(矢印側突出)		浮脱物(遊離石灰など)
	コールドジョイント		漏水防止工(導水工)
	圧ざ		補修工
	うき、はく離		内装板
	はく落跡		打音検査範囲
	骨材の露出(豆板部)		亀甲状ひび割れ
	漏水(滴水)		
	漏水(濡れている部分)		

図-4 トンネル壁面変状図



凡例

表示	目視点検での変状種類	打音検査	
	施工目地		剥離(ポコポコ)がし、はく離の可能性がある。
	ひび割れ(0.3mm)未満		剥離がする。
	ひび割れ(0.3mm)以上		剥離を押し、反発がある。
	ひび割れ(0.3mm)以上		打音検査により検出できる
	段差		表示方向のひび割れの表示方法
	コールドジョイント		打音検査範囲
	圧ざ		(検定できるひび割れの方法)
	うき、はく離		剥離
	はく離(はく離部)		剥離
	骨材の露出(豆板部)		剥離
	漏水(滴水・噴出)		剥離
	漏水(濡れている部分)		剥離
	滞水、氷盤、沈砂		剥離
	浮脱物(遊離石灰など)		剥離
	漏水防止工(導水工)		剥離

図-5 目視・打音によるトンネル壁面変状図

(2) 結果の検証

図-4, 5の変状図を比較した結果, 走行型画像計測によって, 変状(ひび割れ, 遊離石灰)が, 目視検査と比較して遜色ない程度に測定されていることがわかる。さらに, ひび割れについては0.3mmの精度(青線が0.3mm未満, 赤線が0.3mm以上)での検出が可能であったといえ, 課題とされるひび割れの幅の検出が可能であることが示された。

ただし, 漏水に関しては, 目視検査と画像計測を行った時期に違いがあったため, 若干の違いが認められる。さらに一部のひび割れ(右上部に位置するもの)に関しては画像計測で検出されていないものがある。これについては画像を拡大し(図-3赤色部分), その細部を調べた。図-6に拡大図を示す。これに示されるように, 画像では覆工の細部までとらえることが可能であったといえ, 今回の結果は画像検査員の判定違いの可能性があると見える。

以上のように一部に目視との誤差が見られるが, トンネル覆工広域を目視と同様に見ることが可能であるといえる。そのため, 本手法を目視に代替する手法として用いることは十分に可能であるといえる。

(3) 課題

前項(2)で示されたように走行型画像計測技術を目視検査に代替する手法として用いることが十分に可能であるといえる。しかし, 一方でトンネルが長くなればなるほど画像の量が膨大になり, 変状検出処理に対して人件費がかさんだり, 画像からの変状検出に誤りや見落としが増えることに繋がると考えられる。そこで, 次章では画像から変状を効率的に抽出するために画像処理を用いた自動検出について検討を行った。



図-6 拡大図(図-3の赤部分)

4. ひび割れの自動検出に関する検討

(1) 既往の研究

従来の目視検査による変状検出に比べて, 安全かつ効率的な検出が可能な走行型画像計測であるが, さらに効率的な自動変状検出が必要とされている。しかし, 現状の画像処理は半自動処理であり³⁾, 変状検出作業には人が介入している。これは, トンネル壁面画像が必ずしも一様ではないため, 変状の自動認識が難しいとされるためである。

現在, 研究が進められている変状検出手法は主にひび割れを対象としたものであり, 一般的なものは, ひび割れが輝度変化の激しいエッジをもつという特性を利用したひび割れ検出手法である。ただし, 検出段階では2値化するに留まっており, 自動認識という意味での検出手法はいまだ確立されているとはいえない。

以上を踏まえ, 本章では, 図-7のような考え方でひび割れの自動検出が可能かを検証した。これは従来の2値化のようにピクセル単位で変状を検出しようというのではなく, 領域(ピクセルの集合)ごとに画像を分割し, ピクセル単位では取得できない輝度分布などの特性を調べ, その特性を元に変状部か健全部かを判別しようというものである。

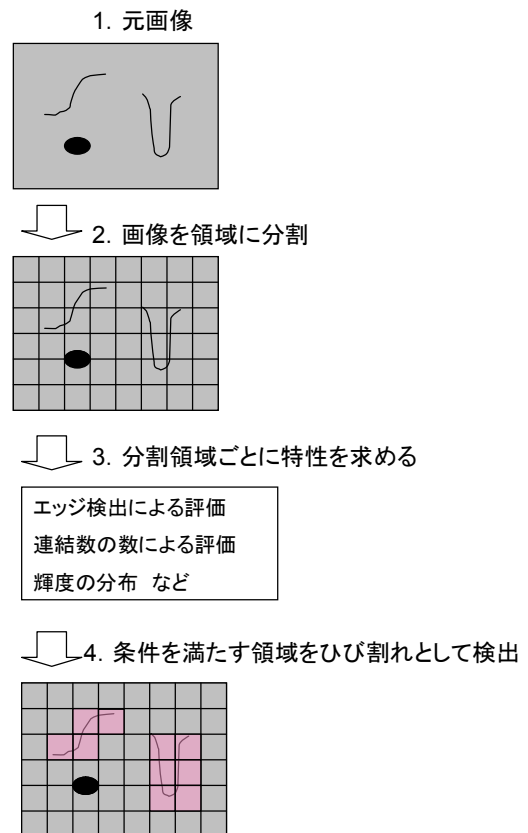


図-7 自動検出の考え方

(2) 変状の特性と画像処理

ここでは覆工画像全体からのひび割れ検出を試みる。本研究では覆工画像を市販の画像処理ソフトを用いて調べること、以下の点をひび割れ箇所の特徴として挙げることにした。

1. ひび割れ部分は輝度変化が激しい
2. ひび割れ部分は周囲に比べて暗い
3. ひび割れ部分は連続性がある
4. ひび割れ部分を含む領域の輝度分布は覆工全体の輝度分布に比べて大きい (標準偏差が大きい)

1, 2に関しては、これまでのエッジ検出において利用されている性質である。従って、従来どおり微分フィルタ (ラプラシアンフィルタ) を用いてエッジ強調処理を行った後、グレースケール画像に変換し、適当な閾値を設定することで2値化を行った。閾値設定の際、覆工画像全体の輝度分布が正規分布に近い形をしていることに着目し、「平均値-標準偏差」を閾値として設定した。この輝度分布の性質は覆工画像を調査することで得られた性質であるが、覆工画像内には変状部分と健全部分が混在するために全体としては正規分布の形に分布することになると考えられる。(図-8に覆工全体と局所的な変状箇所の輝度分布の様子を示す) 実際にこの閾値を用いることでひび割れを消さない程度の適当な閾値となっていることが確かめられた。つまり、ひび割れを検出するために覆工全体を2値化するには、全体の輝度分布において暗い方から約15%程度のピクセルを抜き出せばよいといえる。さらに、2値化した画像の連結成分にラベル付けを行い、その面積の大小により雑音部分を取り除くことで上記3の性質も利用した。

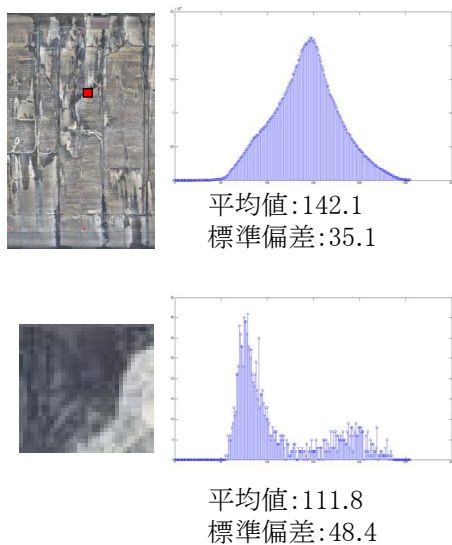


図-8 ヒストグラム(覆工全体(上)とひび割れ箇所(左, 赤四角部分を拡大))

ここで図-8から性質4についても言及できる。すなわち、変状箇所部分においては輝度変化が激しいためにその分布が大きくなる傾向にあるといえる。これは1の性質を、ピクセル領域単位に拡張しているものとも考えられる。この性質を利用するために画像を一辺20×20ピクセルの正方形領域に分割した。なお、原画像の大きさは1618×1000ピクセルである。さらにその領域ごとに輝度分布を計算し、覆工全体の輝度分布と比較することで、分布が大きいものをひび割れ箇所として検出することとした。この際、領域ごとの輝度分布の標準偏差と覆工全体の輝度分布の標準偏差との差をとり、その差が大きい(差の分布の平均値+標準偏差以上)をひび割れ箇所として抽出した。

一連の処理結果を図-9に示す。左側が従来の2値化による処理結果(赤色が2値化で残った箇所)、右側が領域ごとに処理し、変状箇所として検出された結果(緑四角部分)である。

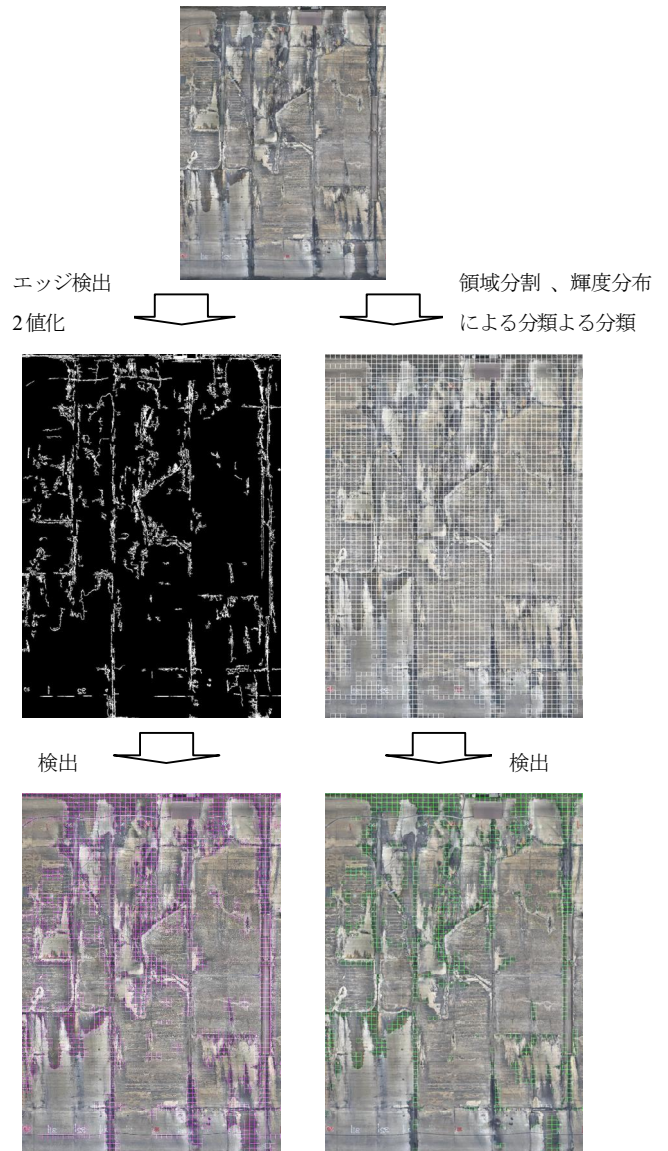


図-9 画像処理結果

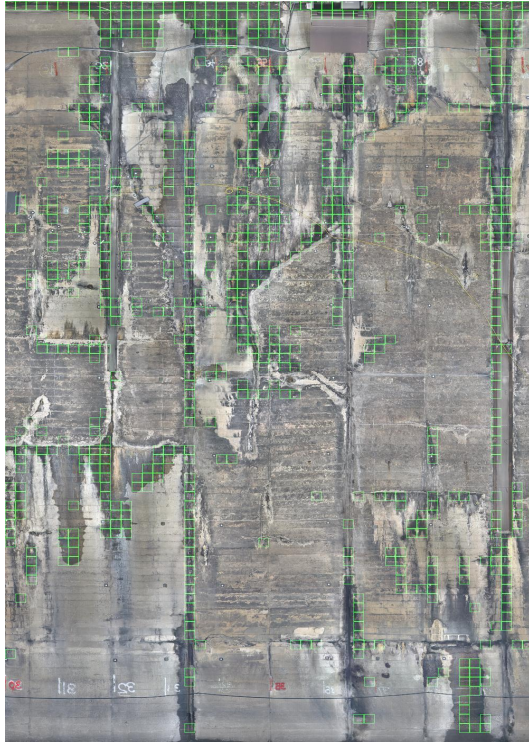


図-10 領域ごとの性質による検出結果

(3) 結果

図-10に領域ごとの性質による検出結果を示す。今回は変状の性質として前項(2)に示された性質4（ひび割れ部分を含む領域の輝度分布は覆工全体の輝度分布に比べて大きい）のみを用いた。その結果、ひび割れ以外の部分（漏水、遊離石灰部分など）についてもひび割れと判断し検出してしまっている。これは、ひび割れとその他変状の性質の区別が今回用いた特徴のみでは十分に表現できなかったためである。

5. 結論

本論文では、効率的な健全性評価のために必要な走行

型が計測技術については、その適用性と画像からの自動変状検出について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

【走行型画像計測技術に関して】

- ・目視と同程度の変状検出性能が認められる
- ・コストに関しては検討の余地がある

【変状自動検出に関して】

- ・従来の1ピクセルごとの処理ではなく、領域ごとに性質を調べ、変状箇所を特定する方法を提案した
- ・変状箇所を特定する手法として有効であると考えられるが、ひび割れのみを検出は困難であった
- ・今後は、変状箇所の特性を調べ、変状ごとに差別化を図ることで検出性能を上げる必要がある

本論文では画像から変状‘箇所’を特定することに主眼を置いたが、変状自動検出に関しては、従来の1ピクセルだけの情報を用いる手法には限界があると考えられる。今後、そもそも画像処理を人的作業の補助的支援として用いるのか、あるいは完全自動化を目指すのかについては技術的な面も考慮して議論する必要があるが、完全自動化のためには、従来の手法にとらわれない画像処理手法が必要であるといえる。

参考文献

- 1) 小島芳之：トンネル維持管理技術の発展，土と基礎，11号，pp.26-29，2006.
- 2) 半田兼一，大西有三，西山哲，矢野隆夫，西川啓一，下澤正道：デジタル画像処理を利用したひび割れ抽出による道路トンネル健全性評価，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.13-18，2008.
- 3) 河村圭，宮本文穂，中村秀明，佐藤亮：対話型遺伝的アルゴリズムによるデジタル画像からのひび割れ抽出，土木学会論文集，742号，pp.115-131，2003.

A STUDY ON IN-VEHICLE PHOTOGRAPHY SYSTEM FOR TUNNEL HEALTH EVALUATION BY USING IMAGE PROCESSING

Ken-ichi HANDA, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Tomofumi KOYAMA,
Kei-ichi NISHIKAWA and Masamichi SHIMOZAWA

Many old tunnels need to be kept or repaired appropriately in Japan, and we have to develop efficient method of tunnel health evaluation. In this situation, we found that improvement of current measuring method or visible check for the efficient management were required following the current research about tunnel management. In this study, we applied in-vehicle photography system for current visible check as the more efficient method. Furthermore, we tried to develop automated procedure for detection of defects by using image processing. Finally we presented the usefulness of the photography system and problems related to the automated procedure.