

デジタル画像を用いた トンネルの変状調査・管理支援システムの開発 DEVELOPMENT OF THE TUNNEL MANAGEMENT SUPPORT SYSTEM USING THE DIGITAL IMAGE

後藤 和夫¹・篠原 秀明²・下澤 正道³・堀内 宏信⁴
Kazuo GOTOH・Hideaki SHINOHARA・Masamichi SHIMOZAWA・Hironobu HORIUCHI

Recently, great depth, large-scale underground spatial development is advanced positively. On the other hand, many of the underground structure which is constructed in high growth period, such as road tunnels, railroad tunnels and conduit tunnels, face deterioration. Maintenance and repair of these structures are one of important topics. This paper shows the development of the tunnel management support system which combines the method of high speed photographing of the tunnel lining surface, using the digital video camera, and the software for managing all data.

Key Words : *underground structure, tunnel management support system, digital image*

1. はじめに

近年, 特に都市部において用地確保が難しくなってきたことに加え, 施工技術や解析技術の進歩によって, さまざまな施設や設備の収容, あるいは資源や廃棄物の貯蔵などの目的で, より大深度, 大規模な地下空間の開発が積極的に進められている。

地下空間の利用は昔から行われてきており, その代表として各種のトンネル構造物が構築され, 重要な社会資本の一部をなしている。しかし, これらの構造物のうち高度成長期に建設された多くの道路, 鉄道, 導水路トンネルなどは急速に老朽化を迎えつつあり, 膨大な数にのぼる老朽化トンネルの適切な維持管理による健全性の確保と長寿命化は, 今後の重要な課題の一つとなっている。

トンネルは周辺地盤や地下水などの影響を受け易い構造物であることから, 変状の早期発見と早期補修が維持管理の基本となる。しかし地中に構築された線状構造物であり, 覆工の内側からしか目視することができず, また延長が長大であるなどの理由から, 管理が難しい構造物でもある。

これに対し, トンネルの効率的な維持管理を目的として, 車載したデジタルビデオカメラによる覆工表面の展開画像を高速撮影する計測手法と, 変状検出およびデータの一元管理のためのソフトウェアを組み合わせた変状調査・管理支援システムを開発したので本稿にて報告する。

2. システム開発

(1) 現状の問題点

トンネルの維持管理において, 従来の点検・調査の手法による主な問題点などを以下に列記する。

キーワード: 地下構造物, トンネル管理支援システム, デジタル画像

¹ 有限会社ジーテック 代表

² 株式会社東設土木コンサルタント 営業・企画室

³ 計測検査株式会社 営業部

⁴ 正会員 山形設計株式会社 技術部

- (a) トンネルの延長が長くなると、目視による点検・調査では現場作業に多くの労力と時間を要する。またこの際に、車線規制や通行止めなどの措置を必要とする。
- (b) 目視による点検・調査では、検出する変状のレベル、位置と形状、抽出頻度などが技術者個人の技量と主観に依存するため、結果にばらつきを生じ易い。
- (c) 点検・調査および補修など、維持管理の各段階で作成される記録が一元化されていない。
- (d) ひびわれ等の変状の変化は複雑であり、汎用CAD等によるレイヤー管理では、変化の過程を履歴として管理することが難しい。

これらの問題点を解決するために、車載したデジタルビデオカメラにより画像撮影を行う現場計測方法と、点検、調査、補修などの各段階で作成した記録を履歴としてトンネルごとに一元的に管理するソフトウェアを組み合わせたシステムの開発を行ったので、その内容について以下に述べる。

(2) 画像撮影

a) 基本方式

現在、トンネル覆工表面を撮影する代表的なデバイスとしてラインセンサカメラ、レーザースキャナ、デジタルビデオカメラなどがあり、本システムではこのうち3CCDデジタルビデオカメラを採用している。

本システムは、図-1,2に示すように測定用台車上の架台に複数台のデジタルビデオカメラと照明器を円周方向に配置して、トンネル内を走行しながら覆工表面の画像を撮影することで、連続した展開画像を作成し、この撮影画像を基にひびわれなどの変状を検出するものである¹⁾。

このようなカメラと照明の円周方向の配列によって、ラインスキャナのようにほとんど影のない均等な明るさの画像を連続的に撮影することが可能である。

また照明に白色光源および撮影に3CCDを用いているため、展開画像として鮮明なカラー画像を得ることができる。覆工表面に発生する変状は、ひびわれだけでなく漏水、遊離石灰や剥落など多岐に及ぶため、変状を詳細に把握するためにカラー情報は非常に有益であり、さらにトンネル内に設置された避難誘導施設や消火施設などの各種付属設備の維持管理にも有効である。

なお、撮影デバイスとして複数台のデジタルビデオカメラを使用しているため、撮影した段階での画像は動画として記録されている。これを、あと処理によって動画の各コマを静止画に変換し、変換した静止画像の有効部分をトンネルの円周方向および延長方向に貼り合わせることで最終的に一枚の展開画像を作成している。

撮影の際、測定用台車は図-3に示すようにさまざまな要因によって各方向に蛇行、回転しているため、撮影した画像にはこれらの影響によるゆがみが含まれている。このため、あと処理においては、画像の貼り合せと同時に、ゆがみを除去し画像が

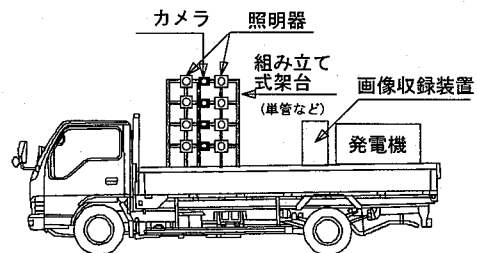


図-1 トンネル延長方向の撮影機材の配置

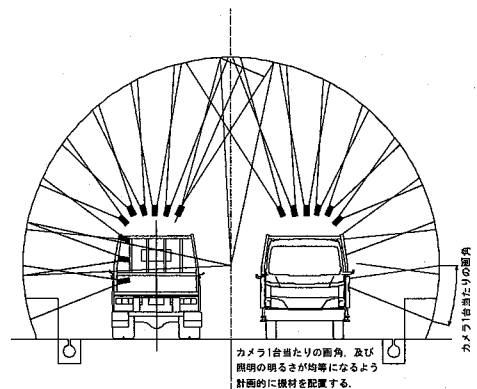


図-2 トンネル円周方向の撮影機材の配置

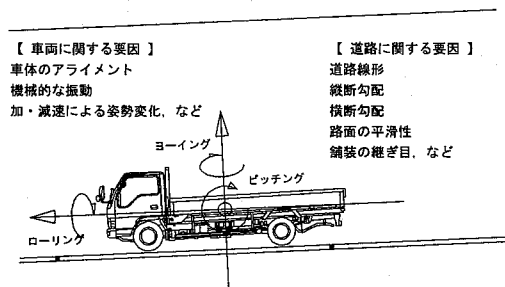


図-3 撮影における車体の運動

正確にトンネル展開と一致するよう、幾何補正処理も併せて行っている。

b) 機材の構造

本システムの特徴として、撮影機材の構造が組み立て式である点が挙げられる。写真-1に示すように単管などで架台を組み、必要な台数のビデオカメラおよび照明器を金具を用いて架台上に固定することで撮影機材全体を組み立てている。

このような組み立て構造を採用したことにより、トンネルの形状や内空断面、使用できる台車の大きさや動力などの様々な制約条件に合わせて架台を組み、その上にビデオカメラおよび照明器を自由にレイアウトして計測を行うことが可能となっている。

c) 最小分解能と計測精度

画像撮影による計測では、光源や撮像素子などの種類に依らず、対象物表面からの照明の反射光を撮像素子により抽出するという光学的な原理は変わらない。計測精度を大きく左右する要因の一つである最小分解能は、図-4に示すようにカメラの画角とこれに対する画素数から求められる。

しかしデジタル画像を用いた計測では、計測精度は必ずしも最小分解能だけでは決まらない。デジタル画像を構成する各画素の明るさは、その画素に対応する撮像素子に入力された光の量に応じて、従って構造物表面のひびわれや欠陥など、背景と比較して極端に暗い対象物を撮影した場合、1画素に満たない大きさであっても、入力される光の量が少なくなるので画素には明暗として記録されている。これによりデジタル画像では1画素より小さい幅のひびわれでも検知できることが広く知られている²⁾。本システムではこの現象を積極的に利用して、背景と対象物との輝度差を n 階に階調化することにより、原理的には1画素の $1/n$ の大きさの計測を可能としている³⁾。

d) 走行速度と計測精度

最小分解能、画像の輝度差に加えて、撮影時の走行速度の3項目が、本システムの総合的な計測精度を決定するうえでの主要因となっている。ビデオカメラのシャッター速度は、台車の走行速度に比較して十分に高速であるため、画像が流れたり画角が欠落するようなことはないが、走行速度が速くなると、上述した画像のゆがみが大きくなったり、トンネル延長方向での撮影画像同士のラップが小さくなるなどの理由から、一般に計測精度は低下する。

これらの要因と計測精度との関係は、さらに覆工表面の汚れ具合などからも影響を受けるため単純には決まらないが、これまでの実験や実績などから、良好な条件下であれば走行速度5km/hrでは最小分解能の $1/10$ (標準的なビデオカメラの配置で0.1~0.2mm)、50km/hrでも最小分解能の $1/2$ (0.5~1.0mm)程度の大きさのひびわれの有無を検知することが可能である。

なお、撮影に用いるデジタルビデオカメラの解像度は、720*480pixelであり、例えばこれで画角約 $1.5^{\circ} \times 1.0m$ の範囲を撮影した場合、最小分解能はおおよそ2mm/pixelとなる。

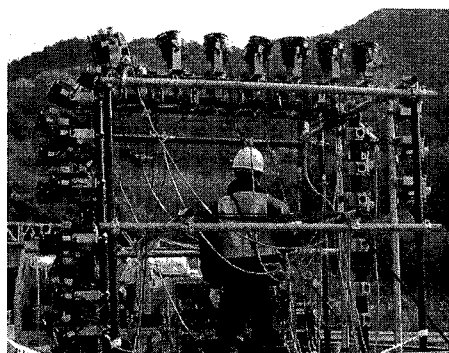


写真-1 架台の組み立て

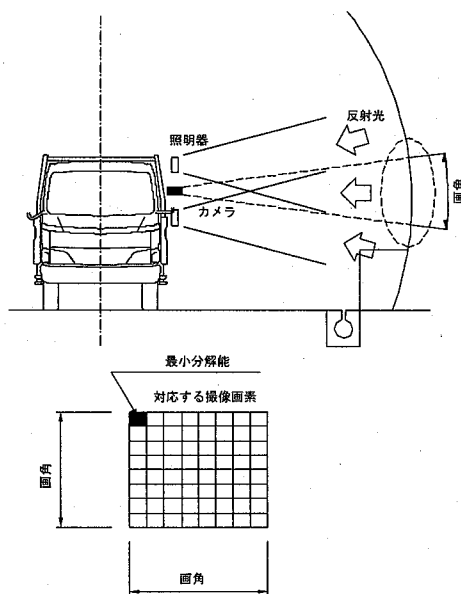


図-4 撮影画角と最小分解能

(3) ソフトウェア

以上の方法により撮影・作成したトンネルの展開画像を基に、併せて開発したソフトウェア⁴⁾によって変状を検出し、データ管理を行う。

a) 変状の検出

作成したトンネルの展開画像を基に、変状の検出を行う。このうちひびわれの抽出は、主にソフトウェア上で作成した展開画像の変状箇所を液晶タブレットなどでトレースすることで行っている。

ソフトウェアで自動抽出させることも条件によっては可能であるが、コンクリートは骨材とモルタルの複合材料であり、表面はこれらの材料の場所による違いに加え、型枠跡や汚れなどが規則的あるいは不規則に複雑な模様をなし、抽出すべきひびわれと分離することが難しい場合が多い。

このため、本システムでは輪郭抽出や輝度範囲選択などの画像処理によってひびわれ含む画面上の暗い箇所を強調・抽出し、そのうえで最終的には技術者の判断より抽出すべきひびわれの端点を短い区間ごとに画面上で指定することで、ひびわれを表すオブジェクトを半自動的に生成する機能を持たせている。

写真-2は、比較的汚れたコンクリート表面を対象として輝度範囲選択により、画面上の暗い箇所を抽出した例であり、これを基にひびわれを抽出してオブジェクト化したものが写真-3である。

b) ゴーストオブジェクト

変状の複雑な挙動変化を履歴として管理とすることを目的として、図-5に示す概念に基づき、変状の拡大、伸展および収縮、消失、再発生などの変化を表現できる“ゴーストオブジェクト”と名付けた特殊なオブジェクトを開発し、採用している。

c) データ構造と履歴管理

本システムでは、一つのファイルですべてのデータを管理できるよう、複数の点検・調査および補修等の記録を保管し、任意に表示できるよう設計している。これを実現するために階層レイヤー構造を採用し、個別の変状は下位のレイヤー上にオブジェクトとして配置している。これにより変状とオブジェクトは常に一対一の関係となるので、変状ごとに写真、コメント、詳細調査結果等の情報を属性として付与することができる。

ゴーストオブジェクトと階層構造を組み合わせることで、複数のイベントの複雑なオブジェクトの変化を履歴として一元管理することが可能となっている。

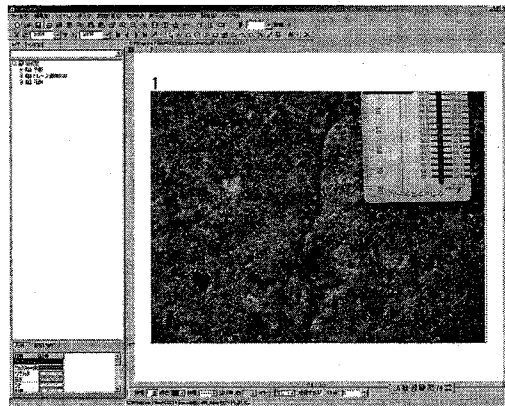


写真-2 輝度範囲選択による画面上の暗い箇所の抽出
(R,G,B=2,4,3から各色増分+10の範囲)

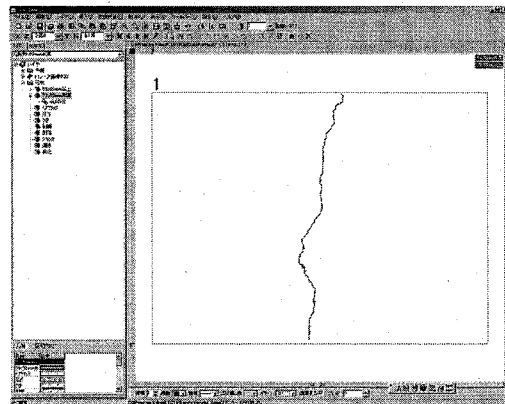


写真-3 半自動的に抽出したひびわれ

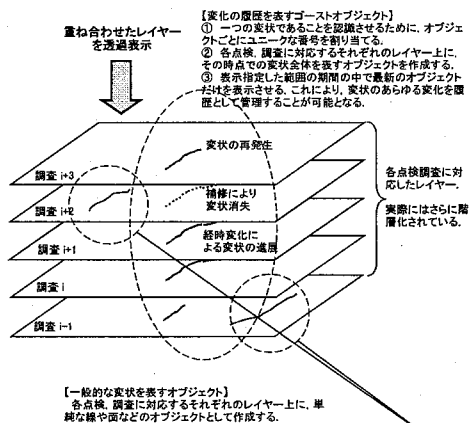


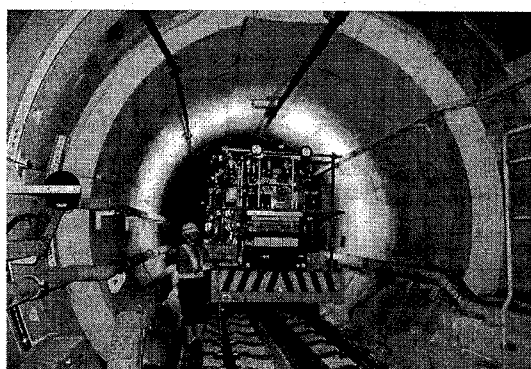
図-5 ゴーストオブジェクトの概念

3. 適用事例

本システムを用いて変状調査を行った事例から、撮影状況および作成した展開画像を紹介する。写真-4は、本システムを用いて道路トンネル(NATM)および軌道トンネル(シールド)で計測を行った際の撮影状況である。

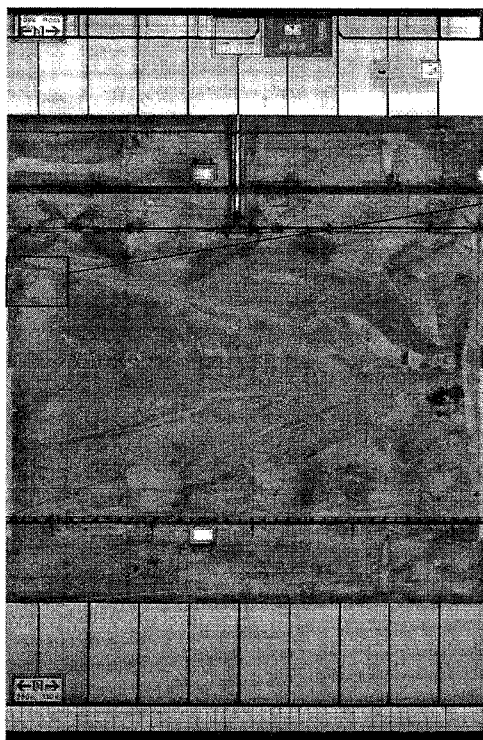


a) 道路トンネル (NATM)

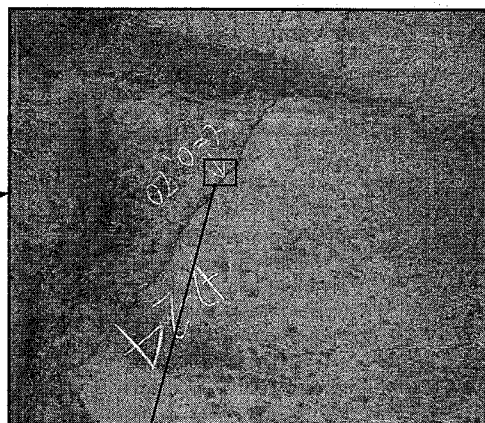


b) 軌道トンネル (シールド)

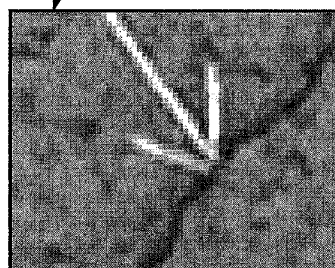
写真-4 本システムによる撮影状況



a) トンネルの展開画像



b) 左図の枠内の拡大図



c) 上図の枠内の拡大図

写真-5 展開画像の撮影例

また写真-5は、道路トンネルの覆工表面を計測し、展開画像を作成した一例である。この画像において最小分解能は約2mm/ pixelであるが、右上および右下の拡大図に示すように0.7mm幅のひびわれは非常に明瞭

な線として記録されており、さらに0.2mm幅程度までは目視により抽出することが可能である。この例では0.7mm幅のひびわれで、その明るさはR,G,B=90,90,90程度であり、抽出可能な微細なひびわれでR,G,B=150,150,150程度、背景となる健全な覆工表面でR,G,B=180,180,180程度以上であった。ここでは0.7mm幅のひびわれは既に最小分解能である約2mm/ pixelよりも小さいことも影響しているが、実際の計測においてはひびわれは完全な黒(R,G,B=0,0,0)ではなく意外と明るいため、ひびわれを輝度等だけによって自動的に背景から抽出することはかなり難しい。

4. おわりに

本システムを適用することで、老朽化トンネルの効率的な維持管理を支援できるものと考えている。今後は、より画素数の多いハイビジョンデジタルビデオカメラの適用や、ひびわれ抽出方法の改良など、計測精度の向上と効率化を主眼に開発を進めていく予定である。

さらに地質や支保構造などの設計・施工段階の情報を取り込み、アセットマネジメントの機能を導入することで、本システムをトンネルのライフサイクル全般を通じた総合的なマネジメントシステムとして拡張することを次段階での開発テーマとしたいと考えている。

参考文献

- 1) NETIS登録番号:QS-020025:コンクリート構造物の損傷・劣化抽出システム
- 2) 例えば、社団法人日本コンクリート工学協会；コンクリート診断技術'02 基礎編，pp.89,2002.など
- 3) 堀内宏信・後藤和夫：デジタル画像を利用したひびわれの計測精度について，平成 16 年度土木学会東北支部技術研究発表会，pp.782-783,2005.
- 4) NETIS登録番号:HR-030010:CrackDraw21，特許番号:KR-100597963:変状管理システム