

道路トンネルの健全性評価技術に関する研究

STUDY ON EVALUATION TECHNOLOGY FOR STRUCTURAL HEALTH OF ROAD TUNNELS

大西 有三¹・小山 倫史²・安田 亨³・水口尚司⁴

Yuzo OHNISHI・Tomofumi KOYAMA・Toru YASUDA・Takashi MIZUGUCHI

Tunnel structures have been excavated in fractured rock masses and geological as well as in-situ stress conditions are very complicated. Hence it is difficult to identify the factors relating deterioration and damage processes of tunnel structures accurately which makes structural health evaluation and deterioration prediction of tunnel structures difficult. In this paper an evaluation method for structural health of tunnel structures was proposed which will be able to replace the conventional method by introducing newest measuring technology such as mobile imaging system and mapping system. The method proposed in this study was applied to the real road tunnel.

Key word: structural health evaluation, mobile imaging system, mobile mapping system, lining deformation mode

1. 研究目的

本研究では、道路トンネルの適切な健全性評価手法を確立するために以下の課題について検討を行った。

- ①トンネル構造物の管理者を対象に、現在の健全性評価手法に関する調査を実施し、従来手法の課題を抽出する。
- ②健全性評価に関する研究文献調査、計測技術に関する調査を行い、抽出した課題に対して工学的・経験的・技術的観点からの包括的な改善を試みる。
- ③適切な健全性評価手法の提案を行う。
- ④新たに提案したトンネル健全度評価手法を実際のトンネルに適用し、その実用性の検討を行う。

2. 健全性評価手法の検討

トンネル構造物の健全性評価手法に関する問題点、課題の抽出、さらに適切な健全度評価手法の提案に向けて、以下に挙げるような調査を行った。

- ① 健全性評価の現状に関する調査
- ② 既往の健全性評価手法に関する文献調査
- ③ 健全度評価のための計測技術に関する調査

(1) トンネルの維持管理手法の現状に関する調査

トンネルの維持管理に関して、一般国道を管理する国土交通省、高速道路を管理する旧日本道路公団、鉄道を管理するJRの基準を俯瞰し、その問題点・課題の抽出を行った。(図-1に国土交通省による維持管理の流れの一例を示す。)得られた知見は以下のようにまとめることができる。なお、これらの知見は今後の健全性評価手法構築のための重要な指針を示していると考えられる。

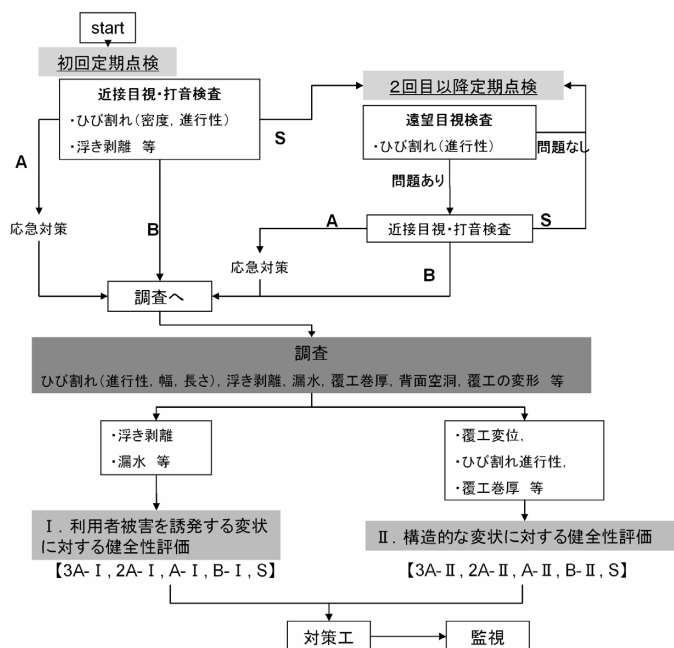


図-1 維持管理の流れ¹⁾

キーワード：健全性評価，走行型画像計測，走行型レーザー計測，覆工変形モード

¹ 正会員 京都大学副学長 理事

² 正会員 京都大学大学院助教 工学研究科都市環境工学専攻

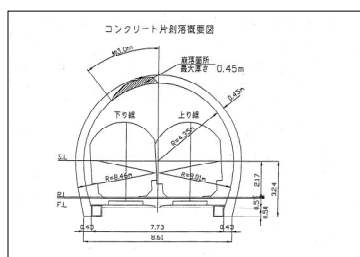
³ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術部 部長

⁴ 非会員 株式会社ニュージェック 道路グループ グループマネージャー

①トンネル構造物の健全性評価のためには、維持管理における最も初期の段階での近接目視・打音検査による定期点検が必須である。ただし、トンネルに生じる変状の経時変化を客観的に捉えることが健全性評価のために必要であり、このためには初期の状態の把握が重要である。

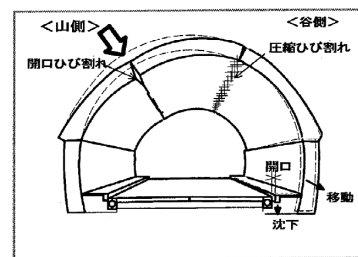
②健全性評価においては、直ちに第三者（利用者）への被害に繋がる可能性のある変状（覆工コンクリートの剥落や漏水など）とトンネルの構造的な安定性に関連する変状（外力の作用により覆工表面に生じるひび割れなど）に分けて評価することが必要である。これは、両変状の特徴として図-2 のように対比することが可能であり、それぞれの対策の考え方に違いが生じるためである。

第三者影響に関係する変状



- ・急速に進展する可能性がある
- ・進展の把握が困難
- ・早急な対策が必要

構造的な変状



- ・事前変形を伴うなどの特徴が見られる
- ・進展の把握が可能
- ・計画的な対策が必要

図-2 変状の特徴 ②の図を引用加筆

③一次点検・二次点検と点検内容をより詳細にしていく中で、健全性評価のレベルを向上させる（すなわち、判定区分をより詳細に行える）評価手法が望ましい。これは一次点検と二次点検において検討されるべき変状の多くが共通しており、健全性評価手法の効率化を図ることが可能であると考えられるためである。

(2) 既往の健全性評価手法に関する文献調査

健全性評価手法について既往の研究からの工学的知見を以下のように取りまとめた。この際、前節までに示したように、第三者影響に関連する変状に対する健全性評価と構造的な変状に対する健全性評価に分けて調査することとした。

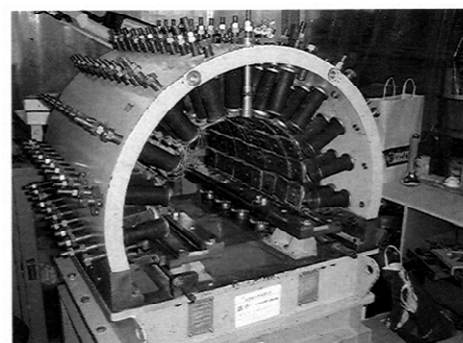


図-3 覆工模型実験装置 ③

a) 構造的な変状に対する健全性評価

構造的な変状は、覆工に作用する外力により生じるものである。覆工の安全性に関する健全度を評価するための手法を構築するために、荷重模型載荷実験^{③,④}により、覆工に生じるひび割れ進展と剛性変化の関係を定量的に評価している。この実験では、図-3に示すようなトンネルの1/30縮尺の三次元覆工模型実験装置を用いて、さまざまな方向から応力条件を変えた載荷を行い、その際の荷重量、荷重点の変位の計測、および覆工に生じるひび割れの観察を行っている。この実験により得られた知見は以下とおりである。

- ①載荷荷重の増加に伴い、覆工には3回の顕著なひび割れが発生し、そのたびに荷重点が急激に変位し、やがて降伏状態に達する。これは、ひび割れが発生するたびに覆工の力学的な構造が変化し、その耐力が減少していることを示している。これより、剛性値を載荷荷重/載荷点変位として定義することで、覆工残存耐力の評価指標として用いることが可能である。
- ②覆工に生じるひび割れは、載荷荷重の方向に依存する。すなわち、載荷を鉛直方向、あるいは水平方向から行うかにより、生じるひび割れの形状や進展が異なる。
- ③上記①、②より、覆工に外力が作用し、かつその作用位置（方向）が既知である場合には、ひび割れの進行状態（形状）から剛性値を算出することで、覆工の残存耐力を評価することができる。

また、覆工に外力を作用させた場合の変形解析に関する研究^⑤から、以下の知見が得られる。

- ①覆工にかかる荷重の方向（鉛直、斜め、水平等）によって覆工の変形モード（覆工の内空変位）がパターン化される。
- ②したがって、覆工の変形モード（覆工の内空変位）を知ることができれば、外力の位置（方向）を知ることができる。

b) 第三者影響に関係する変状に対する健全性評価

第三者影響に関係する変状として剥落、漏水などが特に重要と考えられるが、既往の文献によれば、剥落のメカニズムとして、ひび割れの発生・拡大により覆工に3次元的に囲まれた浮き領域が形成されることが示されている。また、漏水についてもひび割れを介して発生するメカニズムが示されており、第三者影響に関係する変状を評価する場合にはひび割れの評価が重要である。また、これに加えて、トンネル技術者を対象に実施した調査結果を取りまとめることで、以下の知見を得た。

- ①第三者影響に関係する変状では、ひび割れに着目した評価が必要であり、ひび割れの閉合性（ひび割れで囲われているかどうか）と密度を指標として評価する必要がある。
- ②ただし、明らかに第三者影響を与えると判断できる変状については、即対応するなど、ひび割れの評価以前に処置を行う必要がある。

（3）健全度評価のための計測技術に関する調査

現行の維持管理の中心的作業は一次点検であり、その主な内容は近接目視、及び打音検査となっている。このため、これらの検査に対する計測技術の開発が盛んに行われてきている。

特に近接目視検査に代替する新しい計測技術として、車載型で走行しながら覆工表面画像を取得する技術が挙げられる。本技術の特長として、以下の3点が挙げられる。

- ①トンネル全延長を短期間・効率的に取得可能であること
- ②電子データであることから客観的であること
- ③車載型なので安全であること

なお、画像を取得する機器としては、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用いられている。

3CCDのデジタルビデオカメラを用いた画像撮影手法は、車載型のデジタルビデオカメラにより連続的に覆工を撮影し、画像処理により合成することで覆工の画像を取得するものである。本手法はカラー画像を取得することが可能であることから、ひび割れのような変状の有無だけでなく、漏水、遊離石灰等との判別や、避難誘導設備や消火設備などの判別などにも有効である。さらに、走行速度5km/hrでの最小分解能が0.1～0.2mm、50km/hrでも0.5～1.0mm程度である。図-4に本計測技術によって得られる覆工展開画像の例を示す。

一方、レーザ光を用いた撮影手法は、覆工表面の凹凸を捉えることが可能であり、ひび割れの状況を高精度に計測できる手法として位置づけられている。覆工表面の画像から技術者がひび割れの検出を行った検証によれば、幅0.5mm以上のひび割れを検知でき、近接目視と同程度の精度を有する。

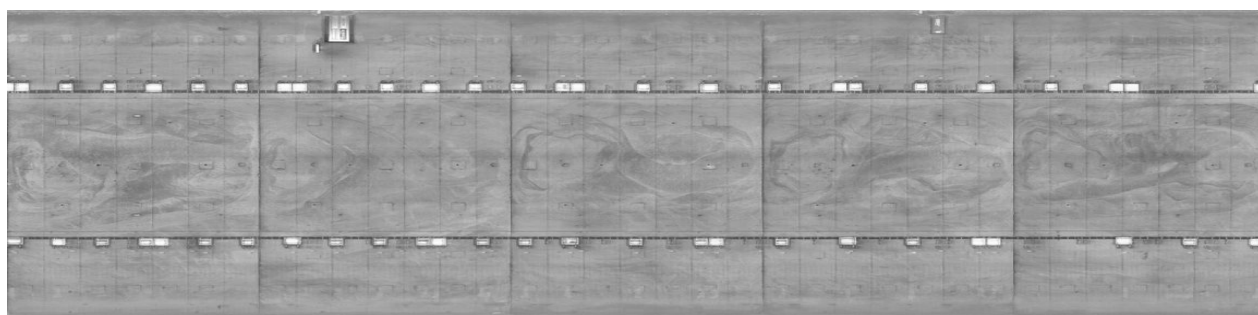


図-4 走行型画像計測による覆工展開図(例)

また前項(2)a)で示したように、トンネルの維持管理において、覆工の内空変位を直接計測することができれば、トンネル覆工に生じる外力の方向が分かり、健全性評価を行うことが可能である。これに対して、トンネル内空の三次元座標を大量に取得可能な3次元レーザースキャナ(レーザプロファイラ)を走行型に改良することで、トンネル覆工全体の面的な形状の計測を行う技術(走行型レーザ計測)の開発が進められている。3次元レーザースキャナは、対象物の詳細な表面形状の計測を非接触で、短時間、かつ遠隔からの計測が可能である。この技術をトンネル覆工に適用できれば、覆工の変位計測が可能であると考えられる。

図-5に走行型レーザー計測でトンネル覆工面を計測した結果を示す。本図より、計測箇所画像と比較すれば、照明器や覆工目地などが確認できることが分かる。また、各点は三次元の座標を持っており、この点群から、覆工を模した基準面を算出し、そこからのずれを算出することで変形モードが確認できる可能性がある。ただし、精度や点群の処理方法など検証すべき課題あり、今後の技術的進歩が期待される。

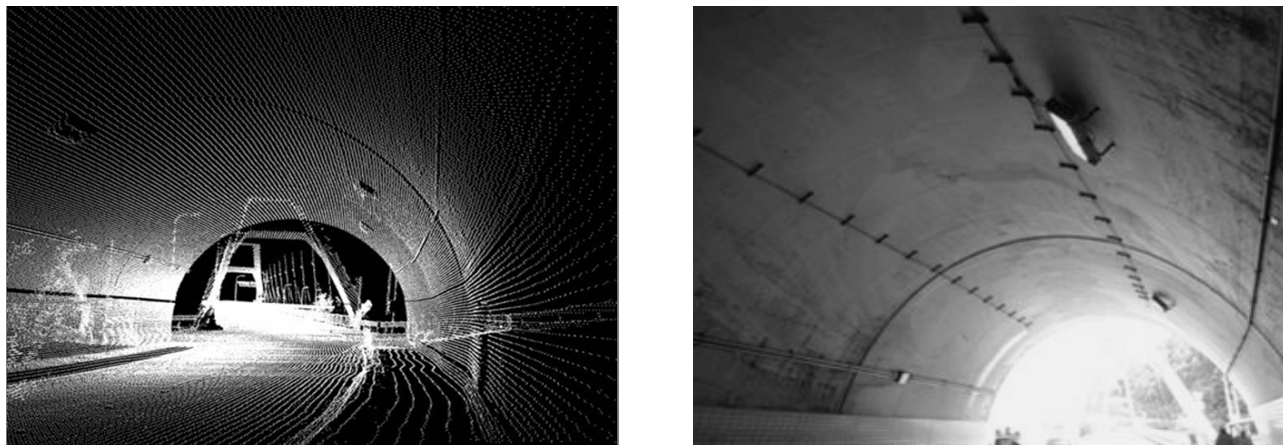


図-5 走行型レーザー計測
(左：点群データ、右：計測地点)

(4) 適切な健全性評価手法に対する要件整理

(1) ～(3) で得られた知見より、適切な健全性評価手法の確立のために必要な事項を以下にまとめる。

a) 現行の維持管理手法に関する調査から、

- ① 初期の検査記録を取得する必要がある。
- ② そのために、初回の近接目視・打音検査により詳細なデータ取得が必要である。
- ③ 第三者被害に関係する変状と構造的安定性に関する変状に分けて評価する必要がある。
- ④ 一次点検、二次点検と段階を踏むごとに詳細な評価を行う必要がある。
- ⑤ 詳細調査を行わずとも、定期点検程度の検査である程度の健全性を評価できることが望ましい。
- ⑥ 変状のうち特にひび割れ（幅、本数、漏水の有無、場所）に着目する必要がある。
- ⑦ 変状は大部分が第三者影響に関わるものであり、構造的安定性に関する変状はまれであるため、第三者影響に関わるひび割れを適切に評価する必要がある。
- ⑧ 近接目視や打音検査などの替わりにより効率的な新技術を導入することが望ましい。

b) トンネル健全性評価に関する文献調査から、

- ① 構造的安定性は、覆工耐力による評価が可能である。
- ② 覆工耐力は、ひび割れの形状と覆工の変形モードから、剛性値を用いて概略的に評価できる。
- ③ 詳細な物性値（覆工厚、地圧）などが測定されれば、解析的手法から詳細なトンネル内空の変形量の算出が可能である。
- ④ 第三者影響は、ひび割れの閉合性と密度に着目して剥落危険性を評価すべきである。
- ⑤ 明らかに第三者被害を生じると考えられる事例を収集することで、即対応すべきかどうかの判断ができるようにすべきである。

3. 適切な健全性評価手法の提案

前章で示された健全性評価手法の要件および、計測技術の現状から、以下のように新たな健全性評価手法を提案する。なお、本節で示す手法は国土交通省の維持管理手順を基にしており、主に「定期点検」と「調査」の部分で改良を試みた。その際、計測技術として、走行型画像計測技術、及び走行型レーザー計測技術の導入を試みた。図-6にその手順を示す。

(1) 初回検査

近接目視・打音点検を行うことで、トンネルに生じる変状について、詳細に初期状態の把握を行う。また、画像計測による覆工展開図の取得、およびレーザー計測による覆工形状の取得もあわせて行う。これらの記録は変状の経時変化を捉える際に初期値として利用する。

(2) 2回目以降の検査

2回目以降の検査では、第三者影響に関する変状に対する健全性評価、及び構造的な変状に関する健全性判定を行う。この際、覆工表面の変状検査と覆工の変形モード検査に分けて検査を行い、前者には走行型画像計測技術を、後者には走行型レーザー計測技術を適用する。なお、構造的な変状に関する健全性評価については、外力の影響の程度を考慮に入れ、外力の影響が大きい場合にはさらに詳細な調査を行うこととした。

(3) 詳細検査

2回目以降の検査において外力による影響が大きいと評価される場合に行う検査である。覆工厚や内空変位の経時計測、背面地すべり調査などの詳細なデータを取得し、解析的手法により覆工耐力を算定し、構造的な変状に対する健全性評価を行う。

(4) 第三者影響に関する変状に対する健全性評価

第三者影響に関する変状は、特にひび割れの閉合性、ひび割れ密度に着目し、覆工ごとに剥落箇所の危険性について評価を行う。それぞれ走行型画像計測データにより、ほぼ自動的にひび割れ検出を行い機械的に評価することが可能となる。図-7にその具体的なその健全性評価手法を示す。

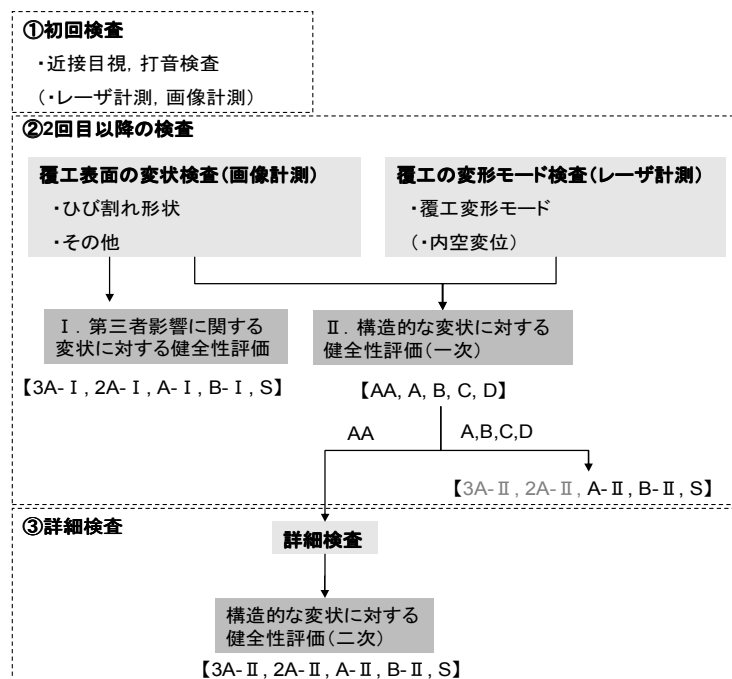


図-6 適正な健全性評価手法（案）

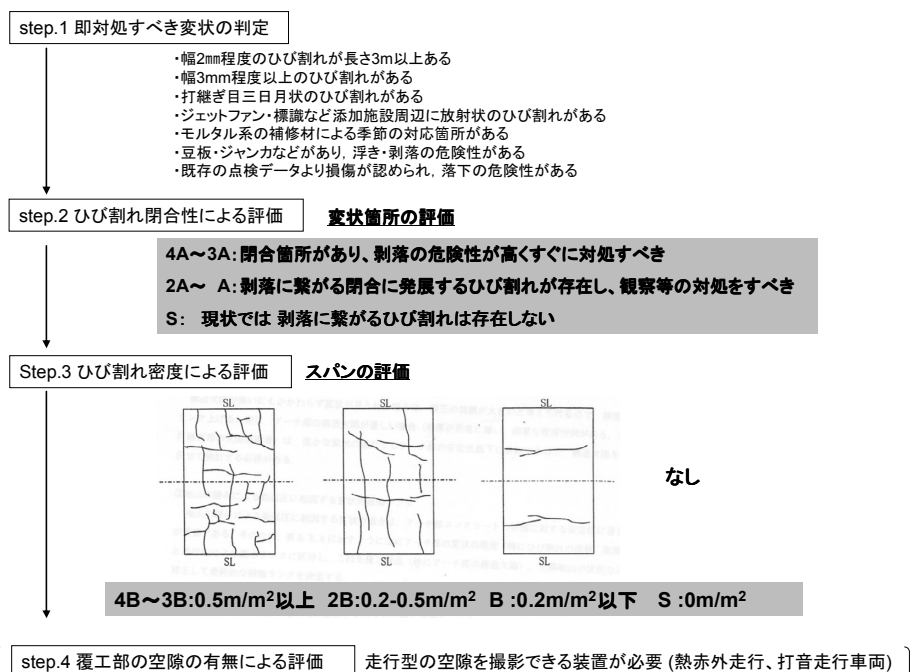


図-7 第三者影響に関する変状に対する健全性評価

(5) 構造的な変状に関する健全性評価

構造的な変状は、一次評価として外力からどの程度の損傷を受けているかをひび割れの形状と覆工変形モードの関係から評価する。この際、走行型レーザー計測データにより、覆工変形から外力の影響を受けているかを判別し、その度合い（どれほどの影響を受けているか）をひび割れの形状・進展より評価する。評価区分にはAA, A, B, C, Sの5段階を用いる。さらに、一次評価を受けて、明らかに外力の影響があり、詳細な検査が必要とされる場合（AA）に覆工の詳細検査で得られる物性値を用いて覆工耐力評価により詳細な評価が可能となる。図-8にその健全性評価手法を示す。

覆工変形モード	○		○	×	×
ひび割れ形状	○		×	○	×
評価	AA	A	B	C	S

- AA: ひび割れと覆工変形モードの関係性について、既往の覆工模型実験結果との整合性があると判断され、かつ、ひび割れが複数個所に発生しているため、その進行が一次ひび割れ以降であると考えられる場合あるいは、
- ひび割れと覆工変形モードの関係性について、既往の覆工模型実験結果との整合性は無いと判断されるが、ひび割れが複数個所に発生しているため、外力が複合的に作用していると考えられる場合
- A : ひび割れと覆工変形モードの関係性について、既往の覆工模型実験結果との整合性があると判断されるが、ひび割れが未発達であるため、その進行が一次ひび割れ以前までにあると考えられる場合
- B : 覆工は変形しているが、覆工表面にひび割れが生じておらず、外力の作用が初期段階未満(一次ひび割れ未満)と考えられる場合
- C : 覆工の変形が確認されず、覆工表面にひび割れが発生している場合で、温度変化や材料劣化等による覆工損傷と考えられる場合
- S : 覆工の変形が確認されず、また覆工表面のひび割れも見られず、外力が作用していないと考えられる場合

図-8 構造的な変状に関する健全性評価

4. 実際の道路トンネルへの適用

本節では、地すべり地帯に位置する実際の道路トンネル（以下Mトンネルとする）を対象として本研究で提案した新たなトンネル健全性評価手法を適用し、その実用性の検討を行った。

Mトンネルは、延長82m、内空幅7.72m、内空高さ5.75mの形状を呈し、供用は昭和37年である。本トンネルの地形的な特徴は、海岸沿線を通る国道上に位置し、斜面を南北に貫通していることが挙げられる。斜面の地質は主に安山岩や礫混じりの土砂、粘板岩などであり、Mトンネルは粘板岩と安山岩の境界部に位置する。

これまでの調査で、Mトンネルを含めた周辺道路一帯の地山において、地すべりの発生が確認され、現在ではMトンネルを含む道路周辺は廃道となっている。地すべりは、起点側の坑口部の土砂が地すべりブロックとして山側から海側へと移動（山側から海側）することで発生したとされている。このため現状では、特に地すべりの影響を受けたとされる起点側の坑口付近には鋼製のリングビームによる補強がなされている。

図-9にトンネルの位置する地質平面図、図-10に地質横断面図、図-11に地質縦断面図をそれぞれ示す。

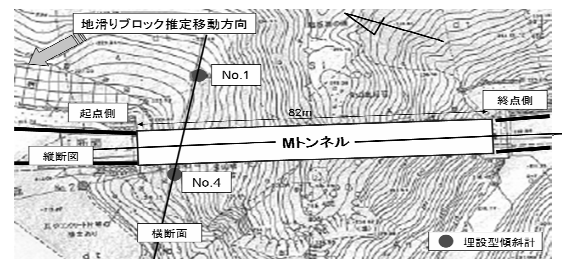


図-9 地質平面図

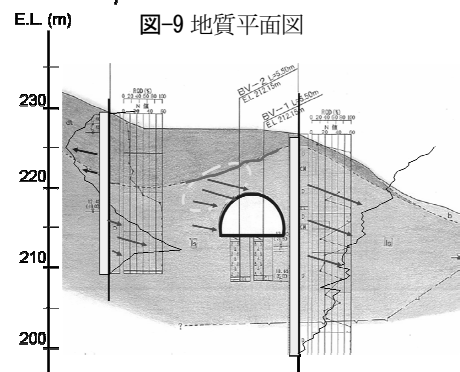


図-10 地質横断面図

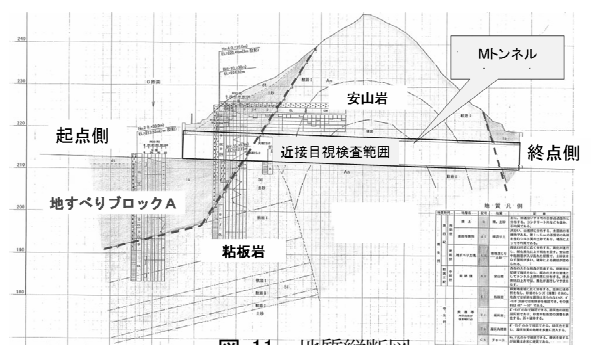


図-11 地質縦断面図

(1) 第三者影響に関する変状に対する健全性評価

前節で提案した、新しい健全性評価手法に基づいて、以下にMトンネルの健全性評価を行った。

a) ひび割れ閉合性による評価

- ①閉合があると判定された箇所を赤○で示す。
- ②閉合はしていないが、閉合に発展しそうな箇所として青○を示す。(図-12 参照)
- ③今回はこの青○箇所も併合しているものとして評価を行う。

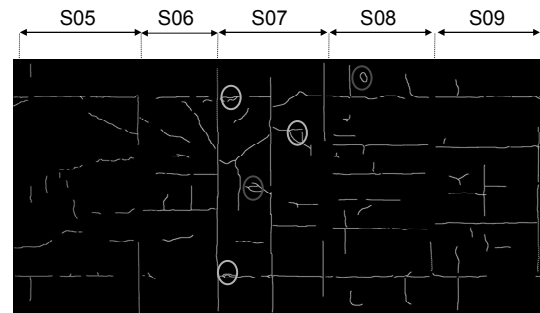


図-12 ひび割れ併合箇所の特定

b) ひび割れ密度による評価

- ①ひび割れ密度が大きいスパン S06 において、従来手法より安全側の判定がなされている。
- ②S09 のスパンについては従来手法と同一程度の判定がなされているが、その要因として密度が大きいことが挙げられる。

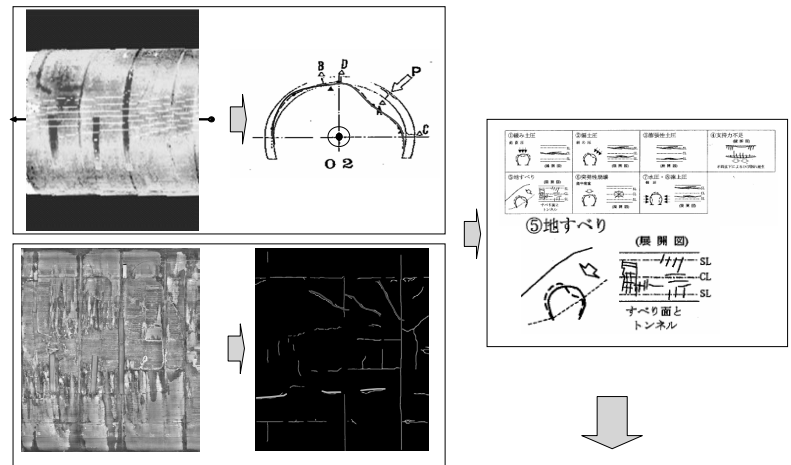
表-1 第三者影響に関連する健全性判定結果の比較

覆工スパンNo.	S05	S06	S07	S08	S09
従来手法による判定	S	B-I	B-I	S	B-I
提案手法による判定	A-I ~ B-I	3A-I ~ 2A-I	3A-I ~ 2A-I	3A-I ~ 2A-I	A-I ~ B-I
・ひび割れ閉合性の評価	S	S	4A~3A	4A~3A	S
・ひび割れ密度の評価 (ひび割れ密度[m/m ²])	2B~B (0.26)	4B~3B (0.55)	2B~B (0.49)	2B~B (0.38)	2B~B (0.45)

(2) 構造的な変状に対する健全性評価

図-13 のように、覆工の変形モードを特定し、さらに覆工に生じるひび割れの状態を把握する。これを基に、生じていると考えられる外力を特定すると、地すべりによる変形モードが選定される。

従来手法では構造的な変状は生じているが、その程度が軽微であるとの評価 (A-II) がなされているが、提案手法では、地すべりの変形モードに基づく構造的な影響により、さらに詳細調査が必要であるとの判定 (3A-II ~ 2A-II) とされている。



II. 構造的な変状に対する健全性評価(一次)

AA :
ひび割れと覆工変形モードの関係性について、既往の覆工模型実験結果との整合性があると判断され、かつ、ひび割れが複数箇所に発生しているため、その進行が一次ひび割れ以降であると考えられる場合

3A-II ~ 2A-II
詳細調査へ

従来手法での評価
A-II
(S05,S06)

図-13 構造的な変状に対する健全性評価

(3) まとめ

提案する健全性評価手法をMトンネルに適用し、得られた知見を以下にまとめる。

- ①本研究で提案した新たな健全性評価手法は、従来のものと比較して、より安全側の判定となった。
- ②提案手法は、地すべりによる影響をトンネルの覆工の変形モードという形で適切に健全度評価に反映している。
- ③提案手法は、走行型計測手法を適用できる範囲での判定が可能であり、交通規制を必要としない点検程度の作業量での判定が可能であり、従来の方法に比べて有利である。

6. 結論

本研究では、走行型の画像撮影およびレーザー計測といった最新の計測技術を導入することで、現行の方法に代わる新たなトンネル構造物の健全度評価手法の提案を行い、実際の道路トンネル（Mトンネル）に適用した。本研究より得られた知見は以下のとおりである。

- ① 健全性評価で評価対象とすべき変状は『ひび割れ』である。ひび割れの形状・密度から第三者影響に関する評価を行うことができ、ひび割れのパターン（位置・形状・進展度合い）から構造的な変状に関する評価を行うことが可能である。
- ② トンネルの構造的な健全性を評価することは‘覆工変位の経時変化’と‘ひび割れの進展度合い’を等価として評価することが可能である。これは、トンネルが受ける外力の大きさが覆工の変形量に表れ、その外力に対する覆工の残存耐力がひび割れの進行度合いに現れるからである。外力が大きくとも残存耐力が大きければ健全性は高く、逆に外力が小さくとも残存耐力が小さければ健全性は低い判断できる。
- ③ 上記①②より、覆工表面の変状・変形モードの2検査を行うことで、従来手法より安全側の健全性評価となった。この際、第三者影響と構造的な変状に分けて評価を行い、構造的な変状に関する健全性評価については外力による影響の度合いによってさらに二段階に分けることが重要である。
- ④ ひび割れの計測に対しては走行型の画像計測技術を、覆工の変位計測には走行型のレーザー計測技術を適用することが可能である。これらの技術を利用することで、道路トンネルの健全性評価において、社会資本としての機能維持の観点から望ましくないとされてきた交通の遮断を行う必要がなくなる。

本研究では、上記の点を考慮することで、より客観的かつ適切にトンネルの健全性評価を行う手法を確立した。しかし、トンネル構造物の特性として、トンネルごとに置かれる状況が相当に異なっていることから、依然として、健全性評価手法における専門技術者の経験的な判断は重要である。この点に関して、本研究で提案した評価手法では、例えば、第三者影響に関する健全性評価における step. 0 の即対応すべき変状に対する判定において、経験的な蓄積を考慮に入れた拡張が可能であるし、構造的な変状に対する健全性評価において、ひび割れの形態判定に過去の事例を反映させることが可能である。

また効率的な維持管理を行って行くためには、①点検結果をデータベースにより管理する、②まずは現状（初期値）のデータを取得しておくことが重要といえる。

なお、今後は、各種知見のデータ蓄積に伴う、以下の検証を行っていく必要があると考えられる。

- ① ひび割れ検出に関する精度の検討
- ② 変状（ひび割れ）の自動検出手法の検討
- ③ 煤などで汚れた覆工表面への適用性の検討（撮影手法、変状検出手法）
- ④ 計測データの精度向上：レーザー計測技術）
- ⑤ 覆工変形モード計測のためのデータ処理手法の検討
- ⑥ 実際に稼働しているトンネルへの適用性の検討（実務に向けた現況トンネルへの適用）

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局：道路トンネル点検・補修の手引き【近畿地方整備局版】，2001. 7
- 2) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策，2002. 9
- 3) 佐野信夫，佐藤哲男，馬場弘二，小島芳之，津野究，川島義和，松岡茂：ひび割れ進展と剛性変化に基づいたトンネル覆工の健全度評価，土木学会論文集 F，Vol. 62，No. 2，pp. 194-202，2006. 4
- 4) 小島芳之，津野究，佐野信夫，佐藤哲男，馬場弘二，松岡茂，川島義和：三次元効果を考慮したトンネル覆工のひび割れ進展と力学特性，土木学会論文集，No. 812，VI-70，pp. 163-176，2006. 3
- 5) 朝倉俊弘，安東豊弘，小俣富士夫，若菜和之，松浦章夫：欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果，土木学会論文集，No. 493/III-27，pp. 89-98，1994. 佐野信夫，伊藤哲男，馬場弘二，西村和夫，吉武勇，中川浩二：連続印刷画像を用いたトンネル覆工コンクリートのひび割れ評価におよぼす技術者資格の影響，土木学会論文集 F，Vol. 6，No. 3，pp. 558-566，2006. 9