

| |
|-------|
| 鉄道一般 |
| 車両 |
| 施設 |
| 電気 |
| 運転・輸送 |
| 防災 |
| 環境 |
| 人間科学 |
| 浮上式鉄道 |

トンネルの健全性を診断する

鉄道トンネルにおいては、鉄道構造物等維持管理標準などをもとに定期的に検査および健全性を診断し、必要に応じて補修・補強などの措置が行われています。一方、トンネルの検査は、目視やハンマーで覆工表面を打音するといった人手に頼った方法で行われることが多く、検査の効率化や省力化が求められています。これに対して開発した、総研式打音検査装置、無線センサーを活用したモニタリングシステムおよびトンネル健全度診断システムの3つの技術について紹介します。



津野 究
Kiwamu Tsuno
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員
【専門分野】トンネル維持管理、都市トンネル設計・建設、地下鉄振動



西金 佑一郎
Yuichiro Nishikane
防災技術研究部
地質研究室
研究員
【専門分野】土木地質

はじめに

トンネルは、周りを地山に囲まれた安定した構造物ですが、長期にわたって使用していくためには、適切に維持管理することが重要になります。とくに、1999年に相次いで生じたトンネルのコンクリートはく落問題を契機に、トンネルの維持管理の重要性が再認識されました。現在では、「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編、トンネル）」^{〔註〕}を参考に、定期的に検査および健全性を診断し、必要に応じて補修・補強などの措置が行われています。

トンネルの検査と健全度判定

鉄道トンネルの維持管理の流れを図1に示しますが、目視および打音調

査を基本とした全般検査が2年ごとに実施されます。また、全般検査により判定された変状の程度により、詳細な検査である個別検査が行われます。

トンネルの全般検査は、延長方向に長いトンネルを対象に、目視やハンマーで覆工表面を打音するといった人手に頼った方法で行われることが多く、手間と時間を要します。そのうえ、列車が走行しない深夜など、限られた時間で作業を行わなければならないため、検査の効率化や省力化が求められています。また、検査の結果にどうしても個人差が出てしまうため、定量的に健全度を判定する方法も求められています。

総研式打音検査装置

ハンマーによる打音検査は、迅速か

〔註〕 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）

2007年に国土交通省から通達された「鉄道構造物等維持管理標準」に解説を加えたもので、コンクリート構造物、鋼・合成構造物、基礎構造物・抗土圧構造物、土構造物、トンネルの5分冊から成ります。構造物に要求される性能を設定し、検査を実施して健全度を判定することで要求性能を満たしているかを確認し、健全度に応じて措置し、記録するといった維持管理の標準的な手法が体系化され示されています。なお、トンネルについては、1999年に生じたコンクリートはく落問題を踏まえて「トンネル安全問題検討会」が設置され、2000年に「トンネル保守管理マニュアル」が策定されていますが、ここに示された手法や考え方がおおむね踏襲されています。

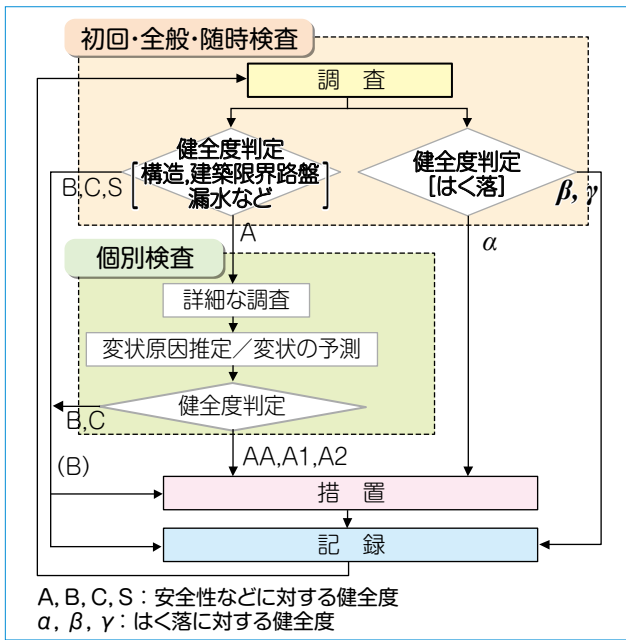


図1 鉄道トンネル維持管理の流れ



図3 総研式打音検査装置の使用状況

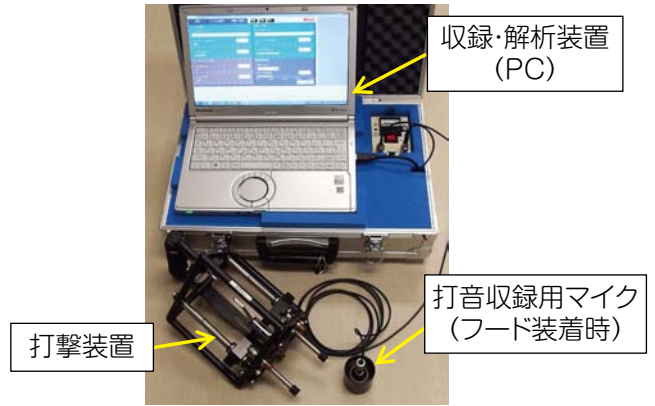


図2 総研式打音検査装置

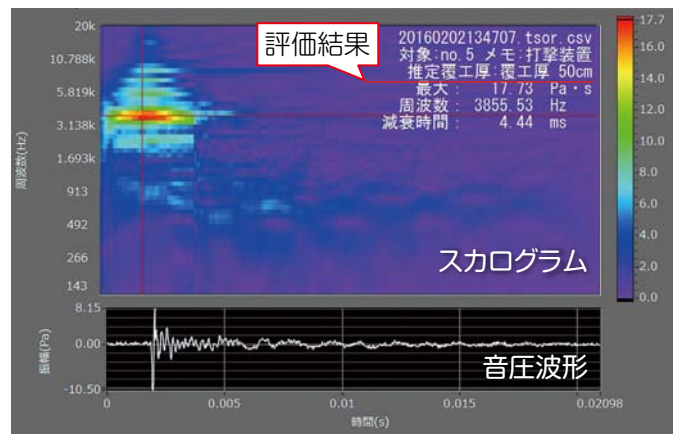


図4 測定結果の例

つ低コストに対象物の状態検査を行える利点がありますが、評価結果に個人差が出るという課題があります。これに対して、総研式打音検査装置では打音測定により得られた音のデータを解析することで、トンネル覆工コンクリートの健全性を定量的に評価することができます¹⁾。

図2は、総研式打音検査装置の外観、図3は現場での使用状況を示しています。総研式打音検査装置は、打撃装置、打音収録用マイクおよび収録・解析装置から構成されており、総重量は約7kgで、現場でも容易に持ち運ぶことができます。使用方法は、まず、打撃装置を用いて、トンネル覆工を一定の力で打撃するとともに、打撃によりトンネル覆工表面から放射される音を

フード付きマイクで収録します。続いて、収録した音をウェーブレット変換(☞参照)して得られるスカログラムから、「トンネル覆工の健全度評価プログラム」によってコンクリートの巻厚やコンクリートの空洞、き裂の有無を評価できます。スカログラムとは、ウェーブレット変換によって得られた信号の大きさを、時間-周波数の平面上に示した図のことです。これらの一連の解析は収録・解析装置の中で自動的に行われます。

図4は、総研式打音検査装置により厚さ50cmで空洞などの欠陥がないコンクリート試験体を打撃し、得られた結果の一例を示しています。スカログラムから卓越する周波数領域、最大強度および減衰時間などが得られます

が、卓越周波数からトンネル覆工コンクリートの厚さを、最大強度および減衰時間から空洞やはく落の有無を推定することができます。図4においては、試験対象が健全かつトンネル覆工の厚さが50cmという結果が出ており、実際の試験体の厚さに対応しています。

なお、収録・解析装置には「不安定岩塊の安定度判定プログラム」も入っており、岩塊の打撃音をフーリエ変換して得られる卓越周波数と最大振幅を用いて、岩盤斜面中の岩塊の安定性を評価できます。

☞ ウェーブレット変換

時間的に周波数特性が変化する信号を時間と周波数の領域で表す、時間-周波数解析の一種です。

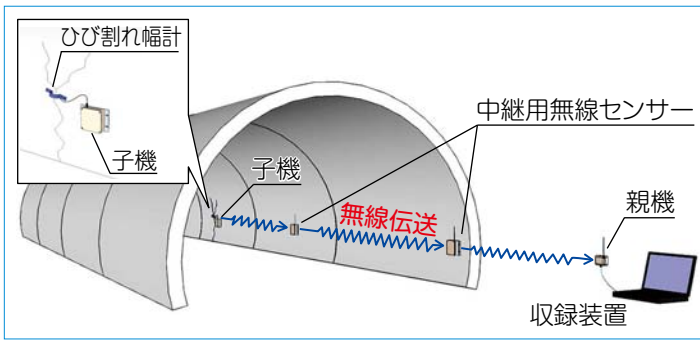


図5 無線センサーを活用したモニタリングシステムの概要

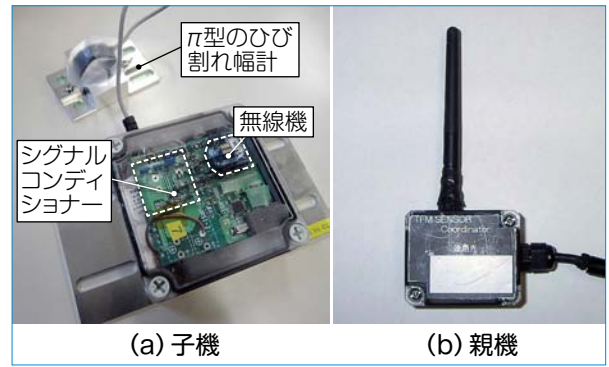


図6 無線センサーの外観



図7 親機一体型収録装置

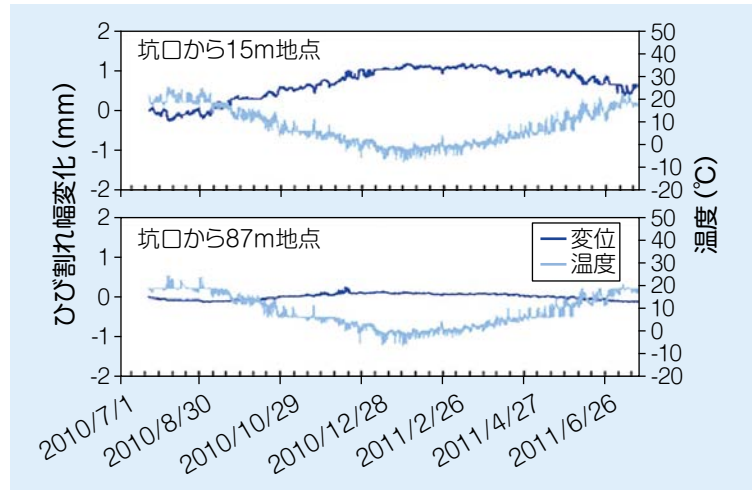


図8 供用中のトンネルにおける計測データ

無線センサーを活用したモニタリングシステム

山岳トンネルの中には、地圧を受けてトンネルが変形したり、トンネル覆工コンクリートにひび割れが入るなどの変状を起こす場合があります。個別検査においては、変状の原因を推定することが重要になりますが、このような地圧による変状に対しては、計測により変状のモードや進行性を把握することが重要になります。これに対して、一般的には内空変位の手動計測など人手による計測が行われていますが、計測頻度に制約があり十分なデータが得られないという課題があります。また、自動計測技術を用いることも考えられますが、コストがかかることや配線作業に膨大な労力を要するなどの課題がありました。

これに対して、無線センサーを活用したモニタリングシステムを用いて状態監視を行うことで、低コストでリアルタイムに変状の進行を把握すること

ができます²⁾。

図5にモニタリングシステムの概要を示します。まず、変状箇所にひび割れ幅計などの変状の進行を計測するセンサーを設置し、これに無線センサーの子機を接続します。つぎに、坑口などのスペースがある場所に無線センサーの親機を設置し、子機から親機まで計測データを無線で伝送するものです。ここでは、ワイヤレスPAN(近距離無線)規格の一種であるZigBee規格の無線を用いており、1~10分間隔でデータを伝送できるようにしています。また、トンネルは延長方向に長い構造物であるため、データの伝送距離が長くなることもあります。中継用無線センサーを用いて長距離でもデータ伝送できるようにしています。

無線センサーの外観を図6に示します。子機は、単三形のリチウム一次電池で駆動することができ、温度計を内

蔵したうえでアンパや電池も含めて縦10cm、横10cm、高さ3.5cmの防水容器に格納し、小型かつ軽量なものです。一方、親機については、データ収録用のパソコンとUSBケーブルを用いて接続し、パソコンから給電することで常時稼働させます。ただし、実際のトンネルでは、データを収録するためのパソコンを設置するスペースを確保できないことや、パソコン用の常時電源が確保できない場面もあります。そこで、電池で駆動させることも可能な親機一体型収録装置を開発しています。

無線センサーを活用したモニタリングシステムは、供用中の鉄道トンネルにおいても計測を行っています。図8は、トンネル覆工にひび割れ幅計を取りつけてモニタリングを行った一例ですが、長期間計測が可能であることを確認しています。

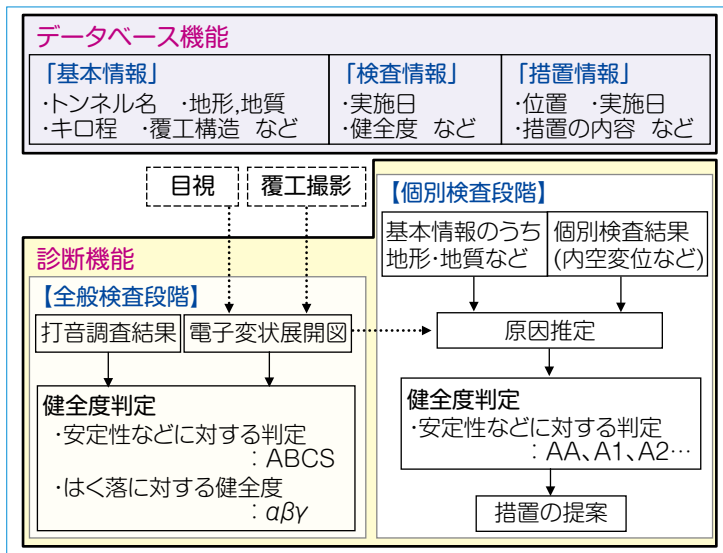


図9 トンネル健全度診断システムの全体構成

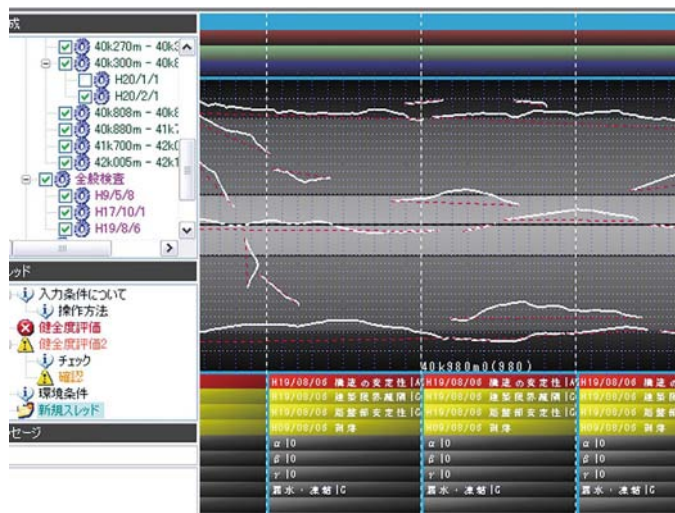


図10 トンネル健全度診断システムの標準画面

トンネル健全度診断システム

鉄道トンネルでは、検査結果をもとに安全性などに対する健全度(A, B, C, S)およびはく落に対する健全度(α, β, γ)を判定し、Aあるいは α と判定した場合には措置が必要になりますが、この判定そのものにも個人差が出るといった課題があります。検査データの電子化やデータベース化の新技术は開発されていますが、健全度の判定は大部分を手作業で行っているのが現状です。

これに対して、トンネルの健全度を自動的に判定することができるトンネル健全度診断システム(TUNOS)を開発しています³⁾。

トンネル健全度診断システムの全体構成を図9に示します。本システムは

データベース機能を有しており、トンネル諸元などの基本情報、検査情報、措置の履歴などの情報を入力します。

システムでは、全般検査の目視調査などで得られたひび割れ情報が入力された電子変状展開図をもとに、打音調査が必要な箇所を提示し、その後実施される打音調査結果などをもとに、はく落に対する健全度(α, β, γ)の判定を自動的に行います。また、安全性などに対する健全度(A, B, C, S)の判定については、電子変状展開図により判定できるものは自動で行い、それ以外のものについては手動で入力します。

その後、健全度Aと判定とされたものについては個別検査が行われますが、これにより得られた詳細な調査データ

をもとに、変状原因の推定、詳細な健全度の判定、対策工の提案をする流れとなっています。ここでは、トンネル模型載荷実験結果や変状トンネルに関するデータなどをもとにあらかじめ作成したひび割れパターンとトンネルの状態とを照合することにより、変状箇所抽出と変状原因の推定を自動的に行うアルゴリズムを内蔵しています。

図10は、トンネル健全度診断システムの画面ですが、ひび割れや漏水などの状況とともに、自動判定した健全度を一括して表示します。その他の機能として、検査結果や措置情報の履歴管理や統計管理、変状写真、管理図面などをシステムに取り込むことも可能となっているため、健全度診断システムとしてだけでなく、台帳管理システムとしての活用も可能なシステムです。

おわりに

近い将来、高度経済成長長期に建設された多くのトンネルが老朽化していくことを考えると、今後トンネル維持管理はますます重要になっていきます。今回3つの技術を紹介しましたが、検査や健全度の判定も含めて、トンネルの維持管理の効率化や省力化を図るための技術開発が重要であると考えています。[RRR]

文献

- 1) 榎本秀明, 横山秀史: トンネル覆工打音検査装置の開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol.44, No.5, pp.392-394, 2006
- 2) 津野究, 蒲地秀矢, 中西祐介, 仲山貴司: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの開発, トンネル工学報告集, Vol.19, pp.245-249, 2009
- 3) 小島芳之, 岡野法之, 津野究, 中西祐, 蒲地秀矢: トンネル健全度診断システムの開発, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演要旨集, pp.915-920, 2008