

地下構造物の維持管理における 新しい非破壊調査方法の適用

Apply new nondestructive testing method to maintenance
of underground structures

堤 知明¹・Jiaye WU²・池尻 健³

Tomoaki TSUTSUMI, Jiaye WU and Takeshi IKEJIRI

In maintenance of underground structures, various investigation to evaluate durability and deterioration of structures is carried out. In this paper, we propose new nondestructive testing method on maintenance (detailed investigation) of underground structures. Those investigation items are depth of the crack, thickness of tunnel lining and strength (uni-axial compression strength) of tunnel lining. We tried improvement of precision of investigation with those methods which used the property of elastic wave. We can investigate those methods only by one system. In addition, an object of this paper is mountain tunnel and urban tunnel.

Key words : new nondestructive test , underground structures, maintenance

1. はじめに

地下構造物の維持管理においては、経年変化により構造物に生じる変状状況の把握および構造物の耐久性評価を目的とする様々な調査が実施されている。その中で、弾性波の諸特性を利用する非破壊調査方法は、必要な情報を広範囲で迅速に得ることが可能である。また、同一調査箇所における変状の進行も評価することが可能である。現状では、それらは、トンネル等の地下構造物の維持管理において、構造物に生じる変状を早期に捕らえその状態を把握することを目的とする「一次点検」結果の判定に基づいて実施される、変状状況の把握、変状原因の推定、構造物としての健全性、対策工の必要性や緊急性の評価・判定を目的とする「二次点検」を対象に適用されている¹⁾。

本論文では、地下構造物の二次点検において非破壊調査方法が適用される調査項目の中で「ひび割れ（深さ）」「覆工巻厚」「覆工コンクリート強度の推定」を調査対象とした新しい非破壊調査方法を提案する。それらは、いずれも弾性波の諸特性を利用し、調査精度の向上を試みたものである。また、それらを地下構造物等に適用した事例を紹介する。なお、本論文の対象とする地下構造物は、主にトンネル（山岳トンネルおよび都市トンネル）である。

2. 地下構造物の維持管理における非破壊調査方法の適用

地下構造物（トンネル）の維持管理における検査・点検は、一般的に変状の発現を早期に捉えてその状態

キーワード：非破壊調査方法、地下構造物、維持管理

¹正会員 東京電力 株式会社 技術開発研究所 設備基盤技術グループ

²正会員 株式会社 セントラル技研 計測診断グループ

³正会員 株式会社 セントラル技研 地盤技術部

把握する目的で実施される「一次点検」と、一次点検結果の判定に基づいて実施され、変状状況の把握、変状原因の推定、構造物としての健全性、対策工の必要性や緊急性の評価・判定等、変状に関する詳細な情報を得る目的で実施される「二次点検」に分類される¹⁾。それらの中で、本論文で着目する調査方法である非破壊調査方法は、「二次点検」においてよく適用されている²⁾。なお、事業者等によって、「二次点検」の名称は異なっている。表-1にそれらの代表的なものを整理する¹⁾。

表-1 各事業者等における二次点検の名称

用途	事業者名等	二次点検
道路	一般国道トンネル	調査
	日本道路公団	調査
鉄道	鉄道事業者共通	個別検査
水路	東京電力	詳細調査
	東京都下水道局	調査
	一般農業用水	調査
送電・通信	NTT東日本	精密点検
	NTT西日本	
	東京電力	詳細点検

二次点検の中で非破壊調査方法が適用される項目として、構造物調査の中の「ひび割れ調査」、「覆工巻厚および覆工背面調査」、「材料試験」および「コンクリートテストハンマー（コンクリート強度の簡易推定）」が挙げられる²⁾。本論文では、上記の調査の中で、鉄筋探査計等による鉄筋被り測定、自然電極電位等による鉄筋の錆び測定等の「材料試験」を除くものに着目し、それらを対象とした新しい非破壊調査方法を提案する。具体的には、現状の調査方法の問題点を明確にし、それらを解決可能な新しい調査方法の原理およびシステムを提案する。そして、それらの妥当性を、実際の現場等に適用した事例によって検証する。

なお、一次点検の中でも、「打音調査」においては、非破壊調査方法が適用されている²⁾。ただし、本論文では「二次点検」に着目し検討したので、二次点検以外に適用される非破壊調査方法は除外している。打音調査に関しては、衝撃弾性波の諸特性に着目した新しい非破壊調査方法（剥離探査技術）を他の文献において提案している³⁾。

3. 地下構造物の維持管理における新しい非破壊調査方法

(1) ひび割れ調査

a) 現状の調査方法

ひび割れはトンネルの変状現象で最も一般的に認められるものであり、それらの形態、規模、パターン等を観察することで覆工への荷重のかかり方、変状の進行、変状原因等がある程度推定することが可能である。現状のひび割れ調査としては、ひび割れ幅、長さ、段差の測定およびそれらの分布を図示することが挙げられる¹⁾。ただし、ひび割れの進行を評価する上で、上記の測定項目の変化は非常に小さく、それらを的確に評価することは困難である。そこで、上記の項目に加え、「ひび割れ深さ」を測定する事例も見られる²⁾。

ひび割れ深さの測定法としては、電気的な外力により発振される超音波の伝播時間に着目した超音波法が一般的である⁴⁾。超音波法では、縦波がひび割れ界面で回折することを利用している（ T_c - T_0 法、 T 法等）⁴⁾。ただし、ひび割れが深くなるほど縦波が小さくなる（エネルギーが小さい）。また、ひび割れ中に充填物が存在する場合それらの接触部に縦波が伝播するため、ひび割れ深さを過小評価することが指摘されている⁴⁾。

b) 調査原理

現状の超音波法の問題点を踏まえ、本論文では、新しい非破壊調査方法を提案する。本方法は、調査対象であるコンクリートの表面を力学的外力（ハンマー）により打撃した際に発生する衝撃弾性波の中の「レイリー波」に着目している。レイリー波は弾性波の一種で、媒体表面より一定深度の範囲にしか存在しないことから、表面波に属する。レイリー波の特徴としては、媒体表面を打撃した際に発生する弾性波の中ではエネルギーが最大であること、それらが伝播する際に媒体のせん断剛性の影響を受けるため充填物の存在が結果に影響を与えにくい等が挙げられる。従って、レイリー波に着目した本方法を実施することで、前述の超音波法における問題点を解決することが可能である。レイリー波の主な特性を図-1に示す。

本方法の概念を図-2に示す。レイリー波の伝播過程では、波頭が広がるにつれて単位面積でのエネルギー密度は減少する（幾何減衰）。また、コンクリートには粘性による減衰も存在する（材料減衰）。従って、それらの減衰を補正することにより、波のエネルギー（振幅）を常に一定な値に保つことが可能である。ただし、媒体中にひび割れが存在するとレイリー波がある程度遮断され、ひび割れ以降では振幅が減少する。つまり、ひび割れの存在により、その前後における波の振幅は変化する。このとき、ひび割れが深くなるほど、

その変化は大きくなる。以上のことから、幾何減衰および材料減衰を補正し、レイリー波の振幅の変化を測定することで、ひび割れの有無および深さが推定可能である。なお、本方法によりひび割れ深さを測定するためには、ひび割れ深さとひび割れの存在により変化する振幅（振幅比）との相関を評価する必要がある。それらの相関について、著者らが人工ひび割れを有する室内試験結果により定量的に評価している⁴⁾。

c) システム構成

調査システムは、ハード部分（計測ドライバー）とソフト部分（解析および処理ソフト）から構成されている。ハード部分のシステム構成を図-3に示す。ソフト部分は、独自に開発した解析および処理ソフトにより、採取したデータのノイズ除去および分析（例えば、双方向発振法⁴⁾）を実施し、ひび割れ深さを算出する。また、上記の計測ドライバー、解析および処理ソフトは、すべてC++または VisualC++を用いて独自に開発したものであり、簡易にソフトの改良およびメンテナンスが可能である。なお、本システムによる調査方法は、調査対象のひび割れを挟むように加速度センサーを対象構造物に手で圧着し、その近傍をハンマーで打撃することにより生じたレイリー波を測定する。調査状況を写真-1に示す。

d) 調査結果の妥当性の検証

地下構造物（水路トンネルの覆工コンクリート）を対象に、本方法を適用した事例を示す。

具体的には、覆工コンクリート（3 箇所）に生じたひび割れに対して、本方法により算出したひび割れ深さと調査と同一箇所から採取したボーリングコアの目視観察（以下コア抜きと記す）により算出したひび割れ深さを比較する。図-4に本方法による結果（推定値）とコア抜きによる結果（実測値）との比較を示す。同図より、本方法による推定値は、コア抜きによる結果と良好に一致している。また、図-5に地下発電所（A 発電所）妻壁で生じたひび割れの深さを対象に、それらを経時的にモニタリングした事例を示す。図中、縦軸の「ひび割れ深さ増加度」とは、ひび割れ深さの増加を評価するパラメータで、各調査結果と各調査箇所の初回の調査結果との差を初回の調査結果で除し無次元化したものである。同図より、調査箇所①および②はひび割れの深さの増加が収束傾向にあることから、ひび割れの進行性は認められない。ただし、調査箇所③に関しては、増加の勾配は小さくなっているもののひび割れ深さは増加傾向にあり、ひび割れの進行性が認められる。なお、同時に測定したひび割れ幅は、各調査箇所ともに変化が認められなかった。

上記の事例は、地下構造物を対象としたものであるが、過去に本方法を適用しひび割れ深さを算出した最大値は100cm（探査対象：コンクリートダム）であり、その結果と目視観察結果は良好に一致した⁵⁾。

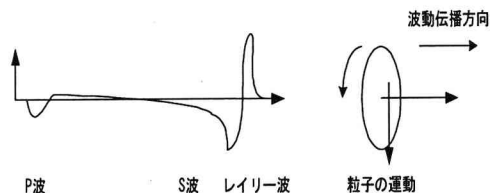


図-1 レイリー波の主な特性

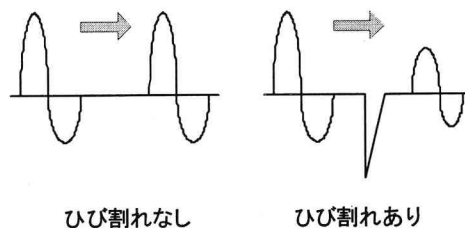


図-2 本方法の概念

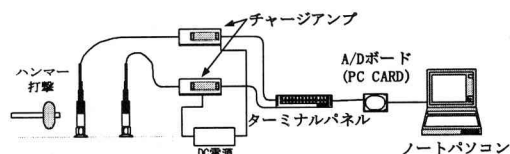


図-3 調査システム（ハード部分）の構成



写真-1 調査状況

(2) 覆工巻厚および覆工背面調査

a) 現状の調査方法

覆工巻厚および覆工背面調査に関しては、現状では、ボーリングによる局所破壊調査方法および非破壊調査方法が適用されている¹⁾。非破壊調査方法の代表的なものとしては、打撃音法、超音波法、電磁波法、衝撃弾性波法、音響弾性波法、熱赤外線法が挙げられる²⁾。この中で最も広く適用されている調査手法は、電磁波法である⁶⁾。電磁波法は、広範囲を迅速に調査可能という利点を有している。ただし、覆工巻厚が大きく(30cm以上)になると電磁波の減衰が激しく調査精度が低下する。また、鉄筋および水(漏水等)の存在が調査精度に影響を与える等の問題点も指摘されている⁶⁾。

b) 調査原理

現状で最も適用されている電磁波法における問題点を踏まえ、本論文では、調査対象であるコンクリートの表面を力学的外力(ハンマー)により打撃した際に発生する衝撃弾性波(Impact-Echo Method)に着目した方法を提案する。衝撃弾性波法は、入力エネルギーを考慮することで電磁波法よりも深い調査深度においても適用可能である。また、鉄筋や水分の影響を電磁波よりも受けにくい。さらに、電磁波法では得ることができない覆工内部、覆工と地山との境界面等の力学特性が評価可能である。

衝撃弾性波法の調査原理は、以下のとおりである。覆工コンクリートのように調査対象が一般的なコンクリート構造物に比べ薄い(板状)場合、覆工表面に垂直にハンマー打撃による衝撃弾性波を入射すると、覆工表面と境界面(覆工と地山の境界面)でそれらが多重に反射し、境界面までの距離(壁厚:覆工巻厚)を h 、弾性波の縦伝播速度を V_p とすると、 $f = V_p / (2 \times h)$ にて周波数応答にピークが検出される(図-6)。従って、受信波の周波数分析を実施し、入射波以外の波の影響(例えば、発振の自由振動、調査対象の自由振動等)を除去すれば、上記の卓越周波数 f (卓越周期 $T = 1/f$)を特定することが可能である。そして、上記の f を上式に代入すれば、 h を算出することが可能である。なお、本方法においては、覆工と地山(覆工背面空洞)との境界部における反射波に着目している。従って、本論文における調査項目としては、「覆工巻厚の測定」に限定している。ただし、今後は、衝撃弾性波法の特徴である力学特性の評価、特に覆工と地山(覆工背面空洞)との境界部の力学特性の評価を試みる。

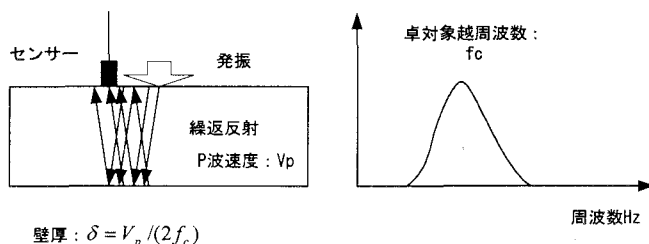


図-6 衝撃弾性波法の調査原理

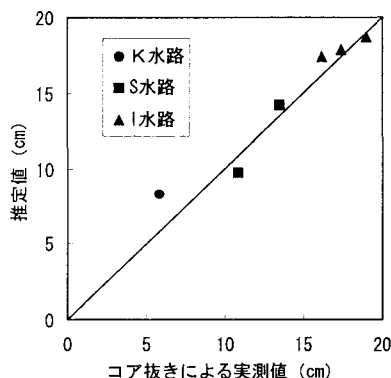


図-4 水路トンネルを対象とした調査結果

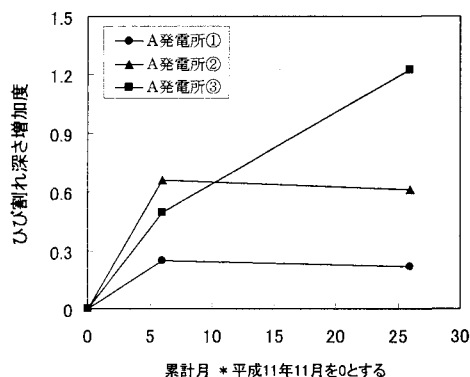


図-5 モニタリング結果 (A 発電所)

c) システム構成

調査システムは、ソフト部分（解析および処理ソフト）を変更するのみで、図-3 に示す調査システムと同様のものが適用可能である。なお、本方法は、調査対象に加速度センサー（1 個）をホットボンドにより固定し、その近傍をハンマーで打撃することにより生じた衝撃弾性波を測定する。調査状況を写真-2 に示す。

d) 調査結果の妥当性の検証

縦 100cm×横 100cm×高さ 25cm のコンクリートブロック供試体上面の 5 箇所（①～⑤）にセンサーをホットボンドで固定し、本方法を用いてコンクリートブロック供試体の高さ（25cm）を推定した。なお、受信波の周波数分析方法に関しては、現状の方法の多くは、FFT を採用しているのに対し⁶⁾、本方法では、解析精度の向上を目指し、MEM を採用した。調査結果を表-2 に示す。同表に示す推定高さ h は、 $h = V_p \times (T/2)$ { V_p : P 波速度、 T : 卓越周期} から算出している。なお、 V_p は別途測定した結果により、 $V_p = 3.888 \text{ km/s}$ を採用している。

同表より、供試体高さは平均値で 23.484 cm（標準偏差：0.5567cm）と推定され、供試体高さの実測値（25cm）とほぼ整合した結果となっている。

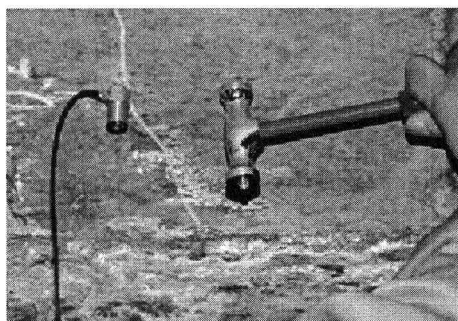


写真-2 調査状況

表-2 調査結果（高さの推定）

No.	卓越周期 ms	推定高さ cm
①	0.117	22.745
②	0.121	23.522
③	0.120	23.328
④	0.125	24.300
⑤	0.121	23.522
平均	0.121	23.484
標準偏差	0.0029	0.5567

(3) 覆工コンクリート強度の推定

a) 現状の調査方法

覆工コンクリートの強度を推定する調査に関しては、ボーリングなどにより試料を採取し一軸圧縮試験を実施する局所破壊調査方法および非破壊調査方法が適用されている。非破壊調査方法の代表的なものとしては、コンクリートの表面をばねのついた鋼棒で打撃し、跳ね返る距離（反発値 R ）からコンクリートの強度（一軸圧縮強度）を推定するコンクリートテストハンマー法が挙げられる¹⁾。コンクリートテストハンマーは、非常に簡易な調査方法であり、実務において広く適用されている¹⁾。ただし、本方法による調査結果は、調査対象（打撃面）の状態（骨材有無、含水状態、平滑度等）、機械特性（ハンマーとガイドバー間の摩擦等）に大きく影響される⁷⁾。図-7 は、水路トンネルにおける、コンクリートテストハンマーによる一軸圧縮強度推定値と同調査箇所におけるボーリングサンプリングコアを対象に実施したコアの一軸圧縮試験結果を比較したものである。同図より、両者の相関係数は 0.3 と非常に低い。

b) 調査原理

覆工コンクリート強度の推定を現状の方法よりも精度よく実施する目的で、本論文では、調査対象であるコンクリートの表面を力学的外力（ハンマー）により打撃した際に発生する表面波（レイリー波）に着目した方法を提案する。表面波（レイリー波）は前述のよ

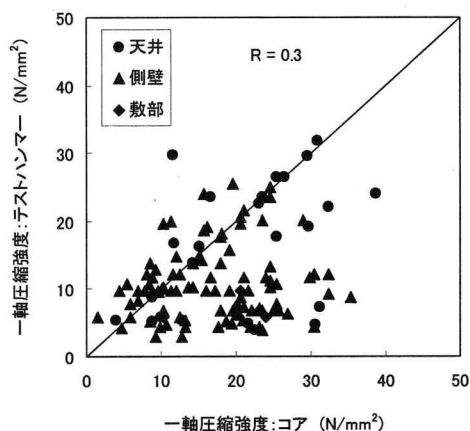


図-7 テストハンマーの調査精度

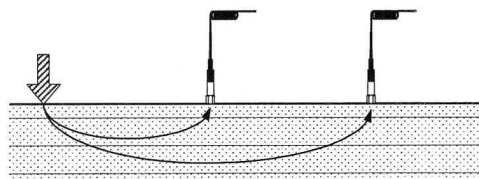


図-8 表面波の伝播速度の測定

うに、コンクリートのせん断特性に大きく影響を受けるため、それらの伝播速度を的確に評価することで、コンクリートの強度（一軸圧縮強度）を精度良く推定可能である。

調査原理としては、図-8に示すように表面波の伝播速度を測定する。そして、覆工コンクリートを対象とする際は、表面波の伝播速度から波長および覆工コンクリートの境界条件（覆工巻厚）を考慮して、等価レイリー波速度を算出する⁷⁾。なお、等価レイリー波速度の算出に必要な覆工巻厚は、前述（2）の調査方法により算出可能である。

c) システム構成

調査システムは、ソフト部分を変更するのみで、図-3に示す調査システムと同様のものが適用可能である。なお、本方法は、調査対象に加速度センサー（2個）を調査対象に圧着し、その近傍をハンマーで打撃することにより生じた表面波の伝播速度を測定する。調査状況を写真-3に示す。

d) 調査結果の妥当性の検証

水路トンネル（覆工コンクリート）、コンクリートブロック供試体、ダム堤体およびコンクリート擁壁を対象に、本方法により算出した等価レイリー波速度と同一調査箇所におけるボーリングサンプリングコアを対象に実施したコアの一軸圧縮試験を比較したものを図-9に示す。同図より、両者の相関係数は0.69であり、比較するパラメータは異なるものの、調査結果と実測値（コアの一軸圧縮強度）との比較という点では、コンクリートテストハンマーにおける両者の相関関係（前述図-7）を大きく上回っている。すなわち、本方法で等価レイリー波速度を算出し、例えば図-9の相関関係を利用すれば、調査対象の一軸圧縮強度を実務において広く適用されているコンクリートテストハンマーよりも精度よく推定可能である。

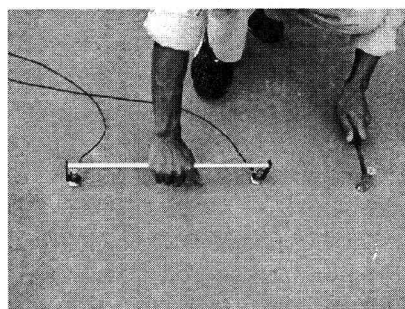


写真-3 調査状況

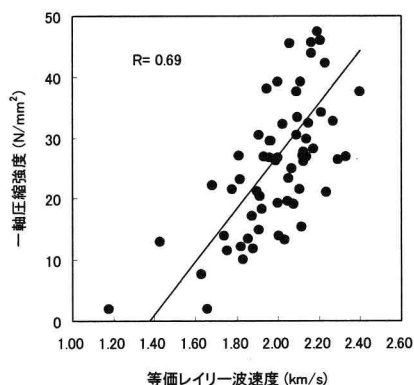


図-9 本方法の調査精度

4. おわりに

本論文では、トンネルの二次調査項目である「ひび割れ（深さ）」、「覆工巻厚」「覆工コンクリート強度の推定」を対象に、新しい非破壊探査方法を提案した。なお、それらの調査方法の大きな特徴として、図-3と同様の調査システム（ハード部分）で、上記の調査項目すべてを実施可能という点が挙げられる。それにより、現状の調査方法と比較して、より迅速な調査が実施可能と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルの維持管理，pp.27-90，2005.
- 2) 例えば、鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案），pp.52-79，2000.
- 3) 日比野悦久，黒川 聡，呉 佳暉，江川顕一郎：地下空間保守管理のためのライニング剥離探査技術，地下空間シンポジウム論文・報告集（査読付論文），Vol.7，pp.99-108，2002.
- 4) 小林賢一，荒木宏則，海野忠行，池尻 健：地下空間保守管理のための新しいひび割れ探査技術，地下空間シンポジウム論文・報告集（査読付論文），Vol.6，pp.69-78，2001.
- 5) 小林順二，鶴田 滋，江川顕一郎，池尻 健：地下発電所の維持管理におけるモニタリング手法の提案，地下空間シンポジウム論文・報告集（査読付論文），Vol.8，pp.49-58，2004.
- 6) JTA 保守管理委員会：トンネルの新しい検査手法，トンネルと地下，Vol.27，No.11，pp.49-56，1996.
- 7) 堤 知明，呉 佳暉，江川顕一郎：表面波を用いたコンクリート強度の新しい測定技術，コンクリート構造物の非破壊探査への期待論文集（Vol.1），pp.65-74，2003.