# 信号伝播モデル法を用いた トンネル覆工厚及び空洞厚の高精度解析システム

### 1. はじめに

ー般に、電磁波レーダによるトンネル覆工厚及び空洞 厚の解析は濃淡画像目視方式(以下,「B モード画像法」と いう)で行われているが、熟練者でないと精度のよい解析 は困難である。加えて、空洞の存在が確認できても、覆工 表面及び空洞の上面・下面からの反射波のダブりにより、 空洞厚は正しく読み取れない。そこで、解析経験が少ない 者でもトンネル覆工厚及び空洞厚を高精度に解析して図 化するシステム(以下、「本解析システム」という)を開発 した。以下では、従来の B モード画像法による解析方法 について概説した後、本解析システムの原理・解析方法に ついて述べる。また、本解析システムによるコンクリート 試験体及び山岳トンネルでの検証結果例について紹介す る。

# 2. B モード画像法による解析方法

B モード画像法では,図-1に示すような濃淡画像(受信 器に得られた反射波形の振幅にしきい値を設け,振幅に 応じて色分けして濃淡表示した画像)から,受信信号波形 (A モード信号)も参考にしながら,トンネル覆工厚や空 洞厚を経験的に読みとっている。





上図は、周波数400MHz のレーダを用いて、覆エコンク リート厚32cm,空洞厚30cm のコンクリート試験体を対象 に計測した B モード画像及び A モード信号を示したもの であるが、熟練者でないと、両画像から覆工底面深度及び 空洞底面深度を正確に読みとるのは困難である。

#### 3. 本解析システムの原理・解析方法

#### (1) 本解析システムの原理

本解析システムは、山口大学名誉教授田中正吾博士開 発による信号伝播モデル法を用いている。この解析手法 は、レーダにより得られる受信信号を、表面波、覆工底面 波、空洞底面波の3つの反射波の1次結合(つまり重ね合 わせ)で作られる合成波形でマッチング(合致)させるこ とにより、3つの反射波を分離し、このときの各反射波の 株式会社ソイル・ブレーン 〇駒崎 友晴,渡邉 一 山口大学名誉教授 田中 正吾

伝播時間と極性により,レーダ走査線上の各ポイントで 覆工厚・空洞厚を求めるものである(図-2参照)。つまり, 表面波,境界面波(覆工底面波,空洞底面波としての)を適 切なコンクリート試験体を用いて予め作成しておき,こ れらを適宜時間シフトしつつ,大きさを調整の上重ね合 わせた合成波形を用いて実際の受信信号に合わせるよう に最適な伝播時間を求め,覆工厚及び空洞厚を計算する 解析システムである。



# (2) 本解析システムによる解析方法

本解析システムは、標準仕様として、周波数400MHz,サ ンプル数512,収録時間25ns(解析対象深度:最大1m 程度) のレーダデータに対応したものである。データ解析は、最 初に「状況把握解析(MODE0)」を行い、その次に「詳細解 析(MODE1)」を行う。

# ① 状況把握解析(MODE0); 図-3参照

まず,解析にあたって状況把握解析を行う。つまり,解 析時間を大幅に短縮化するため,覆工底面深度をほぼ正 確に予測できる「かい離度」画像(受信信号に表面波と食 い違う波形が現れる深度を表示させるための尺度[単位 は deg]を画像化したもの)を考案した。このかい離度画 像で濃度が濃くなる(濃い朱色となる)上端の際を点で結 んで折れ線の「覆工底面深度プロファイル」を作成する。 この際、支保工がある箇所では丸っぽい(上に凸の)濃淡 画像が出現するが、この部分は無視する。 次に、ミスマッ チ角(受信信号と基本表面波の食い違いの尺度[単位は deg])のグラフから空洞の有無判定を行う。ミスマッチ角 が小さければ「空洞なし」,大きければ「空洞あり」と判定 するが,覆工厚が30cm 前後であれば,ミスマッチ角の閾 値としては25(deg)程度が妥当である。覆工厚がそれ以上 であれば若干小さめの値を採用するのが妥当であるが, あくまでこの値を参考にしつつ,走査方向のミスマッチ 角の変化をみて閾値を決めるのが合理的である。





図-3 状況把握解析(MODE0)

#### ② 詳細解析(MODE1); 図-4参照

状況把握解析後に【解析実行】を選択すれば,覆工底面 と空洞底面の生の計測値のみならず平滑深度が表示され る。なお,支保工位置近辺では,支保工波の影響で覆工底 面と空洞底面の深度計測値に誤差が生じるので,そのと きは支保工前後の計測値で内挿することが合理的であ る。ところで,先に,空洞箇所の決定についてミスマッチ 角を参照する方式を述べたが,空洞を仮定したときの覆 工底面波と空洞底面波の振幅を出力した図の符号によっ ても,空洞箇所の妥当性が検証可能である。例えば,図-4 の例では,走査距離にして270cmから530cm辺りまでの範 囲で覆工底面波の振幅が正の値となっており,空洞があ ることを示している(通常は比誘電率の違いで空洞無し の箇所ではゼロ近辺の値,あるいは負値)。



# 4. 本解析システムによる検証結果例

本解析システムによる検証結果例を以下に示す。 (1) 検証例①:コンクリート試験体での検証例

コンクリート厚32cm,空洞厚30cm のコンクリート試験 体に対し,エッジ効果の大きい両端を除く中央部の覆工 厚計測値は31.8cm で,実測値(32.0cm)に対する誤差は 0.2cm,空洞厚計測値は28.3cm で,実測値(30.0cm)に対す る誤差は1.7cm であった。



図-5 コンクリート試験体による検証結果

#### (2) 検証例②: 山岳トンネルでの検証例

コア抜き位置(走査距離250cm)での覆工厚計測値は 31.7cm で,実測値(24.5cm)に対する誤差は7.2cm,空洞底 面深度計測値は71.7cm で,実測値(74.0cm)に対する誤差 は2.3cm。コア抜き位置と走査ラインの隔たりが40cm あ るので,かなりの高精度計測。また,ここではミスマッチ 角の閾値は23(deg)としたが,基準値25(deg)でもほとん ど同一であった。



図-6 山岳トンネルでの検証結果

# 5. おわりに

上記の検証結果から、本解析システムが高精度である ことが立証できた。本解析システムによれば、検査経験が 少ない者でも短時間講習による教育・訓練で使用するこ とができ、省人化・省力化によるコスト削減・工期短縮が 可能である。今後は、周波数400MHz 以外のレーダデータ (300MHz, 800MHz 等)を対象とした解析システムへの拡張 や支保工波の影響を除いた解析システムへの改善を行っ ていく予定である。なお、本解析システムは現在、 NETIS(新技術情報提供システム)に登録申請中である。

#### 《引用・参考文献》

 トンネル覆工厚及び空洞厚の図化解析ソフト開発事業 研究会((一社)全国地質調査業協会連合会):「覆エコンク リート厚・空洞厚解析システム」取扱説明書(案),2021.1
2)田中正吾:電磁波レーダーを用いた先端的非破壊検査 技術,(社)日本非破壊検査協会,2010

# [046]

# レーザースキャナと AI を活用したトンネル点検の効率化

# 1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に整備したインフラが今 後一斉に老朽化することが見込まれているため、計画的 にインフラを維持管理、更新することでトータルコスト の縮減や平準化を図ることが求められている。その一つ の手法として、社会インフラの状態の効率的な把握を可 能とするモニタリング技術の開発と導入が推進されてい る。トンネル点検において時間とコストを要する変状の スケッチ作業を高精度かつ効率化するために、筆者らは 3Dトンネルレーザー計測システム(以下、本システムと する)とAIによる自動図化手法を開発した。

# 2. 3Dトンネルレーザー計測システムの開発

本システムの類似技術として走行型計測が開発されて いるが、道路トンネル点検要領1)では交通規制を伴う点検 作業が基本となっていることから、走行型計測は通常点 検に含まれず、調査費用が別途必要となる。そこで本シ ステムは、以下の点を重視して開発した。

- 三次元点群データを得ることができ、トンネルのア ーチや側壁部の変形や路面変位を捉えることがで きること
- 三次元点群データを活用し、高精度の二次元覆工展 開画像を生成することで、変状のスケッチ作業を省 略でき、作業の効率化と変状展開図の高精度化を両 立すること
- ③ 点検作業に追従してレーザー計測を行い、点検作業 と同時に完了できること
- ④ 計測機器は一般的なレーザースキャナとし、専用計 測車両を用いる走行型計測と比べて安価に計測で きること

本システムでは市販のレーザースキャナを使用し、予 め計測条件を設定しておくことで、計測における熟練し た技能は不要となり、トンネル内で簡易に計測作業が実 施できる。また赤外線レーザーを使用していることから、 計測時にトンネル覆工面を照らす必要はなく、トンネル 照明の逆光も計測の障害とならない。本システムの計測 状況を図-1に、計測仕様を表-1に示す。

# 3. 三次元点群データの計測および AI による覆工展 開画像の解析手順

本システムでは三次元点群データを解析し、二次元覆 工展開画像を生成する。一般的にトンネル点検で作成さ れる手書きの変状スケッチに比較して、三次元座標を持 つ点群データを解析して生成した覆工展開画像の位置精 度は高く、また附属物や対策工など変状以外の対象物も

応用地質株式会社 〇佐藤 元紀, 大塚 弘貴, 莖澤 絵理架, 張 予坤

記録でき、かつ画像同士を合成する必要がなくシームレ スな展開画像を得ることが可能である。さらに、この画 像を活用し高精度な変状展開図を作成でき、次回点検時 の変状の進行性の確認に有効である。図-2~図-5に計測 および解析手順を示す。



図-1 計測状況

表-1 計測仕様 2)

計測頻度	10m 程度毎に 1 回
測定時間	2 車線道路トンネル 10m あたり 3 分程度
使用時間	最大5時間(バッテリー交換可能)
周囲温度	5~40°C
計測条件	トンネル内に濃霧なし
	計測器レンズに結露なし
計測器	重量:7.2kg
	寸法 : 幅 1.2×奥行き 1.1×高さ 1.75m
	三脚を別途使用
センサー	精度 0.015°; 測定範囲±5°
測定誤差	±2mm (測定距離 25m)



図-2 三次元点群データ例



図-3 覆工展開画像生成



図-4 AIによる変状抽出



図-5 CAD 出力



図-6 圧縮センシング技術による画像の鮮明化 3)

手順1 トンネル坑内でレーザースキャナを用いて、トンネル覆工および路面の三次元点群データを計測する。 計測間隔は10m程度とし、トンネル全線を計測する。

手順2 専用ソフトで三次元点群データを自動解析し二次元覆工展開画像を生成する。このとき10m ごとに計測した点群を合成する必要はなく、計測回数ごとの画像を生成できる。また画像解析技術の「圧縮センシング技術」を応用し、画像の端部に発生する陰影を補正し、鮮明な画像を取得することが可能である。

手順3 生成した覆工展開画像には現地でチョークによりマーキングした変状が記録されており、それを AI により自動で抽出する。AI には予め変状データの教師ラベルを学習させ、変状(ひび割れ)のみを抽出できる。

手順4 抽出した変状は、覆工展開画像上で強調表示で きる。さらに抽出した変状のみを CAD に自動で出力する ことが可能であり、点検調書(変状展開図)作成を効率 化できる。

#### 4. おわりに

レーザースキャナにより計測したトンネルの三次元点 群データから高精度な二次元覆工展開画像を生成し、AI により変状を自動図化する手法を開発した。これは熟練 した点検員でなくとも作業ができ、トンネルの変状を効 率的、高精度に把握することが可能である。今後、検証 を深め、より高度なシステムの開発を目指す。

# 《引用·参考文献》

- 1)国土交通省道路局国道・技術課:道路トンネル定期点検 要領,2019.3.
- 2)公益社団法人土木学会:3Dトンネルレーザー計測シス テムの開発と計測事例報告,令和2年度全国大会第75 回土木学会年次学術講演会講演概要集,2020.9.
- 応用地質株式会社:News Release トンネル点検を効率 化・高精度化する AI システムを開発, 2020.9. https://www.oyo.co.jp/oyocms\_hq/wpcontent/uploads/2020/09/20200910\_newsrelease\_oyo.pdf(確認日:2021.6.4)

トンネル路盤下の地山性状について

株式会社北杜地質センター 村上 利之

# 1. はじめに

東日本地域における鉄道の山岳トンネルは、供用開始 から40年近く経過するため、構造物を支持する地山の状 態を評価しておくことは必要と考えられる。こうしたこ とから、トンネル路盤下の地山状況を確認するため、路 盤調査を2018年より2年に亘って実施している。そこで、 2019年度までのボーリング調査及び室内試験の結果を整 理し、トンネル路盤下の地山の性状について検討した結 果を報告する。

# 2. 地山性状の評価で着目した現象

地山の経年劣化に伴って生じる現象としては、主に地 圧の発生や地山の流出等があげられる。このうち、地山 の流出は岩石自体の密度低下や劣化によって強度が低下 し、粒子が移動・流出してしまうことが原因とされる。

トンネル標準示方書(2016)では、地山が流動化する 指標として、①均等粒径の砂(細粒分含有率 $\leq$ 10%、均等 係数 $\leq$ 5、飽和砂)②地下水位の高い砂及び砂礫層、③不 透水層中に介在する帯水砂層からなる地山、④単位体積 重量(乾燥) $\leq$ 1.70g/cm<sup>3</sup>、⑤土粒子の密度 $\leq$ 2.65g/cm<sup>3</sup>、 ⑥均等係数 $\leq$ 4、⑦D50 $\leq$ 1.50 mm、⑧D10 $\leq$ 0.15 mmに該当 する土砂である等としている。

#### 3. 調査対象箇所

路盤調査は東北地区の8トンネル(以下、TN-A~TN-H) で実施した。調査は削孔箇所を1エリア3孔(上り線側1孔、 下り線側2孔)とし、路盤下の地山条件が異なる13エリア を設定した。トンネル周辺の地山は前期白亜紀の花崗岩 類、新第三紀中新世及び第四紀更新世の凝灰岩類や砂岩 類より構成される。

#### 4. 調査内容

コアボーリングは電動コアドリルで 66mmのダブルコ アチューブを使用し、鉛直下方に最大深度3.0m まで削孔 した。採取したコアから各種岩石試験に用いる供試体を 選定し、岩石の一軸圧縮強度試験、浸水崩壊度試験、土 の粒度試験を実施した。

### 5. 調査結果

#### (1) コアボーリング

コアボーリングの結果、コンクリートの厚さは路盤面 から0.3~1.1m 位の範囲であった。地山との境界部には 一部注入痕の存在が認められたが、掘進時に試錐機が急 激に抜け落ちるような明瞭な空隙の存在は確認されなか った。また、測定された地下水位は路盤面より0.1~1.1m の範囲にあり、全地点のうち約6割弱の地点において地山 上部のコンクリート内で地下水位が確認された。

#### (2) 岩石の一軸圧縮試験

トンネル路盤下の地山の圧縮強度を把握するため、計 133 供試体を用いて試験を実施した。図-1 に採取深度と 一軸圧縮強さの関係を示す。一軸圧縮強さ(qu)は、1.2 ×10<sup>-2</sup>  $\leq$  qu  $\leq$  2.1×10<sup>2</sup> (MN/m<sup>2</sup>)の範囲にあり、全供試体 のうち約7割弱の供試体が qu  $\leq$  15 (MN/m<sup>2</sup>)の「軟岩~ 土砂相当」に区分された。このうち、特に TN-H は固結度 の小さい地山となっているが、これは主に新第三紀中新 世の砂岩類からなり、全体的に土被りが小さい上に、ト ンネル付近まで風化が進行していることが要因として考 えられる。





#### (3) 浸水崩壊度試験

固結度の小さい地山は、車両通過時の振動とともに地 下水位の変動に伴って繰り返される間隙水圧等の応力作 用に脆弱であると推察される。そこで、上記一軸圧縮試 験より「軟岩~土砂相当」に区分された地山を対象に、 直接的な応力の他に、水浸等の作用による岩石の崩壊の しやすさを把握するため、試験片を3個用いて計46試料の 浸水崩壊試験を実施した。図-2には各試料の浸水崩壊度 区分を示すが、これは水浸開始24時間後の岩石の状態を 試験片毎に崩壊度区分し、2軸マップ上で該当する位置に 各試料の結果をプロットしたものである。当区分より、 全試料のうち約3割弱の試料が、3つの試験片のうち2つ以 上が原形をとどめない「D 判定」となった。このことか ら、これらの地山は岩種に関わらず、地下水の影響を受けやすいことが分かった。



図-2 浸水崩壊度区分

#### (4) 土の粒度試験

地山の流出のしやすさを検討するために、上記浸水崩 壊度試験で「D判定」となった4トンネルの地山を対象に 粒度試験結果を整理し、粒径加積曲線に示した(図-3)。 両図の比較より、凝灰岩類からなる地山は、粒度組成に 極端な偏りが無く、礫分を含む粗粒土から細粒土までの 範囲に亘って含有するため、粒径幅の広い曲線となって いる。しかし、砂岩類からなる地山は、砂分の含有量が 突出しているため、粒径幅が狭く、急立した曲線を示し ている。両曲線から砂岩類からなる地山は、凝灰岩類か らなる地山よりも地下水の浸入によって流動化しやすい 性質にあるといえる。



図-3 粒径加積曲線

#### 6. 考察

各地点の室内岩石試験の結果を整理し、地山の流動化 を示す指標として、図-4 にヘキサダイヤグラムとして示 した。

地山の流動化の主な指標となる6項目のうち、TN-D は4 項目、TN-H は3~4項目が指標値を下回った。この理由と して、凝灰岩類からなる TN-D の地山は、低密度である 上、砂分の含有がやや多くなっていること。一方、TN-H は地山の基質が主に分級された中~細砂分より構成され る上、細粒分の含有が非常に少ないことがあげられる。 これにより、両トンネルにおいては地山内に水分を含み やすい特性にあるといえる。



図-4 ヘキサダイヤグラム

# 7. おわりに

8トンネルを対象に各種試験結果を整理し、トンネル路 盤下に分布する地山の性状について検討した。その結果、 「軟岩~土砂相当」に区分された4トンネルのうち、特に 砂岩類の地山は粒度組成より、流動化しやすい性状にあ ることが分かった。しかし、凝灰岩類の地山は全般的に 流動化の指標にあまり該当しない結果となったが、TN-D に関しては、低密度な上、基質内に孔隙やフラクチャー (微細な割れ目)が発達していることが考えられるため、 地下水の影響に対して脆弱になっているものと推察され る。このような条件にある地山で発生する流出現象は、 地下水位の変動、地山上部からの振動等といった外力要 因や風化の進行度合いといった環境要因等が複合的に関 係して発生する。このことから、今後もデータの集積を 継続するとともに、低密度の要因として推察される孔隙 やフラクチャーの分布との関係を把握すること等といっ た課題も含め、更なる検討を進めていく所存である。

#### 《引用·参考文献》

 1) 土木学会トンネル工学委員会編:2016年制定トンネル 標準示方書[山岳工法編]・同解説、P44、2016.8.

# 朝日温海道路における膨潤性地山の地質調査事例

# 1. はじめに

朝日温海道路施工が予定されている新潟県村上市碁石 地区を対象に地質調査を実施した。調査対象地(図-1) は、標高50~70mの小規模山岳地帯であり、新第三紀の 泥岩が広く分布する。泥岩は風化が著しく、膨潤性を示 すことが既往調査結果により報告されていた。

本報告では、新第三紀の泥岩を対象とした道路設計・ 施工に必要な地質情報を得るために実施したボーリング 調査、弾性波探査等の地質調査結果を示す。また、切土 工、トンネル施工の観点での検討事項を示す。



図-1 調査位置平面図

# 2. 調査結果

#### (1) 地質構成

図-2 に地質縦断図を、図-3 に弾性波速度縦断図を示 す。

調査地には、新第三紀中新世後期上郷層上部層の泥岩 が広く分布する(図-2参照)。泥岩の表層から標高 50m 付 近は特に風化が著しく、弾性波速度は 0.8~1.2km/sec (Vp)を示し(図-3参照)、スメクタイトを多く含む。 (株) ダイヤコンサルタント ○小林 卓矢、篠原 良彰

さらに、泥岩の乾湿繰返し吸水試験の結果、繰返し回 数が 2~3 回で土砂状となり、吸水量増加率は 46.6~ 99.2%を示し、吸水膨張率に富むことが判明した。このこ とから、泥岩層は吸水に伴う体積増加の影響により、地 山強度が低下することが示唆された。

#### (2) 地すべりブロック

図-1 に示すように、調査地の南方には地すべりブロッ クが判読された。地すべりブロックを対象としたボーリ ング調査の結果、GL-8.5m 付近にすべり面と考えられる 黄褐色粘土を挟在し、この面に鏡肌が認められた。

また、孔内傾斜計観測の結果、2018 年 7 月以前は明瞭 な変化を示さなかったものの、同年 8 月以降の日降水量 100mm 以上の大雨や、2019 年 6 月の震度 6 の地震を起因 とした変位が認められた。ただし、地すべりブロックの 変位量は 2 年間で約 5~7mm であり、現時点では活発な 動きを示すものではないと推定される。



写真-1 ボーリングコアで認められた鏡肌



以下に、「切土案」及び「トンネル案」それぞれの検討 結果、設計・施工上の留意点を述べる。

#### 3. 切土案の検討

切土工は、L側5段、R側3段が計画された。以下に検 討事項を示す。

#### (1) 切土勾配

上郷層上部層の泥岩の自然斜面勾配は、30°~55°(デ ータ数=19)であり、その平均は39.9°である(勾配; 1:1.95≒1:1.2)。

各指針<sup>1),2)</sup>によると、当該斜面の切土勾配は1:0.5~ 1.5の範囲となっている。定量的判断は1:1.5となるが、 自然斜面勾配が1:1.2 であることを考慮すると、「1: 1.2」が最適勾配であると判断した(図-4参照)。



#### (2) 設計・施工上の留意点

- 切土工における設計・施工上の留意点を以下に示す。
- ①上郷層上部層は風化が著しく、浸食を受けやすいと 考えられる。そのため、時間経過とともにのり面の 強度低下が懸念されるため、経年劣化を防ぐような のり面保護工を選定する必要がある。
- ②道路起点側では地すべりブロックが認められ、切土 掘削に伴い斜面の不安定化が懸念されるため、切土 施工に伴う安定度評価を行い、その結果に応じて対 策工を実施する必要がある。
- ③全体として地下水位が高いため、のり面からの湧水が懸念される。そのため、水抜きボーリング等による地下水対策を施す必要がある。

# 4. トンネル案の検討

トンネル延長は、約 350m が計画された。図-5 にトン ネル周辺の3次元地質モデルを示す。



#### (1) 特殊地山

①起点側坑口の約50mの区間は、トンネル施工深度及びトンネル天端上方に地すべりブロックが存在する(図-6参照)。現時点では活発な活動は認められないが、トンネル掘削に伴う再活動が懸念される。



#### 図-6 地すべりブロックとトンネル坑口付近の関係

②図-5に示すように、土被り10m未満の低土被り区間が連続する。この区間は強風化泥岩が分布し、弾性波速度は1.0km/sec(Vp)程度である。

# (2) 設計・施工上の留意点

- ①地すべりブロックの掘削に際し、地山の緩みが発生 し強度が低下した場合、地すべりが再活動する可能 性がある。そのため、継続的な地下水位観測や孔内 傾斜計観測を実施するとともに、水抜きボーリング やアンカー工等を検討する必要がある。
- ②低土被り区間には、強風化泥岩や平均N値1.8の盛 土が分布するため、掘削時に天端崩落や地盤沈下が 懸念される。そのため、対象区間を地盤改良し、地 盤強度の増加が望まれる。

#### 5. おわりに

当該地区の工法の選定に当たっては、今後以下の検討 を行い、最終的な工法を確立することが望ましいと考え る。

- ①地すべりブロックにおいては、継続的な地下水位観 測及び孔内傾斜計観測を実施し、水位変動と地すべ りブロックの変位量の相関を把握する。
- ②膨潤性を示すことや表層部の風化が著しいことを念 頭に、斜面安定性評価を適切に行う。
- ③対策工の選定に当たっては、ライフサイクルコスト を比較した上で、安全かつ経済的な工法を選定する。

# 《引用·参考文献》

- 日本道路協会:道路土工-切土工・斜面安定工指針, p.83, 2009.6.
- 2)地盤工学会編:切土法面の調査・設計から施工まで、 p.141, 1998.1.