

# トンネル覆工の健全度評価

東北大学工学部 学生会員 浅井佑介  
東北大学大学院 正会員 京谷孝史  
東北大学大学院 正会員 寺田賢二郎

## 1. はじめに

今日に至るまで、わが国では、社会基盤施設として多くの土木構造物が建設されてきた。特に、山岳地帯が多いわが国では、古くから道路、鉄道、水力発電などで広くトンネルが利用され、これらの多くは経年化が進行している。そして、これらトンネルの維持管理費は今後増加する傾向にあるので、的確かつ効率的な維持管理の必要性がますます高まっている。

従来、トンネルの点検・調査によりひび割れや構造的欠陥が発見された場合、対策の必要性や実施時期は、過去の経験や実績に基づいて定性的に判断しており、定量的な方法については確立されていない。

本研究は、コンクリートの非破壊検査<sup>1)</sup>の一つである衝撃弾性波法<sup>1)</sup>を用いて、トンネル覆工の健全性評価手法を目的として、トンネル覆工の弾性波伝播特性を数値的に解析し、定量的に評価するための手法を検討する。

## 2. 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法とは、試験対象物に鋼球やハンマー等で機械的な衝撃を与えることで弾性波を発生させ、対象コンクリート中を伝播した弾性波を、対象物に接触させたセンサで受振し、受信波の特性からコンクリート内部の状態を把握する手法のことである。

超音波法との違いは、機械的な衝撃を用いていること、および用いる周波数領域が比較的低い(数 kHz ~ 数 10kHz 程度)ことである。しかしながら弾性波の入力条件によっては、いわゆる超音波領域の弾性波をコンクリートに入力することも可能である。したがって、衝撃弾性波法では、この領域の弾性波も評価対象としている。

衝撃弾性波法では、入力する弾性波のエネルギーが大きく波長が長いため、伝播距離を長くすることが可能であり、大型構造物の検査法として適している。

## 3. トンネル覆工における弾性波伝播の数値シミュレーション

トンネル覆工表面の劣化を考慮して、材料特性が異なる層をもつトンネル数値解析モデルを作成し、劣化状態での弾性波の伝播特性および波長と弾性波速度の関係について考察する。劣化モデルは3パターンについて数値シミュレーションする。トンネル数値解析モデルを図-1に示す。

### 3.1 数値解析モデル

#### 標準モデル

本モデルでは、平面ひずみ状態の2次元問題として数値解析モデルを設定する。トンネルの内半径は4.27mとする。トンネル覆工表面の中心から幅1.2mを解析対象とす

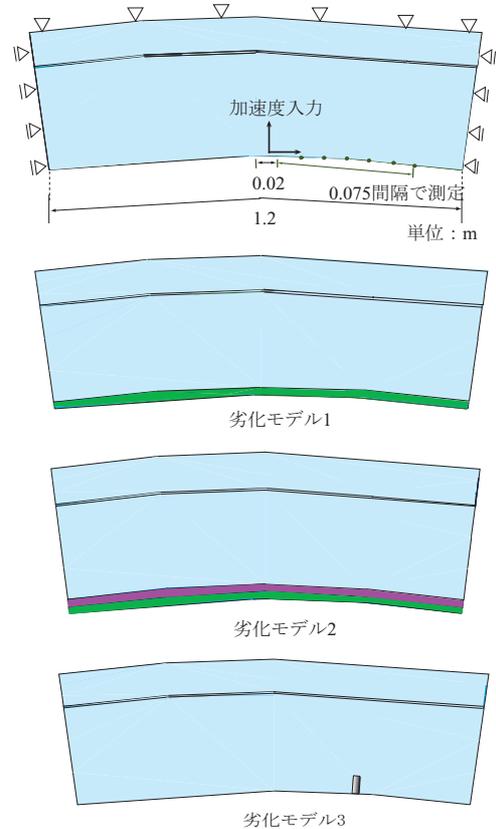


図-1 トンネル数値解析モデル

る。メッシュの細かさは2次覆工コンクリート部では1辺2.0mmとし、防水シートでは1辺2.5mm、吹付けコンクリート部では1辺3.0mmの四角形要素としてメッシュ分割する。総要素数は119598、節点数は360453である。

境界条件は、トンネル覆工数値解析モデル両端の水平方向を固定し、地山側の吹付けコンクリートを全方向固定とする。劣化モデルにおける境界条件、ヤング率以外の材料特性、メッシュの細かさは標準モデルと同様である。

#### 劣化モデル1

2次覆工コンクリートの覆工表面側深さ2.0cmでのヤング率を、標準モデルの半分とする。

#### 劣化モデル2

2次覆工コンクリートの覆工表面側深さ2.0cmでのヤング率を、標準モデルの半分とし、さらに2.0cm深い箇所のヤング率を標準モデルの75%とする。

#### 劣化モデル3

2次覆工コンクリートの覆工表面に生じるクラックなどの材料劣化をシミュレーションするために、覆工表面の中央からの距離25cmを中心に幅2.0cm深さ5.0cmをヤング率が標準モデルの半分とした箇所を作成し、数値解析をする。

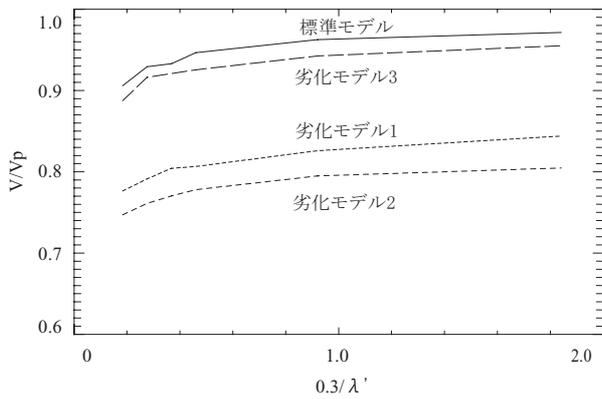


図-2 無次元化長さとの無次元化速度の関係 (水平方向入力水平方向測定)

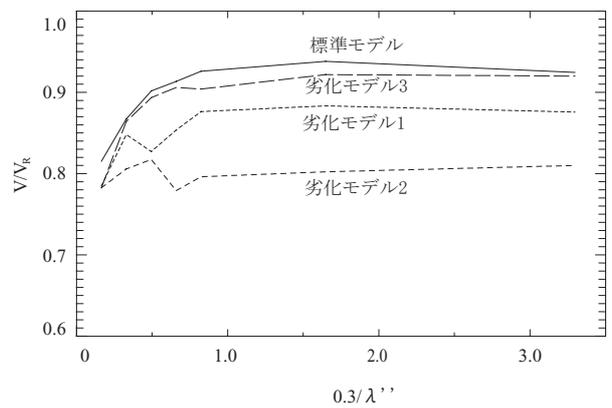


図-3 無次元化長さとの無次元化速度の関係 (壁面垂直方向入力壁面垂直方向測定)

### 3.2 解析方法

本解析は、覆工表面の中央を中心として、幅 2.0cm で 2 次覆工コンクリート表面に  $a = \sin(2\pi ft)$  で与えられる正弦波として与える。周波数毎の入力方法として、各周波数の半波長分の加速度を 8 等分した時間間隔毎の加速度を与えた後に載荷を 0 として入力する。周波数 10kHz ~ 200kHz の 7 種類の異なった周波数で行う。解析は、 $3.0 \cdot 10^{-4}$  秒間行う。減衰率は 0.5% とする。加速度の与え方は水平方向入力と、壁面に垂直方向入力の 2 パターンで行う。測定箇所は、覆工表面中央から、水平方向正として、距離が 8.50cm, 16.0cm, 23.5cm, 31.0cm, 38.5cm, 46.0cm の位置にある覆工表面上の 6 つの節点とする。

### 3.3 解析結果および考察

各周波数から求めた弾性波速度と、波長の関係を一般化するために、材料特性から求められる理論的な弾性波速度と波長を基準値とする。理論的な弾性波速度は、加速度を水平方向に入力すると、水平方向の振動の伝播特性は実体波 P 波に近い挙動となる。実体波 P 波の弾性波速度  $V_p$  はヤング率、ポアソン比、密度を用い式 (1) より求める。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$V_p$  から求められる波長を  $\lambda'$  とする。また、加速度を壁面に垂直方向に入力すると、壁面に垂直な振動の伝播特性は、表面波のレイリー波に近い挙動となる。レイリー波の弾性波速度  $V_R$  は実体波 P 波速度を用い式 (2) より求める。

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}} V_p \quad (2)$$

$V_R$  から求められる波長を  $\lambda''$  とする。そして、横軸をトンネル覆工の 2 次コンクリートの厚さ 0.3m を、理論的な波長  $\lambda'$ ,  $\lambda''$  で除したものとし、縦軸を各周波数における弾性波速度を理論的な弾性波速度  $V_p$ ,  $V_R$  で除したものを図-2、図-3 に示す。図-2、図-3 から無次元化した長さとの無次元化した速度には、波長が短いほど、理論的な弾性波速度に近づく傾向がある。しかし、図-3 から、劣化モデル 1 および 2 においては、周波数にして 30kHz ~ 50kHz のあたりにおいて弾性波速度が遅くなっている。

原因として、表面波の一つであるレイリー波の伝播速度は、伝わる媒質の S 波速度構造と強い関係を有するためであると考える。すなわち、深度方向に S 波速度構造が変化する場合、表面波の伝播速度は周波数に依存する速度分散性が生じる。そのため、周波数 30kHz ~ 50kHz のあたりにおいて劣化部分と標準部分の境目となり、劣化部分でのレイリー波の弾性波速度は標準部分に比べて遅いため、通常モデルに比べて遅くなっていると考える。

また、構造物には減衰率があり加速度を与えた位置からの測定距離により影響を及ぼす。一般的に、距離が離れるほど構造物の減衰率により伝播加速度は小さくなる。

本数値実験の結果では、加速度を水平方向に入力すると、水平方向の振動の伝播特性は、実体波 P 波に近いため減衰の度合いが大きく、入力位置での読み取り加速度を 1 とすると、最初の読み取り位置ではその大きさが 0.3 以下となり、特に、200kHz などの高周波数においては、その大きさが 0.15 以下となる。

また、壁面に垂直に加速度を入力すると、壁面に垂直な振動の伝播特性は、レイリー波に近いため減衰の度合いが小さく、測定距離が離れていても読み取りが可能である。しかし、低周波数では、減衰の度合いが小さい一方で、高周波数では減衰の度合いが大きく、測定が困難になると考えられる。

また、劣化モデル 3 において、劣化部分を通る前と通過した後では加速度の大きさが半減することがわかった。

## 4. 結論

本研究では、劣化を考慮してトンネル覆工表面の材料特性が異なる層をもつトンネル覆工数値解析モデルを作成し、トンネル覆工の弾性波伝播特性を数値解析的に検討した。

非破壊検査における衝撃弾性波法を用いる場合、周波数およびその波長と弾性波速度との関係、測定方法とトンネル覆工の弾性波伝播特性および減衰率、測定距離の関係を考慮して行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.