

トンネル覆工の弾性波伝播特性に関する数値解析的研究

○東北大学 学生会員 浅井 佑介
 東北大学 正会員 京谷 孝史
 東北大学 正会員 寺田 賢二郎

1. 序論

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¹⁾の一つである衝撃弾性波法¹⁾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. 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伝播速度の関係について考察する。劣化モデルは3パターン準備した。トンネル覆工の数値解析モデルを図-1に示す。

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次元問題として解析を行う。馬蹄形2車線トンネルの内半径は4.27mとする。トンネル覆工の中心から幅1.2mを解析対象とする。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119,598、節点数は360,453である。境界条件は、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

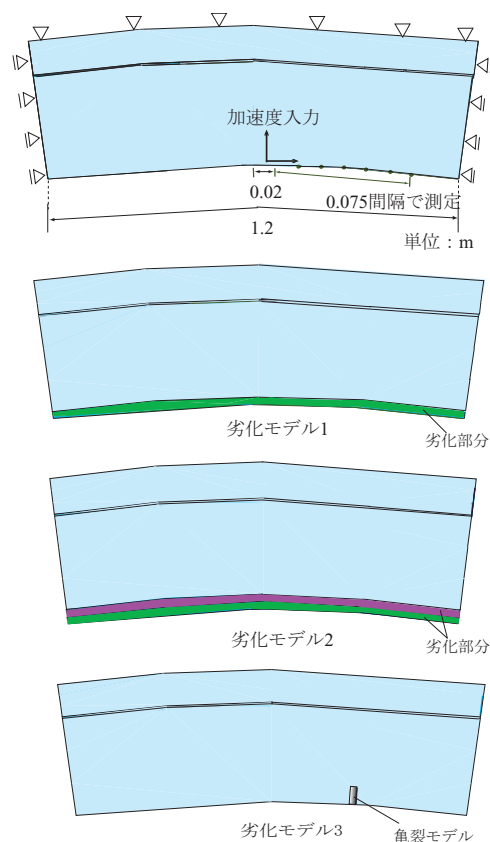


図-1 トンネル数値解析モデル

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設ける。

2.1 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を与える。入力方法としては、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。解析は、周波数10kHz~200kHzの7種類に対して、弾性波が測定位置46.0cmに伝播するのに十分な $4.0 \cdot 10^{-4}$ 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,

キーワード：コンクリート、非破壊検査、衝撃弾性波法、弾性波伝播速度

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06, TEL 022-795-7425, FAX 022-795-7423

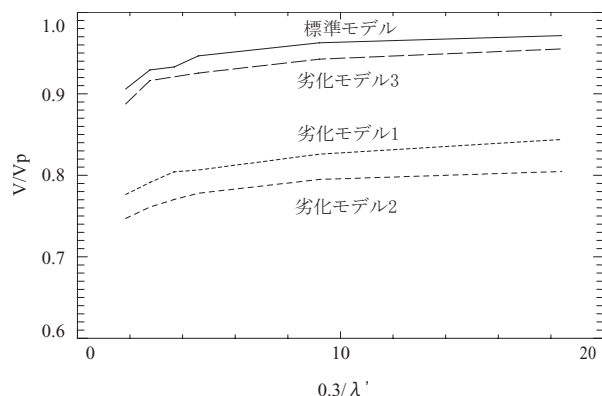


図-2 無次元化長さと無次元化速度の関係（水平方向入力 - 水平方向振動）

38.5cm, 46.0cm の位置にある覆工表面上の6つの節点とする。

2.2 解析結果および考察

各周波数ごとの伝播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伝播速度と波長を基準値とする。加速度を水平方向に入力した場合については実体波 P 波に近い挙動となることから、式 (1) の V_p を伝播速度の基準値とし、 V_p から求められる波長 λ' を波長の基準値とする。

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

加速度を壁面に垂直方向に入力した場合は、レイリー波に近い挙動となることから、式 (2) の V_R を伝播速度の基準値とし、 V_R から求められる波長 λ'' を波長の基準値とする。

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

横軸をトンネル覆工の2次コンクリートの厚さ0.3mを、これら理論的な波長 λ' , λ'' で除して、縦軸を各周波数毎の弾性波伝播速度を理論的な弾性波伝播速度 V_p , V_R で除して整理したものを図-2, 3に示す。劣化モデル1ではトンネル覆工表面から深さ2cmまでのヤング率を標準モデルの半分とし、劣化モデル2では、劣化モデル1よりさらに2.0cm深い箇所までのヤング率を標準モデルの75%としている。このような層があることが無次元化速度に影響を及ぼしていると考えられる。

劣化モデル3については、単一亀裂モデルを設定したが弾性波伝播速度に及ぼす影響はそれほど大きくないと言える。劣化幅が2.0cm 深さ5.0cmであるため、波長と比べてもそれほど大きな影響を与えなかったのではないかと考えられる。

本数値実験では、大まかな傾向として加速度を水平方向に入力した場合は、水平方向振動の伝播特性は実体波 P 波に近いいため減衰の度合いが大きく、壁面に垂直に加速度を

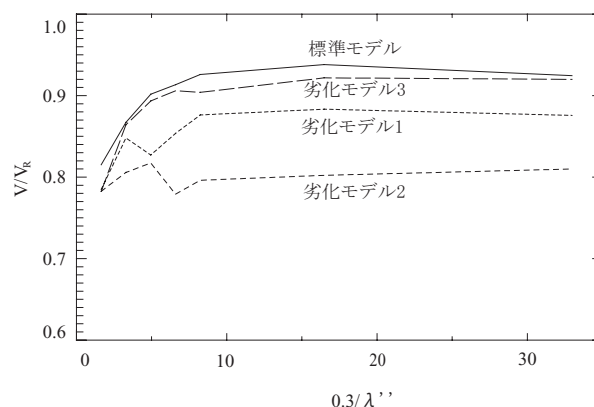


図-3 無次元化長さと無次元化速度の関係（壁面垂直方向入力 - 壁面垂直方向振動）

入力した場合は、レイリー波に近い振動の伝播特性であるため減衰の度合いが小さくなる様子が観察された。

3. 結論

本研究では、コンクリートの非破壊検査で用いられる衝撃弾性波法を用いて、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について数値解析的に検討し、本解析で得られた知見を踏まえて、衝撃弾性波法を用いたトンネル覆工における定量的に健全性を評価する手法について提案した。本研究では、トンネル覆工における衝撃弾性波法の弾性波伝播特性を利用する測定方法は以下を行うことを推奨する。

1. 発振方向および波の振動方向に注意し、弾性波伝播速度を測定する。その際、測定距離と減衰の関係を考慮する。
2. 得られた弾性波伝播速度から、本研究で提案する評価法でトンネル覆工における劣化状態を定量的に健全性を評価する。

本解析によって得られた標準モデルと劣化モデルとの関係を実測値に適用するために、トンネル設計施工標準書にある2次覆工コンクリートの材料特性から求められる理論的な弾性波伝播速度と波長を基準値とする。横軸をトンネル覆工の2次コンクリートの厚さを理論的な波長で除したものとし、縦軸を得られた弾性波伝播速度を理論的な弾性波伝播速度で除した結果を本解析結果と比較する。衝撃弾性波法により弾性波伝播速度を求めることで、本解析結果を基準として定量的な調査を行うことができる。

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.