

地下鉄トンネル覆工厚の 防振最適化に関する設計感度解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 笠原 祐樹
新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛
東京都交通局 正会員 古田 勝

1. はじめに

著者らは、地下鉄トンネルから放射される波動場の特性¹⁾や、トンネル覆工増厚の振動低減効果²⁾などについて検討した。本研究では、これらの結果に基づき、地盤振動低減を目的としたトンネル覆工厚の最適配置に関する設計感度解析手法の構築を試みる。なお、トンネル覆工の増厚は質量と剛性の増加をもたらす。両者が振動低減に寄与すると思われるが、いずれも覆工厚と連動しており、それらの効果を分離して評価することは難しい。そこで、質量と剛性とを覆工厚を変数として独立に定義し、個々に設計感度に反映させる。構築した手法に基づき、質量と剛性の効果、周波数による差異、最適な覆工厚分布などについて検討する。

2. 設計条件

無限一様弾性地盤の中に設置された円形トンネルを解析対象とする。周波数域連成解析に際し、波動場は二次元動弾性場としてモデル化する。対称条件の下でトンネルおよびその周辺地盤を有限要素法により離散化し、その外部の無限領域を境界要素法により与える。概要を図1に示す。

トンネルは単線シールドトンネルを想定し、半径3.1m、覆工厚を25~35cmの円形断面とする。道床・トンネル覆工の物性値は、せん断弾性係数を1435MPa、ポアソン比を0.26、質量密度を2300kg/m³と設定した。外力の入力条件は、道床上面のレール位置の鉛直方向に作用する一対の単位調和加振により与える。地盤はやや強固な沖積地盤を想定し、せん断弾性係数を138MPa、ポアソン比を0.45、質量密度を1800kg/m³とした。また、地下鉄道における主要振動成分が、一般に30~70Hzの範囲内に存在することから、加振周波数は40Hzと60Hzの2種類に設定した。

3. 最適設計手法

目的関数を次式で定義する。

$$\bar{J} = J(\mathbf{U}; \psi) + [\lambda]^T \{\hat{\mathbf{K}}\mathbf{U} - \hat{\mathbf{F}}\} + \lambda_+(A(\psi) - A_{max}) \quad (1)$$

ここで、 J は鉛直軸から θ 方向に伝播する横波の単位開き角当りの放射平均パワー $P_\theta(\omega)^{1)}$ の l_2 ノルムで与える。ま

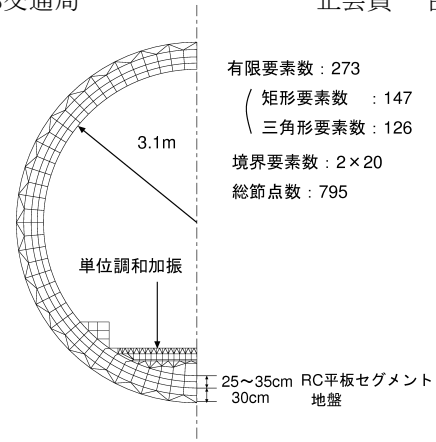


図1 解析条件の概要

た、式(1)右辺第2項はFE-BE結合方程式のつり合い条件、第3項はトンネル断面積の制約条件に関する項である。 $[\lambda]$ 、 λ_+ はLagrange乗数ベクトルとパラメータである。

なお、トンネル円周方向の各位置におけるトンネル覆工厚 h は、変数 $0 \leq \psi \leq 1$ を介して次式により与えるものとする。

$$h = h_{min} + (h_{max} - h_{min})\psi^p \quad (p \geq 1) \quad (2)$$

ここで h_{min} 、 h_{max} は前述の覆工厚の最小、最大値である。また、覆工厚増加に伴う曲げ剛性と質量増加の効果を分離するために、トンネル断面各位置における曲げ剛性をそれと等価な剛性 $\bar{E} = E(h/h_{min})^3$ により表現する。同様に覆工質量と等価な質量密度を $\bar{\rho} = \rho(h/h_{min})$ により表現する。式(2)のパラメータ p は、最適化過程における中間覆工厚の発生を抑制するためのペナルティーべき次数であり、以下の解析では $p=3$ としている。

$\psi \rightarrow \psi + \Delta\psi$ による目的関数の増分 $\Delta\bar{J}$ は随伴方程式併用の下、次式で与えられる。

$$\Delta\bar{J} = \left[\frac{\partial J}{\partial \psi} \right] \{\Delta\psi\} + [\lambda]^T \left[\frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \psi} \mathbf{U} \right] \{\Delta\psi\} + \lambda_+ \frac{\partial A}{\partial \psi} \{\Delta\psi\},$$

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \psi} = \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \mathbf{E}} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{h}} + \frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{h}} \right) \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \psi} \quad (3)$$

keywords: トンネル覆工厚最適化, 振動低減, 放射波動
連絡先: 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地
TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

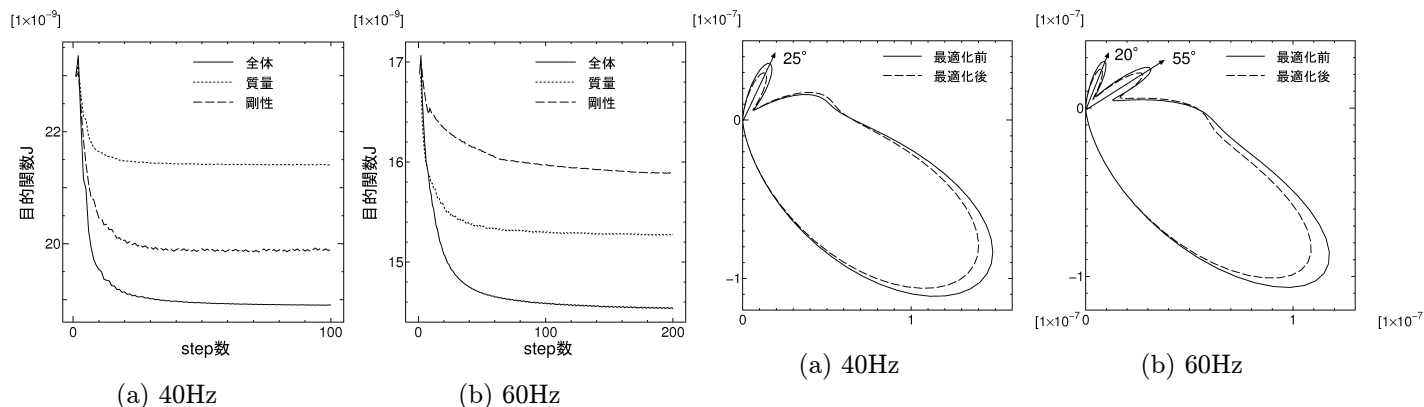


図2 目的関数の変化

ただし、感度解析において、剛性の影響のみを評価する場合は $\partial \rho / \partial h = 0$ 、質量の影響のみを評価する場合は $\partial E / \partial h = 0$ とおく。その下で、 ψ を最終的な設計変数としてトンネル覆工厚の最適化計算を実行する。

4. 解析結果

(1) 目的関数

波動の放射方向は周波数に依存した強い指向性を示す。そこで主要な放射方向を考慮して、加振周波数が 40Hz のときは鉛直軸から 45° 、60Hz のときは 60° までの範囲に放射される波動の平均パワーより目的関数 J を計算した。

以上の条件の下で実施した最適化過程における目的関数 J の変動の様子を図2に示す。加振周波数が 40Hz と 60Hz の場合で、質量・剛性を個々に最適化したときと、両者(全体)を最適化したものとを比較している。40Hz 加振では剛性の最適化による低減効果が大きいものに対して、60Hz 加振では質量の効果が大きく、振動低減に対するこれらの寄与度が周波数依存することがわかる。

(2) 放射平均パワー

最適化前後における放射平均パワーの分布を図3に示す。放射パターンの対称性により、右半分のみ示した。なお、剛性と質量を合わせた全体による最適化前後の平均パワーを比較している。図は原点から放射方向に見て、その方向にどれだけの平均パワーが放射されているのかを示したものである。

40Hz 加振では地表面に向かい斜め約 25° 方向に、60Hz 加振においては 20° と 55° の2方向にそれぞれ強い波動放射が発生しており、放射方向の周波数に対する強い依存性を示している。いずれの周波数においても、最適化により主要放射成分が低減されている。

(3) 覆工厚

本最適化計算で得た覆工厚分布を図4に示す。なお、ここでも質量・剛性の全体で最適化した結果を示している。

図3 放射平均パワー

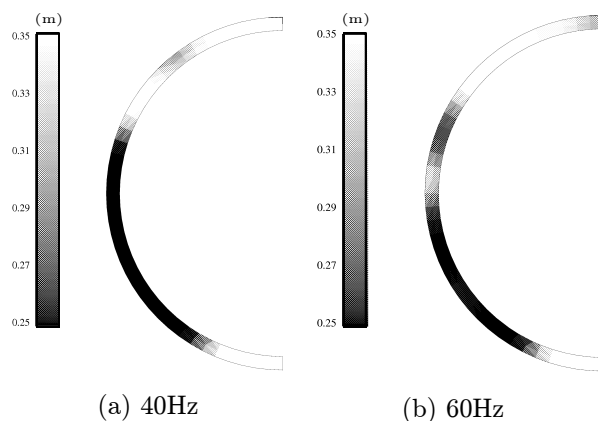


図4 覆工厚の分布

40Hz 加振ではトンネル天井部から約 70° の範囲で、60Hz 加振ではトンネル天井部から約 90° のより広い範囲で増厚域が分布している。また、いずれの加振周波数の下でも、トンネル断面の最下部では最大覆工厚が選択されている。以上より、多少の差異が認められるものの、40~60Hz の範囲の振動低減には、トンネル上半分および底部の増厚が寄与していることがわかった。

5. 結論

振動低減の観点から、地下鉄トンネル覆工厚の最適分布について考察を行った。その際に、本来覆工厚と連動して変化する曲げ剛性と質量の効果を分離して評価する方法を採った。その結果、両者共に振動低減に対して有効であることが確認されたが、その寄与度は振動数により異なることがわかった。また、トンネルアーチ部およびインバート部を増厚することで、地表面に伝播する主要波動の効果的な低減を図ることが可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 阿部和久, 加藤宏輝, 古田 勝: 地下鉄周辺地盤における波動の伝播特性, 鉄道力学論文集, 8, 43-48, 2005.
- 2) 西宮裕騎, 阿部和久, 古田 勝: 多目的GAを用いた地下鉄軌道防振対策の最適化に関する研究, 境界要素法論文集, 21, 33-38, 2004.