

# 地下鉄トンネル断面の防振最適化に関する研究

阿部和久<sup>1</sup>・笠原祐樹<sup>2</sup>・紅露一寛<sup>3</sup>・古田 勝<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 新潟大学准教授 工学部建設学科 (〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地)  
E-mail:abe@eng.niigata-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生員 新潟大学大学院 博士前期課程 (〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 新潟大学准教授 大学院自然科学研究科 (〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 東京都交通局 (〒 163-8001 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

地盤振動低減を目的に、地下鉄トンネル覆工厚の最適化を試みた。その際に、本来覆工厚と連動して変化するトンネル曲げ剛性と質量とを分離して評価する方法を構成した。その下で設計感度解析を実施し、剛性と質量のいずれか一方、または両者について最適化した場合の覆工厚分布を求めた。その結果、振動低減に対する剛性と質量の寄与度は、振動数により異なることがわかった。また、トンネル上半分(アーチ部)および底部(インパート部)の覆工厚を増すことが、振動低減につながる事が確かめられた。

*Key Words : tunnel thickness optimization, vibration reduction, radiated waves*

## 1. はじめに

地下鉄道においてなされる防振対策では、パッド類の低バネ定数化による比較的簡易な方法から、フローティングスラブの様に軌道構造自体の大幅な変更を伴うものまで、様々なレベルでの工夫が検討されている。これらの対策には、建設時のみ対応可能なものや、実施に多大なコストを要するものなどもあるため、その効果を事前、且つ適切に評価しておくことが望まれる。

以前に著者らの研究グループでは、この様な観点から、地下鉄道における各種防振対策の評価<sup>1)</sup>、およびその結果に基づく最適化手法の構築<sup>2)</sup>を試みた。その際に具体的な対策として、まくらぎ下に装着する防振パッドの低バネ定数化や、シールドトンネル覆工の増厚等について検討した。数値モデルを対象としてはいるものの、当該の設定条件下ではトンネル覆工厚を1.5倍に増すことで、トンネル上部の振動加速度レベルが約10dB低減されるという結果を得た。

トンネル覆工増厚による振動低減効果の主な影響因子としては、質量の増加と曲げ剛性の増加の2つが考えられる。しかし、それらの影響は覆工厚の増加によってもたらされるものであるため不可分である。よって、その何れがどの程度関与しているのかについては明らかではない。

また、地下鉄道でなされる防振対策では、トンネルから建物等の周辺施設に到達する振動エネルギーの低減を図ることが最終目的である。そのため著者ら<sup>3)</sup>は、トンネルから地盤中に伝わる波動エネルギーに着目し、その放射特性について調べた。その結果、地表面に到

達する波動は主に横波成分により構成されていること、およびその放射エネルギーは周波数に依存した強い指向性を有することなどが明らかとなった。この周波数依存性は、トンネルの振動特性を反映したものであると考えられ、振動低減にはトンネル覆工全体の一様な増厚ではなく、ある特定箇所の局所的な増厚が大きく寄与している可能性がある。しかし、本来どの部分を増厚することで振動低減効果が得られているのかについては必ずしも明らかにはされていない。

以上のことより、トンネル覆工の増厚がもたらす振動低減効果について、一度考察し整理しておくことは、地下鉄道の防振対策を講ずる上で有用な知見を与えられるものと思われる。

そこで、本研究では設計感度解析に基づき、理論的に最適な覆工厚分布の探索を試みる。なお、その際にトンネル各部の覆工厚を設計変数にとり、質量と剛性とをその関数として与える。具体的には、トンネル覆工厚を材料特性と同様に、トンネル断面に分布する関数として定義する。その下で、トンネル覆工厚の変化に伴う曲げ剛性の変化を、それと等価な結果を与えるヤング率の変化(後述)で表現する。同様にトンネル質量の変化を、それと等価な結果を与える質量密度分布の変化により表現する。以上の定式化に基づき、覆工厚の変化に伴う質量と剛性の変化を分離して表現し、両者およびいずれか一方のみの効果を考慮した場合の各々に対して最適化を実施する。得られた結果に基づき、質量・剛性の効果、および理想的な覆工厚分布について考察する。

## 2. 解析モデル

### (1) 解析条件

後述の様に無限遠での波動放射特性を評価するため、地下鉄トンネルは一様な無限弾性体中に埋め込まれているものとする。なお、以下では二次元平面ひずみ問題を仮定する。トンネル・地盤の解析条件を図-1に示す。地下鉄トンネルには単線シールドトンネルを想定し、その内径を6.2m、覆工厚を25～35cmの円形断面とする。道床・トンネル覆工共にコンクリート製とし、その物性値を過去の解析経験<sup>4)</sup>に基づき、せん断弾性係数を1435MPa、ポアソン比を0.26、質量密度を2300kg/m<sup>3</sup>と設定した。外力はレール位置に対応する道床上面に、左右一対の鉛直方向単位調和加振として与える。地盤は実際の条件を参考にやや強固な沖積地盤を想定し、そのせん断弾性係数を138MPa、ポアソン比を0.45、質量密度を1800kg/m<sup>3</sup>とした。また、軌道振動特性より、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<sup>1)</sup>、その範囲での解析を行った。以下では紙面の制約上、代表例として40Hzと60Hzの2種類について示す。

### (2) 応答解析手法の概要

(1)に述べた解析条件の下で、トンネル・地盤連成系の強制振動応答解析を実施する。なお、トンネル覆工厚の最適化は、その結果に基づきなされることとなる。解析では、トンネルおよびその周辺地盤の一部を有限要素で、その外部の一様無限地盤を境界要素で離散近似する。有限要素-境界要素結合解析に当り、境界要素方程式を有限要素型に変換する。その下で結合境界 $\Gamma_B$ において両方程式に対し、変位の適合条件と力のつり合い条件を課して、次の求解結合方程式を得る。

$$[\hat{\mathbf{K}}]\{\mathbf{U}\} = \{\hat{\mathbf{F}}\},$$

$$[\hat{\mathbf{K}}] = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{K}}_{11} + \mathbf{K}_B & \bar{\mathbf{K}}_{12} \\ \bar{\mathbf{K}}_{21} & \bar{\mathbf{K}}_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\{\mathbf{U}\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{Bmatrix}, \quad \{\hat{\mathbf{F}}\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_2 \end{Bmatrix}$$

ここで、 $\{\mathbf{U}_1\}, \{\mathbf{U}_2\}$ は $\Gamma_B$ 上の節点とそれ以外の節点に対応する部分節点変位ベクトル、 $[\mathbf{K}_B]$ は有限要素型に変換した境界要素方程式の係数行列である。

なお、有限要素の係数行列 $[\bar{\mathbf{K}}_{ij}]$ は次式で与えられる。

$$[\bar{\mathbf{K}}_{ij}] = [\mathbf{K}_{ij}] - \omega^2[\mathbf{M}_{ij}] \quad (2)$$

ここで、 $[\mathbf{K}_{ij}], [\mathbf{M}_{ij}]$ は有限要素の剛性行列と質量行列の部分行列、 $\omega$ は加振振動数である。

解析では、問題の対称性により図-1の様に半分を離散化する。ただし、境界要素方程式の構成には全結合

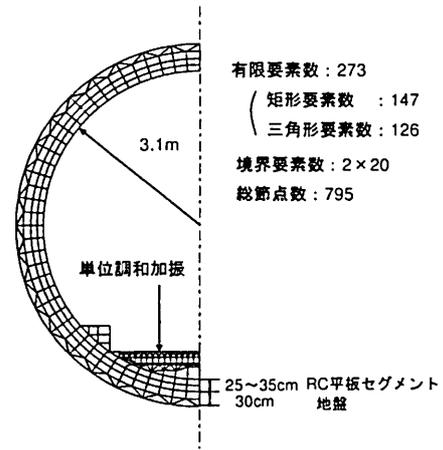


図-1 トンネル・地盤の解析条件

境界上での積分が必要となる。よって、対称条件を付帯の上、当該積分を処理する。なお、以下ではトンネル覆工厚の最適化を実施するが、その際に覆工厚の変化に合わせて有限要素節点位置を変更する、いわゆるLagrange記法は用いず、図-1に示した一定の要素分割の下で定式化を行う。その具体的処理方法については次節に述べる。

### (3) 遠方放射波動場における平均パワー

本研究では最適化過程における目的関数を、トンネルから遠方へ放射される波動の、単位開き角当りの平均パワーにより与える。当該物理量については文献3)で詳述したが、ここでは以下の議論で必要となる最小限の範囲でその定義を述べる。

まず、波動エネルギーを放射している物体を完全に包含する半径 $x$ の十分に大きな円を考える。なお、本問題では、トンネルがその物体に相当する。その下で、ある方向 $\theta$ において、円周境界を通過して遠方へ伝播して行く波動を考える。その単位開き角当りの時間平均パワー(以下放射平均パワーと呼ぶ) $P_\theta(\omega)$ は、 $x \rightarrow \infty$ における漸近近似を経て次式により与えられる。

$$P_\theta(\omega) = -\frac{\omega x}{2} \text{Im}(\hat{\mathbf{p}}^T \cdot \hat{\mathbf{u}}^T + \hat{\mathbf{p}}^L \cdot \hat{\mathbf{u}}^L) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}^T, \mathbf{u}^L$ はそれぞれ変位の横波と縦波成分、 $\hat{\mathbf{p}}^T, \hat{\mathbf{p}}^L$ は半径 $x$ の円周上における表面力の横波および縦波成分である。また、 $(\cdot)$ は共役複素数を、 $\text{Im}(\cdot)$ は虚数部を意味する。

式(3)の変位と表面力は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^T &= \Omega^T g(x, k_T), & \mathbf{u}^L &= \Omega^L g(x, k_L), \\ \hat{\mathbf{p}}^T &= i\mu k_T \mathbf{u}^T, \\ \hat{\mathbf{p}}^L &= ik_L [(\lambda + \mu)(\hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{u}^L)\hat{\mathbf{x}} + \mu \mathbf{u}^L] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\Omega^T, \Omega^L, g$  等はさらに次式により定義される。

$$\begin{aligned} \Omega^T &= A^T \cdot \int_{\Gamma} p e^{ik_T x} d\Gamma_y + B^T : \int_{\Gamma} (\mathbf{u} \otimes \mathbf{n}) e^{ik_T x} d\Gamma_y, \\ \Omega^L &= A^L \cdot \int_{\Gamma} p e^{ik_L x} d\Gamma_y + B^L : \int_{\Gamma} (\mathbf{u} \otimes \mathbf{n}) e^{ik_L x} d\Gamma_y, \\ A_{jk}^T &= \frac{1}{\mu} (\delta_{jk} - \hat{x}_j \hat{x}_k), \quad A_{jk}^L = \frac{\kappa^2}{\mu} \hat{x}_j \hat{x}_k, \\ B_{jkl}^T &= ik_T (\delta_{jk} \hat{x}_l + \delta_{jl} \hat{x}_k - 2\hat{x}_j \hat{x}_k \hat{x}_l), \\ B_{jkl}^L &= ik_L \{2\kappa^2 \hat{x}_k \hat{x}_l + (1 - 2\kappa^2) \delta_{kl}\} \hat{x}_j, \\ g(x, k) &= \frac{e^{i(kx + \pi/4)}}{\sqrt{8\pi kx}} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $k_T, k_L$  は横波と縦波波数、 $\mathbf{n}$  は物体境界  $\Gamma$  上の地盤側から見た単位外向き法線ベクトル、 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}/x$ 、 $\alpha = \hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{y}$ 、 $\mathbf{y}$  は  $\Gamma$  上の積分点、 $\kappa^2 = (k_L/k_T)^2$ 、 $\lambda, \mu$  は Lamé 定数、 $\mathbf{u}, \mathbf{p}$  は  $\Gamma$  上の変位と表面力である。なお、本解析において、 $\Gamma$  は有限要素・境界要素結合面  $\Gamma_B$  にとる。この時、変位  $\mathbf{u}$  と表面力  $\mathbf{p}$  は結合面境界における境界要素解により与えられることとなる。

### 3. 最適設計手法

#### (1) 設計変数

本研究では、トンネル各部の覆工厚を設計変数に用いる。ただし、最適設計過程において実際の覆工厚を変更する手法による場合、その都度要素節点座標を更新する必要があり、解析が煩雑になる。なにより、トンネル覆工の質量と曲げ剛性とが連動して変化するため、これらの効果を分離して最適化に反映させることができなくなる。そこで本研究では、密度やヤング率と同様に、覆工厚を一種の空間分布関数に拡張し、それをトンネル覆工部に位置する有限要素に対して新たな物理量  $h_e$  として与える。曲げ剛性や質量は、以下に述べる様に  $h_e$  と関連付けて定義する。

まず、トンネル断面において基準となるヤング率と覆工厚をそれぞれ  $E_0, h_0$  で与える。この下での基準曲げ剛性  $D_0$  を次式で与える。

$$D_0 = a E_0 h_0^3, \quad (a: \text{定数}) \quad (6)$$

すると、 $h_0 \rightarrow h$  と変更した時の曲げ剛性  $D$  は次式により与えられることとなる。

$$D = D_0 \left(\frac{h}{h_0}\right)^3 \quad (7)$$

そこで、実際の覆工厚  $h$  の変化と等価な効果をもたらす見かけのヤング率を、要素毎に次式により設定する。

$$E_e = E_0 \left(\frac{h_e}{h_0}\right)^3 \quad (8)$$

この時、要素毎に与えた分布覆工厚  $h_e$  がトンネル覆工の厚さ方向に一様分布し、 $h_e = h$  で与えられる場合、その箇所における曲げ剛性は  $D = a E_e h_0^3 = a E_0 h^3$  となる。これによって、実際の覆工厚の変化に伴う曲げ剛性の変化を、それと等価なヤング率(剛性)の変化で表現することが可能となる。

一方、トンネル周方向単位長さ当りの覆工質量の基準値  $m_0$  は  $h_0$  に比例するので、次式で与えられる。

$$m_0 = b h_0, \quad (b: \text{定数}) \quad (9)$$

すると、 $h_0 \rightarrow h$  としたときの覆工質量  $m$  は次式で与えられる。

$$m = m_0 \frac{h}{h_0} \quad (10)$$

そこで、実際の覆工厚  $h$  の変化と等価な効果をもたらす見かけの質量密度を、要素毎に次式により設定する。

$$\rho_e = \rho_0 \frac{h_e}{h_0} \quad (11)$$

ここで、 $\rho_0$  は基準質量密度である。これによって、実際の覆工厚の変化に伴う覆工質量の変化を、それと等価な質量密度の変化で表現することが可能となる。

式(8)によるヤング率の変化は、式(2)の剛性行列  $[K_{ij}]$  に反映される。一方、式(11)による質量密度の変化は、式(2)の質量行列  $[M_{ij}]$  に反映されることとなる。これにより、覆工厚の変化に伴う曲げ剛性と質量の変動を分離して記述することが可能となる。

なお、以下ではトンネル断面積を制約条件として設定する。一要素当りの見かけの面積  $A_e$  も、式(11)と同様に次式により与える。

$$A_e = A_0 \frac{h_e}{h_0} \quad (12)$$

ここで、 $A_0$  は基準覆工厚  $h_0$  における基準要素面積である。

以上より、必要となる全ての物理量が分布覆工厚  $h_e$  により表現された。なお、最適化過程において、 $h_e$  はさらに  $[0,1]$  の範囲で値をとる変数  $\psi$  を介し次式により与える。

$$h_e = h_{min} + (h_{max} - h_{min}) \psi^p \quad (13)$$

ここで、 $h_{min}, h_{max}$  は覆工厚がとり得る最小・最大値である。また、 $p \geq 1$  は、 $h_e$  が最適化過程で  $h_{min}$  と  $h_{max}$  の中間値を取ることを防ぐためのペナルティーべき数<sup>5)</sup>である。以上により、最終的な設計変数は各有限要素における  $\psi$  で与えられる。

## (2) 最適化問題

放射波動が地表面応答に強く影響することから<sup>3)</sup>, 目的関数  $J$  を放射平均パワーの  $l_2$  ノルムにより与える.

$$J := \left[ \sum_i^n \bar{P}_{\theta_i}^2(\omega) \right]^{1/2} \quad (14)$$

ここで,  $\theta_i$  は放射平均パワーを評価する第  $i$  番目の放射方向,  $n$  はそれらの総数である. また, 地表面方向に放射される波動は主に横波成分により与えられる<sup>3)</sup>ことから, 以下では横波成分のみ抽出する. さらに, 覆工厚の変動に対して不変な  $\omega$  等の定数項を省略すると, 放射平均パワーは本質的に次式の  $\bar{P}_\theta$  で評価できることとなる.

$$\bar{P}_\theta(\omega) = \mu \Omega^T \cdot \bar{\Omega}^T \quad (15)$$

最適化計算に当り, トンネル断面積  $A$  を制約条件に課す. このとき, 随伴変数法に基づく最終的な最適化問題を次式で与える.

$$\begin{aligned} \min_{\psi} \bar{J}(\mathbf{u}; \psi) &:= J(\mathbf{u}) + [\lambda]^T \{ \hat{\mathbf{K}}\mathbf{U} - \hat{\mathbf{F}} \} \\ &\quad + \lambda_+ (A(\psi) - A_{max}), \\ \text{subject to } [\lambda]^T \{ \hat{\mathbf{K}}\mathbf{U} - \hat{\mathbf{F}} \} &= 0 \quad \text{for } \forall \{ \lambda \}, \\ \lambda_+ (A - A_{max}) &= 0, \quad \lambda_+ \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで,  $\bar{J}$  は式(16)により定義される最終的な目的関数,  $\{ \lambda \}$  は Lagrange 乗数ベクトル,  $\lambda_+$  は Lagrange 乗数,  $A_{max}$  はトンネル断面積の許容値である. また, 右辺第 2, 3 項目は, それぞれ有限要素-境界要素結合方程式とトンネル断面積に関する制約条件である.

なお, 式(16)におけるトンネル断面積は, 式(12)より次式で評価できる.

$$A = \sum_c A_c \quad (17)$$

## (3) 設計感度解析

$\psi \rightarrow \psi + \Delta\psi$  による  $\bar{J}$  の増分は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{J} &= \left[ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \right] \{ \Delta \mathbf{U} \} \\ &\quad + [\lambda]^T \left\{ \left[ \frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \psi} \right] \mathbf{U} \{ \Delta \psi \} + \hat{\mathbf{K}} \Delta \mathbf{U} \right\} + \lambda_+ \left[ \frac{\partial A}{\partial \psi} \right] \{ \Delta \psi \} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで,  $\{ \Delta \mathbf{U} \}$  は  $\{ \Delta \psi \}$  に伴って生ずる結合解の節点変位増分である. なお,  $\{ \Delta \mathbf{U} \}$  の直接評価は, 計算量の大幅な負荷を招く. そこで,  $\{ \Delta \mathbf{U} \}$  に関する項を消去するために, 次の随伴問題を導入する.

$$[\hat{\mathbf{K}}]^T \{ \lambda \} = - \left[ \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \right] \quad (19)$$

式(19)の解  $\{ \lambda \}$  を式(18)に代入すると,  $\Delta \bar{J}$  を  $\{ \Delta \psi \}$  のみで表現した次の関係式を得る.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{J} &= [\beta + \lambda_+ \frac{\partial A}{\partial \psi}]^T \{ \Delta \psi \}, \\ \{ \beta \} &= [\lambda]^T \left[ \frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \psi} \right] \mathbf{U} \end{aligned} \quad (20)$$

ここで,  $\partial \hat{\mathbf{K}} / \partial \psi$  は式(8), (11), (13)に基づき次のように展開される.

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{K}}}{\partial \psi} = \left[ \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{E}_e} \frac{\partial \mathbf{E}_e}{\partial h_e} + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} \frac{\partial \rho_e}{\partial h_e} \right] \left\{ \frac{\partial h_e}{\partial \psi} \right\} \quad (21)$$

式(21)右辺第 1 項目は剛性の影響を, 第 2 項目は質量の影響をそれぞれ表している. よって, 以下の計算において, 剛性または質量についてのみ最適化を実施する時には, それぞれ第 1 項もしくは第 2 項のみ評価すれば良い. また, その際は当然のことながら, 覆工厚  $h_e$  による変動は剛性行列または質量行列のいずれか一方にのみ反映されることとなる.

## (4) 最適化過程

最適化過程における  $\psi$  の補正は, 式(20)より勾配法に基づき次式で与える.

$$\{ \Delta \psi \} = -\Delta t \{ \beta + \lambda_+ \frac{\partial A}{\partial \psi} \} \quad (22)$$

ここで,  $\Delta t$  は正の増分パラメータである.

なお, 一度トンネル覆工の断面積  $A$  が  $A_{max}$  に達して以降は  $\Delta A = 0$  となる. この条件をみだす Lagrange 乗数  $\lambda_+$  は次式で与えられる.

$$\lambda_+ = - \frac{\left[ \frac{\partial A}{\partial \psi} \right]^T \{ \beta \}}{\left[ \frac{\partial A}{\partial \psi} \right]^T \left\{ \frac{\partial A}{\partial \psi} \right\}} \quad (23)$$

## 4. 解析結果

### (1) 剛性と質量の効果

最適化計算における初期覆工厚は, 最大厚 (35cm) と最小厚 (25cm) の中央値 30cm で一様に与えた. なお, 基準覆工厚もこの値とした. トンネルの許容断面積  $A_{max}$  はこの基準覆工厚時の断面積  $A_0$  で与える.

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, 主要な放射方向を包含するように, 加振周波数が 40Hz のときは鉛直軸から 45°, 60Hz のときは 60° までの範囲内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. なお, 式(14)の評価に用いる放射方向は,  $\Delta\theta = \pi/80$  間隔で与え, 加振周波数毎に定めた上記開き角の範囲内で設定した.

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(40Hz), 図-3(60Hz) に示

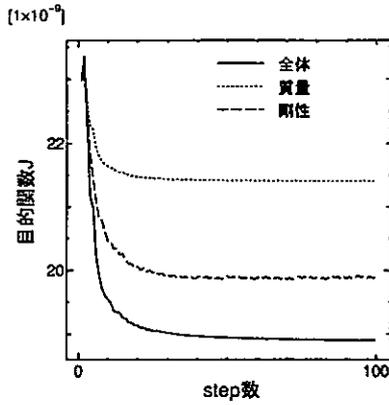


図-2 目的関数の推移 (40Hz)

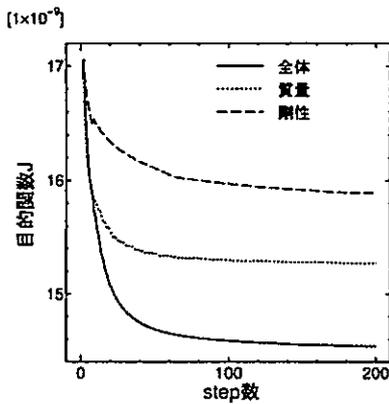


図-3 目的関数の推移 (60Hz)

す。なお、最適化計算は十分に目的関数値が収束するまで繰り返すものとし、40Hzでは100回、60Hzでは200回まで実行した。また、図には質量と剛性のいずれか一方のみを  $h_e$  と連動させて最適化した場合と、両者を連動させて最適化した場合(全体)とを合わせて示した。図より、いずれの場合も目的関数は最適化過程の進行と共に減少しており、本最適化手法が有効に機能していることが確認できる。なお、質量と剛性のいずれを覆工厚  $h_e$  と連動して変化させても目的関数が減少していることより、両者共に振動低減に有効であることがわかる。ただし、40Hz加振では剛性の効果が質量より大きく、逆に60Hz加振では質量の効果がより大きく現れており、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。これは、低周波数域では変位応答が準静的な弾性変形に支配されるため剛性の増加が大きく影響するのに対し、高周波数域では慣性力が支配的となるため質量増加が大きく影響することが相対的な差として現れたためと考えられる。

## (2) 放射平均パワー

最適化前後における放射平均パワー(式(15)の  $\bar{P}_\theta$ )の分布を図-4(40Hz)、図-5(60Hz)に示す。図では原点か

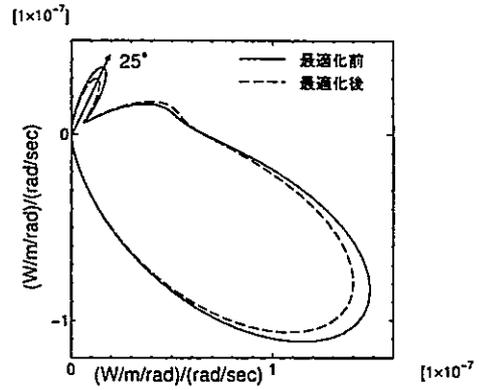


図-4 放射平均パワー  $\bar{P}_\theta$  の分布 (40Hz)

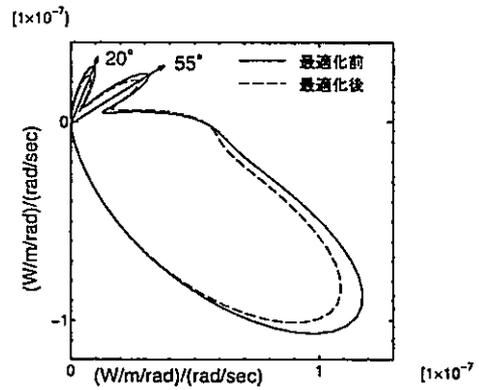


図-5 放射平均パワー  $\bar{P}_\theta$  の分布 (60Hz)

ら曲線上の各点までの距離が、その方向への放射パワーを示している。なお、放射パターンの対称性により右半分のみ図示した。また、ここでは最も振動低減効果の認められた質量と剛性の全体で最適化を行った結果を示した。40Hz加振では地表面方向に向かい斜め約25°方向に、60Hz加振では斜め約20°と55°方向に、それぞれ強い波動放射が発生している<sup>3)</sup>。いずれの周波数においても、最適化によりこれらの主要放射成分が低減されている。また、目的関数は上方に放射される波動エネルギーにより評価しているが、斜め下方に放射される波動エネルギーも同時に減少している。なお、このことについては以降の覆工厚分布に関する項目でも考察する。

## (3) 覆工厚分布

本最適化計算で得た覆工厚分布を図-6(40Hz)、図-7(60Hz)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。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おり、これらの差異に上述の放射パターンが影響しているものと思われる。

また、いずれの加振周波数の下でも、トンネル断面

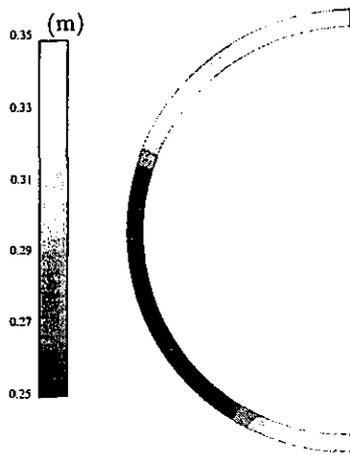


図-6 トンネル覆工厚の分布 (40Hz)

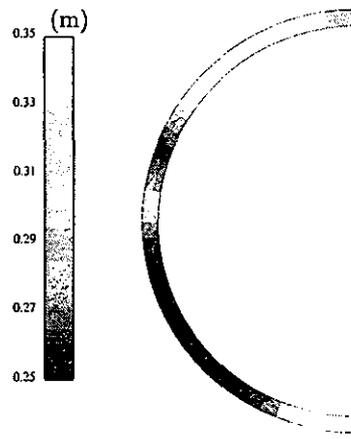


図-7 トンネル覆工厚の分布 (60Hz)

の下半分については同様の傾向を示しており、最下部では最大覆工厚、それ以外では最小覆工厚が選択されている。上述の様に、下方に放射される波動の影響は目的関数に反映されていない。それにも関わらずトンネル底部で増厚がなされていることから、その領域の覆工厚の増加が地表面に伝播して行く波動エネルギーの低減にも有効であることが理解できる。なお、図-4,5において、斜め下方に放射されるエネルギーにも減少が認められたが、これはトンネル底部の増厚により派生したものと考えられる。

以上より、加振周波数によって最適な覆工厚分布に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(アーチ部)および底部(インバート部)の増厚が寄与していることがわかった。

## 5. おわりに

振動低減の観点から、地下鉄トンネル覆工厚の最適分布の探索を試みた。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、剛性と質量の増加はいずれも振動低減に有効に作用しているが、その寄与度は振動

数により異なることがわかった。また、トンネルから地表面に放射される波動エネルギー低減には、トンネル上半分(アーチ部)およびトンネル底部(インバート部)の覆工厚の増加が重要となることが明らかとなった。

なお、実際のシールドトンネル建設においては様々な制約があり、ここに得た覆工厚分布が直ちに実現可能であるとは考えていない。ただし、本研究を通して得た知見は、トンネル振動特性のさらなる理解に有用となるものであり、それが今後の防振技術向上の一助となれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 阿部和久, 佐藤大輔, 古田 勝: 地下鉄道における各種防振対策の解析的検討, 鉄道力学論文集, 7, 7-12, 2003.
- 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.
- 3) 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, 9, 43-48, 2005.
- 4) Abe, K., Suzuki, T., Satou, D. and Furuta, M.: Three-dimensional analysis of subway track vibrations due to running wheels, Wave Prop.-Mov. Load-Vib. Reduc., N.Chouw and G.Schmid (eds.), Balkema, 149-156, 2003.
- 5) Bendsøe, M.P.: Optimal shape design as a material distribution problem, Struct. Optim., 1, 193-202, 1989.

## DESIGN SENSITIVITY ANALYSIS OF SUBWAY TUNNEL CONSIDERING VIBRATION REDUCTION

Kazuhisa ABE, Yuuki KASAHARA, Kazuhiro KORO and Masaru FURUTA

An optimization method is developed for the tunnel thickness design in the context of the vibration reduction of subway. The split of effects into stiffness and mass is attempted in the design sensitivity analysis. To achieve this, the elastic modulus and mass density are described in terms of the tunnel thickness. The stiffness and mass matrices can then be given by functions of the thickness. Through optimization analysis, it is found that the contribution of the stiffness and mass to the vibration reduction depends on the frequency. Moreover, it can be concluded that the thickening of the upper part and bottom of tunnel leads to the reduction of radiated waves.