地下鉄トンネル加振による地盤波動の伝播特性

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

1. はじめに

これまで，地下鉄列車走行時の地盤振動応答特性について 2.5 次元解析を通し検討してきた．その結果，地表面振動応答には，トンネル深さの増加と共にトンネル直上からより離れた領域に振幅のピークが現れることが分かった [1)]．この振動特性の原因を究明することは，地下鉄道の防振対策の面から非常に重要に思われる．

そこで本研究では，トンネル加振に伴い地盤中に放射される波動場に着目し，それと地表面振動特性との関連について考察する．

2. 放射波動の遠方場近似

2 次元平面ひずみ動弾性場を考える．ある閉境界 Γ から放射される波動場は次の積分表現式で書き表すことができる．

$$u_j(\mathbf{x}) = -\int_\Gamma p^*_{jk}(\mathbf{x},\mathbf{y})u_k(\mathbf{y})d\Gamma + \int_\Gamma u^*_{jk}(\mathbf{x},\mathbf{y})p_k(\mathbf{y})d\Gamma \quad (1)$$

ここで，u_k，p_k は Γ 上における変位と表面力，u^*_{jk}，p^*_{jk} は基本解である．

基本解の遠方場近似を求め，式 (1) に用いると遠方場における変位解近似を得る [2)]．

$$u_j(\mathbf{x}) \cong \Omega^T_j \frac{e^{i(k_T x+\frac{\pi}{4})}}{\sqrt{8\pi k_T x}} + \Omega^L_j \frac{e^{i(k_L x+\frac{\pi}{4})}}{\sqrt{8\pi k_L x}} := u^T_j + u^L_j \quad (2)$$

ここで，Ω^T_j,Ω^L_j は積分項を含む定数である．

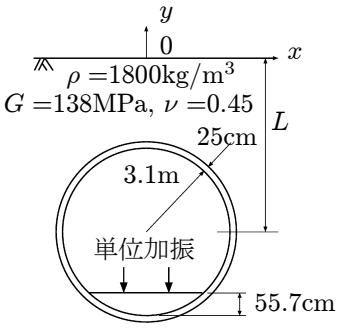
また，遠方場での表面力 $\hat{p}_j$ は次式で与えられる．

$$\hat{p}_j = \lambda \hat{x}_j u_{k,k} + \mu \hat{x}_i (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

式 (2)，(3) を用いることで，遠方場での放射波動の時間平均パワー $P_s(\omega)$ を得ることができる．

$$P_s(\omega) = -\frac{\omega}{2} Im(\hat{p}_j(\mathbf{x},\omega)\bar{u}_j(\mathbf{x},\omega)) \quad (4)$$

ここで，ω は振動数，$\bar{u}_j$ は u_j の複素共役，$Im(\cdot)$ は $(\cdot)$ の虚部である．



図–1　トンネル・地盤の解析条件

3. 解析結果

(1)　2 次元問題の解析条件

トンネル・地盤の解析条件を**図-1** に示す．トンネルは二次覆工なしのシールドトンネルを想定し，半径が 3.1m，厚さが 25cm の円筒体で与えた．また，コンクリート道床とトンネル覆工の物性値は同一とし，過去の解析経験を参考にせん断弾性係数を 1435MPa，ポアソン比を 0.26，質量密度を 2300kg/m^3 に設定した．外力は，トンネル道床上面に作用する一対の単位集中加振により与えた．地盤の質量密度 ρ，せん断弾性係数 G，ポアソン比 ν は**図-1** のように設定した．

解析に際し，トンネルおよびその周辺地盤は有限要素で離散化し，その外部の半無限領域を境界要素法により与えた．以下の解析において，トンネル深さは L=15m と 30m の 2 ケースとした．また，地下鉄軌道の主要振動成分が 30Hz〜70Hz の範囲内に存在することから，加振周波数を 40Hz と 60Hz の 2 種類に設定した．なお，トンネルおよび地盤共に減衰定数は 0.05 とし，複素剛性により与えた．

(2)　遠方放射波動近似に基づく考察

上述の 2 次元解析に基づき，式 (4) より求めた遠方場での平均パワーを**図-2,3** に示す．図は原点から放射方向に見て，その方向に単位開き角当りどれだけの平均パワーが放射されているかを示したものである．図より，加振周波数に依らず縦波成分はトンネル上部方向にはほとんど伝播していないことが分かる．また，横波成分もその多くは主にトンネル斜め下方向に放射されているが，地表面方向にも幾らか伝播している．その結果，地表面に到達する波動は

keywords：地下鉄トンネル，地盤振動，遠方放射波動近似
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

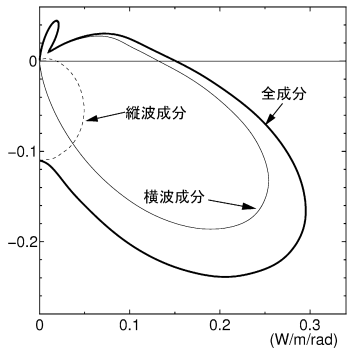


図-2 放射平均パワー：ω_0=40Hz

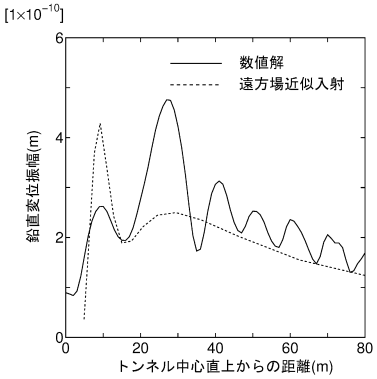


図-4 地表面変位振幅：ω_0=40Hz,L=15m

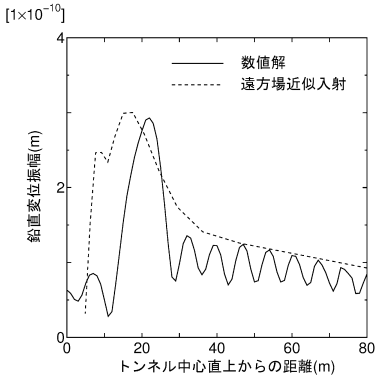


図-6 放射平均パワー：ω_0=60Hz,L=30m

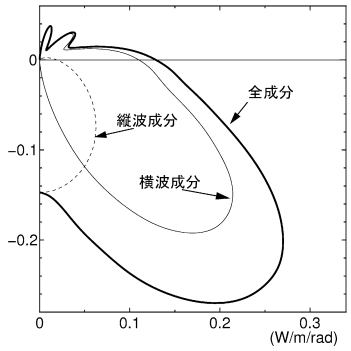


図-3 放射平均パワー：ω_0=60Hz

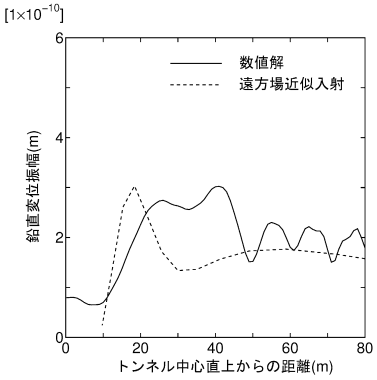


図-5 地表面変位振幅：ω_0=40Hz,L=30m

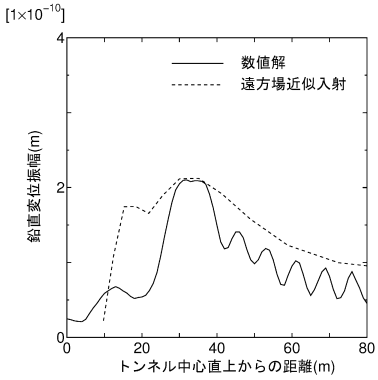


図-7 放射平均パワー：ω_0=60Hz,L=30m

主に横波成分から構成されていることが分かる．さらに，地表面に向かって放射される平均パワー分布には強い指向性が確認できる．40Hz 加振では鉛直軸から斜め約 25° 方向に，60Hz 加振では 20° と 55° の 2 方向にそれが現れている．

(3) 遠方放射波動近似に基づく地表面応答の評価

遠方放射波動近似の横波成分と同一振幅の平面波が地表面に入射する場合を想定し，変位振幅を求めた．結果を**図-4～7** に示す．なお比較のため，**3.(1)** に述べた 2 次元解析より求めた地表面変位振幅も合わせて示した．40Hz 加振については，鉛直軸から斜め 25° 方向に放射された波動による変位応答のピークが，遠方場近似を用いたものに明瞭に現れているが 2 次元解析ではそれより遠方に最大ピークが現れている．この差異は，40Hz では平面波近似が成立し得ないことを意味しており，2 次元解析で認められるピークの発生は地表面各地点への波動入射角等の違いに起因する波動の重畳効果によるものであると考えられる．一方，60Hz 加振について見てみると，40Hz 加振に比べ 2 次元解析との対応は良好なものとなっている．特に最大ピークの発生位置とその値について比較的良い一致が認められる．これは，40Hz の場合に比べ入射波長が短く，入射角や振幅・位相等の空間変動の影響が相対的に低減され，その結果平面波入射が近似的に成立していることによるものと思われる．またこのことは，60Hz 以上の高周波成分に関しては，遠方放射波動近似に認められた指向性に基づき，地表面変位のピーク位置が十分評価可能であることを意味しており，トンネル深さに比例してその位置が移動することが結論づけられる．なお，ピーク発生位置以遠においては，周波数に依らず変位振幅が適切に近似評価されている．

4. おわりに

トンネル加振が地盤振動に及ぼす影響について検討を行った．その結果，トンネルから地表面に到達する波動は主に横波成分であること，さらにその放射には強い指向性があり，周波数に依存することがわかった．また，トンネル直上から離れた位置に発生する変位振幅のピークは，周波数によってその発生機構に差異があるものの，トンネルからの放射波動の指向性と密接に関連してい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：列車走行荷重を受けるトンネル・地盤系の動的応答解析，鉄道力学論文集，8，47-52，2004.
2) 小林昭一 編著：波動解析と境界要素法，京都大学学術出版会，2000.