

IV-151 軟弱地盤における地下鉄振動レベルの予測手法

東京都立大学 学 小泉 威
 東京都交通局 正 古田 勝
 東京都立大学 正 長嶋 文雄

1. はじめに 地下鉄トンネル区間の列車走行に伴う地表面振動レベルの予測においては、地盤中の振動の減衰に関して、地表面の測定データのみを用い、単項の対数回帰式で表わす例が多く、更に予測の精度を向上させるためには、地盤中の波動伝播特性を考慮した手法が必要と考えられる。筆者らは、数年来軟弱地盤中に敷設されたシールドトンネルおよび地表面振動の実態調査を行なっている²⁾が、本報告では、単線円形シールドトンネルに関する検討結果をまとめ、一つの予測手法を提案し、これに基づいて地下鉄トンネル敷設深さが地表面振動レベルに及ぼす影響等について若干の考察を行なった。

2. 調査地点 実態調査は図-1の土質柱状図に示すようなN値10以下の沖積層中に、敷設深さの異なるS、KおよびOの3シールド（土被りはそれぞれ、12.3m, 14.0m, 10.0mである）で行なわれた。ただし、これらのシールドは、この敷設深さ以外は殆んど同じ条件（単線[トンネル内径6.2m]、コンクリート直結軌道、0.7kgレール、直線または緩曲線区間、列車走行速度約65km/h）である。K地点ではトンネル内部と地表面の同時観測が行なわれた。S、O地点は地表面における調査のみであるが、S地点は1/3オクターブバンド分析等のデータが数多く得られている。

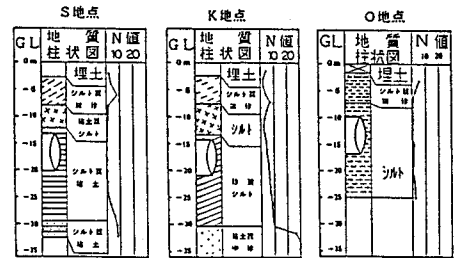


図-1 測定地点の地質柱状図とトンネル敷設位置

3. 地盤振動の距離減衰 距離減衰は図-2に示すように振動源から距離 r_0 離れた点の加速度振幅を a_0 、距離 r 離れた点の振幅を a とすると、幾何減衰および内部減衰に対応する項を考慮して見かけ上の減衰とし、一般に次式で表わしている。

$$a = a_0 r^{-n} \exp(-\alpha r) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 n 、 α は幾何減衰と内部減衰に関する係数である。式(1)に対し、波動の周波数特性を考慮に入れ、周波数領域をISO規格の1/3オクターブバンドに分割し、基準点から測定点までの相対的振動加速度レベルの低下量 ΔL_i を考えると、次式となる。

$$\Delta L_i = 20 \log(a_i/a_{0i}) = -20 n_i \log(r/r_0) - 8.69 \alpha_i (r - r_0) \\ = p_i \log\{(r_0+u)/r_0\} + q_i u \quad \dots\dots (2)$$

p_i は幾何減衰に、また q_i は内部減衰に対応する定数である。

3. 回帰分析結果 シールド側壁（図-3に振動加速度レベルを示す。）を r_0 地点とし、ここから地表の各測定点（トンネル中心直上の地表を0mとし水平距離50mまで）に至るまでの振動レベルの相対的低下量 ΔL_i と直線伝播距離 u を用いると各周波数バンド毎の p_i 、 q_i は重非線形回帰分析より求められる。 $v_{ij} = \Delta L_{ij}$ 、 $w_j = \log\{(r_0+u_j)/r_0\}$ とすれば（ここで、 $j=1 \sim n$ 、 n :データ総数）、式(2)は次式となる。

$$v_{ij} = p_i w_j + q_i u_j \quad \dots\dots (3)$$

従って、 p_i 、 q_i は次式で与えられる。

$$p_i = (\sum w_j v_{ij} \sum u_j^2 - \sum u_j v_{ij} \sum w_j u_j) / \{ \sum w_j^2 \sum u_j^2 - (\sum w_j u_j)^2 \} \\ q_i = (\sum w_j^2 \sum u_j v_{ij} - \sum w_j v_{ij} \sum w_j u_j) / \{ \sum w_j^2 \sum u_j^2 - (\sum w_j u_j)^2 \}, \quad \dots\dots (4), \text{ここで、} \sum = \sum_{j=1}^n \text{である。}$$

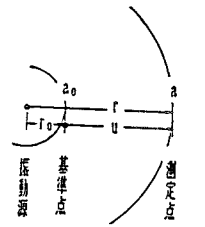


図-2 地盤振動の減衰

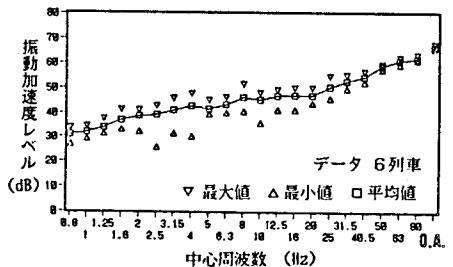


図-3 側壁の1/3オクターブバンド分析結果

振動源からの距離 r_0 の取り方による p_i, q_i の傾向を検討するため、見かけ上の距離として、単位長さの 0.1m, 1.0m または、シールド半径 3.1m の 3 ケースにつき、オーバーオール振動加速度を用い p_i, q_i を回帰式で求めると、 r_0 が大きい場合は p_i が大きくなり、従って q_i が小さくなる傾向がある。これが最終的な予測値に及ぼす影響は僅かであるが、重要な問題であると思われる。ここでは、 $r_0 = 1.0\text{m}$ とした。

S および K シールドのデータを用いた重非線形回帰分析により求めた p_i は $-0.18 \sim -23$ の範囲の値となり、 p_i がばらつく結果となった。その理由として地盤の半無限境界の存在や地質の不均質などが考えられる。ここで、強いて幾何減衰に対応する係数 p_i を周波数に関係なく一定値とする場合には次に示す 2 法が考えられる。

方法①： p の算定は、振動の卓越成分が大きく寄与するオーバーオール振動加速度に対し、回帰式により p を決める。この方法では $p = -2.5$ となる。これから図 - 4 に示すような q_i が得られる。

方法②： p の最適な値として、 p を 0 から 1 ずつ増加させ、このときの各周波数バンドの回帰式の標準偏差を積分し、その値が最小となる p を求める（図 - 5）。この方法によると、 $p = -5$ が最適となる。同様にこれから q_i が求められる。これらの q_i の値を $0.8 \sim 63\text{Hz}$, $63 \sim 80\text{Hz}$ の 2 区間に分け直線で近似した（表 - 1）。

4. 振動レベルの予測 軟弱地盤の任意地点のシールド側壁の 1/3 オクターブバンドの振動加速度が分かれば、式 (2) により低下量 ΔL_i を求め、各オクターブバンド毎に振動感覚補正を行なうことにより、予測地点の振動レベルを予測できる。図 - 1 に示した地点について表 - 1 の定数を用いて予測した結果を図 - 6 に示す。どの方法も予測値は測定値に良く対応している。次に、方法①によりシールドトンネルの土被りをパラメータとした場合の予測を図 - 7 に示す。敷設深さによって異なるが、解析範囲内では土被りが 1m 増すごとに直上 0 m 地点では $0.40 \sim 0.25\text{dB}$ 低下しており、またトンネルから水平距離 30m 程度離れると、殆んど差が無いという結果が得られた。

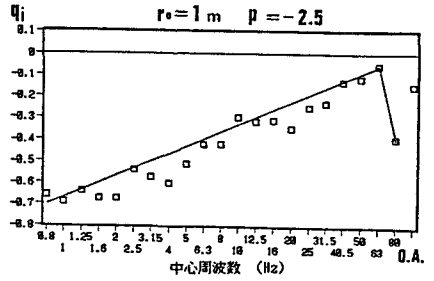
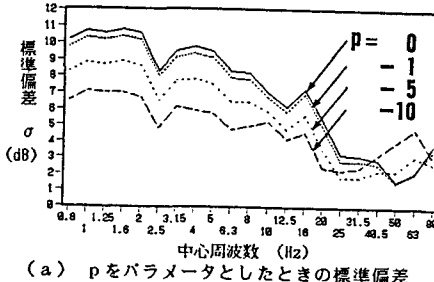
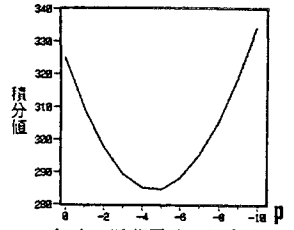


図 - 4 S 地点の内部減衰に対応する定数 q_i



(a) p をパラメータとしたときの標準偏差



(b) 標準偏差の積分値

図 - 5 最適な p の計算法

表 - 1 q_i の近似式

	0.8~63Hz	63~80Hz
方法①	$-0.740.343 \log(f_c/0.8)$	$-0.05-3.16 \log(f_c/63)$
方法②	$-0.6+0.364 \log(f_c/0.8)$	$0.07-3.61 \log(f_c/63)$

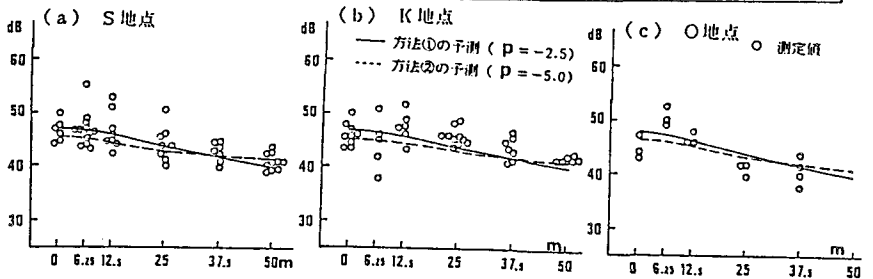


図 - 6 各地点の測定値と予測値

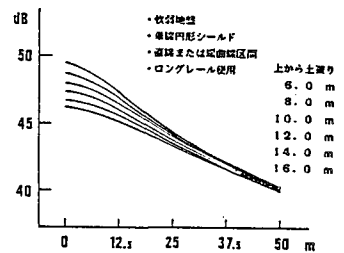


図 - 7 土被りをパラメータとしたときの予測例

【参考文献】 1) 長嶋・古田・伊藤：地下鉄振動の現況調査に関する一提言、土木学会第42回講義集。

2) 長嶋・古田・秋好・伊藤：地下鉄シールドトンネルおよび周辺沖積地盤の波動伝播特性、構造工学論文集Vol.34A (1988年3月)