

地下鉄シールドトンネルの振動調査と解析例

AN INVESTIGATION AND ANALYSIS OF SUBWAY-INDUCED VIBRATION

古田 勝*・長嶋文雄**

Masaru FURUTA and Fumio NAGASHIMA

Prediction of the vibration level of subway-induced vibration is one of important items in the environment assessment report that has to be made prior to subway construction.

For the purpose of improving the prediction method, an investigation has been made on wave transmitting behavior in the subway shield-tunnel and poor alluvial soil. Distribution of the vibration levels, spectra of the several tracks and the phase velocity and wavelength of the predominant wave are determined in this study.

Keywords: shield-tunnel, traffic vibration, subway-induced vibration, spectrum, phase velocity, wavelength

1. はじめに

列車走行に伴うトンネル近傍の地盤振動は、地下鉄建設の環境影響評価において予測・評価項目とされ、振動レベルの予測が行われている。この列車走行に伴うトンネル周辺地盤の振動（以下「地下鉄振動」と言う。）の予測方法は、主として既設地下鉄の地表部で測定された振動レベル分布をトンネルからの距離の関数として対数回帰式で表わし、これに列車速度、軌道構造の種別、トンネル構造の区分（箱形トンネル又はシールドトンネル）及びトンネル重量等の補正を加えて予測式とする例⁻¹⁾が多い。

しかし、これらの予測手法は地盤振動の振動レベルの予測を主目的とするものであり、トンネル近傍に設けられた住宅、ビル等への環境振動対策を計画する場合は、地下鉄振動の加速度振幅やスペクトル等の予測が必要である。

一方、シールドトンネルの振動に関する過去における研究は、地表面の振動レベルを主に調査した例⁻²⁾が多く、トンネル及びトンネルから伝播する振動に関する測定例^{-3), -4)}は数例のみであり、地下鉄振動の細かい特性を考慮できる予測手法を確立するためには、振動実態調査を行ない、資料を蓄積することが重要である。本研究は、地下鉄振動の予測手法を改善するための基礎データを得ることを目的に、N値0～5程度の軟弱な沖積地盤中に敷設した地下鉄シールドトンネルの振動調査を行ったものである。

* 正会員 東京都交通局 高速電車建設本部建設部

**正会員 工修 東京都立大学 工学部土木工学科

2. 地下鉄振動の一般的な特性

地下鉄振動の報告例^{(2)・(3)・(4)}によれば、地表で観測される上下方向振動レベルは、トンネルの土被りが10～20mの場合、ピークはトンネル直上ないし直上から少し離れた地点にあり、トンネル直上から25m以内では50dB前後である。地震動や道路交通振動が対象とする周波数領域が20Hz程度以下にに対して、地下鉄振動は40～60Hzの周波数領域が卓越する高周波振動であることが確認されている。また、振動の減衰特性については、軌道付近の数百galの振動加速度がトンネルアーチ部では数十galに、地表面では数galに減衰するなどが調査されている。

これらを参考に、まずシールドトンネル内において多点観測を行うこととした。この観測においては、筆者等がこれまで行った十数ヶ所の振動加速度計によるシールドトンネルの調査から、振動に影響する諸因子を少なくして、なるべく同一条件のもとで振動特性を把握するために、測定地点を選択するに際して、次に示す条件の箇所で測定を行うこととした。

- 1) N値0～5程度の沖積地盤に敷設したトンネルを対象とする。
- 2) RCセグメントで二次覆工を行なったトンネルとする。
- 3) 線路の平面及び縦断線形は、直線ないし緩曲線区間とする。
- 4) 測定対象とする列車は、20m車両の6又は8両編成とし、列車速度を40～60Km/h程度とする。
- 5) 軌道構造の違いによる影響を調べるため、コンクリート直結軌道、バラスト軌道及び防振まくらぎの3区間とする。
- 6) 対象とするシールドトンネルは、同径の単線地下鉄トンネルとする。

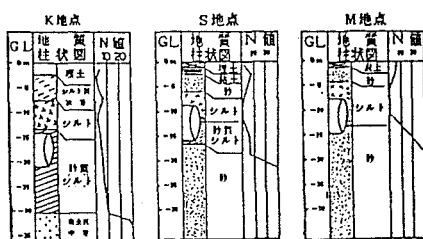


図-1 測定地点の地質柱状図及びN値

3. シールドトンネルの振動特性

3・1 測定地点と測定方法

測定地点は、東京江東地区の沖積地盤に敷設した都営地下鉄の単線シールドトンネルで、K地点（コンクリート直結軌道）、S地点（バラスト軌道）及びM地点（防振まくらぎ）の3地点とした。なお、バラスト軌道は振動対策としてバラストマットを敷設した箇所である。

図-1に測定地点の地質柱状図、N値及びトンネル敷設位置を示す。各地点の測点は図-2に示すとおり、トンネルのおおよそ半断面について、軌道の道床又はインバート部、待避通路部、スプリング部、アーチ部に合計9点設けた。各測点の測定方向は図に示す矢印に示すとおり、半径方向（測点A、C、E、G、H）と円周方向（測点D、F、I）としたが、測点Bについては上下方向とした。測定は、圧電型ピックアップを用いて振動加速度と変位を約20列車について行い、これをデータレコーダーに同時記録した。地表面においてもトンネル直上の0m測点と水平距離12.5m離れた測点、計2箇所の上下方向振動レベルを測定した。

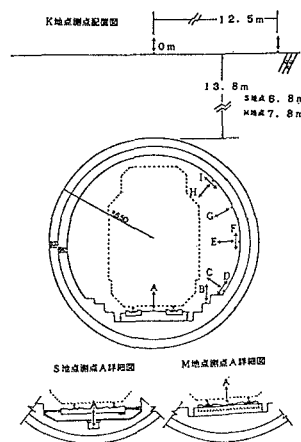


図-2 測定位置

3・2 シールドトンネルの振動加速度分布

各トンネル毎に列車速度等のそろった代表的な3列車の加速度データを選び、1/5,000秒刻みで列車中央部分が通過する箇所について、1車両の通過時間に相当する約1.6秒間をA/D変換した後、周波数分析等を行なった。表-1にトンネル内各測点の0.5～1,250Hzの周波数域における1/3オクターブバンドの振動加速度レベルと地表の振動レベルを示す。なお、各々の測定箇所の列車速度は異なっており、K地点；59km/h、

S地点；50km/h、M地点；39km/hであった。

図-3にコンクリート直結軌道（K地点）の軌道付近（測点A）、アーチ部（測点H、I）の加速度波形及びパワースペクトルの例を示す。3地点に共通して次の事項が認められた。

- ・台車の通過ごとに振動加速度波形のピークが軌道に近い測点A～Dと半径方向の測点E、G、Hに見られるが、円周方向の測点F及びIではピークはあまり明瞭に現われず、定常に近い状態となっている。
- ・振動加速度振幅は、軌道に近い測点ほど円周方向と半径方向の差が認められるが、アーチ部の測点G～Iでは、同程度となっている。従って、振動加速度レベルの差も小さい。
- ・円周方向の測点（D、F及びI）は、800～1,250Hzの高周波成分を含み、振動加速度波形は円周方向に比較して密であり、疎密波成分が含まれていることがわかる。

次に、図-4は、測点B（待避通路部）と測点H、I（アーチ部）の1/3オクターブバンド分析結果を示したものであり、次の事項が認められた。

- ・K地点（コンクリート直結軌道）及びM地点（防振まくらぎ）は、軌道付近のレベルに比較してアーチ部のレベルが40Hz以下の周波数域で著しく低下している。これに対して、S地点（バラスト軌道）は広い周波数域にわたり50dB前後で、レベルが平坦である。
- ・K地点（コンクリート直結軌道）は、他の地点よりも40～60Hzの周波数域のレベルが高く、オーバーオール(OA)も高いレベルを示している。
- ・M地点（防振まくらぎ）の測点Bは、低ばね定数の防振マットで支持された構造であるため、数Hzの周波数域にピークがある。
- ・測点I（円周方向）と測点H（半径方向）のスペクトルは、800Hz以下の周波数域ではほぼ良く似た形となっている。

図-5は、K地点の測点Bにおける卓越周波数（20、63、315、1,250Hz）に着目し、半径方向と円周方向の振動加速度レベルの減衰傾向を比較したものである。両方向とも同じ減衰傾向を示し、周波数によらず軌道から離れるに従ってレベルが低下している。但し、20Hzのバンドの減衰が著しい。

3・3 シールドトンネルの変位分布

図-6にS地点の測点Hの変位スペクトルを例に示したが、各地点とも4～8Hzが卓越していた。図-7はS地点の各測点の変位について、0.05秒間隔で0.2秒間の運動の軌跡を示したものであり、片側断面については、対称変形していると思倣して描いたものである。軌道付近の変位量が約0.1mm生じるのに対して、アーチ部は半径方向が0.01mm程度、円周方向が

	道床 インポート	待避 通路	—			スプリング 部			アーチ部			地上 振動レベル
測点	A	B	C	D	E	F	G	H	I	0a	12.5	
K地点	92	82	81	80	82	78	79	78	79	50	48	
S地点	87	73	75	68	75	69	72	71	68	40	42	
M地点	79	74	63	78	63	70	71	65	64	37	40	

*シールド内測点は0.8～1250Hzに対する加速度レベル、地上は振動レベル 単位：dB

表-1トンネル内の加速度レベルと地表の振動レベル

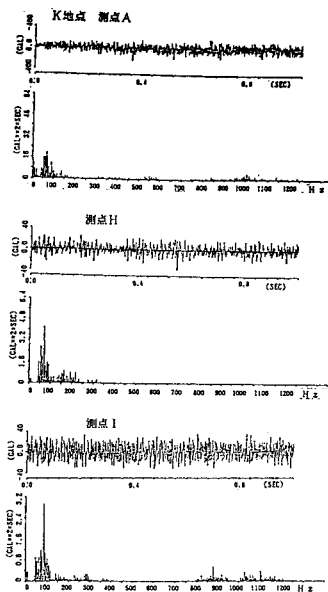


図-3 K地点の加速度波形及びパワースペクトル

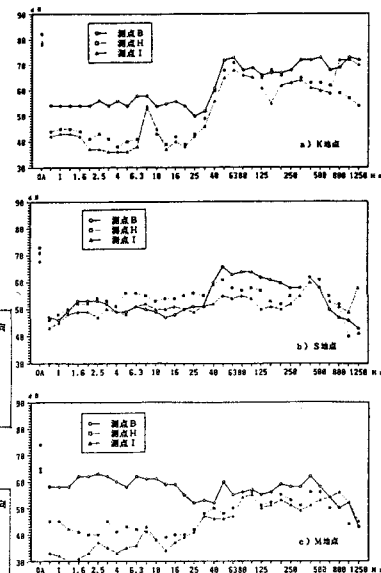


図-4地点別1/3オクターブ分析結果及びパワースペクトル

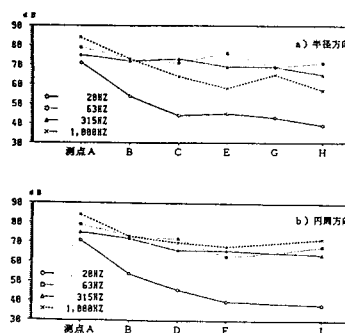


図-5 K地点の加速度レベル変化

0.001mm程度であり、自由表面を持つ半径方向に変形量が多いことを示している。トンネルの変形モードについて検討したが、変形モードを特定するまでには至らなかった。

4. 地盤を伝播する振動波動の調査

4・1 測定地点と測定方法

振動源のトンネル構造物から地盤中を伝播する振動波動の調査では、トンネル内と地表の同時観測を行い、同一記録装置に記録して、解析することが望ましい。K地点（コンクリート直結軌道）は同時測定のできる数少ない地点

地点の1つであり、付近の中間換気所を利用して、トンネル内と地表を延長コードで結び、データレコーダーに記録する方法で同時測定した。図-8にK地点の測点配置を示す。

トンネル内に3測点、地表に5測点を設置し、上下方向の振動加速度を測定した。測定データの解析は、必要に応じて1/500秒～1/5,000秒刻みでA/D変換した後、スペクトル解析及び1/3オクターブバンド分析等を行った。

4・2 弾性波速度

列車走行時の振動加速度の測定に先立ち、インパートに50Kgfの重量物を落下させ、弾性波（P波、S波）の伝播速度（ V_p 、 V_s ）を測定した。図-9に示す波動の伝播経路を仮定し、振動加速度波形から読み取った伝播時間を用いて算定した弾性波速度を図-10に示す。シールドトンネル内では、 $V_p=1,380\text{m/sec}$ $V_s=790\text{m/sec}$ 程度であり、弾性波動論に基づき速度比からポアソン比を求めると、0.26となった。また、地盤中を伝播する弾性波速度は測点によって多少異なり、 $V_p=800\sim1,410\text{m/sec}$ $V_s=110\sim270\text{m/sec}$ 程度で、測定地点の付近で行ったPS検層の弾性波速度の $V_p=1,050\text{m/sec}$ $V_s=105\sim225\text{m/sec}$ に近い値であった。同様にポアソン比を求めると0.48～0.49となった。 V_p は水中における波動伝播速度に近い値が観測されており、衝撃波は地下水の影響を強く受けることが予想される。 V_s についてはトンネル直上では回り込んだ伝播経路を仮定したにもかかわらず、他の測点に比べて速度が遅く、地下水位の部分的な低下や表土の影響等の理由が考えられる。

4・3 地盤を伝播する地下鉄振動波動の速度

波動の進行方向に隔たった2点で観測される振動は、伝播時間の分だけ位相遅れがあり、かつ多少変形している。地下鉄振動波動について、インパートと地表間において相互相関係数とクロススペクトルを求め、位相差と伝播距離から波動の波群速度を、またクロススペクトルから卓越周波数を調べることとした。図-11

にインパートに対する地表各測点の振動加速度の相互相関係数を示す。どの測点にも相関性が強い部分が2～3箇所認められ、これを位相遅れての小さい方から第1、第2、第3波群と呼ぶことにする。第1波群の

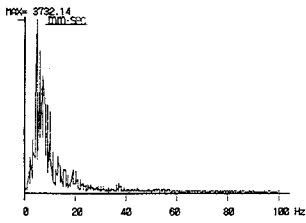


図-6 測点Hの変位波形のフーリエ変換

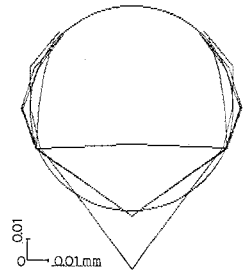


図-7 0.2秒間のシールドトンネルの変形

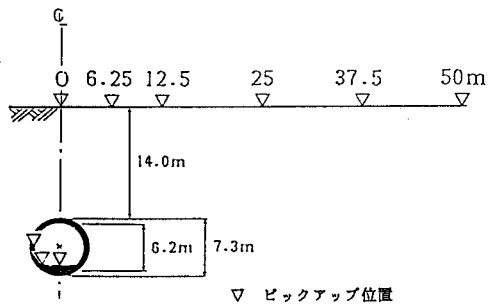


図-8 K地点の測点の配置

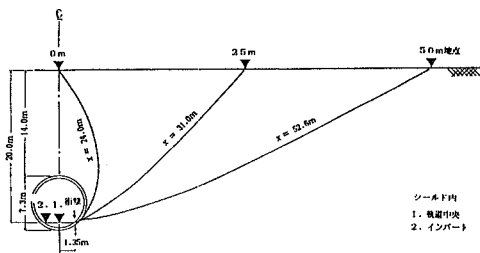


図-9 波動伝播経路の仮定

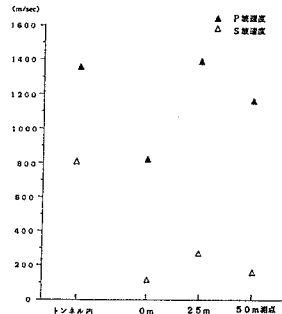


図-10 弾性波速度

相関性は他に比べて強い傾向にあり、次に第2波群が強くなっている。これらの波群の位相遅れと図-9に示した波動伝播経路により、波群速度を計算して図-12に示す。

図の波群速度は、解析を行った3列車の相互相関係数 C_{xy} の大きさを3段階に分類して表わしている。なお、地表50m地点での第1波群は換算波群速度が極端に速くなるため除いているが、50m地点は振動源から遠いため概して相関性が弱く、このような現象が現れたものと思われる。

図-12の波群速度と弾性波速度を比較すると、第1群波はP波速度よりも遅いが、P波である可能性が高い。エネルギーの小さい衝撃波とエネルギーの大きな地下鉄振動波との伝播特性の違いが現れたものと思われる。また、第2波群はS波の速度に相当している。

次に、図-13にインバートに対する地表0m、25m及び50m測点の加速度波形のクロススペクトルを示す。クロススペクトルから、地中を伝播する波動は40~60Hzが卓越していることが判る。クロススペクトルから求めた卓越周波数と最も遅い波群速度から波長を計算すると、主要な波動で約7m、第2波群で2m程度である。

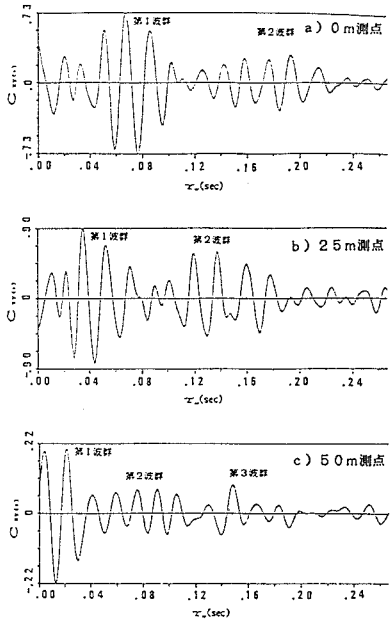


図-11 インバートに対する地表各点の相互相関係数

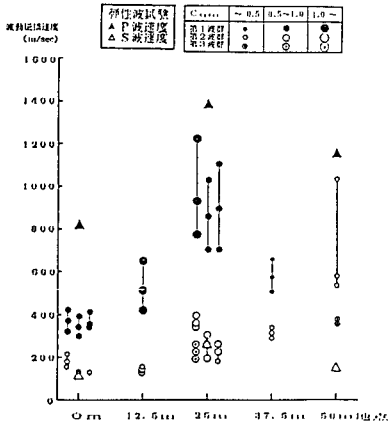


図-12 沖積地盤の波群速度

4・4 地盤を伝播する振動の減衰

K地点の軌道中心(測点A)の振動加速度は、最大400gal程度であるがスプリング部で40gal、地表で数galに振動が減衰していることから、次の方法により検討を行なった。振動源から距離 r_0 離れた点の振動加速度振幅を a_0 、距離 r 離れた点の振幅を a_r とすると、2点間の関係は一般的に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、次式で表わされる。

$$a_r = a_0 (r/r_0)^{-n} \exp \{-\alpha(r-r_0)\} \quad (1) \text{ ここで、} n, \alpha \text{ は幾何減衰及び内部減衰に関する定数である。}$$

地下鉄振動の周波数域が広いことを考慮して、ISO規格の1/3オクターブバンドに定める周波数領域に対して式(1)を適用し、さらに基準点から測定点までの振動加速度

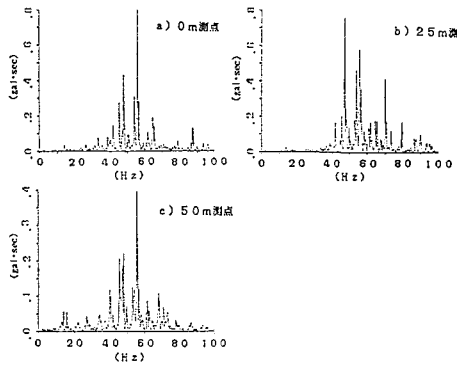


図-13 インバートに対する地表測点の加速度波形のクロススペクトル

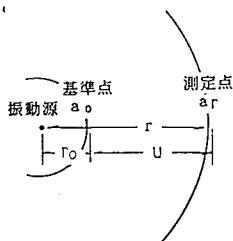


図-14 振動の減衰

レベルの低下量を ΔL_i で示すと、次式となる。

$$\Delta L_i = 20 \log (a_{ri} / a_{oi})$$

$$= -20 n_i \log (r / r_o) - 8.69 \alpha_i (r - r_o)$$

$$= p_i \log \{ (r_o + u) / r_o \} + q_i u \quad (2) \quad \text{ここで、}$$

$p_i = -20n_i$ 、 $q_i = -8.69\alpha_i$ であり、周波数領域 i における幾何減衰及び内部減衰に対応する定数である。

図-2に示したアーチ部の測点Hを基準点と仮定し、図-8の各地表測点の振動加速度レベルを測定点として回帰分析を行うこととした。

回帰分析においては、トンネルを地盤中の線状の振動源と見做し、幾何減衰の項 $p_i = -10$ として内部減衰の項 q_i を求めた。図-15に内部減衰の項 q_i を示す。図から、12.5～63Hzの周波数域は正の値であり、伝播する振動の減衰が小さいことを示している。

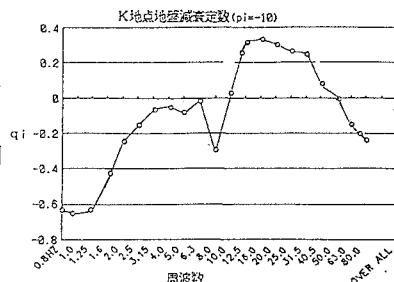


図-15 振動の沖積地盤中の減衰

5. おわりに

シールドトンネルの振動特性の調査並びに地盤を伝播する振動波の調査結果を要約すると、次のとおりである。

- 1) シールドトンネルの振動加速度は、軌道構造により振動加速度の分布及びスペクトルに差がある。
- 2) シールドトンネルの振動加速度振幅は、軌道に近い測点ほど円周方向と半径方向に差が認められるが、アーチ部では同程度の振幅となっている。
- 3) 地下鉄振動の予測式の作成において、トンネルを線状の振動源と仮定する場合には、スプリングないしアーチ部を基準とするのが妥当と考えられる。
- 4) インバートに衝撃を与えた時のトンネル内の弾性波速度は、P波1,380m/sec、S波790m/secであり、ポアソン比は0.26であった。また、沖積層地盤中を伝播する弾性波速は、P波800～1,410m/sec、S波110～270m/sec程度であり、測定地点の付近で行なったP-S検層から得た伝播速度に近い値を示した。
- 5) 相互相関係数からもとめた地下鉄振動の波群速度は、第1群波がP波速度の50～90%、第2群波がS波速度に相当していた。
- 6) トンネル-地表間のクロススペクトル解析によれば、主要な波の卓越周波数と波群速度から波長を計算すると、最も伝播速度が遅い波で約7mであった。
- 7) トンネル-地表間の地盤の減衰には周波数特性があり、12.5～63Hzの周波数領域は減衰が少ない傾向を示した。

これらの地下鉄振動の波動伝播の基礎的な事項は、地盤振動の予測式の作成や有限要素法による振動のシミュレーションを行う場合の資料に有効であるものと考えられる。

6. 参考文献

- 1) 風巻友治：地下鉄における防振工法、日本建築学会、環境振動分科会資料83-1、pp.25～33、1983.2
- 2) 浅野郡司：列車走行によるトンネル上の地盤振動、国鉄鉄道技術研究報告、NO.1207 pp.13～23、1982.3
- 3) 及川昭男、風巻友治：地下鉄シールドトンネルの地表における列車振動の調査例、土木学会、第2回関東支部学術講演概要集、IV-12、pp.351～354、1973.3
- 4) 長嶋、古田、秋好、伊藤：地下鉄シールドトンネル及び周辺沖積地盤の波動伝播特性、土木学会、構造工学論文集 Vol.34A、1988.3