

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

VIBRATION TRANSMISSIBILITY PROPERTIES OF THE SUBWAY SHIELD - TUNNEL
AND THE ALLUVIAL SOIL PERIPHERAL TO IT

長嶋文雄* 古田 勝** 秋好賢治*** 伊藤文人****

By Fumio NAGASHIMA, Masaru FURUTA, Kenji AKIYOSHI and Fumihito ITOH

Subway-induced vibration transmissibility properties of the shield tunnel and the alluvial soil peripheral to it are investigated.

Vibration acceleration was identically recorded inside the shield tunnel and above ground by using extension cords connected with the both side through a ventilation tower. Phase velocity and the predominant frequency of subway-induced vibration in the tunnel and alluvial soil are determined by calculating correlation function and cross spectrum. Coefficients of vibration attenuation with distance are also determined with every 1/3 octave bands by regression analysis. The theory using these coefficients makes the predictions of vibration level more accurate.

1. 序

地下鉄トンネルは既存構造物に近接して敷設される場合や、有効利用の面から、これと合築して総合的に計画される場合などがあり、この時の構造的な振動対策を講じる上でも軌道から発せられる高周波振動のトンネル構築内及び地中の伝播性状を明らかにする必要がある。

箱型トンネルに関して地下鉄振動の伝播問題は固体音に注目した研究が数例^{1), 2)}あるが、総合的な振動伝播問題については軌道振動(車輪軸系および軌道系)、トンネル構築振動、地盤振動、地表面振動さらに構造物振動など多岐に渡る問題^{3), 4)}を含んでいるために未だ十分解明されるまでに至っていない。

さらに、この種の研究では次の2点が障害となっているように思われる。すなわち、

- (i) 振動源となるトンネル構築の大きさが埋設深さに対して大きい(埋設深さはシールドトンネル直径Dに対して1D~3D程度である)ため点振動源と見なすことができず、従って、波動論などによる解析的なアプローチに限界があること。
- (ii) 供用時振動の地中伝播性状を調べるためにはトンネル構築と地盤および地表の同時観測(同一記録装置に記録すること)が必要であるが、シールドトンネルにおいてはこれが一般に困難であることなどである。

* 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒158 東京都世田谷区深沢 2-1-1)

** 東京都交通局主査 高速電車建設本部建設部計画第一課(〒100 東京都千代田区有楽町 2-10-1)

*** 工修 (株)大林組 東京本社土木技術第一部(〒101 東京都千代田区神田駿河台 3-4)

**** 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒158 東京都世田谷区深沢 2-1-1)

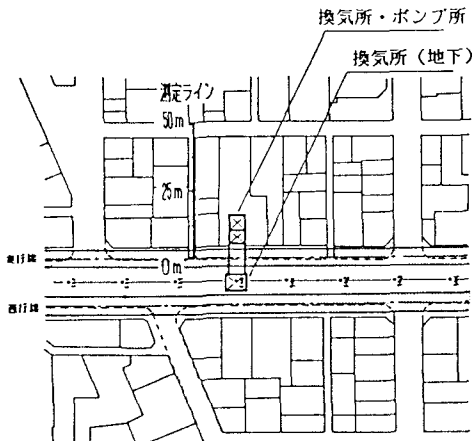
上記の問題点を解決するためにはなんといっても振動実態調査を行ない、この資料の蓄積が必要であり、しかも、振動源と振動伝播媒体の同時測定が望まれる。本報告は調査例の少ない軟弱地盤中に敷設された都営地下鉄S線のKシールドトンネルにおいて、トンネル内と地表を換気所を利用して延長コードで結び、上下方向加速度を同時測定し高周波振動のトンネル構築および周辺地盤における伝播特性を考察し、検討を加えたものである。

2. 測定地点および測定方法

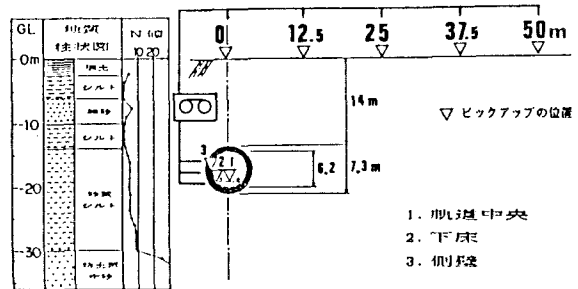
測定地点を選定するに際して以下に示す条件を加えた。

- 1) 調査例の比較的少ない軟弱地盤であること。
- 2) 地表部と地下部（トンネル内）のデータを同一の磁気記録装置に同時記録ができるような、地上と地下を連絡する開口部があること。
- 3) 列車速度が高速となる駅間中央付近であること。
- 4) 地表部にトンネル直上から直角に直線で50mまで測定できるスペースがあること。
- 5) 主要幹線道路から離れた場所であること（道路交通振動による影響を避けるため）。
- 6) 付近に地下室や基礎構造物を持つ建物がないこと。
- 7) 軌道の線形は直線ないしは緩曲線区間であること。

条件2）、3）に対しては中間換気所を利用することにしたが、他の条件を同時に満足するような地点は都営地下鉄S線において今回測定した箇所のみであった。図－1は測定地点の概略図である。薄墨部分が円形断面単線シールドトンネル（外径 7.3m、内径 6.2m）である。図－2は測定地点付近の地質柱状図とトンネル敷設位置およびピックアップの配置位置を示したものである。



図－1 測定位置付近概略図および地表測定ライン



図－2 地質柱状図と測定位置

地質は砂質シルトを主体としたもので、所によって細砂を挟んでいる。N値 10 以下の沖積層が GL -30 mまで堆積する江東デルタ地帯特有の軟弱地盤である。また地下水位は GL -1.0m 付近にある。

地表の測点は、トンネル中心直上を 0mとして 50mまで 12.5m毎に5点設定したが、延長コードの数の制約により同時に測定できるのは3点であった。トンネル内部の測点は軌道構造がコンクリート直結軌道であるため、コンクリート下床上の軌道中心（図－2の1）に1点、また軌道中心から 1.82m離れた点（2）およびトンネル側壁（3）の計3点とした。

道路交通振動の影響を極力避けるために最終列車通過後ピックアップの設置など測定準備を始め、始発列車から測定を開始することにした。尚、この列車走行時振動測定に先立ってトンネル下床に衝撃を加え、弾

性波試験を行なうことにした。測定データは必要に応じて 1/500秒～ 1/5,000秒刻みでデジタル化し、スペクトル解析^{5)、6)}、1/3オクターブ分析などの処理を行なった。

1/3オクターブバンド分析における中心周波数 f_c Hz の振動加速度レベル (Vibration Acceleration Level; VAL) と振動レベル (Vibration Level; VL) はそれぞれパワースペクトル $G(f)$ から次式を用いて計算した。これは、ISO規格の 1/3オクターブバンド分析器に準じており、また振動レベルの算定法は JIS C 1510 に準じたものである。

$$P_{fc} = \left\{ \int_{f_L}^{f_H} G(f) df \right\}^{1/2} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} VAL_{fc} &= 10 \log \{ (P_{fc})^2 / (P_o)^2 \} \\ &= 20 \log (P_{fc} / P_o) \end{aligned} \tag{2}$$

$$VL_{fc} = 10 \log \{ (P_{fc})^2 \cdot 10^{C_{fc}/10} / (P_o)^2 \} \tag{3}$$

ここで P_{fc} は中心周波数 f_c Hz の成分の振動加速度の実効値であり、 P_o は基準となる実効値 (10^{-5} [m/sec²])、また f_L 、 f_H はそれぞれ低域と高域の遮断周波数、 C_{fc} は周波数 f_c Hz における相対レソポンスである。

3. 弾性波試験結果

トンネル内の側溝に衝撃を加え、弾性波 (P 波、S 波) の伝播速度 (V_P 、 V_S) を計測した結果 (平均値) を図-3 に示す。これらは 2～3 回の試験の平均値である。シールドトンネル内では、 $V_P=1,380$ m/sec、 $V_S=790$ m/sec 程度であり、弾性振動論に基づき両者の速度比からポアソン比を求めると、0.26 となる。

一方、地盤における弾性波速度は測定地点によって多少異なり、 $V_P=800\sim1,410$ m/sec、 $V_S=110\sim270$ m/sec であった。同様にポアソン比を概算すると 0.48～0.49 程度となった。

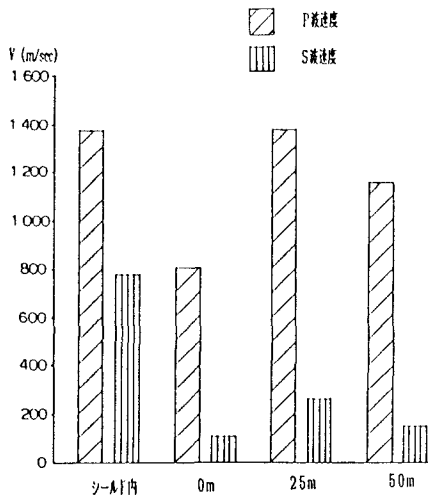


図-3 弾性波速度

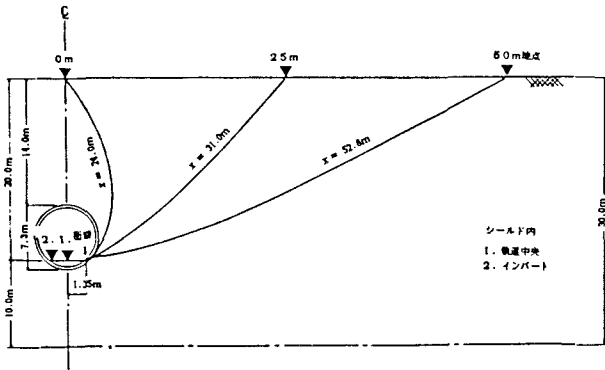


図-4 波動伝播経路の仮定

V_P は水中における波動伝播速度⁷⁾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 は地表 25m 地点でやや大きな値となっているが、他はほぼ一般の沖積層における速度と同程度⁸⁾のものとなっている。ここで伝播経路は図-4 のように仮定し、トンネル直上付近では回り込んだ経路を仮定

した。それにもかかわらず伝播速度が他の地点に比べて遅いのは地下水位が部分的に低くなっていることやトンネル上方の土が乱されているためなどが考えられる。

4. 供用時振動測定結果

1列車につきトンネル内3点、地表3点の上下方向加速度波を同時測定したが、図-5は約0.7秒間の記録波形例である。上から3波形がトンネル内の加速度(単位 gal)であり、それぞれ軌道中心、下床、側壁位置での波形例である。また下段の3波形が地表0m、25m、50m、における加速度である。軌道中心では最大400gal程度の加速度を示しているが、トンネル側壁では40gal、さらに地表では数galとなっており、高周波振動であることから非常に減衰が大きいという性質が見受けられる。

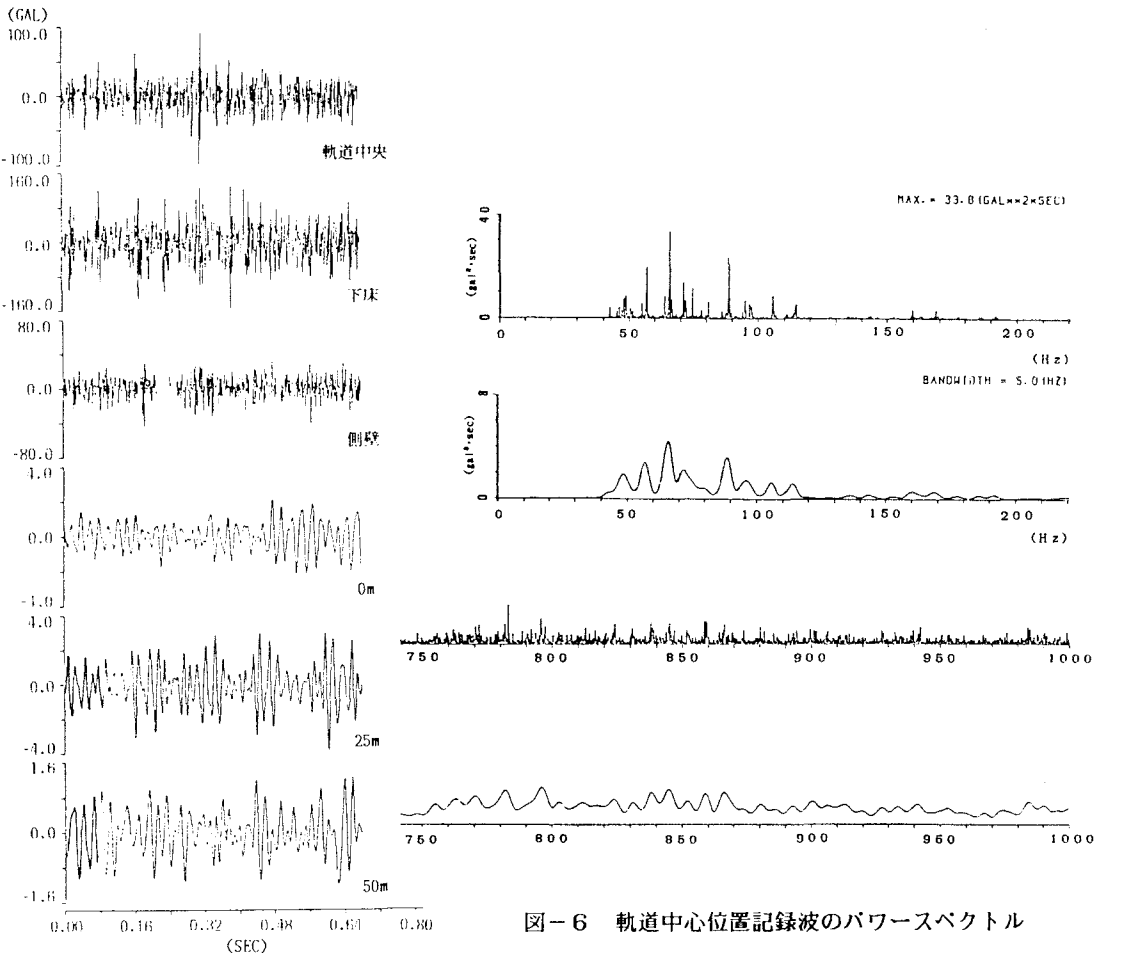


図-6 軌道中心位置記録波のパワースペクトル

図-5 トンネル内および地表各測定点の同時加速度波形

図-6は軌道中心での加速度波形のパワースペクトル(1,000 Hz まで)を示したものである。下段はバンド幅5 Hz のスペクトルウインドーによるスムージングを行なったものである。卓越周波数は40 Hz ~ 120 Hz およびの750 Hz付近以上に見られる。両者の間の周波数領域には卓越した部分は殆んど見られないので省略した。

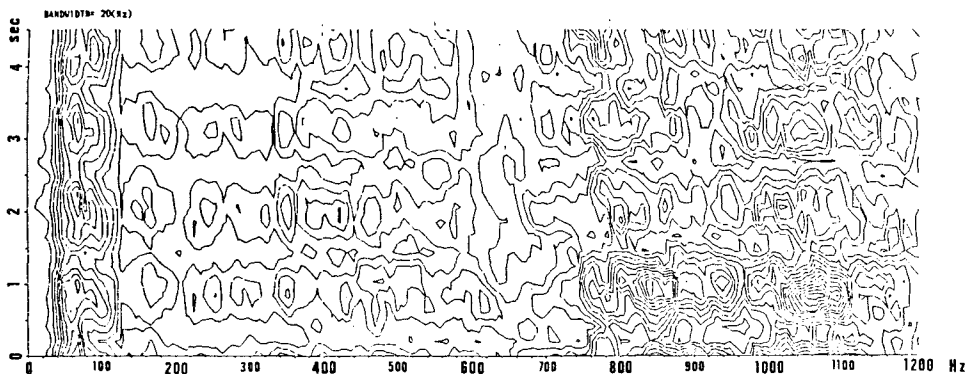


図-7は同じ軌道中心での加速度波のランニングスペクトル（フーリエスペクトル：バンド幅 20 Hzのスペクトルウインドーをかけたもの）をコンタラインで示したものである。

横軸が周波数、縦軸が経過時刻である。スペクトルの時刻変化に周期性のあることが確認できる。この周期は約 1.2 秒であり、これは列車の走行速度約 62 km/h から前後車両の近接した 2 台の台車通過時間に相当する。図-8 に参考までに車体寸法、車輪軸間隔などを示した。

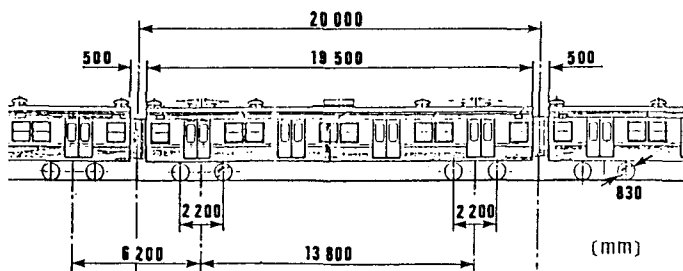


図-8 車体寸法および車輪軸間隔

40 Hz～60 Hz付近で見られる卓越部分は時刻に対してやや変動が緩慢である。これは軌道構造系（レールまくらぎ間）の固有な振動が台車通過によって励起されている可能性を示すものである。

図-9はトンネル内および地表の振動レベル（VL：白抜きのもの）、振動加速度レベル（黒く塗り潰したもの）を示したものである（0～90 Hzまでの周波数領域についてのもの）。ここで○印は今回行った地下一地上同時測定によるものであり、△、□印は後で追加測定したものである。また破線は暗振動（常時微動）のレベルを示したものである。

振動レベルではトンネル側壁におけるレベルと地表におけるレベルに2～3 dB程度の差しか見られず、地中における減衰が小さいことを示している。これは既に示した加速度最大振幅の減少傾向に対してやや異なった印象を受けるが、周波数帯域 0～90 Hz に関する解析であるためと地盤中で高周波成分が急激に減

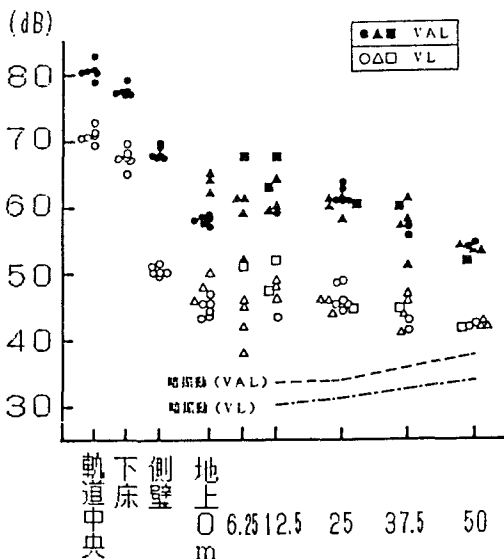


図-9 地表および地下部のVL・VAL

衰したことを示すものである。

軟弱地盤の地表における振動レベルの距離に対する減衰傾向は、良質な地盤における測定例^{9), 10), 11)}に比べて緩慢である。またトンネル直上より少し離れたところにある振動レベルの最大値は、ほぼ同じ埋設深さの良質な地盤のもの¹²⁾に対して同程度の値であった。

5. 供用時振動伝播特性

5. 1 地盤（トンネルー地表間）の伝播特性

波動の進行方向に隔たった2点で観測される振動はよく似ている部分があるが、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場合が多い。トンネル下床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群速度を、またクロススペクトルから卓越周波数を調べた。

図-10はトンネル下床に対する地表0m、25m、50m地点の加速度波の相互相関係数であり、図-11はクロススペクトルである。

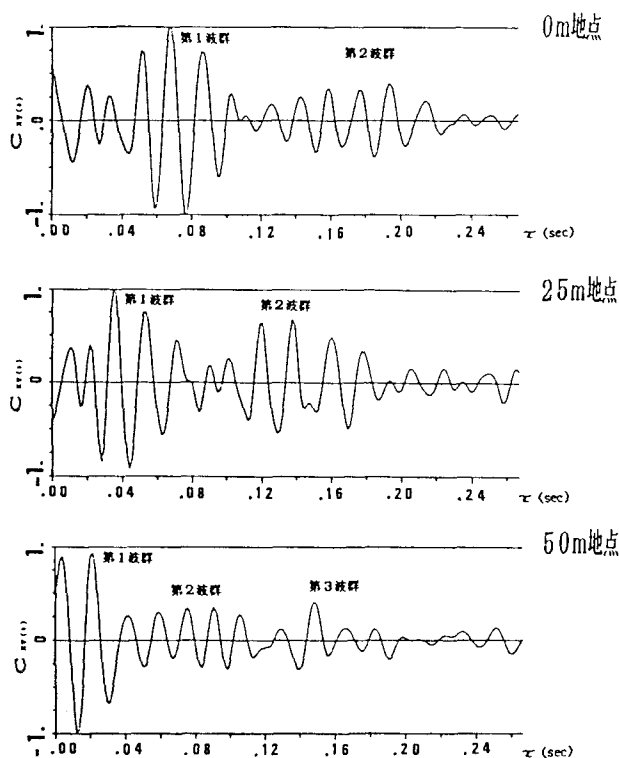


図-10 トンネル下床に対する地上各測点の加速度波の相互相関係数

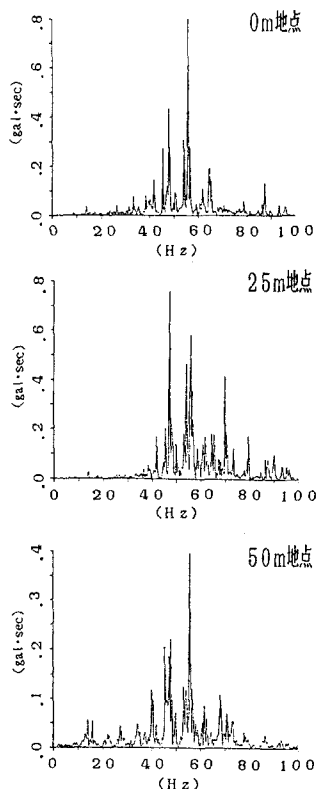


図-11 トンネル下床に対する地上各測点の加速度波のクロススペクトル

クロススペクトルから、列車走行時に地中を伝播する波動は40~60 Hzが卓越することがわかる。この理由は現在のところ不明ではあるが（トンネルの固有振動数であろうとする意見もある¹³⁾）、固有値解析や重複反射理論などによる説明が必要であろう。相互相関係数によれば、相関性が強くなっている部分が2~3ヶ所現われている。これを位相遅れ τ の小さい方から第1、第2、第3波群と呼ぶことにする。この中で第1波群の相関性が他の波群に比べて強い傾向がある。ついで第2波群の相関性が強く、第3波群は現われ

る場合と現われない場合がある。

図-12にこれらの波群の群速度を、波群毎(●;第1波群、○;第2波群、◎;第3波群)に示した。ここで各記号に大きさの変化を付けてあるが、これは相互相関係数 C_{xy} の大きさを3段階($0.0 \leq |C_{xy}| < 0.5$, $0.5 \leq |C_{xy}| < 1.0$, $|C_{xy}| = 1.0$)に分類して現わしたものである。但し、地表50m地点での第1波群は換算群速度が極端に速くなるため除いた。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われたものと思われる。

図中には弾性波試験から求められたP波(▲)、S波(△)の速度も示してある(ただし、12.5m地点と37.5m地点では弾性波試験は行っていない。)

第1波群の速度はS波速度とP波速度の中間にあるが、S波速度よりも速いためP波である可能性が強い。第2波群はS波の速度に非常に近い。

地表50m地点では第2波群がP波、第3波群がS波に相当していると思われる。

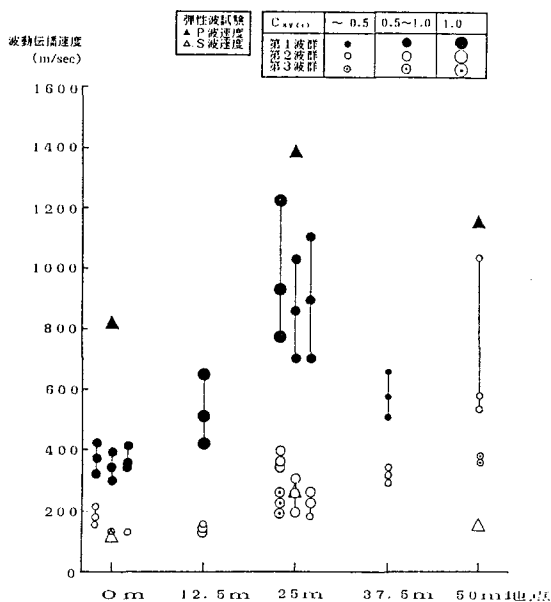


図-12 沖積地盤の波動伝播速度

5.2 距離減衰特性

振動源から距離 x_0 離れた点の加速度振幅を a_0 、距離 x 離れた点の振幅を a_x とする(但し、 $x \geq x_0$)と、両者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^{14), 15)}。

$$a_x = a_0 (x / x_0)^{-n} \exp \{-\alpha(x - x_0)\} \quad (4)$$

ここで n 、 α はそれぞれ幾何減衰と内部減衰に関する定数である。

式(4)は波動伝播媒体が均質かつ無限の広がりを持つもの例えば空気中の音の伝播問題に対して適用性がよい。しかし、構造物は有限であり、また地盤には地層および地表面境界がある。従って、周波数特性があることを考慮してISO規格の1/3オクターブバンドの各周波数領域に対して式(4)を適用することにする。すなわち、

$$a_{xi} = a_{0i} (x / x_0)^{-n} \exp \{-\alpha_i(x - x_0)\} \quad (5)$$

ここで添字(i)は1/3オクターブバンドの周波数に対する番号であり、 $i = 1, 2, \dots, 21$ である。また n は幾何減衰に対応する定数であるから各周波数バンドに渡って一定であると仮定することにした。振動源からの相対的振動加速度レベルの低下量 ΔL_i は上式より、

$$\begin{aligned} \Delta L_i &= 20 \log (a_{xi} / a_{0i}) \\ &= -20 n \log (x / x_0) - 8.69 \alpha_i (x - x_0) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

n は実測によるオーバーオール振動加速度レベルの低下量から、内部減衰に対応する項を無視して、回帰分析によって求めることにした。この結果、トンネル構築では $n = 0.35$ 、地中では $n = 0.28$ となった。これらはそれぞれ2.1 dB/倍距離、1.7 dB/倍距離の減衰に相当する。この地中(軟弱地盤)の幾何減衰の値は良質地盤^{9), 10)}のものに比べて小さい。

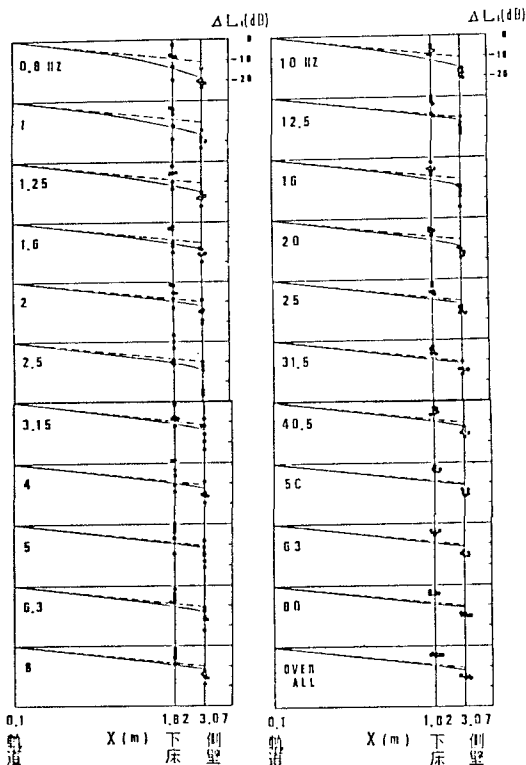


図-13 距離減衰（トンネル構築）

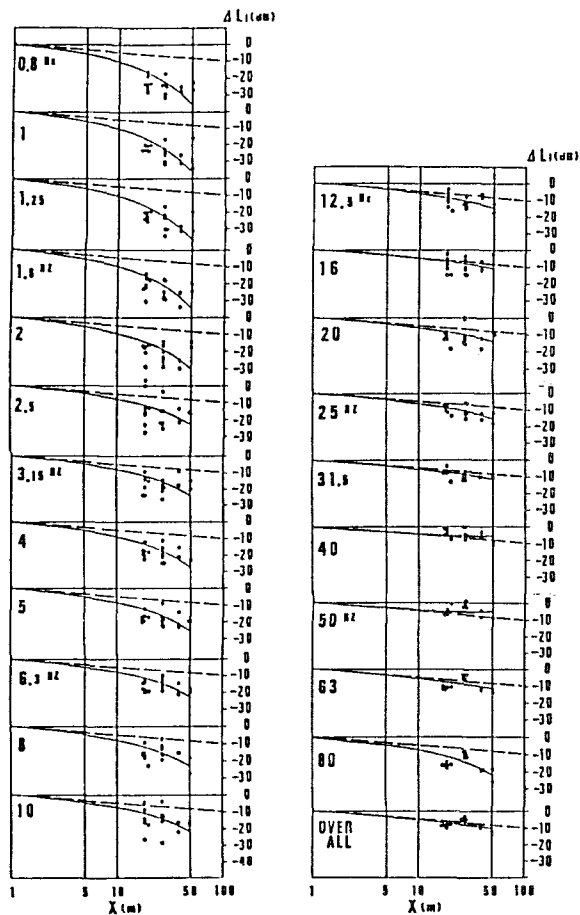


図-14 距離減衰（地中）

次に列車走行時振動の実測波の 1/3オクターブ分析結果と相対的振動加速度レベルの低下量 ΔL_i を求め、式(6)を用いて、同様に回帰分析によって各周波数領域に対する係数 α_i を求めた。ここで a_{0i} としてトンネル構築では軌道中心位置の加速度、また地中においてはトンネル側壁の加速度を用いた。また x_0 はトンネル構築では 0.1 m、地中に関しては 1 mとした。1/3オクターブ毎の ΔL_i を図-13（トンネル構築）、図-14（地中）に示す。

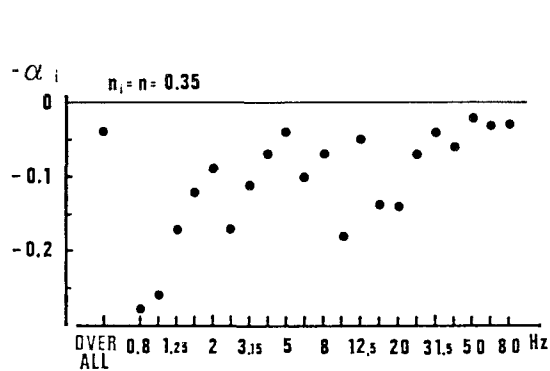


図-15 トンネル構築の α_i

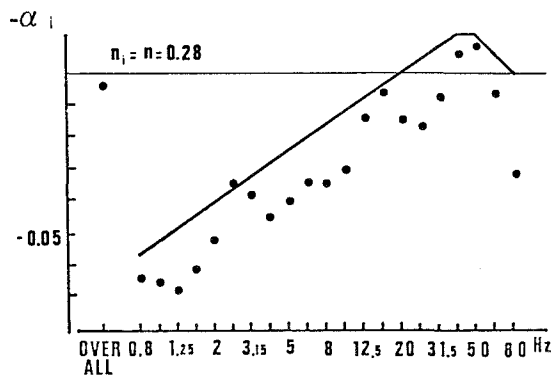


図-16 軟弱地盤中の α_i

図-15、16はそれぞれ 1/3オクターブバンド毎のトンネル構築、地中の内部減衰 α_i を示したものである（縦軸は $-\alpha_i$ で表示している）。トンネル構築、地中ともに周波数が高くなるにつれて α_i の絶対値が小さくなる傾向が見られる。トンネル構築の $(-\alpha_i)$ の範囲は-0.03~-0.28程度でバラツキが大きい。地中（トンネル側壁-地表間）の $(-\alpha_i)$ は中心周波数 40 Hz、50 Hz のバンドにおいて正の値となっている。これは地中において 50 Hz を中心に、30 Hz ~ 60 Hz 程度の波動が幾分増幅されていることを示すものである。

図-13、14には以上の回帰分析で得られた n 、 α_i と式（5）を用いて計算される回帰曲線を実線で、また距離減衰に対応する項のみについて破線で示してある。

シールドトンネル側壁における 1/3オクターブバンド毎の振動加速度レベルがわかれば、地表における各バンド毎の振動加速度レベルは式（5）を用いて予測でき、これからオーバーオール振動レベルも簡単に計算できる。

α_i の近似として図-16中に実線で示した値を用いた時でも VAL、VL とともに実測値によく対応した。

図-17は、図-2に示した測定地点から数 km 離れた R 地点の実測値と、予測値を示したものである。R 地点は今回調査した K 地点と非常によく似た地質（軟弱地盤）であり、土被り 12.9m の単線シールドトンネルが敷設されている。図-17中の実線は式（5）による予測値を示したものであり、また破線は実測データのばらつきを考慮に入れ、標準偏差値 2.5 dB を加えたものである。

VAL、VL とともに実測値と予測値はよく対応している。

6. 結語

これまで検討された例の少ない、軟弱地盤中に敷設された円形単線シールドトンネルに対して、列車走行時振動のトンネル内および地中の伝播特性について検討を試みた。ここでは換気所を利用して延長コードで地下と地上を結び、同一の磁気記録装置に同時に記録する方法をとった。この新しい試みにより、相互相関やクロススペクトルなどの統計処理が可能となり、高周波波動の伝播特性が明かとなった。また地上における測定範囲も従来より 2 倍程度延長しており、これによって振動レベル分布の様子を詳しく検討することができた。

波動伝播エネルギーの伝播問題を距離減衰問題として捉え、予測手法に関する検討を加えたが、この時、地盤の内部減衰の周波数依存性を考慮した 1/3オクターブ分析結果を用いる新しい予測手法を考案し、従来よりも精度を向上させることができた。

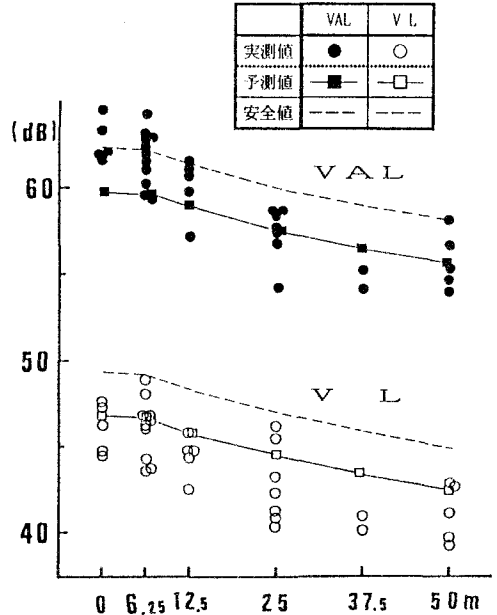


図-17 軟弱地盤における地表の振動加速度レベルと振動レベルの予測例

参考文献

- 1) 松田・岩瀬・橘・石井：地下鉄振動の近接建物への伝播、日本音響学会、1979年 3月。
- 2) 石井・橘・今石：地下鉄振動の近接建物への伝播、日本建築学会、環境工学委員会、環境振動分科会、83-1 資料、1983年 2月。
- 3) 渡辺：鉄道における振動の特性と対策、基礎工、Vol.3, No.10, 1975年10月。
- 4) 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回年次学術講演概要集（Ⅳ-110）、1987年 9月。
- 5) 大崎：地震動のスペクトル解析入門、1976年 7月、鹿島出版会。
- 6) 日野：スペクトル解析、1977年10月、朝倉書店。
- 7) F.E.Richart, Jr 他 岩崎・嶋津訳：土と基礎の振動、1975年 9月、鹿島出版会。
- 8) 地震探鉱実験グループ：地震波の生成・伝播に関する実験、1976年 5月。
- 9) 浅野：列車走行によるトンネル上の地盤振動、鉄道技術研究報告 No.1207、1982年 3月。
- 10) 渡辺・中村：地下鉄のトンネルと地盤の振動、鉄道土木、Vol.16, No.10、 1974年10月。
- 11) 古田・秋好・長嶋：地下鉄振動による地表面土粒子の運動軌跡、
土木学会第42回年次学術講演概要集（Ⅳ-111）、昭和51年 9月。
- 12) 古田・高橋・長嶋：列車走行に伴う地下鉄トンネル周辺地盤の振動特性、
土木学会第39回年次学術講演概要集（Ⅳ-47）、1984年10月。
- 13) 日本鉄道施設協会：鉄道振動対策研究会資料、1976年 9月。
- 14) 環境庁大気保全局特殊公害課編：道路交通振動防止技術マニュアル 1980年11月、ぎょうせい。
- 15) 塩田：公害振動の予測手法、1986年 6月、井上書院。

(1987年10月16日)