

シールドトンネル二次覆工の列車走行時振動 に対する低減効果

EFFECT OF SECONDARY LINING OF SHIELD TUNNEL FOR REDUCING SUBWAY-INDUCED VIBRATION

古田 勝* ・酒井 孝一** ・山本 稔***
Masaru FURUTA, Kouichi SAKAI, Minoru YAMAMOTO

Research has never been made on the effect of the secondary lining of a shield tunnel as to the reduction of subway-induced vibration.

To analyze the effect, study was made by the use of the two methods as follows:

- 1) Observations were made at two points, with and without a secondary lining, on the acceleration of tunnel and ground vibration. As a result, no noteworthy difference was found in the diminishing tendency between the two points.
- 2) Numerical analysis was made by the use of two vibration models, the mass and the FEM. The result was that the secondary lining had little effect on tunnel and ground vibration.

Keyword: Subway-induced Vibration, Shield tunnel, Secondary Lining of shield tunnel, Vibration level

1. はじめに

大都市における公共交通機関の整備の一環として、地下鉄の建設が進められているが、近年建設される地下鉄トンネルの形式は、駅部分を開削トンネル、駅間をシールドトンネルとする例が多く、シールドトンネルが占める割合が大きくなっている。

地下鉄シールドトンネルの二次覆工は、力学的補強効果、漏水の防止、電気施設物の添架等を目的としているが、二次覆工を施工した場合の列車走行時振動に対する影響については、トンネル重量が増すことにより、振動の低減効果があるとする考え方と、部材厚さが25cm程度の覆工ではトンネル断面を占める割合が少なく、低減効果をほとんど見込めないとする二つの考え方がある。

二次覆工コンクリートの列車走行時振動への影響については、同一箇所において同一条件のもとで二次覆工の施工、未設による差異を測定した事例や二次覆工施工区間と未設区間の地表面の地盤振動を統計的に分析し、その影響を検討した例がなく、定性的・定量的にも把握されていない。

一方、地下鉄建設の行政手続きとして行われる環境影響評価の列車走行時振動の予測式¹⁾では、二次覆工を施工した場合、トンネル重量が増加することにより地表面の振動レベルを低下させるものとしている。

* 正会員 東京都交通局工務部

** 東京都交通局高速電車建設本部建設部

***正会員 東京立大学名誉教授

この考え方は、土被りが浅く部材の薄い箇所の開削トンネルと土被りが深く部材が厚い箇所の開削トンネルの振動加速度を比較した報告例⁻²⁾ やトンネルを質点系の振動モデルに置き換え、トンネル重量の影響を検討した例⁻²⁾ に基づくものであり、シールドトンネルの重量に関しても同様な扱いとしている。

本論文は、東京都交通局が建設するシールドトンネルの二次覆工施工区間を判断するための内部規定を定めるにあたり、二次覆工の列車走行時振動に対する低減効果を確認するため、都営地下鉄12号線の二次覆工施工箇所と未設箇所において振動加速度の測定を実施し、測定データの分析を行うとともに、質点系モデル及び有限要素モデルによる数値シミュレーションを行ったものである。

なお、以下においては、公害及び環境振動が地表面の地盤振動を人の体感で表わす「振動レベル⁻³⁾」で評価するのが一般的であることから、振動レベルに寄与する90Hz以下の周波数領域を主に扱うこととした。

2. 検討の方法

シールドトンネルの二次覆工の列車走行時振動に及ぼす影響の検討は、同一箇所において二次覆工施工前後に同一条件のもとで振動を測定し、比較を行うのが望ましいと考えられが、測定のために地下鉄の営業を中止して二次覆工を施工したり終車から始発までの夜間に施工するのは費用及び時間の制約から実際上は困難である。また、二次覆工施工区間と未設区間の地表面の振動レベルの測定結果を単純に比較する方法は、軌道構造、列車速度、トンネルの土被り、車両及び軌道の保守状態など、振動に影響する因子⁻⁴⁾が多く、各測定箇所異なるため、難しい。

これらのことから、間接的ではあるが、次の方法が考えられる。

- 1) 地質、土被り等が類似する二次覆工施工及び未設のシールドトンネルにおいて、トンネル内と地表面の振動加速度を詳細に測定し、振動の減衰傾向から判断する。
- 2) 二次覆工施工及び未設区間における振動レベルの測定データを蓄積し、統計学的方法により判断する。
- 3) シールドトンネル工事中の箇所において、二次覆工の施工前後に、インバート上に重りの落下または起振機により加振し、トンネル内と地表面の振動加速度を詳細に測定し、減衰傾向を分析する。
- 4) 車両・軌道・トンネル・地盤等から構成される振動系を質点系モデルや有限要素モデルなどの数値解析モデルに置換し、二次覆工施工、未設の差異を比較検討⁻⁵⁾する。

このうち、2)の方法は、既設の都営地下鉄線では未設区間の延長が短く、分析するための十分な測定データ数が得られない。3)の方法は、工事施工中の適切な箇所が無い。などの理由から、以下の検討においては、1)及び4)の方法によることとした。

3. 二次覆工施工区間、未設区間における振動加速度の測定と測定データの分析

- 都営地下鉄のシールドトンネル区間における調査例^{-6)、-7)}によれば、列車走行時振動は次の特徴がある。
- ・列車走行時の振動加速度は、シールドトンネルの土被りが10～20m、コンクリート直結軌道、列車速度が60Km/h前後の場合、シールドトンネル内の軌道付近では数百galであるが、アーチ部では数十gal、トンネル直上ないし直上から少し離れた箇所で数galに減衰する。
 - ・伝播する振動加速度の周波数成分は、トンネル内では数Hz～数kHzの周波数域にわたるが、地表面では数Hz～300Hz付近までとなり、20～60Hzが卓越する。
 - ・シールドトンネル内の振動加速度は、軌道付近では車両台車の通過時にピークが認められるが、軌道から離れるにしたがいピークが平滑化され、アーチ部では定常的な振動となっている。
- 測定方法は、これらの特徴を考慮に入れ、シールドトンネル内に1～10kHzの高帯域振動計を4～5点、地表に0.5～250Hzの低周波数用振動計を3点設置した。

測定箇所は、地下鉄12号線の練馬～光が丘間の二次覆工施工の単線シールドトンネル2箇所（T及びH地点、外径5.3m、二次覆工厚さ25cm）と二次覆工未設の複線シールドトンネル2箇所（N及びK地点、外径8.5m）において行った。図-1に単線シールドトンネル、図-2に複線シールドトンネルの測点配置を示す。各測定箇所は、土被り10～16m、洪積層地盤、T及びN地点は防振まくらぎ軌道区間、H及びK地点はコンクリート直結軌道区間である。

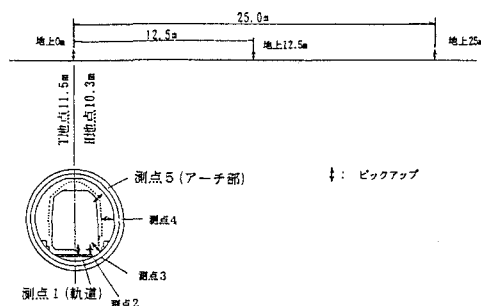


図-1 単線シールドの測点配置図

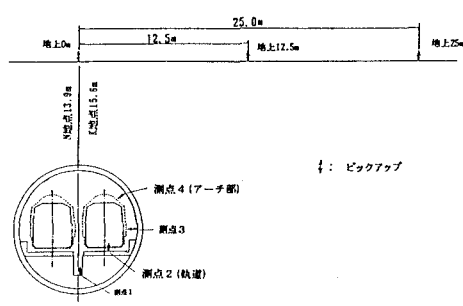


図-2 複線シールドトンネルの測点配置

測定作業は、道路交通振動等の影響を少なくするために機器類を夜間に準備し、早朝からデータレコーダーに振動加速度を記録した。

測定データの分析は、振動レベルの出力、1/3オクターブバンド分析、振動加速度の時刻歴波形の作画を行った。単線シールドトンネルにおける測定結果の例として、図-3に振動加速度の時刻歴波形、図-4に1/3オクターブバンド分析結果（6列車のエネルギー平均値）を示す。

二次覆工の施工、未設の差による地盤振動への影響を検討する方法として、1/3オクターブバンド分析結果を用い、次の二つの方法により差異を確認することとした。

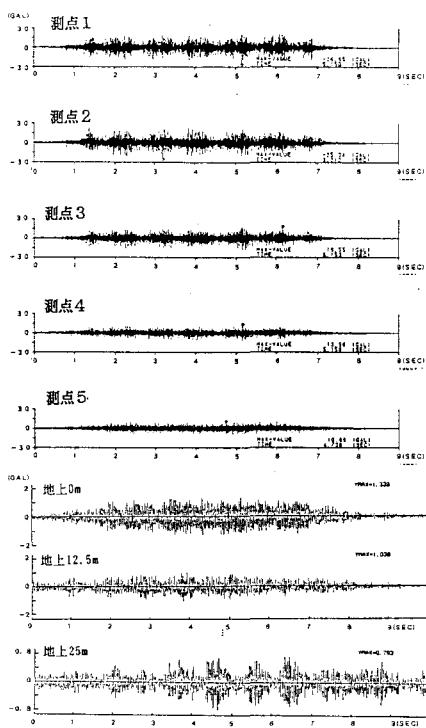


図-3 振動加速度の時刻歴波形(T地点)

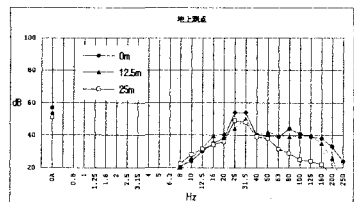
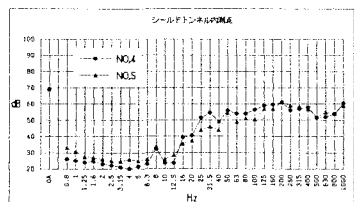
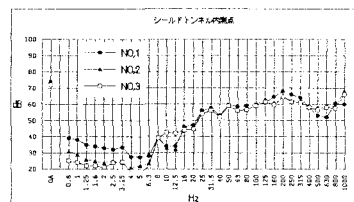


図-4 1/3オクターブバンド分析(T地点)

3・1、2測点間の振動加速度レベルの差の比較

振動源に近い点と振動源から離れた点の2測点間の振動加速度レベルの差を求め、異なるシールドトンネルと比較を行い、差異がある場合には、振動の伝播経路中の媒体に性状の違いがあるものと考えられる。

図-5に二次覆工を行ったT地点、図-6に二次覆工未設のK地点のそれぞれ軌道とトンネルアーチ部測点間

のレベル差並びにトンネルアーチ部と地表測点間のレベル差を示す。

図-5及び図-6について、振動レベルに寄与する90Hz以下の領域に着目して比較すると、軌道とトンネルアーチ部測点間の差は、二次覆工施工のTは-2~-10dB、平均-7dB程度、二次覆工未設のNは-10~-20dB、Kは-10dB前後であり、二次覆工未設箇所は僅かながら振動の減衰が大きく傾向を示している。また、トンネルアーチ部と地表間のレベル差は、二次覆工施工のTと未設のNとは同傾向を示している。

3・2、振動加速度の減衰傾向の回帰分析^{(6)・(8)}

軌道付近から発生した数十Hzの比較的周波数の高い振動は、図-7の概念図に示すとおり、トンネル覆工中を伝播し、シールドトンネルを振動させ、周辺地盤へ振動波動として伝播するものと想定される。

減衰傾向の分析は、シールドトンネル内と地盤中の二つに区分して回帰分析を行うこととし、次の式(1)を一般式として定義する。

振動源から距離 r 。離れた点の振動加速度振幅を a_0 、距離 r 離れた点の振動加速度振幅を a とし、幾何減衰及び内部減衰に関する項を考慮すると、見かけ上の減衰は次式⁽⁸⁾で表わされる。

$$a_r = a_0 (r/r_0)^{-n} \exp \{ -\alpha (r - r_0) \} \quad (1)$$

ここで、 n 、 α は幾何減衰及び内部減衰に関する定数である。

式(1)に対して、1/3オクターブバンド分析器に規定される周波数領域に適用すると、次式となる。

$$a_{ri} = a_{0i} (r/r_0)^{-n_i} \exp \{ -\alpha_i (r - r_0) \} \quad (2)$$

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 $i = 1, 2, \dots, 21$ である。

式(2)をデシベル表示して、さらに振動源からの相対的振動加速度レベルの低下量を ΔL_i とすれば、次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta L_i &= 20 \log (a_{ri} / a_{0i}) \\ &= -20 n_i \log (r / r_0) - 8.69 \alpha_i (r - r_0) \\ &= P_i \log \{ (r_0 + u) / r_0 \} + q_i u \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $P_i = -20 n_i$ 、 $q_i = -8.69 \alpha_i$ であり、 P_i 及び q_i は、周波数領域 i の幾何減衰と内部減衰に対する係数である。

回帰分析の方法は、振動源に近い測点を基準点とし、基準点からの振動の伝播距離 u と振動加速度レベルの相対的低下量 ΔL_i の関係を複数の測点に対して式(3)を適用して回帰することにより、周波数領域 i の P_i 及び q_i をもとめることができる。

シールドトンネル内における振動加速度の減衰傾向の回帰分析は、軌道を基準点に、トンネル内の各測点までの距離と軌道とのレベル差の関係から求めることとした。なお、セグメント及び二次覆工の材質がコンクリートであり、内部減衰がきわめて小さいことから、内部減衰を示す項は $q_i = 0$ とした。また、振動の伝播経路は軌道中心から各測点までの最短距離を仮定した。

シールド内の回帰分析結果を図-8に示す。図から、二次覆工未設シールドトンネル(K及びN地点)は、 $P_i = -10 \sim -15$ であるのに対し、二次覆工施工(T及びH地点)の場合は $P_i = -5 \sim -10$ 程度であり、二次覆工施工シールドトンネルは減衰が小さいことを示している。

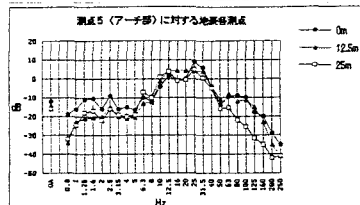
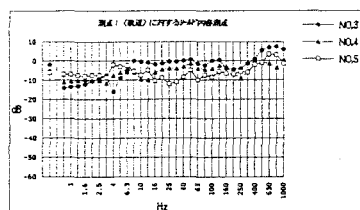


図-5 T地点の2測点間のレベルの差

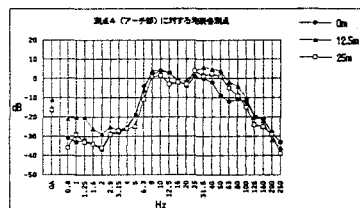
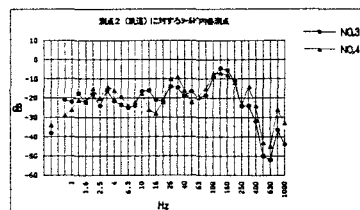


図-6 N地点の2測点間のレベルの差

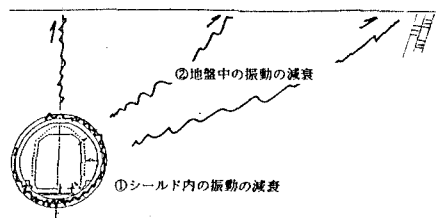


図-7 地盤へ伝播する振動の概念図

次に、都営新宿線（10号線）の沖積地盤に敷設した二次覆工施工の単線シールドトンネル（外径7.3m、二次覆工厚さ25cm）について、同様な方法で回帰分析した結果を図-9に示す。これを12号線の例（図-8）と比較すると、30Hz以下の周波数域は各測定箇所によって差があるものの、31.5～80Hzの周波数域は P_i が-5前後の値を示す箇所が多い。図-8 12号線シールドトンネル内の回帰分析結果

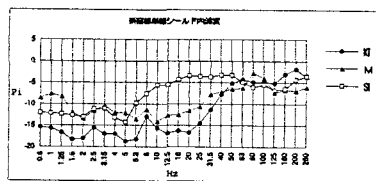
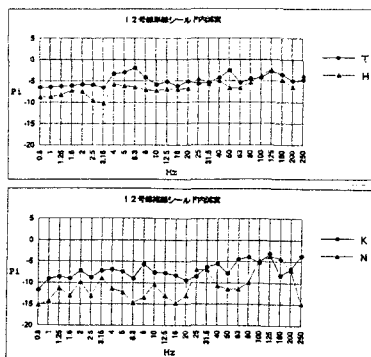


図-9 新宿線シールドトンネル内の回帰分析結果

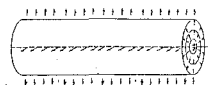


図-10 地盤中の線状振動源

洪積地盤中を伝播する振動の減衰傾向の回帰分析は、図-10に示すとおり、シールドトンネルを地盤中の線状の振動源と見なし、式(3)の幾何減衰項 $P_i = -10$ とし、トンネルアーチ部の基準点から地表各測点へ最短距離の経路で振動が伝播するものと仮定し、アーチ部からの直線距離とアーチ部と各測点間のレベル差から地盤の内部減衰に対応する項 q_i をもとめた。

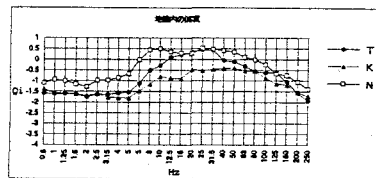


図-11 地盤を伝播する振動の回帰分析

図-11に結果を示す。図から、各測定箇所とも10～63Hzの周波数域は、振動加速度の減衰が小さい傾向を示すこと、K地点は他の箇所よりも全体的に地盤中の減衰が大きいことが認められる。

4. 数値解析モデルによる検討

数値解析モデルによる検討は、質点系モデルと有限要素法モデルにより行った。

4・1、質点系モデルによる検討

列車走行に伴う振動の発生原因に関する理論⁽⁹⁾の一つとして、レール走行面に局部的な凹凸あるいは車輪にフラットがある場合、車両走行に伴い衝撃振動が生じるとしている。この考え方によれば、・軌道に励起される固有振動は数十Hz以上であり、車両は台車ばね下重量のみを考慮すればよい。・車輪とレール間の衝突は、ヘルツ接触が生じる。・軌道のモデル化においては、レールを弾性支承上のはりとして扱い、車輪荷重によるたわみ変形を考え、質点に換算する。としている。

これらの軌道の振動モデルを前提に、参考文献⁽²⁾では軌道及びシールドトンネルが周辺地盤の地盤ばねにより支持される図-12に示す質点系の振動モデルを提案している。

12号線単線シールドトンネルの検討例として表-1に各質点の重量及びばね係数を示す。二次覆工施工の場合はセグメントに二次覆工の重量を加えている。また軌道構造は、振動への影響が大きいことから、コンクリート直結軌道と防振まくらぎに区別している。計算結果を表-2に示す。二次覆工施工の場合、コンクリート直結軌道は3.0dB、防振まくらぎは4.6dBそれぞれシールドトンネルの振動レベルが低下すると予測される。

複線シールドトンネルの検討では、二次覆工施工の場合には同様にコンクリート直結軌道は2.5dB、防振まくらぎは2.8dB シールドトンネルの振動レベルが低下する結果であった。

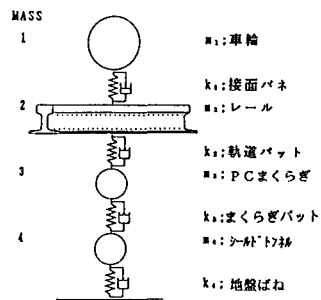


図-12 シールドトンネルの質点系振動モデル

4・2、有限要素法モデルによる検討

有限要素法による検討は、前章に示した測定箇所のシールドトンネル及び地盤をモデル化し、測定から得た軌道の振動加速度を入力波に用い、時刻歴応答解析を行い、地表面の振動レベルの予測を行うこととした。

有限要素法モデルによる地下鉄振動の時刻歴応答解析は、過去における事例^{(10)・(11)}が少なく、次の難さがある。

- ・列車走行時振動は、地震動に比較して高周波、低レベルであり、地盤のひずみも小さい振動である。これらの振動に関する弾性係数、減衰係数等の資料が少ない。
- ・入力波の周波数領域は、数Hzから数kHz までわたることから、要素分割、計算の時間刻みなどに配慮が必要である。

検討するケースは、前章に示した測定箇所について、現況再現のシミュレーションを行い、測定結果と比較して予測モデルの妥当性を確認の後、二次覆工施工または未設の条件を変えたシミュレーションを行うこととした。

さらに、シールドトンネル周辺地盤の影響が予想されることから、周辺地盤が沖積層地盤のケースも加えることとした。

有限要素モデルは、二次元の平面ひずみ問題として扱うこととし、要素分割は、90Hz以下の周波数域の信頼性が十分確保できるよう、測定地点の近くで行ったPS検層のせん断波速度を参考⁽⁷⁾に、要素の一边の長さが150Hzのせん断波の波長の4分の1以下になるようにした。

要素分割の例を図-13に示す。また、計算に用いたシールドトンネル及び地盤の係数は文献⁽¹¹⁾を参考に、表-3に示す値とした。

T地点（二次覆工施工の単線シールド）の測定値を図-14に、一車両の通過時間の約1秒間を1/2000秒刻みで計算した現況再現の結果を図-15に示す。図-14と図-15の1/3オクターブバンド分析を比較すると、20Hz以下の周波数域に差があるものの、25～80Hzの周波数成分が卓越し、ピークが28Hzと一致している。また、振動レベル(VL)の差は2.5dB以下であることから、現況再現結果は地下鉄振動の特徴を良く示している。なお、図-14及び図-15の振動加速

項目	質量又はばね係数
車輪質量（車輪一対と車軸一本の1/2）	310.0 kg
50H レール質量	50.47 kg/m
まぐらぎ間隔	80.0 cm
軌道バットばね係数	40.0 ton/cm
PCまぐらぎ質量	150.0 kg
シート ⁽¹⁾ 114質量（道床質量含む）	二次覆工あり 18.8 ton/m 二次覆工なし 9.9 ton/m
シート ⁽¹⁾ 114支持ばね係数	二次覆工あり 348.7 ton/cm 二次覆工なし 502.8 ton/cm
防振まぐらぎばね係数	15.0 ton/cm

表-1 各質点の質量及びばね係数の例

軌道構造	二次覆工の有無	一次	二次	三次	四次	トンネル頂部加速度 (g)	トンネル側部加速度 (g)	トンネル底面加速度 (g)
3771→直結軌道	あり	84	82	781	—	133.6	114.3	—
	なし	80	84	781	—	128.2	117.3	+2.0
防振まぐらぎ	あり	41	59	170	874	121.9	108.0	—
	なし	40	59	170	874	128.5	110.6	+4.6

表-2 質点系モデルによる単線シールドトンネルの計算結果

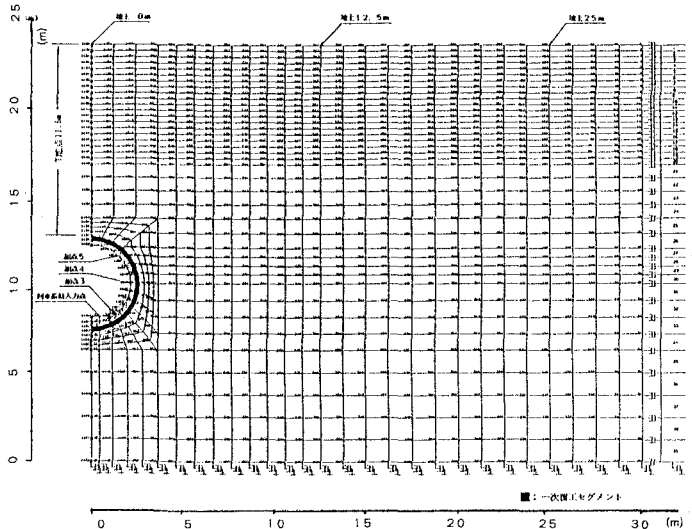


図-13 単線シールドトンネルの要素分割の例

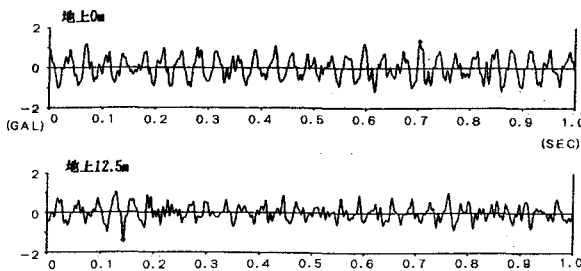
沖積層地盤の係数				
せん断弾性係数 ($G:tf/m^2$)	ポアソン比 (ν)	単位体積質量 ($\gamma:tf/m^3$)	減衰係数 (η)	
ローム層 (Lm)	2200	0.485	1.42	0.2
武蔵野層 (Kc)	30000	0.485	2.37	0.05
東京層 (Toe)	40000	0.478	1.80	0.02
(Tog)	51000	0.485	2.35	0.02
沖積層地盤の係数				
せん断弾性係数 ($G:tf/m^2$)	ポアソン比 (ν)	単位体積質量 ($\gamma:tf/m^3$)	減衰係数 (η)	
沖積層 (A)	2200	0.485	1.42	0.2
コンクリートセグメント及び二次覆工コンクリートの係数				
せん断弾性係数 ($G:tf/m^2$)	ポアソン比 (ν)	単位体積質量 ($\gamma:tf/m^3$)	減衰係数 (η)	
コンクリート	3000000	0.167	2.30	0.005

表-3 シールドトンネル及び地盤の諸係数

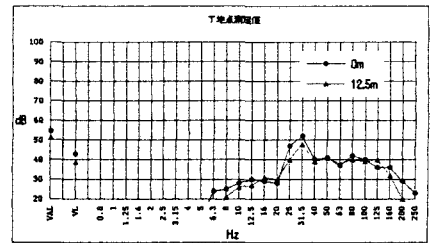
度の時刻歴波形が一致しない理由は、測定時にトンネル内及び地上の測定データを同一のデータレコーダーに記録することが困難であったため、時間的なずれが生じたこと、有限要素モデルを二次元モデルとしたことによるものと考えられる。

図-16 は、二次覆工未設の場合のシミュレーション結果を示す。図-16 と図-15 の1/3オクターブバンド分析を比較すると、20Hz以下の周波数域の振動加速度レベルは同レベルであるものの、二次覆工未設の場合は、25Hz以上の周波数域のレベルが2dB 程度低くなっている。振動レベルの比較では、シールドトンネルの直上位置で2dBの低下、水平距離12.5m離れた位置で 1dB低下する結果であった。また、複線シールドトンネルのN地点のシミュレーションの結果は、単線シールドトンネルと同様な傾向を示し、二次覆工未設の場合には0～2dB振動レベルが低くなる予測が得られた。

なお、N値が0～5程度のシルト層で構成される沖積地盤の検討ケースでは、二次覆工未設の場合、洪積地盤と同様に振動レベルは1～2dB低い結果であった。

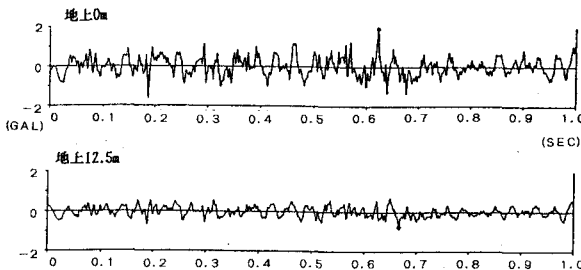


(a) 振動加速度の時刻歴波形

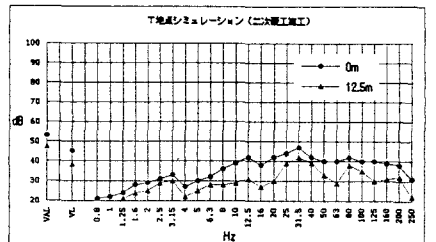


(b) 振動レベル (VL) 及び1/3オクターブバンド分析

図-14 二次覆工施工単線シールドトンネルの測定値 (T地点)

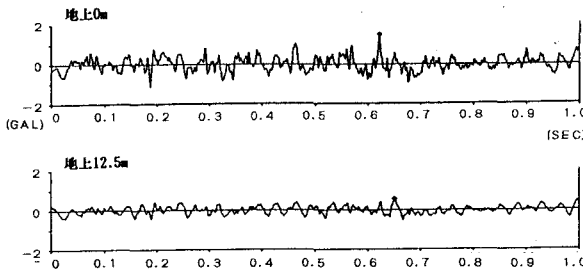


(a) 振動加速度の時刻歴波形

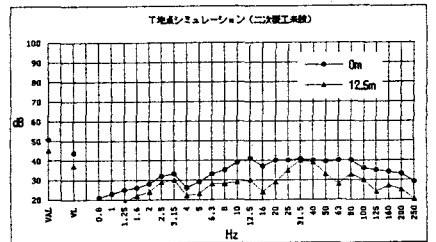


(b) 振動レベル (VL) 及び1/3オクターブバンド分析

図-15 二次覆工施工単線シールドトンネルの現況再現シミュレーション結果



(a) 振動加速度の時刻歴波形



(b) 振動レベル (VL) 及び1/3オクターブバンド分析

図-16 二次覆工未設単線シールドトンネルのシミュレーション結果

5. おわりに

地下鉄シールドトンネル二次覆工の列車走行時振動への影響を確認するため、複数箇所における振動測定と数値解析モデルによる振動のシミュレーションを行った。検討結果を要約すると次のとおりである。

- 1) 二次覆工施工及び未設のシールドトンネルにおいて測定した振動加速度を 1/3オクターブバンド分析し、分析結果を用いた振動の減衰傾向の回帰分析等により、比較を行った。その結果、二次覆工施工と未設の場合との著しい差が認められないことから、地盤振動への影響は少ないと考えられる。
- 2) シールドトンネルの質点系モデルによる検討では、二次覆工施工によるトンネル重量の増加により、単線シールド及び複線シールドとも 3dB程度振動レベルが低減すると予測された。
- 3) 有限要素モデルによる検討では、二次覆工施工の場合、トンネルの重量及び剛性が変化することにより、未設に比較して0～2dB程度振動レベルが高くなると予測された。

以上の検討結果を基に、現在建設を進めている12号線シールドトンネルの二次覆工について考察すると、12号線は、既設線よりも深い位置に計画されていること、リニア駆動小型車両の採用によりレベルが低いこと、振動対策が必要な区間へ防振まくらぎを使用することにより、コンクリート直結軌道よりも振動レベルを約10dB低下させることが可能である等を合わせると、振動低減対策として二次覆工を施工する意義は小さいと言える。

最後に、本論文は東京都交通局が社団法人日本トンネル技術協会に委託した「シールドトンネルの二次覆工に関する調査・特別委員会」（委員長山本稔東京都立大学名誉教授、幹事長西村和夫東京都立大学講師）における検討の一部である。協力をいただいた関係委員並びに幹事に感謝するとともに、振動測定において協力を得た交通局工務部関係者に感謝の意を表わすものである。

6. 参考文献

- 1) 風巻：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、1983. 2
- 2) 風巻：地下鉄トンネルの振動騒音と防止対策、基礎工、1975. 10
- 3) 日本規格協会：振動レベル計、JIS C 1510-1976
- 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、1987. 9
- 5) 古田、長嶋、伊藤：地下鉄シールドトンネル二次覆工コンクリートの振動レベル低減効果、土木学会、第40回年次学術講演概要集、III、1985. 10
- 6) 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
- 7) 古田、長嶋：地下鉄シールドトンネルの振動調査と解析例、土木学会、第1回トンネル工学研究発表会、1991. 12
- 8) 塩田：公害振動の予測手法、1986. 6、井上書院
- 9) 佐藤：軌道構造と振動との関係についての理論的考察、鉄道業務研究資料13-8、1956. 4
- 10) 田村、中村、加藤：地中坑道に発振源がある場合の周辺地盤の震動の解析方法、土木学会論文報告集、第281号、1979. 1
- 11) 秋好、長嶋、伊藤：地下鉄シールドトンネルー地盤系の列車走行時振動応答解析、土木学会、第40回年次学術講演概要集、III、1985. 10