

地下鉄走行に伴うシールドトンネル及び地盤系の 動的応答解析とその計算例

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF SUBWAY-INDUCED VIBRATION ON
SHIELD TUNNEL - GROUND SYSTEMS, AND CALCULATION EXAMPLES

古田 勝*・長嶋文雄**

Masaru FURUTA and Fumio NAGASIMA

For the purpose of analyzing vibrations induced by the running of subway railcars, a time history response analysis was made on shield tunnel - ground system modeled by the finite element method. When the results of this analysis were compared with those obtained by measurement, some differences were noted in spectrum, but the differences were only about 3 decibels in vibration level.

As a result of a study made on the effects on the ground in areas adjacent to tunnels using this analytic method, it was seen that vibration acceleration levels of tunnel structures in alluvial ground tended to increase by several decibels, compared with those in diluvial ground, but, conversely, it was seen that ground surface vibration tended to decrease by several decibels.

Keyword: subway-induced vibration, shield-tunnel, finite element method, vibration level

1 はじめに

地下鉄の列車走行に伴うトンネル近傍の地盤振動を対象とする調査・研究例は、軌道への振動対策例¹⁾・²⁾や地下鉄沿線の音楽ホールなどの特に静寂が必要な建物への固体音対策を行った事例³⁾は近年多くなっているものの、トンネルの振動及び地盤中を伝播する波動に関する調査例は少なく、特にシールドトンネルに関するもの⁴⁾・⁵⁾はわずかである。

列車走行に伴うトンネル及び周辺地盤の振動（以下、地下鉄振動と言う。）の対策を有効に進める上で、伝播する波動の特性を把握することが重要であるが、次のような問題点があり、その解明を遅らせている。

- ・振動源が閉塞されたトンネル内にあり、トンネル内と地上の同時測定を簡単にすることが困難である。
- ・振動の周波数域は、シールドトンネル内では数Hz～数千Hzまで、地盤中を伝播する振動は数Hz～数百Hzまでであることから、広い周波数域を対象とする必要がある。
- ・軌道及び車両の保守状態並びにトンネル周辺地盤の影響などにより地表面振動のレベルは、測定地点により10dB程度のばらつきが見られる。
- ・トンネルの埋設深さに比較して振動源となるシールドトンネル径が大きいいため、トンネルを点または線振

* 正会員 東京都交通局建設工務部 古田 勝

** 正会員 工博 東京都立大学助教授 長嶋文雄

動源と見なすことができず、波動論などによる解析的なアプローチに限界がある。

これらの地下鉄振動の伝播問題を検討する方法として、筆者らは数年来、有限要素法を用い、測定から得た振動加速度を入力とする時刻歴応答解析による動的シミュレーション⁹⁾を行っている。このシミュレーション手法は、予測位置の時刻歴波形を計算できることから、予測手法として優れ、シールドトンネル二次覆工の地下鉄振動に対する影響の検討⁷⁾に用い、比較的良好な結果を得ている。

トンネル及び周辺地盤の振動問題に有限要素法によるシミュレーションを適用した過去の例は、数例^{8)・9)・10)}発表され、いずれも振動の予測手法として有効であることを示している。しかし、数Hz～数千Hzまでの周波数域を扱う計算にも係わらず、要素分割の方法、時間刻み、トンネル構造物及び地盤の諸係数の決め方が明確でない点や、シミュレーションの結果と測定値の差がどの程度かを示した例が少ない。

本論文は、有限要素法を用いた時刻歴応答解析による動的シミュレーションの具体的方法を示し、測定結果とシミュレーション結果の比較を行うことにより現況再現性の確認を行った。次に、この手法によりトンネル周辺地盤が異なる場合のトンネル及び地盤振動への影響の解析とシールドトンネルの敷設位置を変えたシミュレーションを行い、地表面振動へ及ぼす影響について考察した。

2. 有限要素法による動的シミュレーションの方法

今回使用した有限要素法では四辺形要素を用い、平面ひずみ問題として扱い、以下の方法によりシミュレーションモデルを定めることとした。

2・1 要素分割の方法とシールドトンネル及び地盤の諸係数

2・1・1 シールドトンネルから伝播する振動の特性

シールドトンネル及び周辺地盤をモデル化するにあたり、要素分割、地盤の諸係数を定めるためには、シールドトンネルから伝播する波動の特性に基づく必要がある。筆者らは地下鉄駅間にある換気所を利用して、トンネル内と地表間を延長コードで結び、同一のデータレコーダに記録する方法により同時測定を行い、伝播する振動の調査⁵⁾を沖積地盤において行っている。この調査の概要は、次のとおりであった。

- 1) インバートへの落錘試験によるトンネル縦断方向の弾性波速度は、P波1,080m/sec、S波790m/secであり、ポアソン比0.26であった。また、地盤中を伝播する弾性波速度はP波800～1,410m/sec、S波110～270m/sec、ポアソン比0.48～0.49であり、耐震設計のために行ったP S検層の結果に近い値であった。
- 2) インバートと地表測点間の相互相関係数から求めた地下鉄振動の波群速度は、第1波群がP波の50～90%、第2波群がS波速度に相当していた。
- 3) トンネルー地表間を伝播する波動の減衰には周波数特性があり、12.5～63Hzの周波数域は減衰が小さい。また、地下鉄振動に伴う地表面の地盤変位の測定結果¹¹⁾では、上下方向成分が最大値を示し、7ミクロン程度であったことから、地盤の歪が小さい振動と言える。

2・1・2 要素分割の方法

有限要素法の波動伝播問題における要素寸法は、一定の通過周波数帯及び遮断周波数帯を持つローパスフィルターに似た挙動を示すことから、計算精度を確保するためには、計算機のメモリー及び計算時間の制約の中で可能な限り細かい要素分割が必要である。これらに関し、川本・林¹²⁾は次の様に述べている。

- ①要素の長さは、せん断波の波長の1/8以下にすることが望ましいが、要素の水平方向の長さは緩和して良く、せん断波の波長の1/2でも良い場合がある。
- ②形状、物性等にも左右されるので2、3のモデルで応答特性を比較検討して、要素寸法を定めるのが良い。

これを参考に、要素分割と計算精度の関係を確認するため、Kuhlemeyer, R.LとLysmer, Jの提案¹³⁾するダッシュポットを下端に付けた一次元のロットのモデルで定常応答解析を行った結果では、理論解に対して1/8波長の場合には誤差が最大3%、1/4波長の場合には誤差の最大が9%程度であった。

これらのことから、計算機の制約を考え、シミュレーションモデルの要素寸法は、解析対象とする上限の振動数のせん断波速度の $1/4$ 波長以下とした。

シミュレーションの上限の振動数は、振動レベルを扱う場合は振動レベル計（JISC 1510）の規格を考慮して上限を90Hz、固体音の領域の振動を対象とする場合には 350Hz程度までを目安とする必要がある。

2・1・3 シールドトンネル及び地盤の諸係数

動的シミュレーションでは、地盤及びシールドトンネル（セグメント及び二次覆工コンクリート）のせん断弾性係数、ポアソン比、密度及び減衰定数が必要である。地盤のせん断弾性係数及びポアソン比は、地下鉄振動の第2波群速度がPS検層のS波速度に相当していたこと及び地盤の歪が小さい振動である特徴を参考に、PS検層から得た値を基準とした。また、密度は土質試験の結果から得た値を用いることとした。

シールドトンネル（セグメント及び二次覆工コンクリート）の諸係数は、過去の調査結果⁵⁾及び事例⁴⁾を参考にしている。減衰定数は、調査結果⁵⁾では周波数特性が確認されているものの、時刻歴応答解析を直接積分法により行うことから、地層ごとに 0.02~0.2 の値とし、試算の結果から定めることとした。

2・2 要素境界の処理

半無限な広がりを持つ地盤振動の解析に有限要素法を適用する場合、仮定の境界を設けて有限な領域に置き換える境界が必要である。シミュレーションでは、要素境界に比較的扱いが簡単で特性の良く判っている参考文献¹³⁾の粘性境界を設けることとした。

2・3 入力波

地下鉄振動のシミュレーションに用いる入力波は、現場における測定及びシミュレーションモデルへの入力の容易さから、軌道構造がコンクリート道床の場合には道床部分、バラスト軌道の場合はインバート部分で測定した振動加速度の上下方向成分が適当と考え、これを用いている。

2・4 計算の時間刻みと継続時間

入力波として用いる軌道の振動加速度成分は数Hz~数千Hzまでおよぶことから、時間刻みを決めるには特に計算の不安定現象に注意する必要がある。試算した結果では時間刻みが1/1500秒よりも大きい場合、不安定になる例があったことから、1/1500秒程度以下とするのが良いと考えられる。

計算の継続時間は、長くすることが望ましいが、時間刻みと同様に計算機の制約を考慮する必要がある。動的シミュレーションでは、二次元の問題として扱っていること、及び振動レベルは一般的にはピークレベルで読み取ることから、少なくとも1車両の通過時間に相当する必要がある。地下鉄の駅間における列車の最高速度は、70Km/h程度であることから、20m車両の場合には通過時間が約1秒間となる。

2・5 シミュレーション結果の 1/3オクターブバンド分析及び振動レベルの計算方法

公害振動では、振動加速度の分析方法として、1/3オクターブバンド分析器（JIS C1513）が用いられる例が多い。この方法に対して、シミュレーション結果の 1/3オクターブバンド分析は、時間刻み毎の離散型データの振動加速度から高速フーリエ変換によりパワースペクトルをもとめ、これを 1/3オクターブバンド分析器の各バンドに対応する振動加速度レベルを計算する方法（以下、FFTによる方法と言う。）により、行うこととした。1/3オクターブバンド分析器の性能では、フィルタ特性として通過帯域と減衰帯域の許容範囲が規定されていること、また、FFTによる方法では周波数の分解能の問題¹⁴⁾があることから、そのフィルタ特性を確認するため、30Hzの正弦波信号を分析し、1/3オクターブバンド分析器との比較を行った。

図-1にJIS規格に適合した 1/3オクターブバンドリアルタイムアナライザの結果とFFTによる方法を比較して示す。FFTによる方法は、1/2000秒刻みで2048個のデータを用い、パワースペクトルを10Hzのスムージングを行い、デシベル表示したもの

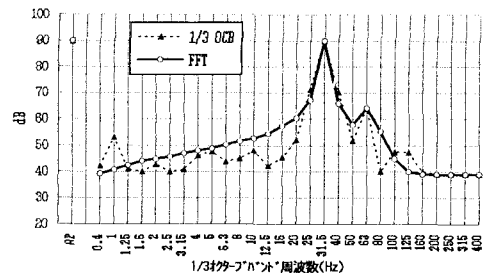


図-1 1/3オクターブバンド分析方法の比較

である。図-1に示すとおり、振動加速度レベル90dBの信号に対し、オーバーオールは0.1dB 程度であり、隣接するバンドに対して約20dBの減衰量があり、フィルタとして十分な減衰特性を示している。

地下鉄走行に伴う地盤振動の評価方法として、振動レベル計（JIS C1510）とレベルレコーダー（JISC1512）で測定した振動レベルのピークレベルを読み取る方法が一般的である。振動レベルの計算は、1/3オクターブバンド分析結果の各バンドについて、振動レベル計の人体の感覚補正回路に相当する周波数補正を行い、エネルギー和する方法から求めている。

3 現況再現のためのシミュレーション

地下鉄シールドトンネル区間における測定値と振動のシミュレーション結果との比較を行い計算精度を確認するため、現況再現のためのシミュレーションを行うこととした。測定箇所は、都営地下鉄12号線の洪積層地盤に土被り11.5m（2.2D、Dはシールドトンネルの外径寸法）で敷設したトンネルであり、防振まくらぎ軌道、ロングレール区間、列車速度63Km/hの箇所で測定したものである。

図-2 に測点の配置を示す。振動加速度の測定はシールドトンネル内は半径方向、地表測点は上下方向について行った。測定箇所の地層構成は、地表から7mまではローム層、その下はN値30～50の粘土及び砂れき層となっている。

シミュレーションモデルは、単線シールドトンネルが対称構造であることから、半断面のモデルとし、要素分割の方法は、各地層の要素の一边の長さを 150HzのS波の一波長の1／4以下になる様にした。要素分割の例を図-3 に示す。

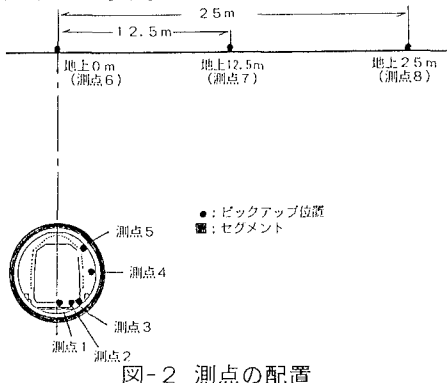


図-2 測点の配置

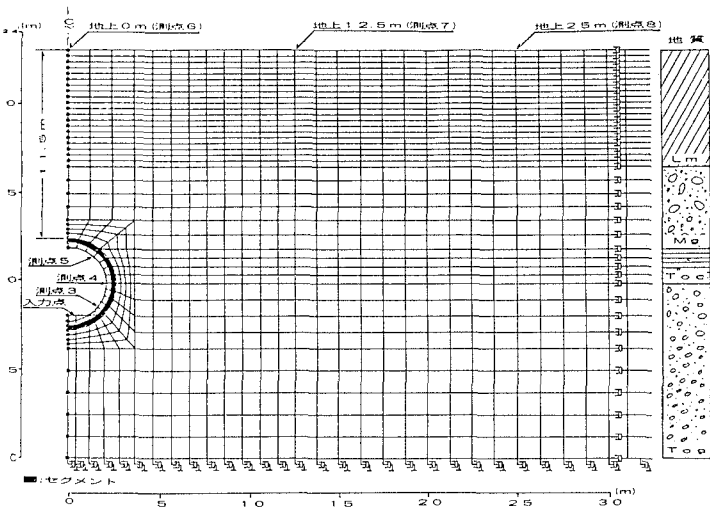
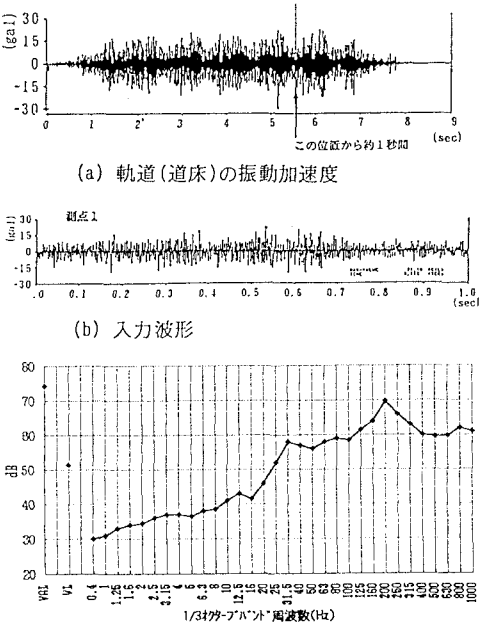


図-3 単線シールドトンネルのシミュレーションモデル

表-1 覆工部材及び地盤の諸係数

	せん断弾性係数 (G:tf/m ²)	ポアソン比 (ν)	単位体積重量 (γ:tf/m ³)	減衰定数 (η)
セグメント (RC)	3000000	0.167	2.30	0.005
二次覆工 (C)	〃	〃	〃	〃
洪積層地盤				
ローム層 (Lm)	2200	0.485	1.42	0.2
武蔵野れき層 (Wp)	30000	0.485	2.00	0.05
東京れき層 (Toe)	40000	0.478	1.80	0.02
〃 (Toq)	51000	0.485	2.00	0.02



(C) 1/3オクターブバンド分析結果

図-4 シミュレーションの入力波

入力波の時刻歴波形及び1/3オクターブバンド分析結果を図-4に示す。入力波は、軌道の道床中央部(測点1)で測定した上下方向成分を用いている。シールドトンネルの覆工部材及び地盤各層の諸係数は、P S 検層及び事例⁴⁾を参考に表-1に示す。計算の時間刻みは1/2000秒とし、1秒間の継続時間としている。

測定値とシミュレーション結果の振動加速度波形を比較し、シールドトンネル内測点の半径方向成分の時刻歴波形を図-5に、1/3オクターブバンド分析結果の比較を図-6に、地表の上下方向成分の加速度波形を図-7に及び1/3オクターブバンド分析結果を図-8に示す。

図-5及び図-6に関し、測点3は加振点に近く、波形及びスペクトルが良く似ている。測点4及び5のスペクトルは高周波域に差があるが、公害振動で問題となる90Hz以下の周波数域は比較的良く対応している。

図-7及び図-8は、測定時の制約から同時刻のデータを比較したものではないが、図-8の1/3オクターブバンド分析結果の比較では、シミュレーション結果は20Hz以下の周波数域においてレベルが高く、差が生じているものの、20~60Hzの周波数域が卓越するトンネル周辺地盤の振動の特徴を良く示している。

表-2に90Hz以下の振動加速度レベル及び振動レベル(上下方向の感覚補正を行ったもの)を比較して示す。トンネルから離れた地上測点の12.5及び25m地点の振動加速度レベルに差があるものの、他の振動加速度レベル及び振動レベルの差は3dB程度以下であり、測定値とシミュレーション結果は対応している。

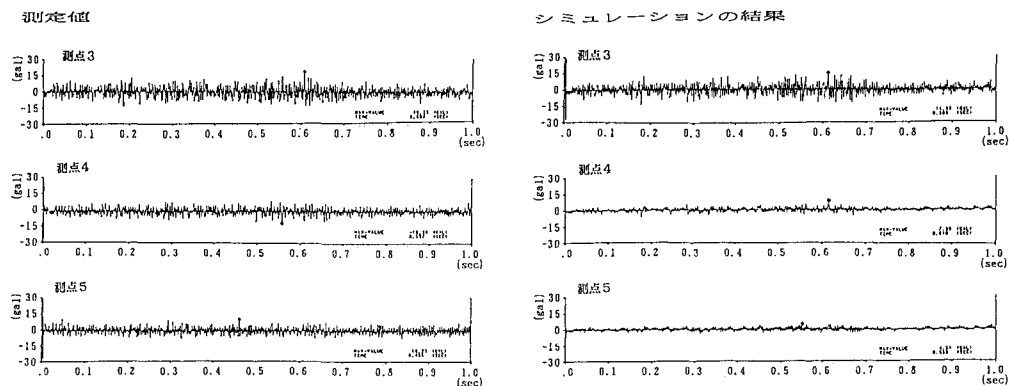


図-5 振動加速度波形の比較(トンネル内測点)

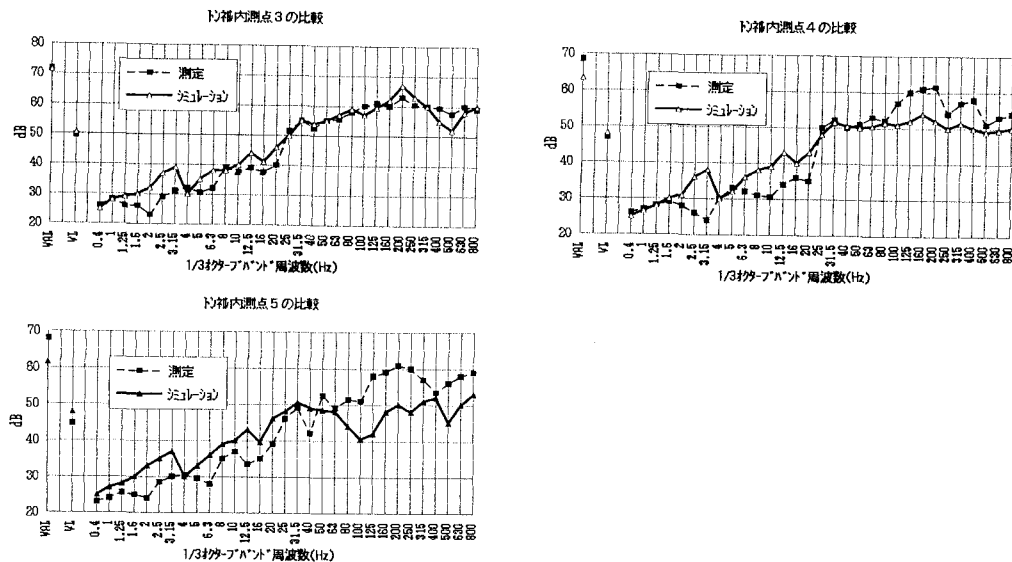


図-6 1/3オクターブバンド分析結果の比較(トンネル内測点)

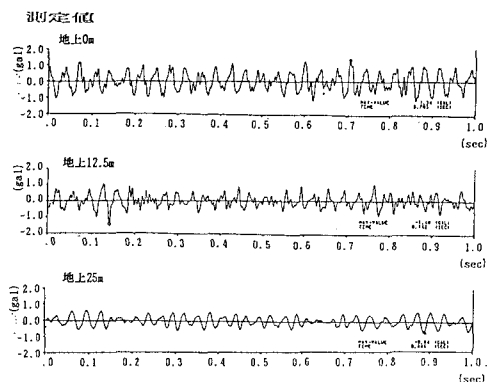


図-7 振動加速度波形の比較(地表測点)

シミュレーションの結果

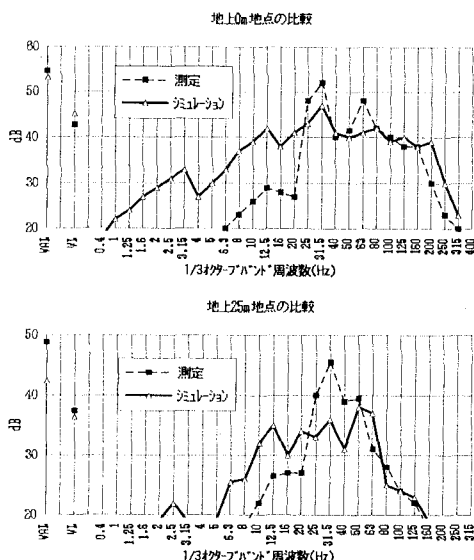
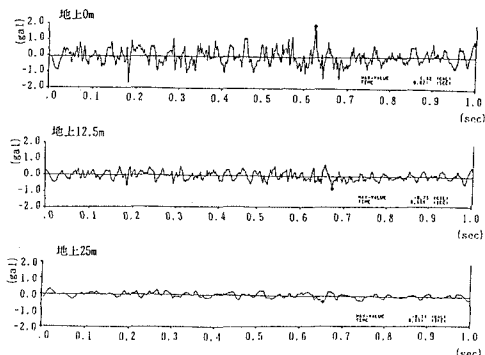


図-8 1/3オクターブバンド分析結果の比較(地表測点)

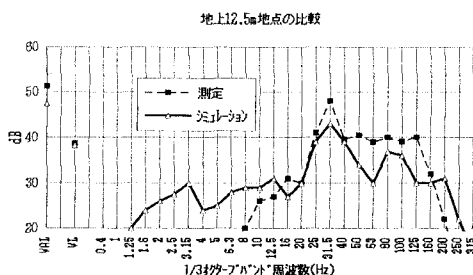


表-2 振動加速度レベルと振動レベルの比較

振動加速度レベル(0~90Hz) 単位: dB						
	測点3	測点4	測点5	地上0m	地上12.5m	地上25m
測定値	62.9	59.9	57.2	54.2	50.5	46.8
シミュレーション	63.2	58.9	56.9	52.4	46.6	42.3
差	-0.3	+1.0	+0.3	+1.8	+3.7	+6.5

振動レベル(上下方向) 単位: dB						
	測点3	測点4	測点5	地上0m	地上12.5m	地上25m
測定値	49.5	46.9	44.6	42.7	38.7	37.4
シミュレーション	50.5	48.2	47.8	45.2	38.3	36.4
差	-1.0	-1.3	-3.2	-2.5	+0.4	+1.0

4 シールドトンネルの周辺地盤を変えたシミュレーション

シールドトンネル周辺地盤の違いによるトンネル及び地表面地盤振動の影響を検討するため、トンネル周辺地盤をN値0～5程度の軟弱な沖積地盤の場合をシミュレートし、前項の現況再現で行った洪積地盤の結果と比較を行うこととした。

シミュレーションでは、図-3に示したモデルを用い、表-3に示す地盤の諸係数を沖積層に対応した値とし、入力波及び時間刻みは現況再現のシミュレーションと同一としている。入力波を同一とした理由は、入力波を測定した位置が振動源である軌道に近く、トンネル及び周辺地盤振動の影響が少ないと考えられるからである。

シミュレーションの結果について、時刻歴波形を図-9に、現況再現のシミュレーション結果と振動加速度レベル及び振動レベルを比較して表-4に示す。軟弱な沖積地盤中ではシールドトンネル内測点のレベルは1～4dB高くなっている。これは、周囲の地質の違いにより、シールドトンネルの変形に対する拘束力が変わるためであると思われる。また、地表面の地盤振動はシールド内とは逆に数dBレベル低い傾向を示して

表-3 覆工部材及び地盤の諸係数

	せん断弾性係数 (G:tf/m ²)	ポアソン比 (ν)	単位体積重量 (γ:tf/m ³)	減衰定数 (η)
セグメント 二次覆工 (RC)	3000000	0.167	2.30	0.005
沖積層地盤 沖積層 (A)	2200	0.485	1.42	0.2

いる。この地盤の違いによる傾向は、図-10 に示す地下鉄沿線の調査例と同傾向を示し、沖積地盤の方がレベルが低い傾向にあることと対応している。なお、図-10 はシールドトンネル土被り、列車速度など比較的類似した箇所で測定したものである。

表- 4 振動加速度レベルと振動レベルの比較

振動加速度レベル(0~90Hz)						
	測点3	測点4	測点5	地上0m	地上12.5m	地上25m
洪積地盤	63.2	58.9	56.9	52.4	46.8	42.3
沖積地盤	64.4	62.6	62.3	52.9	42.2	35.8
差	-1.2	-3.7	-5.4	-0.5	+4.6	+6.5

振動レベル(上下方向)						
	測点3	測点4	測点5	地上0m	地上12.5m	地上25m
洪積地盤	50.5	48.2	47.8	45.2	38.3	36.4
沖積地盤	51.4	51.1	51.6	43.1	35.3	33.2
差	-0.9	-2.9	-3.8	+2.1	+3.0	+3.2

5 トンネルの土被りを変えたシミュレーション

洪積地盤において、土被りが浅い例として1 D (5.3m)、深い例として5 D (26.5m) 及び2.2 Dの箇所(現況再現のシミュレーション)の比較を行った。

図-11 に5 Dのシミュレーションモデルを示す。シミュレーションの結果について、図-12 に各測点の振動加速度レベル (VAL) と振動レベル (上下方向の体感補正を行ったもの ; VL) を示す。

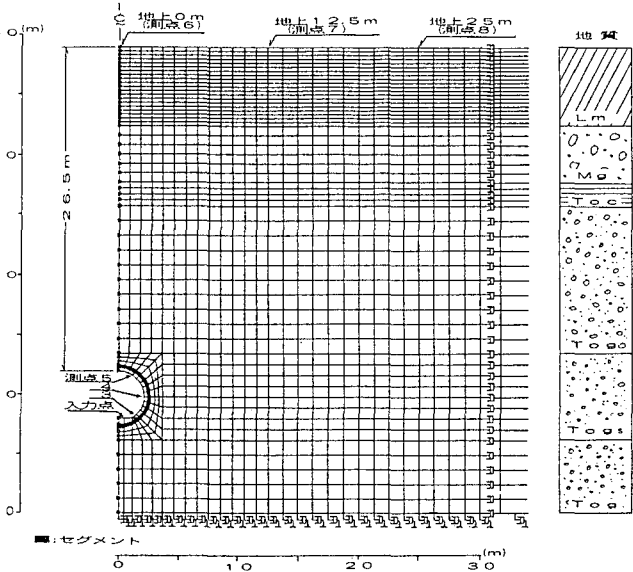


図-11 土被り5 Dのシミュレーションモデル

図-12について、トンネル内(測点4、5)の振動加速度レベルを比較すると、1 Dと5 Dの差は約2〜3 dBあり、土被りが増すと周辺地盤の影響を受け、レベルが低下するものと思われる。同様に地上測点を比較すると、トンネル直上(地上0m)では、1 Dと5 Dでは約6 dBの差が、他の測点では2〜3 dBの差が認められる。トンネル直上の低下量大きい理由は、トンネル振動のレベルの低下と共に、波動の伝播距離の増加による振動の減衰が考えられる。トンネル直上(地上0m)の振動加速度を比較し、図-13に加速度波形、図-14に1/3オクターブ分析結果を示す。5 Dは1 Dと比較し、20Hz以上の周波数域の低下が著しい。

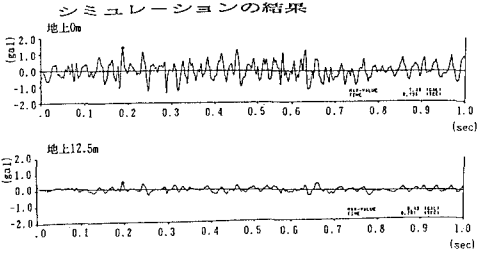


図- 9 沖積地盤の振動加速度波形

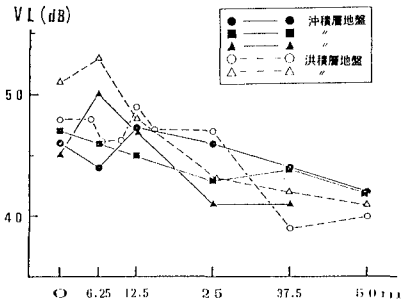


図-10 地表面の振動レベル測定例

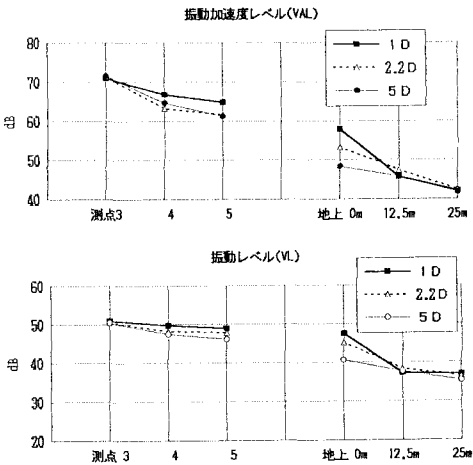


図-12 振動加速度レベルと振動レベルの比較

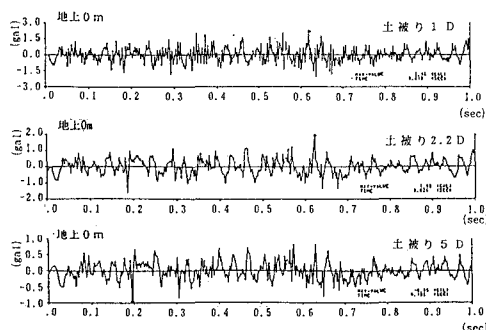


図-13 地表0m地点の加速度波形

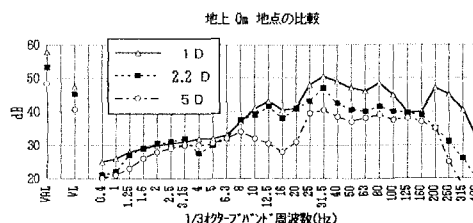


図-14 1/3オクターブバンド分析結果

6 おわりに

地下鉄の列車走行に伴うシールドトンネル及び周辺地盤の振動問題を検討するための有限要素法によるシミュレーション手法を具体的に示し、この手法を用いて地下鉄振動に対するトンネル周辺地盤の影響並びにトンネル土被りの影響について検討した。結果の概要は次のとおりである。

- 1) 地盤の要素分割及び諸係数は、トンネルから伝播する振動の波群速度の測定例では、第1波群速度はP S 検層のP波の50～90%、第2波群速度がP S 検層のS波速度に相当していたこと及び本解析例から、最も遅いS波速度を基準とし、P S 検層から得られる値を参考にするのがよい。
- 2) シミュレーションにおける計算の時間刻みは、100Hz程度以下の周波数帯について論議する振動の問題においても、入力波の特性及び計算の安定から、1/1500秒程度かそれより細かく刻むのがよい。
- 3) 現況再現のためのシミュレーションでは、振動加速度波形及びスペクトルに多少差が見られ、地表面振動の20Hz以下の周波数成分に差が生じたものの、振動レベルの測定値との差は3dB程度以内であった。
- 4) トンネル周辺地盤を洪積地盤と沖積地盤に対応する地盤の諸係数を用いたシミュレーションの結果を比較したところ、沖積地盤の場合はトンネル構造物の振動加速度レベルが数dB高くなり、また地表面地盤振動は逆に数dB低い結果となった。
- 5) トンネル土被りを変えたシミュレーションの結果では、トンネル土被りが大きくなるとトンネル直上付近の加速度レベルの低下が大きく、20Hz以上の周波数成分の低下が顕著であることが確認された。

参考文献：

- 1) 三浦：低ばね係数軌道の防振特性，鉄道施設協会誌，28-6，pp. 21～24，1990. 6
- 2) 山本・市東：トンネル内省力化軌道としての防振マクラギ軌道，鉄道施設協会誌，31-6，pp. 45～47，1993. 6
- 3) 池田：地下鉄の固体音防止設計施工例，建築学会環境工学委員会，第36回音シボ・ジウム 固体音防止設計における予測法の現状と今後の課題，pp. 155～161，1994. 2
- 4) 長嶋・古田・秋好他：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，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 837～846，1988. 3
- 5) 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論文・報告集，pp. 101～106，1991. 12
- 6) 秋好・長嶋他：地下鉄シールドトンネル—地盤系の列車走行時振動応答解析，土木学会第40回年次学術講演会，III-171，pp. 341～342，1985. 10
- 7) 古田・酒井・山本：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，第3回トンネル工学研究発表会論文・報告集，pp. 63～70，1993. 11
- 8) 田村他：地中坑道に振動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，pp. 41～53，1979. 1
- 9) 山本・池田・小長井：地下鉄道周辺の地盤振動に関する基礎研究，土木学会第40回年次学術講演会，IV-107，pp. 213～214，1985. 10
- 10) 吉原・中村他：地下鉄振動の伝搬性状に関する研究(その1)，大林組技術研究所報，No42，pp. 27～36，1991
- 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回年次学術講演会，IV-111，pp. 242～243，1987. 10
- 12) 川本・林：地盤工学における有限要素解析，培風館，1978. 4
- 13) Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. ; Finite element method accuracy for wave propagation problems, Technical notes, ASCE, SM 5, 1973. 5
- 14) 大崎：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp. 63～66，1976. 7