S3-2-5 地下鉄走行時振動のFEM解析における

要素寸法と精度に関する検討

[土]	〇松本	大輔	(首都	大学東京大学院)	[土]	古田	勝	(東京都交通局)
[土]	津野	究	((財)	鉄道総合技術研究所)	[土]	長嶋	文雄	(首都大学東京)

Effects of Element Size in Precision Analysis for Wave Propagation Problems of Subway Induced Vibration

Daisuke Matsumoto, Tokyo Metropolitan University

Masaru Furuta, Bureau of Transportation, Tokyo Metropolitan Government Kiwamu Tsuno, Railway Technical Research Institute Fumio Nagashima, Tokyo Metropolitan University

Wide-range ground vibration has to be considered to investigate vibration transmissibility and inducing process of solid-borne noise in a building constructed closely to a subway tunnel. In discrete dynamic analysis, the element size roles major factor which affects directly to the calculating precision.

In this paper, we conduct parameter analyses for wave propagation problems of subway induced vibration and investigate the effects of the element size to the calculating precision.

キーワード:地下鉄振動、固体伝播音、有限要素法、精度解析 KeyWord: Subway induced vibration, Solid-borne noise, FEM, Precision analysis

1. はじめに

地下鉄沿線では、列車走行時に40~60Hzにピークを持 つ低レベルの地盤振動が生じる場合がある。最近では地下 鉄構造物に接近してコンサートホールなどの特に静寂が求 められる施設が建設される場合があり、建物に発生する固 体音の予測・評価を行うには、従来から行ってきた振動レベ ルの評価範囲を超えた100Hz以上の高周波領域の振動ま でを取り扱う必要がある。

地下鉄トンネルから地盤への振動伝播については、現場 測定をもとに検討した例 ^{1)・の}があるが、現場測定データに は地盤の物性など様々な影響要因が含まれており、振動の 伝播メカニズムは未だ十分に解明されていない。



一方において、数値解析により検討した例 6),8) があり、

図1 測定地点の地盤概要と測定箇所 6)

現場測定データと比較的良い対応が取れていることが確認 されている。しかし、高周波領域の振動を扱う場合、解析 メッシュの細かさが数値解析において重要なパラメータと なり得るが、この関連を詳しく扱うためには計算機のメモ リ及び計算時間等の制約等の問題があり、現在までに、伝 播する波動の波長を検討して、要素分割において十分な寸 法に分割を行った事例はほとんど見受けられない。

このような背景を踏まえ、本研究では、広帯域の振動伝 播解析において、有限要素のメッシュの細かさが解析精度 に及ぼす影響について検討を行ったものである。

2. 解析条件

2.1 解析対象

解析の対象として、東京都内の沖積地盤に位置する複線 シールドトンネルで行われた現場測定例(図1)を選んだ。 振動の測定箇所は、トンネル内、トンネルに近接したボー リング坑内、地表面に各々3箇所を設けている。トンネル 内軌道付近で得られた加速度波形の一例を図2に示す。



図 2 軌道付近の加速度波形([®]地点,鉛直方向)

2.2 解析概要

有限要素解析には、高次要素(8節点アイソパラメトリ ック要素)を用いた。解析モデル境界付近における反射の 影響を抑えるため、地盤の側方と底面を粘性境界とした。

入力した加速度波形は、現場測定での軌道側方で得られ た加速度波形(図2)である。1台車が通過するのに必要 な1秒間の振動を、時間刻み1/2000秒で直接加振点に入 力した。また加振点は軌道位置の2節点とした。

2.3 入力物性值

地盤各層の物性値は、表1に示す PS 検層より得られた 値を採用した。また、下式(1)で表される比例減衰(レーリ ー減衰)を用いている。

$$C = aM + \beta K \qquad \dots (1)$$

(M:質量マトリックス K:剛性マトリックス)

本研究では、全ての層、モデルに対して同一の α , β を設 定した。また、 α , β の値は既往の計算例をもとに、表2の 値とした。

表1 地盤の物性値

		弾性定数 MN/m ²	密度 kg/m ³				
結鍵	第1層	230	1600				
	第2層	510	1800	裏の「	比例演查完数 a B		
	第3層	519	1729	12 4 1	1. 179 //94-30	LACSALU, D	
	第4層	3530	1688		α	β	
	第5層	5710	1890	地層部	7.25	9.750 × 10 -5	
	第6层	3530	1756	トンネル部	0.3769	1.582 × 10 ⁻⁶	

2.4 解析ケース

解析メッシュの細かさが異なる6種類のモデルを作成した。基本要素長4mモデルについてはトンネル周辺部のメ ッシュの切り方により振動の伝播がどのように変わるかを 調べるために、2種類のモデルを作成した(図3(a))。

各解析モデルの概要を表3に表す。ここで「基本要素長」 とは、図4に示す要素一つ分の鉛直方向長さとしている。 例として、基本要素長4m、1m、37.5cmモデルの3種類 を図3に示す。基本要素長と解析精度の関係については、 次のようなことが考えられる。

要素は8接点アイソパラメトリック要素であるので、一 辺には3つの節点が存在する。振動の波長を 2 とすると、 一波長を表現するために少なくとも5つの節点が必要とな る (図4参照)。つまり、この表現可能な最小の波長 2 min は基本要素長 dに依存し、(2)式で表される。

*A*min=2d
…(2)
一方、地盤のせん断波速度 Vs、波長 *A* および周波数 *f*には(3)式のような関係があり、波長が最小となるとき周波数は最大となる。

$$f_{\rm max} = V_{\rm s} / \lambda_{\rm min} \qquad \dots (3)$$

fmaxと解析モデルの基本要素長 dとの関係は、(2)式および (3)式より(4)式で表される。

$$f_{\max} = V_s / 2d \qquad \dots (4)$$

基本要素長 dのモデルにおいて、解析結果が信頼できる 周波数領域は、この fmax 以下の領域であると言える。この fmax を以下では「最大限界周波数」と呼ぶことにする。式 (4)から各解析モデル・各地盤毎の最大限界周波数が計算で きる。表4は、各層のせん断波速度 Vs と各解析モデルの 基本要素長 dから求めた最大限界周波数をまとめたもので ある。



表3 解析モデルに関する概要

	基本要請	素長(cm)	節点数	要素数
	鉛直方向	水平方向		
4mモデル(A)	400	522	98	350
4mモデル(B)	400	555	116	409
2mモデル	200	267	247	821
1mモデル	100	133	974	3078
50cmモデル	50	66.7	3876	11930
37.5cmモデル	37.5	50	6916	21154

各層の最大限界周波数(Hz) 表 4 第1層 第2層 第3層 第4層 第5層 第6層 せん断波速度(m/s) 4mモデル 2mモデル 264 96 101 320 258 72 9 12 13 33 40 32 18 24 25 66 80 65 1mモデル 50cmモデル 36 48 51 132 160 129 72 96 101 264 320 258 344 37.5cmモデル 96 128 135 352 427



図 4 基本要素長と最小波長の関係

3. 解析結果

3.1 オールパス値

現場測定及び解析より得られた各測定点毎の振動加速度 レベル(オールパス値)を図5に示す。各解析ケースを比 較してみると、地中部分(測定点③~⑤)については比較 的粗いメッシュ(2m,4mモデル)でも実測値に近い結果とな っている。これに対して、地表部分(測定点⑥~⑧)につ いては若干の差はあるものの細かいメッシュ(1m以下のモ デル)が実測値に近いといえる。なお、トンネル内(測定点 ①および②)ではモデルによる変化はあまり見られない。 これは振動の伝達距離が短いためと考えられる。

また、図6に解析値と実測値との振動加速度レベル(オ ールパス値)の差を各解析ケース毎に示す。全体的に見る と解析モデルのメッシュが細かくなるほど、振動加速度レ ベルは低下する傾向が見られる。図より、50cm および 37.5cm 解析モデルは測定点⑤を除き、実測値との差がい ずれの測定点においても概ね5dB以内に納まっており、粗 いメッシュのモデルと比較して良い結果だと言える。測定 点⑤に関しては4m以外のケースで、実測値が解析値を大 幅に上回る結果が出た。これは、測定点⑤は地表部近傍に 位置し、この付近で振動が増幅していることが原因の一つ であると考えられる。



図 6 振動加速度レベルオールパス値の実測値との差

3.2 1/3 オクターブバンド分析

図7に主な測定点(②,④,⑥)における1/3 オクターブ バンド分析による振動加速度レベル値を示す。

トンネル側方(測定点②,図7(a))では、12.5Hz以下 の低周波数領域において解析値と実測値の間に差が見られ るが、実測値が示す20dB程度の低レベル振動は、周波数 分析における誤差範囲の振動である。16~100Hzまでの領 域では解析値と実測値の間に大きな違いは見られない。一 方、100Hz以上の周波数領域では各ケース間に若干のばら つきが見られるようになる。基本要素長さが短いモデルは トンネル内のメッシュ分割も細かくしているが、粗いメッ シュのものに比べて、必ずしも高周波成分が多くなってい ない。これは、粗いメッシュのモデルの誤差が最大限界周 波数以上で高レベルの振動誤差を産み出す場合があること を示している。

地中部(測定点④,図7(b))では、50~80Hz付近が卓 越しており、これは実測値の卓越周波数と合致している。 一方、250Hz付近の卓越部分では、全ケースで実測に比べ てレベルは低く、メッシュの細かさにより結果に差が見ら れる。特に周波数が高い部分においては誤差が拡大してお り、基本要素長さと伴に地中の比例減衰(高次高減衰)に ついても、環境振動または固体音の評価などの問題に応じ て適切なメッシュと比例減衰のセットを考える必要がある。



図 7 主な測定点の 1/3 オクターブバンド分析結果

地上部(測定点⑥,図 7(c))では、卓越周波数が実測値 と解析値で若干ずれが生じているがピーク値は 50cm と 37.5cm モデルでは実測値とほぼ同じ値を示している。一 方で、1m、2m、4m モデルでは 5~10dB の差が見られる。 測定点⑥は地盤第1層に属しており、50cm モデル、1m モ デルの最大限界周波数はそれぞれ 72Hz、36Hz である。こ れは 50cm と 1m モデルの解析値が乖離する周波数領域 (63~80Hz と見られる)と概ね合致している。よって 2.4 節の最大限界周波数の考え方に適応している。

以上解析を行った結果、各解析ケースの最大限界周波数 は概して対応でき、高周波領域の解析には細かいメッシュ を切る必要があることがわかった。また、地盤のせん断波 速度の値が小さい地盤では、値が大きい地盤と比べて最大 限界周波数が低く、高周波領域を扱うためにはより細かい メッシュ分割をする必要があるといえる。

4. まとめ

本研究では、2 次元 FEM を用いた解析において、要素 寸法が解析精度に及ぼす影響について検討を行い以下の知 見を得た。

解析モデルの基本要素長によって、信頼できる周波数領 域(最大限界周波数)が定まるという考え方を仮定し、6 種類の解析モデルの解析結果について比較を行った。しか し、粗いメッシュのモデルの誤差が最大限界周波数以上で 高レベルの振動誤差を産み出す場合があり、問題に応じて 適切なメッシュと比例減衰のセットを考える必要があるこ とがわかった。

また 1/3 オクターブバンド分析では、地中部および地上 部の結果から、各解析ケースの最大限界周波数は概して解 析結果に対応し、高周波領域の解析には細かくメッシュを 切る必要があることがわかった。

メッシュ分割はコンピュータのスペックの制約を受け、 本研究でも基本要素長 37.5cm のモデルが限界であった。 メモリ空間が飛躍的に広がる 64bit 演算環境の整備が進め ばさらに高周波域の精度を向上させることは可能である。

参考文献

1)及川昭雄,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

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)長嶋文雄,古田勝,秋好賢治,伊藤文人: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

4) 古田勝, 長嶋文雄: 地下鉄シールドトンネルの振動調 査と解析例, トンネル工学研究発表会論文・報告集 第 1 巻, pp.101-106, 1991.12

5) 津野究 他:列車走行時振動に対するトンネル径の影響 検討,第8回地盤工学研究発表会講演集,pp.2243-2244, 2003.7

(6)藤井光治郎,武居泰,津野究:トンネルからの地盤振動伝搬特性,鉄道総研報告,Vol.18, No.11, 2004.

7) 津野究,古田勝,藤井光治郎,長嶋文雄,日下部治: 地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特 性,土木学会論文集,No.792/III-71, pp.185-197, 2005.

8) 古田勝,長嶋文雄: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,トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻, pp.93-100,1994