

改良軌道による地下鉄振動の軽減対策

早川 清

正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科(〒 525-8577 草津市野路東 1-1-1)

本論文は、地下軌道区間での列車走行により発生される地盤振動の軽減対策に関し、バラストマットと弾性枕木を用いる対策法の有効性について、現地振動調査を主体として検討したものである。対象地点の地下軌道区間および地表上の素地軌道区間において、列車走行により発生される振動を地表面および地下軌道部の床、壁、柱、軌道等において測定し、各部位での発生振動値、スペクトル特性と振動減衰特性等について述べた。これらの結果より、振動加速度レベル (VAL) での振動軽減効果を把握するとともに、バラストマットを用いた振動軽減対策法の有効性が、インサージョンロス理論を用いて推定できることを示した。

Key Words: balast mat, vibration, railroad, measurement

1. はじめに

列車走行時に発生する地盤振動は、車両の種類、列車編成、軌道構造、線路構造物、地盤の性質などの諸条件によって影響される。この中でも、軌道構造、線路構造物による影響が大きいと考えられる。また、このような振動の発生現象は、移動する輪荷重列による動的載荷現象とみなされる。

本論文で対象とした某地区の鉄軌道では、素地軌道区間と地下軌道区間が並行して運行されている。この地下軌道区間は市街地に建設されているため、直上は住居地区となっている。このために、地下軌道区間より発生する振動が地盤を介して建物に伝播され、従来より一部の住民により苦情が出されて環境問題となっていた。そこで防振対策として、バラストマットと弾性枕木（ポリウレタン系の樹脂を注入したもの）を用いた防振軌道に改良する対策工を実施することになった。

このようなバラストマットを使用した振動対策工は、我が国での高架橋や地下鉄、ドイツやフランスでの地下鉄にも採用されており、騒音対策を含めて効果的であった事例^{1), 2), 3), 4)}も報告されている。しかしながら、本研究で対象としているような動的ばね定数の極めて小さいバラストマットを用いた事例は、我が国ではほとんど見られないと思われる。

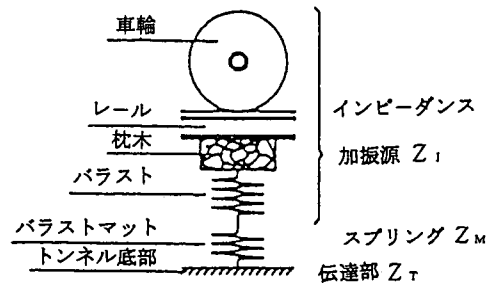


図-1 バラストマットによる振動低減システムに関する解析モデル

この防振軌道に改良する対策工を実施したところ、かなり良好な振動対策効果が計られた。

本論文では、振動対策工の施工前後における地下軌道構造物および地表面上の多数点での振動調査結果より、初めに素地軌道区間と地下軌道区間における振動特性を比較して両者の相違について検討した。次に、実測結果からこの防振軌道の有効性を確認するとともに、超低ばねバラストマットの敷設による防振効果の評価が、インサージョンロス理論によって可能であることの方角性を示した。

すなわち、バラストマットの敷設時と無敷設時と

のレベル差は、インサージョンロス（挿入損失）として定義されている。軌道系を図-1に示すような解析モデルに仮定した場合、インサージョンロスは式(1)^{5), 6), 7)}で与えられる。

$$\Delta L = 20 \log \left| 1 + \frac{S_s / S_m}{1 - (\omega_0 / \omega)^2} \right| \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

ここに、 ΔL ：インサージョンロス (dB)、 S_s ：バラストの動的ばね定数 (kN/cm^3)、 S_m ：バラストマットの動的ばね定数 (kN/cm^3)、 ω_0 ：固有円振動数 (rad/sec) である。

本計算モデルでは、加振源と想定される車輪、レール、枕木およびバラストとバラストマットとの剛性差（インピーダンスの差）が極端に大きいことに着目して理論式が誘導されている。すなわち、加振源のインピーダンスは Z_1 であり、バラストマットのインピーダンスは Z_M で表現される。また、振動伝達部である床版の剛性は、バラストマットの剛性と比較してかなり大きいものと考えられる。そこで本論文では、単純化のために減衰を省略したモデルを採用して検討している。

2. 測定概要

調査計画の内容は、事前調査および第1回目の事後調査（地下・上り線に超低ばねバラストマット敷設後）、第2回目の事後調査（同上、弾性枕木敷設後）で構成されている。なお、地下・下り線にはJRSタイプのバラストマット（旧国鉄規格の製品で、動的ばね定数は $44.4 (\text{kN/cm}^3)$ 、厚さ 25 mm である）が既設済みである。今回使用した超低ばね定数のバラストマット（旧西ドイツ製で、製品名シロマーRD25）は、厚さ 25 mm の二層構造を持つ特殊発泡ポリウレタン製であり、マットの動的ばね定数は $4.9 (\text{kN/cm}^3)$ である。従って、通常使用されているSBR系のマットの動的ばね定数に比較して極端に小さいことが特徴である。

測定内容を表-1に示す。すなわち、地表面上および近傍の事務所1階内の2地点における振動加速度および振動加速度レベル、地下軌道内のレール、枕木、床版、バラストマットの上下部、側壁および天井の振動加速度、枕木の相対変位などである。

これらの測定位置と地下軌道構造の断面形状を図

表-1 振動測定内容一覧

測定内容	測定対象	測定成分	測定点数
振動 加 速 度	レール	上下線 各1箇所	Z方向 2測点
	枕木	上下線 各1箇所	Z方向 2測点
	床版	上下線 各1箇所	X・Y・Z方向 6測点
	側壁	上下線 各1箇所	Z方向 2測点
	天井	中央部 1箇所	Z方向 1測点
	中央柱	下面 1箇所	Z方向 1測点
	バラストマットの上下	上下線 各1箇所	Z方向 3測点
変位	枕木	上下線 各1箇所	2測点
	光電管	上下線 各1箇所	1測点
合計			20測点

X: 軌道方向 Y: 軌道直角方向 Z: 鉛直方向

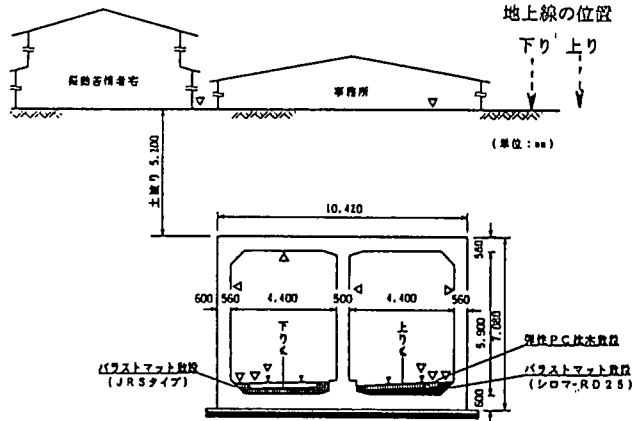


図-2 測定位置と地下軌道構造の断面形状

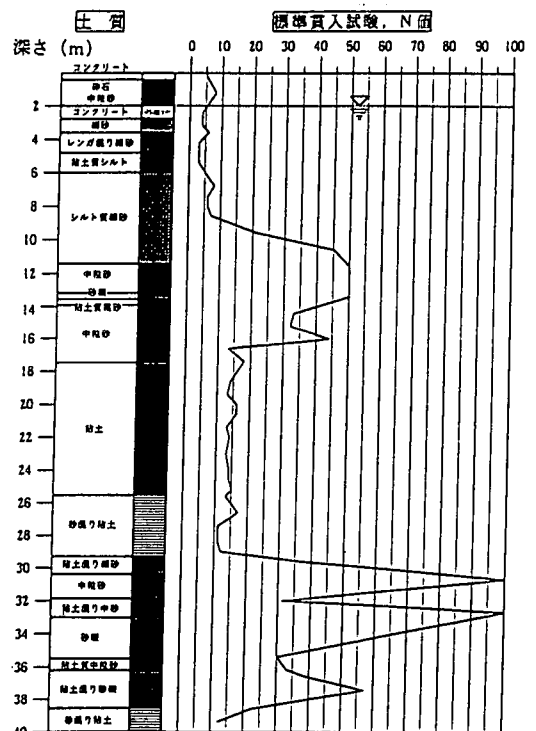


図-3 調査地付近の地質状況

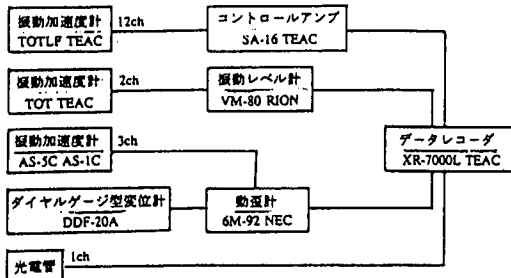


図-4 振動の測定システム

表-2 地表面および事務所内の振動加速度レベル (dB)

走行路線	事務所内	地盤上	事務所内	地盤上
地下線	上り		下り	
特急	74.0	74.4	66.6	66.0
その他	72.3	71.9	66.1	65.4
地上線	上り		下り	
特急	60.0	56.5	62.3	60.0
その他	62.7	60.0	64.0	63.4

-2に示す。なお、X：水平軌道方向成分、Y：水平軌道直角方向成分、Z：鉛直方向成分を示している。地下軌道構造物はRC2径間ラーメン、土被り厚さ5.2mであり、軌道構造物は曲線半径500m、50N定尺レール、道床厚さは250mm以上である。

調査地付近の地質状況を図-3に示す。地表面から深さ9mまではN値4～8のシルト・細砂層、深さ9～18mまではN値50程度の砂層、深さ18～30mまではN値15程度の粘土層で構成されており、これに深さN値50以上の堅固な砂と礫の互層状態となっている。

図-4は振動の測定システムを示したものである。地上と地下の計測基地は電話線で連絡しており、同時計測を行っている。以下の考察において、全測定データは、各列車の走行中に生じた振動加速度レベルの最大値で表示するものとし、防振効果は原則的に走行車線、車両条件などが同一のもので比較するものとした。

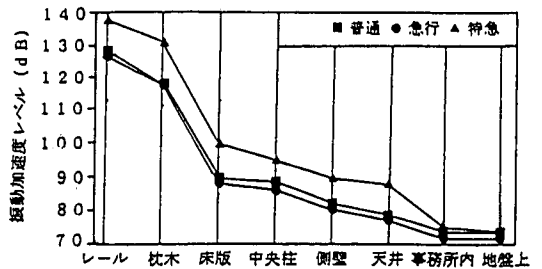


図-5 地下軌道内から地表面までの振動加速度レベルの分布

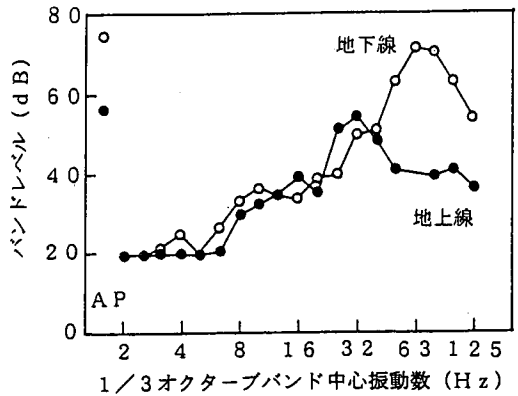


図-6 振動数分析結果 (地表面上)

3. 測定結果および考察

(1) 地上軌道と地下軌道における振動特性^{8), 9)}

a) 地表面上の振動加速度レベル

列車分類を特急およびその他の列車とし、地表面上および近傍の事務所1F内の振動加速度レベルの最大値(鉛直成分)について、それぞれ5列車での算術平均値を、地下線走行時と地上線走行時の結果で比較したものが表-2である。

同一の走行条件においては、事務所内と地盤上での振動加速度レベルにはほとんど差が見られない。従って、ここでは両者の平均値で考察した。上り線と下り線での振動加速度レベルの差は、地下線走行時では7.1dB、地上線走行時では2.4dBである。地下の上・下線走行時と振動値の大きい地上・上り線走行時との振動加速度レベルとの差は、上り線では10.8dB、下り線では3.7dBである。従って、いずれも地下線走行時の振動加速度レベルが、地上線走行時のものに比較してかなり大きい特徴が知られる。地下・下り線走行時の振動加速度レベルは、上り線走行時の振動加速度レベルに比較して小さい。このことは、地下・下り線に防振工とし

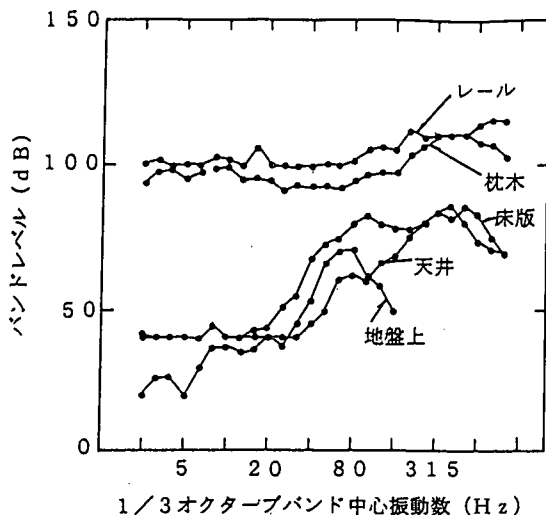


図-7 振動数分析結果(地下軌道・地表面)

てJRSタイプのバラストマットが既設されていることに起因している。

b) 地下軌道から地表面上までの振動加速度レベルの減衰状況

地下・上り線走行時のデータに関して、軌道-軌道構造物-地表面上への振動加速度レベル(鉛直成分)の分布を示したものが図-5である。

これより、枕木から床版までの減衰量が30 dB程度と大きく、土被りによる減衰量は10 dB程度とみなされる。地下・上り線走行時と下り線走行時の振動加速度レベルの相違は、地下軌道構造物では10~15 dBであり、地表面では10~20 dBである。

c) 振動数特性

地下線および地上線の上り線走行時のデータに関し、地表地盤上の鉛直成分の1/3オクターブバンドの振動数分析結果を示したものが図-6である。図中の左側上部に示した○(地下線)・●(地上線)印は、それぞれのオールパスのレベルを示している。

これより、地下線走行時では63~80 Hz領域のレベルが高く、地上線走行時には31.5 Hz付近のレベルの高いことが理解される。既往の研究成果¹⁰⁾によれば、軌道構造物であるレール、枕木、道床では、200~700 Hzおよび30~60 Hzの振動数の卓越することが知られており、また軌道モデルによる振動数応答計算からは、30~70 Hzでは、ばね下質量とレール支持ばねが主要因であるとされている。従って、本調査で見られる63~80 Hz領域の振動数成分は、道床およびレール、枕木に起因して発生されているものと推定される。

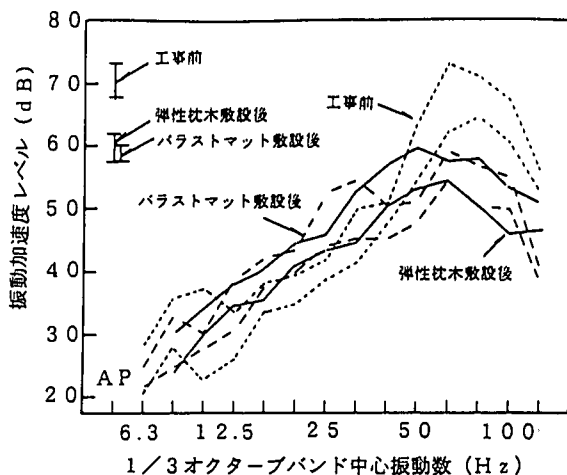


図-8 地表面における防振効果

3. (1) a) で述べたように、地表面上では、地下線走行時の振動加速度レベルが、地上線走行時の振動加速度レベルより大きい。この理由は、63~80 Hz領域での両者のレベル差の著しい相違のためと考えられる。

d) 地下軌道から地表面上までの振動数特性の変化

地下・上り線における特急走行時の1/3オクターブバンドの振動数分析結果を代表例として、地下軌道のレール、枕木、床版、側壁および天井から地表面までの振動伝達経路における振動数特性(鉛直成分)の変化を示したものが図-7である。一般的に、振動公害問題で取り扱われている振動数は、100 Hz程度までである。しかしながら、前述したように、地下の軌道構造物で発生される振動は、これよりも高振動数領域でも卓越する傾向にある。従って、以下の検討において、軌道構造物に関しては対象の振動数領域を600~900 Hzまでに拡大して示している。

レール、枕木での振動数分布の特徴は、2.5~160 Hzの広範囲の振動数領域におけるレベル変動が10~15 dBと小さく、500 Hz付近のレベルがやや卓越していることにある。これに比較して、床版および天井では400~500 Hz付近に最大レベルを示す第1のピークがあり、80~100 Hzには第2のピークがある。一方、地表面上では、63~80 Hzが顕著なピークを示す振動数領域である。これらの卓越振動数のうち、63~80 Hzのものは3. (1) c) で述べたように、道床とレール、枕木から発生されているものと考えられる。

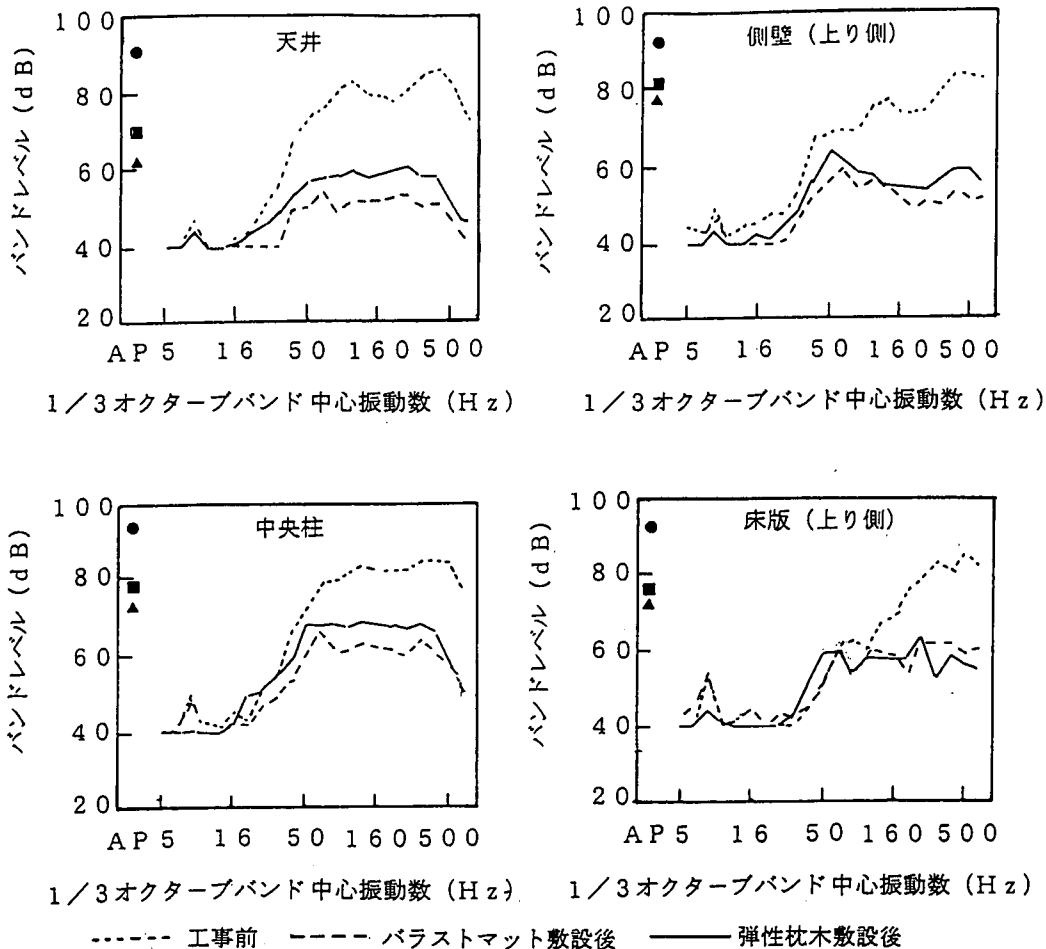


図-9 地下軌道内における防振効果

表-3 振動加速度レベル一覧表 (平均値)

測定条件	(dB)							(mm)
	レール	枕木	床版 (上り側)	側壁 (上り側)	天井	地盤上	事務所内	枕木変位 (上り側)
工事前	130.7	118.0	89.5	80.3	78.3	73.5	73.5	0.4
マット敷設後	134.8	112.6	72.6	70.2	66.6	62.0	60.5	2.1
(工事前との差)	+4.1	-5.4	-16.9	-10.1	-11.7	-11.5	-13.0	+1.7
弾性枕木敷設後	131.2	118.8	73.4	70.1	65.4	65.0	61.5	2.9
(工事前との差)	+0.5	+0.8	-16.1	-10.2	-12.9	-8.5	-12.0	+2.5

(2) 改良軌道による防振効果¹¹⁾

a) 振動数分析結果による防振効果の比較 (地表面上)

地表面上における磁気録音記録を、1/3オクターブバンド振動数分析器を用いて振動数分析したものが図-8である。それぞれ5データについて、点

線は工事前の分析結果、波線はバラストマット敷設後の分析結果、実線は弾性枕木敷設後の分析結果に相当しており、最大・最小のバンドレベルを結んで示している。

この図より、両対策を比較した全体的な振動数特性の変化は余り見られない。工事前のピークの振動

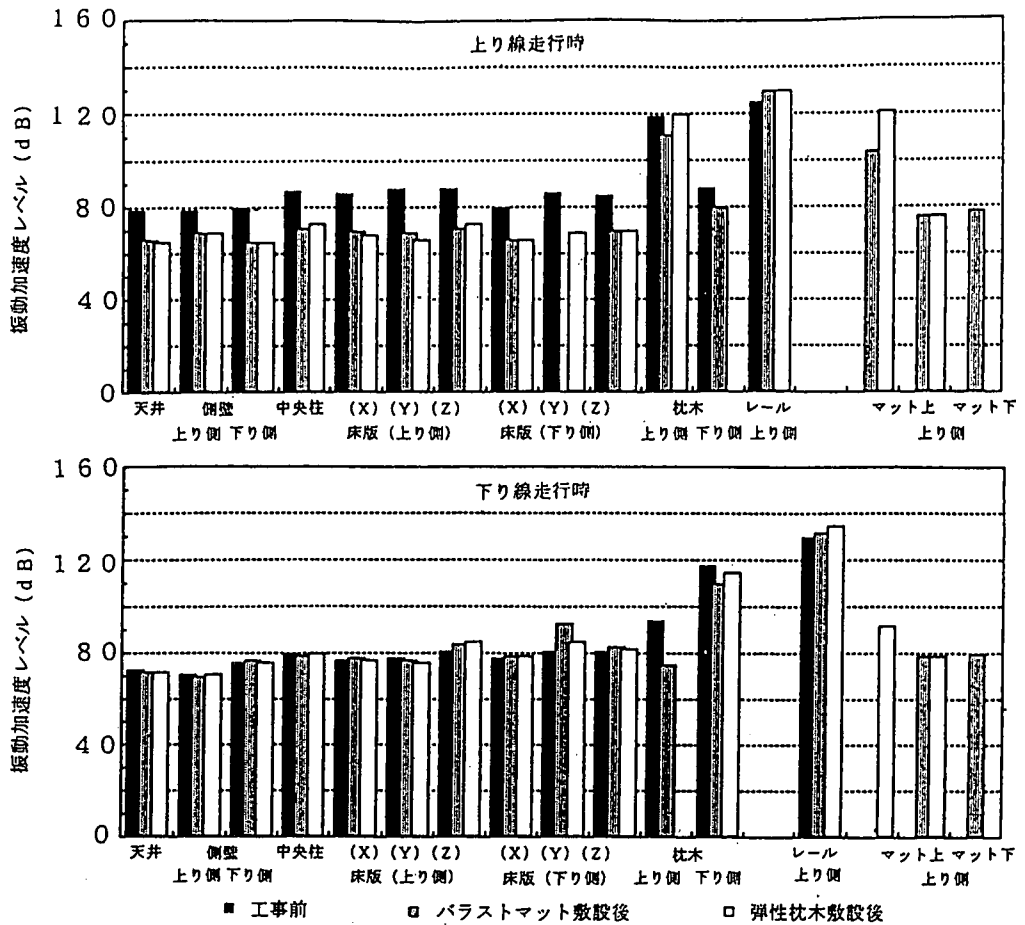


図-10 振動加速度レベルの分布 (地下軌道内)

数レベルは63~80Hz付近にあり、バラストマット敷設後にはこの63Hz以上の振動数で顕著な防振効果の生じていることが分かる。

本対策工の施工工程では、バラストマットの敷設後に弾性枕木を敷設している。従って、弾性枕木のみによる防振効果は判定できないが、弾性枕木敷設後には、63Hz以上でバラストマット敷設後とほぼ同様の防振効果が見られる。しかしながら、40~50Hzの振動数領域では返って逆効果となる傾向も見られる。

b) 振動数分析結果による防振効果の比較 (地下軌道内)

地下・上り線における特急通過時のデータに関し、地下軌道内の床版(上り側), 中央柱, 側壁(上り側)および天井(上り側)の各位置において、対策工の施工前後の振動数特性の変化を示したものが図-9である。図中の●■▲印は、それぞれ工事前、

弾性枕木敷設後およびバラストマット敷設後のオールパスのレベルを示している。

床版, 側壁および天井等の地下軌道構造物では、対策工の施工後に50~60Hz以上の卓越振動数の応答が大きく減衰されている。また、いずれの測点でもバラストマット敷設後には、振動加速度レベルが大幅に低減されていることが理解される。

c) 振動加速度レベルによる防振効果の比較 (地表面上)

地下・上り線走行時の全測定データの平均値について、地上および地下の各測定点における対策前後の平均振動加速度レベル(鉛直方向)および上り側の枕木変位を示したものが表-3である。

これらより、地表面上ではバラストマット敷設後には11.5dB, 弾性枕木敷設後には8.5dBの防振効果が見られる。また、建物1階内ではバラストマット敷設後には13.0dB, 弾性枕木敷設後

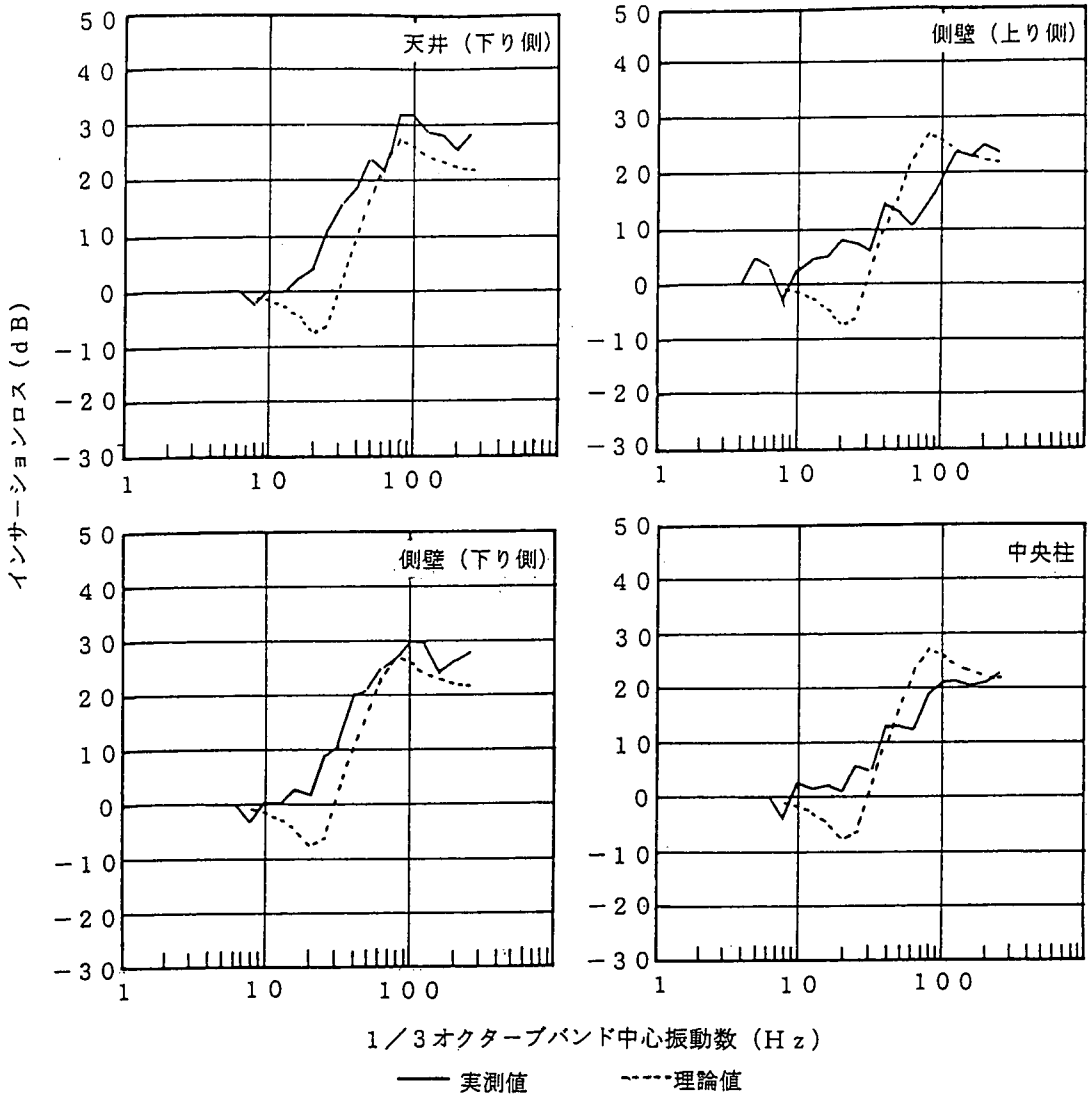


図-11 インサージョンロスの理論値と実測値の比較

には12.0 dBの防振効果が見られる。また枕木の最大変位量は、事前では0.4 mm程度、バラストマット敷設後では、2.1 mm程度、弾性枕木敷設後では2.8 mm程度である。

d) 振動加速度レベルによる防振効果の比較 (地下軌道内)

対策工の施工前後に関して、代表的な一列車走行時の地下軌道内における振動加速度レベルの分布を示したものが図-10である。この図および上述の表-3から理解されるように、軌道(レール・枕木)を除く構造物全体では10~30 dBの防振効果が

表-4 軌道系の計算緒元

バラストの動的ばね定数	$S_s=4E+06N/cm^3$
バラストマットの動的ばね定数	$S_m=4.9 kN/cm^3$
系の共振振動数	$f_0=25 Hz$

見られ、特にバラストマット敷設後の防振効果が顕著である。レール・枕木の振動加速度レベルには余り大きな変化が認められない。最も大きな防振効果は、上り線通過時の上り側の床版に見られ、X、Y、

Z各成分とも10～30dB程度の防振効果を示している。同様に、下り線床版での振動加速度レベルも大幅に低減されており、10～20dB程度の防振効果を示している。さらに、天井、側壁および中央柱における防振効果は、10～20dB程度である。また、バラストマットの上下部での振動加速度レベルの差は、24～31dBと極めて大きく、これはバラストマットによるインサージョンロスと考えられる。

4. インサージョンロス理論による防振効果の評価

インサージョンロスと振動数との関係を検討するために、式(1)から求めたインサージョンロスの理論値と実測結果から求めたインサージョンロス値とを、中央柱、上りと下りの側壁および天井の各位置で比較したものが図-12である。また、ここでの計算に使用した軌道系の計算緒元を表-4に示した。なお、バラストの動的ばね定数は、文献6)、7)のものから引用した。

これらの図より、10dB程度の相違のある振動数帯域も見られるが、8～200Hzの広い振動数領域において、インサージョンロス値が増減する両者の全体的な傾向は良く一致しているものと考えられる。このような軌道系における固有円振動数 ω_0 は、次式から求められる。

$$\omega_0 = (S_s / M)^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 S_s ：バラストの動的ばね定数、 M ：輪荷重である。ここでの輪荷重は、単一車輪の枕木2本分への荷重分布を考慮して定められる。本関係式から、対象軌道系の共振振動数は25Hzと算定される。インサージョンロスの理論値が示すバラストマットの有効範囲は、地下構造物で卓越する40Hz以上の高い振動数成分である。従って、図-8に示すように、このことが地表で卓越している50～80Hzの振動数での大幅な振動低減効果に寄与したものと考えられる。

5. 結論

本論文では、素地軌道区間と地下軌道区間が並行して運行されている軌道を対象として、地下軌道区

間での振動対策工（バラストマット敷設および弾性枕木敷設）の効果について検討した。対策工の施工前後において、地下軌道構造物および地表面上の多数点で実施した詳細な振動調査結果より、素地軌道区間と地下軌道区間における振動特性を比較して両者の相違について検討するとともに、実測結果からこの防振軌道の有効性を確認した。さらに、バラストマット敷設による防振効果の評価が、インサージョンロス理論によって算定し得る可能性を示した。得られた主要な知見をまとめると、以下のようになる。

(1) 地下線走行時の振動加速度レベルは、地上線走行時のものに比較して、上り線では約11dB大きく、下り線では約4dB大きい。

(2) 地表面上において、地下線走行時では、レール、枕木および道床の影響による63～80Hzの振動数領域のレベルが高い。一方、地上線走行時には、特に31.5Hz付近の振動数のレベルが高くなる特徴がある。

(3) 枕木から床版までの減衰量が30dBと大きく、土被りによる減衰量は10dB程度とみなされる。地下の上り線と下り線走行による振動加速度レベルの相違は、地下軌道構造物では10～15dB、地表面上では10～20dBである。

(4) 地表面上での防振効果は、バラストマット敷設後で11.5～13.0dB、弾性枕木敷設後では8.5～12.0dBになる。バラストマット敷設後に63Hz以上の振動数で防振効果が生じており、この傾向は弾性枕木敷設後でもほぼ同様である。しかしながら、後者では返って一部に逆効果となる傾向も見られる。

(5) 地下軌道のレール・枕木を除く構造物全体では、10～30dBの防振効果が見られ、特にバラストマット敷設後の防振効果が顕著である。

(6) 床版・側壁および天井の地下軌道構造物では、対策工の施工後に60Hz付近以上の振動数帯域の振動加速度レベルが大きく減衰されている。

(7) バラストマット上下部での振動加速度レベルの差は、24～31dBである。また、枕木の最大変位量は事前では0.4mm程度、バラストマット敷設後では2.1mm程度、弾性枕木敷設後では2.8mm程度である。

(8) 地下軌道軌道構造物におけるバラストマット敷設後の防振効果は、8～200Hzの振動数領域において、インサージョンロス理論によって算定できそうである。

参考文献

- 1) Urban Mass Transportation Administration Transportation Systems Center: Prediction and Control of Rail Transit, *Noise and Vibration -A State of the Art*, pp.111-157, 1974.4.
- 2) James, T. Nelson and Hugh, J. Saurenman :State of the Art Review, Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains, *U.S. Department of Transportation Urban Mass Transportation Administration*, pp.5.1-5.53, 1983.
- 3) Wettshureck, R. und Muller, D. D.:Unterschottermatten im Munchner S-Bahntunnel, *Kurzfassung, DAGA*, pp.413-416, 1958.
- 4) 江島 淳:地盤振動と対策(基礎・法令から交通・建設振動まで), 集文社, pp.69-187, 1979.6.
- 5) 早川 清, 竹下貞雄, 松井 保:防振マットによる鉄軌道の地盤振動低減効果とその評価, 土質工学会論文報告集, Vol.32. No.1, pp.249-259, 1992.3.
- 6) Wettshurek, R., Muller, D. D. and Koch, R.: Ballast Mats in Tunnels-Analytical Model and Measurement, *Inter Noise*, pp.1-4, 1985.
- 7) Wettshureck, R. and Muller, D. D.:Einfugungsdamma von Unterschottermatten, *Acustica*, Vol.58, pp.177-182, 1985.
- 8) 早川 清, 澤武正昭:トンネル区間と素地区間における列車走行時の地盤振動特性の比較, 平成5年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集, III-10-1-2, 1993.5.
- 9) 早川 清, 澤武正昭:防振マット・弾性枕木を用いたトンネル軌道の防振対策, 第28回土質工学会研究発表会講演集, pp.1249-1252, 1993.6.
- 10) 宮本俊光, 渡辺偕年:線路-軌道の設計・管理-, 山海堂, pp.11-28, 1980.
- 11) 早川 清, 土性清隆, 野村勝義:地下鉄軌道での防振マットの低減効果確認試験, 第2回土木学会振動制御コロキウム講演論文集, pp.143-150, 1993.8.

(1999.1.4 受付)

GROUND VIBRATION REDUCTION DUE TO IMPROVEMENT OF TRACK IN SUBWAY

Kiyoshi HAYAKAWA

This paper presents the results of measurements in subway line vibration by ballast mat. These measurements were performed at ground level line and subway line like subway rail, rail support, wall, ceiling, column and ballast mat. The vibration reduction characteristics and the difference of spectrum property in ground level line and subway line were provided. Finally, an estimation method of vibration reduction by these countermeasures was presented, being based on insertion loss theory.