

## IV-8 交通振動の軽減に資する舗装構造に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平成12年度～14年度

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁構造）

研究担当者：村越 潤、新井恵一、大石 哲也

### 【要旨】

本研究は交通振動に軽減効果のある振動軽減型舗装の検討、舗装構造のモデル化による交通振動の予測手法の検討を行うものであり、舗装チームと連携して実施したものである。当チームは、舗装構造を考慮した振動伝播メカニズムの解析手法の例示を目標としている。舗装チームで実施した4種類の振動軽減型舗装に対する振動実験を基に解析モデルを作成し、打撃加振実験における入力荷重を考慮した時刻歴応答解析を行った。その結果、加振位置からの距離と振動加速度レベルの関係について、実験値と解析値の傾向が概ね一致することを確認した。4種類の中の1つであるPC版をゴム支承により支持する構造については、実験値と解析値ともに、振動軽減効果が最も高いことを確認した。

キーワード：舗装、交通振動、FEM（有限要素法）、モード合成法、振動軽減型舗装、振動加速度レベル

### 1. はじめに

本研究は、交通振動の軽減効果のある振動軽減型舗装の検討、舗装構造のモデル化による交通振動の予測手法の検討を行うものであり、舗装チームと連携して実施した<sup>1)</sup>。このうち、橋梁構造チームは舗装構造を考慮した振動伝播メカニズムの解析手法の例示を目標とする。

既往の研究においては、地盤の振動伝播解析の研究例は数多く見られる<sup>2)</sup>が、舗装構造の効果に着目して振動伝播解析を行った事例はほとんどない。本研究では、数値解析手法として3次元立体 FEM モデルを用いた時刻歴応答解析を行い、振動軽減型舗装の振動実験結果との比較を通して、解析手法の評価を行った。

### 2. 研究方法

舗装チームにおいて、試験施工及び振動実験を実施した次の4種類の舗装（図-1）<sup>1)</sup>を対象として、各舗装体の材料物性、構造特性等の特徴を考慮できる3次元立体 FEM 解析モデルを作成した。

- ・振動軽減型舗装A（砕石マスチック混合物（SMA）の2層構造によるタイプ）、
- ・振動軽減型舗装B（多孔質弾性舗装と重量排水性舗装を利用したタイプ）
- ・振動軽減型舗装C（PC版とゴム材を併用したタイプ）
- ・密粒度舗装

その上で、各舗装体の FWD による振動実験結果（加振位置からの距離～振動加速度レベル）に対して、FWD による入力荷重を用いた線形時刻歴応答解析を行い、実験値と解析値の比較分析を行った。

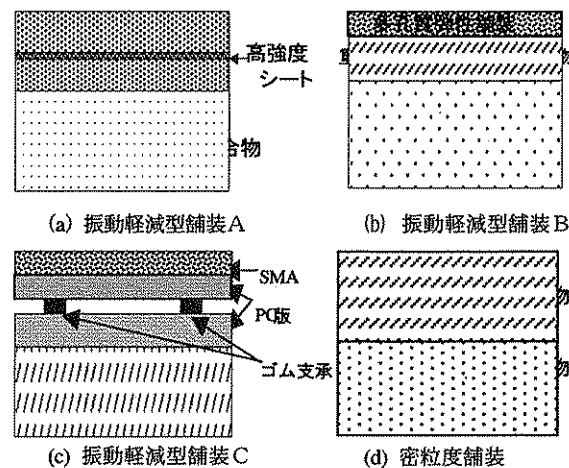


図-1 対象とした舗装種別（断面構成イメージ図）

### 3. 研究結果

#### 3.1 解析方法

本研究では、点加振入力が可能有限要素動的応答プログラム(Strand7)を使用し、舗装-地盤系の3次元モデルにより応答解析を行った。解析は、①3次元解析モデルの作成（2次元固有値解析による境界条件の設定）、②3次元固有値解析によるモード等価減衰定数の算出、卓越モードの抽出、③モード解析法による3次元線形時刻歴応答解析、の手順からなる。

等価減衰定数の算出に当たって、各要素の等価減衰定数には地盤の振動伝播解析において多く用いられている0.05を用いた。時刻歴応答解析で考慮するモード次数は、寄与率が最も高いモード（表-1参照）及びその周辺で寄与率が高いモードとした。ただし、PC版を用いた舗装については、地盤部と舗装部の固有周

期が大きく異なることから、地盤部の卓越モードに加えて、舗装部の卓越モード周辺も考慮した。

### 3. 2 解析条件

#### (1) 対象とした舗装-地盤系

図-2に舗装-地盤系の解析モデルを示す。解析モデルは、道路軸方向の舗装を中心に対称 1/2 モデルとし、着目する3~12Hz程度の振動特性が表現できるように、既存の解析事例と事前に実施した2次元時刻応答解析結果を参考に、道路軸直角方向40m程度、道路軸方向18m、深さ方向30m程度とした。図中の①の部分(幅6.8mの舗装部)には各舗装モデルが組み込まれる。また、地盤は試験施工・振動実験を行った土木研究所内の実験場付近柱状図<sup>3)</sup>を参考にしてモデル化した。図中②(深さ5mまでの層)の部分がローム層( $V_s=120\text{m/s}$ ,密度 $1.4\text{t/m}^3$ ,ポアソン比0.45)、③(深さ5m以深の層)の部分が洪積砂質土層( $V_s=250\text{m/s}$ ,密度 $1.8\text{t/m}^3$ ,ポアソン比0.45)である。

境界条件は図-2に示すが、粘性境界については、2次元固有値解析の結果を基に地盤の卓越周期に対し、理論解と等価な解が得られるようにバネ定数と減衰定数の設定を行った。地盤部分の要素分割は、波長の1/10(ローム層のせん断弾性波速度 $V_s=120\text{m/s}$ 及び上限振動数12Hzより計算:1m)を目安とし、計測地点周辺では30~50cm程度として舗装モデルとすりつけ、加振点から離れるに従い順次大きくした。

#### (2) 舗装のモデル化

振動軽減型舗装A, B及び密粒度舗装については、ソリッド要素でモデル化した。振動軽減型舗装Cについては、モデルの簡略化を図るために、舗装体全体をソリッド要素でモデル化した場合との精度比較を行った上で、アスファルト舗装とPC版をシェル要素に置き換え、ゴム支承をソリッド要素とした。舗装体の要素分割数については、事前に2次元FEM解析により要素分割数が振動加速度レベルに与える影響の感度分析を行い、最大辺の長さを20cm程度とした。

物性値としては、各舗装の弾性係数、密度、ポアソン比を用いた。なお、ここで用いた材料物性値は舗装材料の供試体レベルの試験値を用いており、実際に試験施工されたものとは異なる。

#### (3) FWDによる入力波形

今回のFWDによる加振実験では、入力荷重として最大応答値(45.7kN)以外は測定していないことから、既往の他の舗装体におけるFWD実験結果により、最大応答値に至る時間を概略推定し、図-3に示す時刻

表-1 各モデルの最も寄与率の高い振動モード

舗装の種類	固有周波数 (Hz)	固有円振動数 (rad/s)	等価減衰定数 ( $h_i$ )	寄与率 (%)
振動軽減型舗装A	5.52	34.7	0.045	40.5
振動軽減型舗装B	5.48	34.5	0.046	39.4
振動軽減型舗装C	3.94	24.8	0.044	70.6
密粒度舗装	5.51	34.6	0.045	39.2

\*振動軽減型舗装CでのPC版の固有周波数は9.32Hz

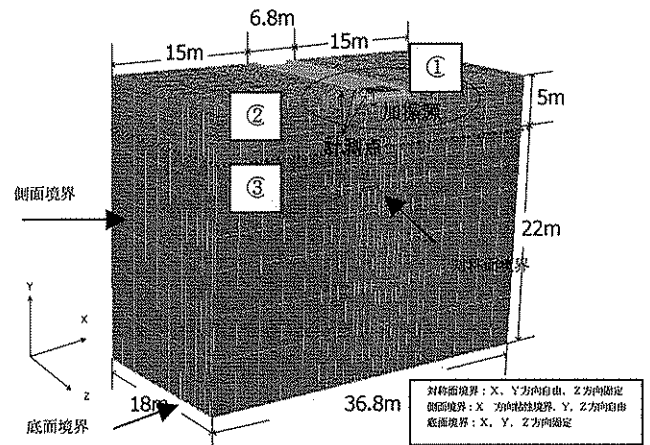


図-2 3次元FEM解析モデル

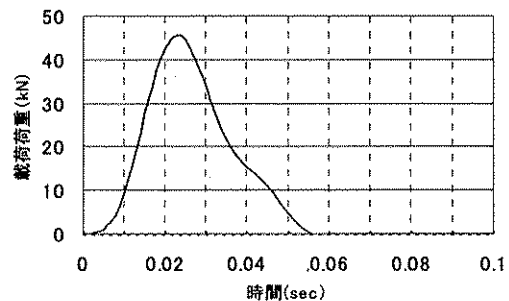


図-3 FWDによる入力荷重の時刻歴波形

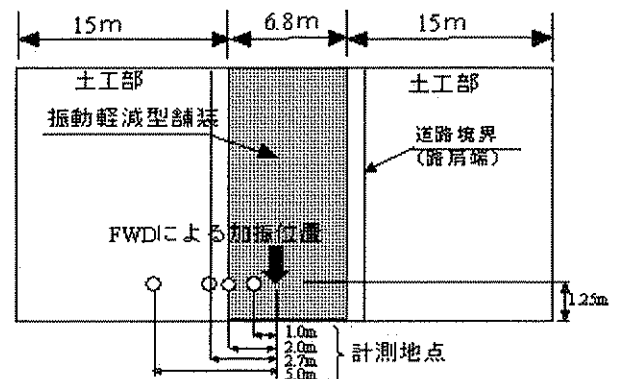


図-4 舗装部分平面図(図-2円内の拡大)

歴応答波形を用いることとした。

#### (4) 解析結果の評価

解析結果については、図-4に示す実験時の計測地点 (FWD 加振位置から 1m、2.0m、2.7m、5m の位置の地表面) と同じ位置における振動加速度レベルの最大値 (鉛直方向) を整理し、振動実験結果 (4 回の測定 の平均値) と比較した。なお、2.7m 地点は道路境界 (路肩端) と一致する。

### 3. 3 解析結果

#### (1) 各舗装における実験値と解析値の比較

図-5に、各振動軽減型舗装及び密粒度舗装の実験結果と解析結果について、加振位置からの距離と振動加速度レベルの関係を示す。

##### 1) 振動軽減型舗装 A (SMA)

加振位置から道路境界の 2.7m 地点では、実験値で 82dB、解析値で 84dB を示し、他の位置においても、実験値と解析値はほぼ一致した。実験値と解析値の差は、最大 3dB (2.7m 地点) であった。

##### 2) 振動軽減型舗装 B (多孔質+重量 As)

加振位置から 2.7m 地点では、実験値で 82dB、解析値で 89dB を示し、ほぼ近い値を示した。実験値と解析値の差は、最大 6.8dB (2.7m 地点) であった。

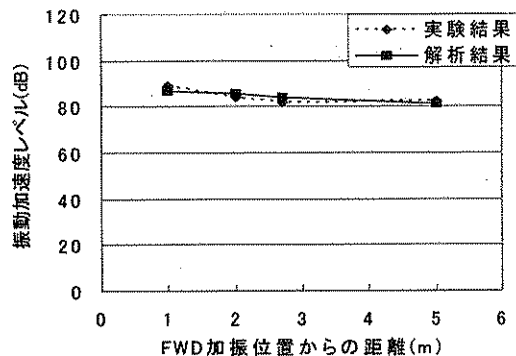
##### 3) 振動軽減型舗装 C (PC 版)

加振位置から 2.7m 地点では、実験値で 74dB、解析値で 83dB を示し、舗装 A、B と比較して両者の差は大きい結果となった。実験値と解析値の差は、最大 19dB (1m 地点) であった。また、他の舗装と比較して実験値および解析値ともに、2m 地点の振動加速度レベルに対して、1m 地点の値が大きいが、これは 1m 地点がゴム支承で支持した PC 版上にあり、他の舗装が舗装体と地盤が追従した挙動を示すのに対して、版単独としての振動が生じているためと考えられる。

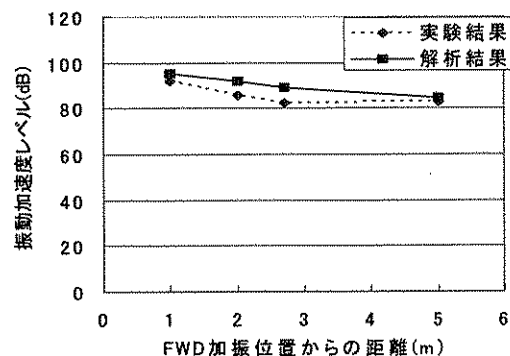
##### 4) 密粒度舗装

加振位置から 2.7m 地点では、実験値で 81dB、解析値で 92dB を示した。両者の絶対値は異なるが、1m 地点から 2.7m 地点の間の低減された値は、実験値で 9dB、解析値で 8dB であり、ほぼ一致している。

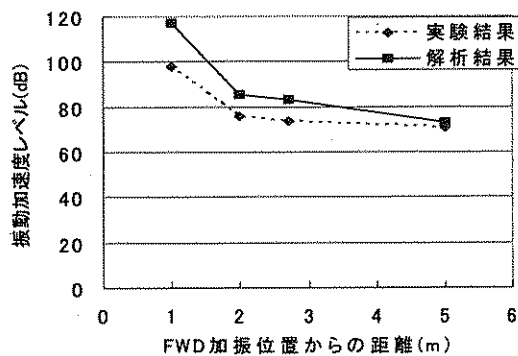
上記実験値と解析値の比較により、舗装によっては 10dB 以上の差が見られるが、両者の差としては解析モデルの仮定上の誤差 (解析に用いた材料定数と実舗装の材料定数の違い、地盤のモデル化の仮定の影響等) の影響が考えられる。振動軽減型舗装 C を除いては実験値の差が小さいことも踏まえれば、解析値は各舗装体の振動特性の傾向を概ね表現出来ているものと考え



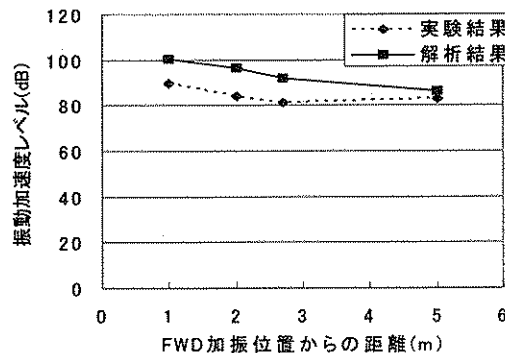
(a) 振動軽減型舗装 A



(b) 振動軽減型舗装 B (多孔質+重量 As)



(c) 振動軽減型舗装 C (PC 版)



(d) 密粒度舗装

図-5 実験結果と解析結果の比較

られる。

## (2) 実験値と解析値の距離減衰効果の比較

実験値と解析値について、それぞれ地点 1m の振動レベルに対する地点 2m、2.7m、5m 地点における振動加速度レベルの低減量を用いて、両者の減衰効果を比較した。

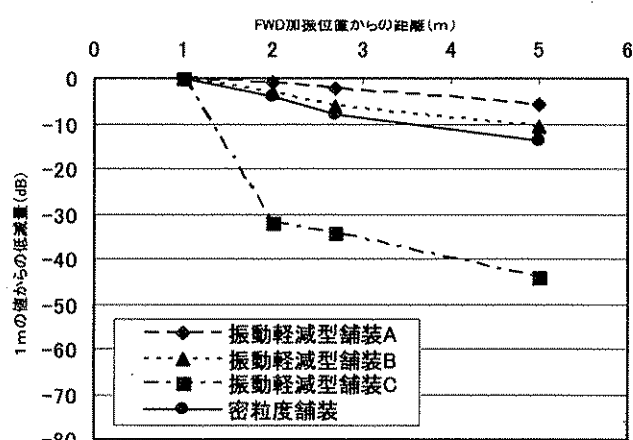
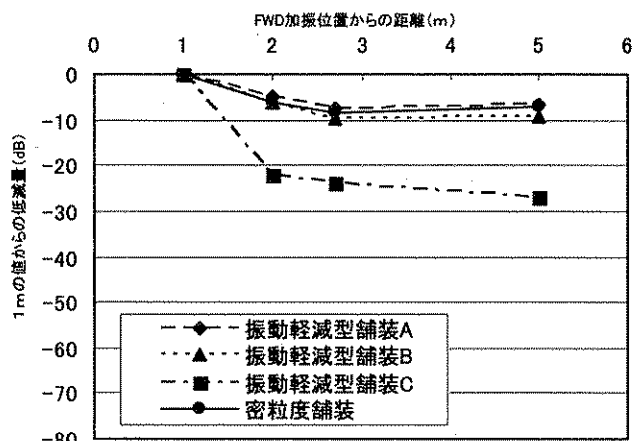
図-6 に各舗装体の実験値と解析値の比較結果を示す。実験値と解析値を比較すると、振動軽減型舗装 A、B 及び密粒度舗装の低減効果がほぼ同程度で、振動軽減型舗装 C の低減効果が相対的に大きいという点で、両者は概ね傾向が一致している。

上記(1)(2)で述べたように、今回の解析結果との比較に用いた FWD 加振実験結果によれば振動軽減型舗装 C を除いて振動軽減効果に大きな違いが見られていない。これに対し、荷重車走行試験結果<sup>1)</sup>によれば、振動軽減型舗装 A、B については 2~5m 計測地点において、密粒度舗装に対し 1~3dB の振動軽減効果が見られ、また、振動軽減型舗装 A の方が B よりも振動軽減効果が若干大きい結果が得られており、この結果を踏まえると、今回の解析結果は、各舗装体の振動軽減効果の違いを概ね評価できているものと考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、舗装構造を考慮した振動伝播メカニズムの解析手法の例示を目標とし、4 種類の舗装体における実験結果を基に、数値解析を行い、実測値と解析値の比較分析を行った。主な結果を以下にまとめる。

- ①舗装体の材料物性と地盤を考慮した 3次元立体 FEM 解析モデルを用いた時刻歴応答解析による解析手法を示した。
- ②FWD による打撃加振実験結果に対して、実験値と解析値の比較を行った結果、加振位置からの距離と振動加速度レベルに関して、両者の傾向が概ね一致することを確認した。
- ③3種類の振動軽減型舗装の振動軽減効果について、実験値及び解析値ともに、PC版をゴム支承により支持する構造が最も効果が高いことを確認した。



## 【参考文献】

- 1) 梁、新田、吉田、大石、新井：交通振動の軽減に寄与する新しい舗装の開発，土木技術資料 Vol.44-12, 2002.12
- 2) 例えば、早川清、原文人他：鋼矢板振壁による地盤振動遮断メカニズム，地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム，pp.79~pp.84, 2001.2.
- 3) 財団法人建築保全センター：筑波研究学園都市地盤図，1986