

◆ 特集：道路の機能向上に資する技術開発 ◆

交通振動の軽減に寄与する新しい舗装の開発

梁 真二* 新田弘之** 吉田 武*** 大石哲也**** 新井恵一*****

1. はじめに

道路周辺においては、交通騒音や大気汚染などと同様に交通振動の発生による環境悪化が懸念されている。交通振動の発生要因としては、路面平坦性の低下、路床の支持力不足、交通荷重の超過などが考えられる。これらの要因に対して、表層の打換えによる平坦性の回復、路床の強化などによる対策が従来からあった。しかし、表層の打換えによる方法では平坦性の持続性に課題があり、また路床の強化は大規模工事を伴うため実際の対策としては適用困難な場合が多い。そのため、工事が比較的短期間で済み、効果の持続性の高い工法の開発が求められている。

一方、交通振動の発生・伝搬メカニズムと舗装構造や材料物性、路面性状などの関係については未だ不明な点が多く、振動軽減技術の理論的検討が困難であるのが現状である。そこで交通振動を軽減する舗装の開発する際に、材料特性を考慮に入れた舗装の振動予測を確立することでできれば、振動軽減型舗装の技術開発においてより有効となると考えられる。

本研究では、交通振動の軽減に効果のある振動軽減型舗装を民間5社と共同で開発するとともに、舗装材の材料特性を考慮に入れた振動予測について研究を行ったので報告する。

2. 振動軽減型舗装の概要

振動軽減型舗装は、一般公募した民間5社((株)ガイアートクマガイ、ジオスター(株)、日本エラストラー(株)、日本道路(株)、日本舗道(株))と独立行政法人土木研究所による共同研究で開発した。共同研究で開発した3種類の振動軽減型舗装の概要を以下に示す。

2.1 振動軽減型舗装 A

振動軽減型舗装 A の舗装断面構成を図-1 に示

す。この舗装は、振動減衰性能を有する高強度シートを使用するとともに、振動を伝達しにくいと考えられる開粒度アスファルト混合物を用い、振動軽減効果の高い舗装体とすることを目指した。また耐久性の高い舗装という観点から、表層に SMA (碎石マッシュアスファルト) 混合物を用いた。

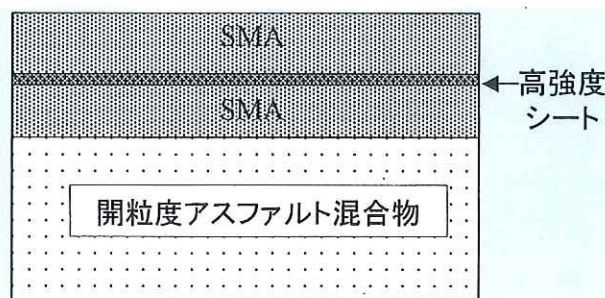


図-1 振動軽減型舗装 A の舗装断面図

2.2 振動軽減型舗装 B

振動軽減型舗装 B の舗装断面構成を図-2 に示す。この舗装は、振動発生抑制及び伝達抑制効果があると考えられる重量排水性舗装を用い、さらに表面にゴム弾性を有する多孔質弾性舗装を使用することで、振動抑制効果を図った。

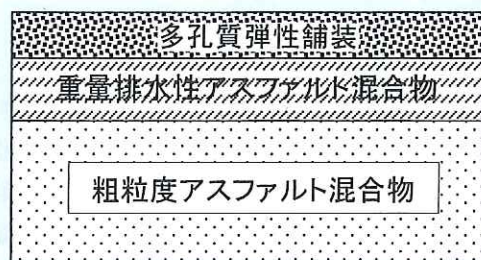


図-2 振動軽減型舗装 B の舗装断面図

2.3 振動軽減型舗装 C

振動軽減型舗装 C の舗装断面構成を図-3 に示す。この舗装は、PC 版間に防振ゴムを設置することで、発生した交通振動を吸収させる構造とした。また表層には SMA を用いることで、耐久性向上を図った。

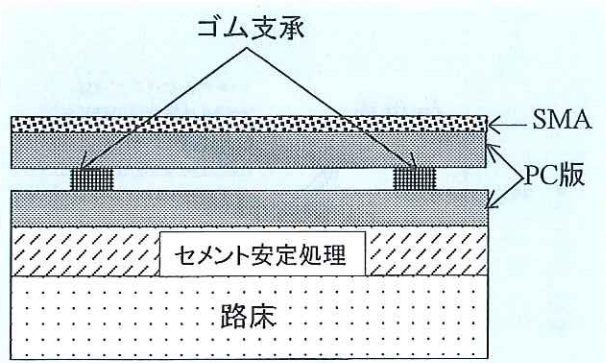


図-3 振動軽減型舗装 C の舗装断面図

3. 振動軽減型舗装の評価

3.1 振動試験

本研究では、予備試験として荷重車の振動測定を行った。続いて、開発した振動軽減型舗装 3 種類および比較用の密粒度舗装を用いて周囲の振動レベル測定を行った。写真-1 に振動測定の様子を示す。振動は荷重車の走行によって発生させた場合と FWD (Falling Weight Deflectometer) の 49kN の荷重を走行中心位置で載荷した場合の



写真-1 振動測定の様子

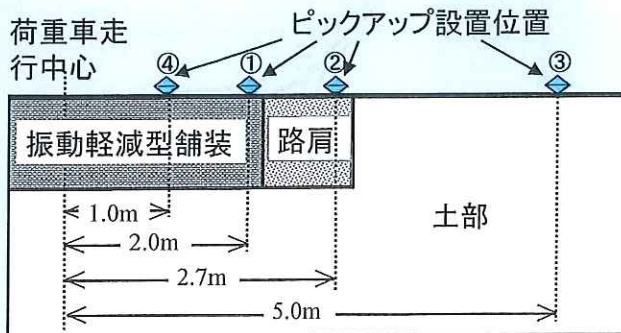


図-4 振動レベル測定位置

2 通りとした。

振動測定位置は図-4 に示すとおりとし、各工区中央部の荷重車走行中心から 1.0m 点、2.0m 点、2.7m 点および 5.0m 点の計 4 点 (加振源が荷重車の場合は 1.0m 点を除く 3 点) に振動加速度ピックアップを設置し測定した。また振動レベル測定条件については表-1 のとおりとした。

表-1 振動レベル測定条件

	概要	頻度
①測定方法	JIS Z 8735 (振動レベル)	5 回/測定点
②測定位置	工区の中央地点: 1m, 2m, 2.7m, 5m	
③加振方法	大型車 (後軸重 58.8kN) 大型車 (後軸重 117.6kN) FWD	3 パターン/工区

3.2 振動評価項目

本研究では、振動軽減型舗装の評価項目を表-2 のように設定した。

表-2 評価項目

	評価項目	概要
1	振動レベル	各点における振動レベルの絶対値
2	通常舗装との比較	比較工区と比べた振動軽減効果 (各測定点)
3	路面性状	路面性状値との相関関係
4	周波数特性	振動加速度レベルの 1/3 オクターブバンド周波数解析

3.3 振動測定結果

3.3.1 荷重車の振動測定結果

荷重車の性状を確認するため、荷重車の前輪と後輪の周波数解析を既設舗装を用いて行った。図-5 に前輪の調査結果、図-6 に後輪の調査結果の一例を示す。

今回の測定結果では、荷重車の前輪・後輪のバネ定数がともに 12.5Hz 付近であった。通常、板バネ (リーフサス) 形式の大型車の前輪・後輪の卓越周波数は大凡 10~20Hz 付近と言われている。また、荷台のバネ定数は 2~3Hz と言われている。本実験で使用している荷重車は板バネ形式のものであり、この周波数帯に合致していることがわかった。よって、そのままこの荷重車を用いて振動測定を行うことにした。

3.3.2 周囲の振動測定結果

荷重車走行による振動測定、および FWD を加振源とした振動測定の結果を図-7~9

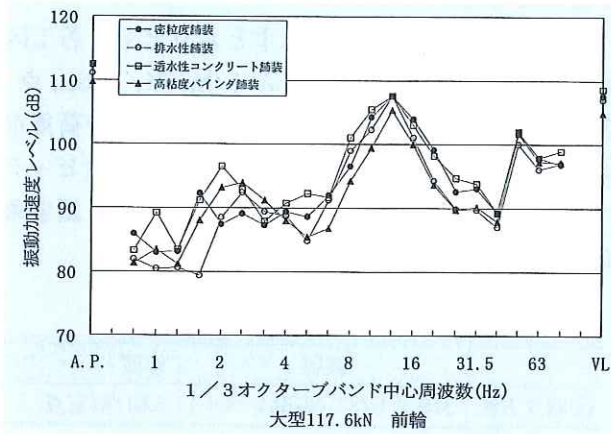


図-5 車両振動の周波数解析 (前輪)

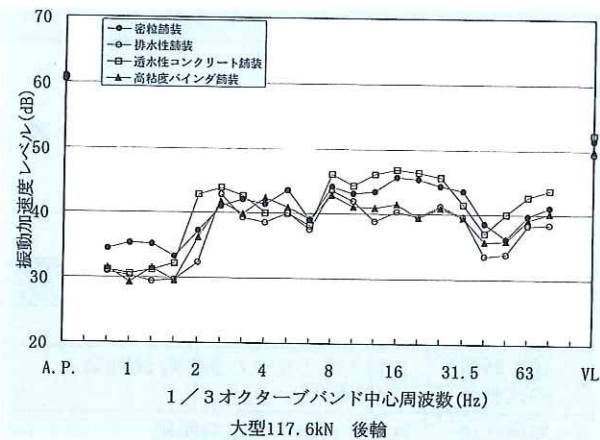


図-6 車両振動の周波数結果 (後輪)

に示す。なお図の振動レベル値は測定した振動レベルのピーク値 (Z方向) を示しており、5回測定 の平均値とした。

荷重車走行による加振については、図-7、8より、ほとんどの場合において振動軽減型舗装の振動軽減効果が見られた。特に振動軽減型舗装Cでは最も大きな効果が得られ、最大で約8dBの振動軽減が見られた。また、振動軽減型舗装A、Bは1~3dB程度の振動軽減が見られた。

また加振源をFWDにした場合では、図-9のように振動軽減型舗装Cを除いて、比較工区との大きな違いが見られなかった。振動軽減型舗装Cの場合は、1mの位置で大きな振動となっているが、これはゴム上に発生した振動であり、路面が振動していることを示している。しかし、2mより遠くでは振動が小さくなっており、ゴムが振動を伝達していないことを示している。

3.3.3 振動軽減効果

荷重車走行による振動測定結果を基に、3種類の振動軽減型舗装の振動軽減効果について検討を

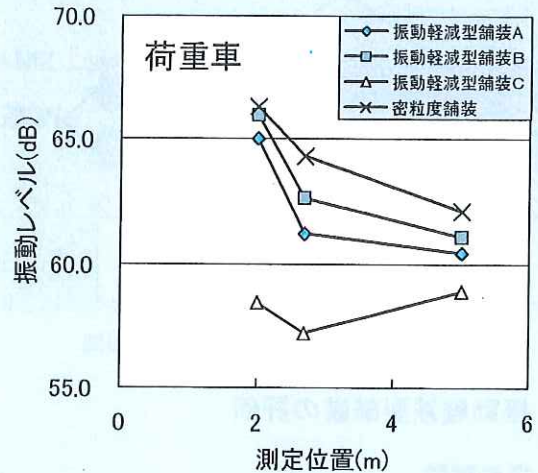


図-7 振動レベル結果 (荷重条件:117.6kN, 50km/h)

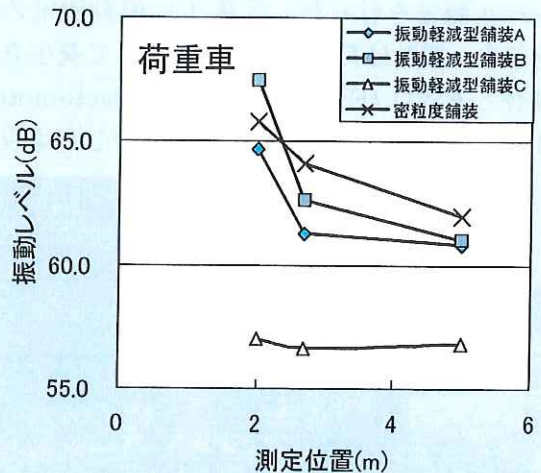


図-8 振動レベル結果 (荷重条件:58.8kN, 50km/h)

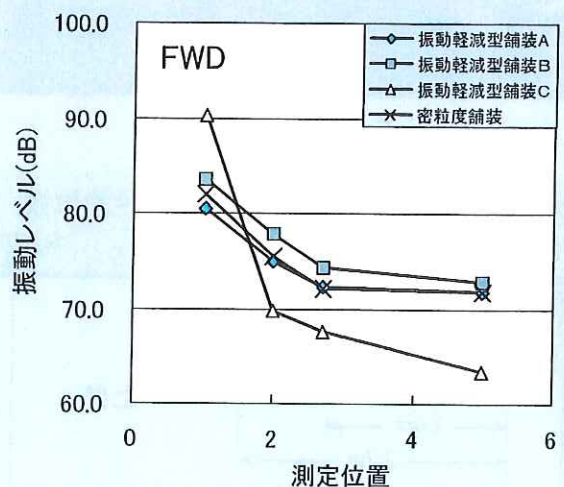


図-9 振動レベル結果 (荷重条件: FWD)

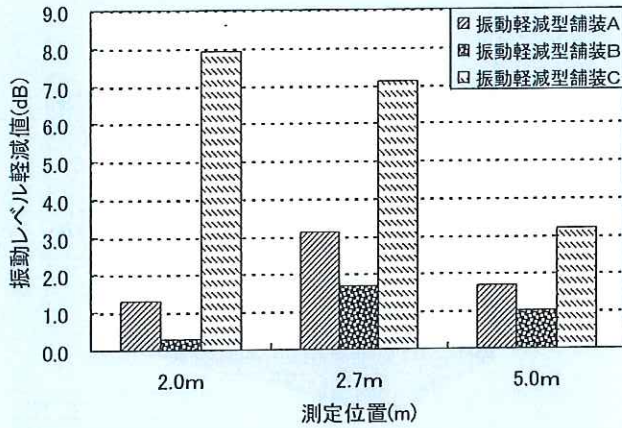


図-10 振動軽減効果

行った。

密粒度舗装を基準として、各工区各測定点での振動レベルピーク軽減値を図-10に示した。

全ての振動軽減型舗装において、振動軽減効果が確認された。振動軽減型舗装 A、B は、舗装体に近い 2.7m 地点での軽減効果が一番大きいことがわかった。振動軽減型舗装 C は、高い軽減効果があることがわかった。5.0m 地点では全ての振動軽減型舗装において、振動軽減効果が小さくなっているが、これは今回の試験施工は、1 工区 36m と短く、5m 付近では他の振動の影響が大きくなった可能性もあると考えられる。

3.3.4 周波数分析

荷重車走行により発生した場合の振動レベルの周波数分析を行った。図-11 に周波数分析の一例を示す¹⁾。なお条件は加振源が後軸重 117.6kN の荷重車、測定位置は 2.7m 地点のものとする。

図-11 より、卓越している周波数帯がどの舗装体でも 20Hz を示していることが確認され、また

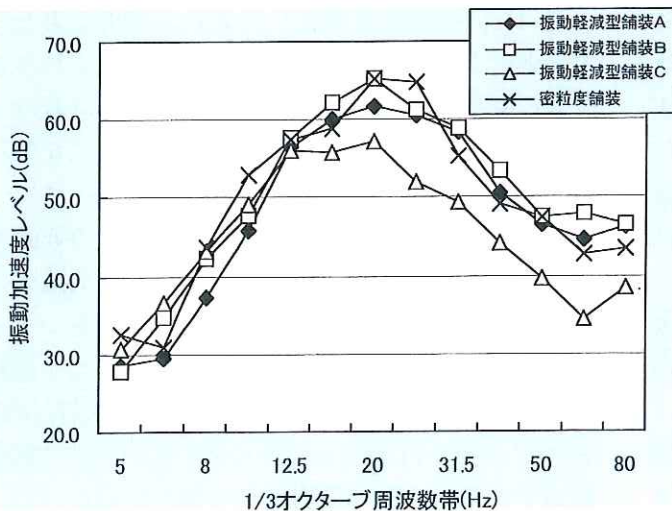


図-11 周波数分析結果

比較工区と振動軽減型舗装 A、B は、ほぼ同じ形状をしていることがわかる。したがって、振動軽減型舗装 A、B は、特定の周波数帯の振動を軽減しているのではなく、全体的にわずかつ軽減していると考えられる。一方、振動軽減型舗装 C は、12.5Hz 付近より高周波の部分で振動が軽減されていた。これはゴム支承の特性によるものと考えられ、効果的に振動軽減が図られたことがわかる。

3.4 交通振動と他の性状との関係

荷重車の走行による振動は、実際の交通振動の傾向に近いと考えられるが、大規模な実験が必要となるため、比較的小規模で行える評価方法が必要である。

FWD による測定は、所定の位置からおもりを落下させて振動を発生させることから、舗装体を与えるエネルギーは一定と考えられる。そこで、これを舗装構造の持つ振動特性ととらえて変数の 1 つとする。また、走行による振動は路面の平坦性との関係があることがわかっており²⁾、平坦性を振動発生特性ととらえてもう 1 つの変数とする。これらの変数と荷重車走行の振動との関係をみた。ここで、路面平坦性としては IRI(International Roughness Index) を用いた。

図-12 に示すとおり、路面平坦性と FWD の振動加速度レベル (FWD 時 VL)、大型車走行による振動加速度レベル (大型車時 VL) は、概ね一つの平面上にプロットされた。このため、走行による振動は FWD 衝撃振動と平坦性からある程度予測できると考えられた。

そこで、これらを重回帰分析すると、以下のようになり、相関係数 $R^2 = 0.720$ となった。

大型車時 VL =

$$0.789 \times \text{FWD 時 VL} + 0.246 \times \text{IRI} - 4.090$$

従って、FWD や平坦性調査により、実際の車両を走行させることなく、振動レベルの予測が行える可能性があることがわかった。しかし、今回の解析ではデータ数が少ないことから、今後はデータ数を増やして精度向上、および更なる変数の検討を行う必要がある。

3.4 FEM 解析による振動レベルの評価

実験により振動軽減に効果的な舗装体を確認することは、多大な時間と費用を要す

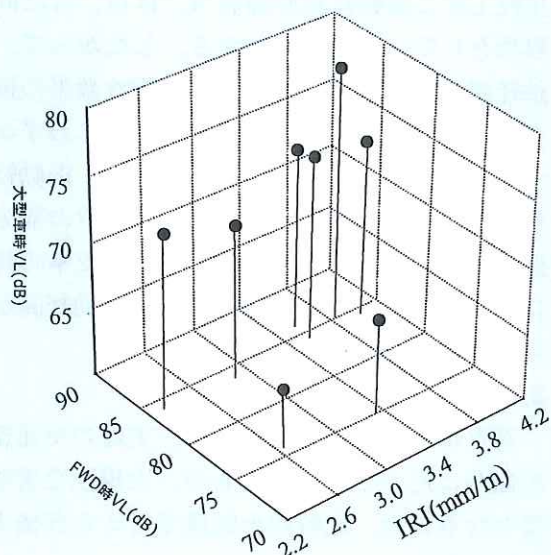


図-12 路面平坦性と振動レベルの相関図

る。そのため、振動軽減効果の予測を各舗装体の物性条件、舗装厚を容易に変更できる FEM 解析により評価した。ここでは、実験から得られた各舗装体の振動軽減効果と各舗装体の材料物性、構造特性を考慮した 3 次元 FEM 解析の結果を比較した。本報では、FWD を加振源にした場合の振動軽減型舗装 B, C に対する解析結果を示す。

3.5.1 解析方法

振動測定に用いた振動軽減型舗装の弾性係数、密度、ポアソン比を物性条件とし、3次元 FEM 解析を行った。入力に用いた FWD 波形において、実験では、最大値のみを測定しており、それに到る時間を計測することができなかった。そのため他の地盤 FWD 測定結果より、実験で得られた最大値に到る時間を予測し入力波形を仮定した。

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、その詳細を図-13 に示す。地盤は実験場付近の柱状図よりモデル化し、図中の B の部分はローム層、C の部分は洪積砂質土層である。計測点付近のメッシュ分割は 1.0m とし、計測点から離れるに従って順次大きくした。せん断弾性波速度 (V_s) の最も遅い関東ローム層 ($V_s = 120\text{m/s}$) に影響を与える波長 (L) は約 20m と予測される。解析に用いたメッシュ分割は、仮に地盤条件が大きく異なり波長の 1/10 を仮定した場合でも対応でき、結果を十分表現できるものと思われる。

図-13 の A の部分にそれぞれの振動軽減型舗装を構成するが、振動軽減型舗装 B に関しては、ソリッド要素により、また振動軽減型舗装 C に関し

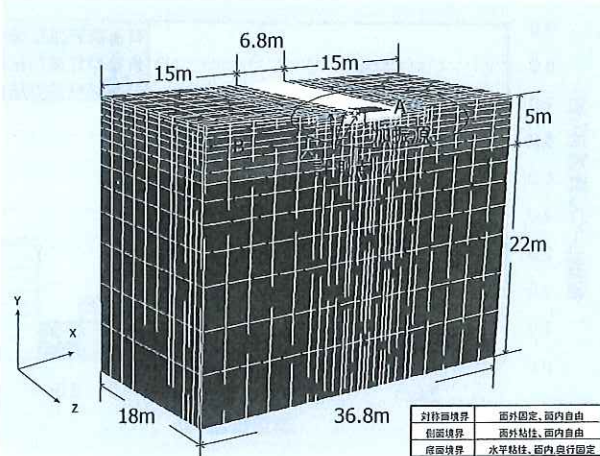


図-13 3次元 FEM 解析モデル

ては、アスファルト舗装及び PC 版をシェル要素とし、支承部をビーム要素から構成した。解析における計測地点は、実験と同様に加振源から 1m, 2m, 2.7m, 5m の地点とした。

3.5.2 解析結果

解析結果から、実験値と解析値では測定点ごとに、10dB 以上差がみられる場合があった。これらに関しては今後検討を要するが、弾性解析のため、計測点 1m の最大振動レベルを基準とした場合の 2m, 2.7m, 5.0m 地点における最大振動レベルから、実験値と解析値の正規化を行いその軽減効果を検討した。

図-14 に振動軽減型舗装 B における解析結果を示す。測定点 1m 地点と 2m 地点での解析における振動低減率は、13%であった。また、各計測点における実験値と解析値の低減率の差は、2m 地点で 7%、2.7m 地点で 3%、5m 地点で 14%であった。

図-15 に振動軽減舗装 C における解析結果を示す。測定点 1m 地点と 2m 地点での解析における振動低減率は、28%であった。各計測点における実験値と解析値の低減率の差は、2m 地点で 6.5%、2.7m 地点で 5.3%、5m 地点で 8.3%であった。

振動軽減型舗装 B における 5m 地点での低減率の差は 10%を超えてるが、他の測定点の低減率は実験との整合性が高く、解析はほぼ実験をシミュレートできているものと考えられる。また、振動軽減型舗装 B, C では、実験と同様に振動軽減舗装体 C の方が計測点 1m から 2m に到る際に振動低減率が高いことが解析からも明らかになった。

さらに、振動軽減舗装体 C のゴム支承の軽減効

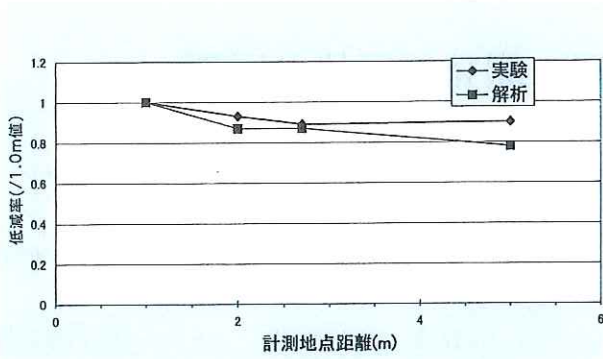


図-14 実験と解析の比較 (舗装 B)

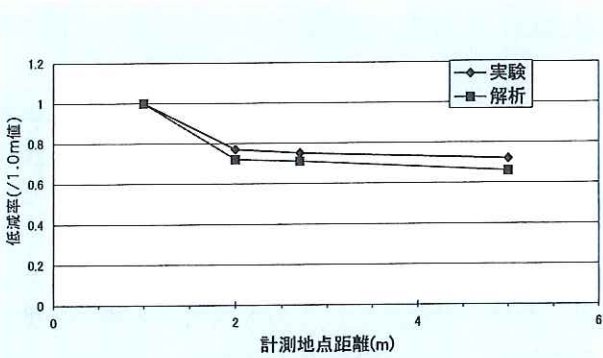


図-15 実験と解析の比較 (舗装 C)

果を確認するため、支承部を十分剛な支承とした場合との比較解析を行った。その結果、十分剛な支承と比較しゴム支承は測定点 2m の地点で 4 割程度の振動低減効果を示し、ゴム支承の効果が明らかとなった。

今回用いた解析モデルでは、実験値と解析値の正規化により、振動低減効果の予測を行ったが、今後は実験値と解析値の最大振動レベルなどの再現性を高める必要がある。そのため、FWD の波形特性や実験で使用される材料物性値を統一的に測定する試験方法などを考える必要がある。

5. あとがき

本報では、表・基層を打換えるという短期間で施工可能な振動軽減型舗装の開発、および振動レベル予測に関する検討を紹介した。紹介の通り、振動軽減効果を持つ舗装の開発に成功したものの、振動軽減効果が振動レベル最大値で 2~7dB 程度であったため、現在では更に高い振動軽減効果を持ち、より耐久性に富んだ舗装の開発を進めている。また材料物性による振動予測においては、解析を行うための事例に乏しいのが現状である。振動予測の実用化のためにも、現在開発している新しい振動軽減型舗装の実験データを用いて、精度向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 梁真二、新田弘之、吉田武：振動軽減型舗装の評価方法に関する検討，第 57 回土木学会年次学術講演会，2002.9
- 2) 梁真二、新田弘之、吉田武：舗装の振動評価に関する一考察，第 24 回日本道路会議，2001.10

梁 真二*



独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループ舗装チーム
Shinji YANA

新田弘之**



同 舗装チーム主任
研究員
Hiroyuki NITTA

吉田 武***



同 舗装チーム上席
研究員
Takeshi YOSHIDA

大石哲也****



同 構造物研究グループ橋梁構造チーム
研究員
Tetsuya OOISHI

新井恵一*****



同 橋梁構造チーム
主任研究員
Keiichi ARAI