

石灰系安定処理による道路振動緩和特性の実験的研究

嘉門雅史¹・溝口孝芳²・井 真宏³

¹正会員 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 教授 (〒611-0011 京都府京都市左京区吉田本町)

²Fe 石灰技術研究所 技術開発室 (〒811-3101 福岡県古賀市天神 4 丁目 13-5)

³正会員 西日本地研株式会社 (〒811-0011 福岡県福岡市中央区高砂 2 丁目 6-18)

生活と密接に関係している振動公害の一つの発生要因でもある道路交通振動の低減を目的とし、本研究では舗装に適用する材料の変化による、振動低減効果を検討したものである。2つの測定区間において、模擬的に振動を発生させる起振機を用いて振動レベルおよび路面変位量を測定した。振動レベルの結果からは、路床・路盤に石灰系安定処理を適用した区間における振動低減が確認された。また、路面変位量測定結果の分析に周波数解析を応用して、振動発生と伝搬における路面変位量の卓越周波数の把握や伝搬速度の検討を行った。その結果、現地盤の変形係数の違いにより、振動特性が現地盤に依存するケースと、舗装体の材料特性が発揮されるケースがあり、それぞれ異なった振動特性を示すことが明らかとなった。

Key Words : traffic vibration, decrement properties, vibration levels, road displacement, spectrum analysis, propagation velocity

1. はじめに

我が国における振動に関する苦情件数をみると、1977年度以降に増加に転じた時期はあるものの、ほぼ減少傾向にあり、1997年度は1590件で、前年度より287件減少した(図-1参照)。発生源別にみると、1997年度は建築・土木工事が846件(振動の53.2%)と半数を占め、次いで交通機関が281件(17.7%)、製造事業所が224件(14.1%)等の順となっている。交通機関の苦情の推移は、1980年度以降、ほぼ一定の件数を示している¹⁾。この傾向から、交通機関に起因する振動公害は、毎年同様の件数が発生しており、対応が確立されていないことが主な原因であると推測できる。近年では、交通機関から発生する振動の伝搬過程において、トレンチや障壁を設けることによって、振動を遮断する研究がなされているとともに、振動発生源である道路の振動特性の改善や低減に関する研究も行われている。しかし、振動公害は、発生している区間の環境要素が大きく影響していることから、全ての区間に共通した、画一的かつ、明確な改善手法が確立されているわけではない。

また、公害振動は、地盤の物理的変化が伝搬する現象で、しかも距離減衰が大きいという性質を有しているため、大気汚染のように気象条件により汚染物質が移動することはなく、ある限られた地域で発生する局所的という特徴を持っている。さらに、問題となる区間の環境が一様ではないこともあり、

様々な舗装の振動に対する統一的評価が行えない状況になっていると考える²⁾。

2. 本研究の目的

地盤の振動特性を変化させ、発生および伝搬する振動を低減させる手法は、既往の研究において多く取り入れられている。竹宮らによると、地盤にハニカム状の地中壁を設けることで、振動の伝搬特性を変化させ、対象となる地域の振動を低減する研究が行われており、その効果が実証されている³⁾。また、安原らによると、道路盛土下に軽量土の土中壁を設けることにより、振動低減に有効であることが、FEMの解析により証明されているとともに、その効果は、設置が深いほど大きいことが確認されている⁴⁾。また、地盤の振動低減の確認実験を行う際、衝撃荷重

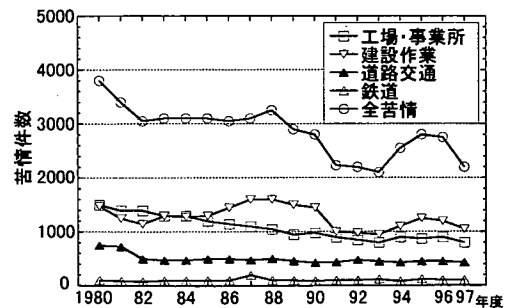


図-1 振動に関する苦情件数¹⁾

を振動源として測定を行っている研究は少なくない。重量は様々であるが、重錘を落下させて振動を発生させ、任意の距離において測定を行う手法や、バックホウを用いて地盤を打撃することで、模擬振動を発生させる手法も見られる³⁾。本研究では、道路の舗装体である路床・路盤の材料に着目し、一般的に適用されている粒状材料に対して、安定処理を適用することで、舗装体の振動特性を変化させ、発生および伝搬する振動を低減することを目的としている。また、振動低減の確認においては、重錘を落下させて模擬振動を発生させる手法を適用し、各々の舗装上において振動レベルおよび路面変位量を測定することにより、比較を行うこととした。

3. 重錘落下方式による起振機の適用

(1) 概要

本研究では、様々な舗装区間の振動特性を比較するため、一般交通を対象とした振動測定ではなく、道路舗装上で模擬交通荷重を発生させる起振機⁶⁾を用いて、その荷重に対する発生振動を測定した。また、その結果を用い、舗装体に発生する振動およびその伝搬の検討を行った。測定区間の選定においては、振動抑制だけでなく、環境負荷軽減対策としても有効と考えられる路床・路盤の強化策を取りあげ、既存粒状材料工法を安定処理工法へと設計の変更が予定されている箇所を条件とした。

測定は、加速度計を用いた路面変位量と振動ピックアップを用いた振動レベルの両方を実施することとした。計測された路面変位量データから、振動に伴う路面の変位状況を確認した。また、スペクトル解析⁸⁾を応用することによって、測定区間の変位スペクトル特性を確認するとともに、起振機による載荷振動の発生地点から各測定点までの変位伝搬速度を把握した。一方、計測された振動レベルについては、発生した振動レベルの確認、および載荷点からの距離の変化に伴う振動レベルの減衰状況について路面変位量測定結果と比較検討を実施した。

(2) 振機の載荷波形

起振機の適用目的は、道路面に与えるエネルギーを同一にし、測定データの相互比較を可能とすることである。したがって、自動車の通過を模擬した載荷荷重および波形である必要があるとともに、舗装の変形係数が異なる場合においても、その波形に過大な変化があってはならない。

実際に道路を往来している自動車は、ゴム製の空気タイヤをはじめ、サスペンションやダンパー等が設置されているため、自動車の自重や積載重量を和

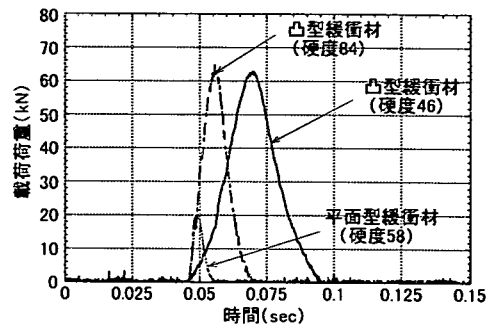


図-2 起振機による衝撃載荷波形

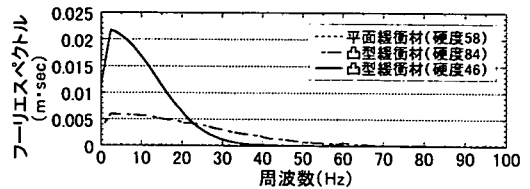


図-3 各々の載荷波形を用いた周波数解析結果

らげて路面に伝達する仕組みとなっている。また、道路路面上の一点に着目すると、通過する車両によって荷重を与えられているため、車両の速度や重量によっても、載荷時間は大幅に変化する。

起振機の載荷荷重の発生には、重錘を落下させる機構を採用し、重錘重量は250kgfで、落下点にはゴム製緩衝材を設置している。この緩衝材の形状および硬度を変化させることにより、載荷時間をコントロールすることができる。性状の異なる緩衝材を用いて、試験場の鉄筋コンクリート基礎地盤上で載荷した場合の、載荷時間の変化を図-2、載荷波形の周波数解析結果を図-3に示す。図-2および3から、緩衝材の形状を平面型から凸型にすること、また緩衝材の硬度を84から46にすることで、載荷時間が長くなり、周波数帯域が0~20Hzに定収端数側に変化していることがわかる。すなわち、緩衝材の形状を凸型とし、軟質化させることにより、載荷時間を延長させ、荷重周波数帯域を低くすることが可能になる。

(3) 現場における載荷実験

ここで、最も載荷時間が長く、発生する周波数帯が低かった凸型緩衝材(硬度46)を用いて、実際の舗装面上で載荷振動を発生させ、路面変位量を測定した。また、実際に走行している車輛を対象として路面変位量を同様に測定し、各々の測定波形を周波数解析し比較を行った。

起振機を用いて振動を発生させる地点は、車両が走行することを想定すると、車輪が通過する位置が良い。供用状態にある道路舗装は、車輪通過位置は平坦である場合が多いが、わだちの中央部は、アス

ファルトの流動等が影響して、凹凸をとまう場合が少なくない。また、振動が道路周辺環境に及ぼす影響を考慮すると、外側車輪位置において振動を発生させることが有効であると考えられる。

起振機は、重錘落下機構であるため、衝撃荷重の大小によって、道路舗装へ与える振動をコントロールすることができる。アスファルト舗装要綱では、設計交通量を決定する場合、走行車両の輪荷重を49kNとし、設計期間における累積49kN換算輪数を求めている⁹⁾。よって、起振機の衝撃荷重の設定においても設計輪荷重49kNを基本とした。

測定地点は、載荷点より1.0mおよび2.5m地点で測定を行い、一般車両を振動源とした測定では、通過車輛の車輪走行位置から1.0m離れた地点において測定を行うこととした。測定区間は、振動公害の多くが、地盤が軟弱な地域において発生している⁷⁾ことを考慮して選定した。図-4に、舗装を含めた、深度2.0mまでの柱状図を示す。測定区間は、有明干拓地内であるため地下水位が高く、現地盤の土質は、有明潟土（沖積粘土）と推測される。室内CBR試験を行った結果、CBR値は0.5%であり、N値に換算するとN≒0.9であり¹⁰⁾、非常に軟弱である。

路面変位量の測定は、加速度計を用いることによって、鉛直方向の変位測定を行った。加速度計は、共和電業製ASQ型加速度測定器を用いた。これは、舗装面上の微少な振動を、精度良く高感度測定することが必要になることから、従来のひずみゲージ式加速度変換器ではなく、サーボ機構を有することが重要になると判断したためである。測定現場においては、得られた加速度波形を変位波形に変換し、測定データの状況を確認する必要がある。したがって、測定された加速度アナログデータを、共和電業製VAQ-700Aコンディショナを用いて±1.0Vの振幅に増幅し、YOKOGAWA製DL-716デジタルスコープによって、サンプリング解像度を0.0005secとしてA/D変換し、モニターにより波形確認をすることとした。変換においては、積分回路を利用している。加速度信号 $A_0(t)$ が正弦波であると仮定すると、加速度、速度、変位の関係は式(1)に示すとおりである。

$$A_0(t) = a \cdot \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

ここに、 a :加速度、 t :時間、 f :周波数である。その信号を重力加速度 G を単位として表すと、式(2)のようになる。

$$AG(t) = k \cdot A_0(t) = k \cdot a \cdot \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

ここに、 k :変換係数である。標準の重力加速度は $1G=980.665\text{cm/s}^2$ であるため、 $k=0.00102$ となる。また、速度 $V_0(t)$ および変位 $D_0(t)$ は、それぞれ以下に示すとおりとなる。

$$V_0(t) = \int A_0(t) dt = -\frac{a}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f t) \quad (3)$$

$$D_0(t) = 10 \int V(t) dt = -\frac{10a}{(2\pi f)^2} \cdot \sin(2\pi f t) \quad (4)$$

出力されたデータは、それらのデータを、アスキー変換し、フロッピーディスクへ保存する作業を行った。また、変位測定結果を用いて周波数解析を行った。解析では、測定されたデータの2048点を用いて、測定間隔を0.005secとし解析を行った。

図-5は、振動源を起振機とした場合の路面変位量測定結果を示したものである。測定では、載荷荷重を49kNとした。載荷点に近い1.0m地点では、最大0.14mmの沈下方向への変位が発生し、リバウンドに伴う上方方向の変位が0.08mm発生していることが確認できた。また、2.5m地点の結果と比較すると、載荷点からの距離が延長することによって、発生する路面変位量は減少していることが確認できる。これらの変位波形を、周波数解析した結果を図-6に示す。結果より、1.0mおよび2.5m地点の双方におけるピーク周波数は、2.93Hzであることがわかる。また、発

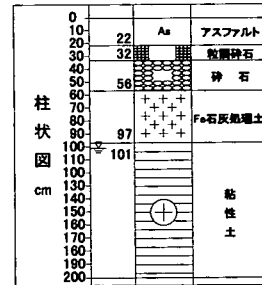


図-4 試験載荷の舗装断面図

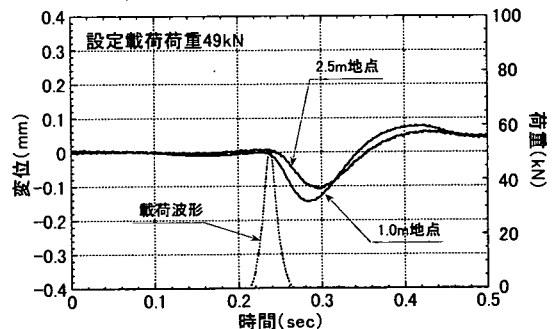


図-5 起振機載荷による路面変位量測定結果

生している周波数の帯域も、8Hz 付近までとなっており、載荷点からの距離が変化しても、ほぼ同様の結果となっている。

図-7は、一般交通を振動源とした場合の路面変位量結果である。結果を見ると、約 $\pm 0.05\text{mm}$ の変位をとまなう暗振動と、大型車両の通過にとまなって最大 0.22mm の路面変位が発生している。また図-8は、この変位波形を用いた、周波数解析結果を示したものである。これによると、 0.5Hz に鋭いピークがあり、 $1.5\sim 3.5\text{Hz}$ の周波数帯域にピークが連続している。したがって、当該測定区間では、一般交通荷重によって発生した振動は、これらの周波数を主に伝搬していることになる。また、起振機を用いた測定結果からも、ピーク周波数が 2.93Hz であったことも含めて考察すると、当該測定区間の固有周波数が、 $1.5\sim 3.5\text{Hz}$ の周波数帯域に存在していると推測できる。一般的に、道路交通振動は、 10.0Hz 付近にピークを有する 100Hz 以下の振動であると言われていたが³⁾、当該測定区間の現地盤が、 $\text{CBR}=0.5\%$ の非常に軟弱な区間であるため、固有周波数が低いものと考えられる⁷⁾。

以上の結果より、起振機の単一振動においても、車輛が連続的に通過して発生させる振動の場合においても、発生と伝搬において、測定区間の舗装および地盤条件を反映した結果が得られた。よって、凸型緩衝材（硬度46）を用いた場合の起振機の載荷振動は、 20.0Hz 以下の周波数帯域の振動であるため、自動車の通過を模擬した載荷荷重および振動特性を有していると考えられる。

4. 現場測定

(1) 検討対象調査区間と測定

振動減衰特性を測定する上で、同一の地盤条件において異なる舗装断面の測定を行うことは、結果を比較する際の影響要素を減少させることにつながるため、非常に有用な方法であると考えられる。したがって、施工工事が予定されている路線を選定し、施工にとまなって路床および路盤材料が変更される区間に対して測定を行った。よって、施工前の舗装断面で供用されている時点で起振機を用いた振動および路面変位量測定を行うとともに、施工によって石灰系安定処理土が適用された舗装断面に対しても同様の測定を行うこととした。

振動レベルを測定する目的は、振動規制法において、振動レベル（デシベル：dB）によって基準が設けられていることと、振動レベルを基準として、振動減衰機能を確認する手法を簡便に活用することにある。一方、路面変位量測定の目的は、振動レベ

ル計で求められる振動加速度の絶対値ではなく、加速度計から路面変位量を測定することで、振動の発生と深く関係を持つ路面変位量が、どのような特性を有しているかを確認することにある。また、路面変位量の測定結果を用いて周波数解析を行うことにより、舗装材料の変化や減衰に伴う周波数特性の変化を確認するという目的もある。周波数解析の条件は、3.2項と同様としている。

測定においては、振動源となる起振機から、 1.0 、 2.5 、 5.0 、 10.0 、 20.0m 地点において、振動レベルおよび路面変位量を測定する。概要を図-9に示す。

(2) 国道444号における起振機振動測定結果

佐賀県小城郡芦刈町三王崎地区の国道444号の測定区間（交通量区分：D交通）は、路床が粘性土（有明潟土）で形成されているため、路床 CBR 値も 0.4% （ $N=0.9$ ）と非常に軟弱な区間である。周囲は、水田で囲まれており地下水位も高い。施工前の既設舗装断面においては、路床改良としてFe石灰安定処理が適用されており、路盤には粒状材料（碎石）が適用されている。また、施工後の断面では、路床のFe

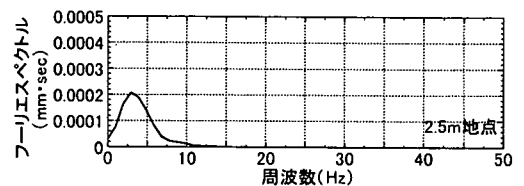
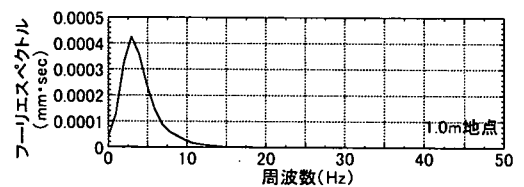


図-6 載荷点より1.0mおよび2.5m地点における周波数解析結果

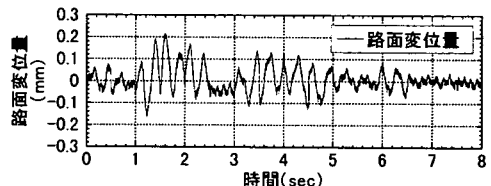


図-7 一般交通を対象とした路面変位量測定結果

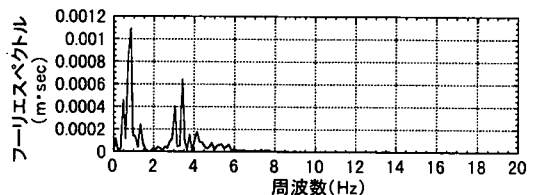


図-8 一般交通変位を用いたスペクトル解析結果

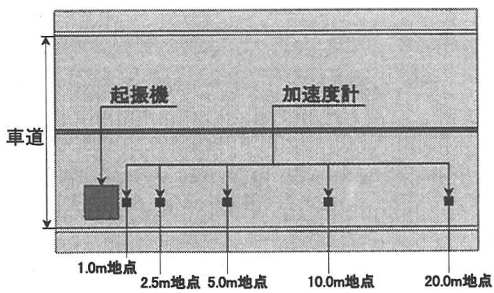


図-9 現場測定の概要図

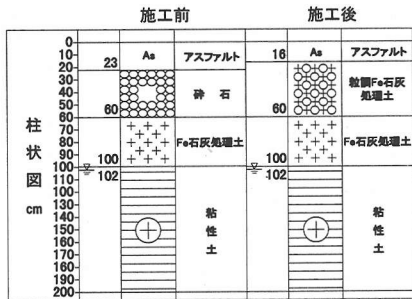


図-10 国道444号の舗装断面図

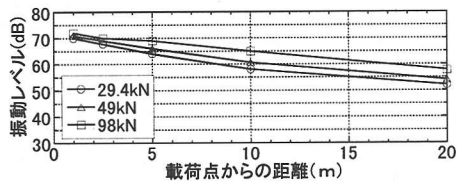


図-11 IVGを用いた振動レベル測定結果 (補修前)

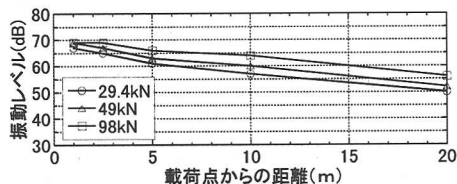


図-12 IVGを用いた振動レベル測定結果 (補修後)

石灰安定処理層¹¹⁾をそのまま利用し、路盤は粒調 Fe 石灰安定処理を適用する設計となっている。図-10 に、施工前および施工後の舗装断面を示す。

a) 振動レベル測定結果

施工前の振動レベル測定結果を図-11 に示す。結果を見ると、振動を発生させる際の衝撃荷重の増加に伴って、発生する振動レベルも増加していることが確認できる。載荷点に最も近い 1.0m 地点における振動レベルは、衝撃荷重 29.4kN において 70.0dB であり、49.0kN において 71.0dB、98.0kN においては 72.0dB という結果になった。その後、測定地点が載荷点より遠くなるとともに、各々の振動レベルとも減衰しているのが確認でき、載荷点より 20.0m 地点

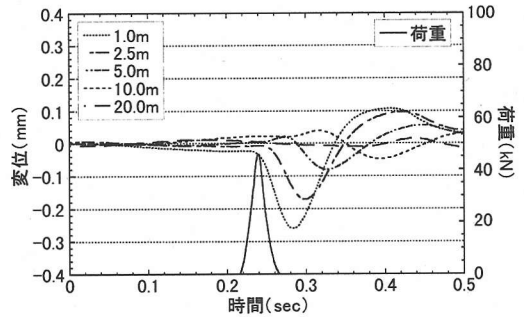


図-13 IVGを用いた路面変位量測定結果 (補修前)

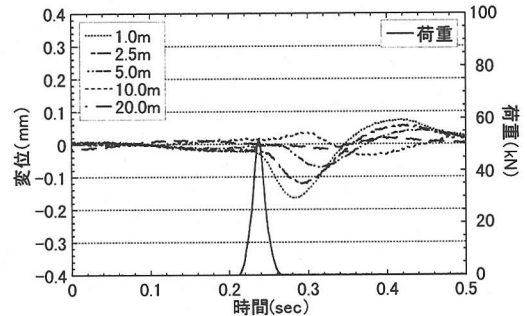


図-14 IVGを用いた路面変位量測定結果 (補修後)

になると、衝撃荷重 49kN に対して約 55.0dB まで減衰している。その減衰過程においては、衝撃荷重の大小と振動レベルの関係は保たれたままであり、各々の衝撃荷重に対する振動レベル差が、増減しないまま減少している。また、距離に対する振動減衰は載荷点に近いほど大きな減衰が見られ、距離が遠くなるにつれて減衰量が少なくなっている。

図-13 は、施工後において、同様の測定を行った結果を示したものである。結果より、1.0m 地点における各々の衝撃荷重での振動レベルは、67.0～69.0dB を示しており、施工前と比較して各々の衝撃荷重においても約 3.0dB 減少していることが確認できる。載荷点より 20.0m 離れた地点における振動レベルは、衝撃荷重 49kN に対して約 50.0dB を示しており施工前と比較して約 5.0dB の減少が確認できる。距離減衰過程においては、施工前の結果と同様、各々の衝撃荷重に対する振動レベルに差が見られるとともに、それらの差が増減しないまま減衰する傾向となっている。また、距離に対する振動減衰は施工前と同様の現象を示している。

b) 路面変位量測定結果

図-14 は、施工前において、衝撃荷重 49.0kN において起振機を用いた路面変位量の測定結果を示したものである。発生させた衝撃荷重に対して、1.0m～20.0m 地点において路面に変位が発生している。載荷点に最も近い 1.0m 地点の波形を見ると、衝撃荷重がピークになると同時に沈下方向の変位が発生し、

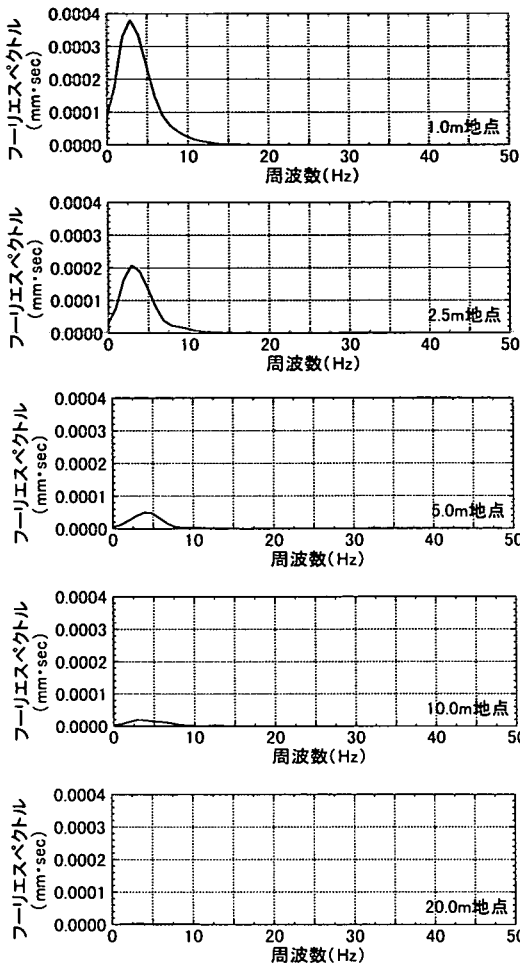


図-15 補修前における変位周波数解析結果

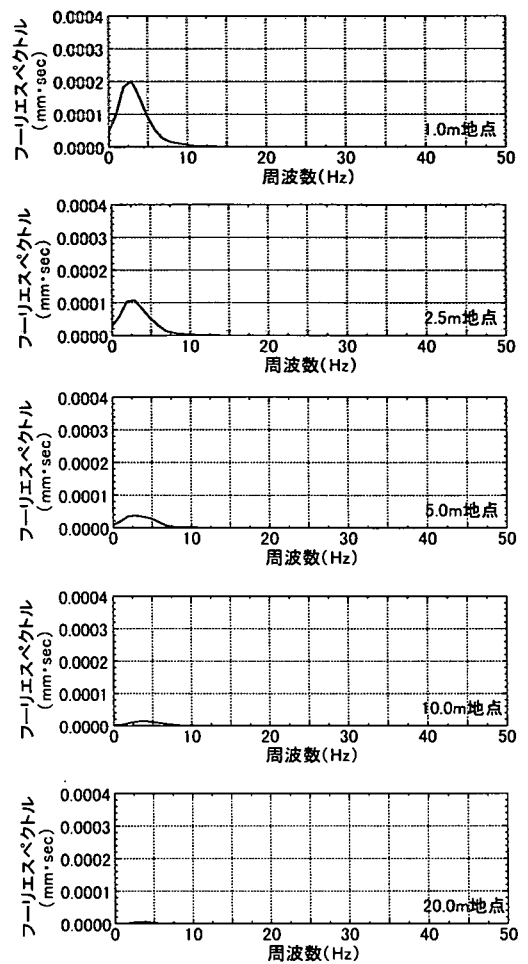


図-16 補修後における変位周波数解析結果

その後リバウンドに伴う、上方向の変位が発生する現象が見られる。また、それらの変位は、載荷点からの距離が増加するとともに減少し、10.0m 地点の波形から、初期変位が上方向へ変化していることが確認できる。結果より1.0m 地点の最大変位量は、約0.25mm 発生している。また、2.5m 地点での最大変位量は約0.17mm であり、5.0m 地点における最大変位量が約0.08mm となっている。

図-14 は、施工後において、路面変位波形を測定したものである。結果より、最大変位は、1.0m 地点では約0.15mm、載荷点からの距離が2.5m 地点では約0.12mm、5.0m 地点では約0.06mm の変位量が発生している。施工前の変位量と比較すると、1.0m 地点では、沈下方向で約0.1mm、リバウンド方向で0.02mm の減少が確認でき、安定処理を適用することによって、路面変位量が減少していることから、舗装の変形係数が增大していると判断できる。

c) 路面変位量を用いた周波数解析結果

路面変位量測定で得られた結果を用いてスペクトル解析を行った。解析にはFFTを適用し、衝撃荷重に対する、載荷点から各距離の路面変位波形を対象として解析を行った。図-15 は、施工前において、衝撃荷重が49.0kN の場合の路面変位波形を用いた結果である。これによると、載荷点に近い測定点のフーリエスペクトルが最も高く発生している。これは、発生する路面変位量が最も大きいためであり、載荷点からの距離が増加するとともに、発生するフーリエスペクトルも減少する傾向である。また、発生している周波数特性を見ると、1.0m 地点ではピーク周波数が2.93Hz であり、距離の変化にともなうピーク周波数の変化では、5.0m 地点で3.90Hz にピークが変化しているものの、その他の測定地点では、変化が見られない傾向となっている。図-16 は、施工後の波形を用いて、周波数解析を行ったものである。こ

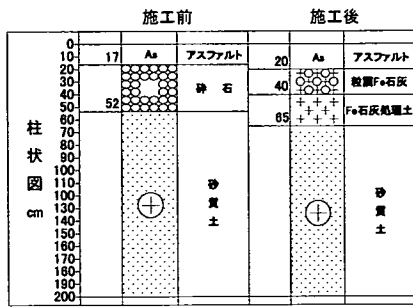


図-17 県道筑紫野古賀線の舗装断面図

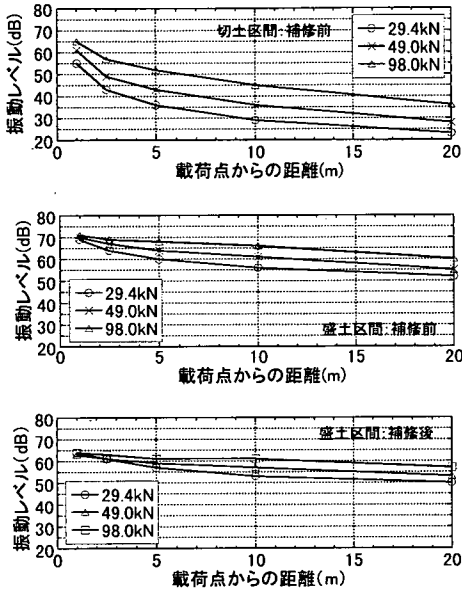


図-18 各々の区間におけるIVG振動レベル測定結果

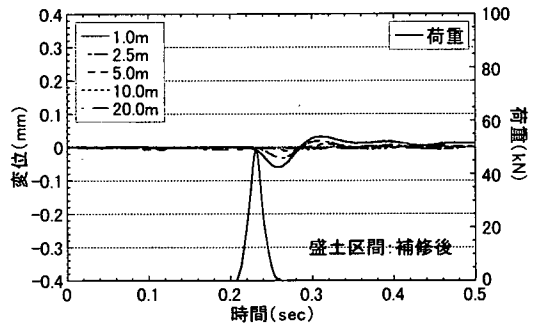
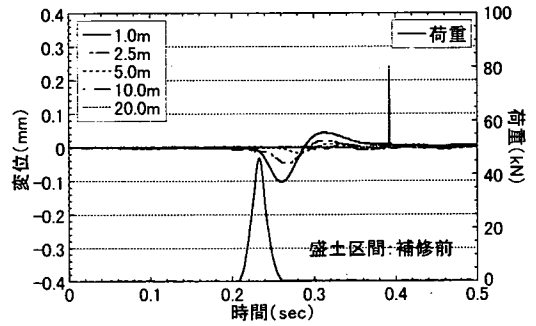
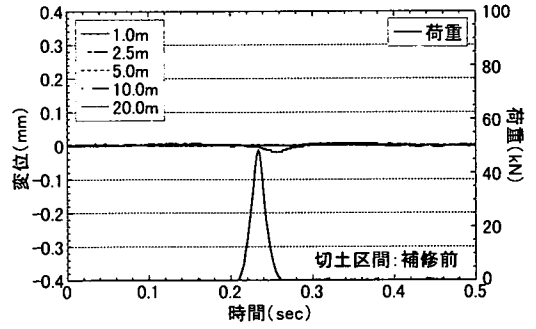


図-19 各々の区間におけるIVG路面変位量測定結果

れによると、施工前と比較して、発生する路面変位量が減少しているため、フーリエスペクトルも減少している。また、施工前と施工後を比較した場合、ピーク周波数は、ほぼ 2.93Hz~3.90Hz を示しており、舗装材料の違いに伴う周波数特性の大幅な変化は見られなかった。したがって、軟弱地盤上の道路では、発生する振動特性が舗装に適用する材料ではなく、現地盤に依存していることが推測できる。

(3) 県道筑紫野古賀線における起振機振動測定結果

福岡県糟屋郡須恵町地内の県道筑紫野古賀線（筑紫野古賀線）の測定区間は、路床が盛土で形成されている区間と、路床が切土で形成されている区間とに分かれている。路床が盛土で形成されている区間は、路床 CBR 値が 4.5% (N=8.1) であり、切土で形成されている区間は、路床 CBR 値が 17.5% (N=31.5) である。既存の舗装断面を図-17 に示す。当該測定区間では、路床条件の異なる切土・盛土区間におい

て測定を行い、路床の変形係数が低く、良好な振動減衰特性が得られないと予想される盛土区間は、施工後も測定を行うこととした。

a) 振動レベル測定結果

図-18 は、切土区間の施工前と盛土区間の施工前・施工後の 3 点において起振機を用いて振動レベルを測定したものである。結果より、施工前の切土区間と盛土区間の比較を行うと、路床条件が良好な切土区間の方が、载荷点付近で発生する振動レベルが低く、距離減衰においても良好な結果を示している。これに対し、盛土区間は、载荷点からの距離減衰においても、振動レベルの推移が水平に近い傾向を示しており、良好な減衰を示しているとは言えない。

また、盛土区間における、施工前と施工後の振動レベル測定結果を見ると、载荷点付近において発生していた振動レベルが大幅に減少しているとともに、

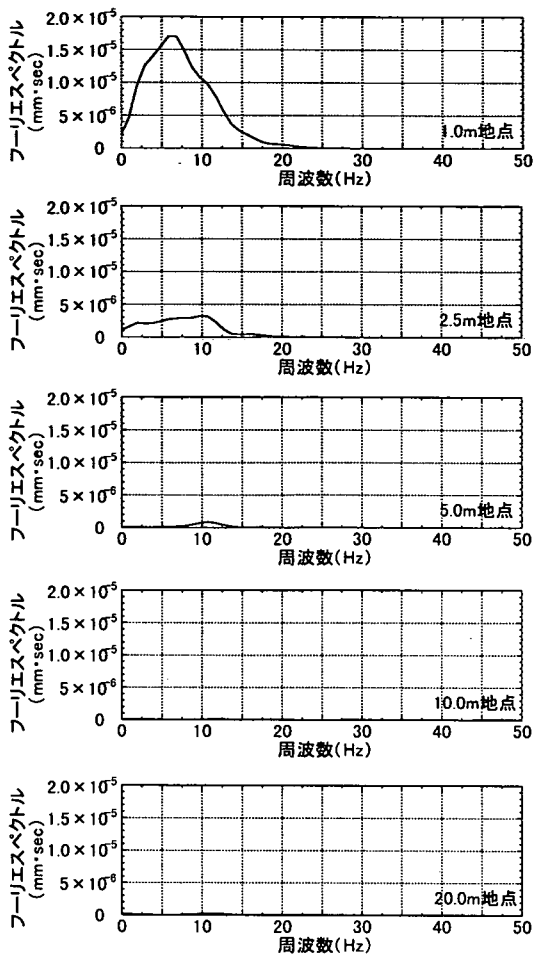


図-20 盛土区間の補修前の路面変位量を用いた周波数解析結果

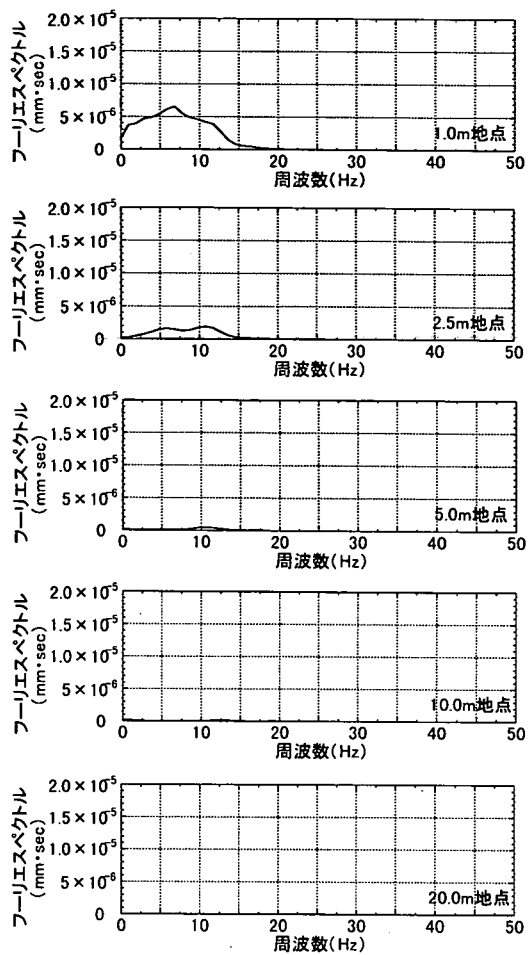


図-21 盛土区間の補修後の路面変位量を用いた周波数解析結果

距離ともなう減衰傾向も施工前と比較すると、全体的に下回っていることが確認できた。施工前における衝撃荷重 49.0kN の結果で、載荷点に最も近い 1.0m 地点での振動レベルが、ほぼ 70.0dB であり、距離とともに減衰し 20.0m 地点においては、55.0dB の値に推移しているのに対し、施工後の結果によると、1.0m 地点での振動レベルが 64.0dB であり、20.0m 地点においては、53.0dB という結果が得られた。

b) 路面変位量測定結果

図-19 は、同じ測定区間において、路面変位量を測定した結果である。波形グラフより、施工前の切土区間と盛土区間で、明らかに異なる変位波形を示していることが確認できる。切土区間においては、載荷点に最も近い 1.0m 地点での路面変位量の最大値が 0.03mm 程度であるのに対し、盛土区間においては 0.1mm であることがわかる。これは、測定を行った 2 つの地点の舗装断面には大きな差がないことを考慮すると、路床の変形係数の違いに起因していると推

測できる。また、盛土区間の施工前と施工後を比較すると、施工前における 1.0m 地点での路面変位量が 0.1mm であったのに対し、施工後では 0.06mm 程度まで減少しているのが確認できた。これは、変形係数が不足している区間に対して石灰系安定処理を施すことによる路面変位量の減少であると推定され、振動低減の一要因となっていることが考えられる。

c) 路面変位量を用いた周波数解析結果

図-20 は、施工前での盛土区間の路面変位量測定結果を用いて周波数解析を行った結果を示したものである。これによると、スペクトル値の発現が非常に小さいものであることがわかるが、これは、路面変位量測定結果をもとに周波数解析を行っているため、発生する路面変位量が非常に微小であることに起因していると考えられる。周波数解析結果を見ると、1.0m 地点のピーク周波数は 6.83Hz であるが、2.5m 地点では 9.76Hz、5.0m 地点では 10.74Hz と、ピーク周波数が 10Hz 付近へと変化している。

図-21は、盛土区間の施工後において測定を行った路面変位量をもとに周波数解析を行った結果を示したものである。結果から、1.0m地点でのピーク周波数は6.83Hzであり、2.5mおよび5.0m地点では10.74Hzとなる傾向が見られ、施工前と同様に、載荷点に最も近い1.0m地点では、若干低い周波数帯域にピークが発生し、距離減衰の過程においては、ピークが10Hz付近に変化している。施工前・後の1.0m地点の周波数が、やや低い結果を示した要因としては、地盤が軟弱で固有振動数が低いと推測される区間では、1.0m地点のピーク周波数とその他の地点のピーク周波数に変化がなかったため、明かとならなかったが、測定地点が載荷点に近い場所に位置しているため、起振機の載荷に対する、舗装体の変形と関係していると考えられる。したがって、載荷点からの距離が増大し、載荷による直接の変位を受けていないと考えられる2.5mおよび5.0m地点では、その地盤が最も伝搬をしやすい卓越周波数が顕著に現れていると推測できる。よって、盛土区間の測定結果より、伝搬される振動の周波数特性は、施工によって1Hz程度増加し、卓越周波数は10Hz付近であることが明らかとなった。

5. 振動の発生源と伝搬過程における考察

(1) 振動低減の傾向と影響因子

一般に振動レベルは、加速度によって算出される(式(1)、(2)参照)。

$$L_v = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (5)$$

ここに、 a : 加速度(絶対値)、 a_0 : 補正值(10^{-5})である。

また、加速度を算出する式を以下に示す。

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 y_0 \sin \omega t \quad (6)$$

ここに、 ω : 角振動数($\omega = 2\pi f$, f : 振動数)、 y_0 : 振幅である。

式(5)および(6)より、振動レベル L_v は、角振動数(振動数)と振動振幅(路面変位量)に依存することがわかる。すなわち、道路舗装上における振動は、載荷によって発生する路面変位量が増加すると振動レベルは増加し、路面変位量が減少すると振動レベルも減少する。また、周波数特性は、二区間の測定結果からも分かるように、その区間の地盤特性と振

表-1 国道444号における起振機測定結果

		施工前	施工後
路面変位量		0.25mm	0.15mm
ピーク周波数	1.0m地点	2.92Hz	2.92Hz
ピーク周波数	2.5m地点	2.92Hz	2.92Hz
発生振動レベル		71.0dB	69.0dB

※ 載荷点から1.0m地点における測定結果

表-2 県道筑紫野古賀線(筑紫野古賀線号)における起振機測定結果

		施工前	施工後
路面変位量		0.1mm [※]	0.05mm [※]
ピーク周波数	1.0m	6.83Hz	6.83Hz
ピーク周波数	2.5m	9.76Hz	10.74Hz
発生振動レベル		70.0dB [※]	63.0dB [※]

※ 載荷点から1.0m地点における測定結果

動源の両方に関係している値であるため、単純な傾向性を見いだすのが困難である。結果として、今回の測定区間では(表-1, 2参照)、現地盤が軟弱で卓越周波数が低いと考えられる地点では、発生および伝搬において、周波数の変化は、ほとんど見られることがなかった。しかし、地盤の卓越周波数が、発生源の振動周波数より高いと考えられる地点においては、現地盤の周波数特性に関係なく、振動源付近では、載荷の振動周波数を反映するとともに、伝搬の領域では、地盤の卓越周波数が顕著に現れる結果となった。

国道444号の結果では、施工前と施工後の周波数特性に大きな変化は見られなかったのに対し、県道筑紫野古賀線では、施工後の卓越周波数が、高い値になっている。路面上に荷重を与えると、その荷重は分散され、現地盤に達する。軟弱地盤上の舗装では、舗装体と現地盤の強度差が大きくなり、その軟弱地盤の変形係数に依存した振動特性となっていると推測できる。その結果、舗装体に用いている材料の差違は、振動特性に与える影響が低く、現地盤への依存性が高くなることを表していると考えられる。それに対し、県道筑紫野古賀線の結果では、施工前後で卓越周波数が変化した。現地盤がある程度変形係数を有している場合には、舗装体に適用している材料が反映される結果となっていると考える。したがって、測定区間での、施工に伴う振動低減は、路床および路盤の変形係数の増加に起因した、路面変位量の低下と深く関係していることが推測できる。

(2) 石灰系安定処理の適用と距離減衰の関係

振動の伝搬過程における振動減衰は、距離減衰が最も大きな影響要素である。距離減衰の算定は、

式(7)に基づいて行った³⁾。

$$L_0 - L_r = 10 \log \frac{r}{r_0} + 8.7 \lambda (r - r_0) \quad (7)$$

ここに、 L_r ： $r(m)$ 地点の振動レベル、 L_0 ：载荷点付近における振動レベル、 λ ：内部減衰定数である。この式からわかるように、右辺の第1項は距離が延長することによる幾何減衰を、右辺第2項は地盤による内部減衰を示している。したがって、右辺第1項の幾何減衰は、载荷点からの距離によって決定されるものであるため、測定区間によって違いが現れることはない。しかし、右辺第2項の内部減衰は、内部減衰定数である λ によって決定されるため、内部減衰定数 λ が増大すると、振動レベルの減衰も大きくなり、内部減衰定数 λ が減少すると、振動レベルの減衰が小さくなることがわかる。内部減衰定数 λ は、式(8)によって表される。

$$\lambda = \frac{2\pi f}{V} h \quad (8)$$

ここに、 V ：伝搬速度、 f ：振動の周波数、 h ：地盤の性状により決定する係数である³⁾。

これによると、施工前・後の測定区間の地盤条件は同じであるため、 h に変動はないため、内部減衰定数 λ に直接関係するのは、 f の周波数と V の伝搬速度である³⁾。伝搬速度 V は、地盤の硬さによって変化する値である。

測定された二区間の結果を用いて、式(3)により、内部減衰定数を試算してみることとした。1.0m地点で測定した値には、载荷の影響を受けていることが考えられるため、2.5m地点の振動レベルと20.0m地点の振動レベルで、17.5m間の減衰に対して行った(表-3参照)。

内部減衰定数は、式(4)で表されるように、振動の周波数と伝搬速度が関係している。したがって、軟弱地盤上で測定された路面変位の周波数解析結果からは、ピーク周波数および伝搬速度に変化がなかったため、変位の発生が現地盤に高く依存していると考えられるが、現地盤がある程度の変形係数を有している場合には、路面変位量に対する舗装材料の変形係数の影響が高くなってくると考えられ、周波数特性や伝搬速度が変化するとともに、内部減衰定数が変化していることとなる。デシベル計の測定結果より算出した内部減衰定数と前項で算出したピーク周波数により、式(4)を用いて伝搬速度を試算した結果を表-3に示している。なお、地盤性状定数を0.1とした³⁾。それぞれの測定区間の内部減衰定数およ

表-3 内部減衰定数の試算結果

国道444号	施工前	施工後
内部減衰定数	0.0426	0.0426
伝搬速度(m/s)	43.1	43.1
現地盤のCBR(%)	0.4 (N≒0.9)	
県道筑紫野古賀線	施工前	施工後
内部減衰定数	0.0134	0.0092
伝搬速度(m/s)	457.6	733.5
現地盤のCBR(%)	4.5 (N≒8.1)	

び伝搬速度を比較すると、異なった値を示している。これは、路面変位量を用いた周波数解析結果からもわかるように、振動の伝搬領域では、地盤の特性を反映していると考えられるため、現地盤の変形係数が国道444号よりも高い県道筑紫野古賀線では、振動伝搬速度が速く、内部減衰定数が低い値を示しているのがわかる。

各測定区間の施工前と施工後では、異なった傾向となっている。現地盤が軟弱な国道444号では、舗装材料の差違によって、内部減衰定数が変化することはなかった。しかし、県道筑紫野古賀線の結果で、同区間では、路床・路盤に安定処理を適用し、施工によって内部減衰定数が減少している。これは、舗装に適用した材料の強度を増大させたことが、路面変位量の減少とともに、伝搬速度の増大および内部減衰定数の低下につながっていると考えられる。しかし、国道444号では、内部減衰定数に変化がないことから、安定処理の効果が発揮されていないように見えるが、路面変位量の測定では、減少が確認できていたため、舗装体の強度増加につながっていないとは判断できない。また、国道444号の現地盤が軟弱であり、周波数解析の結果が何れの地点においても同じ値であったことを考慮すると、振動レベルが、現地盤の性状への依存性が高いことで、内部減衰定数に、変化が見られなかったものと考えられる。変形係数が低い軟弱地盤上の舗装では、振動が現地盤に依存した傾向を示し、変形係数を有する地盤では、舗装体に適用する材料特性を反映させる特性を示すことがわかった。

6. まとめ

本研究では、交通荷重を模擬した起振機を用いて、振動低減効果の検討を行った。供用されている2区間の舗装の施工前および施工後に測定を行い、舗装材料の差違による振動特性の変化を捉えることができた。測定により確認されたことを以下に示す。

1. 起振機による振動レベル測定結果から、施工によって石灰系の安定処理土を適用することによって、発生する振動および伝搬される振動の両

- 方が減少していることが確認できた。また、加速度計を用いた路面変位量測定結果も同様の傾向が見られ、施工後の路面変位量が減少している傾向が見られた。
2. 軟弱地盤上の区間では、舗装材料が変化しても、路面変位量は減少するが、周波数特性、内部減衰定数、振動伝搬速度には変化が見られなかった。これは、舗装体と現地盤の変形係数に差があるためであると考えられる。したがって、舗装材料の変形係数の差に起因する振動は、低減することができるが、現地盤の変形係数不足や特性変化に起因する振動は、舗装材料の違いにより低減することは確認されなかった。
 3. 現地盤が高い変形係数を有する区間では、舗装材料の特性が明らかとなる結果となった。これは、現路床と舗装体の変形係数差が減少するため、であると考えられる。したがって、高い変形係数を有する材料を、路床・路盤に適用することによって、路面変位量の減少および振動の低減に有効である結果となったが、内部減衰定数の低下を引き起こすため、距離減衰に関しては効果が十分ではないことが明らかとなった。

現時点で得られた上記の振動発生および減衰特性は、2つの測定区間における、路床・路盤材料（粒状材料と石灰系安定処理土）の比較によるものである。各々の区間において、発生する振動や路面変位量の違いを明確にするため、材料特性や層厚なども考慮して、理論的な考察するとともに、その他の様々な材料・地盤についてもデータを蓄積し、検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 環境庁：環境白書，大蔵省印刷局，pp. 62-69，1999.

- 2) 公害防止の技術と法規編集委員会：新訂・公害防止の技術と法規〔振動編〕，社団法人産業公害防止協会，pp. 45-49，1991.
- 3) 竹宮宏和，合田和哉，佐藤直毅：波動遮断ブロック（WIB）の受動的制振効果，土木学会第 51 回年次学術講演概要集，第 I 部門，pp. 221-230，1996.
- 4) 佐藤 将，安原一哉，村上 哲，小峯秀雄：軽量土による交通振動制御に関する数値解析，第 37 回地盤工学研究会発表会平成 14 年度発表講演集，CD-ROM，No.967，2002.
- 5) 福田 健，松岡 元，辰井俊美，山本春行，劉 斯宏，島尾 陸，長谷部智久：G 市における工事用道路の振動低減実験，第 37 回地盤工学研究会発表会平成 14 年度発表講演集，CD-ROM，No.968，2002.
- 6) Kamon, M., Mizoguchi, T. and I, M.: Traffic vibration decrement properties using lime stabilization, *Material science research international*, the society of materials science, Japan, pp. 25-28, 2001.
- 7) 環境庁大気保全局特種公害課編集：道路交通振動防止技術マニュアル，ぎょうせい，pp. 95-106，1980.
- 8) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp. 25-73，1997.
- 9) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，丸善株式会社，pp.16-17，1994.
- 10) 土質調査法改訂編集委員会：地盤調査法，社団法人地盤工学会，pp. 193-206，1998.
- 11) Kamon, M., Mizoguchi, T. and I, M.: Reuse of aluminum sludge and sewage incinerated fly ash as stabilizers for a base course or subgrade, *Proceedings of the 4th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development*, pp. 468-477，1998.

(2002. 4. 3 受付)

EXPERIMENTAL STUDY OF TRAFFIC VIBRATION DECREMENT PROPERTIES USING LIME SERIES STABILIZATION

Masashi KAMON, Takayoshi MIZOGUCHI and Masahiro I

In this study, traffic vibration decrement properties are confirmed by comparing to some different road pavements using the impact vibration generator. The pavements that were compared can roughly be classified into two groups. One of them, the granular materials was applied to subbase, and the other of them, the lime series stabilization was applied to subbase. The comparing tests were carried out with that the vibration level and road surface displacement were measured on these roads surface. In the results, following factors were confirmed. The vibration decrement with the distances was performed with the pavement that was constructed by granular materials to the subbase. And, the generated vibrations were decreased with the pavement that was constructed with lime series stabilization.