

道路交通振動の加振力特性

-3次元解析による等価加振力の解析-

田口典生・花里利一・高木政美・池田能夫*¹

Keywords : Ground Vibrations, Traffic-induced Vibrations, Road, Exciting Force, 3-Dimensional Thin Layer Method

地盤環境振動,交通振動,道路,加振力,3次元薄層法

1. はじめに

従来の2次元解析法では、車両・鉄道等の交通振動を扱う際に、走行方向の奥行きがないために3次元的な振動伝播現象をシミュレーションすることはできない。したがって、従来の2次元解析では地盤振動記録から解析モデルを介して逆算される等価加振力も、振源の加振力を正しく評価しているとはいえない。本研究は、薄層法と有限要素法を適切に組み合わせたハイブリッド3次元解析法^{1),2)}を適用して、大型ダンプトラックの走行実験による加振力を逆解析により算定し、その妥当性を検証することを主目的とする。一般道路における交通振動問題では、大型ダンプトラック走行が最も大きな振動源と考えられる。本研究は基礎データとしてその等価加振力を求めるものであり、そのほかの車種による等価加振力も同様に適用することができる。

既に開発した地盤環境振動に関する3次元解析法を適用して等価加振力を求めるにあたり、振動源の移動効果と3成分(xyz)間の連成効果の取り扱いの検討が必要となる。本稿では、まず、文献調査と移動振源効果を考慮した解析に基づいて振源の移動効果の検討を行い、等価加振力の算定において振源が移動しないと仮定することの妥当性を確認する。さらに、3成分(xyz)間の連成の有無をパラメータとした計算を行い、実用的には非連成と仮定してもよいことを確認する。等価加振力の妥当性は車体の実測慣性力と比較することにより検証する。また、実測慣性力を加振力とした地盤振動解析を行い、3次元解析法の適用性を確認する。

2. 実験概要

西阪ら³⁾は、埋め立て地盤上(表1参照)のアスファル

* 1 設計本部原子力部

ト一般道路において、大型ダンプ等を走行させた場合について、更地地盤の地表面の速度測定と、車両の車体ばね下に取り付けたセンサーによる加速度測定を行った。車体ばね下の加速度測定結果は、車両の質量を乗ずることにより車両の上下方向慣性力を求めることを目的としたものである。

表1 地盤条件(西坂ら³⁾)
Soil Profiles (Nishizaka et al.³⁾)

| 層 No. | 層厚 (m) | 土質 | V _s (m/s) | ρ (t/m ³) | G (tf/m ²) | ν | h (%) |
|--------|---------|-----|----------------------|----------------------------|------------------------|-------|-------|
| GL | 0.35 | | | | | | |
| 2 | 0.1.2x7 | 埋土 | 120 | 1.61 | 2366 | 0.492 | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | 0.1.25 | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| GL-10m | 10 | 埋土 | 150 | 1.80 | 4133 | 0.494 | |
| 11 | | | | | | | |
| | 12 | 砂質土 | 210 | 1.80 | 8100 | 0.491 | |
| GL-20m | 13 | 粘性土 | 270 | 1.80 | 13390 | 0.485 | |
| | 14 | 砂質土 | 240 | 1.63 | 9580 | 0.488 | 2.0 |
| GL-30m | 15 | | | | | | |
| | 16 | 粘性土 | 320 | 1.80 | 18810 | 0.479 | |
| GL-40m | | | | | | | |
| | 17 | 砂質土 | 290 | 1.76 | 15100 | 0.483 | |
| GL-50m | | | | | | | |
| | 18 | 粘性土 | 450 | 2.00 | 41320 | 0.463 | |
| GL-60m | | | | | | | |
| GL-64m | | | | | | | |

地盤振動の測定点は、車両の左側車輪の中心位置より、走行直行方向に5m離れた位置に振動計を設置した。使用したトラックは10トンダンプトラックで、荷物満載時と空載時の2ケースについて、時速30km/hおよび60km/hで定速走行させた。

図1に車両ばね下の加速度計より求めた上下方向の慣性力波形と地盤振動の速度波形の例を示す。慣性力波形が大きくなっているところはタイヤがマンホールを通過

した瞬間である。慣性力は衝撃波的な形状を示しており、それに対応して地盤振動も大きくなっている。

$$P = P_0 + \alpha \cdot P_0 \cdot e^{i2\pi ft}$$

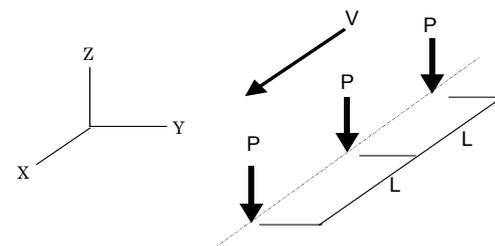


図2 移動振源モデル
Model of Moving Load

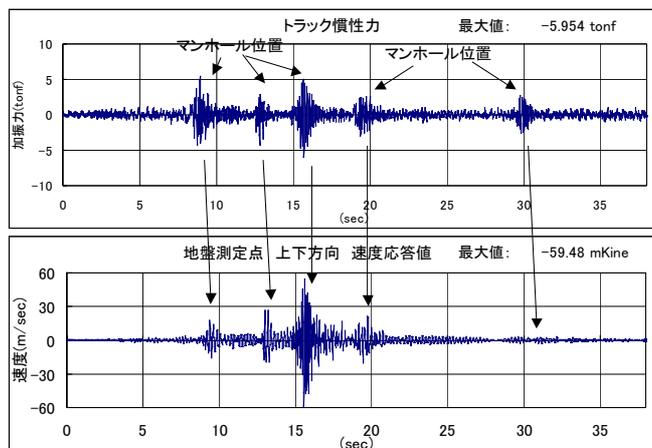


図1 地盤振動および加振力実測値(空載時)
Measurement of Exciting Force and Ground Vibrations

3. 振源の移動効果の検討

3.1 解析方法

西坂らの実験³⁾に対して、薄層要素と有限要素を組み合わせた移動振源による地盤振動解析法⁴⁾を適用し、当該地盤をモデルとして解析を行った。移動荷重モデルを図2に、地盤の要素分割を図3に示す。荷重(車両)は、直線上を等速移動する等間隔の集中荷重とし、自重 $P_0=20tf$ 、振動振幅比 $\alpha=0.05$ 、振動数 10Hz、集中荷重の間隔 $L=50m$ である。走行速度は、30km/h、60km/h、90km/h とした。

3.2 解析結果

図4に上下動成分の距離減衰を示す。車輪近傍を除いて、移動振源の走行速度の影響はほとんどみられない。北村⁵⁾は、3次元半無限弾性体の表面を一定振動数、等振幅の振動荷重が等速走行するときの理論解を展開し、走行速度 60km/h、地盤 $V_s=200m/s$ 、密度 1.8t/m³、荷重振幅 9.8kN の場合の計算結果を示し、走行線から 1m の地点では、固定点と仮定した場合との差はあるが、走行線から 5m の地点では固定点と走行荷重による結果がほぼ一致することを示している。また、福和ら⁶⁾も等速移動点加振力に対する3次元均質等方弾性体の基本解を導出して、調和振動を仮定した振源の移動効果を検討した結果より、走行速度が地盤の弾性波速度の40%程度以下であれば、無次元距離が大きい位置では、ドップラー効果による振動数の変化が小さくなり、包絡形も定常に

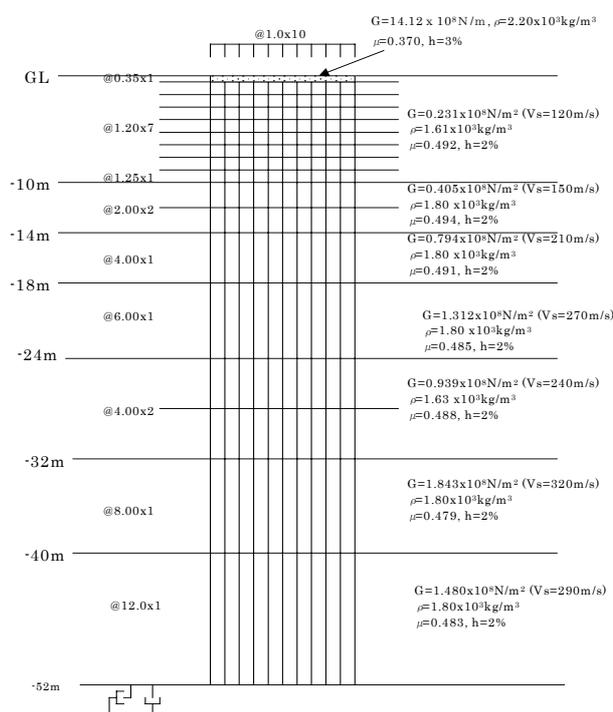


図3 移動振源による地盤振動解析モデル
Mathematical Model of Ground Vibrations Induced by Moving Load

近づくと示している。既往の研究および本稿の解析結果より、通常交通機関の速度(地盤の弾性波速度に比べて低い)では、走行線近傍を除いて、地盤振動に及ぼす振源の移動の影響は小さく、工学的にみて空間的に固定点で扱ってよいと判断できる。図-1に示す実測結果もマンホールなどの振動発生箇所からの地盤振動が卓越しており、本解析結果とも合わせれば振動源が動かないと仮定した解析でも妥当な結果を与え得ることが確かめられた。

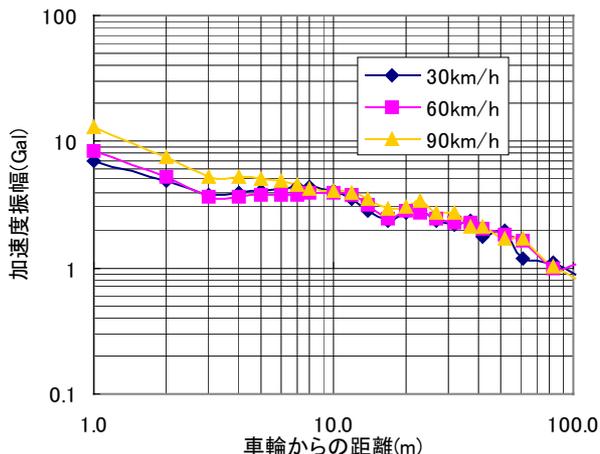


図4 走行速度をパラメータとした解析結果
(上下動の距離減衰)
Attenuation Curves of UD Component of Vibrations
Obtained by Analysis to Examine Effect of Vehicle's
Velocity

3.3 実験結果における走行速度の影響

西坂らの大型トラック走行実験³⁾では、走行速度をパラメータとした。図5は満載トラック(約20tf)の走行速度30km/h(8.3m/s)、60km/h(16.6m/s)の地盤振動(5m地点)のフーリエスペクトルを比較したものである。振幅はおおむね同レベルであるが、卓越振動数域の約3H~5Hz付近のピークに着目すれば、地盤振動のピーク振動数は30km/h走行の場合、約5Hz、50km/h走行の場合、約3Hzである。走行速度の表層Vsに対する比は、7~14%であり、走行速度による地盤振動ピーク振動数の差は、マンホールへの衝撃荷重と車体運動によるものと考えられる。このような現象は、交通振動の振源問題における今後の課題のひとつである。

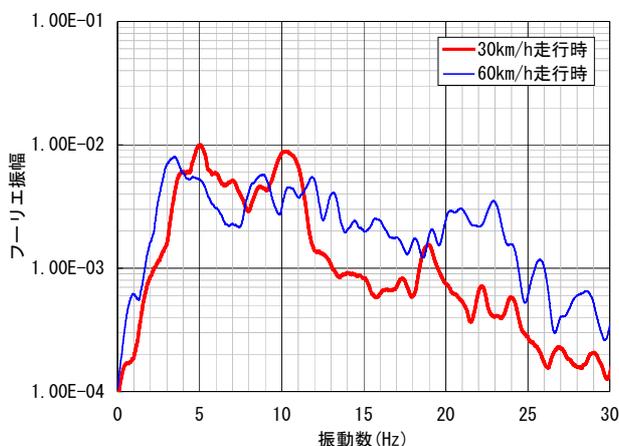


図5 車体の動荷重のフーリエスペクトル(西坂らの実験³⁾)
Fourier Spectra of Inertia Force of Body
(after Nishizaka et al. ³⁾)

4. 等価加振力の評価

4.1 解析モデル

解析モデルを図6に示す。本解析では、地盤は解析対象の振動数域を考慮して地盤を水平薄層に分割した薄層モデルを用い、最上層の一部を、道路表層のアスファルト舗装の一部区域として平面寸法20m×10mの部分を取り出して有限要素でモデル化している。薄層モデルの下端境界条件は粘性境界である。解析に用いた地盤定数は表1に示している。

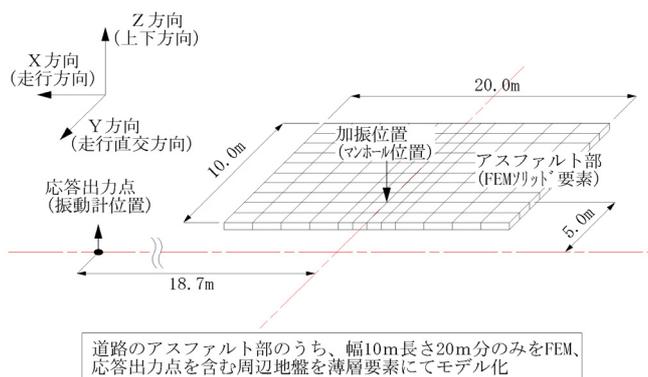


図6 解析モデル
Analysis Model

加振位置に関して、本来は車両走行に合わせた移動加振源を考慮に入れなければならないが、図1に示したように車両がマンホールを通過した際に大きな振動が発生していることならびに3章の検討結果から、最も地盤振動の大きかったマンホール1点を加振点とし、移動加振源および他のマンホールによる振動は無視した。加振位置と地表面上の振動計との位置関係は、車両走行方向(X方向)に18.7m、車両走行直交方向(Y方向)に5.0mずれている。

4.2 非連成を仮定した解析

等価加振力は、振動数領域において加振点にホワイトノイズ特性を有する単位加振力を入力した時の地盤振動応答と、車両走行時の地盤振動実測結果から算定する。その際、各3方向成分の応答は各方向成分の加振力のみ起因し、他の方向成分とは連成しないとする簡易法と、3方向加振力が連成して3方向応答を励起することを評価した精算法の2種類が考えられる。本節では、非連成を仮定した解析方法と結果を示し、次節において連成効果を考慮した解析について示す。

非連成を仮定した等価加振力算定式は振動数領域にお

いて次式(1)で表せる。

$$F(\omega) = X(\omega) \cdot (W(\omega)/R(\omega)) \quad (1)$$

ここに、 $F(\omega)$: 等価加振力

$X(\omega)$: 地盤振動実測結果

$W(\omega), R(\omega)$: 単位加振力および単位加振力による
応答

速度 30km/h の満載車両走行時において、算定した等価加振力と、実測の上下慣性力を比較して図7に示す。マンホール通過時の波形部分は2秒付近である。等価加振力にもその影響が現れており、加振力波形の包絡形状やピーク振幅は実測と近い結果となっている。ただし、実測慣性力は高い振動数成分を含んでいるが、等価加振力にはそれがみられない。これは、実測加振力は車体の慣性力であり、実際に道路面に作用する加振力はタイヤを介しており、そのクッション効果によるものと考えられ、その特性については今後の課題である。なお、実測慣性力と等価加振力のスペクトル特性は次節で比較する。

次に、地盤振動の各方向実測波形を図8に、求めた上下(Z)方向等価加振力を解析モデルに加振した場合の地盤振動の各方向応答結果を図9に、実測上下慣性力を解析モデルに入力して計算した地盤振動の解析結果を図10に示す。ここで、等価加振力入力時の上下(Z)方向解析値は実測値と同一である。

図8と図9を比較すると、走行(X)方向では包絡形状・ピーク振幅が似た結果を示していたが、走行直交(Y)方向ではピーク振幅が約1/3程度の値になった。このことは、上下方向加振力のみでは、測定点における走行直交(Y)方向成分を十分に励起できないことを示している。逆にいえば、実際には、道路面においてマンホール通過時に走行直交(Y)方向にも加振力が発生していることを示唆している。図8と図10を比較すると、解析による走行(X)方向・上下(Z)方向の波形は実測結果と包

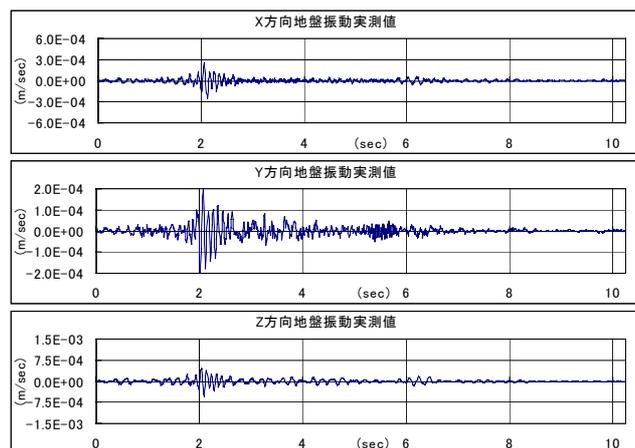


図8 地盤振動実測値
Measured Ground Vibrations

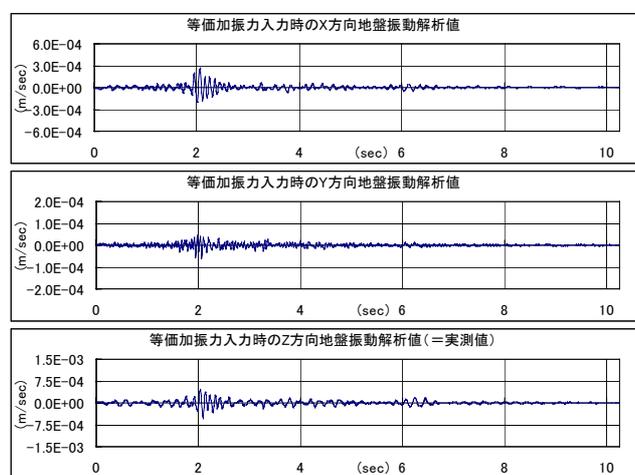


図9 等価加振力入力時の地盤振動解析結果
Ground Vibrations Simulated by Use of Equivalent
Exciting Force

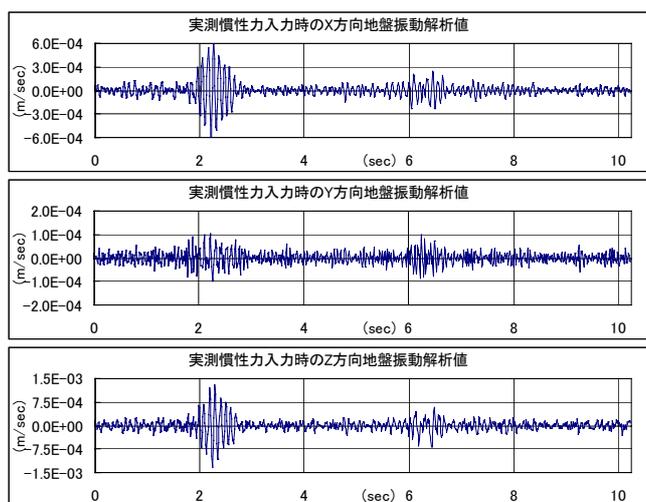


図10 実測慣性力入力時の地盤振動解析結果
Ground Vibrations Simulated by Use of Measured
Exciting Force

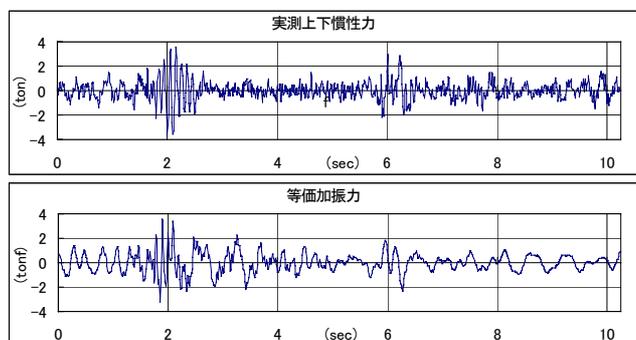


図7 実測慣性力(上)および等価加振力(下)
Measured Inertia Force and Equivalent
Exciting Force

絡形状は対応しているものの、振幅は約2倍になっている。このことは、前述したように、実際の路面に作用する加振力は、タイヤの効果によって車体ばね下に取り付けた加速度記録から求めた車体の慣性力より低減している可能性が考えられる。また、後述するように、地盤振動解析で仮定した地盤モデルの減衰定数の問題も考えられる。

等価加振力と実測上下慣性力のスペクトルを図11に示す。実測慣性力にみられる約10Hzおよび約3Hzのピークについては求めた等価加振力でも再現できているものの、それより低い振動数域において振幅に差が見られた。解析では、水平成層地盤で振動数非依存型の減衰を仮定している。低振動数域にみられる等価加振力と実測加振力の差異の理由には、実際の地盤の不規則性や、減衰の振動数依存性が考えられ、今後の検討課題である。

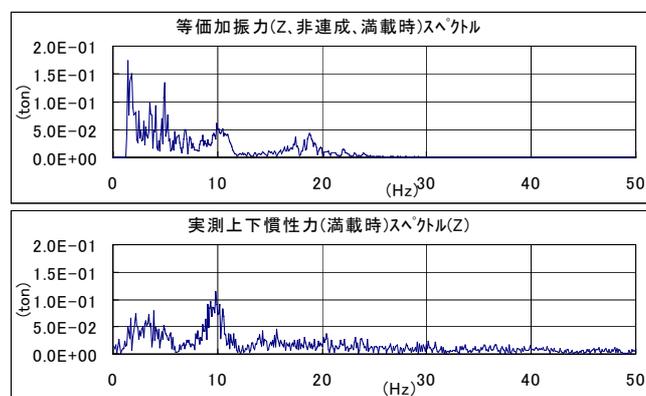


図11 加振力のフーリエスペクトルの比較
Fourier Spectra of Exciting Force

4.3 連成効果を考慮した解析

3(xyz)成分間の連成効果を考慮した等価加振力は以下の要領で考慮した。

いま、振動数領域において、単位調和加振力による応答で構成されるグリーン関数マトリクスを $[A(\omega)]$ とし、x,y,z 成分で構成される加振力ベクトルを $\{F(\omega)\}$ 、応答である地盤振動を $\{X(\omega)\}$ とすれば、

$$\{F(\omega)\} = [A(\omega)]^{-1} \cdot \{X(\omega)\} \quad (2)$$

となる。求めた $\{F(\omega)\}$ を時間領域に変換すれば、等価加振力の時刻歴が得られる。

図12に満載トラック走行(重量約20tf, 走行速度30km/h)時の地盤振動記録(5m地点)から求めた等価加振力の時刻歴波形を連成と非連成(それぞれの方向ごとの計算結果)の場合と比較して示す。本研究で求めたこれらの等価加振力を検証するため、車体動荷重(上下方向慣

性力)の実測結果(西坂らの実験³⁾)を合わせて示す。図13は上下方向加振力のフーリエスペクトルを比較したものである。図12、図13からわかるように、上下方向加振力波形は連成・非連成による差は小さく、上下方向の地盤振動に対しては、連成効果を見無視した解析でもおおむね妥当な等価加振力(上下方向)を求め得ることを確認した。また、等価加振力と実測慣性力のスペクトル特性を比較すると、大型トラック走行による加振力の卓越振動数域³⁾とされる約3-5Hzおよび約10Hzではほぼ合っており、この振動数域の等価加振力は車体の慣性力と良好な対応を示し、おおむね妥当な結果が得られていることが確認できる。しかし、約12-15Hz付近や約20Hz以上の高振動数域では等価加振力と実測慣性力に差がみ

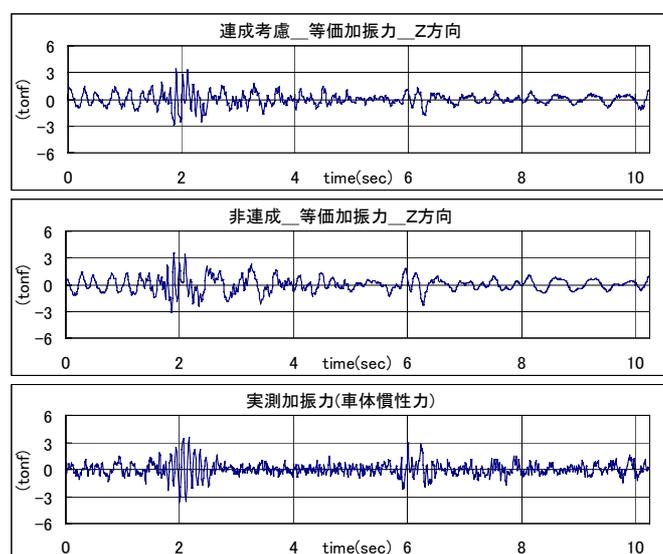


図12 等価加振力(連成・非連成)と実測の時刻歴波形の比較
Time History of Equivalent Exciting Force Compared with Measurement

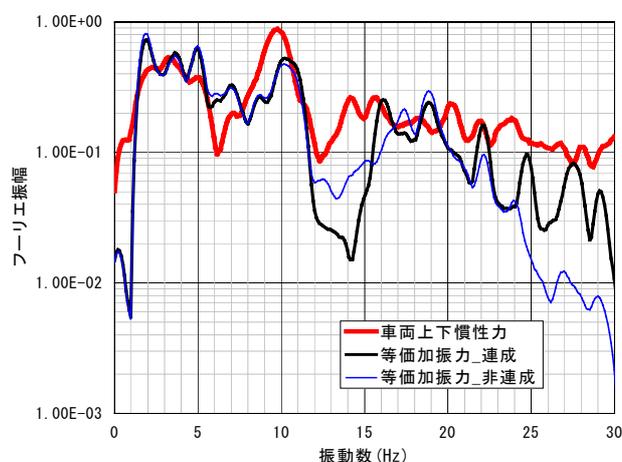


図13 等価加振力(連成・非連成)と実測結果のフーリエスペクトルの比較
Fourier Spectra of Equivalent Exciting Force Compared with Measurement

られる。前述したように、タイヤから路面に伝達される荷重と車体の慣性力の差による可能性が考えられる。

6. まとめ

既開発した地盤環境振動の3次元予測解析手法は、一般道路交通振動の等価加振力の計算にも適用することができることが確認できた。

一般道路の交通振動の加振力問題では、マンホール等の路面の不規則性の影響が大きいこと、走行線近傍を除いて、地盤振動に及ぼす振源移動の影響は小さいことから、加振源を空間的に固定として解析してよいことを確認した。また、3(xyz)成分間の連成効果を解析的に検討し、一般道路の交通振動問題では、上下方向の等価加振力の計算は非連成と仮定してよいことを確認した。したがって、一般的に問題となるケースが多い上下動の問題では、地盤振動の上下動記録を用いて、等価加振力を求めればよい。

加振力の評価にあたり、以下の項目が今後の課題として挙げられる。

- ① 解析に用いる地盤モデルの減衰定数の評価方法
- ② タイヤから路面に伝達される加振力特性と等価加振力の関係

参考文献

- 1) 田口他:3次元地盤環境予測システムの開発,大成建設技術センター報, No.27, Vol.35, CD-ROM, 2002
- 2) 田口他:3次元地盤環境振動予測システムの研究開発 その1~2, 第37回地盤工学研究発表会, 2001年7月
- 3) 西阪, 福和:交通振動問題における車両動荷重特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第491号, 1997年1月, pp65-72
- 4) Hanazato, T. et al: Three Dimensional Analysis of Traffic-induced Ground Vibrations, J. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, pp1133-1151, 1991
- 5) 北村:走行変動荷重による地盤振動解析, 神戸大学自然科学研究科紀要, 16-B, pp53-59, 1998
- 6) 福和他:等速移動点加振力に対する3次元均質等方弾性体の基本解に関する研究, 交通振動による地盤の応答性状に関する解析的研究, 建築学会構造系論文報告集, 第441号, pp45-52, 1992