

自動車走行外乱による地盤の振動性状に関する研究
 —実測記録の分析と薄層法によるシミュレーション解析—
 AN OBSERVATION STUDY ON THE DYNAMIC RESPONSE OF SOIL
 DUE TO A MOVING TRAFFIC EXCITATION

福和 伸夫* 西阪理永** 浅野三男*** 多賀直恒**** 寺村彰*****

Nobuo FUKUWA Riei NISHIZAKA Mitsuo ASANO Naotsune TAGA Akira TERAMURA

In a study of the dynamic response of the soil due to a mobil, it is necessary to confirm the dynamic load excited by a mobil and the wave propagation in a soil. In order to clarify them, a large size of dump car was driven at midnight. The accelerations on the car, velocities on the surrounding ground surface and in the soil were recorded. The PS logging and the smoothness of road surface were also surveyed. The dynamic load induced by the moving car is simulated from the acceleration records on the car and the correspondence with the smoothness record of road surface is studied. On the soil response, the nonstationary response spectra, Tgr are evaluated. Motion product and the orbit are also examined to grasp the effect of surface waves. Finally, the complex envelope is evaluated in order to study the attenuation. From these results, it is clarified that the surface waves act an important role in the wave propagation in a soil. Finally, the simulation analysis using thin layer method is carried out in order to examine the effect of moving excited load.

1. はじめに

近年, 科学設備, 生産設備, 情報機器などの精密化に伴い, 地盤の微振動が精密機器設置上クリティカルとなる建築物が増えてきた。半導体工場, 電子顕微鏡施設, 加速器施設などがこれに当たる。これらの施設が道路や鉄道に近接して設置される例も多く, 交通振動問題が設計上重要なテーマとなってきた。一方, 駅再開発に伴い高層建築物が線路上に建設される計画も多く, 居住性の観点からの検討の必要性も高い。こういった交通外乱に伴う振動は, 車両などの加振源が移動しながら地盤に振動外力を与え, 地盤内を波動伝播し, 構造物と地盤との動的相互作用を介して構造物に輸入される。したがって, 図-1に示す種々の要因の影響を明確にすることが必要である。この中で, 移動加振源に対する地盤の応答性状を考察することが第一の出発点となる。そこで本研究では, 名古屋大学構内で実施した実測結果を基に, 自動車振動外力の特性ならびに地盤応答性状に関して考察した結果を示す。

計測では, 大学に隣接する道路に大型ダンプを深夜単独走行させ, 車両各点の加速度ならびに地盤の速度

波形を記録した。地盤に関しては基盤位置の地中記録も採取した。プロフィールメータを用いた道路の平滑度調査, ならびに地盤のPS検層についてもあわせて実施した。まず, 車両の加速度記録から走行車両が地盤に与える振動荷重の概略推定をした後に, 車両振動荷重と道路舗装面の平滑度との関係を論じる。次に, 振動荷重と道路路肩で計測した応答波形との関係を検討する。ここでは, 車両の走行速度を2種類採用し, 車両速度による路肩応答特性の違いを非定常スペクトルならびに $Fgr^{1)}$ を用いて議論する。地表各点に設置した応答記録からは, 非定常スペクトルと $Tgr^{1)}$ の算定を行い, 地盤内を伝播する波動の分散性を確認する。あわせて, モーションプロダクトならびに軌跡の検討を行い, 表面波の卓越度合いを明確にする。最後に, 周波数帯域ごとの複素包絡形の検討を通して, 方向成分別, 振動数帯域別の距離減衰特性を議論する。

交通振動問題に対しては, 従来より振動実測に基づく検討が多く行われてきている²⁾⁻¹¹⁾。その多くは環境振動問題として捉えた研究であり, 研究成果は振動規制技術マニュアルとして整備されている¹²⁾。これら

* 工博 名古屋大学助教授 工学部建築学科
 ** 工学 名古屋大学大学院 工学部建築学科
 *** 工修 竹中工務店設計部
 **** 工博 名古屋大学教授 工学部建築学科
 ***** 工修 (株)大林組主席研究員 技術研究所

(〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 (〒104 東京都中央区銀座8-21-1)
 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)
 (〒204 東京都清瀬市下清戸4-640)

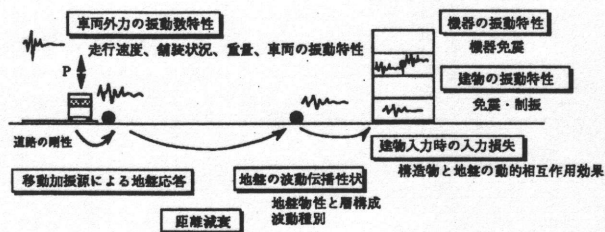


図-1 交通振動問題の主要要因

の研究では、振動レベル計による計測結果²⁾に基づいて、振動性状の考察^{3) 4)}、回帰式を用いた予測法の提案^{5) 6) 7)}が行われている。何れも、人体への振動を念頭とした振動レベルの抑制が主たる目的であると考えられる。また、距離減衰や波動伝播をレーリー波の分散性や軌跡の観点から検討した例^{8) 9)}はあるが、本論のように車両走行に伴う地盤内の波動伝播性状を多角的に考察した研究は少ない。路面の平滑性と地盤の振動応答との関係については、回帰式に基づいた分析³⁾、道路橋の路面凹凸のパワースペクトル密度に関する統計的考察¹⁰⁾が行われている。車両振動外力そのものに関する研究には、高架橋の継ぎ目の段差による振動外力に関する土木研究所の研究¹¹⁾などがある。しかし、平面道路に関して、走行車両から生じる振動外力、路面平滑性、地盤応答の関係を総合的に考察した研究は稀である。一方で、種々の波形解析手法の利用による地盤特性の同定や伝播波動の特定などが、機械振動による地盤応答の解析や常時微動解析において近年精力的に行われている^{13) ~ 14)}。そこで、これらの知見を道路交通振動問題に利用して、地盤内波動の伝播性状を詳細に検討することとする。

一方、交通振動問題に対する解析的な取組に関しては、土木分野における高架道路に対する検討例^{15) ~ 16)}、移動加振外乱に対する成層地盤の応答に関する研究^{17) ~ 18)}、弾性波動論に基づく移動調和加振外乱に対する基本解に関する研究¹⁹⁾などがある。従来の研究の多くは走行車両の移動効果を見逃し、加振点を空間的に固定して、2次元問題あるいは3次元問題として取り扱っており、花里ら¹⁷⁾の研究は外乱の移動効果を考慮し、かつ成層地盤を対象とした先駆的な研究である。ここでは、外乱をフーリエ級数展開することによって、1方向伝播波動に対する有限要素法の定式化を行い、側方に薄層境界を利用している。本論でも、得られた観測記録のシミュレーションを行うことを目的として、移動加振外力に対する薄層解の誘導を行っている。対象とする問題は花里ら¹⁷⁾と同様の問題であるが、定式化がフーリエ積分法に基づいていることに差異がある。なお、移動外乱に対する研究としては、半無限地盤の

地表面を静荷重が等速移動する問題を解析的に取り扱ったEason²⁰⁾やGakenheimer²¹⁾による研究もある。

2. 実測方法

実測は名古屋大学構内で行った。道路と地表観測点の位置関係を図-2に示す。各観測点ともに上下・水平2方向の計3成分の速度波形の観測を行っている。ボーリング孔を利用した支持基盤位置での地中観測もあわせて行った。当該地点は道路北側が小高い山になっており、道路一敷地境界には3m程の崖が、約60mにおいて15m程の崖が存在する不整形な地盤となっている。観測地点近傍で実施された計3本のPS検層結果を図-

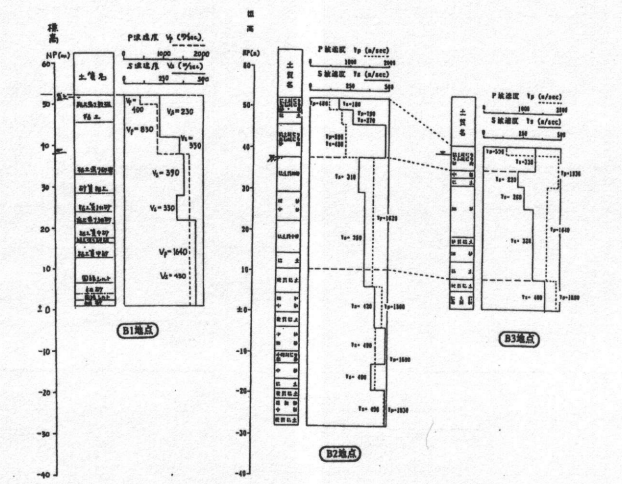
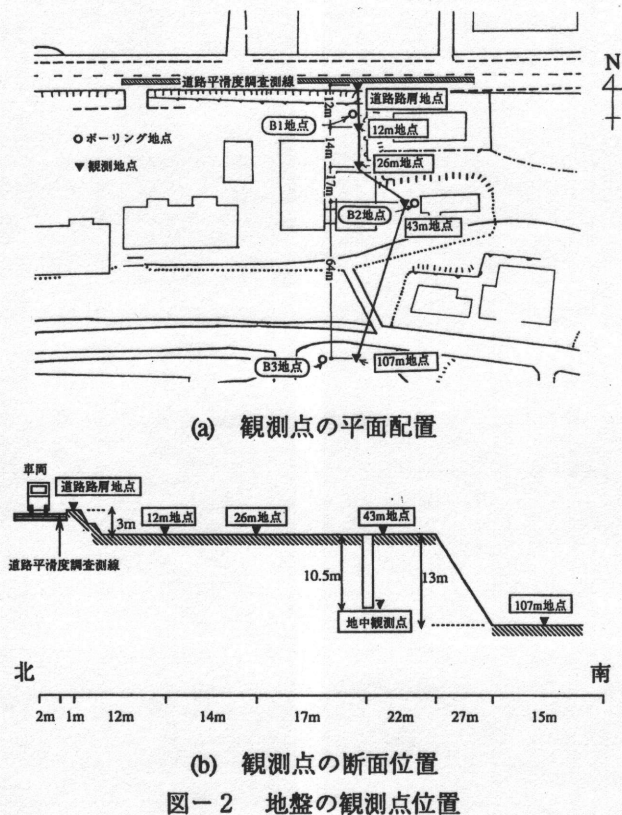


図-3 観測点近傍のPS検層結果

3に示す。図のように当地点は表層部にやや軟弱な層があるものの比較的良質の地盤である。

走行車両は砂利を満載した総重量約25tonの大型ダンプであり、深夜に単独で西向に走行させた。速度は約30km/hと50km/hを目安とした。走行車両には、図-4に示すように、前後輪の板ばねの上下に上下方向の加速度計を設置し、走行時の加速度波形を記録した。

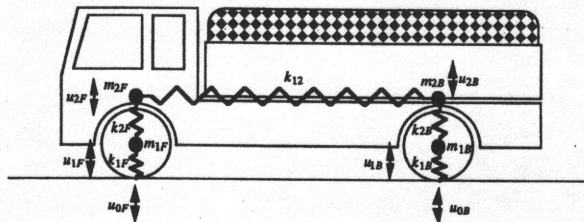


図-4 走行車両の加速度計設置位置と振動モデル

また、プロフィールメータを用いて道路路面の平滑度調査を実施した。当該道路は比較的路面が痛んでいるので、比較のために舗装状態が良好な西側隣接道路(四谷通り)の平滑度調査もあわせて実施した。

3. 車両振動荷重の推定と路面平滑度との関係

車両に設置した加速度記録から、車両が地盤に与える振動荷重を推定する。車両の振動諸元を得ることが困難なため、車両を図-4に示す様に4質点モデルに置換する。図中に示す記号を用い、上下方向の自由度のみを考慮すると、以下の運動方程式が得られる。但し、 k_{12} は無有限大の剛性であるとし、ばね上の変位として、 u_{2F} と u_{2B} の質量を重みとした荷重平均値を用いることとする。また、左右両輪の変位は同一と仮定する。

$$\begin{aligned} m_{2F}\ddot{u}_{2F} + m_{2B}\ddot{u}_{2B} + k_{2F}(u_{2F} - u_{1F}) + k_{2B}(u_{2B} - u_{1B}) &= 0 \\ m_{1F}\ddot{u}_{1F} - k_{2F}(u_{2F} - u_{1F}) + k_{1F}(u_{1F} - u_{0F}) &= 0 \\ m_{1B}\ddot{u}_{1B} - k_{2B}(u_{2B} - u_{1B}) + k_{1B}(u_{1B} - u_{0B}) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

上3式の和を求めることにより、

$$m_{2F}\ddot{u}_{2F} + m_{2B}\ddot{u}_{2B} + m_{1F}\ddot{u}_{1F} + m_{1B}\ddot{u}_{1B} + k_{1F}(u_{1F} - u_{0F}) + k_{1B}(u_{1B} - u_{0B}) = 0 \quad (2)$$

が得られ、結果として、タイヤに生じる動的なばね反力の総和は下式で与えられる。

$$F(t) = k_{1F}(u_{0F} - u_{1F}) + k_{1B}(u_{0B} - u_{1B}) = m_{2F}\ddot{u}_{2F} + m_{2B}\ddot{u}_{2B} + m_{1F}\ddot{u}_{1F} + m_{1B}\ddot{u}_{1B} \quad (3)$$

上式は、車両各部で生じた慣性力の和に他ならない。これはあくまでも概算式であり、車両各部の諸元が公開されればより適切な振動荷重評価が可能となる。

前輪および後輪のみを各々秤にのせた時の車両重量を測定し、ばね下部の重量を概略積算して車両各部の重量を表-1のように算出した。動的なタイヤ反力は、車両各部の重量および加速度記録から(3)式を用いて推

定される。図-5に50km/h走行時の車両各部の加速度波形と推定振動荷重を示す。また、対応するフーリエスペクトルを図-6に示す。図より、ばね下では12Hz程度に、ばね上では3Hz程度に卓越振動数がある。この結果は従来より示されているダンプトラックの振動特性に符合している。本測定では満載車両を走行させたので、推定振動荷重には後輪ばね上の振動特性が支配的になっており、3Hzに卓越を持つと共に10~25Hzの広帯域の特性を有している。

表-1 車両各部の重量(ton)

m_{2F}	5.17	m_{2B}	18.39
m_{1F}	0.3	m_{1B}	1.8

次に、平滑度調査で得られた路面凹凸の変化量を図-7に示す。路面の凹凸に直接的に影響を受ける後輪ばね下の加速度波形との相関から車両走行速度を同定すると50km/h走行時は41.5km/h、30km/h走行時は33.5km/hと求められた。この結果を用いて、路面変動の時刻歴波形及びフーリエスペクトルを求めた結果を図-5及び図-6にあわせて示す。また、50km/h走行時の車両の振動荷重と路面凹凸変化量の各波形ならびに非定常スペクトルを図-8に比較して示す。参考のために平滑道路で測定した結果も示す。図より、路面に急激な変動が生じると広振動数帯域のレベルの大きな応答が刺激されており、路面が比較的平坦な場合には荷重が小さくかつ車両の振動特性が反映された形となっている。また、路面凹凸変化量と車両振動荷重とは、波形ならびに振動数特性とも比較的よく対応しており、結果として車両振動荷重には、路面の平滑特性と車両の振動数特性の関与が大きいことが理解できる。

4. 路肩の応答特性

図-9に道路上路肩で観測された上下方向の応答変位波形と非定常スペクトルならびに $Fgr^{(1)}$ を示す。 Fgr は各時刻におけるスペクトルの重心を表すので、図より卓越振動数の経時変化を読み取ることができる。本計測ケースの場合、地盤のS波速度 V_s と走行速度 c の比が0.1弱であるので荷重の移動に伴う振動数の移行は約1~2割となる¹⁾⁹⁾。走行速度30km/hと50km/hを比較すると後者に卓越振動数の経時変化が認められ、ドップラー効果的な現象が現われている。

図-10には50km/h走行時の路肩応答変位のフーリエスペクトルを上下方向について示す。また、参考のために図-11に深夜静寂時にボーリング孔(BP2地点)で得られた常時微動の地表と支持基盤のフーリエスペクトル比をNS方向と上下方向について示す。図-12には、振動荷重と路肩応答変位のフーリエスペクトル

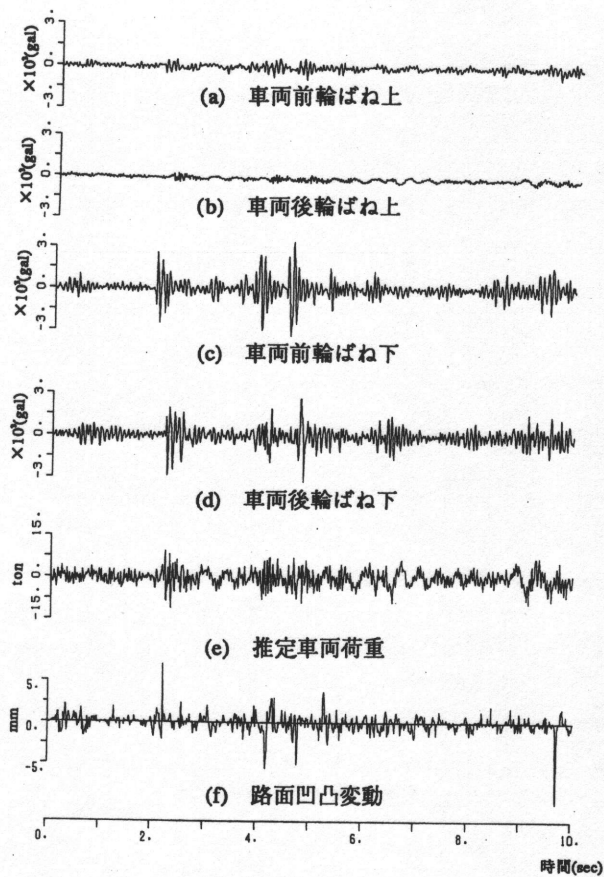
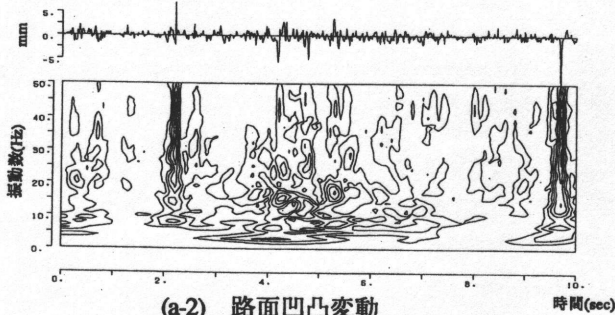
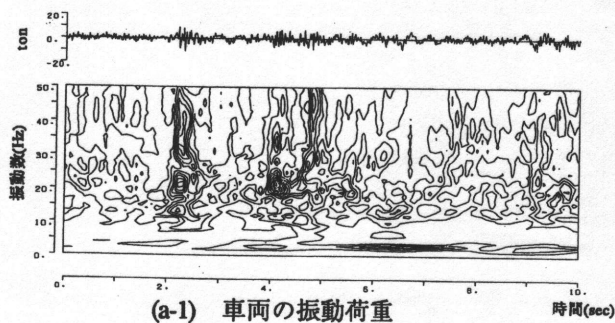
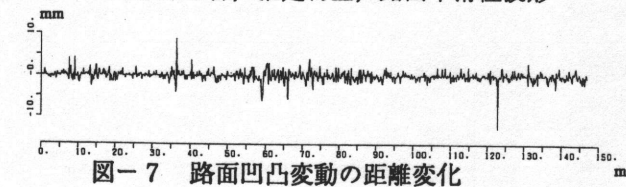


図-5 車両各部応答, 推定荷重, 路面平滑性波形



(a) 50km/h走行

図-8 車両の振動荷重と路面凹凸変動の非定常スペクトル

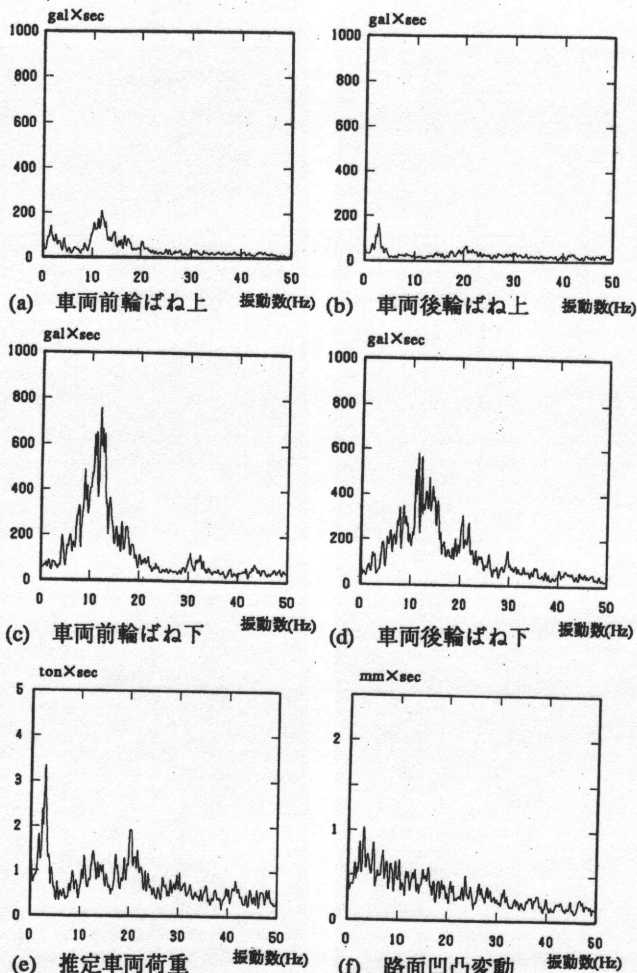
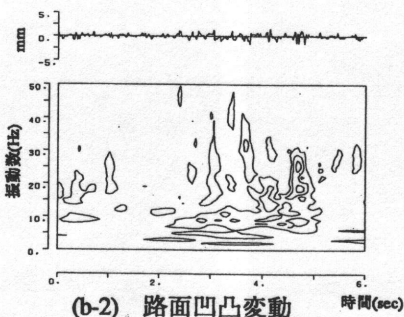
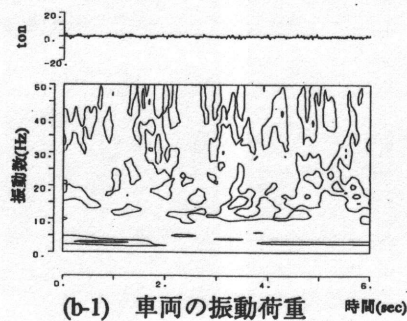


図-6 車両各部応答, 推定荷重, 路面平滑性のフーリエスペクトル



(b) 平滑路50km/h走行

比を示す。各図より、路肩応答変位には、図-6に示した車両荷重の卓越振動数(3Hz付近)と、10Hz付近が増幅されるといふ表層地盤の固有振動特性が反映されていることが分かる。

5. 地盤の振動特性と距離減衰特性

図-13に50km/h走行時の道路からの測線上の地表の変位波形を方向別に示す。また、図-14には路肩と26m地点の非定常スペクトルと $T_{gr}^{1)}$ を示す。 T_{gr} は群遅延時間であり各振動数帯域での包絡波形の重心位置に対応する。図から分かるように、道路から離れた位置では振幅が減少すると共に継続時間が増加している。また、10~20Hzの高振動数で T_{gr} が遅れており波動速度の分散性が認められる。これらは、表面波の存在によるものと推定される。次に、路肩と26m地点の上下とNS方向の時刻歴波形の振動数帯域ごとのモーシヨンプロダクトとオービットを図-15、図-16に示す。モーシヨンプロダクトはレーリー波が卓越すると正負で振動し、実体波が卓越すると軸の片側に寄る特徴がある。以上の図から、路肩と比較して、道路から離れた位置では低振動数で実体波が、また5Hzを超える高振動数でレーリー波の影響が大きくなる事が分かる。

最後に交通振動問題の距離減衰特性を検討する。各波形の複素包絡形¹⁾から求めた包絡波形を振動数帯域ごとに図-17に示す。図より方向・振動数によって距離減衰特性が異なっていることが分かる。特に、NS方向に比較して上下方向とEW方向の距離による減衰の仕方が小さくなっており、上下方向については5Hz以上の高振動数においても比較的その傾向が認められる。

以上の結果をあわせて考察すると、NS方向については実体波成分が多く、上下方向については振動数による実体波とレーリー波の混在の仕方が異なり、高振動数にレーリー波成分が多く含まれている可能性がある。また、EW方向の減衰が小さいのは、ラブ波などの表面波が卓越しているからと考えられる。

6. 薄層法によるシミュレーション解析

Appendixに示す等速移動加振外乱に対する薄層解を用いて、シミュレーションを実施した。推定荷重には、図-6に示したように3Hzに卓越があるので、走行速度41.5km/h、加振振動数3Hzの調和振動外乱を想定する。荷重振幅は、車両荷重に種々の振動数成分が含まれているので、図-18のように2~4Hzのバンドパスフィルターを施した波形の包絡形の平均値から1.57tと求めた。一方、地盤は、図-3のPS検層結果を参考に、表-2のような成層地盤モデルを作成した。結果として、解析モデルは図-19のようになる。図-20に、解析によって得られた12m位置の変位応答波形を観測記録と比較して示す。観測値は図-13に示した観測波

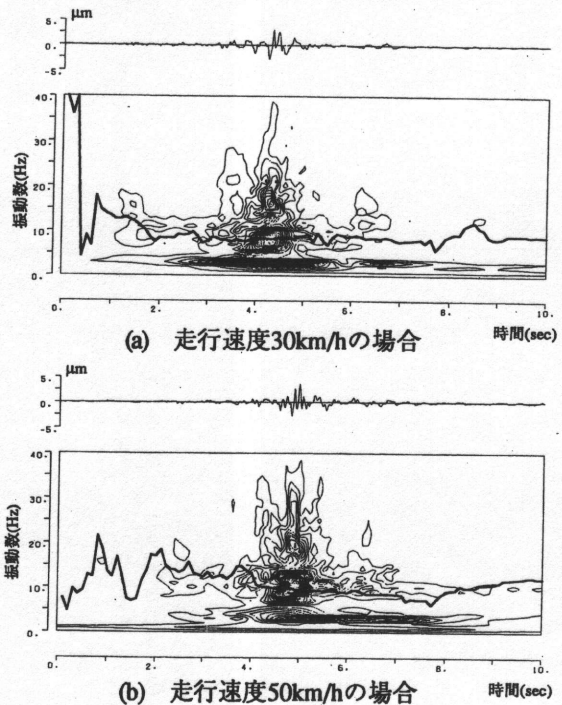


図-9 路肩変位応答の非定常スペクトルとFgr

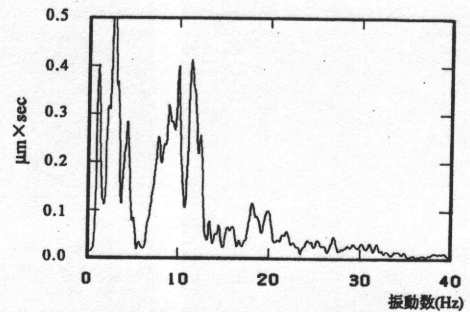


図-10 路肩応答のフーリエスペクトル

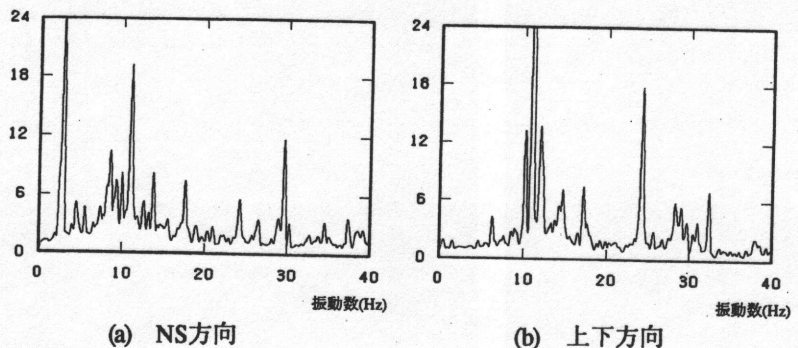


図-11 表層地盤のフーリエスペクトル比

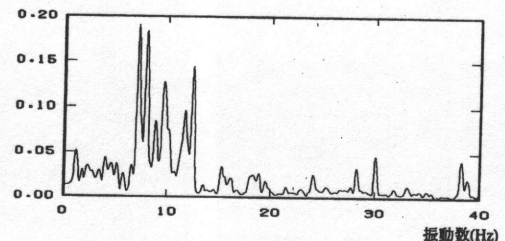


図-12 路肩変位応答と車両荷重のフーリエスペクトル比

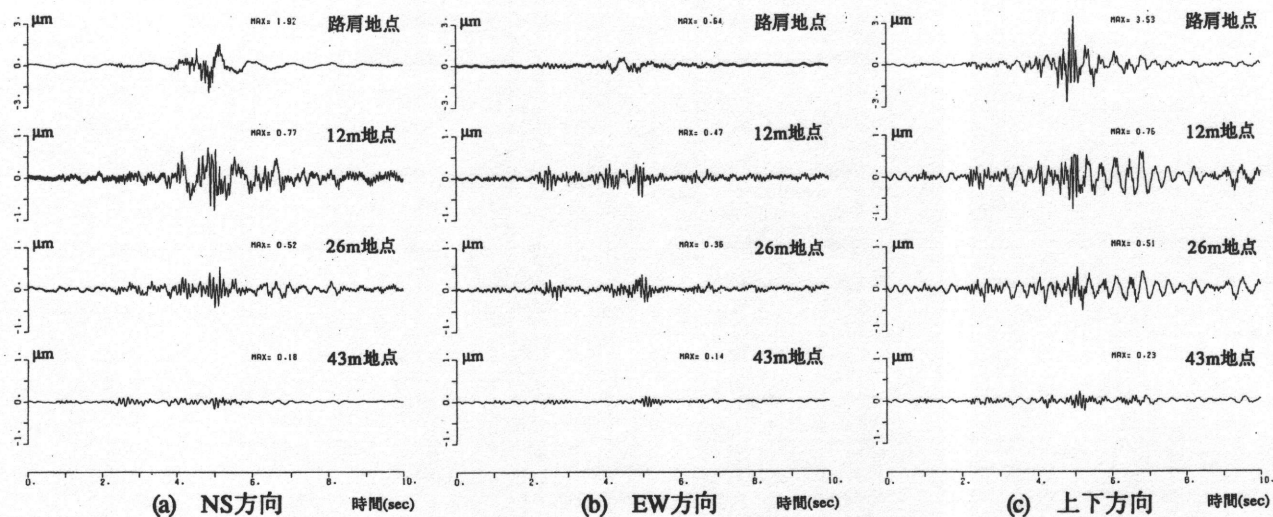


図-13 50km/h走行時の地盤各点での変位応答波形

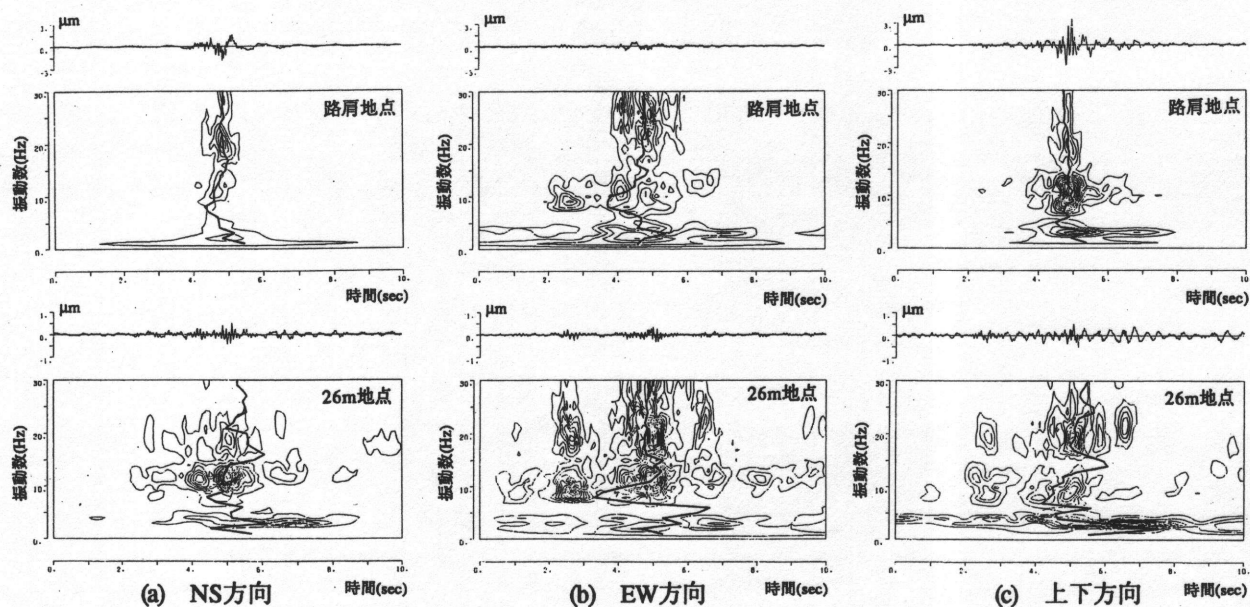


図-14 50km/h走行時の非定常スペクトル

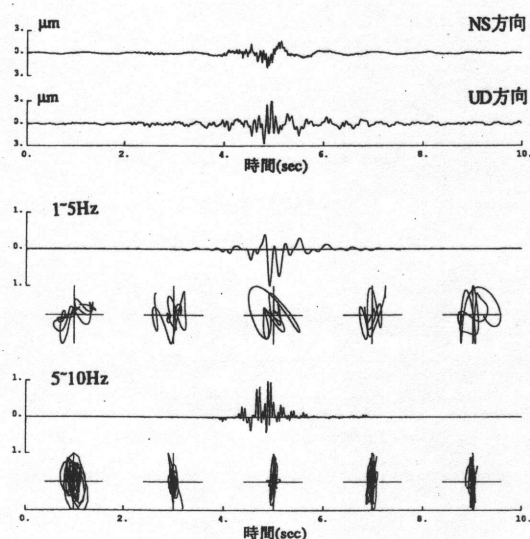


図-15 路肩のモーションプロダクトとオービット (50km/h走行時)

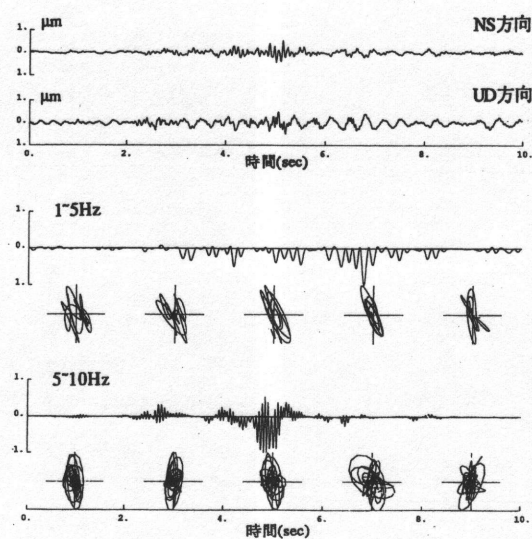


図-16 26m地点のモーションプロダクトとオービット (50km/h走行時)

形に2～4 Hzのバンドパスフィルタを通した結果である。両者を比較すると、解析結果は加振振動数を3Hz調和加振としているため、単純な応答を示しているが、交通振動特有のビート形の波形を示している。また、振幅レベルについては、応答を過大に評価しているが、これは、本解析に

表-2 地盤諸元

H (m)	γ (N/m ³)	V_s (m/s)	ν	h
2.5x2	1.8	290.	0.348	0.05
2.5x2	1.8	250.	0.453	
5.	1.7	480.	0.295	
3.5x2	1.95	390.	0.472	
4.	1.8	350.	0.468	
3.75x4	1.9	350.	0.476	
4.5x2	1.75	450.	0.457	
10.	1.9	450.	0.457	
20.x2	1.9	450.	0.467	
—	1.9	450.	0.467	

において道路の剛性を無視していることと地盤の不整形性に主たる原因があると推察される。しかし、大略的に自動車外乱による地盤応答が把握できていると判断される。

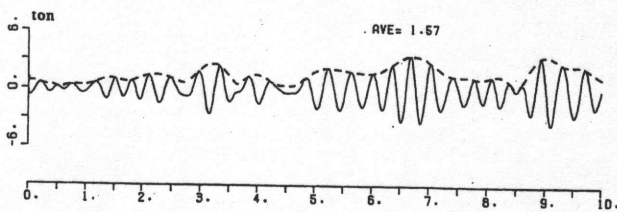


図-18 車両荷重の包絡形(2～4 Hz)

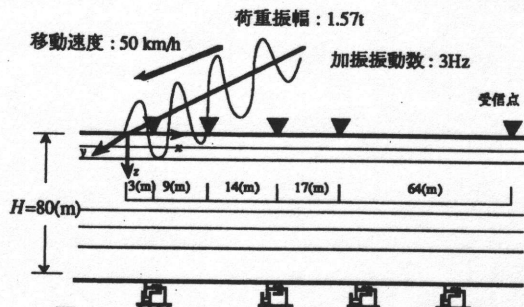


図-19 シミュレーション解析モデル

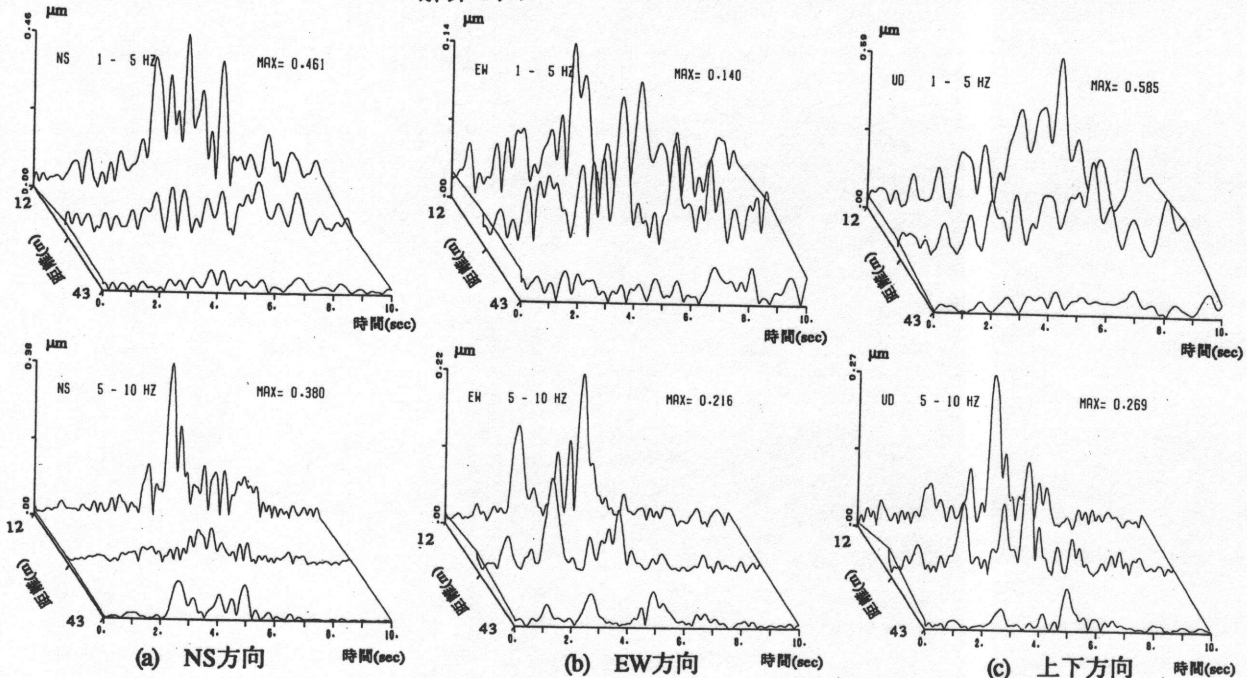


図-17 50km/h走行時の地盤各点での周波数帯域ごとの包絡形

7. まとめ

深夜に大型ダンプを走行させた場合の、車両が地盤に与える動荷重、周辺地盤の振動特性について、観測結果をもとに分析を行うと共に、等速移動加振外乱に対する薄層解を定式化し、観測記録のシミュレーション解析を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 車両の上下加速度記録から簡易的に推定した車両の動荷重は、路面の平滑性との相関が高い。
- (2) 路肩の応答はドップラー効果的な振動数の移行が認められると共に、車両荷重ならびに表層地盤の振動特性が反映されたスペクトル特性を有している。
- (3) 周辺地盤の応答には実体波と表面波の混在が認められ、振動数並びに距離によって両者の混在度合いが異なる傾向が見られる。
- (4) 薄層法を用いたシミュレーション解析結果は概ね観測記録の振動性状を表すことが出来た。

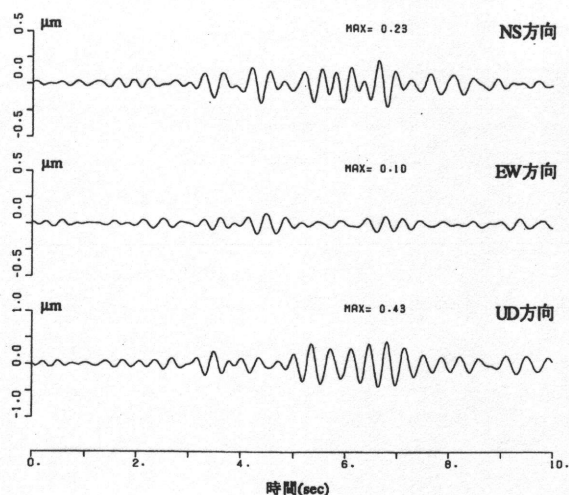
謝辞

本観測記録を得るに当たり、名古屋大学の今岡克也助手、平埴義正技官、研究室の学生各位、大林組の栗本修氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

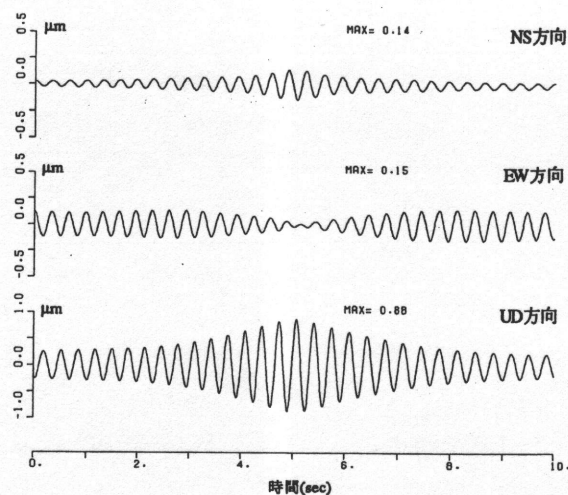
Appendix 等速移動調和加振外乱に対する薄層解

解析対象は、平行成層地盤の地表あるいは地中の直線上を一定の速度で移動する調和点加振力であり、地盤は深さ方向に薄層要素に分割したモデルとする。

$x=0$ 面上を速度 c で移動する円振動数 p の調和点加振力 $\{f_x, f_y, f_z\}e^{ipx}$ を考え、深さ方向 (z 方向) の荷重分布を $q(z)$ とすると、外力は以下のように表すことができる。



(a) 観測波形



(b) 解析波形

図-20 観測波形と薄層法により得られた変位応答波形との比較

i ($i=1,2,3$ は x, y, z に対応) 方向の外力は,

$$f_i = f_i(q(z)) \delta(x) \delta(y - ct) e^{i\omega t} \quad (A1)$$

ここに, $\delta(\cdot)$ はDiracのデルタ関数である。この外力に対する, 3次元等質等方弾性体の支配方程式は,

$$\sigma_{ji,j} - \rho \ddot{u}_i + f_i(q(z)) \delta(x) \delta(y - ct) e^{i\omega t} = 0 \quad (A2)$$

と書ける。ここに, ρ は質量密度であり総和規約を用いている。時間 t と座標 x, y に関してフーリエ変換すると,

$$\bar{A}(k_x, k_y, \omega) = \iiint_{-\infty}^{\infty} A(x, y, t) e^{-i\omega t} e^{ik_x x} e^{ik_y y} dt dx dy \quad (A3)$$

$$-ik_x \bar{\sigma}_x - ik_y \bar{\tau}_{xy} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\tau}_{zx} + \rho \omega^2 \bar{u} + 2\pi f_x(q(z)) \delta(\omega - p - k_y c) = 0$$

$$-ik_y \bar{\sigma}_y - ik_x \bar{\tau}_{xy} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{\tau}_{yz} + \rho \omega^2 \bar{v} + 2\pi f_y(q(z)) \delta(\omega - p - k_y c) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \bar{\sigma}_z - ik_x \bar{\tau}_{zx} - ik_y \bar{\tau}_{yz} + \rho \omega^2 \bar{w} + 2\pi f_z(q(z)) \delta(\omega - p - k_y c) = 0 \quad (A4)$$

上3式に仮想変位を乗じて各層(層厚 h)ごとに z 方向に線積分し, 部分積分を施すと, 下式が得られる。

$$\begin{aligned} & \int_0^L [\delta \bar{u}_x \bar{\sigma}_x + \delta \bar{v}_y \bar{\sigma}_y - \delta \bar{w}_z \bar{\sigma}_z + (\delta \bar{u}_y + \delta \bar{v}_x) \bar{\tau}_{xy} \\ & + (-\delta \bar{v}_z + \delta \bar{w}_y) \bar{\tau}_{yz} + (-\delta \bar{u}_z + \delta \bar{w}_x) \bar{\tau}_{zx} \\ & + \rho \omega^2 (\delta \bar{u} \bar{u} + \delta \bar{v} \bar{v} + \delta \bar{w} \bar{w}) \\ & + 2\pi \delta(\omega - p - k_y c) q(z) (\delta \bar{u} f_x + \delta \bar{v} f_y + \delta \bar{w} f_z)] dz = 0 \end{aligned} \quad (A5)$$

上式の変位を各薄層の上下面の節点変位 $\{\bar{\xi}\}$ を用いて線形補間し,

$$\begin{Bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \frac{z}{h}) I_3 & (\frac{1}{2} + \frac{z}{h}) I_3 \end{bmatrix} \{\bar{\xi}\} \quad (A6)$$

ここに $\{\bar{\xi}\} = (\bar{u}_1 \bar{v}_1 \bar{w}_1 \bar{u}_2 \bar{v}_2 \bar{w}_2)'$

ラムの定数 λ, μ を用いた応力-歪み関係を利用するこ

とにより, 波数 k に関する連立代数方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & (k_x^2 [a] + k_x (k_y [b_1] + [b_2]) + k_y^2 [c] + k_y [d] + [e] - \omega^2 [m]) \{\bar{\xi}\} \\ & = 2\pi \delta(\omega - p - k_y c) \{f\} \end{aligned} \quad (A7)$$

ここに上式中の各行列は,

$$[a] = \frac{h}{6} \begin{bmatrix} 2(\lambda+2\mu) & 0 & 0 & \lambda+2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & \mu \\ \lambda+2\mu & 0 & 0 & 2(\lambda+2\mu) & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix}$$

$$[b_1] = \frac{h}{6} \begin{bmatrix} 0 & 2(\lambda+\mu) & 0 & 0 & \lambda+\mu & 0 \\ 2(\lambda+\mu) & 0 & 0 & \lambda+\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda+\mu & 0 & 0 & 2(\lambda+\mu) & 0 \\ \lambda+\mu & 0 & 0 & 2(\lambda+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[b_2] = \frac{i}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(\lambda-\mu) & 0 & 0 & \lambda+\mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda-\mu & 0 & 0 & \lambda+\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\lambda+\mu) & 0 & 0 & \lambda-\mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(\lambda+\mu) & 0 & 0 & -(\lambda-\mu) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[c] = \frac{h}{6} \begin{bmatrix} 2\mu & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 2(\lambda+2\mu) & 0 & 0 & \lambda+2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & \mu \\ \mu & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & \lambda+2\mu & 0 & 0 & 2(\lambda+2\mu) & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
[\mathcal{A}] &= \frac{i}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\lambda-\mu) & 0 & 0 & \lambda+\mu \\ 0 & \lambda-\mu & 0 & 0 & \lambda+\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\lambda+\mu) & 0 & 0 & \lambda-\mu \\ 0 & -(\lambda+\mu) & 0 & 0 & -(\lambda-\mu) & 0 \end{bmatrix} \\
[\mathcal{E}] &= \frac{1}{h} \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & -\mu & 0 \\ 0 & 0 & \lambda+2\mu & 0 & 0 & -(\lambda+2\mu) \\ -\mu & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & -(\lambda+2\mu) & 0 & 0 & \lambda+2\mu \end{bmatrix} \\
[\mathcal{M}] &= \frac{\rho h}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (A8)
\end{aligned}$$

である。ここで、下方の半無限性を表現するために薄層底面境界として粘性境界を導入する場合には、最下層の薄層の $[\mathcal{E}]$ に以下の行列を加える必要がある。

$$[\mathcal{E}] = [\mathcal{E}] + \begin{bmatrix} O_3 & & \\ i\omega\rho V_s & 0 & 0 \\ 0 & i\omega\rho V_s & 0 \\ 0 & 0 & i\omega\rho V_p \end{bmatrix} \quad (A9)$$

ここに、 ρ , V_s , V_p は薄層底面以深に続く地盤の質量密度、S波速度、P波速度である。また、(A7)式中の等価節点外力 $\{f\}$ は層境界に外力が作用する場合には当該の層節点自由度のみに値を有するベクトルとなる。

今、(A7)式を全薄層について加算すると、

$$\begin{aligned}
[\mathcal{A}] &= \sum_{\text{elem}} [\mathcal{A}] \quad [\mathcal{B}] = \sum_{\text{elem}} (k_y [\mathcal{B}_1] + [\mathcal{B}_2]) \\
[\mathcal{C}] &= \sum_{\text{elem}} (k_y [\mathcal{C}] + k_y [\mathcal{A}] + [\mathcal{E}] - \omega^2 [\mathcal{M}]) \\
\{q\} &= \sum_{\text{elem}} \{f\} \quad (A10)
\end{aligned}$$

を用いることにより、全体系の方程式は、

$$(k_x^2 [\mathcal{A}] + k_x [\mathcal{B}] + [\mathcal{C}]) \{\xi\} = 2\pi \delta(\omega - p - k_y c) \{q\} \quad (A11)$$

となる。上式を減階表現し、行列操作を行うと、

$$\begin{aligned}
-k_x \begin{Bmatrix} \{\xi\} \\ k_x \{\xi\} \end{Bmatrix} + [V] \begin{Bmatrix} \{\xi\} \\ k_x \{\xi\} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -2\pi \delta(\omega - p - k_y c) [\mathcal{A}]^{-1} \{q\} \end{Bmatrix} \\
[V] &= \begin{bmatrix} 0 & [I_3] \\ -[\mathcal{A}]^{-1} [\mathcal{C}] & -[\mathcal{A}]^{-1} [\mathcal{B}] \end{bmatrix} \quad (A11)
\end{aligned}$$

が得られる。上式の右辺をゼロとすることにより固有

値問題に帰着させると、 $6n$ 個 (n : 薄層境界の数) の固有値と固有ベクトルが得られる。固有値と固有ベクトルは共役な対をなすので、これらを、

$$[k] = \begin{bmatrix} k_x^1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & k_x^{3n} \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} [k] & 0 \\ 0 & [k^*] \end{bmatrix} \quad (A12)$$

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} [\varphi] & [\varphi^*] \\ [\varphi][k] & [\varphi^*][k^*] \end{bmatrix}$$

と表すことができる。ここに、 $[K]$ はスペクトル行列、 $[\Phi]$ はモード行列である。ここで、

$$\begin{Bmatrix} \{\xi\} \\ k_x \{\xi\} \end{Bmatrix} = [\Phi] \{\bar{\alpha}\} = \begin{bmatrix} [\varphi] & [\varphi^*] \\ [\varphi][k] & [\varphi^*][k^*] \end{bmatrix} \{\bar{\alpha}\} \quad (A13)$$

のように層境界変位をモード座標に座標変換し、(A11)式の左から $[\Phi]^{-1}$ を乗じると、

$$-k_x \{\bar{\alpha}\} + [K] \{\bar{\alpha}\} = [\Phi]^{-1} \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -[\mathcal{A}]^{-1} \{q\} \end{Bmatrix} \quad (A14)$$

と左辺の係数行列が非連成化される。上式の右辺は、ブロック行列の逆行列の性質を利用することにより、

$$\begin{aligned}
&[\Phi]^{-1} \begin{Bmatrix} \{0\} \\ -[\mathcal{A}]^{-1} \{q\} \end{Bmatrix} \\
&= \begin{Bmatrix} [\varphi]^{-1} ([\varphi^*][k^*][\varphi^*]^{-1} - [\varphi][k][\varphi]^{-1})^{-1} [\mathcal{A}]^{-1} \{q\} \\ -[\varphi^*]^{-1} ([\varphi^*][k^*][\varphi^*]^{-1} - [\varphi][k][\varphi]^{-1})^{-1} [\mathcal{A}]^{-1} \{q\} \end{Bmatrix} = \{Q\} \quad (A15)
\end{aligned}$$

と展開される。従って、 s 次の固有値 k_x^s を用いることによって、一般化変位は、

$$\bar{\alpha}_s = \frac{Q_s}{k_x^s - k_x} \quad \bar{\alpha}_{s+3n} = \frac{Q_{s+3n}}{k_x^{s*} - k_x} \quad (A16)$$

と得られる。結果として層境界変位は、(A13)式より、

$$\{\xi\} = \sum_{s=1}^{3n} \left(\{\varphi\}_s \frac{Q_s}{k_x^s - k_x} + \{\varphi^*\}_s \frac{Q_{s+3n}}{k_x^{s*} - k_x} \right) \quad (A17)$$

と誘導される。上式を k_x に関してフーリエ逆変換し、留数の定理を適用すると、

$$\begin{aligned}
&\{\xi(x, k_y, \omega)\} \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{s=1}^{3n} \left(\{\varphi\}_s \frac{Q_s}{k_x^s - k_x} + \{\varphi^*\}_s \frac{Q_{s+3n}}{k_x^{s*} - k_x} \right) e^{-ik_x x} dk_x \\
&= \frac{1}{2\pi} \sum_{s=1}^{3n} \left(\{\varphi\}_s Q_s (-2\pi i e^{-k_x^s x}) + \{\varphi^*\}_s Q_{s+3n} (2\pi i e^{-k_x^{s*} x}) \right) \\
&= -i \begin{bmatrix} [\varphi][E] & [\varphi^*][E^*] \end{bmatrix} \{Q\}
\end{aligned}$$

$$[E] = \begin{bmatrix} e^{-ik_x^1 x} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & e^{-ik_x^{3n} x} \end{bmatrix} \quad [E^*] = \begin{bmatrix} e^{-ik_x^{1*} x} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & e^{-ik_x^{3n*} x} \end{bmatrix} \quad (A18)$$

が得られる。上式に(A15)式を代入して展開すると、

$$\{\bar{\xi}(x, k_y, \omega)\} = -2\pi i \delta(\omega - p k_y c) \{H(x, k_y, \omega)\} \quad (A19)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \{H(x, k_y, \omega)\} = & \{[\varphi][E][\varphi]^{-1} + [\varphi^*][E^*][\varphi^*]^{-1}\} \\ & \times \{[\varphi^*][k^*][\varphi^*]^{-1} - [\varphi][k][\varphi]^{-1}\}^{-1} [\varphi]^{-1} f \end{aligned}$$

となる。求めるべき節点変位は、上式を座標 y と時間 t に関してフーリエ逆変換を行うことによって得られる。

$$\{\xi(x, y, t)\} = \frac{i}{2\pi c} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ H\left(x, \frac{\omega - p}{c}, \omega\right) \right\} e^{-i \frac{\omega - p}{c} y} e^{i \omega t} d\omega \quad (A20)$$

以上に述べた解析手法の検証のために、 $k_y = 0$ とすることにより、既往の解が得られている半無限一様地盤の地表に線加振が作用する問題の解²²⁾と比較する。解析に用いたモデル及び諸元は図-A1の通りであり、薄層数21、せん断波速度500m/s、ポアソン比0.4、単位体積重量2.0t/m³、減衰定数0.05とした。

解析結果を図-A2に示す。一例として、地表に上下方向線加振が作用する問題を考え、地表面上の上下変位応答を求める。各結果は加振点からの距離 r の地点における変位を $1/\pi\mu$ で規準化したものである。薄層解と解析解は良く一致しており、本解析法は十分な精度を有していると判断できる。

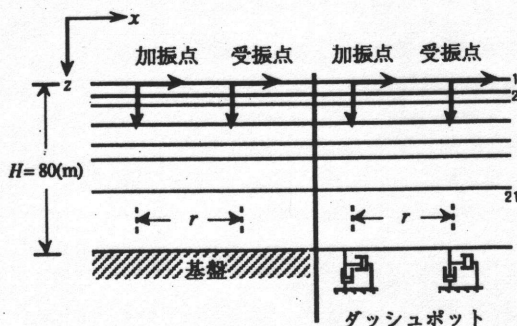


図-A1 解析モデル

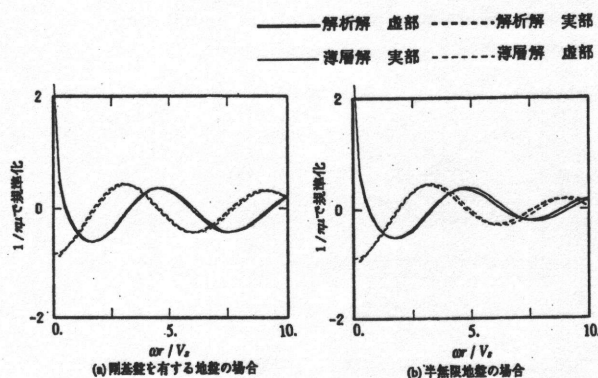


図-A2 薄層点加振解の検証

参考文献

- 1) 和泉正哲, 勝倉裕 : 地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第327号, pp.20-27, 1983
- 2) 岩崎敏男, 若林進 : 道路交通振動の測定法"土と基礎", Vol.27, No.8, pp.47-53, 1979
- 3) 時田保夫 : 道路交通振動の実体について, 日本建築学会環境工学委員会, 環境振動分科会83-1資料, pp.1-4, 1983
- 4) 成瀬治典 : 道路振動の伝播について, 日本建築学会環境工学委員会, 環境振動分科会83-1資料, pp.5-8, 1983
- 5) 成田信之 : 道路交通振動の予測法について, 日本建築学会環境工学委員会, 環境振動分科会83-1資料, pp.9-12, 1983
- 6) 成瀬治典, 宮野明彦 : 道路交通機関による環境振動の実体調査結果とその予測の一方, 日本建築学会論文報告集, 第344号, pp.174-181, 1984
- 7) 建設省土木研究所 : 交通振動に関する試験調査報告書, 第2263号, 1985
- 8) 谷口栄一, 沢田健吉 : 道路交通振動の距離減衰について, 第13回土質工学研究発表会, pp.1085-1088, 1973
- 9) 森尾敏, 吉川実 : 交通振動の伝播特性, 土と基礎, Vol.135, No.6, pp.57-62, 1987
- 10) 本田秀行, 城戸隆良, 梶川康男, 小堀為雄 : 道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査, 土木学会論文報告集, 第315号, pp.149-155, 1981
- 11) 横山功一, 井上順三, 永原隆 : 路面段差部に作用する自動車衝撃荷重の特性, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.757-764, 1989
- 12) 環境庁大気保全局特殊公害課 : 振動規制技術マニュアル, 1977
- 13) 奈良岡浩二, 福和伸夫, 渡辺宏一, 塩谷清人, 箕輪親宏 : 大型振動台加振時の周辺地盤の振動性状と振動抑制に関する実験・解析的研究, 構造工学論文集, Vol.35B, pp.195-204, 1989
- 14) 例えば, Ashigara Valley Blind Prediction Test Part 3 Data on Microtremors, Japanese National Working Group on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1991
- 15) 川谷充郎, 西山誠治 : 走行車両による道路橋の動的応答解析, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第16巻, pp.231-236, 1992
- 16) 梶川康男, 村田幸一 : 走行荷重による高架橋の環境振動シミュレーション解析, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第16巻, pp.243-248, 1992
- 17) Hanazato, T., Ugai, K., Mori, M. and Sakaguchi, R. : Three-Dimensional Analysis of Traffic-Induced Ground Vibrations, J. Geotech. Eng., ASCE, Vol.117, No.8, pp.1133-1151, 1991
- 18) 沖田正夫, 浅野三男, 福和伸夫, 多賀直恒 : 移動加振源による波動伝播性状に関する解析的研究(その1)及び(その2), 日本建築学会東海支部研究報告, pp.201-208, 1992
- 19) 福和伸夫, 梅村建次, 多賀直恒 : 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—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第441号, 1992
- 20) Eason, G. : The Stresses Produced in a Semi-Infinite Solid by a Moving Surface Force, Int. J. Engng. Sci., Vol.2, pp.581-609, 1965
- 21) Gakenheimer, D., C. and Miklowitz, J. : Transient Excitation of an Elastic Half Space by a Point Load Traveling on the Surface, J. Appl. Mech., ASME, pp.505-515, 1969
- 22) 中井正一, 福和伸夫 : 2次元地盤地表面上剛基礎の動特性 境界要素法による動的擬似3次元効果に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第344号, 1984, pp.81-92