

高架道路から伝播する交通振動における表面波の寄与率

On the participation factor of the surface wave to the ground vibrations
propagating from the urban viaduct

徳永法夫*、森尾 敏**、家村浩和***、西村 昂****

Norio Tokunaga, Satoshi Morio, Hirokazu Iemura and Takasi Nisimura

* 阪神高速道路公団 神戸第二建設部 (〒650-0044 神戸市中央区東川崎町1-3-3)

** 工博 (株)奥村組 電算センター (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

*** 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

**** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558-0022 大阪市住吉区杉本三丁目3-138)

With the expansion of the elevated road network in urban areas, there has been a strong demand for reduction of traffic-induced vibrations. However, an effective vibration reduction technique is not yet established. We have investigated the effectiveness of EPS(expanded polystyrol) underground wall in reducing traffic-induced vibrations by conducting model vibration tests, in-site vibration tests and FEM simulation analyses. In this study, a numerical method is presented for computing the participation factor of Rayleigh wave to the ground vibrations. By using this method, the influences of the depth and the location of EPS underground wall to the participation factor of Rayleigh wave are examined.

Key Words : participation factor, surface wave, Rayleigh wave, body wave, FEM

1. まえがき

近年、都市内の高速道路網の拡充に伴い、高架道路から地盤に伝播する交通振動の軽減化が強く望まれており、多くの関係機関で種々の対策がとられてきた¹⁾。これらは、振動源対策、伝播経路対策、受振点対策に分類され、模型実験、数値解析、現場実験を含めて様々な面からの検討が加えられている。しかしながら、個々の高架構造形式の違い、地盤条件の違い等が複雑に関与し、一般化された振動軽減化手法が確立されるまでには至っていない。

筆者ら^{2),3)}は、模型振動実験、現場実験、FEMシミュレーション解析を通して、伝播経路対策の範疇に含まれるEPS(発泡スチロール)地中防振壁の交通振動低減効果について研究を進めてきた。この結果、深さ8mのEPS地中壁は10Hz付近以上の高振動数域で平均5dB程度の振動加速度レベルVALの低減が期待できることを示した。また、橋脚近傍では高架橋ジョイント部からの衝撃的な振動に起因する高振動数成分が卓越し、この波動はP波が主体であること、一方、橋脚中心からの距離が増加するのに伴い、若干の時間遅れを伴ってS波が、その後さらに遅れてレイレイ波基本モードが卓越することを明らかにした。

上述のように、高架高速道路で発生した交通振動は実体波(P波、S波)および表面波(レイレイ波、ラブ波)として地盤を伝播していく。実体波と表面波を区別し、高架橋からの距離に応じて両者の寄与がどう変化するかを調べることは、交通振動の距離減衰を考察する上で、また、地中防振壁の位置と深さを決める上で意義あることと考えられる。時松ら⁴⁾は3次元多層地盤の地表面鉛直加振時におけるレイレイ波と実体波の寄与率を検討するに際し、分岐線積分法を用いている。しかし、この方法を高架橋・杭基礎と地盤の連成問題に適用することは難しい。一方、道路交通振動のシミュレーションは一般にFEM応答解析により行われるが、薄層要素法を含めたこの種の解析では実体波と表面波を区別することが困難である。そこで本研究では、2次元FEM応答解析において実体波と表面波を区別し、両者の寄与率を定量的に評価する手法を提案する。この手法は、有限要素領域内の鉛直断面において、フーリエ変位振幅分布を一般化されたレイレイ波^{5),6)}の固有モードの重ね合わせで表現し、各モードの寄与率を算定するものである。次に、作成したレイレイ波の固有値解析プログラムの検証を行った後、本手法を成層2層地盤の地表部および地中部を鉛直方向に加振する問題に適用し、表面波の寄与率の違いを調べる。さらに、阪神高速道路公団の一般的構造であ

る杭基礎・T型単柱式橋脚を対象に防振壁の位置と深さを変えた解析を実施し、表面波の寄与率がどう変化するかを調べる。

2. 解析方法

レイレイ波をFEM(2次元平面ひずみ場)で取り扱うに際し、固有モード $\{V\}$ が各地層内で線形に変化すると仮定する離散化された考え方を用いる。従って、一般化されたレイレイ波の変位 $\{\delta\}$ は次式で表される。

$$\{\delta\} = \alpha \{V\} e^{i(\omega t - kx)} \quad (1)$$

ここに、 i は虚数単位、 x は水平方向座標、 ω は角振動数、 k は x 方向に伝播する波動の波数、 α は固有モードに関する係数(刺激係数)である。式(1)の仮定の下で、レイレイ波の特性方程式は式(2)で表される固有値問題に帰着する^{5), 6)}。

$$([A]k^2 + i[B]k + [G] - \omega^2[M])\{V\} = \{0\} \quad (2)$$

ここで、 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[G]$ は剛性マトリックス、 $[M]$ は質量マトリックスであり、鉛直方向の要素分割数を n とすれば、これらのマトリックスはすべて $2n \times 2n$ の次元である。

式(2)から、深さ方向の地盤構造が決まれば、角振動数 ω での固有値 K_s と固有ベクトル $\{V\}_s$ が得られる。ここに、添字 s は s 次のモード形を表し、 $s=1 \sim 2n$ である。以下、固有値 K_s が実数、複素数、虚数およびゼロの場合、固有ベクトル $\{V\}_s$ をそれぞれ実数モード、複素モード、虚数モードおよびゼロモードと呼ぶ。このうち、水平方向に伝播するモードは実数モードと複素モードであり、虚数モードとゼロモードは伝播しない。また、式(2)に $k=0$ を代入すると通常の実体波(P波とS波)の固有値問題に帰着する。すなわち、ゼロモードはP波またはS波の佇立した波形(鉛直伝播波動)に対応し、両波の固有振動数付近において現れる。

実数モードは正常なレイレイ波と呼ばれ、非減衰のとき(減衰定数 $h=0$)、水平成分が実数、鉛直成分が虚数となる性質がある。このことは、水平成分と鉛直成分の位相が90度ずれることを意味し、両者が同符号のとき粒子軌跡の回転方向は反時計回り、逆符号のとき時計回りである。また、実数モードの固有値 k_s はレイレイ波の伝播特性を表し、振動数を f とすれば位相速度 C は式(3)、群速度 C_g は式(4)で表される。

$$C = 2\pi f / k_s \quad (3)$$

$$C_g = 2\pi df / dk_s \quad (4)$$

式(2)は、地盤-構造物連成系地震応答解析プログラムFLUSH⁷⁾の境界処理(エネルギー伝達境界)にも使用されている。森地ら⁸⁾は、通常の2次元FEM固有値解析で得られる固有振動モードにおける水平方向の節の数から波数と波長を求め、理論分散曲線との比較からレイ

レイ波と実体波の識別を行っているが、式(2)はこれを1次元問題として取り扱う。本方法は、積層構造にレイレイ波が伝播する場合の分散性の解析、チャンネル波の解析等を精度良く行うことができ、解析の容易さ、汎用性から表面波の一般的解析手法として優れたものと考えられる^{9), 10)}。さらに、剛性マトリックス $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[G]$ の中に複素剛性として容易に粘性減衰を導入できるという利点があり、粘性減衰に伴う分散特性の評価が可能である。ただし、FEM固有の問題として、波動の波長に応じて要素分割を密にする必要があること、半無限地盤を正確に表現することが困難であること等の問題がある。

次に、FEM応答解析を行い、加振点からある距離 L 離れた鉛直断面でのフーリエ変位振幅分布 $\{U\}_i$ を求める。 $\{U\}_i$ は、モーダル・マトリックス $[V]$ と刺激係数 $\{\alpha\}$ によって次式で表すことができる。

$$\{U\}_i = \sum_{s=1}^{2n} \alpha_s \{V\}_s = [V] \{\alpha\} \quad (5)$$

上式から、刺激係数 $\{\alpha\}$ は次式で与えられる。

$$\{\alpha\} = [V]^{-1} \{U\}_i \quad (6)$$

ここで、実数モードの次数を i ($i=0 \sim m$)、 V_i は i 次のモード、 α_i は i 次の刺激係数とする。 i 次モードの変位分布 $\{U\}_i$ は式(7)、寄与率 β_i は式(8)で表される。

$$\{U\}_i = \alpha_i \{V\}_i \quad (7)$$

$$\beta_i = |\alpha_i| / \sum_{s=1}^{2n} |\alpha_s| \quad (8)$$

以下、実数モードのうち低次のものから(K_s の大きなものから)順に、基本モード($i=0$)、1次 $\sim m$ 次モード($i=1 \sim m$)と呼ぶ。高次モードには、cut off frequencyが存在するため、 m の数は振動数によって異なる。実数モードの合計であるレイレイ波による変位分布 $\{U_R\}$ は式(9)、寄与率 β_R は式(10)で与えられる。

$$\{U_R\} = \sum_{i=0}^m (V_i \cdot \alpha_i) \quad (9)$$

$$\beta_R = \sum_{i=0}^m \beta_i \quad (10)$$

実数モード以外のモードを、すべてリーキングモード¹²⁾を含めた実体波によるものと考え、実体波の寄与率 β_B は式(11)で与えられる。

$$\beta_B = 1 - \beta_R \quad (11)$$

なお、式(8)はモード全体の寄与率を表すと考えられるが、交通振動においては、地表面の鉛直方向変位に関する寄与率が重要である。このため、式(7)の変位 $\{U\}_i$ における地表面の鉛直方向変位を U_{zi} とすると、地表面鉛直変位に関する寄与率 β_{zi} は式(12)で定義される¹¹⁾。

$$\beta_{zi} = |U_{zi}| / \sum_{s=1}^{2n} |U_{zs}| \quad (12)$$

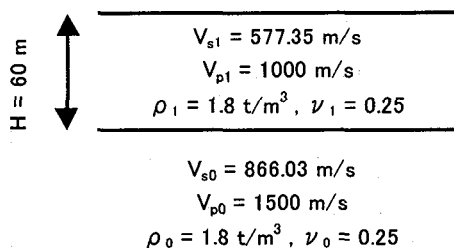


図-1 レイレイ波の固有値解析の検証

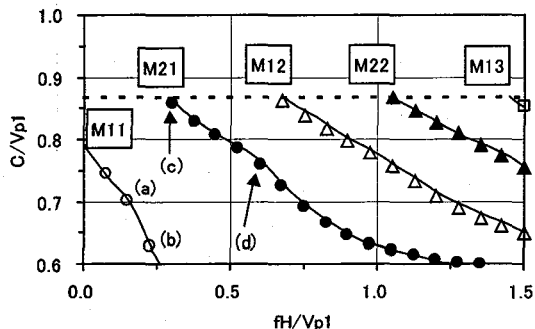


図-2 位相速度Cの分散曲線

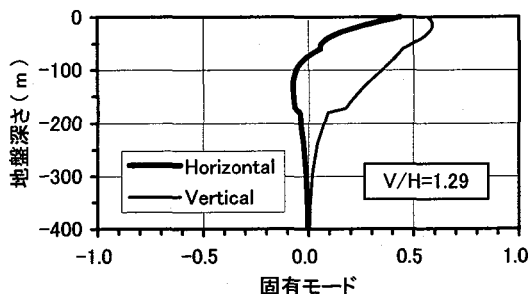
3. レイレイ波の固有値解析の検証

ここでは、波動論による理論分散曲線との比較から、作成した固有値解析プログラム(式(2))の検証を行う。

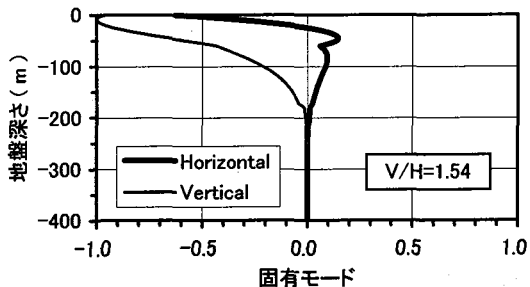
図-1に示すように、層厚 $H=60\text{m}$ の表層地盤の下に弾性波速度の速い基盤層を有する2層構造地盤を想定した。基盤層は半無限に続くものと仮定した。ここで、図中の V_s はS波速度、 V_p はP波速度、 ρ は質量密度、 ν はポアソン比で、添字0は基盤層、1は表層地盤を表す。減衰定数は、ほぼゼロ($h=0.001$)とした。FEM要素分割は、 30Hz のS波波長の $1/4$ 以下をめどに、表層地盤を15分割($4\text{m} \times 15=60\text{m}$)、基盤層を15分割($8\text{m} \times 15=120\text{m}$)した。また、半無限地盤を表現するために基盤層の下側に層厚 $D(D=1.5\lambda)$ で基盤層と同じ物性を有する層(8分割)を付加した。ここに、 λ は対象とする振動数におけるS波の波長である。

図-2に位相速度 C の分散曲線を示す。横軸は無次元振動数 $f^* (=fH/V_{p1})$ 、縦軸は無次元位相速度(C/V_{p1})であり、○、●、△、▲、□印が本解析結果、実線は田治米¹²⁾による理論分散曲線である。レイレイ波の分類にはいくつかの方法があるが¹³⁾、本解析法は田治米が分類したM11からM13に至るモードの分散曲線を正確に表現している。ただし、ここでは実数モードを低次のものから(K_s の実数部が大きいものから) M11、M21、M12、M22、M13としてプロットしており、M11モードは前述の基本モードに対応する。

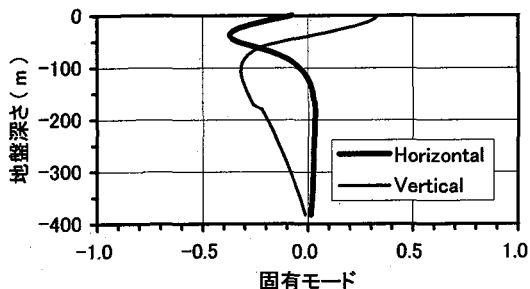
無次元振動数 f^* が0.15および0.225でのM11モードを図-3(a)、(b)に、同じく無次元振動数が0.3および0.6での



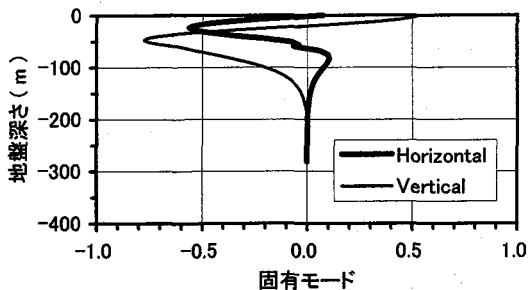
(a) M11モード ($f^*=0.15$)



(b) M11モード ($f^*=0.225$)



(c) M21モード ($f^*=0.3$)



(d) M21モード ($f^*=0.6$)

図-3 M11モードとM21モード

M21モードを同図(c)、(d)に示す。これらは、図-2の中に示した(a)~(d)に対応する。水平成分は固有ベクトル $\{V\}_s$ の実数部を、鉛直成分は虚数部をプロットした。図(a)、(b)のM11モードには地表面での鉛直振幅と水平振幅の比 V/H を併記している。 V/H は、粒子軌跡の縦軸/横軸の比を表し、M11モードの粒子軌跡はすべて半時計回りの縦長の楕円である。図-3から、振動数の増加に伴い地盤の浅い部分を反映した変形モードになること、高次のモードほど変形が地盤の深い部分まで反映されることが分かる。

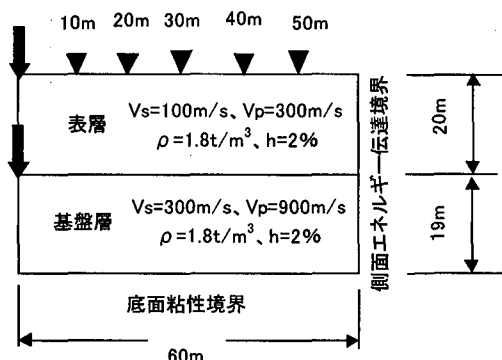


図-4 2層構造地盤

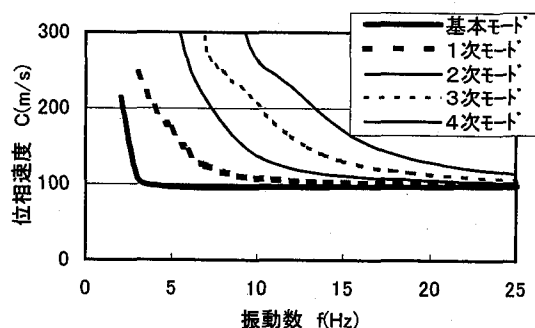


図-5 位相速度Cの分散曲線

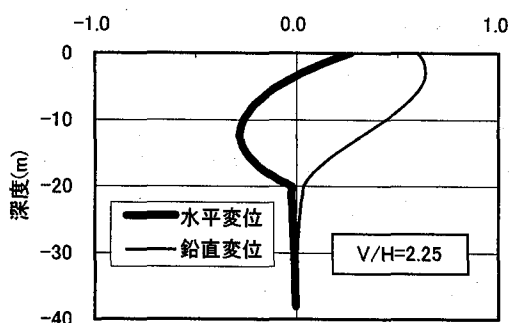


図-6 基本モード (2.83Hz)

4. 2層構造地盤でのレイレイ波の寄与率

4.1 解析条件

図-4に示すように層厚20mの表層地盤の下に弾性波速度の速い基盤層(層厚19m)を有する成層2層地盤の地表部および地中部を鉛直方向に加振する問題を考える。地表部での鉛直加振は、高架橋からの交通振動がフーチング近傍から放射されることを、地中部での加振は支持層まで根入れされた杭の先端付近から放射されることを想定したものである。なお、P波速度 V_p はS波速度 V_s の3倍、減衰定数は $h=0.02$ とした。

解析最大振動数を30Hzとし、要素厚は30HzのS波波長の1/4以下とした。モデル周辺の境界条件は、モデルの対称性を考慮して加振点側の左側側面は鉛直ローラとした。右側側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とし、境界からの波動の反射を低減させた。加振点には次

章で高架橋走行車線位置に入力した動的外力(図-14)を直接地盤に与えた。寄与率の計算は加振点から10、20、30、40、50m離れた鉛直断面で行った。対象とした振動数は、スペクトルのピーク振動数である2.83、6.35、9.45、14.45Hzとした。

4.2 解析結果

基本モード、1次～4次モードの位相速度Cの分散曲線を図-5に示す。固有値解析では、半無限地盤を表現するため、3章と同様に基盤層の下に同じ物性を有する厚さD($D=1.5\lambda$)の層を付加している。2.83Hzにおけるレイレイ波基本モードを図-6に示す。表層地盤と基盤層のコントラストがはっきりしているため、教科書¹⁴⁾に出てくるような典型的な基本モードが表れている。

FEM応答計算で得られた最大速度のコンターを図-7に示す。図(a)、(b)は地表加振時の水平および鉛直成分、図(c)、(d)は地中加振時の水平、鉛直成分である。ここで、速度に着目したのは加速度～速度間の変換が振動レベルVLの人体感覚補正(振動数補正)と等価なためである。すなわち、振動公害で重要な指標である振動レベルVLは、加速度よりむしろ速度との相関が高いことによる。地表加振では、加振点から斜め下方に波動が伝播し、基盤層上面で反射した波が再び地表面に至る経路が表れている。地中加振の場合も加振点から斜め上方と下方に波動が伝播しているが、最大振幅は軟弱な表層地盤のほうが大きい。また、表層と基盤層の境界に沿って最大振幅が卓越する傾向がみられる。

地表加振時の最大速度の距離減衰を図-8に示す。図(a)に水平成分、図(b)に鉛直成分の結果を示している。両図とも縦軸は、加振点の最大鉛直速度で規準化しており、水平成分の加振点の値がプロットされていないのは、加振点の水平変位が拘束されていることによる。参考のため、図中に軸対称解析で得られた距離減衰を併記している。2次元解析と軸対称解析との差は3次元的な幾何学的減衰によるものである。図-8(b)の鉛直成分では、10m付近を境にして距離減衰の特性が変わっており、10m以内は実体波が、以遠はレイレイ波が支配的な領域に対応するものと考えられる。

振動数2.83Hzで、加振点からの距離が $L=10$ mおよび $L=20$ mでのフーリエ変位振幅ベクトルを図-9に示す。図(a)に地表加振、図(b)に地中加振時の結果を示しており、それぞれ左側が水平成分、右側が鉛直成分である。これらは、モデル底面(底面粘性減衰を表すダッシュポット上端)に対する相対変位波形をフーリエ変換し、得られた振幅(絶対値)を鉛直断面上に並べたものである。振幅分布を絶対値で表示しているため、特に水平成分では位相の反転が分かりにくい。地表加振時の変位分布は

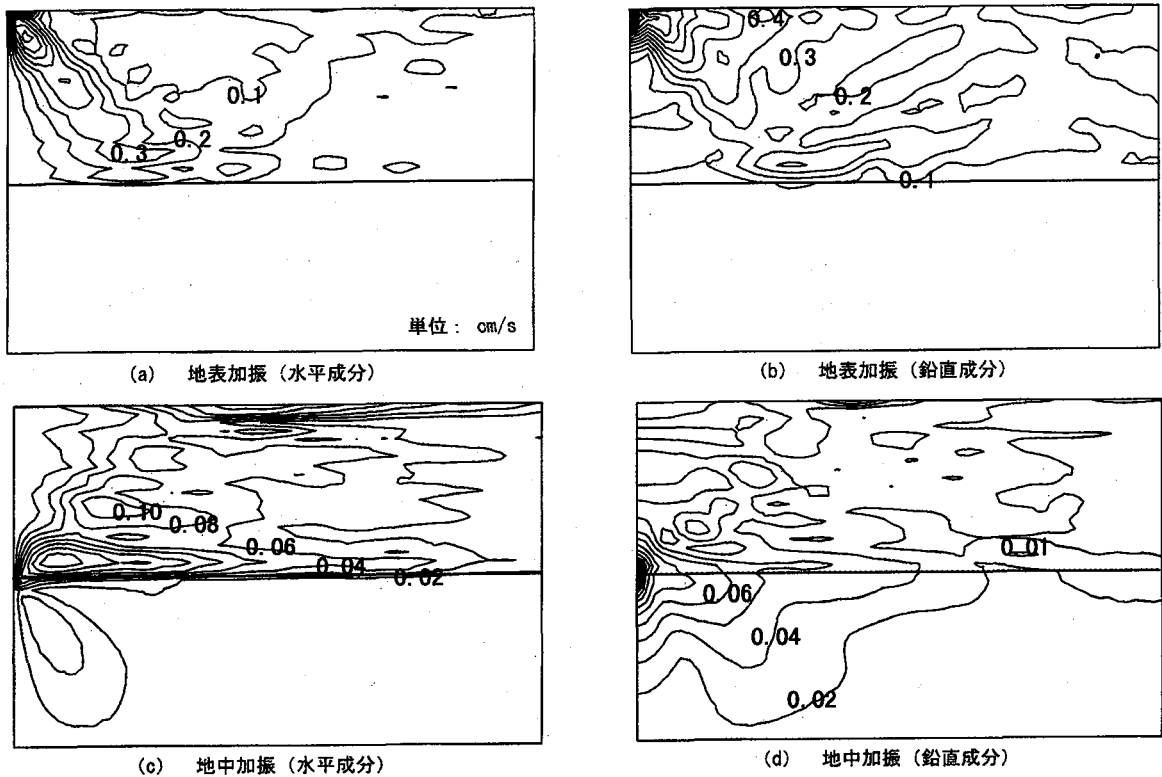


図-7 最大速度のコンター

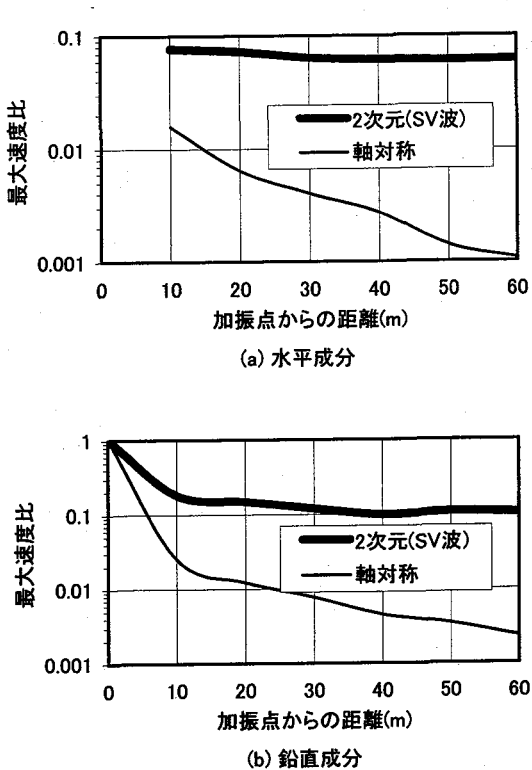


図-8 地表加振時の最大速度の距離減衰

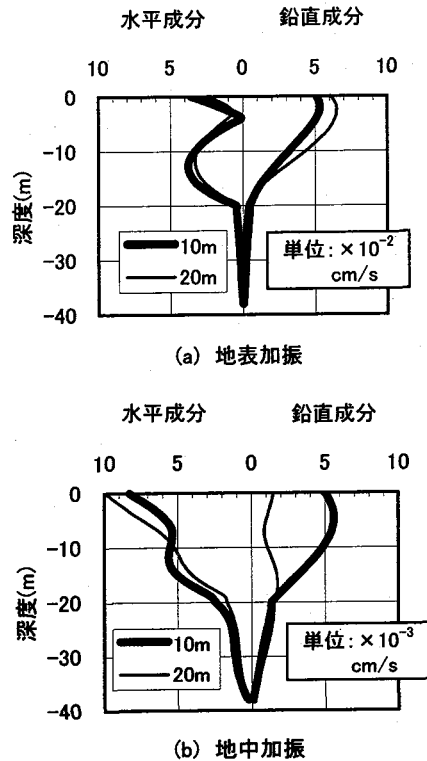


図-9 2.83Hzでのフーリエ変位振幅分布

水平、鉛直成分とも図-6の基本モードに極めて近似しており、基本モードの卓越が伺える。一方、地中加振時は地表加振に比べて振幅値は小さく、振幅分布も基本モードと異なっている。

地表加振時のレイレイ波モード寄与率の空間分布を図

-10(a)に、地中加振時の結果を同図(b)に示す。これらは、式(10)に示した実数モードの寄与率の合計である。加振点から離れるにつれて寄与率は増える傾向にあり、特に地表加振時には橋脚から10m以内で急激に大きくなる。この結果は、図-8(b)の距離減衰と調和的であり、

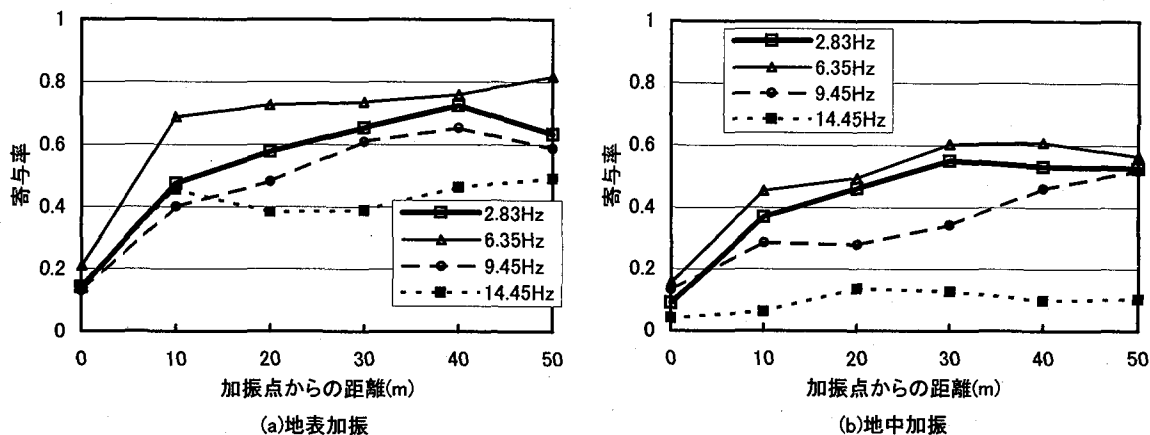


図-10 レイレイ波実数モードの寄与率

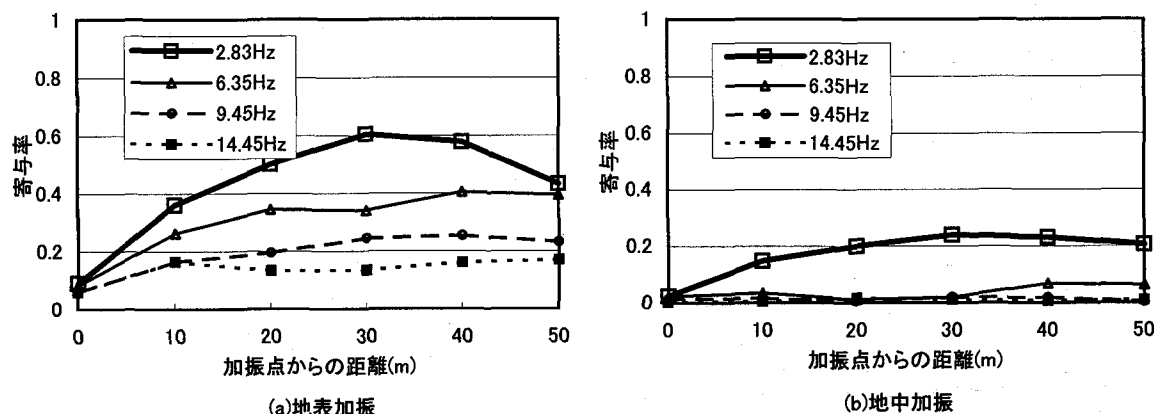


図-11 レイレイ波基本モードの寄与率

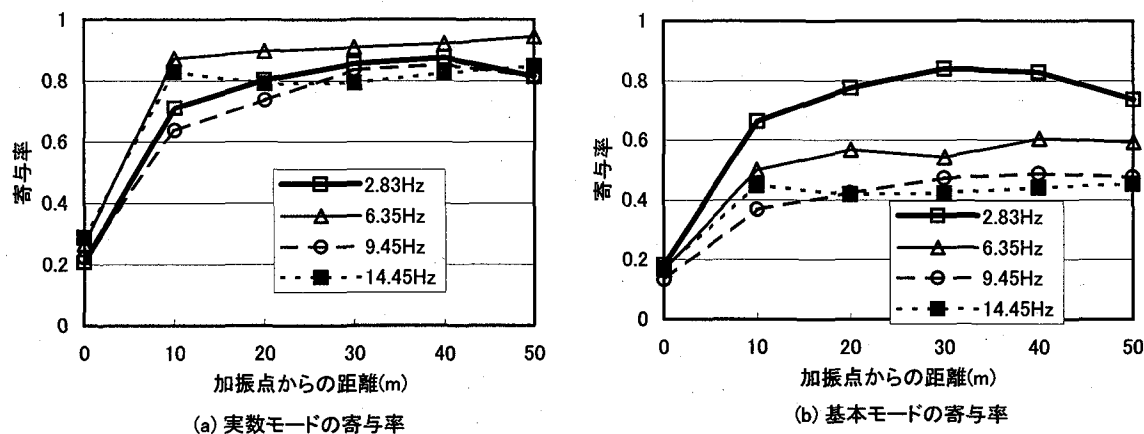


図-12 地表面の鉛直方向変位に関するレイレイ波の寄与率

加振点近傍では実体波が支配的で、距離の増加とともにレイレイ波が卓越することを示している。6.35Hzの寄与率が最も大きい、振動数が高くなるほど寄与率は小さくなる傾向にある。また、地表加振の最大寄与率は0.8程度に対し、地中加振の場合には0.6程度と小さい。これは、地表加振の場合が地中加振よりレイレイ波が発生しやすいことを意味する。

レイレイ波基本モードに対する寄与率を図-11に示す。図-10と同じ傾向であり、加振点から離れるほど、また

低振動数域ほど寄与率大きい。さらに、地中加振の場合、高振動数域で基本モードはほとんど生成されないことが分かる。

図-12に地表加振時の地表面鉛直方向変位に関する寄与率を示す。図(a)は実数モードの寄与率の合計、図(b)は基本モードの寄与率である。両図とも図-10(a)、図-11(a)のモード寄与率より大きくなっており、交通振動で重要な地表面鉛直成分に着目するとレイレイ波の寄与がさらに支配的になることが分かる。

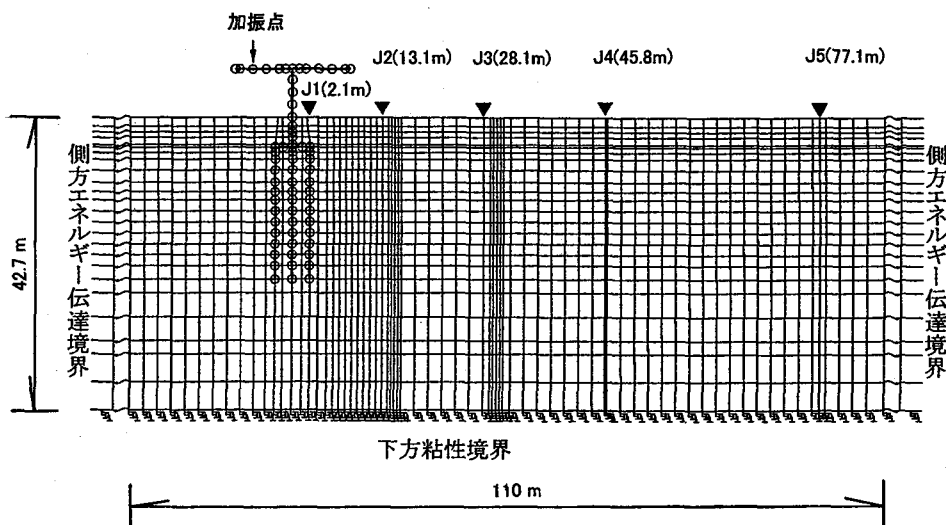


図-13 解析モデル

表-1 地盤条件

表-2 対策工の解析ケース

土質	深度 (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	G (kPa)	h
表土	GL-0.0~-2.1	1.70	100	300	17347	0.02
シルト質細砂	GL-2.1~-5.1	1.80	110	700	22224	0.02
細砂	GL-5.1~-7.7	1.95	130	1600	33628	0.02
シルト質細砂	GL-7.7~-10.9	1.80	130	1600	31041	0.02
細砂	GL-10.9~-13.7	1.95	180	1600	64469	0.02
シルト	GL-13.7~-21.7	1.75	160	1600	45714	0.02
シルト	GL-21.7~-23.7	1.75	240	1600	102857	0.02
細砂	GL-23.7~-25.7	1.95	350	1600	243750	0.02
シルト	GL-25.7~-32.7	1.75	240	1600	102857	0.02
細砂	GL-32.7~-34.7	1.95	350	1600	243750	0.02
シルト	GL-34.7~-42.7	1.75	240	1600	102857	0.02

解析ケース	橋脚からの距離 L(m)	防振壁の深さ H(m)
対策工1	15.0	12.0
対策工2	15.0	24.0
対策工3	30.0	12.0
対策工4	30.0	24.0

表-3 防振壁の材料定数

材料	せん断剛性 G (kPa)	ポアソン比 ν	質量密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)
EPS(D-20)	7100.0	0.1	0.02	0.7
コンクリート(無筋)	1.071×10^7	0.167	2.35	2.0

5. 地中防振壁の設置による表面波寄与率の変化

5.1 解析モデルおよび解析条件

地中防振壁設置前（対策前）の解析モデルを図-13に示す。当該高架橋は阪神高速道路公団の一般的な構造であるT型単柱式橋脚で、基礎は場所打ちベント杭（ $\phi 1\text{m}$ 、 $L=18\text{m}$ 、10本）である。地盤条件を表-1に示す。表層地盤は深さ23.7mで、 $V_s=100\sim 240\text{m/s}$ のシルト層と細砂層の互層地盤である。この下に $V_s=350\text{m/s}$ の基盤層が存在し、杭基礎はこの基盤層まで根入れされている。

本高架橋では試験車両（25tダンプトラック）による走行試験が行われており¹⁵⁾、図中の▼印（J1～J5）はサーボ型加速度計の設置位置である。解析モデルは、計測位置（J1～J5）を含むように水平方向に110m、深さ方向に42.7mの範囲とした。解析領域周辺の境界条件は、両側面をエネルギー伝達境界、底面を粘性境界とした。地盤、防振壁は平面ひずみ要素、構造部材（橋脚、フーチング、杭）は曲げ梁要素を用い、高架橋の水平梁材の主桁位置に上部工質量を付加した。対象とする最大振動数を30Hzとし、各要素厚が1/4波長以下になるように要素を分割した。構造部材については、3次元構造である高架橋を

2次元FEMにモデル化するにあたり、部材の諸定数をフーチングの奥行き幅9.5mで除した等価断面性能を用いた。

解析は、対策前および表-2に示す対策工（対策1～対策4の4ケース）の合計5ケースについて実施した。対策工は地中防振壁の橋脚からの距離と深さをパラメータにしており、要素分割、解析条件はすべて同じである。防振壁は、厚さ1mのEPSの両側に地下水による浮力対策として厚さ0.5mのコンクリートブロックを設置している³⁾。防振壁の材料定数を表-3に示す。

高架橋水平梁材に作用させる入力波形は、J2地点（官民境界）で計測された鉛直方向加速度波形を生じさせる等価節点外力波形を逆算し、これを図中の加振点（走行車線位置）に入力した。等価節点外力の計算方法は、以下の通りである。まず、J2点の加速度／加振力間の伝達関数 $T(f)$ をFEM解析から求め、一方、J2点の実測加速度波形のフーリエスペクトル $A(f)$ を計算する。次に、節点外力のフーリエスペクトル $F(f)$ を $F(f) = A(f) / T(f)$ から求め、このフーリエ逆変換から時刻歴波形 $F(t)$ を得る。このようにして求めた入力波形を図-14に、このフーリエスペクトルを図-15示す。2.83、6.35、9.45、

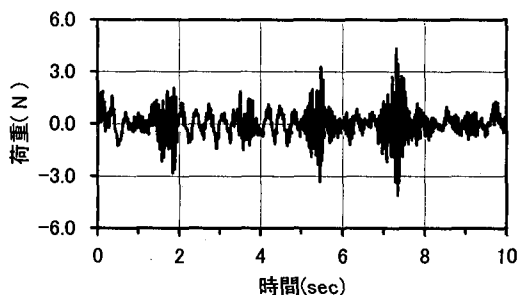


図-14 入力荷重波形

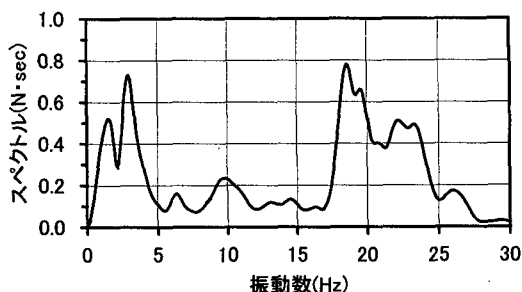


図-15 入力荷重のフーリエスペクトル

14.45および18.85Hzに卓越振動数があり、2.83Hzと18.85Hzのピークが優勢である。前者は試験車両のパネ上振動¹⁶⁾により励起された主桁の曲げ対称1次モードに、後者は高架橋ジョイント部からの衝撃的振動¹⁷⁾によるものと考えられる。

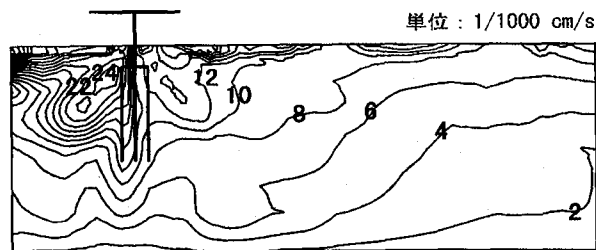
5.2 解析結果

(1) 最大速度分布

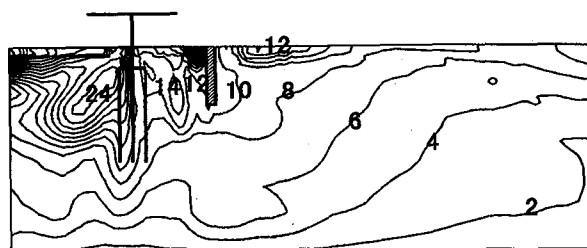
対策前および対策工（対策1～対策4）の最大速度分布（鉛直成分）を図-16に示す。対策前では橋脚の接地部付近から斜め下方30～50°方向に最大振幅の帯が集中しており、図-7の地表加振に比較的近いといえる。ただし、表層地盤と基盤層のコントラストが小さいため、図-7でみられた基盤層上面からの反射波はみられない。また、地表面上には最大振幅の節があり、局所的に最大振幅が大きくなる部分が見られる。対策1～対策4では、防振壁前面の最大振幅は防振壁からの反射波により大きくなり、背面では逆に小さくなる。対策1と対策2および対策3と対策4を比較した場合、防振壁を深くした対策2と対策4の方が防振壁底部からの波動の廻り込みが少なく、振動低減効果は大きい。

(2) 速度パワースペクトルと振動加速度レベル

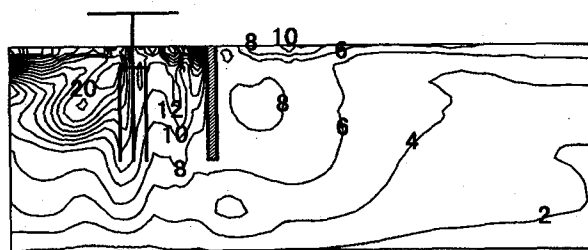
J4地点における鉛直成分の速度パワースペクトルを図-17に示す。図(a)に対策1および対策2、図(b)に対策3および対策4の結果を示しており、それぞれ対策前の結果を併記している。ここに、パワースペクトルの縦軸は対策前の自己相関の最大値（平均パワー）で規準化している。対策1および対策2の場合、10Hz付近以上の高振動数域において遮振効果がみられ、対策2ではより大きな効果が認められる。対策3および対策4の場合には、対



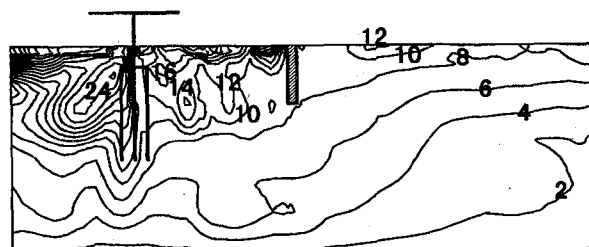
(a) 対策前



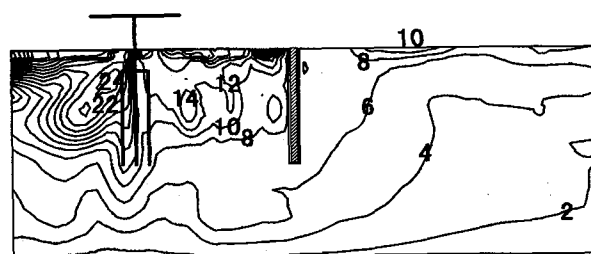
(b) 対策1



(c) 対策2



(d) 対策3

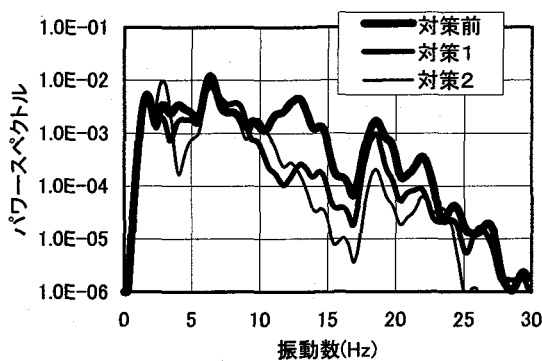


(e) 対策4

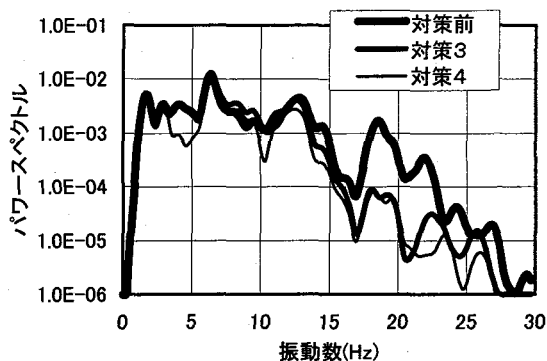
図-16 最大速度のコンター

策1、2より若干高い13Hz付近以上の高振動数域で効果がみられる。

J4地点における対策前に対する振動加速度レベルVAL（鉛直成分）の増減を図-18に示す。同図は、図-17において対策前と対策後のパワースペクトルの平方根の差をdB表示したもので、縦軸の正(+)側は対策前に比べVAL

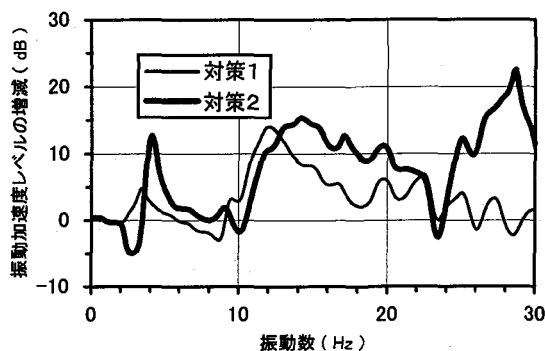


(a) 対策1、対策2のパワースペクトル

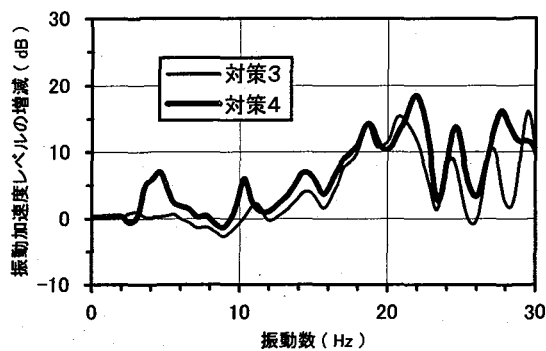


(b) 対策3、対策4のパワースペクトル

図-17 対策前、対策1～対策4のパワースペクトル

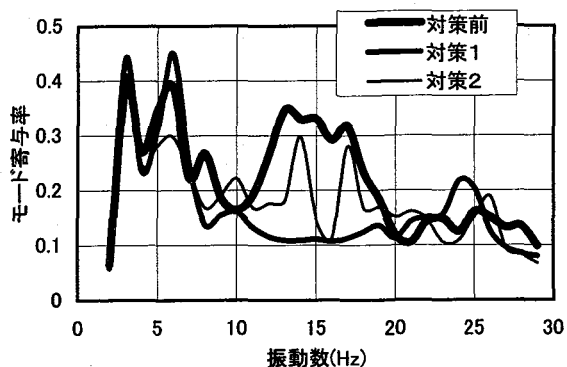


(a) 対策1、対策2

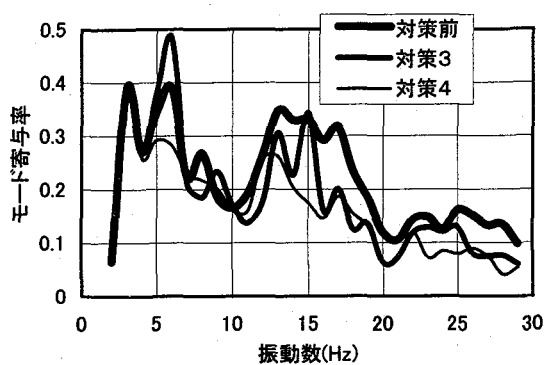


(b) 対策3、対策4

図-18 対策1、2および対策3、4における振動加速度レベルVALの増減



(a) 対策1、対策2



(b) 対策3、対策4

図-19 J4地点におけるレイレイ波実数モードの寄与率

が低下したことを、負(－)側は逆に増加したことを示す。VALの増減は振動数によってばらついているが、対策2の振動低減効果が最も大きく、10Hz付近以上の高振動数域で平均10dB程度の低下が見られる。対策1では、12Hz付近で10dBを越えるVALの低下がみられるが、12Hz以上の高振動数域では振動数の増加に伴い次第に低減効果が低下している。対策3と対策4を比べると、対策4の方が振動低減効果は大きい、その差はあまり大きくない。

(3) レイレイ波のモード寄与率

J4地点におけるレイレイ波実数モードの寄与率を図-19

に示す。図(a)の対策1および対策2の寄与率は10～20Hz付近で大きく低下している。図(b)の対策3、対策4では10～30Hz付近の広範囲の振動数域で寄与率の低下が認められる。図は省略するが、J5地点においてもほぼ同様の結果が得られた。これらレイレイ波の寄与率が低下する振動数域は、図-18の振動加速度レベルVALの低下する振動数域と概ね対応しており、10Hz付近以上の波長の短いレイレイ波が遮断されたことにより防振壁の振動低減効果が表れたものと考えられる。

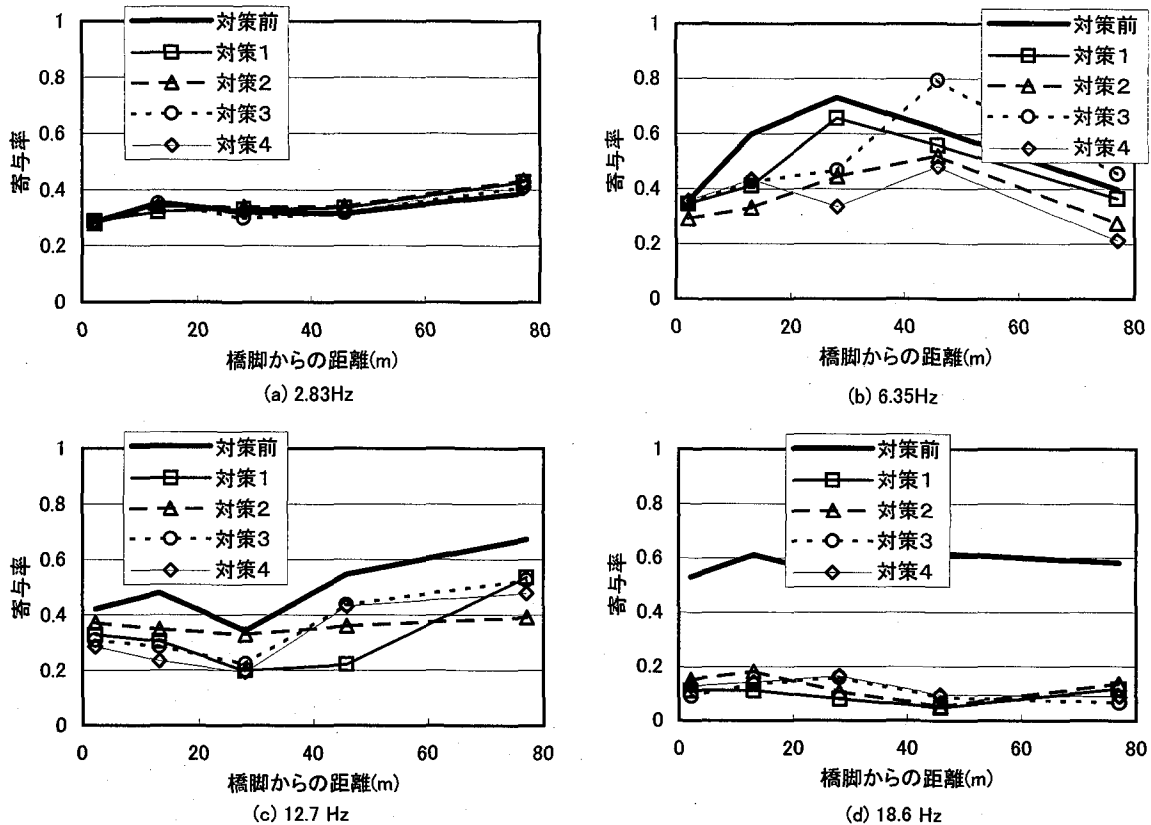


図-20 地表面鉛直変位に関する実数モードの寄与率の空間分布

地表面鉛直変位に関する実数モードの寄与率の空間分布を図-20に示す。図(a)~(d)に、それぞれ2.83、6.35、12.7、18.6Hzの結果を示している。低振動数域の2.83Hzでは対策前および対策1~対策4で寄与率の変化はみられない。これは、防振壁が波長の長い低振動数域のレイレイ波を遮断できないことによる。一方、振動数の増加に伴い対策後の寄与率の低下が大きくなる。特に、18.6Hzでの対策後の寄与率の低下が顕著であり、波長の短い高振動数域のレイレイ波が遮断されたことによると考えられる。

6. まとめ

2次元FEM応答解析において実体波と表面波を区別し、両者の寄与率を定量的に評価する手法を提案した。次に、この手法を成層2層構造地盤の地表部および地中部を鉛直方向に加振する問題に適用した。この結果、加振点からの距離の増加とともにレイレイ波が卓越すること、地中加振より地表加振のほうがレイレイ波が発生しやすいこと、また、低振動数域ほどレイレイ波が発生しやすいことが分かった。

さらに、T型単柱式橋脚を対象に地中防振壁の位置と深さを変えた解析を行い、レイレイ波の寄与率の違いを調べた。この結果、防振壁を深くした対策では防振壁底部からの波動の廻り込みが少なく振動低減効果は大きいこと、特に10Hz付近以上の高振動数域で効果が大きいことが分かった。この振動低減効果は波長の短いレイレイ波が防振壁に遮断されたことによることを明らかにした。

謝辞

本研究は阪神高速道路公団が(財)阪神高速道路管理技術センターの協力を得て設けた道路交通振動対策委員会(委員長:前田幸雄大阪大学名誉教授)の活動の一環として実施したものである。また、レイレイ波寄与率の算定プログラムの作成にあたり、(株)地震工学研究所・宇高竹和博士に貴重な助言をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、竹宮宏和:「環境振動における地盤内の波動伝播と振動対策」、土と基礎、Vol.44、No.9、1996
- 2) 徳永法夫、森尾 敏、家村宏和、西村 昂、早川 清:「EPSの振動低減効果に関する模型振動実験とそのシミュレーション解析」、構造工学論文集、Vol.44A、pp.1705-1716、1998.3
- 3) 徳永法夫、森尾 敏、家村宏和、西村 昂:「EPS地中防振壁の交通振動低減効果に関する研究」、土木学会論文集、No.638/III-49、pp.91-106、1999.12
- 4) 時松考次、田村修次:「3次元多層地盤における地表面鉛直加振の応答変位に対するレイリー波と実体波の寄与」、日本建築学会構造系論文集、第476号、pp.95-101、1995.10
- 5) J.Lysmer:「Lumped mass method for Rayleigh waves」、Bulletin of the Seismological Society of America、Vol.60、

- No.1, pp.89-104, 1970.2
- 6) J.Lysmer and J.A.Drake : 「A Finite Element Method for Seismology Method in Seismological Physics」, Academic Press, Chap.6, pp.180-216, 1973
 - 7) J.Lysmer, T.Udaka, C.Tsai and H.B.Seed : 「FLUSH A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems」, EERC75-30, 1975, 11
 - 8) 森地重暉、大町達夫、年縄 巧、宮井明世 : 「Reyleigh 波として特性づけられる弾性層の振動モードについての基礎的研究」, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.631-644, 1987.3
 - 9) 渡辺勝彦、奥村秀人 : 「2.6.6 積層材を伝播する表面波の有限要素解析」, 複合材料技術に関する研究, 東京大学生産技術研究所・大型共同研究成果概要, 第3号, pp.184-188, 昭和58年9月
 - 10) 森尾 敏、吉川 実 : 「交通振動の伝播特性」, 土と基礎, Vol.35, No.6, pp.57-66, 昭和62年6月
 - 11) 松浦康男、森尾 敏、北角 哲 : 「高架橋から伝播するレイリー波の特徴」, 土と基礎, Vol.38, No.4, pp.49-55, 1990.4
 - 12) 田治米鏡二 : 「表面波の話」, 物理探鉱, 第36巻, 第1号, pp.23-32, 昭和58年2月
 - 13) Sezawa,K.and K.Kanai : 「The M_2 Seismic Waves」, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.13, pp.471-475, 1935
 - 14) 例えば、佐藤泰夫 : 「弾性波動論」, 岩波書店, 1978
 - 15) 「道路交通振動対策検討会に係る振動調査業務 報告書」, 阪神高速道路公団、(株)フジエンジニアリング、平成8年3月
 - 16) 「高架道路橋の交通振動問題とその対策」, (社)日本橋梁建設協会, 昭和60年3月
 - 17) 「高架橋脚および地盤の模型振動実験業務報告書」, 阪神高速道路公団・(株)奥村組技術研究所, 昭和59年3月

(1999年9月17日受付)