

EPS地中防振壁の交通振動低減効果に関する研究

徳永法夫¹・森尾 敏²・家村浩和³・西村 昂⁴

¹正会員 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)

²正会員 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)

³フェロー 工博 京都大学教授 工学部 大学院工学研究科 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー 工博 大阪市立大学教授 工学部 土木工学科 (〒558-0022 大阪市住吉区杉本町3-3-138)

本研究は、EPS(発泡スチロール)地中防振壁の交通振動低減効果に関する有効性を検討したものである。まず、EPS単体の模型振動実験からその動特性(弹性定数、減衰定数)を調べ、更に、1次元砂地盤中にEPSブロックを埋め込んだ模型実験から、この振動低減効果を考察した。

次に、深さ8mのEPS地中壁を施工し、試験車両を用いた走行実験から本工法の効果を検討した。また、地盤を伝播する波動の種類について考察を加えた。更に、地中壁施工中の空溝(3段切梁)の状態でも同様の走行試験を実施し、空溝とEPS壁の効果の違いについて言及した。最後に、2次元FEMを用いたこれらのシミュレーション解析を実施し、実験と解析の比較について考察した。

Key Words : EPS(expanded polystyrol), underground wall, traffic-induced vibration, vibration test, FEM, surface wave, body wave, spectrum analysis

1. 序論

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。阪神高速道路公団²⁾では、振動源対策として動吸振器(TMD)の開発・施工、既設の主桁を連結し、併せて路面を連続舗装するノージoint化工事、および端横補強工事、また、受振点対策として2階建家屋へのTMDの設置等、種々の対策を実施してきた。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、一般化された合理的振動軽減手法が確立されるまでには至っていない。ここに、合理的とは振動低減効果が大きく、永続性があること、施工が容易で、施工費が低廉であることを意味する。

本研究は、伝播経路対策の範疇に含まれるEPS(発泡スチロール)地中防振壁の有効性を検討したものである。地中防振壁の実施工例には、深さ11m、厚さ1m、長さ80mのソイルセメント地中壁の振動低減効果を調べた橋詰らの研究³⁾、新幹線沿線で施工された深さ3m、

厚さ1mのコンクリート防振壁の試験例⁴⁾、および深さ3.3m、厚さ0.5m、長さ12mのEPS地中壁の効果を調べた早川らの研究⁵⁾がある。また、常田ら⁶⁾は深さ36mのウレタンおよびEPS地中防振壁試験工事の比較から、地盤と防振材料の波動インピーダンスの差が大きいほど軽減効果があること、防振材が厚いほど効果が大きいことを示した。しかしながら、これらの研究における振動源は織布機械からの機械振動³⁾、列車振動^{4), 5)}、地表面を走行する試験車両⁶⁾であり、振動源の振動特性が本研究で対象とする高架道路からの交通振動とは大きく異なることが予想される。また、早川ら⁵⁾の深さ3.3mのEPS地中壁は、伝播する波動の波長との関係から若干浅いとの印象を受ける。

地中壁の振動低減効果は、本来2次元、あるいは3次元問題として取り扱うべきである。卓越する波動も表面波(レイレイ波、ラブ波)が優勢であることが考えられる^{7), 8)}。しかし、表面波がある種の境界条件の下で実体波の全反射を含めた反射、屈折、透過により生じること^{9), 10)}を考えると、1次元波動伝播場におけるEPSの振動低減効果を定量的に把握しておくことは極めて重要であろう。

上述のように、EPS地中防振壁の施工例は幾つかみられる。しかし、これらの研究ではEPS材料の動特性

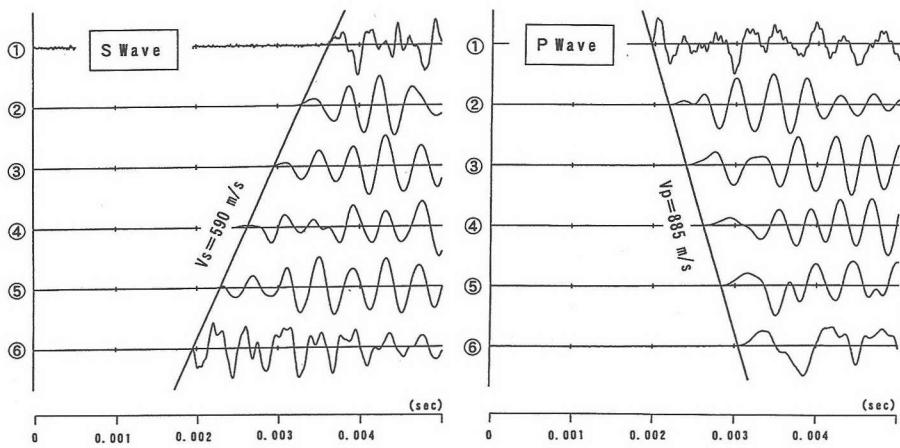


図-2 EPSのS波速度、P波速度

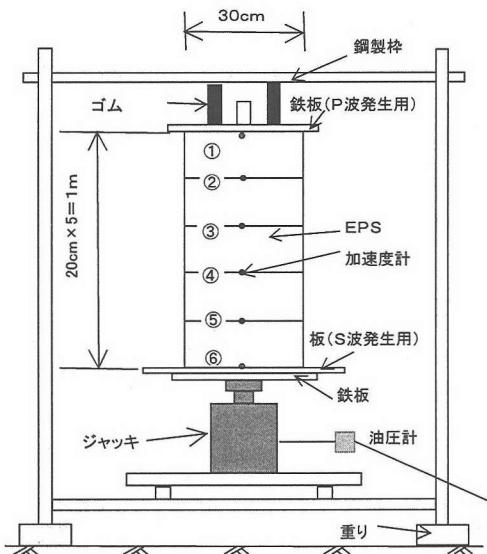


図-1 EPSの弾性定数を求める実験

(弾性波速度、減衰定数)と基本となる1次元波動(実体波)伝播場におけるEPSの振動低減効果について言及されていない。筆者ら¹¹⁾は、まず土圧に相当する拘束圧下でのEPS単体の模型振動実験からその動特性を調べた。更に、砂地盤中に厚さ20cmのEPSおよびコンクリートブロックを埋め込んだ1次元模型振動実験からEPSとコンクリートの振動低減効果の違いを調べた。次章では、この概要について述べる。

次に、高架高速道路と平行に深さ8mのEPS地中壁を施工し、試験車両を用いた走行実験の結果を示し、本工法の振動低減効果を調べる。また、地盤を伝播する波

動の種類について考察を加える。更に、地中壁施工中の空溝(3段切張)の状態で実施した同様の走行実験の結果に基づいて、空溝とEPS地中壁の振動低減効果の違いについて言及する。最後に、2次元FEMを用いたこれらのシミュレーション解析を実施し、実験と解析の比較について考察する。

2. EPSの振動低減効果に関する模型実験

(1) EPSの動特性

EPSはその比重が土の1/100前後と極めて軽いにもかかわらず、適度の強さを有している。このため、軟弱地盤上の超軽量盛土材料として数多くの実績¹²⁾がある。ただし、この軽量盛土工法における関心はEPSの圧縮強度、有限ひずみ時の変形係数であり、微小変形時の弾性定数あるいは弾性波速度に関する研究は極めて少ない¹³⁾。

このため、筆者ら¹¹⁾は土圧に相当する拘束圧下でEPS単体の模型振動実験を行い、その結果から弾性波速度を調べた。また、自由振動実験から減衰定数を求めた。模型実験では、図-1に示すように直径30cm、高さ1mのEPSブロックの①から⑥の位置に20cm間隔で圧電型小型加速度計を挿入した。下端の木製板を水平方向にたたいてS波(SH波)を、上端の鋼製突起を鉛直方向にたたいてP波を発生させた。図-2に拘束圧19.6kPaでのEPS(D-30)の実験結果を示す。ここに、D-30とは質量密度が0.03t/m³であることを意味する。拘束圧は、ジャッキに連結した油圧計をモニターしながらジャッキ圧を調整することにより与えた。この例では、S波速度Vs=590m/s、P波速度Vp=885m/sが得られた。なお、拘束圧を変化させた実験からS波速度は拘束圧の

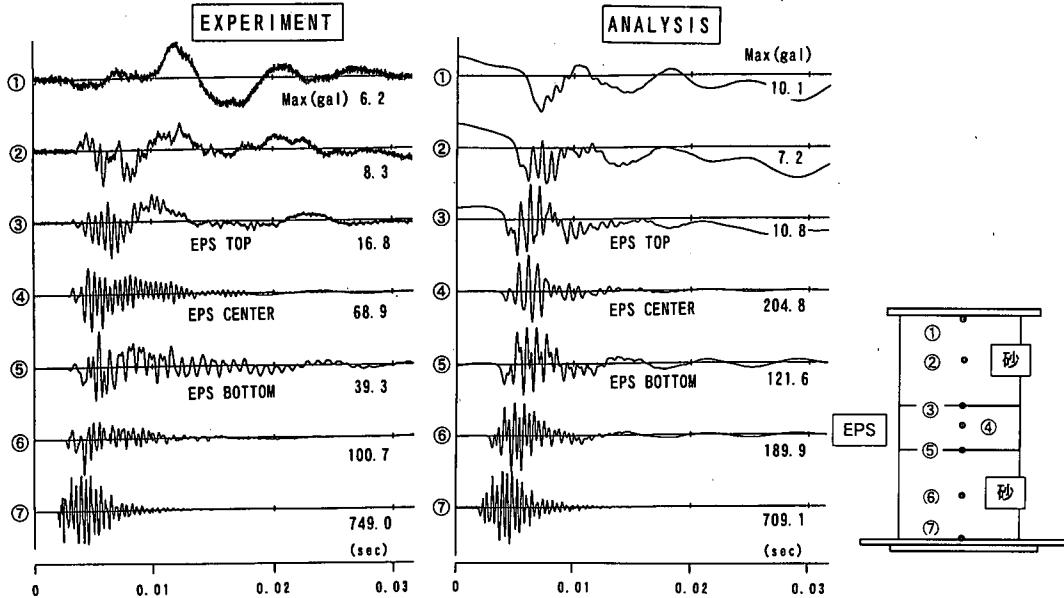


図-3 砂層内にEPSブロックを挿入した場合の模型振動実験と解析結果

表-1 入力定数

	ρ t/m ³	V_s m/sec	V_p m/sec	h %
砂	1.80	200	340	10
EPS	0.03	590	885	1
コンクリート	2.50	1878	2970	2
木	0.50	2746	5137	2
鉄	7.85	3175	5940	2

変化にあまり影響されないことが分かった。また、別途実施した自由振動実験から卓越振動数において得られた減衰定数は1～1.5%で、拘束圧が大きくなると減少する傾向を示した。更に、自由振動実験で得られた卓越振動数は、S波速度、P波速度から計算されるヤング係数を有する片持ち梁の固有振動数に一致することを確認した。

(2) EPS及びコンクリートの振動低減効果

図-1と同じ載荷枠内に直径30cm、高さ1mの塩化ビニールパイプを置き、この中に豊浦砂を打設した。砂層の中央に厚さ20cmのEPSまたはコンクリートブロックを挿入し、(1)と同様にしてS波とP波を発生させた。一例として、EPSを挿入した砂層にS波を発生させた場合の実験結果と解析結果を図-3に示す。ただし、この実験の加速度計位置は図-3右下に示す通りで、入力点(打撃点)は最下段の⑦である。同図では波形の様相を詳しく見るため、①～⑦の各波の最大振幅を同一にし

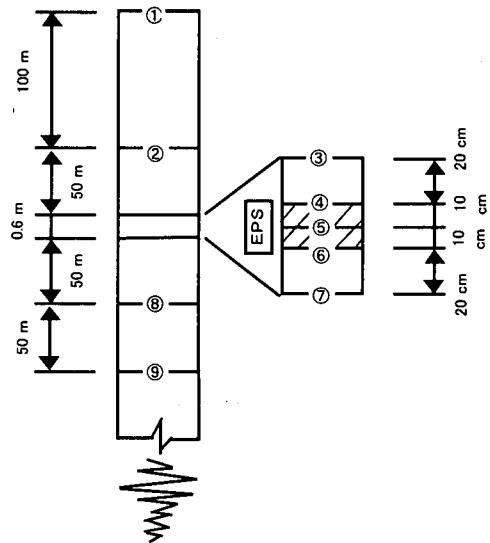


図-4 1次元波動伝播の解析モデル

て描いている(最大振幅は図中に併記している)。また、解析には重複反射理論に基づく地震応答解析プログラム(Shake)¹⁴⁾を用いた。使用した入力定数は表-1の通りである。同図の実験結果では、波動インピーダンスの小さなEPS中央④で最大振幅が急増する。また、EPSブロックを通過した後の②、①で最大振幅が低下すると共に高振動数域の振幅低下が現れている。この傾向は解析でも表現されている。これは、後述の図-5にも示すように、波長の短い高振動数域ほどEPSによる振動低

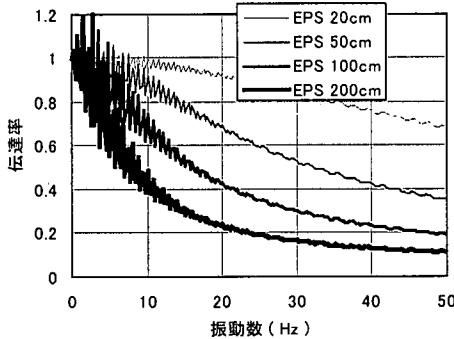


図-5 EPS厚を変えた場合の伝達率

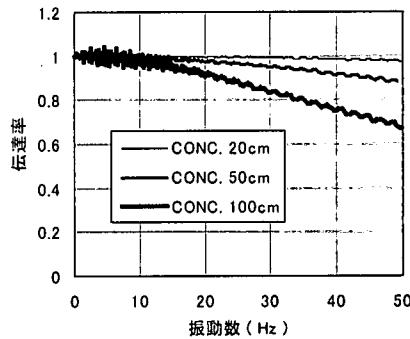


図-6 コンクリート厚を変えた場合の伝達率

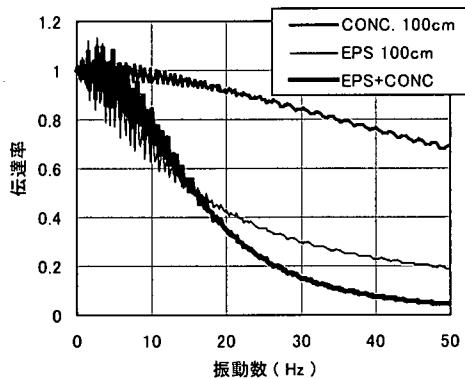


図-7 EPSとコンクリートの組み合わせ

減効果が現れることによる。なお、解析結果の③、②、①では因果性が満たされていない。これは、入力動 θ 及び系の応答に含まれる低振動数成分がFFT(高速フーリエ変換)のリンク効果として現れたものと考えられる。

この模型振動実験で卓越する振動数は1000~4000Hzと極めて高振動数域である。このため、図-3で用いたのと同じ解析法を使用し、現実的な振動数域(0~50Hz)でのEPSとコンクリートの振動低減効果を調べた。解析モデルの一例を図-4に示す。この図は、厚さ20cmのEPSを挿入した場合を示している。EPSブロックの上下にそれぞれ150.2m、100.2mの砂層を想定することで半無限地盤を表現している。

図-5にEPS厚を20、50、100、200cmとしたとき、図-6にコンクリート厚を20、50、100cmとしたときの伝達率を示す。ここに、伝達率とは防振材前後の砂層の(入射波)振幅比を表す。伝達率=1は同一振幅(振動低減効果がみられない)、伝達率=0は波動が完全に遮断されたことを意味する。ただし、図-5の0~20Hz付近の低振動数域では伝達率が大きく変動している。この変動は、図-4のモデル図におけるEPS上端~地表面

間150.2mの砂層内の重複反射によるものである。この間の減衰定数を大きくすることで取り除くことができる¹¹⁾。すなわち、この変動の中心線が伝達率を表す。図-5、図-6から、同じ厚さのEPSとコンクリートでは、EPSの振動低減効果が大きい。これは、インピーダンスの小さな材料を防振材として用いるほうが振動低減効果が大きいことによる。また、防振材を厚くするほど、効果が大きいことが分かる。これらの結論は、前述の常田ら⁶⁾の結論を再確認するものである。

(3) EPSとコンクリートを組み合わせた場合

後述するようにEPS地中壁現場施工実験では、地下水による浮力対策としてEPS壁の両側にコンクリートブロックを設置している。このため、EPSとコンクリートブロックを組み合わせた場合の振動低減効果を調べた。図-7の太い実線(EPS+CONC)は現場施工実験と同様に厚さ100cmのEPSの両側に厚さ90cmのコンクリートブロックを設置した場合の伝達率である。比較のため、図-5、図-6の厚さ100cmのEPSのみ、コンクリートのみの結果も併記している。同図から、EPSとコンクリートブロックを組み合わせた場合の伝達率は20Hz付近まではEPSのみの場合とあまり変わらないが、20Hz付近以上の高振動数域では、振動低減効果が大きくなることが分かる。早川ら⁵⁾は、「コンクリートとEPSのサンドイッチ構造の防振壁では、両者の波動インピーダンス比の相違が極めて大きいことが、振動遮断効果の増加に有効に作用したものと考えられる」と述べているが、この効果は振動数により異なることが分かる。

なお、2つの半無限体の間に中間層が挟まれた場合の理論解は既に佐藤¹⁰⁾が示しており、図-5、図-6がこの理論解と一致することを確認している¹¹⁾。ただし、EPSとコンクリートブロックを組み合わせた場合等の解の誘導は極めて複雑であり、これを陽に記述することは困難である。このような場合、本研究で用いたような

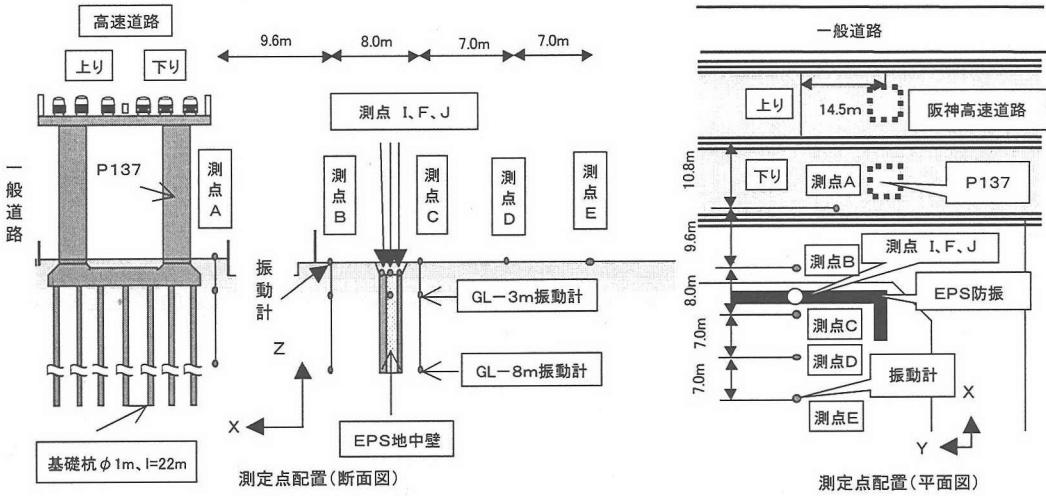


図-8 地中壁施工後の計測概要

数値的な取り扱いが有効である。

3. EPS地中防振壁現場振動実験

(1) 方法

E P S 地中壁施工場所は、阪神高速道路公団大阪府道高速大阪西宮線 P137 橋脚（門型 R C ラーメン橋脚）付近で、図-8 に地中壁施工後の計測概要を示す。橋脚基礎は杭基礎で、 $\phi 1m$, $L=22m$ の場所打杭（ペノト杭 28 本）である。施工場所の北東側を阪神高速道路が通過しており、これに隣接して並行する一般道路を跨いで阪神電車（高架）が同じく並行する。地盤条件は、後述の表-2 に示すようにN値5以下の中間系のシルト系の軟弱な地盤が25m程度連続している。

地中壁は、深さ 8m, 総延長 30.4m, 厚さ 2.8m で、中央に幅 1m のE P S を設置し、地下水による浮力対策として、この両側に幅 0.9m のコンクリートを打設した。E P S 材は、設置深さに応じ、質量密度が 0.02, 0.03, 0.035t/m³ のものを用いた¹¹⁾。なお、E P S の厚さは前述の図-7 を参考にして決定した。地中防振壁の深さは、レイレイ波の波長の6割程度以上¹²⁾が必要である。本研究では、レイレイ波とS波の波長がほぼ等しいとして、表層地盤（GL-0~8m で Vs=137m/s）のS波の10Hzの波長の1/2程度をめどに、深さ 8m とした。

振動計測は、防振壁施工前（以下、施工前）、E P S 設置前の掘削終了段階（空溝）、および防振壁施工後（施工後）の3回実施した。ここで、空溝とは、鋼矢板（IV型、 $L=13.5m$ ）、3段切梁（H300、@3.8m）により土留めされた状態である。振動源として試験車両（25t トラック）を用い、高速道路上及び高速道路に並行する一般

道路を走行させた。走行速度は、一般道路では 50km/h、高速道路では 60km/h 及び 80km/h とした。また、高速道路と並行する電車車両による振動も計測した。測定時間は 20 秒間、サンプリング・レートは 200Hz である。高速道路上に試験車両を走行させるケースでは、P137 橋脚上の鋼製箱桁と P C 枠の継ぎ目部を試験車が通過する前後 10 秒間の振動を計測した。圧電型加速度計を地表面に 5 点（A, B, C, D, E）、地中 GL-3m に 3 点（A3, B3, C3）、GL-8m に 3 点（A8, B8, C8）、GL-1m に位置する防振壁頂部の I, F, J の 3 点に設置した。ここで、F は E P S 頂部、I, J は両側のコンクリート頂部である。また、F の直下 GL-3m 位置の E P S 中にも 1 点（F3）設置した。以上、計測位置は合計 15 点で、すべての測定点で橋軸直角方向水平成分（X成分）、橋軸方向水平成分（Y成分）、鉛直成分（Z成分）を測定した。

(2) 結果

a) 加速度時刻歴波形

試験車両が、高速道路下り線追越側（80km/h）走行時の地表面の A, B, C, D, E 点での Z 成分加速度の波形を図-9 に示す。上段に施工前、中段に空溝、下段に施工後の結果を示している。最大振幅は、施工前、空溝、施工後ともすべて Z 成分 > X 成分 > Y 成分の順であり、ここでは振幅の大きい Z 成分を示した。なお、すべての測定ケースで橋脚近傍の A 点の Z 成分が最大である。この A 点の Z 成分でみられる 2 つの波群は、試験車両の前輪と後輪が P137 橋脚上のジョイント部（鋼製箱桁と P C 枠の継ぎ目）を通過したときのものである。

最大振幅の最も大きい Z 成分の加速度波形から E P S

地中防振壁の振動低減効果を調べる。防振壁施工後のC点では、施工前に比べ最大振幅が大きく低下している。特に、図中に矢印で示した施工前の1秒前後の時間帯にみられる衝撃的な高振動数成分が低下している。この高振動数成分が低下する傾向は、空溝時のC点でもみられる。ただし、空溝時の場合、C, D, E点では、1.5~2秒付近の時間帯で3~4Hzの低振動数成分が大きく卓越している。このため、D, E点では施工前に比べ逆に最大振幅は大きくなっている。この3~4Hzの低振動数成分は、後述するようにレイレイ波基本モード^{7), 8), 9)}によるものと考えられる。空溝時の測定ケースでは、何らかの理由で高架橋から地盤への入力動に、3~4Hzの低振動数成分が卓越したものと考えられる。

図-9のZ成分加速度波形の10Hz以上をカットしたローパス・フィルター通過後の波形を図-10(a)に示す。同図で卓越する振動数は3~4Hzのレイレイ波基本モードによるものである。卓越する時間帯は、ジョイントからの衝撃的な高振動数成分が通過した後の1.5~2秒付近である。

すなわち、地盤振動に寄与する表面波（レイレイ波）は、ジョイントからの衝撃的な高振動数成分が通過した後、若干の時間遅れを伴って卓越していくことが分かる。レイレイ波がある種の境界条件の下で、P波、S波の全反射を含めた反射、屈折、透過により生じることを考えると、P波、S波の実体波からレイレイ波が成熟するまでに若干の時間（ここでは、約1秒）が必要なためであろう。

図-10(b)に20Hz以下をカットしたハイパス・フィルター通過後の波形を示す。同図は、ジョイント部からの衝撃的な高振動数成分のみを取り出したものである。特にC点では20Hz以上の高振動数成分が大きく低下しているのが分かる。施工前、空溝、施工後で基準となるA点の最大振幅が異なるため、A点の最大振幅を同一に補正すると、空溝のC点の振幅は施工前の37%，施工後の振幅は施工前の34%である。

E P S壁施工後のI, F, J点のZ成分加速度波形を図-11に示す。ここに、FはE P S壁頂部、I, Jは両側のコンクリート壁頂部である。同図には比較のため、図-9のA~E点の波形も併記している。

図-11では、E P S壁頂部のF点で振動振幅が急増している。X, Y成分の波形は省略するが、この振幅増加は特にZ成分で著しい。また、E P S両側のコンクリート上のI, J点では逆に振動振幅が低下している。これは、地盤から波動インピーダンスの大きなコンクリートに波動が入ると振幅が低下し、逆に、波動インピーダンスの小さなE P Sに入ると振幅が増加することを意味する。この結果は、振動数帯域は異なるが、模型振動実験で得られた結論（図-3）と一致する。

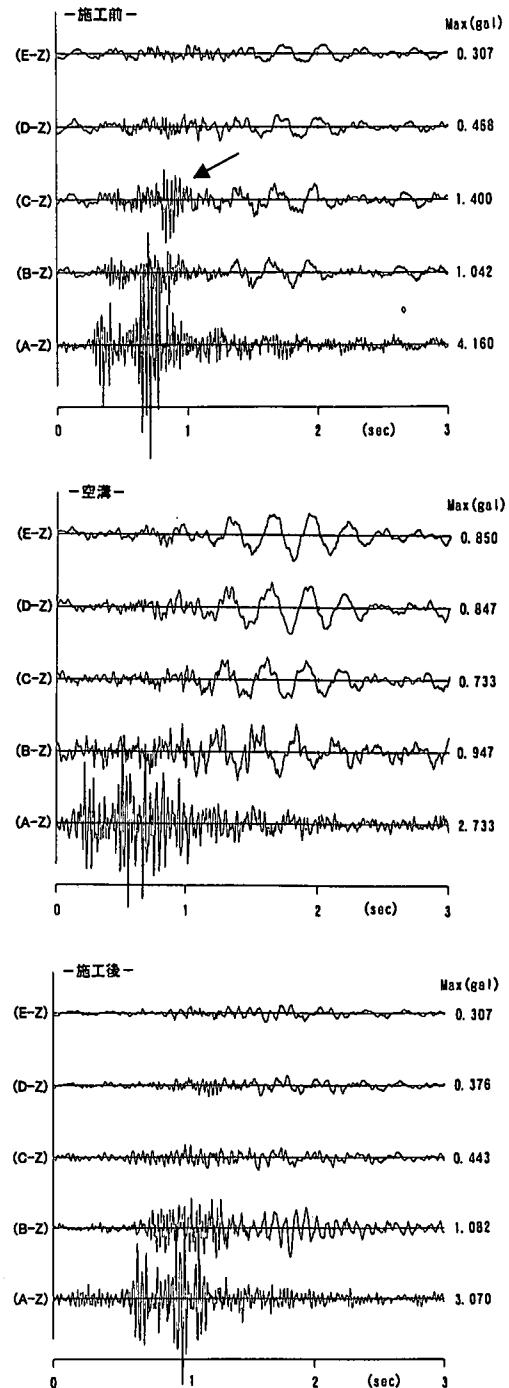


図-9 地表面鉛直加速度波形

b) パワースペクトル比、振動加速度レベル VAL

B, C, D, E点のパワースペクトル比（Z成分）を図-12に示す。同図は、外乱の影響が少ないと判断した5ケースの測定結果を平均したものである。ここで、パワースペクトル比は走行条件等の違いに伴う基準点

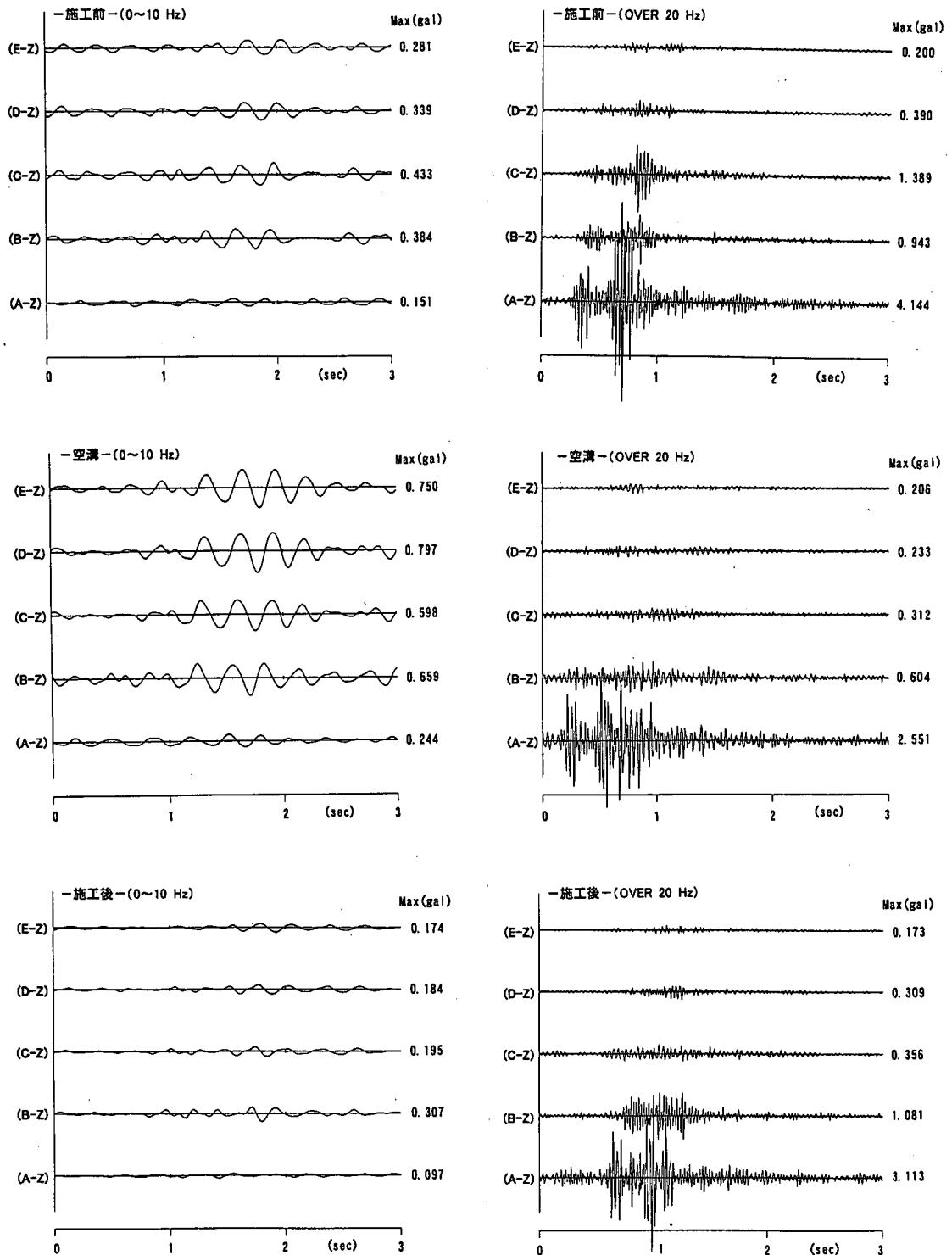


図-10 ローパスおよびハイパスフィルター通過後の加速度波形

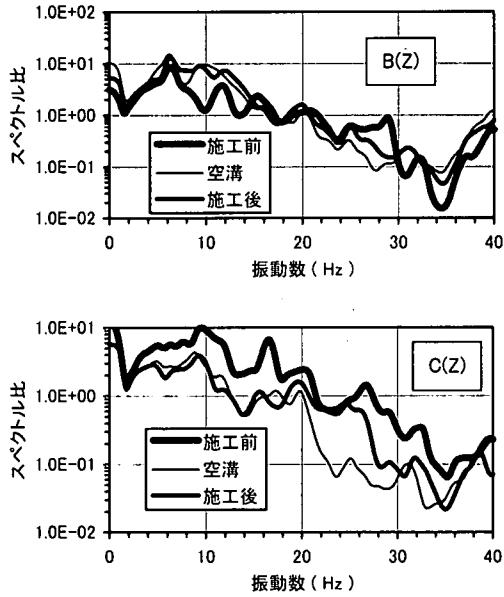


図-12 地表面のパワースペクトル比 (Z成分)

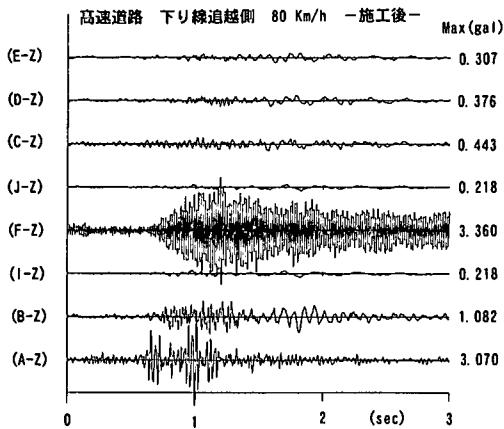


図-11 I, F, J点の加速度波形 (Z成分)

(A点)での振動特性の違いを取り除くためにB, C, D, E点のパワースペクトルを基準となる橋脚近傍のA点のパワースペクトルで除したものである。

同図において、施工前に比べ空溝及び施工後は、地中壁背面のC, D, E点で10Hz付近以上の高振動数成分が大きく低下している。振幅低下はC点で最も大きく、地中壁からの距離が離れるに伴い、D, E点とこの傾向が小さくなっている。

図-13に空溝及び施工後のC, D, E点の振動加速度レベルVAL (Z成分)の低下量を示す。ここに、VAL

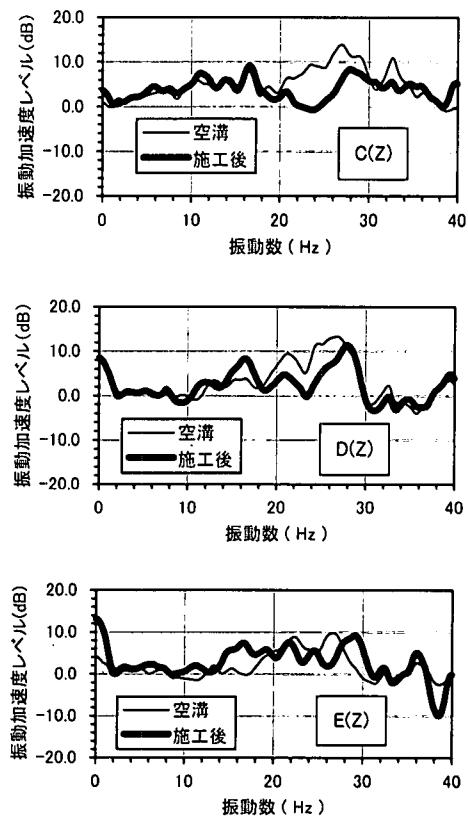
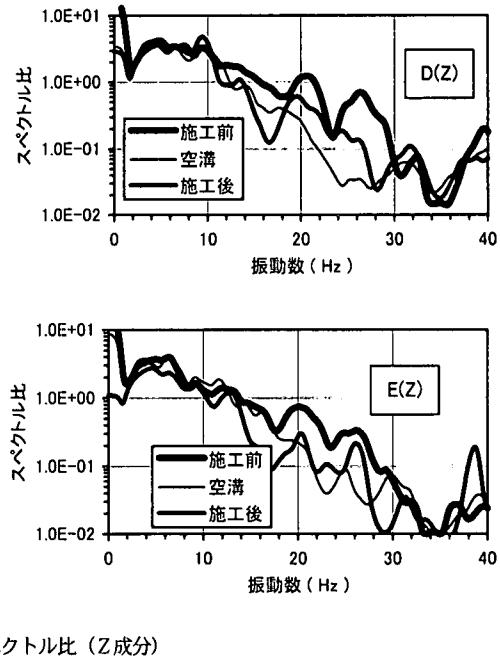


図-13 振動加速度レベルVALの低下

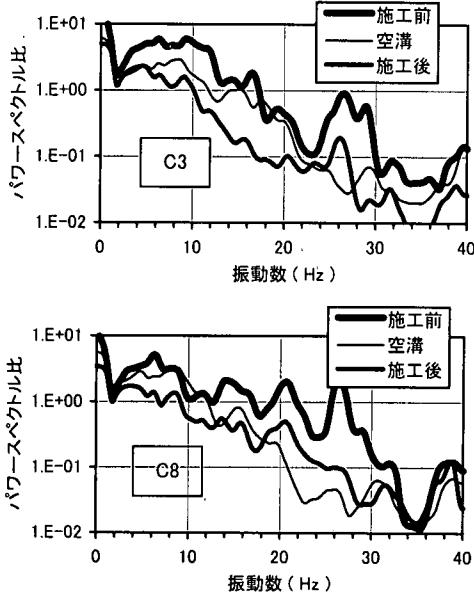


図-14 地中部のパワースペクトル比

は次式で表され、

$$VAL = 20 \log_{10} (A/A_0)$$

A は加速度実効値 (m/s^2)、 A_0 は基準となる加速度実効値 ($10^{-5}m/s^2$) である。同図は、図-12において、施工前と空溝、施工前と施工後のパワースペクトル比の平方根の差を dB 表示したものである。縦軸の + 側は施工前に比べ VAL が低下したことを、- 側は逆に増加したことを示す。C 点では、空溝、施工後とも 5~40Hz で平均 5dB 程度の低下が認められる。D、E 点でも、15~30Hz 付近で同じく平均 5dB 程度の低下が認められる。

C 点の地中部 GL-3m (C3)、GL-8m (C8) でのパワースペクトル比 (Z 成分) の平均を図-14 に示す。同図から、防振壁背後の C 点ではその地中部においても空溝、施工後の振幅低下が明らかである。

c) オーバーオールの振動加速度レベル、振動レベル

前述のように、振動数領域でみた振動加速度レベル VAL は、空溝、施工後とも 10Hz 付近以上の高振動数域で平均 5dB 程度の振動低減効果が明らかに認められた。一方、図は省略するが、これをオーバーオールの VAL、振動レベル VL で評価すると、有意な低減効果があるとは断定できなかった。ここに、オーバーオールとは全振動数域を評価することを意味する。また、振動レベル VL は国松らの方法¹⁵⁾を用いて加速度波形から求めたもので、人体感覚補正とともにいわゆる時定数補正を評価している。

この理由は、10Hz 付近以上の高振動数域で 5~10dB 程度の振動低減が生じたとしても、3~4Hz 付近の低振

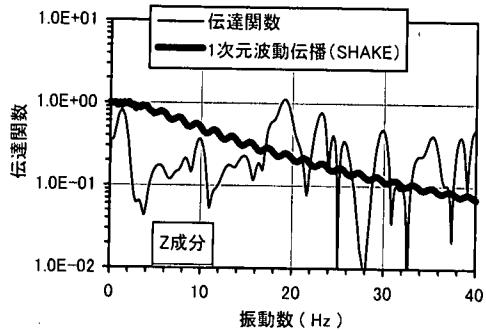


図-15 I、J 点間の伝達関数

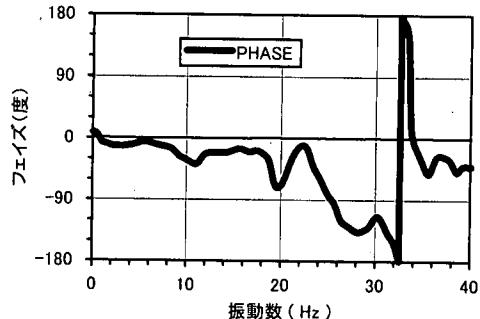


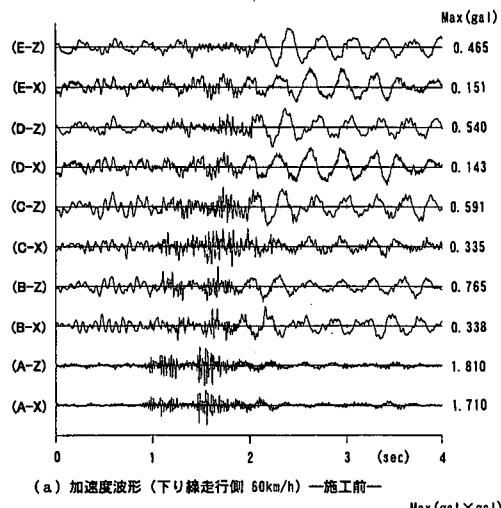
図-16 I、J 点間のフェイズ

動数域の寄与が大きいため、オーバーオールの VAL、VL で評価するとその効果が消失することによると考えられる。

本 E P S 地中防振壁は、本来、10Hz 付近以上の高振動数域の振幅低下を目的にしたものである。このため、主桁の曲げ対称 1 次、ねじれ 1 次、高架橋のロッキング等、構造系の低次固有振動モードに起因する 3~4Hz の低振動数域の寄与が大きい場合、オーバーオールの VAL、及び振動レベル VL の低下を期待することは困難である。ただし、対象とする振動数がジョイント部からの衝撃的振動に起因する高振動数域である場合、地盤が良好で比較的高振動数域が卓越する場合等、その効果を発揮するものと考えられる。また、この場合、オーバーオールの VAL、VL の低下も期待できるものと考えられる。

d) E P S 両側のコンクリートの振動

コンクリート頂部 I、J 点間の Z 成分の伝達関数（計測結果）を図-15 に示す。ここに、伝達関数とは、I 点を入力、J 点を出力とし、両者のクロススペクトルを入力点 (I 点) のパワースペクトルで除したものである。同中に前述した 1 次元波動伝播場での解析結果（図-7）を併記している。計測結果は変動が激しいが、15Hz 付近以上の高振動数域で J 点の振幅は平均的にみて I 点の



(a) 加速度波形 (下り線走行側 60km/h) 一施工前 Max (gal)

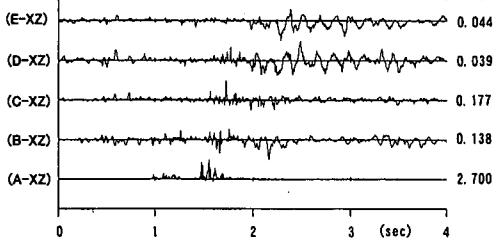


図-17 加速度波形と Motion Product

1/2~1/10 程度に低下している。この低下傾向は解析結果と類似しており、15Hz 付近以上高振動数域では S 波の 1 次元波動伝播場における解析が適用できる可能性がある。図-16 に I, J 点間のフェイズスペクトルを示す。フェイズスペクトルは振動数領域における 2 成分間の位相差を表す。同図から、0~20Hz の振動数域では、両者の位相差はほぼ 0 度であり、E P S 壁両側のコンクリートがほぼ同位相で振動していることが分かる。ただし、30Hz 付近で位相の急激な変動がみられ、両側のコンクリートが逆位相で振動する振動数域が存在する。

e) 地盤を伝播する波動の種類

図-17(a) に高速道路下り線走行側 (80km/h) 走行時の施工前の A, B, C, D, E 点の X, Z 成分の加速度波形を示す。同図では、波形の様相を詳しく調べるために各成分の最大値を同一振幅にして描いている。また、同図 (b) に X 成分と Z 成分の積の時刻歴図 (Motion Product¹⁶⁾) を示す。Motion Product は、波動の種類を簡単に予測するときに使用される。すなわち、この値が正の場合 P 波 (波動の進行方向と振動の方向が同じ)、負の場合 S 波 (波動の進行方向と振動の方向が 90 度ずれる)、+/-に変動する場合レイレイ波と判断することができる。同図において、A 点の X, Z 成分の Motion

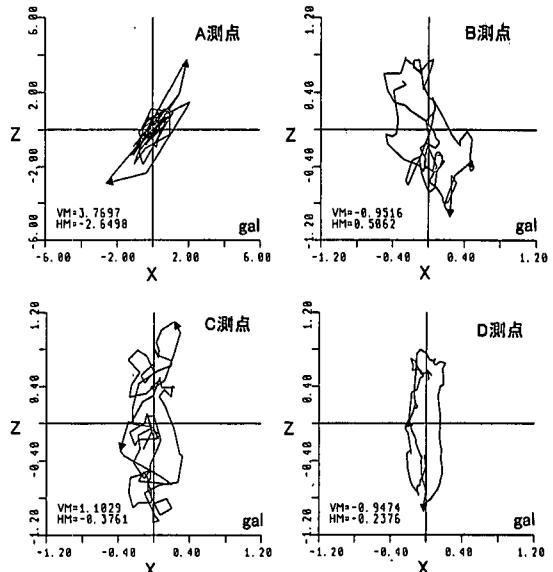


図-18 粒子軌跡 (オーバーオール)

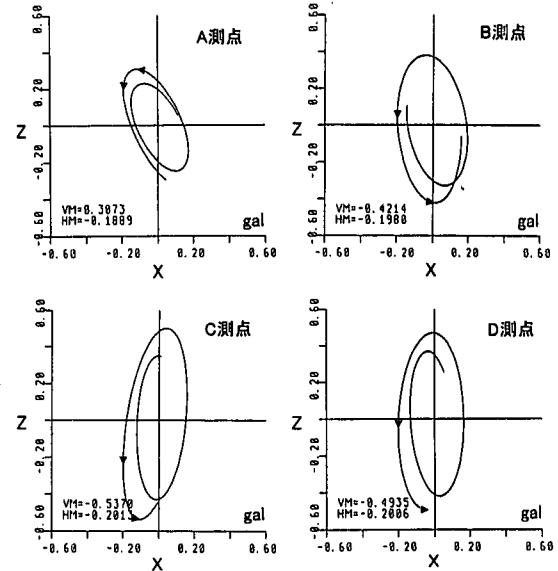


図-19 粒子軌跡 (バンドパス・フィルター)

Product は、すべて正であり、1.5 秒付近の高架橋ジョイント部からの衝撃的な波動が、P 波が主体であることを見ている。一方、B~E 点の 2 秒付近では、若干負の方向に向かう傾向を示しており、この時間帯付近から S 波が卓越しているようである。さらに、D, E 点の 2.5 秒付近からは、3~4Hz の長周期成分が原点を中心に +/- に振動しており、レイレイ波の卓越が伺える。

図-18 に A~D 点のオーバーオールの粒子軌跡を示す。横軸は X 成分、縦軸は Z 成分の粒子軌跡である。同図から、Z 成分の卓越が大きいことが分かる。特に、高架橋

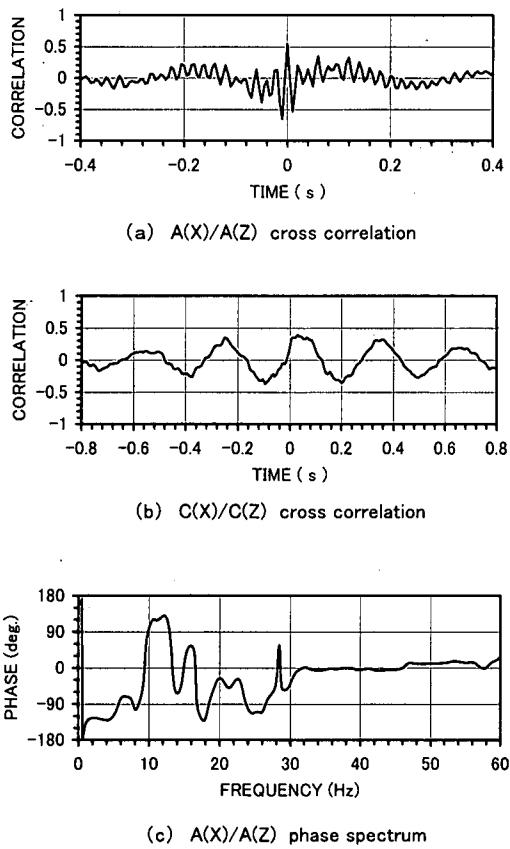


図-20 相互相関、フェイズスペクトル

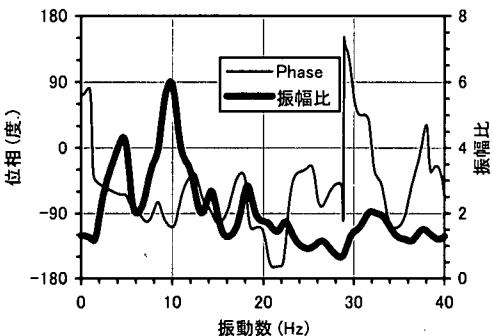


図-21 フェイズスペクトルと振幅比

から離れた C, D 点の粒子軌跡は、縦に細長いものになっている。また、D 点の軌跡では、楕円の縦軸／横軸比は概ね 2~3 倍であり、回転方向は反時計回りである。

同じく、図-19 に A~D 点のバンドパス・フィルター (0.4~4Hz) 通過後の粒子軌跡を示す。同図は、図-17 で前述した 2.5 秒付近以降の 3~4Hz のレイレイ波と考えられる波動を取り出したものである。3~4Hz の波動は明らかに反時計回りの楕円運動を示しており、レイ

イ波基本モードであることが確認される。その縦軸／横軸比は概ね 2~3 倍である。また、A, B, C 点の順に楕円の縦軸の振幅が増加している。この過程はレイレイ波基本モードが成熟する過程であり、C, D 点付近ではほぼ完成したものと考えられる。

A 点の X 成分 / Z 成分の相互相関を図-20(a) に、同じく C 点の相互相関を同図(b) に示す。ここで、相互相関は 2 成分間の時間遅れ領域における相関の高さを示す。A 点では、時間遅れ領域において 60Hz 付近が卓越しており、正の最大ピーク時の時間遅れはほぼ 0 秒である。つまり、X 成分と Z 成分が同位相であることを示す。一方、C 点では 3~4Hz 付近が卓越しており、Z 成分が X 成分に比べほぼ 90 度遅れている。すなわち、粒子軌跡の楕円の回転方向が反時計回りであることを示す。

A 点の X 成分 / Z 成分のフェイズスペクトルを図-20(c) に示す。A 点では 30~60Hz において両成分の位相差は 0 度である。すなわち、両成分は同位相であり、高架橋ジョイント部からの 30Hz 付近以上の高振動数成分は P 波が主体であることが分かる。

C 点の X 成分 / Z 成分のフェイズスペクトルと振幅比を図-21 に示す。ここで、振幅比は Z 成分のフーリエ振幅を X 成分のフーリエ振幅で除したものである。同図から、2~25Hz 付近の振動数域において、X 成分に比べ Z 成分がほぼ 90 度遅れて入ること、すなわち、粒子軌跡の回転方向が反時計回りであることが分かる。また、その縦軸／横軸比はほぼ 2~6 度である。これらの結果から、2~25Hz 付近の振動数域において卓越する波動はレイレイ波基本モードであることが確認される。なお、B, D 点の相互相関、フェイズスペクトルの傾向も C 点とほぼ同様である。

4. FEMによるシミュレーション解析

(1) 解析条件

図-22 に E P S 地中防振壁施工後のモデル化を示す。解析法は振動数領域での複素応答解析であり、フーリエ逆変換により時間領域の解に変換している。モデルの範囲は、橋脚を中心に最遠測定地点を含む幅 130m、高さ 39m である。図中の A~E 点は、地表面の各測定点に対応し、施工前および空溝時のモデル化は B 点と C 点の間に位置する地中壁付近のモデル化が変わるものである。モデル構成は、地盤、E P S 防振壁は平面ひずみ要素、構造部材（橋脚、フーチング、杭、空溝時の支保工）は曲げ梁要素を用い、上部構造重量は高架橋の水平梁主桁位置に附加した。

解析領域周辺の境界条件は、側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とし、モデル境界面からの反射波の影響を低減させた。底面は、GL-37m 以深のレキ層 (N

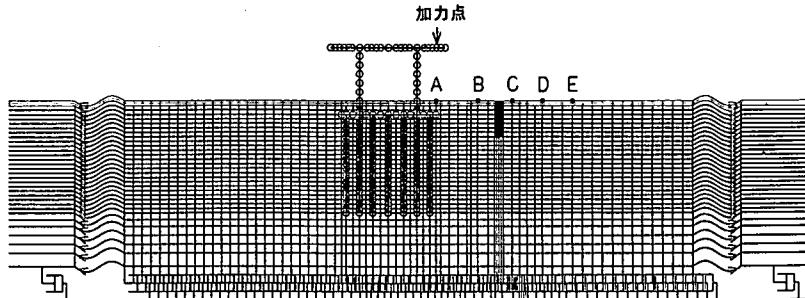


図-22 FEM解析モデル（施工後）

表-2 地盤物性

		N値 t/m3	ρ kg/m3	ν	G kPa	Vs m/sec	Vp m/sec
埋土(砂)	GL-0～-3m	5	2	0.333	38300	433.2	865.8
砂	GL-3～-8m	5	2	0.485	38300	433.2	2538.4
砂質シルト(砂)	GL-8～-13m	3	2	0.485	27000	363.7	2131.3
シルト(砂)	GL-13～-20m	1	2	0.485	13100	253.4	1484.5
砂混シルト(砂)	GL-20～-24m	3	2	0.485	27000	363.7	2131.3
礫	GL-24～-28m	50	2.1	0.485	186500	932.9	5466.4
粘土	GL-28～-30m	15	1.75	0.485	108900	780.9	4575.8
シルト質粘土	GL-30～-37m	8	1.75	0.485	71400	632.3	3705.1
礫	基盤層	50	2.1	0.485	186500	932.9	5466.4

値>50, Vs=295m/s)を工学的基盤層と考え, GL-37mを基盤層上面に設定した。地盤は、ボーリング調査結果をもとに表-2に示す地盤構造とし、減衰定数はすべてh=2%とした。水平方向の地層構造は一様なものと仮定した。地層の要素分割にあたっては、解析対象振動数を40Hzまでとし、要素厚さが波長の1/4以下になるよう分割した。構造部材については、3次元的構造である高架橋を2次元FEMにモデル化するにあたり、部材の断面積、断面2次モーメントを換算奥行き幅で除した等価断面性能を用いた。換算奥行き幅は、フーチングと杭ではフーチングの奥行き幅11.5m、橋脚の梁と柱については2.5mとした。また、EPSの弾性定数、減衰定数は、2章の模型振動実験結果に基づき表-1の値を用いた。

入力波は、官民境界付近のB点で観測された施工前のZ方向加速度波形（下り線・走行車線80km/h走行時のB-Z）を生じさせる等価節点外力波形を逆算し、これを図中の加力点（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、B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、B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。

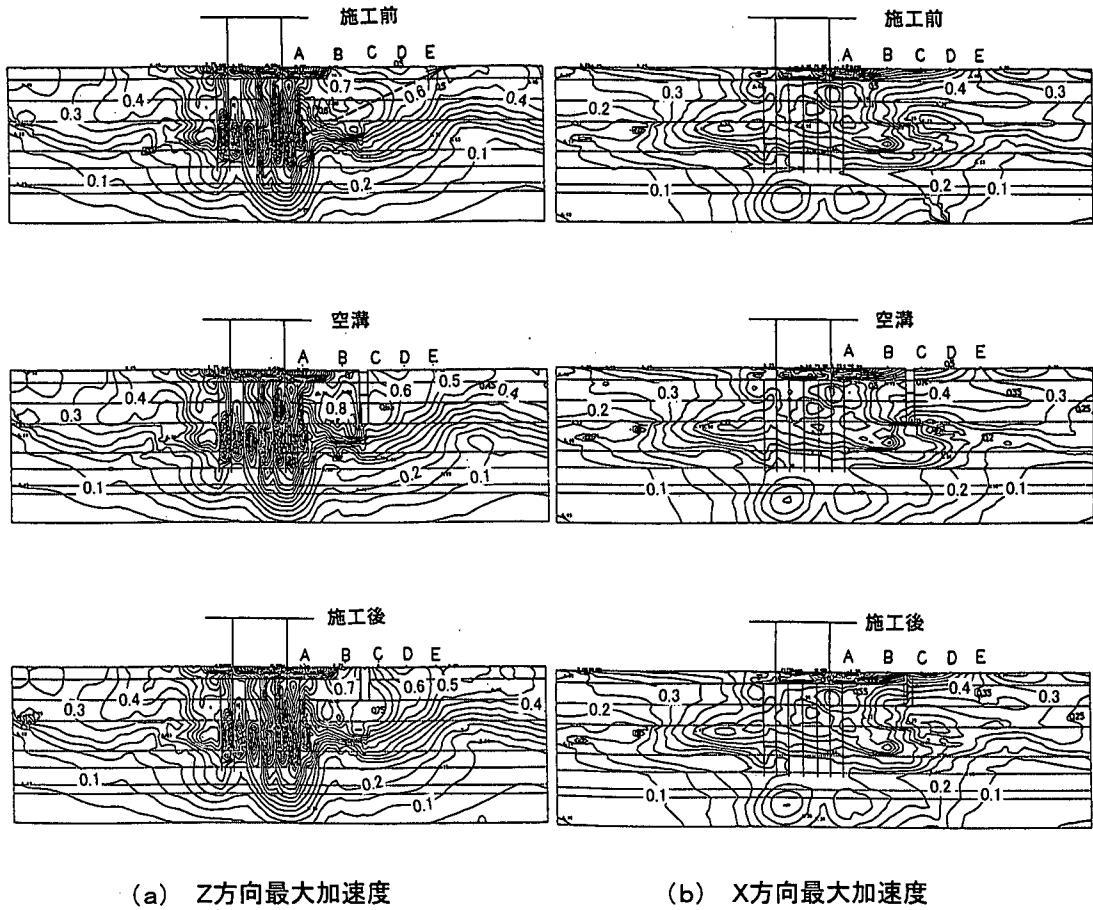
(2) 解析結果

a) 最大加速度のセンター

図-23(a)に施工前、空溝時および施工後の鉛直方向最大加速度（絶対値）のセンターを示す。施工前では、地表から4番目のシルト（砂）層(GL-10m～-20m)で杭に囲まれた部分の増幅が著しい。これは、橋脚、基礎杭を伝播した振動が平均N値1の軟弱地盤で增幅されたことを示している。また、2次元モデルの基礎杭（梁要素）が壁的な効果を示し、波動を内部に閉じこめる解析モデル特性も含まれていると思われるが、主たる要因は軟弱地盤にあると考えられる。従って、波動の伝播は図中に破線で示すように、このシルト（砂）層付近から地表部のE点に向かう経路を示す。施工後ではEPS壁前面の振幅が反射波により若干増加し、背面で僅かに低下する傾向がみられるが、その効果はあまり大きくない。これは、深さ8mのEPS壁が、主たる伝播経路を遮断していないためであろう。空溝の深さも8mであるが、13.5mまで根入れされた矢板の効果により、前面の反射波、背面の振幅低下が施工後より僅かに大きくなっている。

水平方向最大加速度のセンターを図-23(b)に示す。水平方向加速度は鉛直方向より小さいが、卓越振動数の関係で防振壁の振動低減効果が異なるため、ここに示した。主たる振動がフーチング上部の土層から水平方向に伝播し、また、鉛直成分で卓越したシルト（砂）層からも水平方向に振動が伝播している様子が伺える。ただし、空溝時と施工後の振動低減効果は鉛直成分より低下し、前面の反射波もほとんど認められない。これは、水平成分の卓越振動数が低振動数域にあるため、振動低減効果が表れなかつたものである。

最大速度のセンターについては省略するが、低振動数成分がさらに卓越する速度成分では、加速度に比べ空溝、EPS壁による振動低減効果が低下する。振動レベルVLの人体感覚補正と加速度～速度間の振動数域での変換が等価であることを考えると、防振壁によるVLの振動低減効果を期待するなら、地中壁深さを更に深くし



(a) Z方向最大加速度

(b) X方向最大加速度

図-23 最大加速度のコンター

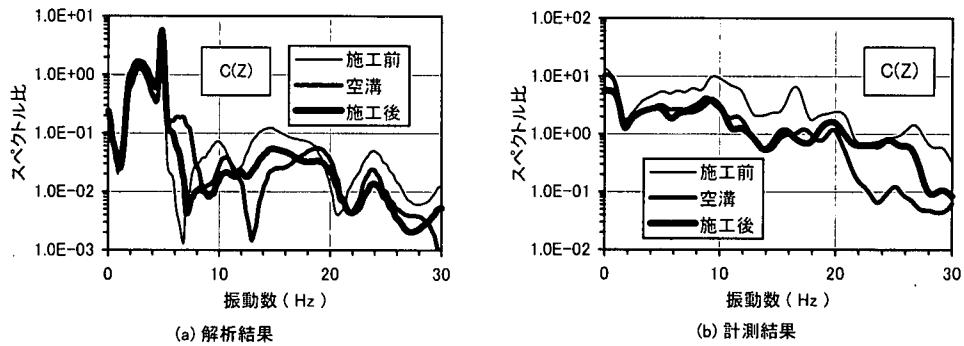


図-24 C点（Z成分）のパワースペクトル比の解析結果と計測結果の比較

なければならないことが分かる。

b) パワースペクトル比、振動加速度レベル VAL

図-24にC点（Z成分）のパワースペクトル比の解析結果と計測結果の比較を示す。図-24(b)の計測結果は図-12のC点（Z成分）と同じもので、解析結果と比較しやすいように振動数域を変更している。また、スペクト

ル比は図-12と同じく、C点のパワースペクトルをA点のパワースペクトルで除したものである。前述の通り、計測結果では0~30Hzの広範囲の振動数域で空溝時および施工後のスペクトル比が施工前に比べ1/10~1/2程度に低下しており、空溝およびE P S防振壁の振動低減効果が明らかである。これに対し、解析結果では10Hz以上

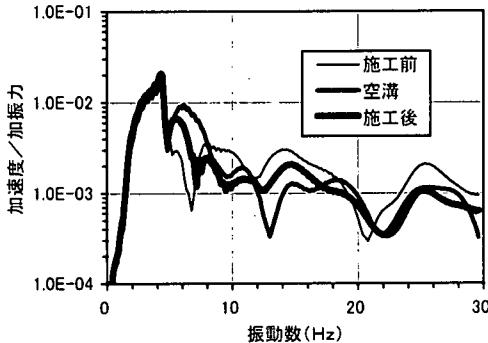


図-25 C点加速度／加振力の伝達関数

の高振動数域では空溝とE P S 防振壁の振動低減効果が認められるものの、10Hz 以下の低振動数域では効果がみられない。また、計測結果に比べスペクトル比の変動が激しく、7Hz 付近、21Hz 付近では逆に施工前の振幅が小さい。

FEM解析では、地層構造を含めた橋脚、フーチング、杭等、構造系の数値解析上のモデル化に結果が敏感に反応しすぎるくらいがある。ただし、スペクトル比の急変部を平滑化してみれば、解析結果と計測結果の対応は比較的良好である。なお、両者の違いは 10Hz 以下の低振動数域で著しいが、この領域は杭・高架橋等、構造系のモデル化に直接関連する領域である。3次元的な構造系を2次元FEMにモデル化したことによる弊害が表されたことも考えられる。

図-25 に FEM 解析で得られた C 点加速度 (Z 成分) / 加振力の伝達関数を示す。図-24(a) のスペクトル比は、この伝達関数をそのまま反映しており、7Hz 付近、21Hz 付近の傾向も同様である。

図-26 に C, D 点の振動加速度レベル VAL (Z 成分) の低下量を示す。同図は、計測結果における図-13 に対応する。5Hz 付近以下の低振動数域や伝達関数の谷部にあたる 7Hz 付近および 21Hz 付近を除けば、C 点では空溝時および E P S 防振壁施工後とも平均 5dB 程度の VAL の低下が認められる。D 点では、伝達関数の谷部が 17Hz 付近に移動しているが、これを除けば同様に平均 2~5dB 程度の振動低減効果が認められる。

c)EPS防振壁を深くした場合

E P S 防振壁の深さを 16m, 24m にした場合の地表面振動加速度レベル VAL の分布を図-27 に示す。同図には、施工前、施工後 (深さ 8m) の結果も併記している。E P S 壁深さが 8m, 16m の場合の VAL は施工前と同程度で、オーバーオールの VAL で評価すれば有意な振動低減効果はみられない。一方、24m の場合、防振壁背後、40m 以遠で平均 5dB 程度の VAL の低下がみられる。これは、主

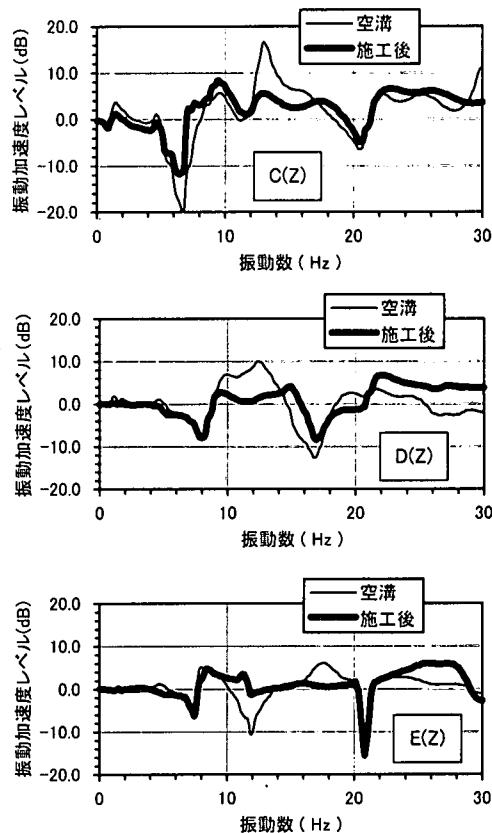


図-26 振動加速度レベル VAL の低下

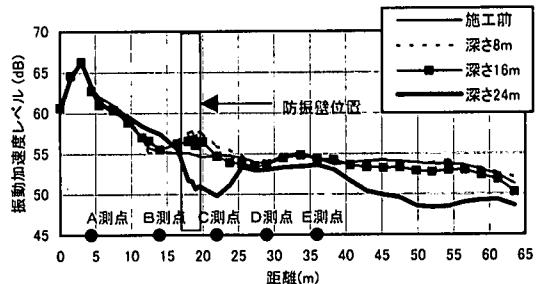


図-27 E P S 防振壁を深くした場合

な振動源と考えられる軟弱層 (GL-8~24m) 下部にまで防振壁が根入れされたため、すなわち、図-23(a)の施工前の図に示した杭下端部から E 点へ延びる破線を防振壁が遮断したことによる。GL-24mまでの表層地盤の平均 Vs を表-2 から 120m/s とすれば、オーバーオールの VAL に最も寄与する 3Hz 付近の波長は 40m である。防振壁の深さがこの波長の 1/2 以上の時振動低減効果が大きく表れたものと考えられる。

5. 結論

以上、E P S 模型振動実験、E P S 地中壁試験施工に伴う振動計測、及びこのシミュレーション解析結果を示した。結論を以下に示す。

- ① 空溝、E P S 地中壁は、高架橋ジョイント部からの衝撃的な振動に起因すると考えられる 10Hz 付近以上の高振動数域で振動低減効果を発揮し、振動数領域で平均 5 dB 程度の振動加速度レベル VAL の低下がみられる。また、この振動低減効果は防振壁背後の地中中部においても認められる。
- ② 一方、これをオーバーオールの VAL、振動レベル VL で評価すると、有意な低減効果があるとは断定できない。これは、10Hz 付近以上の高振動数域で 5dB 程度の振動低減が生じたとしても、3~4Hz 付近の低振動数域の寄与が大きいため、その効果が消失することによると考えられる。
- ③ 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と考えられる 20Hz 付近以上の高振動数成分が卓越し、この波動は P 波が主体である。一方、橋脚中心から 20.4m~35.4m 離れた点では、橋脚近傍で P 波が卓越した後、約 0.5 秒後に S 波が卓越する。その後、さらに 0.5 秒程度遅れてレイレイ波基本モードが卓越する。地盤への入力振動に含まれる 3~4Hz 付近の低振動数成分が、高架橋からの距離の増加に伴いレイレイ波基本モードへ成熟し、これらの地点付近で完成するものと考えられる。
- ④ 実測波形の Motion Product、相互相関、フェイズ・スペクトル、粒子軌跡等から、3~4Hz 付近の振動数域の波動がレイレイ波基本モードであることを示した。
- ⑤ 空溝、E P S 地中壁の振動低減効果に関する計測結果と F E M 解析結果の整合性は 10Hz 付近以上においておむね良好である。ただし、10Hz 付近以下の低振動域で解析結果は変動が激しく、構造系の数値解析上のモデル化に結果が敏感に反応しうるきらいがある。
- ⑥ F E M シミュレーション解析において、高架橋からの振動は、橋脚、基礎杭を伝達し地中 12~20m の軟弱地盤部で大きな増幅を示す。また、この地中 12~20m の基礎杭部から地表の E 点（橋脚中心から 42.4m 地点）への伝搬経路が支配的である。したがって、深さ 8m の E P S 地中壁による直接的な遮断効果を期待することは困難である。
- ⑦ ただし、高架橋ジョイント部からの衝撃的な振動に対応する 10Hz 付近以上の領域では、特に鉛直成分の低減が顕著であり、平均 2~5dB 程度の振動低

減効果がみられる。

以上の結論は、25t トラックを用いた 1 台の試験車両走行時のものである。車両重量の大きな大型トレーラー等の複数走行時には、位相の打ち消しなど複雑な現象が考えられ、今後の検討が必要である。

なお、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置し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。

参考文献

- 1) 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) 阪神高速道路公団、（財）阪神高速道路管理技術センター：平成 9 年度道路交通振動対策委員会報告書、1998. 9.
- 3) 橋詰尚慶、長瀧慶明、若命善雄：地中壁による振動低減対策（その 1、その 2）、第 28 回土質工学研究発表会講演集、pp. 1245~1248, 1993.
- 4) 吉岡 修、芦谷公稔：コンクリート振動遮断工の防振効果、鉄道総研報告、5 (11), pp. 37~46, 1991.
- 5) 早川 清、松井 保：E P S ブロックを用いた 交通振動の軽減対策、土と基礎、Vol. 44, No. 9, 1996.
- 6) 常田賢一、後藤勝志：道路交通振動の軽減対策に関する現地実験、土木技術資料、Vol. 22, No. 10, pp. 501~505, 1980. 10.
- 7) 森尾 敏、吉川 実：交通振動の伝播特性、土と基礎、Vol. 35, No. 6, 1987.
- 8) 松浦康夫、森尾 敏、北角 哲：高架橋から伝播するレイレイ波の特徴、土と基礎、Vol. 38, No. 4, 1990.
- 9) 田治米鏡二：表面波の話、物理探鉱、第 36 卷、第 1 号、pp. 23~32, 1983.
- 10) 佐藤泰夫：弾性波動論、岩波書店、1978.
- 11) 徳永法夫、森尾 敏、家村浩和、西村 昂、早川 清：E P S 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.
- 12) 発泡スチロール土木工法開発機構：E P S 工法、理工図書、1993.
- 13) 田村重四郎：発泡スチロールブロックの集合体の動的特性について、基礎工、Vol. 18, No. 12, pp. 26~30, 1989.
- 14) Schnabel, P., Bolton Seed H. and Lysmer, J. : Modification of seismograph records for effects of local conditions, EERC 71-8, College of Engineering, University of California・Berkeley, 1971. 12.
- 15) 国松 直、中川浩二、三浦房紀、今村 戚：発破振動における振動レベルの推定、土木学会論文集、第 367 号／VI-4, pp. 45~51, 1986.

- 16) 末富岩雄, 辻野修一, 森山健吉, 吉田 望, 河野 興: 17) (社)日本橋梁建設協会, 高架道路橋の交通振動問題と
発破を用いた液状化対策工法に関する現場実験, 佐藤工 その対策, 1985. 3.
業研究所報, No. 23, pp. 99-103, 1997. (1998. 10. 5 受付)

ON THE EFFECTIVENESS OF EPS UNDERGROUND WALL IN REDUCING TRAFFIC-INDUCED VIBRATIONS

Norio TOKUNAGA, Satoshi MORIO, Hirokazu IEMURA and Takashi NISHIMURA

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. This study investigates the effectiveness of EPS(expanded polystyrol) underground wall in reducing traffic-induced vibrations. Firstly, a series of model vibration test is performed to obtain the dynamic characteristics of EPS. Secondly, we constructed an EPS underground wall, and conducted field vibration tests using a test car. Finally FEM simulation analyses were carried out and the comparison between the test results and analytical ones were made.