

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

On the effectiveness of EPS in reducing traffic-induced vibrations based upon
the model tests and its simulation analyses

徳永法夫¹⁾、森尾 敏²⁾、家村浩和³⁾、西村 昂⁴⁾、早川 清⁵⁾

- 1) 阪神高速道路公団 保全施設部 (〒541 大阪市中央区久太郎町 4 丁目 1 番 3 号)
- 2) 工博 (株)奥村組 電算センター (〒545 大阪市阿倍野区松崎町 2 丁目 2 番 2 号)
- 3) 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)
- 4) 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本町 3 丁目 3 番 138 号)
- 5) 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-77 滋賀県草津市野路町 1916)

Ground vibrations generated by road traffics and trains are recognized as environmental disturbances, which should be reduced to a certain allowable level in order to keep our comfortable neighborhood and protect sensitive equipment nearby.

The authors are planning to develop an effective and practical countermeasure method against ground vibrations, in which expanded polystyrol (EPS) blocks are used as wave barriers.

In this paper, a series of EPS model vibration test are performed to investigate the effectiveness in reducing traffic-induced vibrations. Also simulation analyses of these model tests are conducted based on the multi-reflection theory.

And applicability of this analytical approach is evaluated by comparing computed and recorded acceleration waves.

Key Words: traffic-induced vibration, model vibration test, expanded polystyrol (EPS)

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軽減対策がとられてきた。これらの対策は、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¹⁾。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問題解決に複雑に関与し、振動軽減化の手法が確立されるまでには至っていない。

筆者らは、現在、伝播経路対策に含まれる地中防振壁（永久構造物）の現場試験施工を計画しており、防振材として EPS（発砲スチロール）を想定している。平行して、現場での振動測定、地質調査、設計、施工法の検討等の具体的な方策を進めている。これは、防振壁の剛性をパラメーターとした 2 次元 FEM シミュレーション解析結果から、防振壁の剛性をかなり低くすることで、振動低減効果が期待できる²⁾との結論が得られたこと、早川ら³⁾の EPS 地中防振壁の現地振動実験においても、高振動数域で振動遮断効果が大きいとの結論が示されていること等に基づくものである。

現実の EPS 地中防振壁の振動低減効果は、2 次元、

或いは、3 次元問題としてとらえるべきであり、また、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^{4)・5)}。しかしながら、ある種の境界条の下でレイレイ波は SV 波の、ラブ波は SH 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、研究の基本ステップとして実体波の 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検討しておくことが極めて重要であろう。

本研究では、まず、EPS の動的特性を調べるための模型実験を行う。また、防振材として EPS とコンクリートを選び、これらを 1 次元砂地盤中に埋め込んだ試験体を用いて模型振動実験を行う。更に、重複反射理論に基づくそのシミュレーション解析を実施し、解析法の妥当性、適用性を調べる。防振材としてコンクリートを選んだのは、EPS とは反対に、剛性の高い地中壁の振動低減効果を調べておくことも重要であると考えたためである。

ただし、模型実験で対象とする振動数は数千 Hz であり、現実の交通振動で問題となる振動数に比べ極めて高振動数である。このため、シミュレーション解析において実験結果をうまく再現できることを確認した上で、同じ解析法を用いて現実の振動数域（0～50 Hz）での防振材の振動低減効果を調べる。

2. 実験概要

2.1 実験 A

本実験は、EPSの諸定数（弾性定数、減衰定数）を得るためのものである。図-1に示すように直径30cm、高さ20cmのEPSを5個重ねて、鋼製枠内に設置する。鋼製枠を反力にしてジャッキで加圧して、EPSに所定の拘束圧を発生させる。拘束圧は、防振壁設置深さでの土圧を考慮して、0.1、0.2、0.5、1.0 Kgf/cm²の4種類とする。この状態で、EPS下端の木製板を水平方向に打撃し、S波を発生させる。このとき、反対方向からも打撃し、位相の反転からS波の発生を確認する。P波は、上部鉄板に取り付けた突起を下方に叩いて発生させる。使用するEPSはD-20、D-30、D-35の3種類であり、これらは、1m³あたりの重量が、それぞれ、20、30、35 Kgfであることを意味する。

図-1において、①～⑥は加速度計（圧電型小型加速度計・PV-90B(リオン)）設置位置で、S波の実験では水平方向加速度、P波の実験では鉛直方向加速度を計測する。①はP波発生用鉄板に、⑥はS波発生用木製板に接合させている。加速度計の重さ1.2gf、外形6.9×9.2×5.7mm、振動数範囲1～25000Hz、サンプリングレート200 KHzである。この外形、重さから判断して、加速度計の存在が模型実験結果に及ぼす影響は、無視できるものと考えられる。なお、上部のゴムは、鋼製枠からの振動を軽減させるためのものである。

2.2 実験 B

本実験は、波動インピーダンスの違いによる伝播特性、振幅特性を調べるためのものであり、B1、B2、B3の3種類の実験を行う。

実験B1では、豊浦標準砂の間に厚さ20cmのEPS（D-20、D-30、D-35）を挟んだ試験体にS波、P波を発生させる。実験B2では、豊浦標準砂の間に厚さ20cmのコンクリートを挟んだ試験体を用いる。また、実験B3では比較のため豊浦標準砂のみの試験体を用いる。ジャッキによる拘束圧は0.2Kgf/cm²の1種類である。

試験方法は実験Aと同じであるが、砂を使用するため、試験体の外側に塩化ビニールパイプ（内径30cm、高さ100cm）を設置している。また、塩化ビニールパイプからの振動を軽減するために、パイプの内側にフェルトを張っている。実験B1とB2の試験体の様子と加速度計番号を図-2に示す。実験B3の加速度計位置、番号は、実験B1と同じで、実験B1のEPSを砂に置き換えた状態である。

なお、砂は10cm³程度の容器を用いて、均一に高さ5cm程度になるよう打設し、鉄製重り（5kgf、φ10cm）で一様に突き固めた。

2.3 実験 C（自由振動実験）

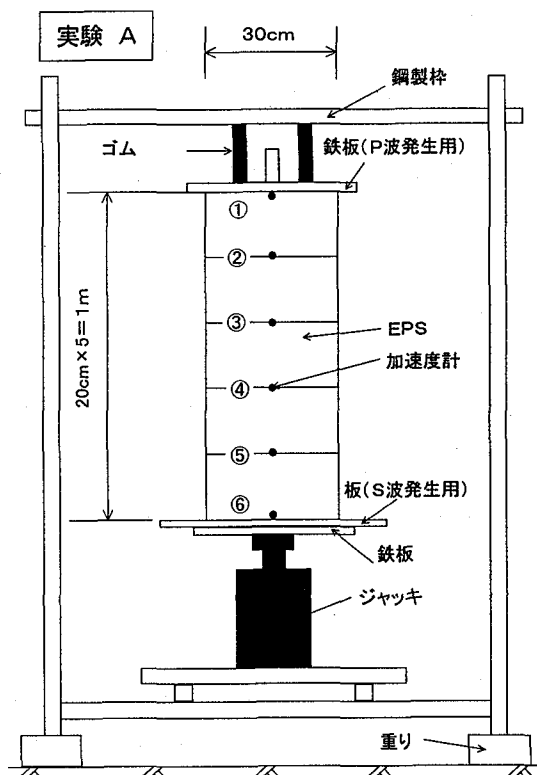


図-1 実験 A

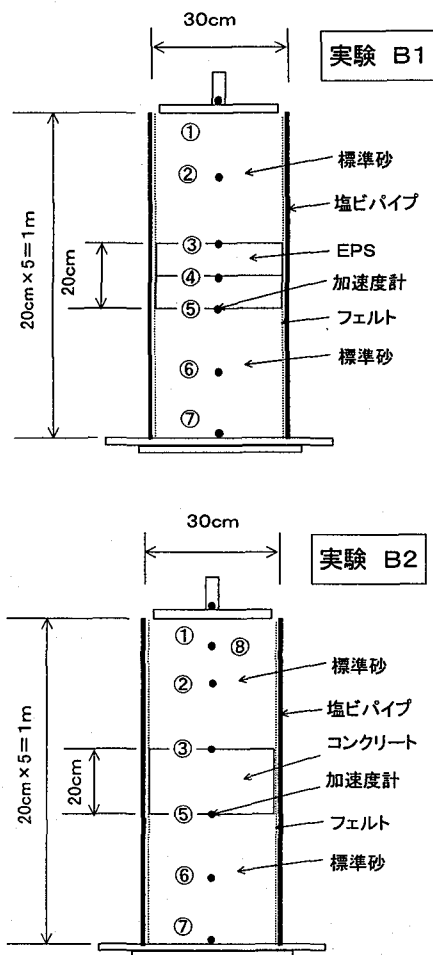


図-2 実験 B1、B2

実験Aでは、打撃により広範囲の振動数域の波動の発生が予想されるため、測定点間の距離減衰から得られる減衰定数の精度はあまり高いものと考えられる。このため、実験Aを補完する意味でEPS（D-20、D-30、D-35）の自由振動実験を行い、減衰定数を求める。また、自由振動実験で得られる固有振動数と実験Aで得られる弾性定数を用いた曲げ梁の固有振動数を比較する。実験概要を図-3に示す。

3. EPSの動的特性（実験A、実験C）

まず、EPSの動的特性を調べるために行った実験A、Cの結果を示す。実験Aのうち、拘束圧0.2Kgf/cm²、EPS（D-30）を用いた実験で得られた加速度記録の立ち上がり部を図-4に示す。次章4.では、このEPS（D-30）を用いた実験のシミュレーション解析を実施している。同図左側はS波の場合、右側はP波の場合であり、①～⑥は、図-1の加速度計番号である。この例ではS波速度Vs=590m/s、P波速度Vp=885m/sが得られた。

同様にして決定したすべての結果を図-5に示す。Vsは各EPSとも拘束圧の違いに対して変化が少なく、概ね、590m/sであった。一方、Vpは拘束圧が増加するにつれて速度が遅くなる傾向がみられる。

実験Aで得られたS波の減衰定数hを図-6に示す。ここでは、図-1の⑤の最大振幅をA₀、②の最大振幅をA(X)、X=60cm、V=590m/sとして、これらを式（1）に代入し、hを求めた。振動数fは、後述の図-10の加速度波形、図-11のパワースペクトルの卓越振動数に基づき、2000Hzとした。

$$A(X)=A_0X^{-n}\exp(-\alpha X)\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\alpha=2\pi hf/V$$

ここに、Xは振動源からの距離、A(X)は振動源から距離Xの地点の振幅、A₀は振動源の振幅、Vは波動の伝播速度である。nは波動の種類によって変わり、表面波の場合1/2、実体波の場合1がとられるが、本実験（実体

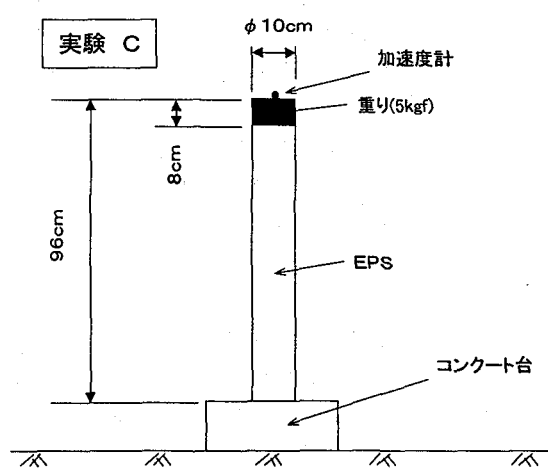


図-3 実験C

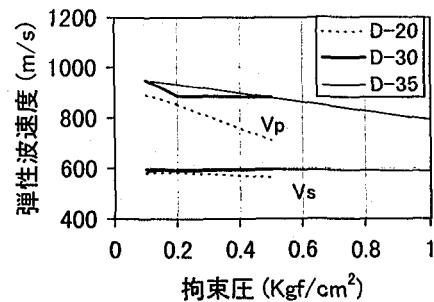


図-5 弾性波速度

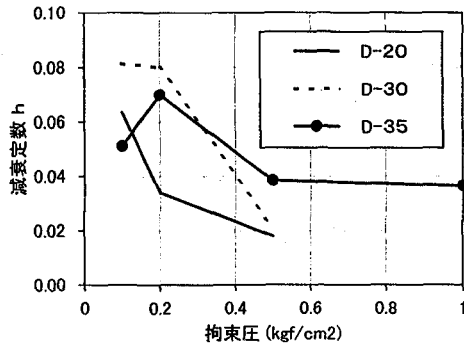


図-6 減衰定数 h

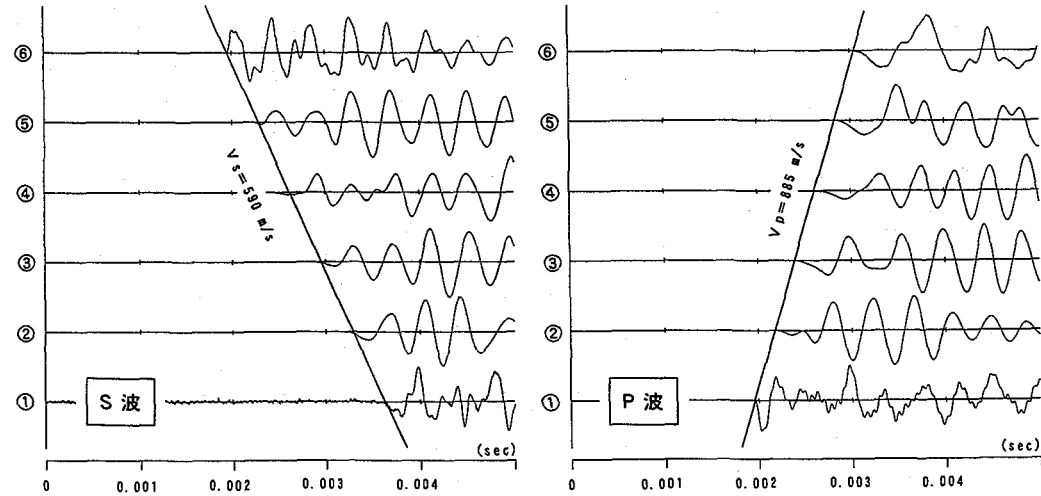


図-4 実験Aで得られた加速度記録の立ち上がり部分

波の1次元波動伝播)では、 $n=0$ である。図-6において、 h は拘束圧が増加するにつれて小さくなる傾向がみられるが、ばらつきがかなり大きく、実験Aで得られる h の精度はあまり高くないものと考えられる。

実験Cで得られた加速度時刻歴のうち、EPS(D-30)の結果を図-7に示す。本実験の卓越振動数は1.47 Hzである。また、加速度時刻歴から、式(2)の対数減衰率を用いて求めた減衰定数 h を図-8に示す。

$h = \log_e (A_n / A_{n+1}) / (2\pi) \cdots \cdots (2)$
自由振動実験で得られた図-8の h は、1.2~1.5%程度であり、図-6に比べかなり小さい。また、EPSの密度が増加するほど、 h が小さくなる傾向がみられ、データのばらつきは図-6より小さい。なお、頂部に集中重量(5Kgf)を有する曲げ梁の1次固有振動数は、図-4の V_s 、 V_p から得られるヤング係数 $E=2345\text{tf/cm}^2$ を用いると1.43 Hzであり、図-7の卓越振動数と一致する。

4. 解析概要

解析法は、重複反射理論による表層地盤の地震応答解析手法(解析プログラム:SHAKE⁶⁾)を用いる。本解析で対象とする実験の拘束圧は、 0.2kgf/cm^2 、EPSの種類はD-30である。また、解析で対象とするひずみレベルは、砂、EPSとも 10^{-6} 以下であり、剛性及び減衰のひずみ依存特性は考慮しない。

図-1、2に示した試験体をS波(厳密にはSH波)およびP波の1次元波動伝播モデルとしてモデル化する。一例として、図-9に実験B1の解析モデルを示す。上部のP波発生用鉄板、その下の試験体、S波発生用の木製板および下部の鉄板を含めてモデル化しており、他の実験の解析モデルは、試験体部分のモデル化が変わるだけである。本解析は、対象とする振動数域が通常の地震応答解析に比べ極めて高いことを除けば、既に確立された一般的な手法であるといえる。

S波を発生させた実験のシミュレーション解析では、図-9においてS波発生用木製板上⑦での加速度記録を地中振幅($E+F$)として入力する。ここに、 E は入射波、 F は反射波である。P波を発生させた実験では、①の加速度記録が入力波になる。このため、上下の加速度計位置を逆にして、①での加速度記録を⑦点での地中振幅($E+F$)として入力する。なお、P波の支配方程式はS波(SH波)の垂直入射時の式と同じであり、せん断弾性係数 G の代わりに $\lambda+2G$ 、応力については、 τ_{yz}

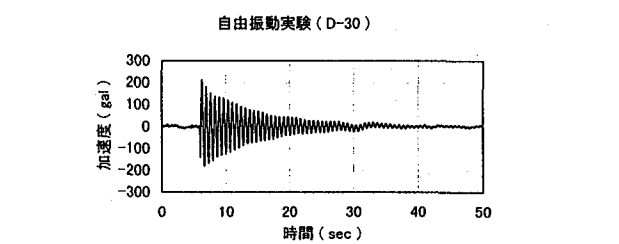


図-7 実験Cの加速度時刻歴

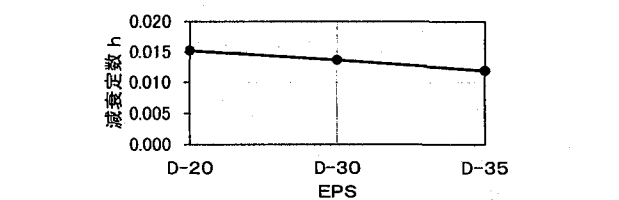


図-8 実験Cで得られた減衰定数 h

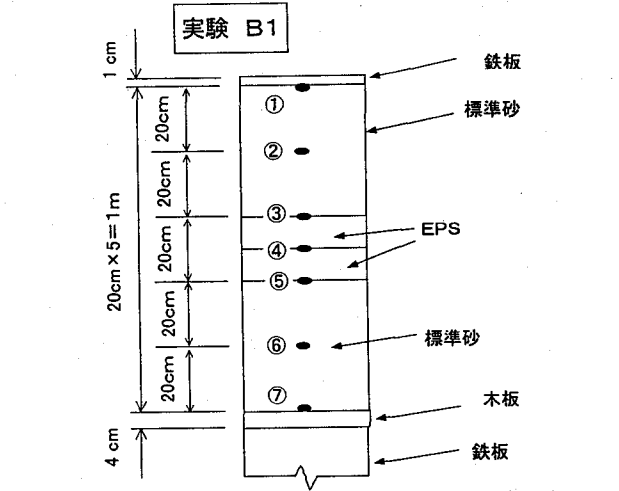


図-9 実験B1の解析モデル

の代わりに σ_{zz} を用いることになる。ただし、 λ は次式で定義されるラムの定数で、 ν はポアソン比、 τ_{yz} はせん断応力、 σ_{zz} は垂直応力である。

$$\lambda = E\nu / \{(1+\nu)(1-2\nu)\} \cdots \cdots (3)$$

材料(砂、EPS、コンクリート、木、鉄)の弾性定数を表-1に示す。EPSと砂の V_s 、 V_p は実験A、および実験B3から決定し、木板の弾性定数は、文献7)に基づいた。また、EPSの減衰定数($h=0.01$)は、実験C(自由振動実験)の結果を参考にして決めた。砂の減衰定数($h=0.1$)は、実験B3のシミュレーション解析(後述の図-13)において、実験結果と整合する値をfittingしたもので、この是非については後述する。

加速度記録の時間きざみは、 $dt=5\times10^{-6}\text{sec}$ 、FFT(高

表-1 解析に使用した弾性定数

	V_s m/s	V_p m/s	ρ g/cm ³	G tf/m ²	E tf/m ²	h %
砂	200	340	1.80	7347	18153	10
EPS	590	885	0.03	1066	2345	1
コンクリート	1878	2970	2.50	8.997×10^5	2.100×10^6	2
木	2746	5137	0.50	3.846×10^5	1.000×10^6	2
鉄	3175	5940	7.85	8.077×10^6	2.100×10^7	2

速フーリエ変換)に使用するデータ数は8192個、継続時間は $t = 0.04096\text{sec}$ 、評価する振動数は5000Hzまでとする。

5. 実験結果と解析結果の比較

ここでは、実験A、実験B 1、B 2、B 3の4種類の実験のシミュレーション解析を行い、EPSとコンクリートのS波およびP波に対する振動低減効果を明らかにすると共に、解析法の適用性を調べる。ただし、EPSのみの実験A、砂のみの実験B 3については、現実の交通振動において重要と考えられるS波を発生させた場合のみの結果を示す。

5.1 実験A (EPSのみ)

S波を発生させた場合の実験と解析の加速度時刻歴波形の比較を図-10に示す。同図では、各波形の最大振幅を同一にして描いており、最大値は図中に併記している。最上段の⑥が入力点であり、解析では実験の⑥の加速度記録を入力している。⑥で、両者の最大加速度が異なるのは、解析で評価する振動数の上限(5000Hz)の影響で

ある。

図-10において、特に②、③、④の最大加速度が異なり、実験では③で最大加速度 578cm/s^2 を示すのに対し、解析では②で最大加速度 463cm/s^2 を示している。これは、上部鉄板で生じる波動の(重複)反射により、試験体中央より上側で最大振幅が発生したものであろう。この現象は実験Aのみの特徴であり、EPSの減衰定数が極めて小さいことに起因する。波形全体の傾向は類似しており、前述の表-1で設定したEPSの減衰定数 $h = 0.01$ は、概ね妥当であると考えられる。

また、解析の①では50Hz程度の長周期成分がみられるが、これは、鉄板、木製板等を含めた系全体の振動モードが表れたものであろう。実験では試験体上部からも波動逸散が生じるため、この系全体の振動モードは表れ難くなっていることが考えられる。

図-10の加速度波形のうち、④、③のパワースペクトルを図-11、12に示す。図-11は実験結果、図-12は解析結果であり、④、③は、実験B 1、B 2において、EPSおよびコンクリートの上下端位置である。以下、パワースペクトルの縦軸は、入力点(図-11、12では⑥)

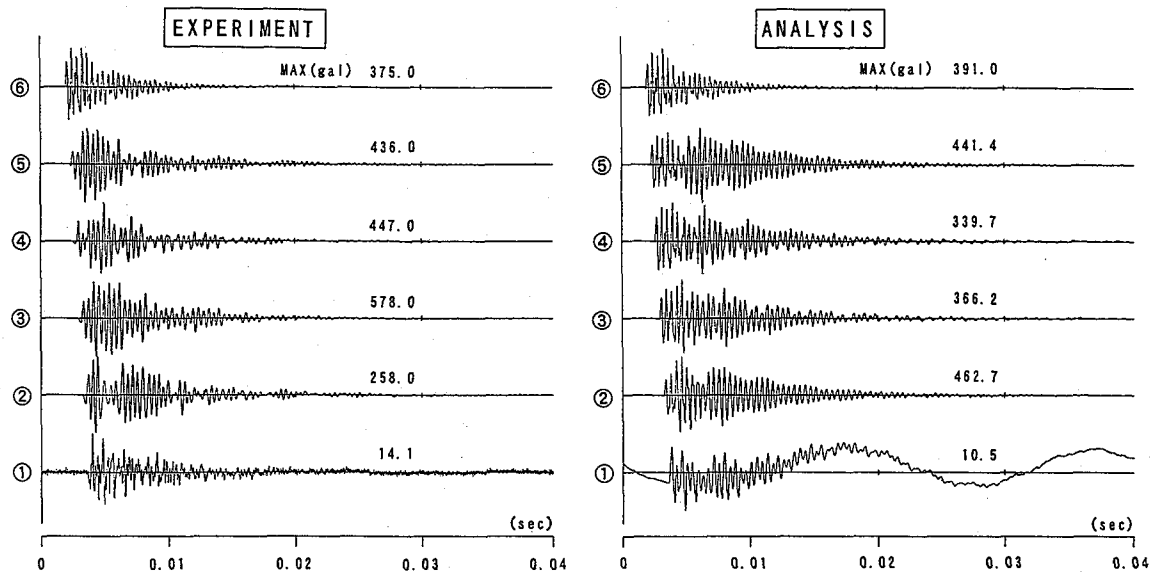


図-10 実験A (S波) の加速度時刻歴

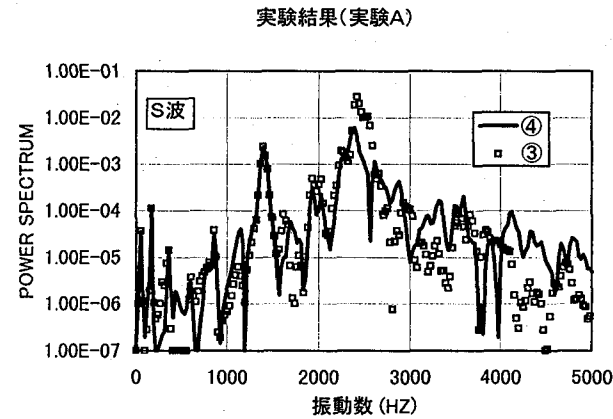


図-11 パワースペクトル (実験結果)

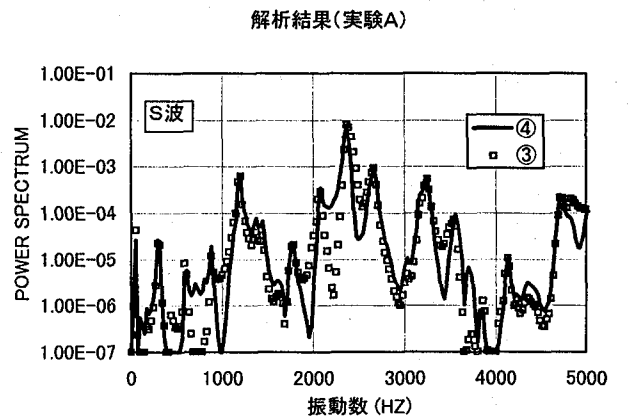


図-12 パワースペクトル (解析結果)

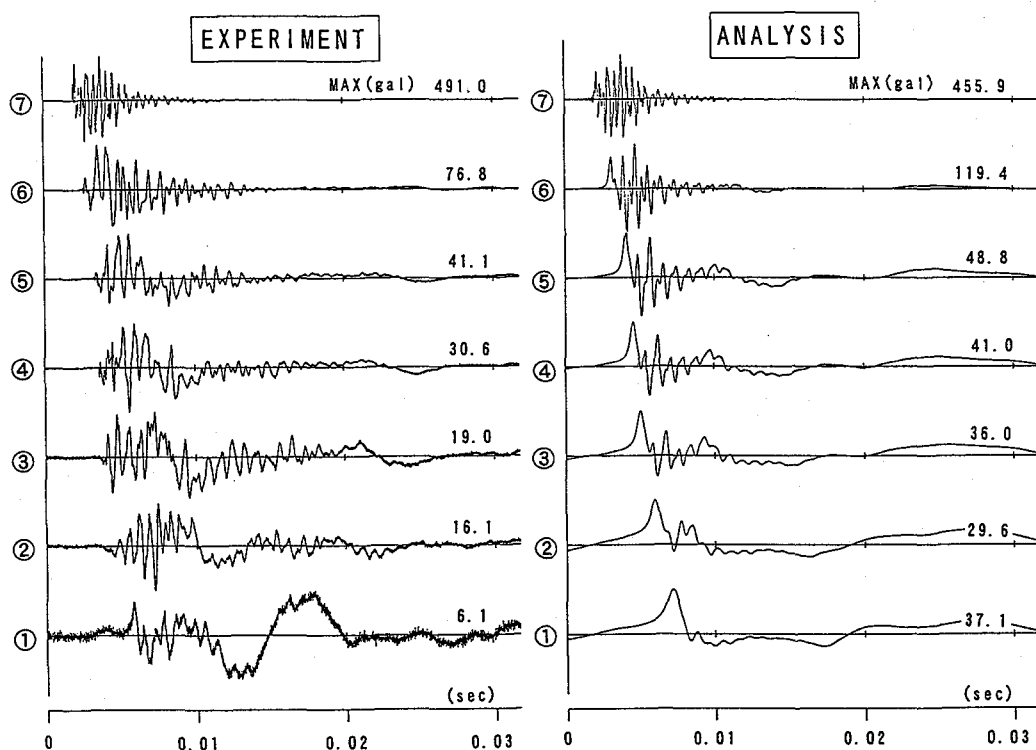


図-13 実験B3 (S波)の加速度時刻歴

の自己相関の最大値(平均パワー)で基準化しており、無次元量である。この結果、それぞれの実験の加振力の違いの影響を取り除くことができる。なお、スペクトルの平滑化等の処理は行っていない。

図-11、12では、実験、解析とも1200~1500Hz付近、2500Hz付近にピークがあり、両者の対応は良好である。図は省略するが、他の①、②、⑤での対応も良好である。

5.2 実験B

(1) 実験B3 (砂のみ)

まず、実験B3(砂のみ)において、S波を発生させた場合の実験結果と解析結果の比較を図-13に示す。最上段の⑦が入力点であり、解析では実験の⑦の加速度記録を入力している。実験と解析の対応は概ね良好である。

表-1に関して前述したように、図-13の解析を行うにあたり、砂の減衰定数 h を種々変えたケーススタディーから、各測定点での振幅が実験と最も整合する $h=0.1$ を採用した。この $h=0.1$ は、微小ひずみ時の砂の減衰定数としては、かなり大きいものであり、図-13の波形の比較からも、この傾向が伺える。このことについては、5.4で考察する。

(2) 実験B1 (砂+EPS)

S波を発生させた場合の実験と解析の加速度波形の比較を図-14に示す。図-13と同様に最上段の⑦が入力点である。

EPS下面⑤、中央④、上面③の最大加速度を比べると、実験ではEPS中央で振幅が増加し、上面で急激に低下する傾向が特徴的に表れており、この傾向は、解析でもうまく表現されている。これは、砂からインピーダ

ンスの小さなEPSに波動が入ると振幅が増加し、逆にEPSからインピーダンスの大きな砂に波動が出ると振幅が減少することを意味し、EPSの振動低減効果を表すものである。ただし、このEPS中央での卓越振動数は、後述の図-18(a)、19(a)に示すように、実験では約2300Hzに対し、解析ではその半分の約1200Hzである。

図-15にP波を発生させた場合の実験結果と解析結果の比較を示す。最下段の①が入力点であり、解析では実験の①の加速度記録を入力している。図-15の解析ではS波の場合と同様にEPS中央④で振幅が増加しているが、実験ではこの傾向は表れていない。これは、EPSのP波とS波に対する減衰定数の違いに起因するものであろう。ただし、EPS下面⑤で振幅が急激に低下する傾向は、実験、解析ともうまく表現されている。

(3) 実験B2 (砂+コンクリート)

S波を発生させた場合の実験と解析の加速度波形の比較を図-16に示す。同図では、④の地震計がなく、①と②の間に新たに⑧の地震計を設置している。

コンクリート上下面の③と⑤の間で波形の様相が大きく異なっており、コンクリート通過後の③、②、⑧、①では、実験、解析とも高振動数域が大きくて減衰している。これは、コンクリートの振動低減効果を表すものであり、後述の図-18(b)、19(b)のパワースペクトル図においても明らかである。

P波を発生させた場合の比較を図-17に示す。実験では、コンクリート上面③で振幅が急激に低下しており、解析でもこの現象がうまく表現されている。

5.3 EPSとコンクリートの振動低減効果

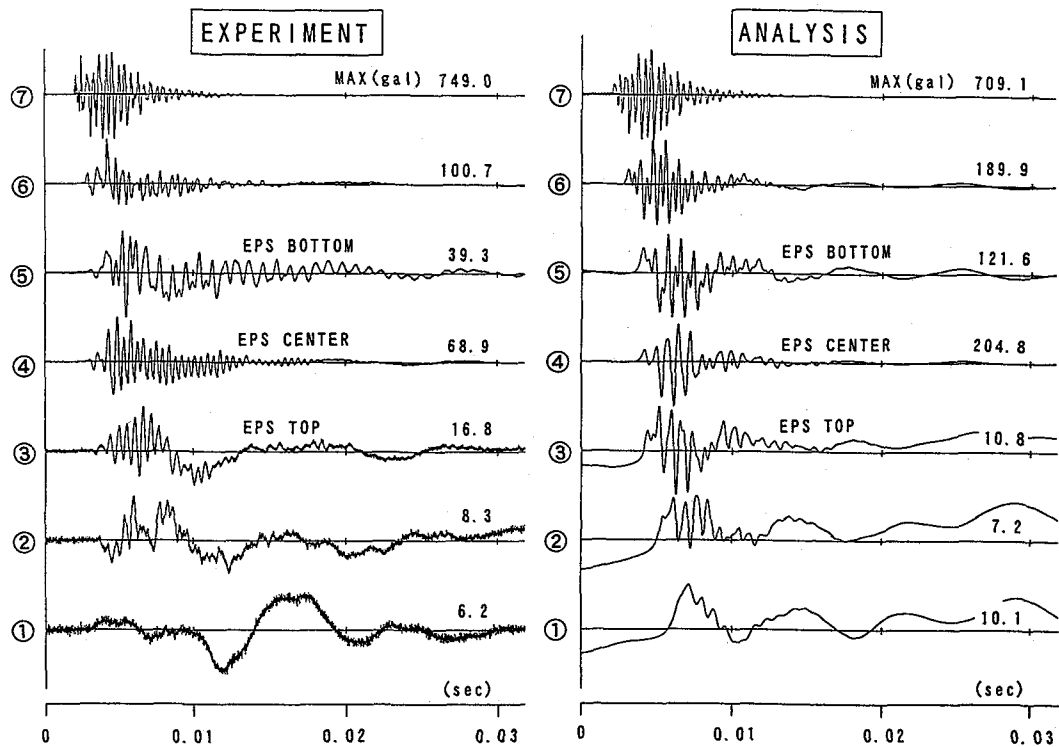


図-14 実験 B 1 (S波) の加速度時刻歴

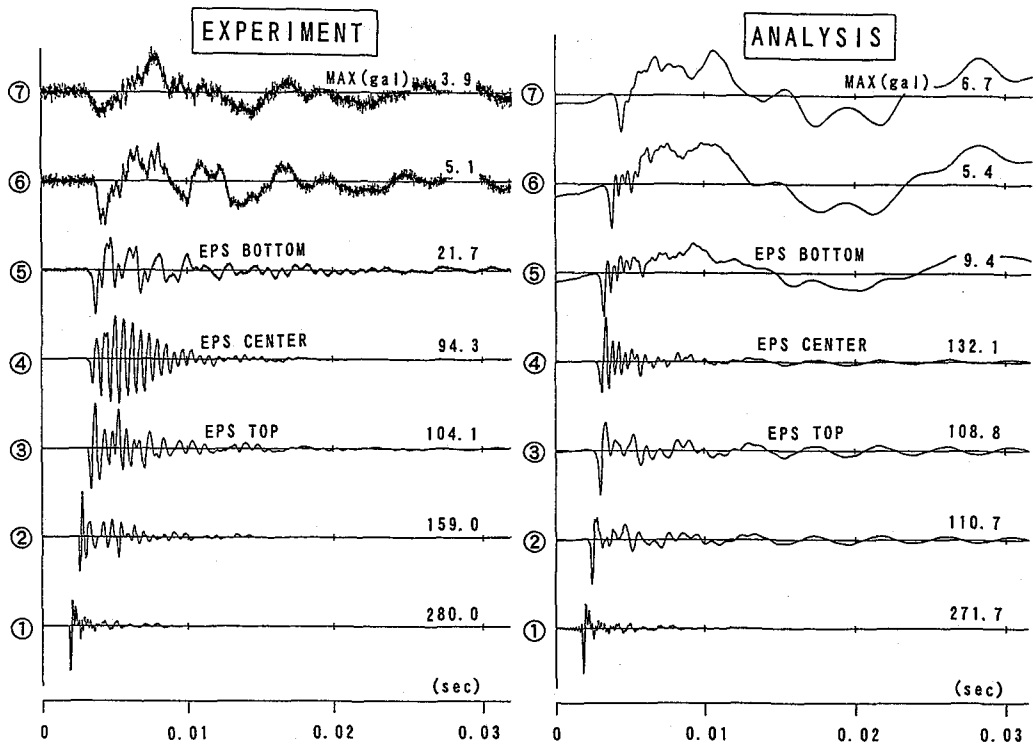


図-15 実験 B 1 (P波) の加速度時刻歴

実験 B 1、B 2、B 3 の⑤、③でのパワースペクトルの比較から EPS とコンクリートの振動低減効果を調べる。⑤、③は、EPS およびコンクリートの上下端位置である。

実験 B 1 の⑤、④、③のパワースペクトルを図-18(a)に、解析結果を図-19(a)に示す。解析では、EPS 中央の④で 1200Hz 付近、2300Hz 付近にピークがあり、1200Hz 付近のピークが優勢である。一方、実験の④では、

2300Hz 付近のピークが優勢であり、この違いが前述図-14の波形時刻歴においても認められる。

EPS の振動低減効果については、実験、解析とも、③で 1200Hz 付近、2300Hz 付近のピークが大きく低下している。

実験 B 2 の⑤、③のパワースペクトルを図-18(b)に、解析結果を図-19(b)に示す。実験では 1000Hz 付近以上の高振動数域で、⑤～③間の振幅が急激に低下しており、

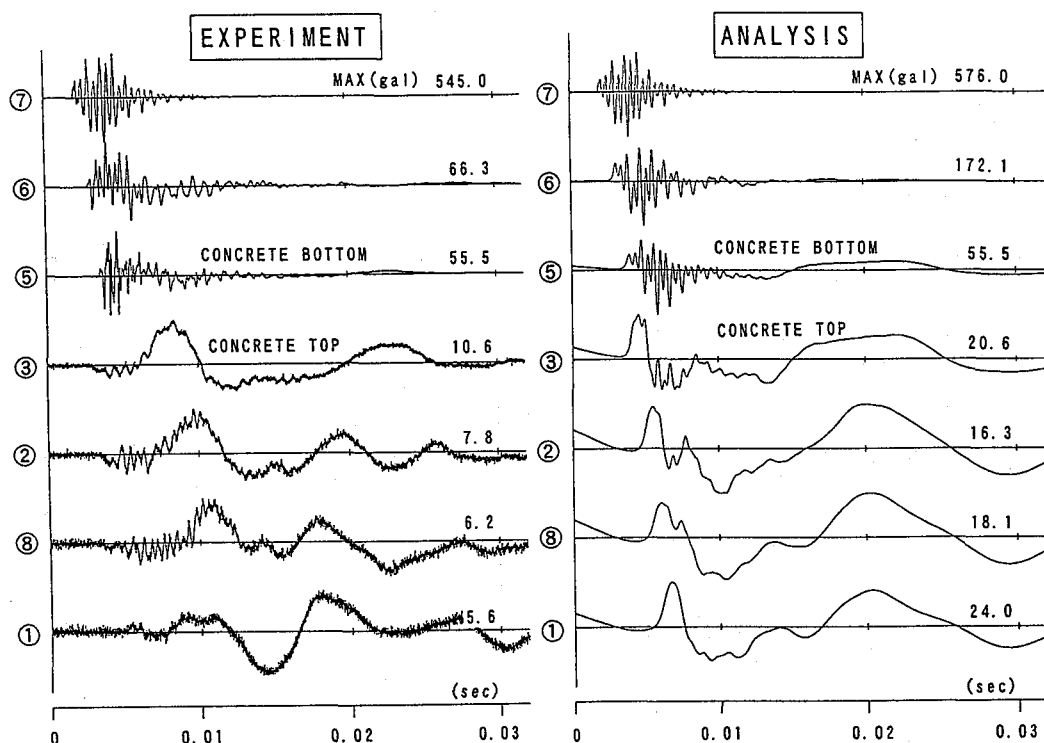


図-16 実験B2 (S波) の加速度時刻歴

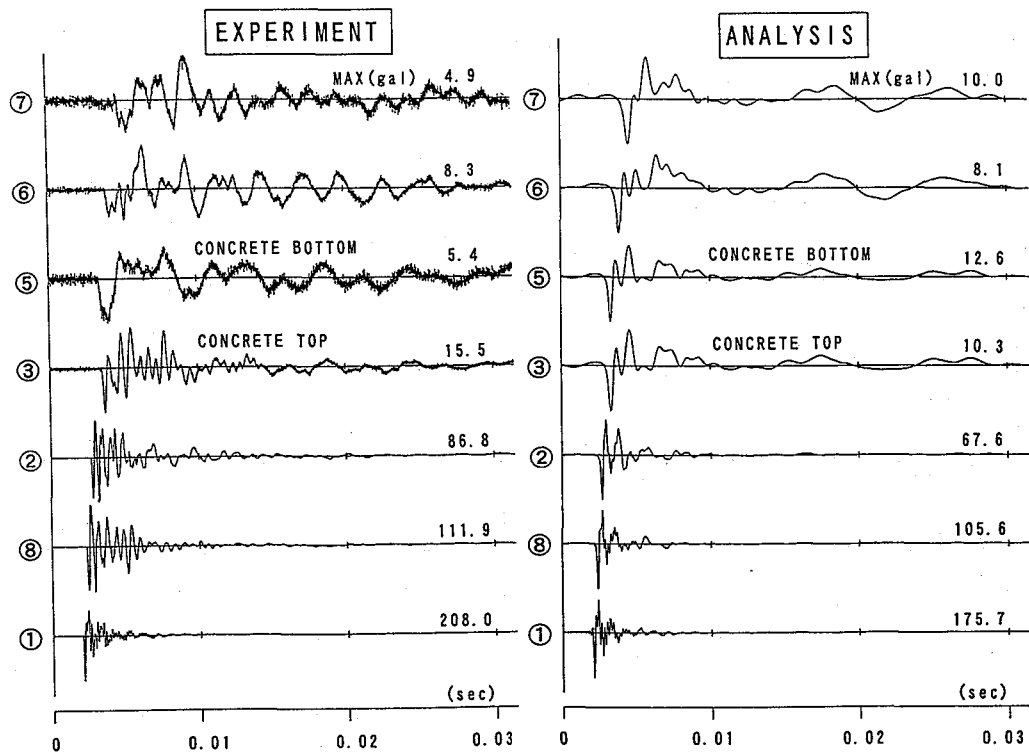


図-17 実験B2 (P波) の加速度時刻歴

コンクリートの振動低減効果が明らかである。解析でも1200Hz付近、2300Hz付近のピークの低下が認められるが、その程度は、実験結果ほど大きくない。

実験B3の⑤、④、③のパワースペクトルを図-18(c)に、解析結果を図-19(c)に示す。解析では、⑤、④、③の順に振幅が規則的に低下しているおり、低下の程度は高振動数ほど大きい。一方、実験の③は⑤に比べ若干振幅が低下しているが、距離20cmでの砂の距離減衰はあ

まり大きくない。また、⑤、④、③で、解析ほど規則的な振幅低下はみられない。

以上の結果から、EPSとコンクリートの振動低減効果を比較する。解析では、1200Hz付近、2300Hz付近のピークにおいてEPSのほうが振動低減効果が大きいですが、実験では、1000Hz付近以上の高振動数域においてコンクリートのほうが効果が大きいといえる。

実験B1、B2、B3の解析において、⑥での入射波

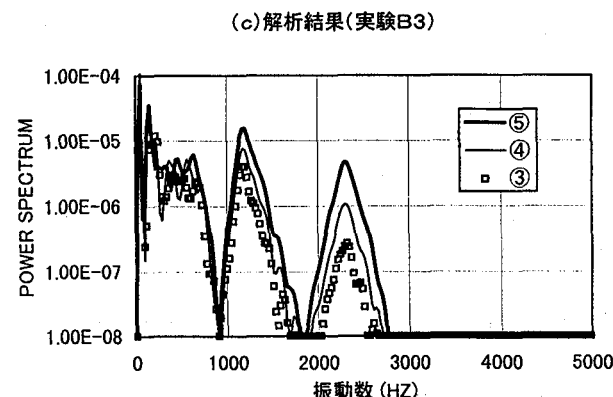
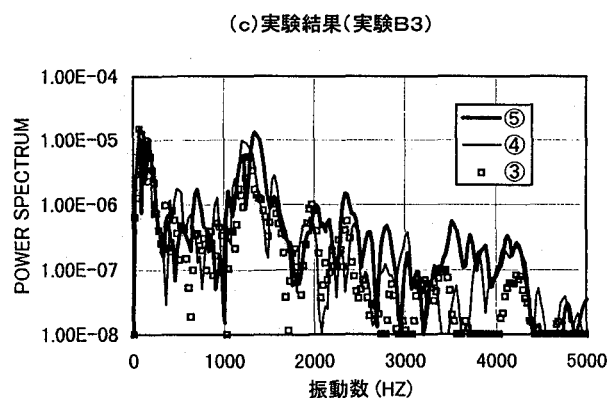
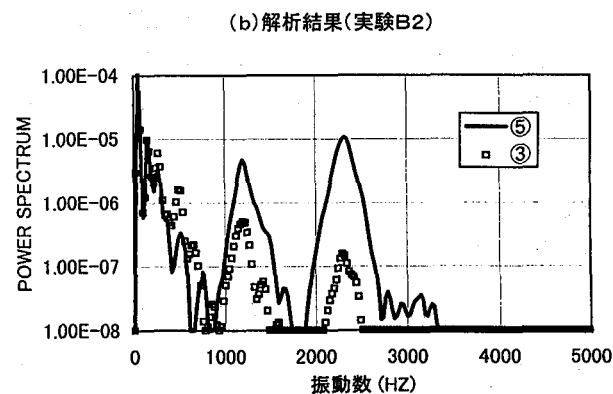
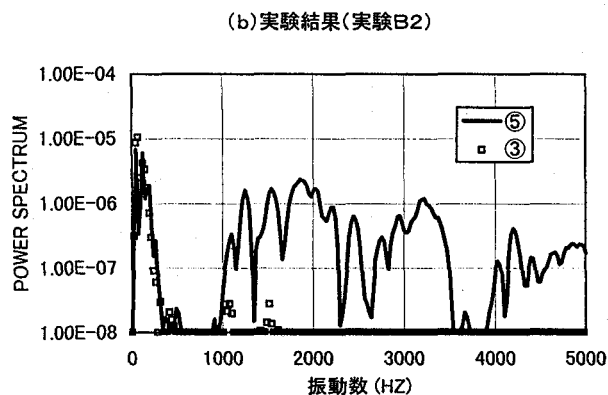
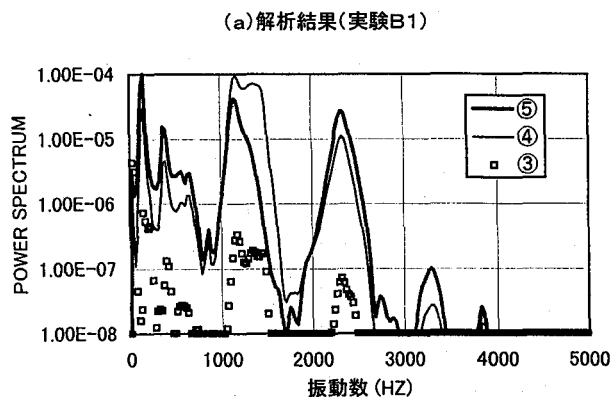
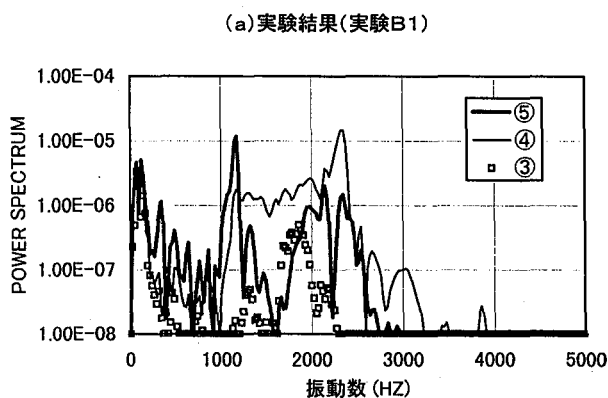


図-18 実験結果(実験B1、B2、B3)

E_3 と③での入射波 E_3 の比 E_3/E_0 を伝達率 $T(f)$ と定義し、これを図-20に示す。同図において、 $T(f)=1.0$ は、波動が同振幅で上方の地盤へ透過することを、 $T(f)=0.0$ は全く透過しないことを表す。0~2500Hz付近までに着目すれば、砂のみの実験B3に比べ、EPS(実験B1)、コンクリート(実験B2)の振動低減効果が認められる。

また、実験B1では、740Hz付近、2200Hz付近での伝達率の低下が著しく、図-19(a)で500~1000Hz付近の③の振幅が大きく低下しているのは、この影響であろう。740Hz、2200Hzは、厚さ $H=20$ cm、 $V_s=590$ m/sのEPSの1/4波長則による1次および2次卓越振動数であり、これらの振動数では波動がEPS内にトラップされ、上方の地盤へ透過できないことを示している。

5.4 砂の減衰定数について

図-19 解析結果(実験B1、B2、B3)

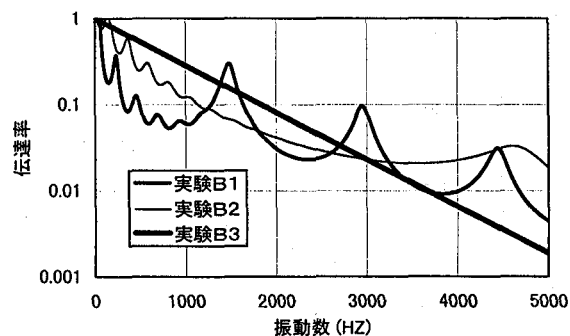


図-20 伝達率(E_3/E_0)

実験B3(砂のみ)の解析において設定した砂の減衰定数($h=0.1$)について考察する。

図-20において、3000Hz以上の高振動数域では、実験B3の伝達率が最も低く、設定した減衰定数 h は、特に高振動数域で若干大きかったものと考えられる。この結

果、図-19(c)では実験に比べ特に高振動数域での③の振幅低下が大きい。この理由として、以下の2点が指摘できる。

- ・実験では入力点⑦～⑥間の振幅低下が著しいが、これは、S波発生用木製板と砂の間で、ずれ等が生じていることが推定される。解析では、この間の振幅低下も含めて減衰定数hでモデル化しているため、結果的にhが大きくなったものと考えられる。
- ・本解析では、減衰定数hは振動数に依存しないとして、次式が仮定されている⁶⁾。

$$\omega \eta = 2 G h \dots\dots\dots (4)$$

このため、振動数が高くなると一定距離内の波数、すなわち、サイクル数が増加し、高振動数域ほど一定距離内の振幅低下が大きくなる。

ただし、 $\omega (=2\pi f)$ は円振動数、 η は粘性係数である。

上の式(4)の効果を調べるために図-21を用意した。同図では、実験B3の解析で得られる⑤での入射波 E_s と③での入射波 E_s の比 E_3/E_s を伝達率 $T(f)$ と定義し、これを3本の実線で示している。

$h=0.0$ の場合、伝達率は全振動数域で1.0である。一方、減衰定数hを大きくする($h=0.05, 0.1$)と振動数に比例して伝達率が指数的に低下することが分かる。

ここで、交通振動の距離減衰として良く用いられる前述の式(1)と図-21の関係を示しておく。式(1)に、 $X=20\text{cm}$ (⑤～③間の距離)、 $V=V_s=200\text{m/s}$ 、 $n=0$ を代入し、 $h=0.05, 0.1$ とした場合の振幅比 $A(X)/A_0$ を図-21に■印、▲印でプロットしている。両者は、本解析(SHAKE)で得られた伝達率と極めて良く一致しているのが分かる。

6. 現実の振動数域(0～50Hz)での振動低減効果

ここでは、交通振動で問題となる現実の振動数域(0～50Hz)におけるEPS、コンクリートの振動低減効果(伝達率)について検討する。解析プログラムは、5.と同じくSHAKEを用いる。

6.1 解析モデル

EPSの振動低減効果を調べるための解析モデルを図-22に示す。同図は、半無限地盤中のSH波1次元波動伝播問題をモデル化したもので、④～⑥間20cmがEPS、その他の層が地盤である。6.3では、EPSの代わりにコンクリートを用いた解析、EPS、コンクリートの厚さを50cm、100cmにした解析等も行っている。

EPS、コンクリート、地盤の材料定数は、前述表-1の値を用いる。減衰定数は①～②間100mを $h=0.03$ とし、その他の層はすべて $h=0$ とする。これは、①～②間の波動の往復に伴う減衰効果により、上部(地表面)からの反射波を取り除くことと、減衰の効果を除いた波動インピーダンスのみによる振動低減効果を調べるため

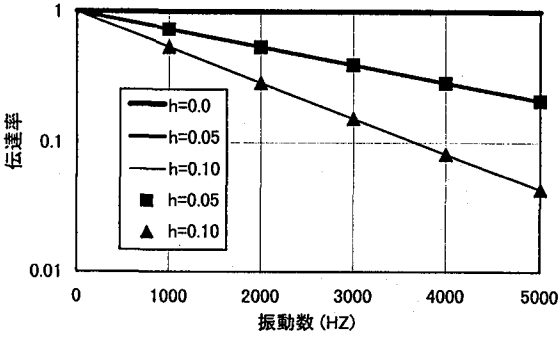


図-21 伝達率 (E_3/E_5)

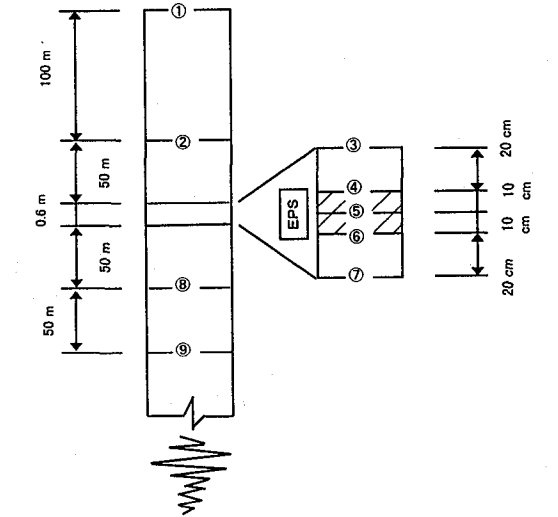


図-22 解析モデル

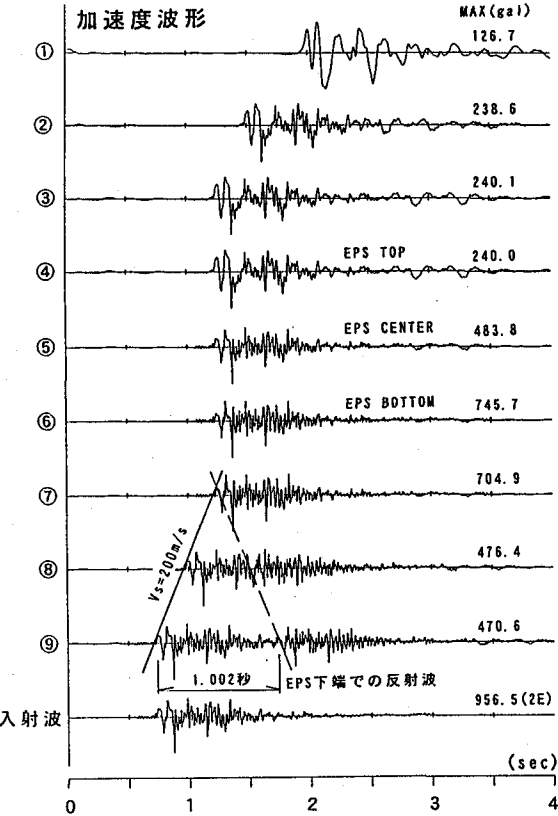


図-23 加速度応答波形

である。

図-22のモデル下端から振動波形を入力し、②での入射波 E_2 と⑧での入射波 E_8 との比 E_2/E_8 を伝達率 $T(f)$ と定義する。この伝達率 $T(f)$ により、EPS、コンクリートの振動低減効果を検討する。ただし、①～②間以外はすべて $h=0$ であるため、伝達率の定義を E_3/E_7 等にしても $T(f)$ の値は同じである。

入力する振動波形、振幅はどのようなものでも良いが、ここでは、兵庫県南部地震における神戸ポートアイランドGL-83mでのNS成分の時間軸を1/10に縮小した波形（ $dt=0.001$ sec、 $N=4096$ ）を用いる。

6.2 加速度時刻歴

図-23に①～⑨の点での加速度時刻歴を示し、最下段に入射波形（2E）を示す。⑨～⑧、⑧～⑦間は、それぞれ50mである。この間を $V_s=200$ m/sの速度でS波が上方へ伝播している様子が図中の実線で示されている。また、EPS下端の⑥の点で発生した反射波が下方へ伝播している様子が破線で示されている。地表面①で発生する反射波は①～②間の減衰、距離が大きいため、②点以深ではあまり目立たない。

6.3 伝達率 $T(f)$

EPSの厚さが100cmの場合のS波の伝達率 $T(f)$ を図-24に細い実線で示す。同図では、10Hz付近までの低振動数域で伝達率の変動が大きい。これは、図-22においてEPSの上方150.2m（地表面～EPS上端）の地盤での重複反射の影響が表れたものである。図-22において、①～②間を150m、①～②間の減衰を $h=0.10$ とし、地表面からの反射波の影響を少なくしたときの伝達率を図-24に太い実線で併記している。低振動数域での変動が小さくなっているのが分かる。また、図中の口印は、波動論による理論解⁸⁾である。SHAKEの解析結果と理論解は良く一致しており、解析法、解析モデルの妥当性を示している。

EPSの厚さが20、50、100、200cmの場合の伝達率を図-25に、コンクリートの厚さが20、50、100cmの場合の伝達率を図-26に示す。

両図の比較から、同じ厚さのEPSとコンクリートでは、EPSのほうが振動低減効果大きいことが分かる。これは、次式で示されるように土～EPS間のインピーダンス比 R_{se} が土～コンクリート間のインピーダンス比 R_{cs} より大きいためである。

$$R_{se} = \{\rho V_s(\text{土})\} / \{\rho V_s(\text{EPS})\} = 20.3 \cdots (5)$$

$$R_{cs} = \{\rho V_s(\text{コンクリート})\} / \{\rho V_s(\text{土})\} = 13.0 \cdots (6)$$

また、図-25において、例えばEPSの厚さ $H=200$ cmの場合、次式の1/4波長則で得られる振動数 $f=73.75$ Hz
$$f = V_s / (4H) = 73.75 \text{ Hz} \cdots \cdots (7)$$

で伝達率が極小になり、振動数がこれ以上大きくなると、逆に伝達率は増加する。これは、入射波の振動数がEP

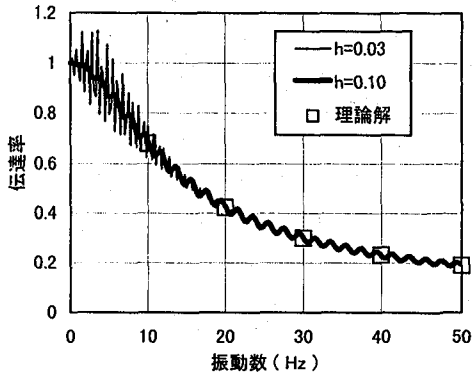


図-24 EPS厚さが100cmの場合の伝達率

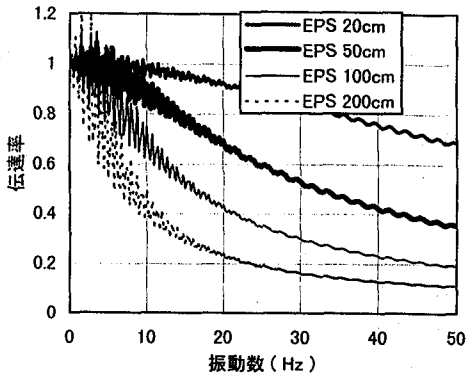


図-25 EPSの伝達率

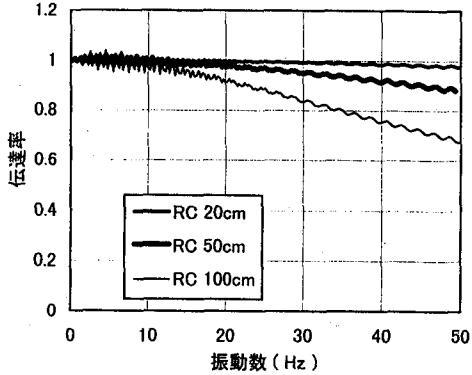


図-26 コンクリートの伝達率

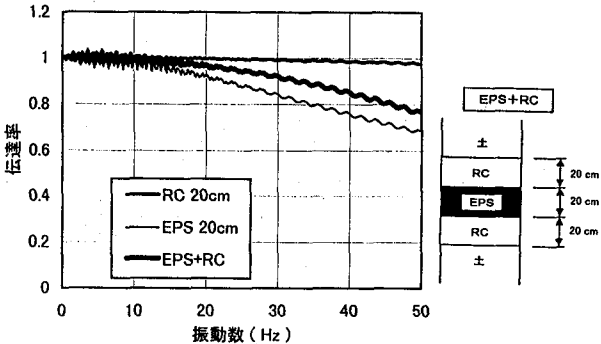


図-27 EPS+コンクリートの伝達率（1）
Sの固有振動数と一致すると波動がEPS内にトラップされ、上方の地盤へ透過できない現象を表している。
EPSを用いた地中防振壁の現場施工においては、地

下水による浮力対策として、EPSの両側にコンクリート・ブロックの設置を考えている。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伝達率を確認しておく必要がある。

EPSの両側にコンクリートを設置した場合の伝達率を図-27、28に太い実線で示す。図-27はEPS厚さ20cm、図-28はEPS厚さ50cmの結果で、両図には比較のため図-25のEPSのみの結果、図-26のコンクリートのみの結果も併記している。

防振壁施工場所を対象とする振動数を20～30Hz程度とすれば、EPS厚さ20cm、50cmの場合、EPSのみのほうが両側にコンクリートを設置するより振動低減効果がやや大きいことが分かる。

EPSとコンクリートの組み合わせを変えた場合の解析結果を図-29に示す。細い実線のEPS+RC(1)は、図-28の結果と同じもので、中央にEPSを、両側にコンクリートを設置している。この設置順序は、防振壁現場施工での組み合わせと同じものである。

一方、太い実線のEPS+RC(2)はEPSとコンクリートの位置を逆にしたもので、中央にコンクリート(厚さ50cm)を、両側にEPS(それぞれ、厚さ25cm)を設置している。この場合、38Hz付近で伝達率 $T(f)=1$ が表れており、振動低減効果が低下する。

7. 結論

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- ①：防振材(EPS)の模型振動実験を行い、地中防振壁の剛性、厚さ、深さを決定するのに必要な動的特性(V_s 、 V_p 、 h)を示した。
- ②：砂からEPSに波動が入ると振動振幅が増加し、逆に、EPSから砂に波動が出ると振幅が急減する。これは、両材料のインピーダンス比に起因しており、この結果、EPSの振動低減効果が表れる。この現象を模型振動実験、及びそのシミュレーション解析で表現することができた。
- ③：砂からインピーダンスの更に大きいコンクリートに波動が入ると、特に高振動数域で振動低減効果が著しい。この現象を模型振動実験、及びそのシミュレーション解析で表現することができた。
- ④：現実の交通振動で問題となる振動数域(0～50Hz)でのEPSとコンクリートの振動低減効果(伝達率)を解析的に示した。また、地中防振壁の現場施工においては、地下水による浮力対策として、EPSの両側にコンクリート・ブロックの設置を考えており、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示した。

本研究は、阪神高速道路公団・道路交通振動対策委員

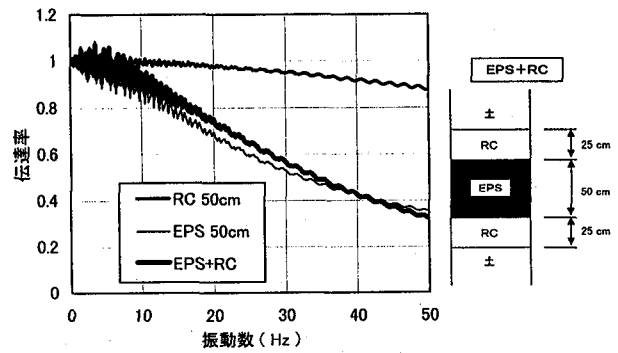


図-28 EPS+コンクリートの伝達率(2)

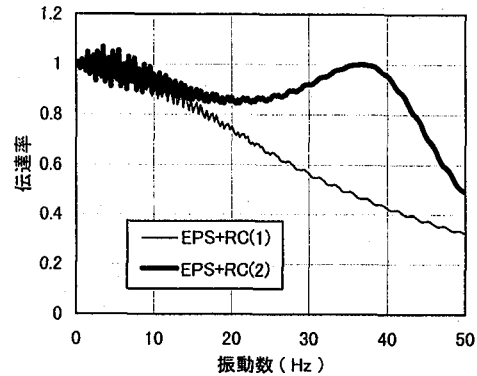


図-29 EPSとコンクリートの組み合わせ

会(委員長:前田幸雄大阪大学名誉教授)の指導をうけながら行ったものである。指導いただいた関係委員に感謝いたします。

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、44-5、1996.9
- 2) (財)阪神高速道路管理技術センター、「平成8年度道路交通振動対策委員会・報告書」、平成9年
- 3) 早川 清、松井 保、「EPSブロックを用いた交通振動の軽減対策」、土と基礎、44-5、1996.9
- 4) 森尾 敏、吉川 実、「交通振動の伝播特性」、土と基礎、35-6、1987.6
- 5) 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、38-4、1990.4
- 6) P. Schnabel, H. Bolton Seed and J. Lysmer, 「Modification of seismograph records for effects of local soil conditions」、EERC 71-8, Univ. of CALIFORNIA, 1971.11
- 7) 国立天文台編、理科年表、1993
- 8) 佐藤泰夫、「弾性波動論」、岩波書店、pp. 61-64、1978.3
- 9) (社)日本橋梁建設協会、「高架道路橋の交通振動問題とその対策」、昭和60年3月

(1997年9月26日受付)