

(129) 発泡スチロール集合構造体の動特性に関する基本的研究

東京大学生産技術研究所 田村重四郎

東京大学生産技術研究所 小長井一男

憫熊谷組技術研究所 宇波 邦宣

1. はじめに

発泡スチロール (Expanded Polystyrol: 以下 EPSと呼ぶ) は土木分野では主に断熱材料として使用されてきたものであり、これを構造材料として捉えた研究例は少ない。しかし近年、軟弱地盤上の軽量盛土材料として EPSのブロックを積み上げた構造が注目されていることから、EPSの静力学的な挙動についての関心が高まり、これについての詳細な研究が活発に行われつつある。しかし地震時の応答等に関する動力学特性についての研究はようやく緒についた段階である。そこでここでは、EPSの連続体としての基本的物性を把握した上で、EPSブロックからなる積層構造モデルを作成し、この集合構造の動的挙動に関する基本的実験を行ったのでその結果を報告する。

2. EPSの基本的物性

EPSは型枠内で発泡する条件で密度が異なり、このため連続体としての物性も微妙に変化が現れる。そこで EPSブロック集合体の振動実験を行うに先立ち、実験に用いる EPSブロック自体の基本的物性を正確に把握しておく必要がある。本研究では EPSの密度、ヤング率、ポアソン比、減衰定数を以下の方法で測定し、検討を加えた。

2.1 密度の測定

EPSブロックから $8\text{cm} \times 6\text{cm} \times 10\text{cm}$ 程度の試験片を3本切り出し、 40°C 前後の乾燥炉内で10時間放置した。その間、1時間毎に供試体の重量を測定したが3本の供試体ともに実験開始から1時間後、重量が1%程度減少したものの、それ以降は重量の変化が全くみられなかった。乾燥終了後、3本の供試体の体積をそれぞれ測定し、密度を算定したところ、3本ともに密度が約 $0.021\text{g}/\text{cm}^3$ という結果を得た。

2.2 ヤング率・ポアソン比の測定

ヤング率・ポアソン比に関しては一軸圧縮試験と弾性波による測定試験を行い、静的な変形を与えた場合の値と動的な変形を与えた場合の値を測定した。

2.2.1 ヤング率・ポアソン比の測定

EPSブロックから $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ の試験片を切り出し、表面をサンドペーパーで整形した後、上下端面に鉄板を敷き、オルゼン型万能試験機で一軸圧縮試験を行った。得られた応力-歪関係を、荷重軸方向については図-1(A)に、荷重軸直角方向については図-1(B)に示す。この図から、応力-歪曲線は載

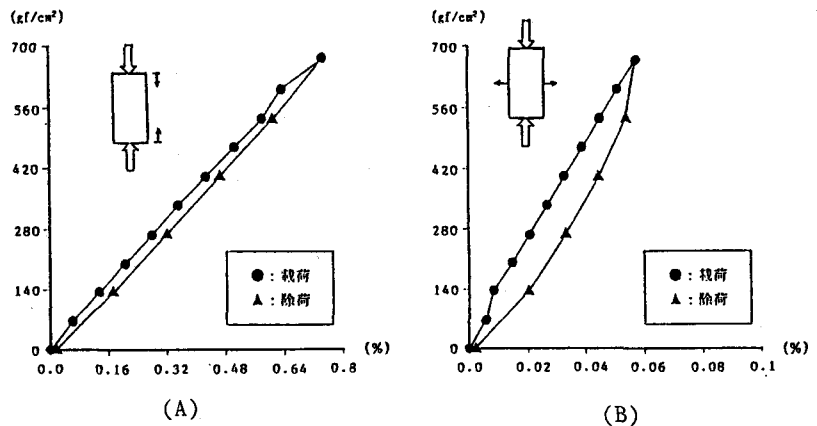


図-1 EPSの応力-歪曲線

荷、除荷の過程でその勾配がわずかながら変化し、ゆるやかなループを描いている様子が認められる。比較的直線部の長い $200\text{gf}/\text{cm}^2 \sim 533\text{gf}/\text{cm}^2$ の範囲でヤング率、ポアソン比を算定し、ヤング率が約 $86\text{Kgf}/\text{cm}^2$ 、ポアソン比が約 0.08 という値を得た。荷重は約 $700\text{gf}/\text{cm}^2$ まで増やしているが、この段階での歪レベルは $8 \times 10^3 \mu$ のオーダーとなる。

2.2.2 弾性波による測定

低歪域での動的なヤング率を求めるべく、EPS内を伝播する弾性波の速度を測定した。この実験では、 $40\text{cm} \times 90\text{cm} \times 180\text{cm}$ のEPSブロックを使用し、最も広い $90\text{cm} \times 180\text{cm}$ の面の中心線上の1点に鉄板を張りつけ、これにコイルを接近させて、電磁誘導によりインパルスを与えている。この時、この中心線上の3ヶ所に等間隔に埋設してある圧電型加速度ピックアップにより伝播する弾性波を記録した(図-2)。得られた加速度計記録からP波、S波の到達時刻を読み取り(図-3)、それぞれの波の伝播速度を求めると、P波速度が約 $714\text{m}/\text{s}$ 、S波速度が約 $484\text{m}/\text{s}$ という値を得た。これらの値からヤング率、ポアソン比はそれぞれ約 $108\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 0.075 と算定される。波動の振幅と周期からこの時点での歪を算定すると 100μ に達しない。

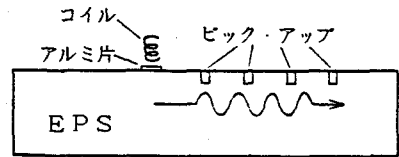


図-2 弾性波動測定システム

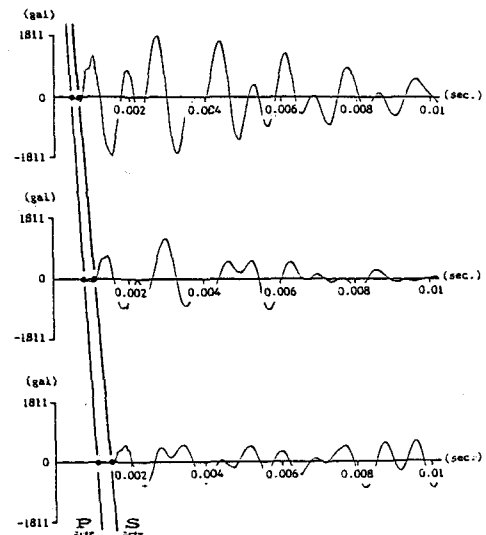


図-3 EPS表面を伝播する波動の時刻歴

2.3 減衰定数の測定

EPSブロックから $80\text{cm} \times 4\text{cm} \times 12\text{cm}$ のEPS柱を作成し、片持ち梁の曲げ自由減衰振動から減衰定数を調べた。このEPS柱の一端を固定して、前述の装置を用いてインパルスを自由端に与えて、この部分での自由減衰振動を非接触型のギャップセンサーを用いて測定した。得られた変位の時刻歴を図4に示す。この結果、片持ち梁の固有振動数が約 7.4Hz で、純粋な曲げ振動を仮定してヤング率が約 $114\text{kgf}/\text{cm}^2$ という値を得た。振幅の対数減衰率から減衰定数を求めてみると、時間の経過とともに減衰定数が小さくなっていく様子が認められ、打撃直後で 0.98% 、4秒後(30サイクル後)で 0.69% という値が得られた。初期の自由端の振幅は約 5mm であり、振幅から逆算した片持ち梁の固定部(根元)のひずみは 1000μ 以下のレベルにあり、一軸圧縮試験でヤング係数を算定した歪レベルを大幅に下回っている。

2.4 EPSの基本物性試験結果

本実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

- ① 今回実験に用いるEPSの密度は $0.021\text{g}/\text{cm}^3$ であり、土やコンクリートの $1/50 \sim 1/100$ である。
- ② ヤング率は初期接線勾配で約 $110\text{kgf}/\text{cm}^2$ であるが、密度が土の場合に比べて小さいことから結果的にEPSの弾性波速度は硬い地盤のそれと同程度である。
- ③ ポアソン比も地盤に比べて $1/5 \sim 1/6$ 程度である。
- ④ 減衰定数は、 1000μ 以下の歪レベルでは 1% 未満であり、相当する歪レベルでの地盤の減衰定数より小さい。

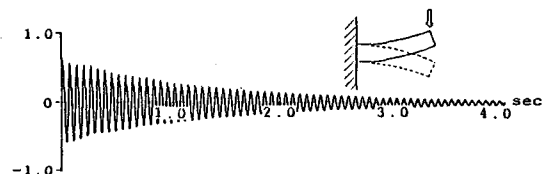


図-4 片持ち梁自由端の自由減衰振動

3. EPSブロックを用いた模型振動実験

EPSブロック集合体の動的挙動を検討するために、EPSブロックの積層構造模型を振動台上に築造して動的実験を行い、その応答特性について検討した。さらに FEM解析による線形領域での応答特性との比較検討を行った。

3.1 実験方法

本実験では、実際に施工で用いられている40cm×90cm×180cmのEPSブロックを図-5のように3段積み重ねている。上載荷重として模型の上面に角材で補強したベニヤ板を敷き、これを介して鉛の散弾を入れた袋（1袋=10kgf）を敷き詰めた。今回の実験では、上載荷重の大きさによる EPSブロック同士の接触面の状況が、全体の動的挙動にどのように影響を及ぼすかについて特に注目した。そこで EPSブロックの下段と振動台、また上段とベニヤ板の接触面は、酢酸ビニル系樹脂で完全に接着固定とし、上段と中段、中段と下段のブロック間の接触面のみ固定しない単純な境界条件を設定した。本研究ではベニヤ板と鉛の散弾を合わせて1462.25kgf、762.25kgf、412.25kgf、62.25kgfとする4種類の上載荷重の場合について共振実験を行った。模型を水平方向に変位制御（BASE: 0.1mm程度）で加振し、図-5に示している4ヶ所の位置で水平方向の変位を、天端ではこれに加えて上下方向の変位をギャップセンサーで測定した。

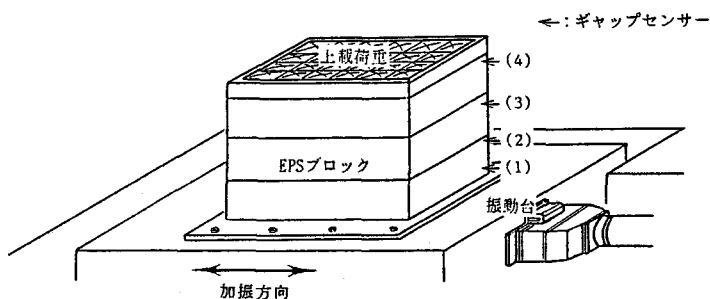


図-5 EPSブロック集合体の加振実験

3.2 実験結果と考察及びFEM解析との比較検討

異なる2種類の上載荷重($W=1462.25\text{kgf}$ 、 $W=412.25\text{kgf}$)についての振動数特性曲線を図-6に示す。上載荷重1462.25kgfの基本振動数は6.2Hzであり、そのときの増幅率は20.6倍となっている。上載荷重が412.25kgfでは基本振動数10.5Hz、増幅率 9.4倍である。このように上載荷重が大きくなるにつれ基本振動数は低くなり、共振時の応答倍率はより大きく鋭く立ち上がるという傾向は、今回の実験で行った他の上載荷重の場合にも共通して認められる。こうした現象を詳細に検討するため FEMによる固有値解析をおこない、得られた基本振動数を、観測された基本振動数、応答倍率と共に表1にまとめた。FEMで用いるEPSの入力データとしては、上載荷重のもっとも大きい $W=1462\text{kgf}$ の状況での共振時の歪レベルを考慮してヤング率 86kgf/cm^2 、ポアソン比0.08を採用した。この構造が線形性状を示すものと想定すれば、荷重 W が小さくなるにつれ基本振動数はほぼ $1/\sqrt{W}$ に比例して増えていくことになるが、観測された値はこの比に応じて増加せず、これを次第に下回っていく。さらに減衰についてみれば、荷重が最も大きく、かつ応答倍率が高い状態で、想定される歪レベルが最も大きくなるにも拘らず、 $W=1462\text{kgf}$ の場合の減衰が

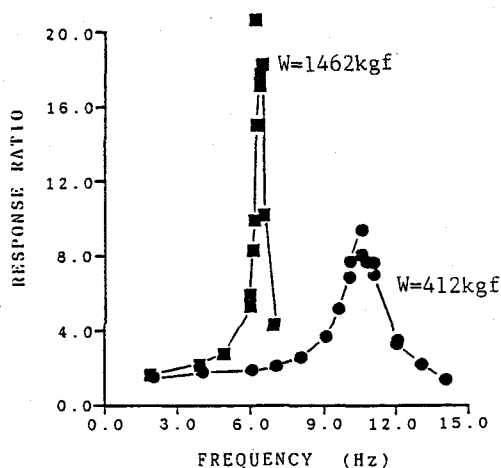


図-6 周波数特性曲線

最も小さくなっている。これは一般の土構造などに見られる現象と相反する現象である。この構造を等価な1質点系に置き換えて考えた場合、質量の集中する構造天端は角材で補剛されたベニヤ板のためにほとんど剛体としてしか動きえないことから、この現象は、EPSブロック集合構造のブロック間の接触面の振動時の状況が、荷重が減少するにつれ変化したことを示している。

図7にはブロック集合体のコーナーの共振時の変位応答（絶対値）を天端の水平変位で基準化し、FEMによる基準振動モードと対比したものである。荷重が大きいほど連続体を仮定した解析解との一致がよいが、荷重が軽くなるにつれ、ブロック集合体の一体性が次第に損なわれていく様子が認められる。

4. まとめ

軟弱地盤上の軽量盛土として近年注目されているEPSブロック集合構造の耐震性を評価する基礎資料を得るため、EPSそのものの力学的特性、並びに集合体の動的挙動について基本的検討を加えた。今回実験に用いたEPSは密度が $0.021\text{gr}/\text{cm}^3$ 程度に発泡整形されたものであり、ヤング率は初期接線勾配で約 $110\text{kgf}/\text{cm}^2$ と柔らかい材料であるが、密度も土やコンクリートに較べ $1/50\sim$

$1/100$ 程度と小さいことから結果的にEPSの弾性波速度は硬い地盤のそれと同じ程度である。一方ポアソン比、減衰定数はともに、 $0.07\sim 0.08$ 、 1% 未満（歪レベル $<1000\mu$ ）であり、ともに相当する歪レベルでの地盤の値より小さい。以上のことは土構造などと接してEPSブロック構造が用いられる場合、動的応答性状の差が耐震性に与える影響を検討することの重要性を示すものである。

EPSブロックが集合構造として用いられた場合、接触面での摩擦、剝離などが付加的な減衰の主因となる。接触面の粗さ、接触応力、方向などに加えて、EPS自体の変形も、集合構造の応答に大きな影響を与えることから、これらを加味した応答解析を行うことが重要である。

表-1 実験結果及びFEM解析解

上載荷重	実験値		計算値
	応答倍率	基本振動数	基本振動数
1462kgf	20.6倍	6.2Hz	6.2Hz
762kgf	13.8倍	8.4Hz	8.7Hz
412kgf	9.4倍	10.5Hz	11.9Hz
62kgf	4.8倍	21.5Hz	29.0Hz

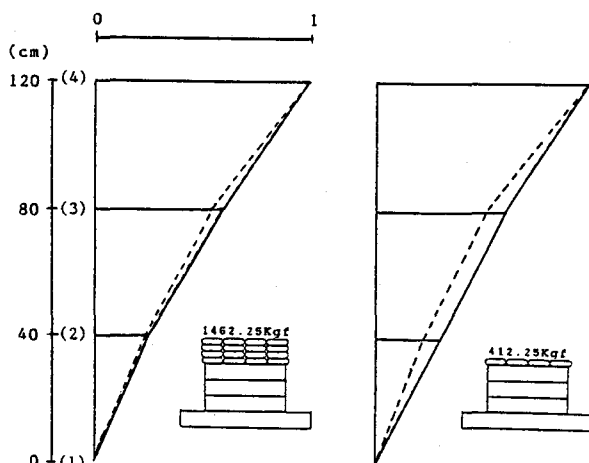


図-7 ブロック集合体側面の水平変位モード