

発泡スチロールブロック集合体の動的安定性に関する基礎的研究(その1)

——実験的研究——

Fundamental Study on Dynamic Stability of Expanded Polystyrol Block Structure

田 村 重四郎*・小長井 一 男*・都 井 裕**・芝 野 亘 浩**
Choshiro TAMURA, Kazuo KONAGAI, Yutaka TOI and Nobuhiro SHIBANO

1. はじめに

軟弱地盤上での道路盛土などの沈下対策は重要な課題である。このため、近年発泡スチロール (Expanded Polystyrol : 以下EPS) ブロックを積み上げた軽量構造が注目されるようになった。この構造は建設に当たり優れた施工性を持っていることもあり、北欧諸国を始めとして各地で盛土に使用されていて、最近とみに施工例が増している。本邦でも軟弱地盤対策として、盛土、埋め立てなどの材料として採用される例が出始めた。

EPSは従来の土木材料に比較して、非常に小さい密度、剛性を持つ人工の新しい材料であり、将来の土木材料として多面的な検討がなされる必要がある^{1)~5)}。この2年間著者らは耐震工学の視点からEPSおよびそのブロックの集合体の基本的な動力的特性を明らかにするため、実験および数値シミュレーションを実施してきた。その結果動力的にみて特徴のある新しい構造であることが明らかになった。本報告で材料の力学的特性およびブロック集合体の模型実験結果を述べ、続報で数値シミュレーションによる解析の結果を記述する。

2. 発泡スチロールの力学的物性

EPSは型枠内での発泡の程度に応じて密度が変化し、このためヤング率、ポアソン比、減衰定数といった粘弾性連続体としての物性が微妙に変化する。そこで集合体構造の動的問題を研究するに先立ち、今回実験に使用するEPSの粘弾性連続体としての物性を把握しておく必要がある。

まず6 cm×6 cm×10cmのEPSブロック3本を整形後、40°Cの炉内で乾燥し10時間後の重量と体積を測定し密度を算定した。乾燥過程での供試体の重量は乾燥開始後1時間で1%程度の減少が認められただけでありEPSブロックは自然放置した状態で内部に水分をほとんど取

り込んでいない。完全乾燥状態での密度は0.021g/cm³である。

ヤング率の算定は、一軸圧縮試験、弾性波速度測定、および片持ち梁状の供試体の自由減衰振動測定の方法によった。一軸圧縮試験では広範な歪領域での応力-歪の履歴を求めることが目的となる。15cm×15cm×30cmの直方体供試体の両端面には2枚重ねのテフロンシートを置き摩擦による端面拘束の影響を極力低減している。図1は供試体の軸方向荷重と軸方向変位、軸直角方向の変位の関係を示したものである。ヤング率は載荷初期の600μ以下の歪域で約118kgf/cm²となるが、応力の増加と共に減少し3000μ程度の歪に達すると108kgf/cm²となる。この歪は、実際の盛土で路盤、路床の荷重によって発生する歪のレベルに相応する。応力がさらに増加し塑性域に達すると、いわゆる塑性流動が認められる

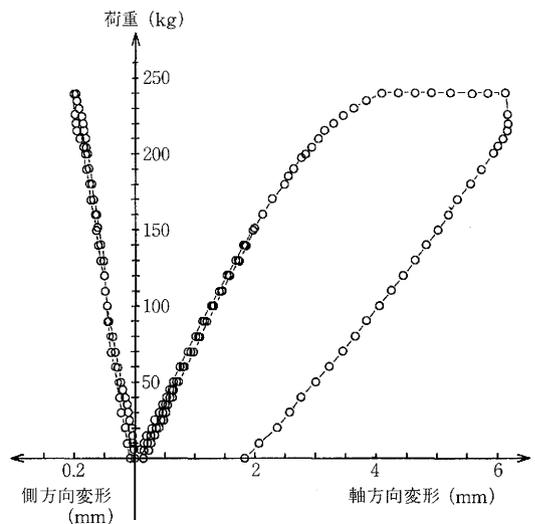


図1 EPSの荷重-変形曲線

*東京大学生産技術研究所 第1部

**東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

ようになる。ポアソン比は3000 μ 以内の歪域で0.07~0.08と、相応する歪域での地盤のポアソン比に較べかなり小さい。

弾性波速度測定ではさらに低歪域での動的なヤング率とポアソン比を検討することが目的となる。EPS表面に立ち上がりの鋭いインパルスを加えるため、打撃点にアルミニウムの板を置き、これに對置したソレノイドコイルを通して950Vの電圧で充電されたコンデンサー(5 μ F)を放電させることで、電磁誘導による衝撃力を得た。図2はEPS表面に20cm間隔で一列に埋め込まれた圧電型加速度センサーからの出力の時刻歴を示したものである。波動の初動部、主要動の到達時間から縦波速度 $V_p=714\text{m/s}$ 、せん断波速度 $V_s=484\text{m/s}$ なる値を得て、これよりヤング率、ポアソン比は、それぞれ108 kg/cm^2 、0.075と算定される。ヤング率は一軸圧縮試験で静的に得たものの初期接線勾配と、またポアソン比は一軸圧縮試験での結果とほとんど一致する。波動の振幅と波長より求められる歪のオーダーは100 μ に達しない。

表1 減衰定数の時間変化

時間	0.1~0.9秒後	1.7~2.5秒後	3.3~4.1秒後
減衰定数	0.98	0.78	0.69

片持梁の自由減衰振動測定では低歪域での減衰定数を容易に評価できる。ここでもインパルスの印加はソレノイドコイルとアルミニウム板を用いた電磁誘導によった。寸法10 $\text{cm} \times 5\text{cm} \times 80\text{cm}$ の矩形梁の一端を打撃し、打撃直後を除く減衰振動の時刻歴を、連続する5周期を一区間とする3つの区間に分け固有振動数と対数減衰率を求めた。打撃直後の最大歪が1000 μ 程度と小さいことから、打撃後の経過時間による固有振動数の変化はほとんど認められないが、減衰定数は時間と共に減少する(表1)。3本の供試体の試験結果からこの歪み域でのヤング率は114 kgf/cm^2 、減衰定数は1%を超えない。このヤング率は弾性波試験で得られた値、108 kgf/cm^2 とほぼ一致し、この値が今回の試験に用いるヤング率の上界値と考えられる。

3. ブロック集合体の動的挙動

EPSブロックの集合体としての動的挙動に関する基本性状を把握しておくため本所千葉実験所の2次元振動台を用い、図3にしめすような2組のブロック積構造の水平1方向の周波数応答を測定した。CASE 1は施工に使用されるサイズの40 $\text{cm} \times 90\text{cm} \times 180\text{cm}$ のブロックを3段重ねた構造であり、加振実験では振動台のテーブルの振幅をほぼ一定(0.09 mm (0-peak))に制御して、主に上載荷重による応答特性の変化を検討している。CASE 2はブロックどうしの接触面の数、面積を増やすべく中段以下に図に示すような小寸法のブロックを積み上げた構造とし、荷重の変化に加え、振動台テーブルの振幅による応答の変化も検討項目に加えている。模型上部には角材で補剛した板を接着し、この上に鉛の散弾を敷き詰めて上載荷重としている。構造体を構成する主要なブロックのコーナーに同図に示すように加速度センサー、ギャップセンサーを配置している。

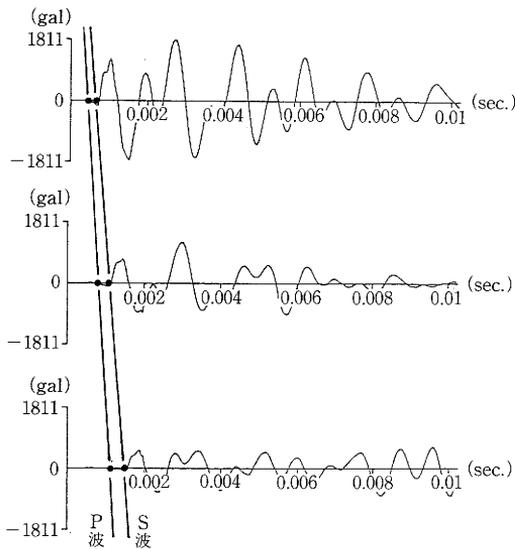


図2 EPSを伝播する波動の時刻歴

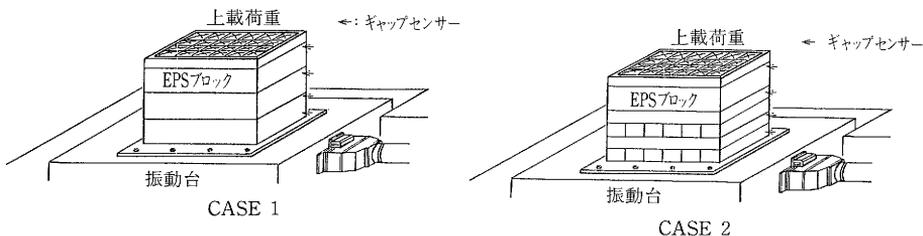


図3 EPSブロック集合体加振実験

研 究 速 報

3 段積み の ブロック 構造 (CASE 1) で 上 載 荷 重 を 1460kgf と し た と き の 構 造 の 天 端 , お よ び 振 動 台 テーブル 部 の 変 位 応 答 を 加 振 周 波 数 の 関 数 と し て 図 4 に 示 す . 6.2Hz で 構 造 天 端 が 大 き く 共 振 す る が , こ の と き 振 動 台 の テーブル の 動 き が 著 し く 抑 止 さ れ て お り , EPS の ブロック 集 合 体 が 全 体 と し て , 振 動 台 に 対 し 動 吸 振 器 (tuned mass damper) と し て 機 能 し て い る 様 子 が 認 め ら れ る . 図 5 は , テーブル に 対 す る 天 端 の 周 波 数 伝 達 関 数 を 上 載 荷 重 を パ ラ メー タ と し て 示 し た も の で あ る . 荷 重 W が 小 さ く な る に つ れ , 共 振 振 動 数 は 増 し て い く が そ の 割 合 は $1/\sqrt{W}$ の 変 化 と 一 致 せ ず , こ れ を 次 第 に 下 ま わ っ て い く (表 2) . さ ら に 共 振 時 の 応 答 倍 率 も 次 第 に 低 下

し , 構 造 全 体 の 減 衰 が 増 し て い く 様 子 が 認 め ら れ る . 荷 重 W が 1462kgf と 最 も 大 き く , 応 答 変 位 の 最 大 と な る 状 態 で , 想 定 さ れ る 歪 が 最 大 に な る に も か か わ ら ず 減 衰 が 最 小 に な っ て い る こ と は , 一 般 の 土 構 造 と 全 く 相 反 す る 現 象 で あ る . 上 載 質 量 の 大 き い こ の 構 造 は 容 易 に 等 価 な 1 質 点 系 に 置 き 換 え ら れ る が , そ の 質 量 が 集 中 す る 構 造 天 端 は 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 , バ ネ と し て 機 能 す る EPS ブロック 集 合 構 造 の 接 触 面 の 振 動 時 の 状 態 に 荷 重 が 軽 量 化 す る に つ れ 大 き な

表 2 上 載 荷 重 に よ る 応 答 倍 率 と 基 本 振 動 数 の 変 化

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

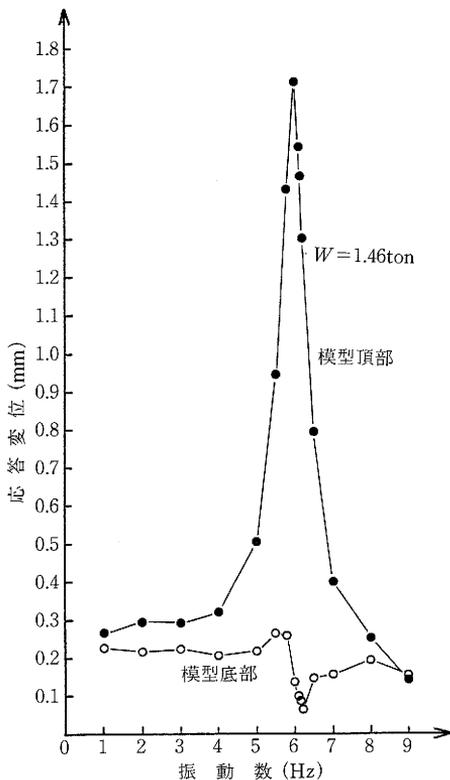


図 4 EPS ブロック 集 合 体 の 応 答 変 位

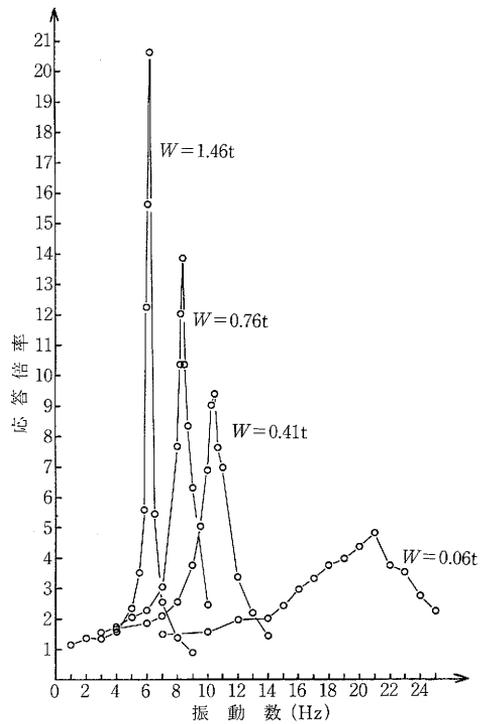


図 5 EPS ブロック 集 合 体 の 変 位 応 答 倍 率 (CASE 7)

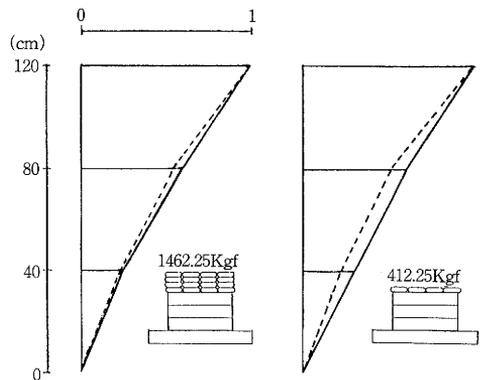


図 6 EPS ブロック 集 合 体 側 面 の 共 振 時 の モード

研究速報

変化が現れたことを示している。図6はブロック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による基本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。天端には上下方向の変位を計測すべくギャップセンサーが置かれているが、この共振時の計測値は天端水平変位の0.3倍にも達している。これは曲げ変形によるものであるが、これに伴う振動時のブロック間の接触面の剝離の程度は W が小さくなると増加しており、動特性の非線形性に強く関与するものと推測される。

小寸法のブロックの混入しているCASE 2の構造の周波数応答を図7に示す。上載荷重 $W=1462\text{kgf}$ の場合も、 $W=762\text{kgf}$ の場合も、共振振動数はCASE 1の対応するケースに較べて1割ほど小さな値になっており、集合体の剛性低下が起こっていることを示している。しかし応答倍率は荷重の小さい $W=762\text{kgf}$ のほうが13倍と、 $W=1462\text{kgf}$ の状況での約5倍を大きく上回っており、CASE 1の状況と逆の結果になっている。ブロックが小型化したことで変形性能が増えて、ブロックどうしのなじみが良くなるのと同時に、構造体内の摩擦の増加、応力分布の変化が生じているものと考えられる。この現象は、接触状況の定量的な評価を行うことが軽量の構造の集合体の応答を議論する上での重要な課題であることを物語っている。

4. ま と め

軟弱地盤上の軽量盛土として注目されているEPSブロック集合構造の耐震性を評価するため、実験に使用したEPSそのものの力学的特性、ならびに集合体の動的挙動に対して基礎的な検討を加えた。その結果、このEPSは 0.021gr/cm^3 の密度に発泡整形されたものであり、動的なヤング率は最大で 110kgf/cm^2 程度、ポアソン比は $0.07\sim 0.08$ 程度である。また減衰定数は1%を超えず一般の盛土材料、土に較べて著しく小さく、構造材料内部の減衰だけでは振動エネルギーの大きな散逸は期待できない。しかしブロックの集合体の動的挙動を検討する場合には、接触面での摩擦、剝離などが大き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、スチロール自体の変形も、全体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耐震性を考慮するうえで重要である。

(1989年6月6日受理)

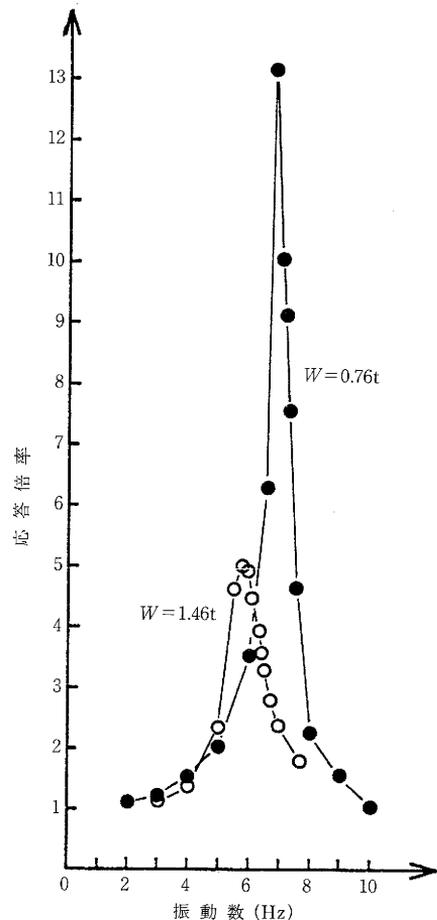


図7 EPSブロック集合体の変位応答倍率 (CASE 2)

参 考 文 献

- 1) AabØe: Experience with Expanded Poly-styrene as Lightweight Fill Material in Road Embankments, Conf., Plastic Foam Road Embankments, 1985.
- 2) 三木五三郎: 1日国際会議「道路盛土に用いるプラスチック材料—軟弱地盤問題の新しい解決法—」出席報告, 土と基礎, Vol. 33, No. 8, 1985.
- 3) 福住隆二: 発泡スチロール土木工法, 土木学会論文集, 第6部門, No. 373.
- 4) Norges Tekniske Høgskole: Dynamisk Belasting Pa Isolas Jonsmaterialer, Sintef Rapport, 1977.
- 5) 山内豊聡, 浜田英治: 道路盛土としての発泡スチロールの荷重・変形特性, 第17回日本道路会議論文集, (2)土木部会