

発泡スチロールを用いた実物大道路盛土の挙動

Performance of Full Scale Road Embankment with Expanded Polystyrol

三 木 五 三 郎* 佐 川 嘉 たね 胤**
 たか ぎ はじめ*** つか もと ひで き 樹****

1. はじめに

1985年6月、ノルウェーの首都オスロで軟弱地盤対策や地すべり対策として発泡スチロールの大型ブロックを道路盛土に用いる国際会議が開催された。

ノルウェー国立道路研究所主催によるこの会議には、日本から2名が出席し北欧を中心とする欧州各国および北米など15か国が出席した。この会議を契機に我が国でも発泡スチロールを用いた荷重軽減工法あるいは自立性を利用した土圧軽減工法への試みが開始されるようになってきた。このような背景をもとに開発機構では、建設省土木研究所の協力を得て同研究所構内に実物大規模の道路盛土を施工し、交通荷重による載荷実験を行った。

ここでは、載荷実験によって得られた盛土内の応力と変形の実測結果を整理するとともに、実験と同様のモデルで行った有限要素法による解析値との比較結果についてとりまとめることにする。

2. 実験概要

2.1 実験の目的

実験は、発泡スチロールブロックを積み重ねた場合の挙動、すなわち単一供試体による弾性挙動がブロック集合体とした場合でも同様に成立するかどうかを確認すること、そして自立した直立盛土構造とした場合の載荷重による側圧の発生程度を把握することを目的としている。

2.2 地盤状況および盛土施工

図-1に実験場所の地盤状況を示した。地盤構成は、地表面からの比較的緩い盛土に続いてN値5程度のローム層が約2m堆積しており、その下部はN値10前後のシルト質砂となっている。

図-2は実験盛土の全体図を示したものである。道路延長95mのうち中央部30m区間と取付け盛土部の一部に発泡スチロールを設置している。

図-3は全体図に示した④、⑤断面の盛土構造を示したものである。④断面は発泡スチロールの自立性を利用した

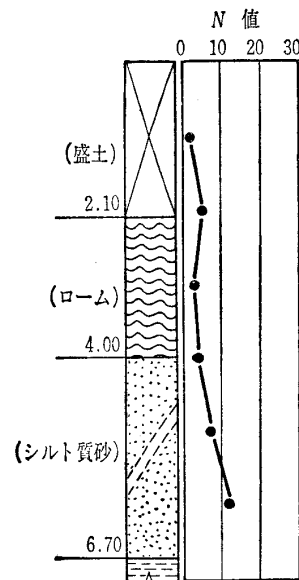


図-1 実験場土質柱状図

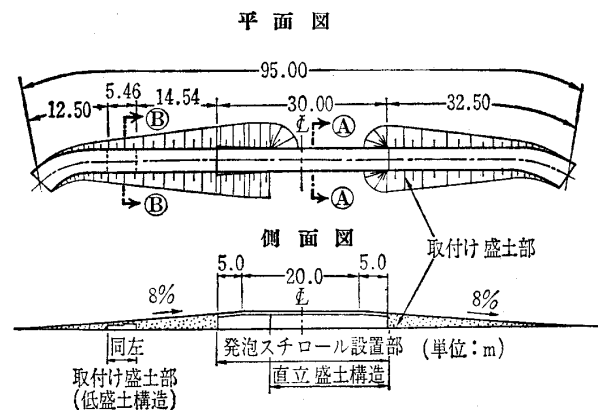


図-2 実験盛土全体図

直立盛土タイプであり、⑤断面は土羽土で被覆した低盛土タイプである。

両断面ともにレベリング層として厚さ15cmの敷砂を施工した。④断面では、厚さ40cmの発泡スチロールブロックを千鳥状に6段設置した後、厚さ10cmのコンクリート床版を打設した。両側のL型擁壁は発泡スチロール直立面の保護壁および側圧測定用の反力壁として設置した。

⑤断面は、厚さ10cmのボード状発泡スチロールを40cm厚にバンドリングしたものを2段設置し、上部は保護砂を施工した。のり面は土砂による被覆である。

*発泡スチロール土木工法開発機構 会長
 **発泡スチロール土木工法開発機構 前施工開発部会長
 (鹿島建設土木技術本部技術部長)
 ***発泡スチロール土木工法開発機構 現場実験WGリーダー
 (清水建設土木本部技術第一担当部長)
 ****発泡スチロール土木工法開発機構 事務局

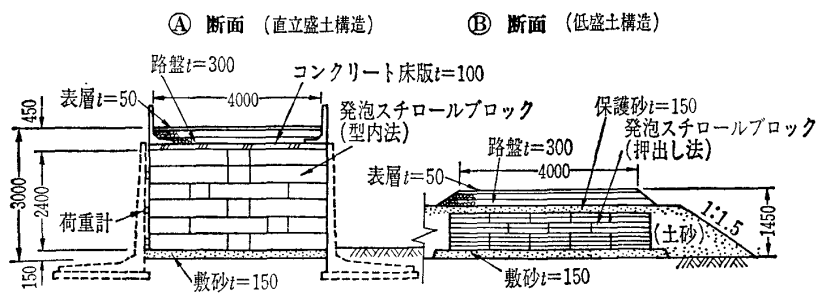


図-3 実験盛土の構造

舗装構成は、両断面とも同じでクラッシャーラン 15 cm, 粒調碎石 15 cm, 密粒アスコン 5 cm の合計 35 cm である。

3. 発泡スチロールの特性

発泡スチロールは、石油精製で生じるスチレンモノマーの重合によって得られるポリスチレンを主原料にしているが、発泡時の形態により型内法あるいは押し出し法と呼ばれる 2 種類の材料に区分され、圧縮強さなどの材料特性が異なったものになる。

発泡スチロールを盛土材料として用いる場合、重要な要素は圧縮応力とひずみの関係であり、かつ材料としての弾性挙動である。

本実験では、④断面（直立盛土部）に型内法、⑤断面（取付け盛土部）に押し出し法による発泡スチロールを用い

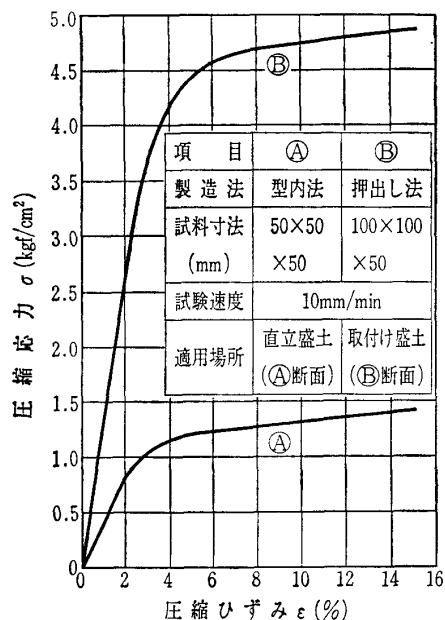


図-4 発泡スチロールの応力とひずみの関係

表-1 実験に用いた発泡スチロールの材料特性

断面	項目	単位体積重量 (kgf/cm³)	圧縮強さ (kgf/cm²)*	形状 (1ブロック)
④断面 (型内法ブロック)		20.6	1.20	縦×横×厚さ 1820×910×400mm
⑤断面 (押し出し法ブロック)		29.2	4.40	1820×910×200~400mm**

*5%ひずみ **100mm厚×4枚バンド掛け

ている。図-4は、実験に使用した両者の圧縮応力とひずみの関係を示したものである（試験法 JIS K 7220）。

図-4によると、発泡スチロールは単位体積重量と製造法によって圧縮強さが大きく異なることが分かる。そして、いずれの材料もひずみが2~3%より大きくなると応力-ひずみ曲線に変曲点が現れ弾性範囲が変化してくることに留意しておく必要がある。

表-1は、実験に用いた発泡スチロールの形状および材料特性をとりまとめたものである。

4. 計測概要

4.1 計測項目および計器設置

(1) 鉛直応力：コンクリート床版の上面、発泡スチロールの上端ならびに地盤面への交通荷重の伝達状況を把握することを目的として土圧計を設置した。

図-5は、コンクリート床版上・下面での土圧計設置状況を示した。上面の土圧計は応力集中の防止と路盤施工を配慮して円形木枠および保護砂によって計器を被覆した。また、下面の土圧計は受圧面を発泡スチロール側に向け、計器の一部はコンクリート版と一体化している。なお、地盤面上の土圧計は敷砂内に設置した。

(2) 伸縮量：輪荷重による鉛直伸縮量つまり、2層ごとの内部変位量分布を把握するため継目計を加工した伸縮計を設置した。図-6は、伸縮計の設置状況を示した例であるが、本実験では下端を敷砂または発泡スチロール面に設置し、上端をコンクリート床版に固定した。なお、⑤断面では床版がないため上端の計器周辺部のみ厚さ5cmのコンクリートで被覆して発泡スチロールと一体化した。

(3) 側圧力：輪荷重載荷時に壁面に発生する側圧力の程度および分布形態を把握することを目的として壁面と発泡スチロール直立面との間に荷重計を設置した。

ここでいう壁面とは荷重計設置のための反力壁である。

図-7に荷重計の設置状態を示した。

図-8は、道路縦断方向の計測器設置位置と輪荷重載荷位置を示したものである。

4.2 載荷実験および計測結果

載荷実験は、ダンプトラック（総重量 32.5 tf, 前軸 7.0

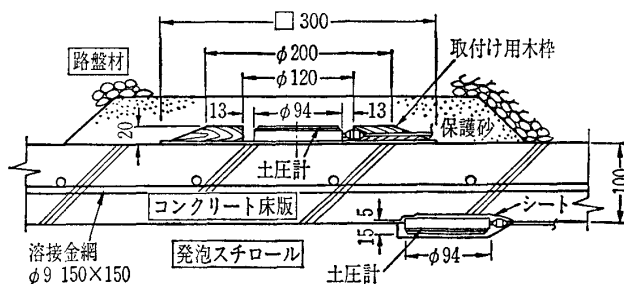


図-5 土圧計の設置詳細

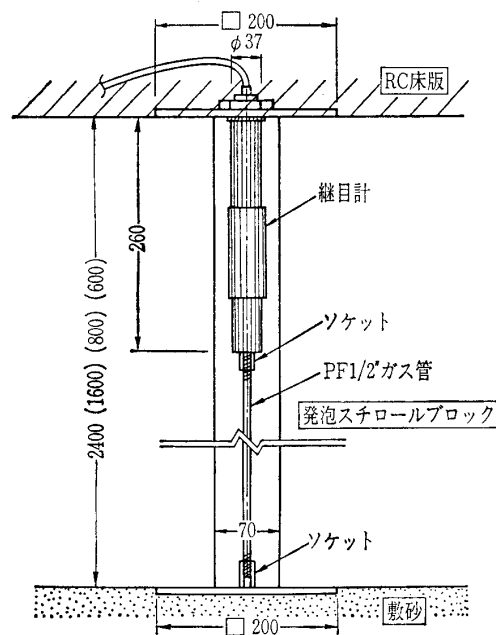


図-6 伸縮計の設置詳細

tf, 後軸 12.75 tf×2) を載荷重として用いた。

載荷は、それぞれの計器設置点を基準に前後 5 m の区間を 1 m 間隔で路面にマーキングし、各位置にトラック前輪を順次停めて計器の同時測定を行った。また、輪荷重接近による側圧力の変化を調べるため、中心線走行以外に路肩接近あるいはその逆の 3 走行ラインによる測定も行った。

図-9 は、④断面中心線走行時における輪荷重の移動に伴う計測値の変化を示したものである。

載荷点 No. 34 の最上部鉛直応力は、前輪が計器直上に位置した時に最大値を示しているが、他の計測値はいずれも計器直上にトラック後輪が位置した時に最大値を示して

表-2 後輪載荷時の計測最大値

断 面	側 圧 力 (kgf)	鉛直応力(kgf/cm ²)	伸 縮 量(mm)			
㊤ 断 面 (直立盛土)	上 部 (LC-3)	54.5	床 版 上 (BE-13)	0.94	上 2 段 (BJ-13)	1.93
	中 央 (LC-2)	50.0	発泡スチ ロール上 端 (BE-12)	0.30	上 4 段 (BJ-12)	3.44
	下 部 (LC-1)	54.6	地 盤 面 (BE-11)	0.12	全 6 段 (BJ-11)	4.75
㊤ 断 面 (取付け盛土)	—	発泡スチ ロール上 端 (BE-32)	1.24	上 1 段 (BJ-32)	2.72	
		地 盤 面 (BE-31)	0.06	全 2 段 (BJ-31)	破損	

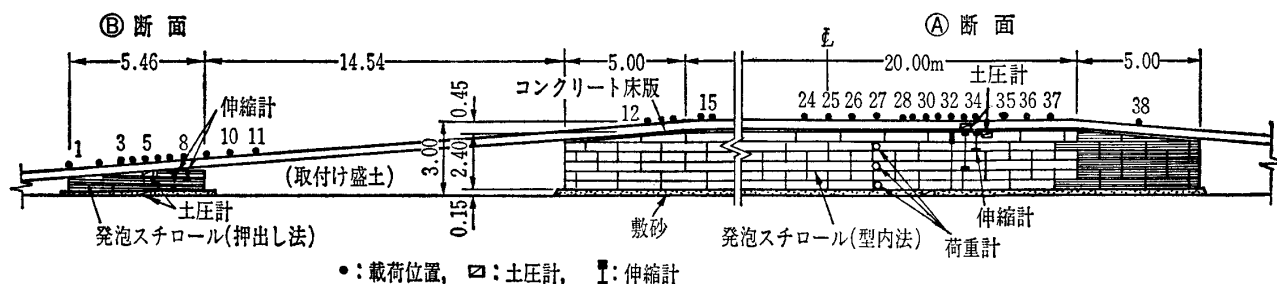


図-8 計測器設置位置および載荷位置図

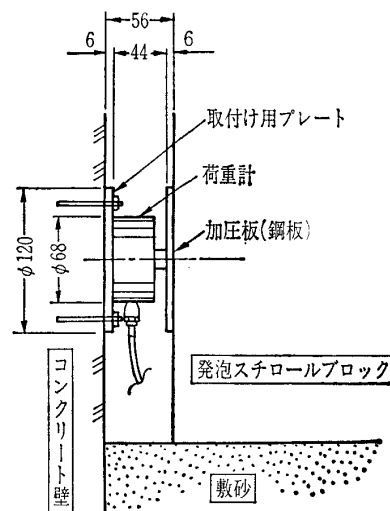


図-7 荷重計の設置詳細

いる。したがって、次節では後輪が位置した時の計測値を対象として解析値との比較を行うことにした。

④、⑤断面の後輪荷重による最大値を表-2 にまとめて示した。

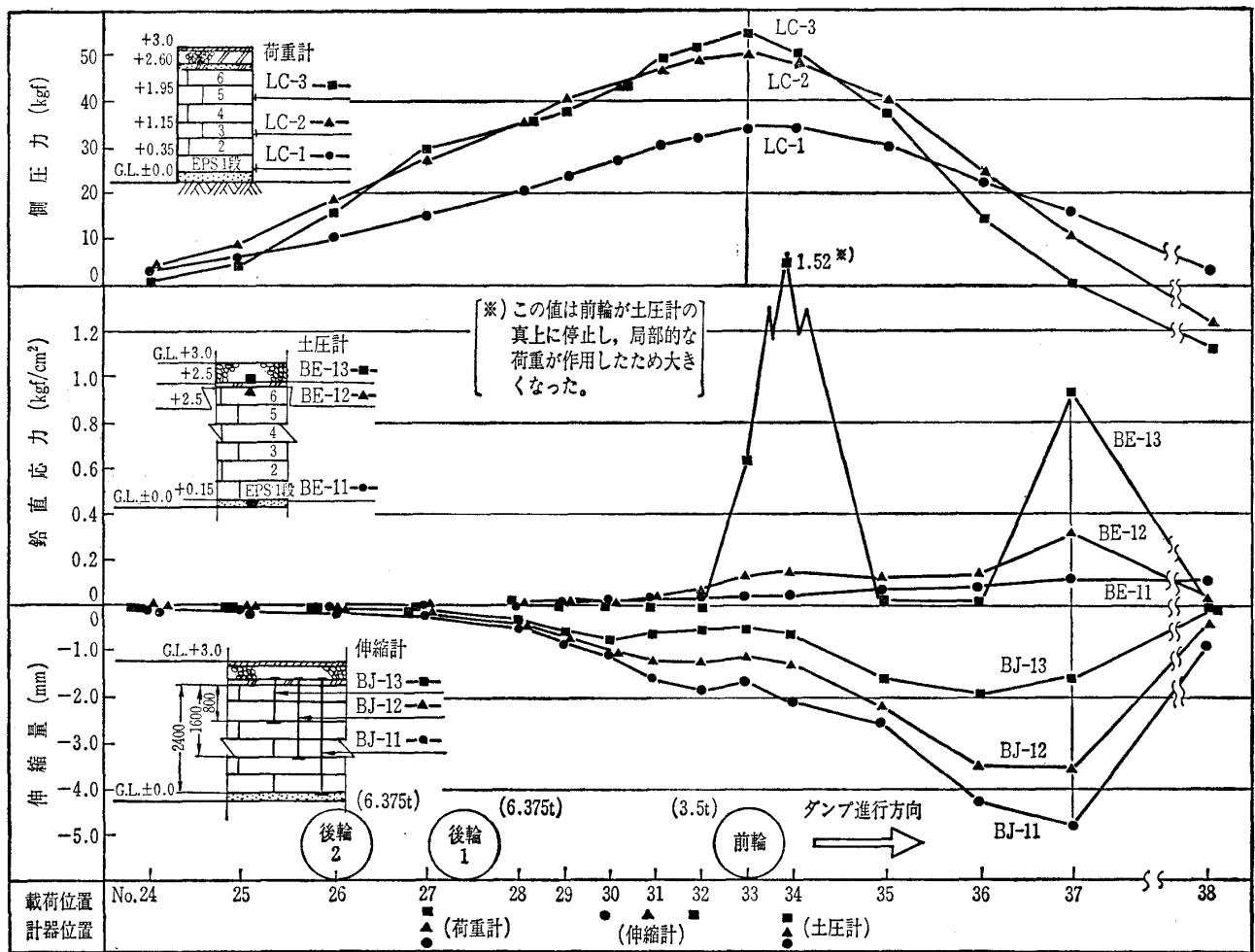
5. 計測結果の解析と考察

計測結果を解析するため、有限要素法 (FEM) による解析を行い、発泡スチロールの鉛直応力、壁面に作用する側圧および発泡スチロール部の弾性挙動について考察する。

5.1 FEM 解析

発泡スチロールブロックの集合体を連続な弾性体と仮定し、直立盛土部を対象とした FEM 解析を行い、実測値と比較する。解析は以下の要領で行った。

- ① 試験の載荷状態に近づけるために三次元モデルとした。
- ② 発泡スチロールは等方弾性体とし、8 節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。
- ③ 解析モデルと発泡スチロールの材料定数 (弾性係数、ポアソン比¹⁾) は図-10 のように設定した。
- ④ モデルと荷重の対称性を考慮して 1/4 モデルで解析した。
- ⑤ 底面は全方向 (X, Y, Z 方向) を固定し、側面は X 方向を固定、Y, Z 方向を自由とした。また、長手



注) 前輪が荷重位置No. 上に停止した時の各計測器が示す値を各No. 上にプロットしたもの。

図-9 輪荷重移動に伴う計測値の変化 (A断面中心線走行)

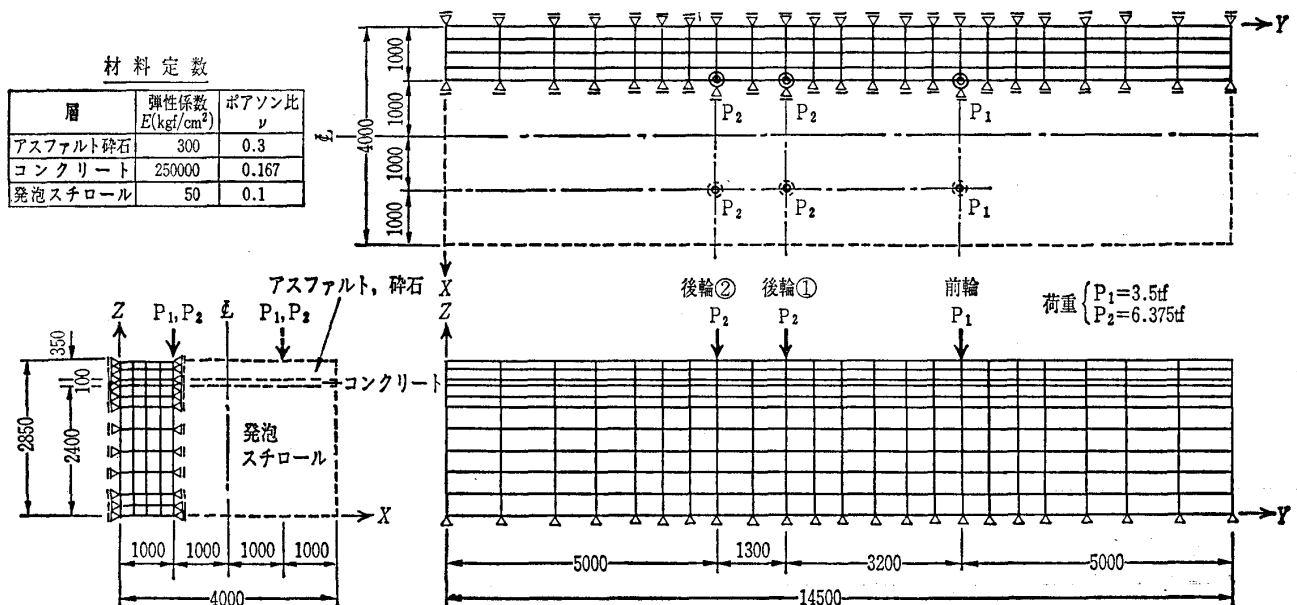


図-10 解析モデル

方向の端部は自由境界とした。

- ⑥ 荷重はダンブ総重量 32.5 tf の場合を想定し、図-10に示すように前輪 3.50 tf、後輪 6.375 tf を節点集中荷重として作用させた。

FEM 解析結果は、以降の鉛直応力、側圧および弾性挙動の確認において実測値とともに示す。

5.2 鉛直応力

後輪①直下の鉛直応力を図-11に示す。発泡スチロール

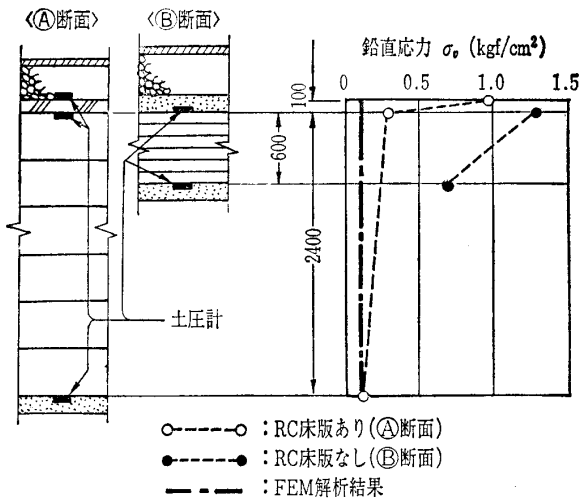


図-11 鉛直応力

上端の実測鉛直応力は、RC床版のある場合が $\sigma_v = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 、RC床版のない場合が $\sigma_v = 1.24 \text{ kgf/cm}^2$ とRC床版による荷重の分散効果が顕著に現れている。一方RC床版がある場合をモデル化した解析結果は、発泡スチロール上端で $\sigma_v = 0.13 \text{ kgf/cm}^2$ 、下端で $\sigma_v = 0.11 \text{ kgf/cm}^2$ であり、上部と下部でほとんど差がない。すなわち、ダンプの輪荷重はRC床版によって分散され、発泡スチロール上端では等分布荷重に近い状態になっている。実測値では高さ方向の分布形状は明確でないが、ほぼ解析結果と同様であると考えられる。

5.3 壁面に作用する側圧

後輪①に最も近い壁面での側圧 p を図-12に示す。実測値は下から1段目、3段目、5段目の発泡スチロールブロックの中心で荷重として得られているが、ここでは得られた荷重を1ブロックの断面積 ($91 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} = 3640 \text{ cm}^2$) で除した値を側圧とした。なお、実測値は輪荷重作用位置の異なる3ケースを示している。

上部における側圧は輪荷重作用位置が壁面に近づくほど大きな値を示すが、中央部から下部においては輪荷重作用位置の影響は小さい。壁面と車輪との離れ $d = 1.0 \text{ m}$ が解析結果に対応するものであるが、実測値が $p = 0.010 \sim 0.015 \text{ kgf/cm}^2$ 、解析値が $p = 0.012 \sim 0.015 \text{ kgf/cm}^2$ と両者は良く一致している。

ここで図-11の鉛直応力に対する側圧の割合に着目すると、側圧は鉛直応力の約10%であることが分かる。一方、等方弾性体の応力～ひずみ関係、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \{ (1-\nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z \} \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \{ \nu\varepsilon_x + (1-\nu)\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z \} \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \{ \nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + (1-\nu)\varepsilon_z \} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

において、 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ とすると次の関係が得られる。

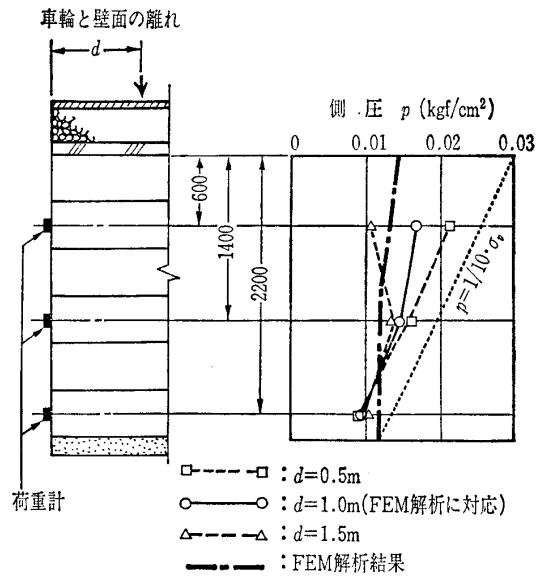


図-12 側圧

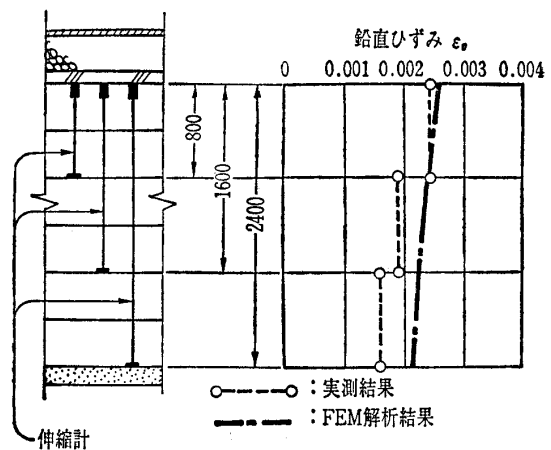


図-13 鉛直ひずみ

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{(1-\nu)} \sigma_z \dots (2)$$

発泡スチロールのポアソン比を $\nu = 0.1$ とすると、(2)式より $\sigma_x = \sigma_y = 0.11 \sigma_z$ となり、実測結果と一致する。

以上より、鉛直荷重作用時に壁面に作用する側圧としては、鉛直応力の10%程度を考慮すれば良いと考えられる。

5.4 弾性挙動の確認

発泡スチロールブロックの集合体が連続な弾性体として取り扱えるかどうかを確認するために、鉛直ひずみについて実測値と解析値を比較検討する。

伸縮量より算定した発泡スチロール部の鉛直ひずみを図-13に示す。実測された鉛直ひずみは、上部で $\varepsilon_v = 0.0024$ 、下部で $\varepsilon_v = 0.0016$ であり、上部から下部へ徐々に小さくなっている。一方、解析値も上端で $\varepsilon_v = 0.0026$ 、下端で $\varepsilon_v = 0.0021$ と上端から下端へほぼ一様に減少しており、おおむね実測値と一致する。したがって、ブロックの積重ねである発泡スチロール部は、本構造体および荷重の範囲では連続な弾性体としての挙動を示していると言える。

6. ま と め

今回の載荷実験および解析結果から発泡スチロールを用いた盛土の挙動について以下のようにまとめることができる。

- 1) 輪荷重載荷実験（後輪 6.375 tf）の結果，発泡スチロール部上端に作用する鉛直応力は，④断面（RC床版あり）では 0.3 kgf/cm^2 ，⑤断面（RC床版なし）では 1.2 kgf/cm^2 を示し，いずれも各材料の弾性範囲内にあるが，特に④断面では RC 床版の荷重分散効果は大きく，これは，FEM 解析でも同様の結果として確認できた。
- 2) 壁面に作用する側圧は，直立盛土部（高さ 2.4m）上部では輪荷重接近による影響はあるものの，中央部から下部にかけてはその影響は小さくなる。側圧の発生程度は実測値および解析値ともによく一致しており，発泡スチロール上端に作用する鉛直応力の 10% 程度であった。
- 3) 発泡スチロール直立盛土部に作用する鉛直応力，側圧ならびに鉛直ひずみについて発泡スチロールを等方弾性体として解析した結果，実測値とよく一致した。したがって，本実験においては，発泡スチロールブロックの集合体も連続な弾性体として取り扱うことができ，さ

らに FEM を用いた応力変形解析手法が適用可能であることが分かった。

7. あとがき

発泡スチロールを用いた超軽量盛土は，すでに全国各地で適用され 20 数例の施工例がある。また，その適用形態は多様で変化に富んでいる。

本報告は，ある道路構造を想定した一形態についての実験および解析結果である。今後は，各種の形態（例えば高さ，設置形状）に応じた実測値や解析結果の蓄積が望まれるが，あわせて実用的な設計手法の確立にも努力してゆきたい。

謝 辞

本実験を進めるにあたっては，建設省土木研究所土質研究室の皆様大変お世話になった。実験施工では，現場実験 WG 始め関係各社に協力していただいた。そして本文をまとめるに際し清水建設 平井孝典，河野泰直の両氏に手伝っていただいた。末筆ながら関係各位に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 久楽勝行・青山憲明・竹内辰典・松橋秀広：発泡スチロールを路床に用いたときの応力変形に関する一考察，第 23 回土質工学研究発表会講演集，pp.1973~1974，1988。
(原稿受理 1988.10.3)

土質工学会書籍案内

土質調査法(第 2 回改訂版)

定 価：7,800 円、会員特価 6,000 円（送料 1 冊につき 400 円）、
体 裁：A 5 判、869 ページ、上製本

内 容

現場で試料土を観察・採取したり，原位置土の性質について試験したり，あるいは地盤土や地下水の基礎構造物と関連する性状を測定したりする通常行なわれる調査，特殊な測定・調査（耐震性，砂の液状化，地盤振動などの調査・測定法，土の透気性・土中ガス・酸欠の調査法，海底地盤の調査法）までを網羅し詳細に解説。「土質試験法」とともに現場技術者必携の図書。（昭和 57 年 12 月発行）

第 1 章 調査計画

第 2 章 地盤の構成

第 3 章 予備調査・地表地質調査

第 4 章 物理探査

第 5 章 ボーリング

第 6 章 サウンディング

第 7 章 サンプリング

第 8 章 地下水調査

第 9 章 載荷試験

第 10 章 基礎杭の試験

第 11 章 土圧・間隙水圧の測定

第 12 章 地盤の変位・変形の測定

第 13 章 施工管理試験

第 14 章 特殊な測定・調査

A. 耐震性・砂の液状化調査

B. 地盤振動測定

C. 土の透気性・土中ガス・
酸欠についての調査

D. 腐食性調査

E. 植生工調査

F. 海底地盤の調査