

軽量盛土材としての発泡スチロールの利用技術に関する実験と考察

Experiments on Application of Expanded Polystyrol to Light Fill Materials

く 久 たら 楽 かつ 勝 ゆき 行* あお 青 やま 山 のり 憲 あき 明**
たけ 竹 うち 内 たつ 辰 のり 典*** おさむ 修****

1. はじめに

土工の分野への新材料の活用ということで、最近発泡スチロールを用いた軽量盛土工法が注目されるようになってきている。発泡スチロール (Expanded Polystyrol, 以後 EPS と呼ぶ) は、密度が $0.02 \sim 0.04 \text{ t/m}^3$ で土と比べて $1/50 \sim 1/100$ と超軽量である。また、EPS 材は強度や耐久性、加工性にも優れている。したがって、大型ブロック状に成形された EPS を積み重ねることにより、容易に盛土や擁壁を築造することができる。すでに、ノルウェーでは 1972 年から、この工法の開発を進めてきており、これまでに良好な結果を得ている¹⁾。日本においても、軟弱地盤上の盛土による地盤の沈下を減ずる^{2), 3)} 目的や地すべり対策などに、EPS が軽量盛土材として使われ始めている。

EPS は、通常の盛土材料に比べて超軽量であるという優れた特性を有しているため、軟弱地盤上の盛土の沈下軽減ならびに構造物取付け部の盛土の段差防止対策、あるいは地すべり地における盛土による地すべりの防止、橋台や擁壁への水平土圧および高盛土下のカルバートに作用する鉛直土圧の軽減対策などに利用することが期待されている⁴⁾。しかしながら、我が国における EPS 材の施工実績はまだ少なく、EPS 材自体の工学的性質や軽量盛土に用いた場合の応力-変形挙動等について十分な解明がなされていない。したがって、EPS を広く軽量盛土材として利用する場合に、EPS 材の力学的特性や交通荷重下における応力-変形挙動などを明らかにして、EPS 材の実際の現場への適用性について検討しておく必要がある。そこで、本報文ではそれらを明らかにするために、EPS 材を用いた室内の三軸圧縮試験や載荷試験、現場における実車走行実験、ならびに多層弾性解析を行って、EPS 材の実際の適合性について考察を加えたので、ここに報告する。

2. EPS 材の強度特性

EPS 材を道路盛土や擁壁、橋台等の裏込めに用いた場合の EPS 材の圧縮、せん断特性を明らかにするために、

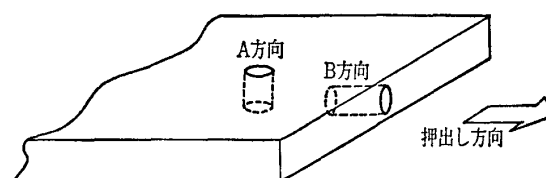


図-1 発泡スチロールの供試体抜き取り方向

土の力学試験で通常用いられている三軸圧縮試験機を用いて、圧縮せん断試験を行った。

EPS 材は、製造方法の違いにより型内発泡型と押し発泡型とに分けられるが、今回の試験では強度があり、しかも製造方法から異方性があると思われる押し発泡型の EPS 材 (密度 $\rho = 0.0298 \text{ t/m}^3$) を用いた。

2.1 試験方法および試料の作製方法

試験に用いた供試体は、幅 910 mm、長さ 1 820 mm、厚さ 100 mm の板状の EPS 材から、図-1 に示すように A、B 方向にサンプリングし、それらをユニバーサルトリマーと電熱線を用いて、直径 50 mm、高さ 100 mm の円筒状に作製したものである。

試験は、排気状態とし、側圧を加えた後、ひずみ制御の圧縮せん断試験を行った。供試体の体積変化量は、外体積の変化を光電管式ビュレットを用いた自動読取りによって求めた。ひずみ速度は、毎分 1% とし、軸ひずみ 15% に達するまで試験を行った。拘束圧 σ_3 は、0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 kgf/cm² の 5 種類とし、供試体の上下面にはテフロンシートを置いて、摩擦の低減をはかった。

2.2 試験結果と考察

(1) EPS 材の変形挙動

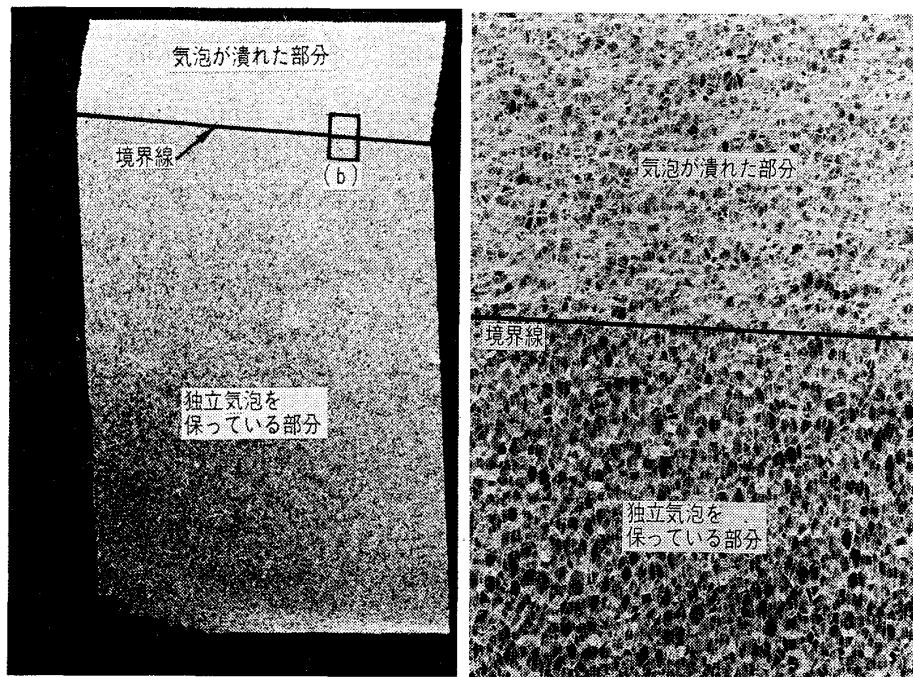
まず圧縮せん断試験を行ったときの EPS 材の変形挙動について述べる。写真-1(a)は、圧縮せん断試験終了後に、供試体を最大主応力 σ_1 方向に薄くスライスして撮影した EPS 材を示したものである。この写真において、白い色の多い部分は、EPS 材の独立気泡の構造がすでに潰れた部分であり、黒い色の多い部分は圧縮せん断試験によっても潰れないで、独立気泡の構造を保っている部分である。さらに、潰れた部分と独立気泡の構造を有している部分の境界付近を拡大したものが写真-1(b)である。これらの写真から、EPS 材の変形に対する抵抗は、プラスチック自体の変形に対する抵抗とプラスチック部に囲まれた

*建設省土木研究所機械施工部土質研究室長

**建設省土木研究所機械施工部土質研究室研究員

***建設省土木研究所機械施工部土質研究室

****鈴竹中土木 (元土質研究室部外研究員)



(a) せん断後の変形状態

(b) 境界部の拡大写真

写真-1 供試体の断面写真

独立気泡の構造部分の圧縮に対する抵抗からなっていると考えられる⁹⁾。また、写真の独立気泡が潰れた領域からすると、EPS 材の塑性変形の大部分は、圧縮・せん断によって供試体の上下面からしだいに中心部へと進行しており、試験後の EPS 材の供試体内部でのひずみの分布は一様でないことが分かる。したがって、独立気泡が潰れるような大きな圧縮力が加わると、それが次第に内部へと進行し、大きな変形を生じることにもなるので、EPS 材を実際に適用するにあたっては、独立気泡の構造が保てる圧縮力以下に抑えることが重要である。

(2) EPS 材の強度特性

三軸圧縮試験の結果から得られた A 方向と B 方向の供試体についての応力-ひずみ曲線を、それぞれに図-2 に示す。ここで、(1)で述べたように供試体のひずみの一様性が試験中のどの程度の応力、ひずみまで確保されているかは、

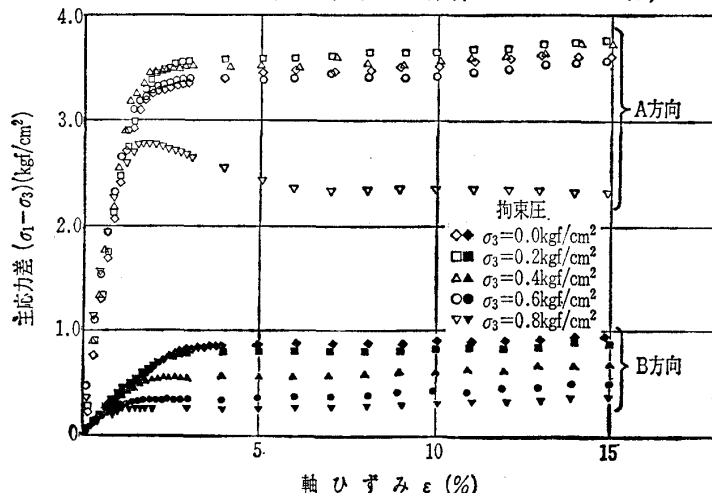


図-2 主応力差-軸ひずみの関係

今回の試験からは確認できなかったため、データの整理にあたっては、軸方向の変位量を供試体の初期高さで除したものを軸ひずみとして用いた。

この図から、供試体を A 方向に作成した場合は、いずれの拘束圧 σ_3 の場合においても軸ひずみが 1.2~1.6% 程度まで、ほぼ直線的に主応力差は増加している。したがって、主応力差が直線的に増加している 3.0 kgf/cm² 程度まで、EPS 材は弾性的な挙動を示しており、独立気泡の構造も保持されているとみなすことができる。軸ひずみがさらに増大すると、多少の主応力差の増加が認められるが、それ以降はほぼ一定の主応力差となっている。これは、一定の主応力差のもとにおける独立気泡の構造の潰れによる軸ひずみの増大に基づくものと思われる。

一方、B 方向の供試体についてみる

と、主応力差の立上がりも緩やかで、強度的にも A 方向の供試体に比べて小さくなっていることが分かる。

次に、A、B 方向のそれぞれについて、図-2 における主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が增大する弾性範囲内での最大値 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ と拘束圧 σ_3 の関係を示したものが、図-3 である。A 方向の供試体の場合には、拘束圧に関係なく、3.0 kgf/cm² 程度でほぼ一定の $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ の値を示している。なお、拘束圧が 0.8 kgf/cm² の場合は $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ の低下が認められる。

一方、B 方向における $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ は、A 方向のそれに比べて 10~25% 程度しかなく、A 方向と B 方向では顕著な強度の異方性があることが認められる。

この強度の異方性は、押出し発泡型の EPS 材の独立気泡の構造が、その製造過程において写真-1 に示すように EPS 材の厚さ方向に伸びた卵形になること、すなわち独

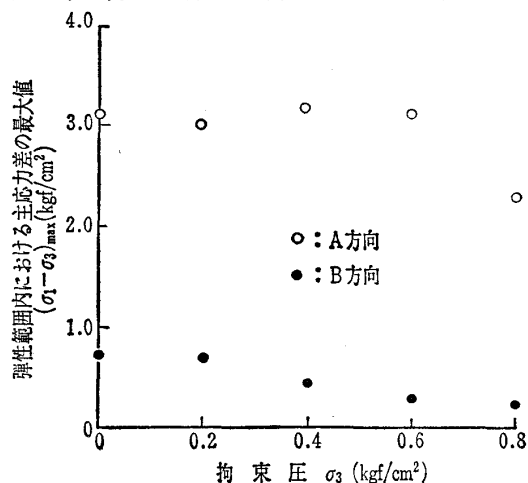


図-3 弾性範囲内における主応力差の最大値と拘束圧の関係

立気泡の構造の配向に起因していると考えられる。

なお、A方向の供試体について拘束圧 σ_3 が 0.8 kgf/cm^2 時の強度低下の原因として、この強度の異方性が大きく作用していると考えられる。すなわち、軸ひずみが 1.0% 付近で供試体は、平均主応力 σ_m によって変形を起こし、強度の低下を生じたものと考えられる。

以上のことから、今回の実験に用いた押出し型の EPS 材の圧縮強度としては、 3.0 kgf/cm^2 程度のものがみこまれる。ただし、拘束圧の大きいところでは強度低下が起こるので、深埋設の場合にはこの点に留意する必要がある。また、押出し型の EPS 材では異方性があるので、EPS 材の敷設と主応力の作用方向については一応の検討を行っておくのが良い。ただし、通常の場合、層状に敷設した EPS 材の上に図-1 に示す A 方向に主応力が加わることが多いので、問題はないといえる。

3. 載荷試験による EPS 材の応力・変形特性

EPS 材の荷重下における応力-変形特性ならびに支持力を解明するために、土槽内に EPS 材を積み重ねて平板載荷試験を実施した。

3.1 試験方法

試験装置は図-4 に示すように、幅 2.5 m 、奥行 2.5 m 、深さ 2.0 m の土槽内に設置した載荷フレームと載荷ジャッキとから成っている。試験は、押出し発泡型の EPS を土槽内に敷設し、その厚さを $10, 40, 60, 80, 100 \text{ cm}$ と変化した。そして、それぞれの厚さにおいて、直径 30 cm の載荷板を用いて、載荷重を加えた。

3.2 試験結果

平板載荷試験の結果から得られた荷重強さと沈下量の関係を示したものが図-5 である。また、図-6 は図-5 の結果を用いて、各敷設層厚における EPS 材の地盤反力係数 (K_{30}) を求め、EPS 材の敷設層厚と地盤反力係数との関係を示したものである。

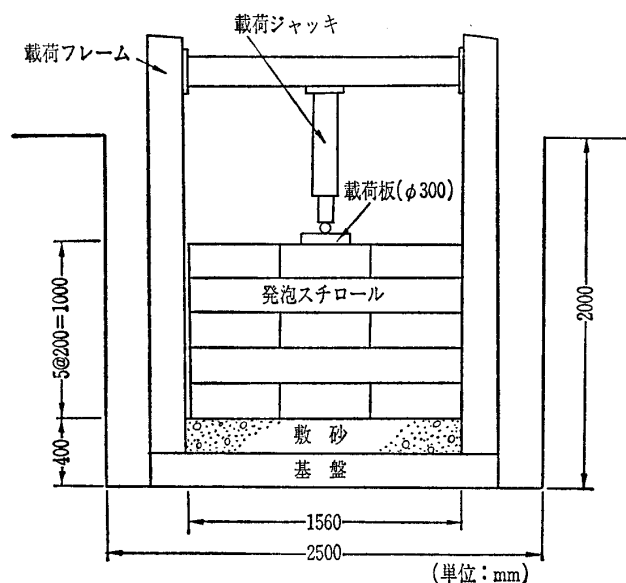


図-4 載荷試験の概要図

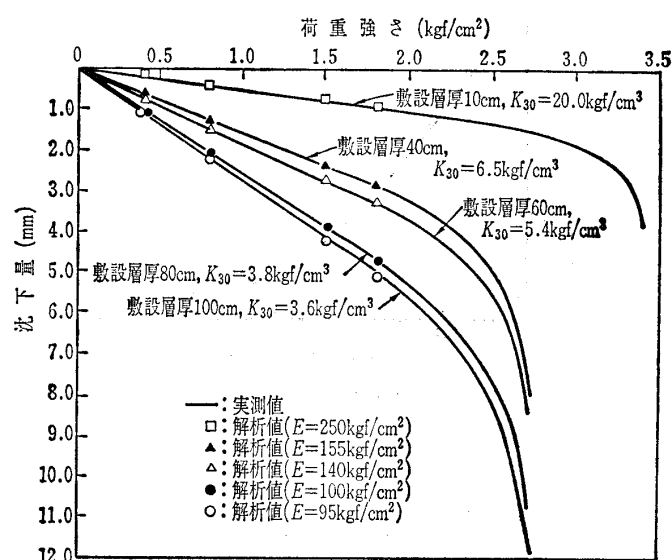


図-5 平板載荷試験から求まる荷重強さと沈下量の関係

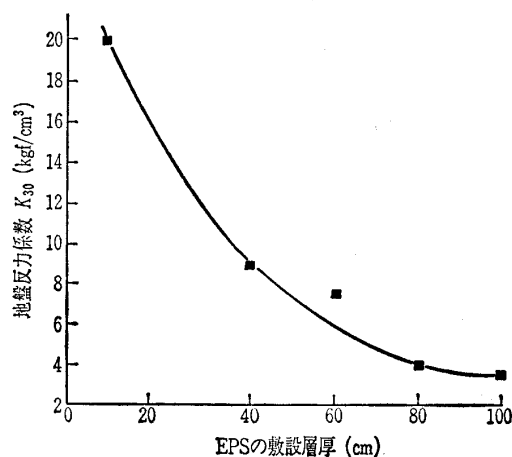


図-6 EPSの敷設層厚と地盤反力係数の関係

係を示したものである。

両図から、EPS 材の敷設厚さが大きくなるに従い、地盤反力係数 (K_{30}) が小さくなる傾向にあるが、層厚が 80 cm 以上になるとほぼ一定の K_{30} 値を示している。これは、EPS 材の層厚が薄い場合には、EPS 材下の基盤の影響を受けて、 K_{30} 値が大きくなるためと考えられる。したがって、層厚が 80 cm 以上のものが基盤の影響を受けない EPS 材の地盤反力係数 (K_{30}) とみなすことができる。

今回実施した載荷試験の結果から、EPS 材は荷重強さ 2.0 kgf/cm^2 までは弾性的な挙動を示し、降伏強度は 2.7 kgf/cm^2 程度である。また、EPS 材の地盤反力係数として、 $K_{30} = 3.6 \text{ kgf/cm}^3$ 程度の値が期待できると考えられる。

3.3 EPS 材の敷設層厚と弾性係数の関係

平板載荷試験から求めた荷重強さと沈下量の関係と多層弾性解析を用いて、EPS 材の各敷設層厚における弾性係数を求めた。それらの結果を図-5 に合わせて示した。また、EPS 材の敷設層厚と弾性係数の関係について整理したものが図-7 である。これらの結果から、EPS 材の敷

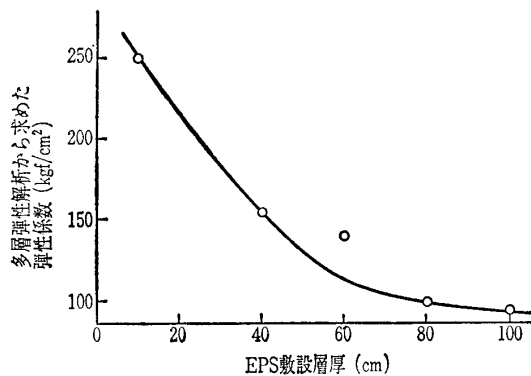


図-7 EPSの敷設層厚と多層弾性解析から求めた弾性係数の関係

設層厚が厚くなるに従って EPS 材の弾性係数は小さくなり、敷設層厚が 80cm 以上になるとほぼ一定の値を示している。これは、3.2 で述べたように EPS 材の敷設層厚と基盤の関係が影響しているとみなすことができる。したがって、EPS 材自体の弾性係数は、剛性の高い基盤の影響のない敷設層厚 80 cm 以上の 100 kgf/cm² 程度が妥当な値として考えられる。

4. 現場走行実験

道路盛土の路床に EPS 材を用いた場合の交通荷重による EPS 材の応力・変形挙動等を調べるために、実車両による走行実験を実施した。

実験に用いた EPS 材は押し発泡型のものである。

4.1 実験の概要

施工は、EPS 材のブロック（長さ 1820mm、幅 910mm、厚さ 200 mm）を 5 層にわたってブロックの継ぎ目が重ならないように積み上げた（口絵写真-3）。また、EPS 材のブロックの間は緊結金具で連結し、EPS 材相互のずれを防止した。舗装は、路床における EPS 材自体の CBR 値を 3 程度と仮定し、交通量の区分を L 交通として設計した。舗装構成は図-8 に示すように、路床材として EPS を 100 cm 敷設し、その上に下層路盤を 30 cm、上層路盤を 15 cm、表層を 5 cm とした。なお、通常の施工では、EPS 材の直上部には厚さ 10~15 cm の鉄筋コンクリート床版を打設するが、今回の実験では交通荷重による EPS 材の変形挙動を調べるために床版を打設しないこととし、下層路盤と EPS 材の間には 10 cm の砂層を設けた。

実験は、写真-2 に示すような土木研究所構内に施工した 1 周約 250m の試験走路の一部に EPS 材を路床材料として施工した工区を設け、総重量 26.5 tf のダンプトラックを L 交通での供用期間 10 年程度に相当する回数、すなわち 15 000

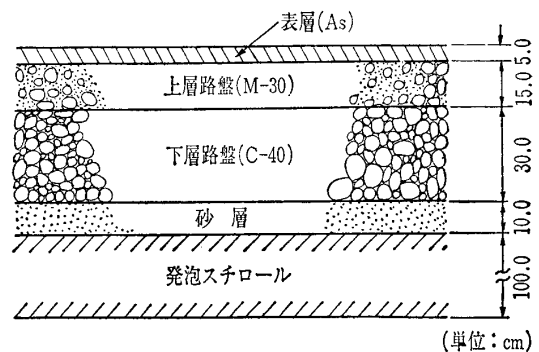


図-8 舗装の断面構成

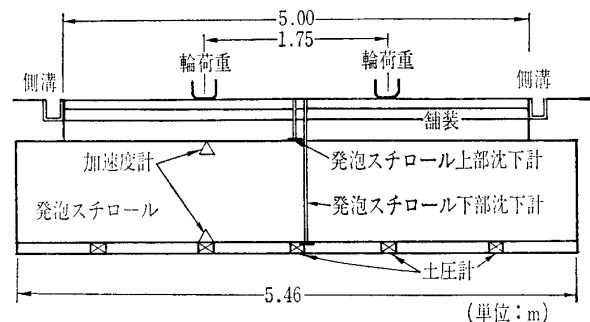


図-9 計測器の設置状況

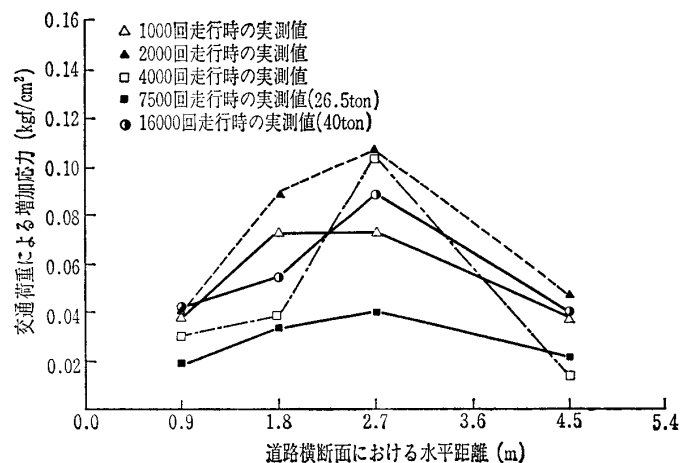


図-10 発泡スチロール下部における交通荷重による増加応力の分布

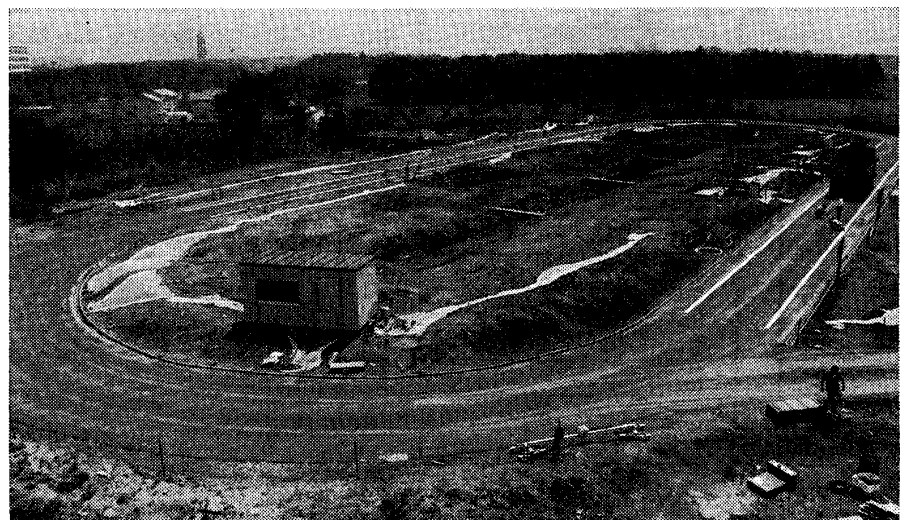


写真-2 試験走路の全景

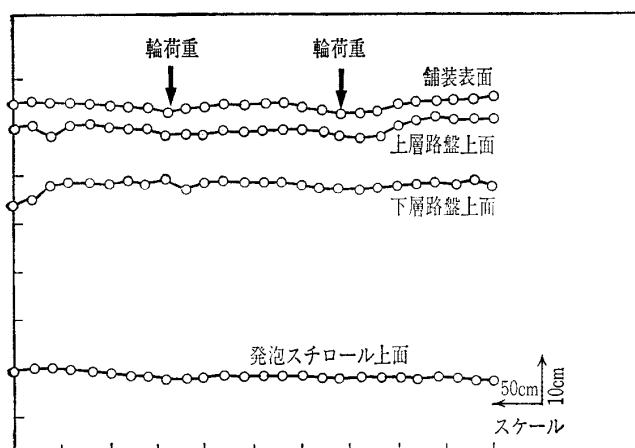


図-11 開削時の舗装横断面の状況

回走行させた。また、EPS 材に苛酷な条件を与えるために、総重量 40 tf のダンプトラックをさらに 1000 回走行させ、合計で 16000 回走行させた。

計測項目は、図-9 に示すように EPS 材下部に生ずる土圧、および沈下計による EPS 材上下の沈下量、ならびに EPS 材内部の振動加速度、舗装表面の変形量などである。また、実験終了後に舗装横断面の開削調査を行い、EPS 材および舗装横断面の変状を調査した。

4.2 実験結果

(1) 交通荷重下における EPS 材の発生応力

交通荷重が作用した場合に EPS 材下部に生じる増加応力の分布を示したものが図-10 である。この図から増加応力の分布は走行回数によって多少の差はあるものの、全体として中央部で凸型の分布形状を示していることが分かる。

(2) EPS 材の変形状況

実験終了後に EPS 材の変形状況を調べるために舗装横断面の開削調査を行った。その結果を示したものが図-11 である。図-11 の測定結果から舗装表面にわだち掘れが生じているが、この変形は概ね上層路盤までで、EPS 材の上面はほぼ平滑を保っており、凹凸等の変状は認められな

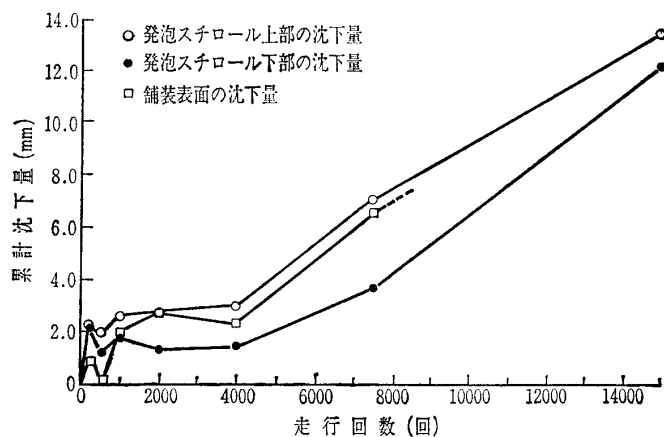


図-12 走行回数と発泡スチロールの沈下量の関係

かった。また、口絵写真-4 は開削調査時の EPS 材表面の状況を示したものである。この写真からも、EPS 材の変形および損傷は認められないことが分かる。

次に、EPS 材上部と下部に設置した沈下計および舗装表面の変位観測紙による沈下量とダンプトラックの走行回数の関係について示したものが、図-12 である。図-12 の結果から、EPS 材上部、下部および舗装表面の沈下量はダンプトラックの走行回数が増加するに従い、それぞれ増加する傾向にあるが、EPS 材上部および下部の沈下量の差はダンプトラックの走行回数が増加しても、ほぼ一様の差を示している。このことから、本実験の沈下は主として EPS 材下部の原地盤に起因しており、交通荷重としてかなり大きなものを載荷したにもかかわらず、EPS 材自体の圧縮量は小さいといえる。

4.3 多層弾性解析による構造解析

EPS 材を路床等に用いたときの応力・変形特性を明らかにするために多層弾性解析（本解析では土木研究所舗装研究室所有の BISAR を使用）を行い、その適合性を調べるとともに、EPS 材上部にコンクリートスラブを打設した場合の効果についても合わせて検討を加えた。解析は、現場走行実験の舗装構成をモデル化して行った。ここで、解析に用いたパラメーターとして EPS 材は平板載荷試験によって求めた変形係数 ($E=100 \text{ kgf/cm}^2$) と三軸圧縮試験から得られたポアソン比 ($\nu=0.1$) を用い、舗装の各層については既存の資料⁶⁾を参考にして決定した。

(1) 解析結果

現場走行実験で用いた舗装構成で解析した場合の EPS 材下部に生じる増加応力の分布を示したものが、図-13 である。図-13 の結果から、解析値と実測値とが比較的良好に合致していることが分かる。

次に、総重量 26.5 tf のダンプトラックを走行させた場合において、輪荷重直下に生じる鉛直方向の増加応力の分布を示したものが図-14 である。図-14 の解析結果から、路床に EPS 材を用いた場合と通常路床材を用いた場合とでは、ほぼ同様な傾向を示していることが分かる。また、

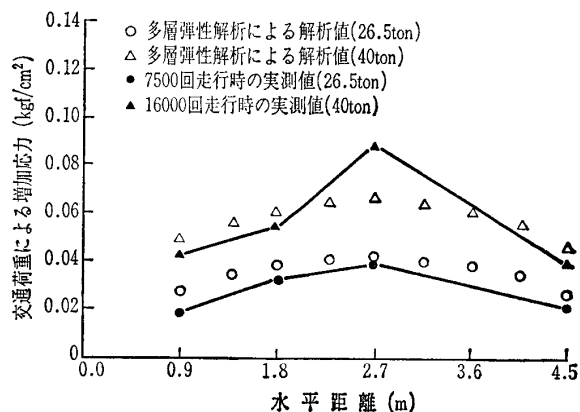


図-13 発泡スチロール下部横断面における交通荷重による増加応力の分布

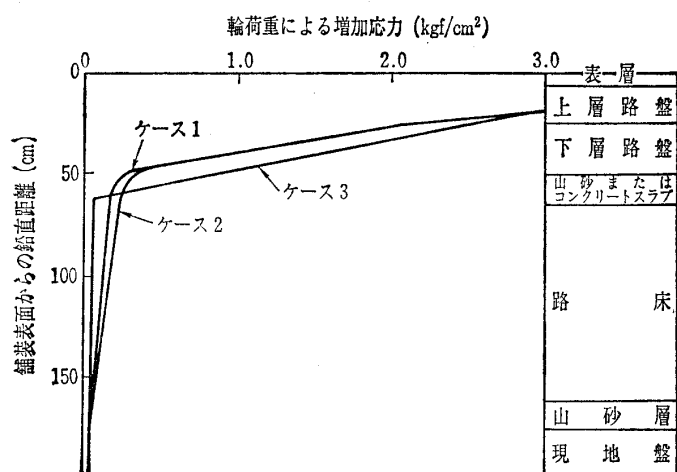


図-14 輪荷重直下における増加応力の分布 (26.5 ton の場合)

EPS 材上部にコンクリートスラブを打設した場合には、コンクリートスラブの荷重分散効果によって、EPS 材上部の増加応力はほかの場合に比べて小さくなる。すなわち、コンクリートスラブは EPS 材の保護ならびに EPS 材上面のレベリングを保持する効果とともに、交通荷重による応力分散をはかり、EPS 材に生じる応力や変形を少なくする効果のあることが確かめられた。また、本解析の結果からコンクリートスラブを打設しない舗装構成において、26.5 tf ダンプトラックを載荷した場合、輪荷重直下の EPS 材 (路床) 上面に作用する増加応力は 0.3 kgf/cm^2 程度である。したがって EPS 材上面に作用する上載圧 0.1 kgf/cm^2 を合わせても、EPS 上面に作用する応力は 0.4 kgf/cm^2 程度となる。この応力は EPS 材の圧縮強度 (3.0 kgf/cm^2) の範囲内にあり、EPS 材を路床に用いても交通荷重等に十分耐え得るものであることが分かる。

5. ま と め

EPS 材の超軽量盛土材としての適用性を検討することを目的にして行った室内の力学試験、ならびに現場走行実験、多層弾性解析の結果から、次に示すことが判明した。

- ① EPS 材の力学特性は、押出し発泡法の製品で圧縮強度が 3.0 kgf/cm^2 程度あり、通常の盛土や路床に適用できる強度を有している。また、圧縮強度の拘束圧による強度の依存性は少ない。なお、押出し発泡法による製品は、製造方法に起因する EPS 材の強度の異方向性が認められた。
- ② 圧縮せん断試験における供試体の変形状況の拡大写真から、EPS 材の供試体に生じた軸ひずみの分布は一様でなく、また EPS 材の破壊領域は独立気泡の潰れにより、供試体の上下面から次第に中心部へと進行

していくことが判明した。したがって、EPS 材内の独立気泡の潰れが生じない一定の圧縮力下のもとの EPS 材の利用を考えることが重要である。

- ③ 押出し発泡型の EPS 材を用いた載荷試験の結果から、EPS 材の地盤反力係数として、 $K_{30}=3.6 \text{ kgf/cm}^3$ 、変形係数 $E=100 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の値が得られた。
- ④ 試験舗装を用いて総重量 26.5 tf および 40 tf のダンプロックを合計 16 000 回走行させた現場走行試験の結果から、EPS 材が路床・路体として十分に交通荷重に耐えることができ、変形量も小さく、舗装への影響も少ないことが認められた。
- ⑤ 現場走行実験後の開削調査の結果からも、EPS 材の変状や損傷は認められず、EPS 材が盛土材として十分適用できることが判明した。
- ⑥ EPS 材を路床等に用いた場合の多層弾性解析結果から、交通荷重によって EPS 材上部に作用する増加応力は、EPS 材の弾性範囲内にあることが明らかとなった。また、EPS 材は従来の路床材と比較しても同様の応力・変形挙動を示すことが判明し、EPS 材の許容応力以下になるように EPS 材を敷設すれば、路床材として使用しても特に問題のないことが確かめられた。
- ⑦ 多層弾性解析の結果から、EPS 材上部の鉄筋コンクリートスラブは、EPS 材上部の舗装の施工時の作業性を良くするだけでなく、交通荷重の分散効果や EPS 材内部に生じる応力を低減させる効果が期待できることが判明した。

最後に、載荷試験にあたって、茨城県土木試験所技師 (元建設省土木研究所土質研究室部外研究員) 松橋秀広氏の多大なる協力を得た。また、試験走路の構築ならびに走行実験の実施にあたって協力をいただいた関係の各位に対して、厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) R. Aabø: 13 Years of Experience with Expanded Polystyrene As a Light Fill Material In Road Embankments, Seminar On the Use of EPS In Road Construction, Lysebu, Oslo, 1988.5.
- 2) 能登繁幸・後藤 彰: 発泡スチロール盛土 (ライトフィル) の挙動と評価, 第17回日本道路会議論文集特定課題, pp.123~125, 1987.
- 3) 東 清和: 発泡スチロールを用いた工法の施工例, 土と基礎, Vol.35, No.4, pp.100~102, 1987.
- 4) 久楽勝行: 土工における新技術・新工法の開発, 九州技報, No.1, 1987.6.
- 5) 牧 廣・小坂田篤編: プラスチックフォームハンドブック, 日刊工業新聞社, pp.43~47, 1973.
- 6) 塚本・桃井: 発泡スチロールを用いた土木工法に関する一考察, 舗装, Vol.22, No.8, pp.4~8, 1987.

(原稿受理 1988.10.7)