

EPS を利用した横ずれ断層による線状土木構造物の破壊を防ぐための地盤改良工法に関する模型実験

Model Test of Ground Improvement Method Using EPS to Prevent Damages on Linear Infrastructure by Strike-Slip Faulting

宮坂 淳*・谷 和夫**・金谷 守***

Jun MIYASAKA, Kazuo TANI and Mamoru KANATANI

In order to mitigate serious fault rupture hazards on linear infrastructures, a new ground improvement method was proposed in which a multi-layer system is designed to absorb, disperse and mask fault displacements. In this study, a series of model tests is conducted to investigate feasibility of the proposed method for the case of strike-slip faulting. Expanded polystyrene and a steel plate are used as the absorption layer and the rigid beam layer. The model test results demonstrate the proposed method is significantly effective to modify the localized fault displacements into continuous mild deflections without causing any unwanted bending on the crossing structures.

Key Words: expanded polystyrene, strike-slip, fault rupture, model test, ground improvement

1. はじめに

1999 年に相次いで発生した台湾の集集地震とトルコのコジャエリ地震を契機に、地表地震断層による土木構造物への被害が注目を集めている。著者らは、軽量地盤材料を利用した地盤改良工法を対策として提案した¹⁾。この工法は、線状土木構造物を剛な基盤（平滑化層）に載せて、断層との間に発泡スチロール（以後、EPS と称す）のようにせん断帯が発達しにくく、圧縮性能が高い軽量地盤材料（吸収層）を挟むことにより、地表地震断層によって平滑化層に生じる変形を土木構造物が許容できる範囲内の連続なものに抑えようとする考え方に基づいている。

本研究では、横ずれ断層の模型実験を行い、平滑化層の曲げ剛性と吸収層の特性（密度、厚さ、配置）が平滑化層の曲げ変形や吸収層の圧縮変形に与える影響について調べた。

2. 横ずれ断層の模型実験の方法

従来、横ずれ断層による地表面の変形を再現する方法として、模型地盤を砂や粘土など土質材料で作製して、土槽に強制変位を与える方法が用いられてきた。しかし、本研究で対象とする平滑化層は、実務では鉄筋コンクリートのスラブを想定しており、地盤材料と比較して剛性が高い。そのため、底盤の摩擦による横ずれだけでは、地表面の変形を再現できない虞がある。そこで、剛な反

* 修士（工学） カネボウ（株） 群馬工場 製造部

** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

*** 博士（工学）（財）電力中央研究所 我孫子研究所 地盤耐震部

力壁を用いて、改良地盤の側方から横ずれ断層による強制変位を与えられるようにした。

(1) 実験装置と使用した材料

図-1に示す内法幅が2,400mmの横ずれ断層用の大型土槽を用いた²⁾。平滑化層(鉄板)の固定端間の距離は2,160mmで、横ずれ断層の強制変位(最大300mm)は、断層線を跨いで配置した鋼鉄製の反力壁を介して改良地盤(吸収層や平滑化層)に与えた。

吸収層には、軽量地盤材料として一般に市販されているEPSのブロック(アキレス(株)製、高さ200mm、厚さ $t_{EPS}=97, 197, 297\text{mm}$ 、密度 $\rho_{EPS}=12, 16, 20\text{ kg/m}^3$)を使用した。一方、平滑化層には、軟鋼の鉄板(SS400、長さ2,340mm、高さ200mm、厚さ $t_{sp}=6, 12, 19\text{mm}$)を用いた。降伏点は 235N/mm^2 以上、引張り強さは $400\sim 510\text{N/mm}^2$ である。

平滑化層(鉄板)を長さ方向(x 方向)に拘束(軸力が作用)しないように、側壁への取り付け部分はローラー支持とした。

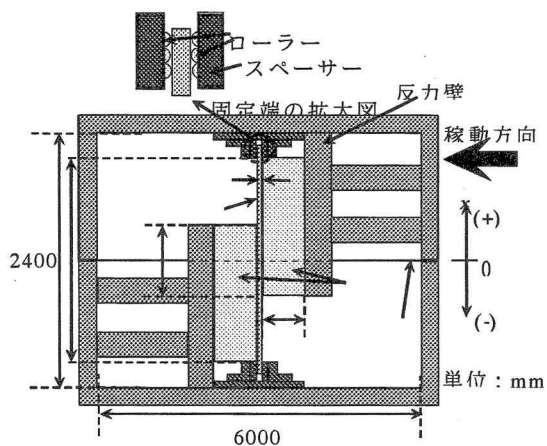


図-1 横ずれ断層の模型実験装置

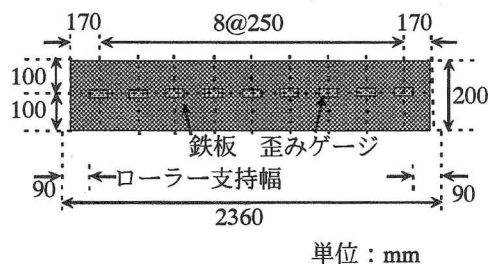


図-2 ひずみゲージの貼付位置

(2) 計測の方法と実験の手順

図-2に示すように、ひずみゲージ(共和電業(株)製)を平滑化層(鉄板)の両面に長さ方向に250mm間隔で貼付し、曲げひずみ分布を求めた。また、上方から撮影した写真から、鉄板とEPSの上面に設けたマーカーを読み取り、鉄板の曲げ変位とEPS内のひずみ分布を求めた。

土槽内に改良地盤(平滑化層と吸収層)をセットした後、横ずれの断層変位を20mmずつ静的に与えた(移動時の平均変位速度は約 1mm/min)。各変位段階($\Delta h=20\text{mm}$)で装置を停止させ、ひずみゲージの値の読み取りと写真の撮影を行った。

横ずれの断層変位量 h が200mmに達した後、初期の状態($h=0\text{mm}$)まで土槽を戻して残留ひずみを計測した。なお、全ての実験ケースにおいて平滑化層(鉄板)の残留ひずみはほぼゼロだったので弾性範囲だったと思われるが、平滑化層(鉄板)もEPSも再利用せずに新品を使用した。

表-1 実験ケース

実験 ケース	t_{sp} (mm)	t_{EPS} (mm)	ρ_{EPS} (kg/m^3)	W_{EPS} (mm)
1	6	197	16.0	300
2	12			
3	19			
4	6	97	12.0	200
5		297		
6		197	20.0	
7			16.0	400
8				
9				

(3) 検討項目

表-1に示すように、平滑化層(鉄板)の曲げ変形や吸収層(EPS)の圧縮変形に及ぼす各種のパラメータの影響を調べるために、合計9ケースに実験を実施した。平滑化層(鉄板)の変形は梁の曲げ問題に類似していることを考慮して、平滑化層(鉄板)の曲げ剛性と作用する地盤反力に関連

するパラメータに注目した。前者については平滑化層（鉄板）の厚さ t_{sp} を、後者については吸収層（EPS）の特性である密度 ρ_{EPS} 、厚さ t_{EPS} 、配置を代表する重なり幅 W_{EPS} をそれぞれ変化させた実験を行った。表-1 に示す 9 ケースの内、ケース 1 の条件（ $t_{sp}=6\text{mm}$ 、 $t_{EPS}=197\text{mm}$ 、 $\rho_{EPS}=16\text{kg/m}^3$ 、 $W_{EPS}=300\text{mm}$ ）を比較のための基本条件とした。

平滑化層（鉄板）の曲げ剛性の影響は、平滑化層（鉄板）の厚さ t_{sp} を変化させ、ケース 1（ $t_{sp}=6\text{mm}$ ）、2（ $t_{sp}=12\text{mm}$ ）、3（ $t_{sp}=19\text{mm}$ ）で検討した。平滑化層（鉄板）に作用する地盤反力は、吸収層（EPS）の特性に依存する。地盤反力係数は EPS の剛性すなわち密度 ρ_{EPS} に依存し、ケース 1（ $\rho_{EPS}=16\text{kg/m}^3$ ）、6（ $\rho_{EPS}=12\text{kg/m}^3$ ）、7（ $\rho_{EPS}=20\text{kg/m}^3$ ）で検討した。また、地盤反力係数は EPS の厚さ t_{EPS} にも依存し、ケース 1（ $t_{EPS}=197\text{mm}$ ）、4（ $t_{EPS}=97\text{mm}$ ）、5（ $t_{EPS}=297\text{mm}$ ）で検討した。さらに地盤反力が作用する範囲は EPS の配置に依存するので、重なり幅 W_{EPS} を変化させてケース 1（ $W_{EPS}=300\text{mm}$ ）、8（ $W_{EPS}=200\text{mm}$ ）、9（ $W_{EPS}=400\text{mm}$ ）で検討した。

3. 模型実験の結果（基本条件：ケース 1）

横ずれの断層変位 $h=100\text{mm}$ の時に得られた吸収層（EPS）内のひずみ分布を図-3 に、平滑化層（鉄板）の曲げ変位と曲げひずみを図-4（ $t_{sp}=6\text{mm}$ 、 $t_{EPS}=197\text{mm}$ 、 $\rho_{EPS}=16\text{kg/m}^3$ 、 $W_{EPS}=300\text{mm}$ のグラフ）に示す。また同じく $h=100\text{mm}$ の時の、吸収層（EPS）内の体積ひずみと最大せん断ひずみの最大値、および平滑化層（鉄板）の曲げひずみと曲げ変位の最大値を表-2 に示す。

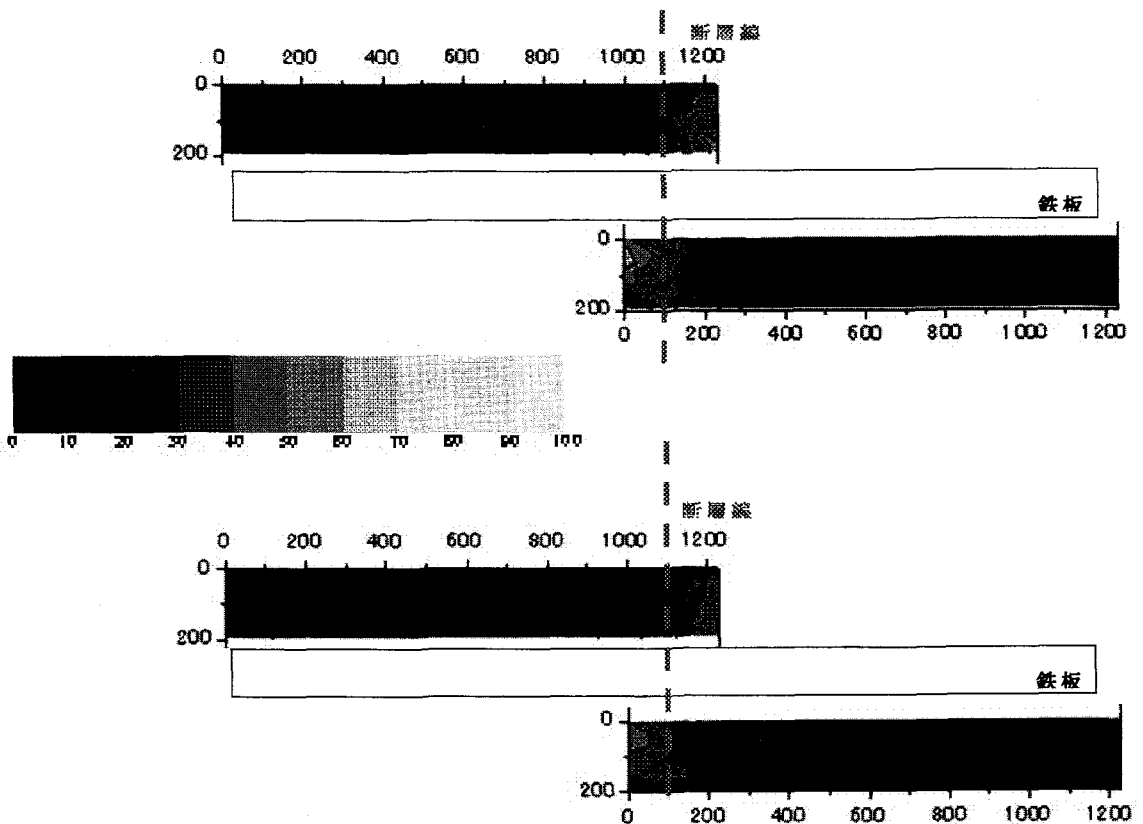


図-3 $h=100\text{mm}$ の吸収層（EPS）内のひずみ分布（上：体積ひずみ，下：最大せん断ひずみ）

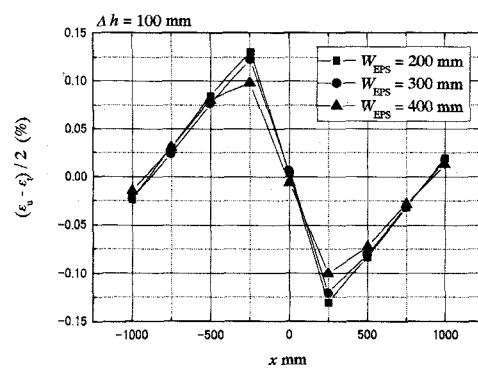
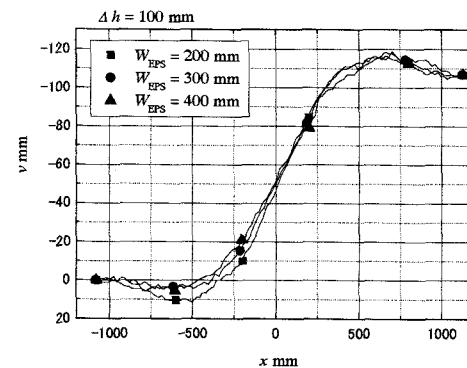
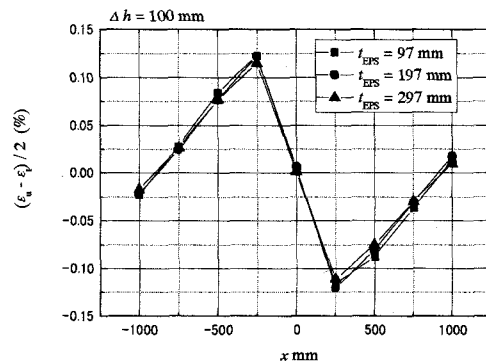
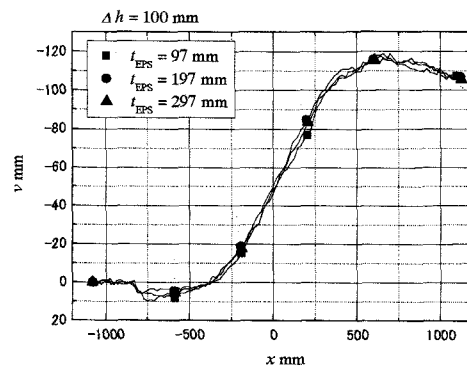
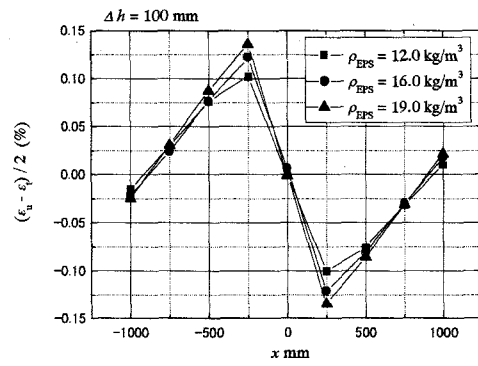
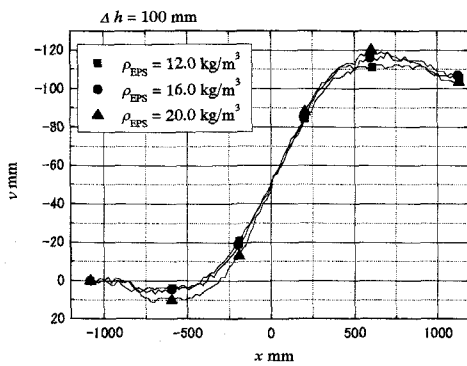
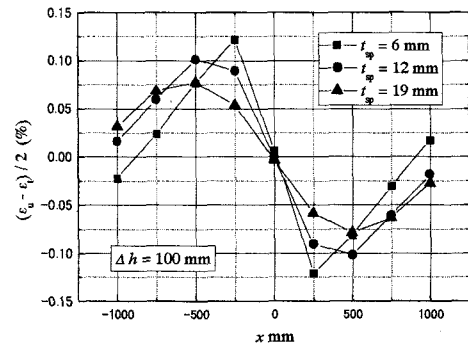
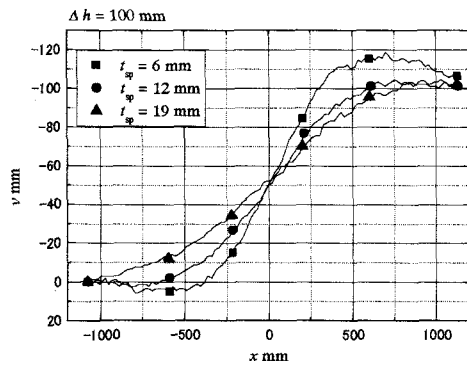


図-4 模型実験の結果 (左: 平滑層 (鉄板) の曲げ変位、右: 平滑層 (鉄板) の曲げひずみ)
上から、 t_{sp} の影響、 ρ_{EPS} の影響、 t_{EPS} の影響、 W_{EPS} の影響

図-3を見ると、断層線の近傍では50%程度、約400mm離れた部分でも10%以上の体積ひずみが生じている。EPSの一軸圧縮試験で降伏時の軸ひずみが約5%であることを考慮すると、断層線上の約1,000mmの範囲で降伏点を越えて接線ヤング率が非常になくなる残留圧縮域にあると推測される。EPSの圧縮性能を全領域でフルに活用するためには、断層線から遠方ほど層厚を小さくすることが有効であろう。また、最大せん断ひずみと体積ひずみの値がほぼ等しく帯状（断層線の方角に一樣）に分布するとより、断層線に平行な方向にのみ圧縮し、直交する方向には変形しない（ポアソン比がゼロである）ことも分かる。

図-4に示す基本条件のケース1に関する平滑化層（鉄板）の曲げ変形を見ると、S字型に撓み、なだらかな線形を描いており、断層変位が連続的な変形に変換されている。断層線から約700mm離れた位置で最大の曲げ変位が見られるが、この曲げ変位量を下げると共に、最大値が出現する位置を断層線から遠くすることが肝要である。また曲げひずみを見ると、断層線から250mm離れた位置で極値をもつ三角形分布を示す。平滑化層（鉄板）が曲げ破壊しないように、この曲げひずみの最大値を下げるのが肝要である。

4. 模型実験の結果（各種のパラメータの影響）

基本条件（ケース1）の結果を踏まえ、図-4と表-2を元に各種のパラメータの影響を議論する。

（1）平滑化層の厚さ t_p の影響（ケース1、2、3）

平滑化層（鉄板）が厚くなるほど曲げ変形はなだらかになり、滑らかなカーブを描く。また、曲げひずみの最大値が小さくなると共に、その出現する位置も断層線から遠くなる。よって、高い曲げ剛性とすることによって、平滑化層（鉄板）の変形を効果的に抑えることができる。

吸収層（EPS）内の体積ひずみと最大せん断ひずみの最大値は、35～55%でほとんど変わらない。EPSの残留圧縮域は一軸圧縮試験の軸ひずみで5～75%と幅広く、この範囲では地盤反力が圧縮量にあまり依存しないと推測される。よって、曲げ変形に対する影響は、主に平滑化層（鉄板）の曲げ剛性が梁の特性値に寄与していたからと思われる。

（2）吸収層（EPS）の密度 ρ_{EPS} の影響（ケース1、6、7）

吸収層（EPS）の密度が減少するほど平滑化層（鉄板）の曲げひずみの最大値は小さくなるが、

表-2 横ずれの断層変位 $h=100$ mm の時の各種の計測値

ケース	吸収層（EPS）内の 体積ひずみの 最大値（%）		吸収層（EPS）内の 最大せん断ひずみの 最大値（%）		平滑化層（鉄板）の 曲げひずみ ($\epsilon_v - \epsilon_t$) / 2（%）		平滑化層（鉄板）の 曲げ変位 v （mm）	
	稼働側	固定側	稼働側	固定側	$x=250\text{mm}$	$x=-250\text{mm}$	$x=700\text{mm}$	$x=-700\text{mm}$
1	53.3	42.2	51.7	42.3	-1.21×10^{-3}	1.22×10^{-3}	-118.68	4.20
2	48.8	38.5	46.0	34.8	-9.00×10^{-4}	8.90×10^{-4}	-101.46	0.70
3	52.1	58.3	35.0	43.4	-5.90×10^{-4}	5.30×10^{-4}	-96.69	-9.81
4	87.0	79.0	81.6	71.7	-1.17×10^{-3}	1.23×10^{-3}	-116.77	6.68
5	50.2	48.3	56.9	37.4	-1.11×10^{-3}	1.15×10^{-3}	-115.56	8.63
6	52.1	42.9	53.1	45.1	-1.00×10^{-3}	1.02×10^{-3}	-110.66	5.82
7	63.4	49.4	57.0	50.0	-1.35×10^{-3}	1.36×10^{-3}	-118.57	11.11
8	52.2	42.3	52.2	34.1	-1.31×10^{-3}	1.31×10^{-3}	-117.56	8.71
9	50.4	46.9	50.0	43.4	-1.01×10^{-3}	9.80×10^{-4}	-114.78	2.82

その出現する位置は変わらない。一方、平滑化層（鉄板）の曲げ変形や吸収層（EPS）内のひずみには有意な差は見られなかった。密度が減少すると剛性が低下して平滑化層（鉄板）の曲げ剛性が相対的に大きくなり、変形緩和効果が期待されるはずである。しかし、 $12\sim 20\text{kg/m}^3$ 程度の密度変化に対応した梁の特性値の変化は、平滑化層（鉄板）の曲げ変形に有意な影響を与えるほどには大きくないことが分かる。

(3) 吸収層（EPS）の厚さ t_{EPS} の影響（ケース 1、4、5）

吸収層（EPS）の厚さが変化しても、平滑化層（鉄板）の曲げ変形も曲げひずみも大きな違いは見られなかった。一方、吸収層（EPS）内で見られた体積ひずみや最大せん断ひずみの最大値については、厚い場合のケース 1 ($t_{\text{EPS}}=197\text{mm}$) とケース 5 ($t_{\text{EPS}}=297\text{mm}$) の結果 35～55%に大きな違いが見られなかったのに対し、薄い場合のケース 4 ($t_{\text{EPS}}=97\text{mm}$) では体積ひずみの最大値が 80～90%、最大せん断ひずみの最大値が 70～80%と非常に大きい。しかし、EPS の最大体積ひずみ・最大せん断ひずみの値に鉄板の変形への影響が見られなかったため、今回の実験条件では、EPS の厚さが基盤の横ずれ断層の移動量より厚ければ良いと考えられる。

(4) 吸収層の重なり幅 W_{EPS} の影響（ケース 1、8、9）

吸収層（EPS）の重なり幅が増加するほど平滑化層（鉄板）の曲げひずみの最大値は小さくなるが、その出現する位置は変わらない。一方、平滑化層（鉄板）の曲げ変形や吸収層（EPS）内のひずみには有意な差は見られなかった。重なり幅が大きくなると、地盤反力が不連続になる部分が断層線から遠くなり、より平坦な地盤反力分布すなわち曲げひずみ分布になり、変形緩和効果が期待されるはずである。しかし、地盤反力の作用範囲が数百 mm 程度変化することに対応した梁の特性値の変化は、平滑化層（鉄板）の曲げ変形に有意な影響を与えるほどには大きくないことが分かる。

5. まとめ

地表地震断層問題に対する対策の一つとして新たに提案された吸収層と平滑化層を組み合わせた地盤改良工法を検証するために、横ずれ断層の大型模型実験装置を利用して、平滑化層として鉄板を、吸収層として EPS を用いて実験を行った。その結果、平滑化層の剛性を高めることにより、平滑化層の変形をよりなめらかにし、曲げひずみを低減させることができた。一方、EPS の密度や厚さ、重なり幅は、今回の実験条件に関する限り平滑層の変形にほとんど影響を及ぼさないようであることが分かった。

謝辞：模型実験の実施に際し、張ヶ谷一成氏（（株）三基産業）にお世話になりました。末筆まがら深謝致します。

参考文献

- 1) 谷和 夫：岩盤の表面ないし内部に立地する構造物を地表地震断層から守るために地盤を改良する工法の提案、第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.101-106、2003。
- 2) 宮坂 淳：地表地震断層による被害を低減する地盤改良工法の FEM と模型実験による検討、横浜国立大学修士論文、2003。
- 3) 宮坂 淳、谷 和夫、金谷 守：EPS を利用した横ずれ断層による地盤変形を緩和する地盤改良工法に関する模型実験、第 38 回地盤工学研究発表会、pp.2177-2178、2003。