

# 繊維混入による土の補強に関する研究

西林清茂 小日向隆

## Studies on Reinforcement of Soil with Fibers

Kiyoshige Nishibayashi Takashi Kohinata

### Abstract

Recently, Reinforced earth by arranging synthetic fibers in the soil in stratified form has been frequently adopted. The authors, as a completely new undertaking, experimented with reinforcing of soil in its entirety by mixing soil and 10-cm length synthetic fibers (Vinylon, polyester). This method aims at adding cohesion and tensile strength to soil through frictional forces between fibers and soil particles and tensile strength of the fibers, and is similar to the principle by which roots of plants increase the strength of soil.

The effect of reinforcement is influenced by thickness and volume of the fibers used, and it was recognized that a large reinforcement effect can be obtained with 250-denier thickness and 0.3% volume in triaxial compression tests, slope model tests, and analyses. It was also determined that mixing could be performed with ample effectiveness by using a special mixer and this method could be put to practical use.

### 概要

近年、石油化学製品などの補強材を層状に土の中に介在させて、土を補強する補強土工法が多用されているが、ここでは全く新しい試みとして長さ 10 cm の合成繊維（ビニロン、ポリエステル）を土に混ぜて、土全体を補強する方法について考えた。この方法は、土と繊維の摩擦力、繊維の引張抵抗力によって土に粘着力、引張抵抗力を付加するものであり、植物根が土の強度を増加させることと類似している。

補強効果は、用いる繊維の太さ、量によって影響を受けるが、三軸圧縮試験、斜面模型実験、解析の結果、太さ 250 デニール、混入率 0.3% 程度で大きな補強効果の得られることがわかった。また、混合は特殊ミキサーを使用することにより、十分効果的に行なうことができ、実用化にも十分対応できるものである。

### 1. まえがき

引張り強さを持つ木、竹などの天然の材料を用いて盛土や地盤を補強する技術は、古くから知られている。近年ではこのような天然の材料に代わり石油化学製品などの工業製品が開発され、補強土工法として発展してきた。一般的には、補強材を層状に土の中に介在させて土と補強材の摩擦力および引張力で土を安定させる方法であるが、著者らは全く新しい試みとして、繊維を土の中に混入して土の強度増加を図る方法を試みた。長さ 10 cm の合成繊維（ビニロン、ポリエステル）を土に混入して、繊維と土の摩擦力により土自体に粘着力および引張力を付加させ、土全体を補強するものである。

まず、三軸圧縮試験による効果的な繊維の選定、ミキサーによる繊維の混合方法の検討、さらに、斜面模型実験による盛土補強効果の確認を行なった。さらに、FEM 解析により繊維による土の補強メカニズムについて考察した。

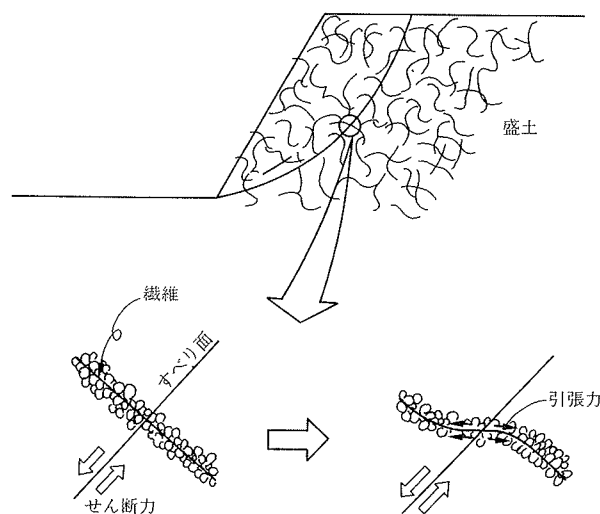


図-1 繊維による補強メカニズム

なお、この研究は、(株)クラレと共同で実施しているものである。

## 2. 工法の概要

工法そのものの原理は簡単で、図-1に示すように繊維と土粒子の摩擦力によって土に加わるせん断力および引張力を繊維に伝え、繊維の持つ引張強度が抵抗力として加わる。いわゆる土に見かけ上の粘着力、引張力成分が付加される。ちょうど、植物根が土の強度を増加させる状態と類似している。以下、この方法をFRS (Fiber Reinforced Soil) と呼称する。

FRSは、補強材である繊維がランダムに土の中に配置された複合材料であるため、補強材をサンドイッチ状に介在させる補強土工法のように、強度増加の期待される位置、方向が限定されない。この意味では、FRSは補強土と言うよりも、土全体の安定を図る土質安定処理と考えることができる。

## 3. 三軸圧縮試験による繊維の選定

### 3.1. 試験方法

試験に用いる繊維として、強度、耐久性、経済性を考えて合成繊維のうちビニロン、ポリエステルを選定した。繊維の長さは、混合性、供試体寸法を考慮して、10 cm以下とし、太さ、フィラメント数を変化させた。試験に用いた繊維の物性を表-1に示す。

対象土は、粘着力成分の小さい砂質土とし、ここでは千葉県佐原産の山砂を用いた。対象土の物理性状を表-2に示す。三軸圧縮試験は、供試体寸法  $\phi 5 \text{ cm} \times h 10 \text{ cm}$ 、拘束圧  $\sigma_3 = 1.0, 2.0, 3.0 \text{ kgf/cm}^2$  とし、ひずみ速度  $\epsilon = 0.5\%/min$  で圧密・排水条件 (CD) で行なった。

繊維の混入率は、土の湿潤重量に対して、0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 2.0%とし、混合は1供試体分の砂をバットに広げ、所定量の繊維をヘラを用いて分散させながら行なった。なお、モールドへの充てんは、6層に分け、所定の密度になるよう締固めた。

### 3.2. 試験結果

3.2.1. 主応力差 まず、一般の繊維補強コンクリート (FRC) に用いられている太さ1.8~2,200デニール (1デニール=1 g/9,000 m)<sup>1)</sup>、長さ6, 24 mmの繊維を用い

物 性	ビニロン	ポリエステル
比 重	1.26~1.30	1.38
引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	75~86	90
弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	5.8~8.4×10 <sup>4</sup>	8.2×10 <sup>4</sup>
伸 度 (%)	17~20	13
軟 化 点 (°C)	220~230	238~240
溶 融 点 (°C)	明瞭でない	255~260

表-1 繊維の物性

て試験を実施した。細い繊維 (1.8デニール) の場合は、繊維が互いに交絡していわゆるファイバーボール状となり、均一混合が不可能である。このため繊維が補強材として寄与しないばかりでなく、砂の中に不連続面を形成するため混入量が多くなるに従って強度が低下する傾向がみられる。一方、太い繊維 (350, 2,200デニール) は、補強効果を得るのに混入率が2%以上必要であり、経済性の面で好ましくないことが分かった。そこで、次に繊維長を100 mmと長くして、太さ、素材、フィラメント数を変化させた試験を行なった。用いた繊維の仕様を表-3に、試験後の供試体の一例を写真-1に示す。

図-2は、応力~ひずみ曲線の代表例として拘束圧  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、混入率0.3%の場合を示したものである。砂のみの場合 (未処理土)、ひずみが10%程度で応力は一定となっているのに対して、No. 1, No. 4, No. 5の繊維を混入した場合 (FRS) は応力のピークがみられず、ひずみが5%以上ではほぼ直線的に増加している。このように繊維による補強効果は、変形が進むにつれて大きくなること分かる。

表-3には、拘束圧  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  の場合の試験結果を併記しているが、一般に繊維の混入率が多いほど最大軸差応力が大きく、補強効果の大きいこと分かる。また、繊維が細いほうが補強効果は大きく、1,000 (No. 6), 500 (No. 5), 250 (No. 4) デニールと細くなるに従って強度が大きくなっている。

太さのほぼ等しいNo. 3とNo. 5では、強度差が小さいことから、今回の実験に用いた繊維のように弾性係数がほぼ等しい場合には、繊維の素材の相違が補強効果に及ぼす影響はほとんど無いものと考えられる。また、モノフィラメント (1本のフィラメントで1本の繊維を構成; No.

粒 度 (%)	粗 砂	11
	細 砂	72
	シルト	10
	粘 土	7
土粒子比重		2.693
含 水 比 (%)		26.1

表-2 対象土の物性

繊維 No.	素 材	※太さ (デニール)	フィラメント数	拘束圧 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$		
				混入率 (%)	最大軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3 (\text{kgf/cm}^2)$	ひずみ $\epsilon (%)$
なし	—	—	—	—	2.6	14.2
1	ビニロン	250	1	0.1	2.6	15.0
				0.2	3.7	15.0
				0.3	4.5	15.0
2	ビニロン	1,650	1	0.1	3.1	15.0
				0.3	3.3	15.0
				0.1	3.8	15.0
3	ビニロン	480	72	0.2	4.1	15.0
				0.1	3.5	15.0
				0.2	4.5	15.0
4	ポリエステル	250	48	0.3	4.9	15.0
				0.1	3.3	15.0
				0.2	4.1	15.0
5	ポリエステル	500	96	0.3	4.0	15.0
				0.1	3.6	15.0
				0.2	3.2	15.0
6	ポリエステル	1,000	192	—	—	—

表-3 三軸圧縮試験結果

1)と、マルチフィラメント(多数のフィラメントで1本の繊維を構成; No.4)の効果を比較してみると、同じデニール数でも繊維の表面積が小さいモノフィラメントの方が、補強効果は小さい。

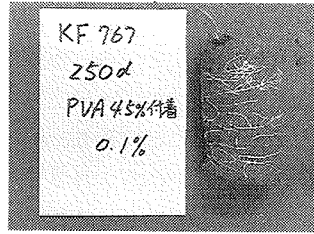


写真-1 試験後の供試体 (No. 1)

しかし、混入率が大きくなるとモノフィラメントの補強効果は大きくなり、両者の差は小さくなる。

3.2.2. 粘着力, 内部摩擦力 表-4は三軸圧縮試験から求めた未処理土とFRS (No.1, No.4)における粘着力および内部摩擦力を示している。繊維を混入することによって見かけ状の粘着力は増加するが内部摩擦角は変わらないことが分かる。これは、ジオテキスタイル、ポリマーグリッドなどを補強材として用いた場合と同じ傾向である。<sup>2)</sup>

#### 4. 土と繊維の混合方法

模型実験, 現場実験, さらに実際の工事への適用を考え, 多量にかつ均一に混合する方法を, 長さ10cmの繊維を用いて検討した。まず, 第一段階として通常土の混合に用いられるソイルミキサーを用いて, 繊維と土の混合を試みた。しかし, 繊維を手で少しずつ分散させてミキサーに投入したにもかかわらず, 混合が進むにつれ繊維がかくはん翼に絡みつき, かくはん翼の回転が止まり, 混合が不可能となった。

次に, 遠心拡散, 渦流原理を利用した特殊高速ミキサーを用いて混合性を検討した。繊維の種類, 混入量, 混合時間を変えて試験を行なった結果, 今回の試験条件の範囲では, 繊維の太さ, 素材による差は認められず混入量0.3%程度では, 混合時間2分程度で概ね均一な混合が可能であることが分かった。

なお, ミキサー混合における繊維の劣化を調べるために, 繊維の引張強度, 弾性率および長さを混合前後で比較した結果, 繊維は十分な強度を保持していることが分かった。

#### 5. 斜面模型実験

##### 5.1. 実験方法

幅2.0m, 高さ1.0m, 奥行き0.3mの綱製の枠とアクリル板からなる土槽<sup>3)</sup>を用いて, 図-3に示すような斜面模型を作成した。前述の山砂を用い, 模型は未処理土の場合, 表-3のNo.1(ビニロン 250d), No.4(ポリエステル 250d/48f)の繊維を0.3%混入した場合の3ケースとし, 締固めは, 地盤が所定の密度となるよう

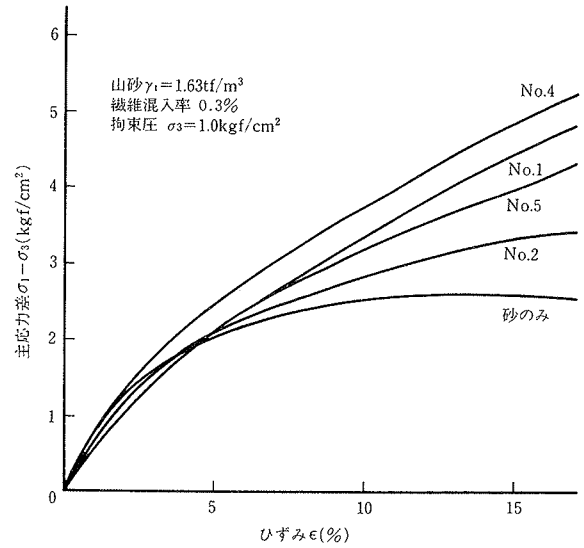


図-2 応力～ひずみ曲線

繊維 No.	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )			粘着力 C (kgf/cm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)
	$\sigma_3 = 1.0$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = 2.0$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = 3.0$ kgf/cm <sup>2</sup>		
なし	2.61	5.23	6.26	0.05	33.4
1	3.70	7.00	8.43	0.35	32.6
4	3.94	6.35	8.70	0.40	33.0

表-4 粘着力, 内部摩擦角

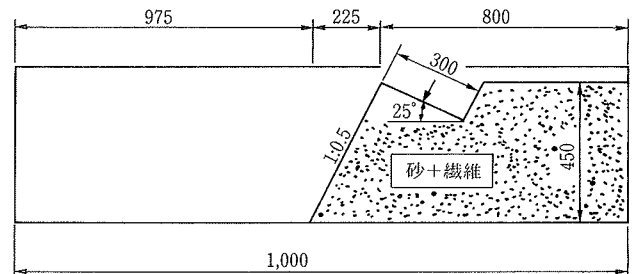


図-3 斜面模型概要

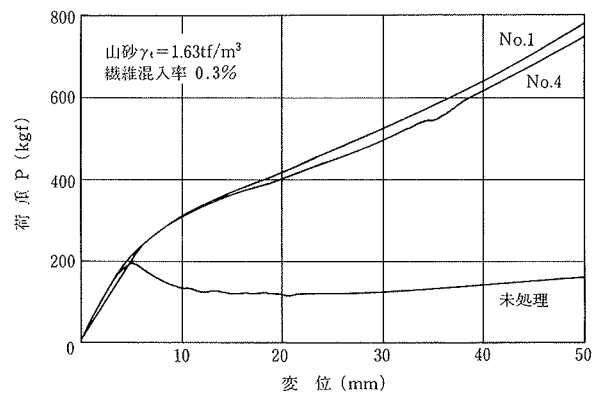


図-4 荷重～変位曲線(実験)

に, 1層当たり5cmで9層に分けて行なった。その際, 土層の前面と背面のアクリル板の内側には, 摩擦低減のためテフロンシートを張り, 地盤の挙動を観察し易いよ

うに縦横 5 cm ピッチで標点を設けた。載荷は、法先を通るすべり面による破壊が生じるよう、載荷板を水平より 25° 傾斜 (斜面にほぼ直角) させて行なった。

## 5.2. 実験結果と考察

5.2.1. 荷重と変位 図-4 に荷重と載荷板変位の関係を示す。未処理土では、変位約 5 mm で降伏点に達し、その後降伏荷重の 70% 程度で変形が進むのに対して、FRS では補強した場合には、このような降伏点はなく荷重が増加を続け変位約 10 mm からは直線的に増加している。なお、No.1 と No. 4 の補強効果の差は小さい。

5.2.2. 地盤の変形 写真-2 は、載荷板の変位約 32 mm における地盤の変形を、未処理土と、FRS (No.1) で比較したものである。未処理土では、載荷板端部を通る明瞭なすべり面が見られるが、FRS では盛土全体が緩く変形しているだけで、明瞭なすべり面は発生しないことが分かる。

5.2.3. ひずみ分布 図-5, 6 は写真の標点の動きから主ひずみ分布を求めて、未処理土と FRS (No.1) で比較したものである。未処理土では、地盤の破壊全般にみられるように降伏時に発生したすべり面に沿って局部的な大きなひずみが発生している。このすべり面周辺のひずみは小さく、すべり面以外の領域の荷重の負担が小さい。また、載荷板変位の増大に伴って局部的なひずみが増加し、形成されたすべり面が拡大されていくことが分かる。これに対して、FRS では、大きなひずみの発生している部分は未処理土と似通っているが、ひずみの絶対値は小さくその発生領域は、載荷板下全体に及んでいる。さらに載荷板変位が増大しても、局部的な大きなひずみの成長はみられず、全体的にひずみが増加して

いることが分かる。

これらのことから、繊維を混入すると繊維の引張抵抗力によって砂が見かけ上のせん断抵抗力と引張抵抗力を合わせ持つことになり、局部的な大きなひずみ (すべり面) の発生が低減されることが分かる。そして荷重を広い範囲に分散させて地盤全体で荷重に抵抗するので、載荷能力が増すものと考えられる。

## 6. 有限要素法による補強メカニズムの検討

### 6.1. 解析方法

繊維混入による砂の補強メカニズムを検討するために、平面ひずみ問題として有限要素法による非線形弾性 (Duncan-Chang) <sup>4)</sup> 解析を実施した。未処理土と FRS (No.1) について、3.2.2. で実施した三軸圧縮試験結果を基に、表-5 に示すように入力定数を設定した。

### 6.2. 解析結果と考察

解析で得られた載荷板の変位量と荷重の関係を、実験

a) 未処理土

b) FRS

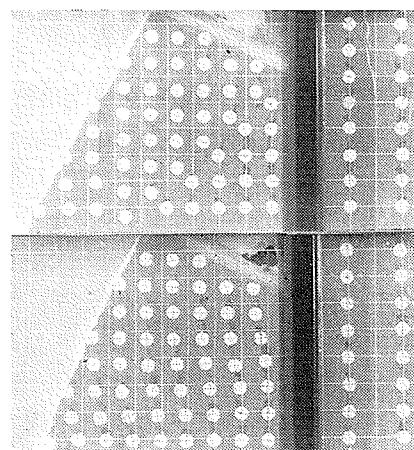


写真-2 地盤変形状態

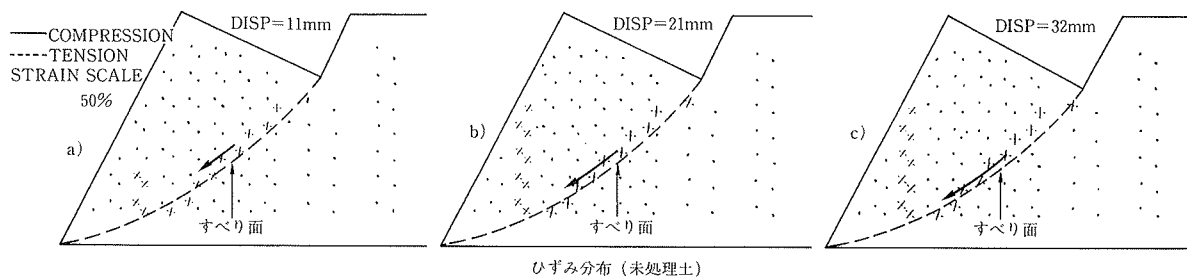


図-5 主ひずみ分布 (未処理土)

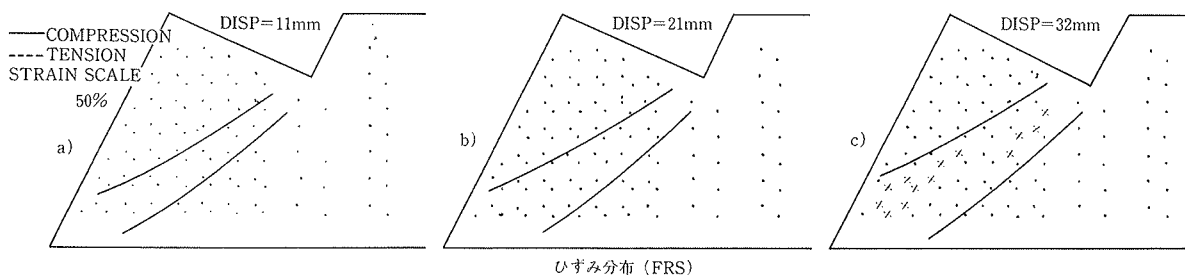


図-6 主ひずみ分布 (FRS)

結果と合わせて図-7に示す。全体的な傾向は、未処理土もFRSも実験結果をよく表現しており、繊維混入による補強効果が明確に現れている。ただし、Duncan-Changモデルは応力ひずみ関係を双曲線で近似するものであるため、荷重～変位曲線が未処理土のように、降伏点、残留強度を示さない。

次に、図-8に変位10mmの場合の最大せん断ひずみの分布を示す。未処理土では、6%以上の大きなひずみの発生する領域は、載荷板端部から法先に向かっており、実験におけるすべり面の位置とよく一致している。このように、未処理土では局所的な大きなひずみの発生が見られるのに対して、FRSでは、比較的小さなひずみが広い範囲で発生しており、局所的な大きなひずみの発

生は少ない。このことから、解析においても繊維が局所的な大きなひずみを低減し、ひずみを広い範囲に分散させる働きがあることが分かる。

### 7. まとめ

三軸圧縮試験、混合試験、斜面模型実験および有限要素法解析により、土に切断した合成繊維を混入して土を補強する方法について検討を行なった結果、以下のことが判明した。

(1) 土に繊維を混入すると、土の強度は粘着力成分が大きくなり、大きな補強効果が得られる。また、その効果の程度は繊維の太さ、長さ、量に影響される。

(2) 土と繊維は比重が異なるため、一般のソイルミキサーでは混合がむずかしいが、特殊ミキサーを使用すれば効果的な混合ができる。

(3) 斜面模型実験の結果、繊維混入によって盛土体の安定性が大きく向上し、補強効果は顕著である。

(4) 模型実験、FEM解析のいずれにおいても、FRSは未処理土に比べて局所的な大きなひずみの発生が少なく、繊維により荷重が地盤全体に分散されていることが認められる。

なお、実斜面での効果を把握するため、現在試験盛土を構築してFRSの安定性について調査研究を進めており、この結果は追って報告する予定である。

項	目	未処理土	FRS
(E <sub>i</sub> )	初期接線係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	20	20
(ν <sub>i</sub> )	初期ポアソン比	0.33	0.33
(K)	接線係数決定のための定数(載荷時)	95	95
(K <sub>0R</sub> )	" (除荷・再載荷時)	120	120
(n)	双曲線の指数≧0	0.44	0.44
(R <sub>i</sub> )	破壊比	0.75	1.00
(c)	粘着力(kgf/cm <sup>2</sup> )	0.05	0.35
(φ)	内部摩擦角(単位はdegree)	33.4	33.4
(p <sub>a</sub> )	大気圧(kgf/cm <sup>2</sup> )	1.0	1.0
(g)	ポアソン比非線形のための定数	1.0	1.0
(G)	"	0	0
(F)	"	0	0
(σ <sub>3T</sub> )	引張り破壊時のσ <sub>3</sub> (正の値で入力)	0.005	0.0035
(E <sub>0</sub> )	初期接線係数の定数項(kgf/cm <sup>2</sup> )	20	20
(α)	せん断破壊時の剛性倍率	0.1	0.1
(ν <sub>max</sub> )	最大ポアソン比	0.49	0.49

表-5 入力定数

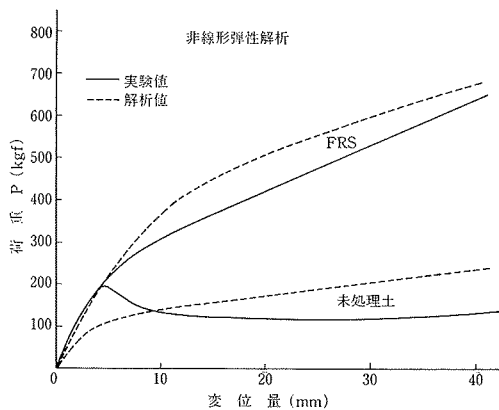


図-7 荷重～変位曲線(解析)

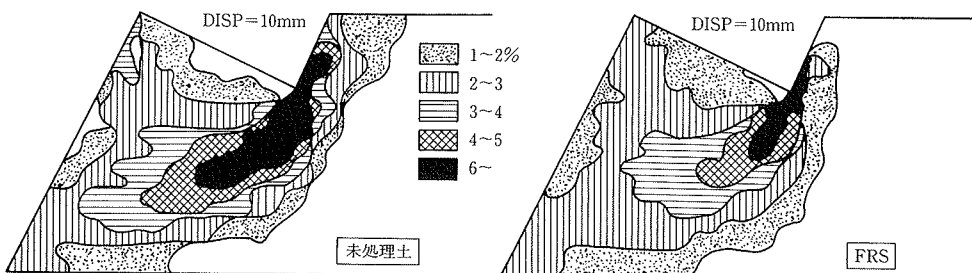


図-8 最大ひずみ分布

### 謝辞

この研究の遂行に当たり、終始御協力、御助言をいただきました、(株)クラレ産業資材販売部 大西部長をはじめ関係者各位に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 渡 義治, 他: ジオテキスタイル関連用語の解説, 土と基礎, Vol. 33, No. 5 (1985), pp. 51~54
- 2) 泰永裕之, 他: 大型三軸圧縮試験におけるジオテキスタイルの補強効果, 第42回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, (1987), pp. 868~869
- 3) 平間邦興, 他: 鉄筋で補強した斜面の室内模型実験, 大林組技術研究所報, No. 38, (1989), pp. 7~11
- 4) 川本眺万, 他: 地盤工学における有限要素法解析, pp. 66~75