

ジオシンセティックスの引抜き試験に基づく 摩擦係数・変形係数の評価法

高橋 悟¹・今泉繁良²・横山幸満³・坪井正行⁴

¹学生会員 工学 宇都宮大学大学院博士前期課程 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

²正会員 工博 宇都宮大学助教授 建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

³正会員 工博 宇都宮大学教授 建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

⁴工学 東洋ゴム工業株式会社 R&P 技術本部 (〒358 入間市狭山ヶ原 302)

ジオシンセティックスの引抜き試験から弾性論に基づいて摩擦係数 μ' と変形係数 $E \cdot t$ を評価する方法を提案した。特に、抜け出しが完了しない場合、土中にあるジオシンセティックス上の2点について、先端引抜き力とその点での変位量との関係を計測すれば、 μ' と $E \cdot t$ が評価できることを理論的に示した。そして、EPDM ジオメンブレンと2種類の不織布を粒状土内に長さ100 cm で敷設し、引抜き試験を実施してこれらの値を評価した。その結果、提案した方法で評価された μ' と $E \cdot t$ の値は、要素試験である直接せん断試験や引張り試験からの値とほぼ一致し、先端での「引抜き量—引抜き力」関係をうまくシミュレートし得ることがわかった。

Key Words : pull-out test, geosynthetics, elastic theory, frictional coefficient, deformation modulus

1. はじめに

近年、ジオテキスタイル、ジオメンブレン等のいわゆるジオシンセティックスが、斜面・擁壁・軟弱地盤の補強工¹⁾や、堤防・貯水池・廃棄物処分場における遮水工²⁾として多用されるようになってきている。

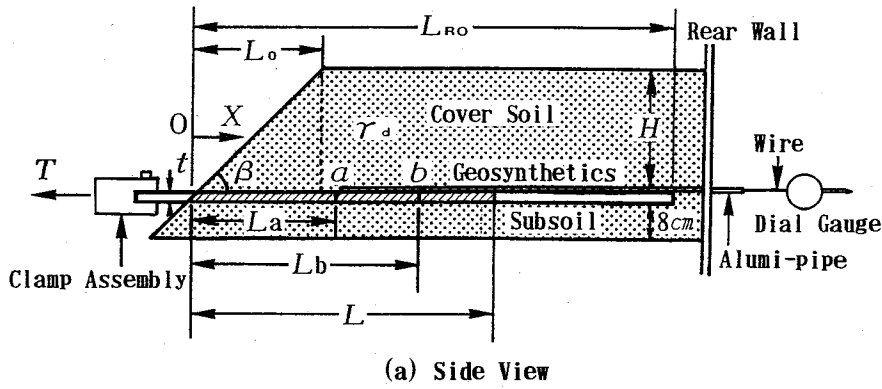
このような構造物の安定性評価³⁾、固定評価⁴⁾、変形評価⁵⁾において、ジオシンセティックス間あるいはジオシンセティックスと土との間の摩擦特性や、ジオシンセティックス自身の弾性係数などのパラメータを知ることが重要となるが、それらは一般的に直接せん断試験^{6),7)}や引張り試験^{8),9)}などの要素試験により求められている。しかし、上述した利用に関して、ジオシンセティックスの変形や固定能を模擬化している引抜き試験による評価は貴重な方法であると考ええる。

引抜き試験を実施すると、ジオシンセティックスは2つの代表的な破壊形態を取る^{10),11)}。一つはジオシンセティックスが破断することなく抜け出す場合で、もう一つは引抜きの途中で破断する場合である。抜け出しが起きた時はジオシンセティックスの全面積においてせん断抵抗が一樣に発揮されているとして摩擦係数は容易に求まるが、他方、抜け出しが起きない場合、つまり、引張り破断が起きたり、ジオシンセティックス先端での引抜き量が計測限界に達しても後端に変位が現れない時には、せん断抵抗がジオシンセティックスの全面積で発揮

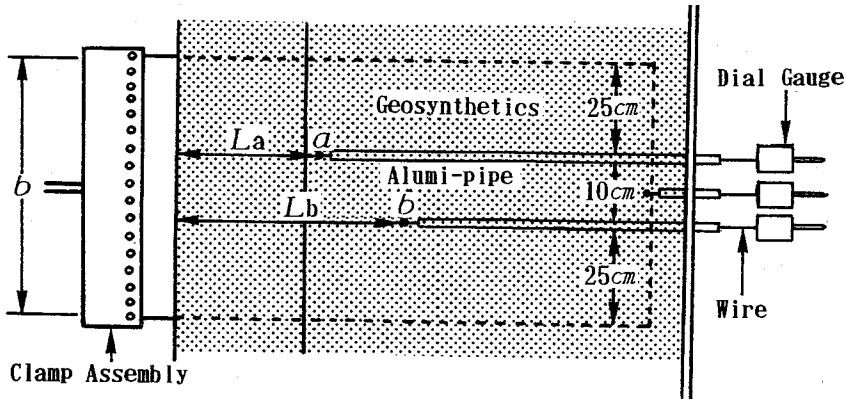
しているわけではないので、敷設全面積で評価した摩擦係数は直接せん断試験によるものに比べて低い値を示すことが報告されている^{8),10)}。それゆえ、ジオグリッドの摩擦特性評価に引抜き試験を実施する場合は、完全に抜け出しが起きた試験についてのみのデータを用いるべきであり、供試体が破断したデータを用いるべきではないという指摘もされている¹²⁾。

このように、ジオシンセティックスが完全に抜け出しを生じないような場合に対する評価方法として、引抜き箱中に敷設された供試体について、その敷設方向にほぼ等間隔で5、6点のジオシンセティックスの変位量を測定することにより、一樣なせん断抵抗を発揮している有効面積を求める方法が提案され^{6),10),13)}、この面積に基づいて摩擦係数を評価すれば、直接せん断試験から得られる結果とほぼ一致することが示されている。

ところで、筆者らはこれまでに土中に敷設されたジオメンブレンを引き抜いた時の先端における引抜き量と引抜き力の関係を表す簡単な弾性モデル式を提案し、模型実験によってその妥当性を確認している¹¹⁾。そして、この基本式に立脚すれば、抜け出しが起きる条件においては、従来と同様に最大引抜き力に着目して摩擦係数を求め、引抜き力と先端引抜き量との関係から弾性係数を求めることが可能であることも示した¹⁴⁾。ここで、基本弾性式におけるパラメータが、敷設材料の弾性係数 E と敷設材料と土との摩擦係数 μ の2つであることを考え



(a) Side View



(b) Plane View

Fig.1 Schematic drawing of pull-out test

ると、引抜き過程における敷設材延長上の2点に関する「引抜き力—引抜き量」関係を実験的、理論的に求め、両者を対応させれば、それらのパラメータは決定される。そしてまた、この考えは単にジオメンブレンに限らず、ジオテキスタイル、ジオグリッド等、土中に敷設される帯状材料(ジオグリッドの場合、グリッドとその中に入っている土との等価的帯状材料とみなした方が良いかもしれないが)にも適用され得るものとする。

そこで、本研究ではまず、抜け出しが起こる場合と起こらない場合のそれぞれにおける摩擦係数 μ と変形係数 $E \cdot t$ (t はジオシンセティックスの厚さ)の評価法の理論を示す。次に、ジオメンブレンとジオテキスタイルを用いて引抜き模型実験を行った結果を評価式に対応させ、摩擦係数と変形係数を求め、新しい評価法の検討を行う。

2. 評価法の基本的考え方

(1) 基本式

Fig.1 (a) に示すように、弾性係数 E 、厚さ t 、幅 b 、

敷設長 L_{RO} のジオシンセティックスが、厚さ H 、斜面部の長さ L_0 、傾斜角 β 、単位重量 γ_s の覆土中に敷設されているとき、単位幅当たりの引抜き力(以下、単に引抜き力と呼ぶ) T/b 、先端での引抜き量 D_0 、伸びが生じている影響範囲 L との関係は、引抜きに関する弾性理論¹¹⁾に従えば式(1)、(2)のように表される。

$$D_0 = \int_0^L ds = \frac{1}{E \cdot t} \left\{ \frac{T}{b} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot \tan \beta \cdot \mu' \cdot L_0^2 \cdot L - \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot \tan \beta \cdot \mu' \cdot L_0 \cdot L^2 - \frac{1}{6} \cdot \gamma_s \cdot \tan \beta \cdot \mu' \cdot L_0^3 \right\} \quad (L > L_0) \quad (1)$$

$$D_0 = \frac{1}{E \cdot t} \left\{ \frac{(T/b)^2}{2 \cdot \gamma_s \cdot H \cdot \mu'} + \frac{L_0 \cdot (T/b)}{2} - \frac{\gamma_s \cdot L_0^2 \cdot H \cdot \mu'}{24} \right\} \quad (T/b > T_0/b) \quad (2)$$

ここに、 μ' はジオシンセティックスの上下面を一体と考えたときの見掛けの層間摩擦係数($=\mu_v + \mu_t$)を、 $E \cdot t$ はジオシンセティックスの変形係数(ジオテキスタイルのような圧縮性の材料では拘束圧の大きさにより厚

さが変化するので、厚さ t を含めた形の $E \cdot t$ を変形係数と定義したを、 T_0/b は $L=L_0$ となった時の引抜き力(= $\gamma_a \cdot H \cdot \mu' \cdot L_0/2$)を示している。さらに、伸びが敷設長 L_{RO} 全体に及んだ時に引抜き力は最大となり、その値 T_p/b は式 (3) で示される。

$$\frac{T_p}{b} = \gamma_a \cdot H \cdot \mu' \cdot (L_{RO} - L_0/2) \quad (L_{RO} > L_0) \quad (3)$$

(2) ジオシンセティックスの抜き出しが完了する場合
摩擦係数は、引抜き試験の最大引抜き力 T_p/b と式 (3) から、

$$\mu' = \frac{(T_p/b)}{\gamma_a \cdot H \cdot (L_{RO} - L_0/2)} \quad (4)$$

として評価し得る。

次に、式 (2) の右辺について、

$$F(T/b) = \frac{(T/b)^2}{2 \cdot \gamma_a \cdot H \cdot \mu'} + \frac{L_0 \cdot (T/b)}{2} - \frac{\gamma_a \cdot L_0^3 \cdot H \cdot \mu'}{24} \quad (T/b > T_0/b) \quad (5)$$

とおくと、式 (2) は

$$E \cdot t \cdot D_0 = F(T/b) \quad (6)$$

となる。したがって、引抜き試験過程における $T/b - D_0$ の関係を、得られた μ' と式 (5) を用いて $F(T/b) - D_0$ の関係に整理し直せば、その比例定数から変形係数 $E \cdot t$ が評価される。この方法を1点評価法と呼ぶことにする。

(3) ジオシンセティックスの抜き出しが完了しない場合

Fig.1 (b) に示すように、覆土斜面先からの距離が L_a, L_b ($L > L_b > L_a > L_0$) となる覆土中のジオシンセティックス上の2点を a, b 点とすると、a 点における変位量 D_a は微小変位 d_s の区間 (L_a, L) の積分値であるから、式 (1) を得た¹¹⁾ のと同様な展開を行うと、

$$D_a = \int_{L_a}^L ds = \frac{1}{E \cdot t} \left\{ \frac{T}{b} \cdot (L - L_a) + \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot \mu' \cdot H \cdot L_0 \cdot (L - L_a) - \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot \mu' \cdot H \cdot (L^2 - L_0^2) \right\} \quad (L > L_a) \quad (7)$$

となる。また、b 点における変位量 D_b も同様に考えると、式 (7) の L_a を L_b に代えた形となる。したがって、a, b の2点における変位量の差 δD_{ab} は次式ようになる。

$$\delta D_{ab} = D_a - D_b = \frac{1}{E \cdot t} \left\{ \frac{T}{b} \cdot (L_b - L_a) + \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot \mu' \cdot H \cdot L_0 \cdot (L_b - L_a) - \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot \mu' \cdot H \cdot (L_b^2 - L_a^2) \right\} \quad (L > L_b) \quad (8)$$

これを T/b について整理すると式 (9) のようになる。

$$\frac{T}{b} = \frac{E \cdot t}{(L_b - L_a)} \cdot \delta D_{ab} + \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot \mu' \cdot H \cdot (L_b + L_a - L_0) \quad (T/b > T_b/b) \quad (9)$$

すなわち、引抜き試験結果について b 点が動き始めた時の引抜き力 T_b/b 以上について T/b と δD_{ab} の関係を整理すれば、その傾きから変形係数 $E \cdot t$ が、切片から摩擦係数 μ' が評価される。

同様に、先端と a 点での変位量の差 δD_{0a} についても

$$\frac{T}{b} = \frac{E \cdot t}{L_a} \cdot \delta D_{0a} + \frac{1}{2} \cdot \gamma_a \cdot \mu' \cdot H \cdot \left\{ L_0 \cdot L_a - L_0^2 + \frac{L_0^3}{3 \cdot L_a} \right\} \quad (T/b > T_a/b) \quad (10)$$

と表すことができ、傾きから変形係数 $E \cdot t$ が、切片から摩擦係数が求まる。なお、a 点が動き始める時の引抜き力を T_a/b とした。

先端と b 点での変位量の差 δD_{0b} については式 (10) の L_a を L_b に代えるだけであり、同様にして変形係数と摩擦係数が求まる。

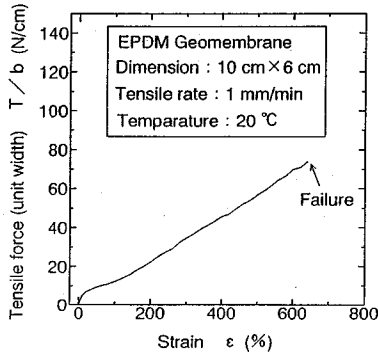
3. 引抜き模型実験の概要

(1) 材料特性

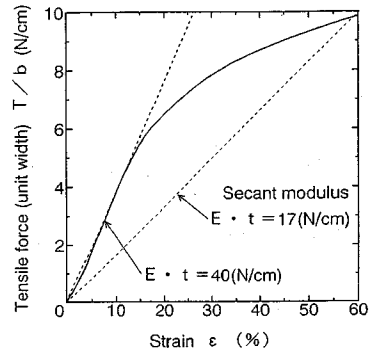
ジオメンブレンとしては表面が絹目状で厚さ 1 mm の合成ゴム系の EPDM (接着タイプ)、ジオテキスタイルとしては表面が滑らかで厚さが 4.86 mm の長繊維不織布 (ボランス 4451 NB) と見掛けの表面粗度が大きく厚さ 10.2 mm の短繊維不織布 (SN パンチ 10 RF) を用いた (以下、長繊維不織布をジオテキスタイル A、短繊維不織布をジオテキスタイル B と呼ぶ)。EPDM については JIS A 6008 に、ジオテキスタイル A, B についてはそれぞれ JIS L 1096, 3204 に従う引張り試験を実施し、その物性値を Table 1 に示した。また、引抜き模型実験と条件を一致させるため、寸法を相似形とした 10 cm × 6 cm の試験片を用い、引張り速度を 1 mm/min として引張り試験を行った時の結果を Figs.2 (a)~(d) に示した。なお、(b) は (a) の初期部分 (引張り力が 10 N/cm 以下) を拡大したものである。(a) に示した EPDM では引張り力が 6 N/cm の前後で曲線の傾きが大きく異なり、初期部分から評価される変形係数 $E \cdot t$ は 40 N/cm であるのに対し、引張り力が 10 N/cm の時の (割線) 変形係数は 17 N/cm である (Fig.2 (b) 参照)。ジオテキスタイル A は破壊まで試験されていないが、引張り力とひずみとの関係は線形的であり、変形係数は 436 N/cm である。ジオテキスタイル B は初期部分においては 188 N/cm、引張り力が 25 N/cm における (割線) 変形係数は 130 N/cm である。粒状土としては乾燥した鬼怒川砂¹¹⁾を用い、その物性

Table 1 Tensile properties of geomembrane and geotextiles

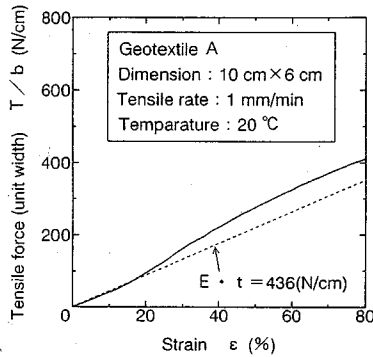
	EPDM	Geotextile A	Geotextile B
Failure strength (N/cm)	100	310	70
Failure strain (%)	500	95	110



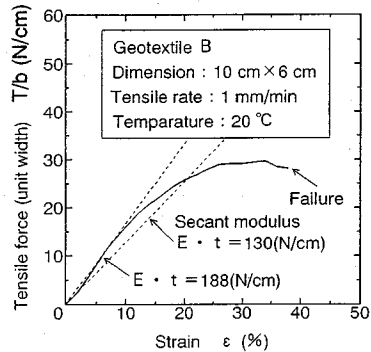
(a) EPDM Geomembrane



(b) Magnification of initial part of (a)



(c) Geotextile A



(d) Geotextile B

Fig.2 Force-Strain plots of tensile tests

Table 2 Properties of Kinugawa sand

Maximum size (mm)	5.0
Specific gravity	2.70
Maximum dry density (kN/mm ³)	17.54
Minimum dry density (kN/mm ³)	14.32
Uniformity coefficient	4.32

値を **Table 2** に示した。最大粒径 5 mm, 均等係数 4.32 の「粒度分布の悪い」砂である。

Fig.3 は 200 mm × 100 mm のせん断面積を有する直接せん断試験装置¹⁵⁾を用いて、EPDM およびジオテキスタイル A, B と鬼怒川砂とのせん断試験を実施した結果である。この図から、ジオシンセティックスの摩擦係数 $\mu = \tau_f / \sigma_n$ の値は、0.862 (EPDM), 0.826 (ジオテキスタイル A) 0.908 (ジオテキスタイル B) と評価された。

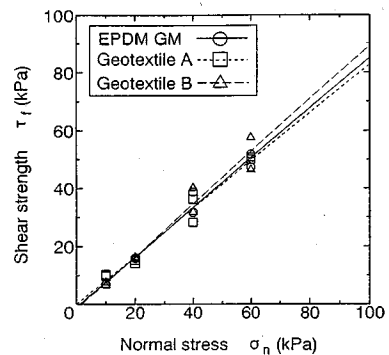


Fig.3 Results of direct shear test

(2) 実験装置および実験方法

実験装置としては、屋外に幅 150 cm, 奥行き 310 cm, 高さ 60 cm の土槽を、コンクリートブロック, H 型鋼,

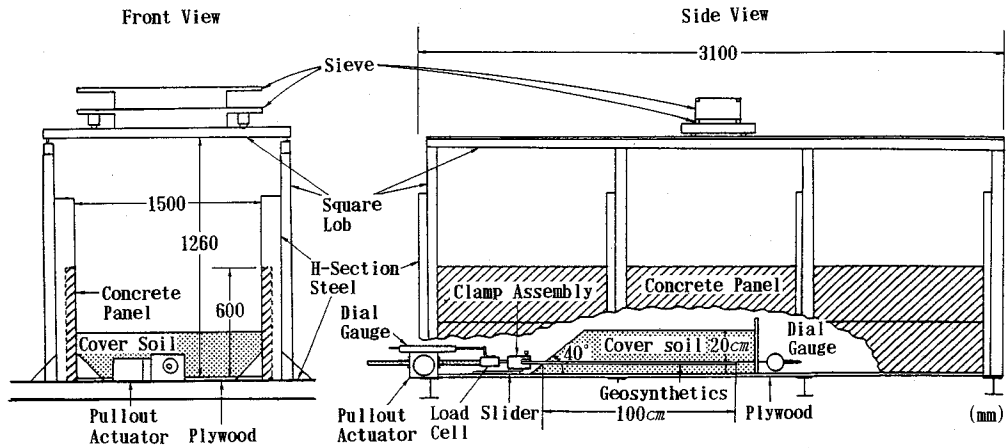


Fig.4 Schematic drawing of pull-out test apparatus

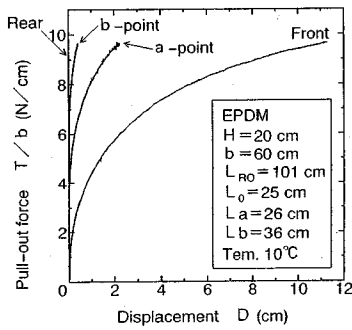


Fig.5 T/b-D plots of EPDM

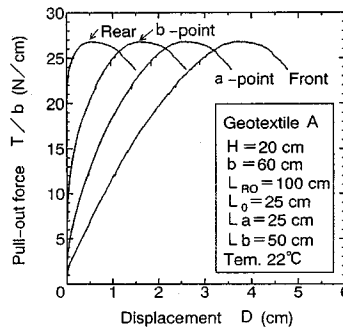


Fig.6 T/b-D plots of gtx.A

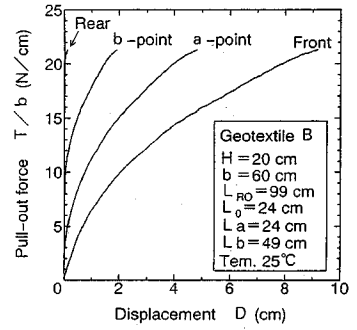


Fig.7 T/b-D plots of gtx.B

木製の角材などを使用して製作した (Fig.4 参照). モーターと一体化した引抜き装置は土槽前面下部の H 型鋼に固定した. 土槽内の基盤土および厚さ 20 cm の覆土は高さ 126 cm に設置した 2 枚の板ふるいを通して鬼怒川砂を落下させて作製した (相対密度は約 100%). なお, 本実験では壁による覆土の拘束をなくするために, 前面に壁は設けず, 覆土は自然斜面 (傾斜角度は約 40 度) のままとした.

EPDM とジオテキスタイル A, B の敷設長は 100 cm とし, 敷設幅に関しては, 土のダイレイタンス効果による鉛直応力の増加¹³⁾を極力避けるため, また引抜き時のジオシンセティックスと粒状土との摩擦がジオシンセティックスの下面でのみ発揮する¹⁴⁾ように 60 cm とした.

引抜き速度は毎分 1 mm として, 掴み具に接触させた変位計 (容量 200 mm) で先端引抜き量を, 引抜き装置のロッドと掴み具の間に剛結した荷重変換器 (容量 2 kN) で引抜き力を計測した. また, 各ジオシンセティックスの土中における a, b 2 点の変位量計測は, EPDM では $L_a = 26$ cm, $L_b = 36$ cm, ジオテキスタイル A, B

では $L_a = 25$ cm, $L_b = 50$ cm として, 幅の端から 25 cm の位置に直径 0.45 mm のワイヤーを取り付け, 外径 4.0 mm, 肉厚 1.0 mm のアルミパイプの中を通して, 土槽の後壁外にある変位計に接続させて計測した. なお, ジオシンセティックス全体の抜け出しを確認するために, 敷設最深部の変位量も測定した.

4. 実験結果と考察

(1) 引抜き実験結果

Fig.5~Fig.7 は, EPDM, ジオテキスタイル A, ジオテキスタイル B の先端引抜き力と先端引抜き量および a, b 点それぞれの変位量との関係を示したものである.

Fig.5 に示した EPDM の場合, 先端引抜き量が 11 cm となってもピークが現れておらず, また後端における変位量も現れていないことから抜け出しは生じていない. つまり, 敷設全面積上でせん断抵抗が発揮していない. また, 引抜き力が約 4 N/cm のときに a 点が, 7 N/cm のときに b 点が変位し始めたことが読み取れる.

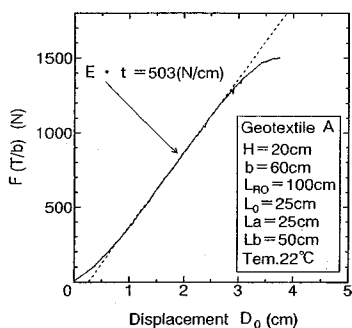


Fig.8 $F(T/b)$ - D_0 plots of geotextile A

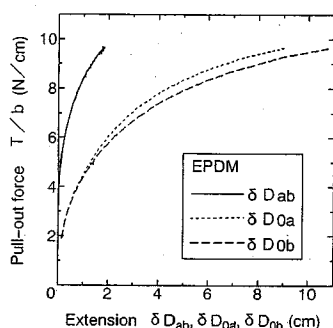


Fig.9 T/b - δD plots of EPDM

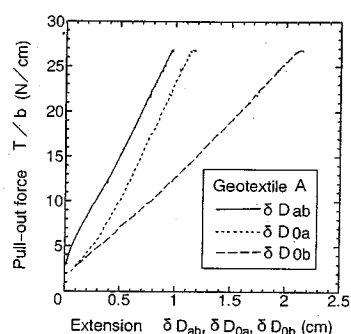


Fig.10 T/b - δD plots of gtx.A

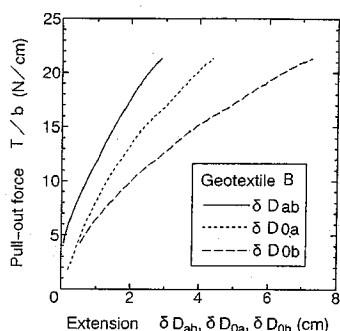


Fig.11 T/b - δD plots of gtx.B

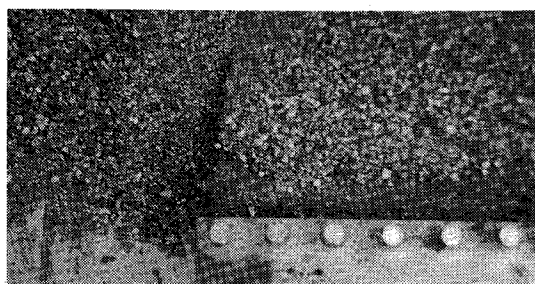


Photo.1 Necking phenomenon of geosynthetics

Fig.6 に示したジオテキスタイル A の場合、a、b 点と後端は、引抜き力が約 3、9、22 N/cm の時点で変位を生じている。また、後端が約 5 mm 変位した時に先端引抜き力が $T_b/b=27$ N/cm の最大値となることから、抜け出しが起きたことが明かである。

Fig.7 のジオテキスタイル B の場合、引抜き先端を 9 cm 引き抜いても引抜き力はピークを示していない。また、a、b 点は引抜き力が 3、9 N/cm の時点で変位を開始しているが、後端は変位を生じていないことから、ジオテキスタイルの抜け出しは起きていない。

(2) 1点評価法

抜け出しを生じたジオテキスタイル A について、式 (4) と $T_b/b=27$ N/cm より摩擦係数を求めると、 $\mu'=0.852$ となる。

Fig.8 はこの μ' を式 (5) に代入して $F(T/b)$ と D_0 との関係をピークに至るまで示したものである。この図から、初期と後半部分を除いた中央部分は線形関係を示している。この前後で直線関係とならない理由としては、引抜き初期にはジオシンセティックスの伸びる範囲が斜面覆土区間にあること、後半については、理論において変位を生じると同時に一定のせん断抵抗を發揮するとしたが、実際には、そこに至るまである程度の変位量を必

要とするためと考えられた。直線部の傾きから式 (6) に従い変形係数を求めると、 $E \cdot t=503$ N/cm となる。

評価された摩擦係数と変形係数の値は、直接せん断試験と引張り試験から得られた $\mu=0.826$ 、 $E \cdot t=436$ N/cm に比べて幾分大きい。

(3) 2点評価法

Fig.9~Fig.11 は δD_{ab} 、 δD_{0a} 、 δD_{0b} と T/b との関係を示したものである。ここで、 δD としては、2つの変位量計測点のなかで奥部にある点 (例えば、 δD_{ab} であれば b 点) が変位し始めてからの変位量の差を取っているため、その点の変位する以前の 2 点間の伸びは含まれていない。

これらの図を見ると、ジオテキスタイル A (Fig.10) では全てが線形関係となっている。ジオテキスタイル B (Fig.11) に関しては δD_{ab} では線形関係が見られるが、 δD_{0a} 、 δD_{0b} では非線形に近い。EPDM (Fig.9) では、全てが著しい非線形となっている。これらの関係が非線形となるのは、Figs.2 (b)、(d) に示した引張り試験結果からわかるように、これらのジオシンセティックスの力-ひずみ関係の非線形性と関係しているものと考えられる。また、EPDM の引抜き実験においては先端付近が Photo 1 に示すように内側に変形したことも原因と考えられる。すなわち、このようなネッキングにより先端付

Table 3 Comparison of frictional coefficient

μ	2 Point method			1 Point method	Element test
	δD_{ab}	δD_{oa}	δD_{ob}		
EPDM	0.766	—	—	—	0.862
	1.029	4.124	2.111		
Geotextile A	0.444	—	0.305	0.852	0.826
Geotextile B	0.794	4.861	1.441	—	0.908

Table 4 Comparison of deformation modulus

$E \cdot t$ (N/cm)	2 Point method			1 Point method	Element test
	δD_{ab}	δD_{oa}	δD_{ob}		
EPDM	34	—	—	—	31
	16	9	11		
Geotextile A	591	577	584	503	436
Geotextile B	130	80	95	—	158

近の断面積が減少し、その部分の引張り応力が高くなり、伸びをさらに助長したと考える。

そこで、Figs.9~11の関係線の後半部分に着目してその直線近似を行い、切片と傾きから摩擦係数 μ' と変形係数 $E \cdot t$ を評価した。なお、力-ひずみ関係で非線形性の著しいEPDMに関しては、Fig.9での引張り力が5.5~8.0 N/cmと8.0~9.5 N/cmの2区間に分けて変形係数を評価してみた。その結果を、直接せん断試験・引張り試験のいわゆる要素試験の結果とともに一覧表としたのがTable 3とTable 4である。

Table 3より、一定の覆土厚さの下に2つの計測点を設けた δD_{ab} に基づく摩擦係数 μ' の値は、直接せん断試験からの値と比べて、EPDMで約90%、120%、ジオテキスタイルBで約90%、ジオテキスタイルAで約55%となっている。このように、提案する評価方法に基づく μ' の値が直接せん断試験からの値より小さいことは、 $T/b-\delta D$ 関係の切片が本来の切片より小さいこと、すなわち奥部にある点の変位に必要な引張り力も本来のものより小さいことに由来しており、これは覆土前面が斜面となっているために覆土の崩壊や砂の抜け出しが起きていることが理由として考えられた。そして、この傾向は拘束圧が小さくてジオシンセティックスの変形係数が大きい程顕著と思われる。

変位量計測点の1つに先端を利用した δD_{oa} と δD_{ob} に基づく摩擦係数の値は0.305~4.861と大きくばらつく。したがって、2点評価法では斜面先端部での変位量を利用しないほうが良いと思われる。

Table 4に示した変形係数 $E \cdot t$ をみると、 δD_{ab} に基づく値が引張り試験に近い値を示し、EPDMでは引張り試験結果の110%と84%、ジオテキスタイルAでは130%、ジオテキスタイルBでは82%となっている。

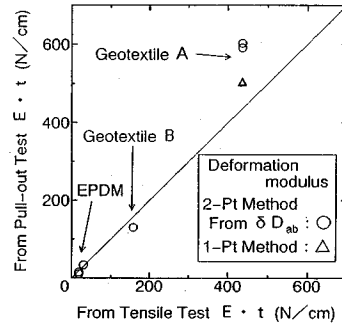


Fig.12 Comparison of deformation modulus

Fig.12は、引張り試験と引抜き試験から評価されたそれぞれ同じ引張り力 T/b における変形係数の比較を、Figs.9~11に示されていない実験ケースのデータを加えて表示したものである。図から、実用的には両者の値はよく対応しているといえる。

(4) 「引抜き力-先端引抜き量」の評価

Figs.13~15は、以上に示した要素試験・1点評価法・2点評価法によるそれぞれの摩擦係数・変形係数と式(2)を用いて、「引抜き力-先端引抜き量」の関係を評価し、実験結果と比較したものである。

Fig.13に示したEPDMの場合、要素試験からの値および δD_{ab} に基づく値を用いた計算値は、実験値の平均的傾向を表してはいるが、計算値と実験値との対応は必ずしも良くない。これは、EPDMが非線形性の著しいものであるため、変形係数を一定とした理論を対応させることの限界を示していると言える。なお、 δD_{ob} に基づく計算値は実験値と大きくはずれており、最大で約3倍の引抜き量を評価することとなった。

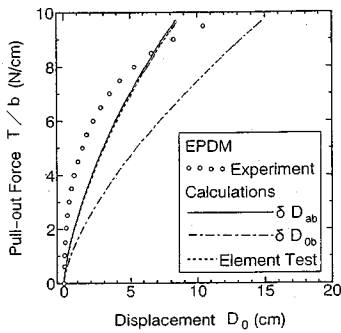


Fig.13 Calculation of EPDM

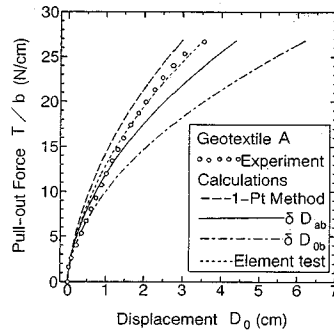


Fig.14 Calculation of gtx.A

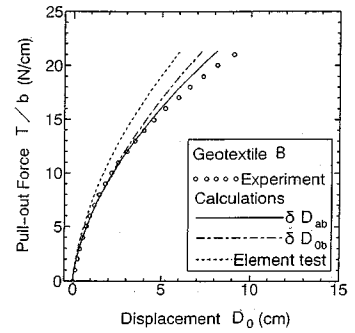


Fig.15 Calculation of gtx.B

Fig.14 のジオテキスタイル A については、要素試験からの値を用いた場合が実験値と良く一致しており、1点法と δD_{ab} に基づく計算値もかなり良い評価を与えている。他方、 δD_{ob} に基づく値を用いると、引抜き量は実験値の約 2 倍の過大評価を与えている。

Fig.15 に示すジオテキスタイル B では、 δD_{ab} あるいは δD_{ob} に基づく値を用いた計算値が実験値と良く一致している。これに対し、要素試験からの値による評価では引抜き量をやや小さく見積もっている。

以上のことから、今回使用したジオシンセティック材料に関しては、拘束圧が等しい 2 つの計測点における変位量差を用いた 2 点評価法からの摩擦係数と変形係数は、「引抜き力—先端引抜き量」の関係をかなり良くシミュレートし得るパラメータであることがわかる。また、1 点評価法あるいは直接せん断試験と引張り試験から求められた摩擦係数と変形係数も妥当な値である。

5. まとめ

補強土工、遮水工に使用されるジオテキスタイル、ジオメンブレン等のいわゆるジオシンセティックの構造的安定性を評価するためには、それらの摩擦係数と変形係数を求めることは重要である。

本研究では、著者らが先にジオメンブレンの引抜き挙動を表すために提案した簡単な弾性論を援用して、ジオシンセティックの引抜き試験結果から摩擦係数と変形係数を求める方法、特にジオシンセティックの抜け出しが完了しない場合の評価法について、実験結果と共に論じた。得られた結論を以下に示す。

(1) 抜け出しが完了する引抜き試験に対しては、最大引抜き力から摩擦係数 μ' が、Fig.8 に示すようなデータの整理から変形係数 $E \cdot t$ の評価が可能である。

(2) 引抜き試験において、途中で試料が破断したり、最大引抜き力に至るには引抜き量が過大すぎて抜け出しが完了しない場合、ジオシンセティック延長上の 2 点の

変位を計測して、Figs.9~11 に示すデータ整理と式 (10) から変形係数 $E \cdot t$ と摩擦係数 μ' の評価が可能である。

(3) 2 点評価法において必要なジオシンセティック延長上の 2 つの計測点は、覆土の厚さが等しい平面区間に設けるのが望ましい。

(4) 1 点評価法からの摩擦係数は直接せん断試験からの値とほぼ一致するが、2 点評価法からの摩擦係数は直接せん断試験からの値より幾分低めとなる傾向がある。

(5) 1 点評価法および 2 点評価法で得られた変形係数は、引張り試験での対応する引張り力での割線変形係数に相当する値となる。

(6) 提案した 1 点評価法および 2 点評価法から得られる 1 対の摩擦係数と変形係数の値は、弾性式 (2) を用いることで、ジオシンセティックの「引抜き力—先端引抜き量」関係をかなり良くシミュレートできる。

今後、EPDM のように引張り試験で非線形性の著しい材料の引抜き変形挙動をより正確にシミュレートするには応力—ひずみ関係の非線形性を考慮した弾性式の確立が必要である。最後に、ジオシンセティックの引張り試験を実施して下さった (株) 東洋ゴムの宮地・津田の両氏に感謝致します。

参考文献

- 1) T. A. Haliburton, J. D. Lawmaker and V. C. McGffer (田中 茂・山岡一三・廣田泰久共訳) : ジオテキスタイル設計マニュアル, 土木工学社, 1981.
- 2) 三木博史, 林 義之 : 国内におけるジオメンブレンの現状, 国際ジオテキスタイル学会日本支部第 1 回ジオメンブレン技術に関するセミナー, pp.28-46, 1994.
- 3) ジオテキスタイル補強土工法普及委員会 : ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, 財団法人土木研究センター, 1994.
- 4) R. M. Koerner : *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, 1990.
- 5) J. P. Giroud : Quantification of Geosynthetic Behavior, *Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Special*

- Lecture & Keynote Lectures, pp.3-27, 1994.
- 6) 木暮敬二, 軽部大蔵: 新規制定の学会基準案「土とジオテキスタイルの摩擦特性試験方法」について, 土と基礎, Vol.42, No.1, pp.92-102, 1994.
 - 7) T. S. Ingold : *Friction Testing, Geomembranes Identification and Performance Testing*, Chapman and Hall, pp.176-203, 1991.
 - 8) 山岡一三, 西形達明: ジオテキスタイルの工学的性質に関する試験法, 土質工学会論文報告集, Vol.27, No.3, pp.123-135, 1987.
 - 9) J.P.Gourc and H.Perrier : *Tensile Tests for Geomembranes, Geomembranes Identification and Performance Testing*, Chapman and Hall, pp.109-134, 1991.
 - 10) 山岡一三, 西形達明: 土とジオファブリック間の摩擦特性, 土木学会論文集, No.406/Ⅲ-11, pp.27-34, 1989.
 - 11) 今泉繁良, 高橋 悟, 横山幸満, 西形達明: 埋め込まれたHDPEジオメンブレンの引抜き抵抗挙動の評価, 土木学会論文集, No.511/Ⅲ-30, pp.155-162, 1995.
 - 12) M. J. Cowell and C. J. Spragne : Comparison of Pull-out Performance of Geogrids and Geotextiles, *Proceedings of Geosynthetics '93 Conference*, Vol.2, pp.579-592, 1993.
 - 13) S. Hayashi, K. Makiuchi and H. Ochiai : Testing Methods For Soil-Geosynthetic Frictional Behavior-Japanese Standard, *Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.1, pp.411-414, 1994.
 - 14) 高橋 悟, 今泉繁良, 横山幸満, 坪井正行: ジオメンブレンの引抜き抵抗試験に与える敷設幅の影響, 第9回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集, pp.77-85, 1994.
 - 15) 今泉繁良, 内藤裕之, 横山幸満, 坪井正行: ジオメンブレンと豊浦砂との層間摩擦特性, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.1558-1559, 1995.
 - 16) ジョグリッド研究会: ジョグリッド工法ガイドライン, 材料試験法, 設計ガイドライン-, pp.115-122, 1990. (1995.6.7 受付)

METHODOLOGY OF EVALUATING A FRICTIONAL COEFFICIENT AND A DEFORMATION MODULUS BASED ON GEOSYNTHETICS PULL-OUT TESTS

Satoru TAKAHASHI, Shigeyoshi IMAIZUMI,
Yukimitsu YOKOYAMA and Masayuki TSUBOI

A methodology by which deformation modulus of geosynthetic and frictional coefficient between geosynthetic and soil could be evaluated by pull-out test was proposed. In a case of conducting a pull-out test without pulling out completely, so far, the frictional coefficient has been determined barely by method based on effective length which was estimated measuring 5 to 6 displacements along a specimen.

Proposed methodology needs only two measurements of displacement. The frictional coefficient and deformation modulus (elastic modulus \times thickness) can be evaluated as a slope and a intercept of relationship between pull-out force and difference of two displacements.

Pull-out tests were carried using three geosynthetics, EPDM geomembrane and two nonwoven geotextiles with different deformation modulus. The evaluated values of deformation modulus and frictional coefficient coincide well with those from tensile test and direct shear test, respectively.