

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

今泉繁良¹・高橋 悟²・横山幸満³・西形達明⁴

¹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)

²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)

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正会員 工博 関西大学専任講師 土木工学科(〒564 吹田市山手町3-3-35)

廃棄物処分場の遮水シートとして期待されている HDPE ジオメンブレンを覆土によって固定するとき、現行設計では強度だけに着目し、変形（伸び）を考慮していない。そこで、ジオメンブレンの引抜き挙動に関する変形を考慮した弾性解を導き、模型実験を実施してその有用性を検討した。その結果、提案した弾性式から、覆土厚さ一定の下ではジオメンブレンの引抜き量は引抜き力の2乗に比例した量となること、ジオメンブレンの変形係数・覆土の厚さ・ジオメンブレンと土との摩擦係数の各値が大きい程一定引抜き力に対する引抜き量は小さいこと、弾性解は実験値と良く対応することを見い出した。

Key Words: design, elasticity, friction, model Test, lining, pull-out test, geomembrane

1.はじめに

近年、廃棄物最終処分場の遮水シートとして、ゴム系シートに代わり、米国を中心として用いられている高密度ポリエチレン (HDPE: High density polyethylene) を素材とするジオメンブレンが期待されている^{1)~3)}。これは、HDPE が紫外線や薬品に対する抵抗性あるいは接合部における強度発揮の点でより優れているためといわれている。

ところで、HDPE ジオメンブレン等の遮水シートの設計^{4),5)}において、遮水シートの固定能は、廃棄物の搬入時の車両荷重への安全性評価や廃棄物の圧密あるいは基盤の沈下に誘引されて遮水シート内に生じる引張り应力への安全性評価に直接関わるので、重要な設計項目の一つである。この固定能の算定は、シートと地盤材料との間の摩擦評価に基づいて行われるが、通常、シートを剛体と仮定して敷設長さに摩擦応力度を乗じた引抜き抵抗力として計算され、シートの伸びは考慮されていない。しかしながら、前述したように基盤の圧密沈下など変形問題を対象とする限り、シートの伸びも考慮すべきであろう。

さて、固定能を実験的に評価するには、土中に埋設したシートの引抜き試験を実施するのが一般的であり、ジオテキスタイルやジオグリッドに対しての引抜き試験結果が数多く発表されている。林ら⁶⁾は、引抜き力を受けるジオグリッドの土中における変位分布と引抜き抵抗の

発生状況を鉛直応力を変化させた土槽実験によって計測し、引抜きに伴うジオグリッドの変位は敷設方向に一様でなく先端から後方に漸減し、ひずみと引抜き抵抗力は引抜き力の増大に伴い後方に移ることを確認した。坂井ら⁷⁾は、この結果を受けて、土とジオグリッド間の不連続面にジョイント要素を使用した有限要素解析を実施し、引抜き試験における引抜き抵抗の変位依存性を解析的に示した。山岡ら⁸⁾は、ジオファブリックの砂層からの引抜き実験を実施し、引張り変形係数の低い材料では引張り破壊の形態、変形係数の大きな場合は引抜き破壊の形態となることを示した。また、引張り変形係数の小さい材料ほど土とジオファブリック間の摩擦発現に有効なせん断面積の減少が著しいことを示し、有効せん断長さの概念を提案した。Palmeira ら⁹⁾は、ジオグリッドの砂層からの引抜き試験に際してグリッドのひずみが引抜き力の増大とともに埋込み長に沿って伝播・増大することを計測し、進行性破壊 (Progressive failure) 現象が生じていることを示した。Milligan ら¹⁰⁾は、ガラス内に埋められた HDPE ジオグリッドを引き抜くときの挙動を光弹性測定し、引抜き力の増大に伴い高応力域が後端に進展することを示した。Christopher ら¹¹⁾は、ジオテキスタイルおよび HDPE ジオグリッドの粘性土からの引抜き実験を実施し、クリープタイプの破壊が生じることを示した。Koerner ら¹²⁾は剛性の異なるジオメンブレンを用い、表面にひずみゲージを貼って引抜き試験を行い、ジオメンブレン内応力が敷設方向に漸減分布する

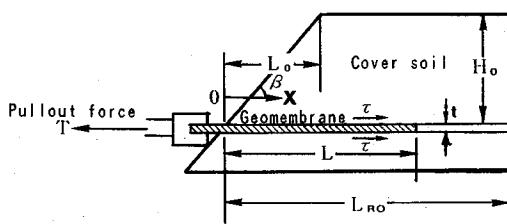


Fig.1 Schematic drawing of acting forces in pull-out test

こと、剛性が低く強度の小さいジオメンブレン程、内力を発揮するジオメンブレン距離が短いことを示した。

以上のような引抜き試験に関する研究によって、敷設材が引抜き力を受けたとき、その弾性的性質によって引抜き先端部から敷設材の変形が生じ、それに応じて摩擦抵抗力も奥部に伝播することが実験的に示されているが、その関係を理論的に示したもののは、前述の有限要素解析や三田地ら¹³⁾の弾性微分式など極めて少ない。

そこで、本研究ではまず、土中に敷設されたHDPEジオメンブレンに引張り力を与えたときの引張り力と引抜き量の関係を表す簡単な弾性モデル式を提案する。次に、模型実験を行い、引抜き時のジオメンブレンの挙動を計測し、計算値と対応することで提案式の妥当性を示す。

2. 引抜きに関する弾性理論

幅 b と厚さ t を持つ敷設長 L_{Ro} のジオメンブレンが厚さ H_0 の土に覆われているとき、Fig.1 に示すように、覆土斜面先を座標原点として、敷設方向に x 軸をとる。ジオメンブレン先端が力 T で引かれるとき、ジオメンブレンが伸びる影響範囲を L とし、その範囲内でジオメンブレン両面と土との間にせん断抵抗力度 $2 \cdot \tau$ が発揮するものとする。一般に τ は、①直応力に比例し、②ジオメンブレンと土との相対変位量がある値に達するまでは相対変位量に依存しその後一定値を示すものであるが、ここでのモデル化としては、相対変位が生じたら直ちに一定せん断抵抗力度を発揮する剛塑性体的モデルを仮定する。

このとき、位置 x における微小ジオメンブレン長 dx に働く引張り応力 $\sigma(x)$ 、ひずみ $\epsilon(x)$ 、それに伴う伸び $ds(x)$ の関係は、 E をジオメンブレンの引張り変形係数として

$$\epsilon(x) = \frac{\sigma(x)}{E} = \frac{ds(x)}{dx} \quad (1)$$

で表される。

覆土前部の斜面の水平距離を L_0 とすると、 x でのせん断抵抗力度は

$$\tau_1(x) = \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot x \cdot \mu \quad (x \leq L_0)$$

$$\tau_2(x) = \gamma_d \cdot L_0 \cdot \tan \beta \cdot \mu \quad (x > L_0) \quad (2)$$

ここに、 γ_d : 覆土の単位体積重量

β : 覆土前部斜面の傾斜角

μ : 砂とジオメンブレンの摩擦係数

であるので、 x での引張り応力 $\sigma(x)$ と先端での単位幅当たりの引抜き力 (T/b : 以下単に引抜き力という) の関係は、

$$\begin{aligned} \sigma_1(x) \cdot t &= T/b - 2 \int_0^x \tau_1(x) \cdot dx \\ &= T/b - \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot x^2 \quad (x \leq L_0) \\ \sigma_2(x) \cdot t &= T/b - 2 \int_0^{L_0} \tau_1(x) \cdot dx \\ &\quad - 2 \int_{L_0}^x \tau_2(x) \cdot dx \\ &= T/b + \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^2 \\ &\quad - 2 \cdot \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0 \cdot x \quad (x > L_0) \end{aligned} \quad (3)$$

である。影響範囲が丁度 L_0 に達するときの引抜き力を T_0/b とすると、 $x=L_0$ で $\sigma=0$ とおいて、

$$T_0/b = \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^2 \quad (4)$$

となる。

式(3)を式(1)に代入すると、 x での伸び $ds(x)$ は、

$$\begin{aligned} ds_1(x) &= \frac{(T/b - \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot x^2) \cdot dx}{(E \cdot t)} \quad (x \leq L_0) \\ &= \frac{(T/b + \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^2)}{(E \cdot t)} \\ ds_2(x) &= \frac{-2 \cdot \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0 \cdot x \cdot dx}{(E \cdot t)} \quad (x > L_0) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

先端での引抜き量 D は、式(5)の区間 $(0, L)$ における総和であるから積分して次式が得られる。

$$\begin{aligned} D &= \int_0^L ds_1(x) \\ &= \frac{-(L \cdot T/b - \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L^3/3)}{(E \cdot t)} \quad (L \leq L_0) \\ D &= \int_0^{L_0} ds_1(x) + \int_{L_0}^L ds_2(x) \\ &= \frac{(L \cdot T/b + \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^2 \cdot L - \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0 \cdot L^2)}{(E \cdot t)} \\ &= \frac{-\gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^3/3}{(E \cdot t)} \quad (L > L_0) \end{aligned} \quad (6)$$

ところで、 $x=L$ では $\sigma(L)=0$ であるから、式(3)より、

$$L = \{T/(b \cdot \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu)\}^{0.5} \quad (L \leq L_0)$$

$$L = \frac{(T/b + \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^2)}{(2 \cdot \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0)} \quad (L > L_0) \quad (7)$$

が得られる。この式を引抜き力 T/b に関する形で表し、敷設長 L_{Ro} を代入すると、最大引抜き力 T_p/b は以下のようになる。

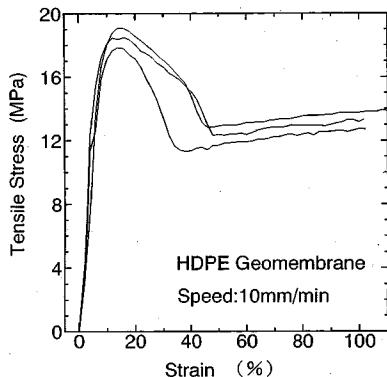


Fig.2 Stress-Strain plots for tension testing.

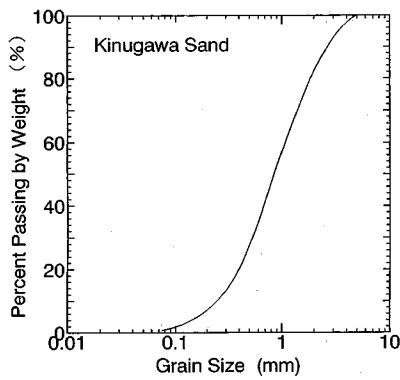


Fig.3 Grain size distribution curve

Table 1 Physical properties of Kinugawa-sand

Maximum size	Coefficient of uniformity	Maximum dry density	Minimum dry density
5.0mm	4.32	17.54KN/m ³	14.32KN/m ³

$$T_p/b = L_{Ro}^2 \cdot \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \quad (L_{Ro} \leq L_0)$$

$$T_p/b = \gamma_d \cdot \mu \cdot H_0 (2 \cdot L_{Ro} - L_0) \quad (L_{Ro} > L_0) \quad (8)$$

この T_p/b の値がジオメンブレンの降伏強度以下であればジオメンブレンの抜け出しが起こり、ジオメンブレン自体の降伏は生じない。

式(7)を式(6)に代入すると、ジオメンブレン降伏前の引抜き力 T_p/b と引抜き量 D の関係は式(9)のようになる。

$(T_p/b) \leq (T_0/b)$ に対して；

$$D = \frac{2 \cdot (T_p/b)^{1.5}}{3 \cdot E \cdot t \cdot (\gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu)^{0.5}}$$

$(T_p/b) > (T_0/b)$ に対して；

$$D = \frac{1}{(E \cdot t)} \left\{ \frac{(T_p/b)^2}{(4 \cdot \gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0)} + \frac{L_0 \cdot T_p/b}{2} - \frac{(\gamma_d \cdot \tan \beta \cdot \mu \cdot L_0^3)}{12} \right\} \quad (9)$$

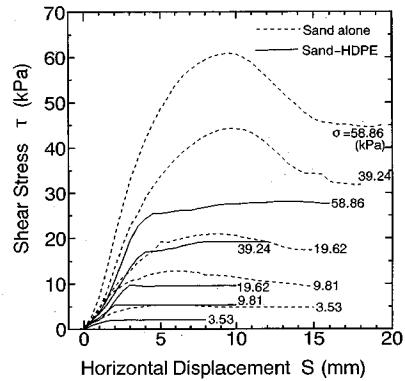


Fig.4 Stress-Displacement plots for direct shear tests.

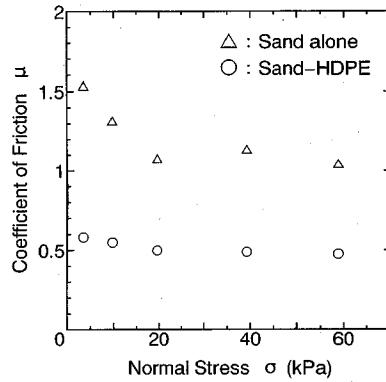


Fig.5 Coefficient of friction versus normal stress

Table 2 Pull-out tests reviewed

Program number	Surface condition of HDPE	Thickness of cover	Runout length Soil
1	smooth	20 cm	50 cm
2	smooth	20 cm	100 cm
3	smooth	20 cm	150 cm
4	smooth	20 cm	200 cm
5	smooth	20 cm	250 cm
6	smooth	111 cm	150 cm
7	smooth	111 cm	200 cm
8	rough	20 cm	100 cm

式(8)と式(9)より、敷設されたジオメンブレンが主に斜面覆土の下にある場合は引抜き量 D が $(T/b)^{1.5}$ に比例し、主に水平覆土下にある場合には D が $(T/b)^2$ に比例する。そして、覆土厚さが厚いほど、覆土の単位体積重量が大きいほど、また、覆土との摩擦係数が大きいほど、ジオメンブレンが抜け出す時の引抜き力 T_p/b は大きく、一定引抜き力に対する引抜き量は小さい。

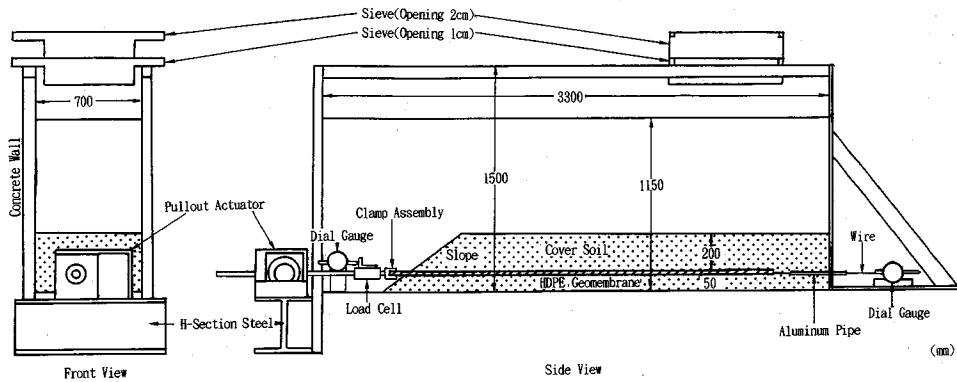


Fig.6 Schematic drawing of pull-out test

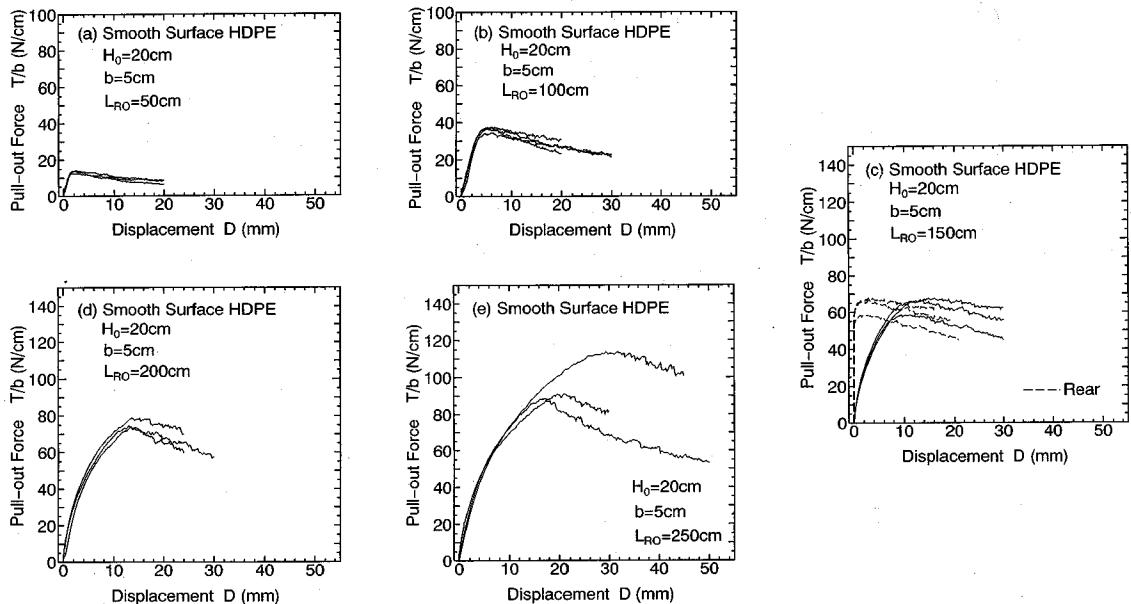


Fig.7 Force-Displacement plots for pull-out test.

3. 引抜き実験

(1) 材料特性

HDPE ジオメンブレンとして、厚さ 1 mm の表面滑らかなものと見かけの厚さ 1.5 mm の表面凹凸なものの 2 種類を使用した。それらの表面粗さは、JIS B 0601 に従えば最大粗さ R_{max} が 82 μm と 1183 μm である。

Fig.2 は、表面滑らかな HDPE ジオメンブレンを JIS 3 号に従う 3 個のダンベル型供試体として、速さ 10 mm/min の同一条件下で引張り試験した結果である。平均して見ると、降伏ひずみは 14%，降伏強度は 19 MPa である。また、降伏に至る応力とひずみの関係が双曲線であると仮定して初期変形係数を求める¹⁴⁾と、平均で $E_i = 637 \text{ MPa}$ となった。これらの値は Koerner⁴⁾

がダンベル型試験結果として示している 22 MPa と 648 MPa に近い。

粒状土としては Fig.3 と Table 1 に示す鬼怒川砂を用いた。最大粒径が 5 mm、均等係数が 4.32 の「粒度分布の悪い」砂である。Fig.4 は一辺 316 mm の大型一面せん断試験機⁸⁾を用いて砂自身の一面せん断試験および表面滑らかな HDPE と砂との層間摩擦試験を実施した結果である。なお、このときの砂供試体の初期単位体積重量は $\gamma_d = 17.5 \text{ KN/m}^3$ である。ピークせん断応力を直応力を除した値を摩擦係数 μ と定義し、これと直応力との関係を示したのが Fig.5 である。直応力の増大とともに摩擦係数は減少する傾向がみられる。また、HDPE と砂との摩擦係数は砂自体の値の約 45% の大きさである。

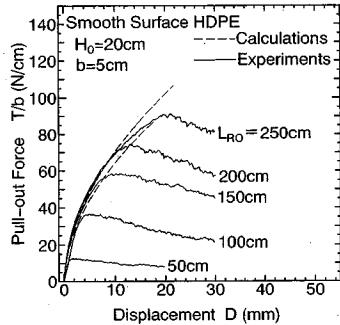


Fig.8 Overlay of force-displacement plots shown in Fig.7

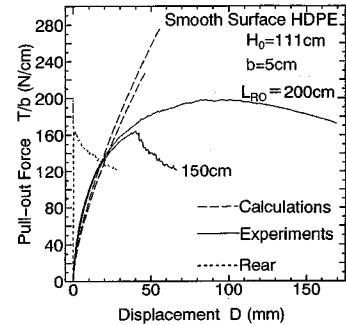


Fig.10 Force-Displacement plots for pull-out test

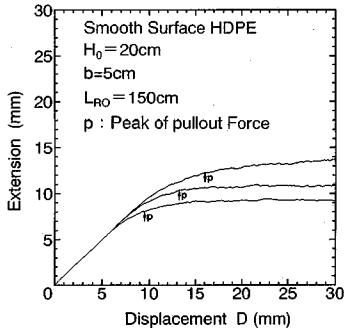


Fig.9 Extension-Displacement plots during pull-out test

(2) 実験装置および実験方法

幅 70 cm, 奥行き 330 cm, 高さ 115 cm の土槽を、既設のコンクリート壁とパネル板（厚さ 12 mm）を用いて造った（Fig.6 参照）。土槽前面に H 型鋼を固定し、その上にモーターと一緒にした引抜き装置を固定した。土槽内の地盤は、約 115 cm の高さから、呼び寸法が 1 cm と 2 cm のふるいを用いて、乾燥させた鬼怒川砂をポアリングさせて作成した。このときの砂地盤の相対密度は 100% ($\gamma_d = 17.5 \text{ KN/m}^3$) であった。なお、前面に壁のある引抜き試験では土と壁面との摩擦が引抜き抵抗力の評価に少なからざる影響を与える¹⁵⁾こと、また、本実験を実際の状況にできるだけ近い地盤形状で実施したいという思いから、引抜き前面はポアリングによって形成される自然斜面のまま（傾斜角度は 35~37 度）とした。

HDPE ジオメンブレンは、上述の方法で地盤高さが 5 cm となったとき、その表面を整形した後に敷設した。引抜き時の側壁の影響をなくすために、ジオメンブレン幅を 5 cm とし、敷設長さを Table 2 に示すように種々変化させた。なお、ジオメンブレンが土中前面に出る量は、掘み具にセットしうる最小量としての 2 cm とした。覆土厚さは 20 cm を標準とし、111 cm の場合も実施した。

引抜きは、荷重変換器後端に変位計を接触させて計測される先端引抜き量が毎分 1 mm となる速さで行い、引

抜き装置先端に剛結した荷重変換器（容量 490 N と 1960 N の 2 種類）で引抜き力を計測した。HDPE ジオメンブレン後端の変位を測定する場合、直徑 0.45 mm のワイヤーをジオメンブレン後端に取り付け、外径 4.0 mm、肉厚 1.0 mm のアルミパイプの中を通して、土槽後壁外に固定した変位計に接続させて計測した。

4. 実験結果と考察

覆土厚さを 20 cm とし、表面滑らかな HDPE ジオメンブレンの埋込み長さ L_{Ro} を変えて引抜き実験を実施したときの、メンブレン先端での引抜き量 D と引抜き力 (T/b) の関係を Fig.7 に示した。ただし、図中には、同一条件で 3 供試体に対して行った結果を示している。いずれの敷設長さに関しても、初め滑らかな曲線で立ち上がり、傾きが小さくなになると曲線が乱れはじめ、やがて引抜き力はピークに至る。その後、微視的には激しく上がり下がりを繰り返し、巨視的には抵抗力が下がる。巨視的に見たとき抵抗力が下がる原因としては、ジオメンブレンの抜け出しと、それに伴う砂の前方への崩壊による接触面積の減少が考えられた。

Fig.8 は、各埋込み長さでの代表的なものを重ね合わせたものである。5 本の曲線は、それぞれのピークに至るまでは、互いにほぼ重なる「1 本の曲線」の様相を示し、ピーク引抜き力直前から、敷設長さの短いものから順次枝分かれしている。仮に、ジオメンブレンが地盤内で剛体として挙動し引き抜かれているならば、ある引抜き量に対応する引抜き力は敷設長に比例した量となり、「引抜き量-引抜き力」の関係は引抜き力に関してのみ正規化しうる形状になるはずである。しかし、Fig.8 はそのようではない。

ところで、Fig.7 (c) に示したように、敷設長 150 cm の実験では、後端での変位も測定した。同図から、後端が 1~2 mm 変位したとき引抜き力がピークに達することが分かる。Fig.9 は先端変位量から後端変位量を

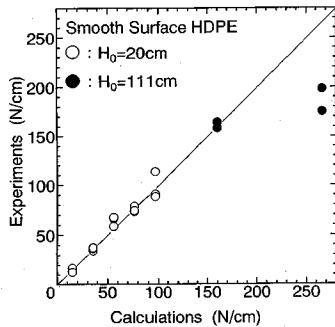


Fig.11 Experiments versus calculations of ultimate pull-out capacity

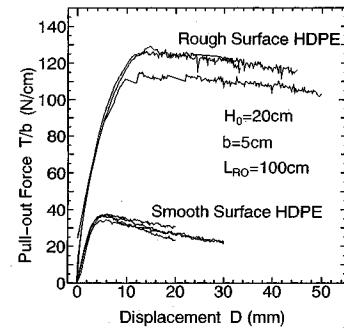


Fig.12 Force-Displacement plots for pull-out

差し引いたジオメンブレンの伸びと先端引抜き量との関係を示したものである。図中の3つの実験線は、同一条件で実施したにもかかわらずピーク時の引抜き力とジオメンブレンの伸びに若干ばらつきが見られるが、そこに至る3線の傾きは45°となり、先端変位は専らジオメンブレンの伸びによることを表している。また、引抜き力のピーク以後はHDPEに伸びが生じないで、抜け出し現象が起きていることも分かる。

以上のことから、土中に埋められたHDPEを引き抜く際の、砂とHDPEジオメンブレン間での実際の挙動は、2.の弾性理論で述べたように、引抜き力の増大に応じて、それに抗するためのせん断摩擦抵抗の発現域が敷設深部に進行し、遂には敷設長の全域に及んだときに、ジオメンブレンそのものが抜け出すと解釈できる。

さて、式(8)からも明らかなように、敷設長あるいは覆土厚さが増大すれば摩擦による引抜き抵抗力も増える。しかし、この抵抗力は無限ではなく、HDPEの強度に依存するはずである。覆土厚さを20cmとして敷設長をさらに長くすることは実験設備の立場から難しかったので、覆土厚さを111cmとして引抜き実験を実施した。

Fig.10に、敷設長を150cmと200cmとしたときの引抜き力と引抜き量の関係を例示した。敷設長が200cmのものは、後端変位が生じないまま先端引抜き量が約40mmを超えると対応する引抜き力の増加も緩くなり、約90mmの引抜き量で引抜き力が200N/cm(=20MPa)のピークを示す。その後は、先端引抜き量の増大に伴い、抵抗力は減少するが、後端変位は依然生じていない。引抜き力のピーク値は、Fig.2に示したHDPEの降伏強度と19MPaにほぼ対応している。したがって、この場合の曲線に見られる引抜き力のピークは、HDPEジオメンブレンの抜け出しによるものではなくて、HDPEの降伏破壊によるものである。他方、敷設長が150cmの場合は、覆土厚さが20cmの場合と

同様に、引抜き力がピークとなる直前で後端変位が生じて、HDPEの抜け出しを示している。しかしながら、ピーク引抜き力に至る引抜き力と先端引抜き量の関係は、降伏破壊を示した敷設長200cmのものと同じである。

このように、引抜き実験によって評価される極限引抜き抵抗力(ピーク引抜き力)には、そのメカニズムからみると、山岡ら⁸⁾やKoernerら¹²⁾が指摘したように引抜き力がHDPEジオメンブレンと土との摩擦力より大きいために生じる抜け出しによるものと、引抜き力がHDPEの降伏強度に達したことによる降伏破壊とがあるが、それは単に材料強度に依存するだけではなく、敷設される環境条件(敷設長、覆土厚さとその密度等)にも影響を受ける。

Fig.8とFig.10に示した「引抜き力-引抜き量」の実験値が、式(9)でどの程度予測できるかの検証を行った。HDPEと砂との摩擦係数は、覆土によるHDPE面上の鉛直応力の分布平均値を求め、Fig.5を参照して決めた。すなわち、覆土厚20cmの敷設長250cmで0.58、覆土厚111cmの敷設長200cmで0.54とした。なお、HDPEの引張り変形係数は、伸びが生じる速さ、試験体幅、拘束圧、温度等の影響を受け易いが、今回は(1)材料特性の項で述べた一般的な材料試験結果としての E_t (=637 MPa)を用いた。

Fig.8とFig.10には、敷設長をそれぞれ250cmと200cmとして、式(9)に基づき計算した結果を波線で示してある。なお、計算曲線の範囲は摩擦係数と単位体積重量の値がそれぞれ5%の変動をすると仮定したときのものである。覆土厚さが20cmの場合、ピーク引抜き力に至る実験値は計算値と良く一致している。覆土厚さが111cmの場合、引抜き力が140N/cm程度までは、曲線の実験値と計算値が一致している。しかし、それ以上の引抜き力に対しては、引抜き量が大きくなり、ピーク引抜き時の引抜き量は敷設長150cmで計算値の1.6倍、敷設長200cmでは3倍となっている。

なお、覆土厚さが引抜き量に与える影響は、Fig.8と

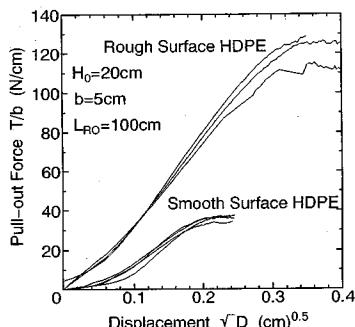


Fig.13 Force-(Displacement)^{0.5} plots

Fig.10 に示した敷設長が 200 cm の結果を比較することによってわかる。すなわち、同じ引抜き力、例えば 70 N/cm における引抜き量を比較すると、覆土厚さが 20 cm の場合に 11 mm であるのに対して、覆土厚さ 111 cm では 4 mm であり、弾性解析で述べたように、覆土厚さの大きい方が先端引抜き量（伸び）は小さい。

ところで、ピーク引抜き力すなわち極限引抜き抵抗力は敷設長に応じて式（8）の値をとる。Fig.11 は極限引抜き抵抗力に関する計算値と実験値の対応性を示したものである。引抜き抵抗力が約 150 N/cm 以下では実験値と計算値は良く対応する。しかし、抵抗力が HDPE の降伏強度に近いと実験値は計算値のほぼ 75% となっている。すなわち、引抜き力が大きく先端引抜き量も大きくなると、実験値は計算値に比べて引抜き量が大きく、ピーク引抜き力は小さくなる。これらの原因として、(1) 変形係数が引抜き力の増大とともに減少すること、(2) HDPE-砂間の相対変位とせん断抵抗力度の関係が計算で仮定した剛塑性的なものより多分に弾塑性的なものになること、(3) HDPE-砂の摩擦面積の減少の 3 つが考えられる。ことに、今回の実験のように、覆土前面に拘束がない場合、ジオメンブレンが引き抜かれて先端部における砂と HDPE との相対変位がある値に達すると、砂の崩壊が起こる。HDPE の引抜きに伴いこのような状態が深部に進行して、ジオメンブレンと砂との摩擦面積の減少は生じ易いと考えられる。

次に、表面凹凸の HDPE ジオメンブレンを、20 cm の覆土厚さのもとで埋込み長さを 100 cm として実験した結果を Fig.12 に示した。図には、比較のために Fig.7 (b) の表面滑らかな HDPE ジオメンブレンの結果も示してある。表面凹凸ジオメンブレンのピーク引抜き力は約 120 N/cm であり、表面滑らかなものの約 3 倍の値を示している。式（8）に基づけば、表面凹凸な HDPE と砂との摩擦係数が表面滑らかなものの 3 倍であることになるが、供試体端部でのダイラタンシーに伴う見掛けの有効応力増加^[6]の相違も考えられる。

ところで、2. で述べたように、覆土厚さ一定のトでは引抜き量と引抜き力の 2 乗は比例関係にある。敷設長を 100 cm としたとき覆土厚さ 20 cm の下にあるジオメンブレンが主体であるので、この理論関係に従い Fig.12 を表示し直したのが Fig.13 である。2 種類の実験値とも、引抜き量 1 mm からピーク引抜き力付近まで範囲で直線性が良く、その勾配は表面凹凸なもので 460 N/cm^{1.5}、表面滑らかなもので 230 N/cm^{1.5} である。式（9）に基づけば、勾配は $2 \cdot (E \cdot t \cdot \gamma_d \cdot \mu \cdot H_0)^{0.5}$ を表すので、2 つの勾配の比 = 2.0 は $(t \cdot \mu)^{0.5}$ の比を反映していると考えてよい。厚さの比を 1.5 とすると摩擦係数比は 2.7 となり、ピーク引抜き力に着目して評価した値に近いものとなる。

なお、同一引抜き力に対する引抜き量は、表面凹凸の HDPE ジオメンブレンの方が表面平滑なものに比べて小さな量となるが、ピーク時引抜き量に関しては、表面凹凸な場合の 13 mm は表面滑らかな場合の 6 mm より大きな量となる。これは、式（8）と（9）から明らかなように、ピーク時引抜き力は摩擦係数に単純比例するのに対し、引抜き量は摩擦係数には反比例するが引抜き力の 2 乗に比例するからである。この 13 mm と 6 mm の比は、摩擦係数比 3 と厚さ比 1.5 を考慮した比にほぼ一致している。

以上のことから、表面凹凸のあるジオメンブレンは、覆土の条件及び敷設長が同じであるとき、極限引抜き抵抗力とそのときの伸び（引抜き量）の 2 つの意味で優れているといえよう。

5. まとめ

廃棄物処分場の遮水シートとして将来の利用増加が期待されている HDPE ジオメンブレンについて、変形を考慮した引抜き抵抗挙動問題を弾性論と模型実験により検討した。提案した弾性式は極めて簡単なモデルに基づくものであるが、実験値との対応も良く、ジオメンブレン以外の各種ジオシンセチック材の引抜き試験データの解析にも利用しうるものと考えている。

本研究によって得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 覆土厚さ一定の下に敷設されたジオメンブレンの引抜き量は、引抜き力の 2 乗に比例した量となる。また、その大きさは、ジオメンブレンの変形係数、厚さ、覆土の厚さ、単位体積重量、ジオメンブレンと土との摩擦係数の各値が大きい程、一定引抜き力に対する引抜き量は小さい。
- (2) 極限引抜き抵抗力には、引抜き力がジオメンブレンと土との摩擦力より大きいことによる抜け出し破壊と、引抜き力がジオメンブレンの降伏強度に達したことによる降伏破壊の 2 形態がある。

(3) 極限引抜き抵抗力の評価は、厚さ1mmのHDPEジオメンブレンの場合、150N/cmまでの引抜き力であれば式(8)に基づき正当に評価されうるが、降伏強度に近づくと過大評価となる傾向が見られる。

(4) HDPEの表面に凹凸を付けたジオメンブレンは、土との摩擦係数を高め、結果として引抜き抵抗力を増大させる。さらに、極限引抜き抵抗時の伸びも大きく遮水シート材として優れている。

(5) この種の引抜き試験結果に関して、ピーク引抜き力に至るまでの「引抜き量-引抜き力」関係に式(9)を適用することにより、摩擦係数を評価しうる可能性がある。

(6) 先端引抜き量から、引抜き抵抗力すなわち先端部における引張作用力を評価できる。

なお、本研究は平成4・5年度文部省科学研究費補助金（一般研究（C）No.04650430代表者：今泉繁良）の援助を受けて実施したものである。また、東洋ゴム工業（株）の坪井氏にはジオメンブレンの特性について、種々教えを戴いた。記して感謝申しあげます。

参考文献

- 1) 福岡正己：廃棄物処理場におけるジオテキスタイルの利用方法、土質工学会ジオテキスタイルの適用性に関するシンポジウム、pp.177-182、1990。
- 2) 嘉門雅史：廃棄物の締固め、土と基礎、Vol.39、No.4、pp.61-68、1991。
- 3) 正井敬人：米国における遮水シートの現状、廃棄物、No.211、pp.138-143、1992。
- 4) R.M. Koerner : *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, 1990.
- 5) G.N. Richardson and R.M. Koerner : *Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste, Landfill Cell and Surface Impoundments*, 1986.
- 6) 林重徳、山内豊聰、落合英俊、孫純鍾：土中におけるポリマーグリッドの引抜き抵抗機構、土と基礎、Vol.33、No.5、pp.21-26、1985。
- 7) 坂井晃、落合英俊、林重徳：ジオグリッドを用いた補強土の変形解析法、土質工学論文報告集、Vol.27、No.3、pp.147-155、1987。
- 8) 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、pp.27-34、1989。
- 9) E.M. Palmeira and G.W.E. Milligan : Large scale pull-out tests on geotextiles and geogrids, Proc. of 4th International Conference of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Vol.2, pp.743-746, 1990.
- 10) G.W.E. Milligan, R.F. Earl and D.I. Bush : Observations of Photo-elastic pullout tests on geotextiles and geogrids, Proc. of 4th International Conference of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Vol.2, pp.747-751, 1990.
- 11) B.R. Christopher and R.R. Berg : Pullout evaluation of geosynthetics in cohesive soils, Proc. of 4th International Conference of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Vol.2, pp.731-736, 1990.
- 12) R.M. Koerner and M.H. Wayne : Geomembrane anchorage behavior using a large-scale pullout apparatus, Geomembranes Identification and Performance Testing, Chapman and Hall, pp.204-218, 1991.
- 13) 三田地利之、山本陽一、村木俊介：伸び剛性を考慮したジオグリッドの引抜き特性の評価について、第6回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集、pp.94-99、1991。
- 14) 山口柏樹：土質力学（全改訂）、技報堂出版、pp.254-255、1984。
- 15) E.M. Palmeira and W.G.E. Milligan : Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand, Geotechnique, Vol.39, No.3, pp.511-524, 1989.
- 16) 坂井晃、林重徳、福島伸二、兵動正幸、治田堅二、安田進、新谷秀人：ジオグリッドの引抜き一斉試験結果について、第4回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集、pp.126-132、1989。

- (1994.6.3受付)

EVALUATION OF PULL-OUT BEHAVIOR OF HDPE GEOMEMBRANE EMBEDDED IN SAND

Shigeyoshi IMAIZUMI, Satoru TAKAHASHI, Yukimitsu YOKOYAMA
and Tatsuaki NISHIGATA

The current design method for anchoring capacity of HDPE geomembrane used for liner in a waste landfill considers its strength and do not its deformation. In this paper, a simple elastic formula which relates a deformation with the pull-out force is proposed. Model tests were also conducted in order to verify this proposed formula. As a result, it is found that deformation is directly proportional to a square of pull-out force per unit width and is inversely proportional to a elastic modulus of geomembrane, a weight of cover-soil as well as a frictional coefficient between soil and geomembrane and that the caluculations based on this elastic formula coincided well with the experimental observations.