

温度変化が埋設 HDPE ジオメンブレンの 変形挙動に与える影響

今泉繁良¹・坪井正行²・高橋 悟³・横山幸満⁴

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

2 正会員 学士 東洋ゴム工業(株)課長 R&P 技術本部 (〒675-11 兵庫県加古郡稻美町六分一 1183)

3 正会員 修士 (元宇都宮大学大学院生)

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

遮水シートとして利用が増大している HDPE ジオメンブレンが温度変化を受けたとき、その引張り強度と弾性係数の変化を定量的に考察した。まず、温度を 0~60°C に変化させて室内引張り試験を実施し、両特性を評価した。さらに、土中温度が 0~48°C と異なる条件下において引抜き試験を行い、弾性論に基づきデータを解析して弾性係数を評価した。主な結論として、①引張り速度が遅いとき温度 t と引張り強度 σ_t 、1% 割線弾性係数 E_{st} との間に $\sigma_t = 23.52 - 0.27 t$ (MPa), $E_{st} = 801.64 \cdot 10^{-0.0125t}$ (MPa) の関係がある、②引抜き試験から逆算された弾性係数も温度変化の影響を受け、その関係は室内試験の E_{st} の関係に一致する、③Co-energy は温度の上昇とともに低下し、許容伸び量は低温時よりも高温時のほうが小さいことが得られた。

Key Words : HDPE geomembrane, tensile strength, elastic modulus, tensile test, pull-out test, effect of temperature

1. まえがき

近年、廃棄物最終処分場の遮水工に、HDPE (高密度ポリエチレン) や EPDM (合成ゴム) 等のいわゆるジオメンブレンが遮水シートとして、またジオテキスタイルがその保護材として多く用いられている。これらの遮水工は、敷設作業終了後、廃棄物埋立てが完了するまで、その一部は外気に曝されたままにあり、温度の日変化および季節変化を受ける。例えば、Koerner ら¹⁾は太陽照射に伴う HDPE ジオメンブレン温度の日変化を実処分場のシートにサーモカプルを貼ることにより計測し、夏季には日変化が 60°C にも及ぶことを示している。また、たとえ廃棄物や保護土に覆われたとしても、廃棄物の分解熱²⁾等の影響による温度変化を受ける。

高分子材料であるジオメンブレンやジオテキスタイルが、温度の変化を受ければ剛性や強度等の材料特性が変化し、それに伴い土との摩擦特性や外力に対する伸縮変形量の変化、あるいは変形が拘束されれば内部応力の発生という問題も生じる。したがって、温度の変化がジオメンブレンやジオテキスタイルの特性に与える影響を定量的に評価する努力が必要となっている。

A. McGown ら³⁾は、夏季に 30°C、冬季に 21°C と温度変化をする地表面下 1.5 m の土中に 12 ヶ月埋設されたジオテキスタイル特性の初期値に対する変化を調査

し、突き破り抵抗に関しては織布は無変化であるのに不織布は 15% の強度低下、引裂き抵抗力は織布・不織布とも 10% 低下、引張り特性は強度が織布では 5~10% 低下するのに不織布では無変化であること、また、切断時のひずみはともに 10~15% 低下してより脆性的となることを示した。Pasqualini ら⁴⁾は、HDPE ジオメンブレンとジオテキスタイルもしくはジオネットとの層間摩擦特性が温度変化から受ける影響を直接せん断試験によって調査し、0°C の低温度下では 45°C の高温時に比べて、それぞれ 14% と 35% 程度摩擦が高くなることを示した。Friberg⁵⁾らは、ポリエチレン系のジオテキスタイルとジオグリッドに関する引張り試験とクリープ試験を実施し、温度低下は引張り強度の増加をもたらすが破壊時のひずみの大きさには影響を与えないこと、クリープにおけるひずみ速度の低下にかなりの影響を与えることを示した。

我が国においては、岩崎⁶⁾がアスファルト系シートに対して -30~60°C の温度での引張り試験を実施し、20°C を基準としたとき、-20°C で 40% の強度増加、40°C で 40% の強度低下となることを示した。三木ら⁷⁾は各種のジオメンブレンに対して温度を -20, 20, 60°C と変えて引張り試験を行い、60°C での強度は 20°C での値に比べ、塩化ビニル系とポリエチレン系では差がないが、合成ゴム系では 10% 程度強くなることを示

した。また、正井⁸⁾はポリエチレン系のジオメンブレンの引張り破断強度を-60~80°Cの変動範囲で試験し、破断強度が温度上昇に対してほぼ線形的に低下し、HDPEではその傾きが0.27 MPa/Cとなることを示した。

ところで、地盤の局所沈下や地盤と構造物との不等沈下に追従するのに必要なジオメンブレンの伸びが、ジオメンブレンの許容応力以内で生じるかどうかを検討することは重要である。このための方法として、Giroud⁹⁾のCo-energy法や今泉ら^{10),11)}の弾性解法が提案されているが、そこでは「引張り力-ひずみ」関係曲線や弾性係数が必要である。

このような背景のもとに、本論文では、HDPEジオメンブレンの引張り特性、すなわち引張り強度と弾性係数の温度変化に伴う特性変化に着目し、室内単軸引張り試験と屋外引抜き試験を実施してその定量的検討を行った結果、ならびに摩擦を受けるときの許容伸び量への温度変化の影響について述べる。

2. 室内引張り試験

(1) 供試体および試験方法

用いたジオメンブレンは厚さ1.0 mmおよび1.5 mmの高密度ポリエチレン(HDPE)で、表面が滑らかなものである。JIS K 6251(温度20°C、引張り速度50 mm/min)に従う引張り試験では、破断強度が32.14 MPa(伸び率680%)、降伏強度が19.70 MPa(伸び率13%)であり、JIS K 7197に基づく0~60°Cにおける平均線膨張係数は $1.65 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ であった。供試体の形状としては、JIS K 6022に定めるダンベル形3号型(Dum.)と幅が0.06 mで掴み間隔が0.10 mの長方形(Rec.)の2種類を用いた。長方形供試体の大きさは、引抜き試験で使用するジオメンブレンと形状が相似形となるようにした。なお、供試体の試験方向は、製造(長手)方向とした。

引張り試験装置は最大荷重4.90 kNのデジタルサーボ負荷型の装置である。この装置は、チャック部と供試体が恒温室内にあり、供試体を-35~250°Cの範囲で恒温に保ったまま引張り試験を実施することが可能である。今回は、原則として温度を0~60°Cまで10°Cごとに変化させた。恒温状態を確保するために、供試体を恒温室にセットし、約30分経過後に引張り試験を開始した。試験はひずみ制御方式で実施し、引張り速度をJIS A 6008に定める500 mm/minとそれより遅い3 mm/min、引抜き試験に対応した1 mm/minの3種類とした。引張り荷重はチャック部と連結したロードセルで、伸び量はチャック間距離の変化量として電気的に計測し、それをX-Yペンレコーダに記録した。なお、引張

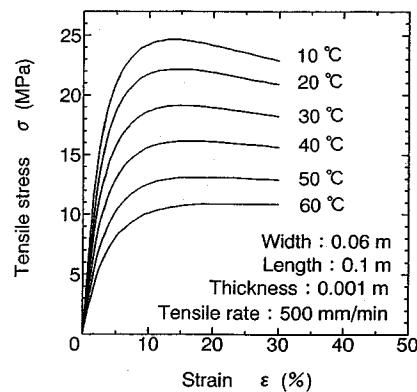


Fig.1 Tensile stress versus strain curves of HDPE.

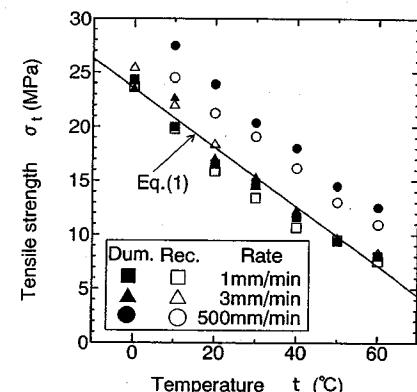


Fig.2 Strength versus temperature from tensile test.

りひずみ量としては、初期チャック間距離に対するチャック間距離の変化量の比で計算した。

得られた応力-ひずみ関係の一例として、長方形供試体を用いて引張り速度500 mm/minで試験したときのものをFig.1に示した。温度の上昇に伴い、ピーク応力(以下引張り強度 σ_t と呼ぶ)と曲線の立ち上がり勾配が減少している。

(2) 引張り強度と温度の関係

Fig.2は引張り強度と温度との関係を示したものである。供試体形状の違いや引張り速度の違いにかかわらず、この範囲の温度では、引張り強度は温度の上昇とともに直線的に減少し、その減少率は0.26~0.30 MPa/Cにある。この傾向は正井⁸⁾がHDPEの破断強度について得られた傾向と同じである。強度が高く評価されているのは引張り速度が500 mm/minのダンベル形と長方形供試体のもので、引張り速度が3 mm/minより遅い場合にはダンベル形と長方形との強度差ならびに温度上昇に伴う強度減少率の相違は小さい。引張り速度が大きい場合は材料の粘性効果が強く出るために降伏強度が高く

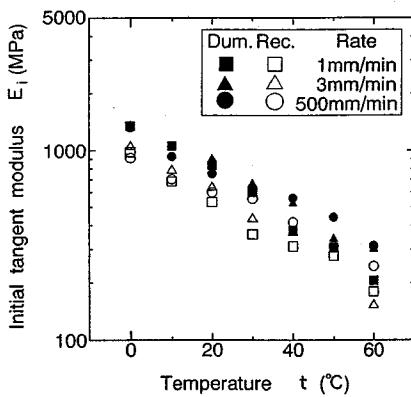


Fig.3 Initial tangent modulus versus temperature from tensile test.

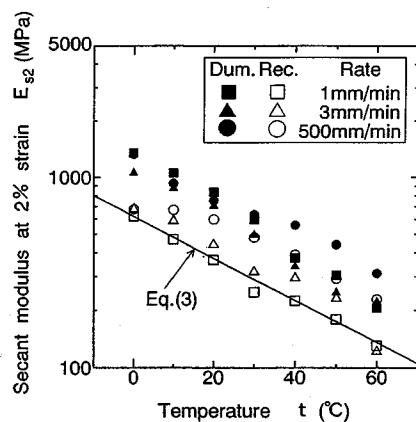


Fig.5 Secant modulus at 2% strain versus temperature from tensile test.

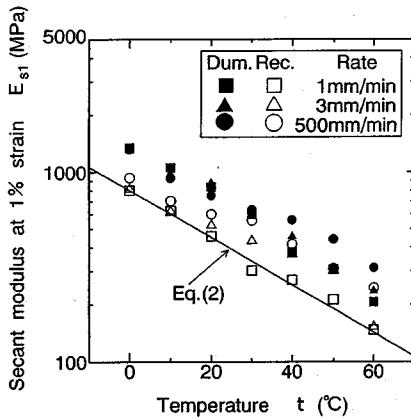


Fig.4 Secant modulus at 1% strain versus temperature from tensile test.

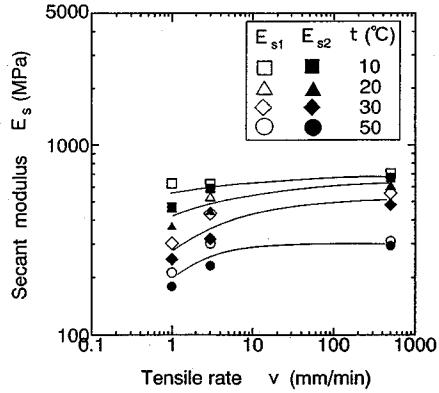


Fig.6 Secant modulus versus tensile rate for tensile test of rectangular sample.

かつ形状の影響を受け易いが、速度が遅いと粘性効果が小さく形状の違いも影響しにくいことを示している。

Fig.2 に示した、載荷速度が 3 mm/min より遅い場合 (1 mm/min) の引張り強度 σ_t と温度 t の平均的関係を求める式 (1) のようになる。

$$\sigma_t = 23.52 - 0.27 \cdot t \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

(3) 弾性係数と温度の関係

弾性係数として、応力一ひずみ関係の初期部に着目した初期弾性係数 E_t 、1% あるいは 2% ひずみに対応する応力と原点を結んで評価した 1% 割線弾性係数 E_{s1} と 2% 割線弾性係数 E_{s2} の 3 種類で評価した。

Figs.3~5 は、弾性係数と温度との関係を示したものである。初期弾性係数・割線弾性係数のいずれにおいても、弾性係数の対数値が温度の増加に伴い直線的に減少している。この傾向は、アスファルト混合物における傾向^[2]と同じもので、材料が粘弾性的なものであることを示している。

Fig.3 の初期弾性係数に着目すると、その値はダンベル形の方が長方形のものより大きく、引張り速度 500 mm/min で約 30%，引張り速度 3 mm/min で約 40%，引張り速度 1 mm/min で約 35% 程度大きい。この理由として、今回のダンベル形のひずみ計算を（チャック間の伸び／元のチャック間距離）として行い、断面積が大きい非くびれ部のひずみもくびれ部のひずみと同等であると見なしているため、計算ひずみが実際より小さめに評価されていると考えられた。引張り速度の違いをみると、速度が 1 mm/min と 3 mm/min の場合は弾性係数と温度との相関性が良いが、500 mm/min の結果では相関性が低い。引張り速度が早い場合、記録紙の送りも早くする必要があり、その結果、記録と読み取りでの誤差が初期弾性係数の計算・評価に大きく影響したものと考える。

温度が 20°C におけるダンベル形での初期弾性係数値（速度 1 mm/min で 834.96 MPa、速度 3 mm/min で 901.60 MPa、速度 500 mm/min で 753.62 MPa）を

Table 1 Test conditions and estimated parameters.

Test Date	Temperature in Cover Soil t (°C)	Geomembrane Width b (m)	Cover Soil Thickness H (m)	Apparent Frictional Coefficient μ'	Apparent Elastic Modulus E (MPa)
'94. 8. 27	41.1	0.55	0.10	0.629	321.34
8. 28	47.7	0.55	0.10	0.705	288.22
9. 9	35.3	0.05	0.20	2.379	303.21
9. 25	26.6	0.05	0.20	2.477	418.85
10. 2	28.5	0.40	0.20	0.737	402.78
11. 24	10.5	0.40	0.20	0.737	544.49
10. 14	26.4	0.60	0.20	0.715	316.15
12. 5	10.6	0.60	0.20	0.723	588.00
12. 16	6.7	0.60	0.20	0.742	652.39
'95. 1. 16	0.7	0.60	0.20	0.669	639.16

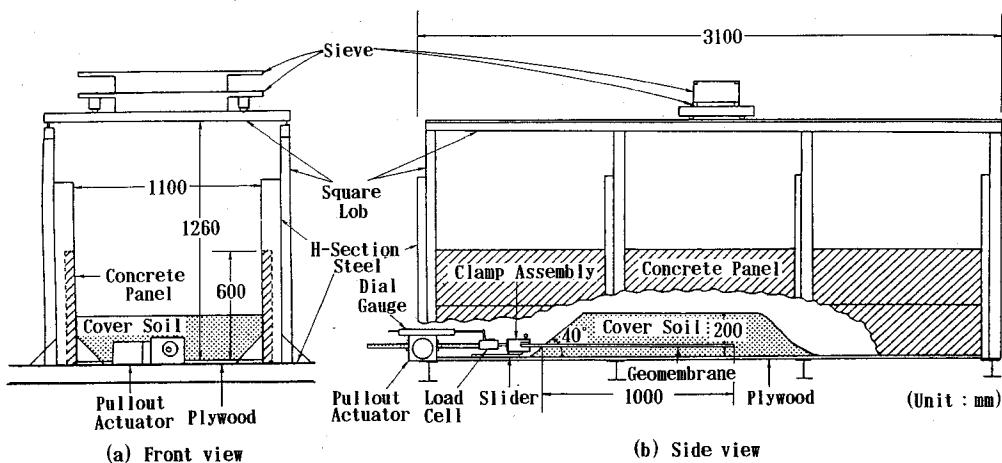


Fig.7 Schematic drawing of pull-out test.

Koerner¹³⁾が示している値（温度21°C、速度50mm/minで648.00 MPa）と比較すると、16~39%大きい。長方形での値（速度1mm/minで531.16 MPa、速度3mm/minで635.43 MPa、速度500mm/minで625.24 MPa）はKoernerが示す幅広供試体の値(227.00 MPa)より2.4~2.8倍大きい。

Fig.4とFig.5に示した割線弾性係数を見ても、先に述べた理由により、ダンベル形による方が長方形によるものより値が大きい。引張り速度の違いについては、ダンベル形ではその特徴を明確に把握することが難しいが、長方形では速度が早いほど割線弾性係数が大きく評価されている。なお、割線弾性係数の対数値と温度との関係線の勾配は、供試体の形状や引張り速度の違いによらずほぼ同一のように思われる。そこで、Fig.4とFig.5に示した載荷速度1mm/minの長方形供試体に着目して、割線弾性係数 E_s と温度 t との関係を求めるとき式(2)と式(3)のようになる。

$$E_{s1}=801.64 \cdot 10^{-0.0125 \cdot t} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$E_{s2}=620.83 \cdot 10^{-0.0110 \cdot t} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Fig.6は長方形供試体の割線弾性係数と載荷速度の関

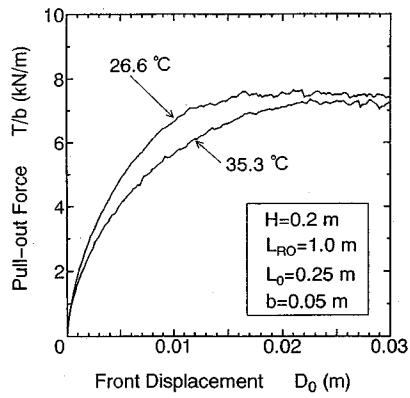
係を温度をパラメータとして示したものである。速度が早くなると弾性係数は大きくなり、高温時ほど引張り速度の影響を受け易く、かつ、それは低速時ほど顕著のようである。

3. 引抜き試験

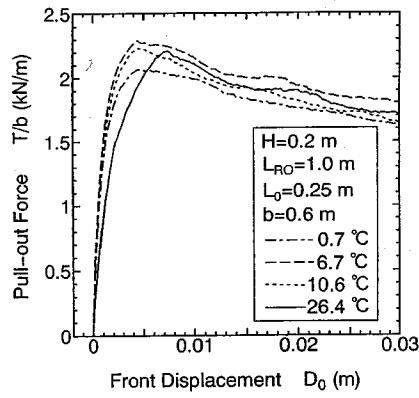
(1) 試験の概要¹⁴⁾

引抜き試験には、Fig.7に示すような幅1.10m、奥行き3.10m、高さ0.60mの前方が開放した土槽を用いた。基層として、まず、乾燥した鬼怒川砂¹⁵⁾（含水比0.5%以下）を相対密度100%に敷き、その上に厚さ1.0mmの表面が滑らかなHDPEジオメンブレンを幅が0.05~0.60mで敷設長が1.00mの状態で敷き、再び鬼怒川砂を厚さが0.10mもしくは0.20mとなるように覆土した。次に、ジオメンブレン先端を鋼製の掴み具で掴み、荷重変換器を介して、1mm/minの速さで引抜き装置を用いて等圧条件のもとで引き抜いた。

試験は、1994年8月から1995年1月にかけて、気温が0~48°Cの範囲の異なる条件下で実施し、ジオメン

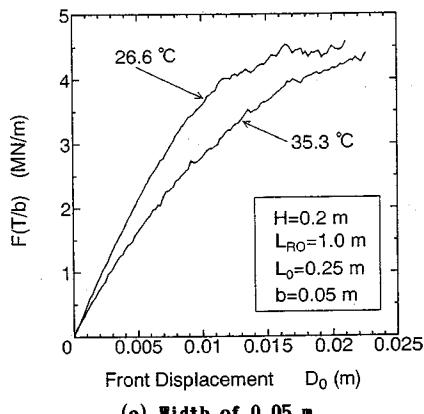


(a) Width of 0.05 m

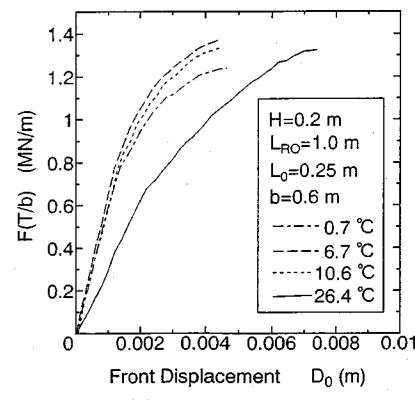


(b) Width of 0.60 m

Fig.8 Pull-out force versus front displacement.



(a) Width of 0.05 m



(b) Width of 0.60 m

Fig.9 $F(T/b)$ versus front displacement.

プレン敷設後引抜き開始までは十分な時間をおいてジオメンブレンと土との温度が安定するのを確認（土中に温度計を入れて計測）してから実施した。

Table 1に、引抜き試験の実施日、土中温度、ジオメンブレン幅、覆土厚さを一覧表として示した。

(2) 引抜き弾性論に基づく弾性係数の評価

Fig.7に示したジオメンブレンの先端を単位幅当たりの力 T/b （以下、単に引抜き力と呼ぶ）で引き抜くとき、先端での引抜き量 D_0 は、HDPE ジオメンブレンを線形弾性体と仮定して、式（4）で表される¹⁶⁾。

$$D_0 = \frac{1}{E \cdot t_G} \left\{ \frac{(T/b)^2}{2 \cdot \gamma_d \cdot H \cdot \mu'} + \frac{L_0 \cdot (T/b)}{2} - \frac{\gamma_d \cdot L_0^2 \cdot H \cdot \mu'}{24} \right\} \quad (4)$$

ここに、
E : ジオメンブレンの弾性係数 (MPa)

b : ジオメンブレンの敷設幅 (m)

t_G : ジオメンブレンの厚さ (m)

γ_d : 覆土の単位重量 (MN/m^3)

H : 覆土厚さ (m)

μ' : ジオメンブレンと覆土の見掛けの層間摩擦係数 ($=\mu_u + \mu_L$)

L_0 : 覆土斜面部の水平距離 (m)

さて、見掛けの摩擦係数 μ' は、ジオメンブレンが抜け出すときの引抜き抵抗力 $(T/b)_p$ を用いれば、式（5）で評価しうる。

$$\mu' = \frac{(T/b)_p}{L_{R0} \cdot \sigma_m} \quad (5)$$

ここに、 R_{R0} : ジオメンブレンの敷設長 (m)

σ_m : ジオメンブレンへの平均作用圧 (MPa)

いま、式（4）の右辺に関して

$$F(T/b) = \frac{(T/b)^2}{2 \cdot \gamma_d \cdot H \cdot \mu' \cdot t_G} + \frac{L_0 \cdot (T/b)}{2 \cdot t_G} - \frac{\gamma_d \cdot L_0^2 \cdot H \cdot \mu'}{24 \cdot t_G} \quad (MN/m) \quad (6)$$

とおくと、式（4）は $F(T/b) = E \cdot D_0$ となる。

したがって、まず、引抜き抵抗力 $(T/b)_p$ から式（5）

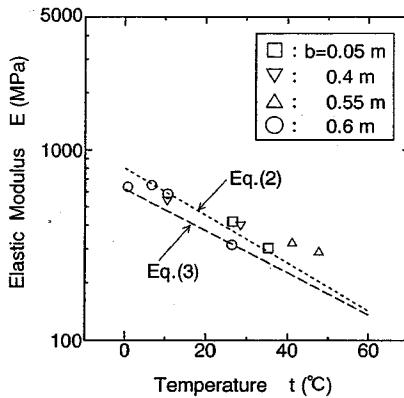


Fig.10 Estimated elastic modulus versus temperature in cover soil.

に基づき μ' を評価し、次に引抜き力ごとに式(6)に基づく $F(T/b)$ を計算する。この $F(T/b)$ の値を縦軸に、対応する先端引抜き量 D_0 を横軸にとれば、HDPE ジオメンブレンが弾性的挙動をする範囲において直線関係となり、その傾きが弾性係数 E を表すことになる。

(3) 試験結果

引抜き試験において、式(5)に基づき評価される平均的摩擦係数は、敷設幅が 0.40 m より狭いとき幅の影響を受け大きめに評価される¹¹⁾。敷設幅ごとに纏めた引抜き力 T/b と先端引抜き量 D_0 との関係曲線を、Fig.8 に示した。Fig.8 より、土中温度の変化はピーク引抜き力（引抜き抵抗力）には大きな影響を与えないが、曲線の形は温度が高いほど立ち上がりが緩やかとなる。

Fig.9 は引抜き抵抗力を式(5)に代入して平均摩擦係数を求めた（Table 1 参照）後、式(6)に基づき引抜き力に対応する $F(T/b)$ を計算し、先端引抜き量 D_0 との関係を示したものである。Fig.9 において、引抜き量が大きいとき直線から外れたものとなるが、引抜き量が Fig.9 (a) で 0.005 m、Fig.9 (b) で 0.002 m までの初期部分では線形的関係にある。この初期の直線部の勾配から弾性係数 E を評価し、その結果も Table 1 に示した。

Fig.10 は評価された弾性係数 E と土中温度 t との関係を示したものである。Fig.10 から、土中温度が高くなると弾性係数は小さくなり、今回の引抜き実験の温度範囲 (0~48°C) においても、弾性係数の対数値と温度との間に線形関係が見られる。図中には、室内実験結果としての式(2)および式(3)の関係も示してあるが、引抜き試験からの関係は室内での 1% 割線弾性係数 E_{st} に対する式(2)に近い。また、このことより、引抜き試験における引抜き力と引抜き量との関係を弾性論でシミュレートするとき、供試体形状と引張り速度を一致さ

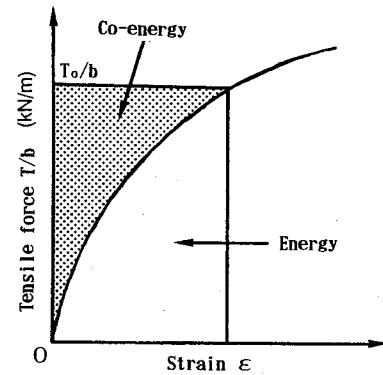


Fig.11 Concept of Co-energy proposed by Giroud⁹⁾.

せた室内引張り試験によって得られた弾性係数に、温度変化の影響を考慮して用いるのが良いこともわかる。

4. 許容伸び量の温度変化の影響

土中に敷設されたジオメンブレンが基盤の局所沈下等を受けると、それに追従するために伸張することが要求される。ジオメンブレンの上・下面に摩擦抵抗力が働くと、伸び量あるいは内部に発生する引張り応力の分布は、敷設方向に一様とはならず複雑である。Giroud⁹⁾ や今泉ら^{10),11)}は、摩擦抵抗力度（単位面積当りの摩擦抵抗力）の発現がジオメンブレンと土との相対変位量の大きさに依存しない、すなわち、相対変位が少しでも生じれば直応力に依存する最大摩擦抵抗力度が発現されると仮定して、応力—ひずみ関係、摩擦係数、直応力をパラメータとして伸び量を表す式を提案した。両者の考えは基本的には同じであるが、Giroud の Co-energy 法は「引張り力 T/b —ひずみ ϵ 」関係が非線形であっても、一応図解的に解ける点で優れている。なお、引張り力 T_0 に関する Co-energy E' とは $\int_0^{T_0/b} \epsilon d(T/b)$ であり、Fig.11 に示すように、材料の引張り試験からの張力—ひずみ関係の曲線と張力軸とのなす面積に等しい量である。

Co-energy 法に基づけば、土中に敷設されたジオメンブレンとその上・下面での接触物との摩擦特性がそれぞれ $\tan\phi_v$, $\tan\phi_l$ であり、直応力 σ_n のもとでジオメンブレンに伸び量 s が要求されるとき、必要な Co-energy : E' は、式(7) のようである。

$$E' = s \cdot \sigma_n \cdot (\tan\phi_v + \tan\phi_l) \quad (\text{kN/m}) \quad (7)$$

直応力と摩擦特性が同じであれば、Co-energy : E' の大きい方が、許される伸び量は大きい。

2. に述べた室内引張り試験のうち、厚さ 1.0 mm の長方形供試体の応力—ひずみ関係 (Fig.1 参照) から図解的に引張り強度に関する Co-energy を計算し、温度との関係を示したのが Fig.12 である。載荷速度が 500

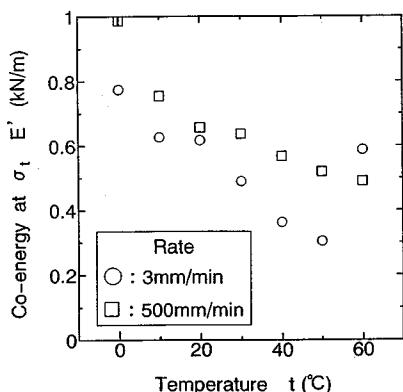


Fig.12 Co-energy at σ_1 versus temperature from tensile test of rectangular sample.

mm/min と 3 mm/min の両方の場合とも、温度の上昇とともに Co-energy は減少している。このことは、式(7)から明らかなように、直応力 σ_n と摩擦特性 ($\tan\phi_u + \tan\phi_L$) が同じであるならば、許される伸び量 s は小さくなることを示している。一般には、Figs.3~5に示したように温度が上昇すると弾性係数が低下し伸び易くなると考えられているが、温度の上昇によって強度も低下するために許容伸び量は減少するのである。このことを、応力一ひずみ関係を線形として伸び量 s を誘導した今泉らの式(8)に基づいて考えれば、伸び量に対して

$$s = \frac{t_G (\sigma_{UL}/F_s)^2}{2 \cdot E \cdot \mu \cdot \sigma_n} \quad (m) \quad (8)$$

ここに、 σ_{UL} ：ジオメンブレンの破壊強度 (MPa)
 F_s ：強度に関する安全率

弾性係数は反比例しているのに、引張り強度は 2 乗で比例しているので、弾性係数より強度の変化が重要であることが理解できる。

また、Fig.12 から、引張り速度を 500 mm/min で引張り試験を実施すると、速度を 3 mm/min 以下で実施したときより Co-energy が大きく評価され、許容伸び量を 30~40% 程大きめに見積る結果となることがわかる。

5. まとめ

廃棄物最終処分場の遮水シートとして利用が増大している高分子材料からなるジオメンブレンは、その特性が温度環境の影響をうける。本研究においては、HDPE の引張り特性、とくに弾性係数が温度変化から受けける影響について、室内単軸引張り試験と模型土槽からの引抜き試験を実施することにより、その定量的評価を行った。

以下に、主な結論を示す。

① 引張り速度が 3 mm/min より遅いときの HDPE ジ

オメンブレンの引張り強度 σ_t と温度 t との関係として、

$$\sigma_t = 23.52 - 0.27 \cdot t \quad (\text{MPa})$$

が得られた。

② 引張り速度が 500 mm/min のときよりも 1 mm/min の場合の方が、弾性係数と温度との相関性の良い結果が得られた。長方形供試体に対する割線弾性係数 E_{s1} , E_{s2} と温度 t との関係は、

$$E_{s1} = 801.64 \cdot 10^{-0.0125 \cdot t} \quad (\text{MPa})$$

$$E_{s2} = 620.83 \cdot 10^{-0.0110 \cdot t} \quad (\text{MPa})$$

で近似でき、 E_{s1} の方が E_{s2} より温度変化の影響を幾分受けやすいことがわかった。

③ 本研究での引抜き試験から逆算された弾性係数も温度変化の影響を受け、その傾向は室内引張り試験での 1 % 割線弾性係数のものとほぼ一致した。

④ HDPE ジオメンブレンの引張り強度に対する Co-energy は、温度の上昇と共に低下した。このことから、許容伸び量は、低温時よりも高温時の方が小さい。

⑤ 許容伸び量を評価するために引張り速度を 500 mm/min で試験すると、速度を 3 mm/min 以下で実施したときより 30~40% 大きめに評価する恐れがある。

なお、HDPE ジオメンブレンの室内引張り試験に際しては、東洋ゴム工業（株）の宮地秀樹・津田知英の両氏の協力を得た。記して感謝する次第である。また、本研究の一部は笹川科学研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) G. R. Koerner and R. M. Koerner : Temperature Behavior of Field Deployed HDPE Geomembrane, *Proc. of Geosynthetics'95*, Vol.3, pp.921-937, 1995.
- 2) 清水恵助：ごみ埋立地跡地利用と基礎工の課題、基礎工, Vol. 20, No. 8, pp. 16-22, 1992.
- 3) A. McGowen and H. F. Al-Mudhat : The Effects of Hot Climate on the Strength of Geotextiles and Geogrids, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.3, pp.1203-1208, 1994.
- 4) E. Pasqualini, M. Roccato, D. Sani and M. Stella : Composite Liners Interface Shear Resistance Versus Temperature : *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.3, pp.937-976, 1994.
- 5) P. Friberg, P. Lahtinen, E. Slunga and H. Suni : Finnish Georeinforcement Research and Development Project, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.3, pp.1169-1172, 1994.
- 6) 岩崎高明：ジオメンブレンの材料試験法—アスファルト

- 系シートについて一、第1回ジオメンブレン技術に関するセミナー、pp.13-27、1994
- 7) 三木博史、林義之：国内におけるジオメンブレンの現状、第1回ジオメンブレン技術に関するセミナー、pp.28-46、1994。
 - 8) 正井敬人：廃棄物処分場の安全対策、最終処分場における遮水工技術、NTS、pp.108-138、1994。
 - 9) J. P. Giroud : Quantification of Geosynthetic Behavior, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Special lecture & Keynote lectures, pp.21-23, 1994.
 - 10) 今泉繁良、横山幸満：ジオメンブレンライナーの厚さ評価法に関する一考察、第9回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集、pp.94-101、1994。
 - 11) 今泉繁良、横山幸満：ジオメンブレンの変形を考慮した厚さ評価における安全率について、土木学会論文集、No.529/III-33、pp.191-196、1995。
 - 12) 今泉繁良、植下 協：等価二層モデルによるアスファルト舗装の解析、土木学会論文報告集、No. 256, pp. 69-77, 1976.
 - 13) R. M. Koerner : *Designing with Geosynthetics-Third Edition*, Prentice Hall, p.438, 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.78-85、1994。
 - 15) 今泉繁良、高橋 悟、西形達明、横山幸満：ジオメンブレン一粒状土の層間摩擦特性、第8回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集、pp.59-67、1993。
 - 16) 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、土木学会論文集、No.511/III-30, pp.155-162, 1995.

(1995.11.27.受付)

EFFECT OF TEMPERATURE ON DEFORMATION BEHAVIORS OF EMBEDDED HDPE GEOMEMBRANE

Shigeyoshi IMAIZUMI, Masayuki TSUBOI, Satoru TAKAHASHI
and Yukimitsu YOKOYAMA

Variation of tensile strength and elastic modulus of HDPE geomembrane with changes in circumstantial temperature were investigated. Two types of tests were conducted. One is laboratory tensile test, where temperature was varied from 0 to 60°C. Other is pull-out test in outdoors at temperature in the range 0 to 48°C. The data from pull-out tests were analyzed to determine the elastic modulus based on the theory of elasticity. As the results, it is found that tensile strength, σ_t , and secant modulus at 1% strain, E_{s1} , obtained from tensile tests were related with temperature t as formulas of $\sigma_t = 23.52 - 0.27t$ (MPa) and $E_{s1} = 801.64 \cdot 10^{-0.0125}$ (MPa), that elastic modulus estimated from pull-out tests varied also with temperature and its trend coincided with that determined from tensile tests, and that Co-energy corresponding to peak stress decreased with increase of temperature.