

廃棄物処分場遮水シートに発生する熱応力の評価

坪井正行¹・宮地秀樹²・野本哲也³・今泉繁良⁴

¹正会員 工学 宇都宮大学大学院博士後期課程 (〒321-8585 宇都宮市石井町 2 7 5 3)

²工学 東洋ゴム工業株式会社 化工品技術部 (〒675-1112 兵庫県加古郡稲美町六分一 1183)

³学正会員 工学 宇都宮大学大学院博士前期課程 (〒321-8585 宇都宮市石井町 2 7 5 3)

⁴正会員 工博 宇都宮大学助教授 エネルギー環境科学専攻 (〒321-8585 宇都宮市石井町 2 7 5 3)

最終処分場の斜面では遮水を目的として遮水シートが用いられ、その天端は抜け出しが生じないように強固に固定されなければならない。固定工に作用する各種力の中で、気温降下に伴い遮水シート内に発生する熱応力の占める割合は大きいと言われているが、その評価式は未だ存在しない。そこで、端部の固定条件を変化させた室内実験及びフィールド実験を実施することにより、遮水シートの温度と発生する熱応力の関係を検証した。その結果、遮水シートの種類によって熱応力の大きさが著しく異なることが明らかになった。また、遮水シートの端部が完全に拘束されたときの実験値は、弾性熱応力評価式と一致することを示し、端部拘束力が覆土工に依存する摩擦力に起因するとき、熱応力は完全拘束時の値より幾分か小さくなることを示し、これを計算するための評価式を提案した。

Key Words: HDPE geomembrane, thermal stress, elastic modulus, effect of temperature, friction

1. はじめに

廃棄物最終処分場では、浸出水の地下への浸透を防止するために、表面遮水工としてHDPE（高密度ポリエチレン）、EPDM（エチレンプロピレンゴム）等の遮水シート（ジオメンブレン）が底面及び斜面上に敷設されている。特に、我が国の処分場は適地難であるがために、埋め立て容量を確保する方策として谷間等を利用することから、処分場は急峻な法面を有し、斜面の割合が多いことが特徴となっている。

底面に敷設された遮水シートは厚さ 30~50cm 程度の保護土で覆われ土中に埋設されるが、斜面上に敷設された遮水シートは通常、保護土で覆われることなく、滑落しないように天端で固定されて設置されている。天端固定の方法としては、幅 30~50cm で、深さ 30~50cm の溝に遮水シートを埋め込み、溝中にコンクリートを打設する方法が一般的で、発生土を用いて埋め戻しを行う方法等もある。コンクリート固定工の場合、固定工の初動に相当する抵抗力はコンクリートの重量とほぼ一致する¹⁾ことが、実験的に明らかにされてきたが、固定工に作用する遮水シートの張力がこの値以上となると、固定工のコンクリートが浮き上がり、遮水シートに損傷が発生する場合がある。

固定工に作用する引張り力としては、遮水シートや保護マットの自重、強風による負圧揚力、ブルドーザー等の重

機の荷重による引込み力、廃棄物や保護土の締め固めによる引込み力などが考えられるが、中でも、温度低下に伴い遮水シートが収縮しようとするのを拘束するための力（熱応力）は、現場での経験では相当な力になるといわれている。すなわち、斜面上に敷設された遮水シートは多くの場合、直射日光や風雨に暴露されて用いられているため、その温度は天候に左右されて上昇・下降を繰り返す。遮水シートの温度は夏季晴天時の昼間では 70°C 以上に達し、冬季夜間には地域によって異なるが、-10°C 以下にまで低下することがある。日最大変化量は約 80°C になるといわれる。遮水シートの線膨張率は、例えばHDPEシートでは 1.9×10^{-4} 程度であるので、この温度変化に対するひずみ量は約 1.5% となる。ひずみ量が約 10% 程度で降伏点となり、引張強さ約 30MPa を持つことから、ひずみ量 1.5% に相当する張力は相当なものになる。

ところで、Koerner ら²⁾は屋外に設置した遮水シートの四季における温度や発生するしわ及び覆土工後の遮水シートの温度を計測し、黒色HDPEシートは夏季日中で最高 70°C まで温度上昇することを示している。Yazdani³⁾らは処分場に設置したHDPEシートの温度及びひずみを 3 年間計測し、法肩のひずみが法尻より大きく、増加することを報告している。さらに、温度変化が遮水シートの特性に与える影響を調べた研究として、Giroud⁴⁾は遮水シートの設計において温度環境が重要であるとしてHDPEシート

Table 1 Properties of geomembrane tested

Kind	HDPE	EPDM
Thickness (mm)	1.5	1.5
Density(g/cm ³)	0.95	1.20
Tensile Strength(MPa)	32.14	10.29
Elongation (%) (Yield)	860 (15)	550
Coefficient of Thermal Expansion, $\beta \times 10^4/\text{deg}$	1.9	1.6
Hardness (JIS A)	93	58

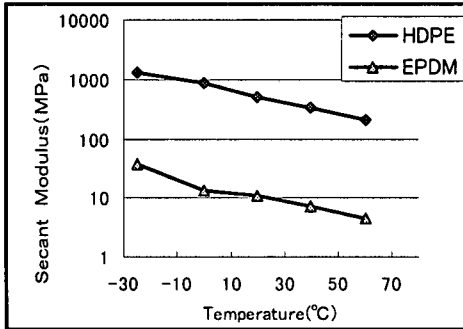


Fig. 1 Relation between temperature and 1%secant modulus

の温度が-20°Cから70°Cまで変化したときの応力ひずみ曲線を計測し、降伏点応力やそのひずみは温度によって大きく変化することを示し、その正規関係式を導いている。Kilius⁵⁾は温度と線膨張係数や接合強度の関係を報告している。Comer⁶⁾は、温度変化による凍結融解サイクルの遮水シートへの影響を報告し、遮水シートの種類によって強度や切断時の伸び率における変化が異なるとしている。また、筆者ら^{7), 8)}も各種シートの引張試験や割線弾性係数の温度依存性を計測し、数式化している。

このように遮水シートの温度環境に関する研究は種々なされているが、国内外を問わず、熱応力がどの程度であるのか、特に、シートの温度変形を拘束する力の源となっている覆土による摩擦力を考慮した評価研究はほとんど見当たらないのが実状である。

2. 遮水シートの特性

実験に用いた遮水シートは、国内の最終処分場の遮水ライナーとして用いられている遮水シートの中から代表的なHDPEシートおよびEPDMシートの二種類(厚さは共に1.5mm)を用いた。それぞれの特性をTable 1に示す。EPDMシートは1970年頃より用いられている遮水シートであり、HDPEシートは1980年頃より米国から導入されて用いられるようになった遮水シートである。

遮水シートの弾性係数と環境温度の関係について、HDPEシート及びEPDMシートを引張り速さ1mm/minで引

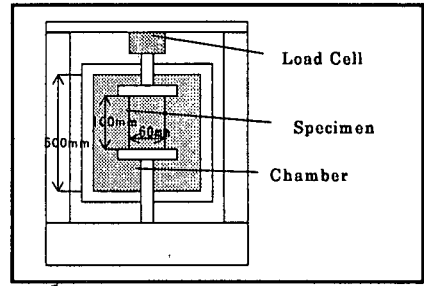


Fig. 2 Equipment of thermal stress indoor test

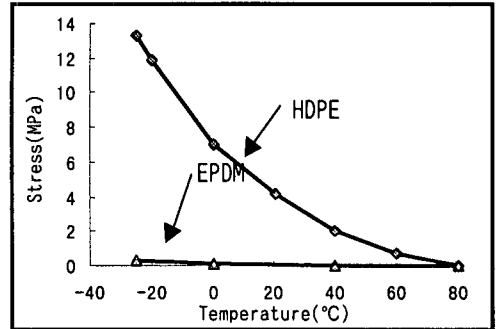


Fig. 3 Test results of thermal stress indoor test

張り試験したときの1%割線弾性係数に着目した関係をFig.1に示す。

1%割線弾性係数 E (MPa) の対数は温度 t (°C) とほぼ直線的な関係が見られ、次式で表わすことができる。

$$\text{HDPEシート} \quad E = 784 \cdot 10^{-0.0102t} \quad (1)$$

$$\text{EPDMシート} \quad E = 17.7 \cdot 10^{-0.0102t} \quad (2)$$

3. 室内熱応力実験

遮水シートの熱応力に関する基礎的な実験として、シートの両端を完全に拘束した状態で温度を低下させた時にシート内に発生する応力を測定し、弾性評価式との対応を検討した。

(1) 実験方法

Fig.2に示すように、引張試験機のかみ具を金属棒に接続して、一定の温度を維持することができる高さ500mmの恒温槽内に取り付け、かみ具の間隔が100mmになるように幅60mmの長方形の供試体を締め付けた。

恒温槽内の温度を80°Cとして約120分間保ち、荷重計(容量1960N)の初期値を読み、-25°Cまで約5°C/30minの速さで温度を低下させた時に発生する張力(熱応力)を測定した。

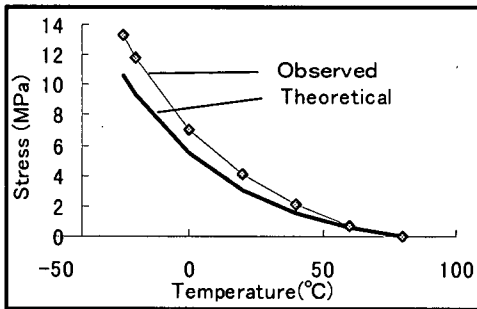


Fig. 4 Test result and theoretical value (HDPE)

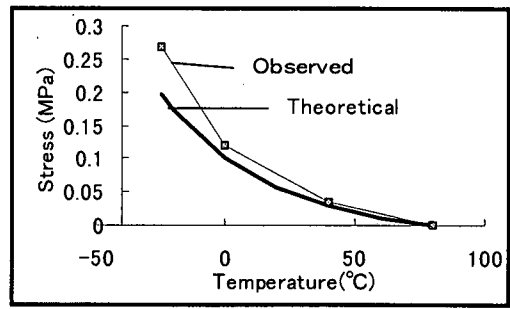


Fig. 5 Test result and theoretical value (EPDM)

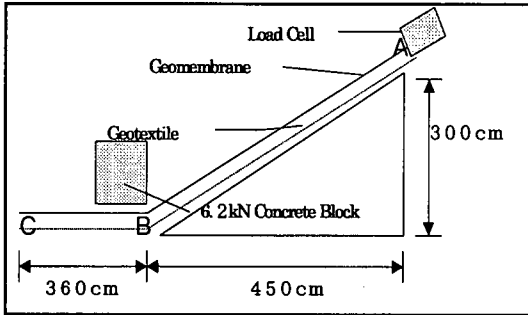


Fig. 6 Cut design of outdoor test (Case B)

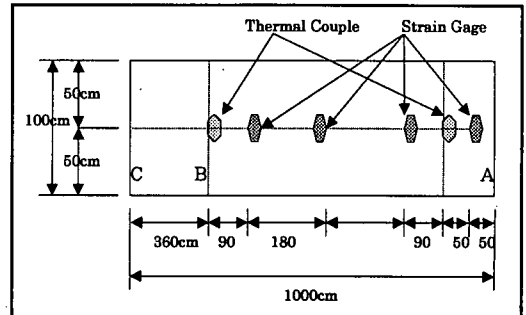


Fig. 7 Positions of sensors

(2) 実験結果

実験結果を Fig. 3 に示す。80°Cでセットした供試体の温度を下げていくと、HDPEシート、EPDMシートともに熱応力が発生している。温度が0°Cまで低下したときの熱応力はHDPEシートで7.0MPa、EPDMシートで0.12MPaとHDPEシートの方が58倍大きな値となっている。さらに、発生する熱応力は、温度が低下するに従って急激に増大することもわかる。

(3) 両端完全固定の熱応力評価式

温度が Δt 変化したとき、遮水シートの両端が完全に拘束されておれば、それに伴う熱応力 $\Delta\sigma$ (引張を正)は、その温度での遮水シートの弾性係数を E_t として

$$\Delta\sigma = -\beta \cdot \Delta t \cdot E_t \quad (3)$$

で表わされる。さらに、温度が t_a から t_b まで単調に変化するとき、遮水シートの弾性係数が式(1),(2)で示した温度依存性を示すとすると、この温度変化による熱応力 σ_{ab} は、

$$\sigma_{ab} = \int_{t_a}^{t_b} \Delta\sigma = -\int_{t_a}^{t_b} \beta \cdot E_0 \cdot 10^{-\alpha t} dt \quad (4)$$

$$\sigma_{ab} = -\beta \cdot E_0 \int_{t_a}^{t_b} e^{-2.302585 \alpha t} dt$$

$$= \frac{\beta \cdot E_0}{2.302585 \alpha} \left[e^{-2.302585 \alpha t} \right]_{t_a}^{t_b} \quad (5)$$

となる。ここに、 β は線膨張係数、 α は弾性係数の温度係数、 E_0 は0°Cでの弾性係数とする。

Fig. 4とFig. 5は、HDPEシートとEPDMシートについて、実験値と式(5)に基づき計算した理論曲線を対比して示したものである。これらの図より、HDPEシート及びEPDMシートの両方で、実測値が理論値を少々上回っている傾向がみられるが、ほぼ一致している。このことより、両端部を完全に拘束した条件では、遮水シートに発生する熱応力は式(5)で推定できることがわかる。そして、EPDMシートの熱応力がHDPEシートよりはるかに小さいのは、弾性係数の相異によるものであることも理解できる。

4. 屋外熱応力実験

(1) 実験方法

廃棄物最終処分場の斜面を想定して、Fig. 6に示すように高さ3m、勾配1:1.5の斜面に、厚さ10mmで単位面積重量が11.8N/m²の短繊維保護マットを設置し、その上に幅

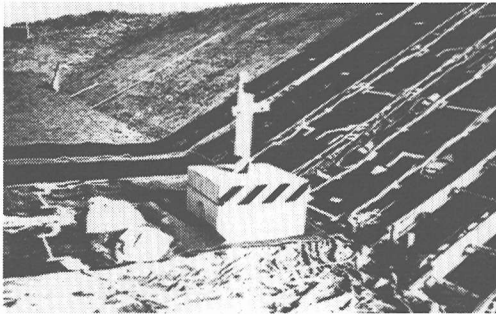


Fig. 8 Slope and concrete block (Case B)

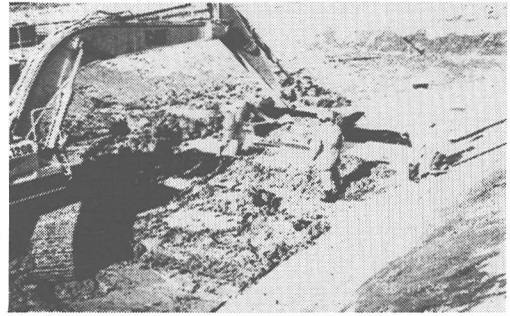


Fig. 9 Mounding on slope (Case C)

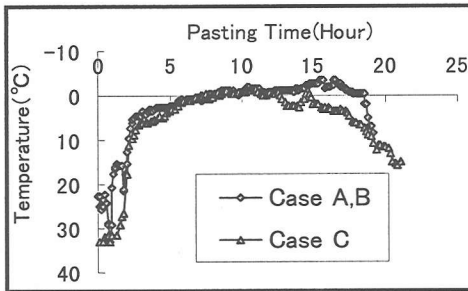


Fig. 10 Temperature of HDPE (Case A,B,C)

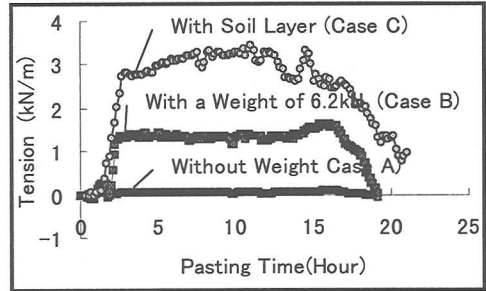


Fig. 11 Tension of HDPE (Case A,B,C)

1mのHDPEシート及びEPDMシートを設置した。法尻部においては保護マット、遮水シートとも水平に3.6m延長して敷いた。遮水シートの天端につかみ具を取り付け、つかみ具とコンクリートで根固めをしたH鋼との間に容量4.9kNの荷重変換器を介して接続した。HDPEシートについては、Fig.7に示すように、ひずみゲージを遮水シートの中心軸に沿って表裏2枚ずつ4個所に張り付け、さらに斜面の2個所に熱電対を設置した。これらはスイッチボックスを経由してデータロガーに接続し、さらにパソコンに接続してハードディスクに記録できるようにした。

熱応力の計測は、法尻に敷かれたシートへの鉛直荷重条件を変化させて実施した。すなわち、まず、HDPEシートを対象として、Fig.6のB-C間上に荷重を与えない場合(ケースA)と、Fig.6のB-C間上に6.2kNのコンクリートブロック(縦横約70cm、高さ約60cm)を設置した場合(ケースB、Fig.8参照)について、平成8年11月22日の正午から翌朝9時まで計測した。次に、HDPEシートとEPDMシートを対象として、B-C間に関東ロームで厚さ1mの土層を設け(ケースC、Fig.9参照)、平成8年11月27日午後2時から翌朝9時まで計測した。覆土層は、巻き出し厚50cmごとに重量63.7kNブルドーサーで5往復転圧した。現場密度試験の結果は 15.2 kN/m^3 であった。

(2) 実験結果

実験ケースA、B及びCについて、経過時間とHDPEシート法肩部の表面温度の関係をFig.10に、また、荷重変換器で計測したHDPEシートの張力と経過時間の関係をFig.11に示す。ケースA及びBでは、HDPEシートの表面温度は試験を開始した11月22日正午には 21.6°C であり、その後直射日光を受けて、最大 31.8°C まで上昇している。夕方から温度が低下し、翌日の午前4時頃に -3.5°C まで低下して、それ以降は上昇している。また、ケースCでは、11月28日午後2時に試験を開始した時のHDPEシートの表面温度は 33.1°C で、その後徐々に低下し、11月29日午前1時には -1.7°C となり、その後上昇している。Fig.10とFig.11を比べると、表面温度が低下すると6.2kNのコンクリートブロックを上載したHDPEシート(ケースB)及び厚さ1mの土層を上載したHDPEシート(ケースC)に張力が発生していることがわかる。ケースB、Cで発生した張力の大きさは異なるが、ともに時間経過に伴う温度変化の形状に近似していることから、張力の発生が温度の影響を受けていることが明らかである。そして、ケースA、B及びCの実験で発生した張力を比較すると、土層荷重のケースCにおける 3.44 kN/m と最も大きく、次いでコンクリートブロック荷重時の 1.65 kN/m 、無荷重の 0.108 kN/m の順となっている。

EPDMシートを対象とした場合、Fig.12に1mの覆土を設けたケースCにおける経過時間と表面温度の関係を、

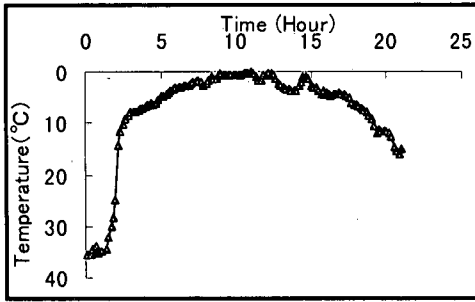


Fig. 12 Temperature of EPDM (Case C)

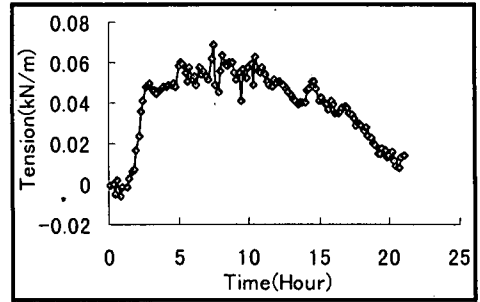


Fig. 13 Tension of EPDM (Case C)

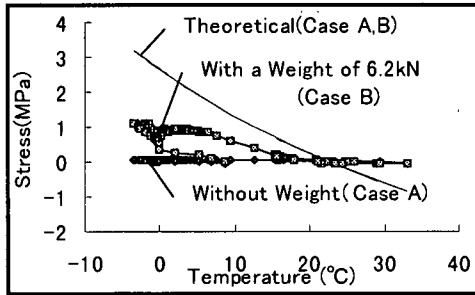


Fig. 14 Thermal stress of HDPE (Case A,B)

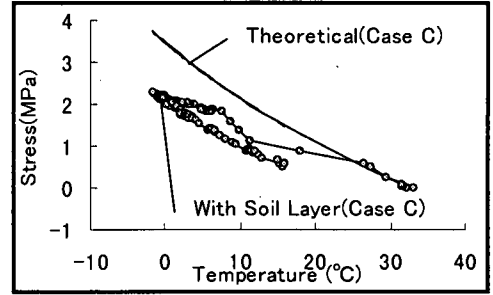


Fig. 15 Thermal stress of HDPE (Case C)

Fig.13 にはその時の経過時間と張力との関係を示す。HDPEシートと同様に、EPDMシートの場合でも、温度低下により張力が発生していることが明らかである。しかし、HDPEシートで最大 3.44kN/m であったのに対し、EPDMでは最大 68N/m であり、応力に換算するとそれぞれ 2.29MPa と 0.0453MPa となり、EPDMシートはHDPEシートに比較して五十分の一の値であった。

5. 屋外実験結果の解析

(1) 拘束力としての摩擦抵抗力

HDPEシートと保護マットの摩擦係数 μ については、コンクリートブロックの荷重による鉛直応力(0.142kN/m²)及び1m覆土による鉛直応力(0.152kN/m²)を考慮して、せん断力 τ と鉛直応力 σ の関係式 $\tau=0.1183\sigma+0.0264$ より⁹⁾、応力 σ が0.15kN/m²の時の摩擦係数を算出して、 $\mu=0.29$ とする。

ケースAの無載荷の場合、拘束力は遮水シートとその下の保護マットとの摩擦力である。遮水シートの単位面積重量を14N/m²、底部部3.6m部分での摩擦力は $14 \times 3.6 \times 0.29=14.6$ N/mとなる。これが斜面方向の力の水平分力に相当するので、斜面方向の力は $14.6/\cos(33.7)=17.5$ N/mである。斜面部5.4m部分での摩擦力は、 $14 \times 5.4 \times \cos(33.7) \times 0.29=18.2$ N/mであるが、上端を固定されて斜面上にあるシートの摩擦力は、ある温度で静置されてい

るときと温度降下により収縮するのを防ぐときには、その方向が逆であるので、シートが収縮しようとするときにシート全体に作用する摩擦抵抗力は $17.5+18.2 \times 2=53.9$ N/mとなる。この値は、両端が完全拘束にあるとした式(5)に基づき計算される3.1kNの約58分の一である。

次に、ケースBの抵抗力は、重量6.2kNのコンクリートブロックの載荷に伴う摩擦力増分を、ケースAでの摩擦抵抗力に加えて評価すればよい。コンクリートブロック重量に摩擦係数0.29を乗じると、摩擦力は1.80kNとなる。この力は水平方向に作用するので、斜面方向には2.16kNの力となる。従って、ケースBでの摩擦抵抗に伴う拘束力は $2.16+0.05=2.11$ kN/mとなる。この値は完全拘束条件の仮定で計算される3.1kN/mより小さいが、計測された張力1.65kN/mと比べると約128%である。

ケースCでは、水平に敷かれたシート上方の土層重量が54.7kN/mであり、水平方向の摩擦抵抗力は15.9kN/m、斜面方向の摩擦抵抗力は19.1kN/mとなる。また、斜面上の土層重量は11.4kN/mであるので、斜面方向の摩擦抵抗力は3.31kN/mである。したがって、ケースCでの斜面方向の合計の摩擦抵抗力は22.4kN/mとなり、完全拘束条件として計算される3.1kN/mと比較しても7.2倍大きい。

(2) 拘束条件の熱応力及びひずみへの影響

HDPEシートについて、計測された発生応力と式(5)

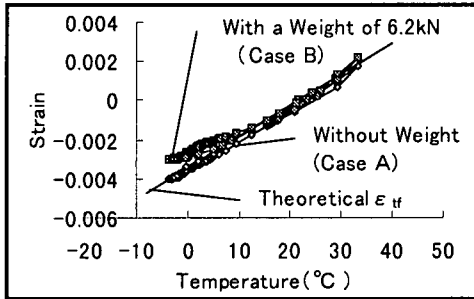


Fig. 16 Relation between temperature and strain(Case A,B)

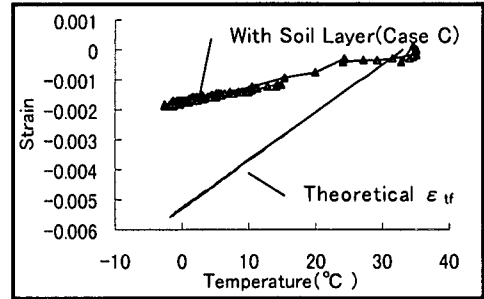


Fig. 17 Relation between temperature and strain(Case C)

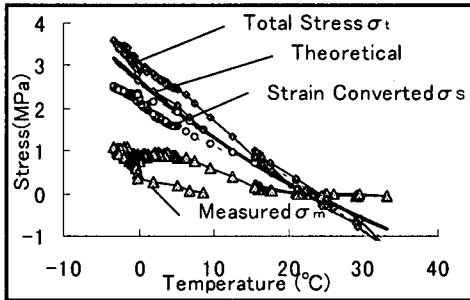


Fig. 18 Analysis of thermal stress(Case B)

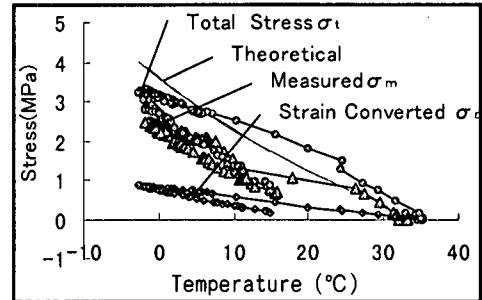


Fig. 19 Analysis of thermal stress(Case C)

に基づいて算出した理論曲線を、ケースA、Bについて Fig.14 に、ケースCについて Fig.15 に示す。屋外実験では実測値が計算値を大きく下回り、一致していないことがわかる。

ケースBのコンクリート載荷では、温度が 5°C以上の範囲で温度低下に伴い応力が増加しているが、5~0°Cの範囲では温度低下による応力の増加傾向が見られず、横ばいとなっている。ケースCの土層載荷では、温度が 10~30°Cの範囲はその前後に比較して温度低下に伴う応力の増加割合が小さい傾向がみられるが、全般に温度低下に伴う応力の増加傾向がみられる。コンクリート載荷と土層載荷の場合を比較すると、土層載荷の方が理論曲線に近い。

ここで、式 (5) に基づく計算値との対応が良かった室内実験と Fig.14 及び Fig.15 に示した屋外実験を比較すると、拘束条件が異なっている。すなわち、室内実験では供試体の両端部をつかみ具で拘束していたのに対して、屋外実験では上方端部は拘束しているが、他端は無載荷あるいはコンクリートブロックまたは厚さ 1mの覆土による載荷であり、これらの荷重に起因する摩擦抵抗力により拘束されている。

供試体の両端部が完全に拘束されている場合、環境温度が低下すると、遮水シートには収縮ひずみが生じないで熱応力が生じる。しかしながら、供試体の一方の端部が摩擦抵抗力によって拘束される場合には、摩擦を発揮するのに必要なシートと土との相対変位が必要であり、そのために

シートには収縮ひずみが生じると考えられたので、遮水シートのひずみを測定した。

Fig.16 と Fig.17 は温度変化に伴う遮水シート法肩部のひずみの変動を示したものである。なお、温度変化に伴いひずみゲージ自体も伸縮するので、シートの真の発生ひずみ ϵ_t の評価に関しては、ゲージからの計測ひずみ ϵ_m を式 (6) に示す温度補正式¹⁰⁾ に基づき補正した。また、図にはシート端部が完全自由な場合に生じるであろう温度 t におけるひずみ ϵ_{tf} 、すなわち $\epsilon_{tf} = \beta (t_0 - t)$ で計算される理論値も示してある。ここに、 β は線膨張係数である。

$$\epsilon_t = \epsilon_m + 0.00065 \cdot (t_0 - t) \quad (6)$$

Fig.16 より、無載荷(ケースA)の場合、計測されたひずみは理論曲線と一致している。コンクリート載荷(ケースB)の場合、計測されたひずみは 10°C以上の温度範囲では理論値に比較的近い値であるが、10°C以下の範囲では絶対値で比較すると計測値が理論値より幾分か小さい。さらに、Fig.17 示した土層載荷(ケースC)の場合には、計測値が理論値に比較して著しく小さいことがわかる。

すなわち、シート上に載荷がない場合ではひずみの対温度変化は完全自由端条件での計算値とほぼ一致しているが、シート上に何らかの載荷がある場合、生じているひずみは無載荷よりも小さな値となっている。前述したとおり、載荷重によって摩擦力が発揮され、これが拘束力となるので

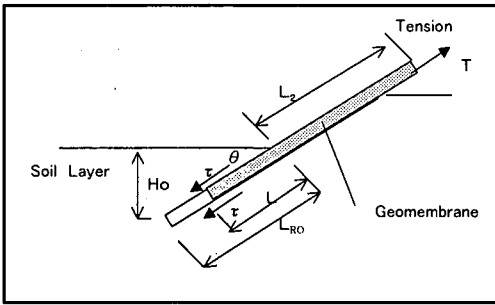


Fig. 20 Schematic diagram for forces of geomembrane on slope

あるが、摩擦力発現のためには土とシートに間に相対変位が生じる必要があり、この相対変位を生じるのに必要なひずみがシート内に発生しているのである。

(3) 発生した熱応力の解析

計測された発生応力を σ_m 、計測されたひずみに相当する換算応力を σ_s とし、これらの和を全応力 σ_t とすると、これらの関係は式(7)となる。

$$\sigma_t = \sigma_m + \sigma_s \quad (7)$$

ここで、算出したひずみを換算応力 σ_s に換算する方法として、温度変化に伴うひずみの変化分に、その平均温度での弾性係数を乗じて増加応力分を求め、累計して評価した。

コンクリート荷重(ケースB)及び土層荷重(ケースC)の場合について、温度変化に伴う拘束応力 σ_m 、換算応力 σ_s 及び全応力 σ_t をFig.18とFig.19に示す。図には式(5)で求めた理論値も加えて示す。理論値と全応力 σ_t を比較すると、コンクリート荷重の場合にはほぼ一致している。土層荷重の場合にも、5℃以下の低温域で全応力が理論値を少々上回っているが、比較的一致している。

このように、式(7)に示す関係が実験的に成立することから、全応力 σ_t が式(5)で評価できることから、斜面に設置した遮水シートの天端に発現する熱応力 σ_m は、端部が完全拘束にあるとして式(5)で計算される全応力 σ_t の値から換算応力 σ_s を除算することで推定できることがわかる。

(4) 引抜き弾性論と熱応力について

ケースCでは、土層に覆われていない固定部付近の遮水シートに熱応力が発生すると、それは土層に埋設された部分の遮水シートへの引抜き力として作用する。そこで、この現象を引抜き試験に置き換えて解析を行う。

今泉ら¹¹⁾は、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 で先端の斜面角が θ の土に覆われて

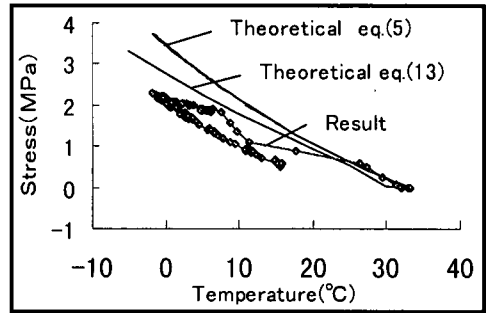


Fig. 21 Analysis by elastic theory

いるとき、ジオメンブレン先端に引抜き力 T が作用したときのジオメンブレン先端の引抜き量 D を評価する弾性式を提案している。本実験では斜面法線が重力の作用方向と θ なる角を有していることを考慮すると、引抜き量 D を表わす式は式(8)のようになる。

$$D = \frac{2 \cdot (T/b)^{0.5}}{3 \cdot E_t \cdot t_g \cdot (\gamma_t \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \theta \cdot \mu)^{0.5}} \quad (8)$$

ここに T : 引張り力 (N)

b : 遮水シートの幅 (m)

E_t : 温度 t ℃におけるシートの弾性係数 (Pa)

γ_t : 覆土の単位体積重量 (N/m³)

θ : 斜面の傾斜角

μ : 遮水シートと上・下面材料との平均摩擦係数

t_g : 遮水シートの厚さ (m)

ところで、引張り力は $T = \sigma_m \cdot t_g \cdot b$ であるので、式(8)は、次のようになる。

$$D = \frac{2}{3 \cdot E_t} \left(\frac{t_g}{\gamma_t \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \theta \cdot \mu} \right)^{0.5} \cdot \sigma_m^{1.5} \quad (9)$$

この引き抜き量 D は、覆土がなされていない斜面部シート(長さ L_2)の収縮量と等しいはずである。したがって、実験における法肩部で計測される収縮ひずみ ϵ_t が、 L_2 において均一に分布すると仮定すれば、収縮量 D は

$$D = \epsilon_t \cdot L_2 \quad (10)$$

である。式(9)と式(10)より、収縮ひずみ ϵ_t と拘束応力 σ_m との関係は

$$\epsilon_t = \frac{2}{3 \cdot L_2 \cdot E_t} \left(\frac{t_g}{\gamma_t \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \theta \cdot \mu} \right)^{0.5} \cdot \sigma_m^{1.5} \quad (11)$$

で表わされ、このひずみによる換算応力 σ_s は

$$\sigma_s = \epsilon_t \cdot E_t = \frac{2}{3 \cdot L_2} \left(\frac{t_g}{\gamma_t \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \theta \cdot \mu} \right)^{0.5} \cdot \sigma_m^{1.5} \quad (12)$$

となる。式(12)を式(7)に代入し、かつ、式(5)

を用いると、温度が t_a から t_b に変化したとき、シート端部で計測される拘束力(熱応力) σ_m は、

$$\frac{\beta \cdot E_0}{2.30258 \cdot \alpha} \left[e^{-2.30258 \alpha t_a} - e^{-2.30258 \alpha t_b} \right] \\ = \sigma_m + \frac{2}{3 \cdot L_2} \left(\frac{t_g}{\gamma_t \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \theta \cdot \mu} \right)^{0.5} \sigma_m^{1.5} \quad (13)$$

を解いた値となる。

実験ケースCのHDPEシートにおける式(13)の諸数値は、 $\beta=1.9 \times 10^{-4}$ 、 $E_0=784.1 \text{MPa}$ 、 $\alpha=-0.0102$ 、 $t_a=33.1^\circ\text{C}$ 、 $L_2=3.6 \text{m}$ 、 $t_g=0.0015 \text{m}$ 、 $\gamma_t=15.2 \text{kN/m}^3$ 、 $\theta=33.7^\circ$ 、 $\mu=0.36$ (HDPEシート-土との摩擦係数=0.43, HDPEシート-保護マットとの摩擦係数=0.29)であるので、温度 t_b を変化させたときの σ_m が計算される。

Fig.21は温度 t_b と計算され σ_m との関係を示したものであるが、同図にはFig.14に示した σ_m の計測値ならびに完全拘束条件での式(5)に従う計算値も示しているが、摩擦を發揮するのに必要な変形量を考慮した熱応力式

(13)の値は計測値より幾分大きい値を示しているものの、完全拘束条件での計算値よりもはるかに実測値に近い値を与えている。

6. まとめ

廃棄物最終処分場の斜面に敷設された遮水シートに発現する熱応力を実験的に調べるために、室内実験及び屋外実験を実施し、遮水シート天端に作用する張力及びびずみについて考察した。さらに、拘束力としての摩擦力が發揮するに必要なシートの変形量を考慮した熱応力式を導いた。本研究によって得られた主な結論を以下に示す。

(1) 両端部を完全拘束した遮水シートの熱応力は、弾性係数の温度依存性を考慮した式(5)で評価できる。そして、EPDMシートで発生する熱応力はHDPEシートと比較すると5/8分の一と小さい。

(2) 廃棄物処分場斜面に敷設されたシートの天端に発生する熱応力は、シート上の荷重とシート上下面での摩擦係数との積で表わされる摩擦抵抗力の大きさが上限値である。

(3) シート上端部で計測される拘束応力とその近傍で計測したびずみからの換算応力を加えた全応力は完全拘束条件に基づく熱応力式(5)の計算値と良く一致する。

(4) 引抜き弾性論を援用して、摩擦を發揮するに必要な変形量を考慮した熱応力評価式(13)は、計測値にかなり近い値を与える。

謝辞：本研究は、最終処分場技術システム研究会 設計ワーキング分科会及びシート固定工分科会が実施したフィー

ルドテストで造成した斜面を利用して行ったものである。フィールドサイトを提供し、造成及び計測にご協力くださった住友建設株式会社 東京本社 ハツ木ニュータウン作業所野崎所長と脇主任、計測を担当してくれた元宇都宮大学学生 高本賢治君、ならびに研究会関係各位に深く感謝致します。なお、本研究をまとめるに際しては、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(代表：今泉繁良、課題番号09555166)の援助を受けました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 坪井正行,土居洋一,今泉繁良:遮水ライナーの固定能評価に関する屋外模型実験,国際ジオシンセティックス学会日本支部第11回ジオシンセティックシンポジウム発表論文集, pp.26~36, 1996.
- 2) Koener, G.R. and Koener, R.M.: Temperature Behavior of Field Deployed HDPE Geomembranes, Geosynthetics'95, pp.921-937, 1995.
- 3) Yazdani, R.: Long Term In situ Strain Measurements of a High Density Polyethylene Geomembrane in a Municipal Solid Waste Landfill, Geosynthetics'95, pp.893-905, 1995.
- 4) Giroud, J.P.: Mechanical Design of Geomembrane Applications, Geosynthetics'93, pp.1455-1467, 1993.
- 5) Darryl E. Kilius: Cold Temperature Performance of Polypropylene Geomembranes and Seams, Geosynthetic Liner System, Industrial Fabrics Association International, pp.197-207, 1994.
- 6) Comer, A.L.: Effect of Freeze Thaw Cycling on Geomembrane Sheets and Their Seams, Geosynthetic '95, pp.853-866, 1995.
- 7) 宮地秀樹,坪井正行,今泉繁良:温度変化が各種遮水シートの引張り特性に与える影響,国際ジオシンセティック学会日本支部,第11回ジオシンセティックシンポジウム発表論文集, pp.1~10, 1996.
- 8) 今泉繁良,坪井正行,高橋梧,横山幸満:温度変化がHDPEジオメンブレンの変形挙動に与える影響,土木学会論文集, No.541/III-35, pp.233-240, 1996.
- 9) 坪井正行,今泉繁良,宮地秀樹:遮水シートの層間摩擦抵抗 廃棄物学会第7回研究発表会講演概要集, pp.706-709, 1996.
- 10) 中村大助,今泉繁良,横山幸満:温度変化に伴うジオメンブレンの挙動,土木学会関東支部第23回技術研究発表会講演概要集, pp.504~505, 1996.
- 11) 今泉繁良,高橋梧,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) 今泉繁良,野本哲也,坪井正行,横山幸満:ジオシンセティックス-土との原位置摩擦特性評価試験,国際ジオシンセティック学会日本支部,第11回ジオシンセティックシンポジウム発表論文集, pp.17~25, 1996.

(1997.12.11 受付)

EVALUATION OF THERMAL STRESS OF THE GEOMEMBRANE AT LANDFILLS

Masayuki TSUBOI, Hideki MIYAJI, Tetsuya NOMOTO and Shigeyoshi IMAIZUMI

The top of geomembranes should be anchored firmly not to slip out. It is known that the thermal stress which occurs with the decrease in temperature should be a large portion of the force, which affects the anchoring section. Reliable equations for evaluating thermal stress cannot be found in literature. The authors conducted the chamber test under the condition of confining with both ends of a sample and the large scale field test and evaluated the relationship between the temperature and thermal stress. As the result, it is found that (1) the thermal stress is much different with the type of a geomembrane, (2) the thermal stress of the test result under the condition of confining with both edges of a sample can be evaluated with the equation of the theory of elasticity,(3) when a confining force occurs by the weight of a soil layer, the thermal stress is smaller than the thermal stress under the condition of a strict confining. And the evaluating equation was presented .