

D 4 - 7

ひずみエネルギー密度関数を用いた遮水シートの二軸引張変形挙動の検討

○ (正) 狩野真吾¹⁾、(正) 近藤三樹郎²⁾、小田勝也³⁾

1) 東北大学大学院環境科学研究科、2) 土木シート技術協会、3) 国土技術政策総合研究所

1. はじめに

廃棄物最終処分場に敷設される遮水シートの性能値を規定する場合、遮水シートに発生する応力状態を考慮し、それを再現できるような試験方法および解析手法によって検討がなされるべきである。これに対し、設計に用いられる遮水シートの性能値は一軸引張変形による検討が主となっている。実現場における遮水シートは地盤の不等沈下や敷設面不陸への追随、突起物の貫入等、二次元的な変形挙動を示す場合が少なくないが、このような二軸応力下での遮水シートの性能値は設計に反映されていないのが現状である。

一方、ゴム材料の力学を対象とした研究分野では、ゴム材料のひずみエネルギー密度関数（以下、W 関数と記す。）の関数形が明らかにされ、ゴム材料の二軸引張変形時における応力ひずみ挙動の W 関数による検討がなされている¹⁾。これに対し、W 関数による評価手法が遮水シートの設計に用いられた例はない。遮水シートの力学的性質を正しく把握し、その結果が遮水シートの設計に反映されることは、管理型廃棄物最終処分場の信頼性設計法の構築に必要な検討事項である。

そこで、本研究では、ゴム材料の W 関数に関する上述の検討例を基礎にして、既往の研究成果である一軸拘束二軸引張試験結果^{2,3)}を用いて遮水シートの W 関数を求めた。さらに、二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線について実験値と W 関数を用いた計算値とを比較することにより、W 関数による遮水シートの応力-ひずみ曲線の推定精度を検討した。



図-1 二軸引張試験機

2. 試験内容

(1) 二軸引張試験機

二軸引張試験は大阪府立産業技術総合研究所所有の二軸引張試験機を使用して行った。試験機の写真および概略図を図-1、図-2 にそれぞれ示す。この試験機は水平軸、鉛直軸が個別にコンピュータ制御されている。試料のつかみ部は試料の1辺あたり各4個のチャックで均等に把持し、試験時に各チャックが試験片の自由変形に応じて連動し移動することが可能である。

(2) 試験に使用した材料

二軸引張試験の供試体には、海面処分場への施工実績が多いポリ塩化ビニル系シート（軟質 PVC：厚さ 3.0 mm）、および陸上処分場で施工実績のあるポリエチレン系シート（HDPE：厚さ 1.5 mm, SMePE：厚さ 3.0 mm）の計 3 種類の材料を使用した。供試体の寸法と形状は一辺が 10 cm の正方形とした。

(3) 試験方法

試験方法は、供試体を二軸引張試験機の試料つかみ部に設置し、チャックで均等に把持した後、50 mm/min の一定速度で二軸方向に等しい荷重で引張し、供試体が破断するまでの荷重と変位を計測した。その際、荷重はロードセルで測定し、変位はチャック間距離を測定した。なお、試験室の温度は 23°C に保ち、また、試験回数は 1 回とした。

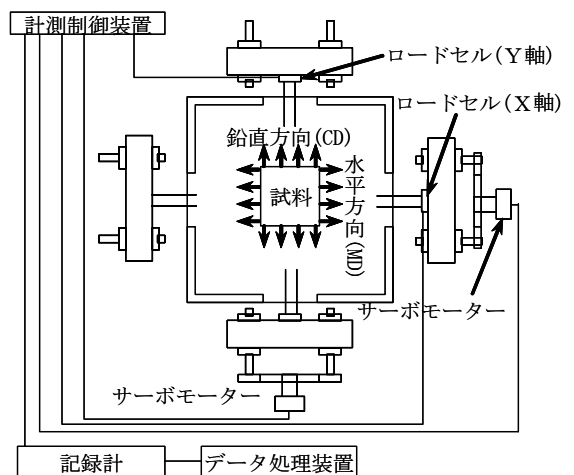


図-2 二軸引張試験機概念図

3. 二軸引張試験結果

【連絡先】〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20 東北大学大学院環境科学研究科

狩野真吾 Tel:022-795-7415 FAX:022-795-6336 e-mail:s-kano@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

【キーワード】二軸引張試験、ひずみエネルギー密度関数、応力-ひずみ曲線

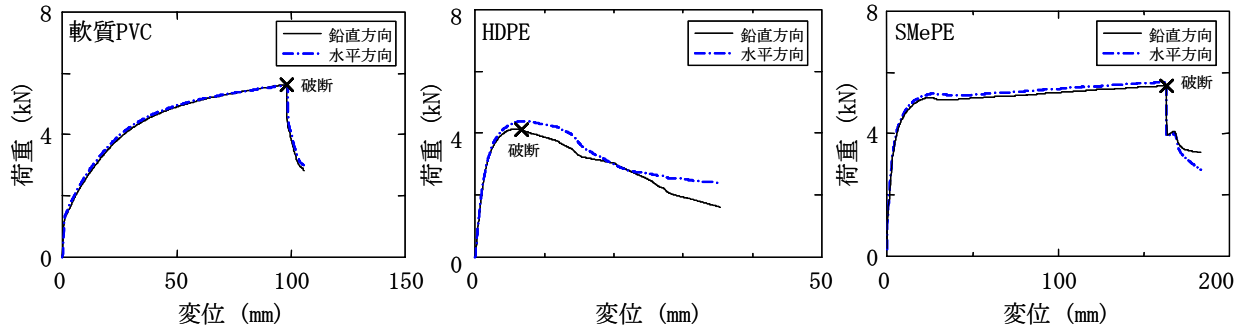


図-3 二軸引張変形時の荷重－変位曲線

(1) 破断挙動

二軸引張試験における供試体の破断は、供試体のつかみ部分（角部）が引き裂かれることにより発生した。これは、局所変形による応力集中が隣り合うチャック間において発生したためと考えられる。そのため、本試験における供試体の破断時性能は供試体が本来有する二軸引張変形時の破断時性能とは異なる。

(2) 荷重－変位曲線

横軸に変位、縦軸に荷重をプロットした結果を図-3に示す。図中の実線は鉛直方向の挙動を、一点鎖線は水平方向の挙動をそれぞれ示している。また、図中の×印は破断点を示している。鉛直方向と水平方向の曲線の傾向はどの供試体も同じことから、供試体は両軸方向に均等に変形したことがわかる。軟質PVCは変位に対して荷重が徐々に増加したのに対し、ポリエチレン系供試体であるHDPEとSMePEは変形初期に急激に荷重が増加した。この荷重増加傾向は、一軸引張変形時や一軸拘束二軸引張変形時の挙動と類似するものである。

4. 考察

(1) 一軸拘束二軸引張試験結果を考慮したW関数の決定

ゴム材料のW関数を求める場合、一軸拘束二軸引張試験がしばしば行われる。これは、一軸拘束二軸引張変形が二軸方向に均等に変形する均等二軸引張変形と一軸引張変形の間位置する変形挙動であり、一軸拘束二軸引張試験から得られるW関数形を二軸変形全体の代表的平均値として用いることができるためである。実際、二軸引張試験は一軸引張試験に比較して比較的手間がかかることから、実験が比較的容易に行える一軸拘束二軸引張試験によるW関数の推定が行われている¹⁾。

そこで、本研究では、上記の手法を基に、一軸拘束二軸引張試験結果^{2,3)}から求めた各種遮水シートのW関数を用いて、遮水シートの均等二軸引張変形時の応力－ひずみ曲線を作成し、実験結果と比較した。

変形時に非圧縮性を仮定すると、一軸拘束二軸引張変形時の応力、伸張比とひずみエネルギー密度関数の偏微分との関係は次式のように表される⁴⁾。

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right), \quad \sigma_2 = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right), \quad I_1 = I_2 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + 1 \quad \dots(1)$$

ここで、 σ_1 ：伸張軸方向の引張応力、 σ_2 ：固定軸方向の引張応力、 λ_1 ：伸張軸方向の伸張比、 I_1, I_2 ：不変量。

また、均等二軸引張変形時の応力の式は以下のように計算される⁴⁾。

$$\sigma = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^5} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right), \quad I_1 = 2\lambda^2 + \lambda^{-4}, \quad I_2 = \lambda^4 + 2\lambda^{-2} \quad \dots(2)$$

ここで、 σ ：引張応力、 λ ：伸張比。

一軸拘束二軸引張試験での実測値である $\sigma_1, \sigma_2, \lambda_1$ を式(1)に代入することにより、 I_1 と $\partial W/\partial I_1$ 、および I_2 と $\partial W/\partial I_2$ の関係が求まる。

(2) W関数を用いた応力－ひずみ曲線の推定精度について

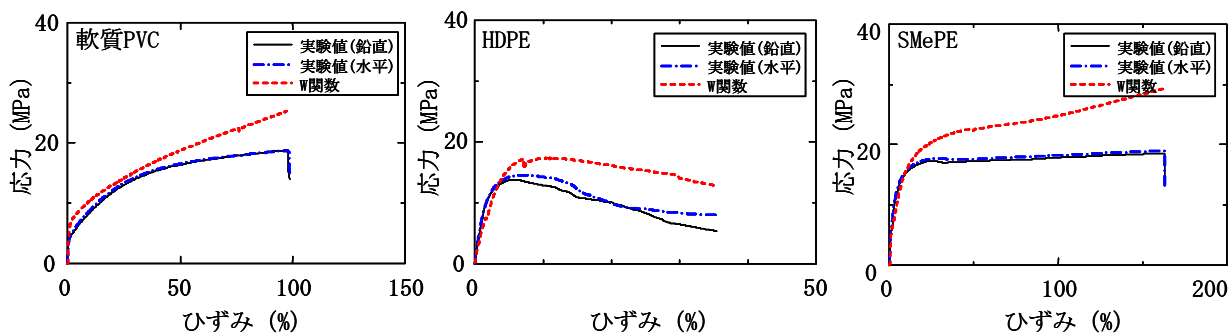


図-4 二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線に関する実験値とW関数による計算値との比較

上述の方法で求められた $\partial W/\partial I_1$, $\partial W/\partial I_2$ を λ の実験値とともに式(2)に代入し、二軸引張変形時の応力を計算した結果を図-4 に示す。図中の破線は計算値を、実線および一点鎖線は実験値をそれぞれ示す。なお、横軸は伸張比をひずみに変換して表示している。また、実験値の応力は測定値である荷重を断面積で除して計算し、ひずみは初期の供試体幅に対する伸び率を計算した結果である。

実験値と計算値とを比較した結果、どの供試体も低ひずみ側では両者の傾向はよく一致したが、高ひずみ側では大きなずれが生じた。その理由としては、①二軸引張変形では伸張比の2乗の項が $\partial W/\partial I_2$ にかかるため、高ひずみ側では小さな誤差が無視できなくなった、②W関数は物質を弾性体と仮定しているが、高ひずみ側では供試体の非弾性的性質が無視できなくなった、等が考えられる。軟質PVCに比べ、ポリエチレン系シートの方がその傾向が顕著だった。計算値と実験値の応力の差異が実験値に対してそれぞれ30%、20%、10%以内となるひずみの上限値をまとめたものを表-1 に示す。これによると、軟質PVCでは42%、HDPEでは4%、SMePEでは15%までのひずみ領域に対して、W関数は応力を10%以内の誤差の精度で推定できるということが出来る。ここで、実際の廃棄物海面処分場において遮水シートに局所的な二軸応力が作用すると考えられる敷設面不陸への追従性を土槽実験により検証した結果、静的な環境下で不陸に追従する軟質PVC製遮水シートに発生したひずみは最大でも15%程度であった⁵⁾。この結果を考慮すると、たとえば軟質PVCの裏込不陸への追従性を検討する場合、W関数による推定手法は十分に適用可能であると考えられる。

表-1 計算値と実験値の応力の誤差に対応するひずみの上限値 (%)

応力の誤差	軟質PVC	HDPE	SMePE
10%以内	42	4	15
20%以内	64	7	27
30%以内	88	9	40

5. まとめ

本研究では、管理型廃棄物最終処分場に敷設される遮水シートを対象とした二軸引張試験を行った。さらに、W関数を用いて遮水シートの二軸引張変形時の応力ひずみ挙動の評価を試みた。その結果、二軸引張変形時のW関数による応力-ひずみ曲線の推定精度が明らかになった。今後は、保護マットの二軸引張変形挙動、および遮水シートと保護マットを重ね合わせた時の二軸引張変形挙動について検討する予定である。なお、本研究の成果の一部は土木シート技術協会が大阪府産業技術総合研究所に委託した研究の結果を活用したものである。

参考文献

- 1) 山下義裕, 川端季雄: 補強ゴムのひずみエネルギー密度関数の近似式, 日本ゴム協会誌, Vol. 65, No. 9, pp. 517-528, 1992.
- 2) 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎: ひずみエネルギー密度関数を用いた管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの変形挙動評価, 国土技術政策総合研究所資料, No. 307, 12p, 2006.
- 3) 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎: ネッキング応力を考慮した遮水シートの接合部強度に関する実験的検討, 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 2006 (印刷中).
- 4) 深堀美英: 設計のための高分子の力学, 技報堂出版, 384p, 2000.
- 5) 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明: 管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの敷設面不陸に対する変形追従性, 海洋開発論文集, Vol. 20, pp. 809-814, 2004.