

最終処分場に敷設された遮水シートの 許容局所沈下量

宇佐見 貞彦¹・今泉 繁良²・葛巻 賢二³

1 八千代エンジニアリング株式会社 (〒153-8639 東京都目黒区中目黒 1-10-23)

2 正会員 宇都宮大学大学院工学研究科 教授 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

3 学生会員 宇都宮大学大学院工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

廃棄物の最終処分場に遮水材として敷設されている遮水シートは、基盤の不等沈下に伴って変形し、引張ひずみが生じる。本論文では、上載圧、下部保護砂層の厚さ及び遮水シートの種類を変えた落とし戸模型実験を行い、これらが沈下形状と遮水シートに発生するひずみ分布に与える影響について把握し、修正 Trough モデルで仮定された下部保護砂層のせん断破壊面の傾斜角を確認した。次に、アーチ効果により沈下部直上の遮水シートに作用する土圧の低減現象が生じていることを確認した。そして、このアーチ効果と遮水シートの応力-ひずみ曲線の非線形性も勘案した非線形修正弾性モデルを提案し、遮水シートに生じる軸ひずみを計算してその精度を検証した。さらに、このモデルに基づき最終処分場に敷設する遮水シートの許容局所沈下量を提案した。

Key Words : waste landfill, trapped door test, shear-failure angle, arching effect, tensile strain, acceptable settlement

1. まえがき

廃棄物最終処分場において、降雨は廃棄物層に染み込み汚染された浸出水となり、やがて底部に敷設された集排水設備を通して水処理施設に集まる。この浸出水の地下水への漏洩防止のため遮水工が設置される¹⁾。

最終処分場における遮水工には、ジオメンブレンが多く使用されている。遮水シートとしてジオメンブレンが我が国で最初に用いられたのは 1970 年代である。これ以降、ほとんどの最終処分場でジオメンブレンによる遮水シートが用いられている。

埋立地における遮水シートは地下水汚染を防止するための重要な部材であるにも関わらず、その挙動が不明のまま経験則で設計され、経験的に 1.5mm 厚さのものが使用されてきた。また、遮水シートが数百%もの伸びを有する材料であることから、遮水シートの保護対策や地盤の沈下対策なしで設置されるケースも多かったため、損傷事故²⁾も発生してきた。特に、1990 年代に入るとモデル的な最終処分場といわれていた東京都下の最終処分場において遮水シートの損傷による地下水汚染疑惑が世論を賑わし³⁾、全国的な規模で遮水シートに対する不信感が高まった。

その後、我が国では二重遮水工の敷設や保護層設置の

義務づけ⁴⁾など、遮水工の基準強化が図られてきたが、住民の遮水シートに対する不信感は払拭されておらず、最終処分場の立地は困難な状況にある。

したがって、地域住民の理解を得るためには、埋立地における遮水工、特に遮水シートの挙動を解明していき、工学的に安全性を立証できる設計モデルを確立し、適正に設計・施工を行い、安全性を工学的に地域住民に説明することが重要である。

基盤の局所沈下に伴う遮水シートの挙動、すなわち、その内部に発生する応力・ひずみに関する研究としては、Knipschild の Trough モデル⁵⁾、Giroud らの Co・Energy モデル⁶⁾、今泉らの応力-ひずみ関係を線形と仮定した弾性モデル（以下、単に弾性モデルと呼ぶ）⁷⁾、Koerner による極限釣り合いモデル⁸⁾などがある。ここに Trough モデルとは、図-1 に示すように、地下水集排水管により管上部の埋戻し土や保護砂が吸い出され、遮水シート下部保護砂層が沈下した場合、遮水シートの沈下範囲は、地下水集排水管埋戻し端部から $\beta = 45^\circ$ 傾斜角の範囲に及ぶとともに、遮水シートはこの範囲で均一に伸びるものと仮定したモデルである。

野本ら⁹⁾は、HDPE (High Density Poly Ethylene, 高密度ポリエチレン) ジオメンブレンを用いて上載荷重を変化させた落とし戸実験を行い、次の結論を得ている。

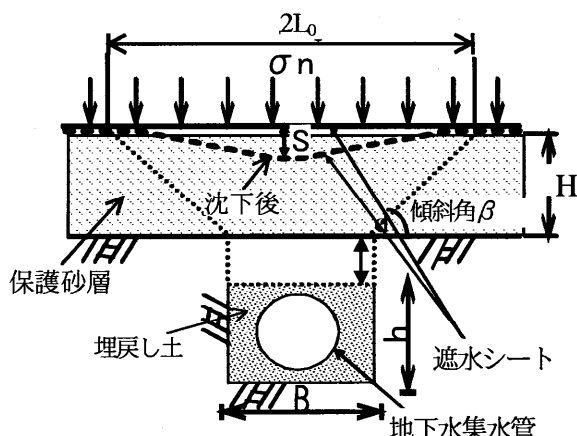


図-1 Trough モデル及び修正 Trough モデルの概念図

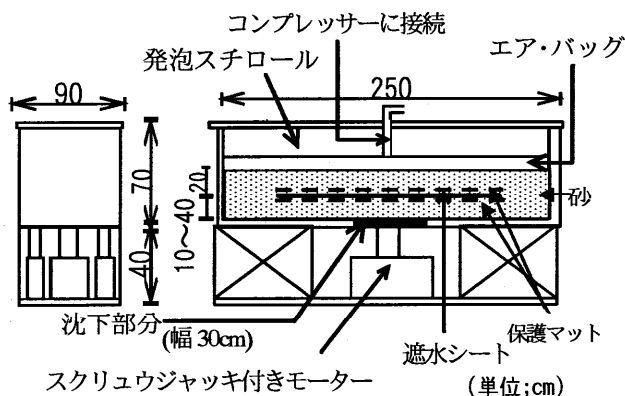


図-2 落とし戸実験装置の概要

①遮水シートに生じるひずみは、Trough モデルが仮定するような一様分布ではなく、沈下中央部にピークが現れる釣り鐘状分布となる。

②Trough モデルで求めた遮水シートの伸び量は、遮水シートの沈下量が15mm以下の場合には実験値と良く近似するが、沈下量が30mm以上の場合には実験値の45～67%と過小評価し、その結果最大軸ひずみを、実験値の36～56%と過小評価する。ここで、遮水シートの伸び量とは、水平にある状態から中央部の沈下により幾何学的に形状が変化したことによる伸びである。

③基盤の沈下に伴い下部保護層がせん断破壊して、遮水シートが変形する範囲を、Trough モデルが仮定する $\beta = 45^\circ$ の範囲ではなく、 $\beta = 45^\circ + \phi/2$ (下部保護砂層の内部摩擦角を ϕ とする。)の範囲であると仮定する修正 Trough モデルを提案した。そして、このモデルを用いて遮水シートの必要伸び量を求め、この必要伸び量から弾性モデルに従って最大引張ひずみを算定する方法が設計法として妥当である。

本論文では、図-1に示すような地下水集排水管周りの埋戻し土の流失などによる遮水シートの局所沈下現象に着目して、①修正 Trough モデルで仮定したせん断破壊面の傾斜角 $45^\circ + \phi/2$ の実験的検証、②アーチ効果による

表-1 実験材料の特性

材料	物理的性質	値
碎石砂	土粒子密度	$2.76 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	最大乾燥密度	$1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	最小乾燥密度	$1.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	内部摩擦角	48°
HDPE	1% 割線弾性係数	484 MPa
	破断強度	33.5 MPa
	線膨張係数	$1.65 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
FPA	1% 割線弾性係数	81.9 MPa
	破断強度	22.7 MPa
	線膨張係数	$1.20 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
TPO	1% 割線弾性係数	152.2 MPa
	破断強度	15.1 MPa
	線膨張係数	$2.87 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
短繊維不織布	密度	120 kg/m^3
	破断強度	1.27 MPa

*遮水シートの特性値は温度20℃のもの。

土圧の再配分現象の確認、③HDPE 以外の材質に対する弾性モデルの適用性を実験的に検討するとともに、④アーチ効果による土圧の再配分並びに遮水シートの応力-ひずみ曲線の非線形性を考慮した遮水シートに生じる最大軸ひずみの評価式と遮水シートの許容沈下量を提案することを目的とする。

2. 基盤の沈下に伴う遮水シートの挙動確認実験

基盤の局所沈下に伴い下部保護砂層中に生じるせん断破壊面の傾斜角、遮水シートに生じる工学ひずみ(以下、「ひずみ」と称する。)の分布、アーチ効果による荷重の再配分状況を確認して、弾性モデルの適用性を検討するため、下部保護砂層の厚さ、遮水シートの種類と上載荷重を変化させた落とし戸模型実験を実施した。

(1) 落とし戸実験装置の概要⁹⁾

落とし戸実験装置は、図-2に示すような幅250cm、奥行き90cm、深さ70cmの直方体鋼製土槽である。土槽底板中央の幅30cmの部分 falls into a trap door, causing localized settlement. また、土槽上蓋の直下には、エアバッグを設置し、コンプレッサーにより最大196kPaの上載圧力を遮水シートに付加することができる。

使用した材料の特性を表-1に示す。保護砂には、碎石砂を水洗いて、約74～840 μm に粒度調整したものをを用いた。相対密度が $\text{Dr}=90 \pm 5\%$ となるように空中落下法で作成した供試体の内部摩擦角 ϕ は 48° (圧密非排水三軸試験)である。

使用した遮水シートは、硬い材質 (弾性係数が大きい)

表2 不織布と遮水シートの摩擦特性

	境界面	GM/CS	GM/SNW	SNW/CS
HDPE	見掛けの粘着力	2.8 kPa	2.8 kPa	5.2 kPa
	せん断抵抗角	23.3°	6.8°	29.2°
TPO	見掛けの粘着力	0.25 kPa	1.5 kPa	5.2 kPa
	せん断抵抗角	33.8°	10.8°	29.2°
FPA	見掛けの粘着力	1.1 kPa	3.8 kPa	5.2 kPa
	せん断抵抗角	36.1°	11.3°	29.2°

*GM: ジオメンブレン CS: 砕石砂 SNW: 短繊維不織布

**摩擦係数は、 $\mu = C / \sigma + \tan \phi$ で求めた。

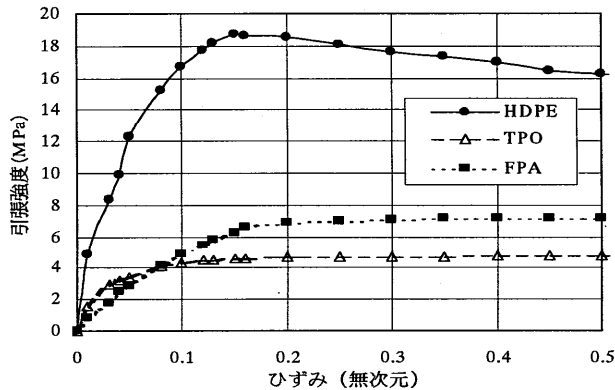


図3 遮水シートの応力-ひずみ曲線

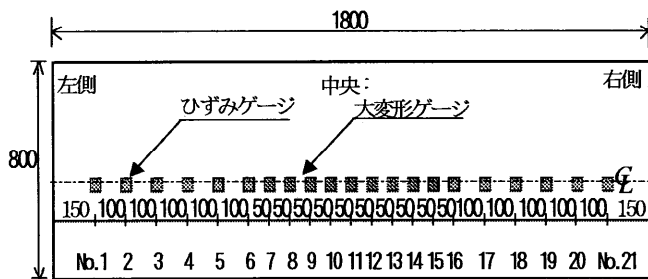


図4 ひずみゲージの貼付状況 (単位: mm)

としてHDPE, 柔らかい材質としてFPA (Flexible Polymer Alloy, ポリプロピレン系熱可塑性樹脂), 両者の中間的材質としてTPO (Thermo Plastic Olefin, ポリエチレン系熱可塑性樹脂) の3種類であり, 厚さはいずれも1.5mmのものである。これら遮水シートの応力-ひずみ関係について, ひずみが50%までの曲線を図-3に示す。ここに, 横軸のひずみは, ダンベル3号供試体 (標線部幅5mm, 長さ100mm) の標線間 (20mm) の変化から計算した値 (測定精度 $\pm 1\%$) である。なお, 上・下部保護砂層と遮水シートの間を用いた保護マットは短繊維不織布である。

遮水シートと保護砂及び不織布との摩擦特性は一面せん断試験により求めた。得られた見かけの粘着力 C とせん断抵抗角 ϕ を表-2に示す。

(2) 実験ケースと実験方法

実験ケースは, 表-3に示すように, まず, 上載圧を196kPaとし, 下部保護砂層厚さを4段階に変化させた4ケースを実施した。これは, 下部保護砂層のせん断破壊

表-3 実験ケース

Case	材 質	上載圧	下部保護層厚	不織布
1	HDPE	196kPa	10cm	有・無
2	HDPE	196kPa	20cm	有・無
3	HDPE	196kPa	30cm	有・無
4	HDPE	196kPa	40cm	有・無
5	HDPE	98kPa	20cm	有・無
6	HDPE	49kPa	20cm	有・無
7	FPA	196kPa	20cm	有・無
8	FPA	98kPa	20cm	有・無
9	FPA	49kPa	20cm	有・無
10	TPO	196kPa	20cm	有・無
11	TPO	98kPa	20cm	有・無
12	TPO	49kPa	20cm	有・無

面の傾斜角を検証するために実施した。次にHDPE, FPA, TPOを対象とし, 下部保護層厚を20cm, 上載圧を49~196kPaの3段階に変化させた8ケースを実施した。なお, それぞれについて上下両保護砂層と遮水シートの間には, 厚さ10mmの短繊維不織布を敷設した場合と敷設しない場合について実施した。

実験に際しては, まず砕石砂を相対密度が $90 \pm 5\%$ になるように, 空中落下法により厚さ10~40cmに敷き均して, 下部保護砂層を設けた。その後, 表面を成形し, 保護マットを設置する場合は幅80cm, 長さ180cmの短繊維不織布を敷設した。その上に同寸法の遮水シートを敷設した。なお, 遮水シートには, 図-4に示すように, 表裏に各21箇所ひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは, 遮水シート (FPA, 剛性=弾性係数 $\times$ 厚さ123kN/m) より剛性が低いエポキシ製 (剛性88.2N/m) のものを使用し, 中央部40cm以内の9点は大変形ゲージを使用した。また, 遮水シート中央部及び両端には, 遮水シート中央部沈下量と遮水シート両端の水平変位量を測定するために, 太さ1mmのワイヤーを固定し, 変位計に接続した。なお, 両端部のワイヤーは, ひずみゲージに影響がない最端部に接着剤で固定し, 砂との接触を防止するためパイプ内を通して摩擦を排除した。また, 遮水シート中央部の沈下量計測のためのワイヤーは, ひずみゲージに影響を及ぼさないように, ひずみゲージを貼付したセンターラインより20cm離れた場所に接着剤で固定し, 砂との接触を防止するためパイプ内を通して摩擦を排除した。変位計を接続したことによる初期変位とひずみは, 初期値として測定値から除外処理した。

さらに, 遮水シートの直上部には, 沈下中央部, それより15cm及び30cmの位置に土圧計を設置し, 遮水シートに働く上載圧を計測した。土圧計は, エアバック直下にも設置し, エアーで載荷した上載圧が試験条件の概ね $\pm 5\%$ の誤差に収まっていることを確認した。

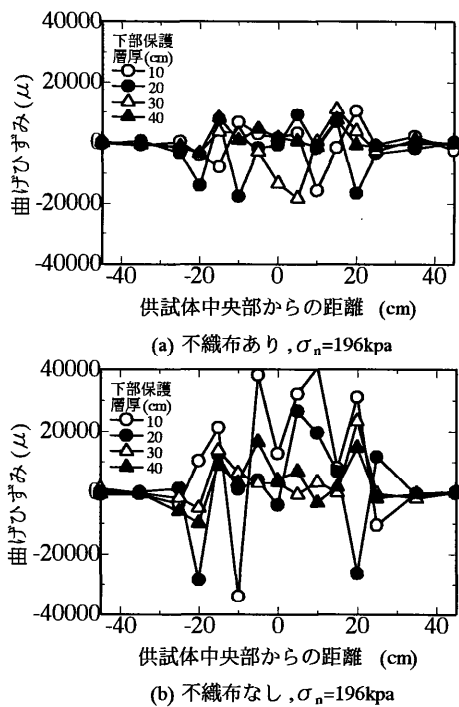


図-5 曲げひずみ分布(HDPE)

遮水シートの上には、保護マットを設置する場合は短繊維不織布を設置し、その上に厚さ 20cm の上部保護砂層を敷き均し、表面を平滑に成形した後に、エアバッグを設置した。エアバッグと上蓋との間には、その隙間を埋めるために、厚さ 10cm の発泡スチロールを設置した。

上載圧力を加えた後に、土槽底板の落とし戸部分を 1mm/min の速さ（実際の圧密沈下速度などより速いが実験上の制約による。）で沈降させ、沈下量が 65mm に達するまで 0.50mm 毎にひずみ、変位量、土圧を測定した。

3. 実験結果及び考察

遮水シートの上下面で計測したひずみの平均値を軸ひずみ ε_a 、偏差を曲げひずみ ε_b （上面が圧縮となる場合を「正」と定義した。

また、遮水シート両端の変位は微小であった。

(1) せん断破壊面の傾斜角とひずみが生じる範囲

図-5 にケース 1~4 の基盤沈下量 65mm 時点における曲げひずみ分布を示す。曲げひずみの絶対値がピークを示す点は、シートが急激な曲げを受けている点であり、例えば負のピーク点は遮水シートが上側に凸となっていることを示している。

図-6 は、最も外側の負のピーク点位置と、HDPE 不織布なしの場合の実験終了後に上部保護砂層を掘り起こし下部保護砂層表面で確認した沈下により変形し段差が生

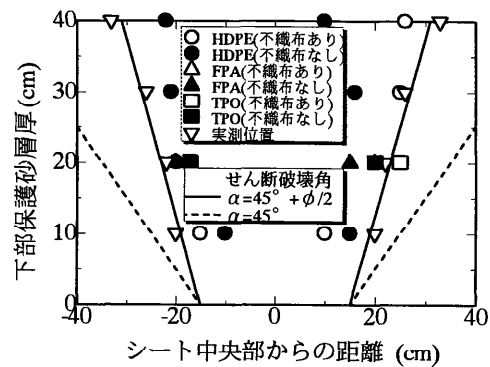


図-6 曲げひずみピーク点とせん断破壊面
(基盤沈下量 65mm 時)

じている両端の位置（図-6 中の▽）を示したものである。また、同図には、下部保護砂層厚 20cm、上載圧力 196kPa、基盤沈下量 65mm 時点の FPA、TPO の曲げひずみのピーク発生点も示した。図-6 より、HDPE 不織布なしで下部保護砂層厚が 30cm 以上の場合を除くと、曲げひずみのピーク発生点と実測段差位置が近似していることから、下部保護層に変形が生じている範囲の両端で曲げひずみがピーク値を示していることがわかる。また、これらの位置は修正 Trough モデルで仮定した $45^\circ + \phi/2 (=69^\circ)$ の線近傍に存在することもわかる。したがって、下部保護砂層の沈下状況とそれに伴う遮水シートの変形は、ほぼ左右対称に生じていると判断された。なお、下部保護砂層厚 10cm の場合、前述した下部保護砂層表面の観察時に 2箇所の段差が見られたが、これは共役な 2 つのせん断破壊面と考えられた。そして、内側の段差 ($\beta = 135^\circ - \phi/2$) が曲げひずみのピーク値を捉えていたため、修正 Trough で仮定した線の内側に存在するものと考えた。

以上のことから、基盤の局所沈下に伴い下部保護砂層に生じるせん断破壊面は、水平面と $45^\circ + \phi/2$ の角度をなす方向に直線上に発生することがわかった。

ところで、図-6 より不織布ありと不織布なしの場合とを比較すると、不織布ありの方が幾分、ピーク発生点が遮水シート中央部から離れている。これは、遮水シート上下面に不織布を敷設したことにより剛性が高まり、下部保護砂層のせん断破壊の影響を受けて遮水シートが形状変化する範囲、つまり最大曲げひずみが生じる範囲が広がったためと考えられる。

(2) ひずみの分布と下部保護砂層の効果

図-7 に、ケース 1~4 における HDPE に生じた軸ひずみ分布を下部保護砂層の厚さごとに示す。

軸ひずみの分布は、中央部 30cm 以内が大きな値となり、沈下量の増加に伴って、ひずみも増大することがわかる。

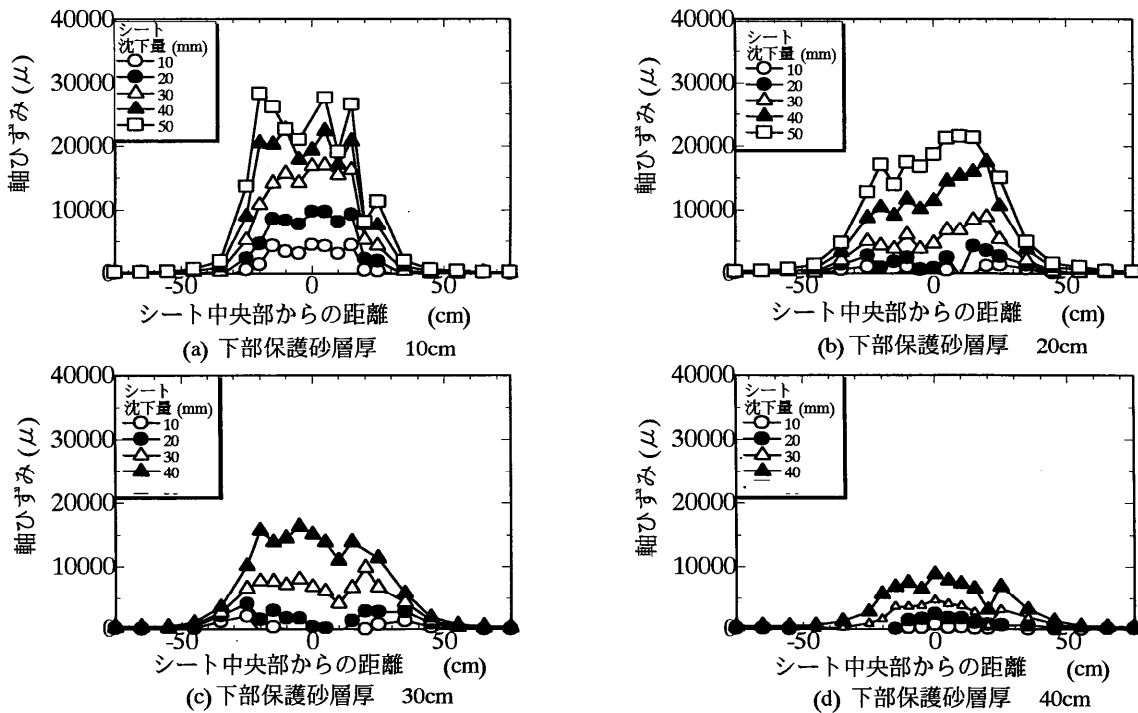


図-7 軸ひずみ分布(HDPE, 不織布なし)

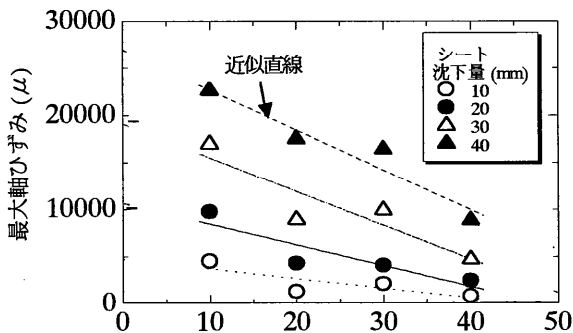


図-8 下部保護層と最大軸ひずみ(HDPE 不織布なし)

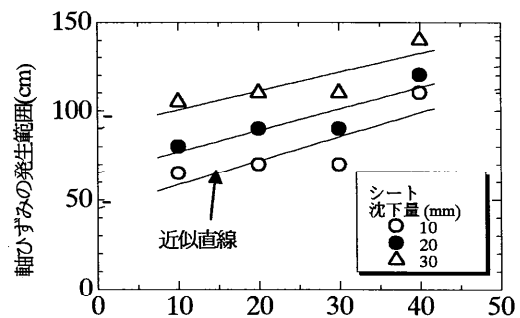


図-9 下部保護砂層厚とひずみの発生範囲
(HDPE 不織布なし, 196kPa)

また、シート中央部の沈下量が同じとき、下部保護砂層が厚いほど最大軸ひずみは小さくなるとともに、軸ひずみの分布は平坦になり、その範囲は広がる傾向がうかがえるとともに、前述したせん断破壊面の外側までひずみが生じていることがわかる。

図-8と図-9は、シート中央部の沈下量が10、20及び30mmにおける最大軸ひずみ量ならびに軸ひずみが生じる範囲と下部保護砂層の厚さの関係を示したものである。図より、同一沈下量時では、下部保護砂層の厚さが増すと最大軸ひずみは減少し、ひずみの発生範囲は増大しており、ほぼ線形関係にあることがわかる。なお、保護砂層厚と最大軸ひずみの関係は、層厚の増大とともに最大軸ひずみがゼロに漸近する非線形関係になると考えられるが、図-8から推定すると、シート沈下量が20mm以下、下部保護砂層の厚さが50cm以上であれば、生じる軸ひ

ずみは極めて小さくなると考えられる。

(3) 遮水シート材質と上載圧力の相違による挙動変化

図-10に、上載圧力196kPa、下部保護砂層の厚さが20cmでの軸ひずみ分布を示す。また図-11に、下部保護砂層厚20cm、シート中央部の沈下量が50mmにおける軸ひずみ分布の遮水シート材質の違いによる比較を、上載圧力別に示す。これらの図より、最大軸ひずみは、上載圧力別には明瞭ではないものの、概ねFPAが最も大きく、次いでTPO、HDPEの順となっている。これは遮水シートの剛性が低い順(FPA<TPO<HDPE)と合致している。また、図-11において遮水シート中央部から±40cmより外側のひずみに着目すると、ひずみが生じている範囲は剛性が高くなるほど広がる傾向にあり、上載圧力の増加に応じて最大軸ひずみも増加している。

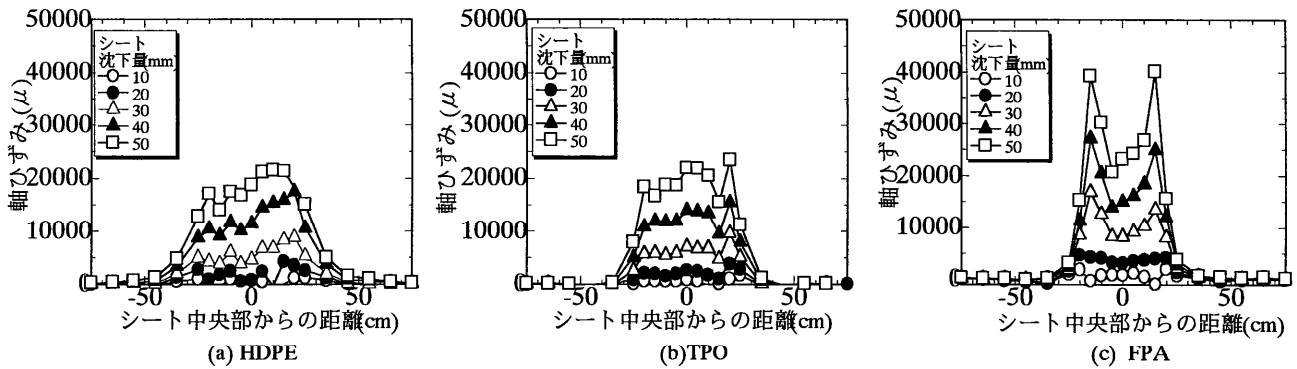


図-10 軸ひずみ分布 ($\sigma_n=196\text{kPa}$, 不織布なし)

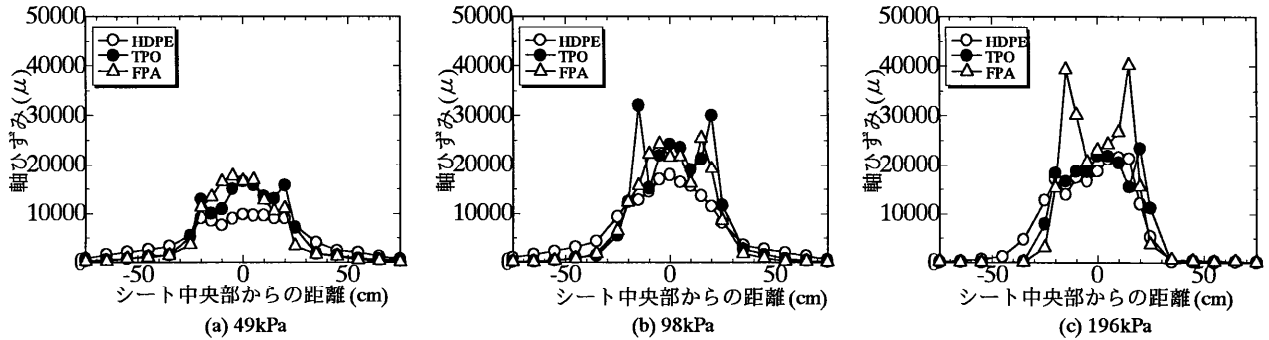


図-11 軸ひずみ分布(シート沈下 50mm 時, 不織布なし)

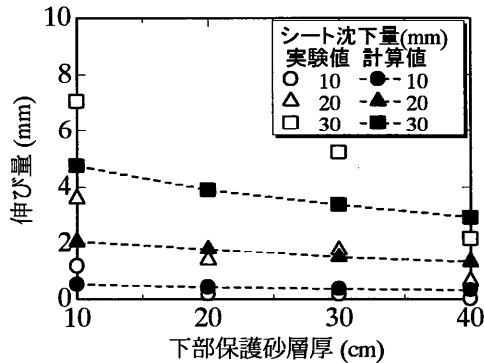


図-12 積分ひずみと修正 Trough モデル伸び量の比較

(4) 遮水シートの伸び量の検討

図-12 は, 上載圧力 196kPa を受ける HDPE 遮水シートに関して, 軸ひずみを積分して求めた伸び量と式(1)に示す修正 Trough モデルに基づく伸び量 $2D$ を下部保護層の厚さに対して示したものである。式中の記号は, 図-1 に示す記号を用いている。

$$2D = 2L_0 \left\{ \sqrt{1 + (s/L_0)^2} - 1 \right\} \quad (1)$$

$$\text{ここに, } 2L_0 = B + 2 \cdot H \cdot \tan(45^\circ - \phi/2) \quad (1)'$$

修正 Trough モデルから求めた伸び量は, 下部保護砂層厚 40cm で沈下量が 10mm の場合を除くと, ひずみを積分して求めた伸び量の約 0.5 倍～ 2.5 倍, 平均 1.1 倍であり, 沈下量 30mm 以上に限ると 0.7 倍～ 1.4 倍となっている。また, 下部保護砂層厚 10cm の場合を除くと, 計算

表-4 各算定法のジオメンブレン伸び量の比較

下部保護 砂層厚	遮水シートの 最終沈下量	ひずみ積分 伸び量	計測伸び量	修正Trough 伸び量
10cm	60.36mm	13.11mm	-	18.81mm
20cm	63.36mm	13.95mm	14.03mm	17.28mm
30cm	47.78mm	6.94mm*	9.91mm	8.48mm
40cm	29.06mm	3.97mm	-	2.75mm

* ひずみゲージの欠損

値は実験値の平均 1.3 倍となる。さらに, 実験終了後に上部保護砂層を除去して計測した沈下形状から求めた計測伸び量は, 表-4 に示すように, ほぼ修正 Trough モデルから求めた伸び量の 81 と 117% となっている。また, 図-13 に遮水シートの材質と上載圧力を変えた場合のシート中央部の沈下量に対する計算伸び量とひずみ積分伸び量との比を示す。図より, シート中央部の沈下量が 10mm の場合には, 計算値が実験値の $2.5 \sim 3.0$ 倍を示すものもあるが, 沈下量 20mm 以上においては HDPE を除くと $1 \sim 1.5$ 倍にある。沈下量が小さい場合に計算値が実測値より大きい原因としては, 沈下による下部保護砂層の変形範囲が修正 Trough モデルで得られる範囲より大きい可能性や, 大変形ひずみゲージがひずみ量が小さいときに, その感度が低いことの可能性が考えられるので, 今後, 確認する予定である。

(5) 遮水シート上の応力分布

図-14 は, シート沈下に伴う土圧の変化の一例として,

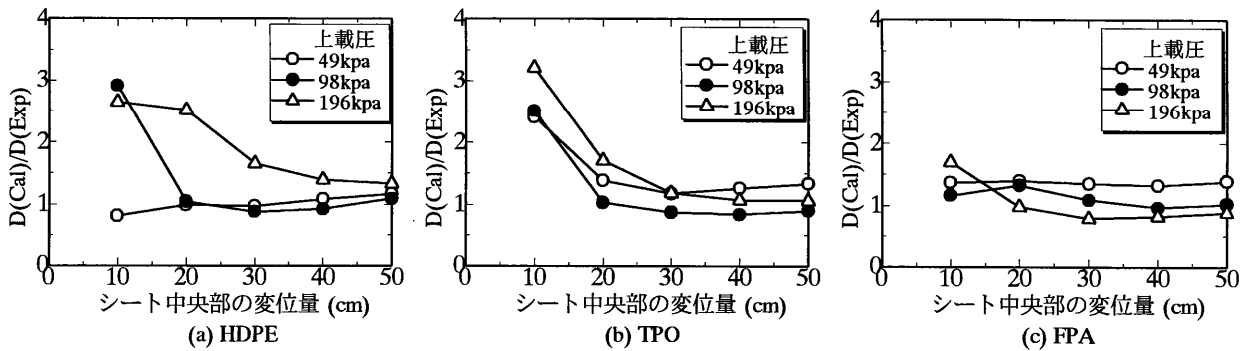


図-13 遮水シート中央部の変位量に対する伸び量の修正 Trough モデル計算値とひずみ積分値との比較

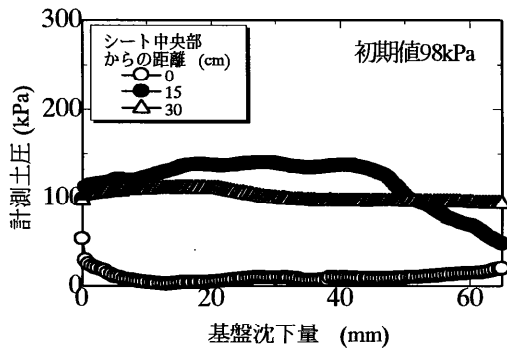


図-14 沈下端部と中央部の土圧変化

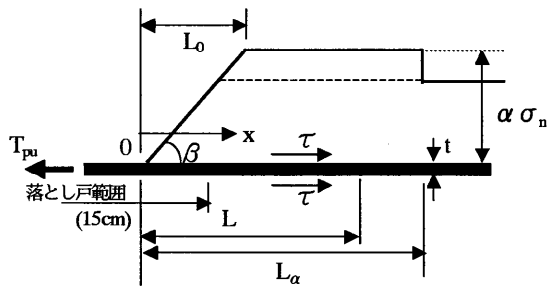


図-16 アーチングを考慮した土圧分布と弾性モデルの概念

ケース 5(HDPE 遮水シート, 下部保護砂層厚 20cm, 上載圧力 98kPa)の場合について示したものである。図より, 基盤が沈下するにつれてシート中央部の土圧は減少し, 沈下量が 10mm になると土圧が全く作用していないことがわかる。他方, 沈下部(落とし戸部)の両端(供試体中央部から 15cm)では沈下するに従って土圧の増加が認められ, 基盤の沈下量が 18mm 以上では, 最大で初期値の 140%に達し, 沈下量が 45mm 以上になると減少している。これは, 供試体中央部の基盤の沈下に伴って, 下部保護砂層内にせん断破壊が発生し, その影響範囲内では鉛直圧力が減少し, その外側では鉛直圧力が増加するようなアーチング現象が生じているためと考える。なお, 沈下量が 45mm 以上になると土圧が減少しているのは, 測定点が陥没し始めたことによると考える。

表-5 は, 沈下中央部から 15cm に設置した土圧計で計測した沈下前の初期土圧と沈下量が約 30mm に至るまでの土圧の割合(土圧増加率 α と呼ぶ)のピーク値を示したものである。この表より, 沈下に伴い沈下端部では,

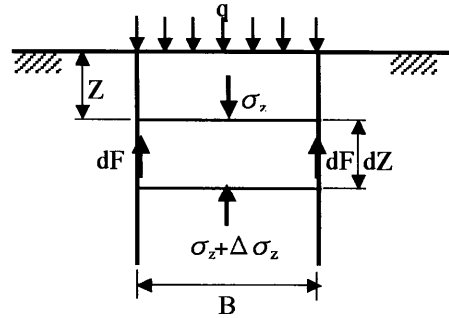


図-15 Terzaghi による局所沈下の土圧概念図

表-5 初期土圧に対するピーク土圧の割合

材質	初期土圧	土圧増加率 α
FPA	49kPa	1.43
FPA	98kPa	1.36
HDPE	49kPa	1.35

初期土圧のおおむね 1.4 倍の土圧が働いていることがわかる。

このように局所沈下が生じると, 下部保護砂層内のせん断破壊がその表面に現れる位置の外側でアーチングによる鉛直応力の増大, すなわち拘束応力の増大が生じて, その内側近傍で引張軸ひずみを大きくする原因となる。

4. アーチ効果と応力ひずみ関係の非線形性を勘案したひずみ評価モデル(非線形修正弾性モデル)の提案

アーチング現象に関する理論は, 一般に Terzaghi によるアーチング理論¹⁰⁾が良く知られている。これは, 図-15 に示すように, 沈下部内は不動壁面との摩擦により土圧が幅 B 内で一様に低減するという考え方である。

しかし, 前述した実験結果から, 沈下中央部における土圧はほぼ 0 となっているが, 沈下の形状が逆三角形であることから端部に近づけば土圧が残存していること, 沈下部外側では土圧が増加していることなど, 図-15 に示したように沈下部全面に渡って均一に土圧が低減する状況でないと考える。

そこで、図-1 に示す土圧 σ_n の分布を三角形とみなして、アーチ効果による土圧分布を図-16 に示すように、

①土圧は、沈下中央部で 0 となり、沈下端部に向けて遮水シートが変形する範囲 L_0 まで増加する三角形分布となる。

②この低減した土圧は、中央部より L_0 の地点から力の総和が不変として計算される $L_a (=0.5 \alpha / (\alpha - 1))$ まで均等に再配分されると仮定した。すなわち、遮水シートにひずみが生じる範囲を L とすると、 L_0 の地点から中央部に向けて土圧が低減し、 L_0 の位置から外側に向けて土圧が α 倍に増加するとした。以下、 L が L_a 以内にあるときの遮水シートの伸び量 D と最大軸ひずみ $\varepsilon_{a, \max}$ の関係について導く。

位置 x における微小遮水シート長 dx に働く引張応力 $\sigma(x)$ 、ひずみ $\varepsilon(x)$ 、伸び $dD(x)$ の関係は、 $\varepsilon(x)$ と $\sigma(x)$ の関係が直角双曲線近似できると仮定する¹¹⁾と、

$$\varepsilon(x) = \frac{\sigma_f \sigma(x)}{K_0 (\sigma_f - \sigma(x))} = \frac{\sigma_f}{K_0} \left[\frac{\sigma_f}{\sigma_f - \sigma(x)} - 1 \right] = \frac{dD(x)}{dx} \quad (2)$$

ここで、 $K_0 = (d\sigma/d\varepsilon)_{\text{initial}}$ 、 σ_f は応力の漸近値

三角形圧力分布の端部までの水平距離を L_0 とすると、 $x \leq L_0$ における遮水シート上のせん断応力度 $\tau_1(x)$ は、遮水シートと土の摩擦係数を μ 、上載圧力を σ_n とすると、

$$\tau_1(x) = \alpha \cdot \sigma_n (x/L_0) \cdot \mu \quad (x \leq L_0) \quad (3-1)$$

同様に、 $L_0 < x \leq L$ における遮水シート上のせん断応力度 $\tau_2(x)$ は、

$$\tau_2(x) = \alpha \cdot \sigma_n \mu \quad (L_0 < x \leq L \leq L_a) \quad (3-2)$$

であるので、位置 x における引張応力 $\sigma(x)$ と先端での引抜き力 T_{pu} との関係は、遮水シートの厚さを t とすると、力の釣り合いから、

$$\sigma_1(x) \cdot t = T_{pu} - 2 \int_0^x \tau_1(x) \cdot dx = T_{pu} - \alpha \cdot \sigma_n \frac{x^2}{L_0} \mu \quad (x \leq L_0) \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_2(x) \cdot t &= T_{pu} - 2 \int_0^{L_0} \tau_1(x) \cdot dx - 2 \int_{L_0}^x \tau_2(x) \cdot dx \\ &= T_{pu} + \alpha \cdot \sigma_n \mu \cdot L_0 - 2\alpha \cdot \sigma_n \mu \cdot x \quad (L_0 < x \leq L \leq L_a) \end{aligned} \quad (4-2)$$

さらに、式(2)と式(4)から、 x でのひずみ量 $\varepsilon(x)$ は、

$$\varepsilon_1(x) = \frac{\sigma_f}{K_0} \left[\frac{\sigma_f \cdot t}{\sigma_f \cdot t - T_{pu} - \frac{\alpha \sigma_n \mu x^2}{L_0}} - 1 \right] \quad (x \leq L_0) \quad (5-1)$$

$$\varepsilon_2(x) = \frac{\sigma_f}{K_0} \left[\frac{\sigma_f \cdot t}{\sigma_f \cdot t - (T_{pu} + \alpha \sigma_n \mu L_0 - 2\alpha \sigma_n \mu x)} - 1 \right] \quad (L_0 < x \leq L \leq L_a) \quad (5-2)$$

遮水シート先端における伸び量 D は、式(5)を区間 $(0, L)$ で積分して、

$$D = \int_0^L \varepsilon_1(x) dx$$

$$= \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{L_0 \sigma_f \cdot t / \alpha \sigma_n \mu}{\sqrt{L_0 (\sigma_f \cdot t - T_{pu}) \alpha \sigma_n \mu}} \tan^{-1} \left[\frac{L}{\sqrt{L_0 (\sigma_f \cdot t - T_{pu}) \alpha \sigma_n \mu}} \right] - L \right\} \quad (x \leq L_0) \quad (6-1)$$

$$\begin{aligned} D &= \int_0^{L_0} \varepsilon_1(x) dx + \int_{L_0}^L \varepsilon_2(x) dx \\ &= \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{L_0 \sigma_f \cdot t / \alpha \sigma_n \mu}{\sqrt{L_0 (\sigma_f \cdot t - T_{pu}) \alpha \sigma_n \mu}} \tan^{-1} \left[\frac{L_0}{\sqrt{L_0 (\sigma_f \cdot t - T_{pu}) \alpha \sigma_n \mu}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_f}{K_0} \left[\frac{\sigma_f \cdot t}{2\alpha \sigma_n \mu} \log \left| \frac{\sigma_f \cdot t - T_{pu} + \alpha \sigma_n \mu (2L - L_0)}{\sigma_f \cdot t - T_{pu} - \alpha \sigma_n \mu L_0} \right| - L \right] \right\} \quad (L_0 < x \leq L \leq L_a) \end{aligned} \quad (6-2)$$

さらに、 $x \geq L$ でひずみが生じていないことから、式(4)において $\sigma(L) = 0$ とすると、

$$L = \sqrt{\frac{T_{pu} L_0}{\alpha \sigma_n \mu}} \quad (x \leq L_0) \quad (7-1)$$

$$L = \frac{1}{2} \left(L_0 + \frac{T_{pu}}{\alpha \sigma_n \mu} \right) \quad (L_0 < x \leq L \leq L_a) \quad (7-2)$$

よって、式(6)と式(7)から、次式が得られる。

$$D = \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{\sigma_f^2 \cdot t^2 L_0}{\alpha \sigma_n \mu (\sigma_f \cdot t - T_{pu})} \tan^{-1} \left(\frac{T_{pu}}{\sigma_f \cdot t - T_{pu}} \right) - \sqrt{\frac{T_{pu} L_0}{\alpha \sigma_n \mu}} \right\} \quad (x \leq L_0) \quad (8-1)$$

$$\begin{aligned} D &= \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{\sigma_f^2 \cdot t^2 L_0}{\alpha \sigma_n \mu (\sigma_f \cdot t - T_{pu})} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sigma_n \mu L_0}{\sigma_f \cdot t - T_{pu}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_f}{K_0} \left[\frac{\sigma_f \cdot t}{2\alpha \sigma_n \mu} \log \left| \frac{\sigma_f \cdot t}{\sigma_f \cdot t - T_{pu} - \alpha \sigma_n \mu L_0} \right| - \frac{1}{2} \left(L_0 + \frac{T_{pu}}{\alpha \sigma_n \mu} \right) \right] \right\} \quad (L_0 < x \leq L \leq L_a) \end{aligned} \quad (8-2)$$

ここで、遮水シートの伸びる範囲 L が L_0 となるときの伸び量 D_0 は、式(4)において $x = L_0$ として、 $\sigma(L_0) = 0$ から T_{pu} を求め、これを式(8-1)に代入して式(8-3)が得られる。

$$D_0 = \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{\sigma_f^2 \cdot t^2 L_0}{\alpha \sigma_n \mu (\sigma_f \cdot t - \alpha \sigma_n \mu L_0)} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sigma_n \mu L_0}{\sigma_f \cdot t - \alpha \sigma_n \mu L_0} \right) - L_0 \right\} \quad (L = L_0) \quad (8-3)$$

最大ひずみ $\varepsilon_{a, \max}$ は、 $x = 0$ で生じるとすると、式(2)、式(4)より

$$T_{pu} = \sigma(0) \cdot t = \frac{\sigma_f K_0 \varepsilon_{a, \max}}{\sigma_f + K_0 \varepsilon_{a, \max}} \cdot t \quad (9)$$

となる。よって、伸び量が D のときにおける最大引張りひずみ $\varepsilon_{a, \max}$ は、式(8)に式(9)を代入して、

$$\begin{aligned} D &= \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{t \cdot L_0 (\sigma_f + K_0 \varepsilon_{a, \max})}{\alpha \sigma_n \mu} \cdot \tan^{-1} \left[\frac{K_0 \varepsilon_{a, \max}}{\sigma_f} \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sigma_f}{K_0} \left[\frac{\sigma_f \cdot t K_0 \varepsilon_{a, \max} \cdot L_0}{\alpha \sigma_n \mu (\sigma_f + K_0 \varepsilon_{a, \max})} \right] \right\} \quad (D \leq D_0) \end{aligned} \quad (10-1)$$

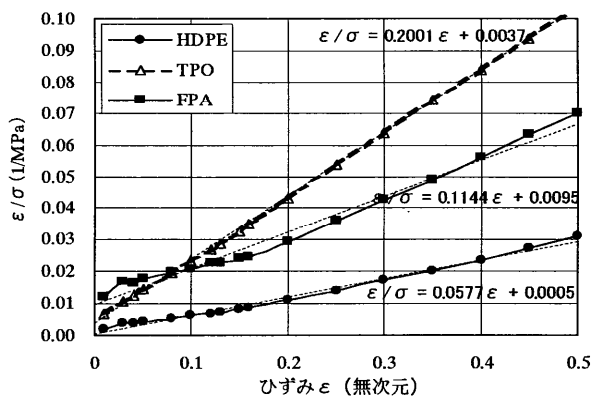


図-17 応力ひずみ曲線の直角双曲線近似

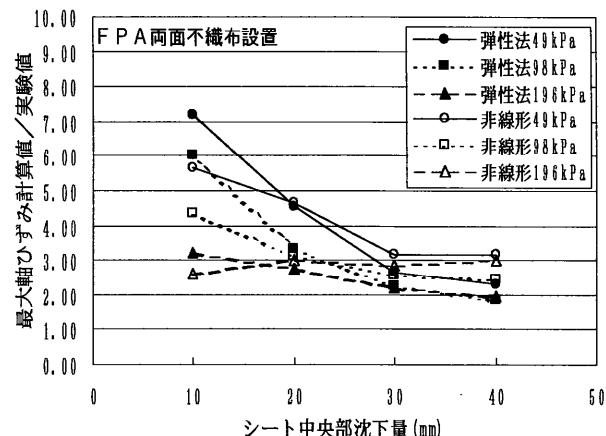
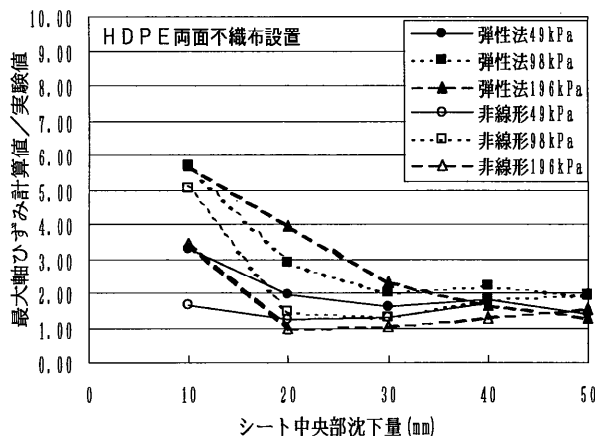


図-18 最大軸ひずみの計算値と実験値の比較

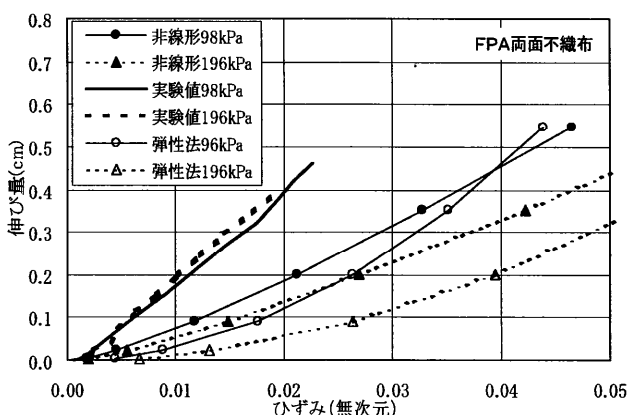
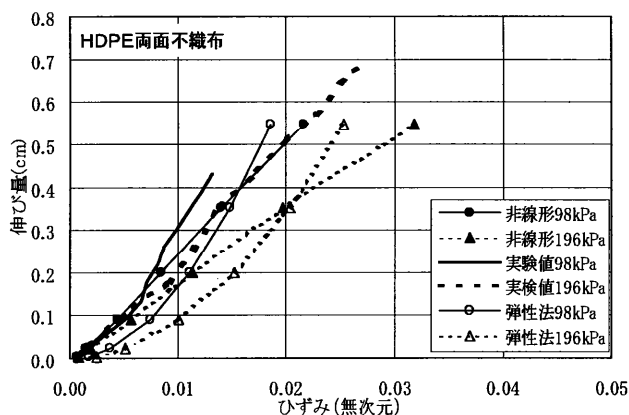


図-19 最大軸ひずみと伸び量の比較

$$D = \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \sqrt{\frac{tL_0(\sigma_f + K_0\varepsilon_{a,\max})}{\alpha\sigma_n\mu}} \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{\alpha\sigma_n\mu L_0(\sigma_f + K_0\varepsilon_{a,\max})}{\sigma_f^2 \cdot t}} \right] \right. \\ \left. + \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{\sigma_f \cdot t}{2\alpha\sigma_n\mu} \log \left| \frac{\sigma_f \cdot t \cdot (\sigma_f + K_0\varepsilon_{a,\max})}{\sigma_f^2 \cdot t + \alpha\sigma_n\mu L_0(\sigma_f + K_0\varepsilon_{a,\max})} \right| \right\} \right. \\ \left. - \frac{\sigma_f}{K_0} \left\{ \frac{1}{2} \left(L_0 + \frac{\sigma_f K_0 \varepsilon_{a,\max} \cdot t}{\alpha\sigma_n\mu(\sigma_f + K_0\varepsilon_{a,\max})} \right) \right\} \right\} \quad (D_0 < D) \quad (10-2)$$

となる。

下部保護砂層厚が 20cm のとき、式(1)より求めた $L_0=22.7\text{cm}$ と、図-17 から求めた初期弾性係数 K_0 (=1/切

表-6 $L=L_0$ のときの遮水シート沈下量

(両面不織布あり)			
上載荷重	HDPE	TPO	FPA
49kPa	8.3mm	30.8mm	51.0mm
98kPa	11.1mm	67.9mm	79.7mm
147kPa	13.6mm	—	128.7mm
196kPa	16.1mm	—	—
294kPa	21.2mm	—	—

(不織布なし)			
上載荷重	HDPE	TPO	FPA
49kPa	15.1mm	—	169.8mm
98kPa	24.7mm	—	—
147kPa	40.7mm	—	—
196kPa	—	—	—
294kPa	—	—	—

—は、軸ひずみが 50%以内のとき常に $L < L_0$

片) と応力の漸近値 σ_f (=1/傾き)、表-2 に示した摩擦特性から $\tan \phi + C/\sigma_n$ として定義した摩擦係数 μ (C は見掛けの粘着力)、表-5 から求めた $\alpha=1.4$ を式(8-3)に代入して伸び量 D_0 を算出した。なお、足立ら¹²⁾の研究によれば、土被り厚の相違に拘わらず α は 1.4 程度であることを確認している。この D_0 を式(1)に代入して遮水シート沈下量 s を計算すると、表-6 に示した値となる。下部保護砂層厚が 20cm のときの最大引張ひずみは、遮水シートの沈下量が表-6 で示した値以下の場合には式(10-1)で、それ以上の場合には式(10-2)を用いることとなる。

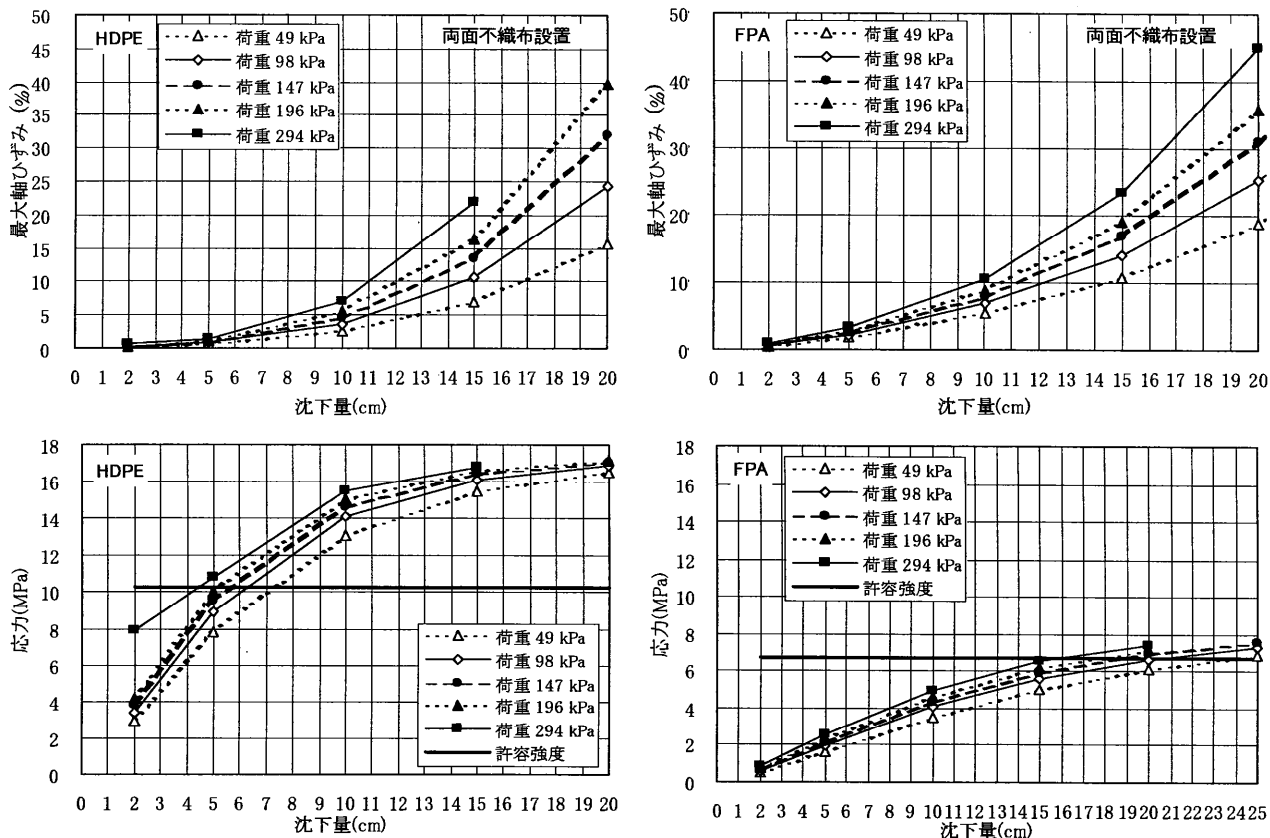


図-20 最終処分場における遮水シートの沈下量と遮水シートに生じるひずみと応力の計算例

5. 非線形修正弾性モデルの適合性

図-18に、剛性の高いHDPEシートと剛性の低いFPAシートを対象として、式(10)に基づく最大軸ひずみの計算値及び従来の弾性モデル⁹⁾に基づく最大軸ひずみの計算値について、それらの値と実験値との比を遮水シート中央部の沈下量に対して示した。なお、従来の弾性モデルでの計算に用いた弾性係数は、軸ひずみが1%時の割線弾性係数に対して温度補正を行った値である。

図-18では、非線形修正弾性モデルで評価される最大軸ひずみは、遮水シートの沈下量が20mm以下の場合、実験値の2～3倍程度大きめの値を示し、沈下量が20mmを越えると、HDPEシートの場合、計算値は実験値にほぼ等しい。また、FPAシートの場合、計算値は実験値の2～3倍程度大きめの値を示している。しかし、図-19に示すように、最大軸ひずみと伸び量の関係を比較すると、従来の弾性モデルで得られる最大軸ひずみ-伸び量の関係よりも実験値に近似しており、傾向も類似している。なお、遮水シート沈下量が小さく発生ひずみ量10,000 μ よりも小さい場合に、非線形修正弾性モデルによる計算最大軸ひずみが実験値よりかなり大きく評価するのは、ひずみが小さいとき、遮水シートと接触材料の相対変位も小さく、摩擦せん断抵抗力 τ も $c + \mu\sigma_v$ で評価される最大値に達していないことによると考える。また、FPAシートにおける計算値と実験値との差異が大きいのは、

応力-ひずみ曲線が、ひずみが小さい場合に直角双曲線との近似性が低いことによると考える。

したがって、非線形修正弾性モデルで最大軸ひずみを評価することは、実測値とは2倍程度の誤差を有する場合があるものの、計算上安全側の値を算定することから弾性モデル等の既存モデルに比べてより妥当であると考えられる。

6. 最終処分場における遮水シートの許容沈下量

計算条件として、基盤の局所沈下幅 $B=50\text{cm}$ 、下部保護砂の内部摩擦角 $\phi=48^\circ$ 、同層厚 $H=50\text{cm}$ を想定し、前述した非線形修正弾性モデルを用いて、遮水シートの許容局所沈下量について検討した。なお、上載圧力として、 $\sigma_v=49, 98, 147, 196, 294\text{kPa}$ の5段階を想定した。許容局所沈下量の計算手順は、以下のとおりである。

①修正 Trough モデルの式(1)'に基づき、遮水シートが変形する範囲 L_0 を計算する。

$$L_0 = 50/2 + 50 \times \tan(45^\circ - \phi/2) = 44.2 \text{ cm}$$

②式(8-3)により、 $L=L_0$ に相当する遮水シートの伸び量 D_0 を求める。

③式(1)より、任意の沈下量 s に対応する遮水シートの伸び量 D を修正 Trough モデルで計算し、これを式(10-1)または式(10-2)に代入して最大軸ひずみ $\varepsilon_{a,\max}$ を評価

する。

④計算した軸ひずみ $\varepsilon_{a, \max}$ に対応する応力 $\sigma_{(a)}$ を式(9)より評価する。

図-20 は、以上の手順で計算した HDPE と FPA の遮水シート中央部の沈下量と遮水シートに発生する最大軸ひずみ（上段）並びに応力（下段）との関係を示したものである。また、同図下段の応力には、著者らが遮水シートの劣化等の安全率を勘案して提案¹³⁾している許容応力値、すなわち、破断強度の 32% 値も示した。沈下量と最大軸ひずみの関係が下に凸な曲線であるのに対し、沈下量と応力の関係は上に凸となっている。これは、応力-ひずみ関係を双曲線と仮定したためである。なお、遮水シートの劣化に伴う弾性係数の影響に関しては、今日十分な知見がみられないので、これを考慮していない。

我が国における最終処分場の埋立深さは、概ね 10m～20m であるので、廃棄物の単位体積質量を 15.7 kN/m^3 と仮定すると、上載圧力は 160～320kPa となる。図-20 より、これらの上載圧力で沈下幅 50cm、下部保護砂層厚 50cm のとき、上下両面に不織布を設置した HDPE シートでは沈下量が約 4～6cm、同 FPA シートでは約 16～20cm を越えると、最大引張応力が許容強度を超えることがわかる。また、これらの沈下量に対応する最大軸ひずみは、HDPE シートでは 1.2～1.8%，FPA シートでは 28～31% であることもわかる。

図-21 は、下部保護砂層の条件は図-20 と同じであるが、基盤の沈下幅を 10～200cm の範囲で変化させ、上述と同様な方法で遮水シートの許容局所沈下量を評価し、両者の関係を示したものである。

図-21 より、沈下幅が増加するほど、または上載圧力が低減するほど許容局所沈下量は増大することがわかる。最終処分場に設置される地下水集排水の管径は $\phi 300 \sim 450 \text{ mm}$ 程度が多いので、地下水集排水管に埋戻し土や下部保護砂が流出する場合を想定し、基盤沈下幅を 1m、上載圧力を上述同様 160～320kPa、下部保護砂層厚を 50cm と仮定すると、上下両面に不織布を設置した遮水シートの許容局所沈下量は、HDPE シートで約 14～16cm 以下、FPA シートでは約 26～28cm 以下となる。また、不織布を設置しない遮水シートの場合、不織布がある場合と比較して、表-2 に示したように摩擦係数が高いことから、式(6)から計算される必要伸び量 D に対する伸びる範囲 L が小さくなり、式(10)から計算される最大軸ひずみは大きくなるので、その結果、許容局所沈下量は HDPE シートで約 10～12cm 以下、FPA シートでは約 18～22cm 以下となる。

これらの結果から、最終処分場の基盤は、できるだけ局所的な沈下が生じないような対策を講じることが必要であり、遮水シートの両面に不織布を設置した場合において、HDPE のように弾性係数が高い遮水シートを用

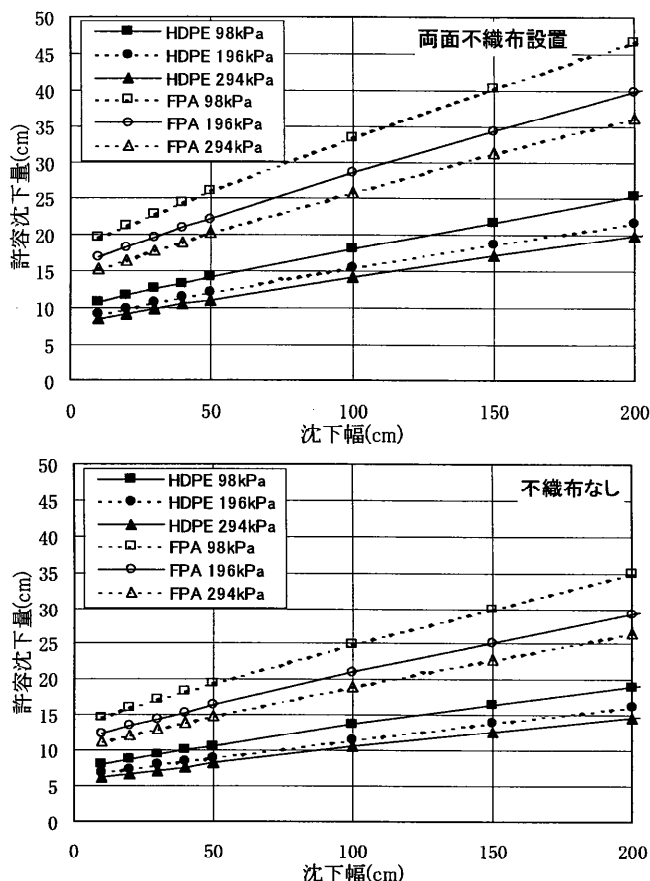


図-21 沈下幅と許容沈下量の計算

いた場合の遮水シートの許容局所沈下量は、概ね 15cm 以下に、FPA のように弾性係数が小さい遮水シートの許容局所沈下量は概ね 25cm 以下にすることが必要であるといえる。

7. まとめ

最終処分場における基盤の局所沈下と、それに伴う遮水シートの伸び挙動を解明するために、落とし戸実験を行い、アーチ効果と遮水シートの応力-ひずみ曲線の非線形性を勘案した遮水シートに生じるひずみの評価式を提案して、遮水シートの許容局所沈下量を試算した。

主要な結論は、以下のとおりである。

- ①基盤の局所沈下により下部保護砂層内に発生するせん断破壊面の傾斜角は、水平面に対して概ね $45^\circ + \phi/2$ をなした。
- ②遮水シートの局所沈下量が 20mm 以上であれば、HDPE、TPO、FPA シートの伸び量は、ほぼ修正 Trough モデルで求めた伸び量に等しい。
- ③遮水シートの剛性が低いほど基盤の沈下に伴い生じる軸ひずみの最大値は大きくなる。また、遮水シートの剛性が低いほど、軸ひずみが生じる範囲は狭くなる。
- ④沈下の中央部では土圧が低減し、両端部では土圧が増

- 加するアーチ効果が生じていることが確認された。
- ⑤アーチ効果と遮水シートの応力-ひずみ曲線の非線形性を勘案した非線形修正弾性モデルで得られる軸ひずみ量は、沈下量が20mm以下の場合は実験値より2~3倍程度過大評価するが、沈下量が20mmを越える場合は実験値に近似する。したがって、非線形修正弾性モデルは、最終処分場基盤の局所沈下に伴い遮水シートに生じる最大軸ひずみの評価式として妥当であると考えられた。
- ⑥アーチ効果と遮水シートの応力-ひずみ曲線の非線形性を勘案した非線形修正弾性モデルで評価した両面に不織布を設置した場合の遮水シートの許容局所沈下量は、HDPEのように弾性係数が大きい遮水シートを用いた場合は概ね15cm、FPAのように弾性係数が小さい遮水シートを用いた場合は概ね25cm以下と考える。

参考文献

- 1) 例えば、全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場指針解説、全国都市清掃会議，1989。
- 2) 池口孝：最終処分場しゃ水シートの課題としゃ水工の考え方，都市と廃棄物，Vol.17，No.8，pp.15-24，1987。
- 3) 都市と廃棄物編集部：日の出町谷戸沢廃棄物広域処分場に係る「水質等検査結果解析調査」解説，都市と廃棄物，Vol.26，No.4，pp.39-41，1996。
- 4) 厚生省水道環境部長通知：衛管284号 国庫補助に係る廃棄物最終処分場指針の一部改正について，1994。
- 5) Knipschild, F. W.: Selected Aspects of Dimensioning Geomembrane for Groundwater Protection Applications, *Proc. of the Int. Conf. on Geomembranes*, Vol.II, pp.439-443, 1984。
- 6) Giroud, J. P.: Quantification of Geosynthetics Behavior, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembrane and Related Products*, Special Lecture & Keynote Lecture, pp.23-24, 1995。
- 7) Imaizumi, S., Yokoyama, Y., Takahashi, S. and Tsuboi, M.: Elastic Formula for Pull-out Behavior of Embedded Geomembrane, *Proc. of 12th Southeast Asian Geotechnical Conf.*, Vol.1, pp.57-62, 1996。
- 8) Koerner, R. M.: *Designing with Geosynthetics*, Second edition, pp.411-413, Prentice Hall, 1996。
- 9) 野本哲也，今泉繁良，阿部秀治，坪井政行，二見智子：基盤沈下に伴う敷設HDPEジオメンブレンの伸び挙動評価の模型実験，土木学会論文集，No.652/III-51，pp.35-45，1999。
- 10) Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, pp.66-76, John Wiley and Sons, 1951。
- 11) 今泉繁良，高橋悟，横山幸満：応力-ひずみ関係の非線形性を考慮したジオシンセティックスの引抜き挙動評価式，第31回地盤工学研究発表会講演論文集，pp.2477-2478, 1996。
- 12) 足立紀尚，木村亮，岸田潔，伊藤浩志：降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明，土木学会論文集，No.694/III-57，pp.277-296, 2001。
- 13) 宇佐見貞彦，山口隆三，鈴木茂，木原利照：しゃ水シートの長期特性と設計許容強度に関する一考察，第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集II，pp.814-816，1997。

(2001.4.13 受付)

STUDY ON ALLOWABLE PARTIAL SETTLEMENT OF FML SPREAD ON THE BOTTOM OF WASTE LANDFILL

Sadahiko USAMI, Shigeyoshi IMAIZUMI and Kenji KUZUMAKI

Many types of Flexible Membrane Liner (FML) made of HDPE, TPO, FPA, EPDM and so on are used as a component of a liner system in waste landfill. But the FML spread on the bottom may create a tensile strain when the bottom subsides partially. In this paper, the authors conducted trapped door tests to confirm the area of FML where it deformed and to find the distribution of tensile strain creating in it. They also measured the change of vertical pressure acting on the FML according to the settlement of the modeled base. Based on the experimental results, they presented modified non-linear elastic model to calculate the maximum tensile strain where the redistributed vertical pressure was considered. As the result, it was recommended that the allowable partial settlement of the FML is about 15 cm and 25 cm for HDPE FML and FPAFML, respectively.