

1. はじめに

1.1 研究の背景

沿岸部に建設される管理型廃棄物処分場では、処分場内の保有水等が周辺海域へ浸出した場合、周辺海域を汚染する恐れがあるため、それを防止するための施設や設備が必要である。具体的には、処分場内の保有水等を安定的に確保するため遮水工が設置される。

重力式護岸構造や捨石式傾斜護岸構造を有する管理型廃棄物埋立護岸では、護岸背後の遮水工に遮水シートが使用される場合が多い。遮水シートには水より重い（比重約 1.3）材質であるポリ塩化ビニル（PVC）が用いられることが多い。また、遮水シートに対する衝撃緩衝用保護材として不織布が用いられている。

(1) 遮水シートの挙動に関する既往の研究

管理型廃棄物埋立護岸遮水工に敷設される遮水シートは、常時、処分場内外の水位差や波圧による力、敷設面不陸や突起物による集中荷重、地盤の不等沈下に伴い発生する引張力等、さまざまな外力を受けている。これらの作用外力に対する遮水シートの力学的特性に関する研究には次のようなものがある。すなわち、小竹ら（2002）は側面および底面遮水工に二重遮水シートを敷設した場合に遮水工に作用する潮汐に起因する揚圧力を二次元 FEM により解析、評価している。地盤の不等沈下への変形追従性の評価手法については、「廃棄物最終処分場技術システムハンドブック」（最終処分場技術システム研究会、1999）や「廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領」（（社）全国都市清掃会議、2001）によって既往研究がまとめられ、主に陸上処分場を対象とした標準的な許容変形量評価手法が体系化されている。一方、海面処分場遮水工の斜面部分における不陸の精度については明確な基準はないが、施工方法の違いにより陸上処分場の斜面ほどの精度は期待できない。海面処分場斜面の不陸は裏込石個々の凹凸程度のもので主であるが、地震時や地盤層の圧密沈下、側方流動等により護岸構造物が沈下、水平変位を起こすと、遮水工斜面には陥没や欠落穴等の空隙が発生する可能性がある。裏込石個々の凹凸や突起物に対する遮水シートの変形挙動については、狩野ら（2004a, 2004b, 2004c）によって突き破り試験や耐圧試験が行われ、遮水シートの破断プロセスが明らかになった。しかし、敷設面の空隙のように局所的に大きな変形が発生する可能性がある場合の遮水シートの変形破断挙動については明らかにされていない。

以上の遮水シートの変形挙動に関する研究はすべて、遮水シートが平面的に敷設された状態であることを前提

とした検討結果である。しかし、実際の処分場では遮水シートは必ずしも平面的に敷設されているわけではなく、場所によっては折れ曲がりを伴う場合がある。遮水シートの折れ曲がりは施工上、シート端部における折り返し処理や処分場の隅角部処理によって発生する他、埋立による引き込みにより発生することも考えられる。遮水シートの折れ曲がり現象は材料強度の低下や遮水性能を低下させる恐れがあるが、物性の変化について詳細に検討した例はなく、試験方法および評価方法の確立が課題となっている。

(2) 不織布の挙動に関する既往の研究

不織布の保護性能に関する検討は、例えば宮地ら（2002）や近藤ら（2004a）によって報告がなされている。これらの研究により、敷設面の突起により遮水シートが突き破り力を受けた際の不織布の保護効果が明らかになった。しかし、敷設面に陥没や欠落穴等の空隙が生じた場合の不織布単体の挙動や、遮水シートと組み合わせた場合の不織布の挙動については明らかになっていない。

(3) 遮水シートの力学特性に関する従来の評価手法

廃棄物処分場遮水工に施工される遮水シートの力学特性の評価手法は、作用外力の種類や遮水シートの変形モードを考慮することなく、遮水シート単独で製品として出荷する際に行われる品質管理のための試験方法が基となっている。そのため、設計や施工管理に導入できる評価手法は確立されていない（小峯、2003）。

1.2 本研究の位置づけ

本研究は、国土技術政策総合研究所のプロジェクト研究である「ゴミゼロ型・資源循環型技術に関する研究」（平成 13～17 年度）において沿岸防災研究室が担当する「極大地震動を考慮した管理型廃棄物護岸の性能設計に関する研究」（平成 14～17 年度；以下「特別研究」と記述する）の一環として行ったものである。

極大地震動が管理型廃棄物護岸に作用した場合、護岸に大変形が発生し、遮水シートを用いた遮水工が破損・損傷する可能性がある。遮水工損傷による保有水等の海域流出を防ぐためには、地震動による遮水工の損傷の有無（遮水機能の健全性）について施設設計の際に照査する必要があるが、現状において遮水機能の健全性を照査する手法は存在しない。そこで、特別研究では管理型廃棄物埋立護岸が極大地震動により被災変形した際に、護岸変形が遮水機能に及ぼす影響について検討し、その結果を踏まえて遮水機能の地震時健全性の評価・検討手法を開発する。

特別研究では図-1 に示す評価項目について研究を行っ

ており、現在までに、一軸応力状態における遮水シートの変形強度特性の検討(狩野ら, 2003b), 突起物貫入時における遮水シートの変形強度特性の検討(狩野ら, 2004a), 地震動の作用による護岸変形が遮水シートの変形に及ぼす影響の検討(狩野ら, 2004d, 2004e)を実施してきた。

特別研究における本研究の位置づけは、地震動や地盤の不等沈下等により護岸ならびに背後地盤が変形し、その結果、遮水シート敷設面に陥没や欠落穴等による空隙が生じた場合の遮水シートならびに不織布の変形挙動を把握することである(図-1のゴシック体に対応)。本研究成果は、敷設面の空隙に由来する遮水シートの許容変形量を評価し、特別研究におけるシート材料の性能照査方法の開発に寄与するものである。

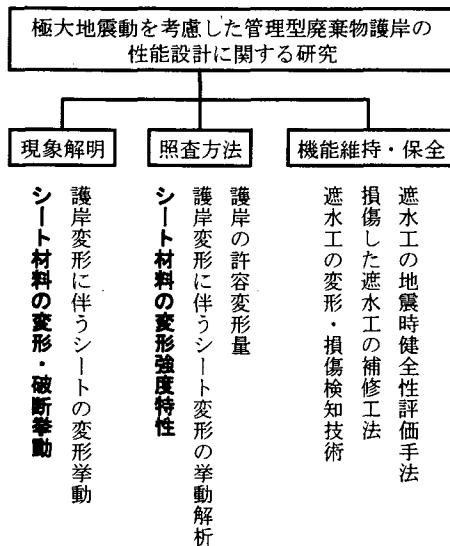


図-1 本研究の位置づけ

なお、本研究は土木シート技術協会との共同研究であり、本資料はその成果の一部をまとめたものである。また、本資料の一部は近藤ら(2003, 2004b), 清水ら(2004), および狩野ら(2004f)として報告されている。

1.3 目的

本研究では、敷設面の空隙により遮水シートおよび不織布が宙づり状態になった場合を想定し、以下に示す項目を目的とした実験および考察を行う。

- (1) 上載荷重が作用した時の遮水シートおよび不織布単体の変形強度特性を把握する
- (2) 折れ曲がりによる遮水シートの物性変化を把握する
- (3) 遮水シートの変形に対する不織布の保護効果を把握する

- (4) 遮水シートおよび不織布の変形挙動に対する応力-ひずみ曲線を用いた評価手法を提案し、その有効性を検討する

上記(1)~(3)の目的を達成するため、本研究では試料に等分布荷重を作用させる試験方法として一般的な水圧膨張実験(ASTM D3786-01 “Standard test method for hydraulic bursting strength of textile fabrics-diaphragm bursting strength tester method”に準拠)を行う。また、変形中の遮水シートのひずみを計測することにより、遮水シートの変形挙動を定量的に把握する。上記(4)については実験で得られた水圧、膨張変位を換算することにより応力-ひずみ曲線を作成し、一軸引張試験における破断時性能と比較する。さらに、ひずみの計算値と計測値を比較することにより、ひずみの計算方法の妥当性および計算結果の有効性について検討する。

1.4 本資料の構成

本資料の構成を以下に示す。

2章では、水圧膨張実験について、実験概要、実験方法、実験条件、実験ケースを示す。

3章では、水圧膨張実験の結果得られる軟質PVCの水圧-膨張変位曲線、および軟質PVCのひずみ計測結果について示し、等分布荷重が作用した場合の軟質PVCの変形強度特性について考察する。

4章では、軟質PVCの変形挙動について水圧、膨張変位を変換することにより応力-ひずみ曲線を作成し、一軸引張試験において得られる破断時性能と比較する。また、ひずみの計算値と計測値を比較することにより、ひずみの計算方法の妥当性および計算結果の有効性について検討する。

5章では、水圧膨張実験の結果得られる短繊維不織布単体および軟質PVCと重ねた時の水圧-膨張変位曲線について示し、等分布荷重が作用した場合の短繊維不織布の変形強度特性と遮水シートの変形に対する保護効果について考察する。さらに、水圧、膨張変位を変換することにより応力-ひずみ曲線を作成し、一軸引張試験において得られる破断時性能と比較する。

6章は本研究から得られる結論である。7章では、今後の研究方策や問題点の抽出、成果の活用法についてまとめる。

2. 水圧膨張実験

2.1 実験概要

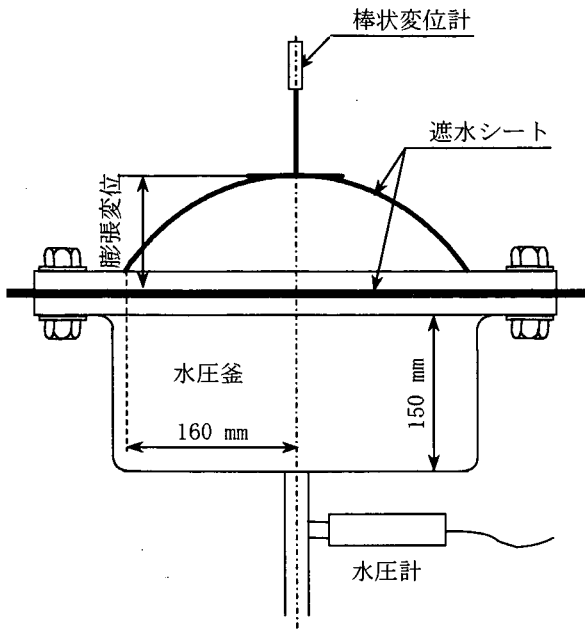


図-2 水圧膨張実験装置

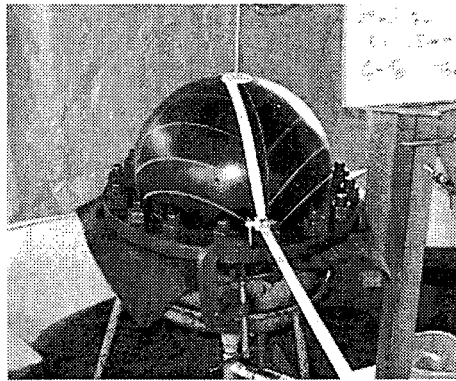


写真-1 水圧膨張実験の様子

水圧膨張実験は、敷設面に空隙が発生し遮水シートが宙ぶり状態になった場合を想定し、上載圧による等分布荷重を受けて遮水シートが膨張変形する様子を再現することができる。実験における載荷水圧および膨張変位はそれぞれ、現場での土被り圧および変形量に相当する。

水圧膨張実験装置は、図-2に示すような内径32 cm、深さ15 cmの円柱状水圧釜および遮水シートを固定するための治具で構成されており、固定された遮水シートの下面中央から水を供給し、水圧を作用させることができる。実験の状況を写真-1に示す。

実験における計測項目は水圧と膨張変位である。実験結果はこれらの計測値をプロットした水圧-膨張変位曲線として得られる。水圧-膨張変位曲線における試料の性能値は、最大水圧とその時の膨張変位、および破断時の水圧と膨張変位によって特徴づけられる。

2.2 実験に使用した材料

実験に使用した遮水シートは、ポリ塩化ビニル (PVC) 系シート (再生 PVC, 軟質 PVC, 超軟質 PVC), ポリエチレン (PE) 系シート (HDPE, MePE, SMePE) およびポリプロピレン (PP) 系シート (PPA) である。再生 PVC は農業用ビニルフィルムや電線被覆材等から回収されたものを原料としたリサイクルシートで、一軸引張試験における破断時ひずみの規格値は 250% 以上である。軟質 PVC は 300% 以上の破断時ひずみを有し、超軟質 PVC はそれらをさらに上回る性能 (規格値: 400% 以上) をもつ。HDPE は数ある遮水シートの中で機械的強度が最も大きい材料の一つである一方、破断時ひずみは小さい。PE 系シートの中でも柔軟性を重視して開発されたのが MePE であり、さらに比重を増して水に沈む材料として開発されたのが SMePE である。PPA はポリプロピレンを使用した熱可塑性エラストマーシートで柔軟性と温度安定性に富んでいるが、PE 系と同様、比重が 0.9 程度であるため水に沈まない。これらの遮水シートの一軸引張試験における物性を付録の表-A.1 に示す。

これらの遮水シートのうち、陸上処分場の遮水工には主に HDPE が、海面処分場の遮水工には主に軟質 PVC がそれぞれ用いられている。本研究が対象とするのは海面処分場であるので、第3章および第4章では主に軟質 PVC に関する実験結果を述べる。他の遮水シートの実験結果については付録 C に記載する。

「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令の運用に伴う留意事項」によると、廃棄物最終処分場の遮水シートの厚さは 1.5 mm 以上と規定されている。陸上処分場の HDPE は 1.5 mm、海面処分場の軟質 PVC は 3.0 mm のシートの施工実績が多い。このため本実験では、PE 系シートと PP 系シートについては 1.5 mm を、PVC シートについては 3.0 mm と他のシートとの比較のため 1.5 mm の 2 種類を使用した。

次に、実験に使用した不織布は 6 種類の短繊維不織布と 3 種類の長繊維不織布である。便宜上、これらの不織布を短 A, 短 B, 短 C, 短 D, 短 E, 短 F, 長 A, 長 B, 長 C と記述する。各種不織布の一軸引張試験における性能値を表-A.2 に示す。短 A と短 F は陸上処分場遮水工の保護マットとして、短 B は海面処分場遮水工の保護マットとしての施工実績が多い。短 C, 短 D, 短 E は本実験用に作製した試作品である。また、長 A, 長 B, 長 C は目付量、厚さが異なる材料である。上述したように、廃棄物処分場の遮水工に敷設される保護マットには主に短繊維不織布が多く用いられることから、第5章では短繊維不織布

に関する実験結果を述べる。長繊維不織布の実験結果については付録Cに記載する。

2.3 実験方法

実験手順はまず、水圧釜の上フランジ面に試料（遮水シートもしくは不織布）を置き、さらにフランジを置いて試料を挟みボルト固定する。その後、電動ポンプにより送水を行い、試料に水圧を载荷する。送水速度は 6.0 l/min である。この時、水温は常温（21℃）と低温（4℃～7℃）に設定した。

実験中は試料が破断するまでの水圧と膨張変位を計測した。不織布単体の性能を評価する場合、不織布自体は遮水性能を有しないため、厚さ 0.2 mm の遮水シート（軟質 PVC）を不織布の下に敷いた。

なお、膨張変位を計測する変位計の容量は 30 cm である。破断時の膨張変位が変位計容量を越えると予想される場合には、予め変位計をシート面から 4～9 cm 浮かせ、シート面からの計測領域を見掛け上大きくして破断時の膨張変位を計測することとした。

2.4 評価項目および実験条件

実験での評価項目および実験条件を表-1 に示す。遮水シート単体を用いた実験での評価項目は、水温、遮水シ

表-1 水圧膨張実験の実験条件

(a) 遮水シート単体の場合

評価項目	実験条件
種類	PVC（再生、軟質、超軟質）、HDPE、MePE、SMePE、PPA
初期の厚さ	PVC：1.5 mm、3.0 mm その他：1.5 mm
折れ曲がりの有無・回数	無し、1回、2回
水温	4℃、21℃

(b) 不織布単体の場合

評価項目	実験条件
種類	短繊維不織布（6種類）、長繊維不織布（3種類）
水温	4℃～7℃

(c) 遮水シートと不織布を重ねた場合

評価項目	実験条件
種類	軟質PVC（3.0 mm厚）+短B、短D、短F、長B、長C HDPE+短B、短F、長B、長C
水温	4℃～7℃

ートの厚さ、遮水シートの折れ曲がりの有無および回数である。水温を 4℃および 21℃に設定して実験を行うことにより、水温が遮水シートの変形強度特性に与える影響について検討する。また、厚さが 1.5 mm および 3.0 mm の遮水シートを使用することにより、厚さが遮水シートの変形強度特性に与える影響について検討する。遮水シートの折れ曲がりについては、折れ曲がりの回数が 1 回の場合と 2 回の場合、および折れ曲がりがない場合での実験結果を比較することにより、折れ曲がりの有無および回数が遮水シートの変形強度特性に与える影響について把握する。なお、遮水シートの折り曲げ方法に関する詳細は付録Bに記載する。

遮水シートと不織布を重ねた場合は、各種不織布の遮水シートの変形および破断に対する保護効果について検討する。

2.5 遮水シートのひずみの計測方法

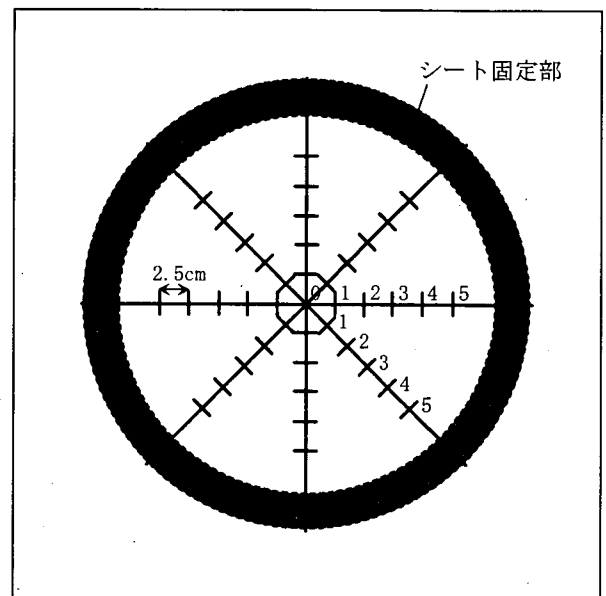


図-3 遮水シートのひずみ計測線

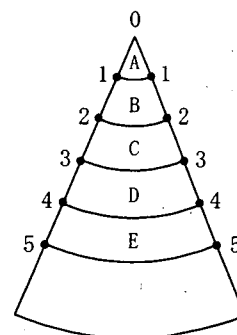


図-4 面ひずみの計算

遮水シート（軟質 PVC）の膨張変形中におけるひずみを計測するため、遮水シートにはあらかじめ図-3のような計測線（太実線）を引いておく。ひずみは、放射方向と周方向の2方向について計測した。すなわち、計測線上に等間隔に記した番号間の長さ（放射方向は区間 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5; 周方向は区間 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5）をシート曲面に沿って計測することにより各方向のひずみを求めた。これらを線ひずみと定義する。さらに、図-4に示す計測線で囲まれた領域（A~E）について計測値を用いて面積を計算し、その変化率からひずみを求めた。これを面ひずみと定義する。なお、計測の際は送水を停止し、遮水シートの膨張変形を一時的に停止させた。

3. 遮水シートに関する実験結果

本章では水圧膨張実験における遮水シート（軟質 PVC）の破断の様子と水圧、膨張変位の計測結果について示す。その他の遮水シートの結果については付録 C に示す。

3.1 軟質 PVC の変形強度特性

(1) 破断挙動

水圧膨張実験において軟質 PVC が破断に至る様子は、変形に伴い膨張頂部付近の色が黒色から徐々に薄くなり白色に変わり、やがて音響とともに膨張頂部から一気に放射方向に引き裂かれるというものであった(写真-2)。これは、膨張頂部はシート取付部から最も離れており、ボルト固定による変形拘束の影響が最も少ない領域であるため、変形が破断に至る塑性ひずみに他の領域に比べ最も早く達した結果であると考えられる。

(2) 水圧-膨張変位曲線

軟質 PVC の最大水圧時および破断時の水圧、膨張変位の値を表-2に示す。実験を複数回行ったケースについては破断時膨張変位が最も小さかった実験結果を示している。膨張変位と水圧の関係について、シートの厚さを変えた場合および水温を変化させた場合の結果をそれぞれ図-5、図-6に示す。水温21℃、厚さ3.0 mmの曲線は初期段階におけるデータが欠落しているが、これは遮水シートの膨張変位が変位計容量の30 cmを越えると実験前に判断されたため、変形の初期段階では変位計が遮水シートから浮いていることにより計測が行えなかったためである。すべての実験ケースにおいて水圧は膨張変形中に最大値をとり、その後破断するまで減少する傾向がみられ、最大値の約10~15%減少する。

厚さが1.5 mmと3.0 mmの場合を比較すると、厚さが2倍になることによって同じ膨張変位時の水圧は約2倍に

増加した。一方、最大水圧時および破断時の膨張変位は厚さ1.5 mm, 3.0 mmともにほぼ同じ値となり、破断時の

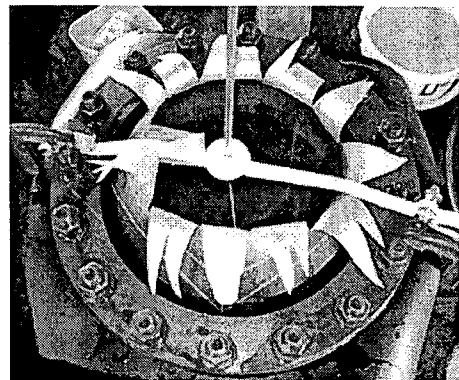


写真-2 遮水シート（軟質PVC）の破断の様子

表-2 軟質PVCの実験結果

厚さ (mm)	水温 (℃)	水圧最大時		破断時	
		水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)	水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)
1.5	21	0.115	16.8	0.104	22.6
3.0	21	0.219	15.7	0.184	25.3
3.0	4	0.325	13.4	0.277	22.0

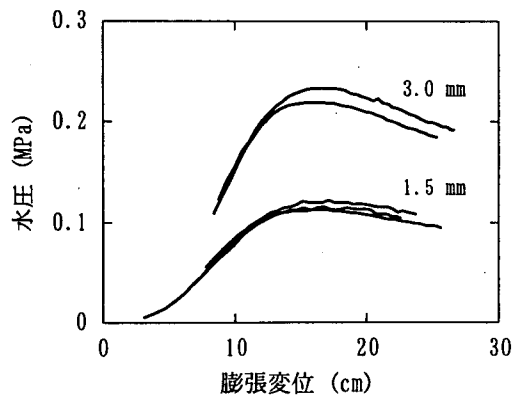


図-5 厚さの相違による比較（水温21℃）

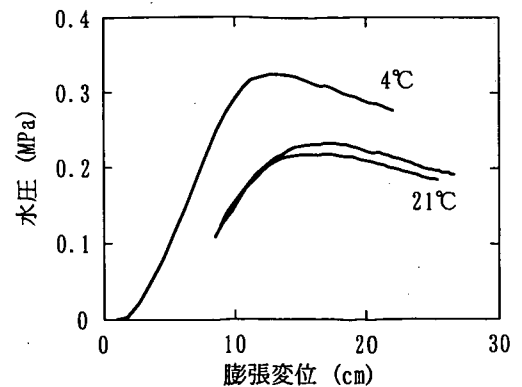


図-6 温度の相違による比較（厚さ3.0 mm）

膨張変位は厚さの影響をあまり受けない。

次に、水温が4℃と21℃の場合を比較すると、水温の増加に伴い最大水圧は減少するが、破断時の膨張変位は増加した。これは、PVCが熱可塑性の素材であるため、温度増加によって軟化し伸びやすくなった結果であると考えられる。

(3) 実験結果の再現性

水圧-膨張変位曲線の再現性について検討するため、軟質PVCとHDPEについて厚さ1.5mm、水温21℃での実験を3回行った結果を図-7に示す。また、最大水圧時および破断時における水圧、膨張変位について、3回の実験における最大値と最小値の差と、この差を3回の実験値の算術平均値で除した値をばらつき度として表-3に示す。その結果、軟質PVCの値のばらつきはHDPEに比べて小さく、水圧、変位ともにおおむね平均値の10%前後であった。また、水圧-膨張変位曲線の傾向もほぼ一致することから、軟質PVCの水圧-膨張変位曲線の再現性は比較的良好であると判断される。

(4) 軟質PVCのひずみ計測結果

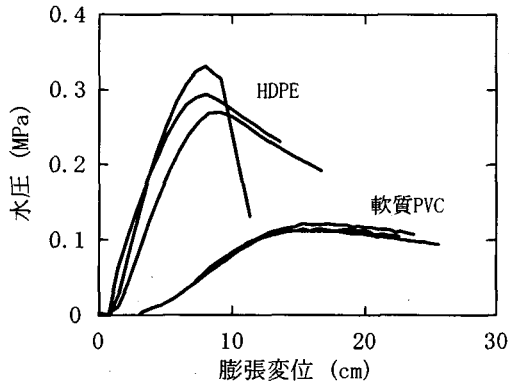


図-7 水圧-膨張変位曲線の再現性

表-3 遮水シートの計測値のばらつき

(a) 軟質PVC

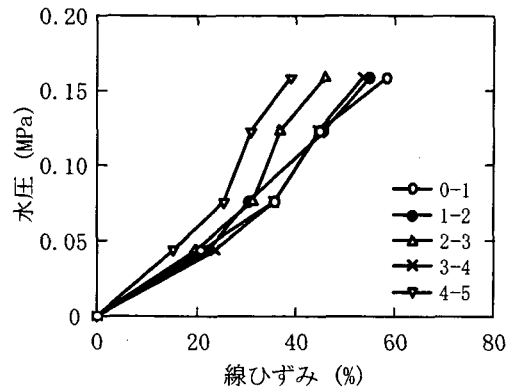
計測点	計測項目	平均値	値の差*	ばらつき度(%)**
最大水圧時	水圧(MPa)	0.116	0.010	8.7
	変位(cm)	16.7	1.2	6.9
破断時	水圧(MPa)	0.102	0.014	13.2
	変位(cm)	24.0	3.0	12.7

(b) HDPE

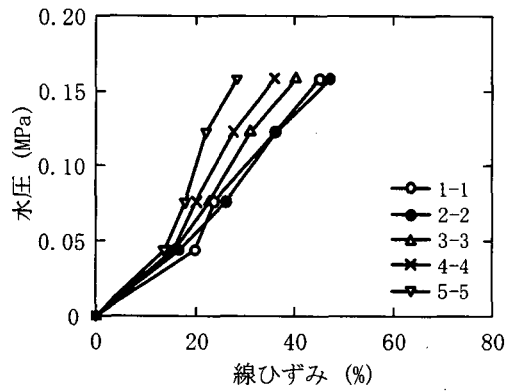
計測点	計測項目	平均値	値の差*	ばらつき度(%)**
最大水圧時	水圧(MPa)	0.298	0.061	20.3
	変位(cm)	8.4	1.1	12.6
破断時	水圧(MPa)	0.184	0.099	53.7
	変位(cm)	13.9	5.4	38.9

* (最大値)-(最小値)
** (値の差)/(平均値)

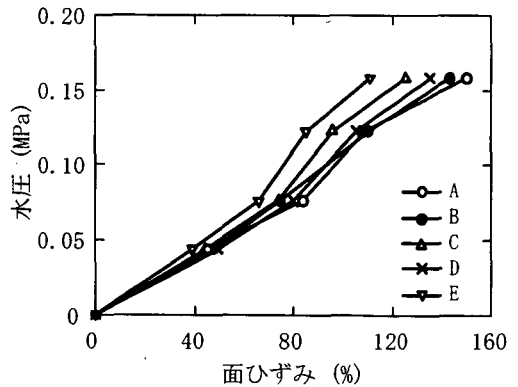
膨張変形過程における遮水シートのひずみを計測した結果を図-8に示す。水温は21℃、厚さは3.0mmである。



(a) 放射方向の線ひずみ分布



(b) 周方向の線ひずみ分布



(c) 面ひずみ分布

図-8 遮水シートのひずみ分布

表-4 区間“0-1”と“4-5”の線ひずみの比較

水圧(MPa)	0.04	0.08	0.12	0.16
0-1(%)	20.8	35.9	44.8	58.4
4-5(%)	15.1	25.6	31.1	39.1
(0-1)/(4-5)	1.38	1.40	1.44	1.49

凡例の“0-1”や“1-1”はそれぞれ図-3に示した計測線の計測区間に対応し，“0”は中心を指す。また、図中のプロットは計測開始時の水圧を示している。放射方向、周方向ともに線ひずみは膨張頂部付近で最も大きく、遮水シート取付部に向かって減少する傾向が見られた。両方向のひずみを比較すると、変形初期（水圧0.04 MPa）において両者の大きさはほぼ等しく、遮水シートは球状に膨張したと考えられる。しかしその後の変形過程においては放射方向のひずみが大きくなり、形状が若干凸状に変化しながら変形が進行したと考えられる。面ひずみは放射、周各方向の計測長の積で表されるため、線ひずみと同様に膨張頂部から取付部に向かって減少する傾向が見られる。このことから、膨張頂部では他の場所に比べて最も早く破断時ひずみに達すると考えられ、膨張頂部において破断するという観察結果とも一致している。

次に、膨張頂部（区間“0-1”）とシート取付部付近（区間“4-5”）の線ひずみを比較した結果を表-4に示す。両者の比は水圧の上昇に伴い増加する傾向が見られることから、大変形になるにしたがって遮水シートは膨張頂部に近いほど変形が進行していると言える。

なお、ひずみ計測中の遮水シートの膨張変形を抑えるため、その間の送水を停止したところ、計測を行っている間に水圧が減少し、計測終了時の水圧は計測開始時から約2割減少した。このような水圧の段階的増減と水圧変化が遮水シートの変形に及ぼす影響については不明であり、今後検討する必要がある。

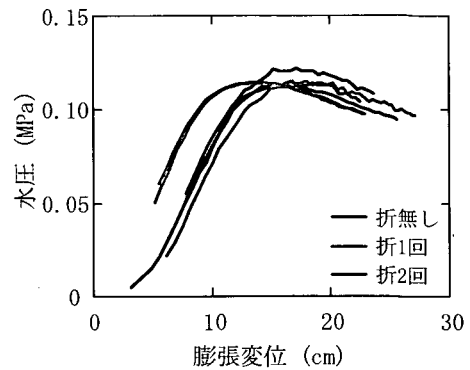
3.2 折り曲げた軟質PVCの変形強度特性

(1) 破断挙動

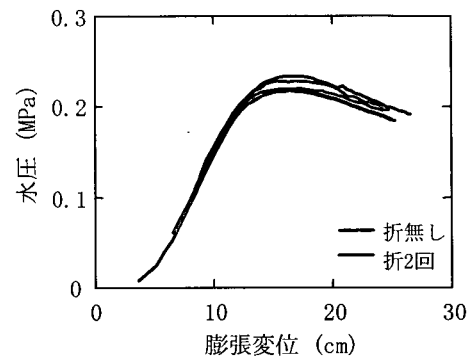
折り曲げた軟質PVCの破断は、折り曲げた回数によらず、すべて膨張頂部において放射状に引き裂かれる破裂型として発生した。この特徴は折れ曲がりがない場合の破断現象と一致する。したがって、軟質PVCの破断挙動は折れ曲がりの影響を受けないと判断される。

(2) 水圧-膨張変位曲線

折り曲げた軟質PVCの水圧-膨張変位曲線を図-9に示す。厚さ1.5 mmの場合の最大水圧および破断時膨張変位は、1回折れの場合は0.114 MPa、23.0 cm、2回折れの場合は0.114 MPa、22.8 cmであった。これらの結果は折り曲げない場合の計測値（0.115 MPa、22.6 cm）とほぼ一致する。さらに、曲線の傾向も折れ曲がりの有無、回数によらずほぼ一定である。一方、厚さが3.0 mmの場合、2回折れでの最大水圧および破断時膨張変位はそれぞれ0.217 MPa、22.0 cmであり、折り曲げない場合の値（0.244 MPa、17.4 cm）と比べて性能の低下は見られ



(a) 1.5 mm厚



(b) 3.0 mm厚

図-9 軟質PVCの折れ曲がり特性

ない。以上の結果から、厚さが1.5 mmと3.0 mmの軟質PVCは折れ曲がりがあることによって材料の物性が低下することはないと判断できる。

4. 応力-ひずみ曲線による評価モデルの提案

前章では、水圧膨張実験における遮水シートの変形強度特性を評価する手段として水圧-膨張変位曲線を作成した。しかしながら、水圧-膨張変位曲線は計測値をそのままグラフ上にプロットしたに過ぎず、変形時の応力やひずみの値は不明である。

遮水シートの品質管理評価法として定着しているのは、一軸引張試験（試験方法はJISA6008に準拠）における応力-ひずみ曲線である。応力は荷重を実験前の断面積で除することにより算出され、ひずみは変形前と変形時の標線間距離の比から算出される。遮水シートの応力-ひずみ曲線による評価手法は現在において技術的に浸透していることから、水圧膨張実験についても同様の評価手法を確立することが必要である。

そこで本研究では、水圧をシート取付部面積で除することによりシート取付部における応力を算出し、ひずみを変形前と変形時の面積比から算出することにより、水

圧膨張実験における応力-ひずみ曲線を検討する。

$$S = \pi (r^2 + h^2) \quad (7)$$

4.1 水圧-膨張変位曲線の応力-ひずみ曲線化

線ひずみの計測結果(図-8)より、遮水シートは変形の初期段階においてはほぼ球状に膨張すると考えられる。変形が進行するにしたがいその形状は球形から徐々に変化するが、解析の簡便性のため、本研究では遮水シートは球状を維持しながら膨張するものとする。

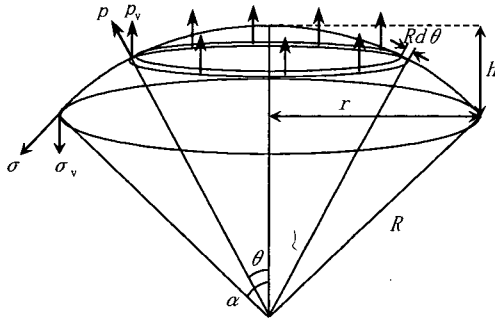


図-10 モデル概念図

遮水シートの変形を模式的に表したものを図-10に示す。遮水シートに作用する力について、シート取付部における放射方向の応力の鉛直成分と水圧の鉛直成分の総和は釣り合うので、

$$2\pi r t \sigma_v = \int_0^\alpha p_v \cdot 2\pi R \sin \theta \cdot R d\theta \quad (1)$$

ここで、 r : 容器の半径、 t : 実験前の遮水シートの厚さ、 σ_v : 放射方向の応力の鉛直成分、 p_v : 水圧の鉛直成分、 R : 球の半径、 α : シート取付部の鉛直方向からの角度である。

σ_v および p_v はそれぞれ次式で表される。

$$\sigma_v = \sigma \sin \alpha \quad (2)$$

$$p_v = p \cos \theta \quad (3)$$

R および α はそれぞれ次式で求められる。

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} \quad (4)$$

$$\sin \alpha = \frac{r}{R} \quad (5)$$

ただし、 h は遮水シートの膨張高さである。

式(1)を計算することにより、 σ は以下のように求まる。

$$\sigma = \frac{\sigma_v}{\sin \alpha} = \frac{R}{2t} p \quad (6)$$

次に、遮水シートの面ひずみを求めるにあたり、図-10における球冠部の表面積 S は次式で表される。

これにより、面ひずみは幾何学的に次式によって求まる。

$$\varepsilon = \frac{S}{\pi r^2} - 1 = \left(\frac{h}{r}\right)^2 \quad (8)$$

4.2 一軸引張試験における破断時性能との比較

式(6)および式(8)を用いて水圧、膨張変位をそれぞれ応力、面ひずみに換算し得られた応力-ひずみ曲線を図-11に示す。水圧-膨張変位曲線では明瞭な相違が見られた厚さの影響は、応力-ひずみ曲線では見られず、厚さ1.5mmと3.0mmの両曲線の応力はほぼ一致した。これは、応力が厚さを考慮した計算式で求められるためである。また、水温21℃、厚さ1.5mmでの破断強度および破断時ひずみについて、一軸引張試験(試験方法はJISA6008に準拠、温度:23℃、試料厚さ:1.5mm、引張速度:50mm/min、供試体形状:ダンベル状1号形)結果と比較したものを表-5に示す。水圧膨張実験から得られた破断強度および破断時ひずみは一軸引張試験における値と大きく異なる数値を示している。

両者の破断時性能が異なる理由として、それぞれの応力状態が異なることが挙げられる。一軸引張試験では当然のことながら、遮水シートは一軸応力状態で変形するのに対し、水圧膨張実験では、遮水シートは膨張頂部において等方的に応力が作用する、いわば均等二軸応力状態となる。応力状態が異なると、遮水シートを構成する

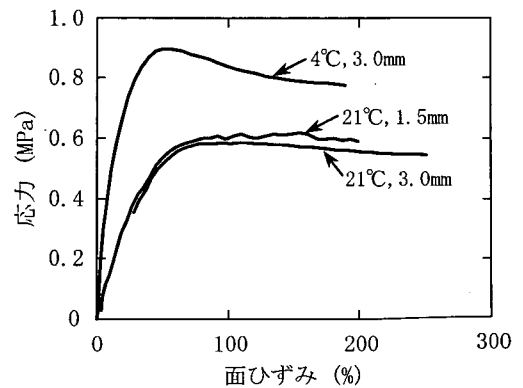


図-11 軟質PVCの応力-ひずみ曲線

表-5 軟質PVCの破断時性能

試験方法	強度 (MPa)	ひずみ (%)
一軸引張	20.9	342
水圧膨張	0.6	200

高分子鎖の伸張に伴う配向の仕方も異なるため、その結果として表-5のような破断時性能の相違が現れたと推察される。

異なる応力状態における材料の物性を比較した例として、山下ら(1994)はカーボンブラック補強ゴムの一軸応力伸張測定および均等二軸バルーン測定を行った。その結果、二軸応力状態は一軸応力状態に比べて破断強度は2~5倍、破断時ひずみは若干小さい傾向を示した。ここで、バルーン測定法における破断時の強度とひずみは、バルーンが破断する膨張頂部における計測値を換算しており、本研究で算出した応力、ひずみとは換算方法が異なる。本実験結果では、水圧膨張時の遮水シートの破断強度は一軸引張時の値に比べて明らかに小さく、山下ら(1994)の傾向と異なる。これは、材料の違いもさることながら、応力、ひずみの換算方法が異なることによると考えられる。

以上より、遮水シートの破断時性能は応力状態によって大きく変化することがわかった。したがって、実際の現場における遮水シートの変形強度特性を把握するためには、想定される遮水シートの応力状態を考慮し、それに対応した実験および評価手法によって検討すべきである。

4.3 ひずみの計測値と計算値の比較

図-12は、水温21℃、厚さ3.0 mmの遮水シートのひずみ

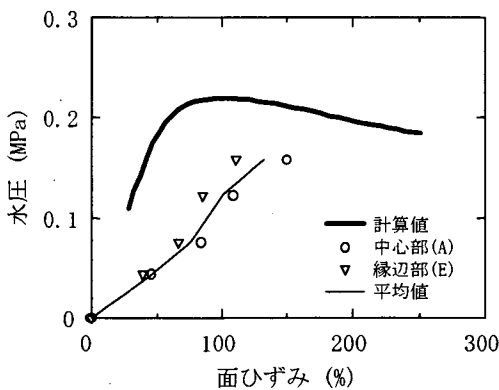


図-12 面ひずみの計測値と計算値の比較

表-6 中心部における面ひずみの計測値と計算値の比較

水圧 (MPa)		0.04	0.08	0.12	0.16
計測値	A (%)	45.4	83.9	108.7	150.0
	平均値 (%)	45.3	75.8	101.0	132.9
計算値 (%)		11.3	19.5	30.2	42.0
A/計算値		4.0	4.3	3.6	3.6
平均値/計算値		4.0	3.9	3.3	3.2

の計測値(面ひずみ)と式(8)による計算値をそれぞれ水圧に対してプロットした結果である。計測値(A~Eの平均値)と計算値との間には3~4倍の差違がみられ、中心部(A)での値と計算値とは同程度かそれを上回る差違があった(表-6)。これらの差違の原因については以下に示す理由が考えられる。

膨張変形中の遮水シートの厚さは場所によって異なり、縁辺部から膨張頂部に向かって減少すると考えられる。このような厚さの分布は遮水シートの変形形状とも密接に関連するものであるが、式(8)から得られるひずみは厚さを考慮していない。

膨張変位が大きくなると、水に作用する重力の影響により、遮水シートに作用する水圧は均質ではなく、膨張頂部と縁辺部ではわずかに差ができると考えられる。このため、変形が進行するにしたがって水に作用する重力が遮水シートの変形に及ぼす影響は無視できなくなる可能性がある。

計測値は遮水シートの全範囲を対象としておらず、計測点番号“5”(図-3参照)から遮水シート端部の間のひずみは計測されていない。

前述のように、遮水シートのひずみ計測の際に水圧载荷用の送水を停止したことが、その後の遮水シートの変形に影響を及ぼした可能性が考えられる。

以上の理由により、式(8)によるひずみの計算手法は遮水シートの変形形状が球状である初期段階においては有効であるが、遮水シートの破断時挙動を評価する際、破断部近傍のひずみを過小評価することになる。そのため、厳密に遮水シートの破断時性能を検討するためには、破断する膨張頂部のみを対象とした応力の算出方法ならびにひずみの計算手法を開発することが必要である。

5. 不織布に関する実験結果および考察

本章では水圧膨張実験における短繊維不織布の破断の様子と水圧、膨張変位の計測結果について示す。長繊維不織布の結果については付録Cに示す。

5.1 短繊維不織布の変形強度特性

(1) 破断挙動

短Aを除く短繊維不織布の破断は、膨張頂部において瞬間的に引き裂かれる現象として発生した(写真-3)。不織布の破断後、裂け口から厚さ0.2 mmの遮水シートが膨張しながら飛び出し、その後遮水シートも破断した。一方、短Aは瞬間的に破断せず、薄くなった箇所が徐々に開きながら破断が進行するというものであった(写真

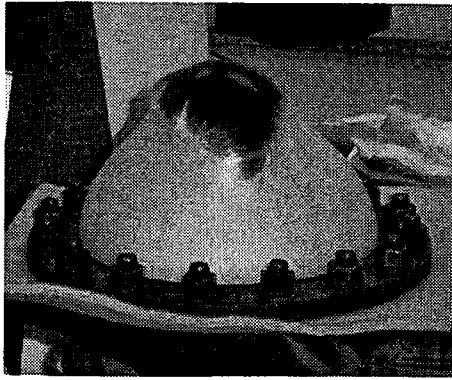


写真-3 短繊維不織布の破断 (短B)

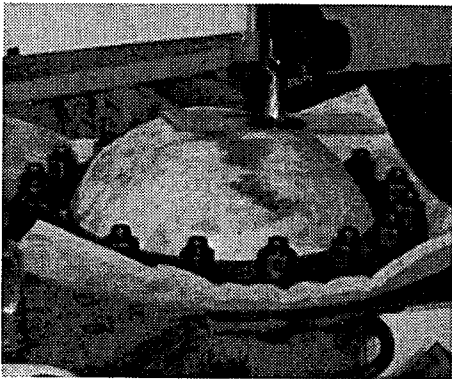


写真-4 短繊維不織布の破断 (短A)

表-7 短繊維不織布の実験結果*

種類	目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	水圧最大時		破断時	
			水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)	水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)
短A	1100	10	0.076	5.0	0.026**	16.9**
短B	700	5	-	-	0.251	14.6
短C	1350	11	-	-	0.317	14.8
短D	1500	11	-	-	0.378	12.2
短E	1300	13	0.283	12.9	0.276	13.8
短F	1500	10	-	-	0.346	13.3
軟質PVC	-	0.2	0.018	19.5	0.017	22.6

* 水温は4℃～7℃に設定
** 短Aの数値は破断終了時の値

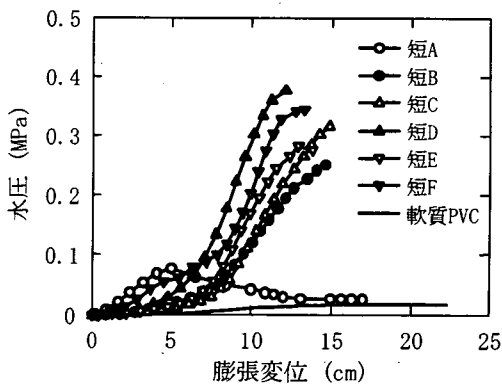


図-13 短繊維不織布の水圧-膨張変位曲線

-4) . その他の不織布の破断後の写真は付録 C に示す.

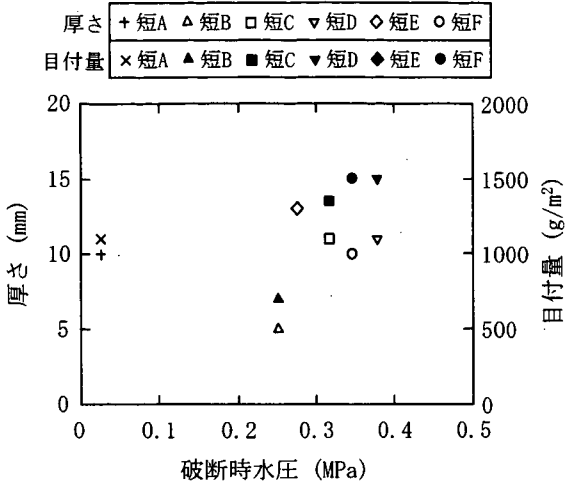
(2) 水圧-膨張変位曲線

短繊維不織布の最大水圧時および破断時の水圧, 膨張変位の各値を表-7 に, 水圧-膨張変位曲線を図-13 に示す. 長繊維不織布についての結果は付録 C に示す. 水圧を担保するため不織布の内側に敷いた厚さ 0.2 mm の遮水シートの水圧-膨張変位曲線は, 最大水圧が 0.018 MPa であり, 不織布の強度に比べると無視できる強度である. したがって, 図示した水圧-膨張変位曲線は不織布単体の性能曲線として見る事ができる. また, 表-7 において最大水圧時の数値が「-」のものは破断点と最大水圧点が等しい場合を意味する. 図表からも明らかなように, 短繊維不織布の破断は多くの場合, 最大水圧点で発生している.

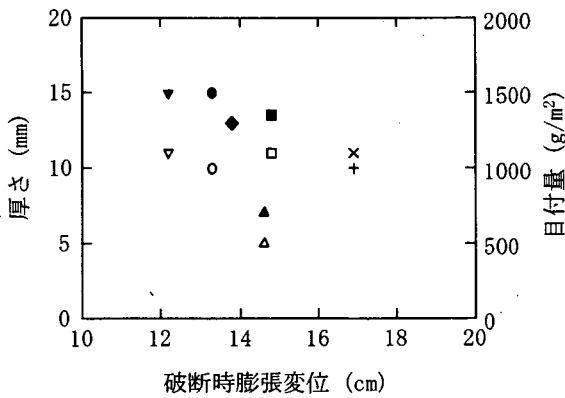
短 A を除く不織布の水圧-膨張変位曲線はどれも似た水圧の増加傾向を示すが, 概して破断時水圧が大きいものほど破断時膨張変位は小さく, 破断時膨張変位が大きいものほど最大水圧は小さい傾向が認められる. この中で, 短 C は破断時の水圧および膨張変位が他の不織布に比べて大きい値を示している. これは, 短 C が破断時の高ひずみ化を重視して製造されたことによる (表-A.2 参照). なお, 短 A の破断は薄くなった箇所が徐々に開きながら進行したため, 破断の開始時点の同定は困難であるが, おそらく最大水圧点から水圧が減少する過程において破断が進行したと考えられる.

不織布の種類による水圧-膨張変位曲線の差異は, その製造方法の違いに由来する. すなわち, 短 A を除く短繊維不織布は繊維を針で突くことにより絡めるニードルパンチ製法で作られるのに対し, 短 A は繊維を熱で溶融し圧着するサーマルボンド製法で作られた不織布である. 短 A を除く短繊維不織布は, 材料によって多少の差はあるものの, 膨張変位が 5~8 cm 以降の変形過程において水圧が急激に増加している. この区間は繊維相互の絡み合いによって強度が発揮された変形領域であると考えられる. 換言すれば, 膨張変位が 5~8 cm 程度であれば, 短繊維不織布は繊維間の滑りによって柔軟に変形できるものと推察される. これらの不織布に対し, 短 A は製造方法の違いにより繊維相互の絡みがないため, 他の不織布に比べ少ない変形量で破断が生じたと考えられる.

図-14 は短繊維不織布の破断時水圧および破断時膨張変位と厚さ, 目付量の関係を示したものである. 破断挙動が他と異なる短 A を除くと, 不織布の破断時水圧は厚さに対する関連性は少ないものの目付量には比例して増加する傾向が見られる. これに対し, 破断時膨張変位と厚さ, 目付量との関連性は見られない. これは, 目付量



(a) 破断時水圧と厚さ、目付量の関係



(b) 破断時膨張変位と厚さ、目付量の関係

図-14 短繊維不織布の破断時性能と厚さ、目付量の関係

や厚さの他に短繊維不織布を構成する短繊維相互の絡み具合が破断時の変位に影響を与えた結果であると推察される。

5.2 軟質PVCと短繊維不織布を重ねた時の変形強度特性

(1) 破断挙動

軟質PVCと短繊維不織布を重ねた場合、最初に不織布が引き裂かれて破断し、その破断口から軟質PVCが飛び出すように膨張し破断した。軟質PVCの破断面形状は放射状に引き裂かれる場合と直線的に引き裂かれる場合が観察された。破断後の状況を付録の写真-C.3に示す。

(2) 水圧-膨張変位曲線

厚さ3.0mmの軟質PVCと短繊維不織布(短B, 短D, 短F)を重ねた時の最大水圧時および破断時の水圧, 膨張変位の値を表-8に, 水圧-膨張変位曲線を図-15に示す。その結果, 最大水圧点是不織布の破断点に等しく, 不織布の破断後急激に減少した水圧はその後の膨張変形

表-8 軟質PVCと短繊維不織布を重ねた時の実験結果*

不織布の種類	目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	水圧最大時		破断時	
			水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)	水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)
短B	700	5	0.579	15.0	0.400	20.0
短D	1500	11	0.638	11.4	0.455	14.9
短F	1500	10	0.678	13.7	0.416	18.5

* 水温は4℃~7℃に設定

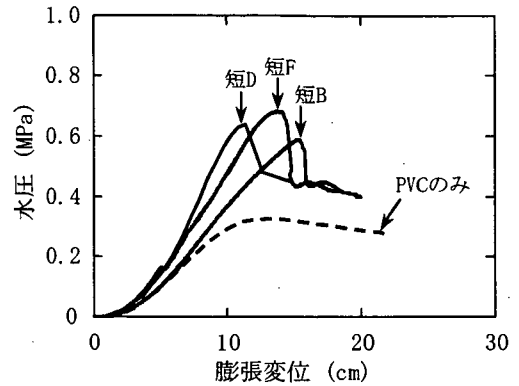


図-15 軟質PVCと短繊維不織布を重ねた時の水圧-膨張変位曲線

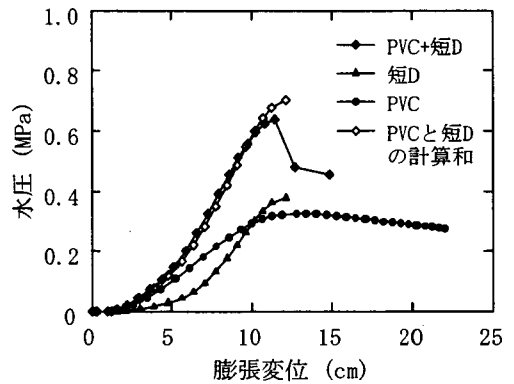


図-16 短繊維不織布の保護効果

過程においてほとんど変化しない。水圧の変化が少ない区間は遮水シートが引き裂かれた不織布の間から飛び出して膨張する段階に相当する。また、破断時膨張変位は最大で約20cm(短B)であり、軟質PVC単体の破断時膨張変位である22cmよりも小さい。これは、不織布破断後の遮水シートの膨張変形は不織布の破断領域内に限定されるため、同箇所において変形が集中し、遮水シート単体の場合の破断時膨張変位に達する前に破断が生じた結果であると考えられる。

(3) 短繊維不織布の保護効果

図-16は軟質PVC(厚さ3.0mm)と短繊維不織布(短D)を重ねた時の水圧-膨張変位曲線(◆印)と、それぞれ単体の場合における水圧-膨張変位曲線をグラフ上で

足し合わせた結果(◇印)を比較したものである。●印および▲印はそれぞれ軟質PVC、短D単体での結果である。図から明らかなように、短繊維不織布と軟質PVCを重ねた時の曲線は材料単体の挙動を足し合わせたものとほぼ一致した。このことから、短繊維不織布の遮水シートの変形に対する保護効果は不織布単体の性能に相当すると言える。

5.3 一軸引張試験における破断時性能との比較

式(6)および式(8)を用いて水圧、膨張変位をそれぞれ応力、面ひずみに換算し得られた応力-ひずみ曲線を図-17に示す。短Bの破断強度が他に比べて大きい。これは、短Bの厚さが5mmであり他の短繊維不織布の約半分の厚さしかないのである。

一軸引張試験における破断時性能と比較した結果を表-9に示す。水圧膨張時の破断強度は一軸引張時の1/6から1/11程度であり、破断時ひずみは同程度のものから約半分のものまで様々である。なお、短Aは破断点が明確でないため、表には最大水圧時の水圧と膨張変位の換算結果を示した。以上の結果から、不織布についても遮水シートと同様、試験方法が異なれば破断時性能は変化することが明らかとなった。不織布の変形破断挙動は製法や材質、繊維の長さ、繊維の絡み合いの程度など様々な要素が複雑に関与しているため、破断時性能は実際に想定される外力、変形の状態を考慮した試験方法で検討されることが重要である。

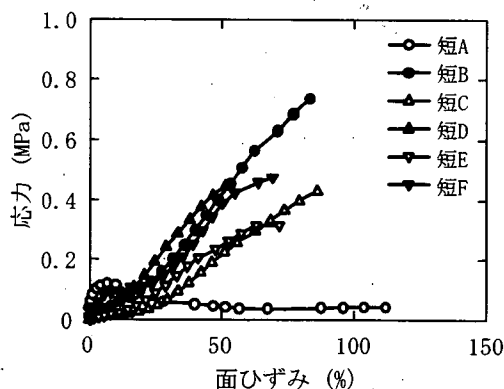


図-17 短繊維不織布の応力-ひずみ曲線

表-9 短繊維不織布の破断時性能

変形モード	物性	短A	短B	短C	短D	短E	短F
一軸引張	強度(MPa)	0.2	3.5	2.2	2.9	1.2	2.0
	ひずみ(%)	5	60	190	150	150	70
水圧膨張	強度(MPa)	0.1	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3
	ひずみ(%)	7	83	86	52	72	69

6. まとめ

本研究では、遮水シートの遮水工を有する管理型廃棄物埋立護岸を対象とし、シート敷設面の空隙により遮水シートおよび不織布が宙づり状態になった場合を想定した水圧膨張実験を行った。また、得られた水圧、膨張変位の各計測値からシート取付部における応力、面ひずみを算出し、一軸引張試験における応力-ひずみ曲線と同様の評価手法を試みた。以下に得られた結果について示す。

(1) 厚さ1.5mmと3.0mmの軟質PVCの破断時水圧はシート厚さに比例して増加するが、破断時膨張変位は厚さによらず一定である。また、水温の増加に伴い最大水圧は減少し、破断時膨張変位は増加した。

(2) 軟質PVCの破断現象および水圧-膨張変位曲線は、折れ曲がりの有無や回数によって変化しなかった。

(3) 軟質PVCの線ひずみは、放射方向、周方向ともに膨張頂部付近で最も大きく、シート取付部に向かって減少した。

(4) 水圧、膨張変位の計測値を用いて応力-ひずみ曲線を作成することにより、膨張変形する遮水シートの破断時性能を得ることができた。また、その値は一軸引張試験における破断時性能と大きく異なるものであった。

(5) 膨張過程において、ひずみの計算値と膨張頂部におけるひずみの計測値は3~4倍程度の差違があった。これは、ひずみが局所的な変形を考慮しない平均値として計算されるためである。

(6) 水圧膨張実験における短繊維不織布の破断時水圧は目付量に比例した。一方、破断時膨張変位は目付量や厚さとの関連性がなかった。

(7) 遮水シートの変形に対する短繊維不織布の保護効果は、不織布単体の性能に等しい。

これらの結果は、管理型廃棄物埋立護岸遮水工における地盤の空隙が遮水シートおよび不織布の変形破断に及ぼす影響を把握する際の基礎資料となると考えている。

7. おわりに

本研究で得られた結果は、管理型廃棄物埋立護岸遮水工の遮水シートおよび不織布について、敷設面の空隙により上載荷重を受け変形した場合の変形強度特性を検討するうえで貴重なデータである。とくに、等分布荷重を受けた時の遮水シートおよび不織布の破断に至る変形プロセスを評価する際に非常に有効である。

本論文では、遮水シートのひずみ計測方法として遮水

シートに引かれた計測線長を実験中に計測する方法を示した。この方法は、ひずみの計測中は遮水シートの変形を一時停止させるため、その影響として水圧減少や応力緩和が発生してしまう。さらに、得られたデータは離散的であり破断時近傍のデータを得ることが極めて困難であるため、遮水シートの変形挙動を把握する手法としては必ずしも最適ではない。遮水シートの変形を止めず、なおかつ破断時近傍のひずみを計測可能な方法として、本研究ではビデオカメラで遮水シートの変形過程を撮影し、その画像をパソコンに取り込み画像解析することによりひずみを算出する手法を現在開発中である。その結果については改めて言及する。

(2004年12月1日受付)

参考文献

- 狩野真吾, 近藤三樹郎, 長尾毅, 諸星一信 (2003a) : 遮水シートおよび不織布の応力緩和特性, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2165-2166.
- 狩野真吾, 諸星一信, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2003b) : 廃棄物海面処分場遮水工に用いられる遮水材の変形強度特性, 国土技術政策総合研究所資料, No. 124, 23p.
- 狩野真吾, 諸星一信, 小田勝也 (2004a) : 廃棄物海面処分場遮水シートの突き破り抵抗に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No. 142, 154p.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2004b) : PVC遮水シートの突起物貫入に対する変形破断プロセス, ジオシンセティックス技術情報, Vol. 20, No. 1, pp. 18-23.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2004c) : 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.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2004d) : 管理型廃棄物埋立護岸の地震時変動に伴う遮水シートの変形特性, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 796-800.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2004e) : 管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの地震時変形特性, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 1131-1133.
- 狩野真吾, 近藤三樹郎, 小田勝也 (2004f) : 水圧膨張実験における遮水シートの変形破断挙動, ジオシンセティックス論文集, vol. 19, pp. 99-104.
- 小竹望, 北浦良樹, 金子清美, 手塚隆, 佐藤清, 徳永和幸福 (2002) : 管理型海面処分場の遮水工に作用する潮汐に起因する揚圧力の評価, 第37回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2431-2432.
- 小峯秀雄 (2003) : 廃棄物処分場遮水ライナーに関する試験項目・試験法の現状調査, 土と基礎, Vol. 51, No. 8, pp. 5-8.
- 近藤三樹郎, 狩野真吾, 渡辺克也, 岩井勉, 永治勇吉 (2003) : 遮水シートの折れ曲がり性能, ジオシンセティックス論文集, Vol. 18, pp. 33-40.
- 近藤三樹郎, 小田勝也, 狩野真吾, 佐藤晶英, 渡辺克也 (2004a) : 土木遮水シート突刺し貫入試験結果の応用, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 1140-1141.
- 近藤三樹郎, 小田勝也, 狩野真吾, 篠幸次, 佐藤晶英 (2004b) : 海面処分場遮水シートの折れ曲がり破断特性試験, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 643-644.
- 最終処分場技術システム研究会 (1999) : 廃棄物最終処分場技術システムハンドブック, 730p.
- 清水昭二, 小田勝也, 狩野真吾, 佐藤晶英, 渡辺克也, 竹内克昌 (2004) : 保護マット不織布の性能試験方法, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 1142-1144.
- (社)全国都市清掃会議 (2001) : 廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領, 485p.
- 土木シート技術協会 (2001) : 技術ハンドブック 21, 34p.
- 宮地秀樹, 今泉繁良, 吉直卓也 (2002) : 保護マットの組合せ順序と遮水シート貫入抵抗の関係について, 第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 942-944.
- 山下義裕, 川端季雄, 竹内祐二, 坂井互 (1994) : カーボンブラック補強ゴムの二軸応力伸張強度, 日本ゴム協会誌, Vol. 67, No. 8, pp. 576-583.

付録A. 実験に使用した遮水シート・不織布の物性

一軸引張試験による遮水シート（試験方法はJISA6008に準拠）および不織布（試験方法はJISA6008に準拠）の破断時性能を表-A.1および表-A.2に示す。

付録B. 遮水シートの折り曲げ方法

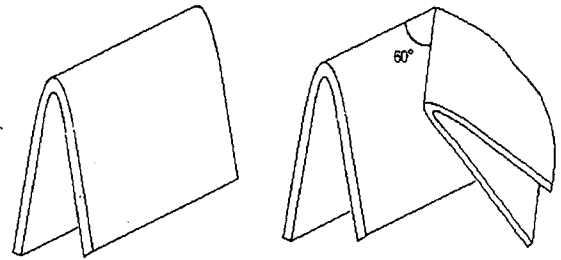
B.1 遮水シートの折れ曲がり現象

遮水シートが折れ曲がると、折れ曲がった突端に局部的に大きな伸びが発生する。厚さ3.0 mmのPVCシートを1回折り曲げると、突端では200%以上の伸びが発生し、厚さが減少するという報告例がある（土木シート技術協会、2001）。この現象はシート厚さが3.0 mmの場合も1.5 mmの場合も同様の傾向を示すと考えられるので、厚さ1.5 mmのシートの場合でも同様に200%程度の伸びが発生していると推測される。

B.2 遮水シートの折り曲げ方法

現場において隅角部処理や端部での折り返し処理を受けた遮水シートは、折れ曲がりや何度も繰り返される可能性がある。そのため、本研究では、遮水シートを1回も

しくは2回折り曲げて実験を行った。1回の折り曲げはシートを180° 折り返す場合のみであるが、2回目に折る場合は直角で折った場合や60° 程度に折った場合等、折る角度によっていろいろな折り方がある。現場で想定される折れ方としては、小さな力で折れ曲がろうとするので90° の2回折れは現実的には生じないものと判断される。そこで本実験では、図-B.1に示すように2回目の折り曲げ角は60° とする。



1回折り

2回折り

図-B.1 遮水シートの折り曲げ方法

表-A.1 実験に使用した遮水シートの物性

物性	単位	試験方法	再生PVC	軟質PVC	超軟質PVC	HDPE	MePE	SMePE	PPA
厚さ	mm	JIS A6008 準拠	1.57	1.56	1.54	1.55	1.52	1.53	1.54
引張強度	MPa		21.2	20.9	14.9	32.0	36.7	32.5	21.1
ひずみ	%		340	342	438	820	710	700	830
比重	—	JIS K7112	1.3	1.32	1.21	0.94	0.92	1.21	0.90

表-A.2 実験に使用した不織布の物性*

物性	単位	短繊維不織布						長繊維不織布		
		短A (NNP)**	短B (WB5)	短C (試作)	短D (試作)	短E (試作)	短F (DT1500)	長A (4421N)	長B (9501HB)	長C (4A21NB)
目付量	g/m ²	1100	700	1350	1500	1300	1500	429	574	1200
厚さ	mm	10	5	11	11	13	10	4	5	8
引張強度	N/5cm	100	882	1200	1600	800	1000	1500	1800	3920
	MPa***	0.20	3.53	2.18	2.91	1.23	2.00	7.50	7.20	9.80
ひずみ	%	5	60	190	150	150	70	70	103	100

* 試験方法はJIS L3204に準拠

** ()内は製品名もしくは品番。(試作)は本実験用に製造した試作品

*** 測定値 (N/5cm) を厚さで除することにより算出

B.2 遮水シートの載荷方法

遮水シートを折り曲げるため、本実験では手で折り曲げた遮水シートに上載荷重を4時間以上作用させた。上載荷重は計画高さ40 mの最終処分場を想定し、この高さに対応する荷重を作用させた。すなわち、土被り40 mによる圧力0.8 MPa (=40 m×2 ton/m³)を作用させた。載荷時間は遮水シートの応力緩和現象がほぼ2時間で収束する(狩野ら, 2003a)ことから、この2倍の4時間に設定した。載荷の様子を写真-B.1に示す。

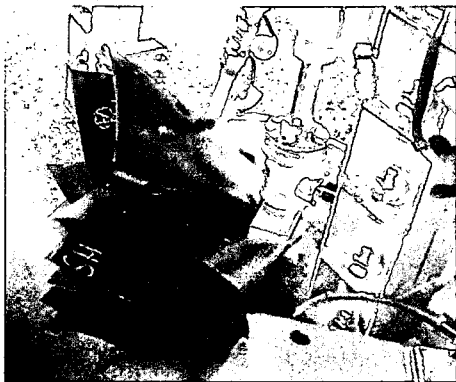


写真-B.1 遮水シートの折り曲げ状況

付録C. 水圧膨張実験結果に関する補足資料

C.1 遮水シートの実験結果

(1) 破断挙動

水圧膨張実験における遮水シートの破断現象は、軟質PVCのような音響とともに膨張頂部から一気に放射方向に引き裂かれる“破裂型”の他に、膨張変形中に孔が発生しそこから水が噴出する“開孔型”も観察された(写真-C.1)。破裂型破断はPVC系シート(再生PVC, 軟質PVC, 超軟質PVC)やMePE, SMePE, PPAが該当し、HDPEのみは

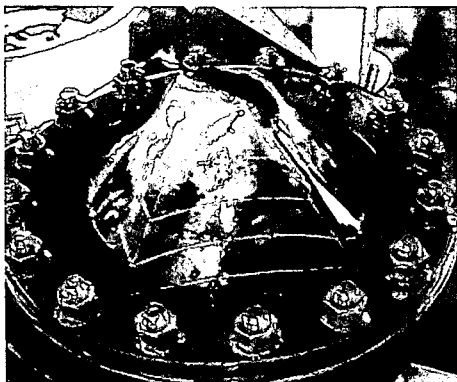


写真-C.1 開孔型破断の様子

開孔型破断であった。開孔型破断は多くの場合、膨張頂部付近に存在する引っかき傷等の外傷の部分で発生したことが実験前後の観察により明らかになった。すなわち、HDPEの表面に外傷が存在する場合、外傷部では厚みが減少しているため他の部分に比べ変形が先行し、変形が塑性域に達した後はさらに外傷部において変形が集中し、結果として孔が発生し水が噴出したと考えられる。

破断挙動の差違はそれぞれの材料の変形強度特性に対する外傷の影響と密接に関連しており、HDPEは他の材料に比べて外傷により敏感であるといえる。

(2) 水圧-膨張変位曲線

遮水シート単体の最大水圧時および破断時における水圧、膨張変位を表-C.1に、水圧-膨張変位曲線を図-C.1にそれぞれ示す。図表はともに、実験を複数回行ったケースについては破断時膨張変位が最も小さかった実験結果を示している。また水温は21℃に設定し、遮水シートの厚さはすべて1.5 mmである。実験の結果、水圧-膨張変位曲線は材料によって傾向が大きく異なった。変形に対して最も高い強度を示すのはHDPEであり、軟質PVCの3倍近い水圧に耐えることができる。一方、破断時膨張変位が大きいのは超軟質PVCやMePE, SMePE, PPAといった種類で、最も破断時変位の小さいHDPEはこれらの半分以下の膨張変位で破断した。また、すべての遮水シートについて水圧は膨張変形中に最大となった後、破断するまで減少する傾向がみられる。特にPVC系シートを除く遮水シートはこの減少傾向が著しく、MePE, SMePEの破断時水圧は最大水圧の約6割, HDPE, PPAでは約4割である。一方、PVCは3種類ともに最大水圧からの水圧の減少程度が少なく、破断時水圧は最大水圧のおよそ9割である。この結果からも明らかなように、PVCは他の材料に比べ大変形時における強度低下を起しにくい材料であるといえることができる。

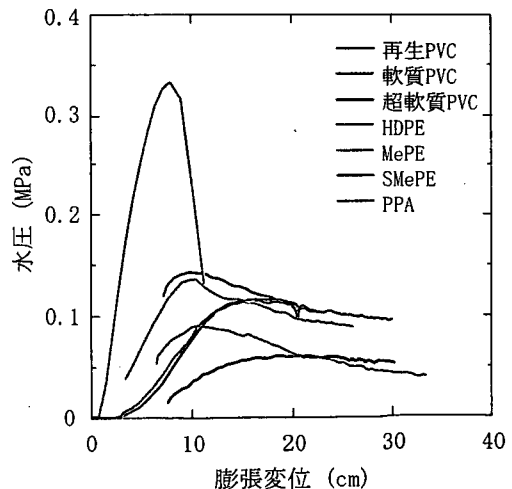


図-C.1 各種遮水シートの水圧-膨張変位曲線

表-C.1 遮水シートの実験結果

種類	厚さ (mm)	折れ曲がり	実験回数	水圧最大時*		破断時*	
				水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)	水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)
再生PVC	1.5	無し	3	0.125	15.9	0.124	20.1
再生PVC	1.5	1回	3	0.118	13.7	0.103	20.6
再生PVC	1.5	2回	2	0.117	12.9	0.102	21.0
軟質PVC	1.5	無し	3	0.115	16.8	0.104	22.6
軟質PVC	1.5	1回	1	0.114	13.6	0.097	23.0
軟質PVC	1.5	2回	2	0.114	13.9	0.098	22.8
軟質PVC	3.0	無し	2	0.219	15.7	0.184	25.3
軟質PVC	3.0	2回	3	0.217	13.6	0.187	22.0
超軟質PVC	1.5	無し	4	0.060	18.4	0.052	30.2
超軟質PVC	1.5	1回	1	0.056	21.3	0.047	31.4
超軟質PVC	1.5	2回	3	0.058	18.8	0.052	31.6
超軟質PVC	3.0	無し	1	0.131	12.8	0.115	23.6
超軟質PVC	3.0	2回	3	0.122	17.8	0.105	29.5
HDPE	1.5	無し	3	0.331	8.0	0.131	11.4
HDPE	1.5	1回	1	0.250	9.5	0.250	9.5
HDPE	1.5	2回	5	0.226	4.0	0.214	4.1
MePE	1.5	無し	2	0.136	10.6	0.089	26.1
MePE	1.5	1回	2	0.127	7.8	0.083	24.6
MePE	1.5	2回	2	0.131	7.4	0.085	24.4
SMePE	1.5	無し	1	0.143	9.8	0.095	29.9
SMePE	1.5	1回	2	0.141	10.1	0.101	24.3
SMePE	1.5	2回	2	0.146	3.4	0.096	23.1
PPA	1.5	無し	2	0.090	10.7	0.039	33.2
PPA	1.5	1回	1	0.087	8.1	0.044	25.6
PPA	1.5	2回	1	0.088	8.3	0.040	30.0

* 実験を複数回行ったケースについては破断時膨張変位が最も小さい結果を記載した

(3) 遮水シートの折れ曲がり特性

折れ曲がりを伴う各種遮水シートの水圧-膨張変位曲線を図-C.2に示す。なお、軟質PVCの水圧-膨張変位曲線は第3章で示したため(図-9)，ここでは省略する。再生PVCおよび超軟質PVCの破断は折り曲げ回数によらずすべて破裂型であり、破断箇所は膨張頂部であった。この特徴は折れ曲がりがない場合の破断現象と同様であることから、再生PVC、超軟質PVCの破断挙動は折れ曲がりの影響を受けないと判断される。

MePE、SMePE、PPAの各遮水シートについて、折れ曲がりの有無および折れ曲がりの回数による水圧、膨張変位の各計測値の相違はほとんどなく、水圧-膨張変位曲線はほぼ同じ傾向を示した。このことから、MePE、SMePE、PPAの変形強度特性は折れ曲がりの影響をほとんど受けないと判断される。

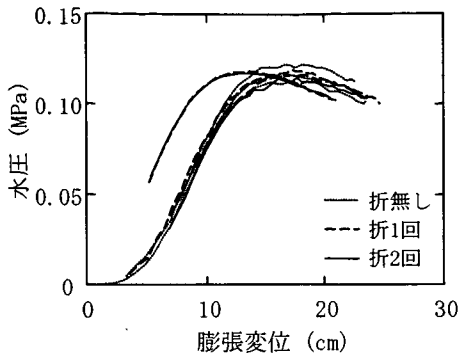
HDPEの折れ曲がり特性については以下のようなものである。1回折れの場合、破断は最大水圧である0.25 MPaで発生し

た。さらに破裂時の変位は9.5 cmになり、折れ曲がり無しの場合の計測値(最大水圧0.331 MPa、変位11.4 cm)より小さい。これらの計測値の低下は折れ曲がりの影響によるものと考えられる。2回折れの場合については、5回の実験結果は大きくばらつき、破断時変位が最も大きかった曲線の破断時の水圧および変位はそれぞれ0.244 MPa、7.5 cmであった。したがって、HDPEの変形強度特性は折れ曲がりの影響を受け、折れ曲がりの回数が増えることにより変形量および強度が低下することが明らかになった。

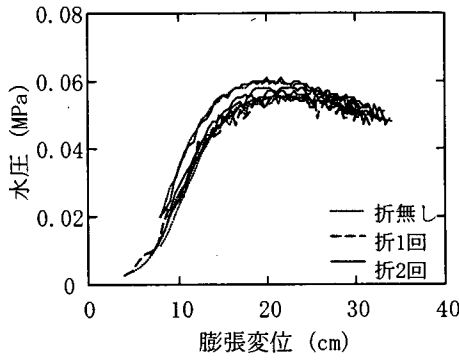
C.2 不織布の実験結果

(1) 破断挙動

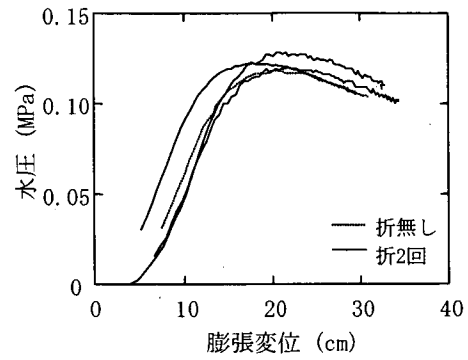
短D、短E、短F、長A、長Bの破断の状況を写真-C.2に示す。長繊維不織布の破断は短繊維不織布と同様、膨張頂部において瞬間的に直線的に引き裂かれる現象として発生した。不織布の破断後、裂け口から水圧を担保し



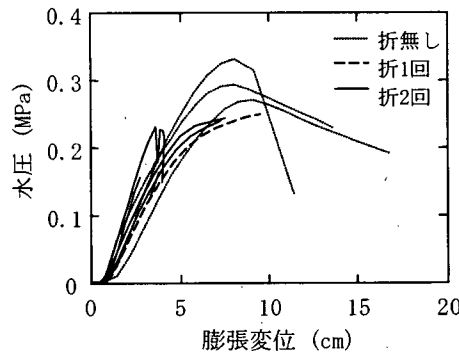
(a) 再生PVC



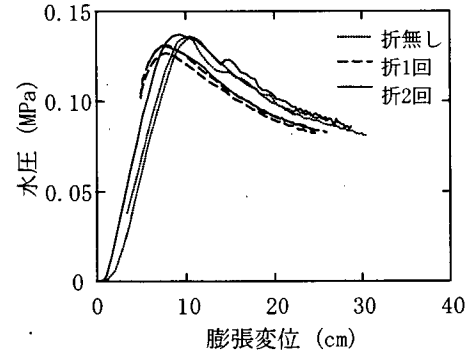
(b) 超軟質PVC (1.5 mm厚)



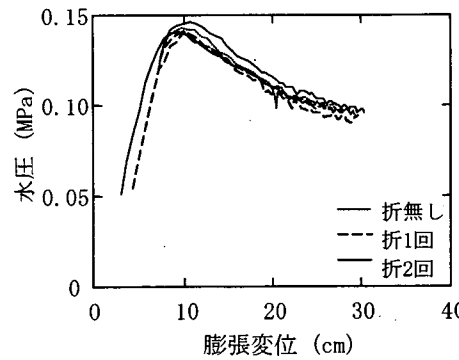
(c) 超軟質PVC (3.0 mm厚)



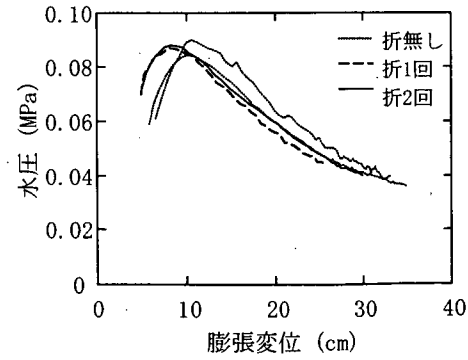
(d) HDPE



(e) MePE



(f) SMePE

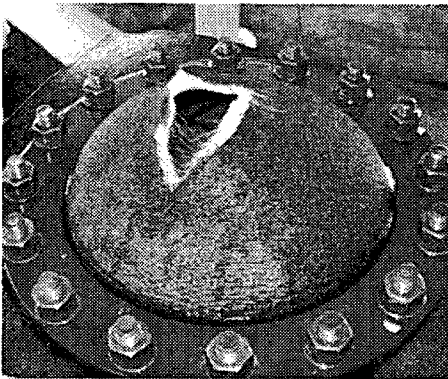


(g) PPA

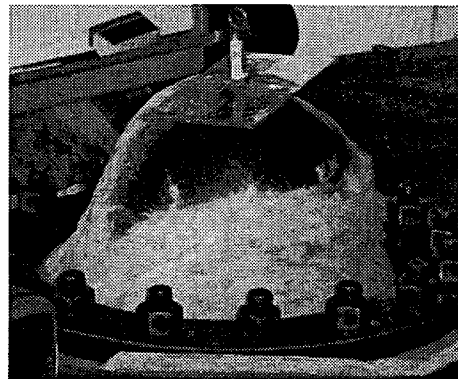
図-C.2 遮水シートの折れ曲がり特性



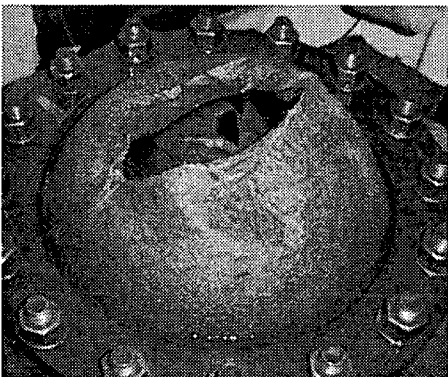
(a) 短D



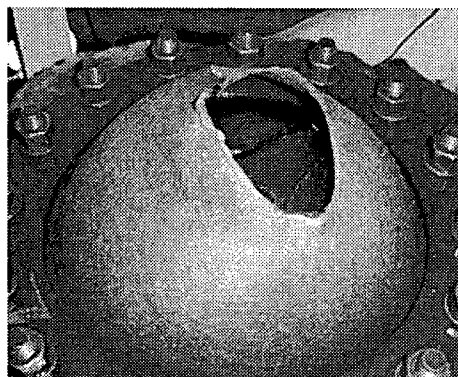
(b) 短E



(c) 短F



(d) 長A



(e) 長B

写真-C.2 不織布単体の破断状況

ていた遮水シート（厚さ 0.2 mm）が膨張しながら飛び出し、その後破断した。

(2) 水圧-膨張変位曲線

長繊維不織布単体の最大水圧時および破断時における水圧、膨張変位を表-C.2 に、水圧-膨張変位曲線を図-C.3 にそれぞれ示す。なお、実験時の水温は約 4℃に設定した。長繊維不織布の破断時膨張変位は約 12 cm で、短繊維不織布と同程度であった。一方破断時水圧は短繊維不織布よりも大きく、0.4 MPa を超えた。また、水圧の増加傾向は短繊維不織布に比べ直線的である。中でも長 C は他の長繊維不織布に比べて倍近い水圧を示しているが、これは長 C の目付量が 1200 g/m² と他の不織布より大きい（長 A : 429 g/m², 長 B : 574 g/m²）ためと考えられる（表-A.2 参照）。

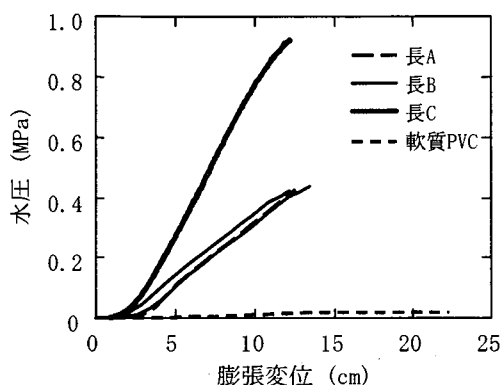


図-C.3 長繊維不織布の水圧-膨張変位曲線

短繊維と長繊維とで変形挙動が異なる点は、変形の初期段階における水圧の増加傾向である。すなわち、短繊維不織布では材質による傾向の違いはあるものの水圧が立ち上がるのは膨張変位が5~7 cm以降であった（図-13）のに対し、長繊維不織布では2, 3 cm程度から水圧が急激に増加した。これは短繊維不織布が長さ3~8 cm程度の短繊維を使用するのにに対し、長繊維不織布は熔融紡糸した連続した繊維を交絡させて製造されることによる。長繊維不織布の方が短繊維不織布に比べて変形初期

表-C.2 不織布の実験結果

種類	目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	水温 (°C)	実験回数	水圧最大時*		破断時*	
					水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)	水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)
長A	429	4	4.7	1	-	-	0.426	12.5
長B	574	5	4.7	2	-	-	0.424	12.2
長C	1200	8	4.2	1	-	-	0.925	12.2
軟質PVC	-	0.2	7.0	2	0.018	19.5	0.017	22.6

* 実験を複数回行ったケースについては破断時膨張変位が最も小さい結果を記載した

における柔軟な変形量が少ないのは、短繊維不織布で特徴的な繊維間の滑りや繊維相互の絡み合いが外れることにより発生する変形が長繊維不織布には少ないためと考えられる。長繊維不織布の方が短繊維のものより高強度であるのも、上述のように連続した繊維で構成されるために変形時における繊維の伸びが少なく、その分短繊維より強度を発揮するものと考えられる。

(3) 実験結果の再現性

不織布の実験結果の再現性を検証するため、長Bを用いた実験を2回行った。実験毎の計測値のばらつきを表-C.3 に示す。その結果、破断時水圧のばらつきの割合は算術平均値に対して1割に満たず、また水圧-膨張変位曲線の傾向もほぼ一致した（図-C.3）。不織布は微小レベルにおける繊維の絡み合いが変形挙動に影響を及ぼす材料であるため、物性値のばらつきについてはより詳細な検討がなされるべきであるが、本実験結果を見る限りでは物性値のばらつきは比較的少なく、再現性の良さはPVC系遮水シートと同程度以上であるという結果が得られた。

表-C.3 長Bの計測値のばらつき

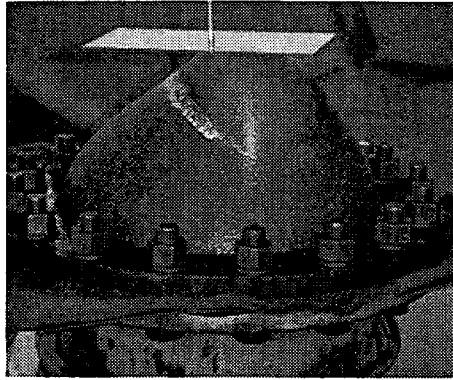
測定項目	実験回数	平均値	値の差	ばらつき度* (%)
破断水圧 (MPa)	2	0.431	0.014	1.4
破断時変位 (cm)	2	12.8	1.2	9.5

* (値の差)/(平均値)

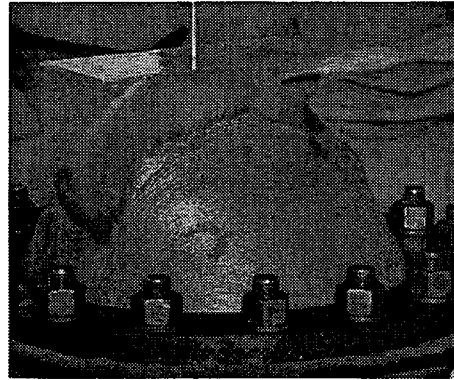
C.3 遮水シートと不織布を重ねた時の実験結果

(1) 破断挙動

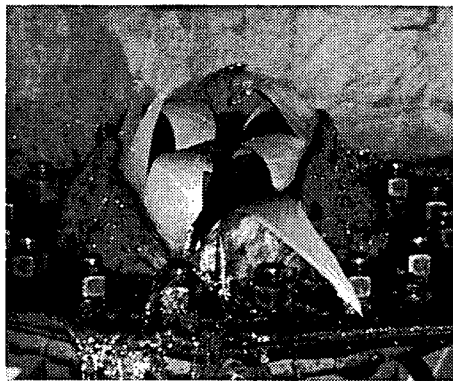
軟質 PVC と短繊維不織布を重ねた時の破断後の状況を写真-C.3 に、HDPE と短繊維および長繊維不織布を重ねた時の破断後の状況を写真-C.4 にそれぞれ示す。軟質 PVC と短繊維不織布を重ねた時の破断挙動は第 5 章で示した通りであるが、長繊維不織布を使用した場合も短繊維不織布と同様、最初に不織布が引き裂かれて破断し、その破断口から遮水シートが飛び出すように膨張し破断した。



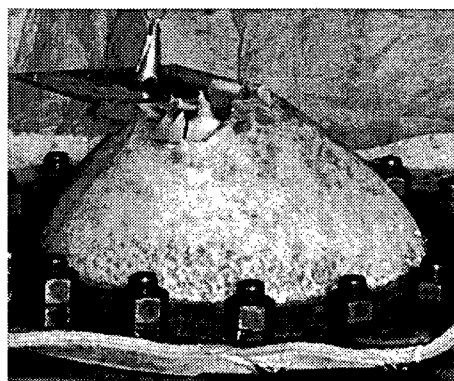
(a) 1.5 mm厚軟質PVC+長A



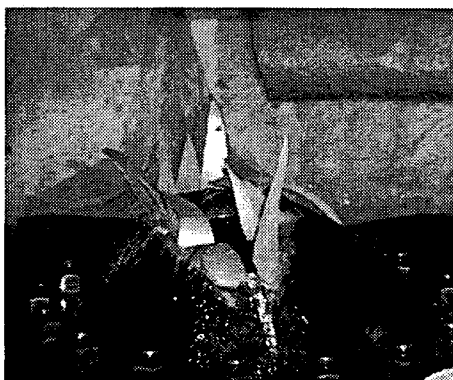
(b) 1.5 mm厚軟質PVC+短B



(c) 3.0 mm厚軟質PVC+短B

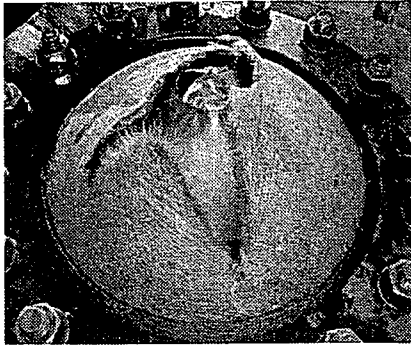


(d) 3.0 mm厚軟質PVC+短D



(e) 3.0 mm厚軟質PVC+短E

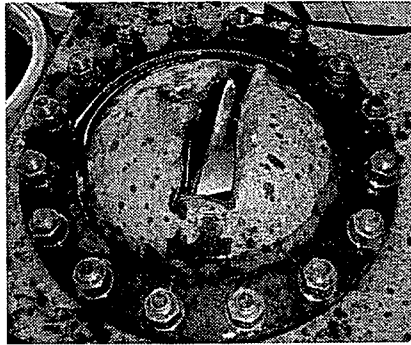
写真-C.3 軟質PVCと不織布を重ねた時の破断状況



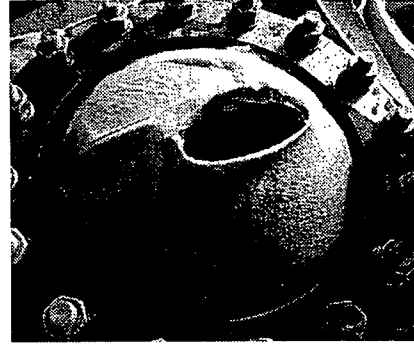
(a) 折れ無し (+短B)



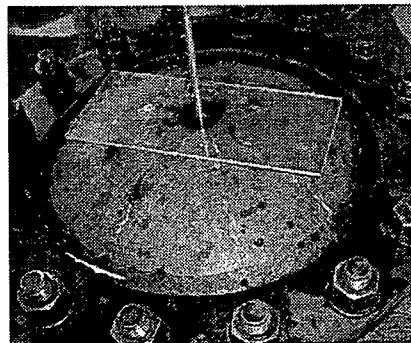
(b) 折れ無し (+長A)



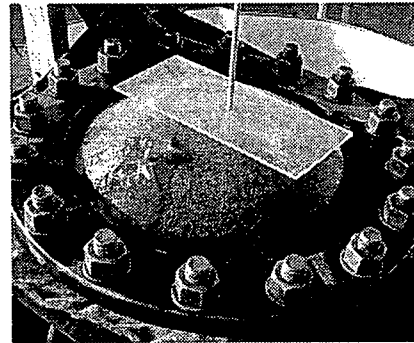
(c) 1回折れ (+短B)



(d) 1回折れ (+長A)



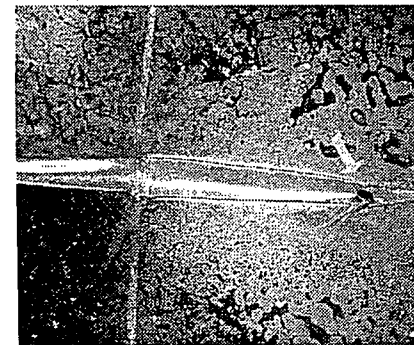
(e) 2回折れ (+短B)



(f) 2回折れ (+長A)



(g) (f)におけるHDPEの破断状況



(h) (e)の拡大図 (矢印が破断箇所)

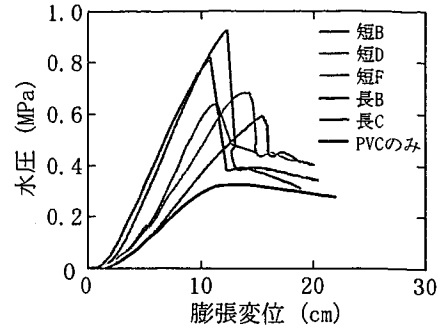
写真-C.4 HDPEと不織布を重ねた時の破断状況

一方、HDPEの破断挙動は、シートに折れ曲がりがない場合は不織布、HDPEともに破断したが、シートに折れ曲がりがある場合はHDPEのみが破断し不織布は破断しなかった。なお、HDPEの破断形態は単体の場合と同じ開孔型であった。

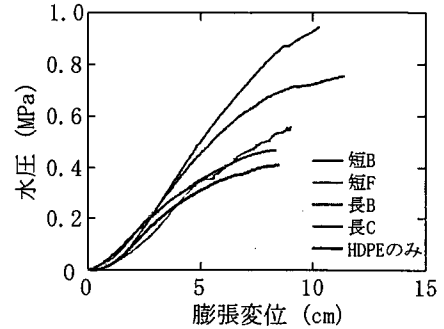
(2) 水圧－膨張変位曲線

軟質PVCと不織布（短B，短D，短F，長B，長C），HDPEと不織布（短B，短F，長B，長C）を重ねた時の最大水圧時および破断時における水圧，膨張変位の計測値を表-C.4に，水圧－膨張変位曲線を図-C.4にそれぞれ示す。HDPEと不織布を重ねた場合，最大水圧点はHDPEの破断点に等しい。また，短繊維不織布と重ねた場合の破断時膨張変位は，HDPE単体での破断時変位と同程度かそれ以上であり，長繊維不織布と重ねた場合は明らかにHDPE単体より破断時変位が増加している。HDPEの物性値は前述の通りシート表面の外傷に敏感に影響を受けるため，材料ごとの破断時強度および変形量のばらつきは他の遮水シートに比べて大きい。本実験結果もHDPEの物性値のばらつきが影響していると考えられるが，長繊維不織布を重ねることで破断時変位が増加する原因については現在のところ不明である。

また，図-C.5は軟質PVC（厚さ3.0 mm）と長繊維不織布（長B）を重ねた時の水圧－膨張変位曲線（◆印）と，それぞれ単体の場合における水圧－膨張変位曲線をグラフ上で足し合わせた結果（◇印）を比較したものである。図から明らかなように，長繊維不織布と軟質PVCを重ねた時の曲線は材料単体の挙動を足し合わせたものより大きい。このことから，長繊維不織布の遮水シートの変形に対する保護効果は不織布単体の性能以上に発揮されると言える。



(a) 軟質PVCと不織布を重ねた場合



(b) HDPEと不織布を重ねた場合

図-C.4 遮水シートと不織布を重ねた時の水圧－膨張変位曲線

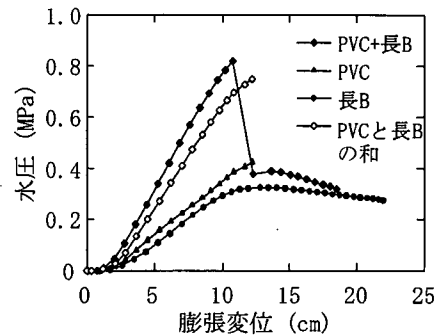


図-C.5 長繊維不織布の保護効果

表-C.4 遮水シートと不織布を重ねた時の実験結果*

種類	厚さ		水温 (°C)	水圧最大時		破断時	
	遮水シート (mm)	不織布 (mm)		水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)	水圧 (MPa)	膨張変位 (cm)
軟質PVC+短B	3.0	5	4.1	0.579	15.0	0.400	20.0
軟質PVC+短D	3.0	11	7.3	0.638	11.4	0.455	14.9
軟質PVC+短F	3.0	10	4.1	0.678	13.7	0.416	18.5
軟質PVC+長B	3.0	5	7.0	0.819	10.8	0.308	18.9
軟質PVC+長C	3.0	8	4.2	0.924	12.2	0.340	20.4
HDPE+短B	1.5	5	5.7	0.465	8.1	0.056	7.9
HDPE+短F	1.5	10	5.7	0.553	9.2	0.166	9.1
HDPE+長B	1.5	5	7.8	0.752	11.3	0.384	11.3
HDPE+長C	1.5	8	7.2	0.944	10.2	0.786	10.4

* 実験回数はすべて1回