

## 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、さまざまな形式の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を使用するケースが多い。遮水シートの遮水工を有する管理型廃棄物埋立護岸の断面図の一例を図-1に示す。遮水シートには水より重い素材のポリ塩化ビニル (PVC, 比重約 1.3.) が用いられることが多い。また、遮水シートに対

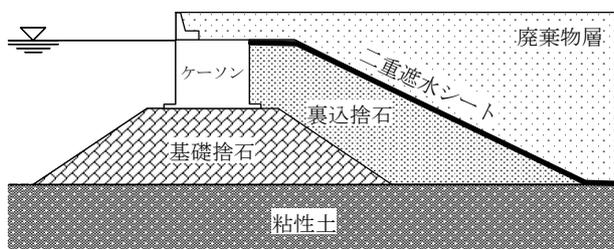


図-1 管理型廃棄物埋立護岸断面図

する衝撃緩衝用保護材として不織布が用いられる。

(1) 遮水シートの力学的性質に関する従来の評価手法

管理型廃棄物埋立護岸の遮水工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、設計資料として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。これは、遮水シートを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一軸引張試験であり、試験方法が簡便でかつデータが揃っていることが理由として挙げられる。しかし、実際の現場における遮水シートの変形は、地盤の不等沈下や敷設面不陸への追随、突起物の貫入、温度変化に伴う膨張・収縮など、二次元的あるいは三次元的な挙動を示す場合が少なくない。これらの変形はシートの厚さ方向の変形に対する拘束がないため、二軸応力下での変形(二軸変形)である場合が多いが、二軸応力下での遮水シートの性能値は現在の設計資料には反映されていないのが現状である。その理由としては、二軸応力

下での遮水シートの挙動を検証するための二軸試験が一軸試験に比べて手間がかかり、工学的には一軸試験がより汎用性の高い試験方法であること等が挙げられる。

(2) 遮水シートの力学的性質に関する既往の研究

廃棄物海面処分場に施工される遮水シートには、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る。これらの作用外力に対する遮水シートの力学的性質の検討に関しては次のような報告例がある。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。藤井ら(2002)は混成堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧を、また、伊野ら(2003)は傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧をそれぞれ水理模型実験により検討し、その結果を数値解析により検証している。突起物の貫入による遮水シートの変形破断挙動については陸上処分場については宮地ら(2002)によって、また、海面処分場については狩野ら(2004h)や平原ら(2005)によって検討が行われ、突起近傍における遮水シートの局所変形の変形が明らかになった。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。シート敷設面の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、たとえば狩野ら(2004a)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。また、敷設面に空隙等がある場合の遮水シートの変形挙動については水圧膨張実験により検討がなされている(狩野ら, 20051)。その他、海面処分場に敷設された遮水シートのひずみの実測結果(小竹ら, 2004)も報告されている。

以上のように、遮水シートの力学的性質を明らかにするため、さまざまな応力状態を想定した要素試験や模型実験、数値解析、現地実測実験等が行われてきた。その結果、個々の応力状態に対する遮水シートの力学的性質が解明されてきた。しかし、それらを体系化しまとめた例はなく、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のが現状である(小峯, 2003)。

(3) ひずみエネルギー密度関数を用いたゴム材料の力学的性質の評価手法について

一般に、エラストマーやゴム材料のような高分子化合物の変形挙動は、前述したように一軸変形については数多くの報告があるにもかかわらず、二軸変形に関する報告は少ない。その中で、二軸応力下でのゴム材料の変形挙動は川端（1988）や山下ら（1994）、山下（2002）によって研究が行われ、ゴム材料の力学特性値である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た。W 関数は物質に特有の関数であり、二軸変形全体の挙動に適用することができる。ところで、図-2 に示すように一軸引張変形は試料の変形時における境界条件を考慮すれば、二軸引張変形に含まれる。さらに、二軸引張試験において一軸方向を拘束し、もう一軸方向に変形する一軸拘束二軸引張変形は、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。このため、一軸拘束二軸引張試験で得られる 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。実際、二軸引張試験は一軸引張試験と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（山下・川端、1992）。W 関数によるゴム材料の力学的特性の推定手法は、高分子力学の分野では上述のように比較的研究がなされているが、廃棄物処分場の遮水工に敷設されるシート材料に対する構造設計として用いられた例は見られない。遮水シートの力学的性質を正しく把握し、以て管理型廃棄物埋立護岸遮水工の設計資料に反映することは、管理型廃棄物埋立護岸の信頼性設計法の構築に必要な不可欠な検討事項である。

1.2 本研究の位置づけ

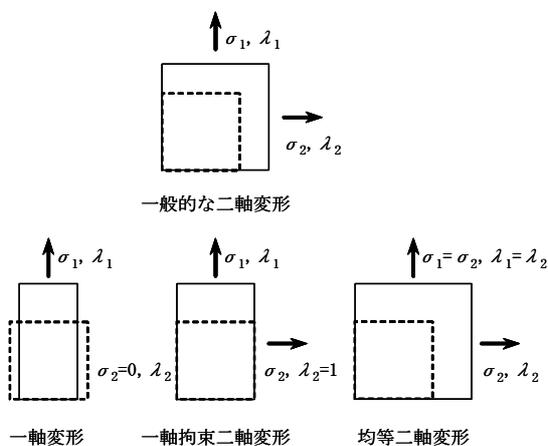


図-2 二軸変形のいろいろな様式（山下, 2002）

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 年度実施、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埋立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（図-3）。遮水工の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-4 に示す評価項目について研究を行っており、現在までに、遮水シートの地震時耐久性に関する現地実証実験（長尾ら、2002a, 2002b, 2002c, 近藤

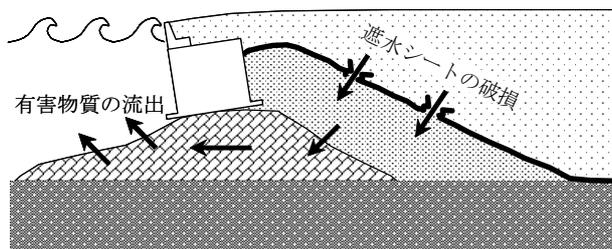


図-3 地震動の作用による有害物質の流出の危険性

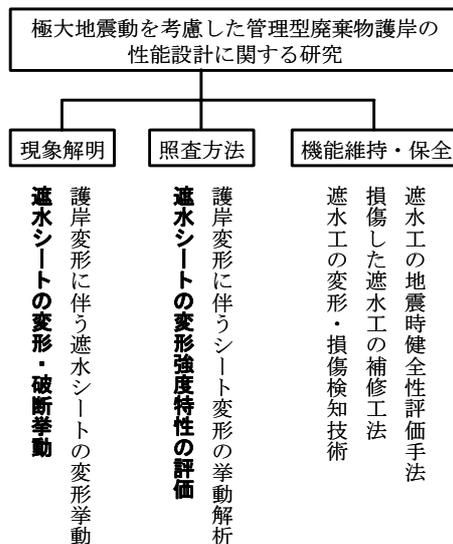


図-4 本研究の位置づけ

ら, 2002), 一軸引張応力状態での遮水シートの変形破断挙動の検討 (Kano *et al.*, 2003a, 狩野ら, 2003b, 2003c, 2003e), 突起物貫入時の遮水シートの変形破断挙動の検討 (狩野ら, 2003d, 2004a, 2004b, 2004d, 2004f, 2004h, 吉田ら, 2003, 近藤ら, 2004b, 2005a), 水圧膨張時の遮水シートおよび不織布の変形破断挙動の検討 (狩野ら, 2004g, 2005b, 2005f, 2005j, 近藤ら, 2003, 2004a, 2005b, 2005c, 清水ら, 2004), 地盤中に敷設された遮水シートの地震時挙動の検討 (狩野ら, 2004c, 2004e, 2005a, 2005c, 2005d, 2005e, 2005g, 2005h, 2005i, 2005k, 2005m), および遮水工の地震時健全性の評価 (小田ら, 2005a, 2005b, 2005c) を行ってきた。

特別研究における本研究の位置づけは, 外力作用時の遮水シートの変形挙動を, W 関数を用いて定量的に評価することである (図-4 のゴシック体に対応.)。本研究成果は, 二軸変形下における遮水シートの応力ひずみ挙動を定量的に評価し, 特別研究におけるシート材料の性能照査手法の開発に寄与するものである。

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。

### 1.3 目的

本研究では, ゴム材料に関する W 関数の検討例を基礎にして, PVC 遮水シートの W 関数を一軸拘束二軸引張試験によって求め, その結果を基に一軸伸張時および均等二軸伸張時の W 関数の推定を行う。これにより, W 関数を用いた一軸変形時および均等二軸変形時の遮水シートの変形挙動の評価手法を提案する。

### 1.4 本資料の構成

本資料の構成を以下に示す。

2章では, W関数に関する理論とその求め方について述べる。

3章では, 二軸引張試験機, 試験に用いた材料, 試験方法について述べる。

4章では, 一軸拘束二軸引張試験結果, および均等二軸引張試験結果について示す。その際, 遮水シートの破断挙動と変形時の応力-ひずみ曲線について述べる。

5章では, W関数を用いて一軸引張変形時および均等二軸引張変形時の遮水シートの応力-ひずみ曲線を推定した結果について示す。

6章では, 既往の研究成果である狩野ら (2005j) の水圧膨張実験結果を対象に, 膨張変形する遮水シートの挙動に対する W 関数の適用性について考察する。

7章は本研究から得られる結論である。8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. ひずみエネルギー密度関数 (W 関数)

### 2.1 大変形理論

W 関数は数学的大変形理論として扱われ, 主に弾性体を対象にして研究が進められてきた。一軸伸張を例にとると, 試験片を伸張させるのに外力がなした単位体積当りの仕事は変形前の体積を基準にすると,

$$W(\lambda) = \int_1^\lambda \sigma d\lambda \quad (1)$$

で与えられる。λは伸張比, W は弾性体をひずませる仕事であるが, W は同時に弾性体内にひずみエネルギーとして貯えられるエネルギーでもある。ここで, 厳密には高分子化合物は非弾性の性質も持つため, 変形時に外部からなした仕事はそのまま内部の弾性エネルギーの増加と等しくならない。しかし, 外力と変形の間を求め, それにより物体を弾性体とみなして W を決定すると, その変形様式またはそれに近い変形に対して応力とひずみの関係はこの W により求まる。また, その W は上記のような非弾性の性質を帯びる場合も, 外力-ひずみの関係を推定するのに唯一の手がかりとなる関数となる (深堀, 2000)。

一軸伸張に対する W 関数である式(1)を三軸方向への伸張に拡大すると, 次式のようになる (深堀, 2000)。

$$W(\lambda) = \int (\sigma_1 d\lambda_1 + \sigma_2 d\lambda_2 + \sigma_3 d\lambda_3) \quad (2)$$

ここに,  $dW(\lambda)/d\lambda_1 = \sigma_1$ ,  $dW(\lambda)/d\lambda_2 = \sigma_2$ ,  $dW(\lambda)/d\lambda_3 = \sigma_3$  であり, 物質特性として  $W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  が与えられると応力が計算で求まる。

### 2.2 W 関数の求め方

変形時に非圧縮性を仮定すると, 二次元応力状態での応力, 伸張比とひずみエネルギー密度関数の偏微分値との関係は以下のように表される (深堀, 2000)。

$$\frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[ \frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^2} - \frac{\lambda_2^3 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \lambda_2} = \frac{1}{2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \left[ \frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^2} - \frac{\lambda_2 \sigma_2}{\lambda_2^2 - (\lambda_1 \lambda_2)^2} \right] \quad (4)$$

ここに,

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_1^{-2} \lambda_2^{-2} \quad (5)$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_1^2 \lambda_2^2 \quad (6)$$

均等二軸変形時は  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$  なので、応力は次式のよう  
に表される。

$$\sigma = 2 \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^5} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (7)$$

ここに、

$$I_1 = 2\lambda^2 + \lambda^{-4} \quad (8)$$

$$I_2 = \lambda^4 + 2\lambda^{-2} \quad (9)$$

また、一軸拘束二軸引張変形での応力は次のように表  
される（深堀，2000）。

$$\sigma_1 = \frac{2}{\lambda_1} \left( \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_2 = 2 \left( 1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11)$$

ここに、

$$I_1 = I_2 = \lambda_1^2 + \frac{1}{\lambda_1^2} + 1 \quad (12)$$

さらに、一軸引張変形での応力は次式で表される。

$$\sigma = 2 \left( \lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (13)$$

ここに、

$$I_1 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda \quad (15)$$

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  
(10)、式(11)に代入することにより、 $I_i$  と  $\partial W / \partial I_i$  の関係  
が求まる。この関係を利用して、一軸および均等二軸引  
張変形時の PVC シートの応力-ひずみ曲線を推定するこ  
とが可能となる。

### 3. 二軸引張試験内容

#### 3.1 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。試験機の概略図を図-5

表-1 二軸引張試験機的主要仕様

|         |               |
|---------|---------------|
| 有効試験片寸法 | 最大200mm×200mm |
| 最大荷重容量  | X軸、Y軸ともに49kN  |
| 最大測定変位  | X軸、Y軸ともに400mm |
| 引張速度範囲  | 0.1～500mm/min |
| 試験温度範囲  | -20～200℃      |

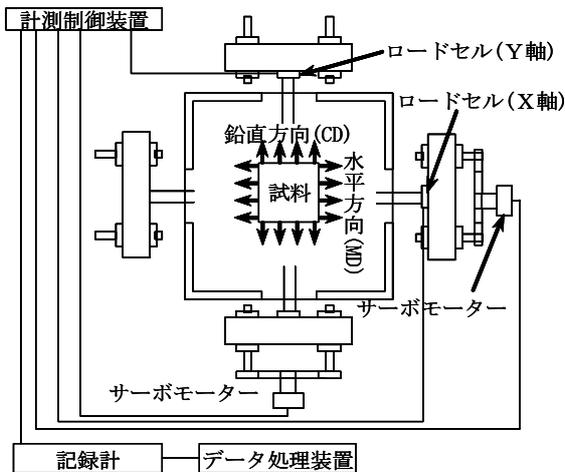


図-5 二軸引張試験機概念図



写真-1 二軸引張試験装置（所有：大阪府立産業技術総合研究所）

に、装置の写真を写真-1に、主な仕様を表-1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おり、鉛直軸を自動荷重一ひずみ制御で荷重拘束し、水平軸に荷重をかけて引張る一軸拘束二軸引張試験、および鉛直軸、水平軸に均等に同時に荷重を負荷する均等二軸引張試験を行うことが可能である。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。

### 3.2 試験に使用した材料

二軸引張試験に使用した供試体は、一軸引張試験と同じ軟質PVC（厚さ3mm）である。供試体の寸法と形状を図-5に示す。

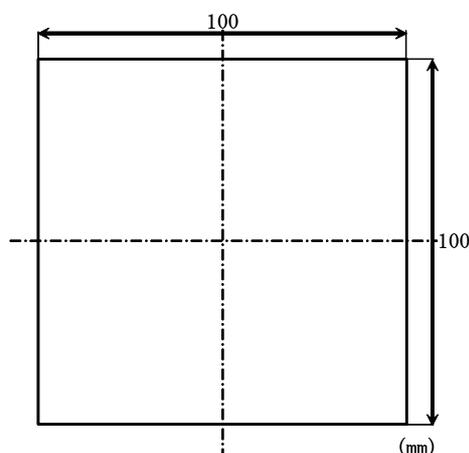


図-5 二軸引張試験における供試体の寸法と形状

### 3.3 試験方法

試験の手順はまず、10 cm×10 cmの大きさに成形した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。その後、50 mm/minの一定速度で引張し、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、変位はクロスヘッドの移動量（チャック間距離）を測定した。なお、試験室の温度は23℃に保ち、また、試験回数は1回とした。

## 4. 二軸引張試験結果

### 4.1 一軸拘束二軸引張試験結果

#### (1) 破断挙動

供試体の変形の様子を写真-2に、破断の様子を写真-3

にそれぞれ示す。軟質PVCの破断は、いずれのケースも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、隣り合うチャック間において局所変形による応力集中が発生したためと考えられる。とくに角部は供試体が縦、横方向に引っ張られるため、他の部分より大きな応力集中が作用したと考えられる。このような破断は引張変形時の二軸応力が原因で発生したものではないため、材料の二軸応力下における破断時性能を評価することはできなかった。同様のことは山下（2002）にも述べられており、つかみ部分での破断をさけるためには供試体の中央部分を薄くしこの部分に大きなひずみがかかるようにして破断時ひずみを測定する方法が有効であることを紹介している。しかし、この方法ではW関数を求められないことに注意が必要である（山下，2002）。

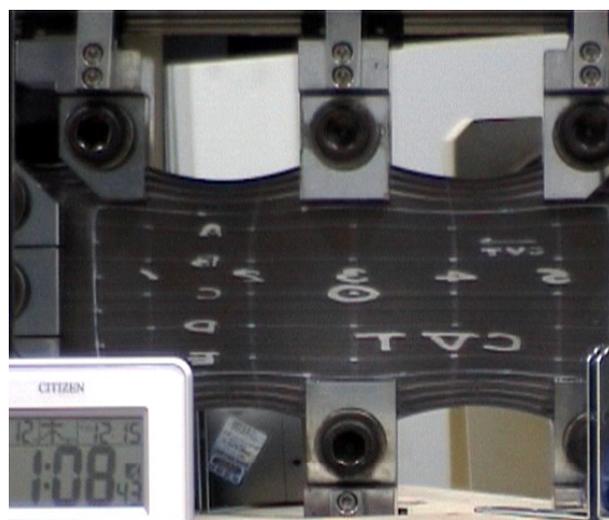


写真-2 一軸拘束二軸引張試験での変形の様子

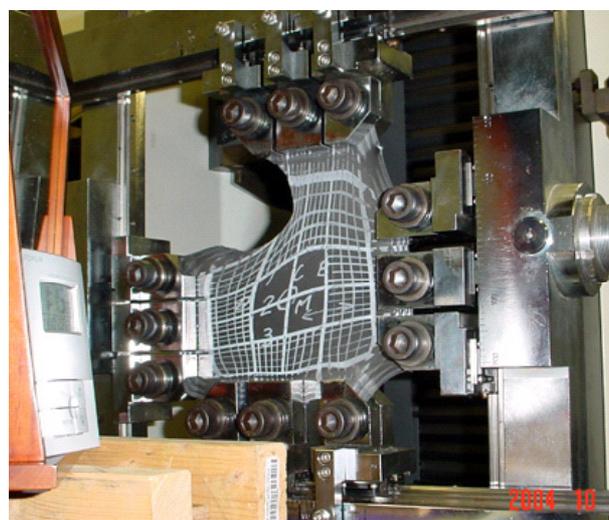


写真-3 一軸拘束二軸引張試験での破断の様子

(2) 変形挙動

軟質 PVC の荷重と変位の関係を図-6 に、測定した荷重を断面積で除して得られた応力 (MPa) と初期の試料幅に対するひずみとの関係を図-7 にそれぞれ示す。図からも明らかなように、荷重-変位曲線は変位とともに連続的に荷重が増加し、明確な降伏点は存在しなかった。同様のことは応力-ひずみ曲線でもいえる。これは一軸引張試験結果と同様の傾向である。なお、図中における最大応力点は供試体のつかみ部分における破断を示し、これは前述のように供試体の真の破断点とは異なる。軟質 PVC 供試体は初期の伸張時 (伸張比: 1~1.5) において応力が急激に増加し、その後はひずみに対してほぼ線形に応力が増加した。なお、変形のごく初期に見られる曲線の急激な立ち上がり (荷重は約 1 kN まで、応力は約 5 MPa までを指す。) は試験機の測定上の誤差の影響を受けた結果であり、供試体の本来の変形挙動ではない。その後の曲線の傾向から推察するに、変位 (ひずみ) の増加とともに荷重 (応力) は連続的に増加していくものと考えられる。

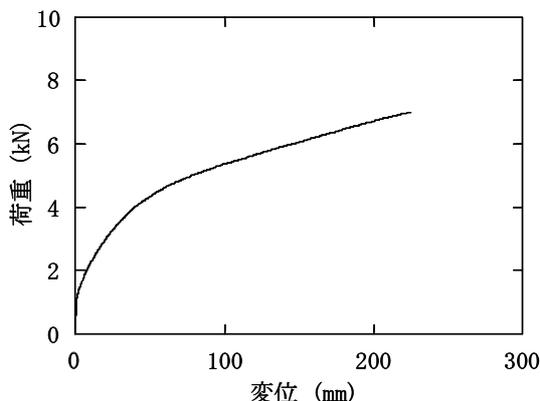


図-6 一軸拘束二軸引張試験での荷重-変位曲線

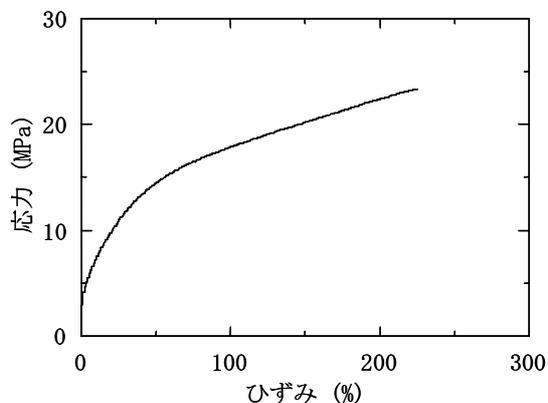


図-7 一軸拘束二軸引張試験での応力-ひずみ曲線

4.2 均等二軸引張試験結果

(1) 破断挙動

均等二軸引張試験における軟質 PVC の破断は、一軸拘束二軸引張試験の時と同様、供試体の角部から発生した。これもやはり、つかみ部分で発生した応力集中が原因と考えられる。

(2) 変形挙動

軟質 PVC の荷重と変位の関係を図-8 に示す。図中の実線は鉛直方向の挙動を、破線は水平方向の挙動をそれぞれ示している。両者の相関性を表す決定係数  $R$  はどちらの図においても 0.997 であった。決定係数は 0 から 1 の範囲にあり、0 であれば対象とする 2 変数の相関性はなく、1 であれば 2 変数は完全に一致する。このことから、水平方向、鉛直方向の両曲線はほぼ一致したといえる。すなわち、本試験は試験機の誤差を考慮しても限りなく均等な状態での二軸引張試験であると判断される。

また、図-9 に鉛直方向について測定した荷重を断面積で除して得られた応力 (MPa) と初期の試料幅に対するひずみとの関係を示す。荷重-変位曲線、応力-ひずみ曲

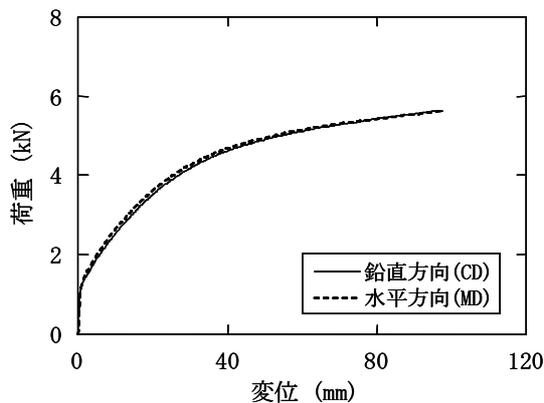


図-8 均等二軸引張試験での荷重-変位曲線

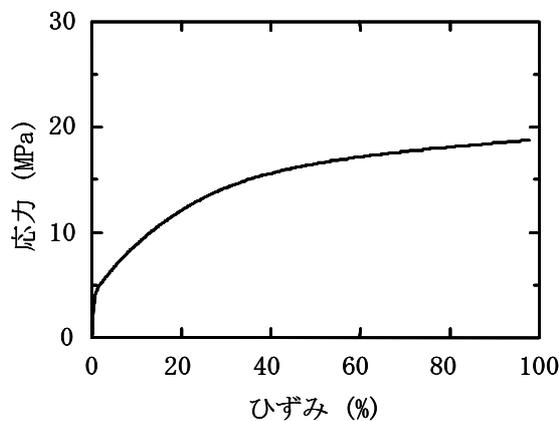


図-9 均等二軸引張試験での応力-ひずみ曲線

線ともに、一軸拘束二軸引張試験の時と同様、明確な降伏点を示さなかった。また、変形のごく初期に見られる曲線の急激な立ち上がり（荷重は約1kNまで、応力は約5MPaまでを指す。）は一軸拘束二軸引張試験結果と同様、試験機の測定上の誤差の影響を受けた結果であり、供試体の本来の変形挙動ではない。

### 5. W関数を用いた遮水シートの二軸引張変形時における応力-ひずみ曲線の推定

#### 5.1 一軸拘束二軸引張試験結果に基づくW関数の推定

Wの偏微分値 $\partial W/\partial I_1$ 、 $\partial W/\partial I_2$ を求めるため、式(10)、式(11)を次式のように変形する。

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \frac{1}{2(\lambda_1^2 - 1)} \left[ \frac{\lambda_1^3 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}} - \frac{\sigma_2}{1 - \lambda_1^{-2}} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial W}{\partial I_2} = \frac{1}{2(1 - \lambda_1^2)} \left[ \frac{\lambda_1 \sigma_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}} - \frac{\sigma_2}{1 - \lambda_1^{-2}} \right] \quad (17)$$

式(16)、式(17)の $\sigma_1, \sigma_2, \lambda_1$ に実測値を代入することにより求められた $\partial W/\partial I_1$ 、 $\partial W/\partial I_2$ を、 $I_1$ に対してプロットしたものを図-10に示す。 $\partial W/\partial I_1$ 、 $\partial W/\partial I_2$ はいずれも $I_1$ の、したがって伸張比 $\lambda$ の複雑な関数であることがわかる。すなわち、 $\partial W/\partial I_1$ は小変形領域では変形の増加に伴い最初は急激に低下するが、極小値をとった後は約9MPa付近で極大値を取り、その後は変形とともに徐々に減少した。一方、 $\partial W/\partial I_2$ は小変形領域において変形の増加に伴い最初急激に増加し、極大値を取った後は0.2~0.7MPaの間で変曲しながら徐々に減少した。

このようにして得られた $\partial W/\partial I_1$ 、 $\partial W/\partial I_2$ を用いて、軟質PVCの一軸引張変形時および均等二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の推定を行った。その結果は次節以降で述べる。

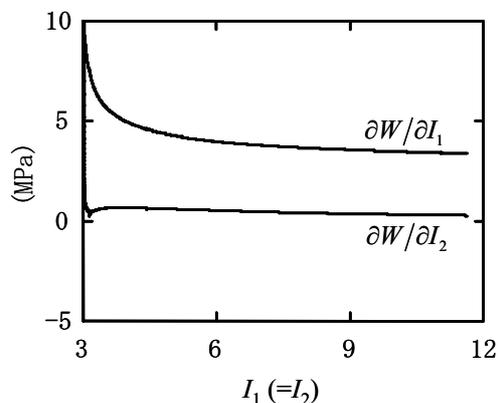
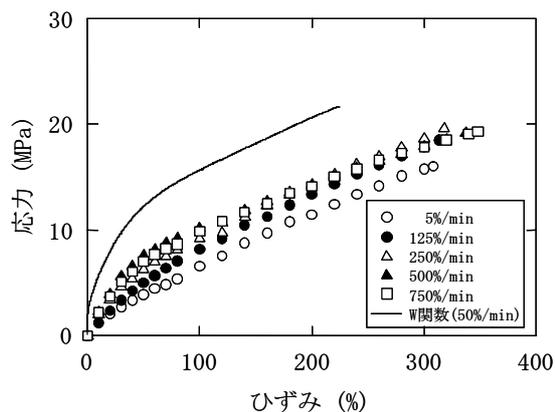


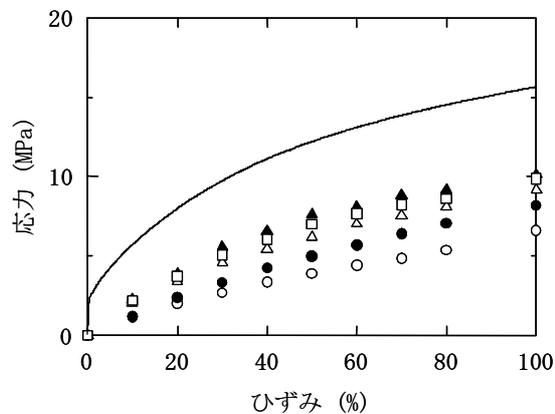
図-10  $\partial W/\partial I_1, \partial W/\partial I_2$  の計算結果

#### 5.2 一軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の推定

式(16)、式(17)から求められた $\partial W/\partial I_1$ 、 $\partial W/\partial I_2$ を $\lambda$ の実測値とともに式(13)に代入し、 $\sigma$ を計算した結果を図-11に示す。図中の実線は計算値を示し、○印はダンベル1号形供試体での実験値である。なお、実験値は狩野ら(2003e)のデータを引用した。W関数を用いて推定した一軸引張変形時の応力-ひずみ曲線は、実験値に対して応力の増加傾向（曲線の勾配）は良く一致したが、応力値には差異が見られた。一軸拘束二軸引張試験は50%/minのひずみ速度で試験を行っており、一軸引張試験結果の中でこれに近いひずみ速度としては5%/minあるいは125%/minのデータがあるが、その場合は約70%以降のひずみ領域において約7~9MPaの差があった。応力の値に差があらわれた主な原因は、変形に伴い供試体の断面積が減少する、いわゆるネッキング現象の影響によるものであると考えられる。一軸拘束二軸引張試験は供試体の断面積が減少しないように側面の変形を拘束するため、供試体にネッキング現象が発生しない。一方、一軸引張試験では供試体の側面を拘束しないため、変形



(a) 全ひずみ領域



(b) 低ひずみ領域

図-11 一軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の推定

に伴うネッキング現象は避けられない。さらに、狩野ら (2003e) の実験で用いたダンベル 1 号形供試体は、幅 2.5 cm のつかみ部に対して変形の計測区間幅 (標線間幅) が 1 cm と細く、くびれたような形状であるため、標線間において応力集中が発生する。そのため、標線間におけるネッキング現象は変形の比較的初期から発生すると考えられる。W 関数は第 2 章でも述べたように弾性変形を対象とするため、ネッキング現象のような塑性変形が顕著な変形領域の推定は不向きである点に注意する必要がある。したがって、一軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の W 関数による推定は、ネッキング現象が顕著に発生しない弾性変形領域を対象に行うことが重要である。

図-11(b)は図-11(a)の低ひずみ領域を表示したものであるが、W 関数による推定曲線は変形の初期において急激に立ち上がっている。これは、試験機の測定上の誤差の影響を受けた実験値 (図-6 あるいは図-8) を反映した結果である。そのため、同領域は一軸引張試験の実験値を推定するために十分な精度を有しておらず、弾性変形領域と想定される変形初期における実験値と W 関数の推定曲線との比較は本実験結果からは行うことができなかった。弾性変形領域の特定、および弾性変形領域での W 関数の推定精度は今後の検討課題である。

### 5.3 均等二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の推定

式(13)、式(14)から求められた  $\partial W/\partial I_1$ ,  $\partial W/\partial I_2$  を  $\lambda$  の実測値とともに式(7)に代入し、 $\sigma$  を計算した結果を図-12 に示す。図中の破線は計算値を、実線は実験値をそれぞれ示す。均等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、少しの誤差でも高ひずみ側では大きなずれが生じた。それでも、ひずみが 10% から 80% の区間においては、W 関数による計算値と実験値の誤差

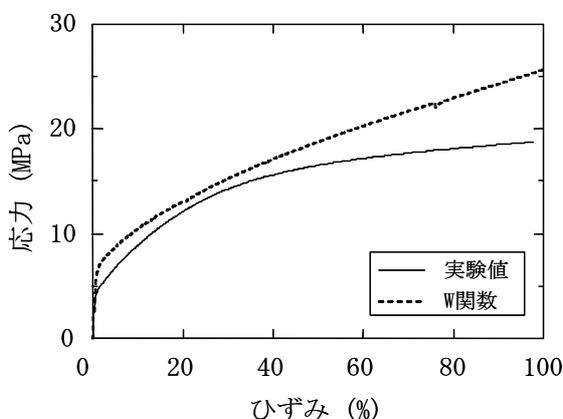


図-12 均等二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線の推定

は 20% 未満であり (図-13), 同変形領域におけるおおよその推定は十分に可能であることがわかった。ここで、狩野ら (2005m) は管理型廃棄物埋立護岸が地震動により被災変形した際の遮水シートの挙動について明らかにすることを目的とした模型振動実験を行った結果、護岸断面および地震波形によって多少の差異はあるものの、遮水シートに発生するひずみは数%~10%程度であった。この結果を考慮すると、特別研究の主な目的である地震動作用時の遮水シートの挙動評価については、本実験から得られた 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。

### 6. 水圧膨張実験での変形挙動に対するW関数の適用性

狩野ら (2005j) 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の変形挙動を把握するため、遮水シートの水圧膨張実験を行った。実験の結果、軟質 PVC 製の遮水シートは水圧の作用により球状に膨張し、音響とともに膨張頂部が一気に放射方向に引き裂かれた。このとき、遮水シートの膨張頂部には等方的な引張応力、すなわち均等二軸引張応力が発生していたと考えられる (狩野ら, 2005j)。そこで、本考察では、水圧膨張実験において均等二軸引張応力の作用下で変形、破断した遮水シートの応力ひずみ挙動を、W 関数を用いて評価してみる。

図-14に天頂部における遮水シートの応力-ひずみ曲線を示す。なお、図中のプロットの応力とひずみの値は、狩野ら (2005j) によって以下の方法で求められた。応力は次式 (山下, 2002) を用いて計算した。

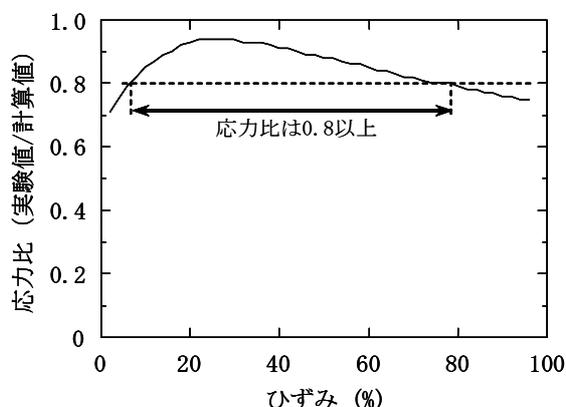


図-13 均等二軸引張変形時の応力に関する実験値と計算値の比

$$\sigma = \frac{pr\lambda}{2t_0} \quad (8)$$

径,  $\lambda$  : 天頂部の伸張比,  $t_0$  : 初期の試料厚みである.

またひずみは, 初期長 2 cm のひずみ計測線間の長さの変化をビデオカメラのデジタル画像から読み取った.

図中の実線は均等二軸引張試験の結果を, 破線は W 関数を用いた計算値をそれぞれ示す. 50%ひずみに対する水圧膨張実験と均等二軸引張試験の応力には約 4 MPa の差が見られたが, 両者の曲線の増加傾向はよく一致した. このことから, 水圧膨張実験でデータのない 50%未満の低ひずみ領域についても, 応力の増加傾向は均等二軸引張試験結果に類似すると考えられる. 一方, 50%ひずみに対する W 関数の応力は, 水圧膨張実験の値に対して約 1.5 倍の差異があった. 両者の曲線の傾向から推量すると, 50%未満の低ひずみ領域では両者の応力の差異は同程度かより小さくなると考えられる. すなわち, 50%未満の低ひずみ領域における水圧膨張実験の応力-ひずみ曲線は, W 関数による計算値の最大約 1.5 倍の精度で推定可能であることが示唆された.

## 7. まとめ

本研究では, 管理型廃棄物埋立護岸の遮水工に敷設される軟質PVC製遮水シートを対象とし, 一軸拘束二軸引張試験ならびに均等二軸引張試験を行った. また, 一軸拘束二軸引張試験によって遮水シートの W 関数の偏微分値を求めた. さらに, 得られた W 関数形を用いて遮水シートの一軸引張変形および均等二軸引張変形時の応力ひずみ挙動の評価を試みた. 以下に得られた結果について示す.

- (1) 一軸拘束二軸引張試験により, 約 220%ひずみまでの一軸拘束二軸引張変形時の遮水シートの応力ひずみ関係が明らかになった.
- (2) 均等二軸引張試験により, 約 100%ひずみまでの均等二軸引張変形時の遮水シートの応力ひずみ関係が明らかになった.
- (3) W 関数を用いて推定した一軸引張変形時の応力-ひずみ曲線は, 実験値に対して応力の増加傾向 (曲線の勾配) については良く一致したが, 応力値にはネッキング現象による影響と思われる差異が見られた.
- (4) W 関数を用いて推定した均等二軸引張変形時の応力-ひずみ曲線は, ひずみが 10%から 80%の区間において W 関数による計算値と実験値の誤差は 20%未満であり, 同変形領域におけるおおよその推定は十分に可能であることがわかった.
- (5) 水圧膨張実験において均等二軸変形していると考え

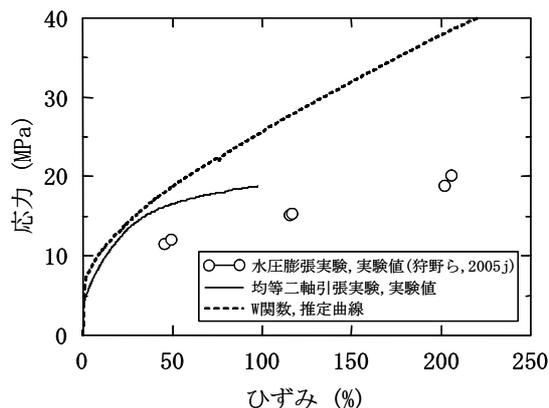


図-14 水圧膨張実験の天頂部における応力ひずみ挙動

られる天頂部の応力-ひずみ曲線は, 50%未満の低ひずみ領域において, W 関数による計算値の最大約 1.5 倍の精度で推定可能であることが示唆された.

これらの結果は, 管理型廃棄物埋立護岸遮水工に敷設される遮水シートに引張外力が作用した場合の変形破断挙動を把握する際の基礎資料となると考えている.

## 8. おわりに

管理型廃棄物埋立護岸遮水工の遮水シートについて, 法面平行方向はシート相互が溶着され変形が拘束されているのに対し, 法面垂直方向はシートの自重や上載荷重による引き込み力によって引張変形が生じやすい. 本研究で得られた結果は, このような片側を拘束された状態でのシートの変形挙動や局所的に発生する二軸引張変形挙動を検討するうえで貴重なデータである. とくに, W 関数を用いることにより, 異なる応力状態で変形する遮水シートの挙動を単一の式で評価できることは遮水シートの設計において非常に有効である.

ここで, W 関数は弾性範囲内の挙動を推定するのに有効であるが, 弾性限界を超えた塑性領域への適用は困難である. さらに, 軟質 PVC 製シートは明確な降伏点をもたないため, 素材の弾性限界が不明確である. 遮水シートの設計では, 外力に対する許容変形量を弾性範囲内にとどめることが望ましいため, 遮水シートの弾性限界を把握することは今後重要な検討課題である.

(2006 年 2 月 15 日受付)

## 参考文献

伊野同, 鶴飼亮行, 熊谷隆宏, 前野詩朗 (2003) : 傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧特性

- およびその評価方法, 海岸工学論文集, Vol. 50, No. 1, pp. 701-706.
- 小田勝也, 狩野真吾, 木俣陽一, 渡邊陽二郎, 黒岩正夫, 石田道彦, 下田宏治, 松村聡 (2005a) : 二重シート構造 (袋状) による健全性評価技術の開発 : その1, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集 (印刷中) .
- 小田勝也, 狩野真吾, 大西健司, 黒岩正夫, 下田宏治, 松村聡, 木俣陽一, 衣笠泰広 (2005b) : 二重シート構造 (袋状) による健全性評価技術の開発 : その2, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集 (印刷中) .
- 小田勝也, 狩野真吾, 羽田晃, 五月女洋, 小久保裕, 山崎宣悦, 高濱利光 (2005c) : 海面処分場に適用可能な漏水検知システムー材料の電気抵抗特性に関する基礎的検討ー, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集 (印刷中) .
- S. Kano, M. Kondo and K. Morohoshi (2003a) : Deformation and strength properties of waterproof sheet applied at coastal waste disposal site, 港湾・臨海部都市機能の耐震性向上に関するシンポジウム発表論文集, pp. 141-146.
- 狩野真吾, 近藤三樹郎, 長尾毅, 諸星一信 (2003b) : 遮水シートの変形強度特性に関する実験的考察ー引張り強度の温度特性および応力緩和特性の評価ー, 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 189-193.
- 狩野真吾, 近藤三樹郎, 長尾毅, 諸星一信 (2003c) : 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, 吉田誠, 三藤正明, 近藤三樹郎, 諸星一信 (2003d) : 突起物貫入による遮水シートの破断とひずみ分布の関係, 第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 943-945.
- 狩野真吾, 諸星一信, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2003e) : 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, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2004a) : 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 (2004b) : 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 (2004c) : 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 (2004d) : 裏込め上に敷設された遮水シートの厚さと破断特性に関する基礎実験, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2309-2310.
- 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, 2004.
- 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎, 吉田誠, 三藤正明 (2004f) : 遮水シートの突起物貫入時における応力ーひずみ挙動, 第15回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 1137-1139.
- 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2004g) : 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.
- 狩野真吾, 諸星一信, 小田勝也 (2004h) : 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 (2005a) : 管理型廃棄物埋立護岸の地震時変形挙動に関する模型振動実験, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp. 843-848.
- 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2005b) : 接合部を考慮した遮水シートの水圧負荷時の変形強度特性, 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2541-2542.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平 (2005c) : 管理型廃棄物埋立護岸の動的挙動に関する模型振動実験, 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2539-2540.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2005d) : 管理型廃棄物埋立護岸の地震時挙動に関する実験的検討, 木学会地震工学論文集, Vol. 28.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平 (2005e) : 管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの模型振動実験, 第60回土木学会年次学術講演会, pp. 413-414.
- 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2005f) : 接合部を考慮した不織布の水圧負荷時の変形強度特性, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 974-976.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平 (2005g) : 管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの動的挙動に関する模型振動実験, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 977-979.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明 (2005h) : 遮水

- シートを敷設した管理型廃棄物埋立護岸の地震時挙動に関する水中振動台実験, 日本地震工学会・大会-2005 梗概集, pp. 200-201.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平 (2005i) : 管理型廃棄物埋立護岸の遮水シートの地震時変形特性に関する静的加力実験, 日本地震工学会・大会-2005 梗概集, pp. 198-199.
- 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2005j) : 遮水シートの水圧膨張変形に関するスケール効果と応力ひずみ挙動の評価, ジオシンセティックス論文集, Vol. 20, pp. 185-192.
- 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明, 秋本哲平 (2005k) : 地震動の違いによる遮水工の動的変形特性に関する模型振動実験, ジオシンセティックス論文集, Vol. 20, pp. 47-52
- 狩野真吾, 小田勝也, 近藤三樹郎 (2005l) : 水圧膨張実験における遮水シート・不織布の変形強度特性に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No. 213, 22p.
- 狩野真吾, 小田勝也 (2005m) : 遮水シートを用いた遮水工を有する管理型廃棄物埋立護岸の地震時挙動に関する実験的研究, 国土技術政策総合研究所資料, No. 256, 39p.
- 川端季雄 (1988) : 多軸応力下の高分子の力学挙動, 高分子, Vol. 37, No. 12, pp. 868-871.
- 小竹望, 北浦良樹, 金子清美, 手塚隆, 佐藤清, 徳永和幸 (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.
- 小竹望, 北出圭介, 鶴ヶ崎和博, 馬場慎太郎, 西野好夫, 徳淵克正 (2004) : 管理型廃棄物海面処分場における遮水シートの発生ひずみ, ジオシンセティックス論文集, Vol. 19, pp. 81-86.
- 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, 諸星一信, 永治勇吉, 河島幸雄, 清水昭二 (2002) : 土木遮水シートの実用耐震実験研究報告, 第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 936-938.
- 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, 篠幸次, 佐藤晶英 (2004a) : 海面処分場遮水シートの折れ曲がり破断特性試験, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 643-644.
- 近藤三樹郎, 小田勝也, 狩野真吾, 佐藤晶英, 渡辺克也 (2004b) : 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, 狩野真吾, 小田勝也, 佐藤晶英, 渡辺克也 (2005a) : 遮水シートの貫入試験とその応力ひずみ曲線化, 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2575-2576.
- 近藤三樹郎, 小田勝也, 狩野真吾, 渡辺克也, 永治勇吉 (2005b) : 土木遮水シートの低温での折れ曲がり性能, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 947-949.
- 近藤三樹郎, 狩野真吾, 小田勝也, 渡辺克也, 永治勇吉 (2005c) : ジオメンブレンの折れ曲がり特性, ジオシンセティックス論文集, Vol. 20, pp. 141-150.
- 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.
- 長尾毅, 近藤三樹郎, 宮田正史, 西守男雄, 菅野高弘 (2002a) : 海面処分場における遮水シートの耐久性に関する現地実証実験 (その1), 第37回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1941-1942.
- 長尾毅, 近藤三樹郎, 宮田正史, 西守男雄, 菅野高弘 (2002b) : 海面処分場における遮水シートの耐久性に関する現地実証実験 (その2), 第37回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1943-1944.
- 長尾毅, 宮田正史, 諸星一信, 近藤三樹郎 (2002c) : 海面処分場における遮水シートの耐震性に関する現地実証試験, 第57回土木学会年次学術講演会, pp. 437-438.
- 平原直征, 兵動正幸, 村田秀一, 中田幸男, 吉本憲正, 黒岩正夫, 下田宏治, 松村聡, 木保陽一, 山本和彦 (2005) : 砕石を模擬したコーンの貫入による遮水シートの損傷評価, 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2579-2580.
- 深堀美英 (2000) : 設計のための高分子の力学, 技報堂出版, pp. 31-36.

- 藤井敦, 宇野健司, 北澤壮介, 土田孝, 五月女洋, 伊野同 (2002) : 混成堤式管理型護岸の遮水シート作用波圧特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 83-88.
- 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 (1992) : 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.
- 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.
- 山下義裕 (2002) : 二軸変形における加硫ゴムの破壊 (特集ゴムの破壊), 日本ゴム協会誌, Vol. 75, No. 6, pp. 252-256.
- 吉田誠, 狩野真吾, 諸星一信, 三藤正明, 近藤三樹郎 (2003) : 遮水シートの厚さがシート破断に及ぼす影響について, 第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 946-948.