

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

近年、全国的に内陸の廃棄物最終処分場がひっ迫するとともに、不法投棄などの不適正処理が横行していることから、廃棄物海面処分場での廃棄物等の受入れに対する期待が大きくなってきている。廃棄物海面処分場は平成15年3月までに全国103箇所を整備または整備中であり、護岸延長は約220 km、埋立面積は約4,900 haに達する（(社)日本港湾協会, 2003）。また、廃棄物処理施設の安全性への意識の高まりや廃棄物の質の多様化などに対応して平成10年に「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命令」（昭和52年総理府・厚生省令第1号；以下「改正命令」と記述する）が改正され、管理型廃棄物護岸に要求される構造及び機能が従来に比べ強化された。

管理型廃棄物護岸に要求される性能は、常時・異常時（地震動作用時等）を問わず護岸内部の管理型廃棄物を安定的に保管し、護岸内部の廃棄物や保有水等を護岸外部の海域に流出させない（遮水機能）ことである。ここで、従来の港湾構造物はレベル1地震動（数十年に一度発生する地震動）およびレベル2地震動（数百年に一度発生する地震動；兵庫県南部地震クラス）に対する耐震設計がなされており、レベル1地震動については変形を許容せず、レベル2地震動については許容変形量が規定されている（(社)日本港湾協会, 1999）。これに対し、管理型廃棄物護岸の耐震設計法は原則として上述の設計法に準拠したものとなっているが（(財)港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所, 2000）、護岸変形が遮水機能に及ぼす影響について十分な検討がなされていないため、護岸の許容変形量の明確な設定は困難である。このため、現時点ではレベル2地震動に対して許容変形量を考慮した設計法を適用できない。したがって、極大地震動作用時における管理型廃棄物護岸の耐震設計法を確立するためには、護岸変形にともなう遮水機能の健全性およびその評価手法を整備し、体系化する必要がある。

### 1.2 本研究の位置づけ

このような状況のもと、国土技術政策総合研究所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）では、管理型廃棄物護岸の耐震設計法の確立を目指し、「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）を行っている。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、管理型廃棄物・保有水を遮断している遮水シートや保護マット等を用いた遮水工が破損・損傷する可能性がある。遮水工が損傷を受けて管理型廃棄物護岸の遮水機能が損失すると、管理型廃棄物が周辺海域に流出し、広範囲の海洋環境に甚大な被害を与える。このため、地震動による遮水工の損傷有無（遮水機能の健全性）について、十分な検討をすることが必要不可欠であるが、現状において遮水機能の健全性を検討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。なお、本研究は土木シート技術協会との共同研究であり、本論文は特別研究の初年度に行われた成果の一部を資料としてまとめたものである。

### 1.3 目的

極大地震動の作用による護岸変形が遮水機能に及ぼす影響を把握するためには、外力作用時における遮水シートおよび保護マットの強度や変形挙動を検討することが必要である。そのため、本研究では海面処分場の遮水工に使用される遮水シートおよび保護マットの変形強度特性について、材料の粘弾性に着目した検討を行う。すなわち、単軸引張り場における遮水シートの応力-ひずみ関係の温度依存性およびひずみ速度依存性、さらに遮水シート・保護マットの応力緩和特性について室内試験を行い、得られる結果について粘弾性モデルによる評価式の提案を試みる。室内実験で使用した遮水シートおよび保護マットは、どちらも海面処分場で実際に使用されている塩化ビニル（PVC）製シート（厚さ3 mm）および短繊維不織布（厚さ5 mm）である。なお、本研究では実際の地震時の変形速度に近い条件での試験に努めたが、一部試験装置の能力などから実際の変形速度とは異なる実験条件での試験にならざるを得なかった部分があることを断っておく。

### 1.4 本資料の構成

本資料の構成を以下に示す。

2章では、陸上および海面の廃棄物処分場で使用されている遮水材の歴史や種類、および材料特性に関する既往の研究について述べる。

3章では、遮水シートの引張り性能の温度依存性を評価するため、異なる温度条件下における単軸引張り試験および3要素粘弾性モデルによる数値解析を行い、得られる結果について比較検討する。さらに、日本近海の海水

温度領域において、温度変化が遮水シートの破壊強度に及ぼす影響を把握する。

4章では、遮水シートの引張り性能のひずみ速度依存性を評価するため、異なるひずみ速度における単軸引張り試験および3要素粘弾性モデルによる数値解析を行い、両結果を比較検討する。さらに、実験条件と兵庫県南部地震における護岸の変形速度とを比較した結果を述べる。

5章では、遮水シートおよび不織布の応力緩和特性について、室内試験および5要素粘弾性モデルを用いた数値解析を行い、両結果を比較検討する。さらに、兵庫県南部地震と同程度の地震動が海面処分場に作用した場合の遮水工の遮水シートに発生する応力緩和傾向について評価した結果を述べる。

6章は本研究から得られる結論であり、7章で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. 遮水材の材料特性

### 2.1 歴史と種類

廃棄物処分場への遮水シートの適用は古く、昭和51年に制定された「最終処分場構造指針」にその使用が記述されている。当時の遮水シートはゴム製であったが、その後合成ゴムと合成樹脂の中間的な素材であるオレフィン系エラストマー(TPO)が開発され、またフレキシブルポリマーアロイ(FPA)と呼ばれる柔軟性に富んだポリプロピレンシートが海外から導入された。平成10年の改正命令により、遮水シートの保護材として保護マットが使用されることとなり、現在に至っている。

近年、最も一般的に使用されている遮水シートは、陸上処分場ではTPOや高密度ポリエチレン(HDPE)であり、海面処分場では塩化ビニル(PVC)である。海面処分場でPVCが用いられている理由として、PVCの比重が約1.3と他の遮水シートより高く(例えば、TPOは0.9~1.02, HDPEは0.95; 国際ジオシンセティックス学会日本支部ジオメンブレン技術委員会, 2000)、水に沈まなければならないという施工条件を満足していることが挙げられる。

一方、保護マットは構造的に分類すると、すべて不織布構造であるもの、不織布と織布を複合的に重ねたもの、不織布とジオグリッドを重ねたものなど多種存在し、それぞれ使用環境に適した材料を選ぶ必要がある。陸上処分場では、覆土により露出しないため目付量の減失が少ないことから長繊維および短繊維不織布が一般的に用いられており、海面処分場でも同様の素材が使用されているようである。

### 2.2 材料特性に関する既往の研究

遮水シートはクリープや応力緩和といった粘弾性を有し、その変形挙動は温度や時間に対する依存性が高い。遮水シートの力学的特性に関する既往の研究としては、突起物への抵抗性に関する研究(三木・林, 1991; 森ら, 1996)、応力緩和やクリープに関する実験的考察(西形・西田, 2000; 西田ら, 2001; 許・今泉, 2002)、基盤の局所沈下にもなう遮水シートの変形挙動の評価(野本ら, 2000; 宇佐見ら, 2002; 葛巻ら, 2002)、温度変化が遮水シートの変形挙動に与える影響(今泉ら, 1996a)や熱応力の測定(坪井ら, 1998)など多数報告されているが、その多くは陸上処分場遮水工に使用されるHDPEを対象としたものであり、海面処分場で使用されるPVCの力学特性に関する詳細な議論はほとんどされていない。

保護マットに要求される性能は、遮水シート破損作用力の減少・緩和にある。この緩和性能は貫入抵抗、伸び率、引張り強さなどの要素を対象として表される。保護マット単体の材料特性に関する既往の研究として、横山(2002)は防砂シート(織布および不織布)の強度と下面均し精度との関係について陸上実験を基に考察した。また、福知ら(1998)は遮水シートや不織布の単軸引張り時における試料幅およびネッキング現象が引張り強度に及ぼす影響について検討を行った。一方、遮水シートと組み合わせた場合の材料特性に関する既往の研究として、貫入試験における貫入抵抗値が最大になる遮水シートと保護マットの組み合わせに関する検討(宮地ら, 2002)や、遮水シート・不織布多層ライナーに生じる張力やせん断力の評価(今泉ら, 1996b; 野本ら, 1996; 小竹ら, 2002a; 小竹ら, 2002b)、さらに引抜き試験に基づく不織布の変形挙動の評価(高橋ら, 1996; 原田ら, 2000)などが行われている。不織布に関する研究は、おもに遮水シートと組み合わせた場合の遮水シートに発生する外力の緩和効果について議論がなされているが、不織布単体の材料特性に関する報告例は少ない。

## 3. 遮水シートの引張り特性の温度依存性評価

### 3.1 試験方法

遮水シートの引張り特性の温度依存性を定量的に調べるため、0℃、23℃、40℃、60℃の各温度条件下におけるPVC遮水シートの単軸引張り試験を行う。試験方法はJISA6008に準拠し、供試体は試験前に数時間、所定温度で放置した。試験機に供試体を設置後、200mm/minの一定速度で引張り(写真-1)、破断までの応力およびひずみを測定した。試験回数は各温度ともに1回である。な

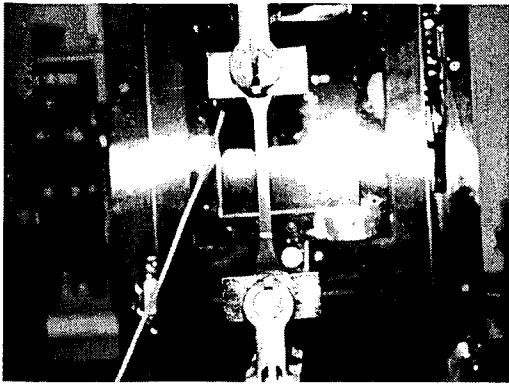


写真-1 PVC供試体の引張り試験

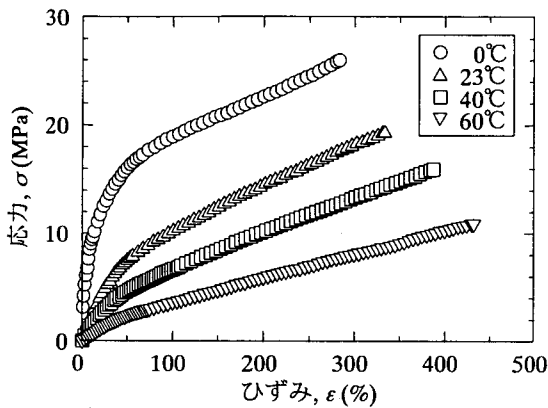


図-1 温度を変化させたときの応力-ひずみ曲線

お、供試体の形状は JISK6251 に規定される 1 号ダンベル (幅 10 mm, 標線間 40 mm) である。

### 3.2 試験結果

各温度における応力-ひずみ曲線を図-1 に示す。曲線の初期勾配は低温側ほど大きく、温度の上昇とともに減少する傾向を示す。また、降伏点にあたる弾性限界点は温度の増加とともに低ひずみ側、低応力側へ移動する傾向が見られる。供試体の破断強度は温度の上昇とともに減少するが、破断ひずみは逆に増大し、供試体が温度上昇によって軟化し伸びやすくなっていることがわかる。

破断強度および破断ひずみの温度依存性について検討した結果を図-2 に示す。破断強度 ( $\sigma_f$ ) は温度上昇に対して直線的に減少し、その減少率は 0.24 MPa/°C であった。これに対し、破断ひずみ ( $\epsilon_f$ ) は温度上昇とともに直線的に増大し、その勾配は 2.5%/°C であった。グラフより、破断強度および破断ひずみの温度依存性は以下の式で表される。

$$\sigma_f = -0.24T + 26 \quad (1)$$

$$\epsilon_f = 2.5T + 280 \quad (2)$$

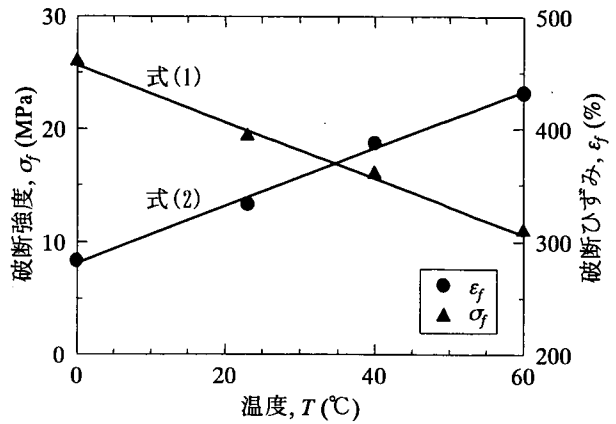


図-2  $\sigma_f, \epsilon_f$  の温度依存性

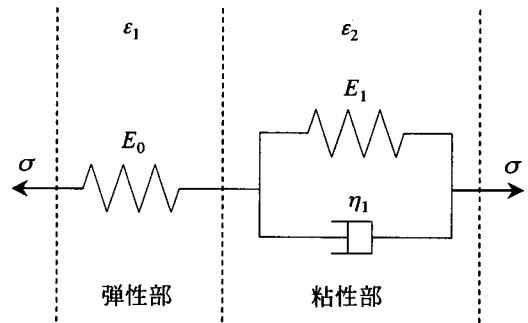


図-3 3要素粘弾性モデル

### 3.3 3要素粘弾性モデルと試験結果との比較

#### (1) 計算方法

遮水シートの引張り変形特性について、本解析では 3 要素粘弾性モデルによる評価を行う。図-3 に示すように、3 要素粘弾性モデルは弾性変形を支配するバネのみで構成される弾性部と、粘性変形を支配するバネとダッシュポットが並列の粘性部とから成る。モデルに応力  $\sigma$  が作用したときの弾性部のひずみを  $\epsilon_1$ 、粘性部のひずみを  $\epsilon_2$  とすると、それぞれの関係は次式 (3)、(4) のようになる。

$$\sigma = E_0 \epsilon_1 \quad (3)$$

$$\sigma = E_1 \epsilon_2 + \eta_1 \frac{d\epsilon_2}{dt} \quad (4)$$

ここで、全ひずみ  $\epsilon$  は  $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  との和で表される。式(3) および式(4)の  $\sigma$ 、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  に対してラプラス変換を行うと、

$$\bar{\sigma} = E_0 \bar{\epsilon}_1 \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} = (E_1 + s\eta_1) \bar{\epsilon}_2 \quad (6)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}_1$ 、 $\bar{\epsilon}_2$  はそれぞれ  $\sigma$ 、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  の像関数、 $s$

は複素変数である。

(式(5)の両辺)  $\times (E_1 + s\eta_1)$  + (式(6)の両辺)  $\times E_0$  を計算し、さらに得られた式の  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\varepsilon}$  についてラプラス逆変換を行うと、

$$\sigma(E_0 + E_1) + \eta_1 \frac{d\sigma}{dt} = E_0 E_1 \varepsilon + E_0 \eta_1 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7)$$

供試体のひずみ速度を一定 ( $=\dot{\varepsilon}_c$ ) とし、 $\sigma$  について解くと、

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon + \left(\frac{\bar{E}}{E_1}\right)^2 \eta_1 \dot{\varepsilon}_c - \left(\frac{\bar{E}}{E_1}\right)^2 \eta_1 \dot{\varepsilon}_c \exp\left(-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1 \dot{\varepsilon}_c} \varepsilon\right) \quad (8)$$

ただし、 $E_0$ ,  $E_1$  は粘弾性モデルの弾性率 (MPa),  $\eta_1$  はダッシュポットの粘性係数 (MPa $\cdot$ min), また、

$$\bar{E} = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \quad (9)$$

なお、指数部において  $t = \varepsilon / \dot{\varepsilon}_c$  とした。

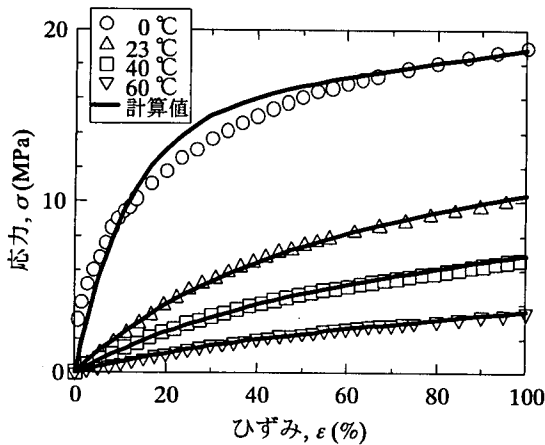


図-4 計算値と実験値との比較 ( $0 \leq \varepsilon \leq 100$ )

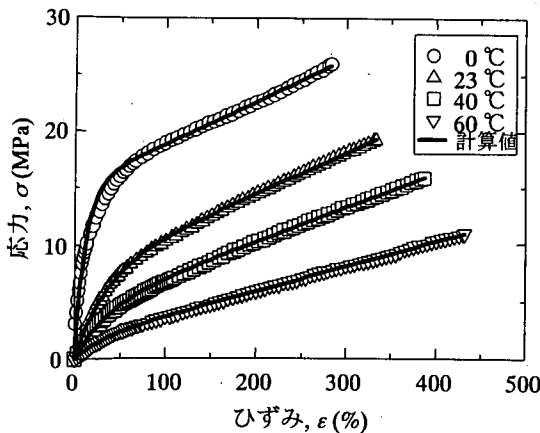


図-5 計算値と実験値との比較 ( $0 \leq \varepsilon \leq 500$ )

(2) 計算結果と試験結果との比較

図-4および図-5に計算値と実験値との比較結果を示す。0°Cにおける曲線の60%ひずみ以下の領域で計算値と実験値との間に若干の誤差がみられるが、それ以外ではおおむね両者の値は一致している。両者の相関性を表す指標として、ここでは決定係数  $R^2$  を考える。 $R^2$  は以下の式で表される。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\sigma_i - \hat{\sigma}_i)^2}{\sum(\sigma_i - \bar{\sigma})^2} \quad (10)$$

ここで、 $\sigma_i$  は実験値、 $\hat{\sigma}_i$  は計算値、 $\bar{\sigma}$  は実験の平均値である。実験値と計算値が完全に一致する場合、 $R^2$  は1となる。本解析における  $R^2$  は、すべての温度において0.99以上であった。

計算にあたり、式(8)の各パラメータは以下の方法で求めた。

- ① 図-1の応力-ひずみ曲線の直線部分(塑性変形領域)は式(8)の第3項である指数項の影響がなくなった領域と考えることができるので、この直線部分の勾配は  $\bar{E}$  に等しい。なお、直線部分の定義は、50%破断ひずみから破断点までの領域とした。
- ②  $E_1$  および  $\eta_1$  は、式(8)に  $\varepsilon = 60\%$  およびそれに対応する  $\sigma$  の実験値を代入して得られる式と、①の直線部分の切片が式(8)の第2項に等しいことより求める。
- ③ 式(9)から、 $E_0$  を計算する。

以上の方法で計算されたパラメータ値を表-1に示す。温度の増加とともに、弾性挙動を支配する  $E_0$ , 粘性挙動を支配する  $\eta_1$ , および塑性変形の度合いを示す  $\bar{E}$  はともに減少する。これらの現象は、PVCの熱可塑性に起因したものであると考えられる。

(3) モデルパラメータの温度依存性

式(8)を次式(11)のように書き換える。

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon + a - ae^{-b\varepsilon} \quad (11)$$

ただし、

表-1 3要素モデルのパラメータ

| T (°C) | $E_0$ (MPa)       | $E_1$ (MPa) | $\eta_1$ (MPa $\cdot$ min) | $\bar{E}$ (MPa) |
|--------|-------------------|-------------|----------------------------|-----------------|
| 0      | $1.3 \times 10^2$ | 3.9         | 3.2                        | 3.8             |
| 23     | $2.6 \times 10^1$ | 4.4         | 1.9                        | 3.7             |
| 40     | $1.5 \times 10^1$ | 3.9         | 1.3                        | 3.1             |
| 60     | 7.3               | 3.2         | 0.60                       | 2.2             |

$$\alpha = \left(\frac{\bar{E}}{E_1}\right)^2 \eta_1 \dot{\epsilon}_c \quad (12)$$

$$\beta = \frac{E_0 + E_1}{\eta_1 \dot{\epsilon}_c} \quad (13)$$

とする。

このとき、パラメータ  $\bar{E}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  は温度  $T$  (°C) によって図-6 のように変化する。図中に示すプロット点の近似曲線は以下のような式で表される。なお、近似曲線とプロット点との相関性を表す決定係数はすべて 0.98 以上であった。

$$\bar{E} = -5.0 \times 10^{-4} T^2 + 5.0 \times 10^{-3} T + 3.8 \quad (14)$$

$$\alpha = 15 \exp(-0.035T) \quad (15)$$

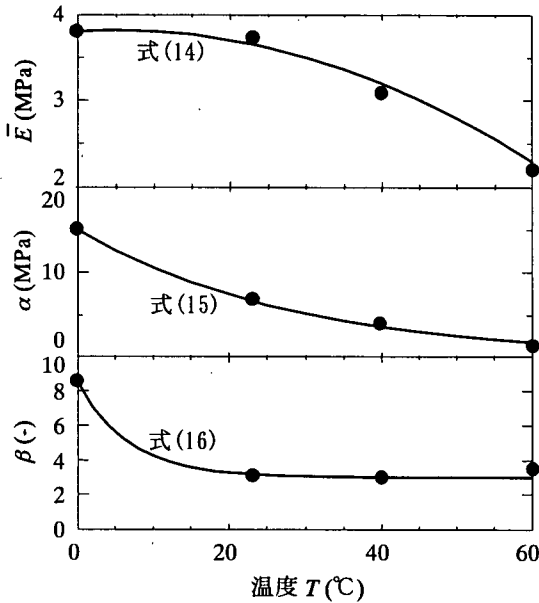


図-6 パラメータの温度依存性

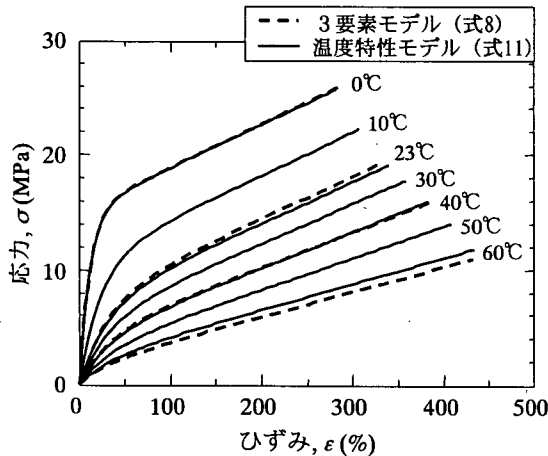


図-7 3要素モデルと温度特性モデルとの比較

$$\beta = 3.0 + 5.5 \exp(-0.15T) \quad (16)$$

式(14)～(16)を式(11)に代入することで、温度をパラメータとした応力とひずみの関係が得られる。式(8)による計算結果と、式(11)に式(14)～(16)を代入して得られた値を比較した結果を図-7に示す。60°Cにおいて数パーセントのずれを生じたが、その他の温度についてはほぼ一致した。

### 3.4 海面処分場への適用性

日本近海の2月および8月における海水面温度の変動幅は0～29°Cである(文部科学省国立天文台編, 2003)。この温度範囲における遮水シートの破断強度は式(1)より19～26 MPa、また破断ひずみは式(2)より280～353%と計算される。また、式(14)～(16)であらわされるモデルパラメータの温度依存性を考慮した近似式は、0～29°Cの温度幅では十分適用可能であるといえる。

しかしながら、海面処分場に敷設される遮水シートには二軸方向の応力も作用するため、本試験結果を設計の段階で使用するためには二軸引張り時における応力、ひずみ特性を考慮する必要がある。また、ネッキング現象のような引張り強度の試料幅依存性も考慮する必要がある(福知ら, 1998)ため、式(8)や式(11)から得られる計算値をそのまま海面処分場に敷設された遮水シートの強度として用いることは困難である。しかし、PVCシートの強度に明確な温度依存性が存在するという結果は、遮水シートの強度設計を行う上で考慮する必要があると考えられる。

### 4. 遮水シートの引張り特性のひずみ速度依存性評価

#### 4.1 試験方法

遮水シートの引張り特性のひずみ速度依存性を検討するため、異なるひずみ速度におけるPVC供試体の単軸引張り試験を行う。試験機は写真-1と同じもので、供試体を2, 50, 100, 200, 300 mm/minの各速度で引張り、破断までの応力およびひずみを測定した。試験回数は各ひずみ速度ともに1回である。供試体の形状はJISK6251に規定される1号ダンベル(幅10 mm, 標線間40 mm)であり、試験温度は23°Cである。

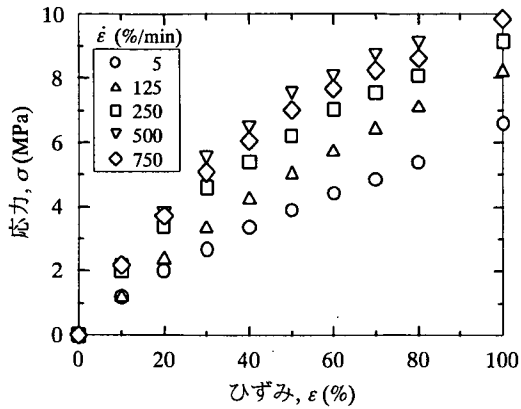


図-8 ひずみ速度を変化させたときの応力-ひずみ曲線 ( $0 \leq \epsilon \leq 100$ )

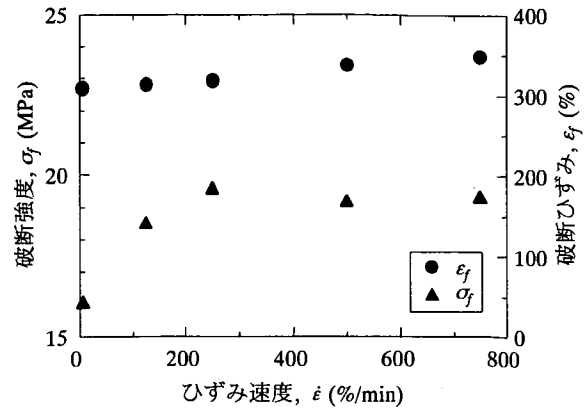


図-10  $\sigma_f, \epsilon_f$ のひずみ速度依存性

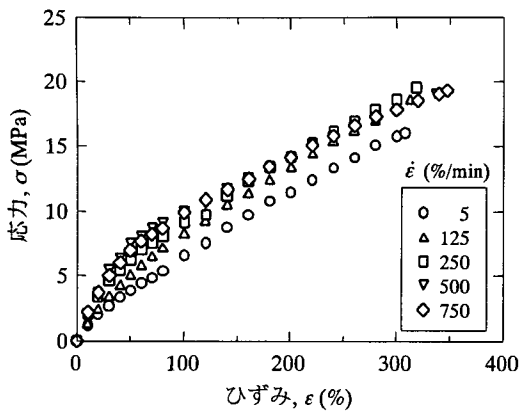


図-9 ひずみ速度を変化させたときの応力-ひずみ曲線 ( $0 \leq \epsilon \leq 400$ )

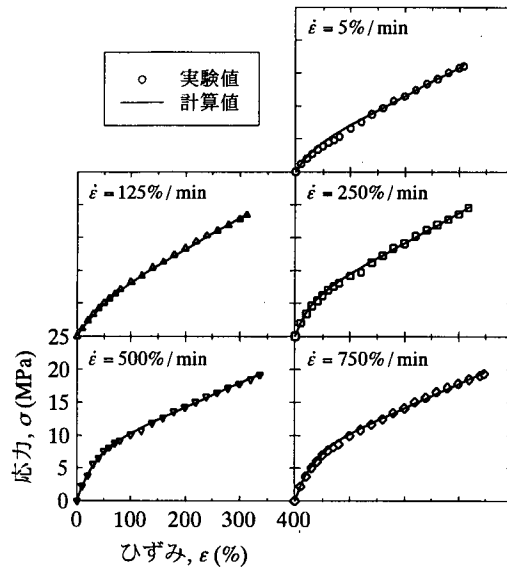


図-11 実験値と計算値との比較

#### 4.2 試験結果

引張り試験結果を図-8, 図-9に示す。ひずみ速度を $\dot{\epsilon}$  (%/min)とすると, 供試体の標線間が40 mmであるので, 2, 50, 100, 200, 300 mm/minの各引張り速度に対応する $\dot{\epsilon}$ は, 5, 125, 250, 500, 750 %/minとなる。応力-ひずみ曲線は, ひずみ速度の増加とともに弾性領域と塑性領域との区別が明確になり, その境界が高ひずみ側へ移動する。その際, 初期勾配は高ひずみ速度ほど急勾配になるが, 塑性領域の勾配はひずみ速度によらずほぼ一定の傾向を示すようである。

次に破断強度 ( $\sigma_f$ ) および破断ひずみ ( $\epsilon_f$ ) とひずみ速度との関係を図-10に示す。 $\sigma_f$ はひずみ速度の増加とともにある程度増大し, その後19.5 MPa近傍に収束する傾向を示した。このことから, 破断強度のひずみ速度依存性は低ひずみ速度領域 ( $\leq 250$  %/min)においてより顕著であるといえる。一方,  $\epsilon_f$ はひずみ速度

の増加に対しゆるやかに増大しているが, その差は試験結果全体の平均値 325%前後に最大7%程度と非常に小さい。すなわち, 本試験範囲における破断ひずみのひずみ速度依存性は少ないといえる。

#### 4.3 3要素粘弾性モデルと試験結果との比較

##### (1) 計算方法

引張り特性のひずみ速度依存性の解析は, 前章と同様の3要素粘弾性モデル式(8)を用いて行う。

##### (2) 計算結果と試験結果との比較

計算値と実験値を比較した結果を図-11に示す。両者の相関性を表す決定係数はすべてのひずみ速度において0.99以上の精度であった。式(8)における各パラメータの決定方法は以下の通りである。

- ① 図-11の応力-ひずみ曲線の直線部分(塑性変形領域)は式(8)の第3項である指数項の影響がなくなっ

た領域と考えることができるので、この直線部分の勾配は $\bar{E}$ に等しい。なお、直線部分は140%ひずみ以降の領域とした。この領域における直線近似の信頼性(決定係数)は0.99以上である。

- ②  $E_1$  および  $\eta_1$  は、式(8)に  $\epsilon = 10\%$  およびそれに対応する  $\sigma$  の実験値を代入して得られる式と、①の直線部分の切片が式(8)の第2項に等しいことより求める。
- ③ 式(9)から、 $E_0$  を計算する。

以上の方法で計算されたパラメータ値を表-2に示す。弾性挙動を支配する  $E_0$  はひずみ速度の増加とともに増大し、粘性挙動を支配する  $\eta_1$  はひずみ速度の増加に対して減少している。すなわち、PVCシートの変形は高ひずみ速度では弾性的挙動が卓越し、低ひずみ速度では粘性的挙動が卓越することを定量的に示した結果であるといえる。さらに、 $\bar{E}$  はひずみ速度によらずほぼ一定の値を示しており、塑性変形がひずみ速度によらずほぼ一定の傾向で進行することを反映した結果であると考えられる。

表-2 3要素モデルのパラメータ

| $\dot{\epsilon}$<br>( $\text{min}^{-1}$ ) | $E_0$<br>$\times 10$ (MPa) | $E_1$<br>(MPa) | $\eta_1$<br>( $\text{MPa} \cdot \text{min}$ ) | $\bar{E}$<br>(MPa) |
|---|----------------------------|----------------|---|--------------------|
| 0.05                                      | 1.3                        | 6.4            | $1.2 \times 10^2$                             | 4.3                |
| 1.25                                      | 1.3                        | 7.4            | 8.0   | 4.6                |
| 2.5                                       | 2.3                        | 5.7            | 3.1   | 4.6                |
| 5.0                                       | 2.6                        | 4.3            | 1.9   | 3.7                |
| 7.5                                       | 2.5                        | 4.3            | 1.2   | 3.7                |

4.4 兵庫県南部地震における護岸変形速度との比較

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、多数の港湾構造物が被災、変形を被った。この地震におけるケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験の結果、約13.5 m 高のケーソンが約15秒間で最大2.8度前傾し(菅野ら, 1995)、この結果から回転によるケーソン天端の移動距離は660 mmと計算される。ここで、13.5 mのケーソン高は、通常廃棄物護岸に適用されるケーソン(6 m程度)と比べて巨大であるが、あえてこの模型振動実験の結果を極大地震動による管理型廃棄物護岸の変形量として適用すると、遮水工に用いられる遮水シートは護岸の変形に追随するため、護岸の変形速度と同程度の引張り速度が生じると考えられる。すなわちこの場合、遮水シートには最大で約2640 mm/minの引張り速度が生じると計算される。この値は、本試験で設定した引張り速度をはるかに超えるものであり、今後の検討課題である。

5. 遮水シートおよび不織布の応力緩和特性評価

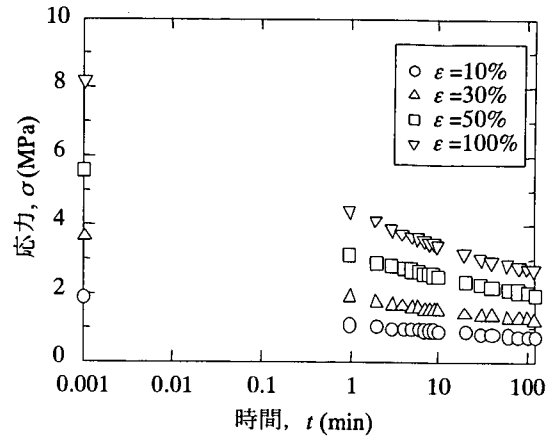


図-12 遮水シートの応力緩和特性

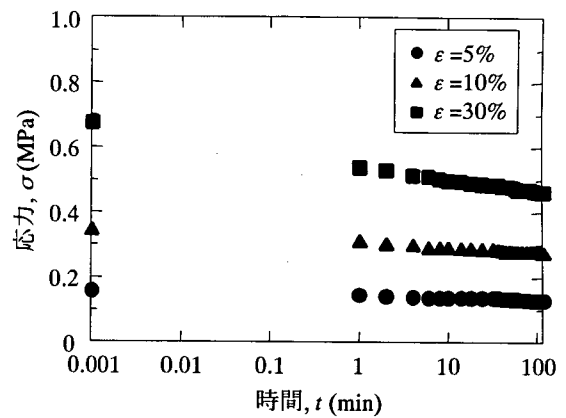


図-13 不織布の応力緩和特性

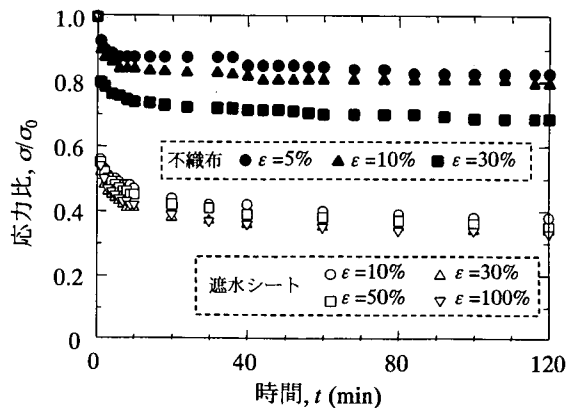


図-14 遮水シートと不織布の応力比

5.1 試験方法

試験装置は供試体を取り付けるクランプとクランプ移動ねじ、鉄製フレームおよび張力計測用の荷重計で構成される。使用する供試体は、PVC遮水シートはJISK6251に規定される1号ダンベル(幅10 mm, 標線間40 mm)、短繊維不織布はJISL1908に規定される長方形試料(縦200 mm, 横50 mm)である。試験装置に供試体を設置後、50 mm/minの一定速度で引張り、設定ひずみ量に達した

ところで固定、放置して応力緩和試験を行った。設定ひずみ量は、遮水シートについては 10%, 30%, 50%, 100%, 不織布については 5%, 10%, 30% である。試験回数は各ひずみ量ともに 1 回であり、緩和時間は応力が平衡状態に達するのに十分な時間である 120 分間とした。

### 5.2 試験結果

遮水シートと不織布の応力緩和試験結果をそれぞれ図-12、図-13 に示す。時間軸が対数表示であるため、計測開始時の応力を便宜的に 0.001 min 時に示している。遮水シート、不織布ともに応力は対数時間に対して直線的に減少するが、その緩和率は異なる傾向を示す。すなわち、遮水シートの場合は設定ひずみ量によらず試験開始後 1 分で初期応力の約半分まで緩和されるのに対し、不織布の緩和率はゆるやかである。この傾向は、各応力値を初期応力 ( $\sigma_0$ ) で除して無次元化した結果 (図-14) において顕著である。すなわち、遮水シートの応力緩和は設定ひずみ量によらず一定 (ばらつき幅は 0.04~0.06) の曲線を描くのにに対し、不織布の場合は設定ひずみ量の増加にともなって緩和率も増大する傾向が認められる。試験終了 120 分後の応力は、遮水シートでは初期応力の 3 分の 1、不織布では最も緩和率の大きい 30% ひずみでも初期応力の 3 分の 2 程度であった。

### 5.3 5 要素粘弾性モデルと試験結果との比較

#### (1) 計算方法

種類の異なる遮水シートの応力緩和特性について、許・今泉 (2002) は 3 要素粘弾性モデルを用いた計算式を提案している。それによると、計算結果は HDPE や TPO といった中~硬質シートの応力緩和傾向に対しては精度よく一致するが、軟質素材である FPA の場合、1 ヶ月後の実験値と計算値との間に約 20% の差が生じると報告している。これは、3 要素モデルが初期の急激な緩和の後も時間の経過とともに徐々に緩和し続ける軟質シート特有の粘性的挙動をうまく表現できないためと考えられる。

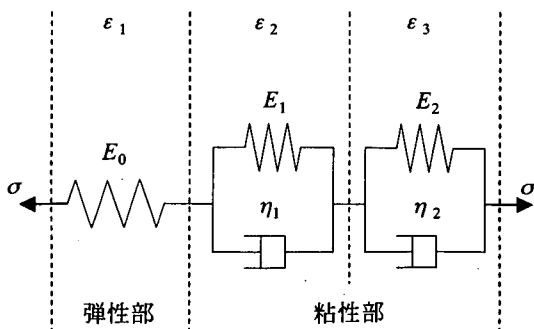


図-15 5 要素粘弾性モデル

ここで、本研究で使用している PVC は軟質シートに属するため、応力緩和のモデル化にあたっては上述の結果を考慮する必要がある。そこで本研究では、粘弾性モデルを従来の 3 要素から 5 要素 (図-15) に拡張することにより、PVC シートに見られる初期の急激な応力緩和とその後の継続的な緩和傾向に対応した評価を行うことを試みる。

5 要素モデルに応力  $\sigma$  が作用したときの弾性部のひずみを  $\epsilon_1$ 、粘性部のひずみをそれぞれ  $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  とすると、それぞれの関係は次式 (17)~(19) のようになる。

$$\sigma = E_0 \epsilon_1 \quad (17)$$

$$\sigma = E_1 \epsilon_2 + \eta_1 \frac{d\epsilon_2}{dt} \quad (18)$$

$$\sigma = E_2 \epsilon_3 + \eta_2 \frac{d\epsilon_3}{dt} \quad (19)$$

式 (17)~式 (19) について前章の 3 要素モデルと同様、ラプラス変換および逆変換を行いまめると、応力とひずみの関係は以下のようなになる。

$$\eta_1 \eta_2 \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \{ \eta_1 (E_0 + E_2) + \eta_2 (E_0 + E_1) \} \frac{d\sigma}{dt} + (E_0 E_1 + E_1 E_2 + E_0 E_2) \sigma = E_0 \eta_1 \eta_2 \frac{d^2 \epsilon}{dt^2} + E_0 (E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1) \frac{d\epsilon}{dt} + E_0 E_1 E_2 \epsilon \quad (20)$$

定ひずみ状態、すなわち、 $\frac{d^2 \epsilon}{dt^2} = \frac{d\epsilon}{dt} = 0$  であることを考慮して微分方程式 (20) を  $\sigma$  について解くと、

$$\sigma = \bar{E} \epsilon + C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (21)$$

ただし、

$$\bar{E} = \frac{E_0 E_1 E_2}{E_0 E_1 + E_1 E_2 + E_0 E_2} \quad (22)$$

表-3 5 要素モデルのパラメータ (遮水シート)

| $\epsilon$<br>(-) | $\bar{E}$<br>( $\times 10^2$ )<br>(MPa) | $C_1$<br>( $\times 10^2$ )<br>(MPa) | $C_2$<br>( $\times 10^2$ )<br>(MPa) | $-\lambda_1$<br>( $\times 10^{-2}$ )<br>(min <sup>-1</sup> ) | $-\lambda_2$<br>(min <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 0.1               | 6.9                                     | 0.24                                | 0.96                                | 1.5  | 1.8                                  |
| 0.3               | 4.0                                     | 0.32                                | 2.1                                 | 2.6  | 1.6                                  |
| 0.5               | 3.9                                     | 0.70                                | 3.0                                 | 2.2  | 1.6                                  |
| 1.0               | 2.7                                     | 0.87                                | 4.6                                 | 2.4  | 1.4                                  |

表-4 5 要素モデルのパラメータ (不織布)

| $\epsilon$<br>(-) | $\bar{E}$<br>( $\times 10^2$ )<br>(MPa) | $C_1$<br>(MPa) | $C_2$<br>(MPa) | $-\lambda_1$<br>( $\times 10^{-2}$ )<br>(min <sup>-1</sup> ) | $-\lambda_2$<br>(min <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|---|----------------|----------------|--|--------------------------------------|
| 0.05              | 2.5                                     | 1.5            | 1.5            | 1.6  | 1.6                                  |
| 0.1               | 2.7                                     | 1.9            | 5.4            | 1.3  | 0.76                                 |
| 0.3               | 1.5                                     | 5.1            | 17             | 1.9  | 1.4                                  |



$$\lambda_1 = \frac{1}{2}(-p + \sqrt{p^2 - 4q}) \quad (23)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2}(-p - \sqrt{p^2 - 4q}) \quad (24)$$

$$p = \frac{\eta_1(E_0 + E_2) + \eta_2(E_0 + E_1)}{\eta_1\eta_2} \quad (25)$$

$$q = \frac{E_0E_1 + E_1E_2 + E_0E_2}{\eta_1\eta_2} \quad (26)$$

ここに、 $C_1, C_2$  : 積分定数,  $t$  : 時間 (min) .

パラメータの決定法は、試験値を3要素モデルで近似した後に5要素モデルに拡張する方法(松本・龍岡, 1996)を採用した(詳細は付録Dを参照)。遮水シートおよび不織布についてのパラメータの計算結果を表-3, 表-4に示す。

(2) 計算結果と試験結果との比較

遮水シートおよび不織布についての実験値および解析結果を図-16, 図-17に示す。その結果、実験値と計算値は遮水シートの場合で決定係数0.98以上、不織布の場合は0.95以上の精度で一致し、遮水シートと不織布の応力緩和傾向を同一の式で評価することができた。ここで、

試験前後の応力比 ( $=\sigma_{120}/\sigma_0$ ) を評価するため式(21)に  $t=120$  を代入すると、 $\lambda$  が負であるため第2項および第3項は0とみなすことができ、応力比は次式(27)のように表すことができる。

$$\frac{\sigma_{120}}{\sigma_0} = \frac{\bar{E}}{\sigma_0} \varepsilon \quad (27)$$

応力比の計算結果を図-18に示す。遮水シートの試験前後の応力比は設定ひずみ量によらずほぼ一定の0.34(最大値は0.37; 最小値は0.32)となった。これに対し、不織布の試験前後の応力比は設定ひずみ量の増加に対して直線的に減少し、30%ひずみにおいて0.68となった。これらの結果は図-14で示した試験結果と一致するものであり、5要素粘弾性モデルが遮水シートおよび不織布の応力緩和傾向の定量評価に有用であることを示唆している。

(3) 初期応力と設定ひずみ量との関係

遮水シートの応力緩和傾向について、5要素粘弾性モデル式(21)の両辺を初期応力 $\sigma_0$ で除し、パラメータに数値を代入したものを以下に示す。

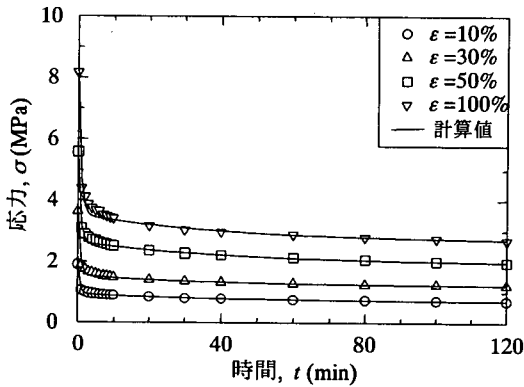


図-16 遮水シートの実験値と計算値との比較

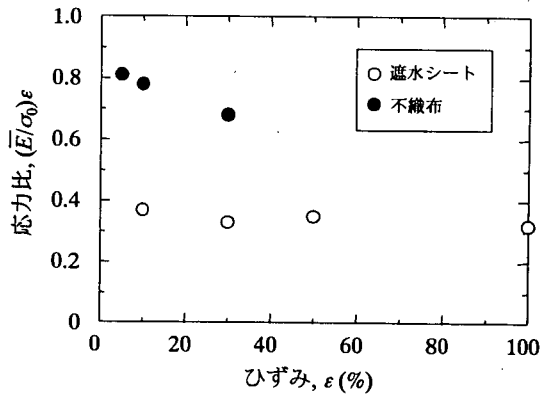


図-18 5要素モデルによる応力比の計算結果

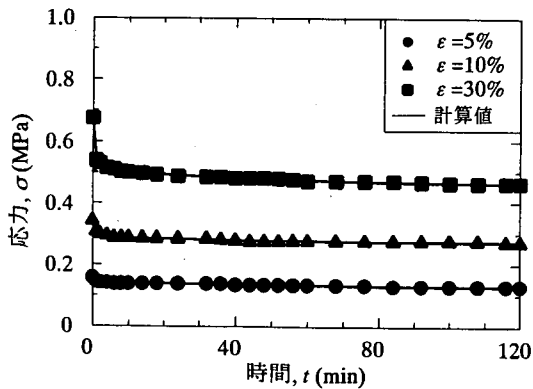


図-17 不織布の実験値と計算値との比較

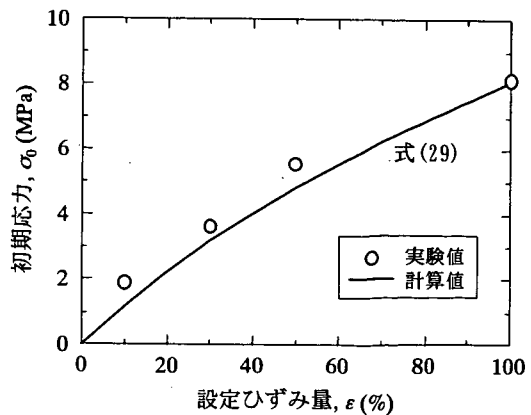


図-19 設定ひずみ量と初期応力の関係

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 0.34 + 0.11 \exp(-0.022t) + 0.55 \exp(-1.6t) \quad (28)$$

次に、実験により得られた初期応力と設定ひずみ量との関係を図-19 に示す。図中の曲線は、前章の引張り特性のひずみ速度依存性評価において、引張り速度が 50 mm/min の場合の 3 要素粘弾性モデルによる計算結果である。計算式を以下に示す。

$$\sigma_0 = 4.6\varepsilon + 3.2\dot{\varepsilon} \left\{ 1 - \exp\left(-2.5\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}}\right) \right\} \quad (29)$$

ただし、 $\dot{\varepsilon} = 1.25 \text{ min}^{-1}$ 。

式(29)を式(28)に代入することにより、遮水シートの

表-5 パラメータの計算結果

| L (m) | $\varepsilon$ (%) | $\dot{\varepsilon}$ (%/min) | $\sigma_0$ (MPa) |
|-------|-------------------|-----------------------------|------------------|
| 6     | 11                | 44                          | 1.2              |
| 8     | 8.3               | 33                          | 0.87             |
| 10    | 6.6               | 26                          | 0.70             |
| 12    | 5.5               | 22                          | 0.58             |

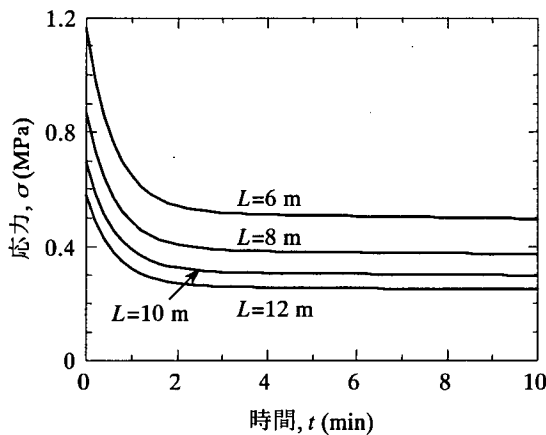


図-20 遮水シート敷設長と応力緩和の関係 ( $0 \leq t \leq 10$ )

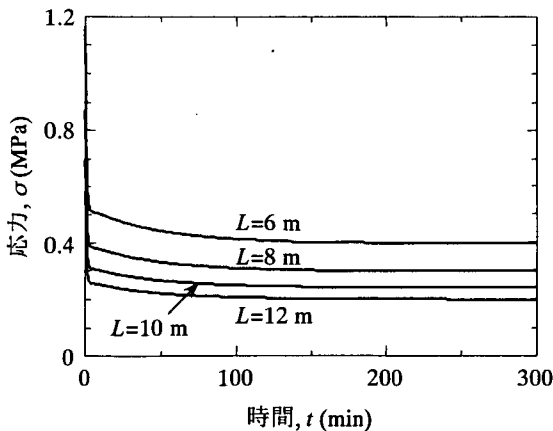


図-21 遮水シート敷設長と応力緩和の関係 ( $0 \leq t \leq 300$ )

応力緩和傾向は、設定ひずみ量とひずみ速度の関数として求まる。

#### 5.4 兵庫県南部地震を対象とした事例解析

ケーソン式護岸を有する廃棄物海面処分場について、兵庫県南部地震の際に当該地区のケーソン式護岸が被災したのと同規模の変形を護岸に与えた場合を想定する。このときの護岸変形は、前章で示したように前傾による天端移動が 660 mm と計算され、同程度の変形が遮水シートにも作用すると考える。なお、遮水シートの局所的な伸び挙動が不明であるので、ひずみはシート全体に均質に発生するものと仮定する。さらに、護岸変形による二軸方向の引張り挙動、および引張り応力のシート幅依存性は考慮しないこととする。このとき、遮水シートの敷設長を設定することにより護岸変形によるシートひずみ量およびひずみ速度が計算され、さらにそれらの値を式(28)および式(29)に代入することでシートにかかる初期応力が求まる。計算結果を表-5 に示す。また、このときの遮水シートの応力緩和曲線は図-20、図-21 のように描かれる。すなわち、シート中の初期応力はシート敷設長が短いほど大きく、護岸変形から数時間後には応力緩和が終了することがわかる。ただし、これらの結果は計算の過程で多くの仮定を含んでおり、また、実際に極大地震動が発生した場合の遮水シートの変形量は不明であるため、模型実験や数値解析等、今後さらなる検討が必要である。

#### 6. まとめ

本研究では、廃棄物海面処分場の遮水工に現在多く使用されている PVC 遮水シートおよび短繊維不織布について、単軸方向の引張り応力が発生した場合の変形強度特性を検討した。すなわち、材料に発生する応力、ひずみの温度依存性、ひずみ速度依存性、ならびに応力緩和特性を把握するための室内試験を行い、得られた結果について数値解析による定量評価を試みた。

これにより、以下の結論を得ることができた。

(1) 遮水シートの単軸引張り強度および破断ひずみ量に関する温度依存性を提案した。

(2) 3 要素粘弾性モデルにおけるパラメータの温度依存性を明らかにし、温度をパラメータとする遮水シートの変形強度特性を提案した。

(3) 遮水シートの単軸引張り特性のひずみ速度依存性について検討した結果、ひずみ速度の増加とともに弾性限度が高ひずみ側へ移動し、応力-ひずみ曲線における初

期勾配が高ひずみ速度ほど急勾配になるなど、弾性変形領域におけるひずみ速度の影響は顕著に現れた。しかし、塑性変形に対する影響はほとんど見られず、塑性領域の勾配はひずみ速度によらずほぼ一定の傾向を示した。

(4) 3要素粘弾性モデルによって遮水シートの単軸引張り特性のひずみ速度依存性を評価し、シート変形が高ひずみ速度では弾性的挙動が卓越し、低ひずみ速度では粘性的挙動が卓越することを定量的に示した。

(5) 応力緩和試験の結果、遮水シートの試験終了後の応力は初期応力の34%まで緩和されたが、不織布の緩和傾向は遮水シートに比べてゆるやかであり、最も緩和率の高い30%ひずみにおいて試験後の応力は初期応力の68%であった。

(6) 遮水シートの応力緩和曲線はひずみ量によらずほぼ一定の傾向を示したが、不織布の場合はひずみ量の増加とともに緩和率が增大する傾向を示した。

(7) 3要素および5要素粘弾性モデルを用いることにより、遮水シートの応力緩和傾向を初期ひずみ量および初期ひずみに至るひずみ速度の2つのパラメータのみで予測可能となる計算式を提案した。

これらの結果は、極大地震動の外力作用時における海面処分場遮水工の力学的特性の把握や季節の変化による海水温度の変動が遮水シートにおよぼす影響等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、管理型廃棄物海面処分場において遮水材として使用される遮水シートおよび緩衝材として使用される不織布が、単軸方向の引張り力を受けた際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、海水温度の変動や極大地震動の外力作用に伴う護岸変形が遮水シートの引張り特性に与える影響を予測する際に非常に有効である。

しかしながら、実際の海面処分場遮水工に使用される遮水シートや不織布には、本研究で対象とした単軸引張り応力以外に二軸方向の引張り応力やせん断応力、敷設面の不陸による突き破り力などさまざまな種類の外力が作用する。また、ネッキング現象のような引張り強度の試料幅依存性も考慮する必要がある。

このため、遮水シートの遮水機能を損なう原因がどのような現象にあるのかを見極め、遮水シートが損傷する原因・現象を特定し、それらを考慮した上で遮水シートの機能が損なわれないような設計方法を確立することが重要である。今後は、本研究成果を基に、遮水工に作用

する外力を考慮した遮水構造の力学特性（破壊メカニズム等）の解明、極大地震動による管理型廃棄物護岸全体の変形特性の解明、さらに管理型廃棄物護岸の全体変形にともなう遮水工（遮水シート、裏込石等）の局所変形特性の解明を行っていく予定である。

(2003年8月29日受付)

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、長尾毅港湾研究部港湾施設研究室長には解析に際して有益なるご助言をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

## 参考文献

- 今泉繁良, 坪井正行, 高橋悟, 横山幸満(1996a): 温度変化が埋設 HDPE ジオメンブレンの変形挙動に与える影響, 土木学会論文集, No. 541/Ⅲ-35, pp. 233-240.
- 今泉繁良, 高橋悟, 坪井正行, 横山幸満(1996b): ジオシンセティックス多層ライナーのせん断力伝播に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 554/Ⅲ-37, pp. 239-249.
- 宇佐見貞彦, 今泉繁良, 葛巻賢二(2002): 最終処分場に敷設された遮水シートの許容局所沈下量, 土木学会論文集, No. 722/Ⅲ-61, pp. 37-48.
- 葛巻賢二, 今泉繁良, 宇佐見貞彦(2002): 局所沈下を受ける遮水シートの非線形性を考慮したひずみ評価, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 2419-2420.
- 許四法・今泉繁良(2002): 遮水シートの応力緩和特性に関する実験研究, ジオシンセティックス論文集, Vol. 17, pp. 63-70.
- 国際ジオシンセティックス学会日本支部ジオメンブレン技術委員会(2000): ごみ埋立地の設計施工ハンドブック—シャ水工技術—, p. 577.
- 小竹望, 山崎智弘, 北浦良樹, 近藤三樹郎(2002a): 管理型海面処分場の表面遮水工における構成材料間のせん断特性, ジオシンセティックス論文集, Vol. 17, pp. 71-78.
- 小竹望, 山崎智弘, 北浦良樹, 近藤三樹郎(2002b): せん断力を受けるジオシンセティックス多層ライナーの荷重伝達特性, ジオシンセティックス論文集, Vol. 17, pp. 79-86.
- (財)港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所(2000): 管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル, p. 86.
- (社)日本港湾協会(1999): 港湾の施設の技術上の基準・

- 同解説, p.1181.
- (社)日本港湾協会(2003):数字でみる港湾2003, p.301.
- 菅野高弘, 三藤正明, 及川研(1995):兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その6)ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験, 港湾技研資料, No.813, pp.207-252.
- 高橋悟, 今泉繁良, 横山幸満, 坪井正行(1996):ジオシンセティックスの引抜き試験に基づく摩擦係数・変形係数の評価法, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, pp.135-143.
- 坪井正行, 宮地秀樹, 野本哲也, 今泉繁良(1998):廃棄物処分場遮水シートに発生する熱応力の評価, 土木学会論文集, No.603/Ⅲ-44, pp.147-155.
- 西形達明・西田一彦(2000):局所沈下を受けるジオメンブレンのクリープ特性, 土木学会第55回年次学術講演会, Ⅲ-B329, pp.656-657.
- 西田一彦, 西形達明, 岡部禎之, 蚊野照久(2001):土中におけるジオメンブレンライナー材のクリープ特性, 土木学会第56回年次学術講演会, Ⅲ-B256, pp.512-513.
- 野本哲也, 高橋悟, 今泉繁良, 横山幸満, 坪井正行(1996):ジオテキスタイル敷設に伴うジオメンブレンの引張り力の分散効果, 土木学会第51回年次学術講演会, Ⅲ-B342, pp.684-685.
- 野本哲也, 今泉繁良, 阿部秀治, 坪井正行, 二見智子(2000):基盤の局所沈下に伴う敷設高密度ポリエチレン(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.
- 原田道幸, 加賀宗彦, 中達太郎(2000):土中に埋設されたジオテキスタイルの変形, 土木学会第55回年次学術講演会, Ⅲ-B328, pp.654-655.
- 福知幹男, 矢口直幸, 御船直人, 西村佳樹, 生駒信康(1998):ジオシンセティックスの引張特性の試料幅依存性, 土木学会第53回年次学術講演会, VI-175, pp.350-351.
- 松本正士, 龍岡文夫(1996):5要素の粘弾性モデルを用いた堆積軟岩のクリープ変形の検討, 土木学会第51回年次学術講演会, Ⅲ-A330, pp.660-661.
- 三木博史・林義之(1991):ジオメンブレンの突き破り抵抗に関する考察, 土木学会第46回年次学術講演会, Ⅲ-372, pp.766-767.
- 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回廃棄物学会講演論文集Ⅱ, pp.942-944.
- 森芳信, 梅村順, 西村淳, 平井貴雄(1996):廃棄物処分場遮水シートの突起物に対する抵抗試験, 土木学会第51回年次学術講演会, Ⅲ-A386, pp.772-773.
- 文部科学省国立天文台編(2003):理科年表, 丸善, p.942.
- 横山慎司(2002):エコランド防波堤施工について—島防波堤背後盛土護岸の均し及び防砂シート規格検証—, 平成14年度国土交通省国土技術研究会自由課題, pp.145-148.

付録 A. 遮水シートの温度別引張り試験に関するデータ

表-A.1(1) 実験結果

| 0°C            |                | 23°C           |                | 40°C           |                | 60°C           |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) |
| 0.0            | 0.00           | 0.0            | 0.00           | 0.0            | 0.00           | 0.0            | 0.00           |
| 0.7            | 3.11           | 2.8            | 0.53           | 2.7            | 0.48           | 2.5            | 0.13           |
| 1.3            | 4.15           | 5.6            | 1.17           | 5.5            | 0.78           | 5.0            | 0.30           |
| 2.7            | 5.19           | 8.4            | 1.77           | 8.2            | 1.12           | 7.5            | 0.40           |
| 4.0            | 6.06           | 11.2           | 2.33           | 11.0           | 1.50           | 10.0           | 0.57           |
| 5.3            | 6.75           | 14.0           | 2.90           | 13.7           | 1.73           | 12.5           | 0.70           |
| 6.7            | 7.61           | 16.8           | 3.40           | 16.4           | 2.07           | 15.0           | 0.83           |
| 8.0            | 8.48           | 19.6           | 3.93           | 19.2           | 2.38           | 17.5           | 1.00           |
| 9.3            | 9.00           | 22.4           | 4.37           | 21.9           | 2.59           | 20.0           | 1.13           |
| 10.7           | 9.41           | 25.2           | 4.83           | 24.7           | 2.89           | 22.5           | 1.27           |
| 12.0           | 9.69           | 28.0           | 5.20           | 27.4           | 3.10           | 25.0           | 1.37           |
| 13.3           | 10.17          | 30.8           | 5.50           | 30.1           | 3.33           | 27.5           | 1.50           |
| 16.7           | 11.07          | 33.7           | 5.90           | 32.9           | 3.50           | 30.0           | 1.63           |
| 20.0           | 11.76          | 36.5           | 6.20           | 35.6           | 3.74           | 32.5           | 1.70           |
| 23.3           | 12.53          | 39.3           | 6.50           | 38.4           | 3.91           | 35.0           | 1.80           |
| 26.7           | 13.04          | 42.1           | 6.77           | 41.1           | 4.08           | 37.5           | 1.90           |
| 30.0           | 13.67          | 44.9           | 7.03           | 43.8           | 4.25           | 40.0           | 2.00           |
| 33.3           | 14.12          | 47.7           | 7.20           | 46.6           | 4.42           | 42.5           | 2.10           |
| 36.7           | 14.60          | 50.5           | 7.47           | 49.3           | 4.56           | 45.0           | 2.20           |
| 40.0           | 14.98          | 53.3           | 7.67           | 52.1           | 4.69           | 47.5           | 2.27           |
| 43.3           | 15.40          | 56.1           | 7.83           | 54.8           | 4.83           | 50.0           | 2.33           |
| 46.7           | 15.74          | 61.7           | 8.20           | 57.5           | 4.93           | 52.5           | 2.40           |
| 50.0           | 16.09          | 67.3           | 8.53           | 60.3           | 5.07           | 55.0           | 2.50           |
| 53.3           | 16.40          | 72.9           | 8.83           | 63.0           | 5.20           | 57.5           | 2.57           |
| 56.7           | 16.61          | 78.5           | 9.17           | 65.8           | 5.31           | 60.0           | 2.63           |
| 60.0           | 16.89          | 84.1           | 9.40           | 68.5           | 5.41           | 62.5           | 2.70           |
| 63.3           | 17.09          | 89.7           | 9.67           | 71.2           | 5.51           | 65.0           | 2.77           |
| 66.7           | 17.30          | 95.4           | 9.97           | 74.0           | 5.61           | 67.5           | 2.83           |
| 73.3           | 17.72          | 101.0          | 10.20          | 76.7           | 5.75           | 70.0           | 2.87           |
| 80.0           | 18.03          | 106.6          | 10.47          | 79.5           | 5.85           | 72.5           | 2.93           |
| 86.7           | 18.37          | 112.2          | 10.70          | 82.2           | 5.95           | 75.0           | 2.97           |
| 93.3           | 18.69          | 117.8          | 10.93          | 84.9           | 6.05           | 80.0           | 3.07           |
| 100.0          | 18.96          | 123.4          | 11.20          | 87.7           | 6.19           | 85.0           | 3.20           |
| 106.7          | 19.20          | 129.0          | 11.43          | 90.4           | 6.29           | 90.0           | 3.33           |
| 113.3          | 19.48          | 134.6          | 11.70          | 93.2           | 6.39           | 95.0           | 3.43           |
| 120.0          | 19.76          | 140.2          | 11.93          | 95.9           | 6.50           | 100.0          | 3.57           |
| 126.7          | 20.00          | 145.8          | 12.20          | 98.6           | 6.60           | 105.0          | 3.67           |
| 133.3          | 20.24          | 151.4          | 12.43          | 101.4          | 6.67           | 110.0          | 3.77           |
| 140.0          | 20.48          | 157.1          | 12.70          | 104.1          | 6.73           | 115.0          | 3.87           |
| 146.7          | 20.76          | 162.7          | 12.93          | 106.8          | 6.84           | 120.0          | 4.00           |
| 153.3          | 20.93          | 168.3          | 13.17          | 109.6          | 6.97           | 125.0          | 4.13           |
| 160.0          | 21.14          | 173.9          | 13.40          | 115.1          | 7.18           | 130.0          | 4.23           |
| 166.7          | 21.38          | 179.5          | 13.63          | 120.5          | 7.35           | 135.0          | 4.37           |
| 173.3          | 21.63          | 185.1          | 13.83          | 126.0          | 7.55           | 140.0          | 4.47           |
| 180.0          | 21.87          | 190.7          | 14.03          | 131.5          | 7.76           | 145.0          | 4.57           |
| 186.7          | 22.15          | 196.3          | 14.27          | 137.0          | 7.96           | 150.0          | 4.67           |
| 193.3          | 22.35          | 201.9          | 14.50          | 142.5          | 8.13           | 155.0          | 4.80           |
| 200.0          | 22.63          | 207.5          | 14.73          | 147.9          | 8.33           | 160.0          | 4.93           |
| 206.7          | 22.84          | 213.1          | 14.93          | 153.4          | 8.54           | 165.0          | 5.03           |
| 213.3          | 23.08          | 218.8          | 15.10          | 158.9          | 8.74           | 170.0          | 5.20           |
| 220.0          | 23.32          | 224.4          | 15.37          | 164.4          | 8.91           | 175.0          | 5.30           |

表-A.1(2) 実験結果

| 0°C            |                | 23°C           |                | 40°C           |                | 60°C           |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) |
| 226.7          | 23.60          | 230.0          | 15.57          | 169.9          | 9.15           | 180.0          | 5.40           |
| 233.3          | 23.88          | 235.6          | 15.73          | 175.3          | 9.32           | 185.0          | 5.53           |
| 240.0          | 24.15          | 241.2          | 16.00          | 180.8          | 9.52           | 190.0          | 5.67           |
| 246.7          | 24.43          | 246.8          | 16.20          | 186.3          | 9.69           | 195.0          | 5.77           |
| 253.3          | 24.64          | 252.4          | 16.40          | 191.8          | 9.90           | 200.0          | 5.87           |
| 260.0          | 24.95          | 258.0          | 16.60          | 197.3          | 10.07          | 205.0          | 6.00           |
| 266.7          | 25.26          | 263.6          | 16.83          | 202.7          | 10.24          | 210.0          | 6.10           |
| 273.3          | 25.54          | 269.2          | 17.03          | 208.2          | 10.41          | 215.0          | 6.23           |
| 280.0          | 25.85          | 274.8          | 17.27          | 213.7          | 10.58          | 220.0          | 6.33           |
| 283.3          | 25.99          | 280.4          | 17.47          | 219.2          | 10.75          | 225.0          | 6.40           |
|                |                | 286.1          | 17.67          | 224.7          | 10.95          | 230.0          | 6.53           |
|                |                | 291.7          | 17.87          | 230.1          | 11.12          | 235.0          | 6.63           |
|                |                | 297.3          | 18.07          | 235.6          | 11.29          | 240.0          | 6.70           |
|                |                | 302.9          | 18.30          | 241.1          | 11.46          | 245.0          | 6.83           |
|                |                | 308.5          | 18.43          | 246.6          | 11.63          | 250.0          | 6.97           |
|                |                | 314.1          | 18.63          | 252.1          | 11.80          | 255.0          | 7.03           |
|                |                | 319.7          | 18.83          | 257.5          | 11.97          | 260.0          | 7.20           |
|                |                | 325.3          | 19.00          | 263.0          | 12.14          | 265.0          | 7.33           |
|                |                | 330.9          | 19.23          | 268.5          | 12.28          | 270.0          | 7.43           |
|                |                | 333.2          | 19.30          | 274.0          | 12.45          | 275.0          | 7.53           |
|                |                |                |                | 279.5          | 12.62          | 280.0          | 7.63           |
|                |                |                |                | 284.9          | 12.79          | 285.0          | 7.73           |
|                |                |                |                | 290.4          | 12.96          | 290.0          | 7.87           |
|                |                |                |                | 295.9          | 13.16          | 295.0          | 7.93           |
|                |                |                |                | 301.4          | 13.33          | 300.0          | 8.03           |
|                |                |                |                | 306.8          | 13.50          | 305.0          | 8.13           |
|                |                |                |                | 312.3          | 13.64          | 310.0          | 8.23           |
|                |                |                |                | 317.8          | 13.84          | 315.0          | 8.33           |
|                |                |                |                | 323.3          | 14.01          | 320.0          | 8.43           |
|                |                |                |                | 328.8          | 14.18          | 325.0          | 8.53           |
|                |                |                |                | 334.2          | 14.32          | 330.0          | 8.63           |
|                |                |                |                | 339.7          | 14.52          | 335.0          | 8.73           |
|                |                |                |                | 345.2          | 14.66          | 340.0          | 8.83           |
|                |                |                |                | 350.7          | 14.83          | 345.0          | 8.93           |
|                |                |                |                | 356.2          | 15.00          | 350.0          | 9.07           |
|                |                |                |                | 361.6          | 15.17          | 355.0          | 9.17           |
|                |                |                |                | 367.1          | 15.31          | 360.0          | 9.33           |
|                |                |                |                | 372.6          | 15.51          | 365.0          | 9.50           |
|                |                |                |                | 378.1          | 15.68          | 370.0          | 9.63           |
|                |                |                |                | 383.6          | 15.85          | 375.0          | 9.77           |
|                |                |                |                | 387.4          | 15.95          | 380.0          | 9.87           |
|                |                |                |                |                |                | 385.0          | 9.97           |
|                |                |                |                |                |                | 390.0          | 10.07          |
|                |                |                |                |                |                | 395.0          | 10.20          |
|                |                |                |                |                |                | 400.0          | 10.30          |
|                |                |                |                |                |                | 405.0          | 10.40          |
|                |                |                |                |                |                | 410.0          | 10.50          |
|                |                |                |                |                |                | 415.0          | 10.63          |
|                |                |                |                |                |                | 420.0          | 10.70          |
|                |                |                |                |                |                | 425.0          | 10.80          |
|                |                |                |                |                |                | 430.0          | 10.90          |
|                |                |                |                |                |                | 432.0          | 10.93          |

表-A.2(1) 計算結果

| 0°C            |                | 23°C           |                | 40°C           |                | 60°C           |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) |
| 0.0            | 0.00           | 0.0            | 0.00           | 0.0            | 0.00           | 0.0            | 0.00           |
| 0.7            | 0.86           | 2.8            | 0.69           | 2.7            | 0.40           | 2.5            | 0.18           |
| 1.3            | 1.67           | 5.6            | 1.33           | 5.5            | 0.77           | 5.0            | 0.34           |
| 2.7            | 3.17           | 8.4            | 1.93           | 8.2            | 1.12           | 7.5            | 0.50           |
| 4.0            | 4.52           | 11.2           | 2.48           | 11.0           | 1.45           | 10.0           | 0.65           |
| 5.3            | 5.72           | 14.0           | 3.00           | 13.7           | 1.76           | 12.5           | 0.79           |
| 6.7            | 6.80           | 16.8           | 3.48           | 16.4           | 2.05           | 15.0           | 0.92           |
| 8.0            | 7.76           | 19.6           | 3.93           | 19.2           | 2.32           | 17.5           | 1.05           |
| 9.3            | 8.63           | 22.4           | 4.35           | 21.9           | 2.59           | 20.0           | 1.17           |
| 10.7           | 9.41           | 25.2           | 4.75           | 24.7           | 2.83           | 22.5           | 1.28           |
| 12.0           | 10.11          | 28.0           | 5.12           | 27.4           | 3.07           | 25.0           | 1.39           |
| 13.3           | 10.74          | 30.8           | 5.47           | 30.1           | 3.29           | 27.5           | 1.50           |
| 16.7           | 12.06          | 33.7           | 5.80           | 32.9           | 3.50           | 30.0           | 1.60           |
| 20.0           | 13.08          | 36.5           | 6.11           | 35.6           | 3.70           | 32.5           | 1.70           |
| 23.3           | 13.88          | 39.3           | 6.40           | 38.4           | 3.90           | 35.0           | 1.79           |
| 26.7           | 14.51          | 42.1           | 6.67           | 41.1           | 4.08           | 37.5           | 1.88           |
| 30.0           | 15.02          | 44.9           | 6.93           | 43.8           | 4.26           | 40.0           | 1.97           |
| 33.3           | 15.43          | 47.7           | 7.18           | 46.6           | 4.43           | 42.5           | 2.06           |
| 36.7           | 15.77          | 50.5           | 7.42           | 49.3           | 4.59           | 45.0           | 2.14           |
| 40.0           | 16.06          | 53.3           | 7.64           | 52.1           | 4.75           | 47.5           | 2.22           |
| 43.3           | 16.31          | 56.1           | 7.86           | 54.8           | 4.90           | 50.0           | 2.30           |
| 46.7           | 16.53          | 61.7           | 8.26           | 57.5           | 5.04           | 52.5           | 2.37           |
| 50.0           | 16.72          | 67.3           | 8.63           | 60.3           | 5.18           | 55.0           | 2.45           |
| 53.3           | 16.90          | 72.9           | 8.98           | 63.0           | 5.32           | 57.5           | 2.52           |
| 56.7           | 17.07          | 78.5           | 9.30           | 65.8           | 5.45           | 60.0           | 2.59           |
| 60.0           | 17.22          | 84.1           | 9.61           | 68.5           | 5.58           | 62.5           | 2.66           |
| 63.3           | 17.37          | 89.7           | 9.90           | 71.2           | 5.71           | 65.0           | 2.73           |
| 66.7           | 17.52          | 95.4           | 10.17          | 74.0           | 5.83           | 67.5           | 2.80           |
| 73.3           | 17.79          | 101.0          | 10.44          | 76.7           | 5.95           | 70.0           | 2.86           |
| 80.0           | 18.06          | 106.6          | 10.70          | 79.5           | 6.07           | 72.5           | 2.93           |
| 86.7           | 18.32          | 112.2          | 10.94          | 82.2           | 6.18           | 75.0           | 2.99           |
| 93.3           | 18.58          | 117.8          | 11.19          | 84.9           | 6.29           | 80.0           | 3.12           |
| 100.0          | 18.84          | 123.4          | 11.42          | 87.7           | 6.40           | 85.0           | 3.25           |
| 106.7          | 19.09          | 129.0          | 11.66          | 90.4           | 6.51           | 90.0           | 3.37           |
| 113.3          | 19.35          | 134.6          | 11.88          | 93.2           | 6.62           | 95.0           | 3.49           |
| 120.0          | 19.60          | 140.2          | 12.11          | 95.9           | 6.72           | 100.0          | 3.61           |
| 126.7          | 19.86          | 145.8          | 12.33          | 98.6           | 6.82           | 105.0          | 3.72           |
| 133.3          | 20.11          | 151.4          | 12.55          | 101.4          | 6.92           | 110.0          | 3.84           |
| 140.0          | 20.37          | 157.1          | 12.77          | 104.1          | 7.02           | 115.0          | 3.95           |
| 146.7          | 20.62          | 162.7          | 12.99          | 106.8          | 7.12           | 120.0          | 4.07           |
| 153.3          | 20.88          | 168.3          | 13.20          | 109.6          | 7.22           | 125.0          | 4.18           |
| 160.0          | 21.13          | 173.9          | 13.42          | 115.1          | 7.41           | 130.0          | 4.29           |
| 166.7          | 21.39          | 179.5          | 13.63          | 120.5          | 7.60           | 135.0          | 4.41           |
| 173.3          | 21.64          | 185.1          | 13.85          | 126.0          | 7.79           | 140.0          | 4.52           |
| 180.0          | 21.90          | 190.7          | 14.06          | 131.5          | 7.97           | 145.0          | 4.63           |
| 186.7          | 22.15          | 196.3          | 14.27          | 137.0          | 8.15           | 150.0          | 4.74           |
| 193.3          | 22.41          | 201.9          | 14.48          | 142.5          | 8.33           | 155.0          | 4.85           |
| 200.0          | 22.66          | 207.5          | 14.69          | 147.9          | 8.51           | 160.0          | 4.96           |
| 206.7          | 22.92          | 213.1          | 14.90          | 153.4          | 8.69           | 165.0          | 5.07           |
| 213.3          | 23.17          | 218.8          | 15.11          | 158.9          | 8.87           | 170.0          | 5.19           |
| 220.0          | 23.43          | 224.4          | 15.32          | 164.4          | 9.04           | 175.0          | 5.30           |

表-A.2(2) 計算結果

| 0°C            |                | 23°C           |                | 40°C           |                | 60°C           |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa) |
| 226.7          | 23.68          | 230.0          | 15.53          | 169.9          | 9.21           | 180.0          | 5.41           |
| 233.3          | 23.94          | 235.6          | 15.74          | 175.3          | 9.39           | 185.0          | 5.52           |
| 240.0          | 24.19          | 241.2          | 15.95          | 180.8          | 9.56           | 190.0          | 5.63           |
| 246.7          | 24.45          | 246.8          | 16.16          | 186.3          | 9.73           | 195.0          | 5.74           |
| 253.3          | 24.70          | 252.4          | 16.37          | 191.8          | 9.91           | 200.0          | 5.85           |
| 260.0          | 24.96          | 258.0          | 16.58          | 197.3          | 10.08          | 205.0          | 5.96           |
| 266.7          | 25.21          | 263.6          | 16.79          | 202.7          | 10.25          | 210.0          | 6.07           |
| 273.3          | 25.47          | 269.2          | 17.00          | 208.2          | 10.42          | 215.0          | 6.18           |
| 280.0          | 25.72          | 274.8          | 17.21          | 213.7          | 10.59          | 220.0          | 6.29           |
| 283.3          | 25.85          | 280.4          | 17.41          | 219.2          | 10.76          | 225.0          | 6.40           |
|                |                | 286.1          | 17.62          | 224.7          | 10.93          | 230.0          | 6.51           |
|                |                | 291.7          | 17.83          | 230.1          | 11.10          | 235.0          | 6.62           |
|                |                | 297.3          | 18.04          | 235.6          | 11.27          | 240.0          | 6.73           |
|                |                | 302.9          | 18.25          | 241.1          | 11.44          | 245.0          | 6.84           |
|                |                | 308.5          | 18.46          | 246.6          | 11.61          | 250.0          | 6.95           |
|                |                | 314.1          | 18.67          | 252.1          | 11.78          | 255.0          | 7.06           |
|                |                | 319.7          | 18.88          | 257.5          | 11.95          | 260.0          | 7.17           |
|                |                | 325.3          | 19.09          | 263.0          | 12.12          | 265.0          | 7.28           |
|                |                | 330.9          | 19.29          | 268.5          | 12.29          | 270.0          | 7.39           |
|                |                | 333.2          | 19.38          | 274.0          | 12.46          | 275.0          | 7.50           |
|                |                |                |                | 279.5          | 12.63          | 280.0          | 7.61           |
|                |                |                |                | 284.9          | 12.80          | 285.0          | 7.72           |
|                |                |                |                | 290.4          | 12.97          | 290.0          | 7.83           |
|                |                |                |                | 295.9          | 13.14          | 295.0          | 7.94           |
|                |                |                |                | 301.4          | 13.31          | 300.0          | 8.05           |
|                |                |                |                | 306.8          | 13.48          | 305.0          | 8.16           |
|                |                |                |                | 312.3          | 13.65          | 310.0          | 8.27           |
|                |                |                |                | 317.8          | 13.82          | 315.0          | 8.38           |
|                |                |                |                | 323.3          | 13.99          | 320.0          | 8.49           |
|                |                |                |                | 328.8          | 14.16          | 325.0          | 8.60           |
|                |                |                |                | 334.2          | 14.33          | 330.0          | 8.71           |
|                |                |                |                | 339.7          | 14.50          | 335.0          | 8.82           |
|                |                |                |                | 345.2          | 14.67          | 340.0          | 8.93           |
|                |                |                |                | 350.7          | 14.84          | 345.0          | 9.04           |
|                |                |                |                | 356.2          | 15.01          | 350.0          | 9.15           |
|                |                |                |                | 361.6          | 15.18          | 355.0          | 9.26           |
|                |                |                |                | 367.1          | 15.35          | 360.0          | 9.37           |
|                |                |                |                | 372.6          | 15.52          | 365.0          | 9.48           |
|                |                |                |                | 378.1          | 15.69          | 370.0          | 9.59           |
|                |                |                |                | 383.6          | 15.85          | 375.0          | 9.70           |
|                |                |                |                | 387.4          | 15.97          | 380.0          | 9.81           |
|                |                |                |                |                |                | 385.0          | 9.92           |
|                |                |                |                |                |                | 390.0          | 10.03          |
|                |                |                |                |                |                | 395.0          | 10.14          |
|                |                |                |                |                |                | 400.0          | 10.25          |
|                |                |                |                |                |                | 405.0          | 10.36          |
|                |                |                |                |                |                | 410.0          | 10.47          |
|                |                |                |                |                |                | 415.0          | 10.58          |
|                |                |                |                |                |                | 420.0          | 10.69          |
|                |                |                |                |                |                | 425.0          | 10.80          |
|                |                |                |                |                |                | 430.0          | 10.91          |
|                |                |                |                |                |                | 432.0          | 10.95          |



付録 B. 遮水シートの引張り速度別引張り試験に関するデータ

表-B.1 実験結果

| $\varepsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa)                |                                 |                                 |                                 |                                 |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                   | $\dot{\varepsilon} = 5\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 125\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 250\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 500\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 750\%/min$ |
| 0                 | 0.00                          | 0.00                            | 0.00                            | 0.00                            | 0.00                            |
| 10                | 1.21                          | 1.18                            | 2.02                            | 2.26                            | 2.19                            |
| 20                | 2.02                          | 2.36                            | 3.37                            | 3.86                            | 3.70                            |
| 30                | 2.69                          | 3.33                            | 4.59                            | 5.59                            | 5.07                            |
| 40                | 3.37                          | 4.24                            | 5.39                            | 6.52                            | 6.03                            |
| 50                | 3.90                          | 5.00                            | 6.19                            | 7.58                            | 6.99                            |
| 60                | 4.44                          | 5.69                            | 7.01                            | 8.11                            | 7.67                            |
| 70                | 4.85                          | 6.39                            | 7.53                            | 8.78                            | 8.22                            |
| 80                | 5.38                          | 7.08                            | 8.08                            | 9.18                            | 8.63                            |
| 100               | 6.60                          | 8.19                            | 9.15                            | 10.11                           | 9.86                            |
| 120               | 7.54                          | 9.17                            | 9.70                            | 10.66                           | 10.82                           |
| 140               | 8.75                          | 10.42                           | 11.17                           | 11.84                           | 11.65                           |
| 160               | 9.69                          | 11.25                           | 12.25                           | 12.64                           | 12.47                           |
| 180               | 10.77                         | 12.36                           | 13.34                           | 13.57                           | 13.43                           |
| 200               | 11.44                         | 13.33                           | 14.14                           | 14.23                           | 14.11                           |
| 220               | 12.38                         | 14.31                           | 15.22                           | 15.03                           | 15.07                           |
| 240               | 13.33                         | 15.28                           | 16.16                           | 15.83                           | 15.76                           |
| 260               | 14.13                         | 16.11                           | 16.96                           | 16.49                           | 16.58                           |
| 280               | 15.08                         | 16.94                           | 17.78                           | 17.16                           | 17.26                           |
| 300               | 15.75                         | 17.78                           | 18.58                           | 17.82                           | 17.81                           |
| 320               | -                             | -                               | -                               | 18.49                           | 18.50                           |
| 340               | -                             | -                               | -                               | -                               | 19.04                           |
| 308               | 16.02                         | -                               | -                               | -                               | -                               |
| 313               | -                             | 18.47                           | -                               | -                               | -                               |
| 318               | -                             | -                               | 19.54                           | -                               | -                               |
| 337               | -                             | -                               | -                               | 19.15                           | -                               |
| 348               | -                             | -                               | -                               | -                               | 19.30                           |

表-B.2 計算結果

| $\varepsilon$ (%) | $\sigma$ (MPa)                |                                 |                                 |                                 |                                 |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                   | $\dot{\varepsilon} = 5\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 125\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 250\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 500\%/min$ | $\dot{\varepsilon} = 750\%/min$ |
| 0                 | 0.00                          | 0.00                            | 0.00                            | 0.00                            | 0.00                            |
| 10                | 1.21                          | 1.18                            | 2.02                            | 2.26                            | 2.19                            |
| 20                | 2.20                          | 2.23                            | 3.55                            | 4.00                            | 3.89                            |
| 30                | 3.04                          | 3.18                            | 4.74                            | 5.36                            | 5.23                            |
| 40                | 3.77                          | 4.04                            | 5.69                            | 6.45                            | 6.31                            |
| 50                | 4.42                          | 4.82                            | 6.49                            | 7.34                            | 7.20                            |
| 60                | 5.01                          | 5.55                            | 7.19                            | 8.08                            | 7.95                            |
| 70                | 5.55                          | 6.23                            | 7.81                            | 8.72                            | 8.59                            |
| 80                | 6.06                          | 6.88                            | 8.38                            | 9.29                            | 9.16                            |
| 100               | 7.03                          | 8.07                            | 9.42                            | 10.27                           | 10.15                           |
| 120               | 7.95                          | 9.18                            | 10.40                           | 11.13                           | 11.03                           |
| 140               | 8.85                          | 10.23                           | 11.35                           | 11.93                           | 11.83                           |
| 160               | 9.73                          | 11.24                           | 12.29                           | 12.70                           | 12.61                           |
| 180               | 10.61                         | 12.22                           | 13.21                           | 13.45                           | 13.36                           |
| 200               | 11.48                         | 13.19                           | 14.14                           | 14.19                           | 14.10                           |
| 220               | 12.35                         | 14.14                           | 15.06                           | 14.93                           | 14.84                           |
| 240               | 13.22                         | 15.09                           | 15.98                           | 15.67                           | 15.58                           |
| 260               | 14.09                         | 16.03                           | 16.91                           | 16.40                           | 16.32                           |
| 280               | 14.96                         | 16.97                           | 17.83                           | 17.13                           | 17.05                           |
| 300               | 15.83                         | 17.90                           | 18.75                           | 17.87                           | 17.79                           |
| 320               | -                             | -                               | -                               | 18.60                           | 18.52                           |
| 340               | -                             | -                               | -                               | -                               | 19.25                           |
| 308               | 16.17                         | -                               | -                               | -                               | -                               |
| 313               | -                             | 18.51                           | -                               | -                               | -                               |
| 318               | -                             | -                               | 19.58                           | -                               | -                               |
| 337               | -                             | -                               | -                               | 19.22                           | -                               |
| 348               | -                             | -                               | -                               | -                               | 19.55                           |

付録 C. 遮水シートおよび不織布の応力緩和試験に関するデータ

表-C.1(1) 実験結果 (遮水シート)

| t (min) | $\sigma$ (MPa)       |                      |                      |                       |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|         | $\varepsilon = 10\%$ | $\varepsilon = 30\%$ | $\varepsilon = 50\%$ | $\varepsilon = 100\%$ |
| 0       | 1.89                 | 3.62                 | 5.57                 | 8.16                  |
| 1       | 1.06                 | 1.87                 | 3.08                 | 4.38                  |
| 2       | 1.00                 | 1.74                 | 2.89                 | 4.12                  |
| 3       | 0.97                 | 1.66                 | 2.78                 | 3.87                  |
| 4       | 0.95                 | 1.62                 | 2.72                 | 3.74                  |
| 5       | 0.94                 | 1.58                 | 2.67                 | 3.66                  |
| 6       | 0.92                 | 1.55                 | 2.62                 | 3.63                  |
| 7       | 0.91                 | 1.52                 | 2.58                 | 3.53                  |
| 8       | 0.90                 | 1.50                 | 2.55                 | 3.48                  |
| 9       | 0.90                 | 1.49                 | 2.52                 | 3.44                  |
| 10      | 0.89                 | 1.47                 | 2.50                 | 3.40                  |
| 20      | 0.84                 | 1.39                 | 2.35                 | 3.16                  |
| 30      | 0.80                 | 1.35                 | 2.26                 | 3.03                  |
| 40      | 0.79                 | 1.32                 | 2.20                 | 2.96                  |
| 60      | 0.76                 | 1.28                 | 2.12                 | 2.87                  |
| 80      | 0.74                 | 1.25                 | 2.06                 | 2.80                  |
| 100     | 0.72                 | 1.24                 | 2.00                 | 2.74                  |
| 120     | 0.71                 | 1.22                 | 1.97                 | 2.69                  |

表-C.1(2) 実験結果 (不織布)

| t (min) | $\sigma$ (MPa)      |                      |                      |
|---------|---------------------|----------------------|----------------------|
|         | $\varepsilon = 5\%$ | $\varepsilon = 10\%$ | $\varepsilon = 30\%$ |
| 0       | 0.16                | 0.34                 | 0.67                 |
| 1       | 0.15                | 0.31                 | 0.54                 |
| 2       | 0.14                | 0.30                 | 0.53                 |
| 4       | 0.14                | 0.29                 | 0.51                 |
| 6       | 0.14                | 0.29                 | 0.51                 |
| 8       | 0.14                | 0.29                 | 0.50                 |
| 10      | 0.14                | 0.29                 | 0.50                 |
| 14      | 0.14                | 0.28                 | 0.50                 |
| 18      | 0.14                | 0.28                 | 0.49                 |
| 24      | 0.14                | 0.28                 | 0.49                 |
| 32      | 0.14                | 0.28                 | 0.48                 |
| 36      | 0.14                | 0.28                 | 0.48                 |
| 40      | 0.13                | 0.28                 | 0.48                 |
| 44      | 0.13                | 0.27                 | 0.48                 |
| 48      | 0.13                | 0.27                 | 0.48                 |
| 52      | 0.13                | 0.27                 | 0.48                 |
| 56      | 0.13                | 0.27                 | 0.47                 |
| 60      | 0.13                | 0.27                 | 0.47                 |
| 68      | 0.13                | 0.27                 | 0.47                 |
| 76      | 0.13                | 0.27                 | 0.47                 |
| 84      | 0.13                | 0.27                 | 0.47                 |
| 92      | 0.13                | 0.27                 | 0.47                 |
| 100     | 0.13                | 0.27                 | 0.46                 |
| 108     | 0.13                | 0.27                 | 0.46                 |
| 116     | 0.13                | 0.27                 | 0.46                 |
| 120     | 0.13                | 0.27                 | 0.46                 |

表-C.2(1) 計算結果 (遮水シート)

| t (min) | $\sigma$ (MPa)       |                      |                      |                       |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|         | $\varepsilon = 10\%$ | $\varepsilon = 30\%$ | $\varepsilon = 50\%$ | $\varepsilon = 100\%$ |
| 0       | 1.89                 | 3.62                 | 5.57                 | 8.16                  |
| 1       | 1.08                 | 1.95                 | 3.18                 | 4.65                  |
| 2       | 0.95                 | 1.60                 | 2.70                 | 3.76                  |
| 3       | 0.92                 | 1.52                 | 2.60                 | 3.53                  |
| 4       | 0.91                 | 1.50                 | 2.56                 | 3.46                  |
| 5       | 0.91                 | 1.49                 | 2.55                 | 3.43                  |
| 6       | 0.90                 | 1.48                 | 2.53                 | 3.40                  |
| 7       | 0.90                 | 1.48                 | 2.52                 | 3.39                  |
| 8       | 0.89                 | 1.47                 | 2.51                 | 3.37                  |
| 9       | 0.89                 | 1.46                 | 2.49                 | 3.35                  |
| 10      | 0.88                 | 1.46                 | 2.48                 | 3.33                  |
| 11      | 0.88                 | 1.45                 | 2.47                 | 3.32                  |
| 12      | 0.88                 | 1.44                 | 2.46                 | 3.30                  |
| 13      | 0.87                 | 1.44                 | 2.44                 | 3.29                  |
| 14      | 0.87                 | 1.43                 | 2.43                 | 3.27                  |
| 15      | 0.86                 | 1.43                 | 2.42                 | 3.26                  |
| 16      | 0.86                 | 1.42                 | 2.41                 | 3.24                  |
| 17      | 0.86                 | 1.42                 | 2.40                 | 3.23                  |
| 18      | 0.85                 | 1.41                 | 2.39                 | 3.21                  |
| 19      | 0.85                 | 1.41                 | 2.38                 | 3.20                  |
| 20      | 0.85                 | 1.40                 | 2.37                 | 3.19                  |
| 21      | 0.84                 | 1.40                 | 2.36                 | 3.17                  |
| 22      | 0.84                 | 1.39                 | 2.35                 | 3.16                  |
| 23      | 0.84                 | 1.39                 | 2.34                 | 3.15                  |
| 24      | 0.83                 | 1.38                 | 2.33                 | 3.14                  |
| 25      | 0.83                 | 1.38                 | 2.32                 | 3.13                  |
| 26      | 0.83                 | 1.37                 | 2.31                 | 3.11                  |
| 27      | 0.82                 | 1.37                 | 2.30                 | 3.10                  |
| 28      | 0.82                 | 1.36                 | 2.30                 | 3.09                  |
| 29      | 0.82                 | 1.36                 | 2.29                 | 3.08                  |
| 30      | 0.82                 | 1.36                 | 2.28                 | 3.07                  |
| 31      | 0.81                 | 1.35                 | 2.27                 | 3.06                  |
| 32      | 0.81                 | 1.35                 | 2.26                 | 3.05                  |
| 33      | 0.81                 | 1.35                 | 2.26                 | 3.04                  |
| 34      | 0.81                 | 1.34                 | 2.25                 | 3.03                  |
| 35      | 0.80                 | 1.34                 | 2.24                 | 3.02                  |
| 36      | 0.80                 | 1.34                 | 2.24                 | 3.02                  |
| 37      | 0.80                 | 1.33                 | 2.23                 | 3.01                  |
| 38      | 0.80                 | 1.33                 | 2.22                 | 3.00                  |
| 39      | 0.79                 | 1.33                 | 2.22                 | 2.99                  |
| 40      | 0.79                 | 1.32                 | 2.21                 | 2.98                  |
| 41      | 0.79                 | 1.32                 | 2.20                 | 2.97                  |
| 42      | 0.79                 | 1.32                 | 2.20                 | 2.97                  |
| 43      | 0.79                 | 1.31                 | 2.19                 | 2.96                  |
| 44      | 0.78                 | 1.31                 | 2.18                 | 2.95                  |
| 45      | 0.78                 | 1.31                 | 2.18                 | 2.94                  |
| 46      | 0.78                 | 1.31                 | 2.17                 | 2.94                  |
| 47      | 0.78                 | 1.30                 | 2.17                 | 2.93                  |
| 48      | 0.78                 | 1.30                 | 2.16                 | 2.92                  |
| 49      | 0.77                 | 1.30                 | 2.16                 | 2.92                  |
| 50      | 0.77                 | 1.30                 | 2.15                 | 2.91                  |
| 51      | 0.77                 | 1.29                 | 2.15                 | 2.90                  |
| 52      | 0.77                 | 1.29                 | 2.14                 | 2.90                  |
| 53      | 0.77                 | 1.29                 | 2.14                 | 2.89                  |
| 54      | 0.77                 | 1.29                 | 2.13                 | 2.89                  |
| 55      | 0.76                 | 1.29                 | 2.13                 | 2.88                  |
| 56      | 0.76                 | 1.28                 | 2.12                 | 2.88                  |
| 57      | 0.76                 | 1.28                 | 2.12                 | 2.87                  |
| 58      | 0.76                 | 1.28                 | 2.11                 | 2.87                  |
| 59      | 0.76                 | 1.28                 | 2.11                 | 2.86                  |
| 60      | 0.76                 | 1.28                 | 2.11                 | 2.85                  |

| t (min) | $\sigma$ (MPa)       |                      |                      |                       |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|         | $\varepsilon = 10\%$ | $\varepsilon = 30\%$ | $\varepsilon = 50\%$ | $\varepsilon = 100\%$ |
| 61      | 0.76                 | 1.28                 | 2.10                 | 2.85                  |
| 62      | 0.75                 | 1.27                 | 2.10                 | 2.85                  |
| 63      | 0.75                 | 1.27                 | 2.09                 | 2.84                  |
| 64      | 0.75                 | 1.27                 | 2.09                 | 2.84                  |
| 65      | 0.75                 | 1.27                 | 2.09                 | 2.83                  |
| 66      | 0.75                 | 1.27                 | 2.08                 | 2.83                  |
| 67      | 0.75                 | 1.27                 | 2.08                 | 2.82                  |
| 68      | 0.75                 | 1.26                 | 2.08                 | 2.82                  |
| 69      | 0.75                 | 1.26                 | 2.07                 | 2.81                  |
| 70      | 0.74                 | 1.26                 | 2.07                 | 2.81                  |
| 71      | 0.74                 | 1.26                 | 2.07                 | 2.81                  |
| 72      | 0.74                 | 1.26                 | 2.06                 | 2.80                  |
| 73      | 0.74                 | 1.26                 | 2.06                 | 2.80                  |
| 74      | 0.74                 | 1.26                 | 2.06                 | 2.80                  |
| 75      | 0.74                 | 1.26                 | 2.05                 | 2.79                  |
| 76      | 0.74                 | 1.25                 | 2.05                 | 2.79                  |
| 77      | 0.74                 | 1.25                 | 2.05                 | 2.79                  |
| 78      | 0.74                 | 1.25                 | 2.05                 | 2.78                  |
| 79      | 0.74                 | 1.25                 | 2.04                 | 2.78                  |
| 80      | 0.73                 | 1.25                 | 2.04                 | 2.78                  |
| 81      | 0.73                 | 1.25                 | 2.04                 | 2.77                  |
| 82      | 0.73                 | 1.25                 | 2.04                 | 2.77                  |
| 83      | 0.73                 | 1.25                 | 2.03                 | 2.77                  |
| 84      | 0.73                 | 1.25                 | 2.03                 | 2.76                  |
| 85      | 0.73                 | 1.24                 | 2.03                 | 2.76                  |
| 86      | 0.73                 | 1.24                 | 2.03                 | 2.76                  |
| 87      | 0.73                 | 1.24                 | 2.02                 | 2.76                  |
| 88      | 0.73                 | 1.24                 | 2.02                 | 2.75                  |
| 89      | 0.73                 | 1.24                 | 2.02                 | 2.75                  |
| 90      | 0.73                 | 1.24                 | 2.02                 | 2.75                  |
| 91      | 0.73                 | 1.24                 | 2.02                 | 2.75                  |
| 92      | 0.73                 | 1.24                 | 2.01                 | 2.74                  |
| 93      | 0.72                 | 1.24                 | 2.01                 | 2.74                  |
| 94      | 0.72                 | 1.24                 | 2.01                 | 2.74                  |
| 95      | 0.72                 | 1.24                 | 2.01                 | 2.74                  |
| 96      | 0.72                 | 1.24                 | 2.01                 | 2.74                  |
| 97      | 0.72                 | 1.24                 | 2.00                 | 2.73                  |
| 98      | 0.72                 | 1.23                 | 2.00                 | 2.73                  |
| 99      | 0.72                 | 1.23                 | 2.00                 | 2.73                  |
| 100     | 0.72                 | 1.23                 | 2.00                 | 2.73                  |
| 101     | 0.72                 | 1.23                 | 2.00                 | 2.73                  |
| 102     | 0.72                 | 1.23                 | 2.00                 | 2.72                  |
| 103     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.72                  |
| 104     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.72                  |
| 105     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.72                  |
| 106     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.72                  |
| 107     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.72                  |
| 108     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.71                  |
| 109     | 0.72                 | 1.23                 | 1.99                 | 2.71                  |
| 110     | 0.72                 | 1.23                 | 1.98                 | 2.71                  |
| 111     | 0.71                 | 1.23                 | 1.98                 | 2.71                  |
| 112     | 0.71                 | 1.23                 | 1.98                 | 2.71                  |
| 113     | 0.71                 | 1.23                 | 1.98                 | 2.71                  |
| 114     | 0.71                 | 1.23                 | 1.98                 | 2.71                  |
| 115     | 0.71                 | 1.23                 | 1.98                 | 2.70                  |
| 116     | 0.71                 | 1.22                 | 1.98                 | 2.70                  |
| 117     | 0.71                 | 1.22                 | 1.98                 | 2.70                  |
| 118     | 0.71                 | 1.22                 | 1.97                 | 2.70                  |
| 119     | 0.71                 | 1.22                 | 1.97                 | 2.70                  |
| 120     | 0.71                 | 1.22                 | 1.97                 | 2.70                  |

表-C.2(2) 計算結果 (不織布)

| t (min) | $\sigma$ (MPa)   |                   |                   |
|---------|------------------|-------------------|-------------------|
|         | $\epsilon = 5\%$ | $\epsilon = 10\%$ | $\epsilon = 30\%$ |
| 0       | 15.68            | 34.10             | 67.42             |
| 1       | 14.45            | 31.19             | 54.71             |
| 2       | 14.18            | 29.81             | 51.53             |
| 3       | 14.11            | 29.15             | 50.69             |
| 4       | 14.07            | 28.83             | 50.41             |
| 5       | 14.05            | 28.67             | 50.28             |
| 6       | 14.02            | 28.58             | 50.18             |
| 7       | 14.00            | 28.52             | 50.09             |
| 8       | 13.98            | 28.49             | 50.01             |
| 9       | 13.96            | 28.46             | 49.93             |
| 10      | 13.94            | 28.43             | 49.85             |
| 11      | 13.91            | 28.41             | 49.77             |
| 12      | 13.89            | 28.39             | 49.69             |
| 13      | 13.87            | 28.36             | 49.62             |
| 14      | 13.85            | 28.34             | 49.54             |
| 15      | 13.83            | 28.32             | 49.47             |
| 16      | 13.82            | 28.30             | 49.40             |
| 17      | 13.80            | 28.28             | 49.33             |
| 18      | 13.78            | 28.26             | 49.26             |
| 19      | 13.76            | 28.24             | 49.19             |
| 20      | 13.74            | 28.22             | 49.12             |
| 21      | 13.72            | 28.20             | 49.06             |
| 22      | 13.71            | 28.18             | 48.99             |
| 23      | 13.69            | 28.17             | 48.93             |
| 24      | 13.67            | 28.15             | 48.87             |
| 25      | 13.66            | 28.13             | 48.81             |
| 26      | 13.64            | 28.11             | 48.75             |
| 27      | 13.62            | 28.09             | 48.69             |
| 28      | 13.61            | 28.08             | 48.63             |
| 29      | 13.59            | 28.06             | 48.58             |
| 30      | 13.58            | 28.04             | 48.52             |
| 31      | 13.56            | 28.02             | 48.47             |
| 32      | 13.55            | 28.01             | 48.42             |
| 33      | 13.53            | 27.99             | 48.37             |
| 34      | 13.52            | 27.98             | 48.31             |
| 35      | 13.50            | 27.96             | 48.26             |
| 36      | 13.49            | 27.94             | 48.22             |
| 37      | 13.48            | 27.93             | 48.17             |
| 38      | 13.46            | 27.91             | 48.12             |
| 39      | 13.45            | 27.90             | 48.07             |
| 40      | 13.44            | 27.88             | 48.03             |
| 41      | 13.42            | 27.87             | 47.98             |
| 42      | 13.41            | 27.85             | 47.94             |
| 43      | 13.40            | 27.84             | 47.90             |
| 44      | 13.39            | 27.82             | 47.85             |
| 45      | 13.37            | 27.81             | 47.81             |
| 46      | 13.36            | 27.80             | 47.77             |
| 47      | 13.35            | 27.78             | 47.73             |
| 48      | 13.34            | 27.77             | 47.69             |
| 49      | 13.33            | 27.76             | 47.66             |
| 50      | 13.32            | 27.74             | 47.62             |
| 51      | 13.31            | 27.73             | 47.58             |
| 52      | 13.30            | 27.72             | 47.55             |
| 53      | 13.29            | 27.71             | 47.51             |
| 54      | 13.27            | 27.69             | 47.48             |
| 55      | 13.26            | 27.68             | 47.44             |
| 56      | 13.25            | 27.67             | 47.41             |
| 57      | 13.24            | 27.66             | 47.37             |
| 58      | 13.24            | 27.64             | 47.34             |
| 59      | 13.23            | 27.63             | 47.31             |
| 60      | 13.22            | 27.62             | 47.28             |

| t (min) | $\sigma$ (MPa)   |                   |                   |
|---------|------------------|-------------------|-------------------|
|         | $\epsilon = 5\%$ | $\epsilon = 10\%$ | $\epsilon = 30\%$ |
| 61      | 13.21            | 27.61             | 47.25             |
| 62      | 13.20            | 27.60             | 47.22             |
| 63      | 13.19            | 27.59             | 47.19             |
| 64      | 13.18            | 27.58             | 47.16             |
| 65      | 13.17            | 27.57             | 47.13             |
| 66      | 13.16            | 27.56             | 47.11             |
| 67      | 13.15            | 27.55             | 47.08             |
| 68      | 13.15            | 27.53             | 47.05             |
| 69      | 13.14            | 27.52             | 47.03             |
| 70      | 13.13            | 27.51             | 47.00             |
| 71      | 13.12            | 27.50             | 46.97             |
| 72      | 13.12            | 27.49             | 46.95             |
| 73      | 13.11            | 27.49             | 46.93             |
| 74      | 13.10            | 27.48             | 46.90             |
| 75      | 13.09            | 27.47             | 46.88             |
| 76      | 13.09            | 27.46             | 46.86             |
| 77      | 13.08            | 27.45             | 46.83             |
| 78      | 13.07            | 27.44             | 46.81             |
| 79      | 13.06            | 27.43             | 46.79             |
| 80      | 13.06            | 27.42             | 46.77             |
| 81      | 13.05            | 27.41             | 46.75             |
| 82      | 13.04            | 27.40             | 46.73             |
| 83      | 13.04            | 27.39             | 46.71             |
| 84      | 13.03            | 27.39             | 46.69             |
| 85      | 13.03            | 27.38             | 46.67             |
| 86      | 13.02            | 27.37             | 46.65             |
| 87      | 13.01            | 27.36             | 46.63             |
| 88      | 13.01            | 27.35             | 46.61             |
| 89      | 13.00            | 27.35             | 46.59             |
| 90      | 13.00            | 27.34             | 46.58             |
| 91      | 12.99            | 27.33             | 46.56             |
| 92      | 12.99            | 27.32             | 46.54             |
| 93      | 12.98            | 27.32             | 46.53             |
| 94      | 12.97            | 27.31             | 46.51             |
| 95      | 12.97            | 27.30             | 46.49             |
| 96      | 12.96            | 27.29             | 46.48             |
| 97      | 12.96            | 27.29             | 46.46             |
| 98      | 12.95            | 27.28             | 46.45             |
| 99      | 12.95            | 27.27             | 46.43             |
| 100     | 12.94            | 27.27             | 46.42             |
| 101     | 12.94            | 27.26             | 46.40             |
| 102     | 12.93            | 27.25             | 46.39             |
| 103     | 12.93            | 27.25             | 46.38             |
| 104     | 12.93            | 27.24             | 46.36             |
| 105     | 12.92            | 27.23             | 46.35             |
| 106     | 12.92            | 27.23             | 46.34             |
| 107     | 12.91            | 27.22             | 46.32             |
| 108     | 12.91            | 27.21             | 46.31             |
| 109     | 12.90            | 27.21             | 46.30             |
| 110     | 12.90            | 27.20             | 46.29             |
| 111     | 12.90            | 27.20             | 46.27             |
| 112     | 12.89            | 27.19             | 46.26             |
| 113     | 12.89            | 27.19             | 46.25             |
| 114     | 12.88            | 27.18             | 46.24             |
| 115     | 12.88            | 27.17             | 46.23             |
| 116     | 12.88            | 27.17             | 46.22             |
| 117     | 12.87            | 27.16             | 46.21             |
| 118     | 12.87            | 27.16             | 46.20             |
| 119     | 12.87            | 27.15             | 46.19             |
| 120     | 12.86            | 27.15             | 46.18             |

付録 D. 5要素粘弾性モデルにおけるパラメータの決定方法

遮水シートおよび不織布の応力緩和傾向の予測式として提案した式(21)のパラメータを決定するため、本研究では堆積軟岩のクリープ変形式におけるパラメータの決定方法(松本・龍岡, 1996)を応用した。この方法は、まず3要素粘弾性モデルにおいてパラメータを決定し、その後計算値と実験値がより適合するようモデルを5要素に拡張するものである。以下にその詳細を述べる。

まず、3要素粘弾性モデルにおける応力緩和の式は以下のように表される。

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon + \frac{E_0}{E_1}\bar{E}\varepsilon \exp\left(-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t\right) \quad (D1)$$

ただし、

$$\bar{E} = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \quad (D2)$$

$\sigma_0 = E_0\varepsilon$  として式(D1)に代入し整理すると、

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon - (\bar{E}\varepsilon - \sigma_0) \exp\left(-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t\right) \quad (D3)$$

式(D3)を  $t$  について解くと次式を得る。

$$\ln\left(\frac{\bar{E}\varepsilon - \sigma}{\bar{E}\varepsilon - \sigma_0}\right) = -\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t \quad (D4)$$

ここで、 $\varepsilon = 0.1$  のとき、実験結果より  $\sigma_0 = 1.9$  であるので、 $E_0 = 19$  と求まる。

式(D4)について  $E_1$  と  $\eta_1$  を線形と仮定し、 $\sigma$  および  $\sigma_0 (=1.9)$  に実験値を代入して得られる曲線が最も直線に近いときの  $\bar{E}$  を試行的に求める(図-D1)。その結果、 $\bar{E} = 6.9$  となり、式(D2)より、 $E_1 = 11$  と計算される。さらに、近似直線の傾きが  $-0.022$  であることから、

$$-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1} = -0.022 \quad (D5)$$

すなわち  $\eta_1 = 8.3 \times 10^2$  となる。

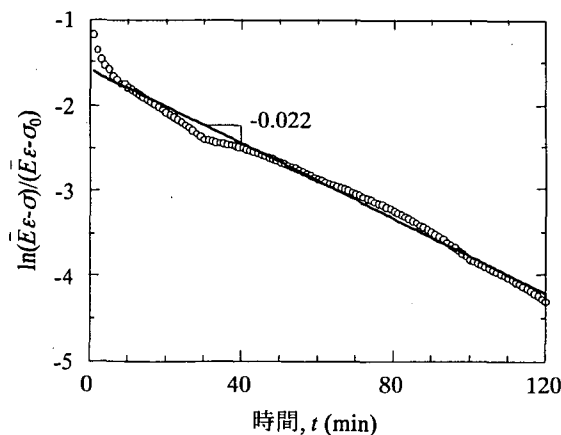


図-D1 時間と応力の関係

次に、式(D3)について  $\bar{E}\varepsilon \rightarrow \bar{E}\varepsilon + \Delta\sigma$  とすると、

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon - \left\{ (\bar{E}\varepsilon + \Delta\sigma) - \sigma_0 \right\} \exp\left(-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t\right) \quad (D6)$$

これについて、 $t \geq 1$  の区間で実験値とより適合するよう  $\Delta\sigma$  を決定する。その際、式(D6)を次のように変形し、

$$\ln\left\{ \frac{\bar{E}\varepsilon - \sigma}{(\bar{E}\varepsilon + \Delta\sigma) - \sigma_0} \right\} = -\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t \quad (D7)$$

について、 $t \geq 1$  の区間で最も良い直線性が得られるように  $\bar{E}$  を試行的に求める(図-D2)。計算の結果、決定係数 0.99 の精度で  $\bar{E} = 6.9$  となり、このとき、式(D2)より  $E_1 = 11$  と計算される。さらに、近似直線の傾きが  $-0.022$  であることから、 $\eta_1 = 1.4 \times 10^3$  となる。

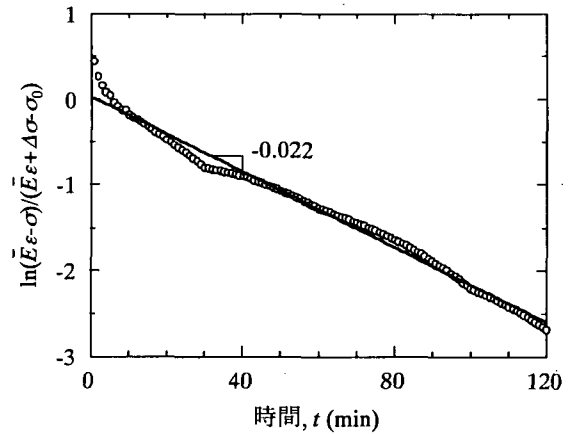


図-D2 時間と応力の関係 ( $\Delta\sigma$  をこれにより算定)

以上、新たに計算された  $E_1$  と  $\eta_1$  を用いて  $\Delta\sigma$  を決定する。実験値と最もよく適合するのは、決定係数 0.99 で  $\Delta\sigma = 0.96$  のときであった。

次に、式(D7)の  $\sigma$  を  $\sigma_a$  とし、 $\sigma_a = \sigma_b - \Delta\sigma$  に置き換えると、

$$\sigma_b - \Delta\sigma = \bar{E}\varepsilon - \left\{ (\bar{E}\varepsilon + \Delta\sigma) - \sigma_0 \right\} \exp\left(-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t\right) \quad (D8)$$

ここで、 $\Delta\sigma = E_2\varepsilon$  とすると、

$$\sigma_b = (\bar{E} + E_2)\varepsilon - \left\{ (\bar{E} + E_2)\varepsilon - \sigma_0 \right\} \exp\left(-\frac{E_0 + E_1}{\eta_1}t\right) \quad (D9)$$

また、

$$\sigma_c = \sigma_b - \sigma_{\text{実験値}} \quad (D10)$$

とし、さらに

$$\sigma_c = E_2\varepsilon - E_2\varepsilon \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right) \quad (D11)$$

とおく。式(D10)と式(D11)の相関性が最も良くなるように  $\eta_2$  を試行的に求める。その結果、 $\eta_2 = 5.3$  のときに両式の相関性が最も良くなり、決定係数は 0.99 であった。

以上より、5要素粘弾性モデルによる応力緩和評価式は

$$\sigma = \sigma_b - \sigma_c \quad (D12)$$

すなわち、

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon - \left\{ (\bar{E}\varepsilon + \Delta\sigma) - \sigma_0 \right\} \exp\left(-\frac{E_0 + E_1 t}{\eta_1}\right) + E_2 \varepsilon \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_2}\right) \quad (D13)$$

と表される。

以上について、 $\sigma_{\text{実験値}}$ 、 $\sigma_{3\text{要素}}$ 、 $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$ 、 $\sigma_{5\text{要素}}$ の各値をプロットしたものを図-D3に示す。

式(D13)の各パラメータに数値を代入すると、 $\varepsilon = 0.1$ のとき、

$$\sigma = 6.9 + 0.24 \exp(-0.015t) + 0.96 \exp(-1.8t) \quad (D14)$$

式(D14)と本文中の式(21)を比較することにより、式(21)のパラメータ値が求まる。その他のひずみ量についても同様の方法で求めることができる。

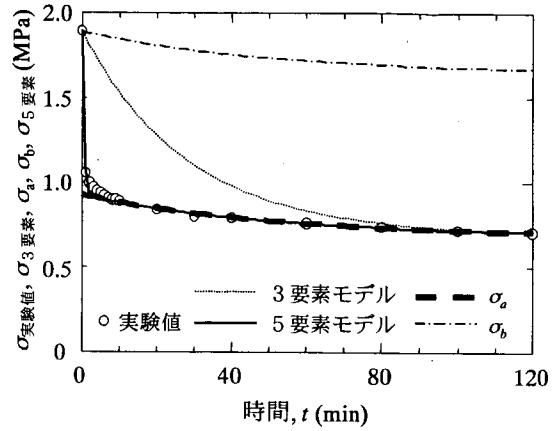


図-D3 実験値と計算値との比較