

遮水シートの変形強度特性に関する実験的考察 — 引張り強度の温度特性および応力緩和特性の 評価 —

STUDY ON DEFORMATION AND STRENGTH PROPERTIES OF WATER PROOF SHEET

- TENSILE STRENGTH PROPERTY ON VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS AND STRESS RELAXATION PROPERTY -

狩野真吾¹・近藤三樹郎²・長尾毅³・諸星一信⁴

Shingo KANO, Mikio KONDO, Takashi NAGAO and Kazunobu MOROHOSHI

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 ㈱ゼオン環境資材 技術部長 (〒105-0011 東京都港区芝公園2-4-1)

³正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Laboratory examinations and numerical analyses were undertaken to clarify the deformation and strength behaviors of water proof sheet, applied at a seepage control structure in an offshore waste disposal site. Water proof sheet, used in this study, is made of Polyvinyl Chloride (PVC), which is mainly used in an offshore waste disposal site. Tensile strength measured on several temperature conditions decreased linearly with the increase of temperature. Degree of stress relaxation of PVC sheet was shown to be constant irrespective of the magnitude of strain, and we proposed the equation about stress relaxation behavior by five-element viscoelastic model. Relationship between tensile stress and strain was evaluated on different strain rate conditions. As the result, tensile stress became larger with the increase of strain rate in the range of small strain, however, in the range of large strain, gradients of stress-strain curves became same for all strain rate conditions.

Creep behavior and the puncture strength using backfilling stone are now under examination, and we will construct a comprehensive model, including those time-dependent deformation and strength properties of PVC sheet.

Key Words : Offshore waste disposal site, Water proof sheet, Deformation and strength properties, Tensile stress, Stress relaxation, Strain rate, Viscoelastic model

1. 緒論

近年、廃棄物量の増大、廃棄物の質の多様化から最終処分場の残余容量の逼迫が生じてきており、海域における廃棄物最終処分場の必要性が高まっている。しかし、海面処分場の設計法や施工・管理基準等に関する技術検討は未だ不十分な事項も多く、その整備は急務の課題である。

海面処分場に建設される管理型廃棄物護岸には、地球環境の保全等のため廃棄物や保有水を外部に流出させないことが強く要請される。しかしながら、阪神淡路大震災クラスの極大地震動に対する耐震設計の手法は整備されておらず、護岸が大変形を起こした場合、護岸の遮水機能が低下・喪失する危険性

がある。

極大地震動を考慮した管理型廃棄物護岸の性能設計法を開発するためには、遮水シートの変形強度特性を把握する必要がある。遮水シートの変形強度特性は、変形モードやシートの厚さ¹⁾、温度²⁾、外力の作用時間^{3,4)}等の影響を受けると考えられるため、これらの要因をパラメータとした包括的な変形強度特性式を構築する必要がある。本研究ではこのうち、温度および外力の作用時間に着目した検討を行った。すなわち、温度変化が遮水シートの引張り強度に与える影響の把握、遮水シートの応力緩和特性の把握、そしてひずみ速度が遮水シートの変形強度特性に与える影響の把握を目的とする。なお、本研究で用いた遮水シートは、海面処分場で一般的に用いられる

厚さ3 mmの塩化ビニル (PVC) 製シートである。

2. 引張り強度の温度依存特性の評価

(1) 試験方法

遮水シートが温度変化を受けたときの引張り強度の変化を定量的に調べるため、本研究では0 °C、23 °C、40 °C、60 °Cの各温度条件下で遮水シートの引張り試験を行った。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、200 mm/minの一定速度で引張り（写真-1）、供試体の破断強度を測定した。なお、供試体の形状はJISK6251に従う1号ダンベル（幅10 mm、標線間40 mm）である。

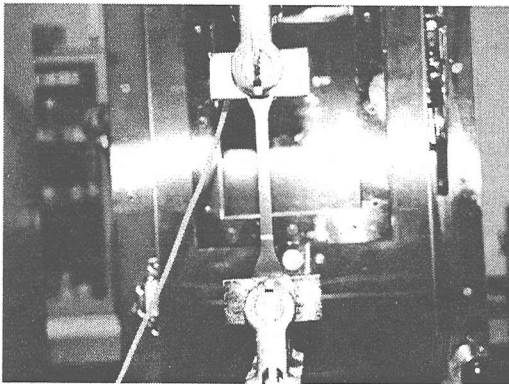


写真-1 PVC供試体の引張り試験

(2) 試験結果

各温度における応力-ひずみ曲線の例を図-1に示す。試験回数は各温度ともに1回である。PVCの応力-ひずみ曲線は明確な降伏点をもたず、ひずみの増加とともに応力の増大を生じる。グラフの初期勾配は低温側ほど大きく、温度の上昇にともなって減少する傾向を示す。また、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。

図-2は引張り強度の温度特性を示したグラフである。試験回数は各温度ともに50回であり、グラフに

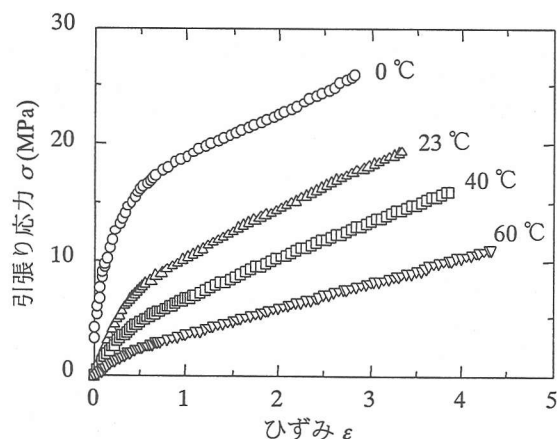


図-1 温度を変化させたときの応力-ひずみ曲線

は最大値と最小値を結ぶバーとそれらの平均値をプロットしている。その結果、各温度での平均引張り強度は温度上昇にともない直線的に減少し、その減少率は0.24 MPa/°Cであった。引張り強度 σ_f と温度 τ の関係を求めると、式(1)のようになる。

$$\sigma_f = -0.24\tau + 25.7 \quad (1)$$

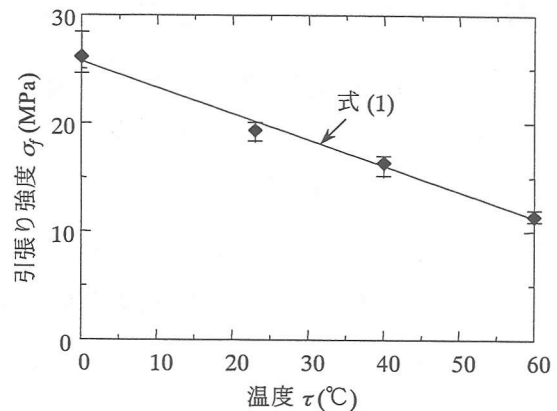


図-2 引張り強度の温度特性

(3) 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⁵⁾。この温度範囲における遮水シートの引張り強度は式(1)より、18.7~25.7 MPaと計算される。この変動幅は、中間値である22.2 MPaの約30%に相当する。海面処分場に敷設される遮水シートには、本試験のような単軸引張りではなくさまざまな現象の重ね合わせとしての外力が作用すると考えられ、また、遮水シートのネッキング現象も考慮する必要がある⁹⁾ため、式(1)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できない。しかしながら、PVCシートの強度に上述のような温度依存性が存在するという事は、遮水シートの強度設計をおこなう上で考慮する必要があると考えられる。

3. 応力緩和特性の評価

(1) 試験方法

PVCシートは粘弾性を有する材料であるため、ある一定ひずみの状態で放置すると蓄積された応力が時間とともに減少するという応力緩和特性を示す。PVCシートの応力緩和特性を定量的に把握するため、本研究では10%、30%、50%、100%の各定ひずみ状態における応力の経時変化を測定した。試験方法はJISK6263に準拠し、供試体の形状は前章の引張り試験と同様のダンベル1号（幅10 mm、標線間40 mm）である。また、設定ひずみ量までの引張り速度は50 mm/min、応力緩和計測時間は120 min、試験温度は23 °Cである。

(2) 試験結果

図-3に応力緩和試験結果を示す。ひずみ量によらず、引張り応力は時間軸の片対数プロットにおいてほぼ直線的に減少する傾向を示した。なお、時間軸を片対数表示にしているため、計測開始時の応力を便宜的に $t=0.001$ min時に示している。試験終了後の引張り応力 (σ_{120}) を初期応力 (σ_0) で除した応力比は、ひずみ量 $\varepsilon=0.1$ のとき0.38, $\varepsilon=0.3$ のとき0.34, $\varepsilon=0.5$ のとき0.35, $\varepsilon=1.0$ のとき0.33となり、応力比はひずみ量によらずほぼ一定の値となることがわかった (図-4)。

(3) 応力緩和の粘弾性モデル

遮水シートの応力緩和特性についての数値解析例として、3要素粘弾性モデルによる評価式が提案⁴⁾されているが、これはPVCのような軟質素材には適用が困難であるため、本研究では5要素粘弾性モデルによる応力緩和特性の評価式を提案し、計算値と実験値の比較を行った。5要素粘弾性モデルは、ふたつのVoigtモデルをもちいて図-5のようにあらわされる。直列のバネ部は非粘性変形を、ふたつのVoigtモデルは粘性変形をあらわしており、 E_0, E_1, E_2 は各要素のバネ定数 (MPa), η_1, η_2 は各要素の粘性係数 (MPa·min) である。応力 σ が作用したときの全ひずみ ε は、各要素のひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ の総和であら

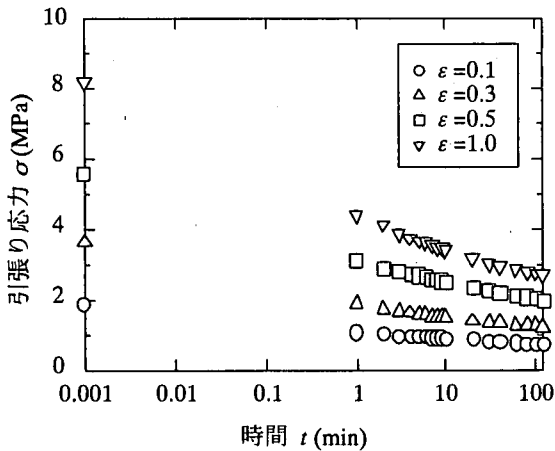


図-3 PVCシートの応力緩和

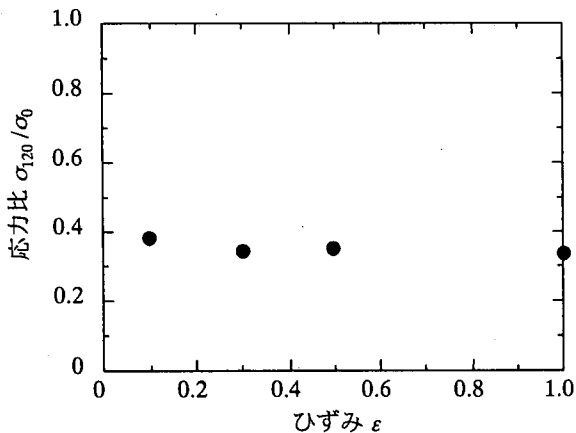


図-4 ひずみと応力比の関係

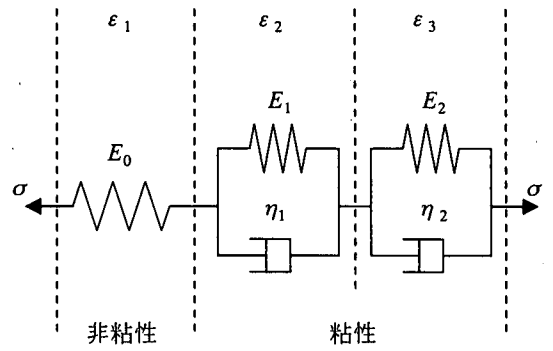


図-5 5要素粘弾性モデルの概略図

わされる。

直列のスプリングについては、外力とひずみの関係は以下のようにあらわされる。

$$\sigma = E_0 \varepsilon_1 \quad (2)$$

ふたつのVoigtモデルについてはそれぞれ、

$$\sigma = E_1 \varepsilon_2 + \eta_1 \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (3)$$

$$\sigma = E_2 \varepsilon_3 + \eta_2 \frac{d\varepsilon_3}{dt} \quad (4)$$

式(2)~(4)の $\sigma, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ についてラプラス変換および逆変換を用い、 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon$ とすることでひとつの式にまとめると、 σ と ε の関係は次式のようになる。

$$\eta_1 \eta_2 \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \{\eta_1(E_0 + E_2) + \eta_2(E_0 + E_1)\} \frac{d\sigma}{dt} + (E_0 E_1 + E_1 E_2 + E_0 E_2) \sigma = E_0 \eta_1 \eta_2 \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + E_0 (E_1 \eta_2 + E_2 \eta_1) \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 E_1 E_2 \varepsilon \quad (5)$$

定ひずみ状態、すなわち、 $\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ であることを考慮して微分方程式(5)を σ について解くと、

$$\sigma = \bar{E} \varepsilon + C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (6)$$

ただし、

$$\bar{E} = \frac{E_0 E_1 E_2}{E_0 E_1 + E_1 E_2 + E_0 E_2} \quad (7)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left(-p + \sqrt{p^2 - 4q} \right) \quad (8)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left(-p - \sqrt{p^2 - 4q} \right) \quad (9)$$

$$p = \frac{\eta_1(E_0 + E_2) + \eta_2(E_0 + E_1)}{\eta_1 \eta_2} \quad (10)$$

$$q = \frac{E_0 E_1 + E_1 E_2 + E_0 E_2}{\eta_1 \eta_2} \quad (11)$$

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⁷⁾を採用した。計算結果と試験結果を比較したものを図-6、図-7に示す。計算結果は試験値と精度良く一致しており、試験終了後における誤差は最大でも0.3%である。試験値に最もよくフィッティングするときの式(6)の各係数 $\bar{E}, C_1, C_2, \lambda_1, \lambda_2$ の値は表-1のとおり

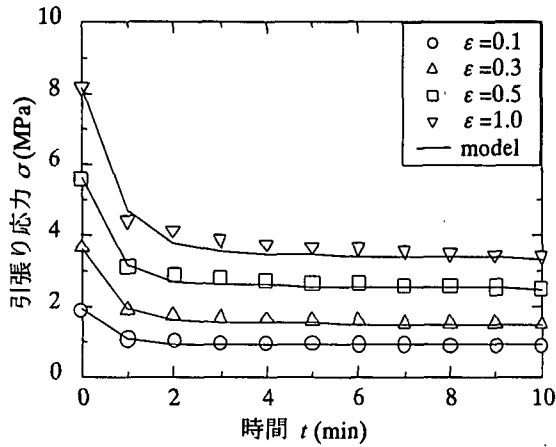


図-6 計算結果と試験結果の比較 ($0 \leq t \leq 10$)

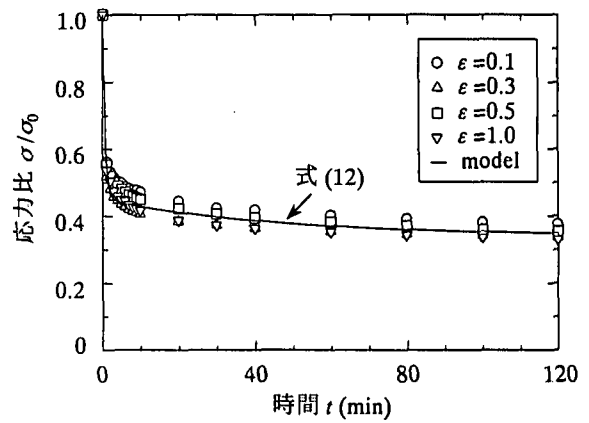


図-8 応力緩和特性

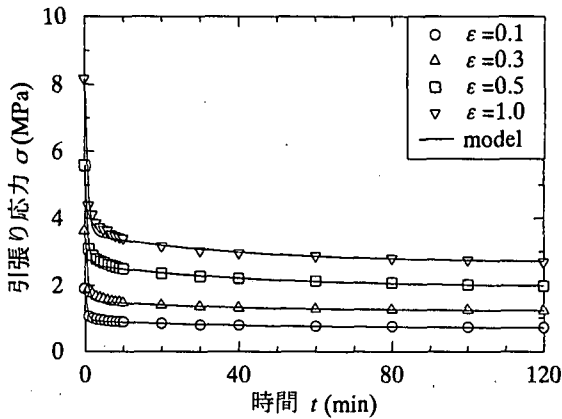


図-7 計算結果と試験結果の比較 ($0 \leq t \leq 120$)

表-1 5要素粘弾性モデルのパラメータ

ϵ	\bar{E} ($\times 10^2$) (MPa)	C_1 ($\times 10^2$) (MPa)	C_2 ($\times 10^2$) (MPa)	$-\lambda_1$ ($\times 10^{-2}$) (min^{-1})	$-\lambda_2$ (min^{-1})
0.1	6.9	0.24	1.0	1.5	1.8
0.3	4.0	0.32	2.0	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

である。

次に、それぞれのひずみ量における応力緩和傾向を比較するため、各応力値を初期応力 σ_0 で規格化したものを図-8に示す。グラフより、応力緩和傾向はひずみ量によらずほぼ一定した曲線を示すことがわかる。また図中の実線は、式(6)に表-1の値を代入し、両辺を初期応力値で除し、すべてのひずみ量について算術平均したものであり、次式(12)であらわされる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 0.34 + 0.11e^{-0.022t} + 0.55e^{-1.6t} \quad (12)$$

上式は、時間の経過とともに応力比が0.34に収束することを示しているが、これは、前節の試験結果で示した初期応力と試験後の応力の比と一致するも

のである。

4. 変形強度特性のひずみ速度依存性

(1) 試験方法

PVCシートの変形強度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供試体の引張り試験をおこなった。試験機は写真-1と同じもので、供試体を2 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/minの各速度で引張り、供試体の破断強度を測定した。供試体の形状は上述の試験と同様の1号ダンベルである。また、試験温度は23 °Cである。

(2) 試験結果

PVC供試体の引張り試験結果を図-9, 図-10に示す。ひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ (min^{-1})とすると、供試体長さが40 mmであるので、2 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/minの各引張り速度に対応する $\dot{\epsilon}$ は、0.05, 1.25, 2.5, 5.0, 7.5となる。応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度が小さいほど弾性領域と塑性領域の区別なくなだらかな上昇を示し、ひずみ速度の増加にともなって初期勾配が急激になる。しかし、後半の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ている。

(3) 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、当該地区における多数の護岸が被災、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、ケーソンは約15秒間で最大2.8°前傾し⁸⁾、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、有効応力解析等を用いたさらなる検討が必要である。

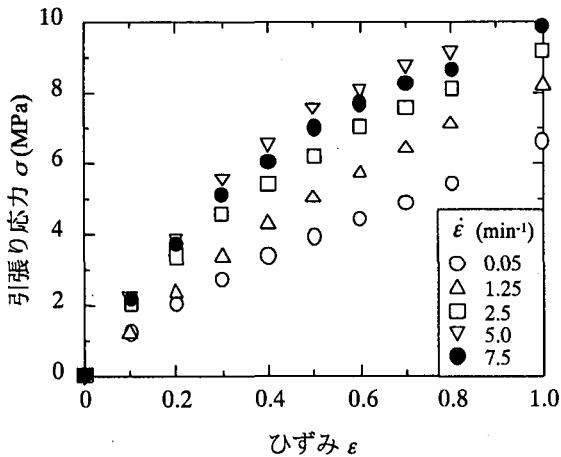


図-9 ひずみ速度を変化させたときの
応力-ひずみ曲線 ($0 \leq \epsilon \leq 1$)

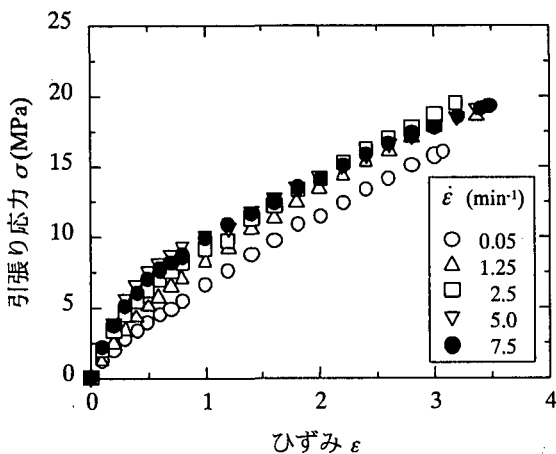


図-10 ひずみ速度を変化させたときの
応力-ひずみ曲線 ($0 \leq \epsilon \leq 4$)

5. 結論

海面廃棄物処分場の遮水工に用いられる遮水シートについて温度や外力の作用時間に着目した試験をおこなった結果、以下のことが明らかになった。

①PVC製遮水シートの引張り強度について、温度の上昇にともない $0.24 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ で直線的に減少する温度依存特性式を提案した。

②PVC製遮水シートの応力緩和傾向はひずみ量によらずほぼ一定となった。また、応力緩和傾向について5要素粘弾性モデルを導入した予測式を提案した。

③異なるひずみ速度におけるPVC製遮水シートの応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度が大きいほど曲線の初期勾配が大きく、また、十分に変形が進行した段階での勾配は、ひずみ速度によらずほぼ一定の傾向となった。

現在、遮水シートのクリープ特性、および裏込石を用いた遮水シートの耐突起物特性についても検討中であり、今度各パラメータを組み込んだ包括的モデルを構築する予定である。

謝辞：本報告は、土木シート技術協会との共同研究である「極大地震動を考慮した管理型廃棄物護岸の性能設計に関する研究」の成果である。

参考文献

- 1) 今泉繁良, 横山幸満: ジオメンブレンの変形を考慮した厚さ評価における安全率について, 土木学会論文集, No.529/III-33, pp.191-196, 1995.
- 2) 今泉繁良, 坪井正行, 高橋悟, 横山幸満: 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, 1996.
- 3) 蚊野照久, 西田一彦, 西形達明, 岡部禎之: 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, 2001.
- 4) 許四法, 今泉繁良: 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, 2002.
- 5) 文部科学省国立天文台編: 理科年表, 丸善, 2003.
- 6) 福知幹男, 矢口直幸, 御船直人, 西村佳樹, 生駒信康: 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, 1998.
- 7) 松本正士, 龍岡文夫: 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, 1996.
- 8) 菅野高弘, 三藤正明, 及川研: 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, 1995.