

埋立地法面部の応力 Ratcheting 現象による遮水シート引込力、変形挙動の評価

神奈川県 正会員 ○遠藤 清亮

神奈川県 正会員 田口 雅丈

1. はじめに

谷戸地形にある最終処分場埋立地の法面部遮水施設は、二重遮水シートを主体とした多重保護構造を採用している。廃棄物埋立の際に力学的な負荷となる埋立荷重や温度応力等の影響により、遮水シートの引込力が Ratcheting 現象として作用するため、応力の発生機構や変形挙動を把握し、シートの安定性を判別する必要がある。そこで、著者らは最初に、温度応力の特性を材料力学試験により検証するものとし、つづいてシートの応力・変形の関係を実物大で評価するための現場試験装置を構築して引込現象を再現し、計測によりシートの変形挙動を把握することに努めた。その後、各種試験結果から引込力の発生に関係した誘因を、客観的に取り入れた二次元有限要素法による数値解析を適用して、シートの変形挙動をモデル化することにより法面部遮水シートの安定性を評価するものとした。

2. 温度応力に関する遮水シート引張試験と引込力計算による評価

法面遮水シートで発生する引込力の一誘因である温度応力による Ratcheting 現象の影響も推測されることから、主要部である熱可塑性ポリウレタンシート(以下、TPUシート)の温度応力を定量的に把握するため、室内力学試験(表-1)を実施した。TPUシートの温度応力に関する推移を図-1に示す。計算値はシート供試体の両端を拘束した端部に作用する温度変化による応力を導いた式-1により算出した。温度応力の実験値は温度低下に反して増加し、計算値と比較して差異が生じた。温度変化による応力増減が、Ratcheting現象のシート引込力の変動に影響することが推察できる。

表-1 温度応力に関する各試験について

	引張試験	1%割線弾性係数測定
試験方法	JISK6251:2010	JISK7113:1995
試験片形状	ダンベル状3号形	2号形試験片
試験片採取方向	試料長手方向	
試験片数	n=3	
試験温度	-25±2℃、0±2℃、23±1℃、40±1℃、60±1℃	
引張速度	50mm/min	1mm/min
試験機	オートグラフ AG-I 100kN	デュアルコラム卓上型万能試験システム 5567A

$$\sigma_{ab} = \int_{t_a}^{t_b} \Delta \sigma dt = -\beta \cdot E_0 \int_{t_a}^{t_b} e^{-2.302585 \alpha t} dt$$

$$= \frac{\beta \cdot E_0}{2.302585 \alpha} (e^{-2.302585 \alpha t_b} - e^{-2.302585 \alpha t_a}) \dots \text{式-1}$$

ここに、 β :線膨張係数、 E_0 :0℃時のシート弾性係数(MPa)、 α :温度変化に関する弾性係数、 t :シート温度(℃)

TPUシートをHDPE、EPDMシートの温度応力と比較すると、高強度を発揮し、降伏点を示さず、力学特性に優れている。

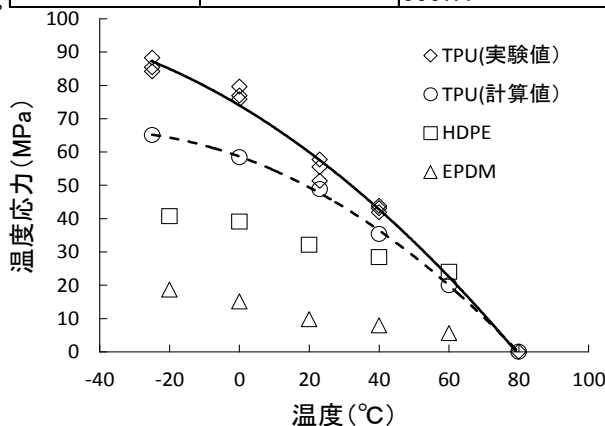


図-1 シート温度と温度応力の関係

3. 現場引込試験による力学的特性の評価

法面遮水シートの引込力に関する応力 Ratcheting 現象を施工スケールで把握するため、温度低下から生じる収縮力(温度応力)や埋立廃棄物の荷重等をシートに作用させる現場試験モデル¹⁾を構築し、各種データを計測することにより、シートの変形挙動を段階ごとに把握するものとした。

3. 1 現場引込試験の計測手法

図-2に示した法面シートの現場引込み試験装置に遮水シートを敷設し、前面に厚さ0.4m/日で盛土を施工して引込力はロードセル、変位量は変位計、シート表面温度は熱伝対を配置してデータロガーを中継すること

キーワード 埋立地法面部、シート引込力、応力 Ratcheting 現象、温度応力、TPUシート、FEM解析

連絡先 〒240-0104 神奈川県横須賀市芦名3-1990 神奈川県環境農政局環境部資源循環推進課 TEL 046-856-6810

により、各種データを日夜5分間隔で収集するものとした。
そして、盛土作業と重機を载荷させない状況時の引込力とシート表面温度について、計測したデータを温度応力の変化値として推測するものとした。

3. 2 試験結果と考察

現場試験時にシートの引込力を時間経過ごとに表現したものを図-3に示す。TPUシートに発現した引込力は、気温変化の影響による温度応力と埋立荷重等の合力として作用していることから、未埋立日の計測データによる温度応力は、合力のうち1割程度であることが認識できる。

引込力について、日夜の温度変化による差異が顕著に見受けられ、試験盛土完了時には最大シートの引込み合力が0.96kN/m程度に収束する結果が得られた。そのうえ、引込力の経時変化から応力 Ratcheting 効果の基礎となる、引込力とシート温度の変動波形は類似していることを把握することができた。

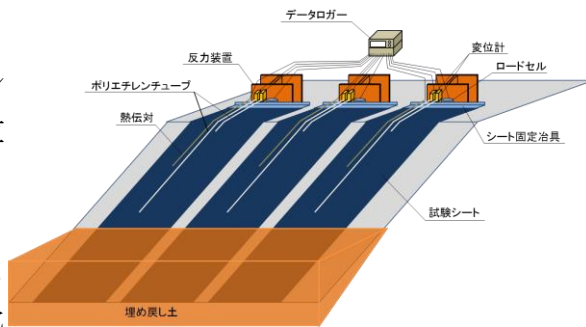


図-2 シート引込み試験の模式図

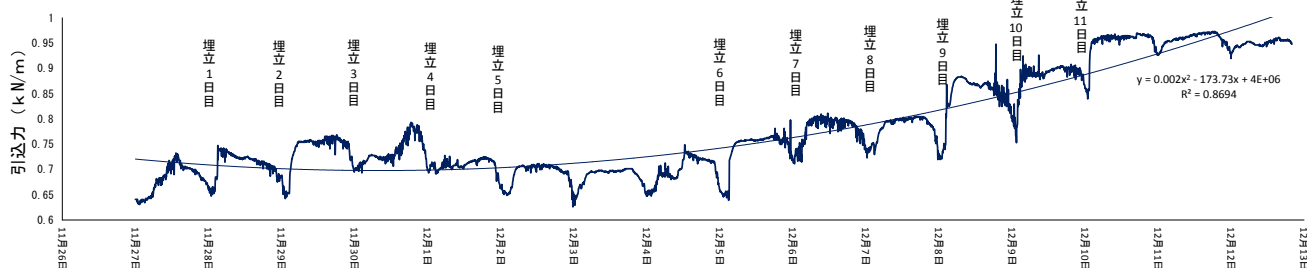


図-3 シート引込力の経過

4. 有限要素法の数値解析による力学的特性の評価

TPUシート（以下、シート）の挙動を、FEM解析により検証した。解析領域は図-4に示すとおりで、埋立、地山を平面歪み要素、シートを2枚重ねの棒要素とし、保護層の不織布は式-2で示す厚さ t_J を考慮したジョイント要素として、軸力 p_a を導入した。それぞれの設定定数を表-2、表-3に示す。シート敷設時の初期温度は15℃とし、1層埋立てるごとに温度を変化させた。

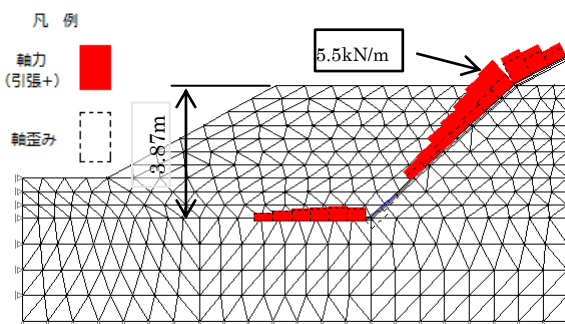


図-4 解析領域及びシート応答量

$$\begin{Bmatrix} p_s \\ p_n \\ p_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_s^{top} - w_s^{bottom} \\ w_n^{top} - w_n^{bottom} \\ \frac{d}{dx} \left(\frac{w_s^{top} + w_s^{bottom}}{2} \right) \end{Bmatrix} \quad \text{ここに、} \quad k_s = \frac{E_J}{2(1+\nu_J)t_J}, \quad k_n = \frac{(1-\nu_J)E_J}{(1+\nu_J)(1-2\nu_J)t_J}, \quad k_a = \frac{(1-\nu_J)Et_J}{(1+\nu_J)(1-2\nu_J)}$$

・・・式-2

表-2 不織布の設定定数

E_J (kN/m ²)	ν_J	t_J (m)
6.7×10^3	0.3	0.01

シート軸力の最大値は、埋立終了後の表面温度5℃の時上層で発生し、5.5kN/mと、実測値の5.7倍の値となった。これは、シートの温度上昇時の軸力減少が非線形性を示し、軸力が蓄積したためと考えられる。

表-3 シートの設定定数

種別	E(kN/m ²)	A(m ²)	γ (kN/m ³)	圧縮強度 σ_c (kN/m ²)	線膨張係数 β (1/°C)	温度(°C)	
						表面	底面
上層	$2.8 \sim 3.6 \times 10^5$	1.5×10^{-3}	11	0	1.6×10^{-4}	55~5	15
下層	$3.2 \sim 3.6 \times 10^5$	1.5×10^{-3}	11	0	1.6×10^{-4}	15~10	15

5. おわりに

今後は応力 Ratcheting 現象をさらに分析するため、熱応力に関する物性を把握する室内力学試験を再検討し、さらに現場引込試験と有限要素法の数値解析による引込力の差異を詳査、検証していく予定である。

【参考文献】

- 1) 表面しゃ水工の設計手法に関する研究：最終処分場技術研究会 平成8年度報告書 平成9年3月