ジオシンセティックス・ライナーの 多層せん断実験とその数値解析

小竹 望¹・近藤三樹郎²・根岸 聖司³・野々村 千里⁴

¹正会員 工博 東洋建設(株) 技術部 (〒101-8463 東京都千代田区神田錦町3-7-1)

E-mail: kotake-nozomu@toyo-const.co.jp

²正会員 三菱化学MKV(株)フィルム事業部 (〒453-0862 名古屋市中村区岩塚町大池2)

³正会員 東洋紡績(株) 総合研究所 (〒520-0292 滋賀県大津市堅田2-1-1)

⁴正会員 工博 東洋紡績(株) 総合研究所 (〒520-0292 滋賀県大津市堅田2-1-1)

管理型廃棄物海面処分場の護岸背面の表面遮水工にジオシンセティックス多層ライナーを用いる場合、土質材料からなる被覆層などの自重によって、この多層ライナーにせん断力が作用する。本研究では、多層ライナーの構成材料に生じる引張力を計測できる実験装置を用いて、土質材料-保護マット-遮水シート-保護マット-土質材料から成る5層構造の法面模型に関する多層せん断実験を実施した。その結果、多層構造の挙動は、各層間の境界面せん断強度と各層の伸び剛性が支配する問題であり、伸びの発生要因となる構造的要素も影響すると評価された。また、各層間の境界面せん断応力-相対変位関係と一面せん断試験の応力-変位関係の類似性から、これを境界面モデルとする2次元弾塑性FEMによって多層せん断実験を再現できることを示した。

Key Words : geosynthetic composite liner, multi-layer shear test, relative displacement, interface shear strength, finite element analysis

1. はじめに

廃棄物最終処分場の表面遮水工に、遮水シート（ジオメンブレン）と保護マット（ジオテキスタイル）から成るジオシンセティックス・ライナーがよく用いられている。法面部の遮水工として設置される場合、被覆層などの土質材料や埋立廃棄物の自重によって、遮水工にせん断力が作用する。

図-1は廃棄物海面処分場の護岸背面の法面に表面遮水工を用いる場合を模式的に示している。遮水工の施工段階から埋立期間において、波浪・潮汐の作用が揚圧力として遮水工に作用する。この対策として、被覆層に押さえ荷重としての役割をもたせ、浮上りに対する安定性を確保する方法が取られている^{1), 2), 3)}。この被覆層には一般に土質材料が用いられるため、被覆層の土塊自重が滑動力として遮水工に作用することになる。

表面遮水工には一般に遮水シートが用いられ、土質材料による破損防止を目的として、遮水シートの上面・下面に保護マットが敷設される。そのため遮水工構造は、保護マット～遮水シート～保護マットの3層から成る多層ライナー構造になる。また、粘性土層の圧密沈下や地

震時の地盤変形、下地層の不陸などに対する遮水工の変形追随性が求められるため、遮水シートや保護マットには柔軟性の高い合成樹脂材料が主に用いられる。したがって、廃棄物護岸背面に設置する表面遮水工の滑りに対する法面安定検討においては、多層ライナー構造における各層間の境界面せん断抵抗特性と各層の引張剛性の評価が重要になる。

図-1 廃棄物護岸の表面遮水工

【A部詳細図】

【平面図】

【正面図】

図-2 多層せん断試験装置概略図

写真-1 多層せん断試験装置のセットアップ状況

廃棄物処分場を対象とする遮水工と覆土層の安定問題について、遮水工に沿った滑りに関する安定解析法^{4), 5)}が提案されている。これらは極限平衡法であるため、滑り土塊や遮水工に発生する変形・ひずみを無視し、最大摩擦角が滑り面に沿って同時に発揮されると仮定している。このため、遮水工に生じる応力・ひずみや、各構成材が分担する引張力についての情報が得られないという限界がある。これに対し、室内多層せん断試験⁶⁾、法面模型の傾斜実験⁷⁾などの実験研究や、最終覆土層の現地計測⁸⁾などにより多層ライナー構造の挙動が研究されている。

本研究では、廃棄物海面処分場の護岸背面に敷設されるジオシンセティックス多層ライナーの挙動把握を目的として、この部分的な構造モデルを対象とする多層せん断実験装置を用いて、せん断力を受ける多層ライナーの法面模型実験を実施した。これにより多層ライナーの基本的な境界面せん断特性、荷重伝達特性を評価した。さらに、実験の検証および表面遮水工の安定検討における力学的設計法・数値解析手法の開発を目的として、多層ライナー構成材料間の相互作用を数値解析モデルで表現し、模型実験を再現した。

2. 実験方法

(1) 実験装置と実験方法

実際の表面遮水工の全体構造系に対して、部分的な構造モデルによる室内模型実験を行った。多層せん断試験装置の概略図を図-2に、セットアップした状況を写真-1に示す。実際の海面処分場の遮水工に用いるジオシンセティックス多層ライナー構造を模した遮水シートと保護マット（不織布）の供試体を水平な架台上にセットし、この最上層にせん断力を作用させたときに各構成材に発生する引張力を測定した。この装置により、土質材料あるいは遮水シート・不織布の面状材料も含めて2層から5層の材料で構成されるライナー構造に関して直接せん断試験を実施した。

最上層（第1層）の土質材料を詰めた鋼製せん断箱（寸法：W188 mm×L288 mm×H150 mm）は法面上に設置した被覆層の土塊に相当し、これに水平に作用させるせん断力は土塊自重による滑動力に相当する。なお、第1層を不織布とする実験では、せん断箱底面に不織布を固定したダミー板（寸法：W240 mm×L340 mm×H10 mm）を使用した。不織布供試体は、ダミー板の全面にブチルゴム系両面テープで接着し、さらに端部を釘止めた。いずれの場合も第1層に作用させるせん断力が、第1層と第2層の間で直接接触している面積の範囲で第2層へ伝達され、さらに下層へ伝達される。

せん断時の多層ライナー供試体に対して、荷重用鉄板を用いて垂直応力 $\sigma_v=30\sim50$ kN/m²を与えた。これは、実際の海面処分場に用いる被覆層の厚さ（3～5 m程度）と勾配（1:2程度）を考慮した場合、被覆層の自重によって生じる法面垂直方向の直応力の大きさに凡そ相当する。そして、多層ライナー上の被覆層が滑動した状態を模して、せん断箱の変位が150mmになるまで変位速度50mm/minでせん断力を載荷した。

面状材料のネッキングがせん断部に与える影響が少なくなる様に、せん断部の載荷範囲（W=188mmまたは240mm）に対して、面状材料供試体の幅は300mmとした。

図-3 多層せん断実験概念図 (5層構造)

面状材料供試体の端部 (せん断箱後端側) は、締付金具で固定し、剛性が高くヒンジをもつ接続金具を介して支柱に固定した。各層に発生する張力は、固定端にセットしたロードセルで測定した。面状材料の他方の端部 (せん断箱前端側) は、せん断箱の移動に伴って面状材料に発生する皺や燃れを防止する程度に軽い引張状態を保たせた。

各層の固定端からせん断箱の後端の間 (自由長) は、各層に生じる引張力に応じて自由に伸びが発生する。これは、表面遮水工は法面天端で固定されており、多層ライナー敷設後、被覆層が底面から天端に施工されていく際に、引張状態になる挙動に類似している。

本装置では、最下層の面状部材の下側境界条件として、以下の3種を設定できる。

- 伸び拘束：最下層の面状材料を剛性の高い鋼製ベース板に接着固定し、面上材料に生じる伸びを拘束する。
- 伸び自由：最下層の面状材料の下側に、表面が滑らかで剛性の高い鋼製プレートを設置し、その下方に鋼製ローラーを並べて配置する。面状材料に引張力が生じると鋼製ローラーが回転して摩擦抵抗が小さくなるため、面状材料が自由に伸びる状態となる。
- 土質材料による下地層：鋼製の下部土槽に詰めた土質材料の表面であり、遮水工の敷設面となる下地層に相当する。

(2) 層間のせん断力と相対変位

土質材料を含めた5層構造の場合の多層せん断実験概念図を図-3に示し、層間に作用する境界面せん断力・せん断応力および相対変位について説明する。5層構造の実験モデルは、第1層：土質材料 (せん断箱)、第2

層：不織布、第3層：遮水シート、第4層：不織布、第5層：土質材料 (下部土槽) から構成される。

F_1 はせん断箱に作用するせん断力、 F_i ($i=2, 3, 4$) は第 i 層 (遮水シートまたは不織布) に発生する引張力、 F_{ij} ($i=2, 3, 4; j=i+1$) は隣接した第 i 層と第 j 層の層間に作用する境界面せん断力である。

実験では、この実験モデルの外力であるせん断力 F_1 と第 i 層の引張力 F_i を計測した。内力に相当する F_{ij} は、各層の力の釣合から導かれる次式を用いて計測値から算定される。

$$\begin{aligned} F_{12} &= F_1 \\ F_{23} &= F_{12} - F_2 = F_1 - F_2 \\ F_{34} &= F_{23} - F_3 = F_1 - F_2 - F_3 \\ F_{45} &= F_{34} - F_4 = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 = F_r \end{aligned} \quad (1)$$

ここで F_r は第5層が発揮するせん断力であり、第4層と第5層の境界面せん断力 F_{45} に等しい。これより、接触する第 i 層と第 j 層の層間に作用する境界面せん断応力 τ_{ij} は、以下のように求められる。

$$\tau_{ij} = F_{ij} / A \quad (2)$$

ここで、 A はせん断力 F_i が作用する面積であり、第1層の面積に等しい。

変位に関しては、せん断箱の変位 u_1 を測定した。一方、第 i 層、第 j 層におけるそれぞれ特定の点で発生する変位を u_i, u_j とすると、この2点間の相対変位 u_{ij} は、以下の通りである。

$$u_{ij} = u_i - u_j \quad (3)$$

ここでは簡単のため、第1層の変位は直接測定されたせん断箱の変位 u_1 とした。また、第2～4層では、せん断部直下部分に生じる伸びが比較的小さく自由長の伸びが支配的であることから、変位 u_i は各層の自由長の伸び δL_i に等しいと仮定し、次式から算定した。

$$u_i = \delta L_i = F_i / (EA)_i \times L_i \quad (i>1) \quad (4)$$

ここで、 $(EA)_i$ は第 i 層の自由長部の引張剛性であり、 E はヤング率、 A_s は断面積である。

(3) 実験ケースと 実験材料

5層構造のプロトタイプに対して、多層ライナーを構成する2層～4層構造を段階的に実験した。その構成材料と最下層の拘束条件 (伸び拘束・自由) を実験パラメーターとした (表-1)。

表-1 実験ケース

Case	層数	σ_n (kN/m ²)	多層構造の構成材				
			1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
4~6	2	10~30	SL 288	GT Fixed			
2~4R	2	10~30	GT 340	GM Fixed			
R-8	2	30	GT 340	GM 231	Free		
3-4-c	3	30	SL 288	GT 177.5	GM Fixed		
4-4-c	4	30	SL 288	GT 158.0	GM 180.0	GT Fixed	
5-5-2	5	50	SL 288	GT 251.5	GM 385.5	GT 357.0	SL Fixed

注1: 各ケースの上段は材料を示す。

SL: スラグ, GT: 不織布, GM: 遮水シート

注2: 各ケースの下段のうち、第1層 (1st) はその長さを、第2層~4層は自由長の長さを示す。Fixed: 伸び拘束, Free: 伸び自由の境界条件を示す。

表-2 遮水シートと不織布の物性値

項目	単位	軟質PVCシート	長繊維不織布
厚さ (呼び値)	(mm)	3	5
単位面積質量	(g/m ²)	4,000	550
規格試験		JIS A 6008 (3号タイプ)	JIS L 1096
引張強さ	(kN/m ²)	16,900	9,000
伸び率	(%)	340	91
供試体の引張試験			
幅	(mm)	300	300
長さ	(mm)	300	300
弾性係数	(kN/m ²)	7,000	5,000

表-3 製鋼スラグの物性値

土粒子の密度	ρ_s	(g/cm ³)	3.26
最大密度	ρ_{dmax}	(g/cm ³)	2.20
最小密度	ρ_{dmin}	(g/cm ³)	1.91
50%粒径	D_{50}	(mm)	7.62
均等係数	U_c		17.9
粘着力	c	(kN/m ²)	12.3
内部摩擦角	ϕ	(°)	39.8
弾性係数 ($\sigma_c=50\sim200\text{kN/m}^2$)	E	(kN/m ²)	10,000 ~ 23,000

注) σ_c は三軸圧縮試験での拘束圧である。

図-4 圧縮荷重と遮水シート・不織布の厚さの関係

実験材料は、廃棄物海面処分場での使用³⁾を考慮して選定した。

a) 遮水シートと不織布

実験に用いた遮水シートと不織布について基本的な物性値を表-2に示す。遮水シートとして、ポリ塩化ビニール製 (PVC) シート (厚さ $t=3\text{mm}$) を選定したが、これは海面処分場での使用実績や、比重が海水より大きいために敷設時の施工性が良好であることなどを考慮したものである。保護マットとして用いる不織布は、遮水シートを突刺しや切裂きなどから保護することが主目的であり、その厚さあるいは単位面積質量 (目付け量) は、載荷重の大きさ、不織布と直接接触する土質材料の粒径、下地の均しの精度などにより設定すべきものである。本実験では、厚さ $t=5\text{mm}$ に相当するポリエステル製の長繊維不織布を用いた。

弾性係数については、幅 30cm の遮水シートと不織布供試体についてそれぞれ引張試験を行い、割線弾性係数の測定値を用いた。式(4)に示した自由長の伸びの算定では、この弾性係数値を用いた。

遮水シートおよび不織布に関して、圧縮荷重と厚さの変化に関する試験結果 (JIS L-1908) を図-4に示す。遮水シートの厚さは試験の範囲ではほとんど変化がないと言える。一方、不織布では、実験での垂直応力の範囲 ($\sigma_n=10\sim50\text{ kN/m}^2$) で、20~25%程度の厚さの変化が生じる。

b) 土質材料

海面処分場の保護層・被覆層に土質材料を用いる場合、その施工は海中施工が中心となる。一般に砂質土を海中に投入し、締固めを行わない場合、相対密度が中程度の緩く堆積した状態になると想定される。一方、製鋼スラグは、緩い状態でも単位体積重量が比較的大きく (湿潤 (含水比 5%) $\gamma=21\text{kN/m}^3$, 水中 $\gamma'=14\text{kN/m}^3$)、せん断強度が大きい (内部摩擦角 $\phi>35^\circ$) という材料特性をもっている⁹⁾。これを廃棄物海面処分場の保護層・被覆層として用いて載荷重としての役割を期待する場合、山土などに比して、処分場容量への影響が小さくなる利点があると考えられる。このような観点から、本実験では土質材料として粒径 30mm 以下の製鋼スラグを相対密度 $Dr=50\sim60\%$ の緩い状態に調整して用いた。

実験に用いた製鋼スラグの物理特性と力学特性を表-3に示す。粗粒材である製鋼スラグの最大密度は ASTM D 4253-83 に準じて下振式振動締固法を、最小密度は ASTM D 4254-83 の Method A に準じて漏斗方式で試験した。また、変形強度特性は、供試体寸法 $D300\text{mm}\times H600\text{mm}$ の大型三軸圧縮試験から求めた。初期相対密度 $Dr=60\%$ に対し、圧密排水三軸圧縮試験結果から、 $c=12.26\text{ (kN/m}^2)$, $\phi=39.8^\circ$ が得られた¹⁰⁾。製鋼スラグ供試体は、気乾状態に近いスラグ (含水比 $w=5\sim6\%$) をせん断箱内で1層

a) スラグ(SL)と不織布(GT) (Case 4~6)

b) 不織布(GT)とシート(QM) (Case 2~4R)

図-5 一面せん断試験のせん断応力 τ ~ せん断変位 u 関係とそのFEM解析結果

図-6 境界面のせん断強度特性 ($\tau_p \sim \sigma_n$ 関係)

3cm 毎に重錘により突き固め、相対密度 60% を目標値として作製した。多層せん断試験に用いた供試体の相対密度は、平均 $Dr=63.3\%$ (Min54.3%~Max71.0%, $n=16$) であった。下部土槽の製鋼スラグも同様な方法で作製した。

(4) 境界面せん断特性

実験ケース Case4~6 と Case2~4R (表-1) は、2層構造で最下層の伸びを拘束する条件、すなわち通常の一面

せん断試験と同様な条件で、2種類の材料間の境界面せん断特性を求めたものである(以降、これらの実験ケースを一面せん断試験と称す)。これらは、多層ライナー構造の多層せん断試験における基本試験に相当している。

a) スラグ(SL)と不織布(GT), b) 不織布(GT)とシート(QM)に関してそれぞれ得られた境界面のせん断応力 τ (kN/m^2) ~ せん断変位 u (mm) 関係を図-5 に示す。境界面せん断応力 τ は式(2)から算定した。

スラグ-不織布の $\tau \sim u$ 関係は、変位 $u=5 \sim 15 \text{mm}$ の範囲で τ が最大になり、その後徐々に τ が低下して残留状態に至る傾向を示している(図-5a)。これは、ピーク時にはスラグ粒子と不織布表面の繊維との摩擦と噛み合わせによるせん断抵抗力が発揮され、ピーク後には変位の増加に伴って噛み合わせが外れて、スラグ内に生じるせん断帯の内部でスラグ粒子の再配列が起こり、接触している材料間の摩擦成分が卓越してくるためと考えられる。また、垂直応力が大きいほど初期剛性が大きくなり、最大せん断応力が生じる変位量が大きくなる傾向を示している。

不織布-シートの $\tau \sim u$ 関係は、 $u=5 \sim 10 \text{mm}$ の範囲で τ が最大になり、その後変位が増加しても τ がピーク値を維持する傾向を示している(図-5b)。また、垂直応力がほぼ等しいスラグ-不織布の場合に比して、せん断応力のピーク時変位が小さくなっている。これは、スラグに比してシートが滑らかな表面をもつためと考えられる。

スラグ-不織布(SL-GT)、不織布-シート(GT-QM)に関してそれぞれ得られたせん断強度 τ_p (kN/m^2) ~ 垂直応力 σ_n (kN/m^2) 関係を図-6 に示す。ここでは、一面せん断試験で得られた境界面の最大せん断応力をせん断強度 τ_p と定義した。SL-GT は、GT-QM よりも大きいせん断強度 τ_p を有している。

3. 多層せん断実験の結果と考察

第2層の伸びを自由とする2層せん断実験 (Case R-8)、スラグを第1層に用いた3層~5層の多層せん断実験 (Case 3-4-c, 4-4-c, 5-5-2) の計4ケースについて実験結果と考察を以下に示す。

各ケースについて、せん断力・引張力・境界面せん断力と変位との関係を図-7~図-11 に示す。5層実験については、境界面「」せん断応力~変位関係 ($\tau_{ij} \sim u_i$ 関係) と境界面せん断応力~相対変位関係 ($\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係) を図-12 に示す。また、a) スラグ-不織布(SL-GT), b) 不織布-シート(GT-QM)の各層間で得られた境界面せん断応力~相対変位関係 ($\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係) をそれぞれ総括して図-13, 14 に示す。同図には一面せん断試験から得られたせん断応力~変位関係 ($\tau \sim u$ 関係) とせん断強

度 τ_p ($\sigma_n=30, 50 \text{ kN/m}^2$) も示している。

(1) 2層～4層せん断実験

a) 2層せん断実験 (第2層伸び自由: Case R-8)

第1層が不織布(GT), 第2層がシート(GM)からなり, 第2層の伸びを自由とする2層せん断実験で得られた $F_i \sim u_i$ 関係を図-7に示す。せん断力 $F_i (=F_{12}=\tau_{12} \cdot A)$ は変位 $u_i=80\text{mm}$ においてほぼ最大となった。また, 同時に第2層の引張力 F_2 も最大となった。このケースと同様な材料を用いた一面せん断試験 (Case 4R: 図-5b の $\sigma_n=30 \text{ kN/m}^2$) と比較すると, 第2層 (GM; 自由長 $L=231\text{mm}$) の伸びによってせん断力のピーク時変位が大きくなったことがわかる。

一方, 2層間の相対変位で示した $\tau_{12} \sim u_{12}$ 関係 (図-14) から, 境界面せん断応力 τ_{12} は相対変位 $u_{12}=40\text{mm}$ でピークになる。したがって, 第2層の伸びを許容しても, 不織布とシートの2層間において一面せん断試験で得られたせん断強度 τ_p が発揮されることが認められる。

一面せん断試験 (Case 4～6, Case 2～4R) では, 第2層は伸びが拘束されて引張力が発生しないため ($F_2=0$), 第2層の下側に発生するせん断抵抗力 F_i は第1層に作用させるせん断力 F_1 と等しくなる ($F_i=F_1$)。これに対して, 本実験で用いた摩擦低減層に生じたせん断抵抗力 $F_r (=F_{23}=F_1-F_2$; 式(1)参照) は, ピーク付近ではせん断力 F_1 の10%程度である。これより, 本実験では最下層 (第2層の下側) の摩擦力が十分に低減され, 第2層に伸びがほぼ自由に発生する境界条件が設定できたと考えられる。後述するFEMでは, $F_r=0$ すなわち $F_1=F_2$ の理想的条件に関して考察を加える。

b) 3層せん断実験 (Case 3-4-c)

第1層がスラグ(SL), 第2層が不織布(GT), 第3層がシート(GM)からなり, 第3層の伸びを拘束した3層せん断実験で得られた $F_i \sim u_i$ と $F_{ij} \sim u_i$ 関係を図-8に示す。せん断力 $F_i (=F_{12}=\tau_{12} \cdot A)$ および第2層の引張力 F_2 は, 変位 $u_i=20\text{mm}$ においてピークとなった。一方, 不織布-シート (GT-GM) からなる第2～3層間の境界面せん断力 F_{23} は, 小さい変位 $u_i=10\text{mm}$ でピークに到達し, $u_i=10 \sim 20\text{mm}$ の間ではピーク値とほぼ同等な値を維持している。

変位 $u_i=10\text{mm}$ の段階では, GT-GM 間の $\tau_{23} \sim u_{23}$ 関係 (図-14) から, 既に τ_{23} が相対変位 $u_{23}=5\text{mm}$ 程度で GT-GM 間のせん断強度 τ_p (図-5b) に近い値を示している。しかし, スラグ-不織布 (SL-GM) 間の境界面せん断応力 τ_{12} は, この段階ではピークに到達しておらず (図-13), 変位 $u_i=20\text{mm}$ において SL-GM 間のせん断強度 τ_p (図-5a) を発揮する。

したがって, 変位 $u_i=10 \sim 20\text{mm}$ の間は, $F_1 \sim u_i$ 関係の勾配が小さくなるが $F_i (=F_{12})$ が増加していき, 第2層の引張力 $F_2 (=F_{12}-F_{23})$ が増加していくと理解される。

図-7 $F_i \sim u_i$ 関係 (Case R-8: 2層)

図-8 $F_i \sim u_i$ と $F_{ij} \sim u_i$ 関係 (Case 3-4-c: 3層)

図-9 $F_i \sim u_i$ と $F_{ij} \sim u_i$ 関係 (Case 4-4-c: 4層)

図-10 $F_i \sim u_i$ と $F_{ij} \sim u_i$ 関係 (Case 5-2-2: 5層)

c) 4層せん断実験 (Case 4-4-c)

第1層がスラグ(SL), 第2層が不織布(GT), 第3層がシート(QM), 第4層が不織布(GT)からなり, 第4層の伸びを拘束した4層せん断実験で得られた $F_i \sim u_i$ と $F_{ij} \sim u_i$ 関係を図-9に示す。

せん断力 $F_i (=F_{12} = \tau_{12} \cdot A)$ と第2層の引張力 F_2 は, 変位 $u_i=16\text{mm}$ でピークとなる。ピーク後, F_1 は減少して残留状態になるが, F_2 はピーク値を維持している。第3層の引張力 $F_3 (=F_{23}-F_{34})$ は第2層引張力 F_2 に比して小さくなった。また, 境界面せん断力 F_{23} と F_{34} は, いずれも不織布とシート(GT-QM)の境界面に働くせん断力であり, 両者の大きさは非常に近い値を示している。図-13, 14にそれぞれ示されるように, スラグ-不織布(SL-GT)からなる第1~2層の境界面せん断応力 τ_{12} はSL-GT間のせん断強度 τ_p (図-5a)に, 不織布とシート(GT-QM)からなる第2~3層と第3~4層の境界面せん断応力 τ_{23} と τ_{34} はGT-QM間のせん断強度 τ_p (図-5b)にほぼ達している。

(2) 5層せん断実験(Case 5-5-2)

5層せん断実験の構成は図-3に示す通りである。

a) せん断力・引張力・境界面せん断力～変位関係

せん断力・引張力～変位関係($F_i \sim u_i$ 関係)と境界面せん断力～変位関係($F_{ij} \sim u_i$ 関係)を図-10に示す。せん断力 $F_i (=F_{12} = \tau_{12} \cdot A)$ と第2層の引張力 F_2 は変位 $u_i=30\text{mm}$ でピークを示す。前に述べた3層・4層せん断実験と同様に, ピーク後, F_1 は減少するが, F_2 はピーク値を維持している。境界面せん断力 F_{ij} は, せん断力 F_1 がピークになると同時にピークになった。その後, F_{23} , F_{34} , F_{45} は F_1 と同様なポストピーク状態を示した。

5層せん断実験のピーク時変位が4層せん断実験(ピーク時変位 $u_i=16\text{mm}$)よりも大きくなった原因として, 5層せん断実験の方が自由長を大きく設定したこと, 垂直応力 σ_n が大きいために最大せん断力が大きくなって各層の伸びが増加したことが考えられる。また, F_3, F_4 となった点については, 第3層と第4層の伸びの差, すなわち相対変位 u_{34} (図-12参照)が比較的小さいため, 引張剛性が小さい第3層(シート)の方が第4層(不織布)よりも引張力が小さくなったと解釈される。

b) 荷重分担率とせん断力伝達率

5層せん断実験について, せん断力 F_i に対して, 第 i 層に生じる引張力 F_i の割合(荷重分担率) F_i/F_1 および層間の境界面せん断力との割合(せん断力伝達率) $F_{ij}/F_1 (=F_{ij}/F_{12})$ と変位 u_i の関係を図-11に示す。

せん断力 F_i に対する荷重分担率は, 最下層(第5層)におけるせん断抵抗 F_r が大きく, F_1 のピーク時に第2層引張力 F_2 が25%程度, 第3層・第4層引張力 F_3 , F_4 が10%未満である。これは, 実際の多層ライナー構造にお

図-11 $F_i/F_1 \sim u_i$ と $F_{ij}/F_1 \sim u_i$ 関係 (Case 5-2-2: 5層)

図-12 $\tau_{ij} \sim u_i$, $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係 (Case 5-5-2: 5層)

いて, 保護マット(不織布)が土塊の滑動力に抵抗する大きい役割を担うことを示唆している。

せん断力伝達率 F_{ij}/F_1 は, せん断力 F_1 のピーク後ほぼ一定となった。また, 下方の層ほどせん断力伝達率が小さくなる傾向を示す。これは, せん断力 F_1 が第2層からさらに下方に伝達するに伴って各層に引張力が発生するためと考えられる。ただし, 上記の通り第3層・第4層の引張力 F_3 , F_4 が小さいため, 境界面せん断力 F_{23} , F_{34} , F_{45} の差異は小さい。これは, 第2~3層と第3~4層を構成する不織布-シート(GT-QM)間の境界面せん断強度 τ_p がスラグ-不織布(SL-GT)間の τ_p に比して小さいことが一因と考えられる。

また, 上述の多層ライナーの挙動には, 自由長の長さ, 発生する伸びなどの構造的要因も含まれると考えられる。これは, 構成材料間の境界面せん断強度と各層の伸び剛性が支配する問題である。その応力変形の評価は, 後述するFEMのような構成材料特性および構造的要因を考慮した数値解析法を用いる必要があると考えられる。

図-13 スラグ-不織布の $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係 (2～5層)

図-14 不織布-シートの $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係 (2～5層)

c) 境界面せん断応力～相対変位関係

5層せん断実験で得られた $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係と $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係を図-12 に示す。 $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係に比して $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係は初期剛性が大きく、ピーク時の変位が小さいことが判る。

第2～3層間と第3～4層間はシート-不織布(GM-GT)から構成される。境界面せん断応力 τ_{23} , τ_{34} とも $u_1 = 30\text{mm}$ のときにピークとなり、シート-不織布間のせん断強度 τ_p を発揮している。このとき相対変位は $u_{23} = 13\text{mm}$ であるのに対し、 $u_{34} = 4\text{mm}$ と小さい。

第1～2層間と第4～5層間はスラグ-不織布(SL-GT)から構成される。第1～2層間の境界面せん断応力 τ_{12} は、せん断力 F_1 がピークになる $u_1 = 30\text{mm}$ ($u_{12} = 12\text{mm}$) のときに SL-GT 間のせん断強度 τ_p を発揮している。しかし、第4～5層間の τ_{45} は、 τ_{12} と同様に $u_1 = 30\text{mm}$ のときにピークになるが、この荷重段階では SL-GT 間のせん断強

度 τ_p が発揮されていない。ピーク後、むしろ減少する傾向を示している。これは、せん断力 F_1 のピーク時 ($u_1 = 30\text{mm}$) では第4～5層間の相対変位が $u_{45} = 6\text{mm}$ と小さいため、境界面せん断応力 τ_{45} が SL-GT 間のせん断強度 τ_p に達しなかったためと考えられる。また、せん断力 F_1 はピーク後減少し、せん断力伝達率が同程度に保持されるため (図-11)、境界面せん断応力 τ_{45} が大きくなり得ない状況になっている。

また図-13, 14 より、多層せん断実験の各層間の境界面における $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係が一面せん断試験で得られた $\tau \sim u$ 関係に近いことが分かる。前者が後者よりやや剛性が高い傾向を示している点については、後述の FEM 解析結果において議論する。

4. 多層せん断実験のFEM解析

(1) 一面せん断試験のFEM解析

異種材料間での一面せん断試験で得られた層間せん断特性を表現できる数値解析モデルを構築するため、一面せん断試験を解析対象として2次元平面ひずみ弾塑性 FEM 解析を行った。

a) 一面せん断試験のFEM解析モデル

土質材料(スラグ)～不織布、不織布～シートの一面せん断試験を対象とする解析モデルを図-15 にそれぞれ示す。スラグ、シート ($t=3\text{mm}$)、不織布 ($t=5\text{mm}$) の供試体は4節点平面要素でモデル化した。スラグは Mohr-Coulomb の降伏則に従う弾完全塑性体とし、シートと不織布は線形弾性体とした。各材料の物性値は表-2, 3 に示す通りである。なお、ダミー板は4節点平面要素でモデル化し、弾性係数 $E=1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ の線形弾性体とした。

土質材料供試体へのせん断力の荷重は、せん断箱に詰められた土質材料の側面に一樣な水平方向の強制変位を与え、荷重に伴って生じる鉛直方向の変位は拘束しない条件を与えた。これにより、剛性が高く、内壁の摩擦が全くないせん断箱をモデル化した。不織布～シートの実験では、それぞれ剛性の高いダミー板に固定されているので、上側供試体のダミー板に一樣な強制変位または水平荷重を荷重させた。また、鉛直荷重は、上側供試体に分布荷重 σ_n を作用させた。

b) 境界面のFEM解析モデル

本研究で対象とする異種材料の境界面では、次の2つのせん断破壊モードが考えられる。a) 異種材料の境界面に摩擦抵抗力より大きいせん断応力が作用し、境界面に滑りが生じて変位の不連続面が発生する。b) 境界面に沿った土質材料の薄い領域が大きくせん断変形し、境界面での滑りが生じる前に土質材料がせん断破壊に到達す

a) 土質材料 (上側) と不織布 (下側)

注) 図中の [] 内は 2 層せん断実験 (Case R-8: 第 2 層伸び自由) の解析条件を示す。

図-15 一面せん断試験の FEM 解析モデル

る。一面せん断試験で得られた境界面せん断特性から、スラグ (土質材料) - 不織布間のせん断破壊モードは、上記の b) に相当すると考えられる。また、不織布-シート間のせん断破壊モードは、柔軟な材料である不織布およびシートが、変位の不連続面が発生する前に境界面付近で大きくせん断変形するため、a) よりも b) に近いと考えられる。

本研究では、上述の境界面せん断特性を数値解析で再現できる様に、上側と下側の供試体の境界に薄層の境界要素^{11), 12)}を配置した (図-15)。境界要素に 4 節点平面要素を用いて、その材料特性を Mohr-Coulomb の降伏則に従う弾完全塑性体とした。これは数値解析モデルによりせん断面を規定していることになる。実際の多層ライナー構造を対象とする解析²⁾では、その薄層の厚さは全体のスケールに対して無視できる程度である。

一面せん断試験から得られた境界面せん断強度 (図-6) から、境界要素のせん断強度をスラグ~不織布は $\tau_p = \sigma_n \tan(38.4)$ 、不織布~シートは $\tau_p = \sigma_n \tan(28.0)$ とした。境界要素の弾性係数 E_b は、一面せん断試験結果を再現できるように設定し、ポアソン比は $\nu = 0.3$ の一定値を用いた。垂直応力 $\sigma_n = 10, 20, 30 \text{ kN/m}^2$ に対して、

図-16 2層せん断実験と FEM 解析結果 ($F_1 \sim u_1$)

図-17 2層せん断実験と FEM 解析結果 ($\tau_{12} \sim u_{12}$)

スラグ~不織布は $E_b = 100, 150, 200 \text{ kN/m}^2$ 、不織布~シートは $E_b = 50, 100, 150 \text{ kN/m}^2$ にそれぞれ設定すると、一面せん断試験の拘束圧に依存するせん断強度と初期剛性がほぼ良好に再現された (図-5)。ここで設定した境界要素の弾性係数 E_b と垂直応力 σ_n の関係は、スラグ~不織布は $E_b = 4.46 \sigma_n + 58.0$ 、不織布~シートは $E_b = 4.91 \sigma_n$ と表される。

なお、本検討では境界要素を弾完全塑性体としているので、スラグと不織布の一面せん断にみられるピーク後の軟化挙動は表現できない。この場合、ピーク後はせん断応力を過大評価することになるため、大きい変位が予想される場合には、残留せん断強度を用いることが考えられる。

(2) 2層せん断実験の FEM 解析

2層せん断実験 (第 2 層の伸び自由: Case R-8) の解析モデルは、一面せん断試験の FEM 解析モデルの境界条件を変更したものである。第 2 層 (シート) の底面境界に水平ローラーを配置し、実験と同様な長さの自由長部

をもつ構造とし、その端部を固定境界とした(図-15b)。また、第1層と第2層の境界面に前節で示した不織布・シートの境界要素を配置した。

図-16, 17 にそれぞれ示すせん断力～変位関係 ($F_1 \sim u_1$ 関係) と境界面せん断応力～相対変位関係 ($\tau_{12} \sim u_{12}$ 関係) から、FEM によって実験結果が良く再現されていることが判る。また同図に、自由長の長さ ($L_2=50 \sim 400$ mm) をパラメータとする解析結果を示す。自由長の長さによって、第2層に発生する伸びが変わってくるため、 $F_1 \sim u_1$ 関係が大きく異なってくる。しかし、これに対応する $\tau_{12} \sim u_{12}$ 関係はほぼ同様であることが判る。

実際の構造物においては、表面遮水工に使用される多層ライナーは法面下端で固定され、その法面下部から段階的に被覆層が投入される。この場合、固定点から被覆層投入箇所までが自由長に相当する。上記の解析結果は、このような自由長の長い場合や多層ライナー構成材料の引張剛性が小さい場合には、各層間の相対変位が十分大きく発生しないと境界面せん断強度が発揮されないことを示唆している。

(3) 5層せん断実験のFEM解析

5層せん断実験のFEM解析モデルは、一面せん断試験のFEM解析モデル(図-15)を重ねて多層構造にしたものである。第2～4層が実験と等しい長さの自由長部をもつ構造とし、その端部を固定境界とした。スラグを弾塑性体、不織布・シートを弾性体の平面要素でモデル化した。スラグ-不織布、不織布-シートの各層間には前節に示した境界要素を配置して、一面せん断試験のFEM解析で設定したパラメータを用いた。

図-18 に5層せん断実験とそのFEM解析から得られた $F_1 \sim u_1$ 関係を示す。主要な F_1 , F_2 に関しては、実験での最大せん断力・最大引張力がFEM解析によって凡そ再現されている。また、 F_3 , F_4 については概ね実験傾向に近いと思われる。しかし、 F_1 , F_2 最大値の生じる変位を見るとFEM解析結果の方が実験値より明らかに大きい。この原因は実験装置の特性から次の様に考えられる。すなわち、せん断箱の直下部分ではシート・不織布の横方向の変形が拘束されること、重ねられたシート・不織布に厚みがあるため鉛直荷重が直接の接触面より広い範囲に分散し、重なって敷設されているシート・不織布間のせん断抵抗が多少生じてしまうことなどにより、実験では供試体の引張剛性が見かけ上大きくなったと推定される。

図-19 に5層せん断実験とFEM解析から得られた $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係を示す。FEMの結果は、実験結果と同様な初期剛性を示し、 τ_{ij} のピーク値の50～60%までは実験結果とほぼ同様な $\tau_{ij} \sim u_{ij}$ 関係を示している。応力レベルが大きくなるとFEMで得られた u_{ij} が実験結果より大きい傾向を示す。これは $F_1 \sim u_1$ 関係について述べた通り、実験

図-18 5層せん断実験結果とFEM解析結果 ($F_i \sim u_i$)

図-19 5層せん断実験結果とFEM解析結果 ($\tau_{ij} \sim u_{ij}$)

では供試体の引張剛性が見かけ上大きくなったことに因るものと考えられる。また、FEMによって得られた τ_{ij} をみると、 τ_{12} , τ_{23} , τ_{34} のピークでは各境界面のせん断強度が発揮されるが、 τ_{45} は u_{45} が小さいためにピーク値がせん断強度に達しないという前述の実験と同様な傾向をFEMが再現している。

5. 結論

せん断力が作用する多層ライナーの構成材に生じる引張力を計測できる実験装置を用いて、「土質材料～保護マット～遮水シート～保護マット～土質材料」から成る5層構造の実物に対して、2層～5層構造の多層せん断模型実験を段階的に実施した。多層せん断実験から得られた引張力～変位関係、境界面せん断力～変位関係および境界面せん断応力～相対変位関係から、各層間のせん

断抵抗特性を評価した。その結果、以下のことが認められた。

- 1) 構成材の変位あるいは伸びによりせん断応力～変位関係は大きく異なる。多層構造では、各層間に発生する境界面せん断力は同時にピークになるとは限らず、境界面せん断強度がすべての層間において発揮されるとは限らない。これは、各層間の境界面せん断強度と各層の伸び剛性が支配する問題である。さらに、本実験における自由長のような構造的要素も影響すると考えられる。
- 2) 各層間の境界面せん断応力～相対変位関係は、一面せん断試験におけるせん断応力～変位関係に類似している傾向が認められた。これに基づき、一面せん断試験で得られた境界面せん断特性をモデル化した境界要素を用いた2次元平面ひずみ弾塑性 FEM によって、多層せん断実験を解析した。その結果、FEM が概ね良好に実験を再現できることがわかった。この解析手法は、実際の表面遮水工の応力変形解析にも適用できると考えられる。
- 3) せん断力が多層ライナーに作用するとせん断力が直接作用する層からさらに下方に伝達し、これに伴って各層に引張力が発生する。実際が多層ライナー構造においては、保護マット（不織布）が土塊の滑動力に抵抗する大きい役割を担うと考えられる。

謝辞：本研究における実験は土木シート技術協会の協力により実施したものである。この場を借りて深謝の意を表す。

参考文献

- 1) (財)港湾空間高度化センター・運輸省港湾局監修：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル, 2000.

- 2) 小竹望, 山崎智弘, 北浦良樹, 松下正樹, 根岸聖司, 野々村千里, 山下勝久：管理型海面処分場の側面遮水工における斜面安定に関する FEM 解析, ジオシンセティックス論文集, Vol.17, pp.87-94, 2002.
- 3) 小竹望, 手塚隆, 大槻貴志, 徳永和幸, 守谷公一：透水性地盤に築造する管理型海面処分場のシート遮水工, ジオシンセティックス論文集, Vol.18, pp.17-20, 2003.
- 4) Koerner, R.M.: *Designing with Geosynthetics*, 4th ed., Prentice Hall, Chapter 5 Designing with Geomembrane, 1999.
- 5) Giroud, J.P. and Beech, J.F.: Stability of soil layers on geosynthetic lining system, *Proceedings of Geosynthetics '89*, Vol.1, pp.35-46, 1989.
- 6) 今泉繁良, 高橋悟, 坪井正行, 横山幸満：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, 1996.
- 7) Gourc, J.P., Villard, P., Ramirez, R., Feki, N., Briancon, L., and Girard, H.: Use of inclined test to assess stress mobilization of liner on slope, *IS on Earth Reinforcement, Landmarks in Earth Reinforcement*, pp.201-205, 2001.
- 8) Feki, N., Villard, P., Gourc, J.P. and Chatelet, J.: Comparative long term survey of geosynthetic cap lining system, *Geosynthetics 7th ICG*, pp.663-666, 2002.
- 9) (財)沿岸開発技術研究センター・鉄鋼スラグ協会：港湾工事用製鋼スラグ利用手引書, 2000.
- 10) 鶴ヶ崎和博, 小竹望, 手塚隆, 和田眞郷, 平田昌史, 金夏永：粒度の異なる製鋼スラグの強度特性について, 第 58 回土木学会年次学術講演会, pp.777-778, 2003.
- 11) Kotake, N., Tatsuoka, F., Tanaka, T., Siddiquee, M.S.A. and Yamauchi, H.: An insight into the failure of reinforced sand in plane strain compression by FEM simulation, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.5, pp.103-130, 1999.
- 12) Villard, P., Kotake, N., and Otani, J.: Modelling of reinforced soil in finite element analysis, Keynote Lecture, *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, 7ICG-Nice2002*, Delmas, Gourc & Girard (eds), Balkema, Vol.1, pp.39-95, 2002.

(2004. 2. 10 受付)

DIRECT SHEAR TESTS ON GEOSYNTHETICS MULTI-LINER SYSTEM AND ITS NUMERICAL ANALYSIS

Nozomu KOTAKE, Mikio KONDOU, Kiyoshi NEGISHI and Chisato NONOMURA

Interactive shear strength and displacement between geosynthetics and geomaterials are important factors to assess the stability of the multi-liner systems installed in the slope as a sideline for coastal landfill sites. In the present study, direct shear tests on multi-layered models were firstly conducted by using a new testing apparatus that could measure tensile forces induced in each component of the liner system when the top layer was suffered from the shear forces caused by the self-weight of the cover soil. The corresponding numerical simulations by elasto-plastic FEM were secondly conducted to clarify the effects of interaction between layers. It can be well understood that the interactive behaviours of layers in the multi-liner are governed by a) the interface shear strength between the layers that depends on the materials and b) the tensile stiffness of each geosynthetic component that depends on both the consisting materials and the structural conditions.