遮水ライナーの固定能評価に関する屋外模型実験

宇都宮大学工学研究科○坪井正行

住友建設（株） 土居洋一

宇都宮大学工学部 今泉繁良

概 要：

廃棄物処分場ではジオメンブレンの端部は固定されているが、この固定能については良く知られていない。そこで、屋外にて、さまざまな固定構造を実験的に作成して、引き抜き試験機を用いてジオメンブレンに引張力を作用させ固定能の評価を行った。実験では、固定工のサイズを200 mm角から500 mm角まで変化させて、サイズの影響を調べた。その結果、固定工の初動荷重とコンクリートの重量がほぼ一致することがわかった。また盛土と切土の違い、ジオテキスタイルを使用した場合についても比較実験を行った。その結果、最大荷重は地盤の強度との関連が深いことやジオテキスタイルを用いるとジオメンブレンが引き抜けを生じやすいこと等がわかった。

Evaluation Field Test for Anchorage Ability of Geosynthetic Liners

Masayuki, Tsuboi

Utsunomiya University

Yohichi, Doi

Sumitomo Construction Co., Ltd.

Shigeyoshi, Imaizumi,

Utsunomiya University

ABSTRACT:

For an investigation of an anchorage ability of geomembrane liner buried in trench filled with concrete, the field model tests were conducted. Test parameters, such as a size of an anchor trench, a type of geomembrane, cut slope or filled slope, with and without geotextile, were considered. A larger anchor has larger ability, but the pulling force when concrete anchor starts to move up, is almost equal to the concrete weight. And the pulling force at the case without geotextile is greater than the force with geotextile. So, a geotextile should be used carefully at the anchor trench. And the soil strength is also important to designing anchorage trench structure, because the anchorage ability thought to be effected by the soil strength.

遮水ライナーの固定能評価に関する屋外模型実験

宇都宮大学工学研究科○坪井正行

住友建設（株） 土居洋一

宇都宮大学工学部 今泉繁良

1. まえがき

管理型の最終処分場では、降雨により発生する浸出水を地盤に浸透させることのないように、表面遮水として遮水シート（ジオメンブレン）が用いられている。遮水シートが滑り落ちたり、強風で吹き飛ばされると表面遮水工の遮水機能を損なうことになるので、法面では遮水シートを適正に固定させる必要がある。このような目的で、天端や小段には固定工が設けられている。

法面に敷設された遮水シートには自重、強風による揚力、温度応力、廃棄物の埋立作業による荷重及び埋立廃棄物の圧縮による引きずり込み等の力が作用し、これらの合力が遮水シートから固定工に伝達されると考えられる。通常、固定工は遮水シートを天端や小段で、深さ30 cm～50 cm程度の大きさの固定溝に入れ込み、コンクリートや現地発生土で埋め戻しを行なうものとしているが、従来、固定工のサイズや構造については経験的に設計・施工されており、固定のメカニズムや固定工の抵抗力は良く知られていない。

本報告では、最終処分場の天端固定工を想定したさまざまな構造のフィールドモデルを用いて、平成8年度に実施した現場実験より、実験結果をまとめて報告する。

2. 使用材料の特性

ジオメンブレンは代表的な5種類を選定して用いた。それらの基本的な特性を表－1に示す。

表－1 ジオメンブレンの基本的特性

種類	厚さ mm	豊浦砂との摩擦 係数	短繊維不織布と の摩擦係数	1%割線弾性係数 kgf/cm ² (20℃)
HDPE	1.5	0.43	0.12	4940
EPDM	1.5	0.90	0.57	110
TPO	1.5	0.77	0.31	1440
PVC	1.5	0.86	0.72	94
アスファルト	4.0	0.91	0.80	120

また、ジオテキスタイルは厚さ10 mm、単位面積重量1200 gf/m²の短繊維不織布を用いた。

3. 試験方法

実験は栃木県芳賀郡芳賀町八ツ木 地先の宅地造成の切土部及び盛土部に、最終処分場の遮水シート天端を想定して図－１に示す断面形状を成型し、固定溝部に遮水シートを設置し、コンクリートを打設し、１週間の養生を行った。

地盤上に厚さ約 10 mm の鉄板に敷き木杭で固定し、さらに H 鋼を並べて鉄板に溶接し、H 鋼の上に引抜き試験機を設置し万力で固定した。遮水シートはコンクリート固定部から 130 mm 出し、幅 30 mm の取付金具を用いて引張用ベルトに接続し、遮水シートを固定工の端部から 100 mm の位置から引き抜く構造とした。引張用ベルトは厚さ約 3 mm の高強度繊維入りゴムシートを 3 枚重ねて用いた。

図－１ 固定部断面構造

引抜き試験は遮水シートと接続した引張用ベルトを引抜速度 3 mm/min にて引張った。計測は図－２に示すように、遮水シートの水平方向の変位をシートの先端に取り付けた変位計で、固定コンクリートの上下移動をコンクリートの前方及び後方に取り付けた２つの鉛直方向の変位計で、固定コンクリートの前後の移動をコンクリートの上部に取り付けた水平方向の変位計で測定した。

図－２ 変位計の設置位置

4. 試験結果と考察

4. 1 固定工のサイズの影響

盛土部にて、HDPEシートを用いて固定工のサイズを200 mm角、300 mm角、400 mm角、500 mm角の4種類を作成し、引き抜き実験を行なった場合の固定工前方の鉛直変位と荷重の関係を図-3に示す。固定工のサイズが大きくなるに従って最大荷重が増加していることがわかる。まず、200 mm角の場合には、ほぼ固定工の全体が抜け出し、鉛直変位が約20 mmを越えると荷重は低下している。次に300 mm角と400 mm角ではほぼ同様の挙動を示し、カギ型を示す箇所は固定工と遮水シートが剥離を生じたために、荷重が一時的に低下しているものと考えられる。したがって、固定工の鉛直変位と剥離が同時に進行していることがわかる。最後に、500 mm角の場合には、初期に剥離とみられる荷重の低下があるが、鉛直変位が約30 mm程度に達したところで、遮水シートの抜けだし破壊が生じた。

図-3 固定工のサイズの影響
(前方鉛直変位と荷重の関係)

図-4 固定工サイズの影響
(後方鉛直変位と初動荷重の関係)

ここで、固定工の動き出す状況としては、固定工の後方変位が固定工全体の持ち上がりを反映していることから、図-4の各曲線の立ち上がり状況をみて、鉛直変位が0.2 mmに達した時の荷重を固定工初動荷重とした。試験終了後に測定したコンクリート重量から算出した1 m当たりの固定工重量とともに表-2に結果をまとめる。

表-2 固定工サイズ実験結果

固定工サイズ	コンクリート重量 kgf/1 m当たり	固定工初動荷重 kgf/1 m当たり	最大荷重 kgf/1 m当たり	最大荷重時の固定工鉛直変位 mm
200 mm 角	98.6	118	341.4	29.4
300 mm 角	229.0	260	818.4	89.2
400 mm 角	360.2	324	111.4	102.1
500 mm 角	604.8	513	1158.0	34.1

固定工サイズと最大荷重の関係を図－５に、コンクリート重量と固定工初動荷重の関係を図－６に示す。図－５より、固定工サイズが２００ mm 角～４００ mm 角の場合には比較的直線的に最大荷重が増加しているが、５００ mm 角と４００ mm 角の差は少ない。また、図－６より、コンクリートの持ち上がりの発生について、コンクリート重量と固定工初動荷重を関係を見ると、ほぼ直線的な関係があることがわかる。

図－５ 固定工のサイズと最大荷重の関係

図－６ コンクリート重量と初動荷重の関係

4. 2地盤の影響(盛土と切土)

固定工サイズ３００ mm 角について、盛土と切土の両方の地盤で実験を行ったので、比較して図７～９に示す。図－７はHDPEシート、図－８はTPOシート、図－９はアスファルトシートについて示す。遮水シートの種類によって、最大荷重や曲線の形状等が異なっているが、盛土と切土の関係をそれぞれの種類についてみると、HDPEシートとTPOシートでは最大荷重は切土と盛土ではほぼ同じであったが、ある荷重に対する固定工前方の鉛直変位は盛土の方が切土よりも大きいことがわかる。この理由としては、切土部のコーン指数が２．８９～１０．５６であったのに対して、盛土部のコーン指数が１．０９～３．９８であり、盛土部は切土に比較して地盤の強度が弱いために、固定工

図－７ 盛土と切土の比較
(HDPEシート)

図－８ 盛土と切土の比較
(TPOシート)

の背面の変形が大きく、固定工の回転が発生しやすいことが考えられる。また、アスファルトシートでは最大荷重は盛土より切土の方が大きく、鉛直変位量はHDPEシート等と同様の結果を示した。

図－ 9 盛土と切土の比較
(アスファルトシート)

4. 3 遮水シートの種類の影響

盛土部にて、固定工サイズ 300 mm 角について、5 種類の遮水シートについて実験した結果をまとめる。遮水シートの水平変位と荷重の関係を図－ 10 に、コンクリートの前方鉛直変位と荷重の関係を図－ 11 に示す。

図－ 10 遮水シートの種類の影響
(シート水平変位と荷重)

図－ 11 遮水シートの種類の影響比較
(鉛直変位と荷重)

実験では固定工の端より 100 mm の位置の遮水シートを引張る方法としたので、荷重に比較して伸びの大きい（弾性係数の小さな）種類である EPDM シート、PVC シートは引き抜き試験装置のストローク及び計測の問題から明確なピークを生じる手前で試験を終了した。図－ 10 は固定部からの遮水シートの剥離や抜け出しがなければ、長さ 100 mm × 幅 500 mm の長方形試験片による応力-

ひずみ曲線を意味するが、引抜きを進めるに従って、遮水シートはコンクリートから剥離して、抜け出す状況が確認された。PVCシートやEPDMシートでは顕著であった。

室内実験で20℃にて長方形（幅6cm×長さ10cm）の試験片で求めた応力とひずみと、現場実験でのシート水平変位からそれぞれのひずみに対応する荷重をまとめて表―3に示す。

表―3 応力とひずみの関係

種類	ひずみ	応力 kgf/cm ²	換算荷重 a kgf/m	現場実験 b kgf/m	比率 b/a
HDPE	1%	4.9	73.5	63	0.09
	5%	12.5	187.5	209	0.11
アスファルト	1%	1.2	48	37	0.77
	5%	8.9	356	91	0.26
EPDM	100%	2.4	360	143	0.40
	200%	3.5	525	243	0.46
PVC	100%	4.1	615	425	0.69
	200%	8.1	1215	617	0.51

表―3より、HDPEではひずみ1%及び5%に相当するシート端部の水平変位1mm、5mmでは室内実験と現場実験での比率が約0.1と小さく、概ね約10倍の長さ、すなわち水平変位が1mmの場合には9mm、5mmの場合には45mmに相当するシートがコンクリートから剥離して伸びていることが予想される。また、アスファルトシートでは1%と5%の時の比率が大きく異なることがわかる。一方、比較的伸びやすい（弾性係数が小さい）PVCシートやEPDMシートでは、ひずみが100%及び200%でみると、比率が0.4～0.69であり、概ね約2倍の長さ、すなわち100%の場合には100mm、200%の場合には200mmに相当するシートがコンクリートから剥離して伸びていることが予想される。このように現場実験では、遮水シートは引き抜きを行うと、剥離及び剥離部の引き抜けが発生していることがわかる。

4. 4不織布との組み合わせの影響

遮水シートの敷設では保護マットとして不織布を用いることが多いので、不織布と組み合わせた構造を持つ実験を切土地盤で固定工サイズ300mm角にて行った。実験モデルとして、不織布を上側、不織布を下側、不織布を上下両側に設置したものについて行った。遮水シートはHDPEシートを用い、両側についてのみアスファルトシートも用いた。実験結果を表―4にまとめる。

表―4 最大荷重の不織布の影響 kgf/m

種類	不織布なし	下面不織布	上面不織布	両面不織布
HDPE	894.0	766.4	136.4	95.4
アスファルト	1776.4	—	—	1407.4

HDPEシートは不織布を用いた場合には、不織布なしの場合に比較して、いずれも最大荷重が低下している。特に上面すなわちコンクリート面に接触する位置に不織布を設置したものは、遮水シートが抜け出すために大幅に低下し、固定工初動荷重に達しないので、固定工の変位は生じていない。両面の場合にはなおさらであり、約1/10にまで低下している。これらのことから、不織布なしの場合ではコンクリートとの密着効果によって、最大荷重を発生していたことがわかる。

ここで、HDPEシートで両面不織布の場合について摩擦係数との比較を検討する。コンクリートの重量が約202kgf/mであり、不織布とHDPEシートとの摩擦係数が0.12であるから、単純に両面の摩擦を算出すると

$$202\text{kgf} \times 0.12 \times 2 = 48.5\text{kgf/m}$$

となり、表—4の結果95.4kgf/mに比較すると約半分である。したがって、コンクリートの荷重による摩擦以外にも引き抜き抵抗となる要素があることが予想される。一例としてエッジ効果が考えられる。

またアスファルトシートでは、両面不織布の場合でも、最大荷重は大幅には低下していない。これはアスファルトシートが不織布と良く密着するためであると考えられる。

5. 固定工抵抗カメカニズムについて

5.1 固定工抵抗カ発現のプロセス

固定工抵抗カは大別して2つのプロセスが考えられる。まず、固定工に引き抜き荷重が作用し、固定工が動き出す段階（初動段階）がある。さらに引き抜き荷重が増加すると、持ち上がりや引き抜けといった現象が発生し、最大荷重を生じる段階（極限段階）がある。さらに、引き抜きを続けると、荷重が直ちに消失する場合と抵抗を続ける場合があるが、抵抗を続ける場合でも低下傾向を示す。

5.2 固定工初動段階

本実験での代表的な固定工の変形状況として、盛土地盤のHDPEシート、固定サイズ300mm

図—1 2 固定コンクリートの動き
(剥離進行型破壊)

図—1 3 固定コンクリートの動き
(瞬時剥離型破壊)

角、及び500mm角について図—12、図—13に示す。

図—12及び図—13ではコンクリートの前方と後方の鉛直変位と荷重の関係を表しているが、コンクリートの前方と後方では、前方の方が変位が大きく、コンクリートが後方へ回転しながら持ち上がっていることがわかる。すなわち、固定工の初動は引張り荷重がコンクリートの重量の約1/2に近い荷重が作用すると、まず前方の微少浮き上がりによる回転が生じ、コンクリート重量に相当する以上の荷重が作用すると全体に持ち上がりが生じる。このように回転と浮き上がりが進行しながら極限段階へと進行すると考えられる。

5.3 極限段階

固定工の極限段階では破壊の形態によって以下の4つのモードが考えられる。

- モードA. 遮水シートの切断
- モードB. 固定コンクリートの抜けだし
- モードC. 固定部前堤及び背面の土の崩壊
- モードD. 固定コンクリートと遮水シートの滑り（剥離）

本実験ではモードAはなかったが、モードB～Dは複合的に発生したが、最大荷重に対してはモードCが関係していた。図—12の例では荷重が増大するにしたがって、HDPEシートはコンクリートから断続的に剥離し、カギ型を示し、ピークと見られるほぼ一定の値になっている。図—12では計測上の制限から鉛直変位が100mmの手前で試験を終了している。また、図—13に示した固定工サイズ500mmの例では荷重が1158 kgf/mまで達すると、遮水シートの引き抜け破壊が発生し、瞬時にコンクリートが落下している。このようにコンクリートと遮水シートの密着が最大荷重を高める効果を持っていることがわかる。

6. まとめ

(1) 固定工のサイズの影響

固定工サイズは大きいほうが、固定工の初動荷重及び最大荷重が大きくなることがわかった。また、コンクリート後方の鉛直変位が0.2mmとなったときの荷重を初動荷重とすると。初動荷重はコンクリート重量にほぼ相当することがわかった。

(2) 地盤の影響

盛土と切土では、最大荷重はHDPEシート及びTPOシートではほぼ同じであった。また、盛土の方が地盤の強度が弱いことから、背面の土の変形が起こりやすく、固定工の回転が大きくなったと考えられる。

(3) 遮水シートの種類の影響

本実験では固定工端部から100mmの位置を引っ張る方法で引き抜き実験を実施したので、この部分の遮水シートの引張特性が大きく影響した。比較的弾性係数の大きなHDPEシートでは固定コンクリートに荷重が作用したが、弾性係数の小さなEPDMシートでは遮水シートの変形が大きく、極限段階に至るまでの荷重は実験できていない。

また、引き抜き荷重と変位の現場実験結果と室内実験の結果を比較すると、現場実験でのシートの水平変位に相当する荷重は室内実験での荷重に比較して小さいことから、コンクリートと遮水シートが剥離し、引き抜けが起こっていることが考えられる。

(4) 不織布との組み合わせの影響

不織布を用いると最大荷重は低下することがわかった。特に遮水シートの上側すなわちコンクリートと接触する面に不織布を用いると大幅に低下し、両面に用いると用いない場合に比較して約1/10となることがわかる。しかしながら、アスファルトシートでは不織布との密着が発現するために大幅な低下はみられなかった。

(5) 固定工抵抗力発現のメカニズムについて

初動段階と極限段階に大別できる。初動段階では後ろ向きの回転を伴いながら、持ち上がりが生じることがわかる。極限段階では4つの破壊モードが考えられるが、本実験では固定部背面の土の崩壊の影響が大きいことがわかった。

7. あとがき

本実験では固定能について実験的に研究し、固定工抵抗力が従来考えられている程度すなわち、固定工の重量に摩擦係数を掛け合わせたものに比較して大きな抵抗力を有することが明らかになった。また、当面、設計においては固定工の極限段階ではなく、初動段階の初動荷重を用いることを提案する。固定工の持ち上がりは設計断面を変えることになるだけでなく、曲線的な部分では遮水機能への影響が予想されるためである。また、極限段階に対しては遮水機能に大きな影響を与えるために、十分な安全率を確保する必要があると言える。

なお、本実験では固定工抵抗力を中心に検討したが、固定工抵抗力は本来、遮水シートに作用する力が固定工に伝達するのであって、どれだけの引き抜き力が固定工に作用するのかを今後議論する必要があると言える。一例として、本実験では変形が大きく、極限段階まで評価できなかったものとしてEPDMシートやPVCシートがあるが、これらの種類の遮水シートの場合には固定工には大きな力は作用しないと考えられる。

謝辞

本研究は、最終処分場技術システム研究会 設計グループ シート固定工分科会の活動の一環として実施したものである。現場を提供いただきました住友建設（株）ハツ木ニュータウン作業所 野崎所長、実験にご協力を願いました（株）新井組 熱野敏殿、（株）クラレ 浜田敏裕殿、筒中シート防水（株）海邊哲也殿、日本技術開発（株）大高達男殿、三星産業（株）清水禎一殿、東洋ゴム工業（株）宮地秀樹殿、宇都宮大学工学部 野本哲也殿、高本賢司殿、中村友香殿、阿保真喜子殿、ならびに研究会関係各位に深く感謝致します。

<参考文献> 1)今泉繁良・高橋悟・西形達明・横山幸満：埋め込まれた HDPEジオメンブレンの引抜き抵抗挙動の評価、土木学会論文集、No 511/Ⅲ-30、pp 155—162、1995 2)今泉繁良・内藤裕之・横山幸満・坪井正行：ジオメンブレンと豊浦砂との層間摩擦特性、土木学会第50回年次学術講演会、1995