

(3) シート固定工検討書

遮水シートには気象条件、地盤状態、および埋立て等の周辺環境の影響を受けて各種の応力が生じる。遮水シートに圧縮応力が生じると、遮水シートにシワ等の変形が生じるが、遮水シートの安全上何ら問題なく、遮水シート端部に接続された固定工には大きな力は働かない。しかし、遮水シートに引張応力が生じると遮水シートの破断あるいは固定工に力が伝達されて固定工が抜け出そうとする。

遮水シートに引張応力が発生する要因としては、以下の事項が挙げられる。

- i. 遮水シートの自重による力
- ii. 温度変化（低下）による収縮力
- iii. 埋立廃棄物の締固めによる引込み力
- iv. 埋立時の重機の接近による荷重増加

遮水シートを多層構造とする場合、各層に作用する張力の合計を求めることとなるが、シート間の摩擦抵抗及び下層と地山との摩擦抵抗を考慮すると、結果的には上層シートの自重しか作用しないこととなる。よって、上面遮水シートの自重を求める。

① 計算事例（「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」NPO、最終処分場システム研究会、p66～67）

〈例題〉法高が5 m、勾配が1:1.5の法面（ $\theta=33.69^\circ$ ）に敷設された遮水シートから発生する引張力を求める。

遮水シートはファーストライナーをHDPEシート（厚さ1.5mm）、セカンドライナーをEPDMシート（厚さ1.5mm）とした二重シート構造とし、下地とシートの間および2枚のシートの上に単位面積質量 1.2kg/m^2 の短繊維不織布を用いることとする。

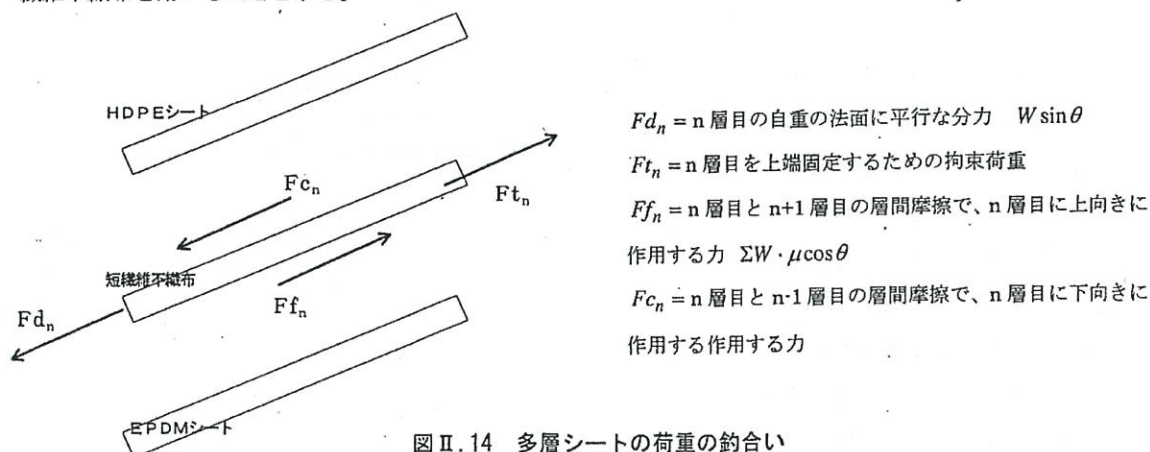


図 II.14 多層シートの荷重の釣り合い

まず、各層の自重 W を求めておく。式(II.5)より、

HDPEシートは $W = 0.0015 \times 9.5 \times 9.1 = 12.97\text{kg/m}$

EPDMシートは $W = 0.0015 \times 12.1 \times 9.1 = 13.21\text{kg/m}$

短繊維不織布は $W = 1.2 \times 9.1 = 10.92\text{kg/m}$

単層の場合の遮水シートの天端に作用する力 Fd_n は図II.14において、 $Fc_n=0$ と考えて、 $F = W \cdot (\sin \theta + \mu \cdot \cos \theta)$ であるが、多層の場合には上層から順に、伝達される力を考慮して算出する必要がある。

法面に平行な下向きの力と上向きの力が釣り合っているとして、図II.14に基づいて最上層から最下層まで各層について下向きの力と上向きの力を求める。すなわち、図II.14に示したように、 Fd_n は自重の法面に平行な下向きの力であり、 $W \sin \theta$ で求めることができる。また Fc_n は2層目以降の n 層における $n-1$ 層と n 層の層間摩擦であり、 $n+1$ 層と n 層の間の層間摩擦の反力で、法面に平行な下向きの力となる。法面に平行な上向きの力は n 層と $n+1$ 層の層間摩擦であり Ff_n で表わす。天端に作用する上向きの力を Ft_n で表わす。

層間摩擦力は法面に垂直な力に摩擦係数を掛け合わせたもので、法面に垂直な力は最上層から n 層までの自重の垂直成分の和となる。また、 Ff_n は法面に垂直な力と摩擦係数の積により最大摩擦値を求めるが、下向きの力である Fd_n と Fc_n の和より大きい場合には $Ff_n = Fd_n + Fc_n$ となり、遮水シートの天端に張力は働かないとする。

このような手順に基づき、各層について上層より順に算出すると、表II.11となる。

表Ⅱ.11 天端張力の算出例

単位：N/m

項目	① W 自重	② $W' = \Sigma W \cos \theta$ 法面に垂直な自重	③ $F_{dn} = W \sin \theta$ 法面に平行な自重	④ $F_{cn} = W \mu \cos \theta$ 伝達滑動力	⑤ 下向きの合力 ③+④	⑥ $F_{fn} = W'/\mu$ 層間摩擦力	⑦ F_{tn} 端末に作用する力 ⑤-⑥
HDPE	127.1	105.8	70.5	0	70.5	12.7	57.7
不織布	107.0	194.9	59.3	12.7	72.0	111.0	0
EPDM	129.5	302.7	71.7	72.0	143.7	172.6	0
不織布	107.0	391.8	59.3	143.8	203.1	223.3	0

*HDPE と不織布 $\mu=0.12$ 、EPDM と不織布 $\mu=0.57$

以上のように、固定工に作用する力は上層の HDPE シートの端末に 57.7N/m(5.89kgf/m)が作用するのみである。

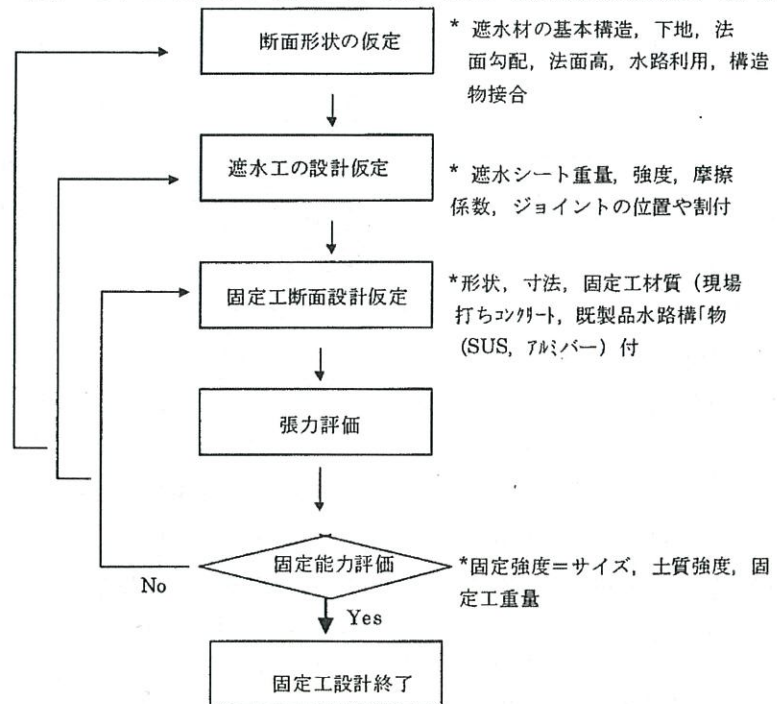
この例題の計算結果では、固定工に働く張力は小さいが、遮水工の構造が異なる場合や急勾配の場合（ θ が大きい場合）、法長が長い場合には張力が増大する。

②端部固定工の設計フロー（「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」NP0、最終処分場システム研究会、p73～75）

(1) 端部固定の設計フロー

遮水工の設計は、以下の手順で行う。

埋立地の設計では、まず調査・計画の結果から、立地条件を考慮して、法面勾配等の断面形状を策定する。次に遮水工を検討して、遮水工断面を決定する。次に固定工断面を決定する。遮水工断面から、遮水工の諸元を考慮して固定工に作用する張力評価を行い、固定工断面から固定能力を予測して、張力他の各要素についての検討を行い固定能力の評価を実施する。この結果、固定工が要求される性能を有する場合には固定工断面を決定し、満足しない場合には、前段階の固定工断面の決定、遮水工断面の決定、および断面形状の決定に戻って、再度検証する。



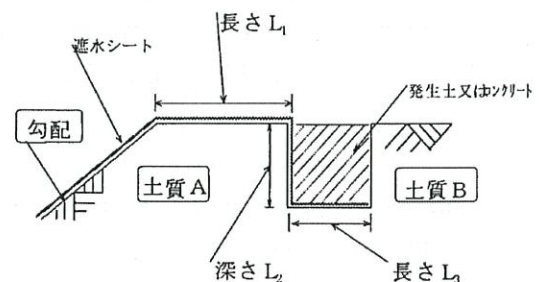
図Ⅱ.24 固定工設計のフロー

(2) 固定工引き抜き強度の評価

遮水シート端部の埋設による固定は、地盤強度や法面勾配との関連が深い。遮水シート固定工の設計に必要な諸元について図Ⅱ.25に示す。

a. 法肩の土質強度

遮水シートには法面に沿った下向きの引張力が働くが、端部が埋設されているので、図Ⅱ.26で示すように、法肩部全体に下向きの力が作用する。したがって、法肩部の強度が第一に重要であると考えられる。法肩の強度とは図Ⅱ.25の法肩長さ L_1 の大きさと土質強度



図Ⅱ.25 シート端部固定工の設計に必要な諸元

を意味する。 L_1 が50cm程度で短い場合や盛土等で強度が弱い場合、さらに寒冷地の凍上等で地盤の強度が十分でない場合には、固定工に作用する力で法肩の崩壊が発生することがあるので注意を要する。なお、このような場合には法肩部の隅角部をコンクリート打設で補強することも必要となる。



図Ⅱ.26 法肩に作用する力

b.固定工の重量

遮水シートに生じる引張力は法肩部を経由して固定工（コンクリートまたは発生土）へと伝達される。固定工には上向きの力として働き、遮水シートと固定工との摩擦力（接着力）が固定部材を持ち上げようとする。さらに、この力が固定工の重量を越える大きさにまで達すると、固定工が上方に動きだす。したがって、初動荷重が重量に一致し、遮水シートと固定工との摩擦力（接着力）が大きく、かつ固定部材の重量が大きいほど固定工の固定力があるといえる。

固定工をコンクリートとし、コンクリートの単位体積質量を 2.35t/m^3 とすると、固定工のサイズと1mあたりの質量は表Ⅱ.17に示す値となる。

なお、固定コンクリートと遮水シートの間に不織布が介在すると、遮水シートとコンクリートの粘着力が少なくなるので、固定工を持ち上げる以前にシートが抜け出すこともあるので留意する必要がある。

また、多層の場合には遮水工の厚さの影響で実質的な固定工重量が減少し、重量が目減りするので注意を要する。

表Ⅱ.17 固定工サイズと質量

固定工サイズ	200×200mm	300×300mm	400×400mm	500×500mm	600×600mm
容積 m^3/m	0.04	1.09	0.16	0.25	0.36
質量 kg/m	94	211	376	588	846

〈固定工の計算例〉

HDPE シートおよび短繊維不織布をシートの下のみに用いた場合の固定工サイズを算出する。法勾配は1:1.5、法高5m、施工は冬期とする。

- ① シート自重の評価：前記例題と同様に、 20.58N/m (2.1kgf/m)
 - ② 温度低下による収縮力：表Ⅱ.13より、冬期荷重 $6,540 \times 0.7 = 4,580\text{N/m}$ (466.9kgf/m)
 - ③ 締固めによる引込み力：表Ⅱ.15より、 $6,810 \times 0.7 = 4,770\text{N/m}$ (486.5kgf/m)
- ただし、夜間の残留は 880N/m (90kgf/m)とする。
- ④ 重機の接近による引込み力：表Ⅱ.16より、 $1,040 \times 0.5 = 520\text{N/m}$ (53kgf/m)

以上より、昼間では①+③+④= $5,310\text{N/m}$ (541.6kgf/m)

また、夜間は①+②+③= $5,480\text{N/m}$ (559kgf/m)となる。したがって、 $L_2=L_3=500\text{mm}$ 角のコンクリート固定工が必要となる。

③シート自重

採用する遮水シートは合成樹脂系の「HDPE(高密度ポリエチレン)」であることから、単位体積重量は下表に示すHDPEとし、 9.5kg/m^3 となる。

表Ⅱ.9 遮水シートの単位体積質量の目安

単位: kg/m^3

種 類	EPDM	TPO	HDPE	PVC	TPU	アスファルト
単位体積質量	12.1	10.2	9.5	13.5	11.3	10.1

(出典:「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」NPO, 最終処分場システム研究会、p66 参照。)

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \text{(自重)} \quad \text{(厚さmm)} \quad \text{(単位体積重量)} \quad \text{(法長 1:2.0)} \\
 &= 1.5 \text{ mm} \times 9.5 \text{ kg/m}^3 \times 11.18 \text{ m} \\
 &= 15.932 \text{ kgf/m} \\
 &\approx 156 \text{ N/m} \quad \dots \dots \textcircled{3}
 \end{aligned}$$

④温度変化による収縮力

遮水シート天端に作用する温度変化に伴う張力は、冬季に最もたかいため、冬季の収縮力について算定する。

下表に示す数値は理論値であり、実際に発生する熱応力は理論値に比較して小さく、かつ、応力緩和があること、また施工時に冬季における収縮を考慮して、余裕を持たせて施工することから、この70%を見込む。

表Ⅱ.13 一日の温度変化で発生する熱応力の計算例

単位: N/m(kgf/m)

施工時期	冬季 (-5~35℃)	夏季 (25~70℃)	春秋季 (10~60℃)
HDPE	6,540 (667)	3,460 (353)	5,210 (532)
TPO	2,210 (226)	970 (99)	1,590 (162)
EPDM	130 (13)	70 (7)	100 (10)
PVC	270 (28)	30 (3)	90 (9)
TPU	340 (35)	550 (56)	330 (34)
アスファルト	610 (62)	60 (6)	200 (20)

* アスファルトシートは厚さ4.0mm、その他は1.5mmとして算出

(出典:「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」NPO, 最終処分場システム研究会、p69 参照。)

$$W_2 = 6,540 \text{ N/m} \times 0.7 = 4,578 \text{ N/m} \quad \dots \dots \textcircled{4}$$

⑤締固めによる引込み力

埋立廃棄物の荷重や圧縮によって発生する遮水シートの引込み力は、設計手法として確立されたものがないため、「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」(NPO, 最終処分場システム研究会)によるフィールドテストのデータを基に算定する。

表Ⅱ.15 フィールドテストの締め固めごとの引込み荷重

単位：N/m(kgf/m)

段階	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
HDPE	1,440 (147)	530 (54)	430 (44)	270 (28)	800 (82)	1,480 (151)	250 (26)	250 (26)	520 (53)	820 (84)	6,810 (695)
HDPE +不織布	1,260 (129)	250 (25)	230 (23)	270 (28)	1,040 (106)	1,210 (124)	270 (28)	280 (29)	460 (47)	610 (62)	5,890 (601)
EPDM	45 (4.6)	52 (5.3)	15 (1.5)	19 (1.9)	41 (4.2)	45 (4.6)	11 (1.1)	7 (0.7)	15 (1.5)	22 (2.2)	270 (27.6)
EPDM +不織布	39 (4.0)	25 (2.5)	11 (1.1)	9 (0.9)	37 (3.8)	37 (3.8)	17 (1.7)	25 (2.5)	54 (5.5)	66 (6.7)	319 (32.5)

(出典：「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」NPO, 最終処分場システム研究会、p70 参照。)

上表に締め固め毎の引込み荷重を示すが、1日の廃棄物搬入量と埋立ヤード全体を均一に埋立てる計画から、埋立1層当たりの埋立高を3.0mとする。また、引込み荷重は時間と共に緩和する傾向があることから、その70%を見込む。

高さ3.0m分(1~10段)の合計(1段30cm)：5,890N/m

$$W_3 = 5,890 \times 0.7 = 4,123 \text{ N/m} \quad \dots \textcircled{5}$$

⑥重機の接近による荷重増加

フィールドテストでの重機の接近により作用した引込み荷重を下表に示す。

実験では重機が遮水シートの20cmの位置まで接近したが、実際にはこのような作業はないと考え、この50%を見込むものとする。

表Ⅱ.16 重機接近による荷重増加

単位：N/m (kgf/m)

重機の種類	ブルドーザ	バックホウ
HDPE	1,040 (106)	920 (94)
HDPE+不織布	1,030 (105)	770 (79)
EPDM	11 (1.1)	11 (1.1)
EPDM+不織布	28 (2.9)	26 (2.7)

(出典：「廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック」NPO, 最終処分場システム研究会、p71 参照。)

(HDPE+不織布) (テスト値3m) (法高5m) (50%)

$$W_4 = 1,030 \div 3.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m} \times 0.5 = 858 \text{ N/m} \quad \dots \textcircled{6}$$

ここで、フィールドテストは勾配1:1.5、高さ3mの法面にHDPEシート及びEPDMシートを敷設し、関東ロームを30cm厚さで撒き出し、その都度締め固めを行い、遮水シートの天端に発生する荷重を測定したものである。

⑦固定工に作用する張力

以上の結果より、固定工に作用する張力を以下に示す。

区分	③シート自重 W_1	④温度変化による収縮力 W_2	⑤締め固めによる引込み力 W_3	⑥重機接近による引込み力 W_4	計
昼間	156N/m	—	4,123N/m	858N/m	5,137N/m
夜間	156N/m	4,578N/m	880N/m (夜間の残留力)	—	5,614N/m

⑧結果・能力検証

表Ⅱ.17 固定工サイズと質量より、□500×500の場合(588kgf/m=5,762N/m)である。

$$\therefore (\text{固定工} \square 500 \times 500 \text{ 重量}) 5,762 \text{ N/m} \geq 5,614 \text{ N/m} (\text{固定工張力：夜間}) \dots \textcircled{0.K}$$

したがって、固定工はコンクリート拘束式□500×500とする。