

1. 概要

たびたび発生するベントナイトシート上面でのすべりについて、土質工学的に解析する。特に、集中豪雨時にシート上面がすべる事例が最近続発しているの、これについて詳しく解析する。また、対策を提案する。

参考文献：(1) 廃棄物処分場の最終カバー Koerner and Daniel 共著 勝見・近藤共訳 技報堂
(2) ガンドシールデザインマニュアル Thiel and Daniel他著 近藤訳 技報堂

2. 計算

局所平衡法(ケース①～④)とDaniel法(計算①～⑨)で解析した結果を表-1に示す。

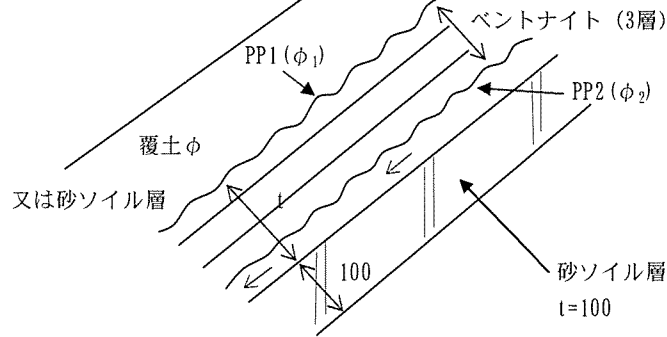
- (1) 覆土に水吐けの良い土を使い(PSR=0)、シート背面から河川の浸透水や雨水・地下水がくる斜面の安定をDaniel法で検討するに際し従来からある局所平衡法と比較検討を行う。
- (2) 局所平衡法では、少雨でもベントナイトシート上面の覆土が飽和してくると斜面に平行な浸透流で覆土がすべろうとする。浸透力は水中部の体積Vに比例する物体力である。粘着力C'が小さい場合には3割でも安全率SF=1.5ない。覆土が薄いと ϕ' の効果はでない。斜面の途中でも土塊のバランスが崩れると滑る。Daniel法では、基礎土の飽和のいかんにかかわらず、覆土の含水比の増加によって安全率は著しく低下してゆく。これは最下端にある覆土の三角地についての釣り合い計算をしているからである。基本的に覆土が等方性なら斜面の途中では滑らないとしている。
- (3) 局所平衡法では、シート上面で浸透流が発生すると表-1のように覆土の含水比の増加(PSR：平行水浸率の増加)によって、安全率は著しく低下してゆく。(ケース①)(SF=1.02~0.48)しかし上面に水がないと、含水比に影響されず安全率は変化なく安定している。満水時は浸透力が作用しないのでSFは1.02にもどる。(ケース③)(計算⑥、⑦)
- (4) 局所平衡法では、ベントナイトシート上面の一部覆土が飽和した時1:2等厚斜面、覆土厚30cm、 $\phi=27\sim30^\circ$ では、SF(安全率)1.0をきりすべる。(ケース①)(計算①～⑤)例えば、高さ1.5mの斜面でも、SF=0.62<1で不可となる。(計算⑤)
- (5) 局所平衡法では、ベントナイトシート上面に浸透流がないなら、斜面長L=22m、高さ10mの1:2等厚斜面でも、SF=1.05>1ですべらない。(ケース③)(計算⑥、⑦)
- (6) Daniel法では覆土の斜面長や覆土厚によっても安全率は変わる。シート上面の土塊の斜面部重量と最下端でのブロックとの主働と受働楔の釣り合いより安全率を求める手法であるから斜面長が長くなると安全率は下る。

3. 考察

- (1) 文献(2)のP210～P215でDanielはランドシールの上面における安定性がクリティカルな表面であるとし、浸透力は下側の接触面の安定性に何ら影響を有するものでないと言っている。
しかし局所平衡法のモデル解析結果では地形上(地山浸透水や背後河川等)の要因で間隙水圧(揚圧力)がかかると斜面の途中でも覆土の安全率は1をきり崩壊することから、シート下面からの背面圧(水圧・残空気圧等)による複合要因の事故例もあると考えられる。
「ため池整備」P158～P159に示す事例からも明らかである。
- (2) 貯水池内のベントナイトシートは膨潤しているので、ほぼ完全遮水材として機能し、水圧で押し付けられているので覆土はすべらない。
しかし、初期貯水時、貯留が急であると、シートを浸透した水は基礎に浸入し十分な膨潤時間がとれない時に、万一水位急降下するとすべることを意味する。
- (3) ベントナイトシートはゴムシートと異なり、貯水初期は膨潤に時間がかかり、水は堤体に浸透する。この状態ではシート上は飽和し、覆土はすべりやすい状態となる。降雨が続けば、まず滑ることを意味する。また、ため池の水がない時(工事期間中も含めて)大雨が降ると同様の状態になる。上面に土木シートを被せ保護することが肝要である理由である。
ひとたび膨潤すると $R=5 \times 10^{-9}$ cm/s 程度と不透水のため、水圧で押し付けられすべりにくくなる。
- (4) 多くの現場では、斜面長の最も弱い箇所で、背後からの雨水の浸透等によりすべり抵抗力が不足し、変状が発生し(クラック等の発生)土塊のバランスが崩れて、斜面の最下端から崩壊している。
Daniel法での浸透誘発型破壊はP200に詳述されている。覆土内の浸透と通過が主原因としている。ただしシート法面崩壊事故ではシート下面の地下水または土中の残空気圧等による、いわゆるシート膨れも原因の一つとして考慮されねばならない。

4. 対策

- (1) シート背面に砂ソイル層 ($t=10\text{cm}$) をつけ、シート厚さ t 内の粒子の散逸を防ぐため、3層構造 (PS2層要) のものを使用する。これにより排水面ができるのでシート下層が飽和しにくくなる。また土中内の空気もソイル層を通して上端部から外部に抜くことができる。

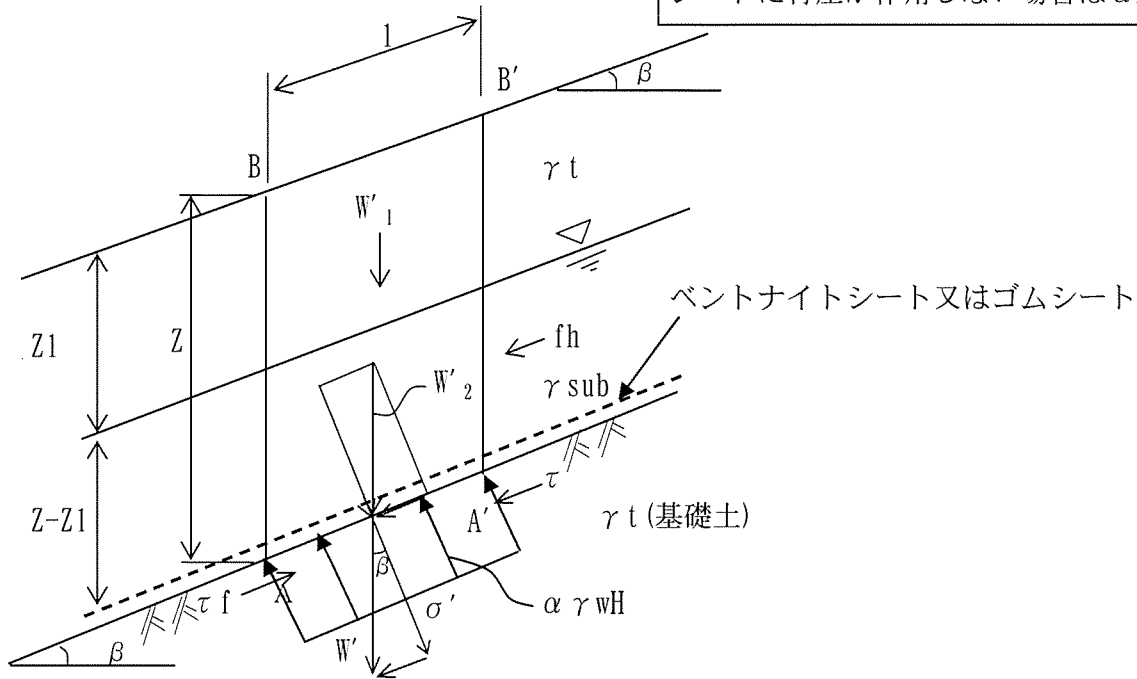


- (2) PP1は粗度の大きいものが良いが、覆土そのものの転圧の難しさと現地土砂は砂質土系が多いので、 $\phi 25 \sim 27^\circ$ あれば充分で $\phi_1 = \phi_2 = 35^\circ$ (PP1とPP2) あっても覆土の ϕ が小さいとあまり意味がない。 $\phi < \phi_1$ であると ϕ 層ですべるからである。
また ϕ 層ですべるからベントナイトシートの引張強度は安全率とは関係ない。
これは ϕ_2 層ですべるなら、シートの引張強度を安全率に考慮できるが、事故例をみるとほとんど ϕ 層で滑っているためである。
- (3) ゴムシートと異なり、シート下層が飽和すると非常に危険な状態になるので、上記の安全対策を行う。
この場合は、段切りまたは緩勾配の処置は不要で、シート施工長も短くなり経済性が上がり、その自己復旧性の特性が生かせることになる。
- (4) 一般のすべりに対して、SFは1.5以上であるから、覆土は飽和しにくい土である砂質/礫質土を使用すべきである。覆土の土質が悪い時でもPSR=0.5でSFは1.0以上あることが望ましい。排水の悪い覆土でかつ背面から湧水が来るような地形では、しばしば3割勾配、又はテーバ化及び段切り施工を必要とする場合がある。(計算⑧、⑨)

局所平衡法

半無限長斜面で解析

シートに背圧が作用しない場合は $\alpha H=0$



浸透圧 $fh = ih \gamma_w \cdot V = \sin \beta \cdot \gamma_w \cdot (Z - Z_1) \cos \beta$

(斜面平行)

$$W' = W'_1 + W'_2 = Z \cos \beta \cdot \gamma_t + (Z - Z_1) \cos \beta \cdot \gamma_{sub}$$

$$\sigma' = W' \cos \beta - \alpha \gamma_w H = Z \cos^2 \beta \cdot \gamma_t + (Z - Z_1) \cos^2 \beta \cdot \gamma_{sub} - \alpha \gamma_w H$$

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' + C'$$

$$= Z \cos^2 \beta \cdot \gamma_t \cdot \tan \phi' + (Z - Z_1) \cos^2 \beta \cdot \gamma_{sub} \cdot \tan \phi' - \alpha \gamma_w H \tan \phi' + C'$$

$$\tau = fh + W' \sin \beta = \gamma_w (Z - Z_1) \sin \beta \cdot \cos \beta + Z \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \gamma_t$$

$$+ (Z - Z_1) \sin \beta \cos \beta \gamma_{sub}$$

$\phi' > 0, C' > 0$ で地下水がある場合、斜面が安定であるとき次式が成り立つ。

$$SF = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{[(Z - Z_1) \cos^2 \beta \cdot \gamma_{sub} + Z \cos^2 \beta \cdot \gamma_t - \alpha \gamma_w H] \tan \phi' + C'}{(Z - Z_1) \sin \beta \cdot \cos \beta \left[\gamma_w + \gamma_{sub} + \frac{Z_1}{Z - Z_1} \gamma_t \right]} \geq 1.5 \text{ (滑動)}$$

ここで

SF : 安全率

β : 斜面の勾配

γ_{sat} : 土の飽和密度 t/m^3

γ : 土の湿潤密度 t/m^3

γ_{sub} : 土の水中密度 t/m^3 ($= \gamma_{sat} - \gamma_w$)

γ_w : 水の密度 t/m^3

C' : 土の粘着力 t/m^2

ϕ' : 土の内部摩擦角 $^\circ$

$$\frac{Z - Z_1}{Z} : \text{PSR (平行水浸率)} \quad \rightarrow \quad \frac{Z_1}{Z} = 1 - \text{PSR}$$

$$\frac{Z}{Z - Z_1} = \frac{1}{\text{PSR}}, \quad \frac{Z_1}{Z - Z_1} = \frac{1 - \text{PSR}}{\text{PSR}}$$

H : 背面水位 (外水位) m

α : 背圧係数 $0 \leq \alpha \leq 1$ でドレーン有るなら α は 0.5 以下

これを解くと

$$SF = \frac{\tau f}{\tau} = \frac{\left[PSR \gamma_{sub} + (1-PSR) \gamma_t \right] \tan \phi' + \frac{C' - \alpha \gamma_w H \tan \phi'}{Z \cos^2 \beta}}{\left[PSR \cdot \gamma_{sat} + (1-PSR) \gamma_t \right] \tan \beta}$$

ケース①

$\phi' > 0, C' = 0, \alpha H = 0, PSR = 1$ (地下水が地表面まである場合) とすると

$$\therefore SF = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad \text{--- ①式}$$

ケース②

$\phi' > 0, C' = 0, \alpha H = 0, PSR = 0$ (地下水がない場合) とすると

$$\therefore SF = \frac{\gamma_t \cdot \tan \phi'}{\gamma_t \cdot \tan \beta} = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad \text{--- ②式}$$

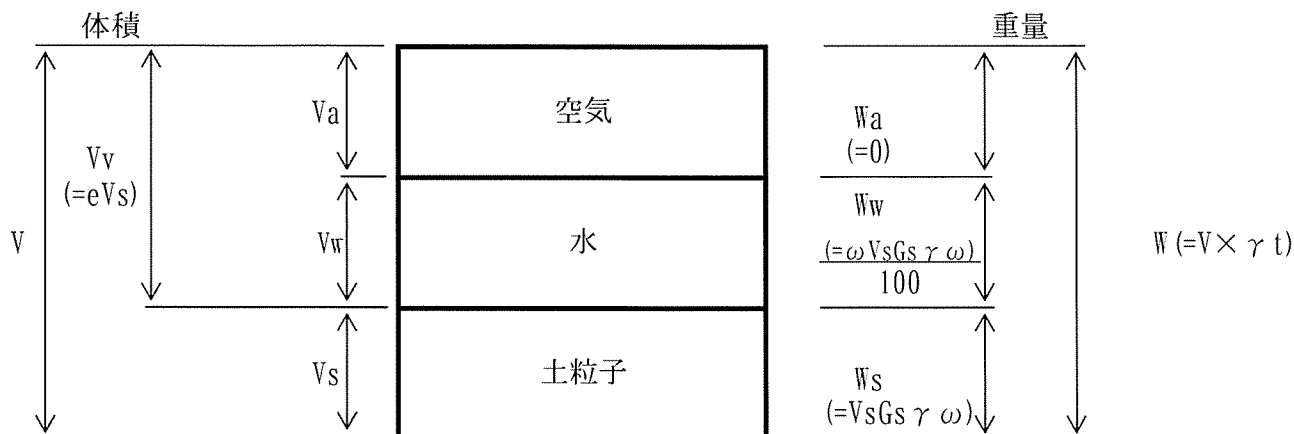
ケース③

一般的に $C' = 0, \alpha H = 0$ であるから

$$\therefore SF = \frac{\left[PSR \cdot \gamma_{sub} + (1-PSR) \gamma_t \right] \tan \phi'}{\left[PSR \cdot \gamma_{sat} + (1-PSR) \gamma_t \right] \tan \beta} \quad \text{--- ③式}$$

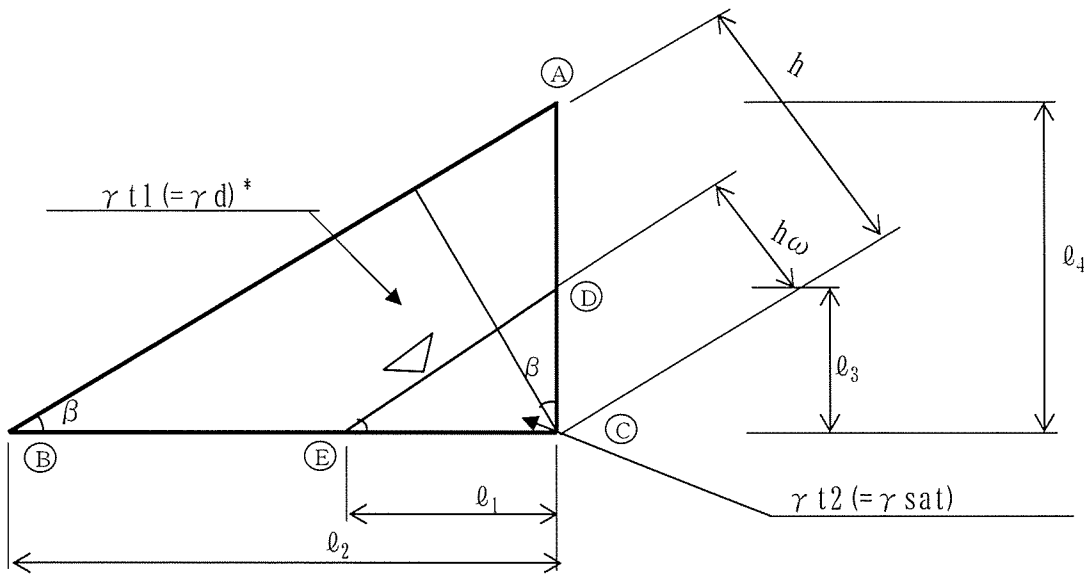
Daniel法 (有限長斜面で解析)

〔図-1〕 地盤工学会公式集より以下の通りである。



間隙比	:	e	=	$\frac{V_w}{V_s}$	
含水比	:	ω	=	$\frac{W_w}{W_s} \times 100$	= $\frac{S_r \cdot e}{G_s}$
乾燥密度	:	γ_d	=	$\frac{W_s}{V}$	= $\frac{G_s}{1+e} \gamma_w$
湿潤密度	:	γ_t	=	$\frac{W}{V}$	= $\frac{G_s + S_r / 100 \cdot e}{1+e} \gamma_w = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \left[1 + \frac{\omega}{100} \right]$
飽和密度	:	γ_{sat}	=	$\frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w$	
水中密度	:	γ_{sub}	=	$\gamma_{sat} - \gamma_w$	= $\frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w$
飽和度	:	S_r	=	$\frac{V_w}{V_v} \times 100$	= $\frac{\omega G_s}{e}$
土粒子比重	:	G_s			
水の密度	:	γ_w			

[図-2] 下図詳細は（廃棄物処分場の最終カバー；E. Daniel共著）赤本P203参照とする。



$$\frac{h\omega}{h} = \text{PSR}$$

(赤本P200より平行水浸率とよぶ)

$$\ell_1 = \frac{h\omega}{\sin\beta}$$

$$\ell_2 = \frac{h}{\sin\beta}$$

$$\ell_3 = \frac{h\omega}{\cos\beta}$$

$$\ell_4 = \frac{h}{\cos\beta}$$

- * □ A(B)E(D) は湿潤密度を使用すべきであるが、赤本にあわせて計算をわかりやすくするため乾燥密度 γd を採用している。
 △ D(E)C は浸透流により飽和している。

前述の設定により

△ A(B)C 内に含まれる水は、△ D(E)C 内の飽和土中の水 (= W_w) のみである。
 △ A(B)C 内の土粒子の重量は W_s である。

$$W_w = V_w \times \gamma \omega = \frac{e}{1+e} \times \frac{\ell_1 \ell_3}{2} \times \gamma \omega$$

$$W_s = W - W_w = \frac{\ell_2 \ell_4}{2} \times \gamma d$$

従って、△ A(B)C の含水比を ω とすると

$$\begin{aligned} \therefore \omega &= \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times \frac{\ell_1 \ell_3 / 2 \gamma \omega}{\ell_2 \ell_4 / 2 \gamma d} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times \frac{\ell_1 \ell_3}{\ell_2 \ell_4} \frac{\gamma \omega}{\gamma d} \times 100 \\ &= \frac{e}{1+e} \frac{h\omega / \sin\beta \cdot h\omega / \cos\beta}{h / \sin\beta \cdot h / \cos\beta} \frac{\gamma \omega}{\gamma d} \times 100 \\ &= \left(\frac{h\omega}{h} \right)^2 \frac{\gamma \omega}{\gamma d} \frac{e}{1+e} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times (\text{PSR})^2 \frac{\gamma \omega}{\gamma d} \times 100 \\ \therefore \text{PSR} &= \sqrt{\frac{(1+e)\omega}{e \times 100} \frac{\gamma d}{\gamma \omega}} \end{aligned}$$

従って、△ A(B)C の含水比 ω が上昇するとPSRも上昇する。

今、 $\gamma_{sat} = 1.90 \text{ t/m}^3$, $G_s = 2.65$, $\gamma_w = 1.00 \text{ t/m}^3$, 間隙比 e とすると、

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = 1.9 = \frac{2.65+e}{1+e} \times 1.00 \quad \therefore e = 0.8315$$

$$\gamma_t = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \left(1 + \frac{\omega}{100} \right) = \frac{2.65 \times 1.00}{1+0.8315} \left(1 + \frac{\omega}{100} \right)$$

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w = \frac{2.65}{1+0.8315} \times 1.00 = 1.447$$

$$\therefore \gamma_d = 1.447 \text{ t/m}^3$$

例えば $\omega = 31.4\%$ の時

$$S_r = \frac{\omega G_s}{e} = \frac{31.4 \times 2.65}{0.8315} = 100\%$$

$$PSR = \sqrt{\frac{(1+0.8315) \omega}{0.8315 \times 100} \frac{1.447}{1.00}} = \sqrt{0.03187 \times \omega} = \sqrt{0.03187 \times 31.4} = 1.00$$

ω (%)	0	7.8	10	17.28	20	31.4
PSR	0	0.5	0.565	0.742	0.798	1.000
γ_t	1.447	1.56	1.592	1.697	1.736	1.900
S_r	0.0	24.9	31.9	55.1	63.70	100.00
e	0.8315	0.8315	0.8315	0.8315	0.8315	0.8315

すなわち、大雨の後、覆土内の含水比が $\omega=31.4\%$ になると、飽和密度は $\gamma_{sat}=1.9 \text{ t/m}^3$ になる。

この時、 $PSR=1.00$ ということは、覆土厚 $h=30 \text{ cm}$ とすると、

$h_w = h \times PSR = 0.3 \times 1.000 = 0.30 \text{ m}$ である。

このような現象は、水はけの悪い土で、粘性土の場合に起こる。水中に土粒子が浮いた状態でシート直上で浸透力により覆土は滑りやすい状態となる。

別紙安定計算によれば、等厚斜面で覆土厚 $h=0.30 \text{ m}$ とし、地下水 0.17 m ($PSR=0.565$)、斜面勾配 $1:2.0$ で $\phi 27^\circ$ の時、 $F_s=0.70 \sim 0.74 < 1.0$ out! である。現実には、ある程度覆土内の水は排出され、粘着力もあって、すべらないケースもあるが、非常に危険な状態にかわりない。

このPSRは覆土の中の地下水の集中具合によって安全率が変化することを示すものである。

上式で、 $PSR=0.564$ とすると $\omega=10.00\%$ になるが、ベントナイト表面で充分浸透誘発すべり現象を引き起こす数値である。

以上のことから、覆土が砂質土/礫質土の時は、覆土内の排水は水位降下とともに行われるが安全面を考慮してPSRを求め $F_s=1.5$ 以上で設計する。

出展:廃棄物処分場の最終カバー 博見・近藤共訳 技報堂

記号	内容	単位	仕上り2割	仕上り2.5割	仕上り3割
WA	主働楔の全重量	KN/m	15.08	18.23	21.46
Wp	受働楔の全重量	KN/m	1.75	2.03	2.34
NA	主働楔の破壊面に垂直な有効力	KN/m	9.29	11.65	14.00
γ_{sat}	覆土の飽和単位体積重量	KN/m ³	19.00	19.00	19.00
γ_{dry}	覆土の乾燥単位体積重量	KN/m ³	14.455	14.455	14.455
γ_w	水の単位体積重量	KN/m ³	10.00	10.00	10.00
H	斜面先から測った斜面の鉛直高さ	m	1.50	1.50	1.50
Hw	斜面先から測った自由水面の鉛直高さ	m	0.00	0.00	0.00
Uh	両楔に作用する水平方向の間隙水圧の合力	KN/m	0.11	0.11	0.11
Un	斜面に垂直に作用する間隙水圧の合力	KN/m	4.25	5.32	6.39
Uv	受働楔に作用する鉛直方向の間隙水圧の合力	KN/m	0.23	0.28	0.34
h	覆土の厚さ	m	0.30	0.30	0.30
hw	斜面に垂直な方向の自由水面の高さ	m	0.15	0.15	0.15
L	ジオメンブレンに沿って測定される斜面長	m	3.35	4.04	4.74
β	ジオメンブレン下の土の傾斜角	°	26.57	21.80	18.43
ϕ	覆土の摩擦角	°	27.00	27.00	27.00
δ	覆土とジオメンブレン間の接触面摩擦角	°	30.00	30.00	30.00
Ca	主働楔の覆土とジオメンブレン間の付着力	KN/m	0.00	0.00	0.00
ca	主働楔の覆土とジオメンブレン間の付着応力	KN/m ²	0.00	0.00	0.00
C	受働楔の破壊面に沿った粘着力	KN/m	0.00	0.00	0.00
c	覆土の粘着力	KN/m ²	0.00	0.00	0.00
Fs	覆土のジオメンブレン上のすべりに対する安全率		0.96	1.16	1.37
nI	覆土の前法勾配	割	2	2.5	3

$$a(Fs)^2 + b(Fs) + c = 0$$

$$Fs = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} > 1.5 \quad \begin{matrix} \text{(ため池整備p49)} \\ \text{(擁壁工p34)} \end{matrix} \quad \text{常時}$$

a=	$WAsin\beta \cos\beta - Uh\cos^2\beta + Uh$	6.054	6.303	6.451
b=	$-WAsin^2\beta \tan\Phi + Uhsin\beta \cos\beta \tan\phi$ $-NA\cos\beta \tan\delta - (Wp - Uv)\tan\Phi$	-7.09	-8.40	-9.77
c=	$NA\sin\beta \tan\delta \tan\phi$	1.222	1.273	1.303

(例題) 203ページ

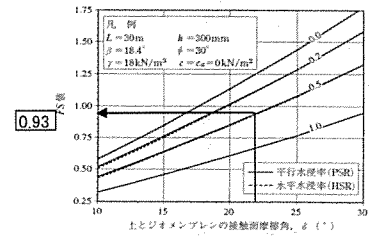


図 5.18 異なる水浸率に対する覆土の安定性を求めるための設計曲線

$$HSR = \frac{Hw}{H} = \frac{0.15}{0.30} = 0.5$$

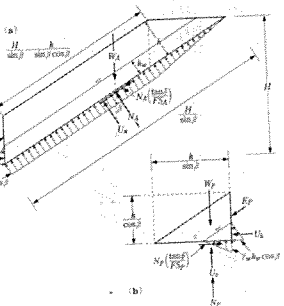


図 5.17 浸透水が斜面に平行に蓄積する場合の覆土の自由体図