

1. 強度定数

(基準書 第3章、3.3.3(4)関連)

1.1 強度定数等の適用

1.1.1 強度定数等の区分

強度定数は、土の力学的性質を表すもので、粘着力 (c 又は c') とせん断抵抗角 (ϕ 又は ϕ') に区分する。

なお、安定計算を行うにあたっては、強度定数のほかに単位体積重量 (γ_t) 等の物性値についても把握しておく必要がある。

1.1.2 基本的な考え方

安定計算における強度定数等の設定は、原則として、土質試験の結果と逆算法から決定する。

なお、土質試験を行うための試料採取ができない等の理由によりやむを得ない場合には、近傍での採用実績や地質に応じた一般値を参考に、逆算法によって強度定数を決定する。なお、粘着力の設計値については、地すべり層厚から決定する方法があるが、新第三紀層の初生すべり以外では適用に留意が必要であり、特に、破碎帯地すべりや層厚25m以上の規模の大きな地すべりに対して適用する場合は十分に注意する必要がある。

強度定数を調べるための土質試験には、圧密条件や排水条件によって、全応力表示の強度定数と有効応力表示の強度定数を求める方法がある。有効応力とは土粒子に作用する応力を指し、これと間隙水圧の和を全応力という。

一般に、土は荷重によって変形(圧縮)するが、透水係数が小さい飽和土の場合、土の圧縮過程で時間の遅れを伴った排水が起こる。このことを圧密といい土の排水と密接に関わっている。荷重に伴う圧縮が進行している間は、静水圧より大きい過剰間隙水圧が生じており、静水圧に戻るにしたがい過剰間隙水圧は消散し、その分有効応力が増大する。

このように、圧密と排水はせん断応力に影響しており、これらの条件を加味したせん断試験によって有効応力表示の強度定数を求めることができる。

(1) 全応力表示の強度定数 (c , ϕ)

全応力表示の強度定数は、非圧密非排水試験(UU試験)により求められた強度定数で、主に、排水を許さない状態を想定した粘土地盤の盛土の安定等、短期的な安定計算に適用される。

(2) 有効応力表示の強度定数 (c' , ϕ')

有効応力表示の強度定数は、間隙水圧を測定しながらの圧密非排水試験($\overline{CU}$ 試験)又は圧密排水試験(CD試験)により求められた強度定数で、間隙水圧を考慮する長期的な安定計算に適用される。

なお、強度定数等を決めるための試験については、技術書「IV資料編、5.1 強度定数を推定するための試験」を参照する。

1.1.3 安定計算に用いる強度定数

安定計算に用いる強度定数は、すべり面に作用する間隙水圧の条件に応じて、全応力表示と有効応力表示の強度定数を選択する。

全応力解析では間隙水圧の変化を考慮しないのに対し、有効応力解析では間隙水圧を考慮した計算をする。一般的に、地すべりの安定計算は、地下水位（間隙水圧）を考慮して計算し、対策工を検討する際にも地下水排除工等地下水位を指標とすることが多い。したがって、通常は有効応力表示の強度定数を適用する。

地すべりを対象として室内試験を行う場合、有効応力表示の強度定数として、ピーク強度、完全軟化強度及び残留強度を求めることが想定される。ピーク強度はすべり面が形成されておらず変位がほとんど生じていない初生地すべり等の計算に適用することがあり、変位が大きい地すべりではあまり使用されない。一方、移動量が大きく活発に活動している地すべりでは、ひずみの増加に伴い応力がほぼ一定値（残留値）に近づくため、この値に近い残留強度を用いた方が適切な場合が多い。ただし、実際の地すべりではこの中間の値を示すことが多く、地すべりの状態も踏まえた上でそれぞれの値を吟味し、計算に用いる強度定数を設定する必要がある。

1.1.4 全応力表示の強度定数

全応力表示の強度定数を求めるには、すべり面粘土の不攪乱試料（地層の状態をそのまま保持した試料）を採取し、非圧密非排水（UU）条件下で三軸圧縮試験を実施する。

また、一軸圧縮試験（野外でベーンの挿入が可能な場合にはベーンせん断試験）によっても簡便に求めることができ、飽和粘土では一軸圧縮強度 q_u から次式を用いて算出する。

$$c_u = 1/2 \cdot q_u \quad (\text{ただし、} \phi_u = 0)$$

なお、同一の土質であっても、圧密の程度により c_u の値は変化するので、検討対象とする地層の条件を踏まえて試料を採取し、試験することが重要である。

なお、全応力表示の強度定数は、標準貫入試験により求められるN値を用い $c = (6 \sim 10) \text{ N (kN/m}^2\text{)}$ として概略の値を推定することがある。

1.1.5 有効応力表示の強度定数

有効応力表示の強度定数として、残留強度、完全軟化強度及び不攪乱試料のピーク強度の3つがあり、実際の安定計算に際しては、条件に応じてこれらのうちの1つ、又はこの中間の値を採用する。

(1) 残留強度

残留強度は、すべり面が形成され、すべり面に沿って粘土粒子の再配列が起きている場合に発揮される強度である。（図-3.1.1）

わが国の地すべりは再活動地すべりが多いと言われており、再活動地すべりでは、この値を設計数値として用いる場合が多い。一般には、残留強度まで強度が低下した場合には粘着力が0又は非常に小さい値になっている場合が多いといわれている。これまでの事例によれば、深度20mないし30m程度までのすべり面に作用している垂直応力レベルでは、 $c'_r = 0$ ないし 10 kN/m^2 程度である。

(2) 完全軟化強度（正規圧密試料のピーク強度）

完全軟化強度は、泥質岩がその続成作用の過程で受けた過圧密の履歴の影響が消え失せて、最

初の堆積時の正規圧密状態で発揮する強度であり、いわば過圧密粘土の正規圧密強度ともいえる強度である。

(3) 不攪乱試料のピーク強度

すべり面を含まない場合は、地すべり以外の一般土木構造物ではこの値を設計数値として用いることが多い。まれな例として、ひび割れの少ない粘土斜面の地すべりがこの強度で発生した事例があるが、地すべりでこの強度が設計数値として用いられることは少ない。

すべり面を含む場合は、完全軟化強度又は残留強度まで強度低下している場合があり、この値を設計数値として用いる。

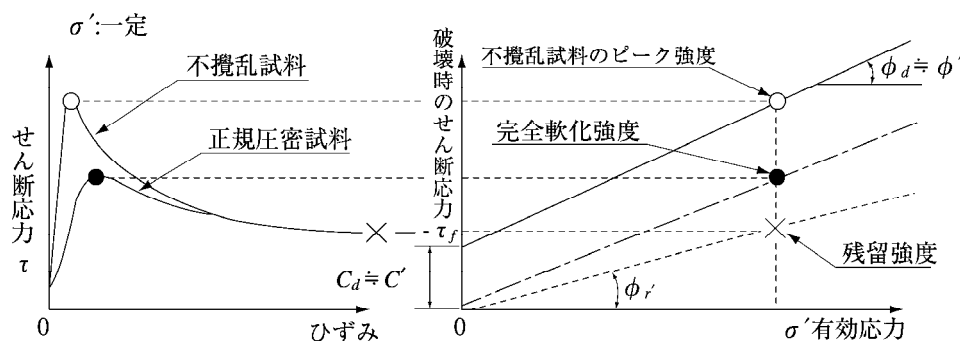


図-3.1.1 土の強度

1.1.6 単位体積重量

単位体積重量は、土塊の構成材料、岩質や風化・変質の程度等によって大きく変化する。地すべり対策を検討する際は、一般に湿潤状態の単位体積重量が用いられることが多く、土塊中の含水状態も考慮して設計値を決める。

単位体積重量の設定によっては、安定計算結果に影響し対策工に期待する抑止力を大きく見積もってしまう可能性もある。したがって、設計値の妥当性については十分留意する。

なお、水没斜面においては、一般に飽和単位体積重量（ γ_{sat} ）が用いられる。

図-3.1.2、表-3.1.1は室内試験によって求めた湿潤密度と地質調査時のコア箱から重量を計測し求めた湿潤密度の事例である。庄内あさひ地区（山形県）では複数の岩種が分布していたことから、それぞれについて単位体積重量を設定する必要があるため、そのために室内試験と現地計測を実施して湿潤密度を求め、湿潤密度に重力加速度（ g ）を乗じることにより計算に用いる単位体積重量を決定した。

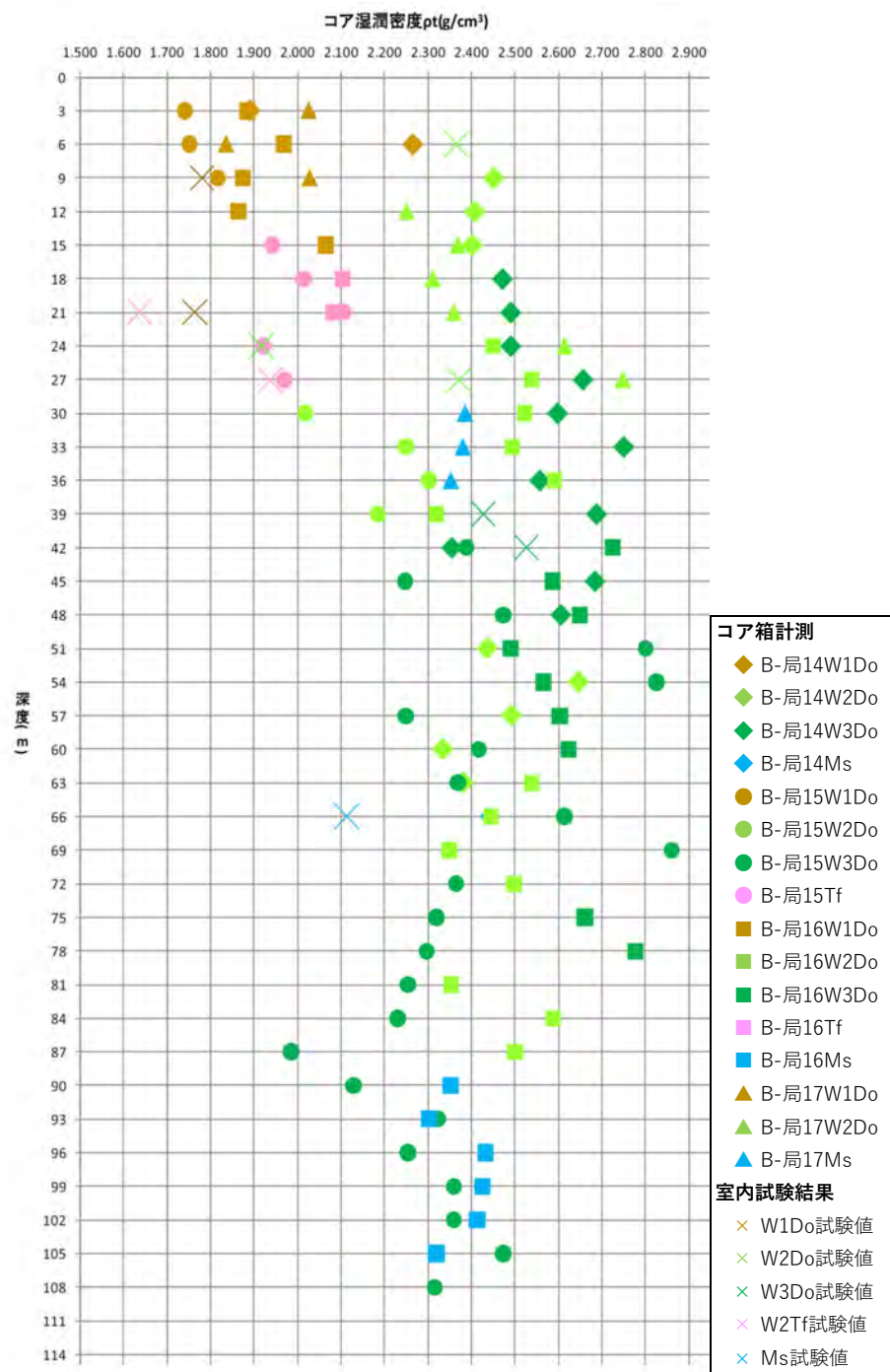


図-3.1.2 湿潤密度の測定例（庄内あさひ地区（山形県））

表-3.1.1 コア箱単位測定によるコア湿潤密度と室内岩石試験による湿潤密度
(庄内あさひ地区(山形県))

区 分	特 徴	コア箱重量測定による コア湿潤密度 $\rho_t(\text{g}/\text{cm}^3)$	室内岩石試験による 湿潤密度 $\rho_t(\text{g}/\text{cm}^3)$	B-1 ブロック	D ブロック
強風化粗粒玄武岩 (W1Do)	全体に褐色化し、軟質、砂状を呈する強風化岩の様相を呈する区間。湿潤密度値は $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 以下が主体。	1.742~2.266 平均値: 1.920 (n=14)	1.764~2.365 平均値: 1.970 (n=3)	2.192 g/cm^3	2.351 g/cm^3 $\downarrow \times 9.80665\text{m}/\text{s}^2$ 23.06 kN/m^3
風化粗粒玄武岩 (W2Do)	灰褐色、原岩色系を呈する風化岩。部分的に軟質部、砂状部を挟在するが、全体的には片状から塊状を呈する破砕状区間。湿潤密度値は $2.0\sim 2.5\text{g}/\text{cm}^3$ が主体。	2.017~2.860 平均値: 2.429 (n=34)	1.918~2.371 平均値: 2.237 (n=5)	$\downarrow \times 9.80665\text{m}/\text{s}^2$ 21.50 kN/m^3	
弱風化粗粒玄武岩 (W3Do)	原岩色系呈し、比較的新鮮な様相を呈する区間。短柱状~棒状コア呈し、コア質は硬質。湿潤密度値は $2.3\sim 2.7\text{g}/\text{cm}^3$ の範囲が主体。	1.985~2.860 平均値: 2.487 (n=40)	2.427~2.570 平均値: 2.508 (n=3)		
凝灰岩 (Tf)	褐色~白灰色系を呈し軟質で湿潤密度値は $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 以下が主体。湿潤密度的には強風化粗粒玄武岩層 (W1Do) と類似しているため、強風化粗粒玄武岩層に含めた。	1.921~2.106 平均値: 2.020 (n=7)	1.637~1.937 平均値: 1.787 (n=2)		
泥岩 (Ms)	原岩色を呈する泥岩、砂岩泥岩互層。風化~弱風化に相当するが、亀裂の発達した区間も見られる。湿潤密度値は $2.3\sim 2.4\text{g}/\text{cm}^3$ が主体。	2.301~2.441 平均値: 2.381 (n=10)	2.113~2.229 平均値: 2.171 (n=2)		

1.2 強度定数等の設定

1.2.1 土質試験結果が得られている場合

c' – ϕ' 関係図上で強度定数を求めることができる。

土質試験によってA) 不攪乱試料のピーク強度、B) 完全軟化強度、C) 残留強度が得られている場合は、 c' – ϕ' 関係図上にあらかじめそれぞれの点をプロットしておく。標準的な地すべり地形の緩傾斜のすべりでは、A) の近傍が設計数値となることは少ないと考えられ、現地状況に応じて省略してよい。点A)–点B) 又は点B)–点C) を結んだ直線を試料の劣化過程と考えると、安定計算式から得られる c' – $\tan \phi'$ 直線との交点は、安定計算式で設定した安全率になるまで劣化した強度となるので、この点での c' 、 ϕ' を設計数値とする。(図-3.1.3)。

図-3.1.4は、繰り返し一面せん断試験とリングせん断試験によって得られた土質定数を用いて、 c' – $\tan \phi'$ 直線からすべり面の強度定数を設定した事例である。せん断試験によって得られた近似線と修正Hovland法による三次元解析で安全率を1.00としたときの逆算法による c' – $\tan \phi'$ 直線の交点から計算に用いる強度定数を設定している。

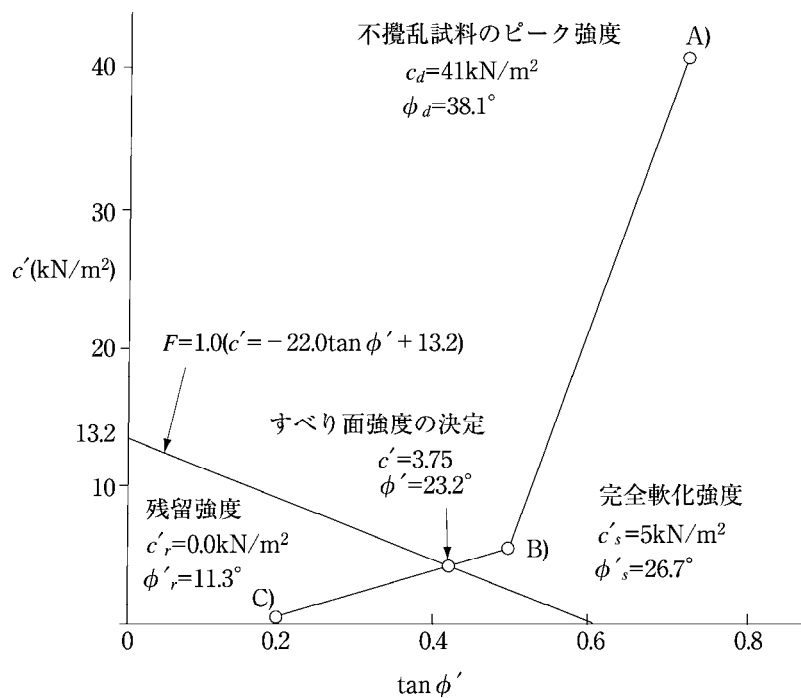


図-3.1.3 試験結果と逆算法による強度定数の決定例

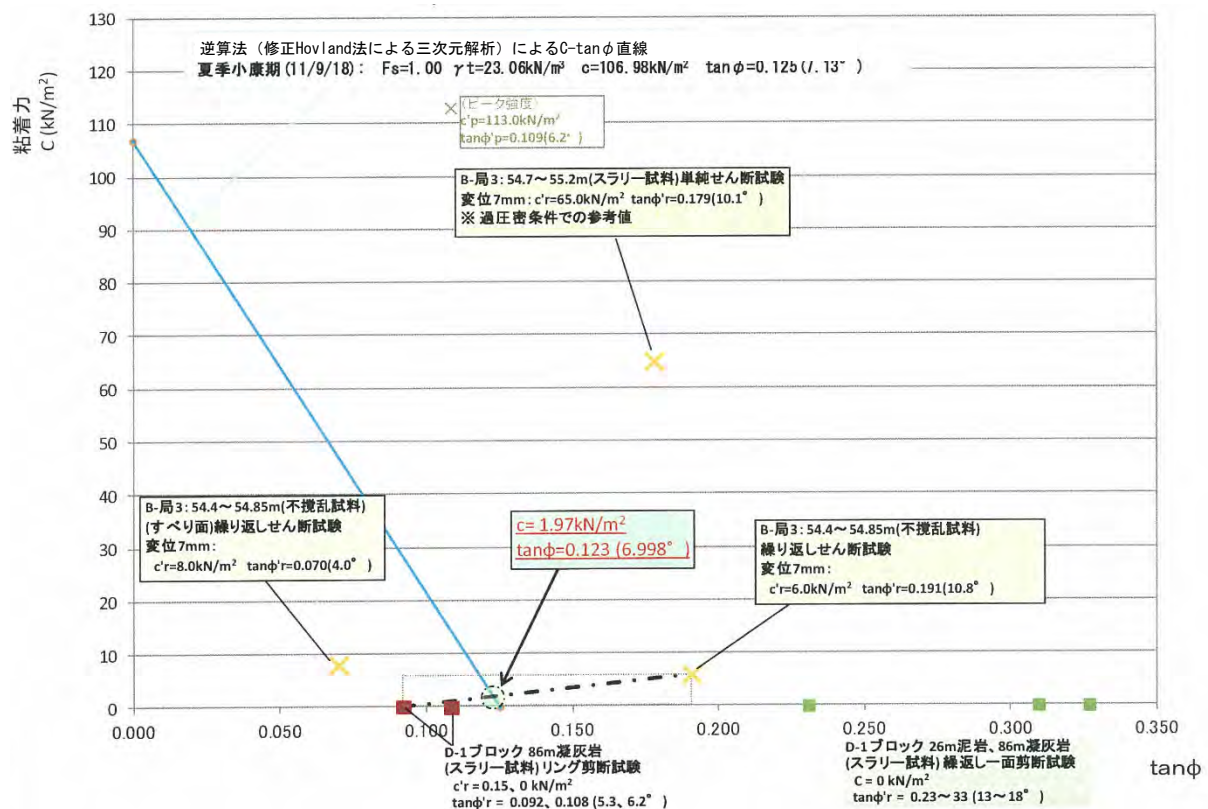


図-3.1.4 大規模地すべりにおけるすべり面強度設定例 (庄内あさひ地区 (山形県))
(リングせん断試験による c' - ϕ' 関係図)

大規模な地すべりでは、複数の岩種によって地すべり土塊が構成されていることがある。このような場合は、それぞれの岩種ごとに代表値を求め、出現する割合等を考慮してすべり面の強度を設定することがある。

以下は、高知三波川帯地区 (高知県) の例であるが、例えば表-3.1.2のように出現する地質ごとに室内試験を実施し代表値を決定し、表-3.1.3に示すようにすべり面の長さの割合を考慮して強度定数を求めることがある。ここでは、図-3.1.5に示す横断形状から側方拘束による効果を算出し、せん断抵抗角の補正までを行っている。(表-3.1.4)

表-3.1.2 繰り返し一面せん断試験による完全軟化強度の例（高知三波川帯地区（高知県））

孔番	位置	原岩の地質	Cs (kN/m ²)	ϕ_s (°)
MO-H14-16W	中腹部	塩基性片岩（淡緑灰）	0	25.3
MO-H14-19	末端	塩基性片岩（白）	0	17.1
MO-H14-17	中腹部	泥質片岩（灰～褐）	0	24.3
MO-H14-19	末端	泥質片岩（灰～褐）	0	22.9

表-3.1.3 すべり面強度の地質別加重平均結果の例（高知三波川帯地区（高知県））

地質	ϕ' (°)	C-1ブロック			C-1-4ブロック		
		すべり面 長さ(m)	割合 (%)	加重平均 (°)	すべり面長 さ(m)	割合 (%)	加重平均 (°)
泥質片岩	23.6	288.446	46.6	23.0	281.8763	65.4	24.2
塩基性片岩	25.3	217.444	35.2		149.2167	34.6	
塩基性片岩（白）	17.1	112.8760	18.2		0	0	
合計		618.7650	100		430.930	100	

表-3.1.4 側方拘束圧による ϕ' の補正の例（高知三波川帯地区（高知県））

項目	算出方法	C-1ブロック	C-1-4ブロック
ϕ' : せん断抵抗角		23°	24°
A: 面積	標準断面積	18,080m ²	9,590m ²
D: 深さ	最大深度	66m	44m
B: 平均幅	$B = A/D$	273.9m	218.0m
K	$K = (1 - \sin \phi') / (1 + \sin \phi')$	0.44	0.42
β	$\beta = 1 / (1 + K \times D/B)$	0.904	0.922
ϕ'' : せん断抵抗角 の補正值	$\phi'' = \tan^{-1} (\tan \phi' / \beta)$	25°	26°

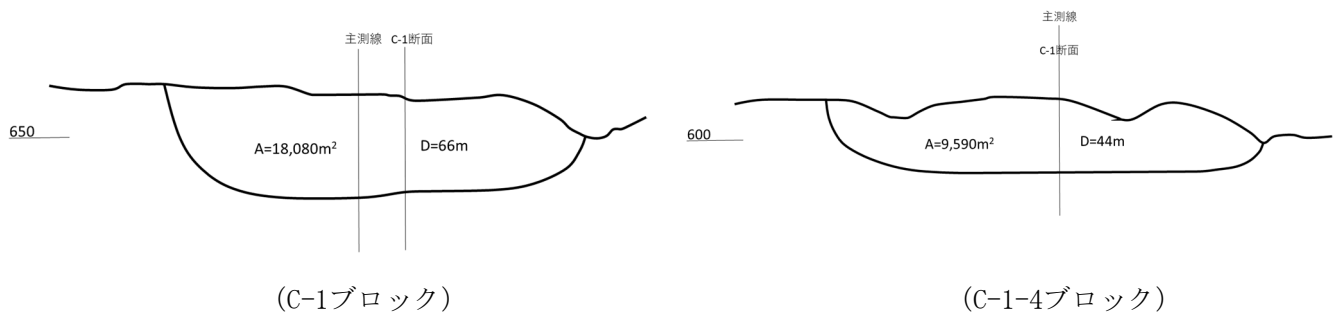


図-3.1.5 地すべりブロック形状（高知三波川帯地区（高知県））

1.2.2 土質試験結果が得られていない場合

逆算によって強度定数の設定を行う。

(1) $c'-\tan \phi'$ 直線の作成

仮定した安全率を代入し、安定計算式 (3.1.1) 中の $c'=0$ として ϕ' を算出し、 $\phi'=0$ として c' を算出し、これによりグラフを作成する。(図-3.1.6)

なお、安定計算については、技術書「Ⅲ計画設計編、3. 安定解析」を参照する。

$$\text{安定計算式 } F_s = \frac{\sum \{c'\ell + (N-U)\tan \phi'\}}{\sum T} \dots\dots\dots (3.1.1)$$

ここで F_s : 安全率

c' : すべり面の土の粘着力 (kN/m^2) (有効応力表示)

ℓ : すべり面の長さ (m)

N : すべり面上に働くスライス重量のすべり面に垂直な分力

$$N = W \cos \alpha \quad (\text{kN/m})$$

U : すべり面上での間隙水圧に起因する力 $U = u\ell$ (kN/m)

ϕ' : すべり面の土のせん断抵抗角 ($^\circ$) (有効応力表示)

T : すべり面上に働くスライス重量の接線分力 $T = W \sin \alpha$ (kN/m)

W : スライス重量 (kN/m)

u : スライスのすべり面上に働く間隙水圧 (kN/m^2)

α : すべり面が水平方向に対してなす角 ($^\circ$)

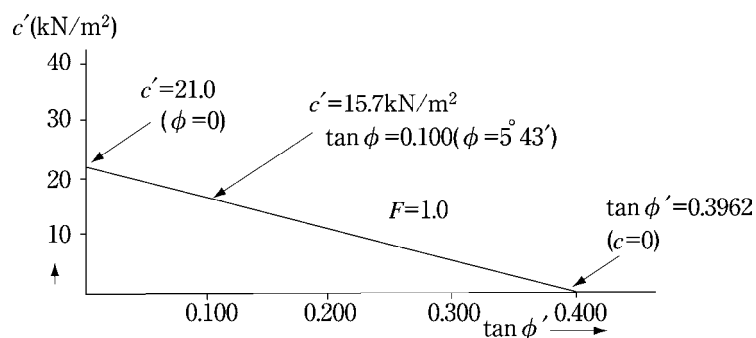


図-3.1.6 逆算法による $c'-\tan \phi'$ 直線の作成例

仮定した安全率から $c'-\tan \phi'$ 直線の関係が得られれば、 c' 若しくは ϕ' から逆算することにより、もう一方の強度定数が算出されることとなる (逆算法の所以)。

強度定数の設定は、土質試験や参考値から設定できるが、算出された値は設計等にも用いられるためその妥当性については十分検証しておく。また、仮定した安全率を基にした計算であるから、安全率の妥当性についても整理しておくことが望ましい。

(2) 粘着力の推定

近傍類似地区の実績又は表-3.1.5から適切な粘着力 (c') を決定し、逆算法による $c'-\tan \phi'$ 直線から ϕ' を決定する。

表-3.1.5 地すべり土塊の最大鉛直層厚と粘着力*¹

地すべり土塊の最大鉛直層厚 (m)	粘着力 c' (kN/m ²)
5	5
10	10
15	15
20	20
25	25

なお、表-3.1.5の適用に当たっては、以下の事項に留意する。

- ① 最大鉛直層厚が25mを超える場合は適用について検討する必要がある。
- ② 新第三紀層泥岩を母岩とする典型的地すべり（たとえば、新潟県東頸城郡下の椎谷層、寺泊層泥岩地帯の地すべり）には適用可能と考えられるが、破碎帯地すべり及び温泉地すべりに適用する場合は、近傍での適用事例や逆算で算出される ϕ' の妥当性を十分検討する。破碎帯地すべり及び温泉地すべりで、地すべり粘土の完全軟化強度や残留強度の試験値が得られていない場合は、 $c'=0\sim 2\text{ kN/m}^2$ とにおいて ϕ' を逆算して求める方がより適切な結果が得られる。

なお、詳細については、技術書「IV資料編、4. 地すべりのメカニズム」を参照する。

(3) せん断抵抗角

斜面勾配が急であったりすると、 c' から得られる逆算値の ϕ' が経験的値より過大に算出されることがある。このような設計値を用いると、地下水排除工等の対策工の効果に大きく影響を及ぼすため、慎重に決定することが求められる。こうしたことから、 ϕ' を与えて逆算法により c' を求める方法も用いられる。

ϕ' を決めるには、近傍類似地区の実績や同じ地質から想定される経験値（表-3.1.6等）を参考にするほか、斜面勾配から推定することもある。

表-3.1.6 風化岩のすべり面強さの範囲*²

風化岩の種類		事例数	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (度)
変成岩		6	0 ~ 2 (1)	20~28(26)
火成岩		8	0 (0)	23~36(29)
堆積岩	古生層	7	0 ~ 4 (1)	23~32(29)
	中生層	6	0 ~ 10 (5)	21~26(24)
	古第三紀層	4	0 ~ 20 (7)	20~25(23)
	新第三紀層	32	0 ~ 25 (20)	12~22(12.5)

※ () 内の数字は平均値を示す。

*1 国土交通省砂防部，(独) 土木研究所：地すべり防止技術指針及び同解説、p. 57 (2008)

*2 (公社) 日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針、p. 402 (2009)

1.2.3 逆算法

(1) 安定計算に用いる単位体積重量の推定

岩盤の場合は岩種のほかに風化や破碎の程度によってもその値が大きく変化するため、地盤特性を踏まえて慎重に判断する。可能であれば、ボーリング調査時にコア箱の重量を直接測定する等して簡易的にでも γ_t の把握に努めることが望ましい。これが難しい場合は、近傍類似地区の実績を参考に決定する。また、同じ土質や岩種から標準的に使用される γ_t の範囲を参考に設計値を決めることもある。

対象とする地すべりの測定値や近傍類似地区の実績がない場合は、一般に移動土塊の γ_t を 18kN/m^3 として標準的に使用する場合もある。

なお、単位体積重量は土の間隙比や含水比に応じて変化するので、地下水位がある場合は地下水位より上の土層は湿潤重量、地下水位より下層については飽和重量を用いることになる。ただし、実務上は標準値を使用する例が多く、厳密に区分して使用することは少ない。

(2) 逆算法に用いる安全率の仮定

地すべりブロックの移動状況に応じて、安定計算に組込む安全率（初期安全率）を $0.95\sim 1.00$ の範囲で仮定する。

一般に採用されている初期安全率の例を以下に示す*¹。

- ①継続的に運動している場合 $Fs=0.95$
- ②降雨等に伴い断続的に運動している場合 $Fs=0.98$
- ③運動が鎮静化している場合 $Fs=1.00$

湛水斜面等において、地すべり観測を実施している場合等は、表-3.1.7の安全率を目安にすることができる。

表-3.1.7 湛水斜面における変動状況の区分と安全率の目安*²

地すべり等の変状	計測調査による変動種別	湛水前の安全率の目安
1) 現在変動中、主亀裂・末端亀裂発生	変動 A：活発に変動中	$Fs_0=0.95$
	変動 B：緩慢に変動中	$Fs_0=0.98$
2) 地表における変動の兆候（亀裂の発生等）は認められない	変動 C： 変動量は非常に小さい（変動C未満）が、累積性が認められ地すべりによる変動の可能性が高い。	$Fs_0=1.00$
3) 変動の兆候は認められない	変動 D	$Fs_0=1.05$

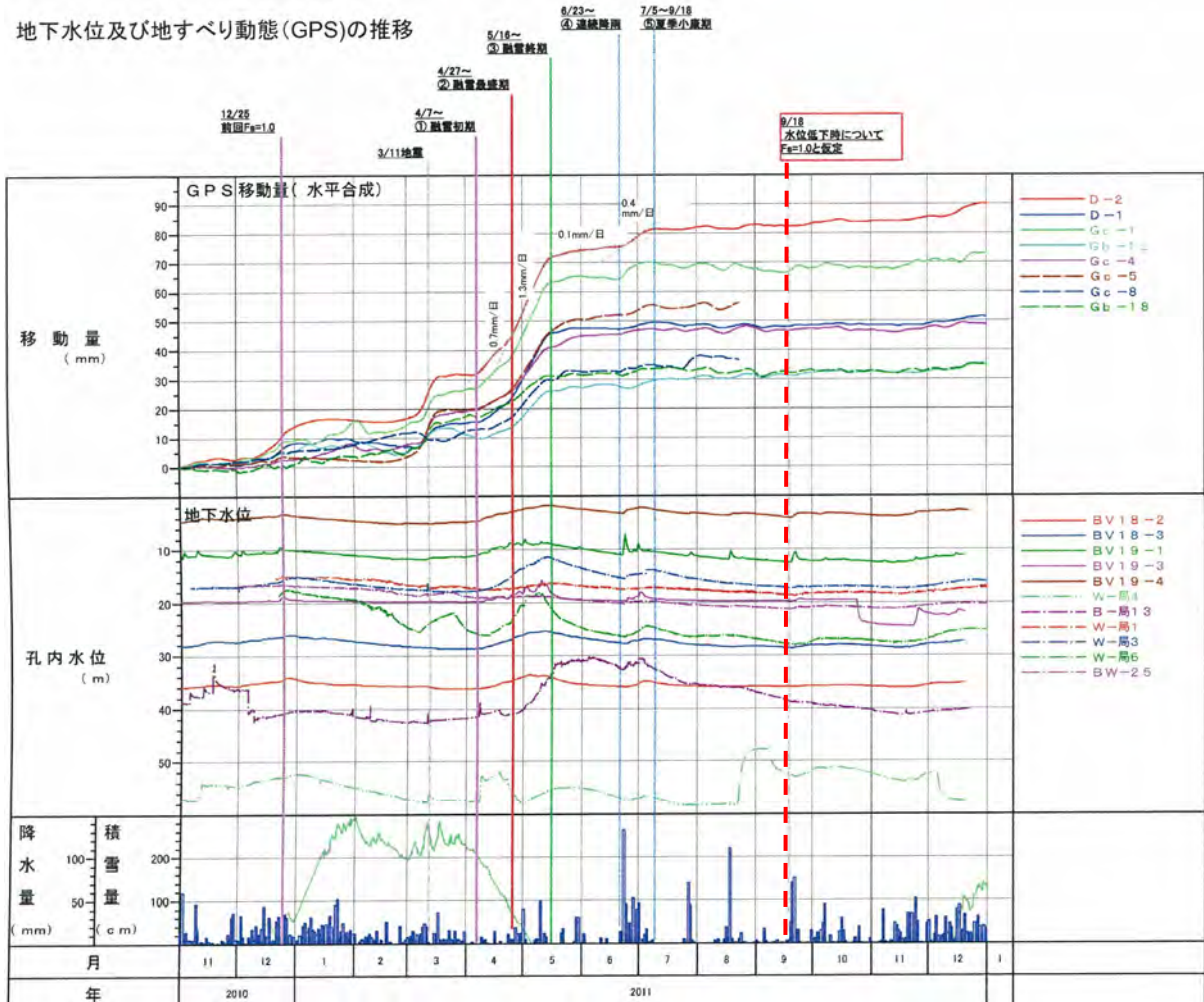
注）表中の変動種別は、表-2.9.5、表-2.9.6による。

*1 （一社）全日本建設技術協会：令和3年災害手帳、p.484（2021）

*2 国土交通省水管理・国土保全局「貯水池周辺の地すべり等に係る調査と対策に関する技術指針・同解説」p.4～7（2019）

安全率の値は、 $F_s=1.00$ を極限状態とみなし $F_s<1.00$ では変動があることを示し、 $F_s>1.00$ のときは変動の可能性がないことを示している。したがって、もっとも確からしい安全率を設定するには、 $F_s=1.00$ の極限状態を把握することが必要となる。

図-3.1.7では、断続的に地すべり活動が続いている状況で、一時的に地すべり運動が小康期になった時点を $F_s=1.00$ に設定した事例である。



融雪期から夏季安定期にかけての期間分け

期間	融雪・降雨	地下水位	地すべり動態
①融雪初期 (4/7～)	降雨及び融雪開始	水位上昇開始	静止→緩慢な移動
②融雪最盛期 (4/27～5/16)	融雪が加速	水位ピーク	1mm/日を超える移動
③融雪終期 (5/16～6/22)	林間で残雪	水位ピーク→低下傾向	極めて緩慢～ほぼ静止
④連続降雨 (6/23～7/1)	積算雨量438mm	短期的な水位上昇	一時的に緩慢な移動
⑤夏季小康期 (7/5～9/18)	(少量の降雨)	(9/19には降雨で上昇)	静止

図-3.1.7 地すべり運動を考慮した安全率の設定事例 (庄内あさひ地区 (山形県))

地下水位がある一定の位置 (臨界水位) に達すると地すべりの変動が始まるような場合は、その臨界水位を基準にして安全率を決定することができる。

図-3.1.8では、地すべり変動の閾値となる臨界水位が把握されている地すべりで、安全率を $F_s=1.00$ とした事例である。

この事例では、変動が8月3日0時から3時の間に確認されていたため、この間における毎時の地下水位と変動量の回帰式を求め、その上で相関係数が最も高くなる2時の時点での回帰式を採用して地すべり変動の初動時の地下水位（臨界水位）を算出し、 $F_s=1.00$ とした。

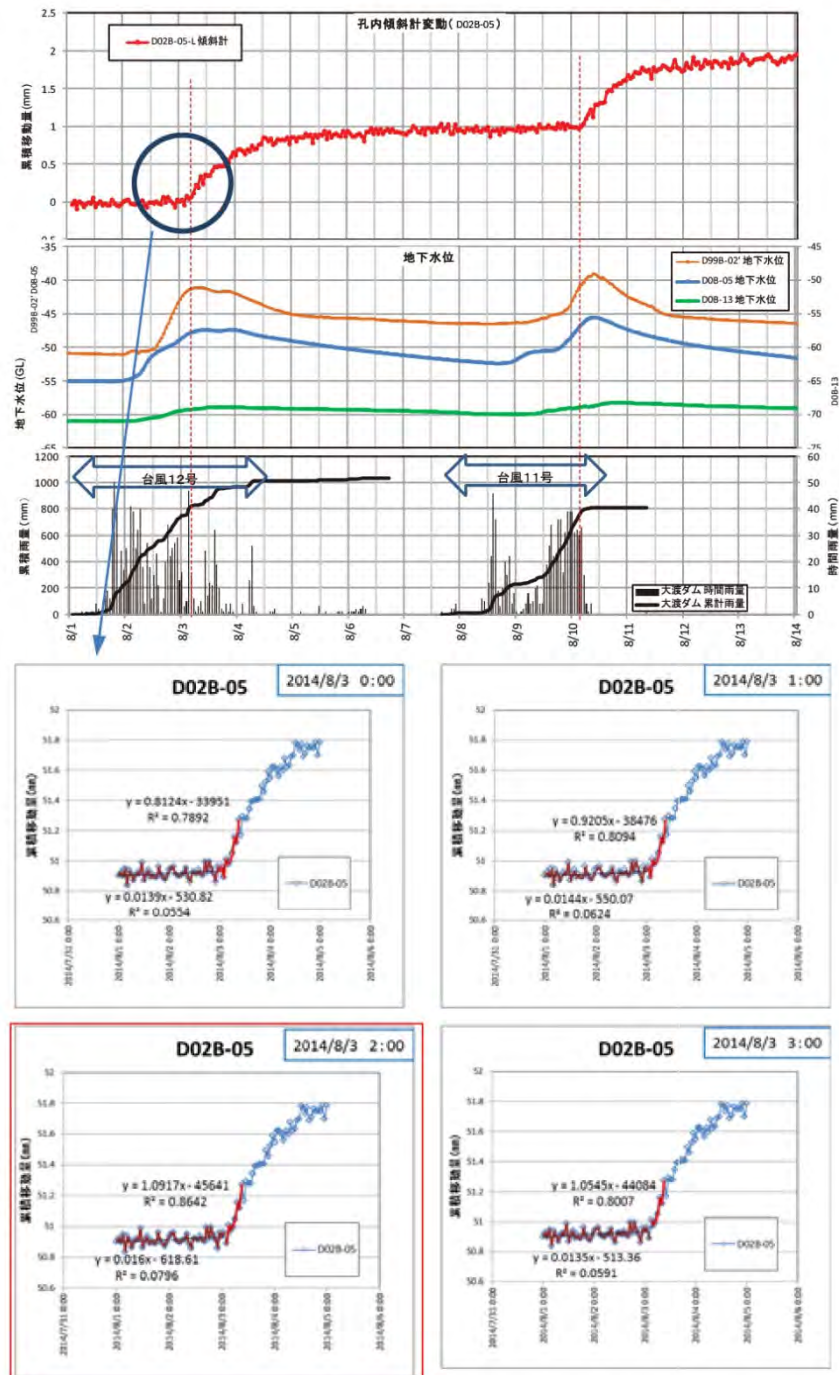


図-3.1.8 臨界水位を基準にして安全率を設定した事例（高瀬地区（高知県））

上：平成26年豪雨時の傾斜計変動と地下水位、降水量の関係 下：設置型傾斜計の累積移動量
（青線：測定値 赤線：地下水位との関係から求めた計算値）

2. 間隙水圧

(基準書 第3章、3.3.3関連)

2.1 間隙水圧の設定

間隙水圧は、地すべり移動と最も相関する水位又は間隙水圧測定地点の値を用いる。粘性土の地盤においては、すべり面付近で注意深く測定された間隙水圧記録が原理的には信頼しうるものであるが、このような記録が常に得られるとは限らないので、その場合は、地下水位の記録から便宜的にすべり面での間隙水圧を決定する。

地下水位は、原則として観測期間の最高水位を用いるが、観測が短期間の場合には豪雨あるいは融雪時の異常水位を勘案して決める。

2.2 留意事項

冠頂部又は舌端部付近のスライスで安定計算式における $(W \cos \alpha - u \ell)$ の項が負になる場合がある。これは安定計算式の中で間隙水圧がすべり面に対して垂直に作用するとして扱われているからで、特に斜面勾配が急な場合は $\cos \alpha$ が小さくなるため計算上の不具合が起こりやすい。こうした結果は実際にはあり得ないことなので、このようなスライスの場合には $(W \cos \alpha - u \ell)$ をゼロとのおくとよい。

$$\text{安定計算式} \quad F_s = \frac{\Sigma\{c' \ell + (N - U) \tan \phi'\}}{\Sigma T} = \frac{\Sigma\{c' \ell + (W \cos \alpha - u \ell) \tan \phi'\}}{\Sigma W \sin \alpha}$$

また、間隙水圧を浮力として扱うことで、こうした不具合を解消する方法もある（修正フェレニウス法）。この計算法による垂直応力は、 $(W - u b) \cos \alpha$ （ただし、 b はスライスの幅）となる。

なお、安定計算については、技術書「Ⅲ計画設計編、3. 安定解析」による。

3. 安定解析

(基準書 第3章、3.3.3関連)

3.1 安定解析の手法

基準書の解説では、一般的に用いられている安定解析手法として、二次元断面でのスライス法（簡便法）が示されている。

また、地形形状やすべり面形状が左右非対称な場合や、規模の大きな地すべりで詳細な検討が有効な場合は、三次元安定計算等を行うこともあることが示されている。例えば、地形やすべり面の詳細な要素を計算に反映させるため、二次元解析手法を三次元的に拡張させたり、数値解析によって現場の事象を整理することがある。これらの計算手法については実用的に用いられつつあるが、二次元解析手法と比べて主断面以外の情報（すべり面深度、地下水分布等）を得るための相応の追加調査が必要となるとともに、目標安全率等、二次元解析で積み上げてきた経験的知見が、三次元解析等でどこまで適用できるか明確にされていない部分もある。このような背景を踏まえ、三次元解析や数値解析を利用する際は、表-3.3.1に示すようなそれぞれの現場の特性や、表-3.3.2に示す三次元安定解析のメリット、留意点を踏まえ、それらの手法を用いることの長所と必要となる追加調査による費用面とを勘案して、必要性等計算条件や結果を適正に評価することが重要である。

図-3.3.1に三次元安定解析の例を示す。

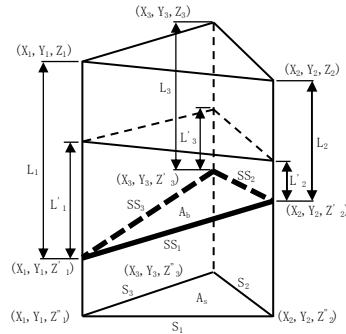
表-3.3.1 三次元解析の適用性について

三次元解析の適用が望ましいケース	・ 地すべりブロック形状や地すべり層厚が横断方向で大きく変わる場合（左右非対称な場合）。 ・ 地すべりブロック中央と側部で地下水位の分布傾向が異なる場合。 ・ 地すべりブロック側部で対策工を施工している場合。
三次元解析の適用が不要/困難なケース	・ 地すべりの断面形状が主測線で代表できる場合（横断方向で概ね同じ場合）。 ・ 主測線以外の調査結果が得られない場合。

表-3.3.2 三次元解析のメリット、留意点

項目	メリット	留意点
地形・地下水位	・ 二次元解析では、通常、地すべり最深部の断面を用いるため、地すべり土塊の土量を過大に評価することになる。三次元解析では、地すべり土塊の土量や地下水位分布を正確に反映させた解析が実施できる。	・ 主断面以外での情報（すべり面深度、地下水分布等）が必要になるため、相応の調査が必要になる。
地下水排除工及び必要抑止力	・ ブロック側部の地下水位分布を計算に考慮することができる。例えば、ブロック側部に地下水排除工を実施した場合の効果を反映することが可能である。 ・ 地すべり土塊の土量を正確に反映した必要抑止力が算定可能であり、二次元解析よりコスト的に有利になる場合がある。	・ 三次元解析では、ブロック形状、土塊の層厚、地下水位、流動層等が三次元的に示される。これを有効的に活用するためには、三次元的な対策工配置を検討する必要がある。

$$F_s = \frac{\sum i \sum j \{ C A + (W \cos(DIP) - U) \tan \phi \}}{\sum i \sum j W \sin \alpha_{yz}}$$



F_s :	安全率
C :	粘着力 (kN/m ²)
A :	コラムのすべり面面積 (m ²)
W :	コラムの重量 (kN/m)
U :	間隙水圧に起因する力 (kN/m)
DIP :	すべり面の最大傾斜角 (°)
ϕ :	せん断抵抗角 (°)
α_{yz} :	すべり方向の傾斜角 (°)

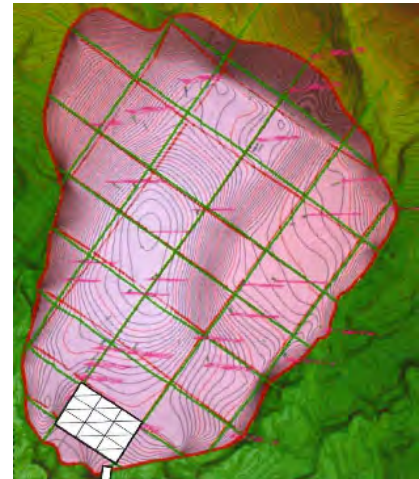


図-3.3.1 三次元安定解析の例（庄内あさひ地区（山形県））

斜面の安定解析を行う手法としては、このほか次のものがある。

- ① 二次元断面で行う簡便法以外のスライス法（Bishop法、Janbu法、Spencer法、Morgenstern-Price法、Sarma法等）
- ② スライス法やBishop法を三次元に拡大したHovland法^{*1}やHungry法^{*2}等
- ③ 有限要素法をはじめとする応力・変形解析による安定解析
- ④ 均一勾配の長大斜面で用いられる層すべりの式や円弧すべりで用いられる摩擦円法等の①～③以外の方法

これらの手法については、それぞれ長所短所があり、その適用条件等に注意が必要である。

3.2 地震力の取扱い

地すべりブロックの安定計算を行う場合には原則として地震力は考慮しない。これは、地すべりブロックは通常、粘性土斜面とみなすことができ、地震等の短期的な振動の影響は、砂に比べて小さいとされていることによる。また、地震と地すべりの具体的な関連性（地すべり地域での地震波形、地震時の変位及び地すべり対策の有無や地質・地盤特性、地下水の状況の影響等）について十分に解明されていない点も多く、現状では実務的に適用できる解析手法が定まっていないことによる。なお、これまでの地震災害の事例等からは、地すべり対策工が施工されているケースでは、対策工の機能が十分発揮されていれば、地震時の地すべり活動の抑制にも寄与しているとの見方もあり（図-3.3.2）、特に、日常の維持管理も含めた地下水排除機能の確保が重要である可能性が示唆されている。

*1 H. J. Hovland (1977) : Three-Dimensional Slope Stability Analysis Method, ASCE GT9, pp. 971～986

*2 Hungry (1987) : An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions, Geotechnique 37, pp. 113～117

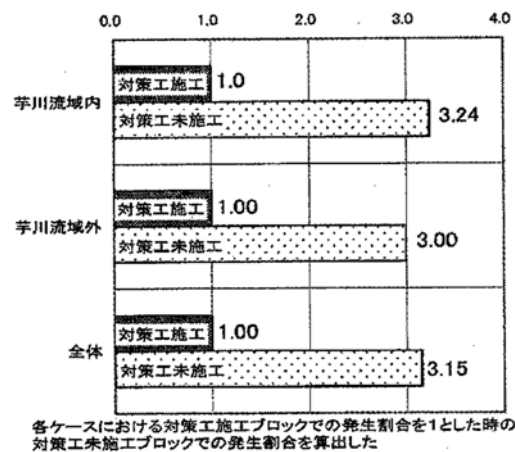


図-3.3.2 対策工施設有無に対する地震時の活動ブロックの比^{*1}

ただし、ダム貯水池内の安定計算については、「土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書」によるものとする。

3.3 安全率の算出

二次元断面の標準スライス法（簡便法）による円形すべりの安全率は次式で表される安定計算式（3.3.1）を用いて求める。

図-3.3.3に安定解析断面図及び詳細図を示す。

$$\text{安定計算式 } F_s = \frac{\Sigma\{c'\ell + (N-U)\tan\phi'\}}{\Sigma T} = \frac{\Sigma\{c'\ell + (W\cos\alpha - u\ell)\tan\phi'\}}{\Sigma W\sin\alpha} \dots\dots (3.3.1)$$

ここで F_s : 安全率

c' : すべり面の土の粘着力 (kN/m^2) (有効応力表示)

ℓ : 各スライスのすべり面の長さ (m)

N : すべり面上に働くスライス重量のすべり面に垂直な分力 $N = W\cos\alpha$ (kN/m)

U : スライスのすべり面上での間隙水圧に起因する力 $U = u\ell$ (kN/m)

ϕ' : すべり面の土のせん断抵抗角 ($^\circ$) (有効応力表示)

T : 各スライスのすべり面上に働くせん断力 ($T = W\sin\alpha$: スライス重量の接線分力 (kN/m))

W : スライス重量 (kN/m)

u : スライスのすべり面上に働く間隙水圧 (kN/m^2)

α : すべり面が水平方向に対してなす角 ($^\circ$)

*1 木下ら (2007) : 新潟県中越地震における芋川流域及びその周辺の地すべり対策工の効果について、第46回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 9～12

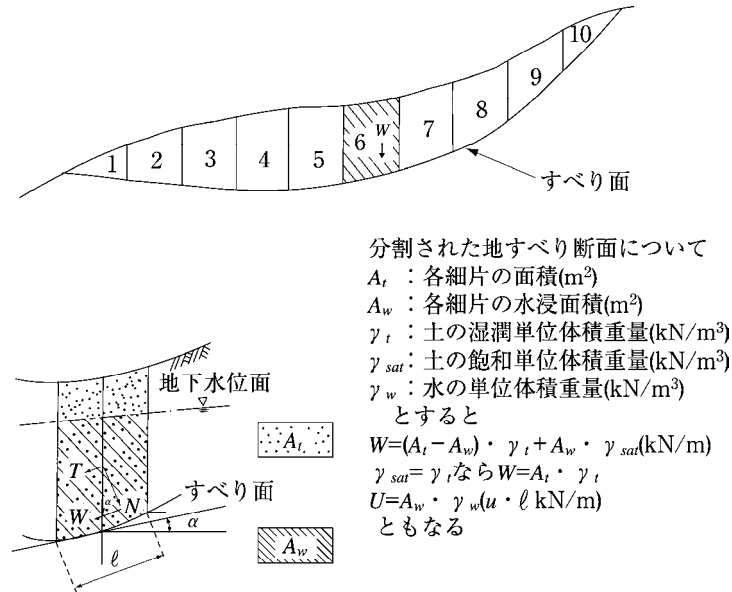


図-3.3.3 安定解析断面図及び詳細図

この式で分子はすべり面に対するせん断抵抗力を表し、強度定数 (c' , ϕ')、間隙水圧等が関与する。また、杭工等の抑止工もこの値を増大する働きをする。分母はすべりに対するせん断推進力を表し、崩土の重量が主に関与する。ただし、冠頭部の傾斜部分はこの値を増加する形で関与し、舌端部の傾斜部分はこの値を減少させる形で関与することが多い。

また、上式は初期安全率及び地すべり防止対策後安定性の試算によって得る安全率の算出に共通な基本的手法であるが、地下水排除工による間隙水圧の低下や抑止工によるせん断抵抗力の付加が伴う場合には、代入数値については対策工の内容に応じて変化する。

仮に、目標安全率 ($P.F_s$) に対して抑止工を計画するとした場合、その抑止工に期待する抑止力 (P_R) は、分母と分子が変化しないものとするれば式 (3.3.1) を基本に次式で求めることができる。

$$P_R = \Delta F_s \sum T \dots\dots\dots (3.3.2)$$

ここで P_R : 必要抑止力 (kN/m)

ΔF_s : 安全率の増分 ($P.F_s = F_s + \Delta F_s$)

$P.F_s$: 目標安全率

F_s : 初期安全率

目標安全率は、表-3.3.3に示すとおり一般に保全対象の種類に応じた重要度を考慮して $P.F_s = 1.10 \sim 1.20$ の間で設定される。また、応急工事等を対象とした段階的な目安として $P.F_s = 1.00 \sim 1.05$ で対策工が計画される場合もある。

農地地すべりにおいては、保全対象に応じた目標安全率を以下の目安で設定される。

- ① 人家、道路、鉄道、河川その他公共施設等の重要な物件がある場合 1.20
- ② 農地が主たる対象の場合 1.10～1.15
- ③ 林地等が主たる対象の場合 1.10

表-3.3.3 農地地すべり対策における目標安全率の設定事例

目標安全率	保全対象			総計
	人家	道路・河川・ その他の施設	農地のみ	
1.10	1※ ¹	10	9	20
1.15	3※ ²	22	7	43
1.20	26	10	0	36
計	30	53	16	99

複数の保全対象を含む場合は、重要度が高いものを対象として分類した。

※1 長さ200m以上のブロックで人家へ直接影響がある末端ブロックは目標安全率1.20として計上

※2 長さ200m以上のブロック

また、ダム等における貯水池周辺斜面では、目標安全率の目安を表-3.3.4のように設定することもある。

表-3.3.4 貯水池周辺斜面における目標安全率の目安*¹

保全対象			計画安全率				備 考
種類と具体例		重要度	1.05	1.10	1.15	1.20	
ダム施設	堤体、管理所、通信施設、取水設備、放流設備、発電設備等	大					ダム機能が著しく低下するとともに、社会的に極めて大きな影響を生じるもの。
貯水池周辺の施設	家屋、国道、主要地方道、迂回路のない地方道、橋梁、トンネル、鉄道等	大					社会的な影響が大きいもの又は復旧に時間を要するもの。 重要度の区分に当たってはダム個別の事情を十分考慮する。
	迂回路のある地方道、公園等	中					
	林道、管理用道路、係船設備、流木処理施設、貯砂ダム等	小					
その他の貯水池周辺斜面							上記以外で貯水池周辺の山林保全上又は景観保全上重要である斜面。

3.4 簡便法

(1) 簡便法の基本的考え方

簡便法は、円弧すべりで用いられる標準スライス法を非円弧のすべりも含めて地すべり斜面の安定計算に準用する方法である。標準スライス法では、せん断推進力と、すべり面上で発揮されるせん断抵抗力の円弧中心に関するモーメントが平衡するような F_s を斜面の安全率と考え、すべり面の円弧中心に対するモーメントの平衡を考える。すべり面上でのせん断推進力を次式で表す。

$$\text{せん断推進力} = \frac{\text{せん断抵抗力}}{\text{安全率 } F_s}$$

*1 国土交通省水管理・国土保全局（2019）：貯水池周辺の地すべり等に係る調査と対策に関する技術指針・同解説、

簡便法では、安全率は、実際の地盤で発揮しうる土のせん断推進力（せん断応力） τ_f と、せん断抵抗力 τ_m の比とする。有効応力表示すれば、

$$\tau_f = \frac{\tau_m}{F_s}, \quad F_s = \frac{\{c' + (\sigma - u) \tan \phi'\}}{\tau_f} \dots\dots\dots (3.3.3)$$

$$F_s = \frac{\Sigma \{c' \ell + (W \cos \alpha - u \ell) \tan \phi'\}}{\Sigma W \sin \alpha} \dots\dots\dots (3.3.4)$$

また、全応力表示すれば、 $u=0$ において

$$F_s = \frac{\Sigma \{c' \ell + (W \cos \alpha \tan \phi')\}}{\Sigma W \sin \alpha} \dots\dots\dots (3.3.5)$$

ここに、 c' 、 ϕ' は有効応力で表示した粘着力、せん断抵抗角、 c 、 ϕ は全応力で表示した粘着力、せん断抵抗角である。

(2) 有効応力と全応力について

本基準ではせん断力はクーロンの破壊規準により求めることとしており、有効応力と全応力の関係は以下ようになる。

クーロンの破壊規準

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (3.3.6)$$

ここに、 τ_f ：せん断応力（kN/m²）

σ ：せん断面上の垂直応力（kN/m²）

c ：見かけの粘着力（kN/m²）

ϕ ：せん断抵抗角（°）

飽和した土において、外部から加わる力によって生じる応力（全応力）は、土粒子の骨格内の応力（有効応力）と、間隙圧でつり合う。

$$\sigma = \sigma' + u \dots\dots\dots (3.3.7)$$

ここに、 σ ：全応力

σ' ：有効応力

u ：間隙圧

土のせん断応力は全応力で決まるものではなく、有効応力で決まるものと考えてよく、上記の関係は次のように表すことができる。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi' \dots\dots\dots (3.3.8)$$

ここに、 σ ：せん断面上の垂直応力

σ' ：せん断面上の有効垂直応力

c' ：有効応力に関する見かけの粘着力

ϕ' ：有効応力に関するせん断抵抗角

u ：間隙圧（ここでは間隙水圧）

土のせん断応力を表すときには、どのような排水条件で求めた c 、 ϕ であるかを明らかにしておかなければならない。

なお、簡便法は、計算式が容易で理解しやすい反面、スライス間に作用する力の平衡を完全には考慮していない。このため、すべり面の法線方向に作用している力 N を一般に真の値より過小評価している。したがって、圧密排水せん断試験により求めた地すべり粘土の c' 、 ϕ' （完全軟化強度定数 c_s 、 ϕ_s や残留強度定数 c_r 、 ϕ_r 等）を用いて標準スライス法で安全率 F_s を求めると、他の、より厳密な方法の式で求めた安全率より一般に小さめの値が得られる。しかし、せん断試験を行わず、二次元断面のスライス法（簡便法）の式で $F_s=0.95\sim 1.00$ と置いて逆算法で c' 、 ϕ' を求めた場合は、（ N を真の値より過小評価しているため）他の、より厳密な方法の式で逆算して求めた c' 、 ϕ' より大きめの値が得られる。このとき、地下水の排除による間隙水圧に起因する力 U の減少値 ΔU や抑止工による抑止力 P_R の値が同じであると、安全率 F_s は、他の、より厳密な方法による場合より大きめの値が得られる。すなわち、この場合は地すべり防止施設の効果を過大に評価することとなり、危険側の設計になる可能性が高い。したがって、利用に当たっては計算誤差の影響を十分検討する必要がある。逆算法によるだけでなく、地すべり粘土のせん断試験も行い、逆算時の間隙水圧 U の値の信頼性についても十分に検討を行った上で、最も妥当と思われる強度定数を用いて地すべり防止対策に関する安定解析を行うことが望ましい。

3.5 安定計算の例

ここでは、推定したすべり面と地下水位を対象に、簡便法を用いた安定計算の例を示す。すべり面の強度定数を設定し、スライスごとに計算を実施して、安全率を算出することができる。

(1) 断面図

計算例に用いる断面図を図-3.3.4に示す。

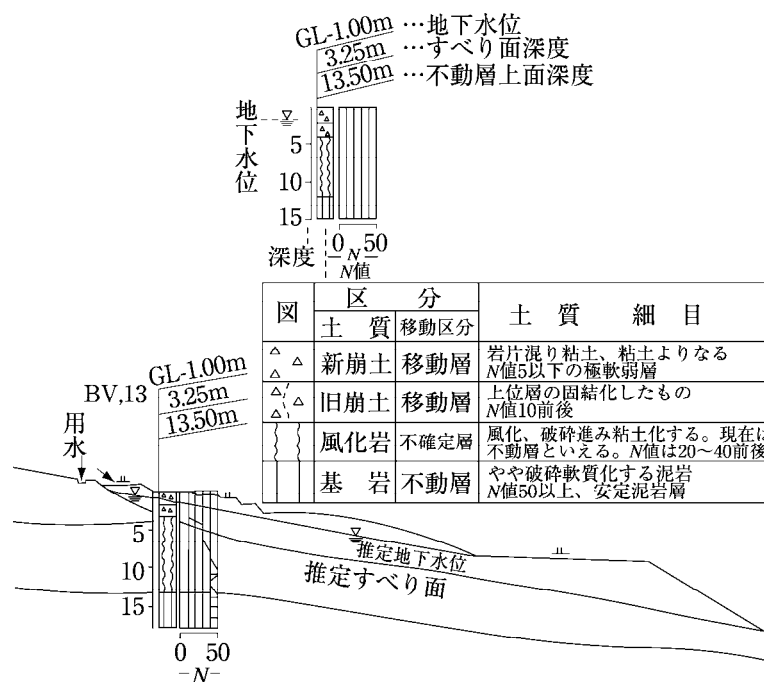
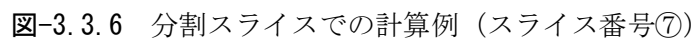


図-3.3.4 断面図

図-3.3.5のように推定した地すべりブロックを地形形状等で分割しいくつかのスライス片に区分する。



図-3.3.6のようにスライス番号ごとに、その幅とすべり面の角度、すべり面から地表や地下水位の高さを計測する。


$$3.65 \cdot q = 35.8 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

γ_t	19.5	kN/m ³
γ_{sat}	19.7	kN/m ³
c'	0	kN/m ²
ϕ'	19.6	° (tan ϕ' =0.356)

表-3.3.5から安全率 F_s は以下のように算出することができる。

$$F_s = \frac{1,440.1}{1,436.6} = 1.00$$

4. 地表水排除工

(基準書 第3章、3.4.2(1)関連)

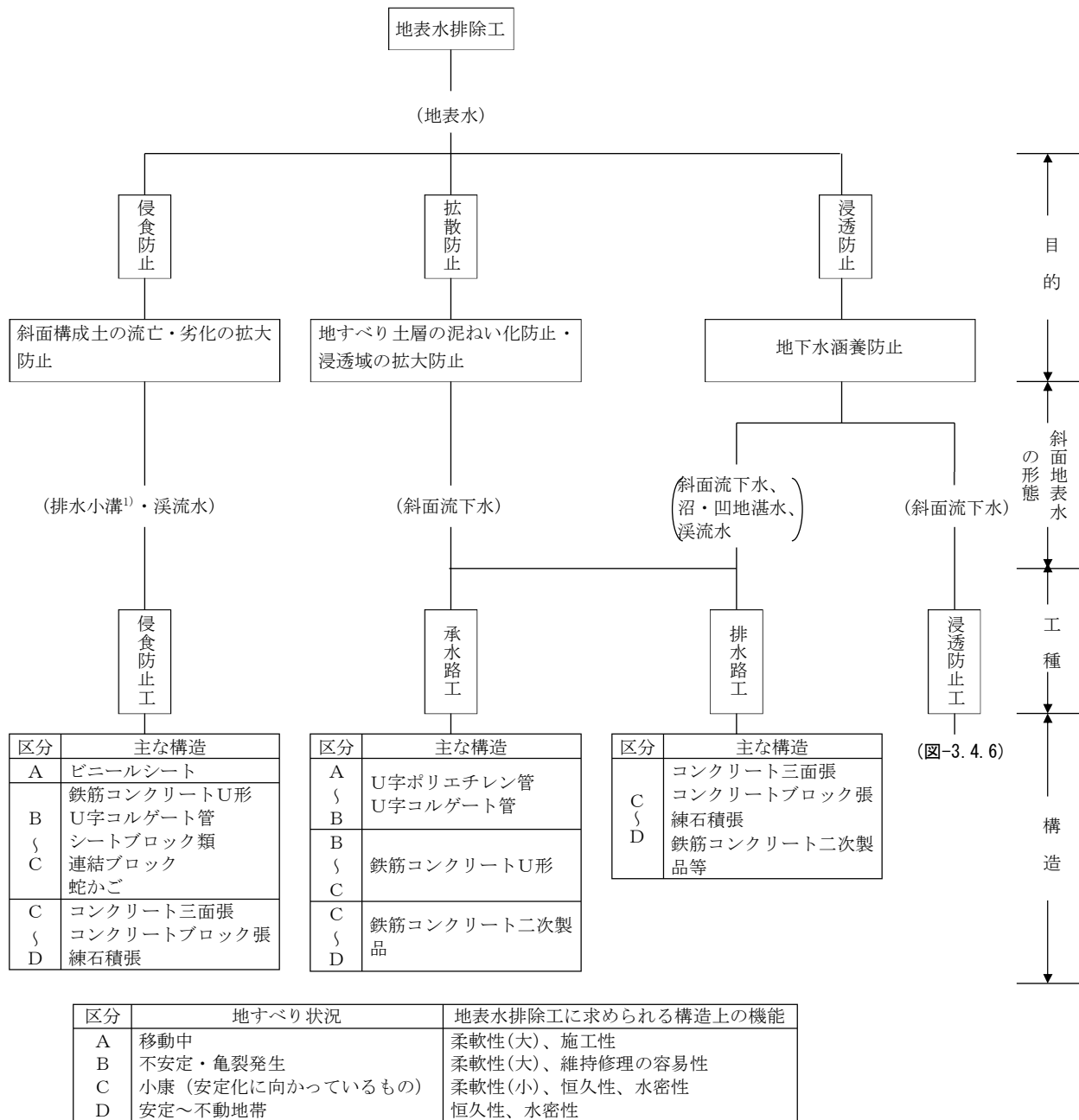
4.1 水路工

4.1.1 設計の基本事項

(1) 構造

水路工は、地すべり地域内の降水・地表水を速やかに集水して地域外に排除する目的で計画するものとする。水路工の断面構造は、十分な水量を流せる余裕を持たせる必要がある。このためには、必要に応じて設計排水量を求め、水路工の断面計算を行う。また、水路工の材質は、地表面の変形に追従できるような柔軟性のある材質を用いることが望ましい。

図-3.4.1に地表水排除工の目的と地すべりの状況を考慮した構造決定に至るまでの手順を示す。



1) 排水小溝とは地すべり地域内に排水している排水路をいう。

図-3.4.1 水路工構造の決定手順

(2) 設計排水量の算定

- ① 水路工の断面は、設計排水量に基づいて決定する。最小水路幅は維持管理及び地すべりの影響による変形等を考慮し、30cm程度以上（ただし承水路工にあつては20cm程度以上）とすることが望ましい。
- ② 集水面積は、調査で用いた適切な縮尺（1/5,000程度）の地形図より求める。必要に応じて、現地調査を行う。また、水路断面決定の基礎となる設計排水量は、原則として10年に1回程度起こると考えられるピーク時の流出量とするが、下流に人家等があり、かつ豪雨時に災害を引起こす危険性のある箇所においては、これより大きくすることができる。また、土砂が混入

する場合は、設計排水量に余裕高を加えて水路断面を決定することがある。
 なお、設計排水量は式(3.4.1)に示す合理式により算定することを標準とする。

$$Q = \frac{1}{3.6} f_p r A \cdots \cdots \cdots (3.4.1)$$

ここで、 Q ：設計排水量 (m³/s)
 r ：降雨強度 (mm/h) (地区に応じ決定する。)
 f_p ：ピーク流出係数
 A ：集水面積 (km²)

設計排水量計算の詳細については、土地改良事業計画設計基準・計画「排水」を参照する。

(3) ライニング

水路をライニングする場合には、その構造は以下の条件に応じ柔軟性、恒久性、水密性、修復性及び維持管理の利便性を考慮して決定する。

- ① 承水路工や小断面の排水路工は機能上、水密性を有するとともに、強度的にも優れた構造とし、安定した地域に設置することが望ましい。不安定な地域に設置せざるを得ない場合には柔軟性を有し、ある程度の変化に対してもその機能が損なわれず、かつ維持修復が可能な構造とする。
- ② 承水路工や小断面の排水路工では施工性、維持修復性、あるいは取替えの利便性からフリューム類が多く使用される。しかし、変形を受ける危険性のある地域に設置する場合には、ある程度の変位を継目部分で吸収できるカラー付既製品を使用し、継目からの漏水を防止する。
 予想される変位の程度が大きい場合には、長めのカラーの使用や目地の工夫等を行う。特に移動中の地すべりブロックに設置する場合においては、水路本体部の変形を許容できる柔軟な半円管を使用することも考慮すべきである。
- ③ 引張亀裂の発生する地すべりブロック上部に施工する承水路工や小断面の排水路工では、変位による継目部分からの漏水は旧況にも増して地すべりを促進する原因となる。したがって、明暗渠工により継目からの漏水を暗渠で捕捉するとともに、水路側壁外面に碎石等を施し、地盤接触部の侵食防止に留意する必要がある。
- ④ 移動中の地すべりブロックに設ける排水路工等で侵食防止の目的も兼ねる場合には、技術書「Ⅲ計画設計編、6. 侵食防止工」を参照する。

4.1.2 設計の留意事項

水路工の設計に当たっては、以下の事項に留意する。なお、水路工は機能上、承水路工と排水路工に分けられるが、設計・施工上は留意事項に共通点が多いので、ここでは併せて示す。

- ① 地表水は、地表面の低い地形に沿って流動・滞留することから、現地の地形状況を十分に把握した上で計画を立案する必要がある。特に水路工の施工位置としては、地すべり斜面内の低い場所を通るように設計する必要がある。このためには、できる限り現地の実測平面図を用いて、現地を確認し、施工が可能な位置に水路工を計画することが望ましい。
- ② 水路工の材質は、施工に当たっての仮設道路整備等の運搬条件を考慮し、鉄筋コンクリート二次製品、U字コルゲート管等から現地に応じた適切な材質を選定する。
- ③ 水路の縦断勾配が大きくなりすぎると流速が速くなり、流水が飛散したり、水路工の目地の

ずれ等が生じやすくなる。このため、適宜落差工等の減勢工を計画し、水路を流れる水の流速が速くなりすぎないように配慮する。屈曲の多い水路においても極力多く減勢工を設け水路を直線にすることが望ましい。なお、合流点には必要に応じて減勢工を設ける。

- ④ 地すべりが活動中の場合、水路工がせん断破壊されるおそれがあるため、地すべりの活動方向と直交する方向に長い延長の水路工を計画しない。
- ⑤ 移動中の地すべりブロックに設ける排水路工等で侵食防止の目的も兼ねる場合には、技術書「Ⅲ計画設計編、6. 侵食防止工」を参照する。
- ⑥ 地下水位の浅い地帯に設置する小断面の排水路工は明暗渠工とし、暗渠で捕水した地下水は落差工、集水柵工等の減勢工を利用して排水路工に排除する。なお、集水柵工と暗渠工の接続構造によっては、暗渠部から地下水浸透を助長する場合もあるので注意する。
- ⑦ 護岸のみで底張りを施さない排水路工においては侵食防止のため必ず帯工、床固め工、落差工等を適宜設ける。
- ⑧ 変化点（地形、水路設置方向）には集水柵を設ける。
- ⑨ 水路工が直角や鋭角に曲がらないように留意する。直角や鋭角に曲がると水路から跳水し、水路脇の地山を侵食する危険性が高い。直角近くに水路工を曲げなければならないときは、水路の縦断勾配を可能な限り緩やかにする。また、跳水による侵食を防止するため水路に蓋を設置することも考慮する。
- ⑩ 水路工と地山の境界となる水路の肩部が洗掘されると、水路に表流水が流入しなくなったり、水路脇の洗掘の拡大により水路が破損したりする場合があるので、必要に応じてコンクリート等で被覆する等、配慮する。
- ⑪ 水路内に土砂等が流入することで、水路の閉塞が生じると、越水により水路周辺部が洗掘されてしまうため、必要に応じて木柵工や法面保護工により土砂流入を防止する。

以下に、参考となる事例を示す。

(1) 水路工の浮力低減対策事例

浮力又は揚圧力については、構造物の安定計算において浮上や転倒、滑動の場合に考慮し、地盤支持力検討の場合には無視する。浮力又は揚圧力を荷重として考える場合、構造物の壁面と土の摩擦角を考慮しても良い。

神石高原地区（広島県）では、浮力に対して安全な外水位の高さを求め、許容高を満足しない場合は、水抜き穴等を設置し、浮力低減対策を実施している。

$$Fs = \frac{W}{B \gamma_w H_a} \dots \dots \dots (3.4.2)$$

H_a ：底版底面から外水位までの高さ（m）

W ：水路 1mあたりの重量（kN/m）

B ：水路外幅（m）

γ_w ：水の単位体積重量（kN/m³）

F_s ：安全率（ ≥ 1.2 ）

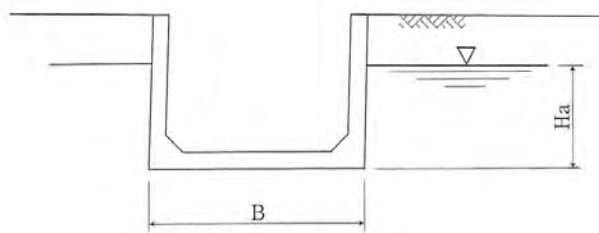


図-3.4.2 水路と外水位の関係

水抜き穴を設ける場合の例として、以下が示されている。

- ① 山側が土砂層で、湧水が許容外水位（ H_a ）より高い位置にある場合（図-3.4.3）
- ② 地下水調査結果により、許容外水位（ H_a ）を超える地下水位が確認されている場合
- ③ 水田の水張り高さが、許容外水位（ H_a ）よりも高い場合は別途対策。

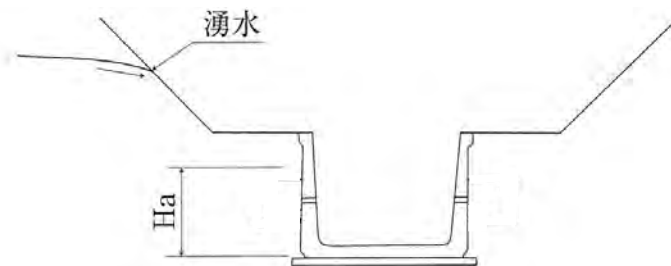


図-3.4.3 水抜き穴の設置位置

なお、現場排水路水抜き穴の口径は40mmを標準とする。水抜き穴を設ける場合で、連続的に湧水を排除する必要がある場合には、図-3.4.4のとおり、水抜き穴を中心に、断面寸法300mm×300mmのサイドドレーン（吸い出し防止材）を設ける。

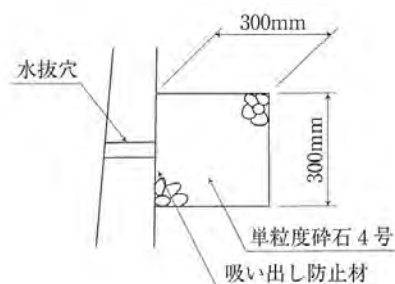


図-3.4.4 サイドドレーン詳細図

(2) 現地発生材の利用による環境配慮事例

神石高原地区（広島県）の周辺地域では、玄武岩等の転石が多く、古くから石垣や畦畔、用排水路護岸として利用されていたことを踏まえ、コスト縮減と景観・環境に配慮して自然石（転石）を用いた排水路工が整備されている（図-3.4.5）。

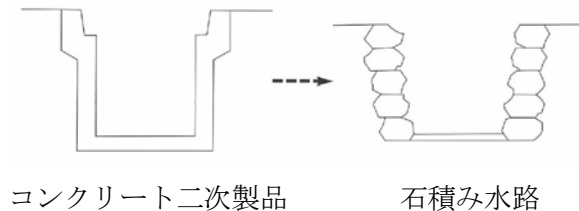


図-3.4.5 自然石を用いた水路護岸（底面はコンクリート張）

4.1.3 施工時の留意事項

- ① 水路工は原則として盛土の上に設置しない。
- ② 水路工は周辺の地表より低い位置に設け、水路工両側は特に勾配をつけて地表水が流入しやすいようにする。
- ③ 地表水によって地表面が侵食されている場所に水路工を設計する場合は、周辺の土塊が緩んでいることが想定されるため、水路工施工時の掘削に伴って、小崩壊が発生しないように留意する（この場合は、侵食部の底面に暗渠工を敷設し、その上に水路工を重ねるように計画する）。
- ④ 現状で地表水が流れている場所に水路工を敷設する場合は、流れている地表水を仮廻し、水路工の施工計画地点を施工可能な含水状態とすることが望ましい。
- ⑤ 暗渠工併用の設計ではない場合でも、水路工施工時に湧水が確認された場合には、暗渠パイプ等を敷設し、水路工に導くように設計の変更を行う必要がある。
- ⑥ 水路工の全施工区間を一気に全区間開削せずに、区間を小割にすることで小崩壊や地すべりに悪影響を与えることを防止できる。
- ⑦ 地すべりに悪影響を与えないために、可能であれば、天候が不順な時期を避けて水路工の開削等を施工することが望ましい。
- ⑧ 地下水位が高い場合には、水路工の浮き上がり（特にコルゲート管使用時）に留意する。

4.2 浸透防止工

4.2.1 設計の基本事項

(1) 構造の決定

浸透防止工は、地すべり等により形成された地表の亀裂等特定の部位からの地表水の浸透を防止する工法であり、水路、ため池、陥没、亀裂等を対象とし、状況に応じて充填工、被覆工、その他の工法等に大別される。対象、状況、緊急性を考慮して構造を決定するものとする。参考として図-3.4.6を示す。

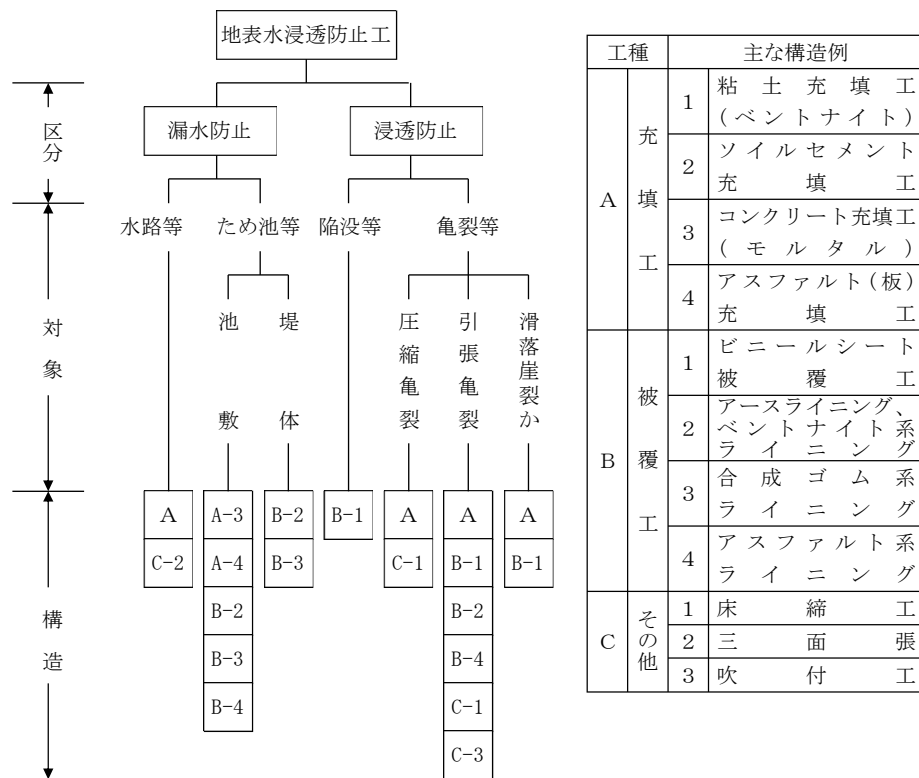


図-3.4.6 浸透防止工の構造の決定手順

(2) 充填工

充填工は、亀裂箇所を周囲となじみのよい材料で充填し、地表水の浸透や漏水を防止する工種である。充填材料は、亀裂の状況、地盤の種類、目的等に応じ適切なものを選定する。

ア. 粘土、ベントナイト

早急に亀裂の閉塞を要する場合に適している。

イ. ソイルセメント

充填材料にある程度強度を持たせたい場合や池敷（粘性土相当地盤）の亀裂からの漏水を防止する目的の場合はソイルセメントが適しているが、変状進行中の亀裂に対しては適さない。

ウ. コンクリート、アスファルト

亀裂発生箇所が岩層からなる場合に適しており、標準的な施工方法は図-3.4.7による。

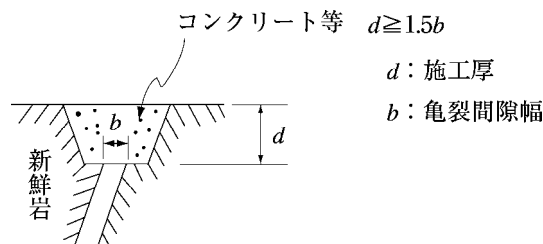


図-3.4.7 コンクリート等による充填工

(3) 被覆工

被覆工は亀裂箇所ないし透水性地盤を不透水性材料で被覆し、降水や地表水の浸透、漏水を防止する工法である。ビニールシート被覆工は、緊急用にごく普通に用いられる。ビニールシート被覆工以外については、一般的に充填工では浸透の防止が困難な場合に用いられる。

被覆工で使用される土木用遮水材（ジオメンブレン）を原料素材と配合度合いをもとに分類すると、図-3.4.8のとおりとなる*1。

ジオメンブレンは、透水性の極めて小さい、又は不透水性の膜状の土木用遮水材である。材料素材は主に合成ゴム、合成樹脂等の合成高分子であり、ベントナイト粘土等を素材とする土木用遮水材は、ジオシンセティック・クレイ・ライナーと呼ばれている。

ジオメンブレンは揚圧力（地下水、湧水、エア、発生ガス等による）に対するジオメンブレン自体の抵抗力は期待できないので、ジオメンブレンの持ち上げ（膨れ）防止対策を講じる。池敷に一定勾配を持たせるとともに、地下水、湧水等に対してはドレーンを、エア、発生ガス等に対しては空気抜きを配置する。

ア. ビニールシート被覆工

緊急的に地表水の浸透防止を必要とする場合や、明瞭な亀裂が形成されている場合について、地表水の浸透防止を目的とする応急的な工法であり、恒久的な対策としては適切でない。一定期間の使用が見込まれる場合には、厚手のものや、紫外線劣化防止材を添加した耐候性のものを使用する必要がある。なお、ビニールシート上部に水が溜まることがあるので、地すべり地域外への導水排除を考慮する必要がある。

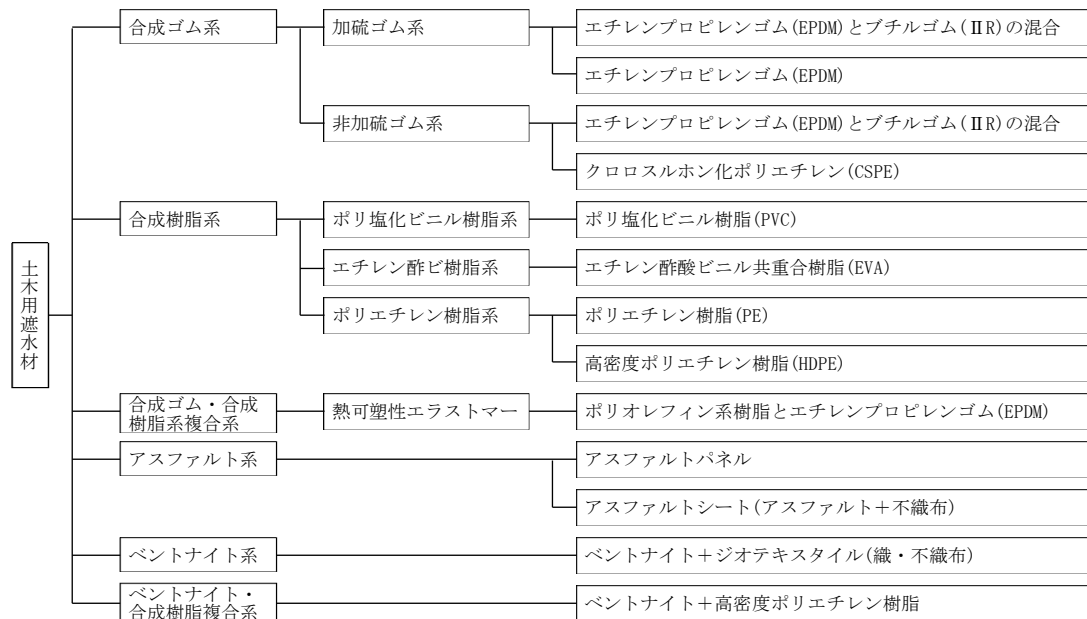


図-3.4.8 土木用遮水材（ジオメンブレン）の分類

*1 長束（1997）：農水分野におけるGM利用の現状と試験方法、ジオメンブレン利用の現状と試験方法 講演論文・資料集、(社)地盤工学会、p.39

イ．合成ゴム系ライニング

ため池等、貯水圧を受ける透水性、漏水性地盤のライニングに適しており、敷設基盤のある程度の変形に対しても追随性が期待できる。地盤に亀裂が発生した場合や敷設地盤が凍上した場合の追随性に関する具体的事例は、関連技術文献*1、*2を参照する。

落石の危険性がある場合は落石防止対策を行うが、困難な場合はアスファルト系ライニング等の他の工法を検討する。

ウ．アスファルト系ライニング

ため池、堤防等の漏水防止工法として、若しくは落石の危険性のある池敷のライニング材料として適している。図-3.4.9に本工法を模式図で示す。

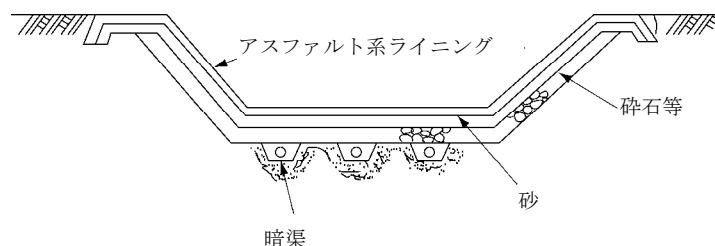


図-3.4.9 アスファルト系ライニング模式図

エ．アースライニング、ベントナイト系ライニング

透水性地盤からの浸透防止や、変状が終息した亀裂帯（非粘性土地盤）からの浸透防止に適している。

後者の場合、床締めを十分に行った後にライニングを施工するが、貯水圧を受ける場合は開口亀裂を処理し、さらに粗粒材料から構成される地盤にあつては、ライニング材料の流亡防止のためにライニングと地盤の境界部にフィルターの施工を考慮する。しかし地すべりの影響を受けるため池等貯水施設にあつては、ライニング自体にも変状を生じる危険性があるので、合成ゴム系ライニング等ある程度の変位を吸収できる構造とすることが望ましい（図-3.4.10）。

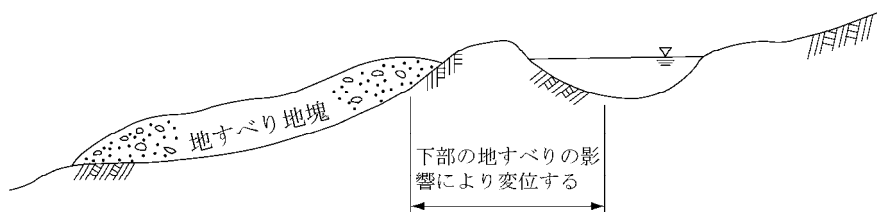


図-3.4.10 地すべりの影響を受けるため池等貯水施設

(4)その他の工法

漏水・浸透防止工には、その他以下のものがあげられる。

*1 長束（2000）：ジオメンブレンを用いた表面遮水工法の設計施工上の留意点、ジオシンセティックス論文集、第15巻、p. 26

*2 長束ら（2002）：敷設基盤の凍上に対するジオメンブレンの追随特性、ジオシンセティックス論文集、第17巻、pp. 95～102

ア. 床締工（粘性土地盤）

床締工は、転圧により地盤を締め固め、地表水の浸透を防止するものであり、粘性土地盤に適している。

イ. 三面張

やや規模の大きな排水路に対し、現場打ちコンクリートやブロック積み擁壁等を用いて排水路からの地表水の浸透を防止する工法である。透水性が高い水路において、効果が高い。

ウ. 吹付工（コンクリート、モルタル、アスファルト）

土圧が作用せず、表面が崩壊するおそれのない地盤に対して行う工法である。

4.2.2 設計の留意事項

浸透防止工は、亀裂や陥没発生箇所に計画されることが多いことから、構造は柔軟なものとし、ある程度の変形に対して追従できる機能を有し、修理が容易なものが望ましい。

(1) 充填工

- ① 充填する材料については、現地の状況を十分に把握した上で選定するものとする。
- ② 冠頭部において、本工法を大規模に採用する場合には、地すべり安定計算を行い、安全率を確認する必要がある。
- ③ 充填部の深さを把握した上で数量を算出する必要がある。

(2) 被覆工

計画設計に当たっては、「土地改良事業計画設計基準・設計 ダム」や「土地改良事業設計指針 ため池整備」を参照する。特に留意すべき事項は、次のとおりである。

- ① 被覆工に用いる材料は、地すべりの活動状況や地形状況及びジオメンブレンの材料特性^{*1}との関連性を検討し、施工性、経済性、維持管理の容易性、景観等も総合的に勘案して選択する必要がある。
- ② ジオメンブレンの厚さは、敷設基盤の表面状態とジオメンブレンに作用する静水圧の大きさによって決まる耐水圧性^{*1}、ジオメンブレン敷設後の損傷の受けやすさ等を検討して決定する。耐水圧性及び損傷の受けやすさは、耐水圧試験や耐損傷試験を行い、その性能を確認することが望ましい。
- ③ ジオメンブレンは感温性が高いことから、使用環境温度の変化により大きな物性変化を起こす可能性^{*1}があるため、その温度依存性を的確に把握しておくことが重要である。
- ④ 亀裂箇所や陥没地を被覆する場合は、流入水を遮断するとともに、表面に地表水が滞留しないように排水を考慮する。
- ⑤ ため池や堤防等で水圧が作用する箇所に設計する場合は、被覆する地盤の土質特性を把握しておくことが望ましい。

4.2.3 施工時の留意事項

(1) 充填工

- ① 地盤の変状が急激な場合には、変状が一旦終息してから施工することが望ましい。地盤の

^{*1} 長束（1999）：ジオメンブレンの貯水池表面遮水工法への合理的な適用法、ジオシンセティックス論文集、第14巻、pp. 370～379

変状が緩慢に継続している場合は材料の補填と床締めを行い、地盤の変状が終わるまで管理する必要がある。

- ② 亀裂箇所の充填部に隙間が発生すると地表水が浸透するため、隙間を発生させないように留意する。
- ③ 不陸が生じ、地表水が滞留しないように施工を行う。

(2) 被覆工

- ① 施工に当たっては、地表面を整形し、流水の停滞やシートのたるみ等を生じさせない工夫をする。
- ② 基盤の凹凸によっては、ジオメンブレンの破断が発生する可能性が高い。このため、不陸や局部的に凹凸ができないよう基盤を形成する。
ジオメンブレン直下に緩衝材（不織布）を配置することも破断の防止策として有効である。
- ③ 合成ゴム系ライニングは、ジオメンブレンが接触する基盤面に突出する角のある礫や岩盤の角稜部は除去整形し、敷設作業中等の不慮の損傷を防止する。また、草木根についても除去し、草木根によるジオメンブレン貫孔の防止を図る。
- ④ ジオメンブレン相互の接着・接合の力学的安定性や水密性が、施工時の気象条件から受ける影響度合い^{*1}を事前に把握しておくことも重要である。
- ⑤ アースライニング、ベントナイト系ライニング、アスファルト系ライニングの場合は、湧水処理及び草木根処理を十分に行う。

*1 長束（1999）：ジオメンブレンの貯水池表面遮水工法への合理的な適用法、ジオシンセティックス論文集、第14巻、pp. 370～379