

7 盛土のり面の設計



1 盛土の種類と機能

盛土にはその目的により様々な役割がある。代表的なものとして道路、鉄道、空港などの交通荷重を担うもの、建築物などの荷重を支持するもの、河川や海岸堤防などの止水、防水を目的とするもの、フィルダムや調整池のように貯水を目的とするものなどがある。これらはそれぞれの目的に応じて、施設の機能および荷重条件を考慮した設計を行う必要がある。

さらに盛土の高さや幅などの規模、万一崩壊した場合の影響の大きさや重要性、復旧の難易なども考慮した計画が求められる。また、道路、鉄道、堤防などのような帯状に細長いものと、宅地や工業用地などのように面状に広いものがあり、その形状も考慮に入れる必要がある。これらを踏まえて盛土の種類と機能をまとめると図 7.1 および表 7.1 となる。

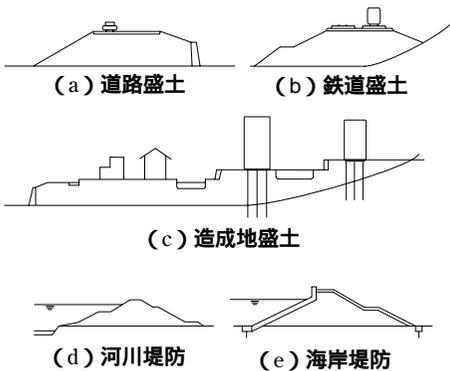


図 7.1 盛土の種類¹⁾

表 7.1 盛土の種類と機能¹⁾

種 類	主な役割	所要条件	一般的なのり面勾配
道路盛土	交通荷重の支持	十分な支持力 沈下量、不同沈下が少ないこと のり面の安定	1 : 1.5 ~ 1 : 2.0
鉄道盛土			1 : 1.8 ~ 1 : 2.0
造成地盛土	建物、施設の支持		1 : 1.8 ~ 1 : 2.0
河川堤防	止水 水防 貯水	漏水がないこと のり面の安定 沈下がないこと	1 : 2.0 ~ 1 : 3.0
海岸堤防			1 : 2.5 ~ 1 : 4.0
調整池			
フィルダム			1 : 2.5 ~ 1 : 4.0



2 盛土の崩壊形態

盛土は人工的構造物であるが、材料には自然材料を用いており、入念に施工管理を行った場合でも品質（強度・透水性）にはバラツキが生じる。したがって、豪雨や地震時には盛土は複雑な挙動を示

し、基礎地盤の複雑さとも相まって、崩壊の形態や原因は様々なものとなる。これらを大別すると「浅い盛土崩壊」、「深い盛土崩壊」、「基礎地盤を含む崩壊」の3種類に分けられる。

1. 浅い盛土崩壊

のり面が細砂やまさ土など浸食を受けやすい土によって構成され、排水設備が不十分な場合には、表面水が集中してのり面を洗掘して、表層崩壊に進展することが多い。崩壊深さは1m程度である。施工後まもなく生じる土羽土^{どはつち}の崩壊や腹付け盛土の崩壊などもこの種の崩壊に属する(図7.2参照)。

表層崩壊は最も多く見られる崩壊形態であるが、盛土本体の機能に直接影響を及ぼすことは少ない。しかし、大規模な崩壊を誘発することがあるため放置せず早期に補修すべきである。

2. 深い盛土崩壊

高含水比粘性土を用いた急速施工の場合には、盛土内に過剰間隙水圧が発生し、のり面のはらみだしや崩壊を起こすことがある。また傾斜地盤上の盛土では雨水の浸透により地下水位が上昇し、盛土全体が崩壊することがある(図7.3参照)。

これらは大規模なものが多く、特に帯状の盛土では連続性が保持できなくなるため、その機能を大きく失う恐れがある。

3. 基礎地盤を含む崩壊

基礎地盤を含む崩壊の典型的なものに軟弱地盤上の盛土がある。また、崖錐や地すべり頭部に盛土した場合には地すべりを助長することがあり、盛土を含む斜面の大崩壊に至ることになる(図7.4参照)。いずれも崩壊した場合には周辺に大きな影響や災害をもたらすため、計画に当たっては注意を要するタイプである。

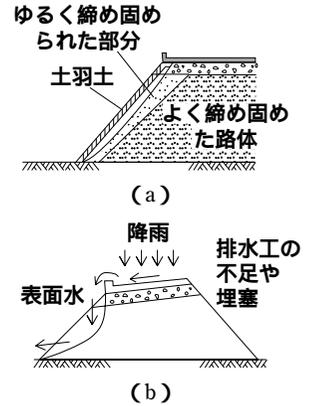
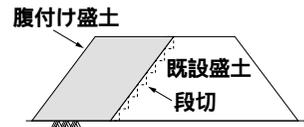


図7.2 浅い盛土の崩壊⁶⁾

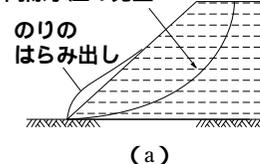
土羽土 盛土のり面の浸食防止、緑化を目的として設ける被覆土あるいは衣土をいう。本来は土羽板を用いて人力で締めていたことからいうが、機械化土工により土羽板での施工は最近あまり見られなくなった。
腹付け盛土 傾斜地盤に接した厚さの薄い盛土部分や既設の盛土のり面に添えた盛土部分のこと。



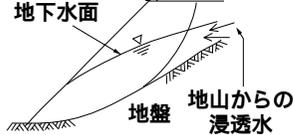
〔腹付け盛土のイメージ図〕

通常の盛土の施工速度は土質にもよるが、20～30cm/day程度である。

盛土荷重による過剰
間隙水圧の発生

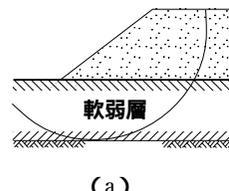


(a)

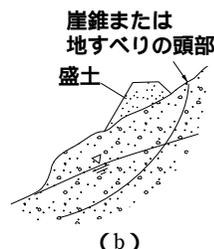


(b)

図7.3 深い盛土の崩壊⁶⁾



(a)



(b)

図7.4 基礎地盤を含む崩壊⁶⁾



3 盛土の標準のり面勾配

盛土のり面保護工の選定は一般に付図 23 にもとづいて行う。

盛土のり面の勾配は、前述のように盛土の種類に応じて表 7.1 に示す値を用いることが多い。なお、発注機関によっては盛土材料や盛土高に応じて標準値を定めており、道路の例を表 7.2 に示す。

ただし、次項の「安定検討が必要な盛土」の場合は安定検討を行う。

表 7.2 盛土材料および盛土高に対する標準のり面勾配⁶⁾

盛土材料	盛土高(m)	勾配	概要
粒度のよい砂(S)	5m以下	1:1.5~1:1.8	基礎地盤の支持力が十分にあり、浸水の影響のない盛土に適用する ()内の統一分類は代表的なものを参考に示す
礫および細粒分混じり礫(G)	5~15m	1:1.8~1:2.0	
粒度の悪い砂(SG)	10m以下	1:1.8~1:2.0	標準のり面勾配の範囲外の場合は安定計算を行う
岩塊(ずりを含む)	10~20m	1:1.5~1:1.8	
砂質土(SF) 硬い粘質土 硬い粘土	5m以下	1:1.5~1:1.8	標準のり面勾配の範囲外の場合は安定計算を行う
	5~10m	1:1.8~1:2.0	
火山灰質粘性土(V)	5m以下	1:1.8~1:2.0	

注)盛土高は、のり肩とのり尻の高低差をいう



4 安定検討が必要な盛土

特に、安定上問題となる盛土としては以下のような場合があり、安定検討を行ってのり勾配を検討し、必要に応じて対策をたてる。

表 7.3 安定検討を必要とする盛土

区分	盛土条件	例	
盛土自体の条件	盛土高が標準値より高い場合 のり面勾配が標準値より急な場合 盛土材料の含水比が高く、せん断強度が低い場合 間隙水圧が上昇しやすい盛土材料の場合	・事例の少ない高盛土など ・地形や用地の制約 ・高含水比火山灰質粘性土など ・シルト質土など	
外的条件	周辺	破壊すると盛土構造物や周辺地域に大きな被害を与える場合 破壊すると復旧に長期間かかり、その機能を失う場合	・ダム、重要構造物に近接など ・ライフライン、山岳道路など
	地盤	基礎地盤が特に不安定な場合 地形条件によって盛土内への浸透水が多い場合 水際で波浪や冠水の影響を受けたり、のり尻付近が浸食される場合	・軟弱地盤、地すべり地 ・沢部や傾斜地盤上の盛土 ・湖沼や、川沿いの盛土



5 代表的安定計算法と安全率

わが国の各種設計法は、従来の許容応力度法や安全率法から確率に基づいた限界状態設計法へと移行しつつあるが、大半の設計基準類は前者のままである。ここでは、盛土の安定検討に広く用いられている安全率法について述べる。

1. 安定計算式

のり面安定問題では一般に、無限長の二次元問題としてすべり面を円弧と仮定した円弧すべり解析法が用いられ、安全率は次式で与えられる。(図 7.5 参照)

$$\text{安全率 } F_s = \text{抵抗モーメント} / \text{すべりモーメント} \quad (7.1)$$

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (7.2)$$

ここに、 F_s : 安全率

c : 粘着力 (kN/m^2 (tf/m^2))

ϕ : せん断抵抗角 (度)

l : スライスで切られたすべり面の長さ (m)

W : スライスの全重量 (kN/m (tf/m))

u : 間隙水圧 (kN/m^2 (tf/m^2))

b : スライスの幅 (m)

α : スライスで切られたすべり面の中心とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (度)

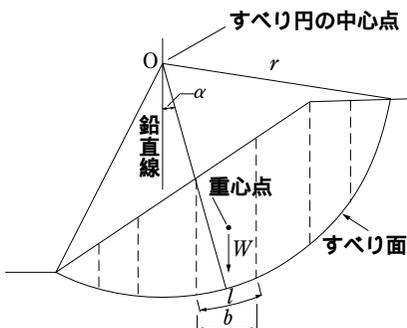


図 7.5 円弧すべり面を用いた常時の安定計算法⁶⁾

7 盛土のり面の設計

計算法は過剰間隙水圧 u の取り扱いによって全応力法と有効応力法に分けられ、安定検討の時期・盛土材料・構造・施工条件や排水環境などに応じてその強度定数や間隙水圧の設定方法が異なる。各計算法に対応した強度定数と間隙水圧の関係を表 7.4 に示す。

表 7.4 全応力法、有効応力法に用いる強度定数と間隙水圧⁶⁾

検討時期	全 応 力 法		有効応力法
施工直後	透水性が低い場合	急速施工の場合	c'_u, ϕ'_u, u_r, u_0
		緩速施工の場合	$c_{cu}, \phi_{cu}, u_r, u_0$
	透水性が高い場合	c'_d, ϕ'_d, u_0	c', ϕ', u_0
長期間経過	透水性が低い場合	c_{cu}, ϕ_{cu}, u_0	c', ϕ', u_A, u_0
	透水性が高い場合	c'_d, ϕ'_d, u_0	c', ϕ', u_0

ここに

- c_{cu}, ϕ_u : 非圧密非排水 (UU) 試験より求められる強度定数
- c_{cu}, ϕ_{cu} : 圧密非排水 (CU) 試験より求められる強度定数
- c', ϕ' : 圧密非排水 (CU) 試験より求められる強度定数
- c'_d, ϕ'_d : 圧密排水 (CD) 試験より求められる強度定数
- u_r : 施工直後の残留間隙水圧
- u_0 : 降雨・地山の地下水等の浸透による間隙水圧
- u_A : すべりに伴って発生する間隙水圧

一般の盛土の場合は、施工直後は簡便さから全応力法を用い、長期的な安定には間隙水圧が重要な役割を果たすことから有効応力法が用いられることが多い。フィルダムなどの水位変動を伴う場合には、表 7.5 に示すように貯水池の水位に応じて細かな条件に応じた有効応力法が用いられる。

表 7.5 フィルダムに用いられる安定計算の条件⁷⁾

条 件	計算対象のり面	堤体覆度	水 位	間 隙 圧
(1) 常時満水位時	上・下流	100%	常時満水位	定常浸透圧
(2) 完成直後	上・下流	50%		工事中的間隙水圧残存
(3) 中間水位時	上流	100%	常時満水位と最低水位との間の水位	定常浸透圧
(4) サーチャージ水位時	上・下流	50%	サーチャージ水位	定常浸透圧
(5) 設計洪水時	上・下流	0%	設計洪水水位	定常浸透圧
(6) 水位急低下時				
a) 日常水位急低下が行われるダム	上流	100%	定常満水位 最低水位 サーチャージ水位 洪水期制限水位 常時満水位 最低水位	残留間隙水圧
b) その他のダム	上流	50%		残留間隙水圧

注) 常時満水位と最低水位の間の水位で最も危険となるときの水圧

2. 地震時の安定計算

地震時の盛土の安定については、特に重要な構造物を除き耐震設計は行われてこなかったが、最近の被災事例から検討の必要性が指摘されている。従来から地震時の盛土の安定検討には、地震力を水平力に置き換えて計算する静的な手法が用いられている。代表的なものは円弧すべり面に震度法を適用した計算法であり、その計算式を以下に示す。この方法では豪雨と地震の同時被災はないとして、降雨による浸透水は考慮せず、次式の安全率 F_s が1.0以上あれば安定としている。

$$F_s = \frac{\sum [c \cdot l + \{ (W - u \cdot b) \cos \alpha - k_h \cdot W \cdot \sin \alpha \} \tan \phi]}{\sum (W \cdot \sin \alpha + \frac{h}{r} \cdot k_h \cdot W)} \quad (7.3)$$

- ここに、 F_s : 安全率
 r : すべり円の半径 (m)
 c : 粘着力 (kN/m^2 (tf/m²))
 l : 分割片で切られたすべり面の弧長 (m)
 W : 分割片の重量 (kN/m (tf/m))
 u : 間隙水圧 (kN/m^2 (tf/m²))
 b : 分割片の幅 (m)
 α : 分割片で切られたすべり面の中点とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (度)
 k_h : 設計水平震度 (無次元)
 ϕ : せん断抵抗角 (度)
 h : 各分割片の重心とすべり円の中心との鉛直距離 (m)

震度法 構造物自重の何割かを水平方向あるいは鉛直方向に作用させて構造物の安全性をチェックする方法。震度という概念を用いることにより、動的な地動を静的な地動に置き換えることができ、これまでの基本的耐震計算法として多用されてきた。

設計震度 震度法に用いる重力に対する地震外力の割合を設計震度と呼び、構造物の重要性と地域特性によって割合が異なる。

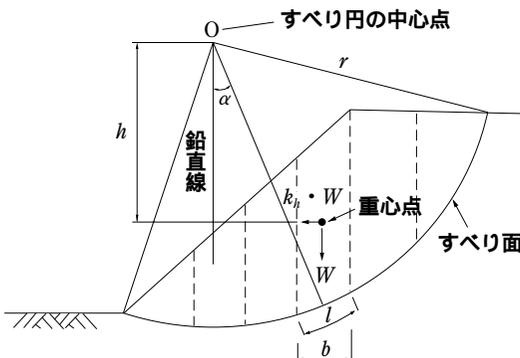


図7.6 円弧すべり面を用いた地震時の安定計算法⁶⁾

3. 安全率

安全率法では調査・設計・施工の各段階における不確実性や対象とする構造物の重要度を総合的に考慮し、実績に基づき経験的に定めている。

安定計算を行う場合の常時安全率 F_s は、一般の盛土のり面では1.2～1.3、フィルダムでは1.2～1.5が用いられる。所要の安全率が確保できれば、一応盛土体の安全は確保できると考えられるが、盛土の安定計算法および強度定数、間隙水圧には多くの仮定や不確定要素を含んでおり、計算結果がそのまま安全性を正しく示しているとは限らない。安定計算はあくまでも安定検討の1つの手段としてとらえ、計算結果を過信せずに周辺の状況や土質・施工条件などを総合的に判断する必要がある。

表 7.6 には、設計基準類における土質・基礎に関連する各種構造物の安全率を示す。

表 7.6 設計基準類における各種構造物の安全率³⁾

構造物	安全照査モード	安全率	
		範囲	代表値
盛土・のり面	安定	1.2～1.3	
フィルダム	安定	1.2～1.5	1.2
コンクリートダム	せん断摩擦抵抗		4
	局部破壊	(2)	(2)
直接基礎	鉛直支持力	2.5～3	3
	水平支持力	1.2～2	1.5
杭基礎(単杭)	鉛直支持力	2.5～4	3
	水平支持力	3～4	
	引抜き支持力	3～6	3
ケーソン基礎	鉛直支持力	3	3
	水平支持力	1.5～3	
擁壁	滑動	1.5	1.5
	転倒	1.5	1.5
	基礎支持力	3	3
土留め工	ヒーピング	1.2～1.5	1.2
	ボイリング	1.2～1.5	1.2
	根入れ安定	(1.2)	(1.2)

注) () 内の値は安全率として厳密に定義されたものではなく、参考値である



6 盛土の地震時変位量の簡易算定法

1. ニューマーク法

発生確率は低いが非常に強い地震動であるレベル2地震動 に対しては、前述の震度法による静的解析法では所要の安全率を確保することが困難である。そこで近年では地震時の円弧すべり面に沿って生じる残留変位量を求め、それが許容限度以下であるかを判定する方法が用いられるようになってきた。この方法はニューマーク法と呼ばれるもので、土木学会の耐震設計ガイドライン⁵⁾に採用され、他の機関でも導入あるいは検討中である。

ニューマーク法はすべり土塊が剛体であり、すべり面における応力ひずみ関係が剛塑性 と仮定して地震時の土塊の滑動変位を計算する方法である。厳密解ではないが、入力パラメータの設定が円弧すべり法と同等であり、比較的妥当な結果が得られ結果の解釈が容易であるなどから、設計に用いやすく、レベル2地震動に対する盛土の耐震性評価の指標として有効とされる。

レベル2地震動 構造物の耐震設計に用いる入力地震動で、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動をいう⁴⁾。(土木学会第3次提言)

剛塑性 一般に材料は、加えた荷重を除去すると変形が復元する弾性と、荷重がある値(降伏点)を超えると変形が急激に増大し、荷重を除去しても変形が残留する塑性を持っている。1つの材料で弾性・塑性の両方の性質を考慮する場合を弾塑性体(elasto-plastic body)、弾性変形は微小であるので無視して剛体と考える場合を剛塑性体(rigid-plastic body)という²⁾。(土質工学用語辞典)

2. 運動方程式

ニューマーク法の基本となる運動方程式は以下のとおりである⁵⁾。

$$-J\ddot{\theta} + M_{DW} + M_{DKh} - M_{RW} - M_{RKh} - M_{RC} - M_{RT} = 0 \quad (7.4)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(k_h - k_y)(M_{DK} + M_{RK})}{J} \quad (7.5)$$

ここに、 θ : 回転角

J : 慣性モーメント

k_h : 水平震度

k_y : 降伏震度

M_{DW} : 自重による滑動モーメント

M_{RW} : 自重による抵抗モーメント

M_{RC} : 粘着力による抵抗モーメント

M_{RT} : 補強工による抵抗モーメント

M_{DK} : 地震慣性力の基準滑動モーメント

M_{RK} : 地震抵抗力の基準抵抗モーメント

M_{DKh} : 地震慣性力による滑動モーメント

$$(\quad = K_h \cdot M_{DK})$$

M_{RKh} : 地震慣性力による抵抗モーメント
 (= $-K_h \cdot M_{Rk}$)
 R : すべり面の半径

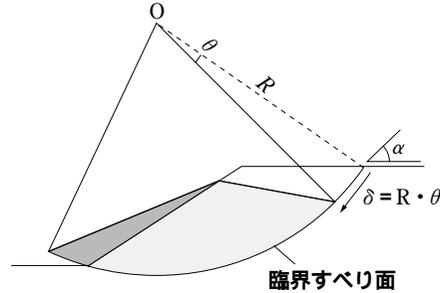


図7.7 滑動変位計算モデル⁵⁾

また、静的安全率 F_s は式7.6 で与えられる。

$$F_s = \frac{M_{RW} + M_{RC} + M_{RT}}{M_{DW}} \quad (7.6)$$

ここで、降伏震度 k_y は、 $F_s = 1$ のときの K_h であるため、式7.7 から得られる。

$$k_y = \frac{M_{RW} + M_{RC} + M_{RT} - M_{DW}}{M_{DK} + M_{RK}} \quad (7.7)$$

3. 計算手順⁵⁾

設計水平震度 k_h を変化させた地震時円弧すべり安定計算を式(7.7)で行い、安全率が1.0となる降伏震度 k_y と、この時の円弧すべり面(臨界すべり面)を求める。

計算に用いる入力加速度波形を設定する。

臨界すべり面の回転変位量は、入力加速度に対して線形加速度法を用いて逐次計算により求める。具体的には、式(7.5)を用いて角加速度 $\ddot{\theta}$ を、以降逐次、式(7.8)で角速度 $\dot{\theta}$ を、式(7.9)で角度 θ を計算し、臨界すべり面に対する円弧半径 R からすべり土塊の滑動変位量 $\delta (= R \cdot \theta)$ を算出する。

$$\dot{\theta}_{t+\Delta t} = \dot{\theta}_t + \frac{1}{2}(\ddot{\theta}_t + \ddot{\theta}_{t+\Delta t})\Delta t \quad (7.8)$$

$$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t + \dot{\theta}_t\Delta t + \frac{1}{6}(2\ddot{\theta}_t + \ddot{\theta}_{t+\Delta t})\Delta t^2 \quad (7.9)$$

なお、この方法は液状化する地盤など極端な変形特性の変化がある場合には、不適当な場合もあるので注意を要する。

線形加速度法 時刻 t から時刻 $t + \Delta t$ までの間で、加速度が直線の変化すると仮定する方法。

7 谷埋め盛土

1. 谷埋め盛土の被災と特徴

わが国は地震国であり古来より地震による多くの地盤災害が発生しているが、昭和39年（1964年）の新潟地震以降、地盤の液状化に大きな関心が寄せられ研究も進められてきた。近年では液状化以外に「谷埋め盛土」の崩壊事例も数多く報告されており、昭和53年（1978年）の宮城沖地震では仙台市で谷埋め盛土が地すべりに変動し注目された。平成7年の阪神・淡路大震災でも阪神間の多くの谷埋め盛土が被災し、これを契機に谷埋め盛土の地震時変動の研究が始まった。

谷埋め盛土とは台地などにおける谷が宅地造成のために埋め立てられた盛土のこと。

釜井らの研究¹⁰⁾によれば、谷埋め盛土では、谷の幅/深さ比(W/D) 10が地震時変動の有無の境界となっており、W/D比が10を越えると被災しやすいとされている。地震時に変動した谷埋め盛土の特徴は、底の浅いお椀型～皿形の横断面形状をしていることが多い。土質はほぼ均質で、不均質な自然斜面の土質とは異なっており、盛土全体が旧地形に沿って変動あるいは崩落している。

同様な現象は平成15年（2003年）三陸南地震や平成16年（2004年）の新潟県中越地震による宅地災害でも見られており、前者の例（宮城県築館町）を図7.8に示す。

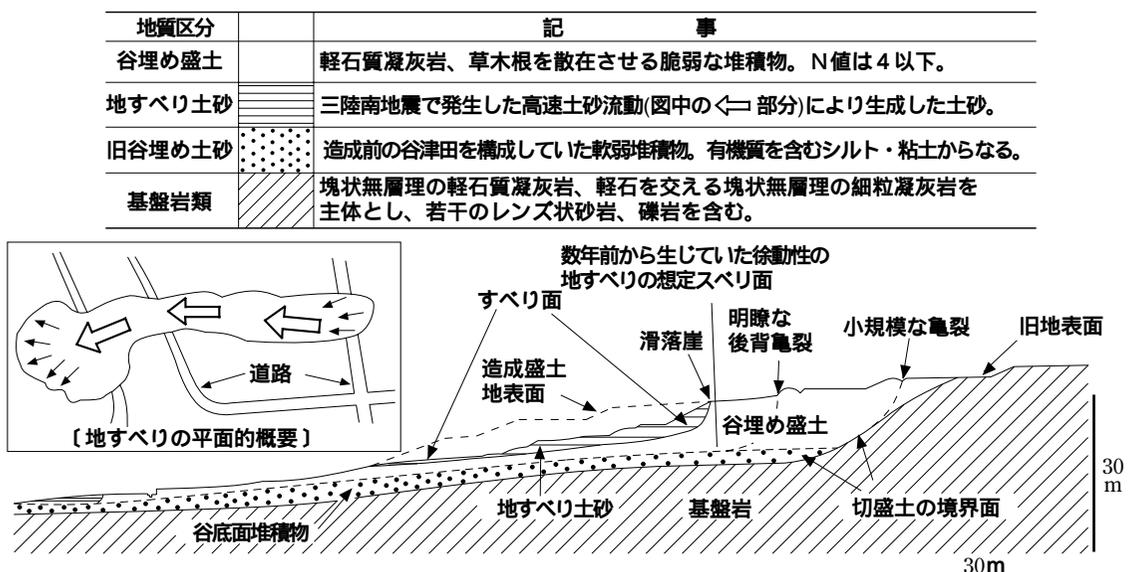
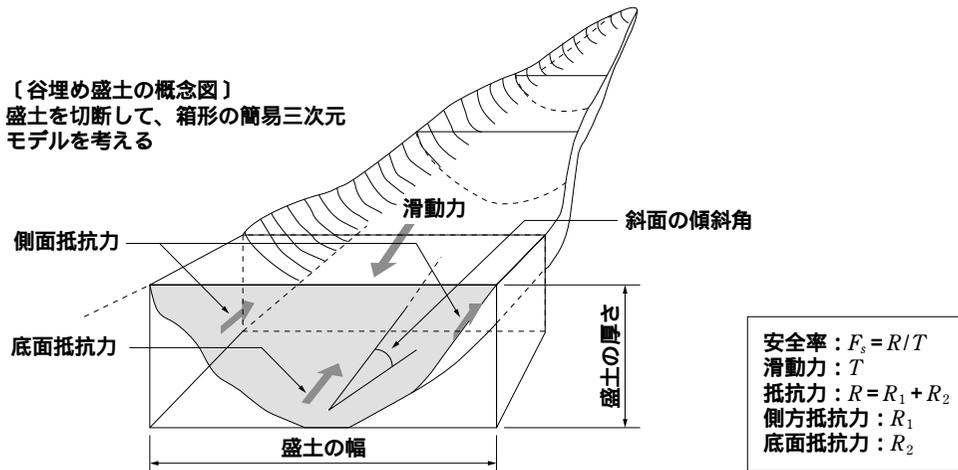


図 7.8 谷埋め盛土で地震時に発した地すべりの例¹¹⁾
(2003年5月26日 三陸南地震、宮城県築館町)

2. 周面摩擦を考慮した安定解析手法

盛土の安定検討は前項までで述べたように、無限長のり面と仮定して二次元問題として解析が進められてきた。しかし、谷埋め盛土はお椀～お皿の形状をしており、側面あるいは周面の抵抗を考慮する必要があり、その安定解析の一手法として下記が提案されている。この方法は盛土をスライスして箱形に近似させ、箱の底と両側面の抵抗を考慮した簡易の三次元モデルである。



〔谷埋め盛土の前提条件〕

- ・ 盛土の幅は有限
- ・ 盛土が滑り落ちようとする滑動力に対して、底面抵抗力と側面抵抗力が働く
- ・ 地震で盛土のせん断抵抗力が小さくなると、すべり面の底面抵抗力が失われるが、側面抵抗力が盛土の滑動に抵抗する

図 7.9 谷埋め盛土の安定解析方法概念図¹²⁾

3. 宅地防災対策の方針変換

谷埋め盛土は都市部、中山間地を問わず全国各地に数多く存在しており、ひとたび大地震が発生すれば多くの災害が発生することはこれまでの事例で明らかである。特に切迫が予想されている首都圏直下、東海・東南海・南海、宮城県沖地震などの大地震発生に対して事前の対策が急がれる。

国土交通省では「総合的な宅地防災対策に関する検討会」を設け、従来の造成地における土砂流出防止に重点を置いていた宅地防災対策を、震災による被害軽減を重視する総合的な「地盤災害」対策として法制度や予算措置も含めて強化、推進していくことに大きく方針を変換した。同検討会の報告書（案）による対策の方向性と施策の概要は以下のとおりである¹³⁾。

リスク基準の明確化：宅地安全性に係わる耐震技術基準の制定

リスクアセスメントとリスクコミュニケーション：宅地ハザードマップの作成と情報開示

減災対策と新たな危険宅地の増加防止：特に危険な大規模谷埋め盛土（全国に約1,000箇所存在と推定）に対する減災対策の実施、宅地造成等規制法の改正

引用・参考文献

- 1) (社)地盤工学会編：「盛土の調査・設計から施工まで第一回改訂版」、1990、pp.6～7
- 2) (社)地盤工学会：「土質工学用語辞典」、1985
- 3) (社)地盤工学会編：「地盤工学ハンドブック」、1999
- 4) (社)土木学会：「土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説」、2000
- 5) (社)土木学会 耐震基準小委員会：「土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）耐震基準作成のための手引き」、2001
- 6) (社)日本道路協会：「道路土工のり面工・斜面安定工指針」、1999
- 7) (社)日本河川協会：「河川砂防技術基準（案）同解説」、1997
- 8) (社)農業土木学会：「土地改良事業計画設計基準 ダム」、2003
- 9) 日本道路公団：「設計要領第一集 土工」、1998
- 10) 釜井俊孝、守隋治雄、太田英将、原口強：「都市域における地震時斜面災害のハザードマップ - 宅地盛土斜面の変動予測 - 日本応用地質学会 シンポジウム予稿集」、2000
- 11) 全国地すべりがけ崩れ対策協議会：「地すべり研究（第49集）」、2005、p.117
- 12) 日経コンストラクション：「2006年の建設産業 - 技術基準 - 」、2006.1.27、p.61
- 13) 国土交通省：「総合的な宅地防災対策に関する検討会報告（案）」、2005