

地すべり滑動における側部摩擦効果検証実験

An experiment of side friction effect in landslide

太田英将* (有限会社太田ジオリサーチ), 美馬健二 (有限会社太田ジオリサーチ)

柏熊誠治 (千代田器材株式会社)

Hidemasa OHTA (Ohta Geo Research Co.,Ltd.), Kenji MIMA (Ohta Geo Research Co.,Ltd.)

Seiji KASHIKUMA (Chiyoda Kizai Co.,Ltd.)

キーワード: 斜面安定, 側部抵抗, 実験, 地すべり

Keywords: slope stability, side friction, experiment, landslide

1. はじめに

斜面の安定計算手法は、通常 2 次元断面極限平衡法が用いられている。地すべりのようなすべり面形状があらかじめわかっているものに対しては、単一すべり面強度を用いた方法が使われている。これらの安定計算手法は、計画安全率とセットになることにより斜面問題の多くを解決し有効な対策がとられている。

現在、安定計算手法は数値解析への発展過程にある。数値解析は、多数の地盤定数により厳密に地盤の安定・変形問題を取り扱えるため、非常に有効な手法であるが、逆に言えばどのような結果でも恣意的あるいは無意識に「合わせてしまう」ことも可能である。

意味のある数値解析モデルをつくるためには、手法が単純な極限平衡法であっても、ある程度自然を説明できることが必要条件であると考え。極限平衡法で説明できないまま、数値解析に移行したとしても同じ問題が残り、なおかつ手法が複雑になるので問題点の抽出が難しくなる。理想的には、極限平衡法の順算法で斜面の安定問題がある程度の精度で説明できるようになった後に、より厳密な数値解析へ移行するのが良いだろう。

2. 側部摩擦抵抗の研究例

すべり面粘土の力学試験の技術が発達し、強度測定が精度良くできるようになってきた。しかし、

その値を用いた安定計算では現状の斜面の安定度を説明できないことが多々ある。

例えば、緩慢な変動を始めた地すべり ($F_s \approx 1.0$ と見なせる) においても、残留強度を用いると $F_s=0.6$, 完全軟化強度を用いると $F_s=1.8$ など、計算誤差とは考えられない差が生じるのが普通である。これは 2 次元法でも 3 次元法でも同様である。これが FEM になれば解消できるということではないだろう。

太田・林 (2001) ¹⁾ は、現場における観察等から周縁部の摩擦が底部の摩擦に比べて大きいことを考慮し、周縁部摩擦を考慮した 3 次元安定解析を利用する手法を提案した。

釜井ほか (2000) ²⁾ では、地震時の谷埋め盛土にあっては、側部摩擦 (幅/深さ比) が支配的要因であることを示した。

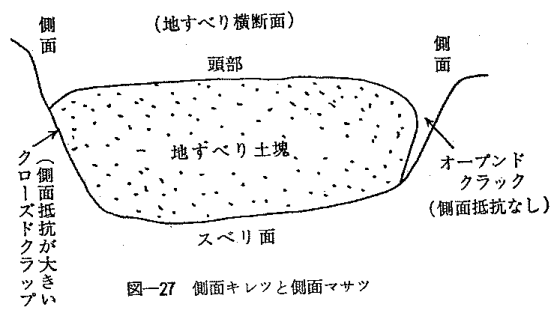


図-1 渡 (1975) の説明図

側部抵抗に関連した記述は、渡ほか (1975) ³⁾ にある。「一般に地すべりにおけるサイドフリク

ション（側面の摩擦抵抗）は安定計算上無視するが、これは地すべりが層厚に比べて幅が約 5 倍以上あり、しかも一般に両サイドが同時に抵抗力を持つわけではなく、片側のみしかない為であるが、将来は此の値を考慮した 3 次元的な解析方法の開発が望ましい。（p35～36 原文通り；図-1 参照）」

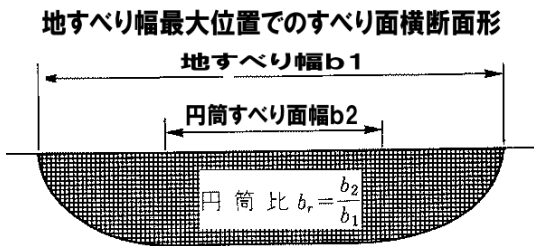


図-2 申(1989)の縁端効果の説明図

また、申(1989)⁴⁾では側壁部分の縁端効果を円筒比（円筒すべり面幅／地すべり斜面最大幅）で定義し、3次元計算に組み込んでいる（図-2）。円筒比の概念の中に側部強度と底部強度が異なる場合については言及されていない。しかし、これらの例は斜面の安定計算に携わった研究者は、側部抵抗の効果を意識していたことを示している。

3.実験概要

現場の最前線で仕事をする技術者は側部抵抗など周縁部強度が安定問題に深く関与していると、体験的に感じている。一方、室内実験を行うグループは、解析に組み込むほど側部抵抗は効いていないとの見解を持つ人が多い。その見解の差がなぜ生じているのか、側部抵抗は本当に効いているのか、効いていないのか、ということは議論を尽くしても結論が出ないので、簡単な実験を行った。

実験方法は、トラックに乾燥した砂を詰め、荷台を傾斜させていって、積んだ砂が滑り落ちるときの傾斜角を計測するという単純なものである。

荷台の底面には鉄板を敷いて平面性を確保した。荷台の側部も鉄製である。砂の締め固めは、単に荷台に載せたただけの場合（締固度低）、載せた後バ

ックホーのバケットで上から押さえた場合（締固度中）、バケットで荷台に砂を置く度に人間の足で踏み固めた場合（締固度高）の3パターンである。

トラック荷台の寸法は（長さ）1920mm×（幅）2050mm×（深さ）380mmである。

締固度低の場合の密度は $\gamma = 11\text{kN/m}^3$ 、締固度高の密度は $\gamma = 15\text{kN/m}^3$ であった。土構造物の盛土地盤は砂の場合 $\gamma = 19\sim 20\text{kN/m}^3$ 程度であるので、これより締固度が高いと想定される。

トラックの荷台を傾斜させると、土は一度に滑動するのではなく、末端の小崩壊が先行して発生する。このため、崩壊角としては、Case1を除いて、荷台奥の鉄板から砂が離れる瞬間の角度とした。

4.実験結果

実験状況および実験結果は図-3に示した。締固度が高くなると崩壊角も大きくなるが、その傾向はどの締固度でも同じなので、「締固度高」についての結果について説明する。

4.1 土と鉄の側部抵抗効果

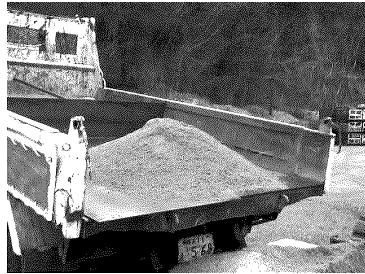
Case1は鉄板の上に乾いた砂を置き、側面がどこにも接しないようにしたものである。Case2は荷台に砂を満タンにして荷台の側面（鉄）の影響があるようにしたものである。底面から全体が滑り落ちる際の崩壊角は、Case1が 36.5° 、Case2が 35.0° とほとんど差が無く、むしろ側面抵抗の影響があるはずの方が崩壊角が若干小さい。この結果から、今回の締固度の条件では平滑な鉄板の容器では側部摩擦効果は発揮されないとと言える。

4.2 土と土の側部抵抗効果

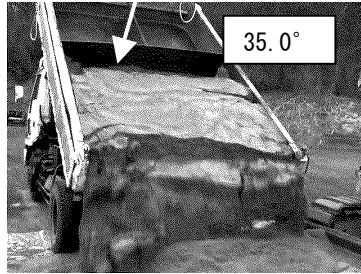
土（乾燥砂）の中にせん断面が発生するように、荷台の中央に、滑動方向と平行に障害物（パイプ）を置いて実験した。1組当たりパイプ2本を並列させたものがCase3、パイプ1本のものがCase4である。

実験状況

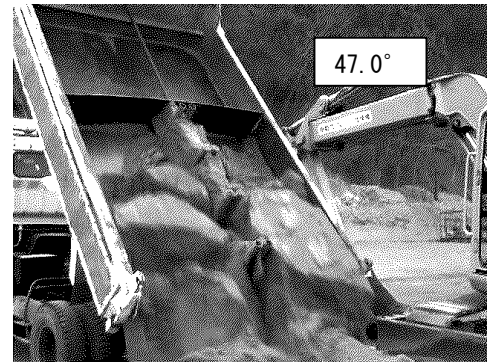
この板から土が離れた時の荷台の角度を計測



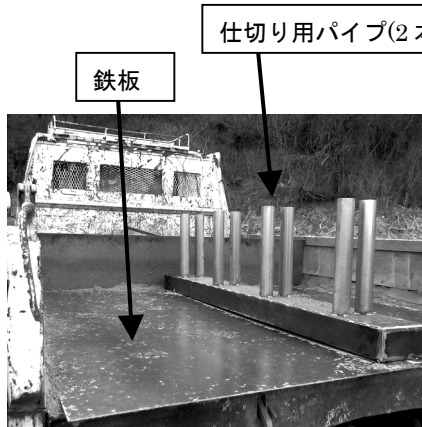
仕切りなし Case1



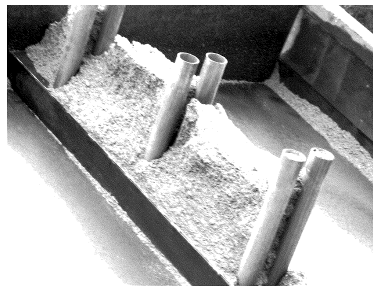
仕切りなし Case2



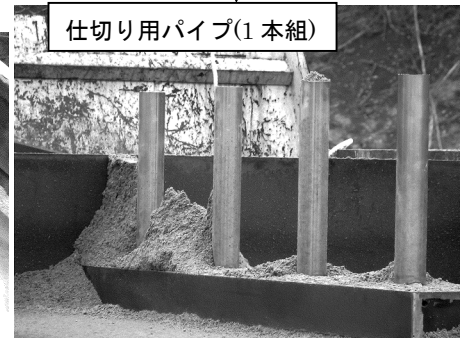
仕切りあり (Case3 および 4)



仕切りにパイプ2列の場合 (Case3)



仕切り部の土壁 (すべりの側部)



仕切りパイプ1列の場合 (Case4)

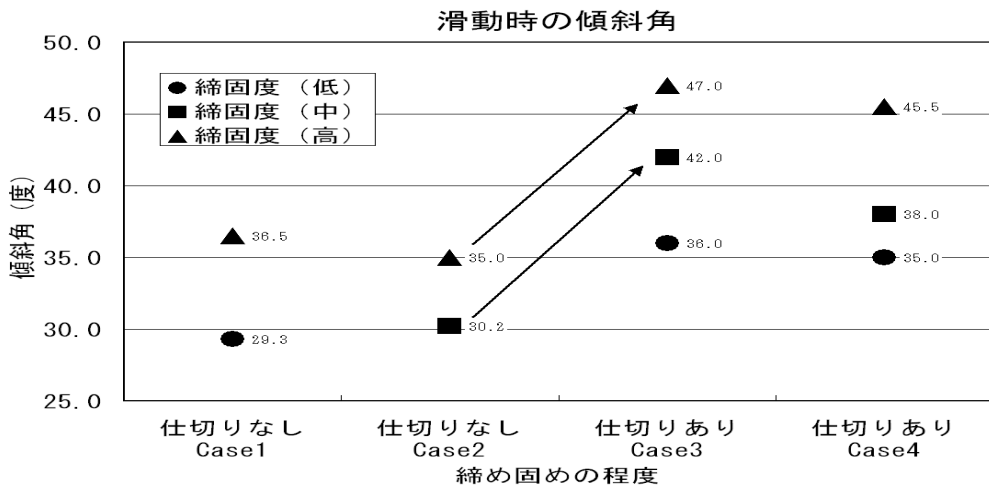


図-3 実験状況と実験結果

トラック荷台の側壁摩擦効果 (土と鉄) は認められない。仕切り部の側壁摩擦効果 (土と土) は崩壊角で 10 度以上の違いが発生する。

Case3 (2本組)の方がCase4 (1本組)より明確に土と土のせん断破壊面を形成させることができた。

Case3の崩壊角は 47.0° 、Case4は 45.5° であった。仕切りがない時の崩壊角は 35.0° (Case2)～ 36.5° (Case1)なので、約 10° 崩壊角が大きくなったことになる。

4.3 側部抵抗の概略値

Case2とCase3の「締固度高」の結果から、側部抵抗の概略値を試算する。対象とする土塊は、仕切られた半分の土塊 $V=(長さ)1920\text{mm}\times(幅)925\text{mm}\times(深さ)380\text{mm}=0.675\text{m}^3$ となる。単位体積重量は実測値で $\gamma=15\text{kN/m}^3$ である。

Case2の崩壊角の時点で抵抗力(R1)と滑動力(T1)がバランスしていたとすると、

$$R1=T1=0.675\times 15\times \sin 35.0^\circ = 5.8\text{kN}$$

仕切りにより土と土のせん断抵抗(側部抵抗R2)が発現し付加されたとすると、Case3の崩壊角 47° の状態は、

$$T2=R1+R2=0.675\times 15\times \sin 47.0^\circ = 7.4\text{kN}$$

$R1=5.8\text{kN}$ なので、 $R2=7.4-5.8=1.6\text{kN}$ となる。これが側部抵抗片面分の抵抗力である。Case3における側部抵抗力は、総抵抗力の $1.6\div 7.4=22\%$ ということになる。この量は、底面の幅が十分広く、その土塊が一体化して滑動すれば無視しうる比率となるわけだが、側部せん断面間隔が狭い場合には安定解析上考慮すべきであろう。発想を転換すれば、人為的に幅を狭くすることで側部摩擦効果を引き出し地すべり対策に利用することも考えられる(太田2001)⁵⁾。

地すべりでは強度的に非常に弱いすべり面(例えば $\phi'=10^\circ$ 未満)が多くの場合存在し、盛土地盤の底面に飽和地下水がある場合には底面の抵抗力が強震動による過剰間隙水圧の上昇で著しく小さくなる場合がある。そのような場合には、この側部抵抗力は斜面安定上も無視し得ないものと考え

えられる。

5.まとめ

斜面安定上、側部抵抗力がどの程度存在するかを簡略的に確かめるための実験を行った。その結果を以下に示す。

- (1)平滑な面(今回の場合、鉄板)と土の間に安定解析上考慮するような側部抵抗は認められなかった。(実験土槽と似た条件と考えられる)
- (2)土と土の間では、比較的大きな側部抵抗力が存在していると考えられる。(自然地盤と似た条件と考えられる)
- (3)極限平衡法の安定解析も側部摩擦を考慮することが実務的に有効であり、より高度な数値解析に側部摩擦の組み込みは不可欠と考えられる。
- (3)底面のせん断強度が著しく小さい地すべりや、地震時のすべり面液状化の際には、側部抵抗力は安定計算上無視し得ないものと考えられる。
- (4)この側部摩擦効果を有効に利用した地すべり対策工開発の可能性がある。

謝辞

株式会社三陽の高田嘉苗氏には、実験の場所および機器・機材の提供で協力いただいた。ここに記して感謝いたします。

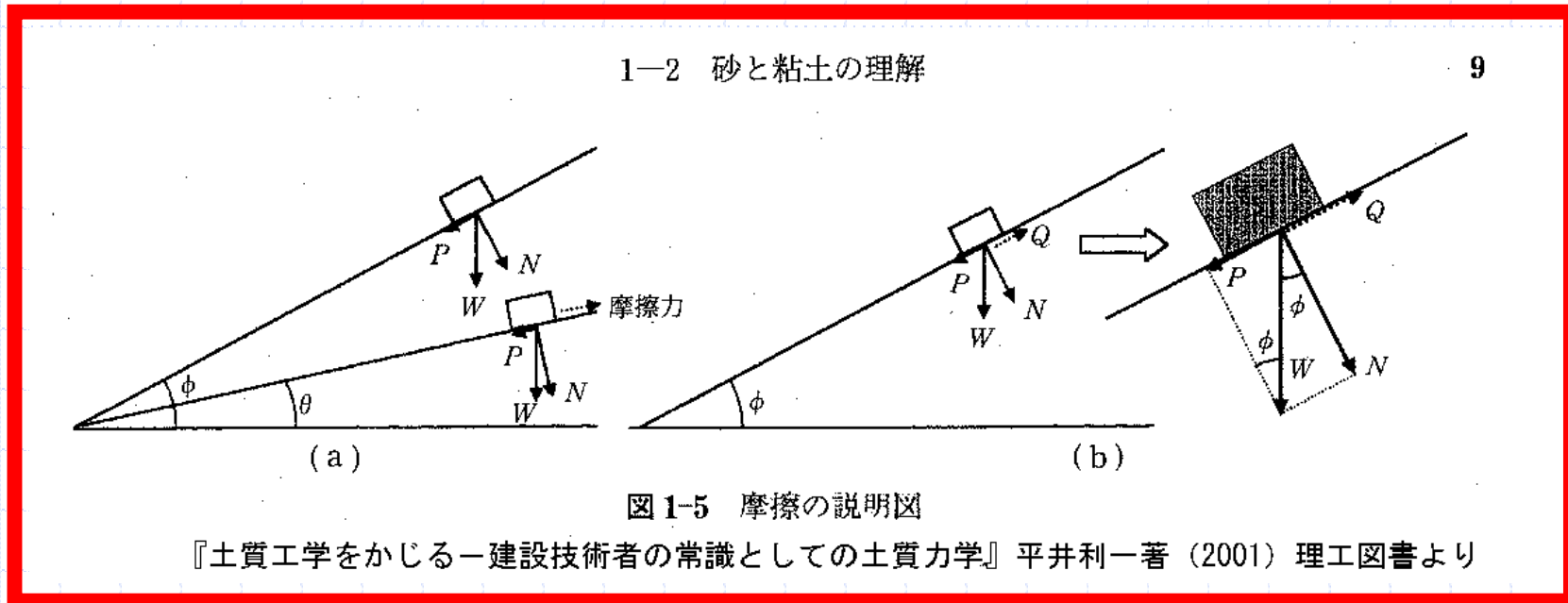
参考文献

- 1) 太田英将・林義隆(2001):周縁部摩擦効果を考慮した地すべりの3次元安定解析, 日本地すべり学会誌
- 2) 釜井俊孝・守随治雄・太田英将・原口強(2000):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-, 日本応用地質学会平成12年度シンポジウム予稿集
- 3) 渡正亮・酒井淳行(1975):地すべり地の概査と調査の考え方, 土木研究所資料1003号
- 4) 申潤植(1989):『地すべり工学-理論と実践-』, 山海堂
- 5) 太田英将(2001):土塊の内部抵抗を利用した新しい地すべり対策工法, 2001年度土木学会研究発表会

地すべり滑動における 側部摩擦効果検証実験

太田英将* (有限会社太田ジオリサーチ)
美馬健二 (有限会社太田ジオリサーチ)
柏熊誠治 (千代田器材株式会社)

斜面の安定問題の教科書的説明が自然現象に適用できるか？

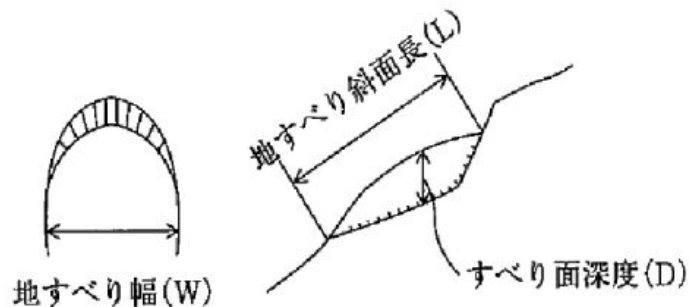


「教科書」で説明できないこと(1)

地すべりに「大きさ」があるのは何故？

表 2.1 地すべり形状比

地すべり形状比	自然発生型地すべり		土工による地すべり
	土研(1977)	上野(2001)	高速道路調査会(1985)
長さ/深さ(=L/D)	16.6	7.39	6.1
長さ/幅(=L/W)	1.85	1.24	0.84
幅/深さ(=W/D)	9.45	6.08	8.32



$L/W = 0.5 \sim 2.9$ (平均1.24, 標準偏差0.51)

$L/D = 2.8 \sim 19.2$ (平均7.39, 標準偏差3.51)

$W/D = 3.0 \sim 10.7$ (平均6.08, 標準偏差1.80)

地すべり形状を示す表面形状比 (上野, 2001)

- これ以上の大きさになると $F_s < 1$ となる大きさが「地すべりの大きさ」を決めているのではないか
- いまの安定解析で大きさを決定することができないのはなぜか

解析の仮説を組む前に、こういった基礎的なことには回答をもっていなければ、解析はただの高校物理の世界になってしまう。
 高校物理：空気抵抗を無視して大砲の弾の弾道を計算する・・・戦争では役にたたないので負ける。

「教科書」で説明できないこと(2)

土質試験結果を使うとうまういかないのは何故？

表-2 3次元極限平衡法による安定解析結果

強度設定手法		解析手法	安全率 F_s	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)
単一すべり面強度	(a) 残留強度のみ	土研式ベクトル法	0.60	11.0	0
	(b) ピーク強度のみ	土研式ベクトル法	3.53	18.4	96.8
	(c) 完全軟化強度のみ	土研式ベクトル法	1.81	24.8	14.7
(d) 複数すべり面強度設定		土研式ベクトル法	1.01	地層毎・破壊形態毎に設定	
		(Janbu 法)	(1.10)		

F_s 1.0

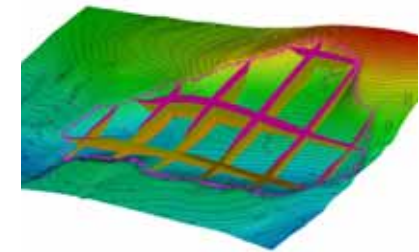
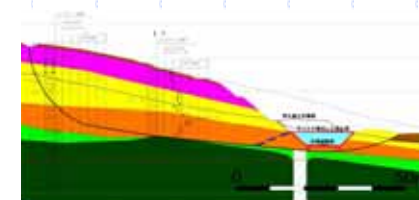


表-3 単一すべり面強度法による2次元極限平衡法による安定計算結果 (参考)

強度決定手法	解析手法	安全率 F_s	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)
逆算法	簡便法	1.00	9.2	20
順算法・残留強度のみ	簡便法	0.65	11.0	0



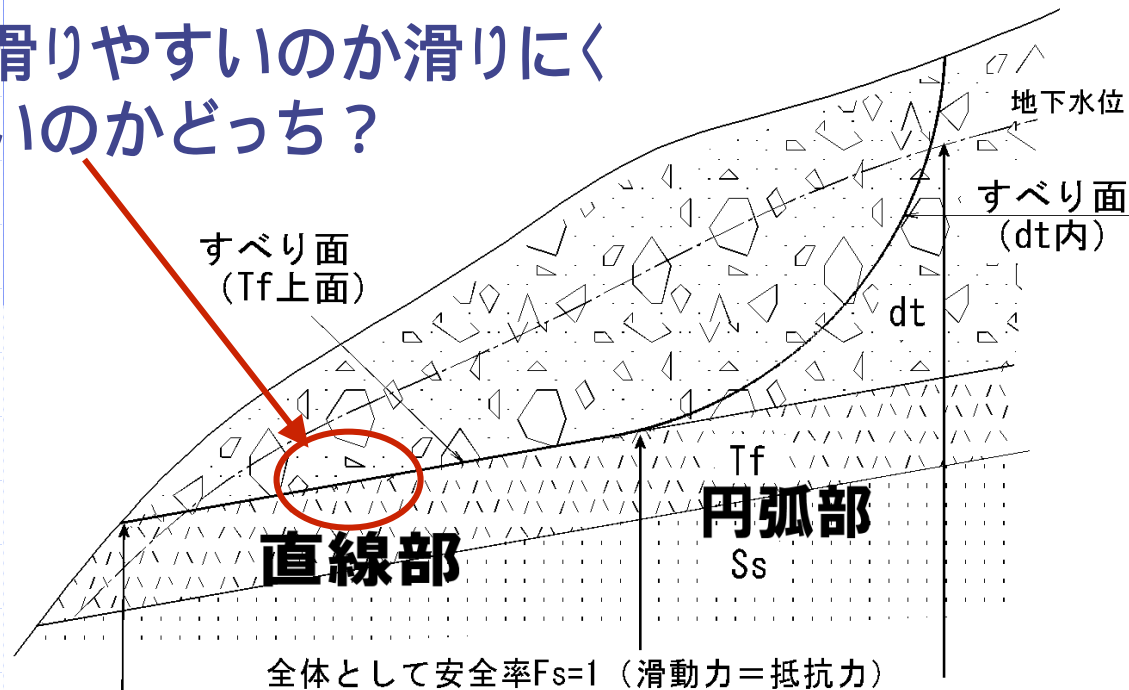
土質試験結果が安定計算に使えない 地すべり調査に土質試験は不要、の悪循環

「教科書」で説明できないこと(3)

逆算法を使うと滑るところが滑らないのはなぜ？

◆地質報告と設計解析の矛盾

滑りやすいのか滑りにくいのかどっち？



dt : 崩積土・風化岩など地すべり移動土塊になる地層

Tf : 凝灰岩など、配向性粘土鉱物含有量が多く、土質強度が小さく、主たるすべり面を形成する地層

Ss : 砂岩など配向性粘土鉱物が少なく、すべり面をつくりにくい地層

矛盾

圧縮部 (滑動力 < 抵抗力) 抵抗力	引張部	滑動部	2次元断面法 (逆算法) によるバランス
引張部 (滑動力 > 抵抗力) 滑動部	(圧縮部?)	抵抗力	

現地調査をやる人と、解析・設計をする人が同一人物なら、必ずぶち当たるジレンマ

2次元断面図にすると同じ形状 でとにかく滑らせてみる

「周縁部の摩擦が無視できるはず」であるならば、同じ崩壊角で崩れたまえ！

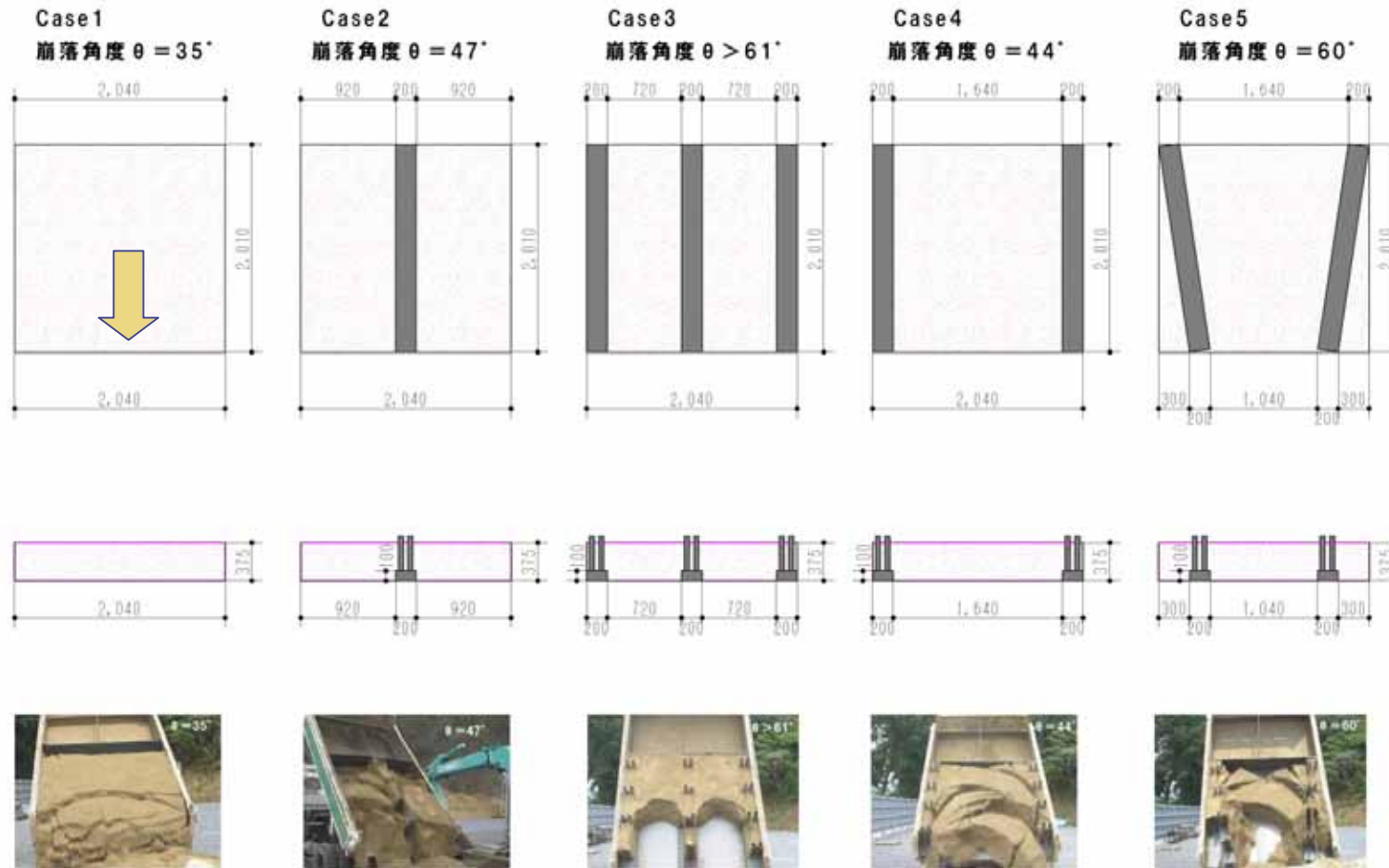
トラック実験



同一2次元断面・同一材料

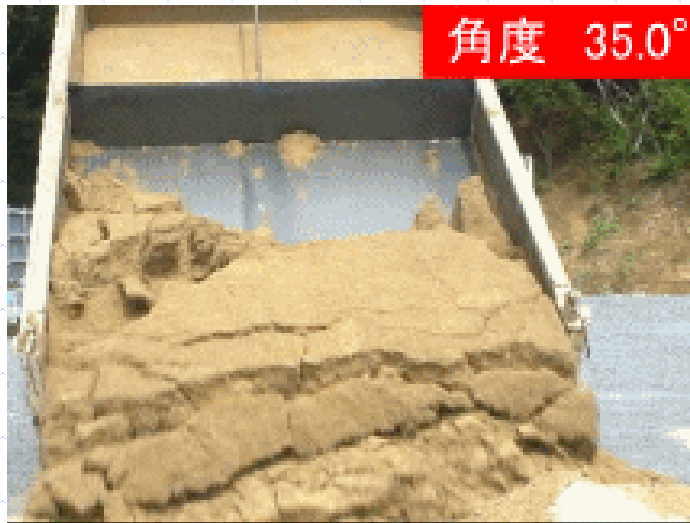
(注) 講演要旨作成後に追試した結果が中心です

側部抵抗を人為的に につくって実験



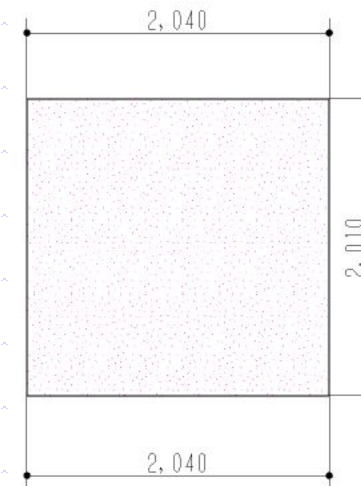
側部抵抗の簡単な実験

- ◆ ダンプトラック荷台から砂をすべり落とす実験
安息角は 35° くらい



この2次元断面を標準とする

Case 1
崩落角度 $\theta = 35^\circ$



側部抵抗の簡単な実験

◆ 載せただけの場合(念のため)



Case1より1.5° 急角度になった。疑似粘着力のため？

側部抵抗の簡単な実験

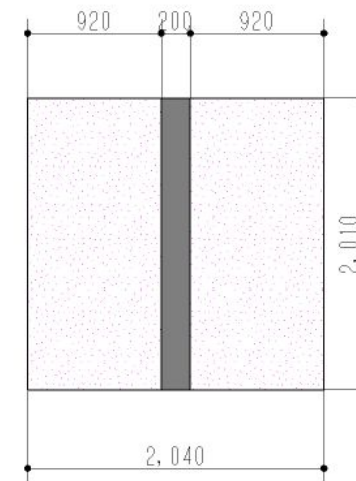
2次元断面形状はみんな同一

◆真ん中に側部抵抗ができるような配置

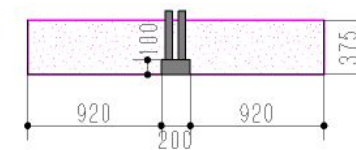
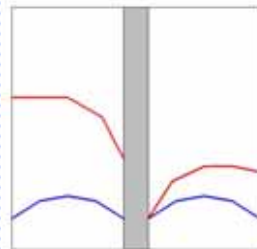


Case2

崩落角度 $\theta = 47^\circ$



47°



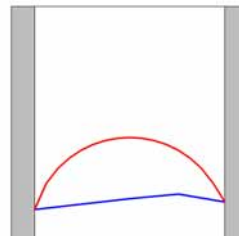
側部抵抗の簡単な実験

2次元断面形状はみんないっしょ

◆両サイドに側部抵抗が発生

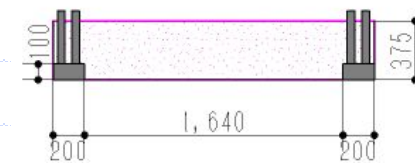
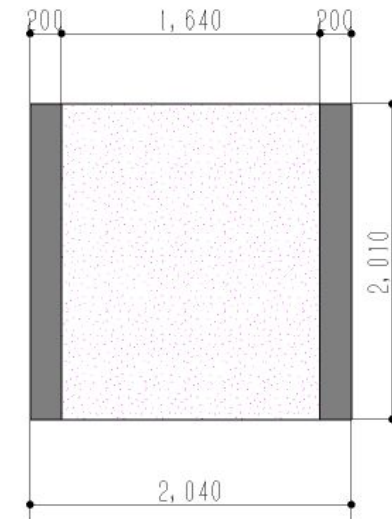


44°



Case 4

崩落角度 $\theta = 44^\circ$



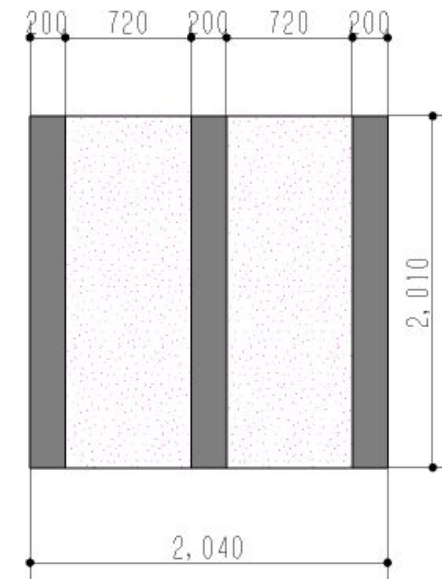
側部抵抗の簡単な実験

◆ 幅狭く両側に側部抵抗

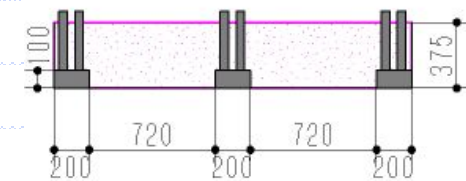
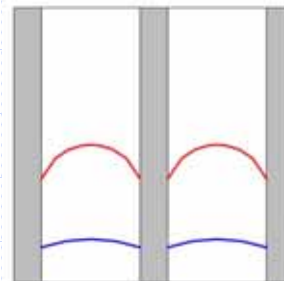


Case 3

崩落角度 $\theta > 61^\circ$



61°
(これ以上ダンプが傾かない)

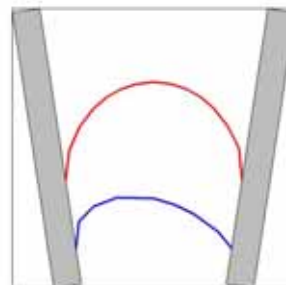


側部抵抗の簡単な実験

◆ 末端部を若干閉塞形状

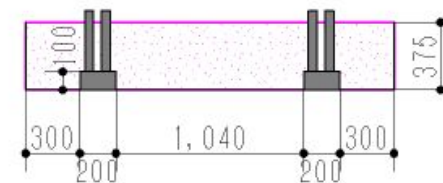
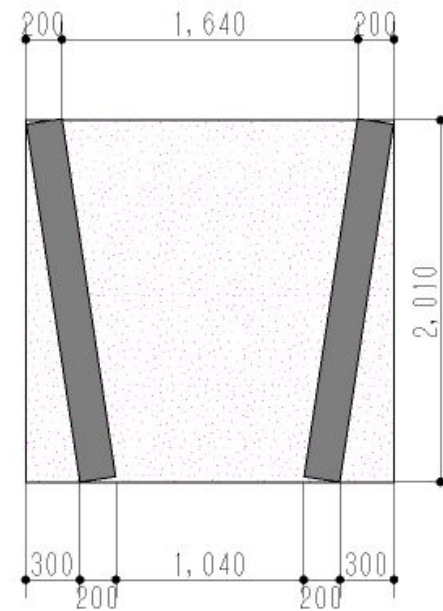


末端閉塞60°
(閉塞していないとき44°)



Case5

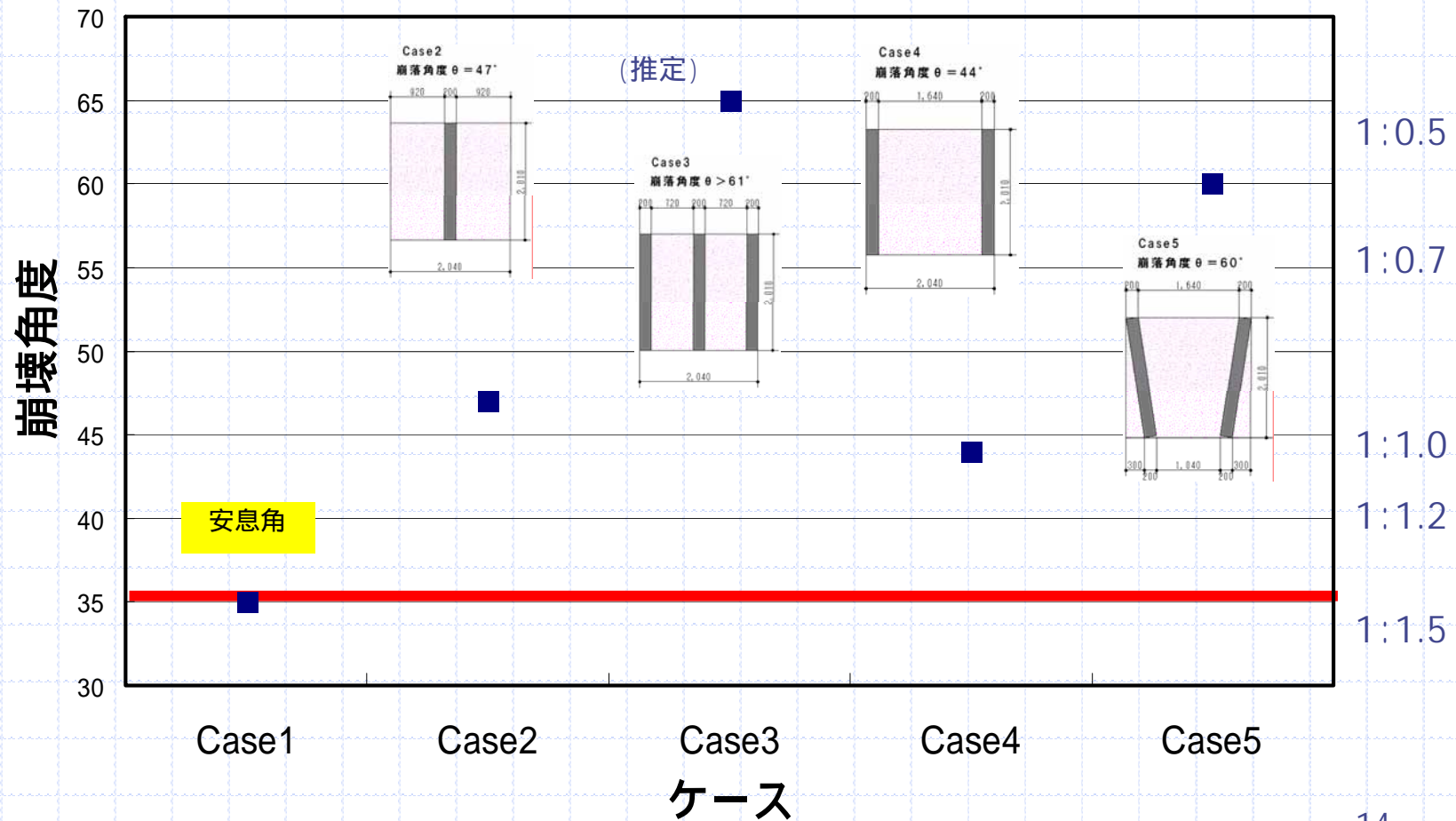
崩落角度 $\theta = 60^\circ$



崩壊角の違い

実験ケースと崩壊角

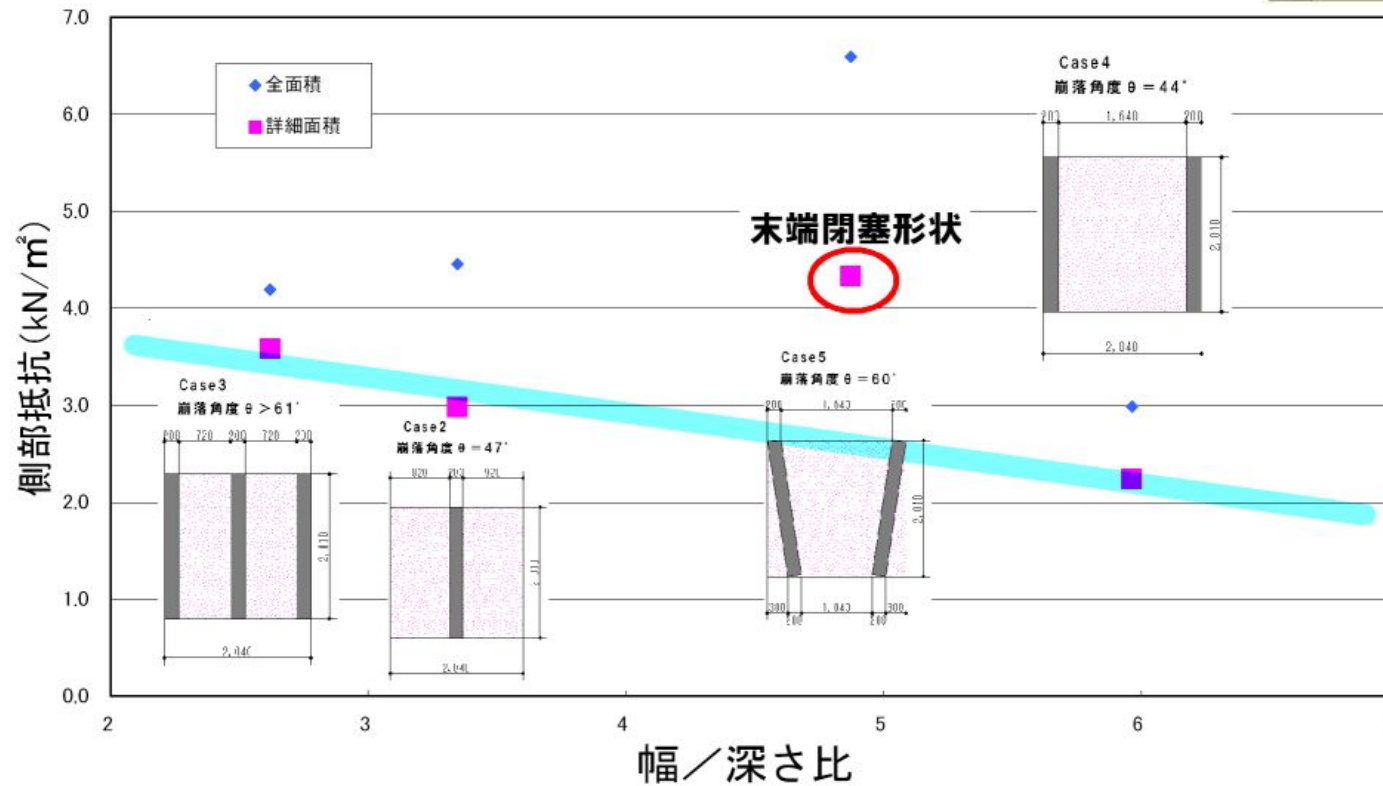
同じ角度でなんか崩れないじゃないか！



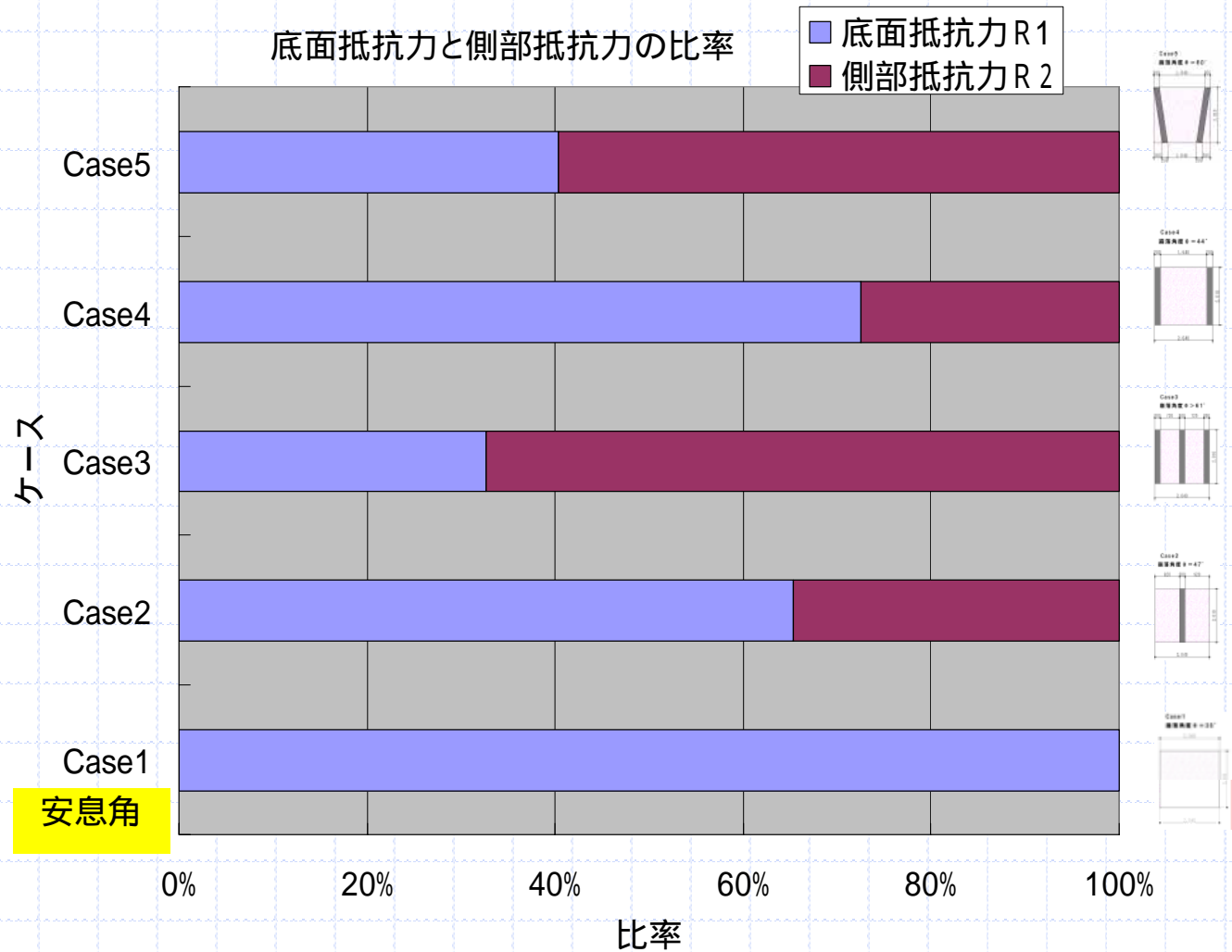
側部抵抗の大きさ試算



幅／深さ比と側部抵抗の関係



側部抵抗力の占める割合



側部抵抗に関する研究例

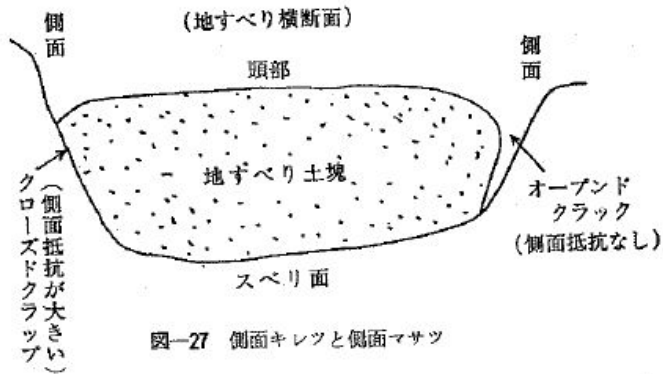


図-27 側面キレツと側面マサツ

図-1 渡(1975)の説明図

地すべり幅最大位置でのすべり面横断面形

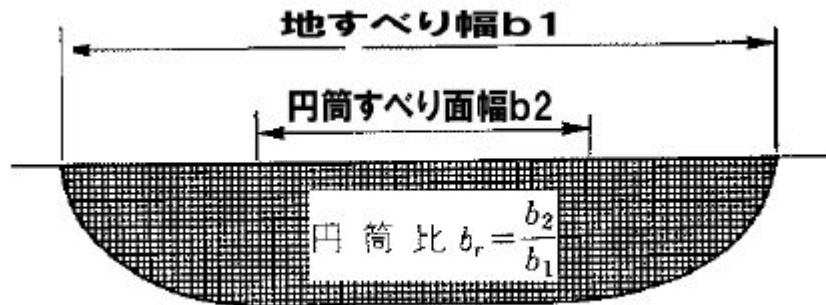
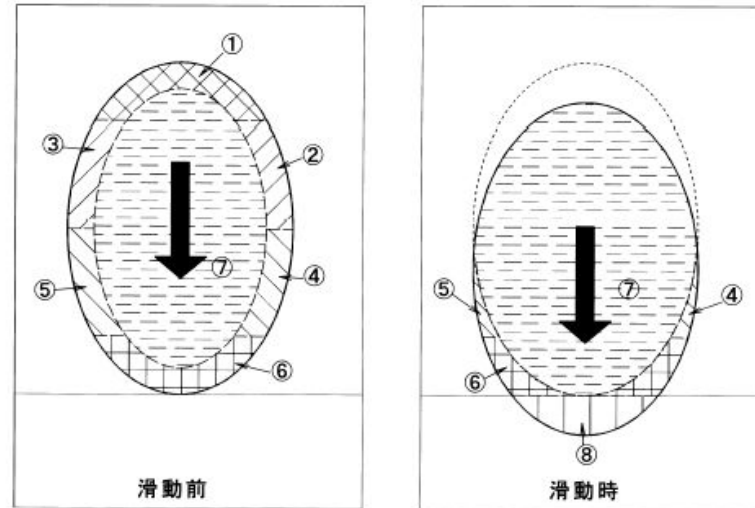


図-2 申(1989)の縁端効果の説明図



場所により摩擦強度は異なる。
 ①頭部, ②③末端開放型側部, ④⑤末端閉塞型側部, ⑥末端部,
 ⑦底部(滑動時, 強度回復時に細分), ⑧乗上げ部

図-7 地すべり・崩壊におけるすべり面強度の区分

太田・林(2001)の説明図

対策工への応用(将来展望)

◆ 土塊の内部抵抗を利用した地すべり対策工法

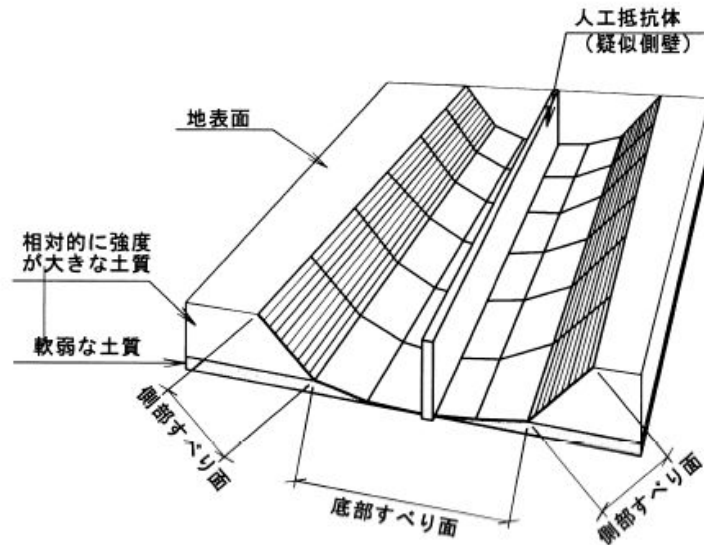


図-10 対策工法イメージ1

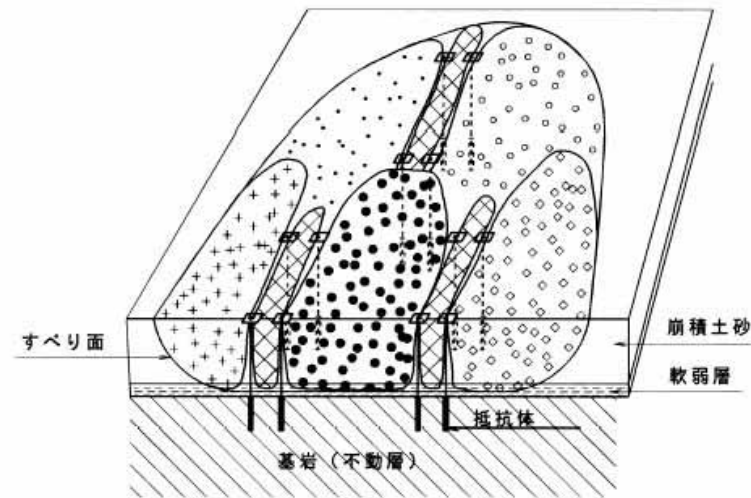


図-11 対策工法イメージ2

太田・林(2001)より

安定計算法の位置づけ

◆ 2次元順算法

底部以外の抵抗力を安全側で無視する設計用手法。現象の説明には適さない。

◆ 2次元逆算法・単一強度3次元逆算法

周縁部も含めた平均すべり面強度を用いる簡易3次元法(土塊の体積算出精度の違い)。現象に安全率を合わせるところからスタートする。

◆ 複数強度3次元順算法

土質試験結果を使える最も簡便な安定計算法。

まとめと課題

- ◆ 極限平衡法の安定解析も側部摩擦を考慮することが実務的に有効であり、より高度な数値解析に側部摩擦の組み込みは不可欠と考えられる。
- ◆ 今回の実験で側部抵抗は約 3kN/m^2 だったが、幅 / 深さ比に若干反比例する傾向があった。
- ◆ 末端部閉塞効果が大きいことも判明したが、3次元極限平衡法で安定度評価するのは困難であるため、新たな評価法を開発する必要がある。
- ◆ 側部摩擦効果を有効に利用した地すべり対策工開発の可能性がある。
- ◆ 抑止工の設計手法を再検討する必要性がでてくる可能性がある。