

地すべり発生運動統合シミュレーション LS-RAPID 説明書

目次

■ 操作編	1
1. はじめに	1
1-1. 本ソフトウェアについて	1
1-2. 動作環境	1
1-3. インストール方法	2
1-4. 起動方法	4
2. シミュレーションまでの流れ	5
3. 地形編集	7
3-1. DEM 標高データの準備	7
3-2. 地形編集の初期設定	10
3-3. 地形の Control Point を編集する	11
3-4. Control Point から地形を推定してメッシュデータに変換する	12
3-5. Mesh Data の編集	13
3-6. 楕円パラメータを用いてすべり面を構築する	17
3-7. 埋め戻し/はぎ取りの設定	20
3-8. 不安定土塊成分の設定	23
4. シミュレーション計算の設定	25
4-1. 土質パラメータの設定	25
4-2. 計算条件の設定	27
4-3. 地震波形データの登録	31
4-4. タイムステップの設定	32
4-5. その他の設定	33
5. シミュレーションの実行	35
5-1. 計算出力の設定	35
5-2. シミュレーションの開始	37
5-3. シミュレーションの結果表示	38
6. そのほかのコマンドについて	39
■ 解説編	49
1. LS-RAPID の原理	49
1-1. 地震力載荷の基礎式への影響	51
1-2. 水平土圧係数 k の説明	51
1-3. 見かけの摩擦角 ϕ_a , 粘着力 C , 間隙水圧比 r_u の説明	52
2. すべり面で発揮される見かけの摩擦係数 ($\tan\phi_a$)	52
2-1. 地すべり発生から運動に至る摩擦抵抗の低下	53
2-2. 地すべり土塊の厚さが見かけの摩擦係数に及ぼす影響	54
2-3. 飽和度と定常状態強度の関係	55
3. 地すべりの発生	57
3-1. 地すべり発生域でのせん断変位の計算および時間ステップ	57
3-2. 間隙圧比とせん断抵抗の変化	57
4. 地すべりの拡大のモデル化	58
5. 非摩擦エネルギー消費に起因するせん断抵抗成分	60
6. 時間降雨量から間隙水圧比への変換	61
7. 参考文献	66
(参考) LS-RAPID シミュレーションのパラメータの目安表	67

(空白ページ)

■ 操作編

ここでは、「地すべり発生運動統合シミュレーション LS-RAPID」について(以下 LS-RAPID と記述)の操作方法を記述します。この内容に沿って進めていけば、シミュレーション計算を行うことができます。

1. はじめに

1-1. 本ソフトウェアについて

本ソフトウェアは、特定非営利活動法人 国際斜面災害研究機構(ICL) 佐々 恭二氏による「地すべり運動シミュレーション」プログラムを基に作成された Windows 用ソフトウェアです。地形・すべり面・土質パラメータおよび水圧や地震動といった地すべり誘因の入力にビジュアルインターフェイスを採用し、また計算結果を3次元でグラフィカルに表現でき、初めてお使いになる場合でも簡単に使えるように作成されています。

1-2. 動作環境

本ソフトウェアを使用するために必要なハードウェア環境は次のとおりです。

・基本ソフトウェア(OS)	Windows 7, Windows 8, Windows 10
・コンピュータ本体	上記 OS が動作する機種 (Core2Duo 等マルチコア CPU 搭載が必須)
・メモリ	2GB 以上を推奨
・ハードディスク	1GB 以上の空き容量
・ドライブ	CD-ROM ドライブ (アプリケーションのセットアップに必要です)
・ディスプレイ	1024×768 ピクセル以上の解像度
・マウス	ホイール付きマウス
・グラフィック環境	nVIDIA 製(GeForce シリーズ) または ATI Technologies 製(RADEON シリーズ) のグラフィックチップ ※上記以外のグラフィック環境では正常に表示されない場合があります。

■ グラフィック環境による表示上の問題について

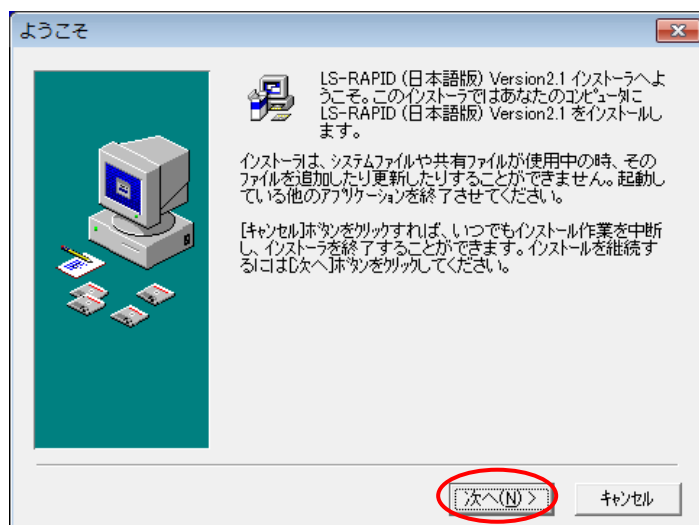
上記以外のグラフィック環境で、表示が極端に遅いなどの問題が発生する場合は、画面のプロパティ・設定・詳細設定・トラブルシューティングの「ハードウェアアクセラレータ」を「なし」に設定してください。

1-3. インストール方法

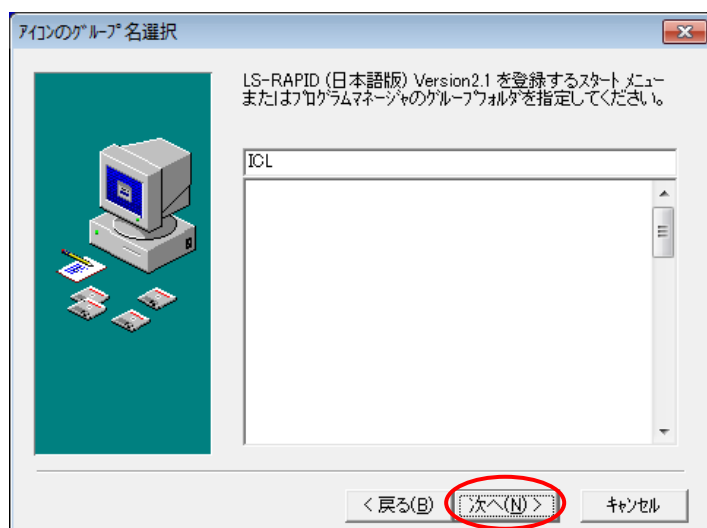
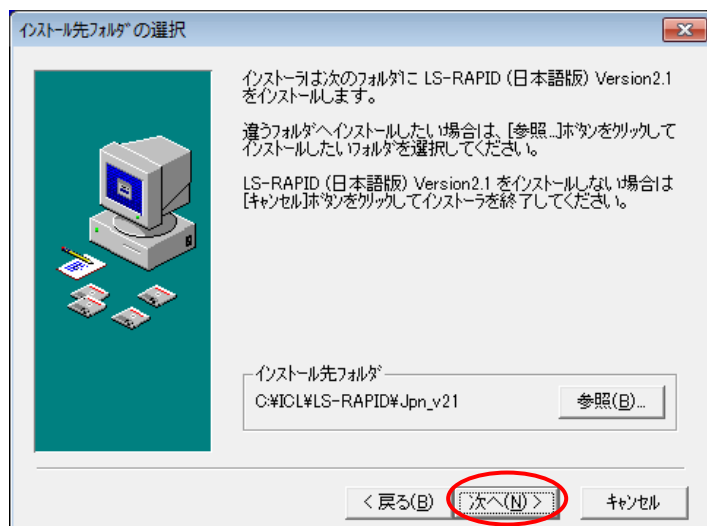
ここでは、LS-RAPID をインストールする手順を説明します。

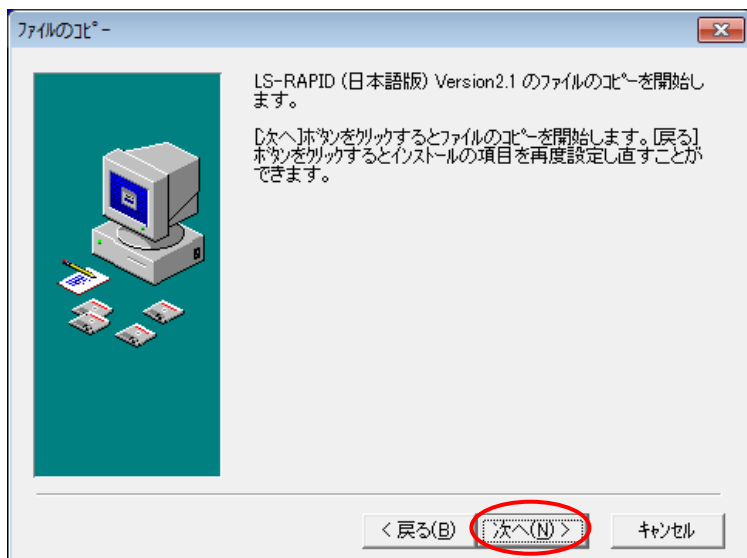
インストール CD を挿入してインストールボタンをクリックすると、以下のようなセットアップ画面が立ち上がります。

「次へ」をクリックするとインストールが始まります。

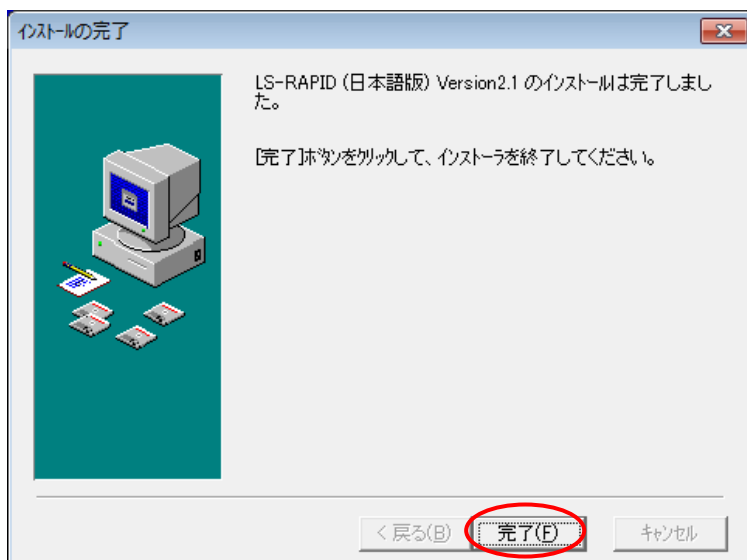


C ドライブ以外へインストールする場合は、インストール先を設定してください。





以下の画面が出たら、インストールは完了です。
「完了」 ボタンをクリックしてインストールを終了してください。



次にプロテクタドライバをインストールします。インストール方法は、CD 内の **manual** フォルダにある **guide.pdf** を参照してください。(評価版をご利用の方、および既にドライバインストール済みの方は必要ありません。)

1-4. 起動方法

本ソフトウェアを起動するには次のように操作してください。

[スタート]ー [(すべての)プログラム] → [ICL] → [LS-RAPID]

本ソフトウェアを起動したら、以下のような起動画面が現れます。

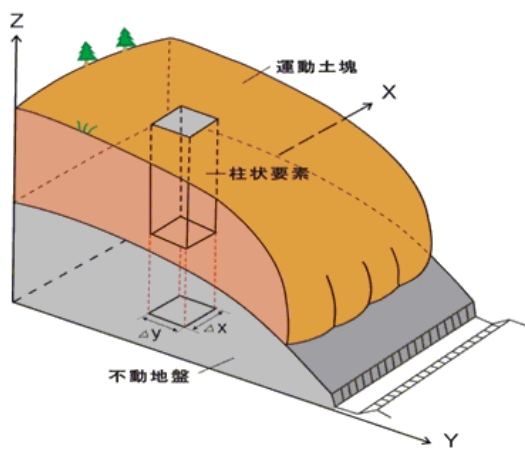
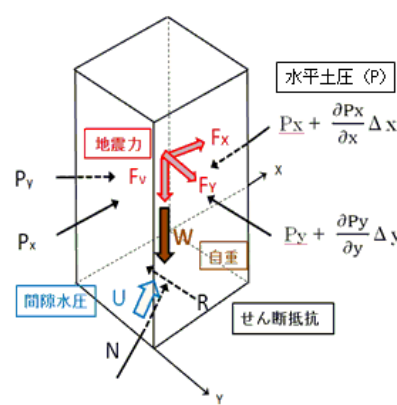
(※設定により作業画面から始めることもできます。)

LS-RAPID

地すべり発生運動統合シミュレーション (LS-RAPID)

特定非営利活動法人 国際斜面災害研究機構 (ICL) 佐々 恭二

地すべり発生運動統合シミュレーション (LS-RAPID) は、地震、豪雨あるいはその複合効果によって引き起こされる高速地すべりの発生過程と運動過程を統合したシミュレーションです。斜面土塊の中に柱状要素を考え、その要素にかかる土塊の自重(W)、水平・鉛直地震力、水平土圧、要素底面にかかるせん断抵抗(間隙水圧の効果を含む)の合力を水平面に投影し、水平面上の力の釣り合いが、質量(m)の土塊を加速度(a)で加速させる式(1) および柱状要素に流入する土量分のみ土塊の高さが変化するとの仮定(2)から、土塊の流量(M,N)と高さ(h)の変化を解くモデルです。

$$am = (W + F_v + F_x + F_y) + \left(\frac{\partial P_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P_y}{\partial y} \Delta y \right) + R \quad \dots (1)$$

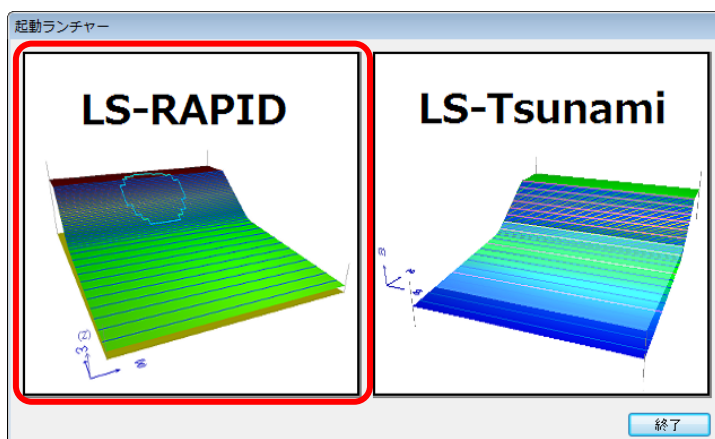
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots (2) \quad (M, N: X, Y \text{ 方向の流量})$$

せん断抵抗 (R) は間隙水圧 (U)、垂直力 (N) の効果を含む。
水平土圧 (P) は鉛直地震力 (Fv) の効果を含む。

☐ この画面は次回から表示しない

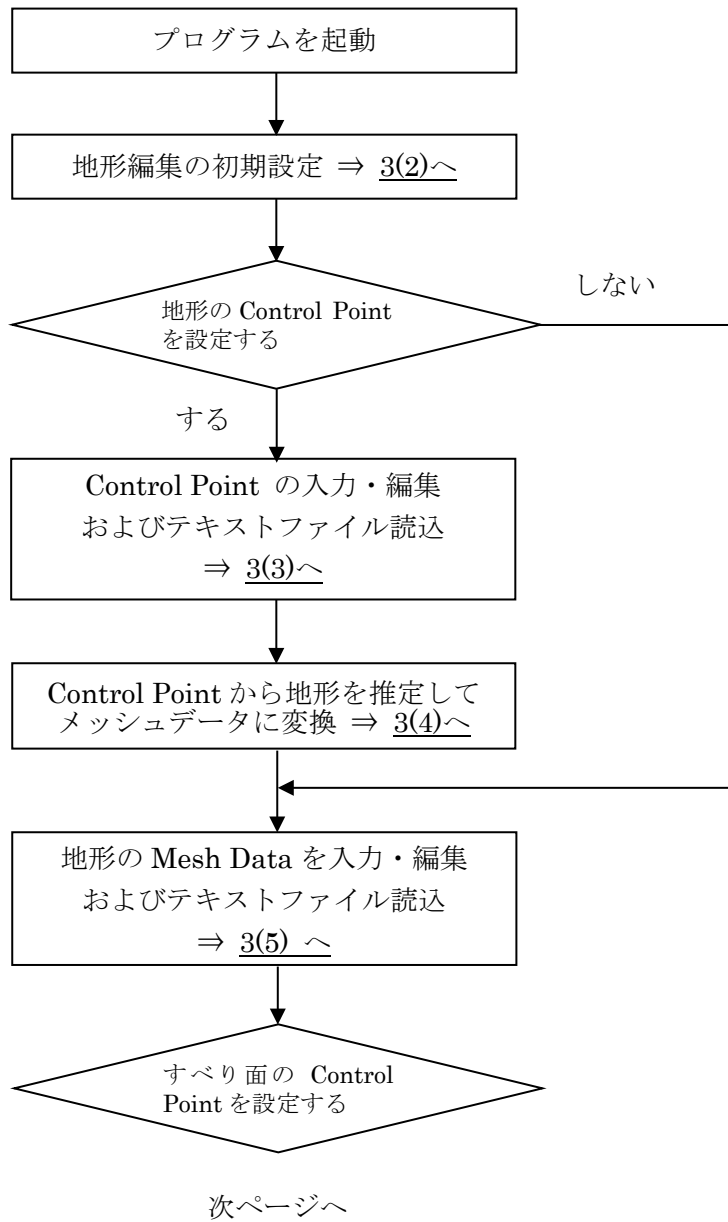
Start

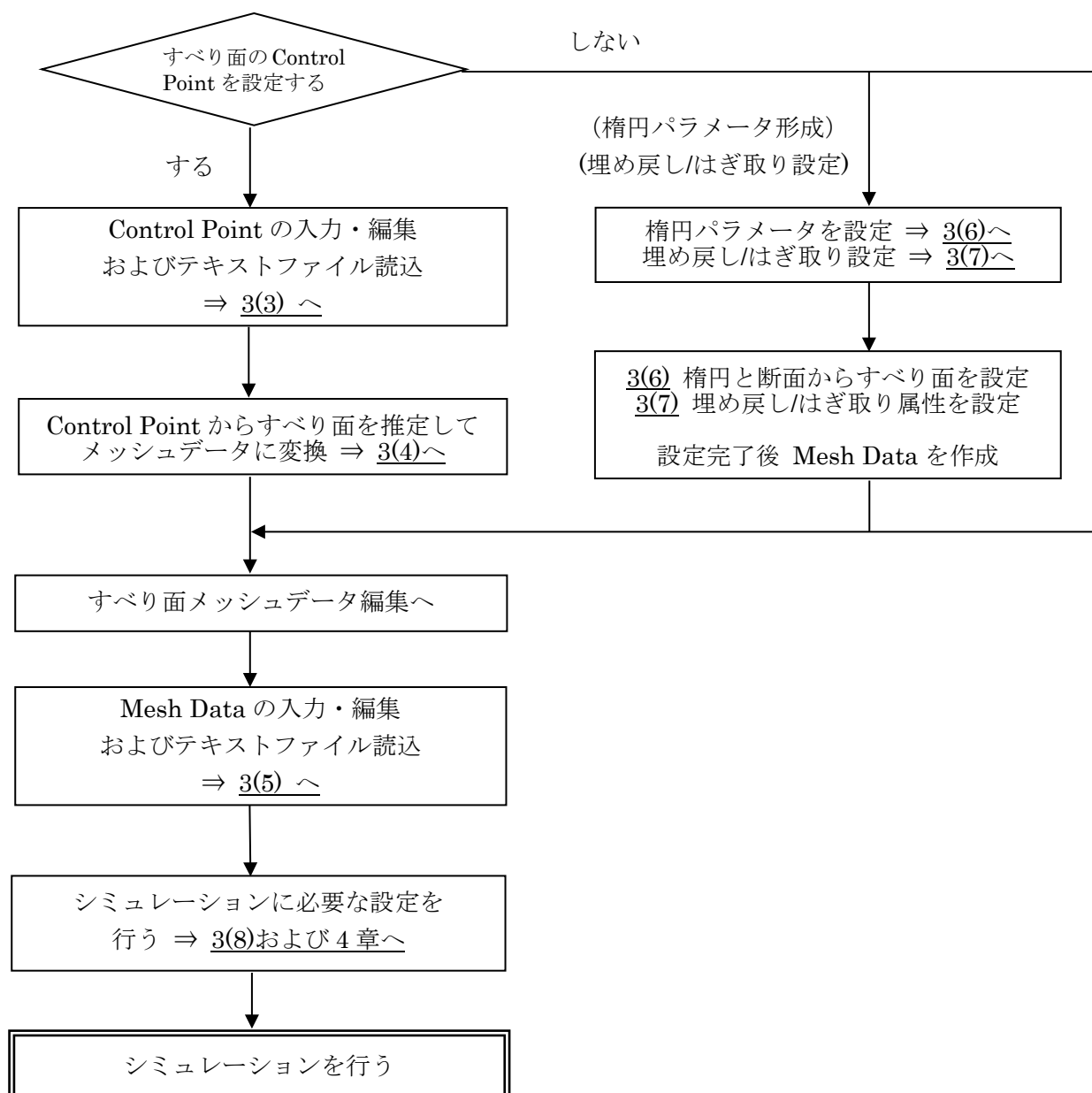
※地すべり津波シミュレーション「LS-Tsunami」のオプションをお持ちの場合は、以下の画面が先に表示されますので、LS-RAPID を選択して下さい。



2. シミュレーションまでの流れ

地すべりシミュレーションを行うまでの大まかな流れは以下のようになります。
詳細な説明は3章以降で行います。





3. 地形編集

3-1. DEM 標高データの準備

(必要なければ読み飛ばしても構いません)

一般的な DEM データは、緯度・経度・標高などの組み合わせになっている、X,Y,Z データを含んだテキストデータファイルとして提供されています。LS-RAPID の”Mesh Data”を入力するには、メッシュ標高データに変換する必要があります。付属の Excel ファイル(DEMmake) はテキストデータファイルを標高データに変換するのに使用します。

“DEMmake” Excel ファイルを開けると以下のような画面が出てきます。(マクロ設定はあらかじめ有効にしておいてください)

テキストファイル読み込み					
読み込みたい任意点テキスト(フルパス限定) ⇒ E:\Grohovo.txt					
グリッド		Min	Max	ピッチ	グリッド 数量
X		5455651.502	5457651.502	10.0000000000	200
Y		5023253.883	5025773.883	10.0000000000	252
任意点をセルに反映させるグリッド 格子点からの距離 10.000 以内					
DEM 形式作成				処理点数 144924	座標 範囲情報
					Min Max
				X	5455651.502000 5457651.502000
				Y	5023253.883000 5025773.883000
				Z	122.594000 475.198000
座標範囲情報を取得					
※ 作成した DEM データは“DEMdata”シートに格納されます ※ X,Y がDEM上にこない場合には近い位置のセルにZが入ります。					

(1) [テキストファイル読み込み] — XYZ 座標点を書かれたテキストファイルを読み込みます。

```
Grohovo.txt - メモ帳
ファイル(F) 編集(E) 書式(O) 表示(V) ヘルプ(H)
5455651.502, 5025743.883, 471.468
5455651.502, 5025738.883, 471.218
5455651.502, 5025733.883, 470.968
5455651.502, 5025728.883, 470.719
5455651.502, 5025723.883, 470.523
5455651.502, 5025718.883, 470.462
5455651.502, 5025713.883, 470.477
5455656.502, 5025758.883, 470.925
5455656.502, 5025753.883, 470.898
5455656.502, 5025748.883, 470.808
5455656.502, 5025743.883, 470.878
5455656.502, 5025738.883, 470.653
5455656.502, 5025733.883, 470.418
5455656.502, 5025728.883, 470.29
```

(※ 座標値はスペースやカンマであらかじめ区切っておく必要があります。)

(2) [座標範囲情報を取得] — 選択したテキストファイルの XY 座標範囲を取得します。

この例の場合：

X の範囲 5455651.502 ～ 5457651.502

Y の範囲 5023253.883 ～ 5025773.883 が得られたことが表示されます。

(3) グリッドの範囲とピッチを入力します。(灰色の欄には入力しないでください。)

ピッチとは、X と Y 座標の間隔になります。オリジナルなデータピッチより大きくしたい場合は、希望の間隔を入力します。(このときグリッド数は自動計算されます。)

(2) で得られた範囲に座標点がまんべんなく分布している場合には、グリッドの範囲としてそのまま入力できます。

この例の場合：

X min = 5455651.502 X max = 5457651.502 Pitch = 10 (メッシュ量 200 (格子点数 201))

Y min = 5023253.883 Y max = 5025773.883 Pitch = 10 (メッシュ量 252 (格子点数 253))

(4) 任意点をセルに反映させるグリッド格子点からの距離を入力します。

この設定は、任意点と一番近い格子点との距離が指定距離未満の場合、その任意点の標高 Z をそのままグリッド格子点の標高とするための設定です。

例として距離を 10.0 と設定した場合、

例 1：任意点が (5455635.185, 5025800.000, -44.0) の場合

一番近い格子点の座標は (X,Y)=(5455651.502, 5025773.883) となる。しかし、平面距離が 30.795 となるので、この格子点の標高としては採用されない。

例 2：任意点が (5455785.251, 5024215.957, -55.0) の場合

一番近い格子点の座標は (X,Y)=(5455781.502, 5024213.883) となる。このとき、平面距離が 4.284 となるので、この格子点の標高として -55.0 が採用される。

(5) [DEM 形式作成] — DEM 標高を”DEMdata”ワークシートに表示します。

このボタンを押すと、任意点の標高が抽出されて、”DEMdata”ワークシートに格子点上の標高が表示されます。

※ 格子点に近い点がない場合、その格子点での標高は空白になります。その場合には(4)の設定距離をあげて再実行することになります。

(6) LS-RAPID で使用する領域を抽出します。(このときメッシュ個数を控えておきます。)

次ページの表示例の場合、メッシュの個数は X が 8 で Y が 18 です。次節で初期設定するグリッドの数はそれぞれ 1 つ減らした数を設定することになります。選択された標高データはコピーして、LS-RAPID の MeshData 入力シートに貼り付けることができます。

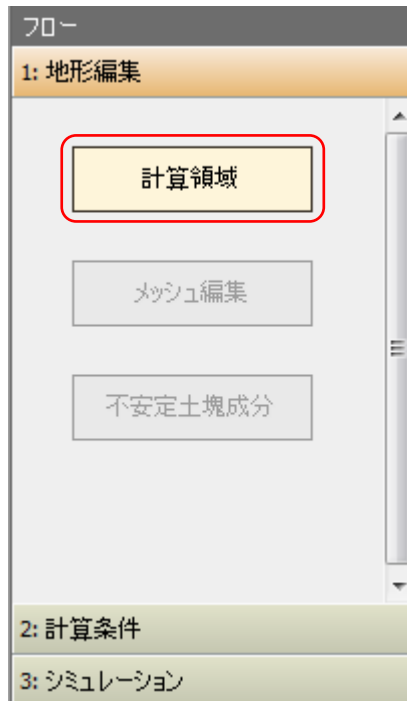
[DEM 形式作成] 後の表示例

	5455682	5455692	5455702	5455712	5455722	5455732	5455742	5455752	5455762	5455772	5455782	5455792
5025774	469.246	469.629	469.824	471.807	474.222	474.136	471.56	468.444	464.228	459.381	453.41	447.352
5025764	469.473	468.963	469.031	472.206	473.58	472.88	471.362	465.723	463.587	456.212	453.271	444.377
5025754	469.316	469.295	469.659	469.956	471.115	473.565	469.984	466.535	462.814	458.077	452.93	447.75
5025744	469.408	469.647	469.731	469.955	470.29	471.422	469.823	464.267	462.493	455.345	452.994	444.51
5025734	469.26	468.948	469.15	469.346	469.414	469.948	470.2	467.027	462.883	458	453.188	448.007
5025724	469.154	468.812	468.912	469.135	468.909	470.027	469.827	465.694	463.441	456.022	453.553	445.588
5025714	468.828	468.041	468.192	468.147	467.2	467.003	467.819	468.549	465.348	460.466	455.445	450.238
5025704	468.742	467.864	467.894	467.57	466.642	465.808	466.234	467.622	465.859	458.629	456.041	448.101
5025694	468.358	467.309	466.714	466.707	465.938	465.446	465.141	467.438	467.261	463.185	457.78	452.605
5025684	468.238	466.714	466.401	466.3	465.986	465.252	465.13	468.439	467.477	461.038	458.355	450.601
5025674	467.068	466.643	465.916	465.504	465.638	465.315	465.892	468.437	468.168	464.531	460.026	455.121
5025664	466.445	465.956	465.664	465.124	465.124	464.775	465.645	469.089	468.378	462.434	460.448	453.507
5025654	464.57	464.342	464.116	463.839	462.349	461.247	463.388	466.272	467.335	464.319	461.488	458.056
5025644		463.602	463.49	462.901	461.837	460.936	462.451	465.981	466.361	463.126	461.881	456.637
5025634		462.578	462.433	462.665	461.096	460	460.042	461.539	463.863	462.925	461.015	458.063
5025624			462.201	462.156	460.915	460	460	461.283	462.319	460.795	460.133	455.938
5025614				462.68	462.333	460.651	460.199	460	460	459.899	458.289	456.22
5025604				462.836	462.869	461.221	460.683	460	459.922	458.968	458.163	455.12
5025594				462.503	462.54	462.498	460.712	459.29	458.405	457.686	457.113	455.716
5025584						461.396	460.42	458.25	457.831	456.83	456.549	454.572
5025574						461.771	459.015	457.395	456.234	455.395	455.052	454.771
5025564							459.191	456.909	456.649	455.019	454.958	454.955

3-2. 地形編集の初期設定

起動当初および新規作成時は、シミュレーションに必要な地形のデータおよび設定がありません。ここでは、地形を表示するために必要な初期設定を行います。

フロー「1.地形編集」内の「計算領域」をクリックします。すると、「計算領域およびデータ入力設定」のダイアログが現れます。

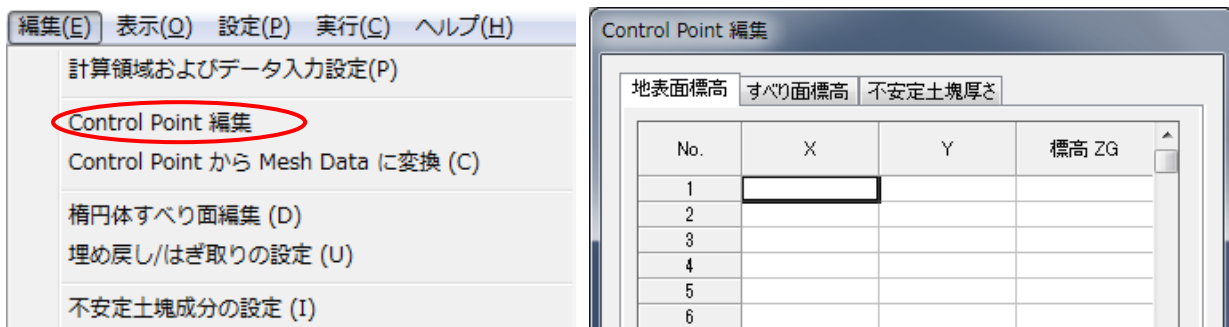


項目	説明
計算領域の座標設定	計算領域の X 方向の範囲、Y 方向の範囲を指定します。 範囲 … -9999999.999 ～ +9999999.999(m)
計算領域のメッシュ設定	X 方向、Y 方向それぞれに対して、計算領域内におけるメッシュの数量、およびピッチを設定します。 数量 … 2～9999(個)、ピッチ … 0.001～999999.999(m)

3-3. 地形の Control Point を編集する

(必要なければ読み飛ばしても構いません)

Control Point を編集する場合は、「編集」－「Control Point 編集」から Control Point 編集ダイアログを開き、編集したいタブを選択して下さい。

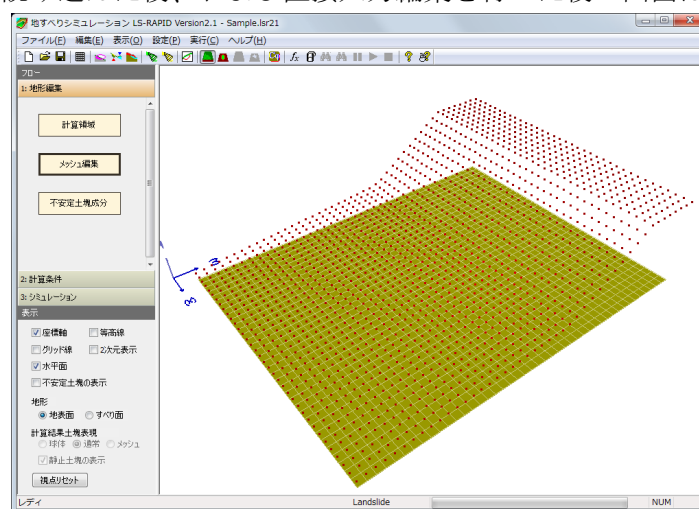


Control Point のテキストデータが既にある場合には、メニューから「ファイル」→「他形式データファイルの読み込み」を選択して、該当するファイルを読み込んでください。

(※ 読み込めるテキストファイルはスペース、タブ、またはカンマ(CSV)区切りのファイルです。)



テキストファイルを読み込んだ後、および直接入力編集を行った後の画面は以下のようになります。

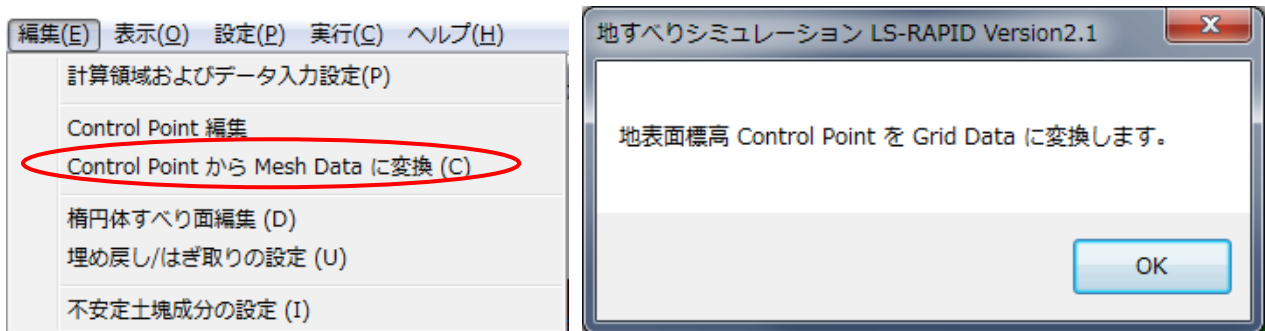


3-4. Control Point から地形を推定してメッシュデータに変換する

(必要なければ読み飛ばしても構いません)

Control Point の編集が終了したら、Mesh Data への変換を行います。

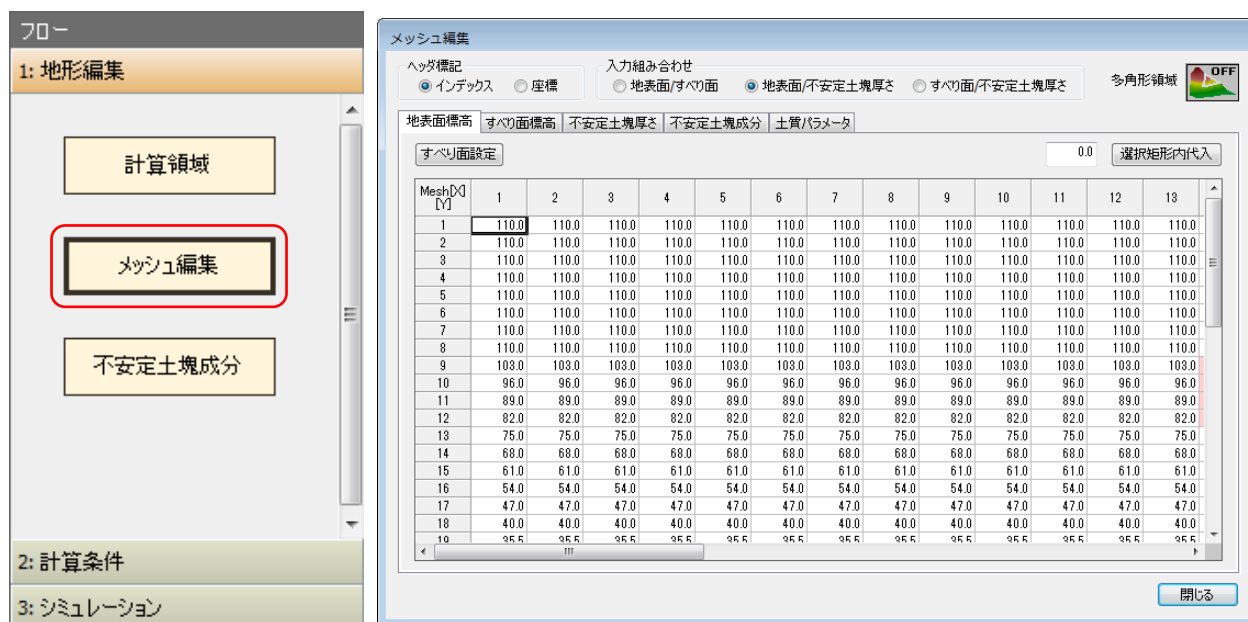
手順は、メニューから「編集」→「Control Point から Mesh Data に変換」を実行します。
ダイアログメッセージが表示された後、処理に成功したら Control Point を反映させたメッシュ地形図が現れます。





※ Mesh Data を作成した後でも Control Point は編集できます。その場合は Control Point の編集が終わった後に再びこのメニューを実行します。

3-5. Mesh Data の編集

計算領域は地形をメッシュ単位で編集できます。



編集画面では以下の処理を行うことができます。

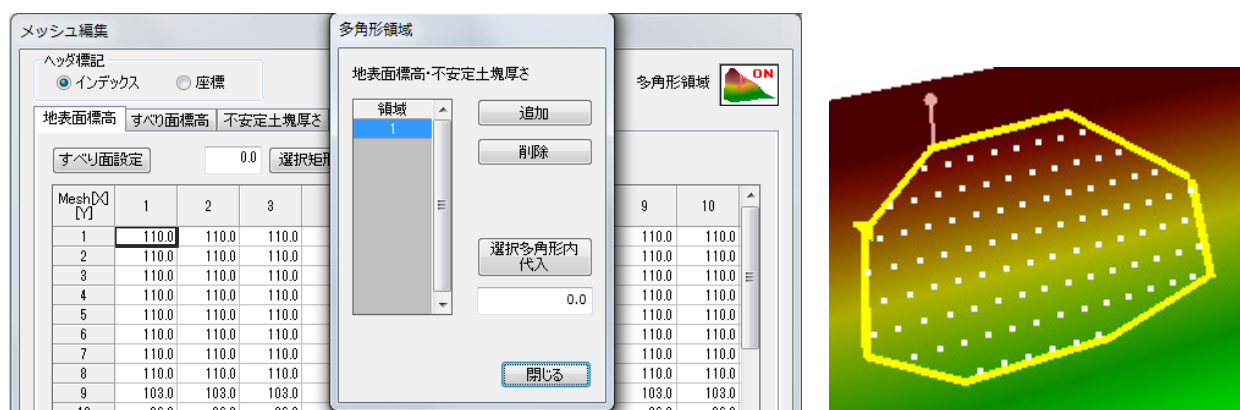
項目	説明
ヘッダ表記	メッシュ項目のヘッダ表現をメッシュ番号にするか X,Y 座標値にするかを選択します。
入力組み合わせ	<p>ここでは編集したいデータ項目を、以下から選択します。選択できる項目は、以下のとおりです。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 地表面標高・すべり面標高を入力する ○ 地表面標高・不安定土塊厚さを入力する ○ すべり面標高・不安定土塊厚さを入力する <p>(※入力選択していない項目については編集およびテキストファイル読込ができなくなります。)</p>
「すべり面設定」ボタン	このボタンをクリックすると、楕円体、または埋め戻しはぎ取り設定ですべり面を設定することができます。
多角形領域編集	<p>ボタンをクリックすると、下図の ON/OFF が切り替えできます。</p> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;">   </div> <p>ON にした状態では、「多角形領域」画面が開き、領域を選択した状態で 3D-View 画面の[Ctrl]+[Shift]キーを押しながら左クリックすると、選択領域用の多角形が生成できます。</p>

「選択矩形内代入」ボタン

左にある標高入力欄に標高を設定して、メッシュ対象領域を設定した後にこのボタンをクリックすると、ダイアログ内の選択したセルブロックの範囲が入力した標高で埋められます。(同一標高の入力の手間を省きます。)

上記の多角形領域編集を ON にした場合は、開いている「多角形領域」画面内の、「選択多角形内代入」ボタンの下にある標高入力欄に標高を設定して、メッシュ対象領域を設定した後にこのボタンをクリックすると、作成した多角形の範囲で代入されます。

多角形領域編集モードで多角形を選択したときの領域表示は以下のようになります。

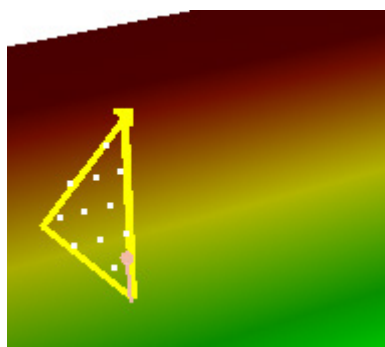


※ 多角形編集集中の修正方法

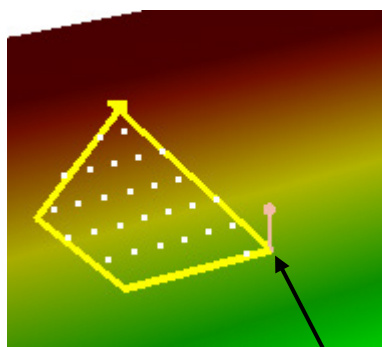
3D-View 画面で右クリックしたときには、ポップアップメニューが現れて最後の編集点 1 点のみ、または全区間消去できます。

現時点での選択領域が、三角形であった場合を例題(図 1)とすると、Ctrl + Shift + 左クリックで、多角形に一点が追加されます(図 2)。右クリックで、一点戻しまたは全消去の選択コマンドが現れます(図 3)。

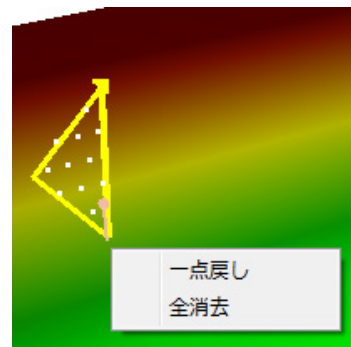
(図 1)



(図 2)



(図 3)



Ctrl + Shift + 左クリック
→ 一点追加

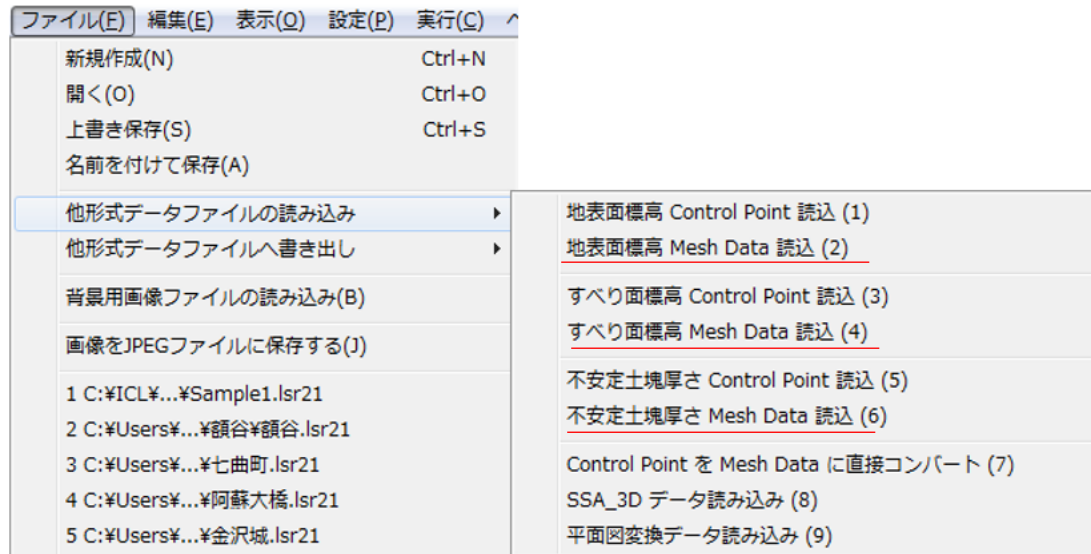
多角形編集モードでは複数の多角形領域を扱えます。



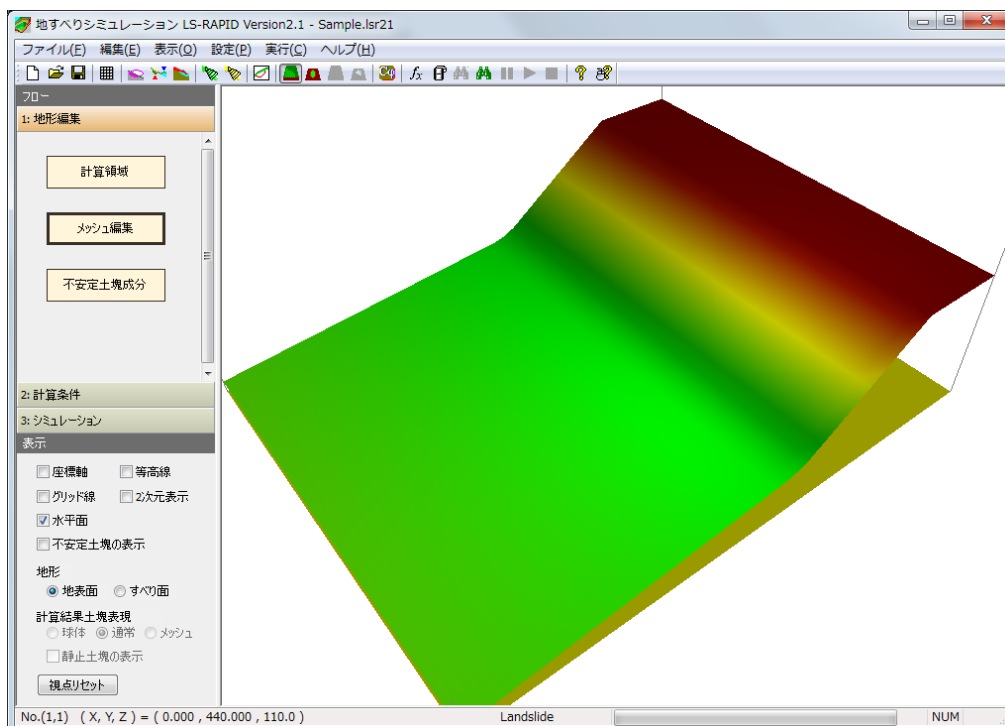
「追加」ボタンをクリックすると新しい領域番号が追加されます。
この状態で多角形領域の編集を行なうと、新しい多角形領域を作成できます。



Mesh Data のテキストデータが既にある場合には、メニューから「ファイル」→「他形式データファイルの読み込み」を選択して、該当するファイルを読み込んでください。



地形の Mesh Data が作成された場合、テキストファイルを読み込んだ後、および直接入力編集を行った後の画面は以下のようになります。

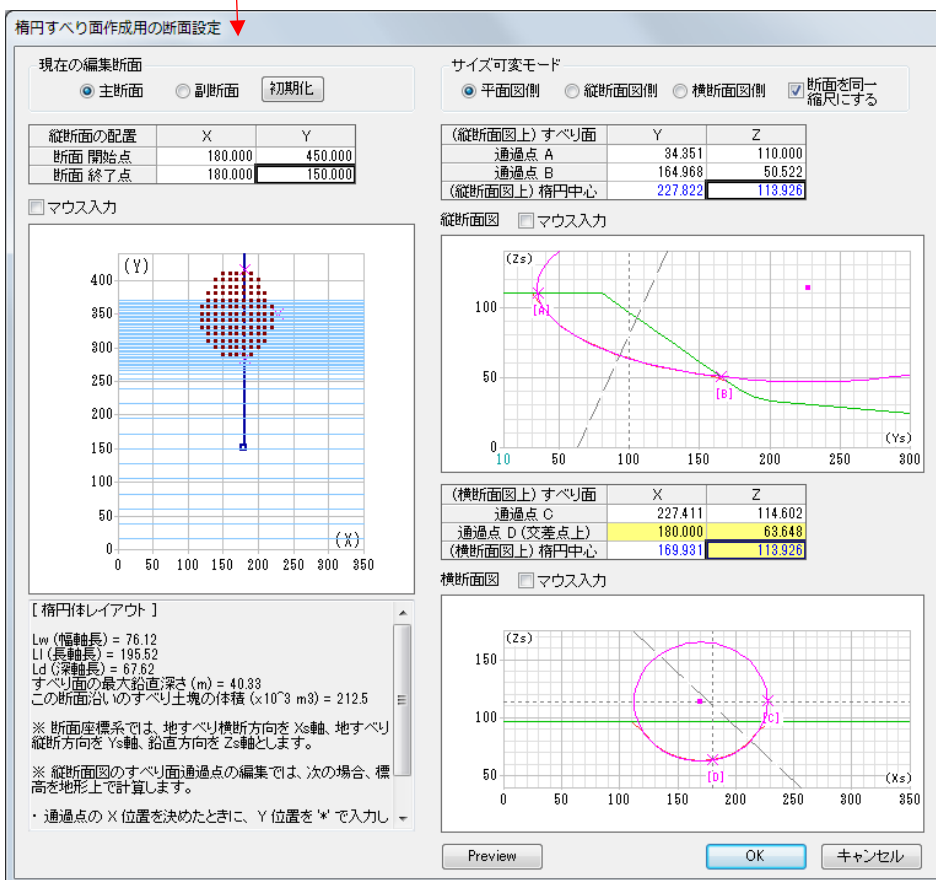
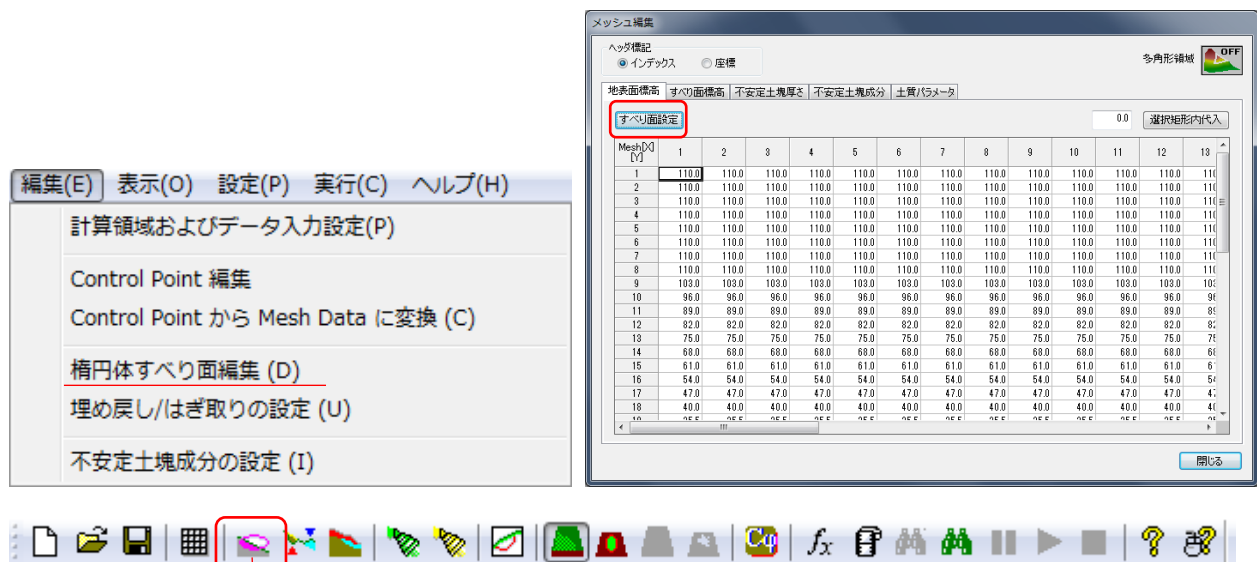


3-6. 楕円パラメータを用いてすべり面を構築する

(必要なければ読み飛ばして構いません)

地表面の Mesh Data が作られている場合は、楕円体を用いてすべり面を作成できます。

メニューから「編集」→「楕円体すべり面編集」を選択してください。ツールバーやメッシュ編集画面からも本機能を利用できます。



以下に、このダイアログから楕円すべり面を作成する手順を説明します。

(1) 地すべり縦断面を設定する

このダイアログの左側画面では、楕円すべり面を作成するための地すべり縦断面を設定します。

縦断面の開始点・終了点を入力すると、それに対応した縦断面図が右側画面に現れます。(開始点・終了点入力マウスからでもできます。)

橋桁すべり面作成用の断面設定

現在の編集断面

☒ 主断面
☐ 副断面

縦断面の配置	X	Y
断面 開始点	180.000	450.000
断面 終了点	180.000	150.000

☐ マウス入力

※ 断面設定では、必ず主橋桁方向を X軸、地すべり方向を Y軸、鉛直方向を Z軸とします。

※ 縦断面のすべり面通過点の編集では、次の場合、橋高を地形上で計算します。

- 通過点の X 位置を決めたときに、Y 位置を * で入力したとき。
- [Shift]キーを押しながら、マウスでをクリックしたとき。

サイズ可変モード

☒ 平面図例
☐ 縦断面図例
☐ 横断面図例
☐ 断面を同一縮小にする

(縦断面図上) すべり面	Y	Z
通過点 A		
通過点 B		
(縦断面図上) 橋桁中心		

☐ マウス入力

(横断面図上) すべり面	X	Z
通過点 G		
通過点 D (交差点上)		
(横断面図上) 橋桁中心		

☐ マウス入力

Preview

OK

キャンセル

(2) 縦断面上ですべり通過点/楕円の中心点を設定する

縦断面を設定した後に、縦断面上ですべり楕円体が通過する点を設定します。通過点を設定すると通過点の中点を通る横断面図が現れ、左側画面に位置情報が表示されます。また、楕円中心を入力すると縦断面上の楕円が現れ、横断面との交差点上に楕円が通過する点が表示されます。(中心点を登録しても楕円が表示されないことがあります。この場合は中心や通過点の位置を調節してください。通過点及び中心点もマウス入力できます。)

橋円すべり面作成用の断面設定

現在の編集断面

☒ 主断面
 ☐ 副断面

断面名の配置	X	Y
断面開始点	180.000	450.000
断面終了点	180.000	150.000

☐ マウス入力

サイズ可モード

☒ 平面図面
 ☐ 縦断面図面
 ☐ 横断面図面
 ☐ 断面を同一図面にする

(縦断面図上) すべり面	Y	Z
通過点 A	34.351	110.000
通過点 B	164.968	50.522
(縦断面図上) 橋円中心	227.822	118.970

☐ マウス入力

(横断面図上) すべり面

	X	Z
通過点 C		
通過点 D (交差点)	180.000	63.646
(横断面図上) 橋円中心		113.926

☐ マウス入力

※ 断面図標準形式で、必ず「横断面図」を「X軸」で表示する。
縦断面図は「Y軸」指定方向で表示されます。

※ 縦断面図のすべり面通過点の編集では、次の場合、橋高を地形上で計算します。

- 通過点の X 位置を決めたときに、Y 位置を「W」を入力したとき。
- [Shift]キーを押しながら、マウスでをクリックしたとき。

Preview

OK

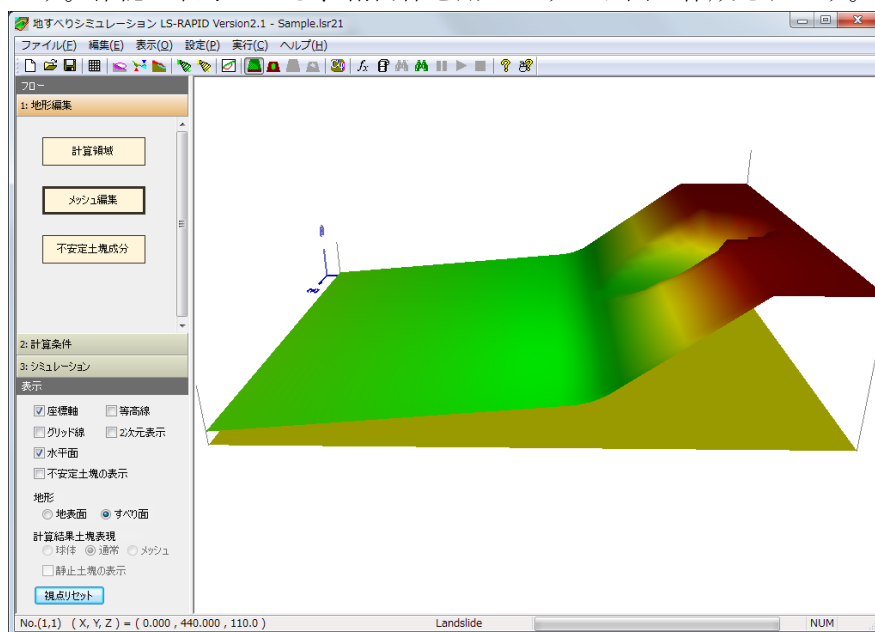
キャンセル

(3) 横断面上ですべり通過点/楕円の中心点を設定する

(2)の縦断面のときと同様に、横断面上でも楕円通過点および中心点を入力します。ただし、横断面では、縦断との交点位置のすべり面の位置(一点)と楕円中心の標高は決まっているので、すべり面と地表の交点(一点のみ)と楕円中心位置の X 座標を入力します。(マウス入力もできます。)

(4) 副断面があれば (1)～(3) までの要領ですべり楕円面を作成します。

上記 (1)～(4)を通して位置を調節しながら楕円体を決定し、設定が完了したら OK ボタンをクリックします。確認が終了したら、楕円体を用いたすべり面が作成されます。



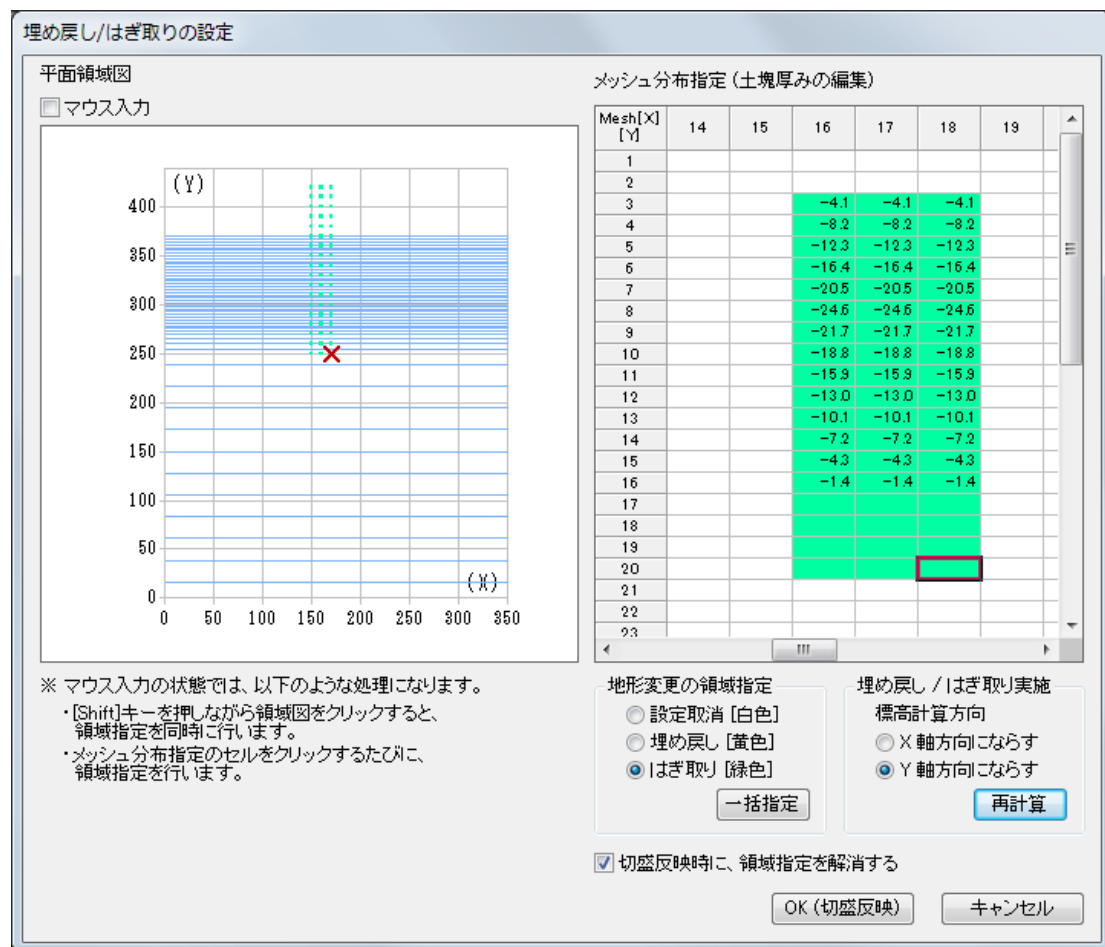
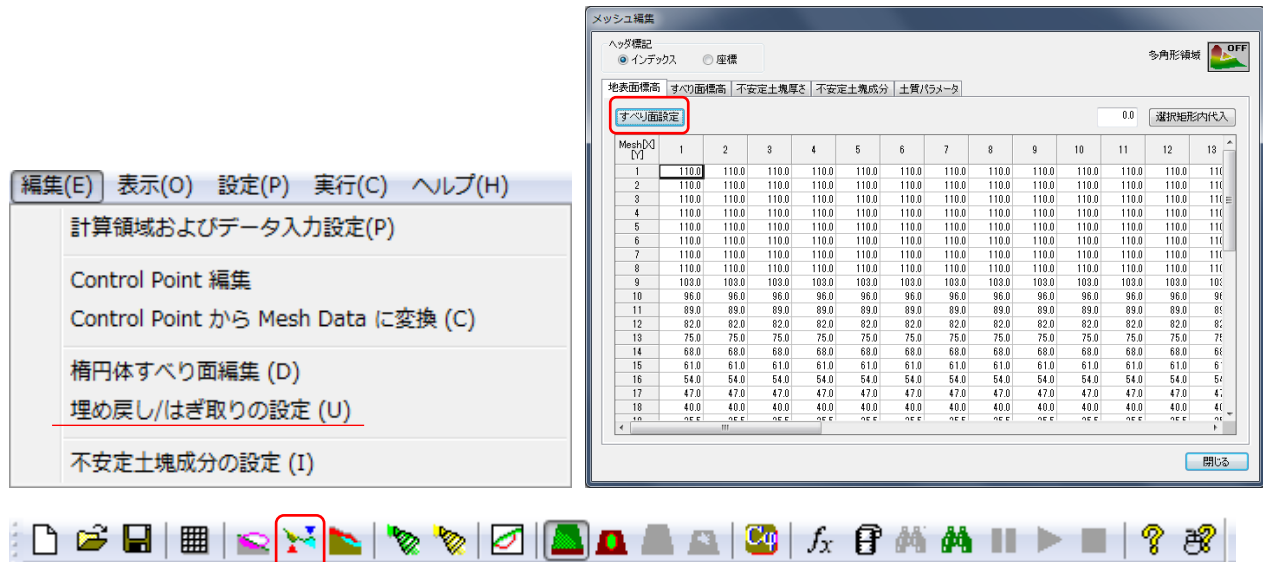
項目	説明
現在の編集断面	主断面および副断面で楕円すべり面が作成できます。(すべり面が 1 つしかない場合は、主断面で入力してください。)
縦断面の配置	楕円すべり面を作成するための地すべり縦断面を設定します。 縦断面の開始点・終了点を入力したら、それに対応した縦断面図が右側画面に現れます。マウス入力もできます。
サイズ可変モード	○ 平面図側 ○ 縦断面図側 ○ 横断面図側 ダイアログの大きさを変えたときにどの画面のサイズを変更するかを設定します。また、“断面を同一縮尺にする”チェックマークをオンにすると、断面座標の縦横比を同一にして断面を表示します。
すべり面 (縦断面図)	縦断面上ですべり楕円体が通過する点 A,B および楕円中心を設定します。通過点を設定すると通過点の中点を通る横断面図が現れます。マウス入力もできます。楕円が作成されると、横断面上に対応する座標が表示されます。
通過点 A,B、楕円中心 (横断面図)	横断面上では縦断面と同様にすべり楕円体が通過する点 C,D および楕円中心を設定します。(点 D は縦断面によって決まります)
通過点 C,D、楕円中心	すべり面通過点の Z_s 座標は、 $Y_s(X_s)$ 座標を決めた後、“*”キーを押す、あるいは、 Shift キーを押しながらマウスをクリックすると、地表面上の $Y_s(X_s)$ 座標に対応した標高値が自動で算出されます。
縦断面・横断面で楕円を作成したら、適切な楕円体を作成されます。このとき、縦断面図設定画面および 3 次元ビュー画面には楕円体の生成範囲が表示されます。また、楕円体の内容がダイアログに表示されます。	
※ 断面座標系では、地すべり横断方向を X_s 軸、地すべり縦断方向を Y_s 軸、鉛直方向を Z_s 軸とします。縦断面図、横断面図の座標値は断面開始点からの距離と標高を軸として表示しています。	

3-7. 埋め戻し/はぎ取りの設定

(必要なければ読み飛ばして構いません)

地表面の Mesh Data が作られている場合は、現在の地表面からの埋め戻し及びはぎ取りの処理をすることによってすべり面および地すべりが発生する前の元地形を作成できます。

メニューから「編集」→「埋め戻し/はぎ取りの設定」を選択してください。

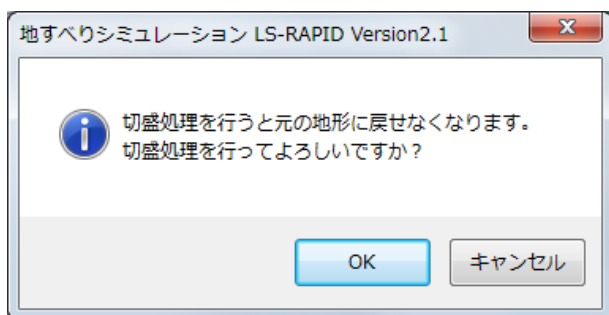


項目	説明
地形変更の領域設定 <input type="radio"/> 設定取消 [白色] <input type="radio"/> 埋め戻し [黄色] <input type="radio"/> はぎ取り [緑色] 「一括指定」ボタン	メッシュごとに現在の地形からの埋め戻し/はぎ取りの属性を指定できます。メッシュを選択した後に「一括指定」ボタンをクリックすると、指定した属性で領域が更新されます。
埋め戻し/はぎ取り実施 標高計算方向 <input type="radio"/> X 軸方向にならず <input type="radio"/> Y 軸方向にならず 「再計算」ボタン	属性を決めた後、「再計算」ボタンをクリックすると、現在の地形標高からの変動値を計算して、メッシュ分布指定表に表示します。(計算軸方向を変更した場合は自動的に再計算されます) 土塊厚みの値は任意に値を設定することもできます。入力した値は再計算処理を行うまで有効です。

※ 領域の属性を変更しただけでは再計算を行いません。

※ マウス入力にチェックを入れた場合、平面領域図をクリックした場合はメッシュ分布指定のカーソルが移動します。Shift キーを押しながらクリックした場合は、その場所の領域指定(設定取消、埋め戻し、はぎ取り)も更新します。また、メッシュ分布指定欄のセルをクリックした場合も領域指定を更新します。

すべての設定が終了して「OK(切盛反映)」ボタンをクリックすると、最終確認のメッセージが出ます。

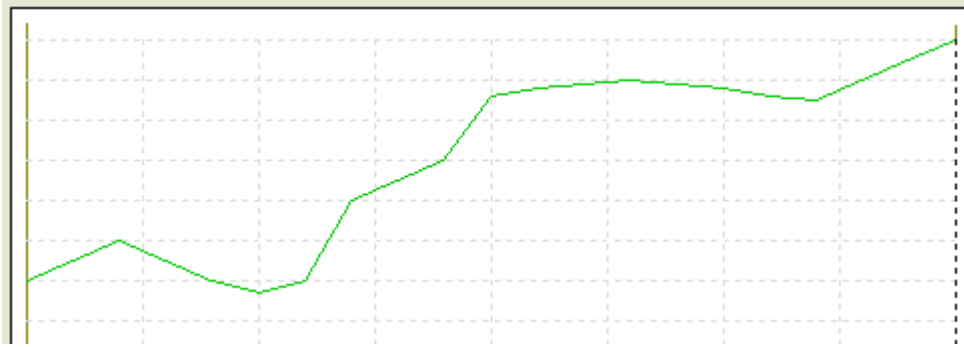


ここで OK をクリックすると、このダイアログで行った設定に基づいて切盛計算を行います。キャンセルをクリックすると、再び設定画面に戻ります。

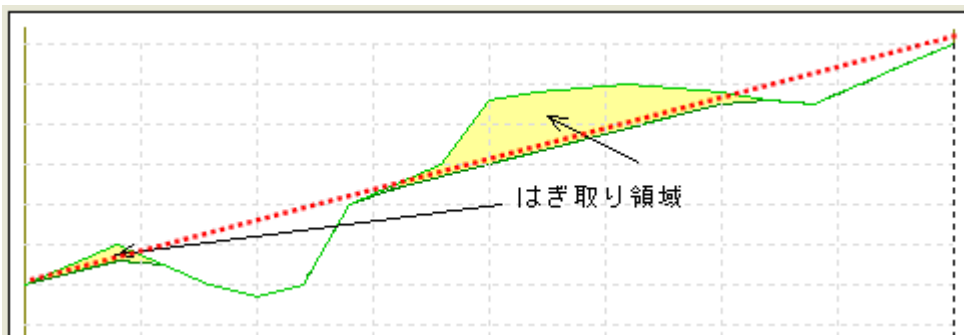
切盛計算を行った後は、現在設定されている地表面がそのまますべり面となり、埋め戻しがあった領域が新しい地表面となります。はぎ取り処理だけを行った場合は、すべり面と地表面の標高は同じとなり、もとあったすべり面の範囲はなくなります。

切盛計算について

以下のような標高分布があった場合、埋め戻し/はぎ取り計算は以下ようになります。



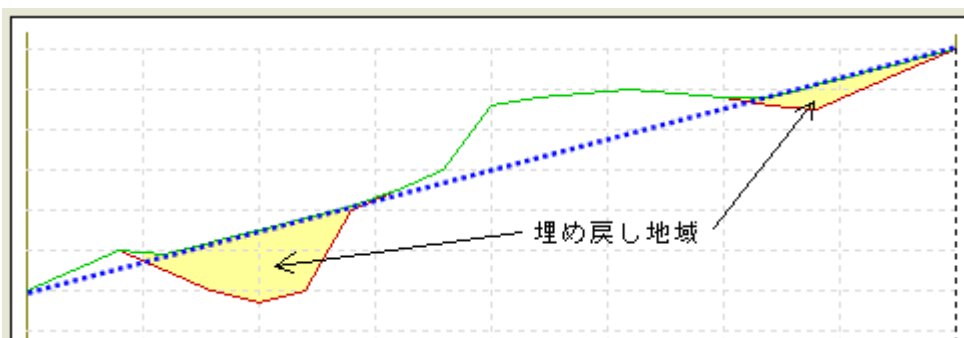
(1) “はぎ取り” 計算の場合



断面全体をはぎ取り領域にした場合、はぎ取り標高の基準線は上記の赤点線のようになります。

おのおののメッシュの標高がこの基準線を上回った場合、基準線の標高まではぎ取られます。下回っている位置については特に何も行いません。

(2) “埋め戻し” 計算の場合



断面全体を埋め戻し領域にした場合、埋め戻し標高の基準線は上記の青点線のようになります。

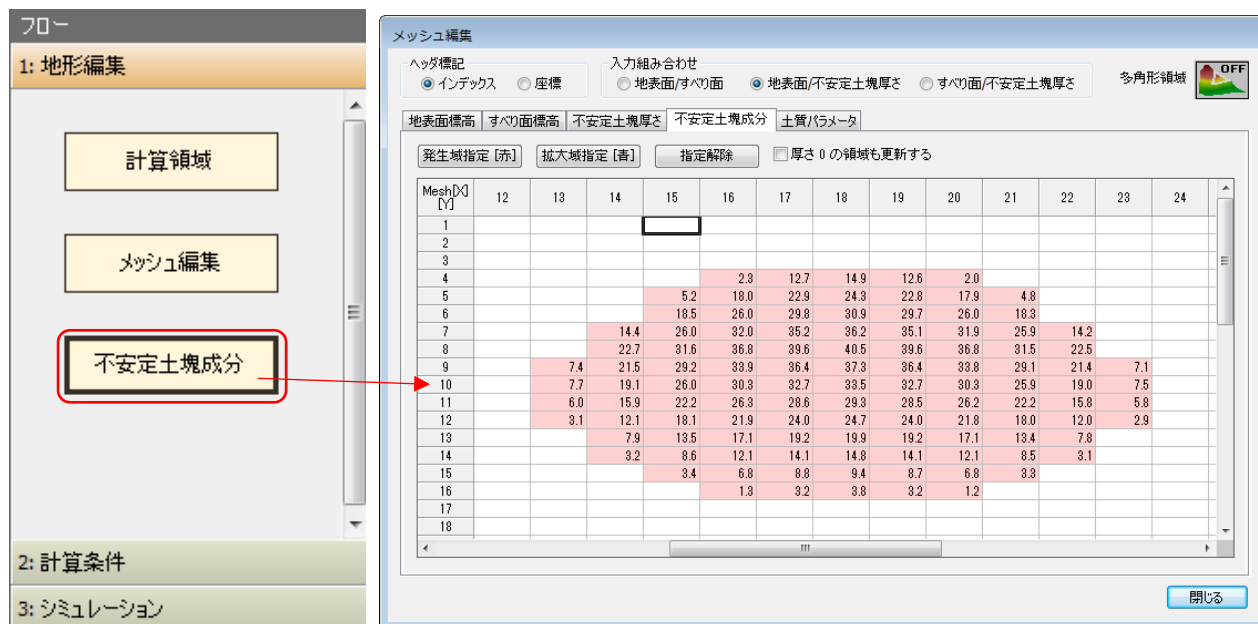
おのおののメッシュの標高がこの基準線を下回った場合、基準線の標高まで埋め戻されます。上回っている位置については特に何も行いません。

埋め戻される前の地形が新しいすべり面となり、埋め戻された後の地形が新しい地表面となります。

3-8. 不安定土塊成分の設定

地表面地形・すべり面地形の作成が終了したら、不安定土塊高さ分布が存在していることになります。不安定土塊分布では、“発生域”“拡大域”というように成分要素を指定することができます。

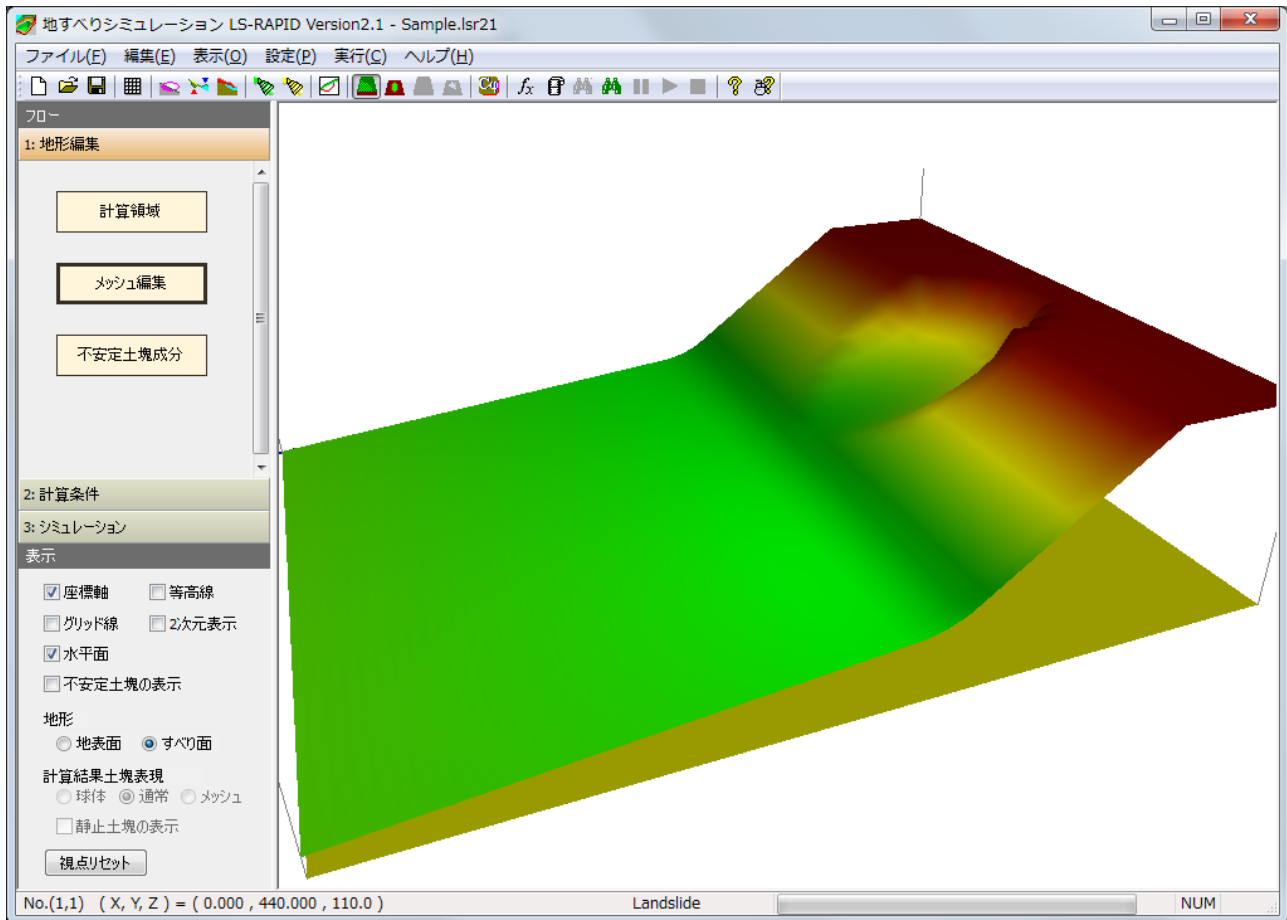
フローから「1.地形編集」→「不安定土塊成分」をクリックすると以下のようなダイアログが現れます。



項目	説明
「発生域指定 [赤]」 「拡大域指定 [青]」ボタン 「指定解除」ボタン	このボタンをクリックすると、選択した範囲の不安定土塊成分メッシュ分布が“発生域”（または“拡大域”）に指定されます。 このボタンをクリックすると、指定済み不安定土塊成分メッシュ分布が解除されます。
多角形領域編集	ボタンをクリックすると、下図の ON/OFF が切り替えできます。 <div data-bbox="563 1332 778 1406" data-label="Image"> </div> ON にした状態では、「多角形領域」画面が開き、領域を選択した状態で 3D-View 画面の[Ctrl]+[Shift]キーを押しながら左クリックすると、選択領域用の多角形が生成できます。
高さ 0 の領域も更新する	この欄にチェックを入れると、不安定土塊高さが存在しない領域も指定できます。（デフォルトでは指定できない設定になっています。）

※ この領域指定は、地震および豪雨を誘因としたシミュレーションを行うときに効果があります。

すべての領域で指定が完了したら、指定完了ボタンを押してこのダイアログを閉じます。完了すると、標高編集領域にも土塊の分布が表示されます。



4. シミュレーション計算の設定

地表面地形・すべり面地形のメッシュデータを構築したら、シミュレーションに必要な設定を行います。

4-1. 土質パラメータの設定

土質パラメータの設定は、メッシュごとにパラメータを設定します。

フローの「2.計算条件」から「土質パラメータ」をクリックすると以下のようなダイアログが現れます。

編集	項目	記号	単位	通常値
1 *	水平土圧係数	$k = \sigma_h / \sigma_v$		0.30 - 0.60
2	土塊内部の摩擦係数	$\tan \phi_i$		0.36 - 0.58
3	すべり面の運動時の摩擦係数	$\tan \phi_m$		0.46 - 0.70
4	定常状態におけるすべり面のせん断抵抗	τ_{ss}	kPa	5 - 50
5	過剰間隙水圧発生率	B_{ss}		0.0 - 1.0
6	すべり面のピーク時の摩擦係数	$\tan \phi_p$		0.65 - 0.78
7	すべり面のピーク時の粘着力	C_p	kPa	10 - 100
8	土塊の単位体積重量	γ	kN/m ³	

Mesh No [V]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
2	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
3	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
4	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
5	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
6	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
7	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
8	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
9	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
10	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0
11	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0

編集欄に、*印がついているものは現在編集集中のパラメータであることを表しています。また、行全体が灰色で覆われているものは入力が必要のない項目であることを示しています。

3D-View 画面で[Ctrl]+[Shift]キーを押しながら左クリックすると、メッシュ編集セルがクリックした地形付近に移動します。

土質パラメータの編集項目

メッシュの格子点別にパラメータを設定します。

多角形領域編集

ボタンをクリックすると、下図の ON/OFF が切り替えできます。



ON にした状態では、「多角形領域」画面が開き、領域を選択した状態で 3D-View 画面の [Ctrl]+[Shift] キーを押しながら左クリックすると、選択領域用の多角形が生成できます。

「選択矩形内代入」ボタン

左にある標高入力欄に標高を設定して、メッシュ対象領域を設定した後にこのボタンをクリックすると、ダイアログ内の選択したセルブロックの範囲が入力した標高で埋められます。(同一標高の入力の手間を省きます。)

上記の多角形領域編集を ON にした場合は、開いている「多角形領域」画面内の、「選択多角形内代入」ボタンの下にある標高入力欄に標高を設定して、メッシュ対象領域を設定した後にこのボタンをクリックすると、作成した多角形の範囲で代入されます。

土質パラメータについて

土質パラメータについての説明ダイアログが開きます。

メッシュの格子点別に設定できるパラメータは、以下の 8 種類です。

項目	記号(単位)	
水平土圧係数	k	○
土塊内部の摩擦係数	$\tan \phi i$	○
すべり面の運動時の有効摩擦係数	$\tan \phi m$	○
定常状態におけるすべり面のせん断抵抗	$\tau ss(kPa)$	○
過剰間隙水圧発生率	Bss	○
すべり面のピーク時の摩擦係数	$\tan \phi p$	△
すべり面のピーク時の粘着力	$Cp(kPa)$	△
土塊の単位体積重量	$\gamma (kN/m^3)$	○

“○”印がついているものは入力必須項目であり、“△”印がついているものは、地震及び豪雨を誘因としたシミュレーションにおいて、強度低下を考慮する場合に入力が必須になる項目です。

4-2. 計算条件の設定

LS-RAPID では、いろいろな地すべりシミュレーションパターンを設定することができます。
フロー「2.計算条件」内の「計算条件」をクリックすると以下のダイアログが現れます。



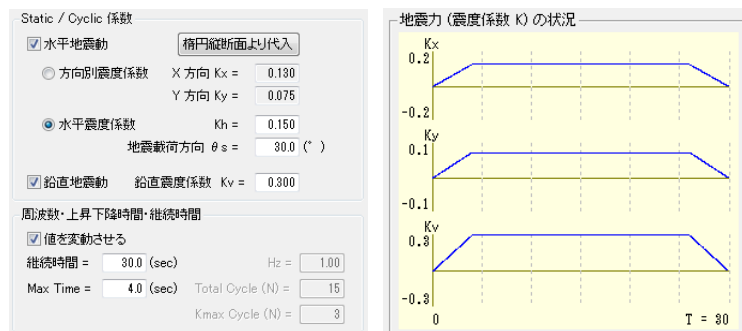
項目	説明
シミュレーションの条件	(運動シミュレーション) <ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> 運動シミュレーション (発生・運動・拡大シミュレーション) <ul style="list-style-type: none"><input type="radio"/> 常時のシミュレーション<input type="radio"/> 地震時のシミュレーション<input type="radio"/> 豪雨時のシミュレーション <input type="checkbox"/> 水圧をかける この欄にチェックを入れると、地すべり誘因として水圧も考慮されます。(常時/地震時のみ選択可。豪雨時の場合は必須です。)

◆ 地震時のシミュレーションについて

項目	説明
震度係数(K)	地すべりの誘因としての地震力を設定します。地震力は一定にする、または時間をかけて変動するように設定できます。また始動時間の設定もできます。 地震力の作動方法は以下から設定できます。 <input type="radio"/> Static <input type="radio"/> Cyclic <input type="radio"/> Seismic Static の場合は地震力の値が線形に作用します。 Cyclic の場合は地震力が波型に作用します。振幅量が線形値となります。 Seismic の場合は、実際の地震波形データを利用して地震力を作用させます。
地震波形の編集	地震力の作動方法として Seismic を選択した場合は、実際の地震波形データが必要となります。このボタンをクリックすると、波形データ編集ダイアログが現れます。
楕円縦断面より代入	このボタンをクリックすると、先に(主断面の)すべり面を楕円図形から作成したときに、「地すべり縦断面」方向を地震载荷方向として値を設定します。

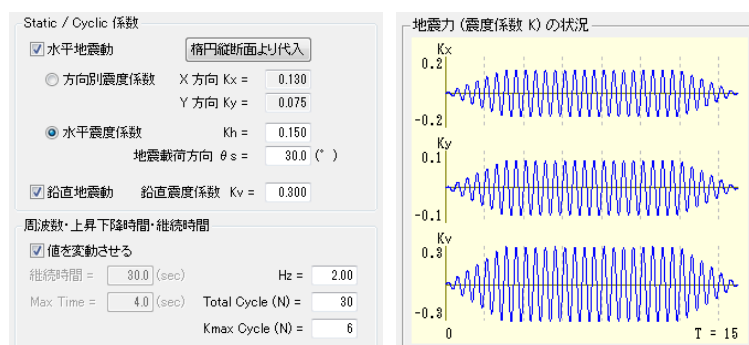
<設定例>

(1) Static の場合



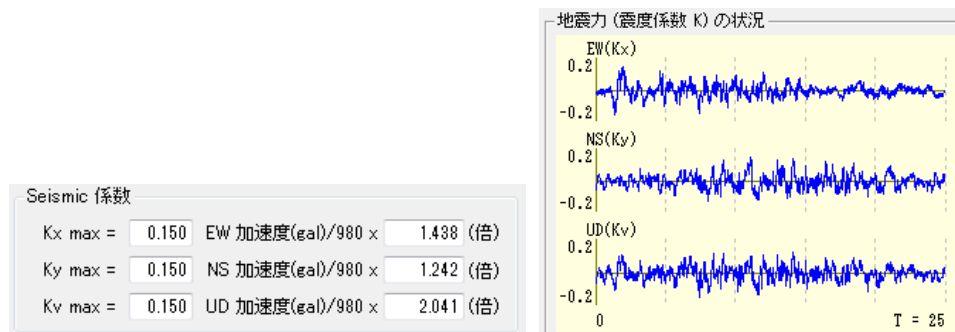
上記の Static の設定の場合は、シミュレーションの開始当初の $K=0$ から 4 秒かけて K_{\max} まで上昇して、30 秒間地震力がかかり続けるという意味になります。

(2) Cyclic の場合



上記の Cyclic の設定の場合は、シミュレーションの開始当初の $K=0$ から、 $3.0(=6/2\text{Hz})$ 秒をかけて K_{\max} まで上昇して、 $15(=30/2\text{Hz})$ 秒まで地震力がかかり続けるという意味になります。

(3) Seismic の場合



上記の Seismic の設定の場合は、編集した地震波形をベースに $K_{\max}=0.15$ になるように地震力を調整したという意味になります。なお、この K_{\max} は各成分(X 方向,Y 方向,鉛直)ごとに設定できます。(※「地震波形の編集」については次節で説明します。)

また、常時/地震時のシミュレーションを選択した際に、「水圧をかける」にチェックを入れた場合、水圧も地すべりの誘因として含めることもできます。

項目	説明
水圧 (間隙圧比 ru) ($ru = u/\sigma \cdots 0.0 \sim 1.0$)	<p>地すべりの誘因としての水圧を設定します。水圧は一定にする、または時間をかけて変動するように設定できます。また始動時間の設定もできます。</p> <p>水圧の作動方法は以下から設定できます。</p> <p><input type="radio"/> Static <input type="radio"/> Survey</p> <p>Static の場合は水圧の値が線形に作用します。</p> <p>Survey の場合は実際の水圧データを利用して水圧を作用させます。</p>
水圧値 ru の入力	<p>水圧の作動方法として Survey を選択した場合は、実際の水圧データが必要となります。このボタンをクリックすると、水圧データの編集ダイアログが現れます。</p>

<設定例>

(1) Static の場合

上記の設定の場合は、シミュレーションの開始当初の $ru=0.0$ から、3 秒かけて $ru=0.4$ まで上昇して、70 秒間水圧がかかり続けるという意味になります。

(2) Survey の場合

	Time (min)	ru (0.0-1.0)
1	0.0	0.04
2	10.0	0.04
3	20.0	0.03
4	30.0	0.03
5	40.0	0.03
6	50.0	0.03

項目	説明
計算時間単位 (発生シミュレーション期間)	
計算ピッチ	このパラメータは、地すべり速度が下で設定される“速度限界”に達していない場合に、ステップあたりの見かけの時間を設定した倍率で早く進めるためのものです。
速度限界	
ru の観測値	間隙圧比 ru を入力します。

◆ 豪雨時のシミュレーションについて

項目	説明
雨量データ入力	地すべりの誘因としての雨量データを入力します。入力単位は 10 分間雨量を mm で入力します。このボタンをクリックすると、雨量データ編集ダイアログが現れます。

	Time (min)	10分間雨量 (mm)
1	0.0	0.0
2	10.0	0.5
3	20.0	0.0
4	30.0	0.0
5	40.0	0.5
6	50.0	0.5
7	60.0	0.5

※ 豪雨時のシミュレーションを行うときは水圧を誘因とするため、間隙圧比 ru の設定は必須です。詳細は解説編第 6 章 “時間降雨量から間隙水圧比への変換” を参照してください。

◆ 強度低下条件パラメータについて（発生・運動・拡大シミュレーションで有効）

項目	説明
発生域 (移動距離による)	<p>先に設定した不安定土塊分布のうち発生域に対して、摩擦係数及び粘着力をピーク時から通常運動時まで低減しながらシミュレーションを行います。 ($\tan \phi p \rightarrow \tan \phi m$, $Cp \rightarrow Cm$ までの低減を行う)</p> <p>※ 原理として、メッシュごとの移動距離が $DL(mm)$ になったときに低減を始めて、$DU(mm)$ に到達したら低減を完了して、通常の運動シミュレーションを行うことになります。</p>
発生域以外 (土塊高さによる)	<p>先に設定した不安定土塊分布のうち発生域以外の領域に対して、摩擦係数及び粘着力をピーク時から通常運動時まで低減しながらシミュレーションを行います。($\tan \phi p \rightarrow \tan \phi m$, $Cp \rightarrow Cm$ までの低減を行う)</p> <p>※ 原理として、メッシュごとの移動土塊高さが $\angle hcr(m)$ に到達したら低減を完了して、通常の運動シミュレーションを行うことになります。</p>

◆ 水没計算時の設定について

項目	説明
水没計算を行う	<p>この項目にチェックを入れると、水没部の土塊については浮力を考慮した重量を用いてシミュレーションを行います。 (例：海底地すべりのシミュレーション(全面水没)、および地すべり土塊が川・湖に突入した場合(部分水没))</p>
水面の標高	水没・非水没土塊の境界となる標高を入力します。
水の単位体積重量	水の単位体積重量を設定します。

4-3. 地震波形データの登録

地すべりシミュレーションでは、地震時のシミュレーションで、モデル地震波および実際の観測データに基づいた地震波形を設定することができます。ここでは実際の観測データに基づいた地震波形の設定方法を記述します。

この編集を行うには、前節“計算条件の設定”から地震動を“Seismic”に設定して、「地震波形の編集」ボタンをクリックするか、メニューから「設定」→「地震波形データの登録」を選択すると以下のダイアログが現れます。

地震波形データの登録

☒ Case 1 地震波形 ☐ Case 2 地震波形 ☐ Case 3 地震波形

Sample

	Time	EW-Acc	NS-Acc	UD-Acc
1	0.000	-10.5200	-42.4600	-52.9800
2	0.010	-11.3700	-42.7800	-54.1500
3	0.020	-10.9000	-43.0100	-53.9100
4	0.030	-9.2800	-41.9400	-51.2200
5	0.040	-7.2100	-38.7700	-45.9800
6	0.050	-5.6100	-33.6100	-39.2200
7	0.060	-5.1800	-27.4600	-32.6400
8	0.070	-6.0100	-21.6100	-27.6200
9	0.080	-7.5400	-16.8400	-24.3800
10	0.090	-8.8200	-12.9300	-21.7500
11	0.100	-9.0200	-8.9300	-17.9500
12	0.110	-7.9700	-3.8100	-11.7800
13	0.120	-6.3100	2.7500	-3.5600
14	0.130	-5.2500	10.0100	4.7600
15	0.140	-5.9500	16.5900	10.6400
16	0.150	-8.8100	21.1900	12.3800
17	0.160	-13.1200	23.4200	10.3000
18	0.170	-17.2500	23.9500	6.7000
19	0.180	-19.3300	24.1400	4.8100
20	0.190	-18.2400	25.1700	6.9300

※ 東西(EW)を X方向、南北(NS)を Y方向に取るものとします。
※ 単位は Time (sec) , Acc (gal) です。

OK キャンセル

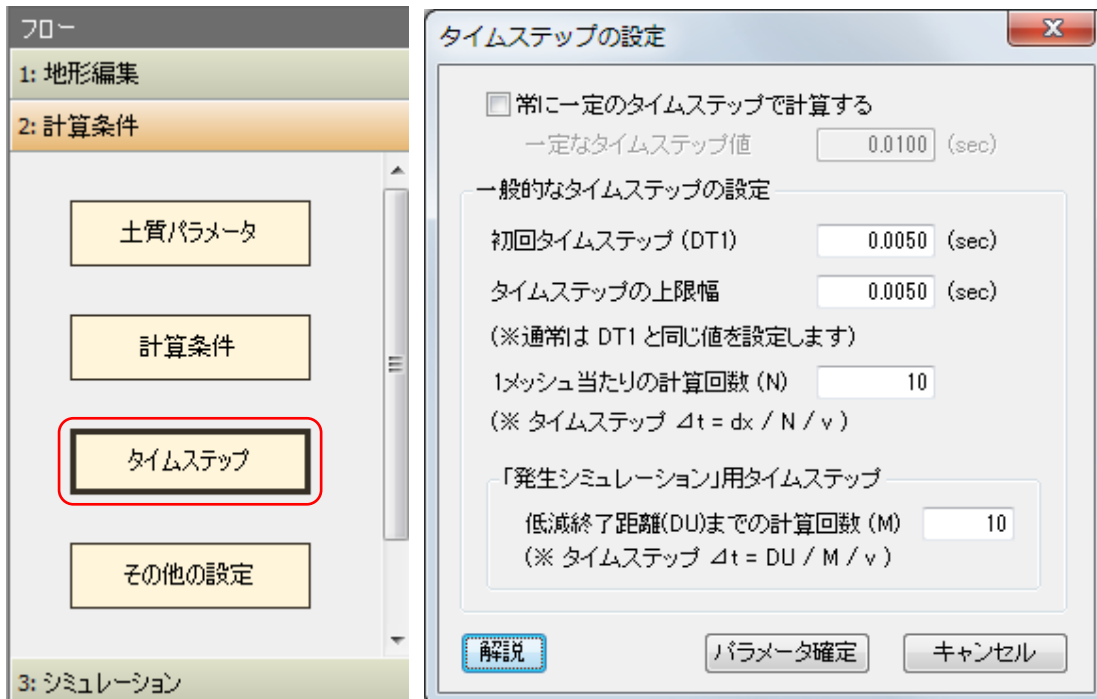
ここでは3ケース分の観測データを登録でき、実際のシミュレーション計算ではそのうちの1ケースを選択して計算することになります。書式は、データ名称を上欄に記述して、観測時刻と加速度(単位gal)を入力することになります。

<入力時の注意事項>

1. 必ず観測時刻順に入力する必要があります。
2. 東西(EW)を X 方向、南北(NS)を Y 方向に取るものとして地震力を入力します。

4-4. タイムステップの設定

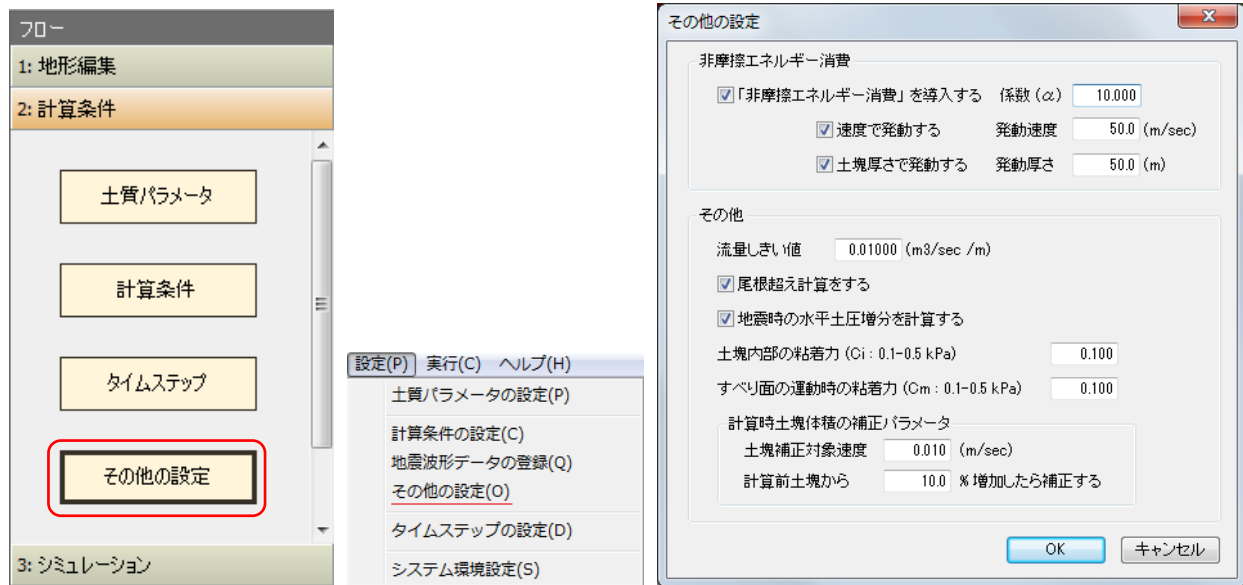
地すべりシミュレーションでは、運動進行度合いをタイムステップの進め方で調整することができます。フロー「2.計算条件」内の「タイムステップ」をクリックすると以下のダイアログが現れます。



項目	説明
常に一定のタイムステップで計算する	ここにチェックを入れると、シミュレーションのタイムステップは常に一定の値で進みます。
初回タイムステップ (DT1)	計算第 1 ステップにおけるタイムステップを設定します。
タイムステップの上限幅	そのステップの平均最大速度($v = \sqrt{u_{\max}^2 + v_{\max}^2}$)から、次回のタイムステップを算出した際に、ここで設定した値を上回ったら次回のタイムステップをここで設定した値にします。
1 メッシュあたりの計算回数 (N)	次回のタイムステップを $dx(= \text{メッシュのピッチ})/N/v$ で定義する際の計算回数を設定します。
低減終了距離(DU)までの計算回数 (M)	「発生シミュレーション」専用のパラメータで、タイムステップを $DU/M/v$ で定義する際の計算回数を設定します。低減終了距離が過ぎた場合は、運動シミュレーションのタイムステップで進行します。

4-5. その他の設定

ここではシミュレーション設定をするにあたり、設定する頻度が低い項目について説明します。
メニューから「設定」→「その他の設定」を選択すると以下のダイアログが現れます。



◆ 非摩擦エネルギー消費について

項目	説明
「非摩擦エネルギー消費」を導入する	このチェックを入れると、シミュレーション計算時に非摩擦エネルギー消費分($=\alpha * 1/2 * m * v^2$)を考慮するようになります。
係数(α)	非摩擦エネルギー消費を導入する際に、計算に入れる係数(α)です。
速度で発動する	このチェックを入れると、指定の速度(土塊厚さ)に到達したメッシュ
土塊厚さで発動する	に対して非摩擦エネルギー消費を考慮するようにします。

非摩擦エネルギー消費についての説明は、解説編第5章“非摩擦エネルギー消費に起因するせん断抵抗成分”を参照してください。

◆ その他諸設定

項目	説明
流量しきい値	<p>流量とは、単位時間内に計算メッシュ内を移動する土量のことで、単位は m^3/sec で表します。地すべりの場合、水と異なりあまりに薄い mm 単位の土砂は、通常流動できません。そのためシミュレーション計算中にメッシュごとの流量値がこの値を下回った場合、そのメッシュでは流量を認めないようにします。</p> <p>計算する地すべり土塊の規模によりますが、通常の場合 $0.01 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度を設定します。</p>
尾根越え計算をする	<p>地すべり運動土塊が曲がった谷を流下する場合、土塊の大部分は谷沿いに流れますが、尾根より高い運動土塊の上部のみが尾根を越える場合があります。このような計算を行う場合にはチェックを入れ、行わない場合にはチェックを外します。(通常は尾根越えの有無に関わらず、チェックを入れていても問題はありません)</p>
地震時の水平土圧増分を計算する	<p>本シミュレーションでは、解説編 1-1 で示すように 3 成分の地震力を与えますが、そのうち鉛直地震部分の増加は、水平土圧係数(鉛直土圧と水平土圧の比)を介して、水平土圧の増加をも引き起こします。この項を考慮する場合にはチェックを入れ、しない場合はチェックを外します。(通常はチェックを入れます)</p>
土塊内部の粘着力 ($C_i \cdot \text{kPa}$)	この地形全体における土塊内部の粘着力を設定します。
すべり面の運動時の粘着力 ($C_m \cdot \text{kPa}$)	この地形全体におけるすべり面の運動時の粘着力を設定します。
計算時土塊体積の補正パラメータ	<p>シミュレーション計算過程で、通常土塊の総体積は変動しませんが、計算がある場所で発散状態になると、体積が増加する現象が起きることがあります。このような場合に運動土塊の体積のみを一定にするための補正パラメータです。</p>
土塊補正対象速度	<p>停止あるいは停止に近い運動土塊は、発散の補正の対象外です。補正の対象とする最低速度を入力します。</p>
計算前土塊から $x\%$ 増加したら補正する	<p>計算前の土塊の総体積が、$x\%$増加したら、補正を開始させるための閾値を入力します。</p>

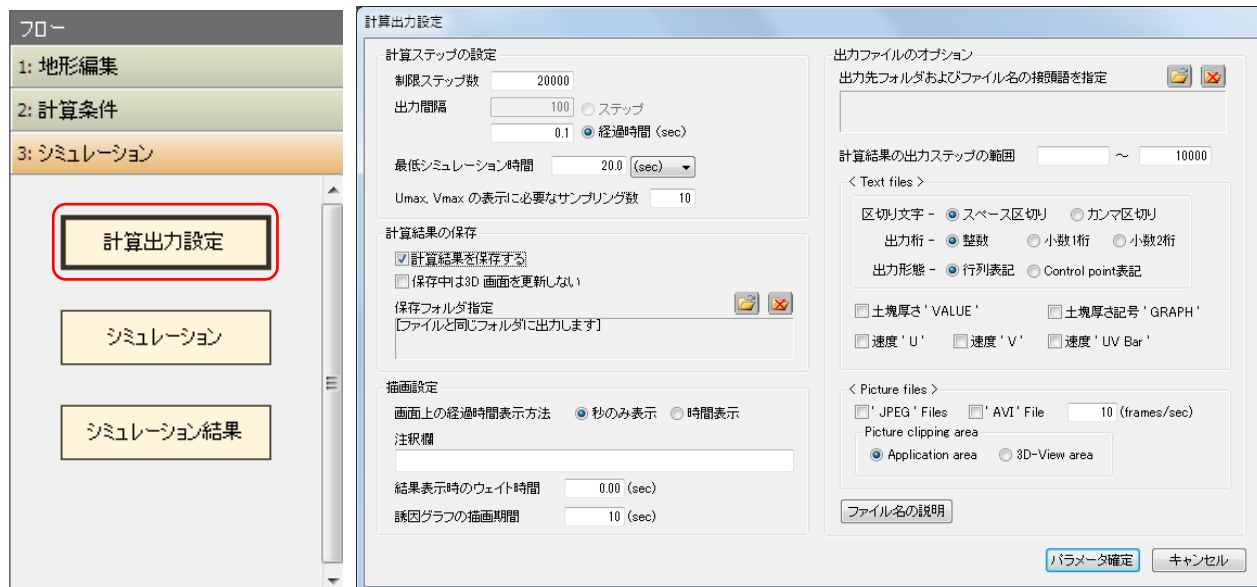
※ このダイアログに出ている C_i, C_m の範囲は通常値の範囲という意味です。

5. シミュレーションの実行

この章ではシミュレーションを実行する上で必要な設定を行います。

5-1. 計算出力の設定

フロー「3.シミュレーション」内の「計算出力設定」をクリックすると以下のダイアログが現れます。



◆ 計算ステップおよび描画の設定

項目	説明
制限ステップ数	シミュレーション計算を行う回数(ステップ数)を指定します。
出力間隔	○ ステップ数 ○ 経過時間 この間隔で計算結果のファイル出力を行います。 また、シミュレーション中の地形表示もこの間隔で更新します。
最低シミュレーション時間	原則的に全土塊が止まったときにシミュレーションが終了しますが、この時間を設定すると止まった状態においても指定時間まではシミュレーション計算をし続けます。
Umax, Vmax の表示に必要な サンプリング数	シミュレーション中には X 成分,Y 成分の最大速度を表示します。 このときに表示される速度の元になる、メッシュ別の速度をサンプリングする個数を設定します。 (表示速度は、サンプリング内での平均値となります。)
注釈欄	シミュレーション中に表示するコメントを入力します。 ※ 注釈欄に登録できる文字列は半角英数字のみです。
誘因グラフの描画期間	地震時または豪雨時のシミュレーションを行うときに、平行してグラフが表示されますが、その時間軸の長さを設定します。

◆ 計算結果の保存

項目	説明
計算結果を保存する	<p>この欄にチェックを入れると、プロジェクトファイルと同じフォルダに計算結果である標高データを出力します。</p> <p>LS-TSUNAMI へ計算結果を渡す場合は本チェックをつけて下さい。</p> <p>本チェックを付けると出力間隔は”経過時間”で固定されます。</p> <p>※出力されるファイルは以下のとおりです。</p> <p>(出力間隔を 1.0 秒で固定した場合)</p> <p>G0000120.dat 12.0 秒後の地表面標高</p> <p>M0000120.dat 12.0 秒後における地表面標高の前回分との変動差 (= “G0000120.dat” - “G0000110.dat”)</p>
保存中は 3D 画面を更新しない	この欄にチェックを入れると、計算中に 3D 画面の更新を行ないません。計算時間を短縮できます。
結果表示時のウェイト時間	「シミュレーション結果」で計算結果を表示する場合の、表示速度調整を行ないます。表示が早すぎる場合に待ち時間を設定します。

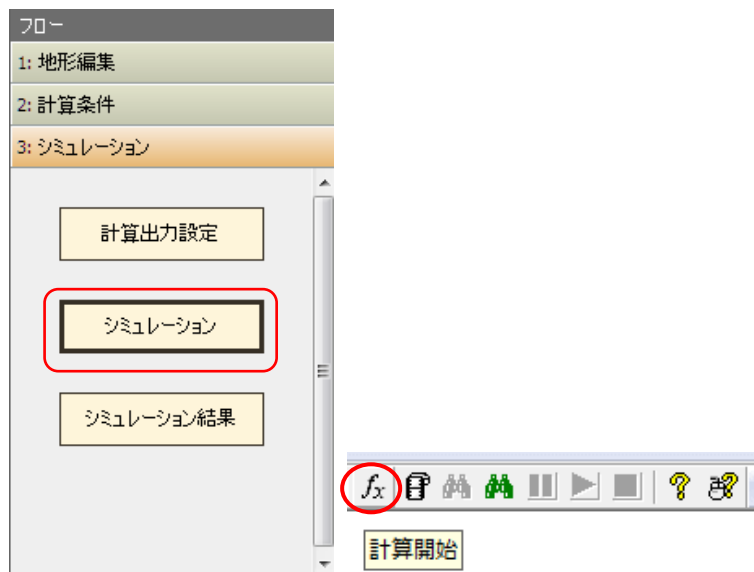
◆ 出力ファイルのオプション

(ここの出力は上の「計算結果の保存」とは別処理です)

項目	説明
出力先フォルダおよびファイル名の接頭語を指定	以下に説明するデータの出力先フォルダ及びファイルの頭文字を指定します。
計算結果の出力ステップの範囲	ここに値を入力するとこの範囲でデータを出力します。 (省略すると開始当初から(または終了時まで)出力します。)
Text files	<p>ここで出力可能なファイルは以下のとおりです。</p> <p>VALUE … メッシュごとの不安定土塊厚さ量</p> <p>GRAPH … メッシュごとの不安定土塊厚さ量を記号表現したもの</p> <p>U, V, UV Bar … メッシュごとの流速</p> <p>(U は X 方向、V は Y 方向、UV Bar は平均値)</p>
区切り文字 (テキスト出力時)	<p>○ スペース区切り ○ カンマ区切り</p> <p>数値と数値の間に入れる文字を設定します。</p>
出力桁 (土塊厚さテキスト出力時)	<p>○ 整数 ○ 小数 1 桁 ○ 小数 2 桁</p> <p>土塊厚さを出力するときの数値単位を選択します。</p>
出力形態 (土塊厚さテキスト出力時)	<p>○ 行列表記 ○ Control Point 表記</p> <p>土塊厚さを出力するときに、土塊厚さだけを行列のように出力するか、メッシュ番号と土塊厚さを 1 行にして全格子分出力するかを選択します。</p>
Picture clipping area (画像ファイル出力時)	<p>○ Application area ○ 3D-View area</p> <p>JPEG 画像・AVI 動画ファイル保存時に出力される領域をアプリケーション全体および 3D 画面範囲で選択します。(画像が正常に出力できなかった場合には 3D-View area を選択してください。)</p>

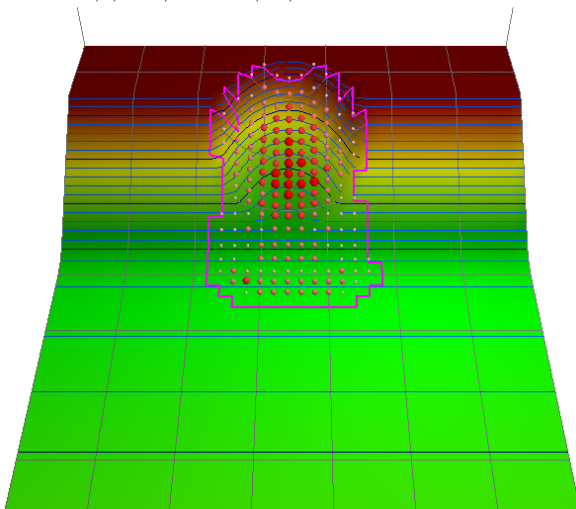
5-2. シミュレーションの開始

フロー「3.シミュレーション」内の「シミュレーション」をクリックすると、シミュレーションの開始を確認後、計算が始まります。

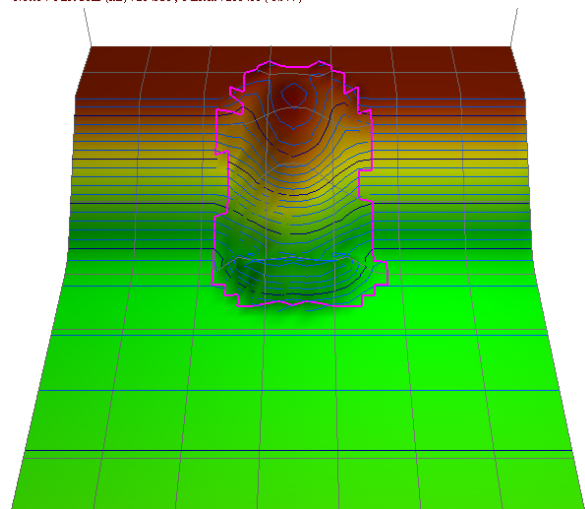


以下はシミュレーション中の画面のサンプルです。(左：球体表現、右：土塊厚さ 2 倍誇張表現)






Step : 3300 Time : 16.5 sec
 Umax : 7.2 m/sec Vmax : 20.0 m/sec
 Notes : First Soils (m3) : 214530 , Current : 216411 (0.9%)



Step : 3300 Time : 16.5 sec
 Umax : 7.2 m/sec Vmax : 20.0 m/sec
 Notes : First Soils (m3) : 214530 , Current : 216411 (0.9%)



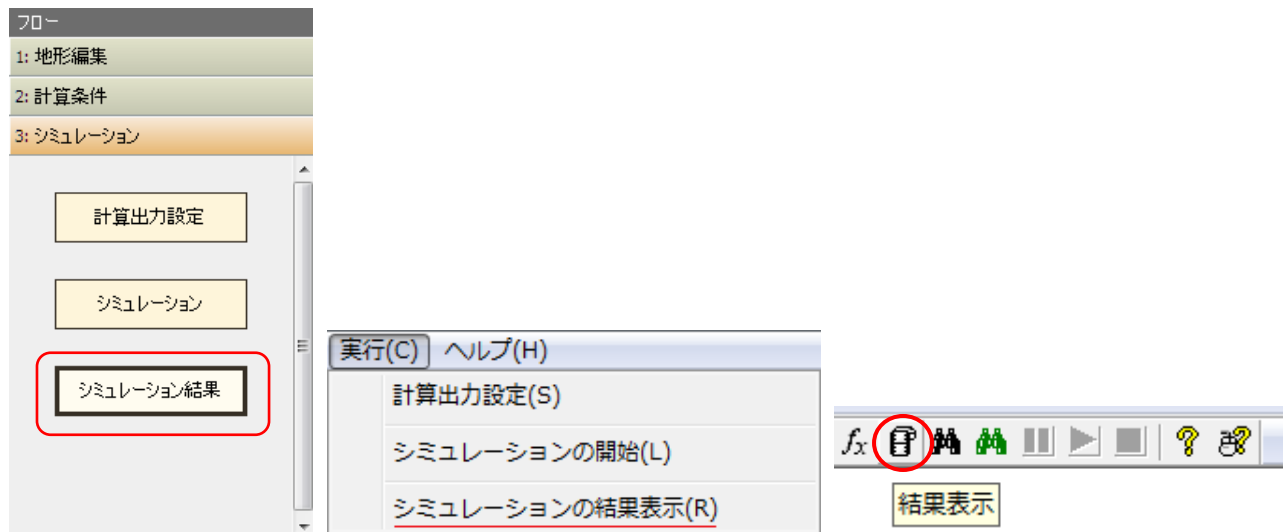
尚、シミュレーション計算中には以下のコマンドをツールバーから実行できます。

	ウォッチ	現在計算中の土塊厚さ及び速度情報などを表示するダイアログを開きます。
	発生要素	発生誘因となる水圧・地震力・雨量グラフを表示するダイアログを開きます。
	一時中断	シミュレーション計算を一時的に停止します。
	計算再開	一時中断したシミュレーション計算を再開します。
	計算中止	シミュレーション計算を強制的に終了させます。

(※ウォッチ・発生要素は、メニューから「表示」→「計算値の表示」としても開きます。)

5-3. シミュレーションの結果表示

先の 5-1. 計算出力の設定で「計算結果を保存する」を行って、シミュレーションを実行した場合、出力したデータファイルを読み込んで結果表示することもできます。フローコマンドの「シミュレーション結果」をクリック、またはメニューから「実行」→「シミュレーションの結果表示」を選択するか、ツールバーの「結果表示」アイコンをクリックします。



6. そのほかのコマンドについて

ここでは、「操作編」でいままで触れなかった機能について説明します。

(1) 「ファイル」メニュー

メニュー項目	内容
新規作成	地すべりシミュレーションシステム用のデータを新規に作成します。
開く	データファイルを開きます。
上書き保存	データファイルを上書き保存します。
名前を付けて保存	名前を指定してデータファイルを保存します。
他形式データファイルの読み込み	数値データテキストファイル (Control Point, Mesh Data) や、SSA_3D データ、平面図変換データ(ともに五大開発株式会社製)を読み込みます。また、Control Point を直接 Mesh Data に変換するツールも用意しています。
他形式データファイルへ書き出し	入力した数値データ (Control Point, Mesh Data, 土質パラメータ) をテキストファイルとして出力します。
画像ファイルの読み込み	地表面上に貼り付ける画像ファイルを設定します。
画像を JPEG ファイルに保存する	現在 3D 画面に表示されている内容を JPEG 形式で保存します。
ファイルを閉じる	現在開いているファイルを閉じます。
アプリケーションの終了	このアプリケーションを終了します。

「他形式データファイルの読み込み」メニューについて

Control Point を直接 Mesh Data に変換するツールは、先に 3-1. DEM 標高データの準備で説明した Excel ツールと同様の内容を備えたダイアログです。このツールの場合、領域設定も同時に行います。

「他形式データファイルへ書き出し」メニューについて

書き出しには、「全項目」と「指定項目」の 2 通りあります。

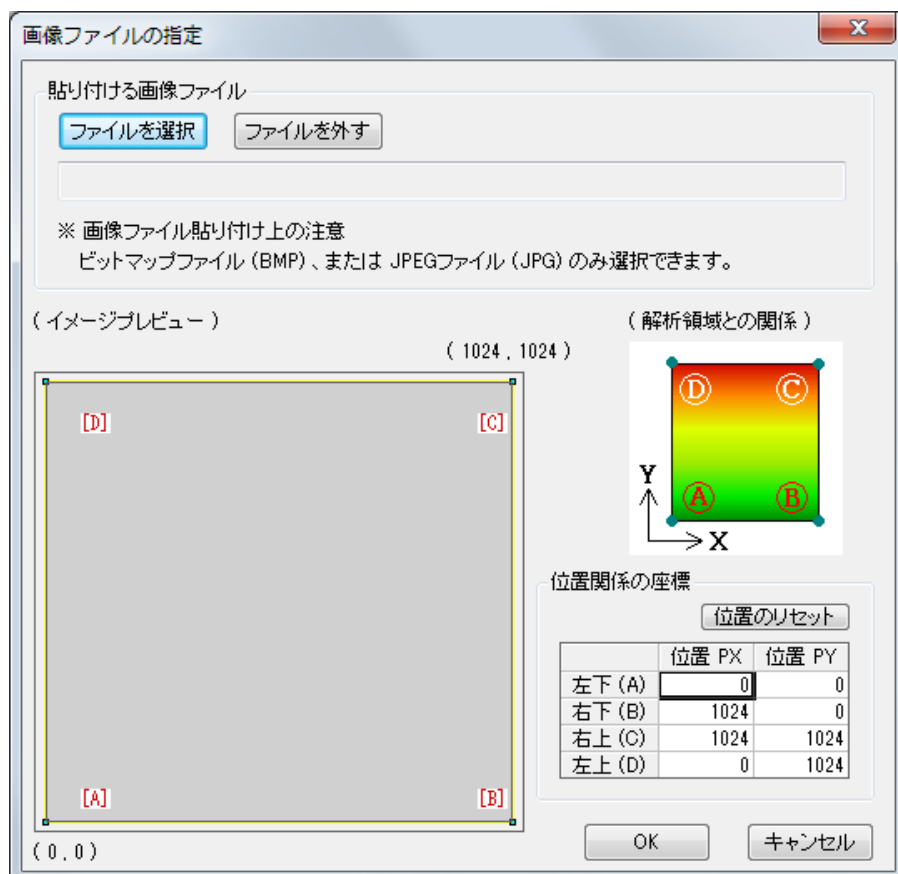
「全項目」を選択したら、上記の出力ファイルの保存先はシミュレーション出力ファイルを選んだ時と同じ方法で“保存データファイルの接頭語”を指定して保存します。「指定項目」を選択したら、表示されている項目の中から 1 項目選択して出力テキストファイルを指定して保存します。

「画像ファイルの読み込み」メニューについて

このメニューを選択したら、選択した画像ファイルを地表面に貼り付けて表示させることができます。

画像ファイルの指定ダイアログが開いて、「ファイルを選択」ボタンで貼り付けたい画像ファイルを選択すると、下のイメージプレビューに選んだ画面が選択されます。不要になった場合は「ファイルを外す」ボタンをクリックして消去します。なお、選択できる画像ファイルは BMP および JPEG 形式のみとなります。

ファイルを選び終えた後は、その画像が解析領域のどの位置に対応するかを設定します。デフォルトは画像の四角形がそのまま解析領域の四角形に対応します。



(2) 「表示」メニュー

メニュー項目	内容
地形の視点設定	軸ごとの回転角度を設定して視点を変更するものです。マウスでも画面の視点を変更することができます。
地形の視点をリセットする	地形の視点を初期状態に戻します。
計算地形をリセットする	シミュレーション計算した後の地形情報をクリアします。
地形表示における設定	地形を表現する時の表現方法を指定します。
地形表現の配色	地形を表現するときの色を設定します。
水平面描画範囲の設定	水平面を指定した範囲内で描画します。水没計算をするシミュレーションを行う場合のみ、この設定が有効になります。
現在の表示図形	見たい地形を選択します。以下の4種類から選べます。 ○ 地表面・すべり面 (デフォルト) ○ 不安定土塊厚さ ○ 最終計算結果画面 ○ 計算結果後の土塊分布
切断面を見る	指定位置での断面を表示します。詳細は後述します。
任意断面で出力する	任意に断面を設定します。断面座標の出力もできます。
計算値の表示	「メッシュ別」の場合、シミュレーション計算中のメッシュごとの値を表示します。「地すべり誘因パラメータ」の場合、発生シミュレーションにおける地震力・降水量・水圧を表示します。

「地形の視点設定」メニューについて

このメニューを選択したら、以下のダイアログが現れますので必要に応じて地形の視点をパラメータで設定します。

地形の視点設定

視点位置 設定 (平行移動量・拡大量)

X Y Z Zoom

回転角 設定 (単位:度)

X

Y

Z

Comment

Reset View

視点の履歴

↓ 履歴登録 ↑ 取り出し

	X	Y	Z	Angle X	Angle Y	Angle Z	Zoom	Comment
1								
2								
3								
4								
5								

開じる

このダイアログでは、視点の位置(X,Y,Z)、拡大倍率、および回転角(X,Y,Z 軸・度単位)を入力して設定します。お気に入りもしくは固定したい視点が見つかったら最大5個まで「↓履歴登録」ボタンで登録できます。履歴から反映させたいときは、行を選択して「↑取り出し」ボタンをクリックします。

「地形表示における設定」メニューについて

このメニューを選択したら、以下のダイアログが現れますので必要に応じて描画に関する設定を行います。

地形表示における設定

地形描画の設定

☐ Control Point を描画する

☐ グリッド線を描画する (ステップ間隔)

☒ 等高線を描画する

☒ 水平面を描画する

☒ 座標軸を描画する

☐ この地形を2次元で描画する

☐ 地表面表示でつやを出さない
(地表面が正常に描画されない場合もチェック)

標高の強調度 (倍)

計算処理中の地形描画の設定

☐ 土塊を球体で描画する

☒ 通常の地形表現で描画する

☐ 土塊分布をメッシュごとに描画する

土塊拡大倍率 (倍)

球体位置 (m)

☒ 自動設定

基準半径

標高加算

土塊/区画線の表現色

(静止土塊→移動土塊)
土塊表示色変更速度 Vcr = (m/sec)

移動土塊 (V>Vcr) の表現色 / 土塊厚さ別の表現色

	厚さ (m)	Color
Level 0	0.00	
Level 1	8.10	
Level 2	16.20	
Level 3	24.30	
Level 4	32.40	
Level 5	40.50	

区画線の描画色

☒ 発生域の土塊

☒ 地すべり運動範囲

土塊厚さ判定のしきい値 (m)

静止土塊 (V≤Vcr) ☒ 描画なし

地すべり拡大域

Color Default

OK キャンセル

項目	説明
地形描画の設定	
Control Point を描画する	Control Point があればそれを描画します。
グリッド線を描画する	グリッド線を描画します。グリッド線間隔も指定できます。
等高線を描画する	等高線を描画します。
水平面を描画する	水平面を描画します。
座標軸を描画する	座標軸を描画します。
この地形を 2 次元で描画する	地形を 2 次元表現で描画します。
地表面表示でつやを出さない	この設定は、3D 画面に地形が現れなかった場合にチェックしてください。通常は必要ありません。
標高の強調度	実際の座標と比べて標高の勾配を強調したい場合に、標高の倍率で入力します。
計算処理中の地形描画の設定	<ul style="list-style-type: none"> ○ 土塊を球体で描画する ○ 通常の地形表現で描画する ○ 土塊分布をメッシュごとに描画する 上記 3 通りの中から選択します
土塊拡大倍率	上記で「通常の地形表現」「土塊分布をメッシュごと」を選択した場合に土塊厚さを指定倍率で拡大して地形を表現します。
球体位置	上記で「土塊を球体で描画する」を選択した場合に、球体のサイズと地表からの高さを設定します。通常は自動的に設定されます。
土塊/区画線の表現色	
土塊表示色変更速度 Vcr	静止土塊から移動土塊に変化する速度条件(Vcr)を設定します。
土塊厚さ判定のしきい値	設定値以上の土塊の厚さだけを「すべり土塊」として表示する、そのしきい値です。
土塊厚さ別の表現色	移動土塊および静止土塊を球体やメッシュで表現する際に、土塊の厚さに応じた色を設定します。静止土塊については、描画しない設定も可能です。
地すべり拡大域の表現色	
区画線の描画色	「発生域の土塊（運動シミュレーションの場合は不安定土塊）」 「地すべり運動範囲」を仕切る線を表示します。
Color Default	設定した表現色を初期状態に戻します。

※ 表現色の設定は、“Color 列”のパレットをダブルクリック、及び六角形のボタンをクリックすることによって変更できます。

「地形表現の配色」メニューについて

このメニューを選択したら、以下のダイアログが現れますので必要に応じて地形上の描画に関する設定を行います。

地形表現の配色

初期配色 - パターンA 初期配色 - パターンB

地形の配色とバランス

Top 1.000
0.850
0.700
0.550
Middle 0.400
0.300
0.200
0.100
Bottom 0.000

色を調和 上下 上中下

水平面の配色

水平面の標高 0 (m)
配色
透明度 0 (%)
☒ 水平面と地形の混合 (DST_COLOR)
☐ 水平面の透過 (SRC_ALPHA)

等高線の配色

等高線 間隔 2.0 (m)
強調線 5 本ごと
水平面上
等高線の太さ 2.0

その他の配色

選択多角形領域線
3D 画面の背景色

光源位置の設定

☒ 自動設定

座標値 (m)		光量 (%)	
X	263	環境光 (Ambient)	30
Y	330	拡散光 (Diffuse)	50
Z	165		

OK キャンセル

項目	説明
初期配色 (パターン A, B)	デフォルトで用意した配色を設定します。パターン A は主に陸上の地すべりシミュレーション向け、パターン B は主に海底の地すべりシミュレーション向けの色になっています。
地形の配色とバランス	地形の標高に応じた色を設定することができます。左側の三角形のボタンをクリックして色を設定します。右側の数値は、設定した色に対する標高の割合(0.0-1.0)を入力します。
色を調和 (上下・上中下)	「上下」ボタンの場合は頂上部と底辺部の色で、「上中下」のボタンの場合は頂上部と中間部、および底辺部の色に基づいて連続的に区間内の色を設定します。
水平面の配色	地形に敷いてある水平面に対して、色・位置・透明度を設定します。「海底地すべりシミュレーション」モードの場合は水面と同等の意味を持ちます。
等高線の配色	等高線を表現するときの、等高線間隔・色・太さ・強調線を何本ごとに引く、および水平面に引く等高線の色を設定します。
その他の配色	
選択多角形領域の配色	土塊編集領域など編集対象領域を囲むときの色を設定します。
3D 画面の背景色	3D 画面の背景色を設定します。

光源位置の設定

座標値

3D 画面を表示する際の地形の表現要素のひとつとして、光の当て方があります。ここでは光源の位置を設定します。通常は自動設定です。

光量

これも光の当て方のパラメータです。環境光(Ambient)と拡散光(Diffuse)の2種類設定できます。環境光は、地形全体の明るさの度合いを設定します。拡散光は、光源から出るスポットライトの明るさの度合いを設定します。

「切断面を見る」メニューについて

このメニューでは、X 軸及び Y 軸に平行な位置で切断した地形の断面を表示します。デフォルトでは緑色は地表面を、赤色はすべり面を、ピンク色はシミュレーション計算後の地表面の断面を表します。「座標値表示」ボタンをクリックしたら、現在表示されている断面の座標値を表示、および断面の描画色・太さ設定を行うダイアログを表示します。

なお、「Y 断面を上に表示する」をチェックしたら、切断面の表示順が入れ替わります。

切断面の位置設定

☒ Y断面を上に表示する

座標値表示

X 成分の切断メッシュ番号

19

(Location : X = 180.000 m)

Y断面

Y=0m

H=110m

H=0m

Y=440m

Y 成分の切断メッシュ番号

38

(Location : Y = 120.000 m)

X断面

X=0m

H=110m

H=0m

X=880m

Zg = 21.3, Zs = 21.3 (m)

開じる

切断面の座標情報

(Location : X = 180.000 m)

Copy

	Length	Height		計算後
		地表面	すべり面	
1	0.000	10.5	10.5	
2	10.000	11.4	11.4	
3	20.000	12.3	12.3	
4	30.000	13.2	13.2	
5	40.000	14.1	14.1	
6	50.000	15.0	15.0	
7	60.000	15.9	15.9	
8	70.000	16.8	16.8	
9	80.000	17.7	17.7	
10	90.000	18.6	18.6	
11	100.000	19.5	19.5	
12	110.000	20.4	20.4	
13	120.000	21.3	21.3	
14	130.000	22.2	22.2	
15	140.000	23.1	23.1	
16	150.000	24.0	24.0	

描画線の設定

	Color	線太さ
地表面	緑	1
すべり面	赤	1
計算後	ピンク	1
水面	青	1

(Location : Y = 120.000 m)

Copy

	Length	Height		計算後
		地表面	すべり面	
1	0.000	21.3	21.3	
2	10.000	21.3	21.3	
3	20.000	21.3	21.3	
4	30.000	21.3	21.3	
5	40.000	21.3	21.3	
6	50.000	21.3	21.3	
7	60.000	21.3	21.3	
8	70.000	21.3	21.3	
9	80.000	21.3	21.3	
10	90.000	21.3	21.3	
11	100.000	21.3	21.3	
12	110.000	21.3	21.3	
13	120.000	21.3	21.3	
14	130.000	21.3	21.3	
15	140.000	21.3	21.3	
16	150.000	21.3	21.3	

開じる

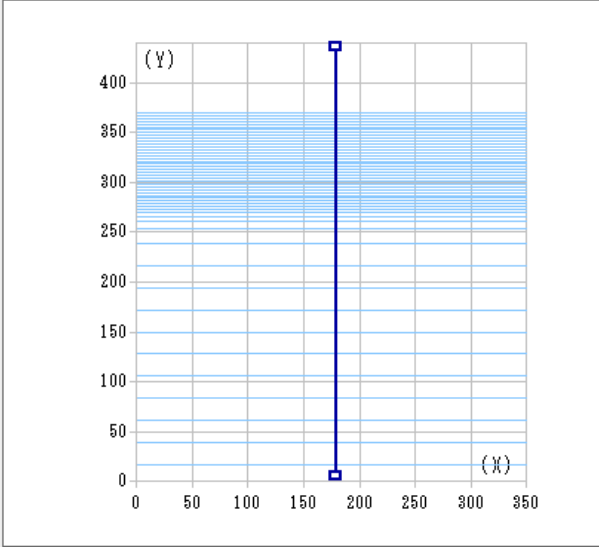
「任意断面で出力する」メニューについて

このメニューを選択したら、以下のダイアログが現れますので必要に応じて断面位置に関する設定を行います。

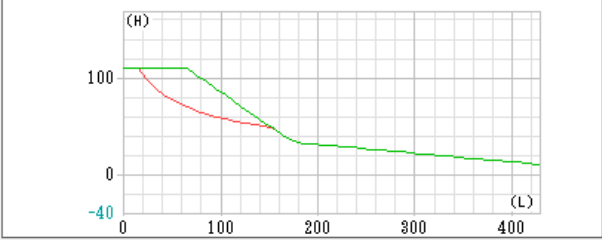
任意断面形状の出力

断面の配置	X	Y
断面 開始点	180.000	435.000
断面 終了点	180.000	5.000

☐ マウス入力



断面形状 ☒ 断面を同一縮尺にする



断面座標一覧

断面座標

	Length	Height		
		地表面	すべり面	結果後
1	0.000	110.000	110.000	
2	5.000	110.000	110.000	
3	15.000	110.000	110.000	
4	25.000	110.000	97.400	
5	35.000	110.000	87.200	
6	45.000	110.000	80.300	
7	55.000	110.000	74.900	
8	65.000	110.000	70.400	
9	75.000	103.000	66.600	
10	85.000	96.000	63.300	
11	95.000	89.000	60.500	
12	105.000	82.000	58.000	

開じる キャンセル

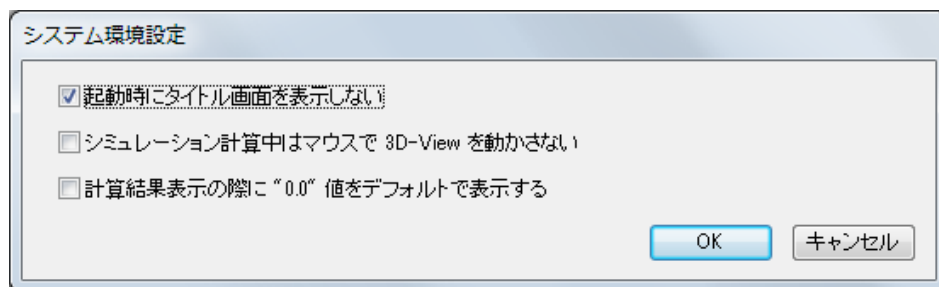
項目

説明

断面の配置	表示したい断面線の開始点・終了点の座標を入力します。マウス入力もできます。
断面形状	設定した断面線座標における断面地形を表示します。
断面座標一覧	上記断面形状における地表面・すべり面・計算結果後の断面を表示します。

(3) 「設定」メニュー（システム環境設定）

このメニューは本ソフトウェアの基本動作に対する設定を行います。



項目	説明
起動時にタイトル画面を表示しない	デフォルトでは LS-RAPID 起動時に概要を紹介する画面が表示されます。このチェックを入れるとすぐに作業できます。
シミュレーション計算中はマウスで 3D-View を動かさない	このチェックを入れると、シミュレーションしている間は、地形画面でマウスをドラッグしても一切の処理を受け付けなくなります。計算中に地形が突然勝手に動き出すような現象が見られる場合に使用します。
計算結果表示の際に “0.0” 値をデフォルトで表示する	計算結果ダイアログを表示する際に、“0.0”を表示するしないの設定が可能です。通常は起動時には出さなくなっていますが、このチェックを入れると起動時に”0.0”も含めて出すようになります。

(4) 「ヘルプ」メニュー

メニュー項目	内容
ヘルプ	本ソフトウェアのヘルプを表示します。
シミュレーション計算の解説	LS-RAPID シミュレーションの考え方を表示します。
画面の動かし方のガイド	マウスで画面を動かす場合のガイドを表示します。
アップデート確認	インターネットに接続可能であれば、お使いの「 LS-RAPID 」が最新バージョンか確認ができます。
バージョン情報	LS-RAPID のバージョン情報です。

(5) ツールバーのコマンド

LS-RAPID では、以下のようなツールバーコマンドを用意しています。下表にその一覧を示します。
(表の順番は左のアイコンからです)



見出し名	内容
新規作成	データファイルを新規作成します。
ファイルを開く	データファイルを開きます。
保存	データファイルを上書き保存します。
計算領域設定	地形を表示するために必要な初期設定を行います。
楕円すべり面	すべり面を断面と楕円体から編集します。
埋め戻しとはぎ取り	地形の埋め戻し及びはぎ取り設定をします。
不安定土塊成分	不安定土塊成分の内容(地すべり発生域・拡大域)を指定します。
地形表示設定	地形を表現する時の表現方法を指定します。
配色設定	地形や等高線の色を設定します。
切断面表示	X 軸及び Y 軸に平行な位置で切断した地形を表示します。
地表面とすべり面	見たい地形を選択します。(地表面またはすべり面)
不安定土塊	〃 (不安定土塊厚さの分布)
最終計算結果	〃 (最終計算結果画面)
計算結果土塊	〃 (計算結果後の土塊分布)
土質パラメータ	メッシュごとの土質パラメータを設定します。
計算開始	シミュレーション計算を開始します。
結果表示	シミュレーションした結果を表示します。
ウォッチ	現在計算中の土塊厚さ及び速度成分値を表示するダイアログを開きます。
発生要素	発生誘因となる水圧・地震力を表示するダイアログを開きます。
一時中断	シミュレーション計算を一時的に停止します。
計算再開	一時中断したシミュレーション計算を再開します。
計算中止	シミュレーション計算を強制的に終了させます。
ヘルプ	本ソフトウェアのヘルプを表示します。
画面の動かし方	マウスで画面を動かす場合のガイドを表示します。

(6) 表示ペインのコマンド

3D-View 画面の表示に関する設定です。

表示

☒ 座標軸
 ☐ 等高線

☐ グリッド線
 ☐ 2次元表示

☒ 水平面

☐ 不安定土塊の表示

地形

☒ 地表面
 ☐ すべり面

計算結果土塊表現

☐ 球体
 ☒ 通常
 ☐ メッシュ

☒ 静止土塊の表示

視点リセット

見出し名	内容
座標軸	座標軸を描画します。
等高線	等高線を描画します。
グリッド線	グリッド線を描画します。グリッド線間隔を指定したい場合は「地形表示における設定」画面で行ってください。
2次元表示	地形を2次元表現で描画します。
水平面	水平面を描画します。
不安定土塊の表示	このチェックをオンにすると、地表面・すべり面描画モードの場合、不安定土塊が厚さに応じて球体で表されます。
地形	地表面・すべり面描画モードの場合、地表面とすべり面どちらを描画するか選択できます。「メッシュ編集」画面のタブと連動しています。
計算結果土塊表現	「地形表示における設定」画面の[計算処理中の地形描画の設定]と同じです。
球体	土塊を球体で描画します。
通常	通常の地形表現で描画します。
すべり面	土塊分布をメッシュごとに描画します。
静止土塊の表示	静止土塊を描画します。

■ 解説編

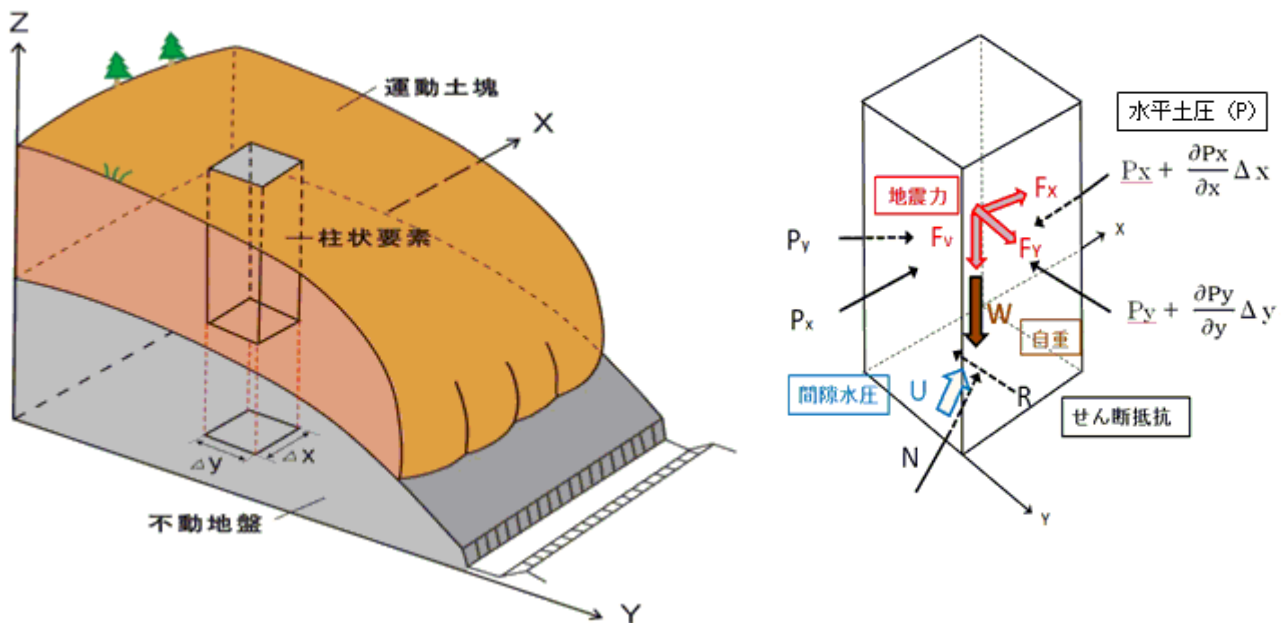
ここからは、本ソフトウェアの理論についての解説を行います。

地すべり発生運動統合シミュレーション(*LS-RAPID*) の概念とパラメータの解説

特定非営利活動法人 国際斜面災害研究機構 (ICL) 佐々 恭二

1. LS-RAPID の原理

山腹を移動する地すべり土塊の中に柱状の要素を考える。柱状要素にかかる力は、土塊の自重 (W) と土塊の側面に作用する水平土圧 (P)、土中要素の底面にかかる摩擦抵抗 (R)、および不動地盤からの垂直反力 (N)、と地すべりの発生の誘因としての地震力(鉛直地震力 F_v , 水平地震力 F_x, F_y)および土中要素の底面にかかる間隙水圧(U)です。これらの力の合力に比例して、地すべり土塊はある加速度 (a) で加速・減速する。土塊の質量を m として表示すると下記の式 (1) になる。



$$am = (W + F_v + F_x + F_y) + \left(\frac{\partial P_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P_y}{\partial y} \Delta y \right) + R \quad (1)$$

a : 柱状土塊の加速度、 m : 柱状土塊の質量

せん断抵抗力 (R) は間隙水圧 (U)、垂直力 (N) の効果を含む。

水平土圧 (P) は鉛直地震力 (F_v) の効果を含む。

図 1 LS-RAPID の基礎概念と基礎式

斜面勾配は場所によって異なるので、計算はすべての力と変位を水平面上に投影し、水平面上で行う (Sassa 1988)。本シミュレーションに用いる鍵となるパラメータは、摩擦抵抗(R)を決定する運動時に発揮される摩擦係数($\tan \phi a$)、および水平土圧を決定する水平応力 (σ_h) と鉛直応力 (σ_v) の比で表される水平土圧係数 (k) である。水平土圧係数は、運動土塊の変形のし易さを表し、流体では 1.0, 剛体では 0.0、土の場合は 0.0-1.0 の間の値をとる。

式（１）を x 方向、y 方向に分けて表示すると（２）（３）式になる（Sassa K. 1988、佐々 1987）

また、運動中に土量が増減しない（すなわちメッシュ内に流入する土量分(M, N) だけメッシュ内の土塊高さ h が変化し、その総和はゼロ）と仮定することにより、（４）式が得られる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_0 M) + \frac{\partial}{\partial y}(v_0 M) = gh \left\{ \frac{\tan \alpha}{q+1} (1 + Kv) + Kx \cos^2 \alpha \right\} - (1 + Kv) kgh \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{g}{(q+1)^{1/2}} \cdot \frac{u_0}{(u_0^2 + v_0^2 + w_0^2)^{1/2}} \{h_c (q+1) + (1 - r_u) h \tan \phi_a\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_0 N) + \frac{\partial}{\partial y}(v_0 N) = gh \left\{ \frac{\tan \beta}{q+1} (1 + Kv) + Ky \cos^2 \beta \right\} - (1 + Kv) kgh \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{g}{(q+1)^{1/2}} \cdot \frac{v_0}{(u_0^2 + v_0^2 + w_0^2)^{1/2}} \{h_c (q+1) + (1 - r_u) h \tan \phi_a\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

h : メッシュ内の土塊の高さ

g : 重力加速度

α 、 β : 地表面と X-Z 面、Y-Z 面のなす角度

u_0 、 v_0 、 w_0 : X, Y, Z 方向の速度（z 方向の速度分布を無視して一定とみなしたもの）

M, N : X, Y 方向の単位巾当たりの流量（ $M = u_0 h$, $N = v_0 h$ ）

k : 水平土圧係数（水平土圧と鉛直土圧の比）

Φ_a : 地すべり土塊底面の見かけの摩擦角

hc : 粘着力 c の高さの単位での表示（ $c = \rho g hc$, ρ : 土塊の密度）

$$q = \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta$$

$$w_0 = -(u_0 \tan \alpha + v_0 \tan \beta)$$

Kv, Kx, Ky : 鉛直、X 方向、Y 方向の震度係数（地震加速度と重力加速度の比）

1-1. 地震力载荷の基礎式への影響

図2は、重力加速度+鉛直地震加速度(gK_v)と水平地震加速度(gK_x , gK_y)の水平面上での成分を示したものである。重力加速度+鉛直地震加速度が、斜面上の土塊（柱状要素）にかかる時、その鉛直成分は、地盤反力で相殺されて、斜面方向（最大傾斜角 θ ）成分のみが残り、その水平成分が土塊を加速させる。その X 方向水平成分、Y 方向水平成分は、 $g \frac{\tan \alpha}{q+1}(1+K_v)$ と $g \frac{\tan \beta}{q+1}(1+K_v)$ である。

同様に X 方向、Y 方向の地震加速度の水平成分は、 $gK_x \cos^2 \alpha$ 、 $gK_y \cos^2 \beta$ になる。

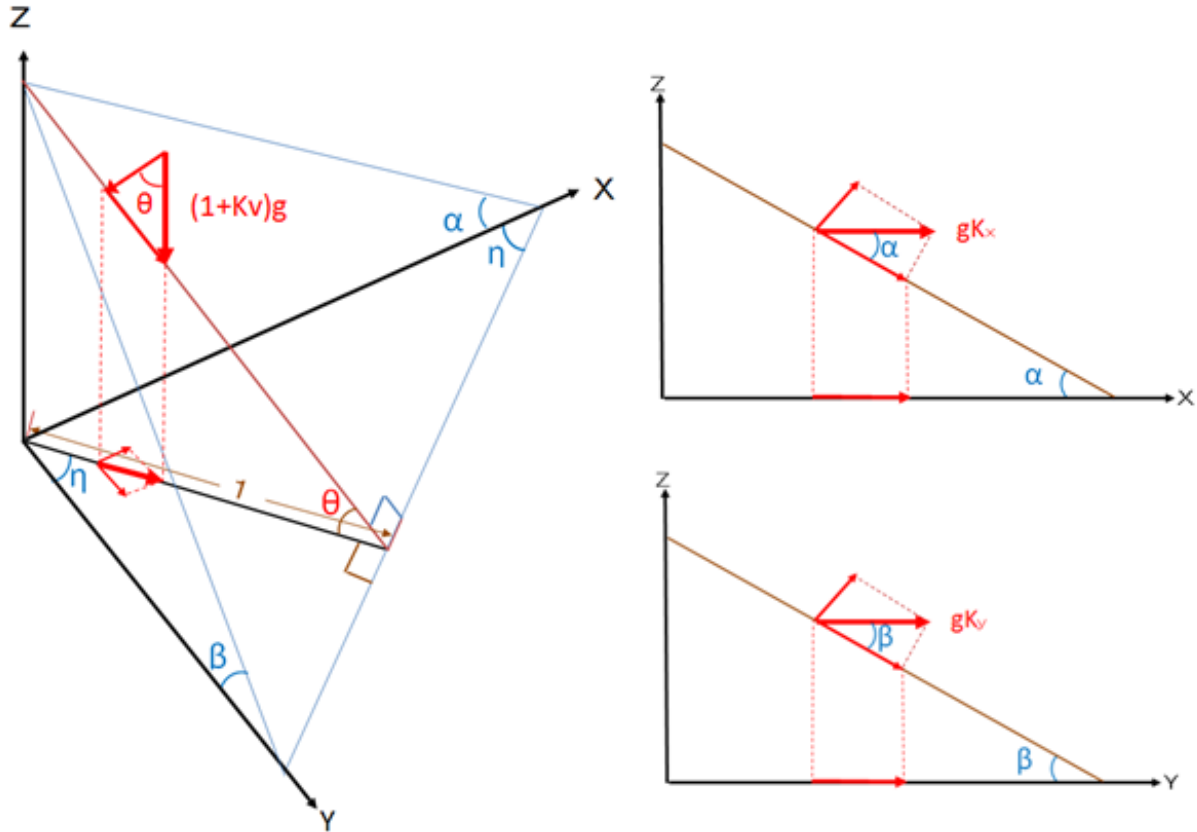


図2 地震加速度（鉛直、X方向、Y方向）の水平面への投影

1-2. 水平土圧係数 k の説明

水平土圧係数(k)は、水平応力 (σ_h) と鉛直応力 (σ_v) の比 ($k = \sigma_h / \sigma_v$) である。 k の値としては Jakey's の近似式を用いている。(Sassa, 1988).

$$k = 1 - \sin \phi_{ia} \quad (5)$$

ここで $\tan \phi_{ia} = (c + (\sigma - u) \tan \phi_i) / \sigma$

$\tan \phi_{ia}$: 土塊内部の見かけの摩擦係数。

$\tan \phi_i$: 土塊内部の有効摩擦係数（土塊底面で発揮される運動時の有効摩擦係数 (ϕ_m) とは必ずしも同じではない。

液状化状態では、 $\sigma = u$, $c = 0$, then, $\sin \phi_{ia} = 0$, and $k = 1.0$

剛体（岩盤など）状態では C は大きいので、 $\sin \phi_{ia}$ は 1.0 に近くなり k は 0 に近くなる。

1-3. 見かけの摩擦角 ϕ_a , 粘着力 C , 間隙水圧比 r_u の説明

基礎式(2), (3), (4) は、地すべりの発生過程、運動過程の両方に成り立つが、見かけの摩擦角、粘着力、間隙水圧比は、次の3つの状態、すなわち、1) 破壊までの変形過程（せん断強度の低下開始点以前のせん断変形状態）、2) せん断強度低下終了後の定常状態での運動過程、3) 前記の二つの状態の中間の遷移過程で異なる。この3状態での値は、関連事項を説明の後、式(13), (14), (15)で示す。

鉛直地震動がかかる場合、鉛直応力は土塊の自重+鉛直地震動になり、 $(1+K_v)$ だけ増大するので、水平土圧も変化する。一方、水平地震動は隣り合う柱状要素にほぼ同じ力がかかるので、水平土圧は変化しないとして近似できる。

2. すべり面で発揮される見かけの摩擦係数 ($\tan \phi_a$)

図3を用いて、見かけの摩擦係数 $\tan \phi_a$ の説明を行う。地すべり面に作用する応力が、降雨・地震などの誘因によって変化し、ピーク時の破壊線（摩擦角： ϕ_p ）に到達すると破壊が生じ、地すべりが移動し始める。地すべり移動に伴ってせん断面で過剰間隙水圧が発生し、有効応力が低下し、運動時に発揮される破壊線（摩擦角： ϕ_m ）上の定常状態に達し、変形だけが進行する。この時、下記の関係にある。

$$\tau_{ss} = \sigma_{ss} * \tan \phi_m = \sigma_0 * \tan \phi_{a(ss)} \quad (6)$$

運動時に発揮される見かけの摩擦係数 $\tan \phi_a$ は、定常状態のせん断抵抗（定常状態強度） τ_{ss} とすべり面の初期（水圧ゼロの時）の垂直応力 σ_0 （これはシミュレーションでは、そのメッシュでの土塊の重さによる全垂直応力（ σ ）に相当する）の比で表される。

$$\tan \phi_{a(ss)} = \tau_{ss} / \sigma_0 \quad (7)$$

$\tau_{ss}, \sigma_{ss}, \phi_{a(ss)}$: 定常状態に達している時のせん断強度、垂直応力および見かけの摩擦角

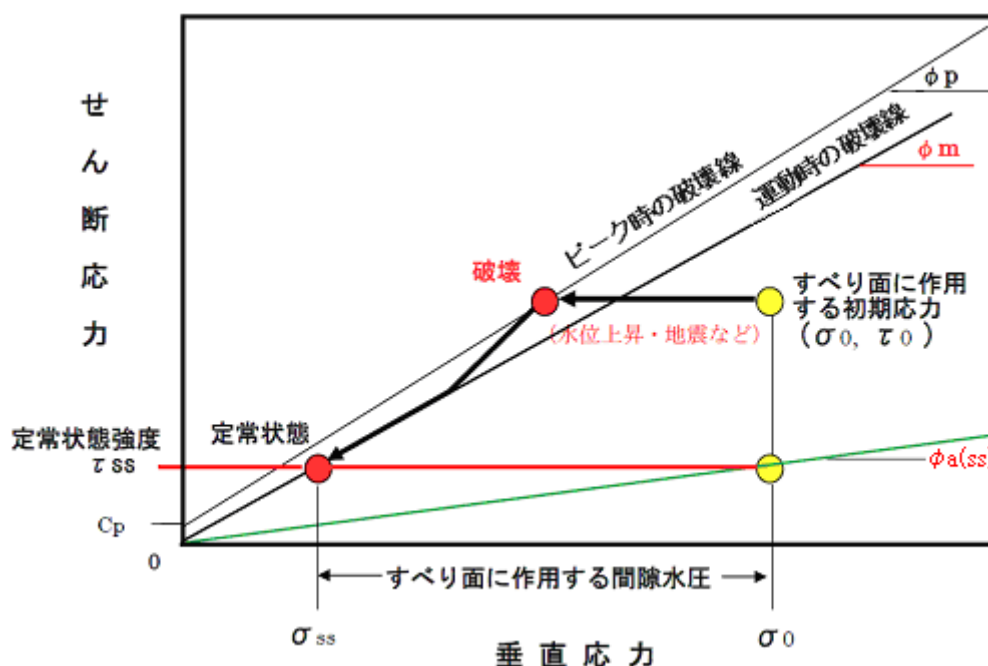


図3 運動時に発揮される見かけの摩擦係数 ϕ_a

2-1. 地すべり発生から運動に至る摩擦抵抗の低下

従来の地すべり運動シミュレーションでは、静止からせん断破壊と地すべり運動開始にいたる過程をシミュレーションすることができなかった。このシミュレーションでは、

- 1) ピーク強度 ($\tan \phi_p$) をもった土層が安定状態で斜面上に存在する初期状態
- 2) 地下水位上昇あるいは地震によって斜面土層内で破壊が生じる過程
- 3) 破壊後の過剰間隙水圧の発生とせん断抵抗が低下する過程
- 4) すべり面が定常状態に達し、地すべり土塊がそれ以上の強度低下なしに運動する過程

をシミュレーションする。

図4は、硅砂の非排水リングせん断試験機の例である。せん断を始めると1・2mmの変位でピーク強度に達し、10-1000mm程度でほぼ定常状態に達している。

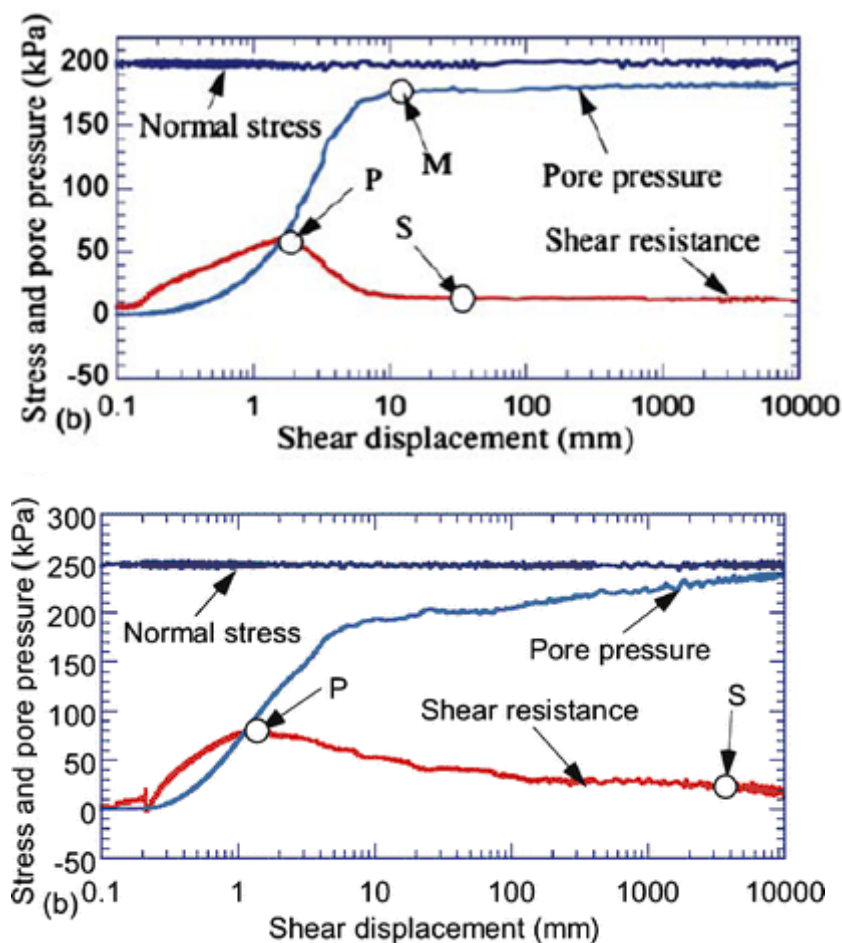


図4 硅砂を用いた非排水リングせん断試験におけるせん断抵抗変化(Igwe, Sassa, Fukuoka, 2004)

この関係を単純化し、図5に示すようにDLの移動量まではすべり面で発揮されるピーク時の摩擦角(ϕ_p)が発揮され、DUの移動量以上では定常状態での見かけの摩擦角($\phi_{a(ss)}$)が発揮され、その間是对数表示の直線で近似する。

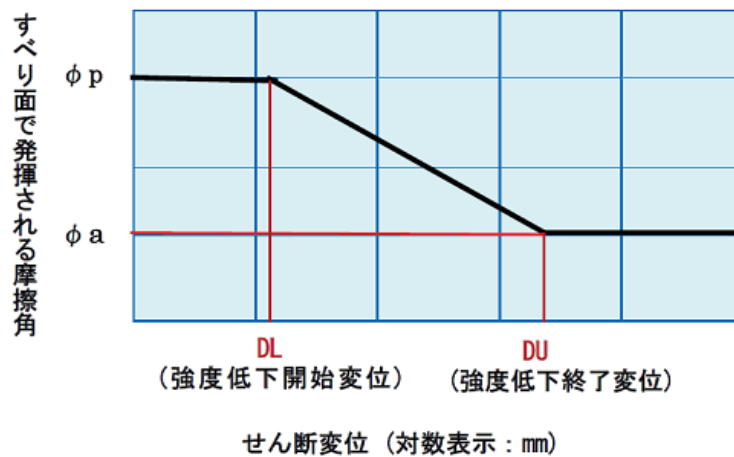


図5 せん断変位に伴う摩擦角の低減モデル

すなわちこのモデルにおいてすべり面に作用する摩擦係数は、下記で表される。

1. せん断変位が DL (破壊時) までの領域: $\tan \phi_a = \tan \phi_p$
2. せん断変位が DL と DU の間の領域: $\tan \phi_a = \tan \phi_p - \frac{\log D - \log DL}{\log DU - \log DL} * (\tan \phi_p - \tan \phi_{a(ss)})$
3. せん断変位が DU 以上の領域 (定常状態): $\tan \phi_a = \tan \phi_{a(ss)}$

2-2. 地すべり土塊の厚さが見かけの摩擦係数に及ぼす影響

図3に示した定常状態強度は、初期の垂直応力の大きさにかかわらず一定値になることが多い。すなわち一定の垂直応力 (σ_{ss}) 以上の応力下でせん断すると粒子が破碎し、過剰間隙水圧が発生し、この垂直応力以下では過剰間隙水圧が発生しないためである。

たとえば図6に示す風化マサ土起源の壊れやすい土粒子からなる大阪層群の場合の試験結果では、初期垂直応力が異なってもすべて同じ定常状態強度に達している。

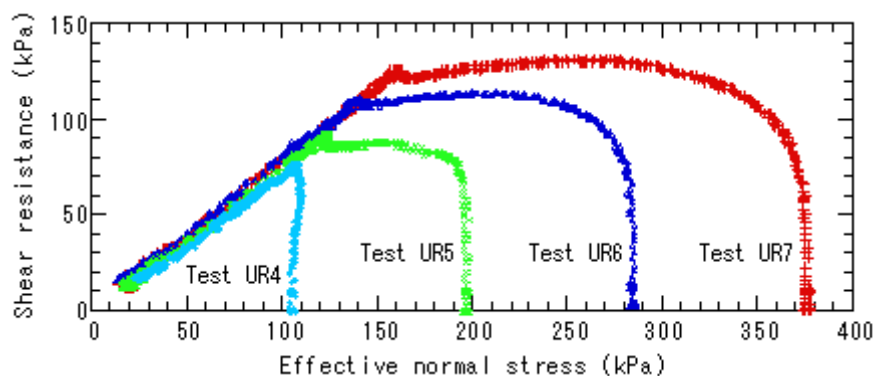


図6 兵庫県南部地震の際に西宮市仁川地すべりが発生した大阪層群の非排水载荷リングせん断試験機の結果 (Okada, Sassa, Fukuoka 2000)

この関係を使うと、図7に示すごとく、地すべり土塊の厚さが大きなところ(A)では、見かけの摩擦角は小さいが、土塊の厚さが小さくなると(B)、見かけの摩擦角は大きくなる。土粒子がそれ以上破壊しない定常状態以下では(C)、発揮される摩擦角は過剰間隙水圧ゼロの場合の運動時の摩擦角 (ϕ_m) になる。(Wang F.W., Sassa K. (2002))

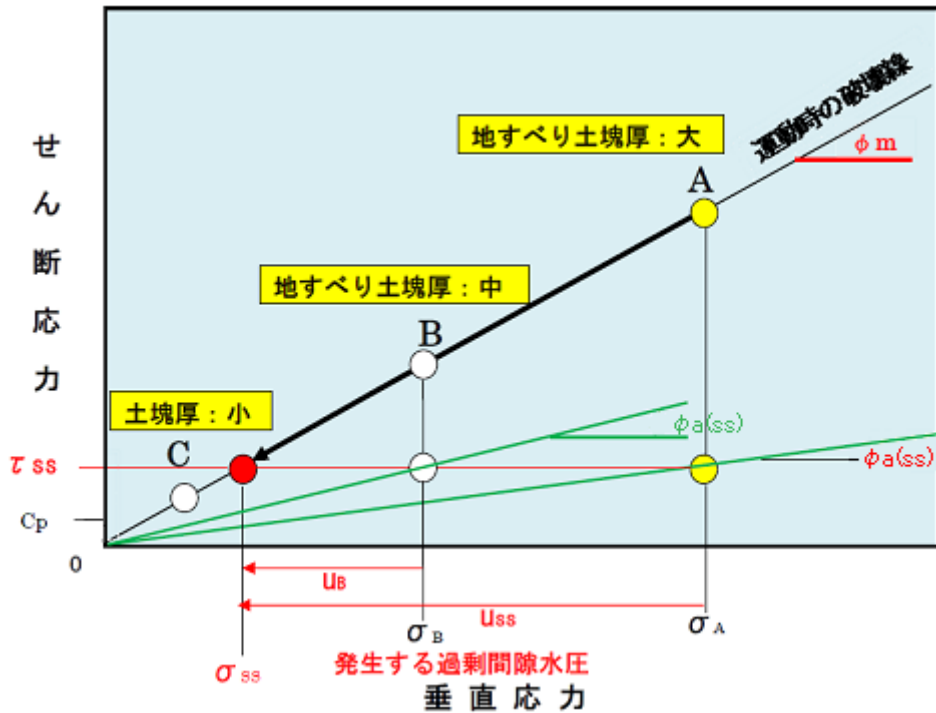


図7 定常状態強度 τ_{ss} と土塊深さ（垂直応力）と見かけの摩擦角の関係

したがって、定常状態で発揮される見かけ摩擦係数は、土塊の厚さ（ h ）の関数であり、式(7)は、式(7a)と表せる。

$$\tan \phi_{a(ss)} = \tau_{ss} / \sigma(h) \quad (7a)$$

ただし、 $\sigma(h) = \rho g h \cos^2 \theta$

2-3. 飽和度と定常状態強度の関係

土塊内部で発生する過剰間隙水圧は、土塊の飽和度によって大きく変わる。土粒子の間を占める流体が、空気と水は土粒子骨格が応力増加を受けて体積収縮する時、空気と水では応力増加の程度が大きく異なる。佐々(1988)は、三軸圧縮試験において拘束圧（ σ_3 ）を増大させた場合の間隙水圧発生率、すなわち過剰間隙水発生パラメータB値（ $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ ）を理論的、実験的に示した（式(8) および図8）。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{n}{Cc3} \left\{ \frac{Sr}{100} Cw + \frac{100 - Sr(1 + \alpha B \Delta \sigma_3)}{100} * \frac{1}{u_0 + B \Delta \sigma_3} \right\}} \quad (8)$$

Sr ：飽和度、 n ：空隙率、 $Cc3$ ：土の三次元圧縮係数、 Cw ：水の圧縮係数、 α ：空気の水への浸透係数(Henryの法則)、 u_0 ：大気圧を含む初期間隙水圧、 $\Delta \sigma_3$ ：三軸圧縮試験における拘束圧の増分

リングせん断試験における過剰間隙水圧発生率(B_{ss})と飽和度の関係は、間隙流体の水と空気の比率で決まり、図8と同じく完全飽和で1.0に近くなり、乾燥状態ではほぼゼロになる。リングせん断試験で定常状態までせん断した時、あるいは地すべり運動において定常状態に達した時に幾らの過剰間隙水圧が発生するかを理論的に求めることは難しい。したがって飽和状態（図8の実験と同じくリングせん断試験においても $B_D > 0.95$ ）で実験して得られた定常状態強度を τ_{ss} ($B_{ss}=1.0$)とする。乾燥状態の場合は、 τ_{ss} ($B_{ss}=0.0$)であり、部分飽和の場合は、図8に示す飽和時に発生する過剰間隙水圧(U_s)の $x\%$ (図の場合は約60%)の水圧(u_p)に対応する有効応力と運動時の破壊線で決まる定常状態強度になる。

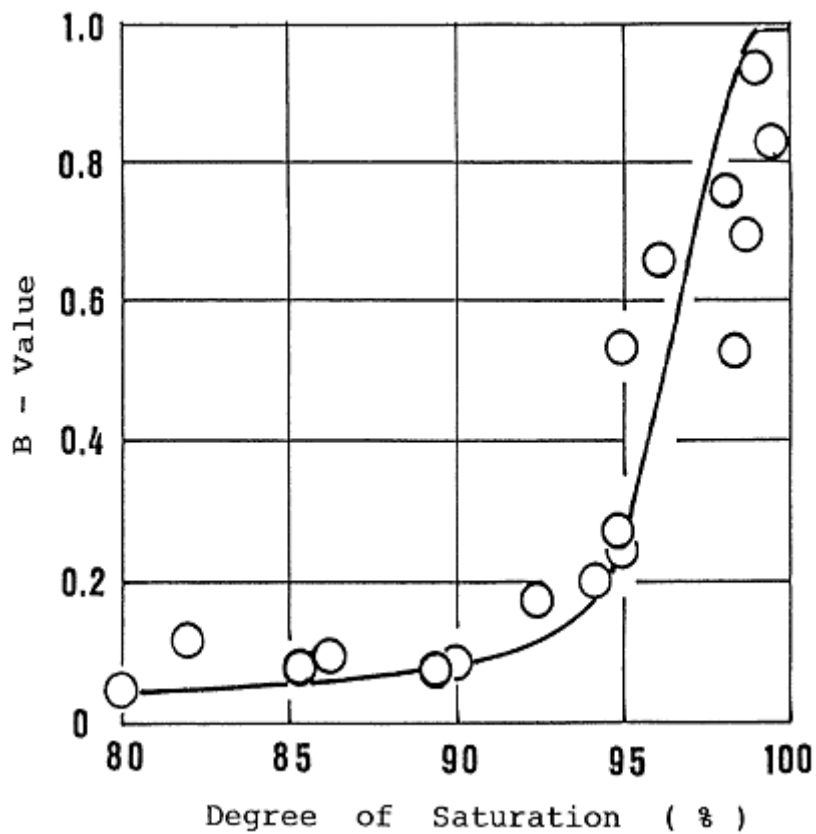


図8 三軸（等方）圧縮試験による 1984 年の御岳大崩壊の溪床堆積物で計測した飽和度と過剰間隙圧発生パラメーターB ($B=\Delta u/\Delta \sigma_3$) の関係

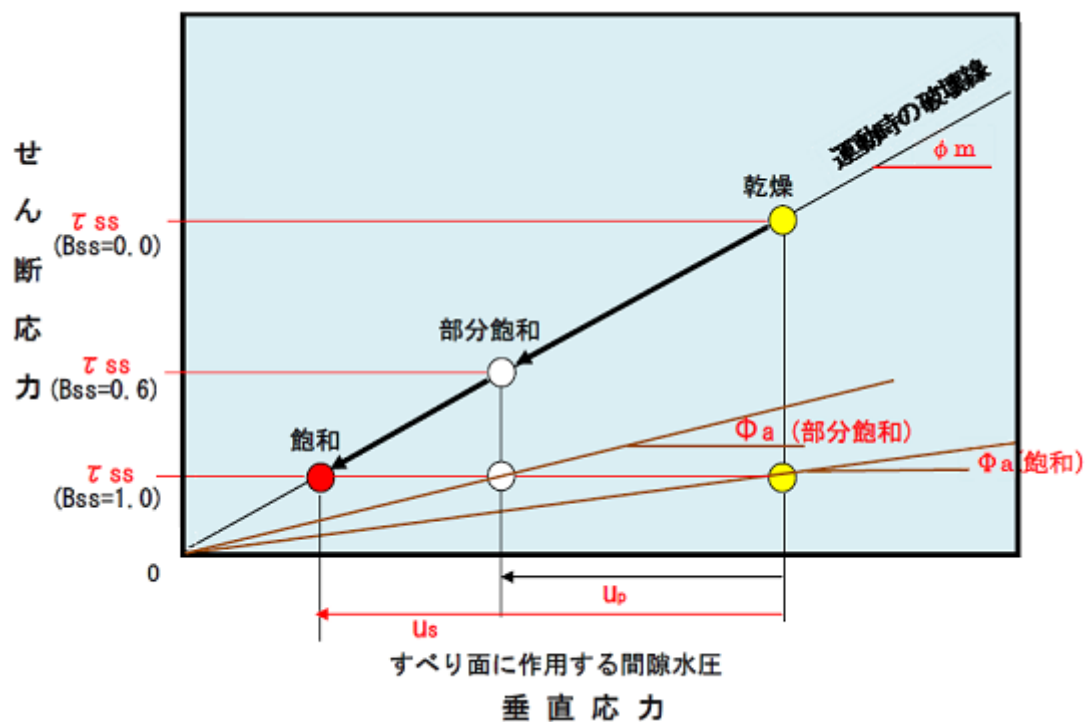


図9 過剰間隙水圧発生率（Bss）と見かけの摩擦角の関係

上記の図を式にすると、定常状態強度（ τ_{ss} ）は、Bss と土塊厚さ h の関数として下記で表せる。

$$\tau_{ss}(h, Bss) = \tau_{ss}(Bss=1.0) + (1-Bss) \{ \sigma(h) \tan \phi_m - \tau_{ss}(Bss=1.0) \} \quad (9)$$

3. 地すべりの発生

3-1. 地すべり発生域でのせん断変位の計算および時間ステップ

地すべり発生域での強度低下は、図 5 に示すごとく土塊の受けるせん断変位によって生じる。各メッシュ毎のせん断変位の計算は下記のように、各メッシュ内の土塊の X 成分速度（U）と時間ステップを累積して X 方向成分の変位をもとめ、Y 成分速度（V）と時間ステップを累積して Y 方向成分の変位を求め、その両成分の自乗の和の平方根から累積変位を求めている。

$$D = \{ (\sum_{i=1}^I U(i) * \Delta t(i))^2 + (\sum_{i=1}^I v(i) * \Delta t(i))^2 \}^{1/2} \quad (10)$$

また、時間ステップは、定常状態に達するまでは（ $D < DU$ ）， DU に到達するまでに一定の回数（ M ）の計算を行うことを条件として下記の式で時間ステップを決めている。

$$\Delta t = DU / M / (U_{\max}^2 + V_{\max}^2)^{1/2} \quad (11)$$

定常状態の運動に移行してからは（ $D \geq DU$ ），1 メッシュあたり（ dx ）一定の回数（ N ）の計算を行うことを条件に下記の式で時間ステップを決めている。

$$\Delta t = dx / N / (U_{\max}^2 + V_{\max}^2)^{1/2} \quad (12)$$

M ， N には、通常 10-20 の値を入れて用いている。

3-2. 間隙圧比とせん断抵抗の変化

- 1) 地すべり発生前の状態では、地すべり発生域（あらかじめ指定）にある土塊に、降雨による水圧上昇に相当する間隙圧比（ r_u ）を徐々に上昇させつつ与える。一方この段階では、せん断に伴う過剰間隙水圧の影響はほとんどないと見なし、せん断抵抗はピーク時の値を維持すると仮定する。
- 2) 定常状態での地すべり運動時には、定常状態強度（ τ_{ss} ）のなかには、（土塊内部での地下水圧上昇に伴う静的な水圧）＋（せん断に伴ってせん断面で発生する過剰間隙水圧）の全ての間隙水圧の影響が含まれている。
- 3) その中間の遷移領域では、図 5 に示す変位の対数で間隙圧比（ r_u ）、せん断強度定数ともに減少すると考える。

すなわち 下記の関係で変化すると見なす。

$$1. \quad D < DL: \tan \phi_a = \tan \phi_p, \quad C = C_p, \quad r_u = r_u \quad (13)$$

$$2. \quad D > DU: \tan \phi_a = \tan \phi_{a(ss)}, \quad C = 0, \quad r_u = 0 \quad (14)$$

$$3. \quad DL \leq D \leq DU: \tan \phi_a = \tan \phi_p - \frac{\log D - \log DL}{\log DU - \log DL} * (\tan \phi_p - \tan \phi_{a(ss)}), \quad C = C_p (1 - \frac{\log D - \log DL}{\log DU - \log DL}),$$

$$r_u = r_u * \frac{\log DU - \log D}{\log DU - \log DL} \quad (15)$$

4. 地すべりの拡大のモデル化

地すべり土塊の運動経路に不安定土塊が存在する時、しばしばその土塊を巻き込み運動土塊の土量が増大する。この現象は斜面上部で小崩壊が生じ次第に拡大する場合や、斜面で発生した土塊が溪床を運動する過程で溪床堆積物を巻き込み土量が増大する場合もある。図 10 はその様子を模式的に示したものである。

土塊拡大域においても、シミュレーションの基礎式(2) (3) (4)は同じであるが、土塊の高さ h は、拡大域では、運動土塊の高さ (h_m) と不安定堆積物の深さ (h_d) の和 $h = h_m + h_d$ になる。不安定堆積物の側からみると、土塊高さが、 h_m だけ増大したことになる。 $\Delta h = h_m$ 。

一定厚さ以上の地すべり運動土塊が、不安定堆積層に乗ると土塊の「自重の非排水載荷＋衝撃力」により不安定堆積層が変位し、不安定堆積層の摩擦角が ϕ_p から運動時の見かけの摩擦角 ϕ_a に低下すると仮定する。発生域と同じく不安定堆積層の変位で摩擦角の低下を入れることも考えられるが、衝撃力の計算が困難であり、一定の厚さ以上 (Δh_{cr}) の土塊による非排水載荷が生じれば、摩擦係数が低下すると単純化して拡大モデルに用いた。

図 11(上)は、山腹からの崩壊土塊が溪床堆積層に非排水載荷を与える場合を模式化したものである。

図 11(下)は、非排水載荷の状態をリングせん断試験機で再現したものである。衝撃力として 5 秒間で垂直応力、せん断応力を与えたが、ごくわずかなせん断抵抗増分で破壊が生じ、堆積土塊が移動を始めた。

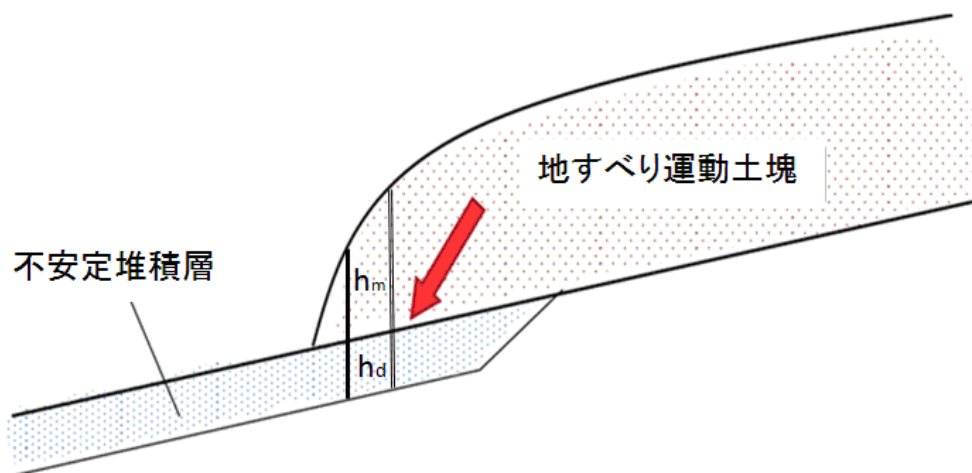


図 10 運動土塊による斜面下方に堆積する不安定土塊への非排水載荷

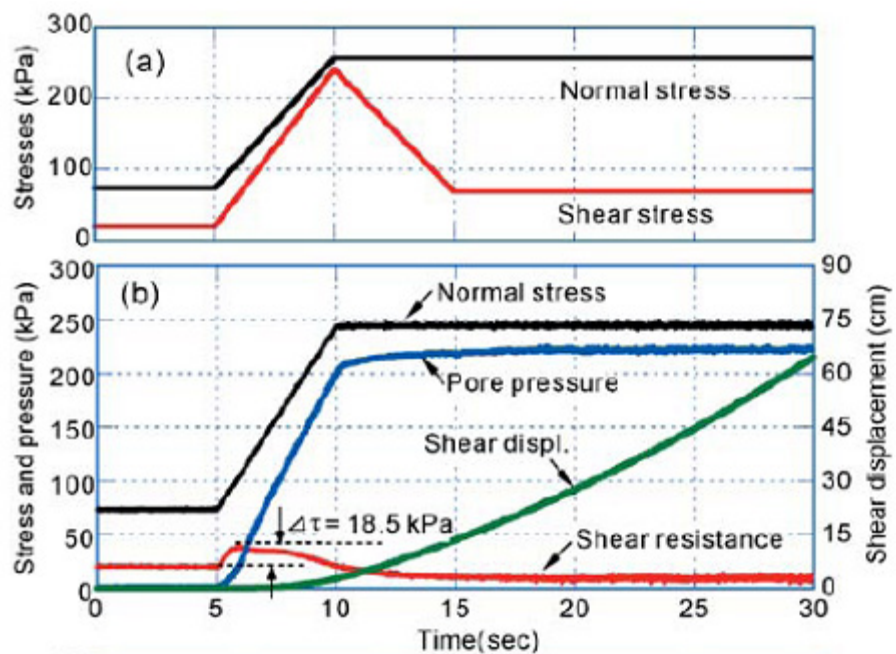
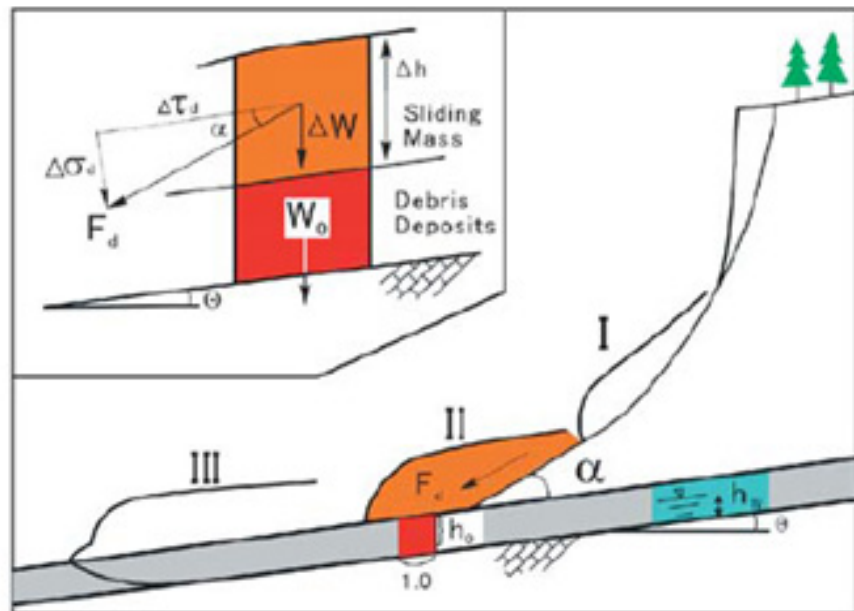


図 11 上部斜面からの運動土塊が、下部の堆積土層に衝撃力を与える場合の模式図（上）と非排水リングせん断試験機を用いた再現試験の結果（下）(Sassa et al 2004)

非排水載荷による強度低下が生じる限界土塊厚さ Δh_{cr} は、シミュレートする地すべり土塊の大きさ、不安定土塊の厚さにも関係すると思われるが、1 m あるいはその半分程度 ($\Delta h_{cr} = 0.5 \text{ m}$) が一つの目安と思われる。

5. 非摩擦エネルギー消費に起因するせん断抵抗成分

LS-RAPID の基礎式 (1) は、土塊の持つ位置エネルギーが、斜面を下降する間に土塊底部の「すべり面での摩擦エネルギー」として消費され、低い位置で停止すると仮定している。しかし、大規模な地すべりや地すべり土塊が複雑な地形の斜面を移動する場合には、地すべり土塊内部のサブブロック同士の衝突や急激な段差や壁など局所的な運動経路の凸凹などにより、摩擦エネルギー以外のエネルギー消費も生じる。Voellmy (Körner 1980, 1982 等で紹介) は、地すべりの運動にともなう抵抗 R は、地すべり土塊中の個体による抵抗 (R_{solid}) と流体による抵抗 (R_{fluid}) の和であらわされるとした。

$$R = R_{\text{solid}} + R_{\text{fluid}} \quad (16)$$

そして流体による抵抗は、(R_{fluid}) を乱流係数 (Turbulent Coefficient ξ) をもちいて、速度の 2 乗 (v^2) に比例する形で表した。Voellmy の研究は、1955 年のものであるが、現在でも地すべりのシミュレーションでは広く用いられている。2007 年に地すべりシミュレーションを実施している世界の 13 グループが参加して、地すべり土塊の運動とそのモデル化に関する比較「Benchmarking exercise on landslide debris runout and mobility modelling」(Hungr et al 2007)が行われたが、大多数の 8 グループが Voellmy の乱流抵抗を取り入れたモデルを用いている。

すなわち速度の速い場合には、せん断抵抗を大きくした方が、実態に合う結果が得やすいことを示している。しかし乱流係数 Turbulent Coefficient (ξ) は、計測不可であり、結果から逆算する以外にない。LS-RAPID では、図 7 に示すごとく、土塊の速度が速くなれば土塊の厚さは減少すると推定されるが、土塊の厚さが減少する場所・時間にはせん断抵抗が増大する。したがって乱流係数を使わなくても実態と合う速度・運動距離が得られ得ると推定される。

しかし、運動過程の全てのメッシュと時間ステップにおいて、摩擦エネルギーの消費で説明できない場合もあり得る。これまでのテストでは単純な斜面では不要であるが、大規模な地すべりで複雑な地形をもつ場合には、計算途中に極めて大きな速度や土塊厚さが出現し、(1)式の仮定、すなわち(2), (3), (4)式では、説明できない現象が生じる場合があることがわかった。摩擦以外のエネルギー消費が発生したと推定されるメッシュと時間ステップを、速度と土塊厚さの閾値で検出し、そのメッシュ、その時間ステップでのみ速度に比例する摩擦抵抗を導入することにした。その場合、(1)式は(17)式で表される。

$$am = (W + Fv + Fx + Fy) + \left(\frac{\partial Px}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial Py}{\partial y} \Delta y \right) + R + \alpha \frac{1}{2} mv^2 \quad (17)$$

摩擦以外のエネルギー消費の主たるものは、該当メッシュ内の土塊のもつ運動エネルギー ($\frac{1}{2}mv^2$) に非摩擦エネルギー消費に関する係数 (Coefficient for non-frictional energy consumption) α を乗じたものとして表現した。 α は長さの逆数の次元をもつ定数である。

Sassa et al (2010)における単純斜面と 2006 年レイテ島の大規模地すべりへの LS-RAPID の適用によれば、単純斜面は $\alpha = 0$ と $\alpha = 1.0$ で差はなく、レイテ島地すべりへの試験的適用は、 $\alpha = 0.2, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0$ では差はなく、 $\alpha = 0$ では極めて大きな速度、土塊厚さが出現し、不自然な結果が得られたため、 $\alpha = 1.0$ を最終的に用いた。 $\alpha (\frac{1}{2}mv^2)$ の摩擦を入力した結果、該当メッシュの土塊高さ $h < 0$ の場合には $h = 0$ を与えるため、必要以上に大きな α を入力してもその影響はでないものと思われる。レイテ地すべりでは、閾値としては、発生前の地すべり土塊の最大値より大きな値 $h_{\text{(threshold)}} = 200 \text{ m}$, 1984 年の御岳大崩壊の際に推定された運動速度 (20-26 m/sec) の 3-4 倍の値である $V_{\text{(threshold)}} = 80 \text{ m/sec}$ を用いた。

6. 時間降雨量から間隙水圧比への変換

降雨による地すべりをシミュレーションするには、降雨から地すべりを引き起こす間隙水圧を計算する必要がある。この計算には Montarasio L & Valentino R (2008)の研究に基づいて、Liao & Hong et al (2010) が提案した SLIDE モデルを用いた。

図 12 が SLIDE モデルの概念図である。斜面上部から降雨が浸透し、不透水層（岩盤など安定な基盤層）の上に飽和した層が形成され、そこを地下水が側方流動する。上部からの降雨浸透が、地下水の側方流動よりも大きいときは、地下水位（すなわち間隙水圧）が上昇し、逆に上部からの降雨浸透が、地下水の側方流動よりも小さくなれば、地下水位（すなわち間隙水圧）が低下する。

Liao et al 2010 によると間隙水圧上昇(ΔU)は、 H を土層厚さ、 mH を地下水層の厚さ、 β を斜面勾配、 γ_n を水の単位体積重量として、(18)式で表される。

$$\Delta U = m.H.\gamma_n.\cos^2 \beta \quad (18)$$

そして、地下水層と土層圧の比 (m) の変化は、10 分間雨量毎に(19)式で計算される。

(19)式で、 I_t は雨量強度すなわち 10 分間雨量、 Δt は、単位時間（この場合は 10 分間）、 S_r は土層の飽和度、 n は空隙率、 K_t は、現場斜面での透水に関する種々の影響を総合して得られる平均的な透水係数、 O_t は、地下水流動層を流れる水の流出量である。

$$\begin{cases} m_t = 0 \\ O_t = K_t * \sin \beta * m_t * H * \cos \beta * \Delta t \\ \Delta m_t = \frac{(I_t - O_t)}{n * H(1 - S_r)} \\ m_{t+1} = m_t + \Delta m_t \end{cases} \quad (19)$$

図 13 は、2014 年 8 月 19 日 20 時 30 分からの「三入」観測点での 10 分間雨量と、(18) (19)式を用いて計算される間隙水圧の値である。この計算に用いた定数の値は、表 1 に示した。

用いた数字は、土層の平均的な透水係数を 0.001 m/s (砂の透水係数の平均的なオーダーの 10^{-3} m/s)、飽和度は、地すべり発生が問題となる時点ではかなり高いと考えて 0.82、土層の厚さは 4m、斜面勾配は 30 度、空隙率は、現地から採取したサンプルの圧密試験をもとに 0.44 と推定して入れた。

SLIDE モデルは、種々単純化しているが、斜面土層内の飽和流動層の形成メカニズムに基づいて雨量から土層内に発生する間隙水圧を計算しているものである。

単純化の一つは、降雨の表面流出、樹冠での遮断の項を無視していること、降雨が地表に達してからの不飽和浸透の過程を無視していることである。したがって裸地のように表面流出が極めて多い場合は、降雨の降り始めの不飽和浸透の段階の推定には適していない。しかし、森林で覆われている斜面ですでに降雨が始まってから一定時間が経過し、地すべりが発生するかしないかが問題になる段階では、初期の不飽和浸透による水位上昇の遅れは、あまり問題ではないようにも思える。

図 13 に示す間隙水圧の最大値は、21.5 kPa である。30 度の斜面上の 4m の土層のすべり面にかかる垂直応力は、採取したサンプルの圧密試験の結果(佐々恭二、福岡 浩、佐藤裕司他、2014)を参考に、ほぼ飽和した地すべり発生域の土層の単位体積重量を 18.5 (kN/m³) とすると、

$$18.5 \text{ (kN/m}^3\text{)} \times \cos^2 30^\circ \times 4 \text{ (m)} = 55.5 \text{ kPa,}$$

間隙圧比の最大値は、この両者の比の ($21.5/55.5 =$) 0.39 である。

図 13 の間隙水圧を 55.5 で除したものを LS-RAPID に誘因として入力した。その結果得られた結果を図 14, 図 15 に参考として示す。

図 14 は、LS-RAPID 解析による地すべり土量分布（上）と航空レーザー測量データ（LP データ：国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所提供）の解析結果（下）の比較である。災害前の測量（2009 年）は、災害直後（2014 年 8 月 25 日）の測量と精度は異なり、速報値として提供したいただいたものであるが、両者の土塊分布はほぼ合致している。

図 15 は、この LS-RAPID を用いて、山頂付近で発生した崩壊土砂が、住宅地まで到達する様子を時間ごとに示したものである。LS-RAPID では、3 次元画面では地すべりの運動と時間が、示され 10 分間雨量（青の棒グラフ）と間隙圧比のグラフ上に計算している時間が赤丸で示される。図 15 では縮小して貼り込んでいるので、よく見えないが、10 分間雨量－斜面内で発生している間隙圧比と地すべりの運動の様子が可視化される。山の上で異なる時間に発生した表層崩壊が、あるいは合流し、あるいは谷の側壁をえぐるにより山腹の崩壊を発生させ、あるいは複数の支線の流下土塊が合流し、住宅が開発されている地域を埋める様子が見て取れる（佐々他 2014）。

降雨から斜面土層内の間隙水圧への換算の方法としては、SLIDE モデル以外のものもあり得るが、計算の単純な SLIDE モデルを用いた例をここに紹介した。

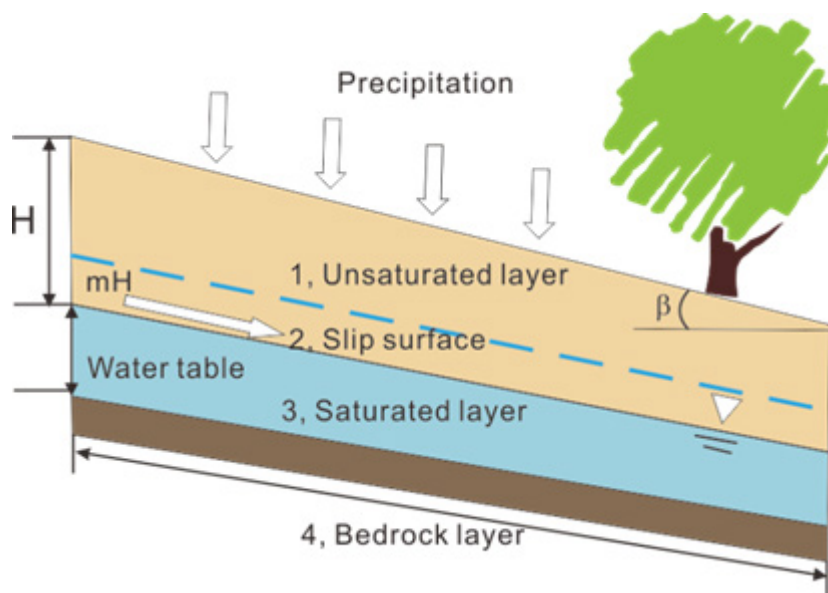


図 12 無限長斜面への降雨浸透と地下水流動のモデル (from Liao et al 2010)

表 1 降雨から間隙水圧への変換に用いたパラメータの値

Parameters	Value	Source
Parameters of soils in the Yagi area		
Porosity (n)	0.44	Test data
Degree of saturation (S_r , %)	0.82	Estimated
Permeability (K_t , m/s)	0.001	Estimated
Parameters of soils in the Midorii area		
Porosity (n)	0.44	Test data
Degree of saturation (S_r , %)	0.82	Estimated
Permeability (K_t , m/s)	0.001	Estimated
Triggering factor		
Excess pore pressure ratio in the fractured zone (r_u)	0.03-0.4	Calculated from SLIDE model
Other parameters		
Slope angle (β ,degree)	30	Investigated
Landslide depth (H , m)	4	Investigated
Unit weight of water (γ_w , N/m ³)	9.8	Normal value
Rainfall intensity (I_t , mm/10 min)	0–21.5	Monitoring

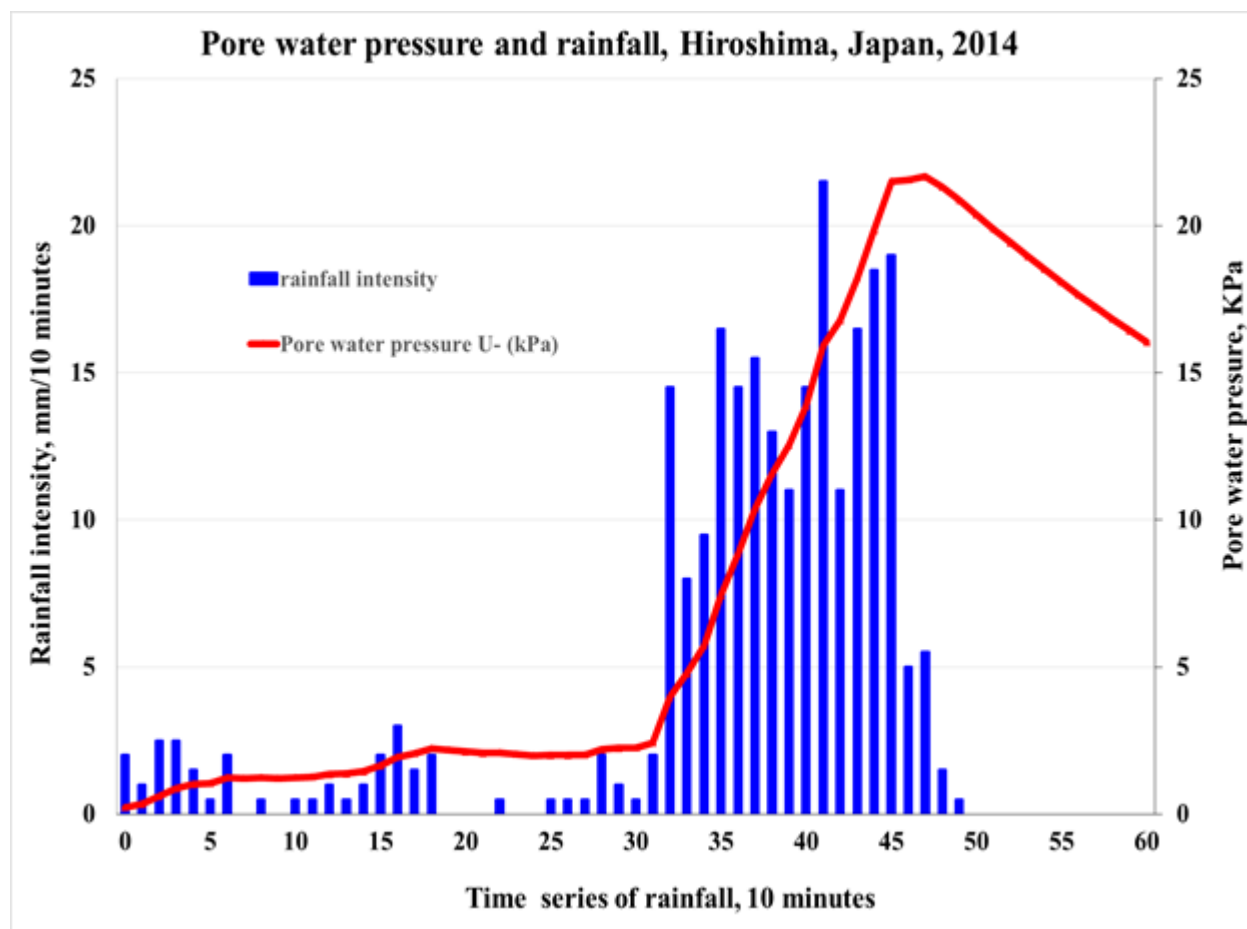
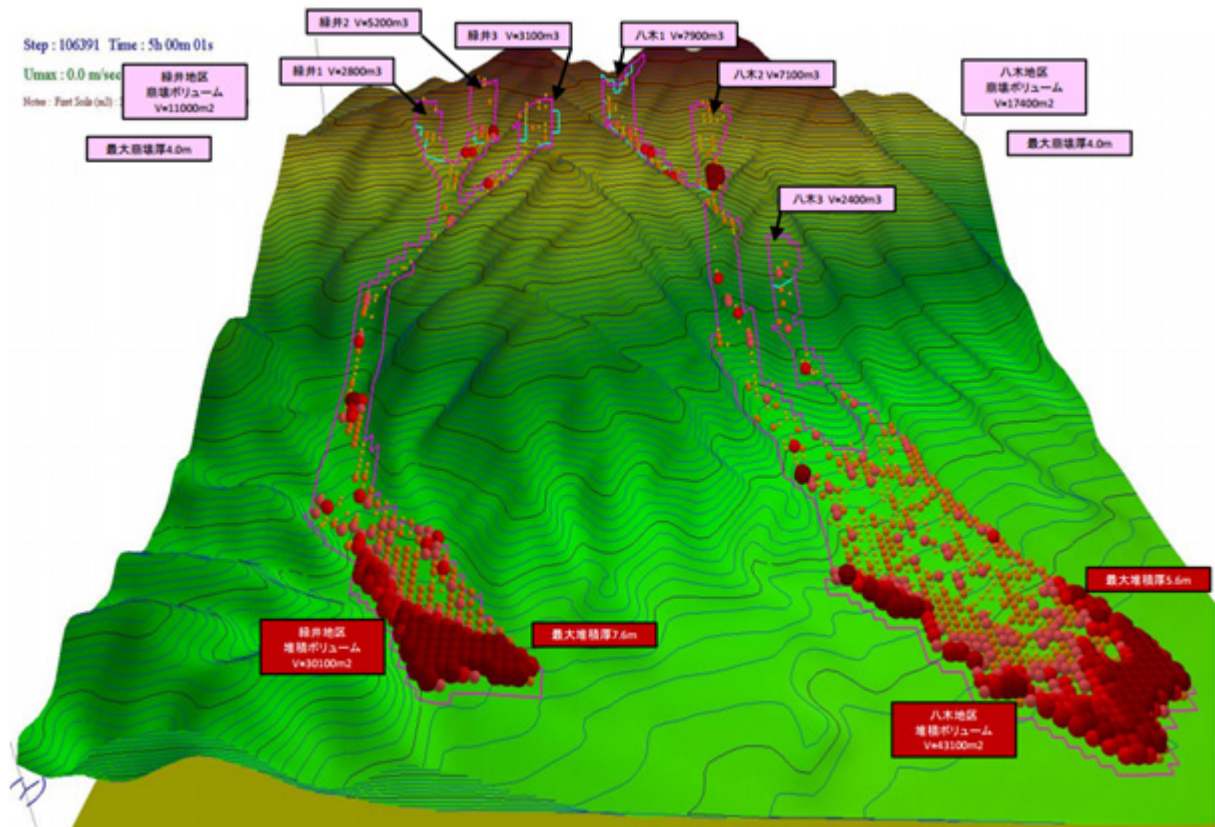


図 13 2014 年 8 月 19 日 20 時 30 分からの「三入」観測点での 10 分間雨量（青）と、(18) (19)式を用いて計算した間隙水圧（赤）

Deposit of landslide mass (red color) by LS-RAPID simulation



Deposit of landslide mass (red color) by Laser Profiler (LIDAR) before/after disaster

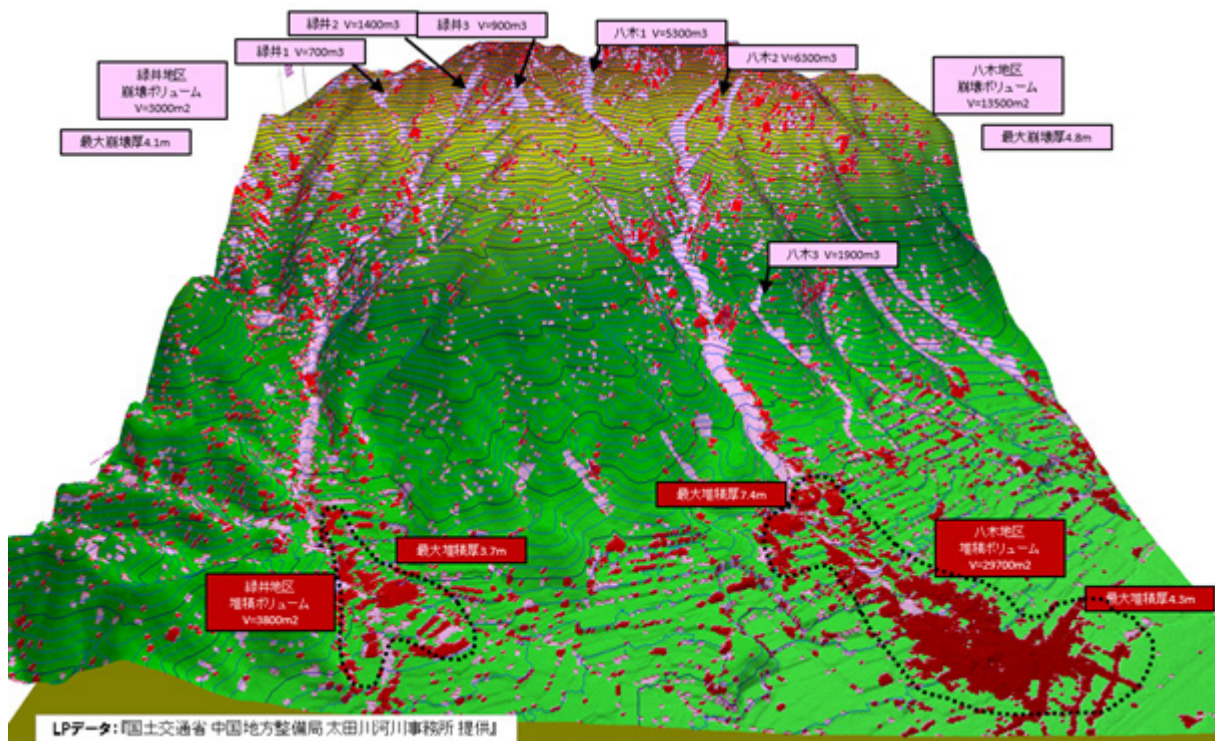


図 14 LS-RAPID 解析による地すべり土量分布（上）と航空レーザー測量データ（LP データ：国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所提供）の解析結果（下）の比較

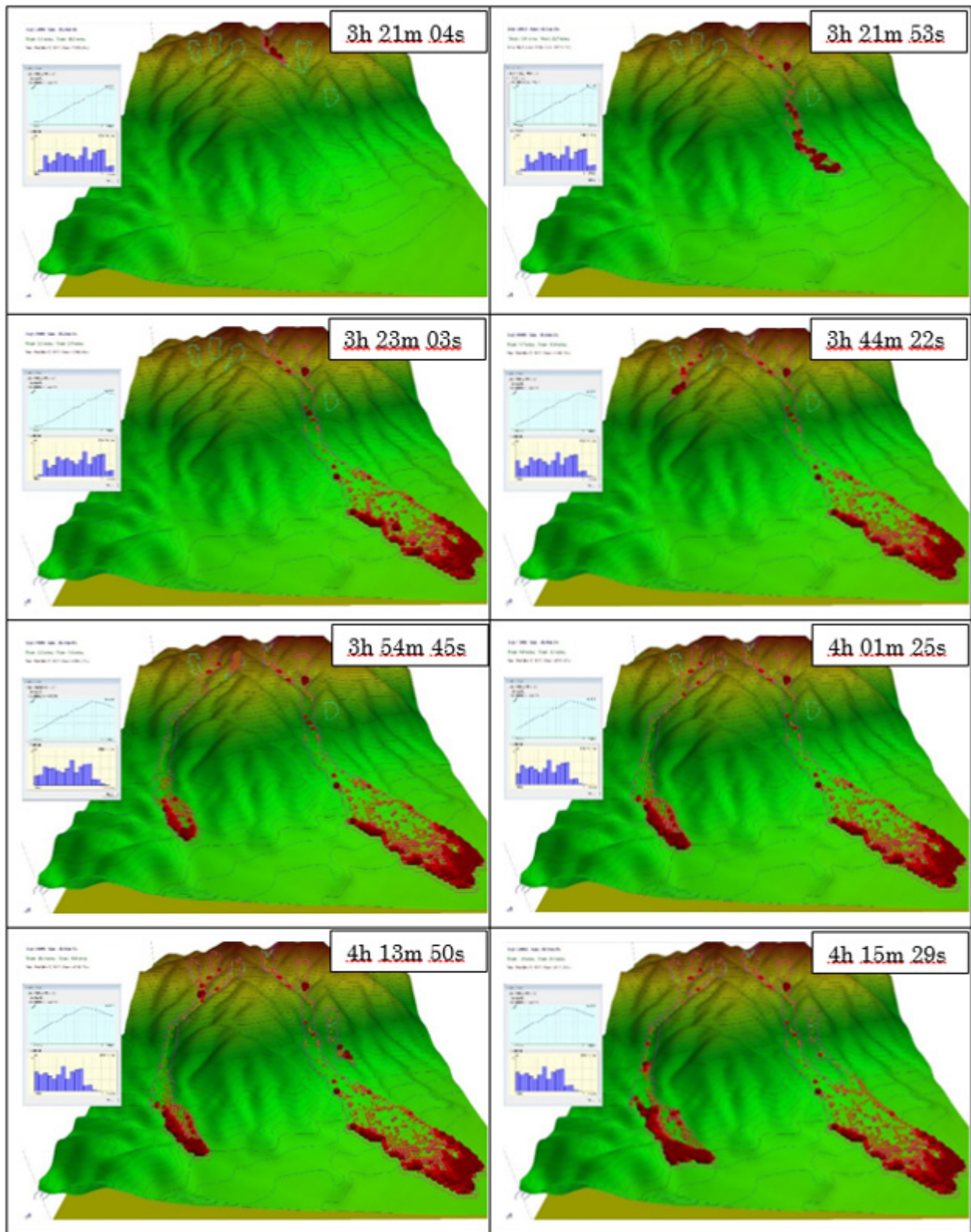


図 15 LS-RAPID を用いた地すべり発生・運動シミュレーションの結果
 左に挿入したものは、10 分間雨量とそれから計算した斜面土層内の間隙圧比の変化

7. 引用文献

- Igwe, O., Sassa, K., and Wang, F.W. (2007): The influence of grading on the shear strength of loose sands in stress-controlled ring shear tests. *Landslides* Vol.4, No.1, 43–51.
- Hung O, Morgenstern N, Wong H.N. Review of benchmarking exercise on landslide debris runout and mobility modelling. Proc. the 2007 International Forum on landslide disaster management. Vol.2: 755-812..
- Körner, H. J (1980): Modelle zur Berechnung der Bergsturz- und Lawinenbewegung. Proc. International Symposium "INTERPRAEBENT 1980", in Bad Ischl. Vol.2, 15-55.
- Körner, H. J (1982): 山崩れ運動となだれ運動の予測のためのモデル(同上翻訳)。国際自然災害防止シンポジウム (INTERPRAEBENT 1980) 論文集。砂防学会、169-206.
- Liao Z, Hong Y, Wang J, Fukuoka H, Sassa K, Karnawati D, Fathani F (2010) Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, Vol.7, No.3, pp. 317-324.
- Montarasio L & Valentino R (2008) A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth Sciences*, 8:1149-1159.
- Okada, Y., Sassa, K., and Fukuoka, H. (2000). Liquefaction and the steady state of weathered granite sands obtained by undrained ring shear tests: A fundamental study on the mechanism of liquidized landslides. *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.22, No.2, 75-85.
- 佐々恭二 (1987) : 地すべり・斜面崩壊の運動予測. 京大防災研究所年報. No.30 B-1. 341-357
- 佐々恭二, 福岡浩, 佐藤裕司, 寶馨, Loi Doan Huy, Hendy Setiawan, Tien Pham, Khang Dang (2014). 高速長距離土砂流動現象の発生メカニズムと地すべり発生運動統合シミュレーション (LS-RAPID) を用いた広島土砂災害の再現。国際フォーラム「都市化と土砂災害」2014年8月広島土砂災害と国連防災枠組みへの日本の貢献。平成26年10月8日、京都大学北部総合教育研究棟・益川ホール。国際斜面災害研究機構出版, 85-112
- Sassa K. (1988): Geotechnical model for the motion of landslides. In: *Proc. of the International Symposium on Landslides*. Vol.1, 37–56.
- Sassa K. (2007); Progress of landslide dynamics and the International Programme on Landslides. In *Proc. of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management*. Vol.1, 319-342.
- Sassa, K, Fukuoka, H, Wang. G, Ishikawa, N. (2004) Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics. *Landslides* Vol.1, No.1, 7-19.
- Sassa, K., Nagai O., Solidum R., Yamazaki Y., Ohta H. (2010): An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake & rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide. *Landslides*. Vol.7, No.3, pp.219-236.
- Wang F.W., Sassa K. (2002): A modified geotechnical simulation model for the areal prediction of landslide motion. In: *Proc. 1st European Conf. on Landslides*, Prague, 735–740.
- Wang F.W., Sassa K. (2007): Landslide simulation by geotechnical model adopting a model for variable apparent friction coefficient. In *Proc. of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management*. Vol.2, 1079-1096.

(参考) LS-RAPID シミュレーションのパラメータの目安表

ここでは、高速地すべりを解析するための目安となるパラメータを表にしました。Sassa et al(2010)での検討をもとに高速の地すべりが発生しやすい砂質土の地すべりを念頭においています。この値を参考にして実情に合うパラメータを入力していくことになります。

a. 土質パラメータ

項目	通常の下限值	通常の上限值	通常の標準値
すべり面の運動時の(有効)摩擦角 ϕ_m (摩擦係数 $\tan \phi_m$)	25° ($\tan \phi_m = 0.466$)	35° ($\tan \phi_m = 0.700$)	30° ($\tan \phi_m = 0.577$)
すべり面のピーク時の摩擦角 ϕ_p (摩擦係数 $\tan \phi_p$)	33° ($\tan \phi_p = 0.649$)	38° ($\tan \phi_p = 0.781$)	35° ($\tan \phi_p = 0.700$)
土塊内部の摩擦角 ϕ_i (※1) (摩擦係数 $\tan \phi_i$)	20° ($\tan \phi_i = 0.364$)	30° ($\tan \phi_i = 0.577$)	25° ($\tan \phi_i = 0.466$)
非排水せん断における 定常時のせん断抵抗 (τ_{ss})	5 kPa	50 kPa	20 kPa
土塊内部の粘着力 (C_i)	0.1 kPa	0.5 kPa	0.2 kPa
すべり面の運動時の粘着力 (C_m)	0.1 kPa	0.5 kPa	0.2 kPa
すべり面のピーク時の粘着力 (C_p)	2 kPa	200 kPa	10~100 kPa

(※1) 土塊内部の間隙水圧によって変わる。尾根越えなど土要素中間でのせん断に関係する。

b. 計算条件の設定

項目	通常の下限值	通常の上限值	通常の標準値
強度完全低下距離 (DU)	100 mm	5000 mm	1000 mm
強度低下開始距離 (DL)	5 mm	100mm	10 mm
間隙圧比 ($r_u = u/\sigma$)	0.0	1.0	0.3
地震力 ($K = a/g$)	0.0	1.5	(※2)
1 メッシュあたりの計算回数 (N)	10	30	20
低減終了距離(DU)までの計算回数 (M)	10	30	20
初回タイムステップ (DT1)	0.001 sec	0.005 sec	0.005 sec
非摩擦エネルギー消費に関する係数(α)	0	3.0	1.0

(※2) $K=1.0$ の時、重力と同じ地震力が載荷。