

「UC-1 / 地盤の動的有効応力解析 (UWLC)」

を利用した液状化詳細判定

2004年7月

株式会社フォーラムエイト

目次

はじめに	1
1 . 1次元動的有効応力解析を用いた液状化予測法	2
1 - 1 . 検討の流れ	2
1 - 2 . UWLC を用いた検討例	4
2 . 非線形全応力法による1次元地震応答解析を用いた液状化判定	13
2 - 1 . 検討の流れ	13
2 - 2 . UWLC を用いた検討例	16

はじめに

現在、設計で用いられている液状化判定方法には、以下のものがあります。

1)簡易な判定方法（土質調査、試験結果をもとにした簡易判定）

- 1-1)限界N値法・・・港湾の施設の技術上の基準
- 1-2)FL値法・・・道路橋示方書耐震設計編、建築基礎構造設計指針

2)詳細な判定方法（地震応答解析による詳細判定）

- 2-1)1次元動的有効応力解析により求まる過剰間隙水圧比などによる判定
- 2-2)1次元全応力解析により繰り返しせん断応力比を求め、
室内液状化試験により液状化強度比（動的せん断強度比）を求め、
両者の比をとって液状化に対する安全率FLを算出する。

上記1-2)については、N値、粒径、細粒分含有率、塑性指数、土の単位重量、地下水位などから推定式により動的せん断強度比R、地震時せん断強度比Lを求めて、両者の比であるFL(=R/L)を安全率として判定の指標とするもので、各種基準に記述があることや、その簡便性から実務において数多く利用されています。

ただし、地形や地盤条件が複雑で、簡易な判定方法では液状化判定が難しい場合には、構造物の重要度に応じて、上記2)に示す詳細な判定方法を適用する必要があります。

また、上記2-2)の簡易計算としてSHAKE(カリフォルニア大学で開発された、等価線形化法を適用した水平成層地盤の地震応答解析プログラム)を利用した液状化判定が行なわれることが多いですが、「UC-1/地盤の動的有効応力解析(UWLC)」(以降「UWLC」と省略)では、1次元解析において有効応力法および非線形全応力法による地震応答解析をサポートしているため、上記2-1)、2-2)の両者の方法による詳細な液状化判定を行なうことができます。

本資料では、上記2-1)、2-2)の方法による詳細な判定方法について、

- ・液状化判定の概要、フロー
- ・実際にプログラムを利用した検討事例

を示します。

設計業務において本資料が役立てば幸いです。

2004年7月
株式会社フォーラムエイト

1 . 1 次元動的有効応力解析を用いた液状化予測法

1 - 1 . 検討の流れ

1次元動的有効応力解析を用いた液状化予測法のフローを、図-1.1 に示します。

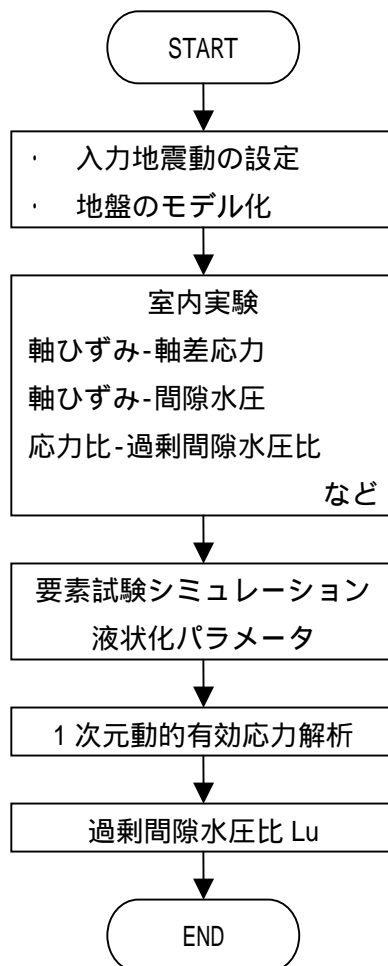


図-1.1 1次元動的有効応力解析を用いた液状化予測法のフロー

(1) 入力地震動の設定

検討の対象とする入力地震動の加速度波形を用意します。

(2) 地盤のモデル化

検討地点の地盤条件をモデル化します。

(3) 室内実験

原地盤より乱さない試料を採取し、液状化層の三軸圧縮試験、繰返し三軸試験、一面せん断試験等を必要に応じて実施します。

(4) 要素試験シミュレーション

室内試験結果のシミュレーションを行い、動的有効応力解析に用いる液状化パラメータを同定します。

(5) 1次元動的有効応力解析

要素試験シミュレーションにより得られた液状化パラメータを用いて、1次元動的有効応力解析を行います。解析は、初期応力解析 動的有効応力解析の順で行います。UWLCでは、初期応力解析と動的解析の両方の解析機能を用意しています。初期応力解析を行うことによって、地盤の拘束圧依存性を自動的に考慮することができます。

(6) 過剰間隙水圧比 L_u

1次元動的有効応力解析を用いた液状化予測では、過剰間隙水圧比 L_u を直接算出することができます。例えば、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編」(丸善株式会社)では、「過剰間隙水圧比が 0.95 以上であれば完全液状化状態と見なして良い」とされています。

1 - 2 . UWLC を用いた検討例

(1) 入力地震動の設定

兵庫県南部地震において、液状化時の鉛直アレー強震記録が得られている神戸ポートアイランドの加速度波形を用います。本検討では、GL-83m の工学的基盤における 2E 波を用います。この加速度波形を図-1.2 に示します。

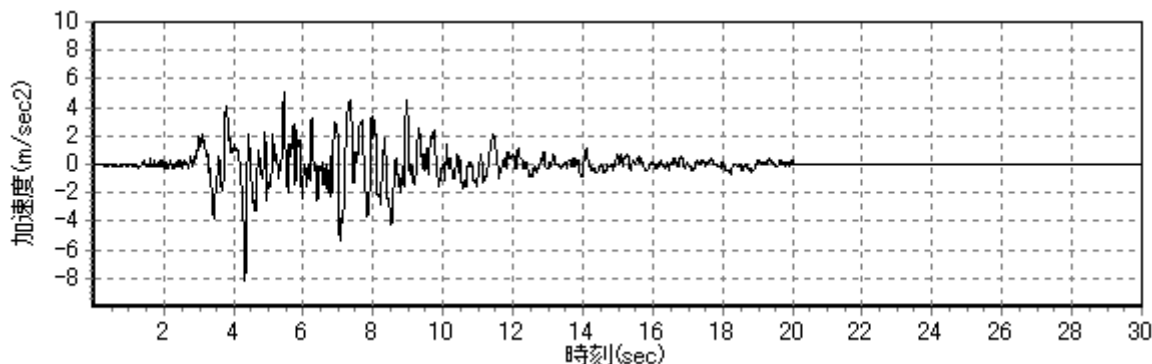


図-1.2 神戸ポートアイランド基盤波形 (2E)

(2) 地盤のモデル化

表-1.1 に示す神戸ポートアイランドの鉛直アレー観測地点の地盤プロフィールを使います。

表-1.1 神戸ポートアイランド地盤条件と適用構成モデル

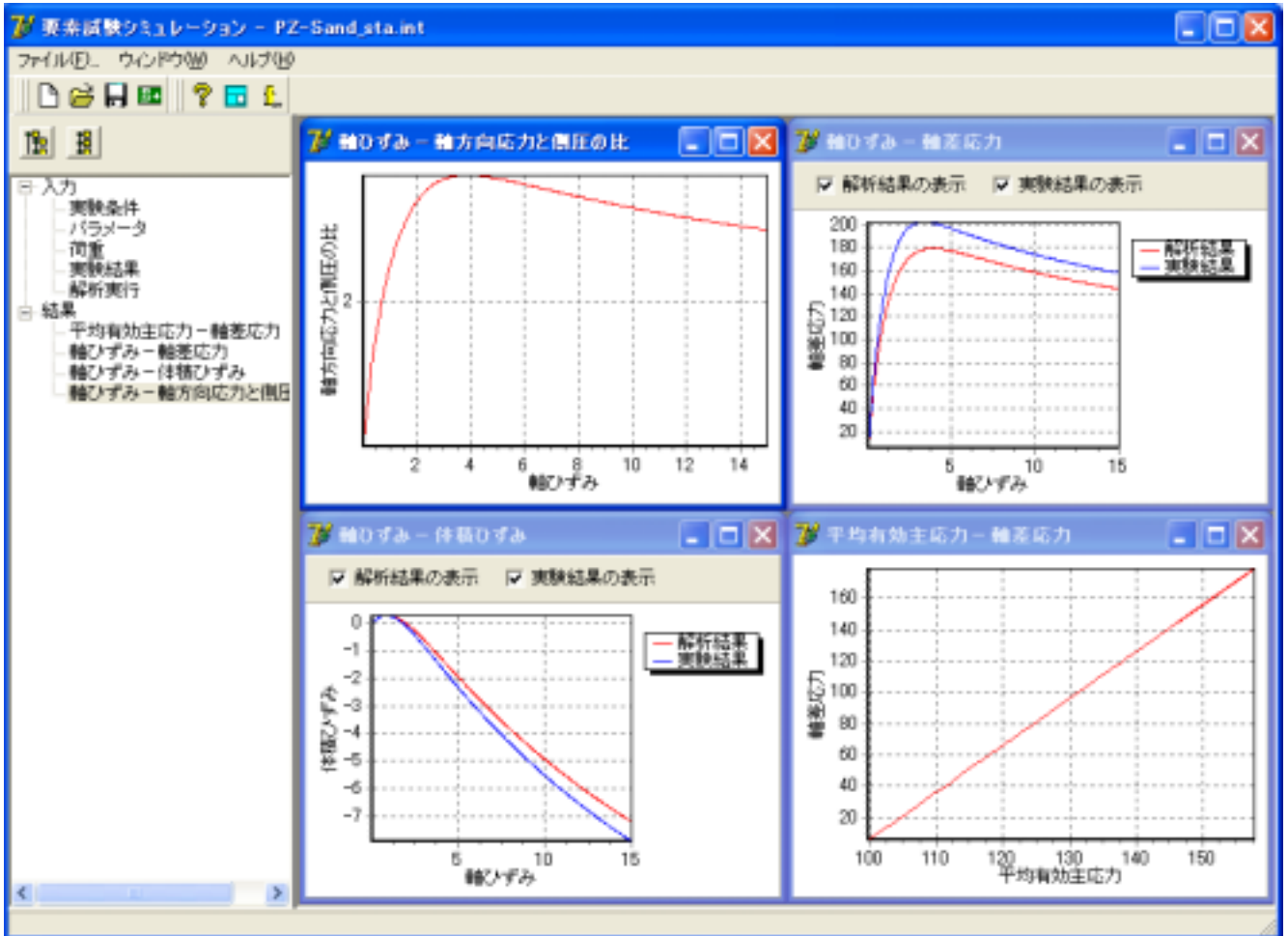
深度 (GL m)	土層	せん断弾性波速度 Vs(m/sec)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	適用構成モデル
0.0 ~ -2.4	砂礫(埋土)	140	0	25	PZ-Sand モデル
-2.4 ~ -5.0	砂礫(埋土)	180	0	25	PZ-Sand モデル
-5.0 ~ -12.6	砂礫(埋土)	195	0	25	PZ-Sand モデル
-12.6 ~ -19.0	礫混り砂(埋土)	220	0	25	PZ-Sand モデル
-19.0 ~ -27.0	沖積粘土	180	60	0	HD モデル
-27.0 ~ -33.0	沖積砂	245	0	40	PZ-Sand モデル
-33.0 ~ -50.0	洪積砂礫	305	0	45	PZ-Sand モデル
-50.0 ~ -61.0	洪積砂礫	350	0	45	PZ-Sand モデル
-61.0 ~ -79.0	洪積粘土	303	0	35	HD モデル
-79.0 ~ -83.0	洪積砂礫	320	0	50	HD モデル

(3) 室内実験

本検討では、室内実験を行いませんでした。

(4) 要素試験シミュレーション

本検討では、要素試験シミュレーションを行わずに強震記録の逆解析により液状化パラメータを同定しました。通常は、原地盤から採取した乱さない試料の三軸圧縮試験および繰返し三軸試験を行い、その試験結果のシミュレーションを行って液状化パラメータを同定します。UWLC では、付属ツールとして要素試験シミュレーションプログラムを用意しています。

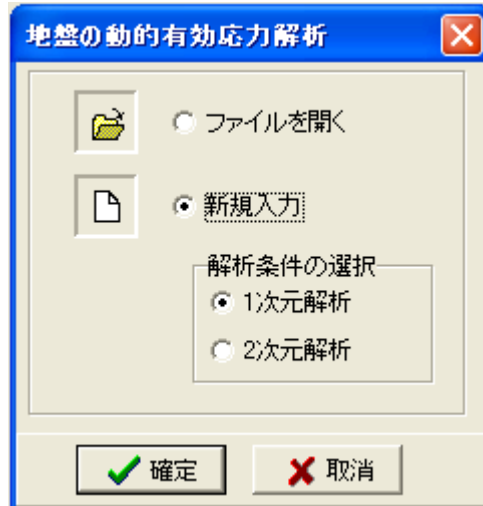


(5) 1次元動的有効応力解析

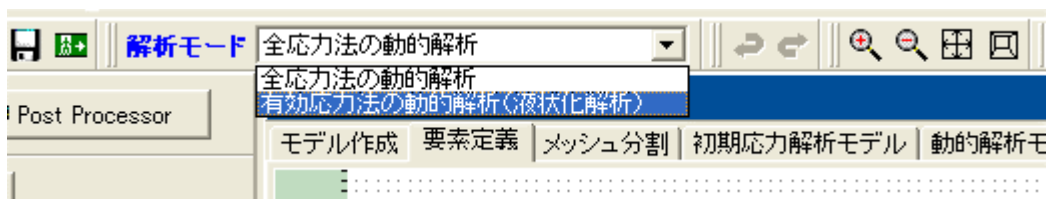
UWLC では、1次元解析モデルの簡易作成機能を用意しています。

解析条件の設定

プログラムを起動すると、解析条件を選択するダイアログボックスが開きます。ここで、1次元地震応答解析による液状化予測を行う場合には、「1次元解析」を選択します。



また、有効応力解析を行う場合には、画面上のツールバーにある[解析モード]コンボボックスで、「有効応力解析（液状化解析）」を選択します。



[モデル設定]タブ

[モデル設定]タブでは、以下の解析条件を入力します。

)地表面位置

地表面位置を入力します。

)地層情報

地層の層厚または標高（レイヤ）と、各地層の分割数（サブレイヤ）を入力します。

)水位情報

水位を考慮するか否かを選択し、水位を考慮する場合には水位線の位置を入力します。有効応力解析の場合、水位線の入力により自由水面が定義されます。水位線を定義せずに有効応力解析を行った場合は、全ての地層が完全非排水状態となります。

)平面ひずみ要素のプロパティ設定

各地層の基本定数と構成モデル、ならびに指定した構成モデルに応じた材料パラメータを入力します。

)中間節点の指定

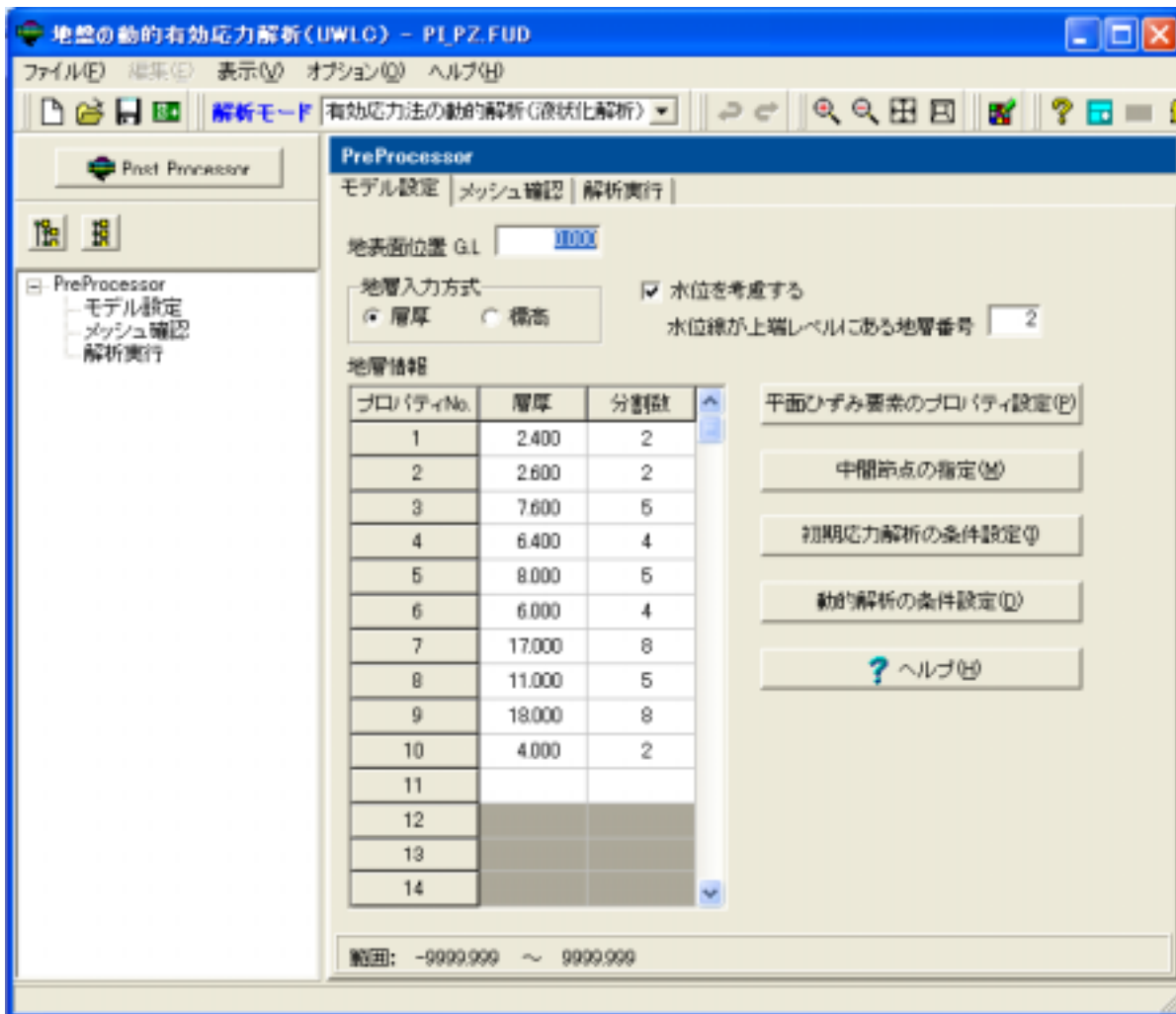
UWLC では有限要素法により1次元地震応答解析を行います。実際には2次元のFEM解析モデルを解くこととなります。したがって、2次元解析の場合と同様に、中間節点の有無（1次要素または2次要素）を指定することができます。

)初期応力解析の条件設定

ひずみ領域や重力加速度など、初期応力解析の条件を設定します。

)動的解析の条件設定

ひずみ領域、積分法、計算の高速化手法などの設定を行います。



平面ロずみ要素のプロパティ設定

プロパティNo.	使用状況	色 お好み (カラー)	K _x (指数) ×10 ⁸	K _y (指数) (ev/sec)	K _z (指数) ×10 ⁸	異方性	構成則	履歴水圧モデル
1	使用中		-5	3000	-5	無し	PZ-Sandモデル	全応力法を適用する材料
2	使用中		-5	3000	-5	無し	PZ-Sandモデル	有効応力法を適用する材料
3	使用中		-5	3000	-5	無し	PZ-Sandモデル	有効応力法を適用する材料
4	使用中		-5	3000	-5	無し	PZ-Sandモデル	有効応力法を適用する材料
5	使用中		-6	2000	-6	無し	HDモデル	全応力法を適用する材料
6	使用中		-5	2000	-5	無し	PZ-Sandモデル	有効応力法を適用する材料
7	使用中		-5	1000	-5	無し	PZ-Sandモデル	有効応力法を適用する材料
8	使用中		-5	1000	-5	無し	PZ-Sandモデル	有効応力法を適用する材料
9	使用中		-6	1000	-6	無し	HDモデル	全応力法を適用する材料
10	使用中		-5	1000	-5	無し	HDモデル	全応力法を適用する材料

一括設定
 α 0.00000 β 0.00000

範囲: 0.00000 ~ 999999

平面ロずみ要素の材料パラメータの設定

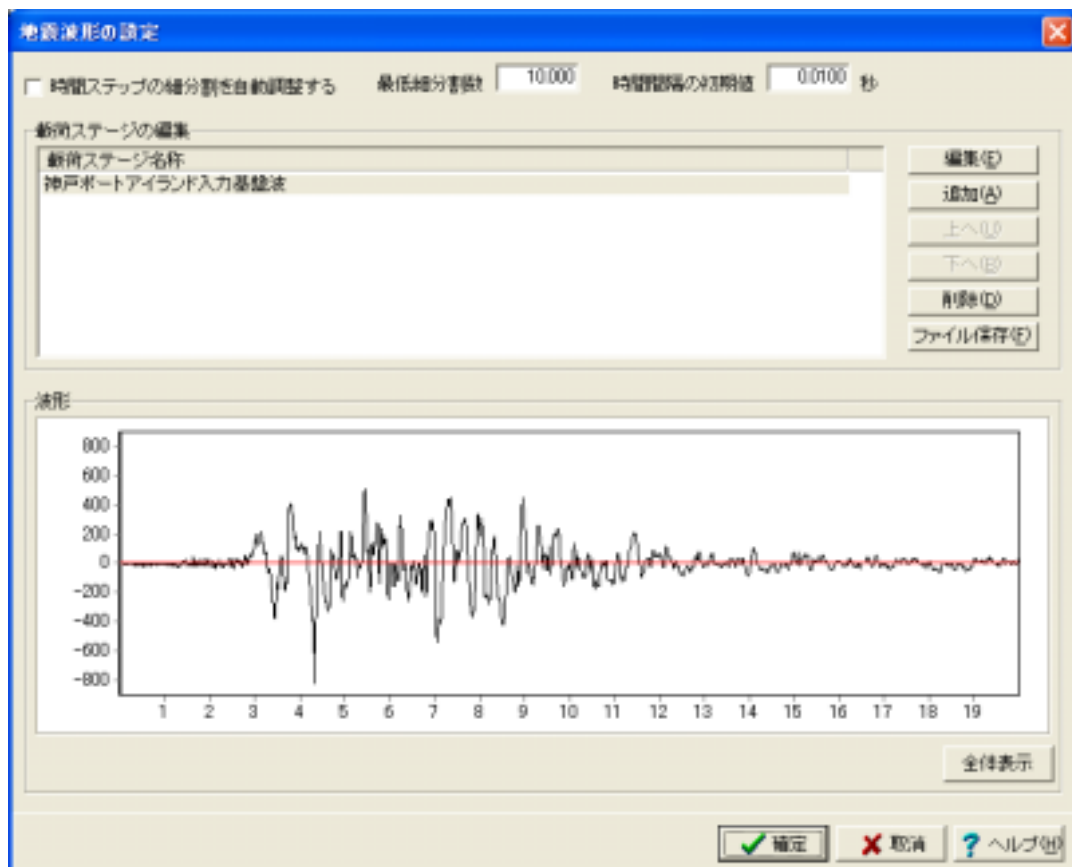
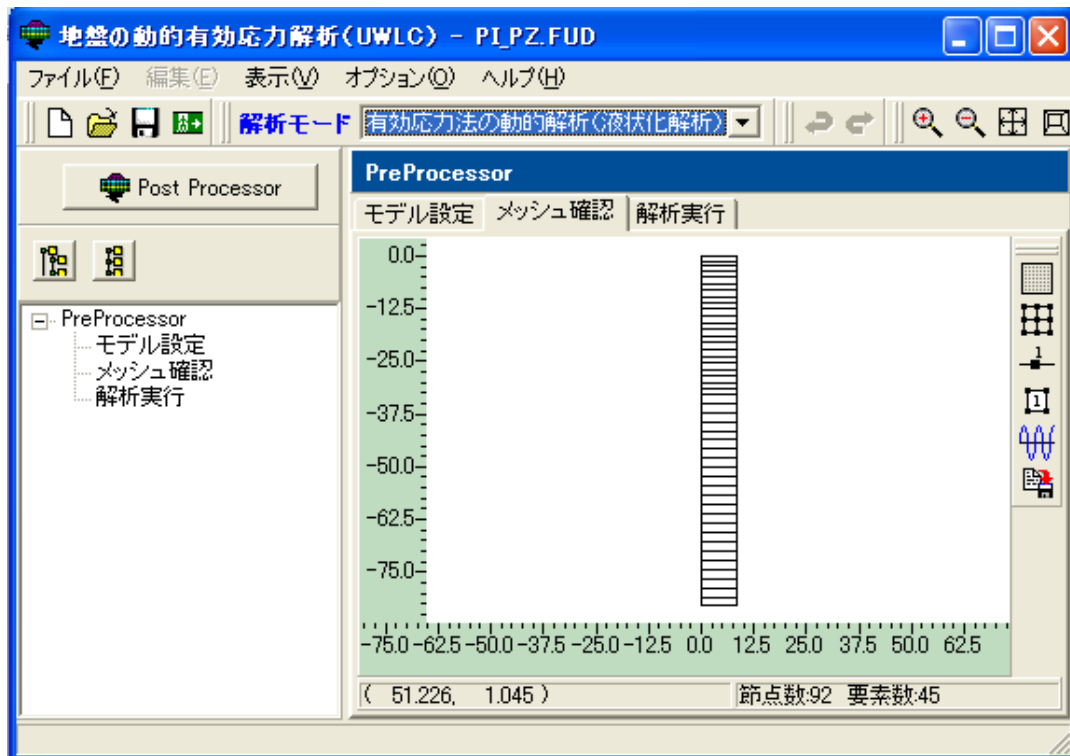
PZ-Sandモデル | HDモデル |

プロパティNo.	Mf	Me	C	αf	αg	Kevo	Geso	mv	ms	$\beta 0$	$\beta 1$	Ho	H _{uo} (kN/m ²)	γ	γu
1	1.000	1.500	0.800	0.450	0.450	2210.887	1326.532	0.800	0.500	4.000	0.120	600.000	6000.000	8.000	6.000
2	0.900	1.370	0.800	0.450	0.450	2851.604	1710.963	0.800	0.500	4.000	0.120	600.000	6000.000	8.000	6.000
3	0.900	1.370	0.800	0.450	0.450	3233.835	1940.301	0.800	0.500	4.000	0.120	600.000	6000.000	8.000	6.000
4	0.900	1.370	0.800	0.450	0.450	4103.892	2462.335	0.800	0.500	4.000	0.120	600.000	6000.000	8.000	6.000
6	1.200	1.500	0.800	0.450	0.450	5073.491	3044.095	0.500	0.500	5.000	1.000	330.000	6000.000	8.000	6.000
7	1.615	1.900	0.800	0.450	0.450	7968.341	4793.005	0.500	0.500	10.000	5.200	300.000	6000.000	15.000	10.000
8	1.615	1.900	0.800	0.450	0.450	10377.970	6226.782	0.500	0.500	10.000	5.200	300.000	6000.000	15.000	10.000

範囲: 0.000 ~ 99.999

[メッシュ確認]タブ

[モデル設定]タブで設定された地層情報をもとに解析用メッシュを自動的に生成します。また、このタブでは入力地震動波形の設定も行います。



[解析実行]タブ

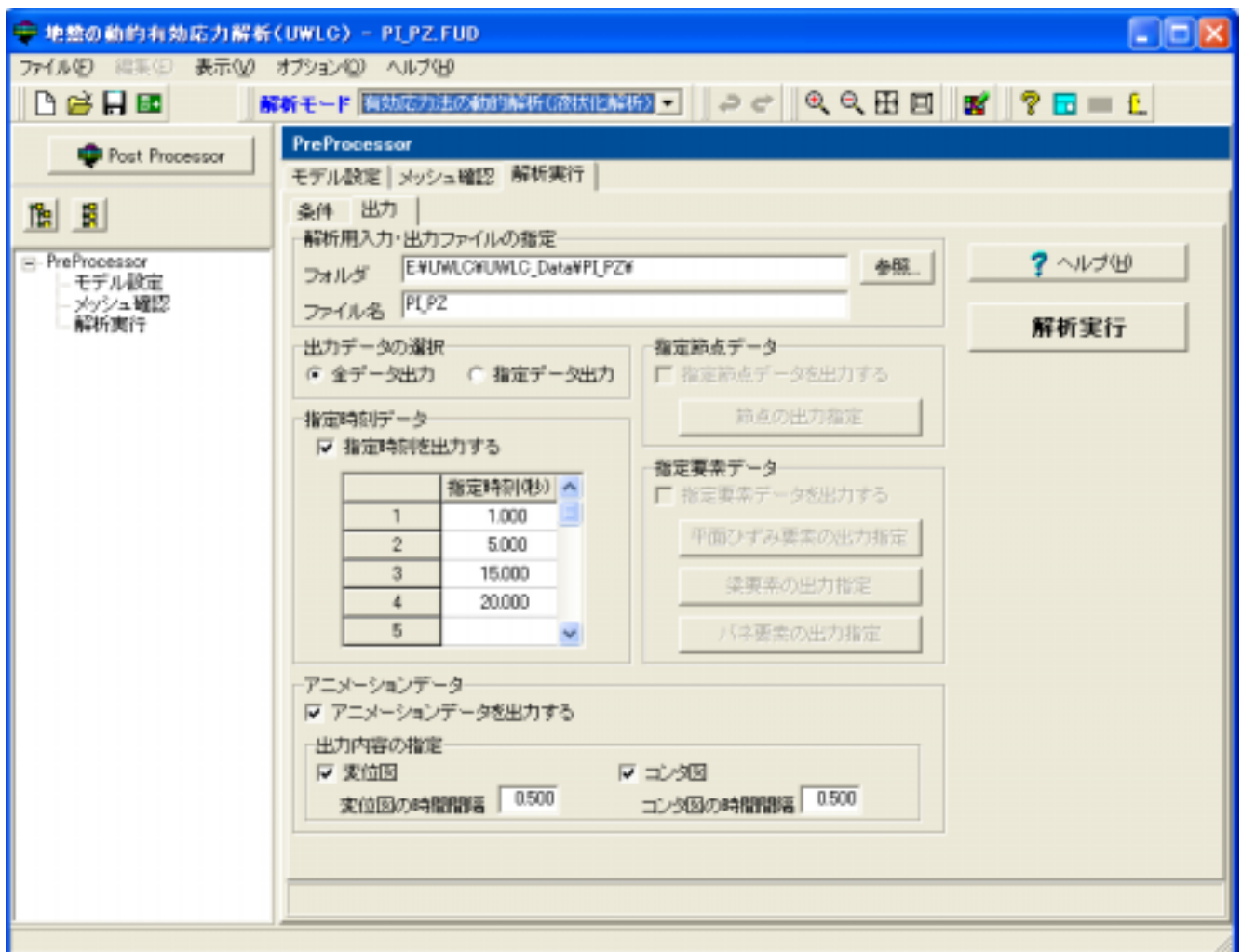
) [条件]タブ

下記の解析条件を設定します。

- ・ 実施する解析の内容
- ・ 動的解析時の初期条件
- ・ 収束判定誤差
- ・ 最大繰返し回数

) [出力]タブ

出力する解析結果の内容を指定します。また、解析用の入出力データが保存されるフォルダとファイル名を指定して、解析を実行します。



過剰間隙水圧比 L_u

解析が正常に終了すると、UWLC のポストプロセッサが起動されます。ポストプロセッサでは、各種の描画機能および数値出力機能を用意しています。

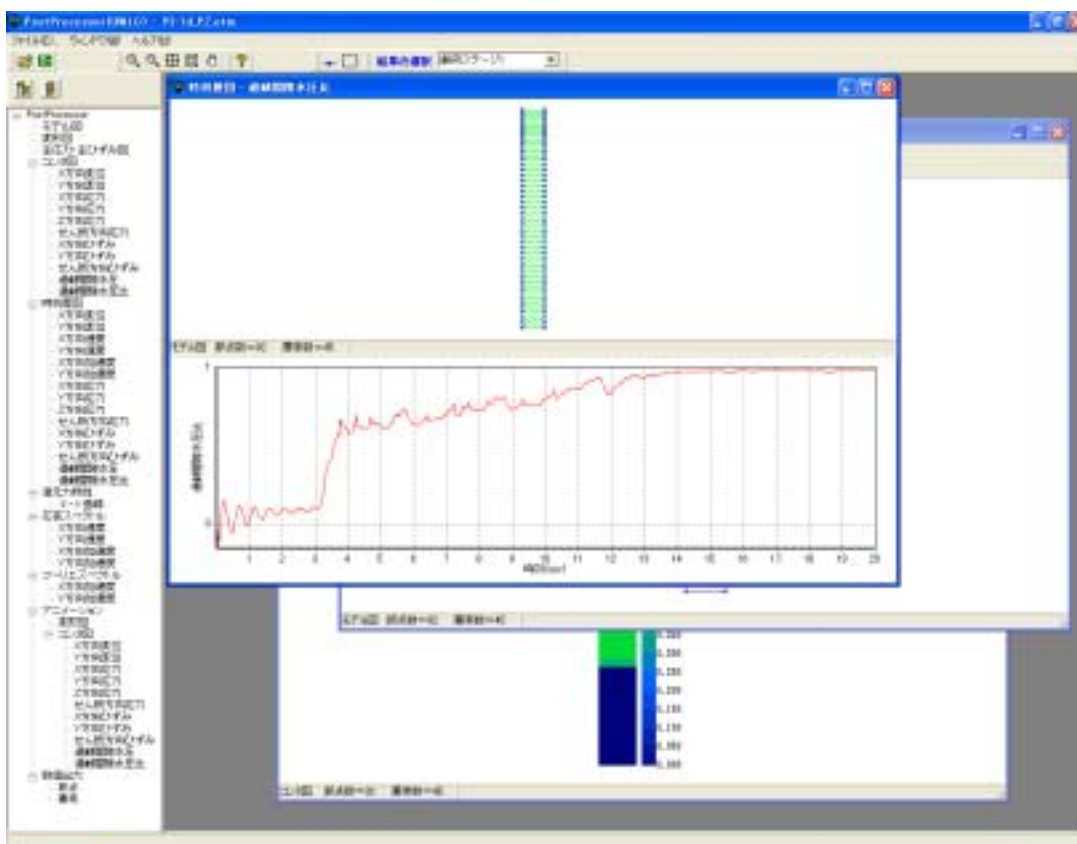
有効応力法の 1 次元地震応答解析により液状化予測を行う場合は、過剰間隙水圧比に着目します。例えば、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編」では、次のように記載されています。

2) 地盤の地震応答解析による場合

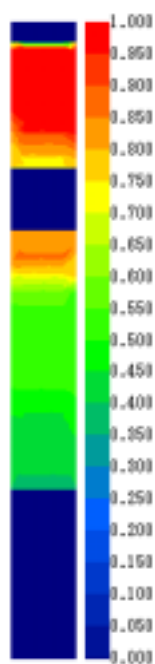
地盤の地震応答解析により液状化判定を行う場合には、「5.7.3.3 液状化の可能性のある地盤の動的解析法」において時刻歴有効応力解析を実施した結果より、液状化発生の有無を判定しても良い。この場合、過剰間隙水圧比が 0.95 以上であれば完全液状化状態と見なしてよい。

「鉄道構造物等設計標準・同解説」(運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編, 丸善株式会社) p.57 ~ 58
より

次に示す過剰間隙水圧比のコンタ図より、過剰間隙水圧比の最大値分布を確認することができます。過剰間隙水圧比 0.95 以上を完全液状化とみなします。



ポストプロセッサ



過剰間隙水圧比のコンタ図（最大値分布）

2 . 非線形全応力法による 1 次元地震応答解析を用いた液状化判定

2 - 1 . 検討の流れ

非線形全応力法による 1 次元地震応答解析を用いた液状化判定のフローを、図-2.1 に示します。

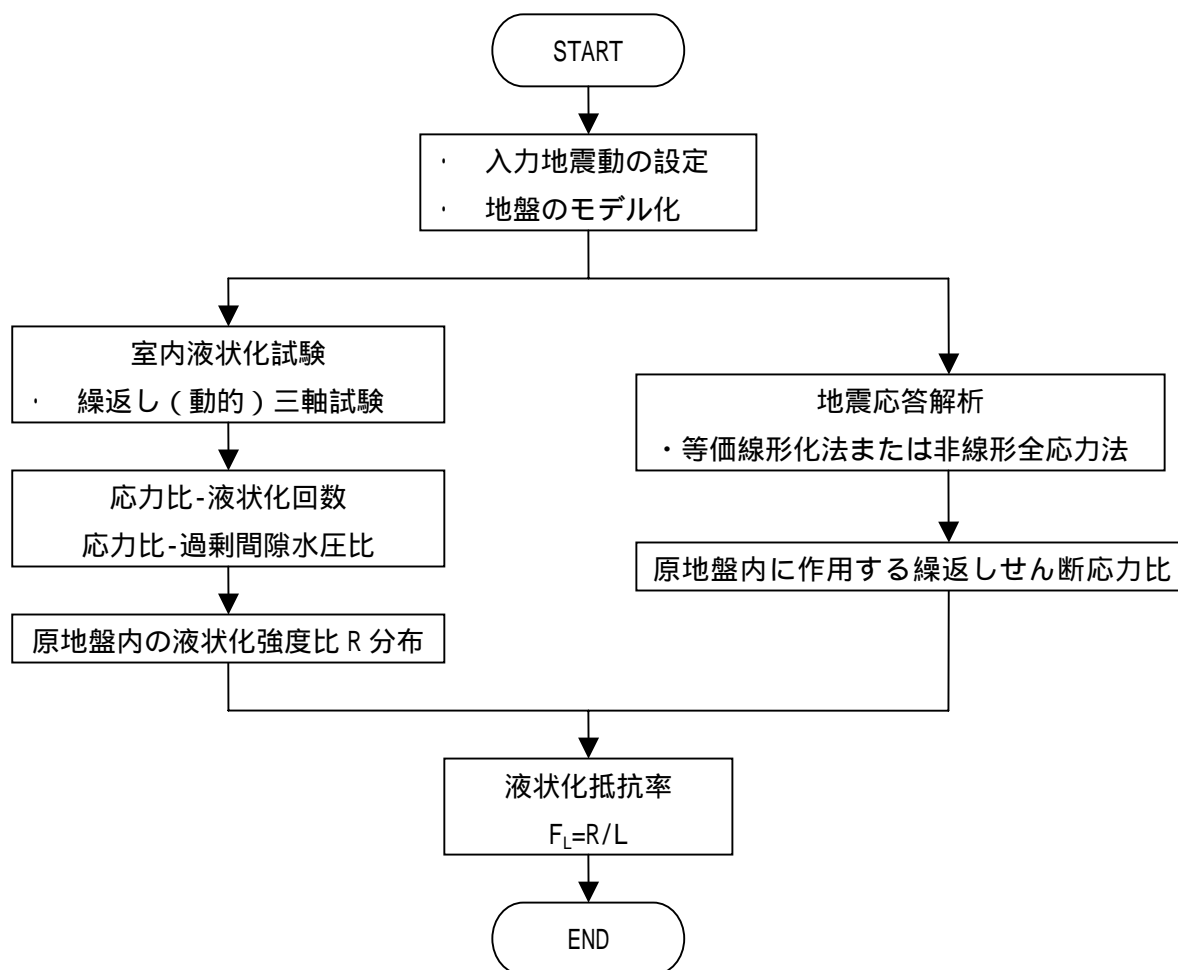


図-2.1 非線形全応力法による液状化判定のフロー

非線形全応力解析では、過剰間隙水圧を直接算出することができません。したがって、非線形全応力法の 1 次元地震応答解析により繰返しせん断応力比（地震時せん断応力比） L を算出し、液状化強度比 R を室内実験もしくは推定式により算出し、液状化抵抗率を求めます。

(1) 入力地震動の設定

検討の対象とする入力地震動の加速度波形を用意します。

(2) 地盤のモデル化

検討地点の地盤条件をモデル化します。

(3) 原地盤内の液状化強度比 R 分布の算出

乱さない試料の室内の繰返し三軸試験より、原地盤内の液状化強度比 R 分布を求めます。室内試験により液状化強度比 R を求めることが困難な場合の推定式が、各設計基準で提案されています。例えば、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編」では、以下のようになっています。詳しくは、それぞれの設計基準を参照してください。

b) L2 地震時における検討

) 液状化強度比の算定

L2 地震動の検討に用いる液状化強度比については、解説図 5.5.2 に示すように乱さない試料を用いた室内土質試験結果から軸ひずみ両振幅 10～15%における動的せん断強度比～繰返し回数のおよび「5.7.3.2 地盤の動的解析法」による地盤の応答解析結果から得られる各深さごとの加速度波形を用い、累積損傷度理論を適用して補正を行い、式(解 5.5.10)により算定する。なお、累積損傷度理論による液状化強度比補正方法の詳細については付属資料 5-2 に示す。

$$R = \frac{1+2K_0}{3} R_D \quad (\text{解 5.5.10})$$

ここに、 R_D : 累積損傷度理論を適用して補正した動的せん断強度比

K_0 : 静止土圧係数

ここで、室内土質試験による動的せん断強度比～繰返し回数の関係の推定が困難な場合は、式(解 5.5.3)より算定される値を繰返し回数 20 回で軸ひずみ両振幅 5%に至る動的せん断応力比として用い、式(解 5.5.11)より軸ひずみ両振幅 10～15%における動的せん断強度比～繰返し回数の関係を推定してよい。

$$R_{(i)} = R_L \left(\frac{N_C}{20} \right)^{-0.23} \quad N_C > 20 \quad (\text{解 5.5.11})$$

$$R_{(i)} = R_L \left(\frac{N_C}{20} \right)^{-1.35 \exp(-3.64+0.037D_r)} \quad N_C \leq 20$$

ここに、 $R_{(i)}$: 繰返し回数 i における動的せん断強度比

R_L : 繰返し回数 20 回における動的せん断強度比

D_r : 相対密度で 50%以下の場合は 50%として考慮する。

N_C : 任意の繰返し回数

「鉄道構造物等設計標準・同解説」(運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編, 丸善株式会社) p.56～58
より

(4) 原地盤内に作用する繰返しせん断応力比 L 分布の算出

非線形全応力法の 1 次元地震応答解析結果から繰返しせん断応力比（地震時せん断応力比）を算出する際には、式(2.1)を用います。

$$L = \tau_{\max} / \sigma'_v \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここに、

L : 繰返しせん断応力比（地震時せん断応力比）

τ_{\max} : 最大せん断応力

σ'_v : 初期有効上載圧

例えば、「鉄道構造物等設計標準・同解説」（丸善株式会社）では、以下のように記述されています。

累積損傷度理論により補正を行う際の地震時せん断応力比のピーク波列は、「5.7.2.3 地盤の動的解析法」による地盤の応答解析結果から得られる各深さごとのせん断応力のピーク値を式（解 5.5.12）によりせん断応力比に換算して求める。

$$L_{(i,z)} = \frac{\tau_{(i,z)}}{\sigma'_v} \quad \text{(解 5.5.12)}$$

ここに、 $L_{(i,z)}$: 深さ z における繰返し回数 i 回目におけるせん断応力比

$\tau_{(i,z)}$: 深さ z における繰返し回数 i 回目におけるせん断応力 (kN/m²)

σ'_v : 有効上載圧 (kN/m²)

「鉄道構造物等設計標準・同解説」（運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編，丸善株式会社）p.57～58
より

(5) 液状化抵抗率 F_L

(3)，(4)より、液状化抵抗率 F_L の分布を算出します。

2 - 2 . UWLC を用いた検討例

(1) 入力地震動の設定

兵庫県南部地震において、液状化時の鉛直アレー強震記録が得られている神戸ポートアイランドの加速度波形を用います。本検討では、前述の有効応力解析と同様に、GL-83m の工学的基盤における 2E 波を用います。

(2) 地盤のモデル化

表-2.1 に示す神戸ポートアイランドの鉛直アレー観測地点の地盤プロフィールを使います。地震応答解析では全ての地層をモデル化しますが、液状化判定は深さ GL-20.0m までの地層を対象に行います。

表-2.1 神戸ポートアイランド地盤条件と適用構成モデル

深度 (GL m)	土層	せん断弾性波速度 Vs(m/sec)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	適用構成モデル
0.0 ~ -2.4	砂礫(埋土)	140	0	25	HD モデル
-2.4 ~ -5.0	砂礫(埋土)	180	0	25	HD モデル
-5.0 ~ -12.6	砂礫(埋土)	195	0	25	HD モデル
-12.6 ~ -19.0	礫混り砂(埋土)	220	0	25	HD モデル
-19.0 ~ -27.0	沖積粘土	180	60	0	HD モデル
-27.0 ~ -33.0	沖積砂	245	0	40	HD モデル
-33.0 ~ -50.0	洪積砂礫	305	0	45	HD モデル
-50.0 ~ -61.0	洪積砂礫	350	0	45	HD モデル
-61.0 ~ -79.0	洪積粘土	303	0	35	HD モデル
-79.0 ~ -83.0	洪積砂礫	320	0	50	HD モデル

(3) 原地盤内の液状化強度比 R 分布の算出

本検討では、原地盤から採取した乱さない試料の繰返し三軸試験は行いませんでした。したがって、設計基準の中で提案されている推定式によって原地盤内の液状化強度比 R 分布を算出します。例として、本検討では道路橋示方書 耐震設計編の液状化判定に示される方法を用います。

UWLC では設計基準に従って R 分布を算出する機能を用意しておりませんので、表計算や他のプログラムなどを用いて別途計算する必要があります。

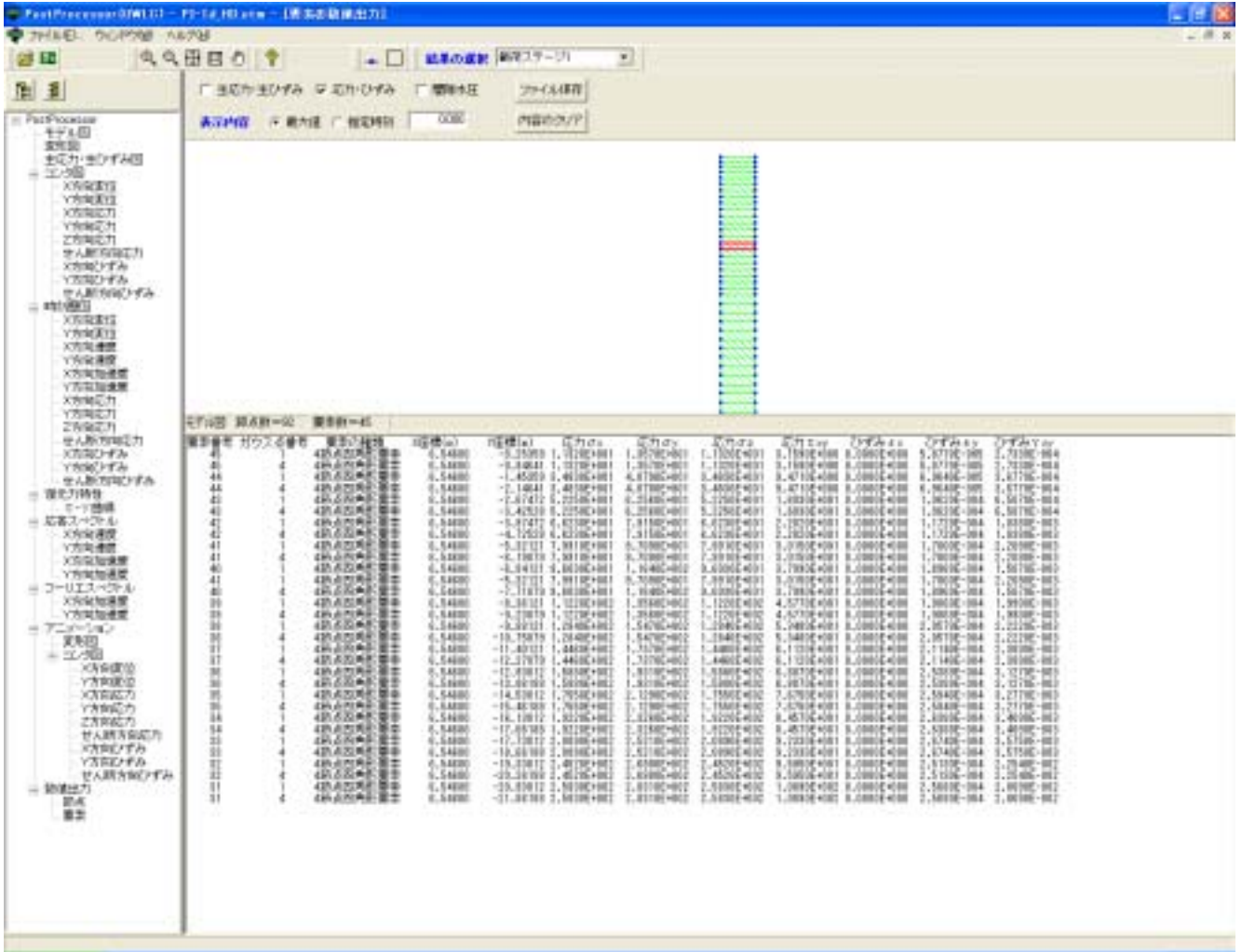
(4) 原地盤内に作用する繰返しせん断応力比 L

UWLC を用いて非線形全応力法による 1 次元地震応答解析を行い、原地盤内に作用する繰返しせん断応力比 L を算出します。

非線形全応力法による 1 次元地震応答解析を行う際のデータ作成要領については、前述の 1 次元動的有効応力解析を参考にしてください。ここでは、解析結果から繰返しせん断応力比 L を算出する流れを示します。

最大せん断応力 τ_{\max}

ポストプロセッサの数値出力機能を使って、最大応力の分布を出力します。



出力された数値をテキストファイルで保存します。

初期有効上載圧 σ_v'

地盤条件から表計算により求めます。初期有効上載圧を算出する位置は、細分割された要素（サブレイヤ）の中央とします。

地震時せん断応力比 L

より表計算により地震時せん断応力比 L を算出します。地震時せん断応力比を算出する位置は、細分割された要素（サブレイヤ）の中央とします。深度方向に存在する 2 つのガウスポイント出力値の平均を採って要素（サブレイヤ）中央の値とします。

Microsoft Excel - 地震時せん断応力比L.xls

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H) 名前を入力してください

MS Pゴシック 11 B

Sheet1 Window

G2 =B2/P2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Y座標(m)	応力 σ_{xy}	層厚 $\Delta H(m)$	$\gamma t(kN/m^2)$	層の有効重量 $w(kN/m^2)$	σ_v	L				
2	-0.600	3.159	1.200	19.600	23.520	11.760	0.268622				
3	-1.800	6.315	1.200	19.600	23.520	35.280	0.178997				
4	-3.050	9.471	1.300	9.800	12.740	53.410	0.177326				
5	-4.350	12.751	1.300	9.800	12.740	66.150	0.192751				
6	-5.760	16.030	1.520	9.800	14.896	79.968	0.200455				
7	-7.280	19.425	1.520	9.800	14.896	94.864	0.204767				
8	-8.800	22.820	1.520	9.800	14.896	109.760	0.207908				
9	-10.320	26.485	1.520	9.800	14.896	124.656	0.212465				
10	-11.840	30.150	1.520	9.800	14.896	139.552	0.216048				
11	-13.400	34.070	1.600	9.800	15.680	154.840	0.220034				
12	-15.000	37.990	1.600	9.800	15.680	170.520	0.222789				
13	-16.600	41.880	1.600	9.800	15.680	186.200	0.224919				
14	-18.200	45.770	1.600	9.800	15.680	201.880	0.226719				
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											

コマンド NUM

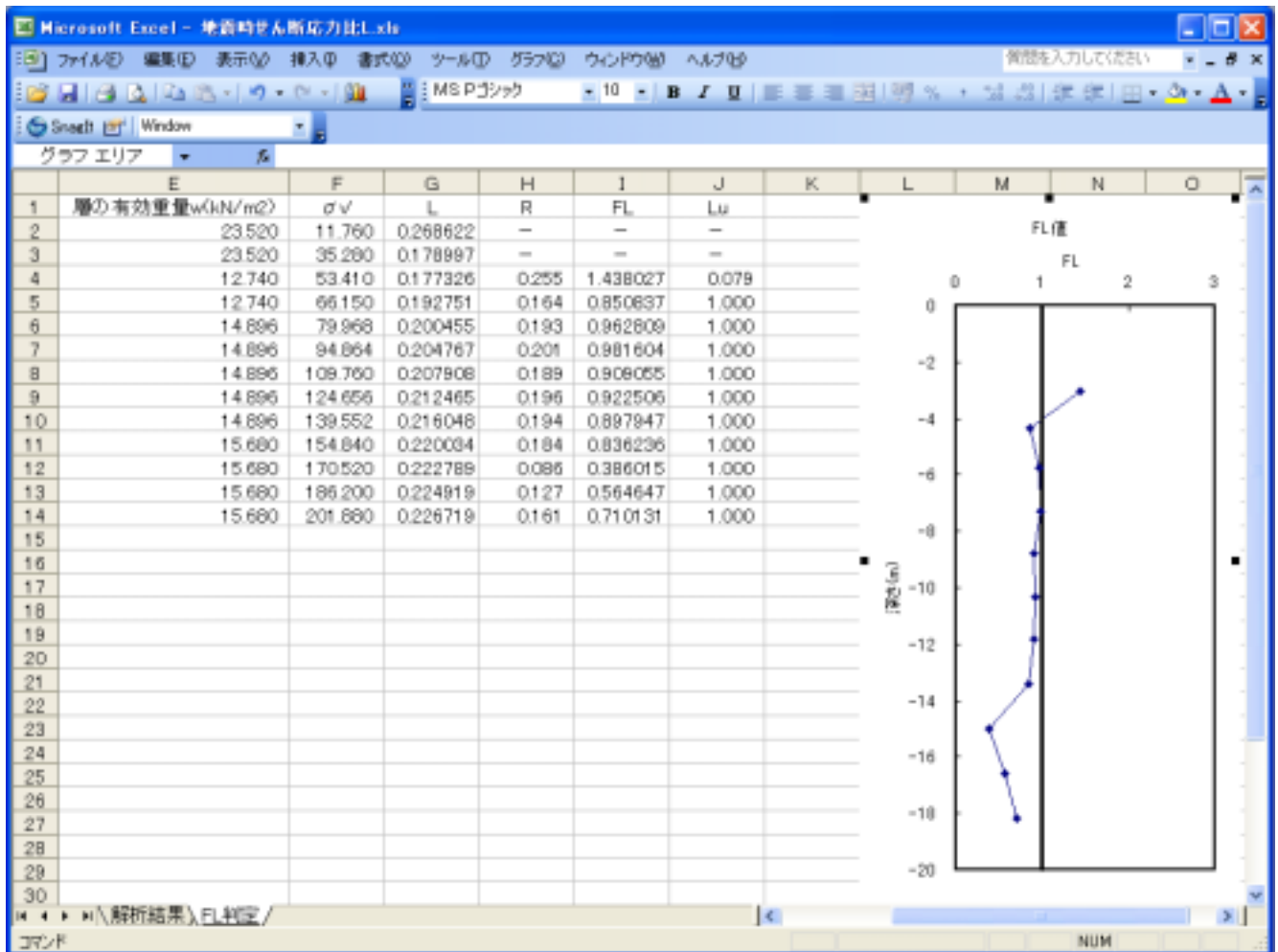
(5) 液状化抵抗率 F_L

繰返しせん断応力比 L の計算を行った表計算に原地盤内の液状化強度比 R 分布を導入し、表計算により $F_L = R/L$ を計算します。

また、下式より、液状化抵抗率 F_L より過剰間隙水圧比 L_u を求めることができます。

$$F_L > 1 \text{ のとき、 } L_u = F_L^{-7}$$

$$F_L \leq 1 \text{ のとき、 } L_u = 1$$



FL 値の分布から、液状化検討層の上端部では完全液状化に至りませんが、その他全ての地層において FL 値が 1 以下となり完全液状化が起こることが分かります。