

FLIP を用いた地盤地震応答解析の最前線

The state of the art in seismic response analysis of the ground by using FLIP

一 井 康 二 (いちい こうじ)

広島大学 准教授 大学院工学研究院

溜 幸 生 (たまり ゆきお)

東電設計㈱新領域開発推進室 担当部長

上 田 恭 平 (うえだ きょうへい)

京都大学防災研究所 助教

中 原 知 洋 (なかはら とむひろ)

五洋建設㈱土木設計部 担当部長

1. FLIP の沿革と本稿の目的

本稿では、液状化を考慮できる動的解析プログラム FLIP ROSE (Finite element analysis program of LIquefaction Process/Response Of Soil-structure systems during Earthquakes) と、同じ構成則を有限変形理論で定式化した FLIP TULIP (Total and Updated lagrangian LIquefaction Program) の概要と、その実務的なモデル化の留意点を紹介する。FLIP ROSE 及び FLIP TULIP (以下、本稿では FLIP と総称) は、運輸省港湾技術研究所において開発された後、FLIP 研究会や一般社団法人 FLIP コンソーシアムにおいて、改良・機能拡張とともに、高度利用の促進が進められてきた。本稿では、他の解析プログラムと異なる FLIP の特徴に力点を置いて、FLIP の構成則や使用時の実務的側面を簡単に紹介する。そして、実務技術者間の情報交換・意見交換の一助となることを目指す。

2. FLIP の構成則

以下では、FLIP の構成則の概要を、3 段階で簡単に説明する。詳細は、例えば参考文献 1)～3) を参照されたい。

2.1 多重せん断ばねモデル^{1),4)}

FLIP では、2 種類の土のダイレイタンスのモデルがこれまでに用いられてきた。最初のモデル¹⁾を使用したものをマルチスプリングモデル、その後に提案されたモデル^{2),3)}を使用したものをカクテルグラスモデルと呼ぶ。そのどちらも、土のせん断に関して多重せん断機構を考えた、多重せん断ばねモデルが基本となっている。

実務設計における多重せん断機構の考慮の重要性を、図 1 の簡単な盛土の例で示す。盛土直下の地盤では、盛土の重量により、地震以前に軸差せん断が作用している (①)。そして、地震時に鉛直下方よりせん断波 (②) が入射すると、単純せん断が卓越して作用する。一方で、盛土側方の地盤では、地震以前においても、軸差せん断に加えて単純せん断が作用しており、地震時にはその状態にさらに単純せん断が作用する。つまり、実際の構造物の地盤では、初期の応力状態が場所ごとに異なり、地震時の影響も異なる。この初期の応力状態の違いを適切に評価するべく、せん断面の方向毎のばねを想定したも

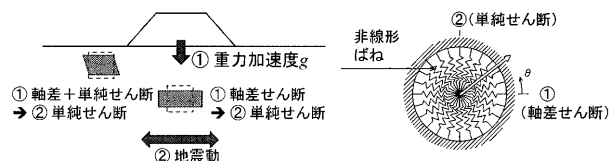


図 1 盛土の地震時挙動と多重せん断ばねモデル^{1),4)}

のが、多重せん断ばねモデルである。

多重せん断ばねモデルは、例えば図 1 の右側のように図示できる^{1),4)}。数多くのばねで構成されており、図の水平方向のばねは軸差せん断 (軸差応力: $(\sigma'_x - \sigma'_y)/2$ と軸差ひずみ: $\varepsilon_x - \varepsilon_y$ の関係) を評価し、鉛直方向のばねは単純せん断 (せん断応力 τ_{xy} とせん断ひずみ γ_{xy} の関係) を評価する。軸差せん断と単純せん断は、現実ではせん断面が 45° 傾いた関係にあり、その間の角度に位置するせん断面もモデル化するため、数多くのばねを考え、それぞれのばねが単純せん断や軸差せん断に寄与する割合を考慮して、土の全体挙動が表現される。

この定式化を数式で表すと、式 (1) となる。各せん断機構のせん断ひずみからせん断応力を算定し、その値から全体の応力を算定するひずみ空間でのモデル化となる。

$$\sigma' = -p\mathbf{n}^{(0)} + \sum_{i=1}^I q^{(i)}\mathbf{n}^{(i)}\Delta\omega \quad \cdots (1)$$

ここで、

$$\mathbf{n}^{(0)T} = \{1 \quad 1 \quad 0\} \quad \cdots (2)$$

$$\mathbf{n}^{(i)T} = \{\cos \omega_i \quad -\cos \omega_i \quad \sin \omega_i\} \quad (i=1, \dots, I) \quad \cdots (3)$$

であり、 ω_i は各せん断面 ($i=1 \sim I$) の方向、 $\Delta\omega$ はモデル化したせん断面の間隔、 p, q はそれぞれ応力の平均成分と偏差成分である。

図 1 の多重せん断ばねモデルにおいて、各ばねの方向は、解析対象の座標系 (水平方向を x 軸、鉛直方向を y 軸) により規定される。構成則によっては、主応力空間上に降伏局面等を規定する場合があるが、その考え方とは大きく異なるので注意されたい。

各ばねは双曲線型の骨格曲線でモデル化される。そして、実際の減衰定数に対応できるように拡張されたメイシング則により、各ばねの履歴が表現される。詳細は参考文献 1) を参照されたい。

双曲線型のばねを用いているため、構成則の多くで定式化される降伏局面等の概念は存在しない。しかし、各

せん断面の双曲線型ばねにおいて、せん断応力がせん断強度近くになるとひずみが増大していくことに加えて、後述するダイレイタンスの効果により双曲線型ばねの状態（骨格曲線の状態）が変動するため、液状化時のひずみの増大やサイクリックモビリティによる剛性回復を表現できる。

なお、図一1は二次元のモデル化であり、せん断面は奥行き方向に向いた軸の周りを回転するように定義されている。実際の三次元挙動では、図一1に対応したせん断面を、三次元的に種々の方向に向いた軸の周りを回転するように定義することになる。計算量は増大するが、その定式化⁵⁾に基づいたFLIP3Dも開発され、必要に応じて実務にも用いることができる。

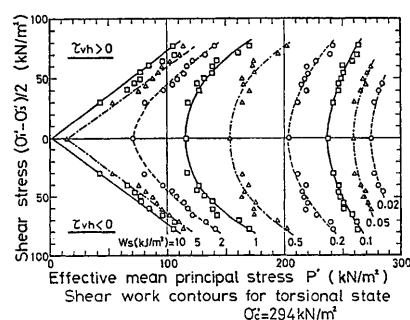
2.2 マルチスプリングモデル¹⁾

FLIPの当初のモデル化では、上述の多重せん断ばねモデルに、累積塑性せん断仕事に基づいた有効応力経路をモデル化することで、土のダイレイタンスの効果を表現してきた。これを、便宜上（後述の新しいモデルと区別するため）マルチスプリングモデルと呼ぶ。

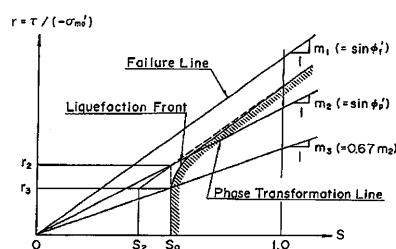
このダイレイタンスのモデルは、図一2に示すように、有効応力がせん断仕事に応じて減少していくという実験結果⁶⁾に基づいている。この図は（ほぼ）上下対称なので上側だけをモデル化することとし、横軸の有効応力と縦軸のせん断応力を初期の平均有効応力で基準化してモデル化したものが図一3である。

したがって、横軸は平均有効応力、縦軸はせん断応力の指標である。そして、せん断仕事（モデル化では消費されたエネルギーに相当する塑性せん断仕事）に応じて、応力状態を図一3の右から左へと変化させる。

実際の応力状態はその時点で作用しているせん断応力の大きさに依存するので、液状化フロントパラメータ S_0 により表現された液状化フロント（Liquefaction



図一2 応力空間上のせん断仕事の等高線の例⁶⁾



図一3 マルチスプリングモデルの概要¹⁾

Front) 上に実際の応力状態があると仮定する。図一3において、液状化フロントの線（ハッチ）は大きくカーブしているが、これは応力状態が変相線よりも破壊線に近い側では正のダイレイタンスの寄与が大きく、サイクリックモビリティが生じることをモデル化している。

上記のモデルにおいて重要となる液状化フロントパラメータの値は、初期に等方圧密状態であれば1.0であり、各サイクルごとに塑性せん断仕事を算定し（全体のせん断仕事から弾性部分を差し引き）、累積の塑性せん断仕事に応じて値を減少させていく。そして、 S_0 が定まると、その時点で作用しているせん断応力の大きさに応じて状態変数 S を図一3より読み取り、 S の値に応じて骨格曲線（せん断強度及びせん断剛性）を変化させる。例えば、 S が小さくなりせん断強度及びせん断剛性が低下すると、初期（地震前）と同じせん断応力が重力等により作用していたとしても、大きなせん断ひずみが発生する。

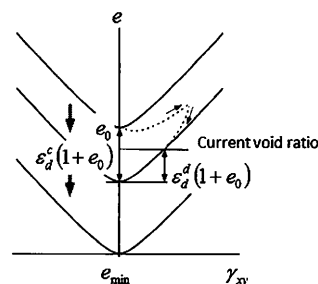
なお、図一3では液状化フロントは破壊線に接しないが、定常状態（Steady state）で破壊線に達して止まるように構成則が改良されている⁷⁾。また、塑性せん断仕事の算定においても、破壊線近傍の応力状態における算定法を要素試験結果等との比較に基づいて検討しており、初期のモデルより要素試験結果や現実の被災事例をよく再現できるモデルが提案されている⁸⁾。

2.3 カクテルグラスモデル^{2),3)}

マルチスプリングモデルでは、液状化後の排水沈下や、振動中・振動後の間隙水の移動に伴う水圧上昇や消散が地盤の変形挙動に及ぼす影響は考慮できなかった。

そこで、せん断に関する多重せん断機構のモデルに、新たなダイレイタンスモデルを組み合わせた構成則が提案された。これがカクテルグラスモデルである。

カクテルグラスモデルの概要を図一4に示す。横軸はせん断ひずみ（概念的には図一3の縦軸に相当）、縦軸は体積ひずみ（概念的には図一3の横軸に相当）である。つまり、図一3では有効応力の減少に対応して、応力状態が右から左に移動したように、図一4では有効応力の減少を引き起こす体積収縮に対応して、体積ひずみの状態が上から下へと移動する。図一3では実際のせん断応力の作用に応じて有効応力が回復する挙動がハッチされた曲線により表現されていたが、同様に、図一4ではせん断ひずみの作用に伴い、体積ひずみが増加する（左右対称のため、カクテルグラス状に見える）曲線により表



図一4 カクテルグラスモデルの概要^{2),3)}

報 告

現されている。つまり、カクテルグラスモデルでは体積ひずみの状態が ε_{d}^0 と ε_{d}^0 ，すなわち，現時点で作用しているせん断ひずみに応じて体積膨張する成分（せん断による仕事をしない成分として算定）と有効応力の減少を生じさせる負のダイレイタンスーとして体積収縮する成分（累積塑性せん断ひずみに比例するとして算定）の重ね合わせで表現される。口絵写真—1 (<http://urx.nu/bmG4>) は，ダイレイタンスー特性の誘導異方性を図示したものである。定式化は，紙面の制約により割愛する。参考文献 2) 及び 3) を参照されたい。なお，カクテルグラスモデルに間隙水の移流を考慮した解析により，典型的な液状化後の排水沈下を良好にシミュレートすることが確認されている⁹⁾。

3. 入力パラメータの設定

FEM などの数値解析の信頼性（精度）は，解析プログラムの構成則や性能だけではなく，担当する解析技術者にも依存すると考えられている¹⁰⁾。これは，解析結果が，解析対象のモデル化（メッシュ作成や境界条件の設定）のほか，構成則に inputs するパラメータの精度にも依存するからだと思われる。以下では，FLIP の入力パラメータの設定に関する検討事例をいくつか紹介する。

3.1 要素シミュレーション

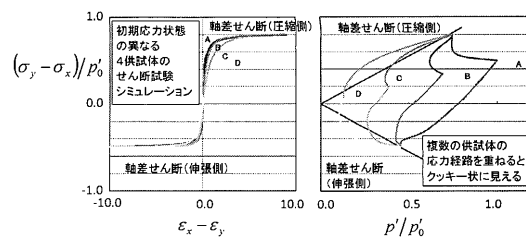
FLIP のパラメータは，密度・間隙率を除くと，動的変形特性として双曲線型ばねの性質を定めるパラメータと，液状化特性としてダイレイタンスーモデルの性質を定めるパラメータに分類できる。このうち，動的変形特性のパラメータは，せん断強度（内部摩擦角 ϕ' ）やせん断剛性（初期せん断剛性 G_0 ）であり，サンプリング試料による要素試験や原位置の PS 検層により定めることができる。なお，せん断剛性は拘束圧に依存するため，せん断剛性と同時に対応する基準拘束圧を入力し，拘束圧依存性をプログラム内で考慮している。

液状化特性のパラメータは，液状化試験結果を再現できるように設定する。このとき，1 要素の FEM モデルを作成し，圧密後にせん断を加えて，要素挙動をシミュレーションし，液状化試験結果と比較する。このプロセスは，パラメータを試行錯誤的に変化させながら，十分な適合度が得られるまで繰り返されることとなる。

実務においても要素シミュレーションを実施することになるが，どの程度まで試験結果を再現できるようにパラメータを設定するべきかは難しい。解析が必要とする精度のレベルにも依存する。FLIP では，ある地点の液状化強度を複数の技術者で要素シミュレーションした結果のばらつきと，その解析結果のばらつきを検討した事例があるので参考にされたい¹¹⁾。

3.2 簡易設定パラメータ

プロジェクトの初期段階等で液状化試験結果が得られていない場合においても， N 値等の基礎情報から地震時の変形量のオーダー等を把握したい場合がある。こういった場合のため， N 値（と対応する拘束圧）及び細粒分含有率から簡易的にパラメータを設定する方法が提



図—5 粘土の非排水単調せん断の解析結果（クッキーモデル）¹⁴⁾

案されている¹²⁾。この簡易設定パラメータは，上述の要素シミュレーションにおける初期値としても使えるほか，設定したパラメータの値の妥当性等の検討にも役立つ。なお，FLIP のマルチスプリングモデルでは，構成則に改良が加えられてきたため，構成則の改良に応じ，これまでに 3 種の簡易設定パラメータが取りまとめられてきた¹³⁾。

3.3 各種地盤材料のモデル化とパラメータ設定

実務設計における解析では，液状化する地盤のほかにも種々の地盤材料の要素を解析する必要がある。具体的には，粘土地盤，基礎捨石，SCP やグラベルドレンによる改良地盤などである。

FLIP では，粘土地盤についてはダイレイタンスーを考慮しない条件で多重せん断ばねモデルを援用することがこれまででは一般的であった。現在，図—5 に示すように粘土に対応した構成則（クッキーモデル）の開発¹⁴⁾に取り組んでおり，将来的にはこちらに移行できると考えている。

基礎捨石や改良地盤のモデル化については，既往の試験結果・被災及び無被災事例の再現解析を通じて，マルチスプリングモデルでの適切なパラメータ設定法が提案されている¹³⁾。

4. 地盤と構造物の相互作用のモデル化

実務設計における解析では，地盤のほかにも杭や矢板といった構造物を同時にモデル化し，地盤と構造物の相互作用を検討する必要がある。FLIP では，構造物の特性に応じた種々の要素を組み込み，地盤と構造物の相互作用を考慮可能にしてきた。

4.1 杭と地盤の相互作用

地盤と構造物の相互作用の中でも，杭間の地盤のすりぬけが発生する杭のモデル化は，矢板壁等のモデル化に比べて難易度が高い。FLIP では，杭をはり要素（必要に応じて非線形はり要素）でモデル化し，地盤要素との間を特殊な「杭—地盤相互作用ばね要素」¹⁵⁾で結合することで，杭間の地盤のすりぬけも考慮した相互作用のモデル化を行っている（図—6）。このばね要素の物性は周囲の地盤の応力状態に依存しており，地盤液状化時のばね剛性の低下を自然に表現できる¹⁵⁾。

杭軸方向の挙動については，先端支持力を考慮するばね要素と，周面摩擦を考慮するジョイント要素によりモデル化する。そして，これらのばね要素の物性については，三次元の FLIP 解析により種々の実験結果を再現し

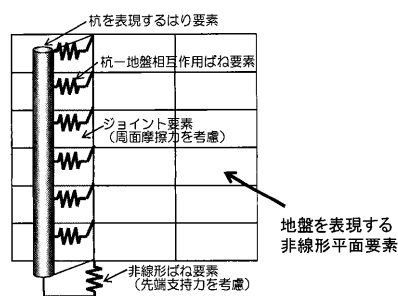


図-6 杭と地盤の相互作用のモデル化

たのち、実務向けに FLIP の二次元解析での設定方法を提案している¹⁶⁾。このモデル化により、例えば、液状化地盤中の杭の引き抜き挙動は地盤の過剰間隙水圧比に依存するが、FLIP ではこれを良好に再現できている¹⁷⁾。

4.2 地盤と構造物の非線形性の考慮 (大変形解析)

地盤の材料非線形性は、構成則の説明で示した通りである。構造物の部材非線形性は、非線形はり要素により考慮できる。特に、曲げの方向に依存して鉄筋の配置が非対称になる場合も考慮できる非対称の修正武田モデル¹⁸⁾も使用可能である。また、地震前の長期の地盤変形に起因して生じた鋼材の応力状態を踏まえた解析が可能のように、鋼材の強制変位解析機能も導入された。

液状化等に伴い変形量が大きくなると、幾何学的非線形の影響が無視できなくなる。この問題に関して、大変形理論の定式化 (Total Lagrangian : TL 法及び Updated Lagrangian : UL 法) で計算が可能な FLIP TULIP が開発されており¹⁹⁾、微小変形理論の解析結果との比較検討がすすめられている。

5. 適用性の検証事例

実際のプログラムの適用性は、被災事例・無被災事例の再現解析を通じた検証が重要である。例えば口絵写真-2 は、東日本大震災における河川堤防の被災事例の再現解析の例であり、間隙水圧の消散時における余震の影響を評価できている²⁰⁾。その他、種々の構造物の解析事例は、例えば FLIP コンソーシアムの HP²¹⁾を参照されたい。

6. おわりに

本稿は、構成則も含めて、FLIP の実務的な解析の現在の状況を、実務技術者向けに大胆に簡略化して説明することを目指した。紙面の制約も大きく、説明が不十分なところや、厳密でない表記もあるかもしれないが、少しでも実務技術者間の交流の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Report of the Port and Harbour Res. Inst. Vol. 29, No. 4, 1990.
- 2) Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, Ueda K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35, No. 3. pp. 360-

392, 2011.

- 3) Iai, S. and Ueda, K.: Energy-less strain in granular materials—micromechanical background and modeling, Soils and Foundations (submitted).
- 4) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behaviour under principal stress axes rotation, Proc. 5th International conference on numerical method in geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 523-530, 1985.
- 5) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol. 33, No. 1, pp. 192-199, 1993.
- 6) Towhata, I. and Ishihara, K.: Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 3, pp. 73-84, 1985.
- 7) 小堤 治ほか：砂質土の定常状態を考慮するために行った過剰間隙水圧モデルにおける応力経路の修正，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1797~1798, 2008.
- 8) 小堤 治ほか：変相線を超えた応力空間における塑性せん断仕事の負のダイレタンシーへの寄与について，第46回地盤工学シンポジウム平成13年度論文集，pp. 83~88, 2001.
- 9) Tamari Y., Ozutsumi O., Iai S., Yokoyama N.: A numerical study on post liquefaction soil behavior by dynamic effective stress analysis, Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Kokusho, Tsukamoto & Yoshimine (eds), Taylor & Francis Group, London, 2009.
- 10) 一井康二：FEM の設計での利用と方向性，土と基礎，Vol. 53, No. 8, pp. 10~12, 2005.
- 11) 三上武子ほか：パラメータ設定が液状化解析結果に及ぼす影響，地盤と建設，Vol. 28, No. 1, pp. 123~128, 2010
- 12) 森田年一ほか：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタ簡易設定法，港湾技研資料，No. 869, 1997.
- 13) 舩沿岸技術研究センター：液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務～FLIP 研究会14年間の検討成果のまとめ～ (事例編)，2011，入手先 <<http://www.flip.or.jp/history.html>> (参照2015.5.5)
- 14) 井合 進：ひずみ空間多重せん断モデルによる粘土地盤の圧密解析，京都大学防災研究所年報，第55号 B, pp. 183~194, 2012.
- 15) 小堤 治ほか：2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化，第38回地盤工学研究発表会，pp. 1899~1900, 2003.
- 16) 兵頭順一ほか：二次元有効応力解析における杭の先端支持力のモデル化手法，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 71, No. 4 (地震工学論文集第34巻)，2015 (掲載決定)
- 17) 兵頭順一ほか：二次元有効応力解析における杭の周面摩擦力のモデル化に関する検討，第33回地震工学研究発表会，2-442, 2013.
- 18) 武田寿一：鉄筋コンクリート建物の動的計算，コンクリートジャーナル，Vol. 12, No. 8, 1974.
- 19) Iai, S., Ueda, K., Tobita, T. and Ozutsumi, O.: Finite Strain Formulation of a Strain Space Multiple Mechanism Model for Granular Materials, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37, No. 9, pp. 1189-1212, 2013.
- 20) 森島直樹ほか：2011年東日本大震災において地震動で被災した河川堤防の事例解析，土木学会第33回地震工学研究発表会，2-415, 2013.
- 21) (一社)FLIP コンソーシアム：適用事例の紹介，入手先 <<http://www.flip.or.jp/examples.html>> (参照2015.5.5) (原稿受理 2015.6.26)