

## 大規模 3 次元地震応答解析に適した多重せん断ばねモデルの再構築に関する基礎的研究

大成建設(株) 正会員○堀田 渉 正会員 鈴木 俊一  
 東京大学 正会員 堀 宗朗

## 1. はじめに

砂質土の繰り返し載荷時の挙動をモデル化するため、Towhata ら<sup>1)</sup>は、平面ひずみ状態における非排水条件下のせん断応力-せん断ひずみ関係について、多重せん断ばねモデル（以下、マルチスプリングモデル）を提案した。当該モデルはせん断応力-せん断ひずみ空間上に定義された固定の円と、その円内にある可動点から構成される。可動点は無数の非線形ばねにより、固定された円と結ばれている。これらのばねは、種々の方向を向く仮想単純せん断機構に対応しており、各ばねの力-変位関係は双曲線タイプの荷重-変位関係に従う。可動点の円の中心からの変位はせん断ひずみを表し、可動点に作用する各ばねの合力はせん断応力を表す。さらに、2次元解析でのマルチスプリングモデル構成式が、xyz 直交座標系で規定された3次元空間においてz軸に垂直な2次元平面(x-y平面)上で成立するものと考え、これをz軸まわりの仮想平面ひずみ状態でのマルチスプリングモデルと設定し、座標系を回転させ、任意の仮想平面ひずみ状態(サブプレーン)でのマルチスプリングモデルを重ね合わせることで3次元に拡張した<sup>2)3)</sup>。

3次元マルチスプリングモデルは、3次元空間上に張り巡らした多数のばねに対してひずみ成分の反転の履歴を保持する必要がある。例えば、1ガウス点に25のサブプレーンを設定し、1サブプレーンの1/2円あたりに12本のばねを設置すると、1ガウス点あたり300の履歴を保持することになる。そのため、大規模3次元モデルを対象とした地震応答解析にマルチスプリングモデルを適用する場合、膨大な消費メモリ量が必要となり、ハードウェアへの負担が非現実的なものとなる。そこで、本論文では、上記課題を解決したマルチスプリングモデルを構築し、要素シミュレーションによりその適用性を検討する。

## 2. 構成則の再構築

マルチスプリングモデル（以下、通常マルチスプリングモデル）により求まる、ある1方向のばね力ベクトル  $T$  は以下のように表される。なお、紙面の都合上ここではダイレイタンスの影響等を見捨てた全応力解析の記載とする。

$$T = \sum_k T^{(k)} t^{(k)} = \sum_k f(\Gamma \cdot t^{(k)}) t^{(k)} \quad (1)$$

$T$  は1サブプレーンのうちの1本のばね力であり、 $t$  と式(3)に示す  $n$  は1サブプレーン上のせん断方向を表すベクトルである。また、 $k$  はサブプレーンに依存しない3次元空間におけるある方向のばねを表している。 $f$  はここでは双曲線モデルを表す。 $\Gamma$  はばね変位ベクトルであり、下式により求まる。

$$\Gamma = \varepsilon \nu \quad (2)$$

$\varepsilon$  は1ガウス点の偏差ひずみテンソルである。 $\nu$  はばねの法線方向を表すベクトルであり、下式の関係がある。

$$t = \nu \times n \quad (3)$$

$T$  を3次元空間において集積することにより応力テンソルを求めるのが通常マルチスプリングモデルである。ここで、式(1)より求まる  $T$  は、 $t$  方向のばね力を集積していることが分かる。これは、通常マルチスプリングモデルは3次元空間におけるある1方向のばね力の算定に対して、過度にばねを設定している可能性を示唆する。

一方、以降に示す再構築したマルチスプリングモデル（以下、改良マルチスプリングモデル）では、ばねは全て異なる方向成分を持つ。改良マルチスプリングモデルにより求まるある1方向のばね力ベクトル  $T$  は以下のように表される。

キーワード 多重せん断ばねモデル, 大規模3次元モデル, 高性能計算

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 原子力本部 TEL 03-5381-5196

$$\mathbf{T} = f(\|\mathbf{\Gamma}\|) \frac{\mathbf{\Gamma}}{\|\mathbf{\Gamma}\|} \tag{4}$$

改良マルチスプリングモデルの基本的な考え方は、通常マルチスプリングモデルに必要な  $J$  個のサブプレーンを、 $J$  個の 3 次元空間に不変のせん断ばねのベクトルとして考えるというものである。この場合、せん断 2 成分（軸差せん断および単純せん断）を持つばね変位ベクトル  $\mathbf{\Gamma}$  の履歴（反転の履歴含む）を保持することにより、ガウス点の応力テンソルおよび剛性テンソルを算定するためメモリの大幅な節約が可能となる。

まず、ばね変位ベクトル  $\mathbf{\Gamma}$  の内積からばねの反転を下式により求める。

$$[m-1]\mathbf{\Gamma} \cdot [m]\mathbf{\Gamma} < 0 \tag{5}$$

ここで、左上添え字は解析ステップを表す。この場合、 $m$  が反転のステップである。次に、式(6)より各ばねの正規化した変位  $x$  を求める。ここで、 $\gamma_v$  は仮想単純せん断機構における規準ひずみである。また、反転時の変位  $x_l$ ,  $x_r$  は、反転したステップのばね変位ベクトルから式(7)のように求まる。

$$x = \mathbf{n}^T \cdot \mathbf{\Gamma} / \gamma_v \tag{6}$$

$$x_{r,l} = \mathbf{n}^T \cdot [m]\mathbf{\Gamma} / \gamma_v \tag{7}$$

以降は、通常マルチスプリングモデルと同様に、各ばねに働く全てのばね力を算定し、各ばねのせん断剛性を決定する。通常マルチスプリングモデルとの違いは、ばねの履歴を  $I \times J$  個のばね毎に保持するのではなく、 $J$  個のばねの履歴を保持する点である ( $I$  は 1 サブプレーン上のばね本数)。これにより、改良マルチスプリングモデルは通常マルチスプリングモデルの  $1/I$  のばね変位の反転の保持に使われるメモリ量で計算が可能となる。

### 3. 検証解析

非排水繰返し単純せん断試験の試験結果に基づく 1 要素を対象とした要素シミュレーションを行った。本検討に用いた入力物性値は等価 N 値 10 の砂を対象とし、細粒分を含まないものとして、森田ら<sup>4)</sup>の簡易設定法により決定した。荷重条件は 30kPa を繰返し単純せん断の条件で载荷した。通常マルチスプリングモデルの 1 サブプレーンあたりのばねの本数は 1/2 円あたり 12 本とし、サブプレーンのセット数は 25 面とした。一方、改良マルチスプリングモデルのばね本数は 25 本とし、方向については通常マルチスプリングモデルのサブプレーンの法線方向とした。この場合、改良マルチスプリングモデルのばね変位の反転の保持に使われる消費メモリ量は通常マルチスプリングモデルの 1/12 ということになる。解析結果を図-2 および図-3 に示す。改良マルチスプリングモデルは通常マルチスプリングモデルと同程度の解析結果が得られていることが分かる。

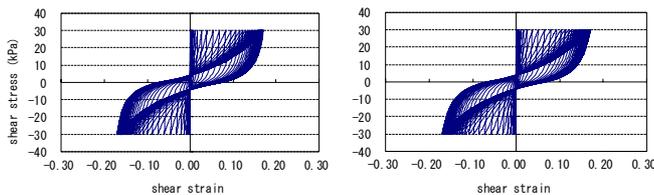


図-2 せん断応力-せん断ひずみ (左：通常，右：改良)

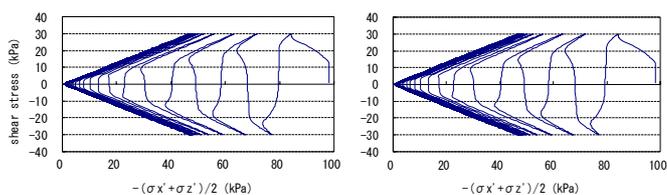


図-3 有効応力経路図 (左：通常，右：改良)

### 4. まとめ

本論文では、砂地盤を対象とした大規模 3 次元モデルによる地震応答解析を可能とするために、消費メモリ量を節約したマルチスプリングモデルの再構築を行い、要素シミュレーションによりその挙動を確認した。今後は、高性能計算を利用した大規模 3 次元地盤モデルによる地震応答解析を実施し、消費メモリ量の計測等を実施する。

#### 参考文献

- 1) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.
- 2) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils & Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 3) Iai, S. and Ozutsumi, O.: Yield and cyclic behavior of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29, pp.417-442, 2005.
- 4) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 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の簡易設定法, 港湾技研資料, No.869, 1997.