

Ⅲ－33 土 - 水連成二相系ハイブリッドオンライン実験システムの開発

東北大学大学院工学研究科 学生会員

○大村洋史 坂本克洋

同 上

正 会 員 風間基樹 渦岡良介 仙頭紀明

1. はじめに

これまで、飽和土の地震時の動力学特性は非排水条件下で繰返しせん断履歴を土要素に与えることで求められてきた。しかし、非排水という仮定の妥当性は本格的に議論されていない。また、土要素の繰返しせん断特性は排水条件により異なることは知られているが、実際の地盤の排水条件は境界条件によって決まるため、要素単体の排水条件を規定した要素試験の解釈は困難である。そこで、本研究では地震中および地震後の間隙水の移動に着目し、間隙水の移動を制御したハイブリッドオンライン実験手法を1次元地震応答解析に応用した実験システムを構築した。

2. 本システムの理論

2.1 支配方程式

本システムの支配方程式は水平方向の運動方程式と連続式とした。それぞれ、

$$\text{水平方向の運動方程式: } \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0$$

$$\text{連続式: } \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p_e}{\gamma_w} \right) \right)$$

と表すことができる。ただし、流速に関してはダルシー則を仮定する。（ τ :せん断応力, u :水平変位, ρ :要素の密度, ε_v :体積ひずみ, k :透水係数, γ_w :間隙水の単位体積重量, p_e :過剰間隙水圧）

2.2 構成関係

場の問題を解くためには、支配方程式の他に構成関係が必要となり、数多くの数値モデルが提案されている。その多くは数値解析上安定したモデルとするために、物理学では表現できない工夫（例えば、ゼロ割が発生しないような工夫）がされており、また、液状化といった材料強非線形性を示す時の材料物性の同定についても依然として研究の余地が残されている。そこで、本システムでは力学特性を表現することが困難な層は要素試験から直接求めることで、モデル化による影響を取り除いた。

2.3 空間領域への離散化

水平成層地盤を集中質点法により空間領域に離散化し

た。この際、地盤の系として生じる減衰特性を支配方程式中に考慮した。また、間隙水圧の自由度は要素中央に持たせた。境界条件は、上部境界は上載圧が大気圧・間隙水圧がゼロの応力境界、自由排水境界とし、下部境界は変位固定境界、非排水境界とした。

2.4 数値積分法

本システムはハイブリッド実験であり、構成関係には数値モデルと実際の土の供試体を用いている。陰解法を用いた数値積分法を用いると数値モデルでは修正子を用いる収束計算を行うが、実際の供試体では収束計算が履歴として反映されるなどの問題が生じる。そこで、本システムでは陽解法を用いた。

3. 本システムの構成

図1に示すように、供試体にせん断ひずみ制御モーターおよび流量（体積ひずみ）制御モーターによって、せん断・体積ひずみ履歴を与える。これらのモーター制御、各センサーからのデータの取得、数値解析など全てPCによって処理する。

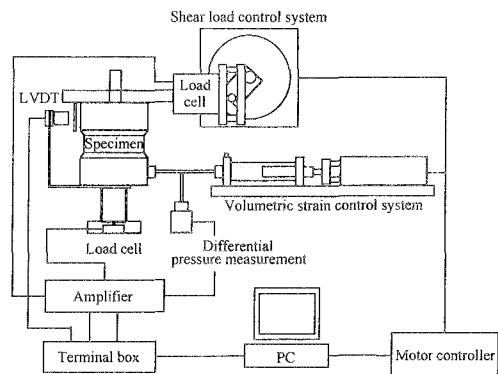


図1 本システムの構成概要図

4. 本システムのアルゴリズム

4.1 初期状態作成

入力地震動により空間領域に離散化した地盤モデルを加振する前の準備段階である。

i) 実地盤・仮想地盤モデルなどの解析対象地盤に応じて、数値モデル層と要素試験層の選定などを行う。

- ii) 入力データファイルを作成する。
- iii) 入力データファイルを PC に取りこみ，支配方程式において必要となる各マトリックスを作成する。
- iv) 要素試験層はアンプ調整や試験条件に適合する供試体を作成する。数値モデル層はパラメータを入力する。
- v) 入力地震動の選定と加速度波形を入力する。

4.2 初期せん断応力の载荷 (図 2)

排水条件下で初期せん断応力を载荷する。要素試験層は供試体に初期せん断応力を载荷し，初期せん断ひずみを取得する。数値モデル層は構成モデルから初期せん断・初期体積ひずみを取得する。

4.3 加振中 (図 3)

排水条件

- i) 運動方程式・連続式から，せん断・体積ひずみを取得する。
 - ii) 要素試験層はせん断・流量制御モーターにより，供試体にせん断・体積ひずみ履歴を与え，せん断応力・間隙水圧を取得する。数値モデル層は構成モデルにせん断・体積ひずみを入力し，せん断応力・間隙水圧を出力する。
- 非排水条件

- i) 運動方程式から，せん断ひずみを取得する。
- ii) 要素試験層はせん断制御モーターにより，供試体にせん断ひずみ履歴を与え，せん断応力・間隙水圧を取得する。数値モデル層は構成モデルにせん断ひずみを入力し，せん断応力・間隙水圧を出力する。
- iii) 加振終了まで i)，ii) を繰り返す。

4.4 自由振動 (図 3)

慣性力の影響により，外力が作用せずに振動している状態である。この過程は排水条件・非排水条件ともに 4.3 と同じ処理を行う。ただし，各ステップで消散過程への移行を慣性項によって判定する。

4.5 消散過程 (図 4)

消散過程の地盤の応答解析を行う。

- i) 連続式から，体積ひずみを取得する。
- ii) 要素試験層はせん断制御モーターにより初期せん断応力を維持し，流量制御モーターにより体積ひずみ履歴を与え，せん断ひずみ・間隙水圧を取得する。数値モデル層は構成モデルに初期せん断応力・体積ひずみを入力し，せん断ひずみ・間隙水圧を取得する。
- iii) 過剰間隙水圧の値により消散の収束判定を行う。収束したら終了し，そうでなければ i)，ii) を繰り返す。

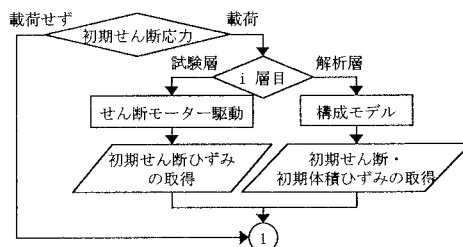


図 2 初期せん断载荷に関するアルゴリズム

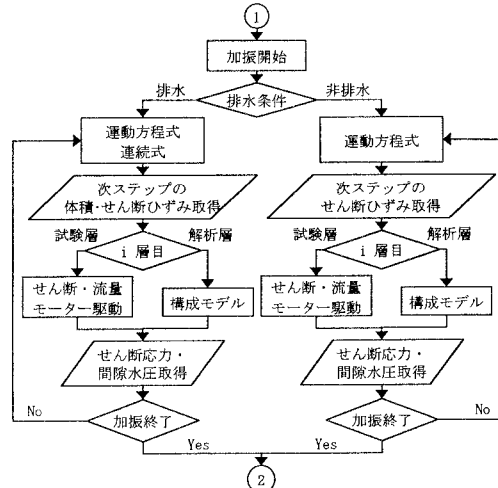


図 3 加振および自由振動時のアルゴリズム

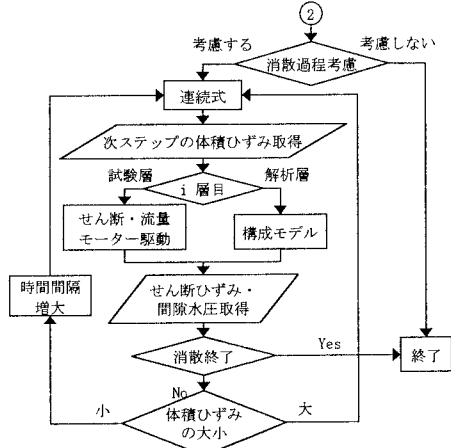


図 4 消散過程のアルゴリズム

5. おわりに

地盤応答解析分野に間隙水の移動を制御したハイブリッドオンライン実験手法を 1 次元地震応答解析に応用したシステムを構築した。このシステムによって，地震時の間隙水の移動による土要素の力学特性や消散過程における流動破壊，傾斜地盤の地震時挙動など，地盤の 1 次元地震応答を再現できる。