

異種解析システム融合による ハイブリッドシミュレーションシステムの構築

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○ 村上 学
京都大学防災研究所 正員 高橋 良和
京都大学大学院工学研究科 フェロー 家村 浩和

1. 概要

構造解析においては、各部材挙動の理解度に応じた適切なモデルの選択が重要である。そこで本研究では、全体系の解析において、弾塑性デバイスが商用 FEM ソフトウェアでモデル化可能となるよう異種解析システムを組み合わせたハイブリッドシミュレーションを行うためのシステムを構築し、構築システムを用いて、2 自由度系のハイブリッドシミュレーションを実施し、システムの妥当性、有効性について検討を行った。

2. 非線形動的構造解析ソフトウェアの特徴

OpenSees¹⁾ は構造、地盤システムのモデル化や地震応答解析を行うための、OpenFresco²⁾³⁾ は構造システムのハイブリッドシミュレーションを行うために、様々な実験、数値モデルなど同士を結びつけるためのオブジェクト指向ソフトウェアフレームワークである。商用 FEM ソフトウェア LS-DYNA は、陽解法 (中心差分法) により構造物の大変形、弾塑性、動的接触・挙動を時間履歴で解析するソフトウェアである。途中で一度解析を止め、一部解析条件を変更して、途中から解析を再開するリスタート機能も備えている。

OpenSees については、RC 構造に対してファイバーモデルによる動的解析が可能であるなど、全体構造を比較的精度良く解析することが可能である。LS-DYNA は三次元有限要素法であり、汎用性は高いが、解析モデルの最小寸法を反映して、1 ステップの時間増分が自動的に計算されるため、細かいモデルを含む全体構造の解析にはかなりの時間を要する。そこで、ミクロ的挙動まで解析が必要な部分のみを LS-DYNA、それ以外の部分を OpenSees でモデル化し、全体構造の解析が可能となるよう、OpenFresco を用いて、両者を組み合わせることとした。

3. ハイブリッドシミュレーションシステムの構築

図 1 は、OpenFresco による OpenSees と FEM ソフトウェアとの連携を表している。OpenSees において全体系の運動方程式を解き、弾塑性ダンパーについては、OpenFresco を通して、変位に応じた荷重を得ている。3 次元ソリッド要素に対して、その節点群に 1 方向強制変位による変位制御を行い、その変位に対する復元力を得ることを目的とし、OpenFresco の制御システムを表す ExperimentalControl クラス、実験システムの構成や配置を表す ExperimentalSetup クラスに、それぞれ ECSimLSDyna クラス、ESSolidTest クラスを実装した。実装の際には LS-DYNA のリスタート機能を用いた。すなわち、解析終了時刻及び変位-時間曲線を、1 ステップごとに変更し、リスタートを行うことにより、1 ステップごとの解析を行うことができ、これにより、OpenSees と LS-DYNA を組み合わせたハイブリッドシミュレーションが可能となる。

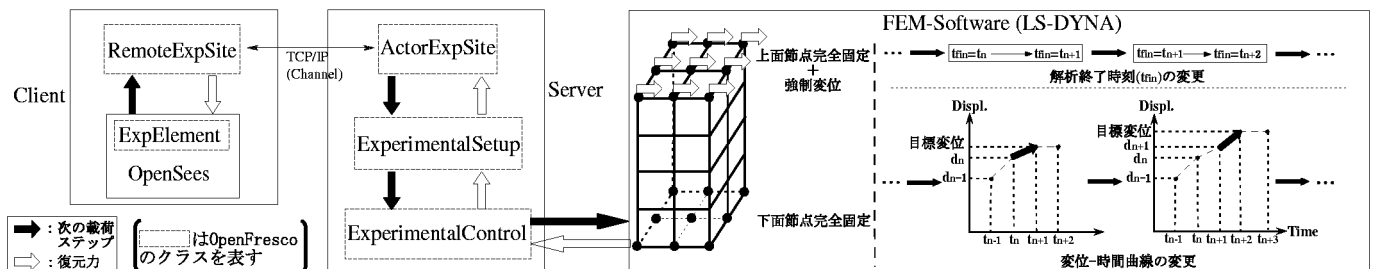


図-1 OpenSees と FEM ソフトウェアの連携

リスタート機能を採用する最大の利点は、LS-DYNA のプログラムに何ら変更を加える必要がないことである。また、リスタート機能が用意されている ABAQUS などの他の商用 FEM ソフトウェアについても本研究と同様の実装を行えば、他の商用 FEM ソフトウェアとの連成シミュレーションも可能であり、本研究で行った OpenFresco の実装は汎用性の高いものであると言える。

Key Words: 異種解析システム融合、ハイブリッドシミュレーションシステム

〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 TEL(075)383-3246 FAX(075)383-3243

4. 2自由度系のハイブリッドシミュレーション

構築したシステムの妥当性、有効性を検証するため、2自由度系のハイブリッドシミュレーションを行った。対象構造物は、天然ゴム系積層ゴム支承及び鋼製U型ダンパーを有する橋脚とする。橋脚部、天然積層ゴム支承については線形バネでモデル化を行った。U型ダンパーは、節点数405、要素数176でメッシュ分割を行い、要素は完全積分要素で、材料の構成則はバイリニア型としてモデル化を行った。また拘束条件は、上部、下部をそれぞれ9点完全固定とし、上部に強制変位を加えた。対象構造物及び鋼製U型ダンパーは図2左側に示している。また、妥当性を検討するため、ダンパーを用いない場合、得られたダンパーの履歴曲線をバイリニア型で近似し、バネモデルでモデル化した場合の2通りについて、OpenSeesのみによる解析も行った。入力地震動はエルセントロ波を用い、橋軸方向に10秒間の地震波を0.01秒時間刻みで入力し、ハイブリッドシミュレーションを行った。

図2右側、図3にハイブリッドシミュレーションの結果を示す。図2右側の桁の相対変位時刻歴を見ると、ダンパーがない場合と比較するとダンパーがある場合は、応答が低減されていることがわかる。また、図2右側の桁の相対変位時刻歴及び図3左側のダンパーの履歴曲線について、ハイブリッドシミュレーションの場合、OpenSeesのみの場合の両者を比較すると、ほぼ同じ応答が得られており、ハイブリッドシミュレーションの解は妥当なものであると考えられる。次に、LS-DYNAとOpenSeesを組み合わせたハイブリッドシミュレーションの有効性について検討する。図3には、ダンパーの最大変形時の相当塑性ひずみコンター図も示している。このように、ひずみ等のミクロな状態の把握やマクロ的挙動とミクロ的挙動の相互の影響を考慮できることがこのシミュレーションの利点である。

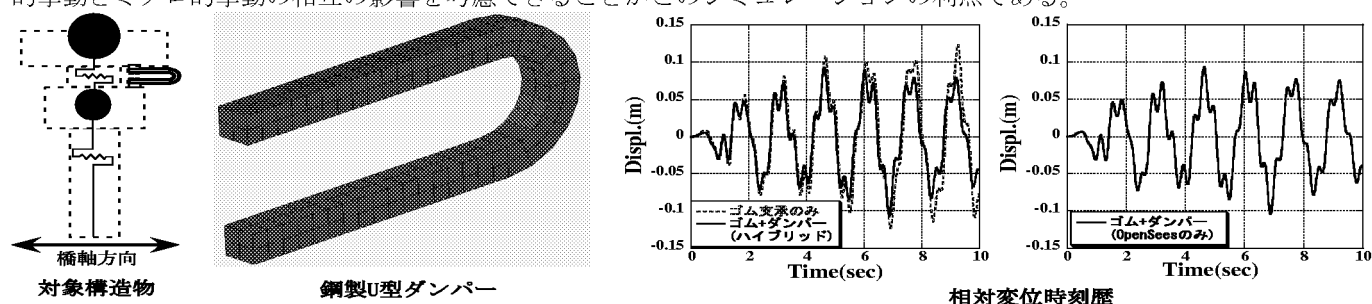


図-2 対象構造物、U型ダンパー、相対変位時刻歴

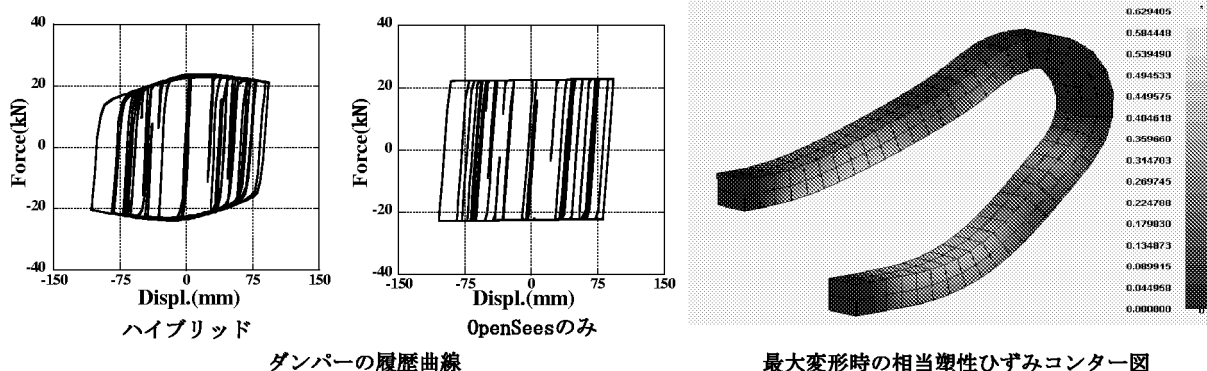


図-3 ダンパーの履歴曲線、最大変形時の相当塑性ひずみコンター図

5. 結論

1. OpenSeesとLS-DYNAとの連成シミュレーションが可能となるようOpenFrescoを実装することにより、両者を組み合わせたハイブリッドシミュレーションシステムを構築した。実装に当たってはLS-DYNAのリスタート機能を応用した。
2. 構築システムを用いて、2自由度系のハイブリッドシミュレーションを行い、システムの妥当性や有効性を検討した。特に有効性については、弾塑性デバイスに数値バネモデルを用いた場合と比較し、デバイスのひずみ等のミクロな状態の把握やマクロ的挙動とミクロ的挙動の相互の影響を考慮できることなどの利点があることを示した。

参考文献

- 1) OpenSees page. <http://opensees.berkeley.edu/>.
- 2) Takahashi Y, Fenves GL. Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2006; 35:267-291.
- 3) OpenFresco page. <https://neeforge.nees.org/projects/openfresco/>.