

第I部門 異種解析システム融合による鉄道高架橋のハイブリッドシミュレーション

京都大学工学研究科 学生員 ○ 村上 学
 京都大学防災研究所 正会員 高橋 良和
 京都大学工学研究科 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、大規模な高架橋システムに対してハイブリッドシミュレーションを行った。

2 非線形動的構造解析ソフトウェアの特徴

OpenSees^[1] 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、OpenFresco^{[2][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、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。

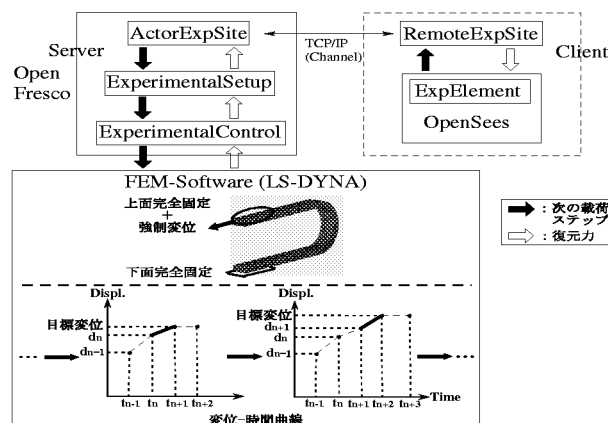


図1 OpenSeesとFEMソフトウェアの連携

4 高架橋システムのハイブリッドシミュレーション

4.1 対象構造物及び地震応答解析

対象構造物を図2に示す。左側部、右側部は、4径間のスラブ軌道用単純ばり式高架橋であり、中間橋脚は、ラーメン橋脚である。支承部は、元は剛結であったと仮定し、ここにゴム支承を導入した場合、ゴム支承と鋼製U型ダンパーを導入した場合の3通りの解析を行った。剛結、ゴム支承のみの場合はOpenSeesのみによる解析である。本研究では、対象構造物を3次元骨組モデルとしてモデル化を行い、上部梁や中梁と柱の接合部は剛体、柱及び中梁を3次元ファイバー要素としてモデル化を行った。支承部は、線形バネ要素としてモデル化を行った。鋼製U型ダンパー

はLS-DYNAにおいて、3次元ソリッド要素でモデル化した。図2に示すように、橋梁システムに対してU型ダンパーを6つ設置することとした。入力波形は、JMA 神戸のEW成分、NS成分を90%に振幅調整したものを、それぞれ橋軸方向、橋軸直角方向に10秒間入力した。

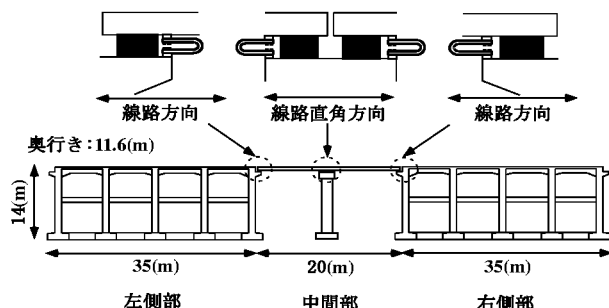


図2 対象構造物 (ゴム支承+ダンパー導入時)

4.2 解析結果及び考察

図3に、中間橋脚の線路方向のM- ϕ 関係を示す。剛結の場合に比べ、ゴム支承のみの場合の方が応答が低減していることがわかる。また、ゴム支承のみの場合と鋼製ダンパーを併用した場合を比較すると、大きな違いは見られないことがわかる。

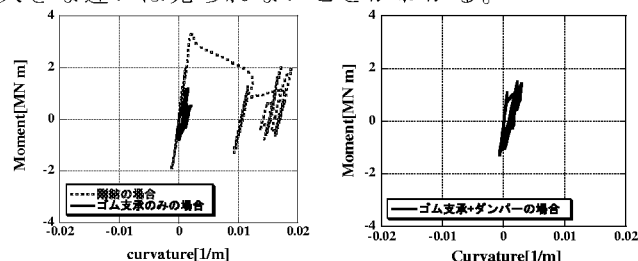


図3 中間橋脚のモーメント-曲率関係 (線路方向)

図4に、左側部正面及び中間部正面のダンパーの履歴曲線及び左側の桁掛違い部における桁の線路方向の相対変位時刻歴を示す。ダンパーの履歴がバイリニアに近い履歴となっていること及びダンパーにより相対変位が低減されていることがわかる。

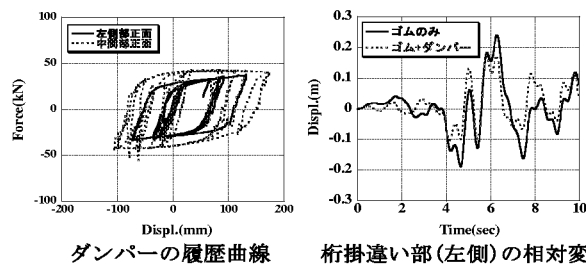


図4 ダンパーの履歴曲線と桁掛違い部の相対変位

図5に、桁の線路方向の絶対加速度時刻歴を示す。ダンパー設置により固有周期が短くなり、絶対加速度応答は本来上昇するが、ダンパーの履歴減衰によ

り、その上昇が抑えられていることがわかる。

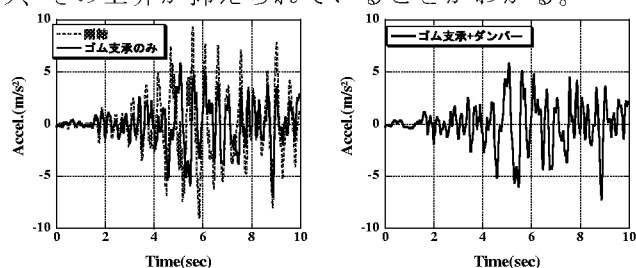


図5 桁掛違い部の絶対加速度

図6に、左側部正面のダンパーの最大変形時の相当塑性ひずみコンター図を示す。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。

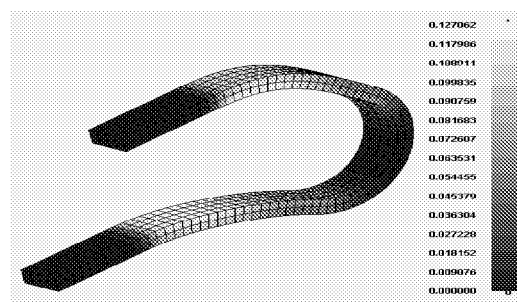


図6 最大変形時の相当塑性ひずみコンター図

また10秒の解析に約6時間10分要したが、このほとんどはLS-DYNAの計算時間であった。

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. 鉄道高架橋システムについて、鋼製ダンパーをLS-DYNA を用いた3次元ソリッド要素で、橋脚部をファイバー要素でモデル化するなど適切なモデル選択を行い、ハイブリッドシミュレーションを実施し、ゴム支承及び鋼製ダンパーの導入前後の応答の比較を行った。また構築システムが大規模な解析にも適用可能であることを示した。

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 system. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2006; 35:267-291.
- [3] OpenFresco page. <https://neesforge.nees.org/projects/openfresco/>.