

# 2014年度(第6回)免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

## OpenSees を用いた免震構造極限挙動解析システムの構築

菊地 優 (北海道大学)

山本雅史 (竹中工務店)

近藤明洋 (鹿島建設)

### 1. はじめに

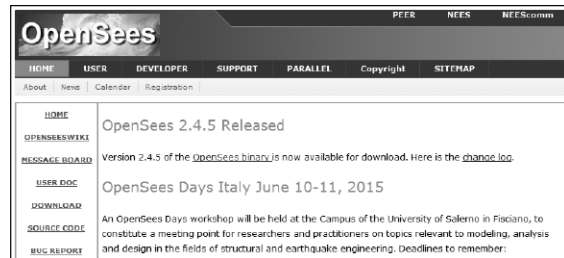
近い将来に発生が懸念される巨大地震への有効な備えである免震構造の一層の普及を図るには、免震構造に関わる研究者・技術者が一丸となりオールジャパン体制で臨む必要がある。免震構造で想定される様々な極限事象はいつの時代にも研究者の研究対象であり、日本国内に蓄積された解析技術は他国に比べて非常に高度化されている。一方で、それらは各研究者・技術者のもとに散在しており、統合する術がないのが現状である。本研究では、この課題を最も効率的に実現できる方法として、米国 UC Berkeley で開発・運用されている OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) に着目する。OpenSees はオープンソースの精神に則ることで、技術の共有が困難であった地震工学・構造解析分野において、その閉鎖性を打開するインテリジェンスとして期待されている。本研究は OpenSees をプラットフォームとして、免震構造物の極限挙動を予測する解析システムを構築するものである。

### 2. OpenSees の概要

#### 2.1 フレームワーク

OpenSees は米国の PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, USA) にて開発が始動したオープンソースによる有限要素解析フレームワークである。図 1 に示すウェブサイトを起点に、(a) プログラム実行ファイルの配布のほか、(b) 各種ドキュメントの整備、(c) ソースコードの閲覧、(d) 電子掲示板での情報交換など、オンラインでの開発体制が構築されている。

OpenSees のインターフェースには現在 Tcl/Tk が採用されているため、テキストベースにて動作する計算プログラムとなっている。数値計算プロ



(a) OpenSees Home



(b) OpenSees Wiki



(c) ソースコード



(d) 電子掲示板

図 1 OpenSees のウェブサイト 1)

ラム本体の開発には主として C++ が用いられている。図 2 に OpenSees に新たな計算モデルを導入する際の概要を示す。研究者は公開されているリポジトリからソースコードを入手して、開発した計算モデル等を追加することができる。さらに、追加したソースコードをリポジトリに公開することで、最新の技術を他の研究者と共有できる。このように、OpenSees の開発により多数の研究者が関わることで、解析システムが継続的に拡張される仕組みとなっている。

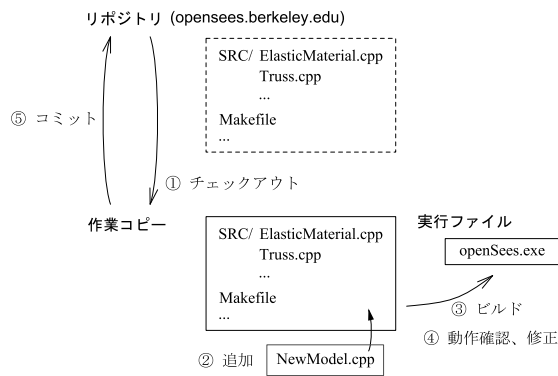


図2 解析システム拡張の流れ

これらは、それぞれ力学モデルおよび復元力モデルを定義するものであり、必要に応じて力学モデル側から復元力モデルを利用することができる。表1と表2にOpenSeesで現在利用可能なモデルを抜粋して示す。新たなモデルを導入する際には、これをElementおよびUniaxialMaterialのサブクラスとして記述することで、他の要素と組み合わせることで、計算結果の出力書式を柔軟に制御可能である。

## 2.2 計算プログラムの構成

図3にOpenSeesの構成を示す。計算プログラムの全体は、数値計算モデルで使用される節点や部材などを管理するDomainクラス、step-by-stepの数値積分を行うAnalysisクラス、計算結果を出力するRecorderクラスなどで構成されている。

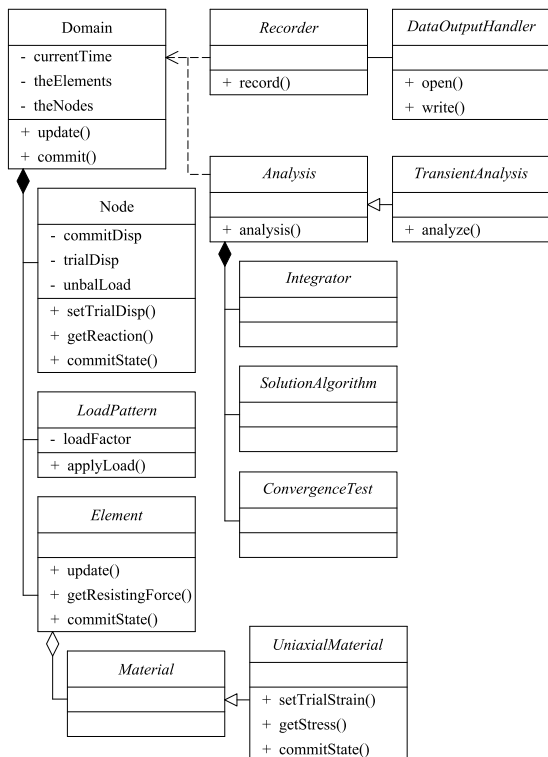


図3 解析システムのクラス図

図3に示すクラスのうち、免震構造の数値計算モデルを定義できるものとしては、ElementクラスおよびUniaxialMaterialクラスが挙げられる。

表1 力学モデル

(Elementのサブクラス、抜粋)

| 力学モデル  | クラス名  |
|--------|---|
| トラス部材  | Truss   |
| 柱梁部材   | ElasticBeam3d<br>ForceBeamColumn3d<br>DispBeamColumn3d  |
| ばね要素   | ZeroLength<br>CoupledZeroLength<br>TwoNodeLink<br>MultipleShearSpring   |
| すべり支承  | FlatSliderSimple3d<br>SingleFPSimple3d<br>TripleFrictionPendulum  |
| 積層ゴム支承 | ElastomericBearingPlasticity3d<br>ElastomericBearingBoucWen3d<br>KikuchiBearing <sup>2)</sup><br>YamamotoBiaxialHDR <sup>3)</sup> |

表2 復元力モデル

(UniaxialMaterialのサブクラス、抜粋)

| 復元力モデル | クラス名   |
|--------|--|
| 線形復元力  | ElasticMaterial  |
| 粘性減衰力  | ViscousMaterial  |
| 復元力組合せ | ParallelMaterial<br>SeriesMaterial<br>InitStrainMaterial<br>InitStressMaterial       |
| 折れ線型   | Steel01<br>MultiLinear<br>HystereticMaterial   |
| 曲線型    | RambergOsgoodSteel<br>KikuchiAikenHDR <sup>4)</sup><br>KikuchiAikenLRB <sup>5)</sup> |

## 3. 要素モデルの開発例

OpenSeesの開発例として、鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）に関わる要素モデル（熱伝導

解析モデル)の開発過程を以下に示す。

LRBは鉛プラグの塑性変形によって吸収した履歴吸収エネルギーを熱エネルギーに変換し、積層ゴム内部に蓄積する性質がある。この性質が鉛プラグの発熱、降伏応力低下を引き起こすことが報告されている<sup>6),7)</sup>。しかしながら、この現象を厳密に再現できるモデルは少なく、LRB履歴挙動を再現する要素モデルを開発することが必要である。

長時間地震動による応力低下現象を要素モデルに組み込むために、降伏応力 $\tau$ と鉛プラグ温度 $T$ の関係には(1)式を適用した<sup>8)</sup>。(1)式の関係を図示すると、図4のようになる。

$$\tau = \tau_0 \{1 - (T/T_L)^{\alpha_\tau}\}, \quad \alpha_\tau = 0.4 + 0.25 \cdot (T/T_L) \quad (1)$$

ここに、 $\tau_0 = 15.0 \text{ N/mm}^2$ 、 $T_L = 327.5 \text{ }^\circ\text{C}$ である。

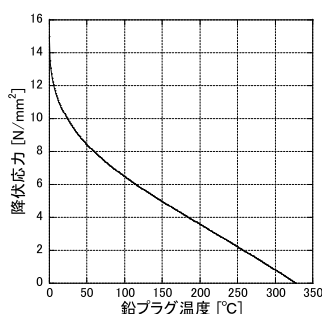


図4 鉛プラグの温度と降伏応力度の関係<sup>8)</sup>

解析の流れは図5のようになる。今回開発したモデルでは、(a)鉛プラグの温度からそのステップの降伏応力を計算、(b)その降伏応力を用いて運動方程式を解く、(c)変位増分と荷重増分から履歴吸収エネルギーを算出、(d)熱伝導方程式を用いて熱エネルギーから鉛プラグ温度を算出、の4つのプロセスを解析刻み1ステップごとに行う。(d)で用いる熱伝導方程式の一般式は(2)式の通りである。

$$\frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (2)$$

ここに、 $\rho$ は密度、 $c$ は比熱、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\theta$ は温度である。

(2)式をOpenSeesに既に導入されている力学モデルMultipleShearSpringに組み込み、さらに(1)式をせん断ひずみ400%まで再現可能な復元力モ

デルKikuchiAikenLRB<sup>9)</sup>に組み込む。この2つのモデルを同時に稼働させることにより、熱伝導と地震応答の連成解析が可能となる。

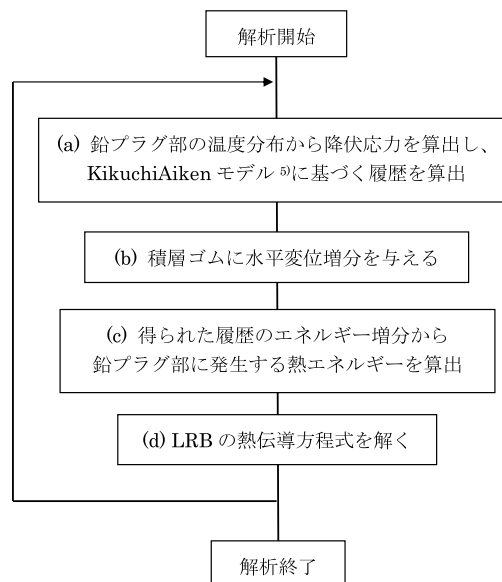


図5 熱伝導・地震応答連成解析のフロー<sup>8)</sup>

#### 4. 動的加振実験のシミュレーション解析

開発した要素モデルの妥当性を確認するために、動的加振実験<sup>7)</sup>との比較を行った。動的加振実験に用いたLRBの諸元は表3の通りである。また、LRBに与えた変位波形は名古屋三の丸想定波に対する免震建物の応答変位波形である。

表3 解析対象LRBの諸元<sup>7)</sup>

| ゴム材料 | 外径 (mm) | 鉛径 (mm) | ゴム層総厚 (mm) | S1   | S2  |
|------|---------|---------|------------|------|-----|
| G4   | 1000    | 200     | 203        | 28.6 | 4.9 |

図6と図7に発熱によるLRBの力学特性変化の考慮有無の結果を比較して示す。力学特性変化を考慮することにより、降伏応力が減少し履歴ループが細り実験結果に近くなっている。また、履歴吸収エネルギーについても、力学特性変化考慮の方が実験値に近づいている。図8に示す鉛プラグ温度の推移では、最大で120°C近くまで上昇している。以上により、長時間地震動に対するLRBの力学挙動を精度よく再現するには、発熱による力

学特性変化を考慮する必要があることがわかる。

同システムが広く普及することを期待する。

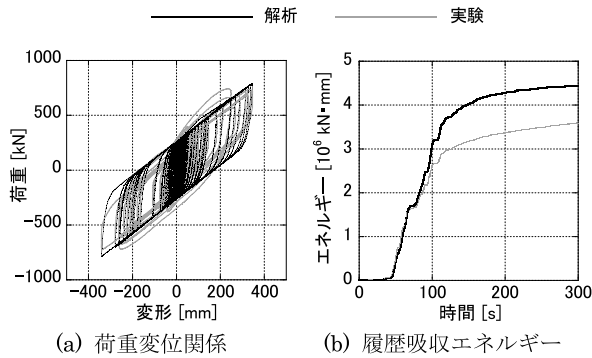


図6 発熱による力学特性変化非考慮の結果

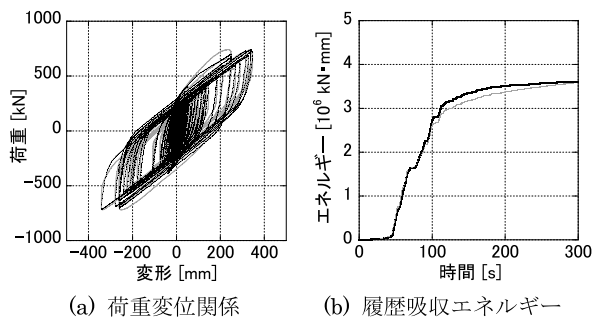


図7 発熱による力学特性変化考慮の結果

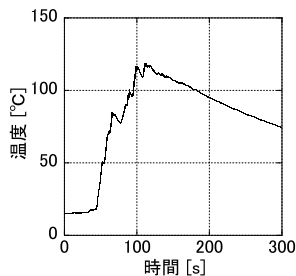


図8 鉛プラグ温度の推移

## 5. まとめ

本研究では、オープンソース解析システム OpenSees を用いて免震構造物の極限挙動を追跡するための解析システムを開発した。初めに OpenSees の構成・運用方法等の情報を提示し、続いて開発例として LRB の熱伝導・地震応答連成挙動モデルを OpenSees に実装する過程を示した。OpenSees は散在する高度な解析技術を統合できるプラットフォームとしての可能性を有している。免震構造協会のコミュニティを通して、多くの研究者・技術者が開発に参画することにより、今後、

## 謝辞

OpenSees の開発を進めるにあたり、米国 UC Berkeley の Frank McKenna 博士、Stephen Mahin 教授、James Kelly 名誉教授に多大の貴重な助言を頂いた。名古屋三の丸波は、国土交通省中部地方整備局、愛知県および名古屋市と関連する設計事務所からご提供頂いた。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Open System for Earthquake Engineering Simulation - Home Page, <http://opensees.berkeley.edu/>, 2015
- 2) Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura and Ian D. Aiken, 'Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads', EESD, Vol. 39, 1513-1531, 2010
- 3) Masashi Yamamoto, Shigeo Minewaki, Harumi Yoneda and Masahiko Higashino, 'Nonlinear behavior of high-damping rubber bearings under horizontal bidirectional loading: full-scale tests and analytical modeling', EESD, Vol. 41, 1845-1860, 2012
- 4) Masaru Kikuchi, Ian D. Aiken, 'An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings', EESD, Vol. 26, 215-231, 1997
- 5) M. Kikuchi, I. D. Aiken, A. Kasalanati, 'Simulation analysis for the ultimate behavior of full-scale lead-rubber seismic isolation bearings', 15WCEE, Lisbon, Portugal, 2012
- 6) 竹中康雄・ほか：積層ゴムの熱・力学連成挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第646号，pp.2245-2253，2009.12
- 7) 河内山修・ほか：長周期地震動を想定したLRB1000の内部温度特性確認実験，日本建築学会大会学術講演集(関東)，2006.9
- 8) 近藤明洋・ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その10)，日本建築学会大会学術講演集(中国)，2008.9