

ソリッド要素を用いた鋼構造 4 層骨組の高精度有限要素解析

High-precision finite element analysis of 4-story steel frame discretized by solid elements

○ 正 宮村倫司 (日大) 正 大崎 純 (京大) 小檜山雅之 (慶大)
恩田邦藏 (アライド) 正 磯部大吾郎 (筑波大) 正 秋葉 博 (アライド)
堀 宗朗 (東大) 梶原浩一 (防災科研) 井根達比古 (防災科研)

Tomoshi Miyamura (Nihon University, 1 Tamura-machi Koriyama 963-8642, Japan)

Makoto Ohsaki (Kyoto University) Masayuki Kohiyama (Keio University)

Kunizo Onda (Allied) Daigorou Isobe (University of Tsukuba) Hiroshi Akiba (Allied)

Muneo Hori (University of Tokyo) Koichi Kajiwara (NIED) Tatsuhiko Ine (NIED)

Key Words: Parallel Finite Element Analysis, Steel Frame, Seismic Response, Elastoplastic Analysis

1. はじめに

防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター (E-ディフェンス) で開発が進められている数値震動台 (E-Simulator)¹⁾³⁾ は、建築、土木構造物の解析に必要な構成則や破壊法則を組み込んだ汎用的な並列有限要素のソフトウェアとなる。本研究では、数値震動台開発の基盤となる ADVENTURECluster⁴⁾ により、E-ディフェンスで完全崩壊実験が行われた 4 層鋼構造骨組の高精度な有限要素解析を行う。

2. 鋼構造 4 層骨組

2.1 メッシュ 平成 19 年 9 月に E-ディフェンスで実施された 4 層鋼構造骨組完全崩壊実験⁵⁾ の結果を仮想震動実験により再現する。同時に実施されたブラインド解析コンテストのための公開データを用いて慶應義塾大学野口研究室で作成されたメッシュを基に、六面体ソリッド一次要素による有限要素モデルを作成する。要素数は 5,181,880、節点数は 7,523,295、自由度数は 22,569,885 である。H 形鋼のウェブ、フランジ等の板材の要素分割は板厚方向に 2 層とする。各層のスラブの形状は平板として、要素分割は板厚方向 2 層とする。フランジとスラブを接続するスタッドのモデル化は省略し、フランジ上部の節点とスラブの節点を共有節点として接続する。

2.2 柱脚のモデル化 柱脚については 3 種類のモデルを作成する。固定モデルではベースプレートと柱を一体としてメッシュを切り、ベースプレート下面を固定している。回転ばねモデルでは建築学会規準に一部準拠した弾性回転ばね (ばね定数: $4.886 \times 10^4 \text{ kNm}$) を用いる。地面に垂直な軸周りの回転ばねの係数は、他の軸のばねの係数の 10 倍とする。柱の下面とベースプレート上面の柱が取り付けられる部分には、多点拘束条件 (MPC) で表された剛体プレートを取り付け、それぞれの中心を回転ばねで接続する。最後に、詳細モデルでは、ソリッド要素でモデル化されたベースプレートと柱脚をトラス要素で表された 8 本のアンカーボルトで接続している。

2.3 非構造材のモデル化 非構造材として各層の外壁パネルを、上下層の梁を結ぶ弾塑性のせん断ばね要素でモデル化し、その構成則のパラメータを文献6)に基づき同定する。文献6)では、2, 3 層の Y 方向について、要素実験結果より換算して 1 層あたりの外壁および内壁による水平抵抗力を求めており、これを同定に用いる。従って、本研究の外壁モデルには、内壁の剛性も含まれている。構造物の減衰の要因の多くは、非

構造材の摩擦と履歴減衰であると予想される。従って、非構造材を精密にモデル化することで、レイリー減衰を入れることなく実験結果に近い応答が得られることが期待される。

2.4 構成則と密度 鋼材の構成則には非線形 (区分線形) 等方硬化則を用い、ブラインド解析で公開された単軸引張試験結果によって硬化係数を定める。スラブのコンクリートについては、バイリニアの移動硬化則とする。スラブ以外の各部材は全て鋼であり、密度は $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とする。一方、非構造材や防護装置の重量を含む積載荷重は、スラブ密度 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を積載荷重に相当する密度で割増すことで表現する。

2.5 解析モデル 三種類の柱脚モデルと非構造材の有無を組み合わせ、Fig. 1 に示す 3 種類のモデルを作成する。Case 1 は柱脚が固定モデルで非構造材はなし、Case 2a は柱脚が回転ばねモデルで非構造材はあり、Case 2b は柱脚が詳細モデルで非構造材はあり、となっている。

3. 解析結果

本稿では Case 1 および Case 2a の結果を示す。

3.1 固有値解析 固有値解析の計算には HP ProLiant BL465 2.6 GHz Dual Core クラスタ (使用コア数: 16 core) を用いた。4 次までの固有値、固有モードの計算には 5,471.6 秒かかった。各モデルの固有周期を Table 1 に示す。

3.2 自重載荷解析および地震応答解析の結果 自重載荷解析の後に、ブラインド解析で公開された JR 鷹取波 (0.6 倍) に対する実験における震動台上加速度の EW, NS, UD 成分を 3 方向に入力 (Case 1: 20 秒, Case 2a: 18 秒) して、時刻歴応答解析を行う。減衰はレイリー減衰とし、減衰定数は 1 次と 4 次 (X 方向の 1 次と 2 次) に対して 0.02 とする。解析には防災科学技術研究所の SGI Altix 4700 (CPU: Intel Itanium 1.66 GHz, 使用コア数: 1 node \times 256 core/node = 256 core) を用いる。

線形ソルバーの CG 法では「残差ノルム < 初期残差ノルムと 1.0×10^{-5} の積」、かつ、「解の修正量のノルム < その時点での解のノルムと 1.0×10^{-5} の積」のときに収束と判定する。Newton-Raphson 法では「不釣り合い力のノルム < 初期不釣り合い力のノルムと 2.5×10^{-4} の積」、かつ、「増分変位の修正量のノルム < その時点での増分変位のノルムと 1.0×10^{-5} の積」となったときに収束と判定する。ただし、各ベクトルのノルムは成分の絶対値の最大値とする。時間積分は Newmark β 法

を改良した手法である Hilber-Hughes-Taylor 法による。パラメータは $\alpha = 0.05$, $\beta = (1 - \alpha)^2 / 4 = 0.275625$ とする。自重載荷解析（静解析）の計算時間は 2,414 秒，地震応答解析の 1 ステップあたりの計算時間は平均 1,106 秒となった。

Fig. 2, 3 に 1 層の X（短辺）, Y（長辺）方向の層間変形角の時刻歴を, Fig. 4, 5 に層せん断力の時刻歴を示す。Case 1, 2a の解析結果と E-ディフェンスによる 4 層鋼構造骨組の実験結果⁵⁾を重ねてプロットしている。層せん断力は解析結果, 実験結果共に, 集中化した各層の質量と各層の重心における加速度の積を合計することにより求めている。Fig. 6, 7 に変形がほぼ最大となる時刻 6 秒における変形図を示す。色は相当応力分布を示す。

4. おわりに

数値震動台プロトタイプによる 4 層鋼構造骨組の高精度な有限要素解析結果を示した。

謝辞 本研究は独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター・数値震動台研究開発分科会における成果である。メッシュ作成を担当された湯山喜芳氏（アライド）をはじめとする関係各位に謝意を表す。4 層鋼構造骨組の完全崩壊実験のデータは、同研究所による「E-ディフェンスを活用した鋼構建造物実験研究」の実行部会（部会長：笠井和彦）における崩壊 WG（主査：吹田啓一郎）から提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 堀, 野口, 井根, 土木学会地震工学論文集, 2007
- 2) Ohsaki et al., Earthquake Eng. Struct. Dyn., 38, 2009, 635-654
- 3) 大崎他, 計算工学講演会論文集, 14, 2009, 829-832
- 4) (株)アライドエンジニアリング, <http://www.alde.co.jp/>
- 5) 吹田他, 建築学会近畿支部研究報告集, 48, 構造系, 2008, 437-440
- 6) 赤澤他, 建築学会近畿支部研究報告集, 48, 構造系, 2008, 449-452

Table 1 Natural periods (sec.)

Mode	1	2	3	4
Case 1	0.8389	0.8144	0.5700	0.2702
Case 2a	0.8303	0.8203	0.5555	0.2700

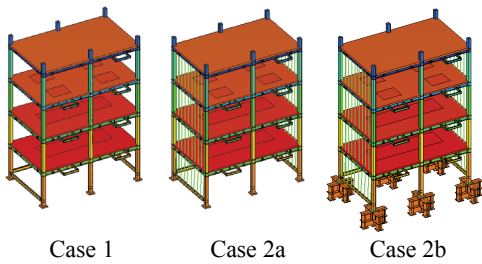


Fig. 1 Analysis models

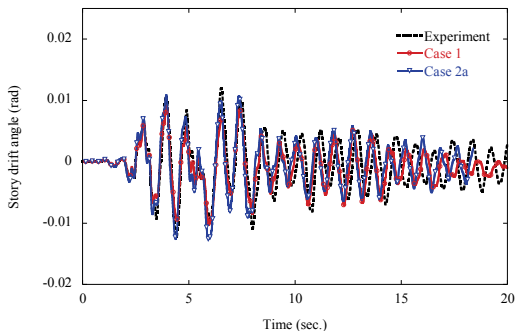


Fig. 2 Time histories of story drift angle of first story (X-direction)

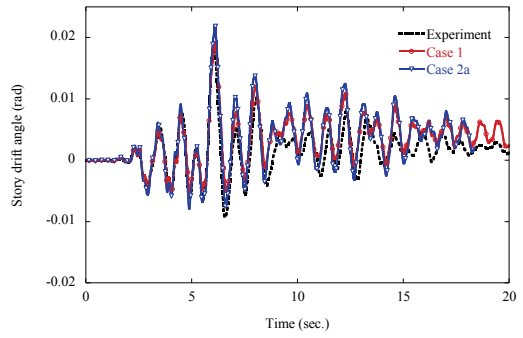


Fig. 3 Time histories of story drift angle of first story (Y-direction)

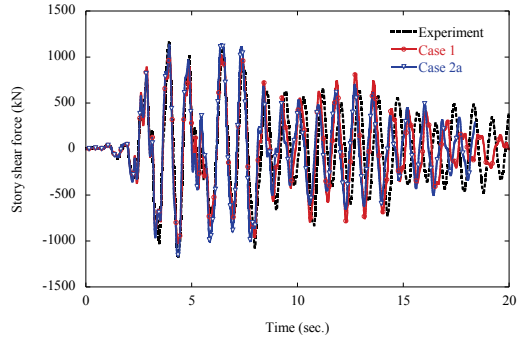


Fig. 4 Time histories of story shear force of first story (X-direction)

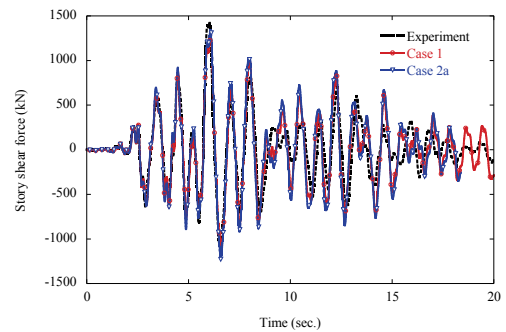


Fig. 5 Time histories of story shear force of first story (Y-direction)

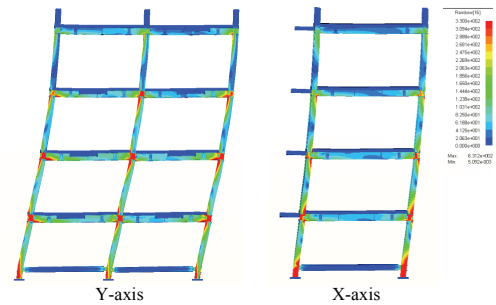


Fig. 6 Case 1: deformation (magnified 10 times) with distribution of equivalent stress at 6 sec.

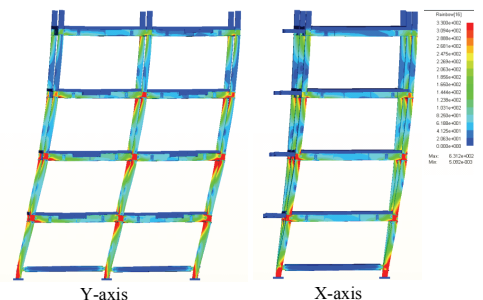


Fig. 7 Case 2a: deformation (magnified 10 times) with distribution of equivalent stress at 6 sec.