

数値震動台プロトタイプによる鋼構造超高層骨組および4層骨組の仮想震動実験

数値震動台	超高層ビル	ソリッド要素
並列計算	弾塑性解析	非線形有限要素法
崩壊解析	E-ディフェンス	鉄骨構造

正会員	○宮村 倫司 ^{*1}	正会員	大崎 純 ^{*2}
同	小檜山 雅之 ^{*3}	同	磯部 大吾郎 ^{*4}
同	秋葉 博 ^{*5}	同	堀 宗朗 ^{*6}
同	梶原 浩一 ^{*7}	同	井根 達比古 ^{*8}

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で開発が進められている数値震動台 (E-Simulator)¹⁾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、数値震動台の基盤となる並列有限要素解析コードである ADVENTURECluster²⁾ (数値振動台のプロトタイプ) により、31 層鋼構造超高層骨組と E-ディフェンスで完全崩壊実験が行われた 4 層鋼構造骨組の仮想的な震動実験を行う。

2. 鋼構造超高層骨組

2.1 解析モデル

本研究のために設計された実在しない 31 階建て超高層事務所ビル (31 層モデル) の仮想震動実験³⁾⁻⁵⁾を行う。前報³⁾では省略していた制震ブレースは、ガセットプレート間を結ぶトラス要素でモデル化している。31 層モデルのメッシュの規模は六面体一次要素 15,592,786 個、剛体梁 78,686 個、トラス 372 本、固着接触面のスレーブ節点 1,503,130 個、節点 24,765,275 個 (約 7429 万自由度) となる。メッシュを一部手直ししているため、節点数、要素数が前報と多少異なる。

鋼材のヤング率は 205 GPa, ポアソン比は 0.3, 降伏応力は 330 MPa, 加工硬化係数は 1/1000 (移動硬化, バイリニア), 密度 $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とする。鉄筋コンクリートのスラブについては、ヤング率が 22.7 GPa, ポアソン比が 0.2 の弾性体とする。非構造部の固定荷重と積載荷重はスラブの密度を割り増すことにより考慮する。

2.2 仮想震動実験の結果

最初に、6 次までの固有値、固有モードを計算する。計算には東工大の TSUBAME (CPU: Dual-Core AMD Opteron 880 2.4 GHz, 使用コア数: 16 node \times 4 cpu/node \times 1 core/cpu = 64 core) を用いた。計算時間は領域分割に 1,331.6 s, 固有値解析に 77,050.3 s である。6 次までの固有振動数は、それぞれ 0.3704, 0.3484, 0.3822, 0.9688, 1.0518, 1.1763 Hz である。

次に、大ひずみ弾塑性解析を実施する。塑性ヒンジが発生して骨組が崩壊するまで解析することを目的とする。減衰は 1 次に対して 2% の初期剛性比例型であり、その係数は固有値解析の結果から 0.02071 とする。計算は東大の T2K (CPU: AMD Quad Core Opteron 2.3 GHz, 使用コア数: 24 node \times 8 core/node = 192 core) で行う。入力地震波は 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取観測波の主要動を含む 10 s の区間を抽出したものである。自重載荷の後に長辺方向 (X 方向, EW 成分), 短辺方向 (Y 方向, NS 成分) 及び上下方向 (Z 方向, UD 成分) に入力する。図 1 に入力加速度の時刻歴波

形, 図 2 に加速度応答スペクトルを示す。

自重載荷解析 (静解析) の計算時間は 40,369.7 s, 地震応答解析の計算時間は平均 85,050.1 s/step となる。原稿執筆時に 325 時間ステップ (時刻 3.25 s) までの計算が終了している。図 3 に 31 層の北西隅柱の上端中央における相対変位の X 方向成分の時刻歴を示す。図 4 に 299 時間ステップ (時刻 2.99 s) における変形 (10 倍に拡大) を相当応力分布とともに示す。梁端部に塑性域が形成されていることが確認できる。

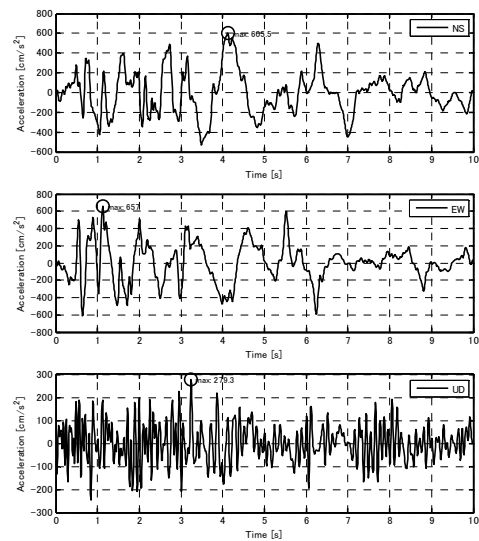


図 1 入力加速度の時刻歴波形

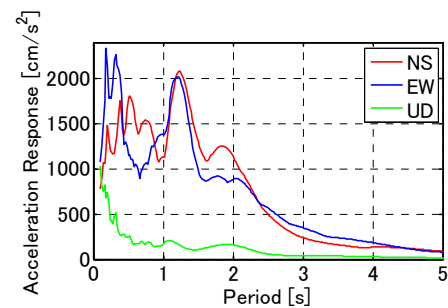


図 2 加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

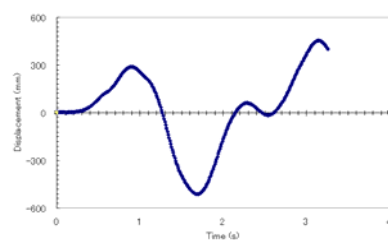


図 3 31 層北西隅柱の上端中央の相対変位 (X 方向成分時刻歴)

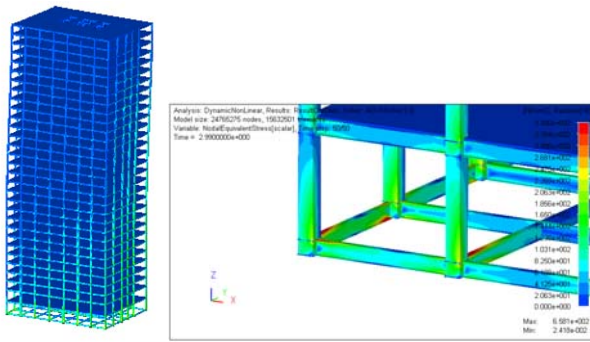


図4 時刻 2.99 s の変形と相当応力分布 (変位 : 10 倍)

3. 鋼構造 4 層骨組

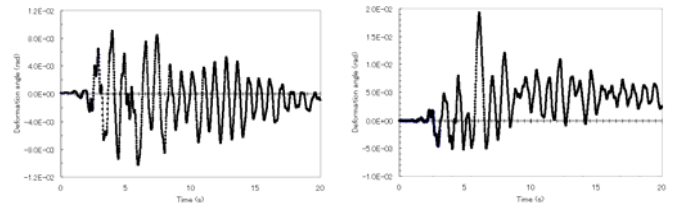
3.1 解析モデル

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⁶⁾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⁷⁾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した。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。

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、バイリニアの構成則を用いる。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り増すことで表現する。ここでは柱脚は固定としたモデルの計算結果を紹介する。

3.2 仮想震動実験の結果

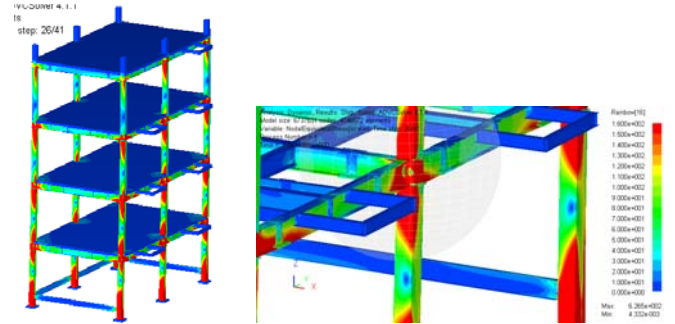
最初に固有値解析を行う。計算には HP ProLiant BL465 2.6 GHz Dual Core の 16 core を用いた。計算時間は 5,471.6 s である。4 次までの固有振動数は、それぞれ 1.1920, 1.2279, 1.7544, 3.7010 Hz となる。自重荷重解析の後に、ブラインド解析で公開された JR 鷹取波 (0.6 倍) に対する実験における震動台上加速度の EW, NS, UD 成分を 3 方向に 20 秒間入力して、時刻歴応答解析を行う。減衰はレイリー減衰とし、減衰定数は 1 次と 4 次 (X 方向の 1 次と 2 次) に対して 0.02 とする。解析には防災科研の SGI Altix 4700 (CPU : Intel Itanium 1.66 GHz, 使用コア数 : 1 node \times 256 core/node = 256 core) を用いた。計算時間は自重荷重解析 : 2,414 s, 地震応答解析 : 平均 1,106 s/step である。



(a) X 方向

(b) Y 方向

図5 1層層間変形角の時刻歴



(a) 全体

(b) 1層と2階床付近の拡大図

図6 最大変形時における変形と相当応力の分布

1 層の層間変形角と層せん断力の時刻歴を図 5 に示す。層間変形角の最大値と最小値は、X 方向(0.00906, -0.01030), Y 方向(0.01924, -0.00521)である。実験では X 方向(0.0121, -0.0122), Y 方向(0.0190, -0.00933)である。解析値の絶対値は実験値より少し小さめであり、Y 方向では残留変形が生じている。層せん断力については、X 方向(1.0701, -1.0119), Y 方向(1.2434, -1.1083)であり、実験結果と良好な精度で対応していることが確認された。最大変形時の相当応力の分布を図 6 に示す。柱脚及び柱梁接合部付近で大きな応力が生じていることが分かる。

4. おわりに

数値震動台のプロトタイプによる超高層ビルと 4 層鋼構造骨組の仮想震動実験について紹介した。

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 (委員長 : 堀宗朗 (東京大学)) における成果である。解析とモデル作成を担当された恩田邦蔵博士と湯山喜芳氏 (株式会社アライドエンジニアリング) をはじめとする関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 堀, 野口, 井根, 土木学会地震工学論文集, 2007
- 2) (株)アライドエンジニアリング, <http://www.alde.co.jp/>
- 3) 宮村他, 日本建築学会大会梗概集, B1, 363-364, 2008
- 4) M. Ohsaki et al., Earthquake Eng. Struct. Dyn., in press.
- 5) 大崎他, 計算工学講演会論文集, 14, 2009 (発表予定)
- 6) 吹田他, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 48, 構造系, 437-440, 2008
- 7) 引野他, 日本建築学会大会梗概集, C1, 849-850, 2008

*1 日本大学工学部情報工学科 専任講師・博 (工)
 *2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博 (工)
 *3 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 准教授・博 (情報)
 *4 筑波大学大学院構造エネルギー工学専攻 准教授・博 (工)
 *5 東京大学地震研究所 教授・Ph. D.
 *6 株式会社アライドエンジニアリング 社長・博 (工)
 *7 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 主任研究員・博 (工)
 *8 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 招聘研究員・博 (工)

*1 Lecturer, Dept. of Computer Science, Nihon University, Dr. Eng.
 *2 Assoc. Prof., Dept. of Archi. and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.
 *3 Assoc. Prof., Dept. of System Design Eng., Keio University, Dr. Informatics
 *4 Assoc. Prof., Dept. of Eng. Mech. and Energy, University of Tsukuba, Dr. Eng.
 *5 Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Ph. D.
 *6 President, Allied Engineering Corporation, Dr. Eng.
 *7 Senior Researcher, NIED, Dr. Eng.
 *8 Invited Researcher, NIED, Dr. Eng.