

鋼構造建築骨組の高精度有限要素解析

HIGH-PRECISION FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STEEL BUILDING FRAMES

大崎 純¹⁾, 宮村倫司²⁾, 小檜山雅之³⁾, 恩田邦藏⁴⁾, 磯部大吾郎⁵⁾, 秋葉 博⁶⁾,
堀 宗朗⁷⁾, 梶原浩一⁸⁾, 井根達比古⁹⁾

Makoto OHSAKI, Tomoshi MIYAMURA, Masayuki KOHIYAMA, Kunizo ONDA, Daigoro ISOBE, Hiroshi AKIBA,
Muneo HORI, Koich KAJIWARA and Tatsuhiko INE

- 1) 博士(工学) 京都大学准教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, ohsaki@archi.kyoto-u.ac.jp)
- 2) 博士(工学) 日本大学専任講師 工学部 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1番地, miyamura@cs.ce.nihon-u.ac.jp)
- 3) 博士(情報学) 慶應義塾大学准教授 理工学部 (〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1, kohiyama@sd.keio.ac.jp)
- 4) 博士(工学)(株)アライドエンジニアリング 解析コンサルティング部 担当部長 (〒105-0014 東京都港区芝1-14-4, onda@alde.co.jp)
- 5) 博士(工学) 筑波大学准教授 システム情報工学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)
- 6) 博士(工学) (株)アライドエンジニアリング 社長 (〒105-0014 東京都港区芝1-14-4, akiba@alde.co.jp)
- 7) 博士(工学) 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1, hori@eri.u-tokyo.ac.jp)
- 8) 博士(工学) (独)防災科学技術研究所 主任研究員 (〒673-0515 三木市志染町三津田西亀田1501-21, kaji@bosai.go.jp)
- 9) 博士(工学) (独)防災科学技術研究所 招聘研究員 (〒673-0515 三木市志染町三津田西亀田1501-21, ine@bosai.go.jp)

High-precision finite element analysis is carried out for structural components, including column-base and steel-concrete composite beam, to improve accuracy of collapse analysis of steel frames. It is shown that the complex behavior of the column-base due to contact between the base plate and mortar can be successfully simulated using solid elements and truss elements representing the anchor bolts.

Key Words : high-precision finite element analysis, steel building frame, column base, steel-concrete composite beam

1. はじめに

防災科学技術研究所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. 建築S造WG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 ADVENTURECluster [2]を用いて, 31層超高層骨組を約8000万自由度のソリッド要素で分割し, 地震時の弾塑性応答解析を実行できることを確認した[3]. また, 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[4]の結果を, 塑性ヒンジなどのマクロモデルを用いずに再現可能であることを示した[5]. しかし, その解析において, 柱脚, 合成梁及び非構造材のモデル化が, 精度向上のために重要であることが明らかになった.

本研究では, まず, 4層骨組柱脚の詳細有限要素モデルを作成し, 静的解析を実施する. さらに, 上記実験の際に行われたブラインド解析コンテスト[6]のために実施された合成梁のコンポーネント実験[7]の結果を再現するための詳細モデルを作成する.

2. 鋼構造柱脚の詳細解析

ソリッド要素とトラス要素を用いて柱脚モデルを作成し, 幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮する弾塑性静解析を行う. 柱脚を構成する柱, 基礎部, ベースプレート, 無収縮モルタルはソリッド要素, アンカーボルトとシームレスパイプはトラス要素でモデル化する. 無収縮モルタルのヤング率は19.8 GPa, ポアソン比は0.246, 圧縮強度は $\sigma_c = 51.8$ MPa, 引張強度は $\sigma_t = 4.26$ MPaであり,

圧縮側と引張側の非対称強度特性は, 拡張ドラッカー・ブラガー則により考慮する. ひずみ硬化係数はヤング率の1/1000とし, 圧縮強度と引張強度の値から, パラメータを決める. アンカーボルトには, 100 kNのプレストレス力(初期応力: 98.3 N/mm²)を負荷する. その他の物性は文献[5]と同様である.

解析モデルと基礎部の拡大図を図1に示す. 節点数は132,752, 六面体一次要素数は87,408, トラス要素数は16, 自由度数は398,256である. 基礎部とモルタルの境界面は, 結合接触条件で結合する. ベースプレートとモルタルの境界面の面(xy平面)内は, 線形拘束式で共有化し, 鉛直方向(z軸方向)は摩擦なしの滑り接触とする.

柱の高さは3354 mmであり, 上端面中央に下向き(-z軸の向き)に軸力264 kNを加え, 同時に水平方向(+x軸の向き)に強制変位+65.96 mmを与えて弾塑性静解析を行う.

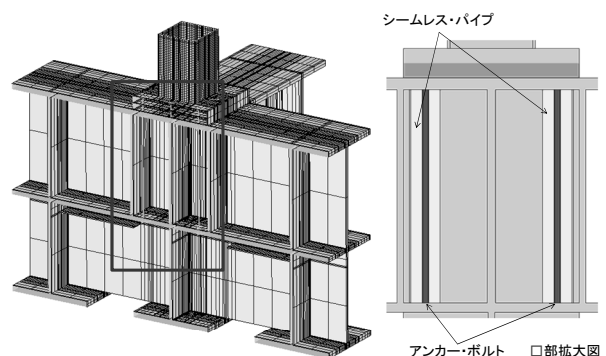


図1 解析モデルと基礎部拡大図

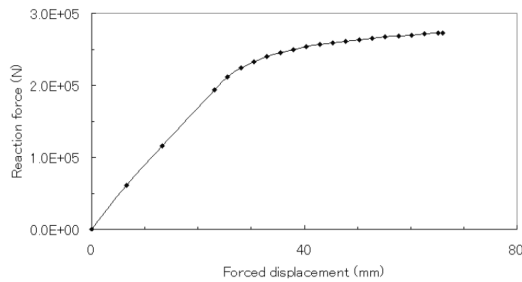


図2 載荷点における強制変位と反力の関係

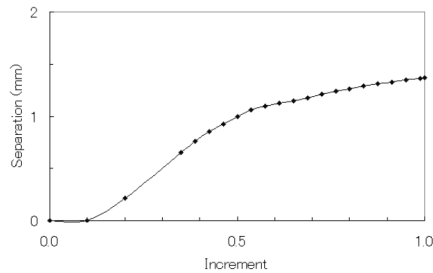


図3 ベースプレートとモルタルの離間量

載荷点における強制変位と反力の関係を図2に示す。また、アンカーボルトの接合部付近での強制変位量と節点間距離の関係を図3に示す。

図2では水平力 $P = 2.0 \times 10^5 \text{ N}$ まで復元力と変位が直線的な関係を保っている。この水平力 P により柱脚に発生する曲げモーメント M を計算する。柱頭断面は水平を保持する拘束を与えており、曲げモーメントの変曲点が柱中央にくるので、柱長さ $H = 3.298 \text{ m}$ より、

$$M = PH/2 = 2.0 \times 10^5 \text{ N} \times 3.298 \text{ m} / 2 \approx 330 \text{ kNm} \quad (1)$$

となる。このときのアンカーボルトの伸びは図3より 0.7 mm で、プレストレス応力から予想される降伏に必要なひずみ 1.169×10^{-3} と整合している。

文献[8]の露出柱脚の設計式では回転ばねの剛性 K_θ は以下のように計算される。

$$K_\theta = [E n A (d_t + d_c)^2] / (2L) \approx 4.886 \times 10^4 \text{ kNm} \quad (2)$$

ここで、ヤング率 $E = 205 \text{ GPa}$ 、引張側アンカーボルトの本数 $n = 3$ 、アンカーボルトの断面積 $A = 1017 \text{ mm}^2$ 、柱断面図心からアンカーボルトまでの距離 $d_t = 225 \text{ mm}$ 、柱断面図心から圧縮側フランジ距離 $d_c = 150 \text{ mm}$ 、アンカーボルトの長さ $L = 900 \text{ mm}$ である。曲げモーメント M による回転角 θ からアンカーボルトの伸びを見積ると、

$$\begin{aligned} d_t \theta &= d_t M / K_\theta = 225 \text{ mm} \times 329.8 \text{ kNm} / (4.886 \times 10^4 \text{ kNm}) \\ &= 225 \text{ mm} \times 0.006749 \dots \text{ rad} \approx 1.518 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、 0.7 mm と比べると約2倍の値となる。これは、式(2)の中辺の分母にある安全率に対応するため、シミュレーション結果は妥当と考えられる。

3. 合成梁の詳細解析

ブラインド解析コンテスト[6]のために実施された合成梁のコンポーネント実験[7]の結果を再現するための詳細モデルを作成する。解析モデルは、床スラブと柱と梁からなる1層の切り出しモデルが基本構造であり、鉄骨梁とコンクリート床スラブはスタッドボルトで接合する。鉄骨梁と床スラブは、六面体ソリッド要素を用いて有限要素分割し、コンクリートのひび割れは無視するが、コンクリートの圧縮側と引張側の非対称強度特性は、拡張ドラッカー・プラガー則により考慮する。

モデルのメッシュを図4に示す。節点数は97,192、六面体一次要素数は69,964、剛体梁は1,972、自由度数は291,594である。境界条件については、実験と同様の条件を再現するため、柱の上下端に剛体梁を設置し、2点でピン接合する。また、大梁の先端では、上下フランジ部の節点に剛体梁を通して上下方向の強制変位を与える。床スラブと柱の接触部分については、微小滑り接触条件を設定する。スタッドボルトは剛体梁でモデル化する。

梁先端に強制繰り返し変位を与えて静的弾塑性解析を行った結果、スラブと柱の接触やコンクリート構成則の非対称性を再現できることを確認した。

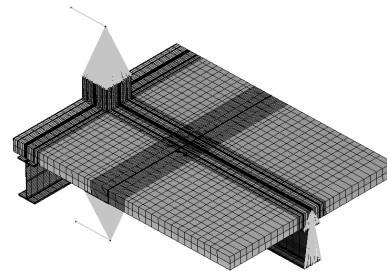


図4 合成梁の有限要素モデル

4. おわりに

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

1. 数値震動台のプロトタイプによる鋼構造骨組の仮想震動実験の精度を向上させるため、柱脚モデルの詳細解析を実施し、合成梁の解析モデルを作成した。
2. 柱脚モデルの解析では、ベースプレートをモルタルの接触と離間を再現でき、回転ばねモデルの結果と比較すると、安全率を考慮しなければ同等の結果が得られていることを確認した。
3. 合成梁モデルの詳細モデルを作成した。コンクリートを拡張ドラッカー・プラガー則、スタッドを剛体梁でモデル化し、スラブと柱の接触・離間を考慮することにより、梁の曲げ方向による合成の非対称性を再現できることを、簡単な解析で確認した。

謝辞：本研究解析は、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・数値震動台開発委員会（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大山知信氏、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 宗朗 他：E-Defenseと連動させた数値震動台の開発計画、土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp. 1420-1425, 2007.
- 2) (株)アライドエンジニアリング (ADV) : <http://www.alde.co.jp/>
- 3) M. Ohsaki et al.: High-precision finite element analysis of elastoplastic dynamic responses of super-highrise steel frames, Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 38, pp. 635-654, 2009.
- 4) 吹田啓一郎 他：震動台実験の概要と弾塑性応答特性 一実大4層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その1, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 635, pp. 157-166, 2009.
- 5) 大崎 純 他：鋼構造建築骨組の弾塑性地震応答の高精度有限要素解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 14, pp. 829-832, 2009.
- 6) 引野 剛 他：実大4層建物完全崩壊実験を対象としたブラインド解析コンテストの実施概要と審査結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp. 849-850, 2008.
- 7) 山田 哲 他：床スラブの付いたト型部分架構パネルゾーンの弾塑性挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 644, pp. 1841-1849, 2009.
- 8) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：建築物の構造関係技術基準解説書, pp. 599-600, 2007.