

# 室内被害シミュレーションの高度化研究

磯部大吾郎<sup>1)</sup>

1) 筑波大学システム情報系、教授 博士（工学）

e-mail : isobe@kz.tsukuba.ac.jp

## 要約

国立研究開発法人防災科学技術研究所が進めている数値震動台研究開発プロジェクトのうち、設備WGでは、室内の非構造部材や設備機器の地震時における変形、脱落、転倒などの被害状況を再現できるシミュレーション技術を開発している。本稿では、設備WGの主な研究成果と今後の展開を紹介する。

キーワード： 非構造部材，設備，什器，地震時挙動シミュレーション，震動台実験

## 1. 設備WGの活動目的

設備WGの活動目的としては、病院・学校・大規模空間等における家具・什器・天井等の非構造部材の地震時挙動を再現可能な解析コードを開発し、数値震動台に組み込むことを掲げている。さらには、人的・経済的被害低減に資する避難路の確保、室内耐震化対策の指標作りに貢献することを目指している。

## 2. 室内被害を再現するシミュレーション技術の開発

設備WGのこれまでの主な研究成果は以下の通りである。

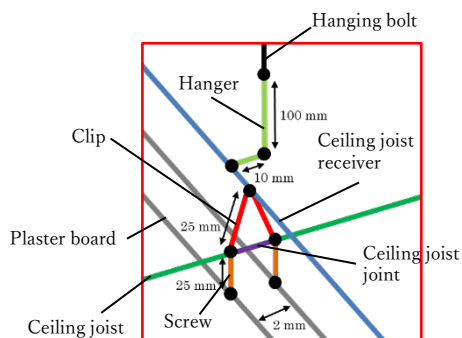


図1 接合部の詳細モデル図

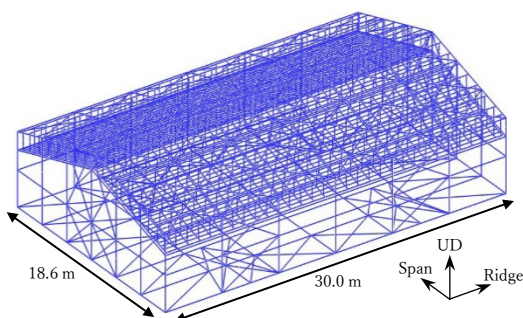


図2 未対策天井を設置した体育館モデル

### (1) 天井脱落現象の再現解析コードの開発

学校体育館などの大規模空間を有する構造物は、災害時に避難拠点としての機能が要求されるため、災害発生後においても施設の健全性を維持する必要がある。そこで、ASI-Gauss法[1]に基づく地震時天井脱落挙動解析技術を開発し[2]、吊りボルトと天井材を接続するハンガーの偏心性を考慮したモデル（図1、図2参照）による体育館の天井脱落実験[3]（E-ディフェンス、2014年実施）の再現解析を実施した。その結果、壁からの反力を受けて吊り天井の頂部付近にモーメントが発生したために吊りボルトが座屈し、それに伴い天井材が大きく上下に振動する現象が起こり、クリップの脱落と天井の落下につながった（図3参照）。また、この現象には、ハンガーの偏心性も少なからずと

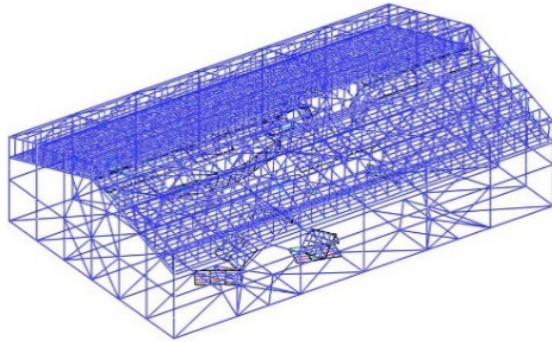


図3 未対策天井の脱落挙動

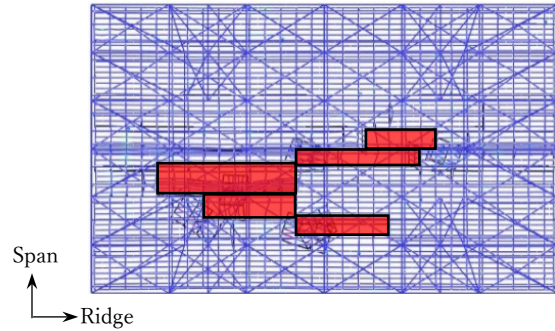


図4 天井の脱落範囲

も影響を与えていることが分かった。解析で得られた天井落下のプロセスおよび天井脱落範囲（図4参照）は、実験結果[3]と良好に一致することが確認された。今後は、2013年に策定された技術基準[4][5]に基づく耐震対策、すなわちブレースの設置、クリアランスの確保、耐震クリップの適用の3つの対策それぞれの有効性について検証していく予定である。

(2) 家具・什器類の地震時挙動解析コードの開発

地震時の室内における怪我の原因は、その約半分が家具等の転倒によるものであり、今後、長周期地震動が発生した場合には、特に高層建物内で人身への直接的な被害が多くなることが予想される。そこで、ペナルティ接触理論[6]に基づいた接触アルゴリズムをASI-Gauss法に導入し、地震動下における家具の挙動を再現する技術を開発した[7]-[9]。地震波の種類・入力レベル・加振軸数を変化させた振動台実験結果と比較すると、家具間の干渉により多少のずれは生じるが、入力波の条件が変化しても家具の転倒状況や変位は概ね一致し、家具の挙動を実用的なレベルで再現できた（図5、図6参照）。今後は、例えば家具の耐震対策効果等を分かり易く提示するために、家具転倒試験結果と解析結果をVRゴーグルに同時投影する技術を開発する予定である。

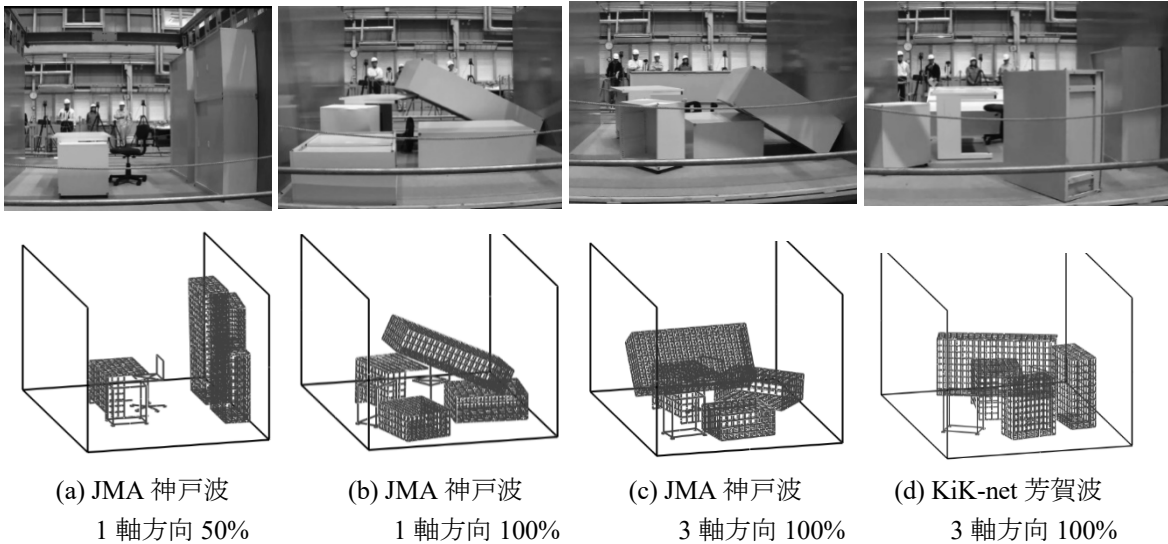


図5 実験および解析終了時の家具の様子

(3) ドアおよびドア枠の地震時挙動解析コードの開発

地震時に建物の層間変形に伴いドア枠が面内変形すると、ドア本体に変形・座屈が生じ、開閉が困難となり、避難経路の妨げとなる恐れがある。そこで、ドア本体とドア枠、蝶番などが含まれる雑壁モデル（図7参照）を構築し、これを10層RC造建物モデル（図8参照）に組み込んだ地震応答解析を実施し、各々の非構造部材の変形挙動について調査した[10]。その結果、低層階（2階）のドア

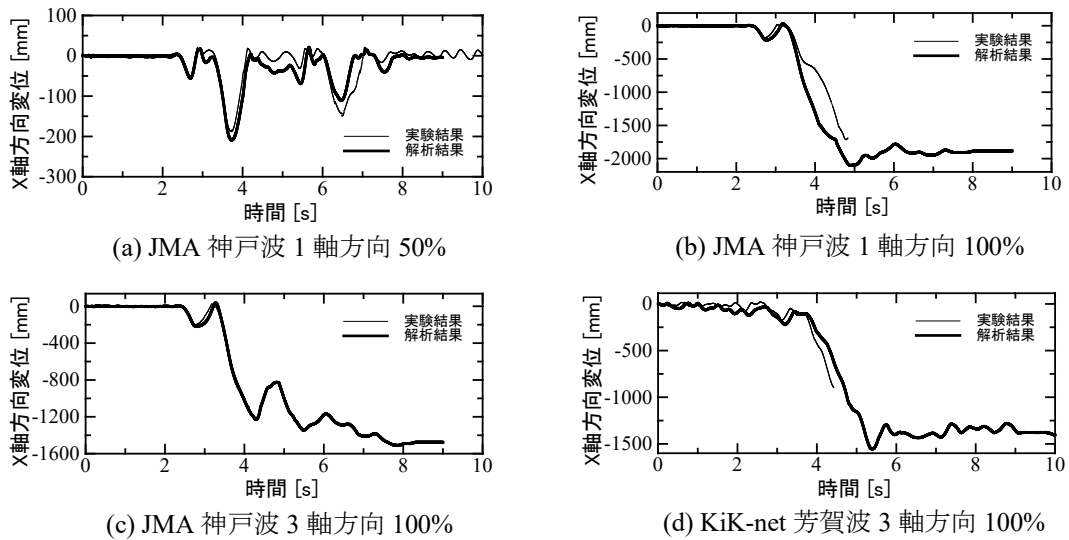


図6 変位の比較（二段棚上段）

枠の最大面内変形角は危険値とされる $1/120 \text{ rad}$ を超え、ドアが開閉不能となっている可能性が高く、一方で上層階（10階）では水平変位が大きいかも拘らずドア枠の最大面内変形角はとて小さいことが分かった（図9参照）。今後、セットバック配置され、建物の層間変形の影響を受けにくいドア枠について数値解析的検証を進める予定である。

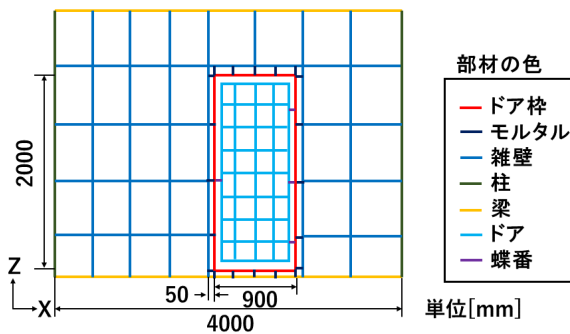


図7 雑壁モデル

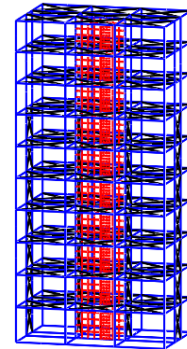


図8 10層RC造建物モデル

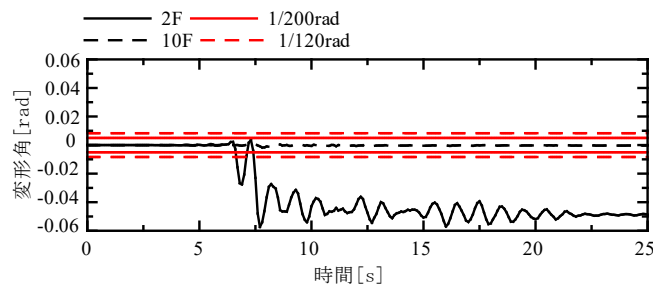


図9 ドア枠の面内変形角

(4) サーバラックの地震時挙動解析コードの開発

地震時にコンピュータやネットワーク機器のような電子装置の故障や通信障害が発生すれば、救命救助や避難のための活動の妨げにもなり、致命的となりうる。また電子装置は、取り付け・取り外しの容易さや安価なことから、ボルトを用いてサーバラックに固定されることが多いが、ボルトのようなねじは振動や衝撃などの動的外力が作用するとゆるみが発生し、締結力が低下する。そ

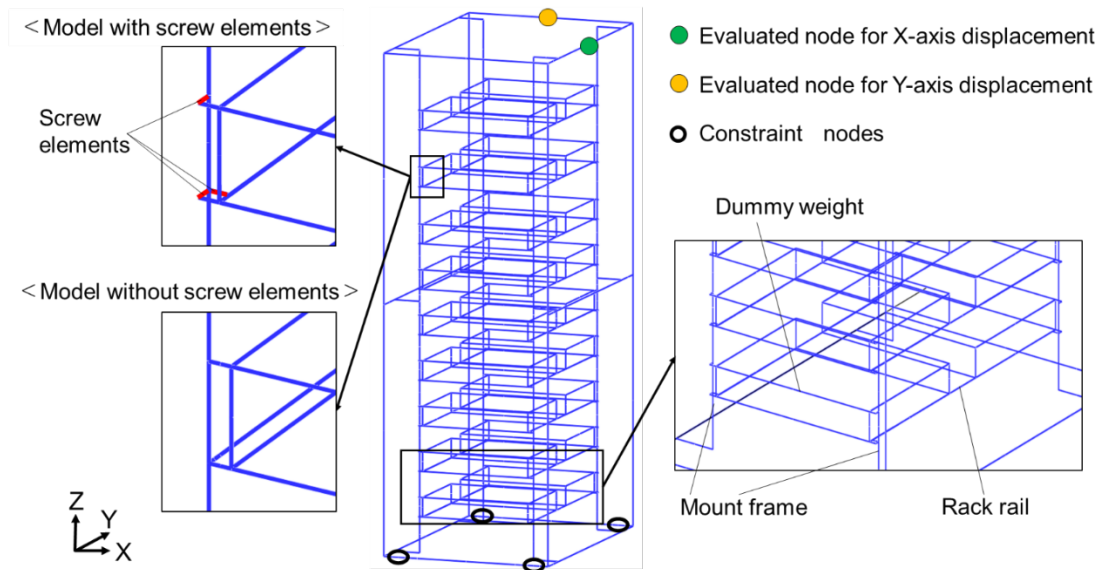


図 10 サーバーラックの解析モデル（ねじ無しモデルとねじ付きモデル）

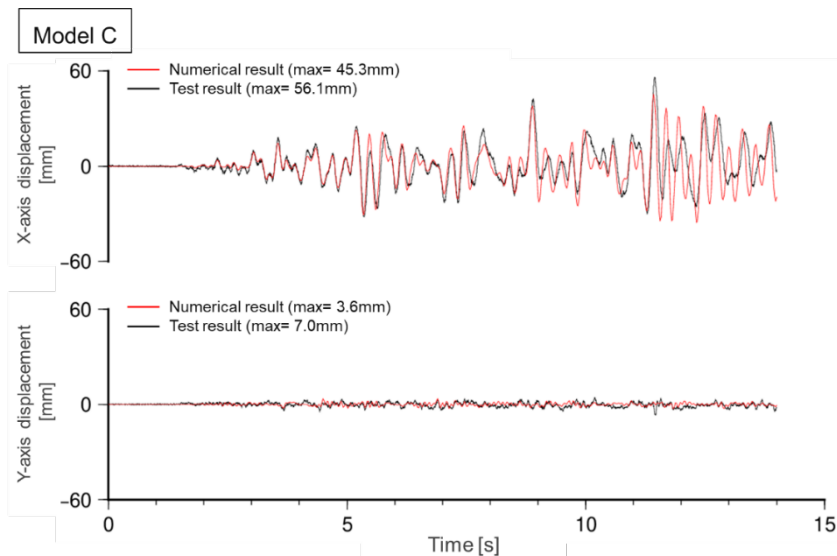


図 11 ねじのゆるみを考慮した解析と実験結果との比較（締結力低下率=4%）

ここで、ASI-Gauss法に基づいた解析コードに座面すべり回数に依存したねじのゆるみ機構[11]を考慮したアルゴリズムを導入し、ねじ締結を有する電子装置用ラック（図10参照）の地震時挙動を数値解析によって再現した[12]。その結果、締結力低下率を適切に設定することで、実験結果と良好に一致することが判明した（図11参照）。得られた知見は、ねじ締結を有する多くの機械構造に適用が可能であるものと思われる。

### 3. 今後の展望と課題

室内被害シミュレーションのさらなる高度化に向けて、以下のような課題が挙げられる。

#### 1. 天井落下メカニズムの完全説明および耐震化対策に関する有効性検討

新技術基準に基づく耐震対策，すなわちブレースの設置，クリアランスの確保，耐震クリップの適用の3つの対策それぞれの有効性について検証する。また，複雑な形状を有する天井（例えばコンサートホールなど）の落下メカニズムを説明する。

2. 建物内における家具の転倒挙動の完全再現およびそのVR可視化  
建物内に設置し耐震化対策を施した家具の解析を実施し、実験結果と比較・検証する。さらには、転倒試験結果と解析結果をVRゴーグルに同時投影する技術を開発する。
3. ドアおよびドア枠の耐震化に向けた指針の構築  
セットバック配置され、建物の層間変形の影響を受けにくいドア枠について数値解析的検証を進め、地震に強いドアおよびドア枠の設計指針を構築する。
4. サーバーラックの強度試験方法の逆提案  
情報・通信用の装置や設備の耐震強度評価のための耐震試験規格は日本工業規格等によって定められているが、実際に使用する装置の構成条件やラックの設置条件は多様な要因により左右されるため、それら全ての条件に合わせて振動台を用いた耐震試験を行うことは現実的ではない。また、ねじのゆるみがラックの振動挙動に大きく影響を及ぼすことが数値解析的に判明したため、ねじの締結力に関する条件を含めた試験方法を逆提案することを目指す予定である。

#### 参考文献

- 1) D. Isobe, Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
- 2) 磯部 大吾郎, 藤原 嵩士, 山下 拓三, 田川 浩之, 佐々木 智大, 有限要素法を用いた大規模空間吊り天井の脱落被害再現シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第741号, pp. 1727-1736, 2017.
- 3) 佐々木 智大, 青井 淳, 田川 浩之, 梶原 浩一, 荒井 智一, 金井 貴浩, 高岡 昌史, 岩下 裕樹, 吉澤 睦博, 壁谷澤 寿海, 清家 剛, 山田 哲, 福山 洋, 太田 勤, 江口 亨, 伊山 潤, 石原 直, 磯部 大吾郎: 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のためのE-ディフェンス加振実験 報告書 一大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験一, 2015. 2.
- 4) 国土交通省, 建築基準法施行令の一部を改正する政令, 平成25年政令第217号, 2013.
- 5) 国土交通省, 建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説, 2013. 9.
- 6) 矢川 元基, 平山 浩, 安藤 良夫, ペナルティ法による二次元およびはりの接触問題の解析, 日本機械学会論文集A編, Vol. 46, No. 411, pp. 1220-1229, 1980.
- 7) 磯部 大吾郎, 山下 拓三, 田川 浩之, 金子 美香, 高橋 徹, 元結 正次郎, 有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第718号, pp. 1891-1900, 2015.
- 8) D. Isobe, T. Yamashita, H. Tagawa, M. Kaneko, T. Takahashi and S. Motoyui, Motion Analysis of Furniture under Seismic Excitation using the Finite Element Method, Japan Architectural Review, 2018;00:1-12. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.1015>.
- 9) 三浦 利季, 小林 康一, 山下 拓三, 田中 聖三, 磯部 大吾郎, RC造建物内に配置した耐震家具の地震時挙動解析, 日本計算工学会論文集, 2018 巻 2 号 p. 20182005, 2018, <https://doi.org/10.11421/jsces.2018.20182005>.
- 10) 佐藤 和輝, 磯部大吾郎, 建物内に設置されたドアの地震時変形挙動解析, 日本建築学会2018年度大会(東北) 学術講演梗概集, pp. 541-542, 2018.
- 11) 泉聡志, 横山喬, 岩崎篤, 酒井信介, ボルト締結体の締付けおよびゆるみ機構の三次元有限要素法解析, 日本機械学会論文集A編, Vol. 71, No. 702, pp. 204-212, 2005.
- 12) 金野 圭祐, 山下 拓三, 磯部 大吾郎, ねじ締結を有する電子装置用ラックの地震時挙動再現解析, 日本機械学会論文集, 2019, 発刊予定.