

地震時の体育館内における天井落下現象の再現解析

Numerical Simulation on Ceiling Collapse Phenomenon in Gymnasium during Earthquake

○非 藤原 嵩士 (筑波大院)

Takashi FUJIWARA, Graduate School, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

非 田川 浩之 (武庫川女子大)
Hiroyuki TAGAWA, Mukogawa Women's
University,
1-13 Tozakicho, Nishimiya-shi, Hyogo

非 山下 拓三 (防災科研)
Takuzo YAMASHITA, National Research
Institute for Earth Science and Disaster
Prevention,
1501-21 Nishikamya, Mitsuta, Shijimicho,
Mikishi, Hyogo

正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

非 佐々木 智大 (防災科研)
Tomohiro SASAKI, National Research
Institute for Earth Science and Disaster
Prevention,
1501-21 Nishikamya, Mitsuta, Shijimicho,
Mikishi, Hyogo

Key Words: Ceiling Collapse, Gymnasium, ASI-Gauss Technique

1. 緒言

2011年の東北地方太平洋沖地震では、体育館に代表される大規模空間を持つ屋内運動場等施設において、天井材等の落下被害により地震後に避難施設としての機能を満たさない事例が多く報告されている[1]。これらの施設は、災害時に避難施設としての役割を担っていることから、天井落下被害を防止する対策が望まれる。そのためには、天井落下のメカニズムを把握しておくことが重要であり、2014年に実大三次元震動破壊実験施設（Eーディフェンス）において吊り天井を有する体育館を模擬した建築物試験体（体育館試験体）を用いた吊り天井の脱落被害再現実験が実施された[2]。また、メカニズム解明のためには様々な条件での検証が必要であり、数値シミュレーションの果たす役割は大きい。

本稿では、地震時の体育館内における天井落下現象を再現するシミュレーション技術を構築するために、上述のEーディフェンス実験の体育館試験体に地震に対する対策の施されていない未対策天井を取り付けた状態を模擬する数値モデルを用いて地震応答解析を行い、未対策天井の落下現象の再現を試みた。解析には、地震動、弾塑性、破断を含む非線形性の高い解析でも安定して行える ASI-Gauss 法を用いた[3]。

2. 数値モデル

(1) 部分天井モデル

天井の損傷過程のモデル化の妥当性検証のため、天井の一部を再現した図1に示す部分天井モデルを作成した。天井は吊りボルト、野縁受け、野縁、クリップ、ビス、せっこうボードで構成されており、吊りボルトとハンガーは一体化してモデル化している。

(2) 体育館構造躯体モデル

図2に体育館試験体を模擬する体育館構造躯体モデルを示す。構造躯体モデルについては文献[2]を参考に構築し、寸法は30×18.6m、屋根の頂部の高さは9.09mであり、梁、柱はラーメン構造、ブレースや一部のボルト接合された部材はトラス構造とした。また、柱脚と基礎梁の間には回転剛性を考慮して要素を設置している。固有周期は X 軸方向で 0.387s（実測値 0.368s）、Y 軸方向で 0.418s（実測値 0.399s）である。

天井は部分天井モデルと同様にモデル化した。吊りボルトの間隔は、X 軸方向に 1,000mm、Y 軸方向に 1,147mm（屋根面沿いに 1,200mm）である。吊りボルトの長さは 1,500mm、クリップ、ビスの寸法は 25mm とした。また、ブレースは履歴特性（引張軸力は伝達、圧縮軸力は非伝達）を導入する代わりに軸剛性を半分にする事で簡易に表現した。

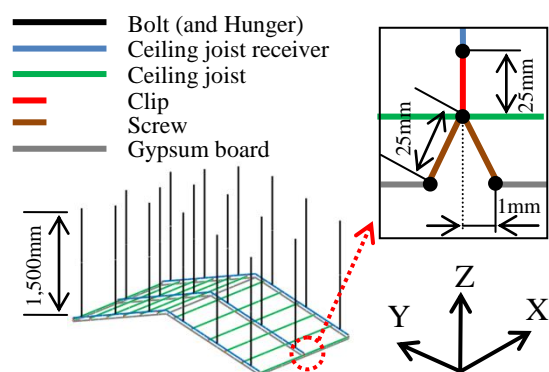


Fig.1 Partial model of Ceiling

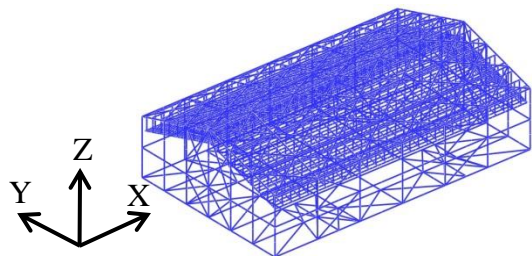


Fig.2 Gymnasium model with ceilings

3. 解析条件

(1) 入力地震波動

入力地震動を図3に示す。東北地方太平洋沖地震時に K-NET 仙台観測点で観測された地震動を 50%に縮小して加振した際に震動台上で観測された加速度を用いた。時間増分は 1 ミリ秒として、90 秒間入力した。試験体は振動台の床から張り出していたため、境界条件として基礎梁の震動台部分を完全拘束した。

(2) 脱落条件

野縁と野縁受けを繋ぐクリップの破壊条件は、天井の要素試験結果[4]を参考にし、鉛直下向きに 0.4kN の力が作用した場合にクリップが破損し脱落するように設定した。

野縁受けを支えるハンガーの破壊条件は、天井の要素試験結果[5]を参考にし、鉛直下向きに 2.8kN の力が作用した場合にクリップが破損し脱落するように設定した。

せっこうボードを野縁に固定するビスに関しては、ビスに作用するせん断力が 0.30kN を上回った場合[6]、または引抜力（引張軸力）が 0.20kN を上回った場合[7]にビスが抜け、せっこうボードが脱落するように設定した。

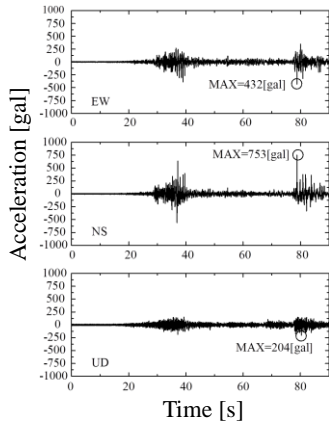


Fig.3 Imposed ground motion

4. 解析結果

屋根面の加速度および変位の時刻歴応答について解析と実験の結果を比較したものを図4に示す。図4より、加速度、変位共に解析結果の応答は実験結果よりも小さくなる結果となった。特に、変位に比較して加速度の再現性が悪いが、体育館試験体の大梁上に取り付けられた屋根荷重を再現するための錘が、実験時に天井を支える母屋材に接触したためと考えられる。そのため実験の加速度データは錘が母屋材に接触した衝撃を取り除くためにローパスフィルターをかけて処理している。しかし、衝撃の影響が完全に除去されていない可能性も考えられ、これらの差異については今後の検討課題としたい。

次に、図5に体育館構造躯体モデルの解析による落下挙動を示す。要素の色は次式に示す関数 f_y によって変化し、赤色に近づくほど降伏が進んでいることを示している。

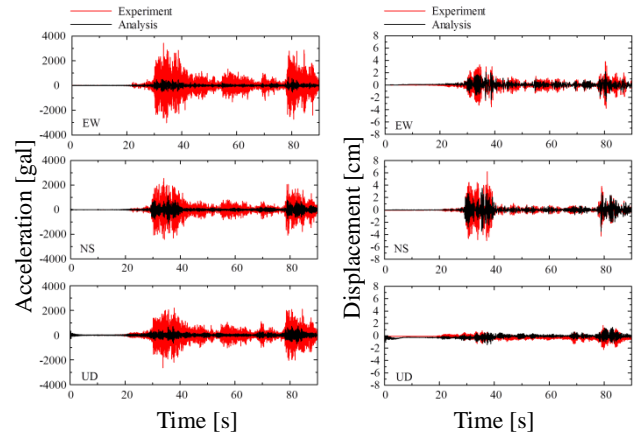
$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 M_x 、 M_y は要素における x 、 y 軸回りのモーメント、 N は軸力である。また、添え字0は各々の断面力が部材断面に単独で作用した場合の全断面塑性値を意味している。

図5(a)の38秒付近において、天井の頂部では隣り合うせっこうボード同士が、体育館側面では壁とせっこうボードが複数回衝突した。その結果クリップの破損や、ビスのせん断破壊が発生し、壁と衝突するせっこうボードが脱落する現象が確認された。クリップやビスが破損した天井では、破損したハンガー・クリップやビスが受け持っていた荷重が周囲のクリップやビスに再分配され、周囲のハンガー・クリップやビスにかかる荷重が増大する。特にクリップについては、この分配による荷重に耐えることができず損傷と再分配が連鎖的に発生した。その結果、図5(b)に示すように43秒においてせっこうボードと野縁が一体化したまま落下するという現象が確認された。なお、実験では天井の頂部付近が集中的に落下しているが、これとは異なる結果となった。この原因として、構造躯体の応答の再現性やクリップ等の脱落条件が考えられる。

5. 結言

天井を付加した体育館構造躯体モデルにクリップ、ハンガー、ビスの脱落条件を導入し、地震応答解析により天井の落下現象の再現を行った。本稿ではせっこうボード同士や壁とせっこうボードの衝突によるクリップやビスの脱落を確認し、衝突や荷重の再分配によって天井が落下する現象が見ら



(a) Acceleration(X4-Y3) (b) Displacement(X4-Y4)
Fig.4 Time histories of responses

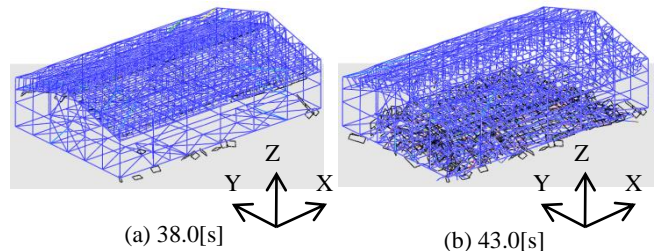


Fig.5 Behavior of the gymnasium

れた。しかし、時刻歴応答や天井の落下箇所などが実験結果と一致せず、完全な再現には至らなかった。今後、プレースの履歴特性や、全面落下の原因となったクリップを含む脱落条件について検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報），平成23年5月
- [2] 佐々木智大 他，2015，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，防災科学技術研究所研究資料，No. 391，平成27年2月。
- [3] 磯部大吾郎，チョウミョウリン：飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析，日本建築学会構造系論文集，第579号，pp39-46，2004年5月
- [4] 中川祐介，元結正次郎：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学特性に関する研究 その2：鉛直荷重を受ける場合，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.845-846
- [5] 杉山達也，柏崎琢也，小林俊夫，貫井泰，藪内彰夫：在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究 その1：全体計画およびハンガーの要素試験，日本間地区学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.227-228，2009年8月
- [6] 杉山達也，柏崎琢也，野曾原瑞樹，貫井泰，鈴木篤：在来工法天井に下地ボードと野縁のビス止め接合部のせん断試験その1，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），2010年9月
- [7] 櫻井重喜，熊谷祥吾，永井拓生，川口健一，安藤頭祐，新谷直人：非地震時における屋内プール天井の落下被害に関する基礎的考察—吸水時のビスの頭抜け強度について—，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），2009年8月