

吊りボルトと構造ブレース材の座屈を考慮した吊り天井を有する体育館の地震時挙動解析

Seismic Motion Analysis of Gymnasium with Ceiling Considering Buckling of Hanging Bolts and Structural Braces

○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  
Univ.,  
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  
Resilience,  
1501-21 Nishikamcy, 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  
Resilience,  
1501-21 Nishikamcy, Mitsuta, Shijimicho,  
Mikishi, Hyogo

Key Words: Gymnasium Ceiling, Collapse, 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の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る。2014年には、実大三次元震動破壊実験施設（E-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]。一方、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、上述の吊り天井の脱落被害再現実験の再現解析を試みた。また再現実験では、吊りボルトやブレースの座屈現象が確認されたため、体育館試験体に地震対策の施されていない未対策天井を取り付けた数値モデルに対し、部材の座屈現象を考慮し地震応答解析を実施した。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[3]を用いた。

2. ブレースの座屈現象の検証

2-1 弾性座屈

部材が圧縮軸力を受け、弾性座屈が発生する際の座屈荷重は以下のオイラーの座屈理論式より求められる。

$$P_{cr} = C \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

ここで、 $E$ はヤング率、 $I$ は断面2次モーメント、 $L$ は部材長、 $C$ は末端条件係数である。ブレースは両端ピン接合であるため、本稿では  $C=1$  である。使用するブレースは直径 16mm、部材長  $L=5,656\text{mm}$  の部材で、 $E=2.05 \times 10^5 \text{MPa}$ 、 $I=3.58 \times 10^3 \text{mm}^4$  であるため、上式より  $P_{cr}=226.5\text{N}$  となる。

2-2 解析モデル

Fig.1 にブレースの座屈を検証するための数値モデルを示す。寸法は  $4 \times 4 \times 4\text{m}$  であり、ブレースは圧縮を受ける側のみに設置した。梁、柱は剛接合、ブレースはピン接合である。ブレースは 8 要素で分割し、さらに両端に微小要素を設置した計 10 要素で表現した。微小要素は、1 軸回りの曲げ剛性を部材の  $1/10000$  に低下させることで、ピン接合を表現した。微小要素の要素長は部材断面長の半分とし、弾性体として扱う。

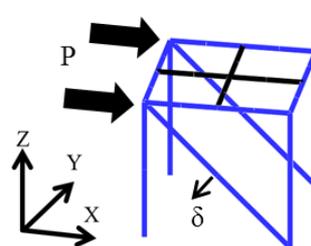


Fig.1 Numerical model

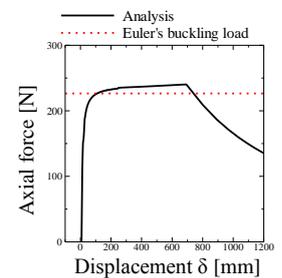


Fig.2 Axial force-displacement relations

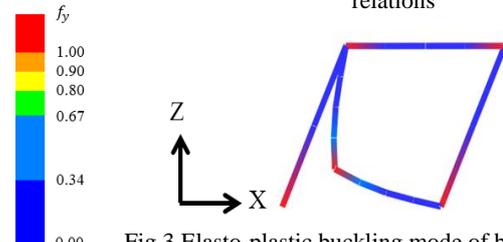


Fig.3 Elasto-plastic buckling mode of brace

2-3 解析結果

数値モデルに重力を作用しない状態で水平荷重を静的に加えた際の、ブレース内に発生する軸力-たわみ量関係とオイラーの弾性座屈荷重値を Fig.2 に示す。図より荷重変位関係は変位 100~600mm で傾向が変化しており、この傾向線が理論値と良好に一致していることから、弾性座屈を良好に表現できることが確認できる。

600mm 以降ではブレースが塑性座屈しており、それに伴い耐力が低下している。この時の変形の様子を Fig.3 に示す。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。

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

ここで、 $M_x$ 、 $M_y$  は要素に生じる  $x$ 、 $y$  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。

図より、ブレースの中央部が塑性化しており、塑性座屈が発生していることが確認できる。以上より、ブレースを 10 要素分割することにより、弾塑性座屈を表現できることを確認した。

### 3. 未対策天井付き体育館構造躯体モデル

#### 3-1 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部分天井モデルを作成した。これを Fig.4 に示す。天井は吊りボルト、野縁受け、野縁、せっこうボードと、接合部材であるクリップ、ハンガー、ビスで構成されており、吊りボルトとハンガーは一体化してモデル化している。

#### 3-2 体育館構造躯体モデル

次に、体育館試験体を模擬する体育館構造躯体モデルを作成した。これを Fig.5 に示す。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、屋根の頂部の高さを 9.09m とし、梁、柱は剛接合、ブレースや一部のボルト接合された部材はピン接合とした。吊りボルトやブレース以外のピン接合の部材は 2 要素分割し、部材両端に 1 軸回りの曲げ剛性を 1/10000 に低下させた微小要素を配置した計 4 要素で表現した。吊りボルトとブレースは 8 要素分割し、両端に微小要素を配置した計 10 要素で表現した。また、柱脚と基礎梁の間には回転剛性を考慮した要素を配置した。固有周期は EW 方向が 0.355s (試験体 0.368s)、NS 方向が 0.405s (試験体 0.399s) である。

天井は部分天井モデルと同様にモデル化し、吊りボルトの間隔は EW 方向に 1,000mm、NS 方向に 1,147mm (屋根面沿いに 1,200mm) とした。また、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。

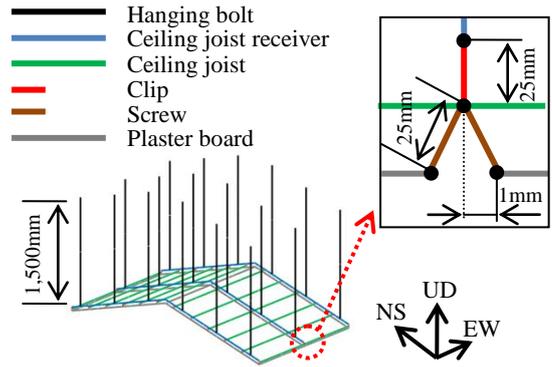


Fig.4 Partial model of ceiling

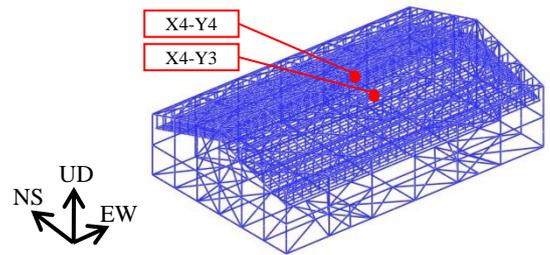


Fig.5 Gymnasium model with ceiling

### 4. 解析条件

#### 4-1 入力地震波

解析の入力地震波としては、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 (Fig.6) を用いた。時間増分は 1ms として、75 秒間入力した。実験時、試験体は振動台の床から張り出していたため、基礎梁の震動台上部分を完全拘束し、そこに地震動を加えた。

#### 4-2 脱落条件

野縁と野縁受けを繋ぐクリップは、滑りが発生して破損しづらくなることが予想されるため、それを考慮し脱落条件には大きめの値を用いた。すなわち、天井の要素試験結果[4]を参考にし、鉛直下向きに 0.812kN 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。また、野縁受けを支えるハンガーの脱落条件は、天井の要素試験結果[5]から、鉛直下向きに 2.800kN の力が作用した場合に脱落するように設定した。さらに、せっこうボードを野縁に固定するビスに関しては、これに作用するせん断力が 0.300kN を上回った場合[6]、または引抜き力 (引張軸力) が 0.200kN 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。

### 5. 解析結果

屋根面の加速度応答の時刻歴および加速度応答スペクトルについて、解析と実験の結果を比較したものを Fig.7 および Fig.8 に示す。なお実験の加速度データには、短周期の卓越加速度が確認されている。これは、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等に接触した際に発生したものと考えられる。この影響を取り除くために、実験結果には 10Hz のローパスフィルター (LPF) をかけて処理している。

Fig.7 より、特に NS, UD 方向の応答が良好に一致することが確認できた。また Fig.8 より、解析と実験ではスペクトルの形状が類似しており、ピークの周期が良好に一致することが確認できた。

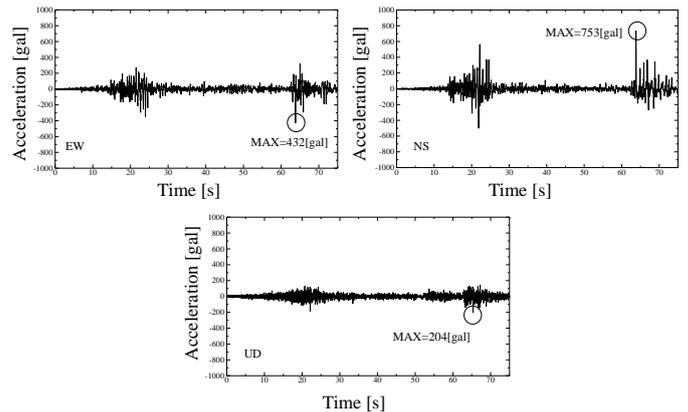


Fig.6 Input ground motion

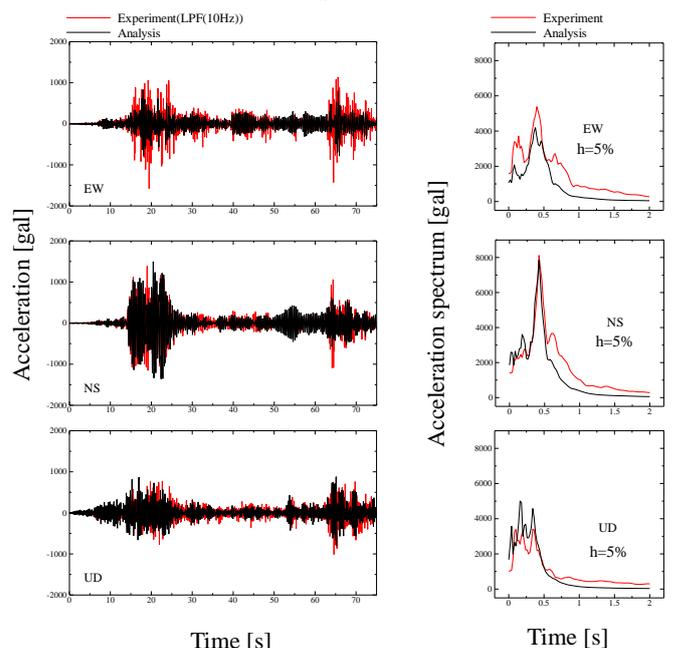


Fig.7 Acceleration responses (X4-Y3) Fig.8 Acceleration response spectrum (X4-Y3)

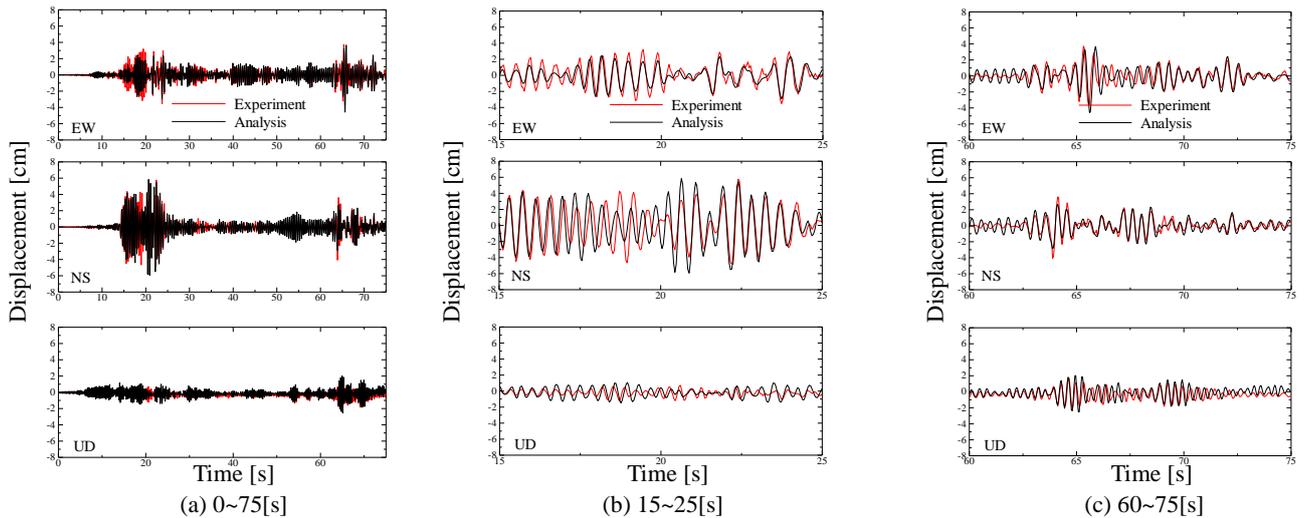


Fig.9 Displacement responses (X4-Y4)

屋根面の変位応答の時刻歴について、解析と実験の結果を比較したものを Fig.9 に示す。Fig.9 より、解析が実験結果の位相や振幅に良好に一致していることが確認できた。

Fig.10 に、23.9s 時の吊りボルトとブレースの挙動を示す。図より、屋根面のブレースの中央部に塑性座屈の発生が確認され、同様の現象は体育館側面のブレースにも確認されたが、床のブレースでは座屈の発生は確認されなかった。また、吊りボルトにも鉛直方向の地震動に起因する座屈変形が確認された。

次に、天井の落下挙動を Fig.11 に示す。Fig.11(a) の 16 秒付近において、壁とせっこうボードが体育館側面で複数回接触した。その結果、ビスのせん断破壊が発生し、そのビスが受け持っていた荷重が周囲のビスに再分配された。さらに、再分配された荷重に周囲のビスが耐えられず引き抜かれ、せっこうボードが単体で脱落する現象が確認された。天井同士が接触し、さらに吊りボルトが座屈したことで天井面全体が上下方向に揺れやすくなったため、頂部の中央付近でクリップが破損し、野縁とせっこうボードが一体化して宙吊り状態になる現象も確認された。72 秒付近 (Fig.11(b)) においては、地震動により宙吊りになった天井が上下に大きく揺れたため、野縁と野縁受けを繋ぐクリップが破損し、また破損したクリップが受け持っていた荷重が周囲のクリップに再分配されることにより、連鎖的な破損が発生した。その結果、頂部付近の天井は、野縁とせっこうボードが一体化して落下した。

実験 (1 回目加振) では、天井の頂部付近のハンガーの滑りや、クリップが破損して野縁とせっこうボードが一体化して宙吊りになる現象は確認されたが、天井落下は発生しなかった。解析と実験で異なる結果となったが、この原因として以下の 2 点が考えられる。

1 つ目は、解析ではハンガー等の滑りを考慮していないことが考えられる。実験では接合部材に外力がかかった際に、滑りが遊びとなることでエネルギーが散逸され、接合部材自体への損傷が抑えられたと思われる。しかし、解析上では滑りを考慮していないため、外力が接合部材の破壊エネルギーに全て変換され、脱落しやすくなったと考えられる。

2 つ目は、壁部材の要素分割が粗く、せっこうボードと広い面積で接触するため、接触時に発生する衝撃力が過大に与えられたものと考えられる。Fig.11(a) の体育館側面におけるビスのせん断破壊はその衝撃力が原因と考えられる。

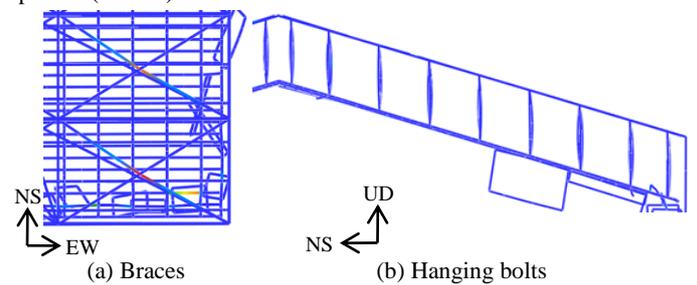


Fig.10 Deformations of braces and hanging bolts (23.9[s])

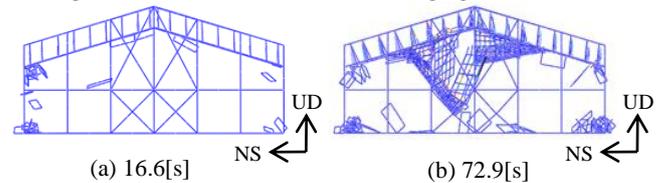


Fig.11 Collapse behavior of ceiling

## 6. 結言

未対策天井を付加した体育館構造躯体モデルに吊りボルトとブレースの座屈現象を考慮し、地震応答解析により天井落下現象の再現を試みた。吊りボルトが座屈して天井面が上下方向に揺れやすくなったためにクリップが脱落し、頂部の中央付近で野縁とせっこうボードが一体化して宙吊りになる現象が確認された。また、宙吊りになった天井が地震動でさらに揺れることにより、天井を支えるクリップが破損し、野縁とせっこうボードが一体化して落下する現象が確認できた。今後、滑りの考慮や接触時の衝撃力について検討する予定である。

## 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, pp.39-46, 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, 日本建築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: 在来工法天井の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, 安藤顕祐, 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