

地震時における体育館施設内の天井落下解析

Collapse Analysis of Ceiling in Gymnasium during Seismic Excitation

磯部大吾郎¹⁾, 山本卓也²⁾, 田川浩之³⁾, 山下 拓三⁴⁾, 佐々木智大⁵⁾

Daigoro Isobe, Takuya Yamamoto, Hiroyuki Tagawa, Takuzo Yamashita and Tomohiro Sasaki

1) 博(工) 筑波大学 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1320975@u.tsukuba.ac.jp)

3) Ph.D. 武庫川女子大学 准教授(〒663-8121 兵庫県西宮市戸崎町1-13, E-mail: tagawa@mukogawa-u.ac.jp)

4) 博(工) (独)防災科学技術研究所(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21, E-mail: tyamashi@bosai.go.jp)

5) 博(工) (独)防災科学技術研究所(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21, E-mail: tomo_s@bosai.go.jp)

Investigations on behaviors of ceiling during seismic excitation as well as on building structure itself are becoming more important to maintain our safety after or during evacuation. On the other hand, it is usually very costly to simulate these behaviors by experiments. The main objective of this study is to develop a low-cost, highly accurate finite element code for analyzing behaviors of ceiling under seismic excitation. We applied the ASI-Gauss code, which is originally developed to analyze collapse behaviors of buildings, to these problems. The numerical results are validated with the experimental result obtained by a shake-table test performed at E-Defense.

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

1. はじめに

近年、大規模空間を持つ施設では、地震により吊り天井などの非構造部材に多数の被害が発生している。適切な天井落下対策を進めるには、天井の脱落メカニズムの把握が必要不可欠であり、そのため天井要素を取り出した実験[1]-[4]や、実大規模の実験[5]が実施されている。しかし、実験では実験装置の制約等により現場の状況を必ずしも再現できていないことも多く、また、屋根形状、設備の干渉など現場毎に異なる特殊な条件に対する解決策が求められることもあり、再現性を向上させることは容易ではない。一方、数値解析により天井の落下現象を再現できるようになればこれらの課題は解決できると考えられ、解析技術の向上も非常に重要である。

本研究では、平成 25 年の建築基準法施行令の改正と関連告示の制定前の耐震対策を施していない未対策天井を数値モデル化し、その地震応答解析を行うことで、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、部材破断などを含む非線形性が高い解析でも安定して行える ASI-Gauss 法[6]を用いた。

2. 解析モデル

(1) 部分天井モデル

ASI-Gauss 法では、1 部材当り 2 つの線形要素モデル化はり要素のモデル化で高精度の弾塑性解析を実現している[6]。図-1 に線形要素モデル化した部分天井モデルを示す。このモデルは、解析手法の検証のために作成したものであり、天井の一部を取り出した簡易モデルである。吊りボルト、野縁受け、野縁、クリップ、ビス、せっこうボードをそれぞれ黒、青、緑、赤、灰色で表す。天井一壁間の衝突による、壁付近のせっこうボ

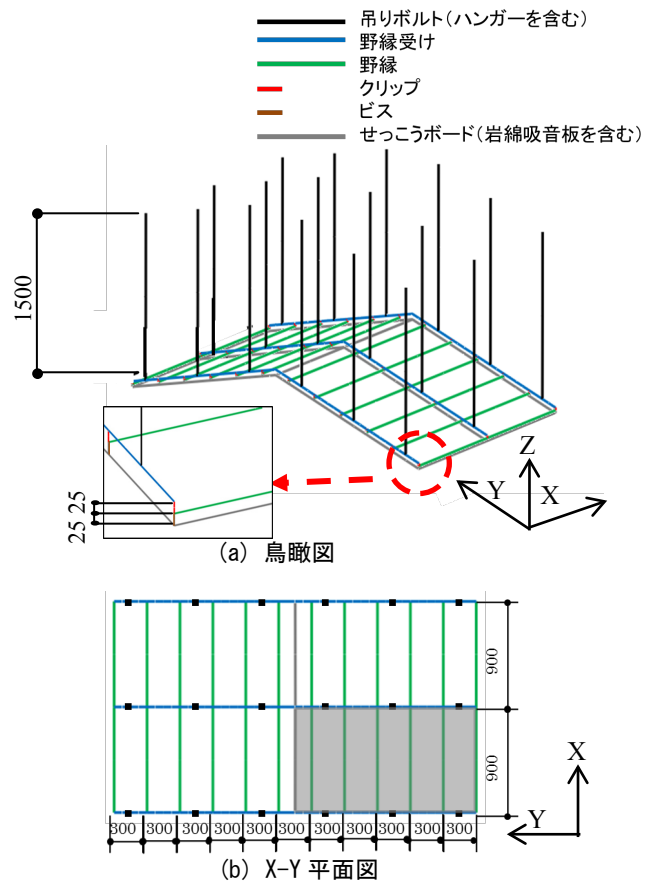


図-1 部分天井モデル (単位 : [mm])

ップ、せっこうボードをそれぞれ黒、青、緑、赤、灰色で表す。天井一壁間の衝突による、壁付近のせっこうボ

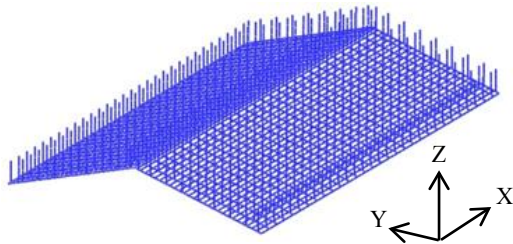


図-2 体育館仕様の天井モデル

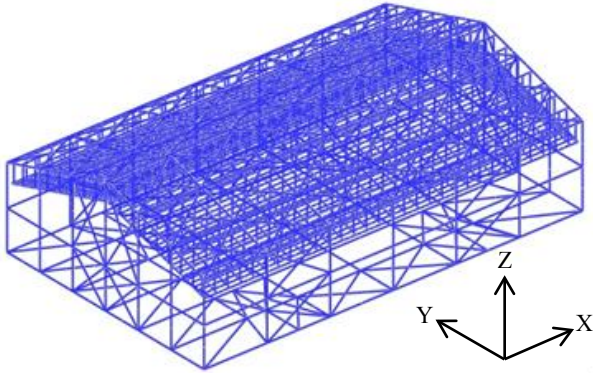


図-3 天井付き体育館構造躯体モデルの鳥瞰図

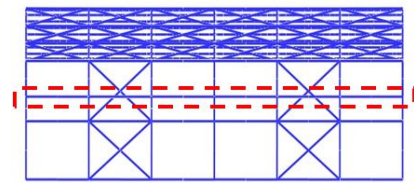
ードの局所的な脱落を再現するため、各々のせっこうボードを個別にモデル化した。また、野縁ーせっこうボード間の脱落を再現するためにビスをモデル化した。ここでは、野縁 1 本当り 2 本のビスでせっこうボードが固定されていると仮定した。また、ボード表面に貼り付けたロックウール吸音板はボードと一体であると仮定し、その重量のみをボードに付加した。なお、吊りボルトとハンガーも一体化してモデル化しており、荷重作用位置が部材軸から偏心していることについては考慮していない。

(2) 体育館仕様天井モデル

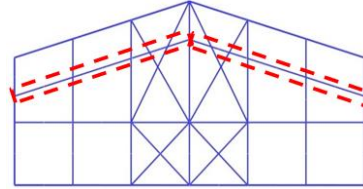
図-2に、部分天井モデルと同様の手法で再現した体育館仕様の天井モデルを示す。吊りボルト間隔はX軸方向に1,000 mm、Y軸方向に1,147 mm（屋根面沿いに1,200 mm）である。吊りボルトの長さは1,500 mm、クリップの高さ寸法は25 mmとした。

(3) 天井付き体育館構造躯体モデル

体育館仕様天井モデルを体育館構造躯体に付加したモデルを図-3に示す。柱、梁、母屋、斜め部材の断面、構造躯体の詳細な仕様については、文献[5]を参照されたい。天井は壁に囲まれており変位が拘束されることから、壁の有無により応答が大きく変化することが考えられるため、壁との接触を考慮することが重要である。実験では壁を模擬するH形鋼を天井周囲に配置していることから、解析モデルに図-4の赤い点線で示す壁を模擬するH形鋼（以降これを単に壁と呼ぶ）を追加し、天井ー壁間の接触を考慮した。また、斜め部材の詳細な履歴特性（引張軸力は伝達、圧縮軸力は非伝達など）を導入する代わりにその軸剛性を半分に低減し、動特性を表現した。本解



(a) X-Z 平面



(b) Y-Z 平面

図-4 壁を模擬する H 形鋼の配置

析モデルの固有周期は桁行方向が0.325 秒、梁間方向が0.365秒（実験の試験体は各々0.368秒、0.399秒）であった。

3. 解析条件

解析には、K-NET仙台波50%加振時に震動台上で観測された加速度記録を用いた。この記録のうち、図-5に示す主要動を含む90秒間を入力して解析した。時間増分は1ミリ秒、総ステップ数は90,000 stepである。実験では試験体が震動台の床を大幅にはみ出していたため、解析では震動台上の柱脚部のみを完全固定とし、その点に地震動を入力した。ただし、現段階では震動台周囲の床にモデルが接地できる状態となっており、試験体の周囲が宙に浮いていた実験条件と完全には一致していない。

(1) クリップの脱落条件

野縁と野縁受けをつなぐクリップは、天井の要素試験結果[1]を参考にし、図-6(a)に示すように鉛直下向きに0.4 kNの力が作用した場合に脱落するものと設定した。

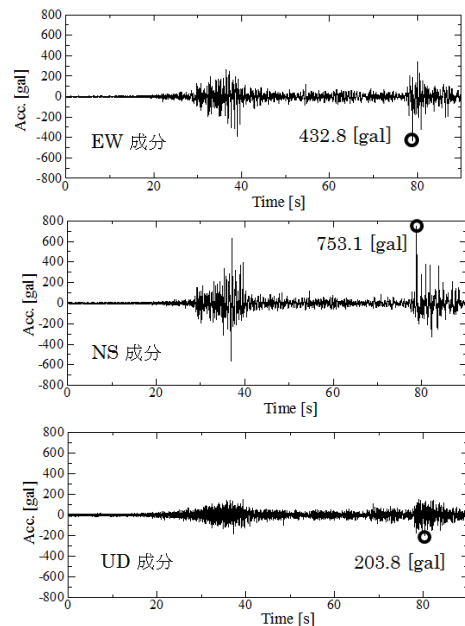
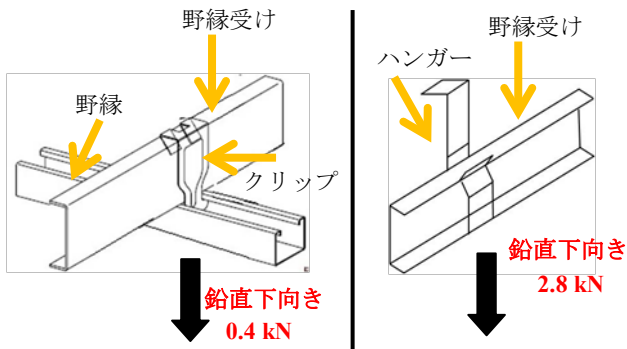


図-5 入力波



(a) クリップの脱落条件 (b) ハンガーの脱落条件

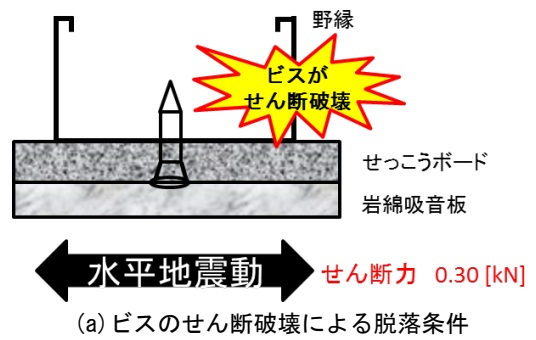
図-6 クリップとハンガーの脱落条件

(2) ハンガーの脱落条件

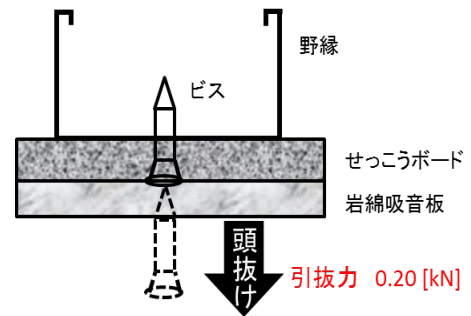
天井の要素試験結果[2]を参考にし、図-6(b)に示すように鉛直下向きに2.8 kNの力が作用した場合、ハンガーが開き、野縁受けの支持能力が低下するものと設定した。

(3) ビスの破壊条件

図-7(a)に示すようにビスに作用するせん断力が0.30 kNを上回った場合[3]、または図-7(b)に示すように引き抜き力(引張軸力)が0.20 kNを上回った場合[4]にビスの頭抜け

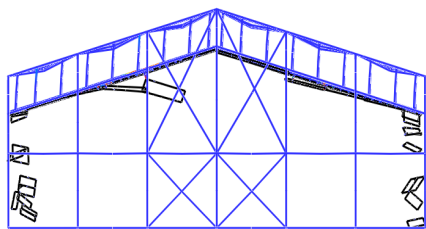


(a) ビスのせん断破壊による脱落条件

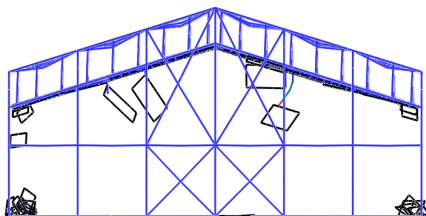
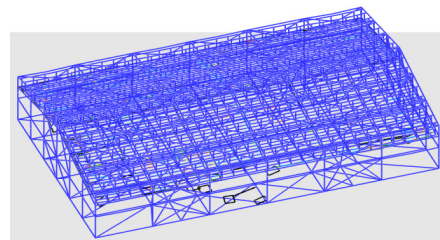


(b) ビスの引抜きによる脱落条件

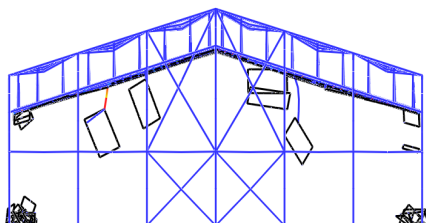
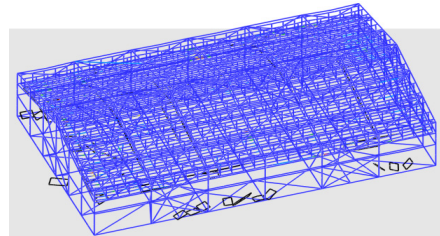
図-7 ビスの脱落条件



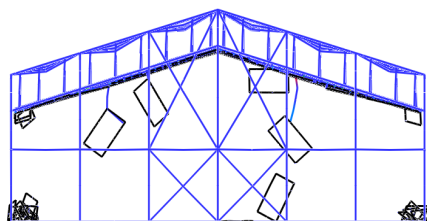
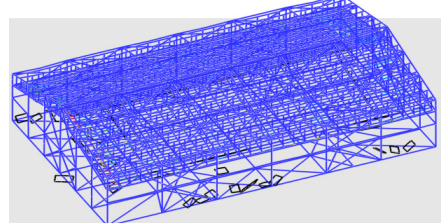
(a) 38.0 秒



(b) 40.0 秒



(c) 44.0 秒



(d) 45.8 秒

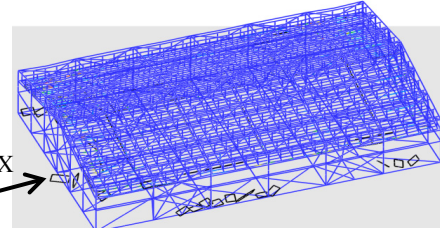


図-8 体育館天井の局所落下現象

が生じ、せっこうボードが脱落することとした。

4. 解析結果

図-8に天井付き体育館構造躯体モデルの解析により得られた天井の落下挙動を示す。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。なお、図には脱落した要素は表示していない。

46秒段階までの天井の落下挙動を図に示す。入力波が第一ピークを迎える38秒付近において壁と天井（せっこうボード）との衝突が頻繁に起こり、多くのクリップとビスが脱落し、せっこうボードが落下する現象が確認された。2枚まとめて落下したり、野縁と連結したまま中吊りになった状態のせっこうボードも見られた。次に、46秒段階での天井の落下範囲を図-9に示す。図から分かるように、落下した天井は壁が配置された端部付近に多く分布しており、これらは主に衝突によって落下したと予想される。頂部付近の天井が多く落下した実験結果とは異なる結果となっているが、これは地表の拘束条件の相違、アンカーボルトの引き抜きを考慮した回転剛性の未考慮、斜め部材の履歴特性の未考慮などが原因と考えられ、今後はこれらの検討が必要である。最後に、屋根面の加速度応答を実験結果と比較したものを図-10に示す。実験結果と比較すると、解析結果の応答加速度はかなり小さい応答値を示している。実験では屋根荷重を再現するための錘が母屋材に衝突するなどの現象も確認されており、これらが計測値に影響を与えている可能性があるため、振幅の相違についても今後検討する必要がある。

5. おわりに

せっこうボードや野縁等をモデル化し、クリップ、ハンガーの破損、ビスの頭抜けなどの脱落条件を導入して解析を実施した結果、天井が衝突により局所的に落下する現象を再現できた。主に壁と天井が衝突し、その付近のクリップやビスが脱落し、せっこうボードが落下するという現象が見られた。現段階では実験結果の再現までには至っていないが、今後、先に挙げた点の検討を行うことにより、再現性が高められるものと考えている。

参考文献

[1] 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

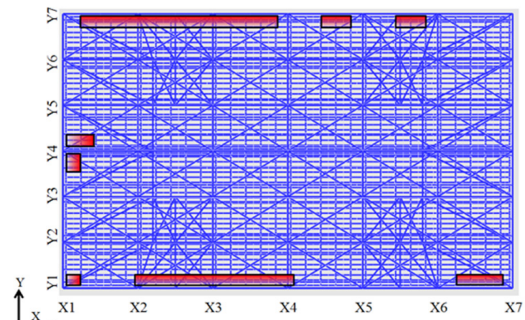


図-9 天井の落下範囲（赤で示す領域）

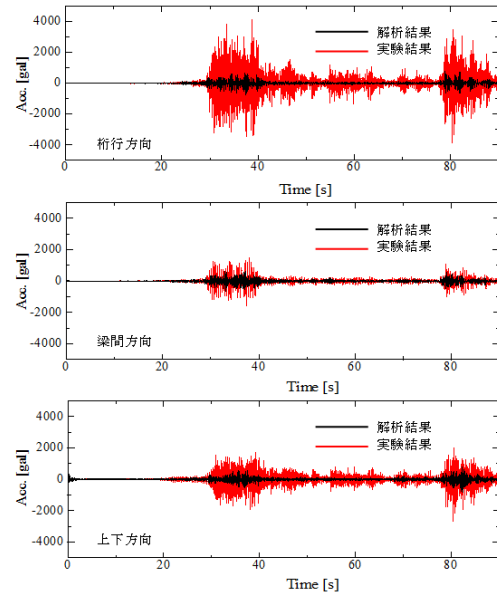


図-10 屋根面の加速度応答の比較 (X4-Y5 通り)

集, B-1, pp. 845-846, 2006年9月。

- [2] 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。
- [3] 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。
- [4] 櫻井重喜, 熊谷祥吾, 永井拓生, 川口健一, 安藤頭祐, 新谷真人: 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。
- [5] 防災科学技術研究所: 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, 第391号, 2015年2月。
- [6] 磯部大吾郎, チョウミョウリン: 飛行機の衝突に伴う骨鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp. 39-46, 2004年5月。