

ASI-Gauss法を用いた体育館天井の落下解析

Collapse Analysis of Gymnasium Ceiling Using ASI-Gauss Technique

山本卓也¹⁾, 田川浩之²⁾, 山下拓三³⁾, 磯部大吾郎⁴⁾

Takuya Yamamoto, Hiroyuki Tagawa, Takuzo Yamashita and Daigoro Isobe

1)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)

2)Ph.D.(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:tagawa@bosai.go.jp)

3) 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)

4) 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)

Many accidents of ceiling collapse were observed in the 2011 Great East Japan earthquake and others in Japan. In this paper, a numerical seismic simulation of ceiling collapse in the full-scale gymnasium specimen is conducted. Numerical model consists of steel structural frames and suspended ceiling. All members are modeled by the linear Timoshenko beam elements. The ASI-Gauss technique, which is utilized to shift the numerical integration point adaptively to an appropriate position, is applied to the nonlinear finite element procedure for structurally discontinuous problems. Numerical seismic simulation shows that ceiling collapse progresses due to the detachment of clips attaching ceiling joist to ceiling joist receiver and finally results in falling-down of ceiling.

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

1. はじめに

大規模空間を持つ施設では、近年の地震において非構造部材に多数の被害が確認されている。その中で最も被害が多いのが天井の落下被害である。東北地方太平洋沖地震においても天井の落下をはじめ、設備機器・配線等の損傷・落下する被害が多く報告されている[1]。大空間建築物は、天井高が高いため、天井が落下した場合、人命に危険を及ぼす恐れがある。特に、避難施設としての役割を担う学校施設の体育館は、地震後の建物の機能維持と人の安全確保のために天井落下対策は喫緊の課題である。適切な天井落下対策を講じるには天井の落下現象のメカニズムの把握が必要不可欠である。これまでに、天井のみを対象とした振動台実験、数値解析による検証が実施された[2]。2014年1月には、実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)において体育館を想定した大空間建築物に設置された吊り天井の脱落被害再現実験[3]が実施された。本研究は、地震動による体育館の天井落下解析を行い、天井落下のメカニズムを解明し、天井の耐震対策を提案することを目的とする。解析には地震動、弾塑性、落下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[4]を用いる。本稿では、体育館仕様の天井および体育館構造躯体をモデル化し、地震動によって天井が損傷・落下する現象について検証した結果を報告する。

2. 天井の概要

体育館で用いられている天井は鋼製下地在来工法天井(以下、在来工法天井)と呼ばれるものである。天井を裏側からみた様子を図-1に示す[5]。吊りボルト、ハンガ

一、野縁受け、クリップ、野縁と呼ばれる部材から天井が構成され、これらが一体化したものを天井鋼製下地材と呼んでいる。屋根から吊り下げられている部材が吊りボルトであり、吊りボルトの下端部に野縁受けを支えるハンガーが取り付けられている。ハンガーの先に野縁受けが取り付けられ、野縁受けと野縁はクリップで連結され、野縁に石膏ボードなどがビスで止められている。

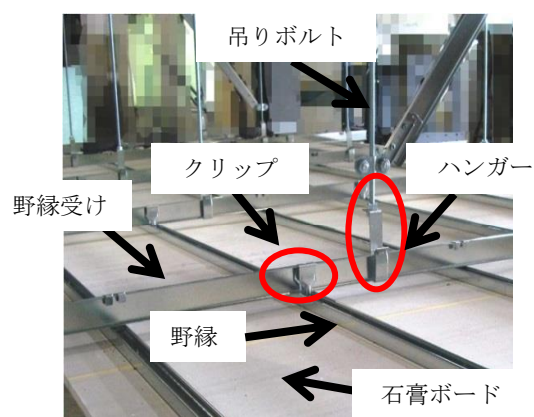


図-1 鋼製下地在来工法天井

3. 大規模空間の天井落下事例

東北地方太平洋沖地震の被害報告[6]によると、ハンガーと野縁受けは落下せず、天井面に残った状態で、野縁と石膏ボードが一体化したまま落下する事例が多かった。図-2(a)に地震動による野縁と石膏ボードの落下の様子を示す。落下の直接的な要因としては、クリップの変形・外れによって他のクリップに荷重が分配され、連鎖的に

他のクリップが変形・外れを起こし、天井落下するということが考えられる。また他の被害例として、ハンガーが開いていたという報告もあり、このハンガーの開きも天井落下の要因の一つであると考えられる。図-2(b)に地震動によってハンガーが開いた様子を示す。



(a)野縁と石膏ボードの落下 (b)ハンガーの開き

図-2 地震動による天井落下被害[6]

4. 未対策天井の仕様

本稿では、未対策天井を解析モデルの対象とする。未対策天井とは、揺れ止めのための斜め部材や周囲の壁との間に隙間（クリアランス）を設けない、平成15年国土交通省による技術的助言[7]よりも前の考え方で設計・施行された、耐震対策がされていない天井のことを示す。下地材はJIS19形の軽量鉄骨下地材を使用しており、天井仕上げ材は厚さ9.5 [mm]の石膏ボードと厚さ9 [mm]の岩綿吸音板を組み合わせている。未対策天井の寸法、材質を表1に、未対策天井の仕様を表2に示す[8]。

表-1 未対策天井の構成部品の寸法および材質

名称	寸法 [mm]	材質
吊りボルト	φ 9	JIS G 3101
野縁受け	38×12×1.2	JIS G 3302
シングル野縁	19×25×0.5	JIS G 3302
ダブル野縁	19×50×0.5	JIS G 3302
クリップ	板厚0.6	JIS G 3302

表-2 未対策天井の仕様

名称	仕様
吊りボルト	3/8"吊りボルト(3分) @1147×1000[mm]
野縁受け	CC-19 @1000[mm]
シングル野縁	CS-19 @364[mm]
ダブル野縁	CW-19 @1820[mm]
クリップ	CS-19クリップ
天井仕上げ材	石膏ボード9.5[mm]+岩綿吸音版9[mm]

5. 解析モデル

(1) 天井の詳細モデル

未対策天井をすべて線形チモシェンコはり要素でモデル化する。ASI-Gauss法では、1部材当り2要素のモデル化でも、弾塑性解析において高い精度で解析が行えることが確認されている。図-3に天井の詳細モデルを示す。吊りボルト、野縁受け、野縁、クリップ、石膏ボードをそれぞれ黒、青、緑、赤、灰色で表す。なお、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) 体育館仕様の天井モデル

図-4に体育館仕様の天井モデルを示す。大空間建築物試験体の図面[9]を参考にモデル化した。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]、クリップの寸法は25 [mm]としている。

(3) 体育館構造躯体モデル

体育館仕様の天井モデルを加えた体育館構造躯体のモデルを図-5に示す。柱、梁、母屋、ブレースの断面は大空間建築物試験体の図面[9]を参考にモデル化した。鋼種はSS400とする。躯体モデルの寸法は30×18.6 [m]で、屋根の頂部の高さは9.09 [m]であり、小中学校で使用される体育館とほぼ同等の大きさである。天井の吊り元となる母屋材はC形鋼(C-100×50×20×3.2)を介して、w3/8吊りボルトを用いて天井を吊り下げている。母屋、ブレースはトラス構造とし、柱、梁はラーメン構造とする。総要素数17,900、総節点数13,736である。

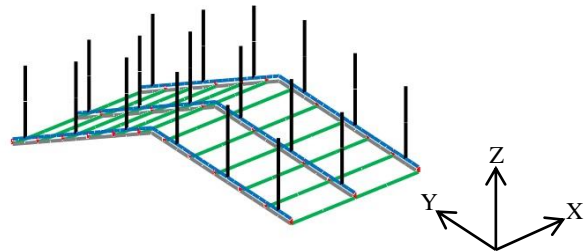


図-3 天井の詳細モデル

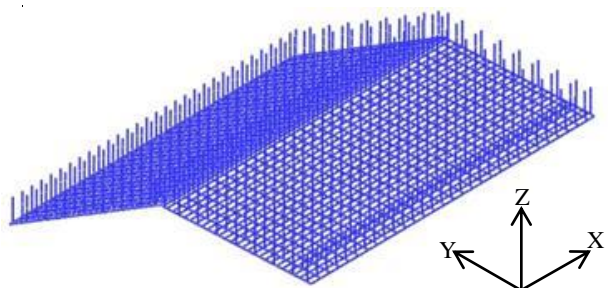


図-4 体育館仕様の天井モデル

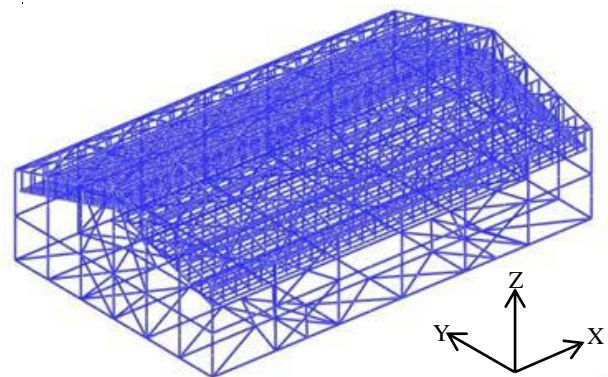


図-5 体育館構造躯体の鳥瞰図

6. 解析条件

(1) 入力地震波

解析に用いた入力地震波は、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の震源から170km離れた宮城県仙台市宮城野区にて強震観測網(K-NET)で観測された地震動K-NET仙台波（震度：6強）である。図-6に入力地震波（K-NET仙台波100%）を示す。表-3にK-NET仙台波100%のそれぞれの方向における加速度のピーク値と時間を示す。本解析では、K-NET仙台波50%を入力加振する。X軸負の方向にEW成分、Y軸負の方向にNS成分、Z軸にUD成分の三軸方向として、90秒間入力する。拘束点は体育館基礎部を完全固定として解析を行う。

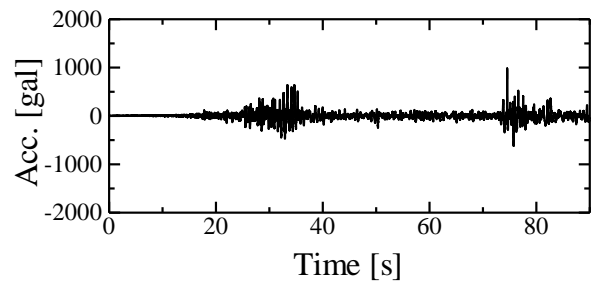
(2) 脱落条件

a) クリップの脱落条件

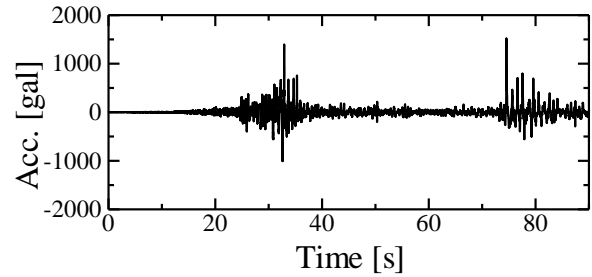
天井落下の最も多い要因であるクリップの脱落条件を導入する。地震動によって野縁と野縁受けをつなぐクリップの脱落を表現する。脱落条件は天井の要素試験結果[10]を参考にし、図-7(a)に示すように鉛直下向きに0.4 [kN]の力が作用した場合、クリップが脱落すると設定した。

b) ハンガースの脱落条件

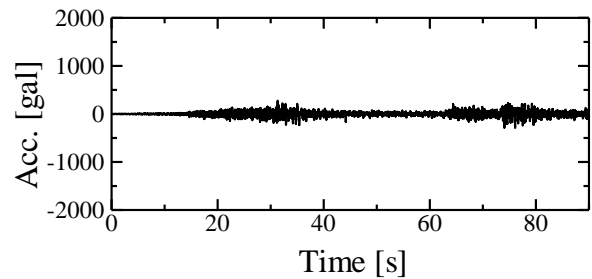
天井落下のもう一つの要因であると考えられるハンガースの脱落条件を導入する。天井の要素試験結果[11]を参考にし、図-7(b)に示すように鉛直下向きに2.8 [kN]の力が作用した場合、ハンガースが開き、野縁受けの支持能力が低下するように設定した。



(a) EW成分



(b) NS成分



(c) UD成分

図-6 入力地震波(仙台波100%)

7. 解析結果

解析での時間増分は1 [ms]とした。解析の総ステップ数は90,000 [step]となる。図-8に解析モデルの落下挙動を示す。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表している。

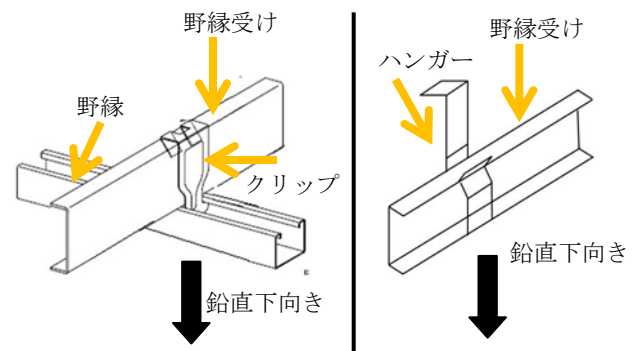
$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (1)$$

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、脱落した要素はグラフィック表示していない。

時刻0.0 [s]は自重のみが作用する初期状態である。解析開始から28.0 [s]においてY軸方向のクリップがいくつか脱落し始め、31.5 [s]においてX軸方向のクリップが脱落し、野縁および石膏ボードが一体化したまま落下が始まった。33.0 [s]で天井全面が落下した。

表-3 加速度のピーク値と時間

	EW成分	NS成分	UD成分
時間[s]	74.54	74.54	31.32
加速度[gal]	982.3	1517.2	276.3



(a)クリップの脱落条件 (b)ハンガースの脱落条件
図-7 脱落条件の設定

8. おわりに

本研究では、大空間建築物試験体の図面を参考に、体育館仕様の天井モデルおよび体育館構造躯体のモデルを作成した。また、ASI-Gauss法を用いた解析コードにクリップ、ハンガーの脱落条件を導入し、3次元地震応答解析を行った結果、地震動による天井落下を再現することができた。

9. 今後の予定

1. 接触アルゴリズムの導入

天井は外壁に囲まれているため、外壁と接触して天井が落下することが考えられる。図-9の赤い点線で示す横架材を追加し天井と外壁の接触アルゴリズムを導入する。

2. クリップの脱落条件の導入

クリップの取り付けの向きによってクリップの耐力が異なるため、水平方向に荷重が加わる際のクリップの脱落条件を導入する。

3. 局所的な天井落下の再現

局所的な天井落下を再現するために、野縁ジョイントなどのモデルを導入する。

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] 中本康，元結正次郎，豊島学，相原正史：在来工法による鋼製下地天井の力学的特性に関する研究その2：天井システムの力学的特性，日本建築学会構造系論文集，B-1，pp.913-914，2005年9月。
- [3] 独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学センター：大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害再現実験公開実験資料，平成25年1月。
- [4] 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。
- [5] 一般社団法人建築性能基準推進協会：地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討（平成23年度建築基準整備促進事業），2012年3月。
- [6] 一般社団法人 建築性能基準推進協会：建築物の天井脱落対策に係る技術基準の解説，平成25年10月。
- [7] 国土交通省住宅建築指導課長：大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について（技術的助言），国住指2402号，平成15年10月。
- [8] 耐震構造設計ハンドブック，社団法人 日本建築構造技術協会，オーム社。
- [9] 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：大空間建築物試験体 設計図。
- [10] 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.845-846，2006年9月。
- [11] 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。

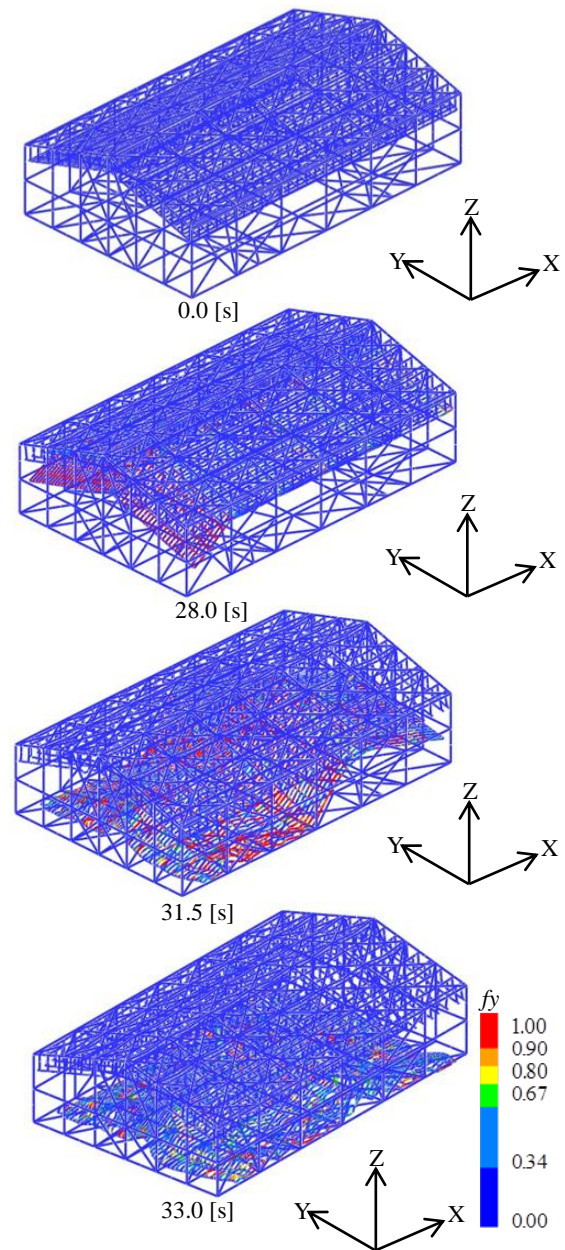


図-8 天井の落下挙動

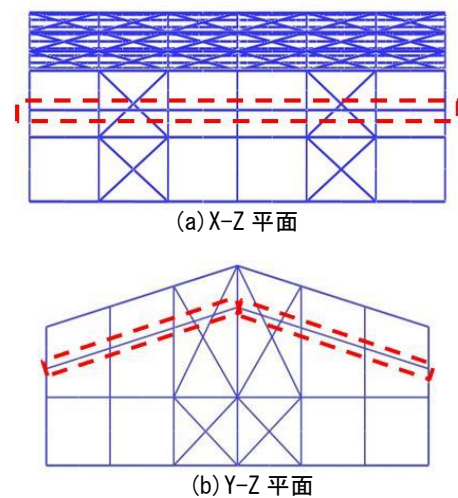


図-9 解析モデル（横架材追加）