

# 耐震対策を施した吊り天井の地震時挙動解析

## Motion Analysis of Earthquake-Resistant Suspended Ceilings under Seismic Excitation

前田 弘徳<sup>1)</sup>, 山下 拓三<sup>2)</sup>, 磯部 大吾郎<sup>3)</sup>

Kotoku Maeda, 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: s1720973@s.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 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)

3) 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)

As large-span buildings such as school gymnasiums are used as refuge bases in a disaster such as earthquakes, they are required to maintain their functionality after suffering an earthquake and are also required to resist aftershocks. However, in the Great East Japan Earthquake, it has been reported that gymnasiums do not satisfy the function as refuge bases due to falling of ceilings and lightings. Thus, there is a need to take measures to prevent ceilings from falling. In order to apply effective earthquake-resistant measures, it is necessary to understand the collapse mechanism of the ceilings. In this paper, the difference of the behaviors between earthquake-resistant and non-resistant ceilings under seismic excitations was confirmed by conducting several motion analyses.

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

### 1. 緒言

学校体育館などの大規模空間を有する建築物は、災害時に避難拠点となるため、災害発生後も使用可能であり、余震にも耐えうる施設であることが求められている。しかし、東日本大震災では、最大震度7の本震に加えて震度6以上の余震が複数回発生し、図-1に示すように天井や外壁、内壁などの非構造部材や照明等の設備機器の落下被害により避難拠点としての機能を満たさない事例が報告されている[1]。東日本大震災以降、天井落下報告を受け、国土交通省では2013年に建築基準法の改正[2]と関連告示の制定[3]を行い、技術基準[4]を2014年4月1日より施行している(以下、この技術基準をH26技術基準とする)。

H26技術基準では「6 m超の高さにある、水平投影面積200 m<sup>2</sup>超、単位面積重量2 kg/m<sup>2</sup>超の天井で、人が日常利用する場所に設置してあるもの」を「脱落によって重大な危害を生ずるおそれがある天井」(「特定天井」とも略される)と定義し、脱落防止対策を義務づけた。

効果的な耐震対策を施すには脱落被害メカニズムの解明が必要であり、そのために実大三次元震動破壊実験施設(以下、E-ディフェンス)で吊り天井の脱落被害再現実験が実施された[5]。この実験では2種類の天井の実験が実施された。一つは、脱落防止対策が施されていない既存の天井を模擬した天井(以下、未対策天井)であり、もう一つは、H26技術基準に基づいて脱落防止対策が施された天井(以下、耐震天井)である。未対策天井を設置した実験では、脱落被害メカニズムの検証が行われ、耐震天井を設置した実験では、耐震性、耐震余裕度の検証が行われた。これらの実験により有用な知見を得られたが、天井は様々な種類の形状が存在するため、脱落被害メカ

ニズムの解明には様々な条件での実験・検証が必要とされる。大規模な実験を様々な条件で何度も実施するには時間やコストがかかるという問題があるが、条件やパラメータを容易に変更することができる数値シミュレーションを用いれば、そのような負担を軽減できる。

本研究の目的は、未対策天井と耐震天井の脱落被害を数値シミュレーションにより再現し、脱落や損傷のメカニズムを解明するための知見を得ることである。解析には、地震動、弾塑性、破断を含む非線形性の高い解析を安定して行えるASI-Gauss解析コード[6]を用いる。

### 2. 体育館天井の概要

体育館には一般に鋼製下地在来工法天井(図-2)と呼ばれる天井が設置されている。天井は吊りボルト、野縁受け、野縁、せっこうボードで構成され、ハンガー、クリ



図-1 東北地方太平洋沖地震(2011年)

ップ、ビス、野縁受け、野縁ジョイントと呼ばれる金具で接合されている。吊りボルトと野縁受けはハンガー、野縁受けと野縁はクリップ、野縁とせっこうボードはビスで接合されている。野縁ジョイントは、野縁または野縁受け同士を接合する。

本研究では、E-ディフェンスの実験で用いられた2種類の天井を対象とした。前述のように、1つは脱落防止対策が施されていない未対策天井で、もう1つはH26技術基準に基づいて脱落防止対策が施された耐震天井である。未対策天井は鋼製下地在来工法天井であり、体育館の屋根の勾配と同じになるようにすべての吊りボルトの長さは1.5 mである。未対策天井の場合は天井と壁との間のクリアランスは設けられていない。

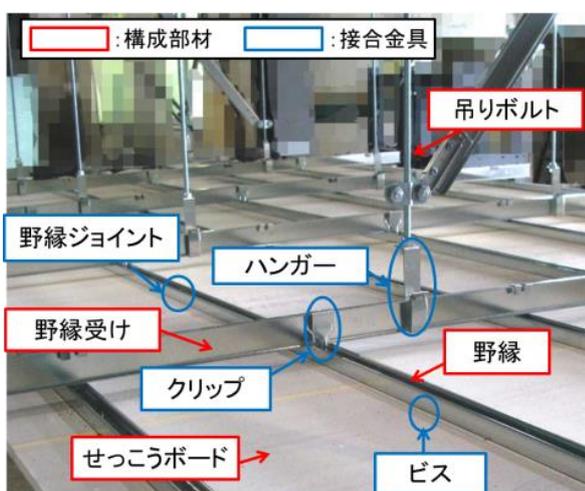


図-2 鋼製下地在来工法天井

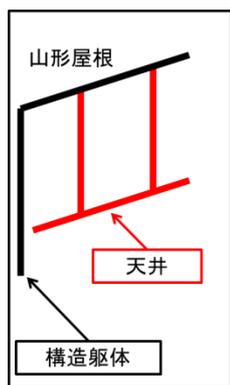


図-3 屋根と天井の位置関係

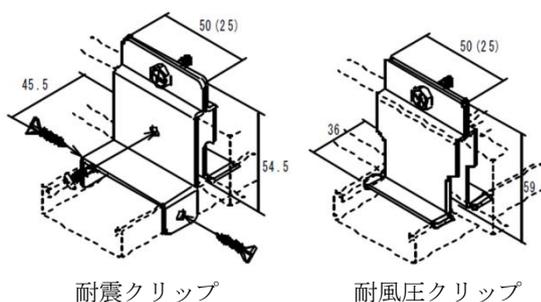


図-4 耐震天井に使用されるクリップ

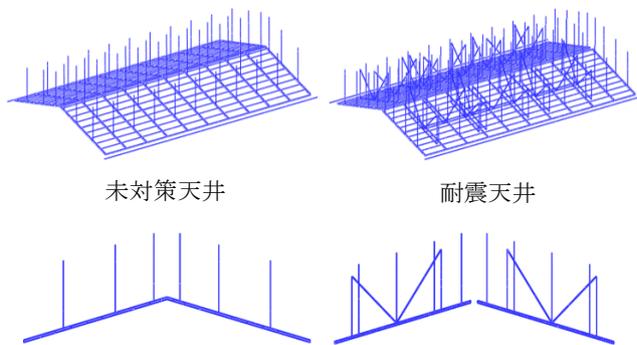


図-5 部分天井モデル

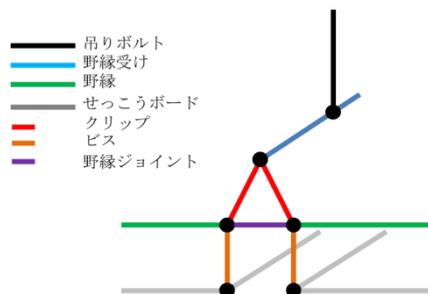


図-6 天井部材の構成図

H26技術基準の仕様では、吊りボルトの長さを一様とする条件が適用できるため、実験で用いられた耐震天井は、図-3に示すように未対策天井と同様に屋根の勾配と同じ傾きを有する勾配天井である。

次に、未対策天井と耐震天井の異なる点を記す。まず、吊りボルトの間隔が異なり、未対策天井の吊りボルトの間隔が桁行1,000 mm×梁間1,147 mmであるのに対し、耐震天井の場合は1本/m<sup>2</sup>以上となるように桁行1,000 mm×梁間860 mmの間隔で設置されている。野縁受けと野縁を接合するクリップも異なり、耐震天井で使用されているクリップは、未対策天井で使用されるクリップよりも強度が高いクリップである。未対策天井で使用されるクリップは爪をひっかけるだけの簡易的なものであるのに対し、図-4に示すように、耐震天井で使用されるクリップ(耐震クリップ、耐風圧クリップ)は力が作用する際に外れにくいようにビスで留めてある。また、耐震天井には桁行方向と梁間方向に斜め部材が設置されている。さらに、未対策天井にはクリアランスが設けられていないが、耐震天井には壁との間に60 mmのクリアランスが設けられている。

### 3. 解析モデルおよび解析条件

E-ディフェンスの実験で設置された未対策天井と耐震天井の2種類の部分天井モデルを作成した(図-5)。部分天井モデルは、実験に使用された天井の1/9の大きさで、寸法は桁行10 m×梁間6.2 mである。壁を模擬した横架材を梁間方向両端にモデル化し、天井と壁との接触を考慮した。解析では計算の安定性を保つために未対策天井のクリアランスを1 mmとし、耐震天井はE-ディフェンスの

実験と同様に60 mmのクリアランスを設けた。解析にはASI-Gauss法を用いたため、天井と横架材は全て線形チモシェンコはり要素を用いてモデル化した。未対策天井の要素数は4,272、節点数は3,465であり、耐震天井の要素数は7,404、節点数は6,610である。

表-1 各接合金具の脱落条件

	未対策天井	耐震天井
ハンガー	引張軸力 $\geq 2.80$ kN [5]	
ビス	引張軸力 $\geq 0.40$ kN かつ 軸歪 $\geq 0.12$ [7]	
	せん断力 $\geq 0.30$ kN かつ せん断歪 $\geq 0.72$ [8]	
クリップ	シングル腹掛け：引張軸力 $\geq 0.35$ kN [5]	耐震クリップ：引張軸力 $\geq 2.50$ kN
	シングル背掛け：引張軸力 $\geq 0.70$ kN [5]	耐風圧クリップ：引張軸力 $\geq 2.0$ kN
	ダブル：引張軸力 $\geq 0.80$ kN [5]	
野縁ジョイント	引張軸力 $\geq 0.29$ kN かつ 軸歪 $\geq 4.93 \times 10^{-5}$	

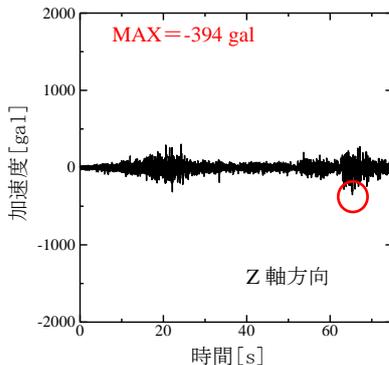
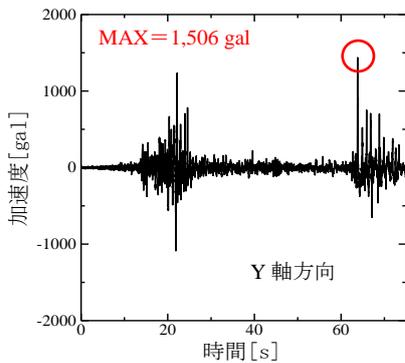
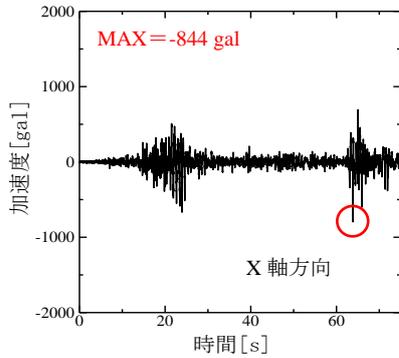


図-7 K-NET 仙台波 200%加速度波形

図-6は天井の構成を示す簡易図である。ハンガーは吊りボルトと一体化してモデル化した。クリップは2又に分かれた構造であり、クリップと野縁の節点の間に野縁ジョイントをモデル化している。また、せっこうボード間に1 mmの隙間を設けて、せっこうボード同士の接触を考慮した。

天井の接合部材であるハンガー、クリップ、ビス、野縁ジョイントには表-1に示す脱落条件を導入し、条件を満たした場合にはその要素を破断させ、脱落を表現した。ハンガーの脱落条件には荷重条件を設定し、ハンガー要素の軸方向に引張力2.8 kNが作用した場合に脱落を判定した[5]。クリップは未対策天井と耐震天井で異なるクリップが使用されているため、異なる条件を設定した。まず、未対策天井の場合には、シングルクリップの背掛けの場合は要素の軸方向に引張力0.35 kN、腹掛けの場合は引張力0.70 kN、ダブルクリップの場合は背掛け腹掛け共に引張力0.80 kNが作用した際に脱落を判定した[5]。次に、耐震天井の場合には、耐震クリップの場合は要素の軸方向に引張力2.50 kN、耐風圧クリップの場合は引張力2.0 kNが作用した際に脱落を判定した。クリップの種類は、脱落条件を変更することで表現した。ハンガーおよびビスについては、未対策天井と耐震天井で同じ条件を設定している[5,7,8]。なお、野縁ジョイントについては、瞬間的に発生する衝撃力で脱落することを防ぐため、荷重条件に加えて0.29 kNの引張軸力が静的に作用したときに発生する軸歪を脱落条件として設定し、これら2つの条件を満たした際に脱落することとした。

図-7に示すK-NET仙台波200%の3成分を吊りボルト上端の全節点に入力し、地震応答解析を実施した。解析の時間刻みは0.001 s、解析時間は75 sである。

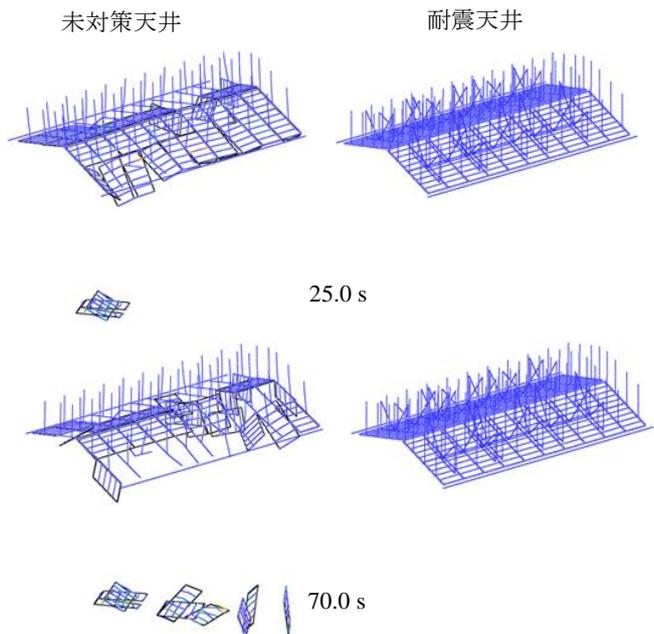
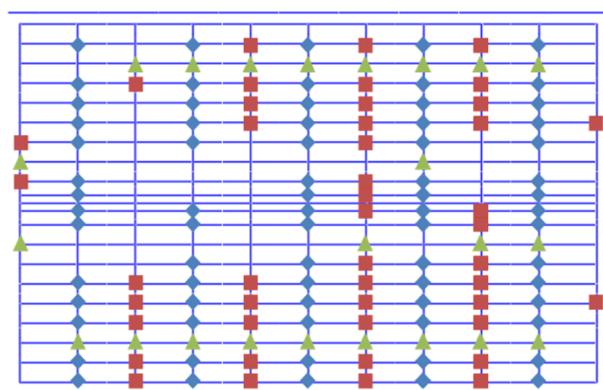
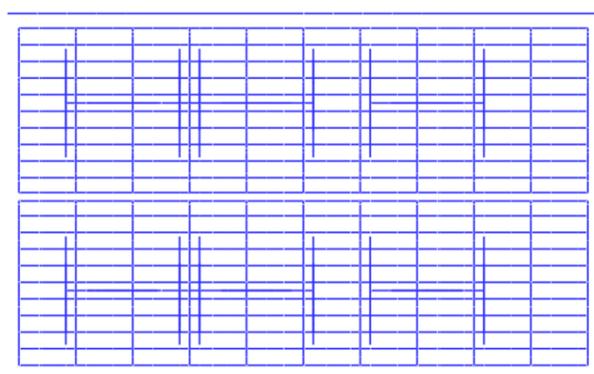


図-8 天井の挙動



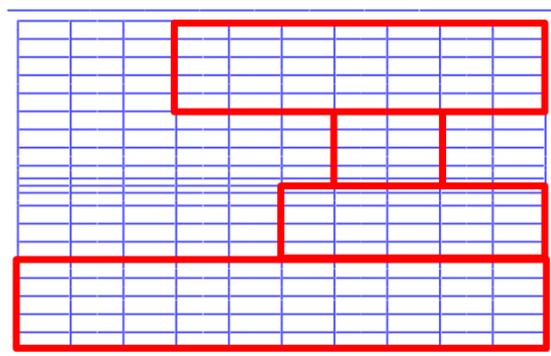
- ◆ シングルクリップ腹掛け
- シングルクリップ背掛け
- ▲ ダブルクリップ

未対策天井



耐震天井

図-9 クリップの脱落状況



- 天井の脱落部分

図-10 未対策天井の脱落状況

#### 4. 体育館天井の地震時挙動解析

図-8に25 sと70 sにおける天井の様子を示す。K-NET仙台波の2回目のピークの際、未対策天井ではクリップや野縁ジョイントが脱落し、広範囲に渡り天井が落下する結果となったが、耐震天井は一切落下しなかった。次に、図-9に最終的な段階でのクリップの脱落状況を示す。未対策天井の場合、シングルクリップとダブルクリップの両方とも大量に脱落している。また、図-10に示す未対策天

井の落下位置と比較すると、クリップの脱落が多い部分で天井が落下していることが分かる。未対策天井は大きく揺れ、壁と衝突するため、クリップ等の接合金具に衝撃力が加わり天井が落下したものと考えられる。

一方、耐震天井の場合は、図-9に示す通り終始クリップの脱落はなく、全く落下しない結果となった。耐震天井は壁との衝突が一度も起きておらず、これは、クリアランスが大きいことに加え、斜め部材の設置により揺れが抑制されたためだと考えられる。

#### 5. 結言

本研究では、未対策天井と耐震天井の2種類の部分天井モデルを作成し、地震時の天井脱落現象を再現した。未対策天井と耐震天井の結果を比較したところ、耐震対策の効果が顕著に見られた。しかし、現在の耐震対策はコストが莫大で工期が長いなどの課題があるため、解析結果を踏まえ、今後はより安全で効率的に行える耐震対策の提案を目指す。

#### 参考文献

- [1] 国土交通省：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告書，平成24年3月。
- [2] 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。
- [3] 国土交通省：特定天井および特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件，平成25年国土交通省告示第771号。
- [4] 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，平成25年9月。
- [5] 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 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年2月。
- [6] 磯部大吾郎，チョウ ミヨウ 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。
- [7] 鎮西宏，元結正次郎，天野聡志，佐々木康人，佐藤幸博，田原健一：頭抜け試験と崩壊メカニズム 非構造部材におけるビス接合部の力学的性状に関する研究 その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.891-892，2015年9月。
- [8] 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。