

## 吊り天井脱落解析技術の高精度化および天井耐震化に関する数値解析的検討

### Improvement of Suspended Ceiling Collapse Simulation and Numerical Investigation on Earthquake-Resistant Measures

○協 大村 浩之<sup>\*1</sup>, 山下 拓三<sup>\*2</sup>, 磯部 大吾郎<sup>\*3</sup>

Hiroyuki OMURA<sup>\*1</sup>, Takuzo YAMASHITA<sup>\*2</sup> and Daigoro ISOBE<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> 筑波大学大学院 Graduate school, University of Tsukuba

<sup>\*2</sup> 防災科学技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

<sup>\*3</sup> 筑波大学 University of Tsukuba

In this study, the effectiveness of earthquake-resistant measures for suspended ceilings was examined through several finite element analyses of earthquake-resistant ceilings and three-types of partially earthquake-resisting ceilings (installation of 1. braces, 2. clearance beside walls, 3. reinforced clips). For the numerical analysis, the Adaptively Shifted Integration (ASI) – Gauss code was applied. Furthermore, the ceiling collapse simulation was improved by introducing the eccentricity of hangers to the numerical model of suspended ceilings. In the case of partially earthquake-resisting ceilings with braces installed, it was confirmed that the ceilings collapsed at the larger parts due to the differences of stiffness in the suspended ceilings than in the case of non-resistant ceilings.

**Key Words** : Suspended ceiling collapse, Earthquake-resistant ceiling, Non-structural component, FEM, ASI-Gauss technique, Collapse analysis

## 1. 緒 言

近年、地震時に体育館やコンサートホールといった大規模空間を有する施設において、施設内部の吊り天井が脱落し、散乱する被害が問題視されている<sup>(1)(2)</sup>。このような現状を受け、国土交通省は天井の耐震化に関する技術基準を策定した<sup>(3)</sup>。また、吊り天井の脱落メカニズム、および技術基準に基づく耐震天井の耐震余裕度を調査するために、実大スケールの体育館を試験体とした吊り天井脱落実験<sup>(4)</sup>が実施された。実験結果から、耐震天井は一定の余裕度を確保していることが確認された。しかしながら、同時に、耐震余裕度が過剰である可能性も示唆された。そこで本研究では、磯部らによって開発された ASI-Gauss 法<sup>(5)</sup>に基づく地震時天井脱落挙動解析技術<sup>(6)</sup>を用い、技術基準によって定められているいくつかの吊り天井耐震対策に対し、有効性の検討を行う。また、数値解析の実施に付随し、天井脱落解析技術における吊り天井のモデル化手法に改良を加えることによって、同解析技術の再現精度向上を試みる。

## 2. 吊り天井脱落解析技術の高精度化

### 2・1 鋼製下地在来工法吊り天井の解析モデル

本研究および上述の実験<sup>(4)</sup>において対象としている吊り天井は、鋼製下地在来工法吊り天井と呼称される、最も広く普及している形式のものである。基本的な構造としては、グリッド状に組まれた野縁および野縁受けと呼ばれる部材と、それにビス留めされた仕上げ材からなる天井材を、建物躯体の屋根部材から吊りボルトで吊るすことで構成されている。また、部材同士はクリップ、ハンガーなどの接合金具で簡易的に結合されている。

鋼製下地在来工法吊り天井モデルの概観図を図1に示す。吊り天井モデルは、石膏ボード、野縁、野縁受け、吊りボルトの構成部材に加え、ビス、野縁ジョイント、クリップ、ハンガーの接合金具まで含めて線形要素で構築している。部材の配置間隔や詳細な仕様は、実験の試験体に基づいている。また、既存の研究において、ハンガーの偏心性が吊りボルトの不安定挙動および天井材の上下運動を引き起こす要因になりうるということが報告されている<sup>(7)</sup>。そこで本研究では、偏心性を考慮し、ハンガーをL字型にモデル化している。さらに、

クリップやハンガーの爪の開きなどによる接合金具の脱落を考慮するために、各接合金具要素に荷重条件および変位条件からなる脱落条件を導入している。接合金具要素が条件を満たした際に、その要素を破断させることによって脱落を解析上で表現する。脱落条件は、各種接合金具を対象に実施された要素試験結果<sup>(4)(8)(9)</sup>に基づいて決定している。

## 2・2 天井脱落解析技術の再現精度検証

本節では、ハンガーの偏心性を考慮した場合における天井脱落解析の再現精度を確認するために、前述の実験<sup>(4)</sup>の再現解析を実施した結果について述べる。解析モデルには、図 1 に示した吊り天井モデルを拡張して体育館躯体モデルに組み込んだ全体モデル（図 2）を用いる。吊り天井モデルと同様、体育館の躯体モデルも実験で使用された試験体に基づき作成している。この全体モデルに、実験における K-NET 仙台波 50%加振時の震動台上加速度を 3 軸で入力することで再現解析を行う。時間刻みは 0.001 s、経過時間は 80 s である。

解析で得られた天井脱落範囲と、実験において報告されている脱落範囲をそれぞれ図 3(a)(b)に示す。図 3(a)の破線は、先行研究<sup>(6)</sup>において得られているハンガーの偏心性を考慮していない場合の脱落範囲を表している。図 3 から、本解析では実験と同様に天井頂部付近で脱落が集中していることから、ハンガーの偏心性を考慮することによって、再現精度が向上していることが定性的に確認できる。

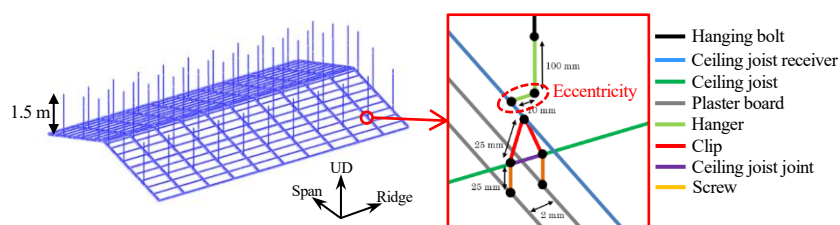


Fig. 1 Numerical model of suspended ceiling

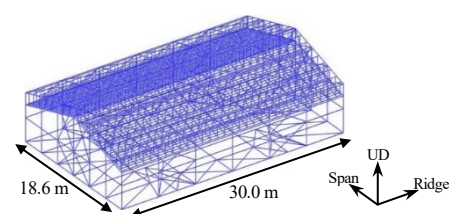


Fig. 2 Gymnasium model with suspended ceilings

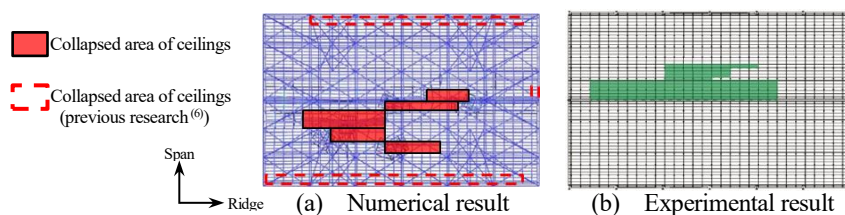


Fig. 3 Collapsed area of suspended ceilings

## 2・3 吊り天井脱落メカニズムの詳細検証

次に、天井の脱落挙動に及ぼすハンガーの偏心性の影響を定量的に調べるために、ハンガーの偏心の有無でケース分けした部分吊り天井モデルで天井脱落解析を実施した。実験<sup>(4)</sup>では天井面の傾斜が脱落挙動に影響を及ぼすことが報告されているため、併せて傾斜の有無に関する解析ケースも設けた。解析ケースは図 4 に示す CASE 1（偏心：無，傾斜：無），CASE 2（偏心：有，傾斜：無），CASE 3（偏心：無，傾斜：有），CASE 4（偏心：有，傾斜：有）の計 4 ケースで検証を行う。なお、入力波は梁間方向のみの一軸加振とした。また、接合金具に作用する断面力を評価するため、接合金具の脱落は考慮しないこととした。

解析で得られた上下方向応答加速度の時刻歴、およびクリップに作用する軸力の時刻歴をそれぞれ図 5, 6 に示す。なお、衝突によって生じるノイズを取り除くために、各データは 10 Hz のローパスフィルターを通して。グラフから、CASE 1, 2 に比べて傾斜がある CASE 3, 4 では、天井頂部が上下振動し、クリップに比較的大きな引張軸力が作用していることが確認できる。これは、壁から受ける反力によって、天井面の傾斜が影響して天井が持ち上がるようなモーメントが作用した結果、吊りボルトが座屈し、野縁受けの折れ曲がった部分が塑性化することで上下方向の剛性が失われたためである（図 7）。さらに、CASE 3 と CASE 4 を比較すると、ハンガーの偏心がある CASE 4 の方が、塑性化した後の振動およびクリップの軸力が大きくなっていることが確認できる。これは、上下方向の剛性が極端に小さい偏心部分で振動が増幅されたためと考えられる。

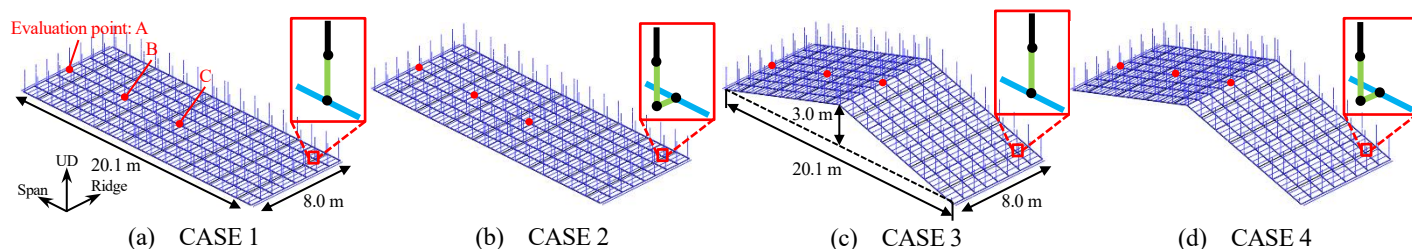


Fig. 4 Partial model of suspended ceilings

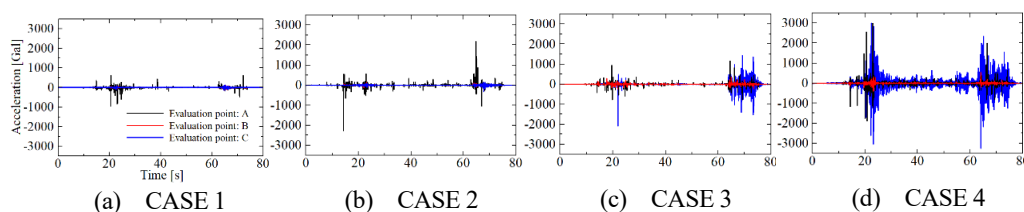


Fig. 5 Response acceleration (UD direction) at evaluation points

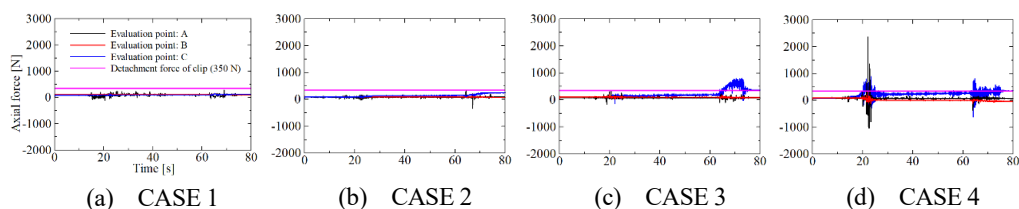


Fig. 6 Axial force acting on the clip at evaluation points

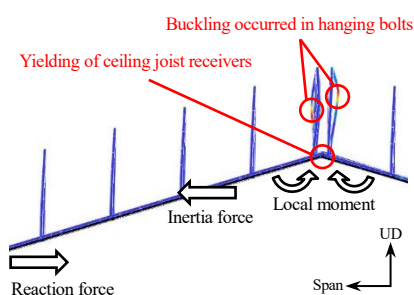


Fig. 7 Damage mechanism at the top of ceiling (t=22.260 s)

### 3. 吊り天井耐震対策の有効性検討

#### 3・1 耐震天井付き体育館の解析モデル

前述した技術基準によって定められている耐震対策には、吊り天井の水平振動を抑制するための斜め部材を設けること、衝突防止のために壁等との間にクリアランスを設けること、接合金具を補強することが定められている。実験<sup>(4)</sup>で用いられた耐震天井は技術基準に基づいて設計され、吊りボルト間に斜め部材が設けられており、壁と天井の間および天井頂部の隙間に 60 mm のクリアランスが確保されている。また、クリップをビスで緊結することによって爪の開きを防止している。図 8 に耐震天井が取り付けられた体育館モデルの概観を示す。接合金具の補強については、クリップの脱落条件を、耐震クリップと呼ばれる補強クリップの脱落条件に変更することで表現している。なお、耐震クリップの脱落荷重は 2.5 kN（一方、非耐震クリップでは 0.35 kN）である<sup>(4)</sup>。

#### 3・2 解析ケースおよび解析条件

本解析では、上記の耐震天井モデルに加えて、斜め部材の設置のみを適用したモデル、クリアランスのみを適用したモデル、クリップの補強のみを適用したモデルの計 4 ケースの解析を実施することで、それぞれの耐震対策の有効性を個別に検討する。入力波および解析条件は、2.2 節で示した再現解析の場合と同様である。

#### 3・3 解析結果

解析によって得られた各ケースの天井脱落範囲を図 9 に示す。天井の脱落が生じなかった耐震天井に対して、斜め部材のみを設置した場合は、広い範囲で天井が脱落した。この原因としては、吊りボルト間のみを補剛したことによって、相対的に剛性が低くなった部分に負荷が集中しやすくなったことが考えられる。クリアランスのみを確保した場合は、耐震対策を施していない場合（2.2 節）と同様、天井頂部付近を中心に天井の脱落が発生したが、当該ケースでは、天井と壁との間の隙間が広がったことで、壁から受ける衝突力が増大したため、壁際においても天井の脱落が見られた。クリップのみを補強した場合は、耐震天井の場合と同様、クリップおよび天井の脱落は生じなかったが、ハンガーの脱落が発生し、天井材がたわんでいる様子が観察された。

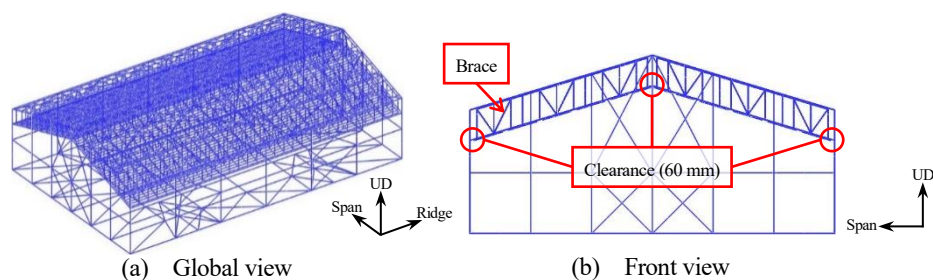


Fig. 8 Gymnasium model with earthquake-resistant ceilings

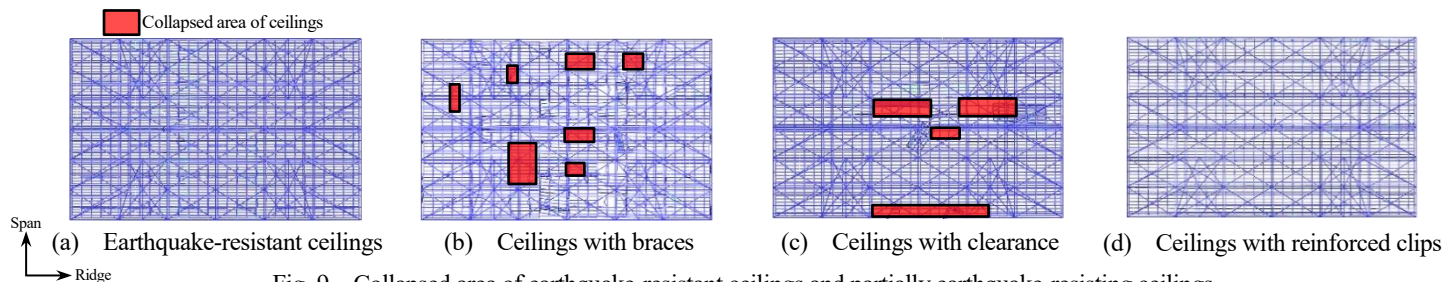


Fig. 9 Collapsed area of earthquake-resistant ceilings and partially earthquake-resisting ceilings

## 5. 結言

本研究では、先行研究<sup>(6)</sup>で開発された ASI-Gauss 法に基づく吊り天井脱落挙動解析技術に対して、ハンガーの偏心性を吊り天井モデルに導入することによって、同解析技術の再現精度向上を図り、実験<sup>(4)</sup>の再現解析を実施することで妥当性を確認した。さらに、部分天井モデルを用いた詳細解析によって、天井頂部付近で損傷が集中する原因として、天井頂部において吊りボルトの座屈および野縁受けの塑性化が生じることで頂部付近の天井材が上下振動し、クリップに比較的大きな引張軸力が作用することを明らかにした。さらに、上下振動の振幅はハンガーの偏心性によって増幅され、クリップへの負荷がより増大する現象が観察された。また、同解析技術を用い、技術基準で定められている吊り天井耐震対策の有効性を検討した。斜め部材のみを設置した場合は、構面内に剛性差が生じることで、クリップ部分に負荷が集中し、天井の脱落がむしろ促進された。クリアランスのみを設けた場合は、壁と天井材が衝突することで、壁際での損傷が発生した。補強クリップのみを適用した場合は、天井の脱落が見られず損傷が軽減された一方で、ハンガーの脱落が生じ天井材がたわむ様子が見られた。

## 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被害調査報告書, 2012. 3.
- (2) 国立研究開発法人 建築研究所: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震建築物被害調査報告書 (速報), 2016. 9.
- (3) 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, 2013. 9.
- (4) 佐々木 智大 他: 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 一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. 2.
- (5) Isobe, D.: Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
- (6) 磯部 大吾郎 他: 有限要素法を用いた大規模吊り天井の脱落被害再現シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 741 号, pp.1727-1736, 2017. 11.
- (7) 清水 睦郎 他: 吊り材の動的不安定挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概, B-1, 20483-20484, 2018. 9.
- (8) 鎮西 宏 他: 頭上げ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, B-1, pp.891-892, 2015. 9.
- (9) 杉山 達也 他: 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, B-1, pp.871-872, 2010. 7.