

地震時における吊り天井の 不安定現象に関する数値解析的検証

Numerical Analysis on Unstable Phenomena Occurred in Suspended Ceilings during Earthquakes

千葉賢¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Satoru Chiba 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: s2020857@s.tsukuba.ac.jp)

2) 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)

In this paper, an investigation was conducted using numerical analysis on the unstable behavior of suspended ceilings during earthquakes caused by the inclination, eccentricity and collision with walls. The Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss method, which can stably calculate non-linear phenomenon such as fracture, contact and ground motion, was used as a numerical method in this research. The numerical results show that the behaviors of the suspended ceiling caused by the collisions with the walls varies owing to the inclination and eccentricity of hangers. Furthermore, it is confirmed that the responses of ceilings dramatically increase by the inclination and eccentricity.

Key Words : *Suspended Ceiling, Inclination, Eccentricity, ASI-Gauss Technique*

1. 序論

近年, 大規模地震の際に, 吊り天井が落下し床に散乱するような被害が相次いでいる[1]. 吊り天井の形状による脱落メカニズムの変化に関する研究としては, 学校体育館における山形の傾斜を有した吊り天井の地震時挙動を数値解析した例[2]がある. ここでは, 傾斜を有する吊り天井は, 壁からの反力によって生じるモーメントに起因して, 吊りボルトが座屈し, 天井面が不安定に上下方向に振動することによって接合金具に負荷が生じることが報告されている. さらに, 別の実験的研究[3]では, 吊りボルトと天井材を接合しているハンガーと呼ばれる金具が偏心性を有することによって, 吊りボルトの軸力変動に影響を及ぼすことが言及されている. また, 地震動下では吊り天井は壁と衝突し, より複雑な挙動を示すことが予想される.

しかしながら, 上記の研究のいずれにおいても, 傾斜およびハンガーの偏心性の有無が天井の挙動に及ぼす影響を定量的には検証していない. これらの構造的な差異が地震時の吊り天井の挙動に与える影響を定量的に把握することは, 吊り天井の設計や適切な耐震対策を施す上で極めて重要である.

そこで本研究では, 傾斜およびハンガーの偏心性の有無が, 吊り天井の地震時挙動に与える影響を有限要素法を用いて数値解析的に検証する. 数値解析手法には, 既存の研究[2]で吊り天井の地震時脱落挙動を良好に再現できることが示されているASI-Gauss法[4]を用いる.

2. 吊り天井の数値解析モデル

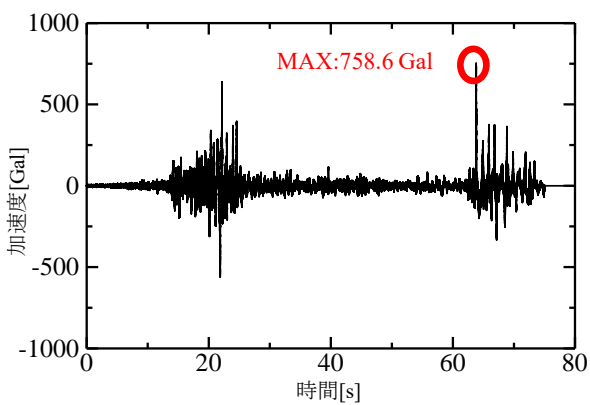
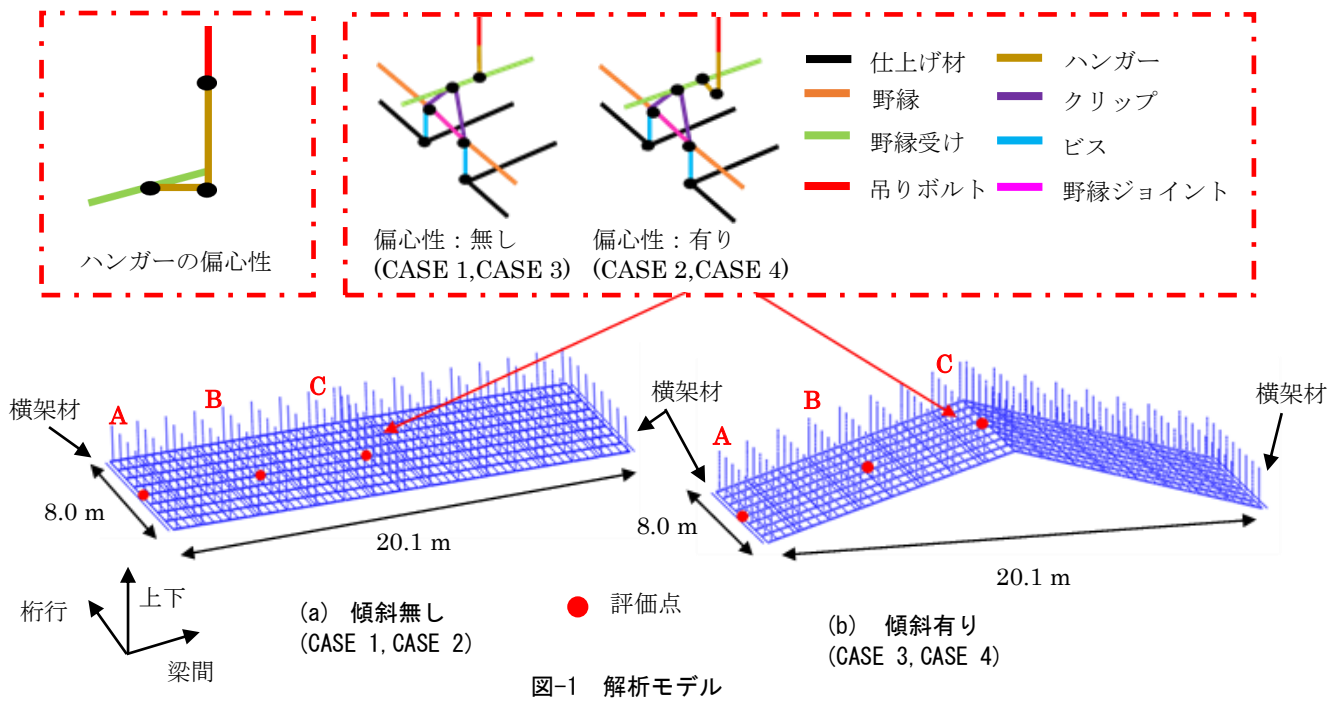
(1) 使用する吊り天井の概要

本研究では, 鋼製下地在来工法の吊り天井を解析対象とする. その構造は, 仕上げ材, 野縁, 野縁受け, 吊りボルトと呼ばれる部材と, ビス, クリップ, ハンガーと呼ばれる接合金具で構成されている. 仕上げ材はビスによって野縁に固定されており, 野縁と野縁受けはクリップにより結合され, 野縁受けと吊りボルトはハンガーで接続されている.

本研究で解析対象とする吊り天井は, E-ディフェンスで行われた天井脱落実験[5]で使用された吊り天井試験体と同じ仕様とする. ただし, 各部材の寸法は異なる. 野縁, 野縁ジョイント, 野縁受けは, JIS19形のものを使用し, クリップはJIS19形用のワンタッチクリップを, 吊りボルトは3/8吊りボルトを, ハンガーにはJIS規格に従うフリーハンガーを用いる.

(2) 解析モデル

吊り天井の解析モデルを図-1に示す. 要素には線形チモシェンコ梁要素を使用している. 天井全体の寸法は桁行方向 8.0 m×梁間方向 20.1 m とし, 傾斜有りの天井の勾配は 10:3 とする. それぞれ傾斜およびハンガーの偏心性の有無を考慮し, 4つの解析モデルを作成した. 偏心性を有するモデルでは, 図-1のようにハンガーをL字型にモデル化することで, 偏心性を表現した. 各モデルはCASE 1(傾斜無し, 偏心性無し), CASE 2(傾斜無し, 偏心性有り), CASE 3(傾斜有り, 偏心性無し), CASE 4(傾斜有り, 偏心性有り)とする. CASE 1, 3 は要素数 13,102,



節点数 11,001 で、CASE 2, 4 は要素数 13,426、節点数 11,325 である。本研究では仕上げ材同士の接触を表現するために、仕上げ材を 1 枚ごとにモデル化した。また、壁と仕上げ材の衝突を表現するために、吊り天井のモデルの梁間方向の両端に、壁を模擬した横架材要素を設置した。横架材は隣接する仕上げ材と同じ高さに配置し、仕上げ材との隙間には 2 mm のクリアランスを設けている。

3. 吊り天井の地震時挙動解析

(1) 解析条件

入力地震波としては、K-NET 仙台波 50% の NS 方向成分 (図-2) を梁間方向に一軸で入力している。また、時間増分は入力波データの時間刻みと同じ 0.001 s であり、解析時間は 80 s である。

壁との衝突を考慮しない天井単体の解析では、仕上げ材同士の接触のみを考慮する。壁との衝突を考慮するモデルでは、仕上げ材同士の接触に加え、仕上げ材と横架材との接触を考慮している。

なお、本解析では、接合金具であるクリップ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ていない。また、拘束点 (かつ地震波入力点) は各吊りボルトの上端点と横架材の両端点である。

本解析における上下方向応答加速度の評価点は図-1に示すように設定し、壁際から順に A, B, C とする。また、実験や被害事例の調査から、天井脱落の主要因はクリップの脱落であることが知られている [5]。さらに、吊り天井の地震時挙動は吊りボルトの座屈が大きく影響することが予想される。したがって、クリップと吊りボルトそれぞれに作用する軸力も評価する。クリップと吊りボルトに作用する軸力は、A, B, C それぞれの評価点最近傍の要素で評価する。

(2) 解析結果

a) 天井単体の場合の解析結果

壁との衝突を考慮しない、天井単体での解析で得られた CASE 4 における上下方向の応答加速度、クリップおよび吊りボルトに作用する軸力をそれぞれ図-3, 4, 5 に示す。

図-3, 4, 5 より CASE 4 に生じる上下方向の応答加速度、クリップと吊りボルトに作用する軸力は大きくないことがわかる。

以上の傾向は、他の 3 ケース全てにおいても確認されている。すなわち、壁との衝突が無ければ、クリップおよび吊りボルトに軸力はほとんど発生せず、かつ傾斜およびハンガーの偏心性の有無は天井の挙動に対して影響を及ぼさないとと言える。

b) 壁ありモデルの解析結果

次に、壁との衝突を考慮した場合の解析結果について述べる。

解析で得られた上下方向の応答加速度、クリップおよ

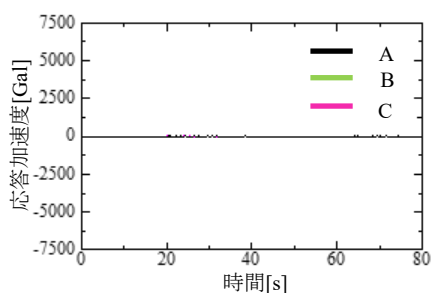


図-3 上下方向応答加速度 (CASE 4)

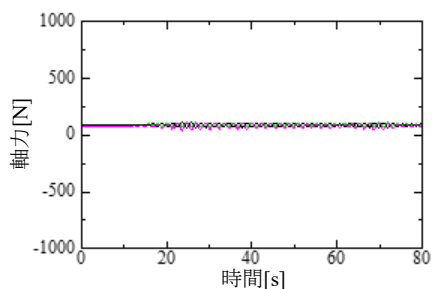


図-4 クリップに作用する軸力 (CASE 4)

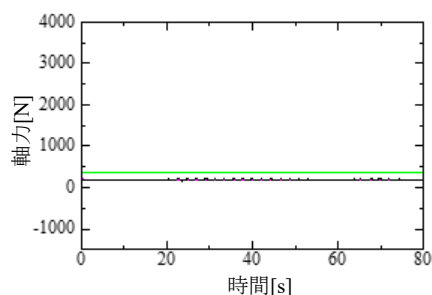
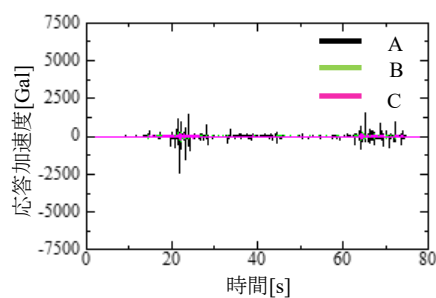


図-5 吊りボルトに作用する軸力 (CASE 4)

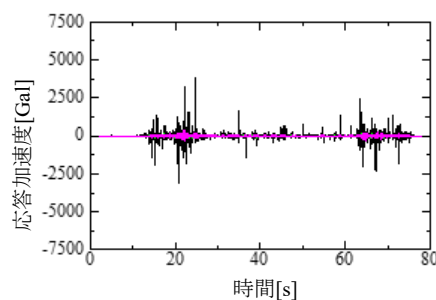
び吊りボルトに作用する軸力をそれぞれ図-6, 7, 8にCASE 1からCASE 4まで示す。

まず、壁との衝突の有無による挙動の差異を考察する。図-3, 4, 5と図-6, 7, 8のCASE 4を比較すると、壁との衝突を考慮した場合の方が、吊り天井の上下方向応答加速度とクリップと吊りボルトに作用する軸力が極めて増大している。この時、上下方向応答加速度の最大値は、壁無しのCASE 4が58.2 Galである一方、壁有りのCASE 4は4,429.4 Galと、約76倍大きくなっている。また、図-6, 7, 8から、天井と壁が衝突する場合はケースによって結果が大きく異なっている。すなわち、壁と吊り天井が衝突する場合は、傾斜およびハンガーの偏心性の有無によって天井の挙動に差異が生まれることがわかる。

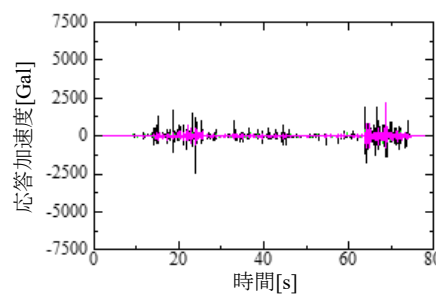
次に、傾斜の有無による結果の違いを比較する。図-6, 7, 8より、CASE 1に比べてCASE 3, CASE 2に比べてCASE 4の上下方向応答加速度、クリップと吊りボルトに作用する軸力の振幅が大きくなっていることが確認できる。頂部付近の評価点における各ケースの最大応答加速度はCASE 1, 3の各々において234.8 Gal, 2239.3 Galであり、傾斜があることで上下方向の最大応答加速度は約10倍に増大している。この原因としては以下のように考察できる。図-9(a)のように傾斜の無い吊り天井は、壁からの反力と



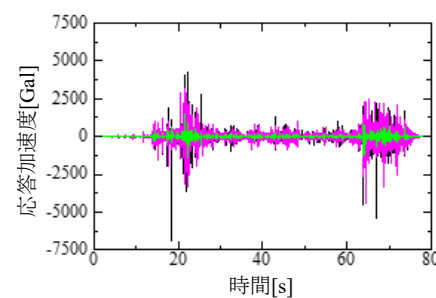
(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3

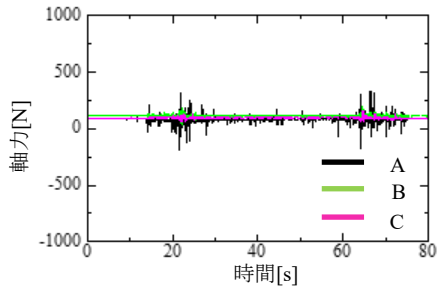


(d) CASE 4

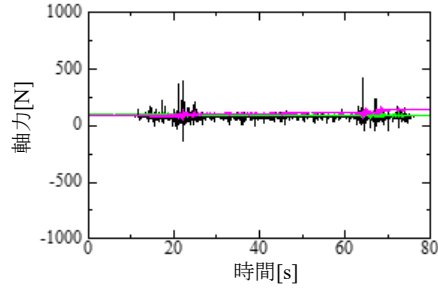
図-6 上下方向応答加速度

慣性力が同一面内で作用するが、その一方、傾斜がある吊り天井は、傾斜があることによって図-9(b)のように壁からの反力と慣性力の作用線がずれ、頂部にモーメントが作用する。その結果、天井面の上下方向の応答が大きくなり、クリップおよび吊りボルトに作用する軸力の振幅が大きくなると考えられる。

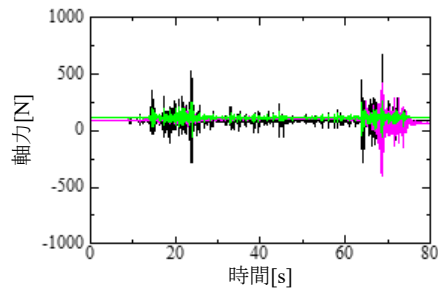
次に、傾斜の無い天井においてハンガーの偏心性の有無についての比較を行う。図-6よりCASE 1よりCASE 2の方が上下方向の応答加速度が大きくなっている。一方、図-7, 8から、CASE 1とCASE 2のクリップ、吊りボルトに作用する軸力はほとんど変化がない。このことから、傾斜の



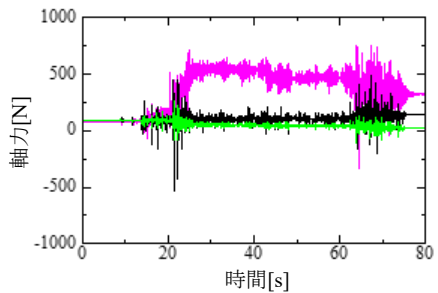
(a) CASE 1



(b) CASE 2

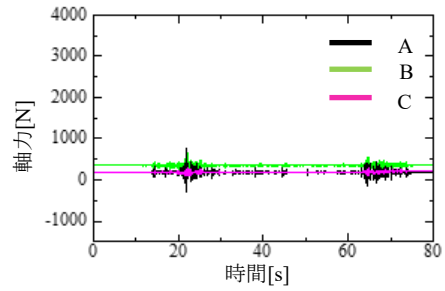


(c) CASE 3

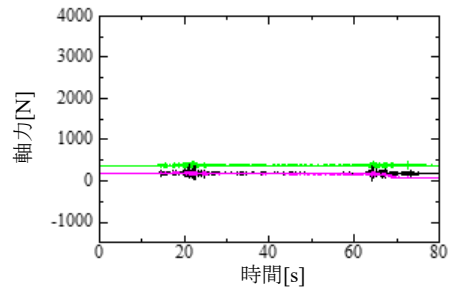


(d) CASE 4

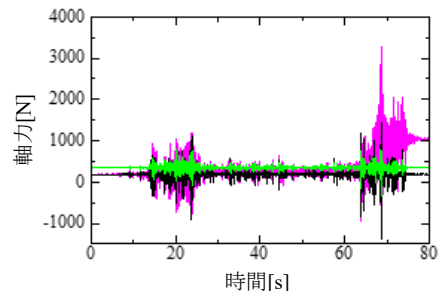
図-7 クリップに作用する軸力



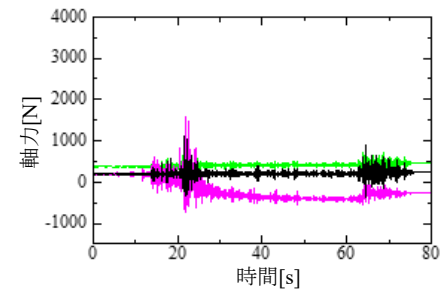
(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3



(d) CASE 4

図-8 吊りボルトに作用する軸力

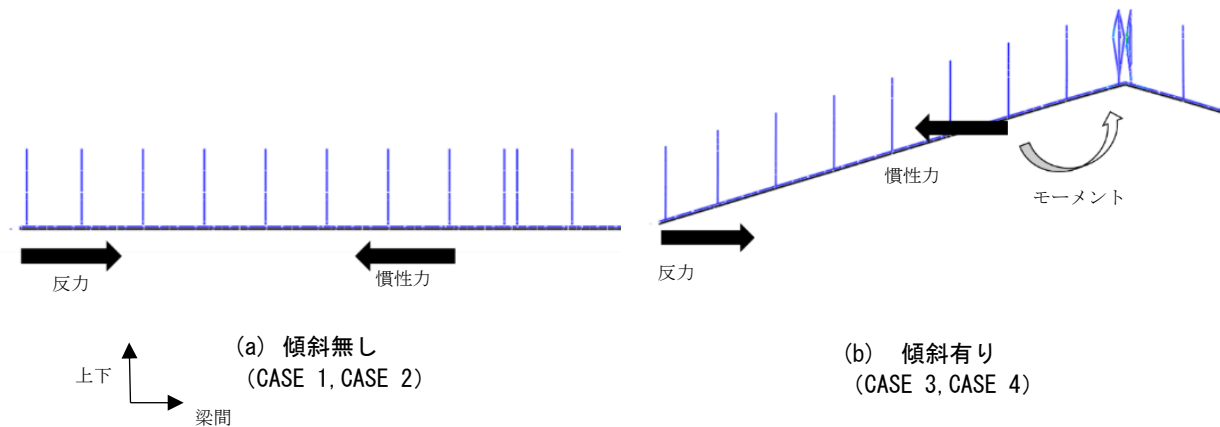


図-9 天井面に作用する力

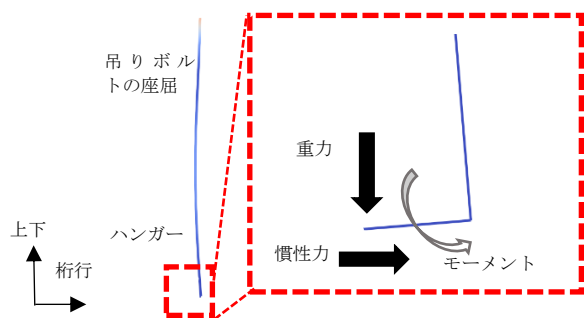


図-10 ハンガーの偏心性によって生じる局所的なモーメント

ない天井では、ハンガーの偏心性があることで上下方向の応答加速度が大きくなる一方で、クリップと吊りボルトの軸力にはほとんど影響を及ぼさないことが分かる。

最後に、傾斜を有する場合におけるハンガーの偏心性の影響について述べる。図-6, 7, 8より、CASE 3に比べてCASE 4の方が上下方向の応答加速度、クリップに作用する引張軸力、吊りボルトに作用する圧縮軸力が増加していることがわかる。これらの傾向は、特に頂部付近（評価点C）において顕著に表れている。ハンガーに偏心性を有する吊り天井は、偏心性が無い場合と比べて上下方向の加速度が大きくなる。応答加速度が大きく出ている頂部付近の評価点において、最大応答加速度は偏心性があることで約2倍になっている。偏心性があることで、ハンガーに図-10に示すような力が作用し、局所的なモーメントが発生する。このモーメントによって吊りボルトの座屈と上下方向の応答が誘発され、クリップに作用する軸力の振れ幅が大きくなっていることが考えられる。

4. 結論

本研究では、鋼製下地在来工法の吊り天井を対象に、壁との接触、傾斜、ハンガーの偏心性それぞれの有無が天井の地震時挙動に及ぼす影響を数値解析的に調査した。その結果、以下の知見が得られた。

- 壁との衝突が無ければ、傾斜とハンガーの偏心性の有無は天井の応答に影響を及ぼさない。

- 傾斜の無い天井において、ハンガーの偏心性の有無はクリップおよび吊りボルトに作用する軸力にほとんど影響を及ぼさない。
- 天井に傾斜があることで、天井面の上下方向の応答が大きくなり、クリップおよび吊りボルトに作用する軸力の振れ幅も増大する。また、ハンガーが有する偏心性が吊りボルトの座屈と上下方向の応答を誘発し、クリップに作用する軸力の振れ幅に影響を及ぼすと考えられる。

今後は、入力する地震波の方向を増やした際の傾向について、調査していく。また、ハンガーの偏心性によって生じるモーメントをより正確に把握し、調査していくことを考えている。

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，2012。
- [2] 磯部 大吾郎，藤原 嵩士，山下 拓三，田川 浩之，佐々木 智大：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。
- [3] 清水 陸朗，廣田 勇，元結 正次郎：吊り材の動的不安定挙動に関する研究 その1 吊り材の軸力の変動，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.965-966，2018。
- [4] D. Isobe: Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
- [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 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。