

# 音響施設における吊り天井の地震時脱落挙動と耐震化方法に関する数値解析的研究

Numerical Research on Ceiling Collapse Mechanisms and Earthquake-Resistant Measures in Acoustic Facility

大村浩之<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Hiroyuki Omura and Daigoro Isobe

1) 筑波大学 大学院生 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1820884@s.tsukuba.ac.jp)

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

In this research, a collapse analysis of a concert hall's box-type suspended ceiling containing level gaps was performed. A numerical model of the concert hall and ceiling was simulated by applying a seismic wave. The detachment of clips was caused by the propagation of the impact force that was generated when the suspended ceiling collided with the wall. Furthermore, the results showed that the locations of the clips detached by the collisions were strongly affected by the geometrical shape of the ceiling. This phenomenon was also confirmed in the numerical results of the model installed with earthquake-resistant measures.

**Key Words** : *Suspended ceiling collapse, Acoustic facility, ASI-Gauss technique, Collapse analysis*

## 1. 序論

東北地方太平洋沖地震や熊本地震などの巨大地震動に伴って、体育館やホールなどの大スパンを有する建造物において吊り天井が脱落する被害が相次いで報告されている[1][2]。吊り天井の脱落防止対策を確立するために、実大三次元震動破壊実験施設(以下、E-ディフェンス)にて天井脱落被害再現実験[3]が実施されたり、先行研究[4]において天井脱落挙動の解析技術が開発されたりするなど、吊り天井の脱落メカニズム解明に向けた研究が進められてきている。

しかし、これまでの吊り天井脱落に関する実験的・解析的研究は、いずれも体育館や商業施設に設けられるような鋼製下地在来工法吊り天井と呼ばれる規格化された吊り天井が対象であった。一方、ホールや劇場などの音響性能が要求される施設では、施設内の反響性を向上させるために天井や壁などの内装に凹凸を持たせたり、遮音性を確保するために高密度の内装材を用いたりするケースが多い。このような規格に沿わない仕様を持つ吊り天井は、地震時に特異な脱落挙動を示すことが予想されるため、個別の検討が必要となる。

そこで本研究は、上述のような規格に沿わない吊り天井の一例として、シューボックス型のコンサートホールに広く用いられる、天井面に箱型の段差が設けられた吊り天井(以下、箱型段差吊り天井)を対象に地震時における脱落挙動を調査し、得られた知見に基づいた適切な耐震化対策の提案を目的とする。具体的には、実在の箱型段差吊り天井が取り付けられたコンサートホールを参考に解析モデルを構築し、先行研究[4]で天井の崩落解析に対して有効性が示された ASI-Gauss 法[5]を用いて、地震時

における構造躯体の応答および天井の脱落挙動を有限要素解析する。その後、解析により得られた天井の脱落傾向を踏まえ、斜め部材の設置による耐震対策を施したモデルを構築し、同様の解析を行うことで耐震性能を評価する。

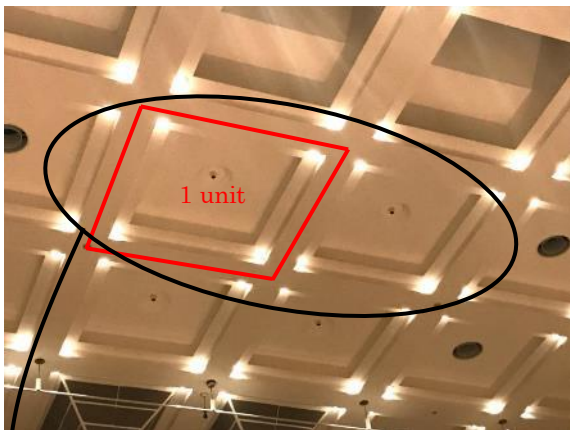
## 2. 箱型段差吊り天井の概要

本研究で解析対象とした箱型段差吊り天井およびコンサートホール躯体は、図1に示す実在のコンサートホールを参考に仕様を決定した。また、図2に箱型段差吊り天井の概観を示す。基本的な構造は在来工法吊り天井と同様、仕上げ材、野縁、野縁受けからなる下地材を吊りボルトで躯体から吊るしている。野縁と野縁受けおよび野縁受けと吊りボルトは、それぞれクリップ、ハンガーと呼ばれる簡易的な金物で接続されている。また、野縁および野縁受けは3mのスペンを持つ部材であり、野縁同士は野縁ジョイントと呼ばれる金物で接続され、野縁受け同士は溶接されている。

当該天井は、同じ構造を持つユニットが連結することで天井全体を構成している。1基の平面寸法は3.6m(X軸方向)×4.0m(Y軸方向)で、天井全体ではX軸方向に16基、Y軸方向に6基の計96基のユニットが連結しており、平面寸法は51.6m(X)×24.0m(Y)である。また、当該天井は図1から確認できるようにユニットを区切るようにして段差が設けられている。段差部の構造は、図2(b)に示すように、凹凸状の仕上げ材(隅部をアングル材で固定)の側面と底面に野縁が2本ずつビス留めされ、それらと矩形に組まれた野縁受けがクリップで接合されている。段差の寸法は深さ・幅ともに0.3mであ

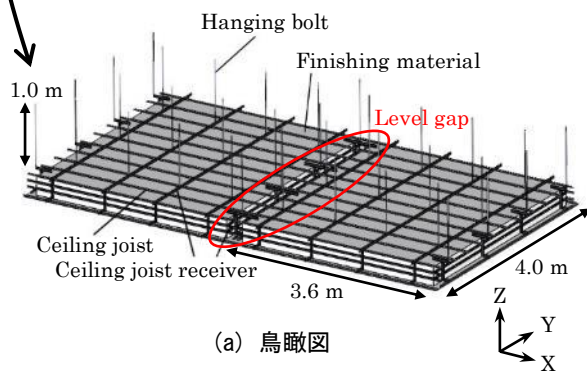


(a) 全体

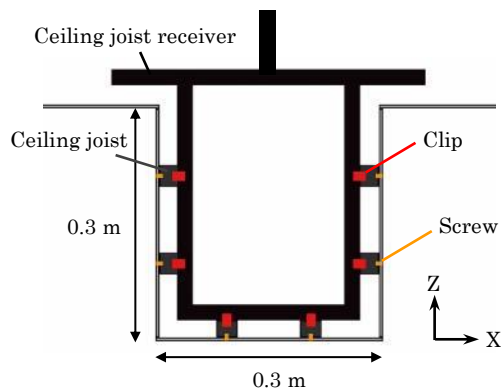


(b) 箱型段差吊り天井

図1 解析対象としたコンサートホールの内観



(a) 鳥瞰図



(b) 段差部の断面図

図2 箱型段差吊り天井の概観

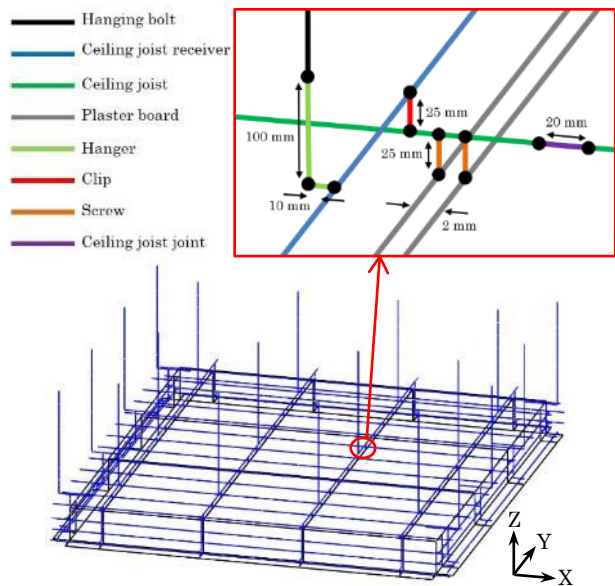


図3 箱型段差吊り天井（ユニット）モデル

る．天井の単位面積質量は  $22.0 \text{ kg/m}^2$ ，総質量は  $30.7 \text{ ton}$  で、在来工法の吊り天井に対して2倍近い値である．

### 3. 解析モデル

#### (1) 箱型段差吊り天井

箱型段差吊り天井（ユニット）の解析モデルを図3に示す．吊りボルト、野縁、野縁受け、仕上げ材の構成部材に加え、ハンガー、クリップ、ビス、野縁ジョイントの接合金具までを含め、線形チモシェンコ梁要素を用いてモデルを構築している．各構成部材要素と各接合金具要素の位置関係は図3の赤線で示した拡大図の通りである．全ての部材は2要素分割としたが、吊りボルトに関してのみ、座屈挙動を精度よく評価するために10要素分割でモデル化した．同時に、座屈挙動に影響を及ぼしやすい境界条件を正確に表現するために、吊りボルトとハンガーの間にヒンジを模擬した微小要素を配し、ハンガーは偏心を考慮してモデル化している．これは、前述の天井脱落実験において、吊りボルトの座屈挙動が天井の落下性状に影響を及ぼしている可能性が示唆されたためである．また、仕上げ材は1枚ずつ独立にモデル化しており、それぞれの隙間に1 mmの間隔を設けることで接触現象を表現する．その際、隙間部分に野縁ジョイント要素を配置することで、野縁ジョイントが脱落した際に仕上げ材が野縁と一体となって局所的に落下する現象を表現することが可能となっている．なお、接触計算には内分ベクトル型アルゴリズムを用い、接触判定がなされた要素間にギャップ要素を生成することで接触力を伝達させる．

#### (2) コンサートホール躯体

構造躯体についても、先に述べた実在のコンサートホールを参考にモデル化した．モデル概観図を図4に示す．建物寸法は  $75.3 \text{ m (X)} \times 35.4 \text{ m (Y)} \times 23.15 \text{ m (Z)}$  であり、躯体は屋根部材のみS造で、他は全てRC造とな

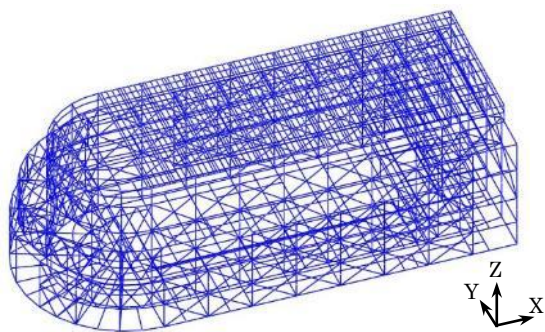


図 4 コンサートホール躯体モデル

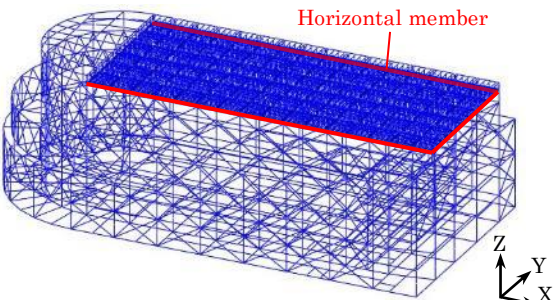


図 5 箱型段差吊り天井付きコンサートホールモデル

表 1 接合金具の脱落条件

Item		Condition
Clip	Single (front cover)	Tensile axial force 0.35 [kN]
	Single (back cover)	Tensile axial force 0.70 [kN]
	Double	Tensile axial force 0.80 [kN]
Hanger		Tensile axial force 2.80 [kN]
Screw		Tensile axial force 0.40 [kN] and Axial displacement 3 [mm]
		Shear force 0.30 [kN] and Shear displacement 18 [mm]
Ceiling joist joint		Tensile axial displacement 42.5 [mm]

っている。各部材は天井モデルと同様、線形チモシェンコ梁要素を用いて 1 部材 2 要素分割で構築している。なお、耐震壁は面内方向に剛である筋交い要素（面内方向の曲げ剛性：1000 倍）で表現している。

(3) 箱型段差吊り天井付きコンサートホール

続いて、上述した構造躯体に箱型段差吊り天井を取り付けたモデルを図 5 に示す。モデルの自由度数は 1,872,336 である。天井と壁との接触を表現するために、雑壁を模擬した横架材要素を壁際の仕上げ材要素と同じ高さに設け、隙間に 1 mm のギャップを設けた。

(4) 接合金具の脱落条件

最後に、接合金具に導入した脱落条件について説明する。クリップやハンガーは 2 章で述べたように爪を引っかけるだけの簡易的な構造となっており、実際に、文献[3]の実験においてクリップやハンガーが脱落することで天井が落下に至ったことが報告されている。そこで本研究では、要素実験結果[3][6][7]に基づいた脱落条件を導入し、接合金具要素がそれらの条件を満たした時、要素を破断させることで接合金具の脱落を表現する。各接合金具の脱落条件は表 1 に示す通りである。クリップとハンガーは引張試験で得られた最大耐力を脱落荷重とし、ビスは引張試験・せん断試験で得られた最大引張耐力・最大せん断耐力のいずれかを満たした時に脱落する。この時、クリップおよびハンガーは、接合部分で滑動が生じ、力が散逸することが考えられるため、解析上で用いる脱落荷重には表 1 の値に安全率 1.5 をかけたものを使用している。野縁ジョイントについては野縁ジョイントの半分の長さである 42.5 mm を変位条件として設定し、それに伴い要素の軸剛性を野縁が野縁ジョイントから引抜かれる時の剛性まで低下させている。

4. 解析結果

図6に示すJMA神戸波100%を入力波とし、箱型段差吊り天井付きコンサートホールモデルの地震時における構造躯体の応答および天井の脱落挙動を有限要素解析する。時間増分 1 ms で汎用コンピュータを用いて解析を実施した。

解析により得られた天井の落下状況とその時点で生じ

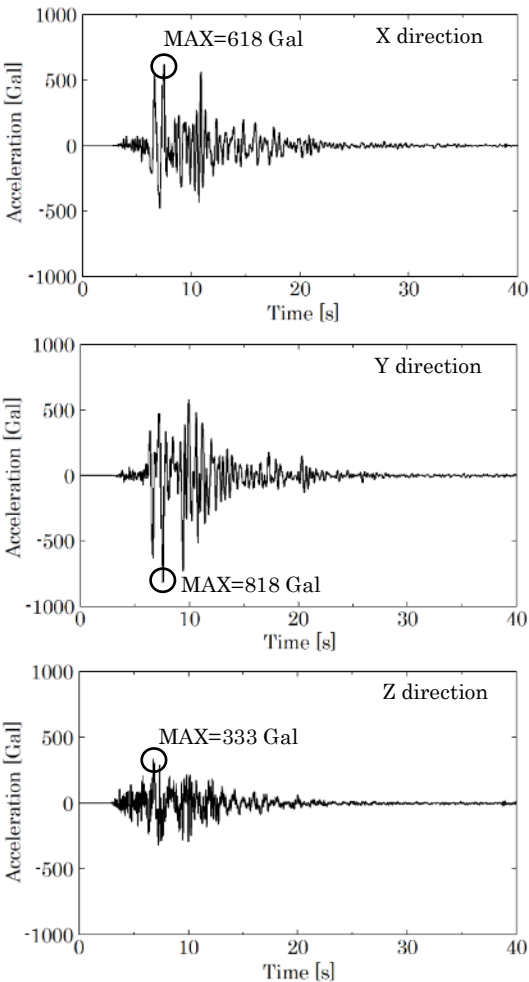


図 6 入力波（JMA 神戸波）

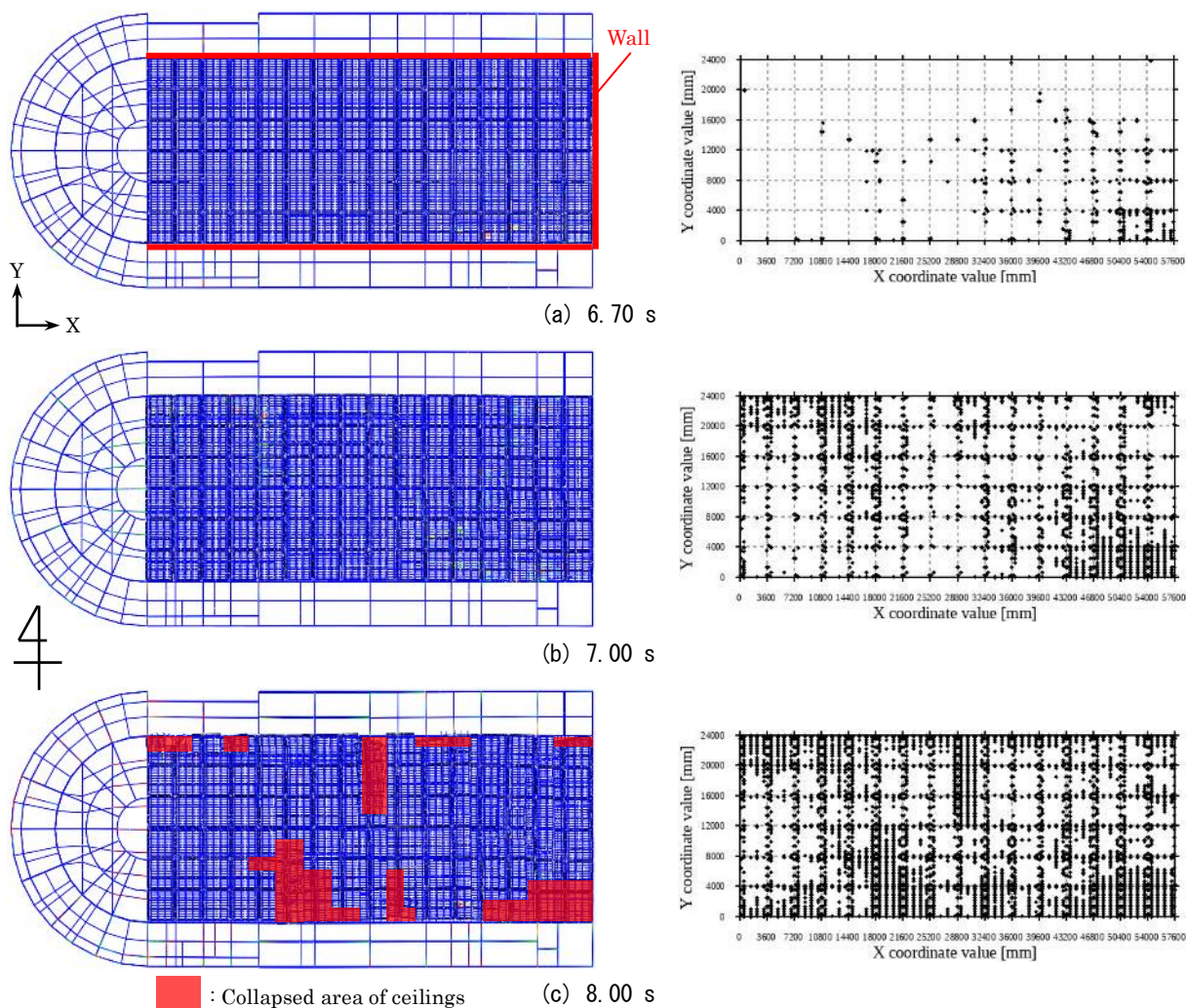


図7 天井落下状況およびクリップ脱落状況

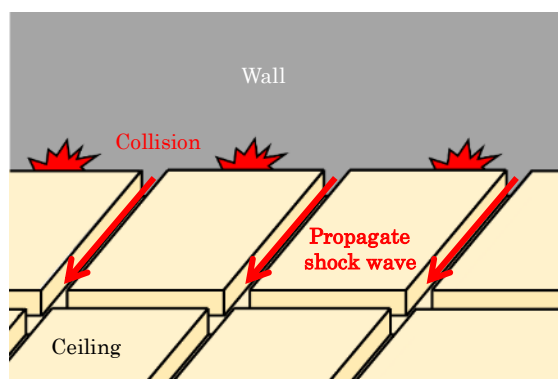


図8 段差部におけるクリップの脱落メカニズム

ている脱落クリップの分布を図7に示す。入力地震波がピークを迎える6.70 s付近で南側の、7.00 s付近で北側の天井と壁が衝突し、クリップが脱落し始めた。その後、周囲のクリップに荷重が再分配されることで脱落が進展し、天井が崩落し始めた。図7(c)から確認できるように、Y軸方向の段差部分が顕著に落下していた。同時に、Y軸方向の段差に沿ったクリップの脱落が生じている。これは、図8に示すように、壁から受ける衝突力に対して、壁と直交す

る向きの段差部分は周囲の平らな部分と比べて剛性が高く衝撃力を伝播しやすいため、その付近でクリップの脱落が卓越したものと考えられる。

## 5. 箱型段差吊り天井の耐震化方法に関する検証

4章で示した解析結果から、箱型段差吊り天井が壁に衝突すると、壁に直交する向きの段差に沿って天井の落下が生じやすいという知見が得られた。一方、図9に示すように、壁との衝突に伴い壁と平行な向きの段差部に局所的なモーメントが作用し、そのことが原因で天井が損傷すると考察している文献[8]も存在する。そこで本章では、4章の解析で用いたモデルに対して、壁と平行な向きの段差を補強した場合、壁と直交する向きの段差を補強した場合に加え、吊りボルト間を補強した場合（通常の吊り天井によく用いられる耐震化方法）の計3ケースについて同様の地震時挙動解析を行うことで、それぞれの耐震化方法の有効性を検証する。

段差部および吊りボルト間の補強には斜め部材を用いる。図10にY軸方向の段差部および吊りボルト間を補強する斜め部材の概観図を示す。段差部に設置する斜め部材

は野縁同士を接続し、吊りボルト間に設置する斜め部材は吊りボルトの先端と根元を接続する。なお、X軸方向の段差部についても、斜め部材を同様の構造（ただし図10とは直交する方向）で設置し補強している。斜め部材の材料・断面パラメータは、実験[3]で用いられた斜め部材の値を用いた。壁と平行な向き（X軸方向）の段差を補強したモデルおよび壁と直交する向き（Y軸方向）の段差を補強したモデルは、いずれも768本の斜め部材を設置している。また、吊りボルト間を補強したモデルはX軸方向の斜

め部材が1,728本、Y軸方向が612本である。

図11にX軸方向の段差を補強したモデルの解析で得られた天井の落下状況およびクリップの脱落状況を示す。天井の落下範囲・傾向とともに、4章で示した未補強のモデルの解析と同様の結果が得られた。壁と平行な向きの段差を補強し、局所的なモーメントの発生を抑制しても結果に変化が見られなかったことから、モーメントが天井の落下挙動に及ぼす影響は小さいことが示唆された。次に、図12にY軸方向の段差を補強したモデルの解析で得ら

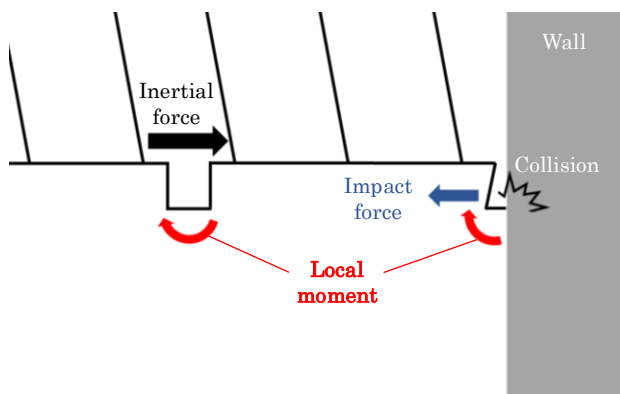


図9 壁と平行な向きの段差に生じる局所的なモーメント

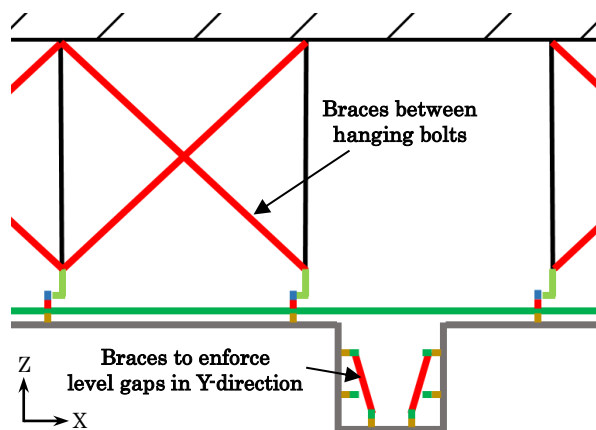


図10 斜め部材の設置方法

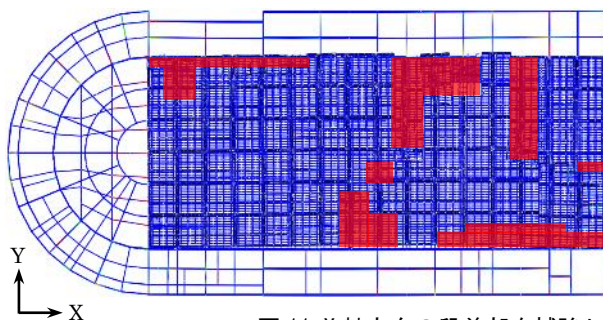


図11 X軸方向の段差部を補強したモデルの解析結果（8.00 s）

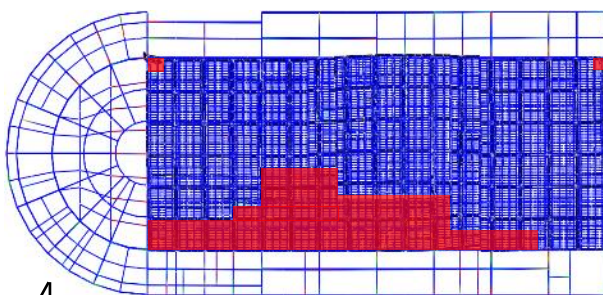
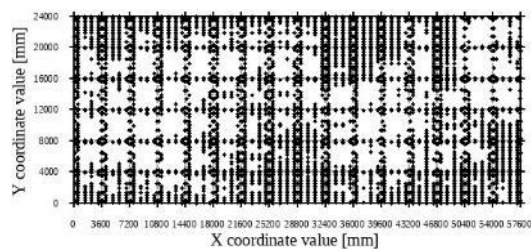


図12 Y軸方向の段差部を補強したモデルの解析結果（8.00 s）

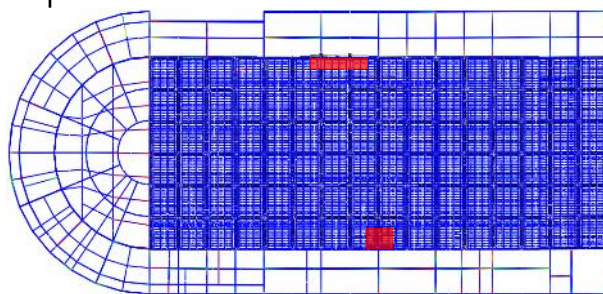
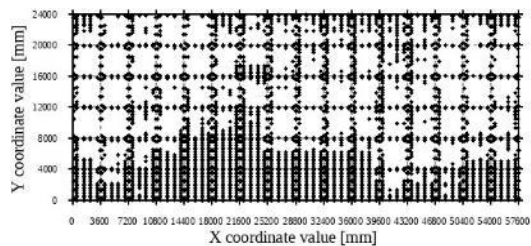
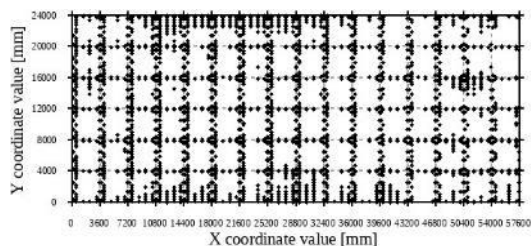


図13 吊りボルト間を補強したモデルの解析結果（8.00 s）



れた結果を示す。未補強モデルの結果に対して、Y軸方向の段差における天井落下は軽減されたが、壁際天井が広範囲に渡って連鎖的に崩落している様子が観察された。この原因として、未補強モデルでは一定の間隔で存在するY軸方向の段差部が落下しやすく構造的な弱部になっていたため、一種のフェイルセーフとして機能していたが、段差部を補強することでその機能が失われ、連結したまま天井が落下しやすくなったことが考えられる。最後に、図13に吊りボルト間を補強したモデルの解析で得られた結果を示す。クリップの脱落はY軸方向の段差部を中心として天井全域に渡って生じているものの、未補強モデルの結果に対して、壁から受ける衝突力および天井の落下が大きく軽減されている。

## 6. 結論

本稿では、ASI-Gauss法に基づく有限要素解析手法を用いて、箱型段差吊り天井が取り付けられたコンサートホールにおける地震時天井落下挙動をシミュレートした。その結果、天井と壁が衝突することでクリップの脱落および天井の落下が生じ、特に壁と直交する向きの段差部分で顕著に天井が損傷した。これは、壁から受ける衝突力に対して剛性が高く、衝撃波が伝播しやすいためと考えられる。また、壁と平行な向きの段差を補強した場合、壁と直交する向きの段差を補強した場合、吊りボルト間を補強した場合の3ケースの耐震化を施したモデルで同様の解析を行った。その結果、本研究で解析対象とした箱型段差吊り天井においては、壁と平行な向きの段差部に発生する局所的なモーメントが天井の落下性状に与える影響は小さいことが示唆された。一方、壁と直交する向きの段差部を補強することで衝撃力の伝播によるクリップの脱落は低減されたが、連結された天井が分離することなく、広範囲に渡って連鎖的に落下する現象が見られた。また、吊りボルト間を補強した場合、壁から伝わる衝撃力が

軽減されることで天井落下が抑制される結果が得られた。今後は、クリップの補強や壁と天井の間に緩衝材を導入するなどの、斜め部材の設置以外の耐震化方法について有効性を検討する予定である。

## 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] 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。
- [3] 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。
- [4] 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。
- [5] D. Isobe: Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018。
- [6] 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。
- [7] 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。
- [8] 西山 功：2003 年十勝沖地震における釧路空港の天井落下被害状況調査報告，建築防災，第 315 号，pp30-35，2004。