

# 有限要素法を用いた大規模空間吊り天井の脱落被害再現シミュレーション

## COLLAPSE SIMULATION OF WIDE-AREA SUSPENDED CEILING SYSTEM USING FINITE ELEMENT METHOD

磯部 大吾郎\*, 藤原 嵩士\*\*, 山下 拓三\*\*\*, 田川 浩之\*\*\*\*, 佐々木 智大\*\*\*\*\*  
Daigoro ISOBE, Takashi FUJIWARA, Takuzo YAMASHITA,  
Hiroyuki TAGAWA and Tomohiro SASAKI

In this paper, a numerical analysis to simulate the ceiling collapse in a full-scale gymnasium specimen, which was tested at the E-Defense shaking table facility in 2014, was conducted. The numerical model consisted of steel structural frames and suspended ceilings were constructed. All the members were modeled using linear Timoshenko beam elements and the ASI-Gauss code was applied. The numerical result had shown the collapse of the ceilings progressed owing to the detachment of clips that connected the ceiling joists to the ceiling joist receivers, which eventually led to a large-scale collapse of the ceilings.

**Keywords** : Ceiling collapse, E-Defense, Gymnasium, Nonstructural component, ASI-Gauss technique, FEM  
天井脱落, E-ディフェンス, 体育館, 非構造部材, ASI-Gauss 法, 有限要素法

### 1. はじめに

学校体育館に代表される大規模空間を有する屋内運動場等施設は、災害時に避難施設としての役割を担っていることから、災害発生後も使用可能であることや余震にも耐えうる施設であることが求められる。しかし、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では最大震度7の本震に加えて震度6以上の余震が複数回発生し、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脱落被害より避難施設としての役割を果たさなかった事例が報告されている<sup>1)</sup>(図1参照)。また一方、2016年4月14日の熊本地震では最大震度7の前震の後、4月16日に最大震度7の本震が発生し、前震で被害が軽

微であった、または、確認されなかった場合でも、本震で天井が落下する等の大きな被害が発生するという、連続地震により天井脱落被害が拡大した事例が多く報告されている<sup>2)</sup>(図2参照)。

東北地方太平洋沖地震以降、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<sup>3)</sup>と関連告示の制定<sup>4)</sup>を行い、技術基準<sup>5)</sup>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「6m超の高さにある、水平投影面積200m<sup>2</sup>超、単位面積重量2kg/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、



Fig. 1 Ceiling collapse occurred during 2011 Great East Japan Earthquake<sup>1)</sup>



Fig. 2 Ceiling collapse occurred during 2016 Kumamoto Earthquake<sup>2)</sup>

\* 筑波大学 教授・博士(工学)

\*\* 前 筑波大学院生・修士(工学)(現 日本サムスン(株))

\*\*\* 防災科学技術研究所 主任研究員・博士(工学)

\*\*\*\* 武庫川女子大学 准教授・Ph.D.

\*\*\*\*\* 前 防災科学技術研究所 主任研究員・博士(工学)  
(現 榊大林組)

Prof., Univ. of Tsukuba, Dr.Eng.

Former Grad. Student, Univ. of Tsukuba, M.Eng. (currently Samsung Japan Corporation)

Chief Researcher, NIED, Dr.Eng.

Assoc. Prof., Mukogawa Women's Univ., Ph.D.

Former Chief Researcher, NIED Dr.Eng. (currently Tech. Res. Inst. of Obayashi Co.)

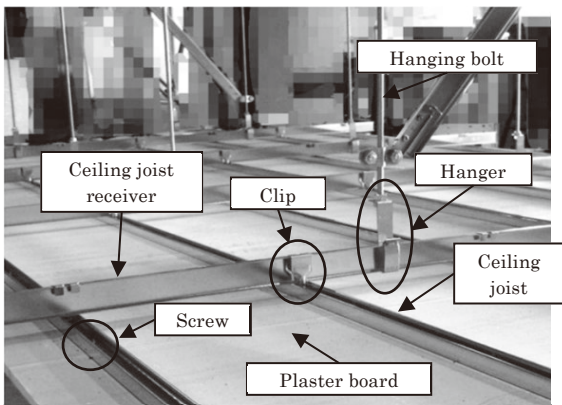


Fig. 3 Components of conventional type ceiling with steel furrings

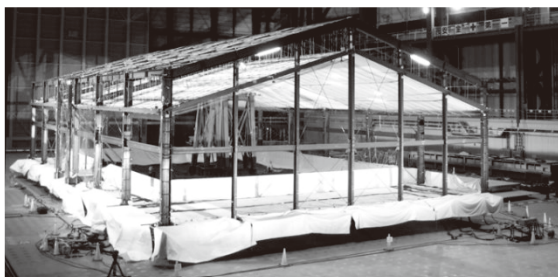


Fig. 4 Gymnasium specimen<sup>8)</sup>

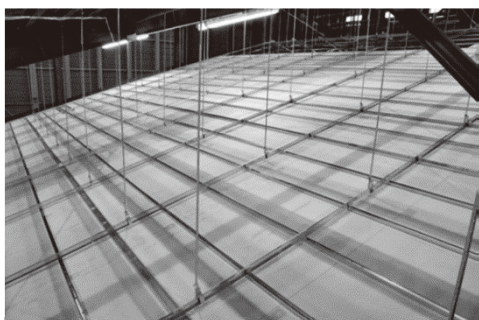


Fig. 5 Ceilings in the specimen<sup>8)</sup>

脱落防止対策を義務づけることとしている。2015年4月時点で公立小中学校の内、対策が未実施の吊り天井を有する屋内運動場等施設は4,849棟(全棟数33,392棟の14.5%)存在しており<sup>8)</sup>、耐震化の遅れている地方公共団体に対しては文部科学大臣より耐震化を進める書簡が発出されている。また、学校施設に耐震化ガイドブックを配布し、天井の定期的な点検・対策を推進している<sup>7)</sup>。

これらの対策は、地震後の被災調査から推定された破壊メカニズムや天井要素の実験結果を根拠としている。しかしながら、天井要素のみを取り出した実験のみでは脱落被害の再現は難しい。そこで、天井の脱落メカニズムを明らかにするべく、2014年1月に実大三次元震動破壊実験施設(以下、E-ディフェンス)で学校体育館を模擬した大空間を有する試験体に設置された吊り天井の脱落被害再現実験が実施された<sup>8)</sup>。この実験により、天井の脱落メカニズムについて多くの有用な知見が得られた。しかし、天井は様々な種類の形状が存在するため、それぞれの場合での脱落メカニズムの解明が望まれる。また、同一形状の天井においても、設備の干渉等の現場毎に異なる特殊な環境が存在することから、実験の再現性を把握す

るため、結果のばらつき評価も必要になる。そのためには、様々な条件での検証や同一対象でも複数回の検証が必要となるが、大規模実験のみではコスト面で問題があり、その代替、補完手法として数値シミュレーションの果たす役割は大きい。また、今後危惧される連続地震に備え、連続地震解析による天井の脱落メカニズムを検証することは重要である。

そこで本稿では、地震時の体育館内における天井落下現象を再現するシミュレーション技術を構築し、上述の吊り天井の脱落被害実験の再現解析を試みた。解析には、地震動、弾塑性、破断を含む非線形性の高い解析でも安定して行えるASI-Gauss法<sup>9)</sup>を用いた。実験では吊りボルトやブレースの座屈現象が確認されたため、体育館構造躯体に未対策天井を取り付けた試験体を対象とし、上記部材の座屈現象を再現可能とするようなモデル化を施し、地震応答解析を実施した。実験と同様に地震波形を連続的に2回入力し、その前後の被害の推移について検証した。

以下に本論文の構成を記す。第2章では試験体で使用された吊り天井の構造について述べ、第3章では各構成要素の脱落条件について説明する。続いて第4章では解析モデルおよび解析条件、第5章では実験と解析を比較・検証した結果について考察する。最後の第6章では結論を述べる。

2. 吊り天井の構造

一般に学校体育館等に用いられる天井は、鋼製下地在来工法天井と呼ばれる。図3に示すように、天井の下地材は吊りボルト、野縁受け、野縁、せっこうボードで構成されており、それぞれはハンガー、クリップ、ビス、野縁・野縁受けジョイントによって接合される。具体的には、ハンガーは吊りボルトと野縁受け、クリップは野縁受けと野縁、ビスは野縁とせっこうボード、ジョイントは野縁ま

Table 1 Spec of non-seismic ceilings used in the experiment<sup>8)</sup>

Item	Spec
Horizontal design load	None
Horizontally projected area	19.0×30.0 [m] (570 [m <sup>2</sup> ])
Total area	625 [m <sup>2</sup> ]
Mass of ceiling per area	13.1 [kg/m <sup>2</sup> ]
Clearance	None
Hanger length	1,500 [mm]
Hanger interval	1,147×1,000 [mm]
Hanging bolt	W3/8 hanging bolt
Hanger	Free hanger (permissible substitute of JIS standard)
Single ceiling joist	JIS19 type @364 [mm]
Double ceiling joist	JIS19 type @1,820 [mm]
Ceiling joist receiver	JIS19 type @1,000 [mm]
Clip	One-touch clip for JIS19 type
Brace	None
Finishing material	Plaster board 9.5 [mm] +Rockwool absorber 9 [mm] Screw φ3.5 [mm]

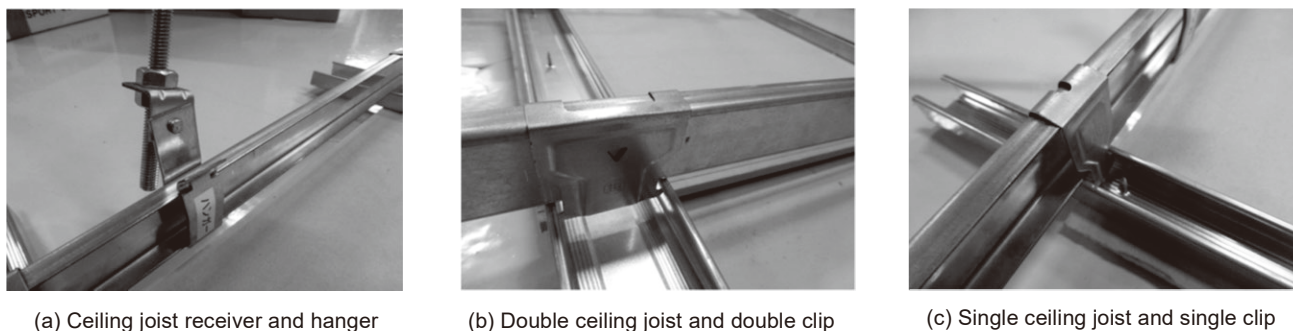


Fig. 6 Base materials used for non-seismic ceilings<sup>9)</sup>

Table 2 Sizes and materials of the components<sup>10)</sup>

Name	Size [mm]	Material
Hanging bolt	φ9	JIS G 3101
Ceiling joist receiver	38×12×1.2	JIS G 3302
Single ceiling joist	19×25×0.5	JIS G 3302
Double ceiling joist	19×50×0.5	JIS G 3302
Clip	t0.6	JIS G 3302

たは野縁受け同士を接合する。

Eーディフェンスの実験で使用された試験体<sup>9)</sup>を図4に示す。この試験体には、図5に示すような未対策天井が施工されている。その主な仕様を表1に示す。天井の勾配は屋根の勾配と同一の10:3となっており、天井の水平投影面積は570 m<sup>2</sup>、見付面積は625 m<sup>2</sup>である。また、天井単位面積質量は13.1 kg/m<sup>2</sup>である。天井と構造躯体の間にクリアランスは無く、試験体側面梁H200×200×8×12を内壁と見なし、これに対し、仕上げ材を隙間なく敷き詰めて天井を仕上げている。下地材には図6に示すJIS規格19形天井下地材を使用している。その寸法および材質を表2に示す<sup>10)</sup>。クリップには施工が容易なワンタッチクリップが採用されており、背掛け、腹掛けを交互に並べるように取り付けられている。

### 3. 脱落条件

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次に示す脱落条件を導入し、設定した条件を満たした際にその要素を破断させることで脱落を再現した。脱落条件には、要素内

Table 3 Main spec of steel gymnasium specimen<sup>9)</sup>

Item	Spec
Structure and floors	Steel frame, single floor
Weight	208.2 ton
Max. height	9.090 m
Horizontal sizes	30.0 m×18.6 m (6×6 spans)
Column	H400×200×8×13(SS400)
Column at end panel	H250×125×6×9(SS400) H300×150×6.5×9(SS400)
Girder	H400×200×8×13(SS400)
Binder	H248×124×5×8(SS400)
Vertical brace	M20, M27(SNR400B)
Horizontal brace	M16, M30(SNR400B)

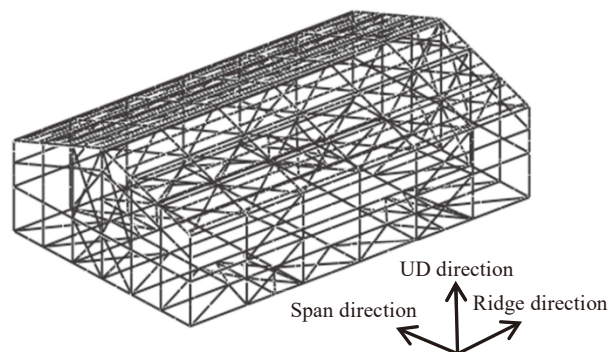


Fig. 7 Structural frame model of gymnasium

断面力により判定する荷重条件と、要素の変形により判定する変位条件の2種類を用いた。

ハンガーの脱落条件には荷重条件を設定し、鉛直下向きに引張力2.8 kNが作用した場合に脱落を判定した<sup>9)</sup>。

クリップの脱落条件には全て荷重条件を設定し、シングルクリップの腹掛けの場合は鉛直下向きに引張力0.35 kN、背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が加わった際に脱落を判定した<sup>9)</sup>。なお、後述のように1つのクリップは2つの要素で表現している。1つの要素が負担する荷重はクリップ単体の半分になるため、解析に導入する荷重条件も上記の値の半分の値にした。

ビスに関しては、引張とせん断方向に脱落条件を設けた。ここで、ビスの要素試験では、最大荷重が加えられた後にしばらく変形してからビスが抜けたため、荷重条件に変位条件を加えた。具体的には、ビスの引張方向に対しては、軸方向に0.40 kNの引張力が作用した後、軸方向に3 mm変位した場合に脱落を判定した<sup>11)</sup>。また、せん断方向に対しては、0.30 kNのせん断力が作用した後、その方向に18 mm変位した際に脱落を判定することとした<sup>12)</sup>。なお、本解析モデルでは、要素分割数を極力減らしビスの本数を試験体の3分の1に縮約したため、脱落条件としては3倍の耐力を設定した。

野縁ジョイントの脱落条件には荷重条件を設定した。野縁ジョイントについては有用な要素試験結果が得られていないため、ここでは野縁ジョイント1本当たりが負担する天井の重量0.28 kNに安全率2を掛けた0.56 kNが要素に引張力として加わった場合に脱落すると仮定した。

### 4. 解析モデルおよび解析条件

体育館の構造躯体モデルは、Eーディフェンスの実験で使用され

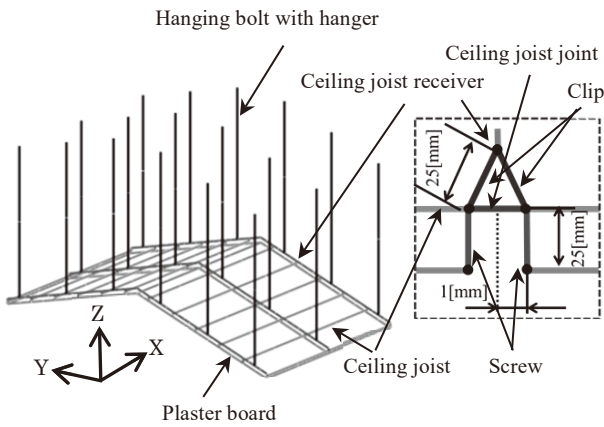


Fig. 8 An outline of suspended ceiling model

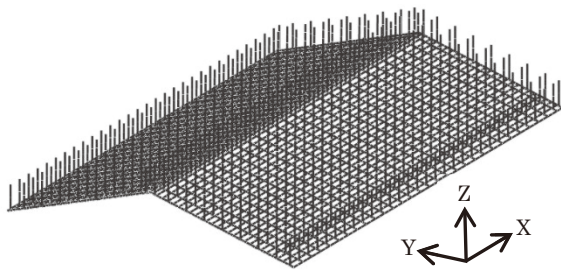


Fig. 9 Full model of suspended ceilings

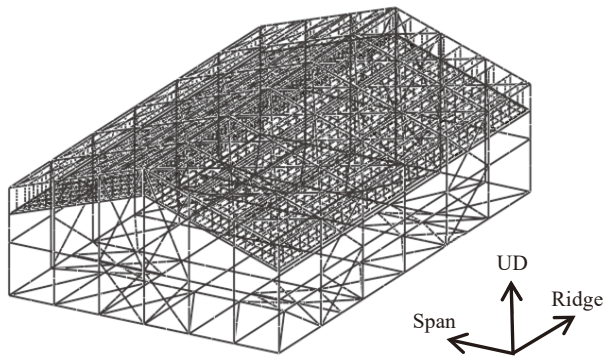


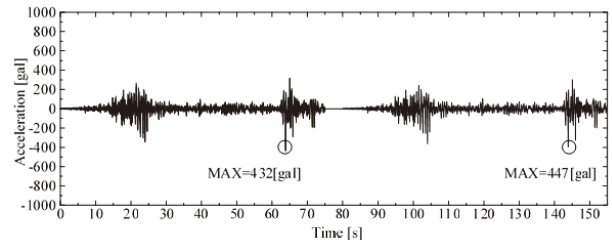
Fig. 10 Gymnasium model with suspended ceilings

た実大体育館試験体の図面<sup>9)</sup>に基づき作成した。表3に構造躯体の主な仕様を示す。構造躯体は鋼構造の平屋建てで、平面寸法は桁行30.0 m×梁間18.6 m、前述のように屋根勾配は10:3で最大高さは9.09 mの大空間を有する構造となっている。解析にはASI-Gauss法<sup>9)</sup>を用いたため、全ての構造部材を基本的には1部材当たり2つの線形要素に分割してモデル化した。大梁、小梁およびブレースは両端がピン接合であるため、部材両端に曲げ剛性を低下させた微小要素(長さ:他要素の断面長の1/2, 剛性:部材剛性の1/10,000)を追加した。また、ブレースは座屈現象を再現可能とするため10要素分割(通常要素8つ+前述の微小要素2つ)とした。大梁上に取り付けた屋根面重量を模擬するための錘、キャットウォークは、重量のみを考慮して大梁に密度として加えた。さらに、引き抜き力によるアンカーボルトの伸びを考慮して、柱脚部には回転剛性を低下させた微小要素を配した。図7に構造躯体のみのモデル概形を示す。

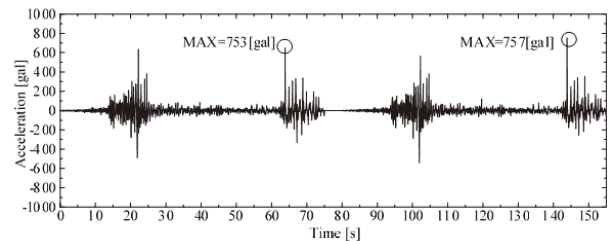
次に、吊り天井を図8に示すようにモデル化した。モデル化した部材は、吊りボルト、野縁受け、野縁、せっこうボード、クリップ、ビス、野縁ジョイントである。吊りボルトの長さは1,500 mm、クリップ、ビスの長さは25 mm、野縁ジョイントの長さは2 mmとした。吊りボルトはハンガーと一体化してモデル化し、ピン接合および座屈を再現するため、前述のように10要素分割とした。クリップは野縁受けから2つに分けて野縁に接続することで、クリップおよび野縁ジョイントが脱落した際に、野縁と一体化したせっこうボードがそれぞれ単体で落下する現象を再現可能とした。2つの要素で1つのクリップを表現しているため、断面積はそれぞれ半分としている。また、せっこうボードを1枚ずつモデル化することにより、ビスが脱落した際のせっこうボード単体の局所落下を、さらにはせっこうボード間を1 mm離すことで、せっこうボード間の接触を再現可能とした。せっこうボードはロックウール吸音板と一体化してモデル化しており、吸音板の重量を密度として加えている。

図9に吊り天井の全体モデルを示す。全体の寸法は桁行29.6 m×梁間18.4 m、吊りボルトの間隔は桁行方向に1,000 mm、梁間方向に1,147 mm(屋根面沿いに1,200 mm)である。

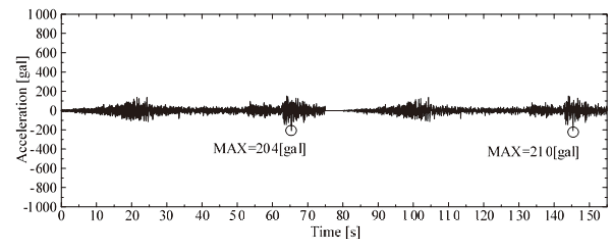
図7の構造躯体モデルと図9の吊り天井全体モデルを組み合わせ、図10に示す吊り天井付き体育館モデルを構築した。全要素数は37,518、全節点数は30,059である。自由振動解析より算出した本モデルの固有周期は桁行方向が0.334 s(実測:0.368 s)、梁間方向は0.404 s(実測:0.399 s)であり、試験体の固有周期と良好に一致した。壁とせっこうボード間の接触を解析上で良好に再現するために、壁とせっこうボード間にも初期段階で1 mmのクリアランス



(a) Ridge direction



(b) Span direction



(c) UD direction

Fig. 11 Input wave (continuous excitation)

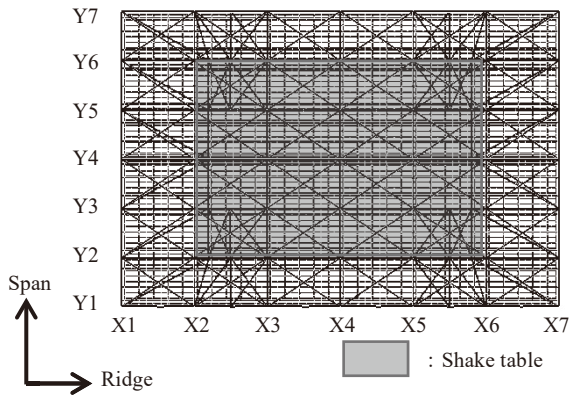
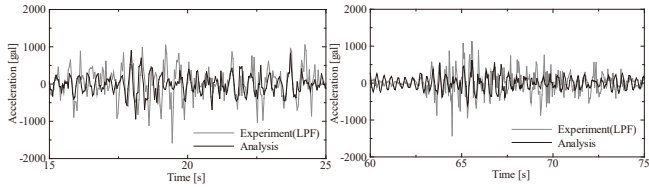
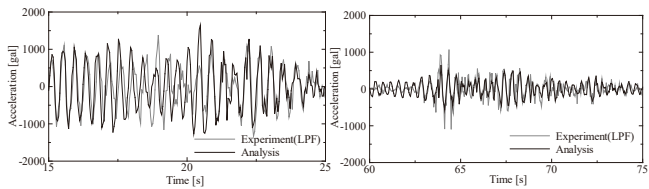


Fig. 12 Constraint area of base columns



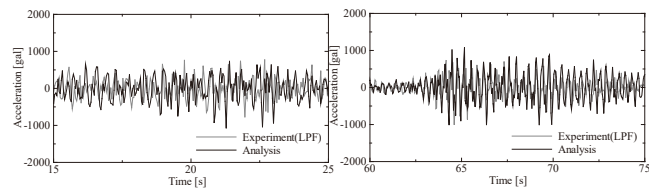
(a) 15-25 s (b) 60-75 s

Fig. 13 Response acceleration at roof top (1<sup>st</sup> excitation, ridge direction)



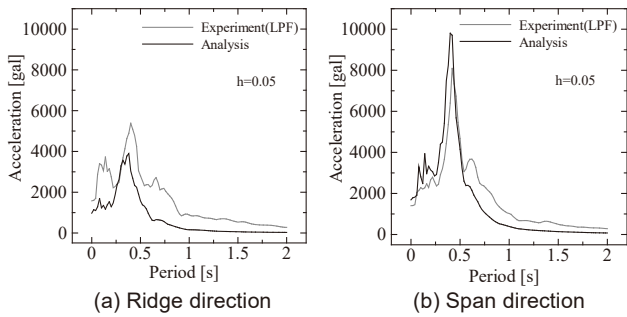
(a) 15-25 s (b) 60-75 s

Fig. 14 Response acceleration at roof top (1<sup>st</sup> excitation, span direction)

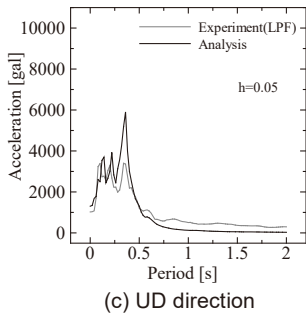


(a) 15-25 s (b) 60-75 s

Fig. 15 Response acceleration at roof top (1<sup>st</sup> excitation, UD direction)

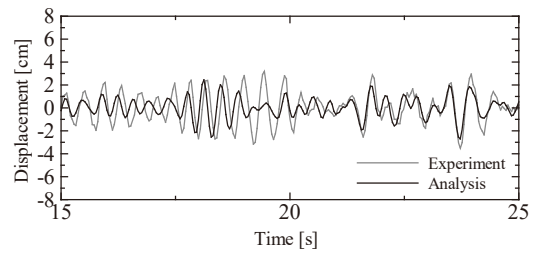


(a) Ridge direction (b) Span direction

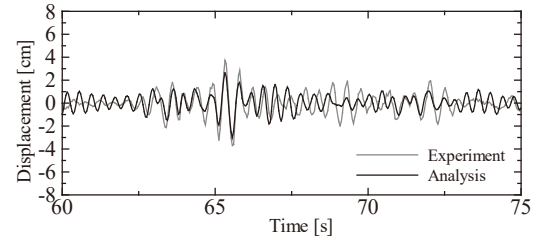


(c) UD direction

Fig. 16 Acceleration response spectrum (1<sup>st</sup> excitation, 0-75 s)

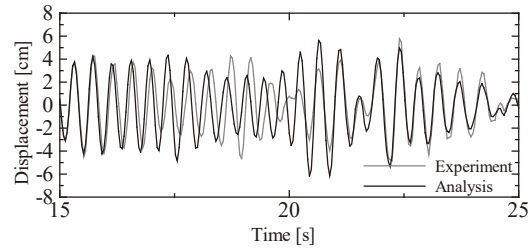


(a) 15-25 s

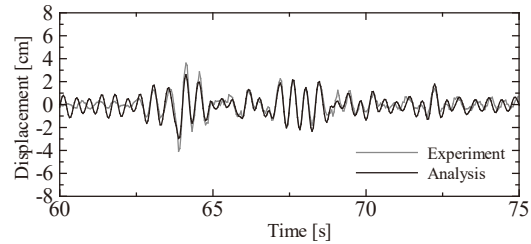


(b) 60-75 s

Fig. 17 Response displacement (1<sup>st</sup> excitation, ridge direction)

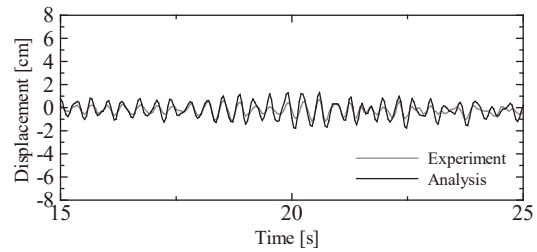


(a) 15-25 s

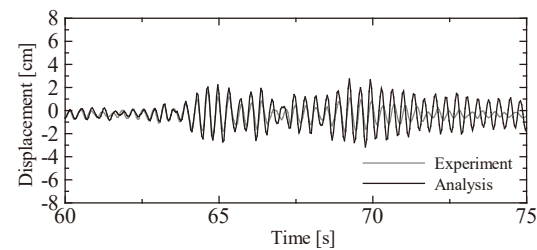


(b) 60-75 s

Fig. 18 Response displacement (1<sup>st</sup> excitation, span direction)



(a) 15-25 s



(b) 60-75 s

Fig. 19 Response displacement (1<sup>st</sup> excitation, UD direction)

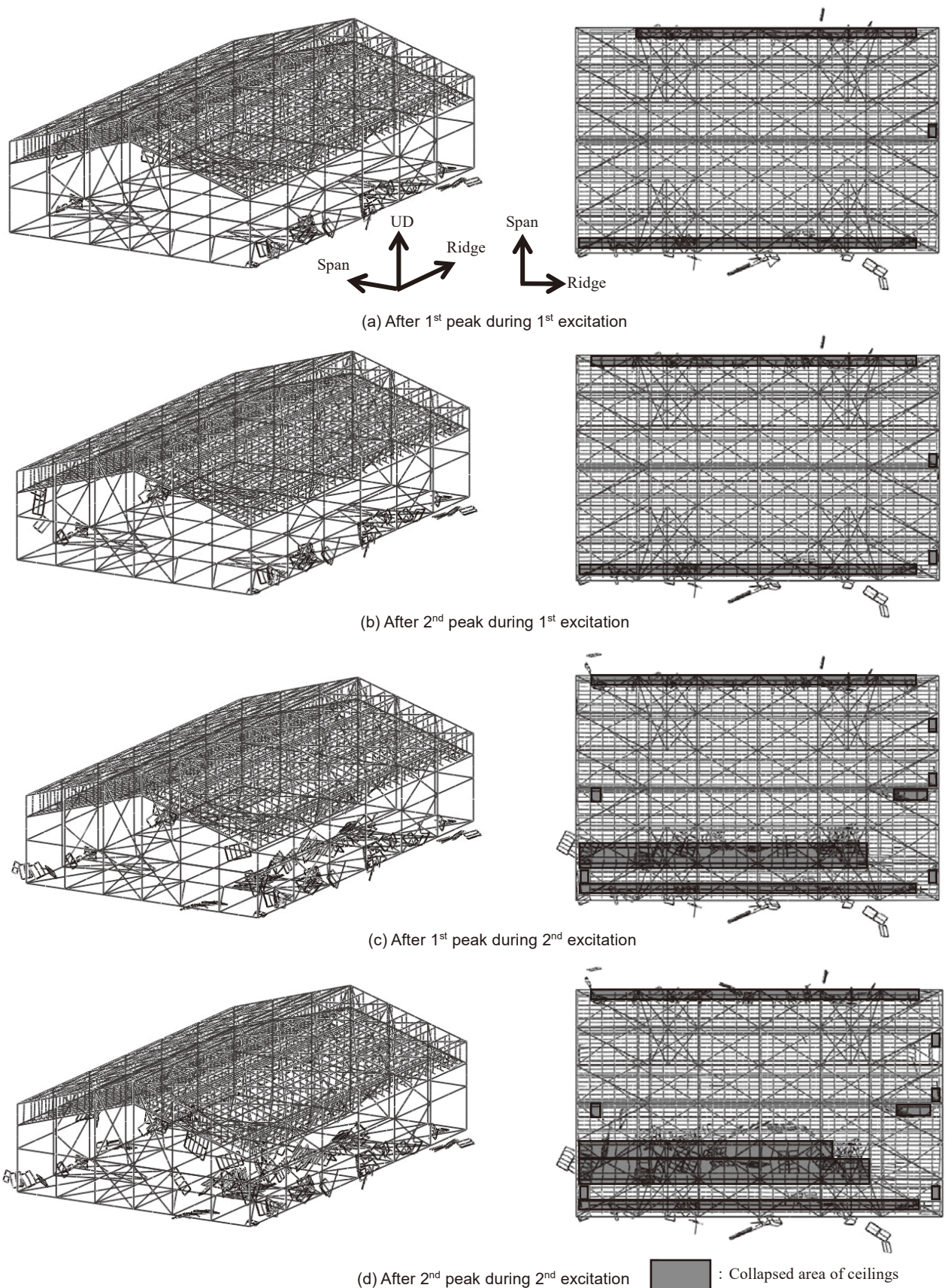


Fig. 20 Collapse sequence of ceilings

スを設けた。解析には、脱落被害再現実験で K-NET 仙台波を 50% に縮小して加振した際に震動台上で観測された、桁行、梁間、上下

の 3 軸方向の加速度 (以下、台上加速度と表記) を用いた。図 11 に 1 回目と 2 回目の加振時に計測された台上加速度を 5 s の間隔を設

けて結合した波形を示す。実験では試験体が震動台上に載りきらず張り出していたため、図 12 に示すように震動台上にある基礎梁のみを固定して加振を行った。そこで、解析でも同様に震動台上の基礎梁の節点のみを完全拘束し、この部分に図 11 の計 155 s の波形を入力した。解析時間は、Intel Core i7-4790K CPU @ 4.00 GHz、メモリ 16.0 GB で約 86 時間であった。

5. 解析結果

5.1 屋根面における応答加速度および変位の比較

図 12 の X4-Y3 通りの屋根面における桁行、梁間、上下方向の 1 回目加振時の応答加速度の時刻歴を図 13~図 15 に、加速度応答スペクトルを図 16 に示す。応答加速度の時刻歴は、15-25 s の第 1 ピーク時および 60-75 s の第 2 ピーク時を抽出して示している。なお、実験の加速度データには、試験体の大梁上に取り付けられた屋根荷重を表現するための錘が、実験時に天井を支える母屋材に接触した際に発生した衝撃を加速度センサーが拾ったためと思われる、短周期成分が卓越した波形が確認された。そこで、加振による躯体の振動のみを観察するため、実験結果には 10 Hz のローパスフィルタ (LPF) をかけて衝撃波の影響を取り除いた。全体的な傾向を見ると、桁行方向については解析結果と実験結果の間に多少の差異が認められるものの、梁間方向と上下方向については良好に一致している。図 16 の加速度応答スペクトルでも、梁間・上下方向は実験結果と良好に一致しているのに対し、桁行方向は実験結果と形状が多少異なる結果となった。2 回目加振時の応答加速度の時刻歴および加速度応答スペクトルについても同様の傾向が確認された。

次に、図 12 の X4-Y4 通りの屋根面における桁行、梁間、上下方向の 1 回目加振時の応答変位の時刻歴を図 17~図 19 に示す。ここでも、15-25 s の第 1 ピーク時および 60-75 s の第 2 ピーク時の時刻歴を抽出して示している。これらの図より、梁間・上下方向の波形は実験結果と良好に一致していることが確認できる。また、桁行方向に関しては実験結果より振幅が多少小さいものの、位相は良好に一致していることが分かる。2 回目加振時の応答変位の時刻歴についても同様の傾向が確認された。

5.2 天井の落下状況およびその要因

図 20 に解析により得られた天井の落下状況を示す。また図 21 には、図に示す時間帯におけるクリップ要素の脱落箇所を黒い点で示す。本解析では、全ての天井落下がクリップの脱落を要因として発生していた。

1 回目加振時の第 1 ピーク時には、図 20(a)に示すように梁間面の壁との接触部で野縁とせっこうボードが一体化して落下している。解析モデルでは梁間面の壁と天井間のクリアランスが 1 mm と容易に接触する距離にあるため、第 1 ピーク時には壁とせっこうボードが接触し、天井面に壁からの反力が作用している。その際、梁間面の壁と天井が斜めに接触するため、反力の天井面法線方向分力によってクリップに引張力が作用し引き抜かれている。クリップが脱落すると、せっこうボードは野縁に支えられたまま吊りになるが、それを支える野縁ジョイントがせっこうボードの重量に耐えきれず脱落するため、野縁とせっこうボードが一体化して落下したと考えられる。また図 21(a)より、多くのクリップ要素が早い段階で脱落していることが確認できる。全体の 1/4 程度のクリップ要素がこの時

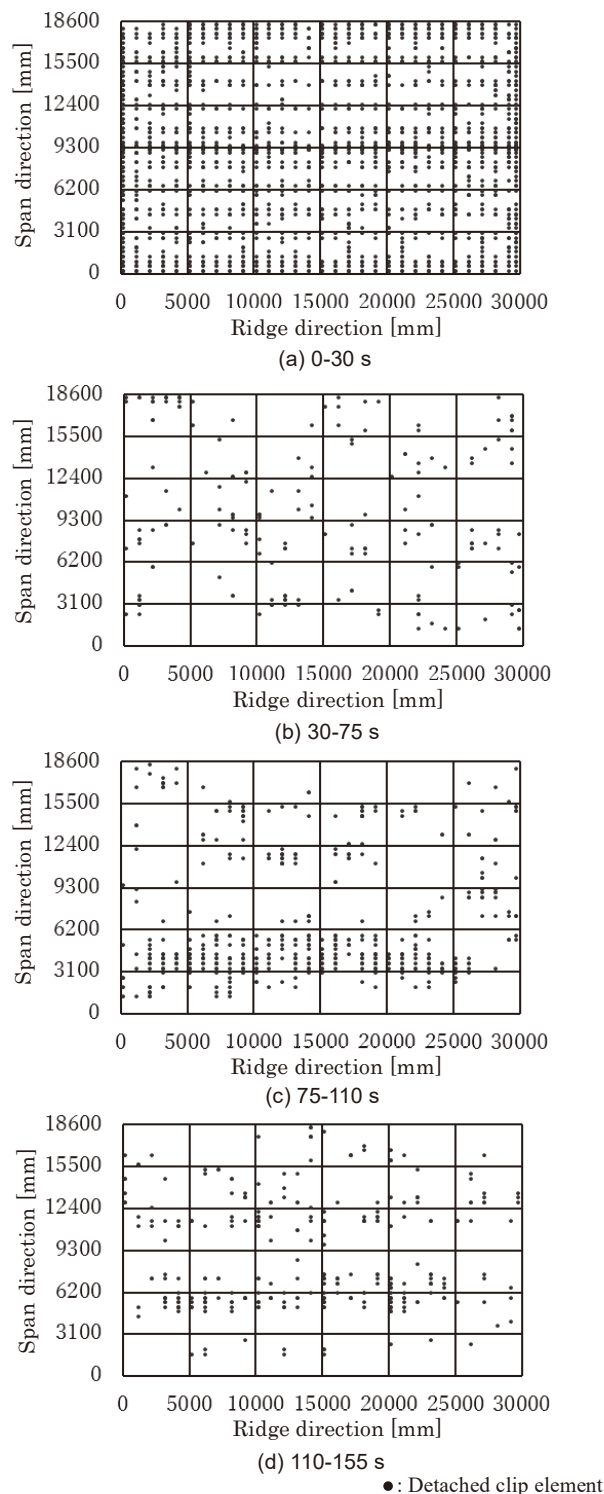


Fig. 21 Location of detached clip elements during each time zone

間帯に脱落していた。これは、せっこうボードが梁間面の壁に接触した際に、壁からの反力と天井面頂部の慣性力により頂部が持ち上がるモーメントが発生し、さらに吊りボルトが座屈することで天井面の上下方向の振動が増大し、クリップに大きな引抜き力が発生したためと考えられる。

1 回目加振時の第 2 ピークでは、図 20(b)に示すように第 1 ピークと同じ状況で壁との接触部で天井落下が確認できるが、それ以外の範囲では落下が見られない。また、梁間面の壁際の天井が落下し

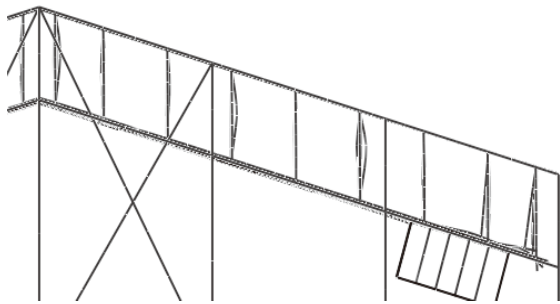


Fig. 22 Buckling occurred in hanging bolts (99.6 s)

たことにより壁との間に大きな隙間ができたため、天井が梁間方向に大きく振れる挙動が見られた。壁との接触がなく、天井面を持ち上げるモーメントが発生しないため、図 21(b)に示すように第 1 ピークよりはクリップの脱落箇所は少ない。しかし、残されたクリップに対しては、第 1 ピーク時に脱落したクリップの負担荷重が再分配され、そこへさらに地震動が加わった。そのため、一定数のクリップが脱落している。

2 回目加振時の第 1 ピークでは、梁間方向 3,100 mm の辺りで天井の連鎖的な落下が確認できる。1 回目加振終了時にはすでに多くのクリップが脱落しており、そのため残存するクリップには大きな荷重が作用している。そこへ 2 回目加振の強い振動が加わることにより一部のクリップが脱落、そして負担荷重の再分配によりさらなる脱落が発生し、結果的に天井の落下が連鎖的に発生したと考えられる。この時にも、図 22 に示すように 1 回目加振第 1 ピーク時に見られたような吊りボルトが座屈する現象が見られた。クリップの脱落箇所も図 21(c)に示すように天井の落下範囲に集中していることが確認できる。

2 回目加振時の第 2 ピークでは、第 1 ピーク時に落下した天井の近傍でさらに別の天井が落下している。ここでも、荷重の再分配により負担が増大したクリップに地震動による慣性力が加わることで、脱落が進んだものと考えられる。

本解析では、せっこうボードが壁に接触した際に壁からの反力が発生している点、それにより天井頂部で持ち上げモーメントが発生し多くのクリップが脱落している点、さらには荷重再分配による負担増に起因して天井が連鎖的に落下している点等、実験より考察された脱落被害メカニズム<sup>9)</sup>が概ね再現できているといえる。しかしながら、天井面頂部で集中的に天井が落下した実験結果とは一致しない結果となった。この要因は、解析では 1 回目加振時に梁間面の壁との接触部で多くの天井が落下したため、その後に頂部を持ち上げるモーメントが発生せず、頂部における損傷が小さくなったためと考えられる。

## 6. 最後に

本稿では、吊り天井付き体育館モデルを構築し、ASI-Gauss 法を用いて連続加振解析を実施した。その結果、屋根面の応答は実験結果と良好に一致した。また、E-ディフェンスによる実験での天井落下要因の一つとされた、吊りボルトの座屈現象を確認することができた。さらに、天井落下位置は多少異なるものの、脱落被害メカニズムは概ね再現できたと考えられる。ほぼ同じ波形を入力した 1

回目と 2 回目加振での解析結果が異なることから、加振前のクリップや吊りボルトの状況がその後の天井の挙動に大きな影響を与えることが確認された。具体的には、クリップが加振前から既に脱落している場合には、その周辺箇所でも荷重負担が増加しクリップの脱落がさらに進行すること、吊りボルトが座屈を起こすとその下部のクリップは脱落が進行しやすくなるなどの点を確認された。今後は、解析の再現性を向上させるために、クリップやハンガーの滑り現象の考慮、野縁ジョイント他の各要素の脱落条件の高精度化について検討していく予定である。

## 謝辞

本研究は、防災科学技術研究所の数値震動台研究開発分科会（委員長：大崎純（京都大学））設備 WG の研究プロジェクトとして行ったものである。また、元筑波大院生の山本 卓也氏（現東芝ライフスタイル（株））から本研究に対して多大なる貢献を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) National Institute for Land and Infrastructure Management & Building Research Institute: Report on Field Surveys and Subsequent Investigations of Building Damage Following the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, 2012. 3 (in Japanese)  
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) Building Research Institute: Quick Report on Field Surveys and Subsequent Investigations of Building Damage Following the 2016 Kumamoto Earthquake, 2016. 9 (in Japanese)  
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(速報), 2016. 9
- 3) National Institute for Land and Infrastructure Management: Decree on Revision of Building Standards Law, No. 217, 2013 (in Japanese)  
国土交通省: 建築基準法施行令の一部を改正する政令, 政令第 217 号, 2013
- 4) National Institute for Land and Infrastructure Management: On Specific Ceiling and Its Structurally Safe Measures, Notice by NILIM, No. 771, 2013 (in Japanese)  
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, 国土交通省告示第 771 号, 2013
- 5) National Institute for Land and Infrastructure Management: On Technical Standards of Ceiling Collapse Countermeasures in Buildings, 2013. 9 (in Japanese)  
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
- 6) Ministry of Science and Technology: Report on Field Surveys of Seismic Renovations in Public School Facilities, 2015. 6 (in Japanese)  
文部科学省: 公立学校施設の耐震改修状況調査の結果について, 2015. 6
- 7) Ministry of Science and Technology: Guidebook on Seismic Renovation of Non-Structural Components in School Facilities (revised version), 2015. 3 (in Japanese)  
文部科学省: 学校施設の非構造部材の耐震化ガイドブック(改訂版), 2015. 3
- 8) Sasaki, T. *et al.*, Collapse Mechanism of Wide-area Suspended Ceiling System Based on E-Defense Full-scale Shake Table Experiments, Shake Table Experiments on Non-seismic Suspended Ceiling and Seismically Designed Suspended Ceiling, 2015. 2 (in Japanese)  
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 -, 2015. 2
- 9) Isobe, D. and Lynn, K.M.: Structural Collapse Analysis of Steel Framed



Structure due to Aircraft Collision, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.579, pp.39-46, 2004. 5 (in Japanese)

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, pp39-46, 2004. 5

10) Japan Structural Consultants Association: Handbook on Anti-Seismic Structural Design, Ohm-sha, 2008 (in Japanese)

社団法人 日本建築構造技術者協会: 耐震構造設計ハンドブック, オーム社, 2008

11) Chinzei, H. *et al.*: Pull Out Experiment and Collapse Mechanism of Tapping Screw Connection Study on Mechanical Characteristic of Tapping Screw: Connection in Nonstructural Components Part1, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 891-892, 2015. 9 (in Japanese)

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, B-1, pp. 891-892, 2015. 9

12) Sugiyama, T. *et al.*: Shear Tests of Screwed Joint between Ceiling Joist and Plaster Board of Conventional Type Ceiling Part 1: Test Plan and Results of Element Tests, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp. 871-872, 2010. 7 (in Japanese)

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:試験計画および要素試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 871-872, 2010. 7

COLLAPSE SIMULATION OF WIDE-AREA SUSPENDED CEILING SYSTEM  
USING FINITE ELEMENT METHOD

*Daigoro ISOBE*\*, *Takashi FUJIWARA*\*\* , *Takuzo YAMASHITA*\*\*\*,  
*Hiroyuki TAGAWA*\*\*\*\* and *Tomohiro SASAKI*\*\*\*\*\*

\* Prof., Univ. of Tsukuba, Dr.Eng.

\*\* Former Grad. Student, Univ. of Tsukuba, M.Eng. (currently Samsung Japan Corporation)

\*\*\* Chief Researcher, NIED, Dr.Eng.

\*\*\*\* Assoc. Prof., Mukogawa Women's Univ., Ph.D.

\*\*\*\*\* Former Chief Researcher, NIED Dr.Eng. (currently Tech. Res. Inst. of Obayashi Co.)

Many ceiling collapse damages were observed in wide-area structures such as gymnasiums during the 2011 Great East-Japan Earthquake and the 2016 Kumamoto Earthquake. The prevention of ceiling collapse phenomena is an important issue not only to save people's lives, but to keep these facilities to be safely used as shelters after earthquakes.

In this paper, a numerical analysis to simulate the ceiling collapse in a full-scale gymnasium specimen, which was tested at the E-Defense shaking table facility in 2014, was conducted. A numerical model consisted of steel structural frames and suspended ceilings were constructed. All the members were modeled using linear Timoshenko beam elements and the adaptively shifted integration (ASI) - Gauss code was applied. Hangers and hanging bolts were modeled in one piece. The plaster boards were assumed as rigid in out of plane direction and only the mass of rock wool boards was considered. Their strength were neglected. Clips and screws were modeled with minute, small elements. Each plaster board was modeled separately to consider local contact between plaster boards, which was simulated by modeling the screws slightly apart. Elasto-plastic buckling of braces and hanging bolts were considered by modeling them with eight beam elements each and two hinge elements on both ends. The clips connecting ceiling joists and ceiling joist receivers are small and delicate components that may be detached during repeated excitation. Once there is a local detachment of clips, a change in the load distribution may cause a chain reaction of detachments, which ends in a drop of plaster boards. Furthermore, the detachments of hanging bolts that are connected to the structural members composing the roof, and failure of screws on plaster boards are assumed to be other main causes of the ceiling collapse. The results of some preliminary tests conducted to see the actual strength of these components are implemented in the analysis for criteria.

The numerical result was validated by the experimental result, which was performed at the E-Defense under an input of two continuous K-NET Sendai 50% waves. The acceleration responses, the spectrum and the displacement responses obtained on the roof matched well with the experimental result. According to the results, the plaster boards near walls pattered down occasionally at the first peak of the first wave. These were due to detachment of clips and screws caused by collisions to the walls. Then, the clips near roof top began to get loose due to buckling of hanging bolts caused by vertical excitation, which ends, at the first peak of the second wave, in drop of plaster boards in a wide range. The numerical result had shown the collapse of the ceilings progressed owing to the detachment of clips that connected the ceiling joists to the ceiling joist receivers, which eventually led to a large-scale collapse of the ceilings.

(2017年6月7日原稿受理, 2017年7月28日採用決定)