

箱型段差吊り天井を取り付けたコンサートホールの 地震時天井脱落シミュレーション

Ceiling Collapse Simulation of Concert Hall with Box-Type Suspended Ceilings under Seismic Motion

○協 大村 浩之^{*1}, 正 磯部 大吾郎^{*2}

Hiroyuki OMURA^{*1}, Daigoro ISOBE^{*2},

^{*1} 筑波大学 大学院 Graduate School, University of Tsukuba

^{*2} 筑波大学 University of Tsukuba

In this study, 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, constructed with linear Timoshenko beam elements, was simulated by applying a seismic wave. The adaptively shifted integration (ASI)-Gauss code, which can stably simulate such phenomena with strong nonlinearities such as fractures and contacts, was used in this analysis. The numerical results revealed that the collapse of the ceiling was caused by the detachment of clips connecting the ceiling joists to the ceiling joist receivers. The detachment of clips, in turn, was caused by the propagation of the impact force that was generated when the suspended ceiling collided with the wall. Furthermore, it was confirmed that the detachment progressed because the load distribution supported by the clips changed from its initial state. The results also showed that the locations of the clips detached by the collisions were strongly affected by the geometrical shape of the ceiling.

Key Words : FEM, ASI-Gauss technique, Linear Timoshenko beam element, Collapse analysis, Non-structural component, Ceiling collapse, Box-type suspended ceiling

1. 緒言

近年、東北地方太平洋沖地震や熊本地震などの大地震の度に、吊り天井が落下する様子が相次いで報告されている。国土交通省によって天井耐震化が義務化⁽¹⁾、耐震化に関する技術基準⁽²⁾が策定されるなど、天井落下防止のためのガイドラインが整備されつつある。しかし、技術基準が対象としているのは一定の仕様を満たす一般的な天井のみで、ホールなどの音響性能が要求される施設の吊り天井は、天井面に凹凸が設けられることが多く、仕上げ材に高密度な材料が用いられるため、形状が複雑で重量が大きくなりやすい。そのような天井は技術基準が適用されず、有効な耐震化策が確立されていない上に、地震時における天井脱落性状にも未知な部分が多い。

そこで本研究では、天井面に箱型の段差が設けられた吊り天井（以下、箱型段差吊り天井と記述する）付きのコンサートホールモデルを構築し、地震時における吊り天井の崩壊まで含めた挙動を有限要素法でシミュレートする。解析手法には最低限の要素分割数で正確に塑性ヒンジおよび破断が表現でき、幾何・材料非線形や部材同士の接触まで考慮できる ASI-Gauss 法⁽³⁾を用いる。そして、得られた解析結果を基に、天井面の幾何形状と天井重量が天井脱落挙動に及ぼす影響を調査する。

2. 吊り天井および構造躯体の解析モデル

2・1 箱型段差吊り天井の解析モデル

箱型段差吊り天井の概観図を図1に示す。基本的な構造は鋼製下地在来工法天井と同様、仕上げ材がビス留めされた野縁、野縁受けからなるグリッド状の骨組みが吊りボルトによって建物躯体から吊るされている。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と呼ばれる接合金具で接続されている。また、野縁同士

の繋ぎ目は野縁ジョイントと呼ばれる接合金具がはめ込まれている。一方、当該天井の特徴的な点として、同じ構造を持つユニットが複数連結することによって構成されており、ユニットを区切るようにして天井面に凹凸状の段差が設けられている。単位面積当たりの天井質量は 22.2 kg/m^2 で、一般的な天井の約2倍ほどである。

図2に1ユニットの箱型段差吊り天井モデルの概観図を示す。吊りボルト、野縁、野縁受け、仕上げ材に加え、ビス、クリップ、ハンガーの接合金具まで含めてモデルを構築した。ASI-Gauss法は要素内に生じる塑性ヒンジの位置を正確に評価することが可能であり、また、節点を共有する2要素をサブセットとして扱い疑似的に数値積分の次数を上げることで弾性領域での解も精度よく計算することができる。そのため、全ての部材は2要素分割でモデル化した。ただし、吊りボルトに関しては座屈挙動をより精度よく計算するために10要素分割でモデル化している。これは、文献⁽⁴⁾で吊りボルトの横たわみ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ているためである。また、仕上げ材は1枚ずつ独立にモデル化することで天井の局所落下まで表現できるように考慮した。

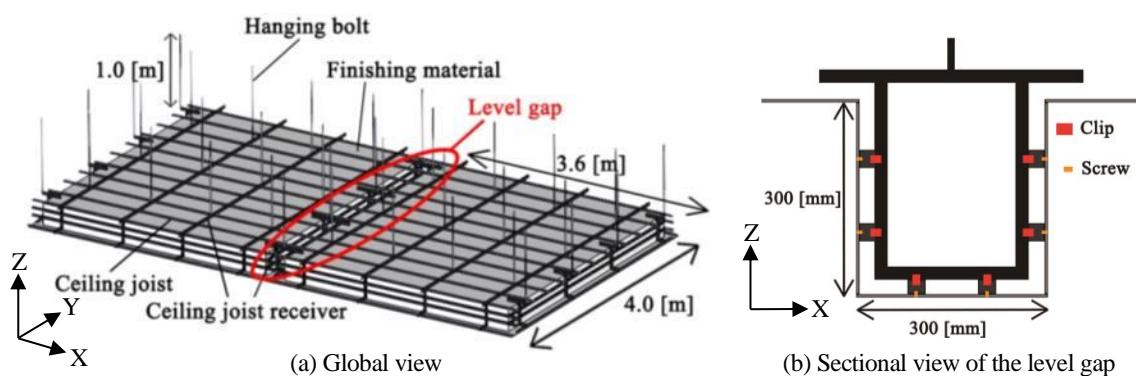


Figure 1 Outline of the box-type suspended ceiling

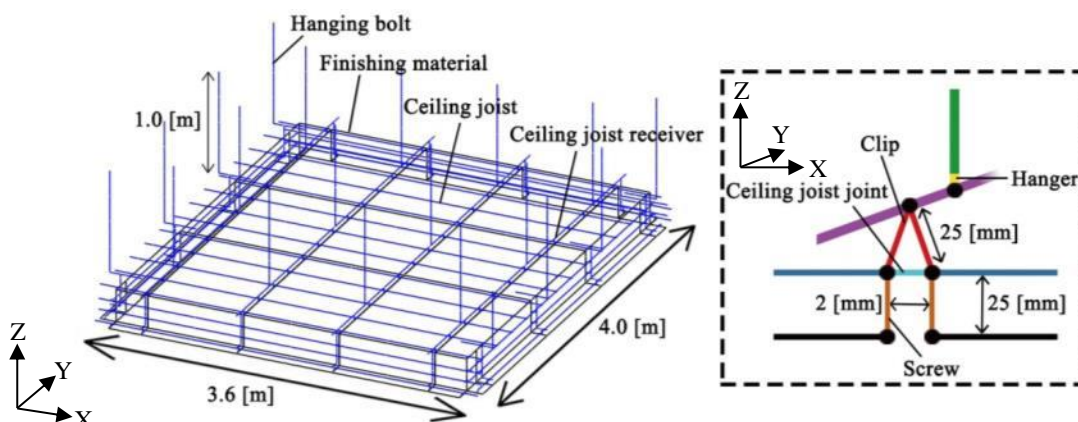


Figure 2 Single-unit model of the box-type suspended ceiling

2・2 箱型段差吊り天井付きコンサートホールの解析モデル

図3に吊り天井付きコンサートホールモデルの概観図を示す。図2に示した箱型段差吊り天井モデルを96ユニット連結し、各吊りボルトの根元を躯体の屋根梁に接続することで吊り天井と躯体を一体化している。総天井質量は30.7 tonとなっている。躯体はRC造で屋根面の梁のみ鉄骨である。躯体の固有周期は天井を外した状態でX軸方向が0.220 s、Y軸方向が0.470 s、天井を有する状態ではX軸方向が0.225 s、Y軸方向が0.485 sである。

平面計画は、矩形部分が客席区画および通路、半円部分が舞台区画となっており、客席区画と通路を隔てる壁が客席区画を囲むようにして設けられている。天井は客席区画のみを覆っており、外壁及び通路に面している部分は壁に接しているため、地震時に天井と雑壁が衝突すると予想される。解析上では天井面と同じレベルに雑壁を模擬した横架材を設け、天井と横架材との接触計算を行うことで衝突を表現する。接触アルゴリズムには内分ベクトル型を使用し、ギャップ要素を介して接触力を伝達させる。

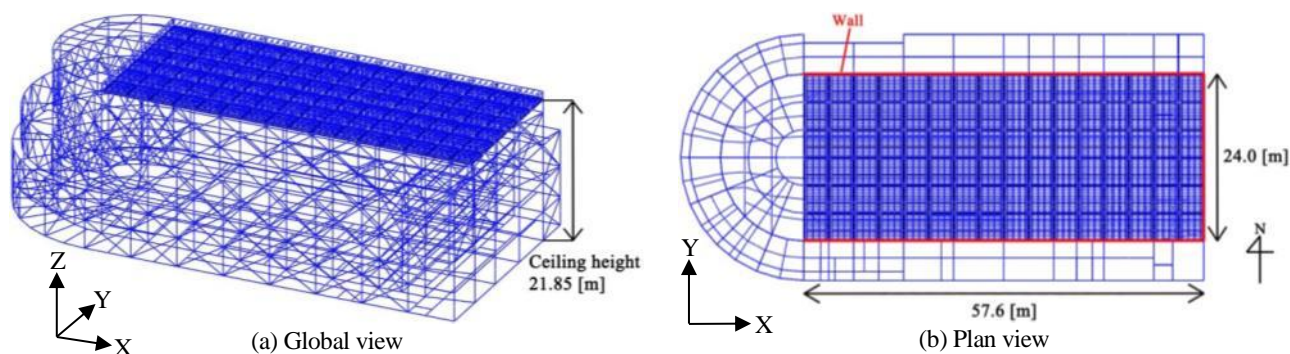


Figure 3 Concert hall model with the box-type suspended ceiling

3. 解析条件

3・1 接合金具の脱落条件

天井の落下は、クリップやハンガーなどの接合金具が脱落することで生じるケースがほとんどであることが知られている。そこで、接合金具要素に脱落条件を導入し、条件を満たした際にその要素を破断させることで接合金具の脱落を表現する。各種接合金具の脱落条件は要素実験⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾に基づいて決定しており、その詳細を表1に示す。

Table 1 Detachment conditions for the joint components

Item		Condition	
Hanger		Tensile axial force 2.80 [kN]	
Ceiling joist joint		Tensile axial force 0.29 [kN] and axial strain 4.93×10^{-5}	
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]	
Screw	and axial displacement 3 [mm]	or	Shear Force 0.30 [kN]
			and shear displacement 18 [mm]

3・2 入力地震波

入力地震波には JMA 神戸波を用い、地表面 ($Z=0$) の拘束点に三軸で入力する。神戸波の卓越周期は 0.35 s および 0.80 s 付近であるため、共振は起こらないと考えられる。時間刻みは 1 ms、経過時間は 20.0 s である。

4. 地震時天井脱落シミュレーション

4・1 解析結果

図4にそれぞれの時間における解析の描画結果を示す。解析開始から約 6 s 経過後天井が揺れ始め、やがて入力地震波にピークが出る 7.0 s 時に北側の壁際で天井が脱落し始め、7.6 s 時に南側の壁際でも同様に脱落した。この時、脱落した接合金具はクリップおよび野縁ジョイントのみで、クリップが外れることで野縁と仕上げ材が一体となって野縁受けから分離し、さらに野縁ジョイントが外れることで落下した。すなわち、天井の落下の危険性はクリップの脱落状況によって評価できるものと考えられる。

4・2 クリップの脱落状況

脱落したクリップ数の時刻歴を図5に示す。この図を見ると、あるタイミングで瞬間的に多くのクリップが脱落しており、描画結果と照らし合わせると、ピークが立つ時刻は天井と壁が衝突する時刻と一致している。例えば、南側の壁と衝突する第2ピーク (7.502s) 付近で脱落したクリップの XY 座標分布 (図6) を見ると、南側の壁際でクリップが大規模に脱落していることが分かる。第2, 3ピークでも同様の傾向が見られた。したがって、

脱落クリップの大多数は壁から伝わる衝撃力により脱落したものと考えられる。その際、壁際において壁と直交する方向（Y 軸方向）の段差に沿って脱落数が卓越している部分が見られる。これは、平らな部分に比べて段差部は剛性が高く、その部分で衝撃力が伝わりやすいためだと考えられる。

また、衝撃力によるクリップ脱落は壁際のユニット内のみ留まっており、天井内側のユニットへの伝播は見られない。これは、壁と平行な方向（X 軸方向）の段差において、水平力が局所的なモーメントに変換されることで、衝撃力が吸収されているためだと考えられる。

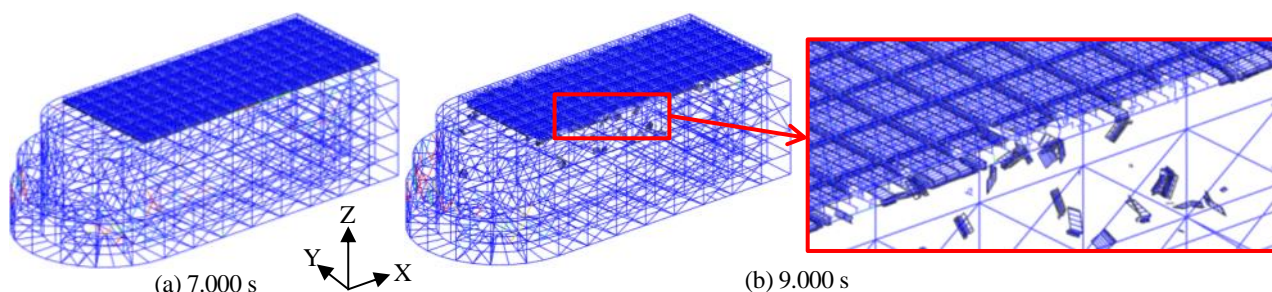


Figure 4 Collapse sequence of the ceiling

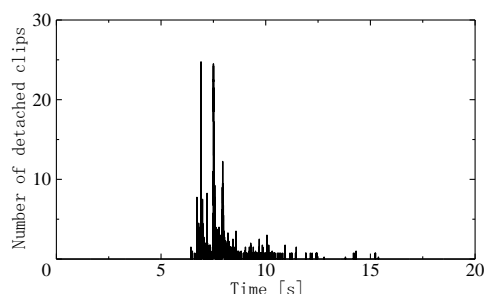


Figure 5 Time history of the number of detached clips

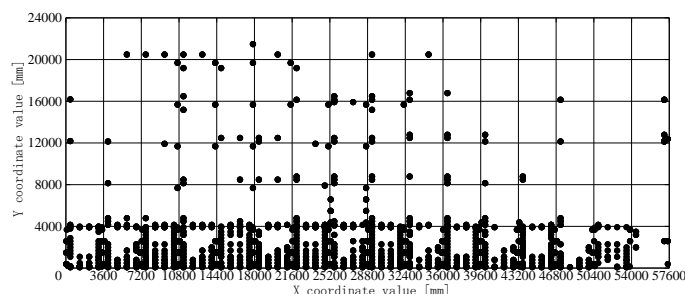


Figure 6 Distribution of detached clips 7.479 s ~ 7.593 s)

5. 結言

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脱落挙動を、ASI-Gauss 法に基づく有限要素解析コードを用いてシミュレートした。その結果、クリップの脱落は天井と壁との衝突で生じる衝撃力が大きく影響することが分かった。さらに、衝突の際に壁と直交する方向の段差に沿ってクリップの脱落が卓越する傾向が見られた。これは、段差部の剛性が平らな部分に比べて高く、衝撃力を伝播しやすいことが原因だと考えられる。一方、壁と平行な向きの段差では衝突によって生じる水平力が局所的なモーメントに変換され、衝撃力が吸収される。そのため、クリップの脱落は壁際のユニット内に留まり、天井内側のユニットへは進展しなかった。

文献

- (1) 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 年。
- (2) 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 年。
- (3) D. Isobe: Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2017.
- (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 年。
- (5) 鎮西 宏 他：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。
- (6) 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(北陸)，2010 年。