

箱型段差吊り天井が取り付けられた 音響施設の地震時挙動解析

Seismic Motion Analysis of Acoustic Facility
with Box-Type Suspended Ceilings Containing Level Gaps

大村 浩之¹⁾, 磯部 大吾郎²⁾

Hiroyuki Omura 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: s1411107@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)

A seismic motion of the box-type suspended ceilings with level gaps was simulated in order to study collapse phenomena of complicated suspended ceilings which is often attached to acoustic facilities such as concert halls. The ASI-Gauss technique which can stably simulate non-linear phenomenon such as fracture, contact and contact release was used as a numerical method for this research. The numerical result had shown that the collapse of the box-type ceilings had started owing to the detachment of clips that connected the ceiling joints to the ceiling joint receivers. Furthermore, it was confirmed that the geometric structure of the level gaps may had strongly influenced the disconnecting process of the clips.

Key Words : Ceiling Collapse, Suspended Ceiling with Box-Type Level Gaps, Collapse Analysis, ASI-Gauss Technique

1. 序論

東北地方太平洋沖地震や熊本地震などの大地震の際に、体育館やコンサートホールなどの大規模空間を有する施設において、図-1に示すような、吊り天井が落下するといった非構造部材の被害が多数報告されている[1][2]。これを受け、国土交通省により天井耐震化に関する技術基準が施行されるなど、天井脱落被害防止のためのガイドラインが整備されつつある。

しかし、これらの法令が対象としているのは鋼製下地在来工法天井と呼ばれる一般的な吊り天井で、質量が約10~16 kg/m²の平らな天井である。一方、コンサートホールなどの音響性能を持つ建築物の吊り天井には、仕上げ材に高密度な材料が用いられることが多く、その場合、天井質量は約30~35 kg/m²にも上る。また、音響設計の一環で天井面の形状が複雑になりやすく、実際に天井の幾何構造がその落下挙動に影響を及ぼしたケースも報告されている[3]。したがって、音響施設に取り付けられるような、重量が大きく構造が複雑な吊り天井の落下メカニズムを調査し、効率的で有効な耐震化方法を明らかにすることは地震防災において重要な課題であると考えられる。

そこで本研究では、コンサートホールに取り付けられているものを想定した、天井面に箱型の段差が設けられた吊り天井(以後、箱型段差吊り天井と記す)を一部分抽出した部分天井モデルを作成し、地震波を入力し有限要素解析を行うことで、地震時における落下挙動メカニズムについて調査を行った。なお、解析手法には、非線形性

が強い解析でも安定的に解くことができ、接触および破壊も考慮することができるASI-Gauss法[4]を用いた。

2. 箱型段差吊り天井の概要

本研究で解析対象とした吊り天井は、図-2に示すTコンサートホールに実際に取り付けられている吊り天井を参考に仕様を決定した。当該天井は同じ構造を持つユニットを複数連結することで構成されており、これらのユニットを区切るようにして段差が設けられている。なお、1ユニットの寸法は3.6 m(桁行)×4.0 m(梁間)、質量は475 kgで、単位面積あたりの質量は33 kg/m²である。

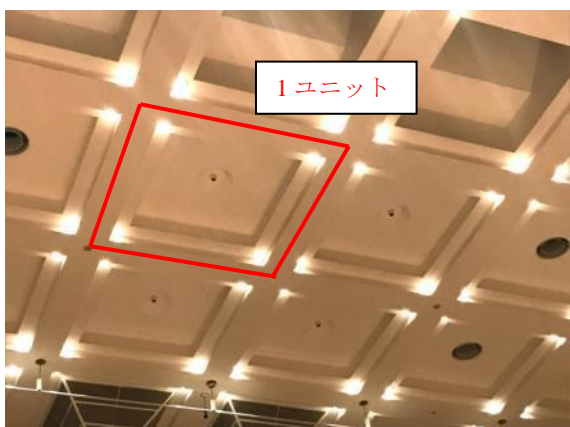
箱型段差吊り天井の概観を図-3に示す。段差部以外の基本的な構造は在来工法天井と同様で、野縁が天井面を構成する仕上げ材にビスで留められ、野縁受けがクリップと呼ばれる接合金具で野縁に結合されている。また、野



図-1 ホールにおける天井脱落被害の様子[1]



(a) 全体



(b) 箱型段差吊り天井

図-2 Tコンサートホールの内観

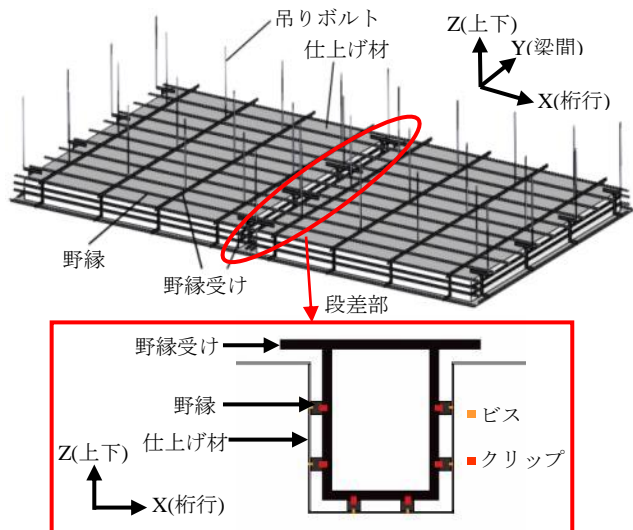


図-3 箱型段差吊り天井の概観図

縁受けはハンガーを介して建物の躯体から吊りボルトによって吊るされている。段差部の高さとは幅はそれぞれ300 mmで、その側面と底面に野縁が2本ずつ配され、それらと立体的に組み立てられた野縁受けがクリップで結合されている。

3. 解析モデルおよび解析条件

(1) 部分天井モデル

前述の箱型段差吊り天井の仕様に基づき、線形チモシエンコはり要素を用いて解析モデルの作成を行った。1ユニットモデルの鳥瞰図を図-4に示す。1ユニットの寸法は3.6 m(桁行)×4.0 m(梁間)で、吊り長さは1.0 mである。先行研究[5]に基づき、天井の局所落下を再現するために仕上げ材は一枚ずつ独立にモデル化しており、仕上げ材の隙間部分と野縁が交わる箇所に接合金具を配置した。

この1ユニットのモデルを3×3ユニット(10.8 m(桁行)×12.0 m(梁間))の計9ユニット連結させることで、部分天井モデル(図-5)を作成した。その際、壁を模擬した横架材要素を梁間方向両端に設置することで、壁と天井の衝突を表現する。横架材と端部の仕上げ材との接触判定上の距離は1 mmとしており、クリアランスはほぼ設けていない。なお、モデル全体の要素数は29,598、節点数は25,253である。

(2) 接合金具の脱落条件

過去に行われた天井脱落被害再現実験[6]では、クリップなどの接合金具が脱落することで天井が落下したという結果が報告されている。そこで本解析では、ハンガー、ビス、クリップ、野縁ジョイントに脱落条件を導入することでそれらの脱落を表現する。各接合金具の脱落条件を表-1に示す[6-8]。野縁ジョイントは瞬間的な衝撃力の作

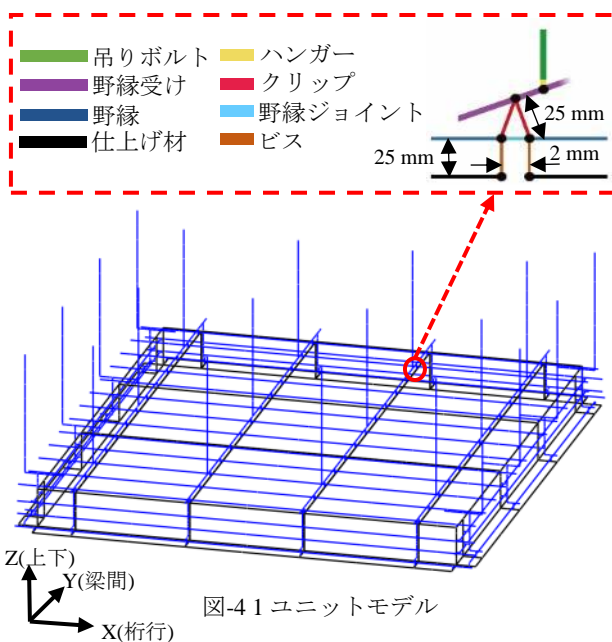


図-4 1ユニットモデル

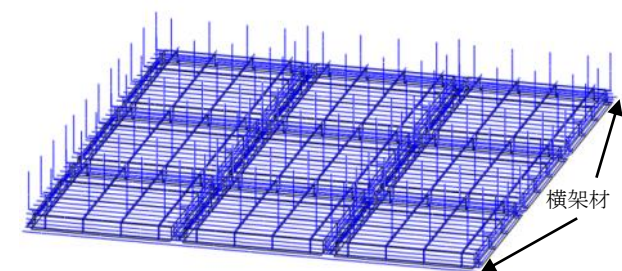


図-5 部分天井モデル

表-1 各接合金具の脱落条件

接合金具	脱落条件
ハンガー	引張軸力 ≥ 2.80 kN [6]
ビス	引張軸力 ≥ 0.40 kN かつ 軸歪 ≥ 0.12 [7]
	せん断力 ≥ 0.30 kN かつ せん断歪 ≥ 0.72 [8]
クリップ	シングル腹掛け：引張軸力 ≥ 0.35 kN [6]
	シングル背掛け：引張軸力 ≥ 0.70 kN [6]
	ダブル：引張軸力 ≥ 0.80 kN [6]
野縁ジョイント	引張軸力 ≥ 0.29 kN かつ 軸歪 $\geq 4.93 \times 10^{-5}$

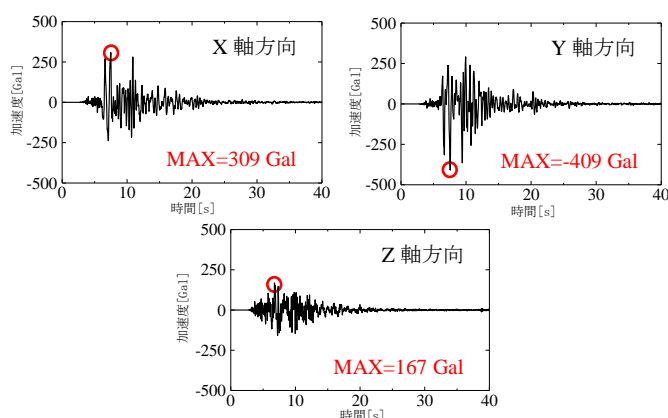


図-6 入力加速度 (JMA 神戸波 50%)

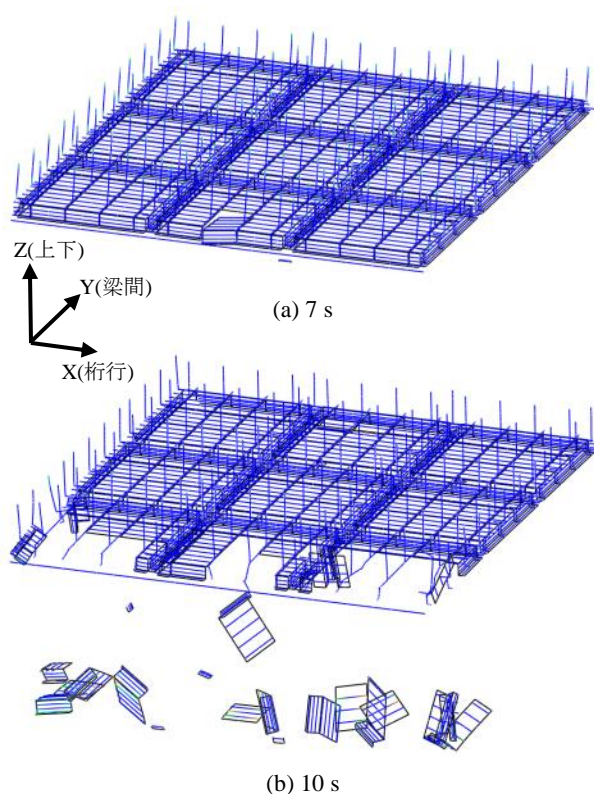


図-7 解析結果

用で脱落することを防ぐため、荷重条件に加えて0.29 kNの引張軸力が静的に作用したときに発生する軸歪を脱落条件として設定している。

(3) 入力地震波

入力地震波には、JMA神戸波50%(図-6)を使用し、解析時間は41 s、時間刻みは0.001 sとした。

4. 部分天井モデルの解析

(1) 解析結果

図-7に解析結果を示す。7 s付近および9 s付近のY軸方向の加速度にピークが出るタイミングで、仕上げ材と横架材が衝突を起こしている。衝突の度に各接合金具に衝撃力が伝播し、その結果、クリップおよび野縁ジョイントが脱落する様子が見られた。また、クリップが脱落すると、そのクリップが支持していた鉛直荷重が周囲のクリップおよび野縁ジョイントに再分配され、やがて一枚の仕上げ材を支持しているクリップと野縁ジョイントが全て脱落し、仕上げ材と野縁が一体で脱落している様子が観察された。以上のことから、一般的にも言われているように、クリップの脱落が天井脱落を引き起こす主要因の一つとなることが示された。

(2) クリップの脱落状況

同解析において脱落したクリップのXY平面上の分布図を図-8に示す。図中の格子状の線はユニットの境界を示しており、すなわち、この格子線に沿って段差部が存在していることになる。段差部側面のクリップは赤色、段差部底面のクリップは青色、その他の天井凸面に配置されているクリップは黒色のプロットで示されている。

図-8より、0 sから7 sの一回目の衝突の際には、壁際の上側クリップと、Y軸方向に走る段差部の側面クリップおよびその付近の上側クリップが脱落していることが分かる。その後、7 sから10 sの二回目の衝突では、Y軸方向段差部の側面クリップおよび底面クリップが脱落するのに加え、前述の荷重再分配の影響で天井内側へクリップの脱落が進行している様子が確認できる。この時、側面クリップより底面クリップの脱落が遅延した原因としては、底面クリップには脱落荷重が大きいダブルクリップが用いられていることが挙げられる。

(3) 段差部におけるクリップの脱落メカニズム

図-9に示すように、X軸方向に走る段差部は天井と横架材との衝突方向に直交しており、衝突によって発生する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を逃しやすい構造になっている。これに対し、Y軸方向に走る段差部は、衝突に対し剛性が高く、衝撃力が吸収されにくい。そのため、図-8に示すように、Y軸方向に走る段差部のクリップが卓越して脱落する結果となったものと考えられる。

5. フルモデルの構築

最後に、Tコンサートホールの建物モデルに、箱型段差吊り天井の全体天井モデルを組み込んだフルモデルにつ

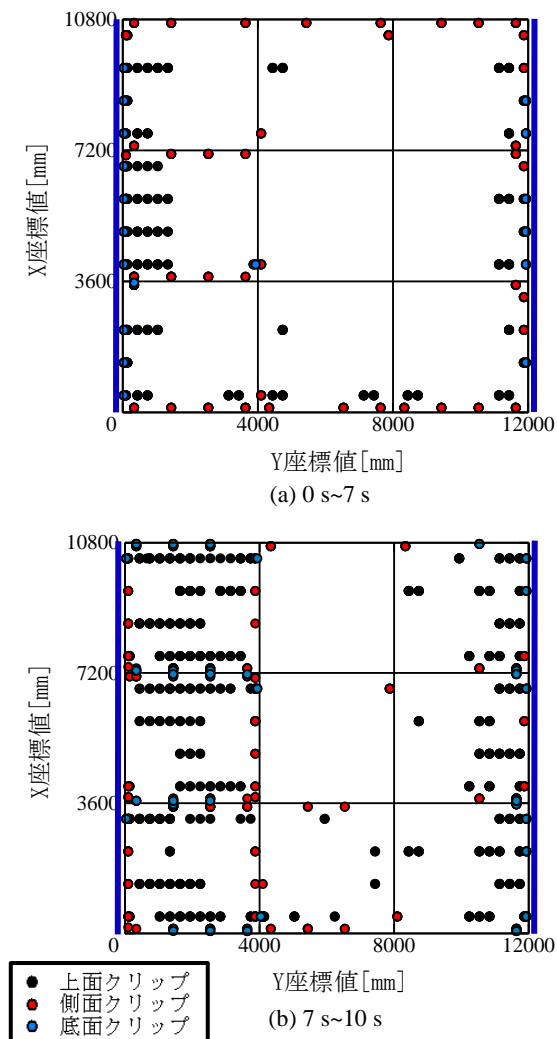


図-8 脱落したクリップのXY平面上分布図

いて述べる。

建物モデル(図-10)の寸法は75.3 m(桁行)×35.4 m(梁間)×23.15 m(上下)であり、基本的にはRC造だが、屋根面の梁のみS造となっている。この屋根面の梁に吊り天井の吊りボルトが接合されている。

続いて、全体天井モデルを図-11に示す。ユニット数は16(桁行)×6(梁間)の計96ユニットで、寸法は57.6 m(桁行)×24.0 m(梁間)である。

上記建物モデルに全体天井モデルを組み込んだフルモデルを図-12に示す。吊りボルトの上端が屋根面の梁と接合されており、吊り長さは1.0 mであるため、段差の高さを考慮した天井高さは21.85 m~22.15 mとなっている。天井は梁間方向両側と、桁行方向片側(X=57.6 m)が壁に面しているため、部分天井モデルと同様、その部分の仕上げ材と隣接する高さに壁を模擬した横架材を建物モデルに導入した。

今後、フルモデルでの地震時挙動解析を実施する予定である。

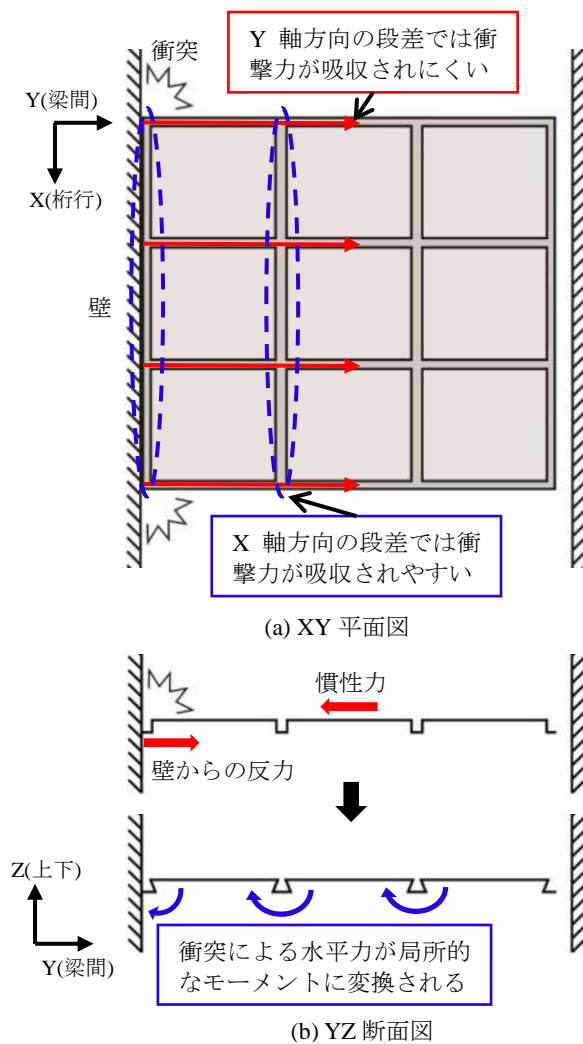


図-9 段差部におけるクリップの脱落メカニズム

6. 結論

本研究では、コンサートホールに取り付けられた箱型段差吊り天井を一部分抽出しモデル化を行い、ASI-Gauss法を用いて地震時挙動解析を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 天井と壁が衝突することによって衝撃力が接合金具に伝播し、クリップおよび野縁ジョイントが脱落した。
- クリップが脱落すると、そのクリップが支持していた荷重が周囲のクリップおよび野縁ジョイントに再分配され、脱落がより進行していく様子が確認された。
- 衝突によって衝撃力が伝播する際、壁と直交する方向に走る段差部において多くクリップが脱落した。これは、段差部の剛性が影響しているものと考えられる。

今後は、コンサートホールの建物モデルに天井モデルを組み込んだフルモデルを対象とした解析を行う予定である。

参考文献

- [1] 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年9月。
- [2] 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年3月。
- [3] 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年4月。
- [4] 磯部 大吾郎，チョウ ミヨウ 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，pp. 39-46，2004年5月。
- [5] 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年11月。
- [6] 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 -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年2月。
- [7] 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9月。
- [8] 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9月。

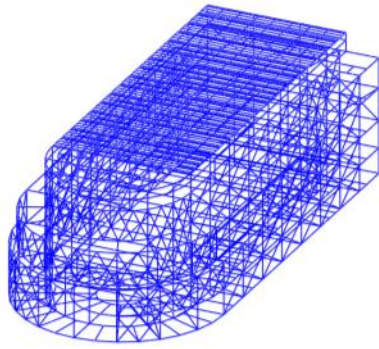


図-10 建物モデル

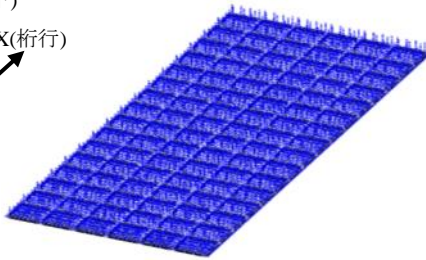
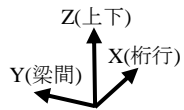


図-11 全体天井モデル

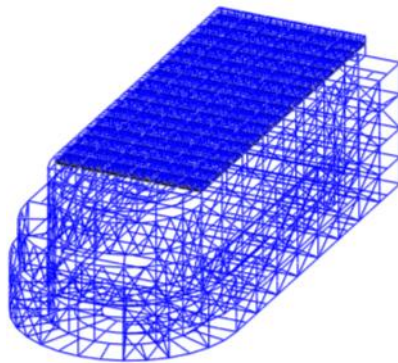


図-12 フルモデル