在来工法天井を対象とした地震時の落下に関する研究

A STUDY ON FALLING DOWN OF SUSPENDED CEILINGS WITHOUT SEISMIC BRACING

二木秀也 ——— * 1 嶺脇重雄 ——— * 2
岡本 肇 ——— * 3 高橋 弘 ——— * 4
山本正人 ——— * 4 富岡裕一 ——— * 5
鴨下直登 ——— * 6 青井 淳 ——— * 7

Shuya FUTATSUGI ——— * 1 Shigeo MINEWAKI ——— * 2
Hajime OKAMOTO ——— * 3 Hiromu TAKAHASHI ——— * 4
Masato YAMAMOTO ——— * 4 Hirokazu TOMIOKA ——— * 5
Naoto KAMOSHITA ——— * 6 Atsushi AOI ——— * 7

キーワード：
在来工法天井, 地震時の落下, 静的載荷試験, ビス孔, クリップ

Keywords:
Suspended ceiling, Falling down, Quasi-static loading test, Screw holes, Connection parts

This report presents experimental and analytical study on progress to the falling down of suspended ceilings without seismic bracing, and the effect of earthquake-resistant connection parts. In the experiments, the ceiling showed high compression buckling stress, but its restoring force had slip-type characteristics. It represented that the factor of the falling down was unfastening connection parts, and the expansion of screw holes.

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災では多くの非構造部材に被害が発生した。とりわけ天井の落下は、事業継続に影響を及ぼし、人的被害も発生するなど社会的に影響が大きい。天井の被害報告¹⁾では、本震直後には崩落していなかった天井が余震後には崩落していたという事例が報告されている。この報告から、天井全体が一気に崩壊しない場合でも、ボードや下地金物に生じた損傷が蓄積することや、揺れの繰返しで損傷が進行し、耐力を喪失した後、最終的には全体の天井落下に至る、という天井の落下過程を示唆している可能性がある。また、設備機器や柱型周囲などへの衝突による局所的な破壊がこのような崩壊の端緒となることも十分に考えられる。

本報では、比較的小規模な空間に採用されるブレースなどの耐震要素がない在来工法天井を対象に、落下に至る性状を検証した。この種の天井では、地震力はボードの面内圧縮により伝達されると考えられるが、既往の研究^{2) 3) 4) 5)}では繰返し加力に伴う力学特性について十分には検討されていない。実験の目的は、まず、ボードなどの座屈により耐力を喪失するまでの力学特性が進行的な破壊の原因と成り得るかを確認することであり、さらには、耐力喪失後の天井落下の直接原因を把握することである。本実験では二つ目の目的に対する対策の方向性として耐震天井などに採用されている補強用金物の効果についても検討した。また、実験により得られた力学特性が進行的な破壊の原因となり得ることを確認するために、実験結果を模擬したモデルを用いて地震応答解析を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、表1に示す6体とした。試験体パラメータは、クリップおよびハンガーにおける補強の有無、加力方向、反力梁側端部の仕様である。反力梁側端部の仕様とは、試験体と反力梁の接触状態の違いであり、野縁、野縁受け接触の場合には、ボードを反力梁から10mmの位置に控えて設置した。No.1~4は、在来型のクリップを用いた補強のない試験体とした。No.5は、ハンガーをビス留めし、シングルクリップのみに耐震クリップを用いた試験体（補強例A）とし、No.6は、No.5の補強に加え、ダブルクリップにも耐震クリップを用いた試験体（補強例B）とした。

図1に試験体の例を示す。いずれの試験体も天井は、石膏ボード（厚さ12.5mm、重量8.1kg/m²）の直張り（1枚張り）とし、大きさ910mm×1,820mmのボード2枚をダブル野縁位置で接合した。試験対象を石膏ボード1枚張りとしたのは、仕上げ張りの割付によっては重ね張りが耐力向上に寄与しないと考えられる報告⁶⁾があり、力学特性の把握は1枚張りが適切と判断したためである。ビス留め間隔は、全ての試験体で共通としダブル野縁部は150mm、シングル野縁部は300mmとした。図2に試験で用いたクリップおよびハンガーの写真を示す。

2.2 載荷方法

図3に載荷状況図を、図4に加力部拡大図（試験体No.1）を示す。加力はアクチュエータを用い、鉄骨架台から吊り下げた天井を鉄骨

¹⁾ ㈱竹中工務店九州支店設計部 構造担当
(〒810-0001 福岡市中央区天神 4-2-20)
²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士（工学）
(〒270-1395 印西市大塚 1-5-1)
³⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 マネージャー・博士（工学）
⁴⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員
⁵⁾ ㈱竹中工務店大阪本店技術部
⁶⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 研究員
⁷⁾ ㈱防災科学技術研究所 E-ディフェンス研究員
(元竹中工務店技術研究所 研究員)

¹⁾ Structural Engineer, Building Design Dept., Kyushu Branch Office, Takenaka Corporation
²⁾ Chief Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.
³⁾ Manager, Research and Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.
⁴⁾ Chief Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation
⁵⁾ Construction Engineering Dept., Osaka Main Office, Takenaka Corporation
⁶⁾ Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation
⁷⁾ Researcher, E-Defense, NIED (formerly Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation)

試験体 No.	補強の有無	加力方向	反力梁側 端部仕様	クリップおよびハンガーの仕様
No.1	なし	野縁受け方向	ボード接触	S クリップ※:ワンタッチクリップ(在来型) W クリップ※:ワンタッチクリップ(在来型) ハンガー:ビス留めなし(在来型)
No.2	なし	野縁受け方向	野縁受け接触	同上
No.3	なし	野縁方向	野縁接触	同上
No.4	なし	野縁方向	ボード接触 (柱型あり)	同上
No.5	あり (補強例 A)	野縁受け方向	ボード接触	S クリップ※:耐震クリップ W クリップ※:ワンタッチクリップ(在来型) ハンガー:ビス留め
No.6	あり (補強例 B)	野縁受け方向	ボード接触	S クリップ※:耐震クリップ W クリップ※:耐震クリップ ハンガー:ビス留め

The image contains four sub-figures labeled a) through d), each showing a different metal component used for seismic reinforcement of roof panels:

- a) ワンタッチクリップ (No. 1～No. 4):** A single-piece metal clip with a T-shaped profile, designed for quick installation by sliding it over the roof panel edge.
- b) シングル野縁用耐震クリップ (No. 5, No. 6):** A metal clip with a rectangular base and a vertical flange, secured with a bolt and nut.
- c) ダブル野縁用耐震クリップ (No. 6):** A metal clip with a rectangular base and a vertical flange, similar to (b) but designed for double eaves.
- d) ビス留めハンガー (No. 5, No. 6):** A metal hanger with a T-shaped profile, secured with a bolt and nut, designed to support the roof panel from below.

表 2 に各試験体の破壊過程を示す。試験体 No. 2 は、野縁受けがクリップ部でスリップすることにより約 10 mm の変位まで荷重は上がらず、その後は試験体 No. 1 と同様の荷重変形関係を示し、変位 366 mm でビス抜け及びクリップの脱落によりボード全体が落下した。試験体 No. 3 は、10 mm までは、野縁先端が壁を模したボードへめり込み、その後ボードが接触し座屈した。300 mm 除荷時に反力側端部のクリップが脱落し、天井先端が反力梁よりも下に垂れ下がり載荷不能となったため実験を終了した。試験体 No. 4 は反力梁に設けた柱型周辺のボードが圧壊し、200 mm 付近でボード全体が反力梁に接触して、座屈した。その後、250 mm 除荷時にビス抜けによりボード全体

150

が落下した。図 9 に試験体 No. 4 の試験時写真を示す。試験体 No. 4 は、局所的な破壊から全体が落下する過程を模擬するものであり、柱型接触部の荷重がボード全体へ伝達され、ビス孔の拡大が進行し最終的な落下に至った。全てのビスは、野縁に残っておりビス孔の拡大によってビスとボード間の接合が外れ、ボードが落下した。

補強例 A として試験体 No. 5 の試験時写真を図 10 に示す。ボードの座屈後、野縁受けが座屈し、一部でダブルクリップの開きとビス抜けを生じた。ダブル野縁部で大きなクリアランスが生じ、野縁受けの変形が進行し載荷限度である 450 mm までボードの落下は生じなかった。野縁受け接合部及び吊りボルト接合部にねじりをともなう大きな変形が生じたが耐震クリップの脱落やビス留めハンガーの開きは生じなかった。補強例 B の試験体 No. 6 の荷重変形関係を図 11 に、試験時写真を図 12 に示す。ボード端部が圧壊し、その後ボードの座屈が生じた。試験体 No. 1～No. 5 に比べて大きな耐力を示す変形領域が大きい。その後、野縁受けが座屈し、ビス抜けによりボードが落下した。補強用金物によって下地材による拘束が高まりボードの座屈前に端部が圧壊し、エネルギー吸収能力が高まったと解釈できる。しかし、落下の防止にはビス抜け対策の併用が求められる。

4. 地震応答解析

実験で求められた天井の力学特性が地震時の天井落下の原因となり得るかどうかを時刻歴応答解析により検証した。対象は補強を施さない場合とし、試験体 No. 1 の実験結果が天井の力学特性を代表し得るものと考えた。図 13 に天井の軸骨格曲線モデルを示す。圧縮領域は図 7 に示した実験結果を単純化して模擬したものである。天井面内の高次モードによる引張変形の発生も想定できるため、小林ら⁶⁾の実験に基づきビス 1 本当たりの傾き耐力を 0.3kN、変形能力を 12 mm とすることで引張特性を設定した。履歴特性は圧縮、引張ともスリップ型とした。図 14 に解析用振動モデルを示す。奥行（紙面の左右方向）19.8m の天井を 4 個の質点としてモデル化した。質量は 20kg/m² とした。天井の破壊は天井端部において先行すると考えられるので、端部ボードに生じる応力を過大評価すると考えられる質点配置とした。各質点はそれぞれ吊長さ 1,500mm の振り子とし、その減衰定数は 1.0% とした。

解析上の天井幅は前述の実験に合わせて 1.8m とし、質点間のボードにはその長さに応じて図 13 の横軸を定数倍した力学特性を与えた。モデル両端の壁は天井面の初期圧縮剛性の 10 倍の圧縮剛性とした。これは RC 壁など剛強な壁を想定したことと相当する。天井と壁とが離間した場合には力は働かない。初期状態では天井と壁との間に微小なクリアランス（1.0 mm）が存在すると仮定した。

入力地震動には、平成 23 年東北地方太平洋沖地震時に MYG013（仙台）で観測された記録の一部を用いた。図 15 に観測加速度波形（NS 方向）を示す。図中に解析区間と表示した 18 秒間を計算に用いた。解析時間刻みは、1/20,000 秒とした。

図 16 に端部のボードの変形波形を示す。解析時刻 17 秒を過ぎたところから圧縮変形が急激に拡大し、最大 100 mm 程度に至った。図 17 に荷重変形関係を示す。太実線でモデル化した骨格曲線を、細線で解析結果の履歴を示す。圧縮領域の最大荷重である 45 kN および野縁受けの座屈を示す 10 kN を越え、耐力をほぼ喪失した。エネルギー吸収能力に乏しい力学特性による進行的な破壊性状を示すものと解釈できる。

a) ボード座屈時 b) ボード落下時

図 6 試験時写真（No. 1）

図 7 荷重変形関係（試験体 No. 1）

a) ボード座屈時 b) ボード全体落下時

図 8 破壊状況図（試験体 No. 1）

表 2 各試験体の破壊過程

試験体	破壊過程
No. 1	ボード座屈 (6.1mm, 44.0kN) → 野縁受け座屈 (52.0mm, 10.0kN) → クリップ脱落、ビス抜け → ボード落下 (450.0mm)
No. 2	ボード接触 (10.4mm) → ボード継目部圧壊 (18.5mm, 41.0kN) → 野縁受け座屈 (64.0mm, 20.4kN) → クリップ脱落 → ボード全体落下 (366.0mm)
No. 3	ボード接触 (9.9mm) → ボード座屈 (15.3mm, 59.0kN) → クリップ脱落 → 載荷不能 (300.0mm除荷時)
No. 4	柱型部ボード圧壊 (2.8mm, 15.2kN) → 中央野縁先端圧壊 (38.0mm, 13.0kN) → ボード全体座屈 (201.0mm, 46.0kN) → ビス抜け → ボード全体落下 (250.0mm除荷時)
No. 5	ボード座屈 (7.8mm, 43.2kN) → 野縁受け座屈 (56.0mm, 26.5kN) → 450.0mmまでボード落下せず
No. 6	ボード端部圧壊 (14.4mm, 40.0kN) → ボード座屈 (47.0mm, 38.8kN) → 野縁受け座屈 (53.0mm, 28.9kN) → ビス抜け → ボード一枚落下 (200.0mm除荷時)

a) 柱型周辺ボード圧壊時 b) ボード落下状況

図 9 試験時写真（No. 4）

5. まとめ

本報では、在来工法天井の落下現象に関して、以下の知見を得た。

- ・天井落下の要因としてクリップの脱落およびビス抜けがある。
- ・石膏ボードは、面内荷重に対して大きな耐力を有するが、復元力特性はスリップ性状を示す。このために、地震時に進行的な破壊性状を示すことが想定される。
- ・天井の落下防止には適切な金物補強に加えて、ビス抜け対策を施す必要がある。

最後に、本研究では、防災科学技術研究所の強震ネットワーク K-net による観測記録を使用しました。また、研究に際し関係各位に多大な御協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本大震災からの教訓、これからの国づくり，日本建築学会 2012 年 3 月
- 2) 中本康，元結正次郎，他；在来工法による鋼製下地天井の力学特性に関する研究 その 2：天井システムの力学特性，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）2005 年 9 月
- 3) 新井智一，大迫勝彦，他；金属パネル天井の耐震性に関する研究 その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）2007 年 8 月
- 4) 横沢秀夫，赤瀬竜也，他；在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究 その 5，その 6，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）2009 年 8 月
- 5) 金川基，飯塚信一，他；天井脱落被害に関する実験的検討 その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）2011 年 8 月
- 6) 小林俊夫，貫井泰，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 2：部分モデル試験の結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）2010 年 9 月

図 10 試験時写真 (No. 5)

図 11 荷重変形関係 (試験体 No. 6)

a) 落下後ビス状況 b) 抜がったビス孔

図 12 試験時写真 (No. 6)

図 13 軸骨格曲線モデル

図 14 解析用振動モデル

図 15 観測加速度記録 (MYG013)

図 16 天井板の変位波形

図 17 荷重変形関係 (解析結果)

[2013 年 2 月 19 日原稿受理 2013 年 6 月 5 日採用決定]