

## 既存天井の後付け改修構工法 —グリッドサポート工法・フェイルサポート工法—

Construction Method of Renovation for Existing Ceiling with Member to be installed later

正藤 倫宏\*1、櫻庭 記彦\*2、松原 正芳\*3、諸星 玲子\*4

### 1. はじめに

平成13年の芸予地震、平成15年の十勝沖地震、平成17年の宮城県沖地震、平成23年の東北地方太平洋沖地震などでは多数の建築物において天井が脱落下人的・物的被害が多数発生した。これらの被害を契機に、平成25年に国土交通省により国土交通省告示第771号～第779号が公布され、「建築物における天井脱落下対策に係る技術基準の解説」<sup>1)</sup>が発行された後、平成26年4月より特定天井に関する法適合が義務化された。

これを踏まえ、大規模施設を中心とした天井脱落下対策が進む中で、既存天井を撤去して新たに耐震天井を施工する手法は既に各種の工法が開発されてきた。例えば、新設する天井ボードに斜めブレースを直接固定する工法は、剛な耐震天井を構築することにより特定天井の技術基準に適合することができる<sup>2)</sup>。その一方で、既存天井の耐震改修工事において、工期短縮・コスト削減、あるいは工事期間中の施設利用の観点から、既存天井を残置したまま脱落下対策を行う手法の開発が望まれてきた。

著者らは、既存天井を残置しながら工事を行い、地震後の施設の機能維持を図ること、また、施工においては施設を使いながらの工事を可能とすることを目的として、既存天井を対象とした「グリッドサポート工法・フェイルサポート工法」を開発した。

本稿では、グリッドサポート工法・フェイルサポート工法の概要とその適用条件、目標性能、および当工法の有用性を確認する目的で行った各種試験結果について報

告する。なお、本稿で報告する「グリッドサポート工法・フェイルサポート工法」は、一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明（GBRC 性能証明 第16-25号）を取得している。

### 2. 技術の概要

#### 2.1 構成

本稿で報告する既存天井の改修構工法には、グリッドサポート工法とフェイルサポート工法の2種類があり、いずれも天井下面に格子状の鋼材を後付するものである。

##### 2.1.1 グリッドサポート工法

本工法は図2-1に示すように、既存天井下面に格子状の鋼材（以下、グリッドサポートと呼ぶ）を配置するものである。グリッドサポートには溝形鋼を用い、室内側からタッピングビスでグリッドサポート、天井ボード、野縁を貫通して固定する。グリッドサポートの端部は、天井周囲に配置された端部構造部材に接合金物でピン接合することとし、地震時に生じる天井の慣性力をグリッドサポートによって天井周囲の端部構造部材に伝達する。これによって、天井面の変位を制御し、天井材の損傷・脱落下を防止するものであり、既存の一般天井向けの耐震補強工法である。

##### 2.1.2 フェイルサポート工法

本工法は、図2-2に示すように、既存天井下面に格子状に配置された鋼材（以下、サポート材と呼ぶ）と天井全面に張り渡した落下防止ネットによる天井の落下防止対策である。サポート材は、天井の短辺方向に配置する

\*1 MASATOU Tomohiro：清水建設株式会社 プロポーザル・ソリューション推進室 ecoBCP 計画部

\*2 SAKURABA Fumihiko：清水建設株式会社 設計本部 設計技術部 技術グループ 兼 技術研究所 安全安心技術センター 主任研究員

\*3 MATSUBARA Masayoshi：清水建設株式会社 設計本部 設計技術部 防災グループ

\*4 MOROHOSHI Reiko：清水建設株式会社 設計本部 設計技術部 防災グループ

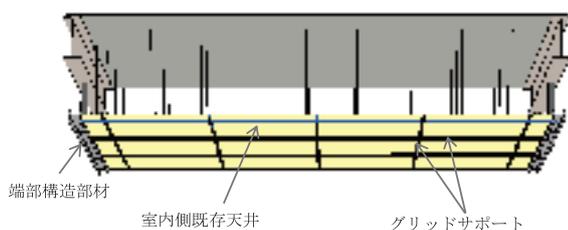


図2-1 グリッドサポート工法の構成

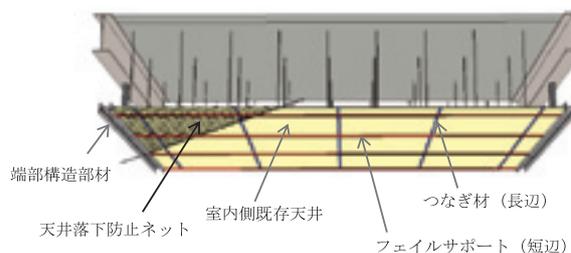


図2-2 フェイルサポート工法の構成

フェイルサポート（溝形鋼）と長辺方向に配置するつなぎ材（フラットバー）で構成される。グリッドサポートと同様に、室内側からタッピングビスでサポート材、天井落下防止ネット、天井ボード、野縁を貫通して固定する。フェイルサポート、つなぎ材双方の端部は、天井周囲に配置された端部構造部材に接合金物でピン接合することとし、サポート材と天井落下防止ネットによって既存天井の大規模な崩落のみならず、部分的な損傷による天井小片の落下を防止することを目的としている。なお、本工法は、既存の特定天井の落下防止対策を目的とするが、一般天井にも適用可能である。

## 2.2 適用条件

本構工法を適用する建築物は、構造耐力上主要な部分が所定の耐震性能を有することを確認されたものとし、改修の対象となる既存天井の条件は、以下の各項による。

- (1) 天井は軽量鉄骨下地にボードを直貼した吊り天井とし、下地工法は原則として在来工法とする。
- (2) 天井形状は、一体として挙動すると想定される形状で、天井周囲に端部構造部材を配置できるものとする。
- (3) 天井面は概ね水平で、吊り長さは3m以下とし、原則として段差がないものとする。
- (4) 劣化防止のための処置をしているか、または劣化の生じにくい環境下にあるものとする。

## 3. 構成材の力学性能

本工法で採用する構成材の力学性能を確認するために、グリッドサポートの接合部および落下防止ネットの定着部について耐力試験を行った。

### 3.1 サポート材の中間接合部の試験

#### 3.1.1 試験目的

地震などによる天井の落下を想定し、天井下面に溝形鋼を敷設することで天井の崩落を防止する工法において、当該溝形鋼の継手の耐力を把握することを目的とした。

#### 3.1.2 試験体と試験方法

試験体を図3-1および図3-2に示す。試験体は $\square-40 \times 40 \times 3.2$ を $\square-33.6 \times 36.8 \times 3.2$ および $\square-33.6 \times 45 \times 3.2$ を介してボルト4本で繋いだ継手部である。試験体数はそれぞれ3体であり、G1～G3、F1～F3とする。各試験体の溝形鋼は、平板（SGCC）から冷間プレス加工により作成した。ボルトはM12（首下60全ネジボルト、強度区分4.8）、皿ばねワッシャを用いた。G1～G3試験体の外観を写真3-1、F1～F3試験体の外観を写真3-2に示す。試験方法は、試験体に単調荷の引張力を加え、最大耐力を把握する。

#### 3.1.3 試験結果

試験により得られた各試験体の最大荷重を表3-1および表3-2に示す。破壊状況を写真3-3および写真3-4に示す。試験体G1～G3では継手部内側の溝形鋼がへりあき破断した。F1～F3試験体では外側の溝形鋼のへりあき破断が先行して、最終的には端抜け破断した。

表3-1に示す試験体Gシリーズの試験結果（最大荷重の平均値=72.6kN、標準偏差=0.02kN）より、終局耐力（平均値-0.5×標準偏差）は72.6kNであり、グリッドサポート母材の短期許容引張耐力の2.1倍であった。一方、表3-2に示す試験体Fシリーズの試験結果（最大荷重の平均値=75.0kN、標準偏差=0.32kN）より、終局耐力（平均値-0.5×標準偏差）は74.9kNであり、フェイルサポート母材の短期許容引張耐力の1.4倍であった。

### 3.2 天井落下防止ネット定着部の試験

#### 3.2.1 試験目的

地震などによる天井の落下を想定し、天井下面に落下防止ネットを敷設することで天井の崩落を防止する工法において、当該落下防止ネットの定着部の耐力を把握することを目的とした。

#### 3.2.2 試験体と試験方法

試験体を図3-3に示す。試験体は、天井落下防止ネッ

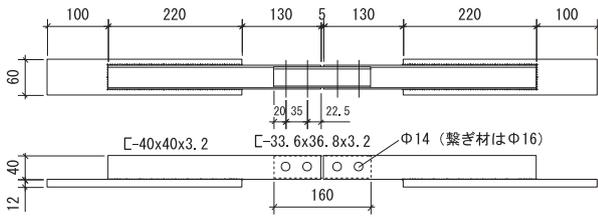


図 3-1 試験体 G1 ~ G3

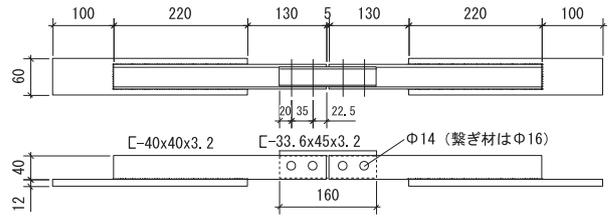


図 3-2 試験体 F1 ~ F3



写真 3-1 試験体 G1 ~ G3

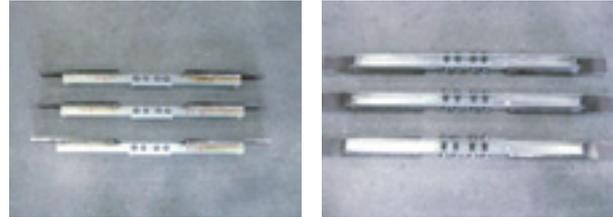


写真 3-2 試験体 F1 ~ F3



写真 3-3 試験体 G1 ~ G3 の破壊状況



写真 3-4 試験体 F1 ~ F3 の破壊状況

表 3-1 試験体 G1 ~ G3 最大荷重一覧

試験体名	最大荷重 (kN)
G1	72.60
G2	72.58
G3	72.61
平均	72.60

表 3-2 試験体 F1 ~ F3 最大荷重一覧

試験体名	最大荷重 (kN)
F1	75.22
F2	75.19
F3	74.65
平均	75.02

トとして難燃性高強度繊維素材ネット（協立工業株式会社製）を1対ずつ用いて、試験体の中央部にネットの重ね継手と定着部を形成したものである。使用する落下防止ネットの諸元を以下に示す。

材 料：難燃性高強度繊維素材ネット「ベクトランフィックスネット」FS840（φ1.31mm 一目巾40mm）  
 破断強度：2440N/2本（メーカーカタログ値による）

$F_n$ ：1m幅当たりの破断強度

$$F_n = (2440/2) \times (1,000\text{mm}/40\text{mm}) = 30,500\text{N/m}$$

引張剛性： $E_t = 640\text{kN/m}$  「(社) 日本膜構造協会試験法標準 膜材料弾性定数試験法 (MSAJ/M-02-1995)」に準じる。

ネットの長期・短期の許容引張り耐力は、表3-3に示す。

1対の落下防止ネットの一端は、加力用治具（□-75×75×4.5+PL-250×100×6）に接合されている。落下防止ネットの他端はケダー（写真3-5、3-6参照）が縫製されており、試験体中央部で溝形鋼□-40×40×3.2とフラットバーFB-40×3.2（いずれもSGCC材）の間に相互に挟み込まれて定着部を形成している。また、この定着部に沿って、JIS材の野縁を設置し、天井板を模擬した幅303mmの石膏ボード（厚さ12.5mm×1枚）をフラットバー側に密着させ、φ5テクスビスを@303mm間隔で野縁から溝形鋼まで貫通して固定している。試験体は同じ仕様のものを3体製作した。試験体の外観を写真3-7に示す。試験方法は、写真3-8に示すように、試験体に単調荷の引張力を加え、最大耐力を把握する。

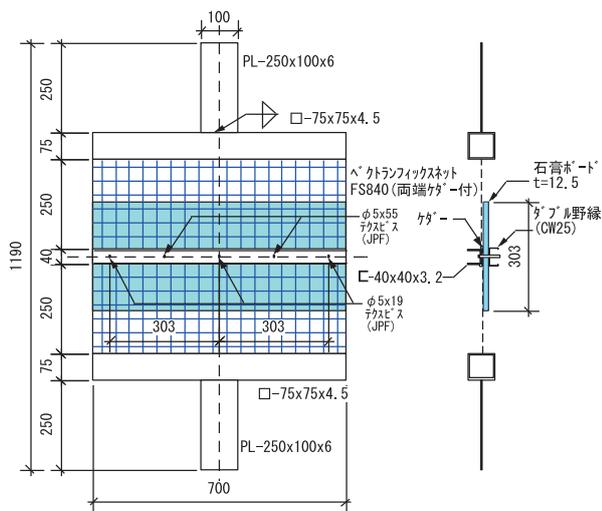


図 3-3 試験体



写真 3-7 試験体外観



写真 3-8 試験状況

表 3-3 ネットの破断強度および長期・短期許容引張耐力

材料名	破断強度 $F_n$	長期許容引張耐力	短期許容引張耐力
FS840	30.5	3.81	7.63

上表の長期許容引張耐力は、平成14年国土交通省告示第666号第6に規定する膜材料の引張許容応力度の規定に準じて $F_n/8$ とし、短期許容引張耐力は長期の2倍としている。

表 3-4 最大荷重一覧

試験体	最大荷重実験値 (kN)	
	計測値	幅1m当たりの換算値
No.1	7.74	11.05
No.2	7.86	11.23
No.3	7.16	10.22
平均値	7.59	10.83
標準偏差	0.37	0.54
終局耐力	7.40	10.56

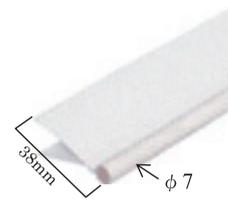


写真 3-5 ケダー (単体)



写真 3-6 ケダー (ネット縫製済み)



写真 3-9 試験後の破壊状況

### 3. 2. 3 試験結果

試験により得られた各試験体の最大荷重を表3-4に示す。最大荷重はネット幅700mmの試験体の計測値と、ネット幅1mあたりに換算した値を示している。試験後の破壊状況を写真3-9に示す。各試験体は、加力治具側のネットが破断して最大荷重となったが、ケダーを重ねたフェイルサポート側の定着部では大きな損傷が見られなかった。

試験結果より、ネット幅1mあたりの最大荷重の平均値=10.83kN、最小値=10.22kNであり、終局耐力（最大荷重の平均値-0.5×標準偏差）は10.56kNであった。

これより、ネット端部定着部の基準強度は、実験結果より $F_u=10$  (kN/m)とした。また、長期許容引張耐力は $F_u/3$ とし、短期許容引張耐力は長期の2倍とした。

## 4. 構造安全性を検証するための実験

本工法の構造安全性を検証するために行った実験について記述する。

### 4. 1 天井加振実験 (グリッドサポート工法)

加振実験では、既存天井を模擬する試験体を振動台上に設置し、強震動記録を入力して地震時の挙動を再現した。

#### 4. 1. 1 加振実験前の要素試験

グリッドサポートと既存天井との接合部は、天井室内側よりグリッドサポートをタッピングビスにて天井ボードを貫通して野縁に固定することとしているが、加振実験の前に要素試験を別途行って、接合部の耐力を検討した。要素試験の試験体は、写真4-1に示すように、内装工事で汎用的に使用される4mmのタッピングビスを用いて、グリッドサポートを模擬するサポート材（鋼製フラットバー  $t=3.2$ mm）側から天井ボード（石膏ボード  $t=9.5$ mmと岩綿吸音板  $t=9.5$ mm）を介して、一般材の野縁を貫通させて作成した。要素試験では、皿ビスと鍋ビスの2種類のビス形状を使用し、引張試験機を用いて、野縁方向に加力した。

試験結果を表4-1、4-2に示す。皿ビスと鍋ビスでは、鍋ビスの方が平均で1.4倍程度耐力が高く、また弾性的な挙動を示す範囲も鍋ビスの方が大きいことが解った。なお、終局耐力を最大荷重の平均値-0.5×標準偏差により算定した結果は、皿ビスが831N、鍋ビスが1162Nであった。

要素試験の結果は、ビス1本あたりの地震時せん断力に対して、皿ビスの終局耐力は3.4倍、鍋ビスの終局耐力は4.8倍の余裕がある。従って、一般的な野縁のピッ

表 4-1 皿ビスの試験結果

試験体No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
最大荷重 (N)	786	823	851	914	932

表 4-2 鍋ビスの試験結果

試験体No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
最大荷重 (N)	1099	1215	1236	1147	1367

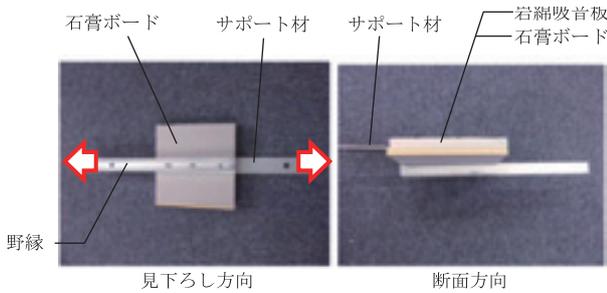


写真 4-1 サポート材と既存天井の接合部の状況

チ@303mmに合わせて、グリッドサポート材を鍋ビスで野縁に固定すれば、天井面の慣性力をグリッドサポート材に確実に伝達できると考えられる。

#### 4.1.2 加振実験

##### (1) 試験体

加振実験では、振動台に加振用フレームを設置し、加振用フレーム上部から既存天井を模した試験体を吊り下げた。試験体の大きさは5.7m×5.0mで、試験体重量は730.5kgf及びおもりを付加した817.8kgf、吊長さを1,500mmとし、ブレース等の耐震部材は設置していない。また、既存天井の野縁と野縁受け等の主材は一般材（非JIS材）とし、JIS A 6517と同形状の一般材クリップ、ハンガーを用いて試験体を製作した。本加振実験では、加振用フレームを既存構造体と想定しているが、実験上の制約により端部構造部材が加振用フレームの相対する2辺にしか設置できないため、グリッドサポートを端部構造部材に緊結する方向（加振用フレームの長手方向）を加振方向とした。

加振実験に用いる試験体を図4-1～図4-3に示す。試験体①は図4-1に示すように、加振方向が野縁方向であり、加振方向のグリッドサポート3本の両端が端部構造部材に緊結されている。試験体②は図4-2に示すように、加振方向が野縁直交方向であり、加振方向のグリッドサポート3本の両端が端部構造部材に緊結されている。試験体③は図4-3に示すように、加振方向が野縁直交方向であり、加振方向のグリッドサポートは中央1本の両端のみが端部構造部材に緊結されている。試験体の全景を写真4-2に示す。想定する建築物を、構造部材のスパン長さ12m、グリッドサポートの取付間隔1.8mとすれば、サポート材1本当たりの天井支配面積が、 $12m \times 1.8m = 21.6m^2$

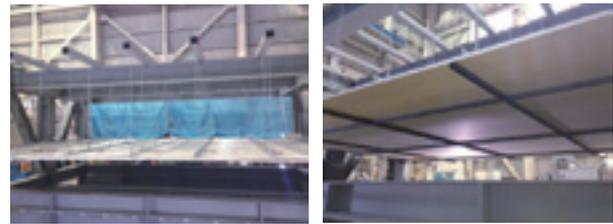


写真 4-2 試験体全景

表 4-3 試験体の諸元

試験体面積	$5.7 \times 5.0 = 28.5m^2$
試験体総重量	既存天井重量（ボード及び天井下地）： 634.12kgf サポート材： $3.38kgf/m^2 \times 28.5m^2 = 96.33kgf$ 天井試験体重量： $634.12 + 96.33 = 730.5kgf$ なお、記号e以降は87.3kgfのおもりを付加し、 天井試験体重量： $730.5 + 87.3 = 817.8kgf$

となる。試験体①と②は、グリッドサポート材1本当たりの天井支配面積が $28.5m^2 / 3 = 9.7m^2$ であるのに対して、試験体③はグリッドサポート1本のみが端部構造部材に緊結されるため、支配面積が $28.5m^2$ であり、想定に対して $28.5 \div 21.6 = 1.3$ 倍となる。また、天井面の設計用地震力は、水平動が2.2Gを想定しているが、加振実験では1.5倍程度の安全率を考慮して、天井面の最大加速度が3.3G相当の慣性力を目標とする。面積が $28.5m^2$ 、単位面積重量が $20kgf/m^2$ の天井に3.3Gの水平加速度が作用した時の慣性力は $28.5 \times 20 \times 3.3 = 1,881kgf$ となる。これは、重量730.5kgfの試験体では2.6G、おもりを付加した重量817.8kgfの試験体で2.3Gの水平加速度が作用した時の慣性力と等価である。

##### (2) 入力地震動

加振実験は、水平1方向+上下方向の同時加振とした。入力地震動は、図4-4に示すエルセントロ波とし、水平方向がNS成分、上下方向がUD成分を最大加速度で基準化して用いた。なお、上下方向の最大加速度は水平方向の1/2とした。

加振実験では、最大加速度が水平方向300gal、鉛直方向150galの入力から開始して、徐々に入力加速度のレベルを上げ、振動台の能力限界に近い水平方向1,500gal、鉛直方向750galまでの加振を行った。試験体①、②の加振実験では、天井面の水平方向の応答加速度2.6Gを目標としたが、目標に達しない場合は天井面におもりを付加して応答加速度2.3Gを目標として実験を行った。なお、試験体③の加振実験では、グリッドサポートの支配面積が想定1.3倍であるため、応答加速度は $2.3G \div 1.3 = 1.7G$ を目標とした。

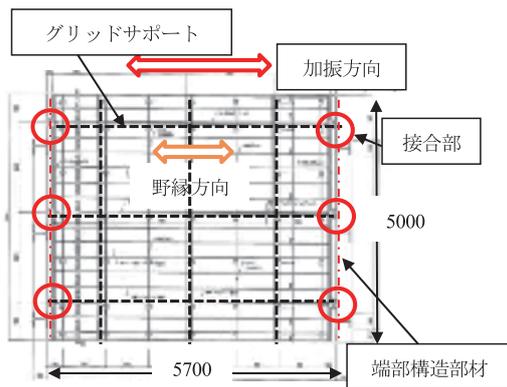


図 4-1 試験体①

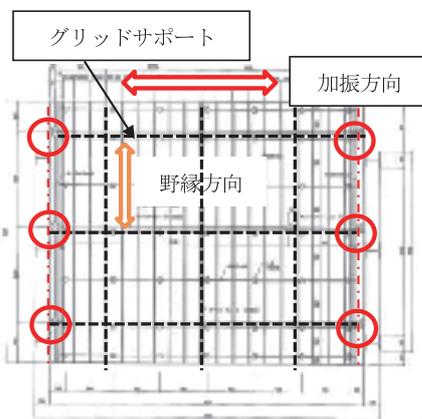


図 4-2 試験体②

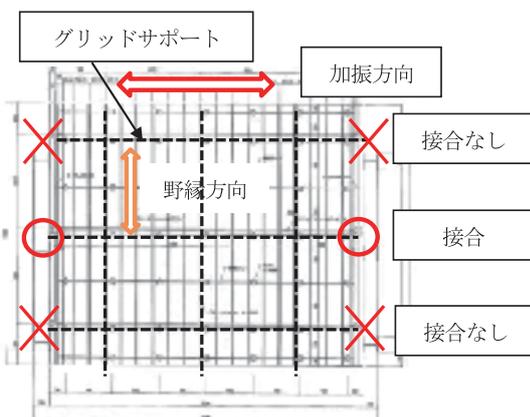


図 4-3 試験体③

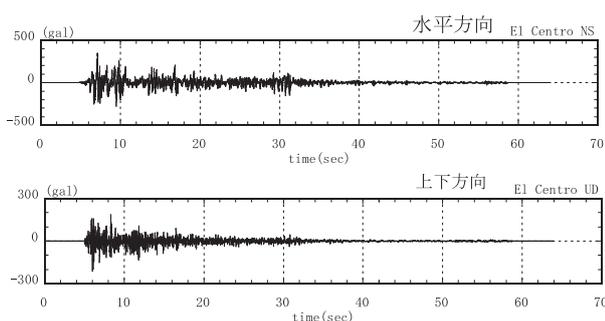


図 4-4 入力地震動 (エルセントロ波)

表 4-4 試験体①の加振結果

記号	振動台入力加速度 (gal)	試験体重量 (kgf)	天井面目標加速度 (G)	天井面応答加速度 (gal)	天井面と加振フレームの相対変位 (mm)	目視観察結果
a	H=300 V=150	730.5	2.6	H=516 V=542	0.3	損傷なし
b	H=900 V=300	730.5	2.6	H=1476 V=3080	1.0	損傷なし
c	H=1200 V=600	730.5	2.6	H=1898 V=2584	0.9	損傷なし
d	H=1500 V=750	730.5	2.6	H=2283 V=5586	1.8	サポート材および天井面に損傷なし 天井のクリップ外れ、ハンガー開きが生じる
e	H=1500 V=750	817.8	2.3	H=3350 V=5238	4.2	サポート材および天井面に損傷なし サポート材と天井の接合ビスに一部ゆるみ

表 4-5 試験体②の加振結果

記号	振動台入力加速度 (gal)	試験体重量 (kgf)	天井面目標加速度 (G)	天井面応答加速度 (gal)	天井面と加振フレームの相対変位 (mm)	目視観察結果
f	H=1000 V=300	817.8	2.3	H=1638 V=887	1.1	損傷なし
g	H=1500 V=450	817.8	2.3	H=2443 V=2241	1.9	損傷なし
h	H=1500 V=750	817.8	2.3	H=3049 V=4818	2.9	サポート材と天井の接合ビスに一部ゆるみ 天井のクリップ外れ、ハンガー開き

表 4-6 試験体③の加振結果

記号	振動台入力加速度 (gal)	試験体重量 (kgf)	天井面目標加速度 (G)	天井面応答加速度 (gal)	天井面と加振フレームの相対変位 (mm)	目視観察結果
i	H=1100 V=300	817.8	1.7	H=2218 V=1060	4.9	損傷なし

#### 4.1.3 実験結果

試験体①～③の加振結果を表4-4～表4-6にそれぞれ示す。試験体①では、おもりを付加した記号eの加振では目標加速度2.3Gを上回った。このとき試験体は目視では損傷が見られなかった。試験体②では、記号g、hの加振において、水平1,500galの入力に対して、天井面応答加速度は2.3Gを上回り、この時、試験体はサポート材自身や接合部の損傷は生じなかった。試験体③では記号iの加振において、入力加速度1,100galに対して天井面応答加速度は目標の1.7Gを上回り、この時、試験体の接合部に損傷は生じなかった。

#### 4.1.4 実験結果の評価

試験体①～③において、いずれも目標加速度（試験体①と②は2.3G、試験体③では1.7G）を上回る加振を行った結果、グリッドサポートが天井を安全に支持し、軽微な補修で継続使用可能な程度の損傷にとどまることを確認した。グリッドサポートと天井ボードの接合部では、地震動の作用によってビスにゆるみを生じる可能性があるため、施工後の一定期間後の定期点検時や大地震後の緊急点検時に、接合ビスおよび周辺を検査して、必要に応じて補修を実施する等の維持管理が必要と思われる。

## 4.2 天井落下実験（フェイルサポート工法）

実大の天井の全面落下実験を行い、フェイルサポートや中間支持材、ワイヤーなどの応力・変形を計測し、天井落下防止機構としてフェイルサポート工法の設計・計画に必要な衝撃係数等の数値を決定するためのデータを取得した。

### 4.2.1 実験方法

天井下面に落下防止用のフェイルサポートとつなぎ材を設置した天井の実物大試験体（幅3.64m×長さ10.7m）を製作し、ロードセルを介してフェイルサポートの両端が支持された状態で、試験体を自由落下させ、フェイルサポートに生じる反力とたわみを計測するものである。

試験体は、**図4-4**に示すように、軽量鉄骨下地（一般材）に石膏ボード（厚さ12.5mm）1枚または2枚張りからなる在来工法天井であり、平面サイズは10.7m×3.64mである。試験体の製作は、実験架台の大梁上の□-100×100材から吊りした吊りボルトにより野縁受（C-38×12×1.0）、野縁（C-25×19×2×0.4、C-50×19×2×0.4）を吊り、それに石膏ボードをビス打ちして行う。実験では、井桁に組まれた支持フレームを揚重し、実験架台の梁で天井および支持フレームを一旦支持する。次に吊りボルトの吊り元の高ナットを外して、吊りボルトと吊り元の接続を解除する。その後、電磁石にて支持フレーム僅かに揚重して、支保工を外し、天井を支持フレームごと自由落下させる。各試験体の天井ボード枚数と中間支

持の有無などを表4-7に示す。

試験体①は天井1枚張りで、試験体中央位置の2か所において実験架台の梁から吊り下げたM16の全ネジボルトにより天井下面のフェイルサポートを中間支持する。フェイルサポートの両端部は、試験体④を除き、ロードセルを介して実験架台の柱材と緊結される。試験体②は、試験体①中央のM16全ネジボルトを撤去して、中間支持無しとする。試験体③は、天井2枚張りで①と同様の支持方法とする。試験体④は、フェイルサポートの左右端部を実験架台の柱材に緊結するピン支持を解除し、当該部分をワイヤーにて実験架台の梁から懸垂する。併せて、試験体中央部のM16全ネジボルトもワイヤー吊りに組み替える。試験体⑤は、フェイルサポートの両端部をロードセルを介して再び実験架台の柱材と緊結し、試験体④の6ヶ所全てのワイヤーを撤去したものである。実験における変位などの計測位置を**図4-5**に示す。計測は、フェイルサポートの端部での張力をロードセル（L1～L4）で計測し、中間点の接触式変位計（DB1、DB2）または非接触式変位計（DS1、DS2、DC1、DC2、DN1、DN2）により計測する。またM16全ネジボルトの吊材およびワイヤーの張力は、ストレインゲージ（GC1、GC2、GS1、GS2、GN1、GN2）により歪を計測して応力を算出する。張力、変位、ひずみ等の計測は、天井落下後20～25秒程度経過して、計測データが安定するまで行う。

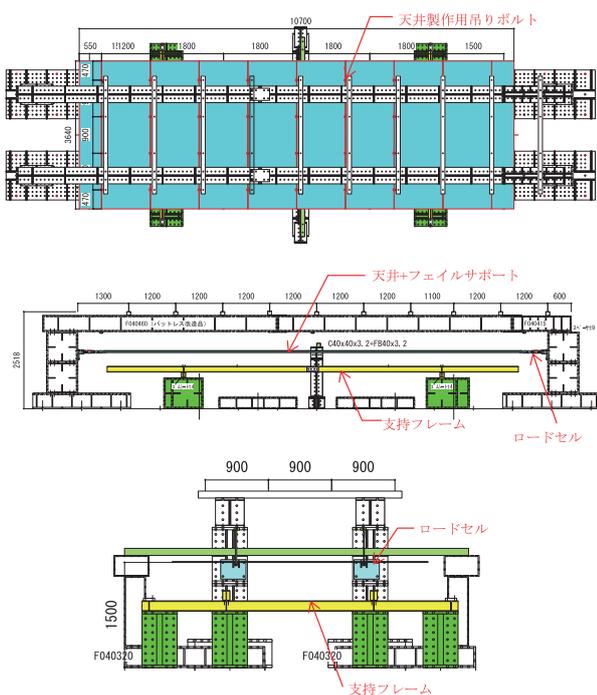


図 4-4 実験架台と試験体

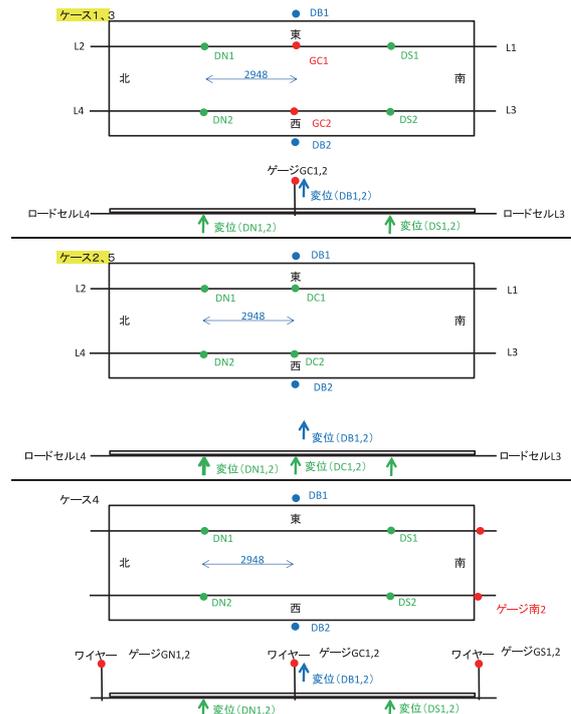


図 4-5 計測位置

表 4-7 各試験体の構成と損傷状況

試験体	天井	支持方法	損傷状況の概要
①	1枚張り	中間支持有り	試験体は変形するものの、目視では損傷は観察されなかった。
②	1枚張り	中間支持無し	試験体①に比べて、試験体②は大きく緩やかに変形したが、目視では損傷は観察されなかった。
③	2枚張り	中間支持有り	中間支持部分で天井板の断面にひび割れが観察された。継手部分でのボルトのずれが見られた。
④	2枚張り	ワイヤー吊り	ワイヤーによる中間支持部分で天井の表面に達するひび割れが観察された。
⑤	2枚張り	中間支持無し	中間部分で天井の割れ、一部のビスのゆるみが観察された。継手部分でのボルトのずれが見られた。

#### 4.2.2 実験結果

天井落下後の各試験体の損傷状況を表4-7に要約する。フェイルサポートは、天井全面落下の衝撃荷重に耐えて、脱落を生じることなく天井を安全に支持した。試験体は、落下時の衝撃によって一部に天井ボードのひび割れやフェイルサポートの継手部のボルトのずれなどの損傷を生じたが、人的被害や避難の支障に繋がるような大規模な破損・落下は生じなかった。各試験体の最大張力や最大たわみの実験結果と後述5.1.1に示す懸垂線理論式による計算結果を比較して表4-8～表4-12に示す。

中間支持のある天井は、無い天井に比べて、フェイルサポートの最大張力や天井の最大たわみが小さく、中間支持材は天井の落下防止対策に有効であること明らかとなった。

表4-8～表4-12の懸垂線理論式による値は、静的な天井荷重に対する計算値であるのに対し、実験結果は、天井全面落下時の衝撃によって生じた計測値である。従って、理論式による値に対する実験結果の比は、天井全面落下に伴う衝撃割増しを表していると考えられる。表4-13は、表4-8～表4-12の実験結果/理論式の比を一覧で示しており、これらの数値を下回らないように定めた衝撃割増係数を表の最下段に示している。フェイルサポートの衝撃割増係数は、中間支持材無しの場合の張力が2.0、たわみが3.0であるのに対して、中間支持材有りの張力が1.0、たわみが2.5となっている。また、中間支持材の鉛直支持力ならびにワイヤーの衝撃割増係数は、いずれも3.0となっている。

表 4-8 試験体① (天井ボード1枚で中間支持あり)

	サポート材張力 (kN)	中央支点反力 (kN)	スパン中央たわみ (mm)
	実験結果	L1:12.3255 L2:11.7716 L3:11.5335 L4:11.8631 平均値:11.8734	GC1:3.56288 GC2:3.22916 平均値:3.3960
懸垂線理論式	17.81	1.37	56.7
実験結果/理論式	0.67	2.48	2.13

表 4-9 試験体② (天井ボード1枚で中間支持無し)

	サポート材張力 (kN)	スパン中央たわみ (mm)
実験結果	L1:46.8322 L2:43.8567 L3:38.6336 L4:41.6915 平均値:42.7535	DC1:355.1019 DC2:369.2744 平均値:362.1882
懸垂線理論式	28.26	142.9
実験結果/理論式	1.51	2.53

表 4-10 試験体③ (天井ボード2枚で中間支持あり)

	サポート材張力 (kN)	中央支点反力 (kN)	スパン中央たわみ (mm)
実験結果	L1:21.3001 L2:21.6480 L3:21.4466 L4:20.2930 平均値:21.1719	GC1:5.84084 GC2:5.515363 平均値:5.6781	DN1:126.966 DN2:140.0226 DS1 :133.241 DS2 :137.1122 平均値:134.3355
懸垂線理論式	24.22	2.17	66.2
実験結果/理論式	0.87	2.62	2.03

表 4-11 試験体④ (天井ボード2枚でワイヤー掛け)

	端部ワイヤー張力 (kN)	中央ワイヤー張力 (kN)
実験結果	GN1:3.1132 GN2:4.4122 GS1:4.0358 GS2:2.4155 平均値:2.7442	GC1:5.0515 GC2:5.4632 平均値:5.2574
計算値	1.084	2.168
実験結果/計算値	2.53	2.43

計算値 = 天井単位重量 × ワイヤー1本当たりの支配面積

表 4-12 試験体⑤ (天井ボード2枚で中間支持無し)

	サポート材張力 (kN)	スパン中央たわみ (mm)
実験結果	L1:62.9755 L2:63.3783 L3:62.6276 L4:61.6571 平均値:62.6596	DC1:449.1495 DC2:469.3134 平均値:459.2315
懸垂線理論式	38.44	166.6
実験結果/理論式	1.63	2.76

(注) 各試験体の計測位置は図4-5参照

表 4-13 衝撃割増係数

	フェイルサポート 端部張力		中間支持材鉛直張力	フェイルサポート たわみ		ワイヤー張力	
	中間支持無し	中間支持有り		中間支持無し	中間支持有り	端部	中央
実験結果/理論式	1.51 ケース②	0.67 ケース①	2.48 ケース①	2.53 ケース②	2.13 ケース①	2.53 ケース④	2.43 ケース④
衝撃割増係数	1.63 ケース⑤	0.87 ケース③	2.62 ケース③	2.76 ケース⑤	2.03 ケース③	3.0	3.0

5. 設計法を検証するための解析

5.1 フェイルサポートの張力とたわみの算定

フェイルサポートの張力とたわみを数値解析的に算定する。解析対象の天井は、4.2章の天井落下実験に用いた実大試験体であり、その諸元を表5-1に示す。

表 5-1 解析対象の天井

ケース名 (試験体名)	天井重量 (N/m <sup>2</sup> )	支点間距離 (m) ×スパン数	フェイルサポート1本 当たりの支配幅 (m)
1	127.5	5.9m × 2スパン (中間支持材有り)	1.82m
2	127.5	11.79m × 1スパン (中間支持材無し)	1.82m
3	202.1	5.9m × 2スパン (中間支持材有り)	1.82m
5	202.1	11.79m × 1スパン (中間支持材無し)	1.82m

5.1.1 懸垂線理論による解析

懸垂線理論による解析は、等分布荷重  $q$  を受ける支点間距離  $l$  のフェイルサポート1本あたりの張力を以下のように算定する。まず、2分法等の反復解法を用いることで、水平力  $H$  を次式により求める。

$$2 \frac{H}{q} \left( 1 - \frac{H}{EA} \right) \sinh \frac{ql}{2H} = l \quad \dots (1)$$

ここで、

$H$ : フェイルサポートに作用する水平力

$q$ : フェイルサポート1本当たりの等分布荷重

$$q = w \times b$$

$w$ : 天井の単位面積重量

$b$ : フェイルサポート1本あたりの支配幅

$E$ : フェイルサポートのヤング係数

$A$ : フェイルサポートの断面積

$l$ : フェイルサポートの支点間距離

水平力  $H$  を用いて、フェイルサポートのたわみ  $\delta$  および張力  $P$  を、次式により算定する。

$$\delta = y_{x=l/2} = \frac{H}{q} \left( \cosh \frac{ql}{2H} - 1 \right) \quad \dots (2)$$

$$P = H \cosh \frac{ql}{2H} \quad \dots (3)$$

また、フェイルサポートの端部支点到作用する鉛直力  $V$  は次式で与えられる。

$$V = \sqrt{P^2 - H^2} \quad \dots (4)$$

フェイルサポートの張力とたわみは、懸垂線理論を用

いれば反復計算により算定することができるが、膜張力の略算式<sup>3)</sup>を用いれば、反復計算せずに算定することができる。これは、支点間に張られた膜材料の支点間の膜張力を求める略算法で、鉛直等分布荷重に対して、初期状態でたわみが無い場合の水平力  $H$ 、鉛直力  $V$ 、張力  $P$ 、たわみ  $\delta$  はそれぞれ下式で算定される。

$$H = \sqrt[3]{\frac{E \times A \times q^2 \times l^2}{24}} \quad \dots (5)$$

$$V = ql / 2 \quad \dots (6)$$

$$P = \sqrt{H^2 + V^2} \quad \dots (7)$$

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3 \times q \times l^4}{64 \times E \times A}} \quad \dots (8)$$

懸垂線理論による解析と膜張力略算式による結果を比較して表5-2に示す。4つの解析ケースの天井に対して、フェイルサポートの張力とたわみは、懸垂線理論式と膜張力略算式による計算結果がほぼ等しいことが明らかになった。このことから、フェイルサポートの部材1本あたりの張力とたわみは、懸垂線理論式である(2)式と(3)式、または膜張力略算式である(7)式と(8)式を用いて算定することとする。

表 5-2 懸垂線理論式と膜張力略算式の比較

ケース	端部張力 $P$ (kN)			中央たわみ $\delta$ (mm)		
	①懸垂線式	②膜略算式	比 (②/①)	③懸垂線式	④膜略算式	比 (④/③)
1	17.8	17.8	1.000	56.8	56.7	0.998
2	28.3	28.2	1.000	142.9	142.8	0.999
3	24.2	24.2	1.000	66.2	66.2	1.000
5	38.4	38.4	1.000	166.6	166.5	0.999

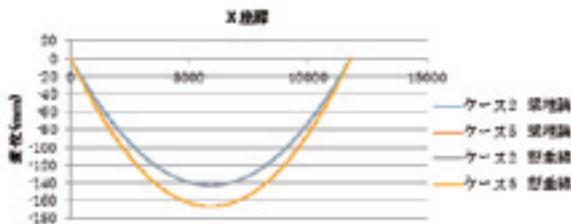
5.1.2 梁理論による解析

表5-1に示す解析対象の天井について、フェイルサポートの曲げ剛性(断面二次モーメント  $I_y=5.72\text{cm}^4$ )を考慮した梁理論による解析を行い、曲げ剛性を考慮しない懸垂線理論による結果と比較検討を行う。

梁理論による解析では、フェイルサポートは幾何学的非線形性を考慮した梁要素でモデル化する。梁要素の長さは40mmを基本とし、全長11.79mの節点数は297個である。梁要素の諸元は  $\square-40 \times 40 \times 3.2$  の数値を用いている。中間支持材がある場合は、フェイルサポートにピン接合された鉛直ばね(軸剛性  $1 \times 10^8 \text{N/m}$ )により中間支持材をモデル化する。解析では梁要素のせん断変形は無視している。

表 5-3 懸垂線理論式と梁理論解析結果の比較  
(中間支持材無し)

ケース名	端部張力P (kN)			中央たわみ $\delta$ (mm)		
	①懸垂線式	②梁理論	比 (②/①)	③懸垂線式	④梁理論	比 (④/③)
2	28.3	27.6	0.975	142.9	142.4	0.997
5	38.4	37.7	0.982	166.6	166.1	0.997

図 5-1 懸垂線理論式と梁理論解析結果のたわみの比較  
(中間支持無し)

## (1) 中間支持材が無い場合の解析結果

表 5-3 は、中間支持材が無い場合 (ケース 2 と ケース 5) の懸垂線理論式と梁理論による解析結果を比較している。同表から明らかなように、フェイルサポートの張力とたわみは、懸垂線理論式の方が梁理論よりもわずかに大きい。両者は概ね良い対応を示している。また、フェイルサポートの材軸に沿ったたわみ分布を図 5-1 に示すが、懸垂線理論式と梁理論によるたわみは殆ど差が見られず、両者のたわみ分布が重なっている。以上から、中間支持が無い場合のフェイルサポートの張力とたわみは、懸垂線理論式の方が梁理論よりも計算結果が僅かに大きいものの、両者はよく整合している。

## (2) 中間支持材がある場合の解析結果比較

表 5-4 は、中間支持材がある場合 (ケース 1 と ケース 3) の懸垂線理論式と梁理論による解析結果を示している。同表から明らかなように、フェイルサポートの張力とたわみは、懸垂線理論の方が梁理論よりも 2~3 割程度大きい。中間支持材の鉛直力は、梁理論の方が 1 割程度大きい結果となっている。

フェイルサポートの材軸に沿ったたわみ分布を図 5-2 に示す。懸垂線理論式のたわみ分布は支点間距離 ( $l=5.9\text{m}$ ) の中央で最大となっているため、中間支持材に生じる鉛直力は、支点間距離分の等分布荷重の合計 ( $W=q \times l = w \times b \times l$ ) となる。

$$\text{ケース 1: } W = w \times b \times l = 127.5 \times 10^{-3} \times 1.82 \times 5.9 = 1.37 \text{ kN}$$

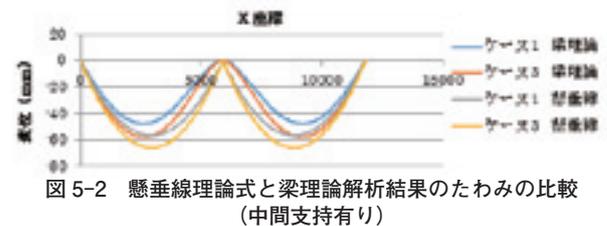
$$\text{ケース 3: } W = w \times b \times l = 202.1 \times 10^{-3} \times 1.82 \times 5.9 = 2.17 \text{ kN}$$

表 5-4 懸垂線理論式と梁理論解析結果の比較  
(中間支持材有り)

ケース名	端部張力P (kN)			中央たわみ $\delta$ (mm)		
	①懸垂線式	②梁理論	比 (②/①)	③懸垂線式	④梁理論	比 (④/③)
1	17.8	12.0	0.674	56.7	46.8	0.825
3	24.2	17.8	0.736	66.2	57.2	0.864

ケース名	中間支持材鉛直力P (kN)		
	⑤懸垂線式	⑥梁理論	比 (⑥/⑤)
1	1.37	1.55	1.13
3	2.17	2.42	1.11

図 5-2 懸垂線理論式と梁理論解析結果のたわみの比較  
(中間支持有り)

一方、梁理論のたわみ分布は、一般的に懸垂線理論式のたわみ分布よりも小さいが、その最大値は支点間距離の中央から 0.32~0.4m 程度外端側へ寄った位置で生じている。中間支持材に生じる鉛直力はたわみの最大位置間の等分布荷重を負担するため、梁理論では懸垂線理論式よりも 1.11~1.13 程度大きい等分布荷重を負担することになる。

以上から、中間支持材がある場合のフェイルサポートの張力とたわみについては、懸垂線理論式による計算結果が梁理論式による結果よりも 2~3 割程度大きく、安全側の評価となる。ただし、中間支持材の鉛直力は、梁理論式による計算結果が懸垂線理論式による結果よりも 1 割程度大きい。中間支持材の設計では、安全側に判断して懸垂線理論式による荷重に対して 1.2 倍程度の余裕を持たせた断面設計を行うものとする。

## 5.2 天井落下実験に関する解析

## 5.2.1 天井落下実験結果の張力とたわみ

「天井落下実験 (フェイルサポート工法)」におけるフェイルサポートの張力とたわみ、ならびに中間支持材の鉛直力の計測結果を表 5-5 に示す。落下後の平衡状態では、落下衝撃時の最大値に対して張力が 2~3 割程度に、たわみが 7~9 割程度に減少している。また、中間支持材の鉛直力は、落下衝撃時の最大値に対して 4~5 割程度に減少している。一方、表 5-6 は、懸垂線理論による計算結果および表 4-12 で示した衝撃割増係数を天井重量に対する計算値に乗じた計算結果を示している。

天井脱落時の落下衝撃に対するフェイルサポートの張力とたわみ、ならびに中間支持材の鉛直力は、計算値が

表 5-5 天井落下実験の結果一覧

試験体	落下衝撃時の最大値			落下後の平衡状態		
	フェイルサポート		中間支持材	フェイルサポート		中間支持材
	張力 (kN)	たわみ (mm)	鉛直力 (kN)	張力 (kN)	たわみ (mm)	鉛直力 (kN)
①	11.9	121	3.4	2.9	108	1.6
②	42.8	362	-	11.2	306	-
③	21.2	134	5.7	6.8	115	2.3
⑤	62.7	459	-	17.0	325	-

表 5-6 懸垂線理論による計算結果一覧

試験体	天井重量に対する計算値			左記の計算値×衝撃割増係数		
	フェイルサポート		中間支持材	フェイルサポート		中間支持材
	張力 (kN)	たわみ (mm)	鉛直力 (kN)	張力 (kN)	たわみ (mm)	鉛直力 (kN)
①	17.8	57	1.37	17.8	142	4.1
②	28.3	143	-	56.6	427	-
③	24.2	66	2.17	24.2	166	6.5
⑤	38.4	167	-	76.8	500	-

実験値よりも大きく、安全側の評価となっている。また、天井重量に対するフェイルサポートの張力の計算値は、天井脱落下後の平衡状態における張力の実験値よりも大きく、安全側の評価となっている。

5.2.2 フェイルサポートの張力とたわみの動的解析

(1) 解析モデル

天井落下実験におけるフェイルサポートの張力とたわみを解析的に検討する。すなわち、動的解析モデルは「5.1.2梁理論による解析」に示す梁要素と接合部の要素を組み合わせたものとする。動的解析モデルを図5-3に示す。接合部の要素は、梁要素と同じ曲げ剛性を有し、軸剛性は図5-4のスケルトンモデルとする。ただし、スケルトンモデルは、減力時も加力時と同じ経路を辿るものとし、ループは描かないものとする。天井重量は、各節点に質量を与えた上で、ある時刻で生起するステップ関数で重力加速度を入力することにより、天井落下衝撃を模擬する。粘性減衰定数は、初期剛性比例型とし、天井落下後の減衰包絡線の実験結果から  $h=0.07$  と仮定した。以上の条件に基づいて、動的応答解析を行った。

(2) 解析結果

各試験体の実験結果と解析結果を比較して表5-7に示す。また、各試験体の実験結果と解析結果の時刻歴を比較して図5-5～図5-8に示す。なお、表ならびに図のcase1、2、3、5はそれぞれ試験体①、②、③、⑤に対応している。表5-7に示すように、天井落下時の最大値における実験結果／解析結果の比は、フェイルサポートの張力が0.87～

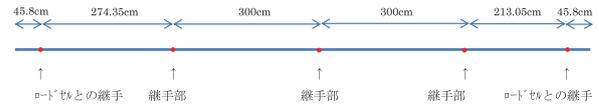


図 5-3 解析モデル

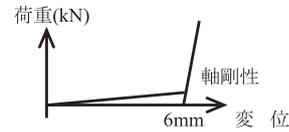


図 5-4 接合部の荷重 - 変形関係のスケルトン

表 5-7 実験結果と解析結果の比較

解析ケース	フェイルサポート				中間支持材		
	端部張力 (kN)		スパン中央たわみ (mm)		鉛直力		
	最大値	平衡状態	最大値	平衡状態	最大値	平衡状態	
case1	実験結果	11.9	2.9	121	108	3.40	1.62
	解析結果	12.2	2.5	110.4	92.6	2.90	1.65
	比	1.03	0.87	0.91	0.86	0.85	1.02
case2	実験結果	42.8	11.2	362	306		
	解析結果	37.1	11.8	346.6	323.7		
	比	0.87	1.05	0.96	1.06		
case3	実験結果	21.2	6.8	134	115	5.70	2.30
	解析結果	20.8	6.2	139	106	5.10	2.52
	比	0.98	0.91	1.04	0.92	0.89	1.10
Case5	実験結果	62.7	17.0	459	325		
	解析結果	70.9	18.5	405	329		
	比	1.13	1.09	0.88	1.01		

1.13、たわみが0.88～1.04、中間支持材の鉛直力が0.85～0.89であり、解析結果は実験結果と良い整合を示している。また、図5-5～図5-8に示すように、解析結果の時刻歴は、実験時の挙動を概ね再現できていることを確認した。

6. まとめ

グリッドサポート工法・フェイルサポート工法の性能確認を目的とした各種実験および解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) サポート材（溝形鋼）の中間接合部の試験、天井の落下防止ネット定着部の試験を行い、構成材料が十分な耐力を有することを確認した。
- (2) 構造安全性を検証するための実験として、天井加振実験（グリッドサポート工法）、天井落下実験（フェイルサポート工法）を実施した。天井加振実験結果より、グリッドサポートのサポート材や接合部に損傷は生じておらず、2.2Gの水平力に1.5倍の安全率を考慮した地震力に対する安全性が確認された。また、天井落下実験においては、天井落下による衝撃割増係数の妥当性を確認した。
- (3) 設計法検証のための解析として、サポート材の張力とたわみを懸垂線理論による計算値と膜張力略算式による計算値により算出し、ほぼ一致することを確認した。また、梁理論による解析結果と実験結果を比較し、妥当性を確認した。今後は、本工法の傾斜天井への応用など、適用拡大に向けた取り組みを行う予定である。

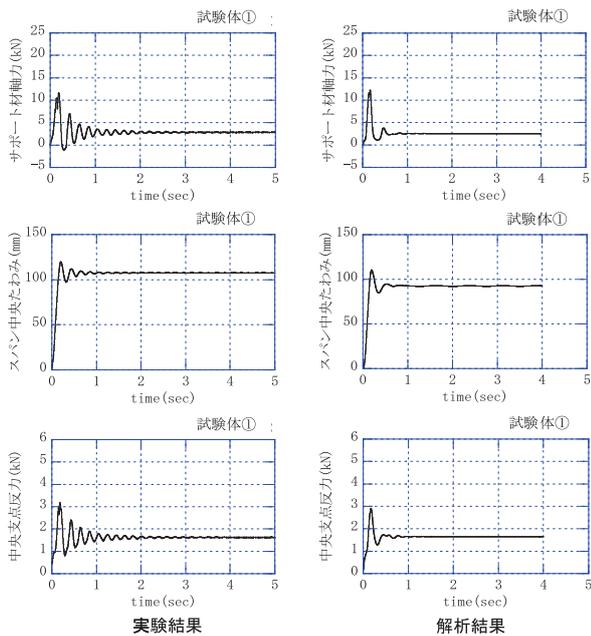


図 5-5 実験結果と解析結果の時刻歴の比較 (case1)

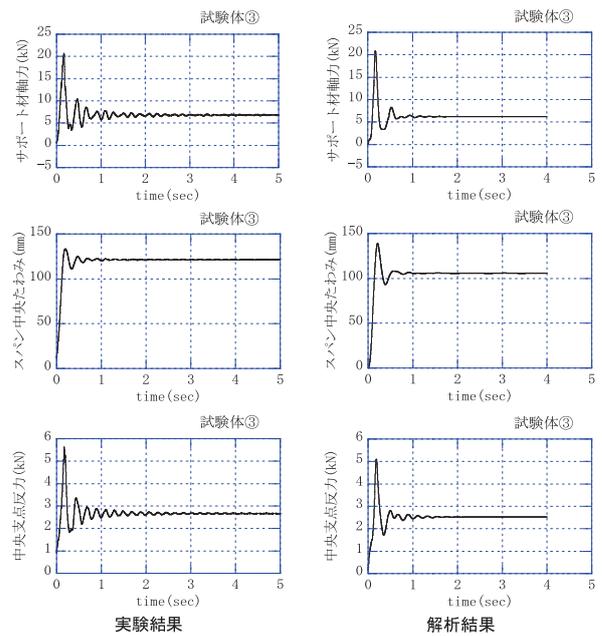


図 5-7 実験結果と解析結果の時刻歴の比較 (case3)

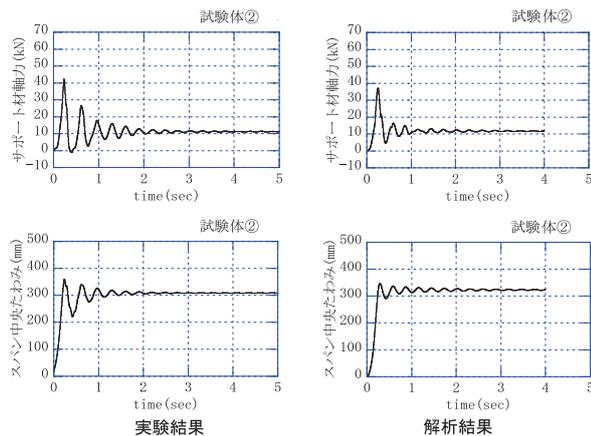


図 5-6 実験結果と解析結果の時刻歴の比較 (case2)

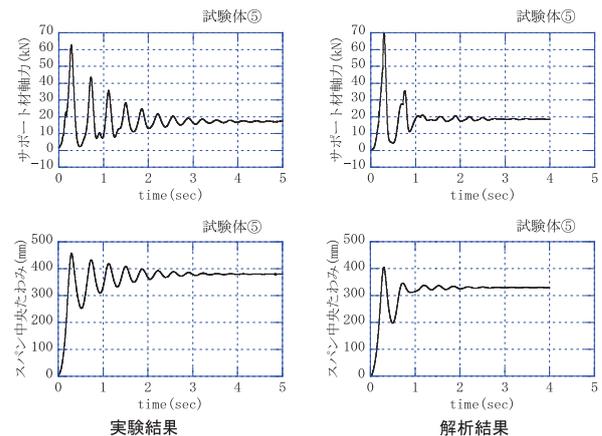


図 5-8 実験結果と解析結果の時刻歴の比較 (case5)

**【参考文献】**

- 1) 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, 一般社団法人 新・建築士制度普及協会: 建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説 (平成 25 年 10 月版), 2013. 10
- 2) 清水建設株式会社: 天井ボード材に斜め部材を固定する“剛”な耐震天井構工法 (リニアプレス R), ビルディングレター第 612 号, 2016 年 12 月
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人 建築研究所監修: 膜構造の建築物・膜材料等の技術基準及び同解説 (平成 15 年 8 月)

**【執筆者】**



\*1 正藤 倫宏  
(MASATOU Tomohiro)



\*2 櫻庭 記彦  
(SAKURABA Fumihiko)



\*3 松原 正芳  
(MATSUBARA Masayoshi)



\*4 諸星 玲子  
(MOROHOSHI Reiko)