

天井落下防止工法「鴻池 CSFP 工法・帯塗くん®」

Ceiling Fall Prevention System "Konoike CSFP Construciotn Method, Taito-kun"

| | | |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 伊藤 真二*1 Shinji Ito | 高松 誠*1 Makoto Takamatsu | 島村 淳平*2 Junpei Shimamura |
| 岩下 智*3 Satoru Iwashita | 大林 慎二*4 Shinji Obayashi | 小池 いずみ*5 Izumi Koike |

要旨

「鴻池 CSFP 工法・帯塗くん®」は、既存建築物を対象とした天井落下防止工法である。繊維強化塗料を用いて天井板同士を一体化し、地震時に天井面構成部材が落下することを防止する。本工法は、一般的に短期間での施工が要求される改修工事において、天井内部での作業をなくすことで休日作業を中心とした居ながら改修を可能とし、改修工事におけるコスト、工期の問題を解決するために開発された。本工法には、在来工法天井の天井板ジョイント部に繊維強化塗料を跨るように塗布し、天井面下に落下防止用ワイヤを敷設する「帯塗・ワイヤタイプ」と、ライン型システム天井を対象とした「帯塗・ワイヤレスタイプ」がある。本報告では主に「帯塗・ワイヤタイプ」について報告する。

キーワード： 既存天井、落下防止、繊維強化塗料、ワイヤ

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震では、多くの吊り天井が落下し、かつてない規模で人的・物的被害が発生した。これを受けて2013年に日本建築学会から「天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン」¹⁾が出され、同年に国土交通省からは特定天井の構造方法を定めた告示771号が公布された。同告示は主に新築を対象としているが、既存建築物の天井に対してはネットやワイヤを用いた落下防止措置が認められている。

当社では、既存天井の落下防止措置として繊維強化塗料(短繊維を混入して補強した塗膜塗料)を用いて部材同士を接着・一体化し、地震時にボード等の天井面構成材が落下することを防止、もしくは損傷を低減する工法(以下 CSFP 工法*)について研究開発を進め、2014年にライン型システム天井を対象とした「帯塗・ワイヤレスタイプ」²⁾を実用

化した。その後、在来工法天井を対象とし、塗膜と落下防止用ワイヤを併用する「帯塗・ワイヤタイプ」を開発した(写真1)。これらの工法は、顧客からの強い要望である短工期、低コスト、美観性確保等に応えたものである。本報告では、主に「帯塗・ワイヤタイプ」の効果を検証するために行った各種試験の概要および結果について報告する。

なお、本工法は、CSFP 工法協会((株)鴻池組、鴻池ビルテクノ(株)、(株)桐井製作所、日本樹脂施工協同組合)による共同開発の成果である。また、本工法は、一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明を取得している(GBRC性能証明 第17-27、2017.11.16付)。

※CSFP 工法：Ceiling Support system by Fiber reinforced coating Paint)

2. CSFP 工法の概要

2.1 工法概要

CSFP 工法「帯塗・ワイヤタイプ(図1)」は、在来工法天井の天井板ジョイント部に跨るように繊維強化塗料を塗布し、天井面下に落下防止用のワイヤを敷設する工法で、吊りワイヤ、部材A(吊り用フック)、天井受けワイヤ、部材B(受け用プレート)、ボルトクリップおよび繊維強化塗料から構成されている。

これらの構成材の取り付け手順を以下に示す。

- ①隣り合う天井板同士を跨ぐように繊維強化塗料(幅45mm)を野縁方向に塗布する。

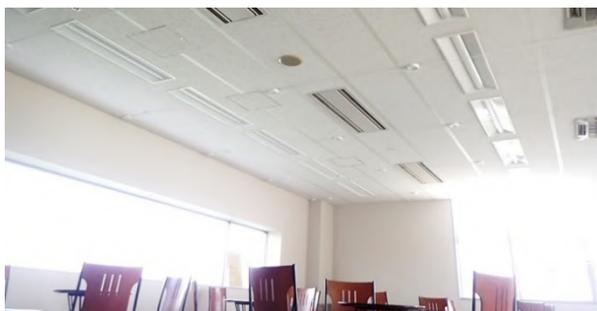
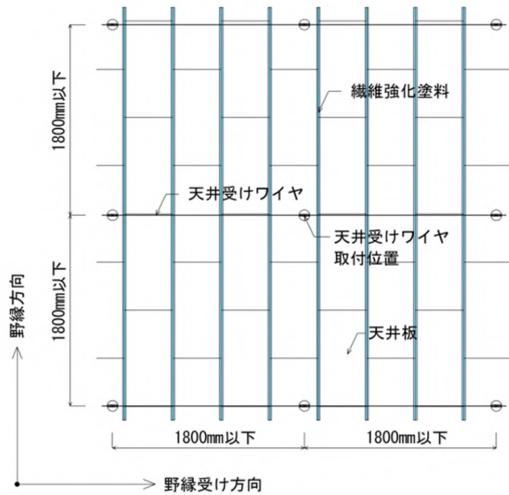
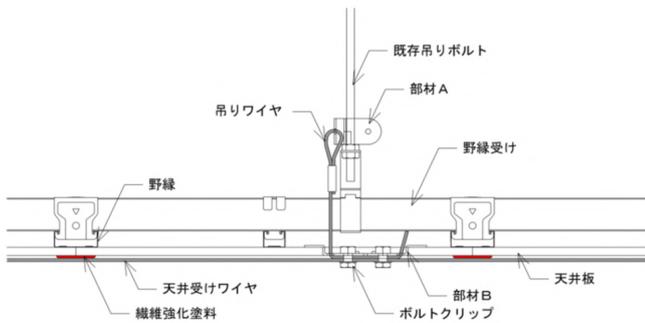


写真1 「帯塗・ワイヤタイプ」の施工事例

- ②既存天井面に1800mm以下の格子間隔で直径100mmの円形開口を設ける。
 - ③吊りワイヤを取り付けた部材Aを既存吊りボルトに取り付ける。
 - ④部材Bを円形開口に設置し、ボルトクリップにて吊りワイヤと接続する。
 - ⑤天井受けワイヤを天井下面に野縁受け方向に敷設し、ボルトクリップにて部材Bと接続する。
- 天井受けワイヤが繊維強化塗料にて一体化された天井板を保持することで、地震時の天井板の落下を防止できる。



a) 天井見上げ図



b) 断面図

図1 帯塗・ワイヤタイプの概要図

2.2 適用条件

「帯塗・ワイヤタイプ」の適用条件を以下に示す(図2)。

- ・天井面はフラットとする。ただし、勾配5/100程度までの斜め天井または端部接線勾配5/100程度までの曲面天井(下に凸のみ)には適用可能である。
- ・吊りワイヤスパンに対し5/100までの段差は許容する。ワイヤは段差と平行方向のみの配置とし、段差を跨ぐワイヤ配置は行わない。
- ・天井面構成部材等の質量が20kg/m²以下の既存吊り天井

を対象とする。

- ・脱落防止処置が施されていない設備機器や天井点検口については、別途、落下防止対策を行う。
- ・吊りワイヤを取り付ける既存吊りボルトのスパンは1800mm以下とする。

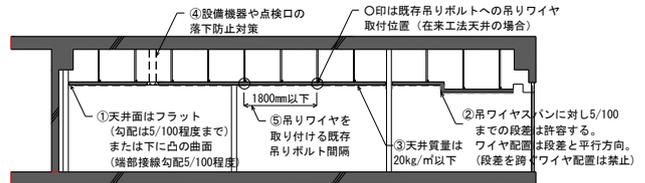


図2 「帯塗・ワイヤタイプ」の適用条件

2.3 使用材料

使用材料は、繊維強化塗料とワイヤおよびそれに付属する金物等の2つに分けられる。繊維強化塗料の塗装仕様を表1に示す。塗料は全て水性の透明塗料で、中塗り塗料に合成樹脂の短繊維が混入されている。中塗りを塗り厚さ1.0mmで塗装し、乾燥塗膜厚さが0.3mm(300μm)以上であることが標準仕様である。図3にワイヤおよび金物の詳細を示す。

表1 繊維強化塗料の塗装仕様

| 工程 | 種類 | 塗装方法 | 塗装回数 | 塗幅 | 塗布量(wet) |
|-----|------------------|------------------|------|----|----------|
| | | | | mm | g/m |
| 下塗り | 2液型アクリルシリコン樹脂系塗料 | ローラー ・はけ塗り | 1回 | 45 | 4~7 |
| | | | | 55 | 5~8 |
| 中塗り | 1液型アクリル樹脂系塗料 | ローキングガン ・へら塗り | 1回 | 45 | 85以上 |
| 上塗り | 2液型アクリルシリコン樹脂系塗料 | ローラー ・はけ塗り | 2回 | 55 | 100以上 |
| | | | | 45 | 8~13 |
| | | | | 55 | 10~15 |

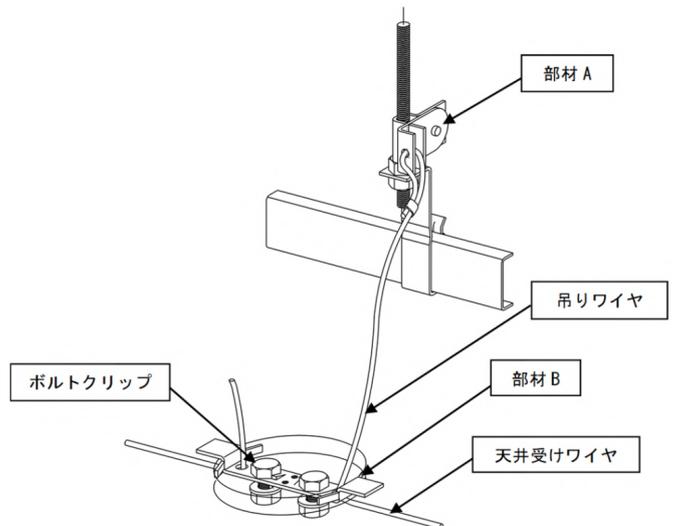


図3 ワイヤおよび金物の詳細

①吊りワイヤ・天井受けワイヤ：以下の何れかを使用

- ・スチールワイヤ（構成記号 6×19, 公称径 3.5mm）
- ・ステンレスワイヤ（構成記号 7×19, 公称径 3.5mm）

②取り付け金物

- ・部材 A(吊り用フック)：FB-30mm×2.3mm
（材料 SGHC, 規格 JIS G 3302）
- ・部材 B(受け用プレート)：FB-20mm×2.3mm
（材料 SGHC, 規格 JIS G 3302）

③ボルトクリップ

- ・呼び M10, 材料 SUS304, 規格 JIS G 4308

2.4 設計方針

地震時に脱落する天井材の衝撃荷重に対して、落下防止措置部材(図 3 に示すワイヤおよび金物)および既存吊りボルトが必要耐力以上であることを確認する。脱落による衝撃荷重の算定は、脱落した天井材が「天井受けワイヤ」に接触するまでの位置エネルギーから算定する³⁾。重力加速度 g 、天井受けワイヤの撓み剛性 k (弾性と仮定する)、天井材質量 m 、天井受けワイヤの質量 ω 、天井受けワイヤの初期撓み量 h とすると、衝撃荷重 F は式(1)で表される。

$$F = (m + \omega)g \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2kh}{(m+\omega)g}} \right) \quad (1)$$

本工法では天井受けワイヤをたるませない程度に張った状態で施工するため初期撓み量 h は 0 とみなすことができ、衝撃荷重 F は(1)式より天井材自重の 2 倍となる。

3. 繊維強化塗料の材料試験

3.1 付着試験

3.1.1 試験方法

在来天井で使用される化粧せっこうボードとせっこうボードをそれぞれ被着体とし、繊維強化塗料の付着強さの測定を行った。試験体は、繊維強化塗料を被着体にそれぞれ塗布し、室内(23±2℃)で 14 日間乾燥養生したものとした。付着寸法は全て 40×40mm とし、載荷速度 2mm/min で試験を行った。試験体数量はそれぞれ 3 体とした。

3.2.2 試験結果

表 2 に測定結果の一覧、写真 2 に試験後の破断状況をそれぞれ示す。付着強さの平均値は、被着体の種類にかかわらず 0.11 N/mm² であった。試験後の破断状況は、被着体の種類にかかわらず、すべての基材において凝集状の破壊形態を示した。

表 2 繊維強化塗料の付着強さ

| 被着体種類 | | 最大荷重 (N) | 付着強さ (N/mm ²) 平均 |
|-----------|---|----------|---------------------------------|
| 化粧せっこうボード | 1 | 200.7 | 0.13 |
| | 2 | 158.7 | 0.10 |
| | 3 | 149.7 | 0.09 |
| せっこうボード | 1 | 205.0 | 0.13 |
| | 2 | 187.7 | 0.12 |
| | 3 | 113.0 | 0.07 |



a) 化粧せっこうボード



b) せっこうボード

写真 2 付着強さ試験後の破断状況

3.2 塗膜の力学的耐久性

繊維強化塗料による塗膜の力学的耐久性を評価するために促進耐候性試験を行い、その後、引張試験を行った。

3.2.1 促進耐候性試験の概要

写真 3 に促進耐候性試験状況を示す。JIS K 5600-7-7「塗料一般試験方法—第 7 部：塗膜の長期耐久性—第 7 節」に準拠して、表 3 に示す試験条件のキセノンランプ法による促進耐候性試験を行った。促進試験時間は、参考文献⁴⁾、⁵⁾を参考に、試験機光源の放射露光量 (300~400nm) と屋内の紫外線量の関係から、約 30 年間の屋内紫外線量に相当する 1,500 時間までとした。試験体は、繊維強化塗料の成膜フィルムとし、室内(23±2℃)で 7 日間乾燥養生してから促進耐候性試験を開始し、所定の促進試験時間終了後、引張試験を行った。

3.2.2 引張試験の概要

写真 4 に試験片および引張試験状況を示す。成膜した繊維強化塗料の引張強さについて、JIS A 6021「建築用塗膜防水材料」に準拠し、載荷速度 200mm/min で試験を行った。試験片は、塗料を成膜させて室内(23±2℃)で所定期間まで乾燥養生を行ったのち、JIS K 6251「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方」に規定されているダンベル状 2 号形にカットしたものとし、数量はそれぞれ 3 片とした。

3.2.3 試験結果

表4に促進耐候性試験後の引張強さの試験結果を、図4に促進試験時間と引張強さの関係を示す。引張強さの平均値は、促進劣化試験開始前が12.5N/mm²、促進240時間後では10.5N/mm²と開始前から2N/mm²低下した。しかし、促進500時間以降では引張強さに大きな変化は見られず、屋内紫外線量の約30年間に相当する促進1,500時間後の引張強さは10.9N/mm²であり、引張耐力の低下は開始前の約12%減少する程度であった。経年での耐力低下の度合いが大きくないことが確認できた。

表4 促進耐候性試験後の引張強さ

| 促進耐候性試験時間 | No. | 膜厚 (mm) | 最大引張力 (N) | 引張強さ (N/mm ²) | | 伸び量 (mm) | 伸び率 (%) | |
|---------------|-----|---------|-----------|---------------------------|------|----------|---------|----|
| | | | | 平均 | | | 平均 | |
| 0時間 | 1 | 0.77 | 86.8 | 11.3 | 12.5 | 6.4 | 32 | 34 |
| | 2 | 0.74 | 99.3 | 13.4 | | 9.3 | 46 | |
| | 3 | 0.90 | 114.1 | 12.6 | | 4.6 | 23 | |
| 240時間 (≒5年) | 1 | 0.90 | 92.1 | 10.2 | 10.5 | 5.6 | 28 | 28 |
| | 2 | 0.69 | 75.0 | 10.9 | | 5.3 | 26 | |
| | 3 | 0.72 | 74.6 | 10.3 | | 5.9 | 30 | |
| 480時間 (≒10年) | 1 | 0.61 | 70.4 | 11.5 | 10.4 | 5.6 | 28 | 24 |
| | 2 | 0.58 | 61.6 | 10.7 | | 5.1 | 26 | |
| | 3 | 0.61 | 55.3 | 9.1 | | 3.7 | 18 | |
| 960時間 (≒20年) | 1 | 0.71 | 67.1 | 9.4 | 9.8 | 2.6 | 13 | 15 |
| | 2 | 0.56 | 58.8 | 10.4 | | 3.3 | 16 | |
| | 3 | 0.67 | 63.8 | 9.5 | | 2.9 | 14 | |
| 1500時間 (≒30年) | 1 | 0.58 | 63.3 | 11.0 | 10.9 | 6.6 | 33 | 30 |
| | 2 | 0.82 | 87.9 | 10.7 | | 6.0 | 30 | |
| | 3 | 0.57 | 63.1 | 11.1 | | 5.2 | 26 | |



写真3 促進耐候性試験状況

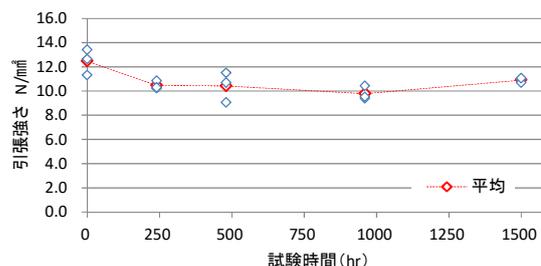


図4 促進試験時間と繊維強化塗料の引張強さの関係

4. 要素試験

「帯塗・ワイヤタイプ」においては、天井面構成部材がハンガーまたはクリップから脱落した時に生じる鉛直衝撃荷重は、天井受けワイヤを介して吊りワイヤ、部材A、既存吊りボルトの順に伝達される。また、この時、天井板同士を一体化した繊維強化塗料は、鉛直荷重により生じる曲げに対する抵抗要素となる。4.1節ならびに4.2節では、吊りワイヤ取り付け部および天井受けワイヤ取り付け部の接合部耐力を確認するための試験について述べ、4.3節、4.4節および4.5節では、せっこうボードに塗布した繊維強化塗料の耐力を確認するための試験について述べる。

4.1 吊りワイヤ取り付け部の鉛直荷重試験

4.1.1 試験概要

天井板落下時に鉛直方向の衝撃荷重が作用する吊りワイヤ取り付け部の耐力を確認するために引張試験を行った。図5および写真5に試験体および試験体設置状況を示す。実際の取り付け状況を模擬するために部材Bと板厚が同じ軽量形鋼(C-60×30×10×2.3)に吊りワイヤおよび天井受けワイヤをボルトクリップ(トルク 15Nm)にて固定した後、吊りワイヤを取り付けた部材Aを吊りボルトに設置し、吊りボルトを鉛直方向に加力した。試験パラメータは2種類のワイヤとし、試験体数は3体ずつとし(表5)、試験体記号はWA(su)、WA(st)とした。

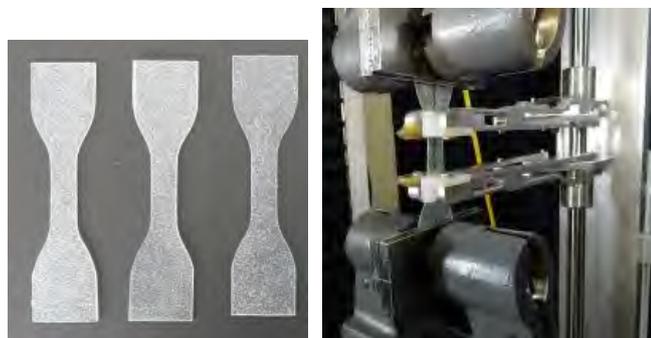


写真4 試験片および引張試験状況

表3 促進耐候性試験条件

| 項目 | 条件 |
|-----------|---------------------------------|
| 光源 | ・キセノンアークランプ ・水冷式7.5kW |
| 光フィルター | ・インナー：石英 ・ OUTER：#275 |
| 放射露光量 | 155.52MJ/m ² |
| 放射照度 | 180W/m ² (300~400nm) |
| BPT温度 | 63±3℃ |
| 相対湿度(照射時) | 50%R.H. |
| 試験サイクル | ・連続運転 ・照射102分、照射+降雨18分 |
| 試験時間 | 最大1,500時間 |

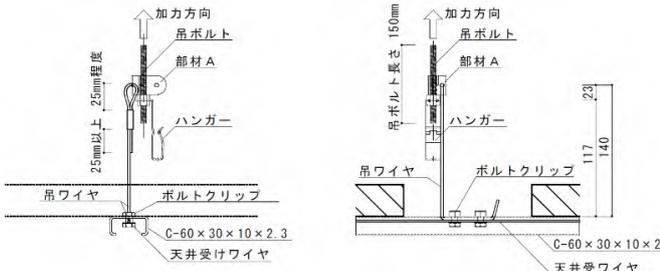


図5 試験体図

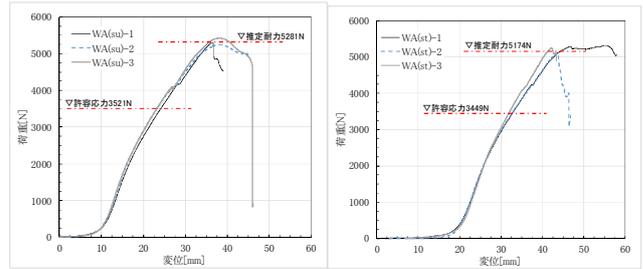


図6 荷重-変位関係(左:WA(su)、右:WA(st))

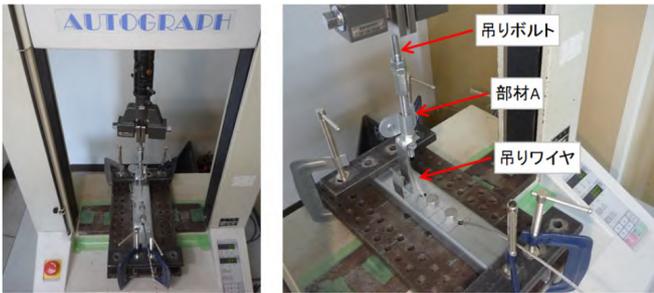


写真5 試験体設置状況

表5 吊りワイヤ取り付け部の試験体一覧

| 記号 | 試験体数 | ワイヤ種類 |
|--------|------|--------------------------------|
| WA(su) | 3 | ステンレス7×19 径3.5mm (破断荷重10.23kN) |
| WA(st) | 3 | スチール6×19 径3.5mm (破断荷重9.48kN) |

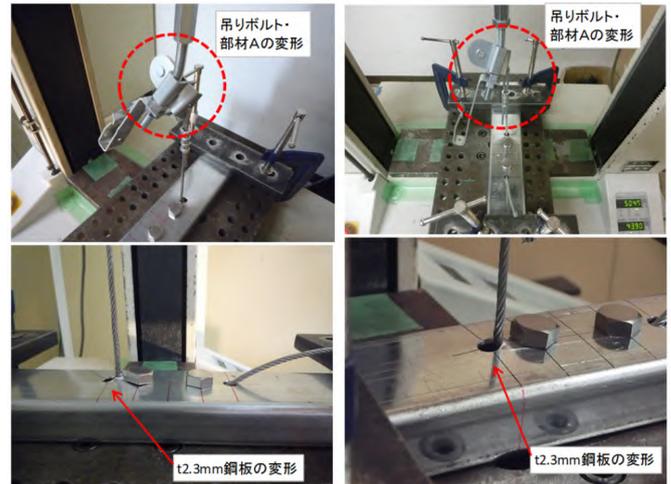


写真6 終局状況(左:WA(su)-1、右:WA(st)-1)

4.1.2 試験結果

図6に荷重-変位関係を、写真6に終局状況をそれぞれ示し、表6に最大耐力および式(2)によって求めた推定耐力 σ_B ⁶⁾を示す。許容応力は推定耐力の2/3とした。

$$\sigma_B = X_{mean} - \sigma/2 \quad (2)$$

$$X_{mean} = (X_1 + X_2 \dots + X_n)/n$$

$$\sigma = \sqrt{\sum (X_i - X_{mean})^2 / (n - 1)}$$

ステンレスワイヤ試験体(WA(su))では、荷重2500N付近から吊りボルトおよび部材Aに変形が生じ、荷重の増加に伴って変形が大きくなっていった。その後、荷重4000N付近から軽量形鋼の変形が生じた。その後、吊りボルトおよび部材Aの変形が進むが、荷重が増加しなくなったので試験終了とした。終局状況でもワイヤの破断は発生しなかった。スチールワイヤ試験体(WA(st))もステンレスワイヤ試験体とほぼ同じ過程で変形が生じた。

表6 吊りワイヤ取り付け部の耐力

| ステンレスワイヤ | | スチールワイヤ | |
|-----------------|---------|-----------------|---------|
| 試験体 | 最大耐力(N) | 試験体 | 最大耐力(N) |
| WA(su)-1 | 5303 | WA(st)-1 | 5312 |
| WA(su)-2 | 5250 | WA(st)-2 | 5110 |
| WA(su)-3 | 5422 | WA(st)-3 | 5256 |
| 推定耐力 σ_B | 5281 | 推定耐力 σ_B | 5174 |

4.2 天井受けワイヤ取り付け部の引張試験

4.2.1 試験概要

天井板落下時には天井受けワイヤ取り付け部に水平方向の衝撃荷重が作用するので、天井受けワイヤ取り付け部の水平方向の耐力を確認するために引張試験を行った。

図7および写真7に試験体および試験体設置状況を示す。試験体は、実際の取り付け状況を模擬するために部材Bと板厚が同じ軽量形鋼(C-60×30×10×2.3)にボルトクリップで吊りワイヤおよび天井受けワイヤを取り付けた後、軽量形鋼を治具に固定し、天井受けワイヤを軸方向に引張加力を行った。試験パラメータやボルトクリップの締め付けトルク値は、吊りワイヤ取り付け部の試験と同一とした。試験体記号はWB(su)、WB(st)とした。

4.2.2 試験結果

図8に荷重-変位関係を、写真8に終局状況写真をそれぞれ示し、表7に最大耐力および式(1)によって求めた推定耐力 σ_B を示す。許容応力は推定耐力の2/3とした。

ステンレスワイヤ試験体(WB(su))では、いずれの試験体においてもすべりは生じず、ボルトクリップ接合部での天井受けワイヤの破断により耐力を失った。スチールワイヤ試験体(WB(st))では、いずれの試験体においてもすべりは生じず、試験装置つかみ治具部での天井受けワイヤの破断により耐力を失った。

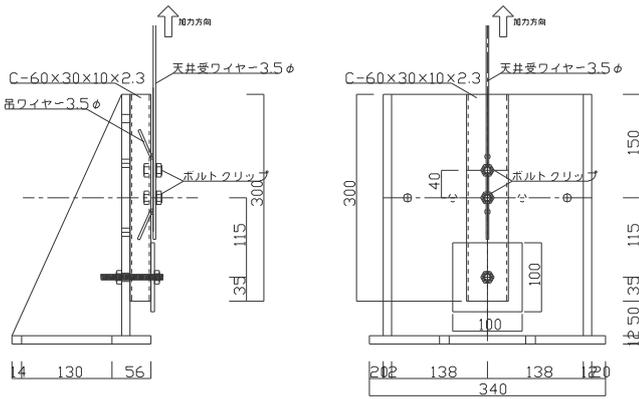


図7 試験体図(右：側面、左：正面)



写真7 試験体設置状況

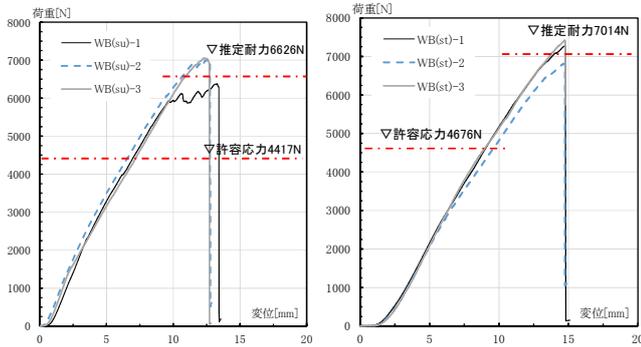


図8 荷重-変位関係(左：WB(su)-1、右：WB(st)-1)

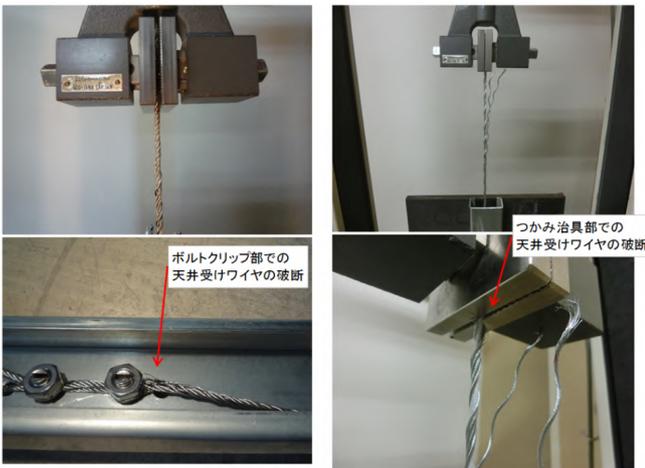


写真8 終局状況(左：WB(su)-1、右：WB(st)-1)

表7 天井受けワイヤ取り付け部の耐力

| ステンレスワイヤ | | スチールワイヤ | |
|-----------------|---------|-----------------|---------|
| 試験体 | 最大耐力(N) | 試験体 | 最大耐力(N) |
| WB(su)-1 | 6379 | WB(st)-1 | 7278 |
| WB(su)-2 | 7010 | WB(st)-2 | 6818 |
| WB(su)-3 | 7057 | WB(st)-3 | 7419 |
| 推定耐力 σ_B | 6626 | 推定耐力 σ_B | 7014 |

4.3 繊維強化塗料塗布部の引張試験

4.3.1 試験方法

図9に引張試験体の概要を示す。試験体は、長手方向に配置した2枚(1枚の寸法80×200×t9.5mm)の化粧せっこうボード(GBT)またはせっこうボード(PBT)を繊維強化塗料で塗布して連結させたものとした。繊維強化塗料の範囲は80mm×45mm、塗厚1.0mm、養生日数14日および施工時室内環境温度は23±2℃とした。載荷速度は200mm/min.として引張試験を行った(写真9)。なお、試験体数量はそれぞれ3体とした。

4.3.2 試験結果

図10に荷重-変位関係を、写真10に引張試験体の終局状況写真をそれぞれ示す。また、表8に各試験体の最大荷重および式(2)によって求めた推定耐力 σ_B を示す。終局状況はすべての試験体において繊維強化塗料の破断であった。

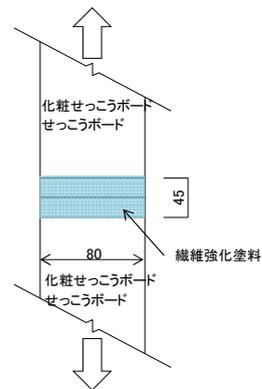
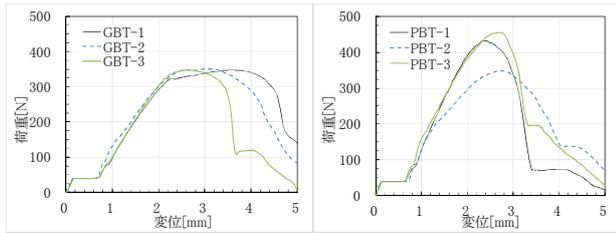


図9 引張試験体 GBT, PBT



写真9 試験体設置状況 [引張試験] (左：GBT、右：PBT)



(化粧せっこうボード) (せっこうボード)
図 10 荷重-変位関係 [引張試験]

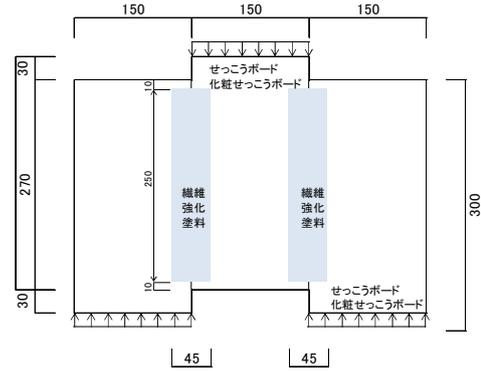


図 11 せん断試験体 GBQ, PBQ

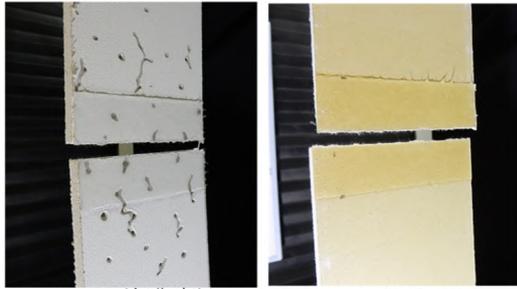


写真 10 終局状況 [引張試験]



写真 11 試験体設置状況 [せん断試験]

表 8 最大耐力結果一覧 [引張試験]

| <化粧せっこうボード> | | | <せっこうボード> | | |
|-----------------|----------|----------------|-----------------|----------|----------------|
| 試験体No. | 最大耐力 (N) | 単位長さ最大耐力 (N/m) | 試験体No. | 最大耐力 (N) | 単位長さ最大耐力 (N/m) |
| GBT-1 | 347.3 | 4341 | PBT-1 | 432.6 | 5407 |
| GBT-2 | 350.4 | 4380 | PBT-2 | 348.1 | 4351 |
| GBT-3 | 347.4 | 4342 | PBT-3 | 455.2 | 5690 |
| 推定耐力 σ_B | | 4343 | 推定耐力 σ_B | | 4796 |

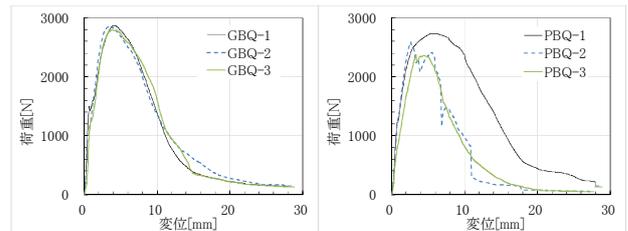


図 12 荷重-変位関係 [せん断試験]

4.4 繊維強化塗料塗布部のせん断試験

4.4.1 試験方法

図 11 および写真 11 にせん断試験体の概要を示す。面内せん断試験は 2 面(辺)せん断による方法とし、試験体は 3 枚(1 枚の寸法 150mm×300mm×t9.5mm)の化粧せっこうボード(GBQ)またはせっこうボード(PBQ)を繊維強化塗料で塗布して連結させたものとした。繊維強化塗料の範囲は 250mm×45mm、板間二か所、中塗りの塗り厚さ 1.0mm、養生日数 14 日とし、載荷速度 200mm/min. でせん断試験を行った。試験体数量はそれぞれ 3 体とした。実験(試験体製作および試験)は、23±2℃の実験室内で行った。

4.4.2 試験結果

図 12 に荷重-変位関係を、写真 12 にせん断試験体の終局状況をそれぞれ示す。また、表 9 に各試験体の最大耐力および式 (1) によって求めた推定耐力 σ_B を示す。

終局状況は繊維強化塗料の破断および表層剥離であった。

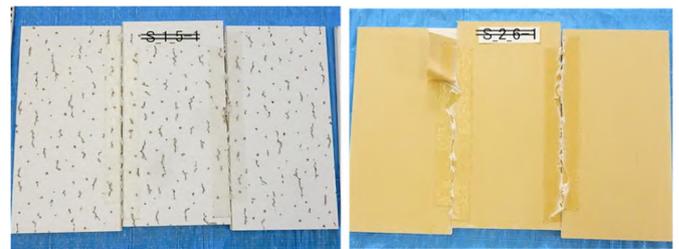


写真 12 終局状況 [せん断試験]

表 9 最大耐力結果一覧 [せん断試験]

| <化粧せっこうボード> | | | <せっこうボード> | | |
|-----------------|----------|----------------|-----------------|----------|----------------|
| 試験体No. | 最大耐力 (N) | 単位長さ最大耐力 (N/m) | 試験体No. | 最大耐力 (N) | 単位長さ最大耐力 (N/m) |
| GBQ-1 | 2865 | 5730 | PBQ-1 | 2732 | 5465 |
| GBQ-2 | 2850 | 5700 | PBQ-2 | 2593 | 5185 |
| GBQ-3 | 2797 | 5595 | PBQ-3 | 2374 | 4749 |
| 推定耐力 σ_B | | 5639 | 推定耐力 σ_B | | 4953 |

4.5 繊維強化塗料塗布部の曲げ試験

4.5.1 試験方法

図 13 に引張試験体の概要を示す。化粧せっこうボード (GBM) では 2 種類の大きさの天井板 (455mm×151.5mm:2 枚, 455mm×303mm:1 枚) を長さ 303mm のダブル野縁に取り付け、目地位置に繊維強化塗料を塗布した。せっこうボード (PBM) では、1 種類の大きさの天井板 (455mm×227.5mm:4 枚) と長さ 455mm のダブル野縁の構成とした。繊維強化塗料は幅 45mm、塗厚 1.0mm、養生日数 14 日および施工時室内環境温度は 23±2℃とした。載荷速度 200mm/min.、スパン 600mm で曲げ試験を行った (写真 13)。試験体数量はそれぞれ 3 体とした。

4.5.2 試験結果

図 14 に荷重-変位関係を、写真 14 に曲げ試験体の終局状況写真をそれぞれ示す。また、表 10 に各試験体の最大荷重および式 (1) によって求めた推定耐力 σ_B を示す。

終局状況は、化粧せっこうボードではボードの曲げ破壊であり、せっこうボードでは繊維強化塗料の破断であった。

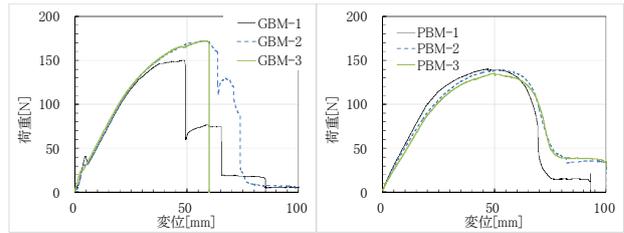


図 14 荷重-変位関係 [曲げ試験]



GBM-1: 曲げ破壊

PBM-1: 塗膜破断

写真 14 終局状況 [曲げ試験]

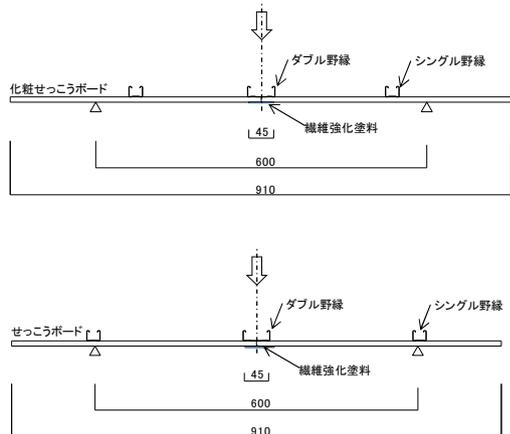
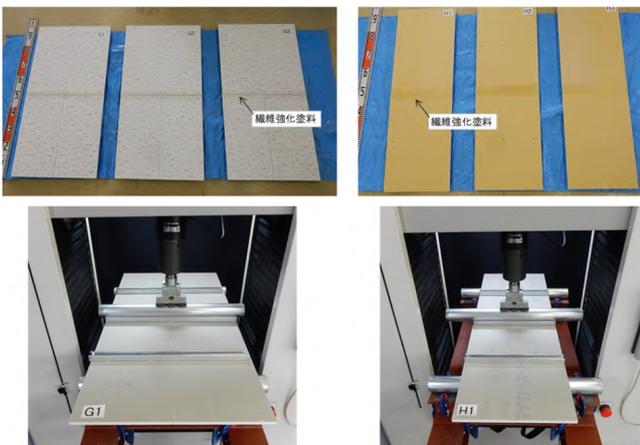


図 13 曲げ試験体 (上: GBM (幅 303mm) 下: PBM (幅 455mm))



(化粧せっこうボード) (せっこうボード)

写真 13 試験体および設置状況 [曲げ試験]

表 10 最大耐力結果一覧 [曲げ試験]

| <化粧せっこうボード> | | | <せっこうボード> | | |
|-----------------|----------|------------------|-----------------|----------|------------------|
| 試験体No. | 最大耐力 (N) | 単位長さ最大曲げM (Nm/m) | 試験体No. | 最大耐力 (N) | 単位長さ最大曲げM (Nm/m) |
| GBM-1 | 150 | 49 | PBM-1 | 140 | 69 |
| GBM-2 | 172 | 57 | PBM-2 | 139 | 69 |
| GBM-3 | 172 | 57 | PBM-3 | 135 | 67 |
| 推定耐力 σ_B | | | 推定耐力 σ_B | | |
| | | | 52 | | |
| | | | 68 | | |

5. 天井ユニット試験

実物の天井を模擬した天井ユニットに静的載荷をすることによって、「帯塗・ワイヤタイプ」の衝撃荷重 F に対する耐力を確認した。また、衝撃荷重を算定する式 (1) は、弾性範囲でのみ成立するため、荷重-変位関係により弾性範囲 (直線性) を確認した。

5.1 天井ユニット試験の概要

試験体は、Case1:「繊維強化塗料あり」と Case2:「繊維強化塗料なし」の 2 種類とした。Case1 では載荷によって天井面構成材が床面に落下しないことの確認、および、Case1 と Case2 の結果を比較することで繊維強化塗料の効果を確認することを目的とした。

写真 15 に試験体全景、図 15 に Case1 の試験体見上げ図、表 11 に試験体仕様をそれぞれ示す。試験体は、躯体等の吊り元を想定した角パイプ (60mm×30mm×1.2mm) に 900mm ピッチで取付けた吊りボルトに対し、野縁受けをハンガーで取り付け、野縁受けに野縁をクリップで取り付けて下地

材を施工し、その下地材に天井板および「帯塗・ワイヤタイプ」における繊維強化塗料、天井受けワイヤ(ステンレス)、部材B、吊りワイヤ(ステンレス)および部材Aを施工した。試験体のサイズは3900mm×3900mm、吊長さ1500mmとした。この状態では天井板は900mmピッチの既存吊りボルトによって支持されている。なお、繊維強化塗料は、天井板の目地(8通り)に塗り幅45mm、中塗りの塗り厚さ1.0mmで施工し、実験室内(気温20℃以上)にて8日間養生を行った。

Case2 は繊維強化塗料を塗布しない試験体とし、試験体仕様および試験方法はCase1と同様である。

表12に載荷計画を示す。野縁受けと野縁を接合している全てのクリップを外し、天井受けワイヤによって保持された状態を自重が作用している初期荷重状態とし、そこからアスファルト系面材を使用して面荷重載荷を行った。



写真15 試験体全景(クリップ除去前)

表11 試験体の仕様

| | |
|----------|--|
| 大きさ | 3.9m×3.9m [15.2m ²] |
| 吊ボルト | 4スパン×4スパン、 φ900、吊長さ1500mm 3/8"全ネジ、φ9mm |
| 野縁受け | 38×12×t1.2 |
| 野縁(シングル) | 25×19×t0.5 |
| 野縁(ダブル) | 50×19×t0.5 |
| クリップ | t=0.6mm |
| ハンガー | t=2.0mm |
| 天井板 | 化粧せっこうボード 一枚張り t=9.5mm |

表12 載荷計画

| ステップ | 載荷荷重 (N) | 累計荷重 (N) |
|-----------|----------|----------|
| 初期荷重 (自重) | | 1459 |
| 1回目 | 1347 | 2806 |
| 2回目 | 1347 | 4152 |
| 3回目 | 1347 | 5499 |
| 4回目 | 668 | 6167 |
| 5回目 | 1944 | 8111 |

5.2 天井ユニット試験の結果

Case1 では、天井板および野縁の局所的な損傷が生じたが、繊維強化塗料塗布部の効果により天井板の落下は生じなかった(写真16左)。また、図3に示した部材A、部材B、天井受けワイヤおよび吊りワイヤの損傷および床面への落下も発生しなかった(写真16右)。

図17に天井板に載荷した荷重と鉛直変位の関係を示す。載荷ステップ2回目4152N(試験体自重1459Nの2.8倍)までの荷重-変位関係は概ね線形であった。天井板が崩壊するまで載荷しなかったため、最大耐力は最終ステップである載荷4回目の6167N(試験体自重の4.2倍)とした。



(A5位置)

(試験体全景)

写真16 Case1: 塗料あり 載荷ステップ4回目の状況

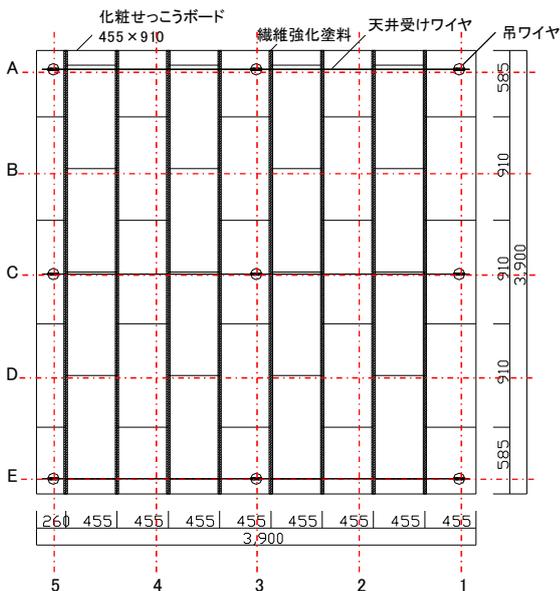


図15 試験体見上げ図(Case1)

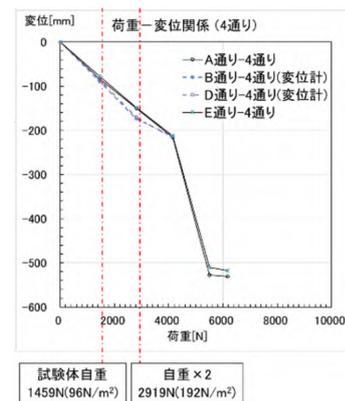


図16 荷重-変位関係(Case1: 塗料あり)

Case2では、Case1と同様に天井受けワイヤの天井板への喰い込み、天井板の野縁からの外れおよび野縁の変形などいたる所に天井面構成材の損傷が発生したが、それらが落下することはなかった(写真17左)。

図 17 に荷重－変位関係を示す。クリップ除去による初期荷重載荷からすでに荷重－変位関係が線形でなく、各点が均等に変形せず、特に 2 通りおよび 4 通りにおいて天井板が離反したためにバラバラの挙動を示した（写真 17 右）。



(A3 位置) (試験体全景)

写真 17 Case2：塗料なし 載荷ステップ 5 回目の状況

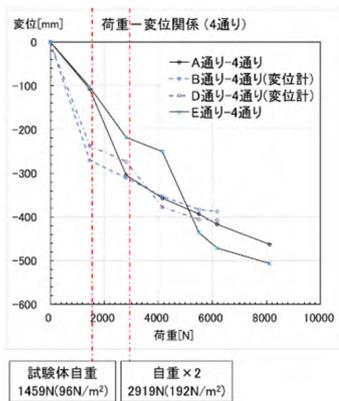


図 17 荷重－変位関係 (Case2：塗料なし)

5.3 天井ユニット試験のまとめ

繊維強化塗料あり／なしの 2 種類の試験体による天井ユニット試験を行い、繊維強化塗料の補強効果、すなわち、クリップが野縁から外れて吊ワイヤで天井板を保持する状況になっても、天井板が一体となって変形し、荷重－変位関係が線形に保たれることを確認した。

6. 振動台加振による落下再現試験

「帯塗・ワイヤタイプ」の天井落下防止効果を検証するために実物天井を模擬した試験体を振動台によって加振し、落下再現試験を行った。

6.1 振動台試験の概要

振動台試験は地震波加振によって野縁と野縁受けを接続しているクリップの外れを再現し、野縁受けから野縁および天井板を脱落させることを目的としている。試験は鴻池組技術研究所（つくば市）の 3 次元振動台（3m×3m、搭載重量 10ton、変位 ±150mm(X, Y)、±100mm(Z)、速度 ±75cm/s(X, Y)、50cm/s(Z)、加速度 ±1.0G(X, Y, Z)）により行

った。

図 18 に試験体見上げ図 (Case1) を、図 19 に試験体立面図およびセンサー配置を、写真 18 に試験体設置状況をそれぞれ示す。試験体は、鉄骨架台に吊り下げられた吊りボルト（長さ 1500mm）から野縁までの下地材は天井ユニット試験と同じで全ケース共通とし、仕上げ材を Case1 化粧せっこうボード、Case2 けい酸カルシウム板、Case3 せっこうボード 2 枚張りの 3 種類とした（表 13）。繊維強化塗料は天井板の板間（Case1 は 8 本、Case2 と Case3 は 4 本）に塗り幅 45mm、中塗りの塗り厚さ 1.0mm で施工し、試験室内（気温 30±3℃）にて Case1 と Case2 が 6 日間、Case3 は 7 日間養生を行った。天井板の端部は壁などで固定せずフリーとした。試験体は吊りワイヤ 2 スパン分の大きさであるが、連続した実天井の条件を模擬するために天井受けワイヤの端部は Case2 のみ鉄骨架台に固定した。加振波は東北地方太平洋沖地震（2011. 3. 11）での気象庁による仙台市宮城野区の観測波とし、加振方向は水平および上下の 2 方向とした（Case3 のみ水平 1 方向）。

また、クリップを外れ易くするために半数のクリップを外した状態で加振した。図 21 に示す架台、天井および振動台の 3 つの高さレベルに至ゲージ式加速度変換器をそれぞれ 3 個 (X, Y, Z) 設置して加速度を測定した。

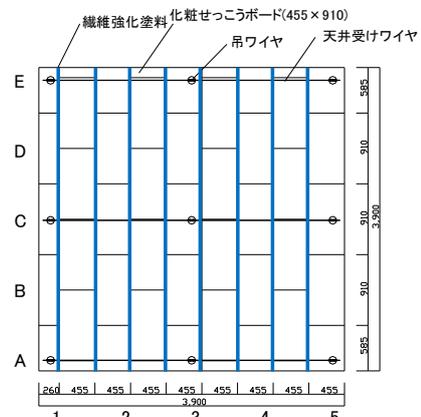


図 18 試験体見上げ図 (Case1)

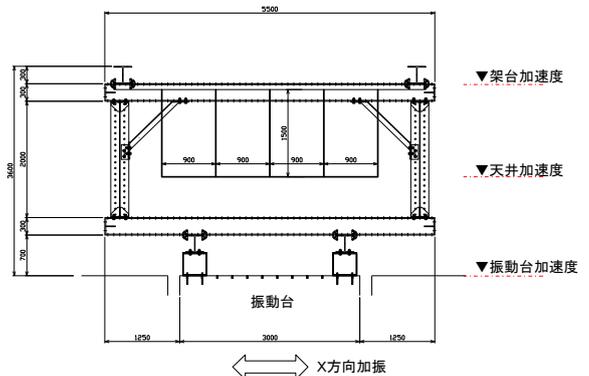


図 19 試験体立面図およびセンサー設置位置



写真 18 試験体設置状況

表 13 試験ケース

| No. | 天井板 | 天井質量 |
|--------|---|-----------------------|
| Case 1 | 化粧せっこうボード (t=9 [455×910]) | 9.5kg/m ² |
| Case 2 | けい酸カルシウム板 (t=6 [910×910]) | 8.3kg/m ² |
| Case 3 | せっこうボード2枚張り (t=12.5 [910×1820], t=9.5 [910×910]) | 18.9kg/m ² |

共通：ステンレスワイヤ 7×19、径3.5mm

6.2 振動台試験の結果

写真 19 に 3 種類の試験体の加振後の状況を示す。3 つの試験体全てで、天井受けワイヤおよび吊りワイヤによって落下衝撃荷重および天井荷重を支持する状況となった。その結果、吊りワイヤスパン中央にたわみが発生したが、天井板の床面への落下はなかった。また、補強金物周辺の天

井板に局所的な損傷が認められたものの、繊維強化塗料、補強金物およびワイヤに損傷はなく、吊りワイヤおよび天井受けワイヤ接合部のすべりも確認されてなかった。表 14 に加振中の最大加速度および落下後加振終了時の天井板最大たわみを示す。

6.3 振動台実験のまとめ

地震波加振によってクリップの外れを再現することによって天井板を脱落させ、本工法で補強した 3 種類の天井に落下衝撃荷重を作用させた。その結果全ての試験体の天井板は床面に落下することなく、また、繊維強化塗料、吊りワイヤ、天井受けワイヤ、取付け金物(部材 A、部材 B)およびボルトクリップに顕著な損傷はなく、振動台試験により本工法の有効性が確認できた。

表 14 最大加速度および天井板最大たわみ

| ケース | 加振方向 | 振動台 (cm/s ²) | | 架台 (cm/s ²) | | 天井 (cm/s ²) | 天井板たわみ (mm) | |
|-------|------|-----------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|----------------|------|
| | | X方向 | Z方向 | X方向 | Z方向 | | X方向 | 測定位置 |
| Case1 | X,Z | 1061 | 994 | 3559 | 3425 | 1168 | 174 | B2 |
| Case2 | X,Z | 1429 | 1085 | 3563 | 3440 | 3316 | 50 | E2 |
| Case3 | X | 697 | 302 | 2090 | 1191 | 640 | 40 | E2 |

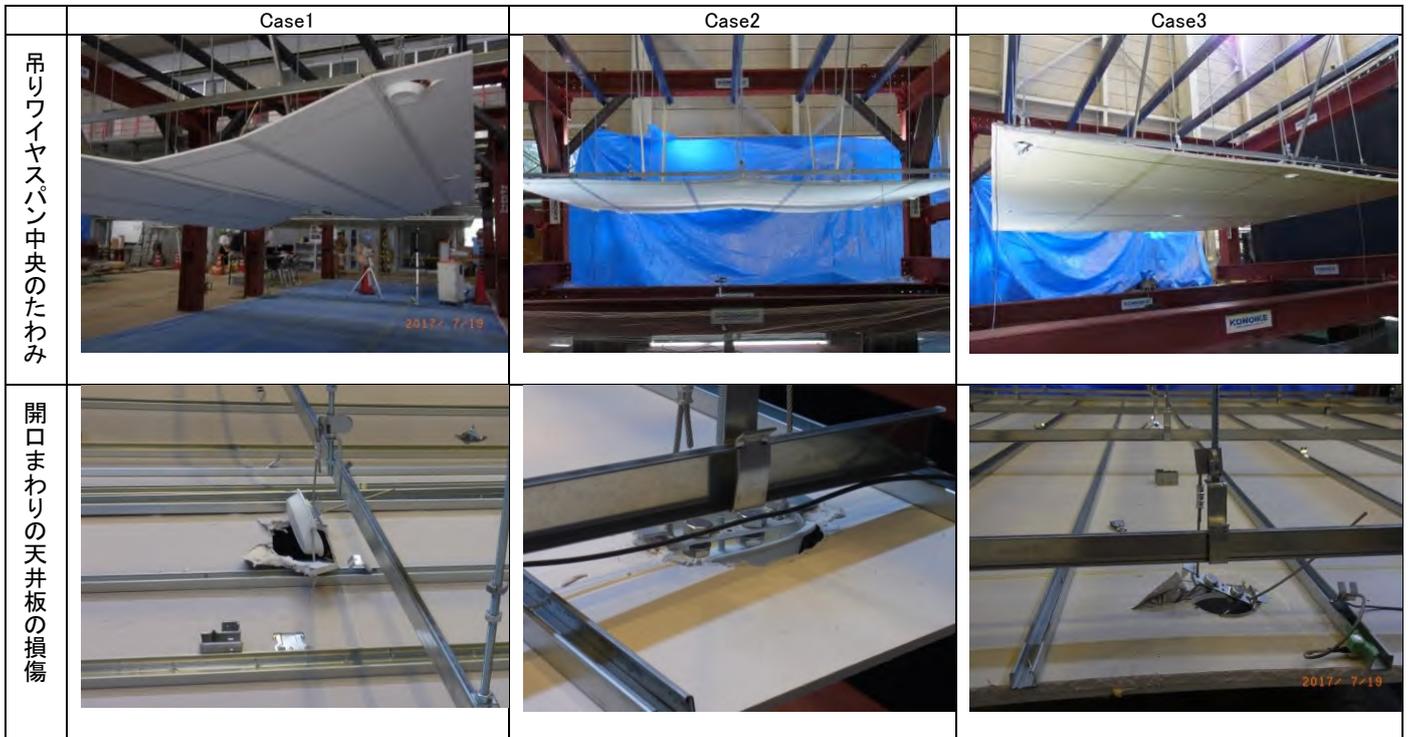


写真 19 加振後の状況

7. まとめ

既存建築物の天井落下防止工法として繊維強化塗料と落下防止用ワイヤを併用した鴻池 CSFP 工法「帯塗・ワイヤタイプ」を開発した。得られた結果を以下に示す。

- ・要素試験によって繊維強化塗料塗布部の耐力およびワイヤならびに金物から構成される落下防止措置部材の耐力を評価した。
- ・天井ユニット試験によって実大天井に本工法を適用した場合の耐力を評価し、繊維補強塗料あり／なしの2種類の試験結果を比較することにより、繊維補強塗料による天井板一体化の効果を検証した。
- ・3種類の天井板仕様の異なる試験体を対象にした振動台加振による落下再現試験を行い、落下時の衝撃荷重を支持することのできる本工法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン, 2013. 3
- 2) 高松誠・伊藤真二ほか：繊維入り強化塗料の帯状塗膜による天井補強工法の開発ーライン型システム天井の耐震補強ー(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)構造 I, 2015. 9
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 建築研究所, 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
- 4) 日本ウェザリングテストセンター:促進暴露試験ハンドブック, [I] 促進耐候性試験, 2009. 4
- 5) 環境省:紫外線環境保健マニュアル 2008
- 6) 日本建築防災協会, 国土交通省住宅局建築指導課:既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説, 2009 年改訂