

超軽量天井面材を用いた新たな天井システムの開発

その1 天井構成の説明と静的試験

超軽量天井 非剛床天井 耐震性能
面内せん断剛性 静的加力実験

正会員 ○稲葉 信子* 同 飯田 秀年 **
正会員 ティア キムチェン*** 同 元結 正次郎***

1. はじめに

近年の地震において吊り天井の落下被害がしばしば発生している。そのような背景のもと、国交省は脱落によって重大な危害を生ずるおそれがある天井、具体的には6m超の高さにある、面積200m²超、質量2kg/m²超の吊り天井を対象とする天井脱落対策に係る一連の技術基準告示を公布・施行した(平成25年国土交通省告示第771号)。この中で質量に制限を設けた理由は落下したときのインパクトを考慮したものと考えられる。天井システムの軽量化が、落下時の危険性を低減させるだけではなく、天井システムの耐震性能を向上させる効果が高いことは明らかであり、この軽量化思想のもとに天井に要求される複数の性能を保持しつつ、できるだけ軽量化を図った天井システムを著者らは提案・開発してきた。一方で、軽量部材は、落下被害時の人的被害を発生し難いとはいえ、室空間の機能を低下させる原因には十分に成り得ることから、地震後の事業継続性を達成するためには、質量の大小に関わらず天井面材等の落下は回避すべき現象であることは言うまでもなく、軽量面材を用いる天井においても地震時に健全性を保持するように設計されることが肝要である。

しかしながら、軽量天井面材を用いる天井システムの場合、面内剛性が小さく天井面が一体として挙動しない、いわゆる「非剛床天井」となり、その設計においては剛床仮定が成立すると考えられる石膏ボードなどを天井面として用いる鋼製下地在来工法天井とは異なる取り扱いが必要となるが、その具体的な耐震設計法については不明な点が多いのが現状である。そこで本報告では、軽量天井面材を用いた本天井システムの合理的な耐震設計法の構築を目標として、面内せん断剛性を静的実験により明らかにすることを目的としている。

2. 軽量面材を用いた天井システムの概要

ここで提案する天井システムは、軽量化を図ることを目的として、図1に示すように本システム用に製作したアルミ製下地フレームに軽量面材をビス留めする仕様となっている。軽量天井面材を図2に示す。本天井面材は925mm角の正方形のパネルであり、ポリエステル製タテ

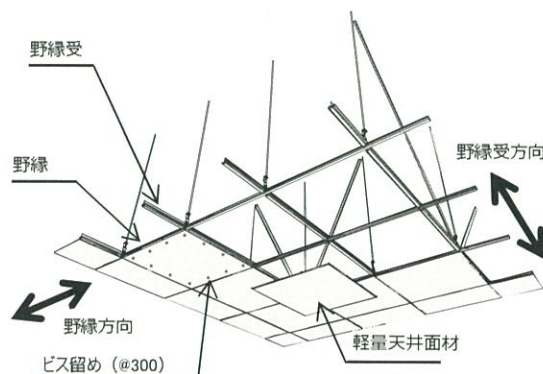


図1 天井システム全景

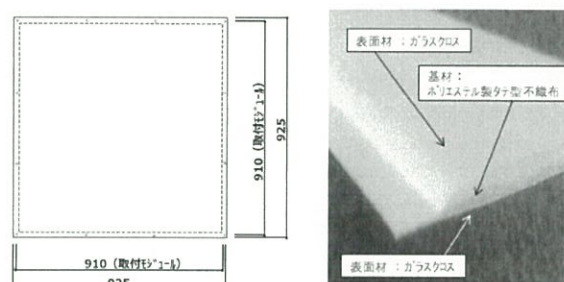


図2 軽量天井面材

表1 軽量天井面材の物性

	軽量天井面材 厚さ4.5mm	岩綿吸音板 厚さ9.0mm	吸音石膏ボード 厚さ9.5mm
質量(kg/m ²)	0.7 kg/m ²	3.0 kg/m ²	6.5 kg/m ²
熱伝導率(W/mk)	0.033	0.046	0.145
熱抵抗値(m ² k/w)	0.121	0.196	0.069
残響室法吸音率	0.5	0.61	0.29

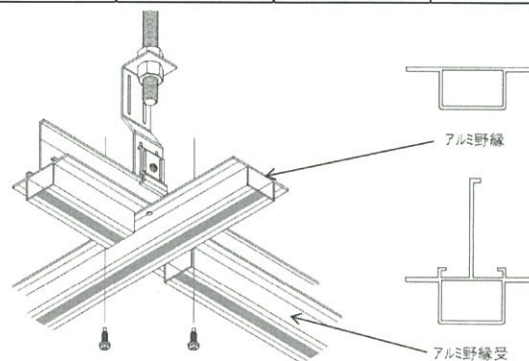


図3 下地フレーム

Suggestion of new type of ceiling system with ultra-light panel,
part 1 Explanation of system & static tests

INABA Nobuko, IIDA Hidetoshi
TEA Kimcheng, MOTOUYI Shojiro

型不織布を基材とし、両面をガラスクロスでサンドイッチした構造となっている。本天井面材の物性を表 1 に示す。質量・厚みは 0.7kg/m^2 および 4.5mm と軽く薄い面材であるが、石膏ボードや岩綿吸音板と同等の断熱性・吸音性を有する材料であることが解る。アルミ製下地フレームの断面形状および部材交差位置のディテールを図 3 に示す。野縁と野縁受けは嵌合ではなくビスにより緊結する接合形式としている。使用する材質はアルミ合金 A6063 である。5 号試験片による引張試験における荷重ひずみ関係を図 4 に、機械的性質を表 2 に示す。

3. 静的面内せん断実験

最小ユニットを用いた面内せん断実験を実施した。試験体を図 5 に示す。天井面材の影響を明らかにするために、天井面材を留め付けた試験体とアルミ製下地フレームのみの試験体を設定した。加力は、図中の a 点にて反力梁にボルトにて試験体を取り付けたうえで、b 点に万能試験機にて引張力を作用させた。

得られた実験結果を図 6 に示す。まずフレームのみの場合に着目し、極めて単純に 2 本の野縁受けを、中央集中荷重を受ける単純支持梁あるいは両端固定支持梁として剛性を求めると、

$$\text{単純支持； } K_{\text{simple}} = \frac{48EI}{L^3} \times 2 = 26.6 [\text{N/mm}] \quad (1)$$

$$\text{固定支持； } K_{\text{fix}} = \frac{192EI}{L^3} \times 2 = 106.4 [\text{N/mm}] \quad (2)$$

となり、これを図示したものが図 6 中の赤破線である。なお、 $E=65000\text{N/mm}^2$ 、 $I=25700\text{mm}^4$ 、 $L=1820\text{mm}$ として計算している。これらの結果と実験にて得られた剛性（赤線）を比較することにより、ビス接合部の固定度は単純支持と固定支持の中間程度であることが解る。次に、天井面材の有無を比較すると、天井面材がある場合の剛性（図中の黒線）は天井面材がない場合の剛性と比し 2 倍程度にまで上昇しており、天井面材の面内せん断剛性に及ぼす影響が大きいことが解る。写真 1 は、図 6 中の変位段階 A、B における天井面材の変形状況を示したものであるが、薄板にせん断力が作用するときに形成される座屈波形（しわ）が発生していることが確認される。ただし、しわが発生した後も張力場が形成されることにより、耐力が低下することなく、最終的に天井面材を留め付けているビス部での面材の破断により最大耐力は決定された。

4. まとめ

本報告では、天井に要求される複数の性能を保持しつつ、できるだけ軽量化を図った天井システムの耐震設計法を構築するための研究の一貫として、その面内せん断剛性を静的試験により明らかにした。

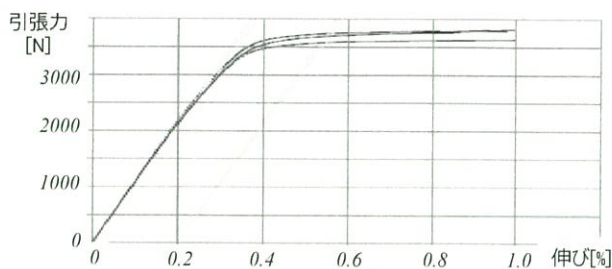


図 4 引張試験結果

表 2 アルミ製下地材機械的性質

	規格値	試験体1	試験体2	試験体3
引張強さ $[\text{N/mm}^2]$	150以上	228	241	237
降伏応力 $[\text{N/mm}^2]$	110以上	213	222	219
伸び [%]	8以上	6.9	6.3	4.1
ヤング係数 $[\text{N/mm}^2]$	68600	65476	65825	64871

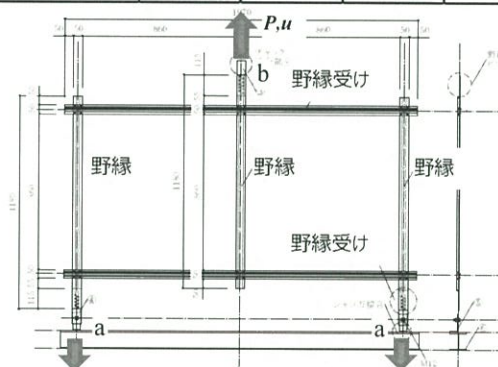


図 5 面内せん断実験用試験体

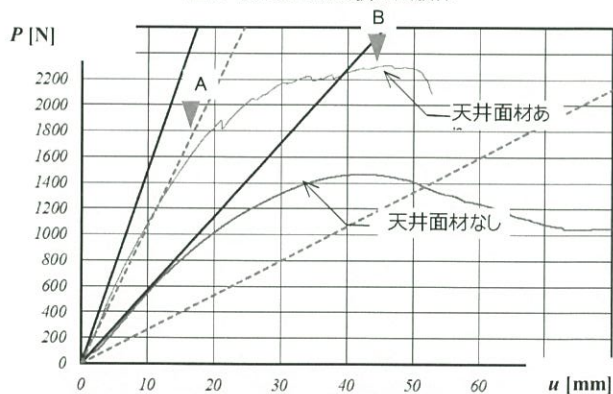


図 6 面内せん断実験結果

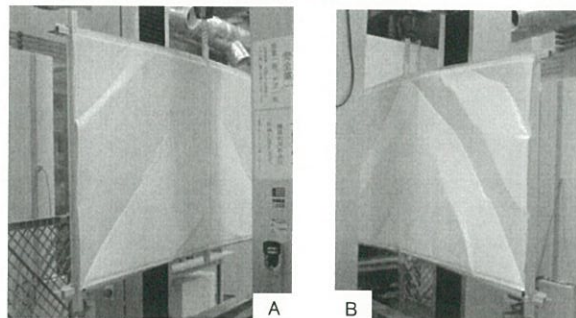


写真 1 天井面材変形状況

* 帝人フロンティア株式会社繊維資材第一部

** (株) えびす建築研究所

*** 東京工業大学 環境・社会理工学院

* TEIJIN FRONTIER CO., LTD Industrial Textiles Department I

** Ebisu Building Laboratory Co.

*** School of Environment and Society, Tokyo Institute of Tech.

超軽量天井面材を用いた新たな天井システムの開発

その2 振動台実験

正会員 ○ティア キムチェン* 同 稲葉 信子**
同 飯田 秀年*** 同 上條 楓****
同 元結 正次郎*

超軽量天井 非剛床天井 耐震性能
面内せん断剛性 振動台実験

1. はじめに

本報では、軽量天井面を用いた天井システムの動的面内せん断力を受けるときの性状を明らかにするために行った振動台実験概要およびその実験結果について述べる。

2. 振動台実験概要

図1に実験装置全体および計測項目を示す。写真1に振動台実験全景を示す。

天井試験体の平面寸法は $1.82\text{m} \times 1.82\text{m}$ ($910\text{mm} \times 910\text{mm}$ の軽量天井面 4 枚)、 $\phi 9$ の吊りボルトを 910mm 間隔で配置し、吊りボルト長は 1100mm としている。また、反力ブレースを加振方向の Y1 と Y3 に、横ずれ防止ブレースを加振直交方向の X1 と X3 に設置している。両ブレース共に、天井面の面内耐力で最大耐力が決定されるように実際の断面よりも大きなサイズ (C-40 $\times$ 20 $\times$ 7 $\times$ 1.0) を採用している。本実験では一軸の加振テーブル $4\text{m} \times 4\text{m}$ (振幅 $\pm 50\text{cm}$ 、最大加速度 1G) を用いて、野縁方向に加振した。ここでは天井面内のせん断変形時の特性を抽出することが実験の目的であることから、 548kg の付加質量を天井の中央線上に配置し、この付加質量を天井面に連結することにより、集中荷重形式の動的な外乱を与えるようにしている。なお、付加質量はスライダース上に設置されており、その摩擦係数は 0.5% 程度であった。

野縁と野縁受けの曲げおよびせん断力を測るためにひずみゲージを野縁受け (12 箇所) および野縁 (8 箇所) に、また反力ブレースにかかる軸力を測るために軸力用のひずみゲージを貼付している。加速度計は野縁の上面に 6 箇所 (加振方向) を設置している。さらに、試験体の振動台からの加振方向の相対変位を測定するために、レーザー変位計を用いて X1、X2、X3 と Y1、Y2、Y3 通りの変位を測定している。表1に加振内容を示す。入力波形はスイープ波と益城波を用いている。スイープ波は $5\text{Hz} \sim 0.5\text{Hz}$ の周波数を持つ加速度一定 (20gal、40gal、80gal) の波である。益城波は源波に対する加速度倍率 (%) をかけて加振方向に入力する。観測波を用いた理由は、天井面が健全なときに天井面の応答が応答スペクトル法により予測可能か否かを検討するためであり、そのために最大加速度値は小さな値としている。

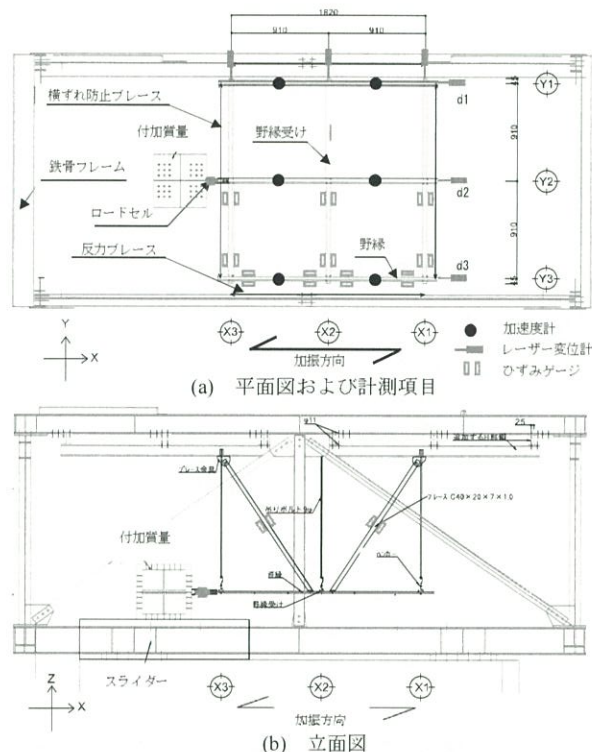


図1 振動台実験全体および計測項目

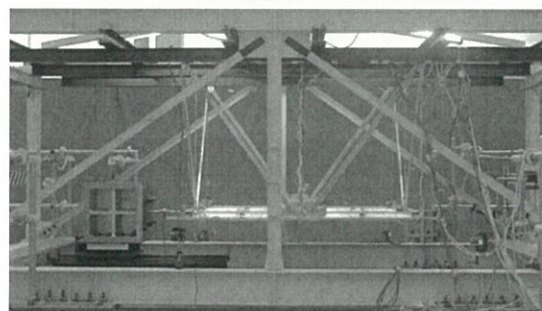


写真1 振動台実験全景

表1 加振内容

No.	入力波	加速度
1	スイープ波 5-0.5Hz	20gal
2	スイープ波 5-0.5Hz	40gal
3	2016 年熊本地震震 KiK-net 益城波-EW	源波の 3.75%
4	2016 年熊本地震震 KiK-net 益城波-EW	源波の 7.50%
5	スイープ波 5-0.5Hz	80gal

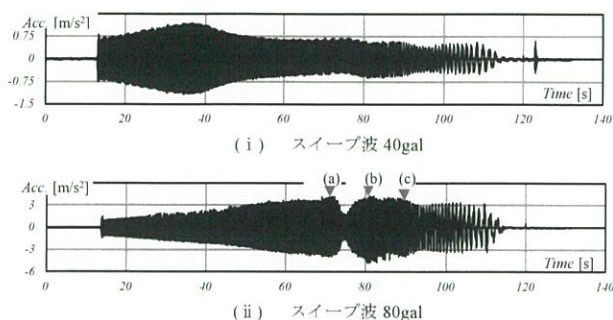


図2 天井中央部の時刻歴加速度

3. 実験結果

図2にスイープ波40gal、80galのときの天井中央部における応答加速度時刻歴を、図3に各スイープ波入力時の荷重変位関係を示す。横軸は天井の中央部の相対変位を測定するレーザー変位計の値 $(d2-(d1+d3)/2)$ であり、縦軸は付加質量と天井面との間に設置したロードセルの値である。スイープ波40galでは応答加速度および応答変位ともに極めて小さく、最大で約 1.0m/s^2 と 1.5mm であり、加速度で言えば2倍強程度の増幅であった。図2,3中の(a),(b),(c)における天井面材の落下状況を示したものが写真2である。アルミ製下地材にビス留めされたパネルがビス近傍の破断あるいは抜けの損傷が発生することにより面内せん断耐力は低下するが、下地材のみとなった(c)以降はかなりの変位レベルまで耐力を維持する様子が確認される。

また、図5は図4に示す下地材のラーメンアクションによって負担されるせん断力の推移を示したものである。図中の黒線は全せん断力(Q の半分)を、赤線は下地材が負担するせん断力 Σq_i を表している。荷重レベルが小さい領域では下地材負担率は小さく本軽量天井面材が面内せん断力に抵抗している様子が確認される。なお、この Σq_i の算定結果は、天井面が脱落した80秒以降において下地材負担分が全せん断力に等しくなっており、適切に本天井システムの挙動を表していると判断される。

次に、図6は益城波を入力したときの応答加速度時刻歴である。これを図(b)にある同波形の応答スペクトルを用いて応答予測すると、 $T=0.22\text{sec}$ であるので、最大応答加速度の値が 0.6m/s^2 として得られ、この値は図(a)における最大値と対応している。このことから、天井面の面内剛性を正しく評価することによって天井面の応答予測が正しく行われることが理解される。

4. まとめ

本報告では超軽量天井面材を用いた天井システムが動的な外乱を受ける時の面内せん断力の抵抗機構について振動台実験結果を用いて明らかにした。

謝辞 本研究の一部は、JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。

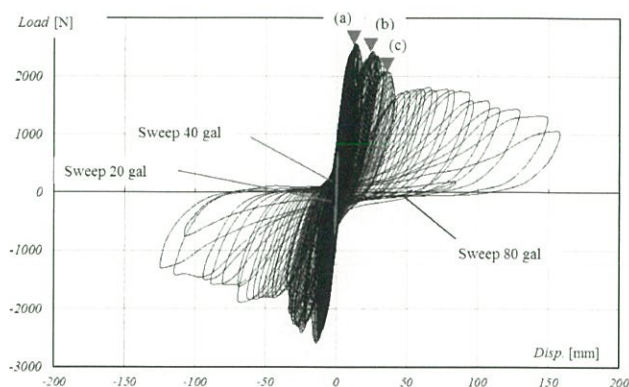


図3 入力荷重-変位関係

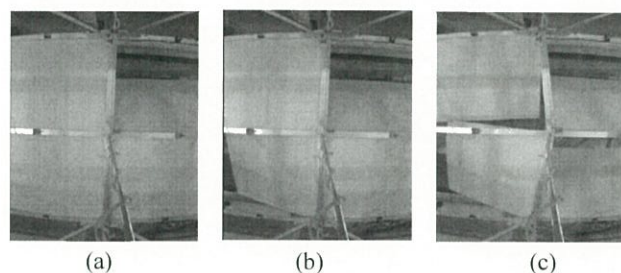


写真2 天井面の落下順番

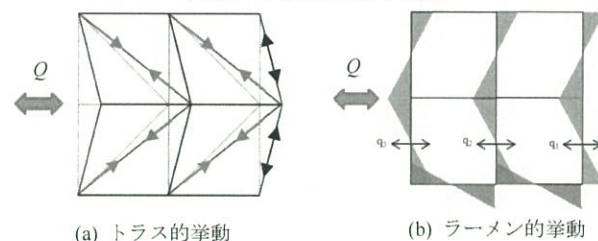


図4 面内伝達メカニズムの概念

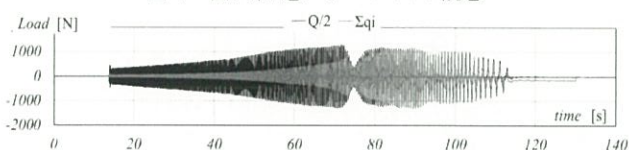
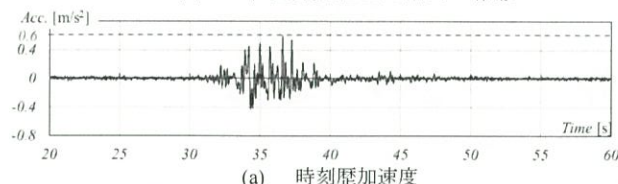
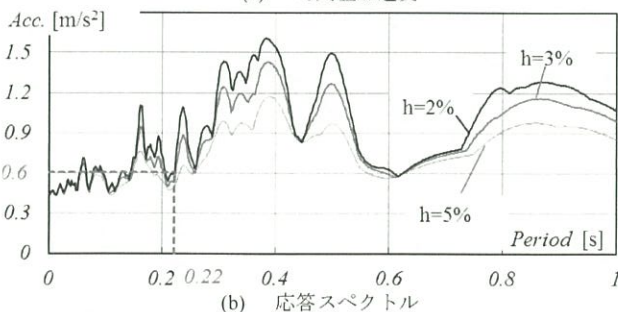


図5 下地材負担せん断力の推移



(a) 時刻歴加速度



(b) 応答スペクトル

図6 熊本地震EW源波の3.75%の応答スペクトル

*東京工業大学 環境・社会理工学院
 **帝人フロンティア株式会社繊維資材第一部
 *** (株) えびす建築研究所
 ****宇宙航空研究開発機構

* School of Environment and Society, Tokyo Institute of Tech.
 ** TEIJIN FRONTIER CO., LTD Industrial Textiles Department I
 **Ebisu Building Laboratory Co.
 ****Japan Aerospace Exploration Agency