

# 断熱サンドイッチパネルの 座屈試験および水平加力試験

Buckling test and horizontal cyclic load test of heat-insulating sandwich panel

大山 卓也\*1、江島 諒介\*2、木全 宏尚\*3、水口 一義\*4

## 1. はじめに

断熱サンドイッチパネル（ガリレイパネルクリエイト製、以下パネルと称す）は、図-1のように樹脂の枠材と金属の表面材を組み合わせ、芯材（ウレタンフォームまたはポリイソシアヌレートフォーム）を注入発泡することで一体成形したものである。発泡剤はHFO（ハイドロフルオロオレフィン）を使用しており、ノンフロン化を実現した環境配慮型の建材であり、ウレタンフォームによって高い断熱性能を発揮する。枠材は凹凸形状になっており、嵌合方式構造により、気密性・防湿性・耐久性に優れる。芯材をポリイソシアヌレートフォームとしたものは不燃材料として個別認定を取得しており、内装制限の規制を受ける一般居室にも使用可能である。

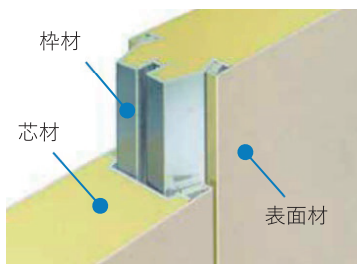


図-1 パネル構成図

一般的なボード系内装仕上げ材と違い、写真-1～4のように下地なしで組み立て可能であり、表面材は金属製で塗膜コーティングを施しているため、組み立てればそのまま仕上げとして使用できる。また、パネルの表面材は薄板であるため切断・穿孔加工が可能である。これらのことから工期短縮が図れて経済的である。

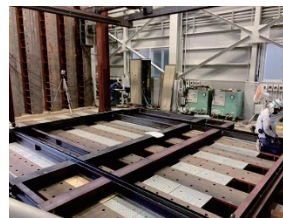


写真-1 ベース設置

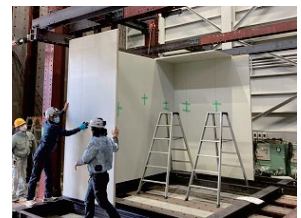


写真-2 壁パネル組立



写真-3 壁・天井パネル組立



写真-4 組立完了

パネルの使用用途として、冷凍・冷蔵分野では物流センターからコンビニバックヤード保管庫まで大小様々な規模で使用されている。近年では省エネ志向から一般作業室でも使用され、空調コスト・エネルギー削減に効果的である。また、医療・薬品・エレクトロニクス産業分野では高い清浄度と一定の環境を維持することが求められるため、気密性・断熱性を有するパネルの需要が高まっている。食品分野ではHACCPによる衛生管理が義務付けられているため、食品加工工場や給食センターといった作業室内の温度管理、ウェット環境、日々の清掃の容易さが求められる施設にもパネルが使用されている。

\*1 OHYAMA Takuya : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 構造試験室 専門役  
 \*2 EJIMA Ryosuke : ガリレイパネルクリエイト(株) 設計部 修士(環境科学)  
 \*3 KIMATA Hirohisa : ガリレイパネルクリエイト(株) 開発部 修士(物理科学)  
 \*4 MIZUGUCHI Kazunori : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 構造試験室

パネルは、下地材無しで壁あるいは天井として用いられることから、鉛直荷重あるいは水平荷重に対してパネル自身が保有する力学的性能を把握する必要がある。したがって、以下に示す3種類の試験を行い、その力学的性能について確認を行った。

- 1) パネル単体の座屈試験
- 2) パネルの水平加力試験その1
- 3) パネルの水平加力試験その2

なお、パネルの水平加力試験その1は、パネル単体の面内せん断特性、その2は、本パネルを用いた実仕様の居室を模擬した試験体についてXY方向にそれぞれ加力した際の特性を確認する試験である。本報では、その結果について報告する。

## 2. パネル単体の座屈試験

### 2.1 試験計画

#### 2.1.1 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体の形状寸法を図-2に示す。試験因子は、表面材の厚さ、側面枠材の有無、パネル厚さおよび芯材種別とし、試験体数は、各種類3体ずつの計15体とした。なお、表面材厚さbは、表面材厚さaの1.5倍程度の厚さとした。また、側面枠材は、パネル相互を嵌合させる際に用いられるプラスチック製の枠である。

表-1 試験体一覧

単位: mm						
試験体名	パネル種別	表面材厚さ	側面枠材の有無	パネル厚さt	芯材種別	パネル幅W
LA-a-A	LA型	a	有	44	ウレタンフォーム	898
LA-a-N			無			848
DF-a	DF型	b	有	100		898
DF-b						
XA-a	XA型	a	有	44	ポリイソシアヌレートフォーム	898

【共通事項】 パネル高さ: 4998mm  
表面材: 溶融亜鉛メッキ鋼板、枠材: プラスチック

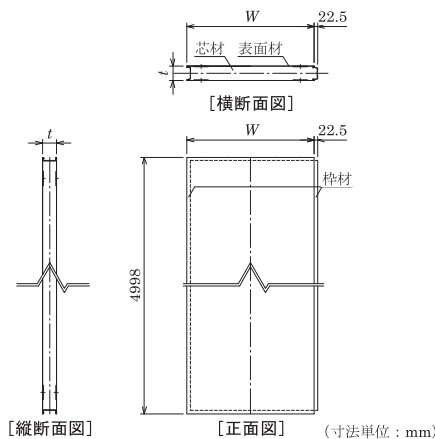


図-2 試験体の形状寸法

#### 2.1.2 試験方法

試験装置を図-3に示す。載荷方法は、JIS A 1414-2 建築用パネルの性能試験方法「5.1 面内圧縮試験」に準じて行うこととした。試験は、10MN構造物圧縮ゆげ試験機を用いて、試験体上部は治具を介してパネルの小口が自由に回転できるように、ピンで支持（以下、ピン支持と称す）し、試験体下部は治具を介してパネルの小口を面で支持（以下、固定支持と称す）して、軸方向に圧縮力Pを与えて行った。なお、試験体DF-a-No.3は試験体上部、下部ともに固定支持とした。圧縮力Pの検出には試験体下部に設置したロードセルを用いた。

載荷履歴は、単調載荷とし、加力は荷重が低下するまで行った。

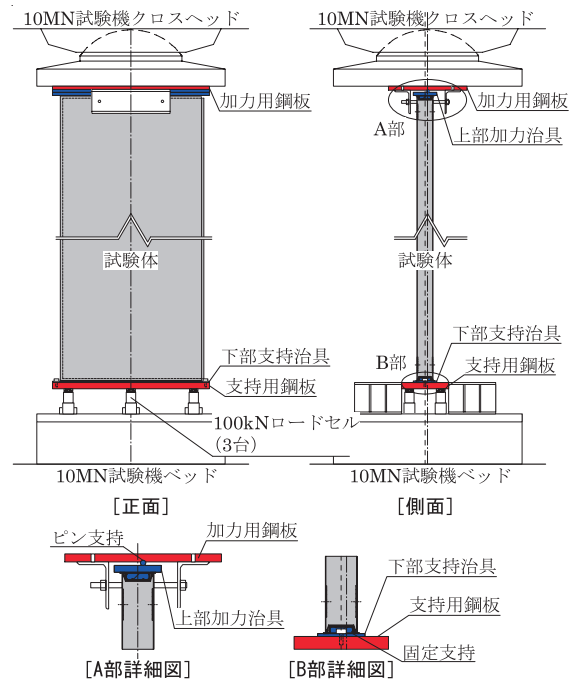


図-3 試験装置

## 2.2 試験結果

### 2.2.1 荷重変形関係および破壊状況

荷重-変形関係を図-4に、試験結果一覧を表-2に、破壊状況を写真-5に示す。ここに、図-4中のPは圧縮力、 $\delta_v$ は全体鉛直変形量、 $\delta_h$ は試験体中央位置での水平変形量を示す。

LA-a-Aでは、いずれの試験体も最大荷重 $P_{max}$ 到達前に試験体下端部の局部変形が発生した後、全体座屈が進行して $P_{max}$ に達した。その後、試験体の中央付近で表面材の局部座屈が発生し、荷重が急落した。

LA-a-N-No.1およびNo.2では、 $P_{max}$ 到達前に試験体

下端部の局部変形が発生した後、全体座屈が進行して  $P_{max}$  に達した。その後、試験体の中央付近で表面材の局部座屈が発生し、荷重が急落した。LA-a-N-No.3では、全体座屈が進行して  $P_{max}$  に達した後、試験体上端部の表面材の局部変形が発生し、荷重が急落した。

DF-a-No.1およびNo.2では、 $P_{max}$  に達した後に、試験体上端部の表面材の局部変形が発生し、荷重が低下した。DF-a-No.3では、 $P_{max}$  に達した後に、試験体上下端部の表面材の局部変形が発生し、荷重が低下した。

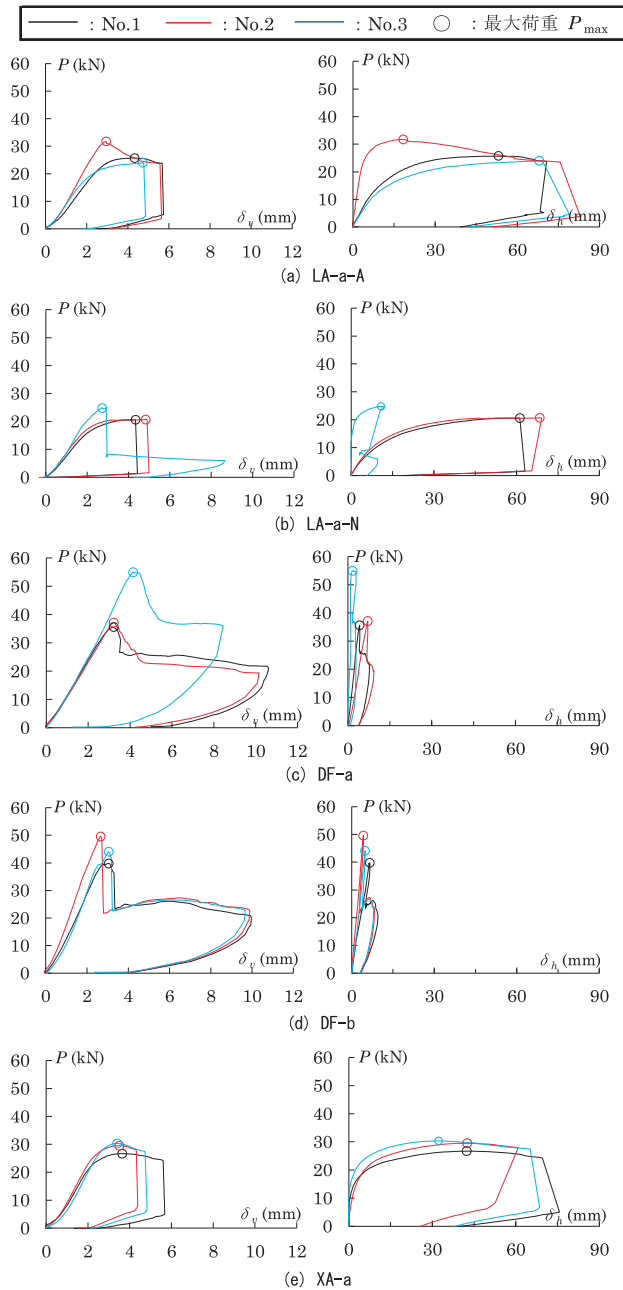


図-4 荷重－変形関係

DF-bでは、いずれの試験体も  $P_{max}$  に達した後に、試験体上端部の局部変形が発生し、荷重が低下した。

XA-aでは、 $P_{max}$  到達前に試験体上下端部の局部変形が発生した後、全体座屈が進行して  $P_{max}$  に達した。その後、試験体の中央付近で表面材の局部座屈が発生し、荷重が急落した。

2.2.2 試験因子の比較

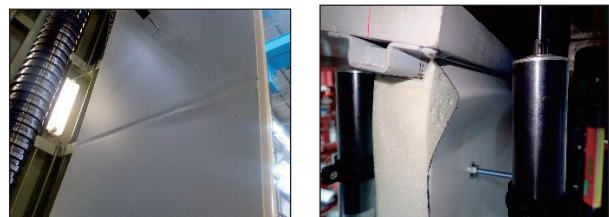
表-2に示すように、各試験体の  $P_{max}$  は、表面材あるいはパネルが厚い方が、また、枠材無しより枠材有りの方が大きな値を示した。一方、芯材種別をウレタンフォーム、ポリイソシアヌレートフォームとした試験体の  $P_{max}$  は、同程度の値となった。

各試験体の破壊状況は、パネル厚さを44mmとした試験体では、LA-a-N-No.3を除き、中央位置での表面材の局部座屈が発生し、荷重が低下した。これに対し、パネル厚さを100mmとした試験体では、上端部の表面材の局部変形が発生し、荷重が低下した。

表-2 試験結果一覧

試験体	試験結果		
	$P_{max}$ (kN)	平均値 (kN)	破壊状況
LA-a-A-No.1	25.7	27.2	試験体中央付近での局部座屈
LA-a-A-No.2	31.7		
LA-a-A-No.3	24.0		
LA-a-N-No.1	20.6	22.0	試験体中央付近での局部座屈
LA-a-N-No.2	20.7		
LA-a-N-No.3	24.8		試験体上端部の局部変形
DF-a-No.1	35.6	36.3 *	試験体上端部の局部変形
DF-a-No.2	37.1		
DF-a-No.3	54.9		
DF-b-No.1	39.8	44.5	
DF-b-No.2	49.5		
DF-b-No.3	44.1		
XA-a-No.1	26.7	28.8	試験体中央付近での局部座屈
XA-a-No.2	29.5		
XA-a-No.3	30.3		

\*: No.1, No.2とNo.3は支持条件が異なるため、No.1, No.2の平均値を示している。



(a) 中央付近の局部座屈 (b) 上端部の局部変形

写真-5 破壊状況

### 3. パネルの水平加力試験その1

#### 3.1 試験計画

##### 3.1.1 試験体

試験体一覧を表-3に、試験体の形状寸法を図-5に、ベース材の詳細を図-6に示す。

実施工では壁パネル相互は嵌合し、下部はベース材、上部は天井パネルと直接接合される。そのため、試験体は、壁パネル、天井パネル、ベース材で構成することとした。壁パネル1構面と天井パネルの組み合わせを試験対象とすると、加力時に偏心の影響が生じるため、壁パネルは2構面配置することとした。各構面についてベース材上部に3枚の壁パネルを設置し、2構面の壁パネルを天井パネルで連結した。なお、壁パネルとベース材はドリルねじで、壁パネルと天井パネルはコーチねじ(DF-SBは六角ボルト)でそれぞれ留め付けた。試験因子は、壁パネル厚さおよびベース材種別とし、試験体数は各1体の計4体とした。

表-3 試験体一覧

単位: mm

試験体名	壁パネル種別	壁パネル厚さ $t$	ベース材種別
LA-RL	LA型	44	RL (樹脂)
LA-SE			SE (樹脂)
LA-NM			NM (アルミニウム合金)
DF-SB	DF型	100	SB (樹脂)

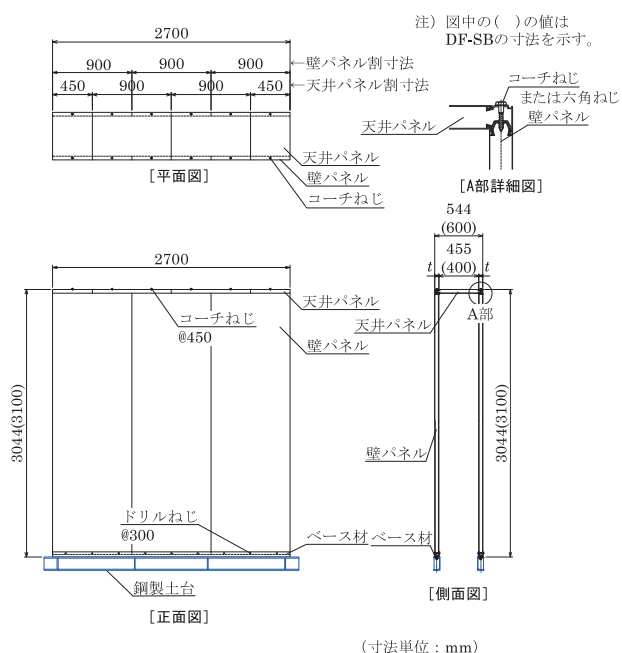


図-5 試験体の形状寸法

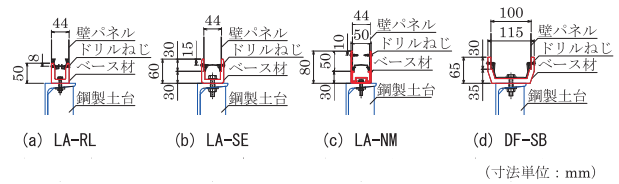


図-6 ベース材の詳細

##### 3.1.2 試験方法

試験装置を図-7に示す。試験は、試験体下部のベース材を鋼製土台にボルトで固定し、加力治具を介して試験体天井パネル芯位置に水平力 $P$ を与える方法により行った。加力には押500kN引280kNの油圧ジャッキを用い、荷重の検出には100kNロードセルを用いた。なお、試験体の構面外の移動を防止するために、振止め装置を配置した。載荷履歴は、以下に示す目標変形角 $R$ で正負繰返し載荷を3回ずつ行った後、正方向に試験体を破壊に至らすこととした。

【試験体: LA-RL, LA-SE】

$\pm 1/300, \pm 1/200, \pm 1/150, \pm 1/120, \pm 1/100$

【試験体: LA-NM】

$\pm 1/300, \pm 1/200, \pm 1/150, \pm 1/120, \pm 1/75$

【試験体: DF-SB】

$\pm 1/300, \pm 1/200, \pm 1/150, \pm 1/120, \pm 1/60$

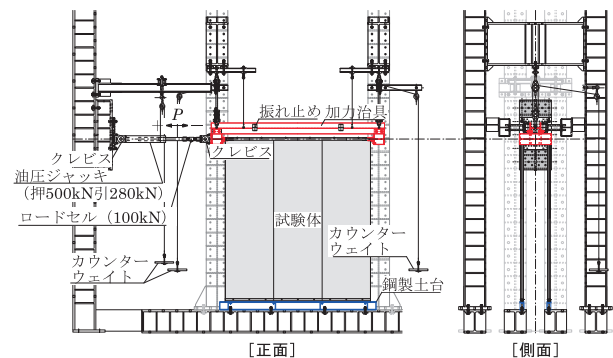


図-7 試験装置

### 3.2 試験結果

#### 3.2.1 荷重変形関係および破壊状況

水平力 $P$ -壁パネルの変形角 $R$ 関係を図-8に、破壊状況を写真-6に示す。

LA-RLでは、載荷初期から壁パネル脚部引張側での壁パネルの浮き上がりが生じ、以降壁パネルの浮き上がりが進展し、最大荷重 $P_{max}$ に達した。 $P_{max}$ 以降、壁パネ

ルベース材接合位置でのベース材の割れ、コーチねじの壁パネルからの抜け出しが発生し荷重が低下した。

LA-SEでは、荷重初期から壁パネル脚部引張側での壁パネルの浮き上がりが生じ、以降壁パネルの浮き上がりが進展し $P_{max}$ に達した。 $P_{max}$ 以降、壁パネルベース材接合位置でのベース材の割れが発生し荷重が低下した。

LA-NMでは、荷重初期から壁パネル脚部引張側での壁パネルの浮き上がりが生じた。その後、ドリルねじによる壁パネルの支圧変形が発生し $P_{max}$ に達した。 $P_{max}$ 以降、ドリルねじの壁パネルからの抜け出し、コーチねじの壁パネルからの抜け出しが発生し荷重が低下した。

DF-SBでは、荷重初期から壁パネル脚部引張側での壁パネルの浮き上がりが生じ、以降壁パネルの浮き上がりが進展し、 $P_{max}$ に達した。 $P_{max}$ 以降、壁パネルベース材接合位置でのベース材の割れが発生し荷重が低下した。

いずれの試験体も $P_{max}$ は、脚部のドリルねじベース材間の耐力で決定した。

### 3.2.2 荷重変形関係の試験体相互比較

正加力時の水平力 $P$ -パネルの変形角 $R$ 関係の包絡線を図-9に示す。

壁パネル厚さを100mmとしたDF-SBの $P_{max}$ は、壁パネル厚さを44mmとしたLA-SEより大きな値を示した。

また、アルミニウム合金製としたLA-NMの $P_{max}$ は、ベース材を樹脂製としたLA-SEより大きな値を示した。これは、ベース材を樹脂製としたLA-SEでは、ベース材の割れにより荷重が低下したのに対し、アルミニウム合金製としたLA-NMでは、ベース材が強くなったことで、ドリルねじが壁パネルから抜け出すまで荷重が低下しなかったことに起因すると考えられる。

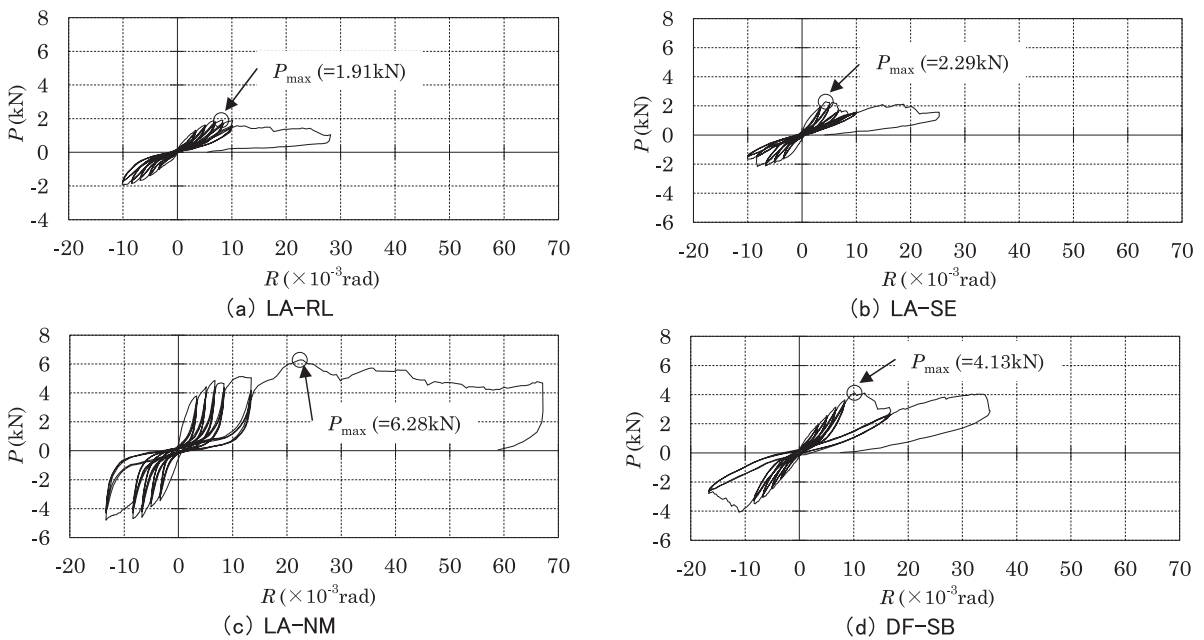


図-8 水平力 $P$ -壁パネルの変形角 $R$ 関係

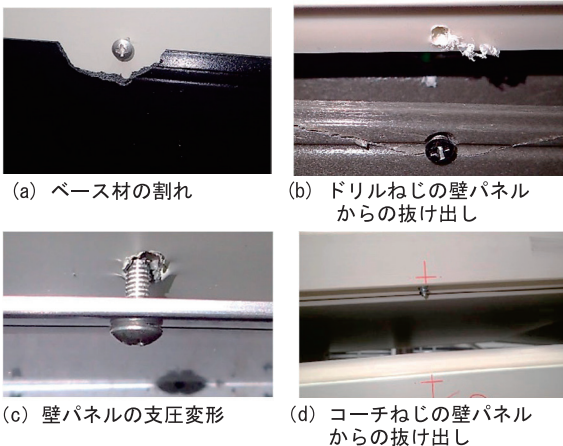


写真-6 破壊状況

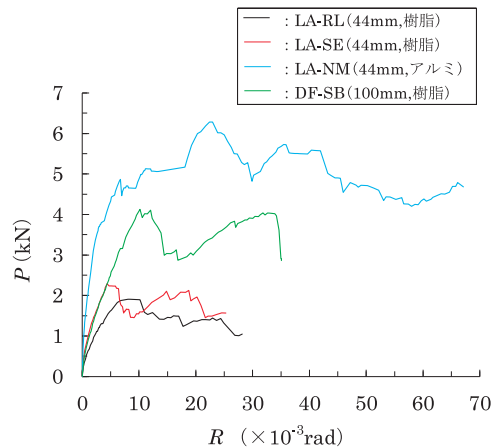


図-9  $P$ - $R$ 関係の包絡線(正加力時)

### 3.2.3 壁パネル脚部の回転角

正加力時の各壁パネル脚部の回転角  $\theta_1 \sim \theta_3$ 、壁パネルの変形角  $R$  の推移を図-10に示す。

いずれの試験体も最終変形時まで、壁パネル脚部の回転角は3枚とも同程度かつこれらの値は  $R$  とほぼ一致した。すなわち、載荷初期から壁パネルは剛体回転したため、脚部回転角  $\theta_1 \sim \theta_3$  と  $R$  がほぼ一致したと考えられる。

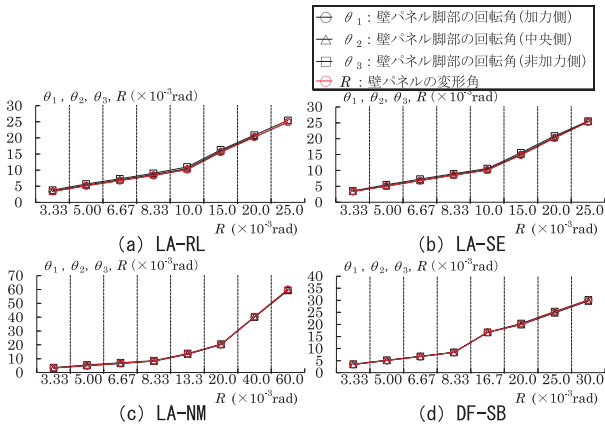


図-10 正加力時の  $\theta_1 \sim \theta_3, R$  の推移

### 3.2.4 各部材間の最大相対ずれ量の推移

試験時には、各部材間の相対ずれ量を各構面14ヶ所ずつ測定している。正加力時の各部材間の最大相対ずれ量の推移を図-11に示す。この相対ずれ量を、天井パネル-壁パネル間、壁パネル相互間、壁パネル-ベース材間に分類し、それぞれの相対ずれ量の中の最大値を各部の最大相対ずれ量と定義した。

壁パネル相互間の最大相対ずれ量は、いずれの試験体も壁パネルの変形角  $R$  の増加に伴い、増大した。一方、天井パネル-壁パネル間および壁パネル-ベース材間の最大相対ずれ量は、いずれの試験体も、 $R$  の増加に係わらず概ね同程度の値で推移した。

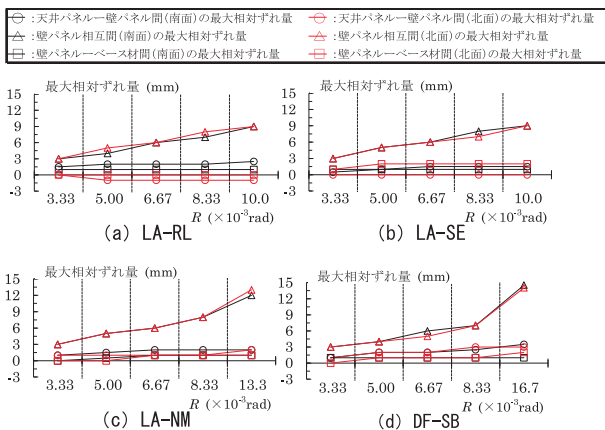


図-11 正加力時の各部材間の最大相対ずれ量の推移

## 4. パネルの水平加力試験その2

### 4.1 試験計画

#### 4.1.1 試験体

試験体は、本パネルを用いた実仕様の居室を模擬した形状とした。

試験体一覧を表-4に、試験体の形状寸法を図-12、図-13に、ベース材の詳細を図-14に、天井補強梁の詳細を図-15に示す。

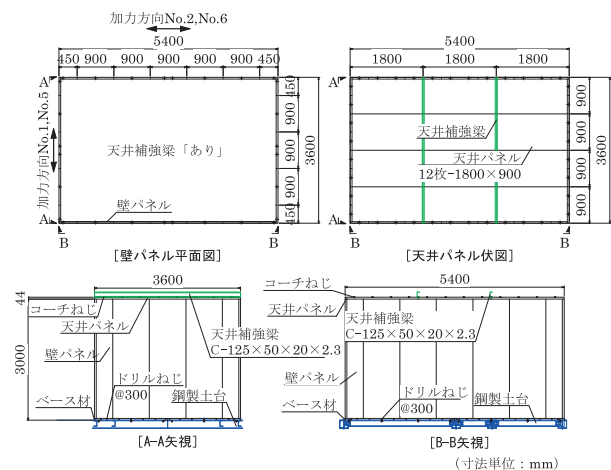
試験体は、壁パネル、天井パネル、ベース材等で構成されており、壁パネルとベース材はドリルねじで、壁パネルと天井パネルはコーチねじでそれぞれ留め付けた。

試験因子は、ベース材種別、天井パネル長手の方向、天井補強梁の有無、試験体サイズとし、試験体数は各1体の計6体とした。なお、天井補強梁は、天井パネル相互を連結し、天井面の剛性を高めるための部材である。

表-4 試験体一覧

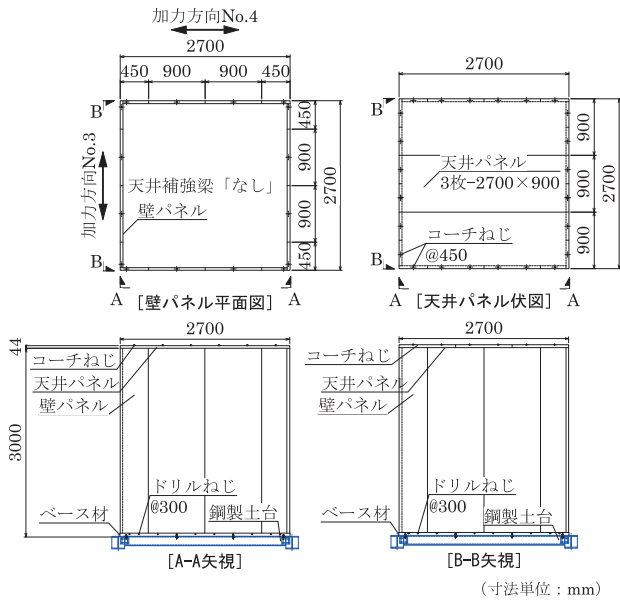
試験体名	ベース材種別	天井パネル長手の方向	天井補強梁の有無	サイズ		
				W	D	H
No.1	SE (樹脂)	加力直交	有	3600	5400	3000
No.2		加力平行	有	5400	3600	
No.3		加力直交	無	2700	2700	
No.4	加力平行	無	2700	2700		
No.5	NM (アルミニウム合金)	加力直交	有	3600	5400	
No.6		加力平行	有	5400	3600	

【共通事項】 パネル形式：LA型、パネル厚さ：44mm



(No.1, No.2, No.5, No.6)

図-12 試験体の形状寸法



(No.3, No.4)

図-13 試験体の形状寸法

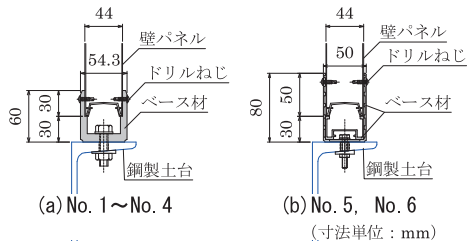


図-14 ベース材の詳細

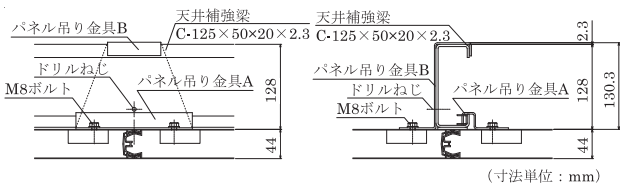


図-15 天井補強梁の詳細

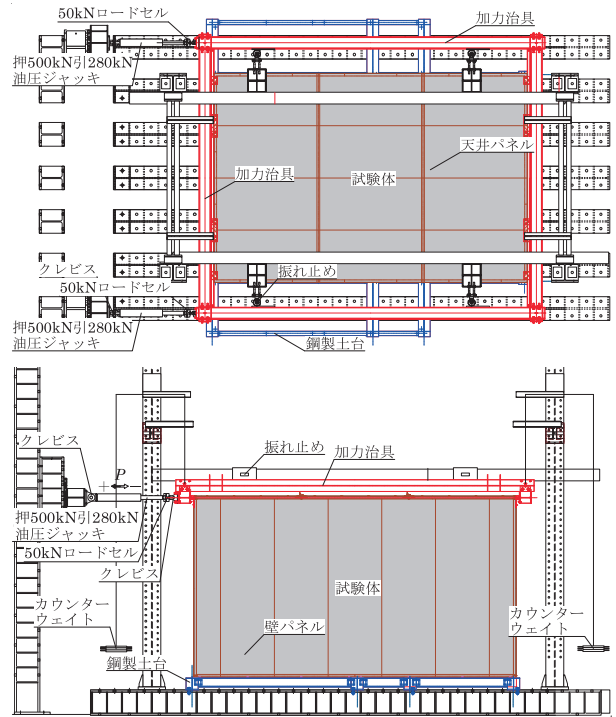


図-16 試験装置

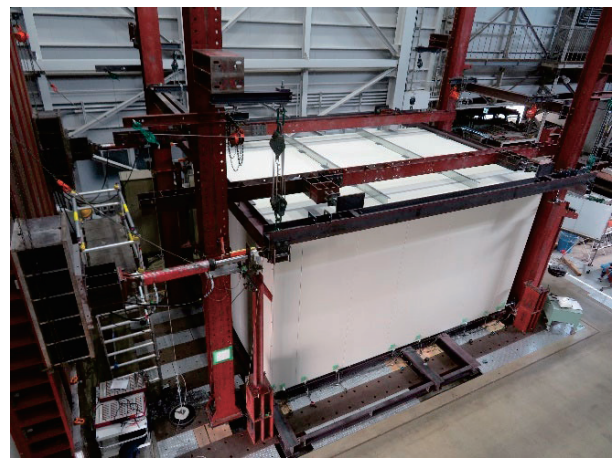


写真-7 試験装置

#### 4.1.2 試験方法

試験装置を図-16、写真-7に示す。試験は、試験体下部のベース材を鋼製土台にボルトで固定し、加力治具を介して試験体天井パネル芯位置に水平力 $P$ を与える方法により行った。加力には押500kN引280kNの油圧ジャッキを2台用い、荷重の検出には100kNロードセルを用いた。なお、試験体の構面外の移動を防止するために、振止め装置を配置した。

載荷履歴は、目標変形角 $R = (1/300, 1/200, 1/150, 1/120, 1/100)$  radで、各3サイクルずつの正負繰返し載荷を行った後、正方向に $R = 1/15$  radまで載荷を行うこととした。

#### 4.2 試験結果

##### 4.2.1 荷重変形関係

水平力 $P$ -壁パネルの変形角 $R$ 関係を図-17に、破壊状況を写真-8に示す。

No.1~No.4では、載荷初期から壁パネル脚部引張側での壁パネルの浮き上がりが生じた。以降、壁パネルの浮き上がりが進展し、壁パネル-ベース材接合位置でのベース材の割れが生じ、最大荷重 $P_{max}$ に達した。 $P_{max}$ 以降、壁パネル-ベース材接合位置でのベース材の割れが随所で生じ、荷重が低下した。その後、コーチねじの壁パネルからの抜け出しが生じた。

No.5, No.6では、荷重初期から壁パネル脚部引張側での壁パネルの浮き上がりが生じ、以降壁パネルの浮き上がりが進展し、ドリルねじによる壁パネルの支圧変形が確認された。その後、随所で支圧変形が進展し、コーチねじの壁パネルからの抜け出し、ドリルねじの壁パネルからの抜け出しが生じたが、荷重は上がり続け、最大荷重 $P_{max}$ に達した。その後、ドリルねじの壁パネルからの抜け出しが随所で生じ、荷重が低下した。

いずれの試験体も $P_{max}$ は、脚部のドリルねじベース材間の耐力で決定した。

4.2.2 荷重変形関係の試験体相互比較

正加力時の水平力 $P$ -パネルの変形角 $R$ 関係の包絡線を図-18に示す。

ベース材をアルミニウム合金製としたNo.5, No.6の

$P-R$ 関係初期剛性および $P_{max}$ は、ベース材を樹脂製としたNo.1, No.2に対して、いずれも大きな値を示した。

また、ベース材を樹脂製、試験体サイズを2700mm×2700mmとし、天井パネルの長手方向を加力直交方向としたNo.3は、天井パネルの長手方向を加力平行方向としたNo.4に対して、初期剛性および $P_{max}$ とも上回った。

これに対し、試験体サイズを5400mm×3600mmとしたNo.1, No.2, No.5, No.6において、天井パネルの長手方向を加力直交方向としたNo.1, No.5では、天井パネルの長手方向を加力平行方向としたNo.2, No.6に対して初期剛性が下回った。これは、No.2およびNo.6の方が、No.1およびNo.5よりも加力構面内の壁パネルの枚数およびベース材と壁パネルとのドリルねじの留め付け箇所数が多い点とその要因として考えられる。

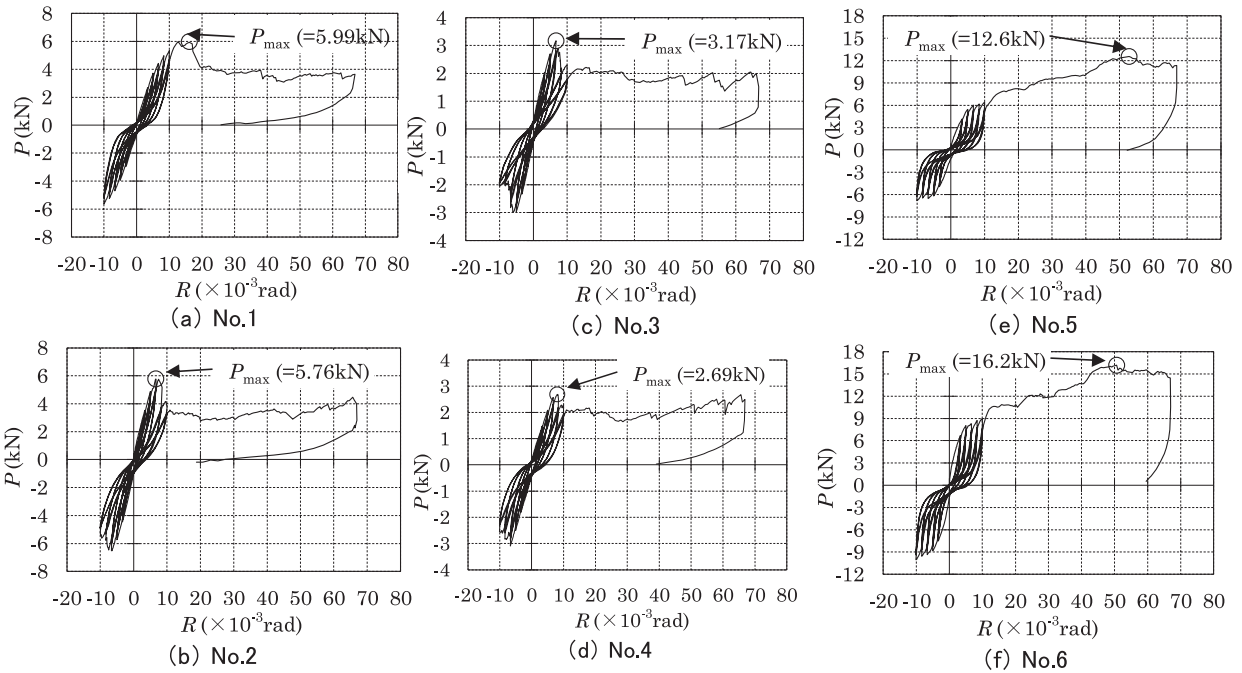


図-17 水平力 $P$ -壁パネルの変形角 $R$ 関係

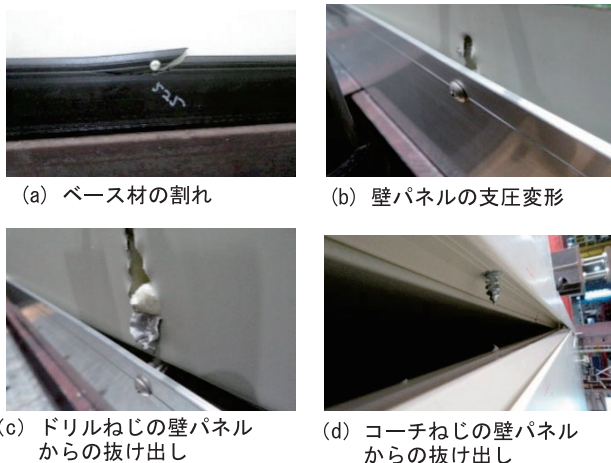


写真-8 破壊状況

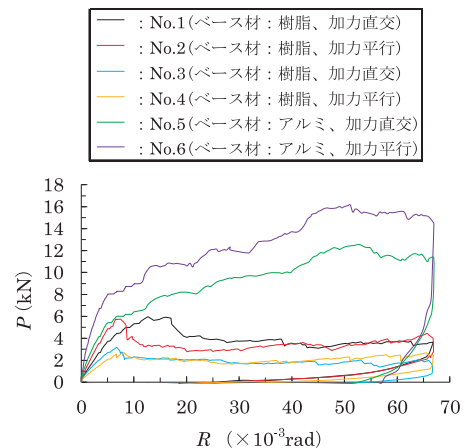


図-18  $P-R$ 関係の包絡線(正加力時)



### 4.2.3 壁パネル脚部の回転角

正加力時の各壁パネル脚部の回転角  $\theta_1 \sim \theta_3$ 、壁パネルの変形角  $R$  の推移を図-19に示す。

いずれの試験体も最終変形時まで、壁パネル脚部の回転角は加力側、中央側、非加力側において同程度かつこれらの値は  $R$  とほぼ一致した。すなわち、载荷初期から壁パネルは剛体回転したため、脚部回転角  $\theta_1 \sim \theta_3$  と  $R$  がほぼ一致したと考えられる。

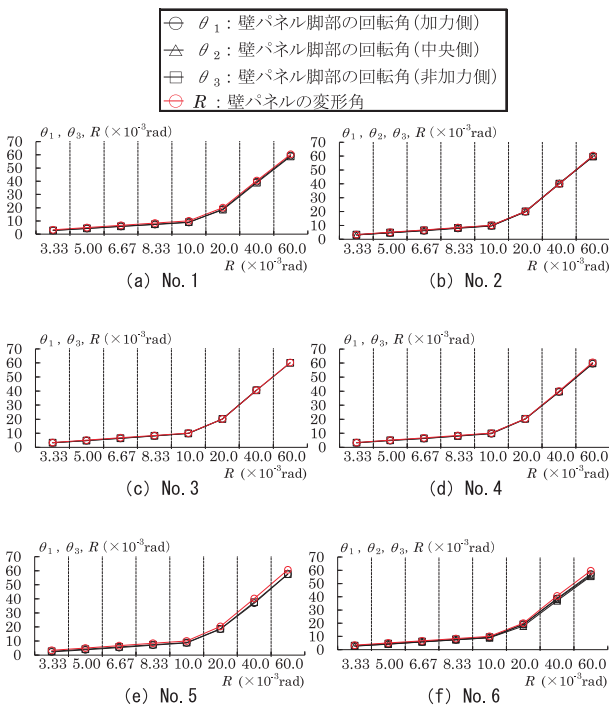


図-19 正加力時の  $\theta_1 \sim \theta_3$ ,  $R$  の推移

### 4.2.4 各部材間の最大相対ずれ量の推移

試験時には、各部材間の相対ずれを各構面で測定している。正加力時の各部材間の最大相対ずれ量の所定時推移を図-20に示す。この相対ずれ量を、天井パネルー壁パネル間、壁パネル相互間、壁パネルーベース材間に分類し、それぞれの相対ずれ量の中の最大値を各部の最大相対ずれ量と定義した。

壁パネル相互間の最大相対ずれ量は、いずれの試験体も壁パネルの変形角  $R$  の増加に伴い増大した。一方、天井パネルー壁パネル間および壁パネルーベース材間の最大相対ずれ量は、いずれの試験体も、 $R$  の増加に係わらず概ね同程度の値で推移した。

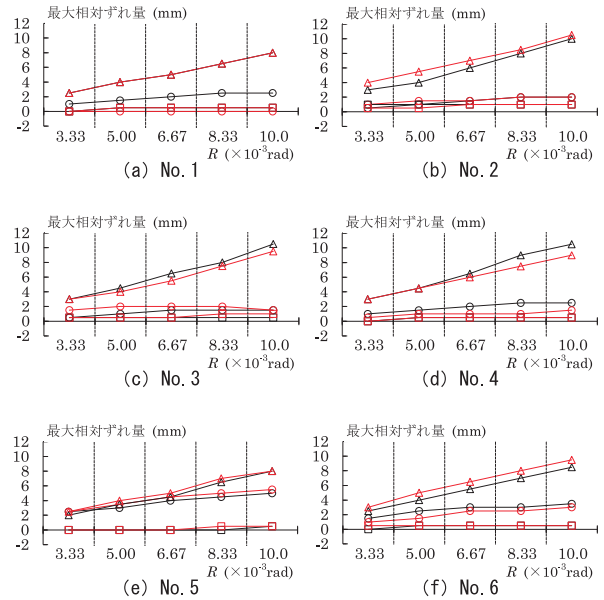
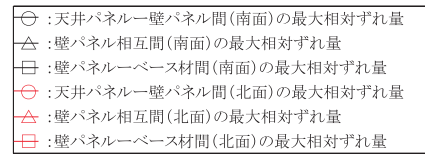


図-20 正加力時の各部材間の最大相対ずれ量の推移

## 5. まとめ

本報では、パネルを用いた3種類の試験を行い、以下の知見が得られた。

#### (1) パネル単体の座屈試験

- ・最大荷重に到達するまでに、パネル厚さを44mmとした試験体では、全体座屈が進行したが、100mmとした試験体では、全体座屈は進行しなかった。
- ・最大荷重は、パネル厚さを44mmとした試験体では、全体座屈進行後の中央付近での表面材の局部座屈、100mmとした試験体では、上端部の表面材の局部変形により決定した。
- ・各試験体の最大荷重は、表面材あるいはパネルが厚い方が、また、枠材無しより枠材有りの方が大きな値を示した。一方、芯材種別をウレタンフォーム、ポリイソシアヌレートフォームとした試験体の最大荷重は、同程度の値となった。

#### (2) パネルの水平加力試験その1

- ・いずれの試験体も最大荷重は、脚部のドリルねじーベース材間の耐力で決定した。
- ・壁パネル厚さを100mmとしたDF-SBの最大荷重は、壁パネル厚さを44mmとしたLA-SEより大きな値を示した。
- ・ベース材をアルミニウム合金製としたLA-NMの最

大荷重は、ベース材を樹脂製としたLA-SEより大きな値を示した。これは、ベース材を樹脂製としたLA-SEでは、ベース材の割れにより、荷重が低下したのに対し、アルミニウム合金製としたLA-NMでは、ベース材が強くなったことで、ドリルねじが壁パネルから抜け出すまで、荷重が低下しなかったことに起因すると考えられる。

### (3) パネルの水平加力試験その2

- ・いずれの試験体も最大荷重は、脚部のドリルねじ-ベース材間の耐力で決定した。
- ・ベース材をアルミニウム合金製としたNo.5, No.6の*P-R*関係初期剛性および最大荷重は、ベース材を樹脂製としたNo.1, No.2に対して、いずれも大きな値を示した。
- ・ベース材を樹脂製、試験体サイズを2700mm×2700mmとし、天井パネルの長手方向を加力直交方向としたNo.3は、天井パネルの長手方向を加力平行方向としたNo.4に対して、初期剛性および最大荷重とも上回った。これに対し、試験体サイズを5400mm×3600mmとしたNo.1, No.2, No.5, No.6において、天井パネルの長手方向を加力直交方向としたNo.1, No.5では、天井パネルの長手方向を加力平行方向としたNo.2, No.6に対して初期剛性が下回った。これは、No.2およびNo.6の方が、No.1およびNo.5よりも加力構面内の壁パネルの枚数およびベース材と壁パネルとのドリルねじの留め付け箇所数が多い点とその要因として考えられる。

以上より、鉛直荷重あるいは水平荷重に対して、断熱サンドイッチパネル自身が保有する力学的性能を確認することができた。

### 【執筆者】



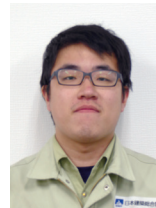
\*1 大山 卓也  
(OHYAMA Takuya)



\*2 江島 諒介  
(EJIMA Ryosuke)



\*3 木全 宏尚  
(KIMATA Hirohisa)



\*4 水口 一義  
(MIZUGUCHI Kazunori)