

金属パネルを用いた1ユニットの非構造外壁の変形追従性能

DEFORMATION CAPACITY OF EXTERIOR WALL USING METAL PANEL

黒澤 未来^{*1}, 吉敷 祥一^{*2}

Miku KUROSAWA and Shoichi KISHIKI

In Japan, non-structural exterior walls consisted of metal panels are widely used for low- and medium-rise buildings. It is important to experimentally verify that the exterior walls can follow the story drift of the structural frame during a major earthquake without damage or falling off.

In this paper, in-plane loading tests were conducted on one unit of non-structural exterior walls using metal panels to confirm the deformation following capacity when subjected to large earthquakes. In addition, the ultimate state corresponding to the falling out of the metal panels was observed.

Keywords : Metal panel, Non-structural exterior wall, Deformation following capacity, Story drift, In-plane loading

金属パネル, 非構造外壁, 変形追従性能, 層間変形角, 面内載荷

1. はじめに

アルミニウム等の金属板を箱形に折り曲げ加工した金属パネルは、意匠性に優れることから中低層建築物における外装パネルとして広く採用されている¹⁾。金属パネルは、取り付け金物であるファスナ、下地鋼材である胴縁等によって支持され、非構造外壁(以下、金属パネル外壁(Fig. 1))を構成する。金属パネル外壁は比較的軽量であることから、地震時には自重に起因する慣性力の影響は小さく、面内方向の層間変形に対する追従性能が求められる。現行の設計では、層間変形角1/300までほとんど補修の必要なしに継続使用が可能であること²⁾、層間変形角1/150まで脱落しないこと³⁾が目標である。

一方、外壁が取り付け構造躯体に着目すると、建築基準法施行令第82条の2では、高さ13mを超える鉄骨造建築物に対して、中地震時に生ずる層間変形角の制限として1/200を定めている。ただし、金属板、ボード類、その他これに類する材料を用いた外装パネルが取り付けの場合、外装パネルの破損や脱落に対する安全性が経験的に確認されていることから、層間変形角の制限値は1/120まで緩和できるとしている³⁾。また、既往の研究⁴⁾では、中低層鉄骨造建築物に対して、大地震時に生ずる層間変形角が1/50程度に達することを予測している。これらは、金属パネル外壁が上述した設計目標を超える強制変形を受ける可能性があることを意味している。地震後、構造躯体に損傷がなくても外壁の破損や脱落によって建築物の機能が損なわれることのないように、外壁の各種損傷状態に基づく変形限界を把握しておくことは重要であると考えている。

GRC(ガラス繊維補強セメント)パネルやECP(押出成形セメント

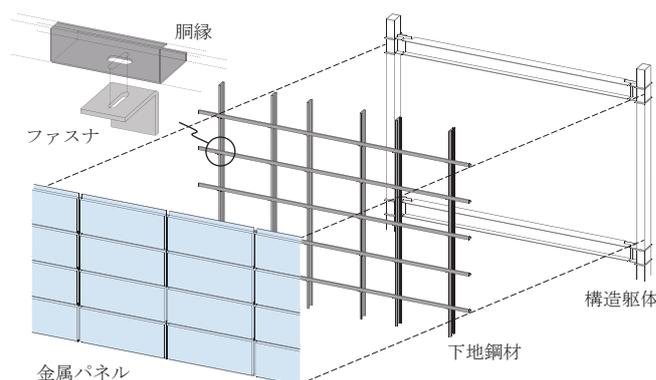


Fig. 1 金属パネルを用いた非構造外壁の構成

板)は、スライド方式あるいはロッキング方式によって地震時に生ずる強制変形に追従することを想定している⁵⁾。また、パネルの変形追従に加えて、下地鋼材の局所的な変形が強制変形を吸収することが確認されている^{6),7)}など。一方、金属パネル外壁をはじめ経験的に変形追従性能が認められている外壁では、外装パネルの変形追従方式および外壁全体の変形追従機構が明確に提示されていないことがある。以下に、中低層鉄骨造建築物における代表的な乾式外壁に採用される外装パネルの取り付け方法と、想定される変形追従機構を記す。また、文献5), 8), 9)を参考に、横張り工法による外装パネルの取り付け方法の概要をTable1に示す。

【変形追従が胴縁・シーリングによるもの】

(a) ALC(軽量気泡コンクリート)薄形パネル, (b) 繊維強化セメン

*1 東京工業大学 科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター 助教・博士(工学)

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター 教授・博士(工学)

Assistant professor, Multidisciplinary Resilience Research Center, I.I.R., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Professor, Multidisciplinary Resilience Research Center, I.I.R., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Table1 横張り工法による各種外装パネルの取り付け方法

名称	(a) ALC薄形パネル	(b) 繊維強化セメント板(スレート)	(c) 鋼板製外壁材(角波(重ね形))
変形追従	胴縁、シーリングの変形		
パネルの取り付け方法			
名称	(d) 窯業系サイディング	(e) 複合金属サイディング	(f) 金属サンドイッチパネル
変形追従	スライド方式に準ずる		
パネルの取り付け方法			
名称	(g) GRC(ガラス繊維補強セメント)パネル	(h) ECP(押出成形セメント板)	(i) 金属パネル
変形追従	スライド方式		
パネルの取り付け方法			

ト板(スレート(フレキシブル板)), および(c) 鋼板製外壁材(角波(重ね形))は、タッピンねじのねじ山をもつドリルねじ(以下、ドリルねじ)あるいはドリリングタッピンねじ(以下、タッピンねじ)によって縦胴縁に留め付ける。変形追従機構に関しては明確な記述が見受けられないが、パネル自体の面内剛性が大きいことから、縦胴縁やシーリングの変形が主であると考えられる。

【変形追従がスライド方式に準ずるもの】

(d) 窯業系サイディングは、留付金具を用いる金具留め工法が標準的である。留付金具は、パネルの上部に十分かみ合わせてからタッピンねじを用いて縦胴縁に固定する。(e) 複合金属サイディングおよび(f) 金属サンドイッチパネルは、ドリルねじあるいはタッピンねじによってパネルの上部を縦胴縁に留め付ける。変形追従機構に関しては明確な記述が見受けられないが、パネル相互のはめ込み部を固定しないことから、スライド方式に準ずるパネルの変形追従が主であることが予想される。

【変形追従がスライド方式によるもの】

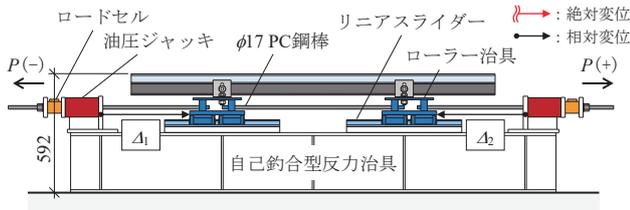
(g) GRC(ガラス繊維補強セメント)パネルおよび(h) ECP(押出成

形セメント板)は、胴縁を用いず、パネルの上下部をそれぞれファスナおよびZクリップによって支持する。ファスナおよびZクリップのボルト孔を水平方向の長孔とすることで、スライド方式によるパネルの変形追従が期待できる。

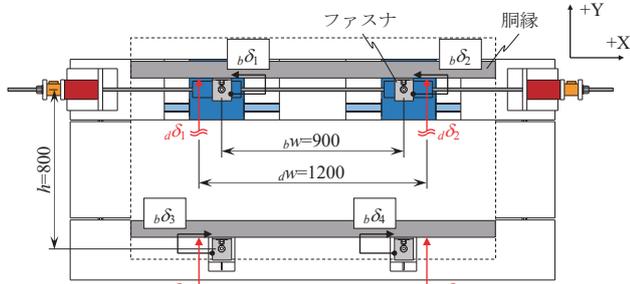
【金属パネル】

(i) 金属パネルは、ドリルねじによって横胴縁に取り付ける。変形追従機構に関しては明確な記述が見受けられないが、パネルの下部のねじ孔を水平方向の長孔としていることで、スライド方式に準ずるパネルの変形追従が予想される。

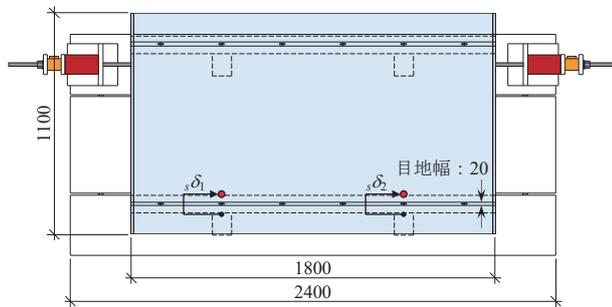
外壁全体の変形追従機構や損傷状態を明らかにすることは、地震後の外壁に対する補修の必要性や脱落の危険性を判断する上で非常に重要である。本研究では、上述した乾式外壁のうち、地震時を想定した実験的研究例のない金属パネル外壁に焦点を当て、1ユニットの外壁の面内載荷実験を実施する。実験から、外壁全体の変形追従機構を確認するとともに、外壁各部の損傷状態を分析し、ほとんど補修の必要なしに継続使用が可能である変形限界、外壁の脱落や重要な機能の低下が生じない変形限界を明確にすることを目的とする。



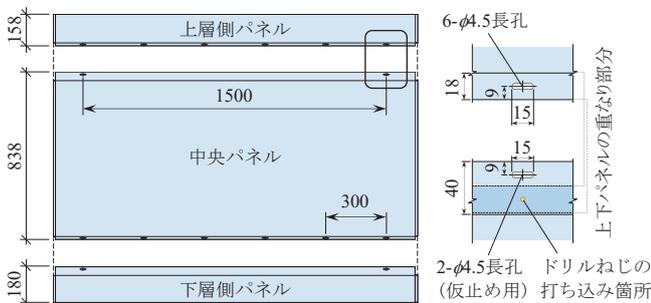
(a) 加力部と層間変形の計測位置



(b) 胴縁とボルト接合部における変形の計測位置



(c) ねじ接合部における変形の計測位置



(d) 金属パネルの詳細

Fig. 2 試験体の詳細とセットアップ

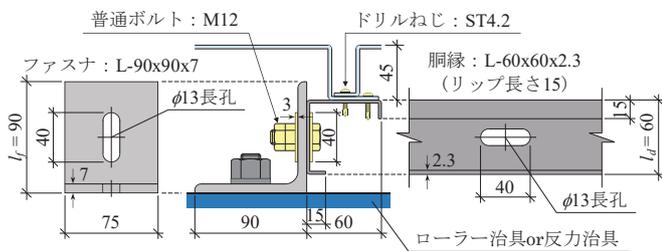


Fig. 3 ボルト接合部の詳細

2. 面内載荷実験の計画

本章ではまず、1ユニットの金属パネル外壁の面内載荷実験の計画について記す。

Table2 面内載荷実験に使用したパネルの材料特性

試験体名称	パネルの材質	t	σ_y	σ_u	E
		mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
A1100	純アルミニウム (A1100P H14)	2.5	102	112	52465
A3003	アルミニウム合金Al-Mn系 (A3003P H24)	2.5	122	137	61573
S0.8	溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 (SGMCC)	0.8	288	318	162957
S2.3	溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 (SGMCC)	2.3	221	313	196584

2.1 試験体の概要

試験体は、中低層建築物への施工を想定した金属パネル外壁である。試験体の概要を、セットアップと計測計画を兼ねてFig. 2に示す。金属パネルは、高さ838mm、幅1,800mmの1枚のパネルを対象とし、実際のねじ接合部を再現するために試験対象であるパネル(中央パネル)の上下部に取り付くパネル(上層側パネル, 下層側パネル)を部分的に製作して接合する(Fig. 2(d))。使用した4種類のパネルについて、JIS-13B号引張試験片を用いた材料試験により得られた材料特性をTable2に示す。

パネルを取り付ける下地鋼材は、2本の胴縁(リップ付き等辺山形断面L-60x60x2.3(リップ長さ15))と4台のファスナ(等辺山形断面L-90x90x7)である。ファスナと胴縁間のボルト接合部の詳細をFig. 3に示す。ボルト接合部には、普通ボルト(M12, SUS304(A2-70))を使用する。ボルト孔は、ファスナを面外方向、胴縁を面内方向の長孔として躯体の施工誤差を吸収する。ボルトを締め付けた後に風荷重によってボルト接合部のすべりが生ずることのないように、ゆるみ止め機構として二重ナットを採用している。胴縁とパネル間のねじ接合部には、十字穴付きなベドリルねじ(ST4.2, SUS410(C1-70))を使用する。パネルの下部は、熱応力による伸縮に対応するため、パネルの長手方向に長孔を設けて面内方向に移動可能となっている。一方、パネルの上部は、仮止め用の長孔を除いてねじ孔を設けておらず、ドリルねじの打ち込みにより胴縁に固定される。

2.2 セットアップ

試験体は、まず自己釣合型反力治具に4台のファスナをパネルの高さ方向の間隔 $h=800\text{mm}$ 、幅方向の間隔 $bW=900\text{mm}$ で固定する。次に、ファスナ2台に対して、1本の胴縁を架け渡し普通ボルトで接続する。ボルトの導入張力は、ボルトの降伏耐力の6割である 20kN を目標とし、ボルト頭部に貼付した2軸のひずみゲージを用いて手締めにて管理する。2本の胴縁は水平かつ平行に設置する。パネルは、下層側パネル、中央パネル、上層側パネルの順に胴縁と接続する。具体的には、下層側パネルの上部2箇所を仮止めしておき、中央パネルの下部を重ねて間隔 300mm でドリルねじを打ち込む。ねじの締め付けは、電動工具を用いてねじ頭部がパネルに接地するまで行う。なお、上層側のファスナはリニアスライダによって支持し、面内水平方向に自由なローラーとなっている。下層側のファスナは反力治具に固定する。

実験では、ローラー治具の左右にPC鋼棒を介して接続した油圧ジャッキにより強制変位を与え、躯体の層間変形を再現する(Fig. 2(a))。試験体に与える面内荷重 P は、油圧ジャッキに接続したロードセルにより計測する。また、層間変形角 R は、左右で計測するローラー治具と反力治具との水平相対変位 Δ_1 , Δ_2 の平均値として得た層間変形 Δ を、上下のファスナ間の距離 h で除して求める。

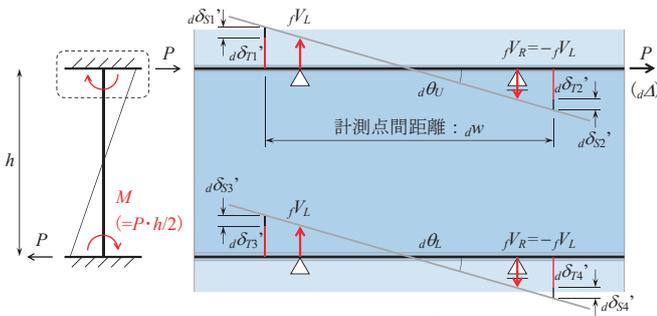


Fig. 4 パネルの力学モデルと胴縁の変形

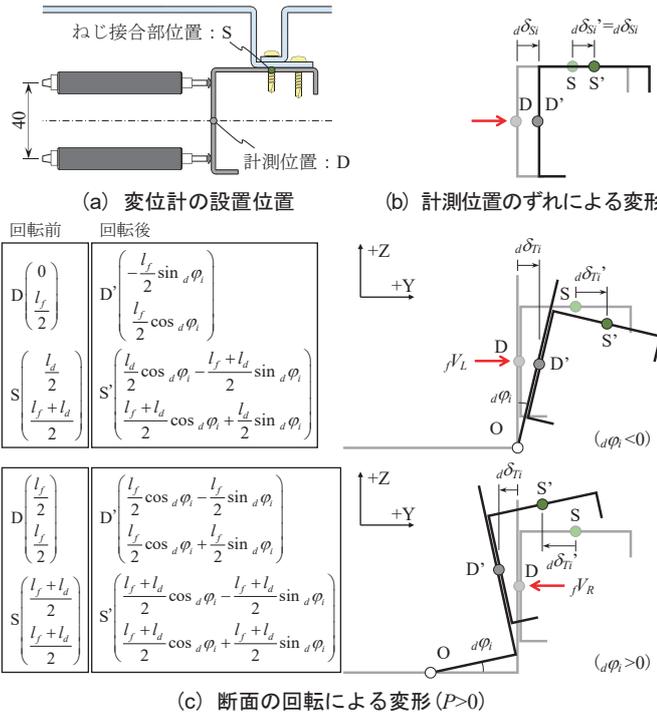


Fig. 5 胴縁断面の鉛直方向の変形に関する計測計画

2.3 計測計画

本実験では (i) ボルト接合部, (ii) ねじ接合部, (iii) 胴縁の3箇所にて生ずる変形を計測する. なお, 以下では実施工時を想定して, パネルの高さ方向を鉛直方向, 幅方向を水平方向と呼び, 鉛直方向上側を正, 水平方向右側を正と定義する.

2.3.1 接合部の変形

まず, (i) ボルト接合部と (ii) ねじ接合部について記す. ボルト接合部の変形は, ファスナと胴縁間の水平方向の相対変位 ${}_b\delta_1 \sim {}_b\delta_4$ (Fig. 2 (b)) によって計測する. ねじ接合部の変形は, 面内方向に移動可能となっている下層側の胴縁とパネル間の水平方向の相対変位 ${}_s\delta_1, {}_s\delta_2$ (Fig. 2 (c)) によって計測する. 計測は, 各接合部において上層側の被接合部材が水平方向正側に変位する状態を正と定義している. ボルト接合部の変形 ${}_b\Delta$ は, 上層側, 下層側のそれぞれで得た変形の平均値を足し合わせることで得る. また, ねじ接合部の変形 ${}_s\Delta$ は下層側で得た変形の平均値によって得る.

$${}_b\Delta = \frac{{}_b\delta_1 + {}_b\delta_2}{2} + \frac{{}_b\delta_3 + {}_b\delta_4}{2} \quad (1)$$

$${}_s\Delta = \frac{{}_s\delta_1 + {}_s\delta_2}{2} \quad (2)$$

2.3.2 胴縁の変形

(iii) 胴縁の変形は, ボルト接合部とねじ接合部の間で生ずる変形であり, 胴縁におけるねじ接合部の回転によって生ずる水平方向の変形として考える (Fig. 4). 上下の胴縁におけるねじ接合部の回転角をそれぞれ ${}_a\theta_U, {}_a\theta_L$ 回転すると, 胴縁の変形 ${}_a\Delta$ は次式により求められる.

$${}_a\Delta = h \cdot \frac{{}_a\theta_U + {}_a\theta_L}{2} \quad (3)$$

水平方向のねじ接合部群を固定端と仮定すると, 面内荷重 P により金属パネルの上下に曲げモーメント $M (= P \cdot h / 2)$ が作用する. これにより, 胴縁とボルト接合されたファスナに鉛直方向の偶力 ${}_fV_L, {}_fV_R$ が作用する. ファスナ断面の回転に伴う胴縁断面の鉛直方向の変形 (Fig. 5) により, 胴縁におけるねじ接合部が回転するものとする.

$${}_fV_L = -{}_fV_R = M \cdot \frac{1}{b \cdot w} = \frac{P \cdot h}{2} \cdot \frac{1}{b \cdot w} \quad (4)$$

胴縁断面の鉛直方向の変形は, Fig. 2 (b) に示す4箇所にて計測する. 面外方向に40mmの間隔で設置した2台の変位計の平均値から, 計測位置Dの鉛直方向の変位 ${}_a\delta_i$ を得る (Fig. 5 (a)). 変位計は, ボルト接合部位置に設置することが困難であり, 水平方向の間隔 ${}_a w$ を1,200mmとしている. したがって, ${}_a\delta_i$ はボルト接合部位置から計測位置までのずれによる変形 ${}_a\delta_{Si}$ と断面の回転による変形 ${}_a\delta_{Ti}$ の和として考えられる. なお, 断面の回転による変形は, 実験時に観察したファスナの変形状態から, Fig. 5 (c) 中の点Oを中心として ${}_a\phi_i$ 回転する状態を仮定している.

$${}_a\delta_i = {}_a\delta_{Si} + {}_a\delta_{Ti} = \frac{{}_a\delta_{Ui} + {}_a\delta_{Li}}{2} \quad (5)$$

$${}_a\delta_{Ti} = \begin{cases} \frac{l_f}{2} \cos {}_a\phi_i - \frac{l_f}{2} \sin {}_a\phi_i - \frac{l_f}{2} & ({}_a\phi_i \geq 0) \\ -\frac{l_f}{2} \sin {}_a\phi_i & ({}_a\phi_i < 0) \end{cases} \quad (6)$$

ただし, ${}_a\phi_i$ は次式で表され, Fig. 5において反時計回りを正とする.

$${}_a\phi_i = \frac{{}_a\delta_{Li} - {}_a\delta_{Ui}}{40} \quad (7)$$

胴縁におけるねじ接合部の回転角 ${}_a\theta_U, {}_a\theta_L$ は, 点Dの鉛直方向の変位 ${}_a\delta_i$ を, ねじ接合部位置Sの鉛直方向の変位 ${}_a\delta'_i$ に換算し, 以下の式で算出する. なお, 胴縁の局所的な変形は考慮しないものとする.

$${}_a\delta'_i = {}_a\delta_{Si}' + {}_a\delta_{Ti}' \quad (8)$$

$${}_a\delta_{Ti}' = \begin{cases} \frac{l_f + l_d}{2} \cos {}_a\phi_i - \frac{l_f + l_d}{2} \sin {}_a\phi_i - \frac{l_f + l_d}{2} & ({}_a\phi_i \geq 0) \\ \frac{l_d}{2} \cos {}_a\phi_i - \frac{l_f + l_d}{2} \sin {}_a\phi_i - \frac{l_d}{2} & ({}_a\phi_i < 0) \end{cases} \quad (9)$$

$${}_a\delta_{Si}' = {}_a\delta_{Si} = {}_a\delta_i - {}_a\delta_{Ti} \quad (10)$$

$${}_a\theta_U = \frac{{}_a\delta_{1}' - {}_a\delta_{2}'}{{}_a w} \quad (11)$$

$${}_a\theta_L = \frac{{}_a\delta_{3}' - {}_a\delta_{4}'}{{}_a w} \quad (12)$$

2.3.3 残余分

層間変形 Δ から (i) ボルト接合部の変形 ${}_b\Delta$ (1式), (ii) ねじ接合部の変形 ${}_s\Delta$ (2式), および (iii) 胴縁の変形 ${}_a\Delta$ (3式) を差し引くことにより, (iv) 残余分 ${}_a\Delta$ を得る. 残余分は, 変位計では把握できない, ねじ孔の支圧による鉛直方向の変形やパネルの折り曲げ加工部分の鉛直方向の変形によって生ずる水平方向の変形等が含まれている.

2.4 荷履歴

本実験における荷履歴をFig. 6に示す。荷は、正負交番漸増変位による繰り返し荷とし、制御振幅には層間変形角 R を用いる。 $R=1/100\text{rad}$ に達するまでは各振幅を2サイクルずつ行い、その後は $1/67\text{rad}$, $1/50\text{rad}$, $1/33\text{rad}$ を各々1サイクルずつ行う。最終的には、試験体の明確な耐力低下が確認できるまで変形を与える。

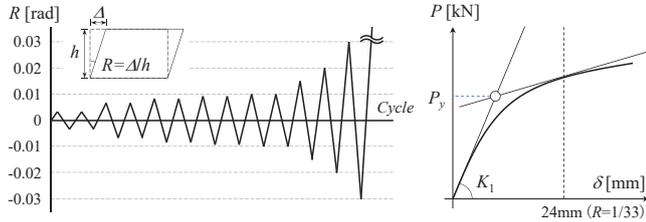


Fig. 6 荷履歴

Fig. 11 降伏耐力

3. 面内荷実験の結果

本章では、各試験体の実験結果について記す。まず、試験体ごとに各変形成分の挙動を分析する。次に、層間変形に応じて生ずる残留変形を整理し、目視による観察と併せて試験体の損傷程度を検討する。

3.1 荷重変形関係

各試験体の荷重変形関係をFig. 7~Fig. 10に示す。図の縦軸は面内荷重 P であり、横軸はそれぞれ(a)ボルト接合部、(b)ねじ接合部、(c)胴縁、(d)残余分、(e)試験体全体にて生ずる水平方向の変形を、変形角に換算した値である。

(a)ボルト接合部と(e)試験体全体には、ボルト接合部のすべり耐力を●で示す。すべり耐力は、ボルト接合部の荷重変形関係から得た包絡曲線において、層間変形角 $1/300\text{rad}$ までの傾きの平均値として求めた初期剛性の 0.2mm オフセット直線と、包絡曲線が交差する点までの最大値として求めた。(b)ねじ接合部では、荷終盤に、それまで

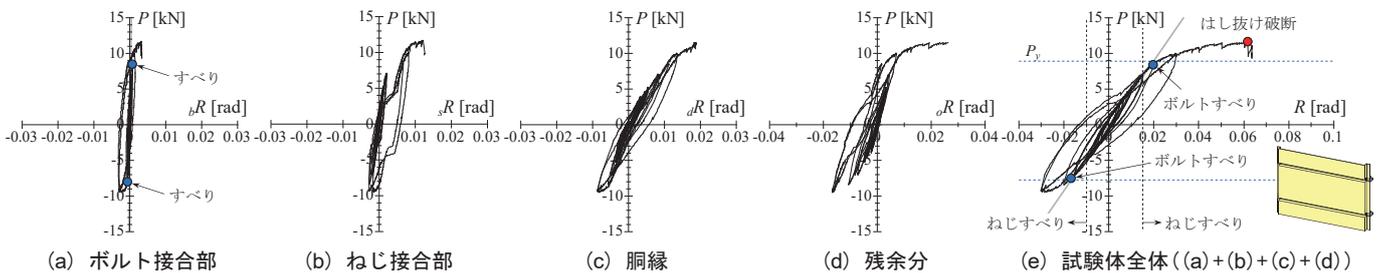


Fig. 7 荷重変形関係(試験体A1100(純アルミニウム, $t=2.5\text{mm}$))

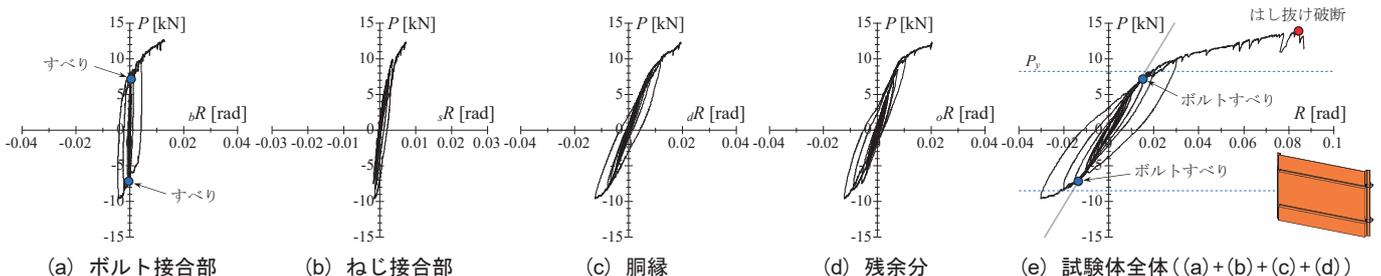


Fig. 8 荷重変形関係(試験体A3003(アルミニウム合金Al-Mn系, $t=2.5\text{mm}$))

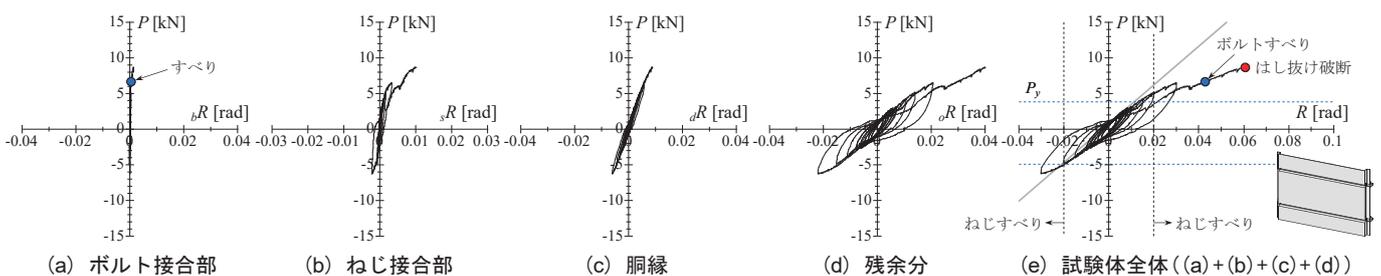


Fig. 9 荷重変形関係(試験体S0.8(溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板, $t=0.8\text{mm}$))

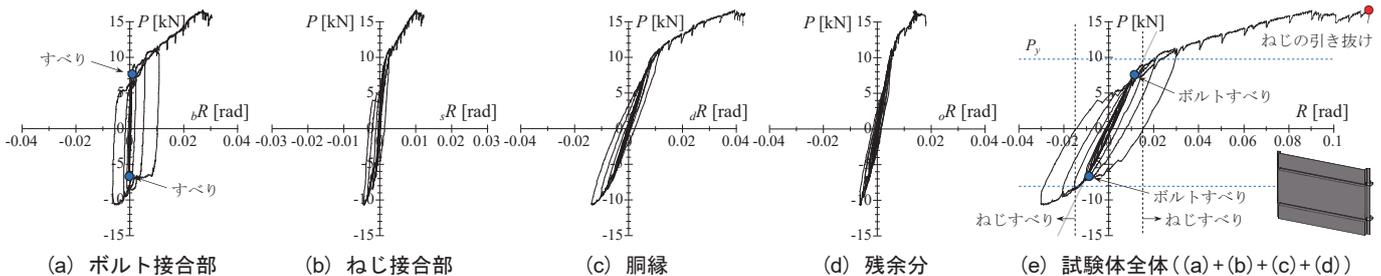
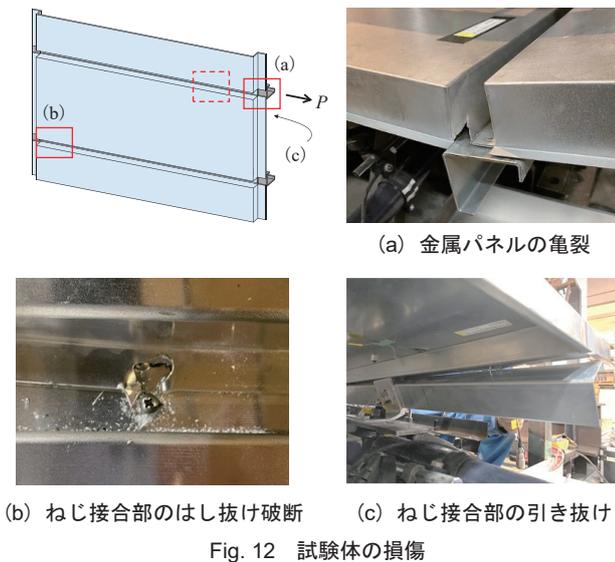


Fig. 10 荷重変形関係(試験体S2.3(溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板, $t=2.3\text{mm}$))



に発揮した耐力を下回る荷重で変形が急増する明確なすべり挙動を示す試験体があった。これは、荷重が進むにつれてパネルの面外変形等によってねじ頭部とパネルの間の材間圧縮力が低下することによるものと考えられる。ねじ接合部のすべりが生じるまでに、試験体に与えた最大の層間変形角を(e)に破線で示す。(e)試験体全体には、弾性剛性を灰色の実線で示している。また、試験体に不可逆的な何らかの損傷が生じている指標として、降伏耐力を導入する。降伏耐力は、荷重変形関係から得た包絡曲線を用いて、Fig. 11に示した方法で求めており、図中に青色の破線で示す。さらに、最大耐力を●で示す。

【純アルミニウム ($t=2.5\text{mm}$) パネルを用いた試験体】

Fig. 7に示す純アルミニウム (A1100P H14, $t=2.5\text{mm}$) パネルを用いた試験体(以下、試験体A1100)では、すべての変形成分において非線形性が確認できる。特にねじ接合部と残余分では、荷重終盤にすべり挙動が見られる。残余分においてもすべり挙動が確認できるのは、残余分にねじ接合部の鉛直方向の変形を含むためである。

試験体全体に着目すると、ボルト接合部のすべりは降伏耐力付近で発生しており、ボルト接合部のすべりを境に試験体の非線形化が進展していることが分かる。荷重終盤には、ねじ接合部のすべりに対応してスリップ挙動が生じている。

目視による観察では、層間変形角 $R=1/67\text{rad}$ の荷重の後に金属パネルの亀裂(Fig. 12(a))を確認した。最終的には、層間変形角 $R=1/16\text{rad}$ でねじ接合部のはし抜け破断(Fig. 12(b))に至った。

【アルミニウム合金Al-Mn系 ($t=2.5\text{mm}$) パネルを用いた試験体】

Fig. 8に示すアルミニウム合金Al-Mn系 (A3003P H24, $t=2.5\text{mm}$) パネルを用いた試験体(以下、試験体A3003)では、ねじ接合部はほぼ弾性である一方で、ボルト接合部、胴縁、および残余分では非線形性が確認できる。試験体全体では、ボルト接合部のすべり直後に降伏に至っていることが分かる。一方、ねじ接合部のすべりが生じていないことから、荷重終盤まで安定した履歴を描いていることが分かる。

目視による観察では、層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ の荷重の後に金属パネルの亀裂を確認した。最終的には、層間変形角 $R=1/12\text{rad}$ でねじ接合部のはし抜け破断に至った。

【溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 ($t=0.8\text{mm}$) パネルを用いた試験体】

Fig. 9に示す溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 (SGMCC, $t=0.8\text{mm}$)

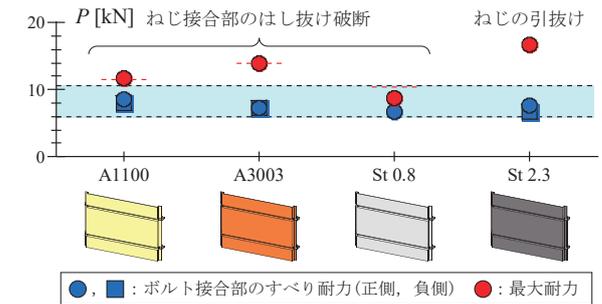
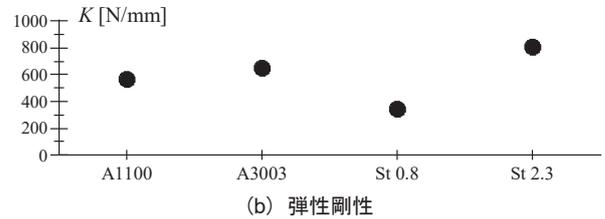
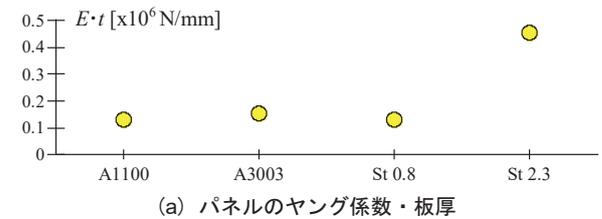


Fig. 13 実験結果の比較

パネルを用いた試験体(以下、試験体S0.8)では、ボルト接合部と胴縁はほぼ弾性である。ねじ接合部では荷重終盤にすべり挙動が確認できるものの変形は小さく、残余分では荷重初期の段階から明確な残留変形が生じている。試験体全体の履歴形状が残余分と非常に類似していることから、他の試験体とは異なり、試験体全体の非線形化がボルト接合部のすべりに起因するものではないことが分かる。荷重終盤には、ねじ接合部のすべりによるスリップ挙動が見られる。

目視による観察では、層間変形角 $R=1/67\text{rad}$ の荷重の後に金属パネルの亀裂を確認した。最終的には、層間変形角 $R=1/17\text{rad}$ でねじ接合部のはし抜け破断に至った。

【溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 ($t=2.3\text{mm}$) パネルを用いた試験体】

Fig. 10に示す溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 (SGMCC, $t=2.3\text{mm}$) パネルを用いた試験体(以下、試験体S2.3)では、ねじ接合部と残余分は最終サイクルを除いてほぼ弾性である。一方、胴縁とボルト接合部には非線形性が表れており、特にボルト接合部においては明確なすべり挙動が確認できる。なお、試験体S2.3では、ボルト接合部の変形、 A の算出において計測不良であった δ_2 を除いている。

試験体全体においては、ボルト接合部のすべり後に試験体の非線形化が進んでいることが分かる。試験体S2.3では、層間変形角 $R=1/10\text{rad}$ を越えても明確な耐力の低下は見られなかったが、ドリルねじの一部では胴縁からの引き抜け(Fig. 12(c))が生じ、耐力が頭打ちとなったため荷重を中断した。

3.2 実験結果の比較

実験結果の比較をFig. 13に示す。図の縦軸は、それぞれ(a)パネルのヤング係数と板厚の積 $E \cdot t$ 、(b)弾性剛性 K 、および(c)接合部のすべり耐力と最大耐力であり、横軸は試験体の種類である。なお、弾性

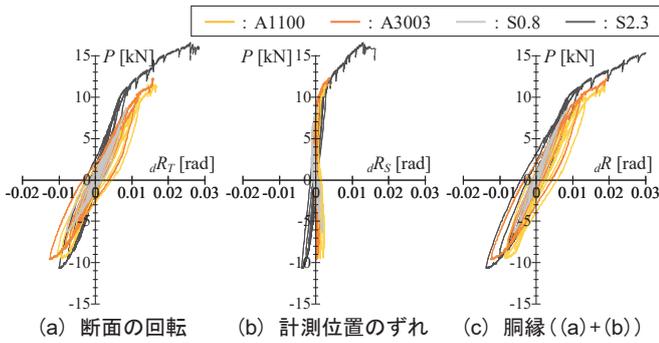


Fig. 14 胴縁の変形の比較

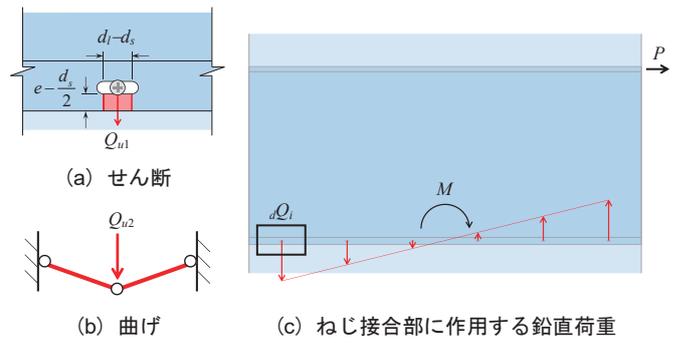


Fig. 15 はしあき部の破壊形式

剛性は、試験体全体の荷重変形関係から得た包絡曲線において、層間変形角 $1/300\text{rad}$ までの傾きの平均値として求めた。

3.2.1 パネルのヤング係数と板厚の積

パネルのヤング係数と板厚の積は、パネルに純アルミニウムを用いた試験体A1100、アルミ合金を用いた試験体A3003、板厚 0.8mm の鋼板を用いた試験体S0.8の3体でほぼ等しい。これに対して、板厚 2.3mm の鋼板を用いた試験体S2.3は、上記の3つの試験体のおよそ3倍であり、パネルの面内剛性が比較的高いと言える。

3.2.2 弾性剛性

弾性剛性は、試験体S0.8、試験体A1100、試験体A3003、試験体S2.3の順で大きくなっている。弾性剛性が同程度である試験体A1100および試験体A3003と比較すると、試験体S2.3は約1.4倍であり、前項に示したパネルのヤング係数と板厚の積の傾向と一致していない。これは、パネルの変形が含まれる残余分だけでなく、ボルト接合部、ねじ接合部、および胴縁の変形によって試験体全体の变形追従が成立しているためである。

パネルのヤング係数と板厚の積が試験体A1100および試験体A3003と同程度である試験体S0.8は、弾性剛性が上記の2体の約0.6倍である。これは、試験体S0.8のパネルの板厚が 0.8mm と非常に薄いことから、パネルが面外に変形することによって水平方向の変形成分が生じているためであると考えられる。

3.2.3 接合部のすべり耐力

Fig. 13(c)に、ボルト接合部のすべり耐力を、正側を●、負側を■で区別して示す。実験結果にはばらつきがあるものの、荷重方向と試験体の違いによる影響は小さいことが分かる。本実験で用いたボルト孔まわりの表面粗さは $1.2\sim 28.2\mu\text{m}R_z$ の範囲であり、既報¹⁰⁾の金属工事を対象としたすべり係数評価試験結果によれば、すべり係数として $0.15\sim 0.26$ に相当する。さらに、試験体におけるボルト接合部が応力方向に2本のボルトを有する1面せん断継手であり、ボルト孔がスロット孔であることを考慮すると、 $6.0\sim 10.6\text{kN}$ のすべり耐力が求められる。図中に、表面粗さから推定したすべり耐力の範囲を水色で示す。実験値は計算値と概ね良く対応しており、ボルト接合部のすべり耐力が既報¹⁰⁾の試験結果と同様に評価できることが分かる。

3.2.4 胴縁の変形

4体の試験体における胴縁の変形をFig. 14に示して比較する。図の縦軸は面内荷重 P であり、横軸はそれぞれ(a)断面の回転による変形角 dR_T 、(b)計測位置のずれによる変形角 dR_S 、および(c)胴縁の変形角 dR ($=dR_T+dR_S$)である。図では、各試験体を線の色によって区別している。

$E\cdot I$ が同程度である3体の試験体は、断面の回転による変形、計測位

置のずれによる変形ともに同様の履歴を描いている。これら3体と比べて、 $E\cdot I$ が3倍程度大きい試験体S2.3は、断面の回転による変形の剛性が高く、計測位置のずれによる変形が大きいことが分かる。これは、試験体S2.3ではパネルによって胴縁断面の回転が抑制されているためであると考えられる。

3.2.5 最大耐力

Fig. 13(c)に、最大耐力を●で示す。ねじ接合部のはし抜け破断に至った試験体A1100、試験体A3003、試験体S0.8に対して、最外縁のねじ接合部がはし抜け破断に至る時点の面内荷重を計算する。ねじ接合部のはし抜け破断時の鉛直荷重 Q_u は、はしあき部のせん断耐力 Q_{u1} (Fig. 15(a))と曲げ耐力 Q_{u2} (Fig. 15(b))のいずれか小さい方で決定するものとして求める¹¹⁾。

$$Q_u = \min \{ Q_{u1}, Q_{u2} \} \quad (13)$$

$$Q_{u1} = \frac{2}{\sqrt{3}} t \cdot \left(e - \frac{d_s}{2} \right) \cdot \sigma_u \quad (14)$$

$$Q_{u2} = \frac{2t \cdot \left(e - \frac{d_s}{2} \right)^2}{d_l - d_s} \cdot \sigma_u \quad (15)$$

ここで、 e ははしあき距離、 d_s はねじ孔の短径、 d_l はねじ孔の長径、 σ_u はTable2に示したパネルの引張強さである。

水平方向に位置するねじ接合部群において弾性応力分布 (Fig. 15(c))を仮定すると、面内荷重 P の作用時に金属パネルがドリルねじより受ける鉛直反力は次式で表せる。

$$dQ_i = M \cdot \frac{r_i}{\sum r_i^2} = \frac{P \cdot h}{2} \cdot \frac{r_i}{\sum r_i^2} \quad (16)$$

ここで、 r_i はねじ接合部群の中心に対するねじ接合部の位置である。

(13)式および(16)式の右辺が等しい関係より得られるはし抜け破断時の面内荷重を、図中に赤色の破線で示す。実験値は計算値と概ね良く対応しており、はし抜け破断に至る時点の面内荷重が、パネルの引張強さと板厚の積から評価できることが分かる。パネルの引張強さと板厚の積を高めていくと、試験体S2.3に見られたように破壊形式がねじの引き抜けに変化することが考えられる。

3.3 各変形成分の割合

各変形成分が層間変形に占める割合を、Fig. 16～Fig. 19の上段(a)に示す。図の縦軸は各サイクルのピーク時の層間変形に対する各変形成分の割合であり、横軸は層間変形角 R である。変形成分は、(i)ボルト接合部を青色、(ii)ねじ接合部を水色、(iii)胴縁を緑色、および(iv)残余分を黒色で示す。なお、図は正側荷重時の結果である。

いずれの試験体においても、試験体がほぼ弾性範囲であった

$R=1/100\text{rad}$ までは、ねじ接合部が占める割合は1割程度と小さく、ボルト接合部が占める割合はさらに小さい。したがって、試験体全体の変形は、胴縁と残余分が支配的な要素であることが分かる。一方、層間変形角 $R=1/67\text{rad}$ 以降は、ボルト接合部またはねじ接合部の割合が増加している。

4体の試験体を比較すると、パネルに板厚0.8mmの鋼板を用いた試験体S0.8では残余分の割合が最も大きく、パネルに板厚2.3mmの鋼板を用いた試験体S2.3では残余分の割合が最も小さい。これは3.2.2項に示したように、試験体S0.8ではパネルの板厚が薄いため、パネルが面外に変形することによって水平方向の変形成分が生じているためである。パネルに純アルミニウムを用いた試験体A1100とアルミ合金を用いた試験体A3003では、4つの変形成分の割合は概ね同程度である。

3.4 残留変形

各サイクルの残留変形をFig. 16～Fig. 19の下段(b)に示す。図の縦軸は正側各サイクルの除荷時における残留変形角 R_{res} であり、横軸は層間変形角 R である。図の凡例は、前節と同様である。図には、ねじ

接合部のすべり、ボルト接合部のすべり、およびパネルの亀裂を確認した時点を破線で示している。

試験体S0.8を除いた3体では、 $R=1/100\text{rad}$ の除荷時点で $R_{res}=1/800\sim 1/500\text{rad}$ 程度と小さい。一方、パネルに板厚0.8mmの鋼板を用いた試験体S0.8では、 $R=1/150\text{rad}$ の除荷時点で $R_{res}=1/500\text{rad}$ 、 $R=1/100\text{rad}$ の除荷時点で $R_{res}=1/250\text{rad}$ 程度であり、残留変形が相対的に大きいことが分かる。試験体S0.8の残留変形の大部分を残余分が占めていることから、荷初期からパネルの損傷が蓄積しているものと考えられる。

$R=1/100\text{rad}$ を境に、試験体S0.8を除いた3体では、ボルト接合部あるいはねじ接合部の残留変形が急増している。増加の傾向は、前節に示した層間変形に対する各変形成分の割合より大きい。すなわち、胴縁と残余分の変形成分に比べてボルト接合部とねじ接合部の変形成分は不可逆性が高く、接合部のすべりの発生後には締め直し等の補修を行うべきであるといえる。

3.5 損傷程度の区分

試験体の損傷過程をTable3に示す。表は、縦に試験体の種類を、横に層間変形角 R を示す。各試験体につき、上段は正側荷時、下段

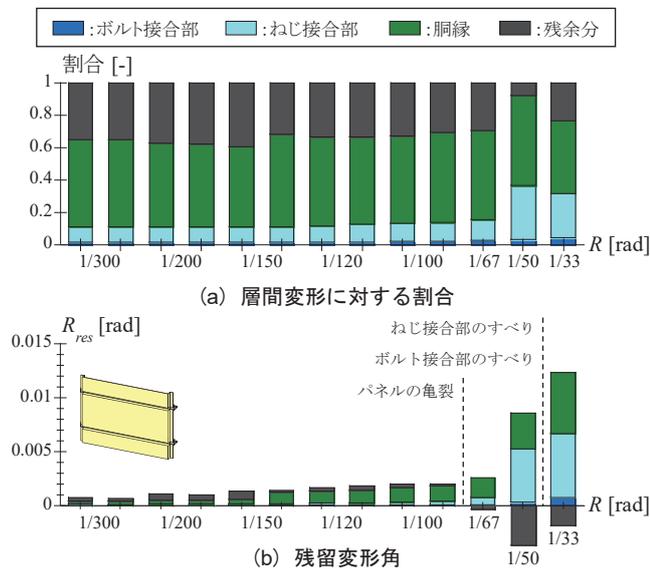


Fig. 16 層間変形角ごとの変形成分(試験体A1100)

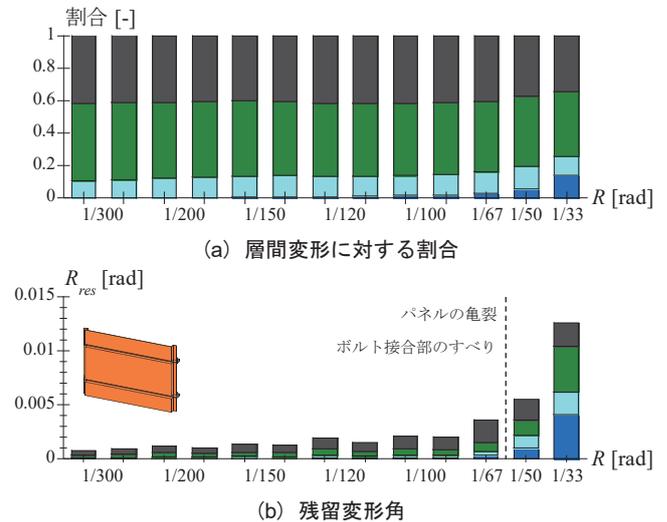


Fig. 17 層間変形角ごとの変形成分(試験体A3003)

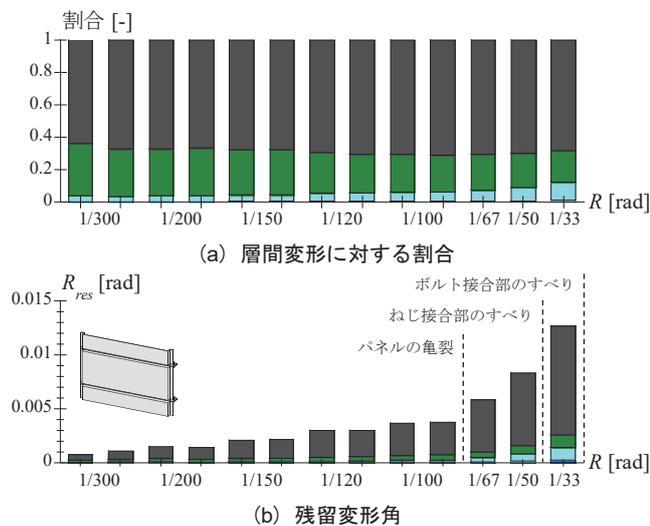


Fig. 18 層間変形角ごとの変形成分(試験体S0.8)

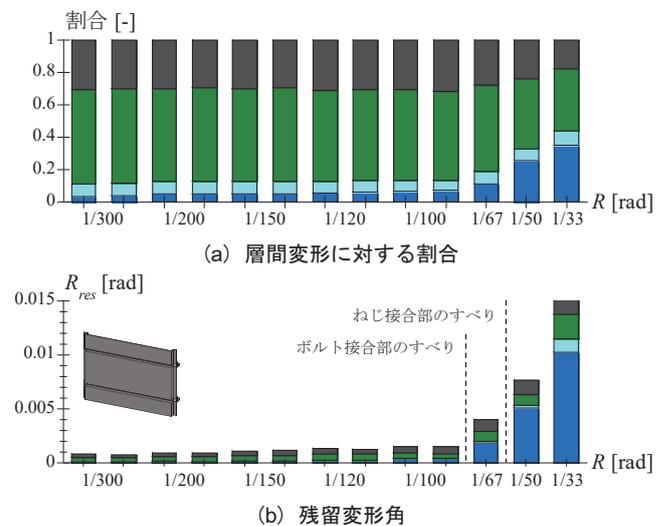


Fig. 19 層間変形角ごとの変形成分(試験体S2.3)

は負側載荷時である。損傷は、各サイクルの除荷時に行った目視による観察の結果に加えて、ボルト接合部のすべり、ねじ接合部のすべり、および試験体が降伏耐力に到達した時点を目視して記述している。また、残留変形角 $R_{res}=1/500rad$ を超えた領域を灰色で示す。

「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領」¹²⁾では、非構造部材の強制変形角に対する設計目標として、地震動の強さ、建物の重要性、および非構造部材の破壊が避難に及ぼす影

響に応じた許容損傷程度を提示している。許容損傷程度は、非構造部材の損傷程度の区分(以下、損傷区分)としてA~Eの5段階で評価する(Table4)。損傷区分AとBは補修の必要がなく、損傷区分CとDは脱落、重要な機能の低下がない範囲である。

実験結果をもとに、金属パネル外壁の損傷区分を評価する。残留変形角が $R_{res}=1/500rad$ 未満である範囲は、顕著な被害が生じないことから損傷区分をAとする。残留変形角が $R_{res}=1/500rad$ を超えるが、補修を要する被害のない範囲は、損傷区分をBとする。ねじ接合部のすべりとボルト接合部のすべりは、部品交換の必要はないが締め直し等の補修を要することから損傷区分をCとする。また、金属パネルの亀裂は、部品交換の必要が生ずることから損傷区分をDとする。さらに、ねじ接合部のはし抜け破断あるいはねじの引き抜けは、パネルの脱落に至る危険性があることから損傷区分をEとする。

Table3に、試験体ごとの損傷区分を併記する。損傷区分は、補修

Table4 非構造部材の損傷程度の区分(文献12)

損傷程度の区分	被害の有無	補修の必要	部品交換の必要	脱落、重要な機能の低下
A	なし	なし	なし	なし
B	あり	なし	なし	なし
C	あり	あり	なし	なし
D	あり	あり	あり	なし
E	あり	あり	あり	あり

Table3 試験体の損傷過程と損傷程度の区分

R [rad]	0.0067 (1/150)	0.010 (1/100)	0.015 (1/67)	0.020 (1/50)	0.030 (1/33)
A1100 			パネルの亀裂 ねじ接合部のすべり ボルト接合部のすべり	試験体の降伏	ねじ接合部のはし抜け破断(0.062 (1/16))
損傷区分	A		D		
A3003 			ボルト接合部のすべり パネルの亀裂 試験体の降伏		ねじ接合部のはし抜け破断(0.084 (1/12))
損傷区分	A		C	D	
S0.8 			パネルの亀裂 試験体の降伏	ねじ接合部のすべり	ボルト接合部のすべり(0.043 (1/23)) ねじ接合部のはし抜け破断(0.060 (1/17))
損傷区分	A	B	D		
S2.3 			ボルト接合部のすべり 試験体の降伏	ねじ接合部のすべり 試験体の降伏	ねじの引き抜け(0.11 (1/9))
損傷区分	A		C		

上段：正側載荷時，下段：負側載荷時，：残留変形角1/500以上

Table5 損傷程度の区分に関する実験結果の比較

外装材名称	層間変形角ごとの損傷程度の区分											パネル工法	文献	
	1/500	1/400	1/300	1/200	1/150	1/120	1/100	1/75	1/60	1/50	1/30			
GRC (ガラス繊維補強セメント) パネル							A						不明	1996年10月 旭硝子商品開発センター(JASS27) 文献5)
							(A)	B	D				縦	
ECP (押出成形セメント板)					A			B	C				縦	建材試験センター(JASS27) 文献7)
					A	B		C				横		
複合金属サイディング							A	B		C			横	JASS27
窯業系サイディング							(A)	(C)~1/40					不明 (木造下地)	公的試験(JASS27) 文献14)
繊維強化セメント板 (スレート)													JASS27※実験なし	
鋼板製外装材												(D)	縦	日本建築総合試験所(SSW2011) 文献15)
												(D)~1/12		
ALC薄型パネル				A	C	D					縦・横	建材試験センター(JASS27)		
金属サンドイッチパネル					(A)	(C)~1/25					(E)	縦	文献16)	
金属パネル							A	D~1/17			E	横	本実験	

—：脱落しない変形限界として要求される変形性能

の必要がないAとBを黄緑色、補修の必要はあるが脱落等の危険性はないCとDを水色で示す。本実験の範囲では、いずれの試験体も $R=1/100\text{rad}$ まで補修の必要がなく、 $R=1/17\text{rad}$ 付近まで脱落等の危険性が低いことが分かる。ただし、パネルに板厚0.8mmの鋼板を用いた試験体S0.8は、目視による損傷がなくとも残留変形が大きくなる可能性があることに注意が必要である。

3.6 他の外壁との比較

本実験結果と既往の実験結果^{5)-8), 13)-16)}を併せて、中低層鉄骨造建築物に採用される代表的な乾式の非構造外壁における損傷区分をTable5に示す。表は、縦に外装パネルの名称、横に層間変形角ごとの損傷区分を示す。赤色の実線は、脱落しない変形限界として要求される層間変形角^{5), 8)}である。Table3と同様に、損傷区分AとBを黄緑色、損傷区分CとDを水色で示す。なお、文献中に損傷区分の記載のないものについては、残留変形が小さい範囲を黄緑色、残留変形に関する記載はないが脱落に至らない範囲を水色で示した。

ほとんどの外壁において、層間変形角 $R=1/200\text{rad}$ までは損傷区分がAであり、補修の必要なしに継続使用が可能であることが分かる。また、実験を実施したものについては、脱落しない変形限界として要求される変形性能を十分に満たしていることが確認できる。ただし、これらの結果のほとんどは、1~4枚程度のパネルからなる一構面の部分的な試験体を用いた実験に基づくものであり、複数の構面や開口、入隅および出隅を有する場合についてはさらに実験が必要である。これらの検討にも今後取り組んでいきたいと考えている。

4. まとめ

本研究では、金属パネルを用いた1ユニットの非構造外壁の面内載荷実験を実施し、変形追従機構と破壊形式を確認した。以下に得られた結果をまとめる。

- [1] 地震時に想定される面内方向の層間変形に対して、試験体全体の変形を (i) ボルト接合部、(ii) ねじ接合部、(iii) 胴縁、および (iv) 残余分の4つの変形成分に分離して変形追従機構を分析した。残余分は、変位計では把握できない、ねじ孔の支圧による鉛直方向の変形やパネルの折り曲げ加工部分の鉛直方向の変形等によって生ずる水平方向の変形を含むものである。
- [2] 4体の試験体における弾性剛性の大小関係の程度は、パネルのヤング係数と板厚の積によって代表されるパネルの面内剛性の大小関係の程度より小さい。これは、金属外壁の変形追従が、パネルの影響が表れる残余分の変形成分だけでなく、ボルト接合部、ねじ接合部、および胴縁の変形成分によって成立しているためである。
- [3] ボルト接合部では、金属パネルの材質と板厚によらずほぼ一定のすべり耐力を発揮した。これは、ボルト接合部のすべり係数と相関が大きい表面粗さがほぼ一定であるためである。また、ボルト接合部のすべり後は試験体全体の非線形化が進展することが分かった。
- [4] 試験体は、層間変形角 $1/17\text{rad}$ 付近でねじ接合部のはし抜け破断によって最大耐力に至った。ねじ接合部のはし抜け破断時の面内荷重は、パネルの引張強さと板厚の積から概ね評価できることを確認した。
- [5] 引張強さと板厚の積が比較的大きい金属パネルを使用する

と、破壊形式がねじ接合部のはし抜け破断ではなくねじの引き抜けに変化した。

- [6] 試験体がほぼ弾性範囲であった層間変形角 $1/100\text{rad}$ までは、層間変形のうちねじ接合部とボルト接合部が占める割合は小さく、胴縁と残余分が支配的であった。一方、層間変形角 $1/67\text{rad}$ 以降は、ボルト接合部またはねじ接合部の割合が増加した。
- [7] 胴縁と残余分に比べて、ボルト接合部とねじ接合部の変形の増加による試験体全体の残留変形の増加の傾向は大きかった。したがって、ボルト接合部とねじ接合部の変形は不可逆性が高く、接合部のすべりの発生後には締め直し等の補修を行うべきであると言える。
- [8] 「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領」に基づいて金属パネルの損傷程度の区分を評価すると、層間変形角 $1/100\text{rad}$ までは補修の必要がなく、層間変形角 $1/17\text{rad}$ 付近まで脱落等の危険性が低いことが分かった。ただし、パネルの板厚が0.8mmと非常に薄い場合は、目視による損傷がなくとも残留変形が大きくなる可能性があることに注意が必要である。
- [9] 中低層鉄骨造建築物に採用される代表的な乾式の非構造外壁と合わせて損傷程度の区分をまとめると、ほとんどの外壁において、層間変形角 $1/200\text{rad}$ までは補修の必要なしに継続使用が可能であること、実験を実施したものについては、脱落しない変形限界として要求される変形性能を十分に満たすことが確認できた。

謝辞

本研究において、菊川工業 佐藤秋雄氏には研究計画をはじめ、多大なご助言を頂きました。また、本研究は、日本学術振興会特別研究員奨励費(課題番号: 21J12852)の助成を受けて実施しました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Architectural Institute of Japan : Japanese Architectural Standard Specification 13, Vol 2, 1998 (in Japanese)
日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説JASS13金属工事, 第2版, 1998
- 2) Architectural Institute of Japan : Japanese Architectural Standard Specification 14, Vol 3, 2012 (in Japanese)
日本建築学会 : 建築工事標準仕様書・同解説JASS14カーテンウォール工事, 第3版, 2012
- 3) Information Center for Building Administration, Japan Building Disaster Prevention Association : Commentary on Structural Regulations of the Building Standard Law of Japan (2020), 2020 (in Japanese)
建築行政情報センター, 日本建築防災協会 : 2020年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2020
- 4) Ogawa, K. et al. : Ductility Demanded of Members in Steel Moment Frames Sustaining Beam-Hinging Mechanism, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 65, No. 537, pp. 121-128, 2000 (in Japanese)
小川厚治, 井上一朗, 中島正愛, 澤泉紳一 : 梁降伏型鋼構造ラーメン部材の必要塑性変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第65巻, 第537号, pp. 121-128, 2000
(DOI https://doi.org/10.3130/aajs.65.121_6)
- 5) Architectural Institute of Japan : Japanese Architectural Standard

- Specification 27, Vol. 2, 2011 (in Japanese)
日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS27乾式外壁工事，第2版，2011
- 6) Kohama, S. et al. : GRC shiageban niyori koseisareta gaihekikako no sokanhenkei nikansuru zikkentekikenkyu, Proceedings of Kyusyu Chapter Architectural Research Meeting, Vol. 39, pp.205-208, 2000 (in Japanese)
小濱修二，徳富久二，香西政彦，有村健一，田中義治，折目貴司：GRC仕上げ板により構成された外壁架構の層間変形に関する実験的研究，日本建築学会九州支部研究報告，第39号，pp. 205-208，2000
- 7) Asai, H., Tokinoya, H., Suzui, Y. : Seismic Deformation Test of Dry External Wall in Steel Structure, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 1059-1060, 2007 (in Japanese)
浅井英克，時野谷浩良，鈴木康正：鉄骨造建物における横張り乾式外壁の層間変形追従性能確認試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造III，pp. 1059-1060，2007
- 8) Japan Metal Roofing Association and Japanese Society of Steel Construction : Standard of Steel Wall (SSW) 2011, 2011 (in Japanese)
日本金属屋根協会，日本鋼構造協会：鋼板製外壁標準SSW2011，2011
- 9) Yamanaka, M., Ikarashi K. and Koyano, Y. : Study on Unstable Behavior of Steel Sandwich Panel under Thermal Stress, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Construction and Materials, pp. 87-88, 2018 (in Japanese)
山中萌，五十嵐規矩夫，小谷野祐希：熱応力を受ける鋼板サンドイッチパネルの不安定挙動に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp. 87-88, 2018
- 10) Kurosawa, M. et al. : Slip Coefficient of Bolted Joint in Metal Work and Its Applications, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 87, No. 792, pp. 229-240, 2022 (in Japanese)
黒澤未来，吉敷祥一，佐藤秋雄，巽信彦：金属工事におけるボルト接合部のすべり係数の評価とその適用，日本建築学会構造系論文集，第87巻，第792号，pp. 229-240，2022
(DOI <https://doi.org/10.3130/aijs.87.229>)
- 11) Kuwamura, H., Isozaki, A. : Ultimate Behavior of Fastener Connections of Thin Stainless Steel Plates Study on light-weight stainless steel structures Part 4, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 67, No. 556, pp. 159-166, 2002 (in Japanese)
桑村仁，磯崎あゆみ：ステンレス鋼薄板ファスナ接合部の終局挙動：軽量ステンレス鋼構造に関する研究 その4，日本建築学会構造系論文集，第67巻，第556号，pp. 159-166，2002
(DOI https://doi.org/10.3130/aijs.67.159_1)
- 12) Architectural Institute of Japan : Recommendations for Aseismic Design and Construction of Nonstructural Elements, Vol. 2, 2003 (in Japanese)
日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，第2版，2003
- 13) Takahashi, S. et al. : Development of GRC-Panel Part3. Relative Story Displacement and Rotational Angle of GRC-Panel, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A-1. Construction and Materials, pp. 1021-1022, 1995 (in Japanese)
高橋秀一，田中義治，小浜洋輔，川上浩史：GRCパネルの開発についてその3．パネルの層間変形追従性能，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp. 1021-1022，1995
- 14) Hagiwara, S. et al. : A Study on Evaluation of Seismic Performances and Energy Characteristics of Timber Structures with Siding Board, Part 1. Plan of Static Loading Test and Results of the Test, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 125-126, 2003 (in Japanese)
萩原慎太郎，小原勝彦，宮澤健二：外装サイディング材の耐力性能とエネルギー吸収性能に関する研究 その1．実験計画と静的加力実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造III，pp.125-126，2003
- 15) Suzuki, H. et al. : Development of Experimental Siding System Using Thin-steel Sheet for External Wall of RC-construction and Steel-construction, AIJ Journal of Technology and Design, No.14, pp.251-254, 2001 (in Japanese)
鈴木大隆，廣田誠一，植松武是，福島明：RC造外断熱・鉄骨造外張断熱建築の外壁における薄板鋼板を用いた外装システムの開発 外装鋼板の構法的要件と構造的検討，日本建築学会技術報告集，第14号，pp.251-254，2001
(DOI <https://doi.org/10.3130/aijt.7.251>)
- 16) Sugimoto, T. et al. : In-plain Shear Tests of Steel Sandwich Panel Walls Applied to Steel-framed House, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 951-952, 2008 (in Japanese)
杉本敏和，平井義行，完山利行，藤田正則，藤内黎明：鋼板サンドイッチパネルを使用した薄板軽量形鋼造用耐力壁の面内せん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造III，pp. 951-952，2008

(2022年11月7日原稿受理，2023年4月12日採用決定)