T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	金属パネルを用いた非構造外壁の面内変形追従機構と各種損傷状態に基づく変形限界
Title(English)	
著者(和文)	黒澤未來
Author(English)	Miku Kurosawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12464号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:吉敷 祥一,元結 正次郎,石原 直,西村 康志郎,佐藤 大樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12464号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

令和４年度　博士論文

金属パネルを用いた非構造外壁の面内変形追従機構と各種損傷状態に基づく変形限界

東京工業大学大学院

黒澤未來

―目次―

第1章　序論

1.1　研究の背景 ・・・(1-1)

1.1.1　金属外壁の概要 ・・・(1-1)

1.1.2　金属外壁の施工方法 ・・・(1-2)

1.1.3　金属外壁の耐震設計 ・・・(1-3)

1.1.4　金属外壁の耐風設計 ・・・(1-4)

1.2　既往の研究 ・・・(1-5)

1.2.1　ボルト接合部とねじ接合部の力学性能に関する研究と課題点 ・・・(1-5)

1.2.2　非構造外壁の変形追従性能に関する研究と課題点 ・・・(1-6)

1.3　本研究の目的と構成 ・・・(1-8)

第2章　金属外壁における接合部の力学挙動

2.1　はじめに ・・・(2-1)

2.2　ボルト接合部のすべり係数に関する実験 ・・・(2-3)

2.2.1　試験体の概要 ・・・(2-3)

2.2.2　載荷方法 ・・・(2-5)

2.2.3　計測計画 ・・・(2-6)

2.2.4　ボルト接合部の要素実験結果の概要 ・・・(2-8)

2.2.5　すべり係数に対する実験パラメータの影響 ・・・(2-19)

2.3　ファスナと胴縁間のボルト接合部の実験 ・・・(2-24)

2.3.1　試験体の概要 ・・・(2-24)

2.3.2　載荷方法 ・・・(2-25)

2.3.3　計測計画 ・・・(2-26)

2.3.4　ファスナと胴縁間のボルト接合部の実験結果の概要 ・・・(2-27)

2.3.5　すべり係数に対する実験パラメータの影響 ・・・(2-34)

2.3.6　実施工における適用可能性の検討 ・・・(2-36)

2.4　胴縁と金属パネル間のねじ接合部の要素実験 ・・・(2-37)

2.4.1　試験体の概要 ・・・(2-37)

2.4.2　載荷方法 ・・・(2-38)

2.4.3　ねじ接合部の要素実験結果の概要 ・・・(2-39)

2.4.4　破壊形式と耐力計算 ・・・(2-51)

2.4.5　最大耐力に対するはしあき部の形状の影響 ・・・(2-53)

2.5　まとめ ・・・(2-56)

第3章　1ユニットの金属外壁要素の変形追従性能

3.1　はじめに　・・・(3-1)
3.2　実験計画　・・・(3-3)
3.2.1　試験体の概要　・・・(3-3)
3.2.2　セットアップ　・・・(3-3)
3.2.3　計測計画　・・・(3-6)
3.2.4　載荷履歴　・・・(3-9)
3.3　実験結果と考察　・・・(3-10)
3.3.1　実験結果の概要　・・・(3-10)
3.3.2　実験結果の比較　・・・(3-16)
3.3.3　胴縁の挙動　・・・(3-18)
3.3.4　最大耐力の評価　・・・(3-19)
3.3.5　各変形成分の割合　・・・(3-21)
3.3.6　残留変形　・・・(3-21)
3.3.7　損傷程度の区分　・・・(3-24)
3.4　まとめ　・・・(3-26)

第4章　1層1スパンの金属外壁システムの変形追従性能

4.1　はじめに　・・・(4-1)
4.2　実験計画　・・・(4-3)
4.2.1　鉄骨架構の概要　・・・(4-3)
4.2.2　試験体の概要　・・・(4-4)
4.2.3　金属パネルの施工方法　・・・(4-6)
4.2.4　セットアップ　・・・(4-10)
4.2.5　計測計画　・・・(4-13)
4.2.6　載荷履歴　・・・(4-14)
4.3　実験結果と考察　・・・(4-15)
4.3.1　鉄骨架構の挙動　・・・(4-15)
4.3.2　荷重変形関係と損傷の観察結果　・・・(4-15)
4.3.3　残留変形　・・・(4-23)
4.3.4　損傷程度の区分　・・・(4-24)
4.4　まとめ　・・・(4-25)

第5章　結論

5.1　本論文で得られた知見　・・・(5-1)
5.2　本論文の総括　・・・(5-5)
5.3　今後の課題　・・・(5-6)

謝辞

第１章

序論

1.1　研究の背景

1.1.1　金属外壁の概要

建物の内外部において，各種金属による表面仕上げを施工することは金属工事と総称される[1.1)]．特に，外壁の化粧を目的とした表面仕上げとして，金属板を箱形に折り曲げ加工した金属パネルが多く用いられる．パネルの材質はアルミニウム，鋼，ステンレス，銅，チタン等が主流である．また，パネル表面の加工方法や熱処理，塗装，板厚の種類は豊富であり，製作金物（オーダー金物）として中低層建物において採用される例が多い．

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，金属外壁（図1.1））を構成する．金属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．また，強風時には面外方向の風荷重に対して構造上安全であることが求められる．なお，面外方向の層間変形に対する追従性能は金属パネル自体の変形に期待できることとし，本論文では面内方向の層間変形のみを取り扱う．

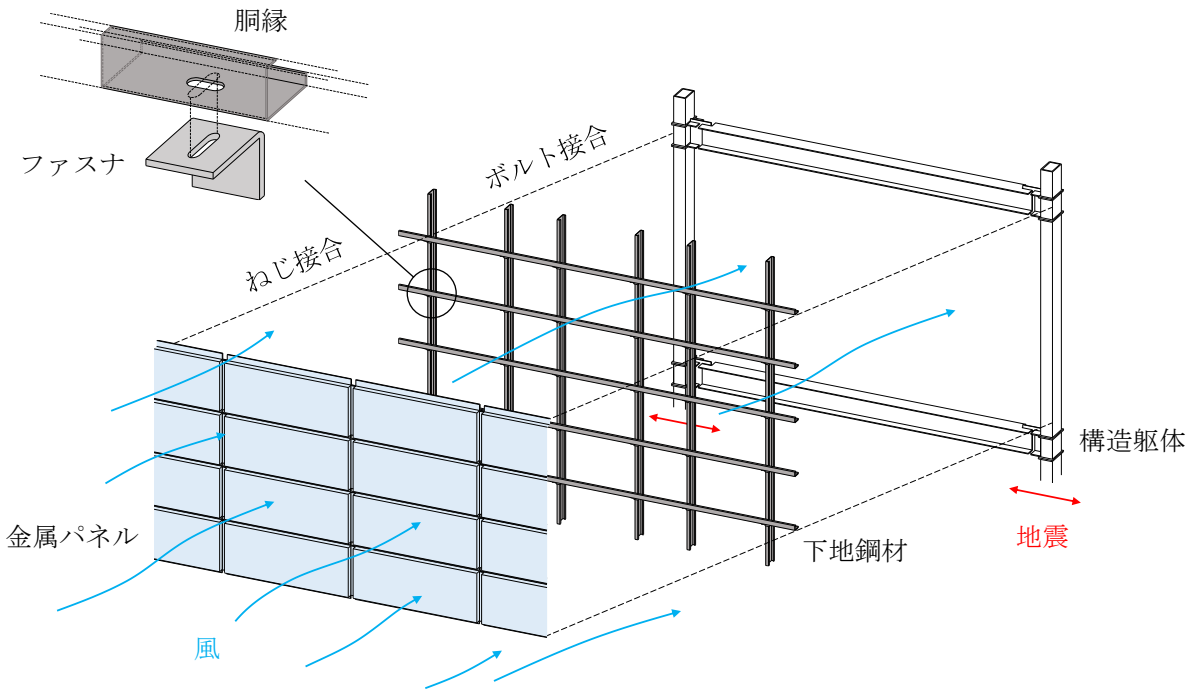


図1.1　金属外壁の構成と想定される外力

1.1.2　金属外壁の施工方法

金属外壁の施工は，パネルの長辺方向を水平に設置する横張り工法，あるいは，パネルの長辺方向を鉛直に設置する縦張り工法による．横張り工法を例に，胴縁に対する金属パネルの取り付け方法を図1.2に示す．隣接するパネル間に水密性や気密性を確保するシーリングを充填するために，パネルの端部には折り曲げ加工を施している．シーリングは，気温の変動や地震時に生ずる層間変形に追従するワーキングジョイントである．隣接するパネル間の横目地では，ドリルねじによってパネルが胴縁に固定され，さらにシーリングによってパネルどうしが接着している．一方，隣接するパネル間の縦目地では，シーリングによってパネルどうしが接着しているのみであり，パネルどうしの干渉を避けるために2mm程度の隙間を設けている．

金属パネルと胴縁間のねじ接合部は，パネルの長辺方向にスロット形状のねじ孔を設けており，気温の変動や地震時の層間変形に追従することを期待している．胴縁は，普通ボルトまたは高力ボルトによってファスナに接続している．胴縁とファスナのボルト接合部は，胴縁に面内方向，ファスナに面外方向のスロット形状のボルト孔を設けて構造躯体の施工誤差を吸収する(図1.1)．位置決めを行い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，ボルトやナットにゆるみ止め機構または現場での溶接を施して固定している．近年では，溶接によって部材表面の塗装をし直す手間や火災リスクが発生することを抑えるため，非溶接化，すなわちボルト接合のみによる固定に対する要求が高まっている．

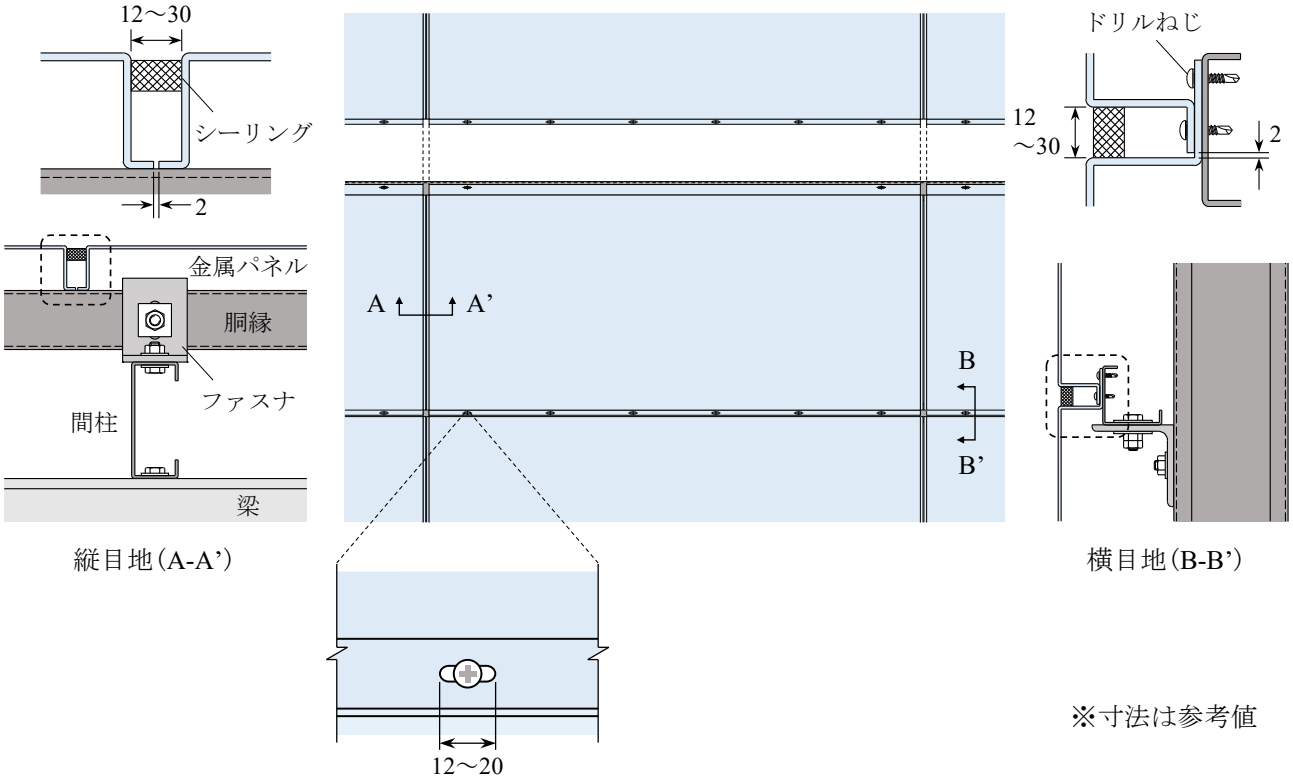


図1.2　胴縁に対する金属パネルの取り付け方法の例

1.1.3　金属外壁の耐震設計

金属外壁の現行の耐震設計では，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として層間変形角1/300[1.2]を，脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界として層間変形角1/150[1.1]を目標としている．パネルの変形追従は，ねじ孔をスロット形状としていることにより，横張り工法の場合はスライド方式（図1.3（a）），縦張り工法の場合はロッキング方式（図1.3（b））が想定されるが，実験的な検証はこれまでに行われていない．

外壁が取り付く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を超える鋼構造建築物に対して，中地震時に生ずる層間変形角が1/200以内に収まるように制限している．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く場合，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，層間変形角の制限は1/120まで緩和できることとしている[1.3]．また，既往の研究[1.4]などでは，中低層鋼構造建物に対する地震応答解析により，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（図1.4）．地震後，構造躯体に損傷がなくても外壁の脱落によって建物の機能が損なわれることのないように，外壁の脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界を確認しておくことは重要である．

（a）スライド方式（横張り工法）　　（b）ロッキング方式（縦張り工法）

図1.3　想定される金属パネルの変形追従方式

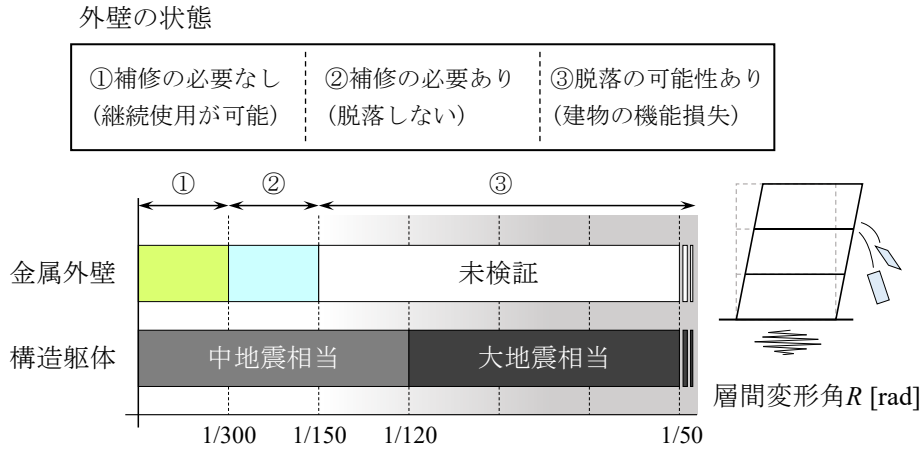


図1.4　現行の設計に基づく金属外壁の耐震性能

ここで，金属外壁に対する補修は，主にシーリングの打ち替えや部材表面の塗装のし直しである．これらの補修事例は，外壁の経年劣化に伴って低下した水密性，気密性，意匠性等の回復を目的としたものであり，地震によって低下した各種性能の回復を目的としているものではないことに注意が必要である．地震後の金属外壁の補修事例が少ない原因として，外壁の変形追従機構や損傷状態が明らかではなく，地震後の継続使用を検討する上で補修の必要性の有無を判断することが困難であったことが考えられる．

1.1.4　金属外壁の耐風設計

金属外壁の現行の耐風設計では，想定される風圧力に対して各部材の応力とたわみを検討する．外壁に作用する風圧力は，建築基準法施行令第82条および平成12年建設省告示第1458号「屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧力」に則って算出する．ただし，再現期間は100年として基準風速の割増しを行っている．

また，ボルト接合部の溶接を省略する場合には，想定される風荷重に対してボルト接合部のすべり抵抗が十分であることを確認する必要がある．図1.5に赤色で示した受圧面積に対して風圧力が等分布に作用することを仮定すると，1か所のボルト接合部に生ずる風荷重は受圧面積と風圧力の積として得られる．ボルト接合部のすべりを防ぐためには，算出した風荷重に対してすべり耐力が上回る必要がある．なお，以上の計算は想定される最大風圧力に対する検討であり，荷重が繰り返し作用する状況や部材の腐食による耐力低下は考慮していない．

ねじ接合部では，風圧力の作用時にねじ孔に変形が集中し，ねじ頭部の引き抜けやはし抜け破断に至ることが確認されている[1.5)]．ねじ接合部の破壊は金属パネルの脱落の直接の原因となるため，危険性の大きい損傷として位置付けられる．しかしながら，ねじ接合部のディテールは，シーリングの性能に基づく目地の設計に付随して決定しており，風や地震に対する設計法は確立されていないのが現状である．

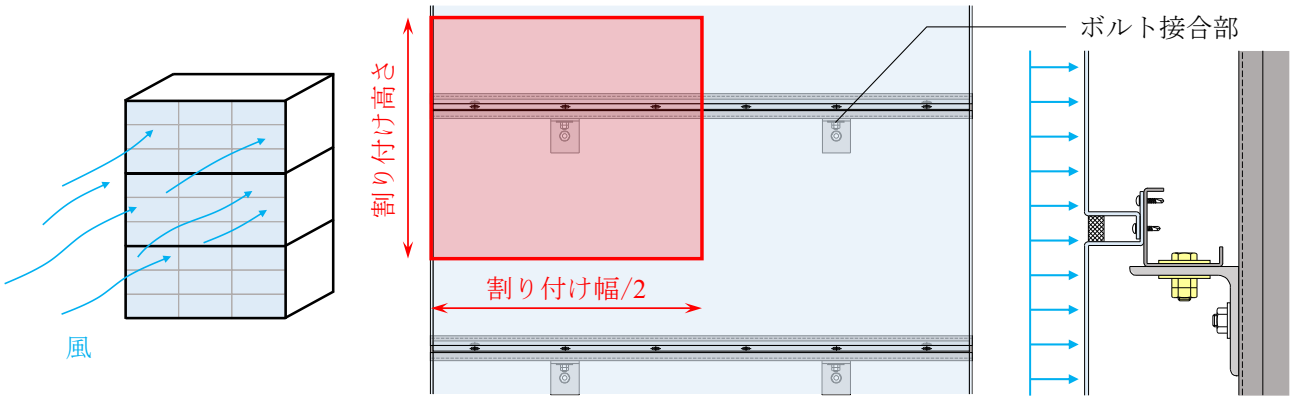


図1.5　ボルト接合部1か所あたりの風圧力の受圧面積

1.2　既往の研究

1.2.1　ボルト接合部とねじ接合部の力学性能に関する研究と課題点

建築・土木の分野では，鋼構造部材の接合に使用する高力ボルト摩擦接合部を対象として，接合部の耐力に関わるすべり係数について多くの実験的研究が行われている．ボルト孔にスロット孔や拡大孔を使用すると，正味断面に基づく降伏耐力が低下し，すべり係数が低下することが分かっている[1.6)~1.9)など]．また，接合面の粗さとすべり係数には正の相関関係があることが認められている[1.10)~1.13)など]．建築分野では「建築工事標準仕様書JASS6鉄骨工事」[1.14)]において，ショットブラストまたはグリットブラストによる摩擦面の表面粗さに50μmR_z以上を求め，0.45以上のすべり係数を期待している．

一方，金属外壁におけるボルト接合部では，スロット孔を有することや，接合面には錆や浸食を防ぐための塗装を施し摩擦処理は行わないことから，高力ボルト摩擦接合部と比較するとすべり係数は小さいことが予想される．風荷重に対する構造安全性を検討するためには，金属外壁におけるボルト接合部のすべり係数を定量的に把握しておくことが重要である．ここで，ボルト接合部のすべり抵抗を意図的に小さくすると，面内方向のスロット孔を活用して地震時の層間変形に対する追従性能を期待することができる．しかしながら，ボルト接合部の固定が慣例的に行われてきたことや，地震と比べて風の発生頻度が高いことから，ボルト接合部においては十分なすべり抵抗を確保する設計が望ましいと言える．

薄板軽量形鋼造建築物では，ドリルねじ等による一面せん断接合部を対象として，力学性状や破壊形式に関する研究が盛んに行われている．既往の実験から，ねじの斜め抜け出し破壊やねじ頭側のねじ孔破壊等による破壊形式と最大耐力の評価式が提案されている[1.15), 1.16)など]．金属外壁におけるねじ接合部では，耐力の評価自体は重要ではないものの，破壊形式を予測し，外壁の脱落防止策を講じる上では有用であると言える．一般に，金属外壁におけるねじ接合部は，目地幅に応じてはしあき距離を5～14mm程度としており，気温の変動や地震時の層間変形に追従するためにねじ孔をスロット形状としている．これらは，文献1.15)と文献1.16)の対象とする接合部の条件と異なるため，既往の評価方法に基づいて破壊形式や最大耐力を評価することは適切ではない．

以上を踏まえて，金属外壁における各接合部の力学性能を確認するため，接合部要素の実験を行う必要がある．また，外壁の変形限界を評価するためには，金属パネル，下地鋼材，および取り付け金物等からなる外壁ユニットを用いた実験を実施し，接合部の損傷状態が外壁の面内挙動に及ぼす影響を検討する必要があると言える．

1.2.2　非構造外壁の変形追従性能に関する研究と課題点

中低層建物に採用される外装パネルのうち，GRC(ガラス繊維補強セメント)パネルやECP(押出成形セメント板)等は，スライド方式あるいはロッキング方式による変形追従を想定して取り付けられる．一方，金属パネルをはじめ，経験的に変形追従性能が認められている外装パネルは，変形追従方式を明確に示していないことがある．以下に，中低層鋼構造建物において代表的な乾式外壁における外装パネルの取り付け方法と想定される変形追従方式について記す．また，文献1.17)～1.19)を参考に，横張り工法による外装パネルの取り付け方法を表1.1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)によって下地鋼材である縦胴縁に留め付ける．変形追従方式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，下地鋼材やシーリングの変形が負担するものと考えられる．

【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，外装材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を用いて縦胴縁に留め付ける．変形追従方式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挙動が予想される．

【変形追従がスライド方式によるもの】

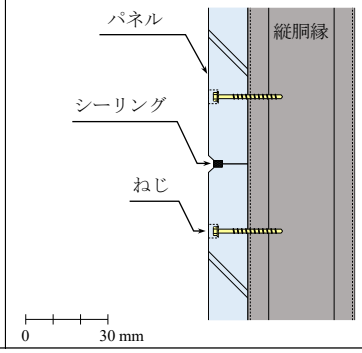
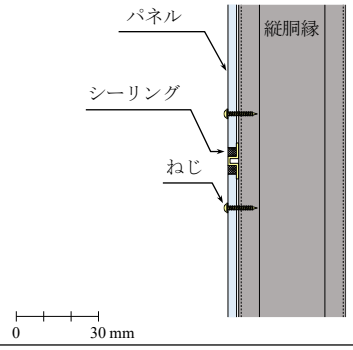
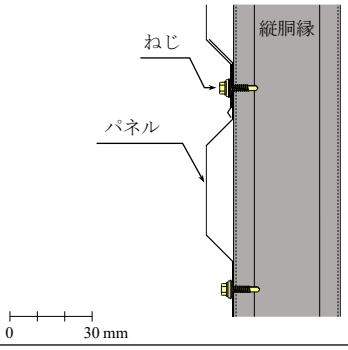
(g)GRC(ガラス繊維補強セメント)パネルおよび(h)ECP(押出成形セメント板)は，胴縁を用いず，パネルの上下をそれぞれファスナおよびZクリップによって支持する．ファスナおよびZクリップのボルト孔を水平方向に長孔とすることで，パネルの変形追従はスライド方式となる．

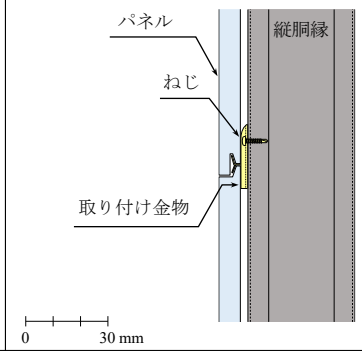
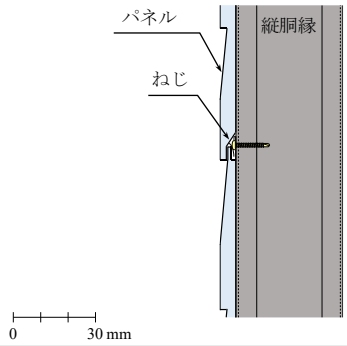
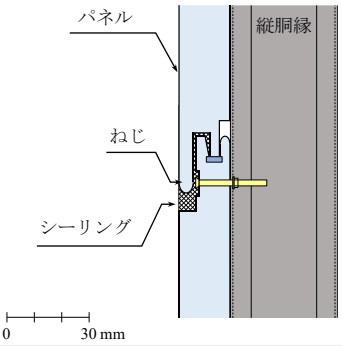
【金属パネル】

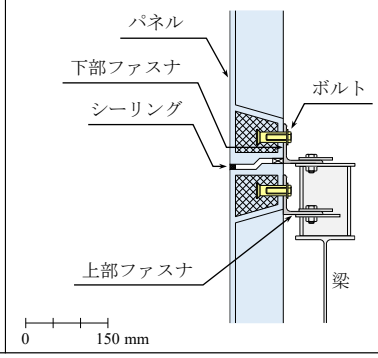
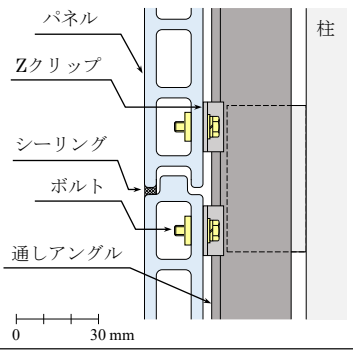
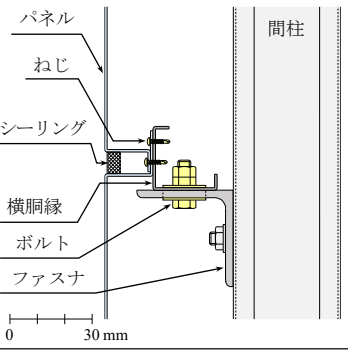
(i)金属パネルは，ドリルねじによって横胴縁に取り付ける．パネル下部のねじ孔を水平方向に長孔とすることで，スライド方式に準ずる挙動が予想される．

乾式外壁の変形追従性能に関して，小濱ら[1.20)]は，GRC(ガラス繊維補強セメント)パネルを用いた面内載荷実験により，層間変形角1/60radまでほとんど補修の必要がないこと，1/30radまで脱落や重要な機能の低下に至らないことを確認している．また，浅井ら[1.21)]はECP(押出成形セメント板)を用いた外壁の面内載荷実験により，層間変形角1/50radまでほとんど補修の必要がないこと，1/40radまで脱落や重要な機能の低下に至らないことを確認している．これらの既往の実験では，外壁に生ずる強制変形が，外装パネルの他にも下地鋼材の局部的な変形によって吸収されることが確認されている．したがって，外壁の変形追従性能を検討する際には外壁の各部材および各接合部の実験にとどまらず，外壁ユニットを用いた実験が重要であることが分かる．ただし，既往の実験の多くは外壁の開口，入隅および出隅を含まない一般部の試験体によるものであり，開口，入隅および出隅を含めた外壁に対してはさらに実験が必要である．

表1.1　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，シーリングの変形による		
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		スライド方式に準ずる
パネルの取り付け方法			

1.3　本研究の目的と構成

本論文では，金属パネルを用いた非構造外壁(金属外壁)を対象として，接合部要素から1層1スパンの実大鉄骨架構に取り付く外壁システムにまで展開した一連の構造実験を実施する．本論文の目的は，ボルト接合部の耐風性能を十分に確保した条件の下で，地震時における金属外壁の面内方向の変形追従機構および変形限界を明確にすることである．本論文は，以下に記す全5章により構成する．

第1章「序論」では，本研究の対象である金属外壁の施工および設計方法について示した．また，ボルトおよびねじによる機械的接合部や，各種の乾式非構造外壁を対象とした面内載荷実験に関する既往の研究論文の調査を行い，地震時における金属外壁の面内変形追従機構が不明確であること，外壁が脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界に関する実験的な検討が必要であることを指摘し，本論文の目的を述べた．

第2章「金属外壁における接合部の力学挙動」では，各接合部の寸法等の違いに着目したボルト接合部およびねじ接合部の実験を行う．ボルト接合部の実験では，接合部のすべり係数を評価し，想定される風荷重に対する構造安全性を確認する．なお，風荷重は想定される最大風圧力により得たものを対象とし，荷重が繰り返し作用する状況や部材の腐食による耐力低下は考慮していない．また，ねじ接合部の実験では，はしあき方向に作用する応力に対して，力学モデルに基づいて破壊形式と最大耐力の評価を行う．

第3章「1ユニットの金属外壁要素の変形追従性能」では，ファスナ，胴縁，および金属パネル1枚からなる1ユニットの金属外壁要素の試験体を用いて，地震時を想定した面内載荷実験を行う．なお，ボルト接合部は第2章にて評価したすべり係数に基づいて，風荷重に対する構造安全性を有する条件の下で検討を行う．実験では，各部材および各接合部の変形を計測し，パネルの変形追従方式だけでなく外壁全体の変形追従機構を分析する．また，第2章に示したねじ接合部の力学モデルを拡張して，外壁の破壊形式と最大耐力の評価を試みる．さらに，各種の損傷状態と残留変形を整理し，補修の必要なしに継続使用が可能である変形限界と脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界について提示する．

第4章「1層1スパンの金属外壁システムの変形追従性能」では，1層1スパンの実大鉄骨架構に複数の金属パネルを取り付けた外壁システムの試験体を用いて，地震時を想定した面内載荷実験を行う．第3章にて扱った試験体は外壁一般部と捉え，本章では外壁一般部に加えて開口，入隅および出隅を有する構面を合わせて，総合的に金属外壁の変形限界を考察する．なお，ボルト接合部は第2章に基づいて風荷重に対する構造安全性を期待できる条件の下，施工方法は実状に即したものとする．

第5章「結論」では，第2章から第4章で得られた知見を総括し，本研究における結論とするとともに，今後の課題を記す．

参考文献

1.1)　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

1.2)　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

1.3)　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

1.4)　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

1.5)　佐藤秋雄，本田宏武，大岡督尚，佐藤良介，中本康，横山広大：アルミ製外装パネルの耐風圧性能（その1）耐風圧試験概要，（その2）耐風圧試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅰ，pp.105-108，2021

1.6)　藤本盛久，田中淳夫：過大孔を有する高力ボルト摩擦接合部の性状について(その1　単純引張試験体による実験)，日本建築学会関東支部研究報告集. 構造系，pp.189-192，1977

1.7)　田中淳夫，増田浩志，脇山廣三，辻丘静雄，平井敬二，立山英二：過大孔・スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状，鋼構造論文集，第5巻，第20号，pp.35-44，1998

1.8)　森猛，山崎信宏，山口実浩：拡大孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力と降伏耐力に関する実験的研究，土木学会論文集，第2005巻，794号，I-72，pp.157-169，2005

1.9)　桑原進，安原慎吾，加藤あゆみ：スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響　すべり試験による検討，構造工学論文集，Vol.67B，pp.351-356, 2021

1.10)　木村富夫，舟橋功男，木下勝弘，小林昌一：高張力ボルト摩擦接合部の研究(2)(接触面の表面あらさと摩擦係数の関係について)，日本建築学会論文報告集，第69号，pp.657-660，1961

1.11)　脇山廣三，八木毅，山田義智：高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす表面粗さの影響に関する実験的研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，構造系，pp.369-372，1987

1.12)　加村隆志，北後寿：高力ボルト摩擦接合の接合面粗さがすべり耐力へ及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第485号，pp.127-134，1996

1.13)　森猛，田坂康介，一宮充，小笠原照夫：鋼材の表面粗さパラメータと高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.67，No.2，pp.446-453，2011

1.14)　日本建築学会：建築工事標準仕様書JASS6鉄骨工事，第11版，2018

1.15)　岡田久志：ドリリングタッピンねじによる薄鋼板の一面せん断重ね継手耐力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第503号，pp.117-123，1998

1.16)　秋元敦，山田丈富，中込忠男，橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究(その5)アルミニウム合金薄板のタッピンねじおよび小径ボルト接合の一面せん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1分冊，構造Ⅲ，pp.267-268，1997

1.17)　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

1.18)　日本金属屋根協会，日本鋼構造協会：鋼板製外壁標準SSW2011，2011

1.19)　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

1.20)　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

1.21) 浅井英克，時野谷浩良，鈴井康正：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分冊，構造Ⅲ，pp.1059-1060，2007

第２章

金属外壁における接合部の力学挙動

2.1　はじめに

本章では，金属外壁におけるボルト接合部とねじ接合部に着目する．ファスナと胴縁間のボルト接合部は，胴縁に面内方向，ファスナに面外方向のスロット形状のボルト孔を設けて構造躯体の施工誤差を吸収している．位置決めを行い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，ボルトやナットにゆるみ止め機構または現場での溶接を施して固定している．近年では，溶接によって部材表面の塗装をし直す手間や火災リスクが発生することを抑えるため，非溶接化，すなわちボルト接合のみによる固定に対する要求が高まっている．

ボルト接合部の溶接を省略する場合には，想定される風荷重に対してボルト接合部のすべり抵抗が十分であることを確認する必要がある．図2.1に赤色で示した受圧面積に対して風圧力が等分布に作用することを仮定すると，1か所のボルト接合部に生ずる風荷重は受圧面積と風圧力の積として得られる．ボルト接合部のすべりを防ぐためには，算出した風荷重に対してすべり耐力が上回る必要がある．なお，以上の計算は想定される最大風圧力に対する検討であり，荷重が繰り返し作用する状況や部材の腐食による耐力低下は考慮していない．

建築・土木の分野では，鋼構造部材の接合に使用する高力ボルト摩擦接合部を対象として，接合部のすべり係数に関する多くの実験的研究が行われている．ボルト孔にスロット孔や拡大孔を使用すると，正味断面に基づく降伏耐力が低下し，すべり係数が低下することが分かっている[2.1)~2.4)など]．また，接合面の粗さとすべり係数には正の相関関係があることが認められている[2.5)~2.8)など]．建築分野では「建築工事標準仕様書JASS6鉄骨工事」[2.9)]においてショットブラストまたはグリットブラストによる摩擦面の表面粗さに50μmR_z以上を求め，0.45以上のすべり係数を期待している．

金属外壁におけるボルト接合部では，スロット孔を有することや，接合面には錆や浸食を防ぐための塗装を施し摩擦処理は行わないことから，高力ボルト摩擦接合部と比較するとすべり係数は小さいことが予想される．風荷重に対する構造安全性を検討するためには，金属外壁におけるボルト接合部のすべり係数を定量的に把握しておくことが重要である．

本章2.2節および2.3節では，胴縁とファスナ間のボルト接合部を対象とした要素実験を行い，ボルト接合部のすべり係数を評価する．また，最大風圧力から想定される風荷重に対して，ボルト接合部の構造安全性を確認する．

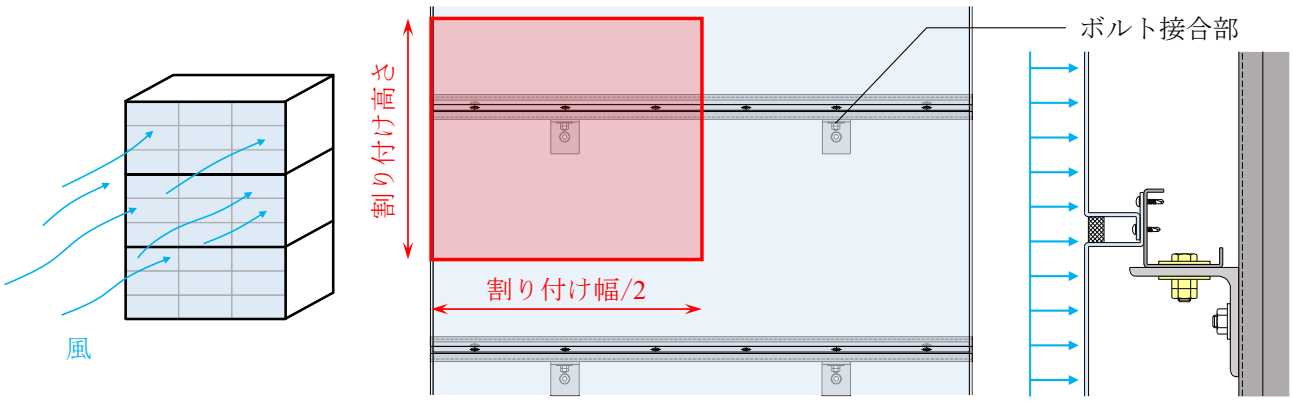


図2.1　ボルト接合部1か所あたりの風圧力の受圧面積

金属パネルと胴縁間のねじ接合部では，風圧力の作用時にねじ孔に変形が集中し，ねじ頭部の引き抜けやはし抜け破断に至ることが確認されている[2.10)]．ねじ接合部の破壊は金属パネルの脱落の直接の原因となるため，危険性の大きい損傷として位置付けられる．しかしながら，ねじ接合部のディテールは，シーリングの性能に基づく目地の設計に付随して決定しており，風や地震に対する設計法は確立されていないのが現状である．

薄板軽量形鋼造建築物では，ドリルねじ等による一面せん断接合部を対象として，力学性状や破壊形式に関する研究が盛んに行われている．既往の実験から，ねじの斜め抜け出し破壊やねじ頭側のねじ孔破壊等による破壊形式と最大耐力の評価式が提案されている[2.11), 2.12)など]．金属外壁におけるねじ接合部では，耐力の評価自体は重要ではないものの，破壊形式を予測し，外壁の脱落防止策を講じる上では有用であると言える．一般に，金属外壁におけるねじ接合部は，目地幅に応じてはしあき距離を5～14mm程度としており，気温の変動や地震時の層間変形に追従するためにねじ孔をスロット形状としている．これらは，文献2.11)と文献2.12)の対象とする接合部の条件と異なるため，既往の評価方法に基づいて破壊形式や最大耐力を評価することは適切ではない．

本章2.4節では，金属パネルと胴縁間のねじ接合部を対象とした要素実験を行う．実験では，接合部の寸法等の違いに着目し，はしあき方向に作用する応力に対して，力学モデルに基づき破壊形式と最大耐力の評価を行う．

2.2　ボルト接合部のすべり係数に関する実験

2.2節では，ファスナと胴縁間のボルト接合部を対象とした要素実験を行い，すべり係数を確認する．

2.2.1　試験体の概要

試験体の寸法を図2.2および表2.1に示す．試験体は，金属仕上げ類への採用を想定したボルト接合部である．ボルト接合部は，2枚の母材と2枚の添板，および両者を締め付けるボルトによって構成する．母材の板厚は12mm，添板の板厚は6mmであり，幅は共通して65mmとしている．これらの寸法は，「鋼構造接合部設計指針」[2.13)]におけるすべり係数評価試験を参考に，部材の正味断面に基づく降伏耐力に対して予測すべり荷重の比が1.0以下になるように決定した．ただし，予測すべり荷重はすべり係数を0.6，初期導入張力を標準ボルト張力として算出している．母材と添板の材質は，非構造部材の接合を想定して一般構造用鋼板(SS400)またはオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を用いる．試験体に使用した母材および添板について，JIS-1A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表2.2に示す．なお，使用するボルトは溶融亜鉛めっき高力ボルト(M12(F8T)，首下長さ50mm)とする．

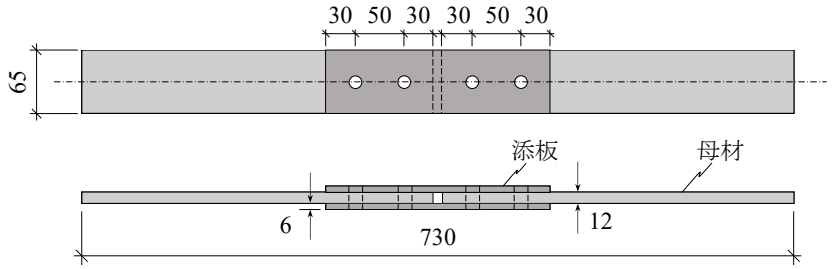


図2.2　試験体の寸法(形状1)

表2.1　試験体の一覧と試験体数

	ボルト孔形状					
	(a) 形状1	(b) 形状2	(c) 形状3	(d) 形状4	(e) 形状5	(f) 形状6
表面処理	φ13		40 30 φ13スロット孔	φ13スロット孔 30 40		
	母材:丸孔×2列 添板:丸孔×2列	母材:丸孔×1列 添板:丸孔×1列	母材:縦スロット孔×1列 添板:丸孔×1列	母材:横スロット孔×1列 添板:丸孔×1列	母材:縦スロット孔×1列 添板:横スロット孔×1列	母材:横スロット孔×1列 添板:縦スロット孔×1列
(i)	5	5	5	5	5	5
(ii)	5	–	–	–	5	5
(iii)	5	–	–	–	5	5
(iv)	5	–	–	–	5	5
(v)	5	–	–	–	5	5

(i)　溶融亜鉛めっき(2種40)
(ii)　溶融亜鉛めっき(2種40)とリン酸塩刷毛塗り
(iii)　電気亜鉛めっき(3級の有色クロメート処理2級)
(iv)　電気亜鉛めっき(3級の有色クロメート処理2級)と錆止め塗料(一液形変性エポキシ樹脂)
(v)　ステンレス(梨地)

実験のパラメータはボルト接合部の表面処理の種類，ボルト孔形状およびボルトの導入張力とする．ボルト接合部の表面処理は，(i)溶融亜鉛めっき(2種40)，(ii)溶融亜鉛めっき(2種40)とリン酸塩刷毛塗り，(iii)電気亜鉛めっき(3級の有色クロメート処理2級)，(iv)電気亜鉛めっき(3級の有色クロメート処理2級)と錆止め塗料(一液形変性エポキシ樹脂)，(v)ステンレス(梨地)の5種類とする．

ボルト孔形状は，表2.1に示す6種類である．まず，(a)形状1は「鋼構造接合部設計指針」[2.13]に記載の試験体と同形状であり，標準試験体としてすべての表面処理において用意し，すべり係数の基準値の算出に用いる．これに対して，金属外壁におけるボルト接合部においては，応力方向のボルト本数を1本とすることが多く，かつ応力方向および応力直交方向にスロット孔を設ける．以下では，応力方向にスロット孔を設けたものを縦スロット孔，応力直交方向にスロット孔を設けたものを横スロット孔と呼ぶ．スロット孔の長径は「鋼構造接合部設計指針」[2.13]において提示されている2.5d(dはボルトの呼び径)よりさらに大きく，躯体の施工誤差を±15mm程度吸収できる40mm(3d)となっている．上記の影響を検証するため，(b)形状2では応力方向のボルト本数を1本とし，(c)形状3および(d)形状4では添板のボルト孔をスロット孔とする．さらに，(e)形状5と(f)形状6では実接合部の形状を想定して，母材と添板に互いに直交するスロット孔を設ける．

上述した表面処理の種類とボルト孔形状の組み合わせにつき，ボルトの初期導入張力を10, 20, 30, 40, 50kNに設定した5種類の試験体を用意して実験を行った．これは，金属外壁におけるボルト接合部では張力管理がほとんど行われていないことを勘案したものである．すなわち，高力ボルト(M12(F8T))の標準ボルト張力50.4kNを上限として幅広く設定し，導入張力の違いによる影響を確認する．

表2.2　材料特性

	t	σ_y	σ_u	$Y.R.$	ε_u
	[mm]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[%]	[%]
SS400	12	294	453	65	29
	6	288	424	68	28
SUS304	12	275	647	43	51
	6	269	667	40	50

2.2.2　載荷方法

試験体のセットアップを図2.3に示す．試験体は，上下をそれぞれスチフナ付きL字形治具によって挟み込み，試験機に固定する．スチフナ付きL字形治具と試験体は，試験体より高強度かつ太径の高力ボルト(M16(F10T))による摩擦接合とし，試験部分より先にすべりが生じないように設計する．また，上下の治具はそれぞれ高力ボルト(M20(F10T))により試験機に引張接合している．

試験体のセットアップは，まず2枚の母材をそれぞれスチフナ付きL字形治具に接合し，試験機に固定した後に実験対象であるボルト接合部の締め付けを行う．なお，本実験では計測機器等の制限からボルトのリラクセーションは考慮せず，締め付けから10分程度で載荷を開始した．実験は単調引張載荷とし，ボルト接合部がすべり出し，最大耐力後の耐力低下が確認できるまで行う．載荷速度はすべり量0.2mmまでは0.1mm/minとし，それ以降は2.0mm/minとする．

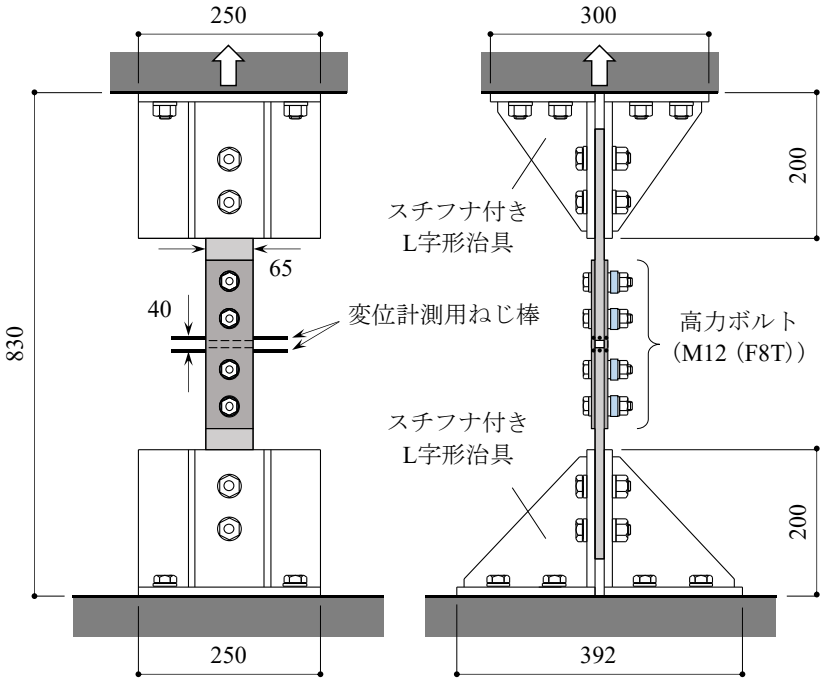


図2.3　セットアップ

2.2.3　計測計画

【表面粗さと膜厚】

実験に先立ち，試験体の表面粗さと膜厚の測定を行った．表面粗さは，触針式粗さ測定器(写真2.1)を用いて最大高さ粗さR_zを測定する．また，膜厚は，膜厚計(写真2.2)を用いて測定する．表面粗さおよび膜厚の測定は，母材と添板の接触面においてボルト孔周りの3箇所にて行い，1試験体あたり合計24箇所について行った(図2.4)．

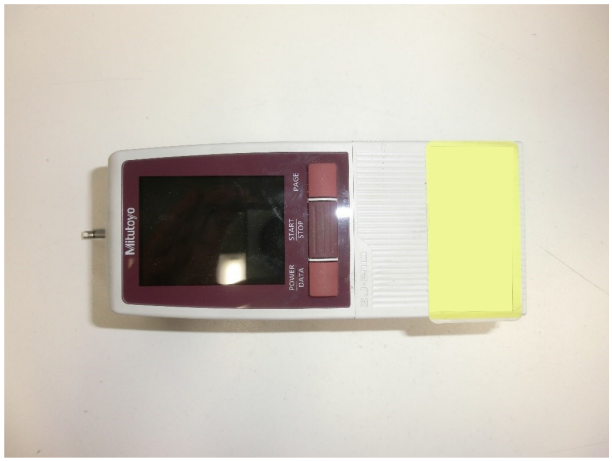


写真2.1　触針式粗さ測定器

写真2.2　膜厚計

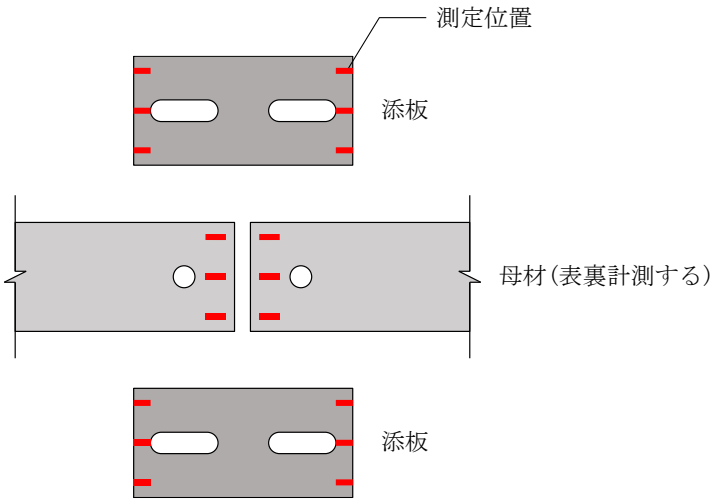


図2.4　表面粗さの測定位置(形状3)

【すべり係数】

実験中は，試験機に組み込まれたロードセルにより軸方向力Pを得る．また，母材および添板の側面には，それぞれ試験体の中央から20mmの位置に計測用ねじ棒を合計12箇所設置する（図2.3，写真2.3）．設置したねじ棒に対して，母材側に変位計を，添板側にターゲットを取り付けて計測した母材と添板の相対変位の平均値から接合部の変形δを得る．また，母材と添板を接合する段階からボルトの導入張力を図2.5に示すワッシャー形ロードセルにより計測する．すべり係数μは，実験によって得られたすべり耐力P_sを用いて次式により算出する．

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot \sum N_i} \qquad \cdots (2.1)$$

ここで，すべり耐力P_sは「鋼構造接合部設計指針」[2.13]に倣って決定する．すなわち，接合部の変形が0.2mmに達するまでに明瞭な主すべりなどによって最大の荷重が得られた場合はその荷重とし，明瞭な主すべりが生じなかった場合は接合部の変形0.2mmに対応する荷重としている．N_i（i=1, 2）はボルトの初期導入張力であり，締め付け終了時の計測値である．mは摩擦面の数であり，本実験では2である．

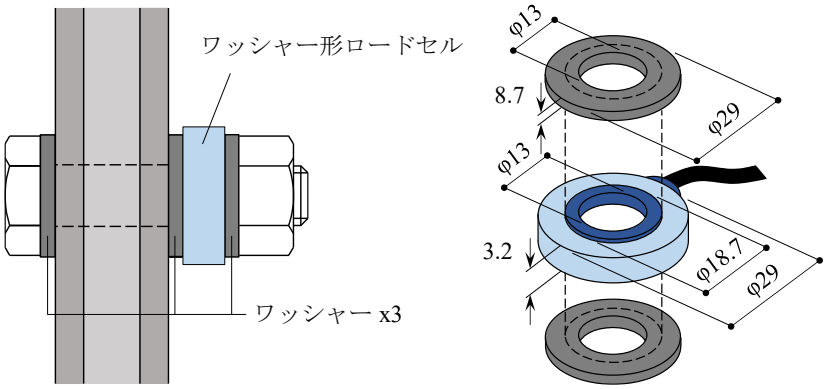


図2.5　導入張力の計測方法

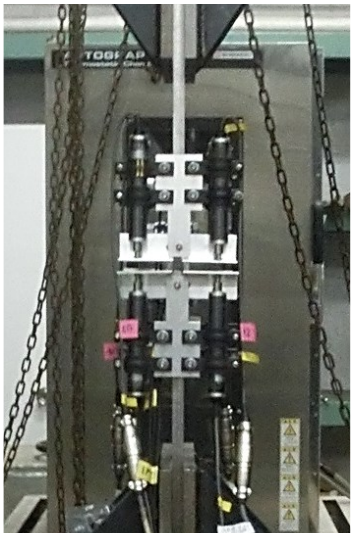


写真2.3　変位計の設置状況

2.2.4　ボルト接合部の要素実験結果の概要

実験結果の一覧を表2.3～表2.5に示す．表には，各試験体の最大高さ粗さ，接合部耐力比，導入張力，すべり耐力，およびすべり係数を記している．また，ボルト孔形状(図2.6)および表面処理ごとの荷重変形関係図2.7～図2.24に示す．各図(a)はすべり耐力の評価範囲である接合部の変形0.2mmを含む1.0mmまで，各図(b)は試験体の最大耐力を確認するまでの範囲である．図の縦軸はボルト1本あたりの軸方向力P/n(nは片側接合部の応力方向に配置したボルト本数)であり，横軸は接合部の変形δである．各図(b)中には破壊形式を記し，載荷後の試験体を各図(c)に示す．実験結果の概要を，ボルト孔形状ごとに以下に述べる．

【形状1…母材：丸孔×2列，添板：丸孔×2列】
【形状2…母材：丸孔×1列，添板：丸孔×1列】

ボルト孔が丸孔であり，かつ孔まわりにめっきが付着しているために接合部の変形1mm程度でボルトが支圧状態に移行したことが推測され，耐力が上昇している．なお，溶融亜鉛めっきを施した試験体のうち，接合部の変形0.2mm以下で支圧剛性を発揮したと考えられる試験体は，結果から除いている．破壊形式は，ボルトのせん断破壊である．

【形状3…母材：丸孔×1列，添板：縦スロット孔×1列】

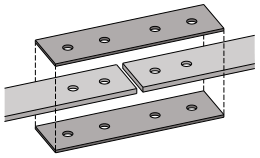
添板のみが縦長孔である形状3では，接合部の変形15mm程度まで荷重をほぼ一定に維持したまま変形が進み，その後支圧状態に移行している．破壊形式は，添板の縦スロット孔のはし抜け破断である．

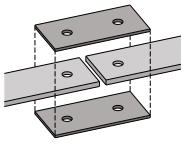
【形状4…母材：丸孔×1列，添板：横スロット孔×1列】

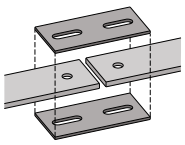
添板のみが横スロット孔である形状4では，支圧状態に移行するまでの接合部の変形は丸孔の形状1や形状2とほとんど同様の挙動を示す．一方，ボルトが支圧状態に移行してから破断に至るまでの変形量は形状1や形状2，さらには添板に縦スロット孔を設けた形状3と比較して大きい．最終的には，添板の横スロット孔はしあき部の著しい変形と，ボルトの曲げ変形を確認した．

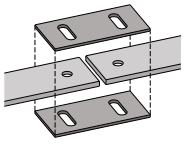
【形状5・形状6…縦スロット孔×1列と横スロット孔×1列の組み合わせ】

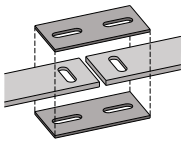
縦スロット孔と横スロット孔を組み合わせた形状5と形状6では，ボルトの支圧状態に移行するまでは形状3と，支圧状態に移行した後は形状4と同様の挙動を示している．破壊形式は，表面処理がステンレスである試験体でボルトのせん断破壊と添板はしあき部の変形およびボルトの曲げ変形が見られた結果を除くと，縦スロット孔のはし抜け破断である．


(a) 形状1


(b) 形状2


(c) 形状3


(d) 形状4


(e) 形状5

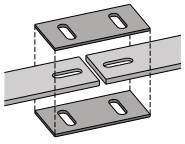

(e) 形状6

図2.6　ボルト孔形状

表2.3　実験結果の一覧(1)

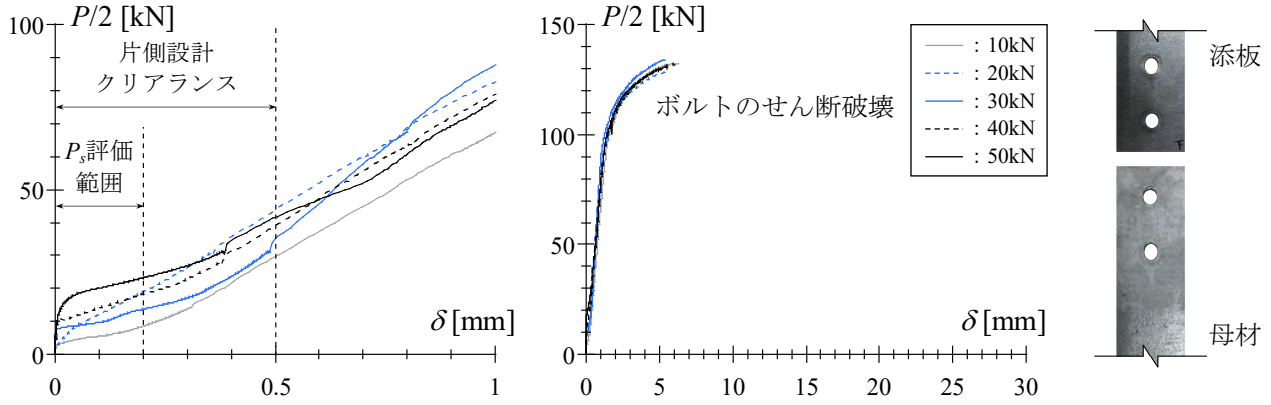
No	表面処理	形状	位置	最大高さ粗さ	計算値			実験値			
					すべり耐力	降伏耐力	接合部耐力比	導入張力N_i [kN]		すべり耐力	すべり係数
				R_z[μm]	${}_{cal}P_s$ [kN]	${}_{cal}P_y$ [kN]	${}_{cal}P_s/{}_{cal}P_y$ [-]	第1ボルト	第2ボルト	P_s [kN]	μ [-]
1	溶融亜鉛めっき	形状1	上	12.1	24.0	146.6	0.82	9.9	10.1	18.3	0.46
2			下	11.0	24.0			10.3	9.8	10.9	0.27
3			上	9.4	48.0			20.4	20.6	16.6	0.20
4			下	13.1	48.0			20.8	20.1	31.0	0.38
5			上	11.0	72.0			30.8	29.5	37.5	0.31
6			下	11.3	72.0			31.1	30.4	27.7	0.23
7			上	10.9	96.0			39.8	39.9	34.6	0.22
8			下	12.5	96.0			40.2	39.7	36.6	0.23
9			上	12.4	120.0			50.1	49.9	24.4	0.12
10			下	9.8	120.0			50.0	49.6	46.6	0.23
11		形状2	上	6.8	12.0	146.6	0.41	10.9		6.5	0.30
12			下	7.5	12.0			10.9		6.7	0.31
13			上	5.5	24.0			19.9		6.7	0.17
14			下	7.5	24.0			20.5		6.5	0.16
15			上	6.7	36.0			29.4		8.5	0.14
16			下	6.9	36.0			30.1		15.8	0.26
17			上	8.3	48.0			40.0		10.0	0.13
18			下	9.8	48.0			41.0		19.2	0.23
19			上	5.8	60.0			50.9		24.9	0.25
20			下	6.6	60.0			49.7		23.0	0.23
21		形状3	上	6.3	12.0	146.6	0.41	10.9		3.9	0.18
22			下	6.2	12.0			10.8		2.4	0.11
23			上	6.7	24.0			20.4		8.9	0.22
24			下	7.0	24.0			20.4		4.9	0.12
25			上	5.5	36.0			29.2		11.5	0.20
26			下	6.3	36.0			29.7		6.3	0.11
27			上	7.5	48.0			40.2		19.9	0.25
28			下	6.7	48.0			40.2		13.2	0.17
29			上	7.6	60.0			49.2		13.5	0.14
30			下	7.2	60.0			49.5		12.6	0.13
31		形状4	上	5.9	12.0	70.5	0.86	10.1		5.9	0.29
32			下	4.6	12.0			9.7		5.7	0.29
33			上	5.5	24.0			19.7		5.9	0.15
34			下	6.3	24.0			19.9		10.2	0.26
35			上	5.4	36.0			30.4		7.9	0.13
36			下	5.5	36.0			30.9		13.0	0.21
37			上	7.0	48.0			39.9		17.0	0.21
38			下	7.5	48.0			40.1		17.9	0.22
39			上	6.0	60.0			49.6		9.1	0.09
40			下	6.0	60.0			49.6		18.0	0.18
41		形状5	上	10.8	12.0	70.5	0.86	10.3		3.9	0.19
42			下	11.8	12.0			10.0		2.7	0.13
43			上	11.2	24.0			20.5		9.1	0.22
44			下	11.6	24.0			20.3		12.0	0.30
45			上	13.5	36.0			30.3		13.8	0.23
46			下	12.1	36.0			30.3		8.2	0.14
47			上	13.3	48.0			39.7		15.5	0.20
48			下	11.9	48.0			40.5		14.7	0.18
49			上	14.7	60.0			50.0		11.2	0.11
50			下	8.6	60.0			50.2		16.5	0.16
51		形状6	上	10.4	12.0	70.5	0.86	10.1		3.0	0.15
52			下	10.1	12.0			11.0		3.9	0.18
53			上	11.0	24.0			20.1		8.6	0.22
54			下	9.4	24.0			20.0		6.9	0.17
55			上	9.6	36.0			30.6		10.2	0.17
56			下	10.7	36.0			31.1		8.2	0.13
57			上	10.0	48.0			40.5		14.3	0.18
58			下	10.0	48.0			40.3		14.0	0.17
59			上	11.4	60.0			50.0		15.0	0.15
60			下	11.3	60.0			50.1		13.0	0.13

表2.4　実験結果の一覧(2)

No	表面処理	形状	位置	最大高さ粗さ	計算値			実験値			
					すべり耐力	降伏耐力	接合部耐力比	導入張力N_i [kN]		すべり耐力	すべり係数
				R_z[μm]	$_{cal}P_s$ [kN]	$_{cal}P_y$ [kN]	$_{cal}P_s/_{cal}P_y$ [-]	第1ボルト	第2ボルト	P_s [kN]	μ [-]
61	溶融亜鉛めっき+リン酸塩刷毛塗り	形状1	上	18.2	24.0	146.6	0.82	10.1	10.9	23.4	0.56
62			下	15.9	24.0			9.7	10.0	18.9	0.48
63			上	20.0	48.0			20.7	20.3	31.1	0.38
64			下	17.0	48.0			20.6	19.6	6.7	0.08
65			上	17.1	72.0			30.9	30.6	28.0	0.23
66			下	14.3	72.0			30.1	29.8	24.4	0.20
67			上	18.3	96.0			40.0	40.4	56.1	0.35
68			下	19.7	96.0			40.3	40.4	69.4	0.43
69			上	15.6	120.0			50.4	50.6	70.3	0.35
70			下	15.8	120.0			50.4	49.7	42.0	0.21
71		形状5	上	18.8	12.0	70.5	0.86	10.6		5.3	0.25
72			下	15.4	12.0			10.0		4.6	0.23
73			上	16.6	24.0			20.3		10.6	0.26
74			下	21.4	24.0			20.1		7.6	0.19
75			上	18.8	36.0			29.9		18.4	0.31
76			下	17.0	36.0			30.0		11.4	0.19
77			上	20.0	48.0			40.6		19.7	0.24
78			下	22.1	48.0			39.5		17.5	0.22
79			上	18.1	60.0			50.4		21.5	0.21
80			下	16.0	60.0			49.7		19.6	0.20
81		形状6	上	14.1	12.0	70.5	0.86	10.1		3.0	0.15
82			下	13.0	12.0			11.0		3.9	0.18
83			上	14.3	24.0			20.5		12.7	0.31
84			下	13.1	24.0			20.1		10.3	0.26
85			上	14.0	36.0			30.7		12.1	0.20
86			下	16.5	36.0			30.8		15.7	0.25
87			上	14.5	48.0			40.2		15.7	0.19
88			下	14.0	48.0			40.0		21.1	0.26
89			上	12.6	60.0			51.0		22.1	0.22
90			下	17.7	60.0			50.9		18.0	0.18
91	電気亜鉛めっき	形状1	上	4.4	24	146.6	0.82	10.8	9.4	3.7	0.09
92			下	3.8	24			9.5	9.8	3.0	0.08
93			上	4.3	48			20.0	19.9	13.5	0.17
94			下	4.9	48			21.0	20.4	9.8	0.12
95			上	3.8	72			30.9	28.3	11.4	0.10
96			下	3.5	72			30.3	29.8	7.3	0.06
97			上	3.8	96			41.0	40.7	26.5	0.16
98			下	3.9	96			40.2	40.3	14.7	0.09
99			上	5.3	120			50.6	49.2	52.1	0.26
100			下	4.1	120			50.4	50.0	15.7	0.08
101		形状5	上	5.1	12	70.5	0.86	10.6		5.4	0.26
102			下	4.1	12			11.1		2.5	0.11
103			上	4.9	24			19.5		6.9	0.18
104			下	3.6	24			20.6		5.0	0.12
105			上	5.6	36			30.0		12.1	0.20
106			下	5.5	36			30.5		10.1	0.17
107			上	4.7	48			40.6		13.5	0.17
108			下	3.7	48			39.0		12.9	0.17
109			上	4.6	60			49.5		11.0	0.11
110			下	4.7	60			50.2		7.0	0.07
111		形状6	上	3.0	12	70.5	0.86	10.6		2.7	0.13
112			下	4.9	12			10.0		1.7	0.09
113			上	5.2	24			20.4		2.2	0.05
114			下	3.8	24			20.1		5.8	0.15
115			上	5.3	36			29.6		6.3	0.11
116			下	4.5	36			29.8		5.2	0.09
117			上	5.5	48			40.3		9.8	0.12
118			下	4.9	48			40.4		6.3	0.08
119			上	4.7	60			50.9		6.8	0.07
120			下	5.0	60			50.6		6.7	0.07

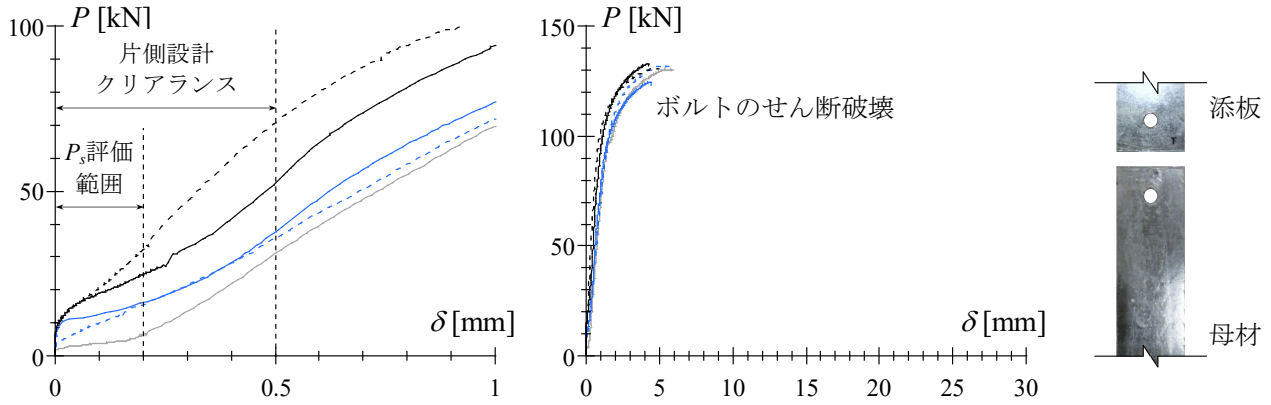
表2.5　実験結果の一覧(3)

No	表面処理	形状	位置	最大高さ粗さ	計算値			実験値			
					すべり耐力	降伏耐力	接合部耐力比	導入張力N_i [kN]		すべり耐力	すべり係数
				R_z[μm]	${}_{cal}P_s$ [kN]	${}_{cal}P_y$ [kN]	${}_{cal}P_s/{}_{cal}P_y$ [-]	第1ボルト	第2ボルト	P_s [kN]	μ [-]
121	電気亜鉛めっき+錆止め塗料	形状1	上	13.6	24.0	146.6	0.82	11.0	10.2	6.8	0.31
122			下	12.7	24.0			10.2	10.3	6.6	0.32
123			上	14.1	48.0			19.9	21.1	9.9	0.25
124			下	12.7	48.0			20.4	19.4	10.6	0.26
125			上	13.6	72.0			29.7	29.9	11.2	0.19
126			下	12.6	72.0			29.9	29.8	12.1	0.20
127			上	12.4	96.0			40.1	40.7	14.1	0.18
128			下	13.1	96.0			39.5	40.5	13.6	0.17
129			上	12.9	120.0			49.6	50.9	13.7	0.14
130			下	12.8	120.0			50.3	53.9	13.4	0.13
131		形状5	上	13.4	12.0	70.5	0.86	11.0		4.3	0.20
132			下	12.3	12.0			10.5		3.8	0.18
133			上	12.6	24.0			20.4		7.5	0.18
134			下	13.5	24.0			19.9		5.3	0.13
135			上	13.5	36.0			30.3		8.1	0.13
136			下	12.5	36.0			29.6		8.1	0.14
137			上	11.7	48.0			39.2		12.1	0.15
138			下	12.9	48.0			39.7		8.1	0.10
139			上	13.2	60.0			50.9		9.2	0.09
140			下	13.2	60.0			49.5		9.2	0.09
141		形状6	上	12.4	12.0	70.5	0.86	10.3		4.5	0.22
142			下	12.5	12.0			10.3		3.8	0.18
143			上	12.7	24.0			19.9		7.1	0.18
144			下	13.0	24.0			21.0		7.0	0.17
145			上	13.4	36.0			30.5		8.2	0.13
146			下	13.7	36.0			30.7		8.2	0.13
147			上	14.3	48.0			39.5		7.6	0.10
148			下	14.6	48.0			40.0		7.6	0.10
149			上	13.9	60.0			49.5		10.0	0.10
150			下	12.8	60.0			49.7		9.7	0.10
151	ステンレス	形状1	上	21.1	24	127.9	0.95	10.7	10.6	9.9	0.23
152			下	20.9	24			9.5	9.7	4.5	0.12
153			上	21.5	48			20.4	21.5	18.0	0.22
154			下	21.0	48			20.9	20.7	12.0	0.15
155			上	20.9	72			31.5	30.4	22.7	0.18
156			下	21.2	72			30.8	30.3	16.0	0.13
157			上	20.9	96			40.6	40.9	33.9	0.21
158			下	21.4	96			40.3	40.4	19.7	0.12
159			上	21.3	120			49.4	48.9	27.9	0.14
160			下	19.0	120			49.3	50.0	28.2	0.14
161		形状5	上	20.8	12	61.5	0.98	11.1		5.7	0.26
162			下	20.0	12			10.6		2.4	0.11
163			上	21.2	24			19.5		6.9	0.18
164			下	20.8	24			20.6		5.0	0.12
165			上	20.5	36			30.0		12.1	0.20
166			下	19.9	36			30.5		10.1	0.17
167			上	20.5	48			40.8		15.3	0.19
168			下	20.5	48			40.0		11.8	0.15
169			上	19.4	60			49.9		13.1	0.13
170			下	20.0	60			50.0		14.8	0.15
171		形状6	上	22.0	12	61.5	0.98	11.0		2.5	0.11
172			下	20.1	12			10.9		1.7	0.08
173			上	19.6	24			19.2		5.2	0.14
174			下	20.4	24			21.0		5.5	0.13
175			上	21.2	36			29.6		8.2	0.14
176			下	19.9	36			28.4		7.2	0.13
177			上	21.2	48			39.5		9.4	0.12
178			下	20.6	48			39.7		10.8	0.14
179			上	20.4	60			49.6		13.8	0.14
180			下	20.6	60			49.4		12.0	0.12



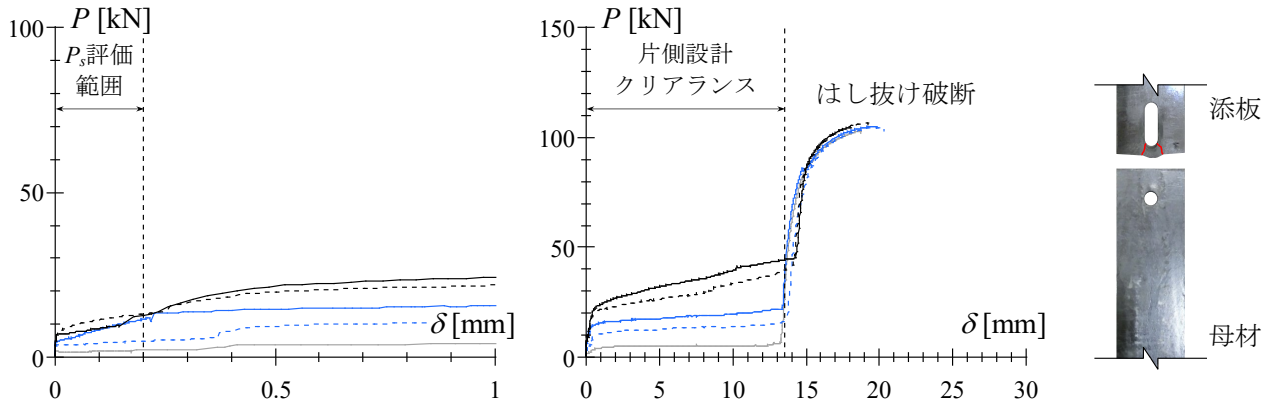
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.7　溶融亜鉛めっき（形状1）



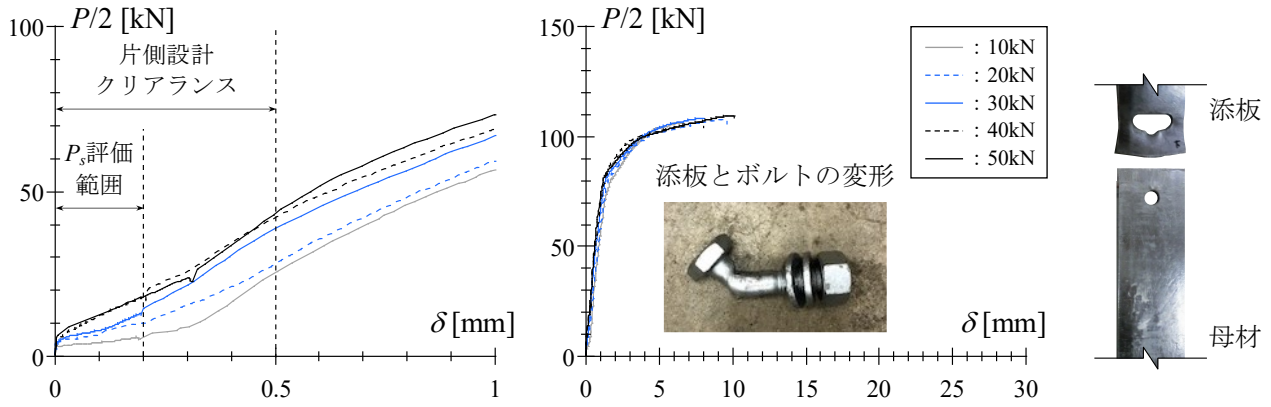
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.8　溶融亜鉛めっき（形状2）



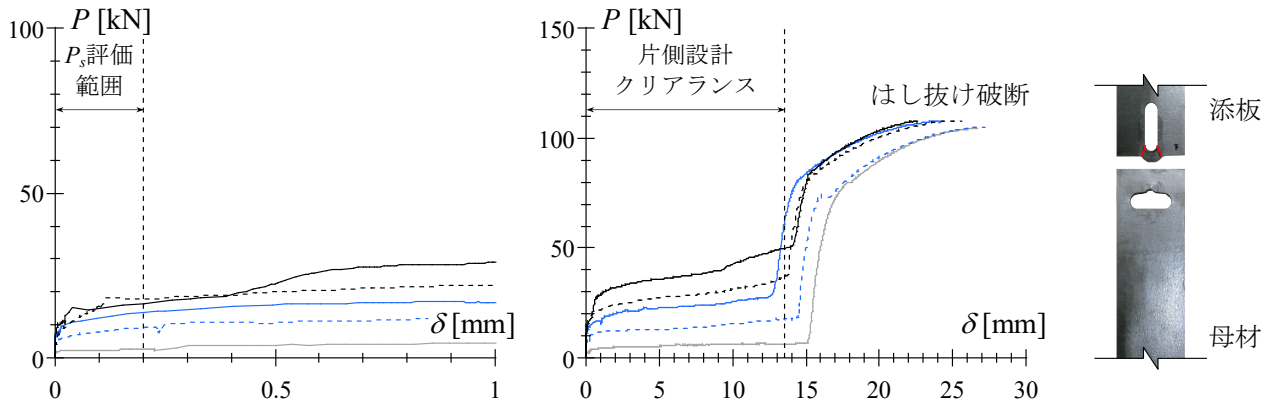
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.9　溶融亜鉛めっき（形状3）



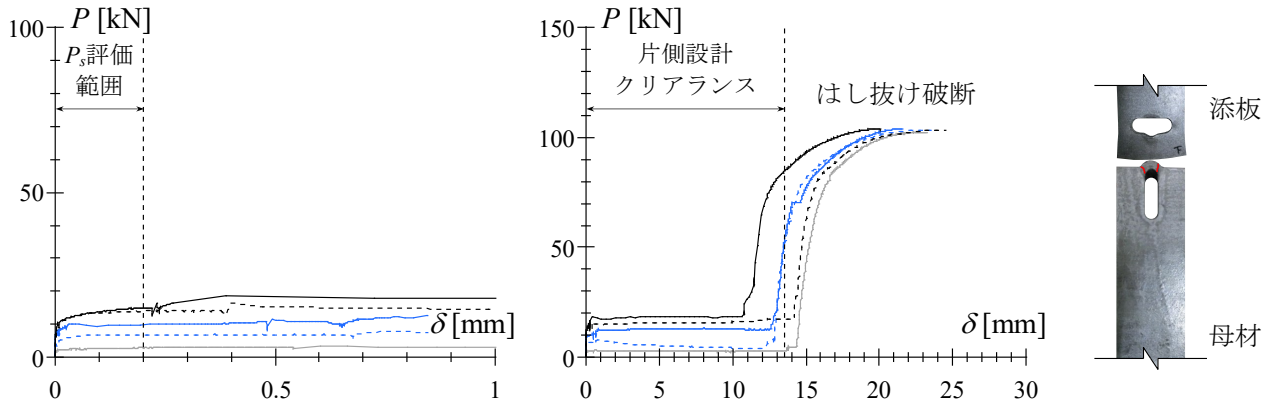
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.10　溶融亜鉛めっき（形状4）



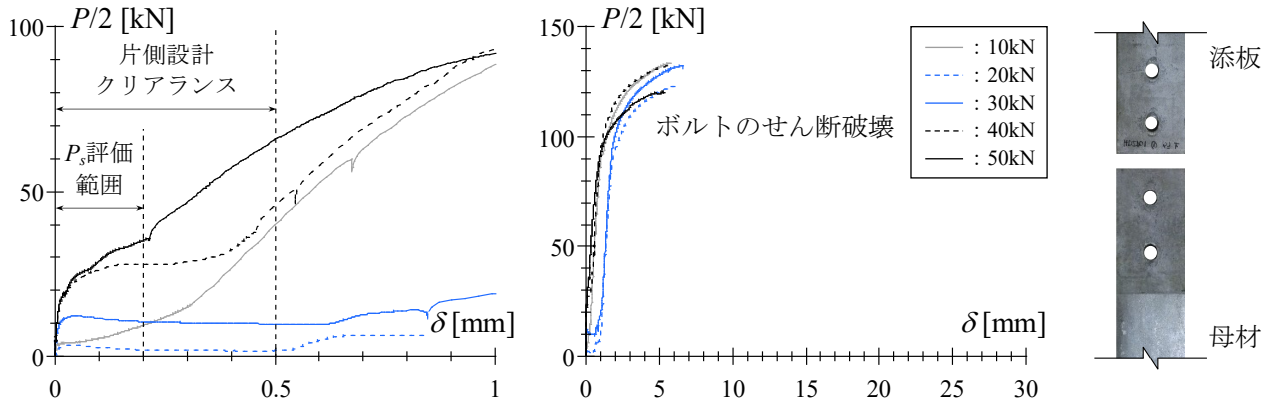
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.11　溶融亜鉛めっき（形状5）



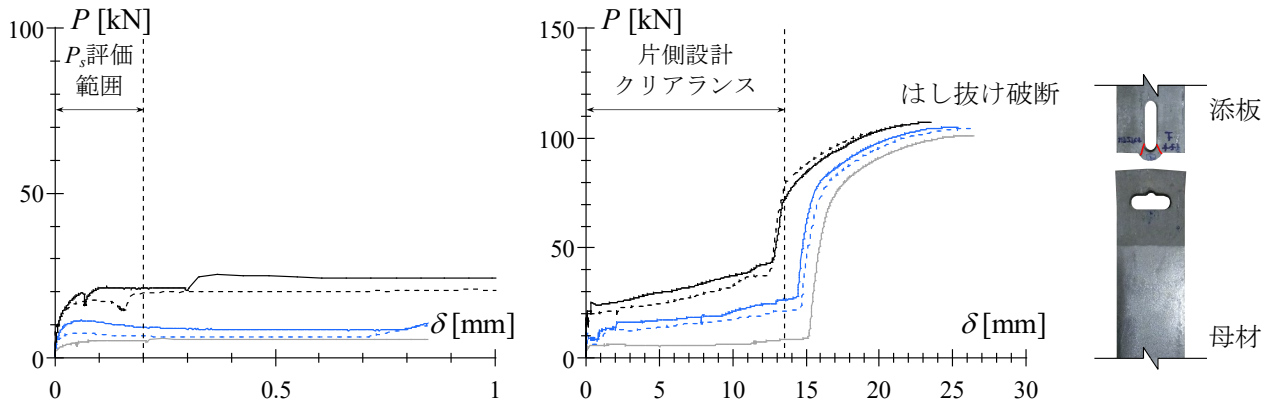
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.12　溶融亜鉛めっき（形状6）



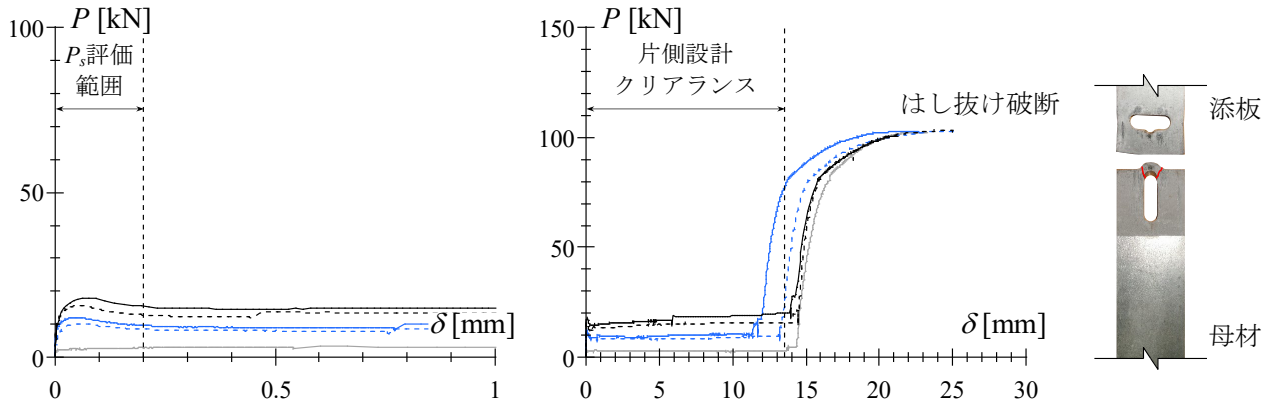
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.13　溶融亜鉛めっき+リン酸塩刷毛塗り（形状1）



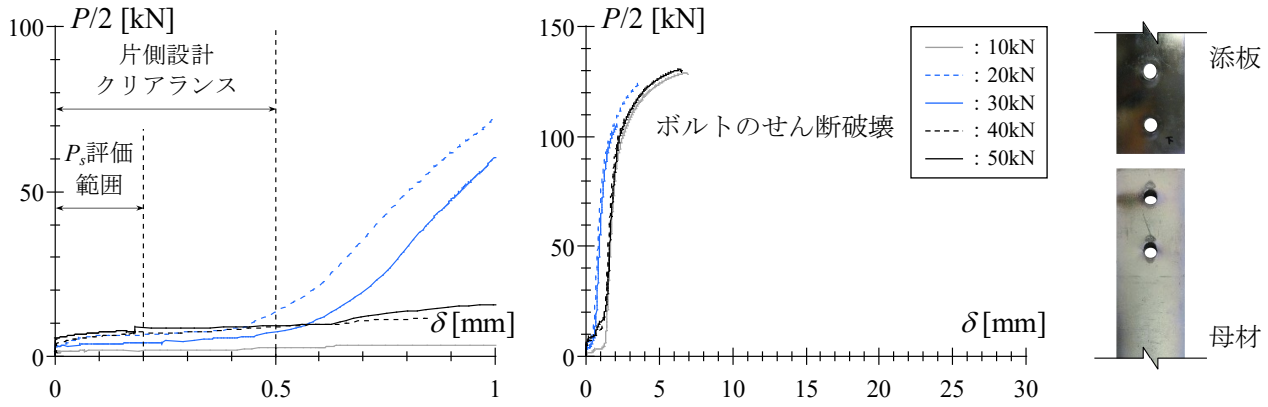
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.14　溶融亜鉛めっき+リン酸塩刷毛塗り（形状5）



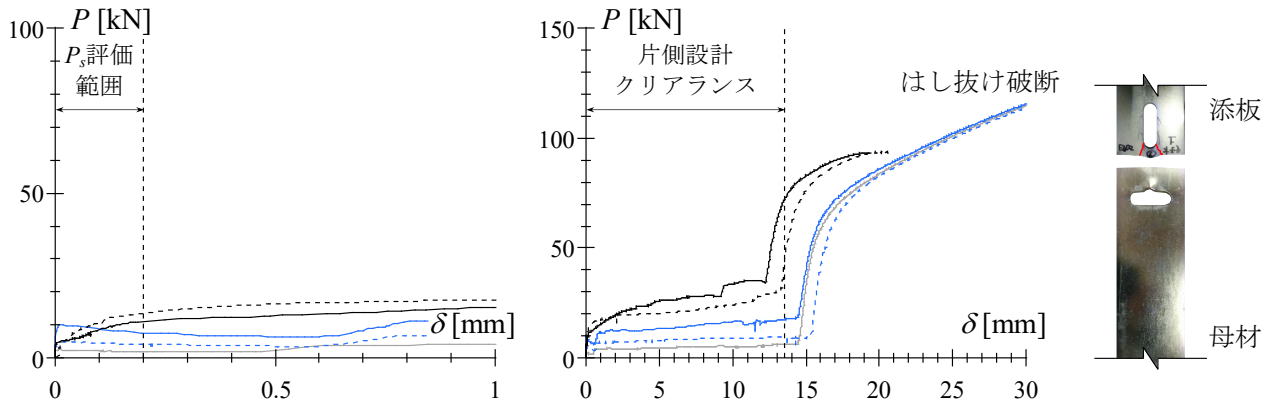
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.15　溶融亜鉛めっき+リン酸塩刷毛塗り（形状6）



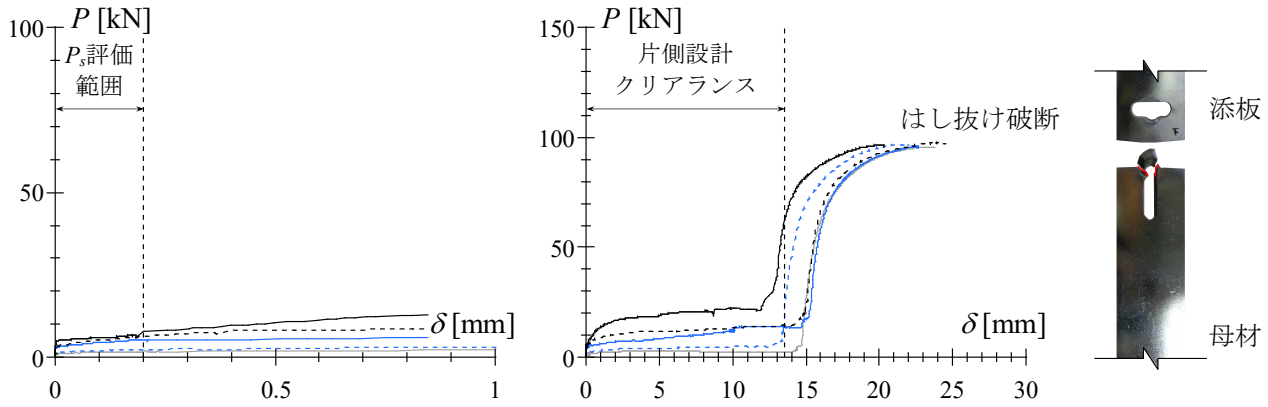
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.16　電気亜鉛めっき（形状1）



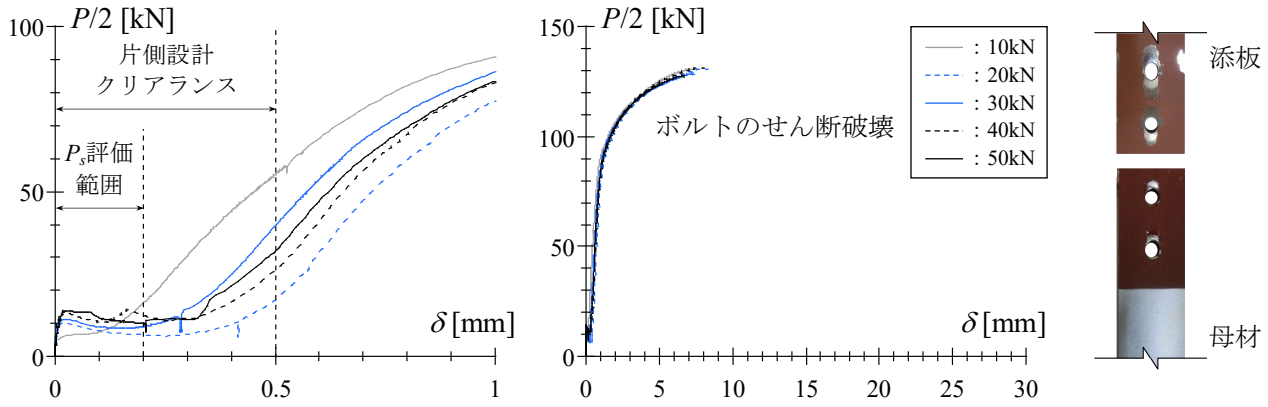
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.17　電気亜鉛めっき（形状5）



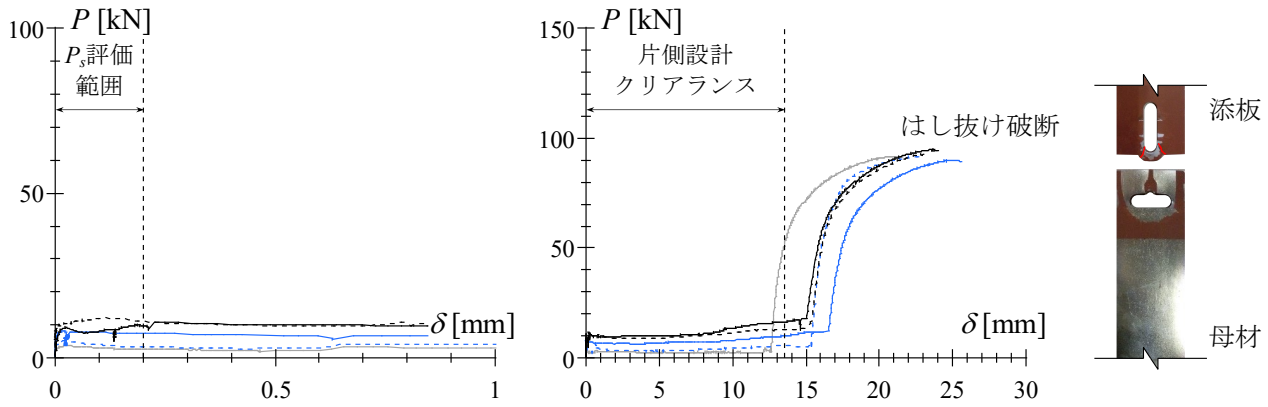
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.18　電気亜鉛めっき（形状6）



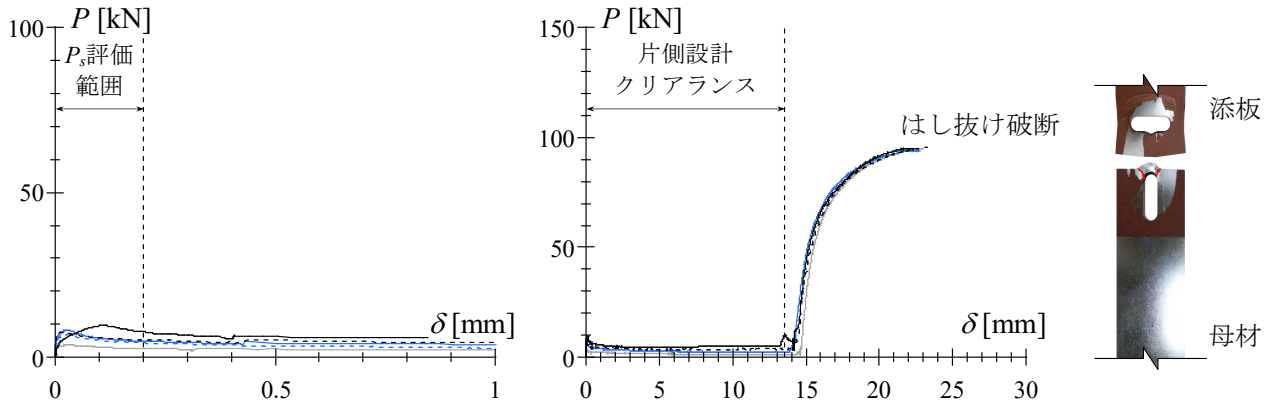
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.19　電気亜鉛めっき+錆止め塗料（形状1）



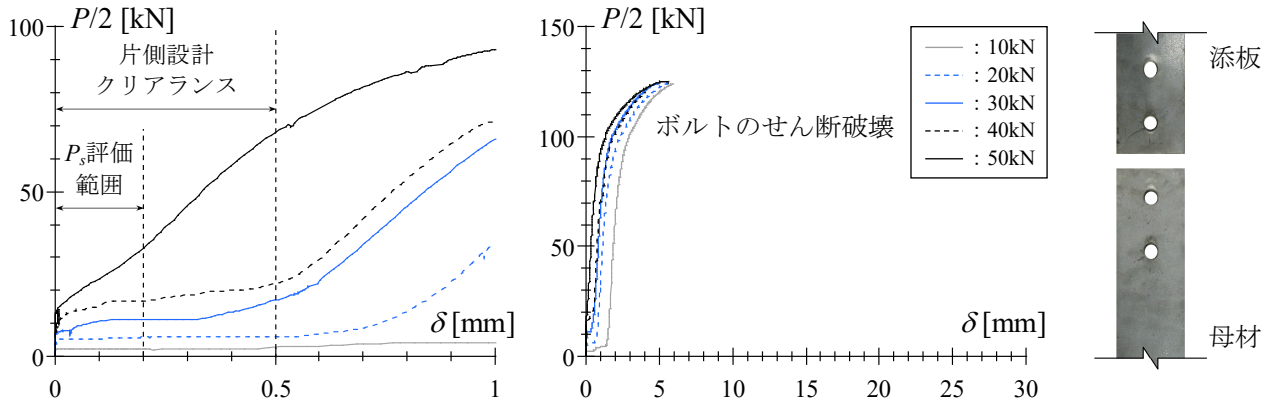
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.20　電気亜鉛めっき+錆止め塗料（形状5）



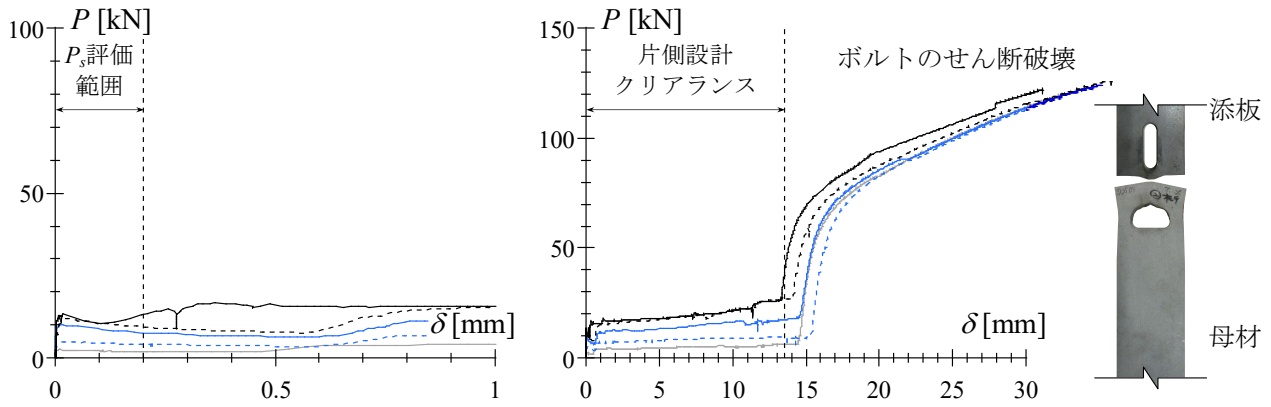
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.21　電気亜鉛めっき+錆止め塗料（形状6）



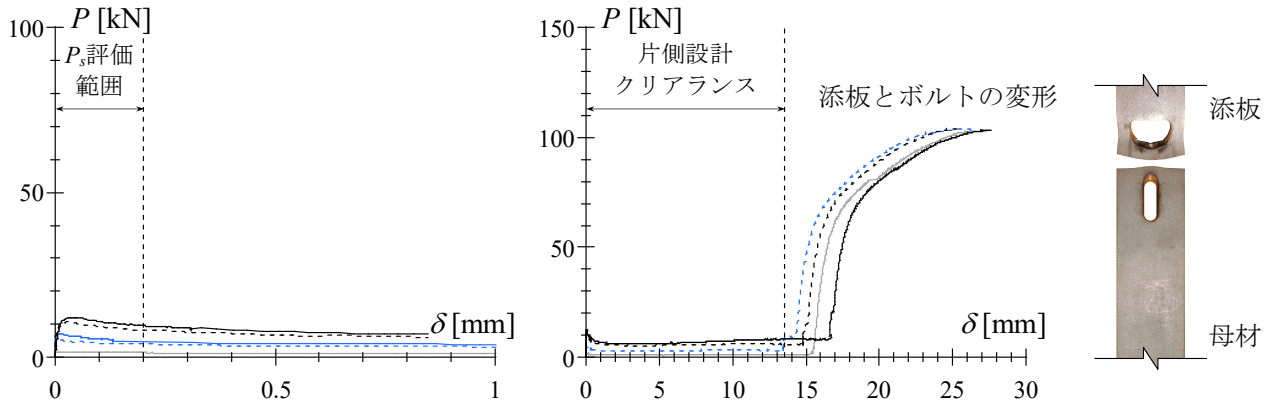
(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.22　ステンレス（形状1）



(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.23　ステンレス（形状5）



(a) 荷重変形関係（$\delta \leq 1.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）　(c) 載荷後の試験体

図2.24　ステンレス（形状6）

本実験において使用した溶融亜鉛めっき高力ボルト(M12(F8T))と同一ロットの高力ボルトを一定のトルクで締め付け，そのときに導入される張力を計測した．計測の結果を図2.25に示す．図の縦軸は締め付けトルクT [N-m]，横軸は導入張力N_i [kN]である．計測は10本の高力ボルトに対して行い，各ボルトの実験結果を○，実験結果の平均値を●で示している．なお，締め付けトルクと導入張力の関係は次式で表される．

$$T = k \cdot d \cdot N_i \qquad \cdots (2.2)$$

ただし，kはトルク係数[-]，dはボルトの呼び径[mm]である．トルク係数の平均値は0.112，標準偏差σは0.021である．図には，トルク係数が平均値$\pm 3\sigma$, 2σ, 1σのときの締め付けトルクと導入軸力の関係を破線で示す．標準偏差が平均値の20%程度であることから，本実験で使用した溶融亜鉛めっき高力ボルトのトルク係数値のばらつきが極めて大きいことが分かる．

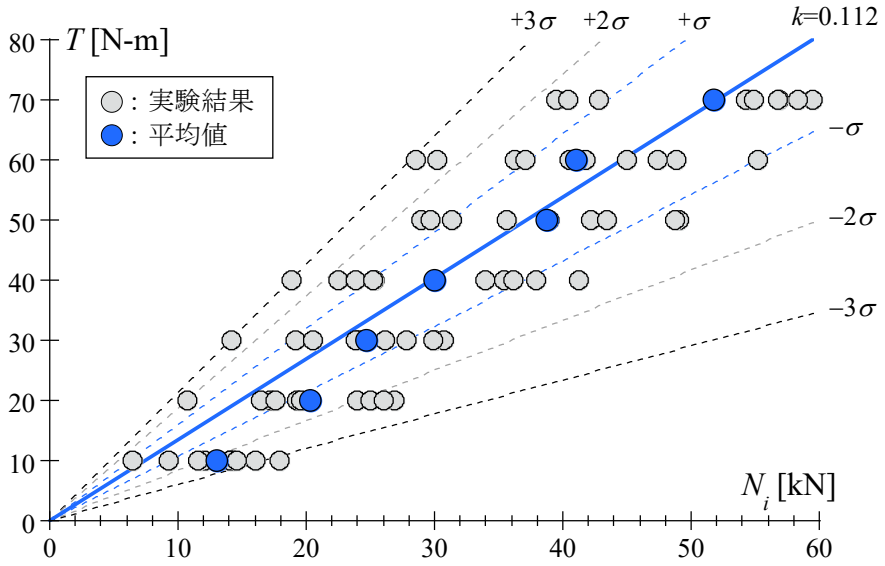


図2.25　締め付けトルクと導入張力の関係

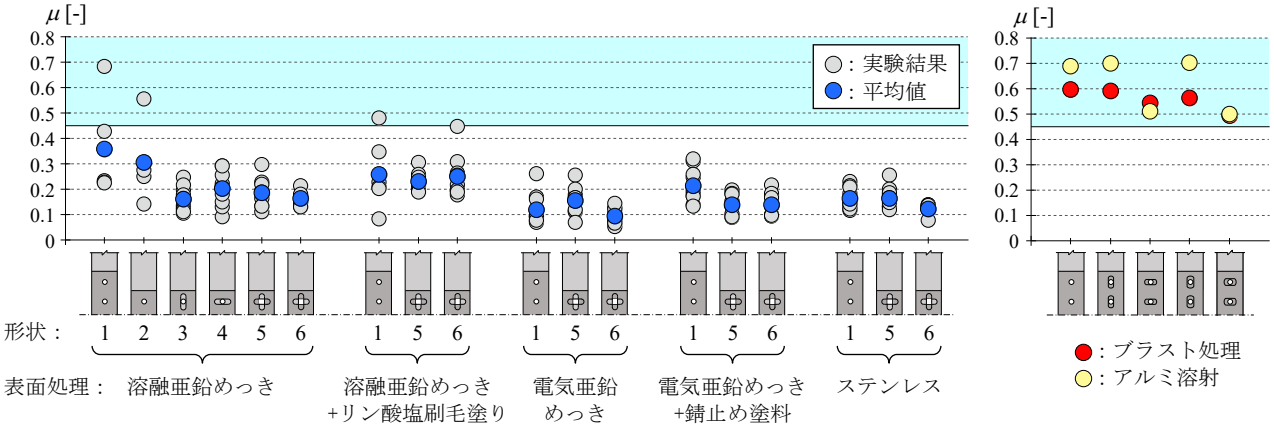
2.2.5　すべり係数に対する実験パラメータの影響

【ボルト孔形状】

ボルト孔形状と表面処理の組み合わせごとのすべり係数を図2.26に示す. 図には, (a)本実験結果と(b)スロット孔を用いた高力ボルト摩擦接合部における実験結果[2.14)]を示す．図の縦軸はすべり係数μであり，横軸はボルト孔形状および表面処理である．図には，一般に高力ボルト摩擦接合部において要求されるすべり係数0.45以上の範囲を水色で示している．また，表面処理ごとにすべり係数を標準試験体のすべり係数の平均値で除して基準化した値を図2.27に示す. 図には, 文献2.15)に規定される, 標準孔のすべり係数に対する長スロット孔(ボルト孔の長径が拡大孔径+2.0以上, 呼び径の2.5倍以下)のすべり係数の比率を超える範囲を水色で示している．

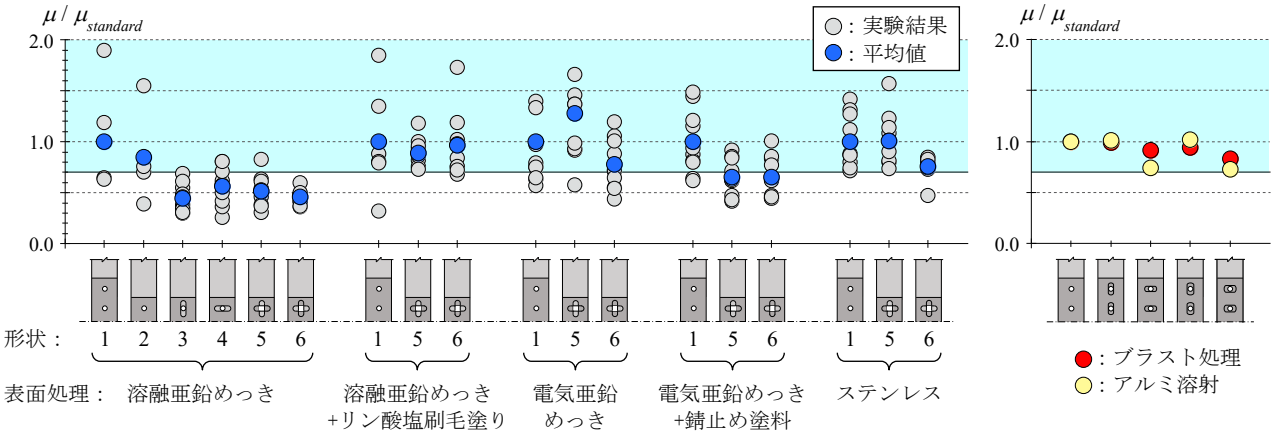
まず，(a)本実験結果について述べる．一般に，高力ボルト摩擦接合部において要求されるすべり係数0.45に対して，本実験結果のほとんどが下回っていることが分かる．溶融亜鉛めっきを施した試験体においてボルト孔形状の違いを比較すると，標準試験体である形状1からボルト本数を1本にした形状2では，すべり係数が形状1に比べて2割程度低下している．添板あるいは添板と母材の両方にスロット孔を設けたボルト孔形状に関しては，すべり係数が形状1に比べて4～6割程度低下している．すべり係数が低下する傾向は，溶融亜鉛めっきにおいて最も大きく，他の表面処理においては3割程度に収まっている．

次いで，(b)既往の実験結果をみると，すべり係数はすべて0.45以上を確保している一方で，スロット孔におけるすべり係数は3割程度低下していることが分かる．なお，文献2.15)ではスロット孔を母材に設けた接合部が対象であり，本実験にて扱う形状3～形状6は対象ではないが，一部の試験体ではすべり係数の低下が同程度であることが分かる．



（a）本実験結果　　（b）既往の実験結果[2.14)]

図2.26　すべり係数とボルト孔形状および表面処理の関係



（a）本実験結果　　（b）既往の実験結果[2.14)]

図2.27　標準試験体で基準化したすべり係数

【表面粗さ】

すべり係数と表面粗さの関係を図2.28に示す．図の縦軸はすべり係数μであり，横軸は最大高さ粗さR_zである．標準孔を用いた本実験結果(形状1，形状2)を●で，スロット孔を用いた本実験結果(形状3～形状6)を●で示す．また，標準孔を用いた高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に関する既往の実験結果[2.6)~2.8), 2.16)~2.24)](表2.6)を□で示す．なお，既往の実験結果においては複数の粗さパラメータが混在しているが，各パラメータ間には高い相関がある[2.8)]ことから，表2.6中に赤文字にて示した粗さパラメータを最大高さ粗さに換算している．一般に鋼構造部材に求められるすべり係数0.45，およびブラスト処理面に期待される最大高さ粗さ50μm[2.9)]を満たす範囲を水色で示すと，本実験結果のほとんどがすべり係数と最大高さ粗さのいずれにおいても上記の規定値の半分以下であることが分かる．

ここで，北後ら[2.7)]により錆のない接合面に対して提案されているすべり係数の回帰式を緑色の実線で図中に示す．

$$\mu_{cal}=0.004R_z+0.260 \quad \cdots (2.3)$$

(2.3)式によると，最大高さ粗さが50μmのときに0.46のすべり係数が確保されることになり，高力ボルト摩擦接合部のすべり耐力を評価する上で有用であることが確認できる．

すべり係数の実験値と計算値の比較を図2.29に示す．図の縦軸は実験値μであり，横軸は(2.3)式による計算値μ_{cal}である．なお，スロット孔を用いた試験体は，(2.3)式を0.7倍して評価した．図には，すべり係数の計算値と実験値が等しくなる直線から，全実験結果に対するμ/μ_{cal}の標準偏差σの±1倍，±2倍，±3倍を考慮した範囲を破線で示している．標準偏差は0.291でありばらつきは大きいものの，概ねすべり係数が予測できることが分かる．実験結果のばらつきは，導入張力の低下のばらつきや接合部耐力比の影響によるものと考えられる．

接合部耐力比は，母材の有効断面に基づく降伏耐力の公称値P_yに対するすべり耐力P_sの比であり，拡大孔やスロット孔に関する既往の研究[2.25), 2.26)など]では，接合部耐力比が大きくなるとすべり係数が低下することを指摘している．すべり係数と接合部耐力比の関係を図2.30に示す．図の縦軸はすべり係数μであり，横軸は接合部耐力比P_s/P_yである．ただし，すべり耐力は，すべり係数を0.6，ボルトの初期導入張力を標準ボルト張力として求めている．図の凡例は，図2.28と同様である．すべり係数と表面粗さ，すべり係数と接合部耐力比の相関係数はそれぞれ0.54，0.37であり，本検討の範囲ではすべり係数に対して接合部耐力比より表面粗さの影響が大きいものと考えられる．

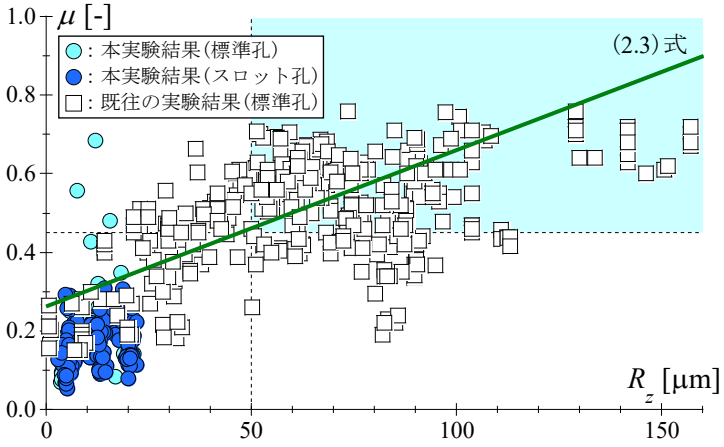


図2.28　すべり係数と表面粗さの関係

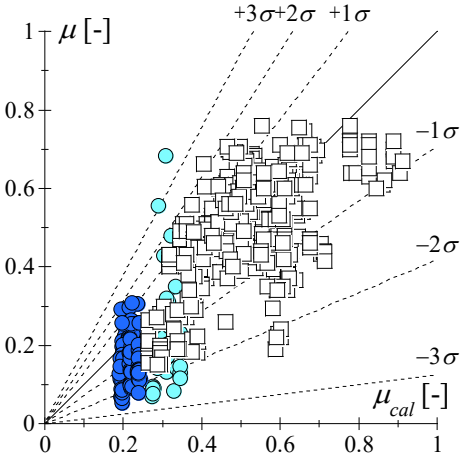


図2.29　すべり係数の実験値と計算値

表2.6　すべり係数と表面粗さに関する既往研究

文献	発行年	著者	表面処理	粗さのパラメータ	締結用ボルト	鋼種	データ数	接合部耐力比 ${}_{cal}P_s/{}_{cal}P_y$ [-]		最大高さ粗さ R_z [μm]		すべり係数 μ [-]	
								最小	最大	最小	最大	最小	最大
2.6)	1987	脇山ら	グリットブラスト，サンドブラスト，サンドペーパー	R_{max}, R_a	M16 (F10T)	SS41, SM50	24	0.3	0.5	0.6	96.6	0.16	0.50
2.16)	1990	野口ら	グラインダー，グリットブラスト，ショットブラスト	R_{max}, R_z, R_a	M20 (F10T)	SS41, SM50	60	1.3		29.9	101.1	0.34	0.76
2.17)	1995	辻岡	ショットブラスト	R_{max}, R_z, R_a	M16 (F10T)	SS400	24	0.8		29.2	108.5	0.29	0.71
2.7)	1996	加村，北後	グラインダー，グリットブラスト，ショットブラスト，薬剤処理	R_{max}, R_z, R_a	M20 (F10T)	SS400	30	1.3		37.9	92.6	0.37	0.63
2.18)	1996	加村，北後	グラインダー，グリットブラスト，ショットブラスト，薬剤処理	R_{max}, R_z, R_a	M20 (F10T)	SS400	18	1.3		38.2	150.6	0.45	0.64
2.19)	1999	小端，佐藤	ブラスト，溶融亜鉛めっきリン酸塩処理	R_y	M16, M20, M24 (F8T, HDZ)	SS400	18	1.0	1.1	21.4	95.7	0.45	0.56
2.20)	2008	森ら	ショットブラスト，赤錆，無機・有機ジンクリッチペイント	R_a	M22 (F10T)	SM490	44	0.7		(53.3)	(113.1)	0.34	0.69
2.21)	2011	桑原ら	グリットブラスト，赤錆，ショットブラスト	R_z, RS_m	M22 (S10T), M22 (S14T)	高張力鋼，SN490	34	0.4	1.0	29.1	84.4	0.42	0.71
2.8)	2011	森ら	グリットブラスト，グラインダー	R_z, R_a, R_{zjis}	M22 (F10T)	SM490	98	1.0	1.0	8.6	157.1	0.17	0.76
2.22)	2014	丹波ら	ディスクサンダー，鋼線カップブラシ，グリットブラスト，無機ジンクリッチペイント	R_z, R_a, R_{zjis}	M22 (F10T)	SS400	30	1.1		6.3	162.9	0.20	0.68
2.23)	2015	柳橋ら	グラインダー，サンドブラスト，ベルトサンダー	R_z, R_{zjis}, R_q	M16 (F10T)	SUS329J4L	24	0.8		(7)	(100.9)	0.15	0.76
2.24)	2016	池田ら	グラインダー	R_{zjis}	M16, M20 (F8T, HDZ)	SS400	30	0.9		(72.4)	(90.9)	0.19	0.60

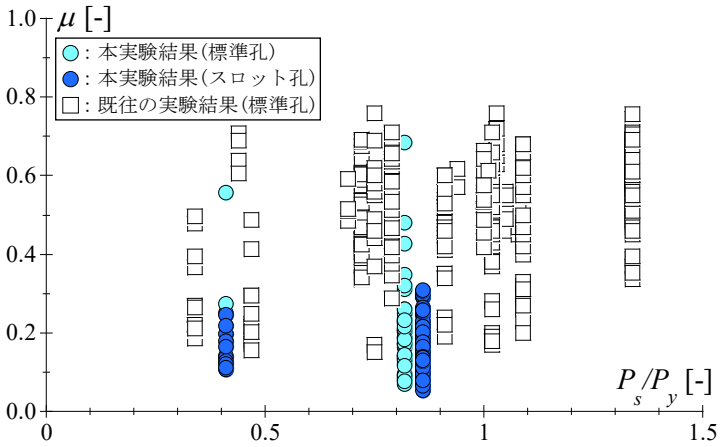


図2.30　すべり係数と接合部耐力比の関係

【導入張力】

すべり係数に対するボルトの導入張力の影響を図2.31に示す. 図の縦軸は表面処理ごとのすべり係数μであり，横軸はボルトの初期導入張力N_iである．また，線の色によって試験体形状を区別している. 実験から得られたすべり係数は前述したようにばらつきが大きいことを考慮すると，本実験の範囲においてボルトの導入張力によるすべり係数への影響は小さいといえる. 一方，ボルトの導入張力は，ボルトの締め付け時から載荷開始時までに0～3%程度低下し，すべり耐力の到達時までに0～20%程度低下している．本実験では安定させていない締め付け直後からの導入張力の低下がすべり係数のばらつきの一因として考えられる.

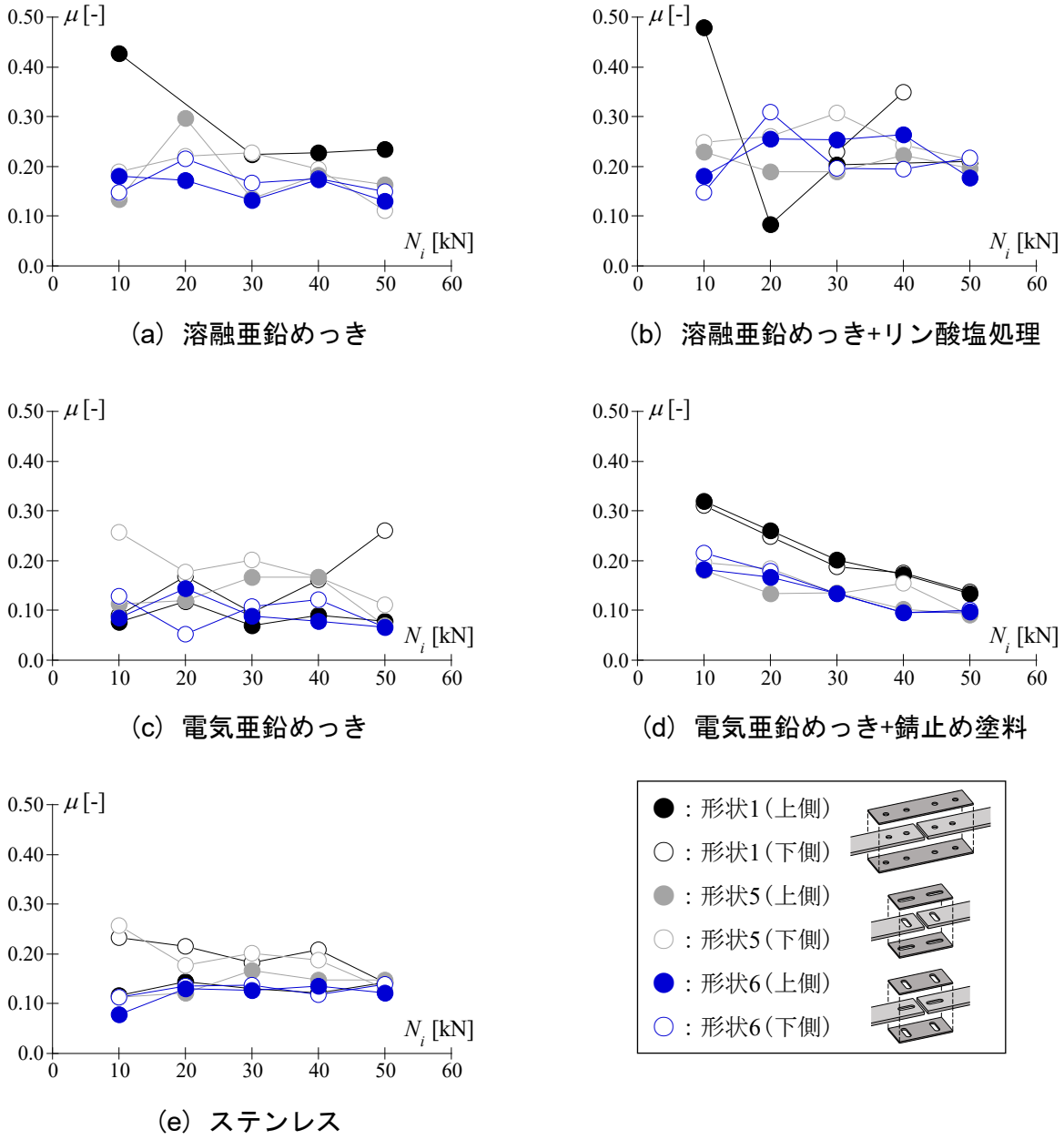


図2.31　すべり係数と導入張力の関係

2.3　ファスナと胴縁間のボルト接合部の実験

2.3節では, ファスナと胴縁間のボルト接合部の構造実験から, 想定される風荷重に対するボルト接合部の構造安全性を検討する.

2.3.1　試験体の概要

試験体の寸法を図2.32に示す. 試験体は, 構造躯体に取りつくファスナ(等辺山形断面L75x75x6), 金属パネルを支持する胴縁(等辺山形鋼L50x50x4), および両者を締め付けるボルトによって構成する. これらの寸法は, ボルト接合部のすべりに先行して胴縁の有効断面における降伏が生ずることのないように決定した. ファスナおよび胴縁の材質は, 2.2節に示した試験体と同様に一般構造用鋼板(SS400)またはオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)である. 試験体に使用したファスナおよび胴縁について, JIS12B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表2.7に示す.

試験体の一覧を表2.8に示す. 実験パラメータは, ボルト接合部の表面処理の種類, ボルトの強度, および載荷方向である. 表面処理は, 2.2節に示した5種類であり, ボルトは呼び径M12の高力ボルト相当材(実験当時に高力ボルトの入手が困難であったことから強度区分10.9の普通ボルトを代用), 普通ボルト(強度区分4.8)の2種類である. なお, 普通ボルト(強度区分4.8)には, 一般的なゆるみ留めであるスプリングワッシャーを介在させている. 載荷方向は, 外壁に作用する風圧力の正圧時, 負圧時を想定した2方向とする.

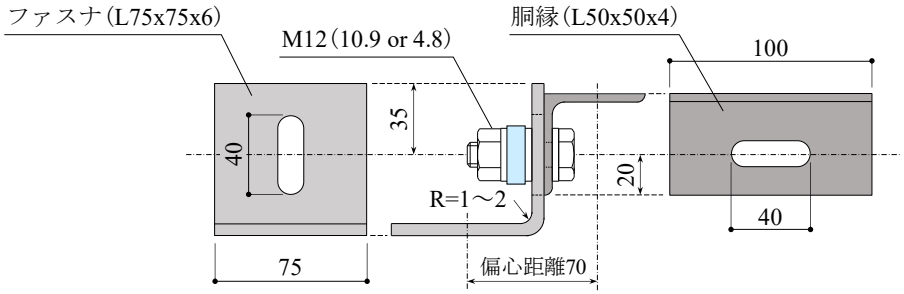


図2.32　試験体の寸法(形状1)

表2.7　材料特性

	t	σ_y	σ_u	$Y.R.$	ε_u
	[mm]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[%]	[%]
SS400	6	295	441	67	35
	4	362	490	74	40
SUS304	6	301	669	45	60
	4	281	661	43	62

表2.8　試験体の一覧

ボルトの強度	載荷方向	表面処理 (i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)
高力ボルト相当材(強度区分10.9)	引張(負圧)	5	5	5	5	5
	圧縮(正圧)	5	5	5	5	5
普通ボルト(強度区分4.8)	引張(負圧)	5	-	-	-	5
	圧縮(正圧)	5	-	-	-	5

(i)　溶融亜鉛めっき(2種40)
(ii)　溶融亜鉛めっき(2種40)とリン酸塩刷毛塗り
(iii)　電気亜鉛めっき(3級の有色クロメート処理2級)
(iv)　電気亜鉛めっき(3級の有色クロメート処理2級)と錆止め塗料(一液形変性エポキシ樹脂)
(v)　ステンレス(梨地)

2.3.2　載荷方法

試験体のセットアップを図2.33に，実際の様子を写真2.4に示す．ファスナは固定治具を介して，胴縁はピン治具を介してそれぞれ試験機に固定する．固定治具やピン治具と試験体の接合は，試験体より高強度かつ太径の高力ボルト(M16(F10T))による引張接合としている．

ボルトの締め付けは，普通ボルト(M12(強度区分4.8))の降伏軸力の約7割である20kNを目標とし，2.2節にて示したワッシャー形ロードセルにより管理する．実験は，圧縮(正圧)または引張(負圧)側への単調載荷とする．載荷速度は，接合部の変形0.2mmまでは0.1mm/minとし，それ以降は2.0mm/minとする．

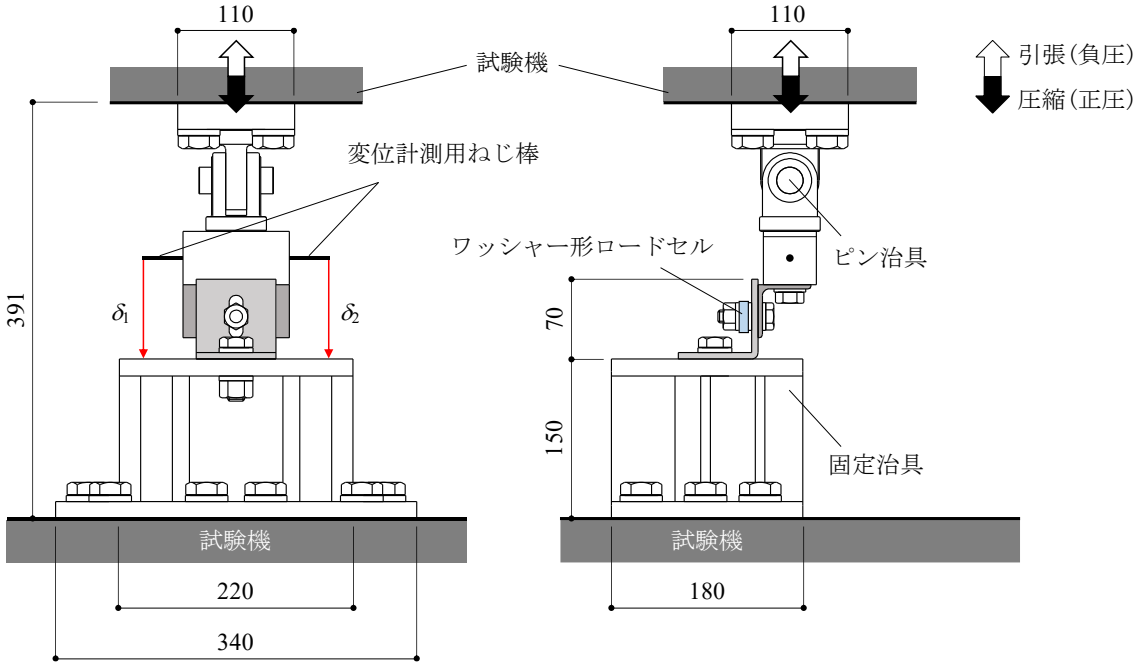


図2.33　セットアップ

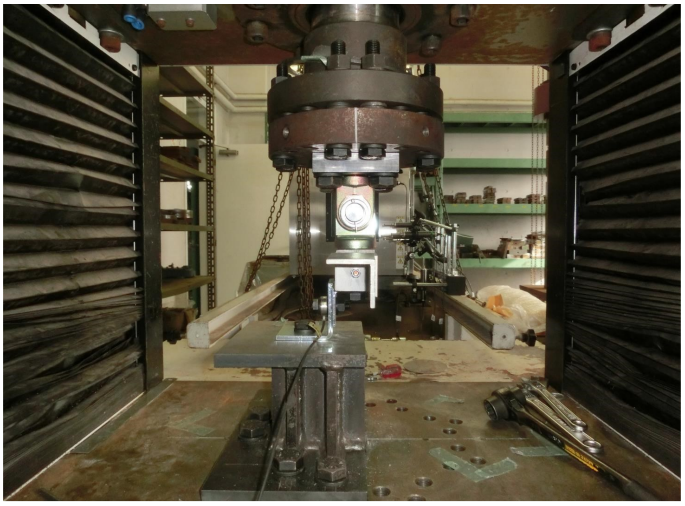


写真2.4　セットアップの様子

2.3.3　計測計画

【表面粗さ】

実験に先立ち，まず試験体の表面粗さの測定を行った．表面粗さは，2.2節に示した触針式粗さ測定器を用いて最大高さ粗さR_zを測定する．測定は，ファスナと胴縁の接触面においてボルト孔周りの3箇所にて行い，1試験体あたり合計6箇所について行った(図2.34)．

【すべり係数】

実験中は，試験機に組み込まれたロードセルにより軸方向力Pを得る．また，ピン治具下部の側面には，継続用ねじ棒を合計2箇所設置する．設置したねじ棒に対してターゲットを取り付けて，固定治具の上面から計測した相対変位をボルト接合部の変形δ(=(δ_1+δ_2)/2)としている．ここで，δには胴縁とファスナ自体の変形が含まれるため，実験で得られた荷重変形関係の初期剛性の0.2mmオフセット直線と荷重変形曲線が交差する点までの最大耐力をすべり耐力としている．すべり係数μは，実験によって得られたすべり耐力P_sを用いて(2.1)式により算出する．

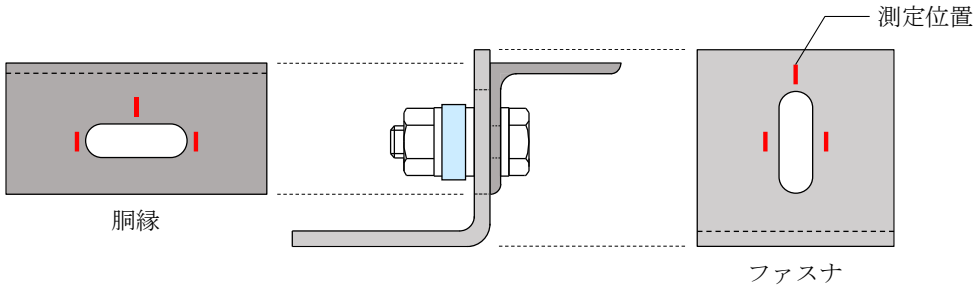


図2.34　表面粗さの測定位置

2.3.4　ファスナと胴縁間のボルト接合部の実験結果の概要

実験結果の一覧を表2.9，表2.10に示す．表には，各試験体の最大高さ粗さ，導入張力，すべり耐力，およびすべり係数に併せて，(2.3)式により算出したすべり係数を併せて記す．ただし，ボルト孔がスロット孔であることから，3割のすべり係数の低下を見込んでいる．また，表面処理ごとの荷重変形関係を図2.35～図2.39に示す．図の縦軸は軸方向力Pであり，横軸は接合部の変形δである．高力ボルト相当材を実線，普通ボルトを破線で区別している．

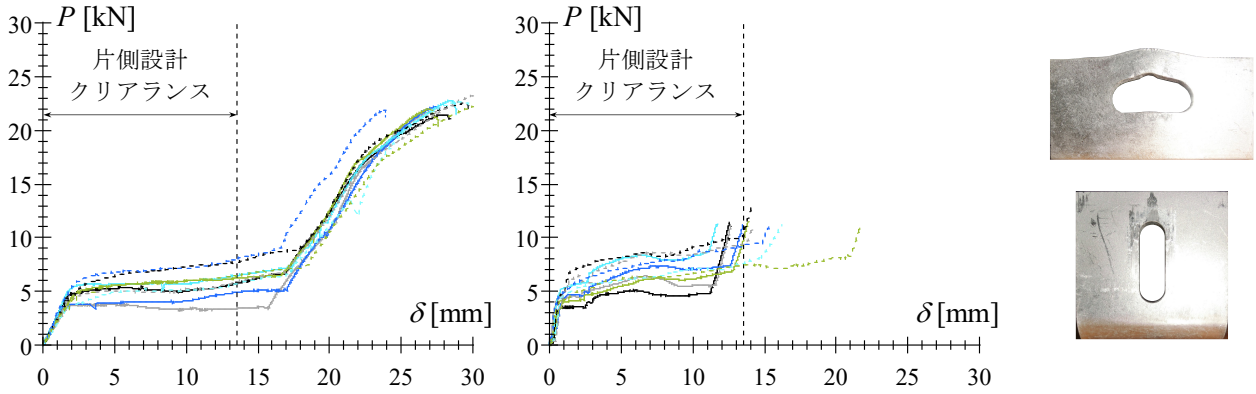
いずれの試験体も2.2節の実験結果と比べて初期剛性が低く，接合部の変形0.2～1.0mm程度ですべりに伴い剛性が低下し始めている．引張載荷時には，おおよそ設計クリアランスまで接合部のすべりにより変形が進行し，その後は支圧状態に移行して急激に耐力が上昇していると考えられる．最終的には，胴縁における横スロット孔のはしあき部分の局所的な降伏により耐力の低下が見られたため，載荷を終了した．なお，圧縮載荷時には胴縁の一部が躯体を想定した固定治具と接触することにより急激に耐力が上昇したため，載荷を中断している．

表2.9　実験結果の一覧(1)

No	表面処理	ボルトの強度区分	載荷方向	最大高さ粗さ R_z [μm]	計算値 すべり係数 μ_{cal} [-]	実験値 導入張力 N_i [kN]	実験値 すべり耐力 P_s [kN]	実験値 すべり係数 μ [-]	μ/μ_{cal} [-]
1	溶融亜鉛めっき	高力ボルト相当材(10.9)	引張	16.4	0.23	20.9	4.7	0.23	0.99
2				15.2	0.22	20.1	3.7	0.18	0.81
3				15.9	0.23	20.3	3.7	0.18	0.80
4				16.9	0.23	20.9	5.3	0.25	1.10
5				16.8	0.23	20.5	4.8	0.24	1.03
6			圧縮	18.8	0.23	20.7	3.5	0.17	0.71
7				17.9	0.23	21.1	4.3	0.20	0.87
8				15.5	0.23	20.3	4.4	0.22	0.96
9				16.5	0.23	20.5	4.9	0.24	1.06
10				14.9	0.22	19.9	3.6	0.18	0.81
11		普通ボルト(4.8)	引張	17.2	0.23	20.0	4.6	0.23	1.00
12				19.5	0.24	19.8	4.0	0.20	0.85
13				15.5	0.23	20.4	5.5	0.27	1.20
14				19.0	0.24	20.3	3.5	0.17	0.72
15				18.0	0.23	20.7	3.4	0.16	0.70
16			圧縮	18.5	0.23	19.8	4.7	0.24	1.01
17				15.5	0.23	20.6	4.7	0.23	1.01
18				15.1	0.22	20.3	4.5	0.22	0.98
19				15.2	0.22	21.1	4.6	0.22	0.97
20				14.8	0.22	20.4	3.7	0.18	0.82
21	溶融亜鉛めっき+リン酸塩刷毛塗り	高力ボルト相当材(10.9)	引張	36.1	0.28	20.5	4.8	0.23	0.82
22				35.1	0.28	20.6	6.2	0.30	1.07
23				40.7	0.30	20.0	4.6	0.23	0.78
24				37.3	0.29	21.0	5.6	0.27	0.94
25				35.1	0.28	20.0	6.0	0.30	1.07
26			圧縮	41.6	0.30	21.0	7.7	0.37	1.23
27				42.1	0.30	20.3	7.2	0.36	1.19
28				43.3	0.30	19.9	8.6	0.43	1.43
29				39.0	0.29	20.9	8.8	0.42	1.44
30				40.1	0.29	20.0	6.7	0.34	1.14
31	電気亜鉛めっき+錆止め塗料	高力ボルト相当材(10.9)	引張	12.4	0.22	20.0	5.0	0.25	1.15
32				10.3	0.21	20.4	4.8	0.24	1.12
33				11.3	0.21	20.7	5.4	0.26	1.22
34				11.4	0.21	20.6	4.5	0.22	1.02
35				12.6	0.22	20.1	6.2	0.31	1.43
36			圧縮	11.1	0.21	20.5	5.0	0.24	1.14
37				10.7	0.21	20.3	3.8	0.19	0.89
38				11.0	0.21	20.4	5.1	0.25	1.16
39				10.1	0.21	20.6	6.6	0.32	1.52
40				12.4	0.22	20.0	5.5	0.27	1.27

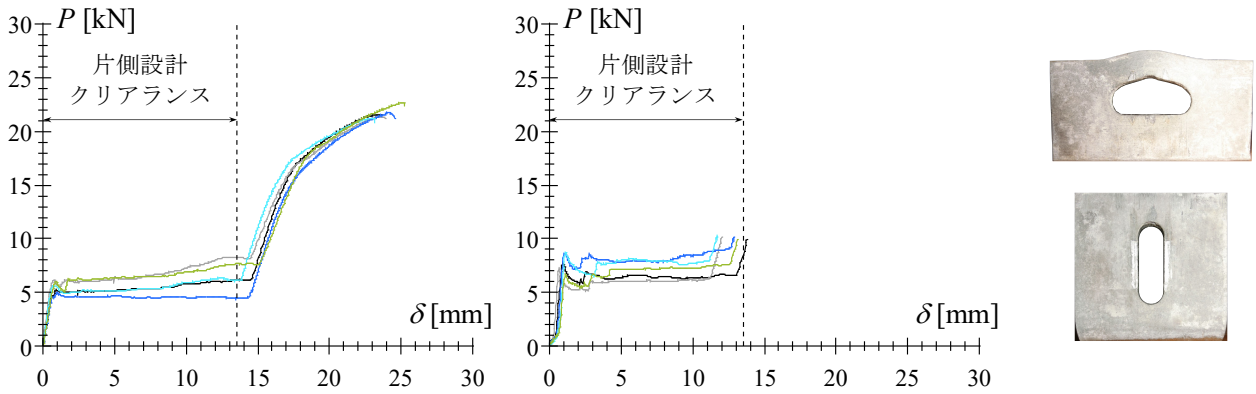
表2.10　実験結果の一覧(2)

No	表面処理	ボルトの強度区分	載荷方向	最大高さ粗さ R_z [μm]	計算値 すべり係数 μ_{cal} [-]	実験値 導入張力 N_i [kN]	実験値 すべり耐力 P_s [kN]	実験値 すべり係数 μ [-]	μ/μ_{cal} [-]
41	電気亜鉛めっき	高力ボルト相当材(10.9)	引張	19.2	0.24	21.2	4.5	0.21	0.90
42				17.6	0.23	21.3	4.6	0.22	0.93
43				20.2	0.24	20.7	4.0	0.19	0.81
44				19.7	0.24	20.4	4.9	0.24	1.02
45				19.1	0.24	20.6	5.1	0.25	1.05
46			圧縮	18.5	0.23	20.3	5.6	0.28	1.18
47				20.6	0.24	20.4	5.8	0.29	1.20
48				18.4	0.23	19.9	5.7	0.29	1.22
49				19.7	0.24	20.5	6.1	0.30	1.25
50				19.4	0.24	20.7	5.2	0.25	1.06
51	ステンレス	高力ボルト相当材(10.9)	引張	10.4	0.21	20.4	5.1	0.25	1.19
52				10.3	0.21	20.1	3.6	0.18	0.85
53				9.6	0.21	20.2	4.5	0.22	1.06
54				9.8	0.21	21.0	4.0	0.19	0.91
55				9.7	0.21	20.4	4.4	0.22	1.03
56			圧縮	10.3	0.21	20.5	6.3	0.31	1.45
57				10.4	0.21	20.7	4.7	0.23	1.07
58				11.2	0.21	20.9	6.8	0.32	1.52
59				10.1	0.21	20.9	6.6	0.32	1.51
60				10.8	0.21	20.5	5.9	0.29	1.37
61		普通ボルト(4.8)	引張	9.7	0.21	19.9	3.9	0.19	0.93
62				9.7	0.21	19.8	5.2	0.26	1.26
63				10.9	0.21	19.4	4.3	0.22	1.04
64				10.0	0.21	20.3	4.2	0.20	0.98
65				11.8	0.21	20.6	4.5	0.22	1.02
66			圧縮	9.6	0.21	20.9	5.2	0.25	1.20
67				10.8	0.21	20.2	6.0	0.29	1.39
68				9.8	0.21	20.8	3.8	0.18	0.87
69				9.9	0.21	19.6	5.8	0.30	1.42
70				9.4	0.21	20.7	4.8	0.23	1.10



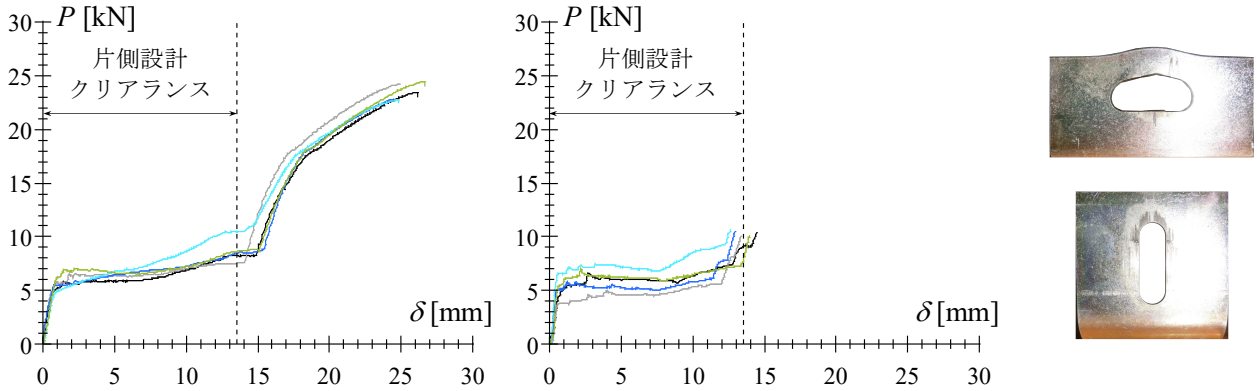
（a）荷重変形関係（引張）　（b）荷重変形関係（圧縮）　（c）載荷後の試験体

図2.35　溶融亜鉛めっき



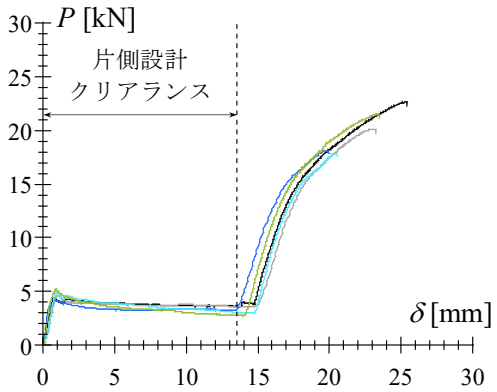
（a）荷重変形関係（引張）　（b）荷重変形関係（圧縮）　（c）載荷後の試験体

図2.36　溶融亜鉛めっき+リン酸塩刷毛塗り

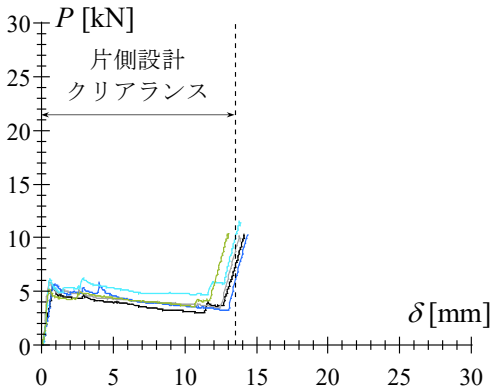


（a）荷重変形関係（引張）　（b）荷重変形関係（圧縮）　（c）載荷後の試験体

図2.37　電気亜鉛めっき



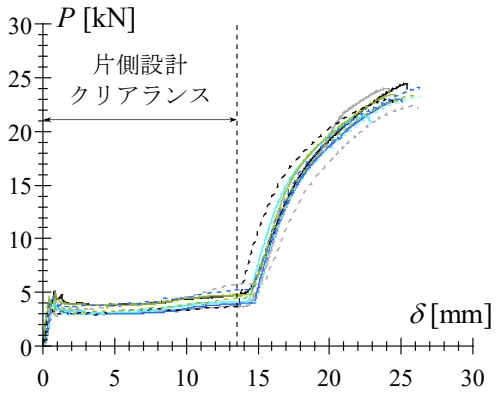
(a) 荷重変形関係(引張)



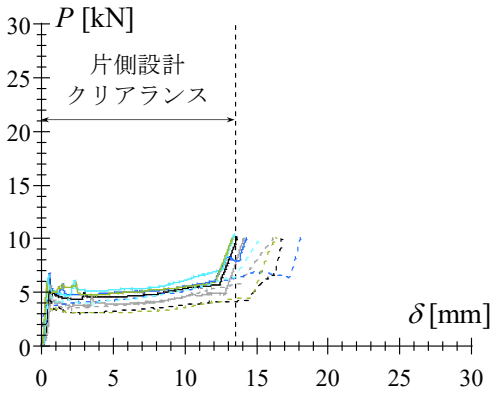
(b) 荷重変形関係(圧縮)

(c) 載荷後の試験体

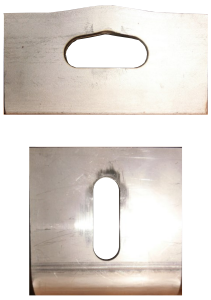
図2.38　電気亜鉛めっき+錆止め塗料



(a) 荷重変形関係(引張)



(b) 荷重変形関係(圧縮)

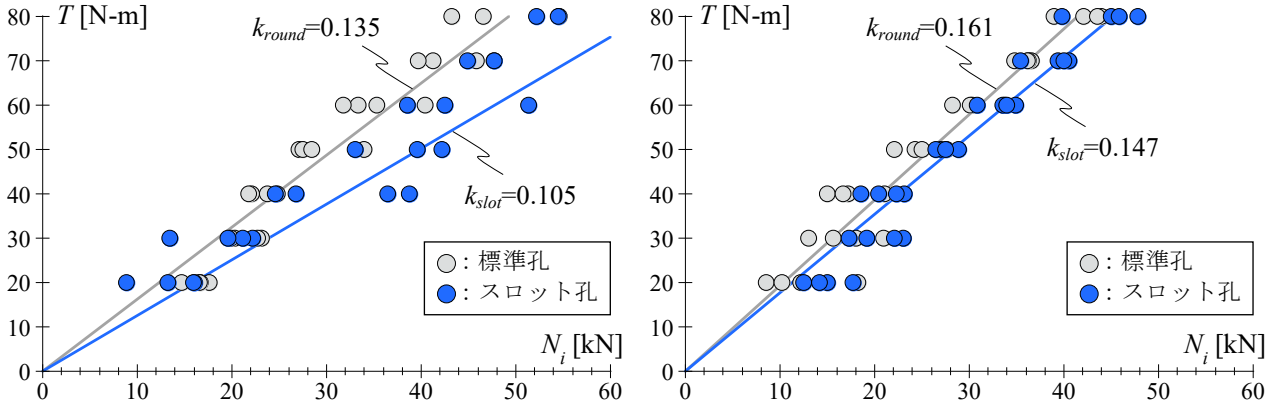


(c) 載荷後の試験体

図2.39　ステンレス

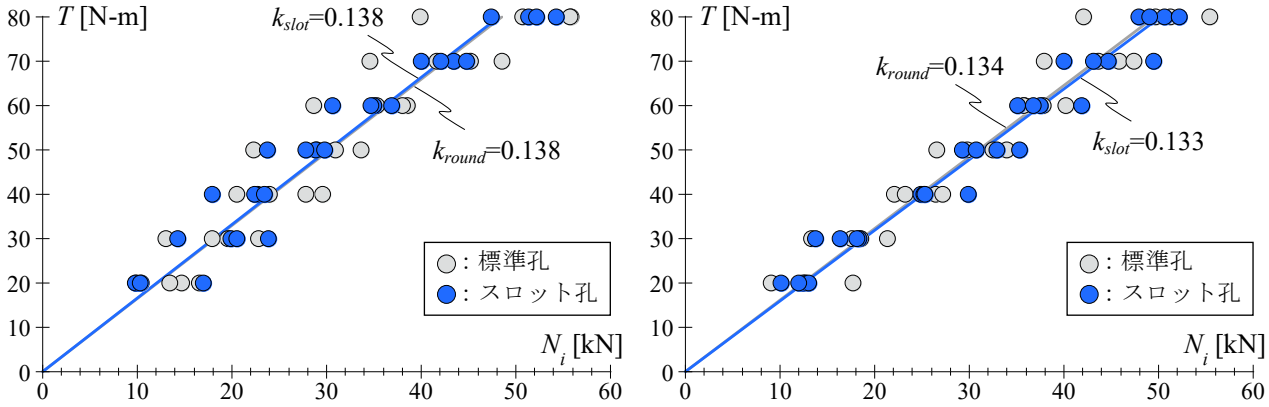
本実験において使用した高力ボルト相当材および普通ボルトと同一ロットのボルトを一定のトルクで締め付け，そのときに導入される張力を計測した．計測は，表面処理に溶融亜鉛めっき，電気亜鉛めっき，およびステンレスである試験体を用いて行った．計測の結果を表面処理ごとに図2.40～図2.42に示す．図の縦軸は締め付けトルクT，横軸は導入張力N_iである．計測は4本のボルトに対して行い，ボルト孔を標準孔とした実験結果を○，ボルト孔をスロット孔とした実験結果を●で示している．また，図にはボルト孔を標準孔，スロット孔としたトルク係数の平均値k_{round}，k_{slot}をそれぞれ灰色，青色の実線で示している．

締め付けトルクと導入張力はほぼ比例関係にあり，ボルト孔形状による違いはほとんどみられなかった．また，表面処理が溶融亜鉛めっきである試験体とステンレスである試験体においては，普通ボルトによる締め付けを行った場合にトルク係数がわずかに高い傾向が見られる．高力ボルト相当材による締め付けを行った場合には，表面処理の種類によるトルク係数の差はほとんど生じていない．



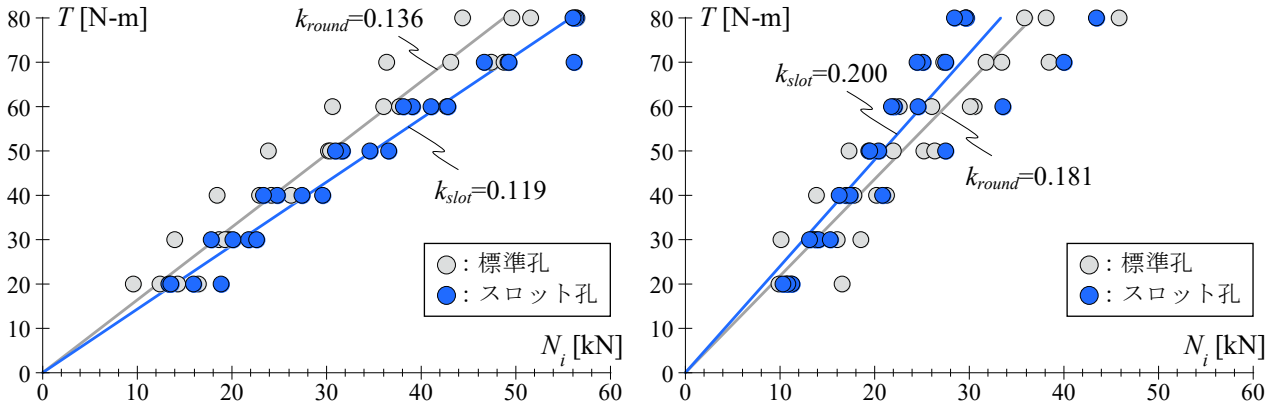
（a）高力ボルト　　（b）普通ボルト

図2.40　溶融亜鉛めっき



（a）高力ボルト　　（b）普通ボルト

図2.41　電気亜鉛めっき



（a）高力ボルト　　（b）普通ボルト

図2.42　ステンレス

2.3.5　すべり係数に対する実験パラメータの影響

【ボルトの強度と載荷方向】

載荷方向と表面処理の組み合わせごとのすべり係数を図2.43に示す．図の縦軸はすべり係数μであり，横軸は載荷方向および表面処理である．高力ボルト相当材と普通ボルトの結果はほぼ同等であり，ボルトの強度による違いはほとんど生じていないことが分かる．一方，載荷方向の違いについては，一部の試験体で圧縮載荷時に引張載荷時よりすべり係数が高い傾向が見られる．これは，引張載荷時にはファスナおよび胴縁が変形することでボルト接合部に接合面面外方向の力が作用し，圧縮載荷時よりもボルトの導入張力が低下するためであると考えられる（写真2.5）．

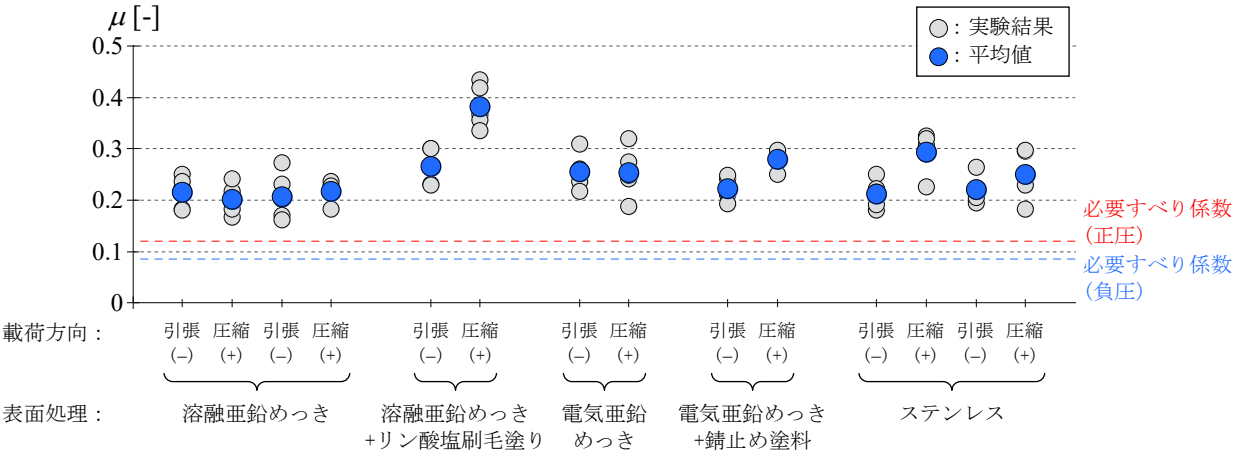


図2.43　すべり係数と載荷方向および表面処理の関係

（a）引張載荷時　　（b）圧縮載荷時

写真2.5　載荷終了時の試験体の様子

【表面粗さ】

本節で得られたすべり係数と表面粗さを図2.44に示す．図の縦軸はすべり係数μ，横軸は最大高さ粗さR_zであり，2.2節にて得られた結果を併せて示している．本節の結果を●で示すと，2.2節の結果に比べて最大高さ粗さが大きいことによりすべり係数が増加していることが分かる．特に，溶融亜鉛めっきとリン酸塩処理を施した試験体については最大高さ粗さが他の試験体の2倍以上であり，偏心や一面せん断としたことによる影響はほとんど見られなかった．

すべり係数の実験値と計算値の関係を図2.45に示す．図の縦軸は実験値μであり，横軸は(2.3)式を0.7倍して得た計算値μ_{cal}である．図には，すべり係数の計算値と実験値が等しくなる直線から，本節の実験結果に対するμ/μ_{cal}の標準偏差σの±1倍，±2倍，±3倍を考慮した範囲を破線で示している．標準偏差は0.147であり，2.2節にて示した実験結果と比較してすべり係数のばらつきが小さいことが分かる．

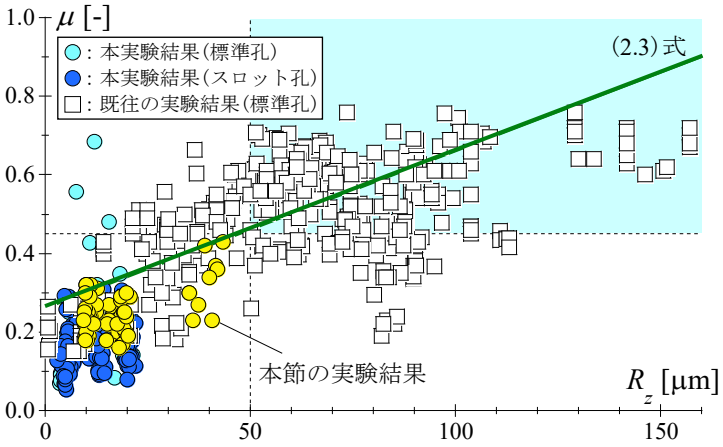


図2.44　すべり係数と表面粗さの関係

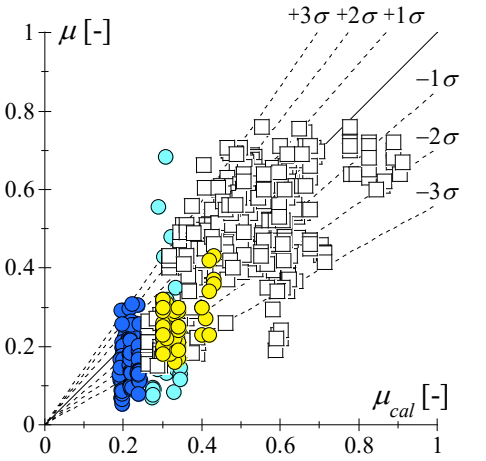


図2.45　すべり係数の実験値と計算値

2.3.6　実施工における適用可能性の検討

ファスナと胴縁間のボルト接合部に作用する風荷重(図2.46)とすべり耐力を比較する．風荷重に対してボルト接合部のすべりが生じないとき，必要すべり係数は次式で表せる．

$$\mu \geq \frac{W}{m \cdot \sum N_i} = \frac{W}{N_1} \qquad \cdots (2.4)$$

なお，ボルト接合部は応力方向のボルト本数が1本($\Sigma N_i = N_1$)の1面摩擦(m=1)である．想定される風荷重Wは，建築基準法施行令第82条および平成12年建設省告示第1458号「屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧力」に則って算出する．このとき，ファスナと胴縁間のボルト接合部1か所が負担する風圧力の受圧面積は1m^{2}とする．検討対象の中層建物の条件を表2.11に示す．建物高さと軒の高さの平均，および外壁の取り付け高さはともに30mとする．

算出した風荷重を図2.47に示す．図の縦軸は外壁の地盤面からの取り付け高さZ，横軸は想定される風荷重Wである．風荷重は，Z=30mにおいて正圧時に2350N，負圧時(隅角部)に1710N程度である．ボルトの導入張力N_1を20kNとすると，必要すべり係数は正圧時に0.12，負圧時に0.085となる．必要すべり係数を，正圧時を赤色破線，負圧時を青色破線で図2.42に示す．

本節の試験体において測定した最大高さ粗さの範囲は9.4～43.3μmであり，(2.3)式によりすべり係数に換算すると0.208～0.303程度である．実験から得られたすべり係数は0.162～0.435程度であり，(2.4)式による必要すべり係数に対して正圧時に1.35倍以上，負圧時に1.90倍以上上回っていることが分かる．したがって，導入張力の低下を考慮しない場合には，風荷重に対するボルト接合部のすべり抵抗は確保できるものと予想される．

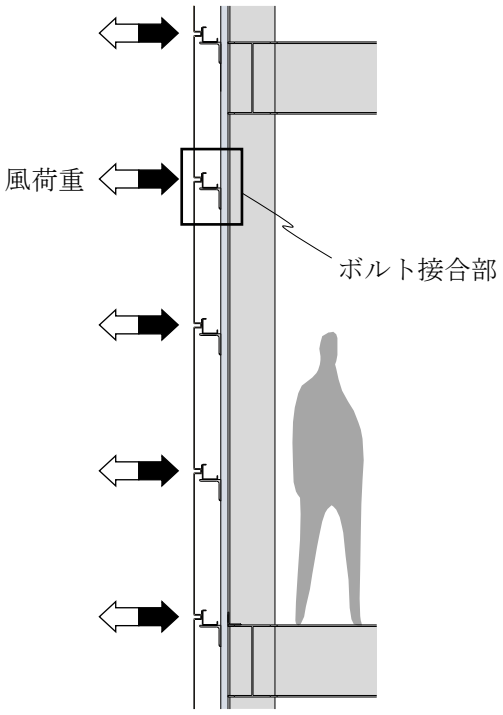


図2.46　ボルト接合部に作用する風荷重

表2.11　中層建物の条件

建物形状	建物の高さと軒の高さの平均 H [m]	地表面粗度区分 [-]	基準風速 V_o [m/s]	再現期間年数 [年]
閉鎖型	30	Ⅲ	34	100

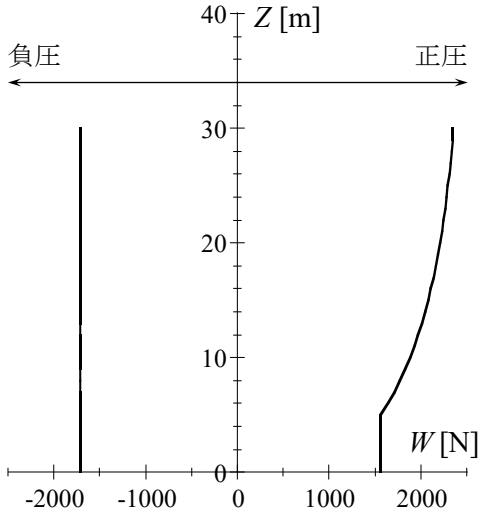


図2.47　想定される風荷重

2.4　胴縁と金属パネル間のねじ接合部の要素実験

2.4節では，胴縁と金属パネル間のねじ接合部を対象とした要素実験から，はしあき方向の応力に対するねじ接合部の破壊形式と最大耐力を確認する．

2.4.1　試験体の概要

試験体の概要を，セットアップと計測計画を兼ねて図2.48に示す．試験体は，外装パネルに用いる金属パネルのねじ接合部である．ねじ接合部は，2枚の金属パネルとドリルねじ（ST4.2，図2.49）により構成する一面せん断継手である．ドリルねじの頭部はナベ形状である．なお，本実験では接合部の有効断面破断が生じないようにパネルの幅を45mmに統一した．

実験パラメータは，図2.50および表2.12に示すパネルの材質，板厚t，はしあきe，ねじ孔の長径d_l，およびねじ孔の角度θの4項目である．ねじ孔の角度は，外壁が面内方向に変形する際に，ねじ接合部に生ずる鉛直荷重とせん断力による複合応力を考慮したものである．パネルの材質はアルミパネル（A1100P H14）と鋼板（SGMHC）の2種類，板厚は3種類（アルミパネルは0.8，2.5，4.0mm，鋼板は0.8，2.3，3.2mm）である．はしあきは，隣接するパネル間のシーリング幅として12，20，30mmを想定した5，9，14mmとする．ねじ孔の長径は12，16，20mmの3種類であり，ねじ孔の角度は，載荷方向とねじ孔が直交するものを0°として，0，20，45，90°の4種類を用意した．ただし，ねじ孔の角度90°ははし抜け破断に至らしめるため，はしあきを5.75mmとして用意した．

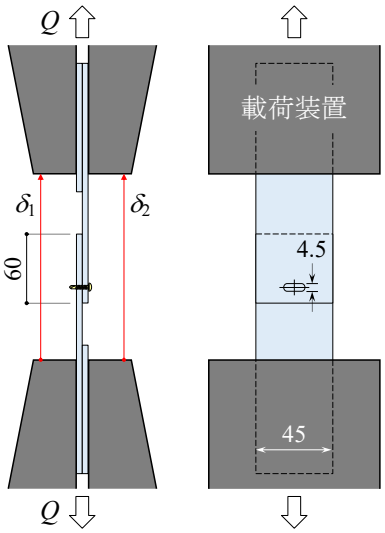


図2.48　セットアップ

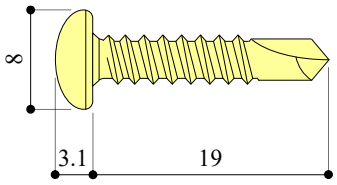


図2.49　ドリルねじ

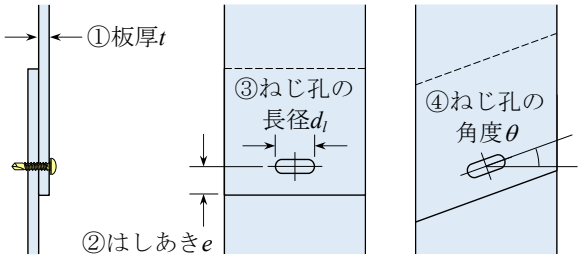


図2.50　実験パラメータ

表2.12　実験パラメータの一覧

材質	板厚 t [mm]	はしあき e [mm]	ねじ孔の長径 d_l [mm]	ねじ孔の角度 θ [°]
アルミパネル (A1100P H14)	0.8	5	12	0
	2.5 (2.3)	9	16	20
鋼板 (SGMHC)	4.0 (3.2)	14	20	45
				90

括弧内は鋼板を示す．

2.4.2　載荷方法

試験体のセットアップは，まず2枚のパネルをそれぞれ上下の載荷装置に挟み込むことで固定する．このとき，一面せん断による載荷軸の偏心を避けるために，試験体と同様の厚さのパネルを合わせて挟み込んでいる．パネルを固定した後に，ねじ接合部の締め付けを行った．締め付けは，インパクトドライバーを用いて，ドリルねじの頭部がパネルに接地するまで行っている．

実験は単調引張載荷とし，ねじ接合部の破壊による明確な耐力低下が確認できるまで行った．実験中は，載荷装置に組み込まれたロードセルにより軸方向力Qを得る．また，下部載荷装置から上部載荷装置の相対変位を計測することで，接合部の変形$\delta(=(\delta_1+\delta_2)/2)$を得る（写真2.6）．

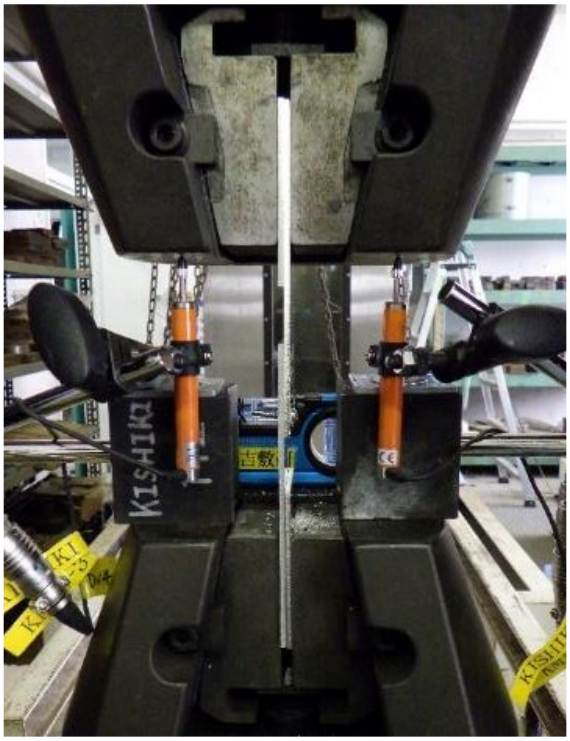


写真2.6　変位計の設置状況

2.4.3　ねじ接合部の要素実験結果の概要

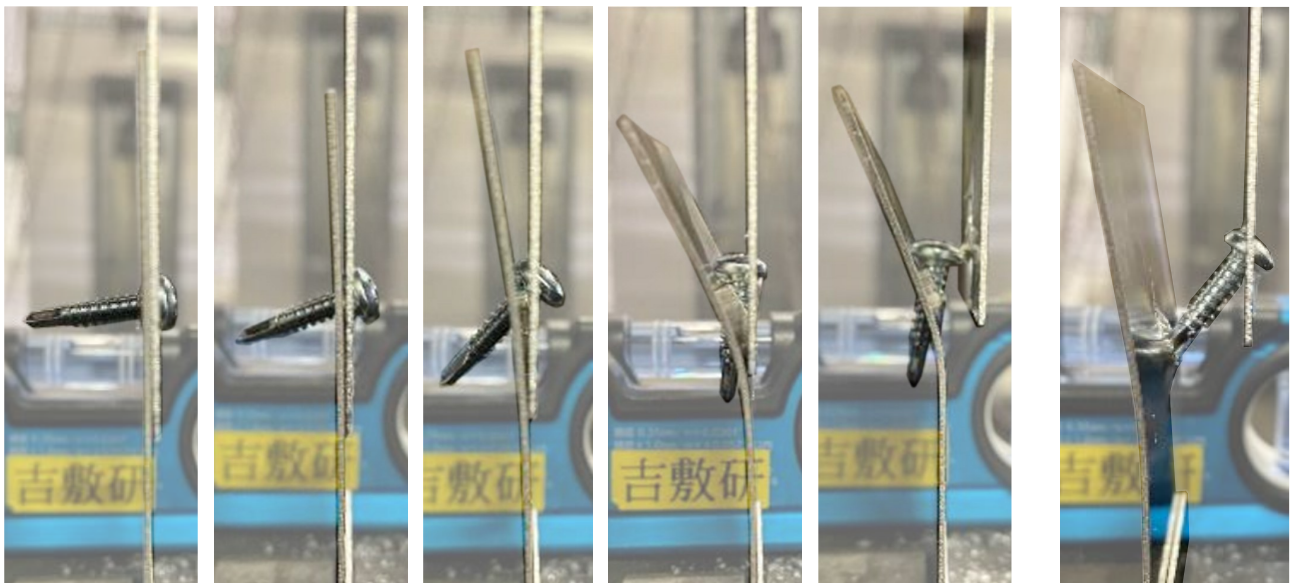
実験結果の一覧を表2.13～表2.16に示す．表には，各試験体の最大耐力と破壊形式を記す．また，パネルの材質および板厚ごとの荷重変形関係を図2.51～図2.57に，載荷後の各試験体を表2.17～表2.23に示す．図2.51～図2.57の(a)および(b)の縦軸は軸方向力Qであり，横軸は接合部の変形δである．(a)は片側の設計クリアランスを超えてねじが支圧状態に移行したことが推測される接合部の変形が2.0mm以下の範囲であり，(b)はねじ接合部の破壊による明確な耐力低下を確認した載荷終了までの範囲である．はしあきおよびねじ孔の角度を線色によって，ねじ孔の長径を線種によって区別している．実験中に確認した破壊形式を以下に述べる．

【はし抜け破断】

アルミパネルでははしあきを5mmあるいは9mm，鋼板でははしあきを5mmとした試験体の多くではし抜け破断を確認した．はし抜け破断は，はしあき部でねじと直接接触する部分あるいははしあき部の両端のいずれかにおいて生じた．

【ねじの引き抜け】

アルミパネルでははしあきを14mm，鋼板でははしあきを9mmあるいは14mmとした試験体の多くでねじの引き抜けを確認した．ねじの引き抜けは，鋼板を用いた試験体ではねじ切り刃側において生じ，アルミパネルを用いた試験体ではねじ頭部側とねじ切り刃側のいずれかにおいて生じた(写真2.7)．これらは，一面せん断に伴う偏心によってねじが曲げモーメントを受けて傾斜することが原因であると考えられる．なお，表2.13～表2.16および表2.17～表2.23中には，ねじ切り刃側の引き抜けを「引き抜け(C)」，ねじ頭部側の引き抜けを「引き抜け(H)」と示す．



(a) ねじ頭部側(引き抜け(H))　　(b) ねじ切り刃側(引き抜け(C))

写真2.7　ねじの引き抜けの様子

表2.13　実験結果の一覧(1)

No	材質	板厚 t [mm]	はしあき e [mm]	ねじ孔長径d_l [mm]	はしあき形状 $(d_l-d_s)/(e-d_s/2)$ [mm]	角度 θ [°]	計算値 最大耐力 Q_{ucal} [-]	計算値 破壊形式 [-]	実験値 最大耐力 Q_u [-]	実験値 破壊形式 [-]	最大耐力 実験値/計算値 Q_u/Q_{ucal} [-]
1	アルミパネル	0.8	5	12	2.73	0	0.20	はし抜け破断	0.26	はし抜け破断	1.3
2		0.8	5	12	2.73	0	0.20	はし抜け破断	0.26	はし抜け破断	1.3
3		0.8	5	12	2.73	0	0.20	はし抜け破断	0.32	はし抜け破断	1.6
4		0.8	5	16	4.18	0	0.13	はし抜け破断	0.22	はし抜け破断	1.7
5		0.8	5	16	4.18	0	0.13	はし抜け破断	0.17	はし抜け破断	1.4
6		0.8	5	16	4.18	0	0.13	はし抜け破断	0.21	はし抜け破断	1.7
7		0.8	5	20	5.64	0	0.09	はし抜け破断	0.16	はし抜け破断	1.7
8		0.8	5	20	5.64	0	0.09	はし抜け破断	0.16	はし抜け破断	1.7
9		0.8	5	20	5.64	0	0.09	はし抜け破断	0.16	はし抜け破断	1.7
10		0.8	9	12	1.11	0	0.70	引き抜け(C)	0.72	引き抜け(C)	1.0
11		0.8	9	12	1.11	0	0.70	引き抜け(C)	0.80	引き抜け(C)	1.1
12		0.8	9	12	1.11	0	0.70	引き抜け(C)	0.83	はし抜け破断	1.2
13		0.8	9	16	1.70	0	0.70	引き抜け(C)	0.73	はし抜け破断	1.0
14		0.8	9	16	1.70	0	0.70	引き抜け(C)	0.74	はし抜け破断	1.1
15		0.8	9	16	1.70	0	0.70	引き抜け(C)	0.73	はし抜け破断	1.0
16		0.8	9	20	2.30	0	0.57	引き抜け(C)	0.61	はし抜け破断	1.1
17		0.8	9	20	2.30	0	0.57	引き抜け(C)	0.60	はし抜け破断	1.1
18		0.8	9	20	2.30	0	0.57	引き抜け(C)	0.60	はし抜け破断	1.1
19		0.8	14	12	0.64	0	0.70	引き抜け(C)	0.90	引き抜け(H)	1.3
20		0.8	14	12	0.64	0	0.70	引き抜け(C)	0.63	引き抜け(H)	0.9
21		0.8	14	12	0.64	0	0.70	引き抜け(C)	0.72	引き抜け(H)	1.0
22		0.8	14	16	0.98	0	0.70	引き抜け(C)	0.77	引き抜け(H)	1.1
23		0.8	14	16	0.98	0	0.70	引き抜け(C)	0.70	引き抜け(H)	1.0
24		0.8	14	16	0.98	0	0.70	引き抜け(C)	0.55	引き抜け(H)	0.8
25		0.8	14	20	1.32	0	0.70	引き抜け(C)	0.80	引き抜け(H)	1.1
26		0.8	14	20	1.32	0	0.70	引き抜け(C)	0.52	引き抜け(H)	0.7
27		0.8	14	20	1.32	0	0.70	引き抜け(C)	0.49	引き抜け(H)	0.7
28		2.5	5	12	2.73	0	0.59	はし抜け破断	1.47	はし抜け破断	2.5
29		2.5	5	12	2.73	0	0.59	はし抜け破断	1.14	はし抜け破断	1.9
30		2.5	5	12	2.73	0	0.59	はし抜け破断	1.26	はし抜け破断	2.1
31		2.5	5	16	4.18	0	0.39	はし抜け破断	0.95	はし抜け破断	2.4
32		2.5	5	16	4.18	0	0.39	はし抜け破断	1.20	はし抜け破断	3.1
33		2.5	5	16	4.18	0	0.39	はし抜け破断	0.92	はし抜け破断	2.4
34		2.5	5	20	5.64	0	0.29	はし抜け破断	0.99	はし抜け破断	3.4
35		2.5	5	20	5.64	0	0.29	はし抜け破断	0.90	はし抜け破断	3.1
36		2.5	5	20	5.64	0	0.29	はし抜け破断	0.94	はし抜け破断	3.3
37		2.5	9	12	1.11	0	2.30	引き抜け(C)	2.33	はし抜け破断	1.0
38		2.5	9	12	1.11	0	2.30	引き抜け(C)	2.36	はし抜け破断	1.0
39		2.5	9	12	1.11	0	2.30	引き抜け(C)	2.27	はし抜け破断	1.0
40		2.5	9	16	1.70	0	2.30	引き抜け(C)	2.14	はし抜け破断	0.9
41		2.5	9	16	1.70	0	2.30	引き抜け(C)	2.16	はし抜け破断	0.9
42		2.5	9	16	1.70	0	2.30	引き抜け(C)	2.21	はし抜け破断	1.0
43		2.5	9	20	2.30	0	1.73	はし抜け破断	2.01	はし抜け破断	1.2
44		2.5	9	20	2.30	0	1.73	はし抜け破断	1.91	はし抜け破断	1.1
45		2.5	9	20	2.30	0	1.73	はし抜け破断	1.99	はし抜け破断	1.1

表2.14　実験結果の一覧(2)

No	材質	板厚 t [mm]	はしあき e [mm]	ねじ孔長径d_l [mm]	はしあき形状 $(d_l-d_s)/(e-d_s/2)$ [mm]	角度 θ [°]	計算値 最大耐力 Q_{ucal} [-]	計算値 破壊形式 [-]	実験値 最大耐力 Q_u [-]	実験値 破壊形式 [-]	最大耐力 実験値/計算値 Q_u/Q_{ucal} [-]
46		2.5	14	12	0.64	0	3.78	引き抜け(C)	2.70	引き抜け(S)	0.7
47		2.5	14	12	0.64	0	3.78	引き抜け(C)	2.72	引き抜け(S)	0.7
48		2.5	14	12	0.64	0	3.78	引き抜け(C)	2.65	引き抜け(S)	0.7
49		2.5	14	16	0.98	0	3.78	引き抜け(C)	2.75	引き抜け(S)	0.7
50		2.5	14	16	0.98	0	3.78	引き抜け(C)	2.80	引き抜け(S)	0.7
51		2.5	14	16	0.98	0	3.78	引き抜け(C)	2.84	引き抜け(S)	0.8
52		2.5	14	20	1.32	0	3.78	引き抜け(C)	2.66	引き抜け(H)	0.7
53		2.5	14	20	1.32	0	3.78	引き抜け(C)	2.62	引き抜け(H)	0.7
54		2.5	14	20	1.32	0	3.78	引き抜け(C)	2.51	引き抜け(H)	0.7
55		4	5	12	2.73	0	1.07	はし抜け破断	1.58	はし抜け破断	1.5
56		4	5	12	2.73	0	1.07	はし抜け破断	1.65	はし抜け破断	1.5
57		4	5	12	2.73	0	1.07	はし抜け破断	1.46	はし抜け破断	1.4
58		4	5	16	4.18	0	0.70	はし抜け破断	1.24	はし抜け破断	1.8
59		4	5	16	4.18	0	0.70	はし抜け破断	1.42	はし抜け破断	2.0
60		4	5	16	4.18	0	0.70	はし抜け破断	1.29	はし抜け破断	1.8
61		4	5	20	5.64	0	0.52	はし抜け破断	1.15	はし抜け破断	2.2
62		4	5	20	5.64	0	0.52	はし抜け破断	1.19	はし抜け破断	2.3
63	アルミ	4	5	20	5.64	0	0.52	はし抜け破断	1.17	はし抜け破断	2.3
64	パネル	4	9	12	1.11	0	4.14	引き抜け(C)	4.00	はし抜け破断	1.0
65		4	9	12	1.11	0	4.14	引き抜け(C)	4.06	はし抜け破断	1.0
66		4	9	12	1.11	0	4.14	引き抜け(C)	3.93	はし抜け破断	0.9
67		4	9	16	1.70	0	4.14	引き抜け(C)	3.91	はし抜け破断	0.9
68		4	9	16	1.70	0	4.14	引き抜け(C)	3.84	はし抜け破断	0.9
69		4	9	16	1.70	0	4.14	引き抜け(C)	3.77	ねじ破断	0.9
70		4	9	20	2.30	0	3.12	はし抜け破断	3.64	はし抜け破断	1.2
71		4	9	20	2.30	0	3.12	はし抜け破断	3.64	はし抜け破断	1.2
72		4	9	20	2.30	0	3.12	はし抜け破断	3.67	はし抜け破断	1.2
73		2.5	9	12	1.11	20	2.45	引き抜け(C)	2.46	はし抜け破断	1.0
74		2.5	9	12	1.11	20	2.45	引き抜け(C)	2.33	はし抜け破断	1.0
75		2.5	9	12	1.11	20	2.45	引き抜け(C)	2.43	はし抜け破断	1.0
76		2.5	9	12	1.11	45	3.25	引き抜け(C)	2.71	はし抜け破断	0.8
77		2.5	9	12	1.11	45	3.25	引き抜け(C)	2.65	はし抜け破断	0.8
78		2.5	9	12	1.11	45	3.25	引き抜け(C)	2.66	はし抜け破断	0.8
79		2.5	5.25	12	0	90	1.79	はし抜け破断	2.58	はし抜け破断	1.4
80		2.5	5.25	12	0	90	1.79	はし抜け破断	2.56	はし抜け破断	1.4
81		2.5	5.25	12	0	90	1.79	はし抜け破断	2.64	はし抜け破断	1.5

表2.15　実験結果の一覧(3)

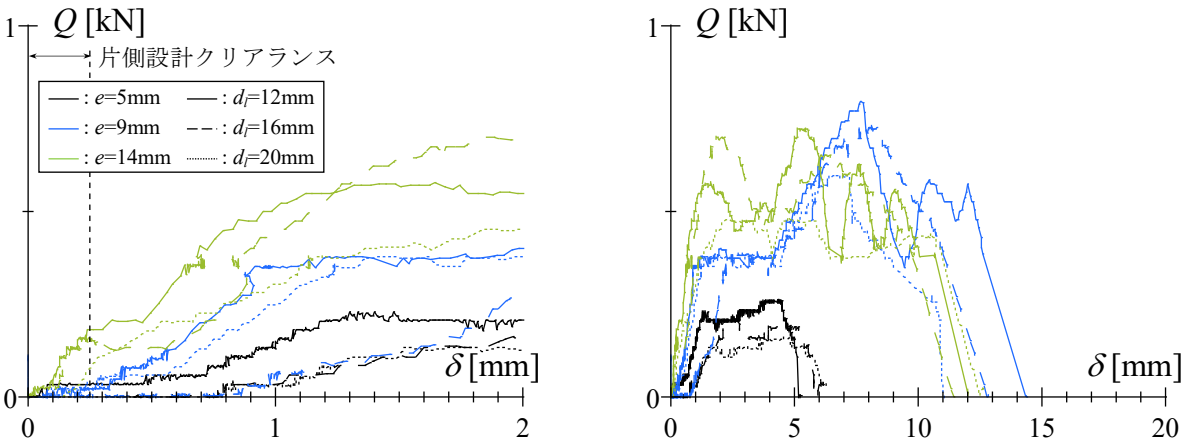
No	材質	板厚 t [mm]	はしあき e [mm]	ねじ孔長径d_l [mm]	はしあき形状 $(d_l-d_s)/(e-d_s/2)$ [mm]	角度 θ [°]	計算値 最大耐力 Q_{ucal} [-]	計算値 破壊形式 [-]	実験値 最大耐力 Q_u [-]	実験値 破壊形式 [-]	最大耐力 実験値/計算値 Q_u/Q_{ucal} [-]
82		0.8	5	12	2.73	0	0.55	はし抜け破断	1.05	はし抜け破断	1.9
83		0.8	5	12	2.73	0	0.55	はし抜け破断	1.16	はし抜け破断	2.1
84		0.8	5	12	2.73	0	0.55	はし抜け破断	1.15	はし抜け破断	2.1
85		0.8	5	16	4.18	0	0.36	はし抜け破断	0.95	はし抜け破断	2.6
86		0.8	5	16	4.18	0	0.36	はし抜け破断	1.01	はし抜け破断	2.8
87		0.8	5	16	4.18	0	0.36	はし抜け破断	0.88	はし抜け破断	2.5
88		0.8	5	20	5.64	0	0.27	はし抜け破断	0.92	はし抜け破断	3.5
89		0.8	5	20	5.64	0	0.27	はし抜け破断	0.88	はし抜け破断	3.3
90		0.8	5	20	5.64	0	0.27	はし抜け破断	0.90	はし抜け破断	3.4
91		0.8	9	12	1.11	0	1.98	引き抜け(C)	2.23	引き抜け(C)	1.1
92		0.8	9	12	1.11	0	1.98	引き抜け(C)	2.21	引き抜け(C)	1.1
93		0.8	9	12	1.11	0	1.98	引き抜け(C)	2.02	引き抜け(C)	1.0
94		0.8	9	16	1.70	0	1.98	引き抜け(C)	2.55	引き抜け(C)	1.3
95		0.8	9	16	1.70	0	1.98	引き抜け(C)	2.39	引き抜け(C)	1.2
96		0.8	9	16	1.70	0	1.98	引き抜け(C)	2.33	引き抜け(C)	1.2
97		0.8	9	20	2.30	0	1.60	引き抜け(C)	2.21	引き抜け(C)	1.4
98		0.8	9	20	2.30	0	1.60	引き抜け(C)	1.98	引き抜け(C)	1.2
99		0.8	9	20	2.30	0	1.60	引き抜け(C)	2.24	はし抜け破断	1.4
100		0.8	14	12	0.64	0	1.98	引き抜け(C)	2.12	引き抜け(C)	1.1
101		0.8	14	12	0.64	0	1.98	引き抜け(C)	2.33	引き抜け(C)	1.2
102		0.8	14	12	0.64	0	1.98	引き抜け(C)	2.13	引き抜け(C)	1.1
103		0.8	14	16	0.98	0	1.98	引き抜け(C)	2.07	引き抜け(C)	1.0
104	鋼板	0.8	14	16	0.98	0	1.98	引き抜け(C)	2.33	引き抜け(C)	1.2
105		0.8	14	16	0.98	0	1.98	引き抜け(C)	2.46	引き抜け(C)	1.2
106		0.8	14	20	1.32	0	1.98	引き抜け(C)	2.35	引き抜け(C)	1.2
107		0.8	14	20	1.32	0	1.98	引き抜け(C)	2.01	引き抜け(C)	1.0
108		0.8	14	20	1.32	0	1.98	引き抜け(C)	2.43	引き抜け(C)	1.2
109		2.3	5	12	2.73	0	1.64	はし抜け破断	3.87	はし抜け破断	2.4
110		2.3	5	12	2.73	0	1.64	はし抜け破断	3.83	はし抜け破断	2.3
111		2.3	5	12	2.73	0	1.64	はし抜け破断	3.86	はし抜け破断	2.4
112		2.3	5	16	4.18	0	1.07	はし抜け破断	2.89	はし抜け破断	2.7
113		2.3	5	16	4.18	0	1.07	はし抜け破断	2.98	はし抜け破断	2.8
114		2.3	5	16	4.18	0	1.07	はし抜け破断	3.26	はし抜け破断	3.1
115		2.3	5	20	5.64	0	0.79	はし抜け破断	2.56	はし抜け破断	3.2
116		2.3	5	20	5.64	0	0.79	はし抜け破断	2.41	はし抜け破断	3.0
117		2.3	5	20	5.64	0	0.79	はし抜け破断	2.44	はし抜け破断	3.1
118		2.3	9	12	1.11	0	6.33	引き抜け(C)	6.40	引き抜け(C)	1.0
119		2.3	9	12	1.11	0	6.33	引き抜け(C)	6.47	引き抜け(C)	1.0
120		2.3	9	12	1.11	0	6.33	引き抜け(C)	6.13	引き抜け(C)	1.0
121		2.3	9	16	1.70	0	6.33	引き抜け(C)	5.75	ねじの破断	0.9
122		2.3	9	16	1.70	0	6.33	引き抜け(C)	5.81	はし抜け破断	0.9
123		2.3	9	16	1.70	0	6.33	引き抜け(C)	5.96	ねじの破断	0.9
124		2.3	9	20	2.30	0	4.77	はし抜け破断	4.77	ねじの破断	1.0
125		2.3	9	20	2.30	0	4.77	はし抜け破断	5.17	ねじの破断	1.1
126		2.3	9	20	2.30	0	4.77	はし抜け破断	5.33	ねじの破断	1.1

表2.16　実験結果の一覧(4)

No	材質	板厚 t [mm]	はしあき e [mm]	ねじ孔長径 d_l [mm]	はしあき形状 $(d_l-d_s)/(e-d_s/2)$ [mm]	角度 θ [°]	計算値 最大耐力 Q_{ucal} [-]	計算値 破壊形式 [-]	実験値 最大耐力 Q_u [-]	実験値 破壊形式 [-]	最大耐力 実験値/計算値 Q_u/Q_{ucal} [-]
127	鋼板	3.2	5	12	2.73	0	2.14	はし抜け破断	4.06	ねじの破断	1.9
128		3.2	5	12	2.73	0	2.14	はし抜け破断	4.05	ねじの破断	1.9
129		3.2	5	16	4.18	0	1.39	はし抜け破断	3.73	ねじの破断	2.7
130		3.2	5	16	4.18	0	1.39	はし抜け破断	4.14	ねじの破断	3.0
131		3.2	5	16	4.18	0	1.39	はし抜け破断	3.99	ねじの破断	2.9
132		3.2	5	20	5.64	0	1.03	はし抜け破断	3.47	ねじの破断	3.4
133		3.2	5	20	5.64	0	1.03	はし抜け破断	3.39	ねじの破断	3.3
134		3.2	5	20	5.64	0	1.03	はし抜け破断	3.53	ねじの破断	3.4
135		0.8	9	12	1.11	20	1.98	引き抜け(C)	2.25	引き抜け(C)	1.1
136		0.8	9	12	1.11	20	1.98	引き抜け(C)	2.18	引き抜け(C)	1.1
137		0.8	9	12	1.11	20	1.98	引き抜け(C)	2.17	引き抜け(C)	1.1
138		2.3	9	12	1.11	20	6.73	引き抜け(C)	6.40	ねじの破断	0.9
139		2.3	9	12	1.11	20	6.73	引き抜け(C)	7.04	ねじの破断	1.0
140		2.3	9	12	1.11	20	6.73	引き抜け(C)	6.75	引き抜け(C)	1.0
141		0.8	9	12	1.11	45	1.98	引き抜け(C)	2.15	引き抜け(C)	1.1
142		0.8	9	12	1.11	45	1.98	引き抜け(C)	2.11	引き抜け(C)	1.1
143		0.8	9	12	1.11	45	1.98	引き抜け(C)	2.14	引き抜け(C)	1.1
144		2.3	9	12	1.11	45	8.95	引き抜け(C)	7.57	ねじの破断	0.8
145		2.3	9	12	1.11	45	8.95	引き抜け(C)	6.21	ねじの破断	0.7
146		2.3	9	12	1.11	45	8.95	引き抜け(C)	5.92	ねじの破断	0.7
147		0.8	5.25	12	0	90	1.65	引き抜け(C)	2.09	引き抜け(C)	1.3
148		0.8	5.25	12	0	90	1.65	引き抜け(C)	2.29	引き抜け(C)	1.4
149		0.8	5.25	12	0	90	1.65	引き抜け(C)	2.25	引き抜け(C)	1.4
150		2.3	5.25	12	0	90	4.92	はし抜け破断	6.75	ねじの破断	1.4
151		2.3	5.25	12	0	90	4.92	はし抜け破断	6.06	ねじの破断	1.2
152		2.3	5.25	12	0	90	4.92	はし抜け破断	6.07	ねじの破断	1.2

【アルミパネル：板厚0.8mm】

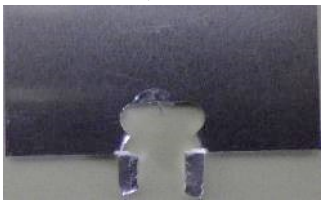
接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，ほとんどの試験体において耐力が非常に小さく，接合部の変形が0.25mm以降では徐々に耐力が上昇している．最大耐力は，はしあき9mmではしあき5mmの3倍程度であり，はしあき14mmでははしあき9mmと同程度である．はし抜け破断に至ったはしあき5mmとはしあき9mmでは，ねじ孔の長径が大きいほど最大耐力が低下する傾向が見られる．一方，ねじの引き抜けに至ったはしあき14mmでは，ねじ孔の長径によらず，最大耐力がほぼ一定となっていることが分かる．



(a) 荷重変形関係（$\delta \leqq 2.0$mm）　　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）

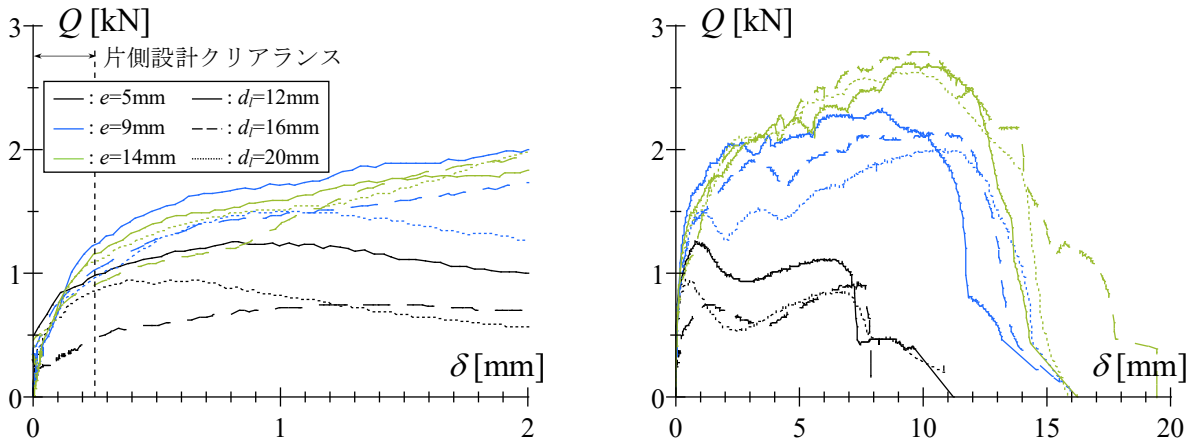
図2.51　荷重変形関係（アルミパネル（t=0.8mm））

表2.17　載荷後の試験体（アルミパネル（t=0.8mm））

ねじ孔長径 d_l [mm]	はしあき e [mm] 5	9	14
12	はし抜け破断 	はし抜け破断，ねじの引き抜け(C)	ねじの引き抜け(H)
16	はし抜け破断	はし抜け破断	ねじの引き抜け(H)
20	はし抜け破断	はし抜け破断	ねじの引き抜け(H)

【アルミパネル：板厚2.5mm】

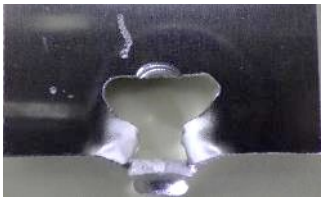
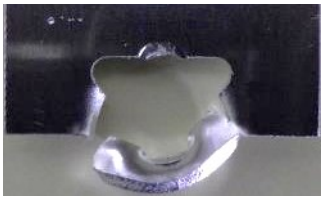
接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，板厚0.8mmと異なり，いずれの試験体も載荷初期の段階から高い剛性を発揮している．最大耐力は，はしあき9mmではしあき5mmの2倍程度であり，はしあき14mmでははしあき9mmの1.2倍程度である．はし抜け破断に至ったはしあき5mmとはしあき9mmでは，ねじ孔の長径が大きいほど最大耐力が低下する傾向が見られる．一方，ねじの引き抜けに至ったはしあき14mmでは，ねじ孔の長径によらず，最大耐力がほぼ一定となっていることが分かる．



(a) 荷重変形関係（$\delta \leqq 2.0$mm）　　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）

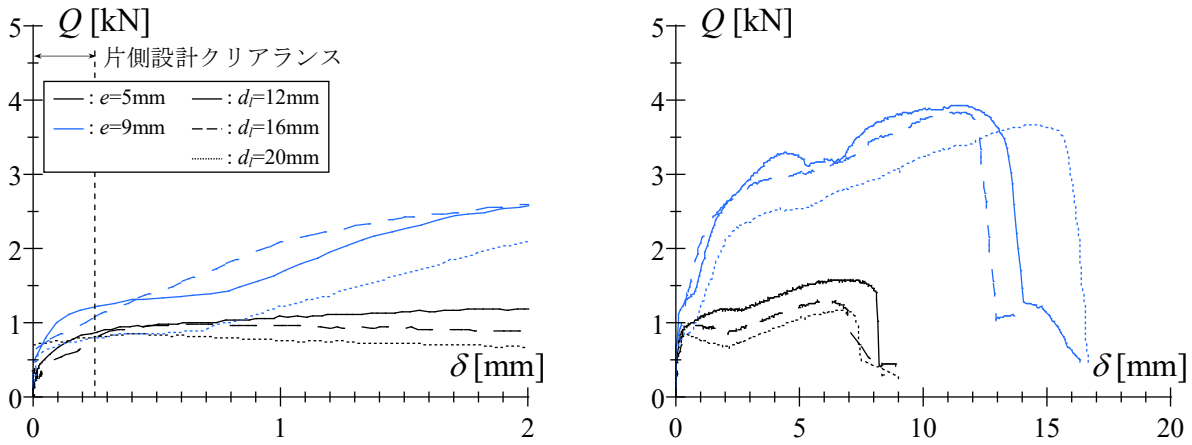
図2.52　荷重変形関係（アルミパネル（t=2.5mm））

表2.18　載荷後の試験体（アルミパネル（t=2.5mm））

ねじ孔長径 d_l [mm]	はしあき e [mm] = 5	はしあき e [mm] = 9	はしあき e [mm] = 14
12	はし抜け破断	はし抜け破断	ねじの引き抜け(C)
16	はし抜け破断	はし抜け破断 	ねじの引き抜け(C)
20	はし抜け破断	はし抜け破断 	ねじの引き抜け(H)

【アルミパネル：板厚4.0mm】

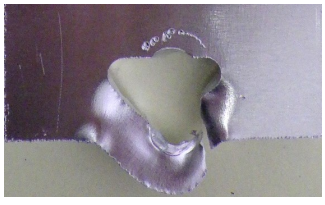
接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，いずれの試験体も載荷初期の段階から高い剛性を発揮している．最大耐力は，はしあき9mmではしあき5mmの3倍程度である．破壊形式ははしあき5mmとはしあき9mmともにはし抜け破断であり，ねじ孔の長径が大きいほど最大耐力が低下する傾向が見られる．



(a) 荷重変形関係（$\delta \leqq 2.0$mm）　　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）

図2.53　荷重変形関係（アルミパネル（t=4.0mm））

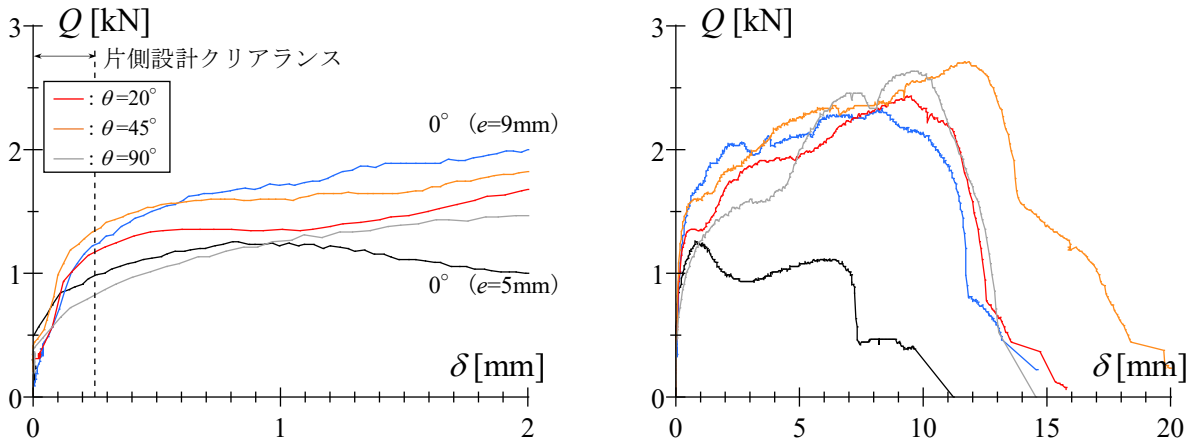
表2.19　載荷後の試験体（アルミパネル（t=4.0mm））

ねじ孔長径 d_l [mm] ＼ はしあき e [mm]	5	9	14
12	はし抜け破断	はし抜け破断	
16	はし抜け破断	はし抜け破断，ねじの破断 	
20	はし抜け破断	はし抜け破断	

【アルミパネル：角度あり】

接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，いずれの試験体も載荷初期の段階から高い剛性を発揮している．ねじ孔の角度θが大きくなるにつれて応力方向のはしあきが$1/\cos\theta$倍になることから，はしあき9mmで角度0°と比較した最大耐力は，角度20°で1.06倍，角度45°での1.41倍になることが予想される．しかしながら，実際には表2.20に示す破断線となり，角度0°と比較した最大耐力は，角度20°で1.04倍，角度45°で1.15倍にとどまっている．

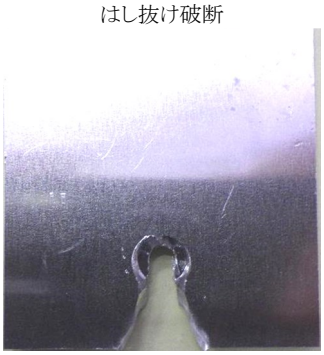
また，はしあきが5.75mmである角度90°の最大耐力は，はしあき5mmで角度0°と比較して2.0倍程度である．ここで，角度90°ではねじ孔の中央から破断しており，はしあき5.75mmがすべて外力に抵抗していると考える．角度0°ではねじ孔部分を除いた2.75mm（e-d_s/2）が外力に抵抗すると考えると，角度90°の最大耐力は外力に抵抗する距離の関係から予測できる．



(a) 荷重変形関係（δ≦2.0mm）　　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）

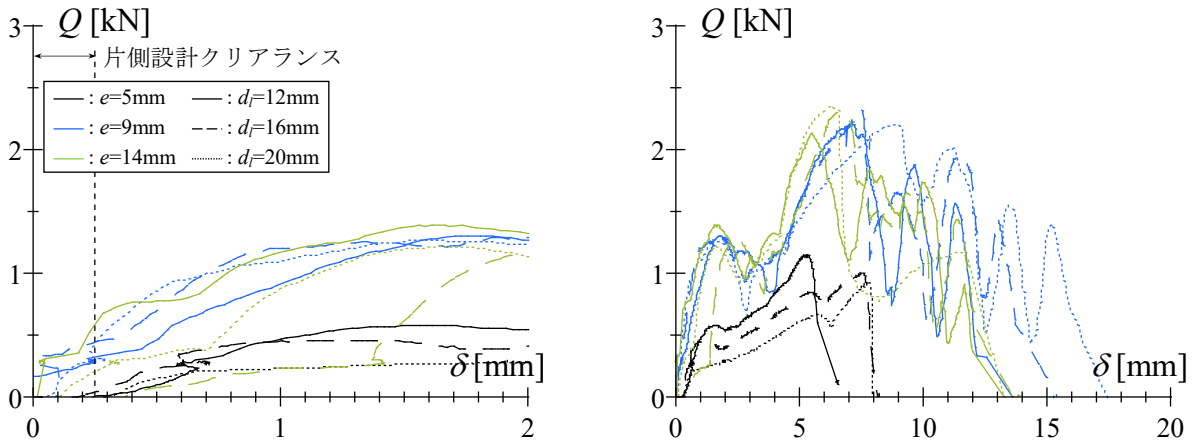
図2.54　荷重変形関係（アルミパネル（角度あり））

表2.20　載荷後の試験体（アルミパネル（角度あり））

		ねじ孔角度θ [°]		
		20	45	90
ねじ孔長径 d_l [mm]	12	はし抜け破断	はし抜け破断	はし抜け破断 

【鋼板：板厚0.8mm】

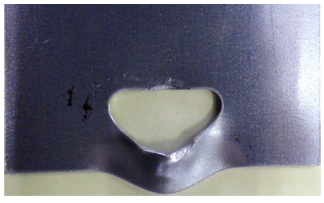
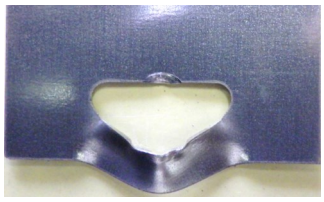
接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，ほとんどの試験体において耐力が非常に小さく，接合部の変形が0.25mm以降では徐々に耐力が上昇している．最大耐力は，はしあき9mmではしあき5mmの2.5倍程度であり，はしあき14mmでははしあき9mmと同程度である．はし抜け破断に至ったはしあき5mmでは，ねじ孔の長径が大きいほど最大耐力が低下する傾向が見られる．一方，ねじの引き抜けに至ったはしあき9mmとはしあき14mmでは，ねじ孔の長径によらず，最大耐力がほぼ一定となっていることが分かる．



(a) 荷重変形関係（$\delta \leqq 2.0$mm）　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）

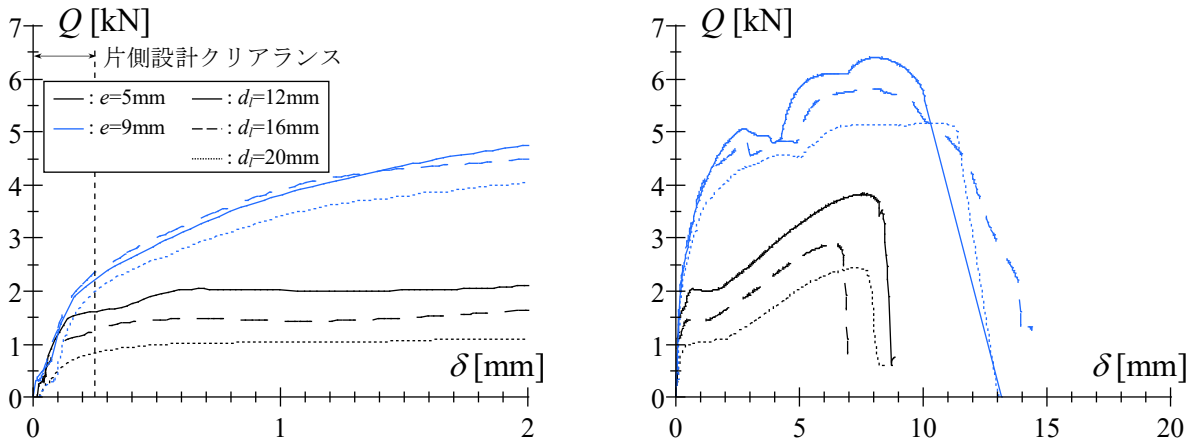
図2.55　荷重変形関係（鋼板（t=0.8mm））

表2.21　載荷後の試験体（鋼板（t=0.8mm））

ねじ孔長径 d_l [mm]	はしあき e [mm] 5	9	14
12	はし抜け破断	ねじの引き抜け(C)	ねじの引き抜け(C)
16	はし抜け破断	ねじの引き抜け(C) 	ねじの引き抜け(C)
20	はし抜け破断	はし抜け破断，ねじの引き抜け(C) 	ねじの引き抜け(C)

【鋼板：板厚2.3mm】

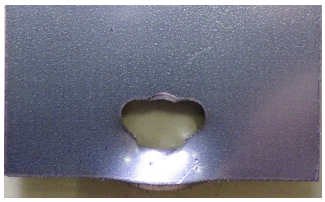
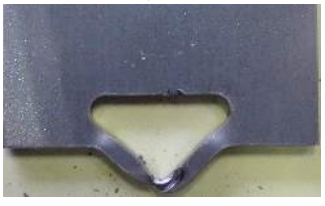
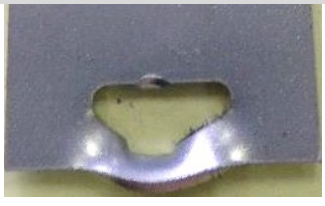
接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，ほとんどの試験体において耐力が非常に小さく，接合部の変形が0.25mm以降では徐々に耐力が上昇している．最大耐力は，はしあき9mmではしあき5mmの2.0倍程度である．はし抜け破断に至ったはしあき5mmでは，ねじ孔の長径が大きいほど最大耐力が低下する傾向が見られる．はしあき9mmでは，はし抜け破断に至ったねじ孔長径が16mmである試験体1体を除いて，ねじの引き抜けまたはねじの破断に至ったものの，ねじ孔の長径が大きいほど最大耐力が低下する傾向を示した．



(a) 荷重変形関係（$\delta \leqq 2.0$mm）　　(b) 荷重変形関係（載荷終了まで）

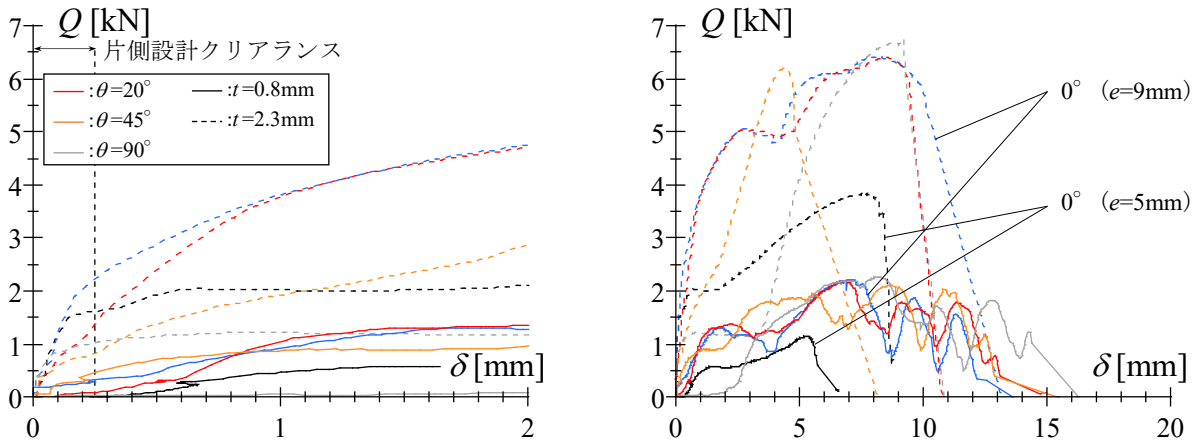
図2.56　荷重変形関係（鋼板（t=2.3mm））

表2.22　載荷後の試験体（鋼板（t=2.3mm））

ねじ孔長径 d_l [mm] ＼ はしあき e [mm]	5	9	14
12	はし抜け破断	ねじの引き抜け(C) 	
16	はし抜け破断	はし抜け破断，ねじの破断	
20	はし抜け破断 	ねじの破断 	

【鋼板：角度あり】

図2.57(a)，(b)では板厚0.8mmを実線で，板厚2.3mmを破線で区別している．接合部の変形が片側設計クリアランスである0.25mm以下では，板厚0.8mmでは耐力が非常に小さい一方で，板厚2.3mmでは載荷初期の段階から高い剛性を発揮している．板厚0.8mmではねじの引き抜け，板厚2.3mmではねじの破断に至っており，ねじ接合部の角度による最大耐力の違いはほとんど見られなかった．



(a) 荷重変形関係(δ≦2.0mm)　　(b) 荷重変形関係(載荷終了まで)

図2.57　荷重変形関係(鋼板(角度あり))

表2.23　載荷後の試験体(鋼板(角度あり))

		ねじ孔角度θ [°]		
		20	45	90
ねじ孔長径 d_l [mm]	12	ねじの引き抜け(C) t=0.8mm	ねじの引き抜け(C) t=0.8mm	ねじの引き抜け(C) t=0.8mm
		ねじの引き抜け(C)，ねじの破断 t=2.3mm	ねじの破断 t=2.3mm	ねじの破断 t=2.3mm

2.4.4　破壊形式と耐力計算

ねじ接合部の破壊形式に基づく最大耐力を評価する. 破壊形式は, はし抜け破断あるいはねじの引き抜けを考慮し, ねじの破断は考慮しないものとする. はし抜け破断時の耐力は, はしあき部のせん断破壊耐力Q_{u1}(⑵.5)式)あるいは曲げ破壊耐力Q_{u2}(⑵.6)式)のいずれか小さい値で評価する.

$$Q_{u1}=\frac{2}{\sqrt{3}}\left(e-\frac{d_s}{2}\right)\cdot t\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.5)$$

$$Q_{u2}=\frac{2\left(e-\frac{d_s}{2}\right)^2}{d_l-d_s}\cdot t\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.6)$$

ここで, tはパネルの板厚, eははしあき, d_lはねじ孔の長径, d_sはねじ孔の短径, σ_uはパネルの引張強さである. また, ねじの引き抜け時の耐力は, 文献2.11)により(2.7)式および(2.8)式が, 文献2.12)により(2.9)式および(2.10)式が提案されている. (2.7)式と(2.9)式はねじ切り刃側の引き抜け, (2.8)式と(2.10)式はねじ頭部側の引き抜けを表す.

$$Q_{u3}=5.03\left(\frac{t}{d}\right)^{1.5}\cdot A_d\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.7)$$

$$Q_{u4}=\left\{0.6+12.0\left(\frac{t}{d}\right)\right\}\cdot\left(\frac{t}{d}\right)\cdot A_d\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.8)$$

$$Q_{u5}=\left(\frac{2.5t}{d}-0.24\right)\cdot A_d\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.9)$$

$$Q_{u6}=1.67t\cdot d\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.10)$$

ここで, dはねじの呼び径, A_dはねじの呼び径による断面積であり, 各式における変数は本実験の条件に応じて書き換えている. なお, 文献2.11)では鋼板(SGCCまたはSGHC), 文献2.12)ではアルミパネル(A6063 T5)を用いた一面せん断試験を実施しており, 本実験にて用いたパネルとは材質が異なる. そこで, 一面せん断に伴う偏心モーメントを受けてねじが傾斜する角度を90°と仮定し, ねじの引き抜き耐力(⑵.11)式)を考える.

$$Q_{u7}=\frac{1}{\sqrt{3}}\pi d\cdot t\cdot\sigma_u \qquad \cdots (2.11)$$

(2.5)式～(2.11)式による最大耐力の計算値と実験値の関係を図2.57に示す. 図の縦軸は最大耐力の実験値Q_u, 横軸は計算値Q_{ucal}である. 図には, はし抜け破断を○, ねじの引き抜けを□で示し, アルミパネルを黄色, 鋼板を灰色で示す. ねじ孔の角度20°と45°ではしあき部に作用する軸方向力を$Q\cos\theta$として計算し, ねじ孔の角度90°では曲げ破壊耐力を除いて計算している.

アルミパネルを用いた試験体では, 最大耐力の計算値と実験値が非常に良く対応しているが, 一部の試験体では予想される破壊形式と異なる形式によって破壊に至った. 鋼板を用いた試験体では, 計算値は実験値をやや過小評価しているものの, ほとんどすべての試験体で予想される破壊形式と同様の破壊形式を確認した.

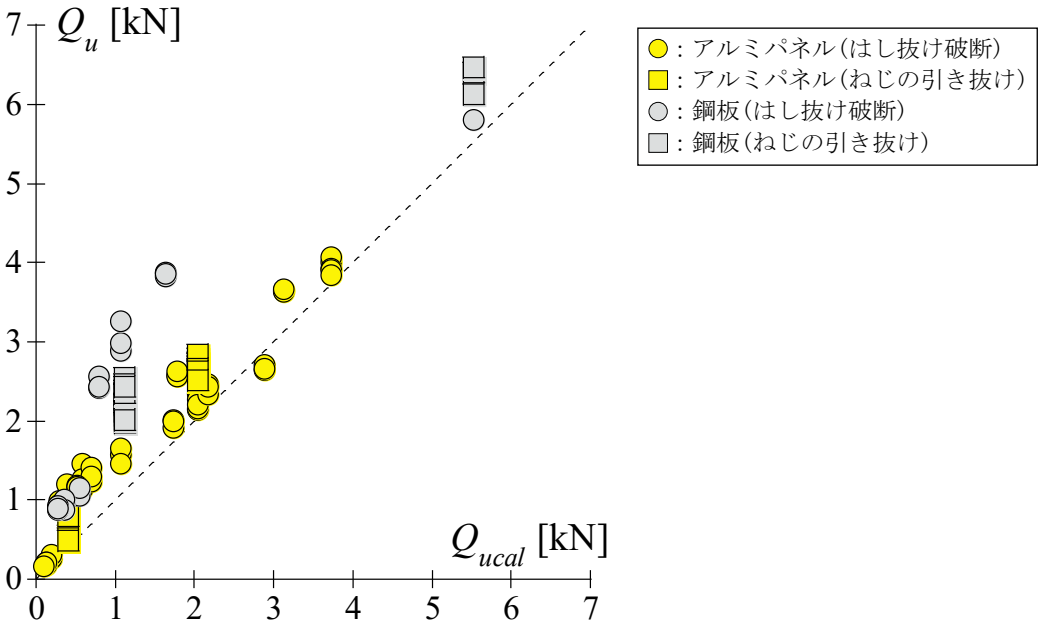


図2.58　実験値と計算値の比較

2.4.5　最大耐力に対するはしあき部の形状の影響

ねじ接合部の最大耐力に対するはしあき部の形状(次ページ，図2.59)の影響を検討する．はしあき部のせいに対するはしあき部の長さをはしあき部の形状係数αと定義する．

$$\alpha = \frac{d_l - d_s}{e - d_s/2} \qquad \cdots (2.12)$$

(2.5)式～(2.11)式による最大耐力の計算値とはしあき部の形状の関係を図2.60に示す．図(a)～(c)はアルミパネルであり，(d)，(e)は鋼板である．板厚3.2mmの鋼板を用いた試験体は，すべてねじの破断に至ったため省略した．図の縦軸はパネルの板厚で除した最大耐力Q_u/tであり，横軸ははしあき部の形状係数αである．線の色によって式を，線の種類によってねじの長径を区別している．

(2.5)式～(2.11)式による最大耐力の最小値を結んだ曲線を，はしあき部の耐力曲線とする．耐力曲線は，ねじ孔の長径が12mm，16mm，20mmの順にそれぞれ灰色，黄緑色，青色で示す．すべての材質および板厚において，はしあき部の形状係数が小さい範囲ではねじの引き抜け，はしあき部の形状係数が大きい範囲でははし抜け破断が生じることが予想される．

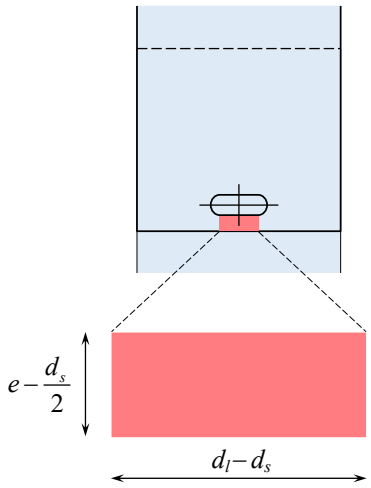
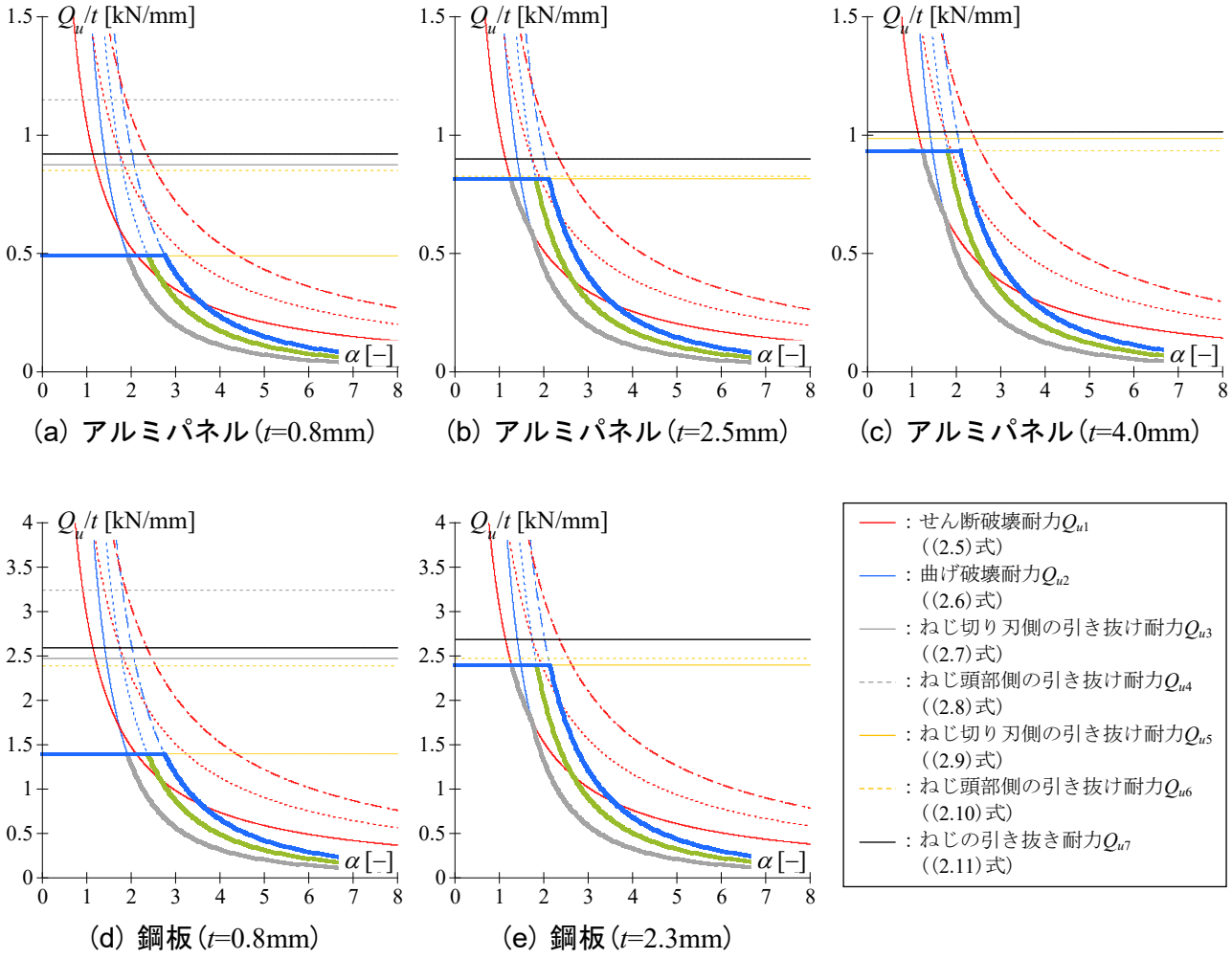


図2.59　はしあき部の形状



(a) アルミパネル (t=0.8mm)　(b) アルミパネル (t=2.5mm)　(c) アルミパネル (t=4.0mm)

(d) 鋼板 (t=0.8mm)　(e) 鋼板 (t=2.3mm)

図2.60　最大耐力の計算値とはしあき部の形状

最大耐力の実験値とはしあき部の形状の関係を図2.61に示す．図(a)～(c)はアルミパネルであり，(d)，(e)は鋼板である．図の縦軸はパネルの板厚で除した最大耐力Q_u/tであり，横軸ははしあき部の形状係数αである．図には，図2.60にて示したはしあき部の耐力曲線を示し，破壊形式がはし抜け破断である結果を○，破壊形式がねじの引き抜けである結果を□で示す．また，線色およびプロットの色によってねじ孔の長径を区別している．

すべての材質および板厚において，はし抜け破断が予想される領域では，はしあき部の形状係数が大きくなるほど，耐力曲線に沿って最大耐力が低下していることが分かる．一方，耐力曲線においてねじの引き抜けが予想される領域に着目すると，(d)鋼板(t=0.8mm)では，最大耐力が過小評価となっていることが分かる．これは，鋼板を用いた実験[2.11)]による耐力式((2.7)式)と対応しているためである．しかしながら，(a)アルミパネル(t=0.8mm)では耐力曲線と同様の破壊に至っているにもかかわらず，過小評価となっている．板厚が小さい場合の破壊形式に関しては，今後さらに検討を行う予定である．

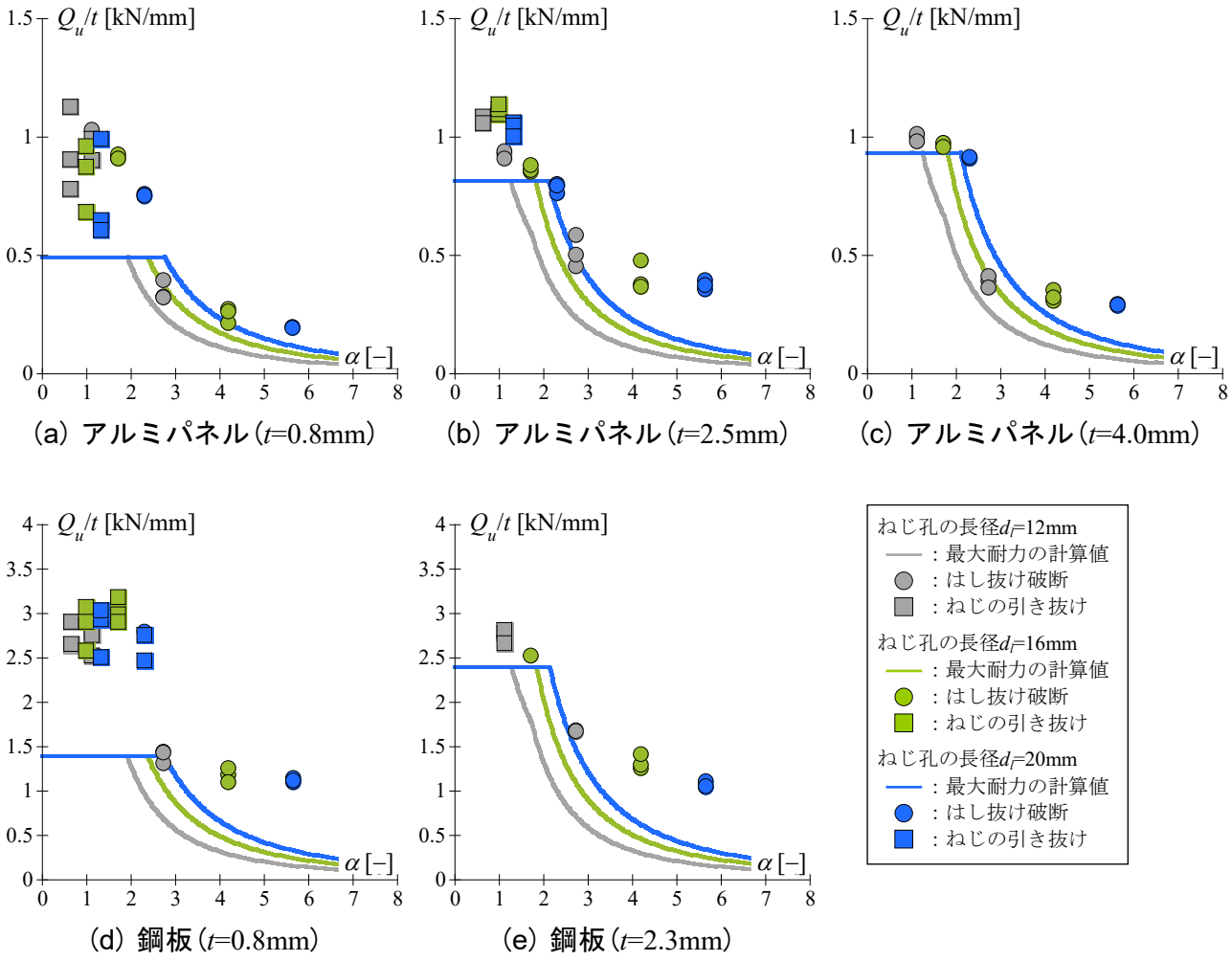


図2.61　最大耐力とはしあき部の形状

2.5　まとめ

本章では，ファスナと胴縁間のボルト接合部および胴縁と金属パネル間のねじ接合部を対象とした要素実験を実施し，各接合部に特有な力学挙動について検討した．本章にて得られた結果を以下にまとめる．

[1] スロット孔を設けたボルト接合部のすべり係数は，標準孔を設けたボルト接合部と比べて，表面処理を溶融亜鉛めっきとした場合に4～6割，溶融亜鉛めっきとリン酸塩刷毛塗り，電気亜鉛めっき，電気亜鉛めっきと錆止め塗料，およびステンレスとした場合に3割程度低下した．

[2] 金属工事において採用される代表的な表面処理により確保される最大高さ粗さR_zは5～25μm程度であり，すべり係数は0.20程度であった．これらは，高力ボルト摩擦接合部に設計上要求される条件と比較するといずれも半分程度に相当する．

[3] 本実験の範囲では，すべり係数と接合部耐力比およびボルトの初期導入張力の相関は小さい一方で，すべり係数と接合面の表面粗さの相関は大きいことが分かった．ボルト孔形状が標準孔である実験結果は，高力ボルト摩擦接合部を対象とした既往の実験結果による回帰式上におおよそ位置することを確認した．ボルト孔形状がスロット孔である実験結果は，既往の回帰式に対して3割のすべり係数の低下を見込むと，偏心や一面せん断とした部分部材実験の結果を含めて概ね予測できることが分かった．

[4] ファスナと胴縁間のボルト接合部を想定した部分部材実験では，中層建物に想定される最大風圧力に基づく風荷重に対して，すべり係数が低い負圧時においても，ボルト接合部のすべり耐力が十分上回ることを確認した．なお，荷重が繰り返し作用する状況や部材の腐食による耐力低下を踏まえた評価は，今後の検討課題である．

[5] 胴縁と金属パネル間のねじ接合部では，はしあき方向の応力に対して，はし抜け破断またはねじの引き抜けによって破壊に至ることを確認した．また，ねじ接合部の最大耐力は，はしあき部のせん断破壊耐力，はしあき部の曲げ破壊耐力，ねじ切り刃側の引き抜け耐力，およびねじ頭部側の引き抜け耐力を考慮することで概ね予想できることを示した．

[6] ねじ接合部のはしあき部のせいに対するはしあき部の長さを指標として，はし抜け破断およびねじの引き抜けによる最大耐力を予想した．板厚が最も薄いパネルを用いた接合部ではやや過小評価となるものの，ねじ接合部のはしあき部の形状から，破壊形式と最大耐力が概ね評価できることを確認した．

参考文献

2.1) 藤本盛久，田中淳夫：過大孔を有する高力ボルト摩擦接合部の性状について(その1　単純引張試験体による実験)，日本建築学会関東支部研究報告集. 構造系，pp.189-192，1977

2.2) 田中淳夫，増田浩志，脇山廣三，辻丘静雄，平井敬二，立山英二：過大孔・スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状，鋼構造論文集，第5巻，第20号，pp.35-44，1998

2.3) 森猛，山崎信宏，山口実浩：拡大孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力と降伏耐力に関する実験的研究，土木学会論文集，第2005巻，794号，I-72，pp.157-169，2005

2.4) 桑原進，安原慎吾，加藤あゆみ：スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響　すべり試験による検討，構造工学論文集，Vol.67B，pp.351-356, 2021

2.5) 木村富夫，舟橋功男，木下勝弘，小林昌一：高張力ボルト摩擦接合部の研究(2)(接触面の表面あらさと摩擦係数の関係について)，日本建築学会論文報告集，第69号，pp.657-660，1961

2.6) 脇山廣三，八木毅，山田義智：高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす表面粗さの影響に関する実験的研究，日本建築学会近畿支部研究報告集. 構造系，pp.369-372，1987

2.7) 加村隆志，北後寿：高力ボルト摩擦接合の接合面粗さがすべり耐力へ及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第485号，pp.127-134，1996

2.8) 森猛，田坂康介，一宮充，小笠原照夫：鋼材の表面粗さパラメータと高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.67，No.2，pp.446-453，2011

2.9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書JASS6鉄骨工事，第11版，2018

2.10) 佐藤秋雄，本田宏武，大岡督尚，佐藤良介，中本康，横山広大：アルミ製外装パネルの耐風圧性能(その1)耐風圧試験概要，(その2)耐風圧試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅰ，pp.105-108，2021

2.11) 岡田久志：ドリリングタッピンねじによる薄鋼板の一面せん断重ね継手耐力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第503号，pp.117-123，1998

2.12) 秋元敦，山田丈富，中込忠男，橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究(その5)アルミニウム合金薄板のタッピンねじおよび小径ボルト接合の一面せん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造Ⅲ，pp.267-268，1997

2.13) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第3版，2012.3

2.14) 久米健一，西谷隆之，石井大吾：スロット孔および過大孔を有する高力ボルト摩擦接合部のすべり係数試験その1　試験計画，その2　試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.933-936，2018

2.15) ECCS：European Recommendations for bolted connections：in structural steelwork, 1985

2.16) 野口茂，北後寿，加村隆，法貴慶人：高力ボルト摩擦接合部の摩擦面に関する実験的研究(その1　すべり耐力実験)，(その2　表面粗さとすべり係数の関係)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C分冊，pp.1549-1552，1990

2.17) 辻岡静雄：ショットブラスト摩擦面を有する高力ボルト接合のすべり荷重と履歴特性，日本建築学会構造系論文集，第471号，pp.173-179，1995

2.18) 加村隆志，北後寿：摩擦面に薬剤処理を施した高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第487号，pp.131-140，1996

2.19) 小端高行，佐藤正康：りん酸塩処理を施した摩擦接合部のリラクセーションと経年後のすべり試験，鋼構造論文集，第6巻，第21号，pp.45-54，1999

2.20) 森猛，南邦明，井口進，山口隆司：接合面処理方法と品質を考慮した高力ボルト摩擦接合継手すべり係数の提案，土木学会論文集A，Vol.64，No.1，pp.48-59，2008

2.21) 桑原進，山本達也，佐々木正道，一戸康生，福田浩司，川畑友弥，西尾大，橋田知幸，沼田俊之，多賀謙蔵：F14T級高力ボルトを用いた1000N級鋼(950N/mm2鋼)摩擦接合部のすべり耐力　1000N級鋼の建築構造物への適用性，構造工学論文集，Vol.57B，pp.421-429，2011

2.22) 丹波寛夫，行藤晋也，木村聡，山口隆司，杉浦邦征：接合面が鋼材粗面と無機ジンクリッチペイント面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の提案，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.1，pp.137-149，2014

2.23) 柳橋卓也，田川泰久，小田達彦，今村しおり，渡辺徳明：二相ステンレス鋼板の高力ボルト摩擦接合部におけるすべり性能に関する実験的研究　その1　摩擦面処理とすべり係数に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ分冊，pp.1019-1020，2015

2.24) 池田裕哉，山口隆司，佐伯英一郎，飛永浩伸，日高哲郎：球状黒鉛鋳鉄板を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力，構造工学論文集，Vol.62A，pp.705-714，2016

2.25) 田中淳夫，増田浩志，脇山廣三，辻岡静雄，平井敬二，立山英二：過大孔・スロット孔を有する高力ボルト摩擦接合部の力学性状，鋼構造論文集，第5巻，第20号，pp.35-44，1998

2.26) 桑原進，安原慎吾，加藤あゆみ：スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響　すべり試験による検討，構造工学論文集，Vol. 67B，pp.351-356，2021

第３章

1ユニットの金属外壁要素の変形追従性能

3.1　はじめに

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」[3.1)]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（表3.1）．損傷区分AとBは補修の必要がなく，損傷区分CとDは脱落や重要な機能の低下がない区分である．一般に，非構造外壁においては中地震時に損傷区分Bまで，大地震時に損傷区分Dまでに収めることが推奨されている．

乾式非構造外壁は，外装パネルと支持部材等によって複雑に構成される．そのため，地震時の変形追従性能は，外装パネルと支持部材等を含むユニットの試験体を用いて検証するのが通例である．小濱ら[3.2)]は，GRC（ガラス繊維補強セメント）パネルを用いた面内載荷実験を行い，層間変形角1/60radまで損傷区分がAまたはBであり補修の必要がないこと，1/30radまで損傷区分がDであり脱落や重要な機能の低下がないことを確認している．また，損傷区分に関する記載はないが，鋼板製外壁材，サイディング，サンドイッチパネル，ECP（押出成形セメント板）等に対しても，外壁面内方向の変形追従性能が検証されている[3.3)~3.9)など]．これらの既往の実験では，外壁に生ずる強制変形が，スライド方式やロッキング方式による外装パネルの変形追従だけでなく，下地鋼材等の局部的な変形によって吸収することが確認されている．したがって，外壁の変形追従性能を検討する際には，各部材および各接合部の変形成分から外壁全体の変形追従機構を確認することが必要である．金属外壁は，経験的に変形追従性能が認められてきたために外壁全体の変形追従機構が明確になっていない．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．

本章では，金属パネル1枚からなる1ユニットの金属外壁要素の試験体を用いて，地震時を想定した面内載荷実験を実施する．なお，ボルト接合部は第2章にて評価したすべり係数によって，風荷重に対する構造安全性を有する条件の下で検討を行う．実験では，パネルの変形追従方式だけでなく外壁全体の変形追従機構を分析する．また，第2章に示したねじ接合部の力学モデルを拡張して，外壁の破壊形式と最大耐力の評価を試みる．さらに，各種の損傷状態と残留変形を整理し，補修の必要なしに継続使用が可能である変形限界と脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界について提示する．

表3.1　非構造部材の損傷程度の区分[3.1)]

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

本章にて扱う外壁要素の試験体は横張り工法とし，出隅，入隅，および開口を含まない一般部とする．横張り工法によるパネルの取り付け方法を図3.1に示す．隣接するパネル間の横目地では，ドリルねじによってパネルが胴縁に固定され，さらにシーリングによってパネル同士が接着している．一方，隣接するパネル間の縦目地では，パネル間に2mm程度の隙間を設けて胴縁には固定せず，シーリングによってパネル同士が接着しているのみである．一般に，金属パネル間に充填するシーリングは，気温の変動等により生ずる変形に対して，ほとんど耐力を発揮せずに追従する[3.10)]．したがって，シーリングは外壁の各部材および各接合部の変形状態や損傷状態にほとんど影響せず，1ユニットの試験体によって金属外壁の一般部が再現できるものと考えられる．

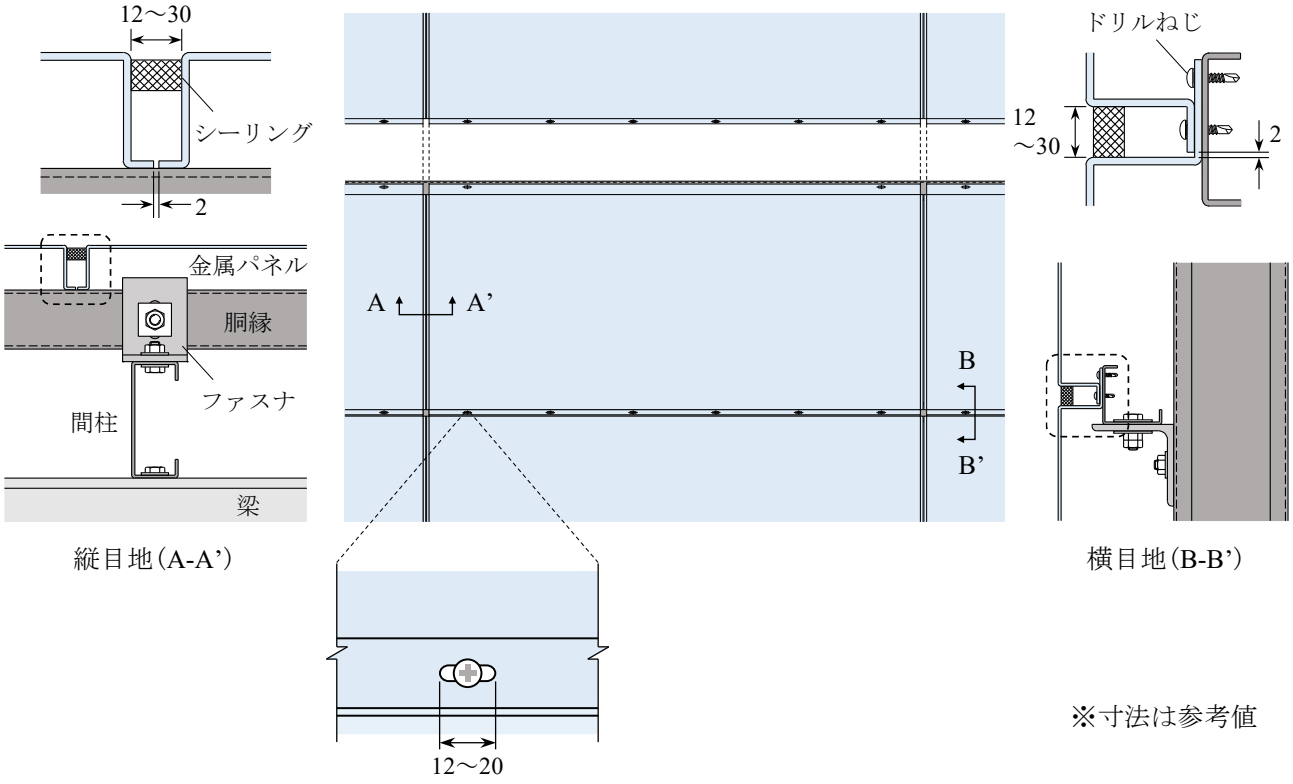


図3.1　横張り工法による金属パネルの取り付け方法

3.2　実験計画

3.2.1　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外壁の一般部である．試験体の概要を，セットアップと計測計画を兼ねて次ページの図3.2に示す．金属パネルは，見付高さ780mm，見付幅1,780mm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（図3.2（d））．金属パネルは，コストの面から採用されやすい代表的な材質として，アルミニウムと鋼板を選択した．使用したパネルについて，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表3.2に示す．

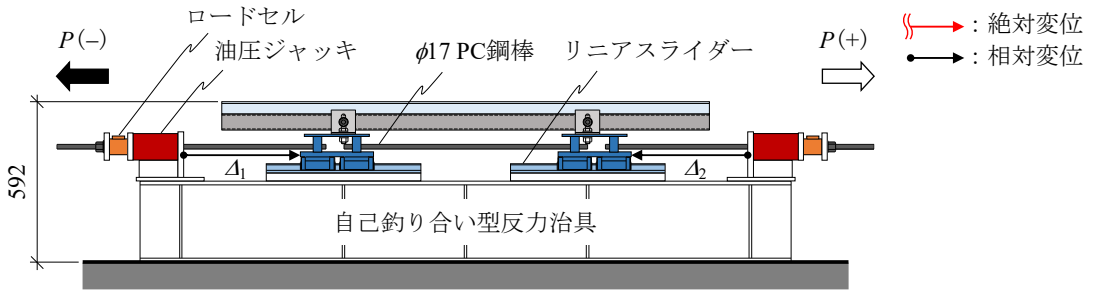
パネルを取り付ける下地鋼材は，2本の胴縁（リップ付き等辺山形断面L-60x60x2.3（リップ長さ15））と4台のファスナ（等辺山形断面L-90x90x7）である．ファスナと胴縁間のボルト接合部の詳細を図3.3に示す．ボルト接合部には，普通ボルト（M12，SUS304（A2-70））を使用する．ボルト孔は，ファスナを面外方向，胴縁を面内方向のスロット孔として躯体の施工誤差を吸収する．胴縁とパネル間のねじ接合部には，十字穴付きなべドリルねじ（ST4.2，SUS410（C1-70））を使用する．パネルの下部に設けたねじ孔は，パネルの長手方向のスロット孔として熱応力による伸縮に対応する．一方，パネルの上部は，仮止め用のスロット孔を除いてねじ孔を設けておらず，ドリルねじを打ち込むことによって胴縁に固定される．

3.2.2　セットアップ

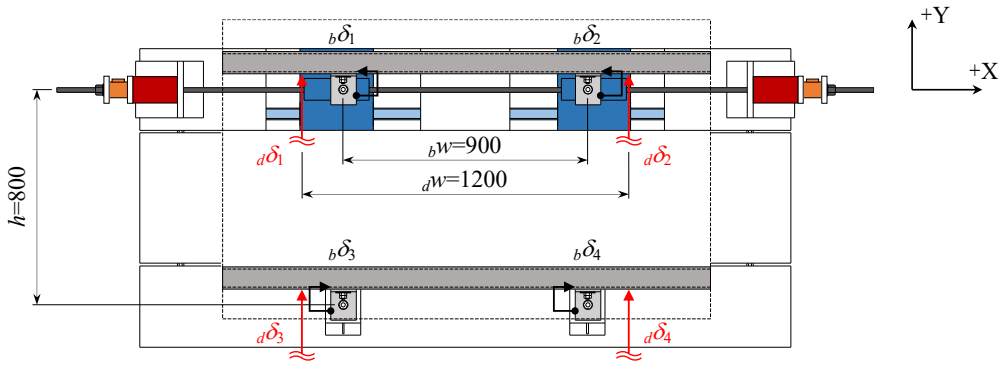
試験体は，まず自己釣り合い型の反力治具に4台のファスナを，パネルの高さ方向の間隔h=800mm，パネルの幅方向の間隔$_bw$=900mmで固定する．次に，ファスナ2台に対して，1本の胴縁を架け渡して普通ボルトで接続する．ボルトの導入張力は，普通ボルト（M12，SUS304（A2-70））の降伏耐力の6割である20kNに統一する．2本の胴縁は水平かつ平行に設置する．パネルは，下層側パネル，中央パネル，上層側パネルの順に胴縁と接続する．具体的には，下層側パネルの上部2箇所を仮止めしておき，中央パネルの下部を重ねて間隔300mmでドリルねじを打ち込む．なお，上層側のファスナはリニアスライダーによって支持し，面内水平方向に自由なローラーとなっている．また，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（図3.2（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，パネルの高さ方向のファスナ間の距離hで除して求める．

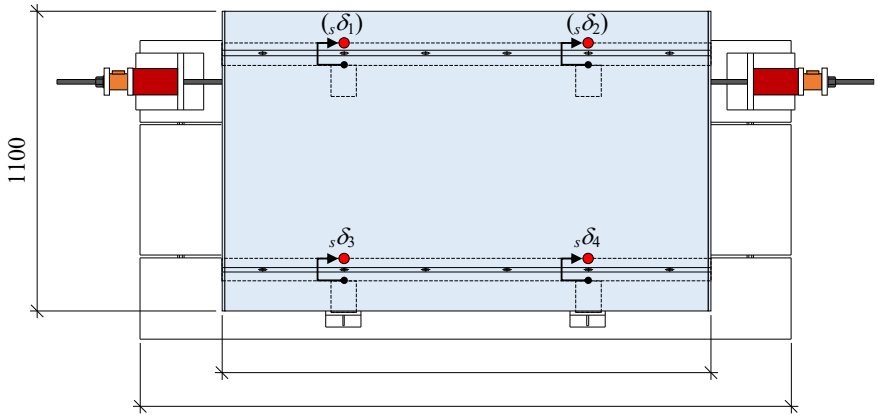
$$R=\frac{\Delta}{h}=\frac{\Delta_1+\Delta_2}{h} \qquad \cdots (3.1)$$



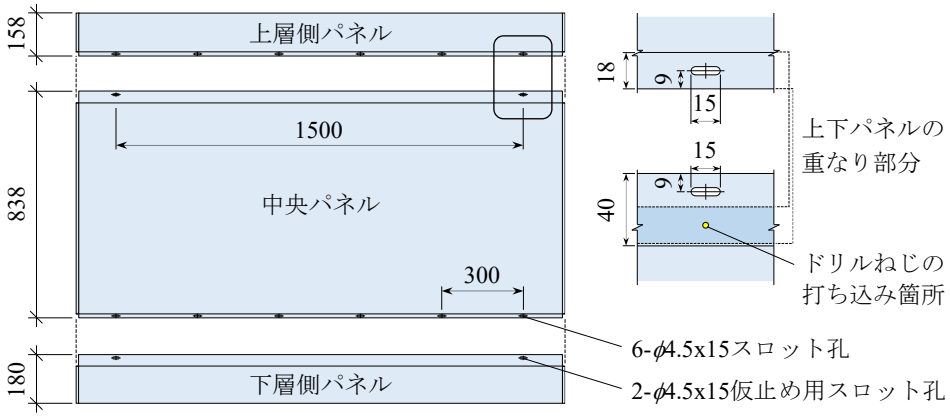
(a) 加力部と層間変形の計測位置



(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

図3.2　セットアップと計測計画

表3.2　使用する金属パネルと材料特性

試験体略称	パネルの材質	t [mm]	σ_y [N/mm^2]	σ_u [N/mm^2]
A1100	純アルミニウム (A1100P H14)	2.5	102	112
A3003	アルミニウム合金Al−Mn系 (A3003P H24)	2.5	122	137
S0.8	溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 (SGMCC)	0.8	276	318
S2.3	溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板 (SGMCC)	2.3	221	313

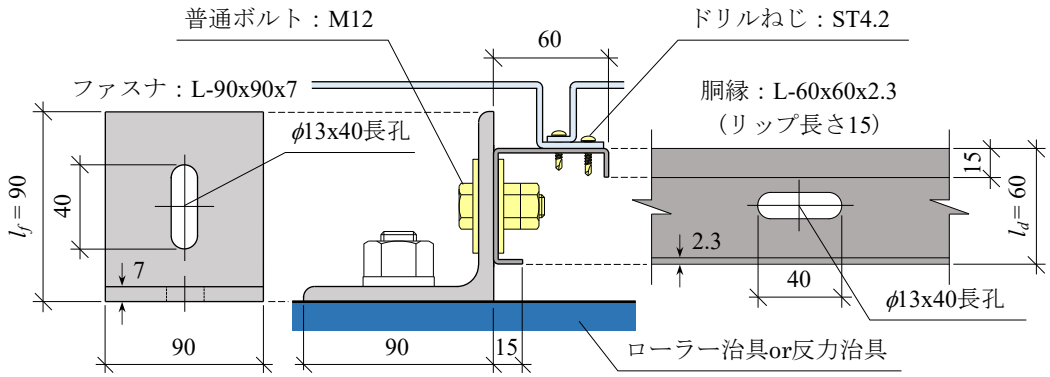


図3.3　ボルト接合部の詳細

3.2.3　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，パネルの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．

【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${}_b\delta_i$（iは計測位置），ねじ接合部の変形は胴縁とパネル間の水平方向の相対変位${}_s\delta_i$として計測する．計測位置をそれぞれ図3.2(b)，(c)に示す．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て，ボルト接合部の変形${}_b\Delta$とねじ接合部の変形${}_s\Delta$を得る．

$$ {}_b\Delta = \frac{1}{2}\sum {}_b\delta_i \qquad \cdots (3.2) $$

$$ {}_s\Delta = \frac{1}{2}\sum {}_s\delta_i \qquad \cdots (3.3) $$

【胴縁の変形】

次に，(iii)胴縁の変形について述べる．胴縁の変形は，金属パネルの回転挙動に伴って回転する胴縁のねじ接合面の水平方向の変形として求める(図3.4(a)右)．上下の胴縁のねじ接合面の回転角をそれぞれ${}_d\theta_U$，${}_d\theta_L$とすると，胴縁の変形${}_d\Delta$は次式で求められる．

$$ {}_d\Delta = h \cdot \frac{{}_d\theta_U + {}_d\theta_L}{2} \qquad \cdots (3.4) $$

なお，上下の胴縁のねじ接合面の回転角は，実験時に観察したファスナの変形状態(図3.4(b))からモデル化を行い，胴縁の各部にて計測した鉛直方向の変形から算出する推測値である．計算にあたって，胴縁の局部的な変形は考慮しないものとする．

水平方向に位置するねじ接合部群を固定端と仮定すると，面内荷重Pによって金属パネルの上下端には曲げモーメントM(=P･h/2)が作用する(図3.4(a)左)．これは，胴縁を介してファスナと胴縁間のボルト接合部における鉛直方向の偶力${}_fV_L$，${}_fV_R$として処理されると考えられる．

$$ {}_fV_L = -{}_fV_R = M \cdot \frac{1}{{}_bw} = \frac{P \cdot h}{2} \cdot \frac{1}{{}_bw} \qquad \cdots (3.5) $$

ここで，${}_bw$は水平方向左右のボルト接合部間の距離である．ボルト接合部に鉛直荷重が作用すると，水平方向左右のファスナ断面はそれぞれコーナーR部および高力ボルト(M16)による接合部を起点に回転する挙動を示した(図3.4(b))．特に，鉛直方向下向きの荷重を受けることが想定されるファスナではローラー治具からの浮き上がりを確認している．左右それぞれのファスナの回転中心を点O，回転角を${}_d\varphi_i$として，胴縁の鉛直方向の変形の計測位置D，ねじ接合部位置Sの変位の様子を図3.5に示す．図3.2(b)に示す4箇所における胴縁の鉛直方向の変形${}_d\delta_i$は，パネルの面外方向に40mmの間隔で設置した2台の変位計による計測値${}_d\delta_{Ui}$，${}_d\delta_{Li}$(図3.5(d))の平均として得る．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，水平方向左右の間隔${}_dw$を1200mmとしている．以

上から，計測位置Dにおける胴縁の鉛直方向の変形${}_d\delta_i$は，ファスナ断面の回転による変形成分${}_d\delta_{Ti}$（図3.5(a)，(b)）と，計測位置のずれによる変形成分${}_d\delta_{Si}$（図3.5(c)）の和であると考えられる．

$$ {}_d\delta_i = {}_d\delta_{Si} + {}_d\delta_{Ti} = \frac{{}_d\delta_{Ui} + {}_d\delta_{Li}}{2} \quad \cdots (3.6) $$

$$ {}_d\delta_{Ti} = \begin{cases} \dfrac{l_f}{2}\cos {}_d\varphi_i - \dfrac{l_f}{2}\sin {}_d\varphi_i - \dfrac{l_f}{2} & \left({}_d\varphi_i \geq 0\right) \\ -\dfrac{l_f}{2}\sin {}_d\varphi_i & \left({}_d\varphi_i < 0\right) \end{cases} \quad \cdots (3.7) $$

$$ {}_d\delta_{Si} = {}_d\delta_i - {}_d\delta_{Ti} \quad \cdots (3.8) $$

ただし，${}_d\varphi_i$は次式で表され，図3.5において反時計回りを正とする．

$$ {}_d\varphi_i = \frac{{}_d\delta_{Li} - {}_d\delta_{Ui}}{40} \quad \cdots (3.9) $$

したがって，ねじ接合部位置Sにおける胴縁の鉛直方向の変形${}_d\delta_i$'および上下の胴縁のねじ接合面の回転角${}_d\theta_U$，${}_d\theta_L$は，以下の通りに求められる．

$$ {}_d\delta_i' = {}_d\delta_{Si}' + {}_d\delta_{Ti}' \quad \cdots (3.10) $$

$$ {}_d\delta_{Ti}' = \begin{cases} \dfrac{l_f + l_d}{2}\cos {}_d\varphi_i - \dfrac{l_f + l_d}{2}\sin {}_d\varphi_i - \dfrac{l_f + l_d}{2} & \left({}_d\varphi_i \geq 0\right) \\ \dfrac{l_d}{2}\cos {}_d\varphi_i - \dfrac{l_f + l_d}{2}\sin {}_d\varphi_i - \dfrac{l_d}{2} & \left({}_d\varphi_i < 0\right) \end{cases} \quad \cdots (3.11) $$

$$ {}_d\delta_{Si}' = {}_d\delta_{Si} = {}_d\delta_i - {}_d\delta_{Ti} \quad \cdots (3.12) $$

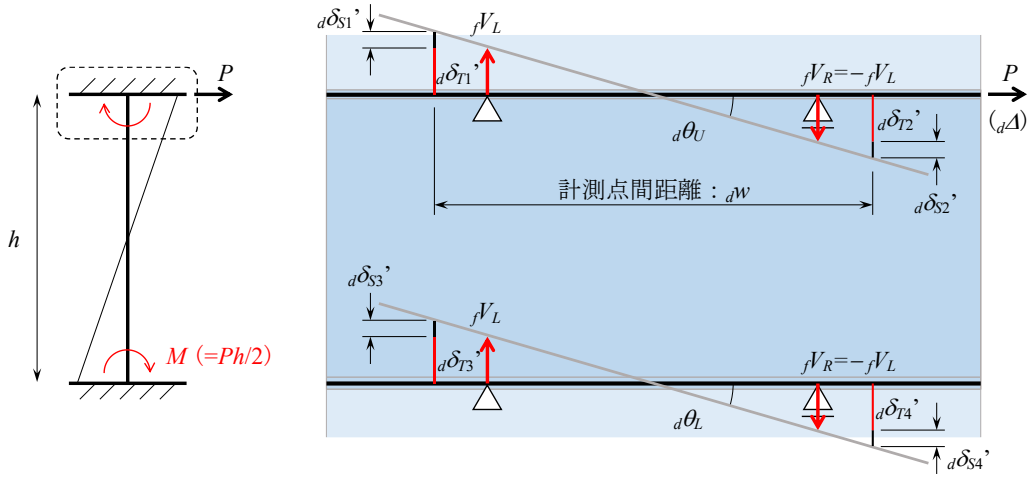
$$ {}_d\theta_U = \frac{{}_d\delta_1' - {}_d\delta_2'}{{}_dw} \quad \cdots (3.13) $$

$$ {}_d\theta_L = \frac{{}_d\delta_3' - {}_d\delta_4'}{{}_dw} \quad \cdots (3.14) $$

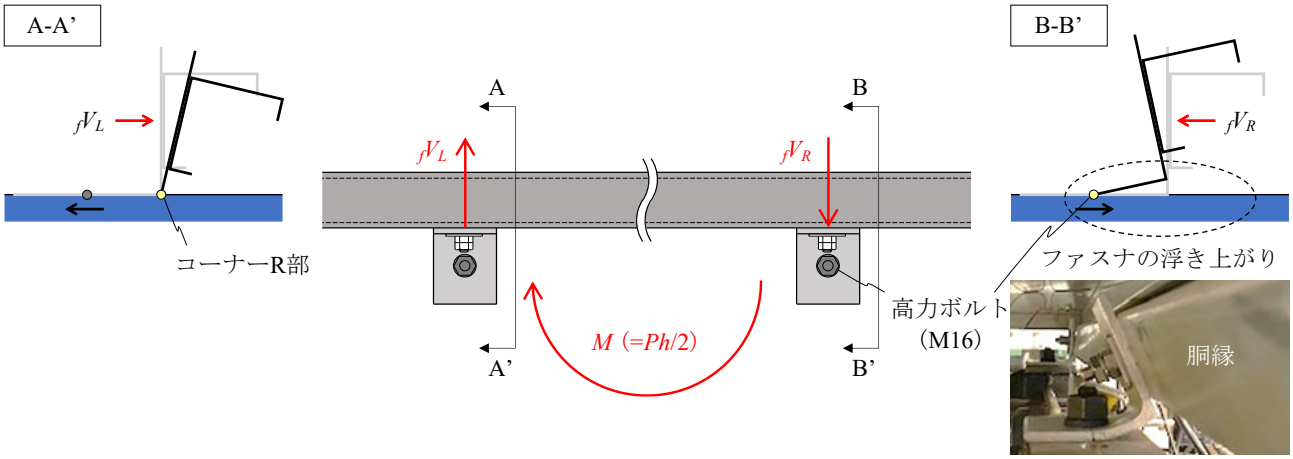
ここで，l_fはファスナ断面の高さ，l_dは胴縁断面の高さである．

【残余分】

層間変形Δから(i)ボルト接合部の変形${}_b\Delta$((3.2)式)，(ii)ねじ接合部の変形${}_s\Delta$((3.3)式)，および(iii)胴縁の変形${}_d\Delta$((3.4)式)を差し引くことで，(iv)残余分${}_o\Delta$を得る．残余分は，変位計では把握できない変形成分であり，後述する金属パネルのロッキング挙動に伴うねじ孔の支圧やパネルの折り曲げ加工部分の変形によって生ずる水平方向の変形等を含むものである．

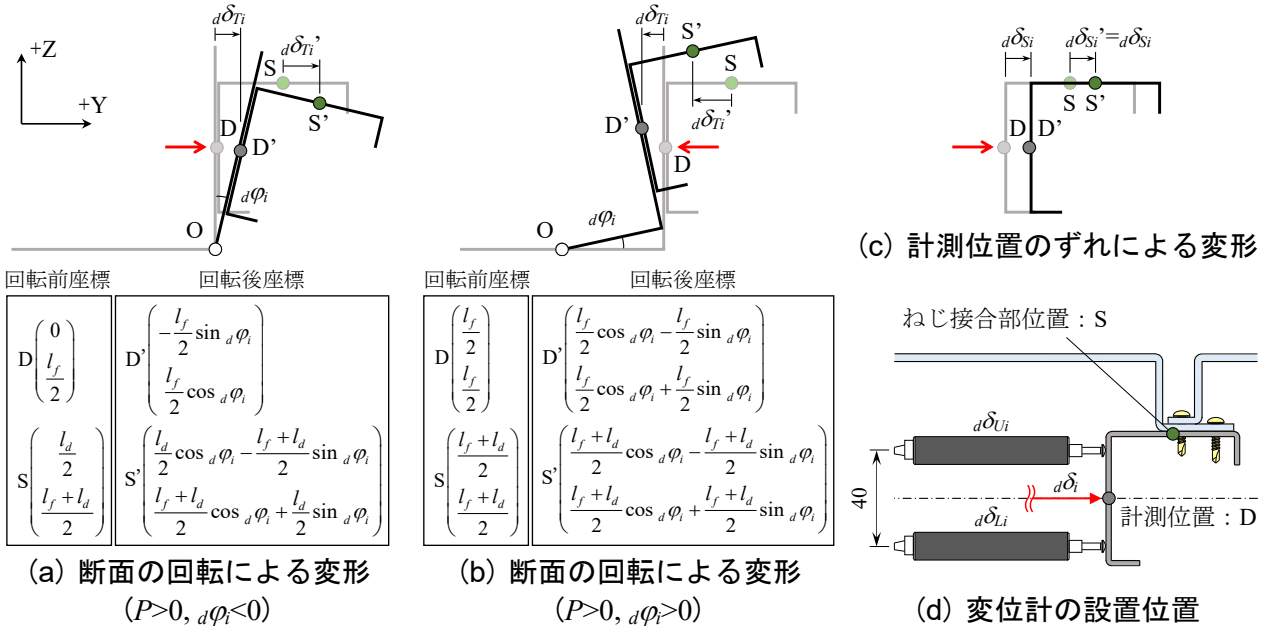


(a) パネルの力学モデルと胴縁の変形



(b) ファスナの変形状態

図3.4　各部材の力学モデルと胴縁の変形 (P>0)



(a) 断面の回転による変形
(P>0, $_d\varphi_i$<0)

(b) 断面の回転による変形
(P>0, $_d\varphi_i$>0)

(c) 計測位置のずれによる変形

(d) 変位計の設置位置

図3.5　胴縁の鉛直方向の変形の処理方法

3.2.4　載荷履歴

本実験における載荷履歴を図3.6に示す．載荷は，正負交番漸増変位による繰り返し載荷とし，制御振幅には層間変形角*R*を用いる．*R*=1/100radに達するまでは各振幅を2サイクルずつ行い，その後は1/67rad，1/50rad，1/33radを各々1サイクルずつ行う．最終的には，金属パネルの脱落が想定される破壊に至るまで変形を与える．

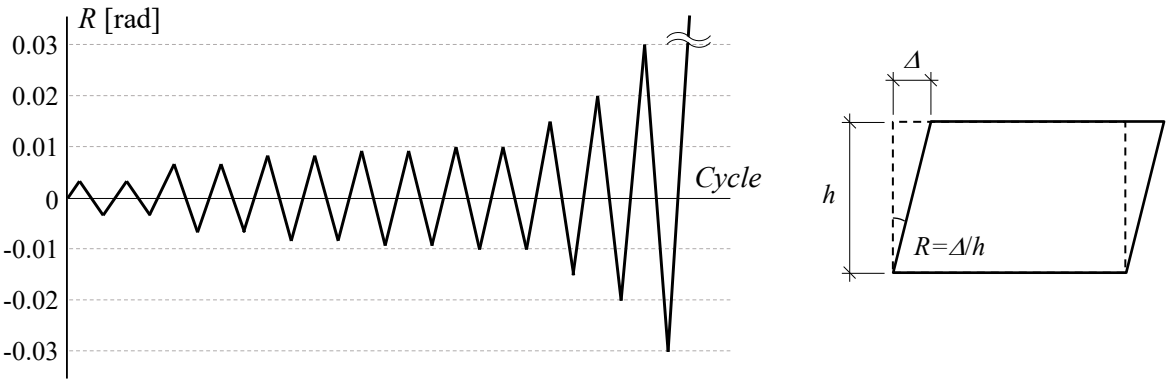


図3.6　胴縁の計測計画

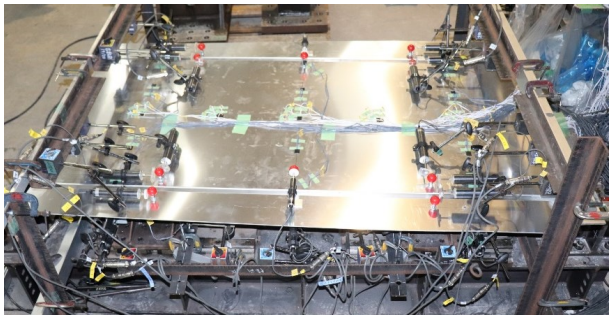
3.3　実験結果と考察

3.3.1　実験結果の概要

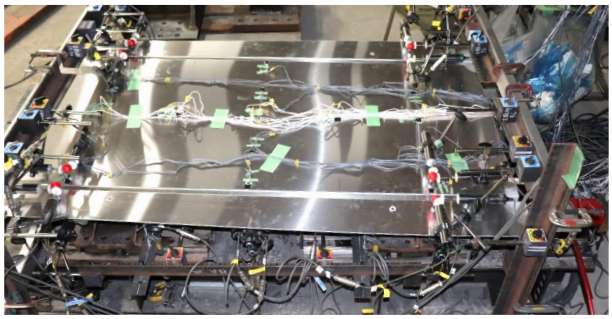
各試験体の載荷時の様子を，層間変形角R=1/33radを例に写真3.1に示す．4体の試験体全てにおいて，金属パネルはロッキング挙動を示していることを確認した．ただし，これらは後述する胴縁の回転に伴う見かけ上の挙動であり，ねじ接合部のすべりによるものではない．

各試験体の荷重変形関係を図3.7～図3.10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．

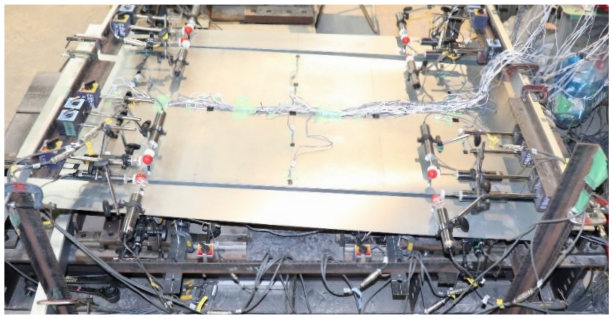
(a)ボルト接合部と(e)試験体全体には，ボルト接合部のすべり耐力を🔵で示す．すべり耐力は，ボルト接合部の荷重変形関係から得た包絡曲線において，初期剛性の0.2mmオフセット直線と包絡線が交差する点までの最大値として求めた(図3.11)．各図(e)試験体全体には，荷重変形関係から得た包絡曲線において，層間変形角R=1/300radまでの傾きをもって算出した初期剛性を黒色の破線で示す．また，図3.12に示した方法で求めた降伏耐力を青色の破線で示す．さらに，最大耐力を🔴で示す．ねじ接合部では，載荷終盤において，それまでに発揮した耐力を下回る荷重で変形が急増するスリップ挙動を示す試験体があった．これは，載荷が進むにつれてねじの締め付け力が低下することで発生した，ねじ接合部のすべりによるものであると考えられる．各図(e)試験体全体には，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灰色の破線で示す．



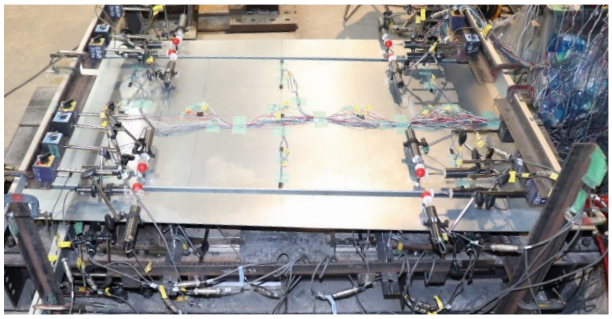
(a)試験体A1100(純アルミニウム，t=2.5mm)



(b)試験体A3003(アルミニウム合金Al-Mn系，t=2.5mm)



(c)試験体S0.8(鋼板，t=0.8mm)



(d)試験体S2.3(鋼板，t=2.3mm)

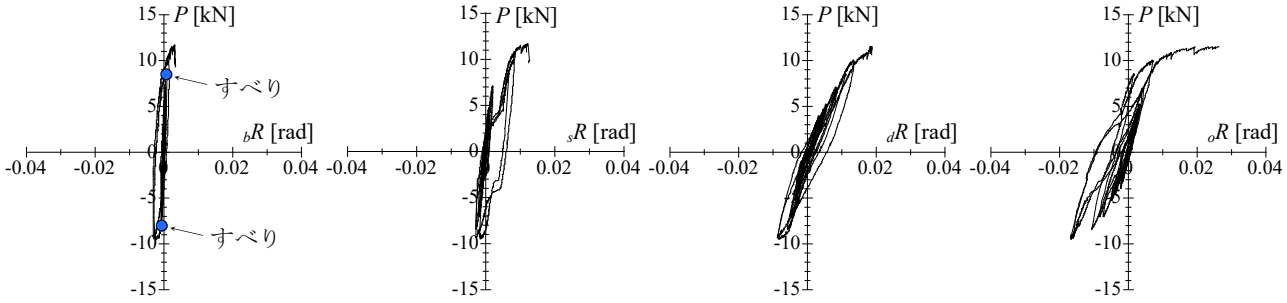
写真3.1　試験体の載荷時の様子(層間変形角1/33rad)

【純アルミニウム（t=2.5mm）を用いた試験体】

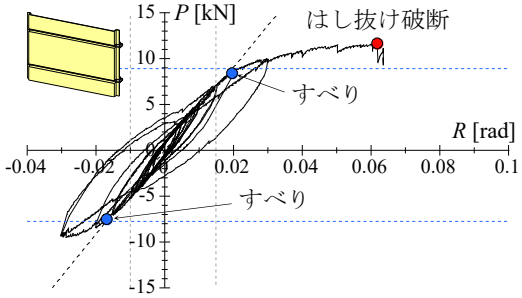
図3.7に示すパネルに純アルミニウム（A1100 H14，t=2.5mm）を用いた試験体（以下，試験体A1100）では，すべての変形成分において非線形性が確認できる．特に(b)ねじ接合部と(d)残余分では，載荷終盤にスリップ挙動が見られる．両図のスリップ挙動が概ね等しい荷重で確認できるのは，残余分にねじ接合部の鉛直方向の変形を含むためである．

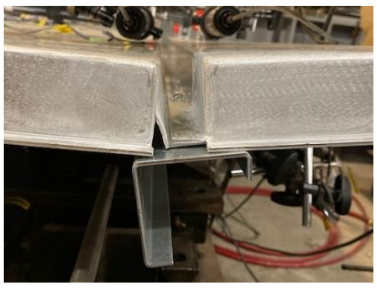
(e)試験体全体に着目すると，ボルト接合部のすべりは降伏耐力付近で発生しており，ボルト接合部のすべりを境に試験体の非線形化が進展していることが分かる．載荷終盤には，ねじ接合部のすべりに対応してスリップ挙動が生じている．

目視による観察では，層間変形角R=1/67radの載荷の後に金属パネルの亀裂（図3.7(f)）を確認した．最終的には，層間変形角R=1/16radでねじ接合部のはし抜け破断（図3.7(g)）に至った．



（a）ボルト接合部　（b）ねじ接合部　（c）胴縁　（d）残余分





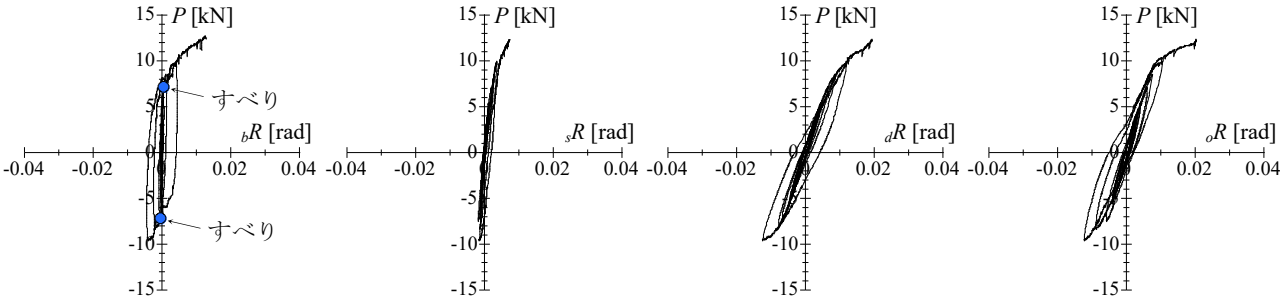
（e）試験体全体（(a)+(b)+(c)+(d)）　（f）パネルの亀裂　（g）ねじ接合部のはし抜け

図3.7　荷重変形関係（試験体A1100（純アルミニウム，t=2.5mm））

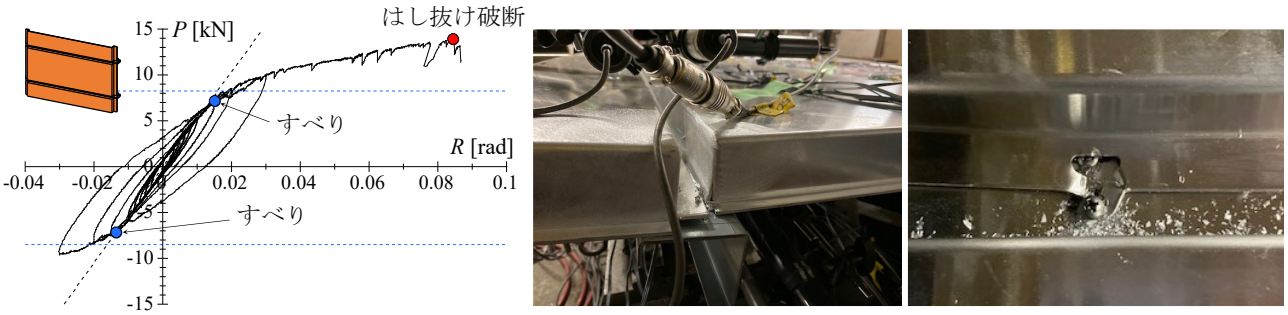
【アルミニウム合金Al-Mn系（t=2.5mm）を用いた試験体】

図3.8に示すパネルにアルミニウム合金Al-Mn系（A3003P H24，t=2.5mm）を用いた試験体（以下，試験体A3003）では，(b)ねじ接合部はほぼ弾性である一方で，(a)ボルト接合部，(c)胴縁，および(d)残余分では非線形性が確認できる．(e)試験体全体では，ボルト接合部のすべり直後に降伏し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，試験体全体は載荷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=1/50radの載荷の後に金属パネルの亀裂（図3.8(f)）を確認した．最終的には，層間変形角R=1/12radでねじ接合部のはし抜け破断（図3.8(g)）に至った．



(a) ボルト接合部　(b) ねじ接合部　(c) 胴縁　(d) 残余分



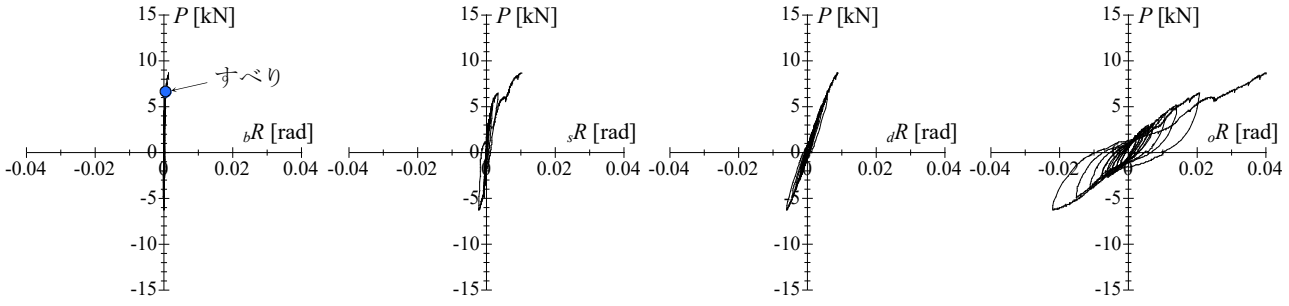
(e) 試験体全体（(a)+(b)+(c)+(d)）　(f) パネルの亀裂　(g) ねじ接合部のはし抜け

図3.8　荷重変形関係（試験体A3003（アルミニウム合金Al-Mn系，t=2.5mm））

【溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板（t=0.8mm）を用いた試験体】

図3.9に示すパネルに溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板（SGMCC，t=0.8mm）を用いた試験体（以下，試験体S0.8）では，(a)ボルト接合部と(c)胴縁はほぼ弾性である．(b)ねじ接合部では載荷終盤にスリップ挙動が確認できるものの変形は小さく，(d)残余分では載荷初期の段階から明確な残留変形が生じている．(e)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．載荷終盤には，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=1/67radの載荷の後に金属パネルの亀裂（図3.9(f)）を確認した．最終的には，層間変形角R=1/17radでねじ接合部のはし抜け破断（図3.9(g)）に至った．



（a）ボルト接合部　　（b）ねじ接合部　　（c）胴縁　　（d）残余分

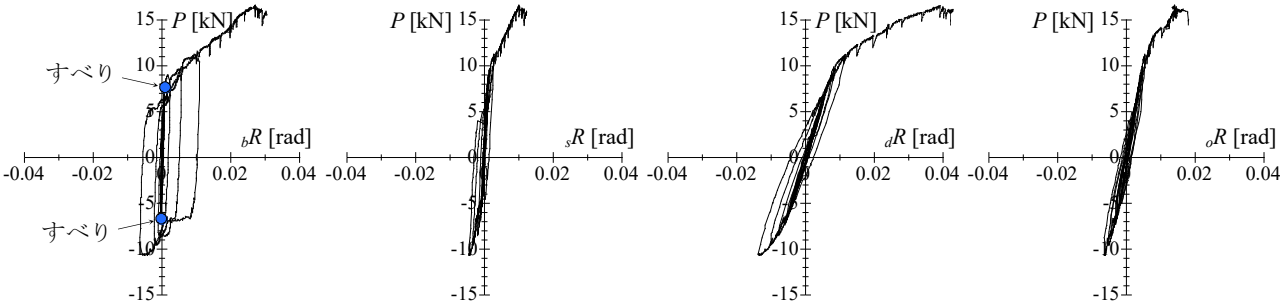
（e）試験体全体（(a)+(b)+(c)+(d)）　　（f）パネルの亀裂　　（g）ねじ接合部のはし抜け

図3.9　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=0.8mm））

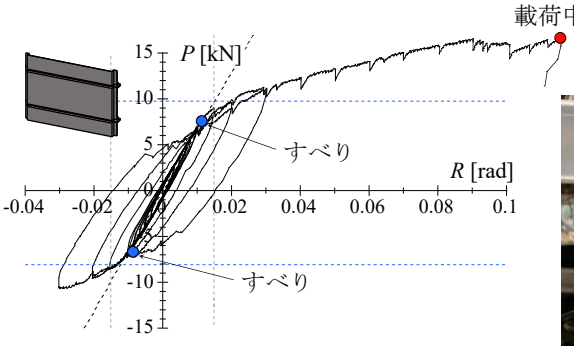
【溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板（t=2.3mm）を用いた試験体】

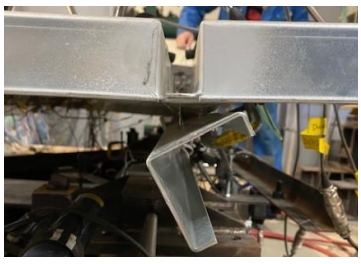
図3.10に示すパネルに溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板（SGMCC，t=2.3mm）を用いた試験体（以下，試験体S2.3）では，(b)ねじ接合部と(d)残余分は最終サイクルを除いてほぼ弾性である．一方，(c)胴縁と(a)ボルト接合部には非線形性が表れており，特にボルト接合部においては明確なスリップ挙動が確認できる．なお，試験体S2.3では，ボルト接合部の変形${}_b\Delta$の算出において計測不良であった${}_b\delta_2$を除いている．

(e)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=1/10radを越えても明確な耐力の低下は見られなかったが，ねじ接合部の一部ではねじ切り刃側の引き抜け（図3.10(f)）またはねじ頭部側の引き抜け（図3.10(g)）が生じ，耐力が頭打ちとなったため載荷を中断した．



（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（(a)+(b)+(c)+(d)）　（f）ねじ切り刃側の引き抜け　（g）ねじ頭部側の引き抜け

図3.10　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=2.3mm））

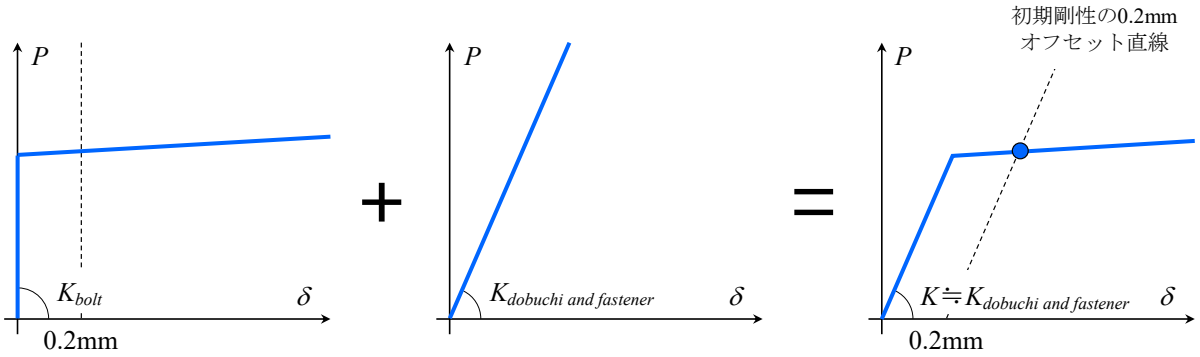


図3.11　ボルト接合部のすべり耐力

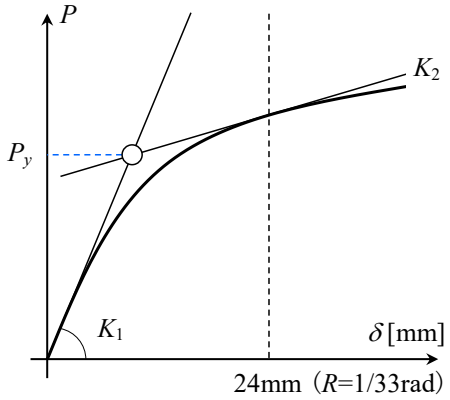


図3.12　降伏耐力の算出方法

3.3.2　実験結果の比較

【パネルのヤング係数と板厚の積】

パネルの材質と板厚の比較を図3.13に示す．図の縦軸はパネルのヤング係数と板厚の積$E \cdot t$であり，横軸は試験体の種類である．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．

【弾性剛性】

図3.14の縦軸は弾性剛性Kであり，横軸は試験体の種類である．弾性剛性は，試験体S0.8，試験体A1100，試験体A3003，試験体S2.3の順に大きい．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倍である．弾性剛性の大小関係の程度は，上述したパネルのヤング係数と板厚の積の大小関係の程度より小さい．これは，金属パネルの回転挙動に伴う変形を含む残余分だけでなく，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変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，弾性剛性では試験体A1100および試験体A3003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も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．

【接合部のすべり耐力】

図3.15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，載荷方向と試験体による違い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1.2～28.2mmR_zの範囲であり，第2章にて適用可能性を示したすべり係数の評価式（(2.3)式）によれば，すべり係数として0.26～0.37に相当する．さらに，外壁要素の試験体におけるボルト接合部は，応力方向のボルト本数が2本の1面せん断継手であり，ボルト孔がスロット形状であることを考慮すると，すべり耐力として7.3～10.4kNが期待できる．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，板厚0.8mmの鋼板を用いた試験体ではわずかに計算値を下回るものの概ね良く対応しており，ボルト接合部のすべり耐力が金属パネルの材質と板厚によらず発揮できていることが分かる．

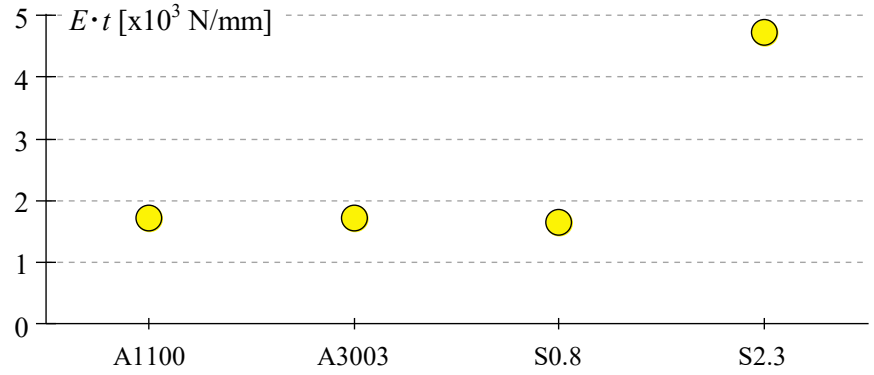


図3.13　パネルのヤング係数・板厚

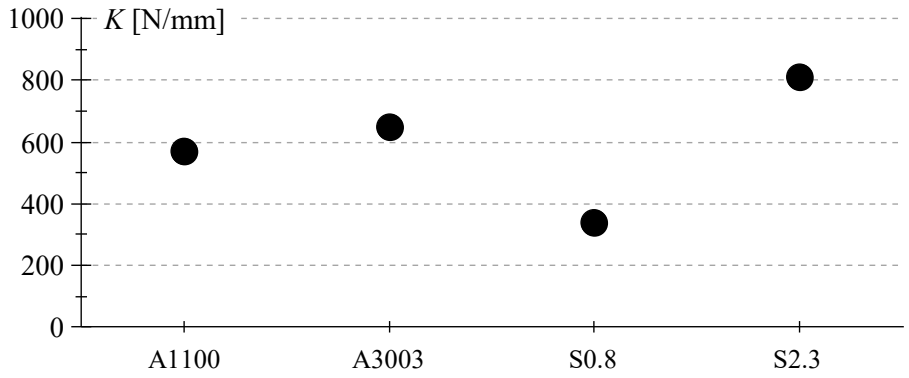


図3.14　弾性剛性

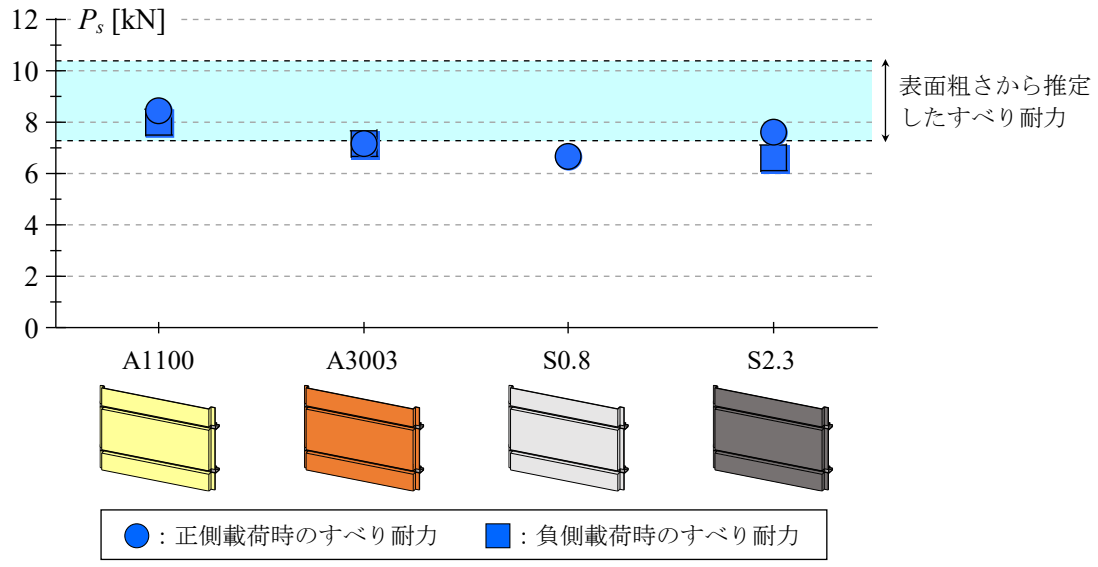


図3.15　接合部のすべり耐力

3.3.3　胴縁の挙動

4体の試験体における胴縁の変形を図3.16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)ねじれによる変形角${}_dR_T$，(b)並進による変形角${}_dR_S$，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．

パネルのヤング係数と板厚の積E･tが同程度である3体の試験体は，ほぼ同様の履歴を描いている一方で，E･tが他の試験体より3倍程度大きい試験体S2.3は，ねじれによる変形の剛性が高く，並進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のねじれが抑制されているためであると考えられる．

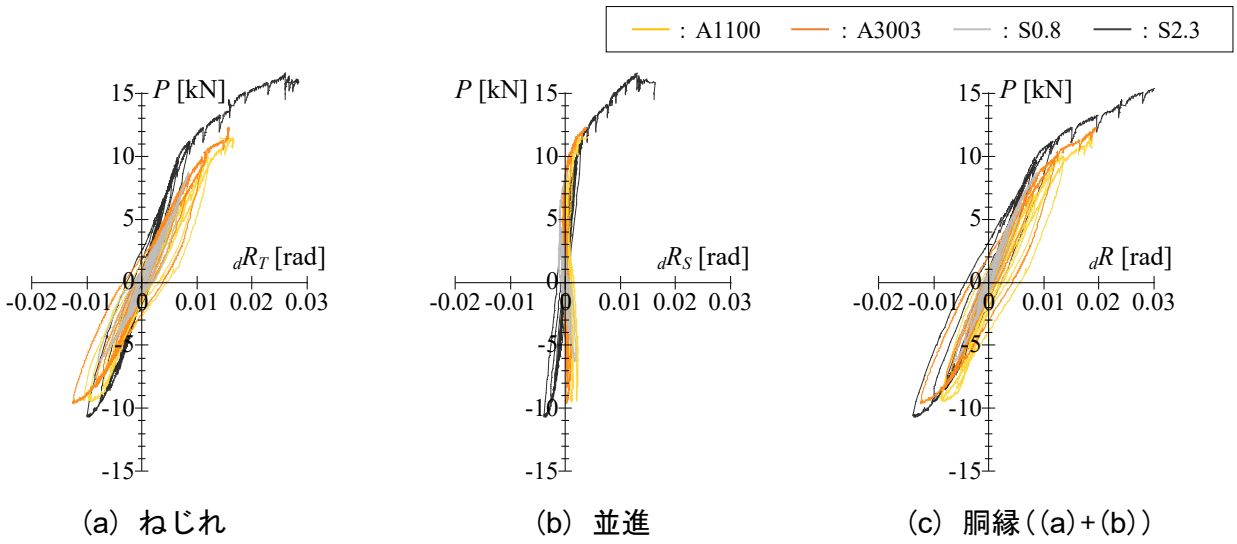


図3.16　胴縁の変形の比較

3.3.4　最大耐力の評価

試験体の最大耐力を評価する．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(図3.17(a))を仮定すると，面内荷重Pの作用時にパネルのねじ孔壁面がねじから受ける鉛直反力${}_dQ_i$は次式で表せる．

$$ {}_dQ_i = M \cdot \frac{r_{i\max}}{\sum r_i^2} = \frac{P \cdot h}{2} \cdot \frac{r_{i\max}}{\sum r_i^2} \qquad \cdots (3.15) $$

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り，特に最外縁のねじ接合部の位置をr_{imax}とする．

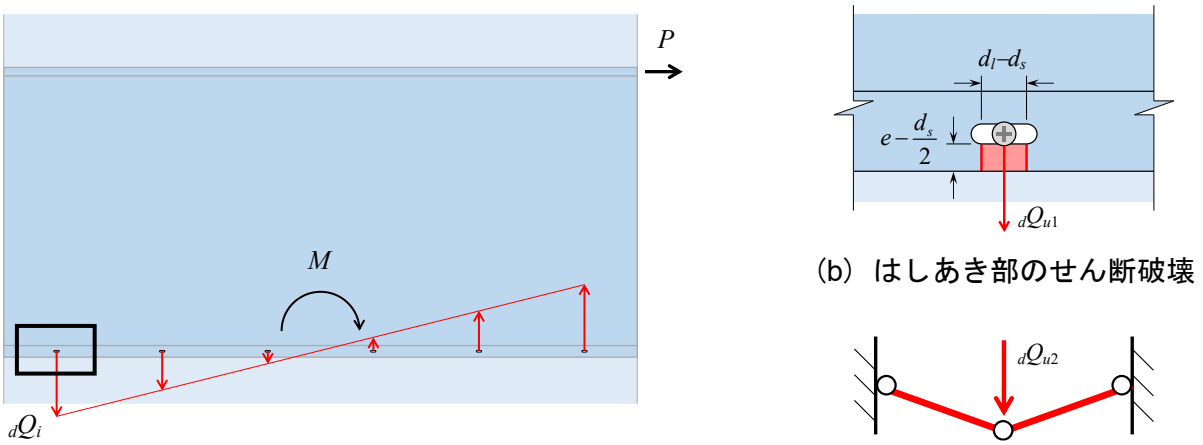
ねじ接合部の破断時の鉛直荷重Q_uは，前章2.4節にて示したはしあき部のせん断耐力Q_{u1}((2.5)式)，はしあき部の曲げ耐力Q_{u2}((2.6)式)，ねじ切り刃側の引き抜け耐力Q_{u3}((2.7)式)，Q_{u5}((2.9)式)，およびねじ頭部側の引き抜け耐力Q_{u4}((2.8)式)，Q_{u6}((2.10)式)の最小値により求められる．金属外壁におけるねじ接合部は，ねじ切り刃側のパネルを胴縁と接続している点で，2.4節に示したねじ接合部の条件と異なる．そこで，本章においてははしあき部のせん断破壊(図3.17(b))とはしあき部の曲げ破壊(図3.17(c))のみを考慮する．すなわち，ねじ接合部の破壊時の面内荷重P_{ucal}は，(2.5)式，(2.6)式，(3.15)式より次式で表せる．

$$ P_{ucal} = \frac{2\sum r_i^2}{h \cdot r_{i\max}} \min\left\{ \frac{2}{\sqrt{3}}\left(e - \frac{d_s}{2}\right) \cdot t \cdot \sigma_u,\ \frac{2}{d_l - d_s}\left(e - \frac{d_s}{2}\right)^2 \cdot t \cdot \sigma_u \right\} \qquad \cdots (3.16) $$

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は表3.2に示したパネルの引張強さである．

最大耐力の実験値と計算値を図3.18に示す．図の縦軸は実験から得られた最大耐力P_uであり，横軸は(3.16)式によるねじ接合部の破壊時の面内荷重P_{ucal}である．4体の試験体のうち，ねじ接合部のはし抜け破断が見られた試験体A1100(○)，試験体A3003(●)，および試験体S0.8(◎)においては，最大耐力の実験値が計算値と良好に対応していることが分かる．一方，ねじの引き抜けによって耐力が頭打ちとなった試験体S2.3(●)においては，最大耐力の実験値が(3.16)式による耐力を大きく下回っていることが分かる．

最大耐力とパネルの引張強さおよび板厚の関係を図3.19に示す．図の縦軸は実験から得られた最大耐力P_uであり，横軸はパネルの引張強さと板厚の積$\sigma_u \cdot t$である．実験結果から，パネルの引張強さと板厚の積$\sigma_u \cdot t$が一定以上に到達すると，ねじ接合部の破壊形式がはし抜け破断からねじの引き抜けに変化することが分かる．



（a）ねじ接合部群の鉛直応力分布

（b）はしあき部のせん断破壊

（c）はしあき部の曲げ破壊

図3.17　はしあき部の破壊形式

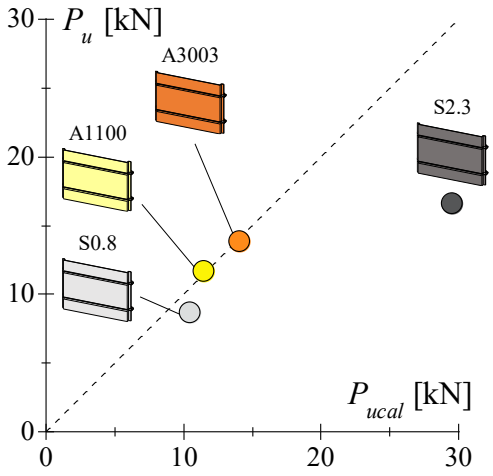


図3.18　最大耐力の実験値と計算値の比較

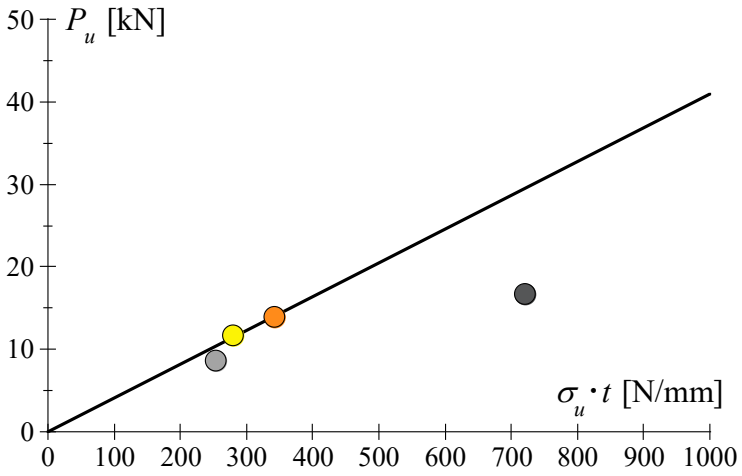


図3.19　最大耐力とパネルの引張強さ･板厚

3.3.5　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，図3.20～図3.23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，ボルト接合部を青色，ねじ接合部を水色，胴縁を緑色，および残余分を黒色で示す．なお，図は正側載荷時の結果である．

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=1/100rad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ことが分かる．したがって，試験体全体の変形に対して，胴縁と残余分が支配的な変形成分であると言える．一方，層間変形角R=1/67rad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．ねじ接合部においては，目視による観察時に接合部のすべりを確認している．したがって，パネルは見かけのロッキング挙動に加えて，スライド方式によって変形に追従していると考えられる．

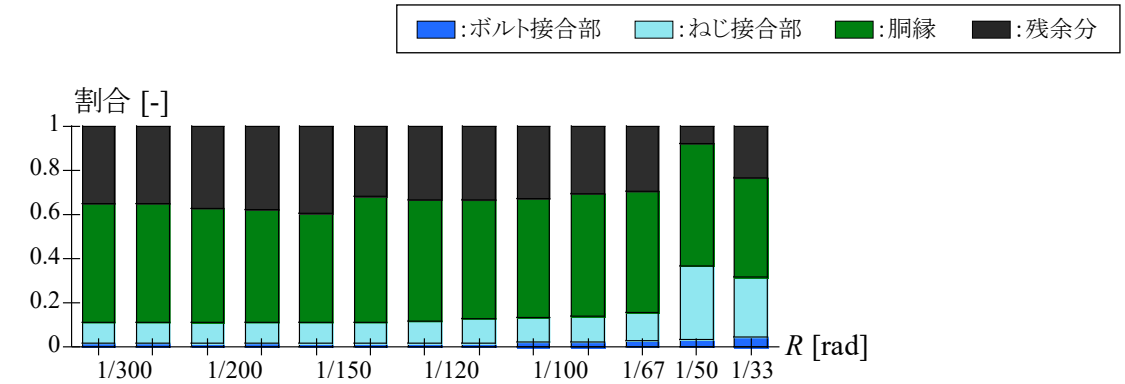
4体の試験体の残余分が占める割合を比較すると，パネルに板厚0.8mmの鋼板を用いた試験体S0.8で最も大きく，パネルに板厚2.3mmの鋼板を用いた試験体S2.3で最も小さい．これは，3.3.2項に示したように，試験体S0.8ではパネルの板厚が非常に薄いことから，パネルが面外に変形することによっても水平方向の変形成分が生じているためであると考えられる．パネルに純アルミニウムを用いた試験体A1100とアルミ合金を用いた試験体A3003では，4つの変形成分の割合は概ね同様である．

3.3.6　残留変形

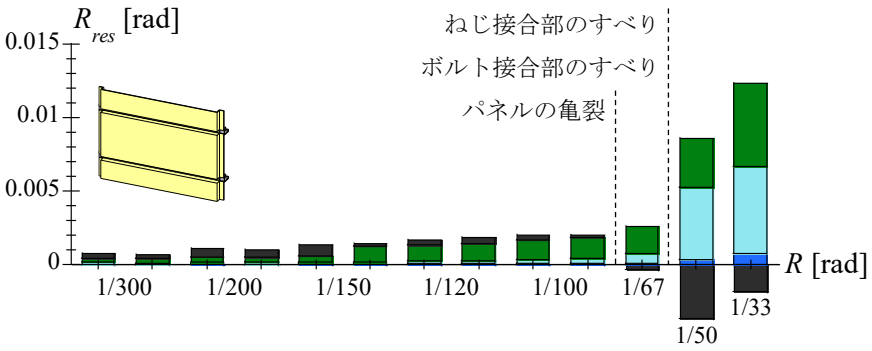
各サイクルの除荷時の残留変形を図3.20～図3.23の下段(b)に示す．図の縦軸は残留変形角R_{res}であり，横軸は層間変形角Rである．図の凡例は，図3.20～図3.23の上段(a)と同様である．図には，ねじ接合部のすべり，ボルト接合部のすべり，およびパネルの亀裂を確認した時点を破線で示す．

試験体S0.8を除いた3体では，R=1/100radの除荷時点でR_{res}=1/800～1/500rad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=1/150radの除荷時点でR_{res}=1/500rad，R=1/100radの除荷時点でR_{res}=1/250rad程度であり，残留変形が相対的に大きくなっていることが分かる．試験体S0.8の残留変形の大半が残余分であることから，載荷初期の段階からパネルの損傷が蓄積しているものと考えられる．

R=1/100rad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．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言える．

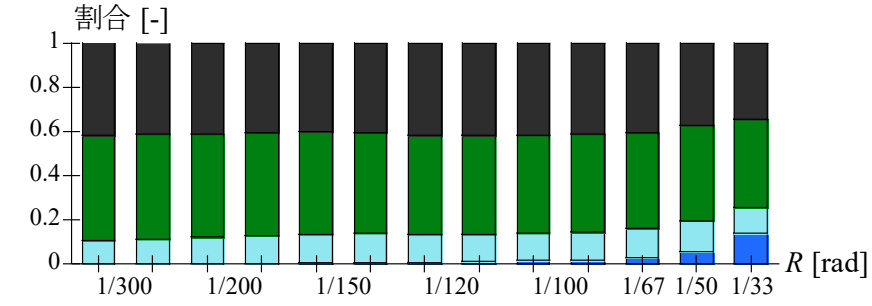


(a) 層間変形に対する割合

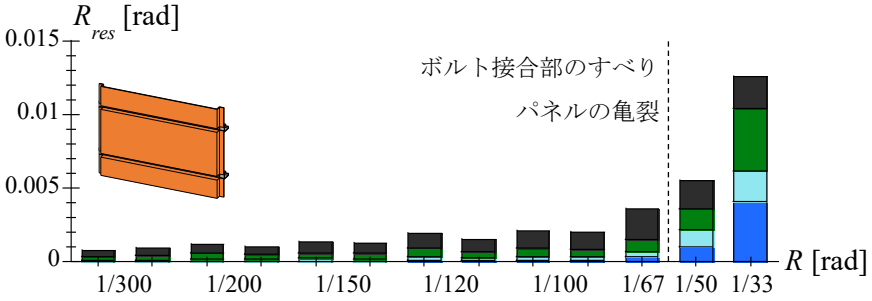


(b) 残留変形角

図3.20　層間変形ごとの変形成分(試験体A1100(純アルミニウム，t=2.5mm))

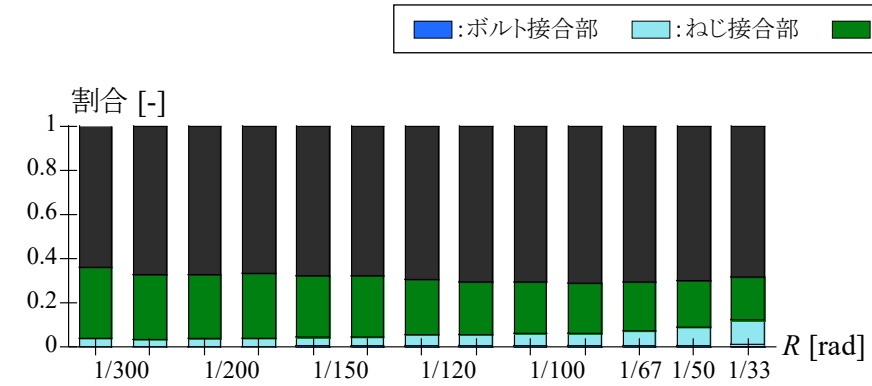


(a) 層間変形に対する割合

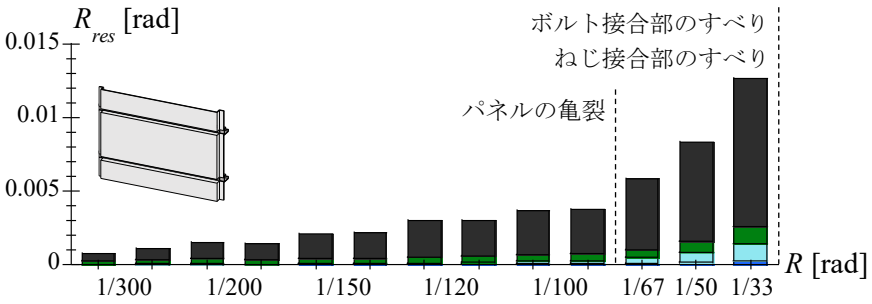


(b) 残留変形角

図3.21　層間変形ごとの変形成分(試験体A3003(アルミニウム合金Al-Mn系，t=2.5mm))

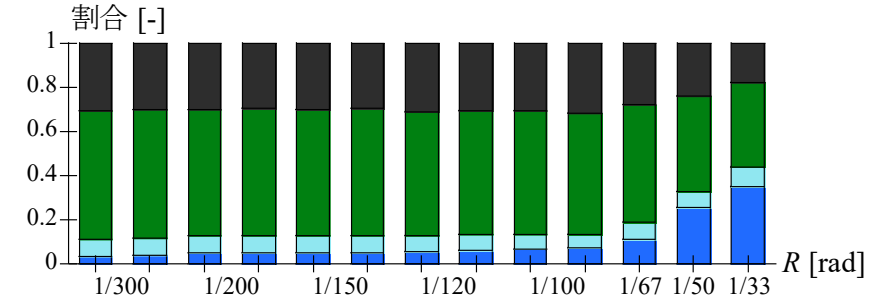


（a）層間変形に対する割合

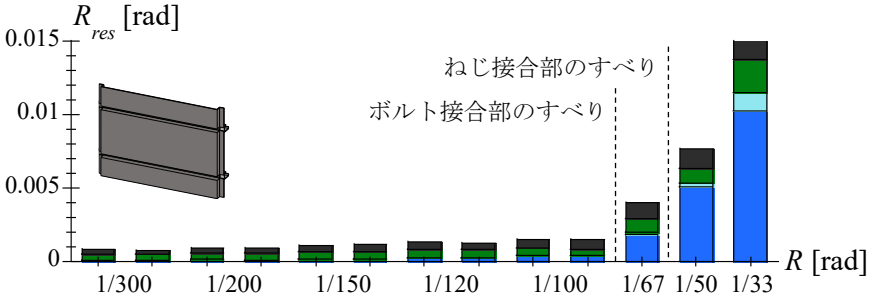


（b）残留変形角

図3.22　層間変形ごとの変形成分（試験体S0.8（溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板，t=0.8mm））



（a）層間変形に対する割合



（b）残留変形角

図3.23　層間変形ごとの変形成分（試験体S2.3（溶融亜鉛-Al-Mg合金めっき鋼板，t=2.3mm））

3.3.7　損傷程度の区分

試験体の損傷過程を表3.3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，上段は正側載荷時，下段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．

実験結果をもとに，金属外壁の損傷区分[3.1)]を評価する．残留変形角がR_{res}=1/500rad未満である範囲は，明確な損傷が生じていないことから被害はないものとみなし，損傷区分をAとする．残留変形角がR_{res}=1/500radを越えるが補修を要する損傷のない範囲は，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，パネルの脱落につながる危険性があることから損傷区分をEとする．

表に，試験体ごとの損傷区分を併記する．損傷区分は，補修の必要がない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=1/100radまで補修の必要がなく，R=1/17radまで脱落等の可能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．

表3.3　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))
		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		
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))
		ボルト接合部のすべり		試験体の降伏	
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))
				ねじ接合部のすべり 試験体の降伏	
損傷区分	A	B	D		
S2.3		ボルト接合部のすべり	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))
		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		
損傷区分	A	C			

本実験結果と既往の実験結果[3.2)~3.9)]を併せて，中低層鋼構造建物に採用される代表的な乾式非構造外壁における損傷区分を表3.4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，脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界として要求される層間変形角[3.3), 3.4)]である．黄緑色は損傷区分AとB，水色は損傷区分CとDを示す．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が生じ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=1/200rad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，脱落や重要な機能の低下に至ら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．一方，層間変形角R=1/100rad程付近から，多くの外壁において損傷区分がCやDとなり，補修や部品交換の必要が生ずる．層間変形角1/50rad程度以降では実験が不足している外壁もあり，検証の余地があると言える．また，実験結果のほとんどは，1～4枚程度のパネルからなる一構面の試験体を用いた実験に基づくものであり，開口や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．

表3.4　損傷程度の区分に関する実験結果の比較

外装パネルの名称と文献	パネル構法	層間変形角ごとの損傷程度の区分 1/500 1/400 1/300 1/200 1/150 1/120 1/100 1/75 1/60 1/50 1/30
ALC薄型パネル 建材試験センター(JASS27)	縦・横	A C D
繊維強化セメント板（スレート） JASS27※実験なし		
鋼板製外装材 SSW2011	縦・横	
鋼板製外装材 文献3.5)	縦	(～1/16) E (～1/12)
窯業系サイディング 公的試験(JASS27)	不明	A
窯業系サイディング 文献3.6)	縦(木造下地)	
複合金属サイディング JASS27	横	A B C
金属サンドイッチパネル 文献3.7)	縦	
金属サンドイッチパネル 文献3.8)	横(木造下地)	(～1/15)
GRCパネル 1996年10月　旭硝子商品開発センター(JASS27)	不明	A
GRCパネル 文献3.2)	横	A B D
ECPパネル 建材試験センター(JASS27)	縦	A B C
ECPパネル 建材試験センター(JASS27)	横	A B C
ECPパネル 文献3.9)	横	(～1/40)
金属パネル 本実験	横	A B D (1/17)

—：脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界として要求される変形性能

3.4　まとめ

本章では，1ユニットの金属外壁要素の試験体を用いて，地震時を想定した面内載荷実験を実施した．実験結果から，金属外壁の変形追従機構を確認するとともに，各部材および各接合部の損傷状態に基づいて面内方向の各種変形限界について検討した．本章にて得られた結果を以下にまとめる．

[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ボルト接合部，ねじ接合部，胴縁，および残余分の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変形成分であり，金属パネルのロッキング挙動に伴うねじ孔の支圧やパネルの折り曲げ加工部分の変形によって生ずる水平方向の変形等を含むものである．

[2] 4体の試験体全てにおいて，金属パネルはロッキング挙動を示していることを確認した．ただし，これらは胴縁の回転に伴う見かけ上の挙動である．層間変形角R=1/67rad以降では，目視による観察時にねじ接合部のすべりを確認している．したがって，パネルは見かけ上のロッキング挙動に加えて，スライド方式によって変形に追従していると考えられる．

[3] 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．

[4] ファスナと胴縁間のボルト接合部は，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．すべり耐力は，外壁要素の試験体におけるボルト接合部の条件においても，第2章にて検証した評価方法により，接合面の表面粗さから概ね評価できることを確認した．一方で，ボルト接合部の耐風性能を確保した状態であっても，地震によって生ずる面内方向の層間変形角として1/100radに相当する変形以降ですべりが発生し，残留変形を引き起こすことが分かった．

[5] 試験体は，層間変形角1/17～1/15rad程度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，第2章にて考察したねじ接合部の耐力式によって，パネルの引張強さと板厚を用いて概ね評価できることを確認した．一方，パネルの引張強さと板厚の積が一定以上に到達すると，ねじ接合部の破壊形式がはし抜け破断からねじの引き抜けに変化することが分かった．

[6] 「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」に基づいて金属外壁の損傷程度の区分を評価すると，層間変形角1/100radまでは補修の必要がなく，層間変形角1/17radまで脱落等の可能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．

[7] 中低層鋼構造建物に採用される代表的な乾式非構造外壁の面内変形追従性能に関して，既往の研究成果を調査した．本章に示した実験結果と合わせて，ほとんどの外壁が層間変形角1/200radまでは補修の必要なしに継続使用が可能であること，脱落や重要な機能の低下に至ら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を確認した．一方，層間変形角

1/100rad程度からほとんどの外壁において補修や部品交換の必要が生ずることを確認した．層間変形角1/50rad程度以降では実験が不足しており，検証の余地があると言える．

参考文献

3.1) 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

3.2) 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

3.3) 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

3.4) 日本金属屋根協会，日本鋼構造協会：鋼板製外壁標準SSW2011，2011

3.5) 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

3.6) 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

3.7) 杉本敏和，平井義行，完山利行，藤田正則，藤内繁明：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梗概集，C-1，構造Ⅲ，pp.951-952，2008

3.8) 安藤充紀，小原勝彦，福本満夫，河本和義，田畑勝，梅田弾平，生喜隆之，蒲原拓也：木質構造計算システムの構築に関する基礎的研究　その16．鋼板サンドイッチパネルを用いた耐震補強工法に関する面内せん断実験，日本建築学会大会学術梗概集，構造Ⅲ，pp.301-302，2014

3.9) 浅井英克，時野谷浩良，鈴井康正：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

3.10) 日本規格協会：「建築用シーリング材(JIS A 5758：2016)」，2019

第４章

1層1スパンの金属外壁システムの変形追従性能

4.1　はじめに

カーテンウォール[4.1)]やALCパネル[4.2)]は取り付け高さの制限がなく，超高層建物にも採用される代表的な非構造外壁である．超高層建物においては，長周期地震動と共振することにより設計時の想定を超える層間変形が生ずる可能性がある．既往の研究[4.3), 4.4)など]では，既存の超高層鋼構造建物を対象として長周期地震動に対する応答を予測しており，構造躯体に生ずる層間変形角は1/100を超え，中には1/50を超える可能性があることを指摘している．

我が国に超高層建物が台頭してきた1970年頃から，カーテンウォールやALCパネルの耐震性能に関する実験的研究が勢力的に行われ，外壁の変形追従性能が解明されてきた[4.5)~4.28)など]．試験体である非構造外壁に対して，層間変形角1/50を超え，建物の倒壊が想定される大変形[4.29)]を与えて脱落に至るまでの挙動を再現している報告もある[4.24), 4.25)など]．また，開口や出隅を含めた試験体を用いた実験により，開口や出隅の損傷によって外壁の変形追従性能が低下することや，避難行動が困難になることが確認されている[4.27)など]．

鋼構造建物に取り付く非構造外壁を対象として，面内方向の変形追従性能に関する実験的研究[4.5)~4.28), 4.30)~4.34)]を調査し，次ページの表4.1に示した．表中の水色で示す範囲は試験体に与えられた層間変形角であり，何らかの損傷が見られたものは実験終盤に確認された損傷を記載している．特に，外壁の脱落に相当する損傷，あるいは外壁が脱落する危険がある損傷は赤色で記している．灰色で示す範囲は中低層建物に採用される乾式外壁を用いた実験であり，カーテンウォールやALCパネルを用いた実験と比べると非常に少ないことが分かる．また，開口や出隅を再現した実験はさらに少なく，乾式外壁の地震時の変形追従性能が十分に検証されていないことが分かる．外壁の脱落は建物の機能損失だけでなく人的被害を及ぼす危険があるため，脱落に対する変形限界を確認することは建物の規模に関わらず重要である．

本章では，1層1スパンの実大鉄骨架構に複数の金属パネルを取り付けた外壁システムの試験体を用いて，地震時を想定した面内載荷実験を実施する．上述した背景から，本章では試験体は開口と出隅に加えて，既往の実験では見当たらなかった入隅を再現する．第3章にて扱った試験体は外壁一般部と捉え，外壁一般部と開口，入隅および出隅を有する構面を合わせて，総合的に金属外壁の変形限界を考察する．なお，ボルト接合部は第2章に基づいて風荷重に対する構造安全性を期待できる条件の下，施工方法は実状に即したものとする．

表4.1　鋼構造建物に取り付く非構造外壁の面内変形追従性能に関する研究

文献	外壁	試験体規模	実験	開口	入隅	出隅	層間変形角 1/500 1/400 1/300 1/200 1/150 1/120 1/100 1/75 1/60 1/50 1/30
4.5) (1970)	PCカーテンウォール	1層1構面	静的	○			1/100
4.6) (1970)	メタルカーテンウォール	1層1構面	静的	○			1/100
4.7) (1976)	PCカーテンウォール	2層1構面	静的				1/100
4.8) (1977)	PCカーテンウォール	1層2構面	動的	○			1/100
						○	1/50
4.9) (1979)	PCカーテンウォール	1ユニット	静的				1/100
4.30) (1985)	GRC	3層1構面	静的				パネルのひび割れ，シーリングの破壊(～1/40)
4.10) (1986)	PCカーテンウォール	3層1構面	静的	○		○	パネルのひび割れ(～1/40)
4.11) (1987)	ALC（ロッキング）	1層1構面	静的				下端角にクラック
				○			自重受け付近の剥離
		1層4構面				○	1/30
		2層1構面					自重受け付近の剥離
4.12) (1989)	PCカーテンウォール	2層1構面	静的	○			1/120
4.31) (1995)	GRC	1ユニット	静的				1/60
4.13) (1997)	ALC（ロッキング）	1層1構面	静的				1/100
			動的				パネル脚部のボルトがわずかに回転
4.14) (1998)	ALC（ロッキング）	3層3構面	静的	○		○	パネルのひび割れ
			動的	○		○	パネルのひび割れ
4.15) (2000)	PCカーテンウォール	1ユニット	静的				ファスナ周辺のパネルの掻き出し破壊
4.32) (2000)	GRC	1層1構面	静的				ビス部陥没，縁端破壊
4.16) (2001)	鋼板製外壁材（角波）	1層1構面	静的				鋼板上部の外れ(1/12)
4.17) (2002)	ALC（ロッキング）	2層1構面	静的				1/60
				○			開口脇のパネルの亀裂
4.18) (2002)	ALC（ロッキング）	1層1構面	静的				パネルの割れ
			動的				パネルの割れ
	ALC（スライド）		静的				パネルの割れ
			動的				パネルの割れ
4.19) (2003)	ALC（ロッキング）	1層1構面	静的				1/200
			動的				1/50
				○			パネルの微小な欠け
4.20) (2004)	ALC（ロッキング）	3層1構面	静的				パネル下部の亀裂（～1/25）
4.33) (2007)	ECP	1層1構面	静的				パネルの局所破壊
4.21) (2009)	ALC（ロッキング）	1層1構面	静的				パネルの取付部や角部のひび割れ，剥落(～1/67)
				○			開口部および開口部下部のパネル，開口補強材の脱落(1/67)
		4層3構面	動的	○		○	パネルの脱落
4.22) (2009)	ALC（ロッキング）	2層3構面	動的	○		○	パネルのひび割れ(～1/25)
4.23) (2010)	メタルカーテンウォール	2層2構面	動的			○	目地の亀裂(～1/25)
4.24) (2013)	PCカーテンウォール	3層1構面	静的				パネル角部のコンクリート片が落下(～1/12) 1/5
4.25) (2015)	PCカーテンウォール	2層2構面	静的			○	パネル角部のコンクリート片が落下(～1/15) 1/6
4.26) (2016)	ALC（ロッキング）	1層1構面	静的	○			シーリングの破断
			動的	○			パネルのひび割れ
	ECP	1層1構面	静的	○			開口補強鋼材の接合部の溶接が破断
			動的	○			ボルトのゆるみ，Zクリップのずれ，スペーサーのずれ
4.34) (2017)	金属パネル	1層2構面	静的			○	1/50
			動的			○	1/50
4.27) (2020)	ALC（ロッキング）	1層2構面	静的	○		○	パネルのひび割れ，下地の溶接の切れ，開口不良(～1/33)
4.28) (2021)	メタルカーテンウォール	3層1構面	静的				1/100
			動的				1/100
第3章	金属パネル	1ユニット	静的				ねじ接合部のはし抜け破壊(1/17)

赤文字は外壁の脱落や重要な機能の低下の危険がある損傷

4.2　実験計画

4.2節では，1層1スパンの金属外壁システムの面内載荷実験の計画を示す．

4.2.1　鉄骨架構の概要

試験体である金属外壁を取り付ける鉄骨架構の概要を図4.1に示す．柱は角形鋼管□200x200x6（BCR295），梁はH350x175x7x11（SS400）を強軸使いで用いて，スパン6,000mm，階高4,000mmの架構を構成する．梁端接合部は，高力ボルト（M16（F10T））を用いてウェブのみを接合したピンディテールとしている．ここで，本実験では層間変形角ごとの外壁の各種損傷状態を観察し，既往の実験結果との比較を行うことを考慮して，高力ボルトの導入張力は5kNに管理し，梁端接合部の曲げ抵抗をさらに低くしている．また，本実験では外壁の入隅および出隅を再現するために，柱には構面外の直交梁を完全溶け込み溶接にて取り付けている．

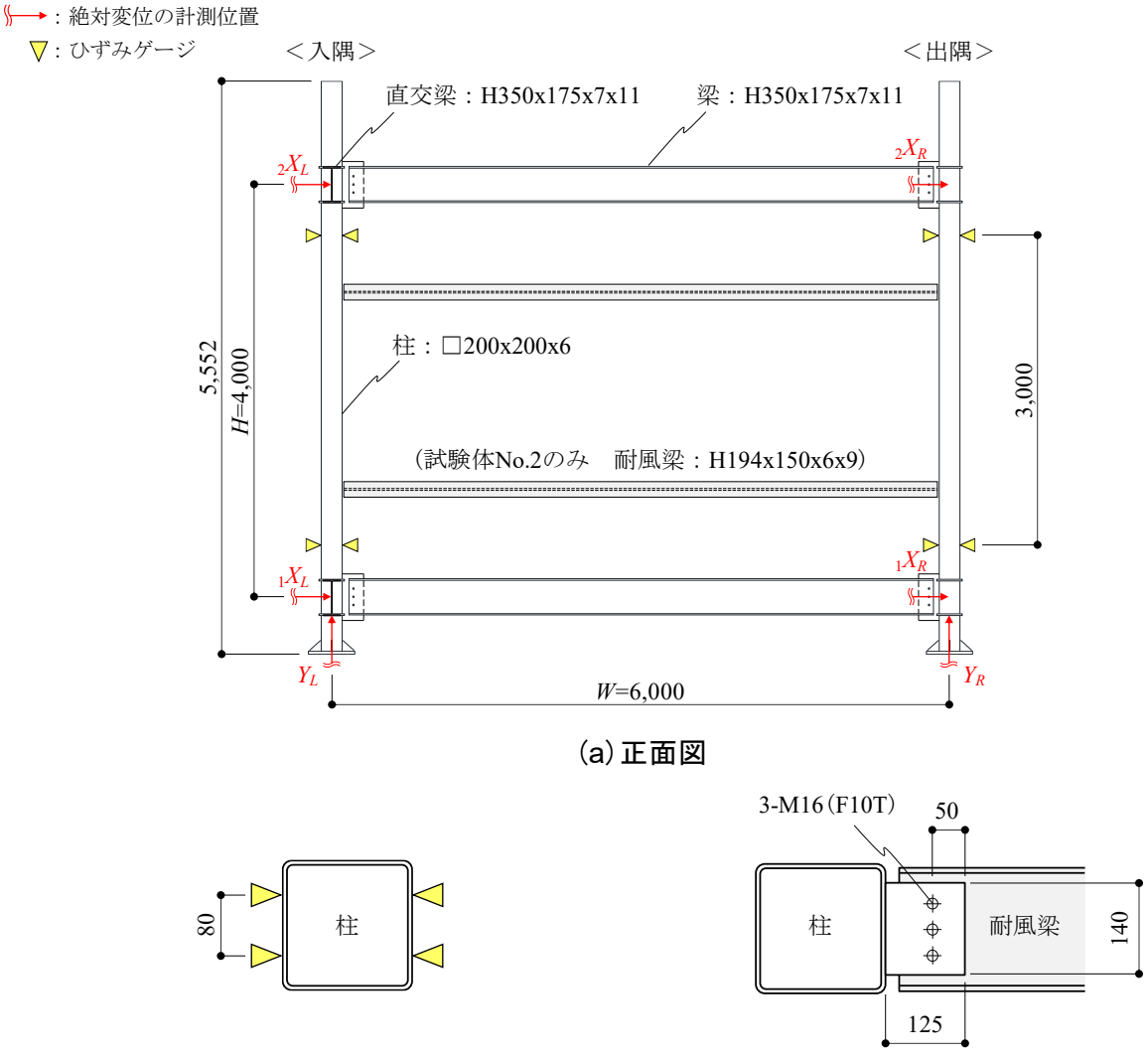


図4.1　鉄骨架構の概要と計測計画

4.2.2　試験体の概要

試験体は，1層1スパンの鉄骨架構に取り付く金属外壁であり，間柱，ファスナ，胴縁，および金属パネルによって構成する．試験体は，後述する無開口の試験体(No.1)と開口を有する試験体(No.2)の2体を用意する．2体の試験体に共通する，鉄骨架構に対する試験体の接合方法を図4.2に示す．梁には，ファスナL100x100x7(SS400)を介して間柱C125x50x20x20x3.2(SGHC)を接続する．また，間柱にはファスナL90x90x7(SS400)を介して胴縁L60x60x2.3(リップ長さ15，SGHC)を接続し，胴縁に沿って金属パネルを取り付ける．なお，試験体は1階あるいは最上階ではない基準階を想定しており，試験体の最上部，最下部のねじ接合部では1枚の金属パネルのみを接合している．

金属パネルは，板厚2.5mmのアルミニウムパネル(A1100P H14)を使用する．使用した金属パネルについて，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表4.2に示す．金属パネルと胴縁間はドリルねじ(ϕ4，SUS410(C1-70))にて，胴縁とファスナL90x90x7間は普通ボルト(M12，SUS304(A2-70))にてそれぞれ接続している．なお，ファスナL90x90x7と間柱間，間柱とファスナL100x100x7間，およびファスナL100x100x7と梁間にはすべて溶融亜鉛めっき高力ボルト(M12(F8T))を使用し，張力管理を行うことで接合部のすべりを防止している．

表4.2　金属パネルの材料特性(ミルシート値)

パネルの材質	t [mm]	σ_u [N/mm^2]	ε_u [%]
純アルミニウム (A1100P H14)	2.5	123	13

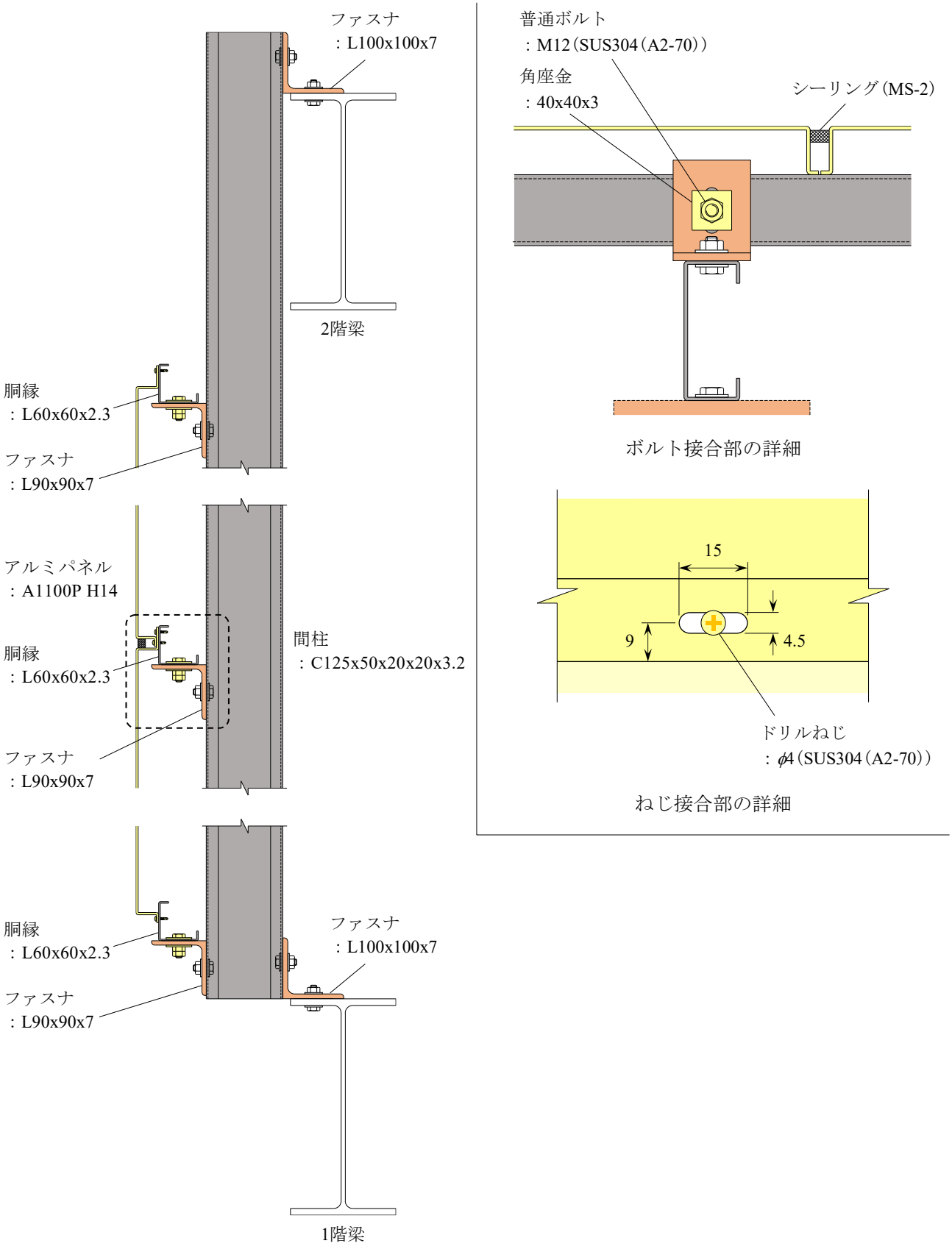


図4.2　鉄骨架構に対する試験体の接合方法

4.2.3　金属パネルの施工方法

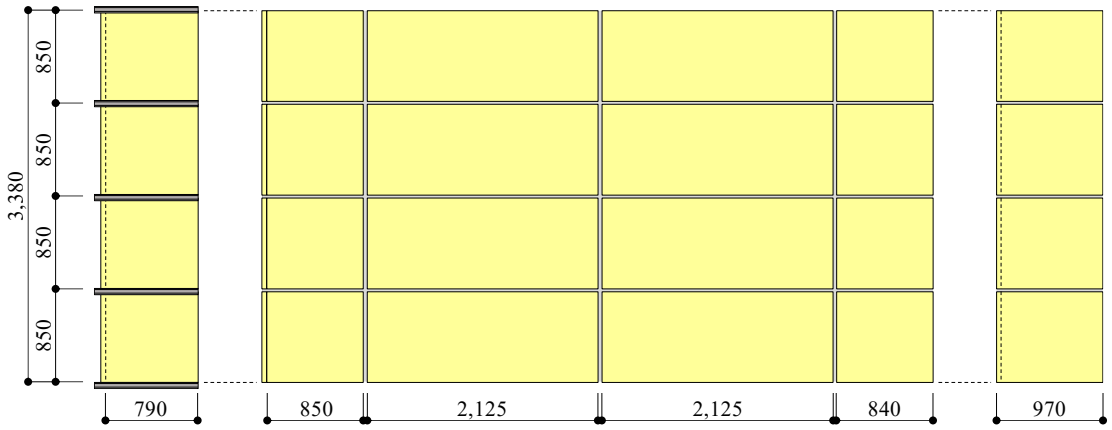
【無開口の試験体No.1】

無開口の試験体No.1の概要を図4.3に示す．試験体No.1の一般部には，長辺方向の見付長さ2,125mm，短辺方向の見付長さ830mmのパネルを横張り工法にて取り付ける．隅角部には，短辺方向の見付長さが一般部のパネルと同様であるL字形のパネルを採用している．一般部および隅角部のパネルはいずれも，パネルの長辺端部はドリルねじによって胴縁と接合する．パネル下端部のねじ接合部には，熱応力に対応することを目的としたスロット孔（ϕ4.5x15）を300mmピッチで設けている．前章にて用いた試験体と同様に，隣接するパネル間の目地幅は20mmである．目地には，シーリングMS-2（変成シリコーン系）を充填している．なお，パネルの短辺方向は下地鋼材に接続していない．

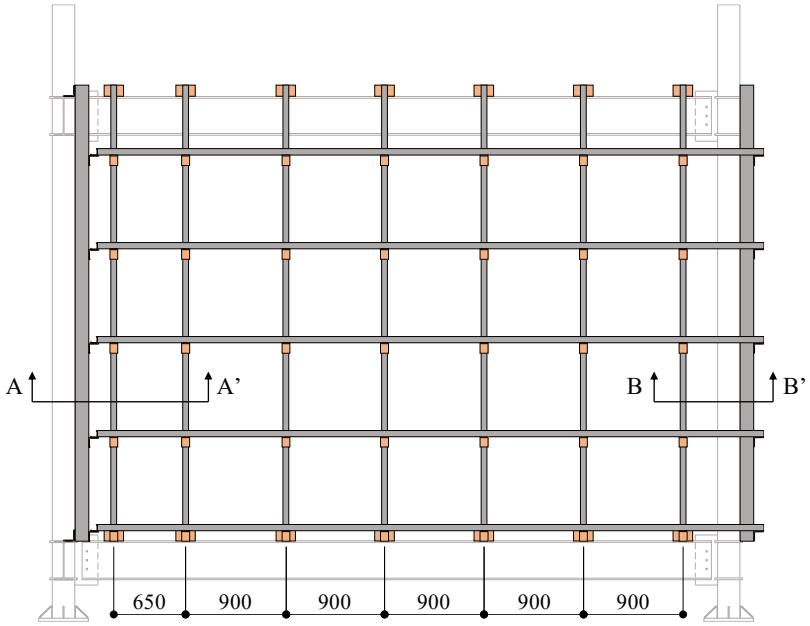
【開口を有する試験体No.2】

図4.4に示す試験体No.2の中央には開口を設ける．開口の上下には，試験体No.1の一般部と同様の寸法のパネルを横張り工法にて取り付ける．一方，開口の高さには胴縁を通すことが困難であることから，開口の左右には長辺方向の見付長さ3,380mm，短辺方向の見付長さ830～850mmのパネルを縦張り工法にて取り付ける．無開口の試験体No.1とは異なり，開口の左右のパネルと隅角部を挟んで直交梁に取り付くパネルは，隅角部が目地となるようにそれぞれ取り付ける．縦張り工法によるパネルの上部は，ドリルねじによって胴縁と接合する．一方，パネルの長辺端部はドリルねじによって竪地（Z-75x90x70x2.3）に接合している．竪地はファスナを介さず，直接間柱に接続する下地鋼材である．いずれのねじ接合部も，試験体No.1と同様にスロット孔（ϕ4.5x15）を300mmピッチにて設けている．また，隣接するパネル間の目地幅は20mmであり，目地にはシーリングMS-2（変成シリコーン系）を充填している．

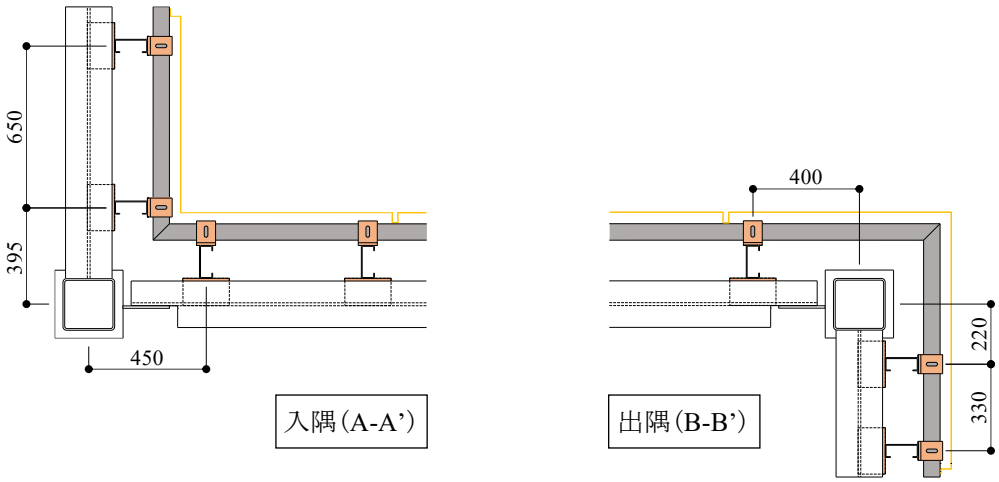
開口の詳細を図4.5に示す．開口は，はめ込み構法にてステンレスサッシに高さ1,600mm，幅2,045mmのフロートガラス（t=0.8mm）をはめ込んだFIX窓である．なお，本実験では外壁の変形追従性能に着目しており，載荷終盤までガラスの破損が生じないようにサッシとガラス間の面クリアランス（外壁面外方向のクリアランス）およびエッジクリアランス（外壁面内方向のクリアランス）を設定している．サッシの上下部はドリルねじによってパネルと接合しており，かつ普通ボルト（M12，SUS304（A2-70））によってL字形のブラケットと接合している．ブラケットは，耐風梁H194x150x6x9（SS400）に固定している．



(a) 金属パネル

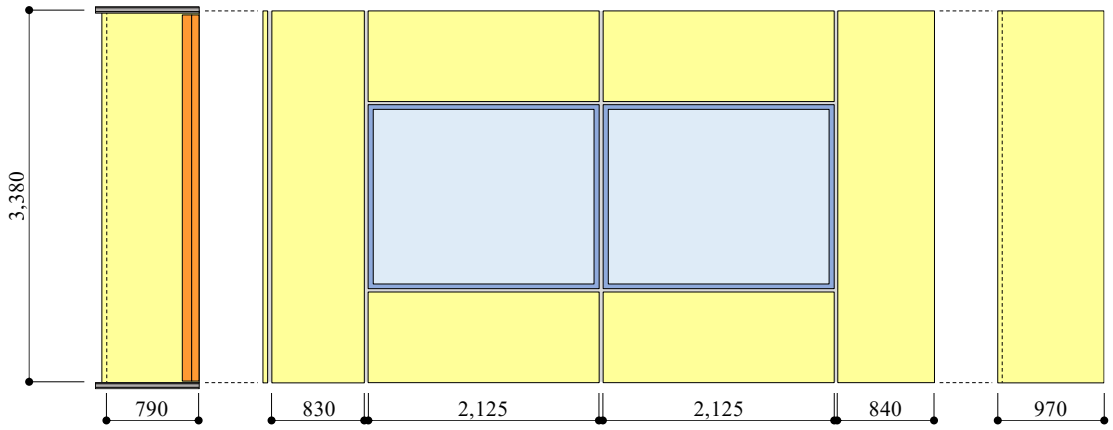


(b) 取り付け金物と下地鋼材

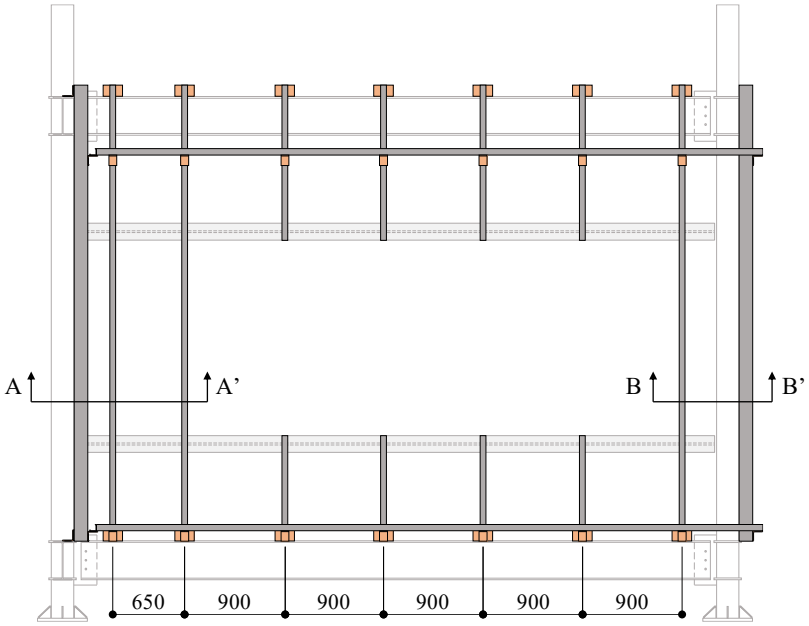


(c) 隅角部(下層側から見た断面)

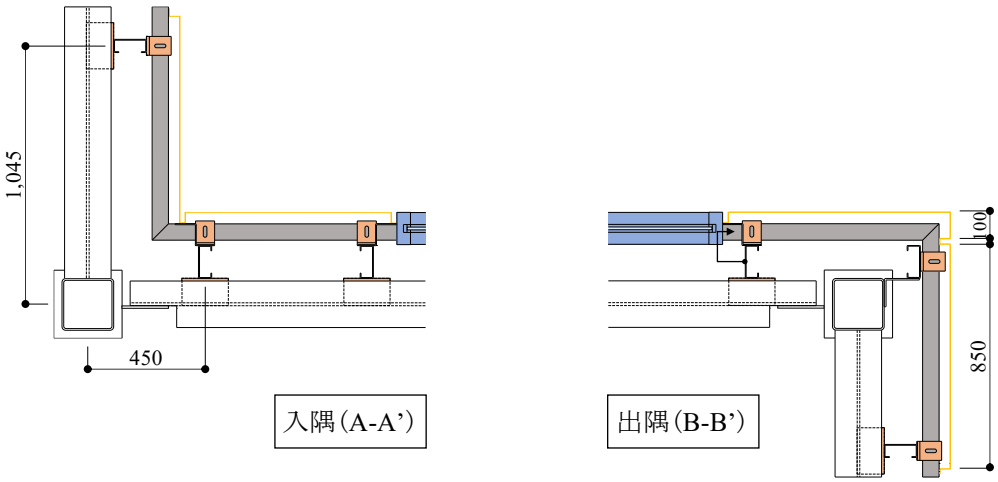
図4.3　試験体No.1(無開口)の概要



(a) 金属パネル

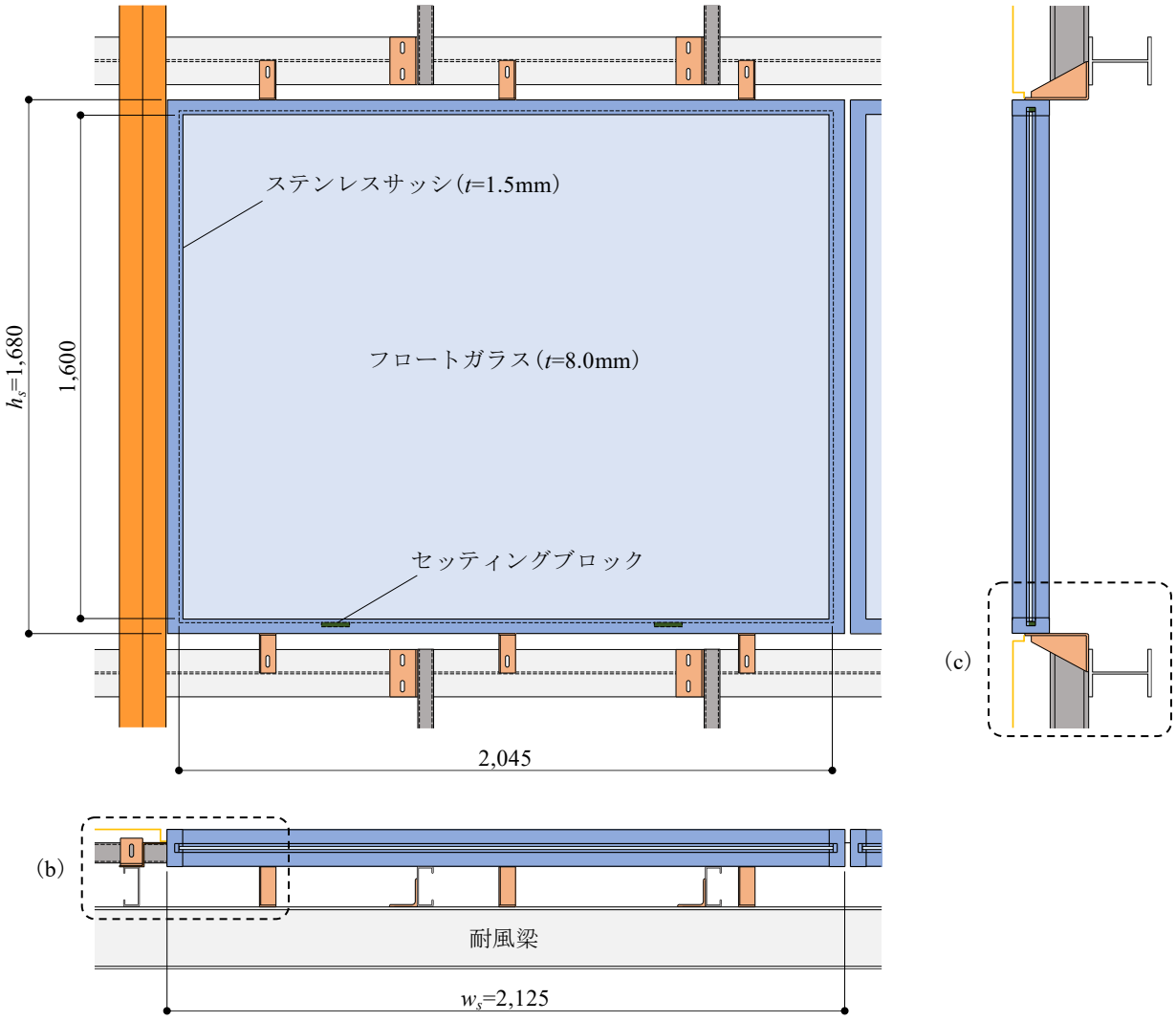


(b) 取り付け金物と下地鋼材

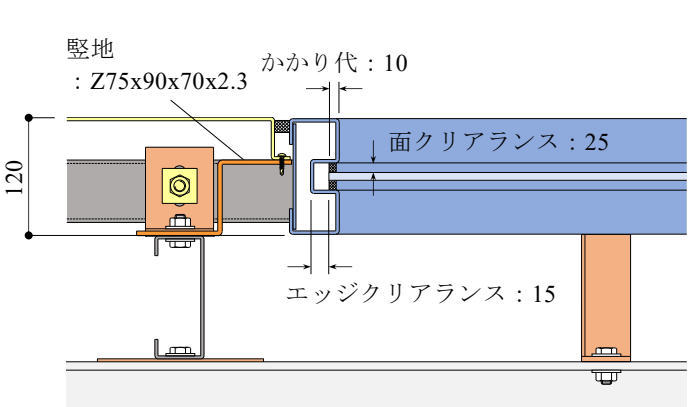


(c) 隅角部(下層側から見た断面)

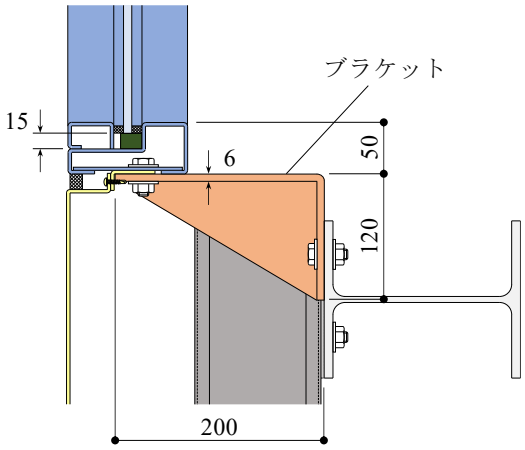
図4.4　試験体No.2(開口有り)の概要



(a) はめ込み構法によるFIX窓



(b) 開口の納まり



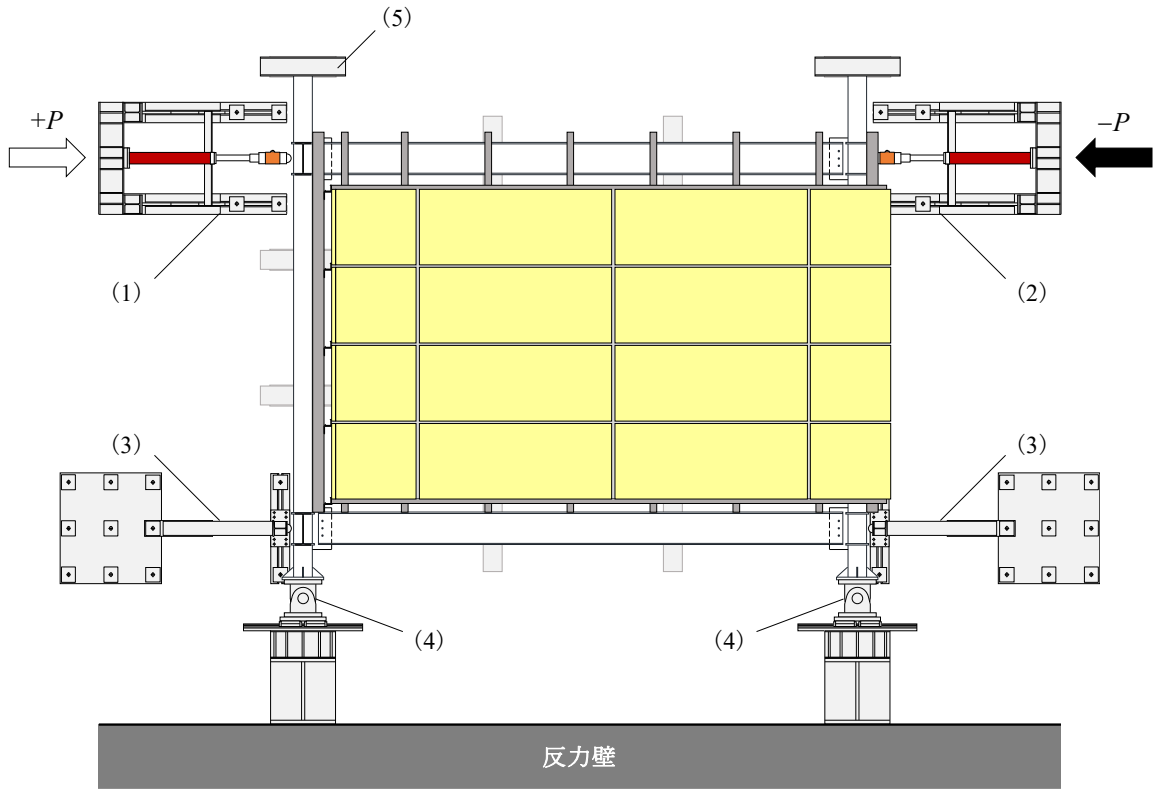
(c) 耐風梁との接合部の詳細

図4.5　開口の詳細

4.2.4　セットアップ

実験のセットアップを，試験体No.1を例に図4.6に示す．試験体は，まず鉄骨架構の柱脚部を水平に自由なピンローラー治具(図4.6中の(4)，写真4.1(c))を介して反力壁と接続する．柱に1階梁を接続した後に，開口を有する試験体No.2では耐風梁を設置する．次いで，柱に2階梁を接続した後に，上下の梁に間柱を架け渡し，ファスナを介して胴縁を接続する．最後に，下層側から胴縁にパネルを取り付け，隣接するパネル間にシーリング材を充填する．実際の施工の様子を，手順ごとに写真4.2に示す．

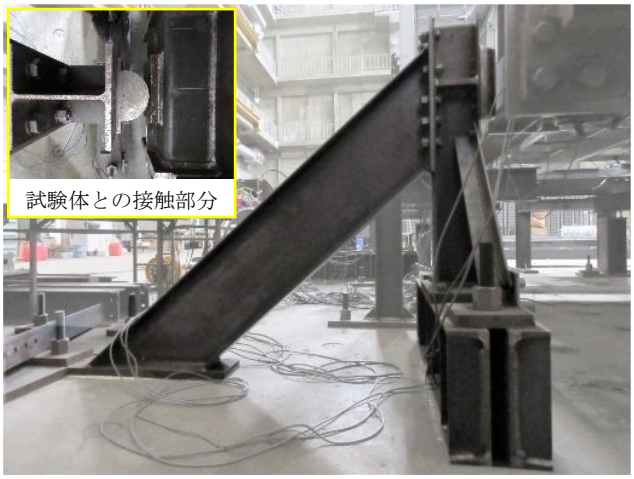
2階梁の左右には図4.6中の(1)と(2)に示す加力治具(写真4.1(a))を設置し，1階梁の左右には図4.6中の(3)に示す反力治具(写真4.1(b))を柱と10mmの隙間を確保して設置する．加力治具と反力治具は，それぞれPC鋼棒を用いて反力床に固定している．加力治具に組み込んだ油圧ジャッキによる荷重は，加力治具と試験体が接触し，さらに試験体と反力治具が接触することにより反力床に伝達する．本実験では，施工時の安全性を考慮して鉄骨架構を水平に組み立てることとし，柱と梁に図4.6中の(5)に示した治具(写真4.1(d))を配置して自重によるたわみとねじれを防止している．



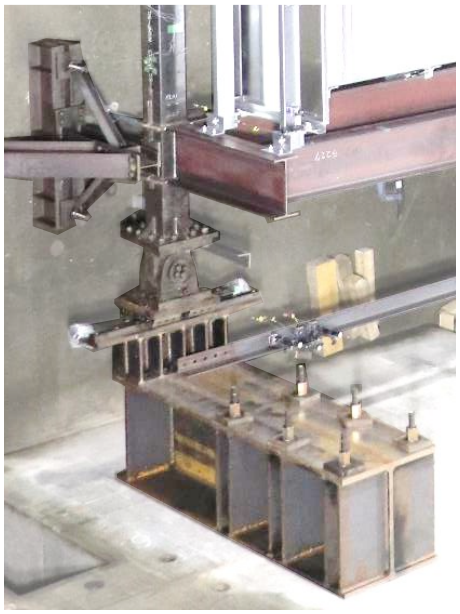
(1) 正方向加力治具　(2) 負方向加力治具　(3) 反力治具
(4) ピンローラー治具　(5) 自重受け・横補剛

図4.6　セットアップ

(a) 加力治具



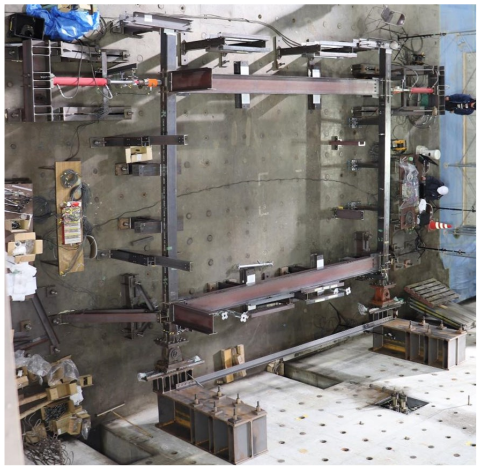
(b) 反力治具



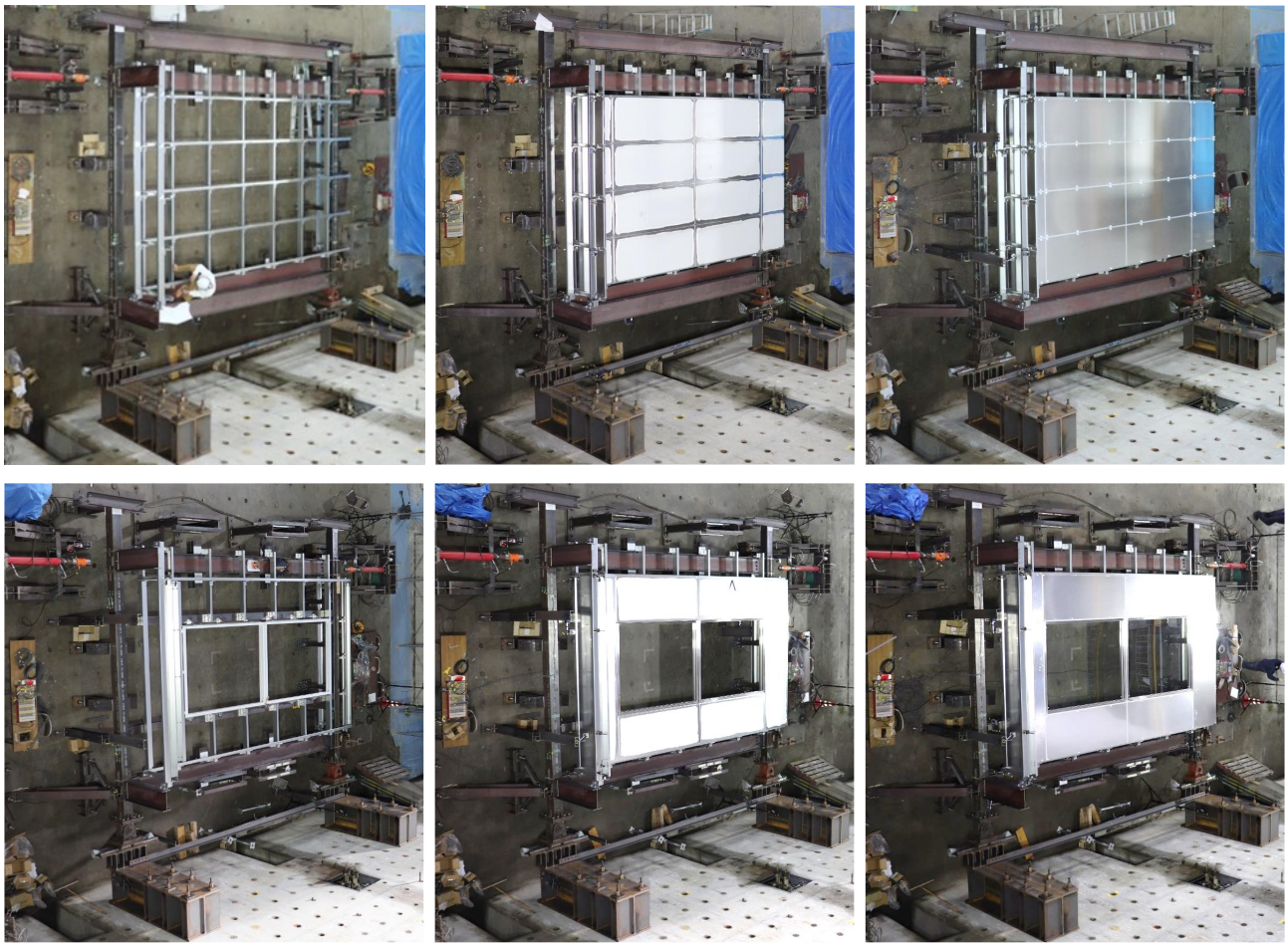
(c) ピンローラー治具

(d) 自重受け・横補剛（左：入隅，右：出隅）

写真4.1　各実験治具



(a) 鉄骨架構の組み立て



(b) 下地鋼材等の取り付け　　(c) パネルの取り付け　　(d) シーリングの充填

写真4.2　施工の様子（(b)～(d)の上段：試験体No.1，下段：試験体No.2）

4.2.5　計測計画

試験体に与える層せん断力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．鉄骨架構に生ずる層間変形角Rは，図4.1(a)に示す位置にて計測する絶対変位から算出する．つまり，1階梁に対する2階梁の相対水平変位を階高Hで除した後に，柱脚部の回転角を差し引いて求める．柱脚部の回転角は，左右の柱脚部にて計測するY方向変位の差を柱スパンWで除して求める．

$$R=\frac{1}{H}\cdot\left(\frac{{}_2X_L+{}_2X_R}{2}-\frac{{}_1X_L+{}_1X_R}{2}\right)-\frac{1}{W}\cdot\frac{Y_L-Y_R}{2} \quad \cdots (4.1)$$

外壁に作用するせん断力P_wは，柱に貼付したひずみゲージにより柱に作用するせん断力を算出し，層せん断力Pから差し引くことで得ている．

また，試験体No.2に取り付けるガラスは，サッシと対角で接触する時点で破壊することを仮定したBouwkampの式により，破壊時の層間変形角が予想できる[4.35)]．サッシの面内変形角と層間変形角が等しいと仮定すると，ガラス破壊時の層間変形角R_gは次式により表せる．

$$R_g=2c\left(\eta_1+\eta_2\cdot\frac{h_g}{w_g}\cdot\frac{d}{c}\right)\cdot\frac{1}{h_s} \quad \cdots (4.2)$$

ここで，c，dはガラスの縦辺，横辺のエッジとサッシとの間のエッジクリアランス，h_gはガラスの高さ，w_gはガラスの幅，h_sはサッシの高さである(図4.7)．また，η_1，η_2はガラスの水平移動，面内回転の難易によるエッジクリアランス有効率である．本実験ではガラスの破壊に先行してシーリングの破壊が生ずることから，η_1，η_2をともに1.0とすると，本実験におけるガラス破壊時の層間変形角は0.032radであると予想できる．

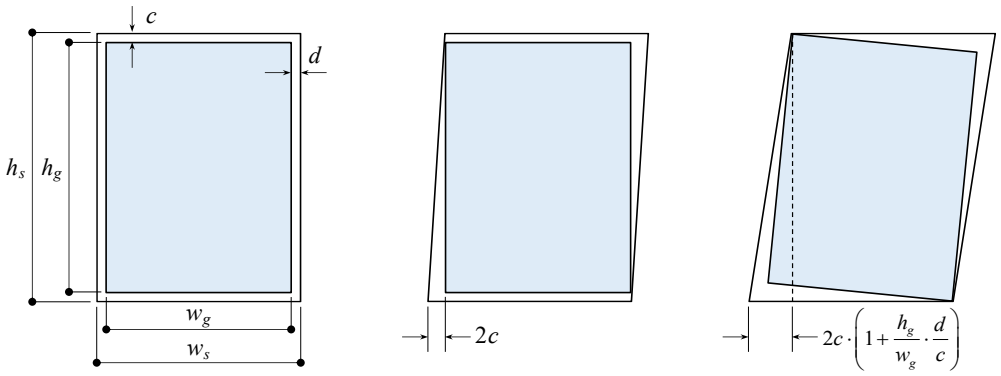
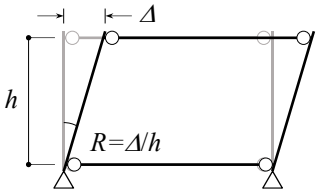
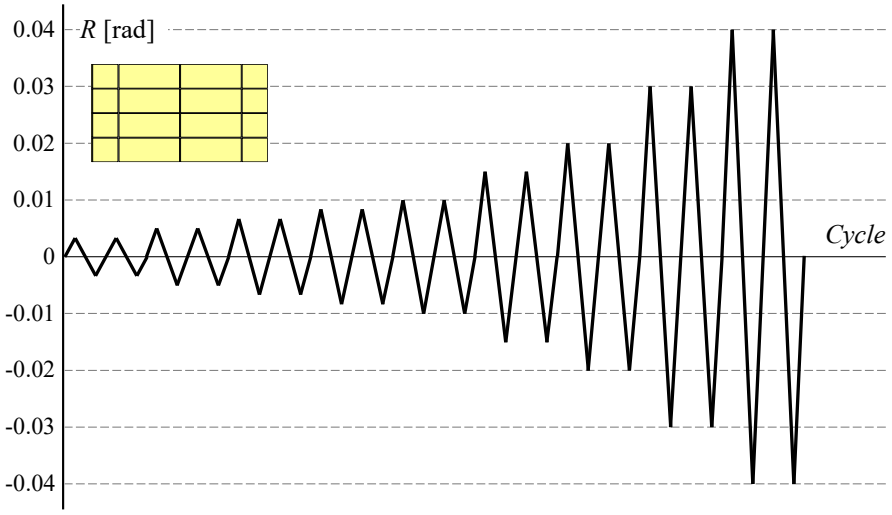


図4.7　はめ込みガラスの破壊機構[4.35)]

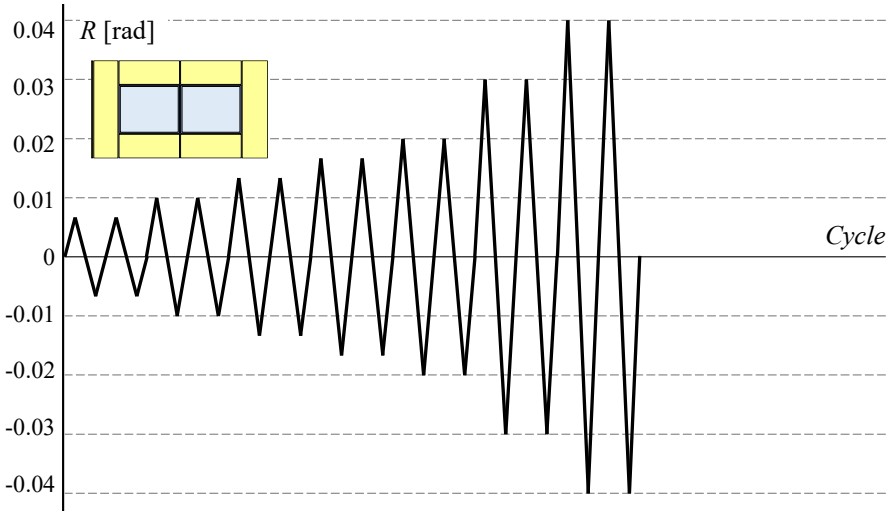
4.2.6　載荷履歴

本実験における載荷履歴を図4.8(a)に示す．載荷には正負交番漸増繰返し載荷を採用し，制御振幅には層間変形角Rを用いる．載荷は各振幅で2サイクルずつ行い，最終的には0.04radまで変形を与えた．ただし，開口を有する試験体No.2においては，大変形に至るまでの振幅の組み合わせの違いを併せて検討するため，図4.8(b)に示す変形を与えている．





(a) 試験体No.1



(b) 試験体No.2

図4.8　載荷履歴

4.3　実験結果と考察

4.3.1　鉄骨架構の挙動

試験体の載荷に先立ち，鉄骨架構が負担する耐力を把握する．鉄骨架構のみを施工した状態で載荷を行った結果を図4.9に示す．図の縦軸は層せん断力Pであり，横軸は層間変形角Rである．鉄骨架構は，載荷開始時に高い剛性を発揮して，2kN程度の耐力を維持したまま変形が進んでいる．これは，梁端接合部の曲げ抵抗と自重による摩擦等によるものであると考えられる．正側載荷時にはR=0.035rad，負側載荷時にはR=0.025radに到達した後に，高力ボルトの支圧に起因する耐力の上昇が見られた．

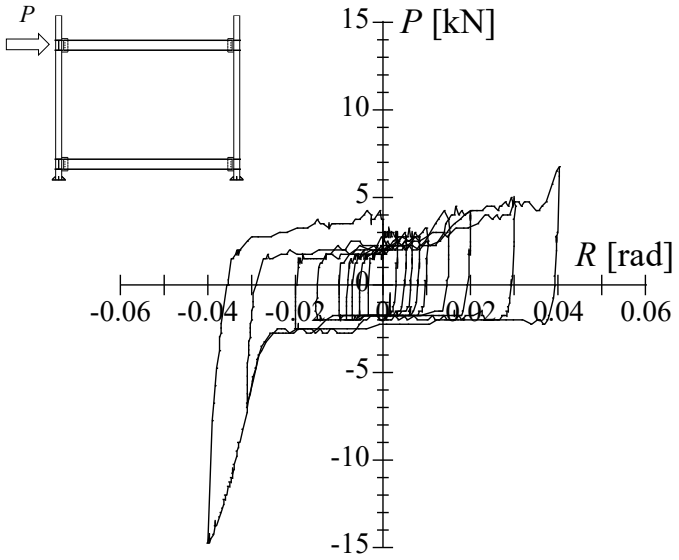


図4.9　鉄骨架構の履歴挙動

4.3.2　荷重変形関係と損傷の観察結果

実験から得られた荷重変形関係を，無開口の試験体No.1を図4.10に，開口を有する試験体No.2を図4.12に示す．両図の縦軸は，層せん断力から柱のせん断力を差し引いて求めた外壁が負担する層せん断力P_wであり，横軸は層間変形角Rである．図には，第3章と同様の方法で算出した降伏耐力を青色の破線で，層間変形角R=0.04radまでの最大耐力を赤色の破線で示す．また，載荷終了時の様子を写真4.3および写真4.6に，各サイクルの除荷時に行った損傷状態の観察結果を写真4.4および写真4.7に示す．なお，各写真は損傷の発生時ではなく，損傷が明確である載荷終盤のものを示している．

【試験体No.1（無開口）】

試験体No.1では，初期載荷時から面外方向のパネルの浮き上がり（写真4.4(a)），ねじ接合部のすべり（写真4.4(b)），および間柱断面の局部的な変形（写真4.4(c)）を確認した．ここで，間柱の変形状態について考察する．間柱と梁の接合部をピン接合と仮定すると，間柱全体には層間変形に相当するせん断変形が生ずる（図4.11(a)）．一方，間柱断面の局部的な変形（図4.11(b)）は，上層側では鉄骨梁が間柱に先行し，下層側では間柱が鉄骨梁に先行していることから，間柱全体のせん断変形がパネルによって拘束されるために生じたものと考えられる．直交梁の先端に取り付く間柱では，間柱断面の局部的な変形はほとんど見られなかった（写真4.5）．

層間変形角R=1/67radでは，一般部のパネルにおいて折り曲げ加工部分の亀裂（写真4.4(d)）を確認した．また，一般部と一般部のパネル間，一般部と隅角部のパネル間において目地に沿ったシーリングの亀裂（写真4.4(e)）が発生した．層間変形角R=1/33radでは，隅角部のパネルおよび胴縁の溶接部が破断した（写真4.4(f)）．これは，直交梁にほとんど付随して水平方向に変形する間柱と，パネルの拘束を受けて強制変形を吸収した間柱との間で変形差が生じたためであると考えられる．なお，入隅では負側載荷時，出隅では正側載荷時の違いがあるものの，両者ともに同程度の層間変形角で破断を確認している．

最終的には，層間変形角R=1/25radに最下層一般部のパネル下部においてねじ接合部のはし抜け破断（写真4.4(g)）と，最上層一般部のパネル上部のねじの引き抜け（写真4.4(h)）が生じた．また，正側で42.3kN，負側で38.5kNの耐力を発揮した．ねじ接合部のはし抜け破断等による明確な耐力の低下は確認されなかったものの，負側の耐力が正側の耐力を3.8kN程度下回っている．これは，正側にて各種損傷が進展しているためであると考えられる．パネルの変形追従方式は，目視にて確認したねじ接合部のすべりによりスライド方式であると考えられる．加えて，第3章と同様に見かけ上のロッキング挙動を確認した（写真4.3）．

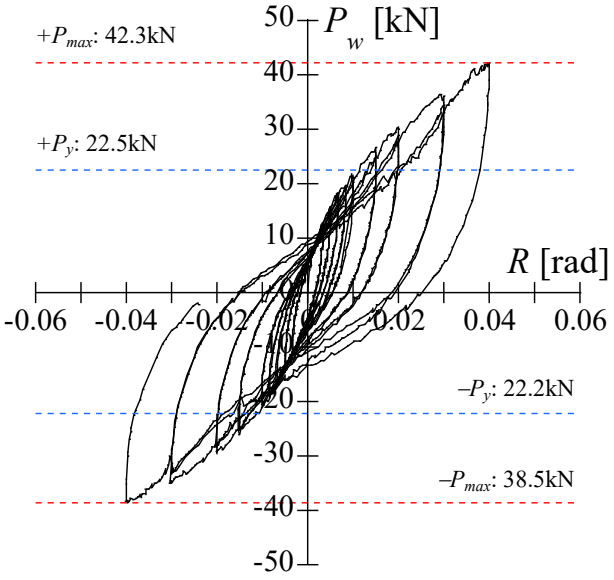


図4.10　荷重変形関係（試験体No.1）

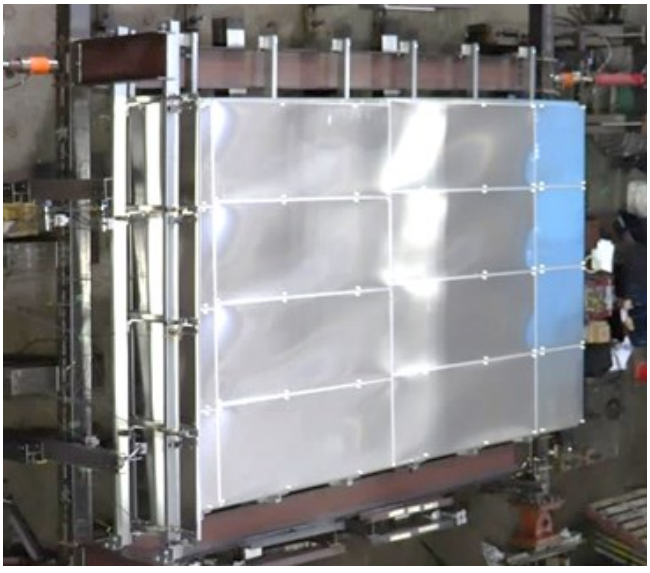
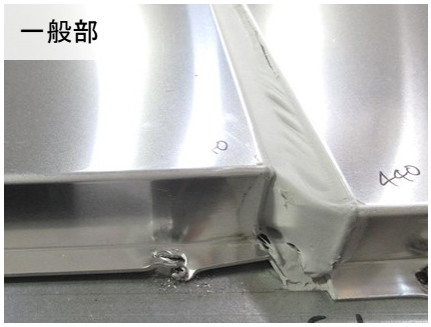
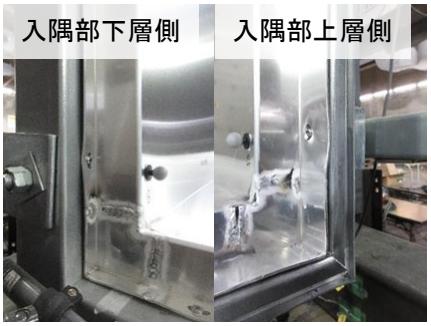
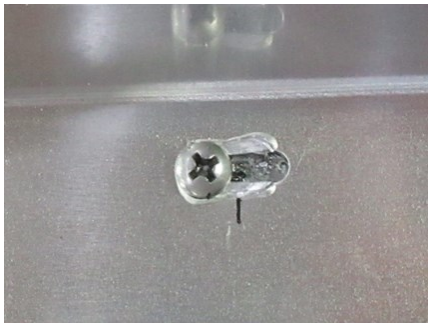


写真4.3　載荷終了時の様子（試験体No.1）

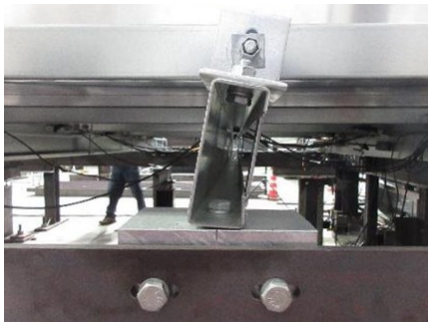


（a）パネルの浮き上がり

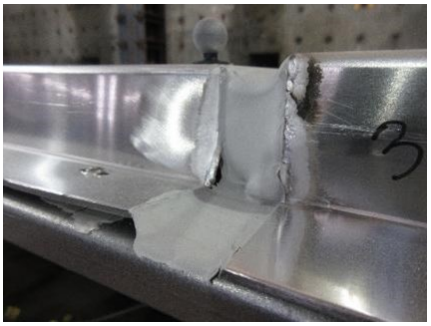




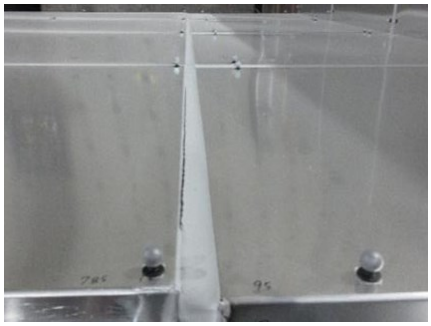
（b）ねじ接合部のすべり



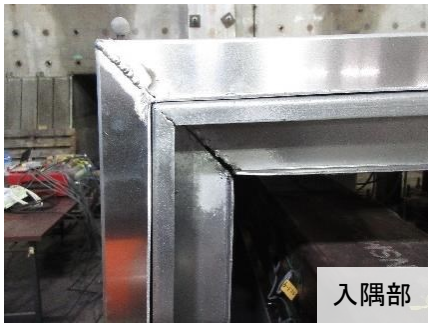
（c）間柱断面の局部的な変形

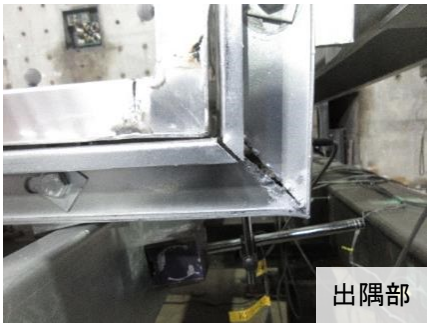


（d）パネルの亀裂



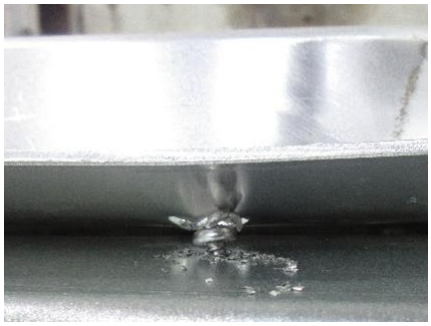
（e）シーリングの亀裂





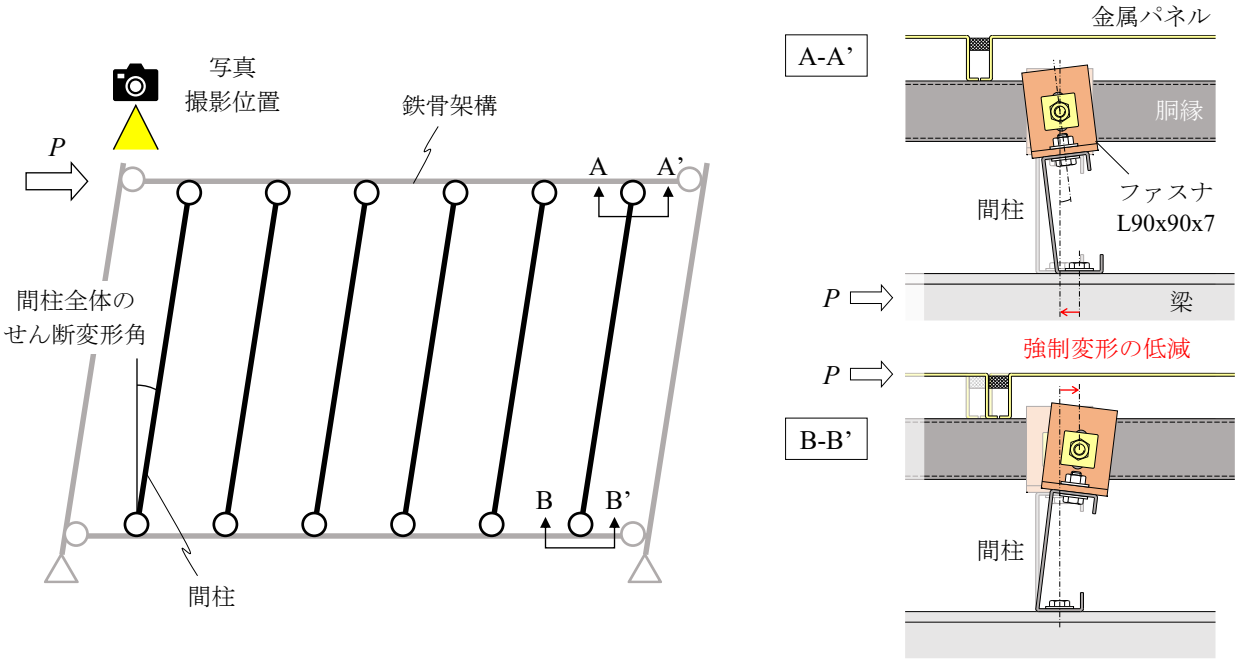
（f）胴縁・パネルの溶接部の破断

（g）ねじ接合部のはし抜け破断



（h）ねじの引き抜け

写真4.4　損傷状態の観察結果（試験体No.1）



(a) 間柱全体のせん断変形　　(b) 間柱断面の局部的な変形

図4.11　間柱の変形状態

写真4.5　入隅周辺の間柱断面の局所的な変形の様子

【試験体No.2（開口有り）】

試験体No.2では，試験体No.1と同様に初期載荷時からパネルの浮き上がり（写真4.7(a)），ねじ接合部のすべり（写真4.7(b)），および間柱断面の局部的な変形（写真4.7(c)）を確認した．層間変形角R=1/150radでは，横張りパネルと縦張りパネルの間において目地に沿ったシーリングの亀裂（写真4.7(d)）が発生した．試験体No.2では，横張りパネルと縦張りパネルの回転角が異なることにより，試験体No.1より早期にシーリングの亀裂が生じたものと考えられる（図4.13）．なお，横張りパネルと横張りパネルの間に充填したシーリングは，層間変形角R=1/33radに亀裂を生じた．

層間変形角R=1/33radでは，一般部のパネルにおいて折り曲げ加工部分の亀裂（写真4.7(e)）の発生と最下層一般部のパネルの下部においてねじ接合部のはし抜け破断（写真4.7(f)）が生じた．なお，試験体No.1で見られた隅角部のパネルおよび胴縁の溶接部の破断は見られなかった．試験体No.2では隅角部が目地であり，シーリングの変形性能[4.36)]によって溶接部に応力が集中することを緩和しているためであると考えられる．さらに，層間変形角R=1/25radでは，縦張りパネル下部のねじ接合部においてはし抜け破断（写真4.7(f)）が，ガラス角部において割れ（写真4.7(g)）が生じた．ガラスの割れは，図4.12に緑色の破線で示したガラス破壊時の層間変形角の計算値を上回っている．これは，間柱断面の局部的な変形等によって強制変形が吸収され，サッシの面内変形角が層間変形角ほど生じなかったためであると考えられる．

最終的には，正側で30.8kN，負側で26.6kNの耐力を発揮した．試験体No.1と同様に，各種破壊による明確な耐力の低下は確認されなかったものの，負側の耐力が正側の耐力を4.2kN程度下回っている．横張りパネルの変形追従方式は，試験体No.1と同様にスライド方式および見かけ上のロッキング挙動である．一方，縦張りパネルの変形追従方式は，パネルの長辺方向に設けたスロット形状のねじ孔によって，ロッキング方式を呈すると考えられる（写真4.6）．

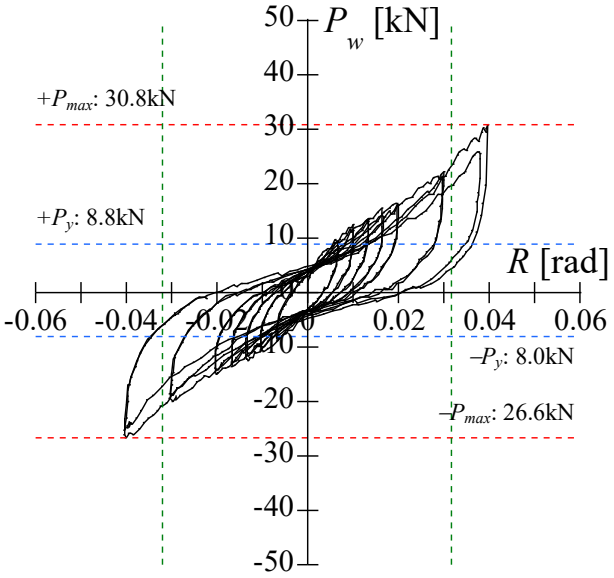


図4.12　荷重変形関係（試験体No.2）

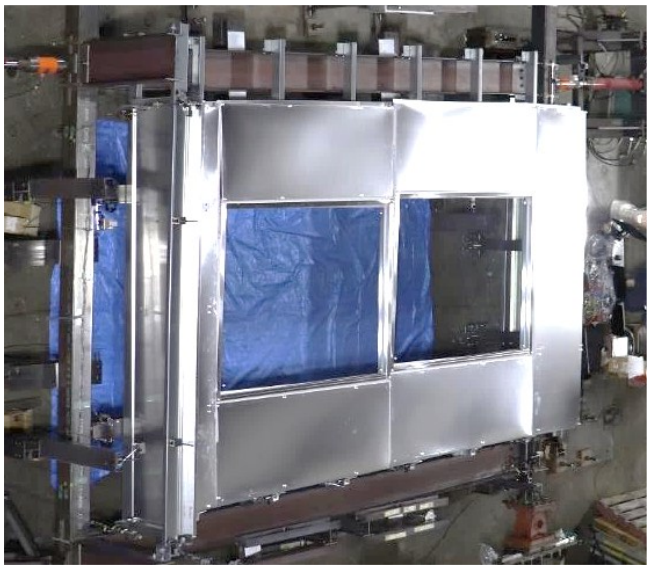
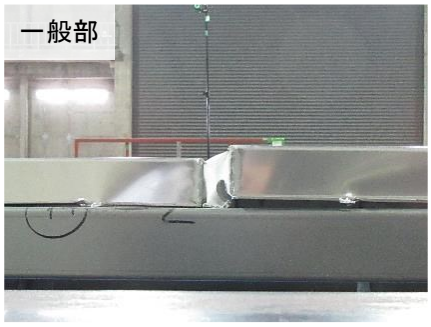
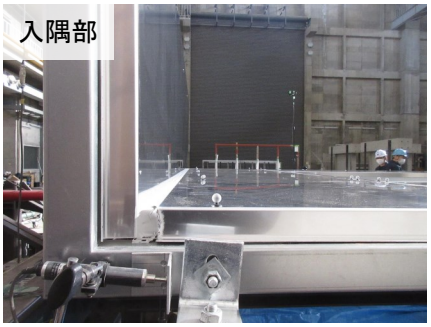


写真4.6　載荷終了時の様子（試験体No.2）

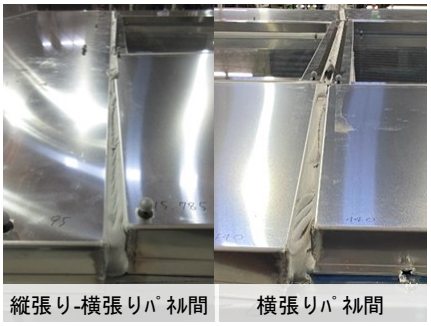


(a) パネルの浮き上がり

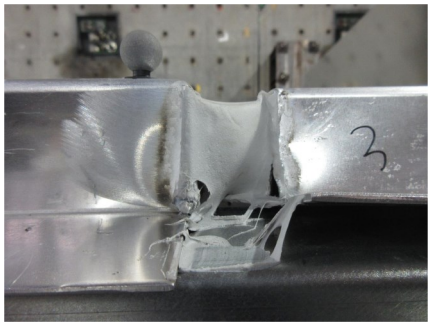


(b) ねじ接合部のすべり

(c) 間柱断面の局部的な変形

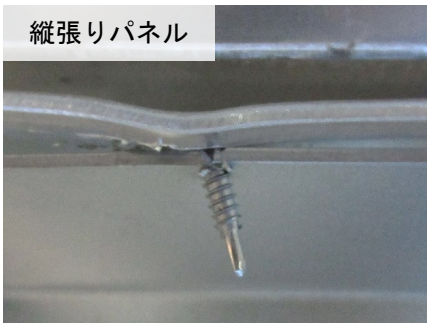


(d) シーリングの亀裂



(e) パネルの亀裂

(f) ねじ接合部のはし抜け破断



(g) ガラスの破壊

写真4.7　損傷状態の観察結果（試験体No.2）

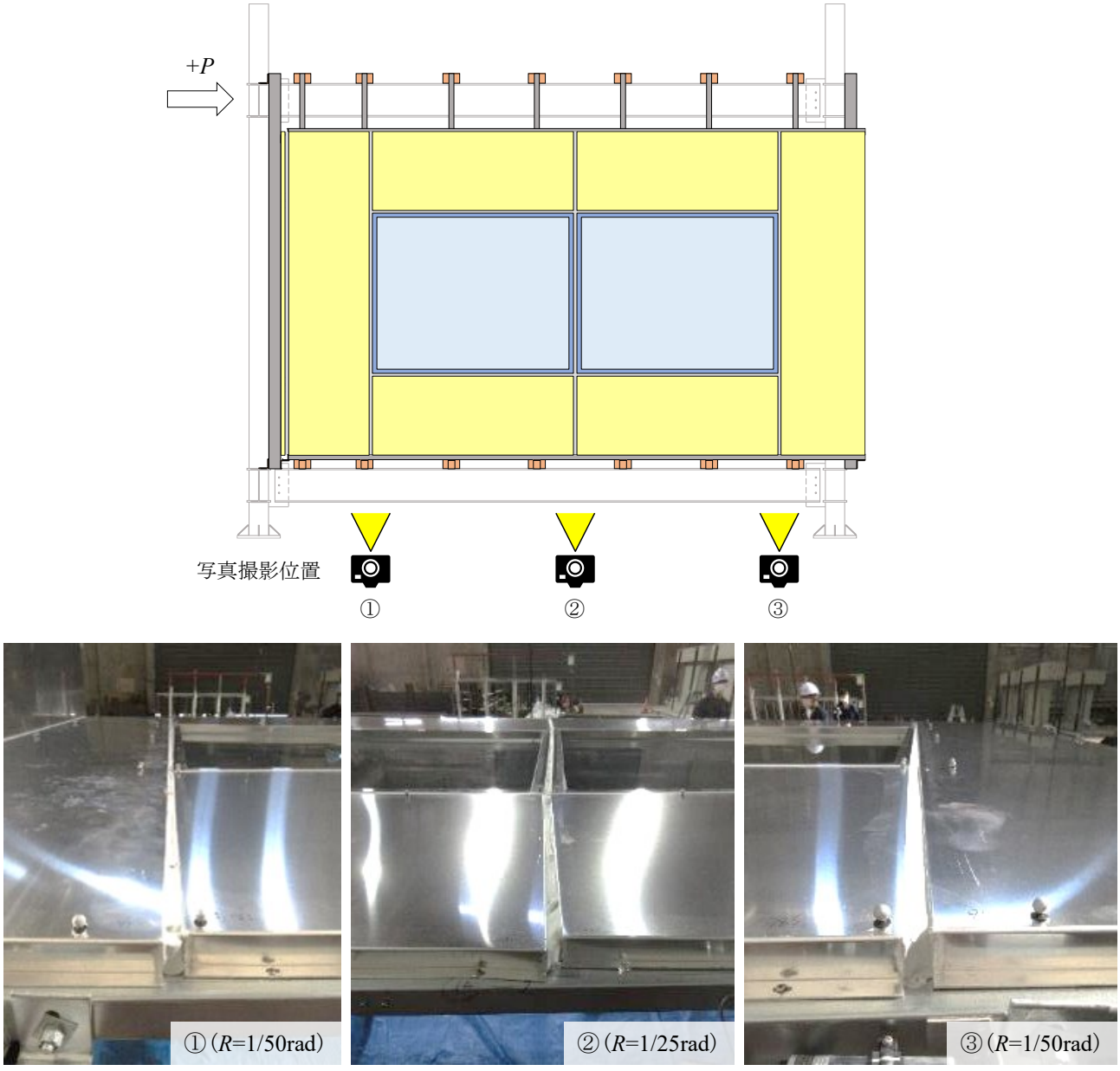
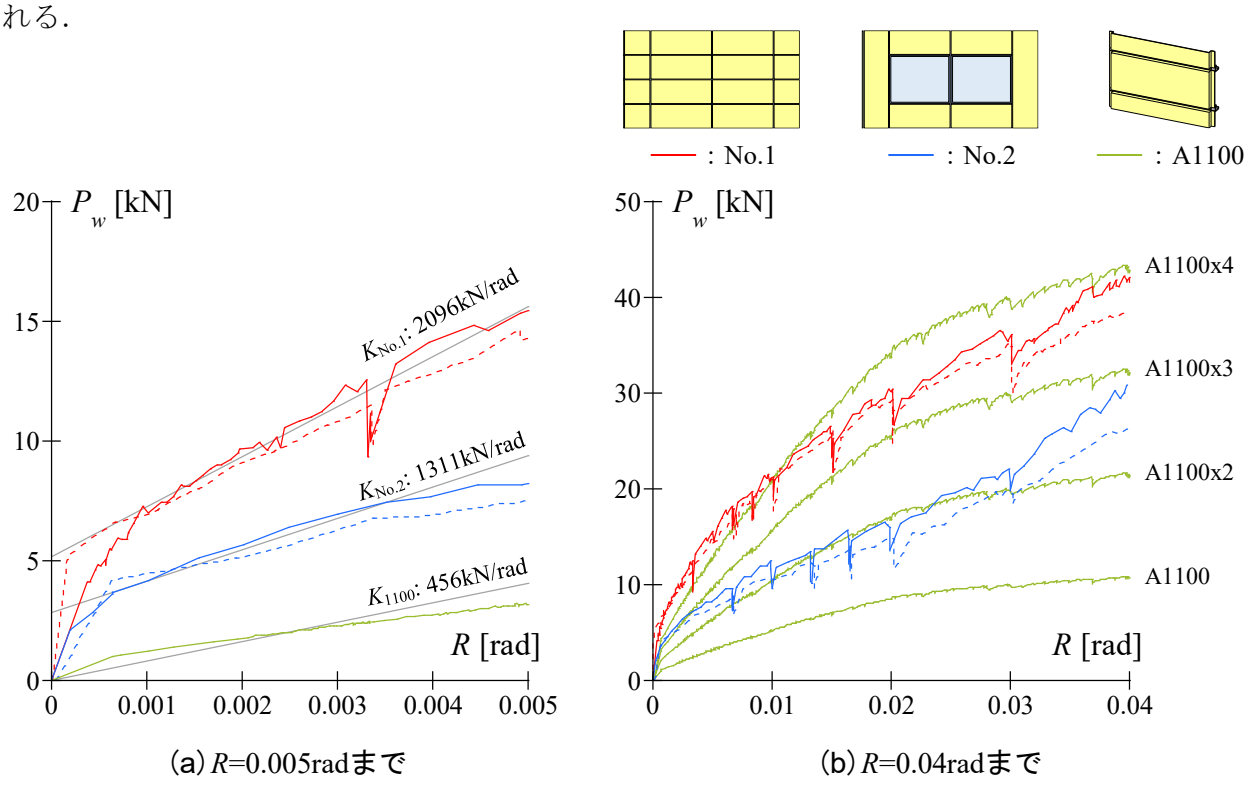


図4.13　パネルの回転とシーリングの変形状態

荷重変形関係から得られた包絡曲線を図4.14に示し，試験体No.1および試験体No.2と，第3章の1ユニットの金属外壁要素の試験体と比較する．金属外壁要素の試験体は，パネルに純アルミニウム（A1100P H14，t=2.5mm）を用いた試験体A1100である．(a)は層間変形角R=0.005radまで，(b)は層間変形角R=0.04radまでの範囲を示しており，無開口の試験体No.1を赤色，開口を有する試験体No.2を青色，金属外壁要素の試験体A1100を黄緑色で示す．さらに，試験体No.1と試験体No.2は，正側載荷時を実線，負側載荷時を破線で区別している．

図4.14(a)に，各試験体の初期剛性を灰色の実線で示す．試験体No.1と試験体No.2ともに，載荷初期における剛性の評価が困難であったため，安定した二次勾配を用いている．すなわち，層間変形角R=0.001～0.0033(1/300)radの包絡曲線の傾きをもって初期剛性を算出した．金属外壁要素の試験体A1100の初期剛性と比較すると，無開口の試験体No.1では約4.6倍，開口を有する試験体No.2では約2.9倍である．これは，試験体No.2では隅角部が目地であり，シーリングの変形性能によって隅角部の抵抗が相対的に低いためであると考えられる．

図4.14(b)から，試験体No.1と試験体No.2ともに，正側の耐力が負側の耐力をわずかに上回っているものの，ほぼ同様の挙動を示していることが分かる．図中に，試験体A1100の結果を定数倍して示すと，試験体No.1では試験体A1100の4倍と同等の耐力を発揮しているものの，早期に履歴が軟化していることが分かる．また，試験体No.2では，ねじ接合部のはし抜け破断が見られた層間変形角R=0.03(1/33)rad辺りまで，試験体A1100の2倍と包絡曲線がほぼ一致している．層間変形角R=0.03(1/33)rad以降は，試験体No.1と試験体No.2ともに，剛性が再度上昇している．これは，金属外壁要素の試験体では再現できなかった，開口や隅角部における抵抗等が原因であると推測される．



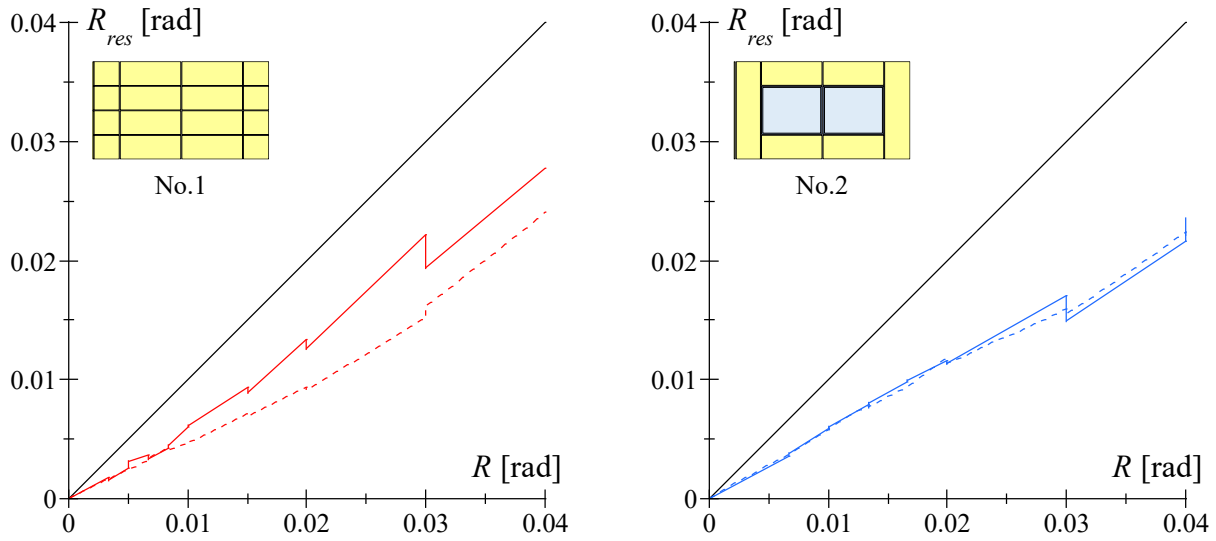
(a) R=0.005radまで　　(b) R=0.04radまで

図4.14　包絡曲線

4.3.3　残留変形

試験体全体において，除荷時に残留する変形角を図4.15に示す．(a)は無開口の試験体No.1，(b)は開口を有する試験体No.2である．各図の縦軸は残留変形角R_{res}，横軸は試験体に与えた層間変形角Rである．また，正側載荷後を実線，負側載荷後を破線で区別している．

試験体No.1，試験体No.2ともに，試験体に与えた層間変形角の半分以上が残留していることが分かる．試験体No.2では載荷方向による違いがほとんど見られなかった一方で，試験体No.1では正側載荷時に生ずる残留変形が負側載荷時に生ずる残留変形を上回っている．試験体No.2と異なり，試験体No.1の隅角部に設けたL字形パネルは，面内変形に対する抵抗力を有することから試験体全体の残留変形にも影響する可能性が考えられる．しかしながら，隅角部に設けたL字型パネルの力学挙動に対して本実験中では検討しておらず，今後の検討課題である．



(a) 試験体No.1（無開口）　　(b) 試験体No.2（開口有り）

図4.15　試験体全体の残留変形角

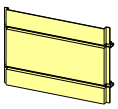
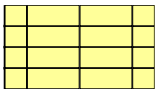
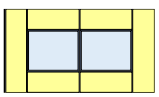
4.3.4　損傷程度の区分

試験体の損傷過程を表4.3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．各試験体について，上段は正側載荷時，下段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，試験体が降伏耐力に到達した時点を記述している．また，残留変形角が1/500radを超えた領域を灰色で示す．

実験結果をもとに，試験体の損傷区分(表3.1)を評価する．損傷区分の評価方法は，第3章と同様である．本章の実験にて新たに観察されたパネルの浮き上がりと間柱断面の局部的な変形は，補修の必要を要さないことから損傷区分をAとした．シーリングは，完全に剥離した状態ではなく亀裂が生じた時点を記している．シーリングの亀裂発生時の段階で早急に打ち替えを行う必要はないが，将来的には外壁の水密性や気密性が低下する直接の原因となり，補修の必要が生ずることから，損傷区分をCとする．

試験体ごとの損傷区分を表4.3に併記する．損傷区分は，補修の必要がないAとBを黄緑色，補修の必要はあるが脱落等の危険はないCとDを水色で示す．無開口の試験体No.1では，金属外壁要素の試験体で見られた損傷を，おおよそ同程度の層間変形角において確認している．ただし，層間変形角R=1/100radまでにはパネルの亀裂が生じ，早期に試験体の降伏に至っている．開口を有する試験体No.2においては，さらに早期に試験体の降伏に至り，R=1/150radまでにはシーリングの亀裂が確認された．最終的な破壊形式として，すべての試験体に共通してねじ接合部のはし抜け破断が確認された．これに加えて，試験体No.1ではねじの引き抜け，試験体No.2ではガラスの破壊が生じている．第3章と第4章の実験結果を合わせて，本実験の範囲では，外壁の脱落や重要な機能の低下の危険がある損傷は，層間変形角R=1/50rad以上で生ずることが分かった．

表4.3　試験体の損傷過程と損傷程度の区分

R [rad]	0.0033 (1/300)	0.0050 (1/200)	0.0067 (1/150)	0.0083 (1/120)	0.010 (1/100)	0.015 (1/67)	0.020 (1/50)	0.030 (1/33)	0.040 (1/25)
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))	
					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			
損傷区分	A				D				
No.1 (無開口) 	パネルの浮き上がり 間柱断面の局部的な変形		試験体の降伏		パネルの亀裂	パネル・胴縁の溶接部の破断(出隅部)			
	パネルの浮き上がり 間柱断面の局部的な変形			パネルの亀裂 試験体の降伏	シーリングの亀裂		パネル・胴縁の溶接部の破断(入隅部)	ねじ接合部のはし抜け破断 ねじの引き抜け	
損傷区分	A		B		D				E
No.2 (開口あり) 	試験体の降伏 パネルの浮き上がり 間柱断面の局部的な変形		シーリングの亀裂		ねじ接合部のはし抜け破断 パネルの亀裂			ねじ接合部のはし抜け破断(縦張りパネル) ガラスの割れ	
	試験体の降伏 パネルの浮き上がり 間柱断面の局部的な変形				パネルの亀裂 ねじ接合部のはし抜け破断 シーリングの亀裂			ねじ接合部のはし抜け破断	
損傷区分	A		C				D	E	

上段：正側載荷時，下段：負側載荷時，▭：残留変形角1/500rad以上

4.4　まとめ

本章では，1層1スパンの実大鉄骨架構に複数の金属パネルを取り付けた外壁システムの面内載荷実験を実施し，前章にて扱った1ユニットの外壁要素の面内載荷実験では確認できなかった，シーリング，開口，入隅および出隅を含めて，外壁面内方向の層間変形に対する各種変形限界について検討した．本章にて得られた結果を以下にまとめる．

[1] 無開口の試験体では，初期載荷時から面外方向のパネルの浮き上がり，ねじ接合部のすべり，および間柱断面の局部的な変形を確認した．また，隅角部のパネルおよび胴縁の溶接部の破断は，直交梁に付随して水平方向に変形する間柱と，パネルの拘束によって強制変形を吸収した間柱との間で変形差が生じたことに起因すると考えられる．最終的には，外壁要素の試験体と同様に，パネルの亀裂，ねじ接合部のはし抜け破断，およびねじの引き抜けが確認された．

[2] 開口を有する試験体では，無開口の試験体と同様に初期載荷時からパネルの浮き上がり，ねじ接合部のすべり，および間柱断面の局部的な変形を確認した．横張りパネルと縦張りパネルの間に充填したシーリングでは，縦張りパネルと横張りパネルの回転角が異なることにより，無開口の試験体より早期に亀裂が生じた．載荷終盤には，外壁要素の試験体および無開口の試験体にて確認したパネルの亀裂やねじ接合部のはし抜け破断に加えて，ガラスの破壊を確認した．

[3] パネルの変形追従方式は，横張り工法によるパネルではスライド方式および見かけ上のロッキング挙動であると考えられる．一方，縦張り工法によるパネルではスロット形状のねじ孔を活用したロッキング方式であると考えられる．

[4] 初期剛性に関して，無開口の試験体は外壁要素の試験体の4.6倍程度を発揮している．これに対して，開口を有する試験体は外壁要素の試験体の2.9倍程度であり，隅角部に目地を設けることで面内方向の抵抗が低くなっていると考えられる．

[5] 試験体No.1と試験体No.2ともに，履歴挙動に対する載荷方向の違いはほとんど見られない一方で，載荷を開始した正側の耐力が負側の耐力をわずかに上回っている．これは，正側にて各種損傷が進展している影響であると考えられる．

[6] 試験体No.1，試験体No.2ともに，試験体に与えた層間変形角の半分以上が除荷時に残留していることが認められた．

[7] 第3章と同様に，金属外壁システムの損傷程度の区分を評価した．無開口の試験体は，層間変形角1/120radまで補修の必要がなく，層間変形角1/33radまで脱落等の可能性が低いことが分かった．また，開口を有する試験体は層間変形角1/200radまで補修の必要がなく，層間変形角1/50radまで脱落等の可能性が低いことが分かった．これらの変形限界は，第3章にて扱った外壁要素の試験体の変形限界を下回るが，シーリング，開口，入隅および出隅の損傷を踏まえた総合的な評価ができたと言える．

参考文献

4.1)　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

4.2)　日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS21ALCパネル工事，第5版，2018

4.3)　吹田啓一郎，北村有希子，五藤友規，岩田知孝，釜江克宏：高度成長期に建設された超高層建物の長周期地震動に対する応答特性，日本建築学会構造系論文集，第611号，pp.55-61，2007

4.4)　森田高市，長谷川隆：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の応答と梁端損傷度の評価，日本建築学会技術報告集，第22巻，第52号，pp.897-900，2016

4.5)　相川新一，仁平久信，木村敬三，遠山幸三，寺内伸，小林美亀雄：世界貿易センタービルメタルカーテンウォールの実大実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.127-128，1970

4.6)　寺内伸，相川新一，仁平久信，木村敬三，遠山幸三，小林美亀雄：世界貿易センタービルで計画されたPCカーテンウォールの実大実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.125-126，1970

4.7)　二階盛，亀田泰弘，安部一郎，小林美亀雄，畑野肇，大川潤：PCカーテンウォール取付け金具の実験的研究（その1）スライドファスナーの性能実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.317-318，1976

4.8)　松本信二，松本洋一，千葉春海：PCカーテンウォールの耐震性能に関する検討（その2　実大PCパネルを用いた振動実験），日本建築学会学術講演梗概集，構造系，pp.491-492，1977

4.9)　松崎育弘，阿部保彦，宇佐美滋：PCカーテンウォールの耐振性に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，構造系，pp.1453-1454，1979

4.10)　諸橋滋巳，木下日出男，伊藤弘，西田和生，坂本功：ー日米共同大型耐震実験研究（鉄骨造）57ー鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験（その8．PCパネル），日本建築学会大会学術講演梗概集，A分冊，pp.313-314，1986

4.11)　坂本功，大橋好光，山田誠，渡辺拓文，横木光一郎：ALCパネル外壁の耐震性に関する実験的研究（その1．構法及び実験の概要）～（その3．立体試験体の試験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，A分冊，pp.201-206，1987

4.12)　嶋田聖二，松谷輝雄，松村耕四郎，岩崎照男：PCカーテンウォールのオープンジョイントに関する開発実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A分冊，pp.101-102，1989

4.13)　黍野和彦，幅祐司，高橋大祐：大型ALC外壁パネルのロッキング工法に関する実験的研究（工法概要と層間変位追従性能試験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.429-430，1997

4.14)　伊藤弘，西田和生，濱崎仁，水谷吉克，相子恒夫，廣波純二，高橋光雄，富田和男：ALCロッキング構法実大変形追従性試験　その1　実験概要～その4　パネルのひびわれ状況，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.107-114，1998

4.15)　岩田弦，加藤泰夫，内田和弘，元宗照良，佐々木仁，奥泉輝夫：PCカーテンウォールの薄型化に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2分冊，pp.879-880，2000

4.16)　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

4.17) 萩原達也，細内正紀，横家尚，横木光一郎：現場タイル張りALCパネルの層間変形追従性能に関する実験的研究(その2　ロッキング構法へのタイル張り)，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.355-356，2002

4.18) 高橋大祐，橋本敏男，池田賢，清家剛：内装仕上げを施したALC二次壁の動的変形能試験　その1　研究概要及び試験方法，その2　試験結果及び考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.359-362，2002

4.19) 菊池雅史，小山明男，小宮岳枝，小林正人，中山正則，横家尚：ALC帳壁部材の耐震安全性に関する基礎的研究（その1. 実験概要および構法の違いによる影響），（その2.開口部，タイル張り仕上げによる影響），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.195-198，2003

4.20) 松宮智央，吹田啓一郎，中島正愛，劉大偉，井上真木，竹原創平：ALC版外壁が構造性能に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第581号，pp.135-141，2004

4.21) 松岡祐一，吹田啓一郎，山田哲，島田侑子，赤澤資貴，松宮智央：実大4層鉄骨造建物の震動台実験における外装材の耐震性能評価，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第641号，pp.1353-1361，2009

4.22) 長江拓也，藤谷秀雄，福山國夫，梶原浩一，城戸史郎：超高層建物の地震応答を受けるALC版外壁の耐震性能－E-ディフェンス振動台実験－，日本建築学会技術報告集，第15巻，第31号，pp.667-672，2009

4.23) 長江拓也，藤谷秀雄，福山國夫，城戸史郎：超高層建物の地震応答を受けるカーテンウォールの耐震性能－E-ディフェンス振動台実験－，日本建築学会技術報告集，第16巻，第33号，pp.535-540，2010

4.24) 吹田啓一郎，平郡竜志，高宏周，聲高裕治，狗飼正敏，佐々木哲也：ロッキング方式PCaカーテンウォールの構面方向変位追従限界と限界後の挙動，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第693号，pp.1841-1850，2013

4.25) 高宏周，吹田啓一郎，狗飼正敏，佐々木哲也：ロッキング方式プレキャストコンクリートカーテンウォールのコーナー部の変位追従限界と限界後の挙動，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第717号，pp.1637-1647，2015

4.26) 法身祐治，林徹，太田匡信，佐藤高行：集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討その1　試験の概要，その2　試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.889-892，2016

4.27) 八木尚太朗，清家剛，山田哲，石田孝徳，吉敷祥一，上瀧敬太，テンデランランディ：鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含むALC外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験，日本建築学会技術報告集，第26巻，第64号，pp.869-874，2020

4.28) 野々山優輔，長江拓也，梶原浩一，神崎喜和，太田匡信：カーテンウォールの耐震性能を評価する数値解析とGyroによるセンサリングシステムのための実験研究，日本建築学会技術報告集，第27巻，第65号，pp.125-130，2021

4.29) 島田侑子，吹田啓一郎，山田哲，松岡祐一，多田元英，大崎純，笠井和彦：日本建築学会構造系論文集，第75巻，第653号，pp.1351-1360，2010

4.30) 朝日清公，前川尚里，宮北邦男，伊藤弘，西田和生，坂本功：－日米共同大型耐震実験研究（鉄骨造）44－鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験（その3．GRCパネルの実験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，C分冊，pp.801-802，1985

4.31) 高橋秀一，田中義治，小濱洋輔，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分冊，pp.1021-1022，1995

4.32) 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

4.33) 浅井英克，時野谷浩良，鈴井康正：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分冊，pp.1059-1060，2007

4,34) 橋爪慶介，飯島一成，上田俊英：非構造面材取付構造システムの開発と層間変位追従試験結果報告，日本建築学会技術報告集，第23巻，第55号，pp.777-782，2017

4.35) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS17ALCガラス工事，第4版，2003

4.36) 日本規格協会：「建築用シーリング材(JIS A 5758：2016)」，2019

第５章

結論

5.1　本論文で得られた知見

本論文では，金属パネルを用いた非構造外壁（金属外壁）を対象とした一連の構造実験を実施し，面内方向の変形追従機構と各種損傷状態に基づく変形限界について検討した．以下に，第2章～第4章で得られた知見をまとめる．

【第2章　金属パネルの施工に要する接合部の力学挙動】

第2章では，ファスナと胴縁間のボルト接合部および胴縁と金属パネル間のねじ接合部を対象とした要素実験を行い，各接合部に特有な力学挙動について検討した．第2章にて得られた結果を以下に示す．

[1] スロット孔を設けたボルト接合部のすべり係数は，標準孔を設けたボルト接合部と比べて，表面処理を溶融亜鉛めっきとした場合に4～6割，溶融亜鉛めっきとリン酸塩刷毛塗り，電気亜鉛めっき，電気亜鉛めっきと錆止め塗料，およびステンレスとした場合に3割程度低下した．

[2] 金属工事において採用される代表的な表面処理により確保される最大高さ粗さR_zは5～25μm程度であり，すべり係数は0.20程度であった．これらは，高力ボルト摩擦接合部に設計上要求される条件と比較するといずれも半分程度に相当する．

[3] 本実験の範囲では，すべり係数と接合部耐力比およびボルトの初期導入張力の相関は小さい一方で，すべり係数と接合面の表面粗さの相関は大きいことが分かった．ボルト孔形状が標準孔である実験結果は，高力ボルト摩擦接合部を対象とした既往の実験結果による回帰式上におおよそ位置することを確認した．ボルト孔形状がスロット孔である実験結果は，既往の回帰式に対して3割のすべり係数の低下を見込むと，偏心や一面せん断とした部分部材実験の結果を含めて概ね予測できることが分かった．

[4] ファスナと胴縁間のボルト接合部を想定した部分部材実験では，中層建物に想定される最大風圧力に基づく風荷重に対して，すべり係数が低い負圧時においても，ボルト接合部のすべり耐力が十分上回ることを確認した．なお，荷重が繰り返し作用する状況や部材の腐食による耐力低下を踏まえた評価は，今後の検討課題である．

[5] 胴縁と金属パネル間のねじ接合部では，はしあき方向の応力に対して，はし抜け破断またはねじの引き抜けによって破壊に至ることを確認した．また，ねじ接合部の最大耐力は，はしあき部のせん断破壊耐力，はしあき部の曲げ破壊耐力，ねじ切り刃側の引き抜け耐力，およびねじ頭部側の引き抜け耐力を考慮することで概ね予想できることを示した．

[6] ねじ接合部のはしあき部のせいに対するはしあき部の長さを指標として，はし抜け破断およびねじの引き抜けによる最大耐力を予想した．板厚が最も薄いパネルを用いた接合部ではやや過小評価となるものの，ねじ接合部のはしあき部の形状から，破壊形式と最大耐力が概ね評価できることを確認した．

【第3章　1ユニットの金属外壁要素の変形追従性能】

第3章では，1ユニットの金属外壁要素の試験体を用いて，地震時を想定した面内載荷実験を実施した．なお，ボルト接合部は第2章にて評価したすべり係数に基づいて，風荷重に対する構造安全性を有する条件とした．実験結果から，金属外壁一般部の変形追従機構を確認するとともに，各種損傷状態に基づいて面内方向の変形限界について検討した．また，第2章に示したねじ接合部の力学モデルを拡張し，金属外壁要素の破壊形式と最大耐力の評価を行った．第3章にて得られた結果を以下に示す．

[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ボルト接合部，ねじ接合部，胴縁，および残余分の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変形成分であり，金属パネルのロッキング挙動に伴うねじ孔の支圧やパネルの折り曲げ加工部分の変形によって生ずる水平方向の変形等を含むものである．

[2] 4体の試験体全てにおいて，金属パネルはロッキング挙動を示していることを確認した．ただし，これらは胴縁の回転に伴う見かけ上の挙動である．層間変形角1/67rad以降では，目視による観察時にねじ接合部のすべりを確認している．したがって，パネルは見かけのロッキング挙動に加えて，スライド方式によって変形に追従していると考えられる．

[3] 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．

[4] ファスナと胴縁間のボルト接合部は，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．すべり耐力は，外壁要素の試験体におけるボルト接合部の条件においても，第2章にて検証した評価方法により，接合面の表面粗さから概ね評価できることを確認した．一方で，ボルト接合部の耐風性能を確保した状態であっても，地震によって生ずる面内方向の層間変形角として1/100radに相当する変形以降ですべりが発生し，残留変形を引き起こすことが分かった．

[5] 試験体は，層間変形角1/17～1/15rad程度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，第2章にて考察したねじ接合部の耐力式によって，パネルの引張強さと板厚を用いて概ね評価できることを確認した．一方，パネルの引張強さと板厚の積が一定以上に到達すると，ねじ接合部の破壊形式がはし抜け破断からねじの引き抜けに変化することが分かった．

[6] 「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」に基づいて金属外壁の損傷程度の区分を評価すると，層間変形角1/100radまでは補修の必要がなく，層間変形角1/17radまで脱落等の可能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．

[7] 中低層鋼構造建物に採用される代表的な乾式非構造外壁の面内変形追従性能に関して，既往の研究成果を調査した．本章に示した実験結果と合わせて，ほとんどの外壁が層間変形角

1/200radまでは補修の必要なしに継続使用が可能であること，脱落や重要な機能の低下に至ら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を確認した．一方，層間変形角1/100rad程度からほとんどの外壁において補修や部品交換の必要が生ずることを確認した．層間変形角1/50rad程度以降では実験が不足しており，検証の余地があると言える．

【第4章　1層1スパンの金属外壁システムの変形追従性能】

第4章では，1層1スパンの実大鉄骨架構に複数の金属パネルを取り付けた外壁システムの面内載荷実験を実施した．第3章にて扱った試験体は外壁一般部と捉え，本章では外壁一般部に加えて開口，入隅および出隅を有する構面を合わせて，地震時に想定される金属外壁の損傷状態と各種変形限界について検討した．第4章にて得られた結果を以下に示す．

[1] 無開口の試験体では，初期載荷時から面外方向のパネルの浮き上がり，ねじ接合部のすべり，および間柱断面の局部的な変形を確認した．また，隅角部のパネルおよび胴縁の溶接部の破断は，直交梁に付随して水平方向に変形する間柱と，パネルの拘束によって強制変形を吸収した間柱との間で変形差が生じたことに起因すると考えられる．最終的には，外壁要素の試験体と同様に，パネルの亀裂，ねじ接合部のはし抜け破断，およびねじの引き抜けが確認された．

[2] 開口を有する試験体では，無開口の試験体と同様に初期載荷時からパネルの浮き上がり，ねじ接合部のすべり，および間柱断面の局部的な変形を確認した．横張りパネルと縦張りパネルの間に充填したシーリングでは，縦張りパネルと横張りパネルの回転角が異なることにより，無開口の試験体より早期に亀裂が生じた．載荷終盤には，外壁要素の試験体および無開口の試験体にて確認したパネルの亀裂やねじ接合部のはし抜け破断に加えて，ガラスの破壊を確認した．

[3] パネルの変形追従方式は，横張り工法によるパネルではスライド方式および見かけ上のロッキング挙動であると考えられる．一方，縦張り工法によるパネルではスロット形状のねじ孔を活用したロッキング方式であると考えられる．

[4] 初期剛性に関して，無開口の試験体は外壁要素の試験体の4.6倍程度を発揮している．これに対して，開口を有する試験体は外壁要素の試験体の2.9倍程度であり，隅角部に目地を設けることで面内方向の抵抗が低くなっていると考えられる．

[5] 試験体No.1と試験体No.2ともに，履歴挙動に対する載荷方向の違いはほとんど見られない一方で，載荷を開始した正側の耐力が負側の耐力をわずかに上回っている．これは，正側にて各種損傷が進展している影響であると考えられる．

[6] 試験体No.1，試験体No.2ともに，試験体に与えた層間変形角の半分以上が除荷時に残留していることが認められた．

[7] 第3章と同様に，金属外壁システムの損傷程度の区分を評価した．無開口の試験体は，層間変形角1/120radまで補修の必要がなく，層間変形角1/33radまで脱落等の可能性が低いことが分かった．また，開口を有する試験体は層間変形角1/200radまで補修の必要がなく，層間変形角1/50radまで脱落等の可能性が低いことが分かった．これらの変形限界は，第3章にて扱った外壁要素の試験体の変形限界を下回るが，シーリング，開口，入隅および出隅の損傷を踏まえた総合的な評価ができたと言える．

5.2　本論文の総括

本論文で得られた知見を以下にまとめる．

[1] 金属パネル，胴縁，ファスナ等によって構成する金属外壁は，面外方向に作用する風荷重に対して，ファスナと胴縁間のボルト接合部のすべりを防ぐことが求められる．第2章では，金属外壁におけるボルト接合部のボルト孔形状や表面処理の下で確保されるすべり係数が0.20程度であることが分かった．また，ファスナと胴縁を模した部分部材実験および第3章の外壁要素の試験体を用いた面内載荷実験の結果から，中低層建物に想定される最大風圧力に基づく風荷重に対して，十分上回るすべり耐力が期待できることを確認した．

[2] 金属外壁は，地震時に構造躯体が倒壊する以前に脱落や重要な機能の低下に至らないことが望ましい．第3章では，層間変形角1/17～1/15rad程度で，金属外壁がねじ接合部のはし抜け破断あるいはねじの引き抜けによって最大耐力に至ることを確認した．第4章では，層間変形角1/33～1/25radまでにはこれらの破壊が生じたものの，外壁システム全体では確認されず，明確な耐力の低下には至っていない．1ユニットの外壁要素においては，ねじ接合部のはし抜け破断時の面内荷重が，第2章にて考察したねじ接合部の耐力式から概ね評価できることを確認した．ただし，1層1スパンに拡張された外壁における同荷重の評価については，今後の課題である．

[3] 地震時に生ずる面内方向の層間変形に対して，ボルト接合部，ねじ接合部，胴縁，および残余分の変形成分によって金属外壁の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変形成分であり，パネルのロッキング挙動に伴うねじ孔の支圧やパネルの折り曲げ加工部分の変形によって生ずる水平方向の変形等を含むものである．パネルのロッキング挙動は，胴縁の回転に伴う見かけ上のものであり，層間変形角が比較的小さい段階から確認できる．変形追従方式として，横張り工法によるパネルでは見かけ上のロッキング挙動に加えてスライド方式を示す．一方，縦張り工法によるパネルでは，スロット形状のねじ孔を活用したロッキング方式を示すことを確認した．

[4] 第3章および第4章では，金属外壁の損傷状態と残留変形を整理し，損傷程度の区分に基づいて各種変形限界を評価した．パネル間のシーリングの亀裂およびパネルの亀裂は水密性や気密性が低下する原因となること，ねじ接合部のすべりおよびボルト接合部のすべりは外壁の残留変形が増加する原因となることから，補修の必要がある損傷と判断した．また，ねじ接合部のはし抜け破断，ねじの引き抜け，およびガラスの破壊は，外壁の脱落や重要な機能の低下の危険がある損傷と判断した．本実験の範囲では，無開口の外壁構面では層間変形角1/120radまで補修の必要がなく，層間変形角1/33radまで脱落等の危険性が低いこと，開口を有する外壁構面では層間変形角1/200radまで補修の必要がなく，層間変形角1/50radまで脱落等の危険性が低いことが分かった．

5.3　今後の課題

第2章では，想定される風荷重に対してボルト接合部のすべり抵抗が十分であることを確認するため，単調載荷実験によってボルト接合部のすべり係数を評価した．本研究では，最大風圧力による風荷重を検討対象としており，風荷重が繰り返し作用することによるすべり耐力への影響は考慮していない．また，ねじ接合部においても，風荷重の作用によってねじの締め付け力が低下し，早期に脱落や重要な機能の低下に至ることが危惧される．したがって，繰り返し載荷条件の下でボルト接合部およびねじ接合部の力学挙動を確認する必要がある．

第2章および第3章では，ねじ接合部の破壊による金属外壁の最大耐力を評価した．非構造外壁である金属外壁の耐震性能は変形追従性能によって示されるため，脱落や重要な機能の低下に至らない変形限界として変形性能を評価し，提示することが設計に対して有用である．

第3章と第4章では，補修の必要の有無から金属外壁の継続使用ができる変形限界を評価した．しかしながら，地震後の補修事例は現状ではなく，補修方法とその効果に関しては，外壁の継続使用の観点からも，早急に取り組むべき課題である．

また，第3章と第4章では，金属外壁の変形追従機構だけでなく，開口，入隅および出隅を含めて各種変形限界を検討した．ただし，金属パネルは材質，表面の加工方法，熱処理，塗装，板厚等の種類が豊富であり，製作金物として意匠的な要求に応じた柔軟な寸法が選択可能であることを踏まえると，本研究の結果は一例に過ぎないと考えられる．これは，鉄骨架構のディテールに対しても同様である．金属外壁の各部材の材質や寸法，鉄骨架構の接合部の条件を幅広く検証していくことによって，より信頼性の高い耐震性能の評価が可能になると考える．

―謝辞―

本論文は，指導教員である吉敷祥一先生をはじめ，多くの方々から多大なご支援，ご協力を頂き実現した研究の成果です．心より感謝し，厚く御礼を申し上げます．

東京工業大学教授　吉敷祥一先生
入学時より絶えず熱心にご指導頂きました．学習や研究に人よりも時間を要する筆者に対して，何度もご説明してくださり，些細な悩み事にまで優しく耳を傾けてくださいました．実験時には，先生自ら手を動かし，筆者らとともに困難に向き合ってくださいました．先生のお陰で，様々なことに挑戦する勇気をもつことができ，5年間のうちに貴重な経験を重ねることができました．また，研究室の学生だけでなく，周囲の人とのつながりを非常に大切にされる先生のように，研究活動を支えてくださる多くの方々への感謝の気持ちを忘れずに，今後も精進していきたいと思います．先生には感謝してもしきれません．

東京工業大学教授　元結正次郎先生
研究の内容だけでなく，研究の意義や位置付けといった観点から多くの貴重なご指摘，ご助言を頂きました．また，授業や学会の場では，学術的な事柄を誰に対しても分かりやすくご説明されている姿に大変感銘を受けました．先生にご教授頂いたことを今後の糧にして，精進していきたいと思います．

東京工業大学教授　石原直先生
研究発表の場を通して，温かい励ましのお言葉と，本研究対象の施工の観点から大変貴重なご指摘，ご助言を頂きました．また，実験から得られた現象をどのように説明すれば理解を得られるのか，という点でともに論文の作成に向き合って頂いたお陰で，自らの表現方法や説明方法について改めて省みることができました．

東京工業大学准教授　西村康志郎先生
本研究に関して鋭いご指摘やご助言を頂き，今後の研究の展望を広げることができました．また，実験の場でも度々温かくお声がけ頂き，研究室を越えて私たち学生の安全に気を配ってくださいました．今後は，筆者も先生のように広い視野をもって研究や実験に取り組んでいきたいと思います．

東京工業大学准教授　佐藤大樹先生
先生とは，筆者が学部4年時よりお会いする機会がありました．研究に関するご指摘やご助言だけでなく，研究生活も度々気にかけてくださり，いつも明るく接して頂きました．今後は，筆者も先生のように周囲を元気付けながら研究やプロジェクトを進めていけるように，尽力したいと思います．

愛知工業大学講師　巽信彦先生
筆者が大学院入学時より，研究面，生活面において大変お世話になりました．学生一人一人としっか

りと向き合う姿勢を大切にされていた先生には，愛知工業大学へのご栄転後にも，度々筆者の研究生活を気にかけて頂きました．今後は，筆者も先生のように学生の声を大事にしながら，研究に励みたいと思います．

豊橋技術科学大学助教　仲田章太郎先生

筆者が大学院入学時より，研究生活を通して大変お世話しました．博士学生ならではの悩み事や，先生方には伺えない程初歩的な質問をし合ったのは，筆者にとってとても良い思い出です．他にも，持ち前の陽気さで，学生同士の交流の中心となって，楽しい思い出をたくさん作ってくださいました．今後も互いに切磋琢磨していきましょう．

菊川工業　宇津野嘉彦様，佐藤秋雄様

筆者が大学院入学時より，研究を進める上で多くの貴重なご助言を頂きました．特に，入学当初は右も左も分からない筆者に対して，大変丁寧に研究対象についてご教示頂きました．また，研究プロジェクトの終了後にも，幾度も筆者の研究に対して技術的なご助言，ご指導を頂きました．

ロブテックス　中島一浩様

筆者が大学院入学時より，研究を通して大変お世話になりました．当時，研究分野に関する知識に乏しい筆者に対して，とても分かりやすく研究対象についてご説明頂き，大変嬉しく感じました．また，学会発表の場においても度々意見交換をしてくださり，研究に対する理解を深めることができました．

東京工業大学名誉教授　和田章先生，京都大学教授　高橋良和先生，東京工業大学教授　竹内徹先生，東京工業大学助教　寺澤友貴先生

筆者が携わった実験を通して，大変お世話になりました．寒かったり暑かったりと大変厳しい時期での実験となりましたが，何度も実験場までご足労頂き，激励を頂きました．また，実験で得られた結果に対して様々な考察を伺う中で，改めて実験の難しさや面白さを強く感じることができました．

建築研究所　長谷川隆様

筆者が携わった実験を通して，大変お世話になりました．実験場では明るくお声がけ頂き，筆者らの安全にも大変配慮してくださいました．また，研究の面白さについてもお話頂けたことは非常に印象に残っており，今後筆者が研究生活を送る上でも大切にしていきたいと思っています．

建築研究所　沖佑典様

筆者が携わった実験を通して，大変お世話になりました．実験やデータ整理を進める上で，筆者らが悩んでいることに対して，親身に向き合ってくださいました．また，先輩として研究だけでなく就職活動についてもお話頂き，大変励みになりました．

住友金属鉱山シポレックス　山下泰介様，クリオン　柴田益弘様

筆者が携わった実験を通して，大変お世話になりました．実験では，筆者らの安全に常に気を配って

頂いただけでなく，建築建材の将来や課題について，大変貴重なお話をたくさん伺いました．また，実際に建材が製作されていく様子を細部までご説明頂き，研究対象に対する関心や理解を非常に深めることができました．

広田鉄工所　廣田二郎様，亀田翔太郎様

筆者が大学院入学時より，実験治具の製作にあたって大変お世話になりました．幾度となく設計の修正をお願いする筆者に対して，いつも快く応じてくださいました．また，搬入・搬出の際にはとても明るく接して頂き，実験を遂行する上でも大変励みになりました．

東京大学教授　山田哲先生

筆者が修士課程の間，合同でゼミや実験を行う中で多くのご指摘，ご助言を頂きました．先生の研究室との交流のお陰で，多くの貴重な経験ができました．また，東京大学へのご異動後も，折に触れて筆者の研究生活を気にかけてくださり，温かい励ましのお言葉を頂きましたこと，大変嬉しく思います．

横浜国立大学准教授　石田孝徳先生

筆者が大学院入学時より，合同ゼミや実験を通して大変お世話になりました．横浜国立大学へのご栄転後も実験場等でお会いする機会があり，実験装置や重機の取り扱いについてご教示頂きました．まだまだ不安で至らない所ばかりですので，いつでもご指導お待ちしております．

千葉大学准教授　島田侑子先生，東京都市大学　焦瑜先生

筆者が大学院入学時より，合同ゼミや実験，学会の場などにおいて，明るく，気さくにお声をかけて頂きました．また，女性研究者の先輩として貴重なお話をお聞かせくださったり，研究の面だけでなくプライベートの面まで親身に相談に乗ってくださったりと，大変勇気づけて頂きました．

東京工業大学教授　河野進先生

筆者が大学院入学時より，研究に関するご指摘やご助言だけでなく，実験場においても温かくお声がけを頂きました．様々な国からの留学生が在籍する先生の研究室との交流は，大変新鮮で楽しい思い出となりました．

東京工業大学助教　Alex Shegay先生

筆者の研究に関して貴重なご助言，ご指摘を頂いただけでなく，筆者の研究や就職活動についても応援してくださいました．また，筆者が修士課程の時に参加したワークショップでは，英語での発表を褒めてくださり，大変嬉しく感じました．お陰様で国際学会の場では，不得意だった英語を使いながらも自信を持って発表することができました．

東京工業大学助教　Pradhan Sujan先生

同じ実験施設を利用する中で，着任早々幾度もご迷惑をおかけしましたが，その都度，温かくフォローして頂きました．今後は，一つ一つの実験がよりスムーズに，安心して気持ちよく行えるように，

精進していきたいと思います.

東京理科大学特任副学長　北村春幸先生

筆者が学部在籍時に大変お世話になりました．いつも気さくにお声をかけて頂き，私たち学生が安心して研究に取り組むことができるように配慮してくださいました．1年という短い間でしたが，研究室の一員として，学生生活を謳歌することができました.

電力中央研究所　金澤健司様

筆者が学部4年時に大変お世話になりました．研究の右も左も分からない筆者に対して，何度も厚いご指導を頂きました．また，論文提出締切の直前には大学までご足労頂き，論文作成にお力添え頂いたお蔭で現在の筆者があると言っても過言ではありません.

工学院大学助教　松田頼征先生

筆者が学部在籍時に大変お世話になりました．授業などを通して，筆者の些細な質問や相談に大変丁寧に対応して頂きました．また，研究室への配属後も，度々研究や進学を応援してくださり，大変嬉しく思いました.

吉敷研究室補佐員　大久保元子様、遠藤祐子様、永見英子様

筆者の研究生活を身近で支えて頂きました．出張や物品の発注の際には，度々丁寧なご説明を頂きました．また，いつも明るくお声をかけて頂き，私たち学生一人一人の研究生活を気にかけてくださったお陰で，安心して研究に取り組むことができました.

吉敷研究室修了生，在学生の皆様（&山田哲研究室修了生の皆様）

研究活動をともにするだけでなく，色々な所に行ったり食事をしたりと，本当にたくさんの充実した時間を過ごすことができました．とても尊敬でき，信頼できる先輩，後輩，そして同期の皆様のお陰で，研究に励み続けることができました.

最後に，長い長い学生生活を経済的にも精神的にも支えてくれた両親と家族に心から感謝いたします．本当にありがとうございました．ここに記しきれないほど多くの方々に（筆者が気づいていないところでも？）支えられてきたことを胸に刻んで，今後一層精進していきたいと思います.

2023年3月1日