

(論文)

ドーム型アルミトラス構造の開発

杵淵雅男*・築城彰良**・高根 一***・田中勝巳****・野原 章*****

*技術開発本部・機械研究所 **都市環境・エンジニアリングカンパニー・構造技術部 ***都市環境・エンジニアリングカンパニー・都市システム営業部
****アルミ・銅カンパニー・アルミ押出・加工品営業部 ***** ㈱コベルコ科研

Development of a Dome-type Aluminum Truss Structure

Masao Kinefuchi・Akira Tsuiki・Hazimu Takane・Katsumi Tanaka・Akira Nohara

In a newly developed dome-type aluminum truss structure, the H-shaped beam aluminum flange and attached plate were joined with special high-tension bolts. In this study, the joint shear strength was investigated and a method for estimating the shear strength, based on plastic hinge theory, was developed. Results showed that a high slip coefficient was obtained by inserting an SUS-rollet plate between the joint contact.

まえがき = アルミの建築構造部材への適用が、アルミ建築協議会で検討されており、設計規準の取りまとめが行われている¹⁾。当社でもアルミ形材を構造部材として使用した建築構造の開発を進め、建設大臣（現国土交通大臣、以下同じ）の特別認定を取得して、2000年10月に、当社第1号物件となるドーム型アルミトラス構造（ふれあいドーム）を、当社神戸総合技術研究所内に完成した。本構造は、従来のアルミトラス構造にしばしば使用されている、パイプトラス材をクリスマスツリー型ジョイントやボールジョイントを用いて機械的に接合する構造とは異なり、アルミH形材をトラスに用い、高力ボルトにより摩擦接合する構造を採用した。この構造は、接合部が剛結合となるためシングルレイヤー化が容易で、シンプルなデザインを実現できること、またトラス組立が容易であることなどのメリットを有している。

本稿では、アルミトラス構造の開発において重要な技術課題の一つである、接合部の強度信頼性に関する検討結果を報告する。

1. 建築概要

開発したドーム型アルミトラス構造を写真1及び図1に示す。ドーム部分の直径は16m、ライズは1.875mであり、アルミH形材（H-125×100×4.5×6、長さ約2m）により構成されており、屋根部分にはガラスパネルとア



写真1 ドーム型アルミトラス構造
Photo 1 Dome type aluminum truss structure

ルミパネルを用いている。なお、柱及びドーム屋根を支えるリングビームには鋼を用いている。

ドーム屋根の接合部の一例を写真2に、その概要を図2に示す。アルミH形材のフランジと、直径約400mmのアルミ製添接板とを、溶融亜鉛めっき高力ボルトにより剛接合した構造となっており、接合面には、5項で報告するステンレス板にローレット加工を施したもの（SUSローレット板）をはさんで、すべり係数を確保した。複数のH形材が集まるこの接合部は、ウェブを突合わせてボルト接合することができないため、添接板間には空間がある。

本トラス構造の施工においては、トラス部材が1本あたり約10kgと軽量であるため、人力での組立が可能である。また、地上で組立てた後、油圧ジャッキによるリフトアップ工法と、クレーンで吊上げて据付ける工法の双方が可能である。したがって、鉄骨トラスに比して施工コストを圧縮することができたため、トラス部の材工コストは鉄骨トラスと同等となった。

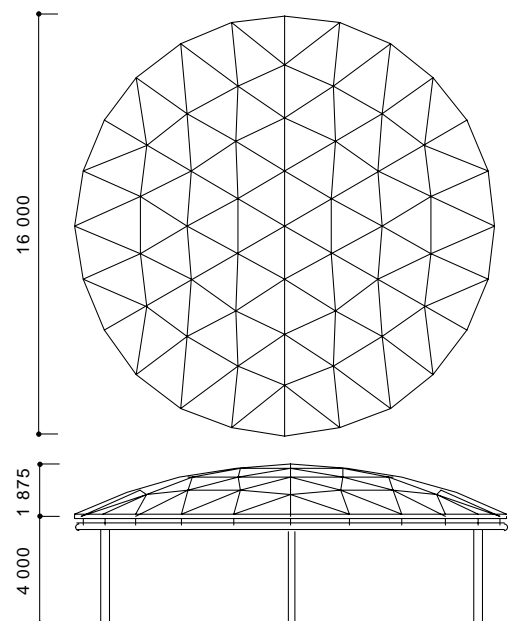


図1 構造概要
Fig. 1 Schematic of dome type aluminum structure

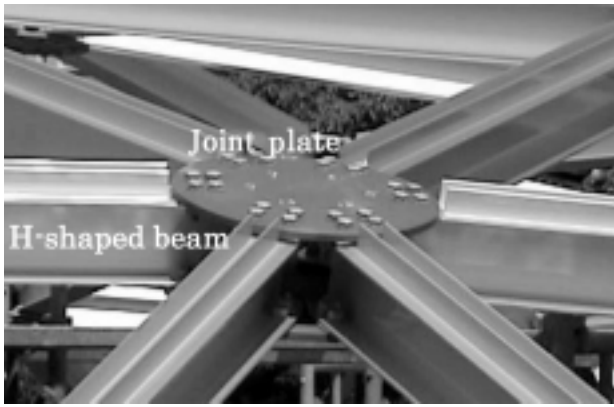


写真2 接合部の構造
Photo 2 Joint part

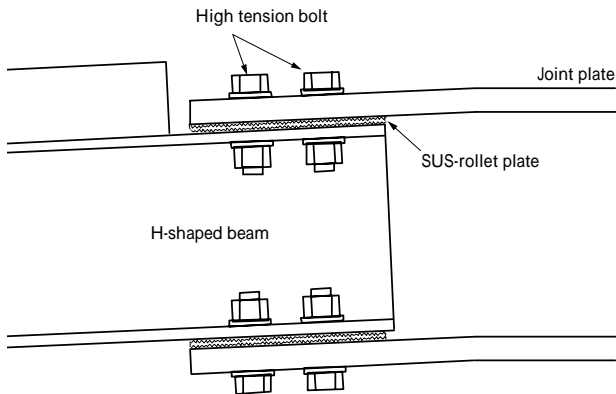


図2 接合部の概要
Fig. 2 Schematic of joint part

2. 接合部の検討課題

本接合構造は、せん断力を伝達するウェブが添接板中央部に存在しないため、設計のためには接合部のせん断耐力に対する評価法の確立が必須である。さらに、アルミ部材に高力ボルト接合を採用する際には、接合部のすべり係数を確保するために、摩擦面にショットブラスト処理を施すことが推奨されている¹⁾²⁾が、ブラスト条件や高力ボルトの施工方法などの詳細は未だ標準化に至っていない。したがって、接合部が十分な耐力を発揮するまでボルト部分がすべりを起こさない十分な強度を有し、かつ低コストの接合方法を確立する必要がある。

3. 接合部のせん断耐力に関する検討

本項では、せん断耐力の評価のために実施した、せん断実験の結果について述べる。

3.1 実験計画

実部材は、6本のH形材を1組の添接板で接合するが、実験でこの状況を再現するのは困難なため、実験は2本

のH形材の接合部について実施した。実験に用いた試験体を図3に示す。試験体に用いたのはA5083-H112及び溶融亜鉛めっき高力ボルト(F8T-M16)である。表1に機械的性質を示す。板材を溶接して製作したアルミH形部材(H-125×100×4.5×6)と添接板(厚さ12mm)の間に、SUSローレット板をはさんでボルト締結(締付トルク171N・m, 予定張力92.2kN)により試験体を製作した。

荷重治具の概要を図4に示す。この治具を介して接合部にせん断力を荷重した。荷重装置は1000kN万能試験機を用い、単調荷重及び繰返し荷重試験を実施した。繰返し荷重パターンを図5に示す。繰返し荷重の正負反転

表1 機械的性質
Table 1 Mechanical properties

Material	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Beam	162	319	27.6
Joint plate	132	299	27.8

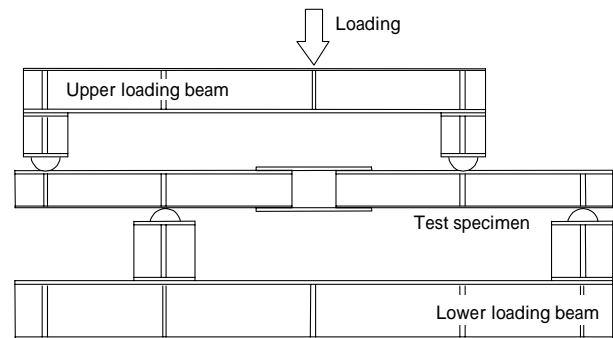


図4 荷重装置の概要
Fig. 4 Schematic of loading instrument

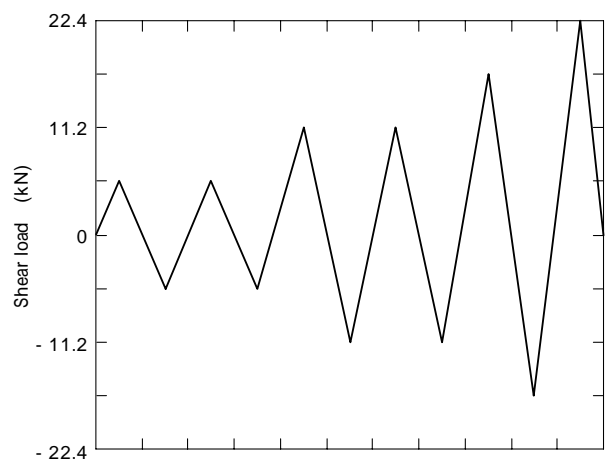


図5 繰返し荷重パターン
Fig. 5 Cyclic loading pattern

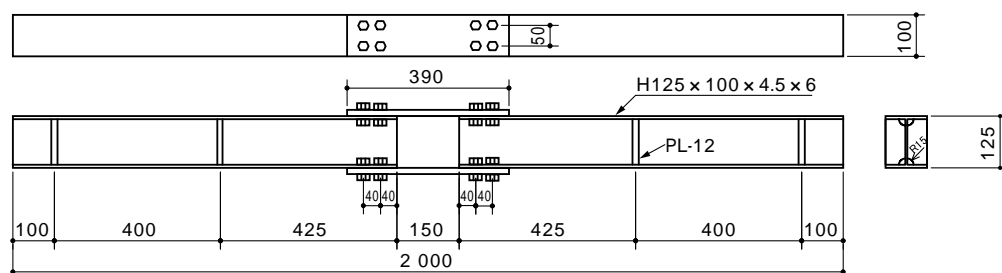


図3 試験体形状
Fig. 3 Test specimen

は、試験体を上下逆に置換えることで実現した。試験中には荷重、ストロークに加えて、試験体のたわみと試験体のひずみを測定したが、ここでは詳細は省略する。

3.2 実験結果

写真3に単調荷重実験終了後の試験体の状況を示す。H形部材の材端付近の添接板に、塑性ヒンジが生じていることがわかる。なお、試験終了まで接合部のすべりは発生しなかった。

図6には、添接板に発生したひずみとせん断力の関係を示す。塑性ヒンジ付近のひずみはせん断力が10kN付近より塑性変形を開始してひずみが増大しているが、中央部のひずみは弾性範囲内に収まっている。図中の一点鎖線は、塑性ヒンジ理論³⁾により計算される添接板のせん断耐力である。仮定した塑性崩壊モードを図7に、塑性崩壊式を式(1)に示す。

$$Q_p = 2b \cdot r_y / ((2S/t)^2 + 3)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

b : 添接板幅 (フランジ幅)

t : 添接板の板厚

r_y : 添接板の降伏応力

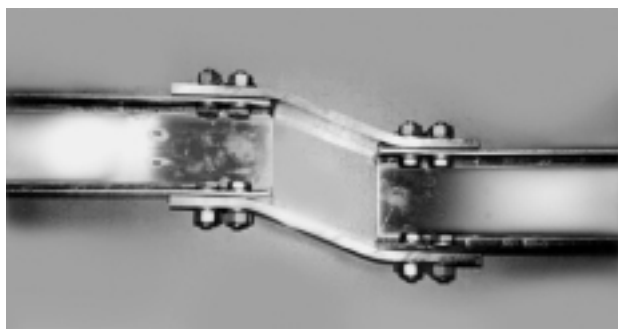


写真3 せん断実験後の試験体
Photo 3 Test specimen after shear test

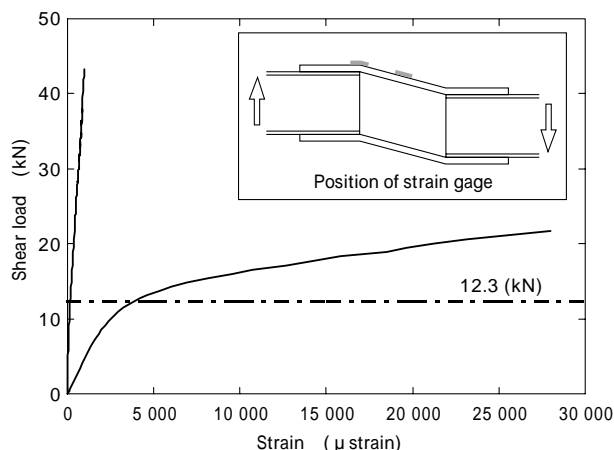


図6 せん断力とひずみの関係 (単調荷重時)
Fig. 6 Relation between shear load and strain (monotonic loading)

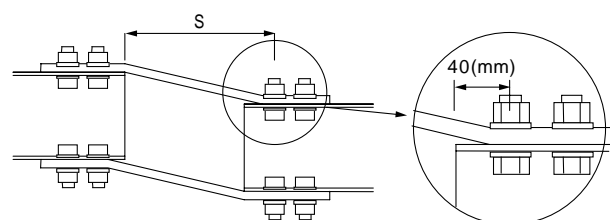


図7 塑性ヒンジモード
Fig. 7 Mode of plastic hinge

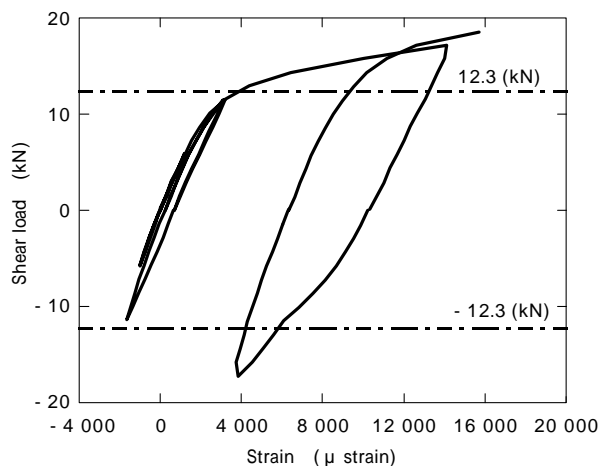


図8 せん断力とひずみの関係 (繰返し荷重時)
Fig. 8 Relation between shear load and strain (cyclic loading)

S : アルミ部材間の距離

写真3からわかるように、塑性ヒンジは一方ではH形部材の材端に生じているが、もう一方は材端ではなくボルト部分に生じている。したがって、ここでの S は、一方の材端から他方のボルトまでの距離をとって計算した。図6の一点鎖線は式(1)より計算した値であり、これより添接板の塑性化を安全側に評価できることがわかる。

図8には繰返し荷重時のせん断力とひずみの関係を示す。式(1)で求めたせん断耐力範囲内では、比較的安定した変形挙動を示すことがわかる。

以上の結果から、2本のH形部材の接合部では、塑性ヒンジ理論によりせん断耐力が安全側に評価できることが明らかとなった。

4. 接合部の応力解析結果

本項では、3項で得られた結果を実部材の接合部に応用するため、H形材6本の接合部を想定し、FEM解析により接合部のせん断耐力評価を行った結果を示す。

4.1 解析方法

図9に接合部のFEM解析モデルを示す。アルミH形材はシェル要素で、添接板はソリッド要素でモデル化し、H形材と添接板の接触面は剛結とした。このモデルに対して、弾塑性有限変位解析を実施した。解析に使用した

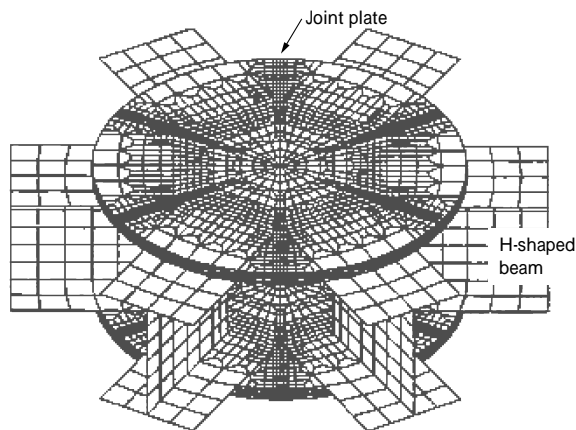


図9 FEM解析モデル
Fig. 9 Model of FEM analysis

表2 機械的性質（解析時）

Table 2 Mechanical properties (FEM analysis)

Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)
70	0.3	100

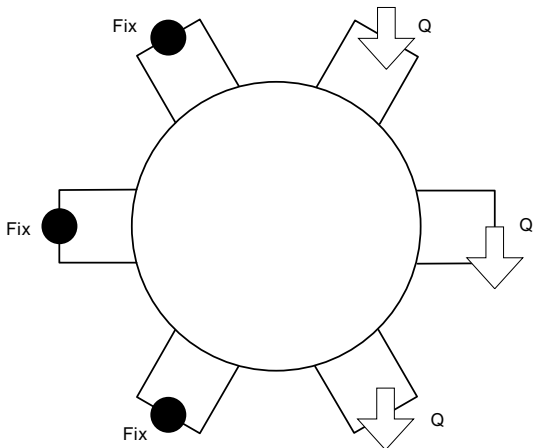


図10 載荷パターン
Fig.10 Loading pattern

物性値は表2のとおりであり、完全弾塑性を仮定して、汎用有限要素法解析コード「ABAQUS」⁴⁾を用いて解析を行った。

6本の部材に対する拘束条件と荷重条件は種々考えられるが、予備解析の結果、図10の条件が最も厳しい条件であることがわかった。以下では、この条件での解析結果を報告する。

4.2 解析結果

図11に変形図を示す。楕円で囲まれた部分に塑性ヒンジが生じた。図12に載荷端のせん断力と負荷方向の変位の関係を示す。図中の一点鎖線は板幅をフランジ幅として式(1)で計算される添接板のせん断耐力である。この結果から、添接板のせん断耐力は式(1)により評価できることがわかる。

以上の結果から、実部材の接合部せん断耐力は、添接板の有効幅 b をフランジ幅とし、材間距離 s をH形材端から反対側のボルトまでとすることで、塑性ヒンジ理論により安全側に評価できることが明らかとなった。

接合部の設計には、せん断耐力のほかに、添接板の座屈及び曲げ耐力の検討が必要であり、各条件に対して接

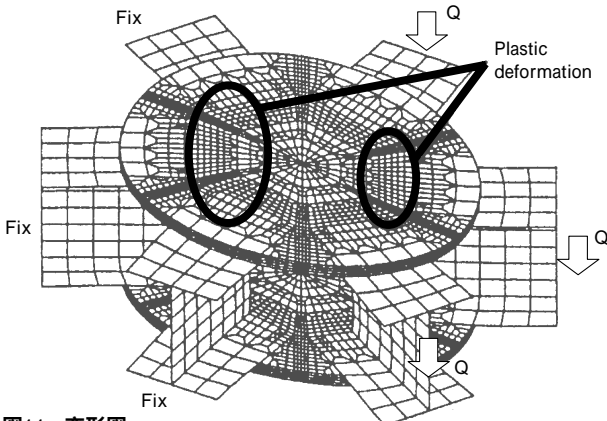


図11 変形図
Fig.11 Deformation diagram

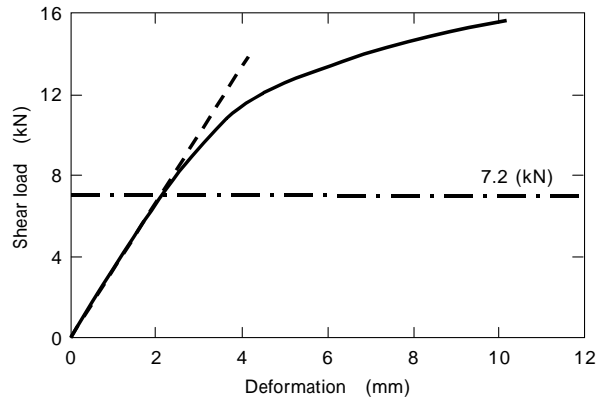


図12 せん断力と変位の関係
Fig.12 Relation between shear load and displacement

合部が安全となるように、実部材の接合部寸法を決定した。

5. 高力ボルト接合部のすべり耐力評価

本項では、高力ボルト接合部の2面せん断試験を行い、ショットブラストを用いなくて、簡便に施工できる摩擦面処理法について検討した結果を示す。

5.1 試験方法

試験素材には、押出材 6063-T5 及び鋳造合金 AC4C-T6 を用いた。それぞれの機械的性質を表3に示す。まず一次検討として、母材と添接板の両方とも 6063-T5 を用い、溶融亜鉛めっき高力ボルト F8T-M16 を用いて試験体を製作し、種々の摩擦面処理を施して、1 000kN 万能試験機により単調引張試験を行い、高いすべり荷重が得られる方法を探索した。そして、良好な結果が得られた方法について、実物件を考慮した母材 (6063-T5)、添接板 (AC4C-T6)、高力ボルト (F8T-M12) の組合わせで、さらに塗装の影響も加味した試験体により、すべり耐力試験⁵⁾を実施した。

摩擦面処理は、添接板に荷重軸垂直方向の溝加工を施したものを、SUS プレートに両面ローレット溝加工を施して接合面に挿入したもの (溝は荷重軸に垂直)、SUS ワイヤメッシュ (ワイヤ径 0.4mm、ピッチ 2.5mm) を接合面に挿入したもの、シリカ砂を接合面に挟み込んだものを検討した。溝形状を図13にまとめる。図14には、試験体形状を示す。なお、ボルト締めは、一次検討では標準ボルト張力とトルク係数より算出されるトルク (184N・m) まで締め付けを行った。すべり耐力試験ではナット回転法⁵⁾⁶⁾を用い、一次締め後にナットを 60 ~ 80° 回転させた。またボルト軸部に歪みゲージを貼付け、ボルト軸力も測定した。

試験時には荷重、変位 (変位計)、母材と添接板の相対変位 2 か所 (クリップゲージ) を計測した。

表3 機械的性質
Table 3 Mechanical properties

Material	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
6063-T5	179	207	24
AC4C-T6	216	303	10

図13 溝形状
Fig.13 Shape of groove

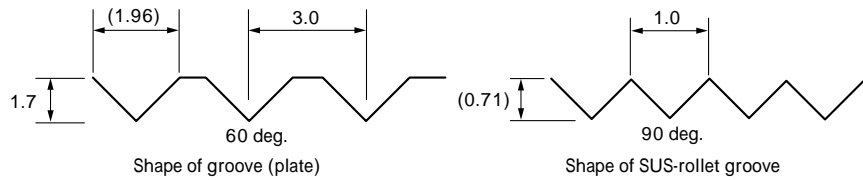
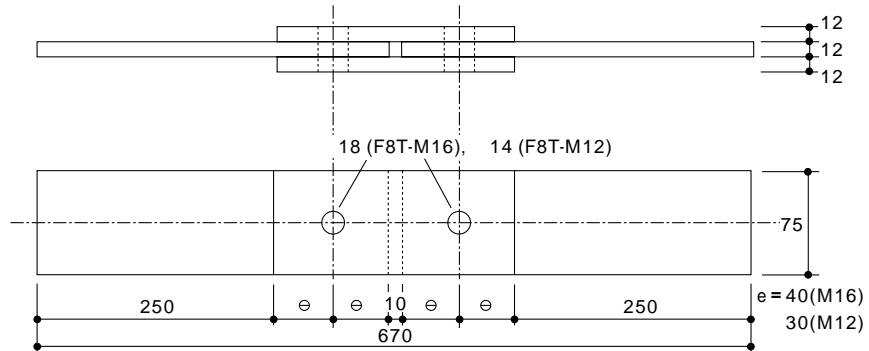


図14 試験体形状
Fig.14 Test specimen



5.2 試験結果及び考察

5.2.1 一次検討結果

得られた荷重-ストローク関係をまとめて図15に示す。これをみると、いくつかの特徴がわかる。

1) 添接板溝加工，ローレット板挿入，砂挟み込みでは荷重-ストローク関係の立上がり部分の勾配がほぼ同じであるのに対し，ワイヤメッシュでは，その勾配が小さい。

2) 添接板溝加工，ローレット板挿入，砂挟み込みは，荷重低下を伴うすべりが発生しているが，ワイヤメッシュでは荷重低下を伴うすべりは発生せず，100kN付近で荷重増加が一時停止した領域が認められる。

3) ローレット板挿入，砂挟み込みでは，荷重低下を伴うすべりが生じるまで，荷重-変位曲線の勾配があまり変化していないが，添接板溝加工では60kN付近で勾配が変化し，その後荷重低下を伴うすべりが発生している。

4) 砂挟み込みは，アルミ母材（未処理）程度のすべり荷重²⁾であり，すべり荷重の向上は認められない。

以上の結果から考察すると，以下ようになる。

ワイヤメッシュが初期から変形が大きいのは，アルミとメッシュの噛み込み効果は得られているが，SUS針金同士の噛み込みが不十分で，この部分がすべりを起こすためではないかと推測される。

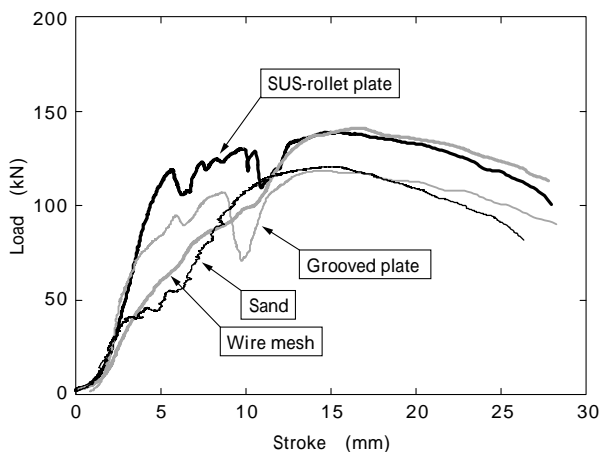


図15 荷重とストロークの関係
Fig.15 Relation between load and stroke

添接板溝加工が明確なすべりを発生する前に勾配が変化した原因は，噛み込み部に存在する平坦部分のため，噛み込み効果が不十分で微小なすべりが発生した，また噛み込んだ角部もアルミであるため，強度の高いSUSローレット板より角部が早期に変形しはじめたなどの理由が考えられる。

砂挟み込みのすべり荷重が小さいのは，接合面で砂の粒子が粉碎され，噛み込み効果が得られなかったためである。したがって，粒子を挟み込ませる場合は，硬質の金属粉末などを用いるべきであろう。

表4には荷重低下を伴うすべり変形時，もしくは荷重の停止が認められた時の荷重（これをすべり荷重と定義する）を示す。砂挟み込み以外は高いすべり荷重が得られているが，早期に大きな変形を起こす場合，繰返し荷重が作用する実構造物では変形が蓄積され，すべり荷重が低下する可能性が考えられる。したがって，最も良好な特性が得られたと考えられるSUSローレット板挿入について，すべり耐力試験を実施した。

5.2.2 すべり耐力試験結果

すべり耐力試験は，アルミ表面にアルマイト処理+焼付塗装を施してから試験体3体を製作し，ボルト締めから24時間以上経過した後実施した⁵⁾。得られた荷重-相対変位関係の例を図16に示す。この図から，荷重が初期勾配を保って直線的に増加し，わずかに初期勾配を外れたところですべりが発生している様子が見える。

表5には，得られた結果をまとめる。本試験ではボルト張力も測定しているため，すべり係数も計算し，その平均と標準偏差も示した。平均 $\pm 2\sigma$ をとると，すべり荷重とすべり係数は以下の範囲になる。

すべり荷重：48.7～63.9kN

すべり係数：0.456～0.564

表4 すべり荷重

Test specimen	Slip load (kN)
Grooved plate	95
SUS-rollet plate	119
Wire mesh	99
Sand	41

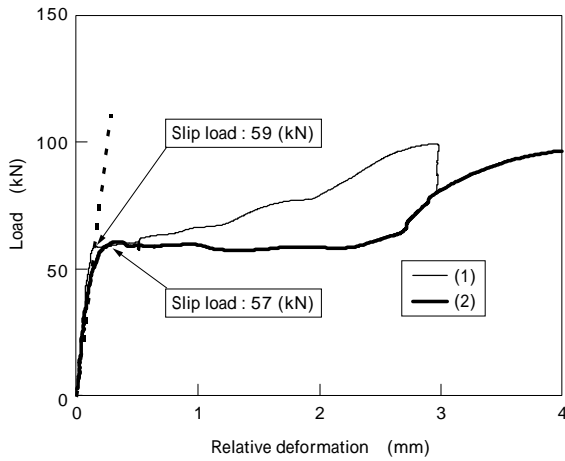


図16 荷重と相対変位の関係
Fig.16 Relation between load and relative displacement

表5 すべり耐力試験結果
Table 5 Results of slip load test

Test specimen		Slip load (kN)	Slip coefficient
No.1	(1)	62	0.54
	(2)	52	0.50
No.2	(1)	59	0.54
	(2)	57	0.52
No.3	(1)	55	0.48
	(2)	53	0.48
Average		56.3	0.510
Standard deviation		3.8	0.027

ここで、すべり係数を 0.45 としたときのすべり耐力試験結果の判定式⁵⁾は、式(2)の通りである。

$$\text{すべり荷重} = 1.2 \times \text{設計ボルト張力} \times 0.45 \times \text{摩擦面数} \times \text{ボルト本数} = 48.4\text{kN} \dots \dots \dots (2)$$

したがって、本方式の継手は十分なすべり耐力を有しており、ばらつきの範囲もすべり係数で0.1程度になると考えられる。さらに、SUS ローレット板の挿入によりすべり耐力を確保するため、摩擦面処理とその後の処理面の保護も不必要となり、施工管理上のメリットも有すると推測される。

むすび=本稿では、ドーム型アルミトラス構造の開発において、重要な技術課題の一つである、接合部のせん断耐力評価法、及び高力ボルト摩擦接合時の摩擦面処理に関する検討結果を報告した。得られた主な結果を以下にまとめる。

1) アルミH形材のフランジ部を、添接板と高力ボルトを用いて剛結合した接合部の、せん断耐力評価法を検討した。その結果、6本の形材が集まる実構造接合部に対して、アルミ形材のフランジ幅を有効幅とし、材間距離を材端から反対側のボルトまでとして、塑性ヒンジ理論によりせん断耐力を評価できることがわかった。

2) 高力ボルト接合における、ショットブラストにかわる摩擦面処理法を検討した結果、SUS ローレット板を接合面に挿入すると、高いすべり耐力が安定して得られることがわかった。

以上の検討より、ドーム型アルミトラス構造の接合部設計が可能となり、建設大臣の特別認定を得るための一助となった。今後、新規物件の設計にこれらの結果を反映していく。

最後に、本研究に有益な助言を頂いた信州大学工学部中込忠男教授に謝意を表す。

参考文献

- 1) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造設計規準(案),(1999)
- 2) 西形啓幸ほか：日本建築学会学術講演梗概集(1992)p.1605.
- 3) 例えば Hodge: 構造物の塑性解析, コロナ社.
- 4) ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc(1999)
- 5) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針(1997)
- 6) アルミニウム建築構造推進協議会：アルミニウム建築構造物製作施工要領書・同解説(案)(1999)