

産業安全研究所安全資料

SAFETY DOCUMENT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

NIIS-SD-NO.18 (2003)

くさび式足場の強度

目 次

1. はじめに	(2)
2. くさび式足場の種類と実験概要	(2)
3. 実験方法	(3)
4. 解析方法	(8)
5. 実験結果と考察	(11)
6. 解析結果と考察	(17)
7. おわりに	(19)
付録 結合部の曲げ実験における荷重と変位の関係	(21)



くさび式足場の強度

目 次

1．はじめに	(2)
2．くさび式足場の種類と実験概要	(2)
3．実験方法	(3)
4．解析方法	(8)
5．実験結果と考察	(11)
6．解析結果と考察	(17)
7．おわりに	(19)
付録 結合部の曲げ実験における荷重と変位の関係	(21)

Strength of Wedge Joint Scaffolds

CONTENTS

1 . Introduction	(2)
2 . Types of Wedge Joint Scaffolds and Outline of Experiments	(2)
3 . Experiment Methods	(3)
4 . Analysis Methods	(8)
5 . Results of Experiment and Discussion	(11)
6 . Results of Analysis and Discussion	(17)
7 . Conclusion	(19)
Appendix : Relations between Load and Displacement on Bending Tests of Joints	(21)

Safety Document of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-SD-NO.18(2003)
UDC 624.046: 620.173.26

くさび式足場の強度

大幢勝利* , 高梨成次* , 日野泰道*

Strength of Wedge Joint Scaffolds

by Katsutoshi OHDO* , Seiji TAKANASHI* , Yasumichi HINO*

Abstract : In recent years, various patterns of the wedge joint scaffolds based on the assembling of the wedge part of the horizontal member and the guide for the wedge of the vertical support member have been invented and used in many construction sites. However, there are very few data on this type of scaffolds and their performances are still not clearly known. Consequently, the standard of the general type of pipe scaffolds is applied for this wedge joint scaffolds in construction.

Since the connection joint of the wedge scaffolds is different from the clamp used in the pipe scaffolds, the strength of the wedge joint scaffolds that are erected based on the standard of the pipe scaffolds is not known. Moreover, a problem on the wedge fitting at the connection joint of the wedge scaffolds that can possibly get loose during construction, which decreases the strength of the scaffolds, also needs to be clarified.

The purpose of this document is to obtain the data that can be used as a standard for considering safety on using of the wedge joint scaffolds by experiments and analyses. The experiments on 4 patterns of the wedge joint scaffolds erected based on the standard of the pipe scaffolds were conducted and the effects of the loose-fitting wedge joint on the strength of the scaffolds were studied by using the Finite Element Method (FEM) analysis. The results were compared between the cases of the wedge joint scaffolds and the pipe scaffolds, in which the main conclusions can be listed as follows:

1. Based on the results of the bending tests of the wedge joint, rotational rigidity of the wedge joint which affects the buckling strength of the scaffolds is lower than that of the clamp of the pipe scaffolds in some cases.
2. Based on the same experiment condition of applying vertical loads on all vertical supports of the 6 story-3 bay scaffold, the strength of the wedge joint scaffolds is higher than that of the pipe scaffolds.
3. From the results of the horizontal load tests to prevent failure from buckling of the wedge joint scaffolds, it is found that the cross bracing should be used in the same way as the pipe scaffolds.
4. The FEM analysis on the buckling strength is found to be very effective and gives very close results to those obtained from the experiments.
5. From the FEM analysis, depends on the location of the connection joint that the wedge fitting got loose, the buckling strength of the scaffolds can decrease a lot, even there is only one place of a loose-fitting wedge. Especially, if the location of the loose-fitting wedge of the horizontal member is near the location of ties, the buckling strength can considerably decrease.

Keywords ; Wedge joint, Scaffolds, Buckling strength, FEM, Construction

1. はじめに

近年、建築工事用足場において、支柱に取り付けられた受け金具に、布材端部に取り付けられたくさびを打ち込むことにより両者を結合する方式の足場が数多く開発され、足場先行工法など様々な現場で使用されている。これらのくさび式足場については、実験データが少なく強度特性が明らかにされていないため、通常は単管足場の法規制や組み立て基準に従って使用されている。

しかし、くさび式足場に使用されるくさび結合部は、単管足場の緊結部に使用される緊結金具（一般にクランプ）とは構造が異なるため、両者の強度特性には相違があると考えられる。このため、単管足場の組み立て基準に従った場合、くさび式足場全体としての強度等に不明確な点が残されている。また、くさび式足場は、使用中に結合部の緩み等が発生する可能性があり、この緩みにより結合部の強度が低下し、足場全体の強度も低下することが懸念される。

そこで、くさび式足場の安全性を確保するための基礎資料を得ることを目的として、単管足場の組み立て基準に従った場合の様々な種類の実験、およびくさびの緩みの影響について検討するための数値解析を行っ

た。本資料では、これらの結果を基に、くさび式足場の強度を単管足場の強度と比較し、くさび式足場の安全な使用方法等について示した。

2. くさび式足場の種類と実験概要

くさび結合部には多くの種類があるが、その中から代表的なものとして、Fig.1～Fig.4に示すA、B、C、Dの4種類の形状を持つくさび結合部を対象に、以下に示す4種類の実験を行った。A、B、C、Dとも支柱の寸法は、単管足場と同様に外径48.6mm、内径2.5mmであるが、布材の寸法は単管足場の48.6mm、2.5mmとは異なり外径42.7mm、内径2.3mmである。実験の概要は、次のとおりである。

2.1 結合部の性能実験

足場の強度は結合部の回転剛性に大きく影響を受けるため、結合部の曲げモーメントに対する性能を、単管足場に用いられる緊結金具と、くさび式足場に用いられる各種のくさび結合部について明らかにする。

2.2 高さの異なる足場の座屈強度実験

単管足場の壁つなぎ間隔は、労働安全衛生規則では垂直方向に5.0m以下に設置することとされている。

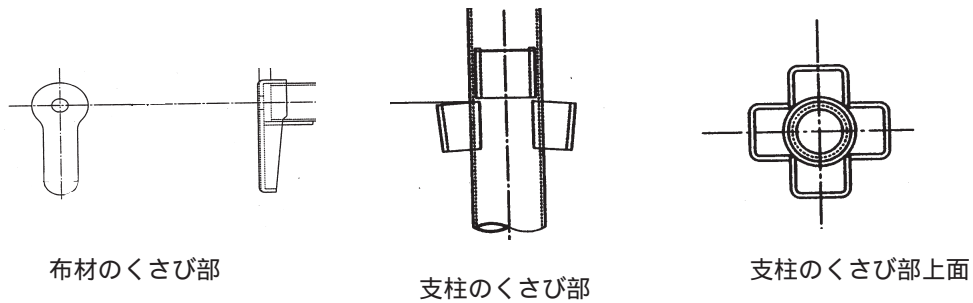


Fig. 1 Shape of wedge joint type A.
くさび結合部 Type A の形状

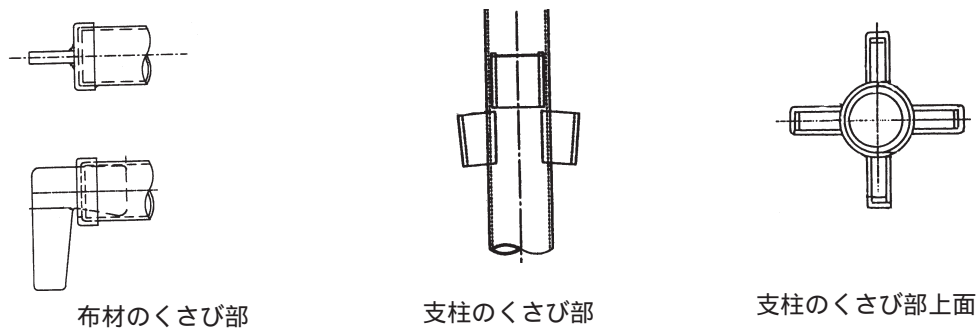


Fig. 2 Shape of wedge joint type B.
くさび結合部 Type B の形状

このため、足場の座屈長を5.0mを挟んで3.6m～5.7mとした2層または3層の四角塔(製品によって1層の高さが1.8mか1.9mと異なる)に対し座屈実験を行い、単管足場と各種くさび式足場の性能の差を比較検討する。

2.3 壁つなぎを使用した足場の座屈強度実験とその解析

単管足場の壁つなぎの水平間隔は、労働安全衛生規則では5.5m以下とされている。このため、壁つなぎをこの間隔で設置した場合、足場には壁つなぎの拘束を受けない支柱が存在し、足場の剛性の大小により座屈強度が影響を受ける。これを、壁つなぎの拘束を受けない支柱のみに載荷する部分荷重実験と、壁つなぎの拘束を受ける支柱も含めた全体荷重実験で確認する。

2.4 斜材効果に関する水平変位実験

座屈を防止するため足場の構面には斜材を取り付け

るが、単管足場の場合には、1本の単管を複数の支柱に緊結金具で取り付けられた大筋交いが使用されている。一方、くさび式足場の場合には、くさび結合を利用した専用斜材を1層1スパン毎に個々に取り付けることが多い。そこで、足場の構面に取り付けられる斜材の効果を水平変位実験により調べ、安全を確保するための斜材の取り付け方法について検討する。

3. 実験方法

3.1 結合部の性能実験

(1) 結合部の曲げ実験

Fig.5～Fig.7に示すように、支柱と布材の結合部のみを切り出し、布材の支点間隔を300mm(緊結金具は加力治具と支点間150mm)として中央の支柱に荷重を載荷することにより、結合部に曲げモーメントを作用させる実験を行った。実験では、支柱に作用する荷重

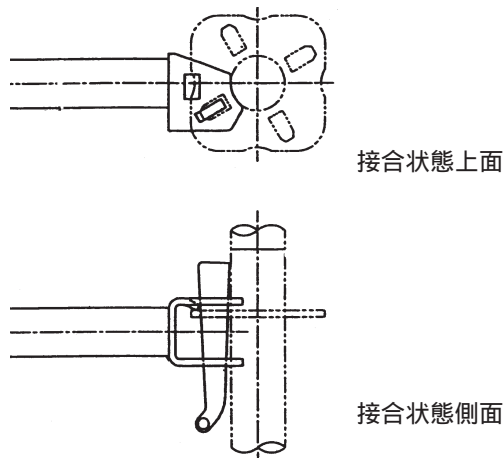


Fig. 3 Shape of wedge joint type C.
くさび結合部 Type C の形状

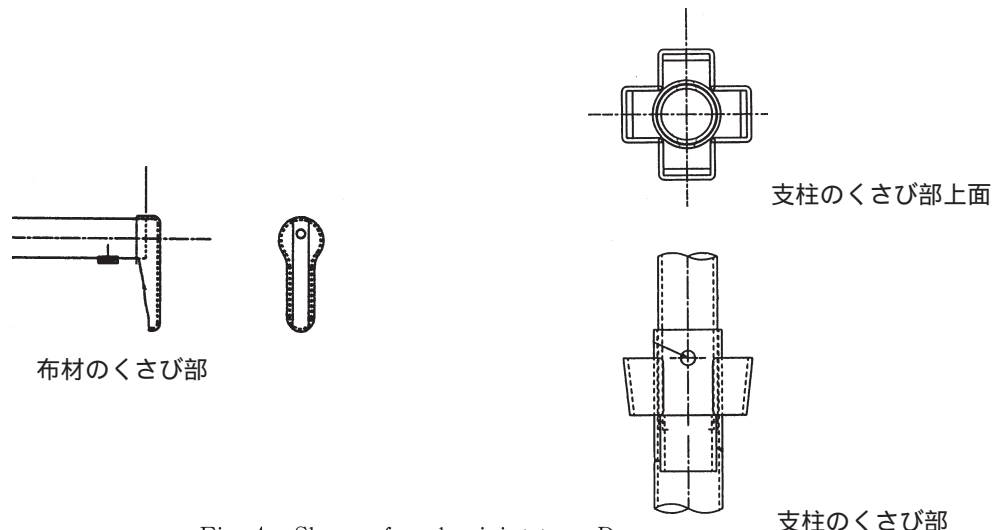


Fig. 4 Shape of wedge joint type D.
くさび結合部 Type D の形状

と支柱下端の変位を測定することにより結合部に作用する曲げモーメントと回転角を求め、その結果より結合部の回転剛性を調べた。

くさび式足場の結合部については、くさびの引き抜き方向 (Fig.6) と打ち込み方向 (Fig.7) の2方向について荷重を載荷した。また、単管足場に用いる緊結金具は $34.3\text{N}\cdot\text{m}$ のトルクで締め付けることにより結合し、くさび式足場に用いる結合部は質量1kgのハンマーでくさびを4回たたいて打ち込むことにより結合した。以降に示す実験についても、くさびを緩めに結合する場合 (3.2高さの異なる足場の座屈強度実験) を除いて全てこの条件とした。

(2) 単位パネルのせん断実験

Fig.8およびFig.9に示すように、接続治具を用いて支柱と布材を結合した長方形の枠を組み立て、これを対角線上に引っ張ることにより、くさび式足場と単管足場の結合部の回転剛性を調べる実験を行った。結合部の回転剛性は、接続治具を引っ張る荷重と変位の関係より求めることとした。その際、接続金具の間隔は1800mm、支柱の間隔は600mmとした。(1)の結合部の曲げ実験と異なる点は、布材の曲げ変形の影響を考慮している点であり、より実際の使用状態に近いものと考えられる。

3.2 高さの異なる足場の座屈強度実験

支柱 (建地) 及び布材を使用して2層または3層の四角塔に組み立てた足場に対し、3000kN垂直荷重試験機により圧縮荷重を載荷する実験を行った。その際、Fig.10およびFig.11に示すように、供試体の水平断面は幅 b (600mmと1200mm)、奥行き1800mmとして、上下端にナイフエッジを取り付け、両端ピンとした場合の足場の座屈荷重を調べた。ナイフエッジは、幅 b の

方向に座屈するように取り付けた。

Table 1に、実験に使用した供試体の高さ h と幅 b を示す。くさび式足場の場合は、製品によって1層の高さが1.8mまたは1.9mと異なるため、2層の場合は高さ3.6mまたは3.8m、3層の場合は高さ5.4mまたは5.7mとなる。一方、単管足場の場合は1層の高さ1800mm、幅 b を600mmとして、2層の場合 (供試体の高さ3.6m) と3層の場合 (同5.4m) について実験を行った。

また、Table 1に示すくさびが緩めの場合は、くさびが振動などにより緩んだ場合を想定したものである。その際、くさび結合部の全ての箇所において、くさびをハンマーで打ち込まず手で押し込むだけの状態で供試体を組み立てた。これらの実験結果より、くさび式足場と単管足場の座屈荷重の比較、および足場の高さ、支柱の間隔 (幅 b)、くさびの緩み等が足場の座屈荷重に及ぼす影響について検討した。

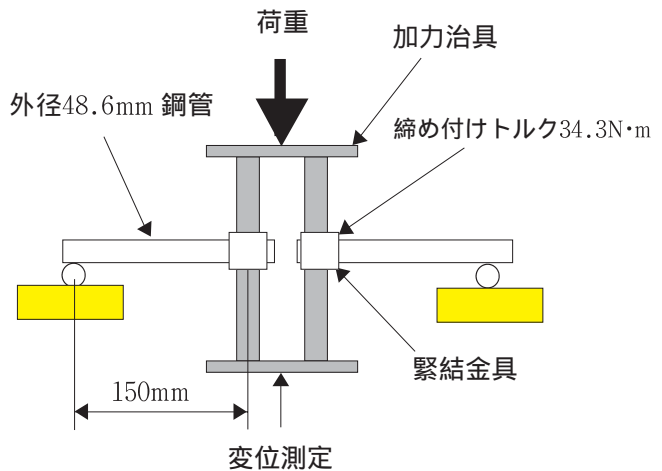


Fig. 5 Bending test for clamp connection. 緊結金具に対する曲げ実験

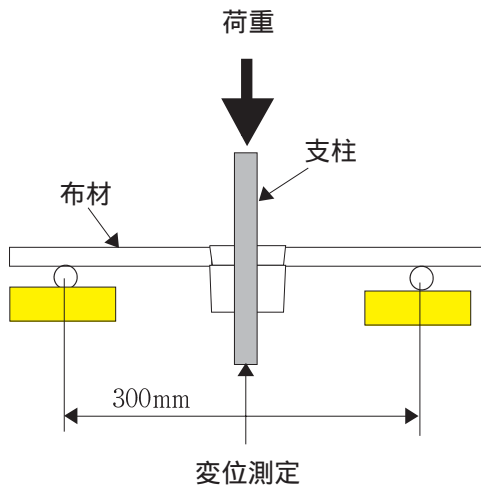


Fig. 6 Bending test for wedge joint (opposing direction). くさび結合部に対する曲げ実験 (引き抜き方向)

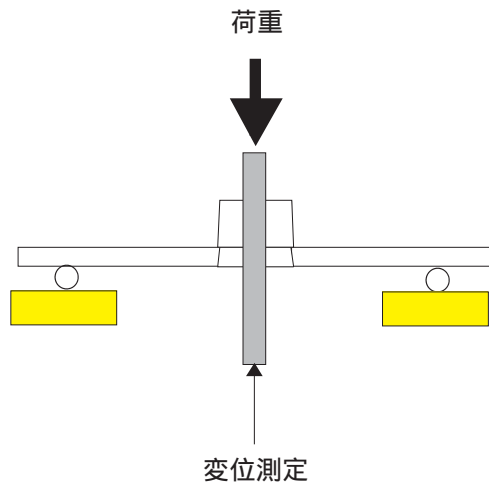


Fig. 7 Bending test for wedge joint (driving direction). くさび結合部に対する曲げ実験 (打ち込み方向)

3.3 壁つなぎを使用した足場の座屈強度実験

(1) 6層3スパン部分荷重実験

Fig.12およびFig.13に示すように、6層3スパンに組み立てた足場に壁つなぎを設け、その壁つなぎの拘束を受けない中央部1スパンの支柱に、3000kN 垂直荷重試験機により圧縮荷重を載荷する部分荷重実験を行い座屈荷重を調べた。

単管足場については、各層において4構面全てに布

材を取り付けた。一方、くさび式足場については、各層においてはり間方向(図の側面側)のみに布材を取り付け、けた行方向(図の正面側)には床付き布枠を取り付けた。けた行方向の布材は手摺の位置(各層間)に取り付け、床付き布枠の位置には取り付けなかった。

壁つなぎの水平方向の取り付け位置は、労働安全衛生規則の5.5mを満たすように3スパン5.4mとした。高さ方向の取り付け位置は、単管足場では労働安全衛生規則に従って高さ約5m毎に取り付けた。くさび式

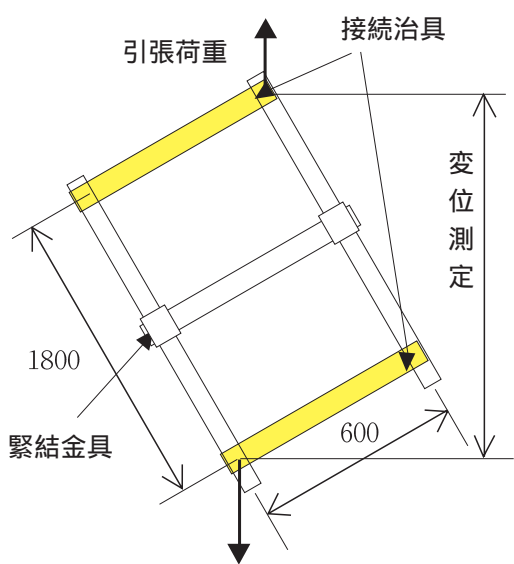


Fig. 8 Shear test for clamp connection.
緊結金具の場合のせん断実験

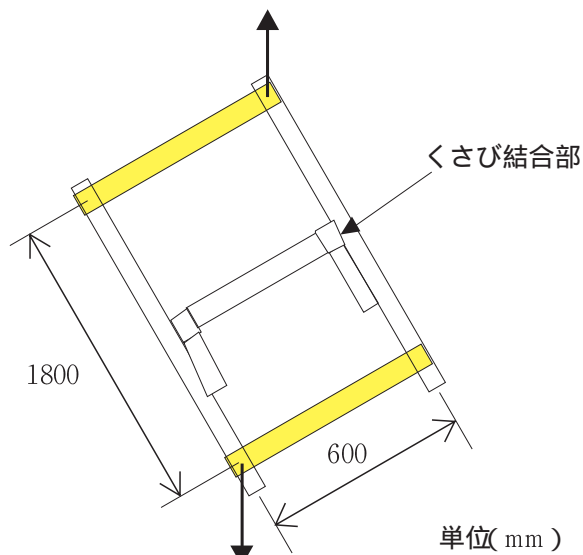


Fig. 9 Shear test for wedge joint.
くさび結合部の場合のせん断実験

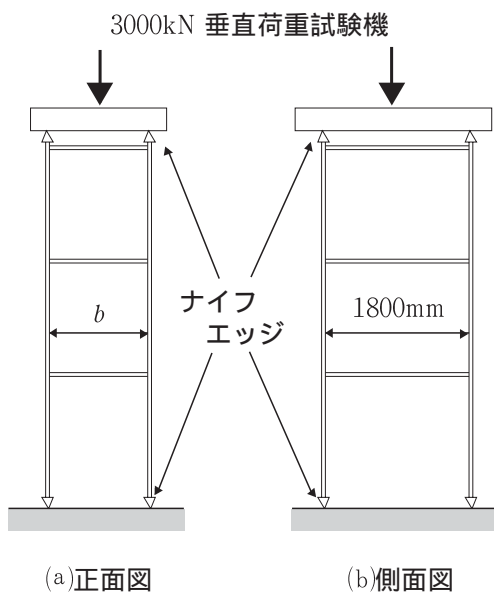


Fig. 10 3 story scaffold model.
高さ3層の供試体

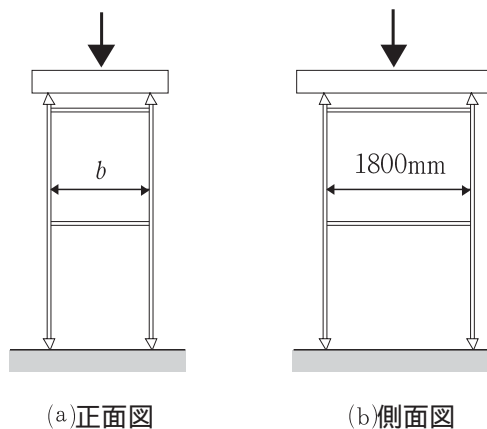


Fig. 11 2 story scaffold model.
高さ2層の供試体

足場では、同様に5m以下でかつ支柱とはり間方向の布材の交点に設けるという意味で2層(3.6m~3.8m)毎に取り付けた。

単管足場における一層の高さは、5m毎に取り付けた壁つなぎが支柱と布材の交点になるように1.67mとした。これは、単管足場は層高1.6m程度の足場を基にして基準が定められているためである。一方、くさび式足場の場合には、製品毎に支柱の受け金具が0.45mまたは0.475m間隔で取り付けられているため、一層の高さが1.8mまたは1.9mとなる。このため、3層毎に壁つなぎを取り付けた場合には5mを超えてしまうため、2層毎に取り付けることとした。

実験においては、上端の加力点で試験機の拘束を受けないよう、ナイフエッジをはり間方向に座屈が生じる方向に取り付けた。また、足場の下端には、通常の使用条件と同じようにジャッキベース設置し、けた行方向のみに斜材を取り付けた。

(2)6層3スパン全面荷重実験

Fig.14およびFig.15に示すように、6層3スパンに組み立てた足場に壁つなぎを取り付け、全ての支柱に均等に圧縮荷重を載荷する全面荷重実験を行った。実験条件は、(1)の部分荷重実験と同一とした。

(3)5層3スパン部分荷重実験

Fig.16に示すように、5層3スパンに組み立てた足場に壁つなぎを取り付け、中央部1スパンの支柱に圧縮荷重を載荷する部分荷重実験を行った。この実験は、(1)の6層3スパンの単管足場の実験結果と比較するためのものであり、壁つなぎの高さ方向の間隔を可能

な限り5mとなるようにした。その際、支柱の受け金具の間隔より、壁つなぎは両端の支柱の最上部および3層目の中間部に設けた。

Table 1 Model configuration of height and width *b*.
実験に使用した足場の高さと同幅 *b*

種類	高さ	幅 <i>b</i> (mm)
A	1.8m×2層 (3.6m)	600 (くさび緩めも実施) 1200
	1.8m×3層 (5.4m)	600
B	1.8m×2層 (3.6m)	600 (くさび緩めも実施) 1200
	1.8m×3層 (5.4m)	600
C	1.9m×2層 (3.8m)	600 (くさび緩めも実施) 1200
	1.9m×3層 (5.7m)	600
D	1.9m×2層 (3.8m)	600 (くさび緩めも実施) 1200
	1.9m×3層 (5.7m)	600
単管	1.8m×2層 (3.6m)	600
	1.8m×3層 (5.4m)	

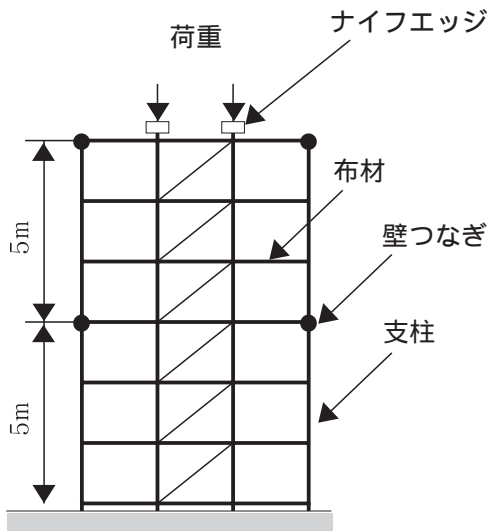


Fig. 12 Vertical load test on 6 story - 3 bay pipe scaffold (inside members).
6層3スパン部分荷重実験(単管足場)

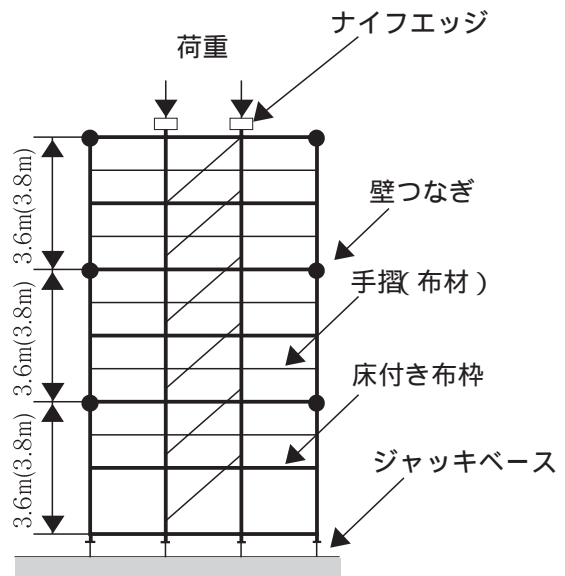


Fig. 13 Vertical load test on 6 story - 3 bay wedge joint scaffold (inside members).
6層3スパン部分荷重実験(くさび式足場)

この場合、壁つなぎが床付き布杵と支柱の交点に位置しないため、単管足場に比べ壁つなぎの拘束力が小さくなり座屈強度が低下する恐れがある。そこで、その影響を調べるための実験として行った。

3.4 斜材効果に関する水平変位実験

単管足場の構面に取り付ける大筋交いと、くさび式足場で使用する1層1スパン毎に個々に取り付ける斜材の効果を確認するため、250kN水平荷重試験機を用いて足場上端に水平荷重を作用させ、この水平荷重と水平変位の関係を調べる実験を行った。

足場は全て4層4スパンに組み立てるものとして、単管足場はFig.17およびFig.18に示すように、けた行方向に4層4スパンの大筋交いを取り付け、その大筋

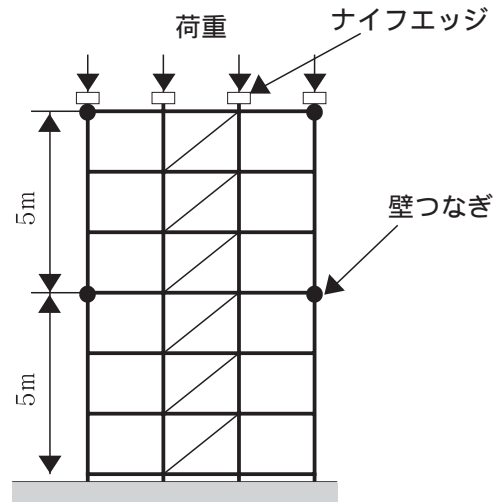


Fig. 14 Vertical load test on 6 story - 3 bay pipe scaffold (all members).
6層3スパン全面荷重実験(単管足場)

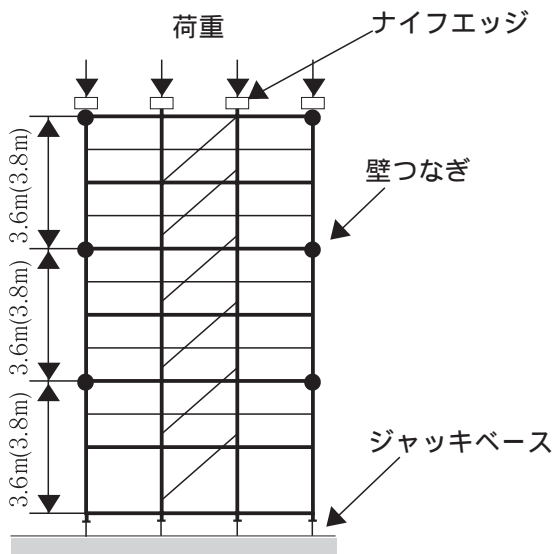


Fig. 15 Vertical load test on 6 story - 3 bay wedge joint scaffold (all members).
6層3スパン全面荷重実験(くさび式足場)

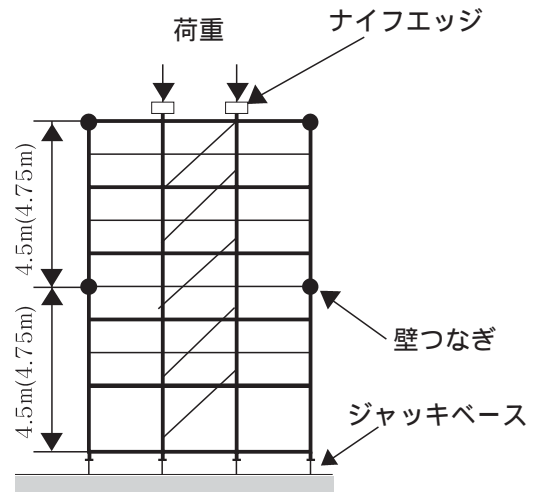


Fig. 16 Vertical load test on 5 story - 3 bay wedge joint scaffold (inside members).
5層3スパン部分荷重実験(くさび式足場)

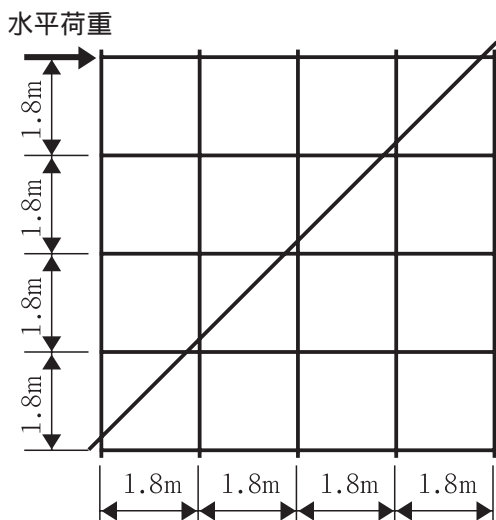


Fig. 17 Horizontal load test for each 4 story - 4 bay diagonal brace of pipe scaffold (tension test).
4層×4スパン毎の引張側斜材に対する水平加力実験(単管足場)

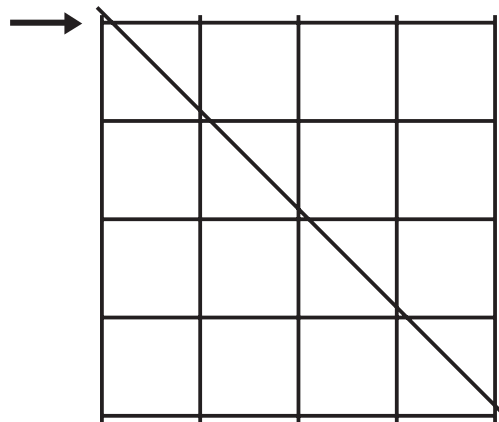


Fig. 18 Horizontal load test for each 4 story - 4 bay diagonal brace of pipe scaffold (compression test).
4層×4スパン毎の圧縮側斜材に対する水平加力実験(単管足場)

交いに圧縮力または引張力が発生する方向に水平荷重を作用させた。一方、くさび式足場はType AのみについてFig.19~Fig.22に示すように、1層1スパン毎に取り付ける斜材を4層4スパンまたは2層2スパン毎に様々な方法で取り付け、斜材に圧縮力または引張力が発生する方向に水平荷重を作用させた。Fig.19とFig.21の異なる点は、Fig.19では斜材が全スパンにわたっているのに対し、Fig.21では1スパンに偏っている点である。

4. 解析方法

4.1 結合部の回転剛性を考慮した計算式

くさび式足場において、斜材を設けていない場合の座屈荷重に対して、結合部の剛性を加味した簡易計算式^{1),2)}が提案されている。この計算式は、エネルギー法による近似式であり、座屈荷重 P_{cr} は以下のように表されている。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_V}{\ell_V^2} + \frac{K}{a} \quad (1)$$

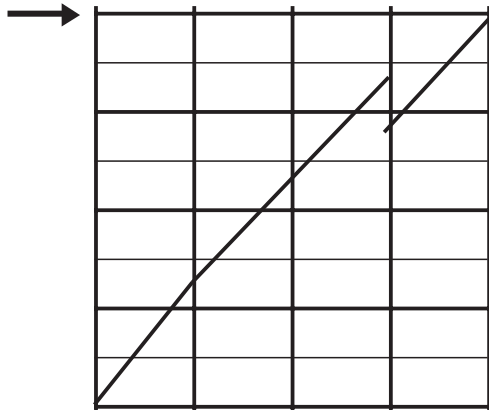


Fig. 19 Horizontal load test for each 4 story-4 bay diagonal brace (1) of wedge joint scaffold (tension test).
4層×4スパン毎の引張側斜材(1)に対する水平加力実験(くさび式足場)

ここで、

- EI_V : 支柱の曲げ剛性
- ℓ_V : 支柱の有効座屈長
- K : 支柱と布材の節点の弾性結合係数
- a : 布材の平均間隔 (= ℓ_V/n で n は布材の数)

式(1)の右辺第一項はオイラーの式であるが、支柱の細長比が約100以上の場合に適用することができる。本資料の場合は支柱の長さが最低でも3.6mであるが、支柱の外径48.6mm、内径2.5mmで断面二次半径が16.3mmであるため、細長比が221以上となり全てこの式が適用可能となる。一方、第二項は結合部の回転剛性と布材の数に関するものである。すなわち、節点の弾性結合係数 K が大きいほど、布材の数が多いほど座屈荷重 P_{cr} は大きくなることを表している。

また、節点の弾性結合係数 K は、支柱と布材の節点に作用する曲げモーメントを M 、節点の回転角を θ とすると以下のように表すことができる。

$$K = \frac{M}{\theta} \quad (2)$$

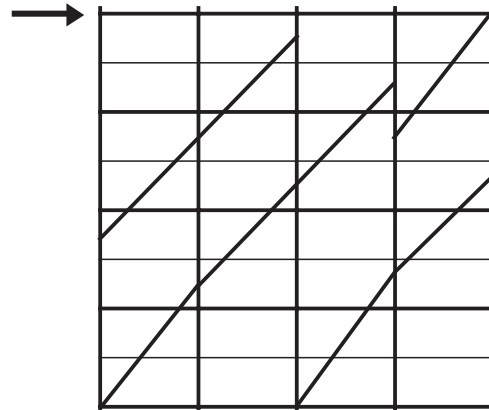


Fig. 20 Horizontal load test for each 2 story-2 bay diagonal brace of wedge joint scaffold (tension test).
2層×2スパン毎の引張側斜材に対する水平加力実験(くさび式足場)

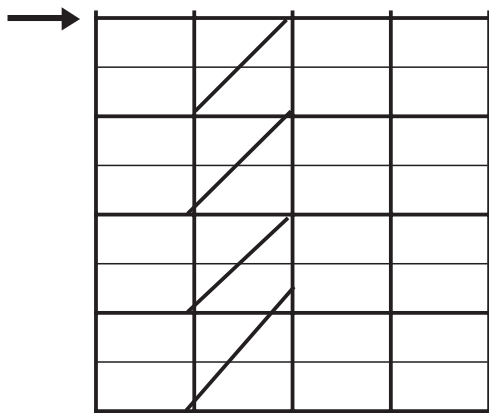


Fig. 21 Horizontal load test for each 4 story-4 bay diagonal brace (2) of wedge joint scaffold (tension test).
4層×4スパン毎の引張側斜材(2)に対する水平加力実験(くさび式足場)

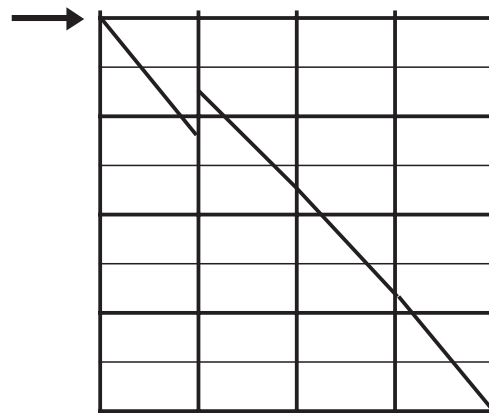


Fig. 22 Horizontal load test for each 4 story-4 bay diagonal brace of wedge joint scaffold (compression test).
4層×4スパン毎の圧縮側斜材に対する水平加力実験(くさび式足場)

式(2)の節点の弾性結合係数 K は, 3.1(2)の単位パネルのせん断実験より直接求めることができる。この時, 節点の回転角 θ は, くさび結合部自体の回転角 θ_F に加え, 布材のたわみ角 θ_H を含んだものとなる。これを表すと式(3)のようになる。

$$\theta = \theta_F + \theta_H \quad (3)$$

θ_H と節点の曲げモーメント M との間には, 式(2)と同様の関係があることから, 次のように表すことができる。

$$\frac{6EI_H}{b} = \frac{M}{\theta_H} \quad (4)$$

ここで,

b : 布材の長さ
 EI_H : 布材の曲げ剛性

よって, θ_H は布材の長さ b に依存することとなり, 式(2)~式(4)の関係より, 節点の弾性結合係数 K も布材の長さ b に依存することとなる。このため, 3.1(2)の実験により節点の弾性結合係数 K を直接求めたとしても, その値はある特定の長さの布材を使用した場合の値となる。

一方, 3.1(1)の結合部の曲げ実験は布材のたわみをできるだけ排除したものであり, くさび結合部自体の回転角 θ_F を直接求めることができる。この時の結合部の回転剛性をくさび結合部の弾性結合係数 K_F とし, 式(2)と同様に表すと次のようになる。

$$K_F = \frac{M}{\theta_F} \quad (5)$$

式(2), 式(4)および式(5)を式(3)に代入すると, 次のように書き換えることができる。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_F} + \frac{b}{6EI_H} \quad (6)$$

よって, 3.1(1)の結合部の曲げ実験から, 式(5)を用いてくさび結合部の弾性結合係数 K_F を求め, これを式(6)に与えることにより, 任意の長さの布材に対する節点の弾性結合係数 K を求めることが可能となる。ただし, 結合部の曲げ実験では荷重 P とその時の変位 δ のみを測定し, 結合部に作用する曲げモーメント M と回転角 θ_F を直接測定しないため, 次に示

す式(7)によりくさび結合部の弾性結合係数 K_F を求めることとする。

$$K_F = \frac{M}{\theta_F} = \frac{P/2 \times (\ell - d)/2}{\delta / (\ell - d)^2} = \frac{P}{\delta} \times \frac{(\ell - d)^2}{8} \quad (7)$$

ここで,

ℓ : 布材の支点間隔

d : 支柱の直径

一方, 3.1(2)の単位パネルのせん断実験では, 式(6)を用いて K_F を推定し直す必要がある。

以上より, 結合部の性能実験により得られたくさび結合部の弾性結合係数 K_F を, 式(1)および式(6)に適用することにより, 斜材がない場合のくさび式足場の座屈荷重をある程度推定することが可能となる。この計算結果は, 3.2の長さの異なる足場の座屈強度実験および3.3(2)の6層3スパン全面荷重実験の結果と比較することとした。

4.2 有限要素法による解析

式(1)は, 節点の弾性結合係数 K が足場全体で同一であると仮定して, くさび式足場の座屈荷重を求めるものである。しかし, くさび結合部は振動等により緩みが生じる恐れがあり, 弾性結合係数 K が部分的に低下することも考えられる。そこで, このようなくさび結合部の部分的な緩みが座屈荷重に及ぼす影響について検討するため, 骨組みモデルを用いて有限要素法による解析³⁾を行った。

3.1(1)の結合部の曲げ実験での供試体に, 荷重 P を加えた時の結合部と布材のたわみ量をそれぞれ δ_1 , δ_2 とすると, Fig. 23のようモデル化することができる。

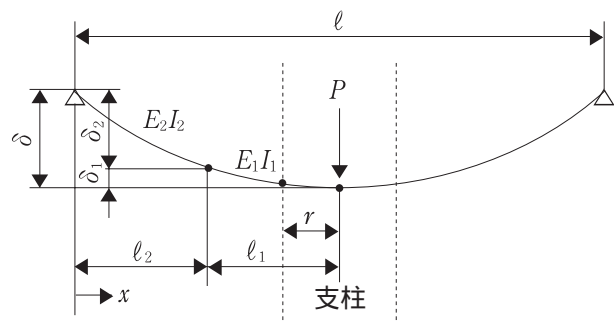


Fig. 23 Deformation of the connection at the wedge joint in the bending test.

曲げ実験でのくさび結合部の変形

る。Fig. 23に示したくさび結合部の変形図より、曲げモーメントによるひずみエネルギー U_i を求めると、以下のように表すことができる。

$$U_i = 2 \left(\int_0^{\ell_2} \frac{M_2^2}{2E_2I_2} dx + \int_{\ell_2}^{\ell_1 + \ell_2} \frac{M_1^2}{2E_1I_1} dx \right) \quad (8)$$

ここで、

- M_1 : くさび結合部に生じる曲げモーメント
- M_2 : 布材に生じる曲げモーメント
- ℓ_1 : くさび結合部の長さ
- ℓ_2 : 布材の長さ
- $E_1 I_1$: くさび結合部の曲げ剛性
- $E_2 I_2$: 布材の曲げ剛性

式(8)の M_1 および M_2 にFig. 23での曲げモーメント $Px/2$ をそれぞれ代入すると、 U_i は次のようになる。

$$U_i = \frac{P^2 \ell_2^3}{12E_2I_2} + \frac{P^2}{12E_1I_1} \left[(\ell_1 + \ell_2)^3 - \ell_2^3 \right] \quad (9)$$

また、外力のなす仕事 U_0 は次のように表すことができる。

$$U_0 = \frac{1}{2} P \delta \quad (10)$$

$U_i = U_0$ であることから、式(9)および式(10)より、実験で計測されるたわみ量 δ は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 + \delta_2 \\ &= \frac{P \ell_2^3}{6E_2I_2} + \frac{P}{6E_1I_1} \left[(\ell_1 + \ell_2)^3 - \ell_2^3 \right] \\ &= \frac{P \ell_1^3}{6E_1I_1} + \frac{P \ell_2^3}{6E_2I_2} + \frac{P \ell_1 \ell_2 (\ell_1 + \ell_2)}{2E_1I_1} \end{aligned} \quad (11)$$

くさび結合部の曲げ剛性は $E_1 I_1$ で表されることから、式(11)を $E_1 I_1$ について解くと以下ようになる。

$$E_1 I_1 = \frac{\ell_1^3 + 3\ell_1 \ell_2 (\ell_1 + \ell_2)}{\left(\frac{6}{P/\delta} - \frac{\ell_2^3}{E_2 I_2} \right)} \quad (12)$$

式(12)におけるくさび結合部の長さ ℓ_1 は、Fig. 23より支柱の半径 r を含んだものである。そこで、実際のくさび結合部の長さを $\ell_1 - r$ と考えると、式(12)は次のように書き換えることができる。

$$E_1 I_1 = \frac{(\ell_1 - r)^3 + 3(\ell_1 - r)\ell_2[(\ell_1 - r) + \ell_2]}{\left(\frac{6}{P/\delta} - \frac{\ell_2^3}{E_2 I_2} \right)} \quad (13)$$

この式(13)を用いてくさび式足場を骨組みモデル化し、有限要素法による座屈解析を行った。解析モデルを、Fig. 24およびFig. 25に示す。Fig. 24に示す解析モデルはくさび式足場の2層で幅600mmの場合であり、Fig. 25は3層で幅600mmの場合である。解析は、支柱頂部(最上段)の4点に荷重を変位制御で与えていく方法で行い、荷重が低下し始める点をくさび式足場の座屈荷重とした。なお、最上段の節点においては、すべて水平変位を拘束した。

解析では、まず3.1(1)の結合部の曲げ実験により得られた P/δ を式(13)に代入し、これをFig. 24の解析モデルに適用して座屈荷重を推定した。その結果を、3.2の2層で幅600mmの場合の実験値と比較することにより、本解析の精度を確認した。次に、結合部においてくさびが緩んでしまった場合を想定して、Fig. 24およびFig. 25の解析モデルについて、部分的に支柱と布材の結合部をピン結合として座屈荷重を解析した。その際、ある仮想的な P/δ を式(13)に代入して解析モデルを作成した。その結果を基に、くさびの緩みが座屈強度に与える影響について検討した。

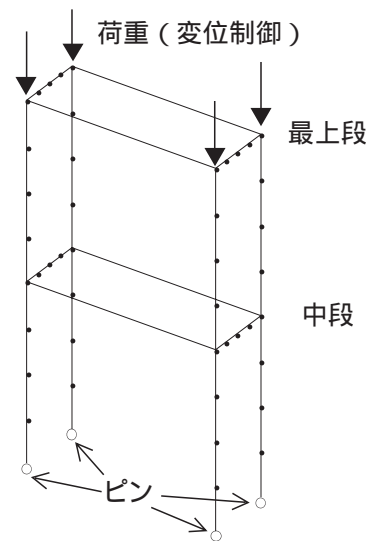


Fig. 24 Analysis model of 2 story scaffold.
足場が2層の場合の解析モデル

5. 実験結果と考察

5.1 結合部の性能実験

(1) 結合部の曲げ実験

実験の結果得られた荷重と変位の関係をグラフにすると、Fig.26およびFig.27に示すとおりとなる。Fig.26はくさびの打ち込み方向に、Fig.27は引き抜き方向に荷重を載荷した場合の荷重と変位の関係を示す。単管足場の緊結金具は、くさび結合部のような方向性がないため一方向のみの実験しか実施していないが、比較のためFig.26とFig.27のどちらのグラフにも同じ結果を用いた。

Fig.26において、くさび結合部を単管足場の緊結金具と比較すると、くさび結合部の方が曲線の傾きが大きくなっている。よって、打ち込み方向の場合、くさび結合部の方が回転剛性が高いと言える。

一方、Fig.27に示す引き抜き方向では、Cの場合のみ単管足場の緊結金具の方が曲線の傾きが大きくなっている。よって、引き抜き方向のCについては、単管足場の緊結金具の方が回転剛性が高いと言える。

結合部の回転剛性が高いほど、式(1)に示す節点の弾性結合係数 K が大きくなり座屈強度も高くなると考えられる。しかし、足場が座屈する際、湾曲した2本の支柱の結合部には、打ち込み方向と引き抜き方向の回転がそれぞれ同時に生じるため、双方の複合した性能を考慮する必要がある。

なお、Fig.27のDにおいて、一つだけ急激に回転

剛性が低くなっているが、これはくさびが引き抜けてしまったためである。このように、引き抜け方向に大きな回転が生じた場合には、くさびが引き抜けてしまうことが危惧される。

(2) 単位パネルのせん断実験

実験の結果得られた荷重と変位の関係をグラフにすると、Fig.28に示すとおりとなる。なお、結合部の種

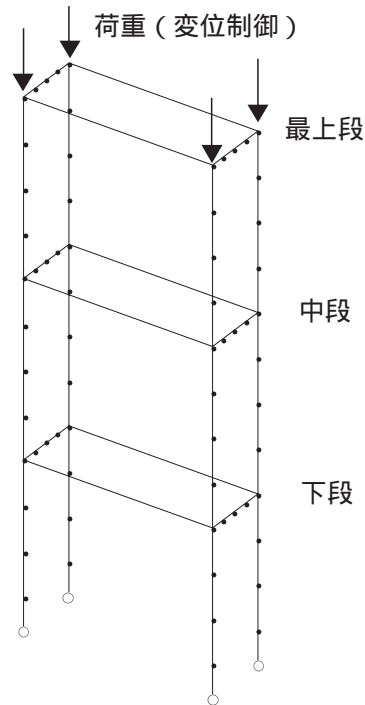


Fig. 25 Analysis model of 3 story scaffold.
足場が3層の場合の解析モデル

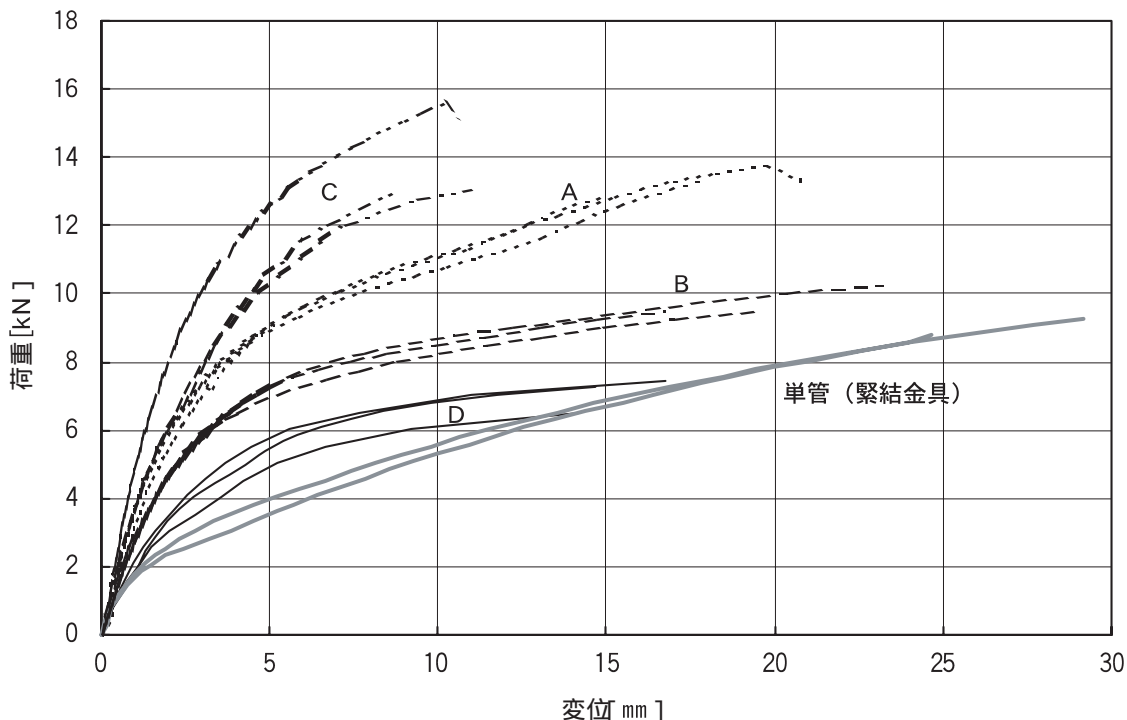


Fig. 26 Results of the bending tests of the connections (driving direction).
結合部の曲げ実験の結果 (打ち込み方向)

類ごとの比較を容易にするため、約580N時における変位を基点として補正したものである。

Fig.28より、単管（緊結金具）とCの傾きはほぼ同じため、せん断実験から得られた結合部の曲げ剛性はほぼ同じと考えられる。一方、A、B、Dは緊結金

具より傾きが大きいため、緊結金具より結合部の曲げ剛性が高いと考えられる。これは、Fig.27に示す引き抜き方向の曲げ実験の結果と同じ傾向であり、せん断実験の結果は引き抜き方向の曲げ実験の結果に依存していると考えられる。

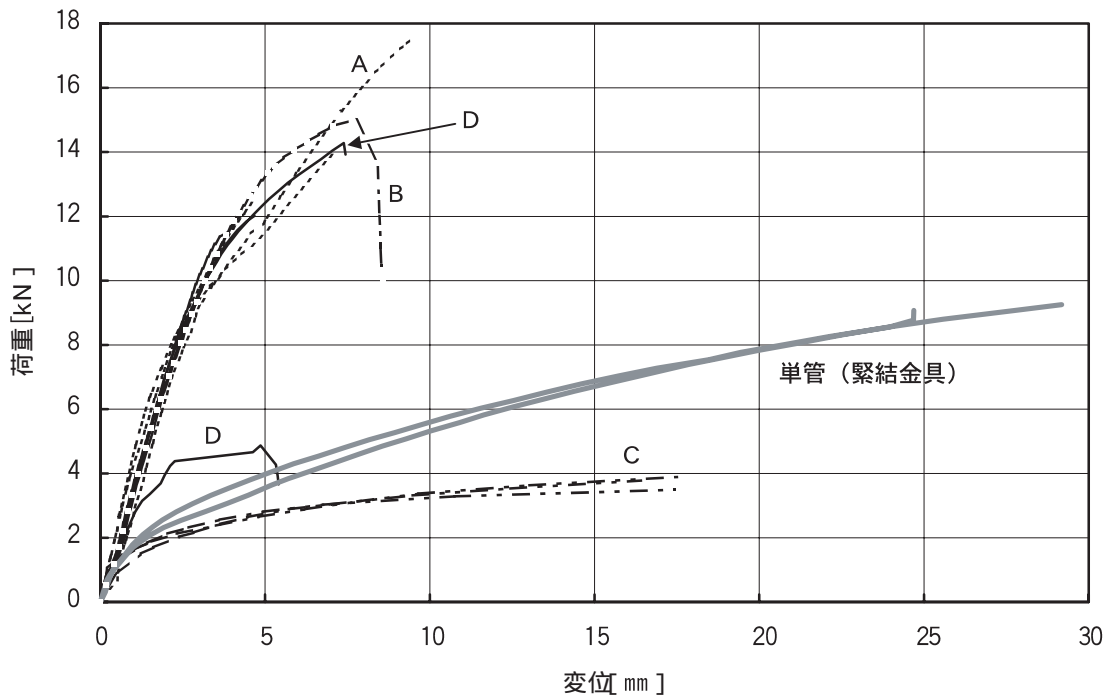


Fig. 27 Results of the bending tests of the connections (opposing direction).
結合部の曲げ実験の結果（引き抜き方向）

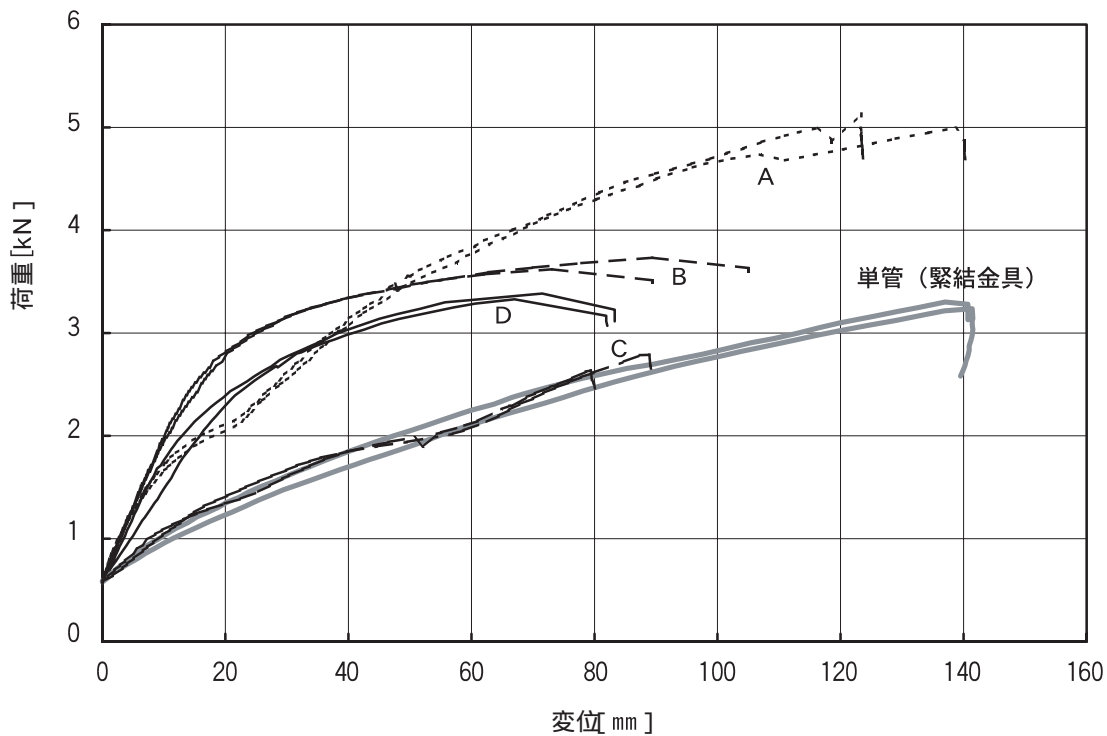


Fig. 28 Results of the shear tests of the panel units.
単位パネルのせん断実験の結果

5.2 高さの異なる足場の座屈強度実験

2層または3層の四角塔の足場に対する座屈強度実験の結果⁴⁾を、Table 2に示す。以下に、各種条件について比較を行った。

(1) 単管足場とくさび式足場の座屈強度の比較

今回行った座屈強度実験のうち、600mm幅の2層1スパンと3層1スパンの実験データについて比較すると、Fig. 29に示すとおりとなった。2層と3層の理論的座屈強度を比較すると、オイラー式では式(1)の右辺第二項に示すように、座屈強度は長さの二乗に反比例するため、3層は2層の $4/9=約44.4\%$ の強度となるはずである。しかし、くさび式足場のA, B, C, Dのデータを比較すると、3層は2層の場合の64%~86%の強度を有している。これは、2層に比べ3層の場合は座屈長さの間に布材が1本多く取り付けられているためであり、くさび結合部が座屈防止に効果があることを示していると考えられる。一方、単管足場の場合には3層は2層の60%となり、くさび式足場ほど結合部の効果は見られなかった。

したがって、くさび式足場については、布材が等間隔に取り付けられている場合には、壁つなぎ間隔が大きくなり座屈長が長くなっても、オイラー式による極端な強度低下(長さの二乗に反比例)は小さいと考えられる。このように、鉛直荷重に対する支柱の性能を十分に発揮するためには、布材が正しく等間隔に取り付けられている事が重要な構造要件と言える。

また、Fig. 29には2層の場合について座屈強度の平均値を示すが、A, Bでは単管足場の平均強度とほぼ同等または上回っているが、C, Dでは11~16%程度低い結果となった。

C, Dは1層の高さが1.9mであり、1層の高さが1.8mであるA, Bおよび単管足場と比較すれば、座屈長が長いことがその原因の一つと考えられる。しかし、壁つなぎは布材付近に取り付ける必要があるため、これを2層ごとに取り付けた四角塔の場合には、少なくとも本実験の結果より、層高1.9mのC, Dの座屈強度は層高が1.8m以下で組み立てられた単管足場の強度を下回っていると考えられる。

(2) はり間方向の幅の違いによる座屈強度の比較

Fig. 30は、はり間方向の幅600mmと1200mmの実験結果を比較したものであるが、幅1200mmの方が幅600mmの平均値に対し、Cを除き5%~11%程度強度が高い結果となった。しかし、Cの場合には幅600mmの方が約13%強度が高かった。

座屈強度実験の結果には通常ばらつきがあり、これを考慮すると、今回の実験からはどちらの強度が高い

Table 2 Results of the buckling tests on 2 or 3 story scaffold.
2層または3層の足場に対する座屈強度実験結果

種類	高さ	幅 b (mm)	座屈荷重 (kN)	平均 (kN)
A	1.8m×2層	600	80.20	85.18
			90.15	
			*59.35	*59.35
	1.8m×3層	1200	89.45	89.45
B	1.8m×2層	600	80.70	76.25
			71.80	
			*58.60	*58.60
	1.8m×3層	1200	85.05	85.05
C	1.9m×2層	600	63.60	69.18
			74.75	
			*53.45	*53.45
	1.9m×3層	1200	61.30	61.30
D	1.9m×2層	600	63.15	65.40
			67.65	
			*65.50	*65.50
	1.9m×3層	1200	70.40	70.40
単管	1.8m×2層	600	72.70	77.88
			83.05	
			46.65	46.68
	1.8m×3層	46.70		

*くさびを緩めに打ち付けた場合

かは判断できなかった。理論的には、はり間方向の幅が広いほうが式(6)より節点の弾性結合係数 K が小さくなり強度的に不利となるはずであるが、今回の実験ではこのことは確認できなかった。

(3) くさびの打ち込み強さの違いによる座屈強度の比較

Fig. 31は、くさびの打ち込み強さの違いによる強度の比較を行ったものである。今回の一連の実験では、くさびを重さ約1kgのハンマーで4回たたくことを原則として実験を行ったが、くさびを手で押し込んだだけのものを特に「緩め」として座屈強度を調べた。その結果、Aで30%、Bで33%、Cで16%、Dで0%、緩めの方が強度が低くなった。よって、程度の差はあるが、くさびの打ち込みが緩いと支柱の座屈強度が低下するものと考えられる。

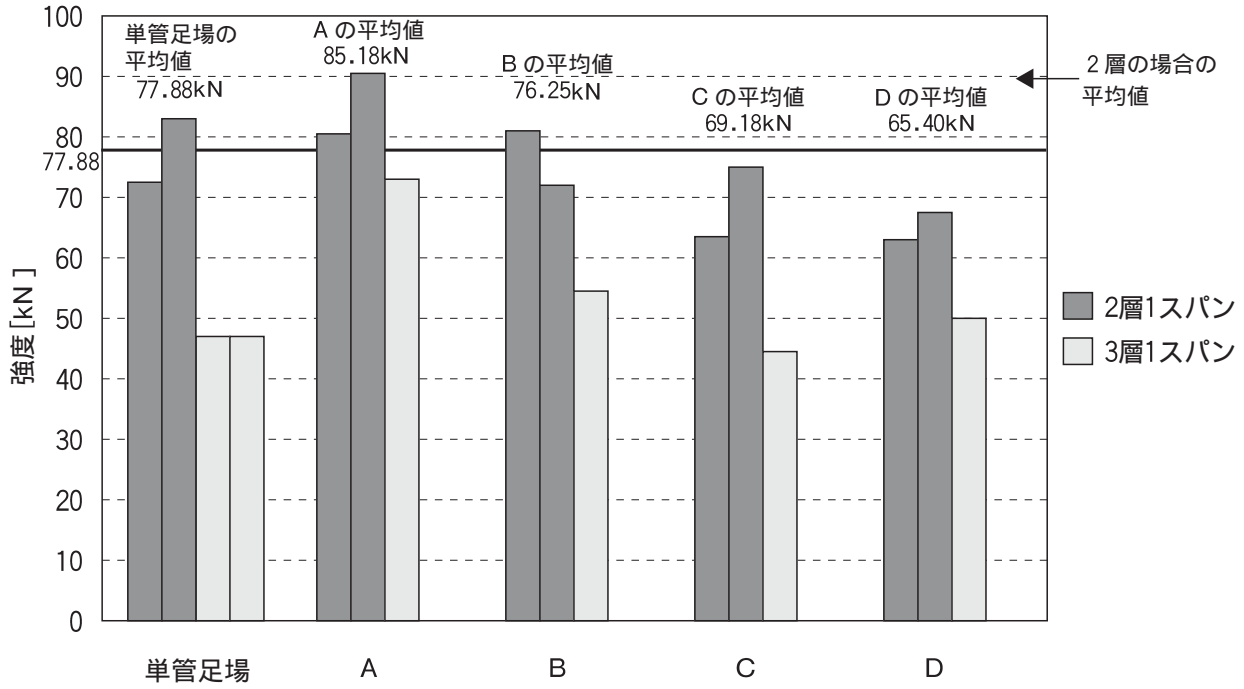


Fig. 29 Comparison of buckling strength between pipe scaffolds and wedge joint scaffolds.
単管足場とくさび式足場の座屈強度の比較

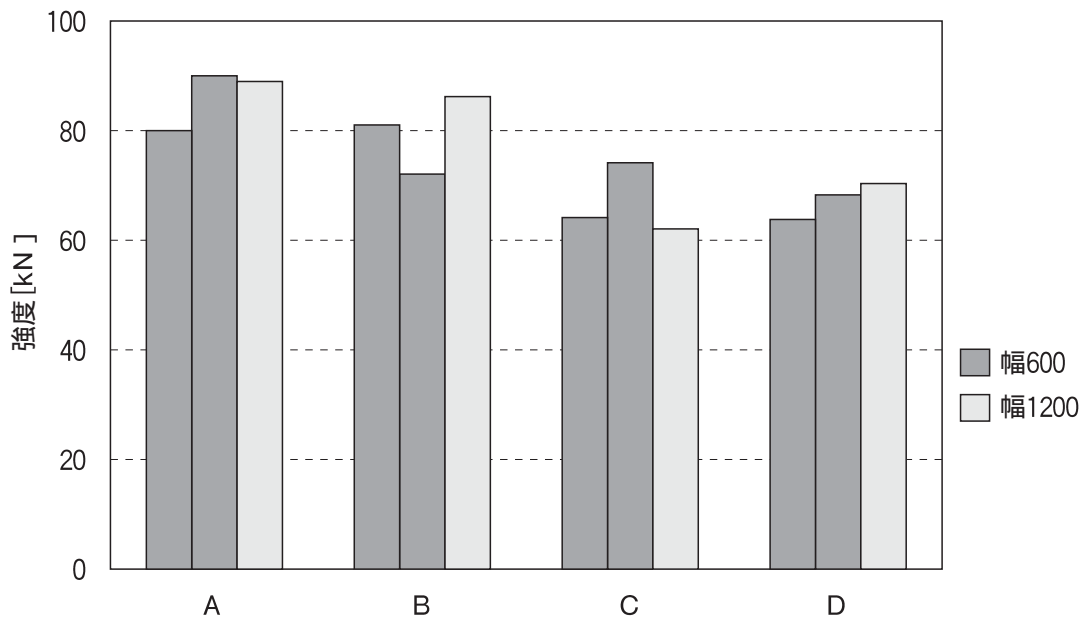


Fig. 30 Comparison of buckling strength for different span lengths.
はり間方向の幅の違いによる座屈強度の比較

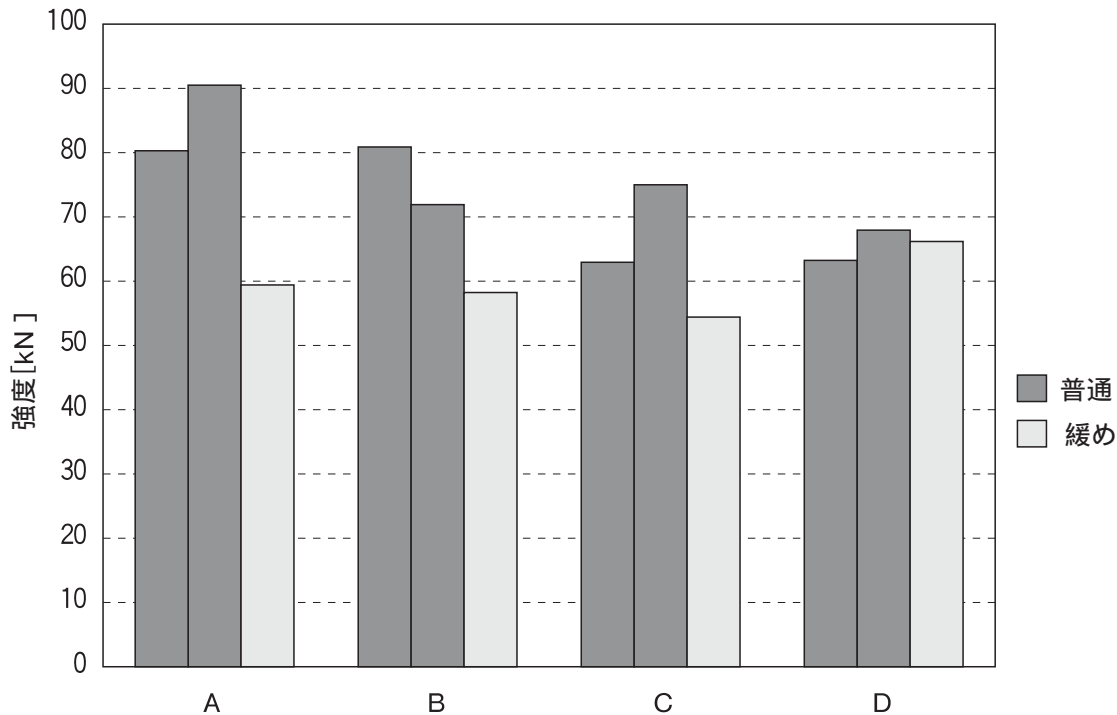


Fig. 31 Comparison of buckling strength for different wedge fitting conditions.
くさびの打ち込み強さの違いによる座屈強度の比較

5.3 壁つなぎを使用した足場の座屈強度実験

6層3スパンまたは5層3スパンに組み立てた足場に、壁つなぎを使用した場合の座屈強度実験の結果を、Table 3に示す。以下に、各実験毎の考察を述べる。

(1) 6層3スパン部分荷重実験

実験における単管足場の座屈形状を見ると、3層目と最上段の壁つなぎ間で、荷重を載荷した中央部1スパンの支柱が座屈していた。さらに、荷重が作用していない両端部の支柱も同じ方向に引っ張られて湾曲していた。これは、単管足場の場合には布材が全スパンにわたり縁が切れずに連続しているためであり、荷重の作用していない支柱も座屈に対し補強的に働くものと考えられる。

一方、くさび式足場では、A、B、C、Dとも全て4層目と最上段の壁つなぎ間で支柱が座屈していた。しかし、Dを除いて、荷重を載荷していない両端部の支柱の変形が、単管足場の場合に比べ非常に小さかった。よって、A、B、Cのくさび式足場の場合、両端部の支柱は、単管足場ほど座屈に対し補強的な役割を果たしていないと考えられる。これは、くさび式足場では布材が単管足場のように全スパンで連続しておらず、1スパンごとに縁が切れている構造であるためと考えら

れる。この影響はB、Cで特に大きく、単管足場に比べ座屈長が短いにも関わらず、座屈強度は単管足場とほぼ同じであった。

また、DはA、B、Cとは異なり、左端部支柱が大きく変形していた。これは、床付き布枠がA、B、Cのように布材に引っ掛けるタイプのもではなく、くさび結合式によるものであるためであり、床付き布枠の水平構としての効果がA、B、Cより大きく発揮されていたと考えられる。

(2) 6層3スパン全面荷重実験

全面荷重実験は、全面積載を想定した場合の支柱の強度を調べるために行ったが、今回の実験結果より支柱1本当たりの強度を求めた結果、Table 4に示すとおりとなった。

Table 4より、くさび式足場の強度は単管足場の強度を34%～61%上回っていた。これは、壁つなぎ間隔、すなわち座屈長が単管足場の方が長いことも一つの理由と考えられるが、少なくとも本実験と同じ使用状況においては、くさび式足場は単管足場より強度が高いと言える。

なお、一般的に単管足場の支柱1本にかかる限界荷重は6.86kNとされており、安全率を2とした場合、今回の実験で使用した単管足場およびくさび式足場は

十分安全であったと考えられる。

(3)5層3スパン部分荷重実験

この実験では、壁つなぎのレベルに床付き布杵が取り付けられておらず、座屈を防止するための水平構の効果は余り期待できない。しかし、座屈形状を見ると壁つなぎのレベルで座屈方向が変化しており、座屈強度、座屈形状とも(1)の6層3スパン部分荷重実験と大きな違いは見られなかった。

また、(1)の単管足場と座屈長はほぼ同じであるが、

全て単管足場の強度を上回っていた。このため、床付き布杵が取り付けられていない位置に壁つなぎを取り付けた場合でも、床付き布杵および布材が一定間隔ごとに正しく取り付けられていれば、座屈防止にある程度効果を発揮するものと考えられる。

5.4 斜材効果に関する水平変位実験

実験結果として、Fig.32に水平荷重と水平変位量の関係を示す⁵⁾。Fig.32における曲線の傾きが大きいは

Table 3 Results of buckling tests on 5 or 6 story - 3 bay scaffold with ties.

6層または5層3スパンに組み立てた足場に壁つなぎを使用した場合の座屈強度実験の結果

実験の種類	くさび式足場 (kN)				単管足場 (kN)
	A	B	C	D	
6層3スパン部分荷重実験	162.8	117.7	119.0	130.0	112.8
6層3スパン全面荷重実験	255.0	210.8	245.0	218.0	157.9
5層3スパン部分荷重実験	158.9	121.6	113.0	—	—

Table 4 Strength per support based on the buckling tests to apply the vertical loads on all supports of 6 story - 3 bay scaffold.

6層3スパン全面荷重試験の結果より算出した支柱1本当たりの強度

種類	A	B	C	D	単管足場
支柱1本当たりの強度 (kN)	31.9	26.4	30.6	27.3	19.7

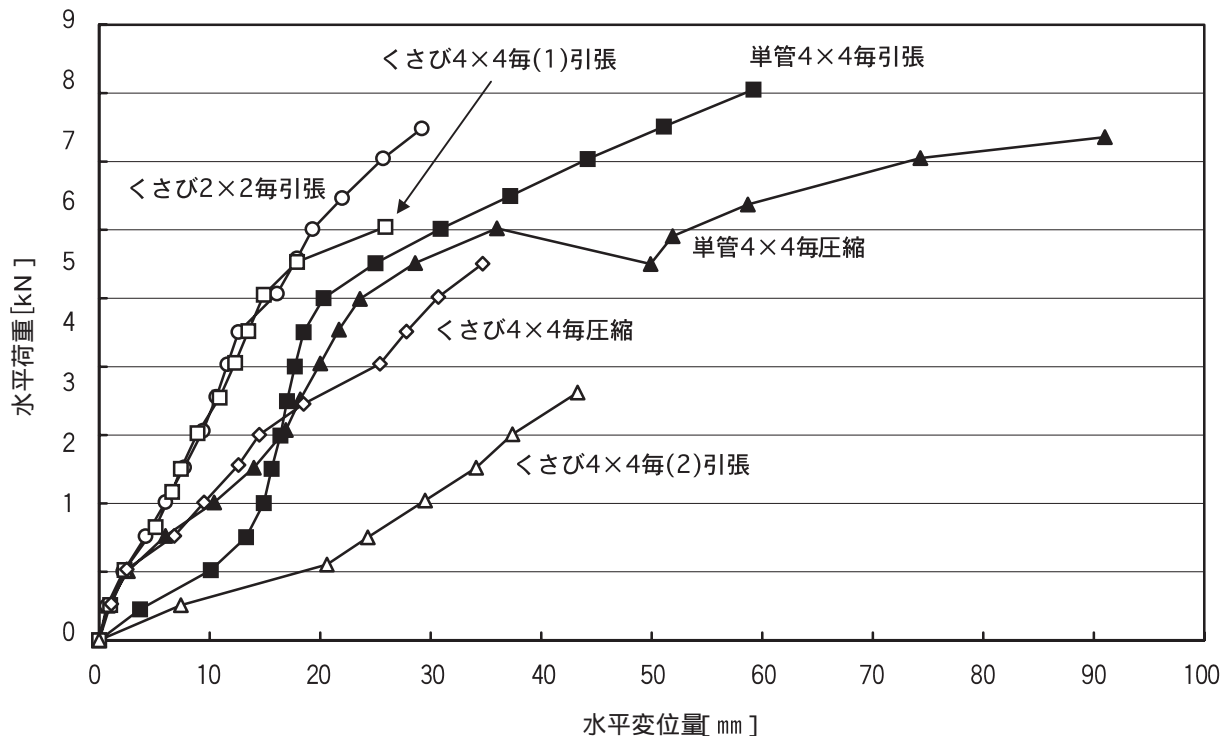


Fig. 32 Relation between horizontal load and displacement of the horizontal load tests.

水平変位実験における水平荷重と水平変位置の関係

ど、すなわち同一変位に対する荷重が大きいほど、支柱の座屈防止に対する効果が大きくなる。

Fig.32より、斜材を4スパン全てにわたって取り付けられた場合には、くさび結合式足場と単管足場の曲線の傾きに大きな差異は見られず、座屈防止に対する効果も同等と考えられる。しかし、斜材を1スパンのみに偏って取り付けられた場合（くさび4×4毎(2)引張、Fig.21参照）には、単管足場に比べ曲線の傾きが明らかに小さく、座屈防止に対する効果も小さいものと考えられる。このように傾きが小さくなった原因は、斜材を取り付けていないスパンでは水平荷重に抵抗する部材がないため、斜材を取り付けたスパンに比べ同一荷重に対する水平変位が大きくなったためである。このため、単管足場と同等の座屈防止効果を得るためには、斜材を全てのスパンにわたって取り付ける方がより効果的である。

6. 解析結果と考察

6.1 結合部の回転剛性

結合部の性能実験の結果より結合部の弾性結合係数 K_F を求めた結果、Table 5に示すとおりとなった。3.1(1)の結合部の曲げ実験では、Fig.26およびFig.27の弾性範囲内の直線の傾き P/δ を式(7)に適用することにより K_F を求めた（付録Fig.A1～A9参照）。一方、(2)の単位パネルのせん断実験では、同様にFig.28の弾性範囲内の直線の傾きより節点の弾性結合係数 K を求め、これを式(6)に適用することにより K_F を求めた。

Table 5より、結合部の曲げ実験と単位パネルのせん断実験の結果を比較すると、くさび結合部と単管足場の緊結金具ともに、結合部の曲げ実験により得られた K_F の方が値が大きくなった。また、結合部の曲げ実験による K_F は、Cの引き抜き方向を除いて、明らかに単管足場の緊結金具に比べくさび結合部の方が大きくなった。しかしながら、Cの場合は、引き抜き方

向に比べ打ち込み方向の K_F が非常に大きく、座屈時に支柱の結合部には打ち込み方向と引き抜き方向の双方の回転が生じることから、その平均値を取ると単管足場の緊結金具の約2倍であった。

一方、単位パネルのせん断実験による結合部の弾性結合係数 K_F は、A、B、C、D全てのくさび結合部において単管足場の緊結金具の値を上回っていた。これらことから考えると、今回の実験で対象としたA、B、C、D全てのくさび結合部の弾性範囲内の回転剛性は、単管足場の緊結金具より高いと考えられる。

6.2 弾性結合係数と座屈荷重

Table 5の結合部の弾性結合係数 K_F を用いて、式(1)の簡易計算式により、3.2の2層で幅600mmの四角塔の場合、および3.3(2)の6層3スパンの場合について、くさび式足場を対象として座屈荷重を計算した。3.3(2)では、座屈長を壁つなぎ間隔の2層分とした。その結果、Table 6に示すとおりとなった。結合部の曲げ実験の場合、引き抜き方向と打ち込み方向の2つの実験結果があり、これを式(1)では表現できないため、Table 6においては両者の平均値を用いて計算した。

Table 6より、3.2の2層の四角塔の実験については、全て計算値が実験値を上回っていた。一方、3.3(2)の6層3スパンの実験については、逆に大部分で実験値が計算値を上回っていた。この理由について考えると、Fig.11に示す2層の四角塔の場合には、実験において中間部の布材が期待したほど座屈防止に寄与していなかったこと、足場の下端に布材がないため座屈荷重が低下したことなどが挙げられる。一方、実際の使用状態に近い6層3スパンの構造についてはこれらの影響が少なく、簡易計算式により座屈強度が概ね安全側で推定できると言える。

6.3 有限要素法による解析

式(13)の P/δ に、3.1(1)の結合部の曲げ実験より

Table 5 Rotational rigidity of the wedge, K_F , based on the performance tests of the wedge joints.

結合部の性能実験の結果より計算した結合部の弾性結合係数 K_F

実験の種類		くさび式足場 (kN・m)				単管足場 (kN・m)
		A	B	C	D	
結合部の 曲げ実験	打ち込み	26.29	21.66	31.14	14.13	9.28
	引き抜き	32.16	30.14	6.48	25.67	
	平均	29.22	25.90	18.81	19.90	
単位パネルのせん断実験		21.81	23.69	10.18	19.45	7.17

得られた値を用いて有限要素法による解析を行い、くさび式足場の2層で幅600mmの場合について座屈強度を調べた。その結果、Table 7に示すとおりとなった。解析においては、6.2と同様に P/δ の引き抜き方向と打ち込み方向の平均値を用いた。

Table 7より、全ての場合において解析値と実験値が非常によく一致しており、本解析手法により高い精度で座屈強度を解析できることが確認できた。

この手法を用いて、式(13)の P/δ に結合部の弾性結合係数 K_F が20.0kN・mに相当する仮想的な値を代入して、くさびの緩みの影響を調べるための解析を行った。その結果、Table 8に示すとおりとなった。解析においては、Fig.24およびFig.25の最上段、中段、下段(3層の場合)それぞれにおいて、くさびが1箇所のみ緩んだ場合を想定した。

Table 8より、2層と3層のどちらの場合も、最上段の布材のくさびが緩んだ場合に最も座屈強度が低下した。特に、3層の場合は、くさびが全く緩んでいない場合に比べ座屈強度が50.0%に低下しており、最上

段におけるくさびの緩みの影響が非常に大きいことがわかった。一方で、2層では中段、3層では下段の布材のくさびが緩んだ場合には、座屈強度がほとんど低下していなかった。

これを、くさびが全く緩んでいない場合の変形図から考察することとして、解析における変形図を2層の場合はFig.33、3層の場合はFig.34に示す。Fig.33およびFig.34より、2層の中段および3層の下段の布材は支柱とほぼ直交しており、座屈にあまり抵抗していないと考えられる。一方、2層3層とも最上段の布材により支柱の変形が大きく拘束されており、座屈に大きく抵抗していることがわかる。よって、最上段の布材のくさびが緩んだ場合に、その布材の拘束力がなくなり座屈強度が大きく低下したと考えられる。

以上のことから、たとえ1箇所のくさびの緩みでも、緩みの場所により足場の座屈強度が大きく低下すると考えられる。特に、壁つなぎ近辺の支柱の変曲点において布材のくさびが緩んだ場合には、座屈強度が大きく低下するため注意が必要である。

Table 6 Comparison of buckling strength between experimental values and calculated values by Eq.(1).
座屈荷重の実験値と式(1)による計算値の比較

			A	B	C	D
2層の四角塔	結合部の 曲げ試験	実験値 (kN)	85.18	76.25	69.18	65.40
		式(1)による計算値 (kN)	113.02	108.10	88.70	90.41
		計算値/実験値×100 (%)	132.7	141.8	128.2	138.2
	単位パネルの せん断試験	実験値 (kN)	85.18	76.25	69.18	65.40
		式(1)による計算値 (kN)	101.72	104.70	74.14	89.70
		計算値/実験値×100 (%)	119.4	137.3	107.2	137.2
6層3スパン	結合部の 曲げ試験	実験値 (kN)	255.0	210.8	245.0	218.0
		式(1)による計算値 (kN)	226.0	216.2	177.4	180.8
		計算値/実験値×100 (%)	88.6	102.6	72.4	82.9
	単位パネルの せん断試験	実験値 (kN)	255.0	210.8	245.0	218.0
		式(1)による計算値 (kN)	203.4	209.4	148.3	179.4
		計算値/実験値×100 (%)	79.8	99.3	60.5	82.3

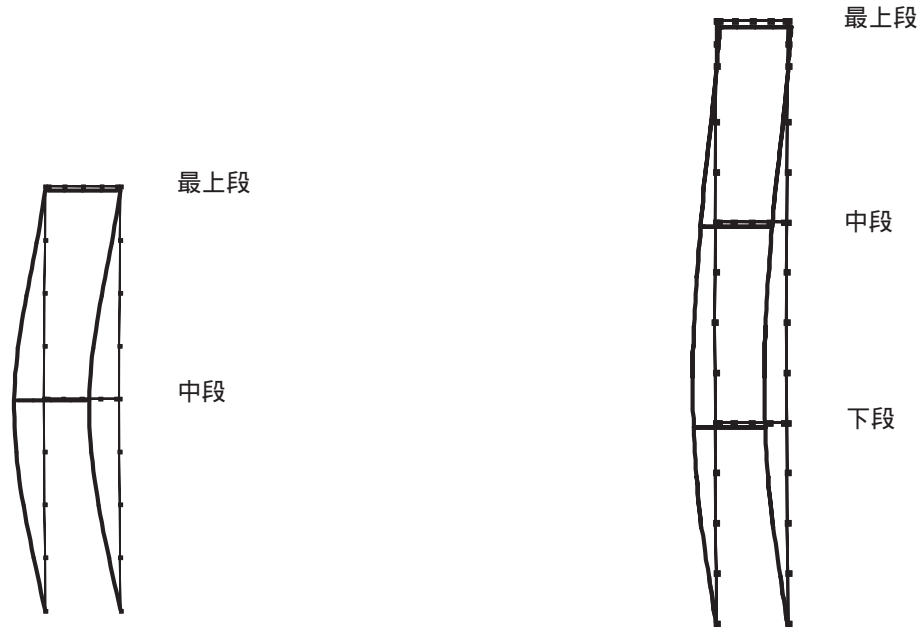
Table 7 Comparison of buckling strength between experimental values and analytical values by FEM.
座屈荷重の実験値とFEMによる解析値の比較

	A	B	C	D
実験値 (kN)	85.18	76.25	69.18	65.40
有限要素法による解析値 (kN)	79.03	76.73	67.72	68.68
解析値/実験値×100 (%)	92.8	100.6	97.9	105.0

Table 8 Results of FEM analysis that considers the effects of the wedge fitting condition.

くさびの緩みの影響を考慮した FEM 解析の結果

	2層			3層			
	緩みなし	最上段緩み	中段緩み	緩みなし	最上段緩み	中断緩み	下段緩み
解析値 (kN)	71.91	57.05	71.77	46.45	23.25	36.93	43.86
緩みあり／緩みなし×100(%)	—	79.3	99.8	—	50.0	79.5	94.4

Fig. 33 Buckling mode of 2 story scaffold by FEM analysis.
FEM 解析による 2 層の足場の変形図Fig. 34 Buckling mode of 3 story scaffold by FEM analysis.
FEM 解析による 3 層の足場の変形図

7. おわりに

くさび式足場の安全性を確認するため、一連の実験を行った。その結果、今回対象とした 4 種類のくさび式足場に限れば以下のことがわかった。

- (1) 結合部の性能実験の結果、一部の形状のくさび結合部で、単管足場の緊結金具と比較して引き抜き方向の回転剛性が低いものが見られた。
- (2) 2 層または 3 層の四角塔に組み立てられたくさび式足場の座屈強度実験の結果、支柱と布材をつなぐくさび結合部の座屈防止効果により、2 層に比べ座屈長の長い 3 層においても、オイラー式による極端な強度低下（長さの二乗に反比例）は見られなかった。このため、鉛直荷重に対する支柱の性能を十分に発揮するためには、布材が正しく等間隔に取り付けられている事が重要な構造要件と言える。
- (3) 壁つなぎは布材付近に取り付ける必要があり、これを労働安全衛生規則の高さ 5 m 以下（今回の場合 2 層ごと）に取り付けた場合には、層高 1.9m × 2 層のくさび式足場は層高 1.8m 以下 × 2 層の単管足場と比較して座屈強度が低いことがわかった。
- (4) くさびを手で押し込んだだけのものを「緩め」として座屈強度を調べた結果、くさびの打ち込みが緩い場合、程度の差はあるが、支柱の座屈強度が低下することが明らかとなった。
- (5) 6 層 3 スパンまたは 5 層 3 スパンの足場に対し、労働安全衛生規則に従い、壁つなぎを水平間隔 5.5m 以内、すなわち 3 スパンの両端に取り付けて鉛直荷重載荷実験を行った。壁つなぎの拘束を受けていない中央部 1 スパンの支柱のみに鉛直荷重を載荷する、6 層 3 スパン部分荷重実験の結果、くさび式足場は単管足場の場合と比較して、荷重

を受けていない両端の支柱が座屈に対し補強的な役割を果たしていないことがわかった。これは、くさび式足場の場合、布材が1スパンごとに縁が切れている構造であるためである。このため、くさび式足場の一部では、単管足場に比べ座屈長が短いにも関わらず座屈強度がほぼ同じであった。

- (6) 一方、全ての支柱に鉛直荷重を載荷する6層3スパン全面荷重実験の結果、本実験と同様の使用状況においては、くさび式足場は単管足場より強度が高いことがわかった。
- (7) 5層3スパン部分荷重実験の結果、床付き布枠が取り付けられていない位置に壁つなぎを取り付けた場合でも、床付き布枠および布材が一定間隔ごとに正しく取り付けられていれば、座屈防止にある程度効果を発揮することがわかった。
- (8) くさび式足場は単管足場の太筋交いと異なり、くさび結合を利用した専用斜材を1層1スパン毎に個々に取り付けることが多いが、水平変位実験の結果、単管足場と同等の座屈防止効果を得るためには、斜材を1スパンのみに偏って取り付けず、全てのスパンにわたって取り付ける方がより効果的であることがわかった。

また、実験結果を基に理論解析を行い、くさび式足場の安全性について検討した。その結果以下のことがわかった。

- (1) 結合部の性能実験の結果より、弾性範囲内において結合部の弾性結合係数を求めた。座屈時には、支柱の結合部に打ち込み方向と引き抜き方向の双方の回転が生じることから、その平均値で比較すると、くさび結合部の方が単管足場の緊結金具より弾性結合係数が高いことがわかった。よって、今回の実験においては、くさび結合部の方が単管足場の緊結金具より、弾性範囲内において回転剛性が高いと言える。
- (2) 実際の使用状態に近い6層3スパンの構造について、既に提案されている簡易計算式により座屈荷重を計算した。その結果、座屈強度が概ね安全側で推定できることがわかった。
- (3) 有限要素法による座屈強度の解析手法を提案し、実験値と比較した。その結果、解析値と実験値が非常によく一致しており、本解析手法により高い精度で座屈強度を解析できることが確認できた。
- (4) 有限要素法による解析の結果、たとえ1箇所のくさびの緩みでも、緩みの場所により足場の座屈強度が大きく低下することがわかった。特に、壁つなぎ近辺となる位置で布材のくさびが緩んだ場合

には、座屈強度が大きく低下するため注意が必要である。

謝辞

本実験および解析は、社団法人仮設工業会との共同研究として行ったものであり、同工業会の関係者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 小川勝教, 河尻義正, 大幢勝利, 武石和彦, 森宜制, くさび結合式型枠支保工の安全性—その1 くさび結合部の性能試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1-2, 1995.
- 2) 河尻義正, 小川勝教, 大幢勝利, 武石和彦, 森宜制, くさび結合式型枠支保工の安全性—その3 座屈荷重の理論的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.5-6, 1995.
- 3) 大幢勝利, 河尻義正, 小川勝教, くさび結合部を有する型枠支保工の座屈強度—斜材のない半剛結合骨組みの座屈強度について—, 産業安全研究所特別研究報告, RIIS-RR-94(1995), pp.45-51, 1995.
- 4) 大幢勝利, 高梨成次, 日野泰道, 河尻義正, くさび結合式足場の座屈強度, 平成12年度産業安全研究所年報, p.32, 2001.
- 5) 大幢勝利, くさび結合式足場の安全性に関する研究—斜材効果に関する水平変位実験—, 平成13年度産業安全研究所年報, p.34, 2002.

(平成15年1月31日 受理)

付録 結合部の曲げ実験における荷重と変位の関係

本資料における簡易計算式(式(1))を用いれば、簡便にくさび式足場の座屈荷重をある程度推測することができる。そのためには、結合部の弾性結合係数 K_F を調べる必要があるが、本資料において示した結合部の曲げ実験は、 K_F を調べるための有用でありかつ簡便な方法の一つであると考えられる。そこで、本資料で実施した結合部の曲げ実験における荷重と変位の関係、およびそれらより求めた結合部の弾性結合係数 K_F をFig. A1~A9に示すこととする。Fig. A1~A9には、Fig. 26およびFig. 27に示した荷重と変位の関係の内、弾性範囲内(すなわち曲線の傾きが最初の直線部分)についてのみ示した。

結合部の弾性結合係数 K_F は、次に示す手順により求めた。

- (1) 各実験について、図中に示した直線の傾き P/δ (P :荷重, δ :変位)を最小二乗法により求める。
- (2) 実験はそれぞれ3回ずつ行ったため、3回の P/δ の平均値を求める。
- (3) 結合部の弾性結合係数 K_F を、次式(式(7))より求める。

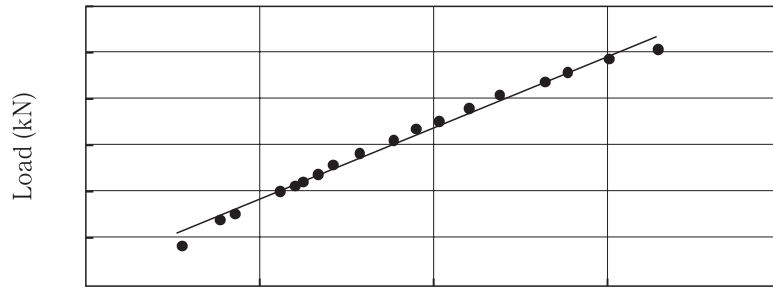
$$K_F = \frac{P}{\delta} \times \frac{(\ell - d)^2}{8}$$

ここで、

ℓ : 布材の支点間隔

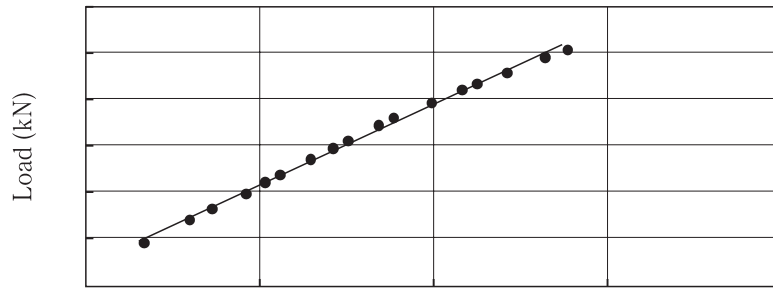
くさび結合部の場合, 300mm; 単管足場の緊結金具の場合, $150 \times 2 = 300$ mm

d : 支柱の直径, 48.6mm



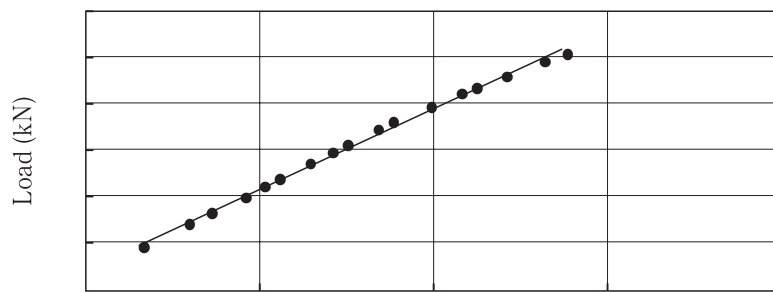
Displacement (mm)

(a) $P/\delta = 3.3058 \text{ kN/mm}$



Displacement (mm)

(b) $P/\delta = 3.1766 \text{ kN/mm}$

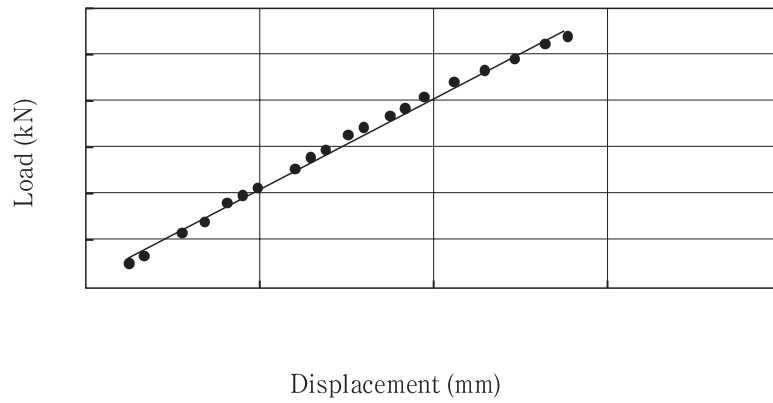


Displacement (mm)

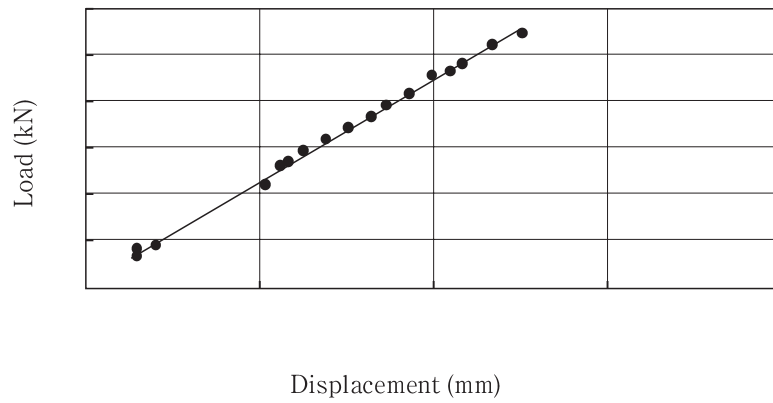
(c) $P/\delta = 3.5014 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値 , 3.3279 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $26.29 \text{ kN}\cdot\text{m}$

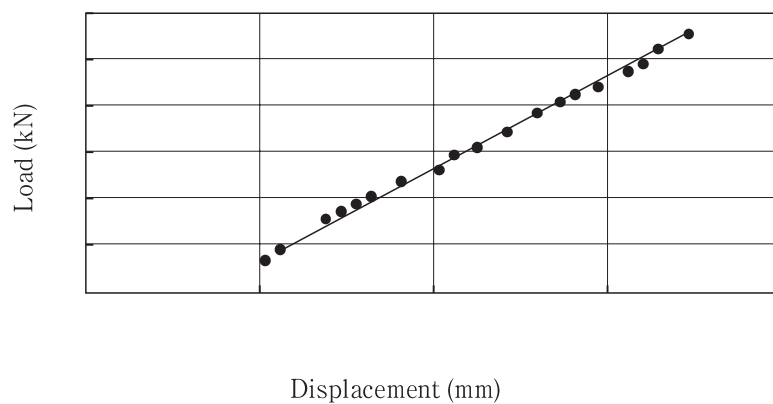
Fig. A1 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type A (driving direction).
くさび結合部 Type A に対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (打ち込み方向)



(a) $P/\delta = 3.9216 \text{ kN/mm}$



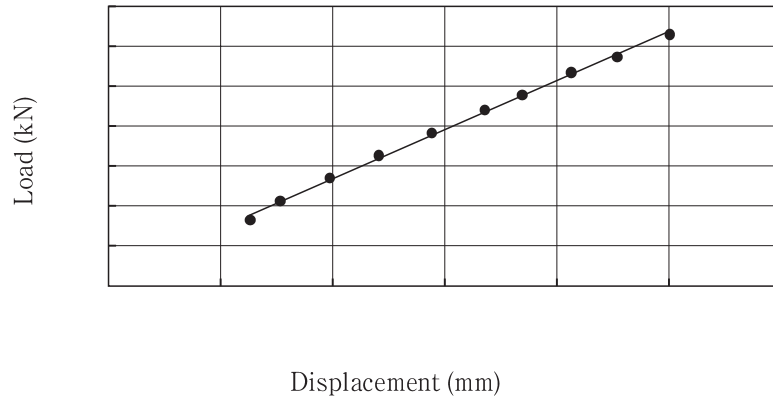
(b) $P/\delta = 4.4903 \text{ kN/mm}$



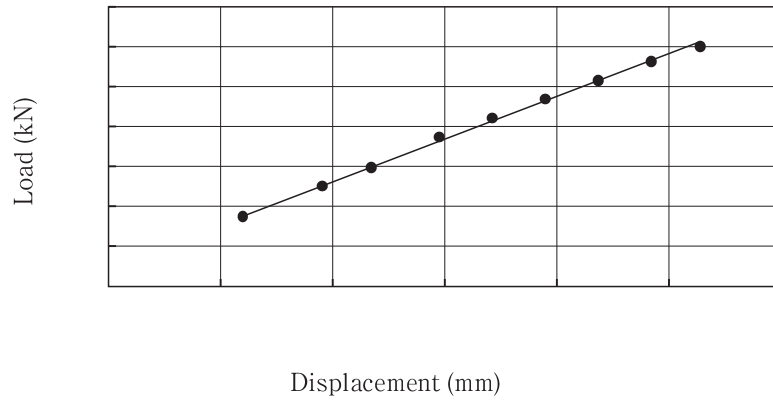
(c) $P/\delta = 3.8008 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 4.0709 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $32.16 \text{ kN}\cdot\text{m}$

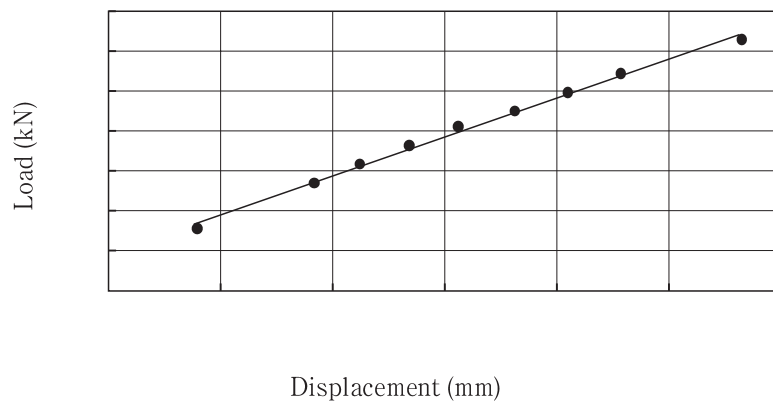
Fig. A2 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type A (pulling direction).
くさび結合部 Type A に対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (引き抜き方向)



(a) $P/\delta = 3.0553 \text{ kN/mm}$



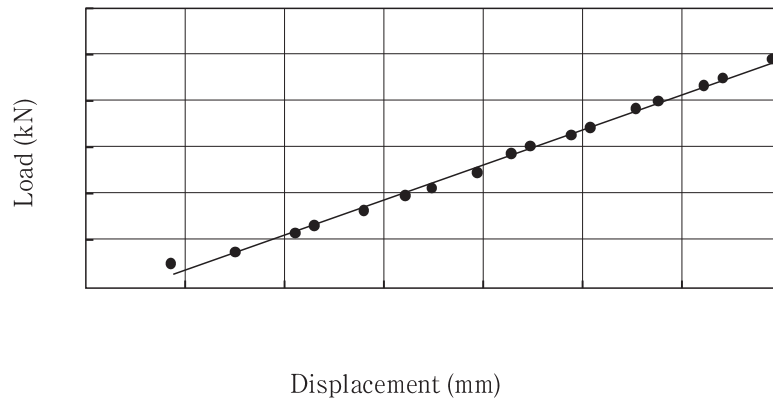
(b) $P/\delta = 2.6767 \text{ kN/mm}$



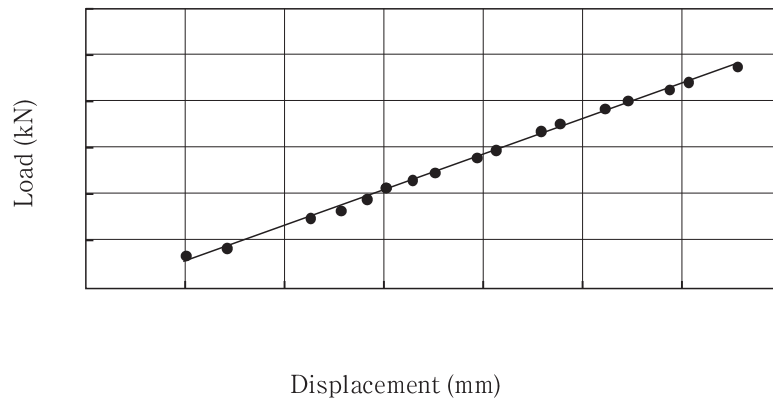
(c) $P/\delta = 2.4919 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値 , 2.7413 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $21.66 \text{ kN}\cdot\text{m}$

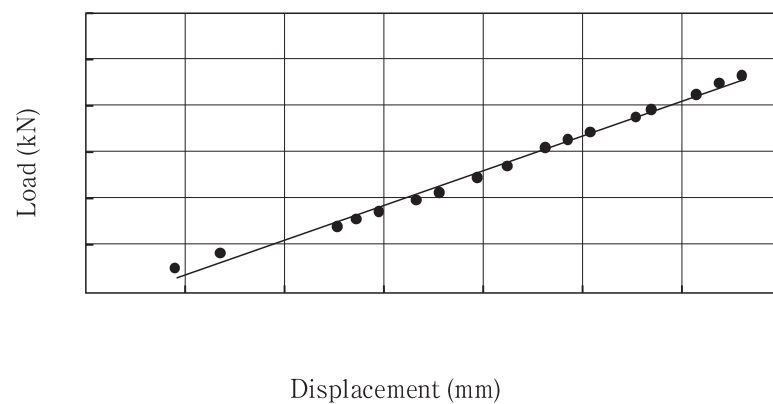
Fig. A3 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type B (driving direction).
くさび結合部 Type Bに対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (打ち込み方向)



(a) $P/\delta = 3.7453 \text{ kN/mm}$



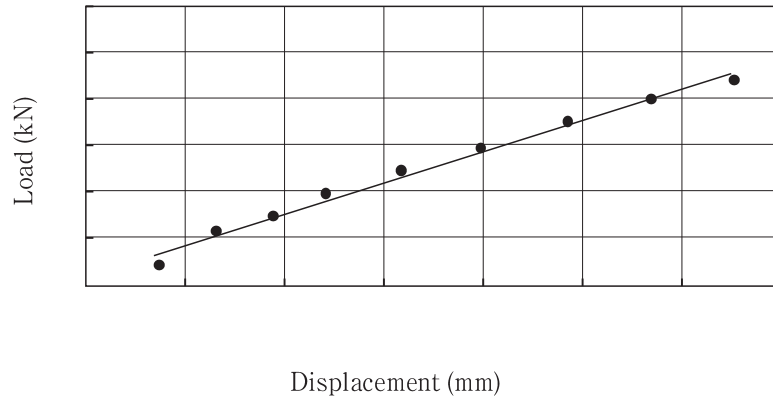
(b) $P/\delta = 3.8745 \text{ kN/mm}$



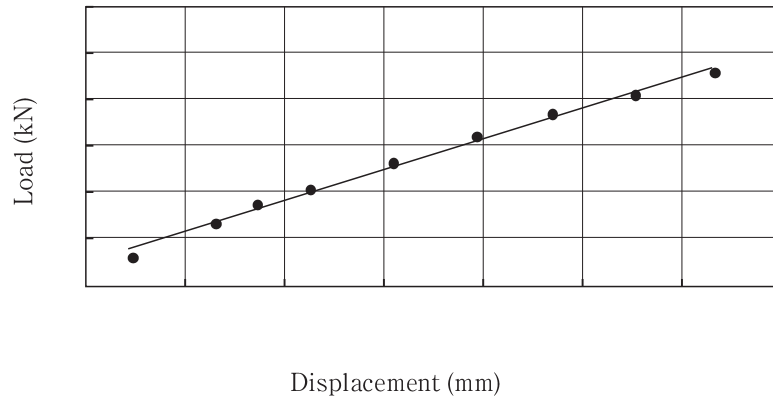
(c) $P/\delta = 3.8526 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 3.8151 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $30.14 \text{ kN}\cdot\text{m}$

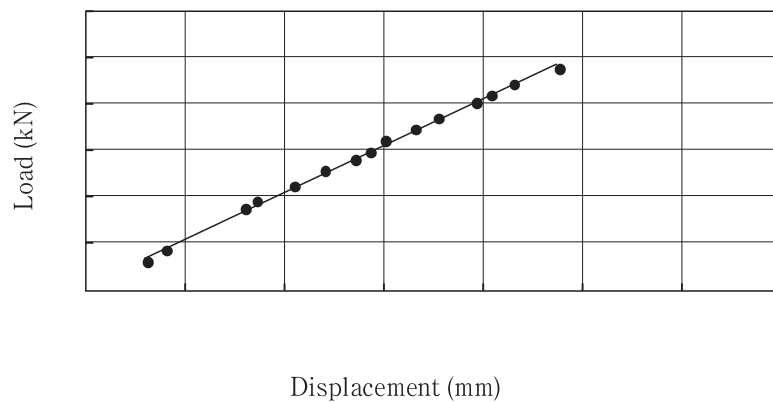
Fig. A4 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type B (pulling direction).
くさび結合部 Type B に対する曲げ実験における荷重と変位の関係(引き抜き方向)



(a) $P/\delta = 3.3647 \text{ kN/mm}$



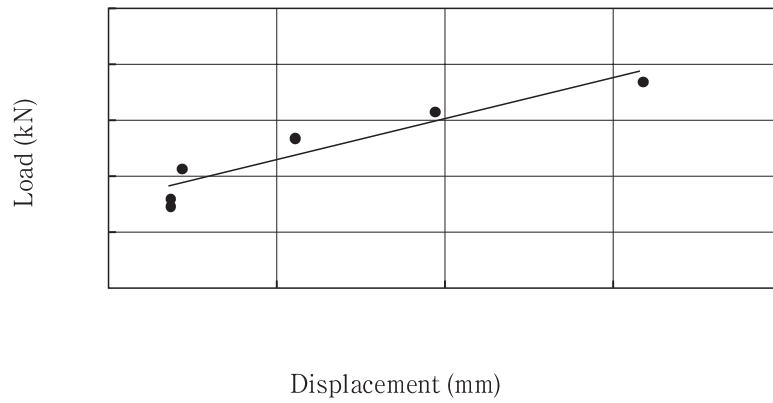
(b) $P/\delta = 3.4235 \text{ kN/mm}$



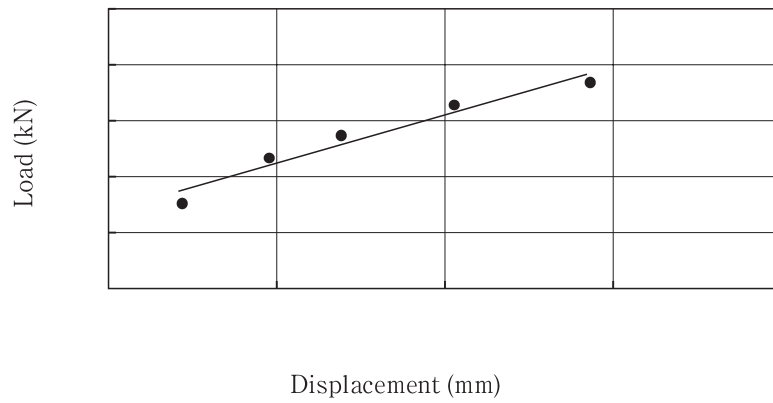
(c) $P/\delta = 5.0378 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 3.9420 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $31.14 \text{ kN}\cdot\text{m}$

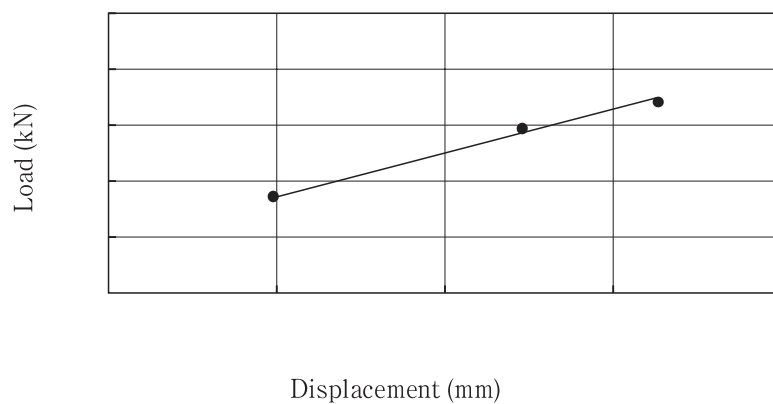
Fig. A5 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type C (driving direction).
くさび結合部 Type C に対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (打ち込み方向)



(a) $P/\delta = 0.8021 \text{ kN/mm}$



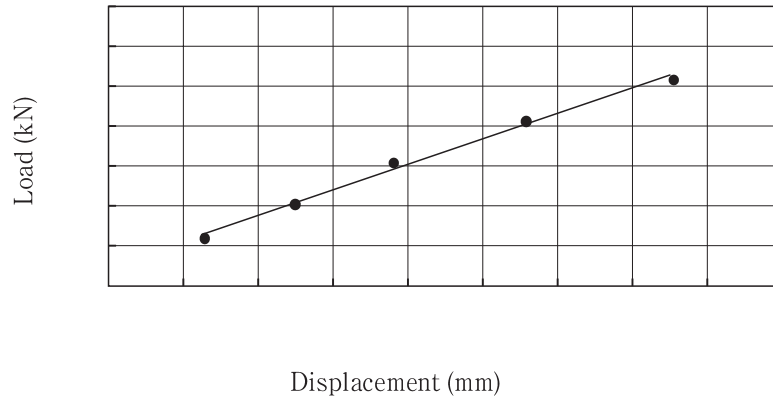
(b) $P/\delta = 0.8929 \text{ kN/mm}$



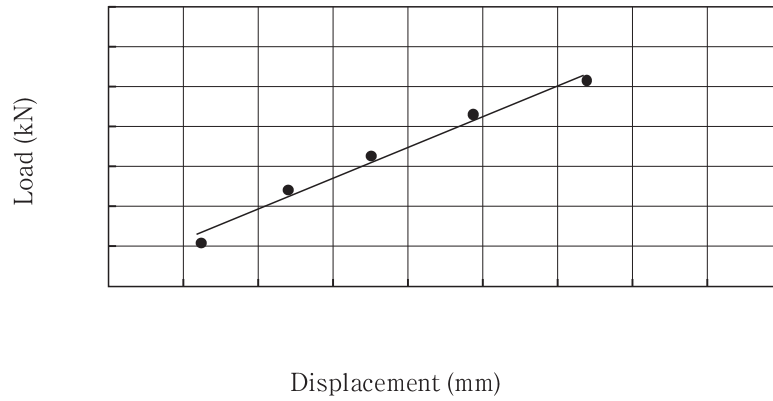
(c) $P/\delta = 0.7649 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 0.8200 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $6.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$

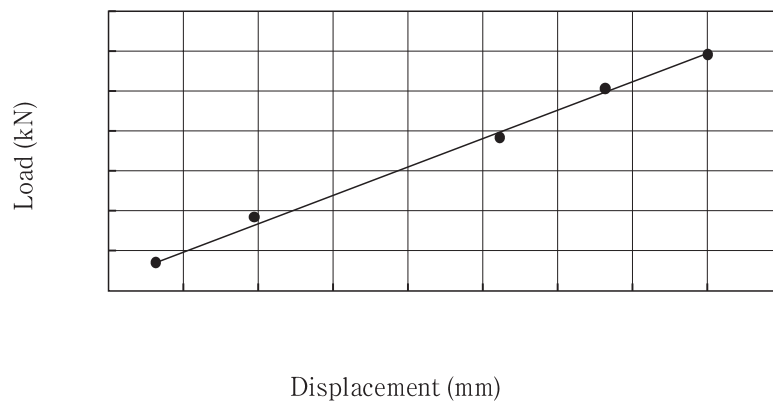
Fig. A6 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type C (pulling direction).
くさび結合部 Type C に対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (引き抜き方向)



(a) $P/\delta = 1.5830 \text{ kN/mm}$



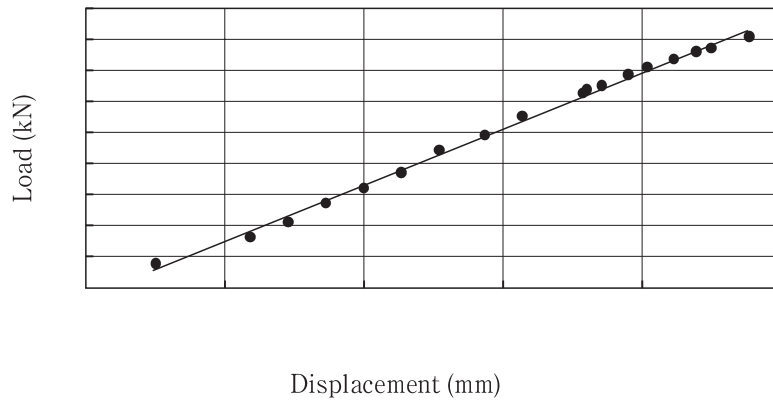
(b) $P/\delta = 2.0263 \text{ kN/mm}$



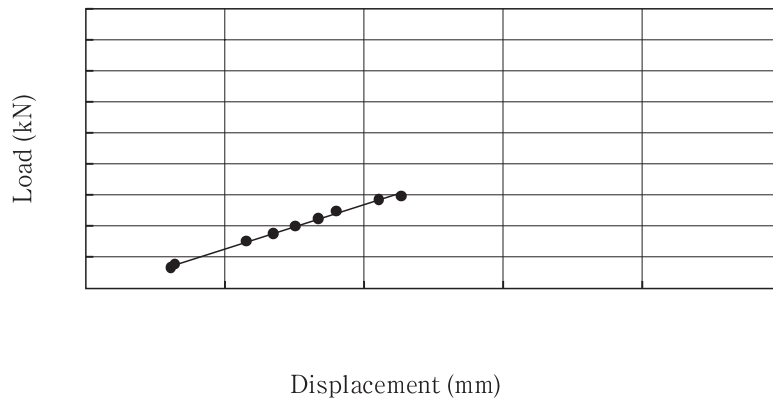
(c) $P/\delta = 1.7569 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 1.7887 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $14.13 \text{ kN}\cdot\text{m}$

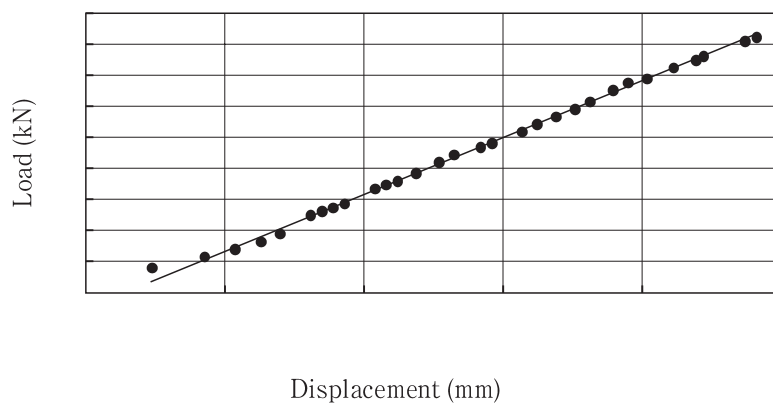
Fig. A7 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type D (driving direction).
くさび結合部 Type D に対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (打ち込み方向)



(a) $P/\delta = 3.6062 \text{ kN/mm}$



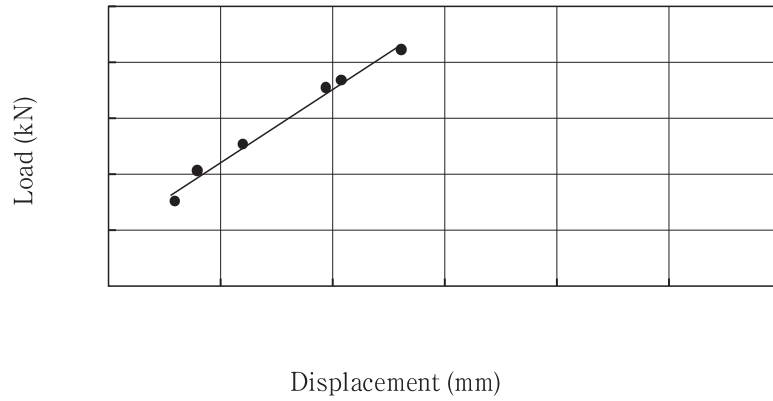
(b) $P/\delta = 2.6406 \text{ kN/mm}$



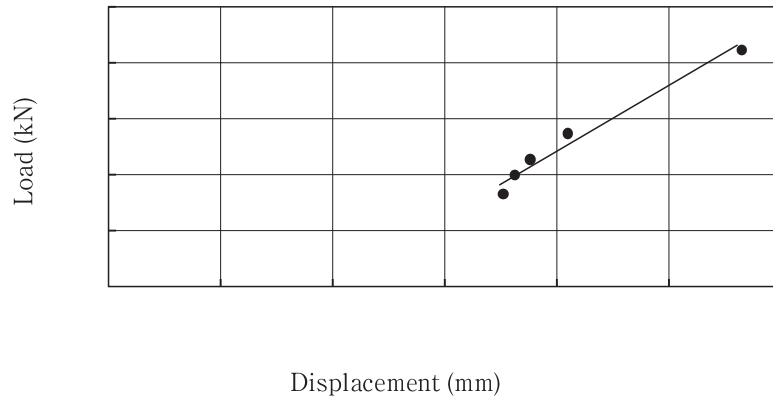
(c) $P/\delta = 3.5026 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 3.2498 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $25.67 \text{ kN}\cdot\text{m}$

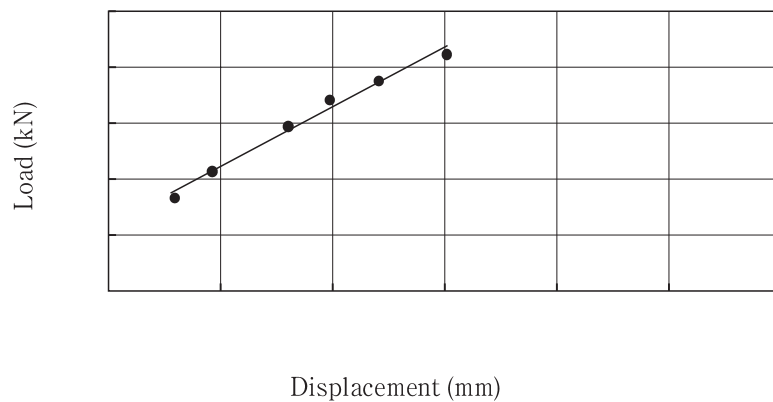
Fig. A8 Relations between load and displacement from the bending test of the wedge joint type D (pulling direction).
くさび結合部 Type D に対する曲げ実験における荷重と変位の関係 (引き抜き方向)



(a) $P/\delta = 1.3043 \text{ kN/mm}$



(b) $P/\delta = 1.1723 \text{ kN/mm}$



(c) $P/\delta = 1.0474 \text{ kN/mm}$

P/δ の平均値, 1.1747 kN/mm ; 結合部の弾性結合係数 K_F , $9.28 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Fig. A9 Relations between load and displacement from the bending test of the clamp of the pipe scaffolds.
単管足場の緊結金具に対する曲げ実験における荷重と変位の関係

Safety Document of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-SD-NO.18(2003)

抄録

くさび式足場の強度

大幢勝利，高梨成次，日野泰道

近年，建築工事用足場において，くさびを用いて組み立てる方式の足場が数多く開発され，様々な現場で使用されている。しかし，これらのくさび式足場については，実験データが少なく座屈などに対する強度特性が明らかにされていない。また，くさび式足場は，使用中に結合部の緩み等が発生する可能性があり，この緩みにより足場全体の強度が低下することが懸念される。そこで，くさび式足場の安全性を確保するための基礎資料を得ることを目的として，従来の単管足場の組み立て基準に従った各種実験および数値解析を行い，単管足場と比較することによりくさび式足場の安全性について検討した。本資料においては，これらの結果を基に，くさび式足場の安全な使用方法，およびくさびの緩みが足場の座屈強度に与える影響等について示した。

(図43，表 8，参考文献 5)

+

+

+

産業安全研究所安全資料 NIIS-SD-NO.18 (2003)

発行日 平成15年 3月25日
発行所 独立行政法人産業安全研究所
〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1丁目 4番 6号
電話 0424-91-4512 (代)

印刷所 (有)祥栄堂

+

Strength of Wedge Joint Scaffolds

CONTENTS

1. Introduction	(2)
2. Types of Wedge Joint Scaffolds and Outline of Experiments	(2)
3. Experiment Methods	(3)
4. Analysis Methods	(8)
5. Results of Experiment and Discussion	(11)
6. Results of Analysis and Discussion	(17)
7. Conclusion	(19)
Appendix: Relations between Load and Displacement on Bending Tests of Joints	(21)