

Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-94 (1995)
UDC 69.057.5:624.075.4:624.078.4

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* —

大幢勝利**, 河尻義正**, 小川勝教**

Analysis of Buckling Load on the Wedge-Type Shorings

— On Buckling Load of Semi-Rigid Frames without Braces —

by Katsutoshi OHDO**, Yoshimasa KAWAJIRI** and Katsunori OGAWA**

Abstract : In case of concrete works, wedge-type shorings are often used and conventional shorings as frame-type shorings tend to be replaced by them. These shorings have wedge connections and the connections are semi-rigid of which flexural rigidity is between fully rigid and pinned connections. The semi-rigid connections as the wedges contribute to increasing of buckling strength of the shorings, and these strength is usually examined by the actual buckling tests because the design method of the shorings with the semi-rigid connections is not clarified yet.

The actual tests can not be performed so many times, therefore it is difficult to examine the strength of all wedge-type shorings assembled in various conditions. So the strength of temporary structures like these shorings is usually calculated by simple models with an assumption that the semi-rigid connection is either fully rigid or pinned one.

Recently, some collapse accidents of the wedge-type shorings happened. For the purpose of preventing these accidents, it needs to develop a new design method to calculate the strength of almost all wedge-type shorings.

In this paper, analyses on the buckling load of the wedge-type shorings were performed by assuming flexural rigidity of the wedge connections, which had been confirmed by bending tests of the connections. Generally the semi-rigid connections like the wedge connections were considered as rotational springs which had no length, but in these analyses the wedge connections were assumed as elastic-plastic beams which had length, because the length of the connections was very large and was thought to influence on the results of analyses.

The analyses were performed on three types of the wedge-type shorings and the results were compared with the those of the actual buckling tests. From these analyses and actual tests, the propriety of this analysis method was evaluated.

The results are summarized as follows:

- (1) From the bending tests of the wedge connections, it was found that flexural rigidity of the wedge connections could be expressed in two lines.
- (2) The buckling loads of the wedge-type shorings in the actual tests were 2.5 times or more than the Euler's loads, in which the connections were assumed as pinned.
- (3) From the comparison between the analyzed values and the calculated values by the simple equation which was based on the energy method, the analyzed values were greatly influenced by flexural rigidity of the wedge connections and boundary conditions of the shorings.

Keywords ; Shoring, Temporary structure, Wedge, Buckling, Flexural rigidity, Concrete work

* この研究の一部は 1995 年度日本建築学会大会学術講演会 (1995 年 8 月, 札幌) において発表した。

**建設安全研究部 Construction Safety Research Division

1. 緒 言

近年、橋梁などの建設工事現場において、組み立て解体が用意であることから、くさびを用いて部材を結合（以下、くさび結合と呼ぶ）し所定の構造に組み立てる方式の足場や型枠支保工が、従来の単管、クランプによって組み立てるわく組み方式のものに代わり数多く使用されるようになってきている。このくさび結合部は、ピン結合と剛結合の中間の剛性を持つ半剛結合となっており、それが構造物の強度に寄与するという利点を持っているが、半剛結合に対しては明確な計算方法が示されていないため、この形式の足場や型枠支保工の強度特性は通常実験的に求められている。しかし、こうした実験による確認は一部の条件で組み立てられた構造形式についてのみ行われており、様々な条件で組み立てられた構造に対しては対応しきれないと考えられる。こうした中、コンクリート打設時において、くさび結合式型枠支保工の倒壊災害がいくつか発生しており¹⁾、このような災害を未然に防ぐためには、様々な構造形式に対応できる設計計算方法を考案する必要がある。

そこで本研究では、実験的に求めた半剛結の特性に関するデータを用い、斜材を設けていない場合のくさび結合式型枠支保工の座屈強度について有限要素法に

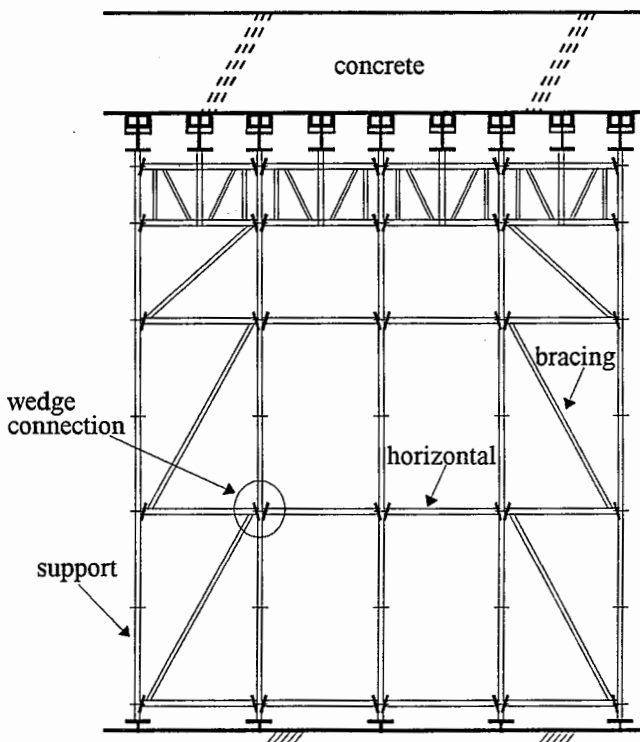


Fig. 1 An example of a wedge-type shoring.
くさび結合式型枠支保工の例

よる解析を行った。さらに、その解析結果を実物大座屈実験の結果と比較することにより、本解析方法の妥当性について検討した。

2. 実験方法

2.1 くさび結合式型枠支保工の構造

くさび結合式型枠支保工は、あらかじめ支柱に溶接されている受け金具と、水平材に溶接されているくさび付金具で支柱と水平材を結合し、それを所定の構造にまで組み立てていくものであり、その使用例を Fig. 1 に示す。くさび結合はこの図のような型枠支保工の他

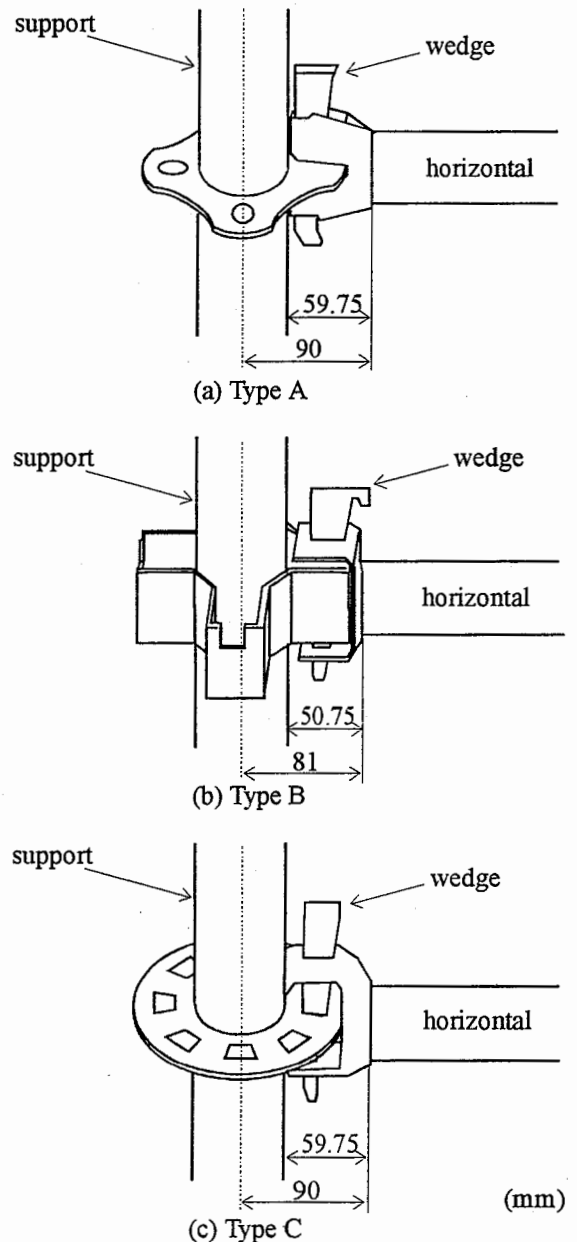


Fig. 2 Forms of the wedge connections.
くさび結合部の形状

Table 1 Specifications of the supports and horizontals.
支柱と水平材の仕様

Type of wedge connection	Quality of material	Diameter (mm)	Thickness (mm)
A	Support	STK500	60.5
	Horizontal	STK500	42.7
B	Support	STK500	60.5
	Horizontal	STK500	42.7
C	Support	STK540	60.5
	Horizontal	STK540	42.7, 48.6

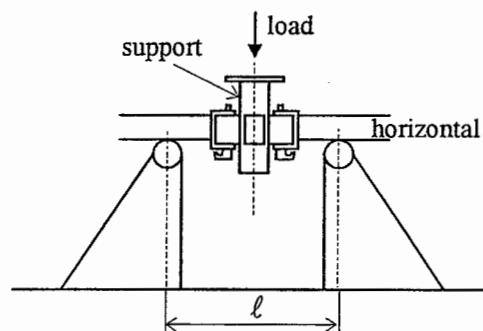


Fig. 3 An outline of the bending test of the wedge connections.

くさび結合部の曲げ実験の概要

に、足場としても使用されている。

くさび結合部には、フランジタイプやボックスタイプなど様々な形状があるが、本研究ではその中で Fig. 2 に示す 3 種類の形状のものを対象とした。これらは、同図のようにくさびを打ち込むことにより結合されており、結合部は半剛結合となっている。このため、有限要素法により解析する場合には、この半剛結合の特性を十分に認識することが必要となる。そこで、結合部の一部を取り出し曲げ実験を行い、その結果より得られた結合部の回転剛性をパラメータとして座屈解析を行うこととした。実験および解析対象とした、各タイプのくさび結合部を持つ支柱および水平材の仕様は、Table 1 に示すとおりである。

2.2 結合部の曲げ実験

くさび結合部の回転剛性を求めるため、支柱と水平材の結合部分のみを取り出し曲げ実験を行った。Fig. 3 に示すように、結合部を支点間に架け渡し、圧縮試験装置により支点中央に鉛直荷重を与え、この時の荷重 P と中央部のたわみ量 δ の関係を調べた。その際、支点間隔 l はくさび結合部の形状を考慮して A タイプでは 220 mm、B タイプでは 300 mm、C タイプでは 250 mm とした。なお、中央部のたわみ量 δ は荷重 100 kg ごとにダイヤルゲージ式変位計で測定した。

2.3 くさび結合式型枠支保工の実物大座屈実験

実物大座屈実験は、2.2 節で行った実験と同じ結合方法、材料の部材を用いて組み立てられた供試体について行った。供試体は、Fig. 4 に示すように A タイプでは 5 層 1 スパン、B タイプでは 4 層 1 スパン、C タイプでは 3 層 1 スパンの四角塔に組み立てた 3 種類の型枠支保工であり、斜材を設けていないものである。ここで、A タイプの支柱間隔は 1829 mm、水平材間隔は 1725 mm、B タイプの支柱間隔は 1200 mm、水平材間隔は 1700 mm、C タイプの支柱間隔は 687.5 mm、水平材間隔は 1200 mm とした。また、供試体の材端

の支持条件として、支柱の下端はジャッキベース、上端は大引き受けジャッキとし、ジャッキの繰り上げ高さは、A タイプでは 580 mm、B タイプでは 175 mm、C タイプでは 350 mm とした。実験は、300tonf 垂直荷重試験機で供試体頂部に鉛直荷重を載荷する方法で行い、それぞれのくさび結合式型枠支保工の座屈荷重を求めた。

3. 解析方法

くさび結合部のような半剛結合部をモデル化する場合、節点を回転バネと考えて計算する方法^{2),3)}が提案されているが、ここで対象としたくさび結合部は部材長に占める結合部の大きさの割合(例えば C タイプで水平材の間隔が 687.5 mm の場合約 20%)が非常に大きいいため、結合部の大きさを考慮する必要があると思われる。そこで、結合部を長さのある一種の弾塑性梁と考えて解析することとした。

2.2 節の曲げ実験での供試体を Fig. 5 のようにモデル化すると、結合部に荷重 P を与えた時の結合部と水平材のたわみ量 δ は以下のように表すことができる(付録参照)。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{Pl_1^3}{6E_1I_1} + \frac{Pl_2^3}{6E_2I_2} + \frac{Pl_1l_2(l_1 + l_2)}{2E_1I_1} \quad (1)$$

ここで、

δ : 部材のたわみ量

l : 部材の長さ

E : 部材の弾性係数

I : 部材の断面 2 次モーメント

接尾辞の 1 は結合部、2 は水平材を示す。

結合部の曲げ剛性は E_1I_1 で表されることから、式 (1) を E_1I_1 について解くと以下のようなになる。

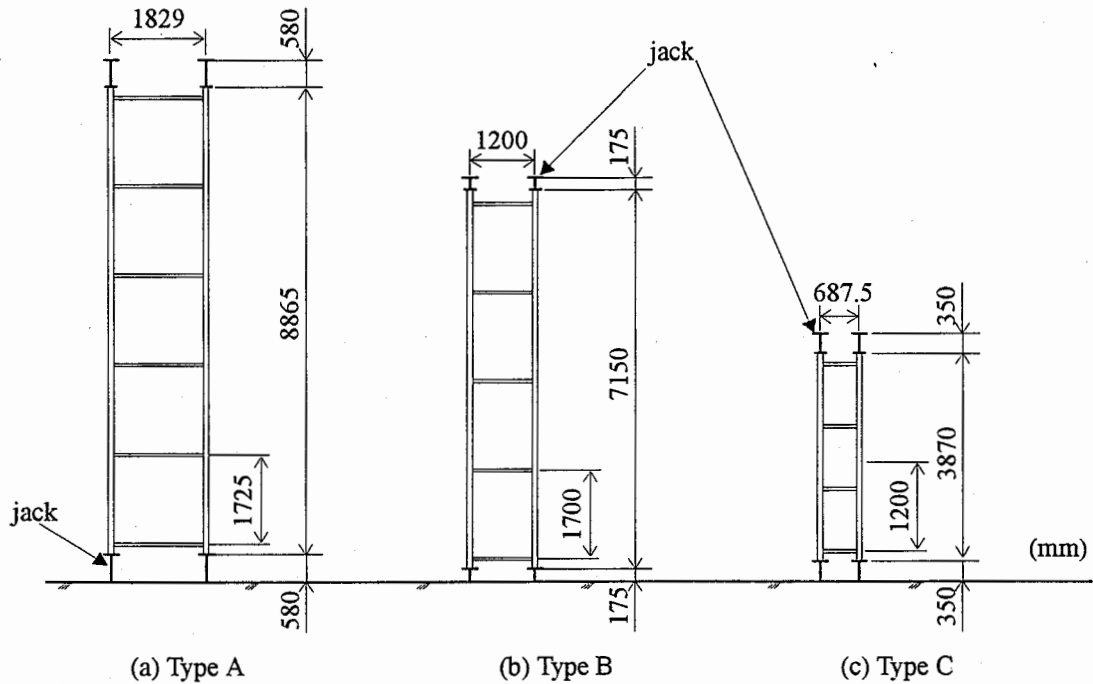


Fig. 4 Outlines of the wedge-type shorings for the actual buckling tests.
 実物大座屈実験用くさび結合式型枠支保工の概要図

$$E_1 I_1 = \frac{l_1^3 + 3l_1 l_2 (l_1 + l_2)}{\left(\frac{6}{P/\delta} - \frac{l_2^3}{E_2 I_2} \right)} \quad (2)$$

式(2)における部材1の長さ l_1 は、Fig. 5より支柱の半径 r を含んだものである。そこで、部材1の長さをくさび結合部の大きさ $l_1 - r$ と考えると、式(2)は次のように書き換えることができる。

$$E_1 I_1 = \frac{(l_1 - r)^3 + 3(l_1 - r)l_2[(l_1 - r) + l_2]}{\left(\frac{6}{P/\delta} - \frac{l_2^3}{E_2 I_2} \right)} \quad (3)$$

式(2)はくさび部の回転による支柱の局所的な変形を考慮し、結合部に支柱を含めた部分を弾塑性梁と考えた場合の曲げ剛性 $E_1 I_1$ を表し、式(3)は支柱の局所的な変形を考慮せず、くさび部のみを弾塑性梁と考えた場合の $E_1 I_1$ を表す。解析は前者をケース1、後者をケース2として、両者について行った。また、式(2)、(3)における P/δ には、結合部の曲げ実験より得られた値を用いた。

座屈解析は、2.3節での実物大座屈実験の供試体を骨組みモデル化することにより行った。その際、支柱とジャッキの境界では連続性が無いものとして、支柱の上下端をピンとすることにより、ジャッキを除いた部分についてモデル化を行った。また、支柱および水平材を表す部材の断面等の諸量には、Table 1より計算

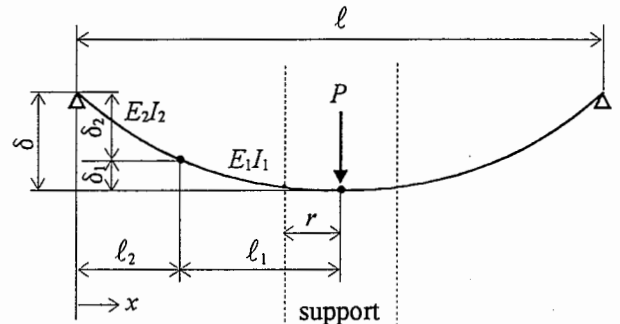


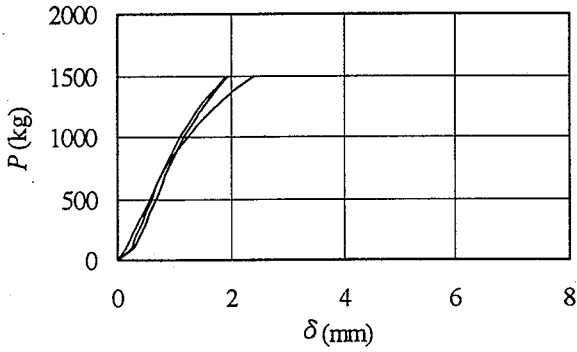
Fig. 5 Deformation of the wedge connections in the bending tests.
 曲げ実験でのくさび結合部の変形

される値を用いた。解析は、支柱頂部の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各くさび結合式型枠支保工の座屈荷重とした。

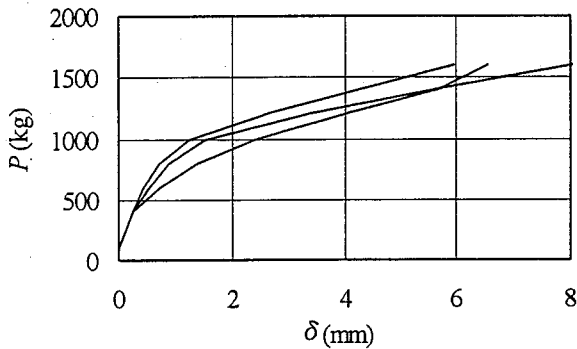
4. 実験および解析結果

4.1 結合部の曲げ剛性

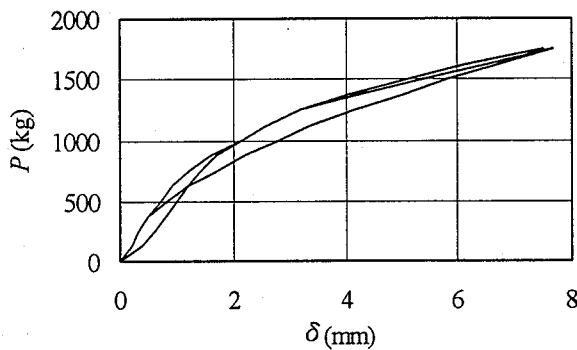
結合部の曲げ実験の結果を、荷重 P -たわみ量 δ 曲線として Fig. 6 に示す。同図より、どのタイプにおいても同様に、荷重はたわみ量約 1 mm まで直線的に立ち上がり、その後変曲して以降緩やかに増加することがわかる。そこで、たわみ量 1 mm を境にこの曲線を2本の直線で近似することとし、最小二乗法により2本の直線の傾きを求め、これを前出の式(2)、(3)の P/δ



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C

Fig. 6 $P-\delta$ curves of the wedge connections.
くさび結合部の $P-\delta$ 曲線

に等しいものとして、くさび結合部の曲げ剛性 $E_1 I_1$ を求めた。Table 2 に各タイプの $E_1 I_1$ の平均を示すが、結合部の変形が $\delta \leq 1$ mm に相当する場合は同表の1次の $E_1 I_1$ を、 $\delta > 1$ mm の場合は2次の $E_1 I_1$ を用いて解析した。

4.2 実物大座屈実験

四角塔に組み立てたくさび結合式型枠支保工の実物大座屈実験の結果を Table 3 に示す。どのタイプの型枠支保工も、骨組み全体が湾曲するような形で全体座屈した。

Table 2 Flexural rigidity of the wedge connections.
くさび結合部の曲げ剛性

Type of wedge connections	Flexural rigidity, $E_1 I_1$ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^2$)			
	Case 1		Case 2	
	1st	2nd	1st	2nd
A	2.05×10^6	1.28×10^6	7.81×10^5	4.86×10^5
B	3.56×10^6	6.58×10^5	1.63×10^6	3.01×10^5
C	1.87×10^6	5.32×10^5	7.98×10^5	2.27×10^5

1st : Flexural rigidity by first P/δ ($\delta \leq 1$ mm)

2nd : Flexural rigidity by second P/δ ($\delta > 1$ mm)

Table 3 Results of the actual buckling tests.
実物大座屈実験結果

Type of wedge-type shoring		Buckling load (tonf)		
		Total	Per column	Average
A	No. 1	6.5	1.63	1.74
	No. 2	7.4	1.85	
B	No. 1	13.0	3.25	3.13
	No. 2	12.0	3.00	
C		26.4	6.60	6.60

4.3 座屈解析

くさび結合式型枠支保工の座屈解析の結果を Table 4 に示す。同表には、結合部をピンと考えた場合のオイラーの座屈荷重と、その荷重に結合部の剛性を加味した簡易計算式による座屈荷重も示してある。これらの計算においては、前述したように座屈長を全てジャッキを除いた支柱の長さとした。この座屈長は、実験で全体座屈した時のみかけの座屈長とほぼ同じものと思われる。

4.3.1 くさび結合部の剛性を無視した場合の座屈荷重

座屈荷重の実験値を、結合部をピンとした場合の計算値と比較してみる。結合部がピンの場合の支柱1本あたりの座屈荷重 P_{cr} は、次のオイラーの式により求めることができる。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I_V}{l_V^2} \quad (4)$$

ここで、

$E I_V$: 支柱の曲げ剛性

l_V : 支柱の長さ

式(4)による計算値の実験値に対する比率は Table 4 に示してあるが、どのタイプのくさび結合式型枠支保工でも、その比率は40%以下と非常に小さくなっている。これは、くさび結合部の回転剛性が支柱の湾曲に対し大きく抵抗しているためであり、ピン結合のよう

Table 4 Results of the analyses.
解析結果

Type of wedge-type shoring	Buckling load of test per column (tonf)	Euler's load		Calculation by eq. (5)		Analysis by F.E.M.			
		Buckling load (tonf)	Percentage* (%)	Buckling load (tonf)	Percentage* (%)	Case 1		Case 2	
						Buckling load (tonf)	Percentage* (%)	Buckling load (tonf)	Percentage* (%)
A	1.74	0.56	32	1.68	97	1.92	110	1.42	82
B	3.13	0.86	27	2.95	94	3.47	111	2.84	91
C	6.60	2.56	39	4.74	72	5.48	83	4.39	67

*Percentage of analyzed values to experimental values.

に支柱の湾曲に対し全く抵抗しないものに比べ、くさび結合は支柱の座屈荷重に大きな影響を及ぼしているものと思われる。

4.3.2 簡易計算式による検討

くさび結合式型枠支保工の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^{4),5)}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。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_V}{\ell_V^2} + \frac{K}{a} \quad (5)$$

ここで、

- K : 支柱と水平材の節点の弾性結合係数 (弾性範囲)
- a : 水平材の平均間隔 (= ℓ_V/n で n は水平材の数)

式(5)の第一項は式(4)と同様にオイラーの式であり、第二項は結合部の回転剛性と水平材の数に関するものである。また、節点の弾性結合係数 K は、以下のように求められる。

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

$$K_F = \frac{M}{\theta_F} \quad (7)$$

ここで、

- b : 水平材の長さ
- EI_H : 水平材の曲げ剛性
- K_F : 曲げ実験より求められるくさび結合部の弾性結合係数 (弾性範囲)
- M : 曲げ実験で結合部に作用した曲げモーメント
- θ_F : 曲げ実験での結合部の回転角

この簡易式は、式(5)~(7)からわかるように、結合部を節点として考えており、結合部の回転を弾性範囲でのみ考慮している。その計算結果は Table 4 に示してあるが、結合部をピンとしたオイラーの座屈荷重に比べて実験値と非常によく一致している。このため、くさび結合式型枠支保工の座屈荷重を正確に把握する

ためには、結合部の回転剛性を考慮して計算する必要があると思われる。しかし、A, Bタイプでは実験値と計算値が非常によく一致しているものの、Cタイプでは計算値が実験値の72%と、他のタイプに比べその比率がかなり小さくなっている。この原因については、次項で考察する。

4.3.3 有限要素法による検討

結合部を弾塑性梁と考えた解析では、Table 4 からわかるように、全てのタイプで簡易計算式による座屈荷重に対して、ケース1ではそれより大きく、ケース2ではそれより小さい座屈荷重となった。また、A, Bタイプでは実験値がケース1と2の中間にあるが、Cタイプではケース1, 2とも実験値をかなり下回っている。

ここで、A, BタイプとCタイプの相違について考えてみる。Cタイプは他に比べ、水平材の長さが短く、支柱の長さも短いものである。水平材の長さの影響については、結合部の大きさを考慮するか否かであるが、簡易計算式と解析結果の関係からその影響は少なく、むしろ、結合部の回転剛性(結合部の曲げ実験による P/δ)の見積もり方に解析結果が左右されていると思われる。また、支柱の長さの影響は支柱の材端条件に関係するものであるが、本研究ではジャッキを除いた支柱の上下端をピンと考えてモデル化しており、支柱の長さが短くなるほどジャッキによる拘束の影響が大きくなると考えられる。このため、支柱の短いCタイプでは、簡易計算式および解析結果が実験値よりかなり小さくなったものと思われる。このことから、支柱が短い場合にも対応させるためには、ジャッキの拘束を含めた計算方法を考案する必要があることがわかる。

5. 結 言

本研究では、斜材を設けていない場合のくさび結合式型枠支保工の座屈強度を求めるために、実験的に求めたくさび結合部の回転剛性をパラメータとして、有限要素法による解析を行った。その際、水平部材の長さに対する結合部の大きさの影響がでないように、結

合部を長さのある一種の弾塑性梁と考えてモデル化を行った。また、本解析結果の妥当性について検討するため、実物大座屈実験の結果との比較を行った。

その結果、結合部を節点と考えた簡易計算式との比較から、結合部の大きさを考慮するか否かよりも、実験による結合部の回転剛性を見積もり方に解析結果が左右されていることがわかった。また、支柱の長さが短くなるほどジャッキによる拘束の影響が大きくなるため、ジャッキの拘束を含めた計算方法を考案する必要があることが示された。

本研究で解析対象としたくさび結合式型枠支保工は斜材を設けていないものであるが、今後は斜材を設けた場合に対しても解析を行う予定である。

謝 辞

本研究で行った実験は、当研究所と社団法人仮設工業会との共同研究の一部である。同工業会に感謝の意を表したいと思います。

付 録

Fig. 5 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。

$$U_i = 2 \left(\int_0^{\ell_2} \frac{M_1^2}{2E_2I_2} dx + \int_{\ell_2}^{\ell_1+\ell_2} \frac{M_2^2}{2E_1I_1} dx \right) \quad (\text{A-1})$$

ここで、

M_1, M_2 : 部材 1 (結合部), 2 (水平材) の曲げモーメント

式 (A-1) の M_1 および M_2 に Fig. 5 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。

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

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。

$$U_0 = \frac{1}{2} P \delta \quad (\text{A-3})$$

$U_i = U_0$ であることから、式 (A-2), (A-3) より、たわみ量 δ は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{P \ell_2^3}{6E_2I_2} + \frac{P}{6E_1I_1} [(\ell_1 + \ell_2)^3 - \ell_2^3] \\ &= \frac{P \ell_1^3}{6E_1I_1} + \frac{P \ell_2^3}{6E_2I_2} + \frac{P \ell_1 \ell_2 (\ell_1 + \ell_2)}{2E_1I_1} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

参 考 文 献

- 1) 建設業労働災害防止協会, 建設業安全衛生年鑑平成 5 年版, pp. 116~118 (1993.9).
- 2) Chen, W. F. and Toma, S., Advanced Analysis of Steel Frames, pp. 60~63, CRC Press (1994).
- 3) 植木・向山・庄村・加藤, 単層ラチスドームの載荷試験および弾塑性座屈解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 421, pp. 117~128 (1991).
- 4) 森・武石・一木・大幢, くさび式結合部を有する支柱式型枠支保工の強度, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集第 6 部, pp. 154~155 (1990.9).
- 5) 労働省産業安全研究所・社団法人仮設工業会, 接合方法が異なる各種の仮設構造物の安全性に関する共同研究報告書, pp. 52~61 (1994).

(平成 7 年 6 月 13 日受理)