

# 段付きボルトを有する立体トラス接合部の 力学性状に関する研究

辻 岡 静 雄\*

## Behavior of Threaded Spherical Nodes of Solid-Bar Space Truss

Shizuo TSUJIOKA

This paper deals with the new threaded joint of system truss consist of compact sections such as solid sections and thick walled seamless tubes. The static tensile tests were conducted. The test parameter were the loading type, the diameter and the type of turnbuckle-type bolt. The stiffness, the inelastic behavior and the fracture mode are discussed. It is confirmed experimentally that this turnbuckle-type bolt joints effectively compact sections.

### 1. はじめに

立体トラスの基本ユニットとして四角錐又は三角錐が考えられるが、いずれにしても上下弦材および斜材をそれらの交点で接合する必要がある。この接合部に取り合う斜材の方向は3次元的に変化するため接合部の中核に球体の部品が、この接合部中核と弦材、斜材を結び付ける接合機構としてボルトが、部材として鋼管が力学性能、施工性、経済性の各観点から適切と考えられている。この球状接合部中核に1本ボルトによる接合機構を用いた構造では、接合用ボルトが特殊高張力ボルトでかつ引張型接合であることによる力学特性、球体の接合部中核の許容耐力、鋼管部材の端部のコーン状部品の応力伝達機構とその許容耐力などが検討されている。工業化された接合部品を用いた上記の接合部形式の立体トラスをシステムトラス<sup>1)</sup>と言い、TMトラス、NSトラス、トモエユニットラス、SSトラス、KTトラスなどが研究開発されている。それぞれ、球体の種類（中実球、中空球）、コーン形状、ボルト形状、ボルトの締付け方法、材長精度調整方法などに特徴があるが、いずれにしても、このシステムトラスの構造安全性は接合機構としてのボルトに大きく依存することには変わりはない。

ところで、このような接合部部品を他の構造システムに適用する場合などを考えれば、部材が鋼管に限定される必要はない。例えば、筋違構造で圧縮耐力を期待しないならば角材などの中実材であってもよい。当然、ボルトと中実材との応力伝達機構を検討することが必要となる。

本研究では、球体接合部中核に両端にねじ部を持つ1本ボルト接合機構によって中実部材を接合して構成される立体トラス節点に着目し、接合部の諸問題を実験的に検討することとした。即ち、球体中核と太径ボルトを用いた立体トラス接合部（図1）の引張実験の概要と実験結果を報告すると共に、剛性、耐力、伝達機構などについての構造安全性を検討するものである。

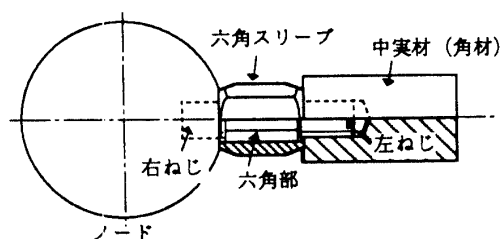


図1 立体トラス接合部

\* 建設工学科 建築学専攻

## 2. 試験体

ノード(球体)、特殊高力ボルト<sup>2)</sup>、六角スリーブおよび中実材(角材)からなる 1/2 接合部モデルで、試験体総数は 5 体である。実験変数は加力形式、ボルト径、ボルト形状で、表 1、図 2 に試験体形状とその一覧を、また、使用した鋼材の機械的性質を表 2 に示す。試験体記号は、[部材形状(R)]、[ボルト呼び径(M36, M48)]、[ボルト形状(標準:N, 特殊 I:I, 特殊 II:II)]、[加力形式(引張:N, 圧縮:C)]の順に表されている。ここで、ボルトは中央部が六角部で両端は右ねじ、左ねじが切削されている。ボルト形状において、標準は単一のねじからなるが、特殊とは段付きボルトと称するもので、太径ねじ切削による角材の断面欠損を小さくするために一端(角材側)のねじ部がねじピッチが同じで径の異なる二つのねじから構成される。太いねじと細いねじのねじ山数を変化させて各ねじの応力分担を制御することが可能である。本実験では M36ねじと M48ねじの組み合わせを考え、M48ねじ山数が 8 山、10 山を各々特殊 I、特殊 II とした。これらは、M48ボルトのノード側のはめこみ長さの 0.48、0.6 倍に相当する。この 2 ケースについて軸対称問題として有限要素法弾塑性解析を行ったが、いずれも M48ボルトの降伏耐力でも接合部は十分弾性状態にあり、8 山、10 山では終局時に M36ねじ部分の応力分担率は各々 0.47、0.39 であった。

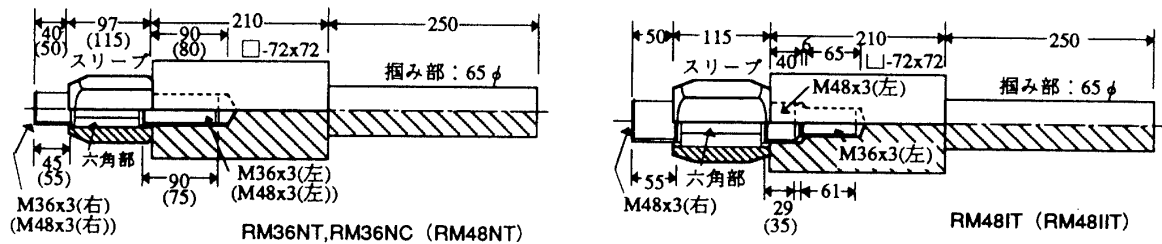


図 2 試験体

表 1 試験体一覧

Series	Specimen	加力形式	ボルト			角材
			呼び径	ねじ長さ*		
				ノード	角材	
A	RM36NT	引張	M36	45(40)	90(80)	□-72x72
	RM36NC	圧縮	M36		90(80)	
B	RM48NT	引張	M48	55(50)	75(70)	
	M48+36		29+61(24+61)			
	M48+36		35+61(30+61)			

[備考] \* : ( ) 内ははめあい長さ、

材料: スリーブ(S45C)、ボルト(SCM435)

表 2 鋼材の機械的性質

Specimen			$\sigma_y$ t/cm <sup>2</sup>	$\sigma_B$ t/cm <sup>2</sup>	E t/cm <sup>2</sup>	$\delta$ %	絞り %
Series	Member	Grade					
A	□-72x72	SM490	3.83	6.51	2366.2	28.1	48.6
B			3.71	6.61	2230.8	27.3	47.5

### 3. 実験方法

100 tあるいは200 t 万能試験機を用いて、ボルト(スリーブ)の長期許容耐力、短期許容耐力で各々1回片振繰返し加力を行った後、初期加力方向に単調加力した。

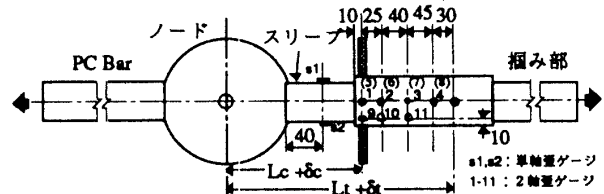


図3 測定方法

引張力は荷重計で、試験体の全体伸び変形(ノードと角材間の平均伸び変位)  $\delta_t$  および接合部伸び変形(ノードと角材端間の平均伸び変位)  $\delta_c$  をダイヤルゲージで計測した。また、スリーブ軸力を軸部に貼付した歪ゲージで、角材端部の応力分布を2軸歪ゲージで測定した(図3)。尚、ノード側のみを拘束し、手締後60°回転でボルトに張力を導入した。その際、スリーブにはAシリーズ(M36)では40-49 t、Bシリーズ(M48、M48+36)で54 t 前後の圧縮力が導入されていた。

### 4. 実験結果とその考察

実験値と理論値を表3に、荷重P-変形( $\delta_t, \delta_c$ )関係を図4に示す。また、荷重-スリーブ平均歪  $\epsilon_s$  関係、角材における荷重-軸方向歪  $\epsilon_L$ 、周方向歪  $\epsilon_c$  関係の一例を、各々図5、6に、実験後のM48ボルトの状況を写真1示す。なお、崩壊荷重の実験値は、明確な崩壊点が得られない場合全体剛性の接線剛性が離間後の剛性の1/6の点とした。理論値の算定に当たり、スリーブとボルトの降伏応力度は各々5.95 t/cm<sup>2</sup>、9.0 t/cm<sup>2</sup>、ボルトの引張強さは10(9.5) t/cm<sup>2</sup>とした。

#### (1) 変形性状と崩壊性状

##### (a) RM36NT:

短期許容耐力までは荷重-変形関係はほぼ線形で、各繰返しに対しスリーブ軸力の抜けは小さい。短期許容耐力当たりから徐々に剛性が低下し、約60 tで離間する。その後はほぼ剛性は一定となるが、80 t前後でさらに剛性が低下し、僅かな耐力上昇しか期待できなくなる。これは崩壊モードがボルトの降伏で規定されるためであるが、ボルト破断は生じなかった。

##### (b) RM36NC:

接合部変形では短期、全体変形は長期許容耐力までは線形である。また、長期での繰返しではほとんどスリーブ軸力の抜けはないが、短期では約16%低下している。その後、徐々に剛性が低下し、100.1 tでスリーブが全面降伏し、スリップ現象が見られる。これはスリーブ降伏によりボルトが引張から圧縮へ移行するためである。母材欠損部での降伏が153.6 tで生じ、その後全体変形では著しい変形増大が生じるが、接合部変形では母材降伏後もほぼ直線関係を保ち、実験ではボルトの圧縮降伏(ねじ降伏を含む)は生じなかったものと考えられる。なお、接合部変形と全体変形で若干の差異(剛性低下開始位置、スリップ量)が生じているが、これは角材端部の局部変形(開口)による影響である。実験終了後、スリーブと角材の接合面(支圧面)でのめり込みが認められた。

##### (c) RM48NT:

長期許容耐力までは直線関係が認められるが、離間が84.7 tで生じ短期許容耐力以前に剛性が低下する。また、長期の繰返しで5%、短期で10%程度スリーブ軸力が抜ける。離間後はほぼ剛性一定となるが、125 tで母材欠損部(3点)に降伏が生じたため、全体変形では耐力上昇が著しく小さくなる。一

表 3 実験値と理論値

Specimen		Test							Analysis			
		Bo (t)	1Kt(1Kc) (t/cm)	2Kt(2Kc) (t/cm)	Psep,Py (t)	Pp (t)	Pmax (t)	$\psi$	Collapse Mode (Failure Mode)	mPye (t)	bPy (t)	bPB (t)
A	RM36NT	39.14	2365.8	791.1	60.0	82.4	90.5	0.301	ボルト	159.6	77.85	86.50
		40.43	(3489.8)	(860.8)				0.271	(ボルト)			
	RM36NC	48.89	2198.4	1070.1	100.1	153.6	187.5	0.258	母材欠損部	154.6	171.5	-
			(3495.0)	(1414.9)					-			
B	RM48NT	55.57	2254.0	1159.4	84.7	125.0	170.5	0.345	母材欠損部	125.2	144.0	152.0
			(3078.7)	(1204.7)					(M48ねじ破断)			
	RM48IT	54.54	2122.7	902.2	79.7	144.9	161.1	0.300	ボルト	154.6	144.0	152.0
			(2962.9)	(478.0)					(M36ねじ破断)			
	RM48IIT	53.90	2483.7	1082.2	84.9	145.0	166.5	0.345	ボルト	154.6	144.0	152.0
			(3465.2)	(948.3)					(M48ねじ抜け)			

備考: ・ ( ) 内は接合部剛性

・ 許容引張耐力: M36NT (長期: 34.3 t、短期: 51.5 t)

M48NT, M48IT, M48IIT (長期: 60.3 t、短期: 90.5 t)

・ 許容圧縮耐力: M36NC (長期: 61.2 t、短期: 91.8 t)

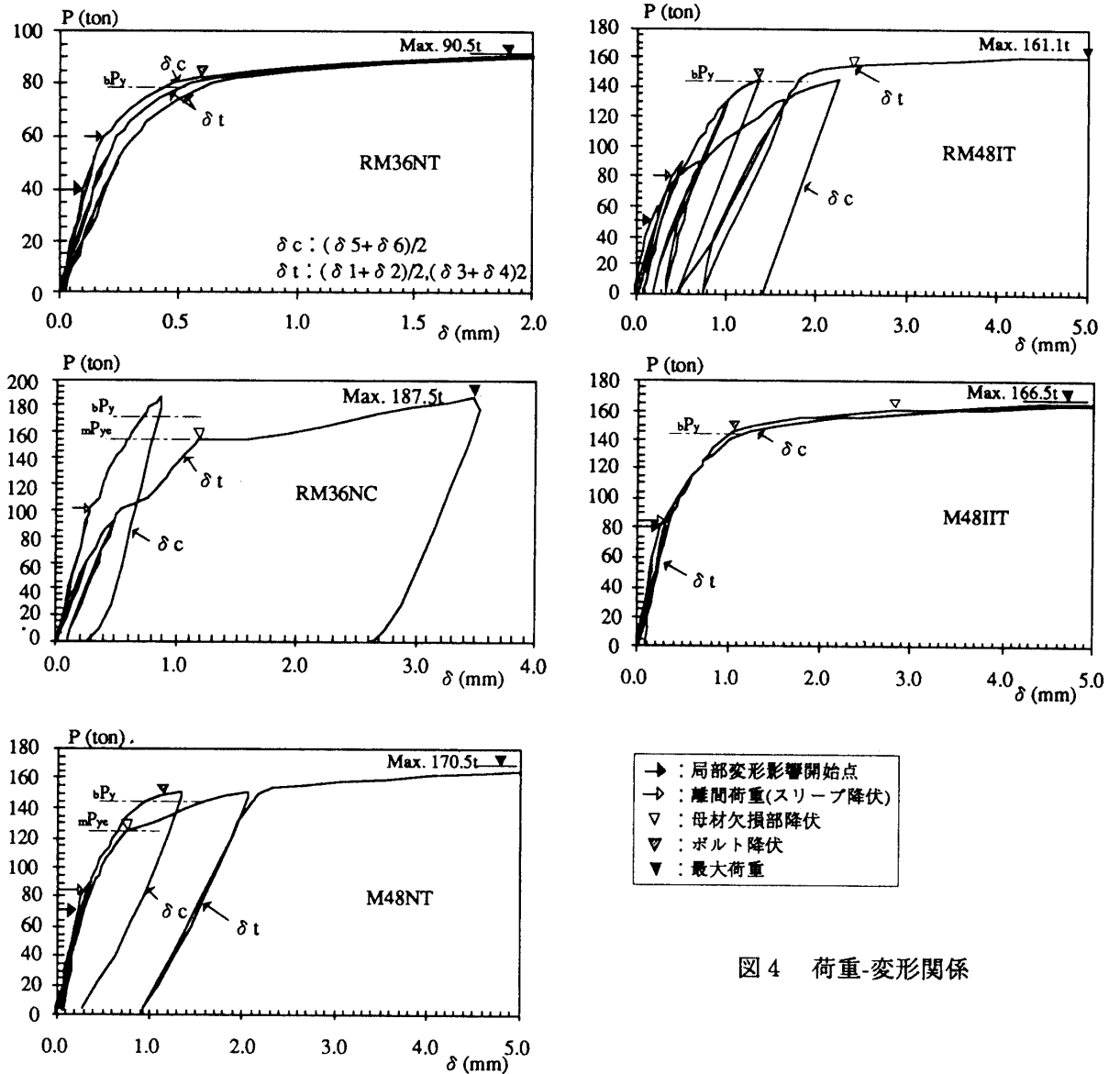


図 4 荷重-変形関係

方、接合部変形では120 t 前後から徐々に剛性が低下する。その後の加力に対して、148 t 以降でさらに剛性が低下し、耐力上昇は僅かである。これはボルトが降伏することによる。最大荷重が生じた時点で実験を終了したが、実験後の観察では、ボルトねじ部(左ねじ)の第1ねじの谷底に伸び変形が認められ、この部分で破壊が生じるものと考えられる。

(d) RM48IT :

全体変形では長期許容耐力までは直線関係が認められるが、離間が79.7 t で生じたため短期の繰返しは剛性低下が生じた後である。接合部変形では50 t 程度から剛性が低下し、60 t 近傍で全体変形より大

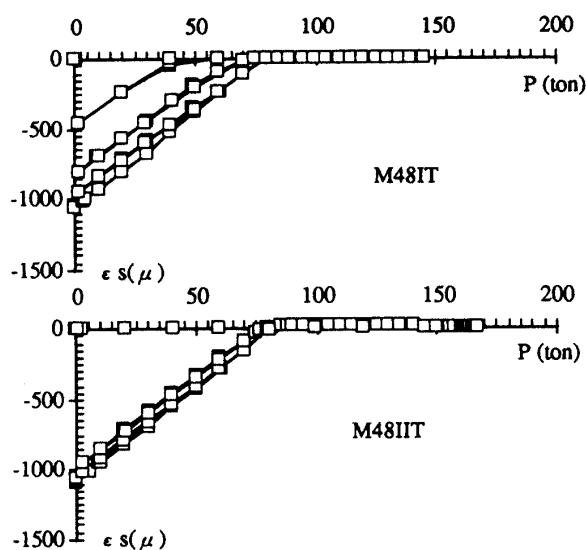


図5 荷重-スリーブ平均歪関係

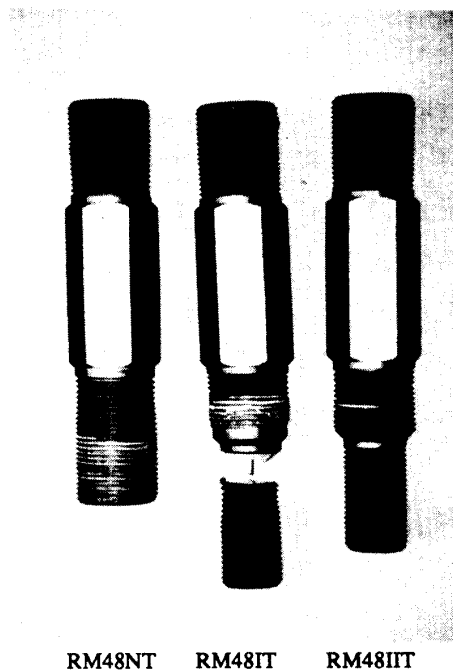


写真1 M48ボルトの破壊状況

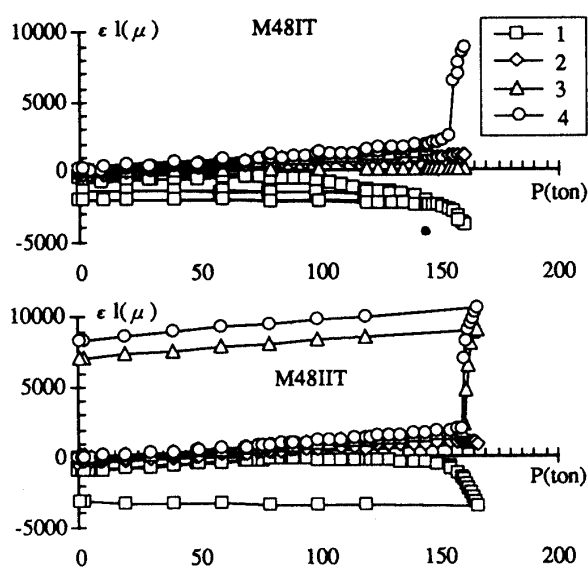


図6-a 荷重-ひずみ関係(軸方向)

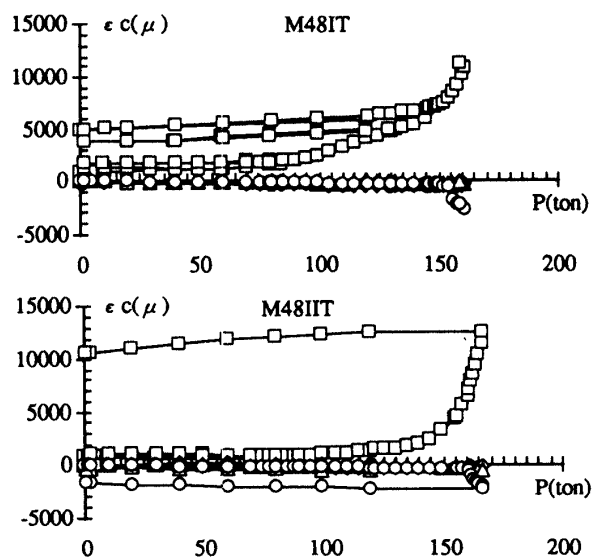


図6-b 荷重-ひずみ関係(周方向)

きくなり、70 t 位から大きく剛性が低下している。これは、角材端部の開きによる局部変形による影響である。また、長期で10%、短期で24%程度スリーブ軸力が抜けているが、標準のM48ボルトの試験体より抜け量が多いのは端部の局部変形による影響であろう。このため短期の繰返しでの再負荷では70 t で離間している。離間後は全体変形ではほぼ剛性一定となるが、125 t 程度から徐々に剛性は低下している。これは端部の開口によりM48ねじ部の有効ねじ長さが小さくなったためと考えられる。140 t 前後で耐力上昇は僅かとなり最大荷重を呈するが、144.9 t ではボルトが、154 t で母材欠損部(4点)が降伏している。なお、標準のボルトで観察された125 t での全体変形における性状は認められない。これは母材欠損部にボルトが存在し、弾性拘束されるためである。実験では段付きボルトのM36ねじの第1ねじで破断した。これは、端部の開口が増大しM48部分のねじ抜けが生じたためである。

#### (e) RM48IIT :

全体変形、接合部変形ともでは80 t 前後までは線形であるが、離間が84.9 t で生じた後剛性低下が起る。接合部変形では110 t 程度から剛性が低下し、115 t 近傍で全体変形より大きくなり、145 t 位から大きく剛性が低下している。これは、角材端部の開きによる局部変形の影響である。また、長期で5%、短期で10%程度スリーブ軸力が抜けている。標準のM48ボルトの試験体と同程度である。離間後は全体変形ではほぼ剛性一定となるが、130 t 程度から徐々に剛性は低下している。これは端部の開口によりM48ねじ部の有効ねじ長さが小さくなったためである。そして140 t 前後で耐力上昇は僅かとなり、145 t ではボルトが降伏したものと推察される。さらに、160.4 t で母材欠損部近傍(3, 4点)が降伏し降伏棚が認められる。最大荷重が166.5 t で生じたため実験を終了した。実験後の観察では、M48ボルトねじ部(左)のねじ山に抜け出しの兆候が生じており、端部の開口の増大によりM48部分のねじ抜け破壊が生じるものと考えられる。なお、この場合も標準ボルトで見られた125 t での全体変形における降伏棚に相当する性状は認められない。

#### (2) 剛性

各試験体の初期剛性には大きな変動が無く、呼び径との相関は明確ではない。これは、スリーブと角材の接触面での支圧変形やねじ長さが異なること、呼び径が大きくなれば角材端部の拘束効果が低下することなどの影響であろう。また、段付きボルトの場合、M48ねじ長さが短くなれば全体剛性は小さくなる傾向がある。これは端部の開口の影響が大きいためと考えられる。

#### (3) 耐力

表3より、次の事柄が得られる。なお、崩壊荷重の理論値はスリーブ降伏荷重 $sPy$ 、角材降伏荷重 $mPy$ 、ボルト降伏荷重 $bPy$ の最小値である。

- 1) 呼び径が大きいと離間荷重、崩壊荷重は上昇する。
- 2) 崩壊荷重の理論値で実験値を良く評価でき、崩壊モードも一致している。
- 3) ねじ山の少ない段付きボルトでは標準ボルトに比べ離間荷重が6%程度低下するものの、段付きボルトとすることにより崩壊荷重の大幅な向上を計れる。
- 4) 引張加力時の最大荷重はボルトの長期許容耐力の2.64-2.83倍で、段付きボルトでは、標準ボルトより若干小さくなる。これは、M36ねじ部降伏と縁端部の開口の影響によるM48ねじ部のねじ抜けが

生じるためである。なお、最大荷重はボルトの破断耐力(理論値)以上となる。

#### (4) 内力係数

離間までの荷重とボルトあるいはスリーブのひずみとの関係を最小近似すれば、各試験体の内力係数は0.258～0.345と得られ、圧縮加力では小さく、段付きボルトの8山では小さく10山とすれば標準ボルトと同じになる傾向が認められる。に関する一般的性状は以下の通りである。

#### (5) 角材のひずみ性状

角材のひずみに関する一般的性状は以下の通りである。

- 1) ボルトの本締め後には、角材端部(1点)には、周方向に引張歪が、軸方向に圧縮歪が導入される。
- 2) 圧縮加力に対し、材軸方向に圧縮歪が、周方向に引張歪が生じる。角材の縁端部を除き降伏が生じ、とくに断面欠損部での降伏が著しい。なお、スリーブが降伏したことによる角材への加力状態の変動も認められた。
- 3) 引張加力では、材軸方向に引張歪が、周方向に圧縮歪が生じ、断面欠損部での歪が大きくなる傾向が認められる。縁端(1点)では歪の戻りが離間荷重以前に生じた。とくに、最大荷重時には周方向の歪は軸方向よりも大きくなり、端部はリング作用で抵抗していると言える。
- 4) 段付きボルトは標準ボルトと著しい差異はないが、ボルトの本締め後、角材縁端部の1点の引張周方向歪が大きくなること、実験の範囲では断面欠損部の2点は弾性状態で4点が降伏することが得られた。
- 5) 段付きボルトのM48ねじ部が長いことにより、ボルトの本締め時の角材端部(1点)の引張周方向歪が小さくなること、縁端(1点)の歪の戻りや降伏が早期に生じること、母材欠損部(2点)の軸方向平均歪は大きくなりM48ねじ部の角材の分担率が増加すること、母材欠損部(2点)に最大荷重近傍でねじ抜けによる歪の戻りが生じることなどが得られた。

### 5. 結論

球体接合部中核に1本ボルト接合機構によって中実部材を接合して構成される立体トラス節点に着目し、接合部の諸問題を実験的に検討することとした。即ち、球体中核と太径ボルトを用いた立体トラス接合部の1/2模型の引張実験を加力形式、ボルト径、ボルト形状を実験変数として行い、剛性、耐力、伝達機構などについて検討し、構造設計資料を得た。その結論を要約すれば以下の通りである。

- 1) 標準ボルトの場合、呼び径が大きくしても角材端部拘束の低下が大きくなるため初期剛性の上昇は期待できない。しかし、呼び径が大きくなると高い張力が導入されるため離間荷重は大きくなり、崩壊荷重も上昇する。
- 2) 段付きボルトとしても初期剛性には変わりはないが、離間後剛性(二次剛性)ではM48ねじ長さが短くなれば標準ボルトの場合よりも低下する。これはリング応力による角材縁端部の塑性化が早期に生じたことによる。また、段付きボルトでは標準ボルトの場合より離間荷重は低下する場合もあるが、崩壊荷重の大幅な向上を計ることが可能である。
- 3) 引張加力時、最大荷重はボルトの破断耐力(公称値)以上で、破壊はボルト破断やねじ抜けによっ

て生じる。また、ボルトの長期許容耐力に対する安全率は2.64-2.83となる。

- 4) 崩壊荷重に関して解析値は実験値を良く評価でき、崩壊モードも一致する。
- 5) 段付きボルトの内力係数は10山とすれば標準ボルトと同じになる。

ところで、段付きボルトのM48ねじ山を10山とすれば、ほぼ標準ボルトと剛性の点からは同程度となり、耐力的にはボルト降伏が先行するために崩壊荷重は上昇するという利点があること、角材縁端部の降伏とM48ねじ部の絞りに起因するねじ抜けを避けられないことを指摘した。しかし、その低下量は2.3%と僅かであり、段付きボルトは優れた力学性状を呈すると言える。ただ、設計上、縁端部を焼き入れしするとか、ねじ山を数山程度長くするとかして端部拘束度を高める配慮が望まれる。

#### 参考文献

- 1) 田中淳夫：評定からみたシステムトラス構造について、ビルディングレター、pp.1-7、1988.4.
- 2) Katsuhiko Imai et al. : A NEW JOINT SYSTEM OF SPACE FRAME WITH THREADED SPHERICAL NODES, 鋼構造年次論文報告集, 第1巻, 1993年7月.

#### 記号

$B_0$  : スリーブの初期導入軸力

$P_{max}$  : 最大荷重

$P_{sep}$  : 離間荷重

$P_p$  : 崩壊荷重

$sP_y$  : スリーブ降伏荷重

$mP_{ye}$  : 角材降伏荷重( $= mA_e \cdot m\sigma_y$ )

$bP_y$  : ボルト降伏荷重( $= bA_e \cdot b\sigma_y$ )

$bP_B$  : ボルト破断耐力( $= bA_e \cdot b\sigma_B$ )

$iK_t$  : 全体剛性

$iK_c$  : 接合部剛性 (前添字1、2は初期接線剛性、2次接線剛性)

$sA, mA_e, bA_e$  : スリーブの断面積、角材とボルトの有効断面

$s\sigma_y, m\sigma_y, b\sigma_y, b\sigma_B$  : スリーブ、角材、ボルトの降伏応力度 およびボルトの引張強さ

$\psi$  : ボルト内力係数

(平成6年11月28日受理)