

# パイプと球で構成された大林トラスの実験

岡田 宏  
武田 寿一  
高橋 泰彦

## 概 要

大林組本店設計部により先刻開発された大林トラス H-1 はその架構をアングル材で構成することによって実現されたが、今回はその部材としてパイプ材をジョイントに球殻をそれぞれ使用して構成することとなった。この構成では球殻節点に特徴があり、耐力上、また施工上の見地から独自のアイデアがもたれている。本実験ではこの接合部の挙動に重点をおき、部材供試体、架構供試体の載架実験を行なった。

結果としては、球殻内部にそり入されているスチフナーが球殻の補強効果をもたらし、パイプからの応力による球殻の変形が加減されるが、球殻の局部変形は架構撓みに約 10% 程度の影響を及ぼすことが判明した。

## 1. 序

パイプを用いた立体トラス構造は、パイプがその鉄骨重量と断面性能との比率が他の形状の材と比較して有利な点を持つばかりでなく、断面内を流れる応力の中立軸と材重心軸とが一致するので、偏心による剛性、耐力の低下も考えられないなどの利点を持ち国内外を問わず現在広く用いられている。しかし数多くの部材の集中する節点の形式に関しては、節点の剛性、施工性、コストなどがからんで問題となる要素を十分に持つものと思われる。今回の実験の対象となる大林トラス H-1 のジョイント型式は 図-1 に示すようにプレス加工にて製作した半球にスチフナーをそり入し、パイプを取付けて四面体のユニットを作成したのち、こ

の半球同志をボルトで仮付けしたあと全周溶接して架構とする方式である。(大林トラス H-1 の基本パターンは所報 No.1 に掲載済みなので割愛する)

このようにスチフナーで補強されたジョイントは、パイプによって集められた応力の伝達をスムーズに行なうものと考えられるが、球体の製作施工とくに溶接施工に高水準の技術、精度が望まれることと、球ジョイント自体の応力伝達にあたっての剛性の保持すなわち変形挙動の把握が必要であろう。我々は、本実験においてまず球節点の挙動に着目し次いで架構全体への影響に留意することとした。問題点を具体的にあげれば次の通りとなる。

球ジョイントに関しては  
パイプを介して伝達される応力に対しての変形挙動  
溶接ジョイントの安全性

架構全体の剛性に関しては  
架構のたわみ挙動  
載荷による部材の応力  
最終耐力と変形状況

## 2. 供試体

供試体はジョイントを含むパイプ材、およびパイプ材のみの部材供試体) MEMBER TEST PIECE 以後 M.T.P. と略称する) および架構としての挙動を観測するための架構供試体) STRUCTURAL TEST PIECE 以後 S.T.P. と略称する) より成る。

### 2.1. 部材供試体

部材供試体を 図-2 に示す。M.T.P.-1~8 の 3 種の供試体を作製しこれにより接合部球殻の引張、圧縮に

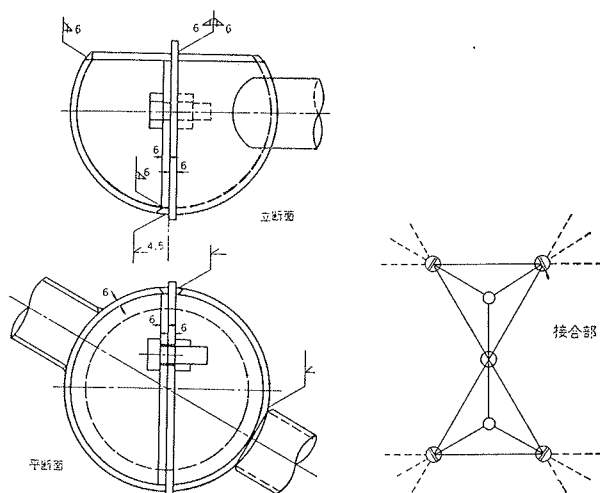


図-1-a 球ジョイント

図-1-b ユニットの接合

よる挙動および素材としての性能を判定することとした。球殻を含む材の引張りは

M.T.P.-2, 3a, 4a

の3種であり、球殻を含む材の圧縮は後述の治具により圧縮試験を行なった。その球面は圧縮用球座に合わせるための研磨をほどこした。これが

M.T.P.-2, 3D, 4D

の3種で、鋼管の引張りは

M.T.P.-5, 6, 7, 8

の4種である。部材の長さとしては架構供試体の部材寸法をとった。なお、M.T.P.-5, 6, 7 の鋼管を展開して、JIS Z 2201 の金属材料引張試験片の規定の内12号試験片の規定により素材試験も行なった。

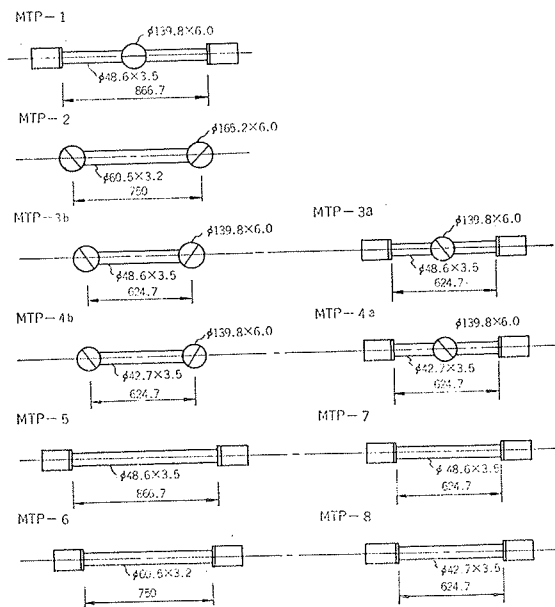


図-2 部材供試体

## 2.2 架構供試体

架構供試体は合計2種3体製作された。内訳は4面体のユニット2個に足を付けた形の S.T.P.-1 およびユニット1個に足を付けた形の S.T.P.-2 である。

S.T.P.-1; 図-3に示す。パイプ寸法、球ジョイント寸法は実施設計例(関西電力高砂開閉所屋根トラス)通り、材長は  $\frac{1}{2}$  の縮尺である。使用材料は

S.T.P.-1a

上弦材 φ60.5×3.2 下弦材 φ48.6×3.5

斜材 φ42.7×3.5 上弦面球殻 φ165.2×6.0

下弦面球殻 φ139.8×6.0

S.T.P.-1b; STP-1a とは載荷点下の斜材をサイズアップしているところが異なる。

斜材 φ42.7×3.5 および φ48.6×3.5 (ただし中央載荷点下に集中している2本の斜材のみ)

S.T.P.-2; 概略は図-3に示す。本供試体は載荷点をT型の載荷治具を用いて3個所に分散させており全体として高応力までの架構挙動が観測できることと、載荷点と支点とをつなぐ斜材を S.T.P.-1b と同様サイズアップして架構の破壊が材の座屈よりむしろ球ジョイントの座屈で決まる可能性をもたせた。使用材料は  
上弦材 φ60.5×3.2 下弦材 φ48.6×3.5  
斜材 φ42.7×3.5 φ48.6×3.5  
上弦面球殻 φ165.2×6.0 下弦面球殻 φ139.8×6.0  
T型載荷治具 H-250×125×6×9

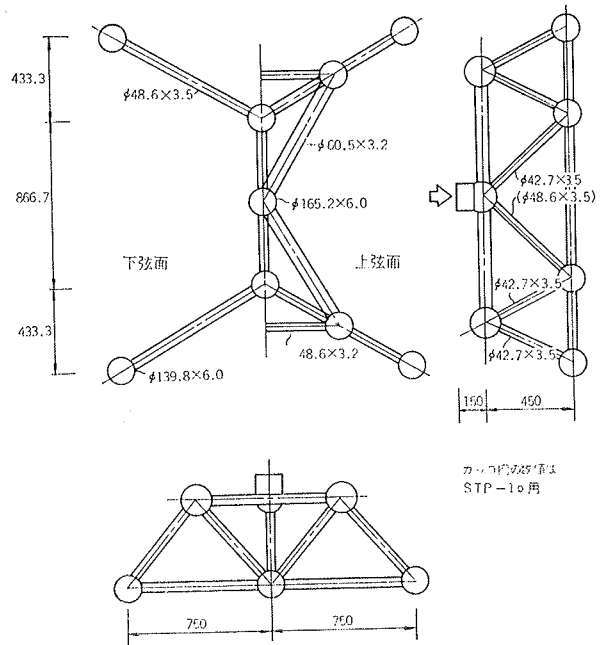


図-3-a 架構供試体 (STP-1a, 1b)

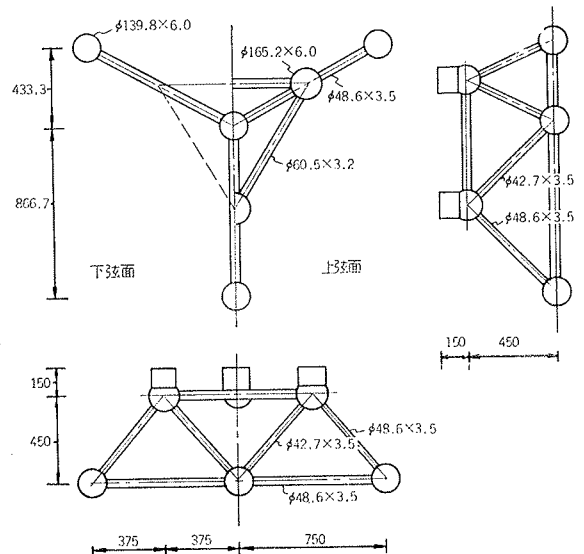


図-3-b 架構供試体 (STP-2)

### 3. 解析

解析に先だって素材試験を行ない  $\bar{\sigma}_Y$ ,  $\bar{E}$  の数値を求めた。素材試験には部材供試体の内から M.T.P.-5, 6, 7, 8 をとり, この内 5, 6, 7 については 12 号試験片を作成した。結果を 表-1 に示す。12 号試験片はパイプより成型加工の途上で加工硬化, 加熱による組織の変化により性能が変化したものと思われるので降伏点等は参考値とするが, 最大耐力については M.T.P.5~7 がパイプと板との溶接部で破断しているので除外してこの 12 号試験片の値をとった。

供試体番号		$E (\times 10^4 \text{ kg/cm}^2)$	伸び (%)	$\bar{\sigma}_Y (\text{t/cm}^2)$	$\bar{\sigma}_b (\text{t/cm}^2)$
M.T.P.-5 $\phi 48.6 \times 3.5$ $l = 86.7 \text{ cm}$	1*	2.02	—	3.06	3.58
	2**	1.93	29	3.50	4.00
	3**	1.95	24	3.42	3.95
M.T.P.-6 $\phi 60.5 \times 3.2$ $l = 75.0 \text{ cm}$	1*	1.92	—	2.52	3.17
	2**	2.06	17	3.10	3.66
	3**	1.76	37	2.67	3.09
M.T.P.-7 $\phi 48.6 \times 3.5$ $l = 62.5 \text{ cm}$	1*	1.97	—	3.06	3.71
	2**	2.01	25	3.58	4.13
	3**	1.82	22	3.34	3.89
M.T.P.-8 $\phi 42.7 \times 3.5$ $l = 62.5 \text{ cm}$	1*	1.71	—	2.84	3.32
	2*	1.70	—	2.83	3.41

$\bar{\sigma}_a = 2.86 \text{ t/cm}^2$  \* パイプにチャックを付けて試験したもの  
 $\bar{\sigma}_b = 3.68 \text{ t/cm}^2$  \*\* パイプを展開し 12 号試験片としたもの  
 $E = 1.90 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

表-1 素材引張試験およびパイプ引張試験

#### 3.1. 球ジョイントの解析

略算による球ジョイントの耐力

ジョイント球殻の耐力は, 架構供試体のジョイントに常に 6 方向からパイプを介して応力が加わるので, この形式での応力解析は困難である。そこで次の仮定を設けて計算する。すなわち第 1 に, 図-4 に示すように球ジョイントはステフナをもたない中空体とする。

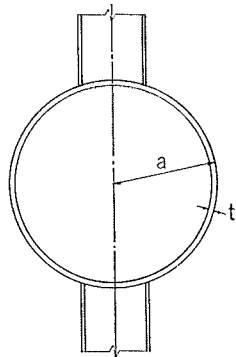


図-4 中空球ジョイント

第 2 にパイプは 2 方向よりのみジョイントに付くものとする。この仮定のもとに秋山氏の式を用いて耐力を求める。

$$P_U(a, t) = (1.13at - 0.008a^2) \sigma_Y$$

ただし, a: 球の半径 t: 球の肉厚

今回用いた球は次の 2 種である。

$$a_1 = 8.26 \text{ cm} \quad t_1 = 0.6 \text{ cm}$$

$$a_2 = 6.99 \text{ cm} \quad t_2 = 0.6 \text{ cm}$$

ゆえに

$$P_{U1} = (1.13 \times 8.26 \times 0.6 - 0.008 \times 8.26^2) \times 2.86$$

$$= 14.4 (\text{t}) \rightarrow \phi 165.2 \times 6.0 \text{ の球}$$

$$P_{U2} = (1.13 \times 6.99 \times 0.6 - 0.008 \times 6.99^2) \times 2.86$$

$$= 12.45 (\text{t}) \rightarrow \phi 139.8 \times 6.0 \text{ の球}$$

ただし  $\sigma_Y$  は表-1 に記載された値を用いた。

#### 3.2. 計算機による球殻部の変形解析

電子計算機による球殻の応力および変形解析に関しては近年開発された FINITE ELEMENT METHOD による軸対称物応力解析プログラムで相当な精度までの解析が可能である。今回は 図-4 の形式について, 図-5 に示すエレメント分割を球およびパイプ断面について行なった上, CYLAN PROGRAM (三菱原子力工業) により IBM 7090 で演算を行なった。その結果を同じく 図-5 に示す。条件は下に示す通りである。

球殻  $\phi 139.8 \times 6.0$

応力  $P = \pm 10 \text{ t}$

パイプ  $\phi 42.7 \times 3.5$

$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$   $\nu = 0.3$

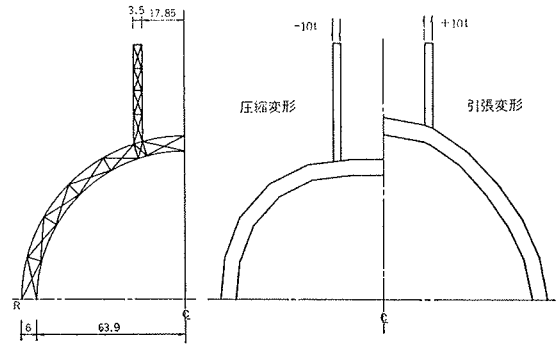


図-5 球ジョイントのエレメント分割と変形

解析の結果によれば 図-5 の半球はパイプを介しての圧縮応力により加力方向に  $\pm 7.49 \times 10^{-3} \text{ cm}$  だけ変形する。これは球半径と同長のパイプの変形  $7.41 \times 10^{-3} \text{ cm}$  と比較してほぼ同一といえよう。

#### 3.3. S.T.P. の応力解析

ピン接合静定構造としての計算; 図-6 に示す架構に単純化して各節点をピンと考えて計算を行なう。各部材の断面性能および耐力を 表-2 に示す。

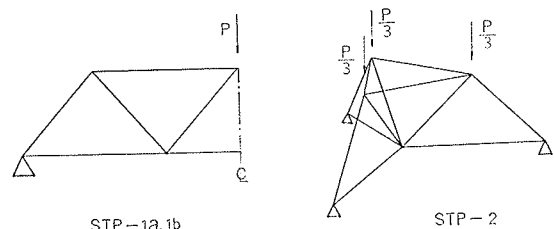


図-6 架構供試体トラス略図

パイプ種類	A (cm <sup>2</sup> )	J (cm <sup>4</sup> )	Z (cm <sup>3</sup> )	i (cm)
φ 42.7×3.5	4.31	8.35	3.91	1.39
φ 48.6×3.5	4.96	12.7	5.22	1.60
φ 60.5×3.2	5.76	23.7	7.84	2.03

表一2-a パイプの断面性能

パイプ種別	l (cm)	λ	ω	座屈耐力(t)	引張降伏力(t)
φ 42.7×3.5	62.5	44.9	1.07	11.6	12.3
φ 48.6×3.5	62.5	39.0	1.05	13.5	14.2
同上	75.0	46.8	1.08	13.1	同上
φ 60.5×3.2	75.0	36.9	1.05	15.7	16.5

表一2-b パイプの耐力

表-2の数値を載荷応力と関連付けると次の結果となる。

S.T.P.-1 a の降伏順序

外力 P=14.7t で下弦材 b<sub>1</sub> が降伏  
 外力 P=16.6t で中央斜材 r<sub>1</sub> が座屈

S.T.P.-1 b の降伏順序

外力 P=14.7t で下弦材 b<sub>1</sub> が降伏  
 外力 P=18.8t で下弦材 b<sub>1</sub> が破断

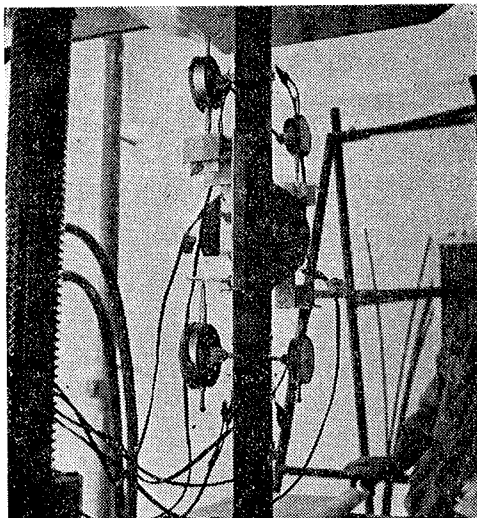
S.T.P.-2 の降伏順序

外力 P=29.3t で斜材 r<sub>2</sub> が座屈  
 外力 P=31.4t で上弦球殻が座屈

剛節トラスとしての計算；架構供試体の載荷にあたっては軸力のほかに、2次曲げ応力の発生も考えられるので架構を剛節トラスとしてIBMのFRANを用いてIBM 7090にて応力解析を行なった。計算に当っては供試体上弦面のネジレ拘束鉄筋も考慮に入れているので、その点だけピン接合トラスの場合とは異なるが、他はほぼ一致している。結果は実験値と共に後述する。

#### 4. 部材供試体の実験

##### 4.1. 引張実験



図一7 部材供試体引張実験

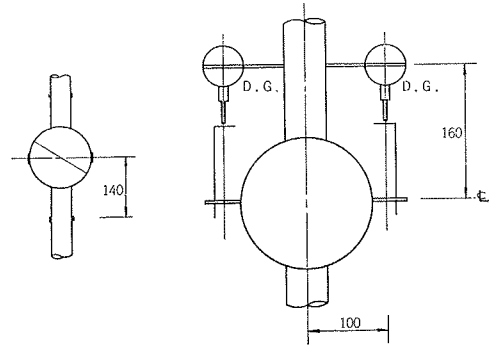
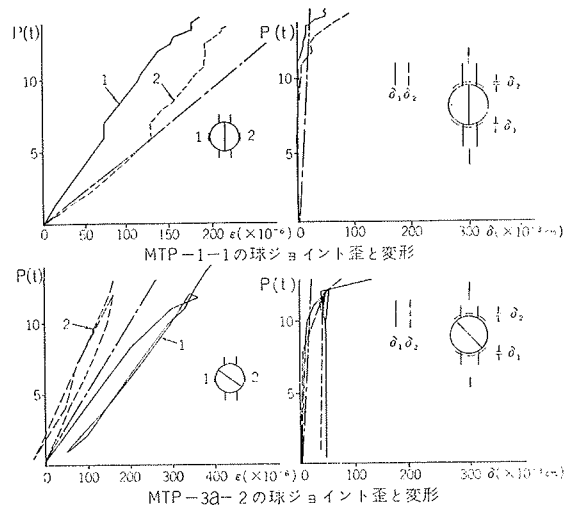


図-8 D.G. とW.S.G. 位置

治具；供試体は先に説明した通りである。球殻の変形を知るために図-8に示す治具を取り付けた。球殻にボルトを取り付けた位置は球殻の中央でスチフナ溶接線上であって、剛な不動点とみなし得る点2カ所である。球中央より16cm離れたパイプ上にもボルトを溶接しダイヤルゲージを据付けるが、測定値からパイプ変形を差引くため図-8に示す点にワイヤストレインゲージを貼付して歪測定も行なった。

実験；引張は大林組技術研究所 200t 万能試験機を用いた。状況を図-7に示す。測定内容は上記のダイヤルゲージによる球殻変形およびワイヤストレインゲージによる球殻およびパイプ表面の歪測定である。測定結果は図-9に典型的ケースとしてM.T.P. 1-1およびM.T.P. 3a-2の球殻表面歪、半球殻変形を示す。両者の比較により球ジョイントのスチフナーが引張方向と平行に付くM.T.P. 1-1では球表面の歪が計算値と等しいかまたは大幅に少なく、変形も同長のパイプと比較して少なくスチフナーが応力流れを吸収し球の変形を拘束する。一方M.T.P. 3a-2では繰返し載荷を行なっているが球殻歪は計算値を大幅に超過するものもあり、変形もパイプ変形と同様な挙動をとっている



図一9 引張供試体の挙動図

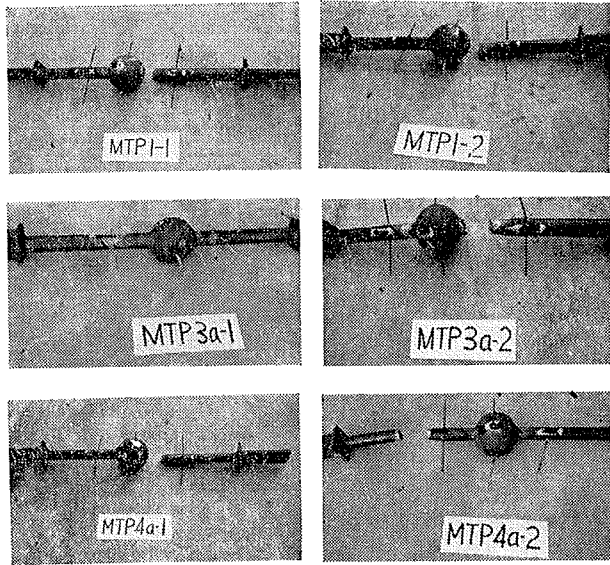


図-10 引張供試体破断状況

ことがわかる。各供試体の破断状況を図-10に示す。

耐力；図-10に示される通り最終破断はパイプ破断によるものと球、パイプ溶接部の破断によるものと両ケースが生じた。パイプ破断ケースについてはゲージ貼布のさいの研磨による断面欠損も考えられる。球ジョイントに関しては、図-9に示すように球殻内ステフナーの角度にかかわらず変形は増大するが破壊には至らなかった。表-3に耐力数値を示す。

供試体		計算値		実験値		破断箇所
		$P_y(t)$	$P_{max}(t)$	$P_y(t)$	$P_{max}(t)$	
MTP-1	1	{ 14.2(パイプ)	{ 18.3(パイプ)	11.0(球)	17.9	パイプ溶接部
ステフナー垂直	2	{ 12.4(球)	{ 17.9(パイプ溶接部)	11.5(球)	16.9	同上
MTP-3a	1	{ 同上	{ 同上	11.0(球)	18.2	パイプ
ステフナー傾斜	2	{ 同上	{ 同上	10.0(球)	16.9	同上
MTP-4a	1	{ 12.3(パイプ)	{ 15.9(パイプ)	9.0(球)	13.1	パイプ溶接部
ステフナー傾斜	2	{ 12.4(球)	{ 15.8(パイプ溶接部)	10.0(球)	14.5	パイプ

表-3 部材供試体引張試験結果

#### 4.2. 圧縮試験

治具；供試体は図-2に示すパイプ両端に球ジョイントの付く鉄皿鈴型であって圧縮用の球座を必要とする。図-11に示す凹型の、200t万能試験機にアタッチメントとして使用可能な球座を作成した。凹型は球径に合わせており、研磨加工した部材供試体の球殻との接触はグリースで円滑化して両端ピンとしての実験が可能である。2種の球

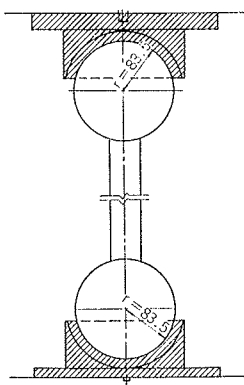


図-11 圧縮実験球座

径のケースがあるため2組作製したが偏心、球との合致の点で良好であった。

実験；前述の治具を200t万能試験機（島津製）に取り付けて載荷を行なった。測定内容は、球殻の歪、変形、パイプの歪、水平方向変形である。耐力は、球ジョイントまたはパイプの座屈で決まるため計測には特に注意を払った。各供試体は球ジョイント内のステフナーの傾斜角が等しいため同様の傾向を示したので、M.T.P. 4b-1のみの測定値について報告する。図-12に球ジョイントの変形、材中腹部の水平変形球殻部歪、パイプ部分の軸方向歪を示す。載荷方法は最初10.3tまで載荷し、除荷したのち再載荷して破壊に至らしめている。図-12から各測定値の示す機の降伏（座屈）発生時点の確認が可能と思われる。球殻の変形は引張実験の場合と同様な方法で測定、計算したものであるが載荷直後より剛性低下が著しく $P=9.0t$ で座屈発生が窺われ、パイプの水平変形がこれを裏付けている。一方球殻でもパイプ溶接部から離れた表面では影響が

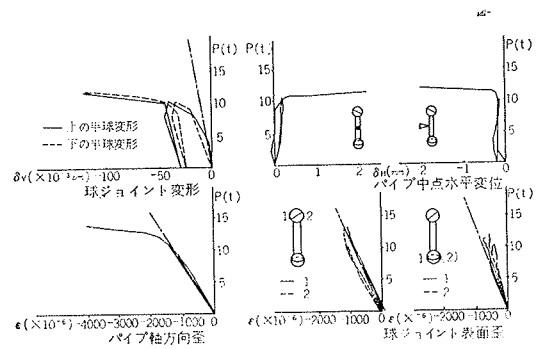


図-12 圧縮供試体の挙動図 (MTP-4 D-1)

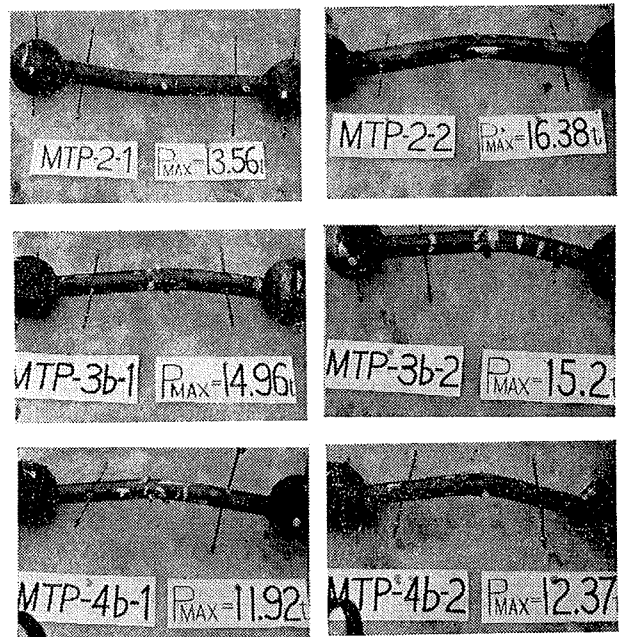


図-13 圧縮供試体座屈状況

全く無く座屈がパイプ溶接部近傍での局部座屈であることを示す。パイプ自体の歪は  $\sigma=2.55 \text{ t/cm}^2$  で増加し、球の局部変形の影響を受けた可能性がある。球殻の変形は  $\phi 139.8 \times 6.0$  のシリーズが大きい傾向を示し中でも  $\phi 42.7$  のパイプを付けた M.T.P. 4b のケースが  $\phi 48.6$  の付く M.T.P. 3b より大きい。 $\phi 60.5$  の付く M.T.P.-5 は他のケースより高い変形剛性を示した。

耐力；最終変形状況を 図-13 に示す。M.T.P.2 は 2-1 がパイプの面外座屈、2-2 がパイプの局部座屈で破壊している。M.T.P.-3b, 4b では、球殻に局部座屈が発生しパイプの面外曲げを誘発している。実験の各数値を表-4 に示す。表-4 の内、座屈応力計算値は、M.T.P.-4b を除いてはパイプの座屈耐力が球ジョイントの座屈耐力を上まわっている。実験値でもこのことは言えるが M.T.P.-2-1 は第1荷重で  $P=14.0 \text{ t}$  まで載荷したが第2荷重では、材軸の偏心、局部変形のためか  $P=12.0 \text{ t}$  の載荷でパイプが面外座屈し計算値を下まわった。

供 試 体		計 算 値		実 験 値	
		$P_y \text{ (t)}$	$P_y \text{ (t)}$	$P_{max} \text{ (t)}$	破壊状況
MTP-2	1	15.7(パイプ)	{ 12.0(球変形) 11.5(パイプ歪) 12.0(パイプ撓み)	14.0	パイプ 面外座屈
スチフナー傾斜	2	14.5(球)	{ 14.0 15.5 同上 13.5	16.4	パイプ 局部座屈
MTP-3D	1	13.5(パイプ)	{ 11.0 14.0 同上 13.5	15.0	球の 局部座屈
スチフナー傾斜	2	12.4(球)	{ 11.5 14.0 同上 13.8	15.2	同 上
MTP-4b	1	11.7(パイプ)	{ 9.0 11.0 同上 9.0	11.9	同 上
スチフナー傾斜	2	12.4(球)	{ 9.0 11.0 同上 10.8	12.4	同 上

表-4 部材供試体圧縮試験結果

### 4.3. 部材供試体実験の考察

球ジョイントを含む部材供試体の引張、圧縮の実験からジョイントの変形、耐力は球とパイプの寸法の組み合わせ、ジョイント内部のスチフナーの角度によって異なる事が示された。表-5 には載荷  $P=10.0 \text{ t}$  での球殻の変形、最大耐力、球ジョイント座屈の有無を示す。スチフナーが材軸を含む平面内にある M.T.P.-1 では変形量が最少である。また本実験では圧縮供試体の変形が、引張供試体の変形を上まわった。球殻の破壊も引張供試体には見られず、圧縮供試体のみが発生した。これらのデータから、球ジョイントの変形が、架構の変形にかなりの影響力を持つ事、圧縮応力を伝えるパイプを受ける球ジョイントの座屈の検討が必要であるが内部スチフナーが有効に働くことが予想される。

供 試 体		球変形量( $\times 10^{-3} \text{ cm}$ )	$P_{max} \text{ (t)}$	球体の破壊
MTP-1	1	3.5	17.9	破損なし
(引張)	2	11.0	16.9	同上
MTP-2	1	17.0	13.6	局部変形
(圧縮)	2	13.5	16.4	破損なし
MTP-3a	1	24.0	18.2	同上
(引張)	2	19.5	16.9	同上
MTP-3b	1	18.0	15.0	局部変形
(圧縮)	2	33.5	15.2	同上
MTP-4a	1	33.0	13.1	破損なし
(引張)	2	28.0	14.5	同上
MTP-4b	1	67.0	11.9	局部変形
(圧縮)	2	62.0	12.4	同上

表-5 部材供試体球ジョイントの変形

## 5. 架構供試体の実験

### 5.1. 実験方法

載荷方法；図-14 に示す。S.T.P.-1a および 1b は上弦中央球ジョイント e に載荷し、支点を A, B, C, D の4点とする。S.T.P.-2 は T 型の載荷治具を作製し上弦球ジョイント abc の作る正三角形の重心に載荷する。支点は A, B, C の3点とする。

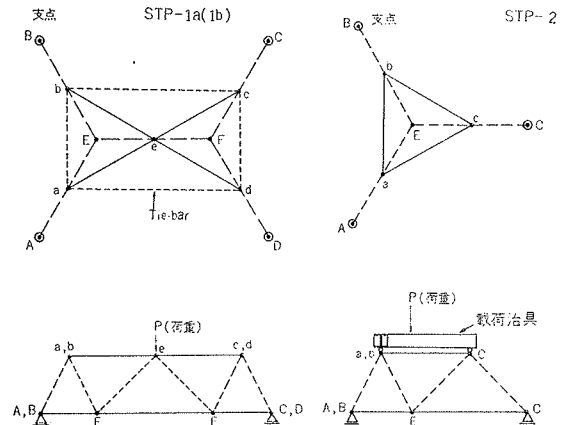


図-14 架構供試体載荷方法

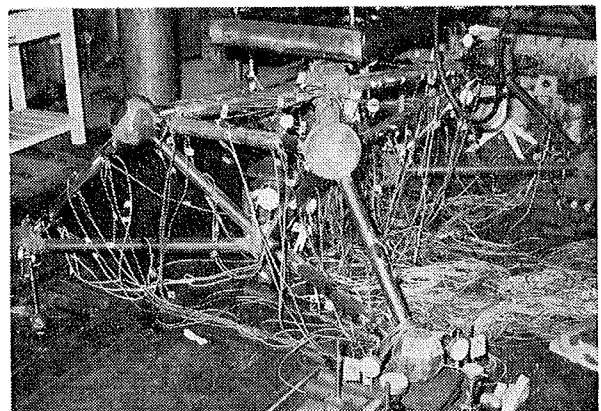


図-15 架構供試体載荷状況

載荷試験機は当研究所の 300 t 圧縮試験機である。  
測定方法；各部材の軸力，2 次曲げ応力の測定には 1 軸のワイヤストレインゲージ（共和 KP-6）を貼布して用いた。節点，支点の沈下，移動，変形の測定のためにダイヤルゲージを用いた。特に球節点の変形の測定には図-8 に示す治具を用いた。載荷状況は 図-15 に示す。

5.2. 架構撓みおよび部材歪

図-16 に各供試体の中央撓み，図-17 に主要部材の軸方向歪を示す。中央撓みはいずれもダイヤルゲージで測定し，支点の沈下を差引いたものである。ただし各支点球ジョイントの圧縮による変形は，球ジョイントにスチフナを鉛直にそう入してあるので無視するものとした。部材軸方向歪は各部材中腹部に 2 枚宛対称的に貼布して得た数値の平均である。

A) S.T.P.-1a

図-16 の中央撓み図中の一点鎖線で表わされる直線は剛節トラスとしての計算値である。載荷初回における撓みは計算値と比較して約 30% 多い値が得られた。本供試体は 4 点支持であるが 4 支点が同一平面内に無く載荷 P=3 t 程度でそのムラが補正されたので，この影響を考慮すると，P=10 t では計算値より，約 10% 増しになる。2 回目の載荷において P=14.5 t で架構の下弦材 EF と斜材 Ee・Fe とが降伏した。撓み曲線の上では識別できないが 図-17 の部材軸方向歪図からは明らかである。斜材の座屈応力計算値は架構外力に直して P=16.6 t なので計算値より低い載荷荷重で降伏していることになる。下弦面の球の降伏応力計算値は P=12.9 t であるが，E, F 両球ジョイント共巨視的変形がみられなかった。

B) S.T.P.-1b

載荷 P=10.0 t での載荷点球ジョイント e での鉛直方向変位は 図-16 から約 0.32 cm (S.T.P.-1a では 0.35 cm) であって計算値の約 0.265 cm より 21% 大きい値となるが，載荷頭初のナラシを考慮に入れば約 13% となる。下弦材 EF の降伏は載荷 P=16.0 t の時で，S.T.P.-1a の場合より大きい。斜材 Ee, Fe は S.T.P.-1a より 1 サイズ断面を上げているので座屈応力計算値も載荷 P=19.5 t であり，下弦材の破断時載荷荷重 P=18.9 t より大きいため座屈には至らなかった。

C) S.T.P.-2

図-16 によれば載荷荷重 P=10.0 t での撓みは計算値より約 20%，載荷頭初のナラシを考慮に入れば 10% 大きい。本供試体では斜材 Aa, Bb, Cc のいずれかの面外座屈か上弦面球ジョイント a, b, c のいずれかの局部座屈が期待された。図-17 には斜材 Aa の歪

曲線を示すが載荷 P=24.0 t，歪数値にして  $\epsilon=1.150 \times 10^{-6}$  から初期弾性を失い歪が増加する傾向を示し計算上の座屈荷重 P=29.3 t に至り， $\epsilon=1.650 \times 10^{-6}$  で素材としての降伏歪  $\epsilon=1.500 \times 10^{-6}$  を超えている。この挙動は Bb, Cc 部材についても言える。材自体は面外座屈を起して当然であったが，実験値最大荷重は P=30.1 t で上弦球ジョイント C の計算耐力載荷 P=31.4 t に未たない載荷で局部座屈した。下弦面球ジョイントは耐力には上弦球ジョイントより下であるがスチフナと斜材，下弦材が同一平面内にあるため変形も小さく局部座屈も発生しなかった。図-16 の荷重—撓み曲線は，球ジョイントの座屈までは初期弾性剛性とあまり差がない剛性を保っているが座屈後は，撓み変形のトレースを行なわなかったので図示できないが，実情は 図-21 に示す通り斜材 Bb が面外変形を急速に起しているの撓みも進行した筈である。

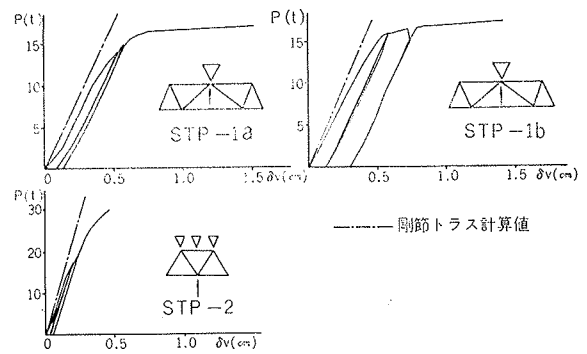


図-16 架構供試体撓み

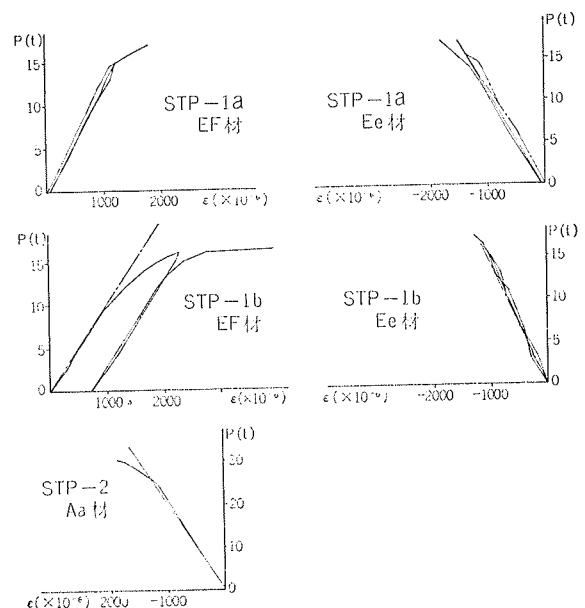


図-17 架構供試体部材軸方向歪〔剛節トラス計算値〕

### 5.3. 部材軸力

図-18に S.T.P.-1a, 1b の部材軸力を示す。これは実験で得られた部材軸方向歪より導いた数値で、剛節トラス計算値、ピン節点計算値と比較した。S.T.P.1aの上弦では ab 材が 18%, 下弦では CF 材が 13%, 斜材では eF 材が 14%, dF 材が 24%, aE材が 38%, それぞれ剛節トラス計算値より不足しているが dF, aE材の数値不足は、測定の誤差によるものと思われる。STP-1b では上弦材で載荷点 e に集中する部材の軸力が計算値より 7~22% 多く、これらを受ける Aa, Bb, Cc, Dd の各部材軸力も 10~25% 計算値より多い傾向にあり、載荷点下の Ee, eF 材が逆に、それぞれ 18%, 22%, 計算値より低く、aE, bE, cF, dF の各斜材が計算値にほぼ等しい現象は STP-1a には無い。上弦面において載荷点 e が他の 4 節点と比較して水平面より高い位置にあり、4 節点から節点 e に集まる部材が水平面からムクリを生じていれば載荷点からの応力が上弦材伝いに支点へ余分に流れるものと思われる。

STP-2 の部材軸力図は図-18に示す。応力流れは計算値とよく合っている。斜材 aD, bD, cD が無応力状態に近い数値である。なお、図-18の各数値は P=10 t 載荷の際の値である。

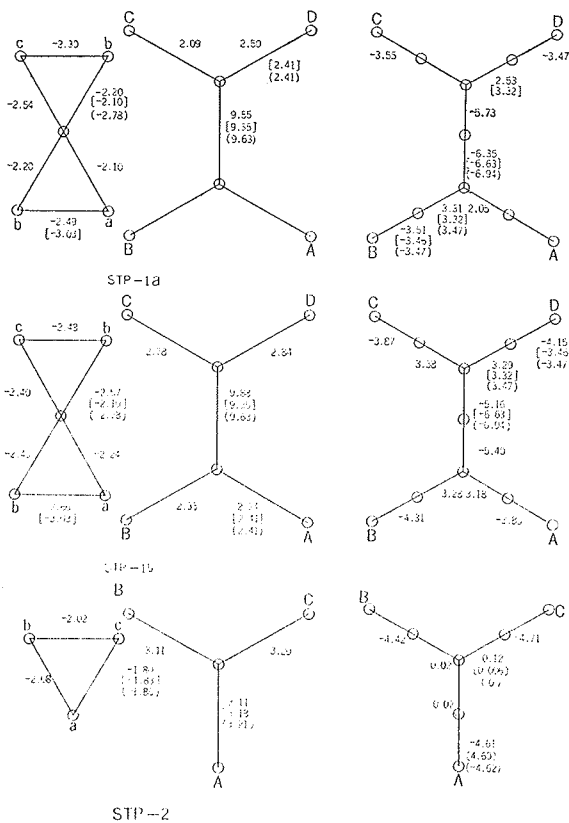


図-18 架構供試体軸力図〔剛節計算値〕(ピン節計算値)

### 5.4. 材端での曲げ応力

架構供試体各部材には載荷中曲げ応力が発生しておりパイプ材に貼布したワイヤストレインゲージの数値より各材端の曲げ応力を求め剛節トラス計算値と比較した結果を図-19に示す。曲げの回転軸も併記する。測定は部分的計測に止まったが傾向は図-19で十分把握できる。STP-1a, 1b では載荷点に集まる上弦材の部材 Y 軸廻りの曲げ応力が 3.0~5.0 t·cm 生じているが、上弦面の外は 1.0 t·cm 未満の数値が多い。STP-2についても同様のことがいえる。なお各数値は載荷 P=10.0 t の時の値である。

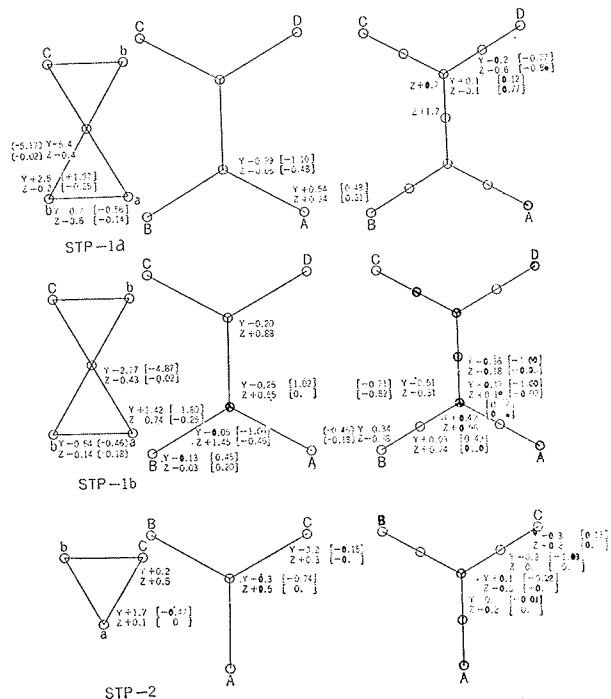


図-19 架構供試体曲げ力図〔剛節計算値〕

### 5.5. 球ジョイントの変形

部材供試体の実験からも球ジョイントの変形はスチフナ方向以外の方向にパイプが付く場合に無視できない事を示したが、架構供試体で球ジョイントの挙動を測定した結果の内典型的なタイプを図-20に示す。S TP-1aでは Cc 材(斜材)の上下に付く球ジョイントの変形(半球分)を示す。一点鎖線で示す線が球半径と同長のパイプの変形曲線で球ジョイントの変形と対比できる。図-20によれば球 c および球 C の変形 (Cc 材軸力 P=4.0 t) を比較して球スチフナと部材軸とが斜交する球 c の変形が、球スチフナが部材軸とスチフナが同一平面内にある球 C の変形の 2 倍になる。S



TP-1b からは Fe 材 (斜材) の当たる球ジョイント e, F の変形を図示する。材とスチフナが斜交する球 e の変形がやはり進んでいる。STP-2 の Aa 材 (斜材) の当たる球ジョイントでも球殻 a がその傾向を示す。このように架構の中でジョイント球殻は、内在スチフナの位置とパイプの付き方の具合で球ジョイントの変形も決まり、パイプの変形と比較して大きい数値となる場合には、その差の分だけ架構撓みに影響を及ぼすものと考えられる。

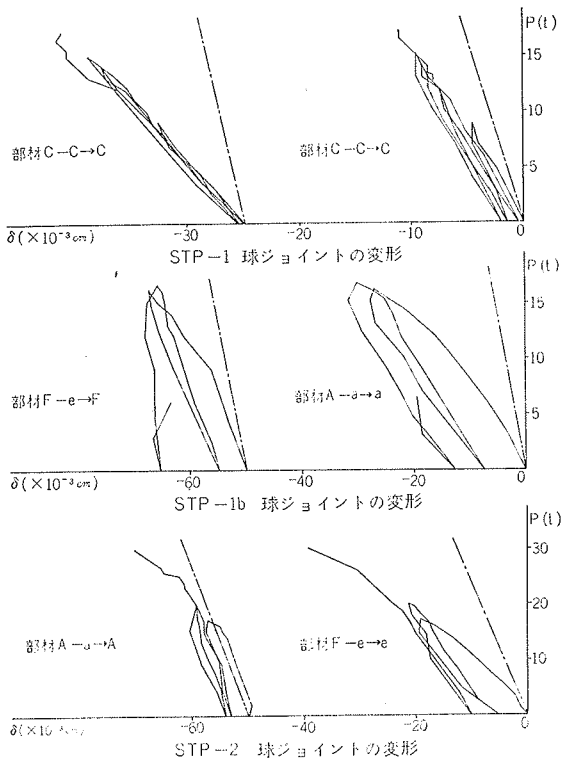


図-20 架構供試体球ジョイントの変形

5.6. 最終耐力

架構の降伏および最終破壊の性状について表-6 に記す。破壊状況は図-21 に示す。

A) STP-1a

載荷 P=14.5 t で斜材 Ee, 下弦材 EF が降伏し P=18.75 t で最大耐力に達した。原因は斜材 Ee の面外座屈である。斜材の座屈耐力の計算値は P=16.6 t で、架構撓み図 (図-16) の撓み急増点 16.5 t と対応しているが、斜材 Ee の歪図にはよく対応していない。本報告には無いが球ジョイント F, c の変形が 16.0 t ~ 16.5 t で急増しているのもその影響と思われる。図-21 にも示されるように斜材 Ee は面外座屈し球ジョイント近傍でも局部変形を誘発している。

B) STP-1b

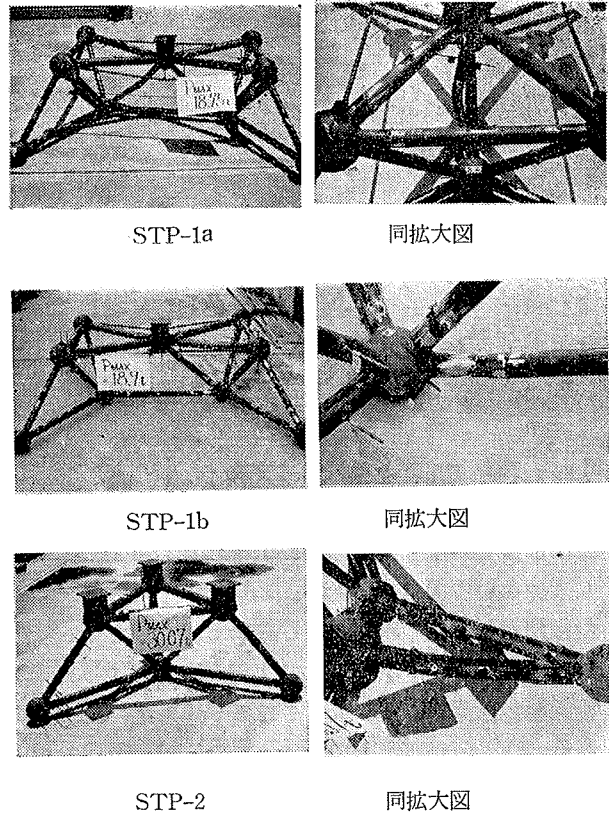


図-21 架構供試体最終変形

供試体符号	計算値		実験値		破壊箇所
	Py (t)	Pmax (t)	Py (t)	Pmax (t)	
STP-1a	16.6 (eE, eF) 14.7 (EF)	18.9 (EF)	14.5 (eE, eF, EF)	18.8	Ee材の面外座屈
STP-1b	19.5 (eE, eF) 14.7 (EF)	18.9 (EF)	15.5 (eE, eF) 16.0 (EF)	18.9	EF材破断
STP-2	29.6 (Aa, Bb, Cc) 36.6 (球 a, b, c)	-	-	30.1	球ジョイント C局座屈

表-6 架構供試体耐力表

先にも説明したように載荷点 e からの応力は上弦面から支点へ流れる傾向がみられ、載荷点の斜材 eE, eF への応力は、約20%少ないための歪図にも示される通り、斜材での座屈は発生せず、下弦材 EF の破断により耐力が決った。下弦材は応力  $\sigma=1.75\text{t/cm}^2$  程度まで初期弾性剛性を保ち、 $\sigma=3.10\text{t/cm}^2$  (載荷 P=16.0 t) で降伏している。架構撓み曲線は下材弦の挙動をよく反映し P=16.0 t で屈曲している。破断箇所は図-21 に示す様に球ジョイント E の近傍、ワイヤストレーンゲージの貼付点である。素材試験の結果よりパイプ部材 EF の耐力を求め載荷荷重を逆算すると P=18.9 t となり実験値通りの値となる。各球ジョイント

は最大耐力時にも破壊しなかった。

C) STP-2

本架構のみに球ジョイントの局部座屈とそれに伴う斜材の面外座屈が発生した。斜材 Cc に付く上弦球ジョイント c は、材軸と球内スチフナと斜交するので容易に座屈することが示された。座屈荷重  $P=30.07t$  を部材実験での同様なケースと比較すると MTP-3b と相対応 ( $\bar{P}_{max}=15.07t$  で本実験荷重に直して  $32.8t$ ) していることが示される。

6. 考察

6.1. 球ジョイントの変形量分布

表-7 は架構供試体球ジョイントの変形測定値を系統的にまとめたものである。架構に加わる応力は一定していないので全て  $10t$  荷重に換算統一した。表-7 の傾向として次の項目が挙げられる。

1. 球ジョイントのスチフナ平面内にパイプ材軸がある場合はそれ以外の場合と比較して変形が約  $1/2$  になる。
2. 径の小なる球ジョイントの変形は大なる球より変形が大きい。
3. 同径の球にパイプが付く場合には径の細いパイプの方が変形が大である。
4. 部材供試体の球ジョイントの変形と架構供試体の球ジョイントの変形を比較すると後者の方が  $2 \sim 3$

ステフナ種別	架 構 供 試 体			部材供試体
	部 材	球ジョイント	変 形 $\delta$	変 形 $\delta$
含まれる場合 スチフナの平面に材軸が	$\phi 42.7$	$\phi 139.8$		
	(1 a) C-C	C	-17.5	
	( # ) C-F	C	14.8	
	(1 b) A-a	A	-6.0	
			$ \delta  = 12.8$	
	$\phi 48.6$	$\phi 139.8$		
	(1 b) e-F	F	-14.4	
	( 2 ) A-a	A	-10.0	
	( # ) A-D	A	6.0	
	( # ) A-D	D	9.0	
		$ \delta  = 9.9$	3.7	
交差する場合 スチフナの平面と材軸が	$\phi 42.7$	$\phi 165.2$		
	(1 a) C-c	c	-24.8	
	( # ) F-c	c	27.1	
	(1 b) A-a	a	-21.7	
			$ \delta  = 24.5$	
	$\phi 48.6$	$\phi 165.2$		
	(1 a) C-d	d	-23.0	
	(1 b) e-F	e	-21.8	
	( 2 ) a-b	b	-10.5	
	( # ) A-a	a	-24.9	
			$ \delta  = 20.1$	
	$\phi 60.5$	$\phi 165.2$		
	(1 a) d-e	d	-31.0	
	( # ) d-e	e	-10.5	
	(1 b) d-e	e	-18.5	
		$ \delta  = 20.0$	7.7	
$\phi 42.7$	$\phi 139.8$			
(1 a) F-c	F	25.3		
(1 b) E-a	E	30.5		
		$ \delta  = 27.9$	15.3	

(P=10t)

単位  $10^{-3} \text{ cm}$

表-7 架構供試体球ジョイントの変形 (半球)

倍大きい。

1. の理由としてはスチフナによる球ジョイントの変形の拘束, 2. 3. は応力集中の度合の問題であろう。4. の理由としては、部材供試体では球ジョイントに1方向の応力が加わるだけであるが架構供試体では最大6方向の応力が集中するため、球ジョイント表面の応力分布、球の変形が複雑な形をとるためと思われる。

6.2. 球ジョイントの変形が

架構撓み変形に及ぼす影響

球ジョイントの変形が架構の変形に及ぼす影響を調査するために各供試体の球ジョイント変形測定値をもととして Williot の変位図から載荷点の余分な変形を求めた結果をまとめたものを表-8 に示す。表-8 によれば、剛節トラスの変形計算値に球ジョイントの付加変形を加えた値は S.T.P.-1a では実験値の 95%, S.T.P.-1b では 87%, S.T.P.-2 では 84% となる。実験値の載荷頭初の乱れを差引くと、S.T.P.-1a で 108%, S.T.P.-1b, S.T.P.-2 で 92% となり、S.T.P.-1a では実験値を超過してしまうのでこの考えは必ずしも妥当ではない。部材供試体実験の球ジョイント変形測定値を用いると S.T.P.-1a, 1b, 2 の付加変形の全変形に占める割合はそれぞれ 23.6%, 10.0%, 4.8% となり架構供試体実験の結果として、架構の余分な撓みの説明の全てにはならないがかなりの説明になると言えよう。撓みが計算値より大である他の要因を考えれば、部材自体の剛性のムラ、測定しなかった球ジョイントでのより大きな変形、支点球ジョイントの載荷荷重によるツブレ、パイプ部材の偏心応力による付加変形などがあげられよう。

供 試 体	(A) (cm) 撓み計算値	(B) (cm) 球ジョイント変形 による撓み	(c) (cm) 実 験 値	(A)+(B) (C)
S T P - 1 a	0.276	0.057	0.350 (0.310)	0.95 (1.08)
S T P - 1 b	0.266	0.020	0.330 (0.310)	0.87 (0.92)
S T P - 2	0.084	0.008	0.110 (0.100)	0.84 (0.92)

表-8 球ジョイントの変形を考慮した架構撓み

7. まとめ

部材供試体、架構供試体の実験を通じてまとめられることは次の項目である。

- i) 内部にスチフナを有する球ジョイントは、球にパイプを溶接する位置、パイプ径の大小、球径の大小

により、パイプを介して応力を加えた場合の変形が異なる。特にスチフナに斜めに交わるようにパイプが球ジョイントに溶接されていれば変形も大きく、圧縮応力が加われば座屈耐力の前後で座屈するが引張応力では破壊されない。

ii) 球ジョイントの変形は、架構の撓み剛性にある程度の影響を与える。

iii) 溶接部の強度に関しては本供試体に関する限りでは良好で、溶接部で破断したものでも計算値通りの値を示しており、溶接施工が十分であれば本架構は耐力的に十分なものといえる。

iv) 部材に生ずる曲げ応力は、集中載荷形式の ST P-1a, 1b の載荷点近傍で 5 tcm ( $P=10$  t) 出る程度であり、他の部材、供試体での曲げは小さく、したがって偏心応力の小さいことが示された。

なお、本実験に当り、ご指導いただいた神戸大学工学部金谷弘助教授、並びに実験にご協力いただいた本店設計部樋口元一主任技師、金沢正明、中村三夫両職員に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会論文報告集 No. 92