

架設用鋼管継手の曲げ耐荷力実験

EXPERIMENT ON BENDING CAPACITY OF THE ERECTING STEEL PIPE CONNECTION

青木徹彦* 国分尚司**

Tetsuhiko AOKI and Takashi KOKUBU

*工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 (〒470-03 豊田市八草町八千草1247)

**愛知工業大学修士課程 建設システム工学専攻 (〒470-03 豊田市八草町八千草1247)

The experimental investigation on the bending moment capacity and the bending rigidity of the joint of steel tubes used during erection is described. This type of joints, composed of four steel plate fins welded in parallel to the member axis at the end of the tube, are commonly used during erection as a simple connection. The stresses from the one side tube are transferred to the other tube through the welded fins and splice plates fixed by the high tension bolts and partly draft pins. Designer usually checks the extreme fiber stresses of the splice plates which give substantial cross section at the joint center section. But there might exist many unknown factors increasing the stresses at the joint such as stress concentration, unexpected local bending, eccentricities out of considerations. By conducting the bending tests for this type of connection, it is found that this type of connection has extremely low bending rigidities than that estimated by stress calculation.

Key Words: Steel tube, Connection, joint, Fin type connection, Bending rigidity

1. まえがき

鋼管を軸方向に連結する場合、高力ボルト、リベット、または溶接による直継手が原則として用いられる。ただし、二次部材でやむを得ない場合は、フランジ継手とすることもある。¹⁾

ところが、架設時の継手部では作用応力が小さいことや、短期であるなどの理由で、もっと簡単な構造が用いられることが多い。例えば、Fig.1 に示す継手構造は架設用鋼管継手としてよく用いられている代表的な例で、部材各部に4枚の継手鋼板を溶接し、これを添接板で挟んでボルト接合した構造となっている。この接合部はエレクションピース²⁾とも呼ばれているが、適切な名称がないので、ここではフィン型継手と呼ぶことにする。

通常、継手の設計では継手断面の断面積、断面2次モーメント等を用いて応力計算を行い安全度を確認する。

しかし応力計算の結果、安全であったとしても、本研究で対象とするような継手構造に関して、実際の強度や剛性が設計値と同じなのか、どの程度異なるかは、土木、建築を問わず、文献、資料のない現状では、実務設計者は知る由も無く、絶対的な確信のない状況で設計業務が行われているのが一般的な現状であろう。

実際に、この形式の継手を用いた鋼アーチ橋が1993年1月、三重県一志郡で架設中に落橋事故を起こした。³⁾

落橋事故の主要原因の一つがこのタイプの継手構造にあると考えられるため、本研究ではこの事故で生じたものと同一形状、寸法の鋼管継手をもつ供試体を製作し、等曲げ載荷を行って、耐荷力、応力伝達の様子および、ひずみ、変形特性を実験的に明らかにし、原因解明の一助とすることを主な目的としている。

継手部のような応力状態が複雑となる構造部分の強度は、実物あるいはモデルの載荷実験を行うことによって明確となる。あるいは有限要素法による弾塑性有限変位解析等でも今日ではかなりの程度まで傾向はつかめるようである。しかし実験や非線形解析は特殊な構造や新しい形式の採用等の特別な場合を除いては、一般に日常の設計業務に付随して行われることはない。架設用ではなおさらである。

架設用継手に関する安全で合理的設計法は、本研究のような実験的研究によるデータの積み重ねが不可欠となるが、現状では十分ではなく、同様の架設時落橋事故を再び起こさないためには、この分野に関する実験的研究を行うことによって力学的性質を明らかにし、基礎資料の整理、公表が一日も早く行われる必要があるように思われる。

2. 実験計画

実験に用いる鋼管部材は事故の生じた継手部材と同じく、材質 STK 400，直径 508mm，板厚 9.5mm の電縫鋼管である。実験供試体は 6 体用意し、4 体は鋼管継手部分の曲げ強度を調べるために、部材中央で継手部を有する曲げ供試体とする。継手の取り付け角度による影響を知るために 90° おきに配した継手鋼板を Fig. 3 に示す部材中央位置の断面の X-X 軸に対して 45°，67.5°，90° の各方向に設け、両面隅肉溶接する。これらの継手鋼板を各 2 枚の添接板(t=12mm)で挟み、トルクシア型高力ボルトで摩擦接合を行う。ただし両側 3 本づつのうち、中央各 1 本は実際の施工状態を再現するためにドラフトピンを挿入する (Fig.1 参照)。他の 2 体は強度、剛性の比較のため継手のない直管を用意する。

なお実橋では継手鋼板は水平 (X-X) 軸に対して 45° であった。

供試体はすべて全長 L= 2385mm とし、45° 継手供試体は 2 本、他の継手供試体は 1 本づつ用意する。実験計画を Table 1 に示す。実際の構造での鋼管部材接合部は架設終了後、全周完全溶込みグルーブ溶接を行うためレ型開先とし、2 本の鋼管部材の間に 5mm の間隙をあけ、裏当て金を設けてある。この継手供試体を記号 ARCBC (ARCh Bending Connection の略) で表し、継手のない鋼管は記号 ARCBN (ARCh Bending Non connection の略) で表す。

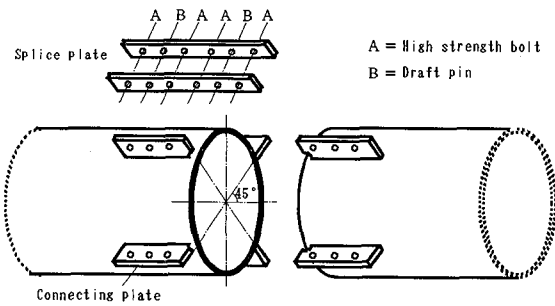


Fig. 1 架設用鋼管フィン型継手組立図

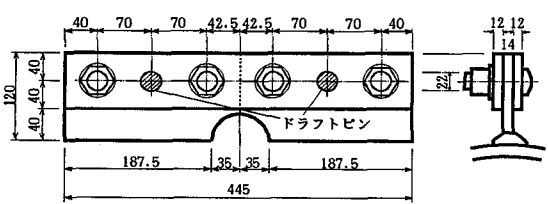


Fig. 2 フィン型継手詳細図

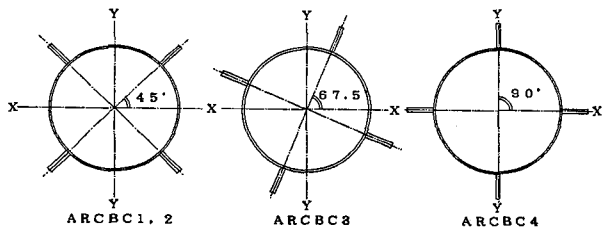


Fig. 3 継手鋼板取り付け位置

Table 1 実験計画

Specimen	継手取付角度	本数	I_{CF} / I_F	備考
ARCBC1	45°	1	0.758	継手供試体
ARCBC2	45°	1	0.758	
ARCBC3	67.5	1	0.762	
ARCBC4	90°	1	0.780	
ARCBN1	ナシ	1	1.000	継手無し供試体
ARCBN2	ナシ	1	1.000	

I_{CF} = 継手供試体の公称断面 2 次モーメント
 I_F = 継手無し供試体の公称断面 2 次モーメント

3. 実験方法

3.1 引張試験

鋼管部材から切出した板材を JIS 5 号試験片に、また、継手部添接板から切出した板材を JIS 14B 号試験片に各 3 体づつ加工し、引張試験を行う。

3.2 等曲げ試験

(1) 載荷方法

載荷は Fig. 4 に示すように、供試体両端を載荷梁に結合し、300tf 油圧式試験機で 2 点載荷等曲げの条件で行う。モーメントアーム長は 1500mm とし、上側支点には $\phi 85$ mm のローラーを用い、下側支点には 2 枚の鋼板にグリースを塗って支点と載荷ばりとの間に挿入し、摩擦が生じないようにする。荷重は降伏荷重付近までは荷重制御で、それ以降は最大ひずみを生じると予想される点でのひずみ、および Fig. 5 の変位計による変位制御とし、変位およびひずみの測定を行う。

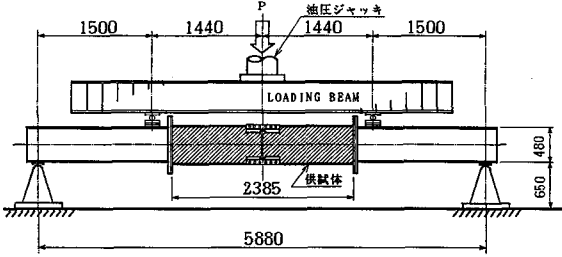


Fig. 4 2点載荷等曲げ試験

(2) 変位およびひずみの計測

鋼管接合部の曲率を計測するために、圧縮、引張側最外縁と中立軸の供試体中央接合部に 4 個の変位計を取り付ける。また鉛直方向変位を計測するために、試験体下部にも変位計を設置する。ひずみゲージは、継手部添接板中央部の両端、継手溶着部周辺の鋼管表面上、および圧縮、引張側の鋼管両最外縁および中立軸に貼り付ける。変位計、およびひずみゲージの張り付け位置を Fig. 5 に

示す。なお継手取り付け位置が 90° の場合、変位計取り付け位置に継手があるため、やや横方向に移動して固定した。

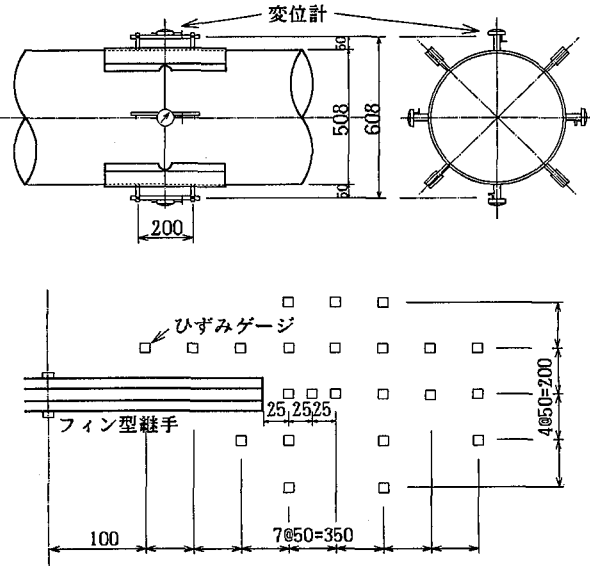


Fig. 5 ゲージ取り付け位置

4. 実験結果とその考察

4.1 引張試験

Table 2 に引張試験の結果を記す。

Table 2 引張試験結果

	σ_y (kgf/cm ²)	σ_u (kgf/cm ²)	$E(\times 10^6)$ (kgf/cm ²)	ε_y	ν
鋼管部	4511	5738	2.076	2173	0.282
添接板	2643	4303	2.167	1215	0.283

Table 3 等曲げ試験結果

Specimen	継手取 付角度	公称値		実測値		実験値 Mu, ex (tf・m)	Elcex / El _{ex}		Mu, ex / My _F
		I _F (cm ⁴)	My _F (tf・m)	I _a (cm ⁴)	My _a (tf・m)		Elcex	El _{ex}	
ARCBC1	45°	35030	27.29	34260	38.09	37.25	0.028		0.85
ARCBC2	45°	35030	27.29	34260	38.09	36.90	0.020		0.84
ARCBC3	67.5°	35230	21.91	34014	31.33	36.98	0.029		0.85
ARCBC4	90°	36060	19.85	34376	29.28	37.80	0.091		0.87
ARCBN1	ナシ	46240	43.68	44452	79.07	94.35	1.000		2.16
ARCBN2	ナシ	46240	43.68	44452	79.07	95.85	1.000		2.19

Elcex = 継手供試体の断面曲げ剛性
El_{ex} = 継手無し供試体の断面曲げ剛性

鋼管部、添接板両試験片は、公称降伏強度 ($\sigma_y = 2400$ kgf/cm²) のそれぞれ約 1.9倍 および 1.1倍の値になった。鋼管部の降伏強度の値が著しく大きいのは一般に電縫鋼管に見られる性質である。

4.2 等曲げ試験

各供試体の断面 2 次モーメント、降伏モーメントの公称値 (I_F, My_F)、実測値による計算値 (I_a, My_a) および実験による最大曲げモーメント (Mu, ex) の結果を Table 3 に示す。継手鋼管の実測値による各計算値は、継手部添接板の引張試験片から求めた実測材料定数、および Fig. 6 の斜線に示す継手部添接板の断面積 (引張側は純断面積) から求めた。継手のない鋼管は鋼管部から切出した引張試験片による実験値を用いた。

(1) 最大強度

継手鋼管の曲げモーメントー曲率図を Fig. 7 に示す。この図の縦軸は各供試体の曲げモーメントを継手のない鋼管の公称降伏モーメント (My_F) で無次元化したものである。また横軸は変位計による曲率 (ϕ) を公称降伏曲率 (ϕ_{yF}) で無次元化したものである。

曲げ実験によって得られた最大曲げモーメント (Mu, ex) の My_F に対する比は 0.84~0.87 で、架設時の許容応力の割増し (1.25) を考えれば、最大強度に対しては 0.8 以上の値が確保されている。よって強度的には十分であると考えられる。また、各継手鋼管の Mu, ex の値を Fig. 6 の添接板のみ考慮した公称降伏モーメントと比較すれば 1.35~1.69 倍の値であった。

継手取り付け角度による強度差は取り付け角度が 67.5°, 90° と大きくなるにつれて計算値による降伏モーメントの値は小さくなるが、実験による強度の差はほとんどみられなかった (Table 3 参照)。

継手のない鋼管の最大曲げモーメントは公称降伏モーメントの 2.19 倍と非常に大きな値となった。

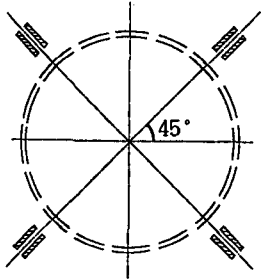


Fig. 6 継手鋼管供試体断面積

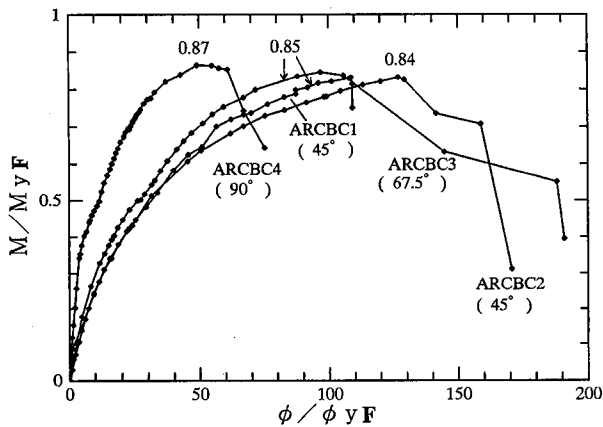


Fig. 7 継手鋼管供試体の曲げ剛性の比較

(2) 曲げ剛性

継手のない鋼管 (ARCBN1) および継手鋼管 (ARCBC2, 45°) の曲げ剛性の比較を Fig. 8 に示す。同図の両軸は Fig. 7 と同じであるがスケールが変えてある。この図より継手のない鋼管の曲げ剛性は理論値をほぼ満たしているが、継手鋼管の曲げ剛性は継手のない鋼管に対し 10% にも満たないという予想を著しくはずれる結果となった (Table 3 参照)。この結果は Table 1 に示すように継手部の断面 2 次モーメントが継手なし鋼管の値の 0.77 程度であったことを考えると本継手鋼管が実際には継手のない鋼管に比べ著しく曲げ剛性が低い危険な構造であったといえる。

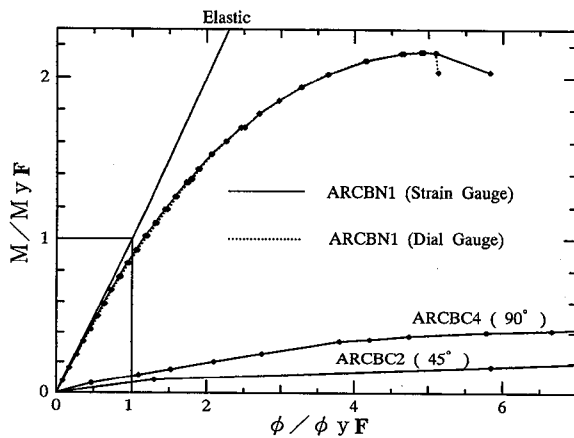


Fig. 8 曲げ剛性の比較

(3) 鋼管最外縁ひずみ

Fig. 9 は継手鋼管 (ARCBC2, 45°) の圧縮側鋼管上に張り付けたひずみゲージによるひずみ曲線で、継手のない鋼管の公称降伏モーメント (MyF) と鋼管部引張試験片により求めた降伏ひずみ (ϵyox) で無次元化してある。

鋼管中央に近い点 (No. 2, 3) のひずみは自由端部となっているため、端部から遠い方の点 (No. 1, 4) のひず

みより小さい。 $M/MyF = 0.65$ あたりに引張側から圧縮側へ No. 2 のひずみが急増しているのは、架設終了後グループ溶接をするために鋼管接合部に設けられていた 5mm の間隙が圧縮変形により閉じ、接触したため局所的曲げが生じ、このような複雑な変形挙動が生じたと思われる。これは他の供試体でも同様であった。

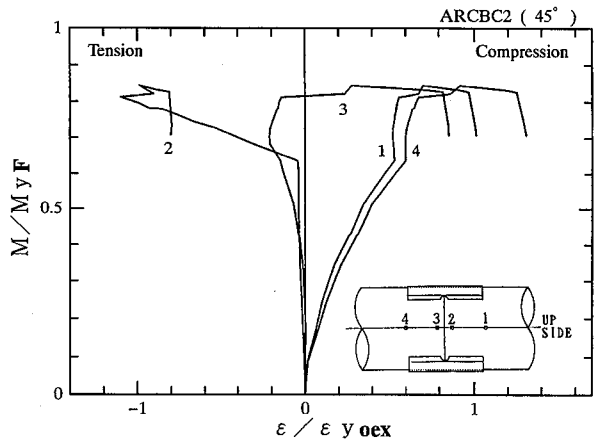


Fig. 9 圧縮側最外縁ひずみ図

(4) 添接板中央部のひずみ

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 は各継手鋼管供試体の継手部添接板におけるひずみ曲線であり、継手のない鋼管の公称降伏モーメント (MyF) と添接板引張試験で求めた降伏ひずみ (ϵyex) で無次元化したものである。図中 2 本の曲線の間の斜線または横線は、添接板表裏 1 組のひずみの差を表し、この幅が面外曲げの大きさに比例している。

上部添接板は曲げ圧縮の最外縁部にあるため、本来これら 6 点のひずみゲージの値はすべて圧縮の値を与えるはずであるが、No. 2, 3, 6 のひずみが圧縮、No. 5 はほぼ 0、最外縁に近い No. 1, 4 では荷重のかかり始めから引張りひずみが生じている。このような結果は全く予想外のことであり、ひずみ分布の観察からも継手部としての機能が著しく低い状態にあったことがわかる。

No. 1 と No. 3 のひずみの比較より、継手板には比較的大きな面内曲げが生じているといえる。これは Fig. 13 に示すように鋼管からの力の伝達がこの継手鋼板下部に集中して作用し、添接板面内で著しい偏心圧縮状態となっていることを示している。Fig. 10, Fig. 11 の結果から、このときのひずみ分布は同図中に示すような曲げひずみ分布となっていることが推察される。Fig. 12 の供試体継手部についても同様の偏心状態が観察される。

つぎに Fig. 10, Fig. 11 の添接板の表裏のひずみ、例えば No. 1 と No. 4 または No. 3 と No. 6 のひずみを比較すると、これも差が生じており、面外曲げも同時に生じていることがわかる。面外曲げが生じるのは Fig. 14 (a) に模式的に示すように継手部が部材曲げ面内に対して傾斜している場合、鋼管からの作用モーメント MY が

継手部とその直角方向への成分 M_a , M_b に分解され、 M_b によって上側が 凹となる曲げ変形が生じる。ただし面内曲げ成分 M_a は先に述べた Fig. 13 に示す鋼管からの偏心力による曲げモーメント (M_c) とは逆方向であり、これら2つの合成モーメントが面内曲げモーメントとなって Fig. 13 に示すひずみ分布が発生していると考えられる。継手曲げ変形の様子を ARCBC1 を例に写真 1 に示す。

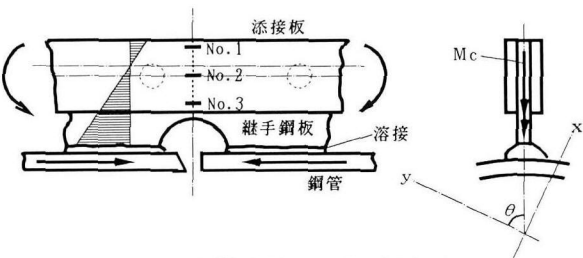


Fig. 13 継手部への応力伝達図

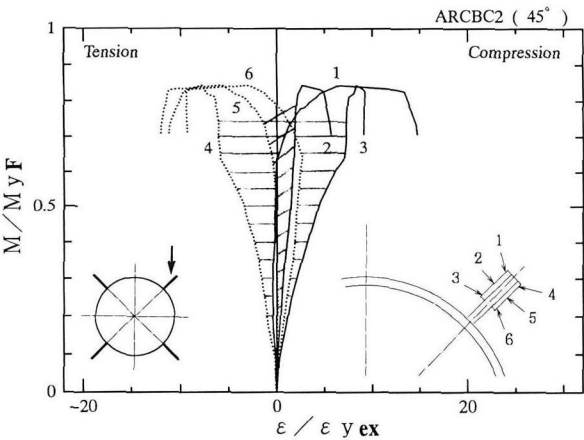


Fig. 10 添接板ひずみ図 (45°)

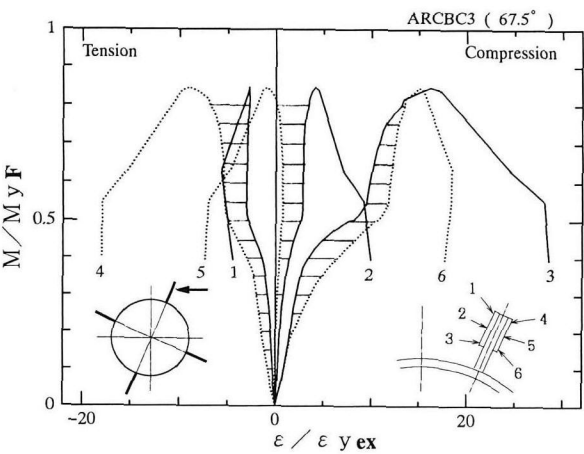


Fig. 11 添接板ひずみ図 (67.5°)

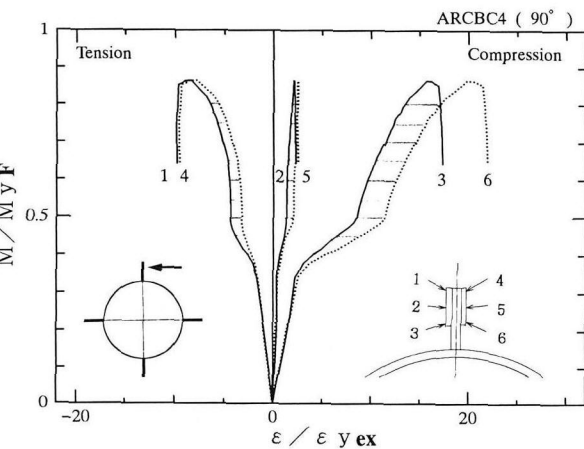


Fig. 12 添接板ひずみ図 (90°)

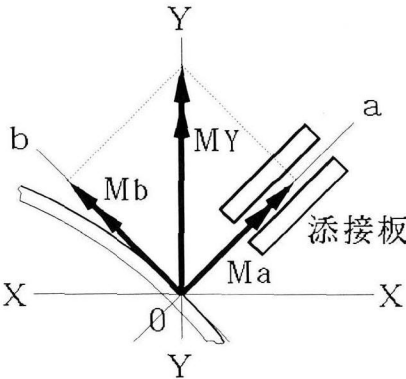


Fig. 14(a) 継手部の曲げ変形成分図

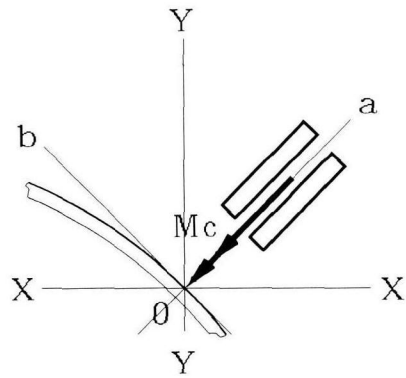


Fig. 14(b) 鋼管からの曲げ変形成分図

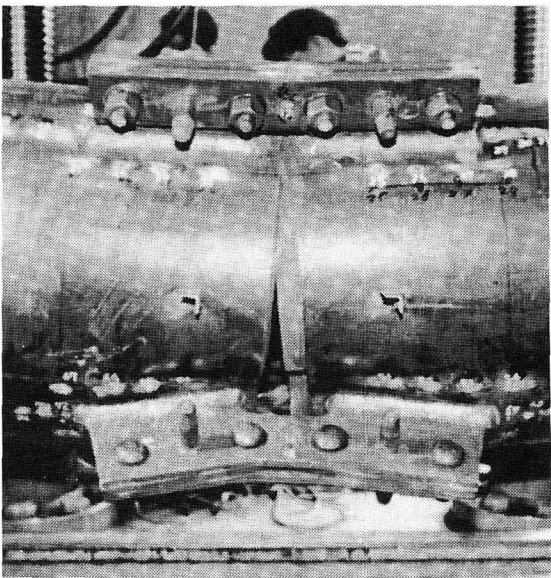


写真 1 継手曲げ変形の様子

(5) フィン型継手周辺部のひずみ

Fig. 15 は継手鋼管 (ARCBC2, 45°) の圧縮側フィン型継手周辺部のひずみ曲線で、継手のない鋼管の公称降伏モーメント ($M_y F$) と鋼管部引張試験から求めた降伏ひずみ ($\epsilon_{y oex}$) で無次元化してある。他方の鋼管部材から継手鋼板を通して圧縮力が集中的に作用するため、継手鋼板先端部から 2.5cm 離れた点 (No. 6) でのひずみが最も大きく、最大荷重の約 1/2 ですでに降伏ひずみに達している。実際には溶接による残留応力があるので、引張側ではより低い荷重で局所的な降伏を生じているものと考えられる。

Fig. 16, Fig. 17 はそれぞれ ARCBC2, ARCBC4 の継手鋼板周辺部の最大曲げモーメント近くでのひずみ分布の様子を平面的に表したものである。このひずみ分布図は各継手鋼管のひずみ (ϵ) を鋼管部引張試験片により求めた降伏ひずみ ($\epsilon_{y oex}$) で無次元化したもので、この図から $M/M_y = 0.7$ 前後で継手鋼板先端部に公称降伏ひずみの 3 倍以上のひずみが集中的に生じており、先端部から離れていくとともにひずみは減少していることが分かる。したがって継手構造全体の曲げ剛性が著しく小さかった原因の他の一つは、集中力が作用する継手鋼板先端部に局所的な塑性化を生じてひずみが増大したことによると考えられる。

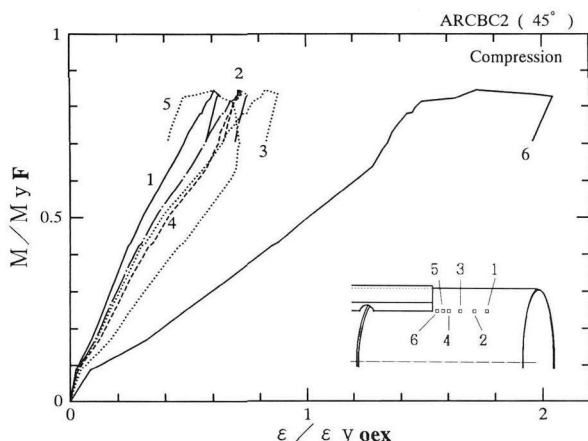


Fig. 15 継手周辺部のひずみ

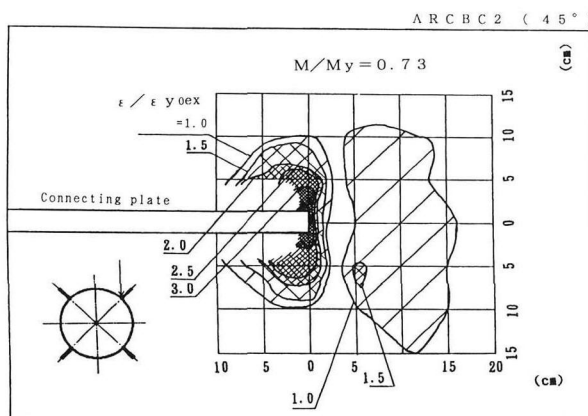


Fig. 16 継手周辺のひずみ分布図 (45°)

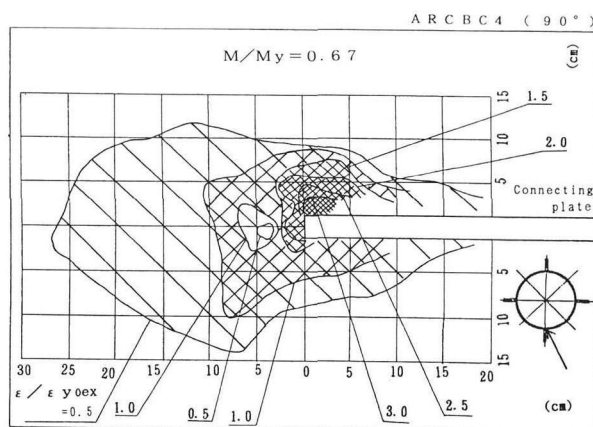


Fig. 17 継手周辺のひずみ分布図 (90°)

(6) 破壊時変形状態

実験中の観察によれば最大曲げモーメントに到る直前に鋼管断面の引張側フィン型継手取り付け部分が内側に座屈変形し、急速に耐荷力が低下した。鋼管のへこみ量は鋼管中央結合部ほど大きく、またフィン型継手自体も面外曲げと同時に面内にくの字に変形した (写真 2 参照)。ボルトの破断等は見られなかった。鋼管の断面変形後、一部でフィン型継手端部の溶接箇所溶接割れが見られたものもあった。

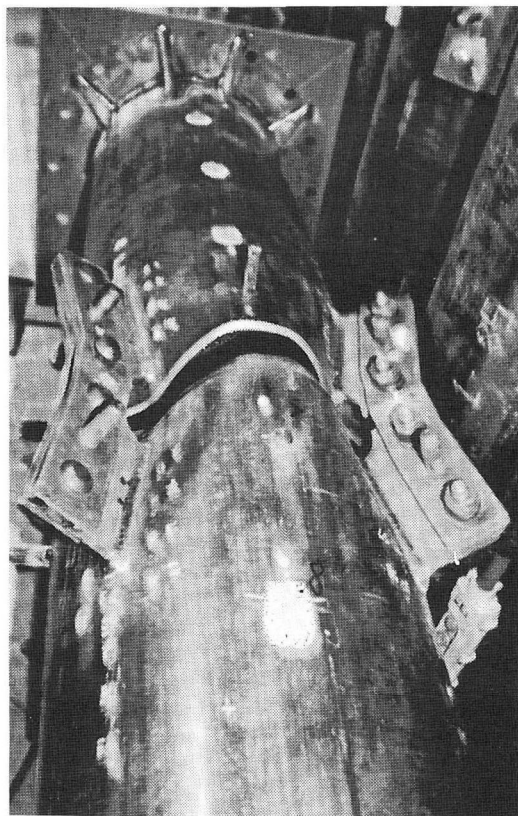


写真 2 断面変形の様子 (ARCBC1)

4.3 剛性低下の原因

以上の実験結果より、本フィン型鋼管継手の異常な剛性低下の主原因は以下の4つと考えられる。

- (1) 継手鋼板に作用する面内偏心曲げによる添接板の早期降伏。
- (2) 傾斜した継手鋼板に作用する面外曲げ成分による添接板の面外曲げ変形と、その中立軸側への移動による断面2次モーメントの低下。
- (3) 継手鋼板から鋼管部への応力が継手鋼板の溶接先端部に集中的に作用し、鋼管部にも局所的な早期塑性化が生じた。
- (4) 鋼管自体の断面変形。

5. 継手構造の改善案

以上に述べた剛性低下の原因に対応する継手構造の改善案として、

- (1) 鋼管内部にリングスティフナーおよび曲げ方向に平行に板スティフナーを設ける。
- (2) フィン型継手を曲げ面内に平行に取り付ける。
- (3) 継手鋼板に三角形の延長部分を設ける。

などが考えられる。このような継手部改善例の詳細を Fig. 18 に示す。

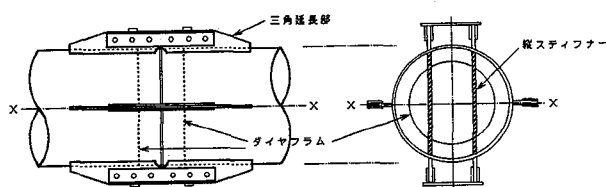


Fig. 18 改善案

7. 結論

本研究は架設用鋼管継手として一般に広く用いられているフィン型継手部の曲げ強度実験についてまとめたものである。得られた結論を要約すると以下のようになる。

- (1) 最大曲げ強度は鋼管自体の公称降伏モーメントの約0.85倍あり、架設時許容応力の割増しを考えると設計強度としては問題となるものではなかった。またフィン型継手の曲げ軸に対する取付け角度による強度差はほとんどなかった。
- (2) フィン型継手の曲げ剛性は鋼管の曲げ剛性の1/10以下と著しく低い値を示した。よって一般的によく用いられているこの継手構造を曲げ部材の継手として用いることは設計応力上は安全であっても、実際には非常に危険であり、曲げでの使用は禁止されるべきである。
- (3) 剛性低下の原因として、①継手鋼板に鋼管部から作用する偏心曲げ作用、②フィン型継手の面外曲げ、③鋼管部の継手鋼板溶接先端部での応力集中、④鋼管自体の断面変形、が考えられる。
- (4) 剛性低下の原因に対応する継手構造の改善案を示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路示方書・同解説（Ⅰ共通編Ⅱ鋼橋編），平成2年2月
- 2) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説，平成4年9月
- 3) 中日新聞，平成5年1月23・24日

（1995年1月23日受付）