

架設用鋼管継手の有限要素解析

Finite Element Analysis of the Erecting Steel Pipe Connection

国分 尚司*、青木 徹彦**

Takashi KOKUBU, Tetsuhiko AOKI

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 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 finite element analysis for this type of connection, it is found that this type of connection has extremely low bending rigidities than that estimated by stress calculation.

1. はじめに

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トロニクス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

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、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、原因解明の一助とした⁴⁾。

本研究では、載荷実験を行ったモデルの3次元有限要素弾性解析を行い、載荷実験値との照合や、継手構造の改善案を提案することを目的としている。

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。

* 愛知工業大学 建設システム工学専攻 (豊田市)

** 愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

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。

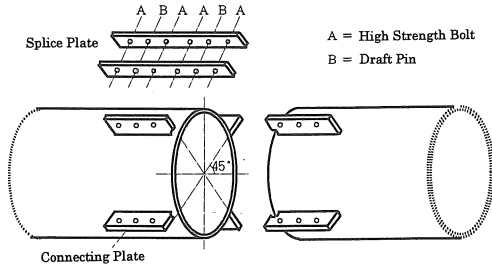


Fig. 1 Assemble of Connecting Specimen

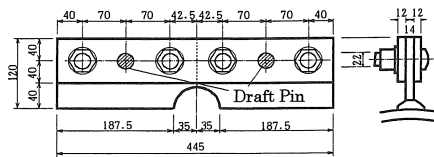


Fig. 2 Fin Type Connection

2. 解析計画および解析方法

2.1 解析計画

載荷実験⁴⁾では、実験供試体の継手構造全体の曲げ剛性が著しく低いという結果が得られた。その原因は、継手の面外、面内曲げ作用と継手取り付け周辺部の局所的なひずみの増大によるものと考察された。そこで数値解析では主にこの2点を重点におき弾性立体解析を行う。解析モデル寸法を Table 1 に、解析計画を Table 2 に示す。

使用する解析プログラムは、従来本学において開発されてきた有限要素解析プログラムを立体構造物モデルの解析を行えるように改良して使用する。ただし、このプログラムは現状として、面内変形の精度が悪いなどのいくつかの問題点があるため、鋼管継手の数値解析を行うにあたり、今回は実験供試体との比較など精度的な照合はせず、継手の変形の様子や応力伝達の様子を定性的に知ることの主な目的として行う。

解析するモデルは、継手取付角度が 45°のタイプを対象とし、設計寸法は基本的に強度実験で使用した供試体の実測寸法を用いる。ただし、Fig.2 に示す継手部のφ35の1/4円部分やボルト穴の欠損部分などは考慮せず1枚板で考える。また、ヤング率、ポアソン比は、

鋼管部、継手部添接板の各素材引張試験で得られたデータを用いる。モデル形状は Fig.3 に示すように解析モデルの対称性を考慮して片側半分だけのモデルとする。また、継手部の面外、面内曲げと継手取付部周辺の局所的な応力の増大を防ぐという意図から、継手部の厚さや長さを変化させて継手部と継手取付部周辺のひずみ分布を調べる。

また、継手部の断面は、Fig.4 に示すように実際の継手と同様な設計寸法とする。ただし、解析モデル A45-T1,A45-T2 は、継手断面中央の継手鋼板の板厚寸法を変化させたものである。継手の長さを変化させる場合は、継手鋼板とともに添接板も同様に伸ばすものとするため、継手の断面積は変化しない。

なお、継手取付角度 67.5°, 90°のモデルは、上下の継手の取付角度が異なりモデルの対称性を考慮できず、考慮せず解析するためには現在使用しているコンピューターのハード的な問題(記憶容量不足)を改善しなければならず、今回は解析を行わない。

解析モデルの記号は、基本構造のモデルを A45-M1(Arch45° Main 1 の略)で表し、継手鋼板の板厚を変化させたものを A45-T1,A45-T2(Arch45° Thickness 1 or 2 の略)、継手の長さを変化させたものを A45-L1,A45-L2(Arch45° Length 1 or 2 の略)で表す。

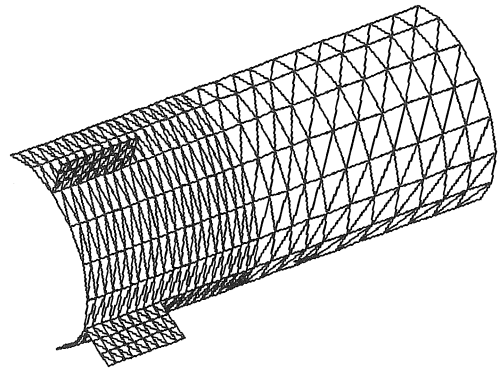


Fig. 3 Analysis Model (A45-M1)

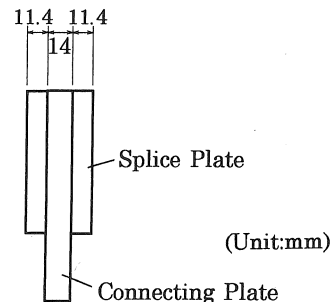


Fig. 4 Cross Section of Connection

Table 1 Dimensions of Analysis Specimen

Diameter of Steel Tube D(mm)	508
Thickness of Steel Tube t(mm)	9.16
Width of Splice Plate h(mm)	81.5
Thickness of Splice Plate b(mm)	11.4

Table 2 Analysis Plan

Model	Number	Connecting Plate(mm)		
		Width	Length	Thickness
A45-M1	1	120	225	14
A45-L1	1	120	125	14
A45-L2	1	120	50	14
A45-T1	1	120	225	28
A45-T2	1	120	225	42

2.2 解析方法

各モデルデータの作成は、まず、今回作成した解析するモデルをパソコンのディスプレイ上に表示させる FEM モデル作成プログラムを用い、解析するモデルをグラフィック表示させ、データ確認を行いながら作成し、これを有限要素解析プログラムに入力して解析を行う。

载荷は強度実験と同じ条件で行うため、Fig.5 に示すように鋼管の端部に曲げモーメントを生じさせるように荷重ベクトルをかける。なお今回は弾性解析を行うため、作用させる曲げモーメントは供試体の実測寸法から求めた降伏モーメント($M_y = 29.50 \text{tfm}$)を使用する。

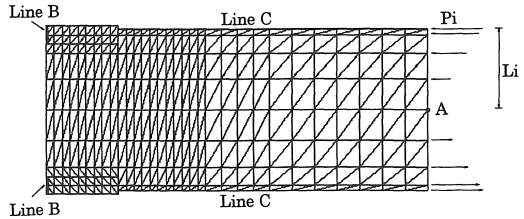
境界条件は Fig.5 の A 点を回転ヒンジとし、曲げ作用がかかるようにする。鋼管上下端の C ラインは鋼管の対称性を考慮する。また、応力は継手部より伝達されるので、継手左端部の B ラインは反対側の継手との対称条件とする。ただし、実際の継手部の応力伝達は継手部添接板より伝達し、継手鋼板からは伝達しないが、添接板のみに境界条件を考慮することが非常に困難であり、また今回は応力伝達の傾向を知るのみなので、継手鋼板と添接板の両方に境界条件を入力することとした。

解析モデルの節点数は、基本モデル(Fig.3 参照)で 348 節点、要素数は 604 要素、方程式の数は 2088 個となった。本来ならば鋼管部の各要素をもっと小さく分割して解析を行う予定であったが、立体構造物の解析では、少ない節点数でも小さい接点番号と大きい接点番号との結合があると解析プログラム内の剛性マトリックスの容量が大きくなる性質があり、今回も少ない節点数ではあるがコンピュータの限界に達したためこの分割数で解析を行う。なお、ワークステーショ

ンとして HP 社製 A1097C を用いる。

数値解析により、各節点の変位、応力、ひずみ、各要素についての応力、ひずみを算出する。

Fig.3, Fig.5 のモデルは、今回開発した FEM モデル作成プログラムにより作画したものである。



$$M_y = \sum P_i \cdot L_i$$

Fig.5 Load Vector and Boundary Condition

3. 解析結果

(1) 継手部の応力伝達

モデル A45-M1 と A45-L1 の圧縮側の継手部のひずみ分布を Fig.6、Fig.7 に示す。Fig.6 は実験供試体の実測寸法($L=225\text{mm}$, $t=14\text{mm}$)であり、Fig.7 は基本寸法より継手の長さを 100mm 短くした($L=125\text{mm}$, $t=14\text{mm}$)ものである。これらの図は数値解析により算出した各節点の図の x 軸方向のひずみを継手部添接板の引張試験で求めた降伏ひずみ($\epsilon_y = 1215 \times 10^{-6}$)で無次元化してある。

Fig.6 の左側は供試体の中心位置かつ継手の中心位置であり、3つの節点 a, b, c には継手の対称条件を入力している。モデルの右側は継手取付先端側であり、B 点は鋼管表面上に接合されている継手取付先端側である。また、図中左下の点線で示した 1/4 円部分やボルト穴部分は実継手では切り取られているが数値解析では切り取らなかったため c 点付近またはボルト穴付近のひずみ分布は実際の継手にかかるひずみ分布とは当然異なるものと考えられる。

これらのひずみ分布より、継手部上部が引張ひずみ(+), 下部が圧縮(-)ひずみとなっており、とくに左上、左下の部分のひずみが増大している結果となった。このことにより、継手全体には実験の解析結果と同じく鋼管部から継手部に偏心圧縮力が作用し、上に凸になるような面内曲げが生じていることが分かる。また、図の右上部分にはほとんどひずみが生じておらず経済性を考えた場合右上部分を斜めに切り落としても継手にかかる影響は少ないものと考えられる。このよ

うなひずみ分布の様子は、引張側継手部では圧縮、引張ひずみの符号が逆になるが、ひずみ分布の様子は同じであった。

設計者は、通常継手部すべての節点には一様な圧縮応力が作用するものと考えて鋼管全体の継手構造の計算を行うものと考えられるので、このような仮定に基づいた計算結果と、実験および数値解析結果との極端な違いがあることが、耐力の不足、ひいては落橋事故の主原因になったものと考えられる。このような応力状態となることは、従来、国内外で発表されたものはなく、本研究で初めて明らかにされたことである。

また、継手の継手取付先端部である B 点付近にもひずみの値が大きくでており、Fig.7 のモデル(A45-L1)ではさらに増大している。Fig.8 に継手部の長さを変化させたときの B 点の無次元化したひずみのグラフを示すが、この図より継手部の長さを大きくすることにより、継手部からの応力が鋼管表面上に与える影響を小さくさせる傾向が見られた。

Fig.9 はモデル A45-M1 を上から見た図であり、Fig.6 の C 点(図中右上)を基準として他の節点の相対変位を表したものである。これにより、継手中心部へ向かうにつれ変位が大きくなるのが分かる。すなわち、継手の面外曲げが生じていることが実験と同様に解析的に確認することができた。

Fig.10 は継手鋼板の板厚を実測寸法($t=14\text{mm}$)の2倍($t=28\text{mm}$)に変化させたひずみ分布図である。Fig.6 と比較すると左上、左下部分では最大ひずみの半分以下にまで減少していることがわかる。また Fig.11 は継手鋼板の板厚を変化させた時の B 点での無次元化したひずみの大きさを示したものである。この図より、継手鋼板の板厚を大きくすることによって継手取付部先端にかかる応力を減少させる傾向が見られる。

以上のことより継手の面内、面外曲げ変形と継手取り付け先端部にかかる応力集中を防ぐためには継手の取り付け長さを大きくすることと継手鋼板の板厚を増加させることが有効であることが確かめられた。

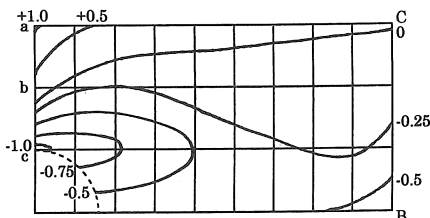


Fig.6 Strain Distribution of Connection(A45-M1)

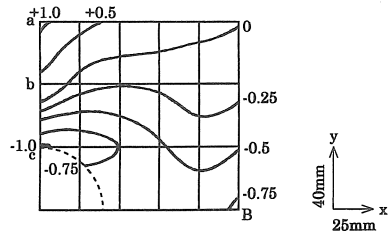


Fig.7 Strain Distribution of Connection(A45-L1)

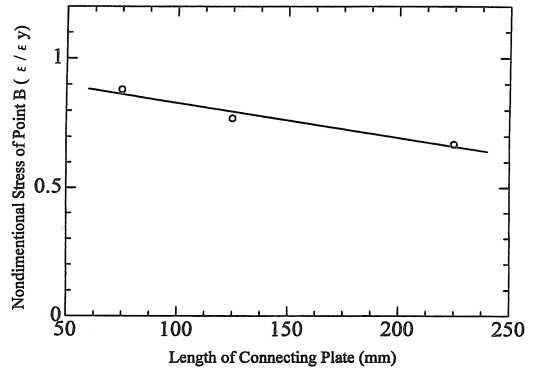


Fig.8 Relation between Length of Connecting Plate and Nondimensional Strain of Point B

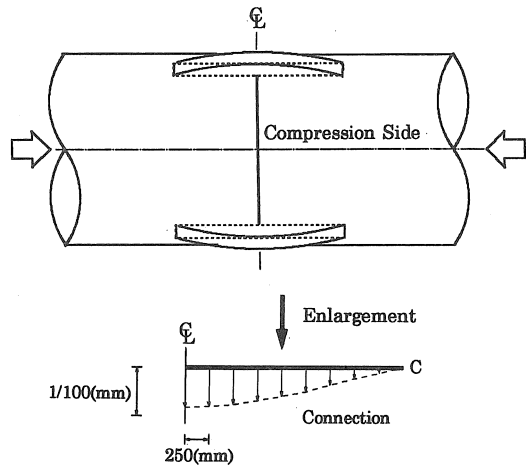


Fig.9 Deformation of Outplane Bending

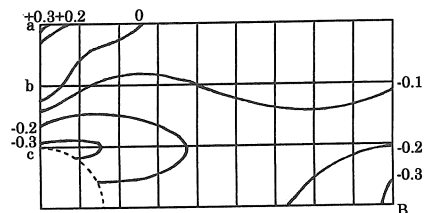


Fig.10 Strain Distribution of Connection(A45-T1)

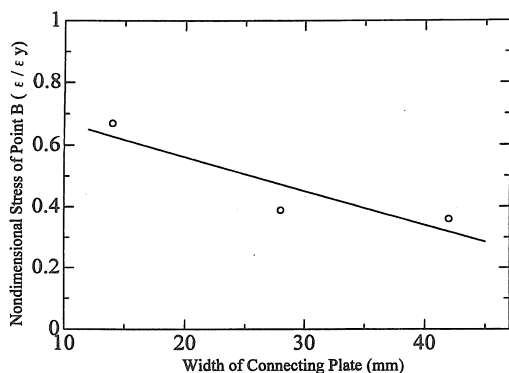


Fig. 11 Relation between Thickness of Connecting Plate and Nondimensional Strain of Point B

(2) 継手取付部周辺の応力伝達

モデル A45-M1 と A45-L1 の圧縮側の継手取付部周辺のひずみ分布図を Fig.12、Fig.13 に示す。この2つの図はどちらも鋼管部の引張試験で得られた降伏ひずみ($\epsilon_y = 2173 \times 10^{-6}$)で無次元化をしている。

解析の結果、継手取付部先端部付近に大きなひずみが生じており、先端部から離れていくとともにひずみが減少していることが確認できた。また Fig.13 のモデル(A45-L1)では、継手の長さが短くなったことによって継手鋼板から鋼管表面上に大きな応力が作用したために鋼管表面上のひずみが広範囲に広がったのではないと思われる。引張側の継手取付周辺部のひずみ分布も圧縮側と同じであった。このように数値解析でも実験解析の結果と同様に、継手取付周辺部に局所的な応力が作用していることが確認できた。

なお、実験値と数値解析でのひずみの値が異なる原因として、①今回の数値解析では、曲げひずみと面内ひずみの結果のうち、面内のみを表示したこと、②継手取付部の溶接による残留応力の影響を考慮しなかったこと、③解析モデルの分割数が少なかったこと、④従来からの問題点で、面内曲げによる解の精度などによる影響があげられる。

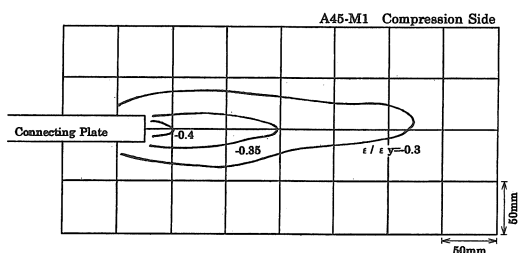


Fig. 12 Strain Distribution around the Connection(A45-M1)

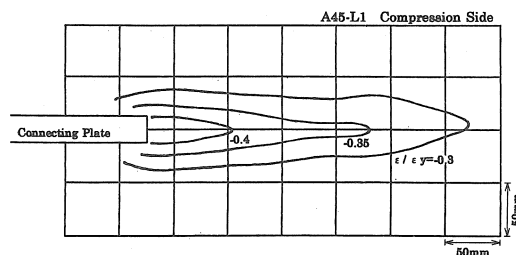


Fig. 13 Strain Distribution around the Connection(A45-L1)

4. 解析結論

実験結果と数値解析の結果から架設用鋼管継手の変位特性をまとめる。

- (1) 継手部は鋼管から応力が伝達される時、偏心圧縮または偏心引張状態となることから、継手部の面内曲げ、面外曲げ作用が誘発される。これにより、鋼管の中心方向へ向かう断面変形が生じ断面2次モーメントの低下となる。
- (2) 継手部から継手取付先端部へ集中的にひずみが作用することより継手取付部の局所的な早期塑性化が生じる。
- (3) 継手鋼板に作用する面内偏心曲げによる継手鋼板および添接板の早期降伏。

5. 改善案

実験結果より、以下の改善案を提案する。

- (1) 継手取付位置で鋼管の内部に向かう断面変形を防ぐために、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) フィン型継手の面外、面内曲げを防ぐために、フィン型継手を曲げ面内に平行に取り付け、継手同士を連結させる。

また、数値解析より、

- (3) フィン型継手の面外、面内曲げ変形成分を減少させ、また、継手取付先端部に局所的な応力を生じさせないように継手の取り付け長さを大きくしたり、継手鋼板の板厚を大きくしたりする。

以上のことを考慮した改善案を Fig.14 に示す。

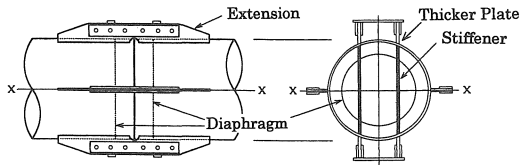


Fig. 5.12 Improvement

6. 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るフィン型継手をもつ架設用鋼管継手の有限要素解析を行い、耐荷力、変位特性を明らかにした。以下に要約を記す。

- (1) 数値解析により、継手部と継手取付周辺部の応力伝達の様子を確認した。
- (2) 数値解析で継手部の板厚や、長さなどを変化させて応力状態を確認した。
- (3) 強度実験と数値解析により、得られた剛性低下の原因に対応する改善案を提案した。

架設用鋼管の継手構造として広く一般に用いられているフィン型継手（エレクトロンピース）に対して、一般の設計者はその変位特性が以上になることは知る由もないと思われる。よって、この継手構造を曲げで使用する事はもちろんのこと、主に軸荷重を受ける鋼管の継手方法として使用することが危険であると言える。

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）,1990
- 2) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説,1992
- 3) 中日新聞,1993/1/23,1993/1/24
- 4) 青木徹彦・国分尚司：構造工学論文集 Vol.41A「架設用鋼管継手の曲げ耐荷力実験」,P191-197,土木学会,1995

（受理 平成8年3月19日）