充填剤を用いた軽量角形鋼管の 嵌合式接合部の曲げ耐荷機構に 関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON EMBEDDING CONNECTION FOR ADHESIVE FILLED LIGHTWEIGHT STEEL SQUARE TUBE

北朴木茉奈 — * 1 伊藤拓海 — * 2

Mana KITAHONOKI — * 1 Takumi ITO — * 2

キーワード：
鋼構造, 角形鋼管, 接合部, 嵌合式, 接着剤, 弾塑性挙動

Keywords:
Steel structure, Steel square tube, Connection, Embedding type,
Adhesives, Inelastic behavior

Sometimes, a fitting type connection is adopted to the connection of steel structures which requires the disassembling properties and any other purpose. In this study, a new type of connection technique for steel square tube is suggested. This proposed joint has fitting connector by embedding mechanism not using bolt or welding, a clearance between each steel tube is filled with adhesives to adjust the rigidity and strength. Therefore, this study develops the possibility and feasibility of new constructional and joint technique using the adhesive material. Herein, the cyclic loading tests are conducted to clarify the resistant mechanism and inelastic behavior.

1. はじめに

鉄骨構造の接合部は、接合要素として一般的にボルトや溶接が用いられ、固定度の違いにより、剛接合、ピン接合、半剛接合に大別される。近年では、様々な復元力特性や保有性能を有する接合部も開発されており、ボルトや溶接を一切用いない嵌合式による接合部も提案されている¹⁾。本研究は、嵌合式接合部を対象としている。

既往研究で提案されている嵌合式接合部としては、接合部に接合用鋼管を配置し、その二重鋼管部分にコンクリートやモルタルを充填して接合する充填接合²⁾、径の異なる円形鋼管を嵌合し、その隙間にグラウトやモルタルを充填して応力伝達させる充填接合構法³⁾、円形鋼管や角形鋼管の接合部において、テーパ付きの接合金物を用いたソケット式接合^{4,5)}などが提案されている。これらの接合部の特徴として、接合作業の簡易化、現場溶接の回避、施工誤差の吸収性、生産性向上、などが期待されている。また、メタルタッチを基本とした接合法は、解体性が要求される建築物への適用が期待されている。しかし、ボルトや溶接による接合と比較し、嵌合式による接合は固定度の調節が難しいといった点も指摘されている。

そこで本研究では、中低層規模の鉄骨構造や期限付き構造物などを対象とし、これらの特性を活かし、かつ固定度の調節機能にも期待した嵌合式接合部の提案を試みる。さらに、接着剤による充填法も想定し、その適用性や有効性を明らかにする。本工法は、図1のように、軽量角形鋼管によるコネクタを介し、柱・梁部材を嵌め込むことで接合する。この接合部では、作業性を勘案すると、外側鋼管とコネクタの間に隙間を設ける必要がある。この隙間に対する充填剤や充填方法により、固定度や耐力の調節機能が期待される。近年、強度、耐久性、耐火性に優れた充填剤・接着剤が開発されており、多様な構造要求性能に対する接合要件を、実験的検討によって見出すことを目的としている。

(a) 角形鋼管柱—角形鋼管梁 (b) 角形鋼管柱—H形鋼梁

図1 鉄骨嵌合式の柱梁接合部のイメージ図

本稿では、軽量角形鋼管に対する具体的な嵌合式接合法を提案し、力学特性、弾塑性挙動を解明するために、曲げ載荷試験により実証的な検討を行う。

2. 本接合法の概要

本接合部において、曲げを受けた際に想定される耐力発現に関わる耐荷機構を以下に示す。

- 1) 充填剤の圧縮・せん断と接着力
- 2) コネクタの曲げ
- 3) 外側鋼管の曲げ
- 4) スペーサーの支圧と摩擦
- 5) ピンのせん断と支圧

以上より、曲げに対して様々な耐荷要素と機構が考えられるが、本稿では、充填剤として接着力を有する接着剤を使用し、その効果について検討する。さらに、接着剤は、層厚が小さいほど強度が増すことを勘案し、また中低層建物への適応に向けて、汎用鋼管の寸法から、クリアランスは4mmとする。

本稿は日本建築学会関東支部研究報告集⁶⁾及び日本建築学会学術講演梗概集⁷⁾などで発表した内容を取りまとめ、加筆・修正したものである。

¹⁾ 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
(〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

²⁾ 東京理科大学工学部建築学科 准教授・博士 (工学)

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Arch., Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Sci.

²⁾ Assoc. Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Sci., Dr. Eng.

3. 実験概要

3.1 試験体の構成と使用材料

本稿では、図 1 の嵌合式接合法に対して、図 2 (a) のように柱梁とパネルゾーンまでを対象にした T 形接合部の試験体（以降、T 形試験体と呼ぶ）、図 2 (b) のように柱部分のみを対象にした片持ち梁形式の試験体（以降、I 形試験体と呼ぶ）の 2 種類を製作した。なお、I 形試験体は、H 形鋼梁の強軸まわりの剛性は、角形鋼管柱の剛性と比較して十分大きく、柱と嵌合部分のみに着目した試験体とする。

使用鋼材は、外側鋼管に角形鋼管 $\square 90 \times 90 \times 3.2$ （鋼種 STKR400）、コネクタに角形鋼管 $\square 75 \times 75 \times 3.2$ （鋼種 STKR400）を用いた。T 形試験体のコネクタは、鋼管を溶接して T 字形になるように一体化して製作した。I 形試験体のコネクタは、端部にエンドプレート（完全溶け込み溶接を行い製作した。なお、T 形試験体では、コネクタの嵌合深さを実験変数とし、2 種類用意した。また、加力ジャッキと接合するため、外側鋼管の一端にエンドプレート（鋼種 SS400, PL-16, 250×350mm）を全周隅肉溶接した。使用鋼材の機械的性質を表 1 に示す。

本工法の柱の浮き上がりに対するフェイルセーフ機構として、図 1 のようにピンを貫通して構成する。I 形試験体では、ピンに高力ボルト F10T-M16（ボルト孔 $\Phi=17\text{mm}$ ）を使用し、ピンの有無を実験変数とした。また、T 形試験体では、梁の受け材としてアングル材 L-145×145×6（鋼種 SS400）を使用した。

外側鋼管とコネクタのクリアランスを充填するため、主剤をエポキシ樹脂、硬化剤を変性脂肪族ポリアミンとする二液混合エポキシ系接着剤（以下、接着剤と呼ぶ）を用いた。JIS29 号に基づき、接着剤の引張せん断試験を実施し、実験結果を表 2 に示す。なお、接着剤の層厚を調節し、養生期間に外側鋼管とコネクタの接触を防止するため、図 2 に示すようにスペーサー（鋼種 SS400, $t=4\text{mm}$, 幅 10mm）を設け、コネクタにそれぞれ 8 箇所点溶接を行い、製作した。なお、T 形試験体ではスペーサーを片側配置とし、I 形試験体では全周配置とした。

3.2 試験体セットアップと計測計画

試験体のセットアップ図及び計測計画を図 3 に示す。同図に示すように、T 形試験体では、実建物の状況に対して、90 度回転させた状態で実験を行い、試験体柱の頂部に可搬式ジャッキを取り付け、試験体梁の両端部はピン治具を取り付けてピン接合とした。また、I 形試験体においては、試験体を片持ち柱形式で設置し、頂部に可搬式ジャッキを取り付け、柱脚部のエンドプレートは反力フレームに剛接合した。なお、すべての試験体において頂部はリニアガイドにより面外変形を拘束している。

水平荷重は可搬式ジャッキに内蔵されたロードセルより検出し、柱脚モーメントは試験体高さを乗じて算出した。試験体頂部の水平変位は、頂部に設けた巻き込み式変位計により計測し、さらに試験体高さで除して、回転角を算出した。また、外側鋼管、コネクタ（T 形試験体ではパネルゾーン及びアングル）のひずみを計測した。

なお、可搬式ジャッキ及び载荷治具による鉛直力は、接着剤剥離荷重に基づく接合部の軸力方向の耐力の 1%未満であるため、本稿では考慮しない。

3.3 载荷計画

载荷プログラムは単調载荷及び漸増繰返し载荷とする。単調载荷

表 1 使用鋼材の機械的性質

使用部位	降伏強度 [N/mm ²]	降伏ひずみ [μ]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [N/mm ²]
コネクタ	333	1570	416	212000
外側鋼管	361	1720	443	210000

表 2 接着剤の引張せん断試験結果

接着剤の層厚[mm]	最大荷重[kN]	せん断剥離強度[N/mm ²]
4.0	2.48	2.02

表 3 試験体一覧

試験体名	スペーサー	嵌合深さ	ピンの有無	接着剤の有無	載荷履歴
T150-nPA-m	片側配置	150	無	有	単調
T150-nPA-c					漸増繰返し
T150-nPnA-m				無	単調
T150-nPnA-c		漸増繰返し			
T375-nPA-m		375		有	単調
T375-nPA-c					漸増繰返し
T375-nPnA-m				無	単調
T375-nPnA-c	漸増繰返し				
I375-nPA-m	全周配置	375	無	有	単調
I375-nPA-c					漸増繰返し
I375-nPnA-m				無	単調
I375-nPnA-c					漸増繰返し
I375-PA-m		有	有	単調	
I375-PA-c				漸増繰返し	
I375-PnA-m			無	単調	
I375-PnA-c				漸増繰返し	

※試験体名における記号は、以下のように定めた

- 1 文字目：接合部の形，嵌合深さ
- 2 文字目：ピンの有無，接着剤の有無
- 3 文字目：载荷履歴

図 2 試験体詳細図

図 3 セットアップ図及び計測計画 [単位:mm]

実験では回転角が 1/10rad に達するまで載荷し、漸増繰返し載荷実験では目標回転角を 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30rad とし、T 形試験体では正負 2 回ずつ、I 形試験体では正負 3 回ずつ繰り返した。以上、本稿における試験体一覧を表 3 に示す。

4. 実験結果の分析と考察

4.1 単調載荷実験

単調載荷実験におけるモーメントー回転角関係の結果を図 4 に示し、同図に実験の観察から判断される接着剤剥離の発生点及び外側鋼管のひずみゲージより推測される接着剤剥離の発生点を併せて示す。また、実験結果より終局耐力、曲げ剛性を求め、一覧を表 4 に示す。ただし、T 形試験体では 1/10rad に達しても荷重が低下しなかったため、終局耐力は I 形試験体のみ記す。また、ピン有りの試験体では、ピンによる支圧抵抗が発生する前の耐力を終局耐力とする。

実験時の観察より、T 形試験体では、①接着剤の剥離、②鋼材の降伏（図 5(a)のコネクタ A,B 部、外側鋼管 B 部）、③コネクタのパネルゾーンの局部座屈（図 5(b)）、の順に崩壊モードが形成された。一方、I 形試験体では、①接着剤の剥離、②鋼材の降伏（図 5(c)のコネクタ A,B 部、外側鋼管 B 部）、③コネクタの局部座屈（図 5(d)）、④ピンによる支圧抵抗、の順に崩壊モードが形成された。なお、載荷終了後、ピン有りの試験体では、コネクタのボルト孔の変形が確認された。

図 4 における接着剤剥離点より、実験で観測された点よりも、実際には早期に接着剤が剥離していることが確認できる。また、I 形試験体においては、ひずみゲージから観測された剥離点以降接合部の剛性が約 30%低下したことが確認された。図 6 の試験体切断面の様子から、接着剤を用いた試験体では、T 形試験体、I 形試験体共に、外側鋼管と接着剤の境界面において接着剤の界面剥離が確認された。

図 4 及び表 4 より、接着剤によるスリップの防止、曲げ剛性及び

曲げ耐力の上昇が確認できる。これは、図 7 に示すように、接着剤の充填により、コネクタから外側鋼管に応力が伝達され、双方の協働効果により接合部の曲げ剛性及び曲げ耐力が上昇したと考えられる。これについては、4.4 節にて考察する。

図 4 より、T 形接合部において、接着剤の有無に関わらず、コネクタの嵌合深さが大きいほど、終局耐力、曲げ剛性が大きくなることが確認された。一方、I 形試験体において、ピンの有無により曲げ剛性は変化しなかったが、ピン有りの試験体では、回転角 1/30rad 以降に荷重の上昇が確認された。これは、載荷終了後、コネクタのボルト孔の変形が確認されたことから、ピンの支圧抵抗によるものと考えられる。

4.2 繰返し載荷実験

繰返し載荷実験におけるモーメントー回転角関係の結果を図 8 に示す。なお、接着剤剥離の発生点はひずみゲージからは特定することができなかったため、実験の観察によるもののみを併せて示す。また、終局耐力、曲げ剛性を表 5 に示す。ただし、終局耐力は単調載荷と同様、I 形試験体のみ記し、曲げ剛性は、T150-nPnA-c 及び T375-nPnA-c において、1/30rad の範囲内で、スリップ挙動が支配的であったため、その他の試験体についてののみ求めた。

載荷終了後、単調載荷と同様に、T 形試験体ではパネルゾーンの局部座屈、I 形試験体ではコネクタの局部座屈、ピンを用いた試験

表 4 単調載荷実験結果

試験体名	終局耐力[kNm]	曲げ剛性[kNm/rad]
T150-nPA-m	-	391
T150-nPnA-m	-	77
T375-nPA-m	-	477
T375-nPnA-m	-	140
I375-nPA-m	12.5	579
I375-nPnA-m	11.6	404
I375-PA-m	11.7	579
I375-PnA-m	10.2	413

図 4 単調載荷実験結果

(a) T 形試験体（降伏箇所） (b) パネルゾーンの局部座屈(切断図) (c) I 形試験体(降伏箇所) (d) コネクタの局部座屈

図 5 T 形試験体及び I 形試験体の崩壊機構

体ではボルト孔の変形，接着剤を用いた試験体では接着剤の界面剥離が確認された。

図 8 及び表 5 より，単調載荷実験と同様，T 形試験体，I 形試験体共に，接着剤によるスリップの防止，曲げ剛性及び曲げ耐力の上昇が確認できる。また，接着剤を用いた試験体では，接着剤が破断するまでは比較的安定した履歴挙動を示すが，接着剤が破断した後はピンチング挙動が生じていることが確認できる。これは，接着剤が破断したことによりコネクタと外側鋼管にずれが生じたためであると考えられる。一方，図 8(a)，(b)より，T150-nPnA-c 及び T375-nPnA-c において，1/100rad 以前のループではスリップが生じ，柱梁間に隙間が生じ，1/100rad 以降では試験体梁同士のずれが進行した。T150-nPnA-c では，本稿における荷重範囲内において，スリップが確認され，梁柱間の隙間のずれと試験体梁同士のずれが観察された。

また，単調載荷実験と同様，I 形試験体において，ピンの有無により，曲げ剛性に大差は確認されなかった。

4.3 T 形試験体と I 形試験体の比較

T 形試験体と I 形試験体の結果の比較を図 9 に示す。本稿では代表として，嵌合深さの大きい試験体の結果を示す。同図(a)より，T 形試験体では接着剤の剥離以降，荷重の低下が見られるが，I 形試験体では顕著な荷重の低下は見られなかった。これは，I 形試験体では，スペーサーが全周に配置されているため，クリアランスの充填率も高くなり，固定度が高かったためであると考えられる。同図(b)より，I 形試験体のスリップ量は T 形試験体よりも小さいことが確認できる。これは，スペーサーが片側のみに配置された T 形試験体に対し，スペーサーが全周に配置された I 形試験体はクリアランスが小さいことから，接着剤の剥離後もスペーサーと鋼管のメタルタッチにより，スリップ挙動を抑制したと推測される。なお，接着剤で充填していない試験体でも同様の傾向が見られた。

4.4 嵌合部のモーメント分布

試験体の弾性範囲内において，外側鋼管ならびにコネクタのひずみゲージより曲げモーメントを算出し，単調載荷試験の降伏時における嵌合部の高さ方向の曲げモーメント分布を図 10 に示す。なお，ここでは代表として，I 形試験体についてのみ記す。また，水平荷重に試験体高さを乗じて柱脚モーメントを求めた。表 6 に降伏時における各部材の曲げモーメントを示す。

図 10 より，柱脚からの高さ 375mm から 1200mm の範囲では，外側鋼管が曲げモーメントを全て負担していることが確認できる。一方，柱脚からの高さ 0mm から 375mm の範囲では，柱脚に向かって外側鋼管の曲げモーメントが減少するが，コネクタの曲げモーメントが増加し，高さ 0mm においてコネクタの曲げモーメントが最大となる。なお，外側鋼管の柱脚からの高さ 375mm における応力は，外側鋼管とコネクタとの接触反力によって大きくなっていると考えられる。

また，接着剤の有無に関わらず，ピン有りの試験体では，コネクタと外側鋼管の曲げモーメントの和が，柱脚モーメントと概ね一致していることが確認できる。一方，ピン無しの試験体では，コネクタのみの曲げモーメントの値と概ね一致していることが確認できる。従って，ピン有りの試験体では，コネクタと外側鋼管の協働効果により曲げ抵抗していると考えられる。一方，ピン無しの試験体では，コネクタが主として曲げ抵抗していると考えられる。

表 5 繰返し載荷実験結果

試験体名	終局耐力[kNm]	曲げ剛性[kNm/rad]
T150-nPA-c	-	396
T375-nPA-c	-	455
I375-nPA-c	11	540
I375-nPnA-c	-11.6	481
I375-PA-c	9.8	541
I375-PnA-c	9.5	474

図 6 試験体切断面

図 7 ウェブ部の応力分布モデル

図 8 繰返し載荷実験結果

図 9 T 形試験体と I 形試験体の比較

表 6 降伏時における各部材モーメント

試験体部位	I375-nPA-m	I375-nPnA-m	I375-PA-m	I375-PnA-m
コネクタ	6.17	5.91	5.59	5.31
外側鋼管	3.08	2.51	3.48	1.52
コネクタ+外側鋼管	9.25	8.43	9.06	6.82
柱脚モーメント	6.86	6.17	9.25	7.88

図 10 試験体の高さ方向におけるモーメント分布（弾性範囲）

また、I375-nPA-m 及び I375-nPnA-m の耐力が概ね近い値を示していることから、接着剤は耐力をほとんど負担していないと考えられる。一方、表 6 より、接着剤有りの試験体では、接着剤無しの試験体より、柱脚部における外側鋼管・コネクタの各々の耐力が大きいことが確認できる。これは 4.1 節で述べたように、コネクタから外側鋼管に応力が伝達されたためであると考えられる。

5. まとめ

本稿では、軽量角形鋼管に対する具体的な嵌合式接合法を提案し、力学特性、弾塑性挙動を解明するために実験的な検討を行った。本稿で得られた知見を以下に示す。

1. 実験結果より、接着剤を充填することによりコネクタから外側鋼管に応力が伝達されることで、接合部の曲げ剛性及び曲げ耐力が上昇する。
2. コネクタの嵌合深さが大きいほど曲げ剛性、終局耐力は大きくなる。一方、ピンの有無により曲げ剛性に大差はないが、終局耐力はピンを用いると大きくなる。
3. 耐荷機構として、接着剤によりスリップが防止され、コネクタから外側鋼管に応力が伝達されるが、接着剤自体は耐力をほとんど負担せず、接着剤の有無に関わらず、ピン有りの試験体ではコネクタと外側鋼管の協働効果により抵抗するのに対し、ピン無しの試験体ではコネクタが主として曲げ抵抗する。

謝辞

本研究の実験では、東京理科大学 崔彰訓助教、東京理科大学大学院 荒井亮太郎君、東京理科大学 八木一樹君、木下堯之君の協力を得ました。また、元・東京理科大学大学院 小沼大樹氏には本研究の実験に多大なるご尽力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、吹田啓一郎：新しい鋼構造接合部開発の最近の動向，鋼構造による新建築システム開発の現状と今後の展望，2009 年度日本建築学会大会（東北），構造部門（鋼構造），PD 資料，pp.4-15，2009.8
- 2) 野澤伸一郎，木下雅敦，築嶋大輔：コンクリート充填ソケット接合部の耐力評価，土木学会論文集，No.606，pp.31-42，1998.11
- 3) 石井大吾，寺田岳彦，田中剛：充填接合法による鋼構造柱継手の耐力評価（その 3），日本建築学会構造系論文集，No.653，pp.1401-1410，2010.07
- 4) 桑村仁，伊藤拓海，富岡裕一：鋼製円錐-円筒ソケット接合の研究，日本建築学会構造系論文集 No.598，pp.155-162，2005.12
- 5) 桑村仁，伊藤拓海：角錐-角筒ソケット接合の圧縮耐力，日本建築学会構造系論文集 No.638，pp.731-738，2009.4
- 6) 北朴木茉奈，宗村大翔，小沼大樹，伊藤拓海，崔彰訓：充填剤を用いた軽量角形鋼管による鉄骨嵌合式接合部の研究(その 1)，2014 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I，pp.509-512，2015.2
- 7) 北朴木茉奈，宗村大翔，小沼大樹，伊藤拓海，崔彰訓：充填剤を用いた軽量角形鋼管による鉄骨嵌合式接合部の研究(その 2)，2015 年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.829-830，2015.

[2016 年 2 月 2 日原稿受理 2016 年 3 月 18 日採用決定]