

円形鋼管構造部材に対する接着 接合を応用した耐震補強法

SEISMIC RETROFIT METHOD FOR STEEL PIPE MEMBERS BY ADHESIVELY BONDING

津之下 睦 — * 1, * 2 池永周造 — * 2
鈴木公平 — * 3 松本幸大 — * 4

Atsushi TSUNOSHITA — * 1, * 2 Shuzo IKENAGA — * 2
Kohei SUZUKI — * 3 Yukihiro MATSUMOTO — * 4

キーワード:

鋼管, 耐震補強, 接着接合, 漸増繰返載荷試験

Keywords:

Steel pipe, Seismic retrofit, Adhesive bonding, Cyclic loading test

We have developed the non-welded joint method for existing steel pipe members and verified the fundamental performance of the method. The non-welded joint method uses epoxy resin adhesive and grout to transfer the shear force, axial force and bending moment to the retrofitting members. As a result of the tests, it was confirmed that the proposed joint satisfied the design strength calculated by the nominal strength of epoxy resin without any significant damage, and the beam theory can be applied to estimate the load-deformation relationship of existing steel pipe members.

1. はじめに

鉄骨造建物の耐震改修を行う際、既存躯体と耐震補強部材の接合方法は、主に高力ボルト接合や現場溶接が用いられる。これらの接合方法は、多くの研究により、その力学的特性や設計法が確立されている。しかし、高力ボルト接合は、既存躯体にボルト孔による断面欠損が生じることや閉断面部材への適用が困難なこと、現場溶接は、対象構造物の制約により火器の使用が制限されることや対象となる鋼材の板厚が薄いと溶接の品質に問題が生じることが課題となり、接合方法として採用できないことがある。また、工場建築物や物流倉庫において多く見られる円形鋼管トラス構造では、高力ボルト接合、現場溶接ともに難易度が高く、耐震改修を実施できないことがある。

このような背景から、接着接合を用いた耐震補強法や接合法が目ざされており¹⁾、筆者らは円形鋼管部材を対象として、接着接合を用いて現場溶接や既存躯体への孔開け等を必要としない無溶接接合法の研究²⁾を行っている。同種の研究に関しては、2分割した補剛リブ付き鋼管で鋼管部材を挟みボルト接合した後、接着剤を充填する池田らの研究³⁾やコの字形の接合金物と鋼管部材の間にエポキシ樹脂接着剤を充填する細井らの研究⁴⁾、外側から2枚の半円形プレス鋼板で挟み込み、鋼管部材に中ボルトを通す松竹らの研究⁵⁾等が行われている。しかし、これらの研究では、円形鋼管部材に断面欠損が生じること、接着面に剥離方向の力が生じ、接着せん断強度が低下する等の問題がある。このような問題を解決するため、筆者らは接着接合と支圧接合を用いた無溶接接合法を開発した。

本研究では、開発した接合法の概要を述べ、接着部の特性を確認するための要素試験、接合部全体と既存鋼管の力学的挙動を確認す

るための接合部試験の結果を示す。また、力学モデルと初等梁理論を用いて、力学的特性を確認する。

2. 無溶接接合法の概要

本工法は、図1に示すように鉄骨枠付きブレースの鉄骨枠との接合部を想定した「鉄骨枠タイプ」とブレース材が直接取り付くことを想定した「ブレースタイプ」の2種類とした。

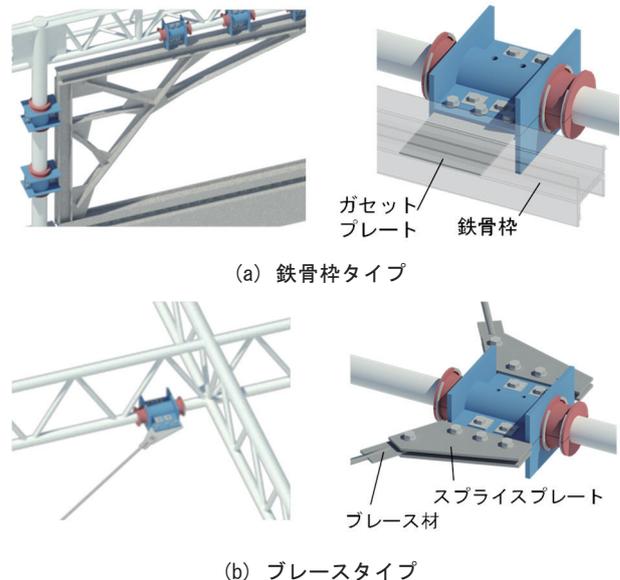


図1 無溶接接合法の取り付けイメージ

*1 (株)コンステック技術本部構造ソリューション部
(〒143-0006 東京都大田区平和島6-1-1)

*2 豊橋技術科学大学大学院建築・都市システム学専攻

*3 (株)コンステック技術本部構造ソリューション部 部長・博士(工学)

*4 豊橋技術科学大学建築・都市システム学系 教授・博士(工学)

*1 Engineering Headquarters, Structure Solutions Dept., Constec Engi., Co.

*2 Dept. of Archi and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech.

*3 General Manager, Engineering Headquarters, Structure Solutions Dept., Constec Engi., Co., Dr.Eng.

*4 Prof., Dept. of Archi and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr.Eng.

接合部は、図2に示すように既存円形鋼管部材（以下、既存鋼管）に耐震補強部材を取り付ける「補強部材接合部（非接着部）」と補強部材接合部の両端に隣接する「せん断抵抗部（接着部）」により構成される。補強部材接合部は、半割にした円形鋼管（以下、半割鋼管）の軸方向端部にリブプレート、軸方向に直交する端部に鍔プレートを有した、一对の部材を既存鋼管に挟み込む形で取り付け、開き止めボルトを設置した後、内部をグラウトで充填する。せん断抵抗部は、半割鋼管の軸方向端部にリブプレートを有した部材の内側および既存鋼管接着部にパテ状エポキシ樹脂を塗布した後、一对の部材を既存鋼管に挟み込む形で圧着し、せん断抵抗部のリブプレート内側に接合プレートを接着することで、一体化される。図1に示すように、耐震補強部材との接合は、鉄骨枠タイプが耐震補強部材側のガセットプレートを補強部材接合部で挟み込み、高力ボルトにより接合し、ブレースタイプがスプライスプレートを用いて補強部材接合部と耐震補強部材を高力ボルトにより接合する。

本工法の力学的な特長は、エポキシ樹脂に剥離応力を作用させないことで、エポキシ樹脂の接着せん断強度を發揮させる機構である。また、複数の部材を用いて接合部を構成することで個々の部材の軽量化を図り、高所や狭小部での施工が容易となること、補強部材接合部、せん断抵抗部のリブプレートを除く既存鋼管と金物のクリアランスを15mm程度設けることで溶接跡や不陸部に施工できることが挙げられる。

図2に示すように、耐震補強部材により接合部に生じる既存鋼管の軸方向に直交する応力 N は、補強部材接合部グラウトから支圧により既存鋼管に伝達する。接合部に生じる既存鋼管軸方向の応力 Q は、補強部材接合部からせん断抵抗部に支圧により流れ、せん断抵抗部からエポキシ樹脂の接着せん断抵抗により既存鋼管に伝達する。接合部に生じる曲げモーメント M は、補強部材接合部グラウトと既存鋼管の支圧および補強部材接合部とせん断抵抗部の支圧により既存鋼管に伝達される。せん断抵抗部と既存鋼管の接着面に生じる応力は、エポキシ樹脂に剥離応力が作用せず、接着せん断強度を發揮する。

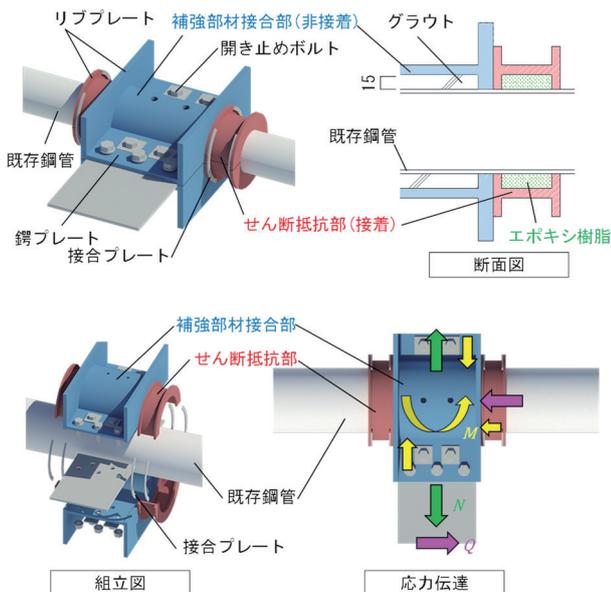


図2 無溶接接合法の概要

3. せん断抵抗部の接着性能試験

3.1 試験概要

せん断抵抗部単体のせん断耐力を確認するため、圧縮せん断形式単純荷重による接着性能試験を実施した。試験体一覧を表1、試験概要を図3、せん断抵抗部形状を図4、エポキシ樹脂のメーカー規格値を表2に示す。試験は、接着部の黒皮を除去した被補強材鋼管にせん断抵抗部をエポキシ樹脂により接着した試験体を用いて、せん断抵抗部リブプレートに載荷治具を設置して加力を行った。試験体 No.1~3 は、せん断抵抗部全周に一樣に荷重が作用するようリング形状の載荷治具を用い、試験体 No.4,5 は、曲げモーメントを既存鋼管に伝達する際、補強部材接合部の回転によりせん断抵抗部に流れる支圧が偏ることを想定して、半周のみ荷重が作用するよう段差加工を行った載荷治具を用いた。試験体 No.4 では片側の半割鋼管のみ荷重が作用するよう載荷治具を設置し、試験体 No.5 では各半割鋼管の半分のみ荷重が作用するよう載荷治具を設置した。せん断抵抗部の接着長さは各試験体共通に52mmとした。これは、目標せん断耐力100kNを満足するよう、式(1)を用いて算出したものである。

$$x = \frac{P_s}{\tau D \pi} \alpha \quad (1)$$

ここで、 x : 接着長さ、 τ : エポキシ樹脂の接着せん断強度(=14.0 N/mm²)、 D : 被補強材鋼管の直径、 α : 余裕率(=2.0)、 P_s : 目標せん断耐力である。

表1 試験体一覧

試験体	被補強材鋼管	接着長さ	加力方法
No.1	φ89.1×4.2 (STK400) 降伏耐力 $P_y=263$ kN	52mm	全周
No.2			
No.3			
No.4			半周（片側）
No.5			半周（各半分）

表2 エポキシ樹脂のメーカー規格値⁷⁾

圧縮降伏強さ	引張強さ	引張せん断接着強さ
70N/mm ² 以上	20N/mm ² 以上	14N/mm ² 以上



図3 試験概要

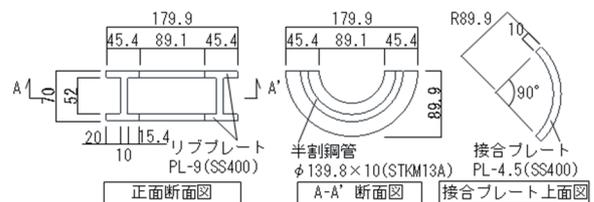


図4 せん断抵抗部形状

図5にせん断抵抗部の鉛直変位および被補強材鋼管の軸歪計測位置を示す。せん断抵抗部の鉛直変位は、カンチレバ変位計を用いてせん断抵抗部リブプレート上面の鉛直方向絶対変位2箇所を計測した。被補強材鋼管の軸歪は、歪ゲージをせん断抵抗部下端から、鋼管厚さの5倍である20mm下の位置に、周方向に8箇所設置した。

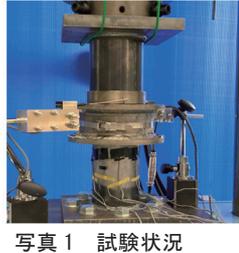
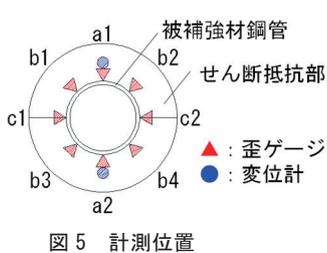


図5 計測位置

写真1 試験状況

3.2 試験結果

(1) 最大荷重

試験結果の最大荷重および被補強材鋼管接着面の最大せん断応力度を表3に示す。被補強材鋼管接着面の最大せん断応力度は最大荷重を全接着面積で除した値を用いた。最大荷重は、目標せん断耐力100kNの1.42~2.96倍となり、目標せん断耐力を上回る結果となった。せん断抵抗部に一樣に荷重を作用させたNo.1~3は、最大せん断応力度が式(1)で用いたエポキシ樹脂の接着せん断強度 $\tau = 14\text{N/mm}^2$ を上回っており、変動係数が2.9%程度であった。せん断抵抗部の半周のみ荷重を作用させたNo.4,5は、最大荷重がNo.1~3の平均値と比較し50%程度に低下する結果となっており、半周部分のみに荷重を作用させたためであると考えられる。本接合部に生じる曲げモーメントが補強部材接合部から両側のせん断抵抗部に支圧力として流れることから、接合部の耐力は2倍になり、式(1)で示した余裕率($\alpha=2.0$)も確保されることが考えられる。また、No.4とNo.5を比較した場合、No.4の最大荷重の方が小さく、半割鋼管部材片側のみ荷重が作用する状態が最も荷重が低下する結果となった。

(2) 荷重-せん断抵抗部鉛直変位関係

図6に荷重-せん断抵抗部鉛直変位関係を示す。各計測位置における荷重初期の変位は、試験体製作精度の影響によるバラつきがみられるが、それ以降の変位においてはNo.4の計測点a2を除いて概ね正側への線形関係が確認された。No.4の計測点a2は、荷重初期以降も負側の変位が継続して生じていることから、せん断抵抗部全体の回転変位が生じていることが考えられる。なお、計測位置2点の平均値は、全ての試験体において概ね等しい勾配となっており、被補強材鋼管軸方向の剛性に偏心圧縮の影響は小さいと考えられる。

表3 最大荷重

試験体	最大荷重 (kN)	最大せん断応力度 (N/mm ²)	備考
No.1	276.3	19.0	平均: 287.3kN 19.8N/mm ² 変動係数: 2.9%
No.2	289.2	19.9	
No.3	296.4	20.4	
No.4	142.1	9.8	No.1~3 平均の49%
No.5	168.1	11.6	No.1~3 平均の58%

(3) 被補強材鋼管の軸歪

図7に最大荷重の80%時における被補強材鋼管軸歪の円周方向の分布を示す。なお、No.3のb4は不具合により計測されていない。No.1~3において、計測位置による軸歪のバラつきがみられるものの、表3に示す最大荷重が概ね一定の値を示していることから、このバラつきがせん断耐力に大きな影響を与えるものでないと判断できる。No.4,5では、歪は荷重範囲の中央付近が大きく、その対角では極めて小さくなっており、円周方向の接着面全てが一様に挙動していないことが分かる。

4. 接合部の正負交番漸増荷重試験

4.1 試験概要

2章で示した鉄骨枠タイプとプレースタイルの接合工法について、接合部全体と被補強材鋼管の力学的挙動を確認するため、接合部の正負交番漸増荷重試験を実施した。試験概要を図8、補強部材接合部形状を図9に示す。なお、せん断抵抗部形状およびエポキシ樹脂のメーカー規格値は、3章の接着性能試験時と同等である。

試験体は、長さ930mmで接着部の黒皮を除去した被補強材鋼管の中央に補強部材接合部を設置し、その両端にせん断抵抗部を設置した。鉄骨枠タイプでは材軸方向に平行な荷重、プレースタイルは材軸方向に対して60°(水平面に対して30°斜交)の荷重が作用するよう、油圧ジャッキを補強部材接合部銜プレート先端に設置した。荷重は荷重制御とし、目標荷重を100kNとして、図10に示す漸増繰返荷重とした。

図11に変位計と歪ゲージの計測位置を示す。変位計は、補強部材接合部の鉛直方向絶対変位を計測するように被補強材鋼管中心位置(M2)と中心から120mm離れた位置(M1,M3)の3箇所を設置し、プレースタイルでは材軸直交方向の荷重による補強部材接合部の開きを計測するため、クリップ型変位計を油圧ジャッキが取り付く側のリブプレート間に2箇所(Tc,Bc)設置した。歪ゲージは、被補強材鋼管の軸歪を計測するため、せん断抵抗部端部から20mm離れた位置(T2,B2)の円周方向に8箇所(a1,a2,b1,b2,c1~c4)、被補強材鋼管端部から100mm離れた位置(T1,B1)に2箇所(c1,c2)設置した。また、上下せん断抵抗部(T,B)の開きを計測するため、せん断抵抗抗

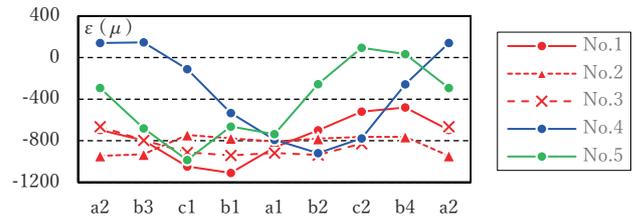


図7 最大荷重の80%時における軸歪分布

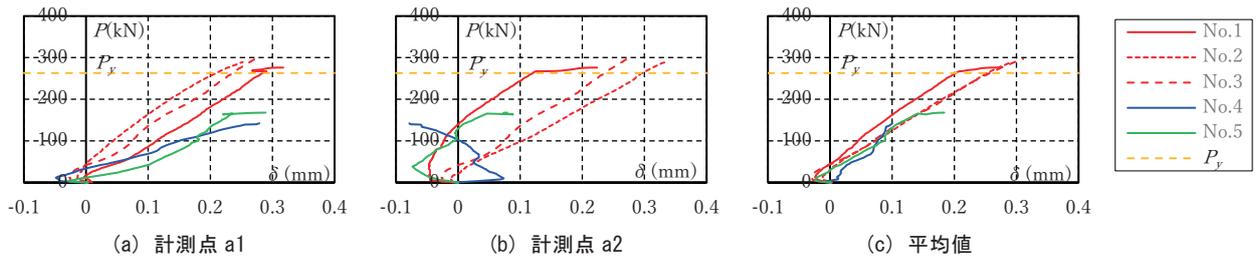
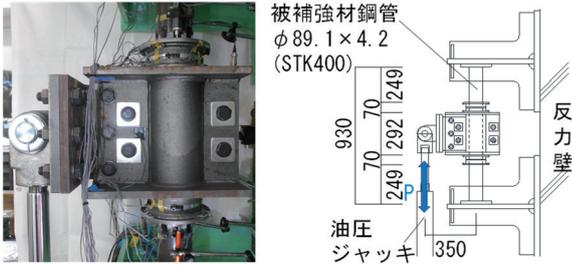
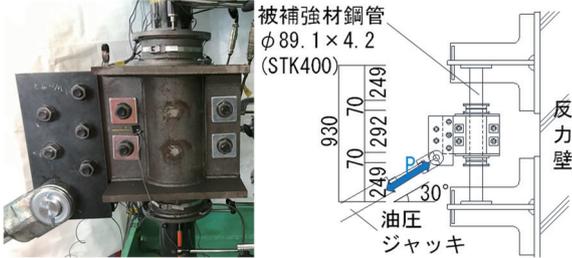


図6 荷重-せん断抵抗部鉛直変位関係

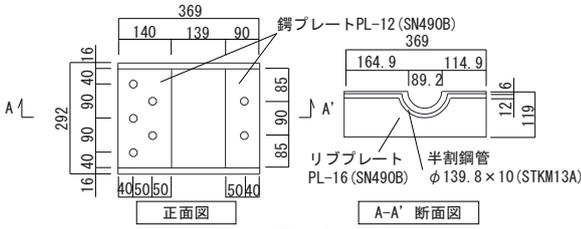


(a) 鉄骨柱タイプ

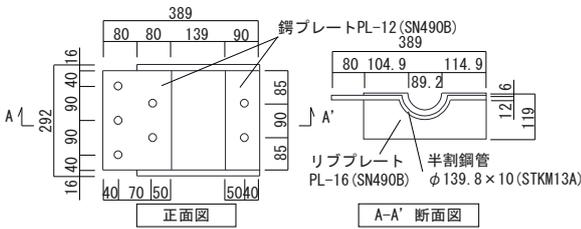


(b) ブレースタイプ

図8 試験概要



(a) 鉄骨柱タイプ



(b) ブレースタイプ

図9 補強部材接合部形状

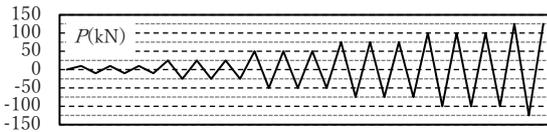


図10 载荷プログラム

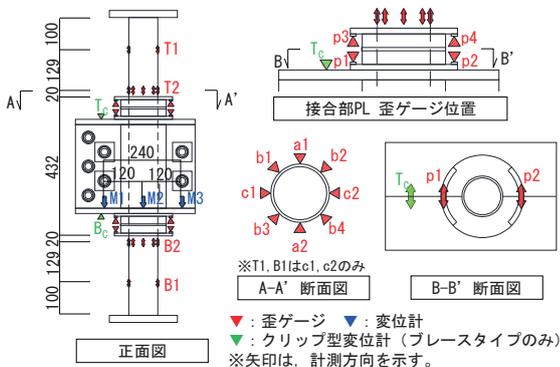


図11 計測位置

部毎に接合プレートの中央に歪ゲージを4箇所 (p1~p4), 計8箇所設置した。

4.2 試験体の力学的モデル

被補強材鋼管の力学的挙動を検証するため、図12に示す補強部材接合部を剛とした力学モデルと初等梁理論による定式化を行う。被補強材鋼管に生じる各応力および補強部材接合部中心部の回転変形は、鉄骨柱タイプでは式(2.a)~(2.d)、ブレースタイプでは式(3.a)~(3.d)により表される。ここで、補強部材接合部が取り付け被補強材鋼管の断面二次モーメント I_2 は、被補強材鋼管が補強部材接合部により曲げ変形を拘束されることから剛であると仮定し、被補強材鋼管の断面二次モーメントの100倍とした。また、被補強材鋼管の降伏は補強部材接合部端部で生じるものと考え、降伏荷重は式(4.a)により表され、鉄骨柱タイプの降伏荷重は73.3kN、ブレースタイプの降伏荷重は107.9kNとなった。

$$M_c = \frac{P}{2}L \quad (2.a)$$

$$M_t = M_c \left(1 - \frac{3 \{ I_2 L_1 (L_1 + 2L_2) + I_1 L_2^2 \} (L_1 + L_2)}{2 I_2 L_1 (L_1^2 + 3L_1 L_2 + 3L_2^2) + I_1 L_2^3} \right) \quad (2.b)$$

$$N = \frac{P}{2} \quad (2.c)$$

$$\theta = \frac{M_c \left(\frac{L_1^2}{I_1} + \frac{2L_1 L_2 + L_2^2}{I_2} \right) + M_t \left(\frac{2L_1 L_2 + L_1^2}{I_1} + \frac{L_2^2}{I_2} \right)}{2E(L_1 + L_2)} \quad (2.d)$$

$$M_c = \frac{\sqrt{3}}{2} P \frac{I_2 L_1 (L_1 + 2L_2) + I_1 L_2^2}{4(I_2 L_1 + I_1 L_2)} \quad (3.a)$$

$$M_t = \frac{\sqrt{3}}{4} P (L_1 + L_2) - M_c \quad (3.b)$$

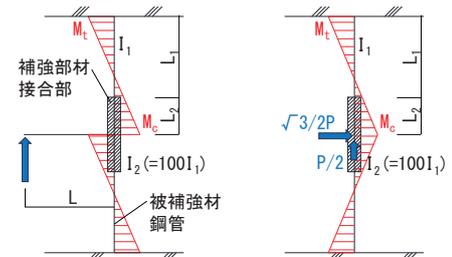
$$N = \frac{P}{4} \quad (3.c)$$

$$\theta = 0 \quad (3.d)$$

$$P_y = \varepsilon_y \frac{P}{\varepsilon_M + \varepsilon_N} \quad (4.a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (4.b)$$

ここで、 P : 載荷荷重、 L : 被補強材鋼管中心から載荷点までの距離、 I_1 : 被補強材鋼管の断面二次モーメント、 I_2 : 補強部材接合部が取り付け被補強材鋼管の断面二次モーメント(=100 I_1)、 L_1 : 被補強材鋼管端部から補強部材接合部端部までの距離、 L_2 : 補強部材接合部端部から中心までの距離、 N : 被補強材鋼管に生じる軸力、 θ : 被補強



(a) 鉄骨柱タイプ

(b) ブレースタイプ

図12 初等梁理論による力学モデル

材鋼管中央の回転変位, P_y : 被補強材鋼管の降伏荷重, σ_y : 被補強材鋼管の鋼材強度(=360N/mm²), ϵ_y : 被補強材鋼管の降伏歪, ϵ_M : 補強部材接合部端部の被補強材鋼管の曲げ歪, ϵ_N : 補強部材接合部端部の被補強材鋼管の軸歪, E : 被補強材鋼管のヤング係数(=205,000N/mm²)である。なお、断面二次モーメント I_1 は、実測寸法 $\phi 89.5 \times 4.0$ より算出した。

4.3 試験結果

(1) 損傷状況と荷重-補強部材接合部回転変形関係

荷重-補強部材接合部回転変形関係および回転角の理論値を図 13 に示す。なお、試験結果の補強部材接合部回転変形は、計測位置 M1,M3 の鉛直変位の差を計測間距離 240mm で除した値、回転角の理論値は、式(2.d), 式(3.d)を用いて算出した。鉄骨枠タイプは、負加力時の荷重 105kN 付近において、荷重-補強部材接合部回転変形関係に滑りのような性状が確認されたが、目視による損傷は確認できなかった。ブレースタイプでは、荷重-補強部材接合部回転変形関係の明確な挙動の変化や目視による損傷は確認されなかった。

鉄骨枠タイプについて試験結果と理論値を比較すると、荷重 50kN までは試験結果と理論値が概ね一致していることから、補強部材接合部自体に回転変形は生じておらず、被補強材鋼管の変形による回転であると判断できる。50kN 以降では、試験結果と理論値の差が大きくなっており、被補強材鋼管が降伏した可能性がある。ブレースタイプは、ほとんど回転変形が生じていないことから、理論値通りの挙動であることが確認された。

(2) 荷重-被補強材鋼管軸歪関係

計測点 T2, B2 の荷重-被補強材鋼管軸歪関係と理論値を図 14 に示す。計測点 T2,B2 における被補強材鋼管の降伏時の歪は、補強部材接合部端部で降伏が生じるものと考え、被補強材鋼管の鋼材強度 $\sigma_y=360\text{N/mm}^2$ とヤング係数 $E=205,000\text{N/mm}^2$ の関係、初等梁理論による力学モデルにおける補強部材接合部端部と計測点 T2,B2 の曲げモーメントの比率から、鉄骨枠タイプ $\epsilon_y=911\mu$ 、ブレースタイプ $\epsilon_y=759\mu$ とした。



図 13 荷重-接合部回転変形関係

鉄骨枠タイプでは、計測点 T2 の計測位置 c2 と計測点 B2 の計測位置 c1 が荷重 70kN 付近で降伏歪に達しており、被補強材鋼管が降伏したものと考えられる。荷重-被補強材鋼管軸歪関係は、降伏以前では試験結果と理論値が概ね一致しており、理論値通りの挙動となったが、降伏以降では差が大きくなっており、被補強材鋼管の降伏による剛性低下や残留歪が影響しものと考えられる。ブレースタイプにおいても、計測点 T2 の計測位置 c2 と計測点 B2 の計測位置 c1 が荷重 100kN 付近で降伏歪に達しているが、荷重-被補強材鋼管軸歪関係は弾性挙動を示している。これは、降伏位置と計測点が離れている影響であると考えられる。また、荷重-被補強材鋼管軸歪関係は、試験結果と理論値が概ね一致しており、理論値通りの挙動であることが確認された。

(3) 被補強材鋼管の応力

試験結果より得られた被補強材鋼管の軸歪から式(5.a)を用いて曲げモーメントを算出し、理論値と比較する。なお、試験結果の曲げモーメントによる歪は計測歪から平均歪を除いた値を用いた。

$$M = \epsilon_M E Z \tag{5.a}$$

$$\epsilon_M = \frac{(\epsilon_{MC1} - \epsilon_{MC2})}{2} \tag{5.b}$$

ここで、 ϵ_{MC1} : 計測位置 C1 の曲げモーメントによる歪, ϵ_{MC2} : 計測位置 C2 の曲げモーメントによる歪, Z : 被補強材鋼管の断面係数である。なお、断面係数 Z は、実測寸法 $\phi 89.5 \times 4.0$ より算出した。

図 15 に正加力時の被補強材鋼管に生じる曲げモーメント分布と各計測点における試験結果と理論値の曲げモーメントの比較を示す。軸力を考慮した被補強材鋼管の降伏曲げ耐力を $M_{\sigma y}$ 、降伏曲げ耐力時の計測点 T1,B1, 計測点 T2,B2 の曲げモーメントを $M_{\sigma y1}$, $M_{\sigma y2}$ とした。鉄骨枠タイプは、計測点 T2,B2 において被補強材鋼管の弾性範囲内で試験結果と理論値が概ね一致した。弾性範囲を超えると、降伏の影響により理論値が試験結果を上回ることが確認された。計測点 T1,B1 では、試験結果と理論値が反転したが、計測位置が反曲点位置付近であったことが原因であると考えられる。ブレースタイプでは、試験結果と理論値が概ね一致することが確認された。

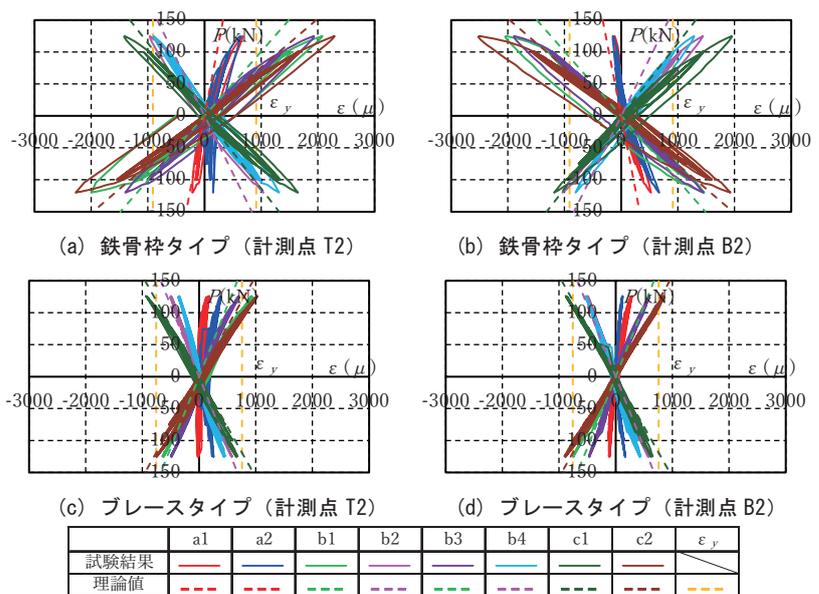


図 14 荷重-被補強材鋼管軸歪関係

(4) 接合部の開き

鉄骨柱タイプの荷重-接合プレート歪関係を図 16、ブレースタイプの荷重-補強部材接合部開き変位関係を図 17 に示す。

鉄骨柱タイプの接合プレートは、目標せん断耐力 100kN までに最大 200 μ 程度の歪が確認された。せん断抵抗部には、一对の部材を開かせる応力が生じており、接合プレートが一体化に有効であることが考えられる。また、荷重-接合部回転変形関係で滑り性状が確認された荷重 105kN 付近において、計測点 T の計測位置 P1 の歪が急激に増加した。これは、滑り性状からせん断抵抗部のエポキシ樹脂に損傷が生じ、一对の部材を開かせる応力が生じたものと考えられる。ブレースタイプの補強部材接合部の開き変位は、0.1mm 以下であり、ほとんど開きが生じないことが確認された。

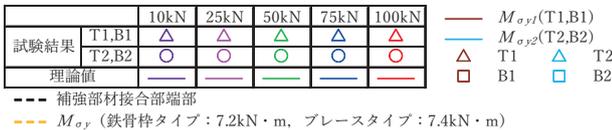
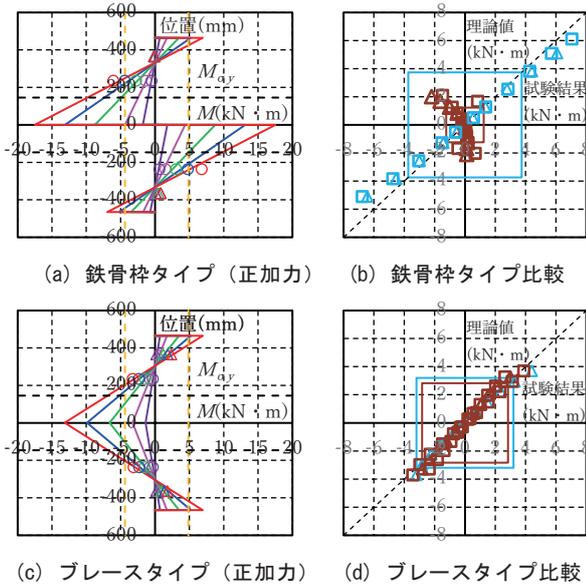


図 15 被補強材鋼管の曲げモーメント

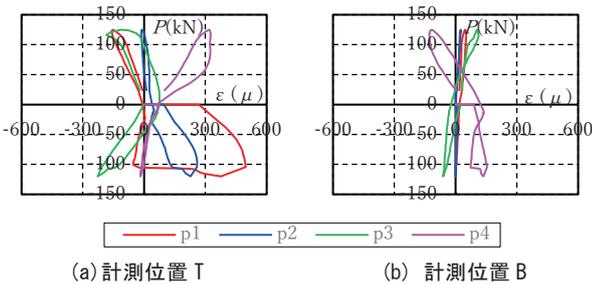


図 16 荷重-接合プレート歪関係

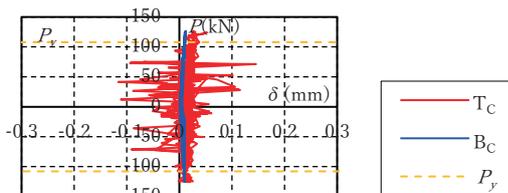


図 17 荷重-補強部材接合部開き変位関係

5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 接着性能試験より、全周載荷では、被補強鋼管周方向の接着面がせん断力に対して有効に作用し、エポキシ樹脂の接着せん断強度を超える性能が発揮されることが確認された。
 - (2) 曲げモーメント伝達時の支圧を想定した半周載荷では、全周載荷の 50%程度に耐力が低下することが確認された。また、半周載荷の位置は、半割鋼管部材片側のみ荷重が作用する状態が最も耐力が低下することが確認された。
 - (3) 補強部材接合部を剛と仮定した力学モデルと初等梁理論を用いることで、被補強材鋼管に生じる部材力や回転変形等の力学的挙動の推定が可能であることが確認された。
 - (4) 接合部試験より、目標荷重 100kN の下では、補強部材接合部、せん断抵抗部ともに、一对の部材間の開きがほとんど確認されず、一体化されていることが確認された。
- 今後、多種の被補強材鋼管や目標耐力に対応できるよう、鋼管径や接着長さ等が本無溶接接合工法の力学的特性や耐力に及ぼす影響を検証する予定である。

参考文献

- 1) Hisao, T., et al.: SEISMIC REINFORCEMENT OF STEEL STRUCTURE BY ADHESIVE METHOD, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 25 No.59, pp.183-187, 2019.2 (in Japanese)
 久翁知巳, 福原武史, 宮内靖昌, 宿里勝信: 接着接合を利用した鉄骨構造物の耐震補強, 日本建築学会技術報告集, 第 25 巻第 59 号, pp.183-187, 2019.2
- 2) Matsui, T., et al.: STRENGTHENING METHOD FOR CONNECTION OF STEEL BRACES BY CARBON FIBER SHEET BONDED AND MOLDED BY VaRTM, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 27 No.67, pp.1279-184, 2021.10 (in Japanese)
 松井孝洋, 鈴木公平, 佐藤壯大, 久保川裕喜, 中本大暉, 松本幸大: 炭素繊維シートの VaRTM 成形接着法による鋼構造ブレース接合部の補強法, 日本建築学会技術報告集, 第 27 巻第 67 号, pp.1279-184, 2021.10
- 3) 鈴木公平, 津之下陸, 中尾貞治, 間野明人, 濱崎瑞生, 山本梨乃, 松本幸大: 鋼管構造部材に対する耐震補強材の接着接合法に関する基礎検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.885-886, 2022.9
- 4) 池田英美, 平川恭章, 宮内靖昌: 樹脂系接着剤を用いた既存パイプトラス屋根への増設ブレースの接合法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.687-688, 2008.9
- 5) 細井泰行, 堀井久一, 小島正勝: 接着剤を用いて鋼管トラスに鋼ブレースを取り付ける無溶接工法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.677-678, 2015.9
- 6) 松竹勲臣, 西村章, 魚永幸人: 無溶接で既存薄肉鋼管トラス屋根への増設ブレースの接合法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III, pp.1245-1246, 2019.9
- 7) コニシ株式会社, 土木建築用エポキシ樹脂系パテ状シール材, コニシ株式会社ホームページ, 2016, <http://www.bond.co.jp/bond/catalog/pdf/download/1000019>, (参照 2023-09-21)

[2023 年 10 月 4 日原稿受理 2023 年 12 月 6 日採用決定]