

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04720

研究課題名(和文) 鉄骨構造部材の回転摩擦溶接を用いた新たな接合法に関する研究

研究課題名(英文) Research on New Joining Method Using Rotational Friction Welding of Steel Structural Members

研究代表者

西村 勝尚 (NISHIMURA, KATSUHISA)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：90826207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：テーパ加工したプラグ(円柱状鋼材)をテーパ加工した接合鋼板孔に挿入し、プラグに押付け力と回転を与え被接合鋼板との摩擦溶接により孔を充填することにより一体化を図る回転摩擦溶接接合の耐力、応力伝達、プラグと鋼板との一体化を図る条件を実験と解析により明らかにした。プラグ底面積当たりの押付け力：60N/mm<sup>2</sup>、回転数3000rpmとすることにより、接合耐力は鋼材引張強さの0.6倍程度を確保することが可能である。また、プラグ底面径と接合鋼材孔径を同一とすることにより、プラグと鋼板の一体化を図ることができる。さらに、本工法による継手を有する水平ハンチ梁の部材実験より継手接合部の耐力評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転摩擦溶接接合法による接合耐力、プラグと鋼板の一体化を図る条件、継手接合耐力評価の提案により、その特徴を生かし溶接接合部の塑性化を回避し変形性能の向上を目的とした水平ハンチ梁のブラケット長さを極端に短くした設計が可能となる。ブラケット製作の省力化、運搬コストの低減、梁端溶接部の破断リスク低減などのメリットが見込める。この接合技術は鉄骨部材接合において大きな優位性があり、技術を確立し実用化することが出来れば鉄骨構造の発展に寄与する。また、片側からの施工が可能であり、既存構造物の耐震補強に有効であり、地震が多発する現在、急務である建築・都市の耐震性向上を促進できる。

研究成果の概要(英文)：Rotary friction welding joint in which a tapered plug (round steel bar) is inserted into a tapered joint steel plate hole, and the plug is subjected to pressing force and rotation to fill the joint steel plate hole by friction welding with the steel plate to be joined. The joining strength, stress transmission, and conditions for integration of the plug and steel plate were clarified by experiments and analysis.

By setting the pressing force per plug bottom area: 60 N / mm<sup>2</sup> and the rotation speed of 3000 rpm, it is possible to secure the joining strength of about 0.6 times the tensile strength of the steel material. Further, by making the diameter of the bottom surface of the plug and the diameter of the hole of the joined steel material the same, it is possible to integrate the plug and the steel plate. Furthermore, we proposed a method for evaluating the strength of joint joints from a member experiment of a horizontal haunch beam with a joint by this method.

研究分野：鋼構造，耐震工学，構造計画

キーワード：回転摩擦溶接 鉄骨造 継手

## 1. 研究開始当初の背景

鉄骨部材の接合法として溶接または高力ボルト摩擦接合がある。溶接接合の場合には施工現場の環境や技術者の技量により品質が左右される。また、外部に飛び火し火災の要因となり既存建物の補強等には不向きである。高力ボルト摩擦接合の場合にはボルト孔による部材の断面欠損や片側だけからの施工が困難、引張力を伝達する接合においてポアソン効果あるいは塑性化により板厚が減少し高力ボルト導入張力がぬけてくる等の理由により塑性化領域での接合は難しい。既往の接合法にはこのような様々な課題がある。

前述した既往の鉄骨部材の接合法の課題・問題点を解決する技術として、溶接接合のように金属的な結合により一体化を図ることが可能な回転摩擦溶接接合を考案した。回転摩擦溶接接合はプラグに押付け力と回転を与え鋼材同士の摩擦で発生する熱エネルギーにより鋼材が溶解した「溶鋼」を接合媒体として有効利用する接合法である。具体的な接合形式として図1に示す重ね接合と突合せ接合の2タイプが考えられる。重ね接合は接合鋼材を介して被接合鋼材同士を接合する形式であり、突合せ接合は被接合鋼材同士を直接接合する形式である。

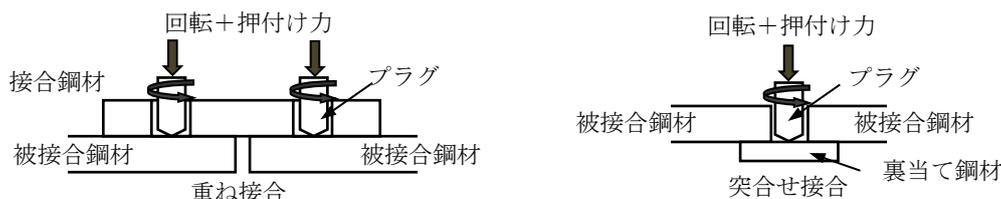


図1 回転摩擦溶接接合による接合形式例

## 2. 研究の目的

一般的な柱梁接合部では梁端は溶接接合されており、この部分が塑性化し、変形性能は溶接技量に影響される。また、溶接部は大きな変形性能を期待できない。そのため、溶接接合部の塑性化を避け塑性化域を梁中央側とし、大きな変形性能に期待したフランジを水平ハンチ形状とした梁部材が考案されている。

本接合法は、接合鋼材のプラグを挿入する孔を摩擦溶接により充填する（すなわち、断面欠損が生じない）ことを目指しているため、継手を塑性化部位に近接させても接合部破断耐力を大きく設計することができる。その特徴を活かす設計例として、水平ハンチ梁のブラケットの梁継手を対象にすると、ブラケット長さを極端に短くした設計が可能となる。この際、ブラケット製作の省力化、運搬コストの低減、梁端溶接部の破断リスク低減などのメリットが見込める。この接合技術は鉄骨部材接合において大きな優位性があり、技術を確立し実用化することが出来れば鉄骨構造の発展に寄与する。また、片側からの施工が可能であり、既存構造物の耐震補強に有効であり、地震が多発する現在、急務である建築・都市の耐震性向上を促進できる。

本研究は、汎用性が高く、有効性が見込まれる鉄骨部材の回転摩擦溶接接合による重ね接合の耐力、力学特性および変形性能を実験および解析により解明し、その結果を基に実用化に向け接合部の設計法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 回転摩擦溶接接合による継手を模擬した単体試験体の単調荷重実験

回転摩擦溶接による重ね接合を対象とし、鋼板継手を模擬した引張接合単体試験体による単調荷重引張実験により接合部耐力、破断形式、応力伝達、プラグと被接合鋼材（母材）および接合鋼材（添板）との一体化を把握する。接合部耐力はプラグ底面と母材あるいは添板孔との一体化の程度が大きく影響すると考えられるため、一体化の程度の要因となる添板厚、添板孔形状、プラグ形状、間隔、配列を実験パラメータとする。

### (2) 弾塑性有限要素法解析

鋼板の継手部および回転摩擦溶接接合のメリットを生かした水平ハンチH形鋼梁部材の詳細な弾塑性有限要素法解析により継手部の応力伝達機構、水平ハンチH形鋼梁の弾塑性領域での性状を把握する。

### (3) 回転摩擦溶接接合による継手を設けた梁部材試験体の正負交番繰返し荷重実験

回転摩擦溶接接合による継手を設けたH形鋼梁および比較対象に継手を有しないH形鋼梁部材の正負交番繰返し荷重実験により、継手を有する部材の力学特性、耐力や変形性能および優位性を確認する。また、実験結果を基に回転摩擦溶接接合部の設計法を提案する。

## 4. 研究成果

### (1) 回転摩擦溶接接合耐力およびプラグと被接合鋼材および接合鋼材との一体化について

プラグ1列設けた二面せん断試験体による単調荷重引張試験を実施し、接合耐力および切断試験によりプラグと母材および添板との一体化の確認を実施した。試験体パラメータは添板厚、プラグ形状（プラグ底面径：17～20、テーパ角度）、プラグ側面と添板孔側面間隔（0.5, 1.0mm）押付け力（プラグ底面積当たり 20～60N/mm<sup>2</sup>）とする。また、プラグ底面径と添板孔底部径を同一とした試験体も製作した。試験体の一例を図2、プラグ形状の一例を図3に示す。なお、回転摩擦溶接時の回転数は3000rpmとする。



降伏耐力に対するプラグ耐力 (有効係数: 0.41) : 継手接合部係数を 1.22 倍, 添板降伏耐力: 1.99 倍とする. なお, プラグ間距離: 40mm, 回転摩擦溶接時の押付け力  $60\text{N}/\text{mm}^2$  (プラグ底面積当たり), 回転数: 3000rpm である. また, 各プラグ間の添板にひずみゲージを設けている. 図 7 に試験体概要図を示す.

最終破壊形式は母材とプラグ底面間の引張せん断破壊であった. 実験結果より得られた荷重-変形関係を図 8, 添板の歪分布を図 9 に示す.

図 9 より, 部材が先行降伏し大きな変形性能が認められる. 最大耐力から推定したプラグ耐力の算定のための有効係数は 0.5, 継手接合部係数は 1.48, 塑性率は 95.3 であった. また, 図 8 中に示すソリッド要素による FEM 解析結果の降伏耐力は実験値とよく対応している. 図 9 より, 加力方向に設置したプラグ間のひずみ値は各荷重レベルで直線分布であることより, 各プラグより母材から添板へ均等に引張力が伝達されている. FEM 解析結果においても各プラグから均等に応力伝達が図れていることを確認している.

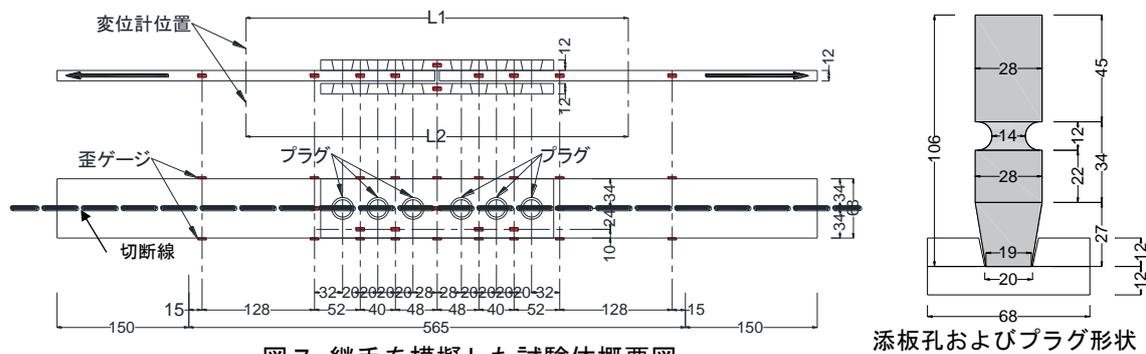


図 7 継手を模擬した試験体概要図

添板孔およびプラグ形状

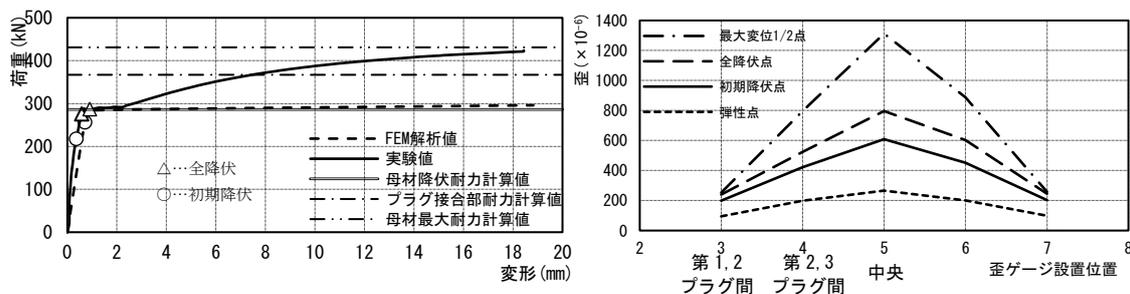


図 8 荷重-変形関係

図 9 添板歪分布

#### (4) 回転摩擦溶接接合を用いた継手を有する水平ハンチ梁の構造性能

実寸法の縮尺 1/2.5 程度となる水平ハンチ梁を実験対象とし, 試験体数は 3 体で, 接合部耐力をパラメータとした梁継手を有する試験体 (J12, J14) が 2 体と比較対象のための梁継手がない試験体 (N) が 1 体である. 試験体形状および寸法を図 10 に示す.

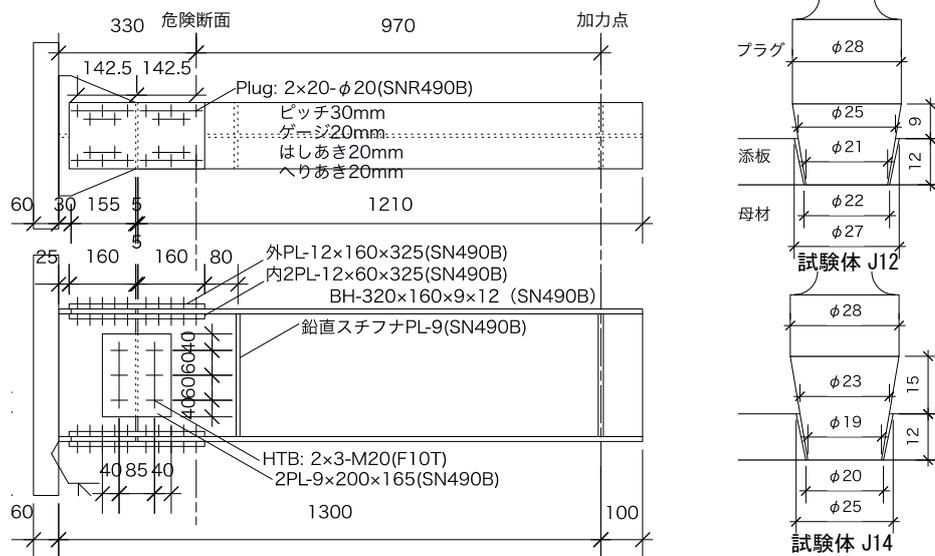


図 10 試験体 (J12, J14)

添板孔およびプラグ形状

継手ありの試験体では第 1 プラグ位置を, 継手なしの試験体ではハンチ開始位置をそれぞれ危険断面位置と見なし, 梁端から距離  $L_p = 330\text{mm}$  としている. 梁端の拡幅断面では, 危険断面位置が全塑性モーメント  $M_{bp}$  となる時に, 1.20 倍の耐力を有している. フランジ継手では, プラグと添板が一体化することを前提に, プラグは施工できる限界まで極端に近づけた配置 (プ

ラグ間隔 30mm) としている。回転摩擦溶接時のプラグ底面積当たりの押付け力は  $60\text{N/mm}^2$ 、回転数 3000rpm とする。

载荷履歴は、漸増交番繰返し载荷とする。まず、危険断面位置が降伏モーメント  $M_y$  となる振幅で 2 サイクル繰返した後、材端回転角  $\theta$  が  $\pm 2\theta_p, \pm 4\theta_p, \pm 6\theta_p, \pm 8\theta_p$  の幅で 2 サイクルずつ载荷する。 $\theta_p$  は、ハンチを無視して全長ストレートと見なした梁が全塑性モーメントに達した際の弾性変形角とする。

実験結果の梁端モーメント  $M_h$  - 部材角  $\theta$  関係を図 11 に示す。試験体 J12 では、主にプラグ底面で破断した。危険断面位置で全塑性時 ( $M_h = 369\text{ kNm}$ ) を基準にすると、プラグ破断時には 1.24 倍の最大耐力であった。プラグの一部はプラグ底面の 5 割程度の未溶着となる破面も確認された。試験体 J14 では、添板が破断した。ただし、それより先にプラグ側面に沿って亀裂が生じた。これは、プラグ側面の応力集中・歪集中の影響や、同位置が熱影響で脆化したことが原因と推察される。その結果、添板の有効断面積が少なくなったと推察する。危険断面位置で全塑性時 ( $M_h = 356\text{ kNm}$ ) を基準にすると、添板破断までに経験した最大耐力は 1.37 倍であった。試験体 N ではハンチ部に局部座屈が生じ耐力が低下した。最大耐力が一番大きかった試験体 N が実験終了時までには経験した最大耐力時には、危険断面位置で全塑性時 ( $M_h = 356\text{ kNm}$ ) を基準にすると、1.41 倍の  $M_h$  となる。

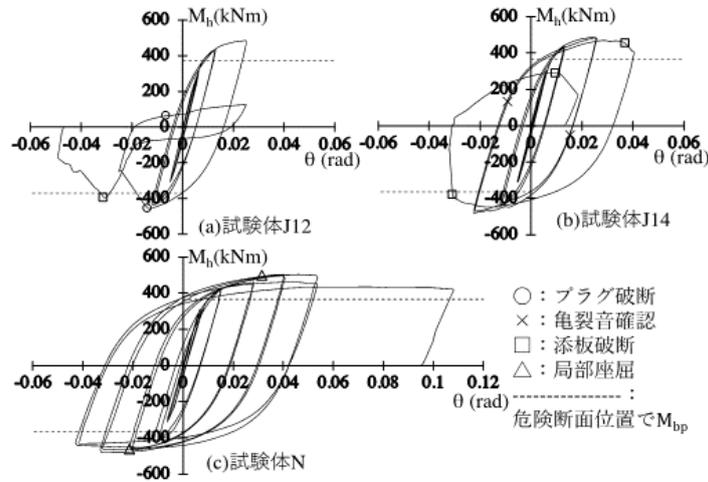


図 11 梁端曲げモーメント  $M_h$  - 部材角  $\theta$  関係

#### (5) フランジ継手の耐力評価の提案

(4) に示した実験結果より、フランジ継手の最大耐力が母材耐力に対して所定の余力を持つよう設計する方法を提案する。ここでは、2つの破壊モード（プラグ底面破断、添板破断）を想定した破断耐力  $P_{pu}$ 、 $P_{su}$  を次式で算定する。

$$P_{pu} = n_p q_{pu} = n_p \alpha A_p \sigma_{pu} \quad (2)$$

$$P_{su} = \{A_{se} + \beta(A_{sg} - A_{se})\} \sigma_{su} \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_{pu}$ 、 $\sigma_{su}$ ：プラグ、添板の引張強さ、 $A_p$ ：プラグ底面積、 $A_{se}$ ：プラグ孔を無視した添板の投影有効断面積（内外の添板の小さい方の 2 倍とする）、 $A_{sg}$ ：添板の全断面積、 $n_p$ ：プラグ本数、 $\alpha$ ：プラグ接合耐力に関する有効係数、 $\beta$ ：プラグ側面接合に関する有効係数。

危険断面位置で  $M_{bp}$  時に、フランジには降伏耐力  $P_{ff}$  が作用するのに対して、梁端に最も近いプラグ位置および継手中央位置のフランジに作用する軸力  $P_{ef}$ 、 $P_{jf}$  は、次式で与えられる。

$$P_{ef} = \frac{L - L_p + L_j}{L - L_p} \cdot \frac{1 - I_w/I_h}{1 - M_{wp}/M_{bp}} P_{fy} \quad (4)$$

$$P_{jf} = \frac{L - L_p + L_j/2}{L - L_p} \cdot \frac{1 - \Phi I_w/I_o}{1 - M_{wp}/M_{bp}} P_{fy} \quad (5)$$

$$P_{fy} = A_f \sigma_{fy} \quad (6)$$

ここに、 $L_j$ ：外縁プラグ間の距離 (= 285mm)、 $\varphi$ ：ウェブの継手効率 (= 0.4)、 $I_o$ 、 $I_w$ 、 $I_h$ ：梁全体、ウェブ、拡幅梁断面の断面二次モーメント、 $A_f$ ：母材の断面積、 $\sigma_{fy}$ ：母材の降伏強さ。

プラグと母材接合部引張破断および添板破断の耐力余裕度は、 $P_{pu}/P_{ef}$ 、 $P_{su}/P_{jf}$  で表される。最大耐力実験値が全塑性耐力計算値の試験体 J12 で 1.24 倍、試験体 J14 で 1.37 倍であったことから、この実験結果から有効係数を逆算すると、 $\alpha$  が 0.45、 $\beta$  が 0.67 であった。継手あり試験体 J12、J14 は、継手で破壊し、継手なし試験体 N より変形性能が乏しくなったが、上記の有効係数を用いて十分な余裕度を与えることで、本工法の継手を用いても高い変形性能を与えることが可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西村勝尚
2. 発表標題 回転摩擦溶接による接合耐力に関する基礎実験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄太, 西村勝尚
2. 発表標題 回転摩擦溶接接合による継手を設けたH形鋼梁に関する解析的研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄太, 西村勝尚
2. 発表標題 回転摩擦溶接接合による継手を設けたH形鋼梁に関する解析的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄太, 西村勝尚
2. 発表標題 回転摩擦溶接接合工法の接合耐力と一体化に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀井雄太, 西村勝尚
2. 発表標題 回転摩擦溶接接合工法の接合耐力と継手性能に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 向出静司, 西村勝尚
2. 発表標題 回転摩擦溶接を用いた継手を有する水平ハンチ梁の構造性能に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	向出 静司  (MUKAIDE SEIJI)  (20423204)	大阪工業大学・工学部・准教授    (34406)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------