

高力ボルト摩擦接合の滑り挙動を利用した 塑性ヒンジ形成工法の抵抗機構について

中村 亮太*・山西 央朗*・山根 拓実**

(令和2年10月30日受付)

A study on resisting mechanism of plastic-hinge developed by stick-slip of high-strength-bolts-connection

Ryota NAKAMURA, Teruaki YAMANISHI and Takumi YAMANE

(Received Oct. 30, 2020)

Abstract

General plastic-hinge is evaluated by full perfect elastoplasticity type shown in Figure 1. But it is difficult to make the location of plastic-hinge in actuality. The stress increases while bearing gentle slope after expressing full plastic endurance. As above, the separation between the evaluate and the actual behavior is a problem of present structures. In this study, we study plastic-hinge developed by stick-slip of high-strength-bolts-connection to match the actual behavior and full perfect elastoplasticity type behavior. We investigated correspondence with the behavior of general plastic-hinge through partial processing experiment.

Key Words: plastic-hinge, stick-slip of high-strength-bolts-connection

1. はじめに

一般的に塑性ヒンジは図1に示すような完全弾塑性で評価され、かつ当該塑性ヒンジが材端部に形成されると考える。しかしながら、実際にはポアソン効果の拘束等により形成位置は、材端部より梁中央形に以降し、その位置は定めにくい。さらに、ひずみ硬化の影響などで、全塑性耐力発現後も緩やかな二次勾配を有しながら耐力が増大する。この耐力の増大は具体的に評価しにくく、全塑性耐力は一般的に用いられるものの、その耐力は比較的下限値的に用いられる。また、塑性変形が蓄積していくと、幅厚比を確保していてもいずれは局部座屈が発生して、劣化勾配が現われる。

このように、曲げを受ける部材を一般塑性ヒンジ法によ

り評価することは比較的簡便で、かつ一定の精度を確保できる観点から非常に有用な概念として利用されている。

しかしながら、実挙動とは潜在的に乖離しているため、

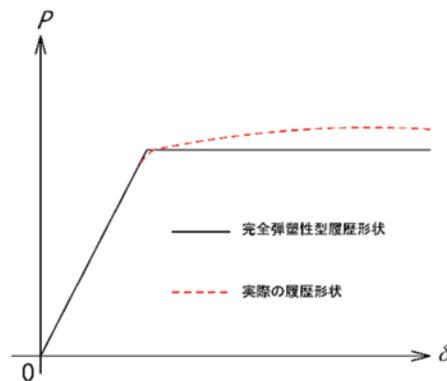


図1 荷重 - 変形関係概念図

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

評価精度を追及することが難しく、かつ現実的な幅厚比の範囲では、地震時に局部座屈の発現を許容せざるを得ない。

このような背景の下、本研究では、物理的な塑性変形挙動を、一般塑性ヒンジ法の概念に整合させるため、摩擦接合滑り挙動を利用した塑性ヒンジ形成工法を提案し、当該工法の確立を目的とする。本論文では先ず、摩擦接合滑り挙動が発生する部分架構実験を行い、一般的な塑性ヒンジ挙動との対応について吟味する。

2. 梁継手の抵抗機構

2.1. 梁継手形状の設計方法

本研究で実現させる塑性ヒンジは、高力ボルト摩擦接合に滑り挙動を発生させることで一定の耐力を持ちながら回転挙動を発生させるというものである。そのため、形状は、通常の摩擦接合による継手と類似しているが、以下の点に相違がある。

- 部分的に配置ボルトを少なくし、意図的に滑り挙動が生じるように工夫する。
- 図2に梁継手における母材の形状を示す。塑性ヒンジ形成後、回転挙動をさせるためには母材同士が干渉しないために、付き合わせる梁断面間に回転を許容できる切り欠きを設ける。
- また、滑り耐力に到達した後、ボルトとボルト貫通鋼の内壁とが接触すると支圧接合に移行する。これにより、耐力が再び上昇するが、単純な要素とは見なせなくなるため、一定の耐力を持ちながら変形のみを進行させるということの阻害をされると考えられる。よって、滑り挙動が発現する部位について支圧接合に移行しないように、母材に長孔加工を施している。

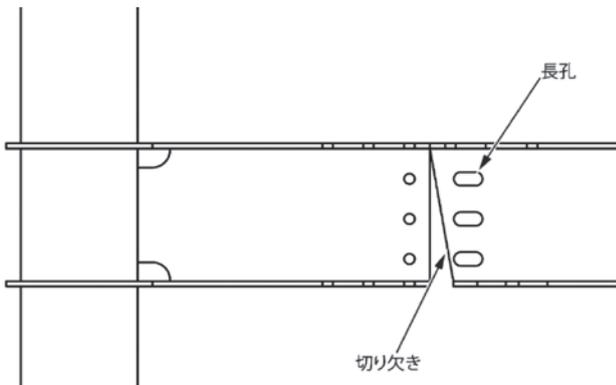


図2 梁継手における母材の形状

2.2. 継手の抵抗機構と耐力

○弾性域

梁継手のどの部位も滑り挙動が発現していない状態を弾性域とよび、これを図3に示す。摩擦力に起因する引張り合力と圧縮合力は中立軸を基軸として、上下ウェブ、上下

フランジにて発生する合力に分解して、それぞれ偶力の関係にある。よって、弾性域における継手の負担モーメント M は(1)式で表される。

$$M = T_f h + T_w h_w \quad (1)$$

T_f :フランジに作用する引張り合力

T_w :ウェブに作用する引張り合力

h :上下フランジ芯々距離

h_w :ウェブボルト孔芯々距離

○弾性限界

下フランジに滑り挙動が発現した状態を弾性限界とよび、これを図4に示す。この段階では下フランジでは滑り耐力に到達しているが、ウェブでは滑り挙動が発現していない。このときの継手の負担モーメント M_y は(2)式で表される。

$$M_y = Q_f h + T_w h_w \quad (2)$$

Q_f :フランジの滑り耐力

○塑性ヒンジ形成

下フランジが滑った後に、ウェブにも滑り挙動が発現し、回転挙動が生じる状態を塑性ヒンジ形成状態とよび、これを図5に示す。このときの継手負担モーメントを塑性ヒンジモーメントとよぶ。 M_{J-U} は(3)式で表される。

$$M_{J-U} = Q_f h + Q_{fw} (h_1 + h_2) \quad (3)$$

Q_{fw} :ウェブの滑り耐力

h_1, h_2 :フランジとウェブボルト孔との芯々距離

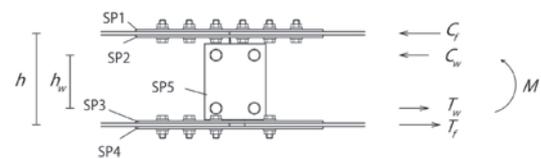


図3 弾性域

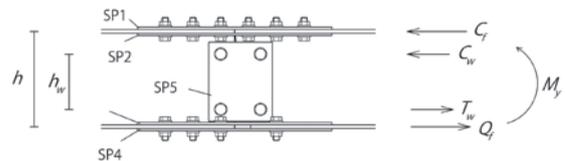


図4 弾性限界

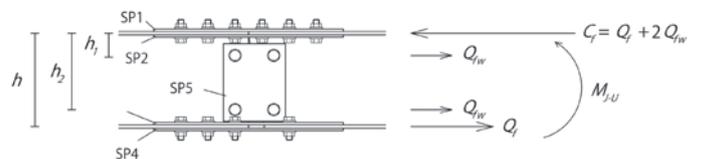


図5 塑性ヒンジ形成状態

3. 実験方法

3-1. 試験体

図6に試験体を示す。H-125×6×9およびPL-6を使用した。柱には□-200×12を使用した。高力ボルトはフランジにおいて20本配置し、ウェブには3本配置した。なお、滑り挙動が発現するフランジに取り付ける高力ボルトは2本とした。摩擦面はディスクグラインダー処理とした。

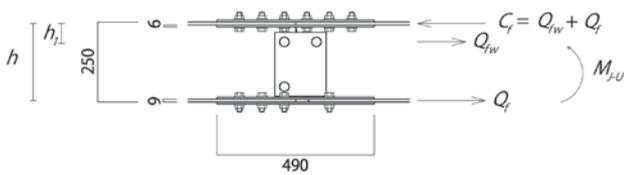


図6 試験体

3-2. 載荷装置

図7に載荷装置を示す。試験体を図のように設置し、梁端部を上下繰り返し載荷した。なお、滑り挙動が発現しないフランジが下側になるように試験体を設置した。

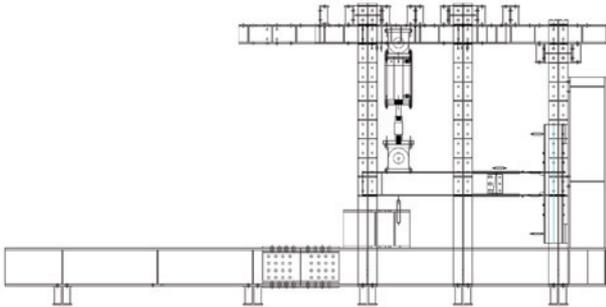


図7 載荷装置

3-3. 塑性ヒンジモーメント評価式

塑性ヒンジモーメント $M_{J,U}$ は(4)式で表される。

$$M_{J-U} = Q_f h + Q_{fw} h_1 \quad (4)$$

滑り耐力 Q_f および Q_{fw} は以下の式で表すことができる。

$$Q_f = n m T_0 \mu \quad (5)$$

$$Q_{fw} = n_w m T_0 \mu \quad (6)$$

n : フランジボルト本数、 n_w : ウェブボルト本数

m : 摩擦面数、 μ : 滑り係数、 T_0 : 締付け力

(5)、(6)式を(4)式に代入して、 μ について整理することで、次の式が得られる。

$$\begin{aligned} \bar{H}_r &= h_B + \frac{\delta_B}{\delta_B - \delta_T} (h_T - h_B) \\ \mu &= \frac{M_{J-U}}{m T_0 (n h + n_w h_1)} \end{aligned} \quad (7)$$

3-4. 塑性ヒンジ回転中心位置評価式

任意の基準線からの回転中心位置 \bar{H}_r は図8の幾何学的諸量を用いて以下の式で表現できる。

δ_T : 上端変位置量、 δ_B : 下端変位置量

θ : 回転角

h_T : 基準線から上端までの距離

h_B : 基準線から下端までの距離

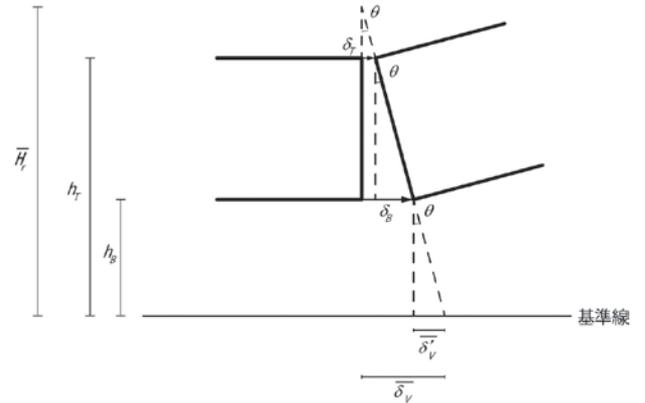


図8 任意の基準線からの回転中心位置 \bar{H}_r

下端からの回転中心位置 H_r は以下の式で表現できる。

$$H_r = \bar{H}_r - h_B \quad (8)$$

δ_T 、 δ_B を測定するために継手に変位計を設置した。写真1に変位計の取り付け方を示す。図9に示すように、上下フランジそれぞれの添え板上端を測定するように変位計を設置した。

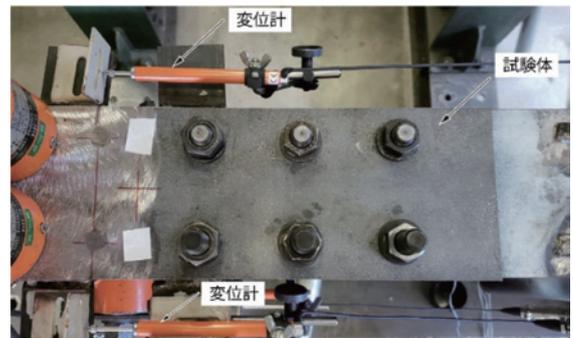


写真1 継手に取り付けられた変位計の様子

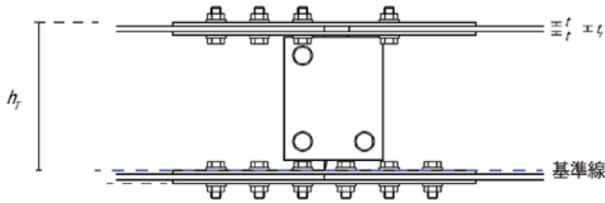


図9 測定変位位置

3.5. 剛性の評価式

載荷点鉛直変位は写真2に示すように仕口から固定した木材に直接取り付けられた変位計により梁の相対変位を測定した。継手で母材の連続性は断たれているが上下フランジ、ウェブに添え板を取り付けており応力伝達は一様に連続体である梁と等価であるので図10のようにモデル化することができる。よって、剛性は次の式で評価できる。

$$K = \frac{3EI}{l_1^3} \quad (9)$$



写真2 鉛直変位測定方法

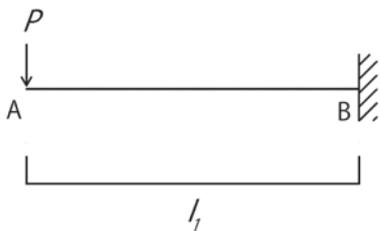


図10 試験体力学モデル

4. 実験結果および考察

4.1. 継手モーメント-部材角の関係

図11に継手モーメント-部材角の関係を示す。図11から実験で得られた履歴形状は二次勾配がほぼ0であり完全弾塑性型の履歴形状と整合する。

実験結果から、最大耐力である塑性ヒンジモーメントは $M_{J,U} = 16\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、この塑性ヒンジモーメントに対応する滑り係数は(7)式を用いて求めることができる。

$$m=2, T_0=30\text{kN}, n=2, n_w=1, h=241\text{mm},$$

$h_1=57.5\text{mm}$ を(7)式に代入する。

$$\mu = \frac{1.6 \times 10^4}{2 \times 30 \times (2 \times 241 + 57.5)} = 0.49$$

ディスクグラインダー処理を施している場合において、この滑り係数は整合性がある。よって、継手の最大耐力を(4)式で評価できたといえる。

4.2. 回転中心位置-鉛直変位関係

図12に回転中心位置-鉛直変位関係を示す。図12から、塑性ヒンジ形成時における回転中心位置は下側フランジ近傍に位置していることがわかった。つまり、滑り挙動が発現しない部位中心に回転挙動をする塑性ヒンジが形成された。

4.3. 荷重-変位関係

図13に荷重-変位関係を示す。剛性は $K' = 5.7\text{kN/mm}$ となった。

ここで、(9)式に $I = 3.89 \times 10^7 [\text{mm}^4]$, $l_1 = 1625\text{mm}$, $E = 205000\text{N/mm}^2$ を代入して $K = 5.6\text{kN/mm}$ を得る。

$$\frac{K}{K'} = \frac{5.6}{5.7} = 0.98$$

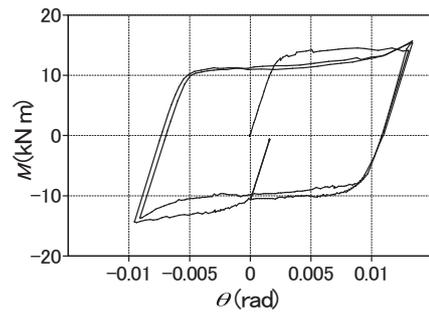


図11 継手モーメント-部材角関係

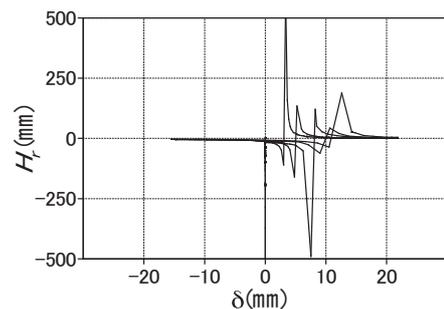


図12 回転中心位置-鉛直変位関係

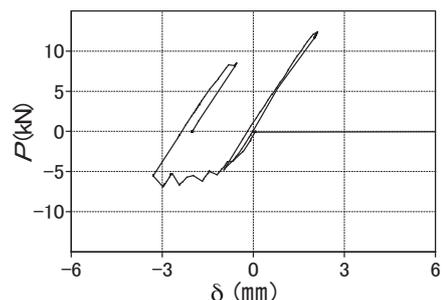


図13 荷重-変位関係

よって、実験値と理論値の誤差は2%という結果となった。実験値と理論値は整合性が取れているものと判断できる。

5. まとめ

梁継手という特定の位置に形成される摩擦接合滑り挙動を利用した塑性ヒンジの挙動と、一般的な塑性ヒンジがもつ挙動との対応について、繰り返し载荷実験を通して吟味

した。得られた結果は以下のように要約される。

- (1) 曲げモーメント - 部材角関係において完全弾塑性型の履歴形状が得られ、一般的な塑性ヒンジの挙動とほぼ対応した。
- (2) 滑り挙動を発生しないフランジ中心に回転挙動が発生した。