

梁継手塑性ヒンジの導入による幅厚比制限緩和の可能性について

中村 亮太*・山西 央朗**・小松 真吾***・松田 頼征****

(令和3年11月5日受付)

A study on width-thickness-ratio for Beam-Joint-Plastic-Hinge.

Ryota NAKAMURA, Teruaki YAMANISHI, Shingo KOMATSU, Yoriyuki MATSUDA

(Received Nov. 5, 2021)

Abstract

In practice, plastic-hinge is evaluated by perfect elastoplasticity type shown in Figure 1. But in fact, the stress increases while bearing gentle slope after expressing full plastic endurance. And if we use FA rank members which satisfy limitation of width-thickness-ratio, local buckling will occur by accumulating plastic deformation. Under the circumstances, we propose Beam-Joint-Plastic-Hinge and aim for improving the evaluation precision of plastic-hinge. In this study, we focus on keeping base materials elastic when we introduce Beam-Joint-Plastic-Hinge and explain the possibility loosens limitation of width-thickness-ratio. At first, we show the design method when Beam-Joint-Plastic-Hinge is introduced. Next, we compare FA rank test specimen and FC rank test specimen.

Key Words: high-strength-bolts, friction joint, beam joint, width-thickness-ratio

1. はじめに

1-1. 研究背景

実務設計において、塑性ヒンジは梁端部が生じる位置に形成されるとみなし、図1に示す完全弾塑性型の履歴形状で評価している¹⁾。また、柱梁耐力比や接合部係数を導入することで、架構の崩壊機構の制御が試みられている。さらに、幅厚比に制限値を設け、局部座屈の詳細な検討をすることなく部材の塑性変形能力を評価している。構造関係技術基準では、部材の保有する塑性変形能力に応じて、部材種別FA、FB、FC、FDとそれぞれに対応する幅厚比制限値が規定されている。一般的な建築物では、部材に繰り返し塑性変形能力を期待するため、塑性変形能力が6以上保証されているFAランク部材を使用する²⁾。一方、FCランク部材は全塑性耐力を期待できるものの、塑性変

形能力が保証されていないため、強度設計として扱うこととなり、二次設計での使用は限定的となる。

上記のような実務設計での評価や扱い方に対して、実際の構造物では、以下の様に乖離のある性質を有している。全塑性耐力発現後も緩やかな二次勾配をもちながら耐力が上昇し、繰り返し塑性変形に対しては移動硬化則と等方硬化則を合わせた履歴形状に模擬される耐力の上昇がみられる。また、材料強度の実勢値が定め難く、全塑性耐力を正確に求めるにはロッド毎に素材試験を実施する必要がある。さらに、部材の塑性化によって実際の構造物に形成される塑性ヒンジは、存在応力が最大となる梁端部より部材中央側に形成され、具体的に形成位置を評価することは難しい。そして、幅厚比制限を満足させたFAランク部材を使用したとしても塑性変形の蓄積によっていずれかは局部座屈が発生し、劣化勾配があらわれる。

* 広島工業大学大学院 建設工学専攻

** 広島工業大学 建築工学科 准教授

*** 島根大学 建築デザイン学科 助教

**** 工学院大学 建築学科 助教

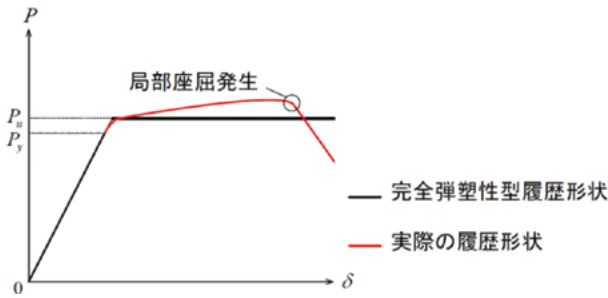


図1 荷重-変形関係概念図

このような背景のもと、著者らは継手部分の加工と工法を工夫することで実現する梁継手塑性ヒンジを提案し、塑性ヒンジの評価精度の向上を目指している³⁾。

1-2. 梁継手塑性ヒンジの特性

本研究で提案する高力ボルト摩擦接合梁継手は、図2(a)に示すように配置ボルト本数を部分的に少なくすることで、母材の降伏に先行して摩擦面で積極的に滑り挙動を発生させる。そして、この滑り挙動を利用して継手位置に回転機構（梁継手塑性ヒンジ）を形成させる（図2(b)参照）。梁継手塑性ヒンジを導入することで、次のことが実現できる。

- (1) 実際の挙動を評価（完全弾塑性）に近づけることができる。梁継手塑性ヒンジを導入することで、繰り返し载荷に対しても耐力の増減がなく二次勾配が一定となる bilinear 型の履歴形状となり、移動硬化則のみで評価することができる。
- (2) 梁継手塑性ヒンジ形成時も母材は塑性化しないため、累積塑性変形による局部座屈を回避できる。したがって、局部座屈に対する検討は、弾性域のみで完了する。

(3) 一般化塑性ヒンジに近い構造特性を期待できる。梁継手塑性ヒンジは、摩擦接合の滑りによって実現する回転機構であり、柱や梁、ブラケット全体に着目すれば一般化塑性ヒンジがもつ剛塑性体として回転する性質に近い特性を構造物に付与することを期待している。

- (4) 塑性領域を含めて、構造物の強度、弾性剛性、変位量を高い精度で評価することができる。梁継手塑性ヒンジ形成時の継手負担モーメント（以下、塑性ヒンジモーメントと呼ぶ。）は後述する(3)式で表現でき、ウェブおよび下フランジのボルト配置位置とボルト軸力、滑り係数により決定する。繰り返し滑り挙動による滑り係数の変動は、摩擦面処理をショットブラスト加工とした場合小さくなることを要素実験にて確認している。したがって、ショットブラスト加工とすることで塑性ヒンジモーメントは簡便かつ高精度に制御することができる。また、弾性剛性は継手を無視した力学モデルにて算出することができる。さらに、継手位置での回転量（以下、継手回転量と呼ぶ。）を算出することによって塑性変形量を明確に定義することができる。
- (5) 塑性ヒンジ形成位置を継手位置で明確に定めることができる。

1-3. 目的

本研究では、梁継手塑性ヒンジを導入することで母材は弾性域に留まることに着目し、幅厚比制限を緩和する可能性について述べる。まず、本論文では梁継手塑性ヒンジを導入する場合の設計方法を示し、これを基に設計したFAランク試験体と、FCランク試験体それぞれの構造的性能を比較する。

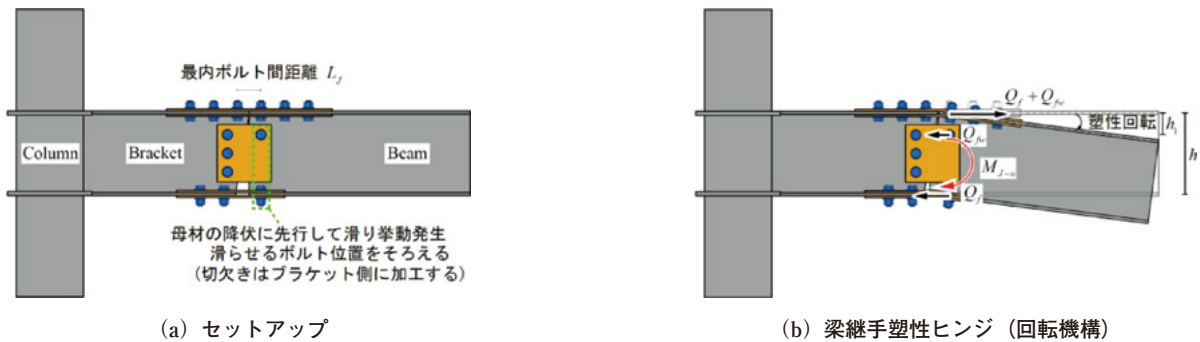


図2 梁継手塑性ヒンジ

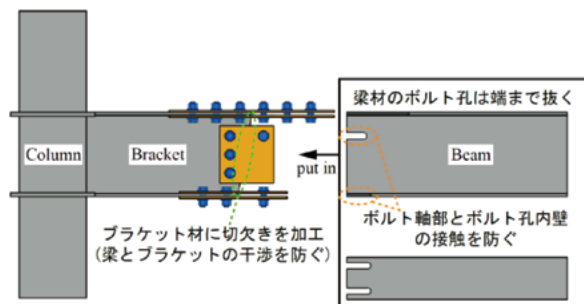


図3 継手部分における梁材加工方法の工夫

2. 設計方法

2-1. 梁継手部分における母材形状

本研究では、梁継手塑性ヒンジを導入するにあたり継手部分の加工方法を次のように工夫する。

(1) 梁材のボルト孔を端まで抜くように加工することで施工性の向上を計った。通常のボルト孔としたブラケット材にあらかじめ添え板と高力ボルトを配置しておくことで、梁材を差し込むように取り付けられ、設置が容易となる(図3参照)。なお、梁材のウェブおよび下フランジでは、滑り挙動によってボルト軸部とボルト孔内壁が接触しないように十分注意する必要がある。

(2) 梁材の配置高力ボルト本数を少なくし、ブラケット材に母材同士の干渉を防ぐための切欠きを設ける。塑性ヒンジモーメントの大きさは、梁材に滑り挙動を発生させた場合と、ブラケット材に滑り挙動を発生させた場合とで等しいため、ブラケット材より載荷点に近い梁材に滑り挙動を発生させる方が、梁継手塑性ヒンジが形成される際の荷重(以下、崩壊荷重と呼ぶ)は大きくなる。また、塑性ヒンジモーメント発生位置を明確にするため、滑らせるボルト材軸方向の位置をそろえた(図2(a)参照)。以上より、梁材に滑り挙動を発生させるように工夫し、切り欠きはブラケット材に加工した。

2-2. 断面算定

図4に示す梁継手塑性ヒンジ形成時の存在応力に対して、母材を弾性域に留めるように設計する。図4中のd点で塑性ヒンジモーメント発現時存在応力に対して弾性を保つ梁の断面係数は次の条件式を満たすものである。

$$\bar{Z}_G \geq \frac{M_{J-u}}{\sigma_{G-Y}} \quad (1)$$

ここに、 \bar{Z}_G :ボルト欠損を考慮した梁有効断面係数、 M_{J-u} :塑性ヒンジモーメント、 σ_{G-Y} :梁降伏応力度である。

(1)式を満足し、かつできるだけ梁材の降伏モーメントの大きさに近い塑性ヒンジモーメントを発揮できるように設計する。したがって、ブラケット材を梁材と同一断面とすると、図4中のf点でブラケット材の降伏モーメントを超えることが予想される。よって、ブラケット材の幅を調整することによって、弾性を保持させる。崩壊荷重作用下での必要な断面係数は、次の条件式を満たすものである。

$$Z_B \geq \frac{L-B}{L_R-L_J} \cdot \frac{M_{J-u}}{\sigma_{B-Y}} \quad (2)$$

ここに、 L :載荷点から柱梁節点までの距離、 B :柱幅(=200mm)、 L_R :載荷点から継手回転中心位置までの距離、 L_J :最内ボルト間距離、 σ_{B-Y} :ブラケット降伏応力度である。

3. 評価式

3-1. 塑性ヒンジモーメント評価式

図2(b)に示す、塑性ヒンジモーメント M_{J-u} は次の式であらわされる。

$$M_{J-u} = n_w \cdot m \cdot \mu \cdot T_0 \cdot h_1 + n_f \cdot m \cdot \mu \cdot T_0 \cdot h \quad (3)$$

ここに、 n_w, n_f :ウェブおよびフランジのボルト本数、 m :摩擦面数(=2)、 μ :滑り係数(ショットブラスト処理とするので0.5として検討する)、 T_0 :設計用ボルト張力、 h_1, h :上フランジ中心から各ボルトまでの距離である。

3-2. 弾性剛性評価式

図5(a)に示す継手を無視した片持ち梁モデルについて、弾性剛性 K は次の式であらわされる。

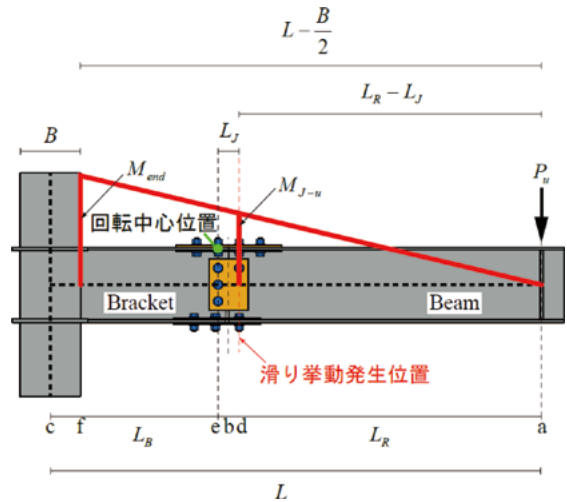
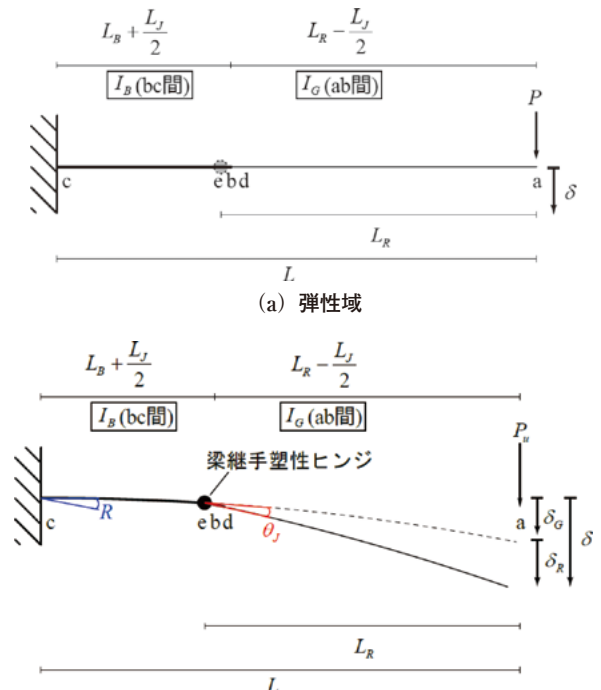


図4 梁継手塑性ヒンジ形成時における梁曲げ応力分布



(b) 継手塑性ヒンジ形成時

図5 力学モデル

$$K = \frac{3 \cdot E}{\frac{\left(L_R - \frac{L_J}{2}\right)^3}{I_G} + \frac{L^3 - \left(L_R - \frac{L_J}{2}\right)^3}{I_B}} \quad (4)$$

ここに、 I_G : 梁断面二次モーメント、 I_B : ブラケット断面二次モーメントである。

3-3. 継手回転量評価式

図5 (b) に示すように、梁継手塑性ヒンジが形成された後の鉛直変位 δ は、母材の弾性曲げ変形による鉛直変位 δ_G と継手回転量による鉛直変位 δ_R の累加である。したがって、継手位置で剛塑性として回転すると仮定した場合、継手回転量と部材角の関係式は次の式となる。

$$\theta_J = \frac{L}{L_R} \cdot R - \frac{M_{J-u}}{3 \cdot E \cdot L_R \cdot (L_R - L_J)} \left\{ \frac{\left(L_R - \frac{L_J}{2}\right)^3}{I_G} + \frac{L^3 - \left(L_R - \frac{L_J}{2}\right)^3}{I_B} \right\} \quad (5)$$

ここに、 R : 部材角である。

4. 試験体

部材重量を基準とし、異なる部材ランクによる構造特性の比較をする。したがって、同一スパンに対してFAランク部材の梁断面積と同等となるように幅厚比を工夫してFCランク部材の梁を設計した。(1)式および(2)式を満足するように設計した試験体断面形状および断面諸量をそれぞれ図6、表1に示す。また、(3)式および(4)式によって算出した塑性ヒンジモーメント、弾性剛性を表1に併記する。また、図7に理論曲線を示す。表1より、FCランク試験体は梁断面二次モーメントが1.84倍となり、梁断面係数は1.41倍大きくなるのがわかる。また、崩壊荷重および弾性剛性は、FCランク試験体のほうが、それぞれ1.27倍、1.65倍大きくなった。

FCランク部材を使用することで、剛性、耐力共に大きくなるのが確認できた。これは、FCランク部材の方が要求性能を基準としたとき、より小さな断面積の部材で設

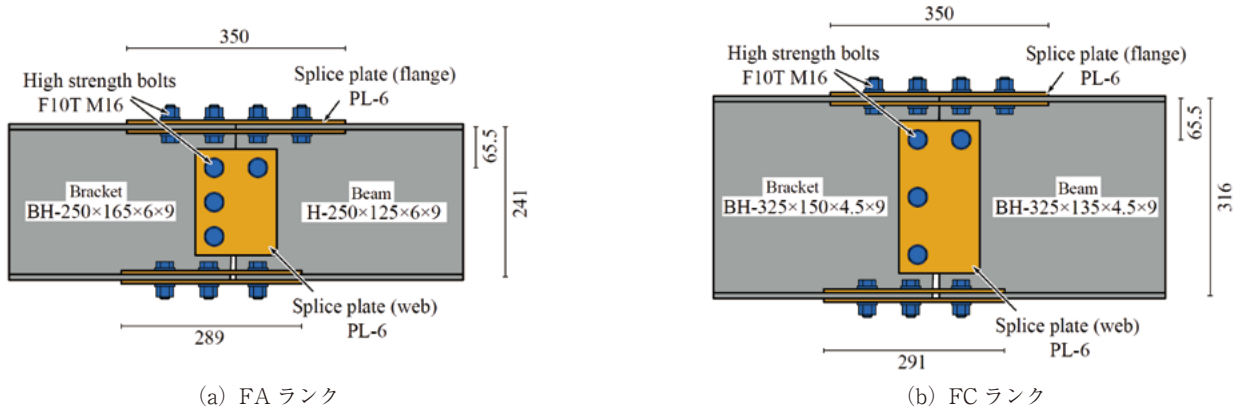


図6 試験体形状

表1 断面諸量および構造特性

	断面積 A (mm ²)		断面二次モーメント I (mm ⁴)		断面係数 Z (mm ³)		塑性ヒンジモーメント M_{ju} (kN·m)	崩壊荷重 P_u (kN)	弾性剛性 K (kN/mm)
	梁	ブラケット	梁	ブラケット	梁	ブラケット			
FA ランク	3642	4362	3.9×10^7	4.9×10^7	3.1×10^5	4.0×10^5	58.0	58.0	6.6
FC ランク	3812 (1.05)	4082 (0.94)	7.2×10^7 (1.84)	7.8×10^7 (1.58)	4.4×10^5 (1.41)	4.8×10^5 (1.22)	73.8 (1.27)	73.8 (1.27)	11.0 (1.65)

(): FA ランクに対する比

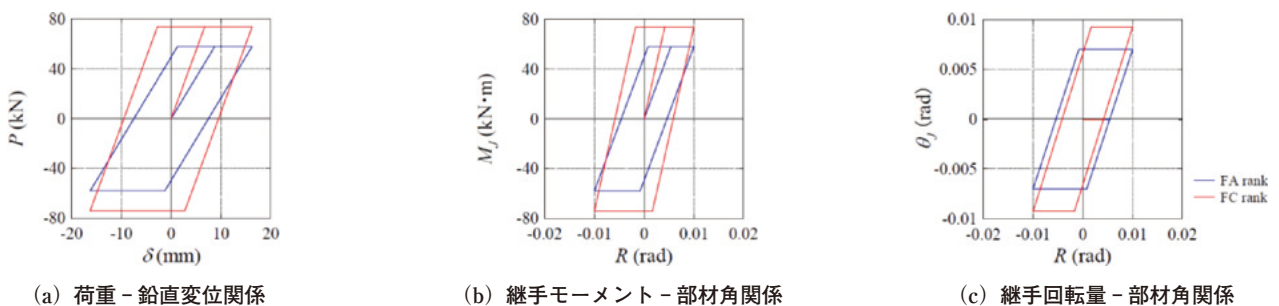


図7 理論曲線

計可能であることを意味し、軽量で高剛性の構造物を実現することができる。したがって、FC ランク部材を使用する優位性を示すことができた。

5. まとめ

本論文では、梁継手塑性ヒンジを導入することで幅厚比制限を緩和し、FC ランク部材を使用する優位性について検討した。試設計の一事例ではあるが、通常使用されるFA ランク部材と比較して、FC ランク部材を使用した場合、1.27倍の耐力、1.65倍の弾性剛性を発揮することが確認できた。今後、載荷実験を実施し、梁継手塑性ヒンジを

導入することでFC ランク部材を使用することができ、軽量で高剛性の構造物実現について継続的に研究を行っていく。

文献

- [1] 日本建築学会・塑性設計指針 第3版 第1刷・2017.2
- [2] 一般財団法人 建築行政情報センター・2015版 建築物の構造関係技術基準解説書・2015.10
- [3] 中村亮太・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・日本建築学会中国支部研究報告集 第44巻・2021