

有限要素法を用いた半剛結鋼門型骨組の弾塑性挙動性状に関する数値解析的検討

Numerical analysis on elasto-plastic behavior of semi-rigid portal frame by means of FEM

室蘭工業大学大学院 ○正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

半剛結接合を有する鉄骨骨組構造の耐荷性状に関する数値解析的研究は、柱梁接合部を非線形なバネ要素にモデル化して行われるのが一般的である¹⁾。しかしながら、ボルト系接合に代表される半剛結接合の場合、その挙動特性は、接合部構成要素間の接触問題や、各要素の変形等によって大きく影響を受けることが明らかになっている^{2), 3)}。したがって、精度の高い結果を得るためには、接合部剛性特性の適切なモデル化が極めて重要である。このため、柱梁接合部の剛性特性を合理的かつ簡易にモデル化する研究が国内外で数多く実施されている^{4)~6)}。

一方、近年のコンピュータ性能の飛躍的向上によって、半剛結接合を対象とした三次元有限要素法による数値解析が可能な状況となってきた。事実、半剛結接合のみを対象とした数値解析的検討によって、アングル材や高力ボルト等を詳細にモデル化することにより、実挙動をほぼ正確に再現できることが明らかになっている⁷⁾。しかしながら、実骨組構造に半剛結接合を適用した場合の接合部挙動は、柱材の拘束効果によって、接合部単体のそれとは異なる特性を有するとの報告もある⁸⁾。

このような背景より、本研究では実骨組構造を対象に、柱梁接合部を構成するアングル材や高力ボルトの他、柱や梁材を詳細にモデル化した場合の半剛結門型骨組の耐荷特性について、三次元有限要素法による弾塑性解析を実施した。また、併せて接合部のみをモデル化する場合の解析も実施し、両者を比較することにより、柱材の拘束効果についても数値解析的に検討を試みた。さらに、同一部材を用いた剛結骨組についても解析を行い、半剛結接合骨組との比較も行った。なお、本解析には、構造解析用汎用プログラム ABAQUS (Ver. 6.8)⁹⁾を使用した。

2. 数値解析仮定

2.1 解析対象骨組

本解析に用いた鋼骨組は、文献 10 に示されている半剛結門型鋼骨組を基本として、各部材の寸法を我が国の

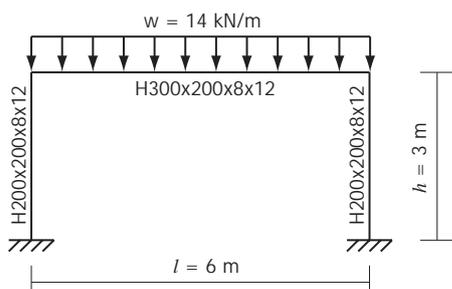


図 1 解析骨組

基準に準拠するように若干修正をしたものである。柱および梁材は、H200×200×8×12, H300×200×8×12 (ともに SS400) である。図 1 および表 1 には、解析対象骨組の形状寸法および各部材の諸元を示している。

柱梁接合部は、図 2 に示すように、L150×100×12 のアングル材 2 枚と高力ボルト (F10T, M20) 6 本を用いて、両者を接合している。接合部近傍の柱材には、柱フランジの局部変形を防ぐために、板厚 12 mm の補剛材を 2 本設置している。柱フランジ表面と梁材端部とのクリアランスは、アングル材厚と等しく 12 mm としている。また、ボルト孔径は 22 mm である。なお、剛結接合を仮定する場合には梁材端と柱フランジ表面を結合している。

2.2 数値解析モデル

解析モデルは、骨組全体を対象として、(1) 柱梁接合部を半剛結接合とする場合、(2) 剛結接合とする場合、および (3) 半剛結接合のみを対象とする場合の 3 種類である。図 3 には、本解析で用いた解析モデルの概略および要素分割状況を示している。

本数値解析では、モデル化を可能な限り正確に行うことを前提に、梁材、柱材、アングル材および高力ボルトは全て 8 節点固体要素を用いてモデル化している。なお、解析モデルは対称性を考慮して 1/2 モデルとしている。総要素数および総節点数は、剛結骨組モデルの場合で 19,376 および 11,400、半剛結骨組モデルの場合で

表 1 部材諸元

部材	形鋼
梁 (SS400)	H300x200x8x12
柱 (SS400)	H200x200x8x12
アングル材	L150x100x12
高力ボルト	F10T, M20
死荷重	14 kN/m

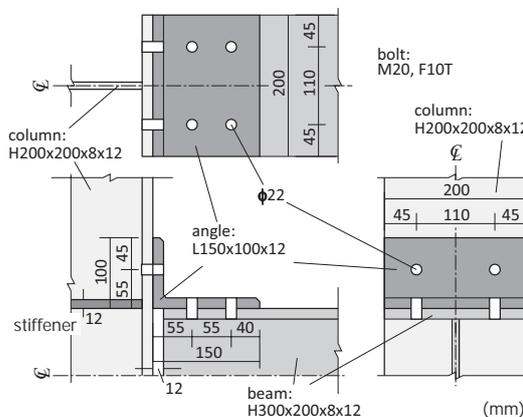


図 2 柱梁接合部の詳細 (半剛結接合)

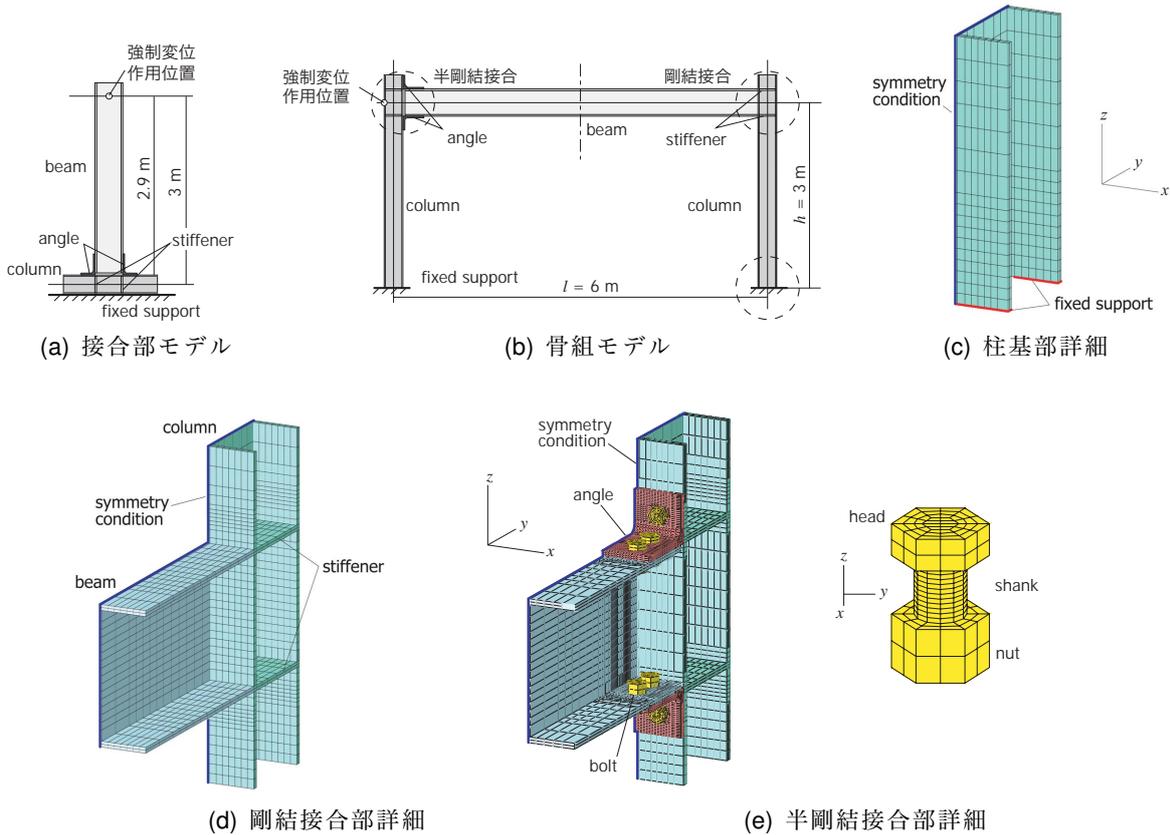


図3 要素分割状況

表2 使用鋼材の力学的特性

	降伏応力 f_y (MPa)	最大荷重 f_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	伸び (%)
柱材	302	458	205	0.3	41.9
梁材	233	426	202		41.1
アングル材	285	480	209		37.4
高力ボルト	1,060	1,098	212		19.7

28,300 および 45,599, 接合部モデルの場合で 12,598 および 20,222 である。

半剛結接合における高力ボルトは、図3(e)に示すようにボルト頭部とナットを一体化してモデル化している。また、(1)梁および柱材とアングル間、(2)ボルト頭部およびナットと各部材間、(3)ボルト軸部とボルト孔間には、接触・剥離が考慮可能な接触面を定義している。接触面には摩擦を考慮し、梁および柱材とアングル間の摩擦係数は0.4と設定した。また、本解析では、設計指針¹¹⁾に準拠して高力ボルトに182 kNの初期張力を導入している。

2.3 材料物性値

表2には、各部材の材料物性値を一覧にして示している。本解析では、既往の研究⁷⁾で実施された引張試験から得られた物性値を与えることとし、真応力-真ひずみ関係を表4に示すように多直線で近似している。降伏判定は、von Misesの条件に従うこととし、硬化則は等方便化則を適用した。

2.4 数値解析方法

本解析では、ボルト張力を導入後、骨組モデルでは、

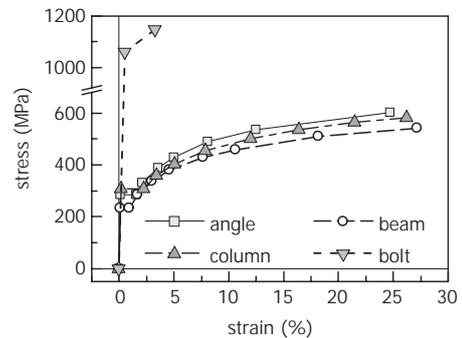


図4 真応力-真ひずみ関係

死荷重を含む自重を作用させ、その後図3(a)および(b)に示す強制変位作用位置に水平変位 δ を与えることにより行っている。また、併せて、死荷重を作用させない解析も実施している。解析は荷重載荷点の変位が層間変形角 δ/h の1/10程度($\delta=300$ mm)となるまで実施した。なお、本解析では、幾何学的非線形性は考慮しているものの、残留応力や初期不正については無視することとした。また、梁材の横倒れ座屈についても、実構造では床スラブが設置されていることより、考慮しないものとした。

3. 数値解析結果および考察

3.1 水平荷重-水平変位関係

図5には、剛結および半剛結骨組モデルにおける強制変位作用点の水平荷重 H と水平変位 δ の関係を示してい

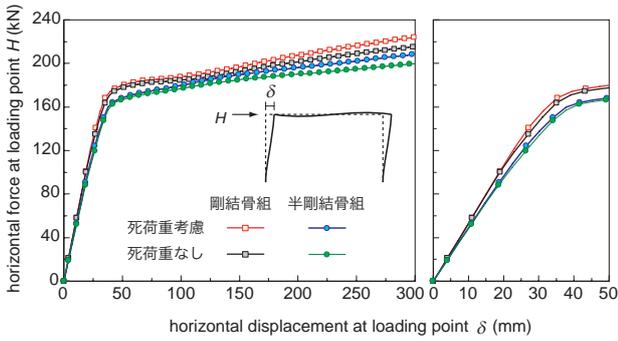


図5 水平荷重－水平変位関係

る。図には、死荷重の有無についても併せて示している。図より、両骨組モデルにおける初期勾配を比較すると、剛結骨組モデルが半剛結骨組モデルよりも若干大きく示されていることが分かる。これは、柱梁接合部の剛性差によるものと考えられる。また、いずれの骨組においても、水平変位 δ が、 $\delta = 35 \sim 50 \text{ mm}$ で剛性勾配が緩やかとなり、その後ほぼ線形な剛性を保っている。層間変形角 $\delta/h = 1/100$ に相当する $\delta = 30 \text{ mm}$ までの領域では、いずれの骨組モデルにおいても、骨組全体としてはほぼ線形な挙動を示していることが確認できる。なお、死荷重の有無に着目すると、いずれの骨組の場合においても、 $\delta < 100 \text{ mm}$ の領域では、その影響が小さいことが分かる。

図6には、水平変位 $\delta = 30, 60, 100 \text{ mm}$ における柱梁接合部の変形状況と Mises 応力分布を、両接合形式で比較して示している。図より、 $\delta = 30 \text{ mm}$ の場合には、剛結接合において柱材のパネルゾーン（以後、単にパネルゾーン）が降伏している。一方、半剛結接合の場合には、アングル材の一部に降伏応力 ($f_y = 285 \text{ MPa}$) を超える応力が発生しているものの、パネルゾーンの降伏は見られない。

次に、 $\delta = 60 \text{ mm}$ に着目すると、剛結接合の場合にはパネルゾーンの隅角部に応力が拡大する傾向が見られる。半剛結接合の場合には、上側アングル材のかかと部が柱フランジ表面から離間しているものの、パネルゾーンの降伏領域は小さい。 $\delta = 100 \text{ mm}$ の場合には、剛結接合においてパネルゾーンの隅角部に 400 MPa を超える応力が発生している。一方、半剛結接合では、アングル材の変形が大きくなるとともに、パネルゾーンの降伏領域も拡大していることが分かる。

3.2 モーメント－相対回転角関係

図7には、柱材の拘束効果を確認するために、接合部モデルと骨組モデルにおける接合部モーメント M と相対回転角 θ_r 関係を比較して示している。なお、接合部モーメント M について、接合部モデルの場合には、載荷点荷重 H_c に柱フランジ表面までの距離 (2.9 m) を乗じることにより算出している。一方、骨組モデルの場合には、梁材のスパン中央部から左右に2断面を取り、その断面内のひずみ分布を用いて、梁材端の曲げモーメントを算出している。また、相対回転角 θ_r については、梁材のフランジ端部の回転角 θ_{bf} と柱フランジ表面の回転角 θ_{cf} の差を用いて算出している。なお、骨組モデルにお

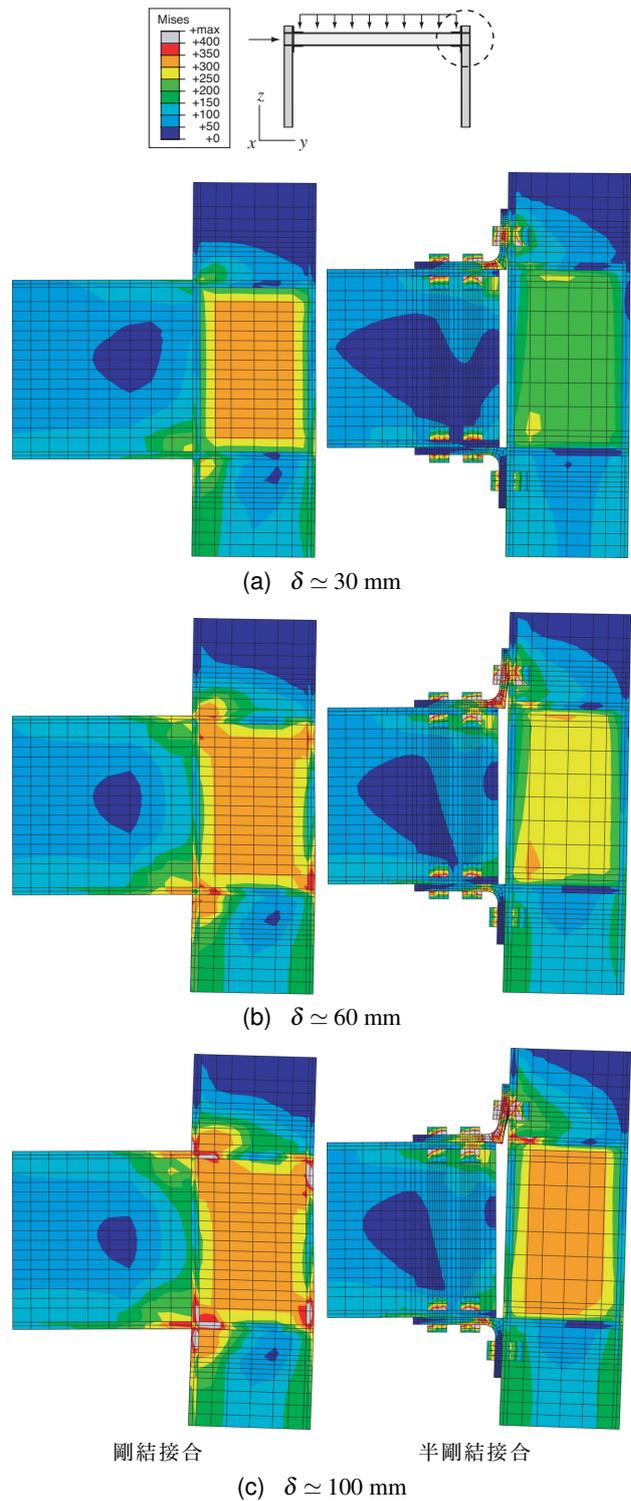


図6 剛結および半剛結接合部の変形状況

ける結果は、死荷重を無視したものである。

図より、初期剛性および最大耐力等を比較すると、骨組モデルが接合部モデルよりも大きく示されていることが分かる。これは、実骨組構造において柱材の拘束効果による影響が存在することを意味している。すなわち、一般に実施されている接合部の実験結果は、半剛結接合を実骨組構造に適用した場合と比較して、剛性を過小に評価する傾向にあり、設計的には安全側の評価を与えることを示唆している。

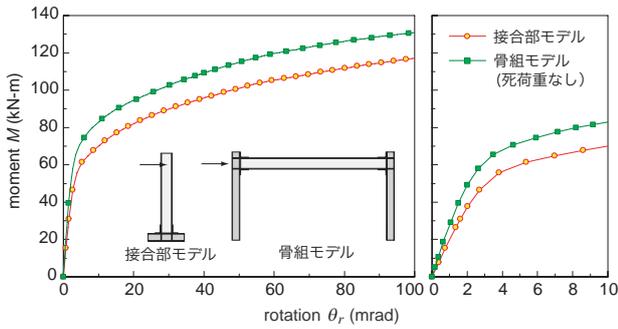


図7 解析モデルによる $M - \theta_r$ 関係の比較

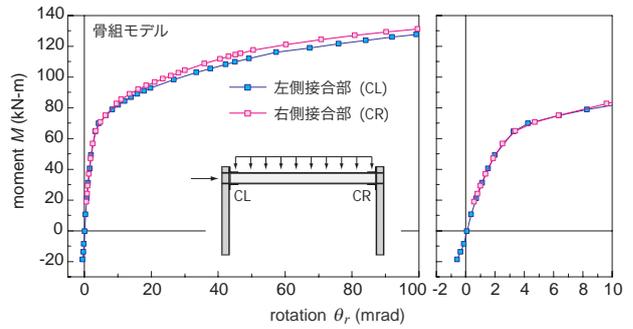


図9 接合部位置による $M - \theta_r$ 関係の比較

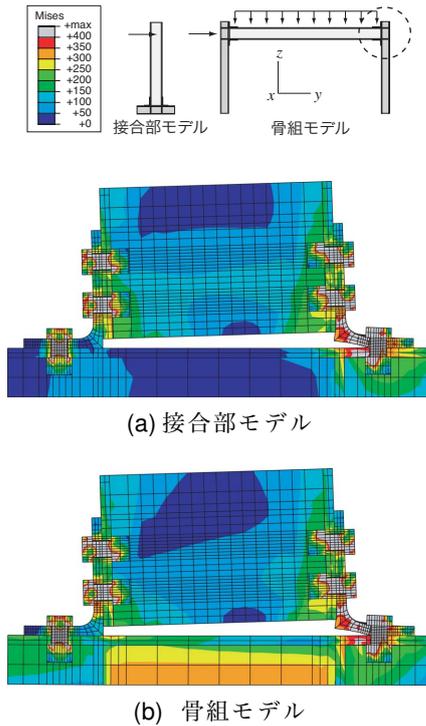


図8 柱梁接合部の変形状況 ($\theta_r \approx 30$ mrad)

図8には、相対回転角 $\theta_r \approx 30$ mradにおける接合部および骨組モデルの変形状況と Mises 応力分布を示している。図はボルト中央断面で切断して表示したものである。図より、同一相対回転角 θ_r における両モデルを比較すると、曲げ圧縮を受けるアンクル材（左側）の応力分布に若干の違いが見られることが分かる。これは、骨組モデルにおいて、柱材の拘束効果によって、梁材に軸圧縮力が作用していることを示唆している。

図9には、死荷重を考慮した場合の半剛結骨組モデルにおいて、左右接合部の $M - \theta_r$ 関係を示している。なお、相対回転角 θ_r は反時計回りを正としている。図より、死荷重の影響により、左右接合部における初期値が異なることが確認される。また、水平荷重作用後は、 $\theta_r = 10$ mrad 程度までは、両接合部ともに同じ経路を示しているものの、それ以降は右側接合部が左側接合部に比較して若干大きな剛性を示している。なお、この経路は、死荷重を考慮しない骨組モデルの結果（図7参照）とほぼ等しいことを確認している。

4. まとめ

本論文では、ボルト系接合を詳細にモデル化した実半剛結門型骨組構造を対象に、三次元有限要素法による弾塑性解析を試みた。また、併せて剛結門型骨組や接合部のみを対象とした解析も実施し、接合部剛性や柱の拘束効果の影響について検討を行った。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようである。

- (1) 水平変位が 30 mm 程度までは、両骨組モデルともにほぼ弾性的な挙動特性を示すこと、
- (2) 水平変位の増大に伴い、剛結接合の場合には柱のパネルゾーンが降伏するのに対し、半剛結接合の場合にはアンクル材が降伏する傾向にあること、
- (3) 実骨組構造における柱の拘束効果を数値解析的に確認した。これより、接合部のみの実験結果は、実骨組構造に適用した場合と比較して、接合部の剛性を低く見積もることとなり、設計的には安全側の評価を与えること、

等を明らかにした。

参考文献

- 1) Chen, W.F. and Kim, S. E. : *LRFD steel design using advanced analysis*, CRC Press, 1997.
- 2) Faella, C., Piluso, V., and Rizzano G. : *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software*, CRC Press, 2000.
- 3) 佐藤陽介, 小室雅人, 岸 徳光: トップ&シートアンクル接合の接合部剛性特性に関する実験的検討, 鋼構造年次論文報告集, **15**, 121-128, 2007.11
- 4) Kishi, N., and Chen, W.F. : Moment-rotation relations of semi-rigid connections with angles, *J. Struct. Div., ASCE*, **116**(7), 1813-1834, 1990
- 5) CEN, *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of Joints*, prEN 1993-1-8, 2003.
- 6) (社)日本鉄鋼連盟: 高力ボルト接合による靱性型鉄骨架構の構造設計マニュアル, 半剛接鉄骨架構の実用化検討委員会, 2003.
- 7) 小室雅人, 岸 徳光, 佐藤陽介: アンクル系接合の接合部履歴挙動特性に関する実験的・解析的研究, 鋼構造年次論文報告集, **16**, 245-252, 2008.11.
- 8) 田沼吉伸, 橋本健一: アンクル材を接合金物として用いた半剛柱はり接合部の挙動, 日本建築学会構造系論文集, **515**, 123-130, 1999.1.
- 9) *ABAQUS/Standard user's manual, Ver. 6.8*, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2008.
- 10) Chen, W.F., Goto, Y., and Liew, J.Y.R., *Stability Design of Semi-Rigid Frames*, John Wiley & Sons, 1995.
- 11) 高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 日本建築学会, 2003.