

半剛結門型骨組の弾塑性地震応答解析

Elasto-Plastic Seismic Response Analysis of Semi-Rigid Portal Steel Frame

室蘭工業大学 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)
 室蘭工業大学 ○学生員 菅野 昌生 (Masao Kanno)

1. はじめに

接合部に非線形な剛性特性を有する半剛結鋼骨組は、一般に剛結鋼骨組と比較して変形しやすい構造であることから、特に耐震安定性の問題が指摘されてきた。しかしながら、近年、地震動などの動的外力を受ける半剛結鋼骨組の動的応答特性に関する研究成果により、半剛結鋼骨組の動的挙動特性は、剛結鋼骨組のそれと比較して必ずしも不利とはならないことが明らかになってきた。これは、半剛結鋼骨組が接合部に非線形な剛性特性を有することより、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果が外部エネルギーに対して有効に作用するためと考えられる。一方、半剛結鋼骨組の応答特性に関する研究の多くは、接合部の剛性特性を線形あるいはバイリニア型に簡略化したものが多く¹⁾、非線形な $M-\theta_r$ 曲線を考慮した研究は非常に少ない。

このような背景のもと、著者等はより合理的な半剛結鋼骨組の耐震設計手法の確立を目的に、接合部の非線形な $M-\theta_r$ 曲線を考慮した鋼骨組の動的応答特性に関する研究を行ってきた²⁾。それらの研究では、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果や応答特性の把握を主な目的としていることより、半剛結接合部の非線形な剛性特性は考慮するものの、柱、梁材等の部材は全て弾性体として取り扱ってきた。しかしながら、巨大地震が半剛結鋼骨組に作用する場合を想定すると、柱、梁材は弾性から弾塑性状態に移行することが予想される。

このような観点から、本研究では、より実状に即した半剛結鋼骨組の動的応答特性を把握することを目的に、梁および柱材を弾塑性体と仮定する場合の地震応答解析を実施し、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果や骨組の応答特性に及ぼす部材の塑性化の影響について検討を行っている。また、本研究では骨組部材における自重の影響を考慮した場合の地震応答解析も実施し、骨組部材の自重が半剛結鋼骨組の断面力、変形モードおよび接合部のエネルギー吸収量に及ぼす影響についても検討を行っている。なお、解析には動的汎用構造解析プログラムである LS-DYNA³⁾ を使用している。

2. 数値解析仮定

2.1 骨組のモデル化

図-1 に本解析で対象とした門型骨組を示している。図中に節点番号、部材番号、使用形鋼を付記している。なお、使用形鋼は米国の設計基準 AISC-LRFD⁴⁾ に準拠している。載荷荷重は死荷重として $w = 14.58 \text{ kN/m}$ を設

定している。本研究では、半剛結鋼骨組の動的応答特性に及ぼす部材の塑性化の影響を検討するために梁および柱材の応力-歪関係には、図-2 に示すような降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等硬化型バイリニアモデルを適用した。表-1 にはその物性値を示している。なお、鋼材は AISC-LRFD における“A36”と設定している。

解析精度を確保するために柱材を10分割、梁材を16分割し、梁材に作用する死荷重 w は、等価な集中質量として梁材節点に付加することとした。なお、解析には幾何学的非線形のみを考慮している。

2.2 接合部のモデル化

柱-梁接合部の変形挙動を正確に評価するためには、軸力、せん断力、曲げモーメントの3成分を考慮する必要がある。本研究では、接合部挙動には曲げモーメント M による相対回転角 θ_r が支配的であると判断し、軸力およびせん断力による変形は無視することとした。すなわち、柱-梁接合部には、曲げモーメントに関する非線形な回転バネのみが存在するものとして、構成則のモデル化を行っている。また、履歴挙動特性に関しては、実験結果の蓄積が少なく適切な評価モデルが公表されるに至っていないことより、本研究では単純で比較的履歴挙動特性を表現していると考えられている Independent Hardening Model⁵⁾ を用いることとした。図-3 にその挙動特性の概略を示している。なお、このような履歴特性に関しては、LS-DYNA にあらかじめ組み込まれている

表-1 鋼材の物性値

鋼種	弾性係数 E_s (GPa)	降伏応力 σ_y (MPa)	ポアソン比 ν_s	単位体積質量 ρ_s (kg/m ³)
A36	206	250	0.3	7.85×10^3

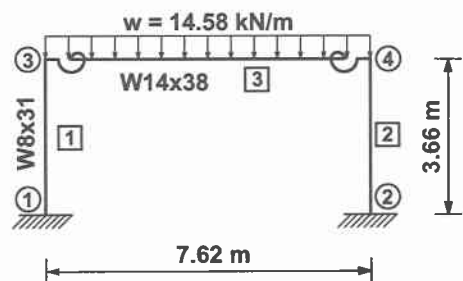


図-1 解析対象骨組

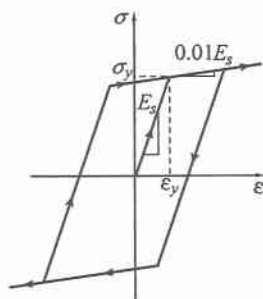


図-2 鋼材の応力-歪関係

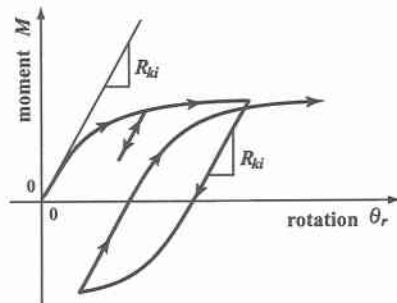


図-3 Independent Hardening Model

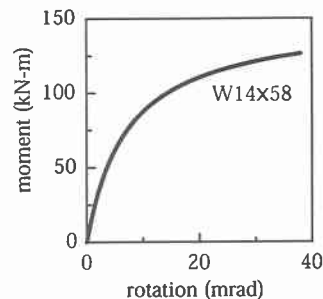


図-4 解析に用いた $M-\theta_r$ 曲線

表-2 固有振動数一覧

接合条件	固有振動数 f_0 (Hz)
剛結接合	2.69
半剛結接合	2.46
ピン接合	1.55

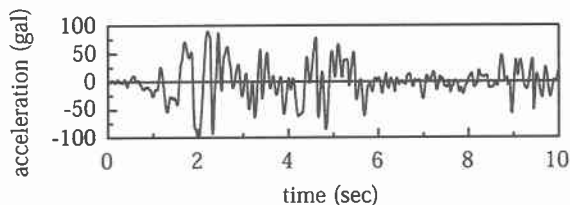


図-5 エル・セントロ NS 成分波形 (100gal)

離散要素を用いて定義した。

2.3 接合部剛性評価

柱-梁接合部の非線形な $M-\theta_r$ 特性評価モデルとして、三要素パワーモデルを採用した。このモデルは、接合部初期剛性 R_{ki} 、限界曲げ耐力 M_u および形状指数 n の3つのパラメータから構成されるものである。本解析では、代表的な半剛結接合の挙動を示すと考えられる組み合わせとして、 $R_{ki} = 5 E_s I_b / L_b$ 、 $M_u = 0.6 M_{pb}$ 、 $n = 1$ を設定した。ここで、 $E_s I_b$: 梁材の曲げ剛性、 L_b : 部材長、 M_{pb} : 梁材の全塑性曲げモーメントである。図-4には解析に用いた接合部 $M-\theta_r$ 曲線を示している。

2.4 地震応答解析

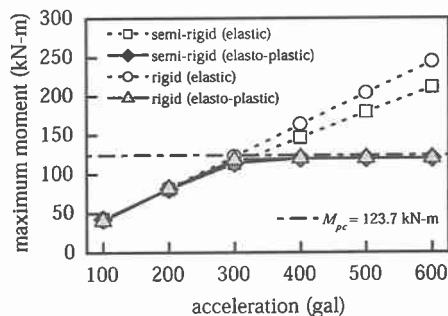
本研究では、接合部の履歴挙動特性や部材の塑性化の影響に伴う各断面力に関する詳細な検討を行うため、入力加速度波形として実地震波を所定の加速度に正規化して解析を行っている。図-5には、本解析で使用したエル・セントロ NS 成分波形を 100 gal に正規化したものを示している。

解析は、入力加速度 α_i を 100 gal ~ 600 gal まで 100 gal 毎に正規化した入力地震波形を物体力として、骨組要素および集中質量に作用させることにより行った。なお、解析時間は主要動を含む 10 秒としている。

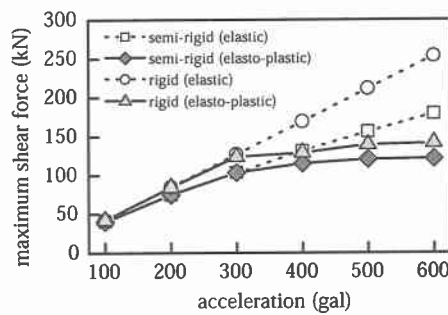
表-2には、接合部剛性として図-4に示した接合部 $M-\theta_r$ 曲線の初期剛性 R_{ki} を線形剛性として仮定する場合の最低次固有振動数 f_0 を示している。また、表中には参考値として剛結接合およびピン接合の場合についても示している。表より、接合部剛性が小さいほど、固有振動数は減少することが確認できる。なお、減衰定数 h は表-2に示す最低次固有振動数に対して、質量比例型減衰を採用し、 $h = 2\%$ と設定している。

3. 解析結果および考察

本研究では、まず自重の影響を無視した場合の弾塑性地震応答解析を実施し、半剛結鋼骨組の部材が弾塑性に移行した場合の動的応答特性や接合部の履歴減衰効果を



(a) 基部曲げモーメント (節点番号 1)



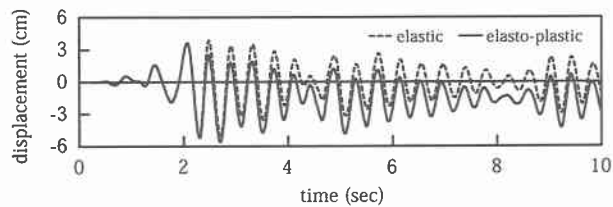
(b) 層せん断力

図-6 自重の影響を無視した場合の最大断面力値と入力加速度の関係

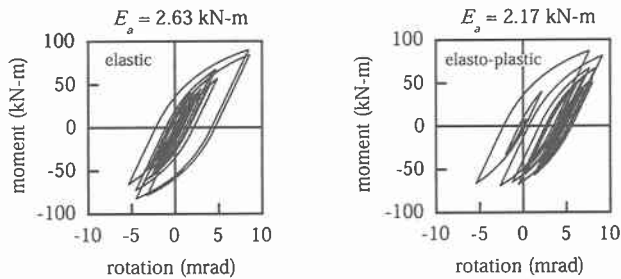
検討する。次に、自重の影響を考慮した場合の弾塑性地震応答解析を実施し、骨組部材の自重が半剛結鋼骨組の動的応答特性に及ぼす影響について検討を行っている。

3.1 自重の影響を無視した場合の弾塑性地震応答解析

図-6には、部材を弾性および弾塑性体と仮定する場合の最大断面力値と入力加速度の関係を示している。なお、接合部を剛結接合とした場合の結果についても併せ



(a) 応答変位波形



(b) 接合部 $M-\theta$ 履歴曲線

図-7 応答変位波形と接合部 $M-\theta$ 履歴曲線
($\alpha_i = 400$ gal, 節点番号3)

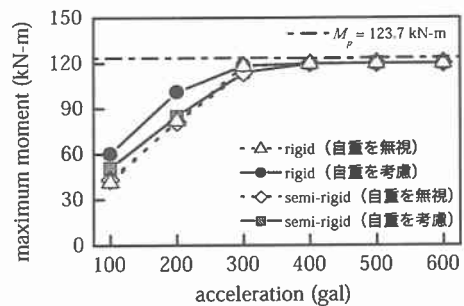
て示している。また、(a) 図の最大基部曲げモーメントは、部材が最も早く塑性化したと考えられる柱材基部(節点番号1)に着目している。なお、(a) 図中の M_{pc} は柱材の全塑性曲げモーメントを示している。

まず、(a) 図に示している最大基部曲げモーメントに着目すると、部材を弾性体と仮定する場合の基部曲げモーメントは剛結鋼骨組を仮定する場合のそれに比較して、入力加速度の増大とともに低下していることがわかる。これは、入力加速度が大きいくほど半剛結接合部の履歴挙動に伴う減衰効果が大きくなるためと考えられる。一方、部材を弾塑性体と仮定する場合の両骨組の応答値を比較すると、入力加速度の大きさにかわらず同程度の値を示している。また、入力加速度 $\alpha_i \geq 400$ gal で柱材の全塑性曲げモーメント M_{pc} と同程度の値を示しており、柱材基部で塑性化を生じていることがわかる。

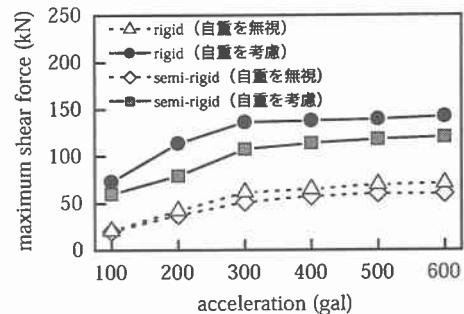
次に、(b) 図に示している最大層せん断力に着目すると、部材を弾性体と仮定する場合には基部曲げモーメントと同様の傾向を示している。しかしながら、部材を弾塑性体と仮定する場合は層せん断力は、基部曲げモーメントの場合と異なり、剛結鋼骨組を仮定する場合に比較して低下していることがわかる。これより、本解析の範囲においては、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果は曲げモーメントよりも層せん断力を低減させる効果が大きいことがわかる。

図-7には、部材の塑性化が生じたと考えられる入力加速度 $\alpha_i = 400$ gal の応答変位波形と接合部 $M-\theta$ 履歴曲線を示している。また、部材を弾性体と仮定する場合の結果についても併せて示している。着目点は、梁部材左端部(節点番号3)である。なお、(b) 図における E_a は履歴ループで囲まれる面積を累積して求められるエネルギー吸収量を示している。

(a) 図より、部材の塑性化の影響に着目すると、弾塑性体と仮定する応答波形は、 $t = 2.5$ 秒以降で振動中心が一



(a) 基部曲げモーメント(節点番号1)



(b) 層せん断力

図-8 自重の影響を考慮した場合の最大断面力値と入力加速度の関係

方向に変位し、柱材の塑性化が生じていることがわかる。一方、(b) 図に示している接合部 $M-\theta$ 履歴曲線に着目すると、部材を弾塑性体と仮定する場合には、応答変位波形における振動中心の変位に伴い履歴ループも一方向に移動していることがわかる。また、両者のエネルギー吸収量 E_a を比較すると、弾塑性体と仮定する場合には弾性体のそれよりも約 0.5 kN-m 小さく示されている。これは、柱材の塑性化によるエネルギー吸収効果により、接合部のエネルギー吸収量が減少したためと考えられる。

3.2 自重の影響を考慮した場合の弾塑性地震応答解析

前項では、自重の影響を無視した場合の弾塑性地震応答解析を行い、塑性化が生じた場合の骨組における動的応答特性を検討した。ここでは、自重の影響を考慮した場合の解析結果について検討を行う。

図-8には、自重の影響を考慮する場合の最大断面力値と入力加速度の関係を示している。なお、自重の影響を無視する場合の解析結果についても併せて示している。まず、(a) 図に示している基部曲げモーメントに着目すると、剛結鋼骨組の場合には、自重の影響を考慮することにより応答値が大きくなる示されていることがわかる。一方、半剛結鋼骨組の場合には、自重の影響の有無にかかわらず同程度の値を示していることがわかる。これは、自重を考慮することにより半剛結鋼骨組における接合部の履歴減衰効果が大きくなったため、応答値が低減されたものと考えられる。このような傾向は、(b) 図に示している最大層せん断力においてより顕著に示されている。なお、この詳細については後述することとする。

図-9には、入力加速度 $\alpha_i = 200$ gal の場合における骨組のモード図とその場合の梁材左端部(節点番号3)

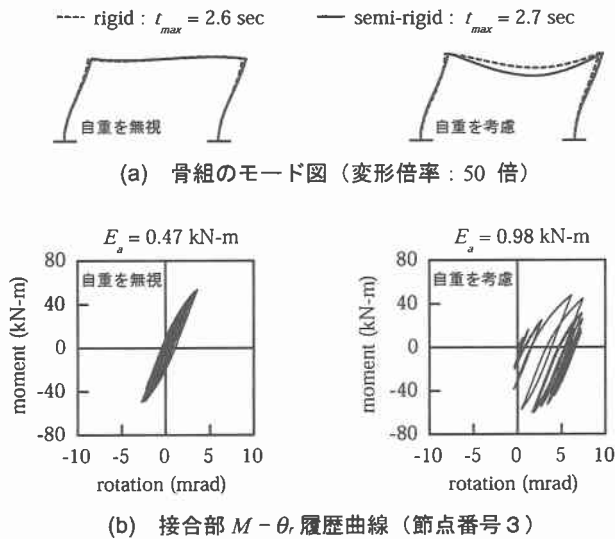


図-9 骨組のモード図と
接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線 ($\alpha_i = 200 \text{ gal}$)

における接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線を示している。なお、(a) 図には骨組が最大変位を示した時刻 t_{max} 、(b) 図にはエネルギー吸収量 E_a も併せて付記している。また、(b) 図中の自重の影響を考慮する場合に関しては、自重により発生する初期曲げモーメントおよび相対回転角を零に補正している。

まず、(a) 図に示している骨組のモード図に着目すると、自重の影響を無視した場合には、剛結および半剛結鋼骨組は大略類似の変形状を示していることがわかる。一方、自重の影響を考慮した場合には、自重を無視した場合と異なり梁部材において大きな変形を生じていることがわかる。特に、半剛結鋼骨組の場合には、梁部材の変形が剛結鋼骨組よりも大きい。

次に、(b) 図に示している接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線に着目すると、自重の影響を考慮する場合の接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線は、自重の影響を無視する場合と異なり履歴ループが一方向に移動していることがわかる。これは、自重を考慮する場合、骨組の横移動量と鉛直荷重である自重によって発生する二次的なモーメントの効果 ($P-\Delta$ 効果) による影響と考えられる。また、この効果により、自重の影響を考慮した場合のエネルギー吸収量は、自重の影響を無視した場合に比較して約2倍程度大きいことがわかる。

図-10 には、接合部のエネルギー吸収量と入力加速度の関係を示している。着目点は、半剛結鋼骨組の梁部材左端部(節点番号3)である。図より、自重の影響を考慮する場合のエネルギー吸収量は、自重を無視する場合に比較して大きな値を示している。これは、前述の $P-\Delta$ 効果による影響と考えられる。また、両者のエネルギー吸収量を比較すると、入力加速度の増大に伴い両者の差が小さくなることがわかる。これは、部材が塑性化を生じた場合には、そのエネルギー吸収効果のために接合部の履歴に伴う減衰効果が低減することによるものと考えられる。

以上より、自重の影響を考慮する場合には、骨組の横

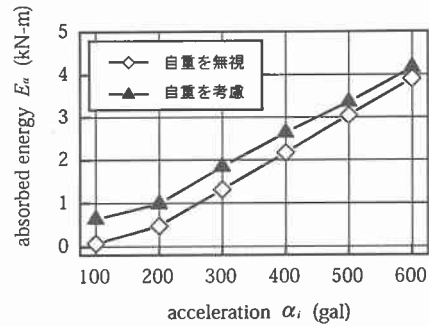


図-10 接合部のエネルギー吸収量と
入力加速度の関係(節点番号3)

移動量と自重によって発生する $P-\Delta$ 効果により、接合部の履歴に伴う減衰効果が大きくなり、骨組の断面力値を大きく低減させることに寄与することが明らかとなった。

4. まとめ

本論文では、半剛結鋼骨組の動的応答特性に及ぼす部材の塑性化の影響を検討するため、半剛結門型骨組を対象に弾塑性地震応答解析を実施した。また、骨組の自重の影響を考慮した場合の弾塑性地震応答解析を行い、自重が半剛結鋼骨組の動的応答特性に及ぼす影響についても検討を行った。得られた結果を整理すると、

- 1) 自重の影響を無視した場合の弾塑性地震応答解析より、部材が塑性化を生じた場合には、そのエネルギーによる吸収効果のため、半剛結接合部の履歴減衰効果は小さくなる。
- 2) また、応力-歪特性が弾性範囲にあるような入力加速度が小さい場合には、半剛結接合部の履歴減衰効果は小さい。
- 3) 自重の影響を考慮した場合の弾塑性地震応答解析より、自重による影響を考慮することにより、骨組の横移動量と鉛直荷重である自重によって二次的なモーメントの効果 ($P-\Delta$ 効果) が発生する。
- 4) その結果、接合部の履歴に伴う減衰効果が自重の影響を無視した場合より大きくなり、骨組の断面力値を大きく低減させることができる。

参考文献

- 1) Lui, E.M. and Lopes, A.: Dynamic analysis and response of semi-rigid frames, *Engineering Structures*, Vol.19(8), pp.644-654, 1997.
- 2) 小室雅人, 岸 徳光, 矢吹信喜, W.F. Chen: 正弦波加振を受ける半剛結門型骨組の動的応答特性, 土木学会, 応用力学論文集, Vol. 4, pp. 203-210, 2001.
- 3) Hallquist, J.O.: *LS-DYNA User's Manual version 960*, Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- 4) American Institute of Steel Construction: *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, 2nd Ed., Chicago, 1993.
- 5) Chen, W.F. and Saleeb, A.F.: Uniaxial behavior and modeling in plasticity, *Structural Engineering Report No. CE-STR-82-35*, School of Civil Engineering, Purdue University, 1982.