

正弦波加振を受ける半剛結門型骨組の弾塑性応答解析

Elasto-Plastic Dynamic Analysis of Semi-Rigid Portal Frame under Sinusoidal Wave Excitation

室蘭工業大学 ○正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)

室蘭工業大学 正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)

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が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に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、梁材など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、巨大地震などが半剛結鋼骨組に作用した場合を想定すると、梁、柱材は弾性から弾塑性状態に移行することが予想される。

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した場合の動的応答解析を実施し、骨組の応答特性におよぼす接合部剛性および部材の塑性化の影響について検討を行っている。ここでは、既往の研究成果²⁾と同様に接合部曲げ耐力の異なる4種類の接合部 $M-\theta_r$ 曲線を設定し、接合部曲げ耐力と変位応答倍率の関係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、使用形鋼に関しては AISC-LRFD 規準⁴⁾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およぼす部材の塑性化の影響を検討するため、梁および柱材を

完全弾塑性体と仮定している。表-1にはその物性値を示している。なお、鋼材は AISC-LRFD 規準における“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-2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離散要素を用いて定義した。

2.3 接合部剛性評価

半剛結接合部の剛性評価モデルは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

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

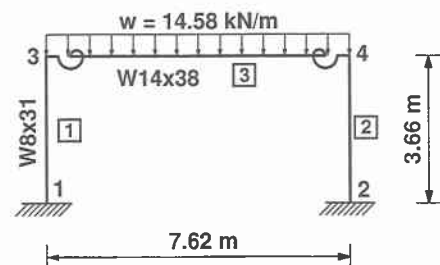


図-1 解析対象骨組

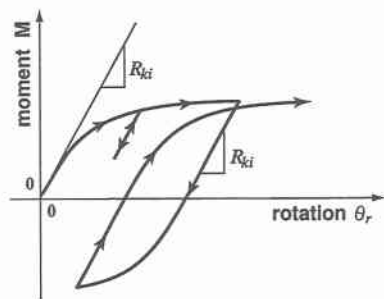


図-2 Independent Hardening Model

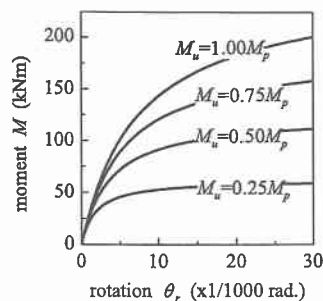
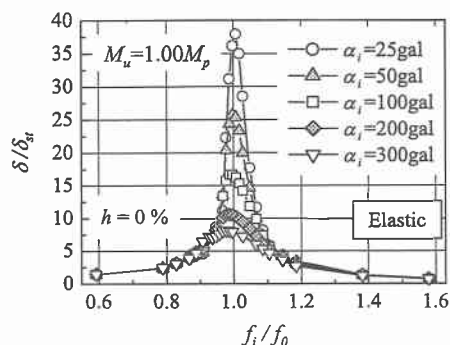
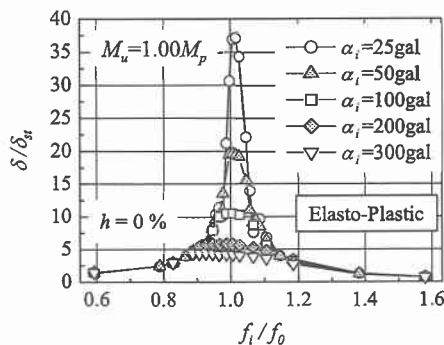


図-3 解析に用いた $M-\theta_r$ 曲線



(a) $M_u = 1.00 M_p$ の場合



(b) $M_u = 0.50 M_p$ の場合

図-4 変位応答スペクトルの比較 ($\alpha_i \leq 300 \text{ gal}$, $h = 0 \%$)

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	2.53
ピン接合	1.55

れている。本研究では、文献 2) と同様に接合部初期剛性 R_{ki} および形状指数 $n=1$ と一定とし、限界曲げ耐力 M_u を変化させている。接合部初期剛性 R_{ki} は、EC3⁶⁾ に規定されている接合部分類法を参考に $R_{ki} = 8E_s I_b / L_b$ ($E_s I_b$: 梁材の曲げ剛性, L_b : 部材長) と設定した。一方、限界曲げ耐力 M_u に関しては、梁材の塑性曲げモーメント M_p ($M_p = 250 \text{ kNm}$) を基準として、 $M_u = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 M_p$ の 4 種類に変化させている。図-3 には解析に用いた接合部 $M-\theta_r$ 曲線を示している。

2.4 動的応答解析

本研究では、接合部の履歴挙動や部材の塑性化の影響に伴う減衰特性に関する詳細な検討を行うため、入力加速度振幅 α_i 、加振振動数 f_i および質量比例型減衰としての減衰定数 h を変化させている。動的応答解析は、所定の入力加速度振幅 α_i および加振振動数 f_i を有する正弦加速度波形を物体力として骨組に作用させ、各応答値が定常状態に至るまで計算を行っている。なお、入力加速度波形は 10 周期で所定の振幅に至るように設定した。

解析は、以下の 2 種類について行っている。すなわち、1) 減衰定数 $h = 0 \%$ として、入力加速度振幅 α_i および加振振動数 f_i を変化させる場合、2) 入力加速度振幅 $\alpha_i = 100 \text{ gal}$ と一定とし、減衰定数 h を変化させる場合、である。表-2 には、接合部剛性として図-3 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した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

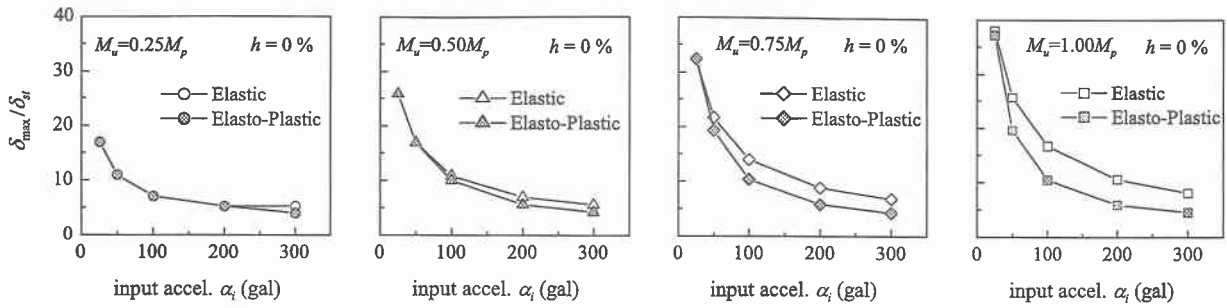


図-5 入力加速度振幅と最大変位応答倍率の関係 ($\alpha_i \leq 300$ gal, $h = 0$ %)

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。

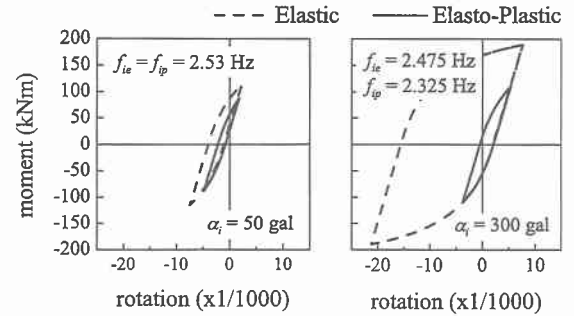
3. 解析結果および考察

3.1 入力加速度振幅と変位応答スペクトルの関係

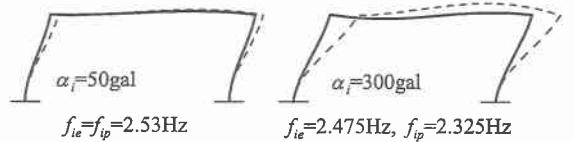
図-4には入力加速度振幅 α_i が $\alpha_i \leq 300$ gal の場合における変位応答スペクトルの一例として、 $M_u = 1.00 M_p$ および $0.50 M_p$ の結果を示している。図には、部材を弾性体と仮定した場合の結果²⁾も示している。図は縦軸に変位応答倍率（以後、単に応答倍率） δ/δ_{st} を、横軸に無次元加振振動数 f_i/f_0 を取って整理している。なお、応答倍率は入力加速度振幅 α_i を震度法的に作用させた場合の水平変位 δ_{st} に対する値として評価している。また、横軸は加振振動数 f_i を前述の固有振動数 f_0 ($f_0 = 2.53$ Hz) で無次元化している。なお、接合部の履歴減衰効果に関しては文献²⁾で詳細に述べられていることより、ここでは、部材の塑性化と骨組の応答特性の关系到限定して考察を行う。

(a) 図より、入力加速度振幅 α_i が非常に小さい $\alpha_i = 25$ gal 入力時では、弾性体および弾塑性体と仮定する場合の結果は、両者ほぼ等しい値を示していることがわかる。しかしながら、入力加速度振幅の増大 ($\alpha_i \geq 50$ gal) とともに、部材を弾塑性体と仮定する場合の最大変位応答倍率（以後、最大応答倍率）は、部材を弾性体と仮定する場合のそれよりも小さく示されている。これは、加振振動数 f_i と固有振動数 f_0 が近接し共振状態に近い場合には、骨組の応答が大きくなるとともに柱材基部の塑性化が生じ、それにより加振エネルギーが吸収されるためと考えられる。また、部材を弾性体および弾塑性体と仮定した両スペクトルの分布性状に着目すると、部材の塑性化の影響は、最大応答倍率を示す共振振動数近傍 ($0.9 \leq f_i/f_0 \leq 1.1$) で顕著であり、それ以外の振動数領域では、その影響はほとんどないことがわかる。なお、 $\alpha_i = 300$ gal 入力時の最大応答倍率を比較すると、部材を弾性体と仮定する場合には8程度であるのに対し、弾塑性体と仮定する場合には4.5と約44%低下している。

次に、(b) 図より、 $M_u = 0.50 M_p$ の場合について検討する。図より、 $M_u = 1.00 M_p$ の場合と同様、入力加速度振幅 α_i の増大とともに部材を弾塑性体と仮定する場合の結果は、弾性体と仮定する場合の結果よりも小さく示されている。しかしながら、その最大値の低下割合は、 $M_u = 1.00 M_p$ の場合よりも小さい。



(a) $M-\theta_r$ 履歴曲線

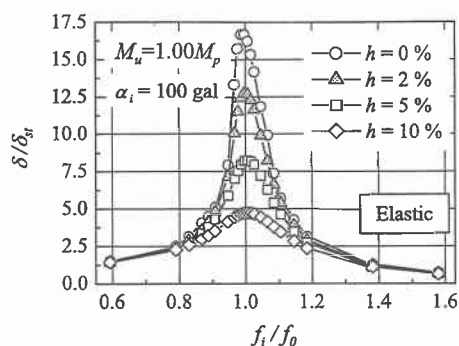


(b) 変形モード (変形倍率: 25 倍)

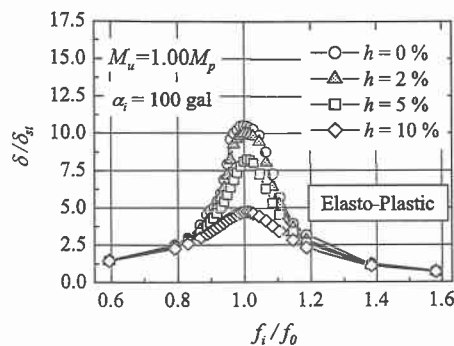
図-6 共振時における接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線と変形モード ($M_u = 1.00 M_p$, $h = 0$ %)

図-5には、入力加速度振幅 α_i と最大変位応答倍率の関係を示している。図より、接合部曲げ耐力の小さい $M_u = 0.25 M_p$ の場合には、入力加速度振幅が大きい $\alpha_i = 300$ gal 入力時においてのみ両者の値が異なっている。一方、接合部曲げ耐力の大きい $M_u = 1.00 M_p$ では、小さな入力加速度振幅 $\alpha_i = 25$ gal から、部材の塑性化の影響を受けていることがわかる。これより、接合部曲げ耐力 M_u が小さいほど、接合部の履歴挙動に伴うエネルギー吸収効果が大きく、柱材基部における曲げモーメントを低減できるものと考えられる。しかしながら、部材を弾塑性体と仮定する場合の入力加速度振幅 $\alpha_i = 300$ gal の応答倍率に着目すると、接合部限界曲げ耐力 M_u の大きさにかかわらず、最大応答倍率は4.5程度を示している。これより、柱材基部に塑性化が生じた場合には、接合部の履歴減衰効果に比較して部材の塑性化によるエネルギー吸収効果が大きくなるものと推察される。

図-6には、 $M_u = 1.00 M_p$ における共振時の接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線とその時の骨組の変形モードを示している。図は、入力加速度振幅 $\alpha_i = 50$ gal および 300 gal の場合の結果である。なお、図中には部材を弾性体および弾塑性体と仮定する場合の共振振動数をそれぞれ f_{ie} , f_{ip} として示している。(a) 図より、部材を弾性体と仮定する場合には、入力加速度振幅 α_i の増大とともに履歴ループ面積も増大



(a) 弾性体



(b) 弾塑性体

図-7 変位応答スペクトルと減衰定数の関係 ($\alpha_i = 100 \text{ gal}$, $h = \text{Var.}$)

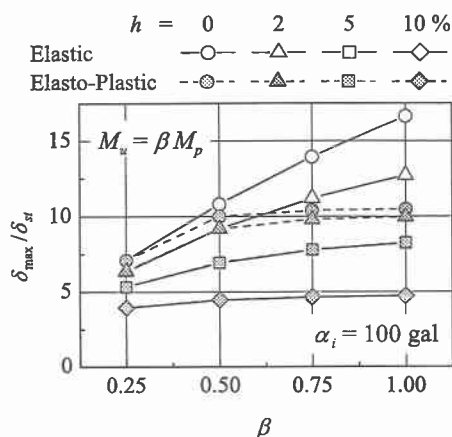


図-8 限界曲げ耐力と最大応答倍率の関係 ($\alpha_i = 100 \text{ gal}$, $h = \text{Var.}$)

し、接合部のエネルギー吸収効果が発揮されている。しかしながら、部材を弾塑性体と仮定する場合には、入力加速度振幅 α_i が增大しても、履歴ループ面積は顕著に増大していない。これは、前述のように柱材基部の塑性化により加振エネルギーが吸収され、骨組の変形量が小さくなるためと推察される。これは、(b) 図に示す変形モードにおいて、部材を弾性体と仮定する場合の変形量が弾塑性体と仮定する場合のそれよりも大きく示されていることから確認できる。

3.2 質量比例型減衰と変位応答スペクトルの関係

図-7 には、入力加速度振幅 $\alpha_i = 100 \text{ gal}$ における変位応答スペクトルと減衰定数 h の関係を示している。なお、減衰定数 h は、表-2 に示した最低次固有振動数 $f_0 = 2.53 \text{ Hz}$ に対して、それぞれ $h = 0, 2, 5, 10 \%$ と設定している。図より、減衰定数 h の増大とともに最大応答倍率は減少する傾向がみられる。また、弾性体と仮定する場合と弾塑性体と仮定する場合の結果を比較すると、 $h = 0, 2 \%$ では後者の値が前者よりも小さく示されていることがわかる。しかしながら、 $h \geq 5 \%$ では、両者ほぼ等しい値を示している。また、弾塑性体と仮定する解析結果に着目すると、 $h = 0$ および 2% の結果はほぼ等しい値を示している。これより、柱材基部が塑性化すると、骨組の応答値はその影響が支配的となり、減衰定数 h の影響は小さいものと考えられる。

図-8 には、 $\alpha_i = 100 \text{ gal}$ 入力時における接合部限界曲げ耐力と最大応答倍率の関係を示している。図は、縦軸に最大応答倍率、横軸に接合部限界曲げ耐力の指標である β ($M_u = \beta M_p$) を取って整理している。図より、弾性体と仮定する場合の応答倍率は、減衰定数 h の大きさにかかわらず、限界曲げ耐力 M_u の増大とともに大きくなっていることがわかる。一方、弾塑性体と仮定する場合の応答倍率は、 $h = 0, 2 \%$ において部材の塑性化の影響により、弾性体と仮定する場合よりも小さく示されている。なお、弾塑性体と仮定する場合の $h = 0 \%$ における最大応答倍率は10程度を示しており、接合部曲げ耐力 M_u の影響は小さいことがわかる。

4. まとめ

本論文では、半剛結鋼骨組の動的応答特性におよ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動的応答解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、

- 1) 柱材基部が塑性化した場合の最大変位応答倍率は、部材を弾性体と仮定した場合と比較して小さくなる。また、柱材基部の塑性化は、接合部曲げ耐力が大きいくほど生じやすい傾向にある。
- 2) また、部材の塑性化に伴うエネルギー吸収量の増加により、骨組の変形量は弾性体と仮定した場合よりも小さくなる。従って、接合部の履歴挙動に伴うエネルギー吸収効果は減少する。

参考文献

- 1) Lui, E.M. and Lopes, A.: Dynamic analysis and response of semirigid 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 950*, Livermore Software Technology Corporation, 1999.
- 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.
- 6) Eurocode 3: *Design of steel structures, Part 1: General rules and rules for buildings*, Vol. 1, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1992.