

半剛結接合を有する門型骨組の定常加振解析

Steady-State Dynamic Analysis of Portal Steel Frame with Semi-Rigid Connections

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 正 員 矢吹 信喜 (Nobuyoshi Yabuki)
 室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)

1. はじめに

一般に鋼骨組の柱-梁接合部は剛結接合あるいはピン接合と仮定して設計が行われている。しかしながら、実際の接合部は、溶接接合を除いて両者の中間的かつ非線形な剛性特性を有することが明らかになっている。このため、諸外国では接合部の非線形な剛性特性やその特性を考慮した構造解析法等に関する実験的・解析的研究が盛んに行われている。しかしながら、これらの研究の多くは、静的に外力を作用させる静的問題に関するものであり、地震等の動的問題に関する研究は比較的少ない。

半剛結鋼骨組は、接合部に非線形な剛性特性を有することより、動的外力を受ける場合には 1) 接合部の履歴挙動特性に伴う減衰効果が期待できること、2) 接合部剛性が外力の大きさによって変化するため、骨組の共振振動数が推移することなど、その応答特性は外力条件に大きく依存する。より合理的な半剛結鋼骨組の耐震設計法を確立するためには、このような応答特性を適切に把握する必要があるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、半剛結鋼骨組の耐震設計手法確立のための基礎資料を得ることを目的として、接合部に非線形な剛性特性を有する半剛結門型鋼骨組を対象に定常加振解析を行った。本研究では、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果や応答特性におよぼす入力加速度振幅および加振振動数の影響について検討を行っている。また、接合部剛性の異なる4種類の接合部 $M-\theta_r$ 曲線を設定し、接合部剛性と減衰効果の関係についても検討を加えている。なお、本解析では構造解析用汎用プログラムである LS-DYNA¹⁾ 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 設計基準²⁾ 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。解析精度を確保するために柱材を8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。また、梁および柱材は全て弾性体とし、その物性値は弾性係数 $E = 206 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

2.2 接合部のモデル化

柱-梁接合部は、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 Model³⁾ 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。図より、接合部モーメントに関しては、零から正あるいは負方向への載荷に対しては評価式より得られる $M-\theta_r$ 特性を採用し、除荷点からモーメント零点までの間は、初期剛性 R_{ki} を有し線形的に挙動するものと仮定している。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

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。本研究では、接合部剛性特性に関する詳細な検討を行うため、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 を変化させることとした。初期剛性 R_{ki} は EC3⁴⁾ に規定

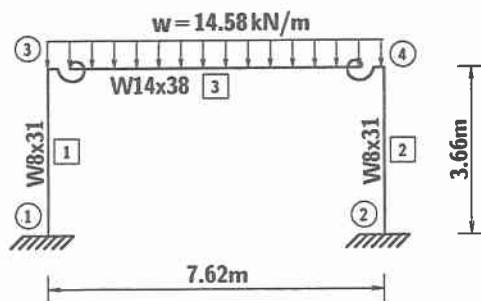
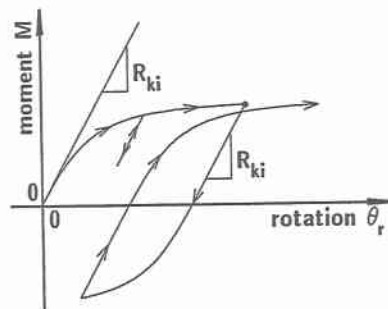


図-1 解析に用いた門型骨組

図-2 接合部履歴挙動
(Independent Hardening Model)

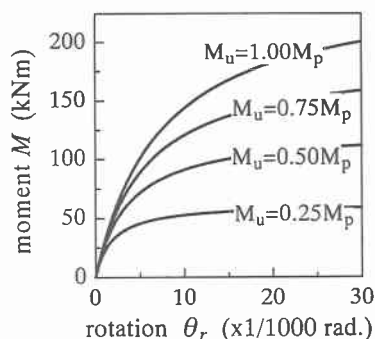


図-3 接合部 $M-\theta_r$ 曲線

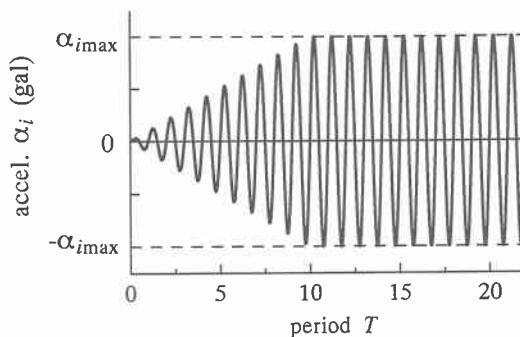
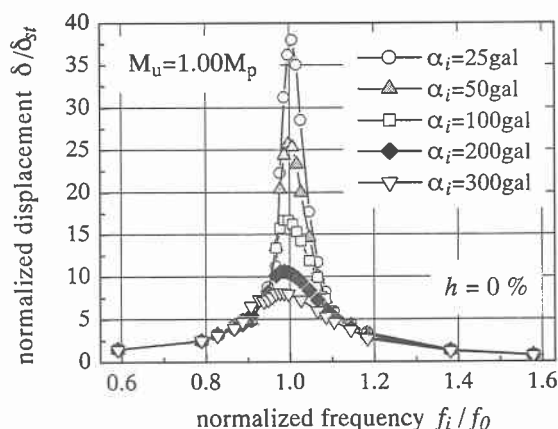
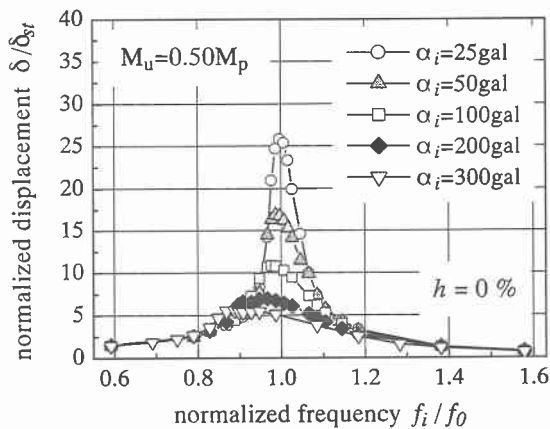


図-4 入力加速度波形



(a) $M_u = 1.00M_p$



(b) $M_u = 0.50M_p$

図-5 入力加速度と相対応答変位の関係

されている接合部分類法を参考に、 $R_{ki} = 8EI/L_b$ (EI : 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 を基準として、 $M_u = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00M_p$ の4種類に変化させている。図-3に接合部 $M-\theta_r$ 曲線を示している。

2.4. 定常加振解析

本研究では、接合部の履歴挙動に伴う減衰特性に関する詳細な検討を行うため、システムダンピングとしての減衰定数 h を $h = 0$ と設定し、入力加速度振幅 α_i および加振振動数 f_i を変化させている。定常加振解析は、図-4に示すような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。

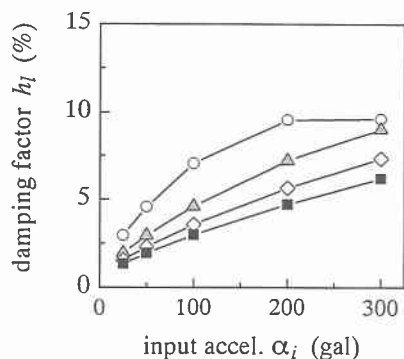
解析条件は、全ての接合部剛性に対して入力加速度振幅 α_i を $\alpha_i = 25 \sim 300$ gal、加振振動数 f_i を $f_i = 1.5 \sim 4.0$ Hz まで変化させている。ただし、 $M_u = 0.50M_p$ の場合に関しては、巨大地震時の半剛結鋼骨組の応答特性を検討するため、入力加速度振幅 α_i の最大値を $\alpha_i = 1,000$ gal と設定した。なお、接合部を剛結接合あるいはピン接合と仮定した場合の固有振動数は、それぞれ 2.69, 1.55 Hz である。また、接合部剛性として図-3に示した $M-\theta_r$ 曲線の初期剛性を線形剛性として与えた場合の固有振動数 f_0 は $f_0 \approx 2.53$ Hz である。

3. 解析結果および考察

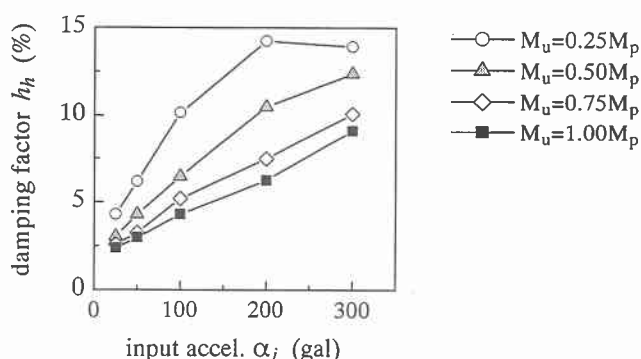
3.1 入力加速度振幅と減衰定数の関係

ここでは、入力加速度振幅 α_i が $\alpha_i \leq 300$ gal の場合について、加速度振幅と減衰定数の関係について考察する。図-5には $M_u = 1.00$ および $0.50M_p$ における変位応答スペクトルを示している。図は縦軸に無次元相対応答変位 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、応答変位 δ は入力加速度 α_i を震度法的に作用させた時の水平変位 δ_{st} で無次元化している。また、横軸は加振振動数 f_i を前述の固有振動数 f_0 で無次元化している。

(a)図より、最も接合部剛性の高い $M_u = 1.00M_p$ の場合において、 $\alpha_i = 25$ gal 入力時の応答値 δ/δ_{st} は 38 程度を示していることがわかる。接合部に線形剛性を仮定した場合における共振応答変位 δ/δ_{st} は、理論的に $\delta/\delta_{st} = \infty$ を示すことより、非常に小さな入力加速度振幅 α_i においても接合部の履歴減衰効果が確認できる。また、入力加速度振幅 α_i の増大とともに応答値が低減し、 $\alpha_i = 300$ gal 入力時には 7.5 程度となっている。(b)図より、 $M_u = 0.50M_p$ の場合においても $M_u = 1.00M_p$ の場合と同様な分布特性を示しているものの、その応答値は $M_u = 1.00M_p$ の場合よりも小さい。これは、同一加速度振幅では接合部剛性が小さいほど接合部の履歴減衰が大きくなるためと考えられる。両者の応答値を比較すると、 M_u



(a) 1 質点系モデルを仮定した場合



(b) ハーフパワー法を用いた場合

図-6 入力加速度振幅と減衰定数の関係 ($\alpha_i \leq 300$ gal)

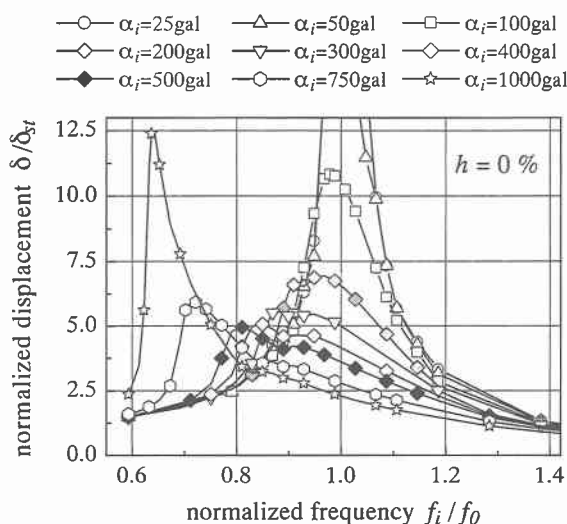


図-7 加速度振幅と応答変位の関係 ($M_u = 0.50 M_p$)

$= 0.50 M_p$ で $\alpha_i = 100$ gal 入力時の応答値は $M_u = 1.00 M_p$ で $\alpha_i = 200$ gal のそれとほぼ等しい。

最大応答値を示す共振振動数（以後、共振振動数）に着目すると、接合部剛性の大きい $M_u = 1.00 M_p$ の場合には、入力加速度振幅の増大に関わらず、その低下傾向は小さく $\alpha_i = 300$ gal 入力時において $f_i/f_0 \approx 0.98$ となっている。一方、 $M_u = 0.50 M_p$ の場合には、入力加速度振幅 α_i の増大とともに共振振動数は低下し、 $\alpha_i = 300$ gal 入力時では $f_i/f_0 \approx 0.89$ となっており、接合部に線形剛性を仮定した場合と比較して約 11 % 程度低下している。この共振振動数の低下は、接合部の非線形な履歴挙動に伴う接合部剛性の低下によるものと考えられる。

ここでは、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果を定量的に評価するために、1) 門型骨組を 1 質点系モデルに置換し、共振振動数における応答値 δ/δ_u から減衰定数 h_i を算出する方法と、2) 図-5 に示した応答変位曲線にハーフパワー法を適用して減衰定数 h_h の算定を試みた。図-6 には入力加速度振幅と減衰定数 h の関係を示している。(a) 図が 1 質点系モデルを仮定した場合、(b) 図がハーフパワー法を用いた場合の結果である。図より、両者の減衰定数を比較すると、ハーフパワー法を用いる算定法は、1 質点系モデルを用いる方法よりも大きな減衰定

数を示すことがわかる。また、両者とも 1) 入力加速度振幅 α_i が増加するほど、2) 接合部剛性が小さいほど、減衰定数は増加する傾向がみられる。しかしながら、接合部剛性の小さい $M_u = 0.25 M_p$ の場合には、 $\alpha_i = 200$ gal と 300 gal 入力時における減衰定数 h はほぼ一定となっている。この理由については次節で説明する。

3.2 半剛結門型骨組の激震時挙動特性

ここでは、巨大地震時における半剛結鋼骨組の応答特性に関する検討を行うため、 $M_u = 0.50 M_p$ に限定して、最大入力加速度振幅 α_i を $\alpha_i = 1,000$ gal まで増加させた場合の解析を行った。

図-7 には、 $M_u = 0.50 M_p$ における各入力加速度に対する変位応答スペクトルを比較して示している。図の縦軸および横軸は、前述の図-5 と同様に δ_u 、 f_0 で無次元化している。

図より、入力加速度振幅 α_i が $\alpha_i < 500$ gal 程度では、 α_i の増大とともに無次元応答変位 δ/δ_u は減少する傾向にある。しかしながら、 $\alpha_i > 500$ gal の場合には、逆に増加傾向にあることがわかる。これは、接合部の履歴挙動に伴う減衰作用には限界があり、過大な入力加速度振幅 α_i を受ける場合には、その減衰効果が期待できないことを示唆している。一方、共振振動数は α_i の増大とともに減少し、 $\alpha_i = 1,000$ gal 入力時の共振振動数は 1.625 Hz ($f_i/f_0 \approx 0.64$) となり、接合部をピン接合と仮定した場合の固有振動数 1.55 Hz に接近することがわかる。また、この分布性状は完全弾塑性復元力モデルを有する 1 質点系モデルの共振曲線⁵⁾と良く類似している。

図-8 には、代表的な入力加速度振幅 α_i における共振時の絶対応答加速度波形を示している。図の縦軸は、絶対応答加速度 α_r を最大応答加速度 α_{max} で無次元化しており、横軸は位相角 $\omega_i t$ (t : 時間) を取って整理している。図より、入力加速度振幅 α_i の小さい $\alpha_i = 25$ gal における応答加速度波形は、正弦波（入力加速度波形）とほぼ等しい性状を示している。しかしながら、入力加速度振幅 α_i の増大とともに、応答加速度波形は正弦波とは異なる性状を呈し、特に $\alpha_i = 500$ gal の場合には最大値が $\pi/2$ より遅れて発生している。また、 $\alpha_i = 1,000$ gal の場合には、最大値は $\pi/2$ で発生しているものの、その

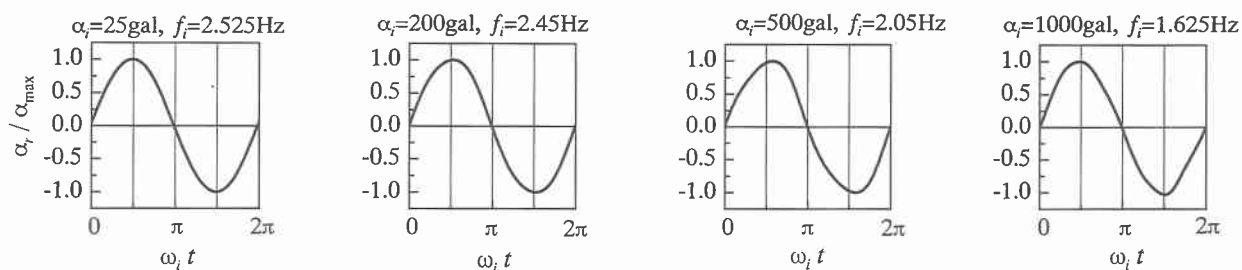


図-8 共振時における絶対応答加速度波形

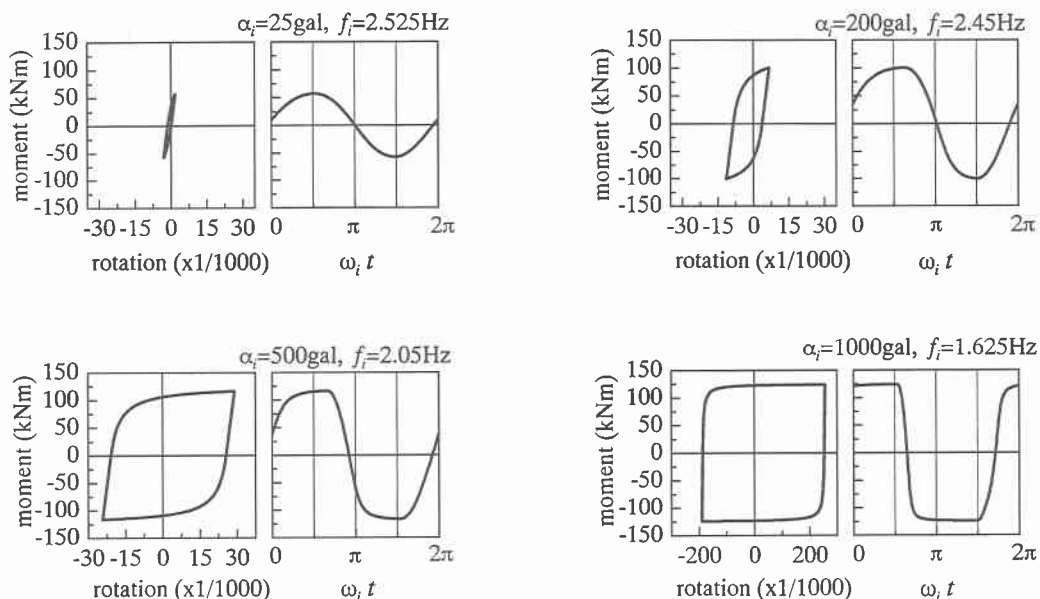


図-9 共振時における接合部 $M-\theta$ 曲線と曲げモーメント波形

性状は正弦波とは異なっている。

図-9には図-8と同一時刻における接合部 $M-\theta$ 、履歴曲線と曲げモーメント波形を示している。図より、加速度振幅の小さな $\alpha_i = 25 \text{ gal}$ 入力時においても接合部 $M-\theta$ 、履歴曲線は小さなループを描いており、多少なりとも履歴減衰効果の存在を確認できる。しかしながら、接合部挙動はほぼ弾性状態であることから、曲げモーメント波形は正弦波に近い形状を示している。一方、入力加速度振幅 α_i が增大するとともに応答変位も増大し、対応して接合部の履歴曲線で囲まれる面積が大きくなるため、より大きな履歴減衰効果が生じることがわかる。また、接合部も非線形性が卓越し曲げモーメント波形も正弦波から矩形波に近い性状に推移している。

$\alpha_i = 1,000 \text{ gal}$ における接合部 $M-\theta$ 曲線は、完全弾塑性モデルに近い分布となっており、接合部はピン接合に近い挙動を示すことがわかる。すなわち、ある程度以上の振幅を有する入力加速度が作用する場合には、接合部の変形が急激に増大し、図-7に示した応答値 δ/δ_{st} が増大することとなる。ただし、 $\alpha_i = 1,000 \text{ gal}$ 入力時の相対回転角 θ は 0.2 rad. 以上を示しており、通常の接合部であれば完全に破壊に至っている。

4. まとめ

本研究では、半剛結接合を有する門型骨組を対象に定

常加振解析を行った。本数値解析より得られた結果を整理すると、

- 1) 定常加振解析により、接合部の履歴減衰効果を定量的に把握した。この減衰効果は i) 入力加速度振幅が大きいほど、ii) 接合部剛性が小さいほど、大きくなる傾向にある。
- 2) しかしながら、この減衰効果には限界があり、限界値を超えるような過大な入力加速度を受ける場合には、その応答値は増大する傾向がある。また、この特性は完全弾塑性復元力モデルを有する1質点系モデルの応答特性と類似している。

参考文献：

- 1) LS-DYNA Users Manual (Ver.940), Livermore Software Technology Corporation, 1997.,
- 2) AISC : Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Buildings 2nd Edition, 1993.
- 3) W.F.Chen, Y.Goto and J.Y.R.Liew: Stability Design of Semi-Rigid Frames, pp.38-44, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- 4) EC3 : Design of Steel Structures, Part 1.1, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, 1992.
- 5) 多治見 宏：建築振動学，コロナ社，1974