

三層一径間半剛結鋼骨組の動的応答特性

Dynamic Response Behavior of Semi-Rigid 1-Bay 3-Story Steel Frames

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 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学 ○学生員 菅野 昌生 (Masao Kanno)

1. はじめに

一般に、鋼骨組における柱-梁接合部は剛結接合もしく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。そのため、諸外国では実状に即した鋼骨組の限界状態設計法を確立するため、接合部の非線形な剛性特性を考慮した構造解析法に関する実験的、解析的研究が盛んに行われている。

このような背景より、著者らは半剛結接合を有する鋼骨組の合理的な設計手法を確立するため、接合部剛性評価モデルをはじめ種々の検討を行ってきた。その結果、静荷重時に限定して、これらの研究成果を基に限界状態設計法に基づいた半剛結鋼骨組の断面設計システムを構築している。しかしながら、より合理的な半剛結鋼骨組の設計手法を確立するためには、静荷重載荷時のみならず、地震等の動的荷重載荷時の挙動特性を考慮可能な設計システムを構築しなければならない。また、半剛結接合の場合には非線形な剛性特性を有していることから、その履歴減衰効果が期待できるため、剛結接合の場合に比較して耐震工学的に有利であるとされている。

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法の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3層1径間骨組を対象に定常加振解析を試みた。本研究では特に接合部の履歴減衰効果に及ぼす減衰定数、入力加速度振幅の影響について検討を行った。なお、本研究では構造解析プログラム LS-DYNA¹⁾を用いている。

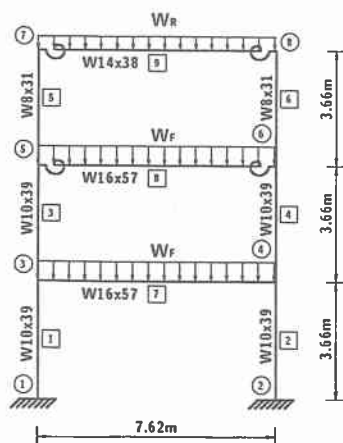


図-1 解析に用いた骨組

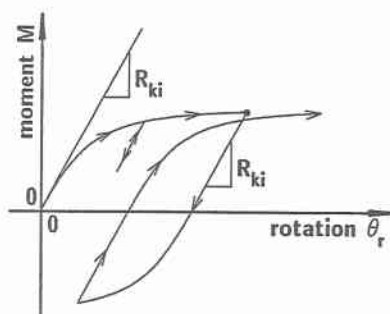
2. 数値解析仮定

2.1. 骨組のモデル化

図-1に本解析で対象とした3層1径間骨組を示している。図中には節点番号、部材番号、使用形鋼を付記している。使用形鋼に関しては AISC-LRFD²⁾ の設計基準に準拠している。載荷荷重は、死荷重として屋根部には $W_R = 14.58 \text{ kN/m}$ 、床部には $W_F = 39.37 \text{ kN/m}$ を設定している。解析精度を確保するため、柱材を8分割、梁材を16分割し、梁材に作用する死荷重 W_R 、 W_F 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。なお、構造安全性を考慮に入れ、1層目の柱-梁接合部を剛結接合と仮定している。

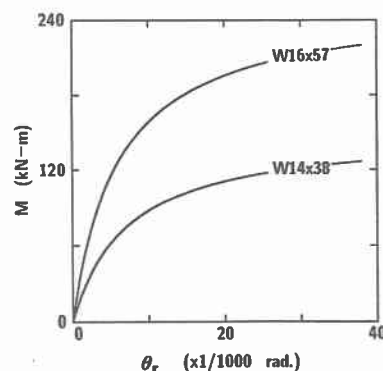
2.2. 接合部のモデル化

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。ここでは、接合部履歴挙動は曲げモーメントによる相対回転角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、接合部には非線形な回転バネのみが存在するとし、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、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



(Independent Hardening Model)

図-2 接合部履歴挙動

図-3 $M-\theta_r$ 曲線

メント零点までの間は、初期剛性 R_{ki} を有し線形に挙動するものと仮定している。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

$$\rho^* = 0.2, M_u = 0.6 M_p, n = 1$$

の組合せを採用し解析を行った。 M_p は梁材の塑性曲げモーメントである。なお、 ρ^* は無次元初期剛性であり、次式で与えられる。

$$\rho^* = \frac{EI_b}{R_{ki}L_b} \tag{1}$$

ここで EI_b : 梁材の曲げ剛性、 L_b : 部材長である。図-3には本解析で用いた $M-\theta_r$ 曲線を示している。

2.4. 定常加振解析

本研究では、半剛結鋼骨組の動的応答特性に及ぼす接合部履歴減衰効果の影響を検討するため、

- 1) 入力加速度振幅 α_i を一定とし、系の質量に比例する減衰として最低次固有振動数に対する減衰定数 h を変化させる場合
- 2) 1) と同様の減衰定数 h を一定とし、入力加速度振幅 α_i を変化させる場合

の2ケースについて、定常加振解析を行った。

定常加振解析は、所定の加速度振幅および加振振動数を有する加速度波形を骨組に物体力として作用させ、各応答値が定常状態になるまで解析を行っている。表-1には、接合部に線形剛性として初期剛性を仮定した場合の各振動モードにおける固有振動数を一覧にして示している。表中には参考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。本研究では表-1に示す線形剛性の場合における最低次固有振動数 ($f_1=1.021$ Hz) に対して、減衰定数 h を評価することとした。ここでは、 $h = 0 \sim 10\%$ まで設定している。

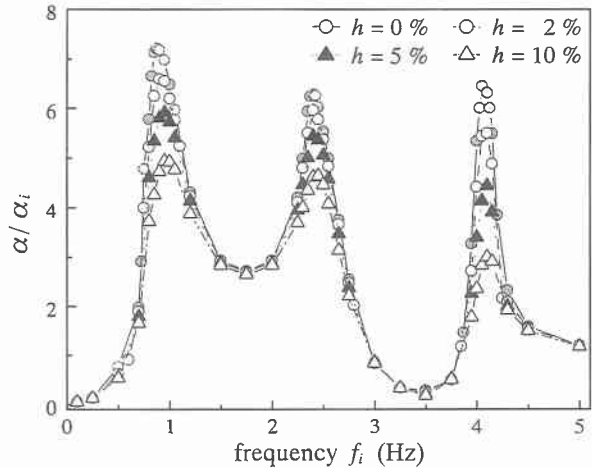
3. 解析結果および考察

3.1. 減衰定数 h を変化させた場合

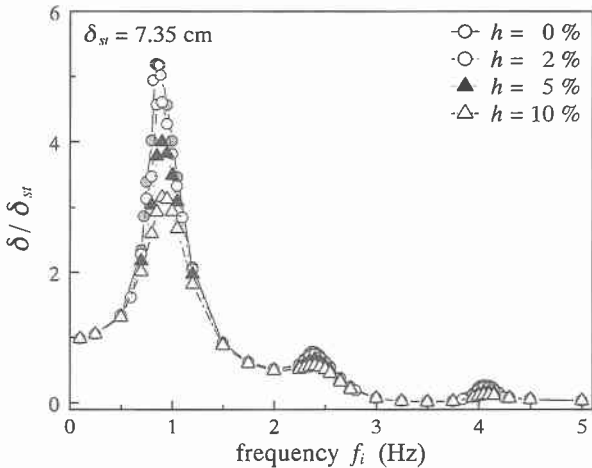
ここでは入力加速度 α_i を 200 gal と一定とし、減衰定数 h を 0, 2, 5, 10 % と変化させている。図-4には入力加速度 $\alpha_i = 200$ gal における加速度応答スペクトルおよび変位応答スペクトルを示している。図は縦軸に無次元応答加速度 α/α_i 、あるいは無次元応答変位 δ/δ_{st} 、横軸に加振振動数 f_i を取って整理している。減衰定数 $h = 0$ の場合に注目すると、図より $h = 0$ の場合における1次固有振動モードの加速度応答倍率は $\alpha/\alpha_i \simeq 7.2$ 、変位応答倍率は $\delta/\delta_{st} \simeq 5.2$ となっている。接合部に線形剛性を仮定した場合における各共振応答値は、無限大となるから、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果により、各応答値が低減していることがわかる。また、 h を 2,

表-1 モード別固有振動数一覧

接合部	モード次数 (Hz)		
	1	2	3
線形剛性 (R_{ki})	1.021	2.579	4.168
剛結接合	1.091	2.860	4.309
ピン接合	0.552	1.760	3.556



(a) 加速度共振曲線



(b) 変位共振曲線

図-4 入力加速度と応答倍率の関係 ($\alpha_i = 200$ gal)

5, 10 % と与えることにより、変位応答倍率 δ/δ_{st} は、4.5, 4.0, 3.0 と大きく低下することがわかる。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、以下の方法により等価減衰定数 h_l を算定した。すなわち、

- 1) 接合部に線形剛性として初期剛性を仮定した場合について等価減衰定数 h_l をパラメータとした定常加振解析を行う
- 2) 1) から得られた共振振動数における応答値 δ_l と等価減衰定数 h_l の関係を整理する
- 3) 図-4に示す曲線から各減衰定数 h に対応する応答値 δ と2)より得られる応答値 δ_l が一致する等価減衰定数 h_l を算出する

である。

表-2は、接合部が非線形剛性を有する場合の減衰定数 h と接合部を線形剛性とした場合の等価減衰定数 h_l

を一覧に示している。表より減衰定数 h が 0 % の場合でも、等価減衰定数 h_i は 9.5 % 程度を示し、履歴挙動に伴う減衰作用は非常に大きいことがわかる。また、減衰定数 h が 0, 2, 5, 10 % と増大するに従い、等価減衰定数 h_i の値も増加していることがわかる。しかしながら、減衰定数 h が 0, 2, 5, 10 % と増大しても等価減衰定数 h_i は同程度の割合では増大していない。このことは接合部が非線形な剛性特性を有する減衰定数 h と線形剛性を有する等価減衰定数 h_i の間には加算則が成立しないことがわかる。以上より、通常応答解析に採用される $h = 2 \sim 5$ % の場合には、接合部を初期剛性から成る線形バネに仮定し $h = 10$ % として安全側で評価可能であることがわかる。

3.2. 入力加速度を変化させる場合

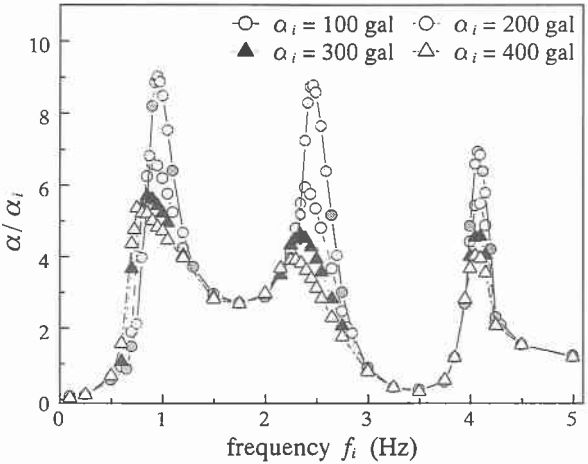
前項では入力加速度 α_i を一定とし、減衰定数 h を変化させた。ここでは減衰定数 $h = 2$ % に一定とし、入力加速度 α_i を 100, 200, 300, 400 gal に変化させた場合における骨組の応答特性と接合部の履歴減衰の関係について検討する。

図一 5 に減衰定数 $h = 2$ % と固定した場合の天端の各応答スペクトルを示している。図より、入力加速度 α_i が増大するとともに加速度応答倍率および変位応答倍率が低下することがわかる。例えば、入力加速度 $\alpha_i = 100$ gal と 300 gal の応答値を比較すると加速度応答倍率 α/α_i 、変位応答倍率 δ/δ_{st} とも約 2/3 程度に低下している。これは、接合部の非線形な剛性特性により、入力加速度の増大とともに、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果が増大することを意味している。また、図より入力加速度振幅 α_i の増大とともに共振振動数が低下していることがわかる。

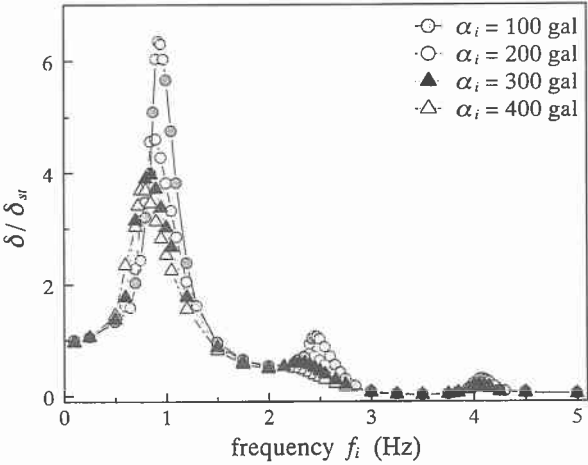
次に、共振振動数の推移状況と入力加速度の関係について検討する。図一 6 は、入力加速度 α_i と各振動モードの共振振動数の関係を示したものである。縦軸には、各モードにおける共振振動数 f_n を R_{ki} を有する線形剛性と仮定した場合の固有振動数 f_i で無次元化している。また、横軸には入力加速度 α_i を取っている。図より、1 次モードおよび 2 次モードに関する共振振動数は、入力加速度 α_i が増大するに伴い、減少する傾向がみられる。一方、3 次モードに関しては入力加速度 α_i に関わらず、ほぼ一定値を示している。この現象について、各モード共振時における接合部 $M-\theta$ 履歴曲線から考察する。図一 7 は各モード共振時の接合部 $M-\theta$ 曲線を示したものである。図は入力加速度 $\alpha_i = 200$ gal の場合であり、着目した接合部は 3 層目（節点番号 7）である。図は縦軸に接合部応答曲げモーメント、横軸に相対回転角を示している。図より、1 次モード共振時における $M-\theta$ 履歴曲線は 2 次および 3 次モード共振時のそれと比較して、履歴ループで囲まれる面積が大きく、減衰作用も大きいことがわかる。また、それに伴い接合部剛性も見かけ上低下していることがわかる。一方、2 次および 3 次モード共振時における $M-\theta$ 履歴曲線は、1 次モード共振時のそれと比較して履歴ループで囲まれる

表一 2 減衰定数一覧

減衰定数 h %	等価減衰定数 h_i %
0	9.50
2	10.4
5	12.3
10	15.8

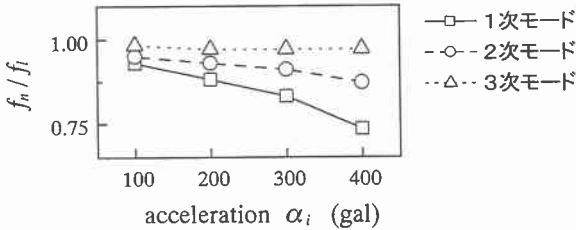


(a) 加速度共振曲線



(b) 変位共振曲線

図一 5 入力加速度と応答倍率の関係 ($h = 2$ %)



図一 6 入力加速度と固有振動数の関係

面積が著しく減少している。特に 3 次モード共振時における接合部剛性は初期剛性に近いものとなっている。これより、各モードに関する共振振動数の低下は接合部の履歴挙動に伴う見かけ上の接合部剛性と密接に関係していることがわかる。

最後に、各入力加速度における共振時の骨組の挙動特性について検討を行う。図一 8 には共振時における骨組のモード図、曲げモーメント図および 3 層目の接合部 M

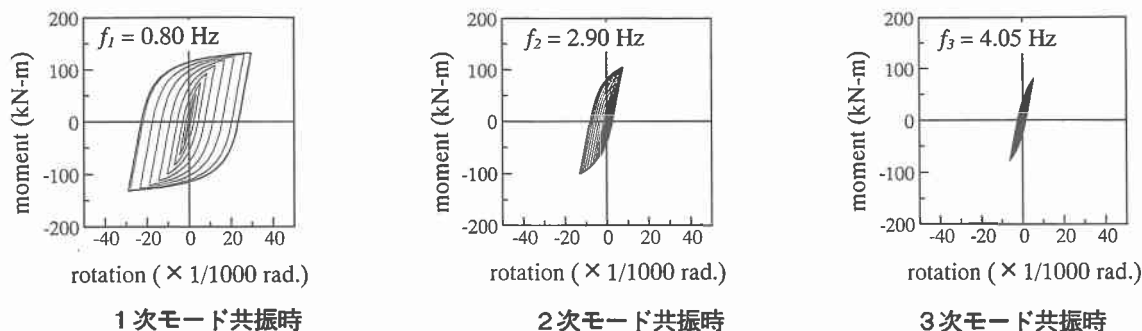
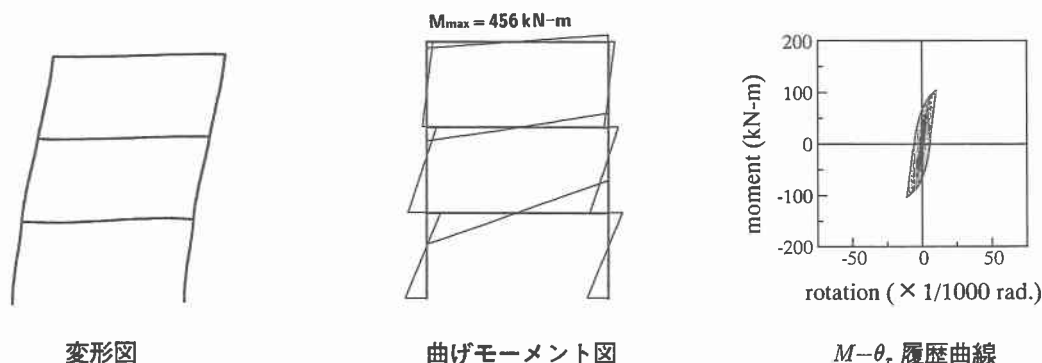
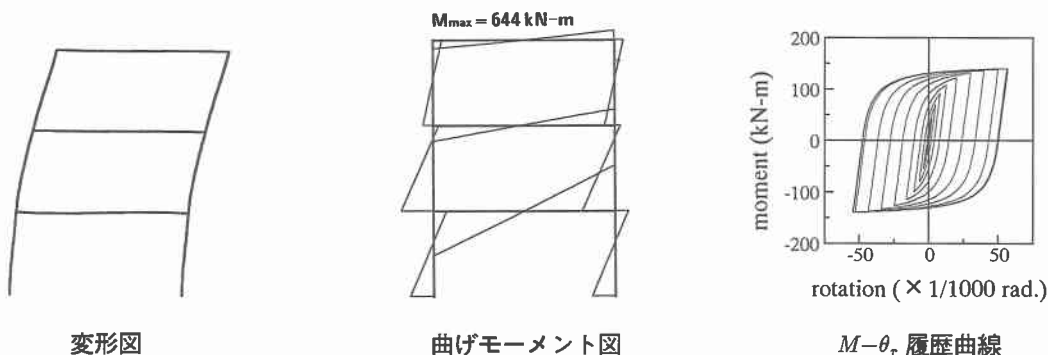


図-7 各モード共振時の接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線 (節点番号 7)



(a) $\alpha_i = 100 \text{ gal}$, $f_n = 0.95 \text{ Hz}$



(b) $\alpha_i = 300 \text{ gal}$, $f_n = 0.85 \text{ Hz}$

図-8 入力加速度の変化による骨組の挙動特性 ($h = 2\%$)

$-\theta_r$ 曲線を示している。ここでは、入力加速度 $\alpha_i = 100 \text{ gal}$ および 300 gal について示している。図より、入力加速度 α_i が 100 gal の場合には変形図および曲げモーメント図から、剛結接合に近い応答特性を示していることがわかる。これは接合部 $M-\theta_r$ 曲線より、その剛性が初期剛性 R_{ki} に近い状態であるためである。

一方、 300 gal の場合には、変形図から接合部剛性特性がピン接合に近い応答特性を示している。 $\alpha_i = 100 \text{ gal}$ と 300 gal の場合における最大曲げモーメント $M_{\max}$ を比較すると、入力加速度振幅が3倍に増加しているのに対し、 $M_{\max}$ は1.5倍程度であり、接合部の非線形効果の著しいことがわかる。

4. まとめ

本研究では、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果について3層1径間骨組を対象に定常加振解析を実施した。得

られた結果を整理すると、

- 1) 接合部剛性の履歴挙動に伴う減衰効果は入力加速度振幅に依存する
 - 2) 入力加速度の増大とともに共振振動数は低下、それに伴い骨組の挙動特性も変化する
- などが明らかとなった。

参考文献

- 1) LS-DYNA Users Manual (Ver.950), Livermore Software Technology Corporation, 1999.
- 2) American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design, 2nd Edition, 1994.
- 3) W.F. Chen, Y. Goto and J.Y. Liew : Stability Design of Semi-Rigid Frames, pp.38-44, John Wiley&Sons, Inc, 1996.