

正弦波加振を受ける半剛結門型骨組の動的応答特性

Dynamic Response Characteristics of Semi-Rigid Portal Frames under Sinusoidal Wave Excitation

小室 雅人* 岸 徳光** 矢吹 信喜*** Chen, W.F. ****

Masato KOMURO, Norimitsu KISHI, Nobuyoshi YABUKI, and Chen Wai-Fah

* 正会員 博(工学) 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

** 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

*** 正会員 Ph. D 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

**** Ph. D Dean, The College of Engineering, University of Hawaii (Honolulu, HI 96822 U.S.A.)

In order to clarify the nonlinear dynamic response characteristics of semi-rigid steel frames, second-order elastic dynamic response analysis is performed for semi-rigid portal frame under sinusoidal wave excitation. Semi-rigid connection is represented by a discrete rotational spring whose stiffness is given by a three-parameter power model and whose hysteretic $M-\theta$ curve is approximated using independent hardening model. The characteristics of displacement response spectra and hysteretic loops of $M-\theta$ curve of connections are discussed. The results obtained from this study are as follows: 1) the bigger the input acceleration amplitude is and/or the smaller the connection moment capacity is, the smaller the dynamic response amplitude is; and 2) even so, by inputting acceleration with excessively high amplitude, the response spectra of the frame may be greatly increased due to the influence of zero tangent connection stiffness.

Key Words : semi-rigid connection, steel frame, dynamic response analysis, hysteretic damping

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。このような背景のもと、著者等は半剛結接合を有する鋼骨組の合理的な設計手法確立のために、接合部剛性評価モデルの開発¹⁾をはじめ種々の検討を行ってきた^{2)~4)}。その結果、これらの研究成果を有機的に組み合わせることにより、限界状態設計法に基づいた半剛結鋼骨組の静荷重に対する断面設計システムを構築している。

一方、近年、地震動などの動的外力を受ける半剛結鋼骨組の応答特性に関する研究が幾つか報告されている。しかしながら、それらの研究では、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^{5), 6)}、非線形な $M-\theta$ 曲線を考慮した研究は少ない⁷⁾。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、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

の耐震設計手法を確立するためには、接合部の非線形な $M-\theta$ 曲線を考慮した動的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、正弦波加振を受ける半剛結門型鋼骨組を対象に動的応答解析を行った。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、加振振動数および減衰定数の影響について検討を行っている。また、接合部曲げ耐力の異なる4種類の接合部 $M-\theta$ 曲線を設定し、接合部曲げ耐力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、接合部の履歴挙動に伴う減衰効果や応答特性の把握に主眼を置いていることより、梁および柱材は弾性体と仮定し、接合部の挙動特性のみの非線形性を考慮している。また、解析には動的構造解析用汎用プログラムである LS-DYNA⁸⁾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設計規準⁹⁾に準拠している。載荷荷重は死荷重として $w = 14.58 \text{ kN/m}$

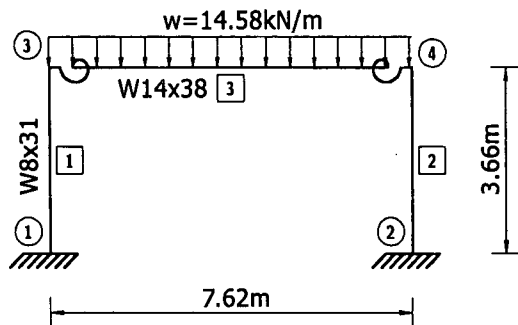


図-1 解析に用いた門型骨組

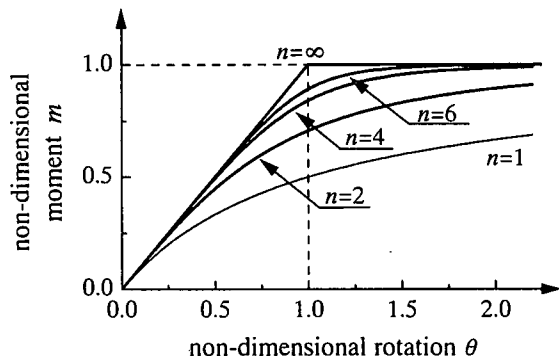


図-3 三要素パワーモデル

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 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ 、単位体積質量 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 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 Model¹⁰⁾ 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 M 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後述の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、

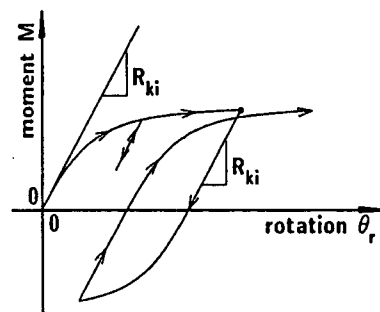


図-2 接合部履歴挙動
(Independent Hardening Model)

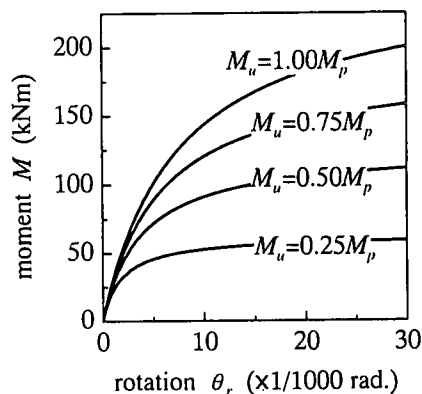


図-4 接合部 $M-\theta_r$ 曲線

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、Richard と Abbott が応力-ひずみ関係に提案した四要素パワーモデル¹¹⁾ を基本として、Kishi と Chen によって簡略化され半剛結接合部の $M-\theta_r$ 曲線の評価モデルに用いられている三要素パワーモデル¹²⁾ 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ている。無次元化された接合部曲げモーメント m は次式のように示される。

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}} \quad (1)$$

ここで、

m : 無次元接合部曲げモーメント ($= M/M_u$)

θ : 無次元相対回転角 ($= \theta_r/\theta_0$)

θ_0 : $= M_u/R_{ki}$

また、図-3にはその概形図を示している。

本研究では、半剛結鋼骨組の動的応答特性におよぼす接合部剛性特性の影響について検討を行うため、接合部初期剛性 R_{ki} および形状指数 n を一定とし、限界曲げ耐力 M_u を変化させることとした。接合部初期剛性 R_{ki}

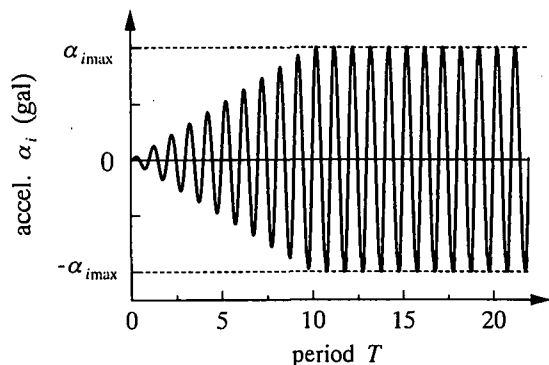


図-5 入力加速度波形

に関しては、梁の曲げ剛性 EI_b および部材長 L_b を用いて、次式のように無次元化することとした。

$$\rho^* = \frac{EI_b}{R_{ki} L_b} \quad (2)$$

式(2)における無次元接合部初期剛性 ρ^* は、EC3¹³⁾に規定されている接合部分類法を参考に $\rho^*=0.125$ と設定し、形状指数 n は $n=1$ と一定とした。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-4には解析に用いた接合部 $M-\theta$ 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、図-5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 $\alpha_i=25\sim 300\text{ gal}$ 、加振振動数 f_i を $f_i=1.5\sim 4.0\text{ Hz}$ まで変化させている。ただし、 $M_u=0.50 M_p$ の場合に関しては、巨大地震時における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 $\alpha_i=1,000\text{ gal}$ と設定した。表-1には、接合部剛性として図-4に示した接合部 $M-\theta$ 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。

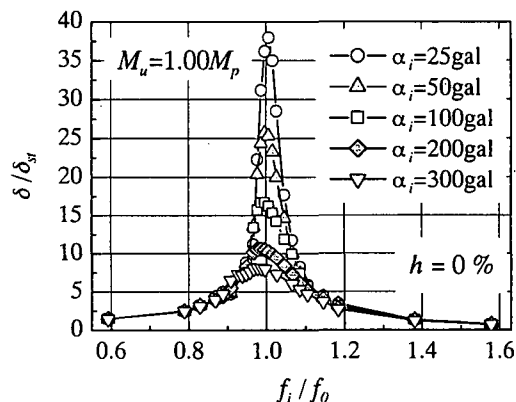
3. 解析結果および考察

3.1 入力加速度振幅と減衰定数の関係

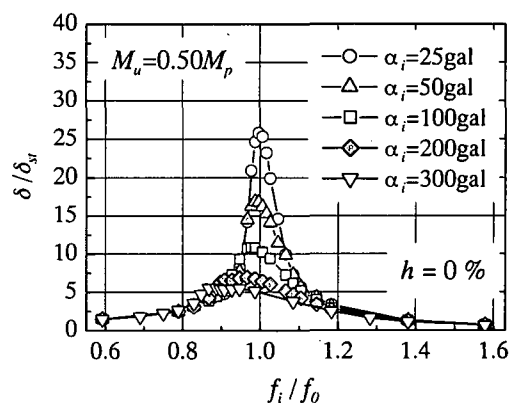
ここでは、接合部の履歴挙動に伴う減衰特性に関する

表-1 固有振動数一覧

接合部	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



(a) $M_u = 1.00 M_p$

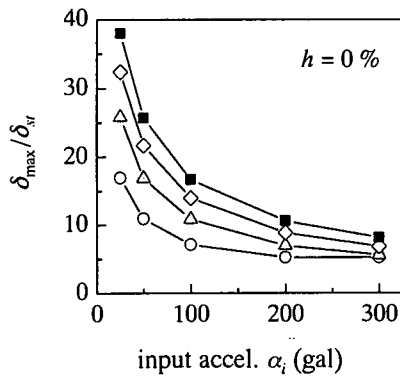


(b) $M_u = 0.50 M_p$

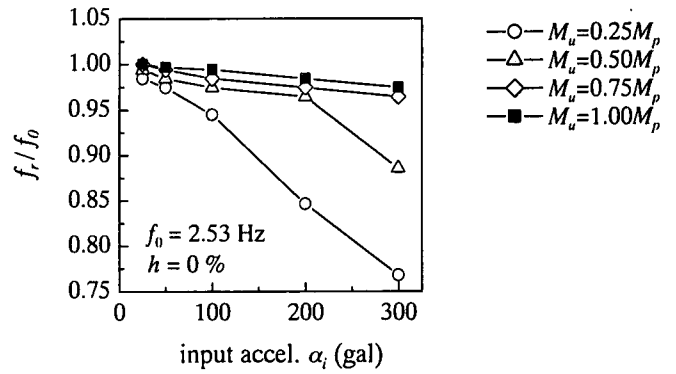
図-6 変位応答スペクトル ($\alpha_i \leq 300\text{ gal}$, $h = 0\%$)

検討を行うため、質量比例型減衰としての減衰定数 h を $h = 0$ とした場合について考察を行う。図-6には入力加速度振幅 α_i が $\alpha_i \leq 300\text{ gal}$ 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 ($f_0=2.53\text{ Hz}$) で無次元化している。

(a) 図より、接合部曲げ耐力の最も高い $M_u=1.00 M_p$ の場合において、 $\alpha_i=25\text{ gal}$ 入力時の最大変位応答倍率（以後、単に最大応答倍率） $\delta_{\max}/\delta_{st}$ は38程度を示して



(a) 最大応答倍率



(b) 共振振動数

図-7 入力加速度振幅と最大応答倍率および共振振動数の関係 ($\alpha_i \leq 300$ gal, $h = 0\%$)

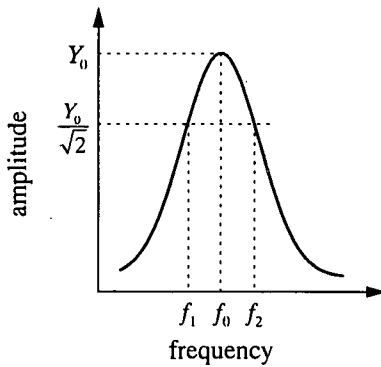
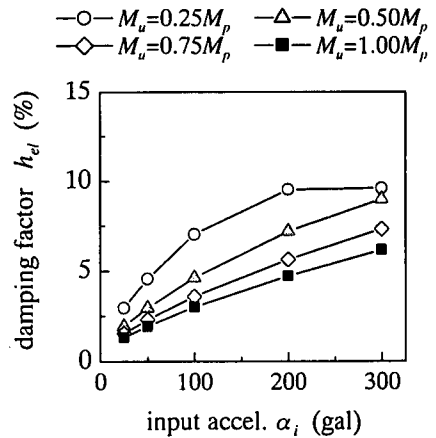


図-8 ハーフパワー法

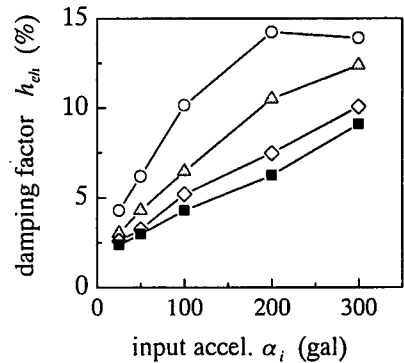
いることがわかる。接合部に線形剛性を仮定した場合における共振時最大応答倍率 $\delta_{\max}/\delta_{st}$ は、理論的に $\delta_{\max}/\delta_{st} = \infty$ を示すことより、小さな入力加速度振幅 α_i においても接合部の履歴減衰効果が確認できる。また、入力加速度振幅 α_i の増大とともに最大応答倍率が低減し、 $\alpha_i = 300$ gal 入力時には 7.5 程度の値を示している。

(b) 図より、 $M_u = 0.50 M_p$ の場合においても $M_u = 1.00 M_p$ の場合と同様な分布特性を示していることがわかる。しかしながら、その応答倍率は $M_u = 1.00 M_p$ の場合よりも小さい。これは、同一加速度振幅では接合部曲げ耐力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。また、両者の応答倍率を比較すると、 $M_u = 0.50 M_p$ で $\alpha_i = 100$ gal 入力時の応答倍率は $M_u = 1.00 M_p$ で $\alpha_i = 200$ gal のそれとほぼ等しい。

最大応答倍率を示す共振振動数（以後、共振振動数 f_r ）に着目すると、接合部曲げ耐力の大きい $M_u = 1.00 M_p$ の場合には、入力加速度振幅 α_i の増大に関わらず、その低減傾向は小さく $\alpha_i = 300$ gal 入力時において $f_r/f_0 \approx 0.98$ となっている。一方、 $M_u = 0.50 M_p$ の場合には、 $M_u = 1.00 M_p$ の場合に比較して、共振振動数 f_r の低減の程度は大きく、 $\alpha_i = 300$ gal 入力時では $f_r/f_0 \approx 0.89$ となっている。この値は、接合部に線形剛性を仮定した場合に比較して約 11 % 程度の低減となる。この共振振動数の低減は、接合部曲げ耐力の低減に伴って、接合部剛



(a) 1 質点系モデルを仮定した場合

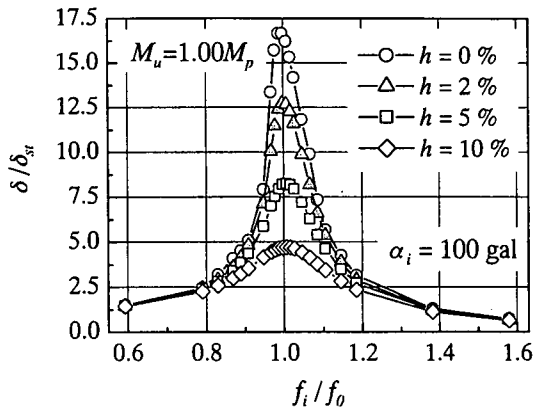


(b) ハーフパワー法を適用した場合

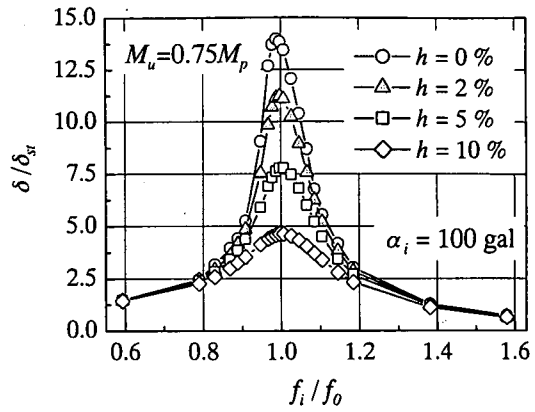
図-9 入力加速度振幅と等価減衰定数の関係

性も低下したことによるものと考えられる。

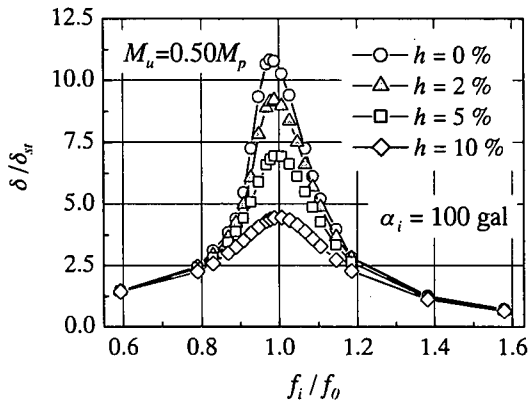
図-7 には、各接合部剛性における入力加速度振幅 α_i と最大応答倍率 $\delta_{\max}/\delta_{st}$ および共振振動数 f_r/f_0 の関係を一覧にして示している。(a) 図より、最大応答倍率 $\delta_{\max}/\delta_{st}$ は入力加速度振幅 α_i の増大とともに指数関数的に減少していることがわかる。また、その減少傾向は、接合部曲げ耐力が大きいほど顕著となっている。一方、(b) 図より、共振振動数 f_r/f_0 に着目すると、入力加速



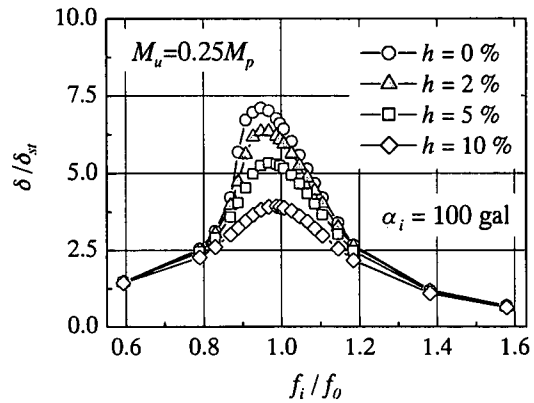
(a) $M_u = 1.00 M_p$



(b) $M_u = 0.75 M_p$



(c) $M_u = 0.50 M_p$



(d) $M_u = 0.25 M_p$

図-10 変位応答スペクトルと減衰定数の関係 ($\alpha_i = 100 \text{ gal}$)

度振幅 α_i の増大とともに f_r/f_0 は減少傾向にあることがわかる。また、その傾向は、最大応答倍率の場合とは異なり、接合部曲げ耐力が小さいほど顕著となっている。 $M_u = 0.25 M_p$, $\alpha_i = 300 \text{ gal}$ の場合には、 f_r/f_0 が 0.76 程度まで低減している。

ここでは、このような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、以下に示す2種類の方法により等価減衰定数 h_e の算定を試みた。すなわち、1) 門型骨組を1質点系の減衰自由振動モデル(以後、単に1質点系モデル)に置換し、図-7(a)に示した共振振動数における最大応答倍率 $\delta_{\max}/\delta_{st}$ から減衰定数 h_{ei} を算出する方法と、2) 図-6に示した変位応答スペクトルにハーフパワー法¹⁴⁾を適用して減衰定数 h_{eh} を算定する方法である。なお、ハーフパワー法は共振曲線から減衰定数 h_{eh} を簡易に算定する手法の一つであり、図-8に示すような共振曲線において、共振時振幅 Y_0 の $1/\sqrt{2}$ の振幅を示す振動数を f_1, f_2 とすれば、減衰定数 h_{eh} は近似的に次式で与えられる。

$$h_{eh} = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (3)$$

ここで、 f_0 : 共振時における振動数である。

図-9には入力加速度振幅 α_i と等価減衰定数 h_e 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、両者の等価減衰定数 h_e 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等価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)接合部曲げ耐力が小さいほど、等価減衰定数は増加する傾向を示している。しかしながら、接合部曲げ耐力の小さい $M_u = 0.25 M_p$ の場合には、 $\alpha_i = 200 \text{ gal}$ と 300 gal 入力時における等価減衰定数 h_e はほぼ一定となっている。

3.2 質量比例型減衰と変位応答スペクトルの関係

ここでは、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 を変化した場合について検討を行う。図-10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-1に示した最低次固有振動数 $f_0 = 2.53 \text{ Hz}$ に対して、 $h = 0, 2, 5, 10\%$ と設定した。

図より、いずれの接合部剛性においても、減衰定数 h の増大とともに、最大応答倍率 $\delta_{\max}/\delta_{st}$ は減少している

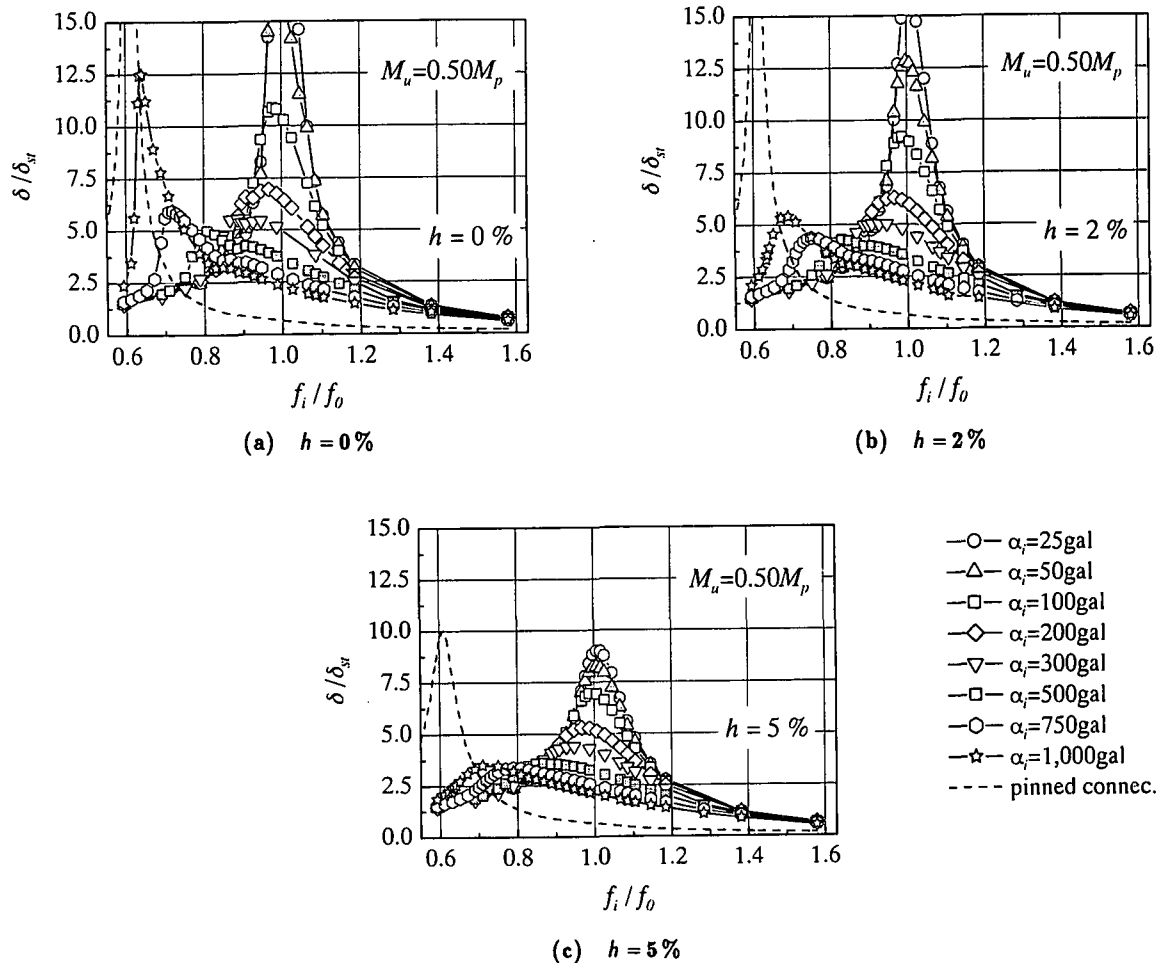


図-11 変位応答スペクトル ($M_u = 0.50 M_p$)

ことがわかる。また、 $h = 0\%$ と $h = 10\%$ における最大応答倍率を比較すると、 $M_u = 1.00 M_p$ の場合には、 $\delta_{\max} / \delta_{st}$ は 16.7 から 4.7 と $1/3.5$ 程度まで減少しているのに対し、 $M_u = 0.25 M_p$ の場合には、7.1 から 3.9 と $1/1.8$ 程度となっている。なお、減衰定数 $h = 10\%$ の場合には、いずれの接合部剛性においてもその最大応答倍率 $\delta_{\max} / \delta_{st}$ が 4 ～ 5 程度となっており、最大応答倍率に対する接合部曲げ耐力の影響の小さいことがわかる。

減衰定数 h と共振振動数 f_r の関係に着目すると、特に接合部曲げ耐力の小さい $M_u = 0.25 M_p$ において、減衰定数 h の増大とともに共振振動数 f_r も増加し、 $h = 10\%$ では、 $f_r / f_i \simeq 1.0$ となっていることがわかる。これは、質量比例型減衰の効果により、接合部の変形が抑制され、それに対応して最大変形時の接合部接線剛性の低減も抑制されるためと考えられる。

3.3 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 $\alpha_i = 1,000 \text{ gal}$ まで増加させた場合の解析を行った。また、前節と同様、減衰定数 h を $h = 0, 2, 5\%$ と変化させている。

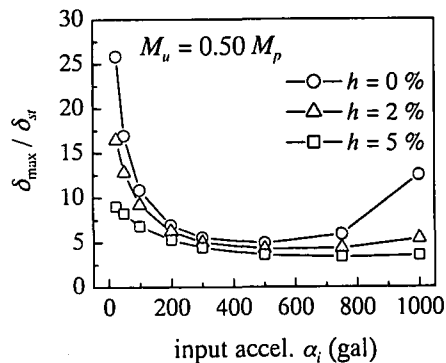


図-12 入力加速度振幅と最大応答倍率の関係

図-11 には、 $M_u = 0.50 M_p$ における各入力加速度振幅に対する変位応答スペクトルを比較して示している。また、図中には接合部がピン接合の場合における解析結果も示している。図は前述の図-6 と同様、縦軸に変位応答倍率 δ / δ_{st} 、横軸に f_i / f_0 を取って整理している。また、図-12 には入力加速度振幅 α_i と最大応答倍率 $\delta_{\max} / \delta_{st}$ の関係を示している。

両図より、減衰定数 h の大きさに関わらず、入力加速度振幅 α_i が $\alpha_i < 500 \text{ gal}$ 程度では、 α_i の増大とともに

変位応答倍率 δ/δ_{st} は減少する傾向にある。しかしながら、 $\alpha_i > 500 \text{ gal}$ の場合には、減衰定数 h の大きさにより、 δ/δ_{st} が増加あるいはほぼ等しい値を示している。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、図-11より、共振振動数 f_r は α_i の増大とともに低減していることがわかる。 $h = 0\%$ 、 $\alpha_i = 1,000 \text{ gal}$ 入力時の共振振動数は $f_r/f_0 \approx 0.64$ ($f_r = 1.625 \text{ Hz}$) 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 ($f_r/f_0 = 0.61$) に接近していることがわかる。また、減衰定数 $h = 0\%$ における変位応答スペクトルの分布性状は、入力加速度振幅 α_i の増大によって共振振動数 f_r の飛び移りの現象を示し、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スペクトル¹⁵⁾と類似している。

図-13には、 $h = 0\%$ における代表的な入力加速度振幅 α_i の共振時応答加速度波形を示している。図の縦軸は、応答加速度 α_r を最大振幅 α_{max} で正規化しており、横軸は位相角 ϕ を取って整理している。図より、入力加速度振幅の小さい $\alpha_i = 25 \text{ gal}$ 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、応答加速度波形は入力加速度振幅 α_i の増大とともに位相差が生じ、特に $\alpha_i = 500 \text{ gal}$ の場合には最大応答時の位相角が $\phi = \pi/2$ より大きい。また、 $\alpha_i = 1,000 \text{ gal}$ の場合には、最大応答時の位相角が $\phi \approx \pi/2$ を示しているものの、その応答性状は正弦波とは異なっている。

図-14には図-13と同一時刻における接合部 $M-\theta$ 、履歴曲線とその曲げモーメント波形を示している。図より、加速度振幅の小さい $\alpha_i = 25 \text{ gal}$ 入力時には、接合部 $M-\theta$ 、履歴曲線が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、接合部挙動がほぼ弾性状態であることより、接合部曲げモーメント波形は正弦波に近い分布性状を示している。これに対して、入力加速度振幅 α_i が大きくなると、応答変位も増大し対応して接合部の履歴曲線によって囲まれる面積も大きくなるため、履歴減衰効果も大きくなることがわかる。また、接合部も非線形性が卓越し接合部曲げモーメント波形も正弦波から矩形波に近い性状に移している。

$\alpha_i = 1,000 \text{ gal}$ における接合部 $M-\theta$ 、曲線が完全弾塑

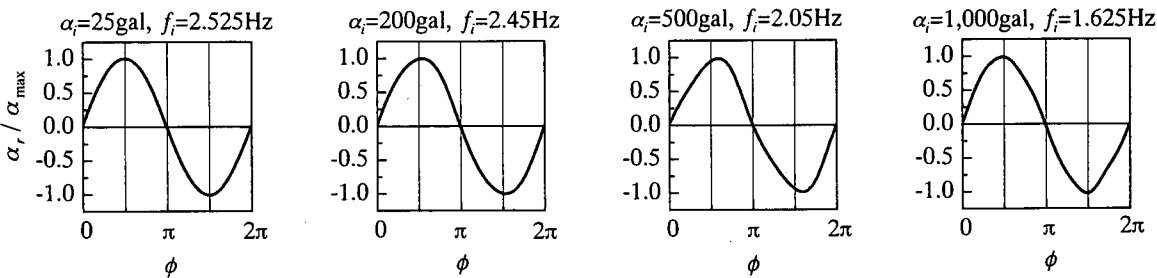


図-13 共振時の応答加速度波形 ($M_u = 0.5 M_p$, $h = 0\%$)

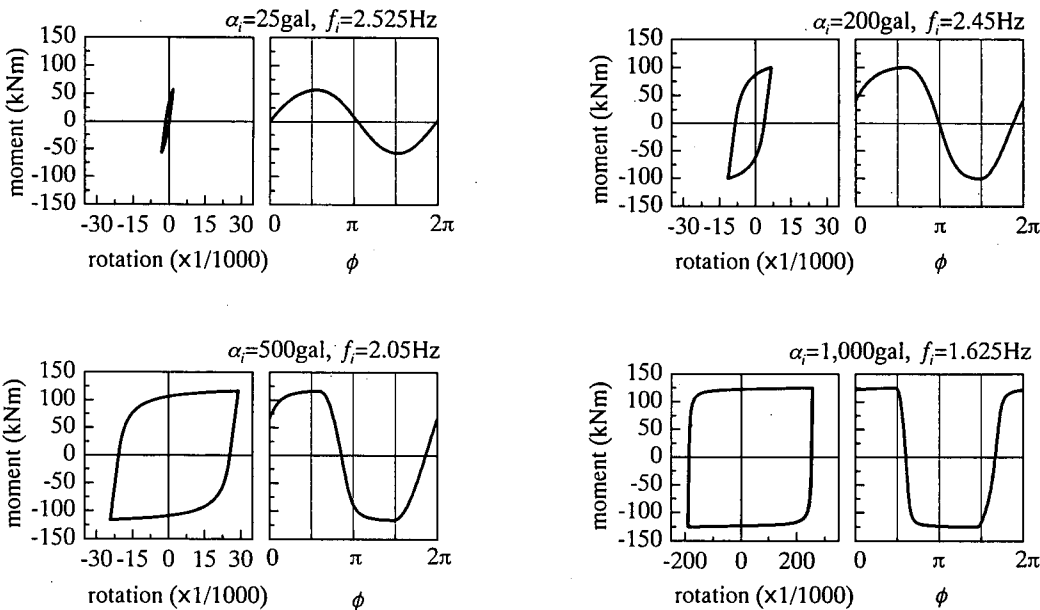


図-14 共振時における接合部 $M-\theta$ 、曲線と接合部曲げモーメント波形 ($M_u = 0.5 M_p$, $h = 0\%$)

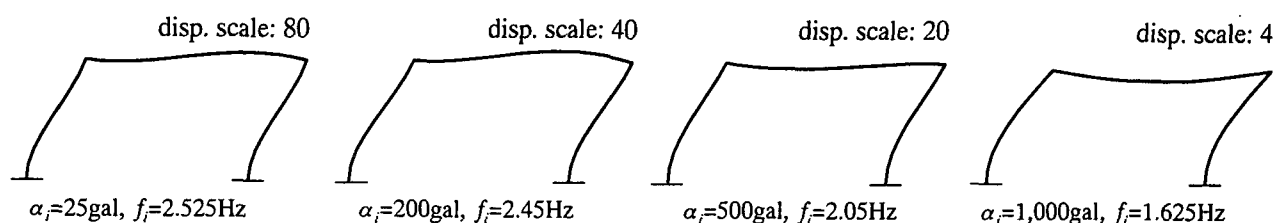


図-15 共振時における骨組の変形モード ($M_u = 0.5 M_p$, $h = 0\%$)

性モデルに近い分布となっていることより、接合部はピン接合に近い挙動を示すことがわかる。

図-15には、 $h = 0\%$ における代表的な入力加速度振幅 α_i の共振時変形モードを示している。なお、図中には各入力加速度振幅 α_i における変形倍率を付記している。

図より、加速度振幅の小さい $\alpha_i = 25$ gal 入力時には、接合部相対回転角も小さく、剛結接合骨組に類似した変形モードを示していることがわかる。また、入力加速度振幅 α_i が大きい場合には、加速度振幅の大きさに対応して接合部相対回転角も大きく示されている。特に入力加速度振幅が $\alpha_i = 1,000$ gal の場合には、梁材の変形も小さく梁材と柱材が独立して振動する傾向を示し、ピン接合骨組に類似した変形モードを示している。すなわち、図-14からも明らかなように接合部曲げ耐力が小さい場合には、入力加速度振幅 α_i が大きくなることによって、接合部がピン接合に類似した性状を示し、応答倍率 δ/δ_u も増大することとなる。

4. まとめ

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、半剛結接合を有する門型骨組を対象に動的応答解析を行った。本数値解析より得られた結果を整理すると、

- 1) 骨組の共振振動数は、入力加速度振幅の増大とともに低下する。
- 2) 半剛結接合を有する骨組の応答スペクトルは、接合部の履歴減衰効果によって減少する。この減衰効果は i) 入力加速度振幅が大きいほど、ii) 接合部曲げ耐力が小さいほど、大きくなる傾向にある。
- 3) しかしながら、この減衰効果には限界があり、過大な入力加速度を受ける場合には、接合部がピン接合に近い挙動を示すため、その応答倍率は急激に増大する傾向がある。
- 4) また、この特性は完全弾塑性復元力モデルを有する1質点系モデルにおける応答スペクトルと類似している。

参考文献

- 1) Chen, W.F. and Kishi, N.: Semi-rigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115(1), pp. 105-119, 1989.
- 2) 岸 徳光, 後藤芳願, 松岡健一: 半剛結接合に関するデータベースを用いた平面骨組構造解析システムの開発, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 36A, pp. 1065-1072, 1990.
- 3) 小室雅人, 岸 徳光, 後藤芳願: 半剛結接合骨組の設計断面力の算定に関する一提案, 土木学会, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 263-272, 1997.
- 4) 小室雅人, 岸 徳光, 矢吹信喜, Chen, W.F.: 半剛接合骨組の簡易横移動量算定法に関する一提案, 日本建築学会, 構造工学論文集, Vol. 46B, pp. 683-692, 2000.
- 5) Chan, S.L.: Vibration and modal analysis of steel frames with semi-rigid connections, *Engineering Structures*, Vol. 16(1), pp. 25-31, 1994.
- 6) Lui, E.M. and Lopes, A.: Dynamic analysis and response of semirigid frames, *Engineering Structures*, Vol. 19(8), pp. 644-654, 1997.
- 7) Zhu, K., Al-Bermani, F.G.A., Kitipornchai, S. and Li, B.: Dynamic response of flexibly jointed frames, *Engineering Structures*, Vol. 17(8), pp. 575-580, 1995.
- 8) Hallquist, J.O.: *LS-DYNA User's Manual version 950*, Livermore Software Technology Corporation, 1999.
- 9) American Institute of Steel Construction: *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, 2nd Ed., Chicago., 1993.
- 10) 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.
- 11) Richard, R.M. and Abbott, B.J.: Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 101(4), pp. 511-515, 1975.
- 12) Kishi, N. and Chen, W.F.: Moment-rotation relation of semi-rigid connections with angles, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116(7), pp. 1818-1834, 1990.
- 13) Eurocode 3: *Design of steel structures, Part 1: General rules and rules for buildings*, Vol. 1, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1992.
- 14) 土木学会, 橋梁振動モニタリングのガイドライン, 構造工学シリーズ10, pp. 90-91, 2000.8
- 15) 多治見 宏: 建築振動学, コロナ社, 1974

(2001年4月20日受付)