

## 【カテゴリーII】

日本建築学会構造系論文集 第575号, 129-135, 2004年1月  
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 575, 129-135, Jan., 2004

## 中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価における構造モデルと入力地震動の研究

RESEARCH ON STRUCTURAL MODELS AND INPUT EARTHQUAKES IN  
SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF LOW-AND-MIDDLE RISE SMRFs

張 惠 雲\*

Heui-Yung CHANG

With dynamic analysis, this paper attempted to illustrate the influence of structural models and input earthquakes on seismic performance evaluation of middle-and-low rise steel moment-resisting frames (SMRFs). Weak-columned SMRFs and artificial waves of an identical Fourier amplitude spectrum were selected to study herein. Analysis results showed that mass-spring models might evaluate as precisely as frame models, only if the relationship of shear force and story drift were setup equivalently. Moreover, the minimum acceleration rates of input earthquakes to have structural models reach the limit states such as elasticity and collapse would remain constant respectively. While the minimum acceleration rate necessary for the limit state of deterioration would significantly increase if the input earthquakes were changed from an epicentral type to an oceanic one.

**Keywords :** structural models, input earthquakes, seismic performance evaluation, limit states, Fourier spectrum  
構造モデル, 入力地震動, 耐震性評価, 限界状態, フーリエスペクトル

## 1. はじめに

中低層鉄骨ラーメン構造は日本の住宅建築と小規模の商業ビルとしてよく使用されている<sup>1)-3)</sup>が、1995年兵庫県南部地震のような大地震に対してその要求される耐震性の評価方法は現在でも不明な点が多い<sup>4),5)</sup>。なぜならば、通常の設計業務では小規模の中低層鉄骨ラーメン構造に対する応答解析を行わないからである。また応答解析を行うとしても、その耐震性評価の結果は構造モデルと入力地震動によって大きく異なる可能性も否定できない。中低層鉄骨ラーメン構造の広汎な普及を考えると、その耐震性評価に及ぼす構造モデルと入力地震動の影響をすみやかに解明すべきである。

中低層鉄骨ラーメン構造を質点系モデルにモデル化することがしばしば行われている。しかし、その耐震性評価の結果は精密なフレームモデルと異なる可能性がある。中低層鉄骨ラーメン構造では、同じ層にある各柱の応力状態は上載荷重の影響と水平外力の作用によって多少違う。フレームモデルでは部材ごとの挙動が表せ、各柱の応力状態が反映される。それに対し、質点系モデルでは層全体が一本の柱として扱われ、各柱の応力状態が反映されない。この相違によって生じる評価誤差はまだ深く触れられていない。一方、1995年兵庫県南部地震では、直下型地震動による被害の大きさが体験された。それ以来、使用性能や修復性能などの構造性能があらためて重視され、構造設計がそれにつれて性能型に移行しつつある。性能型構造設計を実現するために数多くの研究が展開された。そこでは直下型地震動に関しては数多くの研究がなされており、いろいろな

有益な知見が得られている<sup>6)-10)</sup>。例えば、桑村らは一質点系モデルの地震応答を通して、直下型地震動の一撃入力で構造物が大きな塑性変形をして倒壊しやすくなるということを指摘している<sup>6)</sup>。しかし、これらの研究は構造物の終局耐震性を中心に検討したもの、このように蓄積された研究成果から使用限界や修復限界などを推測するには無理がある。

本論は上述の観点に立ち、中低層鉄骨ラーメン構造を研究対象とし、その耐震性評価に及ぼす構造モデルと入力地震動の影響を解明するために行う基礎的研究である。具体的に(1)中低層鉄骨ラーメン構造のフレームモデルと質点系モデルによる耐震性評価の差異、(2)中低層鉄骨ラーメン構造を弾性限界、劣化限界及び倒壊限界の三つの限界状態に至らせる地震動の波形や強さなどの入力特性という二つの課題を応答解析により解明することを研究の目的とする。

## 2. 構造モデルの設定と応答解析の方法

## 2.1. 設定の方針

中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性能を究明するために、数多くの構造モデルを設定することよりも建築基準を満たすような一般的な構造モデルを使用したほうが効率的である。この観点から、本論は構造モデルの数を最小限に抑え、構造モデルの設定を通常の設計業務と同様に行うこととする。そこでは、骨組の剛性と強度を許容応力度設計によって決まり、JIS にある部材断面を採用して部材断面を二、三層ごとに変化させる。一方、強柱弱梁の構造設計が耐震上

\*埼玉大学地盤科学研究センター 非常勤研究員・工博

Postdoctoral Researcher, Geosphere Research Center of Saitama University, Ph. D.

有利であるとは言え、中低層鉄骨ラーメン構造に用いられる柱梁の部材断面は必ずしもこの設計条件を満たさない。また、強柱弱梁の構造設計としても、床スラブと梁の合成効果によって梁の強度が高まり、柱が先に降伏して破壊する可能性は十分ある。通常の設計業務では、この点に対する特別な配慮を払っていない。その結果、弱柱強梁による中低層鉄骨ラーメンは実際に多く存在している。この実情を考え、ここでは弱柱型骨組を検討対象とする。

## 2.2. 対象構造物

対象構造物は図1に示すような一般的な鉄骨ラーメンによる単層三スパン骨組と五層三スパン骨組である。階高は全層3mで、スパンは全て6mである。スパンごとの負担面積は $18m^2$ で、梁上の等分布荷重を $6.0kN/m^2$ に設定する。柱部材はSTKR400の冷間成形角形鋼管で、梁部材をSN400のH形鋼とする。対象構造物をフレームモデルとして固有値解析を行ったところ、単層骨組と五層骨組それぞれの一次固有周期は0.40秒と0.84秒であった。

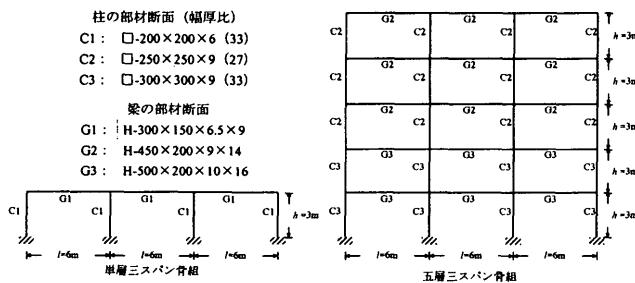


図1 研究対象とする鉄骨骨組

## 2.3. 柱梁の履歴モデル

中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性はそれに使用される冷間成形角形鋼管柱の局部座屈劣化に大きく左右されている<sup>10)-14)</sup>。過去の実験では部材断面の幅厚比が大きいほど、局部座屈により最大耐力に達するまでの塑性変形の能力が小さく、しかも、耐力劣化の度合いが激しくなる傾向を示す<sup>11)</sup>。実験結果を詳しく観察してみると、①鉄骨部材の局部座屈による劣化挙動は最大耐力以前の変形履歴に影響されていないこと、②各サイクルの劣化開始点の荷重は前サイクルまでの骨格部の累積塑性変形によってほぼ決まることが分かる<sup>10), 12)</sup>。

山田ら<sup>13)</sup>は材端に塑性回転バネを有する部材モデルを採用し、柱梁が局部座屈劣化する鉄骨骨組の終局耐震性をフレームモデルの応答解析により評価した。また、桑村ら<sup>10)</sup>は精度が異なる四種類の履歴モデルを作成して一質点系モデルの地震応答を行い、骨格曲線をもとに作成された局部座屈劣化柱の履歴モデルの適用性を提示した。ここでは山田らと同様に、材端に塑性回転バネを有する部材モデルを使用し、柱部材の曲げ降伏や局部座屈劣化などの弾塑性挙動を追跡する。それに、桑村らの研究を参考にし、柱材端の曲げモーメント $M$ と回転角 $\theta$ の履歴関係を図2のように設定する。

図2は、現行の建築基準に認められる最も大きな幅厚比を有する冷間成形角形鋼管柱の実験結果<sup>5)</sup>をモデル化した例である<sup>14)</sup>。柱の断面係数と降伏応力度の公称値それぞれを $S$ 、 $\sigma_y$ とすると、柱の降伏モーメント $M_y$ は次のようになる。

$$M_y = S \times \sigma_y \quad (1)$$

最大モーメント $M_u (=1.5M_y)$ に達する以前、バイリニア型履歴モデルを用いる。降伏モーメント $M_y$ までは初期剛性で $K_0$ 進む。降伏モーメント $M_y$ に達すると、二次剛性 $K_p$ で荷重が上昇する。変形の方向が逆転すると弾性除荷し、除荷荷重からまで $2.0M_y$ 動いて再び降伏する。その後、前述どおりに塑性変形を繰り返し、荷重が増加していく。荷重が増加するうちに、正側あるいは負側の最大モーメント $M_u$ に達すると耐力劣化し始める。柱材端の累積塑性変形角 $\Sigma\theta_p$ を $x$ とすると、その劣化剛性 $K_d$ を式(2)と式(3)のように定められる<sup>14)</sup>。

$$K_d = (-53.630x^4 + 56.504x^3 - 21.244x^2 + 3.434x - 0.2153)K_0 \quad (2)$$

ただし、

$$K_d \geq -0.002K_0 \quad (3)$$

また、累積塑性変形角 $\Sigma\theta_p$ を式(4)のように計算する。

$$\Sigma\theta_p = \theta_u + \Sigma|\theta_d| \quad (4)$$

ここに、

$$\theta_u : \text{劣化開始点の変形角}, \theta_u = 3\theta_y$$

$$\Sigma|\theta_d| : \text{劣化以後の累積塑性変形角}$$

式(2)と式(3)で示されたように、累積塑性変形角 $\Sigma\theta_p$ の増加とともに耐力劣化の度合いが緩やかになり、劣化剛性 $K_d$ が収束する。また式(4)の累積塑性変形角 $\Sigma\theta_p$ の計算には変形の進行方向を考えず、劣化以後の塑性変形角の絶対値 $|\theta_d|$ を用いる。上述の劣化剛性 $K_d$ を用いて耐力劣化が進行する。変形の方向が逆転すると弾性除荷が発生し、その後、変形の方向にかかわらず、前回の除荷時点の荷重まで達すると再び耐力劣化する。このような履歴則に従い、柱材端モーメントの耐力劣化が進んでいく。

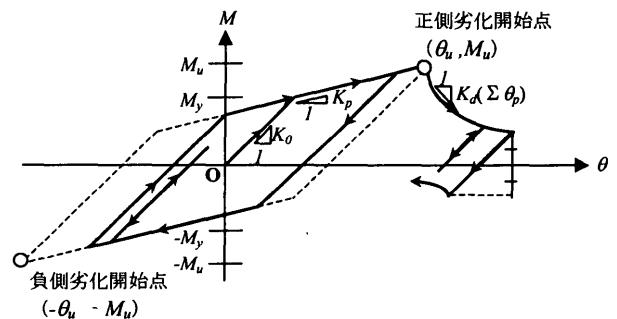


図2 柱の履歴モデル

一方、弱柱型骨組を検討対象とするので、上載荷重による曲げモーメントを考慮しても梁の挙動はほとんど弾性域に止まっている。これを考え、梁を弾性材とする。

## 2.4. 質点系モデルの設定

フレームモデルから質点系モデルへ置換する場合、層としての質点の重量と層せん断バネの特性を特定する必要がある。ここではまず、梁上の等分布荷重を各層に集約して質点ごとの重量を求めた。次に層せん断力と柱材端モーメントの関係を考え、フレームモデルの静的解析結果をもとにして層せん断バネの荷重・変形関係を設定した。さらに、フレームモデルの履歴応答から観察された層の履歴

特性と柱の履歴特性の類似を考え、柱の履歴モデルを参考にし層せん断バネの履歴モデルを設定した。外力制御の静的解析においては柱の局部座屈劣化により層の耐力が低下すると、それ以外の層が弹性除荷し、この解析により全ての層の劣化域を含んだ完全な荷重-変形関係が得られない。ここでは図3のような変形制御の静的解析により層の荷重-変形関係を求めた。具体的に、まず上載荷重による弾性応力度を最初に計算し、その結果を柱梁部材の初期応力として扱って、そしてフレームモデルの一次弹性固有変形 $\phi_{ii}$ に比例する水平変位の増分 $\Delta\delta_i$ を各層の柱頭に与えながら増分計算を行った。

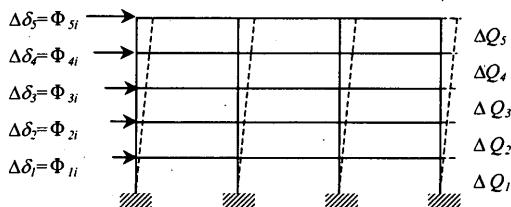


図3 水平変位を一次固有変形に比例させる静的解析

## 2.5. 限界状態の設定

冷間成形角形鋼管柱の部材性能を考え、中低層鉄骨ラーメン構造に対する弹性限界、劣化限界および倒壊限界を以下に定義する。

- ① 弹性限界 柱材端に曲げ降伏が最初に発生するときの層せん断力 $Q$ を降伏層せん断力 $Q_y$ とし、層せん断力 $Q$ が降伏層せん断力 $Q_y$ を最初に超えるかどうかということを弹性限界として定義する。
- ② 劣化限界 層せん断力 $Q$ の最大値を最大層せん断力 $Q_p$ とし、層せん断力 $Q$ が最大層せん断力 $Q_p$ に達するかどうかということを劣化限界として定義する。
- ③ 倒壊限界 層の曲げ抵抗は $P-\Delta$ モーメントより小さくなるかどうかということを倒壊限界とし定義する。

## 2.6. 応答解析の方法

解析には、時間の刻みを0.001秒にし線形加速度法を用いる。ここでは上載荷重と $P-\Delta$ 効果それぞれを梁上の等分布荷重と動的外力の一部として扱う。構造物が塑性化した後、減衰効果により吸収するエネルギー入力の割合が小さい。また減衰効果を無視した地震応答は安全側の評価となる。以上のことを考え、減衰効果を無視する。

## 3. 入力地震動の設定

### 3.1. 模擬地震動のフーリエ特性

時間の関数である地震動記録は、フーリエ変換により周波数の領域で展開できる。桑村ら<sup>15)</sup>の研究では、一次固有周期 $T$ の構造物への総入力エネルギー換算速度 $V$ を地震動(加速度)のフーリエ振幅 $|F(T)|$ で近似できるということを示している。一方、大崎ら<sup>16)</sup>の研究では、實地震動の位相差分が正規分布に近く、しかも、その平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ はそれぞれ地震動波形の最大振幅が起る時間と時間軸上の波形分布の広がりに対応するということを指摘している。ここでは佐藤ら<sup>6)</sup>と同様にフーリエ逆変換により模擬地震動を5波作成する。模擬地震動のフーリエ振幅スペクトルと位相差分の統計

表1 位相差分の統計特性

表記	波形	$\mu$ ( $2\pi$ )	$\sigma$ ( $2\pi$ )
WB5002	直下型	0.50	0.02
WB5005		0.50	0.05
WB5010	...	0.50	0.10
WB5015		0.50	0.15
WB5030	海洋型	0.50	0.30

(←) 図4 フーリエ振幅スペクトル

特性を図4と表1に示す。

### 3.2. 地震動特性の評価

図5は、作成した模擬地震動の加速度の時刻歴である。位相差分の平均値を $0.5 \times 2\pi$ で設定した結果、いずれの地震動でも継続時間(40.96秒)の中程で加速度の最大振幅(PGA)が起こる。また、同じフーリエ振幅を有して構造物へのエネルギー入力が固定されるにもかかわらず、直下型地震動は海洋型地震動より大きな波形振幅を有する。

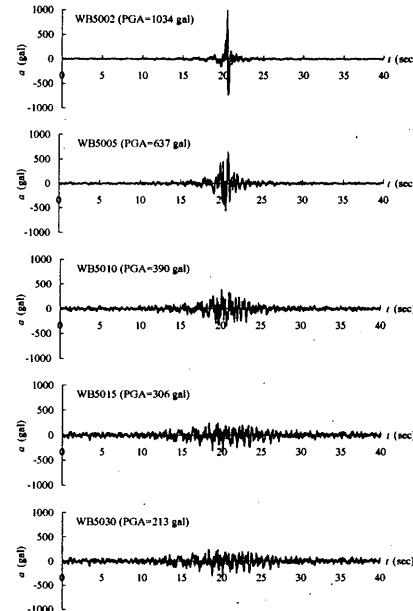


図5 模擬地震動の加速度時刻歴

図6は模擬地震動の絶対加速度応答スペクトルである。そこでは構造物の固有周期 $T$ によって模擬地震動の最大応答値は多少違うが、全体的に同じ傾向を示している。

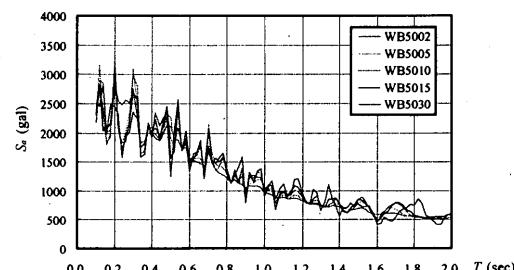


図6 模擬地震動の絶対加速度応答スペクトル (減衰係数 h=0%)

また式(5)に示すように絶対加速度の最大応答  $S_a$  との近似関係から、相対速度と相対変位の最大応答  $S_v, S_d$  にも同じ傾向があると考えられる。

$$S_a \approx \omega S_v \approx \omega^2 S_d \quad (5)$$

ここに、

$$\omega : \text{円振動数}, \omega = 2\pi/T$$

上述のことから、地震動のフリエ振幅スペクトル  $|F(T)|$  を固定すれば構造物の最大弾性応答がほぼ同じになることと、構造物を弾性限界に至らせるに必要なエネルギーは地震動の波形によらず一定であることが推定される。

#### 4. 地震応答解析

##### 4.1. 解析の概要

「2.構造モデルの設定と応答解析の方法」では、研究対象の単層三スパン骨組と五層三スパン骨組それぞれをフレームモデルと質点系モデルにモデル化した。ここでは、上述の構造モデルを用いて応答解析を行い、弾性限界、劣化限界および倒壊限界の三つの限界状態を超えない模擬地震動の最大の加速度倍率  $\beta$ （以下は限界加速度倍率と呼ぶ）とそれに対応する総入力エネルギー換算速度を求める。説明を容易にするため、フレームモデルと質点系モデルそれぞれの応答結果に添字の  $f$  と  $s$  を付けることにする。

##### 4.2. フレームモデルと質点系モデルの地震応答の比較

ここでは層の荷重・変形関係を同様に設定したうえで、フレームモデルと質点系モデルの地震応答を比較して、構造モデルが中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価に与える影響を明確にする。

###### (1) 単層フレームモデルと一質点系モデルとの比較結果

表 2 には単層フレームモデルの限界加速度倍率  $\beta_f$  と一質点系モデルの限界加速度倍率  $\beta_s$  の比を示す。ほとんどの地震応答では、一質点系モデルの限界加速度倍率  $\beta_s$  は単層フレームモデルの限界加

表 2 単層フレームモデルの限界加速度倍率  $\beta_f$  と一質点系モデルの限界加速度倍率  $\beta_s$  の比

$\beta_s/\beta_f$	模擬地震動（直下型→海洋型）				
	WB5002	WB5005	WB5010	WB5015	WB5030
弾性限界	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
劣化限界	0.98	0.98	0.90	1.05	1.00
倒壊限界	0.98	1.08	1.03	0.92	0.98

表 3 五層フレームモデルの限界加速度倍率  $\beta_f$  と五質点系モデルの限界加速度倍率  $\beta_s$  の比

$\beta_s/\beta_f$	模擬地震動（直下型→海洋型）				
	WB5002	WB5005	WB5010	WB5015	WB5030
弾性限界	1.00	0.92	0.96	0.96	0.75
劣化限界	0.96	1.02	0.91	1.03	0.92
倒壊限界	1.01	1.04	0.94	0.97	0.88

表 4 五層フレームモデルと五質点系モデルの弾性限界、劣化限界及び倒壊限界に至る層の位置

弹性限	模擬地震動（直下型→海洋型）				
	WB5002	WB5005	WB5010	WB5015	WB5030
質点系	第三層	第三層	第三層	第三層	第三層
フレーム	第一層	第三層	第三層	第三層	第一層
劣化限	模擬地震動（直下型→海洋型）				
WB5002	WB5005	WB5010	WB5015	WB5030	
質点系	第三層	第三層	第三層	第三層	第三層
フレーム	第三層	第三層	第三層	第三層	第三層
倒壊限	模擬地震動（直下型→海洋型）				
WB5002	WB5005	WB5010	WB5015	WB5030	
質点系	第一層	第一層	第三層	第三層	第三層
フレーム	第一層	第一層	第三層	第三層	第三層

速度倍率  $\beta$  よりやや小さくなる。つまり、一質点系モデルの応答結果は単層骨組の耐震性を安全側に評価する。図 7 は、直下型模擬地震動 WB5002 と海洋形模擬地震動 WB5030 の倒壊限界に対する履歴応答である。そこでは、単層フレームモデルの倒壊限界加速度倍率  $\beta_f$  と一質点系モデルの倒壊限界加速度倍率  $\beta_s$  のうち小さいほうを応答比較に用いることにした。図 7 に示すように、単層フレームモデルと一質点系モデルそれぞれの履歴カーブ、弾性除荷する時とその後再び降伏する時の剛性および耐力劣化の進行度合いなどが違っている。しかし、これらの相違によって履歴応答が大きく変わらない。したがって、このような弾塑性履歴応答はどの構造モデルにおいても同様に見られる。

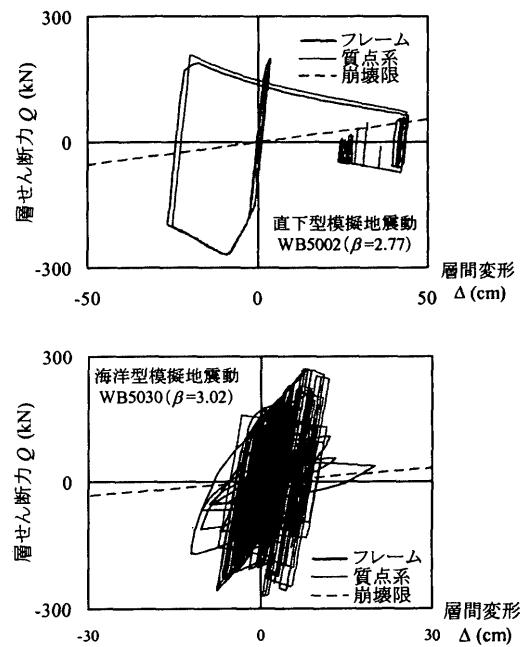


図 7 単層フレームモデルと一質点系モデルの履歴応答の比較

###### (2) 五層フレームモデルと五質点系モデルとの比較結果

五層フレームモデルの限界加速度倍率  $\beta_f$  と五質点系モデルの限界加速度倍率  $\beta_s$  の比を表 3 に示す。表 3 を表 2 に対照した結果、骨組が多層化するとともに質点系モデルの予測精度はやや低下しているが、平均誤差は 10% に抑えられている。また、表 4 に示すように、限界状態に至る層の位置は構造モデルによらずほぼ同じである。一方、五層フレームモデルと五質点系モデルの履歴応答を比較したところ、両者の間に差異はあまり観察されなかった（用紙の制限で履歴応答例の掲示を省略した）。

###### (3) 比較結果から得られた結論

上述の検討から本論と同様に置換すれば、簡単な質点系モデルを用いて中低層鉄骨ラーメン構造を精度よく評価できることが分かる。

##### 4.3. 構造物の限界性能と地震動の入力特性の関連

先に報告したように、フレームモデルと質点系モデルの応答結果はかなり近くなっている。それで以下にはフレームモデルの地震応答を通じ、構造物の限界性能と地震動の入力特性の関連を探究する。

### (1) 限界加速度倍率 $\beta$ に及ぼす地震動の位相特性の影響

図8と図9は、単層フレームモデルの限界加速度倍率 $\beta$ とそれに対応する総入力エネルギー換算速度 $V_f$ の応答結果である。図8で示されたように、地震動の波形が直下型から海洋型まで変化すると、弾性限界加速度倍率と倒壊限界加速度倍率はあまり変わらないのに対し、劣化限界加速度倍率は著しく上昇している。一方、すでに説明したように一次固有周期 $T$ の構造物への総入力エネルギー換算速度 $V_f$ は、地震動原波 ( $\beta=1.0$ ) のフーリエ振幅  $|F|$  と加速度倍率 $\beta$ の積で近似できる。図8と図9を対照した結果、直下型模擬地震 WB5002 と遠距離型模擬地震 WB5005 それぞれの倒壊限界加速度倍率 $\beta$ に対応する総入力エネルギー換算速度の応答値 $V_f$ は理論値より低くなっていることが分かる。図10と図11は、五層フレームモデルの限界加速度倍率 $\beta$ とそれに対応する総入力エネルギー換算速度 $V_f$ である。そこで、五層フレームモデルの地震応答は単層フレームモデルとほぼ同様な傾向があると見られる。

### (2) 五層フレームモデルの入力地震動による損傷分布

図12と図13には、五層フレームモデルの劣化限界と倒壊限界に対する層の損傷分布を示す。部材断面を通常の構造設計と同じく二、三層ごとに変化させた結果、五層骨組の第一層と第三層が比較的に弱くなっている。地震応答解析では、損傷がこれらの層に集中し、構造系全体の限界性能は弱層の弾塑性挙動に大きく左右される。表3で示されたように、いずれの地震応答でも第三層が最初に耐力劣化している。図12では地震動の波形が直下型から海洋型へ変化すると、耐力劣化した第三層の歪エネルギー吸收は構造系全体の歪エネルギー吸收の四割から六割まで増加する。つまり、多層骨組における弱層への損傷集中は、直下型地震動よりも海洋型地震動のほうが激しい。一方、地震動の波形が海洋型に近づくと、最初に耐力劣化した第三層が層崩壊しやすくなる。逆に、地震動の波形が直下型に近づくと、遅めに耐力劣化した第一層が先に層崩壊する可能性が出てくる。図13の倒壊限界に対する損傷分布では、地震動の波形が海洋

型に近づくと、第三層が吸収する塑性歪エネルギーの割合は増加するのに対し、第一層が吸収する塑性歪エネルギーの割合は減少する。上述の結果は地震動の荷重効果による影響と考えられる。直下型地震動は単調載荷と同様に複数の層にほぼ同時に降伏や耐力劣化をさせ、損傷は構造系全体に分散する。一方、海洋型地震動は繰り返し載荷と同じく各層で小さな変形を繰り返させ、初期に降伏や耐力劣化をした層に損傷が集中する。

### (3) 模擬地震動の限界加速度に対する履歴応答の考察

(1)の限界加速度倍率 $\beta$ とそれに対応する総入力エネルギー換算速度 $V_f$ の応答結果から、五層フレームモデルの地震応答は単層フレームモデルとほぼ同様に見られる。それで、説明を容易にするために、以下には単層フレームモデルの履歴応答を通して、構造物の限界性能と地震動の入力特性との関連を究明する。

図14は直下型地震動 WB5002 と海洋型模擬地震動 WB5030 の弾性限界加速度に対する層間変形時刻歴である。そこでは、地震動の継続時間 40.96 秒を超えてから、構造物が自由振動する。図14で示されたように、いずれの地震応答でも地震動で起こる最大応答は、地震終了後の自由振動で生じる振幅とはほぼ等しくなっている。入力地震動に関係なく、構造物が弾性限界に達するとその層間変形は降伏層間変形に等しくなる。一方、無減衰弾性系の場合に、地震終了後の自由振動の変形振幅は地震動の総エネルギー入力に対応する。これらのことと総合にして、構造物を弾性限界に至らせるに必要な地震動の総エネルギー入力はその波形に影響されずほぼ同じであると考えられる。またすでに説明したように、地震動の総エネルギー入力換算速度はそのフーリエ振幅スペクトルで一義的に決められる。このことから、地震動のフーリエ振幅スペクトル  $|F(T)|$  を固定すれば、弾性限界加速度倍率は地震動の位相特性によらずほぼ一定となる。このために、図8と図9で示されたように地震動の波形が直下型から海洋型まで変化しても、弾性限界加速度倍率とそれに対応する総入力エネルギー換算速度はあまり変わらない。

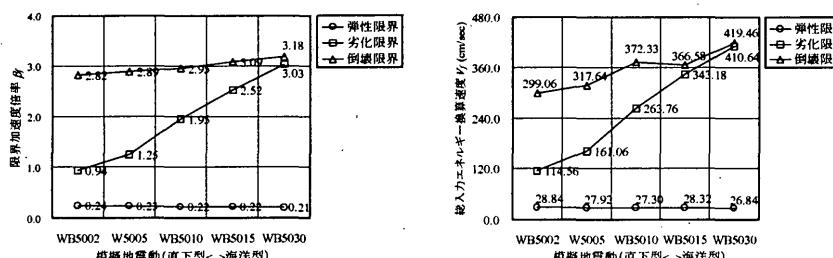


図8と図9 単層フレームモデルの限界加速度倍率と総入力エネルギー換算速度

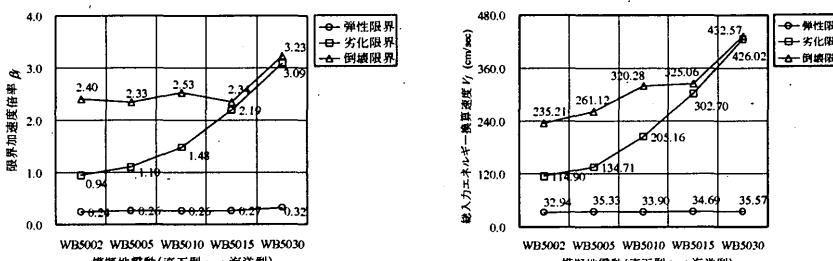


図10と図11 五層フレームモデルの限界加速度倍率と総入力エネルギー換算速度

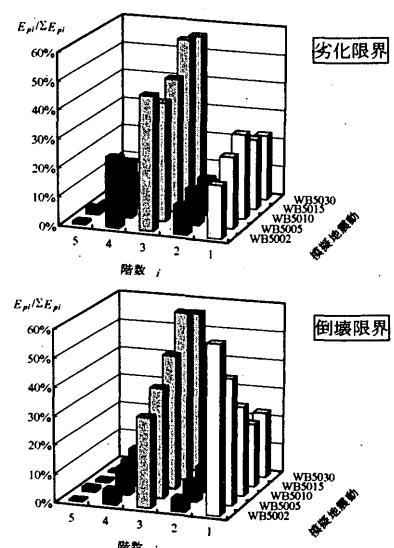


図12と図13 層の損傷分布 ( $E_{pj}$ : 層の歪エネルギー)

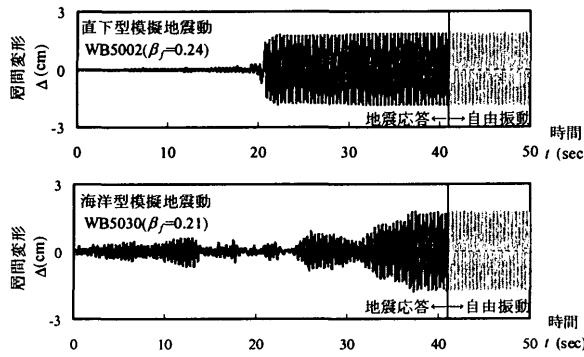
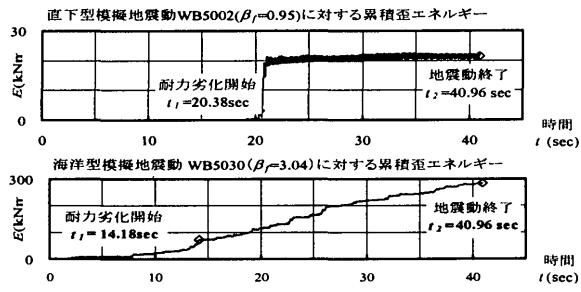
図 14 模擬地震動の弾性限界加速度に対する単層フレームモデルの層間変形の時刻歴  $h=0\%$ 

図 16 模擬地震動の劣化限界加速度をわずかに超えた加速度に対する累積エネルギー時刻歴

図 15 に劣化限界加速度に対する単層フレームモデルの履歴応答例を示す。そこで直下型地震動を受けると構造物が単調載荷的挙動をし、小さなエネルギー入力で倒壊限界に至るのに対し、海洋型地震動を受けると構造物が小さな振幅の塑性変形を繰り返るので、劣化限界に至らせるには大きなエネルギー入力が必要となる。このため、図 8 と図 9 の劣化限界加速度倍率とそれに対応する総エネルギー一入力換算速度は地震動の波形が海洋型に近づくにつれて激増する。

図 16 は、直下型地震動 WB5002 と海洋型模擬地震動 WB5030 それぞれの劣化限界加速度をわずかに超えた単層フレームモデルの累積塑性歪エネルギーの時刻歴である。そこで、直下型地震動の一撃入力で構造物が耐力劣化し始める。それ以降、直下型地震動のエネルギー入力がすでに完了したので、構造物がさらに耐力劣化することはない。したがって、直下型地震動の劣化限界加速度を多少超えても、構造物が直ちに倒壊限界に至らない。一方、海洋型地震動を受けると、地震動の継続時間の中程で構造物が耐力劣化し始める。その後、海洋型地震動が継続的にエネルギー入力し、耐力劣化した構造物が一気に倒壊限界に迫る。このために、海洋型地震動の劣化限界加速度倍率をわずかに超えただけでも、構造物が倒壊限界に至る危険性が出てくる。

図 17 は、単層フレームモデルの倒壊限界における劣化前後の歪エネルギー吸収の換算速度である。地震動の波形が海洋型に近づくと、倒壊限界における劣化以前の歪エネルギー吸収は顕著に増加しているのに対し、倒壊限界における劣化以後の歪エネルギー吸収はあまり変わっていない。図 18 には、単層フレームモデルの倒壊限界における劣化前後の歪エネルギー吸収の割合を示す。そこで、倒壊限界における劣化以後の歪エネルギー吸収は全部の歪エネルギー吸収の六割以上を占めている。つまり、倒壊

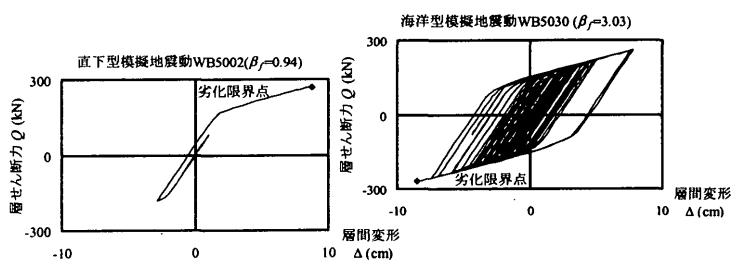


図 15 模擬地震動の劣化限界加速度に対する単層フレームモデル履歴応答

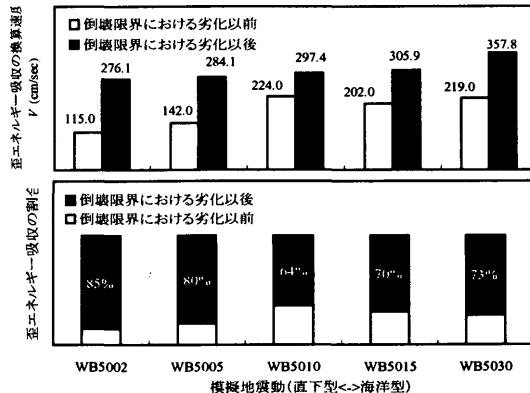


図 17 と図 18 倒壊限界に対する歪エネルギー吸収の内訳

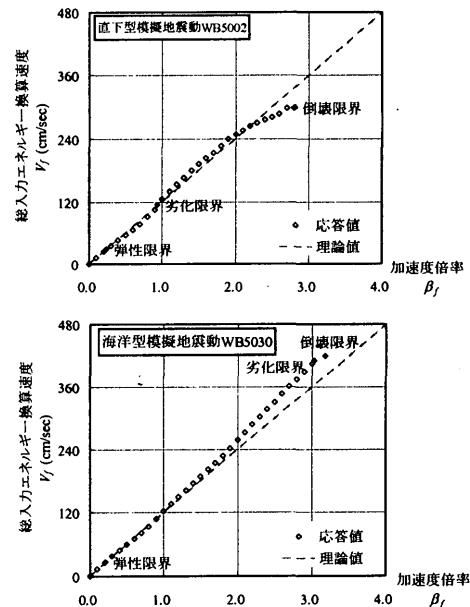


図 19 と図 20 模擬地震動の加速度倍率と総入力エネルギー換算速度との対応関係

限界における劣化域での歪エネルギー吸収は圧倒的に大きい。上述の歪エネルギー吸収の内訳は、地震動の波形が海洋型に近づくにつれても倒壊限界加速度倍率は劣化限界加速度倍率ほど増加しないことを意味する。

図 19 と図 20 は模擬地震動の加速度倍率  $\beta_f$  とそれに対応する総入力エネルギー換算速度  $V_f$  の地震応答例である。参考のために、地震

動原波のフーリエ振幅スペクトル  $|F(T)|$  と加速度倍率  $\beta$  に基づいて計算した総入力エネルギー換算速度  $V_f$  の理論値を同図の破線で表す。理論値と比較した結果、劣化構造物に対する直下型模擬地震動 WB5002 の総エネルギー入力換算速度の応答結果が低下している。一方、海洋型模擬地震動 WB5030 の総入力エネルギー換算速度の応答値は理論値よりやや大きくなっている。図 9 の倒壊限界に対する総入力エネルギー換算速度の応答結果では、直下型地震動に対する構造物のエネルギー吸収能力が少なく見られる。また図 19 で示されたように、劣化構造物に対する直下型地震動のエネルギー入力が低下する。この二つが相殺することにより、地震動の波形を直下型から海洋型に変化させても、図 8 の倒壊限界加速度倍率は 10% しか変わらない。

## 5. 結び

本論では、中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価に及ぼす構造モデルと入力地震動の影響を応答解析により検討した。解析には弱柱型骨組を対象とし、減衰効果を無視した。一連の検討により以下のことが明らかになった。

- ① 本研究では層の荷重と変形の関係を一致させたうえで、フレームモデルと質点系モデルの地震応答を比較した。その結果、前述のように置換すれば、簡単な質点系モデルを用いて中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性を弹性限界、劣化限界、倒壊限界のいずれにおいても精度よく評価できることが分かる。
- ② 研究対象の鉄骨骨組は通常の設計と同様に部材断面を二、三層ごとに変化させる。部材断面の不連続的な変化によって、五層骨組の第一層と第三層が比較的弱くなる。地震応答解析では、これらの弱層への損傷集中が顕著で、構造系全体の限界性能がこれらの弱層の弾塑性挙動によってほぼ決まる。結果的に、限界加速度倍率などの地震応答結果には五層骨組は单層骨組とほぼ同様な傾向を示している。
- ③ 無減衰弹性系の地震動による最大応答と、地震終了後の自由振動の振幅とほぼ等しい。それで、地震終了後の自由振動の振幅が地震動の総入力エネルギー換算速度に対応し、しかも、地震動の総入力エネルギー換算速度はそのフーリエ振幅スペクトルで一義的に決められる。これらのことから、地震動のフーリエ振幅を固定すれば、弹性限界加速度倍率は地震動の波形によらずほぼ一定となる。
- ④ 直下型地震動を受けると構造物は単調的挙動をし、小さなエネルギー入力で劣化限界に至る。一方、海洋型地震動を受けると構造物が小さな振幅の塑性変形を繰り返し、劣化限界に至らせるには大きなエネルギー入力が必要となる。このため、地震動の波形が海洋型に近づくと劣化限界加速度倍率は上昇する。
- ⑤ 地震動の波形が直下型に近づくと、倒壊まで構造物が吸収できるエネルギーは減少する。一方、劣化した構造物に対する直下型地震動の総入力エネルギーが低下する。この二つが相殺することにより、地震動の波形が直下型から海洋型まで変化しても倒壊限界加速度倍率はあまり増加しない。

## 謝辞

本論は、筆者が東京大学工学系研究科建築学専攻の博士課程に在籍して行った学位研究の一部である。在学期間(1999.04. - 2003.09.)、指導教官である桑村仁教授および同研究室の伊山潤講師からご指導・ご助言を頂きました。また投稿論文の完成には、埼玉大学地圈科学研究センターの川上英二教授からご指導・ご意見を頂きました。この場を借りて、関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 向田雄一郎：鉄骨造構法の開発と在来化に関する研究、東京大学大学院 1999 年度修士論文、2000.3.
- 2) 秋田智、田中淳夫、増田浩次：中低層鉄骨造骨組に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集 C1, pp.1321-1322, 1994.9.
- 3) 秋田智、田中淳夫、増田浩次：中低層鉄骨造建築物の構造体に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集 C1, pp.163-164, 1995.8.
- 4) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告・建築 3, 1997.2.
- 5) 東京大学工学部建築学桑村研究室：1995 年兵庫県南部地震被害調査報告書－構造物の被害、1995.5.
- 6) 佐藤義也と桑村仁：直下型地震に対する構造物の必要耐力、日本建築学会大会学術講演梗概集 B1, pp.241-242, 1995.8.
- 7) 上谷宏二、田川浩：梁降伏型骨組の動的崩壊過程における変形集中現象、日本建築学会構造系論文集第 489 号, pp. 77-86, 1996.11.
- 8) 山田哲、松本由香：梁部材の終局挙動が鋼構造多層骨組の耐震性能に与える影響、日本建築学会構造系論文集 535 号, pp. 133-140, 2000.9.
- 9) 桑村仁、竹田拓也、佐藤義也：地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率－直下型地震動と海洋型地震動の比較を通して－、日本建築学会構造系論文集第 491 号, pp.29-36, 1997.1.
- 10) 桑村仁、伊山潤、朱大立：局部座屈劣化系の地震による倒壊および残留変形、日本建築学会構造系論文集, No.526, pp.169-176, 1999.12.
- 11) 角形鋼管の部材性能に関する文献調査結果、社団法人鋼材俱楽部ボックスコラム小委員会、1994.11.
- 12) 張惠雲、桑村仁：局部座屈劣化系を伴う多層鉄骨骨組の倒壊、2000 年度日本建築学会関東支部研究報告書、2001.3.
- 13) 山田哲：局部座屈を伴う鋼部材の劣化挙動と剛接骨組の終局耐震性、東京大学 1994 年度博士論文、1995.3.
- 14) 張惠雲：中低層鉄骨ラーメン構造の耐震性評価における構造モデルと入力地震動の研究、東京大学 2003 年度博士論文、2003.9.
- 15) 桑村仁、秋山宏、桐野康則：フーリエ振幅スペクトルの平滑化による地震入力エネルギーの評価、日本建築学会構造系論文報告集第 442 号, pp.53-60, 1992.12.
- 16) 大崎順彦、岩崎良二、大川出、政尾亭：地震波の位相特性とその応用に関する研究、第 5 回日本地震工学シンポジウム, pp.201-208, 1978.11.

(2003年7月8日原稿受理、2003年10月1日採用決定)