多質点弾塑性系の最大層間変形角速度応答

MAXIMUM INTERSTORY VELOCITY OF ELASTO-PLASTIC MULTI-DEGREE
OF FREEDOM SYSTEM DUE TO SEVERE EARTHQUAKE上村 健二^{*1}, 井上一郎^{*2}

Kenji UEMURA and Kazuo INOUE

It has been pointed out that the strain rate affects on the ductility of mild steel. For the steel moment frame of the strong column type, the strain rate at the end of the beam flange is determined by the rotational velocity. The velocity is almost equals to the interstory velocity when the beam is in the plastic region. In this paper, the various elasto-plastic multi-degree of freedom systems are analyzed with the parameters of input motions, number of story, story height and hysteretic characteristics. The maximum interstory velocity is about 0.1rad/s and 0.2rad/s at most. To estimate the maximum interstory velocity, the velocity is examined theoretically and the estimate method is proposed. The velocity of the theoretical estimation is roughly equals to that of the dynamic responses.

Keywords : strain rate, interstory velocity, multi-degree of freedom system, seismic response analysis

歪速度, 層間変形角速度, 多質点系, 地震応答解析

1. 序

鋼材の破壊靱性に及ぼす歪速度の影響が指摘され²⁾, 動的載荷実験^{3~5)}や速度応答の数値解析^{6, 7)}が行われている。地震時に生じる梁端の歪度は梁端回転角と関係づけられ, 梁端の歪速度は梁端回転角速度の関数となる⁸⁾。ラーメン構造の梁端部を対象とし, 図1に示すように微小時間における梁端の塑性ヒンジ回転角増分を $\Delta\theta$, 層間変形角増分を ΔR とする。図1(a)のように梁の両端にはほぼ同時に塑性ヒンジが形成される場合は, 梁端の回転角速度はほぼ層間変形角速度に等しい。また梁の中間荷重が大きく, 図1(b)のようにまず一方の梁端に塑性ヒンジが形成される場合は, この塑性ヒンジの回転角速度は層間変形角速度の1.5倍になる。どちらの場合も梁端の歪速度は層間変形角速度に直接支配されることになる。したがって, 梁端に生じる歪速度の最大値を把握するためには, 層

間変形角速度の最大値を求める必要がある。

本論では, 地震時に発生する最大層間変形角速度を把握することを目的として, 層数・階高・層の復元力モデル・入力地震動をパラメータとするせん断形多質点系の弾塑性地震応答解析を行い, 最大層間変形角速度に関して整理を行う。また, 最大層間変形角速度の評価式を理論的に誘導し, 応答解析結果と比較する。

2. せん断形多質点系の弾塑性地震応答解析

2.1 復元力特性

復元力モデルとしては, 図2に示す完全弾塑性型と Tri-Linear型の2種類を用いる。完全弾塑性型は梁のスパンが短い場合に相当し, Tri-Linear型は梁スパンが長く, かつ Bauschinger 効果を考慮した場合に相当する。図2の復元力モデルに関する諸量の設定条件は次のとおりである。

- [1] 各層の階高, 質量は等しい。
- [2] 1次設計用の標準せん断力係数 $1C_0 = 0.2$ に対する弾性層間変形角は $1/200\text{rad}$ である。
- [3] Tri-Linear 型の第1折れ曲がり点の層せん断力は保有水平耐力の $2/3$, 2次剛性は初期剛性の 0.3 倍とする。
- [4] 保有水平耐力レベルに対応するベースシヤー係数 C_{BU} (以下,

(a)両端にヒンジが生じる場合 (b)片端にヒンジが生じる場合

図1 層間変形角増分と梁端回転角増分の関係

本論文は, 文献1)に発表したものに解析データおよび, 最大層間変形角速度の評価式を追加したものである。

^{*1} 川崎製鉄(株)建材センター鋼構造研究所 研究員・工修

^{*2} 京都大学大学院工学研究科生活空間学専攻 教授・工博

Research Engineer, Steel Structure Research Labs., Construction Materials Center, Kawasaki Steel Corp., M. Eng.
Prof., Dept. of Architectural and Environmental Design, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

終局ベースシヤ係数)は、2次設計用の標準せん断力係数を1.0として(1)式によって定め、各層の保有水平耐力の分布は(2)式の A_i 分布^{9~12)}による。

$$C_{BU} = R_i D_S \quad (1)$$

$$A_i = 1 / \sqrt{\alpha_i}, \quad \alpha_i = \sum_{j=i}^N m_j / M \quad (2)$$

ここで、 m_i : i 層の質量、 M : 全質量、(1)式における振動特性係数 R_i の決定に必要な基本固有周期 T は、条件[1]、[2]および(2)式から次式で与えられる¹³⁾。

$$T^2 = \frac{2 \pi^2 h R_a (N+1) (2N+1)}{3 Z R_i C_0 g \sum_{i=1}^N \sqrt{\alpha_i}} \quad (3)$$

ここで、 h : 階高、 R_a : 1次設計用の標準せん断力係数に対する弾性層間変形角 ($R_a = 0.005$)、 N : 層数、 Z : 地域係数 ($Z = 1$)。

(1) 式における振動特性係数 R_i の算定には第2種地盤 ($T_c = 0.6$) に対応するものを用い、次式のように基本固有周期 T について場合分けして与える。

$$T \leq 1.6 T_c \text{ の場合: } R_i = 1 \quad (4)$$

$$T > 1.6 T_c \text{ の場合: } R_i = \frac{1.6 T_c}{T} \quad (5)$$

$T \leq 1.6 T_c$ の場合、(3)、(4)式より、 T は次式のように得られる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h R_a (N+1) (2N+1)}{6 Z C_0 g \sum_{i=1}^N \sqrt{\alpha_i}}} \quad (6)$$

$T > 1.6 T_c$ の場合、(3)、(5)式より、 T は次式のように得られる。

$$T = \frac{\pi^2 h R_a (N+1) (2N+1)}{2.4 T_c Z C_0 g \sum_{i=1}^N \sqrt{\alpha_i}} \quad (7)$$

図2 層せん断力-層間変形角関係の復元力モデル

表1 解析系の固有周期と終局ベースシヤ係数

N	T (s)	T ₁ (s)	T ₂ (s)	C _{BU}	
				D _S = 0.3	D _S = 0.5
1	0.635	0.635		0.300	0.500
2	0.768	0.775	0.314	0.300	0.500
3	0.886	0.909	0.358	0.300	0.500
4	1.024	1.049	0.406	0.270	0.450
5	1.231	1.237	0.474	0.234	0.390
6	1.439	1.447	0.551	0.200	0.334
8	1.856	1.869	0.707	0.155	0.259
10	2.274	2.291	0.863	0.127	0.211
12	2.692	2.714	1.021	0.107	0.178
16	3.529	3.560	1.336	0.082	0.136
20	4.367	4.511	1.691	0.063	0.105

(7)式を(5)式に代入して $T > 1.6 T_c$ の場合の R_i が得られる。

$D_S = 0.3, 0.5$ 、階高 $h = 4\text{m}$ の場合について、解析対象とした層数と対応する基本固有周期 T 、固有値解析による1次と2次の固有周期(T_1, T_2)、終局ベースシヤ係数 C_{BU} をまとめて表1に示す。 D_S 値のレベルは0.3と0.5を採用し、一部0.25と弾性系についても解析を行った。階高 h は4mを基本とし、一部3mと8mについても解析を行った。

2.2 入力地震動と応答解析

入力地震動は表2に示す5波である。各地震動の擬似速度応答スペクトル S_V と最初の40秒までの加速度パワー I_E の時刻歴を図3に示す。 I_E は次式で定義される¹⁴⁾。

$$I_E(t) = \int_0^t (\ddot{y})^2 dt \quad (8)$$

ここで、 $\ddot{y}$ は時刻 t での地動加速度であり、 I_E はその二乗積分値である。図3は全継続時間 t_0 に対する全加速度パワー $I_E(t_0)$ で無次元化している。

入力地震動の強さは、損傷に寄与する地震入力エネルギー E_{dn} の速度換算値 V_{dm} がある一定値になるように決定している。ここで、 E_{dn} と V_{dm} は次式で定義される。

$$E_{dn} = (E_{Dp} + E_e)_{max} \quad (9)$$

$$V_{dm} = \sqrt{\frac{2 E_{dn}}{M}} \quad (10)$$

上式で、 E_{Dp} は塑性履歴による吸収エネルギー、 E_e は弾性振動エネルギーで歪エネルギーと運動エネルギーの和である。 V_{dm} は150cm/

表2 入力地震動

加速度記録	略称	最大加速度	継続時間	解析時間
El Centro 1940 NS	El Centro NS	341.7Gal	53.7s	30s
Taft 1952 EW	Taft EW	175.9Gal	54.4s	30s
神戸海洋気象台 1995 NS	Kobe NS	821.0Gal	30.0s	20s
NTT神戸駅前ビルB3F 1995 EW	NTTB3F EW	153.5Gal	50.4s	20s
横浜表面波 (人工地震)	Yokohama	312.0Gal	40.0s	40s

図3 入力地震動の擬似速度応答スペクトルと加速度パワーの時刻歴

sを基本とし、一部225cm/s、300cm/sの場合も解析を行った。

減衰は1次、2次ともに減衰定数が0.01のRayleigh型としている。

2.3 地震応答解析結果

層間変形角速度応答の最大値 V_R に関する数値計算結果を図4～図7に示す。図4では各層の速度応答値および平均値をプロットしているが、図5～図7では、各層の速度応答の平均値だけを比較し

ている。ただし、Taft EWに対する応答値はEl Centro NSの応答値とほぼ同じであり、ここでは割愛した。なお、各解析結果の解析パラメータは、図中に示している。図8、図9はそれぞれ $D_S = 0.3$ 、 $D_S = 0.5$ の1質点系の最大速度の発生点と時刻を、その前後の履歴曲線上にプロットしたものである。

図4～図9に示す結果から、下記の特徴的事項が指摘される。

1) 最大層間変形角速度 V_R は復元力特性に影響されない。ただし V_R

図4 各層の最大層間変形角速度の応答と平均値

図5 最大層間変形角速度の平均値の比較（耐力レベルの影響）

の高さ方向分布については、完全弾塑性型の場合よりTri-Linear型の方がばらつきは小さい(図4)。

- 2) 系の耐力レベルが大きくなると V_R も大きくなる(図5)。
- 3) V_R は損傷に寄与する地震入力エネルギーにほぼ比例して大きくなる(図6)。
- 4) 層数の増加に伴って V_R は漸減する傾向にある。ただし、5層以上ではほぼ一定とみなせる(図4～図7)。
- 5) 階高が大きくなると若干 V_R は減少する傾向にある(図7)。
- 6) 加速度パワーが短時間に急激に増大する地震の方が、徐々に増大する地震に比べて大きな V_R を発生させる(図3～図5)。
- 7) 系の耐力レベルが D_S 値で0.3～0.5の場合、損傷に寄与する地震

図6 最大層間変形角速度の平均値の比較(入力レベルの影響)

入力エネルギーの速度換算値が150cm/sの入力レベル(第2種地盤に相当)に対する V_R の値は平均で0.1rad/s程度であり、高さ方向の応答のばらつきを含めても高々0.2rad/s程度である(図4～図7)。

- 8) V_R は、その前の半サイクルで塑性化している状態、すなわち弾性歪エネルギーが最大になった後、さらに大きな塑性履歴を受ける際に発生する場合が多い(図8, 図9)。

以上、最大層間変形角速度応答に関する解析結果について述べたが、鋼材の破壊靱性に関しては塑性化状態での最大値に着目する必要がある。図8と図9を比較すると、 D_S 値が大きくなるほど V_R は弾性域で生じることが多い。そこで、塑性化状態における最大層間変

図7 最大層間変形角速度の平均値の比較(階高の影響)

図8 1質点系の最大速度の発生点と時刻(●印; $D_S=0.3$ の場合)

図9 1質点系の最大速度の発生点と時刻(●印; $D_S=0.5$ の場合)

形角速度 V_{Rp} に関しても整理を行った。 V_{Rp} に関する数値計算結果を図10、図11に示す。塑性化状態の定義は、完全弾塑性型の場合、2次剛性の状態とし、Tri-Linear型の場合、2次および3次剛性の状態としている。図12は、層数が $N=1, 10, 20$ のケースについて各層の V_{Rp} の V_R に対する比(V_{Rp}/V_R)を示したものである。図12において、(V_{Rp}/V_R)が1.0の時は、塑性化状態で最大層間変形角速度が発生しており、1.0未満の場合は弾性域で最大層間変形角速度が発生していることを示す。

図10 塑性域の最大層間変形角速度の応答と平均値

前述の V_R に関する解析結果と比較して、図10～図12に示す結果から、下記の特徴的事項が指摘される。

- 1) V_{Rp} は V_R と比較して、層数 $N=1$ では V_R と同程度の値となっているが、層数 N が大きいくほど小さくなっている(図4、図10)。
- 2) V_{Rp} は、 V_R と同様、損傷に寄与する地震入力エネルギーが大きいほど大きくなっているが、系の耐力レベルにはほとんど影響されない(図11)。
- 3) 多質点系の場合、下層部および上層部では、塑性域または塑性

図11 塑性域の最大層間変形角速度の平均値の比較

図12 各層における最大層間変形角速度に対する塑性域の最大層間変形角速度の比

域に近い状態で最大層間変形角速度が発生しているが、中間層では弾性域で発生している場合が多く、 V_{Rp} は V_R の50%程度になっている(図12)。

3. 最大層間変形角速度の評価

3.1 評価方法

前章では、最大層間変形角速度応答に関する地震応答解析結果を示した。本章では、この応答値に関して理論的検討を行い、応答解析結果と比較する。

N 質点系の弾塑性構造物において、各質点に発生する運動エネルギーの和の最大値を E_{max}^k とし、これが損傷に寄与する地震入力エネルギー E_{dm} の r 倍であるとする。

$$E_{max}^k = r E_{dm} = r \frac{M V_{dm}^2}{2} \quad (11)$$

ここでは、各層の階高 h と質量 m が等しい多質点系を対象とし、次の仮定を設ける。

- [1] 各層の最大層間変形速度 V_S は等しい。
- [2] i 番目の質点の最大速度は、それより下の最大層間変形速度の二乗和平方根で表される。
- [3] 系全体の運動エネルギーの最大値は各質点の最大運動エネルギーの単純和で表される。

図13に、各層の最大層間変形速度応答値 V_S の解析結果を示す。各解析結果とも V_S は上層部で大きくなっているが、平均値の倍程度以下であり、ほぼ一様であるとみなせる。これが仮定[1]の根拠である。

各層の最大層間変形速度や各質点の最大速度は同時に生じない。仮定[2]はこの非同時性を考慮したものである。各質点系の最上部質点の最大速度の解析値と計算値を図14に示す。計算値は、各質点についてそれより下の最大層間変形角速度の応答値の二乗

和平方根の値である。両者はほぼ同程度の値となっており、仮定[2]も妥当であると考えられる。仮定[3]は1次のモードが卓越するものと考えて設定したものである。

仮定[1]、[2]より、 i 番目の質点の最大速度 V_{ui} は次式で表される。

$$V_{ui} = \sqrt{\sum_{j=1}^i V_S^2} = \sqrt{i} V_S \quad (12)$$

次に仮定[3]から、 N 質点系の最大運動エネルギー E_{max}^k は次式のように得られる。

$$E_{max}^k = \sum_{i=1}^N \frac{m V_{ui}^2}{2} = \frac{m V_S^2}{2} \sum_{i=1}^N i \quad (13)$$

ここで、

$$\sum_{i=1}^N i = \frac{N(N+1)}{2}, \quad M = mN \quad (14)$$

であるから、(13)式と(11)式を等値し、(14)式を代入することによって、最大層間変形角速度 V_R を与える次式が得られる。

$$V_R = \frac{V_S}{h} = \sqrt{\frac{2r}{N+1}} \frac{V_{dm}}{h} \quad (15)$$

ここで、(11)式において定義されている r 値を評価する必要がある。図15は骨組の層せん断力(Q)—層間変形(Δ)関係の1回の片振幅で吸収される弾性歪エネルギー ΔE_e と塑性歪エネルギー ΔE_p を示しており、1質点弾塑性系では、図15に示す弾塑性歪エネルギーの最大値とそれが発生するときの運動エネルギーの最大値が近似的に等しいことが示されている⁶⁾。すなわち、次式が成り立つ。

$$E_{max}^k = \Delta E_e + \Delta E_{pmax} \quad (16)$$

また文献15)によれば、1サイクル当たりの履歴吸収エネルギーと弾性歪エネルギーの和の最大値 ΔE_{max} と総入力エネルギー E_I の関係が次式で与えられている。

図13 各層における最大層間変形角速度

図14 各多質点系の最上部質点の最大速度に関する解析値と計算値

$$0.5^2 \leq \frac{\Delta E_{max}}{E_T} \leq 0.7^2 \quad (17)$$

ΔE_{max} は次式で表される。

$$\Delta E_{max} = \Delta E_e + 2\Delta E_{pmax} \quad (18)$$

E_T は減衰による消費エネルギーも含まれているので、(11)式の E_{dm} と同一ではないが、近似的に $E_T = E_{dm}$ とみなすと、(11), (16)~(18) 式より、次式が得られる。

$$\frac{1}{2} (0.5^2 + \frac{\Delta E_e}{E_{dm}}) \leq r \leq \frac{1}{2} (0.7^2 + \frac{\Delta E_e}{E_{dm}}) \quad (19)$$

上式の $(\Delta E_e / E_{dm})$ の項は弾性歪エネルギーの損傷に寄与する地震入力エネルギーに対する比であり、ここでは次式のように置く。

$$\Delta E_e / E_{dm} = D_S^2 \quad (20)$$

さらに、 ΔE_{pmax} は E_{dm} の1/4程度であることが指摘されていて¹⁶⁾、これは(19)式における上限値に対応する。本論では、これらの結果を考慮して r 値を次式で与える。

$$r = 0.25 + D_S^2 \quad (21)$$

(21)式の右辺第1項は塑性歪エネルギーに対応し、第2項は弾性歪エ

図15 1回の片振幅で吸収される弾塑性歪エネルギー

図16 損傷に寄与する地震入力エネルギーに対する最大運動エネルギーの比に関する解析値と評価値

図17 最大層間変形角速度の解析値と評価値（入力レベルの相違の影響）

ネルギーに対応する。図16は、前章の解析結果を用いて(11)式から得られる r 値をプロットしたものであり、図中の点線は、(21)式に $D_S = 0.3$ を代入した値を、一点鎖線は、 $D_S = 0.5$ を代入した値を示す。当然、同じ D_S 値においても、多質点系および地震波の特性によって r 値は変動しており、(21)式による評価値は、El Centro NSと Kobe NSの r 値に対しては平均的な値を、NTTB3FEWと Yokohama に対しては上限的な値を表す結果となっている。

(15)式と(21)式より、最大層間変形角速度 V_R の推定式が次のように得られる。

$$V_R = \sqrt{\frac{2(0.25 + D_S^2)}{N+1}} \frac{V_{dm}}{h} \quad (22)$$

3.2 応答解析結果との比較

(22)式より得られる最大層間変形角速度 V_R の計算値を実線で、応答解析結果（各層の平均値）をプロット点で図17～図19に示す。応答解析結果については、本論で採用した地震波に対して応答値の大きな El Centro NSと Kobe NS、および応答値の小さな Yokohama について示している。応答解析結果に対して理論値は質点数が多くなるにつれて過大から過小評価に移行しているが、全体的には入力エネルギーの大きさ、 D_S 値、および階高の影響による定性的な応答値の違いを表現している。

4. 結論

地震時に梁端に発生する歪速度は層間変形角速度と直接関係する。本論では、せん断型多質点系の弾塑性地震応答解析を行い、最大層間変形角速度 V_R および塑性域における最大層間変形角速度 V_{Rp} に関する解析結果を示した。さらに、最大層間変形角速度 V_R

図18 最大層間変形角速度の解析値と評価値（耐力レベルの相違の影響）

図19 最大層間変形角速度の解析値と評価値（階高の影響）

の推定式を誘導し、解析結果との比較を行った。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) V_R は、損傷に寄与する地震入力エネルギーにほぼ比例して大きくなり、また層数の増加に伴って漸減する傾向にある。
- 2) 加速度パワーが短時間に急激に増大する地震の方が、徐々に増大する地震に比べて大きな V_R を発生させる。
- 3) V_R は、系の耐力レベルが大きいほど大きくなるが、塑性化領域における最大層間変形角速度 V_{Rp} は、系の耐力レベルにほとんど影響されない。
- 4) 系の耐力レベルが D_S 値で0.5以下の場合、損傷に寄与する地震入力エネルギーの速度換算値が150cm/sの入力レベル（第2種地盤に相当）に対する V_R の値は平均で0.1rad/s程度であり、高さ方向の応答のばらつきを含めても高々0.2rad/s程度である。
- 5) 本論で提案した V_R の推定式は、 V_R の概略値を把握する上で有効である。

謝辞

本研究は（社）日本溶接協会 APD 委員会（委員長：千葉大学教授 高梨晃一博士）における研究の一環として行ったものである。後指導・後討議いただいた高梨晃一博士、委員諸氏に末筆ながら付記して感謝の意を表する。

付記 本論の数値解析は、熊本大学教授 小川厚治博士作成のプログラム「shearms.f」による。

【参考文献】

- 1) 井上一郎、上村健二：多質点弾塑性系の最大層間変形角速度応答、日本建築学会近畿支部研究報告集、構造系、pp.257-260、1997.7.
- 2) 青木博文、加藤勉、難波恒夫、佐藤巨宏：変断面鋼板引張材の変形能力に及ぼす試験温度・ひずみ速度の影響、日本建築学会論文報告集、No.322、pp.11-17、1982.12.
- 3) 寺田岳彦、矢部喜堂、真瀬伸治、坂本真一、宇野寿郎：動的荷重下における鉄骨柱梁接合部の力学的挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.492、pp.121-129、1997.2.
- 4) 中込忠男、山田文富、中野秀二、岡希光、的場耕、村井正敏：高速載荷による柱梁溶接接合部の力学的性能に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.499、pp.115-122、1997.9.
- 5) 田村匠、吹田啓一郎、辻文三：柱梁仕口溶接部の破壊挙動における歪歪および歪速度の影響に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1構造III、pp.367-368、1997.9.
- 6) 多田元英：1層1スパン鋼骨組の層間変位速度応答に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1構造III、pp.745-746、1996.9.
- 7) 前田憲太郎、田中淳夫、増田浩志：地震時に鋼構造骨組に生じる歪速度、鋼構造年次論文報告集、第5巻、pp.423-428、1997.11.
- 8) 日本建築学会接合小委員会：鋼構造接合部の力学性状に関する研究の現状4.3、1993.10.
- 9) Housner, G.W.: The Plastic Failure of Frame during Earthquake, Proc. of 2WCEE, pp.997-1011, 1960.
- 10) 五十嵐定義、井上一郎、永田匡宏：中低層鋼骨組構造物の荷重係数と崩壊機構に関する考察（その2.荷重係数と倒壊安全率の関係）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1377-1378、1978.9.
- 11) 小川厚治：鋼構造骨組構成部材の適正強度分布に関する研究、その1.動的崩壊機構特性とエネルギー吸収能力、日本建築学会論文報告集、第23号、pp.13-21、1983.1.
- 12) 松島 豊：ホワイトノイズを受ける多自由度系の最適せん断力係数分布、日本建築学会論文報告集、No.342、pp.22-29、1984.8.
- 13) 井上一郎、永田匡宏：はり降伏型鋼構造骨組の塑性設計用ベースシャー係数に関する研究、日本建築学会論文報告集、No.305、pp.29-40、1981.7.
- 14) 桑村 仁：耐震建築物の限界状態と破壊規範式、日本建築学会構造系論文集、No.342、pp.45-54、1988.5.
- 15) 日本建築学会：免震構造設計指針5.5.3、pp.88-92、1989.
- 16) 小川厚治、黒羽啓明、待鳥賢治：強震を受ける1自由度系の正負2方向の損傷分布に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.481、pp.117-126、1996.3.

(1998年2月10日原稿受理、1998年5月8日採用決定)