エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震応答予測

SEISMIC RESPONSE PREDICTION OF STEEL FRAMES WITH HYSTERETIC DAMPERS BASED ON ENERGY BALANCE

長谷川 隆*¹, 西山 功*², 向井昭義*³, 石原 直*⁴, 加村久哉*⁵

Takashi HASEGAWA, Isao NISHIYAMA, Akiyoshi MUKAI,

Tadashi ISHIHARA and Hisaya KAMURA

This paper presents a seismic response prediction method for steel frames with hysteretic dampers. This method is based on energy balance and is able to predict the seismic response of frames with dampers yielding under an earthquake to occur several times during the life of buildings. In this method, the number (n_1) of equivalent cycles of plastic deformation in hysteretic dampers is utilized to predict earthquake response of frames with hysteretic dampers. In order to grasp the n_1 values, earthquake response analysis of analytical frames with hysteretic dampers is carried out. And, the adequacy of seismic response prediction by this method is verified through a comparison with results of earthquake response analysis of three different story frames.

Keywords : seismic response prediction, hysteretic damper, energy balance, earthquake response analysis

地震応答予測, 履歴型ダンパー, エネルギーの釣合, 地震応答解析

1. はじめに

履歴型ダンパー付骨組の地震時における応答性状に関しては、これまで、多くの地震応答解析による検討が行われ、履歴型ダンパーに、より多くのエネルギーを消費させることによって、骨組全体の応答変形や柱、梁部材の損傷を小さくできることが明らかにされている^{1), 2)}など。一方、地震応答解析によらずに、履歴型ダンパー付骨組の各層の損傷を簡便に予測しようとする研究もいくつか行われている。

原田、秋山³⁾は、エネルギーの釣合に基づく骨組の耐震設計法⁴⁾が、履歴型のエネルギー吸収要素を持つ多層骨組の損傷予測に対しても適用可能であることを示している。小川ら⁵⁾は、多層骨組を等価1自由度系に置換して、1自由度系の応答を予測し、その値から、地震波毎に変化する骨組各層の平均的な応答値を予測する方法を示している。辻井ら⁶⁾は、地震による骨組の総累積損傷エネルギーを求め、スペクトルモーダル解析によって算定される最適降伏せん断力分布を使って、そのエネルギーを各層に配分して、各層の損傷及び応答変形を算定している。これらの方法はいずれも、骨組への地震入力エネルギーを算定し、地震入力エネルギーと構造物の吸収エネルギーの釣合関係から損傷予測するものであり、履歴型ダンパー付骨組のようにダンパー部分の塑性変形の繰り返しによって多くの地震エネルギーを吸収する構造物の損傷予測法を構築するには、エ

ネルギーの釣合の概念を用いた方法が適するものと思われる。

しかし、提案されているこれらの方法は、柱、梁より構成されるラーメン部分（以下、主体骨組と呼ぶ）を弾性として扱い、主に、各層の履歴型ダンパーとそれを支持する部材で構成される部分（以下、ダンパー系と呼ぶ）に生じる損傷と各層の最大層間変形を予測するものである。文献5)では、部分的に主体骨組が降伏する場合についても提案する予測方法の適用性を検討しているが、主体骨組に生じる損傷を予測することを意図したものではない。

また、履歴型ダンパーに、より効果的にエネルギーを吸収させるための適正耐力分担率⁷⁾を考慮すれば、履歴型ダンパーを現行耐震規定の許容応力度等計算における1次設計の地震荷重レベルよりも小さな荷重で降伏させることが有効となるケースも考えられる。そのような場合の、履歴型ダンパー付骨組の耐震安全性を評価するためには、1次設計の地震荷重レベルに相当する地震（以下、中地震と呼ぶ）に対して、履歴型ダンパー付骨組のダンパー系の損傷と骨組各層の最大応答変形を予測する方法が必要である。文献8)では、このような場合のダンパー系の損傷や最大層間変形の予測法が示されているが、中地震時における予測値と応答解析結果がどの程度対応するのか、必ずしも明らかではない。

本論文で示す応答予測法も、骨組への地震入力エネルギーと構造物の吸収エネルギーの釣合に基づく方法によって、履歴型ダンパー

本論の一部は、参考文献15), 16)に発表している。

*1 独立行政法人建築研究所構造研究グループ
主任研究員・博士(工学)

*2 国土交通省国土技術政策総合研究所住宅研究部 部長・工博

*3 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 室長・工修

*4 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部
主任研究員・博士(工学)

*5 JFE 技術(株)土木・建築研究部 主任研究員・博士(工学)

Senior Researcher, Structural Engineering Dept., Building Research Institute, Dr. Eng.

Director, Housing Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), Dr. Eng.

Head, Building Dept., NILIM, MLIT, M. Eng.

Senior Researcher, Building Dept., NILIM, MLIT, Dr. Eng.

Senior Researcher, Civil Engineering Research Dept., JFE R&D Corp., Dr. Eng.

付骨組の各層の損傷及び最大層間変形を予測するものである。しかし、本論文で提案する方法は、既往の予測法では考慮されていない主体骨組の損傷についても予測可能なものである。また、本予測法は、各層のダンパー系の塑性振幅の等価な繰返し回数(m_1)を用いて、応答予測を行うものであり、中地震及び大地震それぞれで想定される m_1 の上限値及び下限値を用いることによって、地震波や骨組の特性によって変化する骨組各層のダンパー系と主体骨組の損傷及び各層の最大層間変形を安全側(大きめ)に予測しようとするものである。

本論文では、まず、骨組への地震入力エネルギーと構造物の吸収エネルギーの釣合に基づく方法によって、中地震時にダンパーが塑性化する履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の中地震及び大地震時における骨組各層のダンパー系、主体骨組の損傷及び最大層間変形角の予測法を示す。次に、ダンパー付解析骨組による地震応答解析によって、上記 m_1 のとり得る範囲(上限値及び下限値)を解析結果により示す。また、このダンパー付解析骨組の地震応答解析結果と予測値を比較することによって、本予測法の予測精度を明らかにするとともに、既往の予測法による応答予測を行い、本予測法の予測精度と比較する。最後に、1次設計の地震荷重レベルで塑性化する履歴型ダンパーを有する鉄骨造試設計建物(X方向5スパン、Y方向3スパン)を検討対象にして、予測値と地震応答解析結果を比較することによって、本予測法の妥当性を確認する。

2. 履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震時応答予測法⁹⁾

2.1 骨組の損傷に寄与する地震入力エネルギーの計算

骨組への地震入力を、損傷に寄与する地震入力エネルギー(E_D)として与える。骨組の損傷に寄与する地震入力エネルギーに関しては、これまでに、地震応答解析を中心とした検討^{4), 10), 11)}が行われてきた。それらの検討結果から、本予測法では下式を用いて E_D を計算する。

$$E_D = E_e + E_p = \frac{1}{2} M \{S_v(T_e)\}^2 \quad (1)$$

ここで E_e は弾性歪みエネルギー、 E_p は塑性歪みエネルギー、 M は骨組全質量、 S_v は擬似速度応答スペクトル、 T_e は骨組の塑性化の程度によって定まる有効周期。 S_v として、ここでは図1に示す建築基準法施行令の限界耐力計算における第1種、2種、3種地盤で想定されている大地震及び中地震時の加速度応答スペクトルに $T/2\pi$ を乗じたものを用いる。 T は骨組の弾性1次固有周期。有効周期に関して、文献4)及び10)では、骨組の塑性化の程度や復元力特性に応じた有効周期

図1 擬似速度応答スペクトル (S_v)

の計算方法が示されている。本予測法では、中地震でダンパーが塑性化する骨組の有効周期を、簡便かつ安全側に評価する方法として、中地震の骨組の有効周期については、骨組の降伏点割線剛性 k_{ei} (図2参照)によって計算される周期を用い、大地震時は、 k_{ei} で算定される周期を1.2倍することとした。1.2倍は、完全弾塑性型の復元力特性の場合に、現実的な塑性化の程度を考慮して算定される値である⁴⁾。

2.2 中地震時の骨組各層の損傷及び最大応答層間変形の予測法

ここでは、図2に示すように、主体骨組とダンパー系それぞれを2つの完全弾塑性型に置換したモデルによって応答予測を行う。本論文の応答予測法では、文献3)のエネルギー吸収能力の高い要素を骨組中に含む場合の、構造物の最大変形とエネルギー吸収能力の評価式で示された、最大変形時のエネルギーの釣合の考え方に基いて、骨組の最大層間変形の予測を行う。

中地震における履歴型ダンパー付骨組の各層の最大層間変形 δ_i は、(2)式の施行令の A_i 分布で計算される各層の設計用層せん断力 Q_i によって静的増分解析を行い、(3)式で計算される各層の主体骨組の弾性歪みエネルギー eE_{ei} 、ダンパー系の弾性歪みエネルギー dE_{ei} 、ダンパー系のみが塑性変形している応答時(主体骨組は弾性応答)のダンパー系の塑性歪みエネルギー dE_{1pi} の和 E_1 が、(1)式で計算される中地震時のエネルギー E_{D1} と等しくなる場合として求められる。

$$Q_i = C_1 A_i \sum_{j=i}^N m_j g \quad (2)$$

ここで C_1 は1階の地震層せん断力係数、 N は骨組層数、 m_j は j 層の質量、 g は重力加速度。

$$E_1 = \sum_{i=1}^N (fE_{ei} + dE_{ei} + dE_{1pi}) \quad (3)$$

$$fE_{ei} = \frac{1}{2} fQ_i f\delta_i \quad (4)$$

$$dE_{ei} = \frac{1}{2} dQ_{ui} d\delta_{ui} \quad (5)$$

$$dE_{1pi} = 2 (d\delta_i - d\delta_{ui}) dQ_{ui} \cdot d n_1 \quad (6)$$

ここで fQ_i は i 層に Q_i の水平力が作用しているときの i 層の主体骨組に作用するせん断力、 $f\delta_i$ 及び $d\delta_i$ はそのときの主体骨組及びダンパー系の i 層の層間変形で、 $f\delta_i = d\delta_i = \delta_i$ である(図2参照)。 dQ_{ui} は i 層のダンパー系の降伏耐力、 $d\delta_{ui}$ はダンパー系降伏時層間変形。 $d n_1$ は次式で定義されるダンパー系の塑性振幅($d\delta_i - d\delta_{ui}$)の等価な繰返し回数であり、文献4)で示される等価履歴ループの繰返し数 n_{eq} の2倍

図2 主体骨組とダンパー系の復元力特性模式図

の値である。

$$\bar{m}_1 = \bar{\eta}_i / (d\mu_{maxi} - 1) \quad (7)$$

$\bar{\eta}_i$ は下式で表される i 層のダンパー系の正負の平均累積塑性変形倍率、 $d\mu_{maxi}$ は i 層のダンパー系の最大塑性率で、ダンパー系の層間変形 $d\delta_i$ をダンパー系の降伏時層間変形 $d\delta_{ui}$ で除した値。

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{2} \frac{dE_{1pi}}{dQ_{ui} d\delta_{ui}} \quad (8)$$

$\bar{m}_1$ は、後述するダンパー付解析骨組の地震応答解析結果から、中地震ではおよそ 2～10 となる。本予測法では、各層の応答変形 δ_i を安全側（大きめ）に評価するため、便宜的に、 $\bar{m}_1$ の下限近傍の値である 2 を用いて、(6) 式のダンパー系の塑性歪みエネルギー dE_{1pi} を計算する。このような計算により、中地震の各層の最大層間変形が求められる。

一方、地震応答中に主体骨組が保持する弾性歪みエネルギー E_{ei} の一部は、地震終了時には、残留変形がほとんどなくなることに、ダンパー系の塑性歪みエネルギー dE_{1pi} として消費されていると考えられる⁹⁾。そこで、本予測法では、ダンパー系の塑性歪みエネルギー dE_{1pi} は、便宜的に、 $\bar{m}_1$ の上限近傍の値である 10 を使って、(6) 式によって dE_{1pi} を別途計算し、ダンパー系の損傷を安全側（大きめ）に評価する。このようにして、本予測法では、地震波や骨組の特性によって変化する骨組各層の応答変形及びダンパー系と主体骨組の損傷を安全側に予測しようとするものである。なお、中地震でダンパー系が塑性化しない場合は、(6) 式の計算は不要であり、(5) 式では、ダンパー系に作用するせん断力と変形によって dE_{ei} を計算する。

2.3 大地震時の骨組各層の損傷及び最大応答層間変形の予測法

大地震時の骨組の損傷に寄与する地震入力エネルギー (E_{D2}) も、中地震同様、(1) 式で計算する。大地震時においては、(2) 式の設計層せん断力 Q_i で静的増分解析を行い、最初に主体骨組が降伏する時点（以下、損傷限界時と呼ぶ）の各層の層せん断力 (Q_i^{elim}) と変形 (δ_i^{elim}) を求め、それらを使って、(3)～(6) 式によって、骨組全体の損傷限界時までの吸収エネルギー (E_2^{elim}) を求める。大地震時の $\bar{m}_1$ は、後述の地震応答解析からおおよそ 5～20 となる。最大層間変形を予測するために E_2^{elim} を計算する際には、前述の中地震の場合と同様に、大地震の $\bar{m}_1$ の下限近傍の値である 5 を使う。

この E_2^{elim} は、大地震時のダンパー付骨組の応答において、主体骨組が塑性化していない応答時に骨組が吸収するエネルギーを表すものである。したがって、主体骨組が塑性化している応答時に骨組の吸収すべきエネルギー E_{2p} は、 $E_{D2} - E_2^{elim}$ で計算される。 $\bar{m}_1$ の下限近傍の値の 5 を使って、 E_2^{elim} を計算することによって、 E_{2p} が大きめに計算され、骨組全体の变形や主体骨組の損傷が安全側（大きめ）に評価される。

E_{2p} は、秋山により提案された骨組各層への損傷配分の式⁴⁾において、最適せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ を A_i 分布とした次式によって各層に配分する。

$$E_{2pi} = \frac{S_i P_i^n}{\sum_{j=1}^N S_j P_j^n} E_{2p} \quad (9)$$

$$S_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 A_i^2 \left(\frac{k_{pi}}{k_{pi}} \right) \quad (10)$$

$$P_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 A_i} \quad (11)$$

k_{pi} は図 2 に示す骨組の保有水平耐力点割線剛性、 α_i は i 層の降伏層せん断力係数。

n は損傷集中指数であり、文献 12) の結果より、柱崩壊型は 8、梁崩壊型は 4 とする。履歴型ダンパー付骨組では、柱及び梁が、おおむね弾性応答するものと考えられ、梁崩壊型と同様に損傷が集中しにくい構造形式として $n=4$ とする。

(9) 式で計算される各層の塑性歪みエネルギー E_{2pi} は、ダンパー系と主体骨組の耐力比に比例して、次式でダンパー系 (dE_{2pi}) と主体骨組 (E_{2pi}) それぞれに配分される。

$$dE_{2pi} = E_{2pi} \times (dQ_{ui} / Q_{ui}) \quad (12)$$

$$E_{2pi} = E_{2pi} \times (fQ_{ui} / Q_{ui}) \quad (13)$$

大地震時のダンパー系の塑性歪みエネルギー dE_{pi} は、上記 dE_{2pi} とダンパー系だけが塑性変形している応答時のエネルギー dE_{3pi} の和として計算される。

$$dE_{pi} = dE_{2pi} + dE_{3pi} \quad (14)$$

なお、 dE_{3pi} は次式で計算される。

$$dE_{3pi} = 2 (d\delta_i^{elim} - d\delta_{ui}) dQ_{ui} \cdot \bar{m}_1 \quad (15)$$

ここで $d\delta_i^{elim}$ は、損傷限界時の i 層のダンパー系の層間変形で $d\delta_i^{elim} = \delta_i^{elim}$ 。 dE_{3pi} を計算する時の $\bar{m}_1$ は、中地震時のダンパー系の損傷と同様に、大地震の $\bar{m}_1$ の上限近傍の値である 20 を使って、ダンパー系の損傷を安全側（大きめ）で計算する。

履歴型ダンパー付骨組の大地震時の i 層の最大層間変形 δ_{maxi} は、主体骨組の i 層の平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ を用いて次式で計算する。

$$\delta_{maxi} = \left(\frac{\bar{\eta}_i}{\bar{m}_1} + 1 \right) f\delta_{ui} \quad (16)$$

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{2} \frac{fE_{2pi}}{fQ_{ui} f\delta_{ui}} \quad (17)$$

ここで $\bar{m}_1$ は、大地震時の主体骨組の塑性振幅の等価な繰り返し回数であり、(7) 式と同様に定義される。ここでは文献 12) 及び 4) の解析結果から、2 とする。 $f\delta_{ui}$ は図 2 に示す主体骨組の保有水平耐力時の変形。

履歴型ダンパー付骨組では、ダンパーのエネルギー吸収効果によって、 $E_{D2} - E_2^{elim}$ の計算値が負になる場合がある。これは主体骨組が塑性化しないことを意味し、(9) 式以後の計算は不要となる。この場合、中地震時の場合と同様に静的増分解析によって、(4)～(6) 式で fE_{ei} 、 dE_{ei} 、 dE_{1pi} ($\bar{m}_1$ は 5 とする) を計算し、その和 E_2 の値が E_{D2} と等しくなる時点として、各層の最大層間変形 δ_{maxi} が計算される。各層のダンパー系の塑性歪みエネルギーは、(6) 式を用いて、この変形 δ_{maxi} ($d\delta_i = \delta_{maxi}$) と大地震の $\bar{m}_1$ の上限近傍の値である 20 を使って、安全側（大きめ）に計算される。

3. 履歴型ダンパー付解析骨組の地震応答解析と応答予測

ここでは、中地震でダンパーが塑性化するような履歴型ダンパー

付骨組の、大地震及び中地震それぞれにおけるダンパー系の塑性振幅の等価な繰返し回数 ($d\eta_1$) を明らかにするために、ダンパー付解析骨組の地震応答解析を行い、各層のダンパー系の平均累積塑性変形倍率 ($d\bar{\eta}_i$) と最大塑性率 ($d\mu_{maxi}$) の関係調べ。また、ここで設定したダンパー付解析骨組について、予測値と地震応答解析結果を比較することによって、本予測法の予測精度を明らかにし、さらに、既往の予測法による応答予測を行い、本予測法の予測精度と比較する。

3.1 解析骨組の設定と解析方法

解析骨組は、図3で示す8層1スパンのラーメン骨組の各層にブレース型のダンパーを組み込んだダンパー付骨組である。この検討では、主体骨組の各層の剛性 (k_i) に対するダンパー系の各層の剛性 (dk_i) の比 (dk_i/k_i) とダンパー系の降伏耐力を解析パラメータとして、 dk_i/k_i を 0.5、1.0、2.0、3.0 とし、ダンパー部材として 100N/mm² 級と 225N/mm² 級の鋼材を用いた座屈拘束ブレースを仮定することによって、合計8種類のダンパー付骨組を設定する。ここでは、解析骨組のダンパー系、主体骨組それぞれに完全弾塑性型の復元力特性を仮定して、せん断型モデルによる地震応答解析を実施する。解析骨組の名称は、例えば dk_i/k_i が 0.5 で、100N/mm² 級ダンパーの骨組は、DM-05-100 と表示する。

主体骨組の各層の剛性、耐力には、文献12) で設定した8層1スパンの梁崩壊型ラーメン骨組の各層の剛性と耐力を用いた。文献12) の骨組の A_f 分布の層せん断力による静的増分解析から得られる各層の荷重-変形関係を図4に示し、表1に図4から得られる各層の剛性 (k_i) と最大曲率点における耐力 ($f_{Q_{ui}}$) を示す。

解析骨組のダンパー部材の断面は、主体骨組の各層の剛性に対するダンパー系の各層の剛性の比 (dk_i/k_i) が 0.5、1.0、2.0、3.0 とな

図3 解析骨組

図4 文献12) の骨組の荷重-変形関係

表1 主体骨組の各層の剛性、耐力及び解析骨組のダンパー系/主体骨組耐力比

層	各層重量 (t)	主体骨組の剛性 k_i (kN/cm)	主体骨組の耐力 $f_{Q_{ui}}$ (kN)	解析骨組 DM-05-100 の $dQ_{ui}/f_{Q_{ui}}$	解析骨組 DM-30-225 の $dQ_{ui}/f_{Q_{ui}}$
8	33.6	61.2	274.4	0.028	0.388
7	33.6	111.2	440.0	0.032	0.441
6	33.6	158.6	573.3	0.035	0.482
5	33.6	201.1	686.0	0.037	0.511
4	33.6	233.3	785.0	0.038	0.518
3	33.6	271.6	860.4	0.040	0.550
2	33.6	342.3	938.8	0.046	0.635
1	33.6	384.3	989.8	0.058	0.795

るように、 dk_i/k_i に応じて、幾何学的な線形関係から決定する。ここでは、ダンパーとしての塑性変形区間をダンパー系の芯-芯距離の半分とし、ダンパー支持部分 (接合部分) の断面積はダンパーの断面積の2倍と仮定して、ダンパーの断面積を決めている。ここで設定した解析骨組では、各層のダンパー系と主体骨組の耐力比 ($dQ_{ui}/f_{Q_{ui}}$) は一定ではない。各層の $dQ_{ui}/f_{Q_{ui}}$ の例として、DM-05-100 骨組と、DM-30-225 骨組の場合を表1に示す。なお、各解析骨組の $dQ_{ui}/f_{Q_{ui}}$ の値は、ダンパー部材の降伏応力度及び dk_i/k_i の値に比例したものとなる。

応答解析における減衰は、Rayleigh型で1次及び2次の減衰定数を0.01とし、数値積分にはNewmark β 法 ($\beta=1/4$) を使い、時間刻みは1/200秒とする。入力地震動は、El Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NSの3つであり、地震動継続時間はそれぞれ、53.7秒、35.9秒、30.0秒である。解析時間を100秒とし、地震動入力終了後に自由振動させて弾性振動エネルギーを0に収束させる。解析毎に、解析時間中の E_e+E_p の最大応答値が、図1で示す第2種地盤の S_v を使って (1) 式で計算される値に一致するように、入力地震動の最大加速度を調整して解析を行う。なお、解析終了時の E_p でなく、 E_e+E_p の最大応答値を用いているのは、弾性応答に近い場合との連続性を考慮したためである。ここで設定した解析骨組の割線剛性 k_{ei} による固有周期は、1.01秒～1.23秒の範囲であり、図1より、解析骨組の S_v は、中地震では33cm/sec、大地震では165cm/secとなる。

3.2 ダンパー系の平均累積塑性変形倍率と最大塑性率の関係

ダンパー系の塑性振幅の等価な繰返し回数 ($d\eta_1$) は、地震応答解析から得られる骨組各層のダンパー系の平均累積塑性変形倍率と最大塑性率から、(7) 式の計算によって得られる。図5に、3つの地震動に対する8種類の解析骨組の各層のダンパー系の $d\bar{\eta}_i$ と $d\mu_{maxi}-1$ の関係を示す。左が中地震、右が大地震の結果である。本予測法で用いている $d\eta_1$ は、地震時にダンパーのみが塑性化している応答時のダンパーの塑性振幅の等価な繰返し回数を表している。そこで、大地震の図では、主体骨組が塑性化した64プロットを除いて表示している (全プロット数は8骨組×8層×3地震波=192である)。中地震では主体骨組は塑性化していないので全プロットの表示である。この図から、中地震における $d\eta_1$ はおよそ2～10、大地震ではおよそ5～20の範囲に分布している。中地震の $d\eta_1$ の平均値は3.4、大地震は7.7であり、それらを図中に点線で示している。また、直下型の地震動であるJMA Kobeのプロットは、 $d\eta_1$ が小さい範囲に分布する傾向が見られる。

3.3 各骨組の予測値と応答解析の比較

ここで設定した8つの解析骨組は、各層に同一の剛性比 (dk_i/k_i)

図5 中地震及び大地震に対するダンパー系の $d\bar{\eta}_i$ と $d\mu_{maxi}-1$ の関係

のダンパーを配置している。DM-20-100骨組を対象にして、本予測法による予測値と地震応答解析を比較した結果を図6に示す。中地震、大地震の最大層間変形角、ダンパー系の $\bar{d}\eta_i$ 、大地震の主体骨組の $\bar{\eta}_i$ について比較している。ダンパー系については、 $\bar{d}\eta_1$ の上限値と参照値としての下限値による予測値をプロットしている。

中地震及び大地震の最大層間変形角の予測値は、3波の地震動による応答のばらつきの上限の傾向を比較的精度よく予測している。ただし、大地震のJMA Kobeの応答では、上層部で応答値が予測値を超過する部分がある。ダンパー系の各層の $\bar{d}\eta_i$ については、中地震、大地震ともに、3地震波による応答の値は、 $\bar{d}\eta_1$ の下限値と上限値で計算される予測値の間に分布している。主体骨組の各層の $\bar{\eta}_i$ については、JMA Kobeでは上層部に損傷が生じているが、El CentroとHachinoheの各層の損傷は0となり、予測値も0に近い値となった。

これ以外の7つの骨組の結果の概要を以下に記述する。中地震の最大層間変形角については、各骨組とも3地震波の応答のばらつきは少なく、予測値はそれぞれの骨組の応答の傾向を精度よく予測した。大地震の最大層間変形角は、ここで示したDM-20-100骨組の結果と同様に、JMA Kobeの応答では、応答値が予測値を超過する部分が見られたが、El CentroとHachinoheの応答値のばらつきの上限の傾向はおおよそとらえることができた。ダンパー系の $\bar{d}\eta_i$ については、中地震、大地震ともに、 $\bar{d}k_i / k_i$ が大きい設定(2.0と3.0)の骨組では、応答値の分布が、 $\bar{d}\eta_1$ の下限値で計算した予測値の分布に近く、 $\bar{d}k_i / k_i$ が小さい設定(1.0と0.5)の骨組では、応答値の分布は、 $\bar{d}\eta_1$ の上限値で計算した予測値の分布に近づく傾向が見られた。主体骨組の $\bar{\eta}_i$ については、 $\bar{d}k_i / k_i$ が2.0以上の骨組では、JMA Kobeの一部の層で応答値が予測値を超過し、El CentroとHachinoheでの応答値は0となり、予測値も0に近い値となった。 $\bar{d}k_i / k_i$ が1.0以下の骨組でも、JMA Kobeの一部の層で応答値が予測値を超過したが、おおよそ3波の応答のばらつきの上限を予測した。

3.4 本予測法による予測値の精度

本法による予測値の予測精度を明らかにするために、ここで解析した8骨組の中地震と大地震に対する各層の最大層間変形角、ダンパー系と主体骨組の平均累積塑性変形倍率に関して、予測値を縦軸に、応答解析結果を横軸にしてプロットした結果を図7(a)～(e)に示す。また、これらの予測値の応答解析値に対する比の平均と変動係数を計算した結果を表2に示す。なお、表2の計算では、最大層

図6 DM-20-100骨組の予測値と応答解析の比較

間変形角については全データを対象に計算し、平均累積塑性変形倍率については、ダンパー系は応答解析の結果の $\bar{d}\eta_i$ が1以上、主体骨組は、 $\bar{\eta}_i$ が0.1以上のデータを対象にして計算している。

図7及び表2から、最大層間変形角に関しては、中地震及び大地震の(予測値/応答解析)の平均が、1.08と1.04であり、最大層間変形角の予測値は、応答解析結果のおおよそ平均に対応していることがわかる。ただし、JMA Kobeの地震動に対する応答解析値は、予測値よりも大きくなる傾向が見られる。

ダンパー系の $\bar{d}\eta_i$ に関しては、中地震の予測値は、図7(b)で示すように、応答解析値のばらつきの上限をやや大きめに予測する傾向となり、大地震の予測値は、図7(d)で示すように、EL Centroの一部を除き、予測値に対する応答解析値のばらつきの上限近傍を予測する傾向となっている。また、中地震、大地震ともに、 $\bar{d}\eta_i$ が大きくなるにしたがい、(予測値/応答解析)の値は1に近づく傾向が見られる。表2の(予測値/応答解析)の平均は、中地震で3.55、大地震で2.73となっている。本予測法は、ダンパー系の損傷を安全側に予測するために、図5で示した $\bar{d}\eta_1$ のばらつきの上限値を用いて全ての骨組のダンパーの損傷を計算している。図5で示す $\bar{d}\eta_1$ の平均値によって、大地震のダンパーの $\bar{d}\eta_i$ を予測すると、(予測値/応答解析)の平均は1.06(変動係数0.63)になるが、前述のとおり、本論では、ダンパー系の損傷を安全側に予測することを意図して、 $\bar{d}\eta_1$ の上限値により予測することを提案する。

主体骨組の $\bar{\eta}_i$ は、予測値の応答解析値に対する比の平均は1.70であり、応答解析結果を大きめに予測する傾向がある。また、変動係数は0.88であり、最大層間変形角やダンパー系の値に比べて大きな値となっている。

3.5 既往の予測法との比較

既往の研究等で提案されている予測法によって、ここで設定した

図7 本予測法の予測値と応答解析の関係(全データ)

表2 本予測法の(予測値/応答解析)の平均と変動係数

	最大層間変形角		平均累積塑性変形倍率		
	中地震	大地震	中地震ダンパー系	大地震ダンパー系	大地震主体骨組
平均	1.08	1.04	3.55	2.73	1.70
変動係数	0.22	0.24	0.51	0.64	0.88

図8 既往の予測法による予測値と応答解析の関係(全データ)

表3 各予測法の(予測値/応答解析)の平均と変動係数

	大地震の最大層間変形角			大地震のダンパー系の平均累積塑性変形倍率	
	LSP	小川	本予測法	小川	本予測法
平均	1.50	1.18	1.04	1.14	2.73
変動係数	0.31	0.27	0.24	0.31	0.64

8つの解析骨組の応答予測を行い、本法の予測値の精度と比較する。既往の予測法として、ここでは、地震時の履歴型ダンパー付骨組の各層のダンパー系の損傷と最大層間変形角を予測する方法として、小川らの提案した予測法^{5), 8)}及び地震時の骨組各層の最大層間変形を予測する方法として、米国のFEMA-273¹³⁾のLinear Static Procedure (LSP)で示されている方法、の2つを取りあげる。LSPは、変位一定則の考え方に基づく方法であり、(18)式によって、設計用加速度応答スペクトルを用いて建物全体の地震力(V)を計算し、その地震力に基づいて骨組の静的弾性解析を行い、得られる各層の層間変形を弾塑性時の最大層間変形とする方法である。

$$V = C_1 C_2 C_3 S_a W \quad (18)$$

ここで C_1 は静的弾性解析により計算される変形と予測される弾塑性変形を関係づける係数、 C_2 は復元力特性の形態等から決まる係数、 C_3 はP- Δ 効果による係数である。 S_a は設計用加速度応答スペクトルで、ここでは図1で示した2種地盤の擬似速度応答スペクトルの元となった加速度応答スペクトルを用いる。 W は骨組全重量。

この2つの予測法による予測値と応答解析結果の関係を、図8(a)～(c)に示す。(a)、(b)は、小川の予測法による大地震時の各層の最大層間変形角とダンパー系の平均累積塑性変形倍率、(c)はLSPによる大地震時の各層の最大層間変形角である。また、表3には、この2つの予測法による予測値及び本法の予測値の応答解析値に対する比の平均と変動係数を比較して示す。

図8及び表3からは、大地震の最大層間変形角に関しては、本予測法の(予測値/応答解析)の平均が1.04で、他の2つの方法に比べて最も1に近く、変動係数も0.24で最も小さいことがわかる。大地震のダンパー系の平均累積塑性変形倍率に関しては、小川の予測法は、(予測値/応答解析)の平均が1.14であり、本予測法は2.73である。前節で述べたように、本予測法はダンパー系の損傷の予測値に対する応答値のばらつきの上限近傍を予測する傾向があるため、小川の予測法に比べ、大きな値になっている。また、変動係数も本予測法は0.64であり、小川の予測法の0.31に比べ、大きな値である。本法の変動係数が比較的大きいのは、骨組特性等により変化する α_1 を、一定値で予測するためと考えられる。小川の予測法は、地震波によって変動する応答の平均を近似するものである⁵⁾が、図8(b)からは、 α_1 が大きい範囲では、ばらつきの上限を近似する傾向になっている。これは、この解析では α_1 が大きい層では、主体骨組にも損傷が生じる場合が多

くなるのに対して、小川の方法ではダンパー系のみ損傷が生じるものとして計算するためと推測される。

4. 履歴型ダンパー付試設計建物の地震応答解析

中地震で降伏する座屈拘束ブレース型の履歴型ダンパーを有する4層、8層、12層の試設計鉄骨造建物を検討対象にして、本論文の応答予測法による予測値と地震応答解析結果を比較することによって、予測法の妥当性を確認する。

4.1 履歴型ダンパー付鉄骨造建物の概要

試設計建物は、現行耐震規定の許容応力度等計算を満足するように設計された文献2)の履歴型ダンパー付建物のダンパーを、225N/mm²級の鋼材から100N/mm²級の鋼材に変えることによって、中地震時よりダンパーのエネルギー吸収効果を発揮させることを意図した建物である。図9に、検討の対象にした4、8、12層の履歴型ダンパー付鉄骨造建物のうち、4層建物の平面図と軸組図を示す。8、12層建物も同様の平面、軸組である。角形鋼管柱とH形鋼大梁からなるラーメン骨組のセンターコア部のX、Y方向4構面に、座屈拘束ブレース型の履歴型ダンパーを配置したものである。ダンパーの軸材には100N/mm²級の鋼材を用いる。柱脚は固定とする。これらの3つの建物の設計条件や各部材断面等の詳細は、文献2)、8)を参照されたい。

4.2 解析方法

1つの建物について、X、Y方向それぞれで解析モデルを設定する。解析モデルは、ダンパー付の構面とラーメン構面を両端ピンの仮定の剛梁で接続したものであり²⁾、一般硬化化ヒンジ法を用いた平面骨組解析プログラム¹⁴⁾を使って解析を行う。解析モデルの名称は、例えば、4層X方向モデルの場合は、D4Xと表記する。

解析モデルの柱、梁、履歴型ダンパーの復元力特性は、歪硬化2%のバイリニア型、接合部パネルは弾性としている。各層重量は、柱梁節点に支配面積に応じて集中させる。減衰は剛性比例型で、1次モードに対する減衰定数を0.02とする。数値積分にはNewmark β 法($\beta=1/4$)を用い、時間刻みは1/200秒とする。

入力地震動にはEl Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS(いずれも継続時間20秒)を用いる。解析モデル毎に、解析時間中の E_c+E_p の最大応答値が、図1の第2種地盤の S_v を使って(1)式で計算され

図9 履歴型ダンパー付試設計建物の平面及び軸組図

表4 各解析モデルの入力地震動の最大加速度及び骨組特性

解析モデル名称	D4X		D4Y		D8X		D8Y		D12X		D12Y	
入力地震動	中地震	大地震	中地震	大地震	中地震	大地震	中地震	大地震	中地震	大地震	中地震	大地震
El Centro NS (gal)	121	573	132	523	130	789	130	780	206	869	193	869
Hachinohe EW (gal)	91	314	96	322	55	340	54	362	100	389	113	369
JMA Kobe NS (gal)	95	545	118	501	116	663	117	688	123	823	129	847
降伏点割線剛性固有周期	0.87sec		0.86sec		1.49sec		1.55sec		1.87sec		2.01sec	
終局ベースシヤー係数	0.35		0.47		0.29		0.32		0.24		0.24	
各層の dQ_{ui}/fQ_{ui} の範囲 () 内は平均値	0.26~0.56 (0.43)		0.14~0.35 (0.26)		0.12~0.59 (0.44)		0.10~0.49 (0.36)		0.05~0.54 (0.36)		0.05~0.53 (0.34)	
各層の ak_i/lk_i の範囲 () 内は平均値	0.78~3.69 (2.16)		0.65~2.79 (1.71)		0.32~3.56 (2.00)		0.22~4.35 (2.14)		0.10~2.26 (1.25)		0.04~2.74 (1.37)

図10 静的増分解析から得られる荷重-変形関係 (D4X)

る値に一致するように、入力地震動の最大加速度を調整して解析を行う。6つの解析モデルの降伏点割線剛性 k_{ei} による固有周期は0.86秒～2.01秒であり、第2種地盤での S_v は、中地震33cm/sec、大地震165cm/secとなる。各モデルの中地震及び大地震の入力地震動の最大加速度及び骨組基本性能を表4に示す。

6つの解析モデルの応答予測値の計算のために、各モデルの静的増分解析を行い、応答予測の計算に必要となる値を求める。その1例として、図10に、D4Xの静的増分解析から得られる (a) 全体骨組、(b) 主体骨組、(c) ダンパー系、それぞれの各層の層せん断力-層間変形関係を示す。ここでのダンパー系の層せん断力は、全体骨組の層せん断力から主体骨組の各層の柱に生じるせん断力を引いたものである。

4.3 予測値と応答解析結果の比較

図11～15に、Y方向のモデルの応答予測値と地震応答解析結果を比較して示す。図11は中地震による各層の最大層間変形角の結果で

図11 中地震の最大層間変形角の分布

図12 中地震のダンパー系の平均累積塑性変形倍率の分布

ある。3地震波による応答変形のばらつきは小さく、予測値は3波の応答値の傾向を精度よく表している。図12は中地震によるダンパー系の各層の平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ である。予測値は $\bar{\eta}_1$ の上限値と参照値としての下限値それぞれに対する計算値をプロットしている。これらの解析モデルでは、応答解析による各層の $\bar{\eta}_i$ は、 $\bar{\eta}_1$ の下限値で計算した予測値の近くに分布している。

図13は大地震による各層の最大層間変形角の結果である。予測値の分布は、3地震波による応答のばらつきの上限の分布の傾向を比較的精度よく表している。図14は大地震によるダンパー系の各層の平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ である。予測値は $\bar{\eta}_1$ の上限値と参照値としての下限値それぞれに対する計算値をプロットしている。4層モデルでは、3地震波による応答解析の値は、 $\bar{\eta}_1$ の下限値と上限値で計算される予測値の間に分布している。8層及び12層モデルでは、応答解析の値は、 $\bar{\eta}_1$ の下限値で計算した予測値に近くなっている。図15は大地震による主体骨組の各層の平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ である。各層の応答解析の $\bar{\eta}_i$ は、梁に生じた塑性歪みエネルギーを上下層に半分づつ配分して計算している。なお、柱はいずれのモデルにおいても塑性化していない。これらのモデルの予測値は、3波の応答の上限値に比べ、安全側の評価となっている。なお、X方向の解析モデルに関しても、Y方向と同様の傾向となっている^{15), 16)}。

図13 大地震の最大層間変形角の分布

図14 大地震のダンパー系の平均累積塑性変形倍率の分布

図15 大地震の主体骨組の平均累積塑性変形倍率の分布

図16 本予測法の予測値と応答解析の関係(全データ)

表5 各予測法の(予測値/応答解析)の平均と変動係数

	大地震の最大層間変形角			大地震のダンパー系の平均累積塑性変形倍率		大地震の主体骨組の平均累積塑性変形倍率
	LSP	小川	本予測法	小川	本予測法	本予測法
平均	1.75	1.03	1.25	1.06	2.41	4.31
変動係数	0.21	0.17	0.18	0.24	0.41	0.42

図16(a)～(c)に、ここで対象にした解析モデルの、大地震に対する各層の最大層間変形角、ダンパー系、主体骨組の平均累積塑性変形倍率について、本法の予測値と応答解析結果の関係を示す。また、3章と同様に、LSP、小川の予測法によって、これらの解析モデルの応答予測を行い、本予測法の予測精度と比較した結果を表5に示す。

図16から、本予測法では、大地震の最大層間変形角、ダンパー系、主体骨組の損傷に関して、概ね安全側で予測が行われていることがわかる。表5から、これらの解析モデルに対しては、小川の予測法による最大層間変形角、ダンパー系の平均累積塑性変形倍率の、(予測値/応答解析)の平均が最も1に近いのがわかる。また、表3の結果に比べて、全体に変動係数が小さくなっている。

試設計建物を対象にしたこれらの解析結果から、本予測法では、 m_1 の上限値及び下限値を用いることによって、骨組各層の最大層間変形角、ダンパー系及び主体骨組の損傷を、概ね安全側で予測できることが確認された。

5. まとめ

本論文では、エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震時応答予測法を示した。この予測法は、中地震時にダンパーが塑性化する骨組も対象とするものであり、各層のダンパー系の塑性振幅の等価な繰り返し回数(m_1)を考慮して応答予測を行う。本予測法は、中地震及び大地震それぞれで想定される m_1 の上限値及び下限値を用いることによって、地震波や骨組の特性によって変化する骨組各層のダンパー系と主体骨組の損傷及び各層の最大層間変形を安全側に予測しようとするものである。

本予測法で用いるダンパー系の塑性振幅の等価な繰り返し回数(m_1)を、ダンパー付解析骨組の地震応答解析によって明らかにした。その結果、中地震の m_1 はおおよそ2～10、大地震ではおおよそ5～20の範囲であった。また、このダンパー付解析骨組の応答解析結果と予測値を比較して、本予測法の予測精度を明らかにするとともに、既往の予測法による応答予測を行って、予測精度を比較した。その結果、大地震の最大層間変形角に関しては、予測値の応答解析値に対する比の平均が、既往の2つの予測法に比べて、最も1に近くなった。一方、大地震のダンパー系の平均累積塑性変形倍率に関しては、本法の予測値は、応答解析値のばらつきの上限近傍を予測する傾向を有し、既往の予測法と比較すると、予測値の応答解析値に対

する比の平均は大きくなっている。

中地震で塑性化する履歴型ダンパーを有する4、8、12層の現実的な鉄骨造試設計建物を検討対象にして、各層の最大層間変形角、ダンパー系と主体骨組の平均累積塑性変形倍率に関して、予測値と応答解析結果を比較し、本予測法の妥当性を確認した。

なお、中地震及び大地震のダンパー系の損傷 $\overline{d\eta_i}$ が、 m_1 の下限値での予測値に近くなるか、上限値による予測値に近くなるかは、骨組各層の dQ_{ui}/Q_{ui} と dk_i/k_i 、終局ベースシヤー係数、骨組層数、等の骨組特性が関係するものと考えられる。今後の課題として、中地震及び大地震時のダンパー系の m_1 と上記パラメータの定量的関係を明確にする必要があり、それによって、より合理的な応答予測を行うことが可能となる。

【謝辞】

この論文の履歴型ダンパー付解析骨組の地震応答解析では、熊本大学小川厚治教授が作成された *shearms.f* を使わせていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 黄一華、和田章、岩田衛：履歴型ダンパーを有する被害レベル制御構造、構造工学論文集、Vol.40B、pp.221～234、1994.3
- 2) 加村久哉、河村昌俊、小川厚治、井上一郎：許容応力度等計算に準拠して設計された履歴型ダンパー付鋼構造骨組の地震応答、日本鋼構造協会 鋼構造論文集、Vol.10、No.38、pp.91～104、2003.6
- 3) 原田幸博、秋山宏：エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計、日本建築学会構造系論文集、第472号、pp.57～66、1995.6
- 4) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999.11
- 5) 小川厚治、平野智久：履歴型ダンパーの必要塑性変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第558号、pp.197～204、2002.8
- 6) 辻井剛、小倉桂治、高山正春、辻田修、木村雄一：履歴減衰部材を有する架構の耐震設計、シンポジウム「耐震設計の一つの新しい方向」、pp.273～276、1995.10
- 7) 井上一郎、小野聡子：履歴ダンパーの適正耐力分担率と架構の設計耐力、構造工学論文集、Vol.41B、pp.9～15、1995.3
- 8) 履歴型ダンパー付鋼構造骨組の設計法、建築研究所/日本鉄鋼連盟市場センター共同研究報告書、2002.2
- 9) 西山功、向井昭義、長谷川隆、石原直：エネルギーの釣合に基づく建築物の実用的な耐震設計法のフレームワークの提案、鉄構技術、Vol.16、No.184、pp.28～35、2003.9
- 10) 小川厚治、井上一郎、中島正愛：損傷に寄与する地震入力エネルギーに関する考察、日本建築学会構造系論文集、第530号、pp.177～184、2000.4
- 11) 井上一郎：鋼構造の耐震設計の原点、建築技術、No.619、pp.112～119、2001.9
- 12) 長谷川隆：エネルギーの釣合に基づく鉄骨構造骨組の地震応答予測法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.837～838、2002.8
- 13) FEMA-273 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings、Federal Emergency Management Agency、1997.10
- 14) 小川厚治、多田元英：柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発、第17回情報システム利用技術シンポジウム、pp.79～84、1994.12
- 15) 長谷川隆、西山功、向井昭義、石原直、加村久哉：エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震時損傷予測(その1 予測方法の提案と解析骨組による検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.645～646、2003.9
- 16) 加村久哉、長谷川隆、西山功、向井昭義、石原直：エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震時損傷予測(その2 試設計建物による検証)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.647～648、2003.9

(2003年8月18日原稿受理、2004年4月23日採用決定)