履歴型ダンパー付き弾性ラーメン構造の地震応答
（その１　多層骨組の等価な１質点系への置換と解析パラメータ）

正会員○井上一朗[*1]
同　　　桑原　進[*1]
同　　　多田元英[*1]
同　　　中島正愛[*2]

応答解析　　履歴型ダンパー　　ベースシヤー係数
等価１質点系　　適正分担率

１．序

本論では履歴型ダンパー付きの長方形ラーメン構造を対象とし, 柱･梁で構成されるラーメン部分をフレーム, 履歴型ダンパーを構成する部分をダンパー系と称する．構造物への地震入力エネルギーは履歴型ダンパーの有無やその耐力分担率に関わらずほぼ一定である．ただし, 鉛直荷重も支持するフレームの損傷はダンパー系のせん断剛性やせん断耐力に左右される．これから，フレームの損傷を最小化するという意味のダンパー系の適正分担率の存在が指摘され, １質点系の応答解析結果から実証されている[1]．

本論の目的は, フレームを弾性域に留めるのに必要なベースシヤー係数とその最大応答値に及ぼすダンパー系の剛性や耐力分担率の効果を広範な数値計算結果から提示することである. その１では多質点系を等価な１質点系へ置換する手順を導くとともに, その２で述べる数値計算の解析パラメータを示す.

２．等価１質点系

１質点系に置換される多質点系の第 i 層の層せん断力 Q_i －層間変形 δ_i 関係を図１に示す．フレームは弾性であり, ダンパー系は完全弾塑性型の履歴特性を有するものとする. 図１における Q_{mi} は設計用層せん断力を意味し，β は Q_{mi} に対するダンパー系の層せん断力の分担率である．その他図１において，

K_{Fi}　：フレームのせん断弾性剛性
K_{Di}　：ダンパー系のせん断弾性剛性
R_{Dy}　：ダンパー系の降伏層間変形角
γ_D　：ダンパー系の塑性率
Q_{Dyi}　：ダンパー系の降伏せん断耐力

ダンパー系とフレームの剛性比 k を次式で定義する.

$$k = K_{Di}/K_{Fi} \tag{1}$$

対象とする多質点系は次の特性を有するものとする.

[1] 質量 m，階高 h はすべての層で同じである.
[2] ダンパー系とフレームの剛性比 k , ダンパー系の分担率 β はすべての層で同じである.
[3] 設計用層せん断力に対する層間変形はすべての層で同じである.

上記の条件から, 設計用層せん断力を比例荷重とする水平荷重に対して各層のダンパーは層間変形角 R_{Dy} で同時に降伏耐力に達し，１階柱脚の転倒モーメント M^{OVT}－有効構造回転角 θ^{EF} 関係[2]は図１と同様のバイリニア型になる（図 2 参照）．上記 [3] の条件から θ^{EF} は層間変形角に等しく，図 2 の $M^{OVT}-\theta^{EF}$ 関係における降伏変形角も R_{Dy} である．図 2 に示す系全体の $M^{OVT}-\theta^{EF}$ 関係の下の面積は水平力のなす仕事を意味し，$P\Delta$ 効果が無視できる場合は骨組全体の弾･塑性歪エネルギーに相当する[2]．

上記の多質点系を１質点系に置換する目的は広範な数値計算を単純化するためであり, 置換に当たって次の仮定を設定する.

[i] 図 2 に示す多質点系の $M^{OVT}-\theta^{EF}$ 関係を１質点系の関係とみなし，これを図３に示す層せん断力 Q －層間変形 δ 関係に置換する.
[ii] 重量 W_T , 固有周期 T は多質点系の全重量と一次固有周期に等しい.
[iii] 多質点系の１次の固有モードは直線である.

図 3 の $Q-\delta$ 関係は１質点系の等価高さ H^{eq} を決める

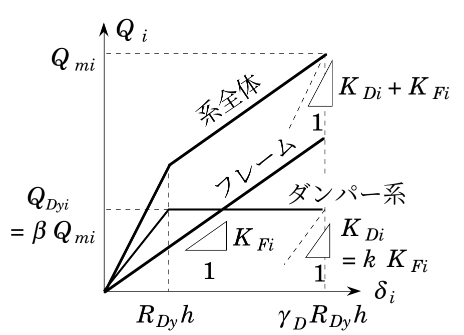

図１　多層骨組 i 層の復元力特性

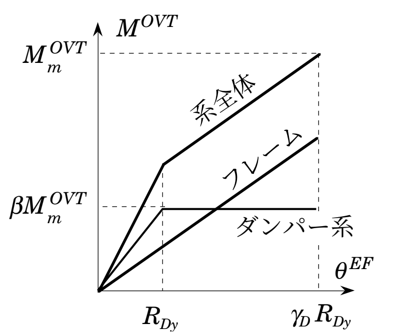

図 2　多層骨組の $M^{OVT}-\theta^{EF}$ 関係

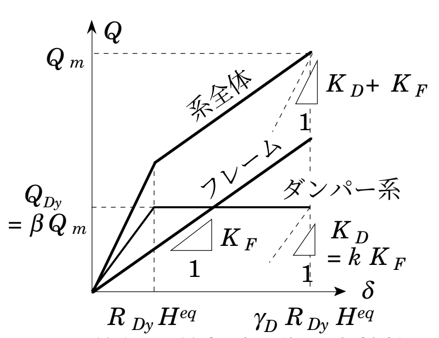

図 3　等価１質点系の復元力特性

Earthquake response of elastic moment resisting frames combined with hysteretic dampers
(Part 1. One degree of freedom systems equivalent to multi-story structures and analysis parameters)

KUWAHARA Susumu, INOUE Kazuo, TADA Motohide and NAKASHIMA Masayoshi

ことによって決まる．

N 層骨組第 i 層の設計用層せん断力 Q_{mi} を次式で与える．

$$Q_{mi} = C_B A_i W_T \tag{2}$$

ただし，

$$A_i = 1/\sqrt{\alpha_i} \tag{3}$$

$$\alpha_i = \sum_{j=i}^{N} m g \Big/ \sum_{j=1}^{N} m g = (N - i + 1)/N \tag{4}$$

ここで C_B はベースシヤー係数であり，g は重力加速度である．

N 層骨組の設計用層せん断力作用時の転倒モーメント M_{Nm}^{OVT} は次式で与えられる．

$$M_{Nm}^{OVT} = \sum_{i=1}^{N} Q_{mi} h \tag{5}$$

一方，等価１質点系の設計用層せん断力作用時の転倒モーメント M_{1m}^{OVT} は次式で表される．

$$M_{1m}^{OVT} = C_B^{eq} H^{eq} W_T \tag{6}$$

ただし，C_B^{eq} は等価１質点系のベースシヤー係数である．仮定 [i] より (5) 式と (6) 式の右辺を等値して (2) 〜 (4) 式を用いると次の関係を得る．

$$C_B^{eq} H^{eq} = C_B h \sum_{i=1}^{N} A_i \alpha_i \tag{7}$$

N 層骨組の固有周期 T_N は次式で与えられる．

$$T_N^2 = \frac{4\pi^2 \sum_{j=1}^{N} m \phi_j^2}{\sum_{j=1}^{N} (K_{Dj} + K_{Fj}) (\phi_j - \phi_{j-1})^2} \tag{8}$$

上式中の ϕ_i は第 i 層の一次固有振動モード値であり，仮定 [iii] より次式で表される．

$$\phi_i = i h \tag{9}$$

また，ダンパー系のせん断耐力 Q_{Dyi} と降伏層間変形角 R_{Dy} との間には次式の関係が成り立つ．

$$Q_{Dyi} = K_{Di} R_{Dy} h \tag{10}$$

(1) 〜 (4), (9), (10) 式より (8) 式の T_N は次式のように表される．

$$T_N^2 = \frac{4\pi^2 R_{Dy} h N (N+1)(2N+1)}{6\left(1+\frac{1}{k}\right) \beta C_B g \sum_{i=1}^{N} \sqrt{N(N-i+1)}} \tag{11}$$

一方，等価１質点系の固有周期 T_1 は次式で表される．

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2 W_T}{(1+1/k) K_D g} \tag{12}$$

(11) 式と同様にして (12) 式より次式を得る．

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2 R_{Dy} H^{eq}}{(1+1/k) \beta C_B^{eq} g} \tag{13}$$

仮定 [ii] より (11), (13) 式の固有周期を等値して次式を得る．

$$\frac{H^{eq}}{C_B^{eq}} = \frac{(N+1)(2N+1)}{6 \sum_{i=1}^{N} \sqrt{N(N-i+1)}} \cdot \frac{N h}{C_B} \tag{14}$$

(7), (14) 式より H^{eq}/Nh は次式のように与えられる．

$$\left(\frac{H^{eq}}{N h}\right)^2 = \frac{(N+1)(2N+1)}{6N} \cdot \frac{\xi_2}{\xi_1} \tag{15}$$

ただし，

$$\xi_1 = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{N(N-i+1)} \tag{16}$$

$$\xi_2 = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{\frac{N-i+1}{N}} \tag{17}$$

(7), (14) 式より C_B と C_B^{eq} の関係が次式より得られる．

$$\left(\frac{C_B}{C_B^{eq}}\right)^2 = \frac{N(N+1)(2N+1)}{6\xi_1 \xi_2} \tag{18}$$

H^{eq}/Nh，C_B/C_B^{eq} はともに層数 N のみの関数である．等価１質点系の応答解析より得られるベースシヤー係数の最大応答値 C_B^{eq} は，多層骨組のベースシヤー係数最大応答値 C_B に (18) 式を用いて変換される．

３．応答解析パラメータ

等価１質点系の応答解析パラメータを以下に示す．

層数 N ： 1, 5, 10

階高 h ： 400 (cm)

固有周期 T ： $\sqrt{2}\,T_0, T_0, T_0/\sqrt{2}$

$T_0 = 0.0003Nh$

T_0 の単位は sec，h の単位は cm

剛性比 k ： 0.5, 1.0, 3.0, 5.0

ダンパー系の降伏シヤー係数 C_D ： 0 〜 0.5

C_D は重量 W_T に対するダンパー系のせん断耐力比を表し，ここでは C_D を解析パラメータに用いてダンパー系のせん断耐力 Q_{Dy} を次式で設定する．

$$Q_{Dy} = C_D W_T \tag{19}$$

$C_D = 0$ はダンパーのないラーメン構造に相当する．ダンパー系のせん断耐力分担率 β は等価１質点系の最大層せん断力応答 Q_m を用いて次式から得られる．

$$\beta = Q_{Dy}/Q_m \tag{20}$$

入力地震動は Yokohama[3]（最大速度 52 cm/sec，最大加速度 312 cm/sec^2，継続時間 40 sec）である．粘性減衰定数を 0.01 とする．

また，等価１質点系の妥当性を検討するために多質点系応答解析を行い，それぞれの応答値を比較する．多質点系の減衰特性は１次，２次モードともに粘性減衰定数 0.01 の Rayleigh 型とする．

４．結

本論ではフレームを弾性域に留めるのに必要なベースシヤー係数とその最大応答値に及ぼすダンパー系の剛性や耐力分担率の効果を数値計算結果から提示する．その１では多質点系を等価な１質点系へ置換する手順を示し，その２で述べる数値計算の解析パラメータを示した．

[参考文献]

その２にまとめて記載する．

*1　大阪大学工学部建築工学科

*2　京都大学防災研究所

Dept. of Architectural Engineering, Faculty of Engineering, Osaka Univ.

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.