

履歴型ダンパー付骨組の残留変形に関する研究

RESIDUAL DEFORMATION OF STEEL FRAMES WITH HYSTERETIC DAMPERS

小川 厚治*

Koji OGAWA

This paper presents a seismic design procedure to estimate the residual deformation of steel frames with hysteretic dampers when main frames do not yield under earthquake excitations. Dynamic response analysis is carried out on single-degree-of-freedom systems with various structural parameters. From these numerical results, the critical parameters that control residual deformation are found to be (1) stiffness ratio of damper system to main frame and (2) initial yield deformation. Based upon the energy-balance consideration during a half-cycle, residual deformation is derived in explicit form as functions of these parameters. The proposed method is applicable for multistory frames.

Keywords: seismic response, steel frame, hysteretic damper, residual deformation, bilinear system

地震応答, 鋼構造骨組, 履歴型ダンパー, 残留変形, バイリニア系

1. 序

履歴型ダンパーの設置箇所は, 建物の平面計画などから大きな制約を受けるのが普通であり, 限られた数の履歴型ダンパーに大きな耐力を持たせるとダンパー系支持架構に応力が集中してしまうので, 履歴型ダンパーに付与できる耐力は限界付けられることが多い. 一方, 履歴型ダンパーは極力小さな変位で降伏させ, エネルギーを消費させるのが効果的であり¹⁾, そのような小さな変位では主体構造が発揮できる復元力は小さい. したがって, 一次設計において想定しているような中小地震においてもダンパーが降伏する程度に, ダンパー降伏時の骨組の弾性限耐力を小さく設計することが, 与えられた条件の下での最適な設計となる場合も当然想定される.

中小地震でダンパーが降伏することを前提に設計するなら, 地震後の残留変形が耐震設計上の重要な問題となる. 主体構造が弾性であれば, 履歴型ダンパー付骨組の残留変形はダンパーを取り外すことによって除去できる²⁾. しかし, 履歴型ダンパーが降伏する地震の度に点検・補修が必然となるのであれば, 履歴型ダンパー付骨組の弾性限耐力には条件を設けることも必要になる. ここでは, 主体構造が弾性を保つ範囲に限定して, 履歴型ダンパー付骨組に生じる残留変形について検討する.

主体構造が弾性の履歴型ダンパー付骨組の荷重-変形関係は, 高

い第2分枝剛性比をもつ Bilinear 型でモデル化でき, このような荷重-変形関係をもつ構造物には残留変形が生じにくいことは既に報告されている^{3~7)}. しかし, 残留変形に及ぼす諸因子の影響の定量化, 残留変形の簡略な予測法は明らかにされていない.

構造物に生じる残留変形は大きなばらつきを持つ量であり, その変動係数は最大変位応答などと比べても遙かに大きい. 本論では, ばらつきの大きい量であることを考慮した上で, 残留変形の上限を近似する簡略な算定式を, エネルギーの釣合に基づいて導く.

2. 1 自由度系の応答解析結果における残留変形

まず, 1 自由度系の応答解析結果から, 残留変形に及ぼす諸因子の影響を調べる. ダンパー系の荷重-変形関係を完全弾塑性とする, 主体構造は弾性としているので, 1 自由度系のせん断力 Q -変位 δ 関係は図 1 に示すような Bilinear 型となる. 図 1 で δ_{\max} と Q_{\max} は, 地震外乱下で生じる最大変位と最大せん断力である. δ_{\max} とダンパー系の弾性限変位 δ_y と

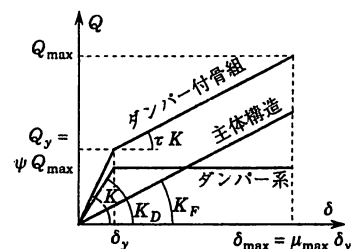


図 1 解析モデル

* 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Kumamoto Univ., Dr. Eng.

の比を最大塑性率 μ_{max} 、弾性限荷重 Q_y と Q_{max} との比をトリガレベル係数 ψ と定義する。

$$\delta_{max} = \mu_{max} \delta_y \quad (1)$$

$$Q_y = \psi Q_{max} \quad (2)$$

また、ダンパー系と主体構造の剛性比 k を次式で定義する。

$$k = K_D / K_F \quad (3)$$

図1のBilinear型の第2分枝剛性比 τ は次式で表される。

$$\tau = \frac{1}{1+k} \quad (4)$$

トリガレベル係数 ψ と k , μ_{max} には次の関係がある。

$$\psi = \frac{k+1}{k+\mu_{max}} \quad (5)$$

本論で応答解析に用いた入力地震動は表1の8種であり、応答解析結果は表1の記号を用いて示している。ただし、これらの地震波

を入力後、固有周期 T_0 の5倍の時間で自由振動させ、その後静的に除荷して残留変形 δ_{res} を求めている。

運動方程式の数値積分にはNewmark β 法 ($\beta = 1/4$) を用い、1自由度系のすべての応答解析例において、時間増分は固有周期 T_0 の1/200以下になるように設定している。系の粘性減衰定数は、特に断らない限り0.02としている。

まず、最大応答 (Q_{max}, δ_{max}) に対する初期降伏点の相対位置と残留変形の関係を調べるために、次のパラメータで応答解析を行った。

ψ : 0.1~1, μ_{max} : 1.5, 2, 3, 5, 10 の5種, T_0 : 0.5, 1, 2秒の3種

図2には、横軸に ψ を取って、応答解析結果の残留変形 δ_{res} を最大変位 δ_{max} で無次元化した値を、表1の記号を用いて示している。図2に示すように、系の固有周期 T_0 が変わっても $\delta_{res} / \delta_{max} - \psi$ 関係には、明確な影響は現れていない。

図2によると、 μ_{max} が一定であれば、 $\psi (= Q_y / Q_{max})$ が大きいほど残留変形が大きくなる傾向が認められる。これは、 μ_{max} を一定として ψ を大きくすると第2分枝剛性比 τ が小さくなるためである。図2には、横軸の ψ に対応するダンパー系の剛性比 k の値を上側目盛りとして付け加えている。残留変形 δ_{res} はダンパー系の剛性比 k の影響を強く受け、 k の現実的な値を2程度以下と考えると¹⁾、残留変形 δ_{res} と δ_{max} の比は0.2以下とかなり小さくなる。また、最大変位 δ_{max} を一定値と考えると、最大塑性率 μ_{max} が大きくなり弾

表1 入力地震動

地震名	最大加速度 (m/sec ²)	継続時間(sec)	記号
El Centro NS 1940	3.4170	53.8	●
El Centro EW 1940	2.1010	53.6	○
Taft NS 1952	1.5270	54.4	▲
Taft EW 1952	1.7590	54.4	△
JMA Kobe NS 1995	8.2057	150.0	■
JMA Kobe EW 1995	6.1920	150.0	□
NTT Kobe NS 1995	3.3073	50.6	◆
NTT Kobe EW 1995	1.5346	50.6	◇

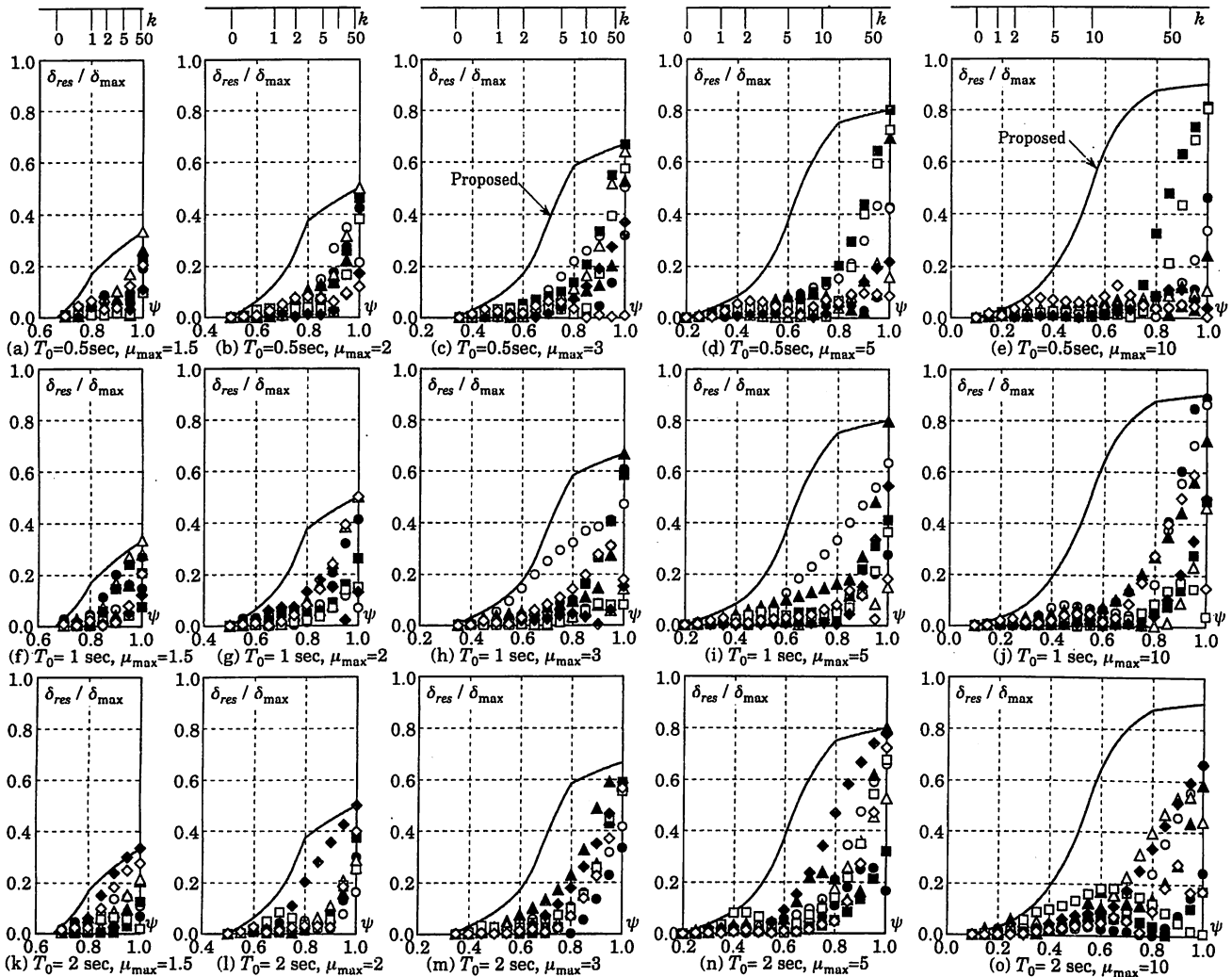


図2 $\psi - \delta_{res} / \delta_{max}$ 関係

性限変位 δ_y が小さくなるほど、 k が 2 程度以下の範囲での残留変形 δ_{res} は小さくなる傾向があり、残留変形 δ_{res} は、最大変位 δ_{max} よりも弾性限変位 δ_y に依存する傾向があることが伺える。

ダンパー系の剛性比 k が 2 以下の現実的な範囲で、残留変形 δ_{res} と k の関係を調べるために、次のパラメータで応答解析を行った。

k : 0.1~2 の 20 種, μ_{max} : 1.5, 2.5, 5, 10 の 4 種, T_0 : 1 秒
結果を図 3 に示す。ただし、これ以降の図では、残留変形 δ_{res} は弾性限変位 δ_y で無次元化して示している。図 3 によると、剛性比 k が大きくなると残留変形 δ_{res} は増大するという強い傾向がある。

次に、図 4 は最大塑性率 μ_{max} ($= \delta_{max} / \delta_y$) と残留変形 δ_{res} の関係を調べたものであり、解析パラメータは次の値を用いている。

k : 0.5, 1, 2, 5 の 4 種, μ_{max} : 1.5~10 の 18 種, T_0 : 1 秒
図 4 によると、最大塑性率 μ_{max} の増大に伴って残留変形 δ_{res} が単調に増大するという傾向は認められず、残留変形 δ_{res} は最大塑性率 μ_{max} の影響をあまり受けないことがわかる。

図 5 は固有周期 T_0 と残留変形 δ_{res} の関係を調べたもので、解析パラメータは次の値を用いている。

k : 0.5, 2 の 2 種, μ_{max} : 1.5, 5 の 2 種, T_0 : 0.2~2 秒の 19 種
図 5 によると、残留変形 δ_{res} は固有周期 T_0 によっても大幅に変動し

ているが、一定の傾向は認められない。

以上の結果によると、固有周期の違いや入力地震によって残留変形 δ_{res} は大きく変動するが、その上限的な値に注目すれば、構造パラメータが残留変形 δ_{res} に及ぼす影響は次のように纏められる。

- [1] 残留変形 δ_{res} は、主に弾性限変位 δ_y とダンパー系の剛性比 k に依存する。
- [2] 最大変位 δ_{max} が残留変形 δ_{res} に及ぼす影響は小さい。
- [3] 固有周期 T_0 が残留変形 δ_{res} に及ぼす影響は小さい。

3. 残留変形の予測

3.1 エネルギーの釣合と残留変形

文献 7) では、半サイクルの間のエネルギーの釣合から Bilinear 系の残留変形を予測している。この文献に倣って残留変形を予測する。

残留変形 δ_{res} が確定する最後の半サイクルの履歴を、図 6 に太線で示すように考える。すなわち、正の変位 δ_1 の状態からの半サイクルで変位 δ_2 に到達し、その後の弾性除荷で正の残留変形 δ_{res} が生じるものとする。 δ_1 は最大変位 δ_{max} より小さいので、次の条件を満たす。

$$1 \leq \mu_1 \leq \mu_{max} \quad (6)$$

また、正の変位 δ_1 の状態からの半サイクルで負の残留変形 δ_{res} が算

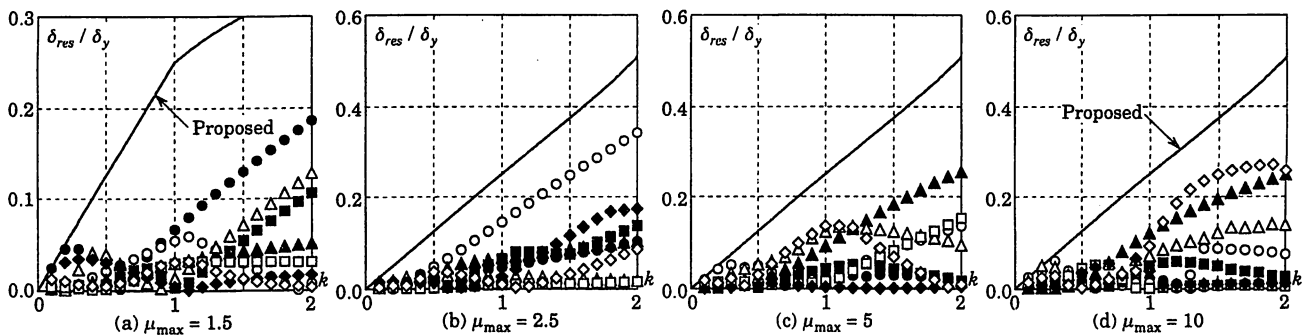


図 3 $k - \delta_{res} / \delta_y$ 関係

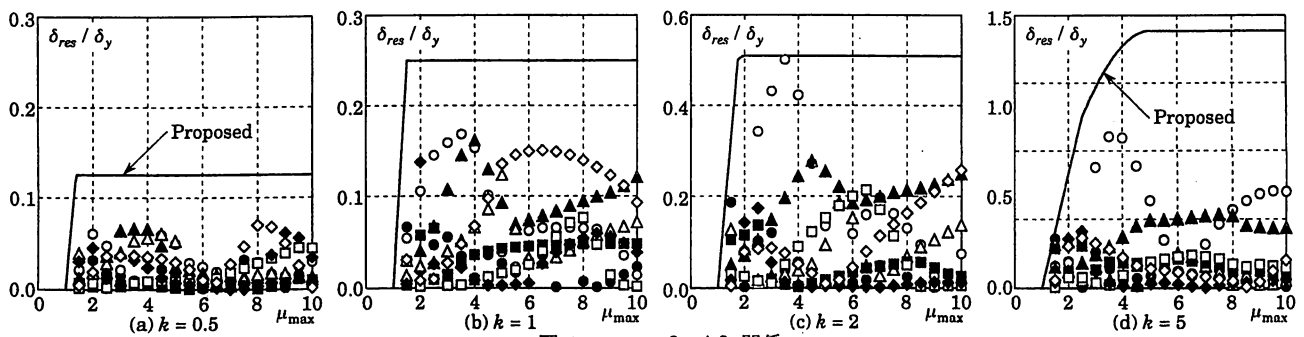


図 4 $\mu_{max} - \delta_{res} / \delta_y$ 関係

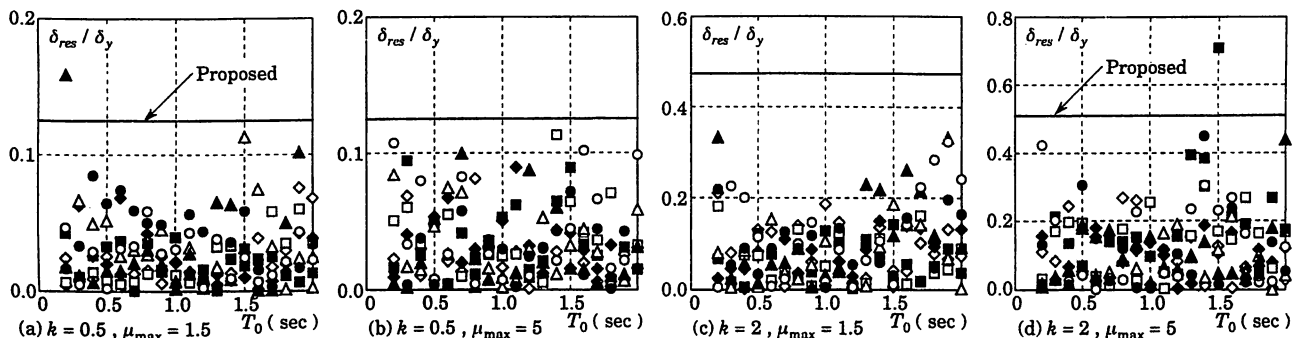


図 5 $T_0 - \delta_{res} / \delta_y$ 関係

定された場合には、 δ_1 より小さい $-\delta_2$ を初期変位とする別の問題として扱うことにする。したがって、

$$\mu_{res} \geq 0, \quad \mu_2 \geq -1 \quad (7)$$

図6の変形を生じる間に散逸したエネルギーを E_{loss} とすると、エネルギーの釣合は次式で表される。

$$E_e = E_s + E_{loss} \quad (8)$$

上式で、 E_e は図6に示すように、変位 δ_1 の状態で蓄えていた弾性歪エネルギーであり、 E_s は変位 δ_2 に到達するために必要なエネルギーである。 E_e と E_s を求めて、(8)式に代入すると次式を得る。

$$\mu_2^2 - \mu_1^2 + 2k(\mu_1 - \mu_2 - 2) + \frac{(1+k)E_{loss}}{E_y} = 0 \quad (9)$$

ここで E_y は初期弾性限界エネルギーである。(9)式から次式を得る。

$$\mu_2 = k - \sqrt{(\mu_1 - k)^2 + 4k - \frac{(1+k)E_{loss}}{E_y}} \quad (10)$$

(10)式から分かるように、 E_{loss} が大きいほど、 μ_2 が大きくなって、残留変形 δ_{res} も大きくなる。

(1) エネルギーの散逸がないとき

まず、この半サイクルの間にエネルギーの散逸はないと考える。

$$E_{loss} = 0 \quad (11)$$

(10)式に(11)式を代入すると μ_2 は次式となる。

$$\mu_2 = k - \sqrt{(\mu_1 - k)^2 + 4k} \quad (12)$$

(12)式の μ_2 は一般には $\mu_1 = k$ で最大となるが、 $\mu_1 \geq 1$ であるので、 $k \leq 1$ の場合には $\mu_1 = 1$ で最大値 $\mu_2 = -1$ をとる。すなわち、 $k \leq 1$ の系は、どのような変位 δ_1 から出発しても、正負の塑性変形を繰り返しながら徐々に振幅が減少し、最終的には残留変形が生じない。

k が1より小さくとも残留変形 δ_{res} が生じることは、既に前章の解析例で示したとおりである。エネルギーの散逸がないとすれば、 k が1以下の系に残留変形 δ_{res} が生じることを説明できない。

(2) 粘性減衰によるエネルギーの散逸

次に、エネルギー散逸の原因を粘性減衰と考えてみる。

$$E_{loss} = E_h \quad (13)$$

上式の E_h は半サイクルの間の粘性減衰による消費エネルギーであり、次式で近似できる⁷⁾。

$$E_h = 2\pi h \left(\frac{k + \mu_1}{1 + k} \right)^2 E_y \quad (14)$$

ここで、 h は粘性減衰定数である。(10)、(14)式から次式を得る。

$$\mu_2 = k - \sqrt{(k - \mu_1)^2 + 4k - \frac{2\pi h}{1+k} (k + \mu_1)^2} \quad (15)$$

変位 δ_2 の後、弾性除荷するとすれば、残留塑性率 μ_{res} は次式となる。

$$\mu_{res} = \frac{k}{1+k} (\mu_2 + 1) = \frac{k}{1+k} \left\{ 1 + k - \sqrt{(k - \mu_1)^2 + 4k - \frac{2\pi h}{1+k} (k + \mu_1)^2} \right\} \quad (16)$$

(16)式の μ_{res} が最大になるときの μ_1 は、上式で $(\partial \mu_{res} / \partial \mu_1) = 0$ の条件を用いて次のように導かれる。

$$\mu_1 = k \frac{1+k+2\pi h}{1+k-2\pi h} \quad (17)$$

μ_1 が(17)式の値の時の残留塑性率 μ_{res} は次式となる。

$$\mu_{res} = \frac{k}{1+k} \left[1 + k - \sqrt{4\pi h \left(\frac{k}{1+k-2\pi h} \right)^2 \{ 4\pi h - 2(1+k) \} + 4k} \right] \quad (18)$$

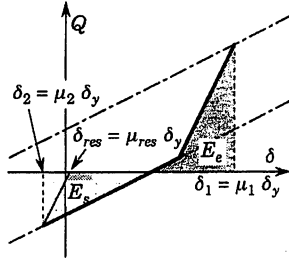


図6 半サイクルの履歴

さて、(9)式はこの半サイクルの間に塑性変形が生じることを前提に導いているので、(15)~(18)式の適用範囲は次式で表される。

$$\mu_1 - \mu_2 \geq 2 \quad (19)$$

(15)式を用いると、(19)式で示す適用範囲は次式となる。

$$\mu_1 \geq \frac{2(1+k)}{1+\sqrt{1-2\pi h}} - k \quad (20)$$

(20)式の条件を満たさないとき、変位 δ_1 の状態の後の挙動は弾性であり、残留塑性率 μ_{res} は次式となる。

$$\mu_{res} = \frac{k}{1+k} (\mu_1 - 1) \quad (21)$$

弾性挙動で最大の残留塑性率 μ_{res} が生じるときの μ_1 は、(20)式の等号で表され、等号が成立するときの残留塑性率 μ_{res} は次式となる。

$$\mu_{res} = \frac{2\pi h k}{(1+\sqrt{1-2\pi h})^2} \quad (22)$$

(17)式の μ_1 が(20)式の適用範囲より小さいとき、(20)式の適用範囲内では μ_1 が小さいほど残留塑性率 μ_{res} は大きくなることを表し、残留塑性率 μ_{res} の最大値は(22)式となる。(17)式の μ_1 が(20)式の適用範囲内であるための条件は次式で表される。

$$k \geq \sqrt{1-2\pi h} \quad (23)$$

(6)式に示したように、 μ_1 は μ_{max} 以下の任意の値を取り得ると考えて、残留塑性率 μ_{res} の上限値を整理すると次のようになる。

$$\mu_{max} \leq \frac{2(1+k)}{1+\sqrt{1-2\pi h}} - k \text{ のとき} \\ \mu_{res} = \frac{k}{1+k} (\mu_{max} - 1) \quad (24)$$

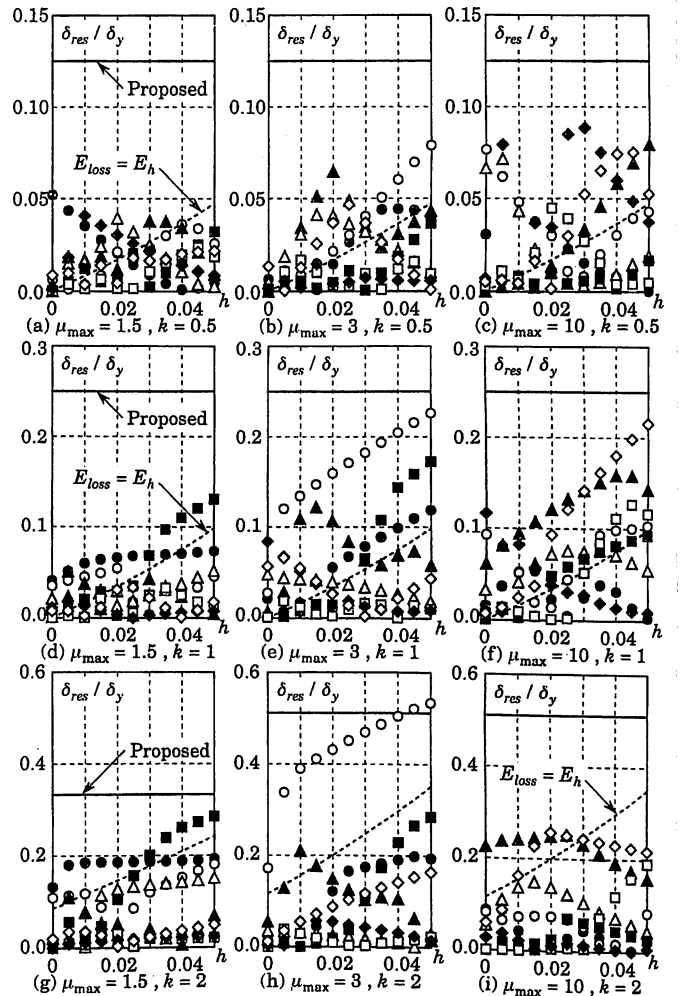


図7 $h - \delta_{res} / \delta_y$ 関係

$$\mu_{\max} \geq \frac{2(1+k)}{1+\sqrt{1-2\pi h}} - k \text{ かつ } k \leq \sqrt{1-2\pi h} \text{ のとき}$$

$$\mu_{\text{res}} = \frac{2\pi h k}{(1+\sqrt{1-2\pi h})^2} \quad (25)$$

$$k \frac{1+k+2\pi h}{1+k-2\pi h} \geq \mu_{\max} \geq \frac{2(1+k)}{1+\sqrt{1-2\pi h}} - k \text{ かつ } k \geq \sqrt{1-2\pi h} \text{ のとき}$$

$$\mu_{\text{res}} = \frac{k}{1+k} \left(1+k - \sqrt{(k-\mu_{\max})^2 + 4k - \frac{2\pi h}{1+k} (k+\mu_{\max})^2} \right) \quad (26)$$

$$\mu_{\max} \geq k \frac{1+k+2\pi h}{1+k-2\pi h} \text{ かつ } k \geq \sqrt{1-2\pi h} \text{ のとき}$$

$$\mu_{\text{res}} = \frac{k}{1+k} \left[1+k - \sqrt{4\pi h \left(\frac{k}{1+k-2\pi h} \right)^2 (4\pi h - 2(1+k)) + 4k} \right] \quad (27)$$

図7は、減衰定数 h を 0~0.05 の範囲で変化させ、減衰定数 h と残留塑性率 $\mu_{\text{res}} (= \delta_{\text{res}} / \delta_y)$ の関係を示したもので、解析パラメータは次の通りである。

k : 0.5, 1, 2 の3種, μ_{\max} : 1.5, 3, 10 の3種, T_0 : 1秒

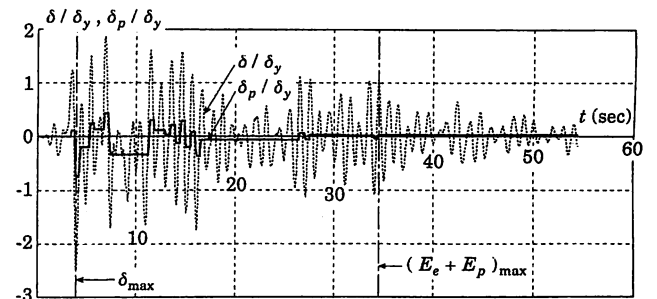
図7には破線で、ここで述べた(24)~(27)式による予測結果を示している。破線の予測結果では、減衰定数 h が大きくなるに伴って残留塑性率 μ_{res} が大きくなっている。しかし、応答解析結果によると、減衰定数 h が0.02の結果だけに注目しても、剛性比 k が0.5の系では過半数の応答解析結果が予測値を上回っており、減衰定数を零とすると剛性比 k が1以下の系の残留変形の予測値は零となる。エネルギー散逸の原因を粘性減衰と考えれば、減衰定数 h が小さく剛性比 k が1以下の系に生じる残留変形を過小に評価する傾向が、図7から認められる。粘性減衰より更に大きな半サイクルの間のエネルギーの散逸を考慮しなければ、残留変形の上限的な値は予測できない。

3.2 半サイクルの散逸エネルギー

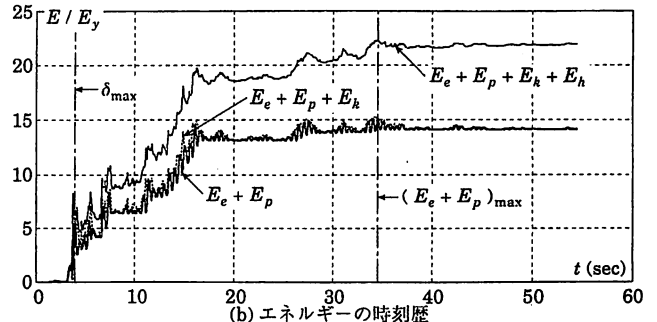
図8に示したのは、固有周期 $T_0 = 1$ 秒で剛性比 $k = 1$ の系に Taft EW を入力して、最大塑性率 $\mu_{\max} = 2.5$ を生じるときの外乱終了時までの時刻歴応答である。(a) 図には変位 δ と塑性変形 δ_p 、(b) 図には歪エネルギー $E_e + E_p$ (弾性歪エネルギー E_e と塑性変形による消費エネルギー E_p の和)、歪エネルギーに運動エネルギー E_k を加えた値 $E_e + E_p + E_k$ 、更に粘性減衰による消費エネルギー E_h を加えた値 $E_e + E_p + E_k + E_h$ を示している。(c) 図は、変位が極値から次の極値をとるまでの半サイクルの間の歪エネルギー $E_e + E_p$ の変化量 ΔE を示したもので、正の値(増加量)を白棒で、負の値(減少量)を黒棒で示している。また、これらの図には、変位 δ が最大となった時刻、歪エネルギー $E_e + E_p$ が最大となった時刻を鎖線で示している。この例では、 $E_e + E_p$ が最大となった時刻に、塑性変形 δ_p が最終的な残留変形 δ_{res} に到達している。

図8(a)によると、数サイクルにわたって塑性変形 δ_p が一定値をとる状態が幾度か現れている。このように弾性振動している状態で地震が中断すれば、その時の塑性変形 δ_p が残留変形 δ_{res} となるのは当然であり、再び系を塑性化させる地震入力エネルギーがあることによって、系は別の塑性変形状態に移行する。

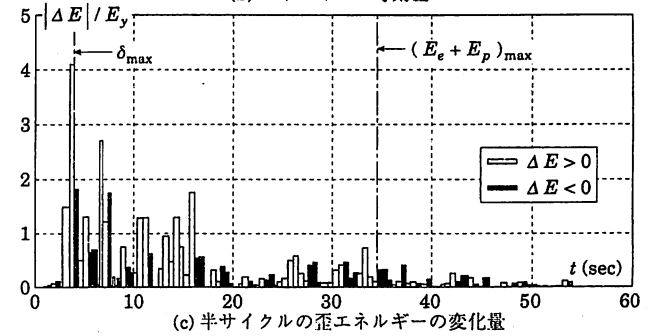
図8(b)によると、 $E_e + E_p + E_k$ の時刻歴は歪エネルギー $E_e + E_p$ の時刻歴の極大値を包絡するような形状であるが、単調に増大するわけではなく頻繁に減少も起こしている。 $E_e + E_p + E_k$ が大幅に減少するときには、 $E_e + E_p + E_k + E_h$ もまた減少することが多く、 $E_e + E_p + E_k$ の減少は粘性減衰の影響だけでなく、地動によって弾



(a) 変位の時刻歴



(b) エネルギーの時刻歴



(c) 半サイクルの歪エネルギーの変化量

図8 Taft EW での時刻歴の例

性振動エネルギーが奪われることによって生じることが分かる。

図8(c)によると、 $E_e + E_p$ が最大値近傍の値になる時刻17秒程度までは、半サイクルの間のエネルギーの変化量 ΔE は正の場合が多く、負の ΔE に比べて絶対値も圧倒的に大きい。しかし、残留変形 δ_{res} が確定するのは $E_e + E_p$ が最大値に到達する半サイクル以降の挙動であり、 $E_e + E_p$ が最大値近傍の値に到達した後に限定すれば、任意の時刻以降の正の ΔE の最大値と負の ΔE の最小値には、絶対値に大きな差違は認められない。

次に示す図9, 10, 11は、いずれも固有周期 T_0 が1秒で剛性比 k が0.5, 2の2つの系の応答解析例である。

図9には、最大塑性率 $\mu_{\max} = 2.5$ の解析例について、半サイクルの間の歪エネルギーの減少量 E_{loss} と、その半サイクルの開始点での弾性歪エネルギー E_e の関係を示している。応答解析中のすべての半サイクルを対象としているが、 E_e が小さいものは除外している。図9によると、 E_{loss} が E_e に近い値を取る例も多く認められ、半サイクルの間にその直前に保持していた弾性歪エネルギー E_e の大部分を喪失してしまうような挙動は必ずしも珍しくないことがわかる。

最後の塑性変形が生じた半サイクル以降だけに注目して、 ΔE の最大値 ΔE_{\max} を図10に、 ΔE の最小値(最大の減少量) E_{loss} を図11に示す。ただし、 μ_{\max} は1.5~10の範囲で変化させている。

系が静止の状態にあっても初期弾性限歪エネルギー E_y 程度のエネルギーが入力されれば、再び塑性変形が生じるので、最後の塑性変

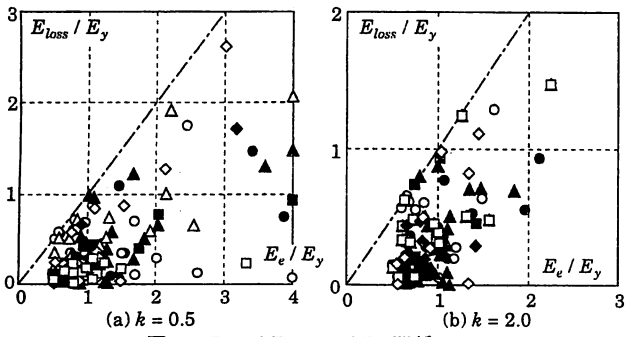


図9 $E_{loss}/E_y - E_e/E_y$ 関係

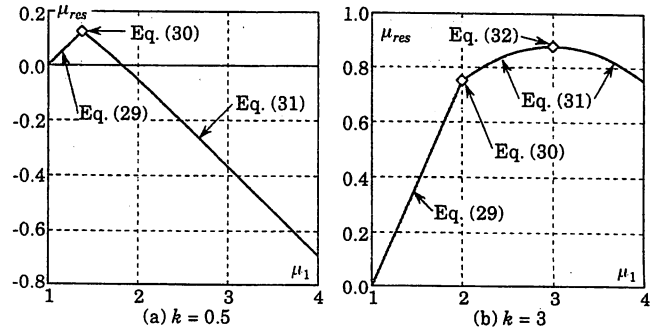


図12 $\mu_1 - \mu_{res}$ 関係

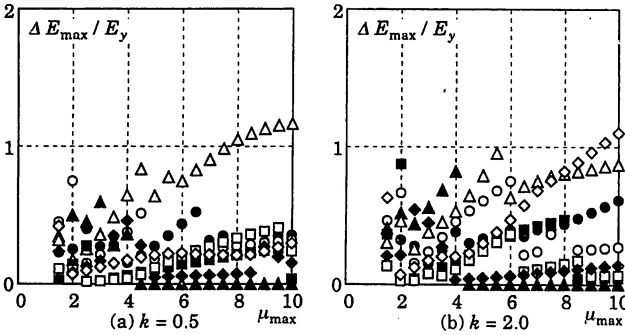


図10 $\Delta E_{max}/E_y - \mu_{max}$ 関係

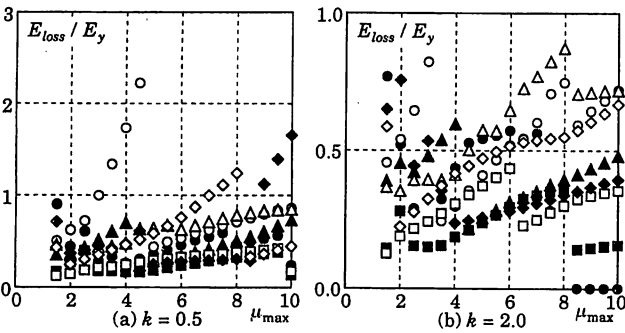


図11 $E_{loss}/E_y - \mu_{max}$ 関係

形が生じた後の ΔE の最大値 ΔE_{max} は、図10に示すように E_y がほぼ上限となる。図8(c)の結果から、一定の時刻以降に限定すれば、正の ΔE の最大値 ΔE_{max} と負の ΔE の最小値の絶対値 E_{loss} はほぼ同じ大きさと推察できるので、 E_{loss} の上限的な値も E_y で近似できることが予想される。図11においても、大部分の E_{loss} は E_y 以下となっている。

以上の考察から残留変形が確定する半サイクルの間に散逸するエネルギー E_{loss} は、その上限的な値として初期弾性限歪エネルギー E_y をとるのが適当と判断した。すなわち、

$$E_{loss} = E_y \quad (28)$$

3.3 残留変形の予測値

(10), (28)式を用いて、残留塑性率 μ_{res} を導いた。式の展開は(15)~(23)式と同様であるので、結果だけを示すと次のようになる。

$$\mu_{max} \leq \frac{k+5}{4} \text{ のとき}$$

$$\mu_{res} = \frac{k}{1+k} (\mu_{max} - 1) \quad (29)$$

$$\mu_{max} \geq \frac{k+5}{4} \text{ かつ } k \leq \frac{5}{3} \text{ のとき}$$

$$\mu_{res} = \frac{k}{4} \quad (30)$$

$$k \geq \mu_{max} \geq \frac{k+5}{4} \text{ かつ } k \geq \frac{5}{3} \text{ のとき}$$

$$\mu_{res} = \frac{k}{1+k} \{ 1+k - \sqrt{(\mu_{max}-k)^2 + 3k-1} \} \quad (31)$$

$$\mu_{max} \geq k \text{ かつ } k \geq \frac{5}{3} \text{ のとき}$$

$$\mu_{res} = \frac{k}{1+k} (1+k - \sqrt{3k-1}) \quad (32)$$

上式の誘導過程は省略したが、各式の意味を説明しておく。図12は、剛性比 k が0.5と3の場合について、(28)式の条件の下で、図6に示した半サイクル開始時の塑性率 μ_1 と残留塑性率 μ_{res} の関係を示したものである。いずれの図も陰を付けた μ_1 の小さい領域は、塑性率 μ_1 から始まる半サイクルが弾性挙動であることを示し、 μ_1 がそれ以上に大きい領域は塑性履歴を伴うことを示している。また、図中には対応する算定式を示しているが、図中に示した(29), (31)式による算定値は μ_{max} の代わりに μ_1 を用いた値である。

図12(a)に示すように k が5/3より小さい場合には、塑性履歴を伴うとして(31)式から算定される残留塑性率 μ_{res} は、開始時の塑性率 μ_1 が大きいほど小さくなる。したがって、 μ_1 が μ_{max} 以下の任意の値を取り得ると考えれば、 μ_{max} がいかに大きくとも残留塑性率 μ_{res} の上限は、(30)式で与えられる。

一方、図12(b)に示すように k が5/3より大きい場合には、塑性履歴を伴うとして(31)式から算定される残留塑性率 μ_{res} が $\mu_1 = k$ で最大となるので、 μ_{max} が k 以下の時の残留塑性率 μ_{res} の上限値は μ_1 が μ_{max} に等しいとして(31)式から算定される。一方、 μ_1 が k を超えると、開始時の塑性率 μ_1 が大きいほど残留塑性率 μ_{res} が小さくなる。したがって、 μ_{max} がいかに大きくとも $\mu_1 = k$ として求めた(32)式が残留塑性率 μ_{res} の上限を与える。

最大塑性率 μ_{max} が一定値以上の場合の残留塑性率 μ_{res} を表す(30)式と(32)式による算定値は、 μ_{max} に依存しない。(30), (32)式による残留塑性率 μ_{res} を図13に示しておく。主体構造が降伏しない限り、図13の値が残留塑性率 μ_{res} の上限となる。

(29)~(32)式による結果は、図2, 3, 4, 5, 7に実線で示している。全体的には実線の予測値は応答値をかなり過大に評価する傾向があり、逆に応答値がこの予測値を上回る例もいくつか認められる。しかし、非常にばらつきが大きい残留変形の上限を近似する値として、本論で提案する(29)~(32)式は適当であると考えている。

4. 複数回の地震を受けたときの残留変形

既に述べたように現実的な履歴

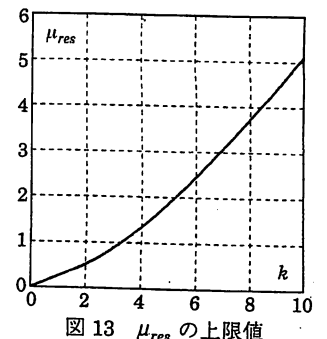


図13 μ_{res} の上限値

型ダンパー付骨組の残留変形はかなり小さいが、小さな残留変形であっても、中小地震の度に降伏し残留変形が累積すれば、その値は耐震設計上の重要な問題となり得る。ここではまず、同じ地震を繰り返し入力することによって、残留変形の累積が起こるかを検討した。

解析パラメータは次の通りとした。

T_0 : 1 sec, k : 0.5, 2, 5 の 3 種, μ_{max} : 1.5, 10 の 2 種

上記のパラメータ μ_{max} は、初期状態で地震波を入力したときに生じる最大塑性率であり、2 回目以降の最大塑性率を表すものではない。

解析は、1 回の地震入力が終わる毎に、2 章で述べた手順で系を停止させ、残留変形を算定した後、同じ強度の同じ地震を繰り返し入力している。繰り返し回数は 10 回とした。

地震波の入力回数 n と残留変形 δ_{res} の関係を図 14 に示す。図 14 によると、最初の 2, 3 回の地震入力の間は残留変形が僅かに変化する場合もあるが、その変化量は極めて小さく、繰り返し回数にかかわらず残留変形はほぼ一定となる。

図 14 においても、図中に収まるものについては 3.3 節で示した予測結果を実線で示している。ただし、この予測値は 1 回目の最大塑性率 μ_{max} を用いた値で、2 回目以降は最大塑性率が変化することを考慮していない。図 14 の解析例の内、残留変形の予測値が最大塑性率 μ_{max} に依存するのは、図中に予測値を示した μ_{max} が 1.5 で剛性比 k が 2 と 5 の 2 例だけである。

主体構造が弾性を保つ履歴型ダンパー付骨組では、最大変位もまた、残留変形の影響を受けにくいという性質があるので¹⁾、残留変形が最大塑性率 μ_{max} に依存するとしても、残留変形に及ぼす繰り返し回数の影響は小さくなっている。

次に、上記と同様の手順で、異なる複数の地震を受けた場合について検討した。図 15 に示す結果は、いずれも固有周期 $T_0 = 1$ sec で剛性比 $k = 1$ であり、8 種の地震を表 1 の順に 2 度入力している。各地震は、初期状態で入力すれば最大塑性率 μ_{max} が 1.5 または 10 となるように加速度を調整しており、各地震を初期状態で入力したときに生じる残留変形 δ_{res} を各図の左端に示している。このような繰

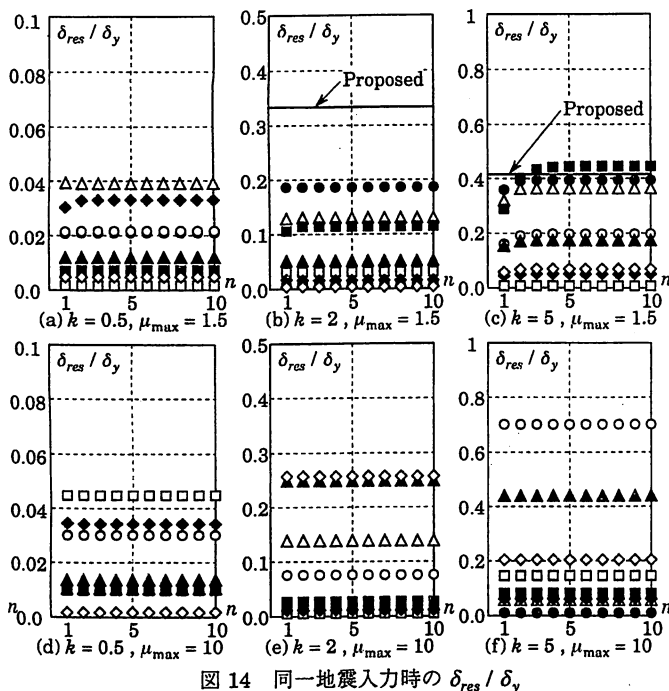


図 14 同一地震入力時の δ_{res} / δ_y

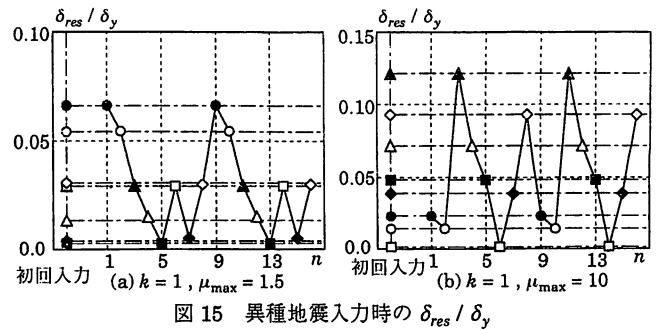


図 15 異種地震入力時の δ_{res} / δ_y

り返し入力を行っても、各地震終了時の残留変形 δ_{res} は、初期状態で入力したときの残留変形 δ_{res} と近い値をとり、残留変形が累積する傾向は認められない。

5. 多自由度系の残留変形

3.2 節で述べたように、1 自由度系に比較的大きな残留変形が生じる原因は、主要動以降の地震動の減衰域において、系が地動によって歪エネルギーを奪われることである。半サイクルで奪われるエネルギー E_{loss} とその後の半サイクルでの歪エネルギーの増大量の最大値 ΔE_{max} は概ね等しく、それ以降は塑性変形を生じないことを考慮して、初期弾性限歪エネルギー E_y を E_{loss} の上限の近似として採用した。この近似に基づいて、3.3 節では残留変形を予測している。

上記の 1 自由度系に残留変形が生じる過程での歪エネルギーの変動は、多層骨組の各層についても同様であろう。このように考えれば、多自由度系の各層に生じる残留変形 δ_{res} は、各層のダンパー系の弾性層間変位 δ_y 、剛性比 k 、最大塑性率 μ_{max} を用いて、(29)~(32) 式から算定できる。このようにして予測した多自由度系の残留変形 δ_{res} を、応答解析結果と比較した。

解析骨組は、各層の質量が等しく各層の階高も一定で 4m としたせん断型多自由度系で、いずれも 10 層の 2 つの骨組 FA と FB である。設計用層せん断力係数分布 A_i は次式を用いている。

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} \quad (33)$$

ここで、 α_i はその層より上部の重量と骨組の全重量の比である。いずれの骨組も、ベースシヤール係数 0.2 の設計用地震荷重を載荷したとき全層に 1/200 の層間変位角が生じるように設計している。骨組 FA と FB の基本固有周期 T_1 と最上層および最下層のダンパー系の弾性限変位角 R_{Dy} を表 2 に示し、各層のダンパー系の弾性限変位角

表 2 解析骨組

	T_1 (sec)	最上層の R_{Dy}	最下層の R_{Dy}
FA	1.20	1/500	1/700
FB	1.28	1/200	1/500

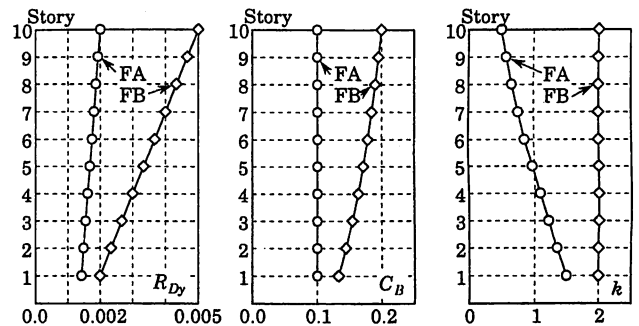


図 16 解析骨組の各層の特性

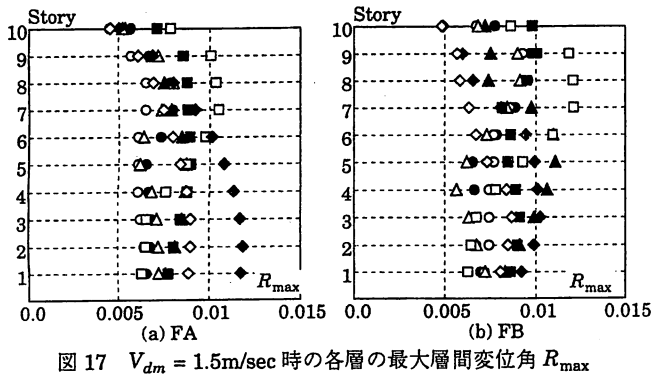


図 17 $V_{dm} = 1.5\text{m/sec}$ 時の各層の最大層間変位角 R_{max}

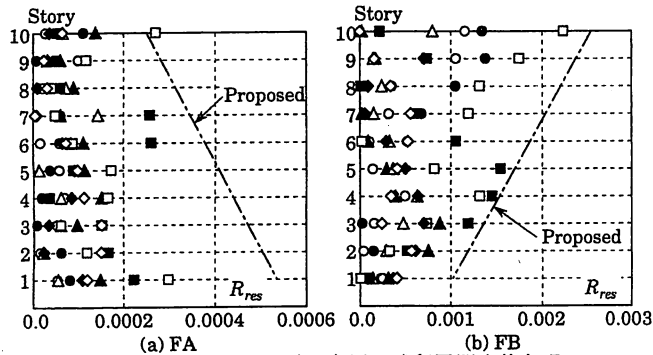


図 18 $V_{dm} = 1.5\text{m/sec}$ 時の各層の残留層間変位角 R_{res}

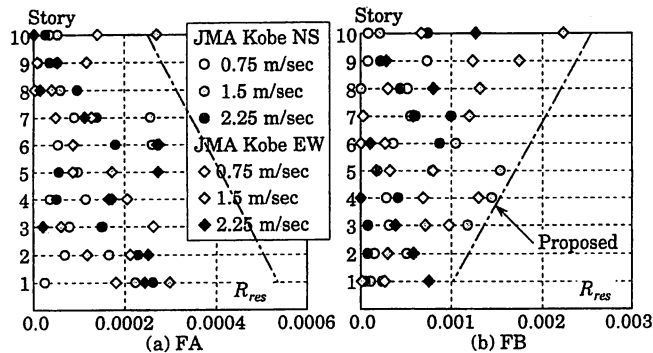


図 19 JMA Kobe に対する各層の残留層間変位角 R_{res}

R_{Dy} , 弾性限でのベースシヤ係数 C_B , ダンパー系の剛性比 k を図 16 に示す。ダンパー系支持柱の伸縮によって上層ほど R_{Dy} が大きくなることを考慮しており, R_{Dy} は層方向に直線的に変化させている。

FA は, ベースシヤ係数 0.1 の設計用地震荷重を載荷したとき, 全層のダンパーが同時に降伏する骨組で, 剛性比 k は 0.5~1.5 の範囲にある。FB は, 全層の剛性比 k を 2 とした骨組で, 設計用地震荷重を載荷すると下層のダンパーから順に降伏する骨組である。

応答解析においては, 1 次の減衰定数は 0.02 とし, 初期剛性比例の減衰マトリックスを用いている⁶⁾。また, 数値積分の時間増分は, 基本固有周期の 1/500 以下になるように設定している。

まず, この骨組に表 1 の 8 種の地震を入力した。ただし, 歪エネルギー $E_e + E_p$ の最大応答値の速度換算値 V_{dm} が 1.5m/sec となるように, 最大地動加速度を調整している。ただし,

$$V_{dm} = \sqrt{\frac{2(E_e + E_p)_{max}}{M}} \quad (34)$$

ここで, M は骨組の全質量である。各層の最大層間変位角 R_{max} を図 17 に示すが, R_{max} は 1/100 程度となっている。

残留層間変位角 R_{res} を図 18 に示し, 鎖線で示した予測結果と比較

する。予測値は, 応答の上限値を近似している。ここで対象とした骨組 FA は, ダンパー系の弾性限変位角 R_{Dy} や剛性比 k に比較的現実的な数値を与えた骨組であるが, 残留層間変位角 R_{res} の応答の最大値は 1/3000 程度である。骨組 FB は, ダンパー系の弾性限変位角 R_{Dy} と剛性比 k を共に大きく残留変形が生じやすい骨組であるが, 残留層間変位角 R_{res} の応答の最大値は 1/500 程度以下に収まっている。

図 18 で比較的大きな残留層間変位角 R_{res} が認められる JMA Kobe NS と EW について, 外乱強度を変化させて応答解析を行った。すなわち, V_{dm} が 1.5m/sec の他, 0.75m/sec と 2.25 m/sec の解析結果を図 19 に示している。外乱強度を大きくすると, 残留層間変位角 R_{res} が增大するという傾向は認められず, いずれも鎖線で示した予測値程度に収まっている。

6. 結論

本論では, ダンパー系の荷重-変形関係が完全弾塑性であり主体構造が弾性であることを前提として, 履歴型ダンパー付骨組の残留変形について検討した。主な結果を纏めると次のようになる。

- [1] 残留塑性率 μ_{res} は, ダンパー系の剛性比 k に主に依存する。
- [2] ダンパー系の最大塑性率 μ_{max} が一定値以上であれば, 最大塑性率 μ_{max} が残留塑性率 μ_{res} に及ぼす影響は小さい。
- [3] 剛性比 k が 5/3 以下のとき残留塑性率 μ_{res} は $k/4$ が上限となる。
- [4] 剛性比 k が 5 程度以下であれば, 同じ地震を繰り返し入力しても, 残留変形の累積はほとんど生じない。
- [5] 多層骨組の各層の残留変形も, その層のダンパー系の弾性限層間変位 δ_y , ダンパー系と主体構造の剛性比 k , ダンパー系の最大塑性率 μ_{max} に基づいて, 1 自由度系と同様に予測できる。

謝辞

本研究は, 文部省科学研究費補助金 (基盤研究 C) の助成を受けて行いました。また, 本研究を進めるにあたっては, 京都大学教授井上一朗 主査を始めとするダンパー用鋼材利用技術開発委員会 (建設省官民連帯共同研究/先端技術による新しい鋼構造建築物の開発) の皆様から貴重なご助言を頂きました。

参考文献

- 1) 小川厚治・井上一朗・小野聡子: 柱・梁を弾性域に留める履歴ダンパー付架構の設計耐力 (1 質点系による考察), JSSC 鋼構造論文集, 第 5 巻 第 17 号, pp.13-28, 1998.3
- 2) 小野聡子・中平和夫・辻岡静雄・井上一朗: アルミ溶射摩擦ダンパーの静的および動的履歴特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.41B, pp.1-8, 1995.3
- 3) 小川厚治・黒羽啓明・待鳥賢治: 強震をうける 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, 第 481 号, pp.117-126, 1996.3
- 4) 李昇宰・方沛宇・大井謙一・田中清・佐々木康人: LYP 履歴ダンパーを組込んだ 3 層鉄骨造骨組模型の地震応答観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.809-810, 1997.9
- 5) 秋山宏・高橋誠: 地震時における柔剛混合せん断型多層骨組の残留変形, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, pp.397-398, 1998.9
- 6) 日本鋼構造協会 耐震要素の効果と耐震設計法 WG: 履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法, (社)鋼材倶楽部発行, pp.96-109, 122-126, 1998.9
- 7) 木戸勝俊樹・井上一朗: 大地震に対する 1 質点パイリニア系の残留変形に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 構造 III, pp.935-936, 1999.9