

損傷集中型制震構造の地震応答特性

手塚 武仁

(技術研究所)

Seismic Response Properties of the Seismic Damage Control Structures

by Takehito Tezuka

Abstract

When input energy by the earthquakes is dissipated in a specific story of the multi-story structures, the other stories of the structure can be released from the energy dissipation.

This study investigated the earthquake response for the Seismic Damage Control Structures placing the Mid-Isolated-Story of the energy dissipation clearly, which have the small amounts of stiffness and the hysteretic damper. The results gave clear that in case where the lower story of the multi-mass shear structure is the Mid-Isolated-Story has the more effects on the seismic performance improvements, and the Seismic Damage Control Structure has the more effects on the retrofit schemes of the existing buildings, or on the seismic performance improvement by being the structures of the damage concentrated story clearly.

概 要

地震エネルギーが建物の特定層で消費される時には、その他の層では地震エネルギーの消費から解放される。本研究では低剛性であり履歴ダンパーを持つエネルギー消費が明確な「中間免震層」を配置した損傷集中型制震構造の地震応答を検討した。その結果、建物の下層が中間免震層である場合には耐震性改善の効果が大きく、損傷集中型制震構造は既存建物の耐震改修や、損傷位置が明確な構造とすることで耐震性を向上する上で効果が大きいことを明らかにした。

§ 1 . はじめに

地震エネルギーの過半を集中的に消費するような中間免震層を設けるならば振動絶縁構造となる。損傷分布の制御が比較的難しいせん断型多層建物を、かような中間免震層を持つ振動系とすることで耐震性を高める構造が「損傷集中型制震構造」である。

塑性変形能力が期待できないような既存建物を損傷集中型制震構造に改築した場合には、中間免震層での変形能力を確保することで他の層は弾性範囲に留めるような耐震改修も考えられる。損傷集中型制震構造への改築工事は中間免震層とする層のみに限定され、その他の層は既存のままとしておくような合理的な耐震改修構法となると考えられる。

また、ポイド形式の高層集合住宅では通風を目的とした非居住階が低層部に設けられるが、一般居住階に比較して層間変形に対する制約が少ないことから中間免震層としての利用が考えられる。損傷集中型制震構造に予め設計しておくことで、損傷を中間

免震層に集中でき、その他の層は塑性変形能力を確保する制約が軽減される。損傷集中型制震構造とする設計は、損傷が不均衡なものとなりやすいせん断型多層建物に対し損傷位置が明確となる構造とすることが可能であり、過大入力に対しても性能の把握が容易な耐震性を確保しやすい構造と考えられる。

本報告は、エネルギーが集中するように剛性が小さく、集中したエネルギーを消費する履歴ダンパーを備えた中間免震層を持つ「損傷集中型制震構造」の構造特性を検討し、既存建物の耐震改修や、新築建物に適用することで耐震性の改善を図ることが実現できることを提案することが目的である。

§ 2 . 中間免震層へのエネルギーの集中特性

地震エネルギーの建物への入力には総質量と固有周期に依存した物理量であるが、中間免震層への地震エネルギーの集中は中間免震層を持つ構造特性の

影響を受けると考えられる。ここでは中間免震層の履歴ダンパーに集中する地震エネルギーに及ぼす主要パラメーターを明らかにする。

2.1 解析モデル

解析モデルは図-1に示す3層構造の建物であり、多層建物の最下層、中間層、最上層という3つの層位置の影響を表すことができる縮約モデルとした。第1層、第2層および第3層を各々中間免震層とした場合について、中間免震層のみに履歴ダンパーを取り付け地震エネルギーの集中を求める。解析モデルは均等重量($W_i = 9.8\text{MN}$)を持つ建物であり、バネは A_i 分布のせん断力に比例する分布を持ち固有周期が1秒となる建物とする。解析はコンクリート系建物を想定していることから、減衰は一次モードに対して $h = 3\%$ の等価粘性減衰を考える。解析モデルの振動諸元を表-1に示す。

中間免震層は大きな層間変形を発生する弾性の免震バネとバイリニア特性を持つ履歴バネ(ダンパーバネ)で構成される。免震バネは中間免震層より上層の重量で決まる固有周期に等しい剛性を持ち、免震バネの固有周期は $T_i = 2$ または4秒とした。表-1のカッコ内に免震バネ定数を示す。また、地震エネルギー入力が入力質量に比例するので、ダンパーバネの耐力は建物全重量に対して決める。中間免震層ではダンパーバネの履歴減衰以外の減衰能は考えない。

$$\text{免震バネ定数 } k_i = (2\pi / T_i)^2 \times \sum W_i / g \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ダンパーバネ耐力 } Q_y &= C \times 29.4(\text{MN}) \\ \delta y &= 2\text{cm} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $T_i = 2$ または4秒、 $\sum W_i$: 中間免震層より上層の重量合計(MN)、 g : 重力加速度(980cm/s^2)、 C : 中間免震層に取り付けるダンパーバネの耐力係数

履歴ダンパーの性能は初期剛性の影響を受けるが、免震バネに対するダンパーバネの初期剛性の比は0.5から60の範囲であり、バネ比を網羅していると考え

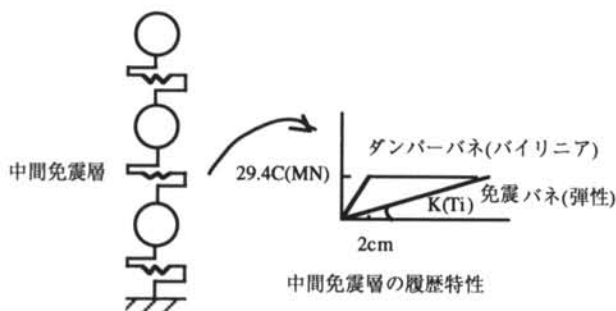


図-1 解析モデル

られる。解析に用いた地震加速度記録は、観測記録波(EI-Centro1940NS、Hachinohe1968NS)とし、解析モデルの固有周期に係わらず地震荷重効果を同一とするために地震エネルギー入力の等価速度で $V_E = 150\text{kine}$ になるように加速度を基準化する。地震継続時間は30秒とする。

階(層)	重量 $W_i(\text{MN})$	バネ定数 $K_i(\text{MN/cm})$
3	9.8	1.30 (0.099) {0.025}
2	9.8	1.95 (0.197) {0.049}
1	9.8	2.29 (0.296) {0.074}

() : $T_i = 2$ 秒、{} : $T_i = 4$ 秒の場合の免震バネ定数

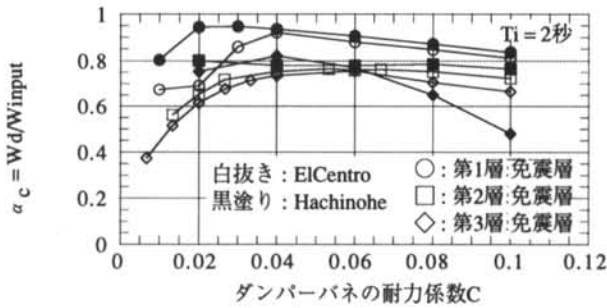
表-1 解析モデルの振動諸元

2.2 解析結果

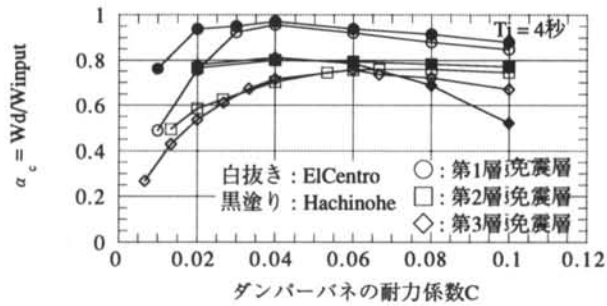
1) 地震エネルギーの中間免震層への集中

(2)式で定義したダンパーの耐力係数 C をパラメーターとして、(3)式で示す地震エネルギー入力のダンパーへの集中割合 α_c を図-2に示す。 $C < 0.04$ となる場合には、ダンパーバネの初期剛性が小さいために免震バネの弾性エネルギーとしての負担の比率が増え、ダンパーの履歴減衰として消費されるエネルギーは小さく考えられる。ダンパーの耐力係数が $C \geq 0.04$ となる場合には、第1層を中間免震層とすると地震エネルギー入力Winputの81~96%を集中できるものの、第2層または第3層を中間免震層とすると最大82%程度を集中できるのみである。中間免震層へのエネルギー集中が大きくなるダンパーの耐力係数は $C = 0.04 \sim 0.06$ に最適値があると考えられる。地震エネルギー入力は建物の弾性エネルギー W_e 、ダンパーバネの履歴エネルギー W_d 、建物固有の粘性減衰により消費されるエネルギー W_h の累加に等しくなるが、各層のエネルギーを(4)式の等価速度に換算して分布を図-3から図-5に示す。ここでは地震エネルギーの伝播の性状を見ることが目的であり、地震波がEI-Centroの場合について示した。中間免震層では直下層の粘性減衰による地震エネルギーを取り込み、中間免震層から上の層への地震エネルギーの伝播は極めて少なくなり中間免震層が地震エネルギーを絶縁することが確認できる。矢部等の研究²⁾によると粘性減衰がない場合には柔剛混合系のエネルギー集中層へのエネルギーの集中割合は70%以上であり大方は90%程度となることが明らかにされているが、現実には地震エネルギーの伝播経路となる下層に材料固有の粘性減衰があり、そのために、エネルギーの集中割合は層の位置による影響を受けると言える。以上のことより、中間免震層の履歴ダンパーへの地震エネルギーの集中は層の

位置に関係した値であり、ダンパーバネの初期剛性が小さくなる範囲を除き $0.04 \leq C \leq 0.10$ について、図-6に示すように中間免震層が支える質量の関数として集中割合 α_c を回帰すると(5)式となる。

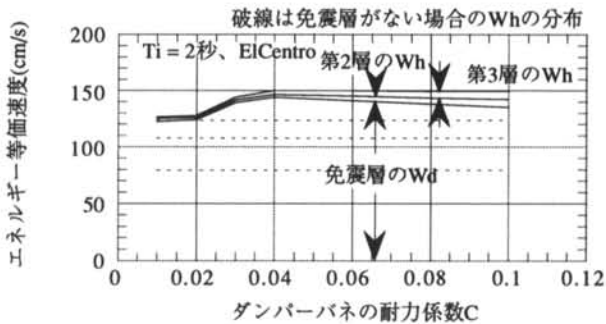


a) 免震バネ周期 $T_i = 2$ 秒の場合

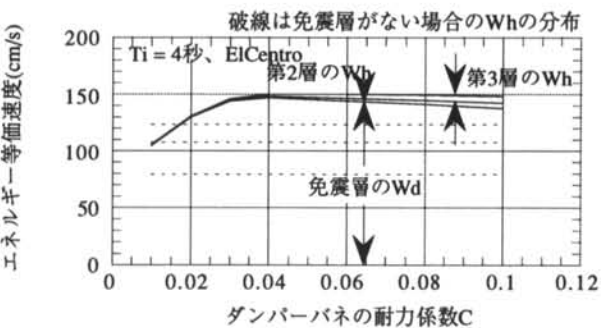


b) 免震バネ周期 $T_i = 4$ 秒の場合

図-2 ダンパーへの地震エネルギーの集中割合



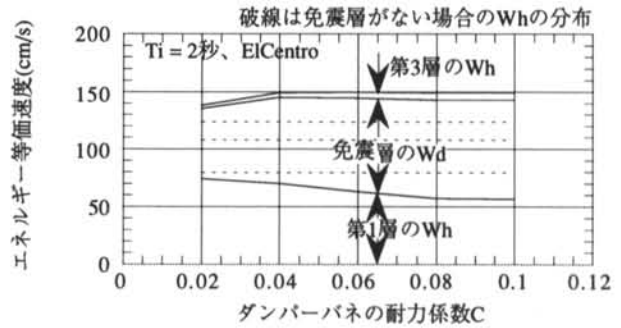
a) 免震バネ周期 $T_i = 2$ 秒の場合



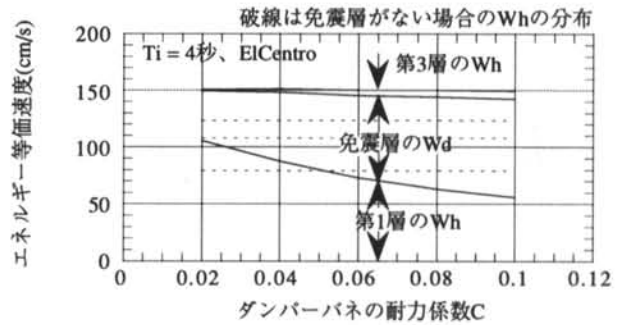
b) 免震バネ周期 $T_i = 4$ 秒の場合

図-3 第1層が免震層の場合のエネルギー分布

(5)式は下層の粘性減衰の影響を含んだ中間免震層への地震エネルギーの集中割合である。ここでの解析より回帰した(5)式の精度の検証は次章で10層建物に適用して行うこととする。

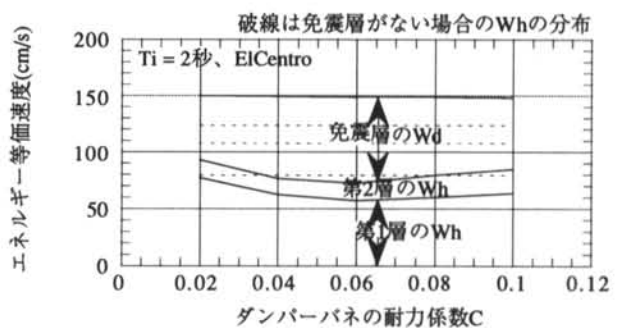


a) 免震バネ周期 $T_i = 2$ 秒の場合

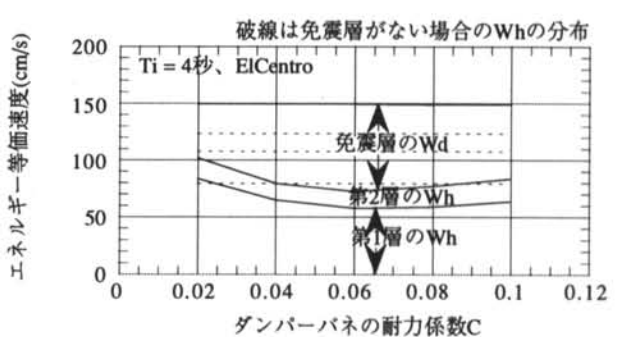


b) 免震バネ周期 $T_i = 4$ 秒の場合

図-4 第2層が免震層の場合のエネルギー分布



a) 免震バネ周期 $T_i = 2$ 秒の場合



b) 免震バネ周期 $T_i = 4$ 秒の場合

図-5 第3層が免震層の場合のエネルギー分布

エネルギーの集中割合 $\alpha_c = W_d / W_{input}$ (3)

エネルギー等価速度 $= \sqrt{(2Wh/M)}$
 または $\sqrt{(2Wd/M)}$ (4)

0.04 ≤ C ≤ 0.10 の範囲に対して、
 $\alpha_c = W_d / W_{input}$
 $= 0.283(m/M) + 0.598$ (r = 0.776) (5)

ここで、Wd: ダンパーの履歴エネルギー、Wh: 粘性減衰で消費されるエネルギー、Winput: 地震エネルギー入力、M: 総質量、m: 中間免震層より上層の質量合計

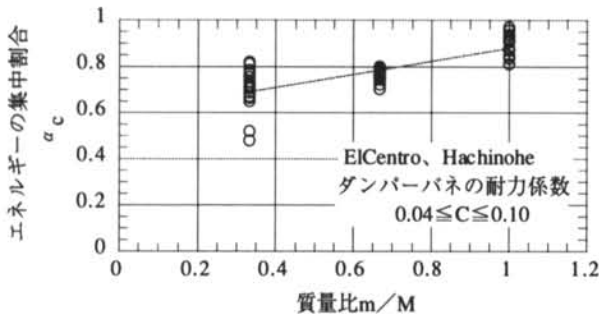


図-6 中間免震層への地震エネルギーの集中

2) エネルギー集中と最大変形の関係

中間免震層の層間変形を図-7に示す。層間変形はダンパーの耐力に逆比例しているが、ダンパーの耐力係数が C ≥ 0.06 では耐力の影響は小さい。ダンパーの履歴エネルギー Wd を耐力で除すことで累積塑性変形と定義し、中間免震層の累積塑性変形と最大変形の関係を求めると図-8が得られる。ダンパーの効果が小さくなる範囲を除き 0.04 ≤ C ≤ 0.10 について累積塑性変形と最大変形の平均を求めると(7)式が得られ、パイリニア特性を持つダンパーバネの累積塑性変形は最大変形の9.8倍となる。これは高橋等の提案値³⁾に近似し、層間変形は履歴ダンパーが負担するエネルギーと対応関係を持つと言える。

累積塑性変形 $\delta p = W_d / (C \cdot \Sigma W) = \eta \delta y$ (6)

$\delta p / \delta \max = \eta / \mu = 9.8$ (7)

ここで、 $\mu = \delta \max / \delta y$

3) 中間免震層の層せん断力係数の予測

中間免震層を持つ多自由度系についても地震エネルギー入力の一定則が成り立つと考えられ、中間免震層への地震エネルギーの集中割合は層の位置および下層の粘性減衰の影響を考慮して(5)式で近似できる。ダンパーの履歴エネルギー Wd と免震バネが持つ弾性エネルギー Wi が中間免震層に集中する地震エネルギーに釣り合うと考えられ、免震バネとダン

パーの地震エネルギーは(8),(9)式で求められ、中間免震層の層せん断力係数 Cc として(11)式を得る。

免震バネの弾性エネルギー

$W_i = (1/2) m (\alpha_i g T_i / 2\pi)^2$ (8)

ダンパーの履歴エネルギー

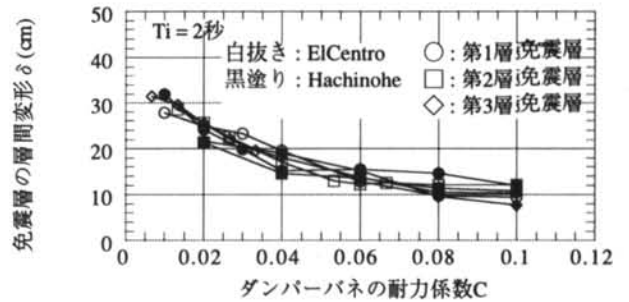
$W_d = 9.8 m (\alpha_d / \alpha_i) (\alpha_i g T_i / 2\pi)^2$ (9)

$W_i + W_d = (0.283m/M + 0.598)(1/2) M V_E^2$ (10)

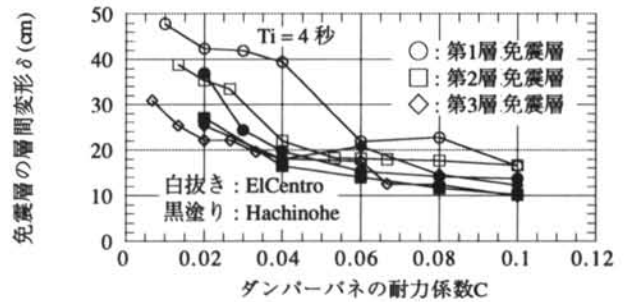
中間免震層の層せん断力係数

$C_c = \alpha_i + \alpha_d$
 $= -8.8 \alpha_d + \{(9.8 \alpha_d)^2 + \alpha_0^2 (0.283 + 0.598M/m)\}^{1/2}$ (11)

ここで、m: 中間免震層より上層の質量合計、M: 総質量、Ti: 免震バネの周期、 $\delta p = 9.8 \delta \max$ 、 $\alpha_0 = 2\pi V_E / g T_i$ 、g: 重力加速度、 α_i : 免震バネの層せん断力係数、 α_d : ダンパーの層せん断力係数(= CM/m)、C: ダンパーバネの耐力係数



a) 免震バネ周期 Ti = 2 秒の場合



b) 免震バネ周期 Ti = 4 秒の場合

図-7 中間免震層の層間変形

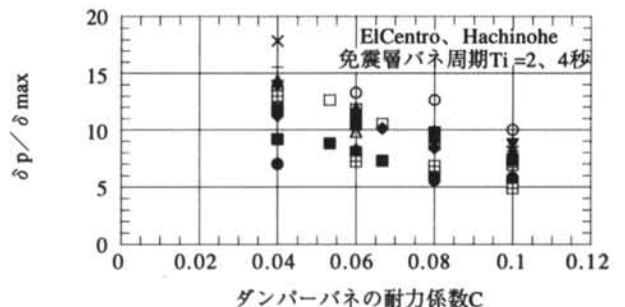


図-8 免震層の累積塑性変形と最大変形の関係

§ 3 . 中間免震層を持つ振動系の特性

10層建物モデルを使い、中間免震層を持つ多層建物の振動特性を明らかにする。

3. 1 解析モデル

解析モデルは均等重量($W_i = 9.8\text{MN}$)を持つ10層建物であり、バネは A_i 分布のせん断力に比例する分布を持ち固有周期は建物高さにより0.7秒とする。減衰はコンクリート系建物を想定しているので $h = 3\%$ の等価粘性減衰を考える。解析モデルの振動諸元を表-2に示す。中間免震層は当該層より上の層を1質点とした時に免震バネで決まる固有周期が $T_i = 2$ 秒となる低剛性を持ち、履歴ダンパーは耐力係数 C が前章の検討より $C = 0.04$ 程度とした場合がエネルギーの集中が大きくなることから、建物全重量に対して $C = 0.04$ となる耐力を持つバイリニア特性のバネとする($Q_y = 3.9\text{MN}$ 、 $\delta y = 2\text{cm}$)。中間免震層ではダンパーバネの履歴減衰以外の減衰能は考えない。

階(層)	重量 $W_i(\text{MN})$	バネ定数 $K_i(\text{MN/cm})$
10	9.8	10.6(0.099)
9	9.8	17.1(0.197)
8	9.8	22.6(0.296)
7	9.8	27.4(0.395)
6	9.8	31.5(0.494)
5	9.8	35.2(0.592)
4	9.8	38.3(0.691)
3	9.8	40.9(0.790)
2	9.8	43.0(0.888)
1	9.8	44.7(0.987)

()内は当該層を中間免震層とする場合の免震バネ定数

表-2 解析モデルの振動諸元

(地震波: ElCentro1940NS)

中間免震層	入力最大加速度 $A_{\text{max}}(\text{gal})$	入力最大速度 $V_{\text{max}}(\text{kine})$
第10層	438.7	42.9
第9層	471.7	46.2
第8層	531.7	52.0
第7層	586.2	57.4
第6層	614.7	60.2
第5層	626.2	61.3
第4層	667.3	65.3
第3層	672.6	65.8
第2層	661.1	64.7
第1層	633.5	62.0

表-3 $V_E = 150\text{kine}$ となる入力加速度一覧

地震波は観測記録波(ElCentro1940NS、継続時間30秒)とし、解析モデルの固有周期に係わらず地震荷重効果を同一とするために地震エネルギー入力の等価速度で $V_E = 150\text{kine}$ になるように加速度を基準化する。各層を中間免震層とした時の入力加速度一覧を表-3に示す。

3. 2 解析結果

1) 中間免震層を持つ建物の固有モード

代表的な層位置が中間免震層となる場合に、ダンパーがエネルギー消費を行う時点、すなわち免震バネのみの剛性の刺激関数 βu を図-9に示す。中間免震層より上層では一次モードが支配的であるのに対して、下層では層の位置によっては2次モード以上の高次モードが支配的となる。中間免震層が第3層以下の場合には一次モードのみで応答が決まると考えられるのに対し、第4層以上になると中間免震層より下層の部分建物としての応答が支配的である。

2) 中間免震層への地震エネルギーの集中

第1層から第10層が順次中間免震層となる場合の、ダンパーの履歴エネルギーおよび建物の粘性減衰($h = 3\%$)によるエネルギーを整理すると図-10を得る。第1層が中間免震層の場合には地震エネルギー入力の96%をダンパーに集中出来るものの、中間免震層が建物上層になるに従いダンパーへのエネルギーの集中割合は低下し、中間免震層より下層での建物の粘性減衰によるエネルギーの割合が増える。中間免震層が最上層となった場合にはダンパーに65%の地震エネルギーを集中でき、これは $h = 3\%$ の建物の粘性減衰が各層で有効に働いたと仮定した場合のエネルギーの集中割合に近似している。エネルギーの伝播経路となる下層の粘性減衰の効果を無視して中間免震層へのエネルギーの集中割合を求めると過大評価となると言える。

3) 中間免震層の層せん断力の予測

(11)式を用いた中間免震層の層せん断力係数と応答解析の結果を比較して図-11に示す。(11)式は応答解析結果を安全側にほぼ近似しており、地震エネルギーの集中割合を回帰した(5)式の精度を含め中間免震層の層せん断力係数を予測できると考える。

4) 中間免震層を持つ建物の層せん断力係数

第1層から第10層が順次中間免震層となった場合の層せん断力係数の分布を図-12に示す。中間免震層の位置が第5層より上層の場合には2次モード以降の高次モードの影響で中間免震層より下層の層せん断力係数が大きくなる。しかし、中間免震層がない場合(弾性)に比べると各層とも層せん断力係数は低下している。地震エネルギーを中間免震層に集中

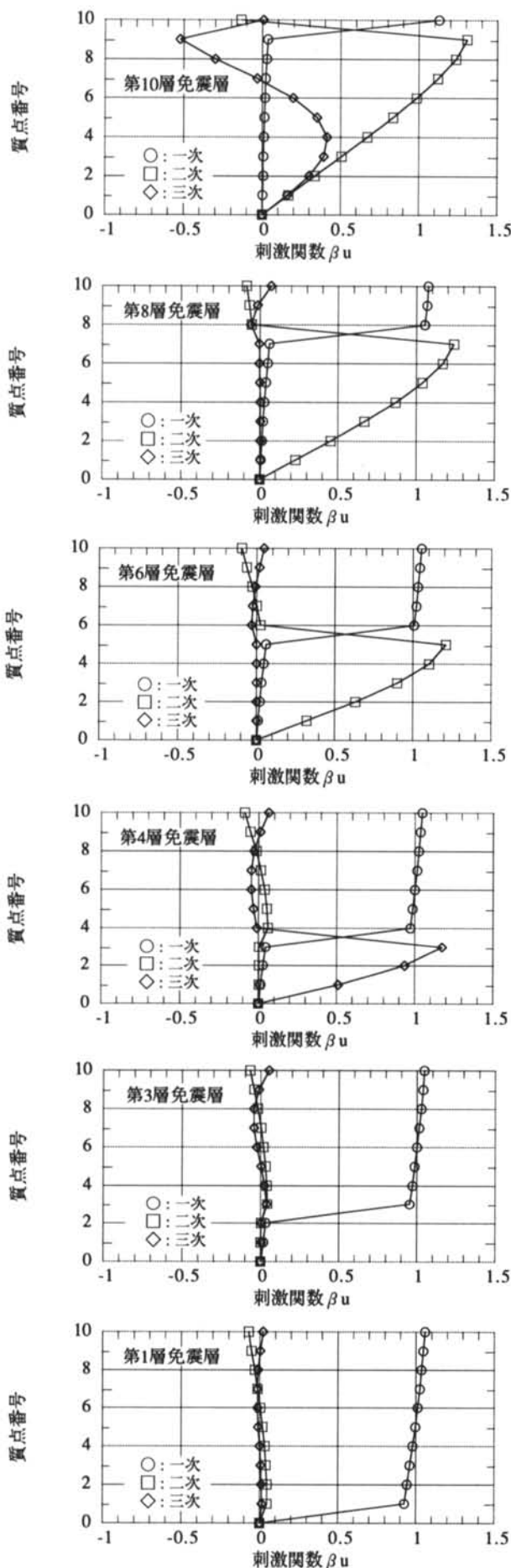


図-9 中間免震層を持つ建物の刺激関数 βu

することでその他の層が消費する地震エネルギーが低減し、振動系としての応答が小さくなることを理解できる。層せん断力係数が建物各層で大凡均等となる中間免震層の位置は第1層から第4層の場合であり、これを質量比で表すと(12)式となる。

$$m / M \geq 0.7 \quad (12)$$

ここで、 m ：中間免震層より上の質量合計、 M ：全質量

(12)式の条件を満たす場合については、層せん断力係数の分布が近似する。各々の場合について第1層の係数で規準化した各層の応答層せん断力係数を求め、それらの平均値として求められる層せん断力係数の分布を求めると A_i 分布に比例している。 A_i 分布の式を基に比例定数を求めると、(12)式の条件を満たす場合の層せん断力係数の分布として(13)式が得られる。(13)式と中間免震層での層せん断力係数が(11)式で求められる値となる時の層せん断力係数の分布を図-13に示す。(11)式と(13)式を用いて算定した結果は動的解析結果に近似し、限られた範囲の検討ではあるが、これらの式は中間免震層を持つ建物の応答を予測する場合に有用であると考えられる。

$$C_i = 1.00 +$$

$$0.32 \{ (1/\sqrt{\alpha_i}) - \alpha_i \} \{ 2T / (1+3T) \} \quad (13)$$

ここで、 α_i ：最上階から i 階までの重量和を全重量で割った値、 T ：免震パネによる系の固有周期

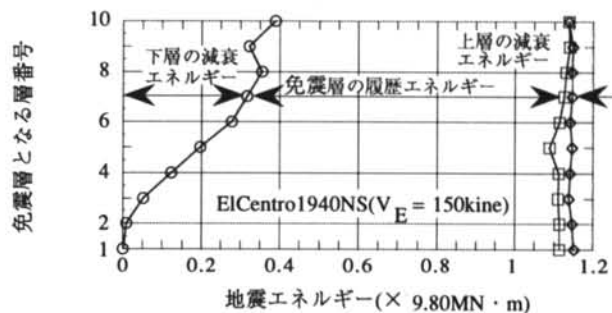


図-10 各層を中間免震層としたエネルギー分布

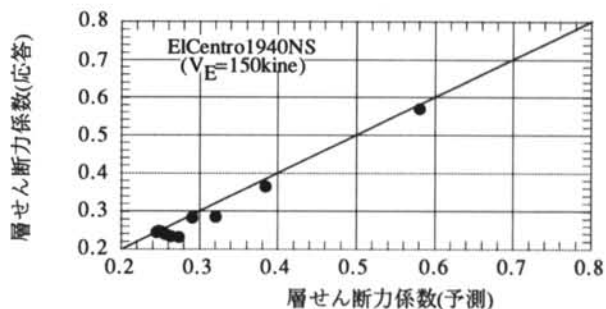
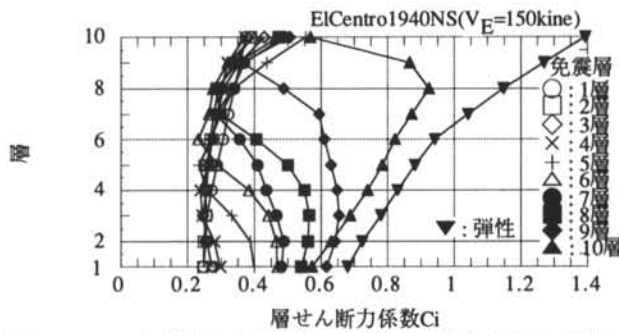
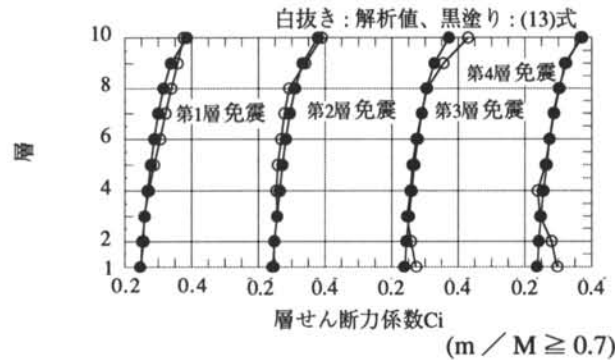


図-11 中間免震層の層せん断力の予測



図一 12 中間免震層を持つ建物の層せん断力係数



図一 13 (13)式による層せん断力係数の予測

§ 4 . 既存建物の耐震改修への適用

中間免震層には地震エネルギーを集中することができ、層の位置によっては振動絶縁型の特性が得られることから、中間免震層を持つ振動特性を利用して既存建物の耐震改修をできる可能性があることが分かった。ここでは昭和40年代に建設された鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造建物の特定層を中間免震層とした場合の耐震改修の効果を、各層に制震ダンパーを配置する制震補強の場合と比較して検討する。

4. 1 解析モデル

解析モデルとした既存建物は桁行方向13スパン(109.2m)、張間方向6スパン(43.2m)の地下2階地上11階の建物である。解析モデルは建物の桁行方向について1階床位置で固定とした等価せん断型振動系モデルとする。解析モデルは表一4に示す振動諸元を持ち、表一5のTri-Linear武田モデルの弾塑性履歴を受けると仮定する。中間免震層の位置は第3層であり(12)式で表す質量比は $m / M = 0.79$ となる。

中間免震層では積層ゴム($\phi 75\text{cm}$)を各柱の中間に入ると仮定する。また、ダンパーはアンボンドブレースダンパー(11構面)が取り付けられると考える。

中間免震層の特性

免震バネ $K_f = 5.14$ (MN/cm) (柱の影響は無視)

免震バネによる上層質量の周期 $T_i = 1.9$ 秒

ダンパー $Q_y = 23.2$ (MN) (耐力係数 $C = 0.039$)

ダンパーの剛性 $K_d = 106$ (MN/cm)

耐震改修の効果を比較する制震補強は、各層の建物耐力と制震ダンパーの耐力の合計が A_i 分布となるように各層に制震ダンパーを配置する(ベースシャ係数 $C_0 = 0.25$ とする)。制震ダンパーは低降伏点鋼を用いたK型アンボンドブレース(芯材 $36 \times 250\text{mm}$)と仮定する。制震補強では建物と制震ダンパーの耐力比 β および剛性比 k の関係がパラメーターとなり、 $\beta < k / (1+k)$ の場合に効果大きい。制震ダンパーの構面の数、耐力および剛性の関係を表一6に示す。

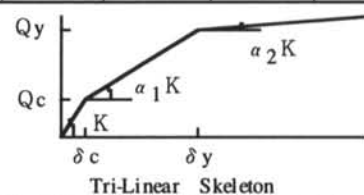
なお、建物が弾塑性履歴を受ける場合が対象であることから、粘性減衰は $h = 3\%$ の瞬間剛性比例型と

階(層)	重量 W_i (MN)	バネ定数 K_i (MN/cm)
11	82.0	88.3
10	37.7	103.7
9	42.9	98.6
8	45.5	113.7
7	48.6	117.5
6	48.8	132.2
5	51.6	158.6
4	52.5	181.5
3	59.6	257.3(5.14)
2	64.7	320.5
1	60.0	347.1

()内は中間免震層とする場合の免震バネ定数

表一 4 既存建物の振動諸元

層	Q_c (MN)	δ_c (cm)	Q_y (MN)	δ_y (cm)	α_1	α_2
11	13.0	0.15	37.2	0.60	0.606	0.055
10	17.2	0.17	48.2	0.64	0.627	0.068
9	20.9	0.21	54.9	0.71	0.692	0.132
8	24.7	0.22	66.6	0.76	0.679	0.117
7	28.2	0.24	73.5	0.80	0.688	0.150
6	31.6	0.24	80.4	0.75	0.722	0.156
5	34.6	0.22	98.0	0.83	0.654	0.099
4	37.3	0.21	106.8	0.80	0.644	0.094
3	40.2	0.16	122.5	0.76	0.530	0.056
2	42.7	0.13	128.4	0.54	0.657	0.061
1	44.7	0.13	131.3	0.50	0.672	0.077



表一 5 既存建物の弾塑性復元力の折点

した。固有周期は原建物が $T = 0.78$ 秒、中間免震層を持つ建物として耐震改修した場合が $T = 2.1$ 秒である。地震入力はいCentro1940NSとしてレベル2相当となるよう地震入力最大速度が $V_{max} = 50$ kinne になるように規準化した。

層	構面	耐力(MN)	剛性(MN/cm)	β	$k / (1+k)$
11	5	10.9	51.7	0.227	0.369
10	5	10.8	49.9	0.183	0.325
9	8	17.0	76.8	0.236	0.438
8	9	19.1	86.4	0.223	0.432
7	11	23.3	105.6	0.241	0.473
6	13	27.6	124.9	0.256	0.944
5	10	21.1	96.0	0.177	0.377
4	10	21.1	96.0	0.165	0.346
3	6	12.7	57.6	0.094	0.183
2	7	14.7	67.2	0.103	0.174
1	9	18.0	73.9	0.120	0.176

β = ダンパー耐力 / 建物とダンパーの合計耐力

k = ダンパー剛性 / 建物のバネ定数

表-6 各層への制震ダンパーの配置

4.2 解析結果

地震応答解析によるエネルギーの分布を図-14に示す。中間免震層には地震入力エネルギーの84%を集中でき、中間免震層を除く層の地震エネルギー負担は著しく低減する。地震入力エネルギーに対して粘性減衰により消費されるエネルギーは、原建物が26%、中間免震層を持つ場合が12%となり、地震エネルギーの消費特性が異なる。層せん断力と層間変形角および各層の塑性率の分布を図-15から図-17に示す。中間免震層でのせん断力は免震バネとダンパーバネのせん断力の合計を表している。中間免震層より上層の応答は著しく低減するが、下層の応答についても中間免震層への地震エネルギーの集中により各層で負担するエネルギーが減少することを原因として応答は低減する。第3層を中間免震層とした場合には下層に高次モードの影響がほとんど表れないことから、地震入力エネルギーの大部分を中間免震層で消費し、その他の層では耐力 Q_y に至っていない。一方、各層に制震ダンパーを配置する制震補強の場合には、上層に損傷が集中する原建物の損傷特性は改善でき、損傷は各層で均等化するものの、第3層を中間免震層とする耐震改修に比較すると応答低減の割合は小さい。

耐力はあるが変形能力が小さく、塑性率を $\mu \leq 1$ にする必要があるような既存建物に対しても、中間免震層に地震エネルギーを集中して消費することは

耐震性改善の効果が大きいと言える。耐震改修で工事を必要とする層は中間免震層となる第3層のみであり、他の層は改修工事を必要とせず、合理的な耐震改修構法となると考える。ダンパーの台数は、制震補強する場合は186台であるのに対して中間免震層とする場合には22台で済みダンパーの台数を考えても中間免震層とすることは合理的な構法である。

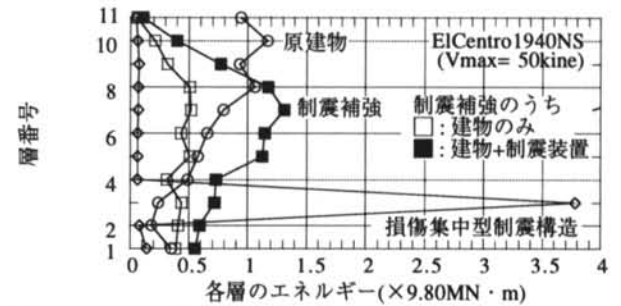


図-14 エネルギーの分布

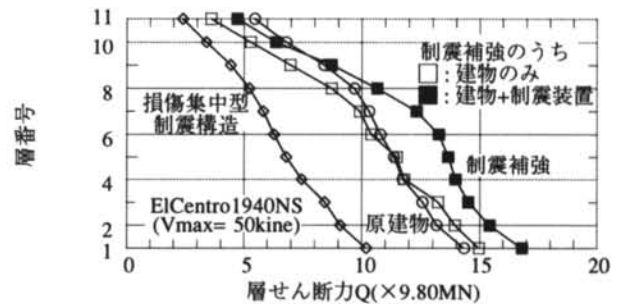


図-15 層せん断力の分布

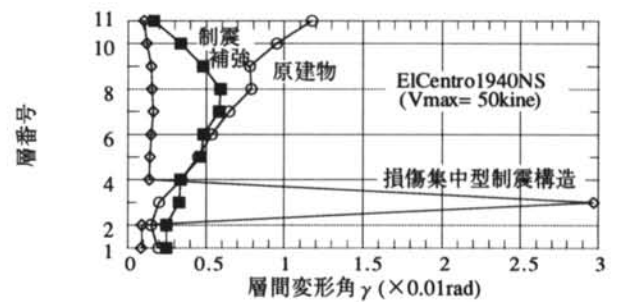


図-16 層間変形角の分布

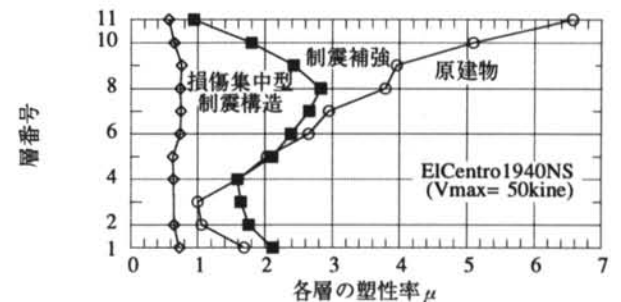


図-17 塑性率の分布

§ 5 . 損傷位置を明確とする構造への適用

超高層集合住宅では各住戸のプライバシーを確保するなどの理由から中ボイド形式の平面計画が増えている。中ボイド形式の場合にはボイド内の通風の確保を目的に図-18に示すように低層部に非居住階が設けられることが多い。ここでは20階建て集合住宅を想定し、3階が非居住階である場合に当該層を中間免震層とした損傷集中型制震構造とすることで、損傷位置を明確にすることを検討する。

5. 1 解析モデル

解析モデルとした建物の平面を図-19に示す。建物高さを80mとして固有一次周期が $T=1.6$ 秒となるとした1階床位置で固定とした等価せん断型振動系モデルとする。各階地震時重量を $W_i=31.9\text{MN}$ とし、弾性バネ定数は固有一次モードが直線となる分布とした。各層バネの復元力はTri-Linear武田モデルの履歴特性を持つとし、第二折点 Q_y は第1層のせん断力係数を0.2とした A_i 分布に従い、第一折点の荷重は $Q_y/3$ として第二折点の割線剛性が弾性剛性の $(1/\sqrt{2})$ 倍になるとした。

中間免震層は第3層であり(12)式で表す質量比は $m/M=0.9$ となる。免震バネによる中間免震層より上層の質量による固有周期を $T_i=4$ 秒とし、中間免震層の履歴ダンパーの耐力係数を $C=0.04$ とする。

建物の粘性減衰は $h=3\%$ の瞬間剛性比例型とした。地震入力はEiCentro1940NSとしてレベル2および安全性余裕度の確認レベルとなるよう地震入力最大速度を $V_{\max}=50\text{kine}$ および 75kine に規準化した。

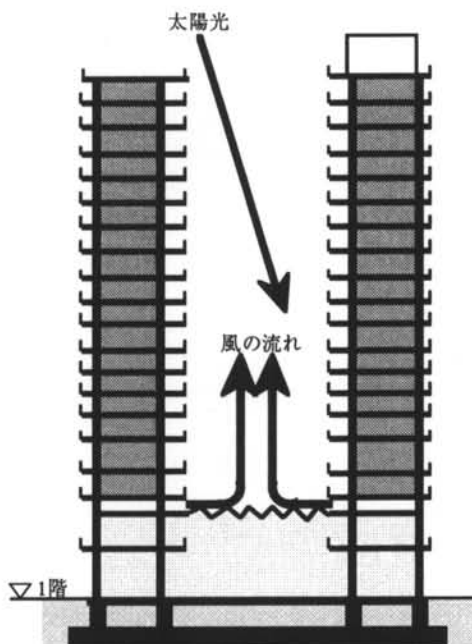


図-18 モデル建物の主要断面

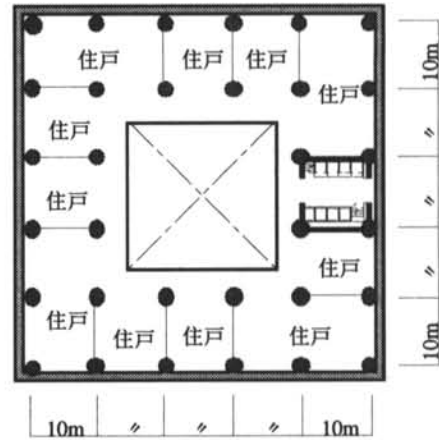


図-19 モデル建物の平面

5. 2 解析結果

弾塑性応答を受けた場合のエネルギーの分布を図-20に、層せん断力と各層の塑性率の分布を図-21と図-22に示す。原建物は安全性余裕度の確認レベル($V_{\max}=75\text{kine}$)となる過大地震を受けると、第1層に地震エネルギーが集中し層間変形が大きくなり、過大地震入力に対して、建物第1層で層崩壊の可能性も想定される。しかし、第3層を中間免震層とした損傷集中型制震構造とすることで、地震入力が最大速度で1.5倍と大きくなっても、中間免震層での地震エネルギー消費量が1.9倍と大きくなることで、中間免震層以外の層での応答の変動は小さい。中間免震層より上の層での応答は地震エネルギーが免震層となる第3層で絶縁されることから、ほぼ近似するものの、中間免震層から下の層についても免震層に地震エネルギーが集中されることで応答の増加は小さい。中間免震層の層間変形はレベル2相当の地震入力の時に $\delta=14.2\text{cm}$ 、安全性余裕度の確認レベルの地震入力の時に $\delta=26.6\text{cm}$ となり、これは免震層を貫通する設備機器等について対応が可能な層間変形と考えられる。

中間免震層を持つ損傷集中型制震構造とすること

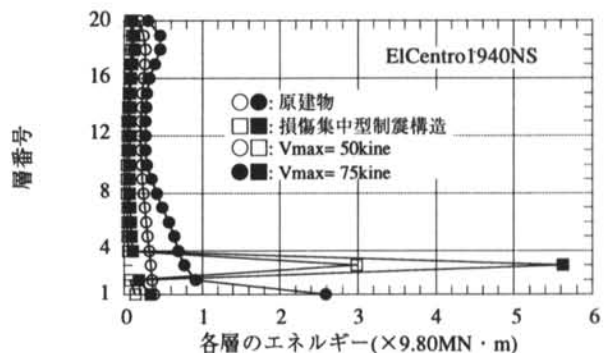
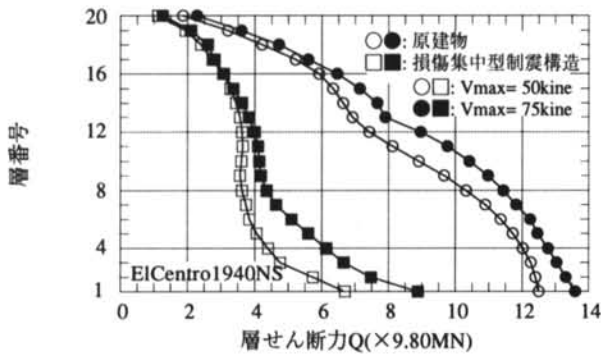
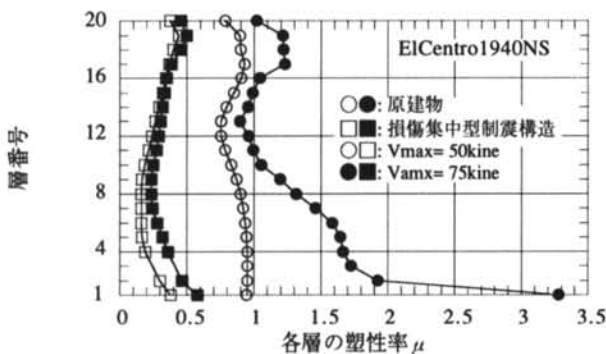


図-20 エネルギーの分布

は、損傷位置が明確となる構造であり、過大地震入力に対しても中間免震層の変形能力が確保できていれば性能の把握が容易な、耐震性を確保しやすい構造と考えられる。損傷集中型制震構造は、エネルギー絶縁層となる中間免震層から上の層の応答を低減するばかりでなく、建物振動系としても応答制御が可能な耐震性を確保しやすい構造とする一つの方法と考えられる。



図一 21 層せん断力の分布



図一 22 塑性率の分布

§ 6 . おわりに

建物の耐震性は、地震から受ける加速度よりはエネルギーが支配的であることが釧路沖地震や兵庫県南部地震を経験して再認識されたと考えられる。本報告では等価せん断型振動系としてモデル化できるコンクリート系多層建物を対象にして、地震エネルギーの過半を集中的に消費するような中間免震層を

設けることで、振動系としての耐震性を改善することを検討した。

コンクリート系建物に中間免震層を設けた「損傷集中型制震構造」の検討結果を要約すると以下の事項が指摘できる。

(1) 損傷集中型制震構造とするための中間免震層のバネは当該層より上の層を1質点とした時に決まる周期が2~4秒程度、また中間免震層のダンパーは建物全重量の4%程度の耐力を持つバイリニア特性を持つ履歴ダンパーとすることで効果が得られる。

(2) 中間免震層の位置は質量比で表すと検討範囲で大凡 $m/M \geq 0.7$ とすることで効果が大きくなる (m : 中間免震層より上層の質量合計、 M : 全質量)。また、質量比が $m/M \geq 0.7$ となる位置を中間免震層とすると、建物振動系の層せん断力係数の分布は A_i 分布に基づく(13)式として求められる。

(3) 既存建物を損傷集中型制震構造に改築することで、耐力はあるが変形能力が小さい建物に関しても変形制御が可能である。耐震改修工事を施す層は中間免震層のみとなり、他の層は改修工事を必要とせず、合理的に既存建物を耐震改修することができると考えられる。

(4) 動的解析を繰り返すならば、建物各部の変形や消費エネルギーをある程度確定的なものとする設計が可能である。しかし、そのような設計を行っても一般的なせん断型振動系に関し、地震入力を含め損傷位置を確定することは難しいと考えられる。損傷集中型制震構造は損傷位置が明確となる構造であり、過大地震入力に対しても性能の把握が容易な耐震性を確保しやすい構造となると考えられる。

(5) 本報告で提案した範囲の損傷集中型制震構造とすることは、中間免震層を含む建物振動系として応答制御が可能な、損傷位置が明確な、耐震性を確保しやすい構造とする一つの方法と考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、平成12年12月末で退職された平島新一構造研究開発部主席研究員に様々な助言およびご教示を頂いた。ここに付記し、謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 秋山宏：建築物の耐震極限設計第2版，東京大学出版会
- 2) 矢部喜堂，他7名：特定層エネルギー集中型柔剛混合構造に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1989年10月，pp.1099~1100
- 3) 高橋誠，秋山宏：地震時における多層骨組の最大変形とエネルギー応答，日本建築学会構造系論文集第515号，1999年1月，pp.59~66