

論文 履歴型ダンパーを付加した鉄筋コンクリート造剛性偏心建物の地震応答特性に関する研究

田村 良一^{*1}

要旨:連層耐震壁が平面的に非対称に配置された剛性偏心建物のように地震時にねじれ振動が発生する建物では特定の部材に損傷が集中するため耐震設計上配慮が必要とされている。本論はねじれ応答成分を低減させるように低降伏点鋼ダンパーを建物に付加し、建物に無偏心建物と同等の耐震性を与えることを考える。耐震壁が偏在する中・高層の建物モデルを用い、入力動レベル及び履歴ダンパーの降伏強度を変動させた立体弾塑性地震応答解析を行い、各入力動レベルを通して安定したねじれ応答低減効果が得られることを示し、無偏心建物と同等の耐震性を得ることが可能であることを示している。

キーワード:偏心建物, 制震補強, 履歴ダンパー, 連層耐震壁, 立体地震応答解析

1. はじめに

偏心を有する建物は地震時にねじれの影響により特定の部材に損傷が集中するため耐震設計上配慮が必要とされている¹⁾。一方、制震デバイスの普及に伴い、履歴型ダンパーを用いて偏心を有する建物を補強する基本的な研究²⁾が行われている。本論では、ねじれの影響により耐震性が低下している建物に対し、構造部材を補強するのではなく、履歴型ダンパーを用いねじれ応答を低減させ無偏心建物と同程度の耐震性を建物に与える制震補強を提案するために、履歴型ダンパーによるねじれ応答低減効果を検討する。具体的には、ねじれ応答を低減させるように低降伏点鋼ダンパーを付加した耐震壁が偏在する中・高層建物モデルを用い、入力動レベルと履歴型ダンパーの降伏強度を変動させた立体弾塑性地震応答解析を行い、ねじれ応答の低減性について検討する。

2. 検討条件

2.1 解析建物モデル

本論では中・高層建物に相当する7層、15層の建物モデル(図-1)を用いる。このモデルは文

献3を参考としている。7層、15層モデル共に平面形状、階高は同一である。平面形は短辺方向3スパン、長辺方向4スパンであり、辺長比1:2である。階高は1層のみ5mで他の階は4mである。各階の単位面積当たりの重量は $12.8\text{kN/m}^2(1.3\text{tf/m}^2)$ とする。表-1に柱、梁、壁部材の配筋及び断面寸法を示す。図-1に示す様に無偏心モデルと偏心モデルは連層耐震壁を含む構面(Y2)と純フレームの構面(Y1)を入れ換えることにより作成する。

2.2 履歴ダンパーの特性及び配置位置

履歴ダンパーの特性 低降伏点鋼による履歴ダンパーを想定する。荷重-変形関係は図-2に示す様に降伏点により2折れ線で表現し、変形は層間のせん断変形成分とし、全層間変形から架構の曲げ変形成分を除いて算出する。降伏変位は層間せん断変形角で1/500、降伏後の剛性は初期剛性の1/100、繰り返しの履歴特性はBilinear型とする。初期剛性は解析パラメータとして変動させる降伏強度に比例して設定させる。**配置位置** 平面的配置位置はねじれ応答に効果を発揮させるために振られ側の構面であるY5と

*1 田治見エンジニアリングサービス 工博(正会員)

し、同じ特性のHD1とHD2を2つ設置する(図-1)。鉛直方向には同位置に同特性の履歴ダンパーを全階に設置する。

降伏せん断強度 履歴ダンパーの降伏強度(Q_y)はダンパー特性を表現するものとして変動させる。各層における降伏強度($Q_y^{s.t} = Q_y^{HD1} + Q_y^{HD2}$)は表-2に示すように7層モデルで $Q_y^{s.t} = 0.01W_7, 0.02W_7, 0.04W_7$ 、15層モデルで $Q_y^{s.t} = 0.005W_{15}, 0.01W_{15}, 0.02W_{15}$ とする。ここに、 W_7, W_{15} は7層、15層モデルの全重量である。以下、7層モデルで履歴ダンパーを設置しない偏心モデルを偏心モデルA0、履歴ダンパーを付加した偏心モデルは降伏強度の小さい順に偏心モデルA1,A2,A3として示す。15層の場合は偏心モデルB0,B1,B2,B3とする。

表-2 履歴ダンパーの降伏強度($Q_y^{s.t}$)

| 7層モデル | 偏心モデルA1 | 偏心モデルA2 | 偏心モデルA3 |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 0.01 W_7 (579kN) | 0.02 W_7 (1158kN) | 0.04 W_7 (2315kN) |
| 15層モデル | 偏心モデルB1 | 偏心モデルB2 | 偏心モデルB3 |
| | 0.005 W_{15} (618kN) | 0.01 W_{15} (1236kN) | 0.02 W_{15} (2482kN) |

注) W_7, W_{15} 7層モデル、15層モデルの総重量、
 $Q_y^{s.t} = Q_y^{HD1} + Q_y^{HD2}$

表-1(a) 7層モデルの断面形状及び配筋

| 階 | 梁 | G1 | G2 | G3 | 階 | 柱 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|-----|-----|-------|-------|------------|-----|----|--------|--------|--------|--------|
| 2~4 | 断面 | 45×75 | 45×75 | 45×90 | 1~3 | 断面 | 80×80 | 80×80 | 80×80 | 80×80 |
| | 配筋 | 5-D38 | 6-D38 | 6-D38 | | 主筋 | 12-D35 | 12-D35 | 12-D35 | 12-D35 |
| 5~6 | 断面 | 45×75 | 45×75 | 45×90 | 4~5 | 断面 | 80×80 | 80×80 | 80×80 | 80×80 |
| | 配筋 | 5-D35 | 6-D35 | 6-D35 | | 主筋 | 12-D35 | 12-D35 | 12-D35 | 12-D35 |
| 7~R | 断面 | 45×75 | 45×75 | 45×90 | 6~7 | 断面 | 80×80 | 80×80 | 80×80 | 80×80 |
| | 配筋 | 4-D35 | 4-D35 | 4-D35 | | 主筋 | 12-D35 | 12-D35 | 12-D35 | 12-D35 |
| | 耐震壁 | | | | | | | | | |
| 1~3 | 厚さ | 30 | 配筋 | 2-D16 @100 | | | | | | |
| 4~7 | 厚さ | 30 | 配筋 | 2-D16 @200 | | | | | | |

表-1(b) 15層モデルの断面形状及び配筋

| 階 | 梁 | G1 | G2 | G3 | 層 | 柱 | C1 | C2 | C3 | C4 |
|------|-----|-------|-------|------------|-------|----|--------|--------|--------|--------|
| 2~6 | 断面 | 65×90 | 65×90 | 90×105 | 1~5 | 断面 | | | | |
| | 配筋 | 7-D41 | 8-D41 | 4-D41 | | 主筋 | 12-D41 | 16-D41 | 20-D41 | 24-D41 |
| 7~10 | 断面 | 60×90 | 60×90 | 85×105 | 6~10 | 断面 | 90×90 | 90×90 | 90×90 | 90×90 |
| | 配筋 | 6-D41 | 7-D35 | 5-D41 | | 主筋 | 12-D38 | 16-D38 | 20-D38 | 24-D38 |
| 11~R | 断面 | 55×90 | 55×90 | 85×105 | 11~15 | 断面 | 90×90 | 90×90 | 90×90 | 90×90 |
| | 配筋 | 4-D41 | 5-D35 | 4-D41 | | 主筋 | 12-D38 | 16-D38 | 16-D38 | 16-D38 |
| | 耐震壁 | | | | | | | | | |
| 1~8 | 厚さ | 40 | 配筋 | 2-D19 @100 | | | | | | |
| 9~15 | 厚さ | 30 | 配筋 | 2-D19 @100 | | | | | | |

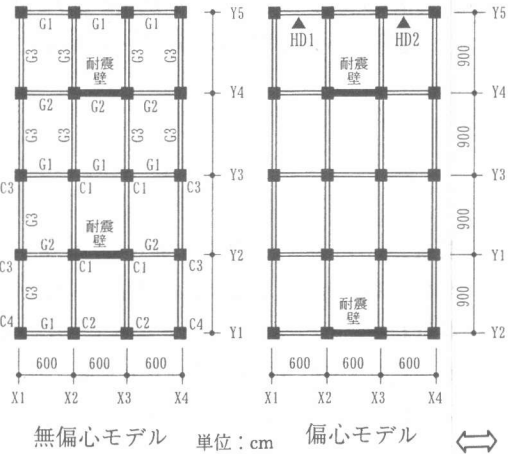
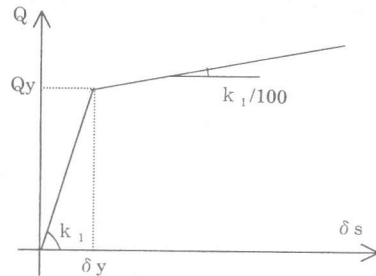


図-1 解析モデルの平面形状 地震入力方向



注) Q : 履歴ダンパー負担せん断力

δ_s : 層間せん断変形

Q_y : 降伏強度、 k_1 : 初期剛性

δ_y : 降伏時せん断変形 (= $H_i/500$, H_i は階高)

図-2 履歴ダンパーの特性

2.3 地震応答解析手法

本論では建物のねじれ挙動を大局的に把握すること目的として ABS 構面要素モデル^{4) 5)}を用いた疑似立体解析を行う。ABS 構面要素モデルを用いる解析について説明する。建物を平面架構に分割し、それぞれを 1 層、1 スパン架構のオープンフレーム、耐震壁に分割する。これら 1 層、1 スパン架構の面内方向の特性を軸ばね (k_v)、曲げばね (k_b)、せん断ばね (k_s) で表現し(図-3)、各ばねの弾塑性荷重-変形関係を用いて地震応答解析を行う手法である。また、応答解析では面内剛床仮定を用い各階重心での水平 2 方向並進とねじれ回転及び全節点の鉛直方向自由度を考慮する。基礎は固定条件とする。数値積分は Newmark の β 法 ($\beta=1/4$)、時間刻みは 0.005 秒とする。粘性減衰は Reyleigh 型とし、地震入力方向の並進とねじれ方向回転成分が卓越する弾性 1 次モードに対して、7 層モデルでは $h=5\%$ 、15 層モデルでは 3% を仮定する。

2.4 入力地震動

本論では El Centro NS(1940)、東北大学 NS(1978) の 2 波を用い、 $h=20\%$ の速度応答スペクトルの平均と定義される (1) 式の SI 値⁶⁾ (Spectrum Intensity) を用いて入力レベルの規準化を行う。SI=12.5, 25, 50, 75, 100cm/s (以下、入力動レベル 1, 2, 3, 4, 5) を用いて検討する。各レベルの 2 波の最大加速度、最大速度を表-3 に示す。SI=75 cm/s とした場合の 2 波の速度応答スペクトル ($h=0.05$) を図-4 に示す。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, h=0.2) dT \quad \dots (1)$$

ここに、 S_v は速度応答スペクトル、 T は周期、 h は減衰定数である。地震動の入力方向は短辺方向 (図-1) からの 1 方向入力とする。

3. 7層建物モデルによる検討

3.1 固有周期、固有モード

弾性固有周期を表-4 に示す。無偏心モデルの 1 次周期は 0.495 秒、履歴ダンパーを付加し

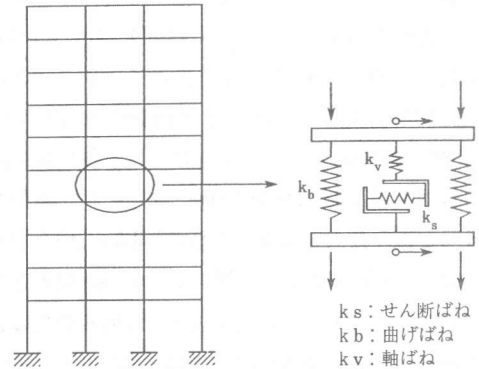


図-3 ABS 構面要素モデル

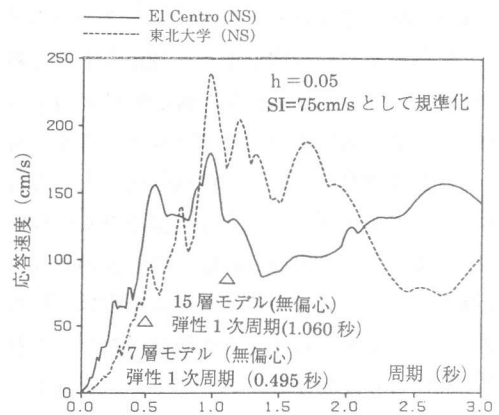


図-4 速度応答スペクトル

表-3 入力動レベル

| 入力動レベル | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| SI (cm/s) | 12.5 | 25 | 50 | 75 | 100 | |
| El Centro NS | PGA | 111 | 221 | 443 | 664 | 885 |
| | PGV | 10.8 | 21.7 | 43.3 | 65.0 | 86.7 |
| 東北大学 NS | PGA | 66 | 133 | 266 | 398 | 531 |
| | PGV | 9.4 | 18.7 | 37.4 | 56.2 | 74.9 |

注) PGA:最大加速度(cm/s²)、PGV:最大速度(cm/s)

ない偏心モデル A0 では周期が若干長くなり、履歴ダンパーの降伏強度が高くなるに従い周期は短くなる。図-5 に入力方向並進及びねじれ方向回転が卓越する 1 次刺激関数 (βu) を、偏心モデル A0 と最も降伏強度の高い偏心モデル A3 について示す。ねじれ方向成分が減少しており、特にねじれ回転が卓越するモードで大きい。

3.2 地震応答解析結果

(1) 履歴ダンパーの降伏強度及び入力動レベルの影響

図-6に El Centro 波を入力動レベル4とした入力による偏心モデル A3の最上階重心の並進変位が最大の時の各階変位分布を示す。ほぼ並進的挙動である。図-7の横軸は入力動レベル(SI)、縦軸は各偏心モデルにおける縁構面の最大層間変位の最大値を無偏心建物における最大層間変位の最大値で割った値(層間変位比)を示しており、1.0より小さい場合は無偏心建物の応答層間変位より小さいことを表す。層間変位比は、履歴ダンパーの降伏強度の増加に伴い1.0に近づいており、最も降伏強度の高い偏心モデルA3ではほぼ1.0以下である。本論の7層モデルの場合、無偏心モデルと同程度の縁変位とするための履歴ダンパーの降伏強度は偏心モデルA3の $0.04W_7$ (2315kN)程度が必要となる。また、層間変位比は履歴ダンパーの降伏強度に応じて各入力動レベルを通して大きな変動はなく比較的安定している。このねじれ応答の低減効果は、履歴ダンパーが弾性域で応答する場合は、弾性固有モードに見られるように履歴ダンパーの初期剛性により建物剛性のアンバランスを減少させることによって発生する。地震入力が大きくなり履歴ダンパーが降伏し塑性域に至る場合は、建物剛性の修正効果は弾性時より小さくなり履歴ダンパーのエネルギー吸収による履歴減衰⁷⁾が履歴ダンパーの構面に加わることにより発生すると考えられる。履歴ダンパーの降伏強度の増加に伴い低減効果が増加するのは降伏強度の増加に伴って初期剛性、履歴吸収エネルギーが増大するためである。

(2) 縁構面の最大応答層間変位

入力動レベル4による振られ側の縁構面であるY5の最大層間変位分布を図-8に示す。無偏心モデルと履歴ダンパー無しの偏心モデルA0を

図-6 応答変位分布
最上階重心並進変位が最大のときの変位分布
El Centro (NS)
偏心モデル A3
入力動レベル4

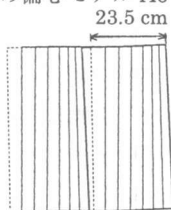


表-4 7層モデルの固有周期 (秒)

| | 無偏心モデル | 偏心モデルA0 | 偏心モデルA2 | 偏心モデルA3 |
|---------|--------|---------|---------|---------|
| 並進(1次) | 0.495 | 0.516 | 0.495 | 0.483 |
| ねじれ(1次) | — | 0.391 | 0.374 | 0.368 |

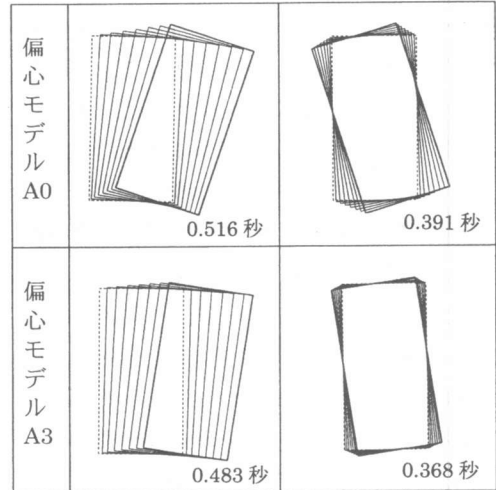


図-5 7層モデルの刺激関数 (βu)

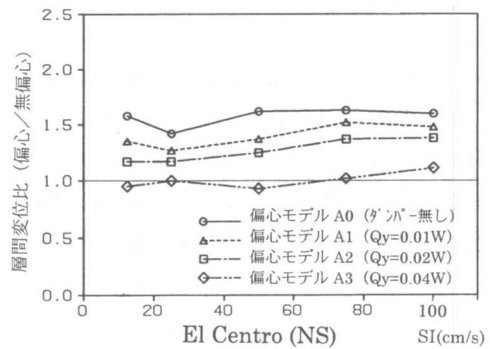


図-7(a) 入力動レベルと降伏強度の影響

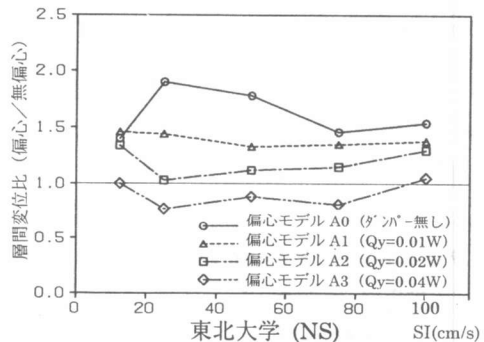


図-7(b) 入力動レベルと降伏強度の影響

比較した場合、偏心モデル A0 で下層に変形が集中する傾向がある。このことについて、静的な多層建物とねじりモーメントの関係⁸⁾ (図-9) から考えてみる。k 層のねじりモーメントは k 層より上階に作用する水平力により生じるねじりモーメントの総和として得られる。各階に偏心を有し、中層建物モデルなので 1 次モード中心の応答となる 7 層モデルでは、上層と比較して大きなねじりモーメントが下層に作用し、縁構面でのねじれ回転による付加変形が大きくなったと考えられる。履歴ダンパーを設置したモデルでは、ねじれ回転による付加変形の発生が低減されており、降伏強度の増加に伴い無偏心モデルの分布に近づいている。

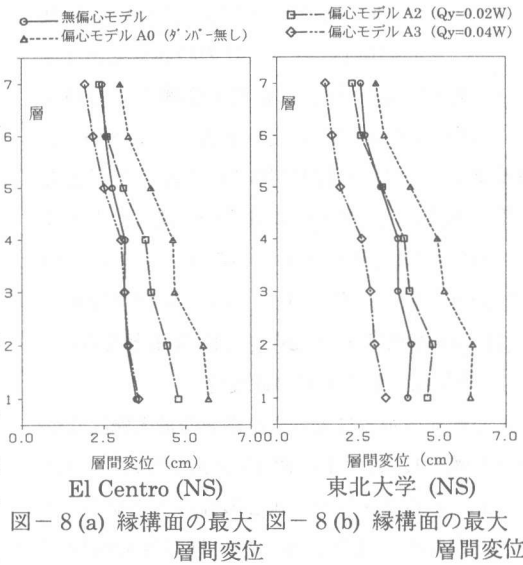


図-8 (a) 縁構面の最大層間変位 El Centro (NS) (b) 縁構面の最大層間変位 東北大学 (NS)

4. 15層建物モデルによる検討

4.1 固有周期、固有モード

弾性固有周期を表-5に示す。無偏心モデルの1次周期は1.060秒、2次周期は0.283秒である。図-10に履歴ダンパーなし偏心モデル B0の刺激関数 (βu) を示す。7層モデルの偏心モデル A0と比較すると、並進成分に対するねじれ回転成分の割合が小さくなっている。

4.2 地震応答解析結果

(1) 履歴ダンパーの降伏強度及び入力動レベルの影響

図-11に7層モデルと同様の入力動レベル(SI)と層間変位比の関係を示す。履歴ダンパーの各降伏強度に応じて層間変位比は各入力動レベルで大きな変動はなく比較的安定している。しかし、特徴として、入力動レベルの小さい範囲(SI < 50cm/s程度)においては履歴ダンパーの降伏強度の増加に対する層間変位比の低下率は小さいが、入力動レベルが大きくなるに従って層間変位比の低下率が大きくなっている。これは、弾性モードに見られたように全応答におけるねじれ回転成分の影響が7層モデルより小さいので、履歴ダンパーのねじれ応答低減効果は入力動レベルの小さい範囲では目立たない。しかし、入

$$e_i = (x_m)_i - (x_R)_i \dots(2) \quad T_i = P_i e_i \dots(4)$$

$$(M_t)_k = \sum_{i=k}^n T_i \dots(3) \quad \theta_k = \frac{(M_t)_k}{(S_R)_k} \dots(5)$$

ここに、 $(x_m)_i$: i 階の重心位置
 $(x_R)_i$: i 階の反力の中心位置
 e_i : i 階の偏心距離
 P_i : i 階の重心に作用する外力
 T_i : i 階のねじりモーメント
 $(M_t)_k$: k 層のねじりモーメント
 $(S_R)_k$: k 層のねじれ剛性
 θ_k : k 層のねじれ回転角

図-9 多層建物とねじりモーメントの関係 (静的)

表-5 15層モデルの固有周期 (秒)

| | 無偏心 モデル | 偏心 モデル B0 | 偏心 モデル B2 | 偏心 モデル B3 |
|---------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 並進(1次) | 1.060 | 1.073 | 1.057 | 1.047 |
| ねじれ(1次) | — | 0.724 | 0.713 | 0.705 |
| 並進(2次) | 0.283 | 0.292 | 0.286 | 0.282 |
| ねじれ(2次) | — | 0.212 | 0.209 | 0.207 |

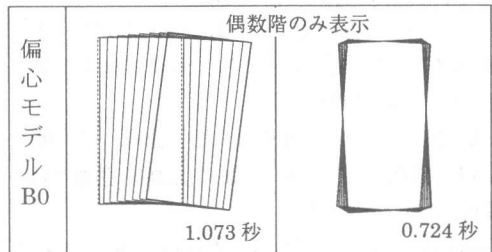


図-10 15層モデルの刺激関数 (βu)

力レベルの増加（建物の塑性化）に伴い、履歴ダンパー無しの偏心モデル B0 の層間変位比は増加する傾向がありねじれ応答の影響を入力動レベルの小さい範囲以上に受けるようになるので、履歴ダンパーの効果が発揮された結果と考えられる。本論の 15 層モデルの場合、無偏心モデルと同程度の縁変位とするための履歴ダンパーの降伏強度は偏心モデル B2 又は B3 程度であり $0.01W_{15}(1236\text{kN}) \sim 0.02W_{15}(2482\text{kN})$ となる。

(2) 縁構面の最大応答層間変位

入力動レベル 4 による Y5 構面の最大層間変位分布を図-12 に示す。El Centro 波による無偏心モデルと履歴ダンパー無しの偏心モデル B0 を比較した場合、上層にも下層と同程度の縁構面層間変位が見られる。これは図-9 の関係から高次モードによる影響と考えられる。

5. まとめ

剛性偏心建物にねじれ応答が低減するように低降伏点鋼ダンパーを付加し、その地震応答特性を検討した。その結果、低降伏点鋼ダンパーの降伏強度に応じて各入力動レベルで安定したねじれ応答低減効果が得られ、無偏心の場合と同程度の耐震性を得ることが可能であることを示した。また、履歴ダンパーの高さ方向の適切な配置等は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 日本建築センター：建築物の構造規定 平成 7 年
- 2) 花井正実 他：偏心のある架項建築の制振ブレースによる補強法について(その 1)、(その 2)、日本建築学会大会梗概集、1998 年 9 月
- 3) 傅 金華、柴田明徳 他：偏心のある立体 RC 壁フレーム構造の動的弾塑性挙動、第 9 回日本地震工学シンポジウム 1994 年
- 4) 田治見エンジニアリングサービス：軸・曲げ・せん断 (ABS) 構面要素を用いた 3 次元高層建物の動的解析、1992 年 10 月
- 5) 田村良一、荻原幸男：軸・曲げ・せん断 (ABS) 構面要素を用いた 3 次元高層建物の弾塑性地震応答解析、日本建築学会、第 16 回情報システム利用

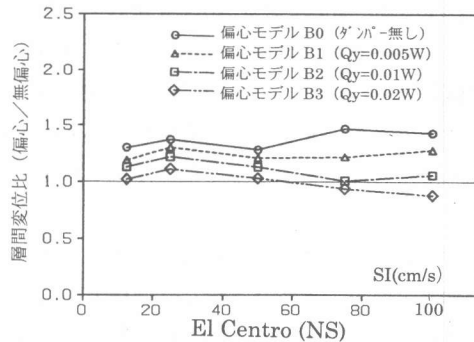


図-11(a) 入力動レベルと降伏強度の影響

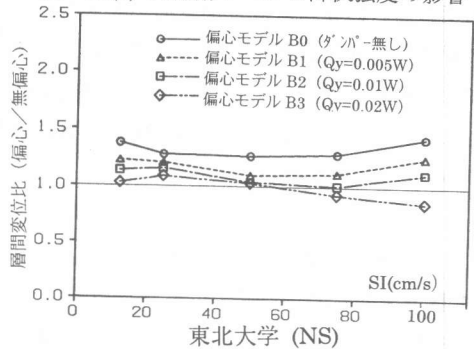


図-11(b) 入力動レベルと降伏強度の影響

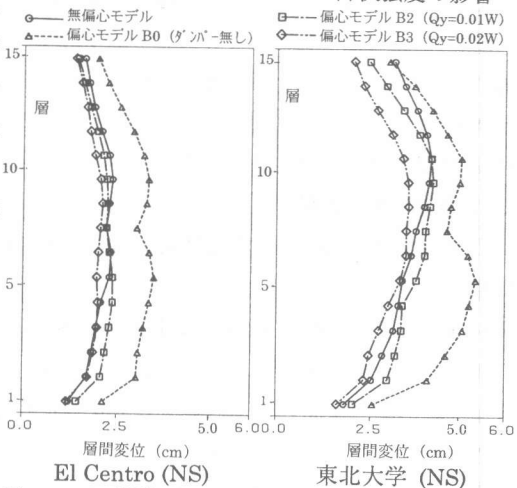


図-12(a) 縁構面の最大層間変位 図-12(b) 縁構面の最大層間変位

技術シンポジウム、1993 年

- 6) 片山恒雄他：新しいセンサーの開発と試作、第 18 回地震工学研究発表会 昭和 60 年 7 月
- 7) 田治見 宏：建築振動学、コロナ社
- 8) Wai K Tso : STATIC ECCENTRICITY CONCEPT FOR TORSIONAL MOMENT ESTIMATION, Journal of Structural Engineering, vol.106 No.5, May, 1990