

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する。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]。また文献[2]では履歴ダンパー付き架構のフレームが塑性化しないために必要な層せん断耐力(ベースシヤール係数)について検討した。本論では逆に系の層せん断耐力を与えて設計した履歴ダンパー付き架構のフレームがどの程度の損傷を受けるのかを数値計算結果より提示する。

2. 等価1質点系による検討

2-1 復元力特性の設定

N 層骨組を置換した等価1質点系を対象に応答解析をする。対象となる N 層骨組は以下の条件を満たすものとする。

- 1) 各層の重量 w ・階高 h ・ダンパー系とフレームの剛性比 k ・ダンパー系の層せん断耐力分担率 β が等しい。
- 2) 1次設計用の層せん断耐力に対する各層の層間変形角は等しい。
- 3) 柱の伸縮による曲げ変形は無視できる。

図1に i 層の層せん断力 Q_i - 層間変位 δ_i 関係を示す。フレームとダンパー系はそれぞれ完全弾塑性型の復

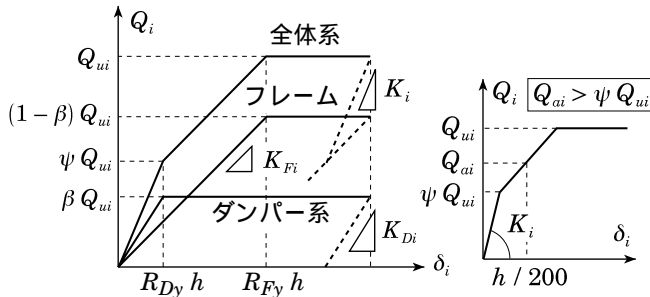


図1 i 層の層せん断力 - 層間変位関係

図2 系全体の剛性の決定

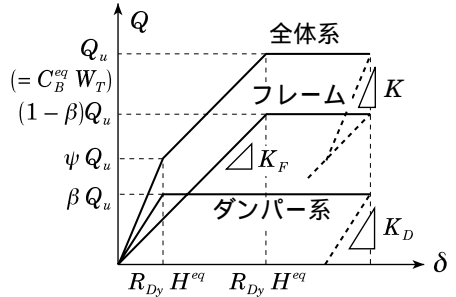
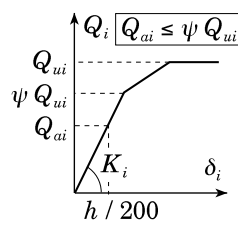
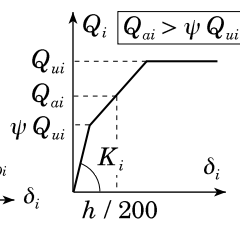


図3 等価1質点系の層せん断力 - 層間変位関係

元力特性を有するものとする。この復元力特性を特定するためには以下の4つのパラメータが必要である。

系全体の層せん断耐力 Q_{ui}

系全体の層せん断剛性 $K_i = (K_{Fi} + K_{Di})$

ダンパー系とフレームのせん断剛性比 k

ダンパー系の層せん断耐力分担率 β

i 層の層せん断耐力 Q_{ui} は次式で与えられる。

$$Q_{ui} = {}_2C_B A_i \alpha_i W_T \quad (1)$$

但し、 $A_i = 1/\sqrt{\alpha_i}$ 、 $\alpha_i = \sum_{j=i}^N w_j / W_T$ 、 w_i は i 層の重量、 W_T は全重量である。2次設計用のベースシヤール係数 ${}_2C_B$ は次式で与えられる。

$${}_2C_B = D_S Z R_t {}_2C_0 \quad (2)$$

${}_2C_0 = 1.0$ 、 $Z = 1.0$ 、 R_t は第2種地盤を想定して算出される R_t の算出に用いられる固有周期 T は $T = 0.03Nh$ (N : 層数、 h : 階高 (単位 m)) から求める。

系全体の剛性 K_i は1次設計用層せん断力 (${}_1C_0 = 0.2$) 作用時の各層の層間変形角がそれぞれ $1/200$ となるように設定する。すなわち図2のようになる。但し図中の Q_{ai} は i 層の1次設計用層せん断力である。ダンパー系とフレームの剛性比 k を次式で定義する。

$$k = K_{Di} / K_{Fi} \quad (3)$$

上記の N 層骨組を、全重量 W_T ・1次固有周期 T が等しく、図3に示す層せん断力 Q - 層間変位 δ 関係を有する等価1質点系に置換する^[2]。等価1質点系のベースシヤール係数 C_B^{eq} と N 層骨組のベースシヤール係数 C_B の関係は次式で表される。

$$\left(\frac{C_B}{C_B^{eq}}\right)^2 = \frac{(N+1)(2N+1)}{6\left(\sum_{i=1}^N A_i \alpha_i\right)^2} \quad (4)$$

等価1質点系の層せん断耐力 Q_u (図3参照) は次式で算定される。

$$Q_u = C_B^{eq} W_T \quad (5)$$

等価1質点系の等価高さ H^{eq} は次式より得られる。

$$\left(\frac{H^{eq}}{N h}\right)^2 = \frac{(N+1)(2N+1)}{6N^2} \quad (6)$$

2-2 応答解析条件

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 : 5, 10, 20
- 剛性比 k : 0.5, 1.0, 2.0
- D_s 値 : 0.25
- 階高 h : 400 (cm)

入力地震動は Yokohama^[3], NTTB3EW, El Centro NS の3波であり, それぞれの解析時間は40, 20, 30 秒とする。図4に各原波の擬似速度応答スペクトルを示す。ここで, 損傷に寄与する地震入力エネルギー E_{dm} とその速度換算値 V_{dm} を次式で定義する。

$$E_{dm} = (E_{Fp} + E_{Dp} + E_e)_{\max} \quad (7)$$

$$V_{dm} = \sqrt{\frac{2gE_{dm}}{W_T}} \quad (8)$$

但し, $E_{Fp} \cdot E_{Dp}$ は各々フレーム・ダンパー系の履歴吸収エネルギー, E_e は系全体の弾性振動エネルギー, g は重力加速度である。入力地震動の入力レベルは V_{dm} が各解析で一定値となるように収斂計算により決定する。 V_H は150, 225, 300 cm/secの3種とする。 $V_{dm} = 150$ cm/sec の入力レベルは第2種地盤の設計用地震入力レベルを想定したものである。粘性減衰定数は0.01とする。

2-3 応答解析結果

フレームの累積塑性変形倍率 η_F とダンパー系の耐力分担率 β の関係を示す。図中の点線は文献[1]で設定されたダンパー系の適正分担率 β_{opt} であり, 剛性比 k の関数として次式で表される。

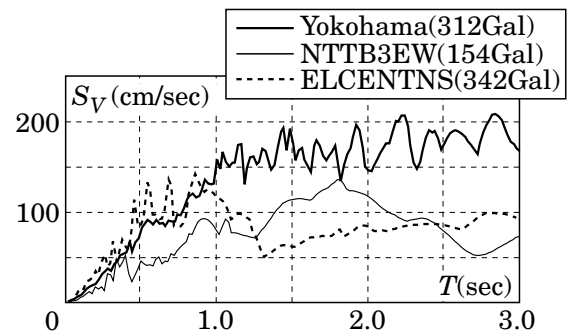


図4 各原波の擬似速度応答スペクトル($h=0.01$)

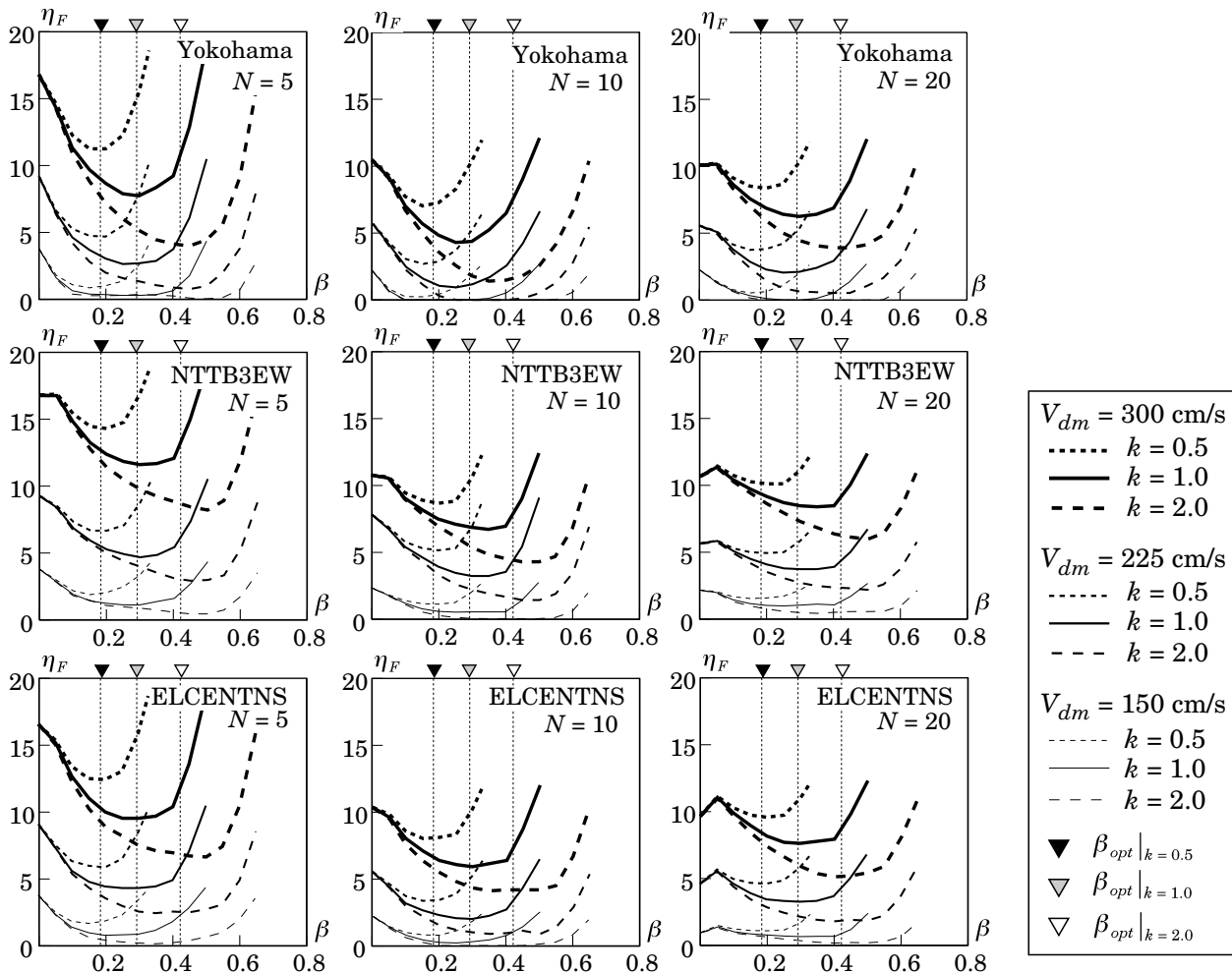


図5 フレームの累積塑性変形倍率

$$\beta_{opt} = 1 - \frac{1}{\sqrt{k+1}} \quad (9)$$

図5より η_F は β に対して極小値を有し、 β_{opt} の近傍で最小となる。この η_F の最小値を与える β は V_{dm} のレベルに無関係である。 η_F の極小値はラーメン構造($\beta=0$)の η_F と比較すると著しく小さく、極小値の近傍では β の変動に対する η_F の変動は小さい。剛性比 k が大きくなると η_F は小さくなり、 β の変動に対して η_F が鈍感になる範囲も広がる。また入力地震動が変わっても上記の傾向は変わらない。 $V_{dm} = 150$ cm/secの入力レベル、すなわち、第2種地盤の設計用地震入力レベルでは、適正な履歴ダンパーを組み込めばフレームは塑性化しないか、塑性化しても累積塑性変形倍率で2程度に留まることがわかる。 $V_{dm} = 300$ cm/secの入力レベルでも適正な履歴ダンパーを組み込めばフレームの累積塑性変形倍率は5~12程度に留まる。

図6には最大層間変形角応答 R_{max} と β の関係を示す。図中の点線は図5と同様に β_{opt} を示す。 R_{max} は履歴ダンパーにより低減され、 β_{opt} 近傍で最小値になる傾向がうかがえるが、その低減率はフレームの累積塑性変形倍率のそれと比較すると非常に小さく、ダンパーの分担率によらずほぼ一定になる場合もある。また、

最小値は剛性比によらずほぼ一定である。

3. 多質点系応答値と等価1質点系応答値の比較

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し、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。

応答結果には地震動の相違による大きな差異がみられないので以下では代表例としてYokohamaによる応答結果を示す。図7の左列・中列にはそれぞれ、 $E_{Fp} / E_{dm} \cdot E_{Dp} / E_{dm}$ の応答値を示す。図中のでプロットされたものが多質点系の応答結果であり、実線・破線が等価1質点系の応答結果である。 $E_{Fp} / E_{dm} \cdot E_{Dp} / E_{dm}$ については多質点系と等価1質点系の応答値はほぼ同じ値となっている。右列の図では、多質点系の最大層間変形角 R_{max} と各層最大層間変形角の最大層せん断力の重み付き平均 $\overline{R_{max}}$ をそれぞれ図中の、のプロットで示す。同図中の実線・破線は等価1質点系の応答結果である。 $\overline{R_{max}}$ は次式で定義する。

$$\overline{R_{max}} = \frac{\sum_{j=1}^N R_{max j} Q_{max j}}{\sum_{j=1}^N Q_{max j}} \quad (10)$$

等価1質点系の R_{max} は多質点系の $\overline{R_{max}}$ と良い対応を示すが、 R_{max} とは大きな差異を示す場合がある。文献[2]

では多質点系と等価1質点系の R_{max} はほぼ一致するとの結論を得ているが、これは系の復元力特性が比較的2次剛性の高いバイリニア型であることによる効果から、 R_{max} の高さ方向分布がほぼ一様となっているためである。本解析ではフレーム

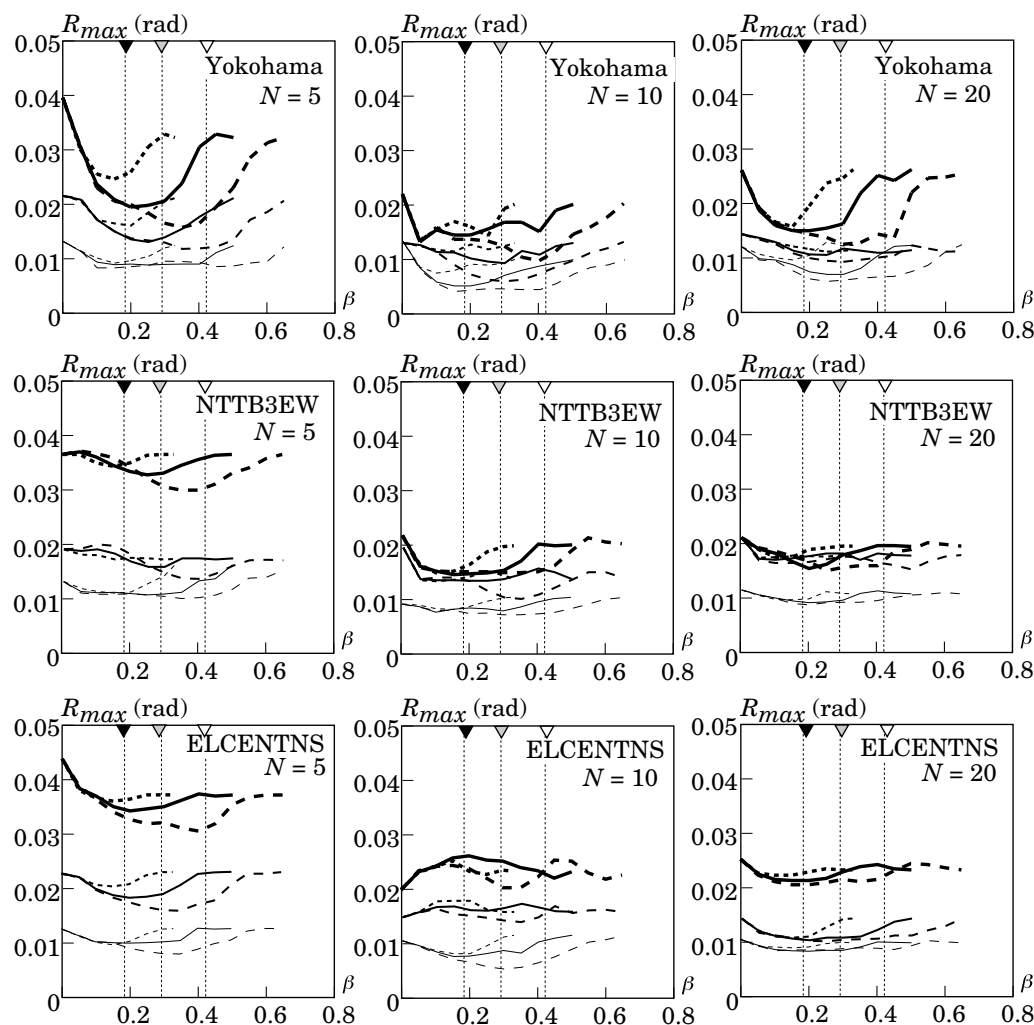
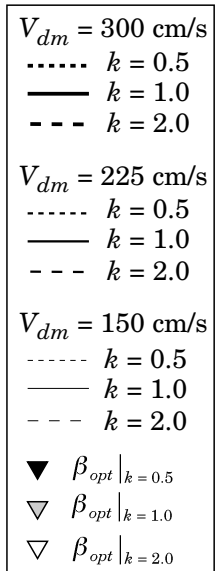


図6 最大層間変形角



が塑性化し、系の剛性が0となるため、 R_{max} の高さ方向分布には大きなばらつきが生じ、多質点系と等価1質点系の R_{max} に差異が生じるものと考えられる。その一例を図8に示す。図中の曲線が多質点系の応答値であり、縦線が等価1質点系の応答値を示す。

6. 結論

本論では系の層せん断耐力を与えて設計した履歴ダンパー付き架構のフレームがどの程度の損傷を受けるのかを数値計算結果より提示した。以下にその結果を要約する。

- 1) フレームの累積塑性変形倍率は履歴ダンパーによって著しく低減される。
- 2) フレームの累積塑性変形倍率はダンパー系の適正分担率 β_{opt} の近傍で最小となり、この最小値を与えるダンパー系の耐力分担率 β の値は地震入力レベルに無関係である。
- 3) フレームの累積塑性変形倍率はダンパー系とフレームの剛性比が大きくなるほど小さくなる。

- 4) 第2種地盤を想定したときの設計用入力レベルでは、適正な履歴ダンパーを組み込んだフレームは塑性化しないか、塑性化しても累積塑性変形倍率で2程度に留まる。
- 5) 等価1質点系のエネルギー応答は多質点系の応答値とほぼ一致する。また、等価1質点系の最大層間変形角は多質点系の各層最大層間変形角の最大層せん断力の重み付き平均と良い対応を示す。

[謝辞]

本研究は、(社)日本鋼構造協会鋼構造新設計法小委員会(主査:高梨晃一教授)の活動の一貫としておこなった成果を含んでいる。御討議頂いた委員諸氏に感謝の意を表する。

[参考文献]

- [1] 井上一朗:履歴ダンパーを用いた耐震設計, シンポジウム「耐震設計の一つの新しい方向」, 1995年10月, pp.95-111
- [2] 井上一朗, 桑原進, 多田元英, 中島正愛:履歴ダンパーを用いた架構の地震応答と設計耐力, 鋼構造論文集 第3巻第11号, 1996.9.
- [3] 横浜市構造建築物耐震指導基準策定委員会:振動応答解析マニュアル, 付-2 横浜標準波の作成

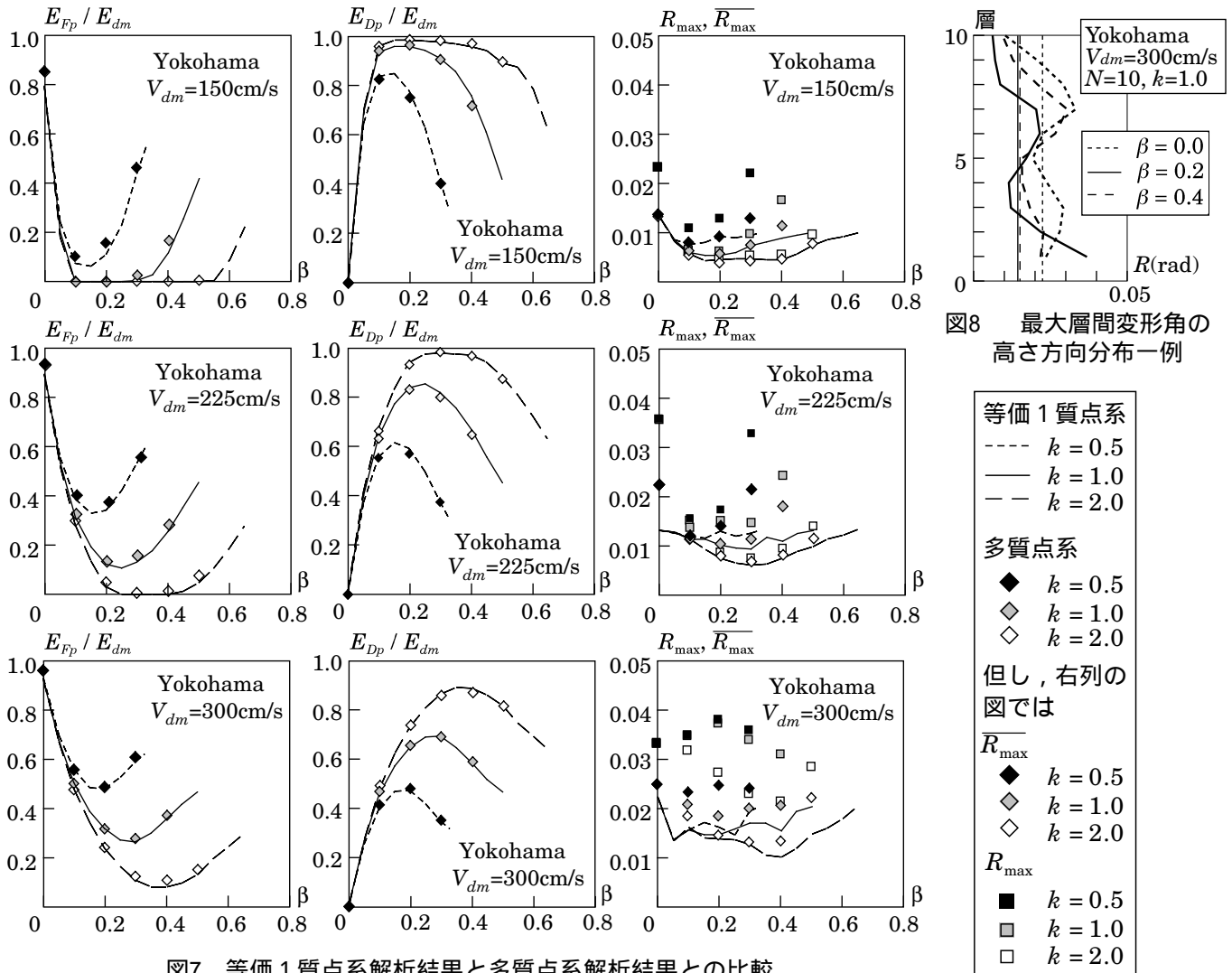


図7 等価1質点系解析結果と多質点系解析結果との比較

図8 最大層間変形角の高さ方向分布一例

*1 大阪大学工学部建築工学科

*2 熊本大学工学部環境システム工学科

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

Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ.