

エネルギー分散型柔剛混合構造のエネルギー応答性状

真瀬 伸治 (技術研究所) 寺田 岳彦 (技術研究所)
矢部 喜堂 (技術研究所) 兼光 知巳 (技術研究所)

§ 1. はじめに

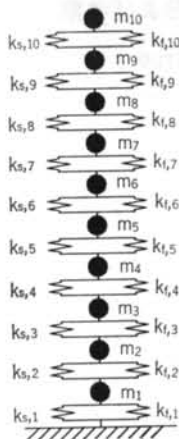
これまでエネルギー論的耐震極限設計法¹⁾に基づいて特定の層で地震による総エネルギー入力を集中的に吸収させる耐震構造に関する一連の研究の結果、エネルギー集中層を柔剛混合構造とすることにより耐震安全性および経済性を向上させることが実証された²⁾³⁾⁴⁾。

高層建物にエネルギー論的耐震極限設計法を適用するためには、地震による総エネルギー入力を特定の層に集中させるより、各層に分散吸収させる方が合理的である。

本報では、これらの研究を踏まえ、高層建物にエネルギー論的耐震極限設計法を適用するため、各層を柔剛混合構造で構成し、地震による総エネルギー入力を各層に分散吸収させる構造を対象に弾塑性応答解析によりそのエネルギー応答性状を検討する⁵⁾。

§ 2. 解析モデルおよび解析条件

解析モデルは第2種地盤上に建つ10層ラーメン構造を想定し、すべての層を柔部材と剛部材から成る柔剛混合



図一 解析モデル

構造としたモデル(柔剛混合系)とし、せん断ばね一質点系でモデル化した(図一参照)。なお、比較のため、すべての層を柔剛混合構造としないモデル(非混合系)についても解析した。

解析 Case は、表一に示す6種類とする。

各層の重量は、いずれの Case も最上層のみ600 t、他の層はすべて550 tとした。

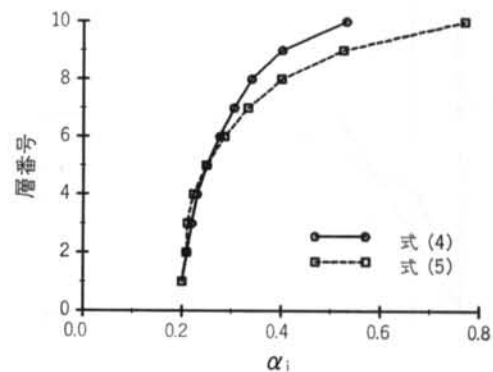
各層の降伏せん断力係数は、いずれの Case も柔部材および剛部材ともに最適降伏せん断力係数分布 α_i に従うものとした(図二参照)。第1層降伏せん断力係数 α_1 は、いずれの Case も0.2とした。

$$\alpha_i = \bar{\alpha}_i \alpha_1 \quad (i=1, 2, 3, \dots, 10) \quad (1)$$

$$\alpha_i = s\alpha_i + r\alpha_i \quad (2)$$

Case	α_i	$\frac{r\alpha_i}{s\alpha_i}$	$\frac{r\delta_{yi}}{s\delta_{yi}}$ (cm)	$\frac{r\delta_{yi}}{s\delta_{yi}}$	T_1 (sec)
I	0.2	—	3.0	—	1.856
II	0.2	1.0	5.0	5	1.384
III	0.2	1.0	10.0	10	1.445
IV	0.2	2.0	5.0	5	1.569
V	0.2	1.0	5.0	5	1.366
VI	0.2	1.0	5.0	5	1.384

表一 解析ケース



図二 最適降伏せん断力係数分布

$$f_{\alpha i}/s_{\alpha i} = \text{一定} \quad (3)$$

最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ は Case V を除いて、文献1)の式を用いる。すなわち、

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.5927x - 11.8519x^2 + 42.5833x^3 - 59.4827x^4 + 30.1586x^5 \quad (4)$$

ここに、 x は各層の地盤面からの高さの無次元量である。各層の階高を第1層のみ3.8m、第2層以上は3.5mとすると、各層の最適降伏せん断力係数分布の値は次のようになる。

$$\bar{\alpha}_i = (1.0000, 1.0496, 1.0992, 1.1504, 1.2482, 1.3753, 1.5155, 1.6877, 1.9811, 2.5898)$$

Case V の場合は最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ は文献6)の式を用いる。すなわち、

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.2890x - 12.490x^2 + 50.397x^3 - 74.552x^4 + 40.836x^5 \quad (5)$$

各層の値は次のようになる。

$$\bar{\alpha}_i = (1.0000, 1.0473, 1.0547, 1.1161, 1.2467, 1.4294, 1.6622, 2.0047, 2.6256, 3.8492)$$

各層の降伏変形は柔剛混合系モデルの柔部材は Case IIIを除き5.0cm、Case IIIの場合10.0cm、非混合系モデルの場合は3.0cmで一定とした。また、柔剛混合系の場合、柔部材と剛部材の降伏変形比も各層とも一定とする。

$$f_{\delta_{yt}} = \text{一定} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (6)$$

$$f_{\delta_{yt}}/s_{\delta_{yt}} = \text{一定} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 10) \quad (7)$$

各層の復元力特性は完全弾塑性型(図-3参照)とし、Case VIを除いて減衰は無視した。数値解析はNewmark β 法 ($\beta = 1/4$)を用い、時間刻みは1/200秒とした。

Case I は各層を柔剛混合構造としない従来型構造のモデルで、非混合系モデルである。これは、柔剛混合系モデルの比較対象となる。

Case II から Case IV はいずれも各層を柔剛混合構造としたモデルで、柔剛混合系モデルである。

Case II は各層の柔部材の剛部材に対する降伏せん断

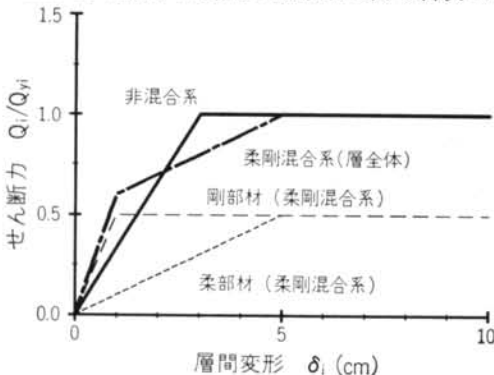


図-3 各層の復元力特性

力係数の比(強度比) $f_{\alpha i}/s_{\alpha i}$ を1.0とし、柔部材の剛部材に対する降伏変形比(降伏変形比) $f_{\delta_{yt}}/s_{\delta_{yt}}$ を5.0とした。これにより、柔剛混合系モデルのエネルギー応答特性を検討する。

Case III は各層の強度比 $f_{\alpha i}/s_{\alpha i}$ は Case II と同じ1.0とし、降伏変形比 $f_{\delta_{yt}}/s_{\delta_{yt}}$ を10.0とした。剛部材の諸元は Case II と全く同じであり、柔部材の初期剛性は Case II の1/2となる。これにより、降伏変形比のエネルギー応答特性に及ぼす影響を検討する。

Case IV は各層の降伏変形比 $f_{\delta_{yt}}/s_{\delta_{yt}}$ は Case II と同じ5.0とし、強度比 $f_{\alpha i}/s_{\alpha i}$ を2.0とした。これにより、強度比のエネルギー応答特性に及ぼす影響を検討する。

Case V は各層の強度比および降伏変形比は Case II と同じとし、最適降伏せん断力係数分布として式(5)を用いる。式(5)は式(4)に対し最上層近傍の層の降伏せん断力係数が大きくなっており、最上層近傍の層の損傷集中を改善できる。

Case VI は各層の柔部材および剛部材の諸元は Case II と全く同じとし、内部粘性減衰を考慮する。減衰は剛性比例型を用い、減衰定数 h は0.02とする。これにより、減衰のエネルギー応答特性に及ぼす影響を検討する。

入力地震波は、El Centro 1940 NS 波(ELCE 波と略記する)、Taft 1952 EW 波(TAFT 波と略記)、Hachinohe 1968 EW 波(HACH 波と略記)、Tohoku Univ. 1F 1978 NS 波(TOHK 波と略記)の4波を用い、入力レベルは極限地震時の総エネルギー入力等の価速度 $V_E = 150 \text{ cm/sec}$ とする。 V_E は1%以内の誤差に収まるように繰り返し計算を行なう。

§ 3. 解析結果および考察

3.1 非混合系の応答性状

本節では Case I の非混合系の結果を検討する。

図-4 に各層のエネルギー吸収率(累積塑性ひずみエネルギー) W_{pt}/W_p を示す。ELCE 波では第10層で最大となり18.2%、Taft 波では第9層で最大となり18.2%、HACH 波では第1層で最大となり23.6%、TOHK 波では第4層で最大で16.9%となる。いずれの入力地震波に対しても各層の吸収率の分布は不規則で、吸収率の突出する層があり、また入力地震波の違いによる各層の分布形の差異が大きく、最大となる生起層も異なる。

図-5 に、各層の平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ を示す。 $\bar{\eta}_i$ は ELCE 波では第10層で最大となり6.40、平均値1.84、変動係数0.91、TAFT 波では第10層で最大となり5.17、

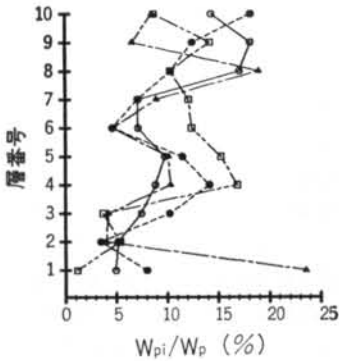


図-4 エネルギー吸収率 W_{pi}/W_p (Case I)

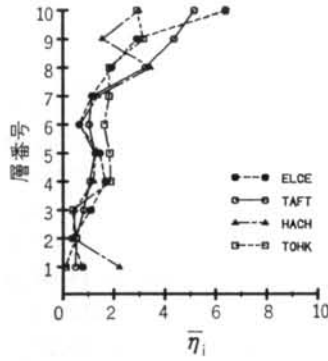


図-5 平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ (Case I)

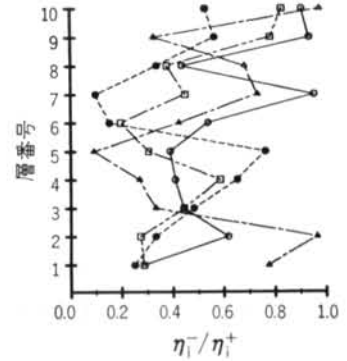


図-6 累積塑性変形倍率の偏り η_i^-/η_i^+ (Case I)

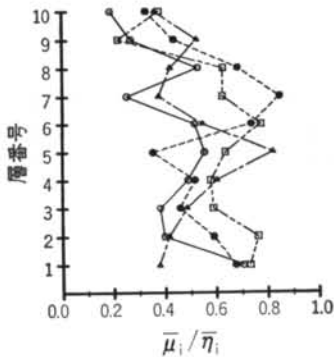


図-7 塑性変形倍率比 $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$ (Case I)

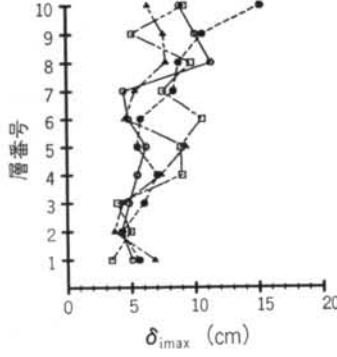


図-8 最大応答層間変形 $\delta_{i\max}$ (Case I)

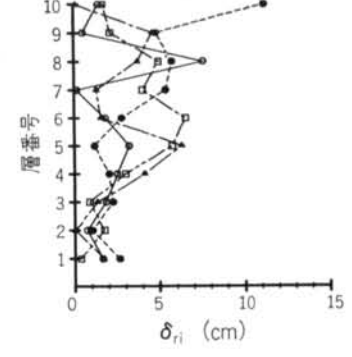


図-9 残留変形 δ_{ri} (Case I)

平均値1.92, 変動係数0.84, HACH 波では第8層で最大となり3.44, 平均値1.56, 変動係数0.62, TOHK 波では第9層で最大で3.19, 平均値1.62, 変動係数0.60となる。4波平均値は1.73と各層の $\bar{\eta}_i$ が一様となる場合の予測値(1.39)の1.24倍とかなり大きく, 変動係数は0.78と大きい。なお, 予測値 $\bar{\eta}_0$ は次式で与えられる。

$$\bar{\eta}_0 = \frac{MV_E^2}{2 \sum_{i=1}^{10} \alpha_i w_i \delta_{yi}} \quad (8)$$

いずれの入力地震波に対しても吸収率の分布が不規則なため, $\bar{\eta}_i$ の各層の分布は非常にばらついており, 概して最上層およびその近傍の層が大きい。また, 入力地震波の違いによる各層の分布形の差異も大きい。

図-6に各層の累積塑性変形倍率の正側および負側のうち小さい方を大きい方で除した値 η_i^-/η_i^+ を示す。 η_i^-/η_i^+ は ELCE 波では0.10~0.77の間に分布し, 各層平均値0.417, 変動係数0.91, TAFT 波では0.29~0.96の間で, 平均値0.592, 変動係数0.401, HACH 波では0.09~0.98の間で, 平均値0.558, 変動係数0.52, TOHK

波では0.20~0.83の間で, 平均値0.453, 変動係数0.45, 4波平均値は0.505, 変動係数は0.49となる。これより, いずれの入力地震波に対しても η_i は一方向への偏りを示し, 各層の分布も大きくばらついている。また, 入力地震波の違いによる各層の分布形の差異も大きい。

図-7に各層の塑性変形倍率比 $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$ を示す。 $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$ は ELCE 波では0.33~0.85の間に分布し, 各層平均値0.56, 変動係数0.29, TAFT 波では0.19~0.71の間で, 平均値0.43, 変動係数0.35, HACH 波では0.36~0.82の間で, 平均値0.50, 変動係数0.27, TOHK 波では0.22~0.78の間で, 平均値0.59, 変動係数0.28, 4波平均値は0.52, 変動係数0.32はとなる。これより, いずれの入力地震波に対しても $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$ は0.5前後と大きく, 各層の分布も非常にばらついている。また, 入力地震波の違いによる分布形の差異も非常に大きい。

図-8に各層の最大応答層間変形 $\delta_{i\max}$ を示す。 $\delta_{i\max}$ は ELCE 波では4.3~15.2cmの間に分布し, 各層平均値7.8cm, 変動係数0.40, TAFT 波では4.3~11.4cmの間で, 平均値6.6cm, 変動係数0.37, HACH 波では

3.7~9.3cmの間で、平均値6.3cm、変動係数0.27、TOHK波では3.5~10.6cmの間で、平均値7.3cm、変動係数0.34、4波平均値は6.98cm、変動係数は0.36となる。このように、本Caseの場合、塑性化により層剛性が失われるため、いずれの入力地震波に対しても δ_{tmax} の各層の分布はかなり大きくばらついており、量的にも予測値(5.09cm)の1.37倍とかなり大きい。ここに、予測値は次式で与えられる。

$$\delta_{0t} = (1 + 0.5\bar{\sigma}_0)\delta_{pt} \quad (9)$$

また、入力地震波の違いによる分布形の差異も大きい。

図-9に各層の残留変形 δ_{rt} を示す。 δ_{rt} はELCE波では1.05~11.19cmの間に分布し、各層平均値3.91cm、変動係数0.74、TAFT波では0.17~7.59cmの間で、平均値2.15cm、変動係数0.93、HACH波では0.06~6.55cmの間で、平均値2.49cm、変動係数0.79、TOHK波では0.37~6.55cmの間で、平均値3.12、変動係数0.64、4波平均値は2.92cm、変動係数は0.81となる。塑性化により層剛性が失われるため、いずれの入力地震波に対しても δ_{rt} の各層の分布は非常に大きくばらついており、量的にも非常に大きい。また、入力地震波の違いによる分布形の差異も大きい。

3.2 柔剛混合系の応答性状

本節では、Case IIの結果、すなわち柔剛混合系モデルのエネルギー応答性状についてCase I(非混合系モデル)と比較し検討する。

図-10に各層のエネルギー吸収率 W_{pt}/W_p を示す。ELCE波では第9層で最大となり16.3%、TAFT波では第4層で最大となり15.0%、HACH波では第3層で最大となり12.4%、TOHK波では第4層で最大15.0%となる。いずれの入力地震波に対しても W_{pt}/W_p の各層の分布は不規則で、吸収の集中する層があり、また入力

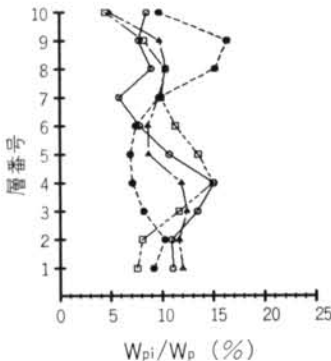


図-10 エネルギー吸収率 W_{pt}/W_p (Case II)

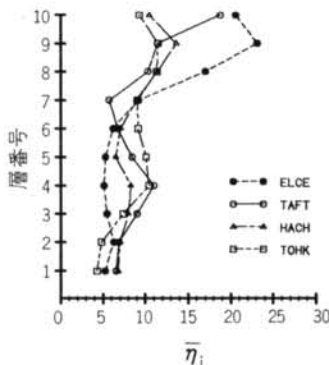


図-11 平均累積塑性変形倍率 $s\bar{\eta}_i$ (Case II)

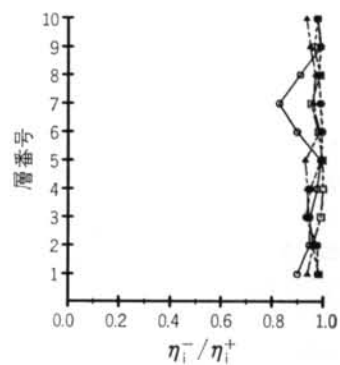


図-12 累積塑性変形倍率の偏り $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ (Case II)

地震波の違いによる差異が大きく、最大となる生起層も異なる。しかしながら、損傷集中の程度はCase Iより小さい。

図-11に、各層の剛部材の平均累積塑性変形倍率 $s\bar{\eta}_i$ を示す。 $s\bar{\eta}_i$ はELCE波では第9層で最大となり23.23、各層平均値10.36、変動係数0.65、TAFT波では第10層で最大となり18.81、平均値9.50、変動係数0.38、HACH波では第9層で最大となり13.63、平均値8.81、変動係数0.25、TOHK波では第9層で最大11.49、平均値9.35、変動係数0.27となる。4波平均値9.35と各層の $s\bar{\eta}_i$ が一樣となる場合の予測値(8.31)の1.13倍とやや大きい。ここに、柔剛混合系の場合の予測値 $s\bar{\eta}_0$ は次式で与えられる。

$$s\bar{\eta}_0 = \frac{MV_2^E}{2 \sum_{i=1}^{10} \alpha_i \tau \omega_{is} \delta_{pt}} \quad (10)$$

変動係数は0.45となり、 $s\bar{\eta}_i$ の各層の分布はCase Iよりばらつきは小さいが、最上層およびその近傍の層の値が大きい。また、入力地震波の違いによる各層の分布形の差異はかなり大きい。

図-12に、各層の剛部材の累積塑性変形倍率の正側および負側のうち小さい方を大きい方で除した値 $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ を示す。 $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ はELCE波では0.934~0.995の間に分布し、各層平均値0.976、変動係数0.019、TAFT波では0.827~0.991の間で、平均値0.936、変動係数0.053、HACH波では0.931~0.986の間で、平均値0.951、変動係数0.018、TOHK波では0.953~0.999の間で、平均値0.979、変動係数0.015、4波平均値は0.961、変動係数は0.035となる。このように、 $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ はいずれの入力地震波に対しても各層間のばらつきが非常に小さく、量的にも非常に1.0に近い値を示し、非混合系(Case I)とは著しく異なり、 η は一方への偏りが極めて小さい。

図-13に各層の剛部材の塑性変形倍率比 $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ を示す。 $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は ELCE 波では 0.11~0.37 の間に分布し、各層平均値 0.206、変動係数 0.37、TAFT 波では 0.11~0.24 の間で、平均値 0.18、変動係数 0.19、HACH 波では 0.13~0.36 の間で、平均値 0.25、変動係数 0.27、TOHK 波では 0.11~0.28 の間で、平均値 0.18、変動係数 0.32、4 波平均値は 0.20、変動係数は 0.33 となる。このように、 $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は各層の分布はかなりばらついてはいるが、量的には Case I の 4 波平均値 0.52 に比べその 2/5 と小さく、エネルギー吸収効率は高い。また、入力地震波の違いによる分布形の差異はやや大きい。

図-14に各層の最大応答層間変形 δ_{imax} を示す。 δ_{imax} は ELCE 波では 2.51~4.38cm の間に分布し、各層平均値 3.19cm、変動係数 0.17、TAFT 波では 2.25~3.93cm の間で、平均値 2.96cm、変動係数 0.17、HACH 波では 3.15~3.96cm の間で、平均値 3.47cm、変動係数 0.77、TOHK 波では 2.36~3.55cm の間で、平均値 3.01cm、変動係数 0.133、4 波平均値は 3.15cm で予測値 (2.66cm) の 1.18 倍、変動係数は 0.153 となる。ここに、柔剛混合系の場合の

予測値 δ_{ot} は次式で与えられる。

$$\delta_{ot} = (1 + 0.2s\bar{\eta}_0)s\bar{\delta}_{yt} \quad (1)$$

このように、いずれの入力地震波に対しても δ_{imax} の各層の分布はばらつき非常に小さく、量的にも Case I の 4 波平均値 6.98cm に比べその 0.45 倍と小さい。また、入力地震波の違いによる差異も小さい。なお、いずれの場合も柔部材は弾性範囲に留まっている。

図-15に各層の残留変形 δ_{ri} を示す。 δ_{ri} は ELCE 波では 0.01~0.35cm の間に分布し、各層平均値 0.17cm、変動係数 0.59、TAFT 波では 0.03~0.93cm の間で、平均値 0.45cm、変動係数 0.60、HACH 波では 0.13~0.64cm の間で、平均値 0.39cm、変動係数 0.38、TOHK 波では 0.04~0.39cm の間で、平均値 0.13cm、変動係数 0.85、4 波平均値は 0.29cm、変動係数は 0.76 となる。いずれの入力地震波に対しても δ_{ri} は各層の分布のばらつきはやや大きい²⁾、量的には Case I の 4 波平均値 2.92cm に比べ格段に小さい。

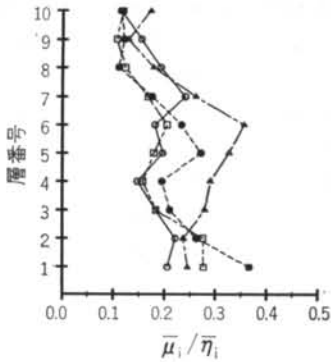


図-13 塑性変形倍率比 $s\mu_i/s\eta_i$ (Case II)

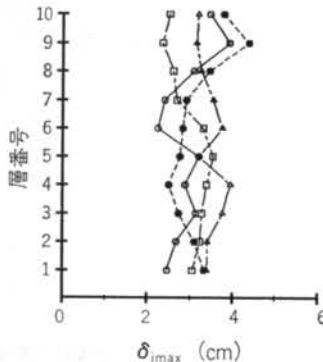


図-14 最大応答層間変形 δ_{imax} (Case II)

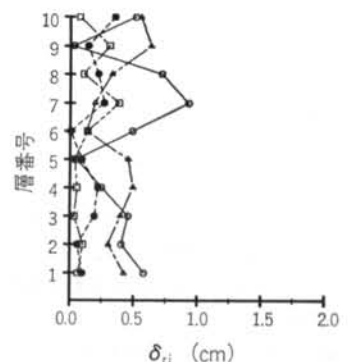


図-15 残留変形 δ_{ri} (Case II)

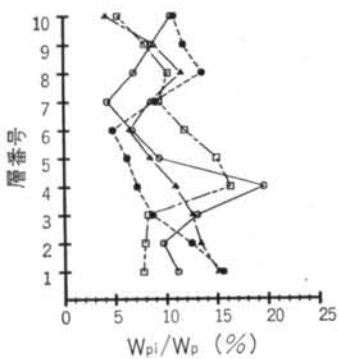


図-16 エネルギー吸収率 W_{pi}/W_p (Case III)

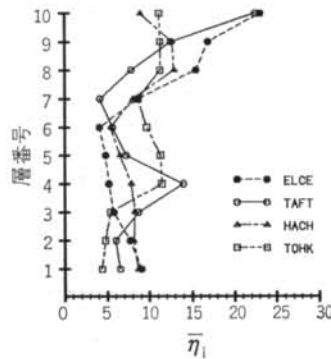


図-17 平均累積塑性変形倍率 $s\eta_i$ (Case III)

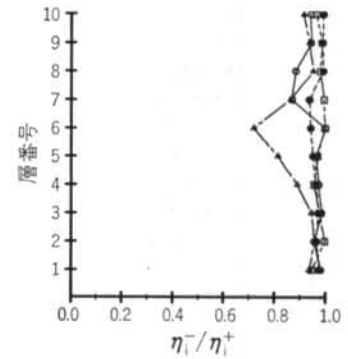


図-18 累積塑性変形倍率の偏り $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ (Case III)

3.3 降伏変形比の影響

本節では、Case IIIの結果、すなわち柔剛混合系モデルにおいて、降伏変形比あるいは柔部材の剛性のエネルギー応答性状に及ぼす影響についてCase IIと比較し検討する。

図-16に W_{pt}/W_p を示す。それぞれ入力地震波の W_{pt}/W_p を見ると、ELCE波、TAFT波、HACH波およびTOHKの順に(以下の項目も同じ)、最大生起層はそれぞれ第5層、第2層、第4層および第4層、最大値はそれぞれ15.6%、19.6%、15.1%および16.3%となり、Case IIと同等かやや大きい。 W_{pt}/W_p の各層の分布はCase IIと同様の分布形を示し、入力地震波の違いによる差異が大きく、最大となる生起層も異なる。

図-17に $s\bar{\eta}_i$ を示す。それぞれの入力地震波の $s\bar{\eta}_i$ は、最大生起層はそれぞれ第10層、第10層、第8層および第4層、最大値はそれぞれ23.1、22.5、12.9および11.5、各層平均値10.06、9.50、8.74、8.93、変動係数は0.60、0.55、0.26および0.31となる。4波平均値9.31と各層の $\bar{\eta}_i$ が一様となる場合の予測値(8.31)の1.12倍、変動係数0.47となる。Case IIと同様にいずれの入力地震波に対しても $s\bar{\eta}_i$ の分布はかなりばらついており、最上層およびその近傍の層の値が大きい。また、入力地震波の違いによる差異も大きい。ただし、各層の分布形はCase IIと類似しており、量的にもCase IIと同等かやや大きい。

図-18に $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ を示す。入力地震波ごとの $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ は、各層の値は0.938~0.992、0.870~1.0、0.719~0.959および0.947~0.999の間に分布し、各層平均値0.968、0.950、0.894および0.978、変動係数0.019、0.043、0.081および0.017となる。4波平均値は0.948、変動係数は0.057となる。HACH波以外の入力地震波に対しては $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ の各層の分布は、Case IIと同様にばらつきはかなり小さく、量的にもCase IIほどではないが、1.0

に近い。すなわち、 $s\bar{\eta}_i$ の一方向への偏りが小さい。

図-19に $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ を示す。入力地震波ごとの $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は、各層の値は0.145~0.325、0.126~0.328、0.156~0.416および0.133~0.349間に分布し、各層平均値0.242、0.238、0.273および0.206、変動係数0.254、0.238、0.314および0.339となる。4波平均値は0.240、変動係数は0.305となる。いずれの入力地震波に対しても $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ はかなりばらついているが、量的にはCase IIと同等かやや大きい。また、各層の分布形はCase IIと類似しており、入力地震波の違いによる差異はやや大きい。

図-20に δ_{tmax} を示す。入力地震波ごとの δ_{tmax} は、各層の値は2.39~5.02cm、2.79~4.60cm、2.50~5.25cmおよび2.81~3.70cm間に分布し、各層平均値3.69cm、3.74cm、4.03cmおよび3.22cm、変動係数0.215、0.147、0.179および0.091となる。4波平均値は3.66cmで予測値(2.66cm)の1.38倍、変動係数は0.186となる。このように、いずれの入力地震波に対しても δ_{tmax} の各層の分布はばらつきが小さく、量的にもCase IIと同等かやや大きい。また、入力地震波の違いによる差異も小さい。なお、いずれの場合も柔部材はほぼ弾性範囲に留まっている。

図-21に δ_{ri} を示す。入力地震波ごとの δ_{ri} は、各層の値は0.048~0.522cm、0.001~1.071cm、0.420~1.626cmおよび0.008~0.448cm間に分布し、各層平均値0.300cm、0.397cm、0.824cmおよび0.210cm、変動係数0.513、0.892、0.446および0.758となる。4波平均値は0.435cm、変動係数は0.846となる。いずれの入力地震波に対しても δ_{ri} はCase IIに比べやや大きいが、Case Iに比べれば格段に小さい。

3.4 強度比の影響

本節では、Case IVの結果、すなわち柔剛混合系モデルにおいて、強度比のエネルギー応答性状に及ぼす影響

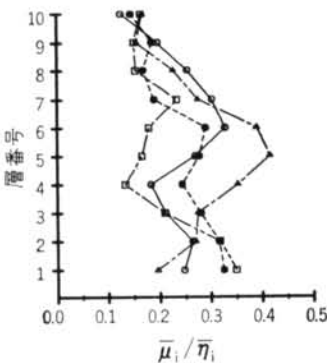


図-19 塑性変形倍率比 $s\mu_i/s\eta_i$ (Case III)

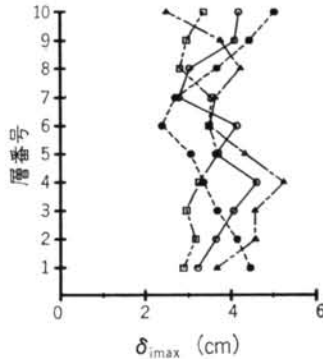


図-20 最大応答層間変形 δ_{tmax} (Case III)

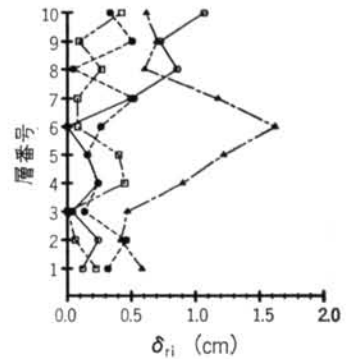


図-21 残留変形 δ_{ri} (Case III)

について Case II と比較し検討する。

本 Case の場合は、柔部材の強度が剛部材の強度の 2 倍となっているため、柔部材の弾性振動エネルギーのエネルギー応答性状への寄与が大きい。

図-22に W_{pi}/W_p を示す。それぞれの入力地震波の W_{pi}/W_p を見ると、最大生起層はそれぞれ第1層、第1層、第4層および第6層、値はそれぞれ12.6%、12.5%、13.2%および12.6%となる。エネルギー吸収率の各層の分布はやや不規則であり、入力地震波の違いによる分布形の差異もやや大きく、最大となる生起層は異なる。ただし、Case II よりはばらつきはかなり小さい。

図-23に、各層の剛部材の平均累積塑性変形倍率 $s\bar{\eta}_i$ を示す。 $s\bar{\eta}_i$ はそれぞれの入力地震波の結果を見ると、最大生起層はそれぞれ第10層、第10層、第8層および第9層、値はそれぞれ29.0、27.8、17.4および19.7、各層平均値は14.4、13.8、13.4および14.0、変動係数は0.48、0.37、0.20および0.33となる。4波平均値は13.9と各層の $s\bar{\eta}_i$ が一様となる場合の予測値(12.47)の1.11倍、変動係数は0.36となる。Case II と同様にいずれの

入力地震波に対しても $s\bar{\eta}_i$ の分布はかなりばらついており、最上層およびその近傍の層の値が大きい。また、入力地震波の違いによる分布形の差異もやや大きい。ただし、中間層のばらつきは Case II より小さい。

図-24に $s\bar{\eta}_i^-/s\bar{\eta}_i^+$ を示す。入力地震波ごとの $s\bar{\eta}_i^-/s\bar{\eta}_i^+$ は、各層の値は0.961~1.0、0.970~0.999、0.938~0.994 および0.962~1.0間に分布し、各層平均値は0.986、0.981、0.980 および0.986、変動係数は0.013、0.010、0.020 および0.013となる。4波平均値は0.983、変動係数は0.015となる。いずれの入力地震波に対しても $s\bar{\eta}_i^-/s\bar{\eta}_i^+$ の各層の分布は Case II に比べてもばらつきは非常に小さく、量的にも1.0に近い。すなわち、一方方向への偏りが非常に小さい。

図-25に $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ を示す。入力地震波ごとの $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は、各層の値は0.090~0.225、0.105~0.225、0.101~0.222 および0.094~0.267間に分布し、各層平均値は0.170、0.175、0.179 および0.172、変動係数は0.259、0.216、0.191および0.290となる。4波平均値は0.174、変動係数は0.242となる。いずれの入力地震波に対しても $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$

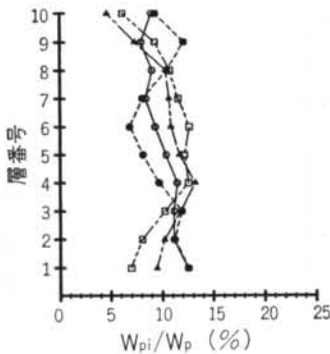


図-22 エネルギー吸収率 W_{pi}/W_p (Case IV)

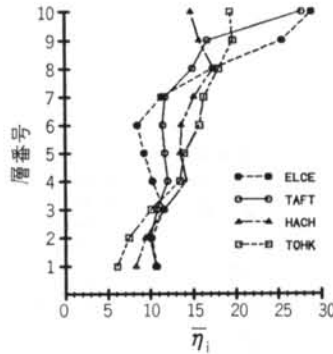


図-23 平均累積塑性変形倍率 $s\bar{\eta}_i$ (Case IV)

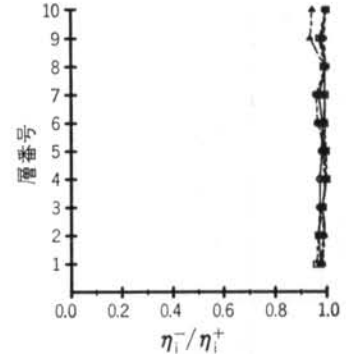


図-24 累積塑性変形倍率の偏り $s\bar{\eta}_i^-/s\bar{\eta}_i^+$ (Case IV)

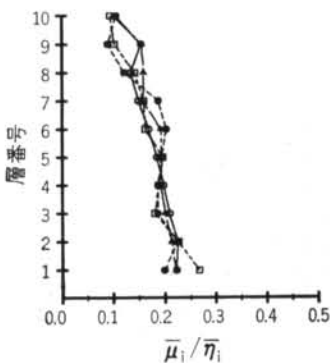


図-25 塑性変形倍率比 $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ (Case IV)

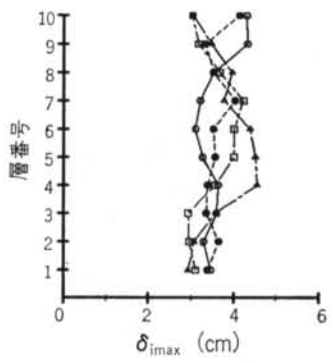


図-26 最大応答層間変形 $\delta_{i\max}$ (Case IV)

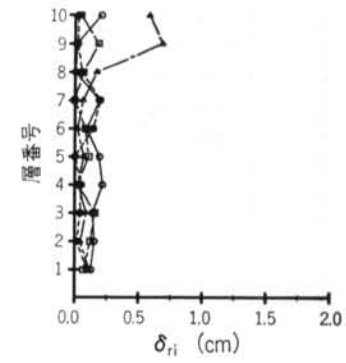


図-27 残留変形 δ_{ri} (Case IV)

の各層の分布は Case II よりばらつきはかなり小さく、各層一様に近く、量的にも Case II よりかなり小さい。また、入力地震波の違いによる分布形の差異は非常に小さい。

図-26に δ_{tmax} を示す。入力地震波ごとの δ_{tmax} は、各層の値は3.33~4.13cm, 3.10~4.32cm, 2.93~4.56cm および 2.94~4.23cm 間に分布し、各層平均値は3.59cm, 3.58cm, 3.73cm および 3.47cm, 変動係数は0.073, 0.113, 0.156 および 0.134 となる。4波平均値は3.59cm で予測値(3.49cm)の1.03倍、変動係数は0.126 となる。いずれの入力地震波に対しても δ_{tmax} の各層の分布は Case II よりばらつきが小さく、量的にも Case II より予測値に近い。また、入力地震波の違いによる差異も Case II よりさらに小さい。なお、いずれの場合も柔部材は弾性範囲に留まっている。

図-27に δ_{rt} を示す。入力地震波ごとの δ_{rt} は、各層の値は0.003~0.201cm, 0.007~0.218cm, 0.023~0.688 cm および 0.001~0.187 cm 間に分布し、各層平均値は0.068cm, 0.137cm, 0.189cm および 0.088cm, 変動係数は

0.873, 0.530, 1.215 および 0.632 となる。4波平均値は0.120cm, 変動係数は1.124 となる。いずれの入力地震波に対しても δ_{rt} は Case II に比べ各層間のばらつきも量的にもかなり小さい。

3.5 最適降伏せん断力係数分布の影響

本節では、Case V の結果、すなわち柔剛混合系モデルにおいて、最適降伏せん断力係数分布のエネルギー応答性状に及ぼす影響について Case II と比較し検討する。

図-28に W_{pt}/W_p を示す。入力地震波ごとの W_{pt}/W_p は、最大生起層はそれぞれ、第5層、第3層、第4層および第4層、値はそれぞれ13.7%, 17.9%, 18.2% および 21.5% となる。 W_{pt}/W_p の各層の分布はいずれの入力地震波に対しても概ね第3層~第5層が大きいが、Case II と異なり、最上層の近傍の層の吸収率は小さくなる。

図-29に $s\bar{\eta}_i$ を示す。入力地震波ごとの $s\bar{\eta}_i$ は、最大生起層はそれぞれ第8層、第4層、第4層および第1層、値はそれぞれ10.6, 12.7, 13.1 および 15.5, 各層平均値

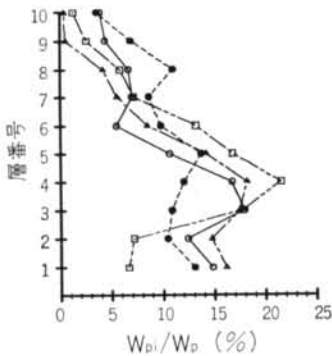


図-28 エネルギー吸収率 W_{pt}/W_p (Case V)

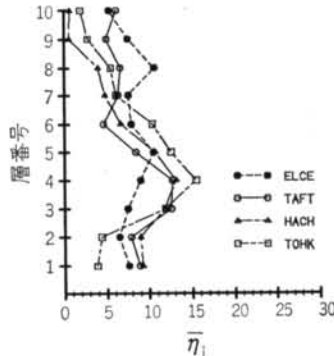


図-29 平均累積塑性変形倍率 $s\bar{\eta}_i$ (Case V)

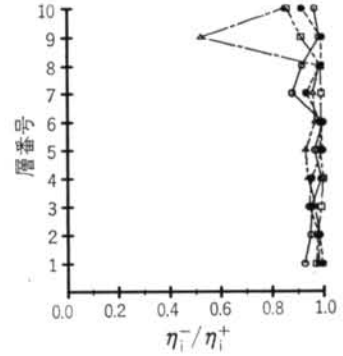


図-30 累積塑性変形倍率の偏り $s\bar{\eta}_i^-/s\bar{\eta}_i^+$ (Case V)

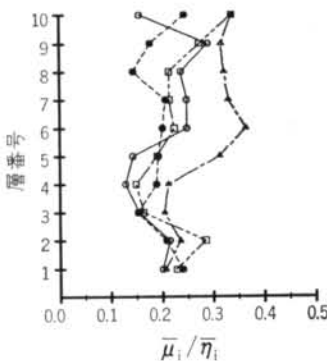


図-31 塑性変形倍率比 $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$ (Case V)

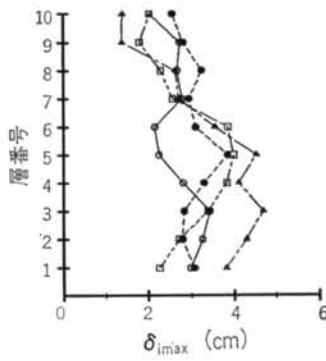


図-32 最大応答層間変形 δ_{tmax} (Case V)

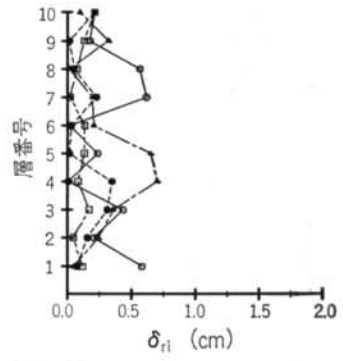


図-33 残留変形 δ_{rt} (Case V)

は7.98, 7.92, 7.06および7.48, 変動係数は0.20, 0.34, 0.60および0.59となる。4波平均値は7.61と各層の $\bar{s}\eta_i$ が一樣となる場合の予測値(7.87)の0.97倍, 変動係数は0.45となる。このように, $\bar{s}\eta_i$ の各層の分布 Case II に比べ, 最上層およびその近傍の層の突出は改善されているが, まだ, かなりばらついている。量的には Case II より小さい。

図-30に $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ を示す。入力地震波ごとの $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ は, 各層の値は0.917~0.997, 0.880~0.999, 0.522~0.985 および0.859~0.999間に分布し, 各層平均値は0.971, 0.954, 0.909および0.968, 変動係数は0.030, 0.037, 0.148, 0.044となる。4波平均値は0.951, 変動係数は0.082となる。HACH波の場合の最上層近傍は $\bar{s}\eta_i$ が小さいため例外だが, それ以外では $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ の各層の分布は Case II と同様に, ばらつきはかなり小さく, 量的にも1.0に近い。すなわち, $s\eta_i$ の一方への偏りが小さい。

図-31に $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ を示す。入力地震波ごとの $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は, 各層の値は0.144~0.245, 0.129~0.290, 0.205~0.365 および0.150~0.337間に分布し, 各層平均値は0.196, 0.203, 0.284および0.228, 変動係数は0.158, 0.254, 0.206および0.237となる。4波平均値は0.299, 変動係数は0.267となる。いずれの入力地震波に対しても $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は各層の分布は Case II よりばらつきが小さく, 量的には Case II と中下層でほぼ同等, 最上層近傍ではやや大きい。また, 入力地震波の違いによる分布形の差異はやや小さい。

図-32に δi_{max} を示す。入力地震波ごとの δi_{max} は, 各層の値は2.56~3.85cm, 2.03~3.44cm, 1.39~4.68cm および1.81~4.00cm間に分布し, 各層平均値は3.06cm, 2.72cm, 3.31cmおよび2.88cm, 変動係数は0.111, 0.161, 0.350および0.272となる。4波平均値は2.99cmで予測値

(2.57cm)の1.16倍, 変動係数は0.262となる。いずれの入力地震波に対しても δi_{max} の各層の分布はばらつきが小さく, 量的にも Case II と同等かやや大きい。また, 入力地震波の違いによる分布形の差異もやや小さい。なお, いずれの場合も柔部材は弾性範囲に留まっている。

図-33に δr_i を示す。入力地震波ごとの δr_i は, 各層の値は0.018~0.351cm, 0.008~0.619cm, 0.021~0.704 cm および0.021~0.216 cm 間に分布し, 各層平均値は0.147cm, 0.308cm, 0.287cmおよび0.114cm, 変動係数は0.806, 0.704, 0.775および0.480となる。4波平均値は0.214cm, 変動係数は0.880となる。いずれの入力地震波に対しても δr_i はかなり小さく, Case II と同等かやや小さい。

3.6 減衰の影響

本節では, Case VIの結果, すなわち Case II の柔剛混合系モデルにおいて, 減衰のエネルギー応答性状に及ぼす影響について検討する。

本 Case の場合, 減衰によって吸収されるエネルギーの総エネルギー入力 $E(=1/2MV_E^2)$ に対する比率は, ELCE波では36.0%, TAFT波では31.6%, HACH波では24.4%, TOHK波では28.8%となっている。したがって, 損傷に寄与するエネルギー W_D は E の76~64%に低減している。

図-34に W_{pi}/W_p を示す。入力地震波ごとの W_{pi}/W_p を見ると, 最大生起層はそれぞれ第1層, 第1層, 第1層および第4層, 値はそれぞれ12.3%, 16.3%, 14.2%および17.5%となる。 W_{pi}/W_p の各層の分布はいずれの入力地震波に対してもおおむね下層が大きく, 上層に行くほど小さくなる傾向を示しており, Case II とかなり異なる分布形を示す。これは, 地震入力エネルギーが下層で減衰エネルギーとして消費され, 上層への伝達が低

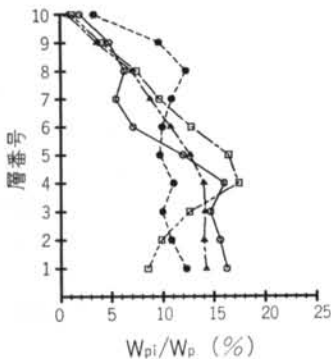


図-34 エネルギー吸収率 W_{pi}/W_p (Case VI)

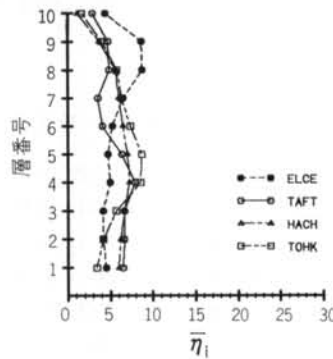


図-35 平均累積塑性変形倍率 $\bar{s}\eta_i$ (Case VI)

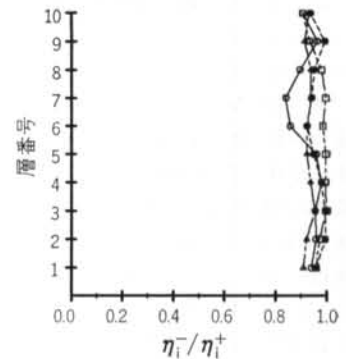


図-36 累積塑性変形倍率の偏り $\bar{s}\eta_i^-/\bar{s}\eta_i^+$ (Case VI)

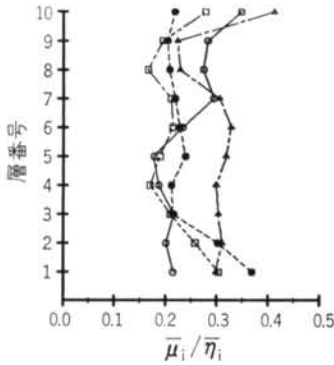


図-37 塑性変形倍率比 $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$
(Case VI)

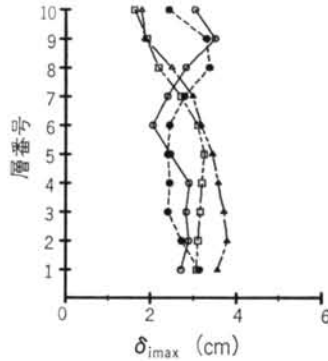


図-38 最大応答層間変形 δ_{imax}
(Case VI)

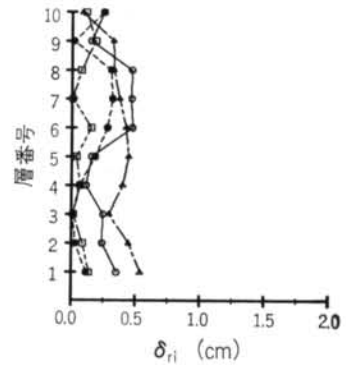


図-39 残留変形 δ_{ri} (Case VI)

減されるためと考えられる。

図-35に $s\eta_i$ を示す。入力地震波ごとの $s\eta_i$ を見ると、最大生起層はそれぞれ第8層、第4層、第4層および第5層、値はそれぞれ8.74、7.91、7.25および8.69、各層平均値は5.62、5.43、5.63および5.57、変動係数は0.30、0.28、0.31および0.39となる。4波平均値は5.56、変動係数は0.32となる。いずれの入力地震波に対しても $s\eta_i$ の各層の分布はCase IIに比べかなりばらつきは小さく、各層一様分布に近づいている。特に、Case IIで見られたような最上層近傍の $s\eta_i$ の突出が見られない。量的には損傷に寄与するエネルギーが低減し、各層の分布のばらつきが小さいため4波平均値はCase IIの0.59倍とかなり小さくなる。

図-36に $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ を示す。入力地震波ごとの $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ は、各層の値は0.923~0.995、0.840~0.980、0.910~0.995 および 0.905~0.999間に分布し、各層平均値は0.962、0.926、0.929 および 0.972、変動係数は0.026、0.049、0.014 および 0.031となる。4波平均値は0.947、変動係数は0.039となる。いずれの入力地震波に対しても $s\eta_i^-/s\eta_i^+$ の各層の分布はCase IIと同様に、ばらつきはかなり小さく、量的にも1.0に近い。すなわち、一方への偏りが小さい。

図-37に $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ を示す。入力地震波ごとの $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ は、各層の値は0.204~0.369、0.178~0.348、0.224~0.412 および 0.167~0.304間に分布し、各層平均値は0.241、0.243、0.303 および 0.220、変動係数は0.208、0.214、0.165 および 0.198となる。4波平均値は0.252、変動係数は0.230となる。いずれの入力地震波に対しても $s\bar{\mu}_i/s\bar{\eta}_i$ はCase IIよりはばらつきは小さく、量的にはCase IIとほぼ同等かやや大きい。

図-38に δ_{imax} を示す。入力地震波ごとの δ_{imax} は、各層の値は2.40~3.37cm、2.05~3.50cm、1.78~3.79cm

および1.62~3.25cm間に分布し、各層平均値は2.75cm、2.76cm、3.04cmおよび2.73cm、変動係数は0.135、0.136、0.234および0.210となる。4波平均値は2.82cm、変動係数は0.192となる。いずれの入力地震波に対しても δ_{imax} の各層の分布はばらつきは小さいが、Case IIよりはややばらつく。また、入力地震波の違いによる差異もCase II同様小さい。量的には損傷に寄与するエネルギーが低減しているため、4波平均値はCase IIの0.90倍と小さくなる。なお、いずれの場合も柔部材は弾性範囲に留まっている。

図-39に δ_{ri} を示す。入力地震波ごとの δ_{ri} は、各層の値は0.012~0.320cm、0.116~0.476cm、0.087~0.539cm および 0.010~0.187cm間に分布し、各層平均値は0.160cm、0.294cm、0.368cmおよび0.090cm、変動係数は0.746、0.451、0.315 および 0.627となる。4波平均値は0.228cm、変動係数は0.680となる。いずれの入力地震波に対しても δ_{ri} 各層の分布はCase IIよりばらつきがかなり小さく、量的にもCase IIよりかなり小さい。

以上のように、減衰は応答性状の改善には寄与するが剛部材の設計上の扱いには注意を要する。

§ 4. まとめ

高層建物にエネルギー論的耐震極限設計法を適用するためには、地震による総エネルギー入力を各層に分散吸収させることが有効であり、各層を柔剛混合構造で構成した構造を対象に、その基本的なエネルギー応答性状について弾塑性応答解析により検討した。その結果、柔剛混合構造のみで各層の損傷(累積塑性変形倍率)を一様にするのは難しいが、各層をエネルギーを積極的に吸収する部材(剛部材)と極限地震時にも弾性を保ち変形を抑

制する部材(柔部材)とを混合配置することは非常に安定した応答性状を示し、耐震性能を向上させることが明らかになった。剛部材はその機能よりエネルギー吸収能力、すなわち塑性変形能力の確保が設計において重要な目標

となる。一方、柔部材はその機能より大きな弾性変形能力が要求され、塑性変形能力に対してはさほど重要ではない。このように、構造部材を機能別に設定することは新しい耐震構造形式の可能性を示唆しているといえる。

<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（1987年）
- 2) 真瀬，宇野，矢部，寺田他：“第1層エネルギー集中型鉄骨柔剛混合構法に関する研究”日本建築学会学術講演梗概集（昭和62年，昭和63年，1989年）
- 3) 真瀬，矢部，寺田，兼光，他：“最上層エネルギー集中型柔剛混合構造に関する研究”日本建築学会学術講演梗概集（1989年，1990年，1991年）
- 4) 真瀬，矢部，寺田，兼光，他：“特定層エネルギー集中型柔剛混合構造のエネルギー応答性状に関する研究”日本建築学会学術講演梗概集（1990年）
- 5) 真瀬，矢部，寺田，兼光，他：“エネルギー分散型柔剛混合構造のエネルギー応答性状に関する研究”日本建築学会学術講演梗概集（1992年）
- 6) 兼光，矢部，真瀬，他：“せん断型多層骨組の最適降伏せん断力係数分布”構造工学論文集（1991年）

