U. D. C　624. 014. 2 : 624. 042. 2 : 699. 84

清水建設研究報告
第54号平成3年10月

エネルギー集中型柔剛混合構造の応答性状

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

筆者らは，エネルギー論による耐震極限設計法[1)2)]に基づいて，第1層の強度を相対的に低下させ，かつ柔部材と剛部材を混合配置することにより，地震入力エネルギーの大部分を第1層剛部材に吸収させ，また柔部材により過大な変形を抑制させる『第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造』を対象に，弾塑性応答解析，縮小模型の振動台実験および実大部分架構の仮動的実験を通してその有効性を実証し，さらに実際の建物へ適用するに至った[3)~10)]．

本報ではこれを発展させ，エネルギーを集中させる層として第1層以外の任意の1つの層を設定し，その層を柔剛混合構造とした多層骨組について，その極限地震時の応答性状，特にエネルギー応答性状を応答解析シミュレーションにより検討する[11)]．

さらに，これらのうち特にエネルギー集中層を最上層に設定した多層骨組に注目し，これを対象に，最上層を柔剛混合構造とした場合について応答解析シミュレーションによりそのエネルギー応答性状を検討する[12)]．

§ 2. 特定層エネルギー集中型柔剛混合構造

2.1 解析方法

解析モデルは，第2種地盤に建つ10層ラーメン構造を想定し，せん断バネ一質点系とした．地震入力エネルギーの大部分を任意の1つの層（第k層：$k=1\sim10$）に集中させるため，第k層の強度を相対的に低下させた．また，第k層を柔剛混合構造とした場合（柔剛混合系）としない場合（非混合系）について解析を行なった．各層の重量分布は，最上層のみ600 t，その他の層はすべて550 tとした．降伏せん断力係数分布は，第k層を除いて最適降伏せん断力係数分布[2)] $\bar{\alpha}_i$ に従い，第k層については非混合系の α_k，柔剛混合系における柔部材の ${}_f\alpha_k$ および剛部材の ${}_s\alpha_k$ は，それぞれ最適降伏せん断力係数分布の1/2とした（図―1参照）．ただし，$\alpha_1=0.2$ とした．

$$\left.\begin{array}{ll}\alpha_i=\bar{\alpha}_i\ \alpha_1 & (1\leqq i\leqq 10,\quad i\neq k)\\ \alpha_k=\bar{\alpha}_k\ \alpha_1/2 & (\text{非混合系})\\ {}_f\alpha_k={}_s\alpha_k=\bar{\alpha}_k\ \alpha_1/2 & (\text{柔剛混合系})\end{array}\right\}\quad(1)$$

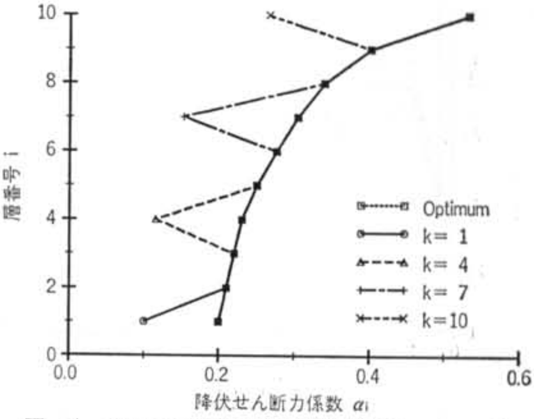
ここに，

$$\left.\begin{array}{ll}\bar{\alpha}=1+1.5927\xi-11.8519\xi^2+42.5833\xi^3 & \\ \quad -59.4827\xi^4+30.1586\xi^5 & (\xi>0.2)\\ \quad =1+\xi & (\xi\leqq 0.2)\end{array}\right\}\quad(2)$$

ただし，$\xi=x/H$，xは各層の地盤面からの高さ，Hは建物の高さである．

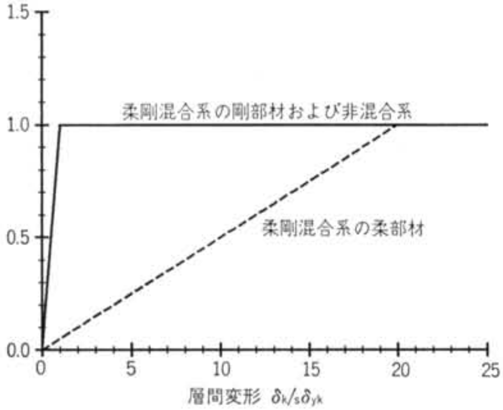
降伏変形 δ_{yi} は第k層を除いて一定（5 cm）とし，第k層については非混合系の δ_{yk} および柔剛混合系の剛部材の ${}_s\delta_{yk}$ は1 cm，柔剛混合系の柔部材の ${}_f\delta_{yk}$ は20 cmとした．復元力特性はすべて完全弾塑性型とした（図―2参照）．また，減衰は無視した．

これらのモデルの弾性剛性による1次固有周期は，非混合系で2.290～2.393 sec，柔剛混合系で2.286～2.381 secとなり，集中層kが上層になるほどわずかに長くなる．また，非混合系と柔剛混合系の間に差は殆どない（図―3参照）．

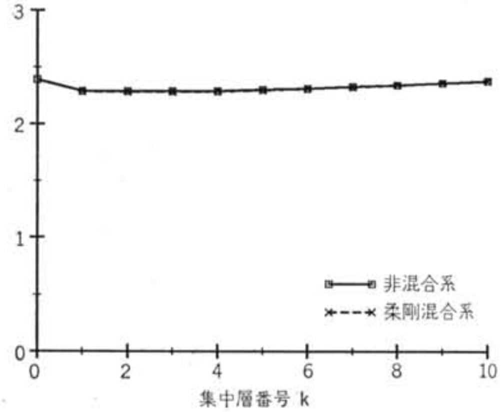


図―1　解析モデルの降伏せん断力係数分布

入力地震波としては，El Centro 1940 NS（最大入力加速度 $\ddot{z}_{0max}=342$ gal，継続時間 $t_0=40$ sec)，Taft 1952 EW（$\ddot{z}_{0max}=176$ gal，$t_0=40$ sec）および Hachinohe 1968 EW（$\ddot{z}_{0max}=184$ gal，$t_0=30$ sec）を用いる．入力レベルは総エネルギー入力により基準化し，極限地震レベルとして総エネルギー入力の等価速度 $V_E=150$ cm/sec を与える．ちなみに，最大入力加速度は El Centro 1940 NS 波で535～650 gal，Taft 1952 EW 波で540～663 gal，Hachinohe 1968 EW 波で193～265 gal となる．数値解析は，Newmark β 法（$\beta=1/4$)，時間刻み $\Delta t=1/200$ sec とした．



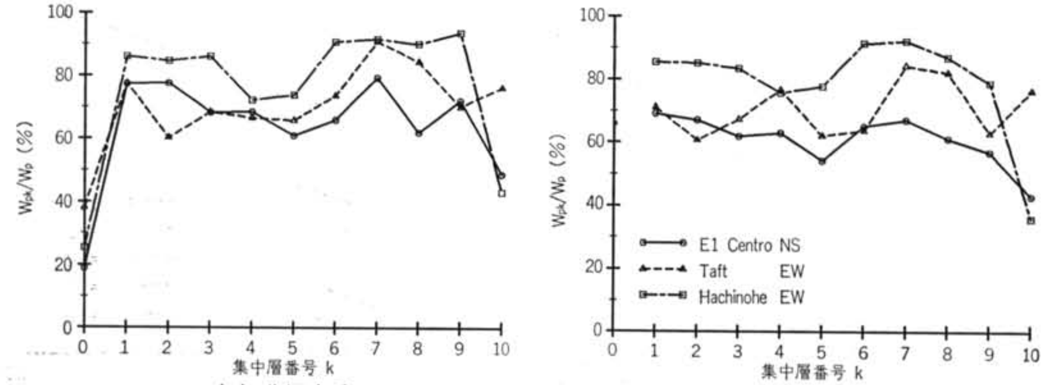
図―2　エネルギー集中層の復元力特性



図―3　解析モデルの1次固有周期

2.2　解析結果および考察

図―4に集中層の塑性ひずみエネルギー吸収率 W_{pk}/W_p を示す．非混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では $k\leq 9$ では60.9～79.4%とややばらつくものの，おのおの安定した性状を示しているが，$k=10$では48.9%とかなり低下している．Taft 1952 EW 波で k が1～10では60.2～90.8%でかなり安定性状を示し，$k=10$のケースについても低下しない．Hachinohe 1968 EW 波では El Centro 1940 NS 波と同様の傾向を示し，$k\leq 9$ では72.1～93.8%となり，$k=10$では43.2%となっている．なお，最適降伏せん断力係数分布をもつケースの最大吸収率は，El Centro 1940 NS 波では第1層で23.8%，Hachinohe 1968 EW 波では第4層で25.3%，Taft 1952 EW 波では第10層で38.1%となり，その生起層および量は入力地震波により異なり一定しない．柔剛混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では $k\leq 9$ で54.2～69.1%とややばらつくものの，おのおの安定した性状を示しているが，$k=10$ では43.1%とかなり低下している．Taft 1952 EW 波で k が1～10では60.6～84.4%で，かなり安定性状を示している．Hachinohe 1968 EW 波では El Centro 1940 NS 波と同様の傾向を示し，$k\leq 9$ では75.6～92.3%となり，$k=10$では40.0%となっている．非混合系と柔剛混合系を比較すると，k による W_{pk}/W_p の定性的傾向はほぼ同様であり，定量的には柔剛混合系の W_{pk}/W_p の非混合系に対する比率は，El Centro 1940 NS 波で0.790～0.988（10ケース平均で0.895)，



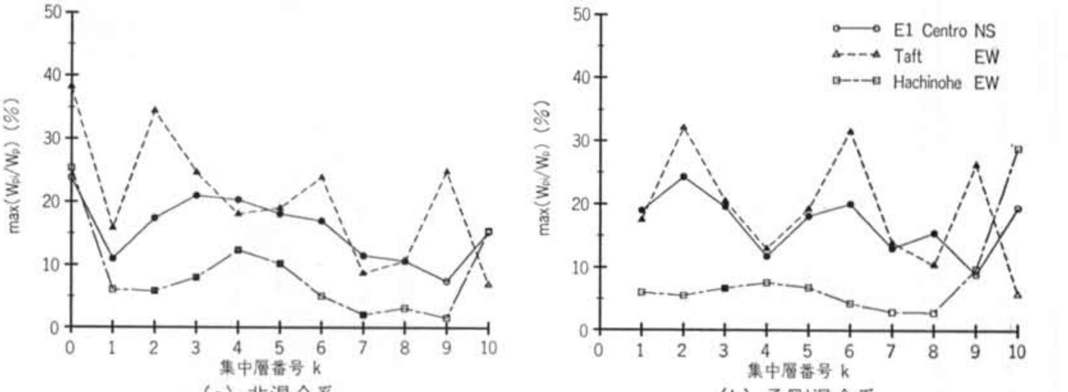
(a) 非混合系　　(b) 柔剛混合系

図―4　集中層の累積塑性ひずみエネルギー

Taft 1952 EW 波で 0.867〜1.152（10ケース平均で 0.967），Hachinohe 1968 EW 波で0.833〜1.055（10ケース平均で 0.973）と集中層の降伏せん断力が2倍になっている割には W_{pk}/W_p はさほど低下していない．なお，両系とも $k=10$ のケースの集中率が低下しているのは，質量比が過少のためと考えられる．

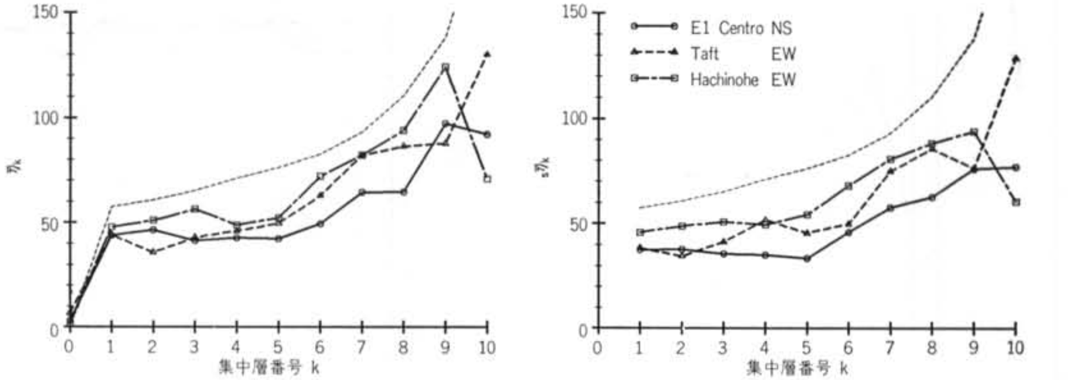
図—5に，非集中層（$i \neq k$）のエネルギー吸収率のうち最大となる層の値 max (W_{pi}/W_p) を示す．図中のシンボルのうち黒塗りは生起層が最上層のものである．図より，非混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では max (W_{pi}/W_p) は 7.5〜21.0% となり，その生起層は $k \leqq 8$ のケースではいずれも最上層となっている．Taft 1952 EW 波では max (W_{pi}/W_p) は 6.9〜34.4% となり，その生起層は $k \leqq 9$ のケースではいずれも最上層となっている．Hachinohe 1968 EW 波では max (W_{pi}/W_p) は 1.6〜15.5%となり，その生起層は $k \leqq 7$ のケースでは最上層あるいはその直下層となっている．柔剛混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では max (W_{pi}/W_p) は10.0〜22.0%となり，その生起層は $k \leqq 8$ のケースでは最上層あるいはその直下層となっている．Taft 1952 EW 波では max (W_{pi}/W_p) は 6.2〜31.9% となり，その生起層は $k \leqq 9$ のケースではいずれも最上層となっている．Hachinohe 1968 EW 波では，$k \leqq 9$ のケースでは max (W_{pi}/W_p) は 2.9〜9.4%，$k=10$ のケースで26.6%となり，その生起層は $k \leqq 8$ の殆どのケースで最上層あるいはその直下層となっている．このように非集中層のエネルギー吸収率は，柔剛混合系と非混合系の間には大きな差異は認められない．また，両系ともに $k \neq 10$ のケースでは，最上層およびその近傍の層の降伏せん断力をより大きく設定すれば（文献 6）参照）W_{pi}/W_p をより小さく抑えることができ，ひいては集中層の吸収率 W_{pk}/W_p をさらに上昇させることができよう．

図—6に，集中層の平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_k$ を示す．ただし，柔剛混合系の場合は剛部材の値 ${}_s\bar{\eta}_k$ である（以下，同じ）．図中，点線は地震総エネルギー入力の全量を集中層で吸収する場合の予測値を示す．予測値は次式で与えられる．



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

図—5　非集中層の最大累積塑性ひずみエネルギー



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

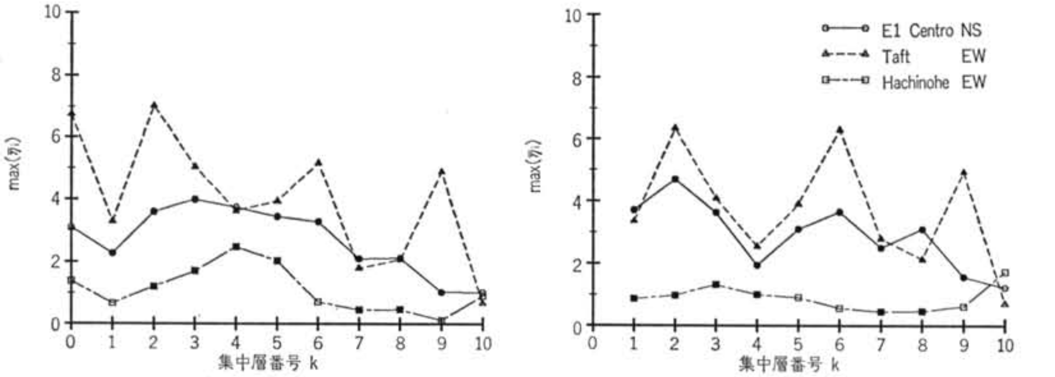
図—6　集中層（剛部材）の累積塑性変形倍率

$${}_s\bar{\eta}_k=\frac{WV_E^2}{4g\ {}_s\alpha_k\ w_k\ {}_s\delta_y} \qquad \cdots\cdots(3)$$

ここに，W は建物総重量，w_k は第 k 層の負担する重量，g は重力加速度である．

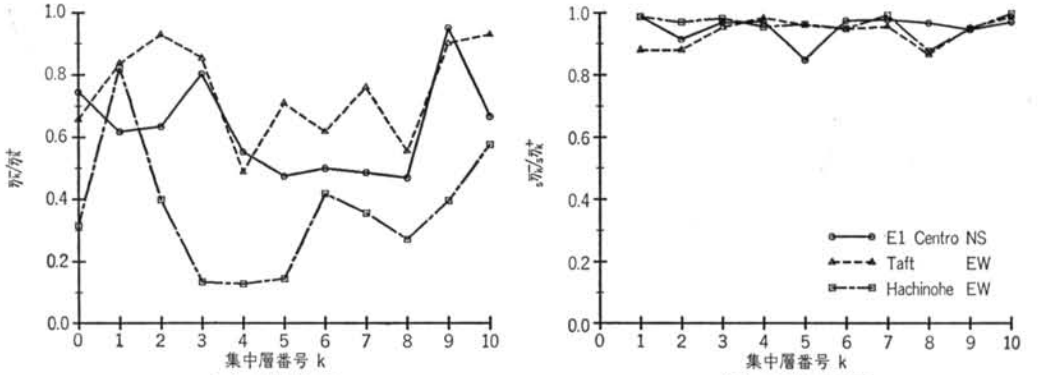
${}_s\bar{\eta}_k$（括弧内は非混合系 $\bar{\eta}_k$）は $k=1$ で37.52〜45.87（43.82〜47.86），$k=5$ で33.67〜54.27（42.22〜52.27），$k=9$ で75.94〜94.00（87.65〜124.05）と k が上層になるほど大きくなる．なお，最適降伏せん断力係数分布をもつケースの平均累積塑性変形倍率の最大値は，El Centro 1940 NS 波では第8層で3.10，Taft 1952 EW では第10層で6.73，Hachinohe 1968 EW 波では第4層で1.39となり，その生起層および量は入力地震波により異なり一定しない．また，予測値と比較すると，**図―4**に示すように集中層のエネルギー吸収率が低下しているためその値は予測値を下回るが，k による定性的傾向は $k=10$のケースを除き予測値とよく合っている．また，柔剛混合系と非混合系の間の差は小さい．

図―7 に，非集中層のうち平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ が最大となる層の値を示す．図中のシンボルのうち黒塗りは生起層が最上層のものである．図より，非混合系の場合El Centro 1940 NS 波では max ($\bar{\eta}_i$) は1.02〜3.98となり，その生起層は $k\leqq 9$ のケースでは殆ど最上層となっている．Taft 1952 EW 波では max ($\bar{\eta}_i$) は0.67〜7.02となり，その生起層は $k\leqq 9$ のケースでいずれも最上層となっている．Hachinohe 1968 EW 波では max ($\bar{\eta}_i$) は0.12〜2.47となり，その生起層は $k\leqq 8$ の殆どのケースで最上層となっている．柔剛混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では max ($\bar{\eta}_i$) は0.91〜5.51となり，その生起層は $k\leqq 9$ のすべてのケースで最上層となっている．Hachinohe 1968 EW 波では $k\leqq 9$ のケースでは max ($\bar{\eta}_i$) は0.58〜2.17となり，その生起層はすべてのケースで最上層となっている．Taft 1952 EW 波では max ($\bar{\eta}_i$) は2.91〜6.20となり，その生起層は $k\leqq 8$ の殆どのケースで最上層となっている．このように，非集中層の max ($\bar{\eta}_i$) は集中層に比べれば非常に小さく，柔剛混合系と非混合系との間に大きな差異は認められず，また**図―5**で述べたように，最上層およびその近傍の層の降伏せん断力係数を大きく設定することにより，一層



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

図―7　非集中層の最大累積塑性変形倍率



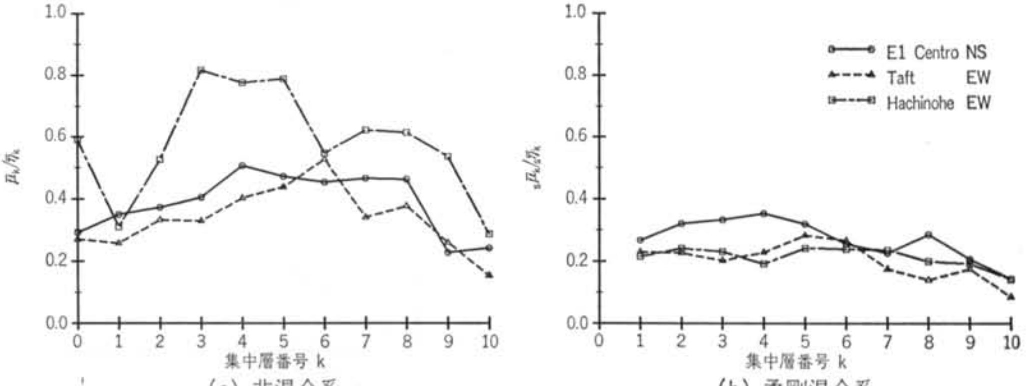
(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

図―8　集中層（剛部材）の η_k の偏り

小さく抑えられよう．

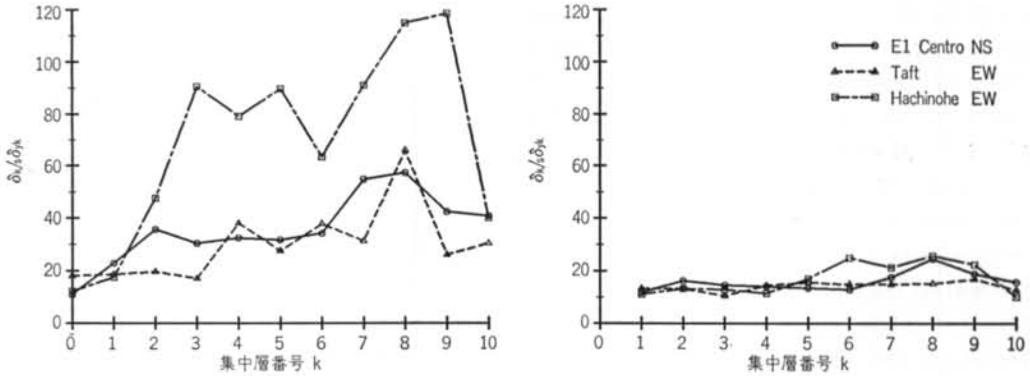
図—8に，集中層の累積塑性変形倍率の正側 ${}_s\eta_k^+$ および負側 ${}_s\eta_k^-$ のうち，小さい方を大きい方で除した値（便宜的に η_k^-/η_k^+ と記す）を示す．非混合系の場合，El Centro 1940 NS波では η_k^-/η_k^+ は0.469〜0.952，平均値0.627，変動係数0.237，Taft 1952 EW波では η_k^-/η_k^+ は0.488〜0.929，平均値0.748，変動係数0.197，Hachinohe 1968 EW波では η_k^-/η_k^+ は0.127〜0.822，平均値0.360，変動係数0.548となっている．このように，非混合系では k および入力地震波の違いにより大きくばらつき，その値も小さく，${}_s\eta_k$ は一方向に偏っている．一方，柔剛混合系では，El Centro 1940 NS波では η_k^-/η_k^+ は0.848〜0.988，平均値0.952，変動係数0.042，Taft 1952 EW波では η_k^-/η_k^+ は0.864〜0.988，平均値0.936，変動係数0.046，Hachinohe 1968 EW波では η_k^-/η_k^+ は0.867〜0.998，平均値0.962，変動係数0.035となっている．このように，柔剛混合系では非混合系の場合と異なり，k および入力地震波の違いに関わらず安定した性状を示し，その値も1.0に近い．すなわち，${}_s\eta_k$ の一方向への偏りが非常に小さい．これは残留変形が小さいことをも意味している．

図—9に，集中層の見掛けの塑性変形倍率（平均値）${}_s\bar{\mu}_k$ と平均累積塑性変形倍率 ${}_s\bar{\eta}_k$ の比 ${}_s\bar{\mu}_k/{}_s\bar{\eta}_k$ を示す．非混合系の場合，El Centro 1940 NS波では $\bar{\mu}_k/\bar{\eta}_k$ は0.226〜0.507，平均値0.386，変動係数0.242，Taft 1952 EW波では $\bar{\mu}_k/\bar{\eta}_k$ は0.153〜0.527，平均値0.335，変動係数0.289，Hachinohe 1968 EW波では $\bar{\mu}_k/\bar{\eta}_k$ は0.286〜0.817，平均値0.583，変動係数0.286となっている．このように，非混合系では k および入力地震波の違いにより大きくばらつき，その値も大きい．一方，柔剛混合系では El Centro 1940 NS波では ${}_s\bar{\mu}_k/{}_s\bar{\eta}_k$ は0.143〜0.352，平均値0.270，変動係数0.229，Taft 1952 EW波では ${}_s\bar{\mu}_k/{}_s\bar{\eta}_k$ は0.086〜0.283，平均値0.201，変動係数0.279，Hachinohe 1968 EW波では ${}_s\bar{\mu}_k/{}_s\bar{\eta}_k$ は0.142〜0.242，平均値0.212，変動係数0.142となっている．このように，柔剛混合系では k および入力地震波の違いによりややばらつくが，その値は非混合系に比べかなり小さい．



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

図—9　集中層（剛部材）の $\bar{\mu}_k/\bar{\eta}_k$



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

図—10　集中層の最大層間変形

図—10に，集中層の最大変形を層の降伏変形で除した量 $\delta_{kmax}/\delta_{yk}$ を示す．ただし，柔剛混合系は剛部材の降伏変形で除した量 $\delta_{kmax}/{}_s\delta_{yk}$ である．非混合系の場合，El Centro 1940 NS波では $\delta_{kmax}/\delta_{yk}$ は11.02～57.33，平均値35.77，変動係数0.3513，Taft 1952 EW波では $\delta_{kmax}/\delta_{yk}$ は17.01～65.83，平均値30.00，変動係数0.4477，Hachinohe 1968 EW波では $\delta_{kmax}/\delta_{yk}$ は12.14～118.6，平均値67.51，変動係数0.4796となっている．このように，非混合系では k および入力地震波の違いにより大きくばらつき，その値も大きい．一方，柔剛混合系ではEl Centro 1940 NS波では $\delta_{kmax}/{}_s\delta_{yk}$ は11.82～24.56，平均値15.96，変動係数0.2193，Taft 1952 EW波では $\delta_{kmax}/{}_s\delta_{yk}$ は10.55～16.82，平均値14.16，変動係数0.1179，Hachinohe 1968 EW波では $\delta_{kmax}/{}_s\delta_{yk}$ は10.25～25.67，平均値17.03，変動係数0.335となっている．このように，柔剛混合系では k および入力地震波の違いによるばらつきは非混合系に比べかなり小さく，その平均値も非混合系の1/2.12～1/3.96と非常に小さい．

§ 3. 最上層エネルギー集中型柔剛混合構造

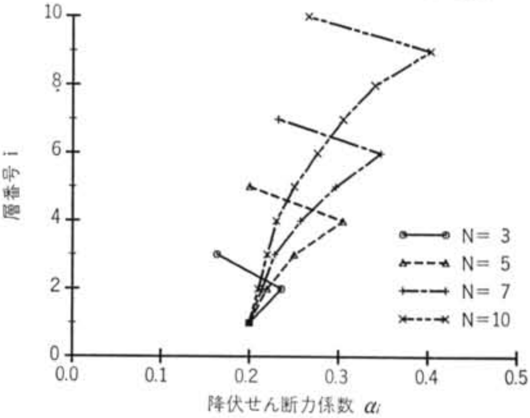
3.1 解析方法

解析対象建屋は，第2種地盤に建つ多層ラーメン構造を想定し，せん断バネ―質点系でモデル化した．地震入力エネルギーの大部分を最上層に集中させるため，最上層の強度を相対的に低下させた．建屋の階数 N をパラメータとし，$N=3, 4, \cdots, 10$ の8ケースについて，また最上層を柔剛混合構造とした場合（柔剛混合系）としない場合（非混合系）について解析を行なった．各層の重量分布は最上層のみ600 t，その他の層はすべて550 tとした．降伏せん断力係数分布は，最上層を除いて最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_i$ に従い，最上層のについては非混合系の α_N，柔剛混合系における柔部材の ${}_f\alpha_N$ および剛部材の ${}_s\alpha_N$ は，それぞれ最適降伏せん断力係数分布の1/2とした（図—11参照）．ただし，$\alpha_1=0.2$ とした．

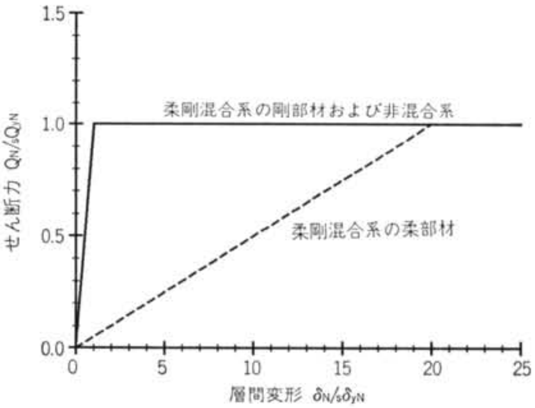
$$\left.\begin{array}{ll} \alpha_i=\bar{\alpha}_i\ \alpha_1 \quad (1\leqq i\leqq N-1) & \\ \alpha_N=\bar{\alpha}_N\ \alpha_1/2 & \text{(非混合系)} \\ {}_f\alpha_N={}_s\alpha_N=\bar{\alpha}_N\ \alpha_1/2 & \text{(柔剛混合系)} \end{array}\right\} \quad (4)$$

降伏変形 δ_{yi} は最上層を除いて一定（5 cm）とし，最上層については非混合系の δ_{yN} および柔剛混合系の剛部材の ${}_s\delta_{yN}$ は1 cm，柔剛混合系の柔部材の ${}_f\delta_{yN}$ は20cmとした．復元力特性はすべて完全弾塑性型とした（図—12参照）．また，減衰は無視した．これらのモデルの1次固有周期は1.35～2.38秒であり，非混合系と柔剛混合系の間に差は殆どない（図—13参照）．

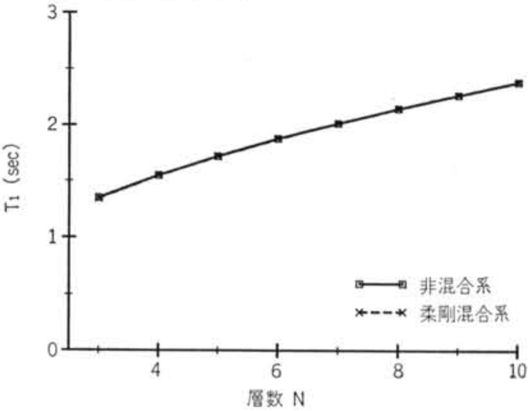
入力地震波としては，§ 2. と同様に El Centro 1940 NS，Taft 1952 EW および Hachinohe 1968 EW を用いる．入力レベルは総エネルギー入力により基準化し，極限地震レベルとして総エネルギー入力の等価速度 V_E



図—11 解析モデルの降伏せん断力係数分布



図—12 最上層の復元力特性



図—13 解析モデルの1次固有周期

=150cm/secを与える．ちなみに，最大入力加速度はEl Centro 1940 NS波で505～603 gal，Taft 1952 EW波で433～636 gal，Hachinohe 1968 EW波で192～325 galとなる．数値解析はNewmark β法（$\beta=1/4$），時間刻み$\Delta t=1/200$秒とした．

3.2 解析結果および考察

図—14に，集中層の塑性ひずみエネルギー吸収率W_{pN}/W_pを示す．なお，図中の点線は文献13)による予測値を示す．この予測値は次式で与えられる．

$$\frac{W_{pN}}{W_p}=\frac{14.3\alpha_1}{N\alpha_{E_1}} \quad (\leqq 1.0) \quad \cdots\cdots(5)$$

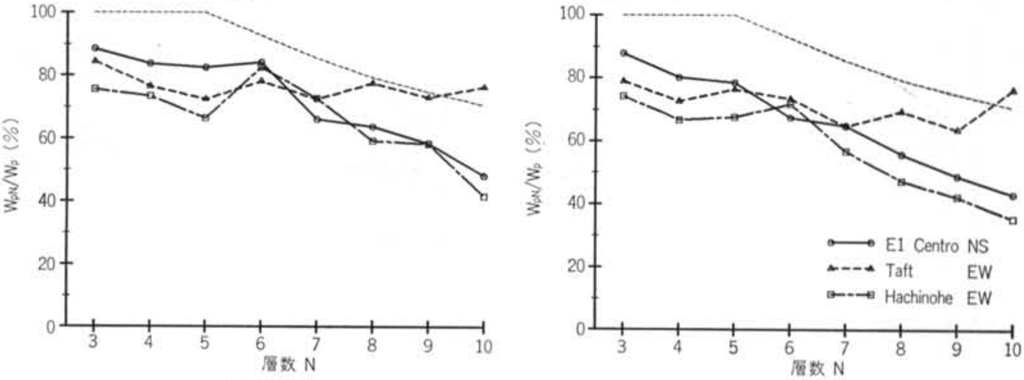
ここに，

$$\alpha_{E_1}=\frac{2\pi V_E}{gT} \quad \cdots\cdots(6)$$

非混合系の場合，El Centro 1940 NS波では$N=3$でW_{pN}/W_pは88.5%，$N=6$で84.2%，$N\geqq 7$ではNが大きくなるにつれて急激に低下し，$N=10$では48.1%となっている．Taft 1952 EW波では$N=3$でW_{pN}/W_pは84.5%，$N=6$で78.1%，$N=10$で76.4%と他の2波と異なりNによらず量的に安定している．Hachinohe 1968 EW波ではEl Centro 1940 NS波と同様の傾向を示し，$N=3$でW_{pN}/W_pは88.5%，$N=6$で82.6%，$N\geqq 7$ではNが大きくなるにつれて急激に低下し，$N=10$では41.7%となっている．柔剛混合系の場合，El Centro 1940 NS波では$N=3$でW_{pN}/W_pは87.9%，$N=6$で67.5%とNが大きくなるにつれて緩やかに低下し，$N\geqq 7$ではNが大きくなるにつれて急激に低下し，$N=10$では43.1%となっている．Taft 1952 EW波ではNに対して量的に安定しており，$N=3$でW_{pN}/W_pは78.9%，$N=6$で73.5%，$N=10$では76.4%となっている．Hachinohe 1968 EW波ではEl Centro 1940 NS波と同様の傾向を示し，$N=3$でW_{pN}/W_pは74.2%，$N=6$で78.1%，$N\geqq 7$ではNが大きくなるにつれて急激に低下し，$N=10$では35.4%となっている．非混合系と柔剛混合系を比較すると，NによるW_{pN}/W_pの定性的傾向はほぼ同様であり，定量的には柔剛混合系のW_{pN}/W_pの非混合系に対する比率は，El Centro 1940 NS波で0.802～0.993（8ケース平均で0.911），Hachinohe 1968 EW波で0.724～1.019（8ケース平均で0.867），Taft 1952 EW波で0.870～1.055（8ケース平均で0.942）と最上層の降伏せん断力が2倍になっている割にはW_{pN}/W_pはさほど低下していない．また，式(5)の予測値と比較すると量的には小さいが，Nとの関係ではほぼ同様の傾向を示している．

図—15に，非集中層（$i\neq k$）のエネルギー吸収率のうち最大となる層の値$\max(W_{pi}/W_p)$を示す．図より，非混合系の場合$\max(W_{pi}/W_p)$はEl Centro 1940 NS波では5.3～16.3%，Hachinohe 1968 EW波では8.3～19.7%，Taft 1952 EW波では4.3～10.9%となっている．その生起層は必ずしも一定しないが，おおむね中間層となるケースが多い．柔剛混合系の場合，$\max(W_{pi}/W_p)$はEl Centro 1940 NS波では8.7～19.5%，Hachinohe 1968 EW波では9.2～27.1%，Taft 1952 EW波では5.8～13.5%となっている．その生起層は必ずしも一定しない．このように，非集中層のエネルギー吸収率は柔剛混合系と非混合系の間には大きな差異は認められない．また，両系ともに最上層の降伏せん断力を他の層に対しさらに低減すれば，$\max(W_{pi}/W_p)$をより小さく抑えることができ，ひいては集中層の吸収率W_{pN}/W_pをさらに上昇させることができよう．

図—16に，集中層の平均累積塑性変形倍率$\bar{\eta}_N$を示す．ただし，柔剛混合系の場合は剛部材の値$_s\bar{\eta}_N$である．図中，点線は地震入力エネルギーのうち式(5)による



(a) 非混合系　　(b) 柔剛混合系

図—14　最上層（剛部材）の累積塑性ひずみエネルギー

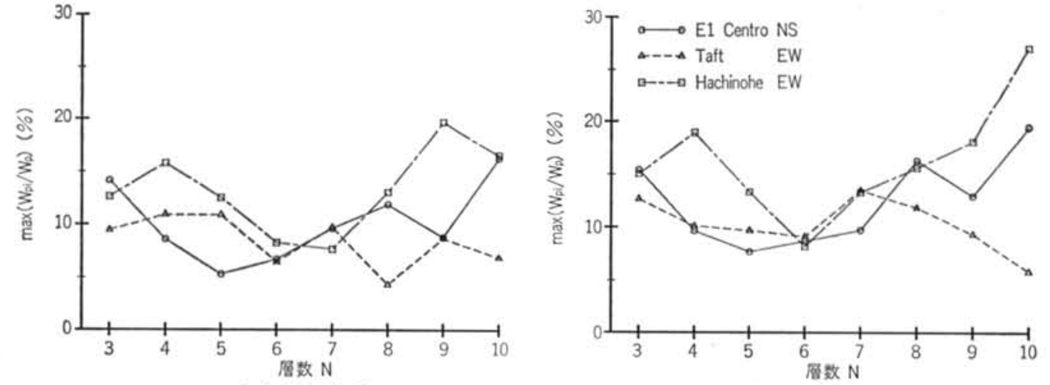
予測量をすべて最上層で吸収する場合の予測値を示す．予測値は次式で与えられる．

$$ {}_s\bar{\eta}_N=\frac{WV_E{}^2}{4g\ {}_s\alpha_N\ w_N\ {}_s\delta_y}\times\frac{14.3\,\alpha_1}{N\alpha_{E_1}} \quad\cdots\cdots(7) $$

${}_s\bar{\eta}_N$（括弧内は非混合系 $\bar{\eta}_N$）は各入力地震波に対し $N=3$ で70.49～83.78（73.25～86.85），$N=6$ で89.12～100.6（111.3～120.7）と N が大きくなるほど大きくなるが，$N>7$ ではほぼ一定あるいは低減し，$N=10$で59.99～130.1（69.02～89.91）となる．また，予測値と比較すると，**図―14**に示すように集中層のエネルギー吸収率が予測値より低下しているため，その値は予測値を下回るが，k による定性的傾向はおおむね予測値とよく合っている．また，柔剛混合系と非混合系の間の差は小さい．

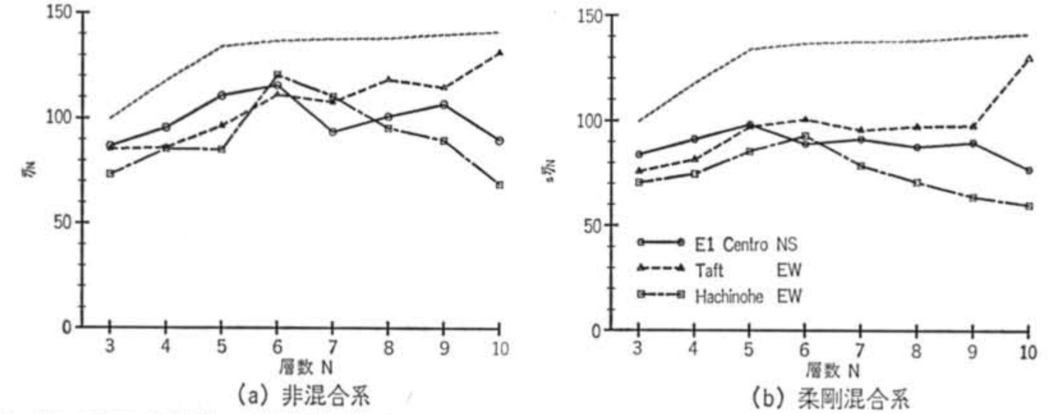
図―17 に，非集中層のうち平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ が最大となる層の値を示す．非混合系の場合，max($\bar{\eta}_i$) は El Centro 1940 NS 波で0.27～1.08，Taft 1952 EW 波では0.45～1.01，Hachinohe 1968 EW 波では0.52～1.18となっている．また，その生起層はNおよび入力地震波により異なり一定しない．柔剛混合系の場合，max ($\bar{\eta}_i$) は El Centro 1940 NS 波で0.45～1.00，Taft 1952 EW 波では 0.56～1.28，Hachinohe 1968 EW 波では 0.68～1.63 となっている．また，その生起層はNおよび入力地震波により異なり一定しない．このように，非集中層の max ($\bar{\eta}_i$) は集中層のに比べれば非常に小さく，エネルギー吸収率の割には損傷が軽微である．柔剛混合系と非混合系との間に大きな差異は認められず，また**図―15**で述べたように，最上層の降伏せん断力係数をさらに低減することにより一層小さく抑えられよう．

図―18に，集中層の累積塑性変形倍率の正側 ${}_s\eta_N{}^+$ および負側 ${}_s\eta_N{}^-$ のうち，小さい方を大きい方で除した値（便宜的に $\eta_N{}^-/\eta_N{}^+$ と記す）を示す．非混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では $\eta_N{}^-/\eta_N{}^+$ は0.405～0.956，平均値 0.689，変動係数 0.276，Taft 1952 EW 波では $\eta_N{}^-/\eta_N{}^+$ は 0.491～0.976，平均値 0.756，変動係数 0.197，Hachinohe 1968 EW 波では $\eta_N{}^-/\eta_N{}^+$ は0.382～0.948，平均値 0.655，変動係数 0.314となっている．このように，非混合系ではNおよび入力地震波の違いに



(a) 非混合系　　(b) 柔剛混合系

図―15　非集中層の最大累積塑性ひずみエネルギー



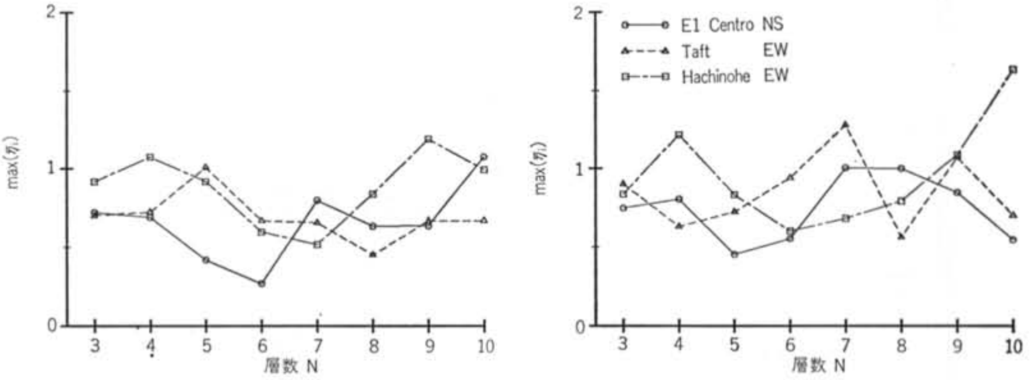
(a) 非混合系　　(b) 柔剛混合系

図―16　最上層（剛部材）の累積塑性変形倍率

より大きくばらつき，その値も小さく，η_Nは一方向に偏っている．一方，柔剛混合系では，El Centro 1940 NS波では $_s\eta_N^-/_s\eta_N^+$ は0.898～0.977，平均値0.946，変動係数0.028，Taft 1952 EW 波では $_s\eta_N^-/_s\eta_N^+$ は0.811～0.992，平均値0.954，変動係数0.059，Hachinohe 1968 EW波では$_s\eta_N^-/_s\eta_N^+$は0.938～0.992，平均値0.968，変動係数0.024となっている．このように，柔剛混合系ではkおよび入力地震波の違いに関わらず安定した性状を示し，その値も1.0に近い．すなわち，$_s\eta_N$ の一方向への偏りが非常に小さく，したがって残留変形も小さい．

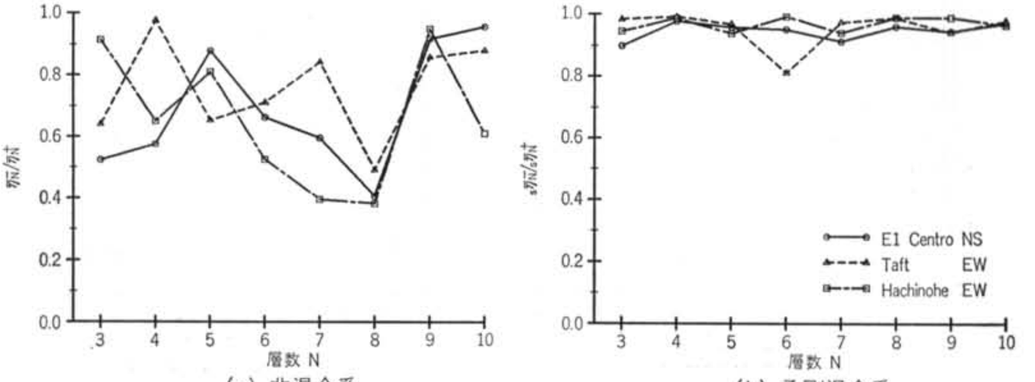
図—19に，最上層の見掛けの塑性変形倍率（平均値）$\bar{\mu}_N$ と平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_N$ の比を示す．非混合系の場合，El Centro 1940 NS 波では $\bar{\mu}_N/\bar{\eta}_N$ は0.180～0.457，平均値0.313，変動係数0.255，Taft 1952 EW 波では $\bar{\mu}_N/\bar{\eta}_N$ は0.164～0.381，平均値0.249，変動係数0.246，Hachinohe 1968 EW 波では $\bar{\mu}_N/\bar{\eta}_N$ は0.218～0.510，平均値0.336，変動係数0.326となっている．このように，非混合系ではNおよび入力地震波の違いにより大きくばらつき，その値も大きい．一方，柔剛混合系では，El Centro 1940 NS波では $_s\bar{\mu}_N/_s\bar{\eta}_N$ は0.122～0.177，平均値0.143，変動係数0.144，Taft 1952 EW波では $_s\bar{\mu}_N/_s\bar{\eta}_N$ は0.080～0.181，平均値0.123，変動係数0.244，Hachinohe 1968 EW 波では $_s\bar{\mu}_N/_s\bar{\eta}_N$ は0.110～0.205，平均値0.154，変動係数0.199となっている．このように，柔剛混合系ではkおよび入力地震波の違いに関わらず安定した性状を示し，その値も0.2以下と非常に小さい．

図—20に，集中層の最大変形を層の降伏変形で除した量 $\delta_{Nmax}/\delta_{yN}$ を示す．ただし，柔剛混合系は剛部材の降伏変形で除した量 $\delta_{Nmax}/_s\delta_{yN}$ である．非混合系の場合，El Centro 1940 NS波では $\delta_{Nmax}/\delta_{yN}$ は29.34～89.40，平均値52.13，変動係数0.3288，Taft 1952 EW波では $\delta_{Nmax}/\delta_{yN}$ は25.52～86.60，平均値40.95，変動係数0.4526，Hachinohe 1968 EW 波では $\delta_{Nmax}/\delta_{yN}$ は22.12～97.43，平均値54.48，変動係数0.4862となっている．このように，非混合系ではNおよび入力地震波の違いにより大きくばらつき，その値も非常に大きい．一方，柔剛混合系ではEl Centro 1940 NS 波では $\delta_{Nmax}/$



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

図—17 非集中層の最大累積塑性変形倍率



(a) 非混合系　(b) 柔剛混合系

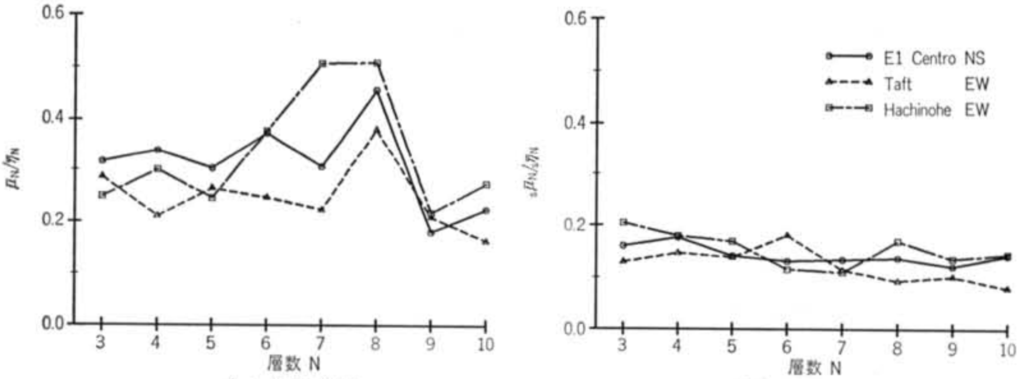
図—18 最上層（剛部材）の η_N の偏り

${}_s\delta_{yN}$ は13.31〜18.90，平均値16.34，変動係数0.0701，Taft 1952 EW 波では $\delta_{Nmax}/{}_s\delta_{yN}$ は10.45〜28.71，平均値15.62，変動係数0.3642，Hachinohe 1968 EW 波では $\delta_{Nmax}/{}_s\delta_{yN}$ は10.45〜15.95，平均値13.32，変動係数0.1472となっている．このように，柔剛混合系では k および入力地震波の違いによるばらつきはかなり小さく，その平均値も非混合系の1/2.62〜1/4.09と非常に小さい．

§4. まとめ

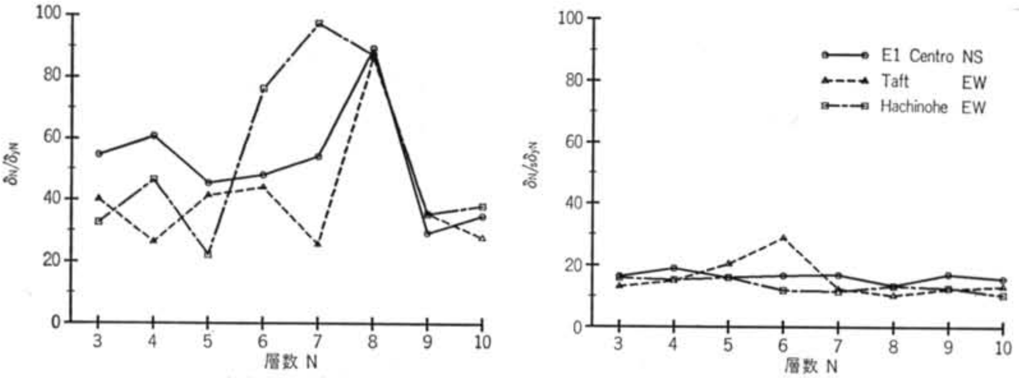
多層建築物において，ある特定の層の強度を相対的に小さくし，その層を柔剛混合構造とした『特定層エネルギー集中型柔剛混合構造』，およびエネルギー集中層を最上層に設定した『最上層エネルギー集中型柔剛混合構造』を対象に，弾塑性応答解析により極限地震時の応答性状，特にエネルギー吸収性状について検討した．その結果，エネルギー集中層の強度を低減することにより，地震入力エネルギーの大部分をその層に集中させることができ，その層の剛部材のエネルギー吸収率は剛部材の強度のほか質量比に依存し，質量比として0.2以上確保する必要があることが分かった．また，集中層を柔剛混合構造とすることによりエネルギー応答性状の安定化が図れ，集中層の累積塑性変形倍率の一方向への偏りおよび応答変形の抑制に効果があることが分かった．

謝辞　本研究に当たり，東京大学教授秋山宏博士に懇切な御指導を頂いた．ここに，深甚なる謝意を表します．



(a) 非混合系　　(b) 柔剛混合系

図—19　最上層（剛部材）の $\bar{\mu}_N/\bar{\eta}_N$



(a) 非混合系　　(b) 柔剛混合系

図—20　最上層の最大層間変形

<参考文献>

1) 秋山 宏："エネルギー集中型多層骨組における D_s 値" 日本建築学会論文報告集 第341号（1984年）

2) 秋山 宏："建築物の耐震極限設計" 東京大学出版会（1987年）

3) 秋山 宏，宇野寿郎，矢部喜堂，真瀬伸治，平間敏彦，寺田岳彦，加藤征宏，大竹章夫："第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造の基本特性" 日本建築学会構造系論文報告集 第402号（1989年8月）pp. 79〜87

4) 矢部喜堂，真瀬伸治，平間敏彦，寺田岳彦，大竹章夫："第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造の弾塑性振動実験" 日本建築学会構造系論文報告集 第412号（1990年6月）pp. 53〜65

5) 矢部喜堂，真瀬伸治，塚越英夫，平間敏彦，大竹章夫："第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨架構の仮動的実験" 日本建築学会構造系論文報告集 第413号（1990年7月）pp. 41〜52

6) 兼光知巳，矢部喜堂，真瀬伸治："地震力を受けるせん断型多層骨組みの損傷分布に関する研究" 構造工学論文集 Vol. 37B（1991年3月）

7) 宇野寿郎，矢部喜堂，伊倉 清，真瀬伸治，平間敏彦，寺田岳彦，加藤征宏，大竹章夫："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（その1）〜（その8）" 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和62年10月）

8) 宇野寿郎，矢部喜堂，真瀬伸治，塚越英夫，平間敏彦，寺田岳彦，加藤征宏，大竹章夫："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（その9）〜（その14）" 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和63年10月）

9) 宇野寿郎，矢部喜堂，真瀬伸治，平間敏彦，寺田岳彦，兼光知巳，加藤征宏，大竹章夫："第1層エネルギー集中型鉄骨系剛混合構法に関する研究（その15）〜（その17）" 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年10月）

10) 宇野寿郎，久光脩文："清水建設㈱技術研究所UCR実験棟" ビルディングレター（1989年1月）pp. 24〜33

11) 矢部喜堂，宇野寿郎，真瀬伸治，平間敏彦，寺田岳彦，兼光知巳，加藤征宏，大竹章夫："特定層エネルギー集中型鉄骨柔剛混合構法に関する研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年10月）

12) 真瀬伸治，宇野寿郎，矢部喜堂，平間敏彦，寺田岳彦，兼光知巳，加藤征宏，大竹章夫："最上層エネルギー集中型鉄骨柔剛混合構法に関する研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年10月）

13) 秋山 宏："最上層損傷集中型多層骨組の D_s 値" 日本建築学会構造系論文報告集 第362号（1986年）pp. 37〜44