

(15) 多層構造物の弾塑性振動時の変形集中性状について

— Bi-linear型復元力特性を持つせん断型4層構造物による検討 —

曾田五月也*

1. 序

1981年6月に建築基準法施工令の改定が行なわれた。その中で耐震設計の手順は2段階に分類され、1次設計が従来の震度法に基く許容応力度設計に順じて行なわれるのに対して2次設計では保有耐力という概念を導入して塑性変形を許容する旨を明確にした点に大きな特徴があるといえよう。2次設計迄実施する場合に、今回の改定では重要度係数の導入が除外されたため構造物の用途別あるいは構造物の部分別に許容塑性変形量を区分する事は行なわず、材料・構法に応じて構造物各層ではほぼ均等な塑性率分布になる事を目指しているものと考えられるが、実際の構造物では種々の要因によってその様な理想的な塑性率分布はなかなか得難い事も十分に予想される所である。

多層構造物の弾性時の振動を考えた場合に上下階で剛性の変化が大きいと剛性の低い層に変形が集中する事が予想される。改定建築基準法施工令でもこの点を考慮して剛性率を定義するとともに、剛性率の小さい層への変形の集中を防止するために剛性率の値が0.6より小さい層ではその値に応じて降伏耐力を割増しするなり、塑性変形能力を増加させるなりする事が必要である事を規定しているのであるが、本来「剛性」とは構造物の弾性時の特性を表すものであり、構造物の塑性変形を許容しなおかつその特定層への集中を防ぐという目的のためには、構造物の塑性時の特性を表す量による規定も必要であると筆者は考えている。

多層構造物の弾塑性振動に関する研究は既に多方面において行なわれているが、特定層への変形の集中を主に扱った研究は少ない様である。加藤・秋山らが最近行った研究^{1,2}によれば、

- i) 損傷分布は主として降伏せん断力分布に支配され、1つの損傷分布を実現するための最適な降伏せん断力係数分布は骨組の剛性分布には殆んど影響されない
- ii) 1つの層の降伏レベルが各層で均等に損傷が生じる様に設計された原系から低下すると損傷がその層に集中し他の層では損傷がほぼ一様に低下するが、1つの層の降伏レベルが高まっても他の層に損傷が集中する様な事は無い

等々とあるが、これらの指摘は弾塑性振動する構造物に対して適性な耐震性能を与えるためには構造物の弾性特性よりも塑性特性の与え方がより重要である事を裏付けるものと考えられる。

加藤らが適性の規範として累積塑性変形量が各層で一樣になる事を採用しといるのに対して本稿では各層での塑性率の一樣化を規範としてBi-linear型の復元力特性を持つせん断型4層構造物モデルによる検討を行うが、現象が特定の地震波の影響を受ける事を避ける為に、外乱を不規則過程として扱う確率論的な振動解析の手法を用いる事とした。また、加藤・秋山らは主として最適な耐力分布を持つ原系よりも耐力の減少する層のある構造物における損傷の集中を扱っているが、本稿では逆に、原系よりも耐力の増加した層のある構造物における損傷集中を主として扱う事にする。これは、良心的な設計においては各層の耐力を規定された下限の耐力よりも大きめに取る事が考えられ、その事がかえって耐震性能上裏目に出る事を懸念するためである。

* 千葉大学工学部

2. 解析モデル

図 - 1 の Bi-linear 型の復元力特性を持つ 4 層のせん断型モデルを用いる。図 - 2 に示す様に 4 層の上部構造に対して地盤特性を代表する質点を加える事によって単独なピークを持つ non-white な外乱が基礎に作用する状態を表す事にする。この時に上部構造と地盤との相互作用は無視して、地盤の質量を上部構造の総質量に比して非常に大きな値とする。構造および外乱の特性は全て無次元化しており、 $\bar{m}$ が上部構造総質量に対する各質点の質量の割合、 $\bar{k}_i$, $\bar{P}_{yi}$, $\bar{X}_{yi}$ は各々最適モデル（後述）の第 1 層の剛性、降伏耐力、降伏点変位を基本量とした無次元剛性、無次元降伏耐力、無次元降伏変位である。4 層程度の RC 骨組構造物ではその 1 次固有円振動数が外乱の卓越円振動数よりもやや大きいと考えて、最適モデルの 1 次固有円振動数約 0.7 に対して外乱の卓越円振動数を 0.5 とした。基盤に作用する非定常 white noise の時間軸上の強度分布は図 - 3 に示す通りで、横軸の時間 2π は上部構造の総質量と 1 層の剛性とでなる 1 自由度系の固有周期に相当する。また、外乱の non-white な特性が比較的顕著であると想定して、田治見の方法³によって定義したスペクトル密度関数のピークの尖度を定義するパラメータ hg は 0.2 とした。

最適モデルとは、設定した外乱の作用に対して各層の塑性率をほぼ一様にする動力学特性の分布を持つモデルをさすが、ここでは弾性剛性が全て 1.0 で降伏後の剛性の弾性剛性に対する比 r が 0.3 の場合に各層の塑性率をほぼ 2.0 に一様化する耐力の分布を持つモデルとする。

3. 解析の手法および最適モデルの応答

外乱の不規則性を考慮した確率論的手法により構造物の応答を統計的に評価するために各種の近似理論が提案されているが、その中で自由度の高い振動系の解析を行うためには統計的等価線形化法が理論の平易さ及び演算時間の短かさ等で利点の多い有効な手法であると考えられる。但し、等価線形化法の適用に際しては応答変位が比較的安定した履歴ループを描く事が前提となるために非線形性の強い（損傷の大きい）振動の解析に対してはその精度の低下する事が知られている。本論で採用した Bi-linear 型復元力特性を持つ系では、降伏後の剛性が 0.3 程度より大であればその精度は非常に良好であるが 0.1 以下になるとその精度が低下する。降伏後の剛性の低い場合においても履歴中心軸の移動を考慮する等の修正を加える事によってその精度を向上させる事は可能であるが計算が複雑になって演算時間の短縮という最大の目的を失う恐れもあるため、本稿では降伏後の剛性が 0.3 のモデルに対しては修正を加える事のない等価線形化法を適用し、0.3 以下（0.0 および 0.1）のモデルに対

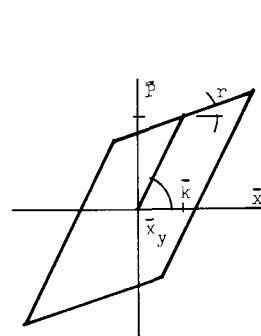


Fig. 1
Bi-linear Restoring
Force Characteristic

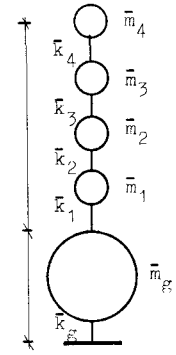


Fig. 2
Analytical Model

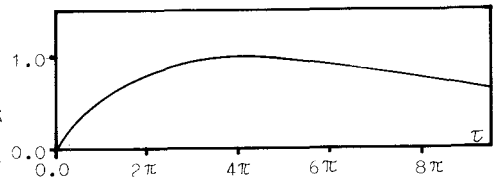


Fig. 3 Intensity Distribution

Tab. 1 Parameters of Optimum Model

	$\bar{k}$	$\bar{m}$	r	h	$\bar{P}$
4F	1.0	0.25	0.3	0.05	0.30
3F	1.0	0.25	0.3	0.05	0.58
2F	1.0	0.25	0.3	0.05	0.82
1F	1.0	0.25	0.3	0.05	1.00
GR	2604.2	10000.	-	0.20	-

してはデジタルシミュレーション法を用いる事とした。等価線形化法の理論については文献4,5などを参照していただきたい。シミュレーションに用いたサンプル波は文献6に記されている方法による50波とした。

最適モデルとは文献5と同様な方法によって各層の剛性が一定であるとの条件下で求めた適正な耐力分布を持つモデルである。最適モデルおよび同モデルで降伏後の剛性のみ0.1および0.0に変更させたモデルの各層の塑性率の標準偏差の時刻歴を図-4に示す。実線、破線、黒丸は何れもシミュレーション解である。白丸印が $r = 0.3$ の場合の等価線形化法による解を表しており実線のシミュレーション解と良好に一致している事が分かる。図-4に示した応答では塑性率の標準偏差の最大値が0.7前後であるので塑性率の最大値を近似的に「3 σ 法」で2.0程度と推定出来る。この程度の塑性率の応答では降伏後の剛性の大小による応答変位の変化は余り大きくないが、降伏後剛性の小さい程履歴中心軸の移動が大きく⁴、それが入力の変位過程において残留変形として残るために変位の減少が少ない事が認められる。この現象は図-5に示す様に入力の強度を高めて塑性変形量が増加した場合に更に明確に認める事が出来る。図-5で $r = 0.1, 0.3$ の場合には依然として各層の塑性率の一樣性が良好に保持されているのに対して $r = 0.0$ の場合には一樣性が失われている。図-4, 5より弾塑性構造物の損傷分布に対しては構造物の塑性特性の影響の大きい事が明らかであろう。図-4, 5の応答の最大値を次ページの表-2に示す。なお、表-2中のSは基盤に作用する非定常white noiseのスペクトル密度の最大値である。

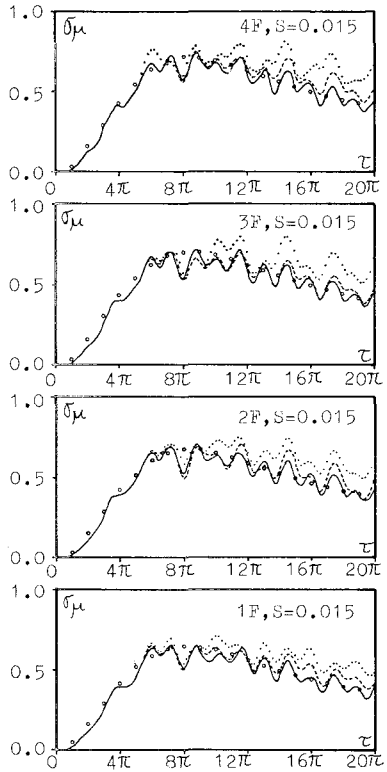


Fig. 4 Non-stationary RMS Ductility Factor

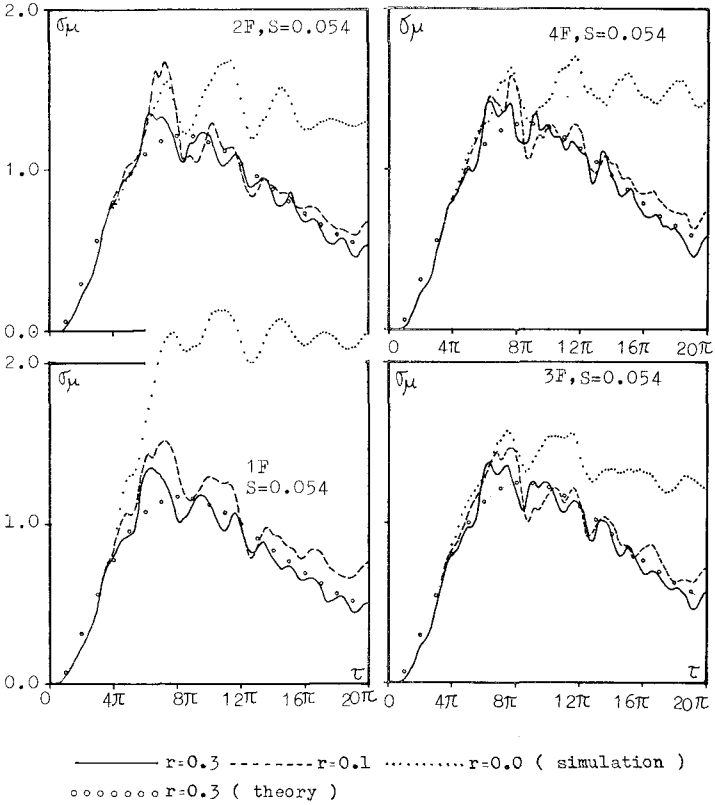


Fig.5 Non-stationary RMS ductility Factor

4. 弾性剛性の分布形状が塑性変形の集中現象に及ぼす影響について

各層の耐力分布を最適モデルの耐力分布と同一に保つ条件下、即ち剛性と耐力とが比例するとの条件下で弾性剛性の分布を変化させた場合の各層の最大塑性率の標準偏差を図 - 6 に示す。剛性の変化は表-3に示す通り 100 % 増加する場合のみを考えている。表 - 3 で右肩に○印のついた数値が最適モデルより変化した数値である。また図 - 6 中の○, ×, △, □印は各々 1 F ~ 4 F の応答を表し、黒塗り記号は最適モデルより変化した層である事を意味する。

図 - 6 には降伏後の剛性 r が 1.0 (弾性), 0.3, 0.0 の 3つの場合を示してあるが $r = 0.0$ の場合においても特定層への塑性変形の集中の度合はそれ程大きくない。また、一般的には各層の塑性率が最適モデルの塑性率よりも小さくなっている。この事より、加藤らが指摘した様に、耐力の分布さえ適性な分布が与えられれば、弾性特性である剛性分布が塑性変形の集中に及ぼす影響は比較的小さいものと考えられる。

5. 降伏耐力の分布形状が塑性変形の集中性状に及ぼす影響について。

各層の弾性剛性は最適モデルと同一で全て 1.0 とし、降伏耐力と降伏点変位は比例するものとして降伏耐力の分布の変化と塑性変形集中との関係について検討したものが次ページの図 - 7 である。表-4に耐力分布の変化表を示す。

Tab. 4 Variation of the Yielding Strength Distribution

		1	2	3	4	5	6
A	Opt.	4F	0.30				
		3F	0.58				
		2F	0.82				
		1F	1.00				
B	-20%	4F	0.30	0.30	0.24*		
		3F	0.58	0.58	0.45*	0.58	
		2F	0.82	0.66*	0.82	0.82	
		1F	0.80*	1.00	1.00	1.00	
F	+30%	4F	0.30	0.30	0.39*		
		3F	0.58	0.58	0.75*	0.58	0.75*
		2F	0.82	1.07*	0.82	0.82	
		1F	1.30*	1.00	1.00	1.00	
G	+30%	4F	0.30	0.30	0.39*	0.39*	0.39*
		3F	0.58	0.75*	0.58	0.75*	0.58
		2F	1.07*	0.82	0.82	1.07*	0.82
		1F	1.30*	1.30*	1.30*	1.00	1.00
H	+30%	4F	0.30	0.39*	0.39*	0.39*	
		3F	0.75*	0.58	0.75*	0.75*	
		2F	1.07*	1.07*	0.82	1.07*	
		1F	1.30*	1.30*	1.30*	1.00	

Tab. 2 RMS Value of the Ductility Factor

		Spectral Density	
		S=0.015	S=0.054
r=0.0	σ_μ	4F	0.806
		3F	0.798
		2F	0.750
		1F	0.713
r=0.1	σ_μ	4F	0.757
		3F	0.704
		2F	0.705
		1F	0.651
r=0.3	σ_μ	4F	0.738
		3F	0.707
		2F	0.689
		1F	0.649

Tab. 3 Variation of the Initial Stiffness Distribution

		1	2	3	4	5	6
A	Opt.	4F	1.0				
		3F	1.0				
		2F	1.0				
		1F	1.0				
B	+100%	4F	2.0*	1.0	1.0	1.0	
		3F	1.0	2.0*	1.0	1.0	
		2F	1.0	1.0	2.0*	1.0	
		1F	1.0	1.0	1.0	2.0*	
C	-100%	4F	2.0*	2.0*	2.0*	1.0	1.0
		3F	2.0*	1.0	1.0	2.0*	2.0*
		2F	1.0	2.0*	1.0	2.0*	1.0
		1F	1.0	1.0	2.0*	1.0	2.0*
D	+100%	4F	2.0*	2.0*	2.0*	1.0	
		3F	2.0*	2.0*	1.0	2.0*	
		2F	2.0*	1.0	2.0*	2.0*	
		1F	1.0	2.0*	2.0*	2.0*	

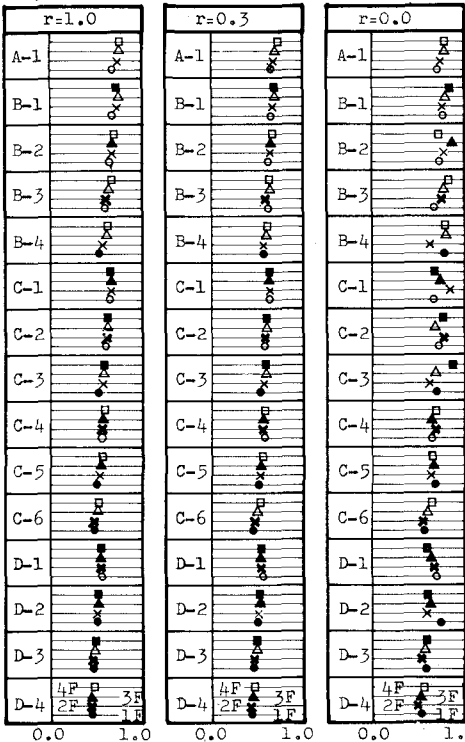


Fig. 6 Relation between the Stiffness Distribution and the Concentration of Plastic Deformation

図-7の3つの図が各々 $r = 1.0$ (弾性), 0.3 , 0.0 の場合の応答を表す。先の剛性分布を変化させた場合に比べると特定層への塑性変形の集中現象ははるかに顕著である。最適モデルより耐力を低下させた層に塑性変形が集中する事は既に認められている事実であるが r の小さい程その度合が高まる。また、 $r = 0.0$ の場合には最適モデルよりも耐力の高い層が存在する場合にもその層に隣接した層においてかなり大きな塑性変形の集中が生じる事に対しても注意が必要である。先の表-2の最適モデルの応答では入力強度を高めて塑性率を4~5程にしても $r = 0.3$, 0.1 の場合には各層で塑性率が一様化されていたが、これらのモデルで1層~4層の耐力を任意に30%増加させると表-5に示す様に、特に $r = 0.1$ の場合には特定層への塑性変形の集中が大きくなる。この時に、相対的に耐力の低い層が上層である程集中の度合は高くなる傾向も認められる。 $r = 0.3$ の場合には何れの応答例においても極端な塑性変形の集中はなく、塑性変形の分布は弾性応答より求めた分布と同様な傾向を示しているため弾性応答に基づく類推も可能であると思われる。これに対し r が 0.1 より小さい場合には極端な塑性変形の集中がみられ、これを弾性応答と単純なエネルギー等価理論等とによって類推するのはなかなか難しいと思われる。

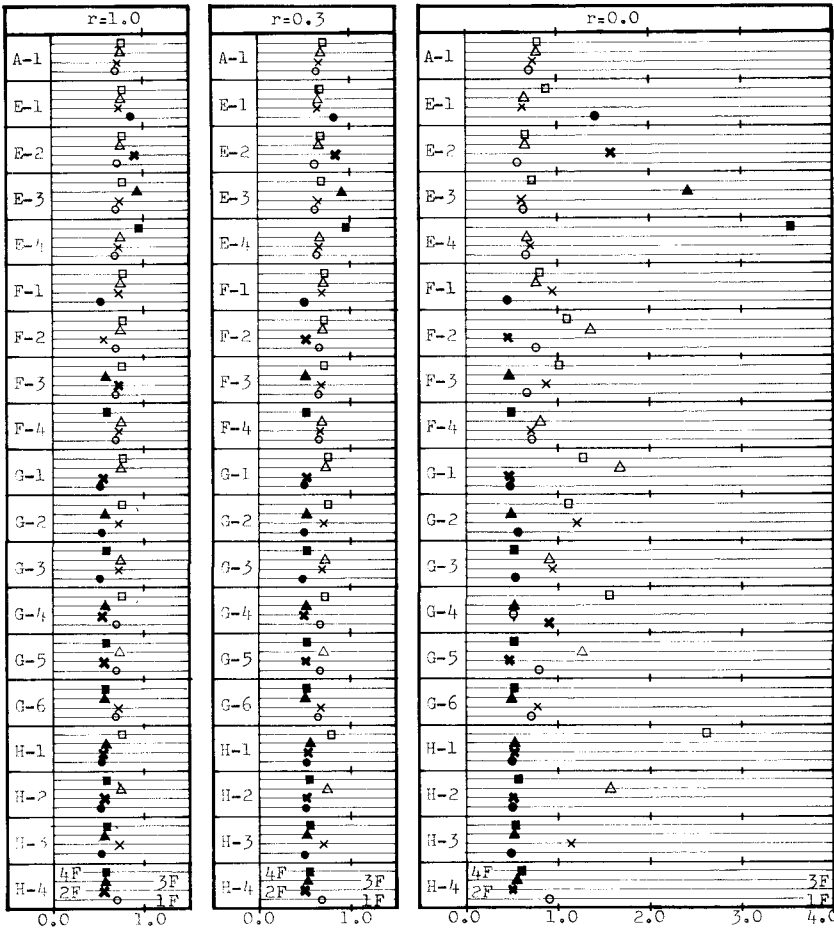


Fig. 7 Relation between the Yielding Strength Distribution and the Concentration of Plastic Deformation

Tab. 5
Effect of the Yielding
Strength Distribution
($S=0.054$)

		$\bar{\sigma}_p$	
		$r=0.1$	$r=0.3$
A-1	4F	1.594	1.283
	3F	1.468	1.255
	2F	1.674	1.214
	1F	1.521	1.170
F-1	4F	1.672	1.368
	3F	1.749	1.332
	2F	1.951	1.278
	1F	0.750	0.837
F-2	4F	2.049	1.345
	3F	1.999	1.311
	2F	0.936	0.862
	1F	1.698	1.219
F-3	4F	2.371	1.306
	3F	0.837	0.870
	2F	1.128	1.243
	1F	1.781	1.199
F-4	4F	0.788	0.873
	3F	3.192	1.261
	2F	2.428	1.223
	1F	1.687	1.179

6. 降伏後の剛性の分布形状が塑性変形の集中性状に及ぼす影響について

降伏後剛性が0.1のモデルについて、弾性剛性と降伏耐力とは最適モデルと同一としたまま降伏後の剛性のみ適宜 $r=0.0, 0.3$ に変化させた場合の各層への塑性変形集中性状について検討する。降伏後の剛性を変化させたモデルの一覧を表-6に示し図-8に計算結果を示す。任意層の降伏後の剛性を最適モデルより増加させた場合には特定層への塑性変形の集中は小さいが、逆に低下させた場合、更に増加させた層と低下させた層とが混在隣接する場合には大きな塑性変形集中を招く可能性のある事が分かる。表-7は入力強度を高めた場合に1層あるいは4層の降伏後の剛性を0.1から0.0に変化させた場合の応答例を示したものであるが、降伏後剛性の僅かな低下によって非常に大きな塑性変形の集中現象の起こる事を示している。なお、相対的に降伏後剛性の低い層が上層である程その層への塑性変形集中は大きくなる傾向も認めることが出来る。

Tab. 6 Variation of the Yielding Stiffness Distribution

		1	2	3	4	5	6
A	Opt.	4F	0.1				
		3F	0.1				
		2F	0.1				
		1F	0.1				
I	0.1 0.3	4F	0.3*	0.1	0.1		
		3F	0.1	0.3*	0.1	0.1	
		2F	0.1	0.1	0.3*	0.1	
		1F	0.1	0.1	0.1	0.3*	
J	0.1 0.0	4F	0.0*	0.1	0.1	0.1	
		3F	0.1	0.0*	0.1	0.1	
		2F	0.1	0.1	0.0*	0.1	
		1F	0.1	0.1	0.1	0.0*	
K	0.1 0.3	4F	0.3*	0.3*	0.3*	0.1	0.1
		3F	0.3*	0.1	0.1	0.3*	0.1
		2F	0.1	0.3*	0.1	0.3*	0.1
		1F	0.1	0.1	0.3*	0.1	0.3*
L	0.1 0.0	4F	0.0*	0.0*	0.0*	0.1	0.1
		3F	0.0*	0.1	0.1	0.0*	0.1
		2F	0.1	0.0*	0.1	0.0*	0.0*
		1F	0.1	0.1	0.0*	0.1	0.0*
M	0.1 0.0 0.3	4F	0.3*	0.0*	0.0*	0.1	0.1
		3F	0.3*	0.1	0.1	0.0*	0.1
		2F	0.1	0.3*	0.1	0.3*	0.1
		1F	0.1	0.1	0.3*	0.1	0.3*
N	0.1 0.0 0.3	4F	0.3*	0.3*	0.3*	0.1	0.1
		3F	0.0*	0.1	0.1	0.3*	0.1
		2F	0.1	0.0*	0.1	0.0*	0.3*
		1F	0.1	0.1	0.0*	0.1	0.0*
O	0.1 0.3	4F	0.1	0.3*	0.3*	0.3*	
		3F	0.3*	0.1	0.3*	0.3*	
		2F	0.3*	0.3*	0.1	0.3*	
		1F	0.3*	0.3*	0.3*	0.1	
P	0.1 0.3	4F	0.1	0.0*	0.0*	0.0*	
		3F	0.0*	0.1	0.0*	0.0*	
		2F	0.0*	0.0*	0.1	0.0*	
		1F	0.0*	0.0*	0.0*	0.1	

Tab. 7 Effect of the Yielding Stiffness Distribution

		Opt.*	$r_1=0.0$	$r_4=0.0$
σ_μ	4F	1.594	1.382	5.828
	3F	1.468	1.432	1.366
	2F	1.674	1.481	1.642
	1F	1.521	2.945	1.519

* $r_1 \sim r_4 = 0.1, S = 0.054$

Tab. 8 Effect of the Yielding Strength Distribution

			S=0.015		S=0.054	
			*	**	*	**
r=0.0	σ_μ	4F	0.806	0.366	1.707	0.476
		3F	0.798	1.344	1.509	2.559
		2F	0.750	0.587	1.682	0.797
		1F	0.713	0.839	2.327	3.074
r=0.1	σ_μ	4F	0.757	0.354	1.594	0.486
		3F	0.704	0.963	1.468	1.834
		2F	0.705	0.564	1.674	0.937
		1F	0.651	0.739	1.521	1.843
r=0.3	σ_μ	4F	0.738	0.368	1.423	0.528
		3F	0.707	0.840	1.388	1.468
		2F	0.689	0.585	1.343	0.945
		1F	0.649	0.700	1.347	1.417

* $\bar{P}_y = \{1.0, 0.82, 0.58, 0.30\}$

** $\bar{P}_y = \{1.0, 1.0, 0.58, 0.58\}$

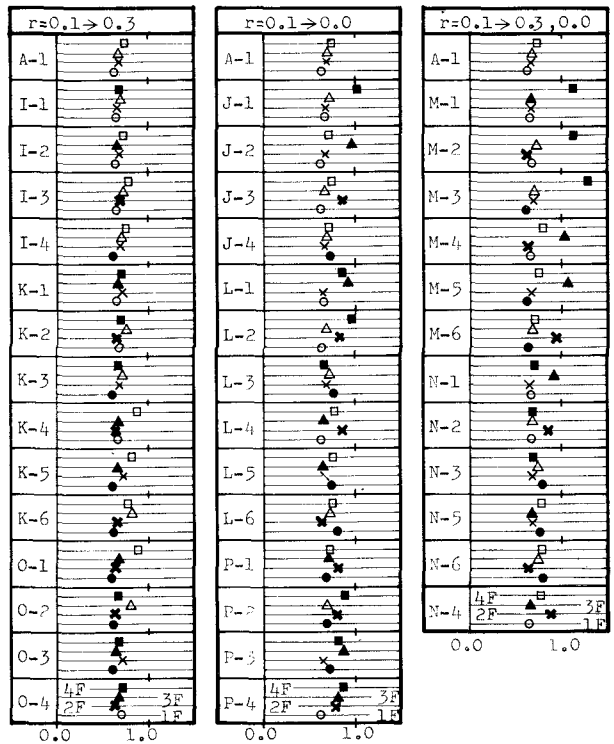


Fig. 8 Relation between the Yielding Stiffness Distribution and the Concentration of Plastic Deformation

7. まとめ

前章迄では多層構造物各層の弾性剛性，降伏後剛性，降伏耐力等々の動力学特性が各層毎に任意に決められるとして計算を行ったが，実際の4層程度のRC骨組では柱の断面寸法は全層同一であっても配筋は下2層と上2層とに分けて変える事も考えられる訳でその様なモデルの応答例を前ページの表-8に示す。適性な耐力分布が下層より順に{1.0, 0.82, 0.58, 0.30}であるのに対して2層と4層との耐力を1層，3層の耐力に等しい様に増加させて{1.0, 1.0, 0.58, 0.58}の分布とした。2種類の入力強度と3種類の降伏後剛性の組み合わせに対して計算したが，降伏後の剛性が低い場合には第3層において大きな塑性変形の集中がみられる。以上より

- i) 多層構造物の弾塑性振動時の塑性変形の集中現象は構造物の弾性特性である剛性分布よりも塑性特性である降伏耐力，降伏後剛性等の分布の影響を強く受ける。
- ii) 想定した外乱に対して各層の塑性率をほぼ一樣にする耐力の分布を持つ最適モデルよりも耐力の低い層を持つ構造物ではその層に塑性変形の集中を招くが，降伏後の剛性が低い程その度合は顕著である。降伏後の剛性が0.3程度以上あれば集中の度合は低く弾性応答に基づいて容易に予測し得るものと考ええる。
- iii) 最適モデルよりも耐力の高い層を持つ構造物においてもその層に隣接した層において無視出来ぬ程度の塑性変形の集中現象が生じ得る。
- iv) 最適モデルよりも降伏後の剛性が高い層のある構造物では塑性変形の集中は余り大きくないが，低い層のある構造物では無視し得ぬ程度の集中現象が生じ得る。

等々の点を指摘する事が出来るが，これらの事より弾塑性振動時の塑性変形の集中を防ぐためには，1981年6月に改定された改定建築基準法施工令に記された剛性分布に対する制約のみでは不十分であり降伏耐力および降伏後の剛性などの塑性動力学特性に対する制約も必要であると考ええる。具体的には解析に用いる復元力特性の降伏耐力，降伏後剛性，弾性剛性等々の定義を明確にしその復元力特性に応じて塑性変形量の許容値（あるいはDs値の類）を規定する事や，偏心，剛性率に類する定義を耐力の分布に対しても採用しそれらに対する規定を与える事等が考えられる。

本稿ではある程度RC骨組を想定しながらBi-linear型の復元力特性を用いているという多小の矛盾があるが，実際のRC骨組では剛性の低下も伴うために上記諸現象は更に顕著になるものと思われる。剛性低下型のモデルに関しては文献7が参考になろう。今回は多層構造物の弾塑性振動時の塑性変形集中性状に及ぼす諸塑性動力学特性の影響に関する定性的な評価のみに止まったが更に定量的な評価を行ない耐震設計法への応用についても研究を進める予定でいる。

8. 謝辞

本研究を行うに当たって，千葉大学工学部の尾崎昌凡教授より多大な御助言を賜りました事に対して感謝致します。

参考文献 1.加藤・秋山，建論報第207，S53年8月，pp.61-67； 2.秋山・大井，建論報第303号，S56年5月，pp.31-39；

3.田治見宏，東大生産研報告，第8巻4号，1959年3月； 4.曾田・谷，建論報第283，S54年9月，pp.68-75； 5.曾田・谷，建論報第288号，

S55年2月，pp.97-105； 6.星谷「確率論手法による振動の解析」，鹿島出版会，1974，p.51； 7.尾崎昌凡，建築技術，1982年5月（予定）

CONCENTRATION OF PLASTIC DEFORMATION ON A SPECIAL STORY OF THE
MULTI-STORY SHEAR-TYPE STRUCTURES WITH BILINEAR HYSTERESIS

by Satsuya Soda*

Earthquake resistant design code of Japan, which is in force from 1st of Jan. 1981, is characterized by the fact that it allows some plastic deformation in the structure when it is subjected to strong ground motion, on condition that the ultimate safety of it is assured by some method.

For frame structures, if the members will not show brittle fracture, calculation of the ultimate strength of the structure is not necessary required. In that case, it is assumed that the stage of the development of plastic deformation in each story is approximately the same and, claiming to realize this assumption, restriction to the stiffness distribution is imposed in the code. However, author thinks that only the restriction to the stiffness distribution, which characterize the elastic behaviour of the structure, is not sufficient but restriction to such yielding strength distribution and yielding stiffness distribution, which characterize the elastic-plastic behaviours of the structure, is necessary.

Based on such probabilistic method of vibration analysis as equivalent linearization and digital simulation, the stochastic characters of concentration of the plastic deformation on a special story of structure is examined and following results are obtained;

- 1) Amount of the concentration of the plastic deformation is mainly affected by yielding strength distribution and the yielding stiffness distribution. Effect of the initial stiffness distribution is comparatively small.
- 2) Not only the decrease of the yielding strength of some story causes the concentration of the plastic deformation on that story, but also the increase of the yielding strength of some story may cause considerable amount of concentration of plastic deformation on its neighbouring stories.
- 3) If the yielding stiffness is small, decrease of it also causes a concentration of the plastic deformation.

In conclusion, in order to make good use of energy absorption due to the plastic deformation in the aseismic design of the structure, it is necessary to make it clear the definition of the yielding strength, yielding stiffness, initial stiffness, etc. Based on these values, allowable stage of the development plastic deformation should be decided to assure the stability of the vibration of the structure.

* Faculty of Engineering, Chiba University