地震時における柔剛混合構造せん断型多層骨組の損傷集中特性

DAMAGE CONCENTRATION CHARACTERISTICS OF FLEXIBLE-STIFF MIXED SHEAR-TYPE MULTI-STORY FRAMES UNDER EARTHQUAKES

高橋 誠*, 秋山 宏**

Makoto TAKAHASHI and Hiroshi AKIYAMA

The energy input to the structure exerted by an earthquake is the most important quantity as a loading effect against the structure. The total energy input of a structure by an earthquake is the same amount as the energy absorbed by the structure. And the total energy input is a very stable amount which is mainly influenced by the total mass and the fundamental natural period of the structure. The total damage of structures under earthquakes can be clearly described by the energy spectrum governed by the total mass and fundamental natural period of the structure, irrespective of the structural behaviors being elastic or inelastic. On the other hand, the damage distribution of multi-story frames is very sensitive to the strength distribution of structures. The flexible-stiff mixed structure, which is composed of flexible elements with low rigidity and large elastic deformation capacity, and stiff elements with high rigidity and high energy absorption capacity, can be considered to be a preferable structural form in efficiency of energy absorption. The relationship between the maximum deformation and cumulative inelastic deformation of the flexible-stiff multi-story shear type frames were obtained already. In this paper, the damage concentration characteristics of flexible-stiff mixed multi-story shear type frames are made clear. The most important parameter, which governs the damage concentration characteristics, is the shear stress ratio between the flexible elements and stiff elements.

keywords : energy spectrum, damage distribution, multi-story frames, flexible-stiff mixed structure, damage concentration characteristics, shear stress ratio
エネルギースペクトル, 損傷分布, 多層骨組, 柔剛混合構造, 損傷集中特性, せん断力比

1. 序

地震に対する建物の抵抗力は端的に地震エネルギーの吸収能力として捉えることができる。従来の耐震設計は、積載荷重を含む建物の重量を支える構造骨組に、地震エネルギー吸収能力を賦与する形で行われてきた。建物の倒壊に関わるような強震時においては、建物重量を支える構造骨組それ自体が塑性化することによるエネルギー吸収に、地震に対する抵抗力を期待していた。この設計手法は、強震時においては骨組が吸収するエネルギーに応じた損傷を骨組自体が受けることを許容し、それによって建物の倒壊と云った人命に関わるような事態の発生を回避しようとする理念に基づいた方法であると言える。

このような耐震設計手法では、建物に要求される耐震性能に対して、以下のような問題点が挙げられる。

- ・主要構造骨組が塑性化する為、その修復には技術的、経済的に困難を伴う場合がある。
- ・強度を上げることで塑性化を軽減する事が可能となるが、強度を高めることは、剛性の増大につながり、加速度応答が増し、結果として得られる利点が少ないことがある。
- ・大きく塑性化する部材ないし層と、殆どあるいは全く塑性化しない部材ないし層との見極めが困難な為、多くの構造部材

に相応のエネルギー吸収能力を持たせる必要がある。それにより、建物全体としてのエネルギー吸収能力は大きなものとなることを見込めるが、その大きなエネルギー吸収能力が有効に発揮されないまま、一部の部材ないし一部の層のエネルギー吸収能力がその限界に達することで、建物の耐震性が支配されることが多くある。

これらの問題点は、主に建物重量を支持し小さな水平剛性を有し地震時にも塑性化しない構造要素（柔要素）と、建物重量を支える役割を担わず柔要素と比べて大きな水平剛性を有し地震時には弾塑性挙動をし地震入力エネルギーを吸収する構造要素（剛要素あるいはエネルギー吸収要素）とで骨組を構成することによって解決することが可能となる。このような構造形式は柔剛混合構造と呼ばれている^{1),2),3)}。近年急速に発達した構造形式として免震構造がある。免震構造における免震層は、建物重量を支える要素として積層ゴムアイソレータ（柔要素に相当）を用い、地震エネルギーを吸収する要素（剛要素）として鉛ダンパー、スチール弾塑性ダンパー等を用いる柔剛混合構造の一形態であると言える。

柔剛混合構造は地震時においては水平剛性の小さな柔要素の弾性挙動により、層としての復元力特性に原点への指向性が生じ、最大変形の進行が抑制され、また地震終了時の残留変形も低減さ

* 東電設計㈱技術開発本部土木技術部 博士(工学)

** 日本大学総合科学研究所 教授・工博

Civil Engineering Dept, Advanced Engineering Operation Center, Tokyo Electric Power Service Com, Ltd, Dr Eng
Prof, Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ, Dr Eng

れる^{4),5),6)}。

せん断型多層骨組の多くは様々な強度、剛性を持った部材で構成されており、広い意味ではすべて柔剛混合構造と見なすことができるが、柔剛混合構造を意図的に導入しなければその利点を引き出すことは難しい。柔剛混合構造を積極的に導入した設計を行うことにより、免震構造に対してだけでなく、一般の構造物に対しても優れた耐震性能を持たせることが可能となる。

柔剛混合構造における柔剛各要素に期待する構造的役割は次のように要約することができる。

- ・柔要素は主として建物の重量を支え、地震時において低い水平剛性の基で弾性挙動し、剛要素のエネルギー吸収効率を高める役割を担う。
- ・剛要素は初期的には高い水平剛性を確保した上で強震時には弾塑性挙動することによって、地震入力エネルギーを吸収する役割を担う。

柔剛混合構造の利点は次のように要約することができる

- ・塑性化する要素と塑性化しない要素とを明確に見極められる為、設計の自由度が増す。
- ・地震入力エネルギーの吸収効率が高まる。
- ・エネルギー吸収要素をデバイスとして骨組内の適所に組込む方式を採れば地震終了後の修復は損傷を受けたデバイスを交換することにより容易に行える。
- ・最大層間変形、残留変形が抑制される。

地震下における柔剛混合構造のエネルギー応答と最大変形応答との関係は文献(4)で明らかにされている。本論文でも文献(4)で述べられている柔剛混合構造の応答を特徴づけるパラメータに着目した解析を行う。文献(7)では本論文と同様の手法において得られた柔剛混合構造の損傷集中特性に関して一部が述べられており、また文献(8)では柔要素も塑性化するモデルに対してその損傷集中特性が述べられているが、本論では柔要素は弾性に限定して、より多くのパラメータを対象とした解析を行い、柔剛混合構造の損傷集中に関する基本特性を一般的に述べるものとする。

2. 柔剛混合構造の基本構成

柔剛混合構造の復元力特性を模式的に図1に示す。(a)図は柔要素の対するものであり、横軸 δ は水平変位、縦軸 Q_f は水平変位 δ に対応する柔要素の負担せん断力である。 k_f は柔要素のバネ定数である。(b)図は剛要素に対するものである。 Q_s は水平変位 δ に対応する剛要素の負担せん断力である。 Q_y は剛要素の降伏せん断力であり、 δ_y は Q_y に対応する剛要素の降伏変位である。 k_s は剛要素の弾性時のバネ定数である。剛要素の復元力特性は完全弾塑性型で代表している。(c)図は柔剛各要素の復元力特性を合成したものであり、正、負の最大変形が等しい場合が例示されている。縦軸 Q は柔要素と剛要素の負担せん断力の和である。 Q_y は剛要素が降伏する時の水平変位 $\delta_y = \delta_y$ に対応する柔要素負担せん断力と剛要素の負担せん断力の和であり、層としての降伏せん断力に対応する。 k_f は柔要素のバネ定数と同一である。

(c)図に示す地震応答下における水平変位 δ_m 時に着目すれば、入力されるエネルギーの一部は剛要素に塑性歪エネルギーとして

吸収されると共に、他の一部は弾性歪エネルギーとして柔要素に蓄えられる(斜線部)。エネルギーが急激に入力する場合には、一般に層間変位が大きくなり、剛要素の損傷(エネルギー吸収)も急激に増大することになるが、同時に柔要素に蓄えられる弾性歪エネルギーも増大する。この弾性歪エネルギーは、復元力特性に原点への指向性を増大させる効果をもたらし、変形の進行を抑制させると共に、正、負両方向の塑性変形量を均一化させる効果ももたらす。結果として、同一のエネルギー入力に対して最大変形が抑制され、塑性変形の片寄りが減少し、剛要素のエネルギー吸収効率が高まる効果をもたらし^{4),5)}。またこの原点指向性は、地震終了時の残留変形を減少させる効果も持つ⁶⁾。

図1 柔剛混合構造の復元力特性

鋼構造を対象とすれば、正、負の繰返し変位振幅を受ける鋼素材の終局エネルギー吸収能力は、変位振幅の大きさとの関係で評価する場合、必ずしも直線関係ではないが、大局的に図2の様に示されることが、実験的に明らかとなっている⁹⁾。

図2 エネルギー吸収能力と繰返し変位振幅との関係

鋼素材の特性は、座屈、破断等の不安定現象を除けば、鋼部材、鋼骨組に対しても基本的に備わっているものである。地震動下において、繰返し変位振幅が小さい応答の場合には部材が発揮できる終局エネルギー吸収能力は大きなものとなり、変位振幅が大きい応答の場合にはそれが小さくなることを図2は示している。

柔剛混合構造は、既述のように、柔要素の弾性挙動により変形の進行が抑制され、その結果、エネルギー吸収要素が発揮できる終局エネルギー吸収能力を大きなものとする事ができる構造形式である。柱、梁骨組を柔要素として重力に対して弾性設計し、剛要素に相当する地震エネルギー吸収機構をその骨組の適所に設けることにより、柔剛混合構造骨組を構築することが可能となる。

制震デバイスとしてスチールスリットダンパー、鋼製せん断パネル、各種アンボンドブレース、粘性ダンパー等のエネルギー吸収要素を骨組各部に組み込み、他の構造要素を弾性に留めようとする制震構造と呼ばれる構造形式も、多くの場合、柔剛混合構造として地震応答特性を述べる事ができる。

3. 解析モデル及び用いる地震動記録

柔剛混合構造せん断型多層骨組を解析対象とする。解析モデルは図3の様に表される。

図3 解析モデル

地震時における柔剛混合構造の変形応答を特徴づけるものは、次式に示す柔剛要素間の剛性比 r_k 、及び柔剛要素間の負担せん断力比 r_q である⁴⁾。

$$r_k = \frac{k_f}{k_s} \quad (1)$$

$$r_q = \frac{Q_f}{Q_s} \quad (2)$$

図1に示す平均最大変形応答 $\delta_m = (1 + \bar{\mu})\delta_y$ における負担せん断力比 r_q は、 $Q_f = (1 + \bar{\mu})k_f\delta_y$ 、及び $Q_s = k_s\delta_y$ であるから次式のように表現できる。

$$r_q = (1 + \bar{\mu})r_k \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\mu} = \frac{\mu^+ + \mu^-}{2}$ ：平均塑性変形倍率

$\mu^+ = \frac{\delta^+ - \delta_y}{\delta_y}$ ：正の荷重領域における塑性変形倍率

$\mu^- = \frac{\delta^- - \delta_y}{\delta_y}$ ：負の荷重領域における塑性変形倍率

δ^+, δ^- ：正、負の荷重領域の最大変位

剛性比 r_k は柔要素のみのバネによる固有周期 T_f （秒）と剛要

素のみのバネによる固有周期 T_s （秒）で与えられる。表1には解析に用いた T_f, T_s が示されている。 T （秒）は柔剛要素を合成した場合の固有周期である。表中の $T_f = 100.0$ （秒）、 $r_k = 0.0$ の行は柔剛混合構造ではない場合に対応する。合成周期は0.5秒から2.28秒迄となっており、中低層建物の標準的な固有周期を含む範囲と言える。解析モデルの層数 N はこれら中低層の建物を代表するものとして5, 10, 20層を採っている。一つの T_s を持つ解析モデルに対して複数の強度レベル、複数の損傷集中レベル、複数の損傷集中層を与えている。パラメータの変化による応答値の影響を明確に抽出するため解析モデルはできる限り単純なものとする。各層の柔剛比 r_k は全層に亘って一定とする。高さ方向の質量分布は一定とする。剛要素の復元力特性は完全弾塑性型とする。入力エネルギーはすべて剛要素の履歴で吸収されるものとする。損傷と入力を一体的に評価する。したがって粘性減衰は無いものとする。

表1 固有周期（秒）

N	T_s (sec)	T_f (sec)	r_k	T (sec)
5	0.5	100.0	0.0	0.5
		2.5	0.04	0.490
		1.5	0.11	0.474
		1.0	0.25	0.473
	1.0	100.0	0.0	1.0
		5.0	0.04	0.981
		3.0	0.11	0.949
		2.0	0.25	0.894
	2.0	100.0	0.0	2.0
		10.0	0.04	1.961
		6.0	0.11	1.897
		4.0	0.25	1.789
10	1.0	100.0	0.0	1.0
		4.0	0.063	0.97
		2.5	0.16	0.929
		1.0	0.25	0.894
	1.5	5.0	0.09	1.437
		3.5	0.184	1.379
		3.0	0.25	1.131
	20	2.0	7.0	0.08
5.0			0.18	1.857
4.0			0.25	1.789
2.5		5.5	0.207	2.276

本論文では地震動特性の異なる3記録を入力地震波として用いている。一つの地震動に対する弾塑性系へのエネルギー入力、臨界減衰比 $h=0.1$ の1質点弾性系のエネルギースペクトルで代表できることが解っている¹⁾。図4に解析に用いる3波の $h=0.1$ の1質点弾性系に対するエネルギースペクトルを示す。縦軸は総エネルギー入力の次式による速度換算値である。横軸 T は固有周期である。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (4)$$

ここで、 $E = -\int_0^{t_0} m \ddot{z}_0 \dot{y} dt$ ：総エネルギー入力

m ：質点の質量、 $\ddot{z}_0$ ：地動加速度、

t_0 ：地動継続時間、 y ：質点の相対変位

図4 エネルギースペクトル

図の太破線は1953年Imperial Valley地震エルセント記録NS成分（エルセントロNS），太実線は1968年十勝沖地震八戸記録EW成分（八戸EW），細破線は1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分（神戸NS）に対するものである。細実線は「建築基準法」に示される第3種地盤における2次設計用加速度応答スペクトルをエネルギースペクトルに換算して示したものである¹⁰⁾。短周期領域において神戸NS波の入力が非常に大きいことが示されている。

図5にはエルセントロNS，八戸EW，JMA神戸NSの各地震記録による時刻歴エネルギー入力曲線を例示する。地震動継続時刻 t における総エネルギー入力 $E(t)$ を地震終了時の総エネルギー入力 E に対する比率として表したものである。太実線は $h=0.1$ ， $T=1.0$ の1質点弾性系の時刻歴入力曲線であり、曲線上の●印は最大層間変位発生点である。細実線は $N=5$ で $T=1.0$ の無減衰完全弾塑性系に対する時刻歴入力曲線であり、○印は各層の最大層間変位発生点である。

図示のように時刻歴入力曲線は地震動により異なる。神戸波の入力は極めて急激であるが八戸波はそれに比べて緩やかであり、エルセントロ波はその中間的であると言える。また、10%減衰の1質点弾性系と5質点弾塑性系の時刻歴入力曲線は、同一の固有周期の場合、対応性があると言える。エネルギー吸収能力と共に設計に際して重要な応答最大変位は1質点系の場合、●印の様に、急激にエネルギーが増大する時間に発生する。多質点系の場合は○印の様に各層の最大変位の発生が一時期に集中するとは限らない。

本論文では、地震動の入力レベルに対する解析モデルの強度レベルが同一の固有周期を持つ系に対して地震動の違いによらずほぼ一定となるように、次式で得られるベースシア係数を用いてモデルの基準強度を定めている。

$$\alpha_1 = \alpha_r \times \frac{2\pi V_E(T)}{gT} \quad (5)$$

ここで、 $V_E(T)$ ：エネルギースペクトルから得られる固有周期 T に対応する入力エネルギー

α_r ：強度係数

g ：重力加速度。

(5)式の右辺乗算の第2項は $V_E(T)$ に対応する弾性限界のベースシア係数 α_e を与える¹⁾。

(a) El Centro NS

(b) 八戸 EW

(c) 神戸 NS

図5 時刻歴エネルギー入力

応答解析に際して、解析モデルの変形限界、エネルギー吸収限界は復元力特性上には与えず、入力エネルギーのすべてが弾塑性履歴で安定的に吸収されるものとする。したがって、解析結果における吸収エネルギーがエネルギー吸収能力あるいは所要エネルギー吸収量と解釈される。すなわち、解析モデルの塑性化レベルは強度をパラメータとして賦与することになる。(5)式における強度係数 α_r は次の(6)式に示す3通りを基本値としているが、他に $\alpha_r = \{0.15, 0.2\}$ の場合もある。これらにより、次節で述べる損傷集中指数 n を求める際の基準モデルにおいて、平均塑性変形倍率 $\bar{\mu}$ の応答解析値が一桁前半から10乃至20、非常に大きい場合は30台に亘る範囲を網羅することになる。(3)式に示した r_q の応答値は、損傷集中が存在するモデルで0から4.0程度、極端に大きい場合は8程度となることもある。

$$\alpha_r = \{0.05, 0.1, 0.3\} \quad (6)$$

(5)式における $V_E(T)$ を得るための T は表1に示される合成固有周期 T を用いる。

4. 基本損傷集中則¹⁾

層の復元力特性が完全弾塑性型であるせん断型多層骨組の損傷分布の予測値は次式で与えられる¹⁾。

$$\frac{W_{pi}}{W_p} = \frac{s_i p_i^{-n}}{\sum_{i=1}^N s_i p_i^{-n}} \quad (7)$$

ここで、 W_{pi} : i 層の損傷， $W_p = \sum_{i=1}^N W_{pi}$: 骨組全損傷

$$p_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 \cdot \bar{\alpha}_i} : \text{強度低下率}$$

$$\alpha_i = p_i \alpha_1 \bar{\alpha}_i : i \text{ 層の降伏せん断力係数}$$

$\bar{\alpha}_i$: 最適降伏せん断力係数分布

n : 損傷集中指数

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \left(\frac{k_i}{k_1} \right)^2 \bar{\alpha}_i^2$$

m_j : 多質点振動系に置換する際の j 質点の質量

N : 層数， $M = \sum_{j=1}^N m_j$: 総質量

上式における $\bar{\alpha}_i$ は各層の累積塑性変形倍率がほぼ一定となる降伏せん断力係数分布である。 i 層の累積塑性変形倍率 η_i は次式で与えられる。

$$\eta_i = \frac{W_{pi}}{Q_{pi} \cdot \delta_{pi}} \quad (8)$$

ここで、 Q_{pi} : i 層の降伏耐力

δ_{pi} : Q_{pi} に対応する i 層の降伏変位

(8)式は着目する層の履歴吸収エネルギーが、完全弾塑性系における一方向の塑性変形で吸収されたとした場合の塑性変形量を、弾性限変形に対する比として表したものと同一である。

(7)式中の p_i は、損傷集中要因を耐力低下で評価する場合の i 層の耐力低下率を示すものである。損傷集中指数 n は p_i による i 層への損傷集中に及ぼす感度を示すものと言え、 n の値が大きいかほど損傷集中が起こりやすいことを示す。柱降伏型骨組に対しては $n=12$ が、梁降伏型骨組では $n=6$ が提案されている^{(11),(12)}。 n 値は p_i に依存する。 p_i に対応する損傷集中要因を p_d とした場合の p_d と n 値との関係は、柱降伏型骨組の場合次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$n = 6 + 23p_d^6 \quad (9)$$

柔剛混合構造に対しても損傷分布を(7)式で表現できるものとして、損傷集中指数 n を応答解析により求める。 n 値は着目する一つの層に降伏耐力の低下をもたらした場合の損傷分布の変化から次のように求められる⁽¹³⁾。

はじめに、着目する k 層の損傷分布の応答解析により求めこれを基準系の応答値 a とする。 a は(7)式より次式で表される。

$$\frac{W_{pk}}{W_p} = a = \frac{s_k p_k^{-n}}{\sum_{i=1}^N s_i p_i^{-n}} \quad (10)$$

次に、着目する k 層のみの降伏耐力を $p_d (< 1.0)$ 倍した場合の損傷分布を応答解析により求め、これを損傷集中系の応答値 b とする。 b は次式で表される。

$$\frac{W_{pk}}{W_p} = b = \frac{s_k p_k^{-n} p_d^{-n}}{\sum_{i=1}^N s_i p_i^{-n} + s_k p_k^{-n} p_d^{-n}} \quad (11)$$

(10),(11)式より n は次式で求められる。

$$n = -\ln \left\{ \frac{b(1-a)}{a(1-b)} \right\} / \ln p_d \quad (12)$$

5. 柔剛混合構造の損傷集中特性

5-1 強度低下率と損傷集中指数

図5は(10)式から(12)式を用いて得た層数 $N=5$ における損傷集中指数 n の応答解析値と強度低下率 p_d との関係を示している。

(12)式を用いる際の基準系の応答値 a は、各層の累積塑性変形倍率がほぼ一定となるように、ベースシア係数を除く各層の降伏せん断力係数 α_i に修正を加えながら、繰返し計算を行うことで求めている。損傷集中系の応答値 b を求める際には、着目する k 層の強度のみを低下させ、バネ定数は変化させない。すなわち系の応答特性を変化させることになる固有周期の変化は行わないものとしている。

図5 $n-p_d$ 関係

図5 (a)は柔剛混合構造ではない柱降伏型骨組の場合であり、用いた3地震動記録による値をまとめて示している。(b), (c), (d)図は柔剛混合構造の場合で、それぞれエルセントロNS、八戸EW、神戸NSによる値である。解析モデルの強度レベルは、一つの固有周期を持つモデルに対して(6)式に示す3通りで、○、△、□はそれぞれ $\alpha_i/\alpha_1 = 0.05, 0.1, 0.3$ の場合に対応する応答解析値である。実線は(9)式で与えられる n 値の上限値である。図示のように n の値は p_d の大きさに依存する。3割程度の耐力低下に相当する損傷集中要因が存在する場合を想定すれば、損傷集中指数の上限値としては

約 $n=9$ が与えられ、一方、耐力低下が1割とした場合には $n=18$ 程度とすることで損傷集中の上限を評価することができる。また、 n 値は(5)式における強度係数 α_r にも依存し、 α_r が大きい場合にその値が大きくなる。これは、高強度の構造物が損傷集中に不利であることを意味するものではない。強度が変化しても固有周期が変わらなければエネルギー入力に変化しないので、(8)式に示すように強度が大きくなれば、累積塑性変形倍率 η は小さくなる。基準モデルにおける η が小さい系に損傷集中要因が存在すると n 値が大きくなることを示すものである。

図6は八戸EW波に対する累積塑性変形倍率 η と n 値の関係の応答値を例示したものである。層数 $N=5$ で固有周期が $T=1.0$ (秒)、強度低下率が $p_d=0.8$ の場合である。 η は基準系における値である。図示のように η が小さい場合に n 値が大きくなる傾向が示されている。

図6 n - η 関係

表2は、(12)式を用いて得られた損傷増加率を示したものである。表中の a は基準系における損傷分布であり、 b/a は損傷集中要因を与えた場合の損傷分布の a に対する比率である。同じ n 値であっても損傷集中要因 p_d の値および a の値により損傷増加率は変化する。例えば $p_d=0.9$ の場合には(9)式および図5の様に $p_d=0.7$ 、 $p_d=0.8$ の場合と比べて n 値は大きくなるが、損傷増加率は同一の a 及び同一の n 値に対して $p_d=0.6$ 、 $p_d=0.7$ 、 $p_d=0.8$ の場合より小さい値となっている。また、 p_d 及び n 値が同一の場合、 a の値が小さい場合に損傷増加率が大きいことが示されている。

図7は、損傷集中層の損傷の骨組全体の損傷に対する比率を示したものである。図中の a 及び b は表2の場合と同様に着目する層の基準系の損傷分布と損傷集中系の損傷分布である。横軸に損傷集中要因 p_d を採って表している。 b を求める際の n 値は応答値の上限値を与える(9)式で与える。

耐震安全性の観点からは、一つの層に多くの損傷が集中するような場合を想定した設計を行う必要がある。そのような損傷集中として $b \geq 0.6$ を考慮すれば、耐力低下率として $p_d=0.8$ を採ることができる。全損傷の8割の損傷が集中する場合でも、基準系で2割以上の損傷を想定する系においては、同様に $p_d=0.8$ を採ることができる。一方、損傷集中要因は材料強度のバラツキ、使用部材サイズの整理等の要因等により生じ、それを強度低下率として換算すれば、およそ15%程度($p_d=0.85$)と見積もることができる。これらにより、損傷集中要因による耐力低下率として $p_d=0.8$ を採用し、それを基本値として採用することは耐震設計の観点から有効であると言える。

表2 損傷増加率 b/a

a	n	b/a			
		$p_d=0.6$	$p_d=0.7$	$p_d=0.8$	$p_d=0.9$
0.1	2	2.36	1.85	1.48	1.21
	6	7.04	4.86	2.98	1.73
	12	9.81	8.89	6.18	2.82
	16	9.97	9.71	7.98	3.75
0.2	2	2.05	1.69	1.40	1.18
	6	4.21	3.40	2.44	1.60
	12	4.96	4.74	3.92	2.35
	16	4.99	4.93	4.49	2.87
0.4	2	1.62	1.44	1.28	1.13
	6	2.34	2.12	1.79	1.39
	12	2.49	2.45	2.27	1.76
	16	2.50	2.49	2.40	1.96
0.6	2	1.34	1.26	1.17	1.08
	6	1.61	1.55	1.42	1.23
	12	1.664	1.65	1.59	1.40
	16	1.666	1.66	1.64	1.48
0.8	2	1.15	1.11	1.08	1.04
	6	1.24	1.21	1.17	1.10
	12	1.249	1.245	1.23	1.17
	16	1.250	1.248	1.24	1.19

図7 損傷集中層の損傷分布

5-2 負担せん断力比 r_q に着目した n 値

柱降伏型骨組における耐力低下係数 p_d と損傷集中指数 n との関係は(9)式で与えられるが、柔剛混合構造の場合には柔要素の弾性挙動により特定層への損傷集中が緩和されることが期待でき、(9)式をそのまま柔剛混合構造に適用することは損傷集中を過剰に見積もることになり設計の合理性に欠ける。柔剛混合構造の地震時挙動を特徴づけるパラメータは、既述のように柔剛要素間バネ定数比 r_k と負担せん断力比 r_q であり、これに着目して柔剛混合構造の n 値を求める。

図8は $p_d=0.8$ における n - r_q 関係を示したものである。解析モデルの層数 N は5の場合である。○, △, ■は強度係数 $\alpha_r = \alpha_1/\alpha_c$ がそれぞれ0.05, 0.1, 0.3の場合である。地震記録3波による解析値をまとめて表している。図における $r_q=0$ は柔剛混合構造ではない場合に対応する。いずれの地震波に対しても柔剛要素間の負担せん断力比 r_q の増大に伴い n の上限値及びバラツキ幅が減少し、 $r_q \geq 2.0$ の領域で $n \leq 2.0$ となっている。 $n=2.0$ は表2に示すように損傷増加率が相対的に少ない場合に相当する。

図8 r_q - n 関係 ($N=5$, $p_d=0.8$) 図9 r_q - n 関係 ($N=10, N=20$, $p_d=0.8$)

図には次式による r_q に対する n 値の上限が実線で示されている。

$$\left. \begin{array}{ll} r_q < 0.4 & \text{の場合 } n=12 \\ 0.4 \leq r_q < 2.0 & \text{の場合 } n=-32+38r_q^{-0.16} \\ r_q \geq 2.0 & \text{の場合 } n=2.0 \end{array} \right\} \quad (13)$$

(13)式の値は $0.4 \leq r_q < 2.0$ の範囲において文献(7)で示される n 値よりも大きな値となっているが基本特性に大きな違いは無い。

図9は同様に $p_d=0.8$ における層数が $N=10$, $N=20$ の場合の

r_q - n 関係であり、この場合にも n の上限値として(13)式が適用できる。図8,図9より、はり降伏型骨組における $n=6.0$ は柔剛混合構造における $r_q=1.0$ の場合に対応していると言える。

図10は強度低下率 p_d の違いに着目した $N=5$ の場合の n - r_q 関係を示している。○, △, ■はそれぞれ p_d が0.7, 0.8, 0.9の場合である。(a)図はエルセントロNS波に対するものであり、(b),(c)図はそれぞれ八戸EW波, JMA神戸NS波に対するものである。図5で述べたように n は p_d の増加関数であり、図10に示される様に $r_q < 0.4$ の領域でその傾向が見られるが、 r_q の増大に伴ってその傾向は減少し、 $r_q > 0.5$ の領域で p_d の違いの影響はほとんどなくなっている。 n の上限値は(13)式で表わされる。この傾向の地震波の違いによる影響は受けない。

図11には塑性化レベルに着目した n - r_q 関係を示している。層数 N は5の場合である。○, △, ■は塑性化レベルを与える強度係数 α_1/α_c がそれぞれ0.05, 0.1, 0.3の場合である。強度レベルが大きく基本的損傷レベルが小さい場合、即ち図の $\alpha_1/\alpha_c=0.3$ 場合、 r_q の小さな領域において n の応答値が大きな値となっている。上限値は(13)式で代表できる。この傾向は地震波の違いによる影響は受けない。

図12は損傷集中層(k層)に着目したものである。○, △, ■はそれぞれ損傷集中層が1, 3, 5層の場合の応答値である。 $r_q < 0.5$ 程度の範囲において、同一の r_q に対して最上層への集中が若干少ないと言える。これは一つの層に損傷を集中させる様なエネルギー集中型骨組を設計する場合、損傷集中層を最上層とすることは多少効率が悪くなる可能性の存在を意味すると言える¹⁴⁾。 $r_q > 0.5$ の領域では層による違いはなくなる。地震波による違いは、神戸NS波で最上層への損傷集中が多少大きくなる傾向が見られるが大きな違いはないと言える。 n 値の上限値は(13)式で代表できる。

図10 r_q - n 関係 (p_d に着目) 図11 r_q - n 関係 (塑性化レベルに着目)

図 12 r_q - n 関係 (損傷集中層に着目)

6 まとめ

柔剛混合せん断型多層骨組の損傷集中特性を地震応答解析により明らかにした。解析に用いた地震動記録はエネルギー入力特性の異なるエルセントロNS, 八戸EW, JMA神戸NSの3波である。剛要素の復元力特性は完全弾塑性型とした。解析モデルの層数は5, 10, 20とした。モデルの固有周期は0.5秒から2.28秒の範囲とした。応答解析結果は次のようにまとめられる。

- 1) せん断型骨組の一般系は柔剛混合構造と見なすことができる。
- 2) 柔剛混合構造を意図的に導入することにより、せん断型多層骨組の設計に際して重要な問題となる損傷集中を制御することができる。
- 3) 柔剛混合構造骨組の地震時の応答性状を特徴づける柔剛要素間の負担せん断力比 r_q を用いて損傷集中を n 値で評価すれば、それらの関係は次式で評価できる。

$$\left. \begin{array}{ll} r_q < 0.4 & \text{の場合 } n = 12 \\ 0.4 \leq r_q < 2.0 & \text{の場合 } n = -32 + 38r_q^{-0.16} \\ r_q \geq 2.0 & \text{の場合 } n = 2.0 \end{array} \right\}$$

- 4) r_q の増大によりに伴い、 n 値のパラッキ幅、最大値が減少し、損傷集中が緩和される。
- 5) 負担せん断力比 $r_q \geq 0.5$ の領域では n 値は損傷集中層の違い、地震動の違いの影響は受けない。 $r_q < 0.5$ の領域でもそれらの影響は少ない。

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
- 2) 秋山 宏・耐震性能の多様化に対応した耐震設計, 日本建築学会構造系論文集 第472号, pp 85-90, 1995, 6月
- 3) 原田幸博, 秋山 宏 エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集 第472号, pp.57-66, 1995, 6月
- 4) 高橋 誠, 秋山 宏: 地震時における多層骨組の最大変形とエネルギー応答, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp59-66, 1999.1
- 5) 高橋 誠, 秋山宏 地震時における柔剛混合せん断型多層骨組の累積塑性変形と最大変形, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.B2
- 6) 秋山 宏, 高橋 誠 地震時における柔剛混合せん断型多層骨組の残留変形, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.B2
- 7) 秋山 宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999
- 8) 邵 立, 高橋 誠, 秋山 宏 柔剛混合構造多層骨組の損傷集中特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.C1, pp931-932
- 9) 秋山 宏, 高橋 誠, 石 軍・繰り返し曲げを受ける円形断面鋼棒の終局エネルギー吸収能力, 日本建築学会構造系論文集, 第475号, pp145-154, 1995.9
- 10) 秋山 宏 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985
- 11) 秋山 宏・地震時における鋼構造ラーメン骨組の損傷分布則, 日本建築学会論文報告集, 第309号, 1981.11
- 12) 秋山 宏 はり降伏型鋼構造多層剛接骨組の D_s 値, 日本建築学会論文報告集, 第332号, pp.38-45, 1983.10
- 13) 日本建築学会・建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990
- 14) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.B2) 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, pp 37-44, 1986.4

(2000年2月8日原稿受理, 2000年5月31日採用決定)