

強震をうける重層骨組の損傷分布に関する基礎的考察

DAMAGE DISTRIBUTION LAW OF MULTI-STORY FRAMES UNDER STRONG GROUND MOTIONS

小川厚治*, 黒羽啓明**, 上遠野明夫***

Koji OGAWA, Yoshiaki KUROBANE and Akio KADONO

This paper first discusses the general features of distributions of damages in multi-story frames under strong ground motions based on numerical response analyses of shear-type lumped mass models. A basic law that governs distributions of damages is then determined by using seismic load distributions expressed in terms of the second joint moments of story shear forces. The results of response analyses show that, as the strength of a story in a multi-story frame decreases, the damage in that weak story increases sharply while the damages in the other stories close to the weak story decrease suddenly. The proposed damage distribution law captures well these tendencies.

Keywords : multi-story frame, shear-type model, aseismic design, damage distribution, damage concentration

重層骨組, せん断型モデル, 耐震設計, 損傷分布, 損傷集中

1. 序

地震外乱によって構造物に入力されるエネルギー量は構造物の強度や復元力特性などの影響をほとんど受けない安定した量であることが知られている^{1,2)}。地震外乱による入力エネルギーは弾性振動エネルギー（運動エネルギー E_i と弾性歪エネルギー E_e の和）または塑性歪エネルギー E_p （以下、損傷と呼ぶ。）として構造物に吸収されるが、構造物各部分の損傷分布はその強度分布の影響を強く受ける。すなわち、構造物の一部が他の部分に比べて相対的に弱ければ、損傷はその弱い部分に集中し、他の部分はエネルギーを吸収する能力を発揮することなく構造物は崩壊する。したがって、損傷分布を適切に予測することは合理的な耐震設計を行うために不可欠な課題である。

既に、秋山らは、構造物各部分の強度の適正值からのずれが損傷分布に及ぼす影響をせん断型多質点系モデルを用いて定量化しており^{3,4)}、このせん断型多質点系の損傷

分布則では予測できない各種の構造物^{5,6,7)}についても地震応答解析結果に基づいた損傷分布の定量化を行っている。この秋山らの研究成果は鋼構造骨組の耐震設計を考える貴重な礎になっているものではあるが、あくまで個々の構造物毎に数値的に損傷分布、特に損傷集中特性を定量化したものであり、必ずしも構造物各部分への損傷分配の一般的法則性を明確にするものではない。構造物の損傷分布を支配する普遍的法則が見い出せれば、それは構造物の耐震安全性を評価する手段として利用できるばかりではなく、新しい損傷分布制御システムを工夫し考え出すための有力な道具にもなりえるであろう。

この研究は、複数要素への損傷分配が生じる最も単純な振動系であるせん断型多質点系を考察対象として、損傷分布の基本的な法則性を明らかにしようとするものである。問題を極力単純化して、損傷分布の基本的な法則を見い出すことがここでの目的であるので、各層の復元力特性は完全弾塑性とし、 PA 効果は無視しており、変

本論文の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集、1993.9に発表している。

* 熊本大学工学部建築学科 助教授・工博

** 熊本大学工学部建築学科 教授・工博

*** 新日本製鐵鋼構造研究開発センター

Associate Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Steel Structure Development Center, Nippon Steel Corporation

形によって骨組の強度特性が変化しないことを前提としている。

2. 地震荷重分布の基礎仮定と応答解析パラメータ

筆者の1人は既に、重層骨組に作用する動的地震荷重分布を各層層せん断力の2乗平均値と相乗平均値（2次モーメント）を使って表すことを提案し、一様せん断棒のモーダルアナリシスによる解析結果を基に定量化している⁸⁾。また、このような地震荷重分布を用いれば、強い地震外乱下で重層骨組に生じる主たる崩壊機構も概ね予測可能であることを報告している⁹⁾。本研究においても、地震外乱下で重層骨組に生じる動的荷重分布は次式で表されるものと仮定する。

$$E[Q_i Q_j] = \sigma_o^2 \sum_{k=1}^i M_k \quad \text{ただし, } i \leq j \quad (1)$$

ここで、 $E[]$ は時間的平均値を表し、 Q_i は上から i 番目の層の層せん断力、 M_i は上から i 番目の層の質量であり、 σ_o は定数である。なお、本論では、上記のように、層番号は常に上から順に数えている。誤解を招き易い表現ではあるが、数式表現は単純になる。上から i 番目の層に作用する動的水平力を H_i とすると、(1)式は次のようにも表現できる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} E[H_i^2] &= M_i \sigma_o^2 \\ E[H_i H_j] &= 0 \quad \text{ただし, } i \neq j \end{aligned} \quad (2)$$

本論では、対象を単純化するために、図1に示すように各層の質量 M 、階高 h が一定のせん断型 N 質点系を考察対象とする。各層の質量は一定値であるので、(1)、(2)式の動的地震荷重分布は次式で表される。

$$\begin{aligned} E[Q_i Q_j] &= i \sigma^2 \quad \text{ここで, } i \leq j \\ E[H_i^2] &= \sigma^2 \\ E[H_i H_j] &= 0 \quad \text{ここで, } i \neq j \end{aligned} \quad (3)$$

次節以降では、強度・剛性を変化させた種々のせん断型多質点系の地震応答解析例を示しているが、ほとんどの構造パラメータは共通であり、ごく一部のパラメータを変化させているに過ぎない。その元になる骨組を基準

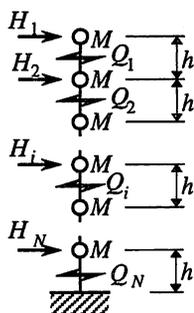


図1 考察対象モデル

表1 解析用基本骨組

N	C_B	T_1 (秒)
5	0.4375	0.977
10	0.2308	1.833
15	0.1570	2.689

骨組と呼ぶことにする。基準骨組の i 層の強度 sQ_{yi} は、(3)式地震荷重の下で各層の降伏の可能性が一様化するよう次式とし、これを基準強度分布と呼ぶ。

$$sQ_{yi} = \sqrt{\frac{i}{N}} sQ_{yN} \quad (4)$$

基準骨組の最下層の強度 sQ_{yN} は、全層に0.02の塑性層間変形角が生じたときに吸収できるエネルギー量が、速度スペクトル $S_v = 150 \text{ kine}$ として求めた入力エネルギーに等しくなるという条件から次式で求めた。

$$0.02 h \sum_{i=1}^N sQ_{yi} = 0.02 h C_B N M g \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{i}{N}} = \frac{1}{2} N M S_v^2 \quad (5)$$

ここで、 C_B はベースシャ係数であり、 g は重力加速度である。

次節以降では、強度分布を変化させた骨組の地震応答解析を行っているが、これらの骨組の i 層の強度 Q_{yi} は(4)、(5)式で表される基準強度を基に次式で与えている。

$$Q_{yi} = p_i sQ_{yi} \quad (6)$$

ただし、特に説明しない限り p_i は1である。

基準骨組の弾性剛性は、全層の弾性限層間変形角が0.01となるように求めた。ただし、強度を変化させた骨組については、弾性剛性は基準骨組と同じとしているので、弾性限層間変形角は強度に比例して変化している。

解析例として示した骨組の層数 N は5, 10, 15の3種で、階高 h はすべて350 cmとしている。基準骨組のベースシャ係数 C_B と基本固有周期 T_1 を表1に示しておく。粘性減衰は、1次および2次の減衰定数が0.01のRayleigh型とした。

応答解析例に用いた入力地震外乱は表2に示す12種である。基準骨組のベースシャ係数を上記のように算定したことに対応させて、弾性振動エネルギー $E_i + E_e$ と塑性歪エネルギー E_p の和の最大応答値が $S_v = 150 \text{ kine}$ として求めた次式の値となるように表2に示した実記録の加速度の値を増幅している。

$$(E_i + E_e + E_p)_{\max} = \frac{1}{2} N M S_v^2 \quad (7)$$

表2 応答解析用入力地震外乱

	最大加速度	継続時間	マーク
El centro, 1940, N-S	341.7gal	53.73sec.	●
El centro, 1940, E-W	210.1gal	53.47sec.	○
Taft, 1952, N-S	152.7gal	54.36sec.	▲
Taft, 1952, E-W	175.9gal	54.38sec.	△
Hachinohe, 1968, N-S	225.0gal	35.99sec.	■
Hachinohe, 1968, E-W	182.9gal	35.99sec.	□
Sendai, 1962, N-S	57.5gal	13.98sec.	▼
Sendai, 1962, E-W	47.5gal	14.18sec.	▽
Tohoku Univ., 1978, N-S	258.2gal	40.94sec.	◆
Tohoku Univ., 1978, E-W	202.6gal	40.94sec.	◇
Tokyo, 1956, N-S	74.0gal	11.38sec.	田
Osaka, 1963, E-W	25.0gal	14.98sec.	⊕

本論では、これら12種の地震外乱に対する応答解析結果を元に考察を進めているが、特に必要がない限り個々の応答値がどの地震外乱によるものかは説明していない。入力外乱は表2に示したマークで区別している。

3. 損傷分配則に関する基礎的考察

骨組全体の損傷に対する*i*層の損傷 E_{pi} の比率を*i*層の損傷分配率 γ_{pi} と定義して、この量の定量化を試みる。ここでは、秋山らがせん断型多質点系の損傷分配率の定量化に用いたもの^{3,4)}と類似の次式から検討を始める。

$$\gamma_{pi} = \frac{E_{pi}}{\sum_{k=1}^N E_{pk}} = \frac{r_i f(\lambda_i)}{\sum_{k=1}^N r_k f(\lambda_k)} \quad (8)$$

ここで、 λ_i は後述する*i*層の荷重係数であり、 $f(\lambda_i)$ は荷重係数の小さな機構に損傷が集中することを表す損傷集中関数、 r_i は*i*層の損傷分配の基準値であり骨組の強度分布に依存しない量である。

3.1 基本荷重係数： λ_i

(3)式で表した動的地震荷重分布に関する基礎仮定から、*i*層のせん断力 Q_i の2乗平均値は次式で表される。

$$E[Q_i^2] = i \sigma^2 \quad (9)$$

一方、*i*層が降伏する条件は、*i*層の強度 Q_{yi} を用いて

次式で表される。

$$Q_i = Q_{yi} \quad (10)$$

*i*層の層せん断力がそのRMSの λ_i 倍とすると(10)式が成立するとき、 λ_i を*i*層の基本荷重係数と定義する。

$$\lambda_i = \frac{Q_{yi}}{\sqrt{i} \sigma} \quad (11)$$

ここでは、まず、この基本荷重係数 λ_i が*i*層の荷重係数であると考えて考察を進める。

3.2 損傷分配の基準値： r_i

2節で示した基準強度分布をもつ骨組については、(11)式の基準荷重係数を求めると、すべての層で一定となるので、(8)式は $f(\lambda_i)$ に無関係な次式となる。

$$\gamma_{pi} = \frac{E_{pi}}{\sum_{k=1}^N E_{pk}} = \frac{r_i}{\sum_{k=1}^N r_k} \quad (12)$$

すなわち、 r_i は基準強度分布をもつ骨組の損傷分配率 γ_{pi} に比例する。

さて、基準強度分布をもつ骨組の損傷分配率について考える。各層の荷重係数 λ_i が一定のとき、骨組の各層の損傷は一様化すると考えるのが適当であろう。しかし、「各層の損傷が一様化する」という現象には、およそ2通りの解釈が考えられる。すなわち、各層の塑性変形が一定になる場合と、各層の塑性変形倍率（塑性変形／弾

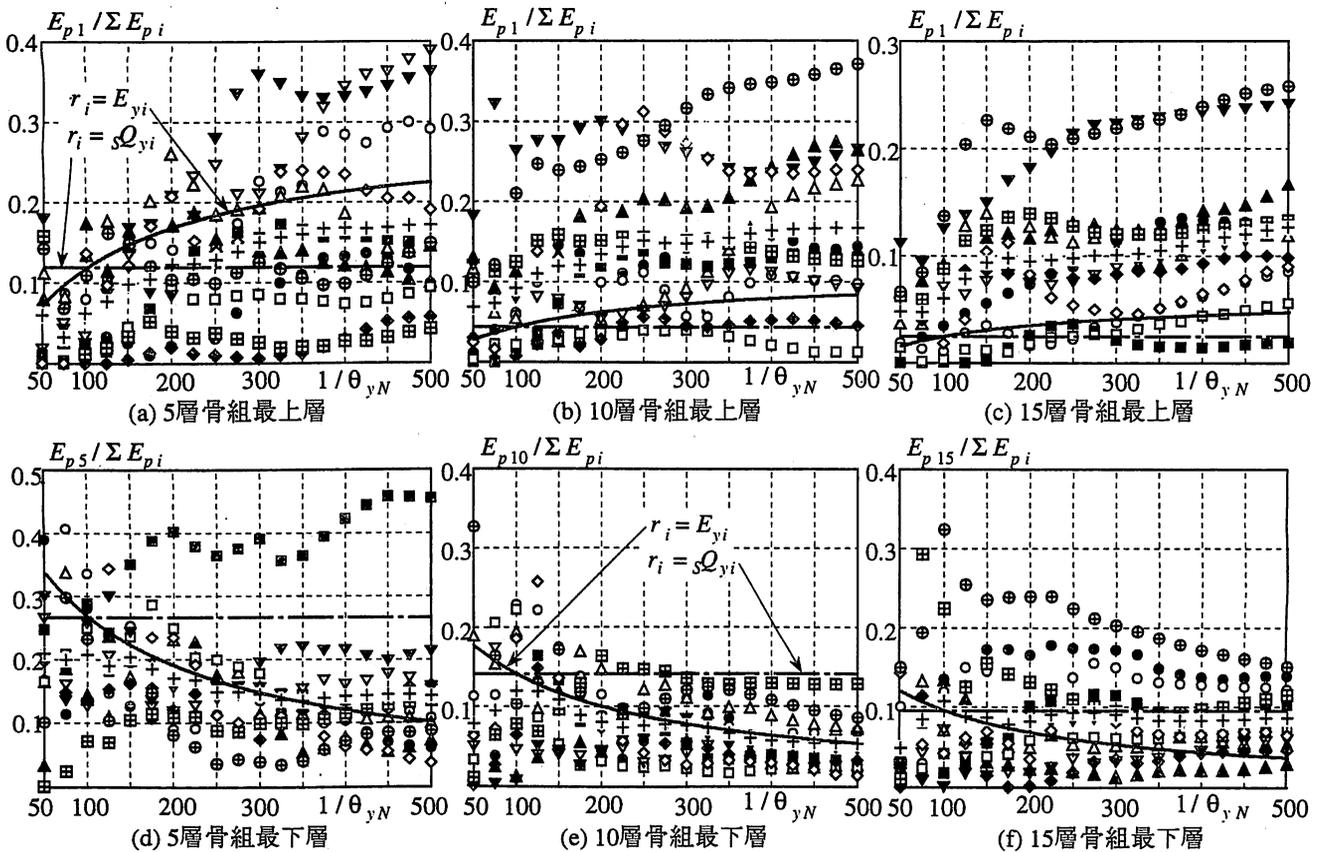


図2 弾性限変形分布が損傷分配率に及ぼす影響

性限変形)が一定になる場合である。前者であると考えれば r_i は強度に比例する量となり、後者であると考えれば r_i は弾性限歪エネルギーに比例する量となる。すなわち、

$$\text{塑性変形一定} \rightarrow r_i = s Q_{y,i} \quad (13.a)$$

$$\text{塑性変形倍率一定} \rightarrow r_i = E_{y,i} = s Q_{y,i} \theta_{y,i} h/2 \quad (13.b)$$

ただし、 $E_{y,i}$ は基準骨組の i 層の弾性限歪エネルギーであり、 $\theta_{y,i}$ は i 層の弾性限層間変形角である。

2節で述べたように基準骨組は各層の弾性限変形角 $\theta_{y,i}$ が一定であり、各層の弾性限歪エネルギーと強度は比例する。ここでは、各層の弾性限変形角 $\theta_{y,i}$ が異なる骨組の応答解析結果を基に r_i は(13)式のいずれが適当かを検討する。

解析骨組の各層の弾性限変形角 $\theta_{y,i}$ は次のように設定する。最上層の弾性限変形角 $\theta_{y,1}$ は基準骨組と同様に常に $1/100$ とし、最下層の弾性限変形角 $\theta_{y,N}$ は $1/50$ から $1/500$ の範囲で変化させた。中間層の弾性限変形角 $\theta_{y,i}$ は、最上層と最下層の値を直線補間した値とする。

$$\theta_{y,i} = 0.01 + \frac{i-1}{N-1} (\theta_{y,N} - 0.01) \quad (14)$$

図2には、最下層の弾性限変形角 $\theta_{y,N}$ と、最上および最下の層の損傷分配率との関係を示す。図中、各応答解析結果は表2のマークで示しており、12種の地震外乱に関する平均値を+印で示している。また、鎖線は r_i として(13.a)式を用いた予測値、実線は(13.b)式を用いた予測値である。図2によると、応答値は非常にばらついており、いずれの予測値が応答値を近似しているかを論じることは甚だ困難であるが、少なくとも12種の外乱に関する平均値は $\theta_{y,N}$ が小さくなり最下層が相対的に剛くなる、最下層の損傷は減少し、最上層の損傷は増大する傾向が認められる。この傾向は、実線で示した弾性限歪エネルギーを r_i として用いた場合の予測結果と対応している。したがって、 r_i としては、(13.b)式に示すように弾性限歪エネルギーを採用することにする。

3.3 損傷集中関数: $f(\lambda)$

損傷集中関数は、その定義からも明らかなように、 $\lambda \rightarrow 0$ または $\lambda \rightarrow \infty$ の極限では次の値を取るものでなければならない。

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} f(\lambda) = \infty \quad (15.a)$$

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} f(\lambda) = 0 \quad (15.b)$$

また、荷重係数 λ は、(11)式からも分かるように、各層の降伏のしやすさを表す相対的尺度であり、その絶対的な大きさには特に物理的な意味を与えていないことを考えれば、 $f(\lambda)$ は任意の正の実数 a, b, c について次の条件を満たす関数でなければならない。

$$\frac{f(ab)}{f(ac)} = \frac{f(b)}{f(c)}$$

すなわち、

$$f(ab) = \text{Const.} f(a) f(b) \quad (16)$$

本研究では、(15), (16)式の条件を満たす関数として、秋山らと同様の次式を採用する。

$$f(\lambda) = \lambda^{-n} \quad (17)$$

ただし、(15)式の条件から指数部は負、 n は正であり、また、(16)式の条件から n は定数でなければならない。

ここまでの結果を整理すると、次式となる。

$$\gamma_{p,i} = \frac{E_{p,i}}{\sum_{k=1}^N E_{p,k}} = \frac{E_{y,i} \lambda_i^{-n}}{\sum_{k=1}^N E_{y,k} \lambda_k^{-n}} \quad (18)$$

上式は、 n を定数と考えていることを除き^{4,6)}、秋山らの提案式と同じものである。

3.4 条件付き荷重係数: $m \lambda_i$

(11)式の荷重係数を用い(18)式にしたがって損傷が各層に分配されると考えたのでは説明できない現象が、地震応答解析結果には認められる。図3は、それぞれ5,10,15層骨組のElcentro, N-S入力時の地震応答解析例であり、□印はいずれも基準骨組の損傷分配率を示している。■印は、(a)図では5層骨組の第4層の強度を基準強度の0.9倍に低減した骨組の応答であり、(b)図では10層骨組の第7層、(c)図では15層骨組の第10層を0.9倍に低減した骨組の応答である。図3は単なる例に過ぎないが、地震応答解析結果においては常に、ある層を弱くするとその弱い層には損傷が集中すると共に、その弱い層のごく周辺の層の損傷は急激に減少するという傾向が認められる。また、この弱い層から離れた層の損傷分配率はほと

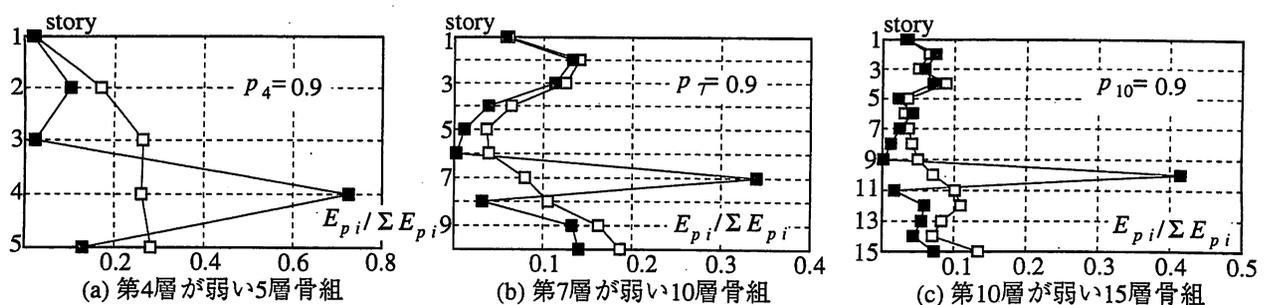


図3 損傷分布の例

んど変化していない。すなわち、弱い層の損傷分配率が単純に大きくなって損傷集中が起こると考えるより、弱い層は周辺層から横取りするように損傷を集めることが損傷集中の原因と考えた方が適当である。

一方、(18)式に示した損傷分配則によれば、(11)式から求められる弱い層の荷重係数は低下し、その弱い層の損傷分配率が急増することは予測できるとしても、他の層の荷重係数は一定のままであり、弱い層に損傷が集中する分だけ他の層は一様に損傷分配率が減少するという結果になる。したがって、弱い層に隣接する層の損傷は急減するといった現象は予測できない。

応答解析において相対的に弱い層の周辺の層の損傷が減少する原因は次のように説明できる。例えば、図3(a)の例のように第4層の強度 Q_{y4} が基準強度より相対的に小さい5層骨組を考える。第5層が降伏する条件は次式で表される。

$$Q_5 = Q_{y5} \quad (19)$$

一方、第5層のせん断力 Q_5 は第4層のせん断力 Q_4 と第5層の水平力 H_5 の和である。

$$Q_5 = Q_4 + H_5 \quad (20)$$

また、第4層のせん断力 Q_4 は常にその強度 Q_{y4} 以下でなければならない。

$$Q_4 \leq Q_{y4} \quad (21)$$

したがって、第5層が降伏するための必要条件は次式となる。

$$Q_{y4} + H_5 \geq Q_{y5} \quad (22)$$

上式は、第4層の弾性限強度 Q_{y4} が小さければ、動的水平力 H_5 が余程大きくならない限り第5層は降伏しないことを表す。すなわち、第5層の降伏の起こり易さは第5層の強度だけではなく第4層の強度の影響を受ける。このような現象の結果として、弱い層の周辺層の損傷が減少するものと考えた。

さて、上記の現象を一般化して定量化するために、 m 層のせん断力 Q_m が既定値 \bar{Q}_m であるという条件の下で、 i 層の荷重係数を考える。動的水平力 H_i が Gauss 分布する確率量であると仮定すれば、(3)式の地震荷重分布から i 層のせん断力の平均値 $E[Q_i | Q_m = \bar{Q}_m]$ 、および分散 $\text{Var}(Q_i | Q_m = \bar{Q}_m)$ は次式で表される^{11,12)}。

$$E[Q_i | Q_m = \bar{Q}_m] = \frac{E[Q_i Q_m]}{E[Q_m^2]} \bar{Q}_m = \frac{\min(i, m)}{m} \bar{Q}_m \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(Q_i | Q_m = \bar{Q}_m) &= E[Q_i^2 | Q_m = \bar{Q}_m] - (E[Q_i | Q_m = \bar{Q}_m])^2 \\ &= E[Q_i^2] - \frac{(E[Q_i Q_m])^2}{E[Q_m^2]} = \left\{ i - \frac{\min(i, m)^2}{m} \right\} \sigma^2 \end{aligned} \quad (24)$$

(23)式の平均値は定数であるので、次式において条件付きの荷重係数 ${}_m\lambda_i$ を定義する。

$$(E[Q_i | Q_m = \bar{Q}_m])^2 + {}_m\lambda_i^2 \text{Var}(Q_i | Q_m = \bar{Q}_m) = Q_{yi}^2 \quad (25)$$

すなわち、

$${}_m\lambda_i = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{m^2 Q_{yi}^2 - \min(i, m)^2 \bar{Q}_m^2}{i m^2 - m \min(i, m)^2}} \quad (26)$$

\bar{Q}_m は次の範囲でなければならない。

$$\bar{Q}_m \leq Q_{ym} \quad (27)$$

上式による m 層の層せん断力の上限值を考慮すると ${}_m\lambda_i$ は最小値 ${}_m\lambda_i$ となるので、 λ_i は次のように表される。

$$\lambda_i \geq {}_m\lambda_i = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{m^2 Q_{yi}^2 - \min(i, m)^2 Q_{ym}^2}{i m^2 - m \min(i, m)^2}} \quad (28)$$

したがって、 i 層の荷重係数 λ_i は、(11)式による基準荷重係数 ${}_o\lambda_i$ 及び i 層以外の層のせん断力の上限值を考慮して求めた ${}_m\lambda_i$ 、合計 N 個の荷重係数の最大値として定義する。

$$\lambda_i = \max({}_o\lambda_i, {}_m\lambda_i) \quad (29)$$

また、以下では、上式の最大値が ${}_m\lambda_i$ である時、 m 層の降伏が i 層の降伏を制限するという意味で、 m 層を i 層の制約機構と呼ぶことにする。

なお、 ${}_o\lambda_i$ は、最上層より上部(第0層)でのせん断力の上限值が零であるという条件の下で(28)式から求めた荷重係数であるとも考えることもできる。また、証明は省略するが、これらの荷重係数 ${}_o\lambda_i$ と ${}_m\lambda_i$ の間には次の関係がある。

$${}_o\lambda_m > {}_o\lambda_i \quad \text{のとき} \quad {}_m\lambda_i < {}_o\lambda_i \quad (30.a)$$

$${}_o\lambda_m = {}_o\lambda_i \quad \text{のとき} \quad {}_m\lambda_i = {}_o\lambda_i \quad (30.b)$$

$${}_o\lambda_m < {}_o\lambda_i \quad \text{のとき} \quad {}_m\lambda_i > {}_o\lambda_i \quad (30.c)$$

したがって、 ${}_o\lambda_m \geq {}_o\lambda_i$ のときには、 m 層は i 層の制約機構とはなりえない。

4. 損傷分配の基本則

以上の考察結果に基づいて、本研究で提案するせん断型多質点系の損傷分配則を纏めると次のようになる。

1) 全損傷 E_p は、まず基準荷重係数 λ_i に応じて各層に分配される。すなわち、 i 層に流入しようとする損傷 E_{pi}' は次式で表される。

$$E_{pi}' = \frac{E_{yi} {}_o\lambda_i^{-n}}{\sum_{k=1}^N E_{yk} {}_o\lambda_k^{-n}} E_p \quad (31)$$

2) 上記の E_{pi}' のうち実際に i 層で吸収される損傷は荷重係数 λ_i に応じた分 $E_{pi,i}$ のみである。

$$E_{pi,i} = \frac{\lambda_i^{-n}}{o\lambda_i^{-n}} E_{pi}' \quad (32)$$

3) 残りの損傷は*i*層の制約機構となる*j*層に分配されるが、*j*層もまた荷重係数 λ_j 以下で生じる損傷は吸収できない。したがって、*i*層から*j*層に再分配され*j*層で吸収される損傷 $E_{pj,i}$ は次式となる。

$$\lambda_j \leq o\lambda_i \text{ のとき, } E_{pj,i} = \frac{o\lambda_i^{-n} - \lambda_i^{-n}}{o\lambda_i^{-n}} E_{pi}' \quad (33)$$

$$o\lambda_i \leq \lambda_j \leq \lambda_i \text{ のとき, } E_{pj,i} = \frac{\lambda_j^{-n} - \lambda_i^{-n}}{o\lambda_i^{-n}} E_{pi}' \quad (34)$$

$$\lambda_i \leq \lambda_j \text{ のとき, } E_{pj,i} = 0 \quad (35)$$

4) *i*層の制約機構である*j*層で吸収されない残りの損傷は、更に*j*層の制約機構に分配され、3)項と同様の分配則にしたがって再分配が繰り返される。

5) 以上の分配の結果として、最終的に*i*層に分配される損傷 E_{pi} は、(32)式による損傷 $E_{pi,i}$ と他層から再分配される損傷 $E_{pi,j}$ の和として表される。

$$E_{pi} = E_{pi,i} + \sum_{j \neq i} E_{pi,j} \quad (36)$$

図4は、ここで提案する損傷分配の例を図示したものである。この例では、*j*層が*i*層の制約機構となって荷重係数 $\lambda_i (= \lambda_j)$ が算定されており、同様に*k*層が*j*層の制約機構となって荷重係数 $\lambda_j (= \lambda_k)$ が算定されているとする。図の縦座標は荷重係数である。

(11)式の基準荷重係数や(28)式の条件付き荷重係数はいずれも特定の層が降伏するのに必要な動的水平力の下限値を示すものであり、特定の層が降伏した後はその層のせん断力は一定となるが、他の層のせん断力は更に大きくなり得る。したがって、特定の層の損傷は、その荷重係数以上の各荷重段階で分配される損傷の積分値、図4における面積によって表している。例えば、*i*層について太線で示した部分の横幅を荷重係数 $o\lambda_i$ から ∞ の範囲で積分した値が、基準荷重係数に応じて*i*層に流入しようとする損傷 E_{pi}' となる。

*i*層は他の層の降伏さえ先行しなければ、荷重係数 $o\lambda_i$ に応じた太線で囲んだ部分の面積 E_{pi}' の損傷分配を受ける。ところが、*i*層の降伏には通常*j*層の降伏が先

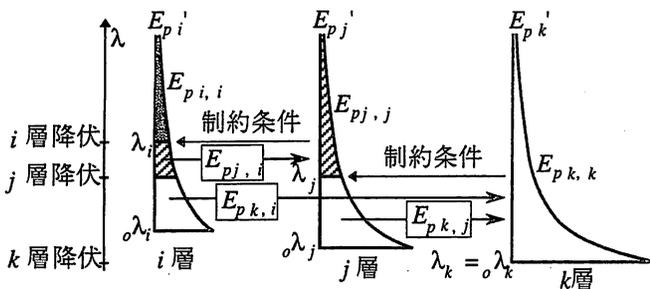


図4 損傷分配の例

行し、*j*層に損傷が集中することによって*i*層のせん断力の上昇は抑制され、荷重係数が $\lambda_i (= \lambda_j)$ 以上になって始めて*i*層は降伏し損傷を吸収し始める。したがって、太線で囲んだ面積のうち荷重係数 λ_i 以上の部分の損傷は*i*層が吸収するが、 λ_i 以下の部分の損傷は*i*層のせん断力の増大を抑制するために*j*層で吸収されると考えた。

更に、図4に示した例では、*j*層の荷重係数は*k*層によって制約されており、*j*層の荷重係数 λ_j は比較的大きくなっている。*i*層から*j*層に再配分される損傷のうち、荷重係数 λ_j 以上で生じる損傷については*j*層で吸収されるが、 λ_j 以下で生じる損傷については*j*層は吸収できず、更に*j*層の制約機構である*k*層に再配分されると考えている。

図4の例では、最終的に*i*層に分配される損傷 E_{pi} は灰色で示した部分の面積によって表され、*j*層の損傷 E_{pj} は斜めハッチを施した部分の面積によって、*k*層の損傷 E_{pk} は白い部分の面積によって表される。

5. 地震応答解析結果との比較

ここではまず、*i*層の強度だけを基準強度の p_i 倍した骨組の地震応答解析結果と前節で提案した損傷分配則による予測結果とを比較して、損傷集中関数に用いられている指数 n （以下、損傷集中指数と呼ぶ。）の値を決定する。

図5～7は、損傷集中指数を決めるのに用いた応答解析結果であり、それぞれ5層、10層、15層骨組について、最上層、中間層、最下層の強度のみを変化させたときのその層の損傷分配率の応答値を示している。このデータの内、損傷が集中する特性を重視して $p_i < 1$ の範囲のみを用い、また、個々の骨組について12種の地震外乱についての応答値は非常にばらついているので損傷分配率の大きい8つのデータのみを用いて、前節の損傷分配則による予測値と応答値の差の2乗和が最小になるように損傷集中指数を算定した。結果を表3に示す。なお、*i*層のみの強度を p_i 倍（ $p_i < 1$ ）した骨組では、*i*層はすべての層の制約機構となり、他の層の制約機構となりえるのは*i*層のみであるので、各層の損傷分配率は次のように単純な式で表現できる。

$$\gamma_{pi} = \frac{E_{pi}}{\sum_{k=1}^N E_{pk}} = \frac{E_{yi} \lambda_i^{-n} + \sum_{j \neq i} E_{yj} (o\lambda_j^{-n} - \lambda_j^{-n})}{\sum_{k=1}^N E_{yk} o\lambda_k^{-n}}$$

$$\gamma_{pj} = \frac{E_{pj}}{\sum_{k=1}^N E_{pk}} = \frac{E_{yj} \lambda_j^{-n}}{\sum_{k=1}^N E_{yk} o\lambda_k^{-n}} \quad \text{ただし, } j \neq i$$

(37)

表3に示すように応答値から最小2乗法で求めた損傷集中指数 n は、骨組の層数や層位置によって必ずしも一定

値ではない。しかし、表3によると、層数または層位置によって損傷集中指数 n が変化する一定の傾向は認めら

れないので、本研究では表3の平均的な値を用いて n は4とした。

表3 損傷集中指数 n

	5層骨組	10層骨組	15層骨組	3つの骨組
最上層	3.75	4.56	4.27	4.17
中間層	5.80	2.65	2.67	3.22
最下層	6.16	3.82	3.76	4.25
3つの層位置	4.49	3.68	3.39	3.87

$$n=4$$

$$(38)$$

図5~7には、 $n=4$ としたときの予測結果を太線で示す。また、参考のために $n=3$ または $n=5$ としたときの予測結果も細線で示している。前節で提案した損傷分配則では、損傷集中特性は他の層の降伏を制約することに

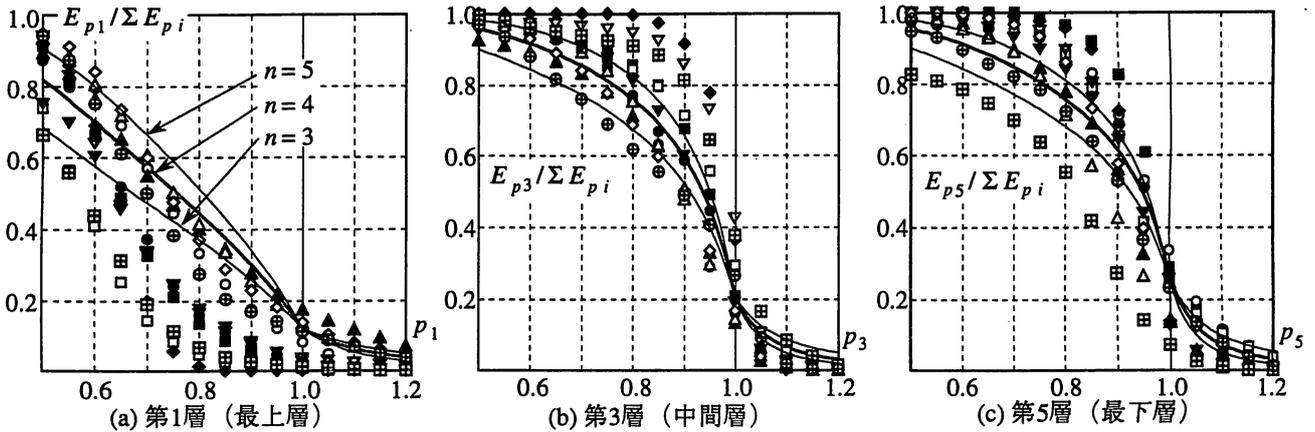


図5 5層骨組

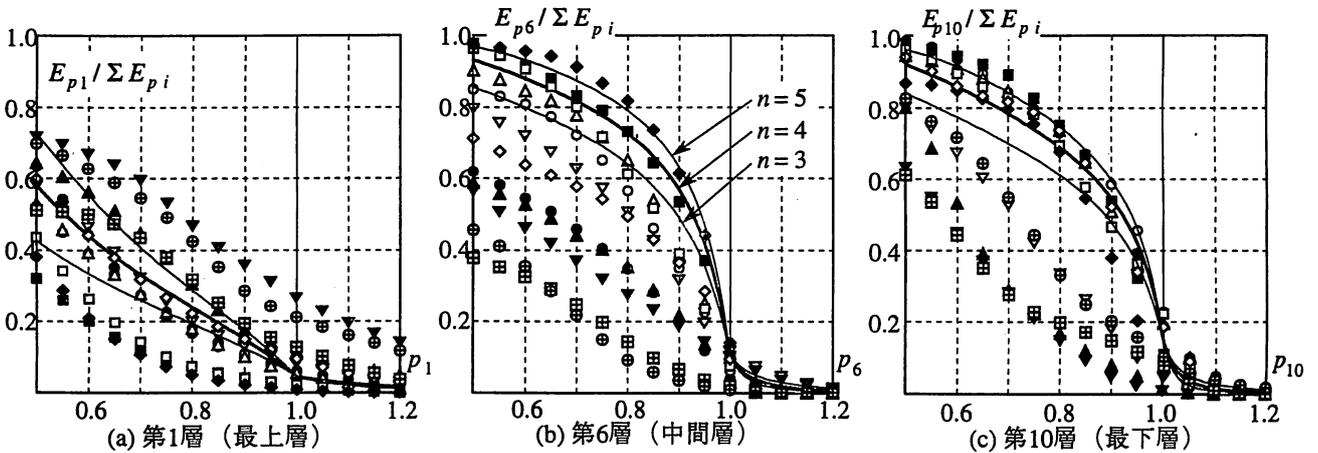


図6 10層骨組

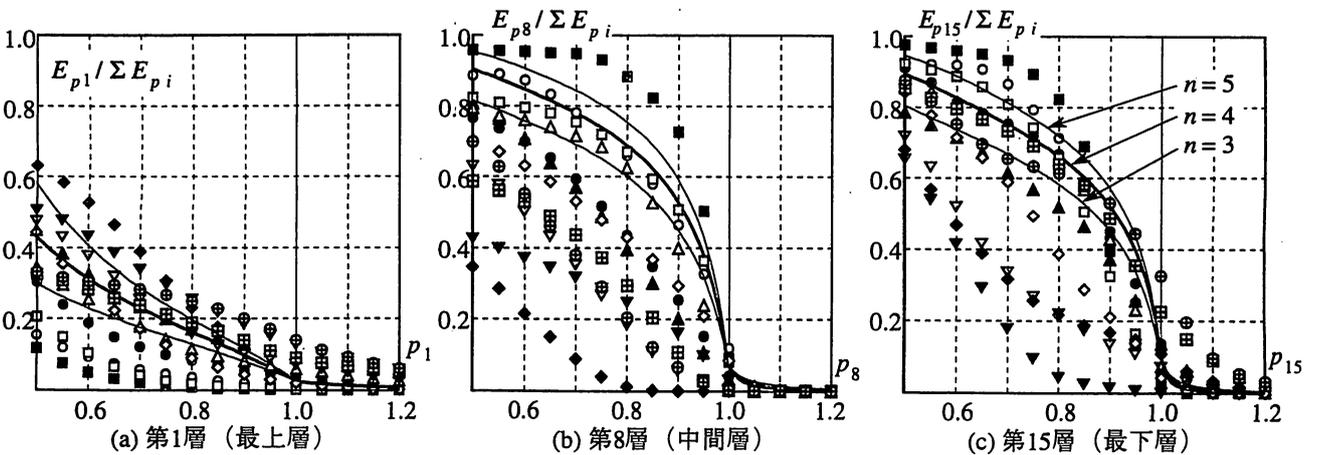


図7 15層骨組

よる損傷の再配分として主に捉えられているので、損傷集中指数を変化させても損傷分配率に及ぼす影響は比較的少ない。

以下では、秋山らが文献4)で提案しているせん断型多質点系の損傷分布式とも比較しながら、 $n=4$ とした本論による損傷分配予測結果を応答値と比較する。ただし、秋山らが文献4)で提案している損傷分布式では、 i 層の強度を p_i 倍にしたときの j 層の損傷分配率は次式で表わされる。

$$\gamma_{pj} = \frac{E_{pj}}{\sum_{k=1}^N E_{pk}} = \frac{E_{yj} p_j^{-n'}}{\sum_{k=1}^N E_{yk} p_k^{-n'}} \quad (39)$$

ここで

$$n' = 6 + 23 p_i^6$$

$$p_j \leq 1$$

まず、図8は、図6(c)に示したものと同一であるが、最下層の強度を変化させた10層骨組の応答解析結果であり、最下層と共に、最下層に隣接する第9層、および最上層の損傷分配率を示している。太線で本論による予測値、細線で秋山らによる予測値を示しているが、図8(c)から分かるように p_{10} を1より小さくしたとき最下層に

損傷が集中する特性については両者の予測結果はほとんど一致している。一方、図8(a),(b)によると、3.4項でも述べたように、 p_{10} を1近傍で変化させると10層に隣接する第9層の損傷分配率は急激に変化し、最下層から離れた最上層の損傷分配率は緩やかに変化する傾向を応答値は示す。本論による予測結果はこのような傾向についても良く近似しているが、秋山らの(39)式によれば第1層と第9層は同じように変化すると予測することになる。

次に図9は1つの層の強度のみを基準強度の0.8倍に低減したときのこの弱い層の損傷分配率を示したものである。ここでも太線で本論による予測値を示し、細線で(39)式による予測値を示している。本論による予測値はおよそ下から1/3程度の層位置で最大となり、この付近の層で損傷が最も集中し易い傾向があることを示す。また、最上層に近づくに連れてその値は急激に小さくなり、最上層には損傷が集中し難いことを予測する。秋山らの提案式では、この値は最下層から最上層に向かって緩やかに単調減少している。応答値は非常にばらついていて、両者の合理性を比較することは困難ではあるが、少なくとも図9(a)によると(39)式は低層骨組の最上

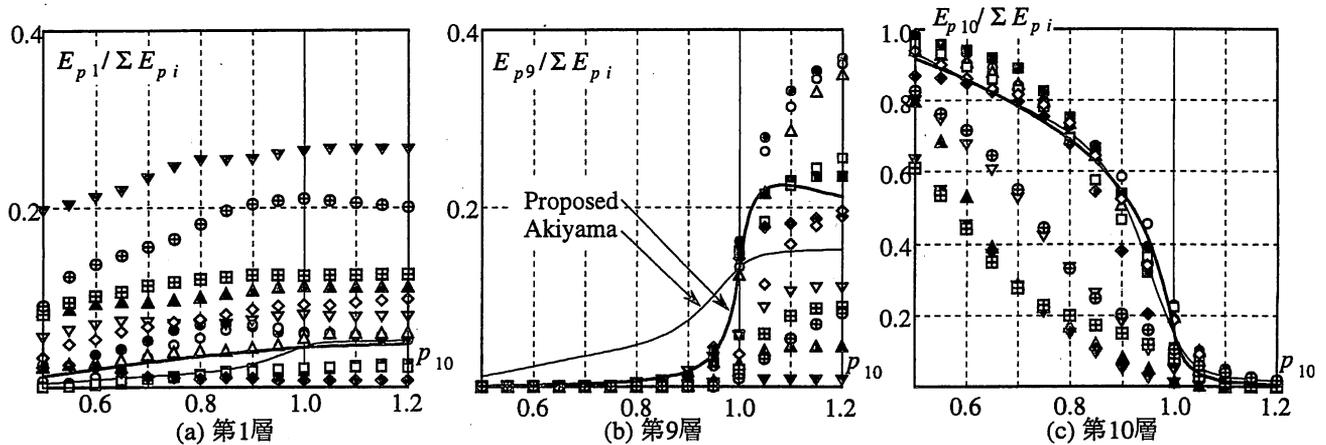


図8 最下層の強度を変化させた10層骨組

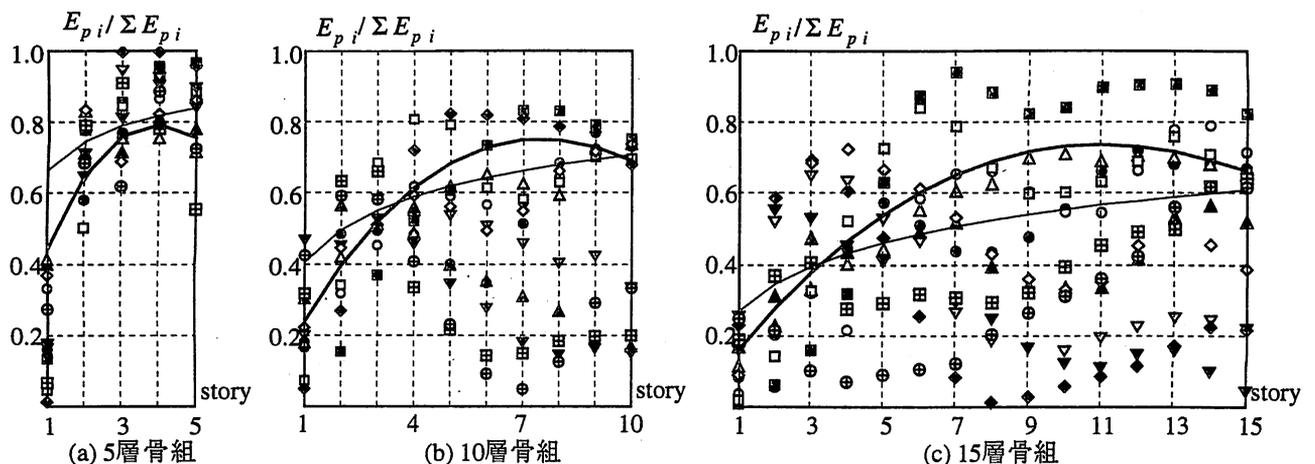


図9 特定層の強度を0.8倍した骨組の弱い層の損傷分配率

層への損傷集中を過大に評価する傾向¹³⁾があることがわかる。

以下は、複数層の耐力を基準強度から変動させた例であり、図10は8,9,10の3つの層の強度を同じ比率で変動させた10層骨組の損傷分配率である。太線で示した本論による予測値は、 $p_8 (= p_9 = p_{10})$ を1より少し減少させると8層の損傷分配率は急激に増大するが、9,10層の損傷分配率は緩やかに増大することを予測する。このような傾向は、応答値にも認められる。一方、細線で示した秋山の提案式によれば、8,9,10層の損傷分配率は同様の増

大傾向をとることが予測される。

最後に、図11に示す例は、最下層の強度が基準強度の0.8倍($p_N = 0.8$)しかない骨組について、最上層の強度を小さくして最上層に損傷を集中させ、最下層の損傷の軽減を試みたものである。図11(a),(d)に示す5層骨組については、本論と(39)式による予測結果はあまり違わないが、層数が多くなるに連れて両者の予測値の差異は大きくなっていく。すなわち、層数が多くなると、最上層を弱くしても最上層への損傷集中は起こり難くなり最下層の損傷集中を軽減する効果は小さくなる傾向があるが、

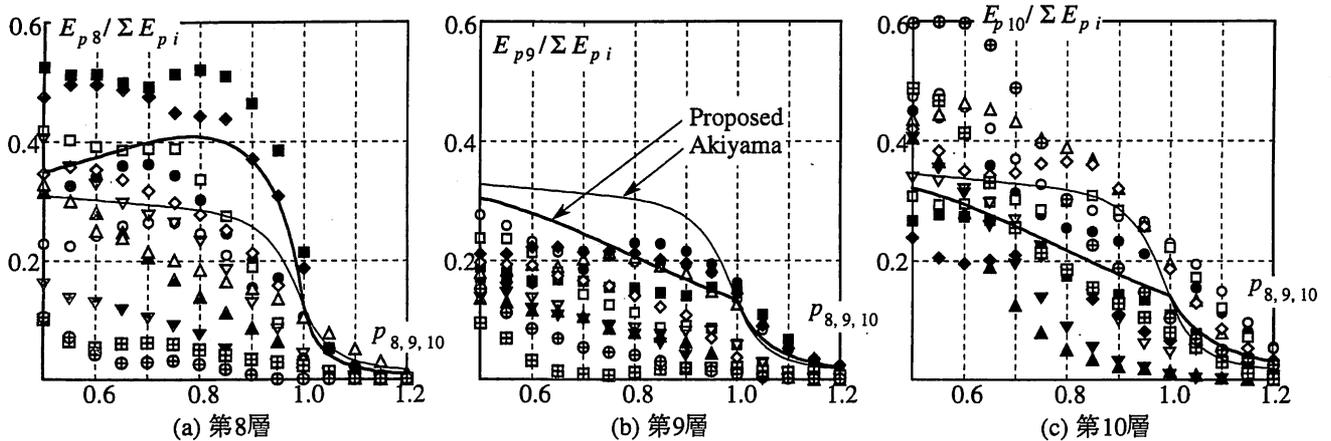


図10 8,9,10層の強度を変化させた10層骨組

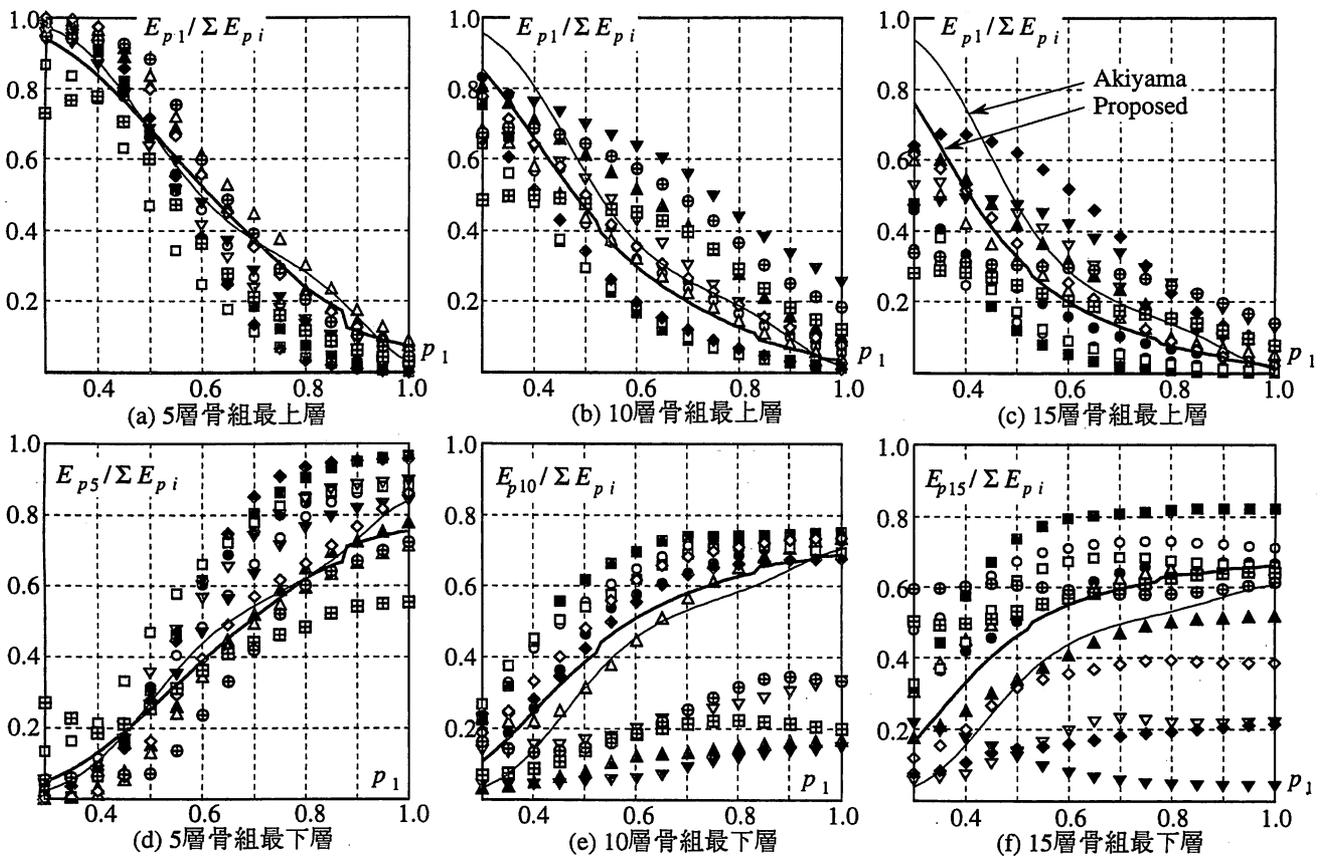


図11 最上層損傷集中型骨組

この傾向は本論による予測の方が秋山らの損傷分布式によるより顕著になる。本論による予測では、15層骨組について $p_1=0.4$ ($p_1/p_{15}=0.5$)としても、図11(c)に示すように最上層の損傷分配率は0.5程度であり、図11(f)によると最下層の損傷分配率は $p_1=1$ のときの半分程度にしか軽減されていない。15層程度以上の骨組では最上層への損傷の集中を図る効果が乏しいことは秋山らも明らかにしている⁷⁾。

6. 結論

本論では、損傷の分配が生じる最も単純な振動系としてせん断型多質点系モデルを対象とし、地震応答解析結果を基にその損傷分配の基本的な法則性について考察し、損傷分配を支配する基本則を提案した。提案した基本則の合理性の検証は地震応答解析結果との比較以外に適当な手段はなく、地震応答解析結果は非常にばらついている。このばらつきの原因としては、地震外乱の周波数特性および骨組の振動特性によって動的地震荷重分布が変化することが挙げられる。本論では、このような動的地震荷重分布の変化を無視して、その平均的な値として(3)式に示した動的地震荷重分布を用いているので、個々の応答解析結果と本論による予測値の対応関係は必ずしも良くない。しかし、ここで示した各種の強度分布をもつ骨組について、本論で示した分配則は、少なくとも損傷分布の定性的傾向・損傷分配率の平均的な値を予測できるものであることは、明らかにし得たと考える。

筆者らは、ここで提案した損傷分配則が対象をせん断型多質点系に限定したものとは考えていない。複数の要素からなる振動系の損傷分配を支配する基本則と捉えている。ここで提案した複数要素への損傷分配則と、1要素内での正負2方向への損傷分配を支配する損傷分配則¹⁴⁾を組み合わせることによって、より一般的な振動系の損傷分布が予測できると考えている。

謝辞

本研究は、1994-1995年度文部省一般研究(C) (課題番号06650639)の援助を受けた。また、本研究内容は耐震性能研究会(建設省建築研究所と(社)鋼材倶楽部の共同研究)で検討された。井上一朗主査はじめ貴重なご意見をいただいた委員各位に感謝します。

参考文献

- 1) G.W.Housner: Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proc. of 1st WCEE, pp.5-1-13, 1956
- 2) 加藤勉・秋山宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975.9
- 3) 加藤勉・秋山宏: 地震時における鋼構造せん断型多層骨組の損傷分布則, 日本建築学会論文報告集, 第270号, pp.61-68, 1978.8
- 4) 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, pp.261-

295, 1990

- 5) 秋山宏・大井謙一: 混合型の復元力特性をもつせん断型多層骨組の損傷集中特性, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.31-38, 1981.5
- 6) 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.38-46, 1983.10
- 7) 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
- 8) 小川厚治: 鋼構造骨組構成部材の適正強度分布に関する研究(その1 動的崩壊機構特性とエネルギー吸収能力), 日本建築学会論文報告集, 第323号, pp.13-22, 1983.1
- 9) 小川厚治: 鋼構造骨組構成部材の適正強度分布に関する研究(その2 動的応答解析例による検討), 日本建築学会論文報告集, 第328号, pp.18-25, 1983.6
- 10) 小川厚治: 鋼構造骨組構成部材の終局強度分布に関する一考察, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, 第5号, pp.289-292, 1981.3
- 11) A.Papoulis: 工学のための応用確率論・基礎編, 東海大学出版会, pp.172-183, 1970
- 12) A.H-S.Ang and W.H.Tang: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, pp.189-191, 1977
- 13) 加藤勉・秋山宏・大井謙一・東清仁: 強震を受けるせん断型多層骨組の損傷集中(鋼構造剛接骨組を対象として), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.169-172, 1977
- 14) 待鳥賢治・小川厚治・黒羽啓明: 強震を受ける構造物の正負2方向への損傷分配に関する一考察, 日本建築学会九州支部研究報告, 第35号1, pp.497-500, 1995.3