

1. はじめに

大きな荷重の発生に際して特定の層が崩壊する層崩壊は、その層を構成する部材の破壊が脆性的である場合には望ましくない。梁が降伏によりエネルギー吸収し、建物全体にバランス良く損傷が分布して構造物全体は崩壊を免れる全体崩壊型が望ましいと考えられる。地震により、柱にせん断破壊が起こった場合、構造物の応力分布は著しく変化し、せん断破壊をした柱を含む層は層崩壊を起こす可能性がある。

構造物の信頼性を求めるにあたり、延性的部材からなる構造物の信頼性は、構造物の最終崩壊型を用いて求められる。一方、脆性的破壊を含む構造物においては、途中の応力状態の変化を考慮し、順次部材の信頼性を求めて解析を行わなければならない。

本論文では、柱のせん断破壊による構造物の層崩壊の確率を求め、脆性的破壊を含む構造物の層崩壊確率の検討を行った。さらに、柱の曲げ破壊による構造物の層崩壊確率と、せん断破壊による層崩壊確率との比較を行う事により、脆性的破壊とならないための安全性余裕の検討を行った。

2. 既往の研究

小野、趙、吉原は柱に塑性ヒンジが発生することによる層崩壊をさけ、全体崩壊機構を実現するための柱梁耐力比を確率的に示した<sup>1)</sup>。しかし、検討の対象は曲げによる延性的破壊であり、脆性的に破壊する部材を含んでいない。

井戸田、山崎は脆性的破壊が構造信頼性に与える影響に関する検討を行い、塑性ヒンジに脆性的挙動が発生した場合の保有水平耐力低下の割合について検討を行った<sup>2)</sup>。

高橋、斎川は<sup>3)</sup>1スパンから6スパンまでの1層構造物と、3層構造物の中間層に関して、1層の柱のせん断に関する信頼性指標を $\beta=1$ として部材の耐力を設定し、構造物の各層の柱にすべて同じ部材を用いた場合のStable Configuration法<sup>4)</sup>による信頼性解析を行った。小規模の構造物においては、その層における柱の本数や規模の違いがあっても、構造物の信頼性指標は最初にせん断破壊する部材の信頼性指標と近い値となる事を示した。延性的破壊する部材からなる構造物においては、部材の信頼性より高い信頼性が見込めるのに対し、脆性的破壊の部材からなる構造物は最初に破壊する部材の破壊の影響が大きい場合があり、構造物に部材の信頼性より高い信頼性を見込めない場合があることを示した。また、中

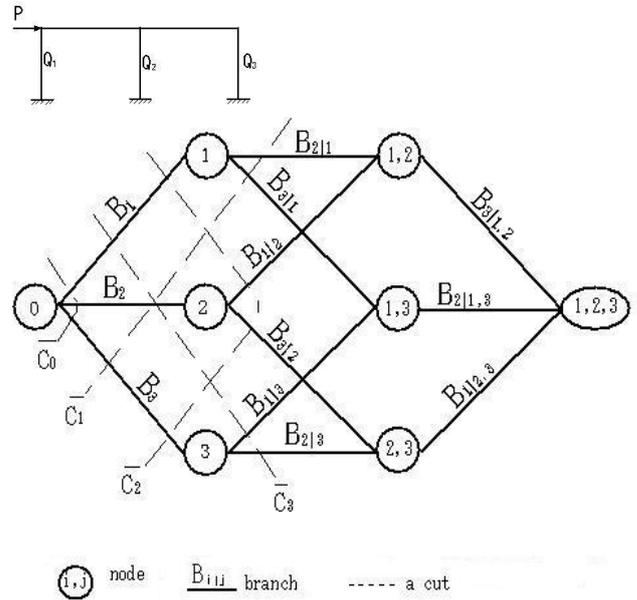


図1 Stable Configuration法モデル

間層が層崩壊する場合についても、1層の場合と同様、最初の部材がせん断破壊するとその他の部材も続けて破壊し、最初の部材の破壊確率と層崩壊の確率は近い値となり、同様の傾向があることを示した。

また渡辺は<sup>5)</sup>一般的な規模の構造物を対象とし、脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析を実現するため、 $\beta$ -unzipping法<sup>6)</sup>による信頼性解析を行い、延性的部材からなる構造物の最終崩壊型における信頼性解析との違いを示した。

3. 方法

(1) 脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析

部材がせん断破壊する場合、部材の脆性的破壊により構造物の応力再配分が行われるため、要素の破壊ごとに応力解析を行い、状態変化ごとに信頼性解析を行わなければならない。構造物の最終崩壊型を用いて構造物の信頼性を求める事ができる延性的破壊の組み合わせで構成される構造物と解析方法が異なる。

部分的破壊あるいは部材の破壊を網羅し、その組合せで構造物全体の破壊を定義して解析する方法としてStable Configuration法がある。Stable Configuration法は図1に示すようにカットセットを用いたネットワーク手法であり、脆性的破壊をおこす構造物のように最初の破壊事象に構造物の信頼

性が左右される構造物の場合、高い精度で解析することができるが、構造物が大きくなるにつれて網羅しなければならない事象の組合せが膨大になるため、小規模の構造物以外には適用が困難である。

一方、構造物の応力解析と信頼性解析を繰り返しい層崩壊の確率を求める  $\beta$ -unzipping 法がある。手順は複雑であるが脆性的破壊を含む構造物においては、順次部材の破壊を追跡し、崩壊型を求め信頼性解析を行うことが可能である。多数の部材を持ち、複雑な構造物の場合には事象の組み合わせが膨大になり適用が難しい場合があるが、分岐限定法を適用して組み合わせが増大することを制限する事ができる。

本論文に用いた部材の応力度ひずみ度モデルを図2に示す。せん断破壊について脆性的破壊の部材モデルを用い、最大耐力に達した後、応力を全く負担できないものとした。曲げ破壊については、最大耐力に達した後、その耐力は維持し、十分な変形能力を持つとした。

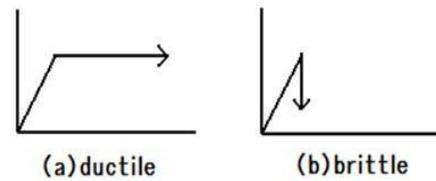


図2 部材の $Q-\delta$

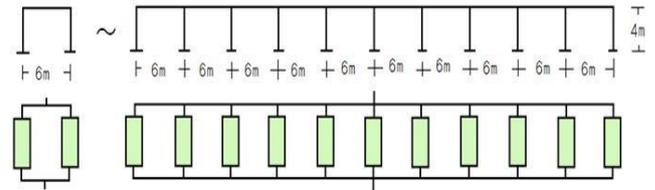


図3 解析モデル

## (2) せん断破壊による層崩壊の確率

柱のせん断破壊により構造物が層崩壊する確率を求めるため、ここでは1層の構造物を用いて解析を行った。多層構造物の特定の層における層崩壊の確率は、部材の信頼性と層崩壊の確率の関係を検討するにあたっては同様の傾向を示す事がわかっている<sup>3)</sup>。層崩壊はその層における部材の数および個々の部材の信頼性により異なると考えられるため、ここでは図3の解析モデルのように1スパンから10スパンの構造物で部材のせん断破壊に関する信頼性を  $\beta = 0.5 \sim 5.0$  とした。柱はすべて同じせん断耐力を持つ部材とし、せん断耐力は互いに独立とした。

1層の構造物について  $\beta$ -unzipping法を用いて層崩壊の確率を求めた。本論文においては、最も破壊確率が高い部材の破壊により破壊が進行し、構造物が崩壊に至ると考える。1層3スパンの構造物の例を図4に示す。単位荷重載荷時の柱のせん断力  $a_{1|1}$ ,  $a_{2|1}$ ,  $\dots$ ,  $a_{n|1}$  を求め、応力と耐力より性能関数を求め破壊確率を求める。柱のせん断による破壊確率を比較し、破壊確率が最も大きい部材が最初に破壊するとした。その性能関数  $Z_1$  は次のように表される。

$$Z_1 = Qs_1 - a_1 P \quad (1)$$

ここに  $Z_1$  は最初に破壊する部材の性能関数を表し、 $a_1$  は単位荷重載荷時最初に破壊する部材に生じるせん断力を表す定数である。 $Qs_1$  は部材のせん断耐力を表し、 $P$  は荷重を表す確率変数である。 $a_1 P$  は荷重をかけた場合に当該部材に生じるせん断力を表す。

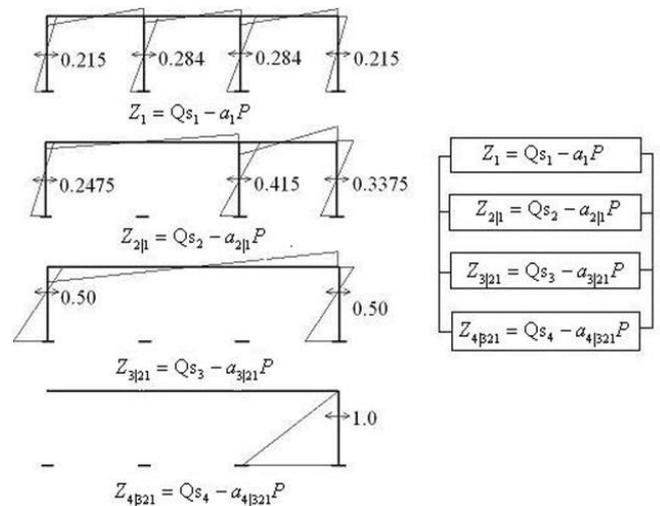


図4  $\beta$ -unzipping法モデル

次に、せん断破壊した部材はその後応力を負担できないとして、さらに単位荷重をかけ、各部材に生じるせん断力を求める。この状態で破壊確率が最も大きくなる部材における耐力  $Qs_2$  およびせん断力  $a_{2|1} P$  を用いて、性能関数  $Z_{2|1}$  を求める。

$$Z_{2|1} = Qs_2 - a_{2|1} P \quad (2)$$

ここに  $Z_{2|1}$  は最初に破壊した部材の破壊後の応力状態を考慮して求めた次の部材の破壊を表す性能関数である。 $a_{2|1}$  は最初の部材の破壊後、その次に破壊する部材の単位荷重時せん断力を表す定数である。

さらに破壊した部材は応力が負担できないとして、同様に応力解析を行い破壊する部材の性能関数を求

める。最終的な構造物の崩壊に至るまでこれを繰り返す。それまでに求められた性能関数を並列システムとして構造物全体の破壊確率を求める。

$$P_f = \text{Prob}\{(Z_1 < 0) \cap (Z_{21} < 0) \cap \dots \cap (Z_{|n-1, n-2, \dots, 2, 1|} < 0)\} \quad (3)$$

ここに  $P_f$  は構造物全体の破壊確率であり、 $\text{Prob}$  は確率を表す。(3)の積事象の確率は、性能関数間の相関係数を考慮し、多重破壊条件付信頼性指標<sup>7)</sup>により求めた。

本研究では、最初にせん断破壊する部材の信頼性指標を  $\beta = 0.5 \sim 5.0$  とし、部材の耐力を設定し、耐力および荷重は正規分布に従うとした。せん断耐力の変動係数  $\delta_s$  は 0.15、荷重の変動係数  $\delta_p$  は 0.3、0.5、0.7 とした。

構造物で考慮すべき部材の数を変化させるため、1スパンから10スパンまで変化させた構造物について、層崩壊の確率を求め、部材の本数の違いによる層崩壊確率について検討を行った。層崩壊の確率  $P_f$  から、(4)式により、システム信頼性指標  $\beta_{\text{sys}}$  を求めた。 $\Phi$  は標準正規分布関数である。

$$\beta_{\text{sys}} = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (4)$$

### (3) 曲げ破壊による層崩壊の確率

せん断破壊となる部材では最大耐力に達した後、応力を全く負担できない脆性的破壊としたが、曲げ破壊となる場合は部材が最大耐力に達した後、その耐力を維持し十分な変形能力を持つものとした。

柱のせん断破壊による層崩壊は急激な応力の変化を伴うため望ましくない。構造物の最終崩壊型は、全体崩壊型となることが望ましく、特定の層における柱の柱頭柱脚に曲げ破壊が生じる層崩壊も望ましくない。従って、図5のように各崩壊型による構造物の信頼性指標は柱のせん断破壊による層崩壊、柱頭柱脚に曲げ破壊がおこる層崩壊、全体崩壊型の順に小さくなるように設定されるべきである。せん断破壊による層崩壊と全体崩壊となる構造物の信頼性を比較するためには、さまざまな要因が影響する。ここでは柱のせん断破壊と柱の曲げ破壊の比較により層崩壊が起こらないための部材の安全性余裕を考えることとした。

図6のように、ある柱についてせん断耐力と柱頭柱脚に曲げ破壊がおこった場合のせん断力の比較を行う。

$$Q = \frac{(M_1 + M_2)}{h} < Q_s \quad (5)$$

ここに  $M_1, M_2$  は柱頭、柱脚の曲げ耐力、 $Q_s$  は柱のせん断耐力を表す確率変数、 $h$  は柱部材長さを表す定数である。(6)式に示す性能関数を用いて、(6)式が

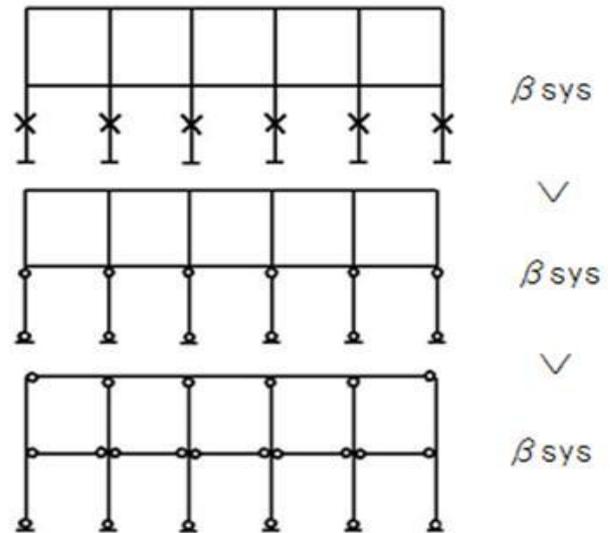


図5 構造物の信頼性の比較

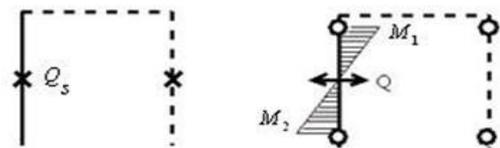


図6 部材の破壊形式の比較

負になる確率より求められる安全性余裕  $\beta_{\text{MQ}}$  を設定する。

$$Z = Q_s - \frac{(M_1 + M_2)}{h} \quad (6)$$

$$\beta_{\text{MQ}} = -\Phi^{-1}\left[P\left\{Q_s - \frac{(M_1 + M_2)}{h} < 0\right\}\right] \quad (7)$$

ここでは、同じ部材の柱頭、柱脚の曲げ耐力は完全相関と仮定した。また、曲げ耐力の変動係数  $\delta_M$  は 0.1 とした。

柱のせん断耐力および(7)式の安全性余裕  $\beta_{\text{MQ}}$  の値を-2から3まで変化させ、柱の曲げ耐力の平均値を求め、その値を用いて、図5のように柱頭柱脚の曲げ破壊により層崩壊となる構造物の最終崩壊型を用いて信頼性解析を行った。

$$Z = \Sigma M - P \cdot h \quad (8)$$

$$\beta_{\text{sys}} = -\Phi^{-1}[P(\Sigma M - P \cdot h < 0)] \quad (9)$$

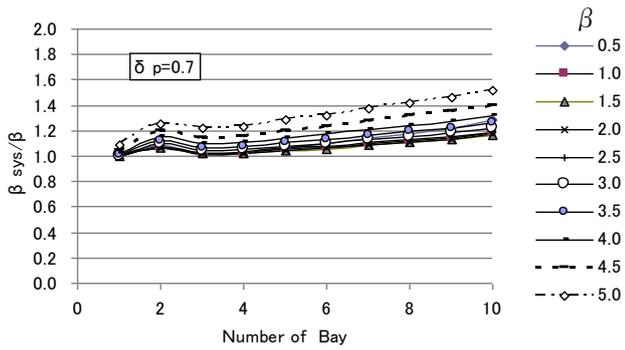


図7 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\delta p=0.7$ )

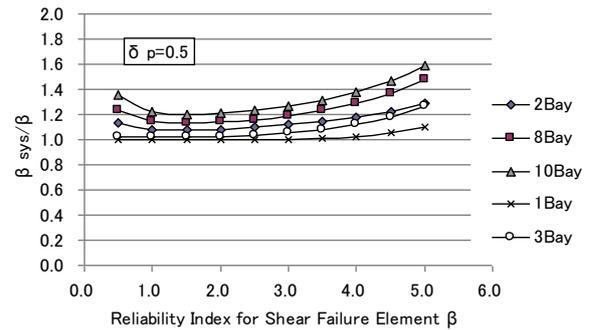


図10 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\delta p=0.7$ )

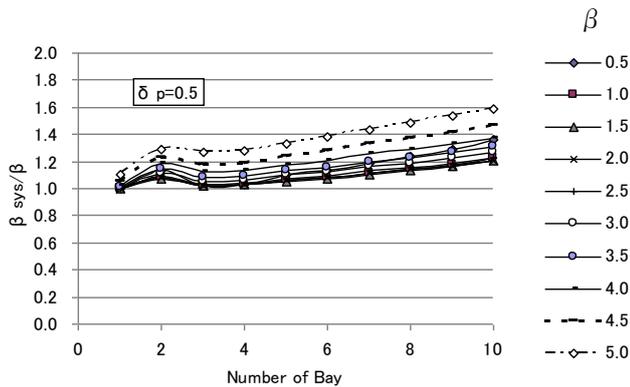


図8 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\delta p=0.5$ )

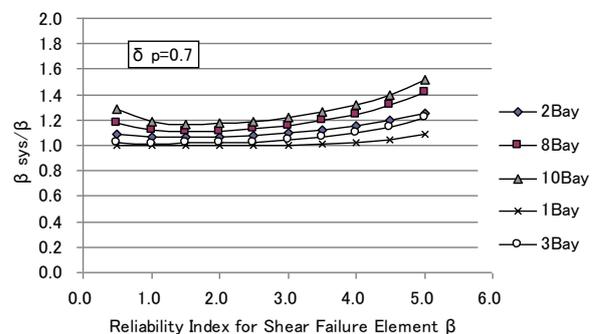


図11 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\delta p=0.5$ )

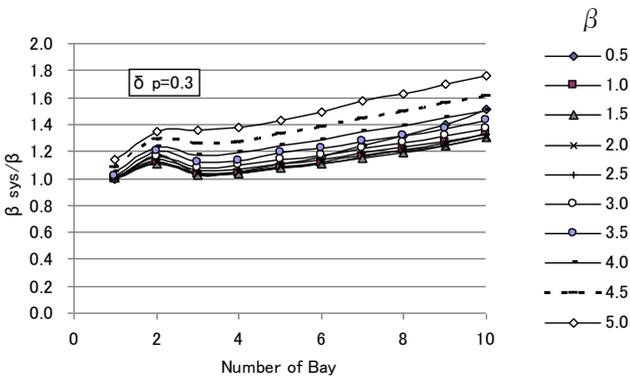


図9 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\delta p=0.3$ )

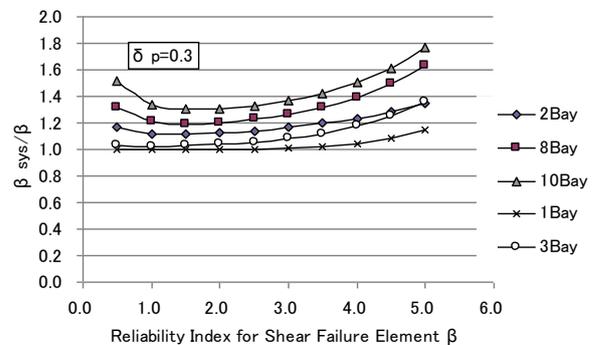


図12 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\delta p=0.3$ )

#### 4. 結果および考察

柱のせん断破壊による構造物の層崩壊確率から求めた信頼性指標について、その結果を部材の信頼性指標  $\beta$  との比  $\beta_{sys}/\beta$  として図7から図9に示す。スパン数が比較的少ない構造物の層崩壊の信頼性指標は、部材の信頼性指標と近い値となった。最初の部材の破壊が起こると、他の部材の負担する応力が大きく変化し、その後の荷重載荷時には各部材の破壊確率が高くなった。最初の部材が破壊するとその他の部材も続けて破壊し、層崩壊の確率は最初に破壊する部材の破壊確率

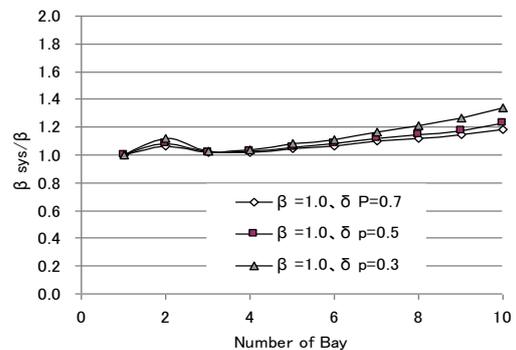


図13 柱のせん断破壊による層崩壊確率 ( $\beta=1.0$ )

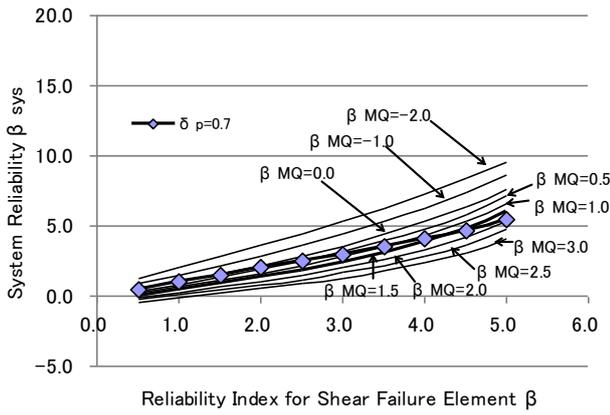


図 1.4 層崩壊信頼性指標の比較  
(1 スパン構造物,  $\delta p=0.7$ )

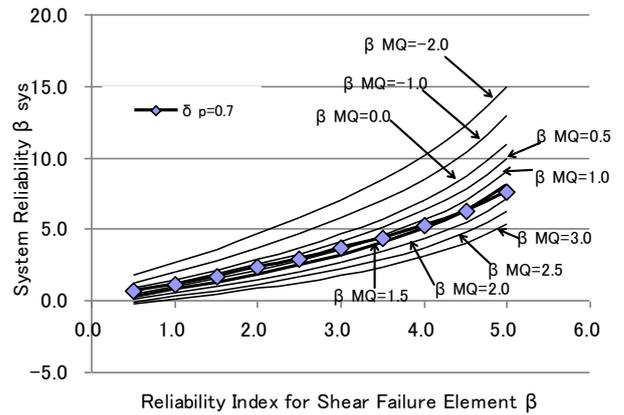


図 1.7 層崩壊信頼性指標の比較  
(10スパン構造物,  $\delta p=0.7$ )

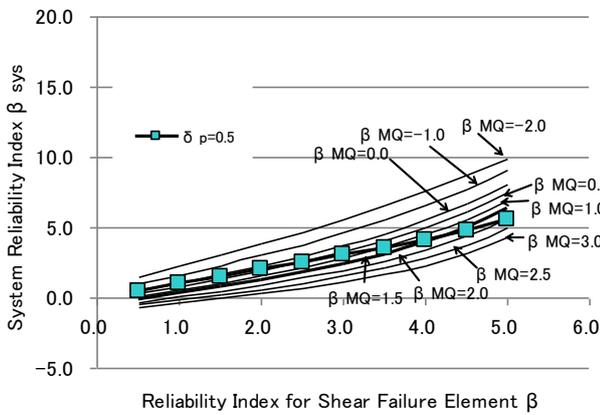


図 1.5 層崩壊信頼性指標の比較  
(1 スパン構造物,  $\delta p=0.5$ )

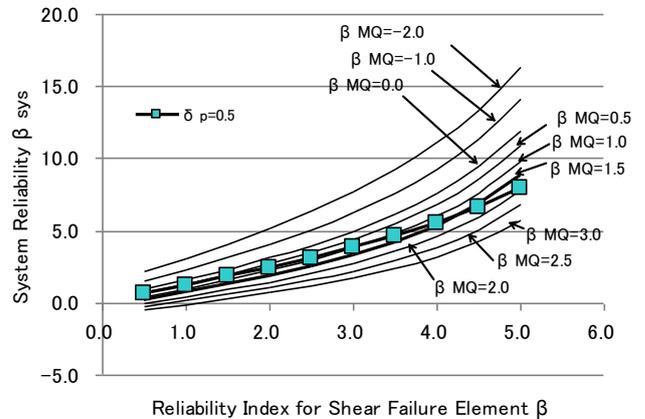


図 1.8 層崩壊信頼性指標の比較  
(10スパン構造物,  $\delta p=0.5$ )

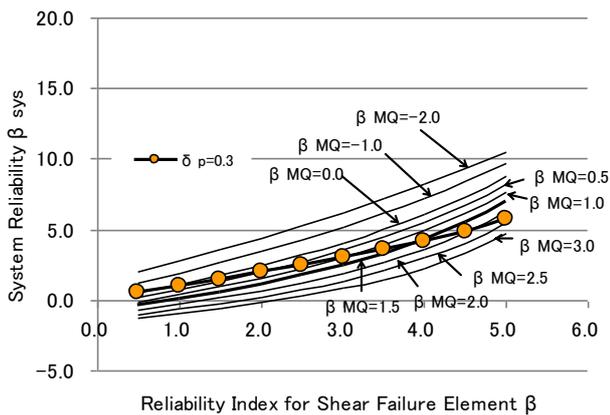


図 1.6 層崩壊信頼性指標の比較  
(1 スパン構造物,  $\delta p=0.3$ )

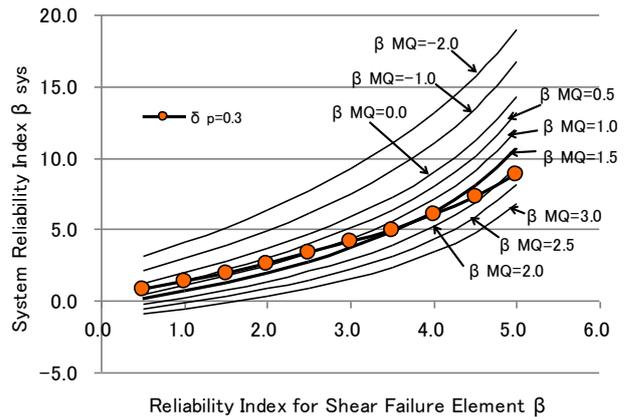


図 1.9 層崩壊信頼性指標の比較  
(10スパン構造物,  $\delta p=0.3$ )

と近い値となった。スパン数が8から10程度の構造物は、部材本数が多いことにより構造物の破壊確率はわずかに小さくなり、連鎖的な破壊は起こるが、部材の本数が多いことにより構造物はわずかに安全になることがわかった。スパン数が2の構造物の応力

状態は他の構造物の応力状態と傾向が異なるため、破壊確率が小さくなる。最も破壊確率が大きいのは、1スパンの場合で、次は3スパンの場合であった。荷重の変動係数が小さく、スパン数が多い場合には、荷重の変動係数が大きい場合と比較して構造物の破

壊確率は小さくなった。部材の信頼性指標  $\beta$  を0.5から5まで変化させ構造物の信頼性指標を求めた結果を図10から図12に示す。部材の信頼性指標が1または1.5の場合、部材の信頼性指標と構造物の信頼性指標が最も近い値となり、部材の信頼性指標が大きいほど、部材の信頼性指標と構造物の信頼性指標には差ができた。

荷重の変動係数の影響について、柱のせん断に対する信頼性指標  $\beta = 1.0$  の場合について図13に示す。荷重の変動係数が大きい場合、部材の信頼性指標と構造物のせん断による層崩壊の確率は近い値となった。

部材設計における曲げの安全性余裕  $\beta_{MQ}$  を設定し、荷重の変動係数  $\delta p = 0.7, 0.5, 0.3$  として曲げにより層崩壊型となる構造物の破壊確率より求めた信頼性指標と、柱せん断破壊による層崩壊の確率より求めた信頼性指標の比較を行った。せん断耐力と曲げ耐力の相関が大きい場合には、より小さい安全性余裕でせん断破壊を免れることができ、独立の場合に最も大きい安全性余裕を必要とするため、ここではせん断耐力と曲げ耐力は独立とした。結果を図14から図19に示す。

柱の曲げ破壊による層崩壊は、部材を組み合わせることにより構造物の信頼性は高くなる。図5に示したように柱のせん断破壊による層崩壊がおこらないためには、せん断による層崩壊より求めた信頼性指標が曲げによる層崩壊の信頼性指標より大きくする必要があり、部材の信頼性指標の大小で、構造物の信頼性の大小は比較できないため、システム信頼性の値を比較し、せん断破壊による層崩壊の信頼性指標が曲げによる信頼性指標より大きくなる  $\beta_{MQ}$  の値を検討した。 $\beta = 1.0 \sim 3.0$  においてはいずれの場合も  $\beta_{MQ} = 1.5$  程度の設定でよいと考えられる。さらに大きいせん断に関する信頼性指標を持つ構造物に関しては、 $\beta_{MQ} = 2.0$  とする必要があり、また部材の本数が構造物の信頼性に影響することがわかった。

## 5. まとめ

せん断破壊による構造物の層崩壊の確率を求め、部材のせん断破壊に関する信頼性指標  $\beta$  が1～3程度で構造物の規模が大きくない場合、部材の信頼性指標と構造物の信頼性指標は近い値となり、連鎖的な破壊となる。

部材の本数が多い構造物の場合、1本の部材の負担が小さくなるため、部材の本数が少ない構造物と比較して安全となり、急激な破壊とはならない事がわかった。

本研究では、柱の曲げ破壊を想定した構造物の層崩壊と、柱のせん断破壊による構造物の層崩壊の破壊確率を比較し、部材の安全性余裕に関する検討を行った。

部材のせん断に関する信頼性指標が1から3程度の構造物の場合、曲げに関する安全性余裕を1.5程度とする必要がある。またせん断に関する部材の信頼性指標がさらに高くなる場合には曲げに関する安全性余裕を大きくしてせん断破壊による層崩壊がおこらないようにする必要があり、ことがわかった。

## 参考文献

- 1) 小野徹郎, 趙衍剛, 吉原和宏: 極限解析法を用いた平面骨組構造物のCOF評価法, 構造工学論文集, Vol. 43B, pp. 377-382(1997)
- 2) 井戸田秀樹, 山崎賢二: 部材変形性能の不確定性を考慮した鉄骨ラーメン骨組の吸収エネルギー量に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第574号, pp. 189-195(2003)
- 3) 高橋利恵, 齊川彰之: 脆性的破壊を考慮した鉄筋コンクリート構造物の目標信頼性指標に関する研究, JCOSSAR2003, Vol. 5, pp. 315-320(2003)
- 4) S-T. Quek and A.H-S. Ang: "Structural System Reliability by the Method of Stable Configuration", University of Illinois
- 5) 渡辺典一: 鉄筋コンクリート構造物のせん断目標機構保証指標設定に関する研究, 平成17年度修士論文, 前橋工科大学大学院建築学専攻
- 6) P. Thoft-Christensen, Y. Murotsu, : "Application of Structural Systems Reliability Theory", Springer-Verlag, 1986
- 7) Sadaichi TERADA and Toshie TAKAHASHI, : "Failure-Conditioned Reliability Index", Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 114, No. 4, p. 942-952(1988)