

# 脆性的破壊を考慮した鉄筋コンクリート構造物の設計目標に関する研究

0126007 齊川彰之  
指導教員 江守克彦

## 1. はじめに

構造部材は、様々な破壊形式で破壊する可能性があり、設計はそれらを考慮して行われる。鉄筋コンクリート構造物の限界状態設計法における機構保証設計では、架構が設計で想定した降伏機構を形成する前に部材の脆性的な破壊が生じないことを検証する。そのため、部材の脆性的破壊に対する目標信頼性指標を部材の曲げ破壊に関する目標信頼性指標より大きくなるように設定するとされているが、脆性的破壊に関する破壊形式の検証は、単一の応力状態に関する信頼性を部材レベルで求めるため、部材破壊後の挙動が構造物全体の信頼性にどのような影響を与えるかの検討を行うことなく設計で用いられている。部材の破壊形式の中で、脆性的な破壊となる場合は、その部材の破壊により構造物の応力状態が急激に変化するため、その後の状態を考慮した検討が必要である。

部材の曲げ破壊により降伏機構を形成することによる構造物の破壊確率は、構造物の破壊形式を定義することにより解析が行われているが、部材の脆性的破壊により構造物が破壊する場合は、同様の方法が適用できないため、脆性的破壊に関する部材の目標信頼性指標をどの程度に設定するべきか、明らかにされていない。

本研究では、部材の脆性的破壊により構造物が破壊する場合と、降伏ヒンジの発生により崩壊形に至る破壊とを比較することにより、構造物の破壊確率の解析方法の違いを明らかにし、その部材の破壊後の状態が構造物全体の信頼性に与える影響について検討を行う。

さらに、部材のせん断破壊により構造物が破壊する確率を算定し、降伏ヒンジの形成により崩壊形に至る場合の構造物の破壊確率と比較することにより、構造部材の目標信頼性指標をどの程度に設定すればよいかについての検討を行うものである。

## 2. 脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析法

### 2.1 解析方法

構造物に脆性的破壊する部材を含む場合、その部材が破壊することにより構造物の応力状態が逐次変化するため、それぞれの段階の応力状態を考慮して信頼性を求める必要があり、延性材のみからなる構造物のように最終崩壊型のみを対象とする信頼性解析を用いることができない。

従って、脆性的破壊を含む信頼性解析は、各状態における多数の性能関数による複雑な組み合わせの解析が必要となる。構造物の状態を逐次追跡しながら信頼性を解

析する方法としては $\beta$ -unzipping法<sup>1)</sup>がある。部材の破壊あるいは部分的破壊に伴う構造物の状態変化が発生するごとに応力解析を行い、破壊の可能性のある場所について信頼性解析を行い、破壊確率の高いところから順に組み合わせを作成し解析を行う方法である。 $\beta$ -unzipping法では、破壊する場所の限定を行い、組み合わせが増大することを制限しているが、多数の部材をもつ大規模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。

一方、最初に部分的破壊あるいは部材における単独の破壊に関する状態を網羅し、それらの組み合わせで、構造物全体の破壊を定義し、脆性的破壊による急激な変化にも適用できる解析方法として、Stable Configuration法<sup>2)</sup>がある。Stable Configuration法はカットセットを用いたネットワーク手法である。高次のStable Configuration法の適用は、 $\beta$ -unzipping法と同様に事象の組み合わせを用いるため適用が困難であるが、脆性的破壊を扱う場合には、部材の破壊による構造物の違いからある程度の規模の構造物に対しても適用が可能であると考えられる。

### 2.2 $\beta$ -unzipping法

最初に部材の破壊形式をすべて明らかにする。弾性範囲で応力解析を行い、最も破壊確率の高い破壊形式により最初の部材が破壊する確率を求める。次に最初の部材の破壊による構造物の変化を考慮して応力解析を行い、その状態で破壊確率の高い破壊形式による部材の破壊確率を求める。最終崩壊型に至るまでこれを繰り返す、それまでの条件付破壊確率の積事象により、構造物のある崩壊型における破壊確率を求める。図1に $\beta$ -unzipping法の解析モデルを示す。この図1の並列モデルはある構造物で想定される1つの崩壊形を表す。構造物には複数の崩壊形が考えられるため、それらを破壊確率の高いものから抽出し、各崩壊形の直列モデルで構造物全体の破壊を定義する。各過程において、破壊確率が非常に低い破壊形式に関しては起こらないものとして、取り扱う事象を制限し解析上の煩雑さを避ける。

### 2.3 脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析例

図2に示す1層1スパンの構造物について、 $\beta$ -unzipping法により部材の破壊を追跡し、部材の破壊形式を考慮しながら、構造物の破壊確率の算定を行った。部材の曲げ破壊を延性材でモデル化し、十分な変形性能

があるものとした。柱のせん断破壊を脆性的破壊とし、ここではせん断破壊後、急激にその能力を失い応力が負担できないものとした。なお部材の曲げ破壊は図3に示す6箇所で行くとし、せん断破壊は2本の柱で行くものとした。図中の破壊位置を表す番号1～8における破壊を表す事象をF1～F8と設定した。

### 2.3-1 部材の曲げ破壊で構造物の破壊が決まる場合

せん断破壊が混在しない場合に限定し、部材の曲げ破壊のみを扱って構造物全体の破壊確率の検討を行った。塑性ヒンジの発生を表す性能関数を順次追跡し、構造物が崩壊形に至るまでの性能関数および性能関数間の相関係数を求める。この1層1スパンの例においては、塑性ヒンジ位置 3→6→1→5 の順で塑性ヒンジが発生し、崩壊形に至る場合が最も破壊確率が高く、図4中のmechanism 1 に示す並列システムの崩壊形となった。mechanism 1 における構造物が崩壊形に至るまでの性能関数および性能関数間の相関係数を図4に示す。並列システム各要素を構成する条件付き事象の起こる確率は、部材の曲げ耐力を表す確率変数  $R_i$  と荷重を表す確率変数  $P$  からなる性能関数  $Z$  により求められる。性能関数を図4中の式①～④に示す。また、mechanism を構成する事象の組み合わせ確率は、多重破壊条件付信頼性指標<sup>3)</sup>を用いて信頼性解析を行った。式①～④に示す性能関数間の相関係数を図4中の $[\rho]$ に示す。これより、最終状態の性能関数と他の性能関数は非常に相関が高く、最終崩壊形を予測できれば途中の状態を考慮することなく最終崩壊形の性能関数を用いて、構造物の崩壊形における破壊確率を算定できると考えられる。

### 2.3-2 部材の脆性的破壊で決まる場合

図2に示す1層1スパンの構造物について、柱のせん断破壊を考慮し、 $\beta$ -unzipping法を用いて信頼性解析を行った。部材のせん断破壊と曲げ破壊を混在させるため、実際の設計によるせん断耐力より平均値を小さくし、部材設計におけるせん断破壊の目標信頼性指標を降伏ヒンジの発生と近い値になるようせん断耐力の設定を行った。

対象とする構造物が崩壊形に至るメカニズムを図5に示す。脆性的破壊の発生により、その後柱は応力を負担できないものとしたため、構造物の状態が急激に変化し他の部材への応力再配分により、他の部材の負担が増し、連鎖的破壊を引き起こす。せん断破壊後の次の状態の破壊に関する信頼性指標は非常に小さくなり、連鎖的破壊が発生することを示している。せん断破壊が起こると、その後1ないし2箇所の破壊で、構造物が崩壊形に至る場合が多い。この例題においては、想定している破壊箇所が少ないため、各崩壊形における信頼性は、脆性的破壊が最初に起こるとその部材の破壊確率が構造物全体の破壊確率に対して支配的となった。

延性材で構成される構造物は、部分的な破壊を表す性

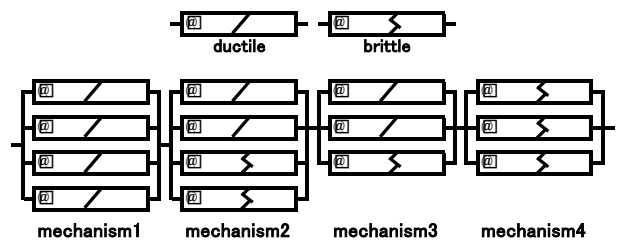


図1  $\beta$ -unzipping法によるシステムモデル

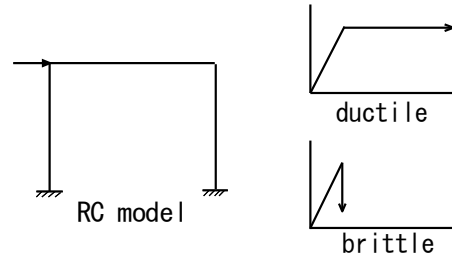


図2 構造物モデルと部材モデル

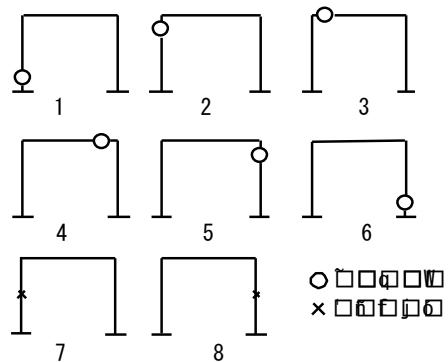
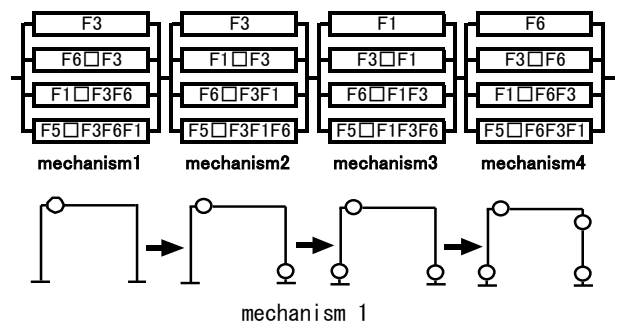


図3 1層1スパンにおける部材の破壊事象一覧



$$\begin{aligned}
 &P(F3 \square F6 \square F1 \square F5) \\
 &= P(F5 \square F3 F6 F1) \quad Z_{5-361} = R_1 + R_2 + 2R_3 - 4P \quad \text{①} \\
 &\square P(F1 \square F3 F6) \quad Z_{1-36} = R_1 + 0.75R_2 + 0.81R_3 - 2.67P \quad \text{②} \\
 &\square P(F6 \square F3) \quad Z_{6-3} = 0.64R_2 + R_3 - 1.72P \quad \text{③} \\
 &\square P(F3) \quad Z_3 = R_2 - 0.88P \quad \text{④}
 \end{aligned}$$

$$[\rho] = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.935 & 0.939 & 0.928 \\ 0.935 & 1.0 & 0.976 & 0.992 \\ 0.939 & 0.976 & 1.0 & 0.994 \\ 0.928 & 0.992 & 0.994 & 1.0 \end{bmatrix}$$

図4 部材の曲げ破壊による構造物の破壊に関する解析モデル

能関数と崩壊形における構造物の性能関数の相関が高いことから、想定される崩壊形により構造物全体の破壊確率を求めることが可能である。それに対し、脆性的破壊を含む場合には、初期の部材の脆性的破壊の確率が構造物全体の破壊確率に対して重要であることがわかった。

### 2.4 Stable Configuration 法による信頼性解析例

構造物の要素の破壊を設定し、その組み合わせで表される崩壊型に至るまでのネットワーク図を作成する。各状態におけるカットセットを想定することにより、構造物全体の破壊確率は次式のように表すことができる。

$$P(F) = P\left(\bigcup_{i=0}^n C_i\right) = P\left(\bigcup_{j=1}^k B_{ij}\right) \quad \dots\dots(1)$$

$C_i$  はカットセットを表し、 $B_{ij}$  はカットセットを構成するブランチにおける要素の破壊事象を表す。 $n$  は最初の破壊における事象の数である。

ここで、3本の脆性的破壊をする部材からなる1層2スパンの構造物を用いて構造物が崩壊型に至るネットワーク図を描くと図6になる。脆性的破壊を取り扱う場合には、1段階あるいは2段階程度の破壊が全体の破壊確率に対して支配的となるため  $C_i$  を用いた和事象の組み合わせで構造物全体の破壊確率の算定を行うことができる。

$$P(F) = P\left(\bigcup_{i=0}^n C_i\right) = P\left(\bigcup_{j=1}^k B_{ij}\right) \quad \dots\dots(2)$$

図6の1層2スパンの構造物に対し、図7に示す6個の破壊モードを用いて Monte Carlo 法を適用し構造物全体の破壊確率を求めた確率と、(2)式により要素の初期破壊の組み合わせで求めた破壊確率を比較し、表1に示す。なお図7に示す組み合わせで、1層2スパンに示す脆性材を用いた構造物の崩壊の事象組み合わせをすべて網羅している。解析に用いた構造物は各部材の耐力を  $\mu_Q = 225.92 \text{ kN}$ 、変動係数  $\delta_Q = 0.15$  とし、荷重を  $\mu_P = 211.68 \text{ kN}$ 、変動係数  $\delta_P = 0.7$  として求めた。部材耐力どうしは独立として扱った。これにより(2)式を用いて、高次のカットセットを用いることなく精度よく構造物全体の破壊確率を求められることがわかった。

### 3 設計における目標信頼性指標に関する検討

部材の破壊形式の違いにより、部材破壊の構造物全体に対する影響、構造物の信頼性解析法は異なると考えられる。従って機構保証設計における目標信頼性指標は構造物全体の信頼性を考慮して設定されるべきである。本論文では、低層の鉄筋コンクリート構造物を対象とし、十分な靱性を持つ部材の曲げ破壊による構造物の破壊と、脆性的破壊として扱う部材のせん断破壊による構造物の破壊を対象として構造物の信頼性解析を行い、脆性的破壊による構造物の破壊が先行しない目標信頼性指標の設定に関する検討を行った。

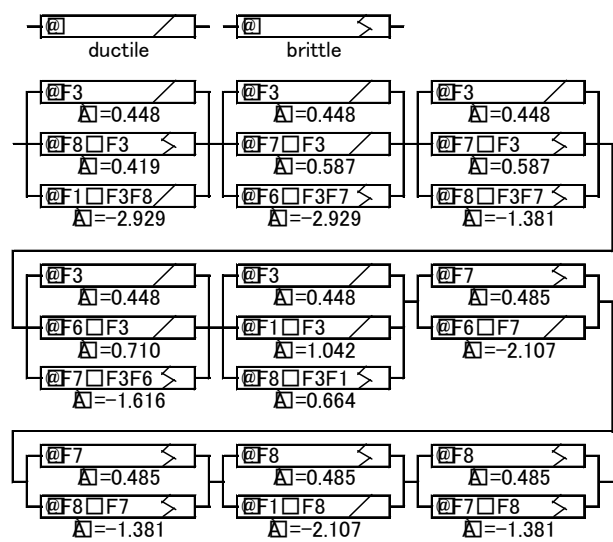


図5 部材の脆性的破壊と曲げ破壊を含む構造物の解析モデル

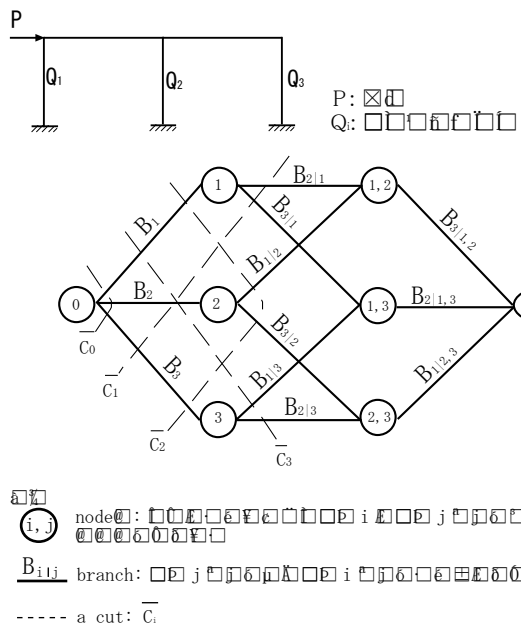


図6 Stable Configuration 法によるネットワーク図

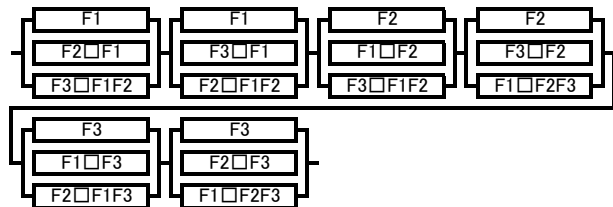
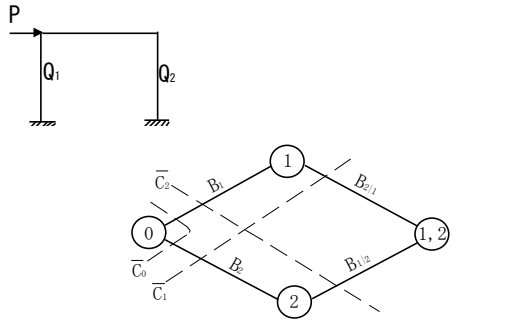


図7 1層2スパンの構造物の破壊事象組合せ

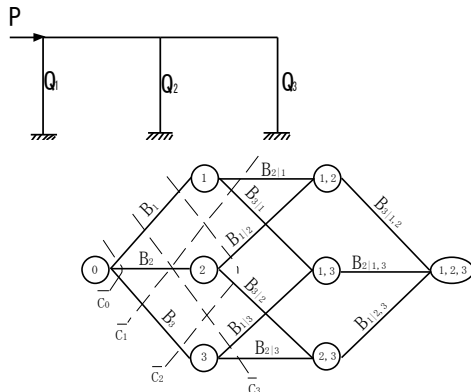
表1 Monte Carlo 法との比較

	Stable Configuration <sup>①</sup>	Monte Carlo <sup>②</sup>
Pf	0.020313	0.020373

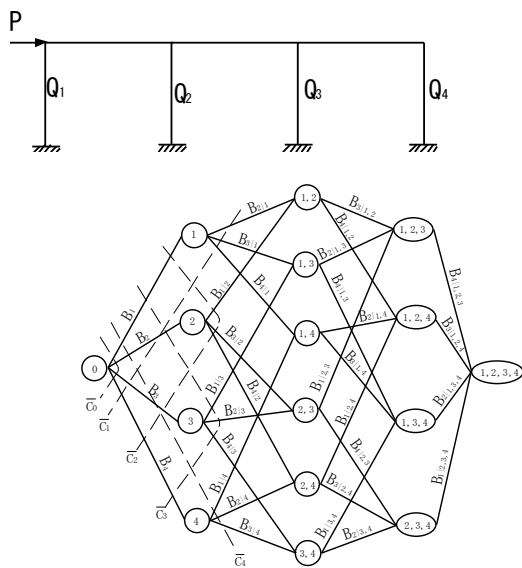
図8に示す5つの構造物を対象とする。部材の曲げ破壊により崩壊形に至る場合は上記の検討結果から、途中の構造物の状態を順次追跡し破壊確率を求めることなく、基本的な崩壊形の組み合わせを設定し、各崩壊形による事象の和事象で構造物の解析を行った。部材の脆性的破壊の発生により構造物が層崩壊する場合は、前述の $\beta$ -unzipping法により逐次追跡する方法では組み合わせが多数となり解析が複雑になるため、Stable Configuration法を適用し、解析を行った。なお、部材どうしは独立として解析を行った。



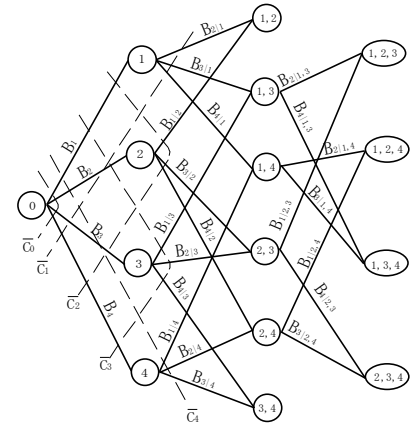
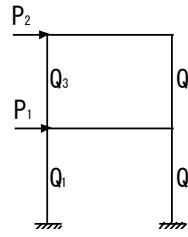
(a) 1層1スパン



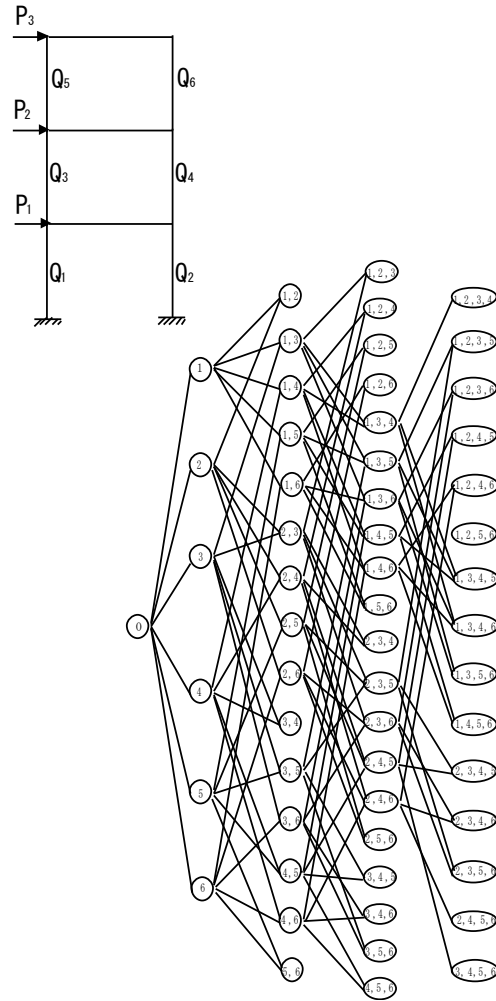
(b) 1層2スパン



(c) 1層3スパン



(d) 2層1スパン



(e) 3層1スパン

図8 せん断の目標信頼性指標検討用解析モデル

### 3.1 せん断耐力の変動係数が破壊確率に与える影響

図8(a)の1層1スパンのモデルに対し、せん断破壊の目標信頼性指標を0.5~5.0と設定し、目標信頼性指標を満たすせん断耐力の平均を求め、変動係数を0.05~0.30と設定し、Stable Configuration法を用いて、2本の柱が共にせん断破壊することにより構造物が層崩壊する確率を算定した。また部材の曲げ破壊の目標信頼性指標を1.0~3.0に設定して、目標信頼性指標を満たす曲げ耐力の平均を求め、曲げ耐力の変動係数を0.1として図9に示す代表的崩壊形を用いて構造物全体の破壊確率を求めた。ここで、柱の曲げ破壊の目標信頼性指標は、はりの曲げ破壊の目標信頼性指標の1.5倍とした。解析結果を図10に示す。図中 $\delta$ は、部材のせん断耐力の変動係数である。

部材の曲げ破壊の目標信頼性指標が1である場合、部材のせん断破壊の目標信頼性指標が同じ1では、せん断破壊による構造物全体の破壊確率の方が大きい値となり、同じ目標信頼性指標の設定では、曲げ崩壊形の先行を保証することは困難である。曲げ破壊の目標信頼性指標が3程度と大きい場合、曲げ崩壊形により構造物が破壊する確率は非常に小さくなるため、部材の曲げ破壊の目標信頼性指標に対する部材のせん断破壊の目標信頼性指標は、さらなる余裕が必要であると考えられる。

せん断耐力の変動係数が大きい場合は、せん断破壊の目標信頼性指標が大きくなるに従い、構造物全体の破壊確率が小さくなる。しかし一般的には、せん断耐力の変動係数0.15程度であることを考慮して、せん断破壊の目標信頼性指標が大きい場合でも、部材の曲げ破壊の目標信頼性指標に対する部材のせん断破壊の目標信頼性指標は、余裕を持った設定が必要である。

### 3.2 柱はり耐力比に関する検討

機構保証設計においては、はり崩壊形を保証するため、柱の耐力をはりの耐力に比べて大きく設定する。ここでは、柱とはりの目標信頼性指標を変化させ、部材の曲げ破壊により崩壊形となって構造物が破壊する確率を求め、部材のせん断破壊による構造物全体の破壊確率との比較を行った。

はりの曲げ破壊に関する目標信頼性指標を1.0, 2.0, 3.0とし、柱の曲げ破壊の目標信頼性指標をはりの曲げ破壊の目標信頼性指標の1.5倍とした場合と2.0倍にした場合の解析を行った。結果を図11及び図12に示す。図中COFは柱はり耐力比を示す。部材の曲げ耐力の変動係数を0.10, 0.15と設定し、またせん断耐力の変動係数を0.15と設定した場合との比較検討を行った。柱の曲げ耐力の目標信頼性指標を大きく設定すると構造物全体の破壊確率が小さくなる。従って、はり崩壊形を保証する機構保証設計において、柱の曲げ耐力の目標信頼性指標を大きく設定した場合、部材のせん断破壊に対する目標信頼性指標を大きく設定しないと、部材のせん断破壊

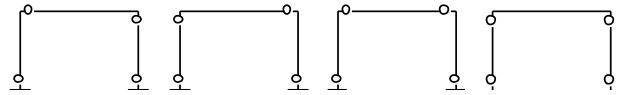


図9 1層1スパンにおける代表的崩壊形

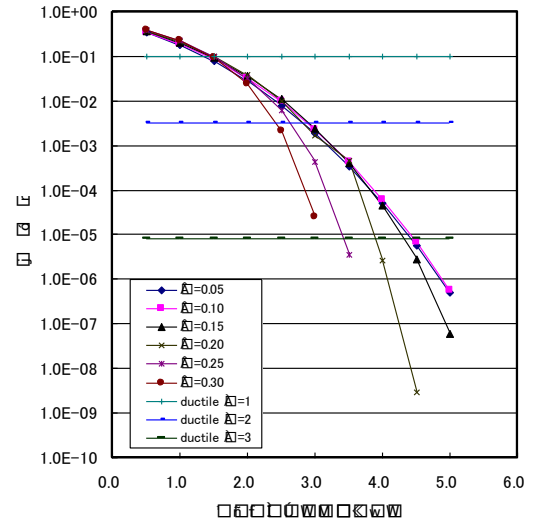


図10-① せん断耐力の変動係数に関する検討(モデル a)

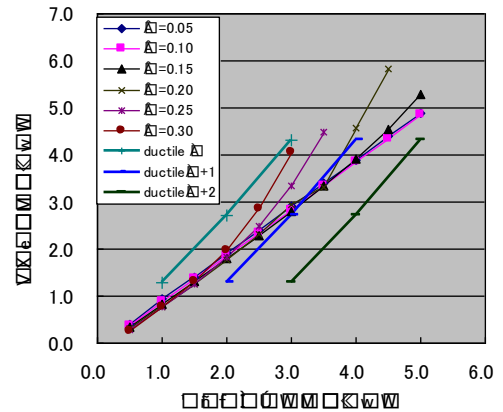


図10-② せん断の目標信頼性指標の検討(モデル a)

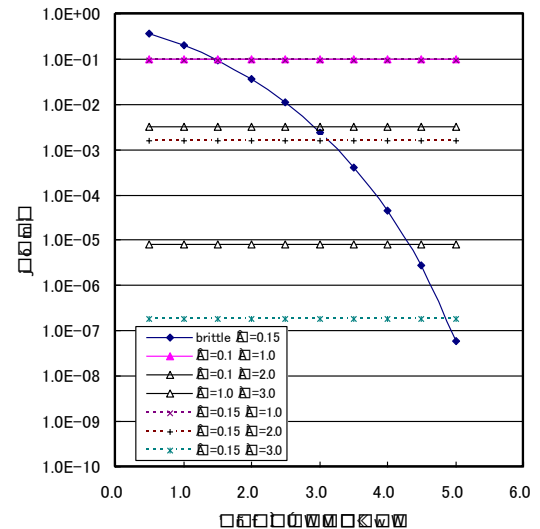


図11 柱はり耐力比に関する検討(モデル a: COF=1.5)

による構造物の破壊確率が大きくなる場合があり、せん断破壊が先行する可能性がある。

### 3.3 構造物のスパン数が増えた場合の破壊確率への影響

図8(b)の2スパン構造物及び図8(c)の3スパン構造物に対して、柱のせん断破壊による層崩壊及び部材の曲げ破壊により崩壊形に至り破壊する確率を求め、せん断破壊に関する目標信頼性指標に関する検討を行った。解析結果を図13及び図14に示す。

1層2スパンのモデルでは、外柱と内柱の応力状態の差が部材の信頼性の差として影響し、1層2スパンのモデルに対する柱のせん断破壊による確率が、1層3スパンのモデルの値より小さくなった。しかし、全体として、部材の曲げ破壊による構造物の破壊確率と柱のせん断破壊による構造物の破壊確率の関係は同様の傾向がある。

### 3.4 構造物の層数が増えた場合の破壊確率への影響

図8(d)の2層構造物及び図8(e)の3層構造物に対して、柱のせん断破壊による層崩壊及び部材の曲げ破壊により崩壊形に至り破壊する確率を求め、せん断破壊に関する目標信頼性指標に関する検討を行った。

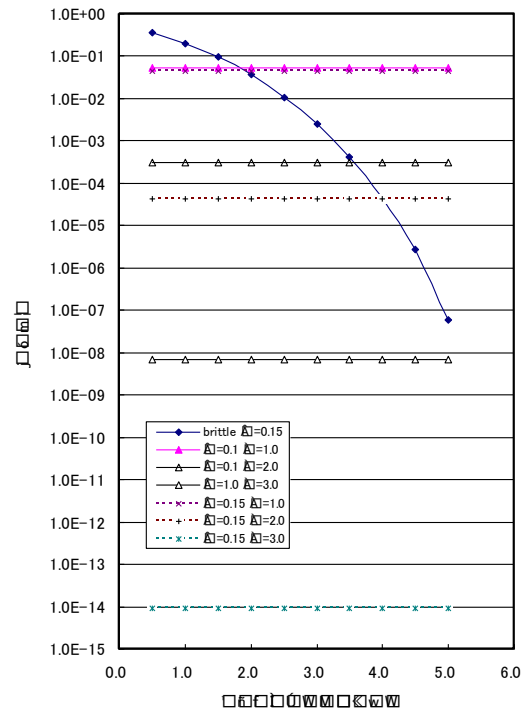


図12 柱はり耐力比に関する検討(モデル a: COF=2.0)

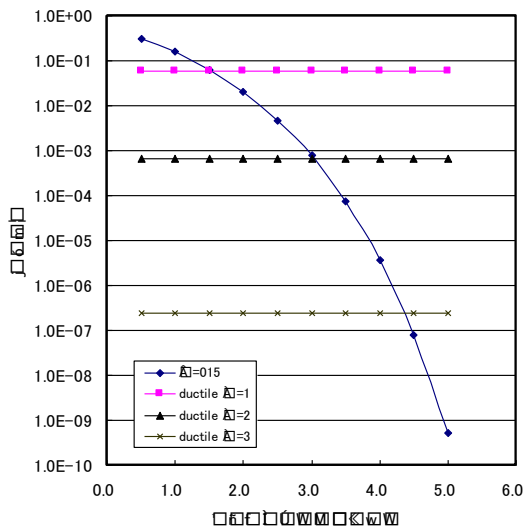


図13-① 構造物全体の破壊確率(モデルb)

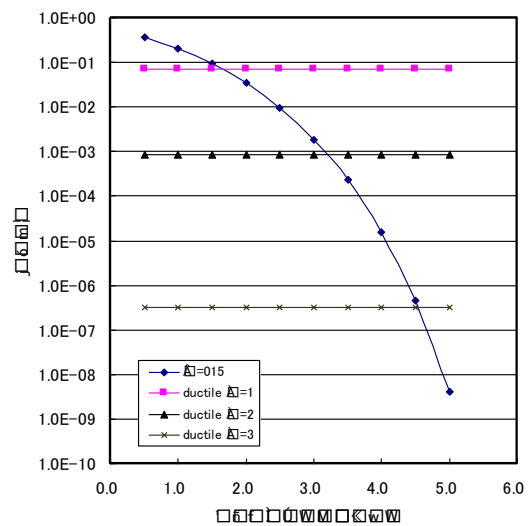


図14-① 構造物全体の破壊確率(モデルc)

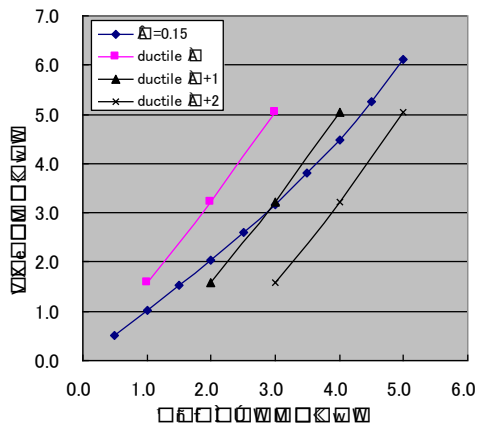


図13-② せん断の目標信頼性指標の検討(モデルb)

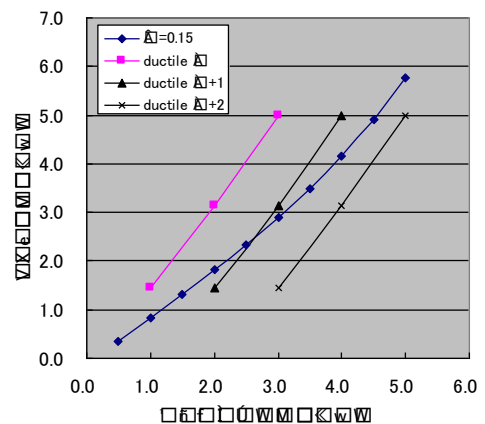


図14-② せん断の目標信頼性指標の検討(モデルc)

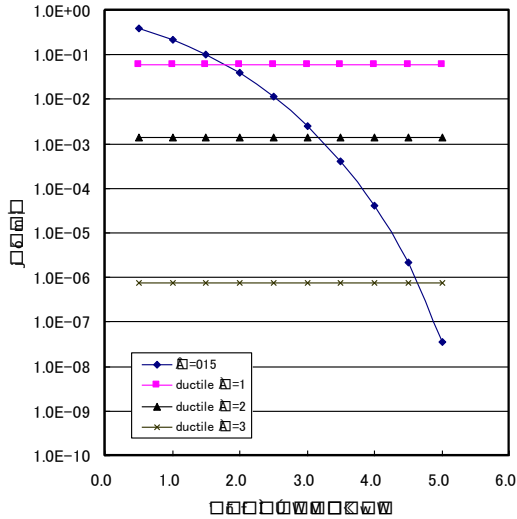


図 15-① 構造物全体の破壊確率(モデル d)

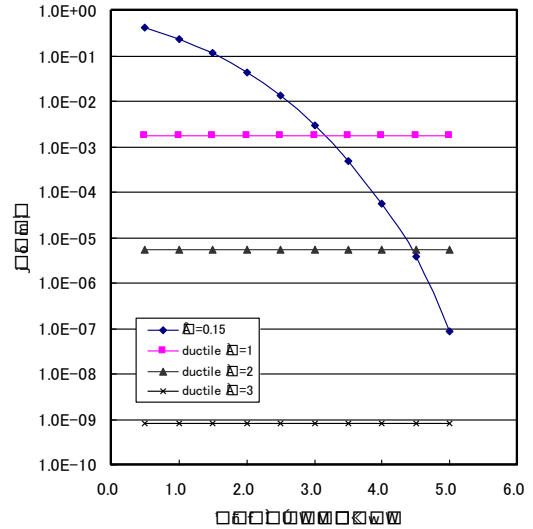


図 16-① 構造物全体の破壊確率(モデル e)

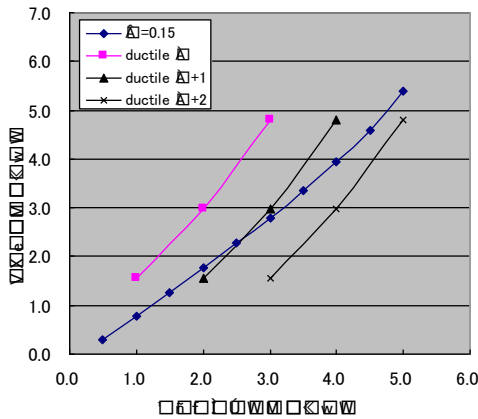


図 15-② せん断の目標信頼性指標の検討(モデル d)

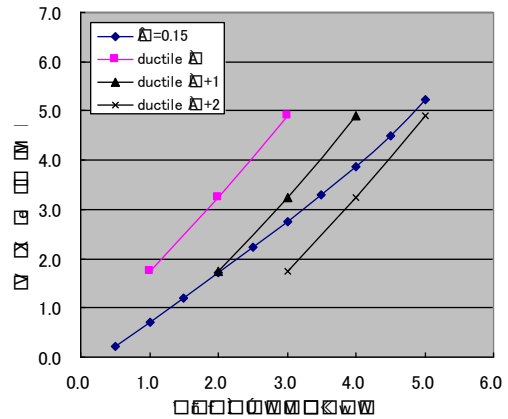


図 16-② せん断の目標信頼性指標の検討(モデル e)

低層の構造物であるため、1 層の柱脚の曲げ破壊に対して目標信頼性指標を設定して信頼性設計を行い、各層とも同じ部材を持つものとした。解析結果を図 15 及び図 16 に示す。また、図 17 に 1 層～3 層構造物の柱のせん断破壊による構造物全体の破壊確率の比較を示す。

部材のせん断破壊により構造物が破壊する場合においては、1 層の層崩壊することによる構造物全体の破壊確率への影響が大きいと考えられ、1 層 1 スパンのモデルの結果と比較的近い値となった。部材の曲げ破壊により崩壊形になり構造物が破壊する確率は、各層とも同じ耐力を持つ部材を用いているため、多層になるにつれ 2 層及び 3 層における部材耐力の余裕が、構造物全体に与える影響が大きくなり、多層になるにつれ構造物全体の破壊確率が小さくなる。従って、1 層のモデルよりせん断破壊が先行する可能性が高く、1 層のモデルより曲げ破壊の目標信頼性指標に対するせん断破壊の目標信頼性指標を大きく設定する必要がある。

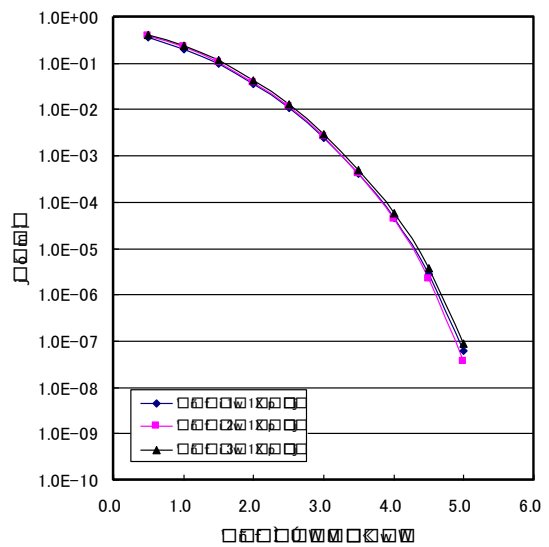


図 17 層数による構造物全体の破壊確率の影響

#### 4 設計における目標信頼性指標の設定

せん断破壊による構造物の破壊確率は最初に破壊する部材の信頼性に大きく左右される。それに対して、曲げ崩壊形の破壊確率においては、構造物が崩壊形に至った場合の構造物全体の信頼性を求めるため、要素の破壊確率と構造物全体の破壊確率は大きく異なる。

せん断破壊による層崩壊で構造物が破壊する確率が、曲げ崩壊形になり構造物が破壊する破壊を上まわらないという基準に対し、どの程度の目標信頼性指標を設定すればよいか検討を行った。

##### 4.1 検討例

2層1スパンを用いて設計時における曲げ破壊の目標信頼性指標に対するせん断破壊の目標信頼性指標をどの程度に設定すれば、曲げ崩壊形が先行するかの検討例を示す。

- ①はじめに、曲げ破壊の目標信頼性指標を設定しその際の構造物のシステム信頼性指標を表2により確認する。
- ②曲げ崩壊形による構造物のシステム信頼性指標を図18の縦軸から探し、点をプロットする。
- ③図18の縦軸にプロットした点から水平に線を引く。
- ④図18の右側にある表で、部材のせん断破壊の目標信頼性指標に対する構造物全体の目標信頼性指標の比 $\gamma$ を確認する。なお、この表に示す $\beta$ は部材のせん断破壊の目標信頼性指標を示す。
- ⑤④の部材と構造物全体の信頼性指標の比 $\gamma$ を踏まえて、曲げ破壊の目標信頼性指標に対するせん断破壊の目標信頼性指標を設定する。

以上の手順を行うと、2層1スパンの構造物の場合、曲げ破壊の目標信頼性指標を2.0に設定することに対し、せん断破壊の目標信頼性指標を4.0程度に設定すれば、構造物の曲げ崩壊形の機構を保証することができる。

#### 5 まとめ

延性的部材の破壊による構造物の信頼性解析を行う場合、構造物が崩壊形に至る途中の性能関数は最終状態の性能関数と相関が高いため、最終崩壊形を予測できれば途中の状態を求めることなく基本的な崩壊形の性能関数を用いることにより、構造物全体の破壊確率を求められる。本研究では、 $\beta$ -unzipping法により部材の破壊を逐次追跡することにより、脆性的破壊する部材を含む構造物の信頼性解析を行う場合、脆性的破壊の初期段階の破壊が重要であることを示した。

また、脆性的破壊する部材の信頼性解析を用いて、想定した降伏機構を形成する前に脆性的破壊が起こらないことを保証する機構保証設計における目標信頼性指標の検討を行い、部材耐力の変動係数、柱とはりの曲げ耐力比及び構造計画が構造物全体の破壊形式及び信頼性に与える影響を示した。

今回、対象としたモデルにおいて、機構保証設計における構造物の破壊である曲げ崩壊形を保証するためには、曲げ破壊の目標信頼性指標を1.0程度に設定する場合、せん断破壊の目標信頼性指標を曲げ破壊の目標信頼性指標に対し1.0程度大きく設定する必要性があり、また曲げ破壊の目標信頼性指標を2.0程度以上に設定する場合、せん断破壊の目標信頼性指標を曲げ破壊の目標信頼性指標に対し2.0程度大きく設定する必要があることを示した。

表2 曲げ破壊による構造物の破壊確率

□□□□□□ □□□□□□□□□□	$\Delta=0.1, COF=1.5$	
	$P_f$	□□□□□□□□□□
1.0	5.8460E-02	1.568
2.0	1.4070E-03	2.987
3.0	7.6940E-07	4.806

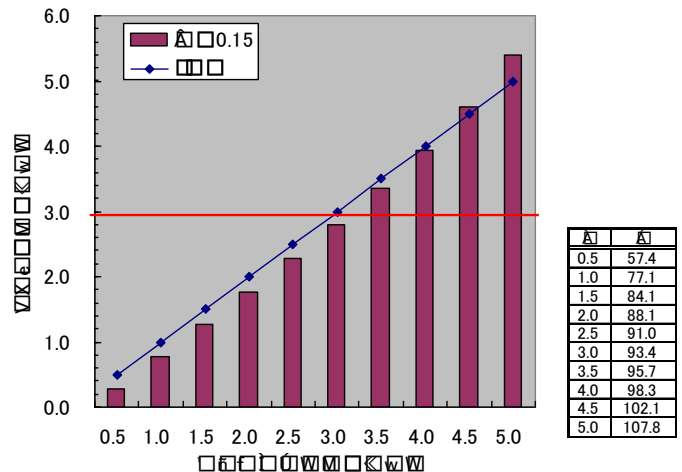


図18 せん断の目標信頼性指標の設定

#### 参考文献

- 1) P.T.-Christensen, Y. Murotsu, APPLICATION OF STRUCTURAL SYSTEMS RELIABILITY THEORY, Springer-Verlag
- 2) S-T. Quek, A.H-S. Ang, STRUCTURAL SYSTEM RELIABILITY BY THE METHOD OF STABLE CONFIGURATION, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, Nov.1986
- 3) S. Terada, T. Takahashi, FAILURE-CONDITIONED RELIABILITY INDEX, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.4, 1988, 942-952
- 4) 日本建築学会 構造物の限界状態設計指針, 2002
- 5) 齊川彰之, 高橋利恵, 部材の脆性的破壊を考慮した鉄筋コンクリート構造物の設計目標に関する考察, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), 2002年8月, 構造I, 11-12