

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

0426016 渡辺 典一
指導教員 高橋 利恵

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、部材のせん断破壊により構造物が崩壊する事がないよう設計が行われる。しかし構造物は様々な不確定性を持つため、大きな荷重を受けた場合に理想的な状態になるとは限らない。

鉄筋コンクリート構造物においては、部材の曲げ破壊により崩壊機構を形成することを前提として設計が行われているが、せん断破壊による構造物の崩壊の可能性を知ることにより、構造物の安全性をより厳密に確認することができる。

部材の曲げ破壊により構造物が崩壊する場合、最終的な崩壊形を用いて構造物の解析が行われている。しかし部材のせん断破壊により構造物が崩壊する場合は、部材の破壊により構造物の応力状態が変化するため同様の方法が適用できず、一般的規模の鉄筋コンクリート構造物のせん断破壊に対する目標信頼性指標はどの程度に設定すべきか、明らかにされていない。

本研究では、一般的規模の鉄筋コンクリート構造物において、脆性的破壊および延性的破壊の部材設計における信頼性と構造物全体の信頼性の関係を示し、部材のせん断破壊による構造物崩壊が部材の曲げ破壊による構造物崩壊に先行しないためのせん断目標機構保証指標の設定を目的とする。

2. 構造物の信頼性設計と信頼性解析

構造物を構成する部材は、様々な破壊形式で破壊し、設計はそれらの破壊性状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の機構保証設計では、設計で理想とした崩壊機構を形成する前に部材の脆性的な破壊が先行しないようにするとされている。つまり、部材の脆性的破壊の目標信頼性指標を部材の曲げ破壊の目標信頼性指標より大きく設定するとされている。(図2)

部材の破壊が構造物の崩壊に与える影響、信頼性解析法は部材の破壊形式によって異なる。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なければならない。

部材の曲げ破壊により構造物が崩壊する場合は、最終崩壊形のみを用いれば構造物の信頼性を求めることができる。しかし、部材の脆性的破壊で構造物が崩壊する場合は、部材の破壊により構造物の応力状態が変化するため同じ方法を用いることができない。

部材の脆性的破壊により構造物が崩壊する場合の信頼性解析は、構造物の応力状態変化を常に考慮した解析法が必要である。

2.1. 脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析

一般的規模の鉄筋コンクリート構造物では、延性的な曲げ破壊や脆性的なせん断破壊といった異なる破壊性状が各部材に想定される。構造物を構成する部材が曲げ破壊をするかせん断破壊をするかによって構造物全体の破壊確率が大きく異なる。¹⁾

部材が曲げ破壊する場合は、その部材が破壊してもまだ応力を負担することができるが、部材がせん断破壊する場合は、その部材が破壊すると応力を負担することができなくなるため、他の部材に応力が再分配され構造物の応力状態が急激に変化し連鎖的な破壊が生じる可能性がある。

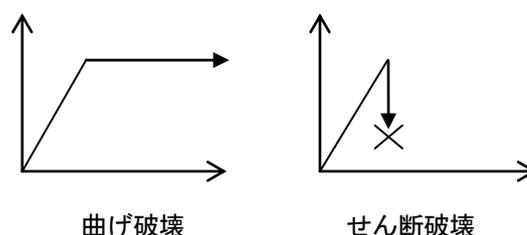


図1 部材の曲げ破壊とせん断破壊の破壊性状

鉄筋コンクリート構造物の設計を行う場合、部材のせん断破壊が曲げ破壊に先行しないように設計しなければならない。

構造物が脆性的な破壊をする部材を含んでいる場合、その部材が破壊するごとに構造物の応力状態が逐次変化する。従って、部材の脆性的な破壊で構造物が崩壊する場合の信頼性を求めるには、それぞれのステップごとの構造物の状態および応力状態を考慮して解析を行う必要がある。

部材の脆性的な破壊により構造物が崩壊する場合、構造物の状態および応力状態をステップごとに逐次追跡しながら信頼性解析をする手法には β -unzipping法などが用いられている。

2.2 β -unzipping 法

β -unzipping法²⁾は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。

図3に示す構造物において、柱のせん断破壊により構造物が層崩壊する場合を考える。ここでは部材の曲げ破壊や他の破壊形式による崩壊形は考えないものとする。

まず、弾性範囲で応力解析を行い各部材の破壊確率を求め、最も破壊確率の高い部材を最初にせん断破壊する部材とする。最初に破壊する部材の破壊確率は性能関数 Z_i として次の式より求められる³⁾。

$$Z_i = R_i - Q_i \quad (1)$$

ここに、 R_i は部材 i のせん断耐力、 Q_i は部材 i が負担するせん断力である。

次に最初に破壊した部材による構造物の変化を考慮して応力解析を行い、その状態で最も破壊確率の高い部材が破壊する部材とする。前ステップで破壊した部材による構造物の変化を考慮した場合の破壊確率は次の式で求められる。

$$Z_{k|i} = R_k - Q_{k|i} \quad (2)$$

ここに、 $Z_{k|i}$ は次にせん断破壊する部材の性能関数、 R_k はせん断耐力、 $Q_{k|i}$ は部材 i がせん断破壊した後の部材 k が負担するせん断力である。

全ての部材がせん断破壊するまでこれらの作業を繰り返し行い、破壊したすべての部材の性能関数を用いてそれらの積事象により構造物の層崩壊の確率を求めることができる。

しかし、部材の破壊ごとに応力解析を行わなければならない β -unzipping 法は、大規模な構造物の解析ほど、より多くの手順を踏むことになる。一般に存在する多層多スパンの構造物になるとその手間は計り知れない。

2.3. D値法を用いた信頼性解析⁴⁾

大規模な構造物ほど手間がかかる β -unzipping 法の作業を簡易化するために、本研究では β -unzipping 法における応力解析にD値法を用いることとした。

D値法は、柱と梁の剛比の関係により柱のせん断力分布係数Dを求め、水平力を受ける構造物の応力を計算する方法である。本研究では柱の脆性的破壊としてせん断破壊を扱うが、柱の負担せん断力をD値法により求める。

せん断破壊する部材を含む構造物の応力解析をD値法で行う場合、性能関数における荷重効果を表す項の係数は、せん断力分布係数Dを当該層のDの総和で除した分配率がそれに該当する。

$$\text{分配率} = \frac{D}{\sum D_F} \quad (3)$$

柱 1 本の負担せん断力 Q は、その層の層せん断力 Q_T に分配率を乗ずることで求められる。

$$Q = Q_T \frac{D}{\sum D_F} \quad (4)$$

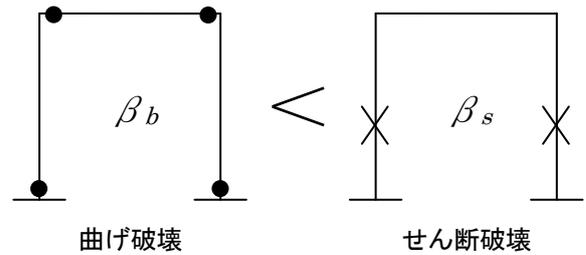


図2 機構保証設計

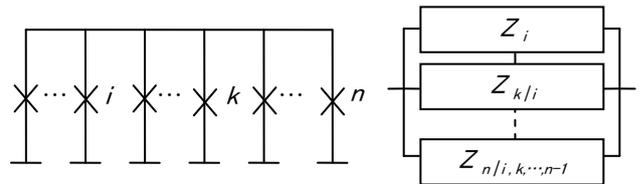


図3 脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析

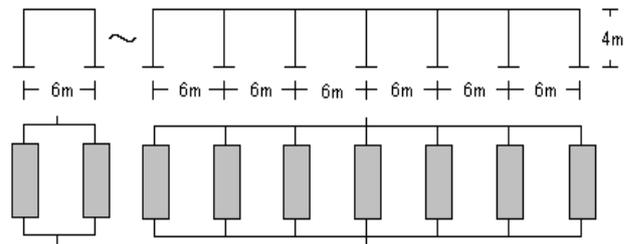


図4 1層モデルと層崩壊の並列システム

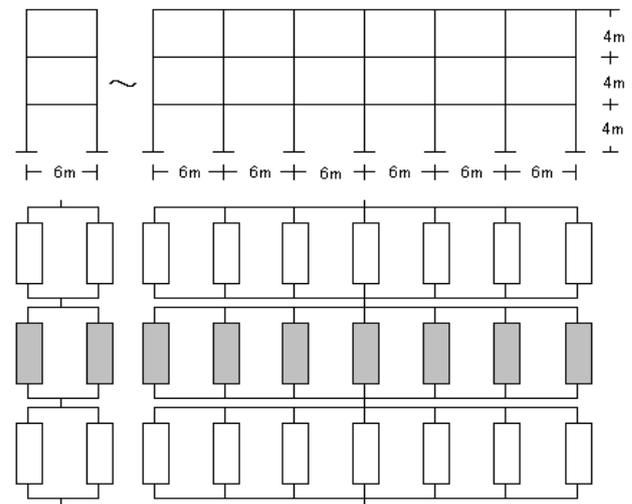


図5 3層モデルと層崩壊の並列システム

表1 部材の断面性能(全モデル共通)

	断面寸法 (cm)	断面積 (cm ²)	I (cm ⁴)	E (kN/cm ²)
柱	50×50	2500	520833	2058
梁	30×60	1800	540000	

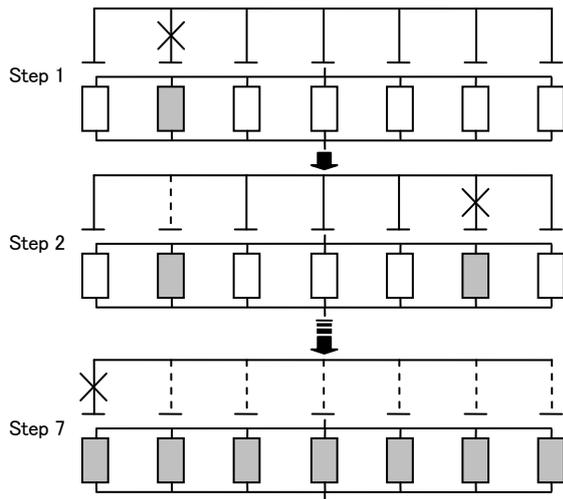


図 6 層モデル 層崩壊メカニズム

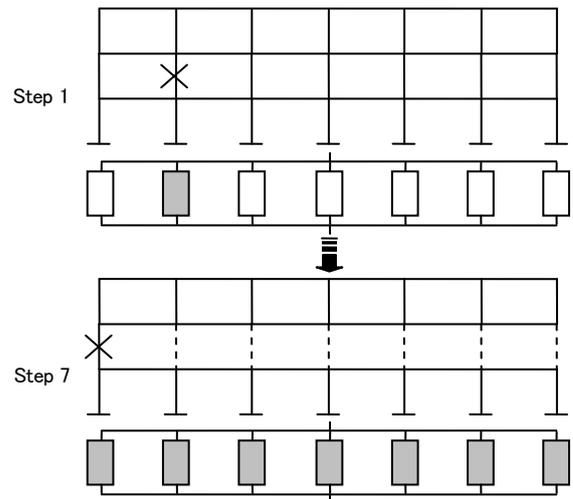


図 7 層モデル 層崩壊メカニズム

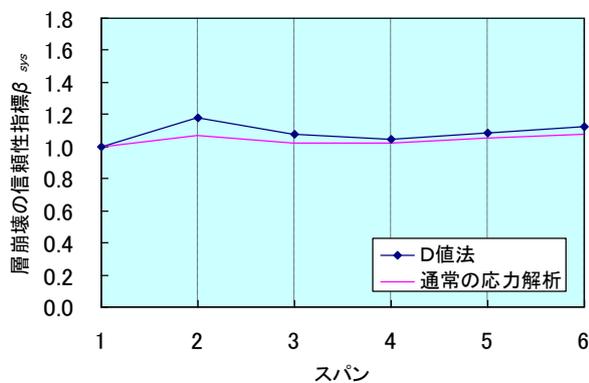


図 8 1層モデル Case.1

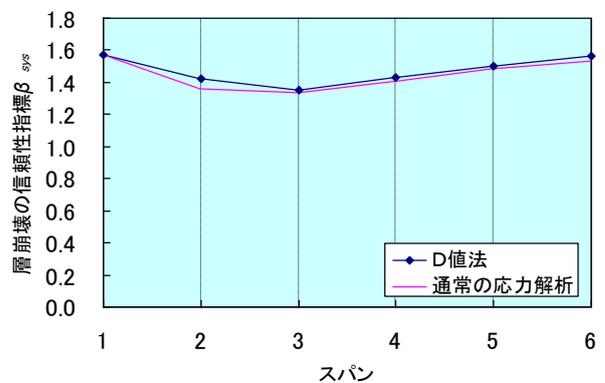


図 10 3層モデル Case.1

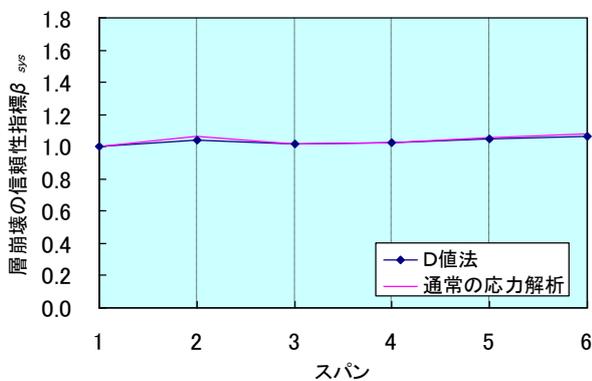


図 9 1層モデル Case.2

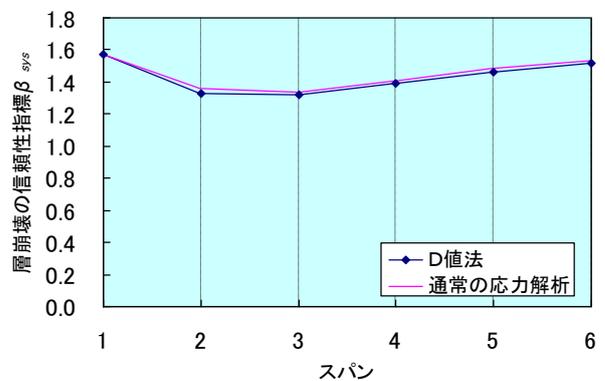


図 11 3層モデル Case.2

2.4 D値法の有効性の検討⁴⁾

β -unzipping 法にD値法を用いれば、何度も行わなければならない応力解析の作業を簡易化できる。しかし、D値法は略算法であり、応力解析の誤差が構造物の信頼性にどの程度の影響を及ぼすか明らかではない。

そこで部材のせん断破壊により構造物が層崩壊する場合について、 β -unzipping 法における応力解析にD値法を用いた場合と通常の応力解析を用いた場合の構造物の信頼性の比較をし、D値法の有効性を検討した。

検討には図4、5の1層1スパン～6スパン、3層1

スパン～6スパンの計12のモデルを用いた。D値法は最下層の計算方法とそれ以外の層の計算方法が異なるため、その影響を確かめるために3層モデルにおいては第2層について検証した。スパンは6m、階高は4m、部材断面性能は表1に示す通りで全モデル共通である。

解析は図6,7に示すように1ステップごとに1本の柱が破壊し当該層の柱すべてが破壊するまで応力解析と信頼性解析を繰り返し行った。

検討に当たってケースを2通り設けた。Case.1とし

て通常の応力解析を設計用として設定したせん断耐力を用い、両者の β -unzipping法による解析の結果を比較した。この場合、両者の断面は同じだが、設計に用いた応力解析の違いにより最初に破壊する部材の信頼性が異なる。Case. 2は設計用の応力解析は両者それぞれ、最初にせん断破壊する柱の信頼性指標を一致するようなせん断耐力を設定した。この場合、両者の断面は異なる。

3層モデルは、第1層がもっとも不利な層としてせん断耐力を設定した。つまり、第2、第3層の柱のせん断耐力は第1層の柱のせん断耐力に等しい。図8から図11に解析結果を示す。

Case. 1は1層モデル、3層モデルともに層崩壊の信頼性にある程度の誤差が生じた。これは応力解析の違いにより最初に破壊する柱の信頼性指標が異なり、層崩壊の信頼性指標 β_{sys} に影響しているものと考えられる。構造物のスパン数による傾向は、スパン数が増えるに従って層崩壊の確率は低くなっている。1スパン、2スパンの傾向は少し特殊だが、3スパン以降の傾向は同じようになった。また、層による計算方法の違いによる影響はないといえる。

Case. 2の結果を見ると、層崩壊の信頼性指標 β_{sys} の誤差はCase. 1に比べ小さくなっている。これは、応力解析の違いによる解析誤差はあるものの、最初に破壊する柱の信頼性指標が等しいため、層崩壊の信頼性指標 β_{sys} はほぼ一致したと考えられる。

検討の結果、D値法による応力解析の誤差がそのまま層崩壊の信頼性に反映されるが、設計用の応力解析にD値法を用いて部材設計を行えば層崩壊の信頼性は、ほぼ一致した。また、D値法を β -unzipping法における応力解析に用いると、通常の応力解析に比べ非常に容易に解析を進めることができた。

従って、本研究では設計よりD値法を応力解析に用いて β -unzipping法を行うこととする。

3. 構造物の違いによる層崩壊確率の検討

構造物はそれぞれの部材の状態や配置、構造計画によってシステムとしての信頼性が異なる。部材設計では同じ信頼性を持っている構造物でも、構造物のシステムとしての信頼性は異なる。

部材のせん断破壊により構造物が崩壊する場合のせん断目標機構保証指標を設定する際、構造物の違いによる信頼性の変化を把握しておく必要がある。

3.1 スパン変更モデル

部材のせん断破壊による層崩壊において、部材の平面的偏りを検討した。

均等なスパンのモデルを基本に、スパンが異なるモデルを作成し、部材のせん断破壊により構造物が層崩壊する信頼性を比較した。

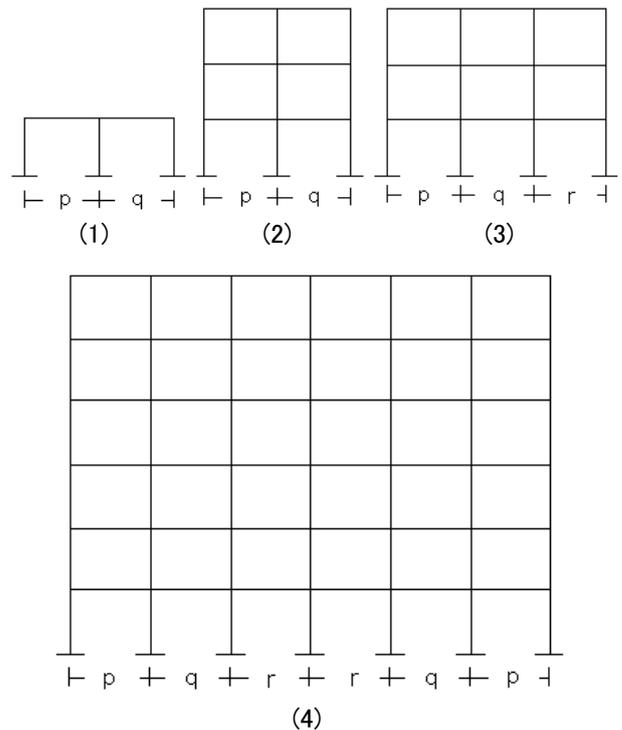


図 12 スパン変更モデル

表 2 端スパン変更値

スパン変更 モデル	モデル(1),(2)		モデル(3)		
	p (m)	q (m)	p (m)	q (m)	r (m)
0	6	6	6	6	6
a	7	5	8	5	5
b	8	4	10	4	4
c	9	3	12	3	3
d	10	2	14	2	2

表 3 中央スパン変更値

スパン変更 モデル	モデル(3)		
	p (m)	q (m)	r (m)
0	6	6	6
a	5	8	5
b	4	10	4
c	3	12	3
d	2	14	2

表 4 中央スパン変更値

スパン変更 モデル	モデル(4)		
	p (m)	q (m)	r (m)
0	6	6	6
a	5	5	8
b	4	4	10
c	3	3	12
d	2	2	14

検討に用いたのは、図 12 に示す 1 層と 3 層の 2 スパンモデル、3 層 3 スパンモデル、さらに 6 層 6 スパンモデルの 4 つを用いた。3 層 2 スパンモデルは第 2 層および第 1 層、それ以外のモデルは第 1 層について検討した。階高および部材断面性能は 2.4 で用いたモデルと同じである。

スパン変更の方法は、図 12 の(1)～(4)のモデルにおいて端スパン p を拡大したものと、(3)と(4)のモデルにおいてそれぞれの中央スパン q と r を拡大したものを 2 種類である。スパンの変更値は表 2 から表 4 に示す。

各検討モデルにおいて、スパン変更モデル 0 は基本モデルである。各検討モデルとも、スパン変更モデル d が最も偏った計画になっている。基本モデルの各柱のせん断耐力は、最初に破壊する柱の信頼性指標が 1.0 になるように設定したものである。

また、比較は各スパン変更モデルにおける最初に破壊する柱の信頼性指標が基本モデルと異なるものと、各スパン変更モデルにおいて部材設計をし直し、最初に破壊する柱の信頼性指標が基本モデルと一致するように設計したものの 2 種類について行った。

図 13 から図 18 に層崩壊の信頼性指標 β_{sys} のスパン変更による変化を示す。図中の実線は、各基本モデルの層崩壊の信頼性指標 β_{sys} である。

図 13～16 の最初に破壊する柱の信頼性指標が基本モデルと異なる場合を見ると、偏ったスパン計画のモデルになるに従って部材のせん断破壊による構造物崩壊の信頼性指標 β_{sys} が小さくなっている。これは偏ったスパン計画になるほど部材のせん断破壊による層崩壊の確率が高くなっていることを意味している。このような結果になった要因には、スパン計画が偏るに従って最初に破壊する柱の信頼性指標が小さくなっているという要因が挙げられる。最初に破壊する柱の信頼性指標が小さくなるのは、スパン計画が偏るに従って、最初に破壊する柱に作用する応力が増加し、またせん断耐力は基本モデルと同じだからである。このことから、部材のせん断破壊により構造物が崩壊する場合、最初に破壊する柱の信頼性指標が層崩壊の信頼性指標 β_{sys} に大きく影響するということが確認された。

本来、構造物は構造計画があり、その構造計画されたモデルについて設計するのが自然である。図 13～18 の最初に破壊する柱の信頼性指標が基本モデルと一致する場合を見ると、スパンが偏るに従って部材のせん断破壊による層崩壊の信頼性指標 β_{sys} は、異なる場合と同様に基本モデルとの差が大きくなっている。

これは、最初に破壊する柱の信頼性指標が一致するようなせん断耐力を設定したため、次の段階で破壊する柱の信頼性指標が影響しているためと考えられる。しかし、異なる場合と比べ差の増加量は小さい。また、最初に破壊する柱の信頼性指標が一致する場合、次に

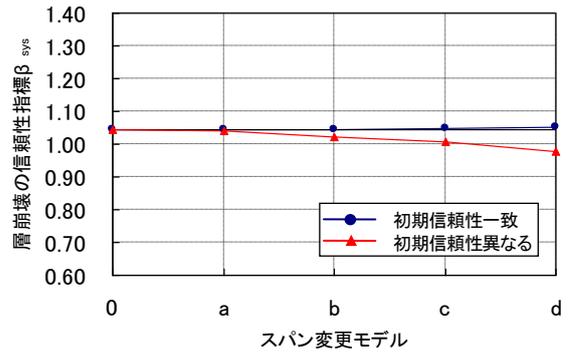


図 13 変更モデル(1) 端スパン拡大

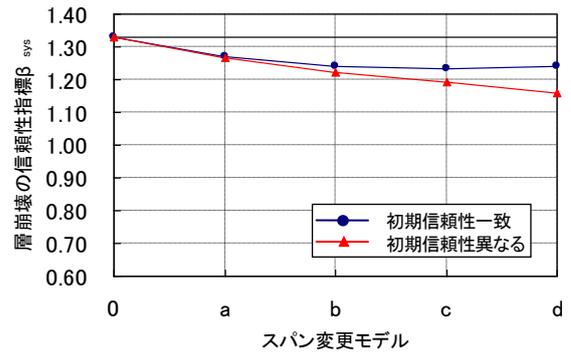


図 14 変更モデル(2)第 2 層 端スパン拡大

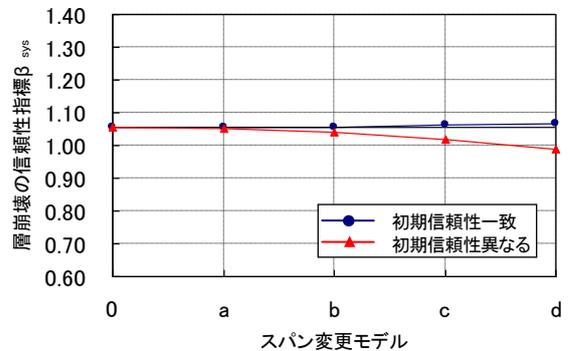


図 15 変更モデル(2)第 1 層 端スパン拡大

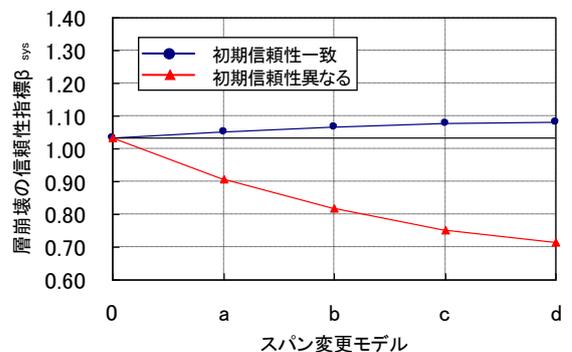


図 16 変更モデル(3) 端スパン拡大

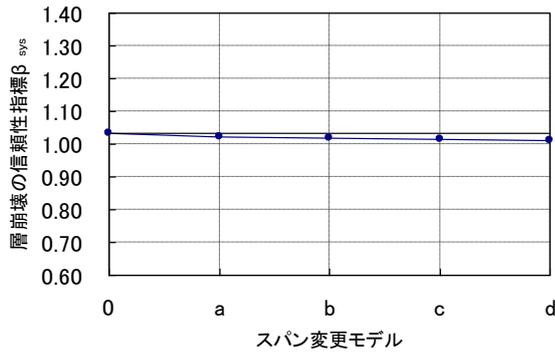


図 17 変更モデル(3) 中央スパン拡大

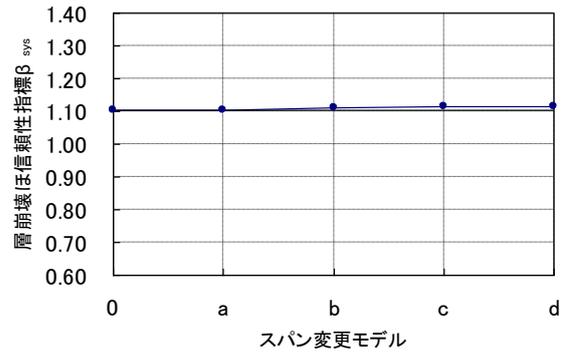


図 18 変更モデル(4) 中央スパン拡大

破壊する柱の信頼性指標が構造物崩壊の信頼性指標に影響を及ぼすことがわかった。

しかし、最初に破壊する柱の信頼性指標と次に破壊する柱の信頼性指標の影響は、最初に破壊する柱の信頼性指標のほうが大きい。従って、部材のせん断破壊により構造物が層崩壊する場合は、最初に破壊する柱の信頼性指標が最も重要であるといえる。

端のスパンが他のスパンに比べ大きい、また中央のスパンが他のスパンに比べ大きいというような部材の平面的偏りは、構造計画、それに作用する荷重に見合った設計をしていなければ部材のせん断破壊による層崩壊に影響を与える。

また構造計画、それに作用する荷重に見合った設計をしていれば影響は小さいが、システム信頼性が安全側、危険側の両方の値をとる可能性がある。しかし、差は最大でも 0.1 程度であるので、一般的規模の鉄筋コンクリート構造物のせん断目標機構保証指標を設定する場合、これを考慮する。

4. せん断目標機構保証指標の設定

小規模の鉄筋コンクリート構造物のせん断目標機構保証指標は文献 1 で示されている。しかし、一般的規模の鉄筋コンクリート構造物のせん断目標機構保証指標は解析の複雑さ困難さからどの程度に設定するべきか、明らかにされていなかった。

今回、D 値法を用いた β -unzipping 法の精度が確認されたため、それを用いて一般的規模の鉄筋コンクリート構造物のせん断目標機構保証指標の設定を検討した。モデルは図 19 に示す 6 層 6 スパン構造物である。部材の断面性能は表 5 に示す。部材のせん断破壊による構造物崩壊と部材の曲げ破壊による構造物のシステム信頼性指標 β_{sys} を比較することで、せん断目標機構保証指標の設定を行った。

まず、6 層 6 スパンモデルが部材のせん断破壊に構造物のシステム信頼性を求めた。部材設計時のせん断破壊に対する信頼性指標は 1.0~5.0 とした。図 20 に解析の結果を示す。

表 5 6 層 6 スパンモデル 部材断面性能

	断面寸法 (cm)	断面積 (cm ²)	I (cm ⁴)	E (kN/cm ²)
柱	50×50	2500	520833	2058
梁	30×60	1800	540000	

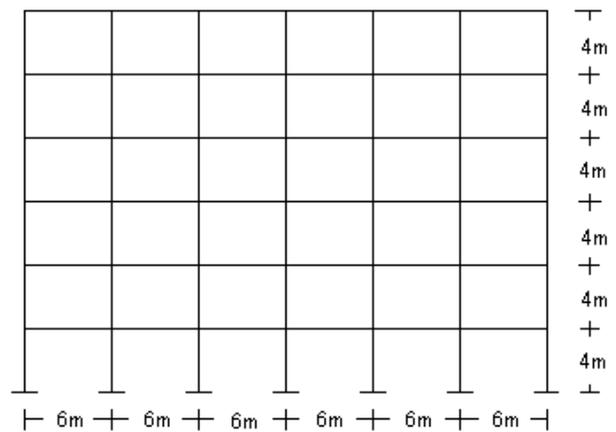


図 19 6 層 6 スパンモデル

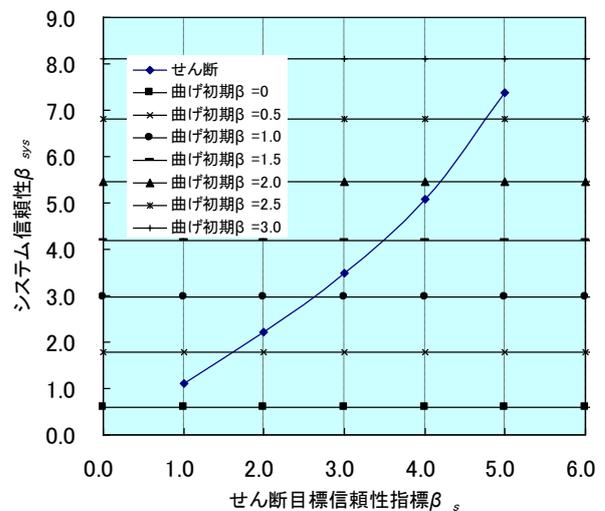


図 20 せん断目標信頼性指標 (COF 考慮なし)

4.1 柱梁耐力比 COF を考慮しない場合

まず、部材の曲げ破壊に対し基本的な設計を行った場合の構造物のシステム信頼性と比較を行った。部材設計時の曲げ破壊に対する信頼性指標 β_b は 0~3.0 とした。ここでは、部材の平面的偏りによる構造物のシステム信頼性の違いを検討した際の結果を考慮して、部材のせん断破壊に対する目標信頼性指標 β_s に余裕を持たせた。

曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 0 の場合、部材のせん断破壊に対する目標信頼性指標 β_s が 1.0 程度であれば部材の曲げ破壊による構造物崩壊が先行するといえる。

曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 0.5 ~ 1.0 程度の場合、部材のせん断破壊に対する目標信頼性指標 β_s が 2.0~3.0 程度であれば部材の曲げ破壊による構造物崩壊が先行するといえる。

曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 1.5 ~ 2.0 程度の場合、部材のせん断破壊に対する目標信頼性指標 β_s が 4.0~4.5 程度であれば部材の曲げ破壊による構造物崩壊が先行するといえる。

曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 2.5 程度の場合、部材のせん断破壊に対する目標信頼性指標 β_s は 5.0 であれば良いが、曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 3.0 程度の場合はさらなる大きな値を設定しなければならないといえる。

4.2 柱梁耐力比 COF を考慮した場合

機構保証設計では、部材の曲げ破壊による崩壊形を保証するため、柱の耐力を梁の耐力比べて大きく設定する。ここでは、部材の曲げ破壊に対する設計において COF を考慮した際の部材の曲げ破壊による構造物のシステム信頼性と比較を行った。

部材設計時の曲げ破壊に対する信頼性指標 β_b は 0~3.0 とした。COF はそれぞれの 0~3.0 とした。図 21 に 6 層 6 スパンモデルにおいて、COF が部材の曲げ破壊による構造物のシステム信頼性に与える影響を示す。

曲げ破壊に対する部材設計において COF を設定した場合、同じ目標信頼性指標 β_b でもシステム信頼性指標は大きくなっている。よってシステム信頼性の値に幅が生じる。その幅は目標信頼性指標 β_b が大きいほど広がっている。

ここでは、部材の平面的偏りによる構造物のシステム信頼性の違いを検討した際の結果、また COF を設定した場合のシステム信頼性指標への影響を考慮して考察を行った。

せん断目標信頼性指標 β_s は、COF の影響で曲げ破壊によるシステム信頼性の値に幅が生じて、1.0 程度大きな値が必要になっている。よって、せん断目標機構保証指標は、曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 1.0 の場合は 3.0~4.0 程度、曲げ破壊に対す

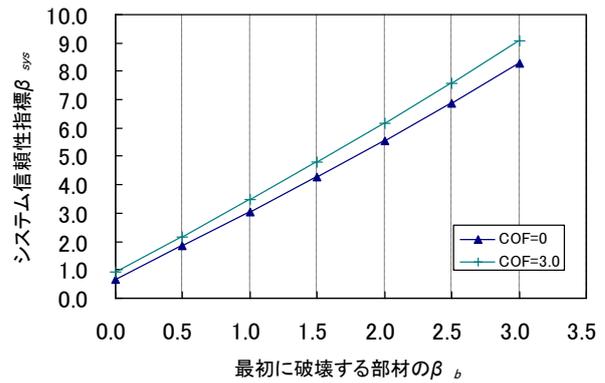


図 21 COF による曲げ崩壊の信頼性への影響

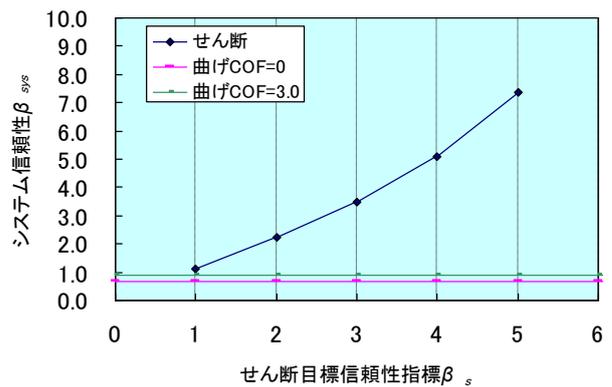


図 22 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta_b = 0$

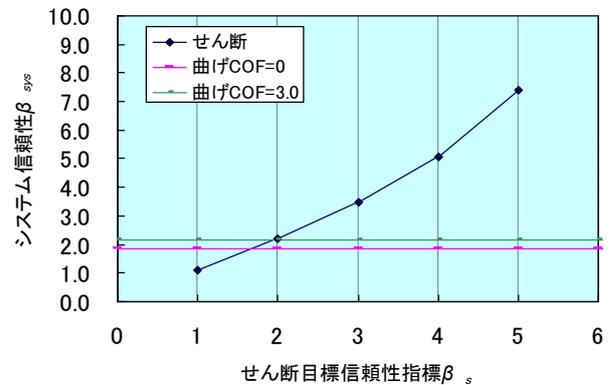


図 23 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta_b = 0.5$

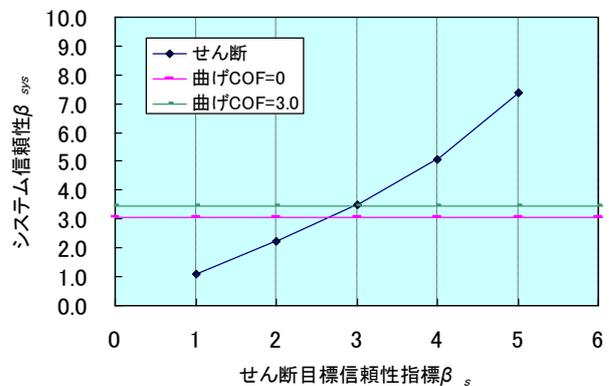


図 24 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta_b = 1.0$

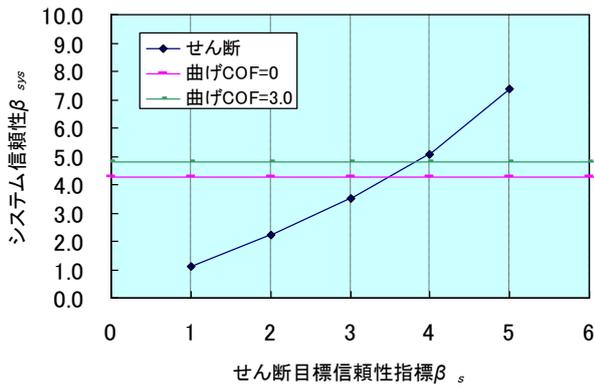


図 25 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta = 1.5$

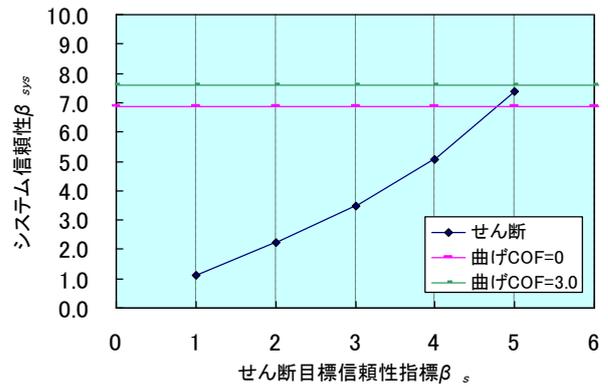


図 27 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta = 2.5$

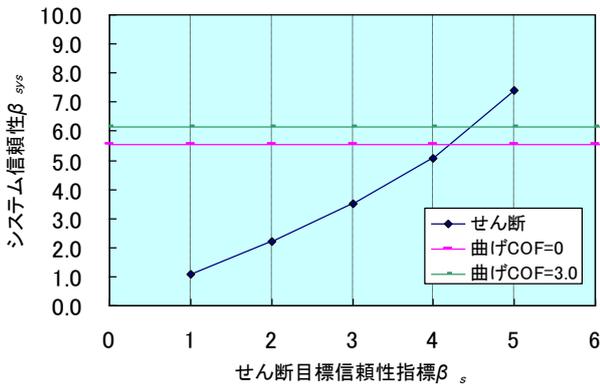


図 26 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta = 2.0$

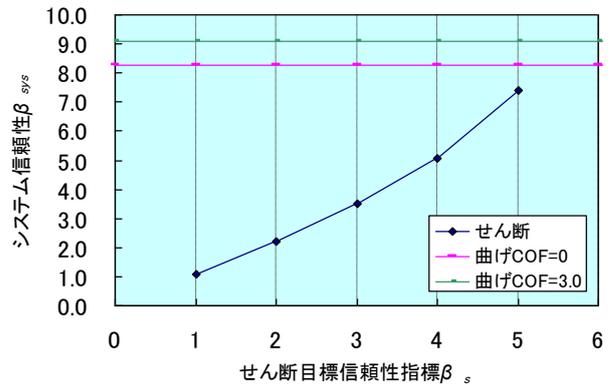


図 28 曲げ破壊に対する部材設計時 $\beta = 3.0$

表 6 一般的規模の鉄筋コンクリート構造物におけるせん断目標機構保証指標

曲げ部材設計時 β_b	せん断目標信頼性指標 β_s		せん断目標機構保証指標
	COF 考慮なし	COF 考慮あり	
1.0	2.0 ~ 3.0	3.0 ~ 4.0	$\beta_b + 2.0 \sim 3.0$
2.0	4.0 ~ 5.0	5.0 ~	$\beta_b + 3.0 \sim$

る部材設計時の信頼性指標 β_b が 2.0 の場合は 5.0 程度必要であるといえる。

5. まとめ

部材のせん断破壊による構造物の崩壊は、構造物にとって望ましくない破壊形式であるので、せん断破壊による構造物崩壊を起こさない設計が必要である。しかし脆性的破壊を扱った信頼性解析は応力解析と信頼性解析を繰り返し行わなければならないため、手順も複雑で一般的ではなかった。

今回、脆性的破壊を含む構造物の信頼性解析における β -unzipping 法に D 値法を適用し、D 値法を適用すれば信頼性解析の手順が簡易化され、設計段階から D 値法を用いていれば解析上問題ないことを確認され、さらにせん断破壊による構造物崩壊には、初期の部材破壊の信頼性が重要であることがわかった。

均等スパンとスパンの偏ったモデルを比較した結果、部材の平面的偏りは部材のせん断破壊による構造物崩

壊の信頼性に小さいが影響を与えることが確認された。

今回、6 層 6 スパンのモデルを用いて検討した結果、一般的規模の鉄筋コンクリート構造物のせん断目標機構保証指標は、曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 1.0 程度の場合は、それより 2.0~3.0 程度大きくし、曲げ破壊に対する部材設計時の信頼性指標 β_b が 2.0 程度の場合はそれより 3.0 以上大きくする必要があることがわかった。

[参考文献]

- 1) 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”年前橋工科大学修士論文, 2003
- 2) Palle Thoft - Christensen, Yoshisada Murotsu “Application of Structural Systems Reliability Theory” Springer-Verlag, 1986
- 3) 星谷勝, 石井清 “構造物の信頼性設計法” 鹿島出版会
- 4) 渡辺典一, 高橋利恵, 日本建築学会大会構造 I, 2005, P.13
- 5) 渡辺典一, 高橋利恵, 日本建築学会大会構造 I, 2004, P.215