鉄骨骨組の全体崩壊機構に要求される柱・梁耐力比に関する一考察

AN INVESTIGATION ON THE COLUMN OVER-DESIGN FACTORS
FOR STEEL FRAMED STRUCTURES

趙 衍 剛*, 小野 徹郎**, 石井 清***, 吉原 和宏****

Yan-Gang ZHAO, Tetsuro ONO, Kiyoshi ISHII
and Kazuhiro YOSHIHARA

In the earthquake resistance design of frame structures, it is a general requirement to give a suitable target value of the column over-design factor (COF) for which the occurrence probability of unpreferable failure modes can be limited to within a specific tolerance. In the present paper, the likely failure modes of weak-beam-strong-column designed structures under uncertain loads and with uncertain member strengths are investigated and the target value of COF is discussed in probabilistic terms under three failure levels, i.e., Level 1 -- strictly beam-hinging pattern, Level 2 -- beam-hinging pattern and Level 3 -- total collapse pattern. It was found that: (1) For levels 1 and 2, the larger the number of bays and stories, the larger the target value of the COF. For level 3, the target value of the COF is independent of the number of bays. (2) The higher the reliability level is set when the structure is designed, the smaller the target value of the COF is required to limit the probability ratio to within a given tolerance level.

Keywords: Frame structure, total beam-hinging pattern mode, column overdesign factor(COF), reliability based design, performance function, stochastic limit analysis

骨組構造物、梁降伏先行型全体崩壊機構、柱・梁耐力比、信頼性設計、限界状態関数、確率極限解析

1. はじめに

骨組を梁降伏先行型全体崩壊機構となるように設計することは、耐震設計上合理的と考えられている。なぜなら、骨組が全体崩壊に至るまでに系全体として大きな塑性変形能力を発揮するため、大きな地震エネルギーを吸収することができるからである^{[1][2]}。梁降伏先行型全体崩壊機構を実現させるためには、梁の部材耐力よりも柱の部材耐力を大きくし、梁に塑性ヒンジができるように柱・梁耐力比(Column Overdesign Factor=COF)を決定しなければならない^{[2][3]}。しかし、骨組を確定論的に梁降伏先行型全体崩壊機構に設計した場合でも、部材耐力の不確実性により、柱と梁の耐力のバランスが逆転して設計時に想定していない崩壊機構が生じることがあり、必ずしも設計した崩壊形式で崩壊するとは限らない^{[3][4]}。降伏耐力等のバラツキを考慮^[5]した上で、梁降伏先行型全体崩壊機構を実現するために重要な役割を果たす柱・梁耐力比(COF)のおおよその目標値を設定し、その目標値以上で設計することによって、確定論的に設計した場合にでも、梁降伏先行型全体崩壊機構からかけ離れる確率をある値に収めることができれば、設計上有用である。

ある特定の骨組に対するCOF値に関する確率論的な評価はいくつか提案されており^{[3][4][6]}、COFの基礎的性質がいくつか得られている。また、任意の多層多スパン骨組に対して確率極限解析法^{[7][8]}に

よって骨組の最尤崩壊モードを検出し、梁降伏先行型全体崩壊機構からかけ離れる確率をある値に収めるような目標COF値を確率論的に評価した研究もある^[9]。しかし、梁降伏先行型全体崩壊機構以外には全て望ましくない崩壊機構であるという大変厳しい条件の下で評価しているため、目標COFはスパン数や層数の増加に伴い、実設計上では困難なほど大きな値となってしまう。

本論文ではまずある一定な信頼性レベルで梁降伏先行型全体崩壊機構に設計された骨組に対して荷重とCOF値との関係を考察した。その考察の結果に基づいて、三つの崩壊レベルで梁降伏先行型全体崩壊機構からかけ離れる確率をある値に収めるような目標COF値を評価し、目標信頼性指標、崩壊レベル、部材耐力の大きさ及び層数とスパン数などによる目標COF値の変化を考察することを本論文の目的とする。

2. COFの定義と基本仮定

本研究では、多層多スパン骨組における柱部材と梁部材が接合する各節点のCOFを式(1)に示すように定義する。

$$C_{of}(k) = \sum_{l=1}^n M_{cl} / \sum_{l=1}^n M_{bl} \quad (1)$$

* 名古屋工業大学 助教授・工博
** 名古屋工業大学 教授・工博
*** 清水建設株式会社 技術研究所 主席研究員・工博
**** 熊谷組構造設計部 工修

Assoc. Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Chief Research Engineer, Shimizu Co. Ltd., Dr. Eng.
Structural Engineering Dept., Kumagagumi Co. Ltd., M. Eng.

ただし、 k は k 番目の節点、 $M_{c,k}$ 、 $M_{b,k}$ はそれぞれ k 番目の節点に接合する柱部材、梁部材の終局耐力（全塑性モーメント）の平均値である。 C_{of} はCOFの値である。

各節点への柱耐力と梁耐力の配分の仕方により、骨組の性能は当然変化するが、本研究では、研究の便宜をはかり、全節点において同じCOF値を用い、構造物全体で一つのCOFとする。また、本研究における解析対象骨組はスパンが8 m、階高が4 m（層数は1~7、スパン数は1~5）の鉄骨平面骨組で、最上階の梁耐力としての終局モーメントの平均値を106.2 kN・m、それ以外の梁耐力の平均値を212.4 kN・mとし、柱耐力の平均値はCOFをパラメータとして変化させて決定する。なお、本研究の解析仮定を以下に示す。

- (1) ラーメン骨組を構成する部材は、完全剛塑性挙動をするものとする。
- (2) 外力は逆三角形分布をした静的水平地震荷重で、一定な信頼性レベルで梁降伏先行型全体崩壊機構に設計された骨組を対象とする。
- (3) 最上階の梁の部材耐力を M_p 、それ以外の梁の部材耐力は、 $2M_p$ とする。柱の部材耐力は、COFを変化させて決定する。
- (4) 全ての確率変数は相互独立な対数正規分布に従うものとする。
外力の変動係数は静的水平地震荷重を想定しているため、0.8とし、部材耐力の変動係数は鉄骨骨組を想定して、0.1とする。

3. 評価手法

3.1 非正規分布を考慮した確率極限解析法

梁降伏先行型全体崩壊機構からかけ離れる確率をある値に収めることに必要なCOFを評価するために、まず骨組の最尤崩壊機構を探索する必要がある。骨組の最尤崩壊機構を探索するには列挙法などいろいろあるが、大井等^{[7][8]}が提案した確率極限解析法は比較的短い計算時間で崩壊機構を探索することができる。ここでは、非正規分布に従う外力・部材耐力を考慮するために、FORMを導入した確率極限解析法^[9]を用いて、骨組の最尤崩壊モードを探索する。そのプロセスを以下に簡単に示す。

まず初期条件として部材の全塑性モーメントに平均値を与え、無荷重の状態から平均外力への比例荷重を仮定してCP(Compact Procedure)を行う。CPの過程で得られる各崩壊モードに対して、FORMに従って信頼性指標 β 及び設計点を算定する。

ここで、解析上、上記プロセスにおいて適当な規準 $\beta \leq \beta_{\min} + \delta$ を導入する。そして、記憶された各設計点に対応する外力・部材全塑性モーメントの確定値を新たな外力・部材耐力として与え、再びCPを行う。最終的に新崩壊モードが出現しなくなるまで、解析は進められるが、荷重係数 λ が1に到達しない場合は、その設計点は破壊領域内にあることになり設計点としての要件を欠くので、除外する。

3.2 荷重レベルの取り扱い

梁降伏先行型全体崩壊機構からかけ離れる確率は荷重の大きさによって違うため、荷重レベルは目標COFを大きく左右する重要なパラメータとなる。本研究ではできるだけパラメータの数を少なくするために、一定な信頼性レベルで設計した骨組を対象とし、荷重レ

Fig.1 Preferable Mode for n -story m -bay Frame

ベルは信頼性レベルによって設定する。即ち、同じ信頼性レベルの下では、荷重の大きさはCOFによって変化する。以下COFによる荷重の変化を考察する。

n 層 m スパンの骨組に対して設計目標とした梁降伏先行型崩壊モードはFig.1に示され、前述の基本仮定により、対応する限界状態関数は次の一般式で容易に表せる。

$$G(X) = 2 \sum_{i=1}^m M_{bni} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m M_{bij} + \sum_{i=1}^2 M_{csi} + \sum_{i=1}^{n-1} M_{ci} - \sum_{j=1}^n jhP_j \quad (2)$$

ただし、 M_{bij} は第 i スパン第 j 層の梁の部材耐力であり、 M_{ci} は中間柱の部材耐力、 M_{csi} は外柱の部材耐力である。 P_j は第 j 層に作用する荷重である。 n 、 m は層数とスパン数であり、 h は階高である。前述の基本仮定により、 M_{bij} 、 M_{ci} 、 M_{csi} 、 P_j は全て相互独立な対数正規確率変数であり、それらの平均値に式(3)の関係があり、変動係数には式(4)の関係がある。

$$\begin{aligned} \mu_{bni} &= \mu_b & \mu_{bij} &= 2\mu_b \\ \mu_{csi} &= C_{of}\mu_b & \mu_{ci} &= 2C_{of}\mu_b & \mu_{pj} &= j\mu_p \end{aligned} \quad (3)$$

$$V_{bni} = V_{bij} = V_{ci} = V_{csi} = V_1 \quad V_{pj} = V_2 \quad (4)$$

ただし、 μ_b は梁の部材耐力の平均値であり、 μ_p は第1層に作用する荷重の平均値である。 V_1 、 V_2 はそれぞれ耐力と荷重の変動係数である。

前述の基本仮定により、 V_2 より V_1 がかなり小さいため、式(2)の限界状態関数に対応する2次モーメント信頼性指標は次式で表される（付録参照）。

$$\beta_{SM} \approx \frac{2m(2n-1)\mu_b + 2mC_{of}\mu_b - \mu_p h \sum_{j=1}^n j^2}{V_2 \mu_p h \sqrt{\sum_{j=1}^n j^4}} \quad (5)$$

即ち、第1層に作用する荷重の平均値 μ_p は次式で表される。

$$\mu_p \approx \frac{2m\mu_b(2n-1+C_{of})}{h(\beta_{SM} V_2 \sqrt{\sum_{j=1}^n j^4} + \sum_{j=1}^n j^2)} \quad (6)$$

V_2 より V_1 がかなり小さいため、同じ信頼性レベルの下では、 β_{SM} はCOFからほぼ影響を受けない（付録参照）ので、 μ_p はほぼ C_{of} の線形関数であることが分かる。

また、同じ信頼性レベルの下では、 β_{SM} は部材耐力 μ_b およびスパン数 m にもよらずほぼ一定値を保つようになっている（付録参照）ので、 μ_p は μ_b および m とほぼ正比例になることが分かる。

2層多スパン骨組を例とし、COFが変化してもFORM信頼性指標 $\beta=2$ を保つように荷重の平均値を計算し、得られた μ_p とCOFの関係をFig.2に示す。Fig.2により μ_p は C_{of} とほぼ線形関係になることが

Fig.2 Relation between COF and Load

分かる。

3.3 γ -COF曲線によるCOF評価手法

本研究では、既に一定な信頼性レベルで梁降伏先行型全体崩壊機構に設計された骨組を想定し、上述のFORMを導入した確率極限解析法により、最も出現しやすいいくつかの崩壊機構を抽出する。そして、式(7)に示すように望ましくない崩壊機構の出現確率と望ましい梁降伏先行型全体崩壊機構の出現確率の割合を評価指標として用いる。

$$\gamma = \frac{P_{f2}}{P_{f1}} \quad (7)$$

ただし、 P_{f1} は望ましい梁降伏先行型崩壊機構の出現確率、 P_{f2} は望ましくない崩壊機構の中で最も出現しやすい崩壊機構の出現確率を表す。 γ は望ましくない崩壊機構の相対的な出現確率を表す評価指標である。

骨組を梁降伏先行型崩壊機構で設計し、設計した崩壊機構の出現を確率論的な意味で保証するために、評価指標 γ は(8)式に示すように明確なレベル γ_0 以内におさめなければならない。

$$\gamma = \frac{P_{f2}}{P_{f1}} \leq \gamma_0 \quad (8)$$

ただし、 γ_0 は評価指標 γ の許容レベルとしての目標値であり、以下目標評価指標という。

一つのCOFの値に対して(6)式に示すように荷重の平均値が設定され、確率極限解析法により最も出現しやすいいくつかの崩壊機構を抽出される。そして、式(7)に対応する望ましい崩壊機構の出現確率 P_{f1} と望ましくない崩壊機構の出現確率 P_{f2} が得られ、一つの評価指標 γ の値が得られる。さらに、COFの値およびそれに対応する荷重の平均値を変化させ、評価指標 γ とCOFの関係を表す γ -COF曲線が得られる。 γ -COF曲線により目標評価指標 γ_0 に対応するCOFの値を求め、目標となるCOF値（以下目標COF値という）とする。

いうまでもなく、上述の方法で得られた目標COFは目標評価指標 γ_0 によって大きく変化する。そこで指標 γ_0 は明確な値を示すべきであるが、設計に受け入れられることができるレベル γ_0 はまだ明らかではないので、本研究では初期的な検討として、 $\gamma_0=0.9$ と設定し、望ましくない崩壊機構の出現確率は望ましい崩壊機構の出現確率の90%以内に納めるような目標COFを考察する。

Fig.3 Type of Tolerable Collapse Mode for Level I

Fig.4 Type of Tolerable Collapse Modes for Level II

Fig.5 Type of Tolerable Collapse Modes for Level III

また、評価指標 γ は相対的な指標であるため、望ましくない崩壊機構をどのように設定するかにより変化する。文献[9]は梁降伏先行型全体崩壊機構以外は全て望ましくない崩壊機構であるという大変厳しい条件の下で評価しているため、目標COFはスパン数や総数の増加に伴い、実設計上では困難なほど大きな値となってしまう。耐震設計では、大きな地震エネルギーを吸収する崩壊機構が望ましいので、本研究では厳しい梁降伏先行型全体崩壊機構のみにこだわらず、設計上有効な崩壊機構を次の3つのレベルに分けて検討する。

レベルⅠ：厳密な梁降伏先行型全体崩壊機構

レベルⅡ：ほぼ梁降伏先行型全体崩壊機構

レベルⅢ：全体崩壊機構

レベルⅠではFig.3に示すように全層の梁にのみ塑性ヒンジが発生する場合以外は全て望ましくない崩壊機構とする。レベルⅡではFig.4に示すように梁と最上層の柱頭部にのみ塑性ヒンジが発生する場合、ほぼ梁降伏先行型全体崩壊機構として許容され、それとレベルⅠの厳密な梁降伏先行型全体崩壊機構以外は全て望ましくない崩壊機構とする。レベルⅢではFig.5に示すように梁と中間層の一部の柱に塑性ヒンジが発生しても全体崩壊機構であれば許容され、それとレベルⅠの厳密な梁降伏先行型全体崩壊機構およびレベルⅡのほぼ梁降伏先行型全体崩壊機構以外は全て望ましくない崩壊機構とする。

3.4 目標COFの評価例

2層2スパン骨組を例とし、評価プロセスを説明する。目標信頼性指標を $\beta=2$ とし、COF=1.14の時、確率極限解析により、Fig.6に示すような最も出現しやすい6つの崩壊機構が得られ、出現確率の大きい順にモード1, 2, 3, 4, 5, 6とする。6つの崩壊機構の中では、望ましい崩壊機構はモード1であり、レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲに対応する式(7)の P_{f1} は全てモード1の出現確率となる。崩壊レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲにおいて望ましくない崩壊機構の中で最も出現しやすい崩壊機構は、それぞれモード2, 3, 4であり、レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲに対応する式(7)の P_{f2} はそれぞれモード2, 3, 4の出現確率となる。

Fig.6 Likely Collops Modes

Fig.7 Relation between COF and the Failure Probabilities

Fig.8 γ-COF Curves

Table 1 Corresponding Unprefere modes in the Three Levels

COF	1.09 ~ 1.105	1.105 ~ 1.12	1.12 ~ 1.15	1.15 ~ 1.28	1.28 ~
order of modes	1-4-2-3-5-6	1-2-4-3-5-6	1-2-3-4-5-6	1-2-3-5-4-6	1-2-3-5-6-4
Level I	mode 4	mode 2	mode 2	mode 2	mode 2
Level II	mode 4	mode 4	mode 3	mode 3	mode 3
Level III	mode 4	mode 4	mode 4	mode 4	mode 6

COFを1.0から5.0まで変化させ、確率極限解析により、得られた最も出現しやすい6つの崩壊機構がFig.6に示す各崩壊機構と同じであるが、COFの変化によって各モードの出現しやすさが変わる。考察するために、COFの変化によってFig.6に示す各崩壊機構の出現確率の変化をFig.7に示す。Fig.7により、COFが非常に小さいとき、一番出現しやすいのはモード4であり、COF=1.09となると、望ましい崩壊機構モード1は一番出現しやすくなる。本研究では、既に梁降伏先行型全体崩壊機構に設計された骨組を想定しており、COF<1.09の範囲は考察の対象外となる。COF=1.09-1.105の範囲では各崩壊機構の出現する順番は1-4-2-3-5-6となり、レベルI、II、IIIに対応する式(7)の P_{ℓ} は全てモード4の出現確率となる。

COFの増加によって各崩壊機構の出現する順番およびレベルI、II、IIIで P_{ℓ} に対応するモードをTable 1に示す。表中、COF=1.15-1.28の範囲ではモード5の出現確率はモード4のそれを上回っているものの、モード5はレベルIIIで許容される崩壊型であるため、レベルIIIで P_{ℓ} に対応するモードはモード4である。COF>1.28の時、モード6の出現確率はモード4のそれを上回っており、レベルIIIで P_{ℓ} に対応するモードはモード6となる。

Fig.8に各崩壊レベルに対応する評価指標 γ とCOFの関係を表す γ -COF曲線を示す。図中、各曲線の折点は P_{ℓ} に対応するモードの入れ代わるところを表す。例えば、レベルIIIでは、COF<1.28とCOF>1.28の時、 P_{ℓ} に対応するモードはそれぞれモード4と5であるので、 γ -COF曲線のCOF=1.28のところで一つの折点が生じる。目標COF値は、レベルI、II、IIIの γ -COF曲線と γ_0 水平線の交点のCOF値を1.55, 1.25, 1.14として求められ、レベルI、II、IIIの順に目標COF値が小さくなるのが分かる。

4. 目標COFの評価結果及び考察

ここでは多層多スパン骨組を対象とし、目標信頼性指標、崩壊レベル及び層数とスパン数による目標COF値の変化を考察する。

4.1 崩壊レベルIIIにおけるスパン数による目標COF値への影響

崩壊レベルIIIではFig.5に示すように梁と中間層の一部の柱に塑性ヒンジが発生しても全体崩壊機構であれば許容され、式(7)の P_{ℓ} に対応する望ましくない崩壊機構は層崩壊モードとなる。層崩壊モードは基本的にはFig.9aとbに示すような形であり、対応する限界状態関数はそれぞれ式(9)と(10)で表わされる。

$$G(X) = 2 \sum_{j=1}^{n_c-1} \sum_{i=1}^m M_{bij} + \sum_{i=1}^4 M_{csl} + \sum_{i=1}^{2n_c-2} M_{cl} - \sum_{j=1}^{n_c} jhP_j - \sum_{j=n_c+1}^{n_c} n_c hP_j \quad (9)$$

$$G(X) = 2 \sum_{i=1}^m M_{bri} + 2 \sum_{j=n_c+1}^{n_c-1} \sum_{i=1}^m M_{bij} + \sum_{i=1}^2 M_{csl} + \sum_{i=1}^{n_c-1} M_{cl} - \sum_{j=n_c+1}^{n_c} (j+n_c-n)hP_j \quad (10)$$

ただし、 n_c は層崩壊モードにおける崩壊した層数である。

式(9)と(10)の限界状態関数に対応する2次モーメント信頼性指標はそれぞれ式(11)と(12)のように求められる。

$$\beta_{SM} = \frac{4m(n_c-1+C_{of})\mu_b - \mu_p h \left(\sum_{j=1}^{n_c} j^2 + n_c \sum_{j=n_c+1}^{n_c} j \right)}{V_2 \mu_p h \sqrt{\sum_{j=1}^{n_c} j^4 + n_c^2 \sum_{j=n_c+1}^{n_c} j^2}} \quad (11)$$

Fig.9 Unpreferable Modes for Level III

Fig. 10 Target COF for Level III

Fig. 11 Target COF for 4 storey multibay Frame

Fig. 12 Target COF for 4-bay multistorey Frame

$$\beta_{SM} \approx \frac{2m(2n_c - 1 + C_{of})\mu_b - \mu_p h \sum_{j=n-n_c+1}^n j(j+n_c-n)}{V_2 \mu_p h \sqrt{\sum_{j=n-n_c+1}^n j^2(j+n_c-n)^2}} \quad (12)$$

同じ信頼性レベルの下では、3.2節に示すように荷重の平均値 μ_p はスパン数 m と正比例になっているので、式(11)と(12)の β_{SM} は m に依存しないことが分かる。また、付録と同様に式(9)と(10)の限界状態関数の高次モーメント α_{Gk} を求めると、 α_{Gk} もスパン数 m に依存しないことが分かる。従って、式(9)と(10)の限界状態関数に対応する信頼性指標あるいは破壊確率は m に依存しない。即ち、同じ信頼性レベルの下では、スパン数 m を変化させても、式(7)の P_R は同じであるので、レベルIIIでは、目標COFは m に依存しないことが分かる。

目標信頼性指標を $\beta=2$ とし、4層骨組の目標COFのスパン数による変化をFig.10に示す。Fig.10より、崩壊レベルIとIIでは、目標COF値がスパン数が多くなるにつれて大きくなっているが、崩壊レベルIIIではスパン数によらずに同一の値となる。

4.2 部材耐力の平均値等による目標COF値への影響

本論文の基本仮定では最上階の梁耐力の平均値を106.2 KN-mと設定したが、ここでは、部材耐力の平均値による目標COF値への影響を検討する。一定な信頼性レベルで梁降伏先行型全体崩壊機構に設計された骨組に対して、出現しやすい崩壊機構はいろいろあるが、式(5)(11)(12)に示すように、あらゆる崩壊機構に対応する2次モーメント信頼性指標は次式で表すことができる。

$$\beta_{SM} \approx \frac{a\mu_b - b\mu_p}{c\mu_p} \quad (13)$$

ただし、 a, b, c は層数、スパン数および崩壊機構の種類に依存する係数である。

同じ信頼性レベルの下では、3.2節に示すように荷重の平均値 μ_p はスパン数 m と正比例になっているので、式(13)の β_{SM} は μ_b に依存しないことが分かる。また、付録と類似するように式(9)と

(10)のような各崩壊機構の限界状態関数の高次モーメント α_{Gk} を求め、 α_{Gk} はスパン数 m にも依存しないことが分かる。即ち、同じ信頼性レベルの下では、各崩壊機構に対応する信頼性指標あるいは破壊確率は μ_b に依存しない。従って、本研究で得られた目標COFは μ_b に依存しないことが分かる。

また、本研究では鉛直荷重を考慮していないので、どの崩壊機構に対応する限界状態関数にはスパンの大きさを含めていない。従って、本研究で得られた目標COFはスパンの大きさにも依存しないことがわかる。

4.3 信頼性レベルなどによる目標COF値への影響

目標信頼性指標を $\beta=2$ と設定し、4スパン骨組の目標COFの層数による変化をFig.11に示す。Fig.11より、崩壊レベルI、II、IIIともに層数が多くなるにつれて目標COF値が大きくなり、崩壊レベルI、II、IIIの順に目標COF値が小さくなるのがわかる。これは崩壊レベルI、II、IIIの順に許容される崩壊機構の制限は緩んでいるからである。

崩壊レベルをIIIと設定し、目標信頼性指標 $\beta=1, 2, 3, 4$ の場合の目標COF値の層数による変化をFig.12に示す。Fig.12により目標COF値は目標信頼性レベルによって大きく変化しており、目標信頼性レベルが高くなるにつれて、目標COF値が小さくなるのがわかる。これは目標信頼性レベルが高くなるにつれて、耐力の平均値が荷重の平均値から離れており、部材耐力のバラツキ（変動係数）の影響が相対的に弱くなり、柱と梁の耐力のバランスが逆転する可能性が小さくなるからである。

4.4 目標COFの評価結果

ここでは、7層5スパンまでの多層多スパンの骨組を対象とし、目標信頼性指標 $\beta=1, 2, 3, 4$ と設定し、崩壊レベルI、II、IIIの順に目標COF値の評価結果をそれぞれTable 2, 3, 4に示す。

5. 結論

本研究の考察より、以下のような結論が得られた。

- (1) 本研究の仮定では、崩壊レベルI、IIにおいては、スパン数が多くなるにつれて目標COF値が大きくなるが、崩壊レベルIIIに

Table 2 Target COF for Level I ($\gamma_0=0.9$)

reliability levels	stories	1-bay	2-bay	3-bay	4-bay	5-bay
$\beta=1$	1-story	1.22	1.49	1.83	2.29	2.92
	2-story	1.38	1.84	2.41	3.13	4.06
	3-story	1.57	2.08	2.78	3.63	4.69
	4-story	1.84	2.25	3.04	3.97	>5
	5-story	2.09	2.39	3.24	4.23	>5
	6-story	2.45	2.51	3.42	4.46	>5
	7-story	2.76	2.77	3.57	4.65	>5
$\beta=2$	1-story	1.14	1.29	1.46	1.68	1.92
	2-story	1.25	1.55	1.86	2.24	2.67
	3-story	1.36	1.73	2.17	2.68	3.25
	4-story	1.50	1.90	2.43	3.03	3.71
	5-story	1.68	2.03	2.64	3.31	4.06
	6-story	1.93	2.15	2.81	3.54	4.35
	7-story	2.18	2.24	2.94	3.72	4.57
$\beta=3$	1-story	1.10	1.20	1.31	1.45	1.59
	2-story	1.18	1.38	1.61	1.85	2.13
	3-story	1.26	1.55	1.87	2.22	2.61
	4-story	1.34	1.71	2.11	2.55	3.04
	5-story	1.40	1.85	2.33	2.85	3.43
	6-story	1.55	1.97	2.52	3.12	3.78
	7-story	1.69	2.09	2.70	3.37	4.09
$\beta=4$	1-story	1.08	1.16	1.24	1.33	1.43
	2-story	1.14	1.29	1.46	1.64	1.84
	3-story	1.21	1.44	1.68	1.94	2.23
	4-story	1.27	1.57	1.89	2.23	2.60
	5-story	1.33	1.70	2.09	2.51	2.96
	6-story	1.39	1.82	2.28	2.77	3.29
	7-story	1.50	1.94	2.46	3.02	3.62

Table 4 Target COF for Level III ($\gamma_0=0.9$)

reliability levels	$\beta=1$	$\beta=2$	$\beta=3$	$\beta=4$
1-story	1.11	1.07	1.06	1.05
2-story	1.25	1.14	1.08	1.07
3-story	1.56	1.32	1.18	1.12
4-story	1.84	1.50	1.29	1.19
5-story	2.09	1.68	1.40	1.27
6-story	2.45	1.93	1.53	1.38
7-story	2.76	2.18	1.69	1.49

おいてはスパン数によらず一定である。

- (2) 崩壊レベル I、II、III ともに層数が増えると、目標COF値は大きくなる。また、崩壊レベル I、II、III の順に目標COF値は小さくなる。
- (3) 目標COF値は目標信頼性レベルによって大きく変化しており、目標信頼性レベルが高くなるにつれて目標COF値は小さくなる。
- (4) 本研究の仮定では、目標COFは部材耐力の大きさおよびスパンの大きさに依存しない。

本研究では、既に一定な信頼性レベルで梁降伏先行型全体崩壊機構に設計された骨組に対して、目標信頼性指標、崩壊レベル、

Table 3 Target COF for Level II ($\gamma_0=0.9$)

reliability levels	stories	1-bay	2-bay	3-bay	4-bay	5-bay
$\beta=1$	1-story	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
	2-story	1.25	1.38	1.60	1.84	2.11
	3-story	1.56	1.57	1.77	2.08	2.41
	4-story	1.84	1.84	1.90	2.25	2.63
	5-story	2.09	2.09	2.09	2.39	2.80
	6-story	2.45	2.45	2.45	2.51	2.95
	7-story	2.76	2.76	2.76	2.77	3.08
$\beta=2$	1-story	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
	2-story	1.16	1.25	1.39	1.53	1.69
	3-story	1.32	1.36	1.53	1.74	1.95
	4-story	1.50	1.50	1.66	1.90	2.16
	5-story	1.68	1.68	1.76	2.03	2.33
	6-story	1.93	1.93	1.95	2.15	2.47
	7-story	2.18	2.18	2.18	2.24	2.59
$\beta=3$	1-story	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
	2-story	1.09	1.18	1.28	1.38	1.49
	3-story	1.18	1.26	1.40	1.55	1.71
	4-story	1.29	1.34	1.52	1.71	1.90
	5-story	1.40	1.40	1.62	1.85	2.08
	6-story	1.53	1.55	1.72	1.97	2.24
	7-story	1.69	1.69	1.80	2.09	2.39
$\beta=4$	1-story	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
	2-story	1.08	1.14	1.22	1.30	1.38
	3-story	1.12	1.21	1.32	1.44	1.56
	4-story	1.19	1.27	1.42	1.57	1.73
	5-story	1.27	1.34	1.52	1.70	1.89
	6-story	1.38	1.40	1.61	1.82	2.05
	7-story	1.49	1.49	1.69	1.94	2.20

部材耐力の大きさおよび層数とスパン数などによる目標COF値の変化を考察した。目標COF値に大きな影響を与えるさまざまな要因として、評価レベルとしての目標評価指標、部材耐力の間の相関性、地震荷重の分布、骨組の動的挙動、鉛直力の大きさなどが考えられる。今後、変動係数の大きさを含めて、これらの要因を総合的に考慮し、目標COF値を評価、検討する必要がある。

謝辞

本研究の数値解析について、元名古屋工業大学大学院生の奥山隆氏（松下電工）と上里智之氏（竹中工務店）及び元名古屋工業大学学生の落合慎吾氏（名鉄エーゼンシー）に負うところが多い。付して感謝します。

参考文献

- [1] 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、1990.10.
- [2] 河野昭彦、松井千秋、他、SRC 構造多層ラーメン架構の全体崩壊機構形成に要求される柱梁耐力比の基礎的性質、日本建築学会構造系論文集、No. 505, 153-160, 1998.3.
- [3] 桑村仁、佐々木道夫、加藤勉、降伏耐力のばらつきを考慮した全体崩壊メカニズムの設計、日本建築学会構造系論文集、No. 401, 1989.7.
- [4] 諏訪仁、鈴木哲夫、他、梁降伏型骨組の耐震信頼性評価に関する一手法、JCOSSAR'95, 425-430.
- [5] 日本建築学会、建築物の限界状態設計指針（案）、第一版、2000.3.
- [6] 小野徹郎、趙衍剛、吉原和宏、確率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, 377-382, 1997.3

- [7] 大井謙一、骨組の確率極限解析、JCROSSAR'91, 675-678.
 [8] 西田明美、孫宏、大井謙一、高梨晃一、骨組の崩壊モード探索に関する一考察、JCROSSAR'95, 239-242, 1995.11.
 [9] Ono, T., Zhao, Y.G. and Ito, T., Probabilistic Evaluation of Column Overdesign Factors for Frames, *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 5, 605-611, 2000.4.
 [10] Zhao, Y.G. and Ono, T., Third-moment standardization for structural reliability analysis, *J. Struct. Engrg, ASCE*, Vol. 126, No. 6, 724-732, 2000.6.

付録：荷重-COF関係の証明

次の変数代替を行い、

$$x_b = 2 \sum_{i=1}^m M_{bni} + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m M_{bij} \quad (14)$$

$$x_c = \sum_{i=1}^2 M_{csi} + \sum_{i=1}^{m-1} M_{ci} \quad (15)$$

$$x_p = \sum_{j=1}^n jhP_j \quad (16)$$

式(2)の限界状態関数は式(17)のようになる。

$$G(\mathbf{X}) = x_b + x_c - x_p \quad (17)$$

式(3)(4)により、 x_b, x_c, x_p の平均値と標準偏差は次式のように得られる。

$$\mu_{xb} = 2m(2n-1)\mu_b \quad \sigma_{xb} = 2V_1\mu_b\sqrt{m(4n-3)} \quad (18)$$

$$\mu_{xc} = 2mC_{of}\mu_b \quad \sigma_{xc} = V_1\mu_bC_{of}\sqrt{2(2m-1)} \quad (19)$$

$$\mu_{xp} = \mu_ph \sum_{j=1}^n j^2 \quad \sigma_{xp} = V_2\mu_ph \sqrt{\sum_{j=1}^n j^4} \quad (20)$$

式(18)(19)(20)により、式(17)の限界状態関数の平均値は次式のよう

に得られる。

$$\mu_G = 2m(2n-1)\mu_b + 2mC_{of}\mu_b - \mu_ph \sum_{j=1}^n j^2 \quad (21)$$

V_2 より V_1 が大分小さいため、式(2)の限界状態関数の標準偏差 σ_G が次式のように近似的に表される。

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_{xb}^2 + \sigma_{xc}^2 + \sigma_{xp}^2} \approx \sigma_{xp} = V_2\mu_ph \sqrt{\sum_{j=1}^n j^4} \quad (22)$$

即ち、式(2)の限界状態関数に対応する2次モーメント信頼性指標は式(5)のように近似的に表される。

なお、限界状態関数 $Z=G(\mathbf{X})$ の分布形はそのモーメントと直接関係があり、 $G(\mathbf{X}) < 0$ に対応する信頼性指標または破壊確率も $Z=G(\mathbf{X})$ のモーメントの関数である^[10]。ここでは、 $Z=G(\mathbf{X})$ の標準化確率変数 $x_s=(Z-\mu_G)/\sigma_G$ と標準正規確率変数 u の間に次式の関係があると仮定する。

$$u = N(x_s, \{\alpha_{Gk}\}) \quad (23)$$

ただし、 N は x_s と u の関係を表す関数であり、 α_{Gk} は $Z=G(\mathbf{X})$ の無次元 k 次中心モーメントである。

式(24)の破壊確率の定義より信頼性指標は式(25)のように与えている。

$$\text{Prob}[G \leq 0] = \text{Prob}\left[x_s \leq -\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right] = \text{Prob}[x_s \leq -\beta_{SM}] \quad (24)$$

$$\beta = -N(-\beta_{SM}, \{\alpha_{Gk}\}) \quad (25)$$

V_2 より V_1 が大分小さいため、 $Z=G(\mathbf{X})$ の無次元 k 次中心モーメント α_{Gk} が次式のように近似的に表される。

$$\alpha_{Gk} = \frac{\alpha_{xbk}\sigma_{xb}^k + \alpha_{xck}\sigma_{xc}^k + \alpha_{xpk}\sigma_{xp}^k}{\sigma_G^k} \approx \alpha_{xpk} \quad (26)$$

$$\alpha_{xpk} = \frac{\alpha_{pk} \sum_{j=1}^n j^{2k}}{\left(\sum_{j=1}^n j^4\right)^{k/2}} \quad (27)$$

ただし、 $\alpha_{xbk}, \alpha_{xck}, \alpha_{xpk}$ はそれぞれ x_b, x_c, x_p の無次元 k 次中心モーメントであり、 α_{pk} は第1層に作用する荷重の無次元 k 次中心モーメントである。式(26)と(27)により、 α_{Gk} はCOFとほぼ関係ないことが分かる。従って、COFを変化させても、式(25)の信頼性指標が一定値を保つために、2次モーメント信頼性指標 β_{SM} もCOFによらず一定値を保たなければならない。

また、式(26)と(27)により、 α_{Gk} は部材耐力 μ_b およびスパン数 m にもほぼ関係ないことが分かる。従って、 μ_b および m を変化させても、一定値の信頼性指標で設定すれば、2次モーメント信頼性指標 β_{SM} も μ_b および m の変化によらず一定値を保つようになる。

(2001年9月7日原稿受理、2002年5月9日採用決定)