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

A STUDY ON ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF STEEL FRAMES CONSIDERING UNCERTAINTY OF MEMBER DUCTILITY

井戸田 秀樹*, 山崎 賢二**
Hideki IDOTA and Kenji YAMAZAKI

The purpose of this paper is to clarify the stochastic properties of energy absorption capacity for steel moment resisting frames considering the uncertainty of member ductility. Six types of moment resisting steel frames with different number of story are used as basic analytical models. The member restoring force-deformation characteristics employed in the analytical models are elastic-plastic bi-linear models with a deformation limit. For six analytical models, load-deformation relations under static horizontal loads are calculated using Monte Carlo simulation and elastic-plastic pushover analysis with considering a stress redistribution after member brittle failures. Energy absorbing capacity of frames is defined for three different limit states, yield limit, initial fracture limit and failure limit. Based on the analytical results, this paper proposes practical and simple formulae which can estimate the lower percentile value of absorbed energy of steel frames.

Keywords : Stochastic and Statistical Method, Ductility, Energy Absorption Capacity,

Steel Frame, Stress Redistribution, Push Over Analysis

確率統計的手法, 塑性変形能力, エネルギー吸収能力, 鉄骨骨組, 応力再配分, 静的漸増載荷

1. はじめに

耐震設計では地震による建物への作用をエネルギーとして扱い、地震時に投入されるエネルギーに対して建物のエネルギー吸収能力を上回らせることによって耐震安全性を確保する考え方が提案されている¹⁾。限界状態設計の基本理念に基づいて安全性を評価するためには、外乱による入力エネルギー量と建物のエネルギー吸収能力が持つ不確定性を定量的に取り扱う必要がある。建物のエネルギー吸収能力は、建物を構成する部材の耐力と変形能力によって決まる。このうち部材耐力の不確定性は骨組のエネルギー吸収能力を大きく左右する崩壊モード形と密接な関係があり、鋼構造骨組を対象とした研究報告もいくつかなされている²⁾³⁾。一方、部材の変形能力の不確定性と骨組の関係については、近年いくつかの研究結果が報告されている。桑村、佐藤⁴⁾⁵⁾は、動的な荷重下における鉄骨骨組の脆性連鎖崩壊について報告しており、部材変形性能のばらつきが骨組の連鎖崩壊を促進するという有益な知見を示すとともに、倒壊を防止するための実用的な耐力および部材変形能力の割り増し係数を提案している。しかし、部材の変形性能はある塑性変形領域内に一定間隔でばらついたモデルが用いられており、厳密には確率論的な扱いはなされておらず、応答については確定的な扱いの中で結論が導かれている。また、日下、中島⁶⁾は、梁部材破断を考慮した鉄骨骨組

の静的水平荷重下の挙動を追跡し、梁破断が骨組の挙動や最大耐力、層間変形量、破壊確率等に与える影響についていくつかの考察を行っている。しかし、骨組の限界状態に対応したエネルギー吸収性能については触れられておらず、解析結果も定性的な評価にとどまっている。

部材変形性能が持つ不確定性については確率モデルを提示するに十分な統計資料が不足しているのが現状であるが、限られた統計資料でもかなり大きな変動性を有するものであることが報告されており⁷⁾、確率統計論的な手法を用いてこの不確定性を骨組の性能評価に積極的に取り込んでいくことは十分意義のあることと考える。部材変形性能の不確定性が骨組の性能に与える影響を検討するためには、まず骨組の基本的な性質として静的水平荷重下の挙動に及ぼす影響を把握しておくこと、および、骨組が有する各種限界状態に対応して定義された物理量と部材変形性能の関係を確率論的な扱いの中で定量化することが必要と考えられる。そこで、本研究では、骨組の安全性能を評価する量としてエネルギー吸収能力に着目し、各種限界状態に対応した骨組のエネルギー吸収量と部材変形性能の不確定性との関係を確率的な手法で把握することを目的とする。具体的には、部材の終局変形後の応力再配分を考慮した弾塑性骨組解析を行い、その結果に基づいて部材の終局変形量の不確定性が鋼構造骨組

* 名古屋工業大学大学院社会工学専攻 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

** 名古屋工業大学大学院社会工学専攻 博士後期課程・工修

Graduate Student, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology, M. Eng.

Fig. 1 Moment vs. Rotation Behavior of Members

Fig. 2 Statistical Inference on Method of Moments

Fig. 3 Analytical Method after Ultimate Deformation

の吸収エネルギー量に及ぼす影響について考察を行う。また、部材の終局変形量の不確定性を表す指標として統計的変形性能指標を定義し、この指標を用いて骨組の吸収エネルギー量の下限値の推定式を提案する。

2. 部材の復元力特性モデル

2-1 部材の復元力特性のモデル化

解析に用いる部材の材端モーメント M -変形角 θ 関係は Fig. 1 に示すような終局変形量 θ_u を持つ Bi-Linear モデルを採用した。このモデルは部材が θ_u まで塑性変形した場合に耐力が 0 まで低下し、以後変形に対して復元力を生じないものである。また、このモデルは柱梁接合部の破断現象による耐力低下モデルなどによく用いられるが、本研究ではこれを破断といった特定の現象に限定せずに終局変形量を考慮した基本モデルとして取り扱う。

2-2 不確定性のモデル化

本研究では、部材の終局耐力 M_p 、および終局変形量 θ_u を不確定量として扱う。Fig. 2 において本解析で考慮した不確定量について示している。 M_p の統計的性質は鋼材の機械的性質である降伏応力度の影響が支配的であり、一般に対数正規分布によって表すことができる。一方、 θ_u においては局部座屈、降伏後の素材特性、脆性破断現象等が関わり、これらの影響をふまえた統計的な性質はほとんど具体的

にされていないのが現状である。そこで、ここでは基本となる確率モデルとして (a) 一様分布モデル (Uniform distribution) と (b) 対数正規分布モデル (Log-normal distribution) の 2 つを仮定した。

3. 骨組解析手法と解析モデル

3-1 骨組解析手法

本研究で対象とする現象は、脆性破壊による耐力劣化の挙動を含む。そこで骨組解析手法には、一般的な増分弾塑性解析の手法を利用しながら耐力劣化時にも静的な釣合条件を満足しつつ骨組全体の挙動を追跡できる手法を用いた⁹⁾。具体的には、各部材に対して終局変形量を設定し、部材の塑性変形が進行して設定した終局変形量を超過後、

1. 弾性剛性で負方向載荷…変形量が減少 (Fig. 3 ㉔)

2. 塑性剛性で正方向載荷…変形量が増加 (Fig. 3 ㉕)

の手順をその部材耐力が 0 になるまで繰り返す手法である⁹⁾。この間、骨組の応力と外力の釣合いを保ちながら応力の再配分が行われる。負方向載荷、正方向載荷の制御は、一定の荷重増分に対して得られた部材端の回転変形角がその部材に与えられた終局変形角を超えていれば負方向載荷、下回れば正方向載荷というルールに従った。応力再配分後、終局変形量に達した剛接部をピンに置き換えて正方向載荷を再開させる。このような解析ステップを導入することで一般的な増分弾塑性解析の手法を利用して Fig. 1 の復元力特性を持つ部材で構成された骨組の荷重変形関係が追跡できる。また、本解析では耐力劣化時の解析ステップ前後における各部材両端の相対変位を材長に対して 1/350 以下になるように 1, 2 の手順を繰り返すことで他の部材端に新たな破断が生じないことを確認している。

Fig. 4 Behavior Examples of Frame Analysis

Fig. 5 Three Limit States of Frames

3-2 骨組解析結果

前節の手法を用いて部材の終局変形量を考慮した2層2スパン骨組の解析を行い、その荷重変形関係について考察する。

部材の終局変形量の不確実性が変化したときの骨組の荷重変形関係に与える影響を考察するために不確実性の異なる3つのタイプについて解析を行った。 θ_y に応じた塑性変形倍率 η を次式、

$$\eta = \frac{\theta_y}{\theta_y} - 1 \quad (1)$$

で表すとき、不確実性をそれぞれ大、中、小に対応させて η の変動係数 V_η を $V_\eta=0.0$, $V_\eta=0.3$, $V_\eta=0.6$ と設定した。また、 η は全て独立な値で一様分布に従い、その平均値 μ_η を $\mu_\eta=20.0$ とした。Fig. 4は解析骨組の第1層部分の荷重変形関係について3回のモンテカルロシミュレーションによる結果を線種を変えて示した図である。図において耐力減少部分が終局変形量に達した部材に対して3-1の手法によって応力再配分を行った結果である。応力再配分後、載荷が再開され耐力は再び増加している。このように骨組の荷重変形関係を本解析手法によって追跡できていることがわかる。また、 V_η が大きいほど終局変形量の小さい部材が存在するために早い段階から骨組の耐力が低下していることがわかる。

3-3 骨組の限界状態と吸収エネルギー量の定義

本研究ではFig. 5に示す3つの限界状態における吸収エネルギー量を考察する。これらの限界状態は静的な水平荷重下の骨組において以下のような状態に対応するものと考え、設定した。

- (a) 降伏限界状態 (Yield limit of frames) : 骨組内のいずれの部材も降伏していない限界の状態
- (b) 延性限界状態 (Ductility limit of frames) : 骨組内のいずれの部材も脆性破壊が生じていない限界の状態
- (c) 倒壊限界状態 (Failure limit of frames) : 構造物の鉛直荷重支持能力が存在している限界の状態

図に示すように破断後の骨組の挙動は直下の釣り合い経路に飛び移

Fig. 6 Analytical Models

Table 1 Mechanical Properties of Structural Elements

	N.O.	E (kN/cm ²)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	M _p (kN·cm)
Column	C1	20,600	237	87,100	99,400
	C2		205	37,200	74,600
	C3		133	18,100	41,900
	C4		102	14,200	32,500
	C5		57.3	5,620	15,400
Beam	B1		114	47,800	51,300
	B2		96.8	33,500	39,500
	B3		63.1	13,600	20,400
	B4		52.7	11,100	16,900

るものとし、それぞれの限界時における吸収エネルギー量を次式のように求める。

$$E_L = \sum_{i=1}^m \left[\int_0^{\delta_i} \{Q(\delta_i) - Q_{ps}(\delta_i)\} d\delta_i \right] \quad (2)$$

ここで、 δ_i : i 層の層間変形量

Q : 層せん断力

Q_{ps} : $P-\Delta$ 効果による付加力

m : 層数

また、式中の L は限界状態を表し、降伏限界状態は $L=y$ 、延性限界状態 $L=d$ 、倒壊限界状態は $L=f$ である。

3-4 骨組解析モデル

解析モデルはFig. 6に示すような鉄骨造の2層2スパン骨組(Frame 1, Frame 2), 4層2スパン骨組(Frame 3, Frame 4), 10層2スパン骨組(Frame 5, Frame 6)を対象とする。また柱、梁の部材の組み合わせによってFrame 1, Frame 3, Frame 5を全体崩壊機構が形成される骨組に、Frame 2, Frame 4, Frame 6を層崩壊型機構が形成される骨組に設定した。各骨組において柱を295N級の角形鋼管、梁を400N級のH形鋼としており、部材断面の諸特性についてはTable 1に示す通りである。当該骨組は事務所ビルを想定しており、単位床面積当たりの質量を0.7tf/m²とした⁹⁾。また、水平荷重は A_1 分布から逆算して求められた bd_1 分布による¹⁰⁾。

4. 解析結果と考察

前章で仮定した条件のもとで η の平均値、変動係数、分布形をパラメタとして、1,000回のモンテカルロシミュレーション解析を行った結果を考察する。各パラメタは $\mu_\eta=0, 10, 20$, $V_\eta=0, 0.2, 0.4, 0.6$ および分布形は一様分布(Fig. 2(a))と対数正規分布(Fig. 2(b))である。また、 M_p の変動係数 V_{M_p} は0.15とした。

Fig. 7 Mean Value and Coefficient of Variation of Energy Absorption Capacity (Frame 1)

Fig. 8 Mean Value and Coefficient of Variation of Energy Absorption Capacity (Frame 2)

Table 2 Histograms of Energy Absorption Capacity

	Yield Limit State	Ductility Limit State	Failure Limit State
$V_\eta = 0.0$	$\mu = 14$ $\sigma = 2.5$ $\alpha_3 = 0.11$ $\alpha_4 = 3.04$	$\mu = 125$ $\sigma = 20.2$ $\alpha_3 = 0.32$ $\alpha_4 = 3.15$	$\mu = 168$ $\sigma = 17.9$ $\alpha_3 = 0.34$ $\alpha_4 = 3.18$
$V_\eta = 0.2$	$\mu = 14$ $\sigma = 2.5$ $\alpha_3 = 0.06$ $\alpha_4 = 3.03$	$\mu = 115$ $\sigma = 22.1$ $\alpha_3 = 0.28$ $\alpha_4 = 2.77$	$\mu = 167$ $\sigma = 20.0$ $\alpha_3 = 0.33$ $\alpha_4 = 3.02$
$V_\eta = 0.4$	$\mu = 14$ $\sigma = 2.4$ $\alpha_3 = 0.05$ $\alpha_4 = 3.07$	$\mu = 84$ $\sigma = 25.2$ $\alpha_3 = 0.83$ $\alpha_4 = 4.40$	$\mu = 158$ $\sigma = 24.4$ $\alpha_3 = 0.41$ $\alpha_4 = 3.15$
$V_\eta = 0.6$	$\mu = 14$ $\sigma = 2.6$ $\alpha_3 = 0.20$ $\alpha_4 = 2.95$	$\mu = 55$ $\sigma = 27.2$ $\alpha_3 = 1.47$ $\alpha_4 = 6.76$	$\mu = 150$ $\sigma = 31.2$ $\alpha_3 = 0.54$ $\alpha_4 = 3.87$

Fig. 7 は Frame 1 について E_y, E_d, E_f の平均値 $\mu_{E_y}, \mu_{E_d}, \mu_{E_f}$ 、変動係数 $V_{E_y}, V_{E_d}, V_{E_f}$ と V_η の関係を表した図である。実線は η を一様分布に仮定した場合、破線は対数正規分布に仮定した場合の結果である。また Fig. 8 は Frame 2 について同様の結果を表した図である。Fig. 7 において、降伏限界時 (a), (b) は部材の一つが降伏した時点で決まるため、 μ_η, V_η の影響を受けていないことがわかる。また、延性限界時 (c), (d) と倒壊限界時 (e), (f) を比較すると、延性限界時の方が、 V_η が増加するに従い、平均値は大きく減少し、変動係数は大きく増加している。これより延性限界時における骨組の吸収エネルギー量は倒壊限界時に比べ V_η の影響を受けやすいことがわかる。また、(a), (c), (e) において実線は破線より下に、(b), (d), (f) において実線は破線より上に位置している。つまり、骨組の吸収エネルギー量は部材の終局変形量を一様分布モデルとする方が対数正規分布とするよりも影響を受け易いことがわかる。具体的に $V_\eta=0$ と $V_\eta=0.6$ における値で比較してみると、延性限界時における骨組の吸収エネルギー量の平均値 μ_{E_f} は一様分布で 40% 程度、対数正規分布で 60% 程度まで低下し、変動係数 V_{E_f} は一様分布で 3 倍、対数正規分布で 2 倍程度の増加がみられる。また倒壊限界時における μ_{E_f} は 90% 程度まで低下し、 V_{E_f} は一様分布で 2 倍、対数正規分布で 1.5 倍程度の増加がみられる。これらの傾向

Fig. 9 Statistical Index of Member Ductility

Fig. 10 Correlation Coefficient between $dJ_{0.01}$ (or $fJ_{0.01}$) and η_{pe} in changing of p_e Fig. 11 Optimum Value of p_e

は、Fig. 8 に示す柱崩壊型の骨組でも同様に観察された。また、層数の異なる骨組でも同様の結果が観察された。

Fig. 7, Fig. 8 では平均値と変動係数についての考察を行ったが、統計的な性質を正しく把握するためには確率分布形状についても確認しておく必要がある。Table 2 は η が一様分布で $\mu_\eta=10$ のときの Frame 1 について E_y, E_d, E_f のヒストグラムを示している。また、確率分布形状を表す情報として、ここでは 4 次までの確率モーメントも併記した。図中の $\mu, \sigma, \alpha_3, \alpha_4$ は平均値、標準偏差、歪度、尖度を表す。 E_y は部材の一つが降伏した時点で決まるためにどの値も V_η の影響を受けていないことがわかる。 E_d は V_η の増加に伴って μ が減少し、 α_3, α_4 が増加するが σ は変化していない。これに対して E_f は V_η の増加に伴って μ, α_3, α_4 はほとんど変化せず、 σ が増加していることがわかる。また、分布形の違いによる影響も確認された。これより、部材の η の確率分布形が一定であっても、骨組の変形性能を評価するためには V_η や分布形状の変化も考慮する必要があるといえる。

5. 統計的変形性能指標を用いた骨組の変形性能近似式の提案

部材の終局変形量の不確定性を考慮した骨組の吸収エネルギー量評価を行うには、前章で考察したように、確率分布形状の変化まで含めた影響を考慮すべきである。しかし、実用的な観点から考えると安全性の定量的な検討を行うには、ある非超過確率に対応した吸収エネルギー量の下限值が有用な場合が多く、確率分布形や変動係数に関わらない指標による簡便な評価が望ましい。そこで、骨組吸収エネルギー量の下限値を評価するための変形性能の指標を提案し、それを用いた骨組吸収エネルギー量評価式を示す。

延性限界状態、終局限界状態ともに、変形性能の小さい部材ほど骨組の性能に及ぼす影響は大きいと考えられ、このことは既往の研究でも触れられている⁹⁾。そこで、部材の終局変形量において分布形の非超過確率が低い値、すなわち分布形の左裾部分の影響が大きいと仮定し、Fig. 9 に示すように確率変数 η の非超過確率が p_e となる値を骨組の統計的変形性能指標 (Statistical index of member ductility),

$${}_c\eta_{p_e} = F^{-1}(p_e) \quad (3)$$

と定める。以降、これを η 指標と呼ぶ。ここで、 $F^{-1}(\cdot)$ は確率分布関数の逆関数である。骨組の吸収エネルギー量は E_d/E_y および E_f/E_y の p_e 非超過確率に対応する値を ${}_dJ_{p_e}, {}_fJ_{p_e}$ とし、 η 指標との関係を調べた。

まず、 η 指標と骨組の吸収エネルギー量 ${}_dJ_{p_e}, {}_fJ_{p_e}$ の相関係数を ρ との関係で示したものが Fig. 10 である。ここでは Frame 1 において、骨組の吸収エネルギー量の非超過確率 0.01 に相当する ${}_dJ_{p_e}, {}_fJ_{p_e}$ との相関係数を示している。ただし、層崩壊型は全体崩壊型に比べて吸収エネルギー量が低下するため、両者を区別して相関係数を求めている。 ${}_dJ_{p_e}$ と η_{p_e} は p_e がおよそ 0.05 において ρ が最大となっており、 ${}_fJ_{p_e}$ と η_{p_e} では全体崩壊型で $p_e=0.3$ 、層崩壊型で $p_e=0.1$ 程度で ρ が最大となっていることがわかる。そこで ρ を最大にする p_e の値を最適値とし、 $p_e=0.01, 0.05, 0.10$ と全ての Frame について同様の方法で p_e の最適値を求めた。Fig. 11 は求めた延性限界時の最適値を横軸に倒壊限界時の最適値を縦軸に表した図である。両者間の相関性は低いいため、ここではそれぞれ独立に平均をとり、その値を各限界状態における p_e の最適値とした。

この結果をもとに ${}_dJ_{0.01}$ と $\eta_{0.07}$ および ${}_fJ_{0.01}$ と $\eta_{0.22}$ の相関を示した

Fig. 12 Relationship between L_p/J_p and η_{pe}

ものが Fig. 12 中のプロットである。◇, ◆は延性限界, ○, ●は倒壊限界に対応しており, 中抜きは全体崩壊骨組, 塗りつぶしは層崩壊骨組を表す。どの図も μ_η , V_η 分布形に関係なく η 指標は dJ_p や fJ_p と明瞭な相関関係を持つことがわかる。

これらの結果に基づき, η 指標を用いた骨組の吸収エネルギー量評価式を提案する。吸収エネルギー量の下限值 dJ_p と fJ_p は $0 < p \leq 0.1$ の範囲でそれぞれ $\eta_{0.07}$ と $\sqrt{\epsilon} \eta_{0.22}$ に比例し, 以下の式で近似する。

$$dJ_p = \begin{cases} C_d \cdot \eta_{0.07} + 1 & 0 \leq \eta_{0.07} < w \\ fJ_p & w \leq \eta_{0.07} \end{cases} \quad (4)$$

$$fJ_p = C_f \cdot \sqrt{\epsilon} \eta_{0.22} + 1 \quad (5)$$

式中の C_d, C_f は骨組の層数, 吸収エネルギー量の非超過確率, 崩壊型によって決まる係数であり, Fig. 12 の結果に基づき, 次式で定める。

$$C_d = (2.0 - 1.4p - 0.1t) e^{-0.07mt} \quad (6)$$

$$C_f = (4.3 + 6.9p - 0.5t) e^{-0.13mt} \quad (7)$$

ここで, m : 骨組の層数

p : 骨組の吸収エネルギー量の非超過確率

t : 崩壊型による係数

(全体崩壊型は 0, 層崩壊型は 1)

Fig. 13 Relationship between dJ_p and fJ_p (dJ_p and fJ_p)

また w は (4) 式の定義域を定めるものであり, (4)(5) 式の交点を求めることにより, 次式で与えられる。

$$w = \frac{C_f \sqrt{\epsilon} \eta_{0.22}}{C_d} \quad (8)$$

Fig. 12 中に示される実線が上式で求めた評価値である。倒壊限界時の評価値 fJ_p が解析値をやや上回るが, その他はよい対応を示していることがわかる。

最後に, 評価式から導いた骨組の吸収エネルギー量の下限值と解析値を限界状態別に比較する。Fig. 13 に $p=0.01$, $p=0.05$, $p=0.10$ における dJ_p と fJ_p , また fJ_p と fJ_p の関係を示した。倒壊限界時で若干ばらつきがみられるが全体的に高い精度で評価できていることがわかる。これより, (4)(5) 式を統計的変形性能指標を用いた骨組の吸収エネルギー量評価式として提案する。

6. まとめ

部材変形性能の不確定性を確率論的に扱い, これを考慮した鉄骨ラーメン骨組の各種限界状態に対応する吸収エネルギー量評価を行った。本研究で対象とした骨組は 10 層以下 2 スパンの柱崩壊および梁崩壊型骨組であり, この解析対象範囲内の骨組において以下の結論が得られた。

1. 部材の統計的変形性能指標 (3) 式を用い, 部材の終局変形量の不確

定性を考慮した骨組の非超過確率 p に対する吸収エネルギー量の下限値は延性限界に対して (4) 式, 倒壊限界に対して (5) 式で評価できる。

2. (4)(5) 式は, 部材変形性能の確率分布形にかかわらず用いることができ, 適用範囲は統計的変形性能指標の平均値が 20 以下, 変動係数が 60% 以下である。
3. 倒壊限界時の吸収エネルギー量よりも延性限界時の吸収エネルギー量の方が部材の終局変形量の変動係数に影響され易い。
4. 統計的変形性能指標を向上させることによる骨組の吸収エネルギー量増加分は, 層崩壊型より全体崩壊型の方が高い。
5. 層数が増すと統計的変形性能指標に対する吸収エネルギー量の増加率は層崩壊型では低くなる。

本研究においては部材の塑性変形能力のばらつきがない状態において骨組の崩壊型を設定し, それぞれの崩壊型ごとに変形能力に与える影響を評価した。今後は, 部材の塑性変形能力のばらつきの増加によって生じる崩壊型の変化や, 部材間の統計的な相関性, 柱梁耐力比による影響についても検討をすすめていく必要がある。

謝辞

本研究の一部は, 平成 14 年度科学研究費補助金 (基盤研究 C, 一般, 課題番号 14550564, 研究課題名「脆性破壊のランダムな発生が建築構

造システムの耐震信頼性に与える影響に関する研究」, 研究代表者 井戸田秀樹) によった。付して感謝いたします。

参考文献

- 1) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計, 1980.9, 東京大学出版会
- 2) 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骨組の設計, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 401 号, pp.151-162, 1989.7
- 3) 趙衍剛, 小野徹郎, 石井清, 吉原和宏: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第 558 号, pp.61-68, 2002.8
- 4) 桑村仁, 佐藤義也: 強震を受ける柱降伏型多層骨組の脆性連鎖崩壊, 日本建築学会構造系論文集, 第 483 号, pp.61-70, 1996.5
- 5) 桑村仁, 佐藤義也: 強震を受ける柱-梁-パネル系多層ラーメンの脆性連鎖崩壊, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.477-483, 1997.3
- 6) 日下彰宏, 中島正愛, 野中泰二郎: 梁部材破断を考慮した鉄骨平面骨組の挙動と信頼性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 493 号, pp.99-106, 1996. 11
- 7) M.Nakashima: Variation of Ductility Capacity of Steel Beam-Columns, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.7, pp.1941-1960, July, 1994.
- 8) 和田章, 久保田英之: 部材の座屈および破断を考慮したトラス構造の崩壊解析, 日本建築学会論文報告集, 第 396 号, pp.109-117, 1989.2
- 9) 山内泰之, 岡本晴仁, 奥蘭敏文: 鉄骨造建築物の耐震設計, 工業調査会, 1999.1
- 10) 国土交通省住宅局建築指導課 他: 2001 年度版限界耐力計算法の計算例とその解説, 2001.3

(2003 年 5 月 10 日原稿受理, 2003 年 9 月 16 日採用決定)