

1. 序

建築構造システムの耐震安全性評価では、構造特性として保有耐力、変形性能、及び地震時の応答性状が総合的に考慮される。従って、設計段階で構造安全性を把握するためには、変形性能まで含めたシステムとしての復元力特性を把握しておく必要がある。しかし、大断面鋼材の脆性破断や、割裂を伴う木質系接合部の破壊など、設計段階でその発生を特定することの困難な脆性的な破壊現象も少なからず存在し、それらが構造物の安全性を大きく左右していることを過去の震害からも知ることが出来る。これらの脆性挙動が安全性に与える影響を把握するには、脆性挙動の発生自体を確率論的な事象として取り扱い、その発生頻度と構造システム全体の安全性との関係を明らかにする必要がある。

本研究の目的は、部材レベルにおける脆性挙動のランダムな発生がシステム全体の信頼性に及ぼす影響を確率論的に把握することである。その具体的な評価方法の流れを Fig.1 に示す。まず 2-1 で解析モデルの設定を行い、2-2 で脆性挙動を考慮した復元力特性を設定する。次に 2-3, 2-4 ではこの脆性挙動がランダムに発生する場合のシステムの復元力特性を、等価な 1 自由度振動系の履歴特性にモデル化する。そして 3-1, 3-2 では再現期待値に対応した地震荷重を用いて動的解析を行い、最大塑性率に基づいて破壊確率の算出を行う。さらに脆性挙動の発生箇所がシステム信頼性に与える影響も考察する。

2. 脆性挙動のランダムな発生を伴う履歴特性

2-1 荷重増分解析

多層骨組の基本崩壊形である全体崩壊と層崩壊の両方を考慮できる最も Simple な建築構造システムの解析モデルとして、Fig.2 及び Table 1 に示すような 2 層 1 スパンの鋼構造骨組を設定する。骨組中の各部材の挙動を完全弾塑性とした場合の骨組の静的な荷重 - 変形関係を荷重増分解析から求め、外力が作用する骨組頂部の復元力特性を算定した。解析仮定は以下のように設定する。

- (1) 部材の塑性域の広がりには考慮せず、部材端以外に塑性ヒンジは形成されないものとする。
- (2) 入力する静的外力は A_i 分布に基づいた一方向水平比例荷重とする。
- (3) 解析モデルで想定する崩壊機構 i は Fig.1 に示すような全体崩壊型 ($i=1$)、1 層崩壊型 ($i=2$)、2 層崩壊型 ($i=3$) の主要な 3 種類とする。

2-2 脆性挙動がランダムに発生する復元力特性

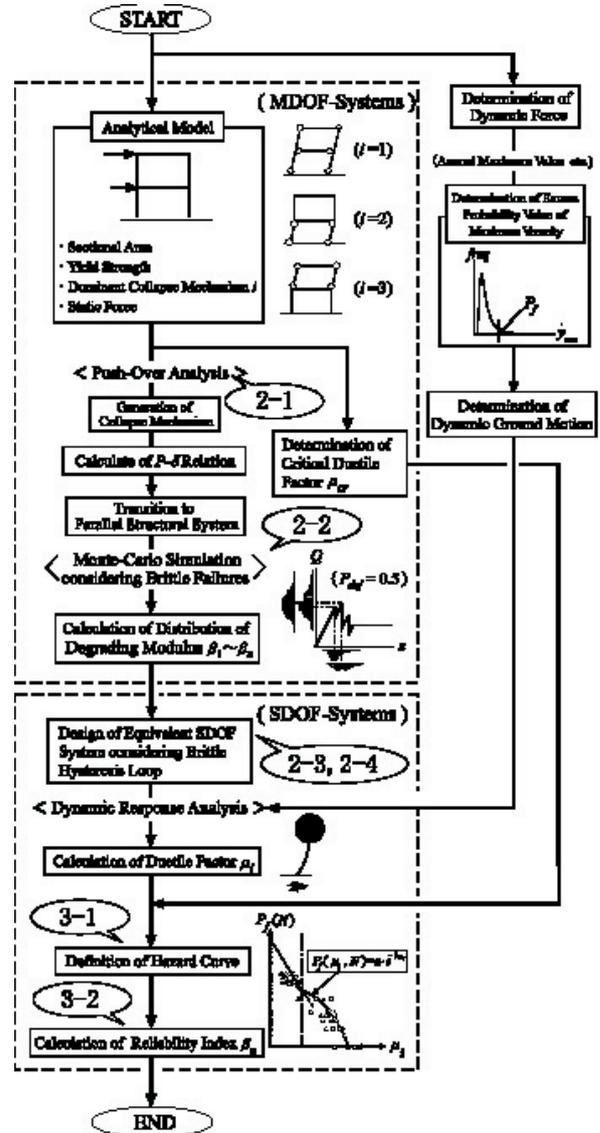


Fig.1 Flow Chart of Analysis

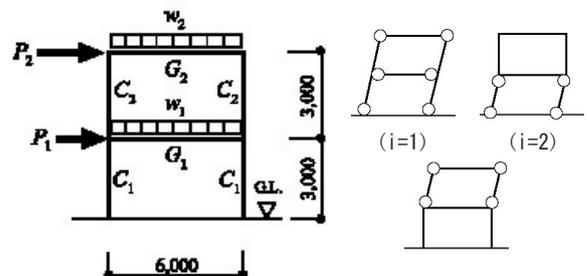


Fig.2 Analytical Model and Dominant Collapse Mechanisms for 2story-1span Frame Structure

Table 1 Parameters of Analytical Model

	Sectional Area (cm^2)	Geometrical Moment of Inertia (cm^4)	Section Modulus (cm^3)	Elastic Modulus (kN/cm^2)
C_1, C_2	92.18	10800	867	21.0
G_1	63.14	13600	775	21.0
G_2	46.78	7210	481	21.0

次に2-1で求めた荷重-変形関係と等しい特性を有する等価な並列構造モデルを設定する。そして、この並列構造モデルの各部材に脆性挙動をランダムに発生させ復元力特性を求めた¹⁾。ここでは降伏強度の変動係数を0.2、部材剛性を確定値としている。また脆性挙動は全ての部材に対しポアソン確率過程に基づいてランダムに発生する事象とする。Fig.3に、並列構造モデルの各部材に脆性挙動が発生する確率 P_{def} を50(%)として、1000回のMonte-Carlo Simulationを行い、脆性挙動を起こす際の復元力 $Q_1 \sim Q_4$ 、変位 $x_1 \sim x_4$ の確率分布を示した。

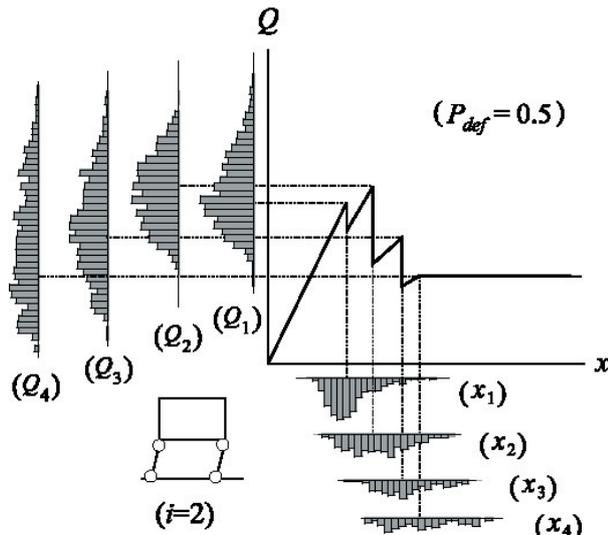


Fig.3 Monte-Carlo Results considering Brittle Behavior

2-3 等価1自由度系モデルへの同定

次に、2-1の荷重増分解析から算定された骨組モデルの復元力特性を、等価1自由度振動系の履歴特性に適用する。等価質量 m_e は各層の質量 m_1, m_2 を合計して $m_e = 3.9 \times 10$ (t)とし、等価剛性 k_e は復元力特性から $k_e = 2.4 \times 10^2$ (kN/mm)とする。等価1自由度系モデルの降伏震度 q_{ye} は骨組モデルの弾性限界時の降伏震度 q_y に置き換え $q_{ye} = 4.7 \times 10^{-1}$ とする。また塑性域での減衰の増大を考慮し、次の等価減衰定数 h_e を設定した。

$$h_e = \alpha \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) k_e \quad (1)$$

この際、 $\alpha = 1/5$ 、初期減衰定数 $h_0 = 2.0$ (%)とする。

2-4 脆性挙動がランダムに発生する履歴特性

等価1自由度振動系の履歴特性に脆性挙動の不確定性を考慮させるためには、履歴特性のパラメータとして2-2で算定した確率分布を当てはめる必

要がある。本研究で用いた履歴特性をFig.4に示す。弾性限界②で脆性挙動が起これると、③のように復元力が劣化した履歴ループに移行する。その後、④のように応答速度が反転すれば逆方向においても⑤→⑥に示す履歴ループに移行する。この履歴ループでは、正か負いずれかの载荷方向で劣化すればその方向に残存する復元力が他方向の復元力となり、劣化後の弾性剛性は残存復元力に比例して低下する。初期降伏の復元力及び変位で無次元化した履歴ループでは、脆性挙動の際に復元力の劣化する値も無次元化される。つまり、

$\beta_n = Q_n/Q_y$ と算定した耐力劣化係数 β_n を劣化後の履歴ループの無次元化復元力 q_0 に乗じることにより、脆性挙動後の復元力を $q_0 \beta_n$ とした。ただし Q_y は系の初期降伏時の復元力 Q_1 である。求めた β_n の確率分布は、この履歴ループの劣化量の不確定性を表す。

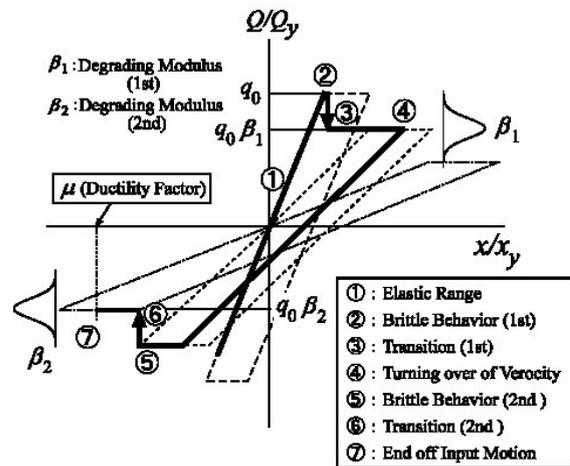


Fig.4 Hysteresis Loop Considering Brittle Behavior

履歴ループが②→③、⑤→⑥の経路を辿る際、脆性挙動によって開放された部材内の弾性エネルギーが運動エネルギーに変換される。従って脆性挙動の直前(第iステップ)と直後(第i+1ステップ)の時間差の無いステップ間で釣り合いが保たれるようにする必要がある。ここでは(2)式のように設定した²⁾。

$$x_{i+1} = x_i - \frac{q_0 D - \beta_n q}{m_e} \Delta t, \quad \dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i, \quad x_{i+1} = x_i \quad (2)$$

3. 脆性挙動のランダムな発生がシステム信頼性に与える影響

3-1 Hazard Curveの算定

構造物が破壊する確率 P_f は、荷重効果 S が限界耐力 R を超過する確率として算出される。つまり、 P_f は(3)式のように定義される。

$$P_f - P_{f,0} - S < 0 \quad (3)$$

(3)

ここでは動的解析により算出される構造物の応答変形を S と捉え、 P_f を算出する。この場合 S は応答の最大塑性率であり、地震荷重の超過確率により変化する。そこで地震荷重の超過確率とその応答塑性率の関係を示す「Hazard Curve」を求める。入力地震波は最大速度 \dot{y}_{max} を基準化した EI-NS, Taft-NS, Kobe-NS, Fukiiai-NS, Sylmar-NS の過去 5 種類の地震波とする。 \dot{y}_{max} は Table 2 に示した今後 N 年間に発生する地震動の最大速度の統計量を用いる³⁾。そして \dot{y}_{max} の超過確率 ${}_n P_f(N)$ を抽出し最大加速度 \ddot{y}_{max} に換算する。この際、 \ddot{y}_{max} の各超過確率 ${}_i P_f(N)$ は、Fig. 5(a) に示す 10, 9, ..., 2, 1, 0.9, ..., 0.2, 0.1% の 19 種類とし、これに対応する地震荷重の値を入力し弾塑性地震動応答解析を行う。

Table 2 Annual Maximum Value of Seismic Verocity in Nagoya

$N(\text{year})$	Mean (kine)	COV	Distribution Type
50	8.68	1.06	Frechet
100	14.49	0.69	Frechet

さらにこの \ddot{y}_{max} を前述の履歴モデルに入力し 1000 回の弾塑性地震動応答解析を実行する。結果、Fig. 5(b) に示すようにそれぞれ 19 種類の最大塑性率の確率分布 ${}_n \mu_i$ が求まる。この分布の上限値として 99% 非超過確率の値をプロットする。この値は最大塑性率で表した荷重効果を地震荷重の超過確率ごとにプロットしたものである。

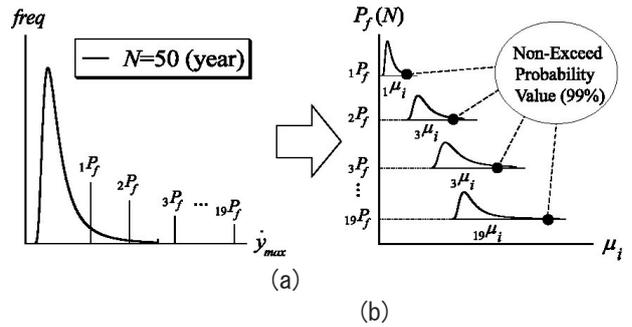


Fig. 5 Non-Exceed Probability Value of Ductile Factor

今、このプロット値を (4) 式に示すような非線形性を考慮できる指数関数での回帰を行う。ただし a , b はプロット値を指数関数に回帰する際に算出される実数の係数である。

$$P_f(\mu_i, N) = a \cdot e^{-b\mu_i} \quad (4)$$

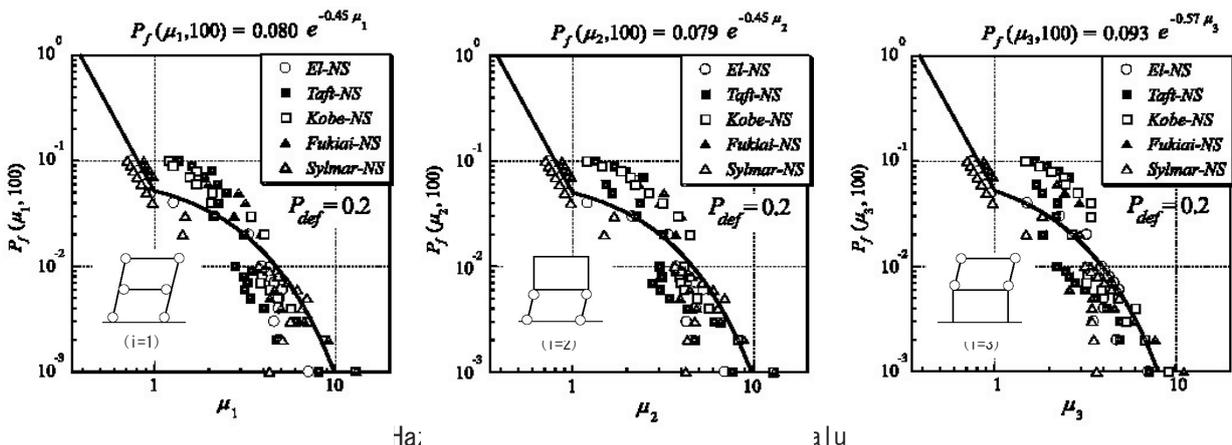
(4)

また (4) 式は $\mu_i > 1$ とし弾性範囲は $(1, a \cdot e^{-b})$ 及び

$(0, 10^0)$ の 2 つの座標を直線で結んだ線形関係にあるとする。即ち、

$$P_f(\mu_i, N) = \begin{cases} a \cdot e^{-b\mu_i} - 1, & 0 \leq \mu_i \leq 1 \\ a \cdot e^{-b\mu_i}, & \mu_i > 1 \end{cases} \quad (5)$$

と定義できる。この Hazard Curve を図示したものが Fig. 6 の実線である。Fig. 7 に $P_{def}=0.2$ の Hazard Curve と塑性範囲での定義式を示す。Fig. 7 の 3 つの Hazard Curve は 5 種類の地震波で応答解析した 99% 非超過確率値を崩壊機構 i ごとに (5) 式で回帰させたものである。この Hazard Curve は地震荷重の超過確率が低くなるにつれ非線形に最大塑性率が増加し、地震波の種類によってその増加量も異なる傾向を示す。



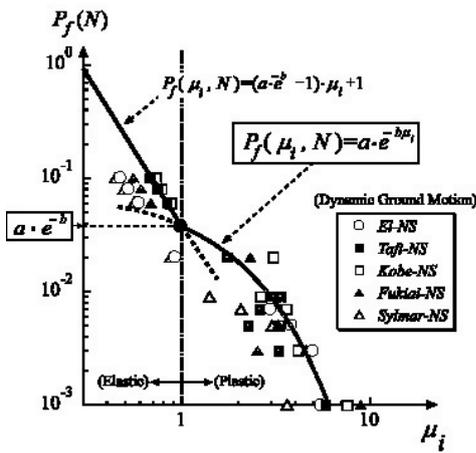


Fig. 6 Definition of Hazard Curve

3-2 破壊確率の算定

定義した Hazard Curve は地震荷重の超過確率に対応する荷重効果 S である。よって限界耐力 R のばらつきが無視できる程度に小さければ、各崩壊機構 i の破壊確率 $P_{fi}(\mu_{cr}, N)$ は限界塑性率 μ_{cr} で読んだ Hazard Curve の超過確率 $P_f(\mu_{cr}, N)$ となる⁴⁾。システムの弾性限界、倒壊限界を層間変形角でそれぞれ $1/120, 1/20$ とすると限界塑性率 μ_{cr} は 6.0 と設定できる。システム全体の破壊確率 $P_f(\mu_{cr}, N)$ は各崩壊機構の破壊確率から、

$$(6) \quad \begin{aligned} P_{fu} &= \max_i \{ P_{fi}(\mu_{cr}, N) \} \\ P_{fl} &= \sum_i P_{fi}(\mu_{cr}, N) \end{aligned}$$

となる。但し P_{fu}, P_{fl} は各崩壊機構がそれぞれ完全相関、完全独立の場合の骨組の破壊確率である。崩壊機構間の相関を考慮することで、骨組の破壊確率 $P_f(\mu_{cr}, N)$ は P_{fu} と P_{fl} の範囲内に存在することになる。 $P_f(\mu_{cr}, N)$ の信頼性指標 β_u は

$$\beta_u = \Phi^{-1} [P_f(\mu_{cr}, N)]$$

(7)

である。 Φ は標準正規確率分布関数を表す。

Fig. 8 は、脆性挙動の発生確率 P_{def} と、(7) 式より求めたシステムの信頼性指標 β_u との関係を示したものである。 ρ は崩壊機構間の相関係数である。

の増加に従って β_u は低下し、その影響は P_{def} の小さい範囲で敏感なことがわかる。

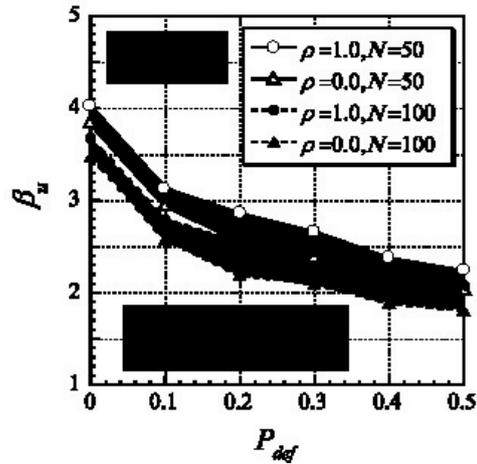


Fig. 8 Reliability Index β_u vs P_{def}

4. 脆性挙動の発生箇所がシステム信頼性に与える影響

前章までの考察では、骨組内の全部材端に等しい頻度で脆性挙動が発生する場合について検討してきた。しかし、構造システムには、全体の信頼性に敏感な要素とそうでない要素が混在していることが予想できる。こうした場合、システム全体の信頼性に対して支配的な要素を重点的に管理し安定した塑性変形能力を確保することで、効率的に安全性を向上させることが可能となる。

このような観点から、本章では十分な検査によって特定の部材端に対しては脆性挙動が生じないと見なせる場合の信頼性について考察を行う。Fig. 9 は、(a) 1階柱脚、(b) 1階梁端、(c) 2階梁端のそれぞれの箇所について脆性挙動の発生確率を 0 とした場合の信頼性 β_u と脆性挙動の発生確率 P_{def} の関係を示したものである。いずれのケースも、骨組内の全部材端に対する脆性挙動の発生確率が P_{def} に等しくなるように設定している。柱脚に脆性挙動の発生を許さない場合 (a) には、 P_{def} の増加に伴い β_u が最も上昇する。逆に、頂部梁端を対象とした場合 (c) には任意の部材端を管理した場合よりも信頼性が下

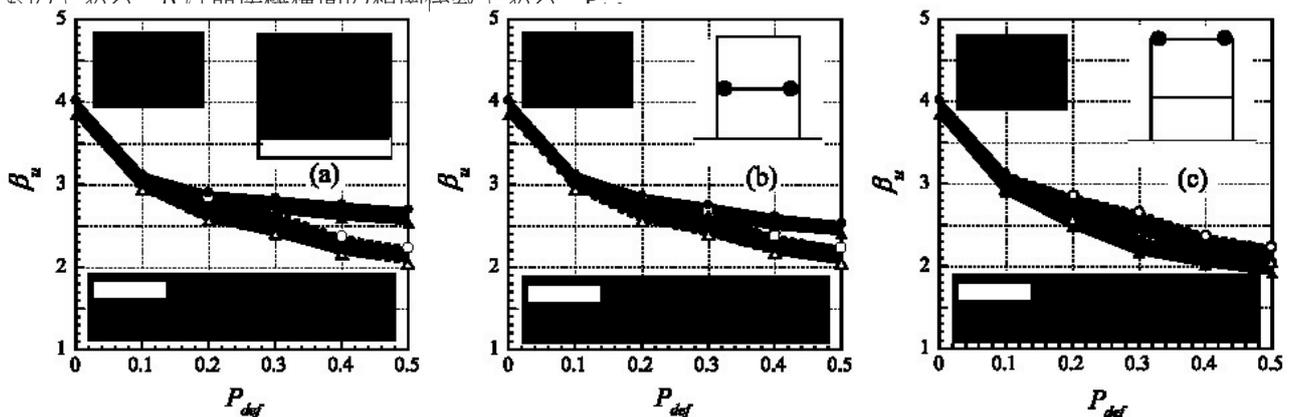


Fig. 9 Effect of Location of Inspection on System Reliability