

平成22年6月2日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：19560570
 研究課題名（和文）部材靱性の不確定性制御による鉄骨ラーメンの耐震信頼性向上に関する基礎的研究
 研究課題名（英文）Fundamental Study on Seismic Capacity Upgrading for Steel Frames by Controlling Uncertain Factors of Member Ductility
 研究代表者
 井戸田 秀樹（IDOTA HIDEKI）
 名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：10203192

研究成果の概要（和文）：本研究は、鋼構造部材の靱性に不可避な不確定性が存在することを前提とし、鉄骨ラーメンの耐震信頼性を効率的に向上させるための部材靱性統計量制御についての新たな知見を目的としたものである。研究成果は以下の3点である。(1) 部材靱性の不確定性が鉄骨ラーメンの耐震信頼性に与える影響を把握した。(2) 文献調査と実験に基づく部材耐力および靱性の統計情報の再構築を行った。(3) 鉄骨ラーメンの効率的な耐震信頼性向上を実現する部材靱性の統計的性質を提示した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to show findings on seismic capacity upgrading for steel moment resisting frames by controlling uncertain factors of member ductility. The new findings proposed in this study are as follows; (1) The effect of the uncertainty in member ductility on seismic reliability of steel frames. (2) The statistical information of the strength and ductility of structural steel members based on the experimental data. (3) The method to upgrade the seismic capacity of steel frames by controlling uncertain factors of member ductility.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鉄骨構造, 耐震安全性, 部材靱性, 不確定性

1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄骨構造物は強震時の耐震安全性確保において部材の靱性に大きく期待している。特に、塑性域に及ぶ累積繰返し荷重を受けた

場合にも脆性的な挙動を示すことなく安定した復元力を維持できるかが建物の倒壊を対象とした安全性に対しては最も重要である。しかし、過去の地震被害例にみられるよ

うに鉄骨構造物の倒壊は累積塑性変形を受けた後の脆性的な破壊によってもたらされており、倒壊限界を把握するためには部材靱性自体の定量的な把握と、骨組における部材靱性の影響度の把握が不可欠である。

(2) 部材靱性の改善に関しては、多くの研究成果が素材特性の改善、溶接ディテールの再検討、あるいは溶接時の温度管理等に反映されてきている。しかし、部材靱性は本来大きなばらつきを持った物理量であることに加え、溶接による人為的な不確定要因も影響する。こういったばらつきは小さい方が建物性能を把握しやすいのは当然であるが、どの程度のばらつきに収めたときにどの程度の建物安全性が確保されるのか、あるいは、ある所定の建物安全性を目標としたときに部材レベルのばらつきはどの程度にしなければいけないのかといった、建物全体の性能と関わった検討はほとんどされていないのが現状である。したがって、鉄骨構造物全体の安全性を高めるために必要な部材靱性も、ただ確定論的に下限値だけを示すのではなく、部材靱性の不確定性を品質管理によって積極的に制御していこうという方向での議論が必要である。

(3) 国際的には、米国を中心として脆性挙動を考慮した構造信頼性評価が進められてきたが、本研究のように骨組の耐震信頼性向上を目指して部材靱性の不確定性を積極的に制御するといった観点からの研究はなされていない。また、国内においても、所定の崩壊機構を発生させるような部材の塑性変形能力という観点からの研究はなされているが、部材靱性の統計的な観点からの考察はほとんどなされておらず、ばらつきの大きな実状を反映させるには不十分な点も多いと言える。こういった既往の研究の問題点を別の視点から解決しうる点が、本研究の位置づけである。

(4) 研究代表者はこれまで、確率統計論的な手法に基づいた建築構造物の安全性評価手法について研究を続けてきた。定量的な安全性評価には建物性能の統計的な性質が大きく関わってくるため、耐力や変形性能の平均値が一定でもばらつきなどの変動性が小さくなれば相対的に安全性は向上する。このことは、鋼構造部材に要求される必要塑性変形性能を考える場合、変形性能の変動性が明らかにならなければ議論できないことから具体的にも示されており、こういった視点から建築構造物の耐震性能を制御していく必要性が明確になったことが本研究を行おうという発想に至った経緯である。

2. 研究の目的

本研究は、鋼構造部材の靱性に不可欠な不確定性が存在することを前提とし、鉄骨ラー

メンの耐震信頼性を効率的に向上させるための部材靱性統計量制御についての新たな知見を目的としたものである。研究期間内に明らかにしようとした内容は、具体的に以下の3点にまとめられる。

(1) 部材靱性の不確定性が鉄骨ラーメンの耐震信頼性に与える影響の把握

本研究の特徴は、骨組としての建物全体の信頼性と部材の不確定性を関連づけながら部材に要求される統計的な特性を明らかにしようとする点にある。したがって、まず部材の統計的性質とシステムとしての骨組全体の統計的性質の関係を十分に把握しておく必要がある。これが、研究期間内に明らかにしようとする一つめの目標である。

(2) 文献調査と実験に基づく部材耐力および靱性の統計情報の再構築

目標1は主に解析的な手法で進められるが、部材が本来有しているばらつきの情報は既往の実験データの調査や、系統的な実験によって別途把握しておかなければならない。本研究では、広範な過去の研究論文の調査といくつかの実験によって鋼構造部材の耐力と変形性能についての統計的情報を再構築する。また、過去にほとんど触れられていない部材耐力間の統計的な相関性についても調査・実験に基づいて新たな知見を得る。これらが二つめの目標である。

(3) 鉄骨ラーメンの効率的な耐震信頼性向上を実現する部材靱性の統計的性質の提示

目標1、目標2で得られた成果を用いれば、現状として部材が有している不確定な要因と、システムとしての骨組の性能との関係が明確になる。したがって、鉄骨ラーメンの耐震性能を効率的に上昇させるという観点から、鋼構造部材に要求するばらつきなどの統計的な特性を提案できることになる。この提案が3つめの目標である。

3. 研究の方法

(1) 部材靱性の不確定性が鉄骨ラーメンの耐震信頼性に与える影響に関しては、従来の研究で開発した数値解析の基本プログラム、および数タイプのラーメン骨組についての特性の把握結果を用い、さらに広範囲な骨組形式についての数値解析的な手法によった。

今までに行った比較的簡易な構造システムの数値解析については、現有の計算機で対応可能であったが、本研究で想定している不静定次数の高い多層骨組の数値解析に当たってはさらに計算処理能力の高い計算機を用いた。

(2) 部材耐力および靱性の統計情報の再構築に関しては、おもに文献調査、数値解析、実験の3つの手法によった。文献調査については、現在までに報告されている学術雑誌、論文、報告書等を対象に部材変形性能にかか

わる実験と数値計算結果を抽出し、統一的な指標のもとに骨組の耐震性能把握に応用できるような形な統計処理手法によった。数値解析は有限要素法の汎用解析ソフトを用いた。実験は、フランジ破断で決定される限界状態に対し、梁端の塑性化領域に無補強開口部を設けて靱性を向上させる方法を開発し、孔位置や大きさをパラメータとした系統的な実験を実施した。

(3) 鉄骨ラーメンの効率的な耐震信頼性向上を実現する部材靱性の統計的性質の提示に関しては、(1)と(2)で得られた成果に基づいて、鉄骨ラーメン骨組のPushOver解析、および地震応答解析を行い、効率的な耐震性能向上のための部材靱性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 部材靱性の不確定性が鉄骨ラーメンの耐震信頼性に与える影響

骨組の変形性能を議論するにあたっては、まず骨組に対して考慮すべき限界状態を設定し、その各限界状態に対する変形性能を考察する必要がある。本研究では延性限界状態と倒壊限界状態に加え、延性限界状態後の耐力低下域における変形性能にも注目し、図1に示す以下の3つの限界状態を検討の対象とした。

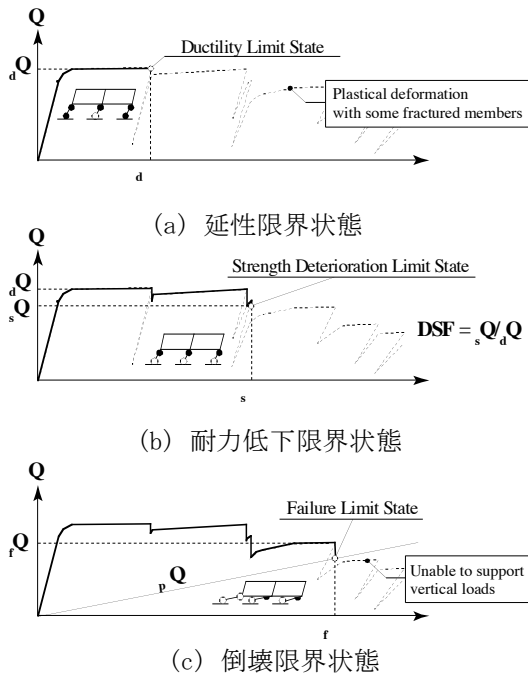


図1 考慮した3つの限界状態

①延性限界状態 (Ductility Limit State) : 骨組内のいずれの部材もその変形が終局変形量 θ_u に達していない限界の状態。

②耐力低下限界状態 (Strength Deterioration Limit State) : 延性限界状態後において

て骨組の耐力が必要とする値よりも低下しない限界の状態。

③倒壊限界状態 (Failure Limit State) : 建造物の鉛直荷重支持能力が存在している限界の状態。

図2は、骨組が各限界状態に到達したときの層間変形角 γ の平均値 μ_γ と変動係数 V_γ を、部材塑性変形性能の変動係数 V_η で整理して示したものである。図中実線は4層4スパン、破線は10層4スパンの結果を示す。また、太線は部材塑性変形性能の平均値 μ_η が15の場合、細線は30の場合である。(a)はCOF=1.0の場合、(b)はCOF=2.0の場合である。(a)と(b)を比較すると、どちらも V_η の増加は μ_γ を減少させる傾向にあるが、 V_γ は(a)と(b)で大きく異なる性状を示しており、COFが骨組変形性能の変動性に与える影響は大きい。また、実線と破線を比較すると μ_γ は破線すなわち10層の方が小さい値となっており、高層骨組ほど小さな変形量で延性限界状態を超える可能性が高いことがわかる。高層骨組ほど小さな変形量で延性限界状態を超える可能性が高くなる理由として部材数の増加および各層の変形量の差が挙げられる。部材数の増加は、全ての部材が延性限界を超えない確率を低くさせ、また、各層の変形量の差は、部材の変形を大きくさせる。すなわち、同じ γ でも高層骨組ほど各層ごとに変形量の差が生じ、これによって各部材の変形量のばらつきが大きくなるため、部材の中に大きく変形するものを含む可能性が高まる。大きく変形する部材は θ_u を超える確率が高くなるため、高層骨組ほど延性限界状態を超える可能性が高くなると考えられる。

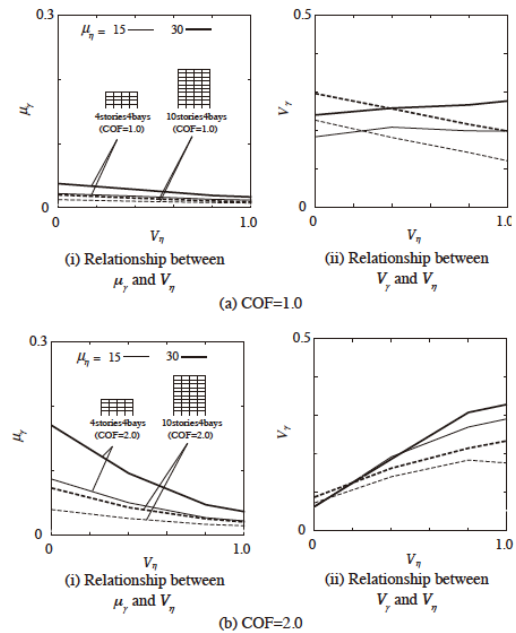


図2 延性限界状態に対する変形性能

(2) 文献調査と実験に基づく部材耐力および靱性の統計情報の再構築

鋼構造部材の耐力については、鋼材の降伏応力度や引張強さ、あるいは残留応力度や初期たわみといった素材が持つ不可避な変動性が鋼構造部材の耐力に与える影響を統計的に検討した報告がなされている。しかし、構造物の終局限界状態を考えた場合、目標とする崩壊メカニズムの設定や骨組としてのエネルギー吸収能力の評価などが不可欠であり、これらは部材耐力のみならず、変形性能あるいは終局状態に至るまでの部材の荷重変形関係を把握しなければ議論することができない。したがって、確率統計的な手法に基づく限界状態設計法の枠組みを骨組設計のレベルまで取り込んでいくためには、部材が終局状態に至るまでの様々な特性が不可避な不確定要因から受ける影響を明確にしておく必要がある。

そこで本研究では、一般的な鋼構造ラーメン骨組で用いられる細長比の小さな部材の挙動が、主に素材特性に支配されることを考慮し、素材特性の変動性を考慮した鋼構造曲げ材の確率論的荷重変形関係の統計モデルを提示した。

鋼構造部材の性能に影響を与える素材特性として、本研究では降伏応力度、引張強さ、歪硬化開始時の歪の3つを対象とした。各統計量を既往の文献調査から求めた。図3に整理した初期不整量の散布図を示す。図中の ρ は相関係数を示す。

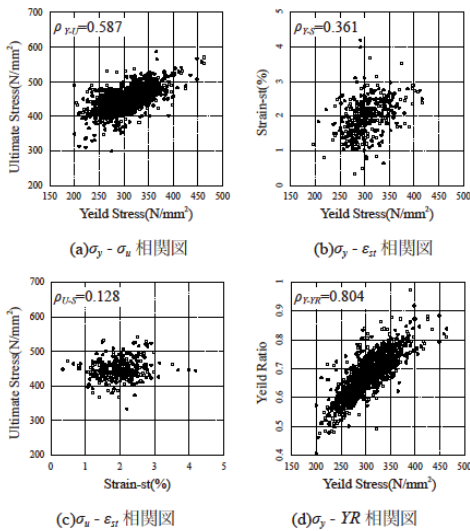


図3 文献調査により求めた初期不整量の統計データ

部材耐力と靱性の統計情報については、図3で得られた情報を用い、汎用プログラム Marc2005 を用い、有限要素法による材料非線形と幾何非線形を考慮した弾塑性数値解

析を行った。材端にモーメント荷重が作用する単純梁を想定し、一端曲げを受けるモデルで単調載荷とした。解析モデルはシェル要素で構成し、断面はウェブを10等分、フランジを10等分にそれぞれ分割した。

図4に解析で得られた荷重変形関係を示す。縦軸は材端モーメントを全塑性モーメントで除したものであり、横軸は材端回転角を全塑性モーメントに対する弾性回転角で除したものである。左側の図は各初期不整量が図3に示す相関をもつ場合であり、右側の図は各初期不整量が互いに独立である場合である。上側の実線は平均値であり、上下の破線はそれぞれ平均値に標準偏差を加減した線である。また下側の一点鎖線は変動係数を示している。

すべての図において降伏が始まる変形前後で急激に変動係数が上昇し、降伏耐力近傍で極大となる。その後、塑性化が進むと変動係数は減少し、変形が $5\theta_p \sim 10\theta_p$ の範囲で降伏時の半分程度まで減少する。さらに塑性化が進むと再び変動係数は増加していく傾向が見られた。

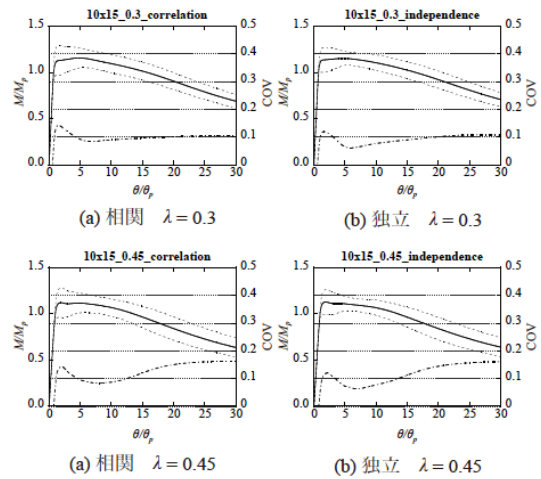


図4 部材荷重変形関係の平均値と標準偏差

(3) 鉄骨ラーメンの効率的な耐震信頼性向上を実現する部材靱性の統計的性質の提示

(1)および(2)の成果を踏まえ、鋼構造ラーメン骨組の耐震性能を向上させるための素材の変動性を柱梁耐力比(COF)をパラメータとして解析し、結果を整理した。

図5に全体崩壊機構発生確率 P と COF の関係を示す。(a)は降伏応力度の変動係数のみを変動させた場合、(b)は引張強度の変動係数のみを変動させた場合、(c)は考慮した初期不整領すべての変動係数を変化させた場合である。いずれの場合も COF の増加に伴い全体崩壊機構の発生率が高くなるとともに、素材特性の変動係数の値が小さいほど小さな COF で全体崩壊機構の発生が確保できてい

る。また、素材特性の変動係数の影響度は全特性を変動させた(c)の場合が最も大きくなった。これは、降伏強度と引張強度の変動係数がともに小さくなる方が一定の降伏比を確保できるためと考えられる。

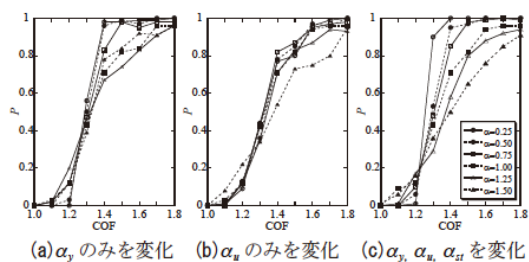


図5 柱梁耐力比と全体崩壊機構発生率

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Hideki Idota, L.Guan and Kenji Yamazaki, Statistical Correlation of Steel Members for System Reliability Analysis, 審査有, Safety, reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering System, Proc. of 10th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol.1, 2009, pp.738+CD-ROM
- ② 井戸田秀樹, 関 琳, 山崎賢二, 部材耐力間の統計的相関性を考慮した鉄骨骨組の耐震信頼性解析, 審査有, 理論応用力学講演会論文集, Vol.58, 2009, pp.431-432
- ③ 趙衍剛、盧朝輝、林玉森、井戸田秀樹, 限界状態関数の4次モーメント標準化による構造信頼性解析, 審査有, 日本建築学会構造系論文集, No.632, 2008, pp.1719-1726
- ④ Kenji Yamazaki and Hideki Idota, Statistical Properties of Member Ductility Demanded for Deformation Capacity of Steel Frames under Seismic Loads, 審査有, Applications of Statistics and Probability, Vol.1, CD-ROM, 2007

[学会発表] (計11件)

- ① 中田寛二, 井戸田秀樹, 三城匡統, 劣化域を考慮した鋼構造物の kD 値に関する統計的考察, 日本建築学会東海支部研究報告会, 2010年2月21日, 名古屋
- ② 関 琳, 井戸田秀樹, 山崎賢二, 鋼構造骨組の信頼性解析に用いる部材耐力間の統計的相関性について その4 相関係数が骨組の終局耐力と変形性能に与える影響,

日本建築学会大会, 2009年8月26日, 仙台

- ③ 中村英嗣, 井戸田秀樹, 小野徹郎, 福住まどか, 梁端塑性化領域に無補強ウェブ貫通孔を有するH形鋼梁の変形性能, 日本建築学会大会, 2009年8月26日, 仙台
- ④ 中田寛二, 井戸田秀樹, 森 保宏, 骨組の塑性変形能力による低減係数に関する統計的考察, 日本建築学会大会, 2009年8月26日, 仙台
- ⑤ 関 琳, 井戸田秀樹, 山崎賢二, 鋼構造骨組の信頼性解析に用いる部材耐力間の統計的相関性についてその等価相関係数の提案, 日本建築学会大会, 2008年9月18日, 広島
- ⑥ 金子翔太, 井戸田秀樹, 鋼構造曲げ材の耐力および変形性能に関する統計的考察～その2 限界状態設計法に用いる統計情報～, 日本建築学会大会, 2008年9月18日, 広島
- ⑦ 中村英嗣, 井戸田秀樹, 金子翔太, 鋼構造曲げ材の耐力および変形性能に関する統計的考察～その1 点推定法を用いた確率論的数値解析～, 日本建築学会大会, 2008年9月18日, 広島
- ⑧ 関 琳, 井戸田秀樹, 部材耐力間の統計的相関性を考慮した鋼構造骨組の信頼性解析に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告会, 2008年2月17日, 名古屋
- ⑨ 関 琳, 井戸田秀樹, 鋼構造骨組の信頼性解析に用いる部材耐力間の統計的相関性について その1 ロットマップの作成, 日本建築学会大会, 2007年8月30日, 福岡
- ⑩ 金子翔太, 井戸田秀樹, 鋼構造曲げ材の塑性変形性能に関する統計的考察(その2 塑性変形性能の統計量), 日本建築学会東海支部研究報告会, 2008年2月17日, 名古屋
- ⑪ 井戸田秀樹, 関 琳, 鋼構造骨組の信頼性解析に用いる部材耐力間の統計的相関性について その2 ロットマップを考慮した骨組の信頼性解析, 日本建築学会大会, 2007年8月30日, 福岡

[図書] (計1件)

- ① 井戸田秀樹, 森 保宏, 他, 事例に学ぶ 建築リスク入門, 技報堂出版, 2007, 31-37, 100-108, 129

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井戸田 秀樹 (IDOTA HIDEKI)

研究者番号：10203192

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし