

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820230

研究課題名(和文) 局所損傷センシング技術に基づく被災建物の構造インテグリティ評価

研究課題名(英文) INTEGRITY ASSESSMENT OF STEEL BEAM-COLUMN CONNECTIONS USING AMBIENT-BASED INNER-FORCE ESTIMATES

研究代表者

倉田 真宏 (Kurata, Masahiro)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：70624592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：建物の局所損傷の評価に基づいて、従来の建物全体の振動特性の変化による損傷推定と一線を画した精度の高い健全性判定システムの構築に取り組んだ。その開発環境として、地震による局所損傷の進行および微小振動に励起される固有振動、を同時に再現する実験装置を考案した。鋼骨組の梁端部の破断量を定量的に評価する損傷指標を定式化し、それに基づいて建物の数値モデルに損傷を反映するモデル更新手法を確立した。損傷を反映した建物モデルの数値解析を実施し、損傷による建物全体の耐力の低下度を精度良く推定できることを実証した。本研究の成果により、極大地震後の建物継続利用判定の精度と分解能の向上が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, a methodology for determining the post-earthquake strength of a steel moment-resisting frame with beam-column fractures based on local monitoring data was established. The proposed methodology was explained and verified experimentally using a unique testing system for beam-column connections. First, a damage index of steel beam fracture based on dynamic strain responses and an associated sensing system using PolyVinylidene DiFluoride (PVDF) sensors and wireless communication modules were introduced. Then, a model updating technique where the identified damage is reflected in a numerical model of the structure was explored. Based on the updated model, the damage in the structure was further translated into the structure's deterioration in terms of stiffness and strength. The model updating approach bridges the gap between damage information and residual structural capacity evaluation and facilitates rapid decision-making immediately following an earthquake.

研究分野：建築耐震工学

キーワード：損傷評価 地震被災 鋼構造 構造ヘルスマニタリング

1. 研究開始当初の背景

東日本の広域に渡り強い地震動が観測された平成 23 年東北地方太平洋沖地震は、未曾有の人的・物的被害をもたらし、95,000 戸以上に及ぶ膨大な数の建物に対して、被災後の安全性が疑われた 1)。この震災を端緒として、今後発生が予想される首都圏直下地震や南海トラフ巨大地震に備え、被災建物の利用再開までの意思決定を支援する、健全性評価手法の確立は焦眉の課題である。

被災建物の健全性は、安全限界状態に対する余裕度として評価できるが、現段階では具体的な数値として示す指標に欠け、その客観的診断は困難である。地震によって構造部材に生じた損傷を同定し、それに起因する剛性や耐力の低下度といった建物の残余耐震性能を定量的に評価することができれば、余震等により崩壊に至るまでの余裕度を推定することが可能となる。

2. 研究の目的

建物内で日常的に観測される微小振動を利用して、柱梁接合部などの建築構造システムの部分構造(サブストラクチャ)の局所損傷を追跡するセンシング技術を開発する。その開発環境として、地震による局所損傷の進行および微小振動に励起される固有振動、を同時に再現するサブストラクチャ損傷評価装置を新たに考案する。さらに、損傷入り建物の数値解析を実施し、部分構造の局所損傷が構造システムの残余耐震性能に及ぼす影響を定量化する。以上の課題から、局所損傷の評価に基づいて建物全体の耐震性能を判断する構造インテグリティ指標を提案し、極大地震後の建物継続利用判定の精度と分解能の向上に貢献する。

3. 研究の方法

本研究では、建物局所損傷の評価に基づく被災建物継続利用判定システムの開発を円滑に進めるために、研究課題を以下の 3 つのフェーズに分割して、当該課題に取り組んだ。

- A) サブストラクチャ損傷評価装置の構築
- B) 内部応力の変化に基づく局所損傷評価技術の開発
- C) 構造インテグリティ指標

A) では、鋼構造建物の部分構造を対象に地震損傷の正確な再現と動的性能評価を同時に実現できる損傷評価装置として、共振フレームと準静的載荷装置を組み合わせた装置を製作し、その運用上の課題を検証した。B では、鋼構造建物の柱梁接合部を対象とした局所損傷評価振動試験を行い、実用化を見据えた適切な局所損傷センシング技術として、損傷評価指標ならびにそれを計測する無線動ひずみ計測システムを開発した。C では、実際の損傷を数値解析モデルに反映するために、損傷評価指標を目的関数としたモデル更新法を開発した。さらに損傷を反映した数値解析モデルの静的変位増分解析を実施することで、

損傷した部分架構の残存耐力を評価する手法を提案した。

4. 研究成果

1) サブストラクチャ損傷評価装置の構築
課題 A に関連して、地盤の常時微動や人為的な活動による建物の固有振動モード下において観測されるサブストラクチャの応答、および地震時の局所損傷を再現する、損傷評価装置を開発した。

図 1a は、建物サブストラクチャの 1 質点系への置換を示している。同図中央のように、部分構造の常時微動を観測すれば、建物固有振動モードに対応する振動成分が卓越して存在する。この卓越する振動成分を実験室内で評価することを考える。具体的には、同図右のように、付加質量を与えた部分構造の 1 質点系モデルを考える。このモデルの振動数を建物の固有振動数に合わせることで、地震により発生する破断などの局所損傷に起因する、建物固有振動モード下の部分構造の内力分布の変化を、簡易な装置により実験的に評価する。

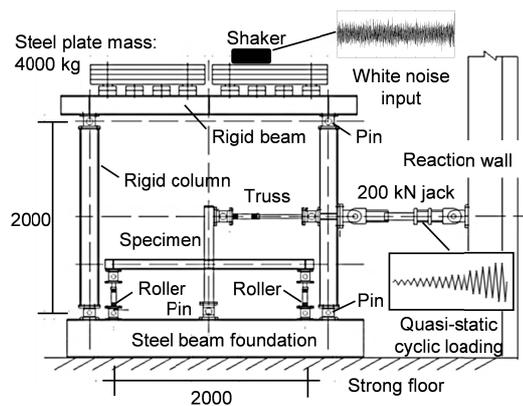
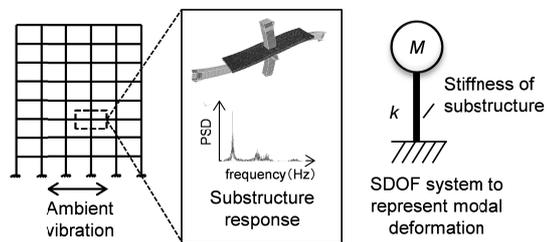


図 1 サブストラクチャ損傷評価装置

図 1b に試験装置の全体図を示す。本実験では中層鋼構造建物を検証対象とし、その部分構造として、十字型柱梁接合部試験体(詳細は次節)を採用した。試験体の柱頂部とピン架構の柱中央を両端ピン接合のトラス材を用いて結合し、系全体において試験体のみが外力に抵抗する。ピン架構上には付加質量を載せ、系全体の固有周期が、中層鋼構造建物の 1 次固有周期を 0.85Hz に相当する 1.7Hz 付近となるように調節した。このとき、付加質量は約 4,000kg とした。この装置を用いて、

(1) この系全体に水平力を作用させ、地震により発生する破断などの局所損傷を再現する準静的載荷試験と、(2)系全体を振動させ、建物固有振動モードを励起する動的載荷試験を試験体の終局状態まで交互に繰り返すことで、内力分布の変化を追跡した。

2) 内部応力の変化に基づく局所損傷評価技術の開発

課題 B に関連して、鋼構造建物床スラブ付き柱梁接合部を対象に、床スラブのひび割れに伴う合成効果の低下や鋼梁の破断に起因する内力分布の変化に着目し、これら 2 つの損傷度を独立して評価することを目指した。具体的には、1) 床スラブの合成効果に対しては、微動下の動ひずみ応答から同定した中立軸、2) 鋼梁の破断に対しては、破断面の曲げ剛性低下に起因する動ひずみ応答の低下度、を損傷度の評価指標として新たに提案した。

評価指標 1) に関連して、床スラブが圧縮力を負担する正曲げ時の中立軸位置は、スラブの有効幅を仮定すれば、梁の断面形状により算出される。負曲げ時には床スラブは引張力を負担しないと仮定すると、上下に対称な H 型断面では、負曲げ時の中立軸は鋼梁断面中央に位置する。骨組内の梁が微振動下で動曲げモーメントを受ける時、 i 次振動モード下における中立軸の位置は、鋼梁の上下フランジの動ひずみ応答比から推定でき、その値は交互に現れる正曲げ・負曲げ時の中立軸の時間平均に相当すると考えられる。ここで梁せい H の合成梁に対し、上下フランジの動ひずみ応答 $\varepsilon_{top}^i, \varepsilon_{bottom}^i$ の RMS 値の比率から、 i 次振動モード下の動的中立軸位置 NA は式 (1) で計算できる。

$$NA = \frac{(\varepsilon_{top}^i)_{RMS}}{(\varepsilon_{top}^i)_{RMS} + (\varepsilon_{bottom}^i)_{RMS}} \quad \text{式 (1)}$$

合成梁を有する柱梁接合部を対象とした実験では、床スラブのひび割れに伴う合成効果の低下によって、式(1)で求められる梁断面の中立軸が変遷することを確認した。動ひずみ応答による中立軸は、繰返し載荷下の正曲げ・負曲げ時の中立軸の平均値にほぼ一致した。

評価指標 2) に関連して、微小振動下の鋼部材の動ひずみ応答の低下度から部材の損傷により局所的に変化する曲げモーメント分布を推定することで、梁部材の損傷度 (破断面の曲げ剛性の低下率) を評価した。この手法では、無損傷部材と損傷部材に生じる動ひずみ応答の低下度に着目した損傷指標 SD を式 (2) で定義している。ここでは、損傷の進展に伴い、微振動下での動ひずみ比が曲げモーメント比に対応して変化すると仮定している。

$$SD = \frac{R_d^i - R^i}{R^i}, \quad R^i = \frac{(\varepsilon_{beam}^i)_{RMS}}{(\varepsilon_{reference}^i)_{RMS}} \quad \text{式 (2)}$$

ここで R^i は建物内のある 2 点間 (例えば損傷を観察する梁とリファレンスとする柱) の動

ひずみ応答 $\varepsilon_{beam}^i, \varepsilon_{reference}^i$ の RMS 値の比であり、構造物が線形であれば外力の大きさに依存しない。リファレンス柱が無損傷であれば、損傷を受けた梁の損傷指標 SD は、無損傷時の比 R^i を基準としたときの損傷時の比 R_d^i への変化率として表現され、損傷による部材剛性の変化を表す。骨組全体の計測においては、事前の解析において損傷が軽微な層 (例えば、最上階付近) の柱をリファレンスとすることで、式 (2) において、損傷した部材とリファレンスとなる無損傷の部材の部材剛性比の変化を追跡できる。

建物の数値解析モデルの梁端部に切り込みを入れ、損傷指標と梁端部の破断による剛性低下の関係性を求めたものを図 2 に示す。損傷指標自体は物理量ではないが、このような関係チャートを利用することで、梁端部の破断量を推定することが可能になる。

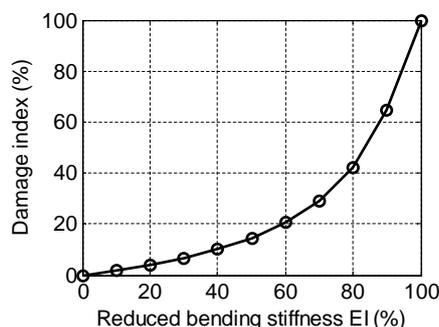


図 2 損傷指標と梁端部剛性低下の関係

部分構造を対象とした実験では試験体内の全ての部材が損傷の影響を受ける。そこで、準静的試験を開始する前の無損傷時と準静的載荷開始後の損傷時の曲げモーメント分布を比較することとし、試験体水平剛性の低下を加味した損傷評価指標 \widetilde{SD} を式 (3) に再定義した。本実験用にカスタマイズした損傷評価指標では、 R_d^i に対して無損傷時の水平剛性 k と損傷時の水平剛性 k_d の比 (部分構造の負担する水平力の比) を乗じる。つまり R_d^i の分母に用いるリファレンスとなる柱の動ひずみ応答の RMS 値に (k/k_d) を乗じることで、損傷時の梁と無損傷時の柱の動ひずみ応答の RMS 値の比を算定する。

$$\widetilde{SD} = \frac{(k_d/k) \cdot R_d^i - R^i}{R^i} \times 100 (\%) \quad \text{式 (3)}$$

試験体の動ひずみの計測には DT1-028K 型 (株式会社東京センサ) の PVDF (Poly Vinylidene Di Fluoride) ピエゾフィルムを使用した。また収録したセンサデータは、無線通信モジュール NARADA (Civionics, LLC) を介して、各ユニットからデータを無線受信した。通信プロトコルは IEEE 802.15.4 準拠の Zigbee で 2.4GHz の帯域を使用しており、毎秒約 1,500 ポイントのデータを送信できる。サンプリング周波数及び計測時間はこれに基づいて決定し、それぞれ 100Hz, 150 秒とした。

柱梁接合部を対象とした実験では、鋼梁の

破断に伴い、損傷指標 \overline{SD} が期待通りに低下することを確認した。実験で求めた損傷指標と断面2次モーメントの関係は、図2の数値解析で求めた関係と非常によく一致していた。

さらに、図2の関係が対象鋼構造建物の柱梁剛性比のみに大きく依存することを明らかにした上で、同関係を閉形式で定式化した。これにより数値解析モデルを用いて梁端部に破断を模擬する解析を事前に実施する必要がなくなった。

3) 構造インテグリティ指標

課題Cに関連して、上記の損傷指標の変化を解析モデルに反映し、更新したモデルを利用して残余耐震性能を評価する手法を新たに提案し、実験的に検証した。本手法は、(1)解析モデルに損傷状態を反映するモデル更新のための動的応答解析と、(2)損傷状態を反映した解析モデルを用いて残余耐震性能を評価する静的解析、の2段階で構成される。モデル更新に必要なデータは、地震前後(無損傷時と損傷時)の動ひずみの実測データから求めた損傷指標で、床スラブおよび鋼梁部材に損傷を加えた解析モデルの動的応答解析から算定した損傷指標と比較する。

手順1)では、実測値との関係から設定した目的関数の条件を満たすまで解析モデルの損傷度を変化させた。動的応答解析では、実験時に用いたホワイトノイズを入力波とした。動ひずみ応答は実験での計測位置と同じ位置で出力し、実測値と同様の手順で信号処理を施した。

次に手順2)では、更新したモデルを用いて残余耐震性能を評価する静的解析を実施した。モデル更新後の水平剛性は、梁端部の回転バネ剛性の低下度から算定し、準静的載荷試験の結果と比較した。同時に、更新した回転バネ剛性の低下度から破断部の断面量 I_{frac} を推定し、目視による実測値と比較した。さらに、推定した破断部の断面量に基づき、最大耐力の低下度を推定した。

以上の手順を踏むことにより、動ひずみ応答の低下度を目的関数としたモデル更新により、梁端部に生じた地震損傷を、損傷バネモデルで同定し、鋼梁の破断に起因する水平剛性と耐力劣化を定量的に評価することを可能にした。

今後は、複数損傷や床スラブ損傷が損傷指標に及ぼす影響及び残余耐震性能評価結果の誤差・影響因子の定量化を図り、柱梁接合部から建物全体モデルへの応用・拡張を目指したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- 倉田真宏, 鈴木明子, 峰岸楓, 中島正愛: 微振動下の内力分布推定に基づいた鋼構造柱梁接合部の健全性評価, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第713号, pp. 1045-1053, 2015.7.: 10.3130/aijs.80.1045

- Li, X., Kurata, M., Nakashima, M. "Simplified derivation of a damage curve for seismically induced beam fracture in steel moment-resisting frames," 142(6), *Journal of Structural Engineering*, 査読有, 04016019-1.: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001473
- Li, X., Kurata, M., Nakashima, M. "Evaluating damage extent of fractured beams in steel moment-resisting frames using dynamic strain responses," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 査読有, 44(4), pp. 563-581, 2015.4.: 10.1002/eqe.2536

〔学会発表〕(計9件)

- Kurata, M., Suzuki, A., Li, X., Nishino, H., Minegishi, K. "Residual performance assessment of steel frames through ambient strain-based model update: application to collapse test of steel frame using shake table," *Proceedings of Engineering Mechanics Institute Conference 2015*, アブストラクト査読有, 799, 2015.6.16-19. (Abstract only)
- Suzuki, A., Kurata, M., Li, X., Minegishi, K., Tang, Z., Burton, A. "Quantification of seismic damage in steel beam-column connection using PVDF strain sensors and model-updating technique," *Proc. SPIE 9435, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, アブストラクト査読有, March, 2015.
- 西野博道, 鈴木明子, 李小華, 倉田真宏: 局所損傷同定とモデル更新に基づく鋼構造骨組の残存耐震性能評価, 鋼構造年次論文報告集, アブストラクト査読有, 第23巻, pp.333-340, 2015.11
- 西野博道, 鈴木明子, 倉田真宏, 峰岸楓: 鋼構造骨組の残存耐震性能評価手法の実験的検証 その1 振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 21488, 2015
- 鈴木明子, 西野博道, 倉田真宏, 峰岸楓: 鋼構造骨組の残存耐震性能評価手法の実験的検証 その2 局所損傷同定とモデル更新, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 21489, 2015
- Li, X., Kurata, M., Nakashima, M. "A damage curve to quantify seismically induced beam fracture in steel buildings", Summary of AIJ Annual Meeting (Kanto), 21502, 2015.
- 倉田真宏, 鈴木明子, 峰岸楓, 李小華,

中島正愛：鋼構造柱梁接合部の微振動下の内力分布推定を応用した局所損傷の定量化 その1 実験手法と損傷度の定義，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，21465，2014

- 鈴木明子，倉田真宏，峰岸楓，李小華，中島正愛：鋼構造柱梁接合部の微振動下の内力分布推定を応用した局所損傷の定量化 その2 損傷指標の抽出とモデル更新，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，21466，2014
- Li, X., Kurata, M., Nakashima, M. “Damage quantification of beam seismic fracture in steel buildings,” Summary of AIJ Annual Meeting (Kinki), 21055, 2014.

〔その他〕

- 米国土木学会（ASCE）の構造ヘルスマニタリング技術アーカイブプロジェクトのウェブページへの掲載：
<http://sites.tufts.edu/shmcasestudies/2015/09/17/piezoelectric-strain-based-member-level-health-monitoring-for-a-large-scale-steel-frame-test-bed/>

6．研究組織

(1) 研究代表者

倉田 真宏（KURATA, Masahiro）

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号： 7 0 6 2 4 5 9 2