

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420559

研究課題名(和文)大地震時に制震装置が損傷した建物の損傷原因究明と補修方法の検証

研究課題名(英文) Repairing effect verification and damage reason investigation of a building with vibration control equipment damaged during great earthquake

研究代表者

薛 松濤 (Xue, Songtao)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：70236107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：東北地方太平洋沖地震時にダンパーが損傷し、積層ゴムを用いて補修した実構造物を対象に研究を行った。損傷したダンパーと同じものの損傷実験を行い、損傷のメカニズムを検討し、大変形を受けても性能がある程度維持できるための設置法について検討した。補修後の地震記録とシミュレーション結果を用いて性能変化を検討し、性能が向上したことが分かり、補修法によって性能回復だけでなく、性能向上も可能なことが分かった。モニタリングシステムを対象構造物に実装し、実記録を取ると共に地震後の構造物の安全性を示すことが可能となり、いくつかの中型(震度4)地震に作動して成功した。

研究成果の概要(英文)：Research has been focused on real earthquake records of a building with vibration control dampers damaged during the 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku and having been repaired using isolator instead of damper. Damage mechanism of same damper was investigated by damage experiment with sine wave input, in which it is clear that suitable design may keep damper effectiveness even receiving over-displacement during great earthquake. Real earthquake records and simulation results clearly indicate that the building capacity has been increased after repairing, which means using appropriate retrofit method will not only recover but also raise the building capacity. Structural health monitoring system has been renovated instead of old sensor system and correctly worked while experiencing 2 great earthquakes, which also in turn clearly indicate the effectiveness of the repairing method.

研究分野：工学

キーワード：制振装置 損傷 補修方法 ダンパー モニタリングシステム

## 1. 研究開始当初の背景

免制震構造物の研究開発は約半世紀の歴史があり、日本国内では2010年末までに免震建物は戸建住宅も含めて約7,000棟、制震建物は約1,000棟におよぶ。これらの構造物は、これまでに多くの中小地震を経験し、その際の有効性が確かめられてきた。その一方、大地震を経験した例は少なく、大地震時における動的挙動や免制震装置の効果については十分検証されていない。免震構造協会の報告書などにより、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、過大な応答による免震建物のエキスパンション部分の被害や、鉛ダンパーの損傷などが報告されている。南海トラフや首都直下大地震などの地震レベルを考慮すれば、免制震建物の大入力時における挙動や安全性が問われることが予想される。しかし、これまで大地震の際に免制震装置が損傷するプロセス、その場合の構造物の挙動、さらにその後の修復手法などに関する検討はあまりなされておらず、これからの研究テーマとして挙げられた。

## 2. 研究の目的

本研究では、東北地方太平洋沖地震において顕著な損傷を受けた制震建物の事例に基づき、その原因の究明と改修手法の提案・実行を通じて、大地震入力を受ける免制震建物の挙動と安全確保に関する考察を行う。具体的な対象は、仙台市内に建つ鉄骨8階建物（東北工業大学研究棟、写真は図1に示す）であり、各階に設置されていた制震装置のうち、1階部分の全てのダンパーが本震時に破損した。実構造物の制震装置が大地震によって破損した事例はこれまで報告されていない。本建物の制震装置が破損に至った詳細な原因を究明し、より効果の高い免制震装置の採用も考慮した補修対応を検討・実施し、その有効性を継続的に検証することは、本建物の安全確保のみならず、全ての免制震建物の性能を検討するのに重要な知見といえる。

本研究を開始までに、本研究グループでは、当該建物の地震観測記録を用いてダンパーの破

損前後における建物の振動モデルを同定し、ダンパーの破損状況とその原因の検討を進めた（2012年日本建築学会大会、第15回世界地震工学会議（2012リスボン）で発表済）。さらに、同定モデルにより、破損したダンパーの設置箇所の制限などから、同種のダンパーの再設置による改修では十分ではないことを明らかにし、代わりに積層ゴムなどを設置する方針を固め、補修工事を2013年2月に実施した（2013年日本建築学会大会で発表済）。その後、2013年8月4日に発生した地震の記録を用いて補修の有効性をある程度確かめた（当初までの成果も含めた後掲の最大応答増図4を参照）。



対象建物全景（鉄骨造8階建）



ブレースの下方にオイルダンパー設置  
上：破損前のダンパー  
下：破損後の状況

図1 対象建物およびオイルダンパーの写真

以上の経緯に基づき、今後はまず、破損した制震装置と同型の装置を用いた破壊実験を実施し、その結果から当初の構造の動的解析モデルを構築して、被害発生メカニズムを詳細に検証する。一方、現状の補修後の構造に関しては、制振装置の挙動も含めた地震観測体制を整備し、

継続的な観測に基づいて免制震構造物のモデル化やモニタリングに関する基礎データを蓄積する。以上から本研究は、首都直下や南海トラフ巨大地震にむけて制震建物で検討すべき大入力時の挙動について、すでに発生した破損事例の検証、補修方法及び補修後の継続的な有効性の検討を行うとともに、モニタリング手法も検討することから、学術的にも実用的にも有意義と考える。

### 3. 研究の方法

東北地方太平洋沖地震の際に、建物に設置されていたオイルダンパーが損傷し、その後、補修工事が行われた制震建物を対象に、以下の方法を用いて検討を行う。(1)実験室で損傷メカニズムを究明したい。損傷したオイルダンパーの破壊実験により、動的挙動と破壊に至るプロセスについて検証する。(2)実構造物の継続観測によって得られる地震データを用いての補修方法を確かめる。上記実験により得られた結果と観測記録から、大入力時における建物の動的挙動や極限状態に関するモデルを検討し、それに基づいて制震装置の破損メカニズムや補修後の挙動を明らかにする。(3)制震建物に新たにヘルスマニタリングシステムを設置し、制震装置の挙動も含めた観測体制を再整備することで、補修の有効性に関する記録を蓄積するとともに、制震建物のモニタリング技術に関する知見を蓄積する。研究に使用する対象建物は研究代表者・分担者の所属する大学の所有であり、当初設計時の資料検討、長期の観測、補修に関する設計、施工、および実験の制約が少ない点より本研究方法が実行できる理由となっている。

### 4. 研究成果

#### (1) 制震ダンパー破壊実験

制震装置の損傷メカニズムを明らかにするために、2015年に破壊試験を行った。使用したのは、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の際に損傷した仙台市内に建つ鉄骨8階建物(東北工業大学研究棟)に設置したオイルダン

パーと同じものである(2003年に建設当時に製造したもので、2機ほど残っている)。破壊実験は、共同研究者がいる中国広州大学耐震工学センターで行われた。今回は、粘弾性体部分の挙動に絞って実験を行った。



実験開始前



ダンパー損傷後

図2 実験前と後のダンパー

実験前の様子と損傷後の写真を図2に示している。正弦波入力で、入力周波数と振幅を変えながら、64パターンの実験を行った。建物固有周波数に近い1 Hzの正弦波入力で、35 mmの振幅のところではダンパーが損傷したとみられている。代表的な入力波と応答履歴を図3に示している。この実験である程度損傷のプロセスを解明したが、機械入力では軸心に加力していたため、粘弾性体が損傷しても、元に戻せばある程度の減衰能力を持っていることも分かった。従って、実構造物に設置した際になるべく軸心方向にだけ作動するように設計すれば減衰を保つことができると予想している。この実験成果に直接関係する論文はまた公表していない。

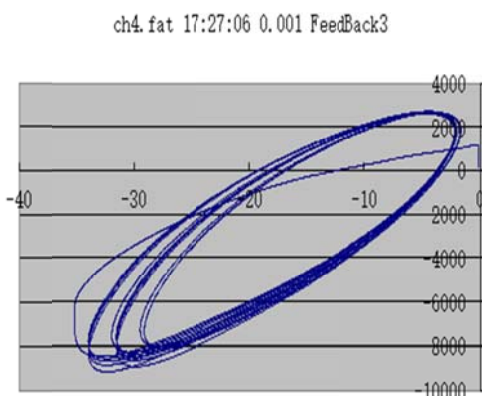
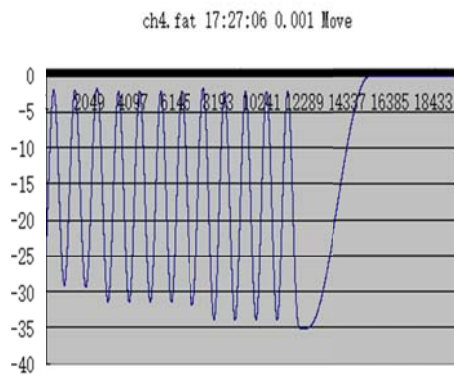


図3 破壊実験のデータ

### (2) 継続観測による性能変化

研究期間中にいくつかの地震が仙台市を襲ったので、その記録と併用して構造物をシミュレーションし、補強の妥当性について検討した。図4は2011年3月よりの1Fに対しての応答倍率の変化、および一次周期の変化を示している。三角形は実地震記録であり、○は大変形を考慮したシミュレーション結果である。研究期間中に最も大きい地震が起きたのは、2016年11月22日である。その時の応答倍率は、建設当初よりもさらに低下したことが分かり、補修の有効性が明らかになっている。周期が少し伸びていることも分かり、補修によって周期変化があることを示している。継続観測によって、補修の有効性が明らかになっていることが分かった。

この部分の研究成果は、すでに雑誌論文（審査、謝辞あり）に3編を公表している。Journal of Asian Architecture and Building Engineering に2編（⑤と⑭）、Structural Engineers に1編（⑬）として公表している。

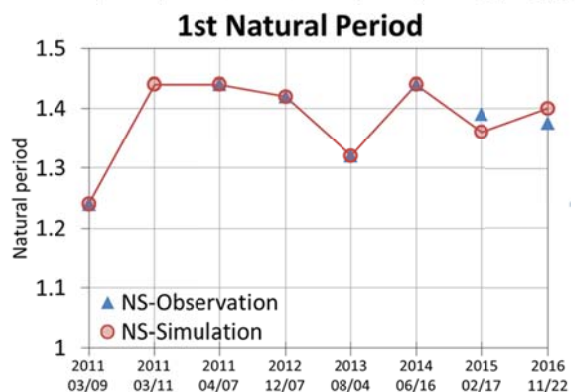
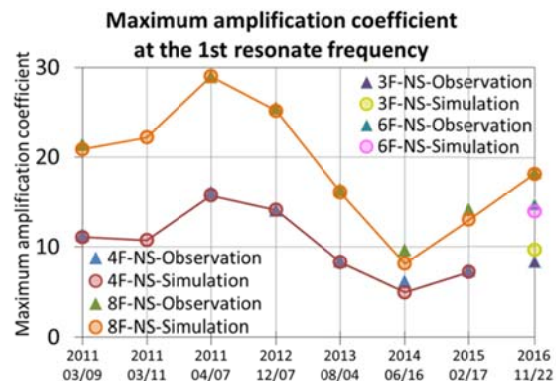


図4 応答倍率と一次周期の変化図

### (3) ヘルスモニタリングの成果

実記録を用いて性能変化を検討するために、2016年9月に、老朽化した2003年建設時に設置した観測システムの代わり新しい構造ヘルスマニタリングシステムを実装した。1階、3階、6階および8階に加速度センサーを設置している。観測した加速度データ、およびそれを積分して求めた変位より変形角を求め、次のように建物の性能を判定し、モニターに表記している。変形角が1/100以上の場合中破、1/100未満1/200以上であれば小破、1/200未満であれば被害の可能性なしとしている。室内被害については、400Gal以上であれば、室内被害中、400Gal未満200Gal以上であれば室内被害小とし、200Gal未満であれば、被害の可能性なしとしている。

実装後に、2016年11月22日および12月28日に2回ほど中地震が起きた。地震直後にモニタリングシステムが作動し、モニターには図5および図6のような、構造物の安全性を示す画面となっていた。モニタリングシステムが正確

に作動し、有効であることが分かった。そして補強の有効性について、11月22日の地震データを解析し、その結果を図4にも示している。

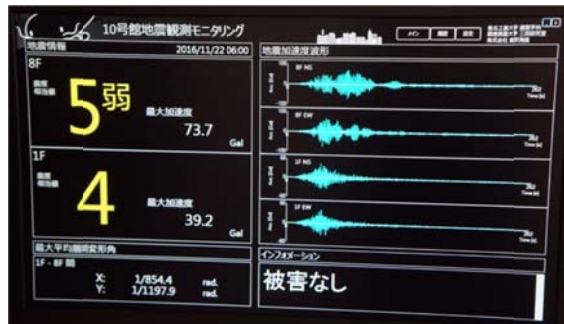


図5 2016年11月22日の地震



図6 2016年12月28日の地震

これからさらに地震データ記録して解析し、補強の有効性を継続的に検討していく。なお、モニタリング実装後に、時間経過が少ないため、審査論文を発表しおらず、シンポジウムでの論文1編(①)となっている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件)

①Wan Chunfeng, Zhao Lei, Ding Youliang, Xue Songtao, A Two-phase Ranging Algorithm for Sensor Localization in Structural Health Monitoring, Advances in Mechanical Engineering, 査読有、2017、9(1)、1-8、DOI: 10.1177/1687814016685964

②Yu Su, Hesheng Tang, Songtao Xue, Dawei Li, Multi-objective differential evolution for truss design optimization with epistemic uncertainty, Advances in Structural Engineering, 査読有、2016、DOI:

10.1177/1369433216643250

③Yang Pengchao, Xue Songtao, Xie Liyu, Dynamic reliability analysis of passive energy dissipation devices subjected to seismic excitations[J], Chinese Civil Engineering Journal, 査読有、2016、49(S1)、1-6

④Xue Songtao, Li Lin, Xie Liyu, Implementation Methods and Numerical Simulation of Multi-stage Energy-dissipating Mild Steel Damper [J], Structural Engineers, 査読有、2016、32(4)、132-138

⑤Xie Liyu, Tang Hesheng, Hu Changyuan, Xue Songtao, An Adaptive Multi-objective Immune Algorithm for Optimal Design of Truss Structures[J], Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 査読有、2016、15(3)、557-564、DOI : 10.3130/jaabe.15.557

⑥Miao Cao, Xie Liyu, Tang Hesheng, Funaki Naoki, Xue Songtao, Performance Study of an 8-story Steel Building Equipped with Oil Damper Damaged During the 2011 Great East Japan Earthquake Part 2 Novel Retrofit Strategy, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 査読有、May 2016/310、DOI:10.3130/jaabe.15.303(謝辞)

⑦Song Chenchen, Xie Liyu, Xue Songtao, System identification of energy-dissipating structure based on decoupling nonlinear damping system, Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 査読有、Oct. 2015、Vol. 35、NO. 5、pp.161-166

⑧Tang Hesheng, Xie Liyu, Xue Songtao, Usage of Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization for Parameter Identification of Structural System, International Journal of Natural Computing Research, 査読有、April-June 2015、5(2)、1-15、DOI: 10.4018/IJNCR

⑨Hao Linfei, Zhang Ruifu, Xie Liyu, Xue

Songtao, Why a Retrofitted Building at Tohoku University Failed in the Great East Japan Earthquake[J], Structural Engineers, 査読有、2015、31(2)、67-79(謝辞)

⑩Hu Jialong, Watanabe Hironori, Xue Songtao, Impact of the Great Natural Disasters on the Lifeline Systems[J], Structural Engineers, 査読有、2015(02)、48-56(謝辞)

⑪Hao Linfei, Zhao Dandan, Zhang Ruifu, Xue Songtao, Seismic Evaluation of Seawater Immersed RC Structure with Crack[J], Structural Engineers, 査読有、2015(02)、28-38(謝辞)

⑫Xie Liyu, Hao Linfei, Zhang Ruifu, Xue Songtao, Performance of Seismic Energy Dissipation Structure in the Great East Japan Earthquake[J], Structural Engineers, 査読有、2015、31(2)、10-20(謝辞)

⑬Xie Liyu, Tang Hesheng, Xue Songtao, Lessons Learned for Design of Passively-controlled Structures from the Great East Japan Earthquake[J], Structural Engineers, 査読有、2015、31(2)、2-9(謝辞)

⑭Xie Liyu, Cao Miao, Funaki Naoki, Xue Songtao, Performance Study of an Eight-story Steel Building Equipped with Oil Dampers Damaged During the 2011 Great East Japan Earthquake Part 1: Structural Identification and Damage Reasoning[J], Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 査読有、2015、14(1)、181-188. DOI: 10.3130/jaabe.14.181(謝辞)

[学会発表] (計4件)

①薛松濤、ハイブリット制振構造物のモニタリングシステム実装および有効性、シンポジウム「建物の構造・機能評価に関するモニタリング技術の現状」、日本建築学会、2017年2月24日、30-33

②Tang Hesheng, Li Dawei, Wei Chen, Xue Songtao, Uncertainty quantification using evidence theory in concrete fatigue damage prognosis, 2016 IEEE International Conference on

Prognostics and Health Management, June 2016, Canada, Ottawa, 20-22

③Tang Hesheng, Li Dawei, Yao Wen, Xue Songtao, Natural Frequencies of a Structural with Epistemic Uncertainty, 1<sup>st</sup> International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering (UNCECOMP 2015), May 2015, Crete, Greece on 25-27

④堀則男、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫、最適な履歴型ダンパーに基づく多段方式連結機構摩擦ダンパーの特性設定、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月12日、神戸大学(兵庫県・神戸市)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者 薛松濤(XUE Songtao) 東北工業大学工学部建築学科・教授 研究者番号: 70236107

(2)研究分担者 堀則男(HORI Norio) 東北工業大学工学部建築学科・教授 研究者番号: 60292249

研究分担者 船木尚己(FUNAKI Naoki) 東北工業大学工学部建築学科・教授 研究者番号: 70347897

研究分担者 大沼正昭(ONUMA Masaaki) 東北工業大学工学部建築学科・教授 研究者番号: 70085447