

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560277

研究課題名(和文) 長継続時間地震による天吊り形式の機械系構造物に関する耐震性の高度化

研究課題名(英文) Study on Seismic Safety Improvement of Hanging Type Mechanical Structure during Long Duration Earthquake

研究代表者

古屋 治 (FURUYA, OSAMU)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：00290726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、天吊り形式の機器構造物における東日本大震災での被害メカニズムを解明し対策の在り方を検討した。結果として、建築機械構造物の固有振動数比を1.1以上、もしくは、0.9以下にすること、および、振動系の減衰比を20%以上付加することにより余震を含む大地震時の天吊り形式の機械構造物の機能と耐震安全性を維持し得ることを明らかにした。以上の得られた成果を国内だけでなくアジア圏、および、米国で投稿と公表を行った。

研究成果の概要(英文)：A lot of seismic damages of hanging type mechanical structure in industrial facilities were occurred in Great East Japan Earthquake, and the industrial functions stopped at many facilities. This study has been carried out to upgrade the seismic safety improvement of hanging type mechanical structure in several industrial and plant facilities from analytical and experimental approaches. As the results, it was confirmed that the conservation of function and seismic safety of hanging type mechanical structure are obtained by following conditions including countermeasure for afterquake. One is that the frequency ratio between main structure and hanging type mechanical structure should be over 1.1 or under 0.9, and the other is that the damping ratio in the vibration system of hanging type mechanical structure should be over 20%.

研究分野：耐震工学，装置機器学

キーワード：天吊り形式 機械構造物 地震被害 耐震安全性向上 振動実験 累積疲労 対策技術

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、機械、建築、土木、地盤など様々な分野において、これまでに類のない広範囲での甚大な被害が発生した。そのなかで、我が国のものづくりの根幹をなす産業施設では、大型/一般機械、タンク、ボイラ/冷凍機/空調機、ポンプ、配管、クレーン、昇降機など様々な機械系構造物で被害が発生し、年々耐震対策技術の高度化が進むなかで新たな地震時の脆弱性が顕在化した。特に、一般に構造減衰が低い鉄骨構造で建造された産業施設においては、東北地方太平洋沖地震の長継続時間での地震入力から多くの減衰性能の低い天吊り形式の機器・配管の被害が多発し産業施設の機能が停止する事態を生じた。また、天吊り形式の機器・配管の落下や一部要素の脱落などによる避難経路の寸断などによる二次的被害の発生にもつながった。

建築分野でも同様の天井構造物の被害が多発したが、比較的大型の天井構造を有する大規模集客施設の復旧と対策は、極めて迅速に行われ(例えば、膜天井:川口健一,東京大学生産技術研究所),安全性評価法の確立,設計ガイドライン改正など鋭意準備が進められている。しかしながら、機械系分野の機器・配管等の吊り形式構造物では、産業施設の主機能復旧が最優先事項であることから生産システムの耐震健全性の向上の優先順位は、必ずしも高くなく地震前と同様の現状復帰に落ち着く場合がほとんどである。また、そのような機械系構造物の耐震安全性の高度化手法が明示されていないことから、一部の企業においては、独自に社内耐震基準を改正し、振動実験から社内設備の耐震性評価手法を検討するなど努力されているところもあるが、多くの被災産業施設では、このような対策を自ら検討することは極めて困難であり、高い発生確率が想定されている東海・東南海地震や首都直下地震の際に同様かそれ以上の被害が発生することが十分に想定される。

したがって、天吊り形式の機器・配管被害の被害様式の分類と発生メカニズムの解明、および、その耐震健全性の向上のための在り方を明らかにすることは産業施設の生産等施設機能の継続性や耐震健全性を担保するうえで極めて重要かつ急務である。

2. 研究の目的

本研究では、次の項目について実施し、最終的に、天吊り形式の機器・配管の耐震健全性向上のための在り方を迅速に明らかにすることを目的とし、また、併せて産業界に成果を公開することで産業施設の耐震性を高める対策と復旧方法を周知する。

- 1) 現状の天吊り形式の機器・配管の支持方法の調査と整理
- 2) 東日本大震災での被害様式の分類
- 3) 現状の耐震性および被害発生メカニズム

の解析的・実験的検討

- 4) 耐震補強・制振構造化等レトロフィットを含む耐震性向上手法の方向についての検討
- 5) 実機レベル試験体の設計・製作
- 6) 要素試験と振動台試験による性能評価
- 7) 天吊り形式の機器・配管の耐震性向上手法の在り方の明示

ただし、本研究では天吊り形式の機器・配管の被害様式、被害発生メカニズムの解明、および、耐震性向上手法の在り方を迅速に明示する事を前提とするものであり、その後の具体的耐震対策技術の製品開発については、広く産業界に周知することで耐震対策メーカーの商品化に期待するものとする。

3. 研究の方法

本研究では、次のような研究展開を計画する。

・被害様式の分類と被害発生メカニズムの解析的・実験的検討

ここでは、天吊り形式の機器・配管について現状の規格/基準、取り付け方法や支持方法等の調査・整理を進める。次に、東日本大震災での被害様式を分類し、分類された被害様式に即して評価条件を設定しメカニズムを解明する。解明にあたっては、材料力学による理論解析と MATLAB による動的シミュレーション、および、1/4 縮尺試験体を用いた振動試験の両面からアプローチする。本段階での評価より天吊り形式の機器・配管における耐震性向上の鍵を握る要素を抽出する。

・天吊り形式の機器・配管の耐震性向上手法の在り方の検討

前研究段階での検討を踏まえて実機試験体の設計・製作を行う。特に1年目で検討した耐震性向上におけるキー要素となる部分については、今後の解析モデル、設計手法などにも大きく影響するためできるだけ実機レベルにて具現化するように配慮する。試験体については、耐震補強形式と制振形式の2種類を検討する。ただし、いずれの場合も実用時を考慮し過度な補強や減衰付加にならぬよう現実的な観点で試験体を設計する。また対象となる機器・配管への入力波も建築構造物の応答を介して入力されるはり部の応答波となることから、当該波形を模擬した人工波を作成し耐震性能を評価することで常に現実に即した観点での検討を継続的に行い性能評価試験より天吊り形式の機器・配管の在り方を検討する。

・天吊り形式の機器・配管の耐震性向上手法の在り方の明示・成果公表

本研究は、迅速性が重要である。したがって、実験等に関しては、基本的に2年間で終了し、事後解析を含む評価・まとめを最終年度にて行い、迅速に研究成果を論文投稿や講演、セミナーなどを通じて迅速に公表する。

4. 研究成果

・予備的解析

予備的解析として、クレーンモデルを改良した解析モデルを検討し、天吊形式の機械構造物の動的挙動等を様々な入力、設置条件で確認した。

・1/4 縮尺試験体を用いた振動実験

加速度・応力・縦弾性係数が一定となる相似則を検討し設計製作した 1/4 縮尺試験体（図 1）を用いて振動実験を実施した。試験結果より、吊ボルト長、および質量の増大に伴い小さな入力加速度でも損傷が生じることを確認し、天吊形式の振動系の損傷評価法（図 2）を提案した。

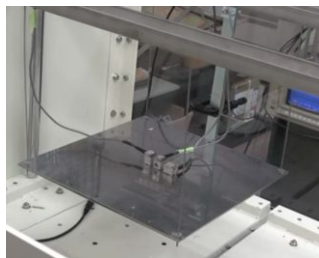


図 1 1/4 縮尺試験体

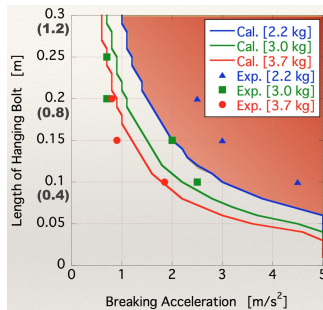


図 2 吊条件と損傷時入力加速度の関係

・実機試験体を用いた振動実験

実機試験（図 3）では、相似則の有効性（図 4）や様々な振動系の構成要素の変化に伴う吊構造物の動的挙動と損傷条件を確認した。特に、吊長さ、吊質量を試験パラメータとした結果より、振動系性状と累積疲労を確認した。また、対策技術として剛性寄与率と減衰寄与率の在り方を明らかにした。



図 3 実機試験体

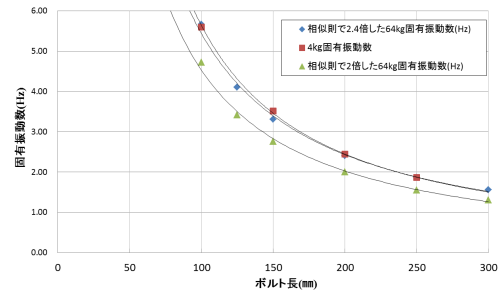


図 4 相似則の検証

・対策技術の在り方

振動実験結果をベースに構築した解析モデル（図 5、図 6）を用いて低サイクル累積疲労の観点から設計パラメータと安全裕度の関係を明らかにした。具体的には、建築-機械構造物の固有振動数比を 1.1 以上、もしくは、0.9 以下にし、また、振動システムの減衰比を 20%以上を設定することで余震を含む大地震の地震入力に対して機能と耐力の安全性を維持し得ることを確認した（図 7）。

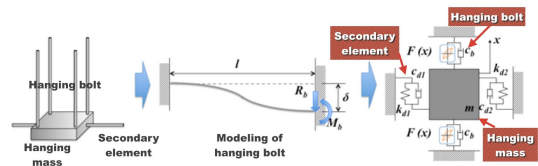


図 5 解析モデルの検討

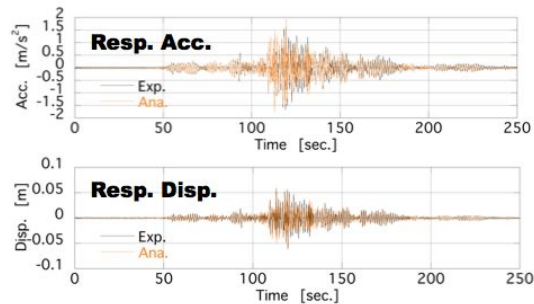


図 6 解析モデルの有効性の検証

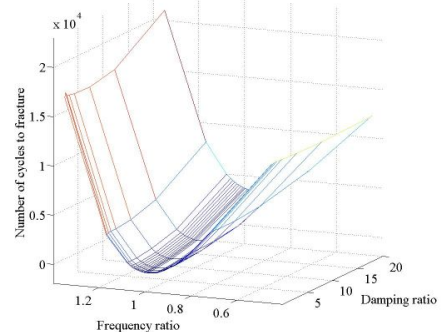


図 7 低サイクル疲労評価による振動数比と減衰比からの耐震対策の在り方

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2件)

Furuya, O., Yoshida, K., Asaoka, S., Ogata, K., Niiyama, N. : Study on Seismic Safety Improvement of Hanging Type Mechanical Structure in Industrial Facilities during Long Duration Earthquake, American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division, Seismic Engineering, 査読有, DOI 10.1115/PVP 2015-45366, 2015. (掲載決定済み)

Yoshida, H. , Furuya, O.: Study on Seismic Safety Improvement of Mechanical Structure in Long Duration Earthquake, American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division, Seismic Engineering, 査読有, DOI 10.1115/PVP 2014-29008, 2014.

[学会発表](計3件)

Osamu FURUYA, Kazuhiro YOSHIDA, Keiji OGATA and Nobuhiro NIIYAMA, Study on Seismic Safety Improvement of Hanging Type Mechanical Structure in Industrial Facilities, The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Oct.18.2014.

吉田一博, 古屋治, 浅岡頌, 小形慶治, 仁井山暢浩: 長継続時間地震時の天吊り型機械構造物の耐震安全性向上に関する研究, 日本機械学会講演論文集, CD-No. J1010202, 東京, 2014.8.29.

吉田一博, 古屋治, 浅岡頌, 小形慶治, 仁井山暢浩: 天吊り型機械構造物の耐震安全性向上に関する研究, 日本機械学会講演論文集, CD-No.446, 東京, 2014.9.8.

6. 研究組織

(1)研究代表者

古屋 治 (FURUYA, Osamu)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号: 00290726