

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月6日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560216

研究課題名（和文） 産業施設内構造物における非線形耐震設計法

研究課題名（英文） Nonlinear Seismic Design of Industrial Facilities

研究代表者

渡邊 鉄也（WATANABE TETSUYA）

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70240504

研究成果の概要（和文）：

近年、東北地方太平洋沖地震（2011）など、大規模な地震が発生しており、一般家屋ばかりでなく配管やタンク、クレーンなどの産業施設内構造物の被害も多く報告されている。産業施設内構造物の耐震設計指針は線形計算が主流であり、摩擦などの非線形現象は考慮されていない。しかし、摩擦は地震エネルギーを散逸することから、設計への積極的利用が考えられる。そこで、本研究では摩擦系応答スペクトルを提案するとともに、非線形耐震設計指針を提案し、その妥当性を実験的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

For the past several years, large scale earthquakes happened. For example, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake or the Southern Hyogo prefecture earthquake in 1995. A lot of industrial facilities such as piping, tanks and cranes were damaged. Nonlinear characteristic such as friction is expected to dissipate the energy of structure excited by earthquake. Therefore, the friction characteristic was utilized in the response spectrum of seismic design, and the nonlinear seismic design was proposed. Proposed design method was evaluated by experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：耐震・免震設計，摩擦振動，地震応答

1. 研究開始当初の背景

近年、兵庫県南部地震(1995)や東北地方太平洋沖地震(2011)などをはじめとする大規模な地震が多発しており、一般家屋もさることながら産業施設内構造物の被害も多く報告されている。産業施設内構造物は2次的な災

害が懸念されるため、一般家屋とは異なる耐震設計基準が定められている。産業施設内に設置されている配管は一般に架構上に支持されており、地震等の振動入力に加わると、配管が架構上をしゅう動する摩擦現象が生じ、その挙動は複雑なものとなる。摩擦は振

動エネルギーを散逸して地震応答を低減する効果があり、その効果を利用すれば耐震性を向上させることが可能となる。現在の耐震設計では、加速度応答倍率を求めるために、設計用応答スペクトルを用いている。過去の研究において摩擦支持配管系の最大応答を推定するため、系の固有周期と加速度応答倍率の関係を示す「摩擦系応答スペクトル」を提案してきた。ところが、摩擦系応答スペクトルを算出する場合には1自由度摩擦系の非線形応答計算を行わなくてはならなかった。そこで、最大応答をより簡単に推定するために摩擦による減衰効果を等価減衰として扱う方法を提案してきた。これにより、高圧ガス設備等耐震設計指針において、摩擦が介在する場合には応答倍率を下げるができるようになった。これらの提案は比較的短周期の地震に対して行われてきたものであるため、近年注目されている長周期地震には対応できない。そこで、本研究では、1秒以上の長周期摩擦系の耐震設計法を構築していく。これを実現するためには、摩擦系応答スペクトルを提案し、その妥当性を実験的に検証する必要があった。

2. 研究の目的

配管を架構上に設置する場合、熱膨張緩和のために完全には固定されてはいない。このような系に地震などの振動入力がかかると、配管が架構上をしゅう動する摩擦現象が生じる。摩擦は非線形現象であるため、振動応答は複雑なものとなるが、その一方で振動エネルギーを散逸する効果があることが知られている。したがって、この効果を有効に利用すれば耐震性が向上するという考えのもとに研究が進められてきている。これは、ダンパやスナッパなど、エネルギーを散逸する装置を用いず、必然的に介在する摩擦を有効利用し、耐震性を向上させようとするところから、画期的なアイデアであり、コストもかからない。本研究は耐震設計に摩擦を導入することを提案しており、これは新たな試みである。

産業施設内構造物の耐震設計では、線形系が主体とされているが、摩擦、衝突、弾塑性などの非線形特性は、振動エネルギーを散逸するため、応答低減効果があることがわかっている。そこで、非線形特性の1つである摩擦特性に注目した。これまでの研究から、実地震波の入力レベルを変化させたときの摩擦系の加速度応答計算において、ある入力レベルで応答低減効果が顕著となる場合があることを明らかにした。すなわち、摩擦支持構造物の摩擦力を適切に設定することで、応答低減効果が顕著になる。そこで、本研究では、この効果を積極的に利用した摩擦系の耐震設計法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

背景と目的を踏まえて、次の項目について研究を遂行する。

- ①摩擦系応答スペクトルの提案
- ②摩擦を考慮した耐震設計指針の提案
- ③提案した耐震設計指針の実験的検証
- ④鉛直地震動による影響

「①摩擦系応答スペクトルの提案」では1秒以上の長周期を含めた応答スペクトルを提案していく。「②摩擦を考慮した耐震設計指針の提案」では、応答スペクトルを現在の耐震設計指針の応答スペクトルに準じて修正震度法に基づく耐震設計が行えるようにする。「③提案した耐震設計指針の実験的検証」では提案した設計指針が実際に適用できるか実験的に検証する。「④鉛直地震動による影響」では、鉛直地震動による水平地震応答の影響を調査する。地震動は水平方向と鉛直方向があり、耐震設計指針では鉛直方向の地動加速度を水平の1/2にしている。摩擦系では、鉛直荷重により摩擦力が異なるため、鉛直振動によっては応答が低減しないと考えられる。

摩擦系応答計算は、停止としゅう動を繰り返す1自由度非線形系であるため、摩擦力を変化させて応答計算するのは多大な時間を要する。これまで、研究者は「長周期摩擦系における応答低減マップ」を提案してきた。これは、摩擦力を慣性力で除した値を α と定義することで摩擦力を無次元化し、地震波の加速度レベルによらず応答低減効果の高い摩擦力を推定できるようにしている。また、この応答低減マップは、1秒以上の長周期において、応答倍率が1未満で線形系より応答が低減される範囲を示したものであり、複雑な非線形応答計算をせずに適切な摩擦力を推定することが可能である。系を免震構造にした場合、長周期地震動により共振現象が生じる恐れがあるが、現有する摩擦支持部の摩擦力を適切に設定する、あるいは通常用いられているダンパに付加的に摩擦支持部を設けることで、応答低減効果を向上することが可能となる。本研究では、まず、実際の地震で記録された波形（実地震波）における応答低減マップを求める。次に、高圧ガス保安協会の耐震設計指針における応答倍率から逆算して求めた模擬地震波を用いて応答低減マップを求める。

応答低減マップは摩擦による応答低減効果が顕著となる周期と摩擦力が得られるのみで、実際の応答倍率を正確に求めることはできない。そこで、「摩擦系応答スペクトル」を提案する。これは、現在までに発生した実地震波を用いて算出する応答スペクトルであり、線形系における応答スペクトルと比較して応答低減している固有周期が得られる。また、このスペクトルから系の固有周

期に応じた加速度応答倍率を推定できる。次に、高圧ガス設備等耐震設計指針のスペクトルから求めた模擬地震波を入力として応答スペクトルを求め、耐震設計指針を提案する。

ここで提案している、応答低減マップや摩擦係数応答スペクトルは、数値解析に基づいているため、実際の現象と一致しているか不明である。そこで、提案した耐震設計指針が適切であるか実験的に検証する。ここでは、しゅう動部が金属、しゅう動面がテフロンからなる摩擦部を有する1自由度系実験モデルを作成し、振動台を用いて加振実験を行う。そして、実験から得られる応答スペクトルと提案した設計用摩擦係数応答スペクトルを比較し、耐震設計指針の妥当性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) α の定義

1自由度摩擦系の運動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) + f\text{sign}(\dot{x} - \dot{y}) = 0 \quad (1)$$

ここで、 m は質量、 c は減衰係数、 k はばね定数、 f は摩擦力、 x は質量の変位、 y は基礎の変位である。また、 $\text{sign}(x)$ は符号関数で、以下となる。

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & (x < 0) \\ 0 & (x = 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases} \quad (2)$$

次に、質量と基礎の相対変位を $z = x - y$ とすると、式(1)は下記のように変形される。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz + f\text{sign}(\dot{z}) = -m\ddot{y} \quad (3)$$

ここで、 $\frac{c}{m} = 2\zeta\omega$ 、 $\frac{k}{m} = \omega^2$ とすると、

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + \frac{f}{m}\text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (4)$$

となる。

実機の摩擦系では、摩擦係数を変化させる、あるいは調整することは困難である。しかし、摩擦力は垂直抗力を変化させることで調整が可能であることから、本研究では摩擦力をパラメータとして用いることとする。入力加速度の最大値を A と表し、摩擦力と慣性力の比を式(5)のように α と定義する。

$$\alpha = \frac{f}{Am} \begin{cases} \alpha = 0 & \text{線形系} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{摩擦系} \\ \alpha \geq 1 & \text{線形系} \end{cases} \quad (5)$$

α の値によって3種類の系に分類することができる。 $\alpha = 0$ の場合は摩擦力が零であるので線形系である。 $0 < \alpha < 1$ では摩擦部でのしゅう動が生じる系である。 $\alpha \geq 1$ ではしゅう動は生じないため、線形系となる。式(5)を式(4)に代入すると次のような式となる。

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z + A\alpha \text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (6)$$

数値計算では、 α を変化させて式(6)を積分して応答倍率を求める。

(2) 模擬地震波

構造物の地震応答解析では、構造物を設置する地盤性状に対応した入力地震波を選定する必要がある。そこで、本研究では高圧ガス設備等耐震設計指針の基準応答倍率を参考にし、模擬地震波を作成する。耐震設計指針における基準応答スペクトルでは、地盤特性を考慮した4種のスペクトルが設定されている。このスペクトルでは固有周期2秒以上の長周期において加速度が一定となっているが、本研究では実際の地震波の応答スペクトルを考慮し、速度一定のスペクトルとして模擬地震波を作成した。

図1に作成した模擬地震波の例を示す。また、模擬地震波のスペクトルと目標スペクトルとの比較を図2に示す。本研究では、第1~4種地盤の基準スペクトルから模擬地震波を作成した。

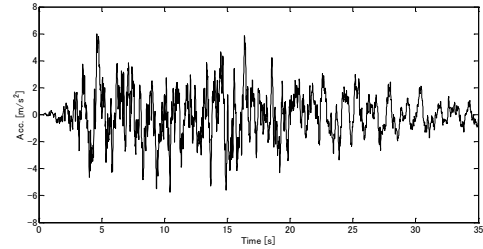


図1 模擬地震波

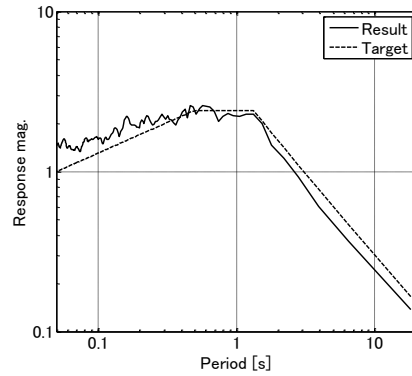
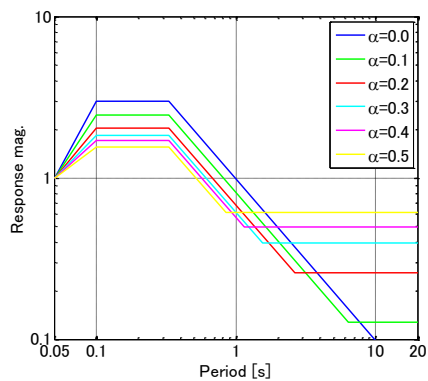


図2 目標スペクトルとの比較 (第1種地盤)

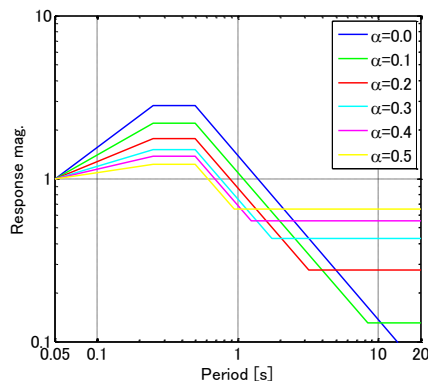
(3) 摩擦係数応答スペクトルおよび耐震設計指針の提案

1自由度摩擦系の加速度応答倍率を簡易推定するため、摩擦係数応答スペクトルを作成した。スペクトルの作成手順は、まず、前述の模擬地震波を入力波として用いて式(6)を数値積分し、加速度応答スペクトルを作成する。次に、各スペクトルの包絡線を求める。包絡

線は、応答倍率が時刻歴応答解析の結果よりも下回らず、耐震設計用スペクトルに対して平行となるようにした。ただし、固有周期が0.1秒未満の加速度応答倍率は線形系とほぼ同値となるため、固有周期0.05秒ですべてのスペクトルを線形系と同値の1倍となるように設定した。図3は第1種、第2種地盤における包絡線を示しており、本研究ではこれらを耐震設計用摩擦系応答スペクトルと呼ぶことにする。系の固有周期、パラメータ及び地震動の最大加速度が分かれば、本スペクトルにより簡易に加速度応答倍率を推定することができる。



(a) 第1種地盤



(b) 第2種地盤

図3 耐震設計用摩擦系応答スペクトル

(3) 耐震設計指針の実験的検証

① 1自由度摩擦系実験装置

耐震設計用摩擦系応答スペクトルの妥当性を検証するため、図4に示す簡易振動モデルを用いて振動試験を行う。簡易振動モデルの固有値は、重錘と引張ばねを調節した。

質点の変位を水平1方向に拘束するため、加振台テーブル⑨の上部にリニアガイド⑦を設置し、重錘⑥と引張ばね⑧を取り付けて1自由度系としている。しゅう動部ではPTFE板⑤とステンレス半球④を接触させて摩擦力を発生させる。摩擦力は、しゅう動部に作用する垂直抗力をボルト②で締めつけて調節する。垂直抗力はしゅう動部の上部に取り付けたロードセル③、摩擦力はPTFE板を固

定するアルミ板と支持構造物の間に取り付けたロードセル①より取得する。振動試験では、加振台と系の振動波形を加速度センサ⑩より取得する。

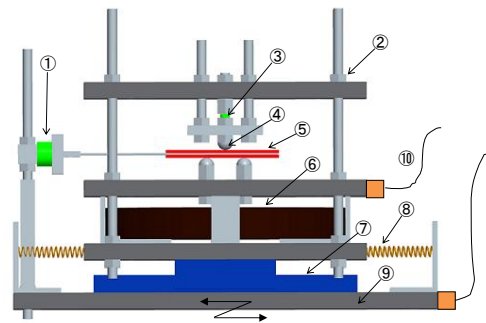
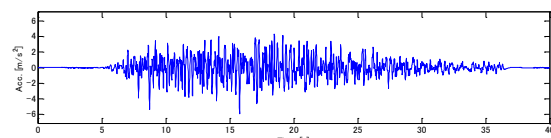


図4 実験装置概略図

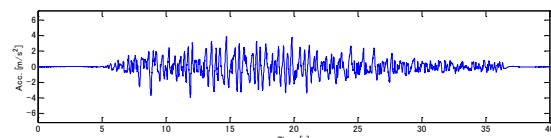
② 模擬地震波入力による応答

まず、第1種地盤模擬地震波を入力波として加振試験を行った。入力波の継続時間は32.0秒であり、最大加速度は6.00m/s²を目標値とした。

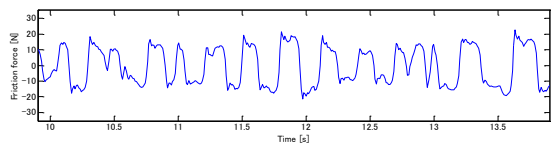
図5に系の固有周期0.457秒、 $\alpha=0.150$ における実験結果を示す。(a)~(d)はそれぞれ振動台の加速度波形、簡易振動モデルの加速度波形、摩擦力の時刻歴波形、加速度応答波形の実験結果と数値解析結果を比較した図である。(c)(d)は応答が最大となる時刻を横軸の中心とし、その前後4秒を示してある。



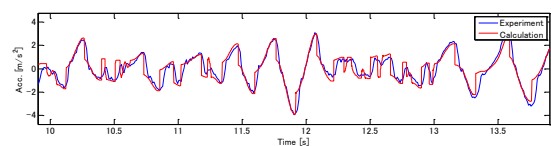
(a) 入力加速度



(b) 応答加速度



(c) 摩擦力



(d) 応答加速度の比較

図5 時刻歴応答波形

数値解析における系のパラメータは実験データ(系の固有周期, 減衰比, α)を用い, 入力波は振動台の加速度波形を用いている. α の算出には, 応答が最大となる時刻の摩擦係数を用いる. 図5(d)に注目すると実験結果と解析結果が良好に一致しており, 数値解析手法の妥当性が証明できたといえる.

次に, 数値解析結果の妥当性を定量的に評価するために, 耐震設計で用いられる加速度応答倍率に注目し, 誤差を算出する. 図5の結果では誤差が1.51%となる.

図6には各種地盤の模擬地震波における誤差をまとめて示す. これより, すべての地盤種に対して実験結果と解析結果の誤差がおおむね10%以内に収まっていることから, 摩擦係数応答スペクトルの妥当性が証明されたといえる.

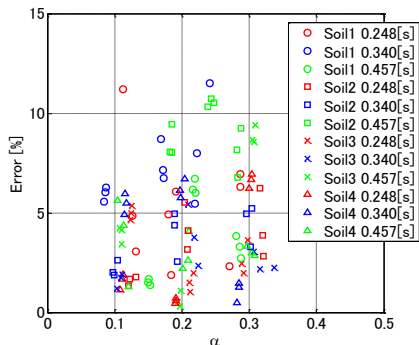


図6 実験結果と解析結果の誤差

(4) 鉛直地震動による影響

① 時刻歴応答解析

上下動を考慮した1自由度摩擦系の運動方程式は, 地震波の上下動の加速度を A_{ud} として, 次のようになる.

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2z + \mu(g + A_{ud})\text{sign}(\dot{z}) = -\ddot{y} \quad (7)$$

ここで, 摩擦部に加わる垂直抗力は構造物の自重であり, 上下動に対して構造物は剛体であると仮定している. 地震波の記録では, A_{ud} の符号は上方向がプラス, 下方向がマイナスとなっており, 上方向の加速度が地盤に加わると摩擦係数が増大するため, 式(7)の A_{ud} の前の符号をプラスとしている.

本研究ではパラメータ α を用いて数値解析を行っているが, 上下動を考慮すると摩擦係数が変化するため, それに伴って α も変化する. そこで, 初期状態の α を α_0 として, α の時間変化を考える. α_0 は式(5)から,

$$\alpha_0 = \frac{\mu mg}{Am} = \frac{\mu g}{A} \quad (8)$$

ここから, 摩擦係数 μ を逆算すると,

$$\mu = \frac{A\alpha_0}{g} \quad (9)$$

となり, これを定数とする. この摩擦係数を用いて α の時間変化を考えると,

$$\alpha(t) = \frac{\mu m(g + A_{ud}(t))}{Am} = \frac{(g + A_{ud}(t))}{A} \times \frac{A\alpha_0}{g} = \alpha_0 \left(1 + \frac{A_{ud}(t)}{g} \right) \quad (10)$$

となる. また, 下方向の加速度が重力加速度を超えると α がマイナスになってしまうので, 数値解析において $\alpha < 0$ のときは $\alpha = 0$ とする.

② 模擬地震波応答解析

各種地盤に対応した模擬地震波を入力波として, 上下動を考慮した解析を行った. 模擬地震波の最大加速度は水平動を 6m/s^2 , 上下動を 3m/s^2 とし, 上下動の地震波は水平動の地震波を半分にしたものを用いる. 上下動では加速度の方向も応答に関係するので, 地盤ごとに上方向に最大加速度をもつものを5波, 下方向に最大加速度をもつものを5波選んでいる.

解析結果は上下動の影響による加速度応答倍率の変化がわかるように, 加速度応答倍率の変動率のマップでまとめた. 変動率については以下の式で求める.

$$\text{Rate}[\%] = \frac{(S_a)_{ud} - (S_a)}{(S_z)} \times 100 \quad (11)$$

ここで, $(S_a)_{ud}$ は上下動を考慮した時の加速度応答倍率, (S_a) は水平動のみの時の加速度応答倍率である. 変動率がマイナスになる点は設計上問題にならないので, 変動率がマイナスのデータ点は変動率0%としている.

加速度応答倍率の変動率が10%以上を危険側として黒, 10%より小さければ安全側として白で表示する白黒マップを作成する. このマップをすべて重ね合わせた, すべての地盤を考慮した白黒マップを図7に示す. 安全側の部分を上下動の影響を無視できる範囲として評価方法を提案する. 図中に, 危険側部分がはみ出さないように境界線を近似した曲線を示す. これより, α が以下の関数の範囲内であれば, 上下動の影響を無視することができる.

$$\alpha \leq \frac{0.12}{T} \quad (12)$$

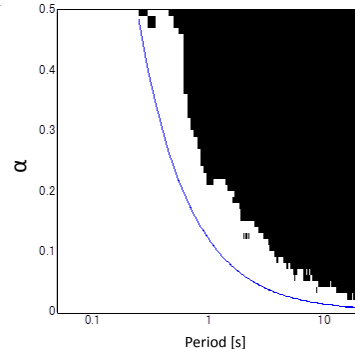


図5 全地盤における安全マップ

(5) まとめ

本研究では、摩擦によるエネルギー散逸効果に注目し、耐震設計に積極的に利用することを考え、耐震設計用摩擦系応答スペクトルを提案した。また、1自由度摩擦系の簡易実験装置を作成し、提案した耐震設計用摩擦系応答スペクトルの妥当性を検証した。これにより、摩擦が介在する場合の地震応答倍率を簡便に算出することができるようになった。

国内外において、摩擦を用いたダンパや減衰装置の開発は行われているが、設計指針にまで踏み込んだ検討はなされていないのが現状である。したがって、本研究の取り組みは設計指針への非線形現象の導入に資するものであればと期待している。今後の展開として、本研究の成果をもとに、多自由度系に摩擦が介在した場合の応答低減効果や応答スペクトルの開発を実施したいと考えている。

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佐藤和希, 渡邊鉄也, 靱田顕章, ひし形リンク構造を用いた免震設計に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 査読有, 掲載決定
- ②靱田顕章, 筒井邦裕, 渡邊鉄也, 耐震設計用摩擦系応答スペクトルの実験的検証, 日本機械学会論文集C編, 査読有, 78巻, 793号, 2012, 40-48
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/78/793/78_3143/_article/-char/ja/
- ③小林浩一, 渡邊鉄也, 田中基八郎, 靱田顕章, 地震時における構造物のロッキング振動(2自由度系転倒マップの提案), 日本機械学会論文集C編, 査読有, 77巻, 778号, 2011, 81-90
https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/77/778/77_778_2249/_article/-char/ja/
- ④渡邊鉄也, 靱田顕章, 摩擦系応答スペクトルにおける鉛直振動の影響, 日本機械学会論文集C編, 76巻, 771号, pp.137-144, 2010.11.

[学会発表] (計6件)

- ①渡邊鉄也, 小林信之, 河田政憲, 原田武重, 東日本大震災におけるクレーン設備に被害状況, 日本機械学会[No.12-12]Dynamics and Design Conference 2012, 2012年9月21日, 慶応義塾大学

- ②藤田聡, 中村いずみ, 古屋治, 渡邊鉄也, 皆川佳祐, 森下正樹, 鎌田崇義, 高橋義考, 日本機械学会による機械設備等の地震被害調査活動, 日本機械学会[No.12-12]Dynamics and Design Conference 2012, 2012年9月21日, 慶応義塾大学

- ③渡邊鉄也, 小林信之, 河田政憲, 原田武重, 東北地方太平洋沖地震におけるクレーンの被害, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学

- ④藤田聡, 中村いずみ, 古屋治, 渡邊鉄也, 皆川佳祐, 森下正樹, 鎌田崇義, 高橋義考, 日本機械学会による機械設備等の地震被害調査活動, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学

- ⑤佐藤和希, 渡邊鉄也, 靱田顕章, ひし形リンク構造を用いた免震設計に関する研究, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学

- ⑥筒井邦裕, 靱田顕章, 渡邊鉄也, 耐震設計用摩擦系応答スペクトルの実験的検証, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2011, 2011年9月5日, 高知工科大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡邊 鉄也 (WATANABE TETSUYA)
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 70240504