石炭火力発電施設ボイラ構造物の制振技術の開発と
長周期長時間地震への適応性検討田中 剛^{*1}, 藤田 聡^{*2}, 皆川 佳祐^{*3}, 相田 清^{*4}Development of vibration control for boiler structure of coal-fired power plant with earthquake
having long period component and long durationGo TANAKA^{*1}, Satoshi FUJITA^{*2}, Keisuke MINAGAWA^{*3} and Kiyoshi AIDA^{*4}^{*1} Oiles Corporation

1000 Hakari-chou, Ashikaga-shi, Tochigi 326-0327, Japan

^{*2} Tokyo Denki University

5 Asahi-chou, Adachi-ku, Tokyo 120-8551, Japan

^{*3} Saitama Institute of Technology

1690 Fusaiji, Fukaya-shi, Saitama 369-0293, Japan

^{*4} Mitsubishi Hitachi Power Systems, LTD.

6-9 Takara-machi, Kure-shi, Hiroshima 737-0029, Japan

Received: 30 May 2018; Revised: 2 October 2018; Accepted: 9 December 2018

Abstract

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake had the largest energy in recorded history of Japan and it caused severe damage. The damage occurred in a large area as well as the Tohoku in various ways. Electric power was one of them. Therefore, rolling blackouts were carried out with lack of power supply in a part of the East Japan. The electric power is indispensable because restoration activity advances at a disaster area. Moreover, Japan is the highly advanced information society. The steady supply in case of the emergency is expected while a large earthquake whose seismic center is Nankai trough is predicted. Therefore, it is necessary to improve seismic proof construction of power plants. At present, the most common type of power generation in Japan is thermal. Even among them, coal-fired power plants become base load power. A proposal of authors is application of vibration control using damper to boiler structures. This study shows the effects while the earthquake with long period component and long duration was used. It is concerned that the damage of the high-rise structure like boiler structure becomes critical by the long period component. Moreover, the durability of the structures and devices is required higher than conventional by the long duration. In this study, authors developed a damper to use for vibration control of the boiler structure and showed the analytical and experimental results of applicability for the earthquake with long period component and long duration of it.

Keywords : Coal-fired power plant, Vibration control, Damper, Earthquake, Long period component, Long duration

1. 緒 言

日本は世界でも有数の地震国である。その被害を低減するため、構造物設計においては、従来の耐震設計に加え、免震・制振技術が開発されており、兵庫県南部地震以降から現在までにその効果が確認されている(藤田他, 1993, 1995, 1998a, 1998b)。免震・制振技術は、今後更なる普及が望まれている一方、度重なる大地震において、新たな課題への対応も求められている。

No.18-00252 [DOI:10.1299/transjsme.18-00252], J-STAGE Advance Publication date : 19 December, 2018

^{*1} 正員, オイレス工業(株)(〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000)^{*2} 正員, フェロー, 東京電機大学(〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5)^{*3} 正員, 埼玉工業大学(〒369-0293 埼玉県深谷市普濟寺 1690)^{*4} 正員, 三菱日立パワーシステムズ(株)(〒737-0029 広島県呉市宝町 6-9)

E-mail of corresponding author: g.tanaka@oiles.co.jp

国内観測史上最大の $M_w9.0$ を記録した 2011 年の東北地方太平洋沖地震では、複数の断層が連動しながら稼働したため、本震の揺れが長時間にわたった。同時に遠方の地域において、地震の長周期成分が堆積層で増幅しながら伝播する長周期地震動ともなり、関東や大阪の高層構造物で被害が発生した。2016 年熊本地震では、国内観測史上初めて、一連の地震活動において気象庁震度階級最大の震度 7 の地震が二度も発生した。いずれの地震でも余震回数が多く、その規模も大きかった。この傾向は、2004 年に同じく震度 7 を記録した新潟県中越地震でも同様であった。兵庫県南部地震から 20 年以上が経過したが、相次ぐ大地震に、今後の対地震構造においては大地震に耐えられるだけでなく、長時間にわたる地震の揺れ、長周期地震及び大地震の繰返しに対応できることが望まれ、一部ではその対策が始まっている（藤田他、2016、日本免震構造協会、2013、建築研究所、2017）。

現在の日本は高度に情報化・産業化が進み、電力安定供給の重要度が高い。東日本大震災では、多くの発電所が被災し、東日本で輪番停電が実施された。これは、被災地に直接的な影響の少ない地域で実施されたものの、企業活動においては生産性や物流性等が低下し、間接的に被災地の復旧支援の遅延因子ともなった。東日本大震災以降、国内の発電は火力がその比率の多くを占めているが、今後も東海地方などで M8 クラス、首都及びその周辺地域において M7 クラスの大地震が予測されており、火力発電所の耐震性向上が望まれている（東日本大震災合同調査報告書編集委員会、2013、火力原子力発電技術協会、2012）。

その中で、石炭火力発電所はベースロード電源を担う重要な発電施設の一つである。同施設内のボイラ構造物は、主要設備のボイラが大規模なため、構造が高層化する傾向があり、且つボイラ本体は熱膨張を逃がすため上端で懸垂支持構造となることから、地震によって揺れやすい。そのため、ボイラと支持構造物の間に振れ止め装置が設置されており、その一部はエネルギー吸収性能を有し、現在も高度化の開発が進められている（Aida et al., 2014）。しかしながら、現在の振れ止め装置は、鋼材の塑性変形を利用したものが多く、長時間の地震や大地震の繰返しに対しては、変形の繰返しに伴う金属疲労による損傷が懸念される。振れ止め装置の損傷は、支持構造物との衝突によるボイラ損傷の因子となるが、ボイラの損傷は電力の安定供給や早期復旧のために防がなければならない。

そこで筆者らは、石炭火力発電所のボイラ構造物の振れ止め装置設置部に当該構造物の耐震要求性能を満たす粘性流体ダンパを設計し、設置することで、当該プラントの耐震性能の向上を図る新たな制振構造の研究開発を進めてきた。従来の振れ止め装置設置部に、ダンパを設置することで、プラント設計は従来通りに実施することが出来る。このため、ダンパは新設だけでなく、既存のボイラ構造物で、その耐震性に不足がある場合にも適用でき、併設も可能である。当該プラントで制振技術を適用する場合、設置されている配管の保護や構成機器の特徴から、最大変位を抑制できること、稼働する累積の変位量が抑制できること、そして現行同等程度若しくはそれ以下の応答加速度となることが求められる。これまでの研究成果として、これらの要求事項を満足するダンパは、抵抗力が速度の 0.1 乗に比例する特性であることを挙げ、実大規模のダンパを開発した（Tanaka et al., 2017）。そこで、本論文ではこれまで未解明であった開発したダンパの抵抗力発生について理論的に解析を行い、過去に実施した試験結果と比較してその有効性を示す。また、現在の課題となっている大地震の繰返しや長周期長時間地震を考慮した地震応答解析と実験を行い、開発したダンパが石炭火力発電所のボイラ構造物の制振化に有効であることを示す。更に、その試験結果をまとめて開発したダンパの耐久性の簡易評価手法を示す。これは、現在、構造物設計において使用される地震波の多種多様化に対して、ダンパに要求される耐久性能を既往のデータより簡易的に評価する新たな試みとなる。本論文では、第二章に石炭火力発電所の制振手法について、第三章に開発したダンパ概要について述べる。それ以降には実機適用を見据えて、第四章に長周期長時間地震動に対する解析的検証、第五章にその実験的検証と耐久性の簡易評価について示す。

2. 石炭火力発電所の制振

石炭火力発電所では、蒸気をボイラで発生させ、その蒸気がタービンを廻し、発電機を動かす。同発電所は、ベースロード電源を担うため、大容量の電力を発電する機会が多いが、その場合、高温、高圧そして大量の蒸気が必要となるため、ボイラは一般的に巨大となり高層化する。ボイラの高さは、数十～100m に至るが、ボイラ自身が高温となるため、熱変形量は非常に大きい。熱変形量を逃がすために、ボイラは支持構造物の頂部から懸垂支持されるが、その構造は揺れやすい。ボイラの概略的な構造を図 1 に示す。支持構造物とボイラの間には、互

いの衝突を防ぐため、振れ止め装置が設置されている。それらの多くは金属製であり、一部の装置は塑性変形を利用したエネルギー吸収性能を有している。それらは制振として機能する一方、長時間の地震や大地震の繰り返しに対して効果を発揮することは難しい。そこで、筆者らはこれまで振れ止め装置が設置されていた箇所に、振れ止め装置の機能を併せ持ち、且つ繰り返しでも使用できる制振ダンパを設置することを提案する。この設置方法によれば、制振ダンパを現在のプラント構造物の設計手法の下で適用することが可能になる。

ボイラ構造物では、多種多様な機器と大小様々な配管が内蔵され、配管はボイラと支持構造物間を繋げている。大地震が発生した時に、その機能を維持するためには、ボイラと支持構造物間の変位（以降：相対変位と呼称）が許容値以下に収められる必要がある。配管は、地震動以外にも構成機器・部材の熱伸縮なども考慮して設計される。それらは、自在継手等を用いて、可動できるように設計されているが、可動部は最大変位の他、正負交番回数にも限度がある。そのため、熱伸縮や大地震の際に稼働する以外は、極力固定に近い状態であることが要求される。一方、ボイラ構造物では地震の加速度の影響を、慣性力による構成部材の応力度評価として捉え、設計する。そのため、構造物の負荷低減を目的に応答加速度低減が要求される。但しこの要求は、機器保全や大地震の際の安全確保のため、ボイラ本体や構成機器及び配管らが健全であった上で必要となる。従って、設計時の評価は、相対変位を優先する。

筆者らは、上記を踏まえてボイラ構造物の制振技術とそれに使用するダンパの特性の適性を求めてきた。ボイラ構造物の制振技術のためには、最大相対変位が抑えられること、相対変位の累積量が小さいこと、それに加えて現行同等程度以下の応答加速度となること、が必要となる。それを実現できる制振ダンパは、変位と抵抗力の関係が矩形となる特性が必要であることを予備解析で明らかにし、抵抗力が速度の 0.1 乗に比例する特性の粘性流体ダンパを開発した (Tanaka et al., 2017)。

Fig. 1 Image of boiler structure, outside view of connectional stopper for an example and developed damper of vibration control. The conventional stopper is used between the boiler and the support structure as drawn on the black bar of the left figure. In other words, it is set between the support structure and the buckstay of boiler. The developed damper is possible to replace simply.

3. 粘性流体を使用したダンパ

3・1 粘性流体ダンパの概要

本研究で開発したダンパは、シリンダ、ピストン、ロッドなどで構成され、密閉した内部に粘性流体が封入されている。ダンパの基本構成を図2に示す。開発したダンパは、ピストン、ロッドが軸方向に稼働することにより、シリンダ内径とピストン外径の間に形成されるオリフィス部を粘性流体が流れ、その抵抗力を減衰力として利用している。全体構造こそ、一般的なオイルダンパと似ているが、オイルダンパは流路に様々な弁構造を使用しているのに対し、開発したダンパは単純な円環構造となっていることを特徴としている。ボイラ構造物の耐用年数は、数十年と言われるが、この間に発生する可能性のある数回の大地震にも、単純なオリフィス構造を有する本ダンパは、確実に稼働し、安定した抵抗力を発揮できる。

開発したダンパの内部の粘性流体は、危険物の規制に関する規則の第六十九条の二に記載された液体の定義には属さない。オイルダンパで使用されているオイルは、例えば粘度が10～数十 cst 等のもの（日本免震構造協会，2013）で液状に属するが、開発したダンパの粘性流体は固体に分類されるほどの高粘度を有する。一般的なオイルダンパの抵抗力は、速度の0.3～1.0 乗に比例し、抵抗力と変位の関係は円形～楕円形状となる。一方、本ダンパの抵抗力は速度の0.1 乗に比例し、抵抗力と変位の関係が矩形形状に近づく。本ダンパのオリフィスは、単純な形状であるために、抵抗力においてオイルダンパと特に異なる点は、粘性流体がもたらすものと言える。また、一般的なシリンダ型装置では内部流体の漏洩が懸念されるが、開発したダンパは粘性流体が高粘度であり、漏洩しにくくなるためにその懸念を低減できる。以上より、開発したダンパは、ボイラ構造物の制振に必要とする特性を、高粘度の粘性流体を適用することで実現する。

Fig. 2 The parameters of viscous fluid damper.

3・2 粘性流体ダンパにおける抵抗力発生理論式

本ダンパは、シリンダ内径とピストン外径の間をオリフィスとし、同部位を粘性流体が流れるときの抵抗力を減衰力として利用している。この作動原理に鑑み、本項では理論式を提案する。

まず、ダンパ内部の流体の流れに、ナビエ・ストークスの式を適用する。そして、内部流体をニュートン流体に置き換え、シリンダ型ダンパに適合する条件を初期条件として付与することで式を単純化し、解を導く。但し、解は、ニュートン流体のときのものであり、実際の粘性流体は非ニュートン流体であるから当然ながら乖離が出る。これに粘性率係数を使用し、補正する手法でダンパの理論式を導出する（坂井他，2001）。

ナビエ・ストークスの式を式(1)に示す。ダンパの軸方向変位を x 、その直交方向を y と置き、それぞれの速度を u 、 v 、粘度を μ 、圧力を p 、密度を ρ 、とおく。また流体に作用する x 、 y 方向の外力を X 、 Y とおく。

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

図2に示すようにシリンダ内径を D_0 、ピストン外径を D_1 、ロッド径を D_2 とし、それぞれの半径を $r_0(=D_0/2)$ 、 $r_1(=D_1/2)$ 、 $r_2(=D_2/2)$ とし、ダンパの相対速度を V とおく。

次に示す仮定条件を与え、ナビエ・ストークスの式を簡略化する。第一に、オリフィスの流れは微小な隙間の流れとなるため、軸方向の流れが主となる。そこで $v=0$ とし、式(1)の上側の式だけを用いる。第二に、流れを定常流と仮定すると、 u の変化がなくなるため、 $\partial u / \partial t = 0$ 、 $\partial u / \partial x = 0$ 、 $\partial^2 u / \partial x^2 = 0$ となる。第三に、質量力もないと仮定すると、 $\rho X = 0$ となる。最後に、隙間 $r_0 - r_1$ は、微小であるため、圧力勾配は y に依存せず、圧力 p は x のみの関数となる。上記仮定条件の下、ダンパの円筒形状を考慮し、ナビエ・ストークスの式を円柱座標系で式(2)のように表現する。またその式を積分し、式(3)のように流速 u を求める。 c_1 及び c_2 は、積分定数とする。

$$\frac{dp}{dx} = \mu \left(\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right) \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r^2 + c_1 \log r + c_2 \quad (3)$$

また、ピストン外径部 ($r=r_1$) において $u=0$, シリンダ内径部 ($r=r_0$) において $u=V$ の二つの境界条件より算出した流速 u を用いて理論的な流量 Q を, 式(4)のように求める. 流量はオリフィスとシリンダが相対速度 V で移動するときの粘性流体体積 Q_r であり, それはオリフィス移動量と等価であるから式(5)となる. 式(4)と式(5)で示す流量は等価であるとするれば, 式(6)のように圧力と速度の関係を得ることができる.

$$Q = -\frac{\pi}{8\mu} \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r_1^2)(r_0^2 + r_1^2) + \pi V r_0^2 + \frac{1}{\log r_0 - \log r_1} (r_0^2 - r_1^2) \left\{ \frac{\pi}{8\mu} \frac{dp}{dx} (r_0^2 - r_1^2) - \frac{1}{2} \pi V \right\} \quad (4)$$

$$Q_r = \pi r_1^2 \frac{dx}{dt} - \pi r_2^2 \frac{dx}{dt} = \pi (r_1^2 - r_2^2) V \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{8\mu V}{(r_0^2 - r_1^2)} \frac{(r_0^2 - r_1^2 + r_2^2)(\log r_0 - \log r_1) - \frac{1}{2}(r_0^2 - r_1^2)}{(r_0^2 + r_1^2)(\log r_0 - \log r_1) - (r_0^2 - r_1^2)} \quad (6)$$

また, ダンパの抵抗力は, オリフィス前後の圧力差 Δp を用いて式(7)のように表すことができる.

$$F_D = \pi (r_0 r_1 - r_2^2) \Delta p \quad (7)$$

同式はニュートン流体を仮定して導いたものであり, 実際に使用している材料に適用するには誤差が生じる. そこで高分子材料などの複雑な粘性を簡便に表す際に用いられる粘性率変数を使用する (中川, 1978). これは, ずり応力 p^* とずりひずみ速度 e^* を定義することで適用できる. ニュートン流体の場合, ずり応力は, 式(8)に示すように, ずりひずみ速度と粘度を係数にした比例関係にある.

$$p^* = \mu e^* \quad (8)$$

本ダンパに適用した時の, ずり応力とずりひずみ速度を次式のように定義する.

$$p^* = \frac{r_0 - r_1}{4L} \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

$$e^* = \frac{2(r_0 + r_1)}{(r_0 - r_1)^2} V \quad (10)$$

ここで, 非ニュートン流体における非線形性を考慮する. 非ニュートン流体は, ビンガム流体, 擬塑性流体, ダイラタント流体に大別できるが, 本粘性流体はビンガム流体のように降伏応力を持たない. 従って後者二種に属するが, この場合, 式(8)をずりひずみ速度に対して n 乗 ($n \neq 1$) 化できる. n は, 実験により同定する定数であるが, $n < 1$ であれば擬塑性流体, $n > 1$ であればダイラタント流体に属する. そこで, 式(8)を式(11)のように表すことができる.

$$p^* = \mu e^{*n} \quad (11)$$

式(7)及び式(9)～(11)より，次式のダンパの理論式を求めることが出来る． c_0 は材料の粘度などを含んだ材料定数である．

$$F_D = c \frac{\pi(D_0 D_1 - D_2^2)L}{D_0 - D_1} V^n \quad (12)$$

$$c = c_0 \left\{ \frac{4(D_0 + D_1)}{(D_0 - D_1)^2} \right\}^n \quad (13)$$

上式はニュートン流体における考え方を非ニュートン流体に展開したものであるが，例えば定常流などの安定した状態の運動を解く場合，非ニュートン流体をニュートン流体と仮定しても正しい結果を得られる場合が多い．また，後述の通り実験結果とも良く一致することから，ダンパ設計の際には非常に有益な式となる．

3・3 粘性流体ダンパの特性

本項では，アクチュエータを用いた動的载荷試験の結果を用いて，粘性流体ダンパの特性を示すと共に理論式の妥当性を示す．動的载荷試験は，二通りの手法で実施し，それぞれ抵抗力の異なるダンパを使用した．一つ目は大容量高速の特性を確認する試験，他方は環境温度の依存性を確認する試験であり，入力波は正弦波とした．

今回载荷試験に用いたダンパは，速度 0.6m/s において定格の抵抗力を発生する設計とした．大容量高速試験のダンパの定格抵抗力は 3000kN とし，環境温度依存性確認試験では 300kN とした．基準となる速度及び抵抗力の設定は任意としたが，速度は実機適用時の最大速度，抵抗力は実機適用時の最大最小容量を考慮した．

大容量高速試験における変位と抵抗力の関係 (Tanaka et al., 2017) 及び速度と一次剛性の関係を，図 3 に示す．

変位と抵抗力の関係は一次剛性を有し，やや角部に丸みのある矩形形状を呈する．図 3 の右図より，一次剛性は平均で約 600kN/mm と評価でき，速度には依存しない．一次剛性は，粘性流体と構成部品の鋼材の弾性でほぼ決まるためである．

また，図 4 に抵抗力と速度の関係を示す．本ダンパは設計より抵抗力が僅かに増加傾向にあった．結果より最小 2 乗法にて求めた回帰式は， $F=3311 \times V^{0.1}$ となり，同図中に青点線で示す．回帰式中の定数は，いずれも試験結果からの算出値である．一方，同図中のマゼンタの実線は，式(12)の理論式から求めた抵抗力を示す．理論式は， n に試験結果の回帰式で得られた 0.1 乗を使用し，それ以外は材料定数及びダンパの内部寸法を使用した．理論式から求めた抵抗力と試験結果を比較すると，試験結果は理論式から求めた抵抗力に対して，-9～+3%の範囲にあった．また理論式から求めた抵抗力と回帰式から求めた抵抗力の差異は，約 1%と小さい．従って，理論式は実施した試験の範囲において試験結果をよく近似している．

Fig. 3 Results of high capacity and high speed loading test. The Left figure shows the relation between the damping force and displacement of developed damper. They are rectangle with slight roundness in the corner even if test conditions changed. The right figure shows the relation between 1st stiffness. 1st stiffness was almost constant even if velocity changed.

Fig. 4 The relation between velocity and damping force. The figure shows that the results fitted the regression equation (Blue dotted line) in proportion to the velocity raised 0.1 power well. Moreover, they also fitted the theoretical formula (Magenta line).

環境温度依存性試験は、ダンパを保温箱で囲い温調機で送風しながら、アクチュエータで载荷した。試験の温度は、常温の 20℃とボイラ構造物の内部温度を考慮した 60℃とした。変位と抵抗力の関係及び速度と抵抗力の関係を、図 5 に示す。抵抗力と変位の関係は、20℃と 60℃ではほぼ重なっており、特性はほぼ同等であった。抵抗力と速度の関係において、温度が高くなれば抵抗力は増加側に变化する傾向が確認できるが、20℃を基準とした場合、60℃の抵抗力は約+5%の変化であり、ダンパ抵抗力の変動は僅かであると言える。

また、図 5 の右図に 20℃の試験結果と理論式から求めた抵抗力との比較を示す。理論式の算出方法は、大容量高速試験と同様とした。試験結果は、理論式から求めた抵抗力に対して±1%の範囲にあった。また試験結果より求めた回帰式は、 $F=316 \times V^{0.1}$ となったが、理論式から求めた抵抗力と回帰式から求めた抵抗力の差異は、約 3%であった。理論式は、実施した試験の範囲において、試験結果をよく近似している。

Fig. 5 The temperature dependency of the viscous fluid damper. The left figure shows the relation between the damping force and displacement. The line of 20℃(Green) fitted the 60℃(Red) one well. Another shows the relation between the damping force and velocity. The results of 60℃ were almost equal to the results of 20℃ because the average of difference was less than 5%. Moreover, theoretical formula fitted the results and the regression equation.

3・4 粘性流体ダンパの解析モデル

前節で示した通り、開発したダンパは一次剛性を有することから、解析モデルには Maxwell モデルを適用することが適当と考えられる。Maxwell モデルは、ばね要素と減衰要素が直列配置されるが、開発したダンパにおいては前者に一次剛性を、後者には抵抗力の速度依存式を入力する。図 6 に高速大容量試験における試験結果と解析モデルの比較を示す。変位と抵抗力の関係において試験結果と解析モデルはほぼ重なっている。なお、3・3

節の試験結果に示したように開発したダンパは温度の依存性が小さい。そのため、本解析モデルにおいて温度の影響は考慮していないものの、その再現性は良好であることが確認できる。

Fig. 6 The comparison between test results and analytical models. The blue line shows test results. The magenta line shows Maxwell model used velocity dependence model and 1st stiffness. The Maxwell model agrees well with the test result.

4. 長周期長時間地震を考慮したボイラ建造物の地震応答解析

4・1 ボイラ建造物の解析モデル

本解析では、従来装置との比較により開発したダンパの効果を示し、その上で長時間長周期地震時の挙動について述べる。ボイラの構造は複雑であるが、地震時に励起される振動モードは、比較的低次に限定され、二質点で簡易評価する手法が報告されている（相田他，2002）。そこで本解析では、ボイラ建造物をボイラと支持構造物の二つの質点に置き換え、制振ダンパをボイラと支持構造物との間においた。解析モデルのパラメータは、ボイラと支持構造物の質量比 m_s/m_b を約 2.6、固有周期は約 1.3 秒とし（相田他，2000）、構造減衰はレーリー減衰で付与してその値は 5%とした（西田他，1993）。式(14)に運動方程式を示す。ボイラ建造物のモデル化について、図 7 に示す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} + \mathbf{F}_{\text{Damper}} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{Z}_H \quad (14)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s + k_b & -k_b \\ -k_b & k_b \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_s \\ x_b \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{\text{Damper}} = \begin{bmatrix} -F_{\text{Damper}} \\ F_{\text{Damper}} \end{bmatrix}, \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 7 Overview and the analytical model of the boiler structure.

4・2 ダンパの解析モデル

本解析で使用するダンパの解析モデルは、Maxwell モデルとする。減衰項には、速度の 0.1 乗に比例する特性を、ばね項には試験結果を考慮し、5mm で最大抵抗力を発揮できる剛性とした。

また、ダンパ効果の比較のため、一部の条件については上記と別に二つの解析モデルを使用した。一つ目は、従来の振れ止め装置を考慮したもので、一次と二次の剛性を有するバイリニアモデルとする。このモデルは、実際に適用されている装置同等となるように降伏変位を 7.0mm とし、一次剛性と二次剛性の比は 1/41 とした (Aida et al., 2014)。二つ目は、シリンダ型ダンパでは代表的なオイルダンパやせん断型粘性ダンパを想定したもので、減衰要素として速度に比例する粘性減衰を採用した Maxwell モデルとする。なお、ばね要素には本体や取付部剛性を考慮した剛性を入力し、その剛性は文献 (日本免震構造協会, 2013) を参考に、4.5mm で最大抵抗力に達する値に設定した。

4・3 開発したダンパをボイラ構造物に適用した場合の応答性状

従来の振れ止め装置を設置したボイラ構造物は、最大速度を 0.5m/s に基準化した Taft EW 波を入力した時に、相対変位が 150mm 以下となるように設計されている (相田他, 2004a)。最大速度を 0.5m/s に基準化した Taft EW 波を、図 8 に示す。開発したダンパのパラメータをこの設計手法に基づき選定し、前項までに示した解析モデルを用いて解析を行い、開発したダンパと従来の振れ止め装置を想定したバイリニアモデルの比較をした。解析結果は、ダンパ抵抗力、累積変位量、応答加速度を評価する。累積変位量は、相対変位の累積を示すものであり、変位差分の絶対値を積分して算出する。

解析結果を、図 9 に示す。開発したダンパは、バイリニアモデルの約 54%の抵抗力で相対変位を 150mm に収めることができ、且つ累積変位量はほぼ同等である。小さい抵抗力で最大応答変位を同等に収められることは、開発したダンパが、変位抑制に効果的であることを示す。一方、加速度は、支持構造物ではほぼ同等ながら、ボイラでは約 55%に低減した。変位抑制効果がありながら加速度低減も図れていることは、ボイラ構造物の剛性がダンパ付加により増加しているだけでなく、ボイラ構造物の減衰がダンパのエネルギー吸収により増加していることを示す。

Fig. 8 The acceleration waveform and response spectrum and of Taft EW. The left figure shows the acceleration wave. The right one shows the response spectrum of acceleration (Green), velocity (Orange), and displacement (Blue) that was calculated in the damping coefficient of 0.05.

Fig. 9 The comparison developed damper and conventional stopper in analysis. The left figure shows maximum value of each evaluation points. The right one shows the relation between the damping force and displacement when Taft EW was inputted.

4・4 長周期長時間地震に対する応答性状

4・4・1 解析手法

本解析では、ボイラ構造物に開発したダンパを導入し、複数の長周期長時間地震を入力した際の応答性状を前節同様に確認する。ダンパの定格抵抗力は前節で決定した値としたが、相対変位が 150mm 以上になった地震動については、定格抵抗力を増加して 150mm に合わせた時の値を評価する。

地震波は、防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) で東北地方太平洋沖地震の時に観測された Haramachi NS 波と EW 波、愛知県入力地震動協議会にて東海・東南海地震を想定して作成された Sannomaru EW 波に加え、南海トラフ沿いの巨大地震を想定し国交省の建築基準整備促進事業で整備された設計用長周期地震動 (国交省, 2017) から SZ1 波, CH1 波, OS1 波を使用した。入力地震動を、図 10 に示す。また、本解析では、東北地方太平洋沖地震の観測波である Haramachi EW 波、東海・東南海地震を想定した Sannomaru EW 波の二波について、抵抗力が速度に比例する粘性減衰を減衰要素に採用した Maxwell モデルと比較し、開発したダンパの応答性状の特徴について述べる。

Fig. 10 The analytical response spectrum and acceleration waveforms of input. There are them of six waves. The right figure shows the inputted acceleration. The left one shows the response spectrum of acceleration (Green), velocity (Orange), and displacement (Blue) that was calculated in 0.05 of the damping coefficient.

4・4・2 解析結果

解析結果を図 11 の左図に示す。同図には、前節結果である Taft EW 波の結果も併記した。今回入力した長周期長時間地震においては、Taft EW 波で設定したダンパ抵抗力和等価な場合、Haramachi NS 波のみ応答の相対変位が 144mm となり、目標値以下に収めることができた。しかしながら、それ以外についてはダンパ抵抗力をより増加させる必要性があった。ダンパ抵抗力は、SZ1 波及び CH1 波を除いては Taft EW 波を入力したときの約 1.3 倍であったが、上記二波では約 2.7 倍であった。これは、固有周期近辺のスペクトルが高くなっていることが要因と推定する。また、相対変位を目標値以下に収めるダンパ抵抗力を配したとき、累積変位量は Taft EW 波を入力した場合の 1.5～3 倍となっていた。累積変位量が最大となった地震波は OS1 波であった。累積変位量の増加に伴い、エネルギー吸収も増加するが、それによる耐久性は実験にて検証する。

ボイラ構造物の相対変位の時刻歴推移を図 12 に示す。全体的に大きく動く時間帯（以降：稼働時）とほぼ動かない時間帯（以降：静止時）に分かれている。本ダンパは、微小な速度から急激に抵抗力を発揮する。そのために、作用する外力が小さければ、ダンパは一次剛性により発生する変位を微小なものとし、外力が大きければ、エネルギー吸収をしながら伸縮するが、このダンパの特徴により稼働時と静止時の分別が生じている。参考として、減衰要素に粘性減衰を採用した Maxwell モデルを用いた解析結果との比較を、図 11 の右図と図 12 に示す。図 11 の右図は、粘性減衰を採用した Maxwell モデルと開発したダンパの応答の比を表す。図 12 より粘性減衰を採用した Maxwell モデルでは、開発したダンパよりも常時稼働し続けることが確認できる。そのために図 11 の右図のように累積変位が過大となる。SZ1 波の結果は、開発したダンパの稼働時と静止時を分別する特徴がよく表れている結果であり、主要動部の揺れが大きくダンパ抵抗力を他地震波より過大に必要とするものの、それ以外の揺れは長時間に及んでも変位を微小化しており、累積変位量が Taft EW 波の 0.85 倍と唯一長周期長時間地震の中で減少側となった。一方で、SZ1 波、CH1 波、OS1 波では、稼働時と静止時を分別する特徴が影響し、残留変位が発生している。但し、開発したダンパは、速度が小さければ小さな抵抗力で稼働する。併せて、ボイラが吊り下げ構造となっていることから復元力を有している。従って、ダンパが残留変位を生じた位置にボイラを留めることはなく、時間を有するもののボイラはゼロ点まで復元すると考えられ、残留変位の影響は少ない。

Fig. 11 Results of analyses by earthquakes with long period component and long duration. The results used earthquake with long period component and long duration are shown in the left upper figure. The right one shows the response ratio of viscous damping/developed damper. V.D. of the label of vertical axis shows viscous damping.

ボイラ構造物の応答加速度は、従来の振れ止め装置を設置した場合と同等程度に留めることを目標としている。現在のプラントは、振れ止め装置を用い、Taft EW 波を入力した時に相対変位が 150mm 以下になるよう設計されていることから、図 9 で示したバイリニアモデルの解析結果がその値となる。その結果は約 3m/s^2 であり、それと比較すると、図 11 の左図に示すように長周期長時間地震の解析結果は、殆どの地震波で同等程度であった。しかしながら、SZ1 波及び CH1 波については、それを超える加速度が発生している。要因は、固有周期近辺のスペクトルが大きいことから共振現象によるものと考えられ、ダンパ抵抗力を増大させて変位を目標振幅以内に収めたものの、その地震力の大きさより加速度の応答が上がったと推定する。スペクトルの形状が同様でその値がやや小さい OS1 波では応答加速度の増大が発生していない。開発したダンパは、前節で示したように従来の振れ止

め装置よりも減衰効果は高く見込めるものの、地震種別によっては応答加速度が増大する可能性があるため、プラント設計時に留意すべき点となる。

Fig. 12 The analytical results of time historic displacement. In Haramachi EW and Sannomaru EW, results of viscous damping are showed jointly. The figures show that the displacement to occur is greatly different.

5. 長周期長時間地震動を考慮したダンパの実験的検証

5・1 変位応答波を用いた载荷試験

5・1・1 試験方法

前章の解析で得られた長周期長時間地震の変位応答波を使用し、開発したダンパの耐久性と解析モデルの再現性を载荷試験によって確認する。载荷試験に用いたダンパは、3章と同様の定格抵抗力 3000kN のダンパとした。長周期長時間地震の変位応答波の他、比較のため Taft EW 波の変位応答波を入力した試験も実施した。Taft EW 波を比較基準とする理由は、現在のプラント設計で用いられる入力波であるからである。試験は、アクチュエータを用いて载荷し、ダンパの抵抗力、変位、表面温度を計測した。図 13 に試験概要図を示す。

Fig. 13 Overview of the loading test.

5・1・2 試験結果

長時間長周期地震の変位応答波を用いた載荷試験における変位と抵抗力の関係を図 14 に示す。変位と抵抗力の関係においては、いずれの波形でもダンパは安定した抵抗力を発生した。温度上昇が高い結果となっていたのは、OS1 波で最大の 48.5°C 、Sannomaru EW 波で 35.2°C であり、これらは Taft EW 波の 1.8~2.7 倍に相当した。この二波の変位応答波試験前後に実施した正弦波による載荷試験の結果を図 15 に示すが、ダンパの変位と抵抗力の関係に変化はない。また、解析モデルとの比較においては、僅かながらに試験結果の方が解析値を下回るものの、解析結果は試験結果をほぼ再現をしている。温度が上昇しているのにも関わらず、抵抗力の変化が少ないことはダンパ抵抗力の温度依存性が低いためであり、この結果から繰返しによっても変化が小さいことが確認できる。なお、条件に挙げた地震波の試験は、1 体のダンパで繰返しして試験を実施した。常温に戻るまでのインターバルは設けているものの、機能の変化は極めて僅かであった。この結果より、大地震後の大きな余震や本震並みの前震があっても本ダンパは機能できることを示した。

Fig. 14 The results of relation between damping force and displacement in the tests used response displacement waves.

Fig. 15 The relation between damping force and displacement before and after the tests of Sannomaru EW and OS1.

5・2 環境温度を考慮した変位応答波試験

開発したダンパはボイラ構造物に取り付けるため、その内部環境温度のなかで長周期長時間地震への性能を発揮する必要がある。そこで3・3節で実施した試験同様に、ボイラ構造物の内部温度を考慮した60℃環境下にダンパを置き、Haramachi EW波、Sannomaru EW波、OS1波の変位応答波にて载荷した。Haramachi波は、条件中の唯一の実地震の観測波であり、EW波はNS波よりも解析上付加したダンパ抵抗力が大きく、且つ応答のRMSで算出した変位量が多いことから条件に選定した。その他二波は前節の試験において、エネルギー吸収が多くダンパの温度上昇が大きかったことから選定した。

抵抗力と変位の関係及びエネルギー吸収の推移を、図16に示す。雰囲気温度が常温よりも高い状況ではありながら、抵抗力は安定して発生している。解析モデルは、3・3節の温度依存性試験で得られた20℃と60℃の二つの回帰式をそれぞれMaxwellモデルの減衰項に採用したモデルを使用した。60℃の回帰式を用いた解析結果と比較すると、試験結果は解析結果とほぼ同等となっている。一方、20℃の回帰式を用いた解析結果の場合、抵抗力及びエネルギー吸収性能の試験結果と解析結果に前述の結果よりも差異が発生する。差異は、20℃の回帰式を用いた解析モデルよりも試験結果の方が、抵抗力、エネルギー吸収性能共に10%前後増加側にある。これは、抵抗力の温度依存性によるものである。しかしながら、20℃の回帰式を用いた解析モデルでも、抵抗力、エネルギー吸収性能共に、試験結果の方が増加側にあることから、構造物設計における変位、加速度評価では安全側評価が可能である。同時に試験結果と解析結果の差異が小さいことから、構造物本体及び取付部設計における応力度評価においても与える影響は小さいと言える。

Fig. 16 The results of tests used response displacement waves of earthquakes with the long period component and the long duration. The upper figures show the relations between the damping force and displacement. The bellow figures show the energy dissipation with time history. The blue line shows experimental results. Orange shows the analytical model of 60℃ and Magenta shows the analytical model of 20℃.

5・3 開発したダンパの耐久性能の簡易評価

近年、本震に加え前震や、大きな余震が数多く発生することから、免震・制振装置の耐久性検討は重要性を増している。特に長周期長時間地震では、継続時間が長いため、免震・制振装置は通常地震よりも多く正負交番の繰返し加振を受ける。この繰返し加振により、一般的な免震・制振装置では抵抗力が低下するが、これは装置が稼働する時に吸収したエネルギーで評価できる損傷及び発熱が要因である。そのため、免震・制振装置の耐久性は、繰返し加振の前後における特性変化と繰返し加振中の抵抗力低下により評価される。繰返し加振前後の特性変化の確認は従来から行われている評価であり、開発したダンパでも前項までにその結果を示した。一方、繰返

し加振中の抵抗力低下の評価は、東北地方太平洋沖地震以降から長周期長時間地震を考慮して行われるようになった。この評価は、継続時間の長い地震において発生する免震・制振装置の抵抗力低下を考慮し、構造物をより安全に設計することを目的としている。実際の耐久性評価の一例として、建築分野でエネルギー吸収性能を有する免震装置を使用する際の、構造物の設計の考え方を下記に示す（日本免震構造協会，2017）。

- ① 構造物の地震応答解析を実施し、免震装置のエネルギー吸収や変位等を算出する。
- ② ①の算出値より、免震装置の抵抗力低下を推測する。
- ③ 免震装置の解析モデルを、抵抗力が低下した場合に置き換える。
- ④ ③を用いて、構造物の地震応答解析を実施し、応答値を評価する。

一方、開発したダンパは、前節までの試験結果に示すように東北地方太平洋沖地震の観測波や南海トラフ沿いの巨大地震を想定した設計用長周期地震動を受けている間にも、抵抗力がほぼ変化しない優れた性能を示した。そこで、本試験結果を更に活用するために、ダンパの定格抵抗力、ダンパの寸法及び地震波に依らず耐久性を評価する手法を提案する。

提案する手法は、一回の地震でダンパが吸収するエネルギーが、これまでに実験でダンパの健全な動作が確認されたエネルギー以下になっているかを確認するものである。ここで、ダンパの定格抵抗力やダンパの寸法に依存しない評価にするため、ダンパが吸収したエネルギーをダンパ内部の粘性流体体積で除した単位体積当たりのエネルギー吸収量を評価に用いた。

また、ダンパの抵抗力は応答速度により変化するため、実験でダンパの健全な動作が確認されたエネルギーの応答速度に着目して整理した。なお、図 17 の左図の Sannomaru EW 波の結果のように、ダンパの稼働時間は地震継続時間の一部である。そこで、応答速度はダンパがエネルギー吸収をした Δt 間におけるダンパの速度の RMS 値（以降：平均速度と呼称）で評価する。また、図 17 の右図の Haramachi NS 波の結果のように、 Δt 間に非常に長い静止時がある場合は、 Δt 間だけでなく稼働時を分割して評価する。例えば、図 17 の右図の Haramachi NS 波では Δt 間に約 30 秒の長い静止時があるため、 Δt_1 間と Δt_2 間に分割して評価した。

Fig. 17 The energy dissipation with time history of Sannomaru EW and Haramachi NS.

単位体積当たりのエネルギー吸収量と Δt 間の平均速度の関係を図 18 に示す。本図は、図 9 や図 16 の試験結果を整理したものである。同図の凡例の Haramachi NS Sep.1 は図 17 の右図の Δt_1 間の値を示し、Sep.2 は Δt_2 間の値を示す。また、(300)は、定格抵抗力が 300kN のダンパの結果を示す。同図に、各平均速度において単位体積当たりのエネルギー吸収量が最大となるプロットを結んだ点線を示す。同線の内側にあれば、ダンパの負荷が実験で確認した範囲にあることを示す。例えば、試験を実施していない寸法のダンパや地震波に対して、地震応答解析を実施し、ダンパが吸収したエネルギーが同線の内側にあれば、ダンパは健全に動作するといえる。

図 18 は、構造物設計において下記に示すように適用できる。

- (1) 構造物の地震応答解析を行い、ダンパのエネルギー吸収、速度を算出する。
- (2) (1)から図 17 に示すエネルギー吸収の時刻歴推移を得て、エネルギー吸収している時間帯 Δt を決定する。
- (3) Δt 間のエネルギー吸収をダンパ内部の粘性流体の体積で除し、単位体積当たりのエネルギー吸収量に換算する。
また、 Δt 間におけるダンパの平均速度を算出する。
- (4) (3)の結果を図 18 にプロットする。結果が点線の内側にあれば、前節までの試験結果同等以下と判断でき、検討した入力地震動では、連続加振の前後でも、連続加振中も抵抗力低下がほぼない評価となる。(3)の結果が図 18 の点線の外側になった場合は、実験でダンパの健全性が確認されていない評価となる。この場合、エネルギー吸収を分散させるためにダンパ本数を増加するか、若しくは実験を実施して抵抗力の低下が発生しないことを確認する必要がある。

以上の手法により、ダンパの定格抵抗力及びダンパの寸法に依存しない評価ができる。また、単位体積当たりのエネルギー吸収量とエネルギー吸収した時間におけるダンパの平均速度の関係をまとめた図 18 は、既往の実験結果の範囲を示すことができる。また、同図はダンパ耐久性評価の指標にすることができる。

Fig. 18 The results between energy dissipation per volume of viscous fluid and average velocity. If analysis of boiler structure is conducted, it is possible to evaluate durability of damper with response displacement waves.

6. 結 言

本研究では、石炭火力発電所のボイラ構造物の耐震性向上を目的に粘性流体ダンパを開発した。本報では、ダンパ抵抗力の理論的検討と長周期長時間地震を考慮した地震応答解析と実験を行い、下記の結果を得た。

- ・理論式を提案し、既往の実験結果と比較した。理論式から求めた抵抗力と試験結果の回帰式から求めた抵抗力を比較すると 3%以下の差異となり、理論式は精度高く試験結果を再現できる。
- ・長周期長時間地震を考慮した解析を行い、開発した粘性流体ダンパは、応答変位や累積変位量を低減させながら、長周期長時間地震に有効に機能することを示した。
- ・長周期長時間地震を考慮した解析から得た変位応答波を用い、載荷試験により粘性流体ダンパの耐久性を確認した。粘性流体ダンパは、東北地方太平洋沖地震の観測波を含む全条件において、安定した抵抗力を示した。
- ・粘性流体の単位体積当たりのエネルギー吸収量と粘性流体ダンパの平均速度の関係は、ダンパの抵抗力や寸法に依存せず、ダンパの繰返し加振のエネルギーの負荷を評価できるものである。また、単位体積当たりのエネルギー吸収量とダンパの平均速度の関係をまとめた図 18 は、既往の実験結果の範囲を示すことができ、ダンパ耐久性評価の指標にすることができる。

以上より、開発した粘性流体ダンパは、大地震の繰返しや長周期長時間地震に対して、ボイラ構造物の更なる耐震性向上を図る制振に適用できる。

文 献

- 相田清, 応和泰行, 丸山直伴, 河村幸太郎, 鈴木浩平, 藤田聡, 千葉敏郎, 弾塑性連結部の剛性分布を最適化したボイラ構造物の制振効果に関する実証実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.698 (2004a), pp. 2817-2821.
- 相田清, 応和泰行, 丸山直伴, 河村幸太郎, 鈴木浩平, 藤田聡, 千葉敏郎, ボイラ構造物弾塑性連結部の振動エネルギー吸収性能, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.690 (2004b), pp. 371-376.
- 相田清, 応和泰行, 丸山直伴, 西田英一, 河村幸太郎, 鈴木浩平, 藤田聡, 千葉敏郎, 実機ボイラ構造物連結部の弾塑性挙動による制振効果の実証実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.676 (2002), pp. 3525-3531.
- Aida, K., Owa, Y., Suzuki, K. and Fujita, S., Evaluation of aseismic reliability of actual boiler structures and a study on design of seismic ties based on proof tests using a large scaled shaking table, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.126 (2004), pp.46-52.
- 相田清, 河村幸太郎, 丸山直伴, 鈴木浩平, 藤田聡, 千葉敏郎, 大型振動台を用いた実証試験に基づく実機ボイラ構造物の耐震信頼性評価, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2000 CD-ROM 論文集, No.613 (2000).
- Aida, K., Kawate, K., Hiyoshi, Y., Kawamura, K. and Fujita, S., Earthquake load reduction effects of boiler structures by high energy absorbing seismic ties, Proceedings of the ASME 2014 PVP, PVP2014-28351 (2014).
- Aida, K., Minagawa, K., Tanaka, G. and Fujita, S., Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants Part2 Evaluation of lifetime, Proceedings of the ASME 2017 PVP, PVP2017-65628 (2017).
- 国立研究開発法人建築研究所, 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ(online), available from <<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>>, (参照日 2017 年 3 月 31 日) .
- 藤田聡, 藤田隆史, 森川尚一, 古屋治, 水津洋二, 高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究: 第 1 報, 高層建物モデルを用いた振動実験と応答解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.565 (1993), pp.2636-2642.
- 藤田聡, 古屋治, 藤田隆史, 水津洋二, 笠原康宏, 寺本隆幸, 北村春幸, 高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究: 第 2 報, ダンパの加力実験と設計に関する考察, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.61, No.585 (1995), pp.1885-1890.
- 藤田聡, 古屋治, 藤田隆史, 水津洋二, 笠原康宏, 寺本隆幸, 北村春幸, 高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究: 第 3 報, ダンパの温度依存性と耐久性に関する考察, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.617 (1998a), pp.86-91.
- 藤田聡, 古屋治, 藤田隆史, 水津洋二, 笠原康宏, 寺本隆幸, 北村春幸, 高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究: 第 4 報, 実大ダンパの加力実験とその制振性能の検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.617 (1998b), pp.92-97.
- 藤田聡, 皆川佳祐, 長田修一, 田中剛, 産業施設を対象とした粘性-摩擦直列ダンパーに関する研究 (ダンパーの構造と基本性能), 日本機械学会論文集, Vol.82, No.838 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00493.
- 国土交通省気象庁, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 ~ 7 年間の地震活動~ (online), available from <<http://www.jma.go.jp/jma/press/1803/08d/1802offtohokueq.pdf>>, (参照日 2018 年 4 月 11 日) .
- 国土交通省気象庁, 報道発表資料「平成 28 年 (2016 年) 熊本地震」について (第 38 報) (online), available from <<http://www.jma.go.jp/jma/press/1605/14a/kaisetsu201605141000.pdf>>, (参照日 2017 年 4 月 14 日) .
- 東日本大震災合同調査報告書編集委員会, 東日本大震災合同調査報告 機械編 (2013), p.49.
- Minagawa, K., Aida, K., Tanaka, G. and Fujita, S., Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants Part3 Evaluation of vibration control performance, Proceedings of the ASME 2017 PVP, PVP2017-65638 (2017).
- 国土交通省, 平成 28 年 6 月 24 日国住指第 1111 号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について (技術的助言) (online), available from <<http://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>>, (参照日 2017 年 5 月 24 日) .
- 中川鶴太郎, レオロジー第 2 版, 岩波書店 (1978), pp.80, 97-100.
- 西田英一, 鈴木浩平, 河之邊浩, 今村正勝, 地震観測波形によるボイラ構造物の動特性同定 (多入力多出力 AR モデルによる同定), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.59, No.557 (1993), pp.73-78.
- 坂井嘉克, 藤田聡, 鈴木重信, 正木信男, 柏崎昭広, 三田倫也, 塑性流動抵抗型エラストマ・ダンパに関する研究 (第一報, 小型モデルによる実験と設計式の開発), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.67, No.655 (2001), pp.604-611.

- Tanaka, G., Minagawa, K., Aida, K. and Fujita, S., Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants Part1 Fundamental analysis and component test, Proceedings of the ASME 2017 PVP, PVP2017-65592 (2017).
- 一般社団法人日本免震構造協会, パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル第3版(2013), pp.438-457.
- 一般社団法人日本免震構造協会, 会誌 MENSIN No.98 (2017), pp.44-52.
- 一般社団法人火力原子力発電技術協会, 東北地方太平洋沖地震火力発電所の被害と復旧調査報告書 (2012), pp.13-14, 47-82.

References

- Aida, K., Owa, Y., Maruyama, N., Kawamura, K., Suzuki, K., Fujita, S. and Chiba, T., Anti-vibration performance proof test for an optimized stiffness distribution of elasto-plastic joint elements for boiler structures, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.70, No.698 (2004a), pp. 2817-2821 (in Japanese).
- Aida, K., Owa, Y., Maruyama, N., Kawamura, K., Suzuki, K., Fujita, S. and Chiba, T., Vibration energy absorbing performance of elasto-plastic joint elements of boiler structures, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.70, No.690 (2004b), pp. 371-376 (in Japanese).
- Aida, K., Owa, Y., Maruyama, N., Nishida, E., Kawamura, K., Suzuki, K., Fujita, S. and Chiba, T., Proof test of anti-vibration effect due to elasto-plastic joint elements of actual boiler structures, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.68, No.676 (2002), pp. 3525-3531 (in Japanese).
- Aida, K., Owa, Y., Suzuki, K. and Fujita, S., Evaluation of aseismic reliability of actual boiler structures and a study on design of seismic ties based on proof tests using a large scaled shaking table, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.126, pp.46-52 (2004).
- Aida, K., Kawamura, K., Maruyama, N., Suzuki, K., Fujita, S. and Chiba, T., Evaluation of aseismic reliability of actual boiler structure based on proof tests using a large scaled shaking table, CD-ROM Proceedings of the JSME Dynamics and Design Conference, No.613 (2000) (in Japanese).
- Aida, K., Kawate, K., Hiyoshi, Y., Kawamura, K. and Fujita, S., Earthquake load reduction effects of boiler structures by high energy absorbing seismic ties, Proceedings of the ASME 2014 PVP, PVP2014-28351 (2014).
- Aida, K., Minagawa, K., Tanaka, G. and Fujita, S., Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants Part2 Evaluation of lifetime, Proceedings of the ASME 2017 PVP, PVP2017-65628 (2017).
- Building Research Institute, Publish a special page of technical paper and data of measure for earthquake with long period component and long duration (on line), available from
<<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>>, (accessed on 31 March, 2017).
- Fujita, S., Fujita, T., Furuya, O., Morikawa, S. and Suizu, Y., Vibration control of high-rise buildings using high-damping rubber damper : 1st report, shaking-table test and response analysis, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.59, No.565 (1993), pp.2636-2642 (in Japanese).
- Fujita, S., Furuya, O., Fujita, T., Suizu, Y., Kasahara, Y., Teramoto, T. and Kitamura, H., Vibration control of high-rise buildings using high-damping rubber damper : 2nd report, loading tests and design formula for cylinder-type high-damping rubber damper, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.61, No.585 (1995), pp.1885-1890 (in Japanese).
- Fujita, S., Furuya, O., Fujita, T., Suizu, Y., Kasahara, Y., Teramoto, T. and Kitamura, H., Vibration control of high-rise buildings using high-damping rubber damper : 3rd report, temperature dependency and durability of cylinder type high-damping rubber damper, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.64, No.617 (1998a), pp.86-91 (in Japanese).
- Fujita, S., Furuya, O., Fujita, T., Suizu, Y., Kasahara, Y., Teramoto, T. and Kitamura, H., Vibration control of high-rise buildings using high-damping rubber damper : 4th report, loading tests of full-size cylinder type high-damping rubber damper and examination of its vibration control performance, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.64, No.617 (1998b), pp.92-97 (in Japanese).

- Fujita, S., Minagawa, K., Nagata, S. and Tanaka, G., Study on viscous-friction series damper for industrial facilities (Mechanism and basic performance of damper), Transactions of the JSME(in Japanese), Vol.82, No.838 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00493.
- Japan Meteorological Agency, Press release of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (the earthquake activity for seven years) (online), available from < <http://www.jma.go.jp/jma/press/1803/08d/1802offtohokueq.pdf> >, (accessed on 11th April, 2018).
- Japan Meteorological Agency, Press release of the 2016 Kumamoto earthquake (volume 38) (online), available from < <http://www.jma.go.jp/jma/press/1605/14a/kaisetsu201605141000.pdf> >, (accessed on 14th April, 2017).
- Joint Editorial Committee for the Report on the Great East Japan Earthquake Disaster, Report on the great east Japan earthquake disaster -mechanical engineering volume- Mechanical Engineers (2013), p.49 (in Japanese).
- Minagawa, K., Aida, K., Tanaka, G. and Fujita, S., Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants Part3 Evaluation of vibration control performance, Proceedings of the ASME 2017 PVP, PVP2017-65638 (2017).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Japan, 24th June 2016 Jyuusi 1111th Countermeasure by the huge earthquake with long period components of the Nankai trough in super high-rises(technical advice) (online), available from <<http://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>>,(accessed on 24th May, 2017).
- Nakagawa, T., Rheology Second Edition, Iwanami Shoten (1978), pp.80, 97-100(in Japanese).
- Nishida, E., Suzuki, K., Kawanobe, K. and Imamura, M., Model identification of boiler plant structures by seismic records (Identification based on a multi-input/output AR model), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.59, No.557 (1993), pp.73-78 (in Japanese).
- Sakai, Y., Fujita, S., Suzuki, S., Masaki, N., Kashiwazaki, A. and Mita, R., Study on plastic flow damper using un-vulcanized rubber (1st Report, Establishment of design formula for the damper using small-scaled models), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.67-655(2001), pp.604-611(in Japanese).
- Tanaka, G., Minagawa, K., Aida, K. and Fujita, S., Research and development of viscous fluid dampers for improvement of seismic resistance of thermal power plants Part1 Fundamental analysis and component test, Proceedings of the ASME 2017 PVP, PVP2017-65592 (2017).
- The Japan Society of Seismic Isolation, Manual for design and construction of passively-controlled buildings (3rd Edition) (2013), pp.438-457(in Japanese).
- The Japan Society of Seismic Isolation, MENSIN No.98 (2017), pp.44-52 (in Japanese).
- Thermal and Nuclear Power Engineering Society, Investigative report on damage and restoration of thermal power plants by the great east Japan earthquake (2012), pp.13-14,47-82 (in Japanese).