

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21011

研究課題名（和文）超巨大地震時の人的被害予測に向けた人間の地震応答解析モデルの構築

研究課題名（英文）Development of Seismic Response Analysis Model of Human Body for Prediction of Human Injury during Huge Earthquake

研究代表者

肥田 剛典（Hida, Takenori）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：60598598

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：今後発生する巨大地震時における人的被害予測を行うためには、人体の地震時挙動を予測可能な解析モデルが必要である。本研究では、人間を振動台上に乗せた振動台搭乗実験を実施し、地震の揺れの最中の被験者の挙動を分析した。これにより得られたデータに基づき、台車型二重倒立振り子により人体の地震応答解析モデルを構築した。このモデルにより、人体頭部の変位や速度だけでなく、足の踏み出しをも評価することが可能である。さらに、頭部傷害基準値を用いて、揺れの最中の人間の負傷に関する検討を行った。また、既往の研究で提案されている地震時の行動難度や家具の転倒率を併せて検討し、地震時の人間の負傷可能性評価法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既往の研究において、地震動のような不規則かつ大振幅の振動にも適用可能で、足の踏み出しも考慮可能な人体の地震応答解析モデルは提案されていなかった。本研究で構築した人体の地震応答解析モデルは、実際の地震時に観測された強震記録を用いた実験に基づいており、人体の頭部の挙動や足の踏み出しも考慮可能である。これによって、地震時の頭部の負傷や転倒の危険性も評価可能である。本研究の成果は、巨大地震時における人的被害予測のみならず、人間の負傷を考慮した建物の耐震設計法の構築に向けた展開も期待できる。その他、例えば昇降機や遊戯施設の安全性評価や、電車の衝突時等の緊急事態における人間の安全性評価にも展開できる。

研究成果の概要（英文）：In order to predict human injury during a huge earthquake, an analysis model of human body that can predict the human behavior during earthquakes is necessary. In this study, we conducted shaking table tests with a human subject. Then, we analyzed the behavior of the human subject during the earthquake shaking. Based on the data obtained by the tests, an earthquake response analysis model of the human body was constructed by a cart-type double inverted pendulum. With this model, it is possible to evaluate not only the displacement and velocity of the human head but also the foot stepping length. In addition, head injury criterion were used to evaluate human injuries during the shaking. Furthermore, we also considered the action difficulty level during the earthquake and the overturning ratio of furniture that proposed in previous studies, and constructed a method for evaluation of the possibility of human injury during earthquakes.

研究分野：建築構造

キーワード：人体 地震 人的被害 振動台実験 姿勢制御 倒立振り子 フィードバック制御 頭部傷害基準

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

これまで発生した被害地震において、多くの人的被害が発生した。特に、建物内における人的被害は、揺れによって人間が転倒したり、家具や什器が転倒してその下敷きになることによる負傷が多い。

近い将来の発生が懸念される南海トラフ地震や首都直下地震等の超巨大地震において、防災対策を講じて死傷者数を低減するためには、揺れに起因する室内の人的被害発生状況を予測することが極めて重要である。

このような背景から、地震時の室内被害予測に関する研究がこれまでに行われてきた。それらの多くは地震時における家具の転倒シミュレーションに関する検討がほとんどであった。これはコンピュータ上で室内の状況を再現し、地震動を入力して家具の転倒状況を再現するものである。しかし、人間の転倒や障害物への衝突等、人間自体の挙動に起因する負傷までを予測するためには、家具の転倒評価だけでは不十分であり、人間の地震時挙動を予測する解析モデルが必要となる。

人的被害の軽減が重要となるのは、一般建物だけではない。例えば、原子力発電所や大型の化学プラント、有毒ガス等の危険物を扱う施設や、鉄道や空港の管制施設、ガスや水道等のインフラ管理施設など、地震時に被害を受けることによって広い地域に甚大な被害を発生させる可能性がある施設においては、管理対象物が広範囲にわたって漏洩する等の甚大な被害の発生を阻止し、都市規模の安全性を確保する必要がある。そのためには人間が適切に管理・制御する必要があり、想定される地震の揺れによってこれらの施設における作業員の負傷可能性を評価し、被害拡大の防止に向けた適切な管理作業を行うことが可能か否かを予測出来れば、減災対策を講じる上で有用である。人間の地震時における安全性の評価を行う上でも、人間の地震時挙動を詳細にシミュレートすることが都市防災につながると言える。

2. 研究の目的

本研究の目的を下記に示す。

- (1) 人間の地震波加振実験に基づく人体の地震時応答の分析
- (2) 地震時における人体の立位姿勢制御メカニズムの解明
- (3) 人間の地震応答解析モデルの構築
- (4) 超巨大地震発生時における人間の負傷評価手法の構築

3. 研究の方法

本研究では、下記の手順で検討を行う。

- (1) 人体の基本的な地震時挙動を検討するため、着座式の可搬型加振機を用いた地震体験実験を実施し、座位時の人体の地震時振動特性を分析する。この際、比較のためにダミー人形に対しても同様の実験を行い、その挙動を比較する。
- (2) 振動台上に人間を乗せた地震波による加振実験（振動台搭乗実験）を実施する。加振の最中の被験者（立位）の挙動をビデオカメラで撮影し、3次元モーションキャプチャーシステムにより被験者の挙動のデータを取得する。そのデータから、地震時における人体の立位姿勢制御メカニズムを分析する。
- (3) 振動台搭乗実験において得られた人体の挙動のデータに基づき、人体の地震応答解析モデルを構築する。解析モデルには、フィードバック制御機構を備えた台車型倒立振子を用いる。
- (4) 構築された解析モデルに様々な地震波を入力し、各地震波における人体挙動を求める。これによって求められた人体頭部の速度から、頭部が障害物に衝突した際の頭部傷害基準値（Head Injury Criterion, HIC）を計算し、負傷可能性を評価する。
- (5) 上記で求めた負傷可能性に加え、既往の研究で評価されている家具の転倒評価法を併せて検討し、地震時の人間の負傷可能性評価手法を構築する。

4. 研究成果

(1) 地震体験実験に基づく人間の地震時振動特性の分析

はじめに、人体の基本的な地震時動特性を検討するため、地震体験実験を実施した。実験は、2016年1月27日に東京大学本郷キャンパス工学部1号館で実施した。実験状況を図1に、平面図を図2に示す。被験者は20歳代の男性である。なお、本実験では比較のためにダミー人形も用いた。2次元モーションキャプチャによって人体と加振機の挙動を記録するため、被験者および加振機にマーカーを貼付した。

ビデオカメラAで撮影した加振中の動画から、モーションキャプチャによって加振機（図1中のP2点）および被験者の頭部（図1中のP3点）のマーカーの水平方向における変位波形を抽出して遠近補正を行ったのち、5 Hzのハイカットフィルタをかけて時間で2階微分して絶対加速度を求めた。

ダミー人形および被験者の、JR 鷹取波入力時における時変周波数応答関数、減衰定数の時刻変動および加振機の加速度時刻歴波形（人体への入力波）を図3に示す。時変周波数応答関数は時々刻々の応答倍率を表すものであり、逐次部分空間法^①を用いて同定した。同定に際しては、加振機の絶対加速度を入力とし、被験者の頭部の絶対加速度を出力とした。

ダミー人形の卓越振動数は 4 Hz 程度、人体の卓越振動数は 1 Hz 程度であることがわかる。ダミー人形の減衰定数は加振時 0.5~3%程度と低い値でほぼ一定であるのに対し、人体の減衰定数はダミー人形より高い値で時々刻々変化している。入力波の主要動の最中において、被験者の卓越振動数における応答倍率は小さく減衰定数は大きい。入力波の加速度振幅が小さくなるにつれて応答倍率は大きくなり、減衰定数が低下する様子が見受けられる。このように、ダミー人形の振動特性と人間のそれは異なった。これは、ダミー人形は主に自動車の衝突実験に用いられるもので、人体の振動特性を再現することが目的ではないためと推察される。

これらのことから、地震時における人間挙動を検討するため、例えば振動台搭乗実験を実施する際、被験者の代わりにダミー人形を用いることは出来ないことが分かった。

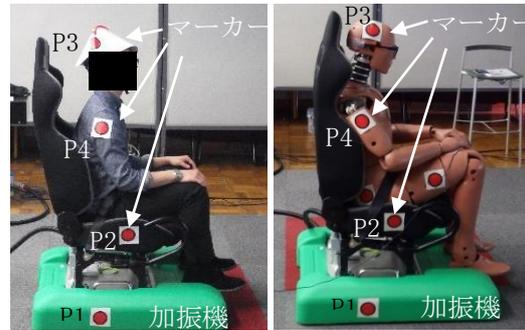
(2) 振動台搭乗実験に基づく人間の地震時立位姿勢制御メカニズムの分析

人間の立位時の地震時振動特性を分析するため、振動台搭乗実験を実施した。実験の状況を図 4 に示す。実験は東京大学柏キャンパスの千葉実験所において実施した。振動台のサイズは 5m×5m で、水平 2 軸加振が可能である。振動台上の外周に鋼製単管パイプを用いて手すりを構築し、手すりの上部に 6 台のビデオカメラを設置して加振中の被験者の挙動を撮影した。

被験者は 24 歳の男性である。被験者にはヘルメットを被せ、肘、掌、腰および膝にプロテクタを装着させた。モーションキャプチャにより身体各部位の挙動を記録するため、ヘルメット上部、両肩、両肘、両手首、腰の左右、両膝、両足の踝および足の甲側部に球形発泡スチロール製のマーカー（直径 35 mm）を貼付した。床反力を計測するため、被験者の下にフォースプレートを設置した。

実験で得られたデータに基づき、人体の地震時挙動を分析した。人間の地震時立位姿勢制御メカニズムの模式図を図 5 に示す。地震の揺れによってバランスを崩した際、人間は足を踏み出して支持基底面 (Base of Support, BoS) を広げ、重心位置 (Center of Gravity, CoG) に対して床反力中心 (Center of Pressure, CoP) の位置をオーバーシュートさせる。これによって、傾斜した身体を起こす反力を発生させて姿勢を修正していることが明らかとなった。

(3) 人体の地震応答解析モデルの構築 振動台搭乗実験で得られたデータに基



a) 被験者 b) ダミー人形
図 1 地震体験実験の状況

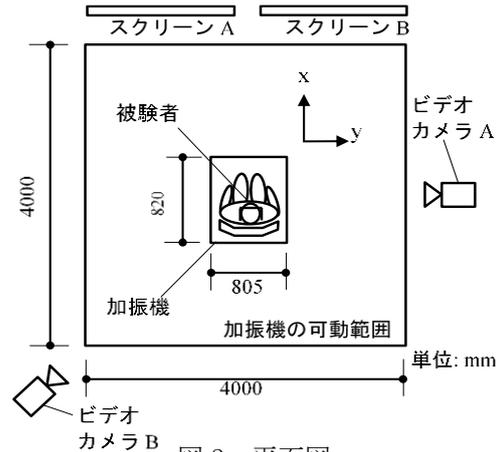


図 2 平面図

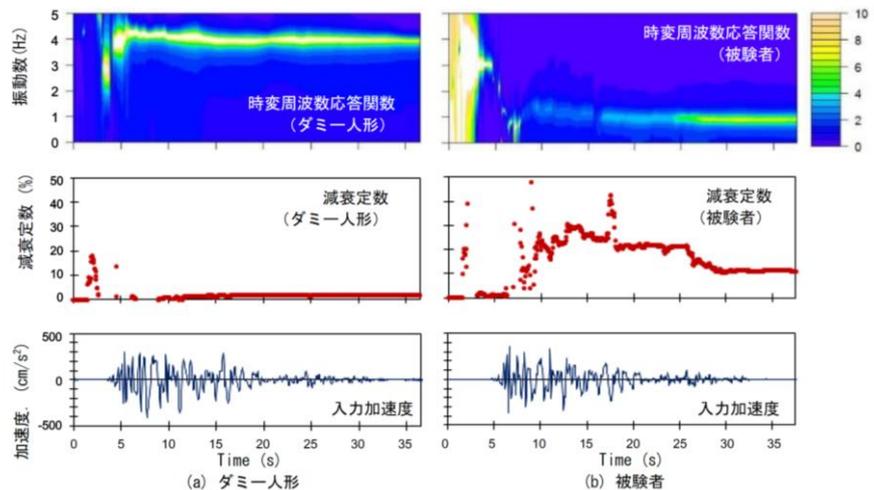


図 3 ダミー人形と被験者の時変振動特性

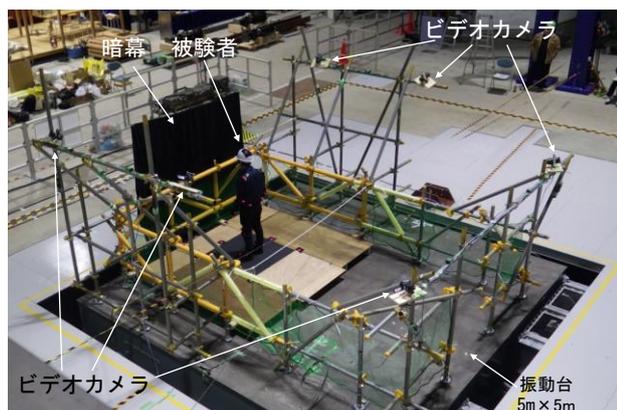


図 4 振動台搭乗実験の状況

づき、人体の地震応答解析モデルを構築した。解析モデルを図6に示す。本研究では台車型二重倒立振子により人体をモデル化した。台車型にすることで、足の踏み出しによる床反力中心(CoP)の大幅な変位を考慮することが出来る。また、腰部のトルク制御を考慮しない場合と考慮した場合のモデルを用いて両者の解析精度を比較した。

本解析モデルの解析結果と振動台搭載実験における被験者の挙動を比較して図7に示す。頭部の床に対する相対速度および相対変位と、床反力中心(CoP)の相対変位の時刻歴波形を実験結果と比較した。その結果、腰部トルク制御を考慮しない場合に比べ、考慮した場合の方が予測精度が高いことが明らかとなった。

(4) 頭部傷害基準値を用いた人間の負傷評価

次に、地震時における人間の負傷の評価法について検討した。

地震の際、人体の頭部の変位が大きいほど、周囲の障害物に衝突するリスクが高まる。また、障害物に衝突する際の頭部の速度が大きいほど深刻な負傷につながりやすい。さらに、床反力中心(CoP)の変位が大きいほど人間がよろめく範囲が広く、例えば高所での狭いスペースや階段等で足を踏み外し、転倒や転落に繋がるリスクが上昇する。これらを考慮し、構築した人体の地震応答解析モデルを用いて、頭部傷害基準値(Head Injury Criterion, HIC)および頭部とCoPの最大変位を評価することにより人体の負傷を試算した。

波形は2007年新潟県中越沖地震時に柏崎刈羽原子力発電所で観測された強震記録に加え、1995年兵庫県南部地震時の観測記録(JMA神戸NSおよびJR鷹取NS)、2016年熊本県地震時の観測記録(KiK-net益城EW)、1968年十勝沖地震時の観測記録(八戸NS)を用いて解析を行った。算出された頭部変位およびCoP変位の最大値と、頭部の最大速度から求めたHICを図8に示す。

八戸では頭部およびCoPの相対変位は極めて小さい。JMA神戸では頭部およびCoPの相対変位は40cm以下で、HICは軽度の負傷(Minor injury)の確率が50%となるレベルを下回る。一方、JR鷹取およびKiK-net益城では頭部およびCoPの相対変位は60cmを超え、HICは800程度と極めて高く、頭蓋骨骨折や意識喪失を伴う負傷(Moderate injury)の確率が50%となるレベルを大きく超えている。

このように、地震動の特性により負傷の可能性が著しく異なる。本研究で構築した人体の地震応答解析モデルを用いれば、負傷を定量的に評価し比較することが可能となることが分かった。

(5) 地震時負傷可能性評価法の提案

最後に、地震時における人間の負傷評価手法を構築する。

人体の地震応答解析モデルに様々な振幅と振動数の正弦波を入力してHICおよびCoP変位を求め、それらを床応答の最大加速度と振動数に関連付けてまとめたものを図9に示す。同図には既往の研究において提案されている家具の転倒率²⁾を用いて求めた、本棚、タンス、ダイニン

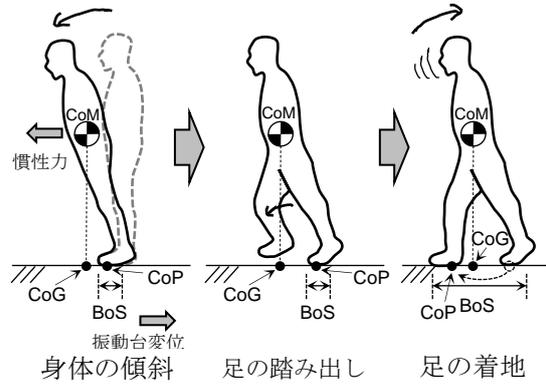


図5 人間の地震時立位姿勢制御メカニズム

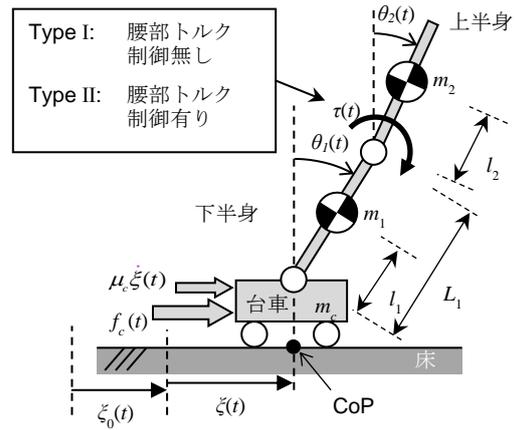
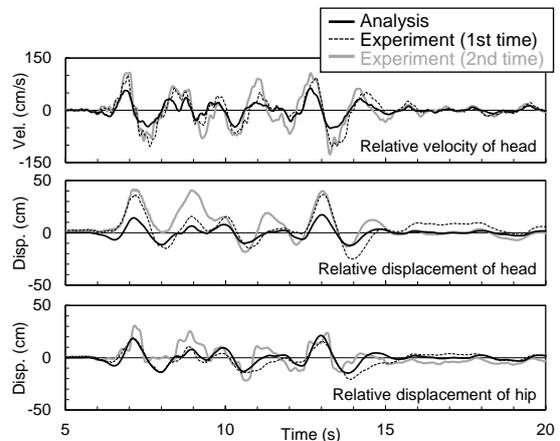
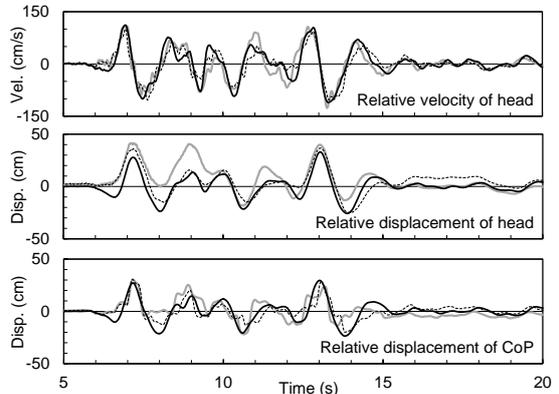


図6 人体の地震応答解析モデル



a) 腰部トルク無し



b) 腰部トルク有り

図7 人体の地震応答解析モデルの解析結果と実験結果の比較

グテーブルの転倒確率が 50%となる曲線も併記している。本研究ではこれらの図をまとめて地震時負傷可能性評価曲線として提案した。

本研究では、この図を用いた地震時の人間の負傷可能性を考慮した建物設計を提案する。例えば、設計対象の床応答の最大加速度が 7m/s^2 、振動数が 0.3Hz である場合、頭部の負傷度は Fatal/Critical であり、CoP 変位は 1m 以上となる。さらに、家具の転倒も同時に発生する可能性が高い。廊下やキッチンのような壁等との距離が近い空間では負傷する可能性が高いと考えられるため、床応答最大加速度を低減することが望ましいと評価される。

一方、設計対象の床応答の最大加速度が 7m/s^2 で振動数が 1.5Hz である場合、負傷度は Minor で、CoP 変位は 0.2m 程度である。背の高い本棚等は転倒する危険性があるものの、CoP 変位が小さいことから、揺れの最中の保身行動をとることは比較的容易であると評価される。そのため、この場合には人間が負傷する危険性は低いと考えられる。

以上のように、本研究で提案した人間の地震時負傷可能性評価曲線を用いることで、人間の負傷を考慮した上での建物の耐震性能を決定することが可能となる。

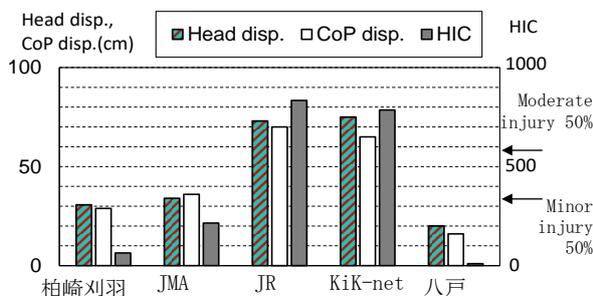


図 8 頭部および CoP の最大相対変位と HIC

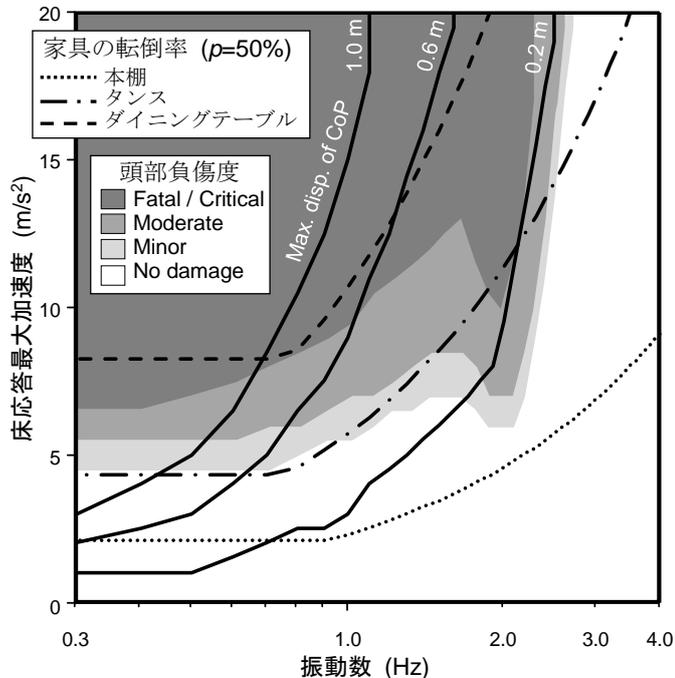


図 9 地震時負傷可能性評価曲線

(6) まとめ

本研究では、地震体験実験及び振動台搭乗実験を実施し、人間の座位時および立位時の振動特性を分析した。その分析結果から、地震時における人体の立位姿勢制御メカニズムを解明した。さらに、振動台搭乗実験における被験者の挙動データに基づいて、人体の地震応答解析モデルを構築した。その解析モデルに対して、様々な地震波を入力して求めた頭部の速度から、頭部が障害物に衝突した場合の頭部傷害基準値 (HIC) を求め、負傷度を試算した。最後に、人体モデルを用いて求めた HIC および床反力中心 (CoP) の最大変位と、既往の研究で提案されている家具の転倒率評価法を統合してまとめ、人間の地震時負傷可能性評価曲線を提案した。

<引用文献>

- ① H. Oku and H. Kimura (1999): A Recursive 4SID from the Input-Output Point of View, Asian Journal of Control, 1(4), 258-269.
- ② 金子美香, 林康裕: 剛体の転倒率曲線の提案, 日本建築学会構造系論文集, No. 536, pp. 55-62, 2000. 10

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 肥田剛典, 大野敦史, 糸井達哉, 高田毅士: 地震時人的被害予測に向けた人体の地震応答解析モデルの構築: 振動台搭乗実験に基づく台車型倒立振り子モデルによるシミュレーション解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 755 号, pp. 17-27, 2019. 1

[学会発表] (計 13 件)

- ① 肥田剛典, 大野敦史, 糸井達哉, 高田毅士: 二重倒立振り子による人体の地震応答解析モデルの構築と地震時負傷予測法の提案, 2018 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 449-452, 2019. 3
- ② 肥田剛典, 大野敦史, 糸井達哉, 高田毅士: 振動台搭乗実験に基づく人体の地震応答解析モデルの構築 - その 2 人体の地震応答解析モデル -, 日本建築学会大会学術講演梗概集,

pp. 565-566, 2018. 9

- ③ 大野敦史, 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士: 振動台搭乗実験に基づく人体の地震応答解析モデルの構築 -その1 人体挙動の再現性と床反力中心との関係性の考察-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 563-564, 2018. 9
- ④ 伊東一輝, 肥田剛典, 高田毅士: 2007年新潟県中越沖地震時における柏崎刈羽原子力発電所運転員のインタビュー調査に基づく行動阻害要因に関する分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 573-574, 2018. 9
- ⑤ 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士: 原子力プラントの包括的安全性向上のための地震時クリフエッジ回避技術の開発 -その10: 人間のクリフエッジ評価-, 日本原子力学会2017年秋の大会, 2017. 9
- ⑥ 大野敦史, 割田聖洋, 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士: 振動台搭乗実験に基づく人体の地震応答解析モデル構築に向けた基礎的検討 ZMPと姿勢保持方略の関係の分析, 日本建築学会大会, 広島, 2017. 8
- ⑦ T. Takada, T. Itoi, T. Hida, K. Muramatsu, H. Muta, O. Furuya, K. Minagawa, H. Yamano, and A. Nishida: Development of Seismic Countermeasures Against Cliff Edges for Enhancement of Comprehensive Safety of Nuclear Power Plants, -PART 1: Conceptual study on identification and avoidance of cliff edges of NPPs against earthquakes-, SMiRT-24, 2017. 8
- ⑧ T. Hida, S. Warita, T. Itoi, and T. Takada: Development of Seismic Countermeasures Against Cliff Edges for Enhancement of Comprehensive Safety of Nuclear Power Plants, -PART 5: Experimental analysis of human body against seismic motions-, SMiRT-24, 2017. 8
- ⑨ Takenori Hida, Seiyo Warita, Tatsuya Itoi, and Tsuyoshi Takada: Study on Seismic Assessment of Human Based on Shaking Table Tests, PSAM Topical conference, 2017. 6
- ⑩ 肥田剛典, 高田毅士, 糸井達哉: 原子力プラントの包括的安全性向上のための地震時クリフエッジ回避技術の開発 その5 地震時人間挙動の検討, 日本原子力学会2016年秋の大会, 2016. 9
- ⑪ 肥田剛典, 割田聖洋, 糸井達哉, 高田毅士: 地震体験実験に基づく人間の揺れの体感と時変振動特性に関する研究, 日本地震工学会第12回年次大会梗概集, 2016. 9
- ⑫ 肥田剛典, 割田聖洋, 糸井達哉, 高田毅士: 地震体験実験に基づく人体の地震応答解析モデルの構築に向けた基礎的検討 -その1 実験概要-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2016. 8
- ⑬ 割田聖洋, 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士: 地震体験実験に基づく人体の地震応答解析モデルの構築に向けた基礎的検討 -その2 人体の時変応答特性-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2016. 8

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

<http://risk.arch.t.u-tokyo.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。