

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02399

研究課題名(和文) ヒトの神経系姿勢制御モデルに基づく超巨大地震時の転倒による死傷メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of Mechanisms of Death and Injury by Falling During Massive Earthquake Based on Postural Control Model Considering Neural System of Human

研究代表者

肥田 剛典 (Hida, Takenori)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：60598598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超巨大地震時におけるヒトの姿勢制御メカニズムについて検討するために、ヒトを振動台に乗せて地震波による加振を行う振動台搭乗実験を行い、台車型二重倒立振子に基づくヒトの地震応答解析モデルを構築した。次に、構築されたモデルに様々な地震動を入力し、地震時におけるヒトの転倒による死傷メカニズムを解明した。また、構築した人体モデルを用いて、地震時における建物内での人間転倒の有無や、家具や壁等との衝突に起因する負傷の程度を評価するための手法を提案した。その結果から、設計クライテリアを満足した建物においても、地震時に人間に対して重度の負傷が生じる可能性があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震等の災害時における人間の死傷可能性の評価を行うためには、その状況を再現した実験を行うことが必要となるが、被験者の安全を最優先に考えるべきであり、実験により人間の死傷に関するデータを得ることは出来ない。これに対し、本研究で構築した人体の地震応答解析モデルを用いることで、コンピュータ内で人的被害をシミュレートすることが可能となる。本研究で得られた成果は、超巨大地震時における人的被害予測等の防災面での利用のみならず、例えば昇降機や遊戯施設、電車等の乗り物の衝突・落下時における人体への影響の検討や安全性の確認にも展開可能であり、様々な状況下での外乱作用時における人命確保対策への応用が期待出来る。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to investigate the human postural control mechanism during a megathrust earthquake, we conducted a shaking table test in which a human is placed on a shaking table and vibrated by a seismic wave. Then, a seismic response analysis model was constructed based on the human behavior data observed from the tests. Next, we input various seismic motions into the constructed model and elucidated the mechanism of death and injury caused by human falls during an earthquake. We also proposed a method for evaluating the human falls in a building during an earthquake and the degree of injury caused by collisions with furniture and walls, using the constructed human body model. From the results, it was clarified that even in a building that satisfies the design criteria, serious injuries to humans may occur during an earthquake.

研究分野：建築構造・防災

キーワード：地震 室内被害 人的被害 転倒 死傷 振動台実験 倒立振子 フィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

これまで発生した被害地震時において、地震の揺れの最中の転倒や物への衝突による人的被害が数多く報告されている。地震が発生した際、化学プラントや原子力発電所等の重要構造物においては、地震により事故が生じた場合、運転員は有害物質漏洩防止等のための事故後対応を行うことが要求される。しかし、地震の揺れによって作業員が負傷した場合、事後対応が困難となり、事故による被害がさらに拡大し、危機的状況を招く危険性がある。また、今後の発生が危惧されている南海トラフ地震や首都直下型地震等、これまでに経験したことのない超巨大地震時における室内人的被害の予測を行う上でも、ヒトの地震時挙動と転倒・死傷のメカニズムを解明することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、超巨大地震時におけるヒトの姿勢制御メカニズムについて検討するために、ヒトを振動台に乗せて地震波による加振を行う振動台搭乗実験を行う。この実験によって、揺れの最中における被験者の身体各部位や床反力中心の挙動の関係を分析する。

地震の揺れを受けたヒトの転倒による死傷可能性の評価を行うためには、ヒトが転倒に至る際の地震時挙動のデータを得る必要がある。しかし、振動台搭乗実験においては被験者の安全を最優先に考えるべきであるため、実験により被験者の死傷に関するデータを得ることは不可能である。そこで本研究では、振動台搭乗実験データに基づき、ヒトの地震応答解析モデルを構築する。構築されたモデルに様々な地震動を入力し、地震時におけるヒトの転倒による死傷メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

振動台搭乗実験で用いる振動台は東京大学生産技術研究所のものを利用し、入力波は実地震時に様々な建物内で観測されたものを用いる。振動台上の外周に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、3D モーションキャプチャにより被験者の身体各部位の挙動を求める。被験者の床反力を計測するため、振動台上にフォースプレートを設置する。フォースプレートのデータから求められるヒトの床反力中心と、被験者の重心の動揺および振動台の挙動との関係から、ヒトの地震時転倒メカニズムを解明する。

次に、振動台搭乗実験のデータに基づき、ヒトの地震応答解析モデルを構築する。ヒトを台車型二重倒立振子でモデル化することで、揺れの最中の足の踏み出しや転倒までの挙動を解析することが可能となる。立位姿勢制御機構にはヒトの神経系を模擬したフィードバック制御器を用いる。振動台搭乗実験における被験者の挙動と整合するようにフィードバックゲインを定める。このようにして構築されたヒトの地震応答解析モデルを用いて、どのような地震タイプ・建物特性等においてヒトの転倒・死傷可能性が高くなるのかを検討する。建物の構造種別(RC造、S造、木造)や高さ(低・中層、超高層)を様々な設定した建物の地震応答解析を行い、得られた床応答波形をヒトの地震応答解析モデルに入力する。これによってヒトの転倒を評価し、さらに転倒時に頭部に生じる衝撃加速度から頭部傷害基準値(Head Injury Criterion, HIC)を求め、人間の死傷可能性を評価する。また、これまでにない超巨大地震を想定した波形も用いることで、ヒトが耐えられる地震動の限界を見極める。

4. 研究成果

(1) 振動台搭乗実験に基づく人体モデルの構築

振動台搭乗実験の様子を図1に示す。実験は上述の手順で実施し、揺れの最中の人体挙動のデータを収集した。

本研究で構築した人体の地震応答解析モデル(以降、人体モデル)を図2に示す。このモデルでは二本の剛体の振子により上半身と下半身を模擬し、台車によって足の踏み出しによる床反力中心(Center of Pressure, CoP)の大幅な移動も考慮可能とした。本研究では、このモデルに対し、上半身と下半身を繋ぐ腰の連結部にダッシュポットと後方の腰の反りを制限するための回転バネを設置した。

振動台搭乗実験の被験者と人体モデルの姿勢を比較するため、両者の姿勢のスナップショットを図3に示す。10秒、13秒付近において、被験者の姿勢は腰部を後方に突き出した「<」を描く様相を呈している。ただし、それ以外の時間帯では被験者はほぼ直立姿勢を保ってお

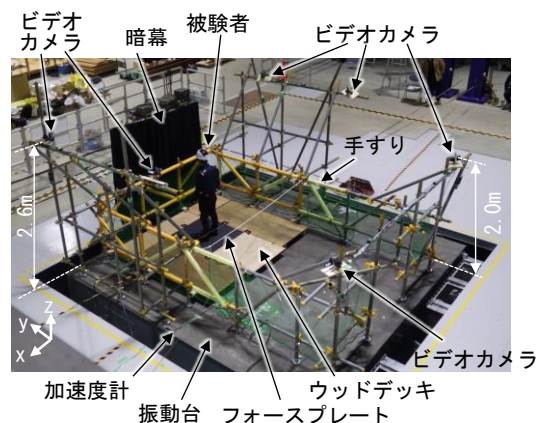


図1 振動台搭乗実験

り、腰部を前方に突き出すような「>」の様相を呈する姿勢をとることはない。人体モデルの姿勢も被験者と同様の傾向を示しており、人体の前後方向の挙動の非対称性を再現できている。このことから、人体の立位姿勢時における本解析モデルの妥当性が示された。

(2) 地震人間転倒評価ダイアグラムの構築

地震時における人間の転倒評価手法を構築するため、構築した人体モデルに正弦波を入力した際の同モデルの転倒の有無について検討した。入力波は正弦波とし、周期と振幅を様々に変化させて用いた。人間の転倒の有無は、人体モデルの頭部または腰部が床面に接触することで判定することとした。

解析結果を地震時の人間転倒評価ダイアグラムと呼称し、図4に示す。これを用いることで、地震時の床応答卓越周期や振幅レベルから、簡便に人間の転倒の有無を評価することが可能となった。

(3) 人体挙動の評価例

RC造超高層建物を例に、1968 Hachinohe NS 入力時における床に対する人体のCoPの最大相対変位、頭部の最大相対変位および頭部の最大相対速度の高さ分布を図5に示す。

頭部変位は特に高層階で極めて大きくなっており、頭部が室内の周囲の障害物に衝突する危険性が高くなる。上層階付近における最大頭部速度は、HICにより評価した負傷度がModerateに対応する速度を超えている。特に最上階における最大頭部速度は負傷度がCriticalとなる速度を超えており、万が一人体の頭部が障害物に衝突した場合には、致命的な傷を負う可能性もあることが示唆される。

建物の最大層間変形角が全ての階で1/100 radを下回っていたにもかかわらず、特に上層階で人間の負傷可能性が極めて高くなっていることから、超高層建物の設計において、層間変形角が設計クライテリアを下回ることを確認するのみでは、建物の地震時安全性評価としては不十分であることを示唆していることが明らかとなった。

(4) 地震時室内人的被害シミュレーション

人間と家具の地震時挙動を考慮した室内人的被害を評価するため、物理エンジンをを用いて室内地震シミュレーションを行った。その結果の例を図6に示す。室内モデルには建物モデルの床応答絶対変位のEW成分とNS成分を入力した。人体モデルは窓側から玄関に向かって歩行させた。30階では家具との衝突は生じず玄関まで到達したが、停止できずにドアに衝突した。1階では歩行を開始する前に家具が転倒して人体と衝突した。

このように、本研究で構築した人体モデルを用いた室内地震被害シミュレーション法は、地震時人的被害評価とその低減対策策定のための極めて有効かつ強力な解析手法となり得るものである。

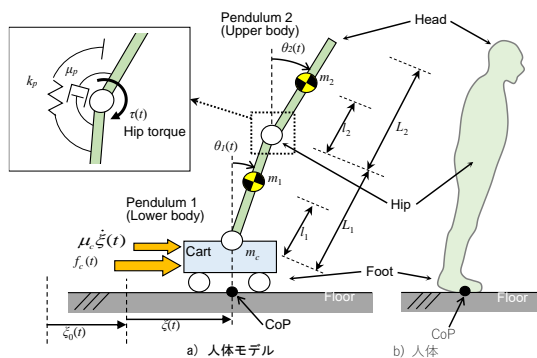


図2 人体の地震応答解析モデル

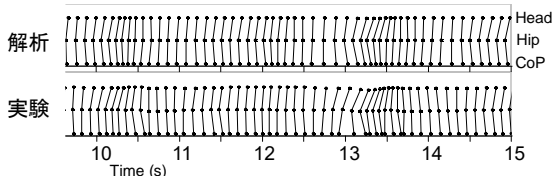


図3 実験と解析の姿勢のスナップショット

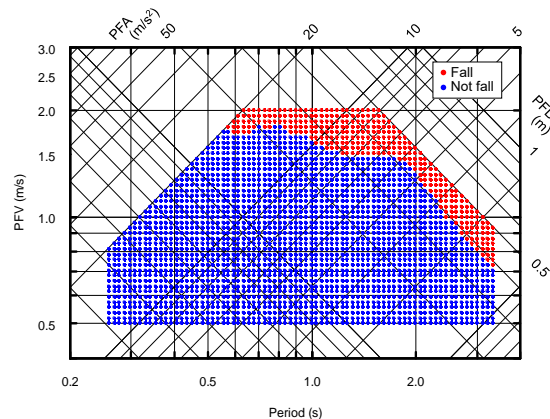


図4 地震時の人間転倒評価ダイアグラム

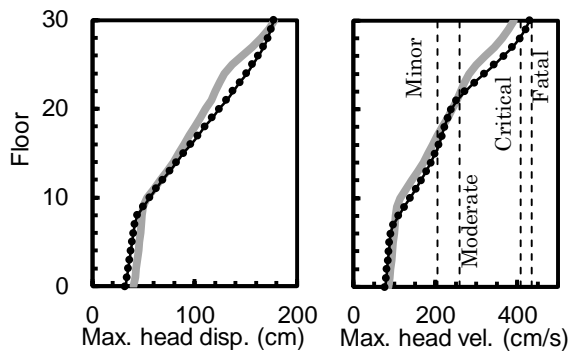


図5 地震時における人体の最大応答の高さ分布 (RC造超高層建物, 1968 Hachinohe NS 入力時)

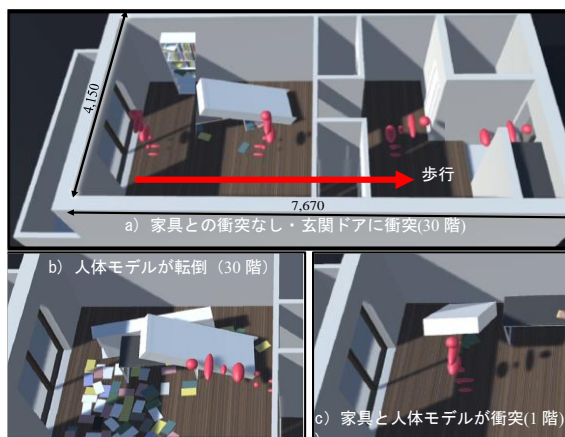


図6 振動台搭載実験の模式図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 HIDA Takenori, KARATSU Hiroki, NAGANO Masayuki, ITOI Tatsuya, TAKADA Tsuyoshi	4. 巻 85
2. 論文標題 EVALUATION OF INJURY IN SUPER HIGH-RISE BUILDING DURING EARTHQUAKE BASED ON NONLINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS MODEL OF HUMAN BODY	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1263 ~ 1273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.1263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 KARATSU Hiroki, HIDA Takenori, NAGANO Masayuki	4. 巻 86
2. 論文標題 EVALUATION OF HUMAN RESPONSES TOWARD INJURY PREDICTION IN SUPER HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS EXCITED BY PULSE-LIKE GROUND MOTIONS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1056 ~ 1067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.1056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 MATSUMOTO Yuma, HIDA Takenori, TAKADA Tsuyoshi, ITOI Tatsuya	4. 巻 86
2. 論文標題 FUNDAMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS MODEL OF HUMAN BODIES CONSIDERING INDIVIDUAL DIFFERENCES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1144 ~ 1155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.1144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 ITO Kazuki, HIDA Takenori, ITOI Tatsuya, TAKADA Tsuyoshi	4. 巻 85
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF EVALUATION METHODOLOGY OF HUMAN INJURY DURING EARTHQUAKE BASED ON SEISMIC RESPONSE ANALYSIS MODEL OF HUMAN BODY	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 159 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.159	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 HIDA Takenori, OHNO Atsushi, ITOI Tatsuya, TAKADA Tsuyoshi	4. 巻 84
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS MODEL OF HUMAN BODY BY CART-TYPE DOUBLE INVERTED PENDULUM MODEL FOR PREDICTION OF HUMAN INJURY DURING EARTHQUAKE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1377 ~ 1387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.1377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 連 惇, 肥田剛典, 松本雄馬, 糸井達哉
2. 発表標題 人体の地震応答解析モデルに基づく建物内の地震時人間転倒評価
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 唐津啓樹, 肥田剛典, 永野正行
2. 発表標題 パルス性地震動入力時の超高層集合住宅における負傷予測に向けた人体応答の簡易評価法
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 唐津啓樹, 肥田剛典, 永野正行
2. 発表標題 人体の非線形地震応答解析モデルを用いた超高層建物の地震時負傷評価法 その2 2016年熊本地震のデータによる簡易負傷評価法の検証
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 肥田剛典, 唐津啓樹, 永野正行, 糸井達哉, 高田毅士
2. 発表標題 人体の非線形地震応答解析モデルを用いた超高層建物の地震時負傷評価法 その1 人間の簡易負傷評価法の提案
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本雄馬, 肥田剛典, 高田毅士, 糸井達哉
2. 発表標題 個人差を考慮した人体の非線形地震応答解析モデルの構築
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 連惇, 松本雄馬, 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士
2. 発表標題 振動台搭乗実験に基づく人体の地震時転倒可能性評価に向けた立位姿勢保持に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Hida, T. Itoi, and T. Takada
2. 発表標題 Evaluation Method of Human Injury During Earthquake Based on Seismic Response Analysis Model of Human Body
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, 17WCEE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Matsumoto, T. Hida, T. Takada and T. Itoi
2. 発表標題 Seismic Fragility Analysis of Human Injury Using Seismic Response Analysis Model of Human Bodies
3. 学会等名 The Seventh Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications, APSSRA2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 肥田剛典, 大野敦史, 伊東一輝, 糸井達哉, 高田毅士
2. 発表標題 人体の地震応答解析モデルに基づく地震時負傷予測手法の構築 その1 人間の地震時頭部負傷スペクトルの提案
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊東一輝, 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士
2. 発表標題 人体の地震応答解析モデルに基づく地震時負傷予測手法の構築 その2 人間の負傷を考慮した耐震設計に向けて
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 肥田剛典, 糸井達哉, 高田毅士
2. 発表標題 地震時安全確保のための建物性能設計に向けた人間負傷評価法の提案
3. 学会等名 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takenori Hida, Tatsuya Itoi, Tsuyoshi Takada
2. 発表標題 Shaking Table Tests for Development of Seismic Response Analysis Model of Human Body for Estimation of Injury During Earthquake
3. 学会等名 54th UK Conference on Human Responses to Vibration (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

茨城大学 建築構造・防災研究室 http://dprl.civil.ibaraki.ac.jp/ 東京大学系井研究室 http://risk.arch.t.u-tokyo.ac.jp/old/research.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高田 毅士 (Takada Tsuyoshi) (10302762)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・安全研究・防災支援部門 リスク情報活用推進室・室長 (82110)	振動台搭乗実験の実施
研究分担者	系井 達哉 (Itoi Tatsuya) (60393625)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	振動台搭乗実験の実施
研究分担者	永野 正行 (Nagano Masayuki) (60416865)	東京理科大学・理工学部建築学科・教授 (32660)	建物の地震応答解析の実施

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------