

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420570

研究課題名(和文) リニアモーター振動台を用いた没入型強震時室内状況再現による不安度の定量化

研究課題名(英文) Quantification of anxiety using the shaking table test that reproduced the indoor situation by the virtual reality during the strong motion

研究代表者

高橋 徹 (TAKAHASHI, Toru)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10226855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：まず、主要設備であるリニアモーターを用いた簡易振動台の運転制御方法を、変位制御から加速度制御に変更した。これに際し、モーションコントロールボードの交換を行い、運転制御プログラムも再構築した。次に「没入型強震時室内状況再現」のためのCG作成と、振動台との同期動作を試み、ヘッドマウントディスプレイの進歩にも対応して、顔の動きに対応したCGをリアルタイムで作成するシステムを構築した。最後に、これらを同期させた振動台実験を行い、強震時の不安度に関する定量的なデータをアンケートと生体反応計測により収集した。

研究成果の概要(英文)：Firstly, we changed the control method of our shaking table from displacement control to acceleration control. By the development, we got more natural acceleration and velocity time history. Secondly, we developed motion CG during strong motion with head-mounted display. Finally, we conducted experimental study with 17 examinees and collected data of anxiety and biological reaction.

研究分野：建築構造学

キーワード：振動台実験 ヘッドマウントディスプレイ 家具転倒 強震 生体情報

### 1. 研究開始当初の背景

従来、構造物の耐震設計は、構造物本体の健全性を指標として行われてきた。これに対し研究代表者らは居住者の避難可能性や不安度を指標とした設計規範の考え方の可能性を提案してきており、これまでに1次元振動に対する行動難度スペクトル、不安度スペクトルなどを提案してきた。近年、フロアレスポンスを設計規範として考慮する動きが盛んになってきているが、研究代表者らの研究はその先駆的なものである。本研究では、平成22年度～平成24年度に実施した基盤研究(C)「強震を受ける室内での人間行動・知覚限界から設計規範を考える基礎的研究」による成果を拡張し、この研究で設置した振動台の制御をより実際の強震動に近い形になるように滑らかにすることと、視覚環境を実際の室内にいるように模擬した状態で加振することで、より強震時の心理状態に近づけてデータ蓄積する必要がある。

### 2. 研究の目的

#### (1) X-Y スライダ型 2次元簡易振動台制御ソフトの開発

リアルタイムOSによる精緻な制御により、従前よりもスムーズな振動台の制御を行えるようにすると共に、別途作成済みの家具転倒状況を再現した室内環境再現CGとの自動同期再生を可能とする制御ソフトを開発し、以下の研究に供する。

#### (2) 高精細ヘッドマウントディスプレイを用いた強震時の人間の知覚に関する検討

応募者らにより平成22年度から実施された実験では、別途作成した強震時の室内状況再現CGムービーを、短焦点プロジェクタを用いてスクリーンに投影させていたが、高振動数時にスクリーンが共振してCGの再現性が落ちるといった問題が発覚した。そこで本研究ではここ数年で高精細化が進歩したヘッドマウントディスプレイを採用し、実際にそのような状況下で揺れの怖さをどのように感じるのか、脈拍や呼吸、動き、さらには事後のアンケート調査などを通じて明らかにしていく。

これらの計測・調査を通じて、一般的な人間の許容できる室内の揺れの程度を定量的に導き出し、人間側に立脚した設計規範の確立への一過程となることをめざす。

#### (3) 人間行動と知覚限界に基づく設計規範の提案

従来、建築物の設計規範は主たる荷重、即ち一般の建物においては地震時に対して、建築物の供用期間に稀に起きるような地震に対してはほぼ健全であり、ごく稀に起きるような地震に対してはある程度の損傷は許容するが人命は守る、という、構造物側の損傷を主眼においてきていた。阪神淡路大震災以降、財産も守るべきであるという議論や、避難行動限界の揺れを探る研究などが行われ、応募

者らのこれまでの研究もその流れにある。

本研究ではもう一步踏み込んで、人間の側から見てどの程度の揺れであれば許容できるのか、という視点に立って設計規範を考える。この背景としては、BCP (Business Continuity Plan : 事業継続計画) などの議論が盛んになり、地震経験後も建物は継続的に使われることが半ば前提となりつつある時代をにらんだものである。

### 3. 研究の方法

#### (1) LabView による加速度制御プログラムの開発

研究開始時、振動台の現状はリニアモーター位置の情報を基に変位制御を行っていたため、基本的に加速度は楕円波、速度は三角波になってしまっていた。適切なモーションコントロールボードを選定・購入すると共に適切なフィードバックとフィードフォワード制御によりなめらかな加速度波形出力を行うプログラムを開発する。

予算にはこの開発に要する技術サポート等の専門知識の提供に見合う経費を計上した。ユーザーインターフェイス部分は LabView により比較的容易に開発を進めることができる。

このプログラムに PC からの CG ムービーを同期再生させる機能も持たせることにより、今まで手動で行っていた CG ムービーと加振の同期を自動で制御することができるようになれば、実験者の負担を大いに低減することが可能となる。

#### (2) 強震時の室内状況再現 CG ムービーの作成

振動台の導入と並行して、実験で用いる室内状況の CG ムービーの制作を進める。この制作には当初は Spring Head という Microsoft Visual Studio 上で動作するフリーソフトと、Blender という、これもフリーのモデリングソフトを用いていたが、ヘッドマウントディスプレイの没入感を向上させるために平成27年度にヘッドマウントディスプレイの再選定を行い、最終的には Unity というフリーソフトを用いて、家具と床や壁の衝突、転倒、移動などをシミュレートした。家具と床との摩擦係数などは研究代表者らがこれまでに行った実験で得られた定数を用いることが可能であったので、物理式と実験結果さらにシミュレーション結果を擦り合わせることでできるようになった。

#### (3) 強震時の人間行動と知覚限界に関する実験

振動台の改良設計・製作・搬入の後、実験シリーズを吟味の上、振動台実験を行う。実験時には危険防止のため、事前に十分なインフォームドコンセントを行うほか、頭にはヘルメット、肘と膝にはプロテクタを装着の上、椅子に車のシートベルトなどを装着して腰掛

けてもらい、振動台から転げ落ちるような事故が起きないように十分な配慮を行う。振動台の周りにはウレタンマットを敷き詰めて、万が一の落下に備えることとする。これらは千葉大学大学院工学研究科生命倫理委員会の審査を経て実施する。

実験の様子はビデオに撮影し、並行して加振ごとに被験者にアンケート調査を行い、人間の許容できる振動の限界がどこにあるのかを探る。

#### 4. 研究成果

##### (1) 振動台の改修

改修前は正弦波形で計測されるはずの加速度が格子状に計測される問題が生じていた。また速度のピーク値においても計測値と計算値とのずれも見られた。これは振動台を時刻ごとの変位によって制御していたためと考えられる。そこで振動台を制御する際、入力した変位データから加速度を計算し、時刻ごとの加速度により振動台を制御するシステムに改修した。その際、制御プログラムを LabWindows/CSI による C 言語をベースとしたプログラムから、図 1 に示すような LabView によるグラフィカル言語をベースとした制御プログラムへと変更した。これにより C 言語の知識が無い者でも比較的容易にプログラムを変更できるようになった。改修前後で同じ 1 Hz の正弦波を入力した際の加速度計測データを図 2, 3 に示す。加速度波形が改修後は正弦波形を保持している。図 4 に示すように改修前後の加速度測定データのフーリエスペクトルを比較すると、改修後はノイズが大幅に低減されたことがわかる。このように振動台の入力に対しての再現性が向上し、スムーズな挙動をとることが可能となった。

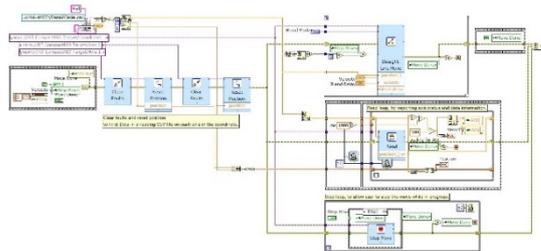


図 1 LabView による制御プログラム<sup>3)</sup>

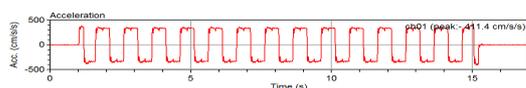


図 2.1 改修前の加速度波形<sup>3)</sup>

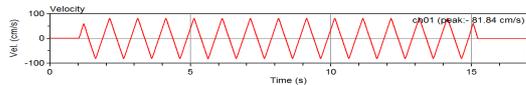


図 2.2 改修前の速度波形<sup>3)</sup>

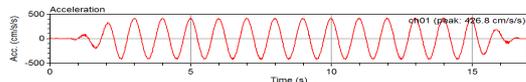


図 3.1 改修後の加速度波形<sup>3)</sup>

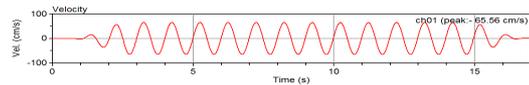


図 3.2 改修後の速度波形<sup>3)</sup>

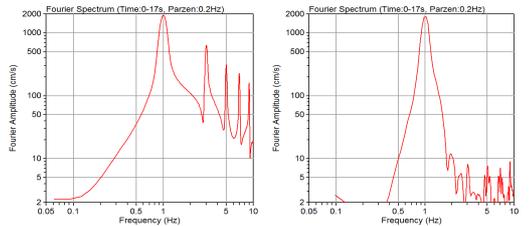


図 4 改修前 (左) と改修後 (右) のフーリエスペクトル<sup>3)</sup>

##### (2) ヘッドマウントディスプレイを用いた強震時室内状況再現

この分野の機器性能向上はめざましく、平成 25 年度当初に選定した機器では没入感が最善とは言えない状況となったので、平成 27 年度に再度機器を選定して Unity というフリーソフトを用いて強震時の室内状況を再現するプログラムの開発を行った。開発にあたっては平成 25 年度、平成 26 年度に蓄積した、物理エンジン検証用のノウハウを活かし、比較的短時間で満足のいく結果を得ることができた。この成果については今後発表の予定である (図 5)。



図 5 ヘッドマウントディスプレイと CG

##### (3) ヘッドマウントディスプレイと振動台を用いた強震時の不安度の定量化

上述のようにして改修された、リニアモーターを用いた簡易振動台を用い、ヘッドマウントディスプレイに CG を投影させながら、振動台を同期させて運転し、被験者に対するアンケートと生体反応から、強震時の不安度を定量化することを試みた。加振周期と速度の一覧を図 6 に示す。

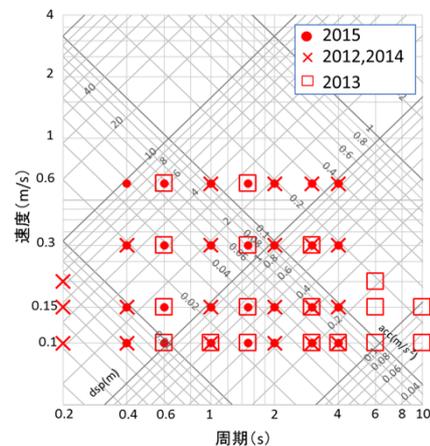


図 6 実験に用いた加振波の周期と速度

図7には、実験により得られた不安度の限界曲線(平均値)を示す。図より、x方向加振(被験者の左右方向)に比べると、O形加振の方がより小さな振幅で不安を感じるようになることがわかる。この結果を精査し、雑誌論文として発表するとともに、構造設計の規範として用いることができるような提案を行っていきたいと考えている。

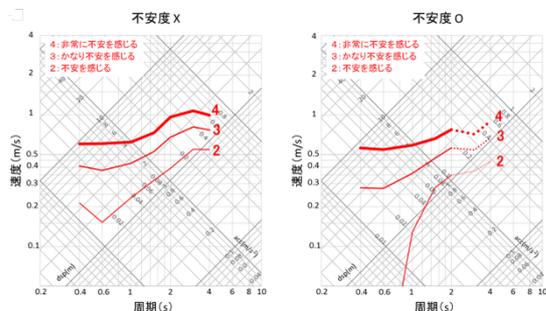


図7 実験より得られた不安度の限界曲線

## 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)

[学会発表] (計 10 件)

- 1) 地震時室内被害シミュレーション解析の妥当性に関する研究, 根本 毅, Uk Vichetch, 山下 拓三, 金子 美香, 中村 友紀子, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, Vol.B2, 1059-1060, 2015年9月6日, 東海大学(神奈川県・平塚市)
- 2) 強震時の不安度と室内危険度の各種指標の対応, 中江 百花, 高橋 徹, 中村 友紀子, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, Vol.B2, 863-864, 2015年9月4日, 東海大学(神奈川県・平塚市)
- 3) 強震時の不安度の定量化に関する実験的研究 その3 ヘッドマウントディスプレイを用いた強震時の状況の再現, 増澤 暁, 大野 雄大, 木村 銀河, 中村 友紀子, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, Vol.B2, 865-866, 2015年9月4日, 東海大学(神奈川県・平塚市)
- 4) 強震時の不安度の定量化に関する実験的研究 その4 2014年の実験結果と考察, 大野 雄大, 増澤 暁, 木村 銀河, 中村 友紀子, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, Vol.B2, 867-868, 2015年9月4日, 東海大学(神奈川県・平塚市)
- 5) ヘッドマウントディスプレイと振動台の同期による地震時の状況の再現, 増澤 暁, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, 917-918, 2014年9月12日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)
- 6) 強震時の不安度の定量化に関する実験的研究 その1 アンケート結果からの考察, 木村 銀河, 渡辺 陽彦, 中村 友紀子, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, 919-920, 2014年9月12

日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

- 7) 強震時の不安度の定量化に関する実験的研究 その2 生体情報計測による考察, 渡辺 陽彦, 木村 銀河, 中村 友紀子, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, 921-922, 2014年9月12日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)
- 8) 振動台実験による2次元振動に対する不安度の定量的把握, 木村 銀河, 渡辺 陽彦, 高橋 徹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 I, 51-52, 2013年8月30日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- 9) 実大規模振動実験結果の個別要素法による再現, 重要施設の強震時室内状況に関する検討, 藤田 大毅, 高橋 徹, 中村 友紀子, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 査読無し, 構造 II, 671-672, 2013年8月30日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- 10) Event tree analysis for strong ground motion at Nishichiba campus of Chiba University, T. Takahashi, M. Katada, Proc. of 11th. ICOSAR, アブストラクト査読, 4491-4495, 2013年6月18日, コロンビア大学(ニューヨーク・米国)

[その他]

ホームページ

<http://salab.ta.chiba-u.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 徹 (TAKAHASHI Toru)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10226855

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

中村 友紀子 (NAKAMURA Yukiko)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20313504

宗方 淳 (MUNAKATA Jun)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80323517

### (4) 研究協力者

渡辺 陽彦 (WATANABE Haruhiko)

木村 銀河 (KIMURA Una)

増澤 暁 (MASUZAWA Akira)

和田 真宜 (WADA Masaki)

いずれも、千葉大学・大学院工学研究科・大学院生(在学時)