

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04670

研究課題名(和文) ASEAN開発途上国の事業継続性を高める震動低減基礎構法の開発に関わる基礎研究

研究課題名(英文) Study of the development of a vibration reduction foundation system that enhances business continuity in developing countries in ASEAN

研究代表者

山岸 邦彰 (Yamagishi, Kuniaki)

金沢工業大学・建築学部・教授

研究者番号：70553189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ASEAN等に広く利用されるNon-engineered建築の震災の減少を目的として、球状骨材の転がり摩擦を利用した震動低減基礎の開発を行った。この結果、以下のことが分かった。(1) 球状骨材径と基礎に生じる面圧により摩擦係数を変化させることができること、(2) 当該基礎の弱点である強風時の滑動を抑止するために滑動開始風速を予測したこと、(3) Non-engineered建築を模擬した解析モデルによる震動シミュレーションの結果、同基礎の適用により外壁に生じる応力を減少することができたこと。以上の結果から震動低減基礎の実現性は高まり、同基礎の適用に一歩近づけることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

摩擦係数を制御できる機構を発見できたことは極めて大きな学術的意義がある。摩擦力の制御は一般的に、摩擦材料に与える軸力を調整して行われる。しかし、基礎の滑動を利用する本機構において、軸力を変化させることは困難であるため、摩擦係数を制御する必要がある。摩擦係数の調整は一般的に材料の選択することで行われる。しかし、本機構は適切な摩擦係数を連続的に定めることができることが意義深い。本機構の適用により、震災レベルを顕著に低下させるだけでなく、その建築物を利用して事業継続や生活継続を高めることができるため、社会的損失を大幅に縮減することが可能になるため、社会的意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of reducing earthquake disasters in non-engineered buildings that are widely used in ASEAN, etc., we developed a vibration reduction foundation using rolling friction of spherical aggregates. As a result, the following things were found. (1) The coefficient of friction can be changed by the diameter of the spherical aggregate and the surface pressure on the foundation, (2) The wind speed at which sliding starts is predicted to prevent sliding during strong winds, which is the weak point of the foundation. (3) As a result of seismic simulation using an analytical model of a non-engineered building, it was possible to reduce the stress occurred in the outer wall by applying this foundation. From the above results, the feasibility of the vibration reduction foundation has increased, and we were able to get one step closer to the application of this foundation.

研究分野：耐震工学

キーワード：震動低減基礎 ノンエンジニアド建築 球状砂 転がり摩擦係数 風圧力 最大滑動変位 簡易予測法

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ASEANをはじめ環太平洋地域に存する国の多くは、開発途上国であるが GDP 成長率が約 5% もある有望な国々でもある。しかし、これらの国々は地震国でもあり、海外からの安定的な投資を受け、永続的に発展するためには震災リスクの低減は不可欠である。しかし、これらの国の建築は独自の建築基準を有しているが、当該基準が遵守されていない、いわゆるノンエンジニアド (Non-engineered) 建築である場合が多い。開発途上国には、日本においてもその普及が限定的である免震構造等の特殊な建築物を建てられる技術力と経済力は殆どない。

これまで研究代表者は、部位の滑り摩擦による建築物の震動低減効果に関する研究を遂行し、免震構造に代わる震動低減基礎構法の開発とそのコストの低廉化を目指してきた。中低層の建築物であれば動摩擦係数が 0.15 ~ 0.20 程度の滑り基礎を構築することにより、一般的な構造設計において想定している地震力を遥かに上回る過大地震力に対して、事業継続や、事業を行う従業員を初めとする市民の暮らしを維持する“生活継続”が可能になる程、応答が減少することを明らかにした (佐々木, 島崎, 山岸, 2017)。また、近年では 0.15 ~ 0.20 程度の動摩擦係数を具現化するデバイス開発に着手し、球状骨材 (写真 1) と RC 部材間の滑り摩擦と転がり摩擦の組合せにより動摩擦係数が約 0.17 となることを把握した (山口, 早福, 山岸, 2019)。しかし、RC 部材より球状骨材の硬度が高いため、RC 部材にめり込みや傷が発生し、これらの材料の組合せが恒久的に当該摩擦係数を維持するものではないことが分かった。一方、石材、特に花崗岩は Mohs 硬度が約 7 であるだけでなく、作業手間や流通を考慮すると RC 部材と同等の建材であり、安価性を有している。また、花崗岩 (ただし、斜長石の少ないものに限る) は耐久性に富むだけでなく、建築意匠上、美観に優れた材料でもある。

以上の背景から、Non-engineered 建築に向けた応答緩和を目指したデバイスを開発できる条件が揃いつつあったため、本研究テーマの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の当初の目的は以下の 3 点である。

- (1) 球状骨材と石材の間の動摩擦係数およびその他の機械的性質の把握
- (2) 温湿度の変化や経年劣化を受けた摩擦材料の機械的性質の把握
- (3) 縮小試験体による振動実験と解析との整合性の把握

しかし、研究初年度から新型コロナウイルスのまん延のほか、研究遂行に係る重大な制約が生じたため、所期の目的を以下のように変更した。

- (1) 球状骨材と石材の間の動摩擦係数およびその他の機械的性質の把握
- (2) 震動低減基礎を適用した建築物の強風時の滑動条件と滑動防止デバイスの開発
- (3) シミュレーションによる Non-engineered 建築の地震時挙動の把握と、大地震動を受けた場合の最大変位予測指標の提案

(1) については、当初の計画通り実施可能であったため、そのまま遂行した。

(2) については、半導体の納期の遅延に伴い、温湿度を制御するための恒温恒湿槽の納期が半年ほど遅れた。また、本槽を用いて予備実験を実施している最中に、共用している実験室のあるエリアで事故が発生したため、その後は事故調査のため同実験室の立ち入りが困難となった。しかし、その実験は同実験室でのみしか実施できず、研究期間終了時まで実験を遂行することはできなかった。そこで、申請時には言及していなかった、震動低減基礎を適用した建築物の強風時における滑動 (すべり) の発生条件と、滑動を防止するデバイスの考案を試みた。

(3) については、当初 Non-engineered 建築の模型を用いた振動実験を予定していたが、前述した実験室の立ち入りが不可能となったため、同建築を模擬した解析モデルを構築して、振動実験の代わりとしてシミュレーションを実施した。また、震動低減基礎は復元材を有していないため、基礎の滑動変位が入力される地震動特性に強く左右される。そこで、過大な地震動を入力地震動として震動低減基礎の滑動変位を予測する指標の構築も、目的とした。この件については、以下で触れる。

3. 研究の方法

- (1) 球状骨材と石材の間の動摩擦係数およびその他の機械的性質の把握

一般的に、物質の機械的性質は力と変形 (応力とひずみ) の関係で表されるが、球状骨材は粒子であるため、その散布状況により耐えられる軸力が異なる。そこで、a) 単位体積 (重量) 当たりの耐荷重の確率値を、b) 圧縮試験機により、c) $53 \mu\text{m} \sim 425 \mu\text{m}$ の範囲の球状骨材について明らかにした。また、球状骨材は JIS Z 8801 のふるいにより区分されるため、様々な粒径が存在する。そこで、a) 粒径加積曲線と圧縮強度との関係を、b) 粒度分布を分析する粒子径分布測定装置 (SALD) と圧縮試験機を用いて、c) 上述の粒径の球状骨材について明らかにした。

続いて、球状骨材のふるい径などをパラメータとした 2 材料間の動摩擦係数を測定するために 2 種類の実験を行った。1 つ目は基本的な動摩擦係数の測定である。2 つ目は、当初非球状の骨材の混入率をパラメータとした動摩擦係数の測定を予定していたが、予備実験の結果、得られ

る摩擦係数が安定性に欠けるなどの問題点を生じたため、骨材粒径や摩擦面に設置する軟質材料の硬度等をパラメータとして、動摩擦係数をコントロールできる材料特性を求めた。両者とも、動摩擦係数測定装置等を用いて、動摩擦係数等の機械的性質を明らかにした。

(2) 震動低減基礎を適用した建築物の強風時の滑動条件と滑動防止デバイスの開発

基礎の摩擦係数はベースシア係数に等しく、0.15～0.20程度の摩擦係数が適当であるとしつつも、このベースシア係数を上回る風圧力が作用した場合に、本基礎は滑動する。風圧力は1方向力であるため、強風時に滑動を許容することはできない。そこで、同基礎が滑動する風速を計算することによって、同基礎を設計する際の注意を促すことができれば良い。前述したように実験による検証は困難であったため、解析により滑動開始風速を計算した。

また、近年の気候変動が顕著となっていることを受けて、最大風速の期待値(または極値)の不確実性が高まっているものと危惧される。具体的にはスーパー台風のように、風速60 m/sを超える強風に対する備えが必要である。そこで、プロトタイプとはなるが、強風による滑動を抑止するシステム開発を行った。具体的なモデルを作成し、所期の機構の実現性を測定した。

(3) シミュレーションによる Non-engineered 建築の地震時挙動の把握と、大地震動を受けた場合の最大変位予測指標の提案

Non-engineered 建築として、人口も多く、経済成長の著しいインドネシアの典型的な組積造を選定した。この組積造建築は、臥梁や柱に鉄筋コンクリート構造(RC造)を、組積造はレンガである。解析にはT-DAP3(アーク情報システム)を用いて、すべりモデルには軸力依存型 Bilinear モデルを適用した。

また、Non-engineered 建築を含めた震動低減基礎構法の一般的な最大滑動変位と相関性が高い地震動指標の開発を行った。同基礎は復元機構がないため、同基礎の設計を設計する際に設計用入力地震動の選定は極めて重要である。しかし、従来の地震動強さの指標である最大速度等を用いると、最大速度は高いが滑動変位が小さい地震動を設計者が故意に選択する可能性がある。そこで、既往の地震動強さの指標に加え、滑動変位を効率よく計算できる手法を考案した。

4. 研究成果

(1) 球状骨材と石材の間の動摩擦係数およびその他の機械的性質の把握

主な成果として球状骨材径および面圧と動摩擦係数の関係を明らかにした。球状骨材径はJISふるいによって分級されるため、径のパラメータは不連続となるが、面圧は基礎サイズを変化させることにより可能である。そのため、両者を適切に選定、決定すれば、摩擦係数を連続して変化させることができる。

従来の摩擦力の制御は、同一の摩擦係数を有する材料に与える圧縮力を変化させることによって行われる。しかし、震動低減基礎では建築物の自重と関連する圧縮力を制御できないため、摩擦係数を制御する必要があった。これに対して、球状骨材径と面圧を制御すれば摩擦係数を調整できることを発見できたことは極めて大きい成果であると考えられる。これまでに摩擦係数を調整できる建築用のデバイスは皆無である。

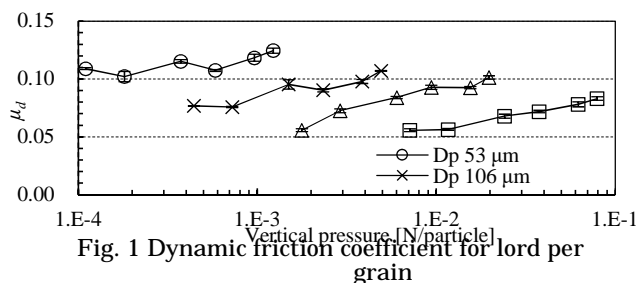


Fig. 1 Dynamic friction coefficient for lord per grain

(2) 震動低減基礎を適用した建築物の強風時の滑動条件と滑動防止デバイスの開発

主な成果として、風速から得られる静的風圧力よりも、同じ風速から得られる動的風圧力の方が低い風速で基礎の滑動が開始されることである。これは、上部構造の水平方向の振動に伴う柱の変動軸力が滑動のタイミングを一部支配していることによる。上部構造の高さが高いほどその影響は顕著となる。したがって、震動低減基礎を適用した建築物の風圧力による検討においては、静的風圧力による滑動の確認ではなく、動的風圧力による確認が必要である。

また、初期モデルとして、風洞と尾翼を用いて常に風向に対して正対する向きに受風板を設け、その風圧力により基礎にあるシアピンを上下させる滑動防止デバイスを開発した。しかし、機構がメカニカルであるだけでなく、極めて強い強風に抵抗できるかは検討の余地を残した。

(3) シミュレーションによる Non-engineered 建築の地震時挙動の把握と、大地震動を受けた場合の最大変位予測指標の提案

RC造フレームとレンガで構成された Non-engineered 建築は、主にレンガの崩落が問題となるため、せん断破壊や引張破壊がレンガの崩壊を意味するものとして、地震時のレンガの応力がある閾値を超えた時点で当該建築が崩壊するものと考えた。震動低減基礎を適用した同建築の各種応力は減少したが、同基礎は元来、通常の布基礎とは異なり、基礎部分に軸力を集中させる構造であるため、長期荷重に対しても基礎周辺のフレームやレンガに大きな応力を生じることが分かった。

最大変位予測指標として、入力地震動の加速度波形と速度波形から容易に同基礎の滑動変位を予測する指標を提案した。この指標は、地震動強さを表す他の指標と比べて最大滑動変位との相関は最も高かった。ただし、基礎が剛体である場合には相関は高いが、基礎に振動体が付随する場合は相関が若干低下することが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 都築莉太郎, 大平陵真, 山岸邦彰
2. 発表標題 球状砂を用いた震動低減基礎の機械的性質に関する研究（その7）面圧を高めたデバイスの振動台実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 震度6強以上の地震を受ける震動低減基礎を適用した建築物の滑動変位
2. 発表標題 大平陵真, 都築莉太郎, 山岸邦彰
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小胎辰未, 百成立希, 山岸邦彰
2. 発表標題 震動低減基礎を構成するパイルキャップの地震時の変形
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 百成立希, 小胎辰未, 山岸邦彰
2. 発表標題 強風時に震動低減基礎の滑動を抑止する方法の試案
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口剛慧, 早福崇之, 宗像麟太郎, 山岸邦彰, 大平陵真
2. 発表標題 球状砂を用いた震動低減基礎の 摩擦特性 に関する研究 (その3) 摺動面の違いによる摩擦特性
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宗像麟太郎, 山口剛慧, 早福崇之, 山岸邦彰, 大平陵真
2. 発表標題 球状砂を用いた震動低減基礎の 摩擦特性 に関する研究 (その4) 各種パラメータに対する摩擦特性
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口剛慧, 早福崇之, 宗像麟太郎, 山岸邦彰, 大平陵真
2. 発表標題 球状砂を用いた震動低減基礎の 摩擦特性 に関する研究 (その5) 球状砂の圧縮試験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大平陵真, 山口剛慧, 早福崇之, 宗像麟太郎, 山岸邦彰
2. 発表標題 球状砂を用いた震動低減基礎の 摩擦特性 に関する研究 (その6) 花崗岩とクロロプレンゴムに挟まれた球状砂を用いた鋼製フレームの振動台実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------