

令和元年6月14日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06601

研究課題名（和文）地盤との動的相互作用を考慮した浮き上がり活用型建築構造の耐震設計に関する基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental study on seismic design of building structures allowed to uplift considering dynamic soil-structure interaction

研究代表者

石原 直（ISHIHARA, tadashi）

国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長

研究者番号：50370747

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：2種の建築物模型を用いた3種の地盤条件による振動台実験により、剛地盤では浮き上がり中に高次振動が顕著に現れるが柔な砂質地盤では高次振動はあまり見られないこと、砂質地盤では上部構造の損傷が抑制されるとともに地盤変状が生じても転倒には至らず残留変形も比較的小さいことなどを明らかにした。

また、作成したプログラムによる地震応答解析等により、上部構造への負荷の大きさや高さ方向分布などを把握した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は簡易かつ安価に地震応答低減効果を獲得するための建築構造の選択肢を拡充することに貢献するため、建築構造設計の自由度の拡大や減災の観点で社会的意義を有すると考える。

研究成果の概要（英文）：By shaking table tests using two types of building models with three different soil conditions, it was clarified that (1) higher mode vibrations during uplift excursions are not seen much in a soft ground while those vibrations appear remarkably in a rigid ground, and (2) the damage of the superstructure is suppressed in a soft ground and the residual deformation is relatively small.

And by earthquake response analysis using a computer program created by us, amounts and distributions of seismic forces and so on were grasped.

研究分野：建築構造

キーワード：浮き上がり 振動台実験 動的相互作用 土槽 直接基礎 地震応答解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 浮き上がり活用型建築構造は、一時的に片足立ち状態になることで地震入力エネルギーの一部を重さの上方移動による位置エネルギーに変換してひずみエネルギーを減少させ、簡易かつ安価に地震時負荷低減効果を得ようとするものである。国内外でいくつかの実施例もあるが、現状の耐震設計では特別な検討が必要となっており、実務において活用できる状況にはなっていない。

(2) 浮き上がり活用型建築構造の実現には、構造物から地盤への局所的な鉛直荷重や再接地時に生じる動的な鉛直荷重に対して地盤が破壊しないことが必要条件となるが、指針類に示される地盤の極限支持力は静的な検討に基づいたもので、浮き上がりやその後の着地時に生じる動的な力に対する極限支持力は必ずしも明らかになっていない。

(3) 研究代表者らは、剛強な基礎又は地盤を前提とした浮き上がり活用型建築構造の研究を行い、実験や解析により負荷や損傷の低減効果等を明らかにしてきており、動的挙動に関する知見を蓄えている一方で、地盤との動的相互作用は今後の課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究では、上部構造及び地盤の変形・塑性化を考慮した浮き上がり活用型建築構造の耐震設計に関する基礎的な事項を検討する。具体的には、地盤の局所の変形による応答の特徴の把握と、地盤の極限支持力に対するバランスを考慮した上部構造の適切な耐力設定に関する検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 研究の方法は、模型試験体を用いた振動台実験と、理論・数値解析である。

(2) 振動台実験では砂質地盤と剛な地盤を用意して地盤の硬軟による応答の差異を実験的に把握するとともに、剛な地盤上で浮き上がりを拘束した場合の応答とも比較した。模型試験体として、弾性の多層模型と弾塑性の1層模型を準備した。前者は主に地盤の局所の変形の影響と応答の高さ方向分布を見るもので、後者は地盤の変形と上部構造の損傷（塑性変形）との関係を把握するためのものである。

(3) 理論・数値解析では、地震応答解析用のプログラム作成を行った上で、振動台実験とは別の地震動や上下動の影響、高さ方向の負荷の分布等について分析を行った。

4. 研究成果

(1) 弾性多層模型を用いた振動台実験

図1に示す鋼製の3層の模型を上部構造とし、その下に基礎相当の剛な鋼製部材（以下、基礎部材）を取り付けたものを試験体に用いた。試験体は上部構造を共通として、砂質地盤上（以下、Sandと呼ぶ。）、剛地盤上（同 Rigid）、剛地盤用の基礎部材を直下のH形鋼に固定した基礎固定（同 Fix）の3種類とした。重力場（1g場）での水平1方向の振動台実験であり、相似則は満足しないため、現象の観察等を重視して時間軸は1倍のまま加速度振幅を20%としたJMA Kobe NS波（1995）の20秒間を加振波とした。

図2に1層の層せん断力係数 C_1 と頂部水平変位の関係を示す。 C_1 の絶対値が0.2前後を超えるとRigidとSandでは線形関係から外れることが分かる。Rigidでは高次振動により C_1 が激しく変動しているが、Sandでは滑らかに推移している。

図3に層せん断力係数の最大値及び最小値を示す。Fixでは正側に比べて負側の応答が大きく最小値がピーク値となっているのに対して、浮き上がりが生じたRigidやSandでは正負の応答がほぼ等しくなっている。RigidではFixに比べて1層の層せん断力係数は大きく低減するものの、2層や3層ではあまり低減していない。Sandでは層せん断力係数はさらに小さくなっており、Fixに対して4割から5割程度に収まっている。

図4は重心上下変位と基部回転角（基礎部材底面の回転角）の関係を示している。図中には地盤が完全に剛な場合の関係を破線で示しているが、それに比べておよそ1/2程度の浮き上がりを生じたことが分かる。図中に示した曲線の矢印は時間の経過を示しており、回転角の絶対値が大きくなっていく過程での浮き上がり変位に比べて、その後回転角が戻る過程での浮き上がり変位の方が小さくなっている。つまり戻る過程で若干の沈下が見られるが、図に示した時間帯では回転角がゼロ付近に戻れば沈下はほとんど生じていない。

写真1にSandについて加振後の地盤変状の様子を示す。周辺地盤のうち加振方向の一部に隆起が見られた。

図5にSandの応答の概念図を示す。単純化して基礎部材と地盤のみで示している。(a)に示すように回転角が増加して浮き上がりが発生する場合には、端部は沈み込むものの重心位置には浮き上がりが発生する。回転角が大きくなり接地率が小さくなると地盤変状が生じる。回転角が戻る過程では(b)のように更なる沈下が生じながら接地率が回復する。直接は確認できていないが、基礎下の地盤にも変状が生じている可能性があり、それも接地率の回復に寄与すると思わ

れる。(c)のようにさらに回転角が減少すると、基礎の端部は地盤と離間するが、中央付近の地盤で支えられることにより重心位置がさほど沈下しなかったと考えられる。

結果をまとめると次のようになる。

- ① 転倒モーメントや層せん断力係数で見た上部構造への負荷は、Fix が最も大きく、Sand が最も小さかった。Sand は Fix に対して 4 割から 5 割程度の負荷に留まった。Rigid は Fix に比べて負荷は低減するが、Sand に比べれば大きな応答であった。
- ② Rigid では浮き上がり中に高次振動が顕著に現れたが、Sand では高次振動はあまり見られなかった。
- ③ Sand では周辺地盤の一部に地盤変状が生じ、最終的にはわずかな沈下を含めた残留変位が生じたものの、転倒には至らなかった。その要因として基礎端部の沈下に伴う接地率の増加が自重を支える上で有利に働くことなどを実験データから明らかにした。

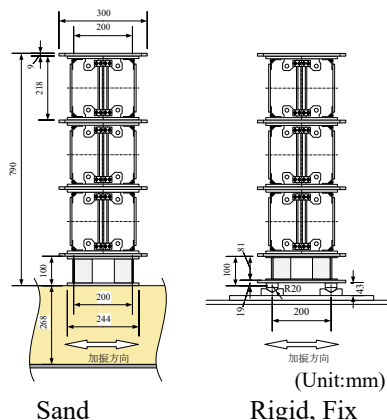


図 1 模型試験体

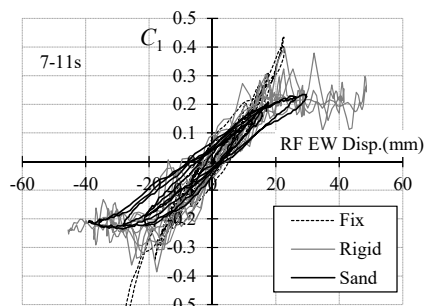


図 2 1層層せん断力係数—頂部水平変位関係

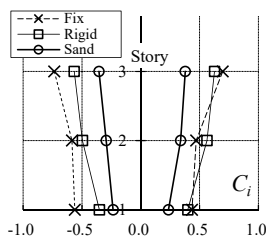


図 3 層せん断力係数

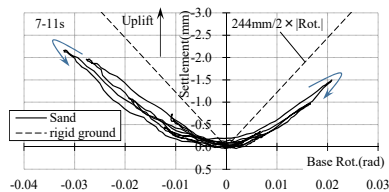


図 4 重心上下変位—基部回転角



写真 1 加振後の地盤変状

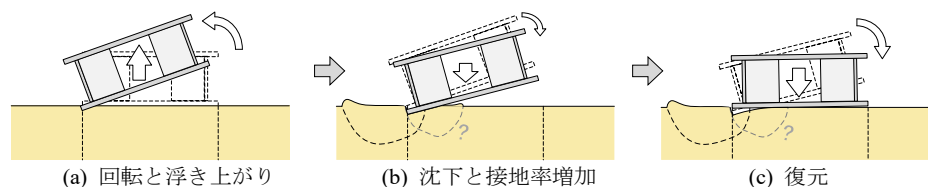


図 5 応答の概念図

(2) 弾塑性 1層模型を用いた振動台実験

図 6 に試験体を示す。1層の鋼製の模型で、剛な 4 本の柱、柔な 2 本の梁、柱と梁との接合と錘を兼ねる厚いフラットバー、剛な基礎部材で構成される。梁は厚さ 4.5mm の薄いフラットバーで、両端に切欠を入れて耐力を調整したものである。梁の耐力で決定される上部構造の降伏耐力は、浮き上がり開始時耐力（基礎部材の片端が地盤と離間し始める耐力）よりも大きくなるように、また転倒限界耐力（基礎部材が全体的に地盤と離間してつま先立ちの状態となる耐力）よりも小さくなるようにした。(1)と同様に上部構造を共通として Sand, Rigid, Fix の 3 種の条件で、重力場 (1g 場) での水平 1 方向の加振を行う。加振波は加速度振幅を 50% とした JMA Kobe NS 波 (1995) の 20 秒間である。加振波に乗じる入力倍率 (Input Amp., I. A.) は 5% 刻みで 10% から 55% までとし、小さい倍率から順に加振した。

図 7 に I. A. 50% での層せん断力係数 C_1 と上部構造のせん断変形角 γ の関係を示す。図中の一点鎖線は $P\Delta$ 効果を示す。Fix で大きな塑性変形が生じるが、Rigid では塑性化の程度が小さく抑制され、また Sand はほぼ弾性である。

写真 2 に I. A. 50% 後の Sand と Fix の状況を示す。Sand では加振方向の周辺地盤に隆起が見られた。Fix では塑性変形により上部構造に明らかな残留変形が生じた。

図 8 に横軸を入力倍率 I. A. としてせん断変形角 γ の最大・最小値を示す。Fix が I. A. 40% 程度から正側へと偏って大きく変形していくのに対して、Sand は正負がほぼ対称で $|\gamma|$ は 0.02 強程度に留まる。Rigid は正側でやや大きくなるが、Fix に比べて変形は小さい。

残留変位について、基部回転角は Sand でも 0.002 程度に抑えられており、地盤の局所的な変状を生じて、加振後の傾きは極めて小さかった。また、上部構造の残留せん断変形角は I. A. 55%後に Fix で 0.24、Rigid では 0.013、Sand で 0.0014 であり、桁違いの差が生じた。Rigid でも残留変形を抑制する効果があり、Sand はほぼ弾性に留まって残留変形は生じなかった。

以上から、浮き上がり開始時耐力よりも上部構造の降伏耐力がある程度大きい場合には上部構造の損傷を免れうることや、局所的な地盤変状が発生しても剛体回転を含む残留変形は小さいこと等を把握した。

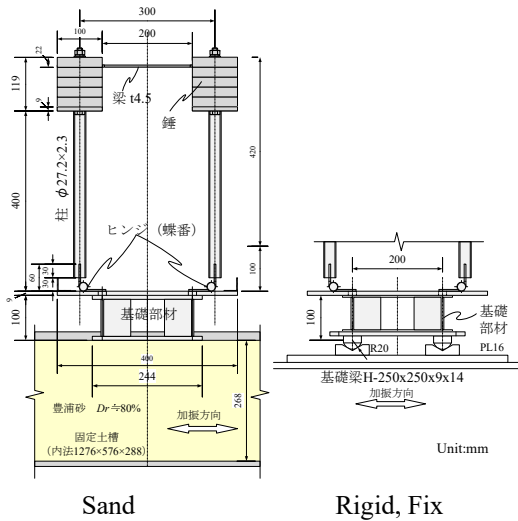


図 6 模型試験体

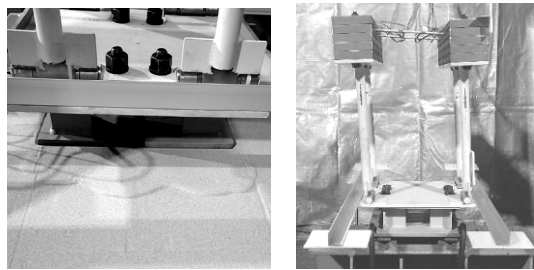


写真 2 地盤変状・残留変形 (I. A. 50%後)

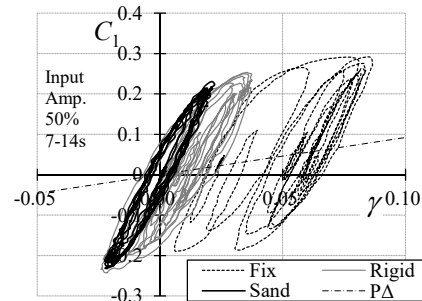


図 7 層せん断力係数 C_1 -せん断変形角 γ 関係 (I. A. 50%)

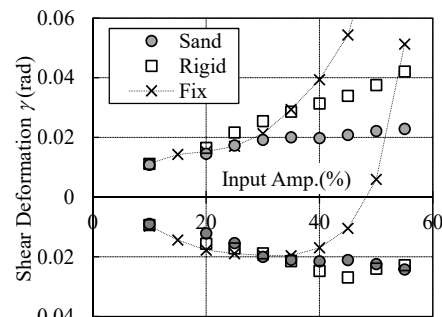


図 8 せん断変形角の最大・最小

(3) 理論・数値解析

多層建築物を模擬する均一せん断棒モデルや(2)の実験に対応したせん断型 1 層モデルを対象とした地震応答解析プログラムを作成した。区分線形系として古典的なモード解析を適用し、浮き上がりを伴う場合に励起される高次モードの応答を明確に分離して把握できる点を特徴とする。

作成したプログラム等を利用して数値解析による検討を行った結果、得られた主な知見は次のとおりである。

- ① 既往の研究で指摘されているとおり、上下地震動の影響は小さい。
- ② 自由振動と地震応答とを一定の条件下で比較したところ、入力地震動が小さい場合には両者は比較的良好に対応するが、入力地震動が大きい場合には高次モードの励起度合が大きくなって地震応答の方が上回る。
- ③ 浮き上がり許容構造での上部構造への負荷の大きさや高さ方向分布は、1 次モードに基づく応答と高次モードの応答を適宜組合せることにより概ね推定可能である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Tadashi ISHIHARA, Tatsuya AZUHATA, Hisatoshi KASHIWA, Mitsumasa MIDORIKAWA, COMPARISON BETWEEN THE SEISMIC RESPONSE AND FREE VIBRATION OF A UNIFORM SHEAR-BEAM MODEL ALLOWED TO UPLIFT BASED ON A PIECEWISE-LINEAR MODAL ANALYSIS METHOD、Proceedings of 16th European Conference on Earthquake Engineering、査読有、ID:11030、2018
- ② 石原直、柏尚稔、小豆畑達哉、緑川光正、浮き上がりによる損傷抑制効果に関する直接基

礎1層弾塑性模型の振動台実験、2017年度日本建築学会関東支部研究報告集、査読無、I、pp. 377-380、2018

- ③ 石原直、柏尚稔、小豆畑達哉、緑川光正、浮き上がりを伴う多層建築物の地震応答に対する地盤の影響の比較実験、日本地震工学会第13回年次大会梗概集、査読無、P4-14、2017
- ④ 小豆畑達哉、石原直、非連成モーダル応答時刻歴解析による浮き上がりを許容する構造物の地震応答に対する高次モードの影響評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、構造II、pp. 23-24、2017
- ⑤ Tatsuya Azuhata, Tadashi Ishihara, A SIMPLIFIED PREDICTION METHOD FOR SEISMIC RESPONSES OF BUILDING FRAME STRUCTURES ALLOWED TO UPLIFT, COMPDYN 2017、C17955、査読無、2017、<https://doi.org/10.7712/120117.5619.17955>
- ⑥ 石原直、小豆畑達哉、柏尚稔、緑川光正、地震時浮き上がりを伴う均一せん断棒モデルの区分線形モード解析法、2016年度日本建築学会関東支部研究報告集、査読無、I、pp. 273-276、2017
- ⑦ 石原直、小豆畑達哉、柏尚稔、緑川光正、均一せん断棒モデルの浮き上がり地震応答解析—熊本地震の観測波を含む計算例一、日本地震工学会第12回年次大会梗概集、査読無、P2-41、2016

〔学会発表〕(計7件)

- ① 石原直、COMPARISON BETWEEN THE SEISMIC RESPONSE AND FREE VIBRATION OF A UNIFORM SHEAR-BEAM MODEL ALLOWED TO UPLIFT BASED ON A PIECEWISE-LINEAR MODAL ANALYSIS METHOD, 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE), 2018
- ② 石原直、浮き上がりによる損傷抑制効果に関する直接基礎1層弾塑性模型の振動台実験、2017年度日本建築学会関東支部研究発表会、2018
- ③ 石原直、浮き上がりを伴う多層建築物の地震応答に対する地盤の影響の比較実験、日本地震工学会第13回年次大会、2017
- ④ 小豆畑達哉、非連成モーダル応答時刻歴解析による浮き上がりを許容する構造物の地震応答に対する高次モードの影響評価、日本建築学会大会、2017
- ⑤ 小豆畑達哉、A SIMPLIFIED PREDICTION METHOD FOR SEISMIC RESPONSES OF BUILDING FRAME STRUCTURES ALLOWED TO UPLIFT, COMPDYN2017 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2017
- ⑥ 石原直、地震時浮き上がりを伴う均一せん断棒モデルの区分線形モード解析法、2016年度日本建築学会関東支部研究発表会、2017
- ⑦ 石原直、均一せん断棒モデルの浮き上がり地震応答解析—熊本地震の観測波を含む計算例一、日本地震工学会第12回年次大会、2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：小豆畑 達哉

ローマ字氏名：(AZUHATA, tatsuya)

所属研究機関名：(国研) 建築研究所

部局名：国際地震工学センター

職名：上席研究員

研究者番号(8桁)：00251629

(2) 研究分担者

研究分担者氏名：柏 尚稔

ローマ字氏名：(KASHIWA, hisatoshi)

所属研究機関名：国土技術政策総合研究所

部局名：建築研究部

職名：主任研究官

研究者番号(8桁)：40550132

※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。