

平成 21 年 6 月 17 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560590

研究課題名（和文） 偏心構造物の浮き上がり挙動に関する基礎研究

研究課題名（英文） Fundamental Study on Uplift Responses of Buildings with Plan Asymmetry

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・主任研究官

研究者番号：50370747

研究成果の概要： 自重を復元力として活用し、簡易かつ安価に地震応答低減を得ようとする浮き上がり許容建築構造に関して、動的な挙動の一般的特性を理論的に明らかにした。その上で、壁が偏在すること等により建築物全体にねじれ振動を生じるような構造を対象として、浮き上がりを許容した場合の動的挙動を解析及び実験により検討し、浮き上がりがねじれ振動を抑制する効果をもつこと等を示すことで、耐震設計に寄与する基礎的な資料を提供した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,400,000	0	1,400,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000		3,500,000

研究分野：建築振動学、鋼構造

科研費の分科・細目： 建築学 ・ 建築構造 ・ 材料

キーワード： 浮き上がり、偏心、振動台実験、モデル化、地震応答低減、耐震設計

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、自重を復元力として活用しながら簡易かつ安価に地震応答低減を得ることを目的として、浮き上がりを積極的に許容した構造の研究をここ数年続けてきた。

実際の構造設計においては特に塔状比の大きな建築物について、設計用地震力に対して基礎の浮き上がりや基礎くい引き抜きが問題となる場合があるが、静的な解析を基本とする通常の構造設計においては建築物全体の浮き上がり（片足立ち）をどのようにとらえるべきか、合理的・客観的な判断が下されていない状態である。浮き上がりに関し

ては研究代表者らのものを含め多数の研究成果があるものの、その基礎的・一般的特性は必ずしも明らかにされているとは言い難く、構造設計上の1つの課題ともなっていた。研究開始後には、平成19年の建築基準法令の改正に伴い、塔状比が一定限度を超える場合に付加的な検討が要求されることとなり、従来にも増して浮き上がり挙動の評価が注目されることとなった。積極的か否定的であるかに関わらず、浮き上がり挙動の一般的特性を把握しておくことは、実務上でも必要と考えられる。

このような状況を踏まえ、研究代表者らは

既往の研究成果を取りまとめて、浮き上がりを許容した建築物の構造設計・応答評価法の構築を最終目標として研究を続けている。通常の構造設計と対比した場合、未解決の課題の1つとして偏心の扱いが考えられた。通常の耐震構造では壁等の偏在による偏心に対していわば一定のペナルティを与えることによって、極端な不整形さを避けるようになっている。浮き上がりに関する研究では整形な建築物を対象とする場合が多く、偏心のある構造物の浮き上がりに関する研究は見当たらない状態であった。

研究開始当初のごく簡単な思考実験により、次のような予想を立てた。1軸偏心のある場合、ねじれによる振られ側の構面（柔構面）とそれ以外の構面（剛構面）とに大きく分ければ、静的な水平力に対して、着地時には負担せん断力が大きくなる剛構面から先に浮き上がり、負担せん断力は頭打ちとなる。構面ごとに浮き上がりを許容することによって、上部構造の偏心によるねじれ変形が基部を固定した場合に比べて緩和される可能性があるのではないかと考えられた。

## 2. 研究の目的

浮き上がり許容構造の耐震設計法・応答評価法を構築することを最終的な目標として、本研究においては浮き上がり挙動の基礎的・一般的特性を把握した上で、上部構造の偏心によりねじれ振動を生じるような構造の浮き上がり挙動の特性を明らかにし、耐震設計に寄与する基礎的な資料を提供することを目的としている。偏心に関するパラメータは非常に多くなるため、対象は平面形状が矩形であり、浮き上がりが生じやすい短辺方向に1軸偏心のある構造に限定している。

## 3. 研究の方法

主な研究内容について、その方法を示す。

### (1) 浮き上がり挙動の一般的特性の把握

多層建築物を均一せん断棒で模擬した上で、浮き上がり状態のモード特性及び自由振動特性を解析的に明らかにする。(図1)

### (2) 偏心構造物に関する数値解析的検討

立体的な挙動を汎用2次元プログラムで再現するための解析モデルを構築し、静的・動的な数値解析を実施する。

### (3) 偏心構造物に関する実験的検討

偏心の大きさ等を比較的容易に変更できるように配慮した模型試験体(写真1)を立案・製作し、振動台実験を行う。試験体の設定に当たり留意した点は、[1]建築構造では床スラブの存在によりいわゆる剛床仮定が成立するが、床の面外変形に対してスラブの拘束効果は小さいため床面の面外変形(反り)を許容すること、[2]浮き上がり後の着地時に生じる衝突・衝撃に対して柱の剛性と耐力を

確保すること、[3]実験を容易にするため試験体サイズを小さくする一方で、上部構造の変形・振動状態を観察するため極端に短い固有周期を避けること、である。

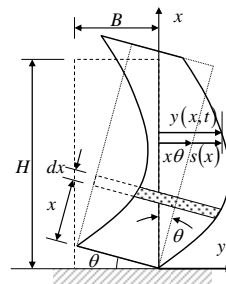


図1 対象モデル



写真1 模型試験体

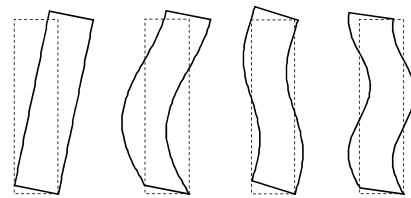
## 4. 研究成果

主な研究成果を示す。

### (1) 浮き上がり挙動の一般的特性の把握

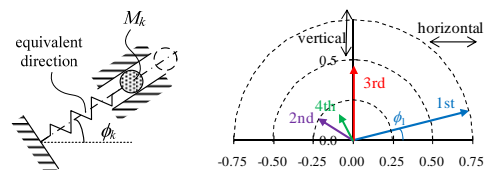
<成果>

浮き上がり状態に関する古典的な固有解析に基づき、図2に示すようなモード形状(固有モード)や有効質量比といったモード特性は図3(a)に示す単純な物理モデルに等価であることを示して直観的な理解を促した。また、有効質量と等価な方向とを図3(b)のようにベクトル(有向線分)として表現した。モード特性として、全てのモードは一定の仰角又は伏角をもつ1自由度系と考えられること、高次モードであっても総質量の1/2程度の大きい有効質量と上下方向に近い方向をもつ場合があることを示した。



(a) 1次 (b) 2次 (c) 3次 (d) 4次

図2 モード形 (H/B=4)

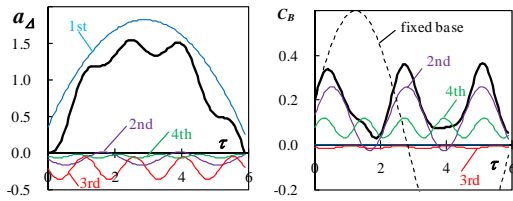


(a) 質点-ばねモデル (b) ベクトル表示

図3 等価1自由度系

自由振動挙動はモード応答の重ね合わせとして表現し、[1]モード特性から重力の影響により全てのモードが必然的に励起されること、[2]大きく浮き上がる1次(剛体)モードと小さく沈み込む高次モードの和であり(図4)、実験等で観察される高次振動は高次モードにおける位置エネルギーの部分的な解

放に起因すること、[3]層せん断力係数の高さ方向分布 (図 5) は特に上層部で大きくなって建築基準法の  $A_i$  分布を上回る場合があること、などを示した。



(a) 浮き上がり変位 (b) ベースシア係数  
図 4 浮き上がり中の応答時刻歴の例  
(黒太線が応答、細線は各モードの寄与)

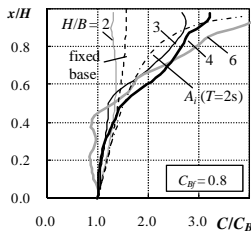


図 5 層せん断力係数の高さ方向分布

<成果の位置づけ、今後の展望>

既往の研究を拡張したものと位置づけられるが、分離された各モードの物理的な特性を直観的な表現で示すことにより、一見すると複雑な浮き上がり中の高次振動を簡明に示している点等に新規性がある。また抽象化した均一せん断棒を対象としたことから、塔状比と振動の強さの2つだけをパラメータとしてまとめられており、浮き上がり挙動の一般的特性が概観されている点は、特定の構造を対象とした具体的ではあるが事例的な研究と一線を画している。基礎的な検討として重力下における自由振動のみを対象としたが、今後、地震応答等を検討する上で地震入力エネルギーのモード分解等、既往の研究にない視点から検討を行うことができると考えられる。また、等価1自由度系としての表現は浮き上がりの問題に限らず一般的に適用できるものと考えられ、従来は1つの計算手段としてとらえられがちであったモード解析の利点を示すものであり、今後さらに検討する価値があると思われる。

(2) 偏心構造物に関する数値解析的検討

<成果>

矩形平面を有する4本柱の単純な1層構造物を対象として、短辺方向に1軸の剛性偏心を設定し、短辺方向に静的外力や地震動等を受ける場合について検討し、次のことを明らかにした。

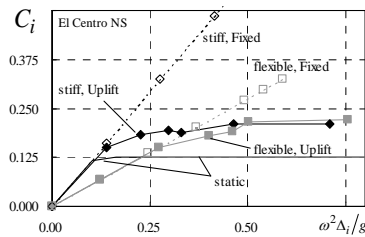
①静的な挙動としては、負担せん断力の大きな剛構面が先に浮き上がり、偏心があつて

も全体が浮き上がることにより負担せん断力は等しくなる。同時にねじれ角は抑制される。一方で、床スラブの損傷等が懸念される反り変形を生じることに注意すべきである。

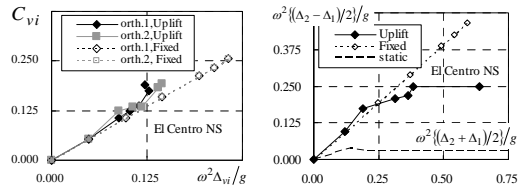
②初速度解析からは、浮き上がりと着地を繰返すうちに、脚部固定とした場合と同程度に直交方向構面のせん断力が大きく上昇する場合があることを示した。

③地震応答解析 (図 6) から、偏心がある場合にも浮き上がりによって短辺方向構面の最大負担せん断力は概ね等しくなることを確認した。また、ねじれや反りは静的解析結果を大きく上回るが、ねじれは脚部固定の場合と同等かそれ以下であった。

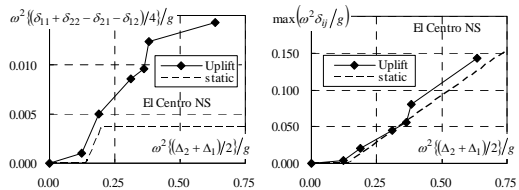
④以上から、ねじれや反りに注意すべきではあるが、浮き上がり許容構造における短辺方向の偏心は過度に評価する必要はないと考えられる。



(a) 短辺構面荷重変位関係



(b) 長辺構面荷重変位関係 (c) ねじれ変位



(d) 反り変位 (e) 浮き上がり変位

図 6 地震応答最大値 (El Centro NS)

<成果の位置づけ、今後の展望>

偏心のある上部構造に対して浮き上がりが生じる場合の挙動を検討した研究例は見当たらず、基礎的な検討ではあるが、偏心があつても浮き上がりによって構面の負担せん断力が平均化されるほか、ねじれ角も抑制されうること示したことは、浮き上がり許容構造の設計において偏心を考える上での技術的な資料となるものである。(3)に示す振

動台実験により動的挙動の検証がなされるが、今後、多軸入力下の挙動や多層・多スパンの場合についても検討していくことが必要である。

(3) 偏心構造物に関する実験的検討  
<成果>

図7に試験体を示す。最も単純な形式として1層の4本柱による形式とした。試験体は剛な柱と柔な梁とで構成することとし、柱には共通のH形鋼を、梁にはパラメータに応じたフラットバー(FB)を用いた。水平面で強軸まわりの曲げを受けるようにFBを用いることで、反り変形を許容しつつ、面内の剛床仮定を満足させる。柱頭部ではFBの幅に合わせた溝をもつ鋼板(接合ブロック)をFBとともに重ねてボルト締めする接合方法とし、FBを容易に交換できるようにした。柱下部も相互に繋ぎ、一体性を確保した。柱頭を繋ぐ4本のFBのみが構面の復元力を担う形式である。柱脚部には半球状の部品を付け、倒立円錐状の窪みを設けた支承上に単に柱を載せる。

計測はひずみゲージによるFBのせん断力、浮き上がり変位、各構面の変形角、等である。各構面のせん断力はFB梁のせん断力を塔状比で除して求めた。

加振は短辺方向の水平1軸加振とする。代表例として表1に示す無偏心(N)と短辺(加振)方向1軸偏心(E)の2種の試験体について結果を示す。

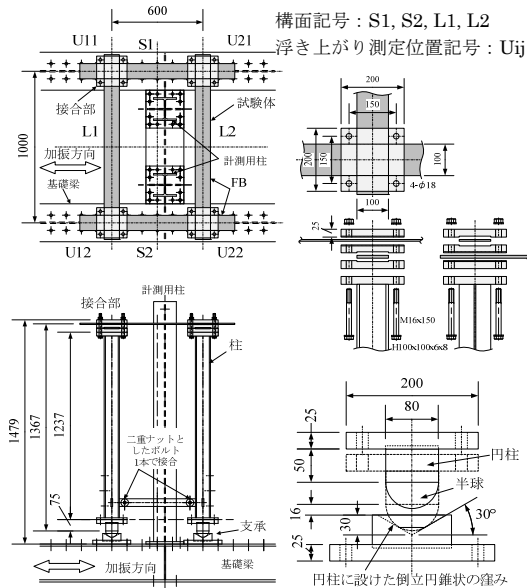


図7 試験体

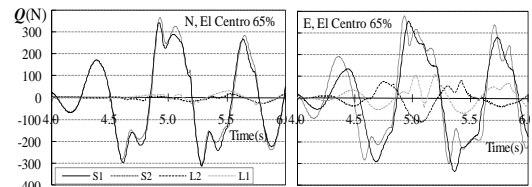
表1 試験体パラメータ

試験体	FB 梁板厚(mm)			塔状比		偏心率	周期(s)
	S1	S2	L1, L2	短辺	長辺		
N	7.0	7.0	8.7	2.28	1.34	0.00	0.45
E	5.8	8.0	8.7			0.48	0.54

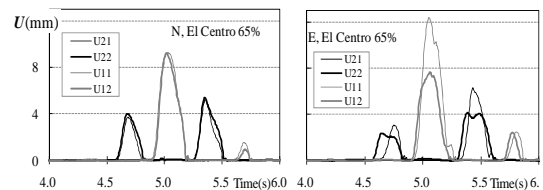
図8に応答の時刻歴の例を示す。偏心の有無に関わらず、短辺方向構面のせん断力には浮き上がり挙動の特徴である高次の振動が見られる。短辺方向に1軸偏心のあるEモデルでは短辺構面の挙動に差異があるが、最大負担せん断力は同程度となっていること、加振直交方向の長辺構面にもねじれによってせん断力が発生していることが分かる。図9に短辺構面のせん断力と変形角(浮き上がりによる剛体回転を含む。)の関係を示す。試験体は弾性範囲にあるが、浮き上がりにより高次振動を含む旗形の履歴を示している。原点付近でもループを描いているのは、支承部の摩擦によるものと考えられる。

図10では横軸に地震波の入力倍率をとり、縦軸にEモデルの最大変形を示している。偏心により、剛な構面(S2)に比べて柔な構面(S1)の変形角が大きくなっているが、浮き上がりが生じるとその差はほぼ一定のままとなり、また直交構面(L1, L2)の変形角も浮き上がり後はあまり増加しなくなっている。

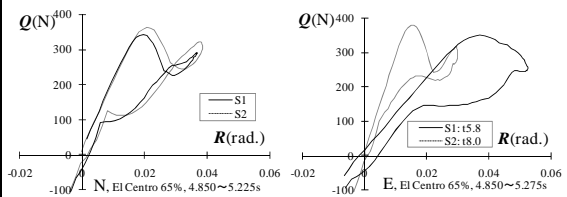
図11は $\omega^2$ を掛けて基準化した短辺構面の平均変形角  $R_m$  を横軸にとり、最大応答値を示したものである。ここで $\omega$ は各モデルの固有円振動数である。図11(a)に示すように短辺構面の平均せん断力は偏心の有無や地震波によらずほぼ同じ結果となっており、全体的な挙動に対して偏心の影響はほとんどないことが分かる。図11(b)より、浮き上がりが大きくなるとねじれ角が頭打ちとなる。



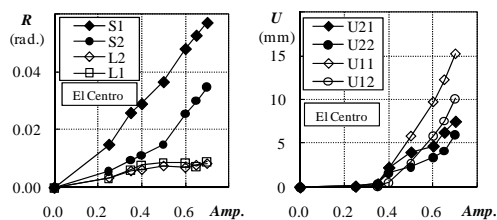
(a-1) N, 構面せん断力 (b-1) E, 構面せん断力



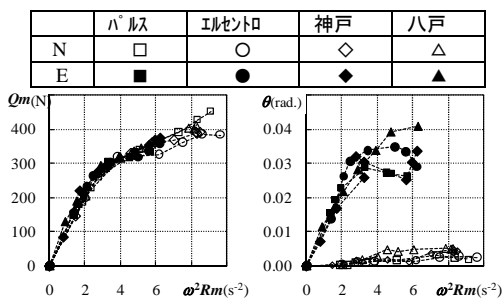
(a-2) N, 浮き上がり (b-2) E, 浮き上がり  
図8 応答の時刻歴



(a) N (b) E  
図9 短辺構面のせん断力~変形角関係



(a) 構面変形角 (b) 浮き上がり変位  
図 10 入力倍率に対する最大変形



(a) 短辺構面平均せん断力 (b) ねじれ角  
図 11 平均変形角に対する最大応答値

振動台実験結果から、浮き上がりによって短辺方向構面の最大負担せん断力は概ね等しくなることやねじれ角が頭打ちとなる傾向などを示した。これらは(2)の知見と調和的である。

<成果の位置づけ、今後の展望>

(2)で得られた知見を実験的に検証し、浮き上がりとねじれが同時に生じる建築構造の地震時応答に関する基礎的な資料を提供している。また、浮き上がりやねじれといった立体的な挙動を許容しつつ、比較的容易に偏心等のパラメータを変更できるようにした試験体を考案した上で実験を行っている点に独創性がある。

(3)では基礎的・定性的な傾向を実験的に把握したが、定量的な応答評価や、(2)と同様に多軸入力下の挙動及び多層・多スパンの場合への拡張が今後の課題である。

#### 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)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 石原直、緑川光正、小豆畑達哉、均一せん断棒による多層建築物の浮き上がりモード特性と自由振動、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 640 号、1055-1061、2009、査読有
- ② 石原直、小豆畑達哉、緑川光正、偏心構造物の浮き上がり地震応答に関する振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009、査読無

- ③ 緑川光正、須藤智文、麻里哲広、小豆畑達哉、石原直、ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した 10 層鉄骨架構の 3 次元地震応答、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 637 号、495-502、2009、査読有
- ④ Ishihara, T.、Midorikawa, M. and Azuhata, T.、Modal Analysis of Uplifting Behavior of Buildings Modeled as Uniform Shear-Beam, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering(14WCEE), 査読無、Paper ID 05-06-0116, 2008
- ⑤ Azuhata, T.、Midorikawa, M. and Ishihara, T.、Earthquake Damage Reduction of Buildings by Self-Centering Systems Using Rocking Mechanism, Proceedings of 14WCEE, 査読無、Paper ID 05-06-0156, 2008
- ⑥ Midorikawa, M.、他 3 名、Azuhata, T. and Ishihara, T.、Seismic Response of Six-Story Eccentrically Braced Steel Frames with Columns Partially Allowed to Uplift, Proceedings of 14WCEE, 査読無、Paper ID S17-03-006, 2008
- ⑦ 須藤智文、緑川光正、麻里哲広、小豆畑達哉、石原直、10 層鉄骨架構の地震応答における浮き上がり降伏ベースプレートの制振効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、819-822、2008、査読無
- ⑧ 緑川光正、豊巻真悟、堀泰健、麻里哲広、小豆畑達哉、石原直、部分的に柱浮き上がりを許容した偏心筋違付鉄骨架構の地震応答、構造工学論文集、Vol.54B、535-545、2008、査読有
- ⑨ 石原直、小豆畑達哉、緑川光正、1 層 1 軸偏心 2×2 構面弾性モデルの浮き上がり 2 次元解析、鋼構造年次論文報告集、第 15 巻、489-492、2007、査読有
- ⑩ 須藤智文、石原直、小豆畑達哉、緑川光正、浮き上がり降伏型ベースプレートの履歴特性と累積塑性変形性能、鋼構造年次論文報告集、第 15 巻、493-498、2007、査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① 石原直、[雑誌論文]②、日本建築学会大会、2009.8、東北学院大学 (予定)
- ② 石原直、[雑誌論文]④、14WCEE、2008.10、北京
- ③ 小豆畑達哉、[雑誌論文]⑤、14WCEE、2008.10、北京
- ④ 石原直、[雑誌論文]⑨、鋼構造シンポジウム、2007.11、東京ファッションタウン

## 6. 研究組織

### (1) 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・主任  
研究官  
研究者番号：50370747

### (2) 研究分担者

小豆畑 達哉 (AZUHATA TATSUYA)  
国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長  
研究者番号：00251629

### (3) 連携研究者

緑川 光正 (MIDORIKAWA MITSUMASA)  
北海道大学大学院・工学研究科・教授  
研究者番号：90126285