

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04707

研究課題名(和文)地震応答低減及び損傷修復性により建物の長寿命化を目指した鋼構造柱脚部システム

研究課題名(英文) Column base system of Steel structural aimed at extending the life of buildings by reducing earthquake response and repairing damage

研究代表者

井上 圭一 (Inoue, Keiichi)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：70333630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：地震時に建物の柱脚部に浮き上がりを許容することによる制振構造システムを提案した。建物の損傷を低減し、継続使用を可能とする構造システムの開発を目標とし、柱脚部試験体の載荷実験、地震応答解析及び小型模型を用いた振動実験を行い、地震応答性状に関して考察した。振動実験の計測は画像解析により実施した。

柱脚部のアンカーボルトを降伏させエネルギーを吸収し、大地震後には損傷したアンカーボルトを交換するという新たな柱脚システムを用いた試験体の載荷実験を行い、有効性を示した。さらに、地震応答解析及び小型振動模型の振動実験により、地震応答性状に関する考察を行い、柱脚浮き上がり建物の実現に向けた知見を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震が発生した場合に、建物の損傷を低減し、エネルギーを吸収する柱脚部の修復を容易とする構造システムを提案した。大地震時に柱脚部が浮き上がり、振動特性の変化による地震応答低減効果があり、かつ柱脚部でエネルギーを吸収することで建物の損傷を減らし、かつ柱脚部の修復性を有する制振システムの開発のための基礎データを提示した。

特に、エネルギー吸収した結果損傷が生じる可能性がある要素が、柱脚部のアンカーボルトのみになり、大地震後に交換できるようにしておくことにより、地震後の建物構造体の長寿命化を見込むことができる。

既存の耐震・制振装置が設置しにくい建物にとっては、有効な地震応答制御法の1つになる。

研究成果の概要(英文)：Structural system that reduces damage to the building and extends its service life by allowing the column base to uplift during an earthquake was proposed. Vibration experiments using small scale models were conducted to discuss the seismic response characteristics. Some load tests were conducted on specimens using a new column base system that absorbs energy by yielding the anchor bolts of the column base and replaces damaged anchor bolts after a large earthquake. Effectiveness of the proposed column base system was demonstrated. In addition, through the seismic response analyses of the structural model and the vibration experiments of the small vibration specimens, it was considered the seismic response property and presented the knowledge toward the realization of the structural system with column base uplifting.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：地震応答 柱脚浮き上がり 制振構造 画像解析

1. 研究開始当初の背景

建物の柱脚浮き上がりを許容して地震応答を低減させようとする構造が提案され、地震応答性状などの研究が行われている。大きな地震動が生じた時には、柱脚が浮き上がることで柱脚部において履歴エネルギーを吸収し、かつ柱脚に生じる水平せん断力を建物基礎に伝達する必要がある。既往の研究では、ベースプレートを降伏させることで履歴エネルギーを吸収する柱脚システムが提案されているが、具体的な柱脚部の設計法が十分に明らかになっておらず、柱脚ダンパーに損傷が生じたあとの修復性の検討はされていない。

研究代表者は、柱脚浮き上がり許容建物の地震応答性状に関する研究を継続して行っているが、柱脚浮き上がり建物の実用化のためには、柱脚部で十分にエネルギー吸収ができ、せん断力と曲げのそれぞれの設計に関して力学的に明快にし、建物の長寿命化のためにも容易に修復できるシステムを新たに開発するための研究が求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、修復性を有する柱脚浮き上がりを許容した制振建物の柱脚部のシステムの構造特性を解明し、修復性を確認し、設計法に関する基礎データの蓄積を目指すことである。本研究では、以下の内容を目的とした。①実物大に近いサイズの柱脚部試験体による載荷実験を行い、構造性能を解明すること。また、修復性についても載荷実験後に確認を行うこと。②有限要素法により材料非線形を考慮したパラメータ解析を実施し、詳細に構造特性を検証すること。③縮小モデルによる振動実験により、地震応答特性を検証すること。④柱脚浮き上がり時の振動性状解明のために解析的に検討すること。

3. 研究の方法

(1) 提案柱脚システムの構造性能の把握のための実験的検討

本研究で提案している柱脚システムの試験体を製作し、載荷試験を実施する。荷重変形関係を求め、その結果から、提案柱脚システムの構造性状について明らかにする。通常露出柱脚の試験体載荷試験も行い比較することで特徴を把握する。初期剛性や降伏耐力の設計式が通常露出柱脚の設計式が適用可能か確認する。また、載荷試験終了後に、降伏したアンカーボルトが交換可能であること、交換後に再度載荷試験を実施して、構造性能の低下がないことを確認する。

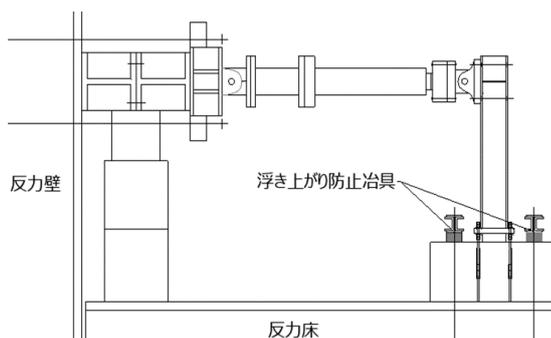


図1 載荷試験 概略図

(2) 柱脚部試験体の有限要素解析

提案する柱脚システムは、アンカーボルトの付着を無くすこと、アンカーボルトの接合部を設けること、基礎コンクリートに凸部を設けることでベースプレートを高く設置することなど、通常露出柱脚に比べて、複雑になる。このようなシステムの荷重変形関係などが解析的に再現することが可能であるか、解析精度を向上させるための課題などについて検討する。

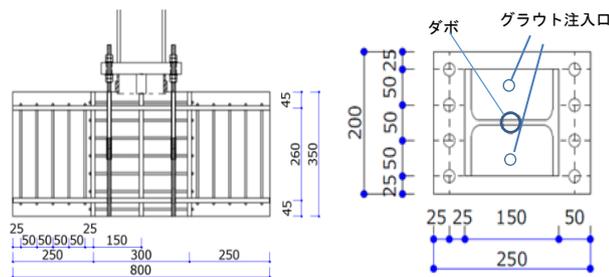


図2 提案システム試験

図3 試験体ベースプレート

(3) 振動特性の把握のための解析的検討

大地震時に柱脚が浮き上がれば、建物の剛体回転が生じることとなり、それが地震応答に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また、建物幅と柱脚部の幅をそれぞれ別に設定することができれば、浮き上がり現象による地震応答を調整することも可能となる。振動性状に及ぼす建物幅、柱脚幅の影響について、振動モード、固有周期観点から解析的に明らかにする。

(4) 地震時振動特性把握のための実験的検討

縮小モデルの振動実験を実施し、柱脚浮き上がりを考慮した建物模型の地震時応答特性について検討する。建物の地震時応答変形の低減効果、振動性状などについて実験的に検討する。また、柱脚浮き上がりからの着地時の柱脚部における衝撃を緩和することなど、柱脚部の構造特性の影響を考慮するために、柱脚部に厚さの異なるゴム板を設置した場合の実験を行い、柱脚部

の特性が及ぼす影響について考察を行う。

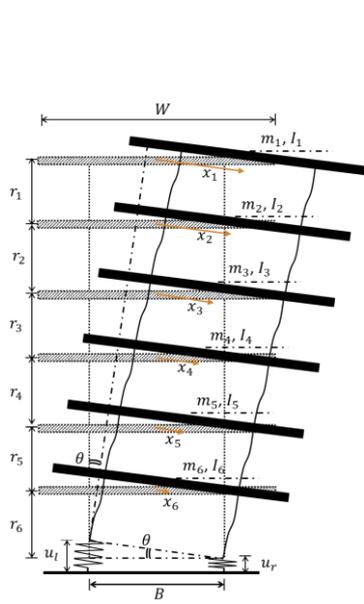


図4 解析モデル

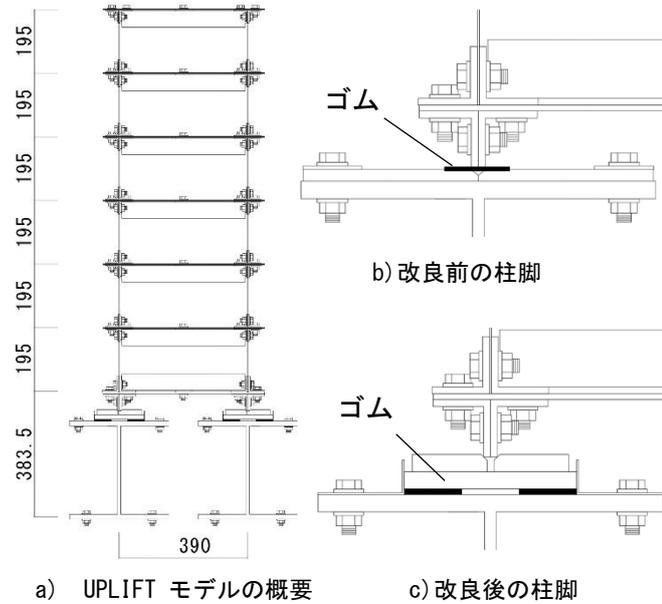


図5 試験体と柱脚

4. 研究成果

(1) エネルギー吸収能力と修復性を有する柱脚部の提案・载荷実験による検証

本研究では、アンカーボルトでエネルギーを吸収し、損傷後は交換することにより修復が可能となる柱脚システムを提案した。このシステムの構造性能を検証するために、試験体を作成し、载荷実験を実施した。提案された柱脚部については、初期剛性及び降伏耐力は既往の設計式（それぞれ図6中(1)式(2)式)と同等であり、履歴エネルギー吸収が大きく紡錘形のグラフ形状となった。図7に示すように、変形が進行するに従い等価粘性減衰定数が大きくなることを確認した。载荷試験後、アンカーボルトの交換可能については、ボルトを回転させ引き抜くことができ、再度アンカーボルトを交換して修復できることを確認した。修復後の载荷実験を行った結果、初期剛性が若干低下するものの、構造特性としては大きく低下しないことを示した。

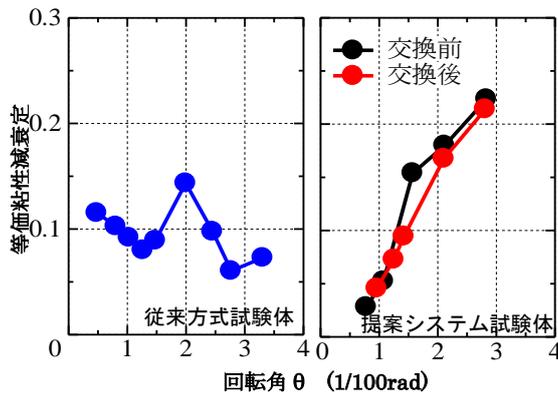


図7 等価粘性減衰定数

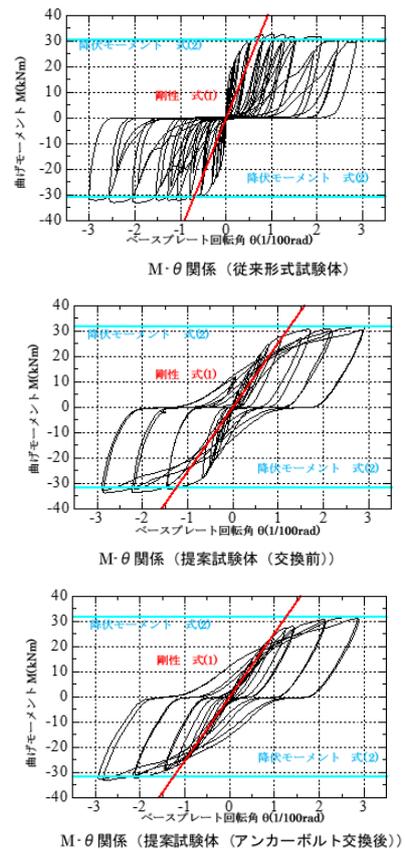


図6 各試験体の M-θ 関係

(2) 有限要素解析による構造的性状の検討

提案した柱脚システムは、従来の露出柱脚よりも複雑になるため、その構造特性のシミュレーションの可能性について検討するために、材料非線形有限要素解析を汎用ソフトのFINALを用いて実験結果の再現を試みた。十分に精度よい再現はできなかったが、今後の展開に向けて、接合要素の有無によって、解析結果が大きく異なることを示し、コンクリートと鋼材の接合部分のモデル化が解析精度の向上に重要であることを示した。また、精確な解析を行うためには、ベースプレートとアンカーボルトの接合や座屈の影響など、解析モデルのさらなる改良が必要である。本研究の提案モデルのエネルギー吸収能力を高めること実現するには、アンカーボルトの座屈を防ぐことなど、ディテールについての改良点についても判明した。

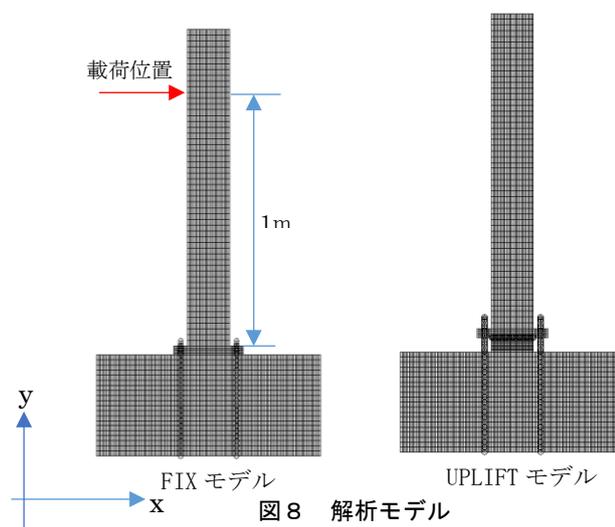


図8 解析モデル

(3) 浮き上がり建物の地震時振動性状に関する解析的考察

本研究では、建物幅と柱脚支持点幅の違いを考慮にいたした柱脚浮き上がり制振建物の自由振動特性に及ぼす影響について、自由振動解析を行い、考察を行った。

柱脚幅を一定にして建物幅を変更する設定1、及び、建物幅を一定にして柱脚幅を変更する設定2の解析によって、建物幅と柱脚支持点幅が柱脚浮き上がり許容建物の振動性状に及ぼす影響について検討した。その結果、柱脚の浮き上がり方向と建物の変形が同じ方向になる1次モードとそれらが反対方向になる逆位相モードに関しての固有周期への影響が大きく、その他の振動モードへの影響は小さいため、浮き上がり性状を検討するには十分に影響が大きいことが明らかになった。(解析例：図9・1次モード、図10・赤線・逆位相モード)

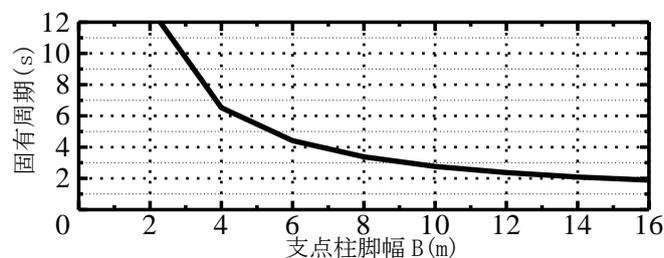


図9 設定2 モデルの1次固有周期

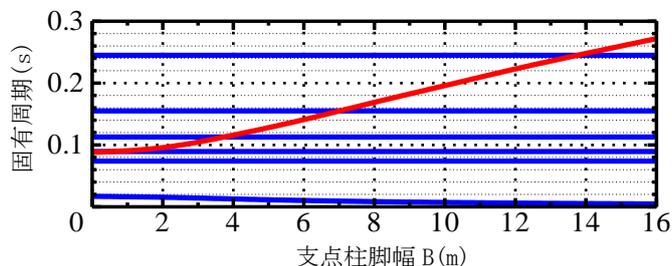


図10 設定2 モデルの2次から8次固有周期

(4) 柱脚浮き上がり建物の縮小模型を用いた振動実験による計測方法の検証と応答性状

図5に示した建物模型の振動実験を行い、画像解析により試験体各点の変位を求めた。画像解析により、振動性状を検討するために十分な精度の計測結果が得られることが示された。

また、その結果から、フーリエ解析、ウェーブレット解析を実施して考察を行った。その結果の例を図11、12に示す。柱脚が浮き上がるように製作したUPLIFT modelにおいて柱脚が浮き上がっている間に高次モードの影響により複雑に振動している様子が把握できた。柱脚部に厚さの異なるゴムシートを設置した模型振動実験を実施した。柱脚部分の構造性状が柱脚浮き上がり応答に及ぼす影響が大きいことが示された。

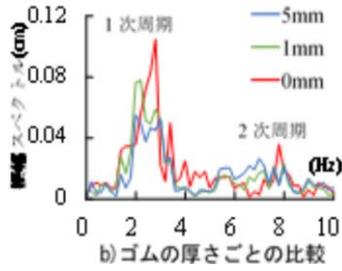
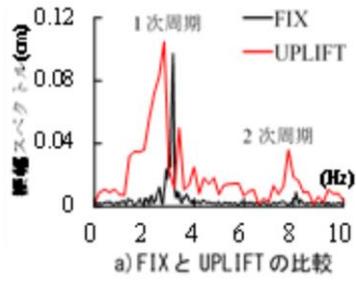


図 1 1 フーリエ解析結果

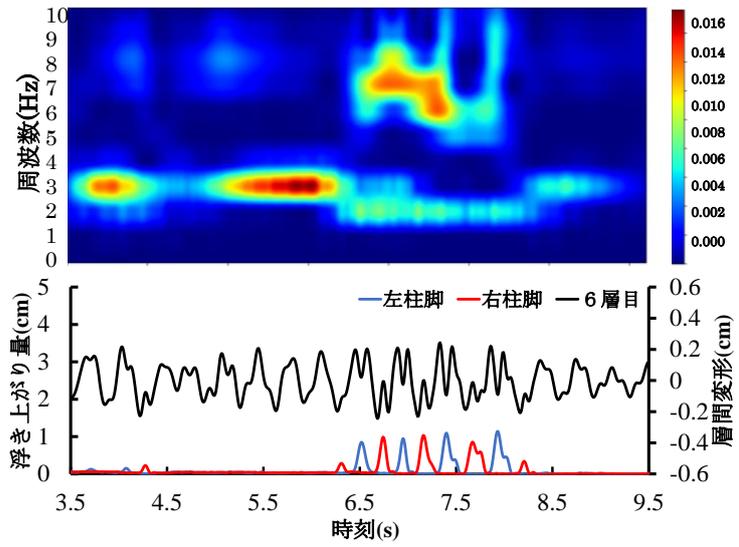


図 1 2 振動模型振動実験結果とウェーブレット変換の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木村逸、井上圭一
2. 発表標題 エネルギー吸収を期待した露出柱脚部の有限要素解析
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部研究報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上圭一
2. 発表標題 建物幅と柱脚支持点幅が異なる柱脚浮き上がり制振建物の自由振動性状
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部研究報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上圭一
2. 発表標題 柱脚浮き上がり制振建物の自由振動性状に及ぼす柱脚支持点幅の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀内翔太、井上圭一
2. 発表標題 振動実験に基づく柱脚浮き上がりを許容した縮小模型の振動性状
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部研究報告集（投稿済み）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上 圭一
2. 発表標題 柱脚浮き上がり制振建物の自由振動性状に及ぼす柱脚支持点幅の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 圭一
2. 発表標題 建物幅と柱脚支持点幅が異なる柱脚浮き上がり制振建物の自由振動性状
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 圭一、木村逸
2. 発表標題 エネルギー吸収を期待した露出柱脚部の有限要素解析
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 圭一
2. 発表標題 柱脚部の構造特性が異なる 柱脚浮き上がり制振建物模型の地震応答性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 圭一、小寺 唯斗、ZHANG YUKUN
2. 発表標題 エネルギー吸収能力及び修復性を有する鋼構造柱脚部の提案と基本的力学特性
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 圭一、北川 紗衣
2. 発表標題 異なる柱脚部構造性状を有する 柱脚浮き上がり制振建物の模型振動実験
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 圭一
2. 発表標題 柱脚浮き上がりを許容した建物模型の振動実験における計測方法と応答性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 圭一、ZHANG YUKUN
2. 発表標題 エネルギー吸収能力及び修復性を有する鋼構造柱脚部の 提案と 基本的力学特性
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 圭一、近藤 將太
2. 発表標題 柱脚浮き上がり建物の縮小模型を用いた振動実験による 計測方法の検証と応答性状
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Inoue
2. 発表標題 SHAKING TABLE TESTS ON EARTHQUAKE RESPONSE OF MULTISTORY BUILDING MODEL WITH COLUMN UPLIFT
3. 学会等名 17 th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
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
---------	---------