

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420586

研究課題名(和文) ソフトストーリーを有する鉄筋コンクリート造架構の地震応答制御に関する研究

研究課題名(英文) SEISMIC RESPONSE CONTROL FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURE WITH SOFT-FIRST STORY

研究代表者

菅野 秀人 (KANNO, Hideto)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：20336449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート(RC)造ピロティ架構を対象として、地震時にソフトストーリーに変形が集中しやすいことを利用して、磁気粘性流体(MR)ダンパーにより地震応答制御を行った。曲げとせん断部材が混在するRC造架構を対象に、サブストラクチャ・オンライン実験を実施して、制御に必要な地震時の最大応答変形を、エネルギー応答の視点から推定可能であることがわかった。ピロティ架構の地震時挙動を模擬した縮小曲げせん断型振動模型の振動台実験を実施して、ピロティ柱軸方向に設置したMRダンパーによるセミアクティブ制御が地震応答低減に有効であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Soft-first story structures such as pilotis buildings are known as vulnerable structures against earthquakes. In case of such buildings, the first stories of the buildings suffer destructive damages during strong earthquakes. In this research, semi-active seismic response control system is applied at the first story of the buildings.

Through the pseudo-dynamic tests of on shear and flexural reinforced concrete columns, we proposed a simplified method to predict maximum response deformation using a seismic momentary input energy. The bending shear scaled model to simulate the vibration properties of soft-first story structure was constructed and discussed a simple control method of the damping force in a magneto-rheological fluid damper subjected to overall flexural deformation response. The response reduction of this scheme was confirmed through the shaking table tests.

研究分野：建築構造

キーワード：地震応答制御 鉄筋コンクリート構造 ソフトストーリー

1. 研究開始当初の背景

(1) 建物の1階部分に壁を設けず柱だけのオープンスペースとするピロティ建築は、その建築計画的な利便性から需要が高い。しかし一般にピロティ階の水平剛性は上層階に比べて低くなる傾向があり、大地震時に損傷集中が生じやすく、大地震における特徴的被害のひとつでもある。多層建物において水平剛性が他階に比べてきわめて小さく、大地震時に過度な変形が生じやすい階をソフトストーリーと呼ぶ。ソフトストーリーの地震被害は一般の大地震で新たに確認された被災形式ではなく、国内外で大地震が発生する度に被害が報告され、その危険性が再認識されている。日本国内においては、1995年の兵庫県南部地震においてピロティ建物に多くの被害が生じ、その後の耐震設計法の見直しに至っている。現在の耐震設計法では、ピロティ構造は「避けるべき構造」として認識されているが、一方で機能面において1階に開放的なスペースを有する建築物に対する社会的な要望は強い。さらに2011年の東北地方太平洋沖地震での津波被害事例から、津波荷重を受けにくくするためにはピロティ形式が有効との見解もある。ソフトストーリーの地震被害を低減する方法の一つとして、当該階の剛性および耐力を増大させて上層との不連続性を軽減する方法がある。現在の耐震設計法で採られたのがこの方法であり、当該階の柱のみを大きくすると柱主筋の配置が上層階との間で不連続になるなどの問題を含んでいる。一方で、ピロティ階がソフトストーリーであることを利用し、変形をソフトストーリーに集中させて積極的にエネルギー吸収を行う設計法も提案されている。

(2) 研究代表者は、合理的な地震応答制御手法としてセミアクティブ制振に着目して研究し、フェールセーフの観点、実構造物の非線形な振動特性に対するロバスト性などを

考慮し、簡便な制御手法として後述のダンパーの履歴形状制御を提案した。これまでの検討の結果、本手法は最大応答加速度低減に効果があるばかりではなく、ダンパー減衰力によって生じるダンパー支持部材の変形を制御力の除荷によって緩和する効果があることを確認している。これは免震構造などで見られる、ダンパー減衰力の付加による加速度と変位との最大応答の抑制に係るトレードオフ関係を、従来のパッシブダンパーに比べて緩和できることを示唆している。損傷が集中しやすいソフトストーリーに免震構造のような効果を付加する場合、これまで検討を行ってきたダンパーの履歴形状制御が、ソフトストーリーの過大な応答変形を抑制し、かつ柱の過大なせん断力の負担を低減できると期待できる。さらに架構の最大応答値が推定できれば、その応答レベルに最適なダンパー力を決定できるため、より応答低減効果の高い制御を行えることが期待できる。

(3) 鉄筋コンクリート(RC)造を対象として、地震時の瞬間最大入力エネルギーに基づく簡易な応答推定法を検討してきた。これは、RC造のような非線形性のある構造物では、地震時最大応答変形と、瞬間的に入力されるエネルギー量とに高い相関があるという経験則に基づいている。また提案した本推定法では、既往の等価線形化法に基づく応答推定法では考慮されていない応答振幅の正負の偏りも考慮でき、良い推定結果が得られている。これまでの検討ではRC造柱の曲げ降伏のみを想定しており、せん断降伏を含む複合的な破壊形式への対応について検討していない。また2011年東北地方太平洋沖地震での地震・津波被害を鑑みて津波避難ビルとしてピロティ架構のスマート制振化を考えた場合、比較的規模の大きな余震動に対する耐震性能(残存耐震性能評価)としての応答推定も必要である。

2. 研究の目的

本研究ではこれまで検討を行ってきたダンパーの履歴形状制御に地震応答推定を取り入れ、さらに発展させてRC造ピロティ架構に適用することを目的とした。またピロティ建物の計画的利便性に配慮して、ダンパーは柱軸方向に設置することとした。本研究では、1) 曲げ降伏部材とせん断降伏部材が混在する架構の地震時挙動をサブストラクチャ・オンライン実験により明らかにし、複合的な破壊形式に対応した地震時最大応答推定を目指して、瞬間最大入力エネルギー性状を検討した。2) ピロティ架構の地震時挙動を模擬した曲げせん断型振動模型の振動台実験を実施して、ピロティ柱の軸方向に可変ダンパーを設置した際の地震応答の抑制効果について検討した。3) RC造ピロティ架構を想定した多層平面モデルを対象に地震応答解析を実施し、本提案の有効性を検証した。

3. 研究の方法

(1) サブストラクチャ・オンライン実験

実験で想定する振動モデルは、図1に示すようなせん断部材と曲げ部材とが並列に設置されたせん断1質点系モデルである。試験体は、破壊性状の異なる2体のRC造柱試験体とし、ひとつはせん断降伏が先行する柱(RCS試験体)、もうひとつは曲げ降伏が先行する柱(RCM試験体)とした。

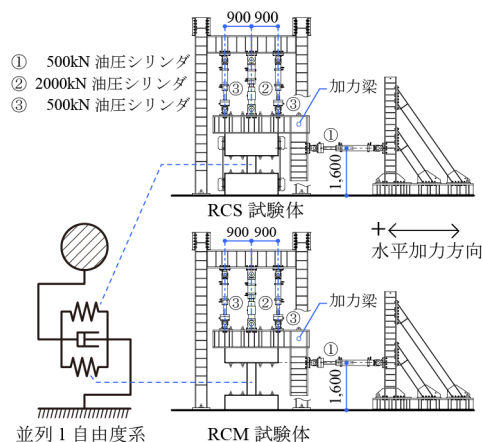


図1 オンライン実験加力装置

柱断面寸法は両試験体で同一の300mm×300mmとし、柱内法寸法は、RCS試験体で600mm、RCM試験体で1100mmとした。両試験体でせん断補強筋量は同一とし、柱内法寸法と主筋量、柱軸力により、2つの破壊性状の異なる試験体を設計した。RCS試験体では、せん断降伏後の急激な耐力低下に対して安定した加力制御を補償するため、試験体の加力方向両側面に平バネ2枚(以後、補剛バネと呼ぶ)を設置した。質点重量は1000kNとし、内部粘性減衰は、本実験では耐力低下域までの応答を扱うため、扱いが容易な初期剛性比例型減衰(1%)を採用した。各加力装置は、水平油圧ジャッキ1台と鉛直油圧ジャッキ3台を用いて、試験体に逆対称曲げせん断力を作用させた。応答計算より算出される目標水平変位へ、水平ジャッキをデジタル式変位計により制御し、鉛直ジャッキ3本によって上スタブの回転を拘束すると同時に一定軸力に制御した。油圧ジャッキが目標値に到達した時点で、各油圧ジャッキに設置したロードセルによる荷重値を応答計算にフィードバックし、逐次数値計算を行った。なお、RCS試験体ではロードセルの荷重値から補剛バネの負担せん断力を差し引いた値を応答計算に使用した。

(2) 振動台実験

高層ピロティ架構の全体曲げ挙動を模擬する曲げせん断型振動試験体を製作した。この基本原理は図2のように片持ち柱を基本とし、柱頭部の回転曲げ変形を鉛直方向のバネにより拘束し、曲げせん断型振動性状を再現している。振動制御を行う可変減衰部材である磁気粘性流体(MR)ダンパーは、回転拘束バネと同じ鉛直方向に設置する。MRダンパーの力学モデルは、ダッシュポットと摩擦スライダーを並列したビンガムモデルで表され、この摩擦力のみが可変要素となる。図3には製作した試験体を示す。頂部重錘の質

量は 29.4kg で、回転拘束バネの剛性は 11.73N/mm である。ダンパー支持部は、回転拘束バネに比べて十分剛なものとした。MR ダンパーは 0.2kN 級でストローク ±21mm の両ロッド型とした。MR ダンパーには、作動油流路の途中に励磁コイルが設けてあり、電流を印可することによりダンパーの減衰力を制御することができる。本実験で用いた MR ダンパーは、非励磁時に比べて最大 9 倍の摩擦力を得ることができる。

この曲げせん断試験体を振動台上に固定して、地震波加振実験を実施した。

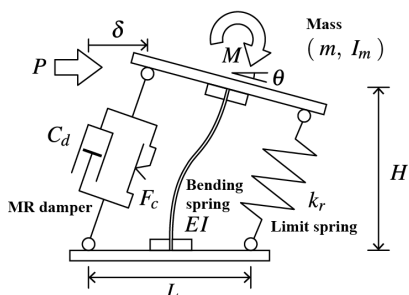


図2 曲げせん断振動系の原理図

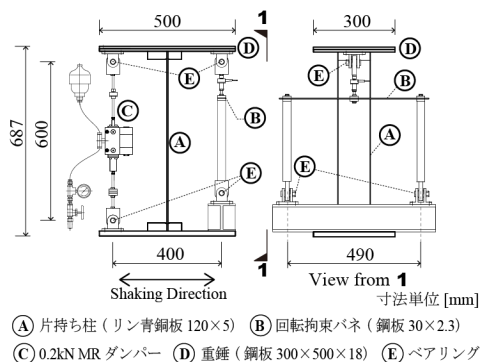


図3 曲げせん断振動モデル

このような MR ダンパーの摩擦力をリアルタイムで制御することで、ピロティ架構を模擬した曲げせん断型振動モデルの地震応答の低減を試みた。制御は MR ダンパーへの励磁を ON と OFF のみ切り替える ON / OFF 制御を採用した。ダンパー力の切り替えは図 4 に示すように MR ダンパーの荷重変位関係において、第 2、4 象限で ON とし、第 1、3 象限で OFF とする。なお、地震動が作用する間、全く励磁しないケースをパッシブ OFF、一定電流印可で励磁し続けるケースをパッシブ ON と呼ぶ。

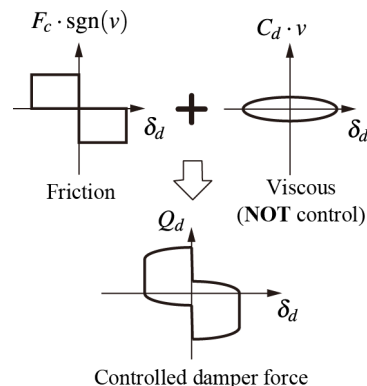


図4 ダンパーの履歴形状制御則

4. 研究成果

(1) サブストラクチャ・オンライン実験

実験には図 5 に示す 4 つの地震波を使用した。これらは工学的基盤上の告示スペクトルに対応した模擬地震波で、繰り返し数のみが異なっている。実験結果より得られた荷重変位関係を図 6 に示す。いずれもせん断部材の降伏後の耐力低下が見られ、また地震波の入力過程の違いにより、最大応答が大きく異なることがわかる。

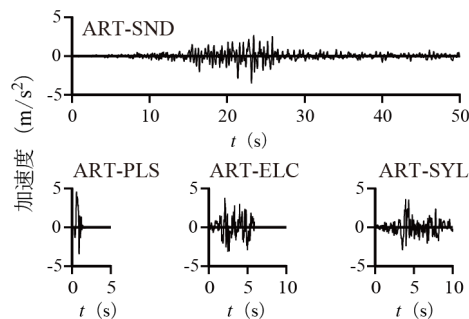


図5 オンライン実験・入力波

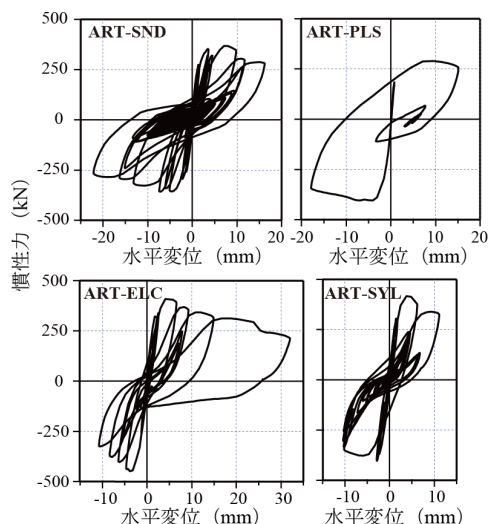


図6 オンライン実験・慣性力-変位関係

本研究では、架構の半サイクル応答時間 (Δt) に入力されるエネルギーを瞬間入力エネルギー (ΔE) と定義した。図 7 には、各実験の ΔE 時刻歴を示す。また図 8 は応答変位が更新された Δt における、 ΔE と応答変位との関係を示したものであり、非常に高い相関があることがわかる。このことから、耐力低下の傾向があるせん断部材を含む架構においても ΔE から最大応答変位が推定可能であることが示唆される。

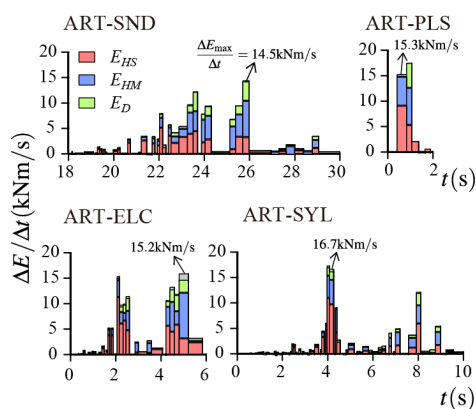


図 7 瞬間入力エネルギー時刻歴

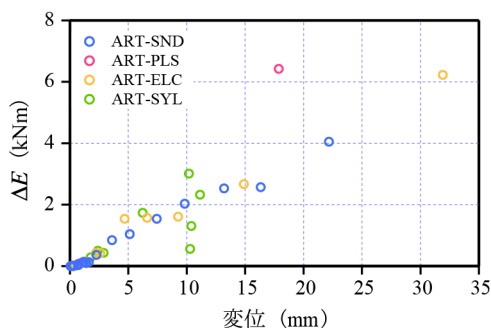


図 8 変位更新時における ΔE と応答変位の関係
 図 9 には、瞬間入力エネルギーと当該時間 t までに入力されたエネルギーの関係を示す。なお、図中のエネルギーは等価速度換算した値となっている。これらは非常に高い相関があることがわかる。縦軸と横軸の関係は、ランダム振動論における、ピークファクターと関連づけられる。一般に地震終了時までに入力される総入力エネルギーは、地震動の速度応答スペクトルと類似した性状を示すため、地震動のスペクトル特性が与えられれば総入力エネルギーの推定が可能とされている。これに本知見を加えれば、地震動経過中の瞬

間入力エネルギー ΔE が推定可能であり、最大応答変形も可能であることが示唆される。ただし、本研究期間において、これらの詳細な推定方法については確立できなかったため、今後の検討課題である。

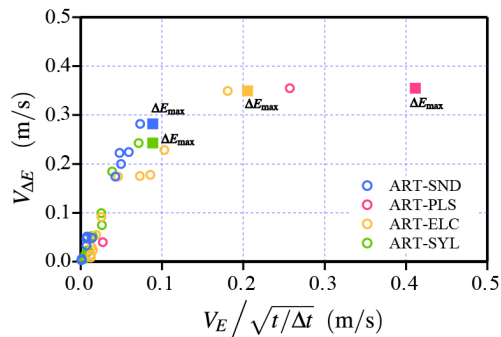


図 9 ΔE と入力エネルギーの関係

(2) 振動台実験

実験には、図 10 に示す 5 波の観測地震と 1 波の模擬地震動を使用した。図 11 には実験結果の一例を示す。

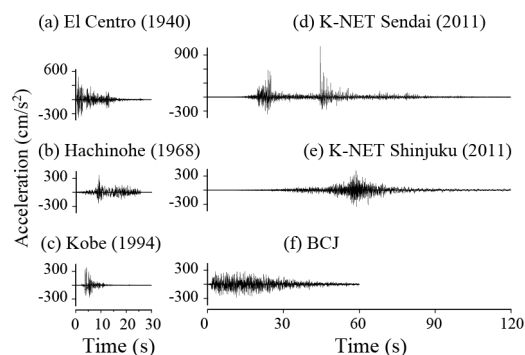


図 10 振動台実験・入力波

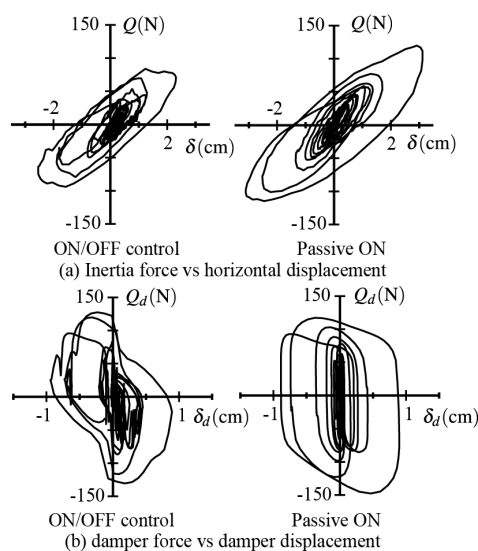


図 11 慣性力-変位関係・ダンパー荷重変位関係

図 11 を見ると、ダンパーの履歴形状は意図通りの形状(図 4)となっており、制御がうまく行えたことがわかる。また慣性力-変位関係(図 11 上段)を見ると、一定電流で励磁し続けるパッシブ ON に比べて、本制御が加速度(慣性力)を抑えていることが確認できる。図 12 は、励磁電流を 0(パッシブ OFF)から 0.7A までの各最大応答値を示している。これを見ると、本制御は非励磁から電流値(ダンパー力)の増加に伴い、加速度(S_A)と変位(S_D)とがともに低減されるが、一定の電流値(ダンパー力)を上回ると応答低減効果が減少することがわかる。一方でパッシブ ON では、ダンパー力の増大により最大加速度が一方向的に増大する傾向が確認できる。これは、ダンパー力の ON/OFF の切替えにより、ダンパー力増大に伴う振動系全体の固有周期の短周期化を抑えているためと考えられる。

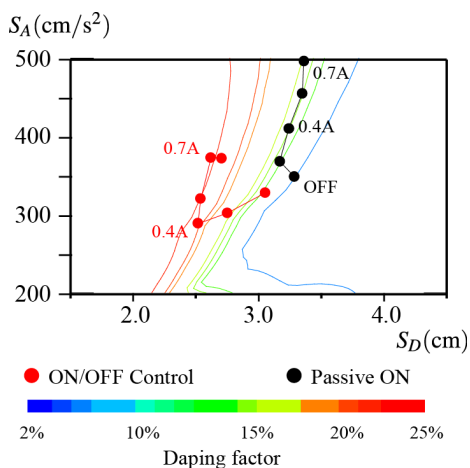


図 12 最大応答値の比較

(3) ピロティ架構への適用とまとめ

本研究では、12 層 1 スパンのピロティ架構を対象に数値解析により、本制御の有用性を検証した。まず、平面フレームモデルを構築し、MAP 解析により荷重 変位関係を求め、ピロティ階が 1/500 変形時の応力から各層の剛性を決定した。これを質点系モデルに置換し、固有値解析より等価一質点系に縮約しダンパー仕様を決定した。制御クライテリアは、地動最大速度 25cm/s 入力時でピロティ階の

変形角を 1/200 以下と定めた。なお、主架構は線形として時刻歴応答解析した。その結果本制御は、ダンパーを設置しない場合に比べて、変位、加速度ならびに主架構の層せん断力を約半分に抑える制御効果が発揮され、パッシブ ON と比べても、応答低減効果が高かった。ただし、本検討で設定されたダンパー力は非常に大きく、現在までに開発されている可変ダンパー容量の 4 倍となっており、今後はいかにダンパー容量を減らしつつ、応答低減効果を満足させられるかが課題となる。

以上の検討から、RC 造ピロティ架構を対象とした合理的な地震応答低減手法について、研究目標をおおむね達成することができたと考えている。ただし、地震応答推定手法ならび制御則に関して、課題も残されており、本提案を実用化するためには、さらなる検討が必要であると考えられる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

菅野秀人、ほか 3 名、せん断柱と曲げ柱からなる並列 1 自由度系モデルの擬似動の実験、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.37、No.2、2015、pp.673-678

帆苅昂太郎、菅野秀人、西田哲也：曲げせん断型振動系の可変ダンパーによる全体曲げ変形制御に関する研究、査読無、第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム、2015、pp.137-142

菅野秀人、ほか 3 名、鉄筋コンクリート造ピロティ架構を対象とした瞬間最大入力エネルギーに基づく地震応答推定に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.36、No.2、2014、pp.691-696

[学会発表](計 1 件)

K.HOKARI, H.KANNO, T.NISHIDA : Shaking table tests of bending-shear vibration model with magneto-rheological fluid damper , 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 秀人 (KANNO, Hideto)
秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授
研究者番号：20336449