

令和元年6月13日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06580

研究課題名(和文) アンボンド極軟鋼を軸方向鉄筋に用いるRC造柱の力学的特性とその活用に関する研究

研究課題名(英文) A study on reinforced concrete columns using low-yield-steel bars setting into axial direction as a damper

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造柱の軸方向に極軟鋼棒をダンパーとして内蔵した部材を提案した。その活用例として、全体曲げ変形挙動が卓越するピロティ架構の地震応答低減効果について検討した。その結果、軸方向にダンパーを内蔵することにより、架構の全体曲げ変形が適度に抑制され、軸変形・水平変形ともに地震応答を低減することが可能であることがわかった。ただし、ダンパー量を過度に多くすると全体曲げ崩壊形式から層崩壊形式に移行し、ダンパーとしての機能が損なわれることがわかった。ダンパー量を架構の静的増分解析結果のみに基づいて設定する方法について提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都心部などで多くみられる形状がスレンダーな高層建物は、地震時に建物全体がしなる全体曲げ変形挙動が卓越する場合が多い。本研究成果はこのような建物の耐震性能の向上に寄与するものとする。本研究では、特に日本国内においては「避けるべき構造」と認識されている一方で、機能面では社会的ニーズの高いピロティ構造への適用に着目した。本研究により、柱軸方向にダンパーを設置して、ピロティ架構の建築計画的な利便性を損なわずに、耐震性能を向上させることが期待できる知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, a reinforced concrete column in which low-yield-steel bars is incorporated as a damper in the axial direction, is proposed. As an example of its application, the seismic response reduction effect for the soft-first-stories frame that is superior in overall flexural deformation is discussed. As a result, it is found that by incorporating a damper in the axial direction, the overall flexural deformation of the frame is appropriately suppressed, and it is possible to reduce the seismic response in both axial deformation and horizontal deformation. Nevertheless, it is also found that when the amount of dampers is excessively increased, its seismic response behavior and fracture type is varied, and the function as a damper is lost because of reduction of axial deformation. A simple method to design the amount of dampers based on the results of static incremental analysis of the bared frame is also proposed in this research.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート造柱 軸鉄筋 アンボンド エネルギー吸収

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ピロティ架構は一般に、ピロティ階の水平剛性が上層階に比べて低いソフトストーリーとなる傾向があり、大地震時に損傷集中が生じて、過度な変形となることが特徴的である。ソフトストーリーの地震被害は今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、ピロティ構造は「避けるべき構造」として認識されている一方で、機能面では1階に開放的なスペースを有する建築に対する社会的ニーズは高い。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。

このような背景から、現在の耐震設計では鉄筋コンクリート(RC)造ピロティ架構について、ピロティ階の柱頭・柱脚部で曲げ降伏する「層崩壊形式」とピロティ階の引張側の柱での全主筋引張軸降伏による「全体曲げ崩壊形式」を許容する設計方法が示されている。このうち、層崩壊形式は1層の柱頭・柱脚で曲げ降伏が生じるため、ここに水平変形が集中すると考えられる。一方で全体曲げ崩壊形式は、各階の柱軸変形によりピロティ階に過度な変形が集中することなく、落階等の脆性的な崩壊形式に至らないことが考えられている。

また現在の制震技術の発展により、このようなピロティ架構に関して制震技術を適用して、地震応答低減を図る技術も提案されている。しかし提案の多くは、「層崩壊形式」のピロティ架構を対象として、ピロティ層の構面内に制震ダンパーを設置するものが多い。ダンパーのエネルギー吸収により制振効果が期待できるものの、ピロティ架構の利点である空間利用の有効性を一部制限してしまうものがほとんどである。

2. 研究の目的

これらの研究知見から、全体曲げ崩壊形式に着目し、柱軸方向にエネルギー吸収部材を設置する本研究の着想に至っている。さらに、ピロティ架構の建築計画的な利便性を損なわないようにするために、柱断面内にアンボンド極軟鋼鉄筋を内蔵することを本研究では提案する。このアンボンド処理した極軟鋼を断面中央に芯筋として、またはX型主筋とすることで、従来のRC造柱よりもエネルギー吸収能が高くなり、地震応答低減効果が増すものと期待できる。本提案に関連する既往の研究として、寺井・南らは、新開発した極軟鋼をX型主筋として配筋したRC部材の力学的性状について、部材長さが部材耐力、エネルギー吸収能に与える影響について検討しており、部材長さが短い方がせん断耐力およびエネルギー吸収能は高くなることを示唆している。ここで検討されているのは、RC柱部材の水平方向に対するせん断抵抗機構であり、柱軸方向の挙動については言及されていない。また、X型配筋される極軟鋼は異形鉄筋となっており、鉄筋とコンクリートとの付着も加味されたものとなっている。また、家村らはRC造橋脚に対して、アンボンド高強度芯材を活用した「次世代高耐震性能橋脚を提案している。塑性ヒンジ区間内にアンボンド処理を施したPC鋼棒を内蔵し、これにより部材の荷重-変位骨格曲線における二次剛性を高めて地震時最大応答変形を抑制し、かつ残留変形も小さく抑えることに成功している。また塑性ヒンジ領域を、コンクリートと鉄筋の付着を除去するアンボンドとすることで、曲げせん断ひび割れが生じにくくなるとの報告も見られる。しかし、内蔵するPC鋼棒は弾性内で使用するため、エネルギー吸収能は従来のRC造に比べて小さくなることが述べられている。

以上のように、本研究の提案のような柱軸方向の挙動に着目した例はほとんど見られないが、既往の研究からも極軟鋼を芯筋またはX型主筋として用い、さらにコンクリートとの付着を切るアンボンド処理を行うことで、小変形領域においては、曲げせん断ひび割れの抑制の効果を期待でき、大変形領域では極軟鋼による大きなエネルギー吸収能の向上が図れるものと期待できる。また、本研究の提案は、全体曲げ崩壊形のピロティ架構だけではなく、アスペクト比が大きく全体曲げ変形が支配的になる高層建物についても有用であることが期待される。そこで本研究では、RC造ピロティ架構を対象に、柱軸方向に鋼材ダンパーを設置した際の、地震応答性状について検討を行った。

3. 研究の方法

本研究では、純ピロティ形式の12階建のRC造集合住宅を想定した。検討モデルは図1に示すような1スパンの平面モデルでスパン長さの異なる3種類である。スパン長さはそれぞれ8m、11m、14mである。以後これらをそれぞれモデル8、モデル11、モデル14と呼ぶ。建物総高さは3モデルとも42.3mとした。また、地震動のスペクトル特性が3つのモデルの応答性状の違いに与える影響を小さくするため、3モデルの弾性1次固有周期が0.4sとなるように、各モデルの重量調整をした。基礎は柱脚固定を想定しており、全体曲げ変形による基礎の浮き上がりは考慮していない。図1には柱の断面諸元も合わせて示す。柱、壁は全層同一断面とし、連層耐震壁を2階以上に配置した。柱は後述の静的増分解析により、ダンパーを設置しない状態で保有水平耐力が必要保有水平耐力を上回るように設計し、かつピロティ階の層崩壊よりも引張側柱の軸降伏が先行するように定めた。耐震壁は壁厚250mmとし、D13のダブル配筋とした。梁はピロティ階直上のみ300×900mmとし、その他は300×600mmの弾性部材として扱った。

数値解析に用いる力学モデルを図2に示す。数値解析には構造システム社のSNAP ver.7を使用した。本研究では、鋼材ダンパーを柱軸方向に並設したことによる地震応答低減効果について検討する。図3のように柱断面内にアンボンド芯筋として内蔵する鋼材ダンパーは、柱部材

に並設する軸方向の単軸バネとしてモデル化し、アンボンド区間はダンパー剛性として反映させる。すなわち、アンボンド区間と、柱の軸変形損傷位置との整合は考慮されていないことを付記する。柱・壁とも曲げ・軸拳動にはマルチスプリング(MSモデル)、せん断挙動にはバイリニア型の原点指向復元力特性をもつ単軸バネを採用した。なお、せん断バネは、本検討では柱のせん断破壊は生じないため、実質的には弾性バネとして扱っている。主筋には SD390、コンクリートには圧縮強度 42N/mm^2 を用いた。MSモデルを構成する鉄筋(主筋)バネとコンクリートバネの復元力特性を図 4(a)、(b)に示す。鉄筋バネはバイリニアの骨格特性を有し、ひずみ硬化、繰り返し载荷による剛性低下、除荷時の剛性低下は無視した簡易なモデルとした。コンクリートバネはトリリニアの骨格特性を有し、こちらも繰り返し载荷による剛性低下、除荷時の剛性低下は無視した。コンクリートの最大強度時ひずみ度は 0.2% とし、終局ひずみは 20% と仮定して、それ以降は圧縮強度の $1/10$ の耐力を維持するものとした。なお、圧縮強度以降の耐力低下(負剛性)については、剛性をゼロとして応答ひずみを求め、耐力低下を考慮した応力の差分を不釣り合い力として修正した。鋼材ダンパーには低降伏点鋼 LY225 を用いた。図 4(c)に鋼材ダンパーの復元力特性を示す。柱軸方向に設置する鋼材ダンパーは柱頭脚の節点間の単軸バネにより表現した。最大耐力を降伏耐力の 1.5 倍としたトリリニアモデルとし、ダンパー剛性とダンパー降伏耐力をパラメータとして、ダンパー仕様を検討した。

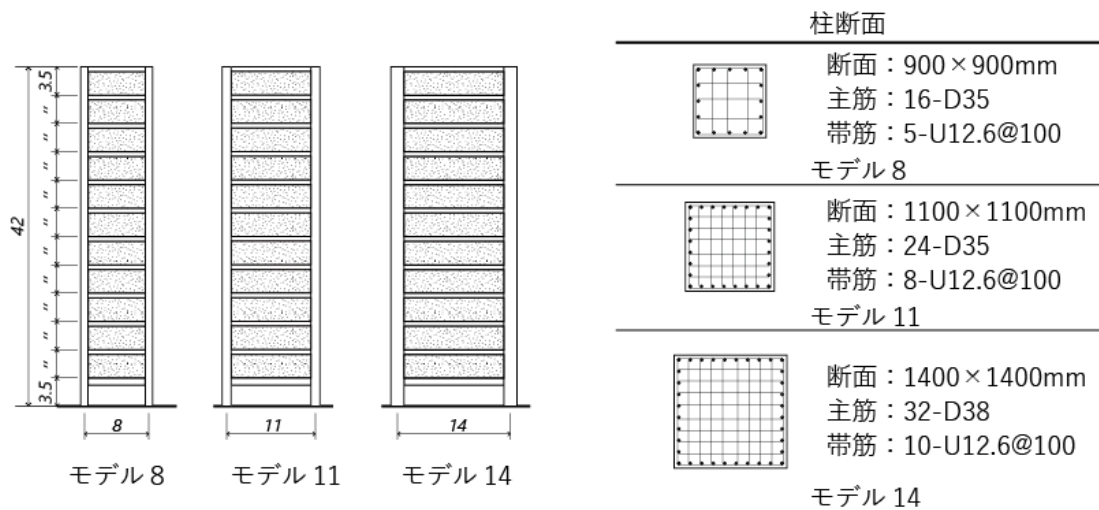


図 1 検討対象 RC 造ピロティモデル

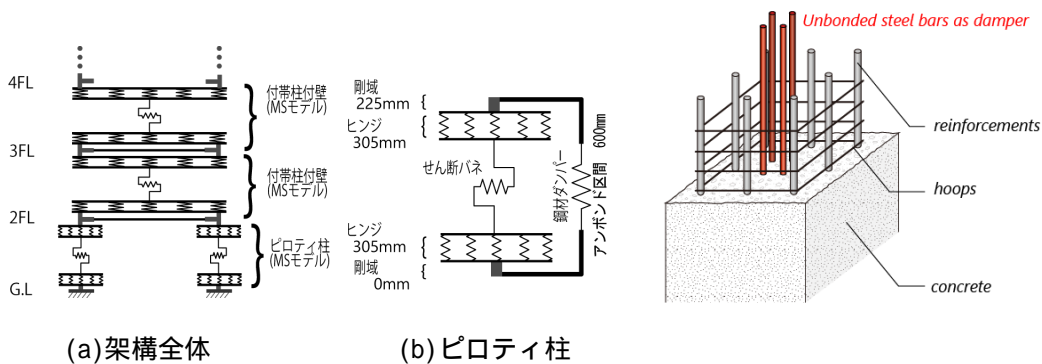


図 2 数値解析モデル

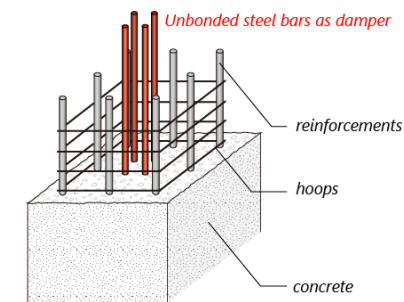


図 3 アンボンド芯筋ダンパー

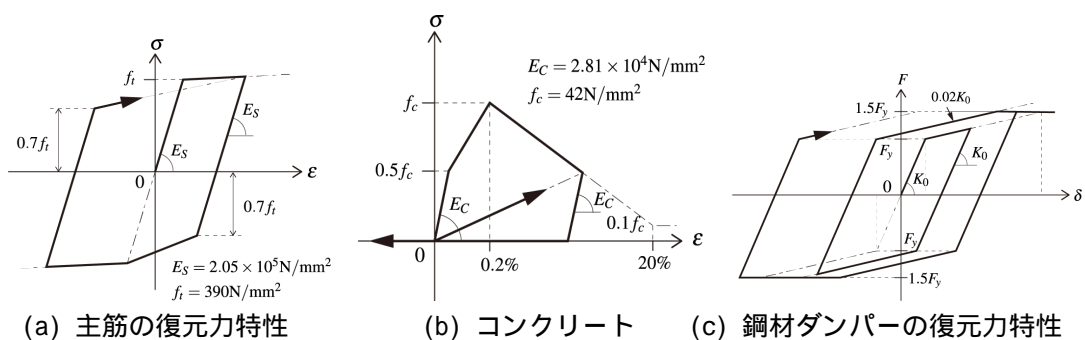


図 4 復元力モデル

4. 研究成果

(1)静的増分解析 研究結果として以降では、モデル8とモデル11について述べる。静的増分解析は、外力分布として A_i 分布を採用した。ダンパーを設置しない状態で現行基準の必要保有水平耐力を満たすように設計してある。崩壊過程は、まず風上側の柱軸力が引張に転じた後、この柱の脚部に曲げヒンジが生じ、続いて柱頭に曲げヒンジが形成され、次に圧縮側の風下側脚部に曲げヒンジが形成し、引張側柱の軸降伏した時点で全体曲げ崩壊形のメカニズムを形成した。図5に両モデルのピロティ階の層せん断力-層間変形関係と軸力-軸変形を示す。ここで、ダンパー量を表す指標として P_d を柱全断面積に対するダンパー断面積の比として定義する。 P_d が増加するにつれピロティ階の最大耐力も増加傾向を示す。これは、軸方向ダンパーにより引張側柱の軸剛性・軸耐力が増加し、ピロティ階は曲げ変形減少していくためであると考えられる。また、 P_d が過度に大きくなりすぎると崩壊メカニズムが全体曲げ崩壊形から層崩壊型へシフトし、梁間スパンがより大きいモデル11がその影響を受けやすい。ピロティ柱の軸力-軸変形関係に着目すると、 P_d が増加するに従い柱の軸変形と軸力は減少傾向にある。本検討では、大きな軸変形により履歴エネルギー吸収を図る架構のため $P_d=3\sim 4\%$ 付近は過度なダンパー量であるといえる。ダンパーが軸力負担することで下層の負担できる軸力が増加する。これにより、柱が軸降伏する軸力は一定だが、メカニズム時の変位は伸びる傾向を示す。

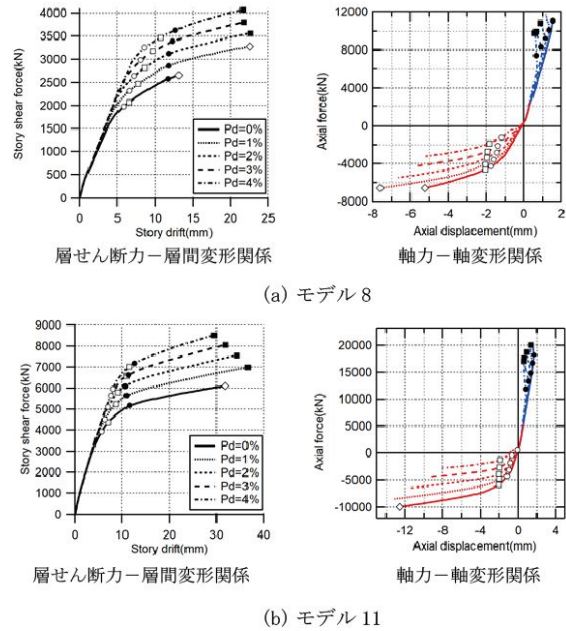


図5 静的増分解析結果（ピロティ柱）

(2)時刻歴応答解析 入力地震波はEL Centro NS 観測波 0~15 秒とし、最大地動速度がモデル8で 33.45cm/s、モデル11で 50cm/s とし、それぞれ原波レベルの 1.0 倍、1.49 倍としている。架構全体の粘性減衰はレーリー減衰(1次減衰定数 3%)とした。

ダンパーの目的は、まず軸剛性の増大により、全体曲げ変形に起因する柱軸変形を適度に抑え、早期に降伏させることで履歴エネルギー吸収能を付加し、全体の応答を抑えることである。しかし、ダンパー剛性、降伏耐力を過度に大きくすると、架構の短周期化により頂部加速度応答が増大する懸念がある。そこで、本研究では鋼材ダンパーの設計パラメータをダンパー剛性とダンパー降伏耐力として、パラメトリックスタディを実施した。ここで、ダンパーのヤング係数を一定値と仮定し、アンボンド区間を仮定すれば、両パラメータは、ダンパー量 (P_d) で一義的に決定できる。

解析結果の一例として、 P_d をパラメータとしたモデル8での最大応答値を図6に示す。なお、この図ではダンパーなしの状態での最大応答値で基準化したもの応答倍率として示している。また、図中の R_d はピロティ階の最大層間変形、 R_a は最上階の最大加速度、 R_v はピロティ柱の最大軸変形を示している。ダンパー量が増加するとピロティ階の最大層間変形と柱の最大軸変形は漸減傾向を示し、一定以上のダンパー量となるとその傾向は底打ちとなった。応答倍率の傾向から、最大層間変形量は軸変形の応答度合いに依存していることがわかる。また、両モデルとも頂部加速度はダンパーによる影響は小さい結果となり、低層への軸剛性の付加による頂部加速度への影響は小さいことがうかがえる。なおこのような性状は、モデル11でも同様であった。図7にはダンパーと架構のエネルギー吸収割合を示す。ダンパーの増加により、ダンパーの最大耐力が増加するため柱の損傷が小さくなる。すなわち、 P_d が増加すると架構のエネルギー吸収量は減少していく一方で、ダンパーのエネルギー吸収量は増加していく。また、架構の

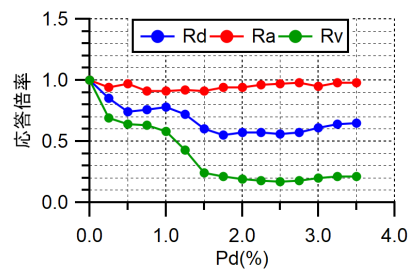


図6 最大応答値（モデル8）

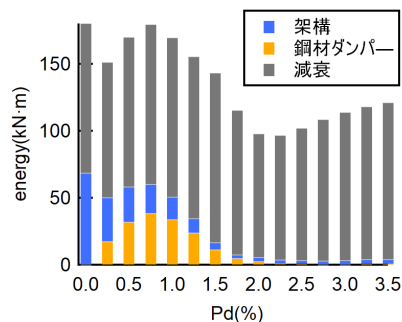


図7 エネルギー吸収割合（モデル8）

損傷が小さくなることで、内部粘性エネルギーは増加傾向を示す。あるダンパー量を境にダンパーのエネルギー吸収量は減少傾向を示す。これは、ダンパーを過度に入れすぎると軸剛性の増大により柱が殆ど軸変形せず、ダンパーは降伏しなくなることを意味する。ダンパーのエネルギー吸収量が最大となるPdは、モデル8で0.75%、モデル11で1.5%となった。図8には、各層の最大層間変形の分布を上述のダンパー量 [図中赤] とダンパーなし (Pd=0%) [図中黒] とを比較して示す。軸方向に設置したダンパーにより全層の (水平) 層間変形を低減している。これは、架構の全体曲げ変形を適度に抑えたことにより、各層の層間変形を抑制できたものと推察される。またダンパー量が大きい方が、応答低減効果は大きくなることが推察される。

図9には、モデル11でのダンパーなし (Pd=0%) と最適なダンパー量 (Pd=1.5%) でのピロティ階の層せん断力 - 層間変形関係を示す。層間変形では最大応答値をダンパーなしの状態の約半分に低減できている。軸変形も、両モデルともダンパーなしの約半分程度に低減できている。また軸力 - 軸変形関係では、柱の引張・圧縮軸力も減少しており、軸方向に設置する鋼材ダンパーの有効性が確認できる。

(3)解析モデルの簡略化 前節までの検討に用いた数値モデルでは、自由度が大きく、不釣り合い力も発生しやすいため、収束計算の回数が多く、実用的ではない解析時間となっていた。そこで、上層耐震壁を2層に簡略化することを試みた。これは、固有値解析結果での刺激係数を鑑みた判断である。本節では主にモデル8についての結果を報告する。なお、解析モデルの簡略化に当たっては、ピロティモデルは原モデルと同一とし、また弾性一次固有周期も揃えている。またピロティ柱の長期軸力や、全体曲げ変形による軸力変形も原モデルと同等となるように重量を調整した。図10に、簡略化したモデルを用いての静的増分解析結果の一例として、ピロティ柱の軸力 - 軸変形関係の原モデルとの比較を示す。簡略化したモデルでも、原モデルの特性よく再現できていることが確認できる。

ここでは、この簡略化した解析モデルを用いて、鋼材ダンパーのアンボンド区間の検討例を示す。まずアンボンド区間Lを応答低減率に基づいて検討する。ダンパー量Pd=0.75%でのEL Centro NS波を用いた地震応答解析結果の一例として、前述の最大応答値 (ダンパーなしでの最大応答値で基準化している) とエネルギー吸収量を図11、12に示す。応答倍率は、ピロティ層の最大層せん断力と最大層間変形に着目した。アンボンド区間が短い (ダンパー剛性が高い) ほど、応答低減効果が高くなることが確認できる。ただしアンボンド区間L=600mmでは、応答倍率はやや増大することが確認できる。エネルギー吸収量を見ると柱の吸収エネルギー (柱の損傷量) は、L<600mmの範囲では大きな違いはないが、L>600mmの範囲では、アンボンド区間が長くなるに従って、柱のエネルギー量も大きくなっている。これらのことから、実際の施工面も考慮すると最適アンボンド区間は600mmと考えられる。ダンパー剛性が高くなるにつれ応答低減は増していき、エネルギー吸収の観点でもアンボンド区間が600mmを超えると柱の損傷量が増大した。ダンパー量は、Pd=0.75%で最も高い応答低減効果を示した。以上から、簡略化したモデルを用いた場合でも、モデル8ではPd=0.75%が最

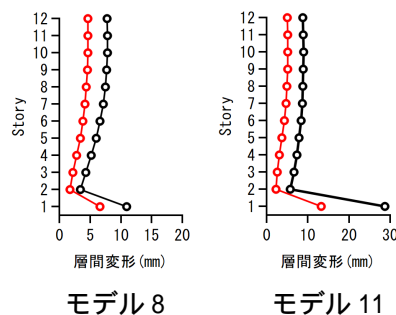


図8 最大層間変形分布

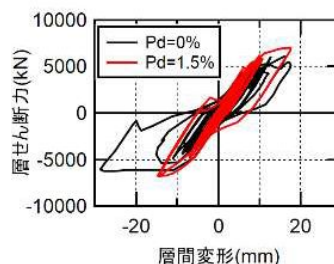


図9 層せん断力 - 層間変形関係

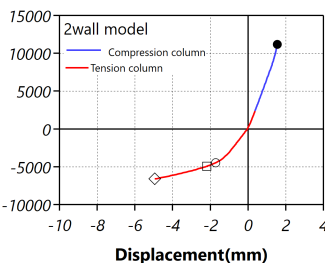
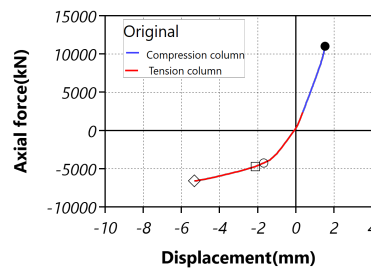


図10 軸力 - 軸変形関係

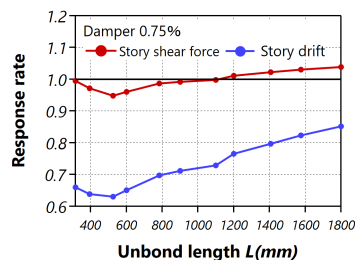


図11 最大応答値の比較

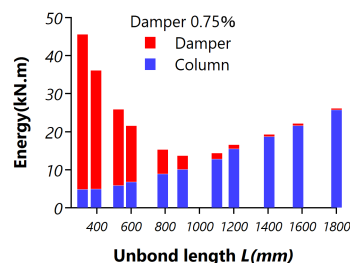


図12 エネルギー吸収量の比較

適ダンパー量と判断でき、これは原モデルを用いた場合の知見と一致することから簡易モデルの妥当性が得られた。また $L=600\text{mm}$ 、 $P_d=0.75\%$ におけるダンパー降伏を求めると 0.67mm となり、これはダンパーなしでの増分解析における第 2 ヒンジ発生時点の鉛直変位の約 0.3 倍となっている。さらにダンパー降伏耐力は、崩壊メカニズム形成時の柱軸力の約 0.2 倍となった。これらの指標がダンパー量の設計における有用な手がかりとなることが示唆される。

(4)まとめ 本研究では RC 造ピロティ架構について、鋼材ダンパーを柱軸方向に内蔵した際の地震時応答性状を、ダンパーなしの場合と比較検討した。また、簡略化したモデルを作成し最適ダンパー量の設計法を検討し元のモデルと比較することで以下の知見を得た。

軸方向にダンパーを内蔵することにより、架構の全体曲げ変形が適度に抑制され、軸変形・水平変形ともに地震応答を低減することが可能である。

ダンパー量を過度に入れすぎると全体曲げ崩壊形式から層崩壊形に移行する。

本検討架構（モデル 8）では、静的増分解析での第 2 ヒンジ時点での引張側軸変位の 0.3 倍がダンパー降伏変位となるようにアンボンド区間を設計し、崩壊メカニズム形成時の軸力の 0.7 倍程度をダンパー降伏耐力とすることで最適ダンパー量が設定できる。このように静的増分解析結果のみを用いて、ダンパー量の設計が可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

林敬祐, 菅野秀人: 鋼材ダンパーを RC 造柱に内蔵したスマートピロティ架構に関する研究, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, 査読なし, pp.1627-1635, 2018.11

林敬祐, 菅野秀人: 鋼材ダンパーを柱軸方向に内蔵した高層 RC 造ピロティ架構の地震応答性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読あり, Vol.40, No.2, pp.943-948, 2018.7

林敬祐, 菅野秀人: 柱軸方向に設置した鋼材ダンパー量の違いが RC 造ピロティ架構の地震応答に及ぼす影響, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読なし, No.81, pp.57-60, 2018.6

林敬祐, 菅野秀人: 鋼材ダンパーを柱軸方向に設置した RC 造ピロティ架構の地震応答性状に関する基礎的研究, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読なし, No.80, pp.59-62, 2017.6

H.Kanno: Experimental study on overall flexural deformation response control for smart high-rise structures, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 査読あり, Santiago, paper ID 4020, 2017.1

〔学会発表〕(計 2 件)

林敬祐, 菅野秀人: 柱軸方向の鋼材ダンパー量の違いによる RC 造ピロティ架構の地震応答性状への影響, 日本建築学会大会(東北) 学術講演梗概集, 構造, pp.533-534, 2018.8

林敬祐, 菅野秀人: 柱軸方向に鋼材ダンパーを設置した RC 造ピロティ架構の地震応答に関する検討, 日本建築学会大会(中国) 学術講演梗概集, 構造, pp.743-744, 2017.8

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 林 敬祐

ローマ字氏名: (HAYASHI, keisuke)

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。