

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360229

研究課題名(和文) 振動形態変化方式の超高耐震構造に関する研究

研究課題名(英文) study of structural systems having high seismic capacities with vibration modes' change

研究代表者

田村 和夫 (Tamura, Kazuo)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：50416822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,800,000円

研究成果の概要(和文)：通常の耐震設計で想定するよりも非常に大きな地震による揺れを受けた時に、建築構造物が大きな損傷を受けないための新しい構造システムとして、(1)通常の地震では建物の基部に設置したゴムなどで建物に作用する地震力を低減する免震構造物であり、非常に大きな地震動に対してはロックンして建物に作用する地震力を増加させない構造方式、(2)各階に地震時の振動エネルギーを吸収するダンパーを備えた制震構造物であり、非常に大きな地震動に対しては特定の層の水平変形が急激に進まないような機構を併せ備えた構造方式、の2つを提案し、解析的・実験的に効果の確認と挙動の把握を行った。

研究成果の概要(英文)：Two types of new response control mechanisms are proposed. One is a system of a base isolated structure which shows rocking movement against extremely large earthquake ground motions. The other is a system composed of frames equipped with passive dampers and hardening elements with gaps. In the former system, the seismic force of the structure is suppressed by rocking motion for unexpectedly large earthquake ground motions. In the latter system, the structure shows full capacity, by changing their vibration modes corresponding to their vibration amplitudes. The effectiveness of these systems are verified by conducting response analyses of multi-degree-of-freedom models and vibration tests of small sized models and a loading test of scaled frames equipped with the proposed system.

研究分野：建築構造工学、耐震設計、免震・制振

キーワード：建築構造物 振動制御 免震 制振 地震応答 適応制御 入力地震動

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、従来建築構造物の耐震設計で想定されていたものを大きく上回る大振幅地震動が、観測あるいは予測されており、このような極大地震動に対しても建築物の安全性を確保するニーズが高まっている。耐震設計においては、経済的な観点から、発生頻度の低い大振幅地震動に対しては、構造骨組の塑性化を許容することが一般的であるが、この場合想定以上の大振幅地震動が入力されると、高層建築物の場合特定層にエネルギー入力が増加し、骨組が崩壊に至る可能性が出てくる。これは各種ダンパーにより地震応答を低減しようとする制震構造においても同様である。

(2) 建物基部に水平方向剛性の低い装置を設置して地震時の応答加速度を低減しようとする免震構造においても、想定以上の入力時には免震層の変形が過大となり、免震クリアランスを超えて擁壁に衝突し、上部構造に大きな損傷をもたらす可能性が生じる。免震構造や制震構造は地震応答の低減が図れる高い性能を有しているが、入力地震動の特性や振幅レベルに不確定な部分を含んでおり、よりロバストな性質を付与するための技術開発ニーズがある。

2. 研究の目的

本研究では、設計における想定を超える大振幅な地震動に対しても構造体を大きく損傷させないことを目的として、振幅に応じて振動形態を変化させる構造方式を提案し、その特性を評価するものである。

一般的に、建築は構造部材の損傷に伴う非線形化により、剛性低下とエネルギー吸収量の増大を生じさせることで、応答の増大傾向を緩和する方向に働く場合が多い。しかし、設計で想定した振幅レベルを超える極大振幅な入力に対しては、構造物の減衰性能は一般には劣化傾向となり、急激に構造物の応答変形が増大して崩壊に至る可能性もある。

本研究で対象とするのは、近年普及が進んでいる免震、制震などの地震応答制御構造であり、これらに想定以上の極大地震動が入力された時に、構造体の応答特性を確実性の高い受動的な方法で変化させることで、地震動の非定常性や不確定性に対応する終局の構造安全性を高めようとするものである。具体的には以下の2つの方式について検討した。

(1) 方式1:

免震構造で、極大地震入力時に振動エネルギーを重力エネルギーに変換する(ロッキングさせる)方式

(2) 方式2:

各階にダンパーを設置する連層耐震要素を利用した制震構造で、極大地震入力時にギャップ機構により可変剛性機能を有発揮する方式

3. 研究の方法

(1) 概念構築

振動形態が振幅に応じて変化する新しい構造システムの概念を、構造設計的な観点で整理する。

(2) 振動解析・縮小模型振動実験による検討

提案構造システムを適用した場合の建築構造物の地震応答特性を、多質点系振動モデルを用いた地震応答解析や小型の振動模型を用いた加振実験により検討する。

(3) 部分骨組の静的加力実験による検討

方式2について一つの架構設置形態をとり上げ、地震時応答挙動を静的構造実験により確認し、設計上の課題を抽出・整理する。

4. 研究成果

(1) 方式1(免震構造+ロッキング方式)に関する検討

概念構築

本方式は、通常の設計で想定する振幅の範囲では免震層のスウェイ変形が卓越するモードで振動し、極大入力時には脚部の一端が浮き上がり、ロッキング振動を生じるシステムである。ロッキングにより、瞬間的に構造物の重心位置が高くなることで一時的に位置エネルギーの増加がもたらされ、これにより上部構造の歪エネルギーが抑制され、極大入力時の構造物の安全性が大きく向上することが期待される。また脚部に上下方向ダンパーを設置することで端部浮き上がり時にエネルギー吸収も可能となる。例えば単数・複数の連層耐震壁(連層耐震要素)を配置した構造形式などに適用することが考えられる。

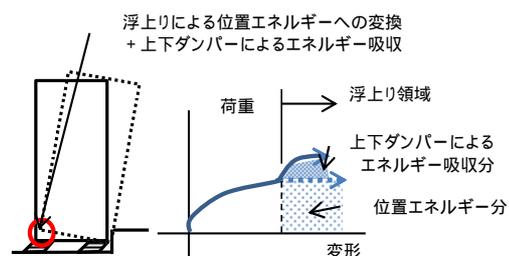


図1 方式1の概念図

振動解析による検討

提案システムの効果と地震応答特性を検討するために、連層耐震要素からなる高層免震建物を想定した1本棒の多質点系振動モデル(図2)を用いて検討した。各質点は水平・上下・回転の自由度を有する平面モデルとした。免震層には、左右2か所に水平ばねと上下ばねを設置し、上下ばねは建物支持重量に達した時点で抵抗力がなくなる非線形弾性モデルを用いて、簡易的に重量効果を表した。水平ばねは線形の場合と非線形の場合の2ケースを想定した。上部構造は、40cm×1000cmのRC壁を想定した線形の梁要素

でモデル化した。

1) 免震層が線形の場合

解析モデル建物において、まず免震層の水平ばねを線形とし、上部構造剛体時の固有周期を 4.0sec、減衰定数が 10% になるように粘性減衰を設定した。既往の観測波計 18 波 (観測波の最大加速度 = 51Gal ~ 1318Gal) を最大速度 $V = 75 \text{ cm/s}$ で規準化したものに対する免震建物の 1 階のせん断力を浮上り許容時と拘束時とで比較して図 3 に示す。全体的には脚部の浮上り許容により浮上り拘束時よりもせん断力が小さくなる傾向が見られる。

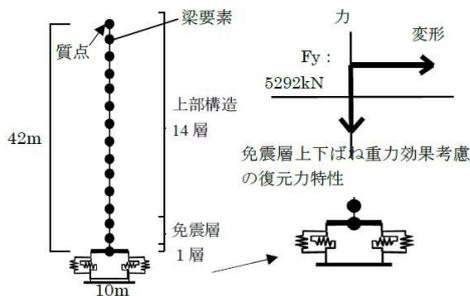


図 2 振動解析モデル

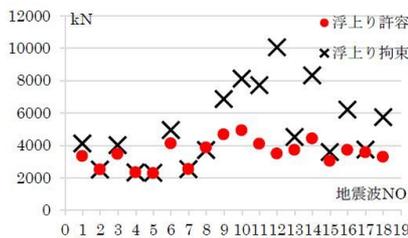


図 3 浮上り許容時と浮上り拘束時の応答せん断力の比較 (18 波入力分)

2) 免震層が非線形の場合

次に免震装置部の水平ばねの特性を非線形のバイリニア型のモデルとした場合について (免震周期 4.0sec、降伏荷重 0.05G 相当、初期剛性は 1.0sec 相当) 入力地震波を告示波 (建築基準法で規定されている応答スペクトルに適合する模擬地震動) とした場合の検討結果を示す。

図 4 に、告示波の 2.6 倍 (最大加速度 = 967.2 cm/s^2) を入力した場合の各層の最大層せん断力を示す。浮上り許容時には、浮上り拘束時よりもせん断力が低減されている。またこの時、最大相対変位は浮上り拘束時より下層階は小さく、上層階は大きくなっていた。浮上り許容時の方が浮上り拘束時よりも上層階のせん断力の値が大きい理由は、浮上り後の着座時の衝撃による振動の高次モードによる影響である。

免震層に上下方向ダンパーを左右両端に設置し、上下方向ダンパーの粘性減衰係数 (ce) を変えて解析を行った結果も同図中に一

緒にプロットしてある。上下方向ダンパーを脚部に設置することで、上下方向ダンパーなしで浮上りを許容した場合よりも上層部でのせん断力が低減されている。また上下方向ダンパーの粘性減衰係数の値が大きいほど、浮上り拘束時の値に近づいていく。これは、上下方向ダンパーが着座時の衝撃力を抑制するだけでなく、浮上りも拘束するためである。また脚部に上下方向ダンパーを設置することで着座時の衝撃的な加速度が低減されている。

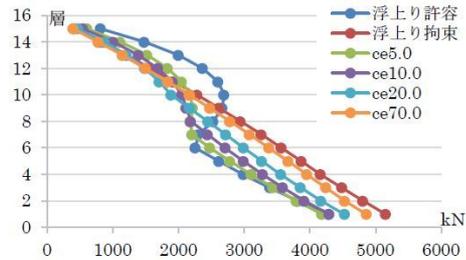


図 4 浮上り許容時と浮上り拘束時の層せん断力の比較

方式 1 のまとめ

極大振幅な地震入力に対して、免震構造物の端部に浮上りを生じさせ、ロッキング振動形態へと変化する構造について解析的に検討した。

この結果、端部に浮上りを生じさせることで、免震層の変形と上部構造の下層部における応答せん断力が低減できることを確認した。また、ロッキングが生じた後の着座時に生じる衝撃力による影響は、適切な上下方向ダンパーの設置により低減できることを示した。

(2) 方式 2 (ギャップ付き剛性増大機構を有する制震構造方式)

概念構築

高層建築に極大地震入力作用した時に、変形が進行し始めた層の剛性を適応的に高めるためのギャップ付き剛性増大装置を設置する。本方法によれば、周期特性の不確定な地震入力に対して、パッシブ的な方法により極大入力時に全層の骨組のエネルギー吸収性能を發揮でき、終局時の耐震性能が高まることが期待できる。また想定範囲内の地震入力に対しては通常の制震効果が得られ、想定を超えてもダンパーの損傷を避けることができる。

ギャップ付き剛性増大機構を実現する方法としては、各種の設置形態が考えられるが、ここでは、各層に山形ブレースを介して鋼材パネルダンパーを設置した制震架構に、ギャップ付きのストッパーを上梁に設置する構造を想定した (図 5)。

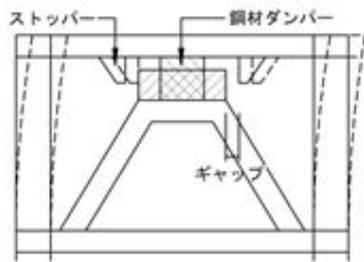
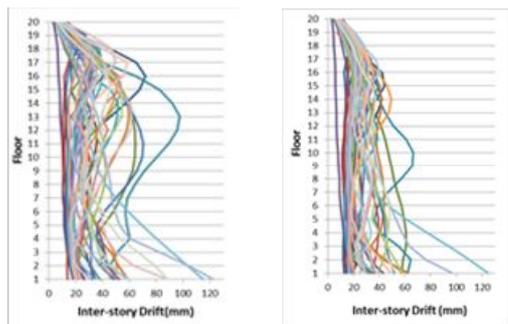
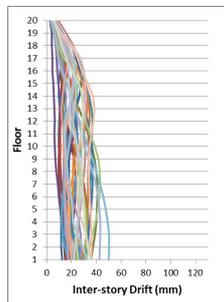


図5 ギャップ付き剛性増大機構の概念

振動解析・縮小模型振動実験による検討
 ギャップ付き剛性増大機構を備えた制震構造骨組の地震時応答特性を把握するために、せん断型 20 質点系振動解析モデルを用いた地震応答解析により検討した。構造骨組のみの 1 次固有周期が 2.0sec になるように剛性値を調整し、各層の降伏耐力分布は建設省告示における A_i 分布、1 階の層せん断耐力係数は 0.3 と設定した。入力地震動として、近年(1995 年～2011 年)日本で発生した 14 地震の観測波 39 波を用い、これらを最大速度が 75cm/s となるように規準化したものに対する最大応答層間変形を、図 6 に示す。構造骨組のみの場合には、地震波により層間変形が 4.0cm を大きく超える値のものがあ、り、大きくなる層は地震波により異なっている。ダンパーを設置したケースでは、全般に層間変形は低減しているが、やはり特定層に変形が集中する傾向はみられる。これらに対し、ギャップ付き剛性増大機構を設置したケースでは、層間変形がより均一化されている。



(a) 構造骨組のみ (b) 構造骨組+ダンパー



(c) 構造骨組 + ダンパー + ギャップ付剛性増大機構

図6 応答層間変形の比較 (39 波入力)

図7には、連層耐震要素を模擬した鋼製プレートと4層のフレームとが粘弾性体で接続され、さらにギャップを介して連層耐震要素とフレームとが衝突する方式の小型振動模型を示す。この模型基部に地震波を入力した場合の各層層間変形の例を図8に示す。本例でも層間変形の均一化は実現できている。

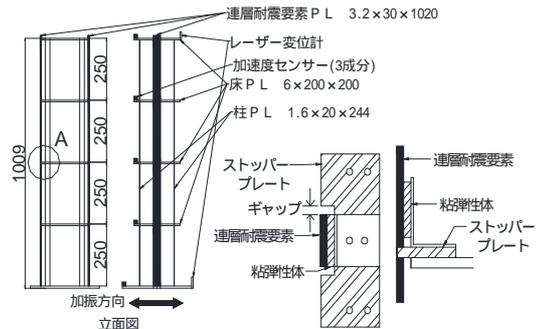


図7 小型振動モデル

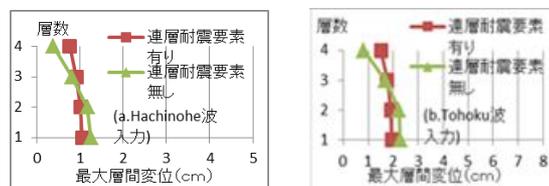


図8 小型振動模型を用いた加振実験結果例

部分骨組の静的加力実験による検討
 前項までで応答低減効果を確認した、ギャップ付き剛性増大機構を設置した鋼構造骨組モデルの一構面をとりだして、静的加力実験を行い、骨組に与える剛性増大機構の影響について検討した。

1) 試験体と加力・計測計画

試験体を図9に示す。柱・梁・ブレースのいずれも H 型鋼 (SS400 相当) とし、各部を溶接接合して作成した。山形ブレース頂部と梁との間に極軟鋼 (LYP235) のパネルを設置してこの部分でエネルギー吸収する制震架構とした。上部梁に溶接接合された三角形のストッパーを鋼板で構成し、ダンパー部の水平変形量がギャップ寸法 5mm に達するとこのストッパーにブレース部が接触するようにした。ギャップ接触後はダンパー部の変形を増大させずにせん断力をブレース部で負担することになる。試験体はストッパーを設置した試験体 1 と、試験体 1 からストッパー部を取り除いた試験体 2 の 2 体とした。

試験体骨組の下部はピン支持とし、上部梁位置に取り付けた $\pm 500\text{kN}$ の複動式油圧ジャッキで静的に水平力を加えた。載荷は正負交番の漸増載荷とし、最終サイクルでは一方向に漸増載荷とした。試験体には梁・柱・ブレース・パネルダンパーの各部にゲージを貼り歪を計測した。またダンパー部の相対水平変形と、柱梁位置の変形を鉛直・水平の 2 点ずつ計測した。

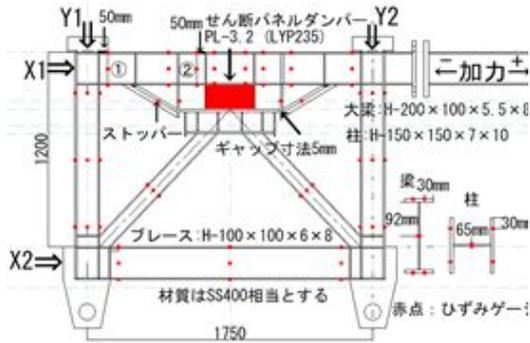


図9 部分骨組の静的加力実験の試験体

2) 加力実験結果

載荷水平荷重と骨組の全体せん断変形との関係を図10に示す。

試験体1では、全体水平変位11mm(層間変形角で1/110程度)以下まではストッパーに衝突せず主としてダンパーでエネルギーを吸収している。水平荷重約320kN、全体変位が11mm、ダンパー部の変形5mmに達したところでストッパーに衝突し荷重の増大に対する変位の増加量が減少した。この時フレーム部の剛性は殆ど変化せず、ダンパー変位分の増加割合が減少し、同時にブレースの歪が増加している。

試験体2では、ダンパーと柱・梁骨組みが塑性化した後も変形が進行し、最大荷重に達するまで大きなループを描き続けた。

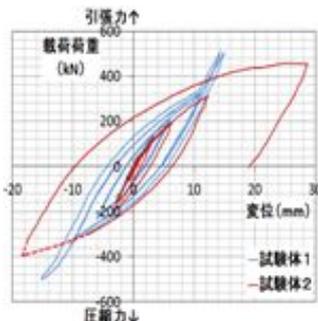


図10 骨組の水平方向荷重 - 変形関係

歪の計測値と鋼材の弾性係数・断面積・断面係数などの値から求めた、ブレース・柱の水平方向荷重の分担の割合を図11に示す。これより以下の点が指摘できる。

試験体1では、ダンパー降伏前(載荷荷重100kN時)には、ブレース部の負担するせん断力の割合が大きい。ダンパー降伏後(載荷荷重200~300kN時)には、ブレースと柱のせん断力の差が少なくなり、柱のせん断力負担が増加している。またストッパー衝突後(450kN時)には、再びブレースの負担割合が増加している。

ストッパーの無い試験体2では、載荷荷重の増大と共に柱の負担せん断力は増大し続けている。(図中の×印)

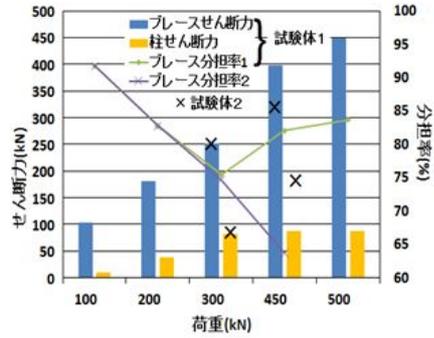


図11 載荷荷重レベルと柱、ブレースのせん断力負担割合の変化

試験体1、2の加力に伴う上梁の応力状態については、以下の点を確認した。

試験体1の断面

ストッパー衝突直前の300kN時まで軸力はほぼ0で、梁の上部は圧縮、下部は引張となる曲げ歪のみ増大し続ける。ストッパーに衝突すると、梁の上下面の歪は変わらずにウェブ部の圧縮歪が増大した。

試験体2の断面

載荷荷重が450kNになると主に梁の下側に大きく引張の曲げ歪が生じ、鋼材降伏点の歪0.16%を上回り、梁下部は降伏している。

試験体1の断面

ストッパー衝突直前300kNまで軸力が引張に、曲げ歪が梁の上部に引張、下部に圧縮を生じ、増加し続ける。ストッパー衝突後は上部歪が変化せず、軸、また下側の歪が増加する。最大載荷荷重まで弾性範囲内であった。

試験体2の断面

載荷荷重が450kNになると、上部の引張歪が減少し、下部の圧縮歪が引張へと変化した。この原因は、ブレース部の合計軸力が梁の下方方向への引張力となり、荷重が増大するにつれ梁の下側の引張応力が増加していったということが考えられる。なお最大荷重まで弾性範囲内であった。

静的加力実験をまとめると以下となる。

- 提案した骨組機構で、比較的低振幅時にはダンパーのエネルギー性能が発揮され、極大振幅時には剛性が増大する特性を発揮できた。
- 上記の効果は、ブレースと柱梁骨組との間の負担せん断力の移行によってもたらされる。
- ストッパーに衝突することで、ストッパーの設置された梁の応力状態は複雑に変化する。
- 本形態のように山形ブレースを介してパネルダンパーを設置する方式の場合、大変形時に梁を下方に引っ張る力が作用することも、応力状態に影響を与える。

方式2のまとめ

ここでは、各階にダンパーを設置したパッ

シブ制震架構にギャップ付剛性増大機構を設置することで、極大地震動入力時に振動形態を変化させ、終局安全性を向上させようとする構造方式を提案した。振動解析および縮小模型の振動実験によりその効果・応答特性を確認するとともに、1層1スパンの鋼構造骨組試験体の加力実験を行い、適用性を検討・確認した。

(3) まとめ

建築構造物の極大地震動に対する安全性確保は重要である。近年普及が進んでいる免震・制震構造は、地震時の応答を低減できる有効な方法ではあるが、入力される地震動の振幅によって振動低減効果が変化する非線形な性質を有する。これら構造物の耐震設計では、想定する地震入力レベルを超える極大振幅の地震動に対しても安全性を確保することが期待されており、そのための研究開発は重要である。

本研究では、極大振幅の地震入力に対する安全性を確保するための以下の2つの新しいアイデアについて提案し、その特性に関する一定の知見を得た。

方式1：免震構造で、極大地震動入力時に振動エネルギーを重力エネルギーに変換する方式

方式2：各階にダンパーを設置する連層耐震要素を利用した制震構造で、極大地震動入力時にギャップ機構により可変剛性機能を有する方式

今後は、本研究成果を広く対外的に広報するとともに、実施設計上の適用研究を継続的に進めて、実用展開を推進していきたい。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

高橋 昇吾、田村 和夫、瓜生 貴大、山田 文富、ギャップ付剛性増大機構を備えたパネルダンパー制震架構の構造実験、2015年度日本建築学会大会、2015年9月4～6日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

田村 和夫、高橋 昇吾、山田 文富、ギャップ付剛性増大機構を備えた制震架構に関する研究、日本機械学会第14回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2015)、2015年6月22～24日、栃木県総合文化センター(栃木県宇都宮市)

廣田 大輝、高橋 昇吾、田村 和夫、振動形態変化方式の構造に関する研究(その1:免震構造のロッキング移行システム)、2014年度日本建築学会大会、2014年9月12～14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

高橋 昇吾、廣田 大輝、田村 和夫、振動形態変化方式の構造に関する研究(そ

の2:抵抗力増大機構付ダンパー架構)、2014年度日本建築学会大会、2014年9月12～14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 和夫 (TAMURA, Kazuo)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号：50416822

(2) 研究分担者

福喜多 輝 (FUKUKITA, Akira)
清水建設株式会社技術研究所・グループ長
研究者番号：20426589

磯田 和彦 (ISODA, Kazuhiko)
清水建設株式会社技術研究所・上席研究員
研究者番号：90416800