

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14339

研究課題名(和文) 柱梁を剛結合しないフレーム構造 = 滑構造の実現可能性評価のための実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study for feasibility of "Sliding Structure" a frame structure without beam-column connection

研究代表者

川瀬 博 (KAWASE, Hiroshi)

京都大学・防災研究所・特定教授

研究者番号：30311856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では柱と梁を剛結合しないで摩擦接合した長方形1スパンの4層構造物模型試験体を作成し、振動台を用いて動的加振試験を実施した。実験は1層時と2層時の挙動を確認したのち、4層まで積層して実験を行った。各層には1トンの錘を載せて長周期化を図った。実験の結果、1層時には大速度地震動を与えた場合にはストッパーに衝突した。その際の摩擦係数は0.4程度と推定された。4層では兵庫県南部地震や熊本地震の地震動の60%入力を与えてもストッパーに衝突することはなかった。しかし、一回の実験で残留変形がかなり生じた。よって滑構造は特に何も装置を設置しない滑動部、ストッパー、セルフセンタリング機構で構成する必要がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, a 4-layered test structure with a rectangular 1 span was prepared by friction connection without pillar and beams being rigidly joined, and a dynamic vibration test was carried out using a shaking table. Experiments were carried out by stacking up to 4 layers after confirming the behavior with only 1 layer and 2 layers. Each layer was loaded with 1 ton of weight to achieve long period. As a result of the experiment, in the case of 1 layer it collided with a stopper when giving a high velocity seismic motion. The friction coefficient at that time was estimated to be around 0.4. In the 4-layer case, even if 60% input of earthquake ground motion of the Hyogo-ken Nanbu Earthquake or Kumamoto earthquake was given it did not collide with the stopper. However, residual deformation occurred considerably in each experiment. Therefore, it is necessary to construct the sliding structure with a sliding part, a stopper, and a self centering mechanism.

研究分野：都市災害管理学

キーワード：摩擦接合 柱-梁 超高層 セルフセンタリング ストッパー ダンパー

## 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート構造物にせよ、鉄骨構造物にせよ、現状のモーメント抵抗型フレーム(ラーメン)構造物では、柱と梁を剛結合し、門形ラーメン構造の連続形を構成して自重と地震荷重に対して抵抗させている。こうした剛構造物の大地震時挙動における最大の弱点は、軸力・せん断力と曲げモーメントが複合的に作用する柱の両端部および柱・梁接合部にあり、実際の震害もこれらの弱点に生じることは過去の事例が証明している。

免震構造は、その問題を解決するために基礎直下に水平方向に大きく変形できる層(免震層)を設け、システムを長周期化するとともに、免震層でもつぱら水平変形させエネルギー吸収させることにより、柱に生じる曲げモーメントを軽減させた構造である。考え方は正しいが、免震層に十分なクリアランスを設ける必要があり、また二重の基礎が必要となる。

制震構造は、同じ問題に対して各層の層間変位もしくは速度に対し抵抗力を発揮する制震デバイス(制震ダンパー)を設置することにより、柱に生じるせん断力・曲げモーメントを軽減させた構造である。これも考え方は正しいが、通常のフレーム構造物に対して適用すると、フレーム剛性が制震デバイスに対して抵抗し、本来の効率を発揮することができないという本質的な欠陥がある。最近では鉄筋コンクリート構造物にまで制震デバイスを組み込むための研究さえなされているが、柱と梁を剛接合して変形を抑えておいてから変形が出ないと効かないデバイスを付加するのは全く合理的ではない。

以上のことから、理想的な対地震構造は、層間には水平剛性を持たず自由に滑る構造であることがわかる。従来の特定期層に変形を集中させる免震構造と区別するため、これを「滑構造」と呼ぶ。「滑構造」では各層で少しずつ水平変形させるために特定期層に過度のクリアランスを設ける必要はなく、またフレーム自体の層間水平剛性が小さいため、付加する制震デバイスにおいて高い制震効率が確保できる。

これが全層免震ならば全柱端に免震装置を設置する必要があり、コスト的に実現可能性がない。また全層免震化では強風時・中小地震時に変形を押さえるためのトリガー機構が別途必要となる。そこで「滑構造」では柱端をコンクリートと鋼材の摩擦接合(ちょんのせ)とする。鋼材とコンクリートの摩擦係数は0.3程度なので震度5強まではトリガーがかかり、滑りは生じない。

## 2. 研究の目的

比較的アスペクト比(塔状比)の小さな一般構造物および超高層構造物に対して、各柱頭部において柱と梁を剛接合せず、中小地震時にはトリガー機能により固着しつづけるが、大地震時にはそこで滑らせることにより

柱に生じるせん断力と曲げモーメントを軽減し、柱の破壊を防ぐことで建物の耐震性能を向上させる、全く新しい構造様式「滑構造」のフィージビリティ(実現可能性)を、試験体を用いた振動実験により、明らかにすることが本研究の目的である。その際、各層で滑る量を可動範囲内に収めるために必要十分な制震デバイス(ダンパー)を付加するとともに、柱を原位置に戻すセルフセンタリング機構を装備する必要があるが、ここでは「滑構造」の基本的性状を明らかにすることを研究の主眼とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 試験体の設計

まず既存の文献等に基づいて鋼-鋼間とコンクリート-鋼間の摩擦係数を設定し、そのトリガー解除前とトリガー解除後の挙動について、簡単な非線形1自由度系あるいは2自由度系のモデルを用いて、動的非線形シミュレーション解析を行い、その結果に基づいて試験体の設計を行う。試験体は、「滑構造」の基本性能を確認するための1層試験体と、層間の連成の影響を考慮するための1層試験体の上部に同様の2~4層目を設置した4層試験体を用いる。

### (2) 免震+制震試験体の実験結果の整理

上記シミュレーション結果に基づいて試験体を製作する。まず柱・梁接合部をローラーで支持し摩擦接合としない試験体を製作し、それに対して制震デバイスとして乾式コンクリートブロックによる摩擦制震壁を用いた振動実験を行い、その有効性を確認するとともに、基本特性のモデル化を行う。

### (3) 滑構造試験体の製作と実験

次に柱・梁接合部は鋼-鋼で摩擦接合とした試験体を製作して、1層・2層・4層の場合の滑動状況を把握した。なおセルフセンタリング機構は2】の試験体と同様に下層フレームに鉛直方向に固定した片持ちのジュラルミン版で形成した。得られた観測波形から滑構造の基本特性を把握した。

## 4. 研究成果

### (1) 免震+制震試験体の実験結果

#### ① 模型振動実験概要

図1に免震+制震試験体の概観を示す。試験体は最終的には4層構造となっており、各層の柱頭部分にはローラーが設置されており、水平荷重を負担しない免震構造となっている。また層の復元力を与える部材として、ジュラルミン製の板ばねを設置している。この試験体ではこの板ばね接合部を両側からはさみこむローラー・ピン接合とすることで材端の鉛直変位および回転を許容する機構とした。予備解析では試験体の固有周期は約5.9秒となり、実験で使用する入力地震動に対して弾性範囲の応答を示し安全であることを確認した。

図2に摩擦制震壁の概観を示す。本制震壁

は環境負荷低減の観点から異質の材料を接着しないリユース型構造として開発された乾式ブロック造の制震壁で、分別解体が容易で居ながらの補強が可能といった特徴がある。本制震壁は上部に設置されたアルミダンパー<sup>3)</sup>が滑ることで地震エネルギーを吸収する構造となっている。アルミダンパーは4kNのプレストレスを導入したボルトの本数によりエネルギー吸収量の調整が可能で本実験ではボルト本数0本、4本、8本、12本のパターンで加振を行う。

加振はすべて一軸加振とし加振方向は試験体の短辺方向である。入力地震動は2011年東北地方太平洋沖地震の際にそれぞれ東京、名古屋、大阪を代表する3点で観測されたものに加えJMA神戸波を使用した。



図1 免震+制震試験体概観



(a)施工状況 (b)摩擦ダンパー

図2 摩擦制震壁概観

## ②免震+制震試験体の動的挙動

加速度フーリエスペクトル比を用いて試験体の固有周期を把握した。全加振ケースを通してローラー接合部の摩擦減衰の影響により明確なピークが見られず、ピークレベルの低いものが多かった。中でも長周期成分が小さいJMA神戸波で明確なピークがみられるものがあった。そのピークは基礎部の加速度スペクトルが谷になっているところであり、試験体の質量ダンパー効果により試験体の固有振動数付近の周波数帯域で振動台の応答が抑制されているものと考えられる。よってこれを試験体の固有振動数とし読み取ると、固有周期は約5.6秒となった。

さらに試験体の復元力特性を描画したと

ころ、ほぼ線形となっており、ローラー接合部の摩擦により矩形の履歴を描くことが分かった。履歴曲線の傾きを最小二乗法の線形近似によって算出し、板ばねの剛性を0.011[kN/mm]と決定した。

## ③摩擦制震壁の動的挙動

摩擦制震壁はボルト本数に依らず小入力時には弾性挙動を示した。摩擦ダンパーの摺動部が滑り出すまでの微小変形時の剛性をピーク周波数より同定した。平均ピーク周波数は9.75Hzとなり、試験体質量を6.5tとして微小変形時の剛性は24.4[kN/mm]と決定した。

摩擦制震壁ボルト0本、4本、8本、12本の各パターンについて、履歴曲線を求めた。ボルト4本、8本のパターンでは、摩擦ダンパーの摺動部が滑り出した後は矩形のループを描き、安定した履歴吸収を行っている。ボルト12本のパターンについては摩擦ダンパーが明確に滑り出したケースが無く、楕円形のループを描いた。

各加振ケースの滑り耐力を読み取り、ボルト本数毎に集計した結果から算出した摩擦係数はボルト本数4本と8本のパターンでほぼ同じ0.2となっており、安定した挙動をしていることが分かる。ボルト本数12本のパターンでは滑り耐力が0.42と突出して大きく、施工時に何らかの原因で摩擦ダンパーのプレストレス力が4kNよりも大きくなり、滑り耐力が想定よりも高くなっていることが考えられる。

## ④まとめ

以上の実験結果をまとめることにより、全層免震+制震構造は兵庫県南部地震クラスの入力にも適用できること、その特性は実験から抽出した各部材のパラメーターで表現できることを明らかにした。

## (2) 完全滑構造の実験結果

### ①滑構造試験体

次に柱-梁接合部をローラーにもせず、剛接合にもしない滑構造試験体の試験体を先に製作した試験体を活用することで製作し、実験に用いた。

柱-梁接合部は、基部はこれまで通り固定とし、上部にはクリアランスを設けてストップとし、その間は自由に滑動できるように設計した。

組み立て上難しいのが均等に荷重を載荷することである。各層のフレーム自体は完全に平面を形成しているわけではないので、柱を立ててから上部フレームを載せた場合に、各柱が負担する荷重は均一ではなく、場合によっては浮き上がっている柱も生じ得る。上載圧が大きければ弾性変形によって不陸は調整されるが、今回の場合は各層に1tonの錘を載せたただけなので、目視とレーザー水準器により、上層のフレームの水平を、ストップ

パに挟む薄い鉄板の枚数で、できるだけ高精度に調整することとした。

実験は1層を組み立てた時点、2層を組み立てた時点、および4層を組み立てた時点の3回に渡り実施した。用いた入力地震動は兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の波のNS成分と熊本地震のKiK-net 益城 (KMMH16) のEW成分の2波である。前回と同様に低加速度レベルのスweep加振を行ったあと、振幅倍率を10%, 20%, 40%と上げながら加振を行った。図3～図5にそれぞれ1層試験体、2層試験体、および4層試験体の外観を示す。



図3 1層試験体の外観



図4 2層試験体の外観



図5 4層試験体の外観

## ②滑構造試験体の実験結果

まず1層モデルの試験結果を示す。図6には1層モデルに神戸海洋気象台波の20%入力 of 試験体1層上部(2F)の加速度波形の一例を示す。加速度は4隅で計測したが、入力が小さい場合および層数が少ない場合にはほぼ同じ動きを示す。

図7には同じコーナーでの振動台上の変位に対する上部構造の相対変位波形を示した。図8にはその相対変位を横軸に、加速度×質量で求めた層のせん断力との関係を図化した。非常に僅かずつではあるが滑りが進展していく様子が見られる。最終的な残留変形は6mmほどとなっている。

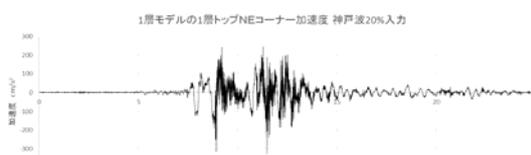


図6 1層試験体の加速度応答波形  
神戸波 20%入力

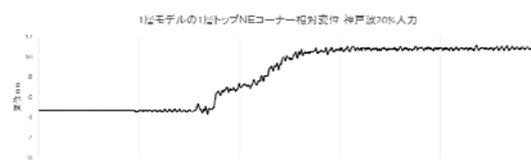


図7 1層試験体の相対変形応答波形  
神戸波 20%入力

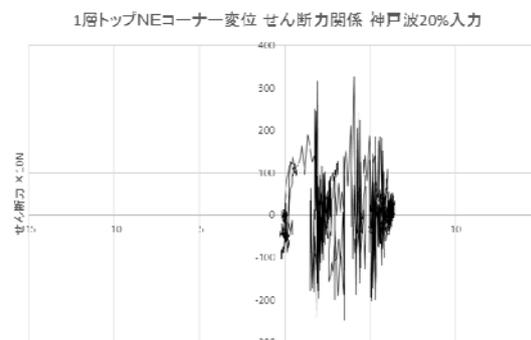


図8 1層試験体の力—変位関係  
神戸波 20%入力

同様にして1層モデルに対して神戸海洋気象台の80%の加速度波形を入力した。図9～図11にその結果を示す。なお変位波形で25mmのオフセットが生じているが、これはそれまでの加振で累積した残留変形である。入力レベルが大きくなると、変形の進展が早く20mmほどの変形が生じた後で後半部分の振動により初期状態に戻っている。

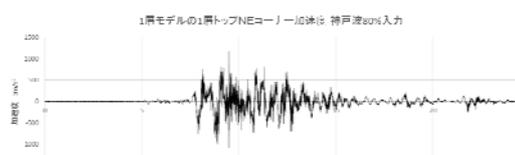


図9 1層試験体の加速度応答波形  
神戸波 80%入力

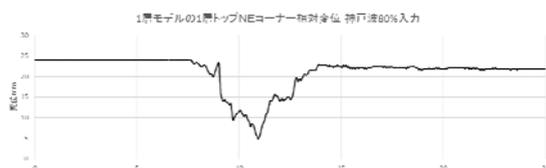


図10 1層試験体の相対変形応答波形  
神戸波 80%入力

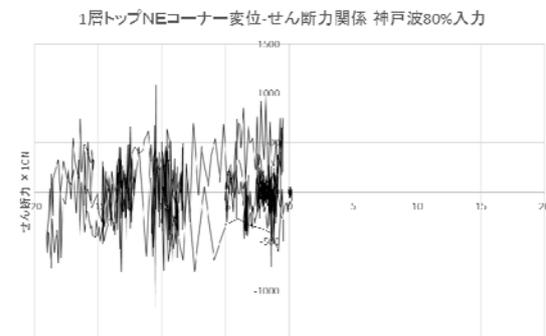


図11 1層試験体の力-変位関係  
神戸波 80%入力

これらの図で加速度には上限があることがわかるが、そのレベルは一定ではなく、最小で自重の0.3倍、平均的には0.5倍、瞬間的には1倍となっている。

次に4層モデルの結果の一例を示す。同様に図12には1層目の加速度を、図13には1層目の相対変形を、図14にはその両者の関係を図化した。入力レベルは60%である。

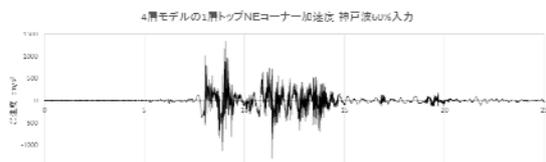


図12 4層試験体の1層での加速度応答波形  
神戸波 60%入力

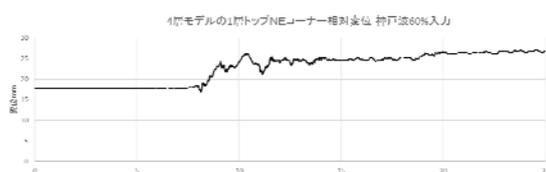


図13 4層試験体の1層での相対変形応答波形  
神戸波 60%入力

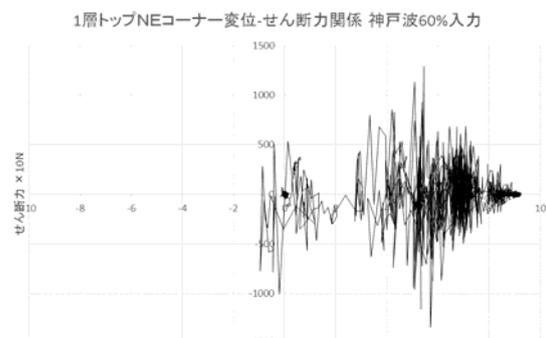


図14 4層試験体の1層での力-変位関係  
神戸波 60%入力

図から1層試験体と同様に、大きな入力で漸次相対変形が増大していくこと、加速度は時にして1gを超えるが概ね500Galレベルで収まることがわかった。

### ③まとめ

柱-梁接合部を一切接合しない完全滑構造試験体を製作して、大加速度入力を与えその挙動を把握した。その結果、滑動は最大加速度で0.3g程度から生じ、鋼と鋼の最小摩擦係数が0.3程度であること、加速度が大きくなると生じる最大加速度は0.6g程度まで上昇するが、一部の短時間パルスを除き、そのレベルで抑えられること、滑動による変位はジュラルミン製復元力では不足で、一度動き始めると片方向にのみ進行する傾向にあることがわかった。このことより、最大加速度を抑えるためには制震ダンパーが必要であるが0.6gのせん断力に耐えるよう柱を設計すればダンパーは不要であること、しかし方揺れした結果ストップに当たる事態を防ぐためにはその発生せん断力に見合う復元力を有したセルフセンタリング機構が必要であることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

①野田卓見、川瀬博、松島信一、模型振動実験に基づく長周期構造物と摩擦制震壁の動的挙動に関する研究、京都大学防災研究所研究発表会、2016年2月23日～2月24日、京都府宇治市

②川瀬博、野田卓見、滑震構造＝全層免震建物の模型実験、京都大学防災研究所研究発表会、2016年2月23日～2月24日、京都府宇治市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川瀬 博 (KAWASE, Hiroshi)  
京都大学・防災研究所・特定教授  
研究者番号：30311856

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

山口 謙太郎 (YAMAGUCHI, Kentaro)  
九州大学大学院・人間環境学研究院・准教授  
研究者番号：10274490

### (4) 研究協力者

長嶋 史明 (NAGASHIMA, Fumiaki)  
野田 卓見 (NODA, Takumi)  
松島 信一 (MATSUSHIMA, Shinichi)  
宝音 図 (BAOYINTU)