

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月20日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21686054

研究課題名（和文） 基礎との摩擦を利用する損傷抑制型鋼構造建物の開発と耐震性評価

研究課題名（英文） Development and performance assessment of damage-resistant steel buildings utilizing friction behaviors between column base and foundation

研究代表者

長江 拓也 (NAGAE TAKUYA)

防災科学技術研究所・減災実験研究領域兵庫耐震工学研究センター・主任研究員

研究者番号：90402932

研究成果の概要（和文）：本研究では、鋼構造建物の1階の柱脚を固定せずに、ある水平力に対してすべる条件にすることで、上部構造に加わる地震力を低減し骨組損傷を抑制する構造形式の開発をめざした。一連の振動台実験では、まず、通常の鋼製柱脚と基礎モルタル間における静止摩擦係数と動摩擦特性を検証した。次に、柱脚の摩擦係数を低減するための鋳鉄製柱脚および黒鉛潤滑柱脚を提案し、これらの静止摩擦係数と動摩擦係数が0.3以下になることを明らかにした。さらに上部構造の損傷を抑制しつつ柱脚のすべり変位を抑制するためのストッパーに必要な条件を検証した。得られた摩擦特性等を組み込んだ建物モデルに対する地震応答解析に基づき、建物としての損傷抑制効果を検証し、実験結果および解析結果を踏まえて耐震性評価手法の構築に取り組んだ。

研究成果の概要（英文）：A series of shaking table tests were conducted in order to develop the damage-resistant steel buildings whose column bases can slip when subjected to strong earthquake motions. First, the friction behaviors between conventional steel column and base mortar were estimated. Second, a cast-iron column was examined, and its low coefficient of friction was clarified. A column base supported by a graphite layer was also examined for a low coefficient of friction. Third, conditions of stopper to reduce the slip drift were verified. Finally, seismic performance of a prototype building was considered by the dynamic response analysis reflecting the test results, and a method to assess the seismic performance was studied for the proposed structural system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鋼構造建物，基礎，摩擦，すべり，損傷抑制，振動台実験

## 1. 研究開始当初の背景

大地震時に、建物には大きな水平外力が作用し、最悪の場合、倒壊等により人命が失われることになる。近年では骨組における各部

材の変形能力を確保し骨組の粘りで地震外力に耐える設計法が趨勢となっており、これにより倒壊までの余裕度が確保されている。このとき、骨組において梁端ヒンジによる全

体降伏メカニズムが達成されると最大層間変形角が合理的に抑制される。ただし、多くの梁に生じる塑性変形によって骨組に重度の損傷が生じれば、補修が困難となり建物としての財産価値を失うことになる。1995年の兵庫県南部地震における教訓として、この問題が大きく取り上げられたが、抜本的な解決には至っていない。さらに、全体降伏メカニズム下においても、1階の柱脚が過酷な応力状態において塑性回転を被ることは避けがたい。1階の柱脚が破壊すると、当初形成されていた全体降伏メカニズムは1階の層崩壊に移行する。

## 2. 研究の目的

以上を背景に、1階の柱脚を基礎に固定せず基礎に置くだけという条件により柱脚に発生する塑性変形を減らすとともに、柱脚がすべることで地震外力に対するヒューズの役割を果たし建物全体の損傷を抑制する鋼構造建物の開発をめざした。本研究では、この直置き型鋼構造建物に対して、(i) 頻繁に生じる地震時には、外力が最大静止摩擦係数に相当するせん断力以下に留まり柱脚すべりを生じない、そして (ii) 極めて稀に起きる大地震に対しては、骨組の損傷が重大になる前に柱脚がすべりだす、さらに (iii) 柱脚の過大なすべりを抑制するストッパー機能を付与する、という目標を設定し、振動台を用いた基礎実験に取り組むこととした。

また本研究では、実現性の高さを重要視し、一般に広く使用されている材料から構成される構造形式の実現を基本方針とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 摩擦特性評価に関する振動台実験と解析

#### ① 実験方法

実験システムの立面を図1(a)、(b)に示す。振動台上の実験システムは、上部構造とその上部構造を支える基礎部から構成される。提案建物の1階の柱脚はコンクリート床付きなぎ梁によって一体化されることを想定しており、上部構造については、1階の柱脚位置を想定した1層目の鋼製フレームと上層階の質量を想定した2層目の鋼製フレームの間に10基の積層ゴム支承を挟むことで表現した。1層目の質量は1,400 kg、2層目の質量は3,210 kgとした。実験システムの一次固有振動数は3.0 Hzとなった。また、比較のため1層目と2層目の間にH形鋼を付加することで上部構造の剛性を高めた(剛体とみなせる)場合も用意した。

上部構造1層目フレーム下部の柱脚想定部の詳細を図1(c)に示す。箱型支持要素内で固定される接触要素は取り替えが可能で、基礎との摩擦面は75 mm×75 mmの正方形断面となるように加工されている。4個の接触要

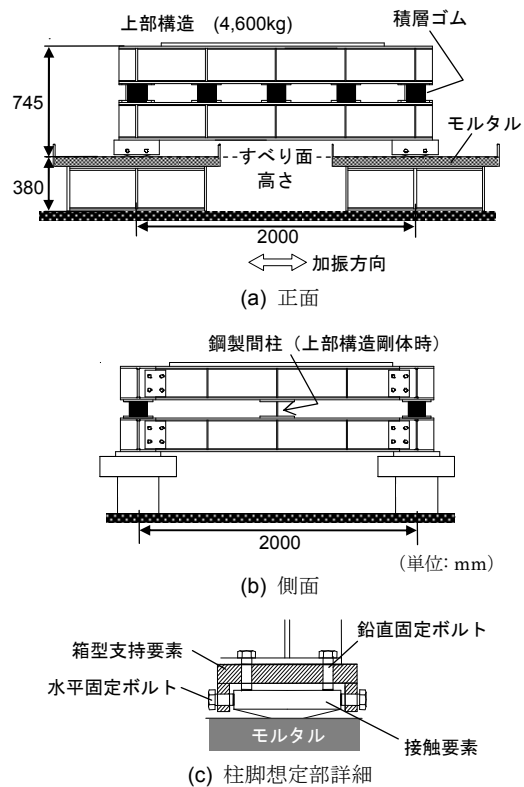


図1 振動台上の実験システム

素の平均面圧は、低層鋼構造建物の柱脚ベースプレート面の値に相当する約  $2.0 \text{ N/mm}^2$  である。

## ② 実験結果

### (i) 鋼製柱脚とモルタル基礎の摩擦性状

接触要素に通常の鋼柱脚を想定した鋼を用いて、平面モルタルとの摩擦性状を検証した。図2に実験で得られた摩擦係数とすべり速度の関係を示す。すべり出すときの静止摩擦係数は約0.8となり、この値はすべりの繰り返しの関係に変わらぬ安定している。一方、すべりが進行しているときの動摩擦係数はすべり速度の上昇に伴って約0.3まで低下している。

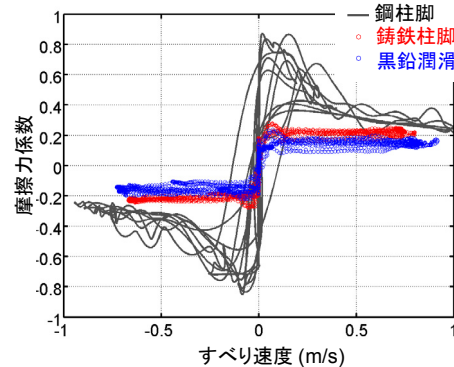


図2 各柱脚における実験時の摩擦特性

本研究では以上の摩擦特性を定式化し、直置き型鋼構造建物の数値解析モデルに組み込み、地震応答解析を実施した。その結果、極大レベルの地震動に対して上部構造の塑性変形が減少する傾向を確認できたが、通常の鋼構造建物がもつ保有水平耐力とのバランスからみて、すべり開始時の静止摩擦係数が0.8というのは値が高すぎて塑性変形の減少割合が十分とはいえなかった。この結果を受けて、柱脚の最大静止摩擦係数を小さくする手段の特定と評価に取り組むこととした。

### (ii) 鋳鉄製柱脚および黒鉛潤滑層による摩擦係数の低減

柱脚の摩擦係数を低減する手段として、本研究では柱脚を鋳鉄製にすること、および柱脚と基礎の間に黒鉛潤滑層を介在させることを考えた。黒鉛はトライボロジーの分野において固体潤滑剤に分類されている。鋳鉄の炭素含有率は約2.5%であり、鋼に対して15倍以上となる。鋳鉄の場合には、すべりによって黒鉛を多く含む磨耗粉が発生し潤滑剤として機能する。図2に、接触要素に鋳鉄を用いた場合、および接触要素の下に黒鉛潤滑層を介在させた場合の実験結果を赤色と青色のプロットで示す。いずれの場合も、静止摩擦係数が0.3以下であり、動摩擦係数は0.15-0.2を推移している。

鋳鉄製柱脚については単にベースプレートを鋳鉄板にするだけであり、適用性は非常に高いといえる。黒鉛潤滑層の場合も、黒鉛自体は安価な材料であり、事前に柱脚底に取り付けておく、もしくは黒鉛をペースト状に加工しモルタル同様の扱いによって建て方時に施工する、などの工夫により技術的な問題はクリアできると考えられる。

### ③ 数値解析による検証

本研究では、実験結果の信頼性を高めるために、解析による再現を試みた。柱脚部と上部構造物の2質点系解析モデルを図3に示す。柱脚部の質量 $m_b$ を1,400 kg、上部構造物の質量 $m_1$ を3,210 kgとした。システム同定実験を参照し、弾性上部構造の固有振動数と減衰を3.0 Hzと2%に、剛体上部構造の固有振動数と減衰を12.0 Hzと1%に設定した。

各柱脚の摩擦特性が速度 $v$ の上昇に伴って漸近的に定常動摩擦係数に収束するという特徴を下式で表した。ここで、 $\mu_s$ : 最大静止摩擦係数、 $\mu_d$ : 定常動摩擦係数、 $\gamma$ : 動摩擦係数の速度依存性を決めるパラメータ、である。

$$|\mu(v)| = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\gamma|v|}$$

実験において得られた摩擦特性を参照することによって、各柱脚の摩擦モデルのパラメータを決定した。図4に黒鉛潤滑柱脚の場合における例を示す。

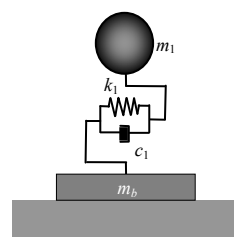


図3 数値解析モデル

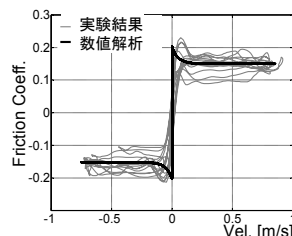
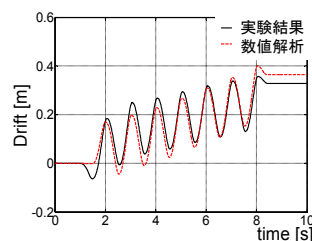
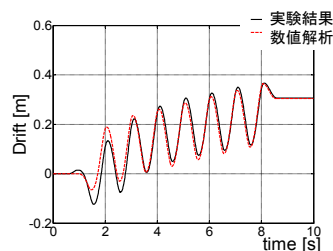


図4 柱脚の摩擦モデル

図5には、上部構造が剛体時の正弦波入力による実験結果と解析結果の比較を示す。この場合、解析によるすべり変位の時刻歴波形と実験結果はほぼ一致している。上部構造が弾性時の場合においては、すべり変位が一方に片寄る状況が顕著に生じたものの、正方向と負方向に交互に生じているすべり変位の両振幅は、剛体時と同様、解析結果と実験結果が一致した。



(a) 鋳鉄製柱脚



(b) 黒鉛潤滑柱脚

図5 実験結果と解析結果の比較

### (2) すべり変位低減に関する実験

鋼構造建物を対象とした時刻歴応答解析による考察では、低摩擦柱脚をバランスよく組み込むことにより、直置き型鋼構造建物の骨組損傷が地動最大速度0.5 m/s以上の地震動に対して効果的に低減されることを確認

した。

一方で、柱脚におけるすべり変位が大きくなると配管設備に損傷が生じるほか、残留すべり変位は建物を本来の位置から移動させてしまう。最終実験では、直置き型鋼構造建物の柱脚すべり変位がある値以上になるとストッパーが効きだす条件で振動台実験を実施した。

### ① 実験方法

実験システムの全景を図 6 (a)に示す。先の実験に用いた実験手法を準用しており、本実験では、上部構造の下部フレームの中心に取り付けた鋼棒が、ある変位に達するとストッパーに接触する条件とした。接触部の詳細を図 6 (b)に示す。ストッパーとしてゴムブロックを採用し、基礎部に固定したアンクルとゴムブロックの間にロードセルを組み込み、ストッパーに加わる反力を計測した。

予備の実験において得られた、反力とすべりの関係を図 7 に示す (ゴムブロック厚さ 150 mm、クロロブレンゴム (硬度 45) の場合)。接触するまでの距離 50 mm を含めても 3 次関数によって履歴特性が適切に表現できることが分かった。本実験では、兵庫県南

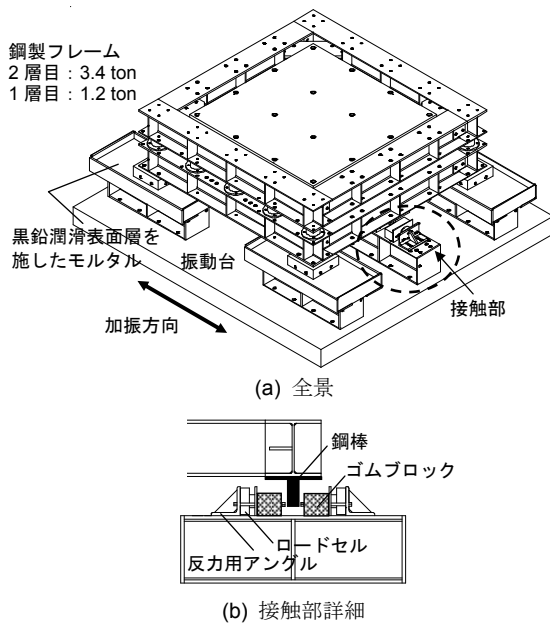


図 6 実験システム

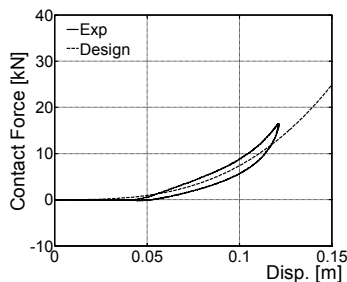


図 7 予備実験におけるゴムの履歴特性

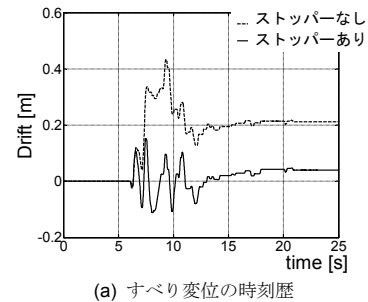
部地震で観測された JMA 神戸 NS 成分を最大速度が 1.0 m/s になるように基準化して入力した。本実験に用いる上部構造は弾性であり、減衰定数 2 % の加速度応答スペクトルにおいて、実験システムに対応する固有周期 0.33 s (固有振動数 3 Hz) の最大応答加速度は約 5.0 g となった。

### ② 実験結果

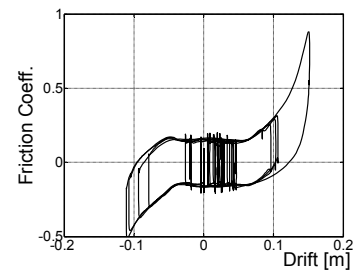
この実験において、振動台上で再現された JMA 神戸 NS 成分の最大速度は 0.98 m/s となった。実験結果を図 8 に示す。ストッパーを用いない場合において、上部構造の最大層せん断力係数は 0.48 に留まったが、最大すべり変位は 0.43 m、残留すべり変位は 0.21 m となった。

ストッパーを用いた場合には、最大すべり変位が 0.15 m 程度とストッパーを用いない場合に対して 1/3 に低減できている。さらに、残留変位は 0.04 m となりストッパーを用いない場合に対して 1/5 に低減できている。一方で、基礎柱脚の最大せん断力係数は柱脚がストッパーに接触する時点から上昇しており、上部構造における最大せん断力係数は約 1.0 となった。これはストッパーを用いない場合の約 2 倍である。

しかし、入力地震動のスペクトル特性において上部構造の 1 次固有周期に対する最大応答加速度は約 5.0 g である。つまり、柱脚を完全固定した場合には、上部構造における最大せん断力係数は約 5.0 に達したと予測される。本実験においては、ストッパーにより柱脚に反力が作用しすべり変位が抑制される一方で、柱脚が 50 mm 以上すべることにより、上部構造の応答せん断力が、柱脚固定の



(a) すべり変位の時刻歴



(b) すべり変位と柱脚位置のせん断力係数

図 8 JMA 神戸 NS100%加振

場合に対して 1/5 程度まで低減されたと解釈することができる。

### ③ 評価手法に関する取り組みと展望

以上の実験は、上部構造が弾性応答に支配される条件に基づいている。提案する直置き型鋼構造建物の耐震性を総合的に評価するために、本研究では引き続き、解析を用いて直置き型鋼構造骨組の弾塑性地震応答性状の評価、および簡易評価手法の構築に取り組んでいる。提案手法の骨子は以下に示すとおりである。

手順の前半は上部構造が弾性であると仮定する。こうすると、ストッパーの変形量を評価することで上部構造に作用する層せん断力が求まる。柱脚すべり時の摩擦抵抗力に対応する上部構造の最大層せん断力は、既往の研究において理論的な評価手法が示されている。本評価において想定する上部構造の最大層せん断力については、すべり時における最大層せん断力とストッパーの最大変形時に対応する層せん断力を足し合わせることで求めることとする。

ここで、ストッパーの最大変形は接触時のすべり速度によって理論的に求められる。このすべり速度を地動最大速度と仮定すると式がシンプルに展開できる。一方、上部構造の周期特性がすべり速度に影響を与えることも容易に想像できることから、1次固有周に対応する弾性最大応答加速を評価に組み込むことを合わせて検討する。

弾塑性挙動する上部構造の塑性変形の評価が一連の手順におけるゴールである。構造物の弾性応答と弾塑性応答を関連付ける構成則のうち、エネルギー一定則は短周期構造物に対して成り立つ傾向にあると広く認識されている。仮定した弾性時の最大層せん断力から塑性率を求める手順としてはエネルギー一定則を想定する。

以上の手法による評価値については、膨大な数の地震動に対する弾塑性地震応答解析結果との相関を検証し、ばらつきも含めて評価値の位置付けを明らかにしておく。

## 4. 研究成果

本報告では割愛した部分も含め、一連の研究による成果を以下に整理する。

通常の鋼製柱脚と基礎モルタルに関する振動台実験では、(1) 最大静止摩擦係数は動的なすべりの繰り返しによらず安定して 0.8 程度となる、(2) すべりが生じているとき動摩擦抵抗力はすべり速度の上昇とともに急激に低下する、という結果を得た。また、それらの現象を数値解析に展開し、鋼構造建物に関する弾塑性地震応答解析を実施したところ、(3) 上部構造の損傷率は最大静止摩擦係数に対する降伏ベースシヤ係数の比で決

まり、この強度比を 1 以上にすれば損傷率が半減する、また、(4) 地動速度が 1.0 m/s 以上になる地震動に対して柱脚すべりが 0.3 m を超える、という結果を得た。

以上の結果を踏まえ、まず、効率のよい損傷抑制効果を得るために、柱脚における摩擦抵抗を低減する手段に関する振動台実験を実施した。その結果、(5) ベースプレートに黒鉛を塗布することで内部黒鉛の自己潤滑作用が生じ最大静止摩擦係数および動摩擦係数が安定して 0.3 程度以下となる、(6) 柱脚・基礎間に黒鉛からなる潤滑層を介在させることで最大静止摩擦係数および動摩擦係数が安定して 0.2 程度となることを実証した。さらに、柱脚のすべり変位を抑制する構造システムについて振動台実験を実施し、(7) ゴムブロックを利用したストッパーによって最大すべりのみならず残留変形を効率的に抑制できるという結果を得た。

現時点では、こうした各種の条件が、鋼構造建物の耐震性能に与える影響を総合的に評価することをめざし、(8) 鋼構造骨組と基礎における力の釣り合い、および消費エネルギーのバランス等に基づく評価手法の構築に取り組んでいる。

以上の成果のうち、(1)~(4)については日本建築学会構造系論文集に掲載済みである。また、(5)および(6)については、同論文集に投稿中である。(7)および(8)については同論文集に掲載することを前提に原稿の作成に取り組んでいる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

① 榎田竜太、池永昌容、長江拓也、中島正愛：鋼とモルタルのすべり面をもつ柔・剛構造物の動摩擦特性と地震応答特性、日本建築学会構造系論文集、査読有、No. 661、2011、pp. 527-534

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/76/61/76\\_661\\_527/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/76/61/76_661_527/_pdf)

〔学会発表〕(計 3 件)

① 榎田竜太、稲美充顕、山崎友也、池永昌容、長江拓也、中島正愛：鋼とモルタルの摩擦係数低減と直置き型鋼構造建物の地震応答 その 1. 摩擦係数とベースシヤ係数の関係と振動台実験の諸条件、日本建築学会大会学術講演梗概集、平成 23 年 8 月 25 日、東京都・早稲田大学

② 山崎友也、榎田竜太、稲美充顕、池永昌容、長江拓也、中島正愛：鋼とモルタルの摩擦係数低減と直置き型鋼構造建物の地震応答 その 2. 黒鉛潤滑と振動台実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、平成 23 年 8 月 25 日、東京都・早稲田大学

③ 稲美充顕、榎田竜太、山崎友也、池永昌容、長江拓也、中島正愛：鋼とモルタルの摩擦係数低減と直置き型鋼構造建物の地震応答 その 3. すべり変位の抑制、日本建築学会大会学術講演梗概集、平成 23 年 8 月 25 日、東京都・早稲田大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長江 拓也 (NAGAE TAKUYA)

防災科学技術研究所・減災実験研究領域兵

庫耐震工学研究センター・主任研究員

研究者番号：90402932

(2) 研究協力者

榎田 竜太 (ENOKIDA RYUTA)

京都大学大学院工学研究科・日本学術振興

会特別研究員