

黒鉛潤滑を応用した直置き型鋼構造建物柱脚の摩擦低減

APPLICATION OF GRAPHITE LUBRICATION FOR COLUMN BASE
IN FREE STANDING STEEL STRUCTURE榎田 竜太*¹, 長江 拓也*², 池永 昌容*³, 稲美 充顕*⁴, 中島 正愛*⁵*Ryuta ENOKIDA, Takuya NAGAE, Masahiro IKENAGA,
Michitaka INAMI and Masayoshi NAKASHIMA*

Free standing steel structures, whose column bases are not fixed to a foundation, contribute to decrease damage to the structures under large earthquakes. However, the friction coefficient of normal steel column bases is 0.8 and too high to the strengths of normal steel structures. In this study, a steel column base lubricated by graphite well known as a lubricant and a cast iron column base containing much more graphite than steel are proposed to realize the low friction column base. Shaking table tests are conducted to investigate the friction characteristics. The tests show that the friction coefficient of the cast iron column base is 0.25 and that of the graphite lubricated steel column base is 0.20. Dynamic response analyses representing these friction characteristics show reasonable correlations with the test results.

Keywords: steel building, column base, graphite lubrication, cast iron, mortar, shaking table test

鋼構造建物, 柱脚, 黒鉛潤滑, 鋳鉄, モルタル, 振動台実験

1. はじめに

地震時において、建物の基礎や柱脚などが一定の条件下で変形することによって、上部構造建物の損傷を低減できることが指摘されている¹⁻⁵⁾。本研究では、地震時に柱脚がすべることによって地震時損傷を低減させる直置き型鋼構造建物の実現をめざしている。鋼柱脚とモルタル基礎の摩擦特性を把握するために実施した一連の実験研究⁶⁻⁸⁾によれば、鋼とモルタルの最大静止摩擦係数は0.7-0.8程度である。直置き型鋼構造建物のようなすべりを伴う構造物の損傷低減効果はすべり面の摩擦係数や上部構造の耐力に大きく影響される。これに関して、壁谷澤ら⁹⁾は、基礎の摩擦係数が0.5-0.8程度の構造物を対象とし、摩擦係数に影響される最大層せん断力を理論的に評価している。最大静止摩擦係数が0.8程度の鋼とモルタルに基づく直置き型鋼構造建物は一定の損傷低減効果を発揮するが⁸⁾、その低減効果を高めるためには、通常の鋼柱脚よりも小さな摩擦係数を有する柱脚が必要である。特別な装置を用いることなく簡易に低摩擦（例えば、0.3以下）を実現できれば、直置き型鋼構造建物の適用性を一段と高めることができる。

これまでの直置き型鋼構造建物の開発には鋼とモルタルを用いることを前提としてきたが、鋼よりも炭素量の多い鋳鉄が建築構造物の塑性化を計画しない高耐力部に使用される場合がある。鋳鉄同士の最大静止摩擦係数は鋼同士の半分程度であるとされている^{10,11)}。鋳鉄に使われる黒鉛は、トライボロジーの分野において低摩擦を実

現する固体潤滑剤¹⁰⁻¹³⁾に分類されており、高荷重に耐え¹³⁾、繰り返しに強く¹⁴⁾、化学的にも安定し、さらに安価であるという特徴を有する。鋳鉄の場合には、鋳鉄自身がすべりによって磨耗し、黒鉛を多く含む磨耗粉が発生する。この磨耗粉がすべり面に表面皮膜を形成することで潤滑剤として機能するという自己潤滑作用を有している¹¹⁾。以上の背景のもと、黒鉛によって得られる潤滑効果を鋼構造建物の柱脚に応用するという着想に至った。本論では、モルタル基礎上に鋳鉄製の柱脚ベースプレートを採用する柱脚（以降、鋳鉄柱脚）と、黒鉛潤滑したモルタル上に鋼製の柱脚ベースプレートを採用する柱脚（以降、黒鉛潤滑鋼柱脚）を提案し、これらの柱脚を用いることによる摩擦係数の低減効果を検証する。

本論文の流れを以下に示す。まず2章では、黒鉛による潤滑効果を念頭に置き、摩擦と潤滑のメカニズムを考察することで、後の実験結果に対する検討材料とする。3章において、振動台実験の条件を説明し、鋳鉄柱脚および黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦特性について実験結果を分析する。その後、地震応答推定手法の構築を補助する実験資料の蓄積を目的として、実際の地震時における直置き型鋼構造建物を模擬した実験についても考察を加える。最後に、4章において、実験によって得られた各柱脚の摩擦特性を一般数式モデルで表現し、計測された入力波を用いた数値解析による再現性を考察することから、実験結果を検証するとともに、その摩擦数式モデルの適用性を確認する。

*¹ 京都大学大学院工学研究科 博士(工学)
日本学術振興会 特別研究員

*² 独立行政法人防災科学技術研究所 主任研究員・博士(工学)

*³ 東北大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

*⁴ 清水建設(株) 修士(工学)

*⁵ 京都大学防災研究所 教授・Ph. D.

JSPS Research Fellow, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

Senior Researcher, E-Defense, NIED, Dr. Eng.

Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

Shimizu Corporation, M. Eng.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Ph. D.

2. 摩擦と潤滑のメカニズム

摩擦とは2つの物体が接触しているときに生じる抵抗力であり、一般に、凝着・掘り起し理論に基づいて、接触材料の引張強度とピッカース硬さ等の力学特性を用いることで説明される⁹⁻¹¹⁾。このように、摩擦力は物体同士の物性にも影響を受けるが、それ以上に2物体同士の表面状態に大きく支配され、この性質を応用して摩擦係数を低減することを潤滑と呼ぶ。この摩擦に対する表面状態の影響については付録において詳細に記述する。

2.1 摩擦における凝着と掘り起し

静止摩擦力と動摩擦力に共通して、摩擦力は式(1)に示すように、材料同士の凝着による摩擦力 F_a と硬い材料が柔らかい材料を押し込みながらすべるときに生じる掘り起しによる摩擦力 F_p の和によって表される。この掘り起しは摩擦力を構成する重要な要素であるが、凝着による摩擦力よりも小さいため、摩擦のメカニズムを解析的に検討する場合には無視されることが多い。図1に示すように、接触物体の垂直荷重によって真実接触面が高い圧力を受け、これによって材料同士の接触面が凝着する。この凝着を切断するために必要なせん断力が凝着による摩擦力 F_a となる。凝着による摩擦力は式(2)として与えられ、摩擦係数は式(3)となる。

$$F = F_a + F_p \approx F_a \quad (1)$$

$$F_a = A_r \tau_m = \frac{W}{\sigma_m} \tau_m \quad (2)$$

$$\mu = \frac{F}{W} \approx \frac{\tau_m}{\sigma_m} \quad (3)$$

F : 摩擦力, F_a : 凝着による摩擦力, F_p : 掘り起しによる摩擦力, A_r : 真実接触面の面積, W : すべる物体の全重量, τ_m : 柔らかい材のせん断強度, σ_m : 柔らかい材の降伏応力, μ : 摩擦係数

2.2 潤滑

付録が示すように、表面状態が摩擦係数に対して大きく影響することから、すべり面にせん断強度の弱い材を付加的に導入することによって摩擦係数を低減することを一般に潤滑と呼ぶ。すなわち、

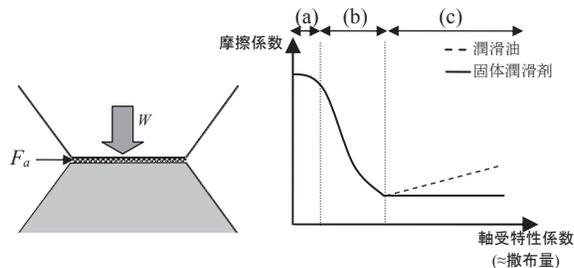
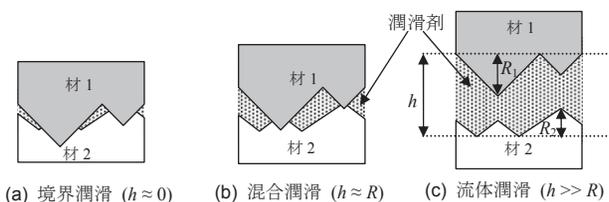


図1 凝着による摩擦力

図2 摩擦係数と潤滑剤の散布量 (ストライベック曲線)



(a) 境界潤滑 ($h \approx 0$)

(b) 混合潤滑 ($h \approx R$)

(c) 流体潤滑 ($h \gg R$)

図3 潤滑状態

接触面にせん断強度の弱い材料を付加的に導入することで、式(3)における τ_m の値を低減し、それによって低摩擦を実現する。これを実現するために各種の潤滑剤が開発されており、以下において、潤滑剤の散布量と摩擦低減効果の関係について示す。潤滑剤 (主に潤滑油) の散布量と摩擦係数の低減効果の関係は図2のストライベック曲線によって示されている。ストライベック曲線で一般に使われる軸受特性係数は、潤滑剤の減衰力を荷重で除したものであるが、これは潤滑剤の散布量とほぼ等価である。図2における状態(a)~(c)のすべり面状態の詳細を図3に示す。この図3(c)に示すように、 h は潤滑剤の膜厚、 R は摩擦2面間の最大粗さである。摩擦2面間の最大粗さは材1の最大粗さ R_1 と材2の最大粗さ R_2 の和によって表される。

潤滑剤の膜厚 h がほぼ0の図3(a)の場合には、図2の状態(a)が示すように、摩擦係数がほとんど低下せず、潤滑の効果は小さい。図3(b)のように潤滑剤の膜厚 h が摩擦2面間の最大粗さ R とほぼ等しくなると、すべり面において突起同士の接触が生じ、混合潤滑の状態になる。このとき、凝着による摩擦力は低下しているが、掘り起しによって生じる摩擦力は大きく変化しないと考えられる。これに対して、潤滑剤の膜厚 h が摩擦2面間の最大粗さ R に対して十分に大きい場合には、図3(c)の流体潤滑状態に至る。このとき、材1と材2は接触していないため、掘り起しによる摩擦力も生じない。

本論で想定する鋼とモルタルの組み合わせを例にとると、モルタルの表面粗さの最大値は $150 \mu\text{m}$ ($=0.15 \text{ mm}$) 以下¹⁵⁾、鋼の表面粗さの最大値は $50 \mu\text{m}$ ($=0.05 \text{ mm}$) 以下¹⁶⁾ である。この2面間の最大粗さは $200 \mu\text{m}$ ($=0.2 \text{ mm}$) となり、その値の3倍が流体潤滑状態を実現するための最小膜厚とされている¹⁰⁾。これらを勘案すれば、鋼とモルタルの場合には、膜厚 0.6 mm 以上の黒鉛の皮膜が形成されれば流体潤滑状態を実現できる。なお、黒鉛のような固体潤滑材には粘性がほとんどないことから、流体潤滑状態における膜厚の増大に伴う摩擦係数の上昇は生じない。

3. 各柱脚の摩擦特性と地震応答低減効果の検証

本論では、提案柱脚における摩擦特性の検証と、直置き型鋼構造建物の地震応答低減効果の確認を目的とし、振動台実験を実施する。

3.1 実験概要

(a) 実験システムと計測計画

振動台実験においては、図4のような3層直置き型鋼構造建物を想定している。1階床に連結された直置き柱脚部分と上部構造部分をそれぞれ1質点に置き換え、直置き柱脚部分と上部構造部分の質量比を3:1と仮定して試験体を設計した。図5のように試験体は基礎モルタルに支えられる。試験体の1層目の鋼製フレームは直置き柱脚部分の質量を、2層目の鋼製フレームは上部構造の質量を模擬している。1層目と2層目の鋼製フレームの間には、上部構造の柔軟性を模擬する積層ゴム支承10基を組み込んでいる。実際の試験体の1層目の質量は $1,400 \text{ kg}$ 、2層目の質量は $3,210 \text{ kg}$ となり、合計重量は 45.1 kN となった。上部構造の剛性が動摩擦特性へ与える影響を見るために、積層ゴム支承の層にH形鋼を付加した試験体も用意した。これを剛試験体と称し、H形鋼が無い場合を弾性試験体と称する。ランダム波加振によるシステム同定では、剛試験体の固有振動数: 12.0 Hz 、減衰定数: 1% 、弾性試験体の固有振動数: 3.0 Hz 、減

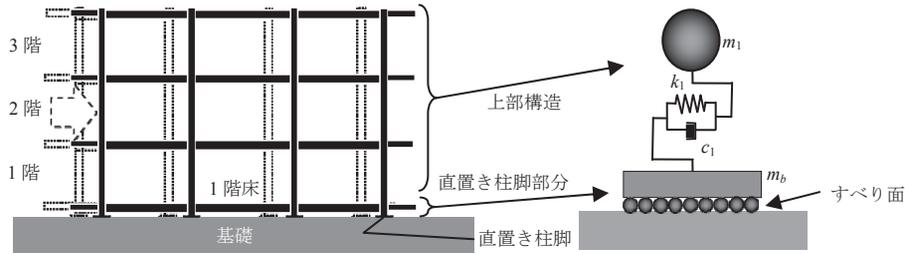


図4 直置き型鋼構造建物のモデル化

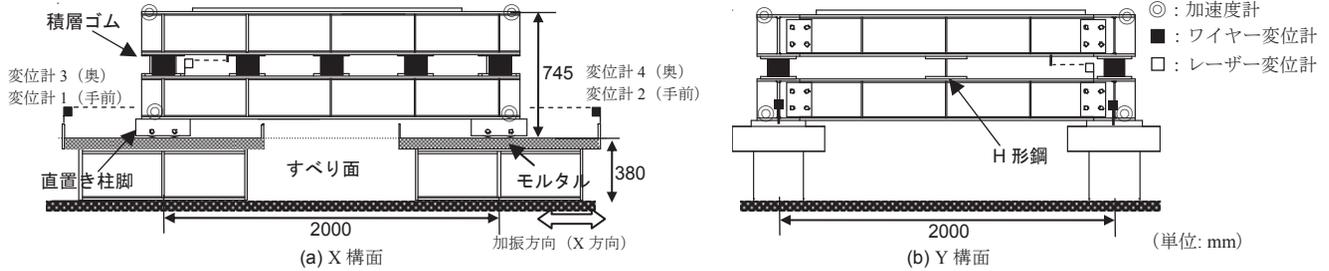


図5 実験システム



図6 実験システムの全景

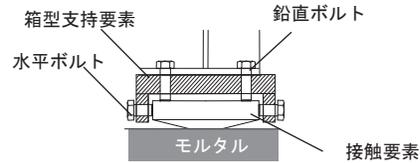


図7 直置き柱脚部分の接触面の詳細

衰定数：2%である。実験システムの全景を図6に示す。

実験はX方向に対する一軸加振である。鋼製フレームの応答加速度については、それぞれ図5のように四隅に配置した加速度計によって計測した。基礎モルタルの四隅にワイヤ変位計を4基配置し、1層目の鋼製フレームとの相対変位から試験体のすべり変位を計測した。4個所ですべり変位を計測することによって、すべりによって生じるねじれの有無についても確認した。また、X、Y両構面の積層ゴム支承の層に2基ずつレーザー変位計を配置して1層目と2層目の鋼製フレーム間の層間変形を計測した。

(b) すべり面

試験体と基礎モルタルの接触面は、図7に示すように、鋼製箱型支持要素の中で接触要素がボルトによって拘束されている。接触要素は基礎モルタルの摩擦面が75mm×75mmの正方形断面となるように加工しており、摩擦面に接触する4個の接触要素の平均面圧は2.0 N/mm²である。この接触要素として、鋼、ねずみ鉄、ダクタイル鉄を用いる。ねずみ鉄には片状黒鉛が使われるが、ダクタイル鉄は黒鉛の形を球状にすることで脆性を改善した鉄である。実験で用いた接触要素の材料特性(引張強度試験結果、ピッカース硬さ試験結果および炭素含有率分析結果)を表1に示す。炭素含有率に関して、鋼は0.14%であり、ねずみ鉄とダクタイル鉄は少なくともその15倍以上を示している。これは、一般的な鋼の炭素含有量がおよそ0.2%であること¹⁷⁾、鉄はおよそ3%であることに整合している¹⁸⁾。これらの接触要素を組み合わせることによって各種の柱脚を模擬する。

表1 接触要素の材料特性

	引張強度 [N/mm ²]	ピッカース硬さ Hv [N/mm ²]	炭素含有率 [%]
鋼 (SS400)	466	1215	0.14
ねずみ鉄 (JIS-FC200)	276	1588	3.09
ダクタイル鉄 (JIS-FCD400)	416	1389	2.44

接触要素を支える基礎モルタルは、通常のモルタルと黒鉛によって潤滑したモルタルの2種類を用いる。基礎モルタル上に黒鉛潤滑を施す際には、膜厚が約5mmになるように黒鉛を敷き詰めており、鋼とモルタルのすべり面に対する最小膜厚0.6mmを十分に上回っている。3種類の接触要素と2種類の基礎モルタルを、以下のように組み合わせることによって検討対象とする柱脚を模擬する。

鋼柱脚：鋼とモルタル、鉄柱脚：ねずみ鉄とモルタル、ダクタイル鉄柱脚：ダクタイル鉄とモルタル、黒鉛潤滑鋼柱脚：鋼と黒鉛潤滑モルタル

3.2 剛試験体に基づく振動台実験

4種類の柱脚(鋼柱脚、鉄柱脚、ダクタイル鉄柱脚、黒鉛潤滑鋼柱脚)を用いた剛試験体に対して1Hz正弦波を入力した。

(a) 実験結果

各実験で得られたすべり変位の時刻歴を図8に、摩擦係数とすべり変位の関係を図9に、摩擦係数とすべり速度の関係を図10に示す。すべり変位に関しては、X方向に関して4基の変位計で計測してい

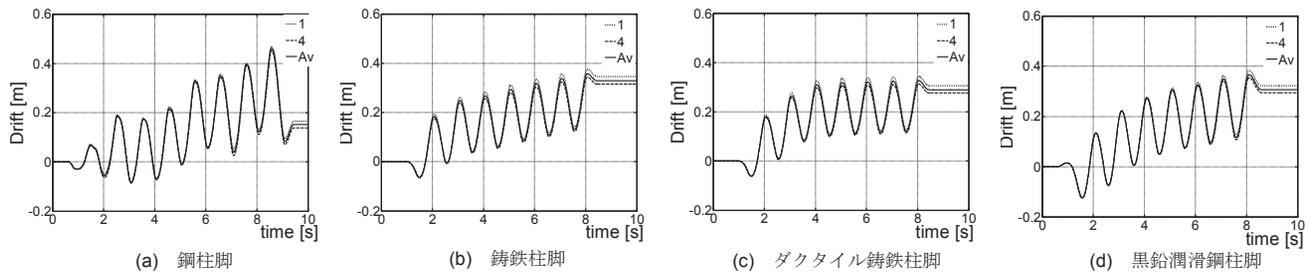


図 8 すべり変位の時刻歴

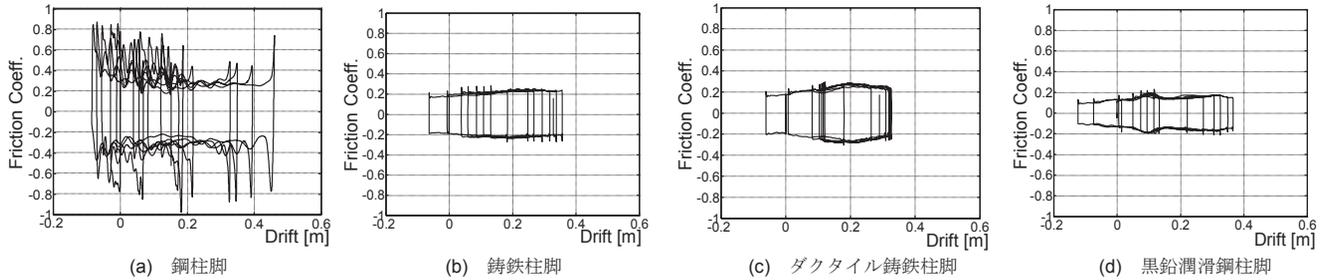


図 9 摩擦係数とすべり変位

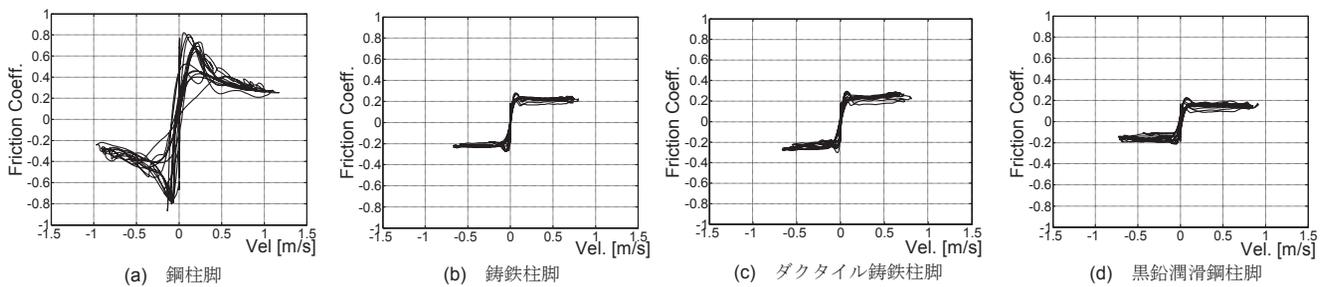


図 10 摩擦係数とすべり速度

ることから、その平均値（平均すべり変位）を図 8 に示している。また、ねじれの有無を見るために変位計 1 と変位計 4 の計測値を合わせて図 8 に示している。図 9 においては平均すべり変位を用い、図 10 のすべり速度は平均すべり変位の増分と計測時間刻み（0.001 秒）に基づいて求めている。摩擦係数に関しては、各鋼製フレーム上で計測された加速度の平均値からすべり面に作用する水平せん断力を求め、その水平せん断力を試験体の全重量で除した値とする。表 2 において、各柱脚の摩擦係数をまとめている。

表 2 各柱脚の摩擦係数

	最大静止摩擦係数	すべり速度 0.7m/s 時の動摩擦係数
鋼柱脚	0.80	0.30
鋳鉄柱脚	0.25	0.20
ダクタイル鋳鉄柱脚	0.25	0.20
黒鉛潤滑鋼柱脚	0.20	0.15

図 8 の各柱脚に関する実験では、変位計 1 と変位計 4 によるすべり変位はおおよそ等しく、加振終了時において平均すべり変位に対する差異は 0.5% に収まっている。

図 9(a)の鋼柱脚では、最大静止摩擦係数が約 0.8 であるが、すべりが進行するにつれて摩擦係数が約 0.3 までに低下している。この動摩擦特性は、既往の実験⁹⁾とほぼ等しい結果を示している。図 9(b)の鋳鉄柱脚では、最大静止摩擦係数が約 0.25 であり、すべりの開始

直後に若干摩擦係数の低下が見られるが、動摩擦係数はほぼ一定値（0.20）を維持している。図 9(c)では、ねずみ鋳鉄よりも引張強度を強くしたダクタイル鋳鉄を用いた柱脚も、鋳鉄柱脚とほぼ等しい摩擦特性を示している。図 9(d)の黒鉛潤滑鋼柱脚の場合には、最大静止摩擦係数が約 0.2 あるが、すべり出すとともに摩擦係数が減少し、すべっている間はほぼ一定の動摩擦係数（0.15）を維持する特徴がある。

図 10 の摩擦係数とすべり速度の関係については、図 11 も参照されたい。図 10(a)の鋼柱脚の場合には速度の上昇とともに摩擦係数が減少し、すべり速度が 0.7 m/s になると、約 0.3 まで低下している。図 10(b)の鋳鉄柱脚と図 10(c)のダクタイル鋳鉄柱脚では、すべり速度が 0.2 m/s 以上で約 0.2 の摩擦係数を安定して維持している。図 10(d)の黒鉛潤滑柱脚では、すべり速度が 0.2 m/s 以下では摩擦係数が低下する傾向があるが、0.2 m/s 以上では約 0.15 を示している。

表 1 において、鋼とダクタイル鋳鉄の引張強度とビッカース硬さはほぼ等しい。摩擦係数が引張強度とビッカース硬さで決まるとすれば、両者のモルタルに対する摩擦係数はほぼ等しくなる¹⁹⁾。しかしながら、鋳鉄柱脚とダクタイル鋳鉄柱脚の最大静止摩擦係数は等しく、鋼柱脚の 1/3 以下になる。これは、炭素含有量が多い鋳鉄では表面に黒鉛の表面皮膜が形成され、その潤滑効果によって低摩擦が実現されたことを示している。

(b) 各柱脚の摩擦特性の考察

ここでは、鋼柱脚の動摩擦係数が漸減的に減少する仕組みと、鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑柱脚の摩擦係数の違いについて検討する。

鋼柱脚の摩擦係数に関しては、すべり速度が大きくなるにつれて最大静止摩擦係数 0.8 から漸減し、すべり速度が 0.7 m/s の時には約 0.3 まで減少するという特徴がある。これは、すべり速度が大きくなるにつれて、式(2)の真実接触面が減少してゆくことが原因である。接触物体がある位置において十分な接触面積を形成するまでには一定時間以上を要するが、すべりが進行すると、その位置に留まり続ける時間が限られ、そのためにすべり速度が速くなるにつれて接触面積が減少し、摩擦力（摩擦係数）も減少することになる²⁰⁾。

黒鉛の潤滑効果を用いた場合には、式(2)におけるせん断力 τ_m が低減されることから、最大静止摩擦係数が低減され、動摩擦係数も安定する。鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚を比較すると（図 11）、黒鉛潤滑鋼柱脚の最大静止摩擦係数は約 0.2 であり、鋳鉄柱脚の最大静止摩擦係数は約 0.25 である。両摩擦特性には、最大静止摩擦係数だけでなく動摩擦係数に関しても、約 0.05 の差が生じている。黒鉛潤滑鋼柱脚は、鋼とモルタルが一切接触することのない図 12(a)の条件となっている。一方、鋳鉄柱脚の場合には、図 12(b)に示すように、鋳鉄の表面に黒鉛膜が生じることによって凝着による摩擦力を抑制しているが、黒鉛膜が掘り起しによる摩擦力を抑制するほどの膜厚を有していないことが考えられる。このことから、式(4)に示すように、鋳鉄柱脚の摩擦係数 μ_m は黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦係数 μ_{sgm} に掘り起しによる摩擦係数 μ_p を加えたものと等しくなると仮定する。また、この掘り起しによる摩擦係数は接触材の突起形状の頂角 θ （図 12(a)参照）によって式(5)として表される。

$$\mu_m = \mu_{sgm} + \mu_p \quad (4)$$

$$\mu_p = \frac{2}{\pi \tan \theta} \quad (5)$$

μ_{sgm} : 黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦係数, μ_m : 鋳鉄柱脚の摩擦係数, μ_p : 掘り起しによる摩擦係数, θ : 突起形状の頂角

式(5)の突起形状の頂角に関して鋼には 85° が用いられる¹¹⁾ことから、鋳鉄にもこの値を適用すると、鋳鉄とモルタルのすべり面の掘り起しによる摩擦係数は 0.06 となる。式(4)に示すように鋳鉄柱脚の摩擦係数 μ_m は黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦係数 μ_{sgm} に式(5)による掘り起

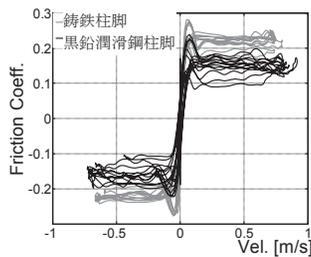


図 11 剛試験体(1 Hz 正弦波)

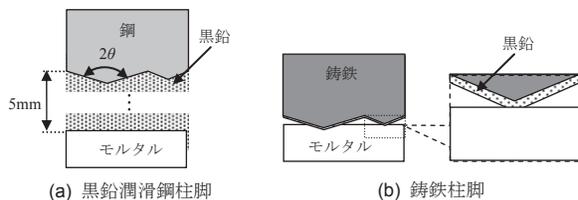


図 12 すべり面の詳細

しによる摩擦係数 (0.06) を加えたものに等しくなる。このことは、鋳鉄に形成された黒鉛膜が十分な厚さを有しておらず、掘り起しによる摩擦力が生じていることを示唆している。

3.3 弾性試験体に基づく振動台実験

3.2 節において、剛試験体に対する各柱脚の摩擦特性を検証しているが、すべる構造物が十分な柔性を有すると、スティックスリップ現象が生じることによって動摩擦特性が大きく影響を受ける⁹⁾。ここでは、弾性試験体に基づいて 3 種類の柱脚（鋼柱脚、鋳鉄柱脚、黒鉛潤滑鋼柱脚）に関して動摩擦特性を検証する振動台実験を実施した。実験で得られたすべり変位の時刻歴を図 13 に、摩擦係数とすべり変位の関係を図 14 に、摩擦係数とすべり速度の関係を図 15 に示す。このときの振動台入力は 1 Hz 正弦波である。

図 13(a)の鋼柱脚の場合にはすべり変位が変化しない固着とすべりが繰り返されており、スティックスリップ現象が確認できる。5 秒付近からすべり変位の振幅が急増しており、このような非正常なすべり挙動は、図 8(a)における剛試験体のすべり挙動と大きく異なる。図 13(b)の鋳鉄柱脚では、すべりが一方方向に片寄るものの、入力波の正弦波と同様、交互に規則正しく正方向と負方向のすべり変位が生じている。図 13(c)の黒鉛潤滑鋼柱脚においても、同様の傾向を示している。

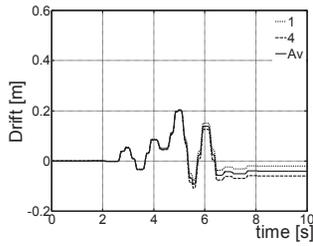
摩擦係数とすべり変位の関係において、図 14(a)の鋼柱脚の場合を見ると、約 0.8 の最大静止摩擦係数を経て動摩擦係数が約 0.3 までに減少している。この点においては、剛試験体の摩擦特性と同様である。図 14(b)の鋳鉄柱脚の場合には、摩擦係数がおよそ 0.2 になっており、すべっている間においてもほとんど摩擦係数が変動しない。図 14(c)の黒鉛潤滑鋼柱脚の場合においても、同様に、動摩擦係数は総じて 0.2 以下を示している。このような摩擦特性は、剛試験体に基づく実験の結果と同様である。

スティックスリップ現象における、摩擦係数とすべり速度の関係は「すべり止るときの摩擦係数が最大静止摩擦係数まで回復せず、時計回りに弧を描く」ことが、多くの研究によって報告されている²⁰⁻²³⁾。図 15(a)の鋼柱脚の場合では、その傾向が確認できる。一方、鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚の場合の図 15(b)、図 15(c)における摩擦係数とすべり速度の関係は、剛試験体に対して得られたそれぞれの柱脚の実験結果（図 10(b)、図 10(d)）とほぼ等しい。

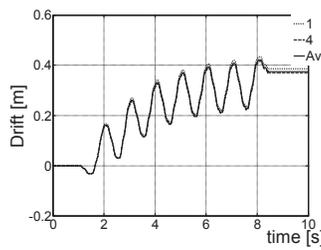
筆者らの過去の報告⁹⁾においても記述しているが、スティックスリップ現象を発生する要因としては、すべる物体の柔性、およびすべり速度の上昇に伴って摩擦係数が減少する漸減型の動摩擦特性の 2 つが要因として挙げられる。スティックスリップ現象を生じさせない方法として、一つは、振動系（ここでは上部構造）の剛性を高めること、もう一つは、摩擦係数を低減することである^{10,11,12)}など。この 2 つの方法に共通することは、すべる物体の応答変形（ひずみなど）を小さくすることである。本実験においては、剛試験体の実験が剛性を高める方法に相当し、弾性試験体の鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚の実験が摩擦係数を低減する方法に相当する。

3.4 弾性試験体の地震応答特性

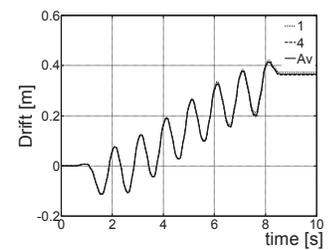
弾性試験体を直置き型構造建物とみなし、鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚を用いた場合に対して、地震動を入力する実験を実施した。試験体の 1 層目の鋼製フレームが直置き柱脚部分に、2 層目の鋼製フレームと積層ゴム支承が上部構造に相当する。兵庫県南部地震で



(a) 鋼柱脚

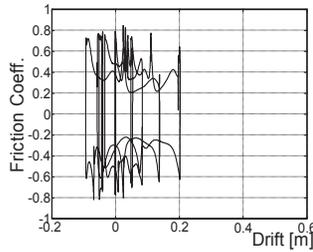


(b) 鋳鉄柱脚

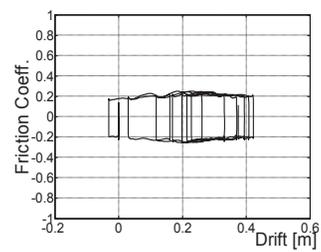


(c) 黒鉛潤滑鋼柱脚

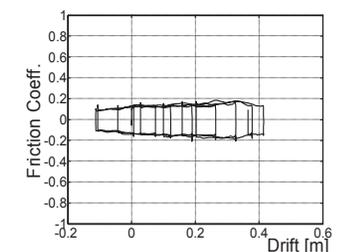
図 13 すべり変位の時刻歴



(a) 鋼柱脚

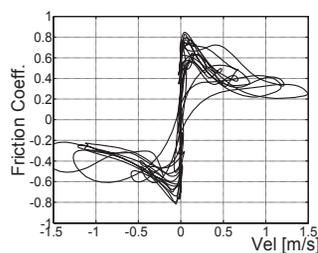


(b) 鋳鉄柱脚

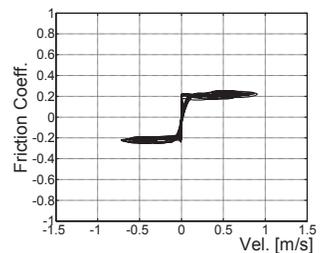


(c) 黒鉛潤滑鋼柱脚

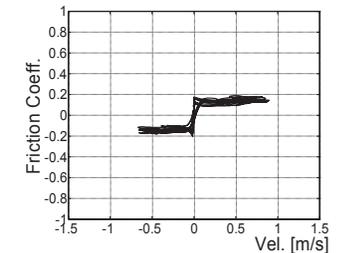
図 14 摩擦係数とすべり変位



(a) 鋼柱脚



(b) 鋳鉄柱脚



(c) 黒鉛潤滑鋼柱脚

図 15 摩擦係数とすべり速度

観測された JMA 神戸波 NS 成分を用い、その地動最大速度が 1.0 m/s になるように基準化して入力した。このときの加速度応答スペクトル (減衰定数: 2%) とエネルギースペクトル²⁴⁾ (減衰定数: 2%) を図 16 に示す。本実験に用いる弾性試験体の固有周期 (0.33 s) において、加速度応答スペクトル振幅は 4.0 g に、エネルギースペクトル振幅である等価速度 V_e は 3.0 m/s に達する。

(a) 黒鉛潤滑鋼柱脚に関する実験

黒鉛潤滑鋼柱脚に関する実験の結果を図 17 に示す。この実験において、上部構造に作用した最大層せん断力係数は図 17(a) に示すように 0.41 である。柱脚を固定した場合には加速度応答スペクトル振幅の 4.0 g 相当のせん断力が作用するはずであるが、この実験においては、その 1/10 に低減できている。これは、直置き型鋼構造物に対して黒鉛潤滑鋼柱脚を用い、上部構造の降伏せん断力係数を 0.4 以上の値に設定すれば、通常想定する大地震動レベル Lv2 (地動最

大速度: 0.5 m/s) の 2 倍に相当する巨大地震動に対しても上部構造を弾性域に留めうることを意味するものである。

図 17(b) のすべり変位時刻歴において、最大すべり変位が 0.4 m に達し、残留変位は 0.21 m になる。このとき、すべり変位の総量すなわち累積すべり変位は 1.46 m であり、すべり面においてはこの累積すべり変位に相当するエネルギーが消費されたことになる。直置き柱脚部分を模擬する 1 層目の鋼製フレーム上で計測された加速度が上部構造への入力とすれば、上部構造に対する等価速度 V_e は 0.88 m/s であり、柱脚を固定した場合における値 3.0 m/s の 1/3 未満となる。上部構造に対する地震入力エネルギーとしては約 1/10 と評価される。このことから、上部構造の降伏せん断力係数を 0.3~0.4 に設定しても、多少の塑性化は被るものの地震被害軽減に大きく寄与することが期待される⁸⁾。

(b) 鋳鉄柱脚に関する実験

JMA 神戸波 NS 成分を鋳鉄柱脚を用いた弾性試験体に入力した実験結果を図 18 に示す。この実験において上部構造に作用した最大層せん断力係数は図 18(a) に示すように、0.66 である。黒鉛潤滑鋼柱脚を用いた場合の最大層せん断力係数は 0.41 であったのに対して、鋳鉄柱脚を用いた場合にはそれよりも 0.15 上昇した。これは、鋳鉄柱脚の摩擦係数 (0.25) が黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦係数 (0.20) よりも約 0.05 上昇しているため、上部構造に対する負荷が大きくなったことに起因している。

図 18(b) では、最大すべり変位が 0.4 m 以上に達し、残留変位は

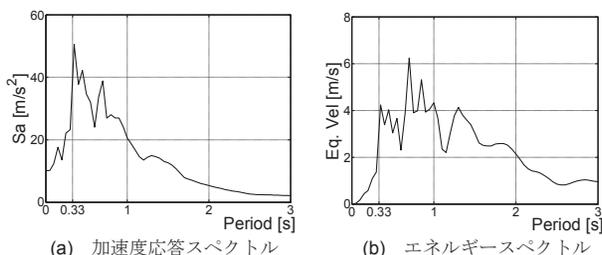


図 16 入力地震動

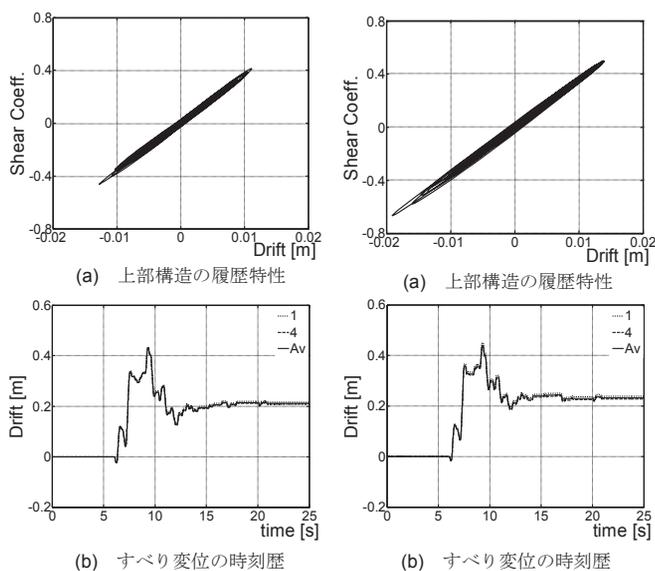


図 17 黒鉛潤滑鋼柱脚

図 18 鋳鉄柱脚

0.23 m である。このとき、柱脚の累積すべり変位は 1.33 m であり、黒鉛潤滑鋼柱脚の場合よりも 0.13 m 低下している。3.4 節 (a) と同様の計算方法に基づくと、上部構造に対する等価速度 V_e は 0.99 m/s であり、黒鉛潤滑柱脚における等価速度 V_e は 0.88 m/s よりも約 13% 上昇している。しかしながら、柱脚を固定した場合と比べれば 1/3 になっており、地震入力エネルギーとしては 1/9 になる。上部構造が弾性であれば、上部構造への地震入力エネルギーの低減効果は黒鉛鋼柱脚と比べてそれほど遜色がない。

4. 実験結果に関する数値解析的検討

実験で得られた摩擦特性を数式モデルによって表現し、その摩擦数式モデルに基づく数値解析の再現性から実験結果を検証する。また、このような数値解析的検討を通して、直置き型鋼構造建物の各柱脚に用いる摩擦数式モデルの適用性を考察する。

4.1 数値解析モデル

数値解析モデルとしては、図 4 に示すとおり、直置き柱脚部分と上部構造の 2 質点系モデルを用いる。それぞれの質量 m_b, m_t は 1,400 kg と 3,210 kg である。システム同定結果を参照し、弾性試験体の固有振動数と減衰定数を 3.0 Hz と 2% に、剛試験体の固有振動数と減衰定数を 12.0 Hz と 1% に設定する。これまでの振動台実験から得られた各柱脚の摩擦特性は、速度の上昇に伴って漸近的にある定常動摩擦係数に収束するという特徴を持つ。このような動摩擦特性は一般に式(6)で表される²⁰⁾。

$$|\mu(v)| = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\gamma|v|} \quad (6)$$

μ_s : 最大静止摩擦係数, μ_d : 定常動摩擦係数, γ : 動摩擦係数の速度依存性を決めるパラメータ

ここでは、剛試験体の実験から得られた摩擦特性を参照することによって、各柱脚の摩擦数式モデルを決定する。黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦数式モデルとして、図 11 から式(6)の各係数に $\mu_s=0.20, \mu_d=0.15, \gamma=20$ を設定する。同様に、鋳鉄柱脚の摩擦数式モデルとして、図 11

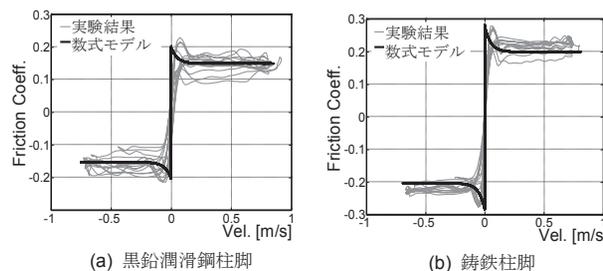


図 19 摩擦特性のモデル化

から式(6)の各係数に、 $\mu_s=0.25, \mu_d=0.20, \gamma=20$ を設定する。また、図 19 には剛試験体を用いた鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦特性と摩擦数式モデルを合わせて示している。数値解析においてすべり挙動を再現するために、初期剛性として高剛性を付与する完全弾塑性型のモデルに基づくが、動摩擦特性に関してはすべり速度によって摩擦係数が変化する式(6)を用いている。具体的には、静止状態(すべり速度が零)の場合には完全弾塑性のモデルが摩擦を模擬し、非静止状態(すべり速度が非零)の場合には式(6)の摩擦数式モデルによって表現される動摩擦特性に移行することになる。なお、静止状態と非静止状態の連続性は、両状態の最大静止摩擦係数が等しいことから維持される。

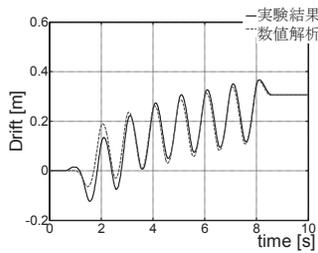
完全弾塑性型のモデルに用いる初期剛性は、すべるまでの弾性限を 0.0001 mm に設定し、最大静止摩擦力(最大静止摩擦係数と全重量の積)を弾性限で除した値を用いることにする。黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦数式モデルに対しては、最大静止摩擦係数 0.2 ですべり始めるため、初期剛性は 6.87×10^4 kN/mm となる。鋳鉄柱脚の摩擦数式モデルに対しては、最大静止摩擦係数 0.25 ですべり始めるため、初期剛性は 12.65×10^4 kN/mm となる。これらの剛性は、上部構造の剛性の少なくとも 50,000 倍に相当し、十分に剛とみなせる。数値解析では、各実験の振動台上で計測された加速度を入力波として用いる。

4.2 数値解析結果

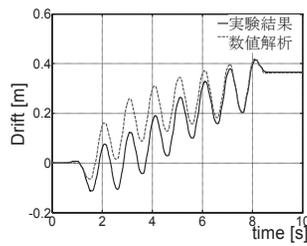
剛試験体と弾性試験体の正弦波入力による実験結果と数値解析結果の比較を図 20 に示す。弾性試験体に対して JMA 神戸波 NS 成分を入力した数値解析結果を図 21 に示す。

(a) 正弦波加振

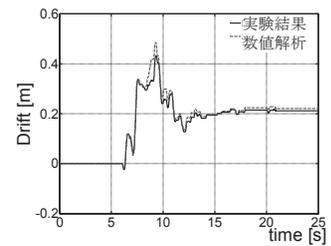
剛試験体における黒鉛潤滑鋼柱脚の図 20(a)と鋳鉄柱脚の図 22(b)では、数値解析によるすべり変位の時刻歴が実験結果とほぼ一致している。一方、弾性試験体における図 20(c)と図 20(d)では、数値解析によるすべり変位の時刻歴が実験結果から離れる傾向があり、特に鋳鉄柱脚の図 20(d)では、一方向への片寄り方に大きな差が見られる。数値解析で用いた摩擦数式モデルは剛試験体の実験結果に基づいて導出している。弾性試験体に基づく鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑柱脚の実験においては、動摩擦特性が上部構造の応答の影響を受けた可能性があり、弾性試験体の数値解析結果に誤差が生じる一因になったとも考えられる。ただし、すべり変位が一方向に片寄る現象については、正方向と負方向の摩擦係数の差によって生じることが多い。鋳鉄柱脚を用いた弾性試験体の実験に対してその条件を加味し、負方向の摩擦係数のみに 0.008 (最大静止摩擦係数の 3.2%) を加算した数値解析においては、残留変位が実験結果 (0.38 m) と等しくなった。また、すべり変位の時刻歴に関して、サイクルごとに正負方向の両振幅を求め、その平均値を平均すべり振幅として表 3 に示し



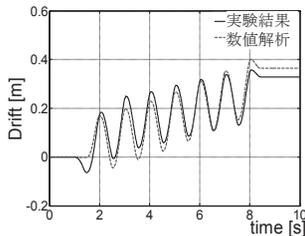
(a) 剛試験体_黒鉛潤滑鋼柱脚



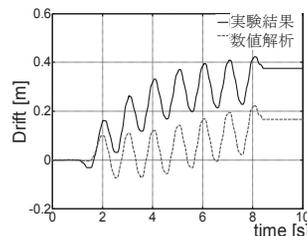
(c) 弾性試験体_黒鉛潤滑鋼柱脚



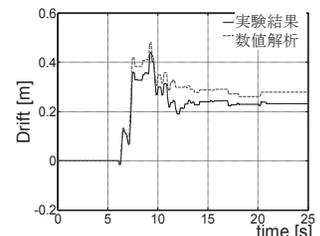
(a) 弾性試験体_黒鉛潤滑鋼柱脚



(b) 剛試験体_鋳鉄柱脚



(d) 弾性試験体_鋳鉄柱脚



(b) 弾性試験体_鋳鉄柱脚

図 20 正弦波入力

図 21 JMA 神戸波 NS 入力

ている。弾性試験体を含むいずれの条件においても、実験結果と数値解析の平均すべり振幅はほぼ等しい。こうしたことから、正負方向の摩擦係数の微小な差異によって、すべりの片寄り方に差が生じたと解釈することができる。

表 3 すべり変位の平均すべり振幅

	実験 [m]	数値解析 [m]
黒鉛潤滑鋼柱脚 (剛)	0.26	0.26
鋳鉄柱脚 (剛)	0.24	0.24
黒鉛潤滑鋼柱脚 (弾性)	0.22	0.21
鋳鉄柱脚 (弾性)	0.20	0.20

(b) 弾性試験体の JMA 神戸波加振

黒鉛潤滑鋼柱脚と鋳鉄柱脚を用いた弾性試験体に対して JMA 神戸波 NS 成分を入力した実験について考察する。4.2 節(a)において、正負方向の微妙な摩擦係数の違いが、すべり変位の全体挙動に影響を及ぼしている。本数値解析でも同じ摩擦数式モデルを用いているが、黒鉛潤滑鋼柱脚の図 21(a)では数値解析結果と実験結果が残留変位も含めて概ね一致している。鋳鉄柱脚の図 21(b)においては、残留変位に約 0.05 m の差が生じているものの、実験結果を概ね再現できている。このことは、正弦波のような定常的な波形ではサイクル毎の誤差が蓄積することによって大きな差を生じるが、JMA 神戸波 NS 成分のような非定常な入力波では摩擦特性の微小な差異の影響が小さくなることを示唆している。

上部構造に作用した最大層せん断力係数を表 4 に示す。黒鉛潤滑鋼柱脚の数値解析値は実験値の約 1.2 倍、鋳鉄柱脚の数値解析値は実験値の約 1.1 倍となった。本摩擦数式モデルにおいて上部構造の最大層せん断力係数は誤差 20%以内で評価できたといえる。

表 4 上部構造に作用する最大せん断力係数

	実験結果	数値解析
黒鉛潤滑鋼柱脚 (弾性)	0.41	0.49
鋳鉄柱脚 (弾性)	0.66	0.73

5. まとめ

本研究では、地震時に損傷低減効果を発揮する直置き型鋼構造建物の開発をめざしている。本論では、直置き型鋼構造建物の損傷低減効果を高めるために、鋼柱脚の摩擦係数の低減を試みた。特別な装置や高価な材料を採用するのではなく、一般的な材料の利用を前提とした。鋼柱脚に比べて 10 倍以上も炭素（黒鉛）を含む鋳鉄柱脚および鋼柱脚と基礎モルタル間に黒鉛層を施した黒鉛潤滑鋼柱脚を提案し、振動台実験を通して摩擦特性を検証した。本論における知見を以下にまとめる。

一般に使われる鋼とモルタルで構成される鋼柱脚では、最大静止摩擦係数は 0.8 であり、動摩擦係数はすべり速度が大きくなるにつれて漸減的に 0.3 まで減少する。一方、鋳鉄柱脚は黒鉛による潤滑効果によって、最大静止摩擦係数および動摩擦係数が、それぞれ安定して 0.25、0.20 となった。これは、ベースプレートに鋳鉄製に代えるだけで、通常の鋼柱脚の 1/3 以下の摩擦係数を容易に実現できることを示している。黒鉛潤滑鋼柱脚の場合には、最大静止摩擦係数および動摩擦係数が 0.2、0.15 となり、鋳鉄柱脚の場合よりも低い値となった。鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚における約 0.05 の摩擦係数の差は、黒鉛の膜厚が関係していると推察される。

直置き型鋼構造建物の地震応答を、固有周期が 0.33 秒、減衰定数が 2% と評価される弾性試験体に対して JMA 神戸波 (NS 成分、最大速度 1.0 m/s) を入力することによって考察した。鋳鉄柱脚の場合には上部構造の最大層せん断力係数は約 0.7、黒鉛潤滑鋼柱脚の場合には最大層せん断力係数は約 0.4 となった。当該周期に対する入力波の最大加速度スペクトル振幅は 4.0 g であることから、両柱脚のすべりによって、その最大層せん断力係数は柱脚を固定した場合に比べて 1/5 以下となった。また、同様に上部構造への地震入力エネルギーは 1/9 以下に低減された。

以上の実験に関して、鋳鉄柱脚と黒鉛潤滑鋼柱脚の摩擦特性を数式モデルで表現し、計測された入力波を用いる数値解析を実施した。この摩擦数式モデルによって、正弦波入力に対する平均すべり振幅はほぼ一致した。弾性試験体の実験結果に対しては片方向にすべりが増大する傾向を正確に再現できなかったが、正方向と負方向の摩

摩擦係数の僅かな差を加味したところ、残留変位を含めて実験結果とほぼ一致した。弾性試験体に対して JMA 神戸波 NS 成分を入力したところ、非定常な入力波では摩擦特性の微小な差異にすべり変位が影響されにくく、本論で提案した摩擦数式モデルによって実験結果を概ね再現できた。上部構造の最大層せん断力係数については、数値解析値が実験値の 1.1-1.2 倍となり、両者はよく対応した。

直置き型鋼構造建物を実現するために、今後の課題として、以下を設定する。

- (A) すべり変位を抑制するストッパーの開発
- (B) 地震応答推定手法の構築
- (C) 鉛直動の摩擦特性への影響評価
- (D) 各柱脚が負担する摩擦力の均一性に関する検討

黒鉛を応用することによって摩擦係数を 0.8 から 0.2 までに大きく低減できたが、JMA 神戸波 NS 成分を用いた実験では、すべり変位が 0.4 m にも達している。摩擦係数を低減することによって上部構造の損傷は低減されるが、一方で大きなすべり変位が要求されてしまう。すべりによる損傷低減効果を維持しつつ、すべり変位を抑制する緩衝材などが必要であり、この緩衝材の設計手法の開発に取り組んでいる²⁵⁾。直置き型鋼構造建物の地震応答推定は、摩擦係数や上部構造に付与する降伏せん断力係数の設定のみならず、上記のストッパーの開発にも大きく関わるものである。このことから、0.2~0.3 の低摩擦領域を対象とした直置き型鋼構造建物に対する地震応答推定手法を構築することを試みる。直置き型鋼構造建物の柱脚は基礎に固定していないため、とりわけ構造物のアスペクト比や地震動の上下動や上部構造の転倒モーメントなどがすべり挙動に大きく影響しかねない。このような鉛直動のすべり挙動への影響についても検討する予定である。また、実際の直置き型鋼構造建物においては、一部の柱脚のみが摩擦力を負担するという不均一が生じかねず、実際の直置き型柱脚をより正確に模擬した実験を通して、各柱脚が負担する摩擦力の均一化に関しても検討する予定である。

謝辞

本論の実験を遂行するにあたり、京都大学防災研究所の山崎友也氏、保木和明氏（現 北九州市立大学）、岡田達司氏、多田光宏氏にご協力いただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害軽減効果，日本建築学会構造系論文集，No.485，pp.53-62，1996.7.
- 2) 山田哲，秋山宏：柱脚の固定度が鋼構造多層骨組の終局耐震性能に与える影響，日本建築学会構造系論文集，No.496，pp.113-118，1997.6.
- 3) 曾田五月也，宮本恵美，園田純：滑り基礎構造の応答加速度抑制効果に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.357-358，2008.
- 4) 壁谷澤寿一，壁谷澤寿海，松森泰造，壁谷澤寿成，金裕錫：実大 3 層鉄筋コンクリート建物の振動実験，日本建築学会学術系論文集，No.632，pp.1833-1840，2008.10.
- 5) 緑川光正，須藤智文，麻里哲広，小豆畑達哉，石原直：ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した 10 層鉄骨架構の 3 次元地震応答，日本建築学会構造系論文集，No.637，pp.495-502，2009.3.
- 6) 長江拓也，池永昌容，中島正愛，吹田啓一郎：鋼構造露出柱脚におけるベースプレートと基礎モルタル間の摩擦抵抗力，日本建築学会構造系論

- 文集，No.606，pp.217-213，2006.8.
- 7) 池永昌容，長江拓也，ジェイソン マコーミック，勝尾美香，中島正愛：鋼構造露出柱脚と基礎モルタル間の摩擦性状に関する振動台実験，日本建築学会学術系論文集，No.629，pp.1185-1191，2008.7.
- 8) 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持つ柔・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，No.661，pp.527-534，2011.3.
- 9) 壁谷澤寿一，壁谷澤寿海：基礎滑り挙動を伴う直接基礎建物の地震応答推定手法，日本建築学会構造系論文集，No.634，pp.2151-2158，2008.12.
- 10) バウデン・テイパー（曾田範宗訳）：固体の摩擦と潤滑，丸善，1961.
- 11) 田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，1985.
- 12) 山本雄二，兼田もと宏：トライボロジー，理工学社，1998.2.
- 13) 社団法人日本トライボロジー学会固体潤滑研究会：固体潤滑ハンドブック，養賢堂，2010.3.
- 14) 青木岩夫：固体潤滑膜，表面技術，Vol.47，No.2，pp.124-127，1996.
- 15) 内田昌宏，田中亨二：エポキシ樹脂塗床の付着性に及ぼすセメントモルタルの表面粗さの影響，日本建築学会構造系論文集，No.531，pp.41-46，2000.5.
- 16) 加村隆志，北後寿：摩擦面に薬剤処理を施した高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.487，pp.131-140，1996.9.
- 17) 井上一郎，吹田啓一郎：建築鋼構造—その理論と設計—，鹿島出版会，2007.12.
- 18) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧，丸善，2002.1.
- 19) 宇野暢芳，井上一郎，志村保美，脇山広三：硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，No.494，pp.123-128，1997.4.
- 20) 加藤仁，松林恒雄：案内面の摩擦特性とスティックスリップ振動，精密機械，Vol.39，No.467，pp.1192-1200，1973.
- 21) 岡村健二郎，松原十三生，野呂周平，山根崇宏：摩擦振動の理論的解析，精密機械，Vol.34，No.406，pp.731-736，1968.
- 22) J. B. Sampson, F. Morgan, D. W. Reed, M. Muskat: Studies in Lubrication XII. Friction Behavior During the Slip Portion of the Stick-Slip Process, *Journal of Applied Physics*, Vol. 14, pp.689-700, 1943.12.
- 23) A.K. Banerjee : Influence of kinetic friction on the critical velocity of Stick-Slip motion, *Wear*, 12 (2) pp. 107-116. 1968.8.
- 24) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999.
- 25) 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特性 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，B-2，構造 II，pp.417-418，2011.8.

付録 摩擦における表面の役割

摩擦力は物体同士の物性にも影響を受けるが、それ以上に 2 物体同士の表面状態に大きく支配されることになる。これについて、トライボロジーの観点^{10,11)}を参照して以下に記述する。

2.1(a)ではすべり面に作用する力として、垂直応力のみを想定して摩擦を検討している。しかし、実際の摩擦においては図 a1 のようにせん断応力も同時にすべり面に作用することから、厳密には両者の相互作用を検討する必要がある。垂直応力とせん断力の相互作用を考慮した摩擦力は式(a1)として表される。式(a1)では、せん断力が増えることによって、真実接触面積が増え、摩擦力も上昇することを示している。このときの摩擦力は接線力と呼ばれ、垂直力に対する接線力の比である接線力係数は式(a2)として与えられる。

$$F = \tau A = \frac{\tau A_0}{\sqrt{1 - (\tau / \tau_m)^2}} \quad (a1)$$

$$\phi = \frac{F}{W} = \frac{\tau A}{\sigma A} = \frac{1}{\sqrt{\alpha \left\{ (\tau_m / \tau)^2 - 1 \right\}}} \quad (a2)$$

A: せん断力が作用しているときの真実接触面の面積，A₀: せん断力が作用

していないときの真実接触面の面積, τ_m : 柔らかい材のせん断強度, σ : 垂直応力, τ : せん断応力, α : 係数, ϕ : 接線力係数である.

式(a1)ではせん断力 τ を徐々に τ_m に近づけていくと, 摩擦力は無限大になり, すべらないことを意味する. これは実現象のすべりと相反することを示しているが, 『乾燥摩擦においては固体自体のせん断強度よりも弱い表面膜が形成されている』と仮定することによって, 実現象と整合する^{10,11}など. また, これは, 図 a1 のように, すべり面には母材のせん断強度の $k(<1)$ 倍程度の表面膜が形成されていることを意味している. 式(a3)となるとき接線力係数が摩擦係数であることから, 摩擦係数は式(a4)として与えられる.

$$\tau = k\tau_m \quad (k < 1) \quad (\text{a3})$$

$$\mu = \phi_{(\tau=k\tau_m)} = \frac{k}{\sqrt{\alpha\{1-k^2\}}} \quad (\text{a4})$$

式(a4)に関して, 一般に用いられる $\alpha=9^9$ に設定し, $k=0.5$ とすれば摩擦係数は0.19となる. 上記のように, 接触表面にせん断力に弱い表面膜が形成されている場合には, 材料同士の物性よりも表面膜のせん断強度によって摩擦係数が決まる.

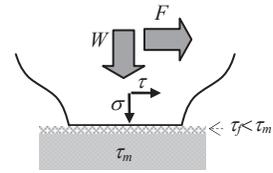


図 a1 表面の役割

(2012年5月1日原稿受理, 2012年11月19日採用決定)