

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249078

研究課題名(和文) 直置き型鋼構造建築物の構造性能と耐震設計

研究課題名(英文) Structural Performance and Seismic Design of Steel Building Structures without Base Anchorage

研究代表者

中島 正愛 (NAKASHIMA, Masayoshi)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：00207771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：より高度な耐震構造を構築すべく、本研究では、上部構造と基礎部を緊結させず、大地震に対してはこの界面で滑らせることによって、上部構造に作用する最大せん断力を制御する「直置き型構造物」を提案した。黒鉛潤滑剤を界面に撒くという簡便かつ安価な方法によって、滑り係数として約0.2を確保することができ、また多数回の滑りに対しても安定した滑り係数が保持されることを、一連の振動台実験から明らかにした。また滑りを伴う2自由度系への理論展開と網羅的な時刻歴応答解析から、パルス性の高い地震動に対して上部構造に作用する最大せん断力係数として、滑り係数の2倍が目安になることを導いた。

研究成果の概要(英文)：Japan and many regions in the world keep suffering from large earthquakes, and building collapse is considered to be most responsible for both the human and material losses. Advancement of building technologies for better collapse prevention is a critical societal need. This study proposes a new system in which the base of the super-structure is detached from the foundation, by which shear forces exerted onto the super-structure can be capped to a specified level. A series of dynamic loading test indicates that placing carbon graphite on the surface of foundation RC/mortar beam is found to ensure a friction coefficient of about 0.2 despite the number of sliding cycles. Theoretical equations are formulated to represent the sliding structure, and extensive time-history analyses are implemented for sliding structures subjected to pulse-type ground motions. The results verified that the maximum shear force applied to the super-structure is approximately twice the friction coefficient.

研究分野：工学

キーワード：耐震設計 トライボロジー 振動台実験 数値解析 黒鉛潤滑

1. 研究開始当初の背景

地震多発国であるわが国は、この四半世紀に限っても、1995年兵庫県南部地震、2011年東日本大震災を始めとした大地震によって多くの命と資産が失われ続けている。また世界に目を向けても、2004年スマトラ島沖地震、2008年四川大地震、2010年チリ地震等、各地で大きな被害が現れている。地震による人的・物的資源の損失の多くは「人の住み処」である建物の崩壊であることを考えれば、地震に強い建物を造るための「耐震設計」の高度化は、世界の安全と安寧にとって焦眉の課題である。

耐震設計の高度化に対する努力は世界中で続けられ、免震構造や制振構造など、地震による建物の揺れを軽減する構造技術は多数開発され、またその多くは実践にも適用されている。しかしながら、多くの技術は耐震費用の増加に繋がり、それはとりわけ発展途上国等における適用を阻んでいる。

耐震設計の発展にとってなくてはならない技術開発に「耐震補強」がある。現在の耐震設計が要求する水準に達していないいわゆる古い建物を将来にわたって使い続けるためには、適切な補強が不可欠である。新規建物の設計や施工に比べて既存建物の耐震補強は、補強部材と既存部分との接続において設計自由度が限られる、補強期間中には事業中断を余儀なくされる等、新規建物の建設以上に拘束力が強い。

これらの状況は、費用増を避けつつ耐震設計の高度化が図れる技術の開発、拘束が多い耐震補強にも簡便に適用できる技術の開発が、わが国はもとより世界の地震災害軽減に求められている。

2. 研究の目的

上記の背景に照らし合わせて、本研究においては、「直置き型」という従来にはないコンセプトを用いた構造技術の開発をめざす(図1)。図1(a)が基礎を地面に緊結した通常構造であるのに対して、図1(b)では、上部構造は同一であるものの、上部構造の根元(柱脚)部分をあえて基礎に固定していない。これを本研究では直置き型構造と呼ぶ。これによって、直置き型構造の挙動は、ある程度の地震力までは通常構造と同一であるが、地震力がある値を超すと直置き型構造では上部構造が滑るので、上部構造に作用する力が頭打ちになる、つまり、上部構造を滑らせることによって上部構造の崩壊を防ぐ、という考え方に依っている。

耐震補強を考えれば、現存する構造の柱脚部と基礎部を切り離すという施工によって直置き型構造は実現できる。上部構造に手を入れる必要がないという利点をもって、耐震補強としての要求にも応えることが可能になる。提案する構造物では、上部構造は低層

もしくは中低層であることを想定している。それは、高層になると転倒モーメント等の影響で浮き上がりという深刻な問題に直面しなければならず実現が困難であること、一方免震構造は元々基礎と上部構造を分離させているので、上等な直置き型構造であるとの認識から、免震構造と直置き型構造に競合はないこと、に依っている。また耐震補強への適用も勘案して、直置き型構造では上部構造を弾性に留める(塑性化によるエネルギー消費に期待しない)を前提とする。

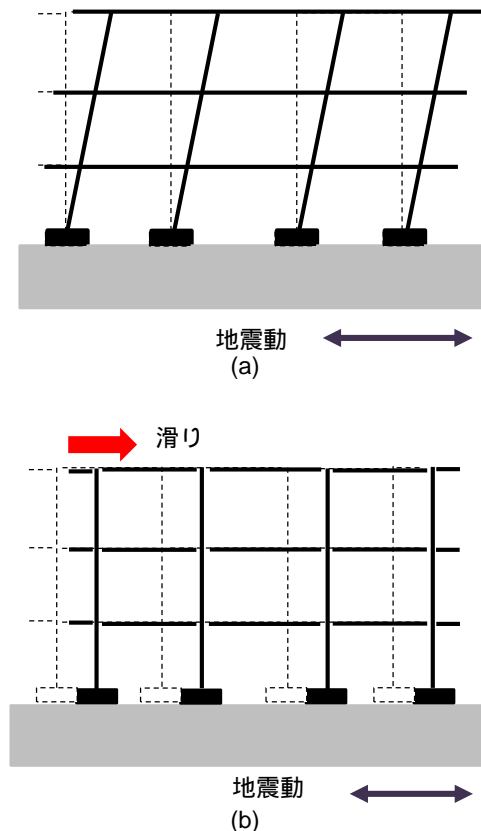


図1 直置き型構造物の基本的考え方

本研究で提案する構造物を実現するためには、1)どのような地震力で滑らせるのが適切か(上部構造の柱脚部と基礎部の界面における滑り係数をどの程度に設定すべきか)、2)所定の滑り係数をどのような材料や部品によって実現するか、3)所定の滑り係数に対して上部構造に作用するせん断力の上限つまり上部構造が保有すべき耐力をどのように算定するか、4)上部構造に作用する力を軽減する代償として生じる滑り量をどのように見積もればよいか、5)上下地震動や地震力に付随する転倒モーメントが産み出す柱脚部と基礎部の界面に作用する軸方向力の変動が及ぼす影響はいかほどか等の課題に対して、明確な指針が必要となる。

本研究では、上記1)~5)の課題に、トライポロジー分野で研究が進められてきた滑り特性に関する理論の適用、動的載荷実験による滑り係数の同定・検証、構造模型を用いた

振動台実験による直置き型構造の滑り挙動と上部構造へのせん断力特性の把握、滑りを許容する運動方程式を用いた滑り挙動への解析的検討、直置き型構造に対する時刻歴応答解析を用いた性能の検証、という視点にたって取り組んだ。

3. 研究の方法

黒鉛潤滑による鋼とモルタル間の滑り

建築構造は元々自重や積載荷重に対して十分安全であるように設計されている。また柱や梁や壁のような主要な部材の他に、間仕切り壁等のいわゆる非構造部材も地震力に対して応分の抵抗を示すことも知られている。一方でそれなりの頻度で起こる中小地震においては、滑らせることなく健全を確保することも求められる。さらに後述するように、上部構造には滑り係数の約2倍に相当するせん断力係数が作用することを斟酌して、射程とする滑り係数を0.2と設定した。

上部構造の柱脚部は滑り時の補強という観点からも鋼板を用い、また基礎部は通例に従ってRC基礎梁を想定することとした。鋼とRC・モルタルとの界面における滑り係数は既往の研究によれば0.6~0.8であり、また繰り返し滑りによってその値は相当変動することが知られている。これらの値は本研究で射程とした0.2を遙かに上回る。一方で免震構造の開発に呼応して、低い滑り係数を保証できる表面コーティング等の技術もあるが、これらは一般に高価であって本研究の目的にはそぐわない。このような状況下、鋼とRC・モルタルの界面に黒鉛潤滑剤を撒くことによって、その界面の滑り係数が0.2程度まで低下するという既往の研究に出会うことができた。

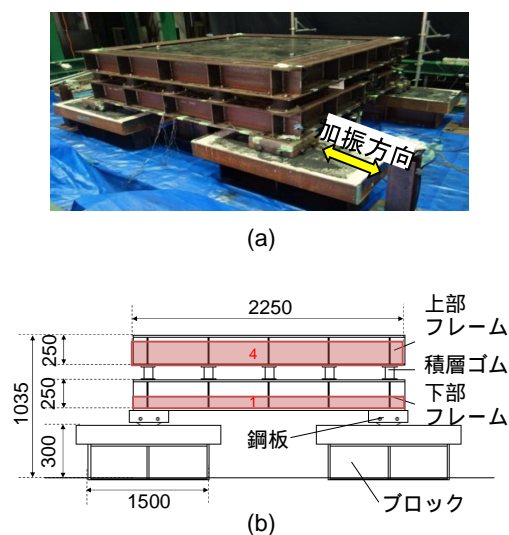


図2 黒鉛潤滑による滑り実験：(a)試験体性状；(b)試験体立面

そこで、図2(aは全体写真、bは立面図)

に示す、鋼とモルタルを滑らせるシステム（相当の重量を付した上部フレーム、その下に配した積層ゴム、さらにその下の同じく相当重量を付した下部フレーム、下部フレームの直下に据え付けた鋼板、最上部をモルタルで覆ったブロックから構成）を製作し、これを振動台に載せてさまざまな振動数と振幅を与えることによって、下部フレームとブロックの滑りを観察した。その結果の一例は図3に示す通りで、縦軸には実験から得られた動摩擦係数の平均値を、横軸には1~80までの载荷ケースを現している。その平均値は0.16、また変動係数は0.04と、80ケースもの载荷（約20mの繰り返し累積変位）にもかかわらず安定した滑り係数を示すことが明らかになった。この他にも、黒鉛潤滑剤は用いず鋼板の代わりに鋳鉄を用いた場合等も試したが、滑り係数の安定性という点において黒鉛潤滑が最も優れていることも明らかになった。

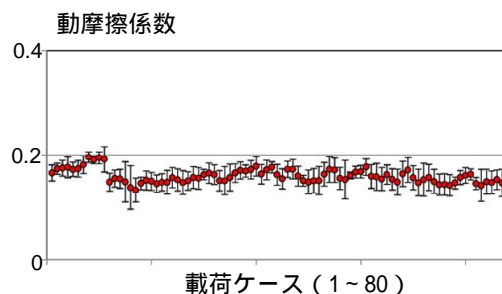


図3 黒鉛潤滑剤塗布による滑り係数

滑り挙動に関する解析解

上部構造が剛体であるとしたときの滑り挙動に関する支配式は簡便に誘導できるが、実際の構造がそうであるように上部構造に柔軟性があるとき、その挙動は上部構造の揺れとの関係からやや複雑になる。

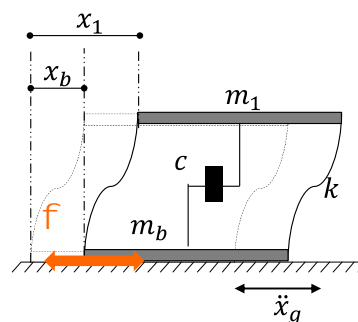


図4 滑り挙動考察のための2自由度系

図4のような、上部構造が質量(m_1)とバネ(k)とダッシュポット(c)から構成される1自由度系、その下部に基礎に相当する質量(m_b)があり、基礎の下が地面に対して滑るという挙動は、式1に示す一連の運動方程式で表現できる(記号については図4を参照)。

この式の解析解は式 2 で表現できるが、上部構造が滑っているときは、基礎固定としたときの固有周期と減衰定数とは異なる固有周期 (ω') と減衰定数 (ξ') を持っている。またこれらの振動特性は、上部構造と基礎の質量の比率 (質量比: α) に左右される。

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k(x_1 - x_b) &= 0 \\ m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) - k(x_1 - x_b) &= f' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\omega' = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\alpha}}, \quad \xi' = \frac{\xi}{\sqrt{1-\alpha}}, \quad \alpha = \frac{m_1}{m_1 + m_b} \quad (2)$$

最も簡単な入力である衝撃力 (初期速度を与えた自由振動) に対しては、滑り時に上部構造に作用するせん断力には上限があり、粘性減衰がないとすればその値は滑り係数の 2 倍となる。これは大きな衝撃力が作用して上部構造がすべり滑っている間に、その下部に作用する滑り抵抗 (f) は衝撃力の大きさに関わらず一定であることに依っている。またこれが、直置き型構造物の利点の源泉である。もう一つの代表的な入力である正弦波については、先にも述べたように滑り時には別の固有振動数と粘性減衰定数を有することから、入力振動数との相関によってその応答特性が顕著に異なる。従って、上部構造に作用するせん断力の上限は、入力振動数と振幅に依存するなど複雑となる。

一方で地震動の種類を考えると、パルス性の高い直下型地震動が直置き構造に最も大きな応答を引き起こすと考えられる。その対極にある長周期地震動に対して直置き構造物は滑ることはない (滑ることがないように滑り係数を設定している) その応答は基礎固定と同一である。ここで提案する直置き型構造は低層・中低層の適用を想定しているので、長周期地震動が大きな応答をもたらすことはない。これらを勘案すれば、直置き型構造の上部構造に作用するせん断力の上限として、滑り係数の 2 倍が目安となる。

パルス性地震動下の応答

パルス性の高い直下型地震動の応答は衝撃力による応答に類似してはいるものの、パルスの卓越周期や繰り返し数等によって、上部構造に作用するせん断力の上限は滑り係数の 2 倍を超えることがある。パルス性が高い多数の地震動に対する網羅的な時刻歴応答解析から、入力レベルを漸増させたときの最大せん断力の推移を検討した。その一例が図 5 で、縦軸に最大せん断力係数を、横軸に地震動の大きさを表し、"Scale=1" がわが国の耐震設計で想定される大地震 (レベル 2、図 5 の横軸に示す "1" の箇所) に相当している。この図から、レベル 2 地震動に対して最大せん断力係数の最大値は概ね滑り係数の 2 倍、またレベル 2 のさらに 2 倍の地震動に対してせん断力係数の最大値は滑り係数の約 2.5 倍

になることが明らかになった (注: 図 5 の La19 地震動は、選択した多くの地震動のうち最も大きな応答を示した地震動)。

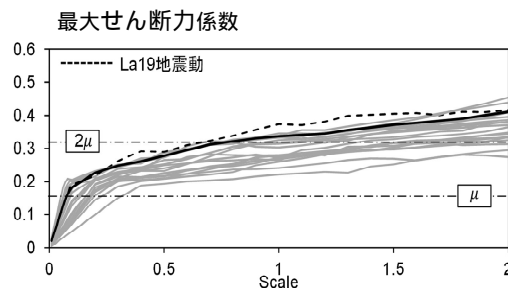


図 5 パルス性地震動下における上部構造最大せん断力係数の推移

この他に本研究では、上下動入力下の応答、高さ方向の重心位置が高い上部構造をもつ場合の応答性状、黒鉛潤滑を市松模様配することによる滑り係数の調節、上下動下で浮き上がりを起こさないためのストッパー機構、水平方向の過大な滑りを抑制するための緩衝材付きストッパー機構、上部構造に若干の塑性化を許容したときに当該上部構造が有すべき保有水平耐力、等にも検討の範囲を拡げた。いずれも有益な知見を得ることができ、また開発機構の有用性も相当以上に検証できたが、実用化に至るまでには一層の研究開発が必要なことを踏まえ、今後の検討課題を同定した。

4. 研究成果

上部構造と基礎部を緊結させず、大地震に対してはこの界面で滑らせることによって、上部構造に作用する最大せん断力を制御する「直置き型構造」を提案した。黒鉛潤滑剤を界面に撒くという簡便かつ安価な方法によって、滑り係数として 0.16 を確保することができ、また多数回の滑りに対しても安定した滑り係数が保持されることを、一連の振動台実験から明らかにした。滑りを伴う 2 自由度系への理論展開と網羅的な時刻歴応答解析から、パルス性の高い地震動に対して上部構造に作用する最大せん断力係数として、滑り係数の 2 倍が目安になることを明らかにした。

本研究では、複数の大学院生が修士論文の一環として本研究に貢献した。また海外からの特別研究員 (ポスドク) 2 名の研究課題としても推進し、SCI ジャーナル 2 編をすでに発表するとともに、和文論文誌への複数編の投稿も準備中である。このように本研究を通じて人材育成にも成果を挙げることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

Barbagallo, F., Hamashima, I., Hu, H., Kurata, M., and Nakashima, M., "Base shear capping buildings with graphite-lubricated bases for collapse prevention in extreme earthquakes", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.46, No.6, May 2017, pp.1003-1021. 査読有, DOI:10.1002/eqe.2842

Hu, H. S. and Nakashima, M., "Responses of two-degree-of-freedom sliding base systems subjected to harmonic ground motions", Journal of Structural Engineering, ASCE, (published online). 査読有, DOI:org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001653#sthash.grCyauXR.dpuf

〔学会発表〕(計6件)

濱嶋 郁望、張 雷、佐藤 美帆、胡 紅松、倉田 真宏、中島 正愛、建物基礎間に黒鉛潤滑剤を用いた直置き型構造の振動台実験と性能評価、日本建築学会近畿支部研究発表会、平成 27 年 6 月 28 日、大阪保健医療大学(大阪府・大阪市)

濱嶋 郁望、山崎 友也、胡 紅松、張 雷、佐藤 美帆、倉田 真宏、中島 正愛、柱脚と基礎間に黒鉛潤滑剤を用いた直置き型構造の振動台実験と性能評価その 1 直置き型構造の基本挙動—、日本建築学会学術講演会、平成 27 年 9 月 4 日~6 日、東海大学(神奈川県・平塚市)

山崎 友也、濱嶋 郁望、胡 紅松、張 雷、佐藤 美帆、倉田 真宏、中島 正愛、柱脚と基礎間に黒鉛潤滑剤を用いた直置き型構造の振動台実験と性能評価 その 2 振動台実験結果と考察—、日本建築学会学術講演会、平成 27 年 9 月 4 日~6 日、東海大学(神奈川県・平塚市)

濱嶋 郁望、倉田 真宏、中島 正愛、建物柱脚と基礎間に黒鉛潤滑剤を用いた直置き型構造の最大ベースシア係数、日本建築学会 近畿支部研究発表会、平成 28 年 6 月 26 日、大阪保健医療大学(大阪府・大阪市)

濱嶋 郁望、倉田 真宏、中島 正愛、上部構造と基礎間に黒鉛潤滑剤を用いた直置き型構造の最大ベースシア係数その 1 数値解析と理論式による直置き型構造の基本挙動の考察、日本建築学会学術講演会、平成 28 年 8 月 24 日~26 日、福岡大学(福岡県・福岡市)

中島 正愛、濱嶋 郁望、倉田 真宏、上部構造と基礎間に黒鉛潤滑剤を用いた直置き型構造の最大ベースシア係数その 2 振動台実験と数値解析による骨組に作用するベースシア係数の検討、日本建築学会学術講演会、平成 28 年 8 月 24 日~26 日、福岡大学(福岡県・福岡市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

中島 正愛 (NAKASHIMA, Masayoshi)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 00207771

(2)研究分担者

倉田 真宏 (KURATA, Masahiro)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 70624592

岡崎 太一郎 (OKAZAKI, Taichiro)
北海道大学・工学研究院・教授
研究者番号: 20414964
(平成 28 年度より連携研究者)

松宮 智央 (MATSUMIYA, Tomohiro)
近畿大学・建築学部・准教授
研究者番号: 20454639
(平成 28 年度より連携研究者)

保木 和明 (HOKI, Kazuaki)
北九州市立大学・国際環境工学部・講師
研究者番号: 70599026
(平成 28 年度より連携研究者)