

機関番号：31303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560514

研究課題名（和文） 免震層変形の効果的減低を目指した免震構造システムの評価研究

研究課題名（英文） An Evaluation Study of Base Isolated System for Effective Reduction of Response Displacement in Isolated Story

研究代表者

堀 則男 (HORI NORIO)

東北工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60292249

研究成果の概要（和文）：免震構造は応答加速度を低減する有効な方法であるが、大きな応答変位が生じるため十分な免震層クリアランスが必要であり、巨大地震や長周期地震動による過大な応答変形が懸念されている。本研究では免震層変形の効果的な低減と応答加速度の抑制を目的とした検討を行い、免震層の応答変形のみに基づいた簡易で効果的なセミアクティブ制御、過大な応答変形が生じた場合に機能する簡易な連結機構摩擦ダンパーの提案について成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Base isolated structures are effective system for reduction of seismic response acceleration, but large response displacement occurs. Therefore enough wide clearance in isolated story must be required, and too large response displacement may occur by extreme severe earthquakes or ground motions including long period vibration components. The purpose of this study is to develop the base isolation system with effective reduction of response displacement and control of response acceleration. By the results of this study, effective and simple semi-active control method based on the response displacement values in isolated story only, and simple friction damper with joint mechanism that works only in case of too large response displacement, are proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2009年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2010年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：建築構造学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：免震構造，長周期地震動，建物クリアランス，磁気粘性流体ダンパー，摩擦ダンパー，振動台実験，変形制御機構

1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震以降、免震構造が急速に普及し、戸建住宅や高さ60mを超える高層建物などさまざまな建物に適用されてきた。免震構造は建物を長周期化することによって、地震時の応答加速度を大幅に低減することが可能であるが、大きな応答変位が生じるため

十分な免震層クリアランスが必要であり、また、マグニチュード8を超えるような巨大地震や長周期地震動による免震層の過大な応答変位も懸念されている。

過大な応答変位を抑制するためには大きな減衰性能を付与することが必要であるが、免震建物の減衰機構は一般にパッシブであり、多大なダンパーを設置することによって応答

加速度の低減効果が損なわれてしまう恐れもある。大地震時の安全性を確保することはもちろんであるが、家具の転倒や、設備機器、配管、電子機器などの損傷を防いで機能性、快適性を維持し、財産を保全するためには、応答変形と応答加速度を適切に抑制する免震構造システムが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、免震層の応答変形を効果的に低減し、なおかつ上部構造の応答加速度の励起を抑制する免震構造システムの提案を目的としている。そのため以下の検討を行い、得られた知見を総合的に評価し、適切な応答制御システムの構築を目指す。

(1) 適切なセミアクティブ制御手法の検討

セミアクティブ制御は、応答に応じてデバイスの特性（剛性や減衰）を変化させて建物地震応答低減を図る手法であり、本研究で対象とする磁気粘性流体ダンパー（MRダンパー）は、作用する磁場の強さに応じて抵抗力が変化し、比較的大きな制御力を発揮でき反応速度も速いことなどから、セミアクティブ制御に適したデバイスの一つと考えられている。

MRダンパーを用いたセミアクティブ制御については、応答加速度低減を実現する手法、エネルギー応答に基づいた手法、最適制御理論に基づいた手法などが提案され、応答低減効果に関する研究が行われている。大地震に対しては大きな制御力を発揮することで応答変形を抑え、中小地震時には制御力を小さくすることによって応答加速度を低減できるため、適切な制御を行えば、地震動のレベルや特性（繰返し型やパルス型、周波数特性など）によらず効果的に応答を低減できることが期待されている。

これらの制御手法の特徴を比較検討し、免震層の応答変形を低減し、かつ上部構造の応答加速度の励起を抑制するようなセミアクティブ制御の提案を試みる。

(2) リミッター設置時の応答性状把握

免震構造の設計においては、万一過大な応答変形が生じた場合でも建物が擁壁などに衝突することは想定されていないため、大地震や長周期地震動にも対応できるような十分なクリアランスが必要となる。しかし一方では、特に戸建住宅などでは敷地面積の理由によりできるだけクリアランスを抑えて有効利用を図ることも必要である。

本研究では、過大な応答変形が生じた場合にはリミッターが作用して応答変形を抑制する免震構造システムの検討を行う。リミッ

ターは中小地震時には全く機能しないが、大地震時に過大な変形が生じた場合にはリミッターが接触して免震層の剛性を高め、応答変位を抑える働きを持つ。リミッターの接触面には、衝撃を緩和するためのクッション材を設置する。

またリミッターについては、過大な応答変形に対する最終的な安全装置と捉えることで、建物クリアランスを必要以上に大きくせずに設計することが可能であり、性状の不明確な擁壁への衝突よりも安定した信頼性の高い安全性が確保できるものと考えられる。

しかしながら、リミッターによる応答変形制御効果と応答加速度低減効果は相反するため、相互の関連を解析し、適切な設計パラメータ（リミッタークリアランスの大きさ、クッション材剛性など）を検討することが必要である。

3) 免震試験体の振動台実験による検討

1層鉄骨フレーム試験体、3層鉄骨フレーム試験体、免震架台を組合せた免震試験体を用い、振動台実験を行う。まずは1層鉄骨フレーム試験体によって基本性状を把握し、制御手法の検証を行う。さらに3層鉄骨フレーム試験体を用いることによって、高次振動モードが発生する場合の応答性状について検討する。

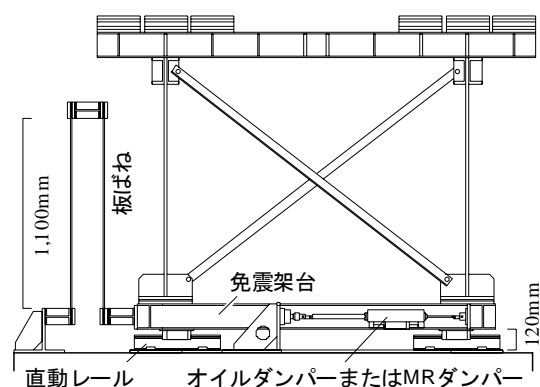


図1 1層免震試験体立面図

3. 研究の方法

(1) 応答制御手法の予備的検討

本研究の実施にあたっては、これまで検討を行ってきた免震構造のセミアクティブ振動制御に基づいた応答低減手法を適用した場合の、地震応答性状の解析的検討、効果的な制御手法の検討を行い、効果的な応答低減システムの構築を試みる。

(2) ダンパーとクッション材の特性把握

実験には磁気粘性流体ダンパー（MRダンパー）を用い、まずはダンパー単体の加力実

験により減衰性能の把握を行う。また衝撃緩和を目的として、リミッター接触面にクッション材を用いるが、その力学的特性を要素実験によって把握し、適切な厚さ、大きさを検討するための基本データを得る。

(3) 1層免震試験体の振動台実験による検証
1層鉄骨フレーム試験体と免震架台を組合せた試験体にMRダンパーを設置し、振動台を用いた加振実験を行い、応答性状を把握する。これにより、試験体の特性、MRダンパーの特性、セミアクティブ制御機構の動作、接触時のクッション材特性などの把握を行い、適切な解析モデルの構築、実験システムの検証、提案する免震構造システムの問題点の把握を行う。

(4) 上部構造への影響の解析的検討
1層免震試験体の振動台実験結果に基づき、解析的検討によって応答変形制御効果と上部構造応答加速度の関連性から適切な応答制御手法について検討する。

(5) 3層免震試験体の振動台実験による検証
3層鉄骨フレームと免震架台を組合せた試験体の振動台実験を行い、応答制御手法の検証を行う。この試験体の場合は高次モードが生じると予想され、免震層での制御に伴う高次モード加速度の増幅、上部構造の高振動数成分の免震層への影響などが考えられるため、これらの影響を実験によって検討する。

(6) 適切な応答制御手法の検討
MRダンパーの制御力を変化させるセミアクティブ制御について、免震層の応答を効果的に低減し、なおかつ上部構造の加速度応答をできるだけ励起しないような手法を検討する。

また、リミッター接触による制御について、クッション材の特性（剛性、復元力の硬化特性、エネルギー吸収能力）、接触までのクリアランス、地震動入力レベルとの関連性などについて、適切な設計パラメータを検討する。

(7) 提案する免震構造システムの評価
振動台実験による検証結果、地震応答解析による検討結果などに基づき、提案する免震構造システムの特性・問題点を総合的に評価する。

4. 研究成果

4-1 ダンパー特性と地震動特性

(1) 各種ダンパーを設置した場合の応答
一般的に用いられている粘性ダンパーと

履歴ダンパー、及び本研究で提案した制御則を適用したセミアクティブダンパーを設置した場合について、応答解析によって地震応答性状を検討し、差異とその要因について検討した。

- ・粘性ダンパーは地震動の入力レベルに応じて適切なダンパー性能を発揮するが、応答変形の割には応答速度が大きくなるような地震動に対しては、過大なダンパー力を発揮してしまう。
- ・履歴ダンパーは抵抗力が一定であるため、想定外の地震動に対して応答を抑制できないことが懸念される。
- ・セミアクティブダンパーは応答変形に対してダンパー力が制御されるため、地震動特性の影響を受けにくい。
(雑誌論文[4], 学会発表[10])

(2) 免震装置のばらつきの影響
固有周期と減衰定数による地震動の S_A-S_D 曲線の変化と対応づけることによって、免震建物特性変化が応答に及ぼす影響と、予測される応答値を簡便に評価することができた。
(学会発表[8][10])

4-2 MRダンパーを用いたセミアクティブ制御

(1) ダンパー単体の特性把握実験
免震建物用のストロークの長いMRダンパーを作製し、加振実験によって特性把握を行った。これにより、ダンパー抵抗力の速度依存性、印加電流依存性、反応時間遅れを把握することができた。
(雑誌論文[6], 学会発表[11])

(2) 免震層変形のみに基づく制御則の提案
既往の制御則を検討してその有効性と問題点を把握し、図2に示す制御則を提案した。この制御則は以下の特長を持つ。

- ・建物の全層の応答変位と応答速度の情報が必要である最適レギュレーター理論に基づいた制御則に対して、提案した制御則は免震層の応答変形のみに基づいており、概ね同程度の応答変形制御効果が得られた。
- ・免震層の振動エネルギーに基づいて効果的な抵抗力を発揮するEF制御を簡略化し、応答変形のみに基づいた制御則とした。より小さいダンパー力によって、同程度の応答変形制御効果が得られた。
- ・応答加速度の上昇を防ぐため、応答変形と応答速度の符号が同じ状態の時には抵抗力を減少させるものとした。
(雑誌論文[7], 学会発表[9])

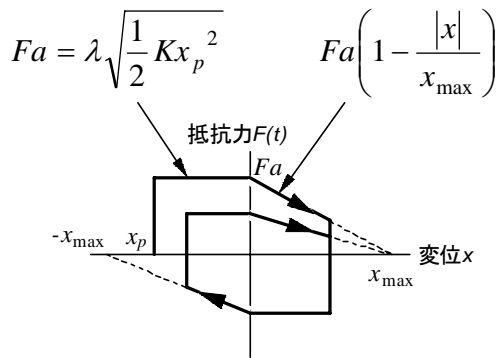


図2 提案した制御則でダンパーに発揮させる抵抗力

(3) 変位依存型と速度依存型のダンパー

本研究で提案した制御則は、免震層の応答変形にのみ依存して抵抗力を発揮する変位依存型ダンパーであるため、応答変形の大きさを直接的に制御できる手法といえる。一方、一般的に用いられているオイルダンパーは速度依存型のダンパーであり、免震構造のような長周期建築物の場合には、応答速度が応答変位の割に大きくなることから過大なダンパー力となることが分かった。

また、これはダンパーの周波数伝達特性と地震動の振動成分の関係が影響していると考えられるため、複素剛性モデルを用いた周波数応答解析によって検討を行った。

(雑誌論文[1], 学会発表[1][2])

4-3 摩擦ダンパーによる過大変形抑制

研究開始当初は、リミッターを用いて地震時過大変形を抑制する手法の検討を行った。これは、ある程度大きな変形が生じた場合に免震層がリミッターに接触して過大変形を抑えるシステムであり、リミッターのクッション材として防振ゴム、粘弾性体などを想定していた。しかしながら、接触時の衝撃や、変形が戻るときにリミッターが免震層を加力すること、再び変形が小さくなった時に離れて全く機能せず効率がよくないこと、などの問題点が明らかとなってきた。

これらを鑑み、通常は全く機能せず、ある程度の大きな変形が生じた場合にのみ作動するというコンセプトを継承した摩擦ダンパーの検討を行うこととした。摩擦ダンパーは、オイルダンパーやセミアクティブダンパーと比較して機構が単純で安価であり、コンピュータや電力なども不要であるため、簡易な適用が期待できると思われる。

(1) 弾塑性型摩擦ダンパー

一般に、摩擦力を利用したダンパーは剛塑性の履歴特性を有しているため、小地震時や、大地震後の応答加速度を低減できない懸念

がある。そこで、弾塑性型の履歴特性を有する摩擦ダンパーを試作し、振動実験及び解析的検討によって有効性と問題点の把握を行った。小振幅時はダンパーも弾性振動をするため、免震効果の阻害が少なく、また地震後の応答加速度の収束にも効果が見られた。

(雑誌論文[3][5])

(2) 連結機構摩擦ダンパー

中小地震時に免震効果を阻害せず、大地震時に応答変形を抑制できるような機構として、連結機構摩擦ダンパーを考案して製作し、1層免震試験体の加振実験と解析的検討を行った。図3に示すように、設定したクリアランスを超える大きな応答変形が生じた場合に連結し、その後は摩擦ダンパーとして機能する装置であり、過大な応答変形を抑え、応答加速度の上昇も過大にはならず、有効性を示すことができた。

(学会発表[5][6][7])

また3層フレーム免震試験体の加振実験を行い、連結時の衝撃の影響、連結後の振動特性変化による応答への影響などを検討した。応答変形低減に効果があることを確認できたが、それほど過大とはいえないものの高次モードの振動を励起してしまうため、適切な弾性剛性、摩擦力の設定を検討する必要があると考えられる。

(雑誌論文[2], 学会発表[3][4])

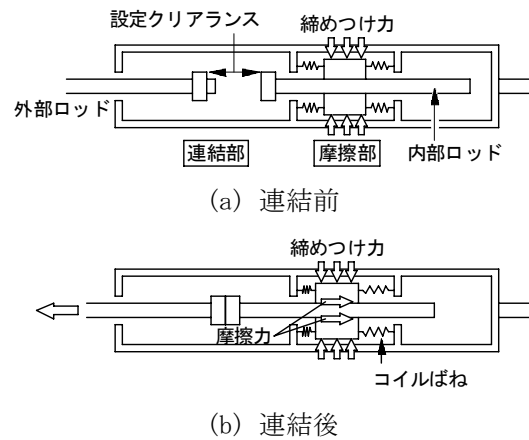


図3 ダンパーの機構模式図

4-4 まとめ

免震層変形の効果的な低減と応答加速度の抑制を目的とした検討を行い、簡易で効果的なセミアクティブ制御と連結機構摩擦ダンパーの提案について成果が得られたと考えている。

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7件）

- [1] 佐上瑤子, 堀 則男, 五十子幸樹, 井上範夫, 複素剛性ダンパーモデルによる免震建物の変位制御設計に関する研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 56B, 2010, pp. 163-170
- [2] 堀 則男, 趙 自由, 連結機構摩擦ダンパーを用いた3層フレーム免震試験体の地震時過大変形抑制実験, 東北地域災害科学研究, 査読無, 第46巻, 2010, pp. 95-100
- [3] 趙 自由, 堀 則男, 井上範夫, 弾塑性型摩擦ダンパーを用いた免震試験体の地震応答性状, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読無, 第72号, 構造系, 2009, pp. 149-152
- [4] 五十子幸樹, 中井川敦, 堀 則男, 井上範夫, ダンパーの作動原理の差異と免震装置のばらつきが免震建物の応答性状に与える影響に関する検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読無, 第72号, 構造系, 2009, pp. 153-156
- [5] 趙 自由, 堀 則男, 弾塑性型摩擦ダンパーを用いた免震試験体の地震応答性状, 東北地域災害科学研究, 査読無, 第45巻, 2009, pp. 117-122
- [6] 藤田康広, 中井川敦, 佐上瑤子, 堀 則男, 井上範夫, 免震用磁気粘性流体ダンパーの特性把握実験, 日本建築学会東北支部研究報告集, 査読無, 第71号, 構造系, 2008, pp. 235-238
- [7] 佐上瑤子, 堀 則男, 井上範夫, 磁気粘性流体ダンパーを用いた免震建物の応答制御手法の検討及び提案, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第73巻, 第627号, 2008, pp. 709-716

〔学会発表〕（計11件）

- [1] 堀 則男, 佐上瑤子, 五十子幸樹, 井上範夫, 速度依存型と変位依存型のダンパーを用いた免震建物の地震応答性状, 日本自然災害学会学術講演会, 2010年9月17日, 岐阜大学
- [2] 佐上瑤子, 堀 則男, 五十子幸樹, 井上範夫, 複素剛性ダンパーモデルによる免震建物の変位制御に関する検討, 日本建築学会大会, 2010年9月11日, 富山大学
- [3] 堀 則男, 趙 自由, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーを用いた3層免震フレーム試験体の地震時過大変形抑制実験（その1）実験概要及び1質点系と4質点系の比較, 日本建築学会大会, 2010年9月11日, 富山大学
- [4] 趙 自由, 堀 則男, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーを用いた3層免震フレーム

試験体の地震時過大変形抑制実験（その2）連結時の応答性状, 日本建築学会大会, 2010年9月11日, 富山大学

- [5] 趙 自由, 堀 則男, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーによる免震試験体の地震時過大変形抑制実験, 第28回日本自然災害学会学術講演会, 2009年9月29日, 京大会館
- [6] 堀 則男, 趙 自由, マテオ アライアルベル, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーによる免震試験体の地震時過大変形抑制（その1）ダンパー機構及び振動実験概要, 日本建築学会大会, 2009年8月29日, 東北学院大学
- [7] 趙 自由, マテオ アライアルベル, 堀 則男, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーによる免震試験体の地震時過大変形抑制（その2）実験結果の検討, 日本建築学会大会, 2009年8月29日, 東北学院大学
- [8] 中井川敦, 堀 則男, 五十子幸樹, 井上範夫, 地震動の S_A-S_D 曲線を用いた免震建物の地震応答評価, 日本建築学会大会, 2009年8月29日, 東北学院大学
- [9] Norio Hori, Yoko Sagami and Norio Inoue, A STUDY AND DEVELOPMENT OF SEMI-ACTIVE CONTROL METHOD BY MAGNETORHEOLOGICAL FLUID DAMPER IN BASE ISOLATED STRUCTURES, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.10.13, Beijing, China
- [10] 中井川敦, 堀 則男, 井上範夫, 各種ダンパーを設置した免震建物の応答性状に与える地震波のスペクトル特性の影響, 日本建築学会大会, 2008年9月19日, 広島大学
- [11] 藤田康広, 中井川敦, 佐上瑤子, 堀 則男, 井上範夫, 免震用磁気粘性流体ダンパーの特性把握実験, 日本建築学会大会, 2008年9月20日, 広島大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀 則男 (HORI NORIO)
東北工業大学・工学部・准教授
研究者番号：60292249