432 可変減衰ダンパを用いたセミアクティブ免震構造に関する研究

Study on Semi-Active Seismic Isolation System Using Variable Damper

○正 皆川 佳祐 (東京電機大学・院)

正 藤田 聡 (東京電機大学)

佐々木 友 (東京電機大学・院)

Keisuke MINAGAWA, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

Satoshi FUJITA, Tokyo Denki University

Tomo SASAKI, Tokyo Denki University

This paper describes isolation performance of semi-active seismic isolation system using variable damper. Recently, the relatively long period seismic waves have been observed in the various earthquakes. These seismic waves have the predominant period that is equivalent to natural period of seismic isolation structures. Therefore technology is required that supply more safety to isolation structure. A semi-active isolation system in this paper has been proposed to satisfy the requirement. Variable damper is applied to isolation system to vary damping ratio. It was confirmed by numerical analysis that this isolation system has good performance of isolation.

Key words: Semi-active control, Base-isolation, Vibration control, Variable Damping

近年、工学的分野で問題視されてきた地震動に加え、やや長周期地震動が多く、地震で観測されている。やや長周期地震動は免震構造の固有周期と同程度の卓越周期を持つため、免震構造のさらなる安全の性向上が望まれている。そこで本研究では、やや長周期地震動を見据えた免震構造として可変減衰ダンパを用いたセミアクティブ免震構造を提案し、その減衰比選定方法、基本性能解析結果を報告する。

本セミアクティブ免震構造は、変位フィードバックにより減衰比を変化させることで、免震性能の向上を狙う。ここで、応答加速度低減と応答変位の抑制を両立させること、非動作時には減衰を高くし動きにくくすることを目標とし、減衰比の選定手法を構築した。可変減衰ダンパとして、減衰比を連続的に変化させる「連続切換えダンパ」と、段階的に変化させる「多段切換えダンパ」を適用した際の応答変位と減衰比の関係を図 A1 に示す。本選定手法では、大変位時には加速度低減よりも変位抑制に重点を置き、減衰比を高くする設計になっている。また非動作時つまり変位がゼロの時も減衰比を高くすることで系に安定性を付加している。なお、免震系の固有周期は一般の免震構造物にならい、3[s]とした。

上記の通り設計されたセミアクティブ免震構造の基本性能を、数値解析により検討した。尚、解析にはやや長周期成分を多く含む人工地震波と、地震応答解析において広く使われている El Centro NS 波 0.5 [m/s] を用いた。解析結果の一例として上記二種類の地震波を入力した際の最大応答加速度、変位を、減衰比一定 (30, 40[%]) とした解析結果とともに図 A2 に示す。図 A2 より、セミアクティブ免震構造は従来の減衰比一定とした免震構造と同程度の変位で応答しながら、特にやや長周期地震動を模した人工地震波で高い応答加速度低減効果を示している。また、多段切換えダンパを用いた免震構造の免震性能は連続切換えダンパを用いた免震構造の免震性能に比べ劣るものの、その性能に大きな差異はない。故に、機械構造上の技術的要求の高くない多段切換えダンパに

おいても十分な免震性能が期待出来ると言える。

以上より、本免震構造は同程度の減衰比を持つ免震構造物に比べて優れた免震性能を持つことが確認された。今後は、これらの知見を受け、実際の変換減衰ダイバの特性式を用いた多質点系性能解析、免震系の固有周期をさらに伸長させた場合の性能解析等に取り組んで行く。

Fig. A1 Switching function of damping ratio

Fig. A2 Performance of semi-active isolation system

1. はじめに

我が国は世界でも有数の地震国であり、地球に占める面積の割合が僅か 0.1% の日本とその近海で、地球で発生する地震の 10% ものエネルギーが消費されている。故に、我が国の耐震技術に対する要求は高く、その技術レベルは世界最高と言っても過言ではない。そのような耐震技術の中でも、とりわけ近年の免震技術の発達が目覚ましい。また、社会的にも、兵庫県南部地震（1995 年）、新潟県中越地震（2004 年）をはじめとする大地震の発生、更にはそれら大地震において免震構造物の効果が確認されたことから、免震技術への期待は高まり、その施行件数も年々増加している。

一方で、鳥取県西部地震（2000 年）において、免震構造物内の加速度が地動加速度よりも大きくなる事例が確認され、地震波の特性如何では免震構造物の安全性が確保されない可能性があることが指摘されている。また、近年研究が進んでいる「やや長周期地震動⁽¹⁾⁽²⁾」は、免震構造物の固有周期付近に卓越周期を持つことから、これらの事実を見据えた免震構造物の更なる安全性向上が望まれる。

以上のような背景のもと、筆者らはこれまでに超長周期アクティブ免震構造に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾を行ってきた。超長周期アクティブ免震構造とは、アクティブ制御により従来の免震構造よりも固有周期を更に伸長させた免震構造であり、やや長周期地震動の影響を受けやすい超高層ビル等の長周期構造物を免震対象としている。これらの研究より、超長周期アクティブ免震構造は優れた免震性能を発揮するものの、上部構造物の重量の 1.5[%] 程度の制御力を要することが確認され、重量の大きい構造物に対する実現性は低いとの知見を得た。

そこで本研究では、アクティブ免震構造の長所を生かしつつ制御力に対する要求を緩和する免震構造として、可変減衰ダンパを用いたセミアクティブ免震構造を提案する。本報では、可変減衰ダンパの減衰比の選定方法の検討、セミアクティブ免震構造の基礎性能の解析による検討を行ったので報告する。

2. やや長周期地震動

2.1 やや長周期地震動とは 近年、従来から建築物の耐震設計などの工学的分野で問題視されてきた周期 1 秒以下の地震動に加え、やや長周期地震動に対する意識が急激に高まりつつある。やや長周期地震動とは、卓越周期 2～20 秒を持つ地震動であり、固有周期が従来の構造物よりも長い免震構造物や超高層ビル、またスロッシング周期の長い各種タンクなどへ大きな影響を与える。例えば、十勝沖地震（2003 年）で発生した石油タンクの火災は、やや長周期地震動のもたらした被害として記憶に新しい。やや長周期地震動は、岩盤の上に厚い堆積層からなる平地や盆地等で発生しやすい。その為、日本の主要都市ではやや長周期地震動が励起されやすく、事実、多くの観測記録がある。

やや長周期地震動の一例として、図 1 に JMA Otemachi NS 波（2004 年新潟県中越地震）の時刻歴波形、応答スペクトルを示す。尚、ここに示した地震波は気象庁ホームページ（<http://www.jma.go.jp/>）に公開されたものである。図 1 の応答スペクトルより、本地震動は従来から問題視されてきた 0.3～0.5 秒の他に、やや長周期領域の 6 秒付近に卓越周期を持つ地震動であることがわかる。

また、地動加速度の時刻歴波形より、観測開始 70 秒後付近から長周期成分が励起されはじめていることが確認出来る。さらに、100 秒以降では、短周期成分は減衰しているにもかかわらず、やや長周期地震動は依然減衰せず、その大きさを増している。このように、やや長周期地震動は主要動終了後に現れ、加速度は主要動に比べ小さいものの、減衰しにくいという特徴を持つ。また、応答スペクトルの形状から、やや長周期地震動は特に応答変位に対して脅威であることがわかる。即ち、やや長周期地震動が入力されたとき、構造物に慣性力として作用する応答加速度は従来から問題視されていた短周期成分に比べ小さいものの、応答変位は大きいいため、やや長周期地震動による被害を防ぐためには応答変位に着目する必要があると言える。

Fig. 1 An example of relatively long period seismic wave (JMA Otemachi NS, Mid Niigata Pref. Earthquake 2004)

Fig. 2 Property of artificial wave

2.2 人工地震波 本研究では、やや長周期地震動による影響をより詳細に検討するため、図2に示す人工地震波を作成し、数値解析等に用いた。本地震波の最大加速度は $3.80[\text{m/s}^2]$ 、応答速度スペクトル ($h=5[\%]$) はやや長周期地震動を考慮し、周期 $2\sim 20[\text{s}]$ で $2.0[\text{m/s}]$ を維持するものとした。それ故、免震構造、超高層ビル等の長周期構造物に対して非常に厳しい地震波となっている。

3. セミアクティブ免震構造

3.1 セミアクティブ免震構造の概要 免震構造のセミアクティブ化手法として、「剛性を変化させる」、「減衰を変化させる」、「摩擦係数を変化させる」などの手法が挙げられる。本研究では、比較的単純な機構によりセミアクティブ化が可能であると考えられる可変減衰ダンパを用い、免震構造のセミアクティブ化を図るものとした。セミアクティブ免震構造の概念図を図3に示す。尚、本研究において、免震対象は汎用性を持たせるために剛体と仮定し、免震系の固有周期は $3.0[\text{s}]$ とした。

ここで、減衰を大きくすることで応答変位は抑制出来るものの、応答加速度は増幅させることがある。従って、減衰比の制御に際し、このようなトレードオフの関係にある応答加速度の低減と応答変位の抑制を両立させること、また、可変減衰ダンパにトリガーとしての機能を持たせ、非動作時の安定性を高めることを設計目標とした。

3.2 地震時応答の評価 上述の目標を達成するためには、地震時の構造物の挙動を適切に評価し、可変減衰ダンパの減衰比を適時変化させる必要がある。そこで以下の通り、地震時の応答を評価する評価関数 F_E を導入する。また、第2章で示した通り、やや長周期地震動では応答変位に与える影響が顕著であるため、制御系は変位フィードバックにより構築するものとした。

図3に示す一質点系モデルの運動方程式は、

$$\ddot{x} + 2\zeta(x)\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{z}_H \quad (1)$$

となる。ここで、 x は構造物の変位、 $\ddot{z}_H$ は水平地動加速度、 ω は系の固有円振動数、 $\zeta(x)$ は可変減衰ダンパの減衰比で構造物の変位 x の関数ある。式(1)で表される運動を評価するため、本研究では以下の評価関数 F_E を導入する。

$$F_E = \left| \frac{x_T - |x|}{x_T} \right| \quad (2)$$

ここで、 x_T は評価関数 F_E がゼロになる変位である。図4に、評価関数 F_E と応答変位 x の関係を示す。図4より、評価関数 F_E は、非動作時ならびに応答が過大になる時には大きく、 x_T 付近では小さくなる特性を持つことがわかる。従って、評価関数 F_E に比例する減衰比 $\zeta(x)$ を選定することで、非動作時ならびに大変位時には減衰比を高くして応答変位を抑制し、また、免震構造としての許容変位内に収まっている時には減衰比を低くして十分な免震効果を発揮することが期待される。本評価関数を用いた減衰比の制御については、次章以降で説明する。

Fig. 3 Basic concept of semi-active isolation system

Fig. 4 Property of evaluation function F_E

4. 連続切換えダンパを用いたセミアクティブ免震構造

本章では、可変減衰ダンパとして、減衰比を連続的に変化することの出来る「連続切換えダンパ」を採用した際の、減衰比選定手法及び基本性能解析の結果を示す。

4.1 連続切換えダンパの減衰比の選定手法 連続切換えダンパの減衰比 $\zeta(x)$ は評価関数 F_E に比例するものとして、以下の式に基づいて選定する。

$$\zeta(x) = KF_E \quad (3)$$

ここで、 K はゲインである。式(3)では、変位によっては実用上不適切な減衰比 $\zeta(x)$ をとる可能性がある。そこで、減衰比 $\zeta(x)$ はゲイン K を上限として、ゲイン K 超えないよう制限を設けた。即ち、ゲイン K は減衰比 $\zeta(x)$ の最大値を表すことになる。図5に応答変位 x と減衰比 $\zeta(x)$ の関係を示す。以後、評価関数がゼロになる変位 x_T とゲイン K の選定を行う。

まず、評価関数がゼロになる変位 x_T を任意に選定し、ゲイン K の変化による最大応答値の比較を行った。ここで、図2に示した人工地震波の特性より固有周期 $3[\text{s}]$ の応答変位を参考にして、 x_T を仮に $0.7[\text{m}]$ と設定した。図6に解析結果として、人工地震波及び El Centro NS 波 $0.5[\text{m/s}]$ ($5.01[\text{m/s}^2]$) を入力した際の、ゲイン K と最大応答値の関係を示す。図6より、 K の増加に伴って応答変位は抑制され、応答加速度はある点で最小値を取りその後大きくなっていることが確認出来る。このことは、ゲイン K が減衰比の上限を表すことから説明出来る。ここで、応答加速度が最小になるゲイン K は、人工地震波で 0.40 、El Centro NS 波で 0.27 である。本研究では、

Fig. 5 Relationship between displacement and damping ratio (Continuous switching)

Fig. 6 Relationship between gain and Max. response Value (Continuous switching)

Fig. 7 Relationship between x_t and Max. response Value (Continuous switching)

特に人工地震波がやや長周期地震動を再現し、免震構造等へ驚異的な波形となることから、人工地震波を入力した際の応答加速度が最小になり、応答変位の抑制も十分に行われている $K=0.40$ をゲインとして採用する。

次に、ゲイン $K=0.40$ として評価関数がゼロになる変位 x_t の変化による最大応答値の比較を行った。図 7 に解析結果として、人工地震波及び El Centro NS 波 $0.5[\text{m/s}]$ ($5.01[\text{m/s}^2]$) を入力した際の、評価関数がゼロになる変位 x_t と最大応答値の関係を示す。図 7 より、応答加速度、変位ともに x_t が小さい範囲で最大値を取り、以降収束して行くことがわかる。ここで、応答加速度が最小になる x_t は、人工地震波で $0.43[\text{m}]$ 、El Centro NS 波で $0.28[\text{m}]$ である。一方、応答変位は x_t の増加に伴って減少して行くものの、 $x_t=0.4[\text{m}]$ 以降は応答変位に大きな差は見られない。従って、人工地震波を入力した際に応答加速度が最小になる $x_t=0.43[\text{m}]$ を評価関数がゼロになる変位として採用する。

Fig. 8 Time history

Table 1 Comparison of maximum response value

		Semi-Active		
		$\zeta = 30[\%]$	$\zeta = 40[\%]$	$\zeta = 40[\%]$
*1	Acc. $[\text{m/s}^2]$	1.54	1.79	1.82
	Disp. $[\text{m}]$	0.333	0.329	0.298
*2	Acc. $[\text{m/s}^2]$	1.12	1.14	1.22
	Disp. $[\text{m}]$	0.139	0.164	0.131

*1: Artificial Wave *2: El Centro NS $0.5[\text{m/s}]$ ($5.01[\text{m/s}^2]$)

4.2 連続切換えダンパによる基本性能解析 前節で設計されたセミアクティブ免震構造の基本性能を、シミュレーション解析により検討する。地震応答解析結果の一例として、人工地震波を入力した際の時刻歴応答波形を図 8 に示す。なお、図 8 には比較のために減衰比一定 ($\zeta=40[\%]$) の応答解析結果も併記した。図 8 より、応答波形は減衰比一定のものとは大きな差がなく、安定した応答を示していることが確認出来る。また、可変減衰ダンパの減衰比は小変位時に高く、3.1 節で提示した設計目標を満たしていることが確認出来る。一方、最大応答変位は評価関数がゼロになる変位 x_t を超えておらず、本解析では、変位が大きくなるほど減衰比は小さくなっている。つまり、本解析において可変減衰ダンパは大変位時の変位抑制効果は果たしていない。また、表 1 に、人工地震波と El Centro NS 波 $0.5[\text{m/s}]$ ($5.01[\text{m/s}^2]$) をそれぞれ入力した際の最大応答加速度、変位を示す。なお、

表 1 には比較のために減衰比一定 ($\zeta=30, 40[\%]$) とした従来免震構造の応答解析結果を併記した。表 1 より、セミアクティブ免震構造は人工地震波の応答変位こそ従来免震構造に比べ若干大きいものの、その他の応答については良好な値を示していることが確認出来る。特に E1 Centro NS 波を入力した際のセミアクティブ免震構造は、減衰比 30[%]一定程度の応答加速度で減衰比 40[%]一定程度の応答変位を実現している。以上より、セミアクティブ免震構造は従来の免震構造に比べ優れた加速度低減性能、変位抑制性能を示すことが確認出来た。

5. 多段切換えダンパを用いたセミアクティブ免震構造

前章で取り扱った連続切換えダンパは、優れた免震性能を示したものの、連続的に減衰比を変化させる機構は技術的要求が高いと考えられる。そこで本章では、セミアクティブ免震構造の実現性を高めるために、複数の減衰比を段階的・離散的に変化させることのできる「多段切換えダンパ」を用い、その減衰比選定手法及び基本性能解析結果を検討した。

5.1 多段切換えダンパの減衰比の選定手法 本研究における多段切換えダンパとして、減衰比 $\zeta(x)$ を 2, 20, 30, 40[%]の 4 つの値で切換えられる 4 値切換えダンパと、20, 40[%]の 2 つの値で切換えられる 2 値切換えダンパを想定した。ここで減衰比 $\zeta(x)$ は、連続切換えダンパにおける手法を基に、4 値切換えダンパでは、

$$\zeta(x) = \begin{cases} 2.0[\%] & (0 < F_E \leq 0.5 - a) \\ 20[\%] & (0.5 - a < F_E \leq 0.75 - a) \\ 30[\%] & (0.75 - a < F_E \leq 1 - a) \\ 40[\%] & (1 - a \leq F_E) \end{cases} \quad (4)$$

2 値切換えダンパでは、

$$\zeta(x) = \begin{cases} 20[\%] & (F_E \leq 0.5 - a) \\ 40[\%] & (0.5 - a < F_E) \end{cases} \quad (5)$$

と F_E の範囲により場合分けし、切り換えるものとした。ここで、 a は減衰比の切換えのタイミングを調整するパラメータである。図 9, 10 に、それぞれ 4 値, 2 値切換えダンパ用いた場合の、応答変位を x_T で除した無次元量 x/x_T と減衰比 $\zeta(x)$ の関係を示す。図 9, 10 より、減衰比の切換えのタイミングを調整するパラメータ a により、減衰比の分布を調整出来ることがわかる。ここで、前述のゲイン K , 評価関数がゼロになる変位 x_i と同様の検討を行った結果、4 値切換えダンパでは $a=0.15$, 2 値切換えダンパでは $a=0.16$ で良好な免震性能を示したため、以後の基本性能解析ではこれらの値を採用した。

5.2 多段切換えダンパによる基本性能解析 多段切換えダンパを用いたセミアクティブ免震構造の基本性能を、シミュレーション解析により検討する。結果の一例として、4 値切換えダンパを用いたセミアクティブ免震構造に人工地震波を入力した際の時刻歴応答波形を、図 11 に示す。なお、図 11 には比較のために減衰比一定 ($\zeta=40[\%]$) の応答解析結果も併記した。図 11 より、減衰比が断続的に変化しているにも関わらず応答波形は連続的に変化しており、また、減衰比一定の波形とも大きな相違が見られないことから、本免震構造は安定した

Fig. 9 Relationship between displacement and damping ratio (4 step switching)

Fig. 10 Relationship between displacement and damping ratio (2 step switching)

Fig. 11 Time history

挙動を示していると言える。更に、前章の連続切換えダンパを用いた解析結果とも大きな差異は見られず、減衰比の時刻歴変化においても連続切換えダンパの波形を離散化させた形になっている。即ち、技術的に実現性の高い多段切換えダンパを用いた場合でも、連続切換えダンパを用いた場合と同程度の性能が得られると期待できる。

図 12 には、「連続切換えダンパ」、「4 値切換えダンパ」、「2 値切換えダンパ」を用いたセミアクティブ免震構造、ならびに減衰比一定 ($\zeta=30, 40[\%]$) の従来免震構造の最大応答値の比較を示す。図 12 より、セミアクティブ免震構造は従来免震構造と同程度の応答変位で、従来免震構造に比べ応答加速度を低減できていることがわかる。また、人工地震波に比べて応答変位の小さい El Centro NS 波では、減衰比の平均値が大きくなっているが、これは人工地震波での応答加速度低減を目標としたパラメータ設定に依るものだと考えられる。各種可変減衰ダンパの結果を比較すると、加速度低減効果、変位抑制効果ともに、概ね、「連続切換え」、「4 値切換え」、「2 値切換え」の順に優れた性能を示していると言える。これは切換えの段数が多いほど適切な減衰比を与えられるためだと考えられる。ここで、連続切換えダンパが多段切換えダンパに比べ優れた性能を示すものの、前述の通り 4 値切換えダンパを用いることで連続切換えダンパを用いた場合と同程度の免震性能が得られると期待できる。

6. 結論

本報では、やや長周期地震動を見据えた免震構造として、セミアクティブ免震構造を提案し、可変減衰ダンパの減衰比選定方法、基本性能解析の結果を報告した。本報で得られた結果は以下の通りである。

(1) 可変減衰ダンパを用いたセミアクティブ免震構造は、同程度の減衰比を持つ従来の免震構造に比べて優れた免震効果を発揮する。

(2) 減衰比が離散的に変化する「多段減衰ダンパ」を用いたセミアクティブ免震構造においても、応答波形は連続的であり、安定した免震性能を示す。

また、本報での結論を受け、今後は、実際の可変減衰ダイパの特性式を組み込んだ多質点系性能解析、本報では 3[s]とした免震系の固有周期をさらに伸長させた場合の性能解析等に取り組んで行く。更に、本研究で扱った可変減衰ダンパは変位依存型であり、従来の可変ダンパのように電磁弁に頼らなくとも機械的に減衰比を変化させられる見込みがある。そこで、本研究での要求を満足する可変減衰ダンパの開発も視野に入れる。

参考文献

- (1) 井上涼介, やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望, 土木学会論文集, 第 374 号 / I-6(1986), 1-23
- (2) 座間信作, やや長周期地震動, 地震, 第 2 輯, 第 46 巻(1993), 329-342
- (3) 皆川佳祐, 濱崎宏典, 藤田聡, 藤田隆史, 高橋治, 超長周期アクティブ免震構造に関する研究, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2003 CD-ROM 論文集, 231.pdf
- (4) 佐々木友, 藤田聡, 皆川佳祐, 藤田隆史, 高橋治, やや長周期地震動を考慮した超長周期アクティブ免震構造に関する研究, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集(5)(2004), 269-270

Fig. 12 Maximum response value