

論文 可変摩擦ダンパーを有するRC構造の1自由度系モデルによる地震応答解析

白井 和貴*1・佐野 剛志*2・菊地 優*3

要旨: 本論では、所定の変位を超えると摩擦耐力が低下するパッシブ型の変摩擦ダンパー (VFD) を主架構内に有する鉄筋コンクリート (RC) 構造を対象とし、強震時の応答性状とダンパーによる制御効果の把握を目的として、1自由度系モデルによる非線形時刻歴地震応答解析を行った。解析の結果、VFD は塑性率 (応答変位) だけでなく応答せん断力、応答加速度を制御する効果があることが判明した。これにより、既存 RC 構造の補強において VFD を適用することで、ダンパー新設に伴う基礎構造への負荷増加を抑えつつ上部構造の応答を低減できる可能性が示された。

キーワード: 制震補強, 耐震補強, 応答せん断力の制御, パッシブ制振, 可変摩擦力, 軸力制御型ダンパー

1. はじめに

1.1 研究の背景

既存鉄筋コンクリート (RC) 構造の地震時の応答変形を抑制し耐震性を向上するための方法として、耐震補強・制震補強は有用である。これらの補強の際には、上部構造に壁、筋違、ダンパー等の補強要素を増設することが多く行われる。この結果、強震時の各層の応答変位は低減されるが、その反面で応答せん断力と応答加速度については低減が難しく逆に増加する場合も多々ある。

このとき、基礎構造を補強することは一般に困難であるため、上部構造のみを従来の補強方法で強くすればするほど、基礎構造にかかる応力が増加し基礎構造の損傷・破壊を招きかねないという課題がある。実際、2011年東北地方太平洋沖地震における RC 建物の被害分析¹⁾によれば、耐震補強が施された RC 建物で基礎構造の被害が認められ、この要因として上部構造の補強によって基礎構造の破壊が誘発された可能性が指摘されている¹⁾。従って、上記課題の解決に貢献する新しい補強技術が必要といえる。

一方、著者らは近年、ダンパー変位の増加に応じて摩擦耐力が低下するパッシブ型の変摩擦ダンパー (Variable Friction Damper: VFD) を開発し²⁾、筋違型 VFD の装置特性を動的載荷実験により確認している²⁾。この VFD を既存 RC 構造の大地震に対する補強技術として上部構造に適用すれば、応答せん断力と応答加速度を増加させることなく応答変形を低減できる可能性がある。しかし、VFD を RC 構造に適用した場合の地震応答性状とダンパーによる応答制御効果については、これまで検討が行われておらず、未解明であった。

1.2 研究の目的と内容

本研究の目的は、VFD を有する RC 構造を対象として、強震時の応答性状とダンパーによる応答制御効果を把握することである。

本論文では、ダンパー付き RC 構造の 1 自由度系モデルによる非線形時刻歴地震応答解析を行い、VFD による応答変位、せん断力、加速度の低減効果について、他ダンパーの場合との比較を通して検討する。対象とする構造物は、1 次モードが卓越する低層で短周期の RC 主架構の内部に VFD を設置した構造物とする。具体的には、既存の低層建物や土木構造物の耐震性を制震補強によって向上させる際に、ダンパー新設による応答せん断力の増加を抑えつつ応答変位を低減することを意図して VFD を適用する場合を想定している。

2. 可変摩擦ダンパー (VFD) の概要

2.1 VFD の特徴

VFD の特徴を従来型の摩擦ダンパー³⁾ (FD) と比較して図-1 に示す。(a)の FD は、ダンパー変位に依らずほぼ一定の摩擦耐力を発揮する。一方、(b)の VFD は、ダンパー変位が所定値を超えると変位増加に応じて摩擦耐力の骨格曲線が指向点に向かって低下する特徴を有する。

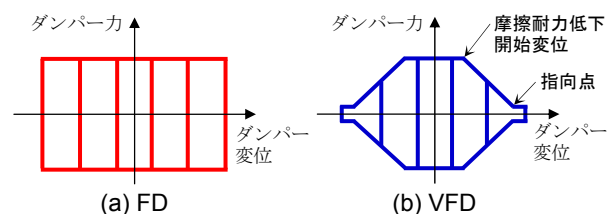


図-1 可変摩擦ダンパー (VFD) の特徴

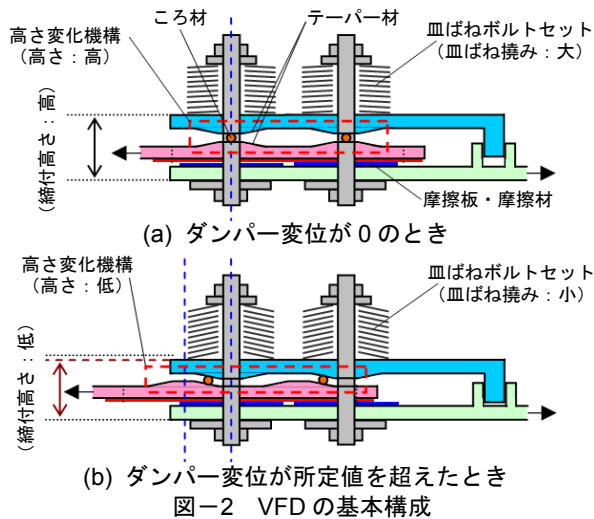
*1 北海道大学 大学院工学研究院 准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 大林組 技術研究所構造技術研究部 主任研究員 工修

*3 北海道大学 大学院工学研究院 教授 博士 (工学)

2.2 VFD の構成

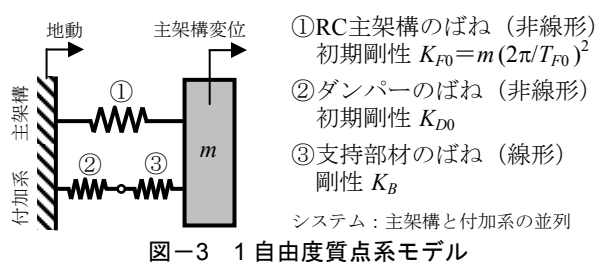
VFD の基本構成²⁾を図-2に示す。摩擦板、摩擦材、皿ばねボルトセットを用いることはFDと同じであるが、さらにVFDではダンパー変位に応じて高さが変化する高さ変化機構を介装する。高さ変化機構は、隆起部が対向したテーパー材の間に摩擦低減用のころ材が挟み込まれており、ダンパー変位が0ときに高さ変化機構の高さ（および皿ばね撓み・軸力）が最大となり、ダンパー変位が所定値を超えて増加すると高さ変化機構の高さ（および皿ばね撓み・軸力）が低下する。このため、ダンパー変位が0のときは摩擦耐力が最大となり、ダンパー変位が所定値を超えると変位に応じて摩擦耐力が低下するダンパー特性が得られる。摩擦面に圧接力を発生させるばね材には皿ばねを採用しているが、皿ばねは概ね線形領域で使用する。



3. 解析方法

3.1 解析概要

RC主架構内にダンパーを有するパッシブ制振構造を想定し、1自由度質点系モデル（図-3）による非線形時刻歴地震応答解析を実施した。付加系⁴⁾（ダンパーと支持部材の直列接続）と主架構を並列配置してシステム⁴⁾を構成した。主架構は1つのモデルに固定し、ダンパーの種類・降伏せん断力・初期剛性、および支持部材剛性を変化させて解析を行った。数値積分はNewmark- β 法（ $\beta=1/4$ ）を用い、時間刻みは0.001 sとした。粘性減衰は減衰定数3%の瞬間剛性比例型とした。なお、解析には



直接使用しないが、想定した構造物はRCラーメン主架構内の各層に筋違型ダンパーを有する5階建て建物（総高さ15 m）であり、質点等価高さは11 mを想定した。

3.2 解析モデル

(1) RC主架構

RC主架構の諸元を表-1に示す。gは重力加速度（ $=9.80665 \text{ m/s}^2$ ）である。主架構の復元力特性はTakeda型とした。降伏後剛性比 α_3 は、主架構塑性率 μ が過度に大きくない応答レベルを想定し $\alpha_3=0.05$ とした。主架構の降伏変位は35.84 mm、ひび割れ変位は2.99 mmとした。

表-1 RC主架構の諸元

名称	記号	値
質点質量	m	4000 t
初期周期（主架構のみ）	T_{F0}	0.3 s
降伏せん断力係数	C_{Fy}	0.4
降伏せん断力	F_{Fy}	mgC_{Fy}
ひび割れせん断力	F_{Fc}	$(1/3)F_{Fy}$
降伏時剛性低下率 （=降伏点割線剛性/初期剛性）	α_y	0.25
降伏後剛性比 （=降伏後剛性/初期剛性）	α_3	0.05
除荷剛性係数	γ	0.4

(2) ダンパーと支持部材

ダンパーと支持部材の諸元を表-2に示す。ダンパーは計3種類とした。1つ目は従来型摩擦ダンパー（FD）とし、ダンパー変位に依らず一定の摩擦耐力を発揮する剛塑性型の復元力特性を与えた。2つ目は可変摩擦ダンパー（VFD）とし、ダンパー変位が所定値を超えると変位増加に応じて摩擦耐力が低下する復元力特性を与えた。3つ目はノーマルバイリニア（NB）とし、鋼材ダンパーを想定してFDと比べてダンパー初期剛性を低くし降伏後も若干の剛性を有するモデルを設定した。

解析はCase1、Case2の2ケースを実施した。Case1はダンパー初期剛性 K_{D0} と支持部材剛性 K_B を固定し、ダンパー降伏せん断力 F_{Dy} のみを変化させた場合である。Case2は、 F_{Dy} を変化させる際に同時に F_{Dy} に比例させて K_{D0} と K_B も変化させた場合である。FDとVFDは K_{D0} を ∞ に設定した。付加系初期剛性 K_{A0} は式(1)で与えられ、表-2からNBの K_{A0} はFDとVFDの K_{A0} に対して常に0.4倍の剛性を設定したことになる。

$$K_{A0} = \{(1/K_{D0}) + (1/K_B)\}^{-1} \quad (1)$$

VFDの可変特性は次のように設定した。摩擦耐力低下が開始するダンパー変位は、FDとの応答性状の違いがより明瞭に表れるように文献2)よりも小さく設定し5 mmとした。なお、VFDはダンパー変位が5 mm以内のときはFDと同じ挙動を示す。摩擦耐力低下後に目指す

指向点のダンパーせん断力は $0.1 F_{Dy}$ とした。指向点変位 d_D (摩擦耐力低下後に目指す指向点のダンパー変位) は、事前に予備地震応答解析を行い 3.3 で述べる各入力波に対して最大応答変位が d_D を上回らないように設定した。具体的には、 $(F_{Dy}/F_{Fy})=[0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5]$ に応じて Case1 では $d_D=[135, 125, 120, 110, 110, 105, 105, 100, 100, 100]$ mm, Case2 では $d_D=[140, 130, 120, 110, 100, 90, 80, 70, 60, 50]$ mm と設定した。

表-2 ダンパーと支持部材の諸元

名称 (記号)	FD, VFD	NB
ダンパー降伏せん断力比 (F_{Dy}/F_{Fy})	0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5	
ダンパー初期剛性比 (K_{D0}/K_{F0})	∞	Case1 : 0.1 Case2 : $0.5(F_{Dy}/F_{Fy})$
ダンパー降伏後剛性比 (K_{Dy}/K_{D0})	0	0.02
支持部材剛性比 (K_B/K_{F0})	Case1 : 0.2 Case2 : (F_{Dy}/F_{Fy})	Case1 : 0.4 Case2 : $2(F_{Dy}/F_{Fy})$

3.3 入力地震動

入力波として、位相特性が異なる計 7 波の告示スペクトル適合波 (極稀, 工学的基盤) を 1.5 倍に増幅した波形を用いた。位相特性は、乱数 (A, B, C) 位相 3 波, 観測記録 (1940EICentroNS, 1968 八戸港湾 NS, 1995JMA 神戸 NS, 1995JMA 神戸 EW) 位相 4 波とした。入力波

の加速度応答スペクトルと加速度時刻歴を 図-4 に示す。

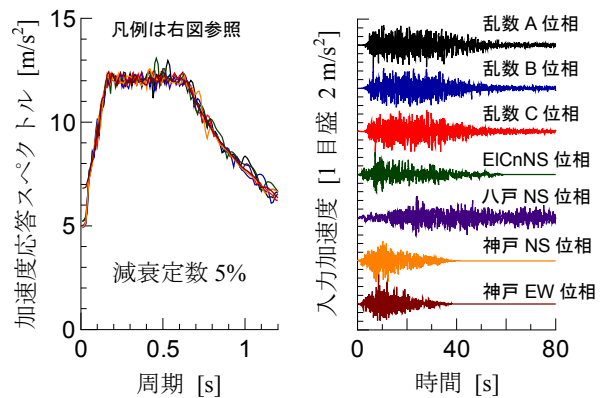


図-4 入力波の応答スペクトル(左)と時刻歴波形(右)

4. 解析結果

4.1 応答せん断力-応答変位関係

地震応答解析から得られた各ダンパーの応答せん断力-応答変位関係の比較例 (Case1, $F_{Dy}/F_{Fy}=0.2$, 乱数 A 位相波) を 図-5 に示す。(a)が FD, (b)が VFD, (c)が NB であり, 上段が主架構, 中段が付加系, 下段がシステムを表す。破線は VFD の正負最大せん断力を示す。

(b)中段のグラフによれば, VFD の付加系ではダンパー変位が所定値を超えると負担せん断力が低下する可変型の復元力特性モデルが表現できていることが確認できる。(a)~(c)下段のグラフによれば, システムの応答せん断力は, 顕著な差ではないものの, VFD が最も小さく NB が最も大きい (破線を参照)。この要因は, (a)~(c)中段の付加系の復元力特性が示す形状から容易に理解できる。

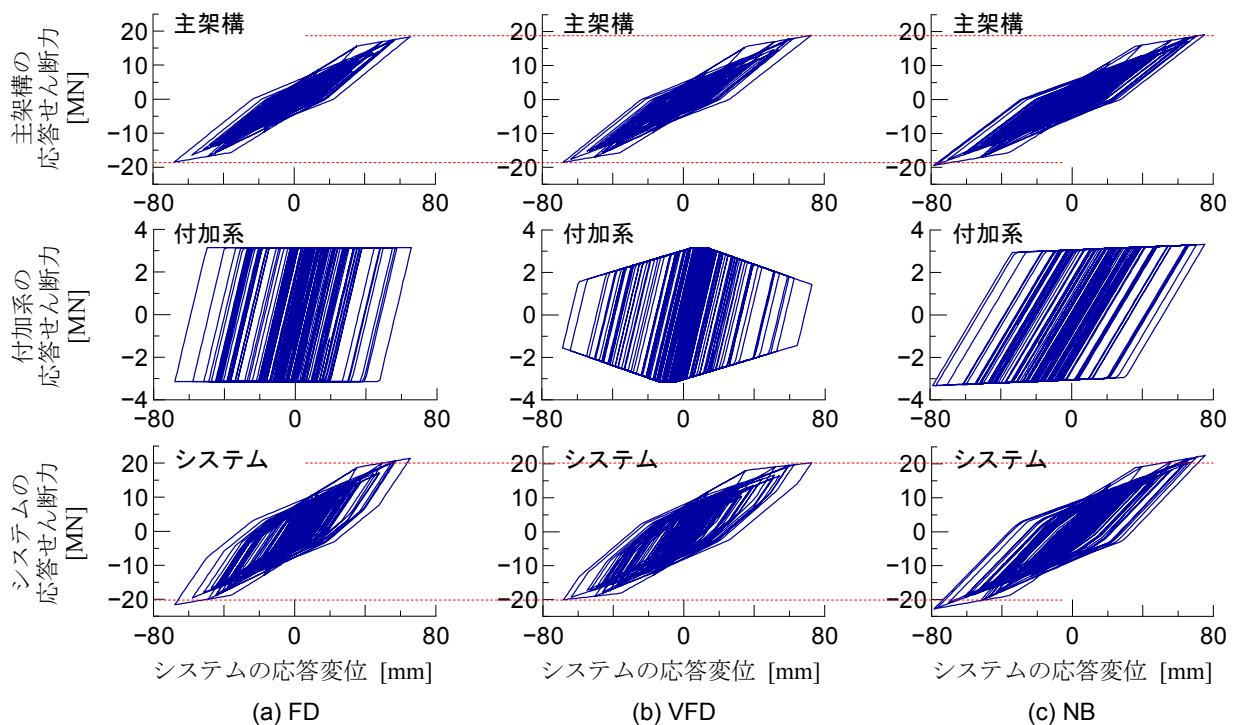


図-5 応答せん断力-応答変位関係の比較 (Case1, $F_{Dy}/F_{Fy}=0.2$, 乱数 A 位相波)

4.2 時刻歴応答

FD と VFD の時刻歴応答波形の比較例 (Case1, $F_{Dy}/F_{Fy} = 0.2$, 乱数 A 位相波) を図-6 に示す。上段が付加系の応答せん断力, 中段がシステムの応答せん断力, 下段がシステムの応答変位である。横軸は 12~18 s の時間範囲を表示している。

上段のグラフによれば, FD では付加系の応答せん断力がダンパー摩擦耐力と一致し頭打ちになっている時間の長さは概ね 0.2~0.3 s 程度であるが, これに対して VFD では付加系の応答せん断力がピーク値をとる時間は短い。中段のグラフによれば, システムの応答せん断力のピーク値は FD と比べて VFD の方が若干小さい。一方, 下段のグラフによれば, システムの応答変位のピーク値は VFD の方が FD よりも若干大きい。

4.3 最大応答値

(1) Case1 の解析結果

各ダンパーについて Case1 (ダンパー初期剛性と支持部材剛性を固定し, ダンパー降伏せん断力を変化させた場合) の解析から得られた最大応答値の比較を図-7 に示す。(a)は主架構の最大応答塑性率 (=最大応答変位/降伏変位), (b)はシステムの最大応答せん断力, (c)はシステムの最大応答加速度であり, 上段は各地震波の最大

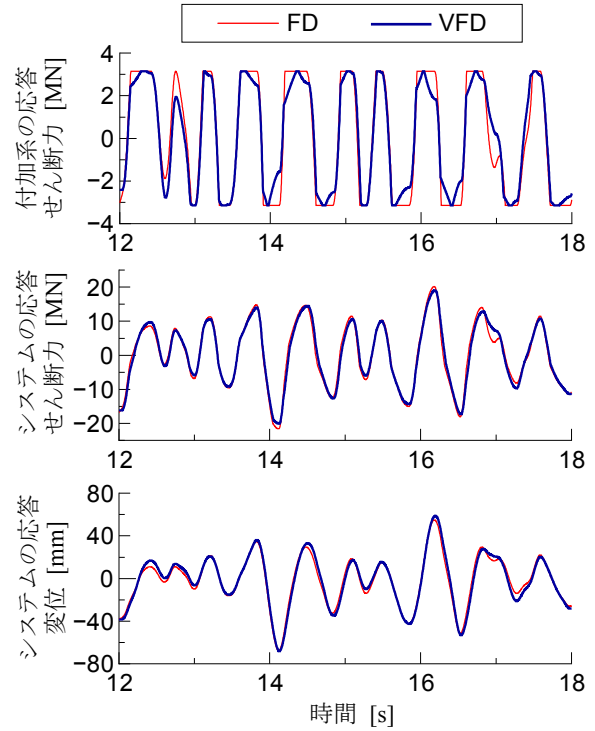


図-6 時刻歴応答波形の比較 (FD, VFD)
(Case1, $F_{Dy}/F_{Fy} = 0.2$, 乱数 A 位相波)

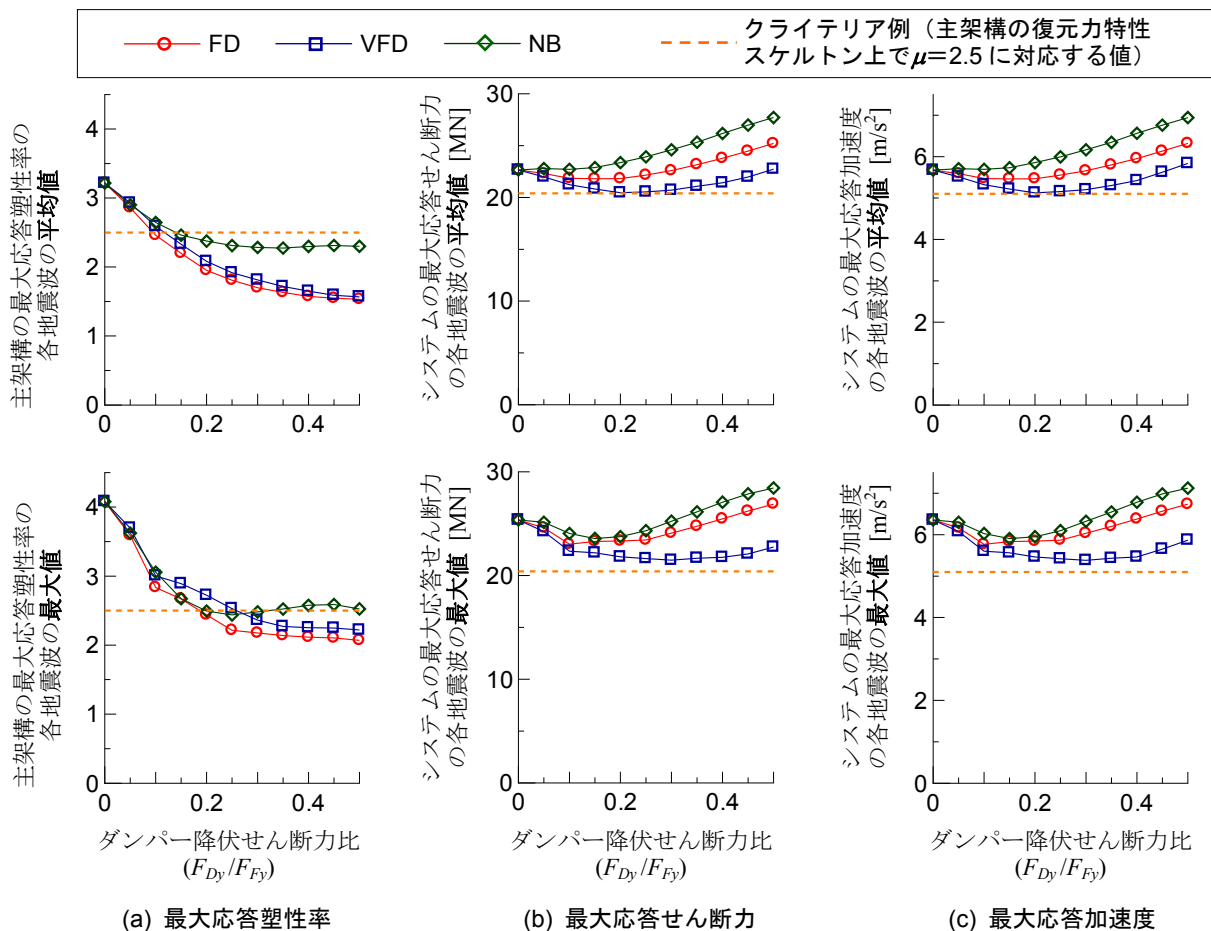


図-7 最大応答値の比較 (Case1)

応答値の平均値，下段は各地震波の最大応答値の最大値を示し，全て横軸をダンパー降伏せん断力比(F_{Dy}/F_{Fy})で表示している。破線については本節(3)で述べる。

図-7(a)によれば，最大応答塑性率は，どの(F_{Dy}/F_{Fy})においてもFDが最も小さい値を示している。この要因として，FDはNBよりも初期剛性が高くVFDよりも1サイクル当たりのエネルギー吸収量が大きいことが挙げられる。また，各ダンパーともに(F_{Dy}/F_{Fy})の増加に伴い最大応答塑性率が概ね低下しており，その勾配は(F_{Dy}/F_{Fy})が大きいくほど緩やかである。ただし厳密には，NBでは(F_{Dy}/F_{Fy})が0.25~0.35を超えると塑性率が僅かに増加に転じている。この一因として，NBは付加系初期剛性がFD・VFDと比べて低いため，先行してダンパー降伏せん断力の最適値⁹⁾を超えたことが挙げられる。(b)によれば，最大応答せん断力は，どの(F_{Dy}/F_{Fy})においてもVFDが最も小さく，NBが最も大きい。また，各ダンパーとも(F_{Dy}/F_{Fy})の増加に伴い最大応答せん断力が概して一旦低下した後に上昇に転じている。この上昇に転じる(F_{Dy}/F_{Fy})の値はVFDが最も大きい。(c)によれば，各ダンパーの最大応答加速度の変化性状は(b)の最大応答せん断力の場合とほぼ同じ傾向を示している。

(2) Case2の解析結果

各ダンパーについてCase2(ダンパー降伏せん断力を変化させる際にそれに比例させて付加系初期剛性も同時に変化させた場合)の解析から得られた最大応答値の比較を図-8に示す。各グラフの構成はCase1(図-7)と同様である。

(a)によれば，応答変位(塑性率)については各ダンパーとも，ダンパー降伏せん断力・付加系初期剛性を同時に大きく設定するほど低減(ほぼ単調減少)している。(b)(c)によれば，応答せん断力と応答加速度については，VFDではダンパー降伏せん断力・付加系初期剛性を同時に大きく設定するほど低減(概ね単調減少)している。一方，FDとNBでは，応答せん断力と応答加速度は単調減少しておらず，VFDよりも制御効果が低い。

全体的に，Case2では，Case1で認められた性状がより明瞭に示されている。ただし，Case1と比べてCase2の方が，(F_{Dy}/F_{Fy})が0.2を超える範囲で制振効果が高く，0.2より小さい範囲で制振効果が劣る。これは，制振効果に影響を及ぼす付加系初期剛性 K_{A0} の値を，(F_{Dy}/F_{Fy})が0.2を超える範囲ではCase2の方を大きく，0.2より小さい範囲ではその逆に設定したためである(表-2)。

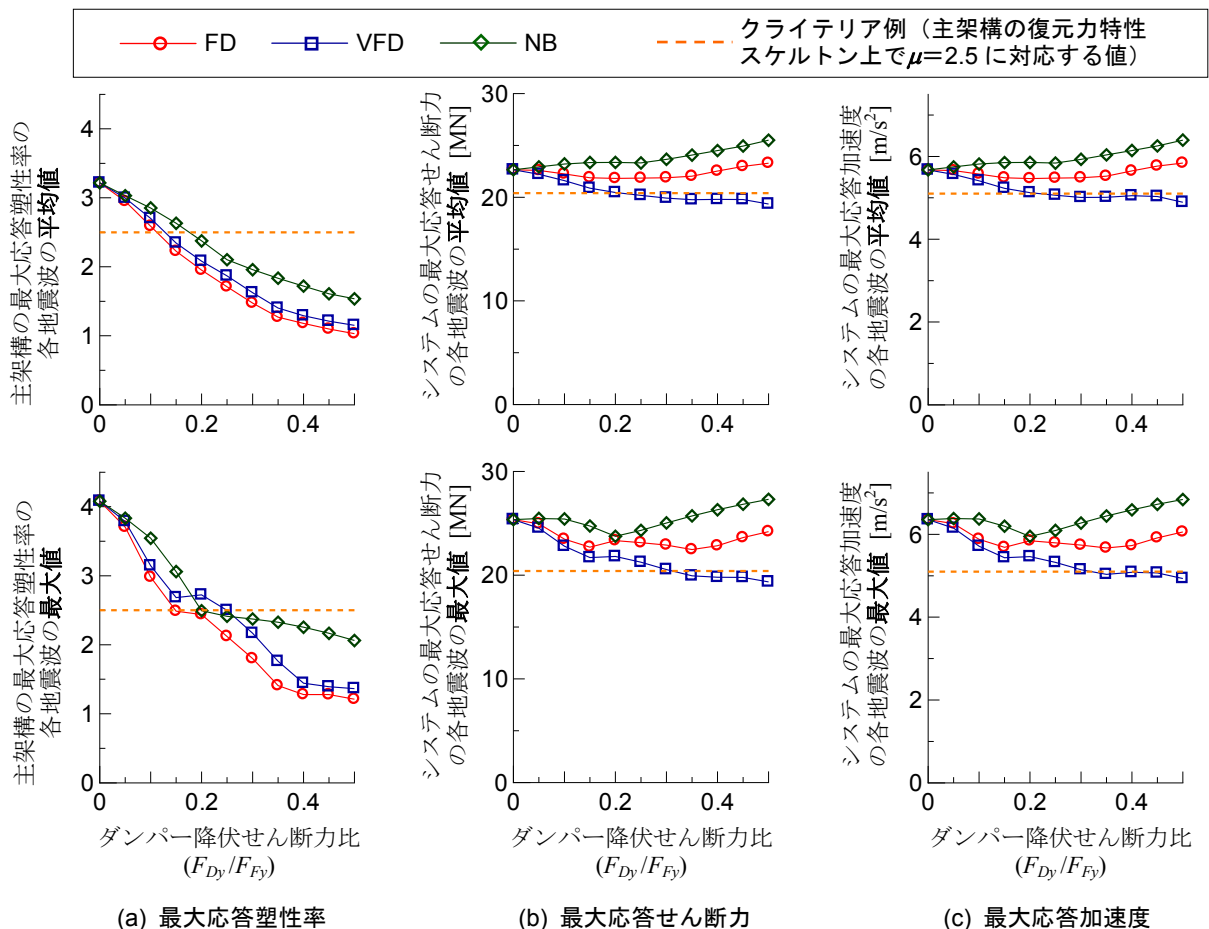


図-8 最大応答値の比較 (Case2)

(3) クライテリア例による VFD の制御効果の説明

VFD の制御効果を説明するため、RC 主架構のみ（ダンパー無し）の復元力特性スケルトン上に、ある主架構塑性率 μ の応答点を設定し、この点をクライテリアとして用いることを考える。これは、既存 RC 構造の制震補強を検討する際に、ダンパー新設に伴う基礎構造への負荷増加を抑制することを重視し、ダンパー無しの状態のある μ における応答せん断力（および応答変形）以下に補強後の応答を抑えることを目標とする場合を想定している。

ここでは、VFD の効果をより分かり易く示すために、 $\mu=2.5$ という値をクライテリア例として用いることとする。なお、本解析では $\mu=2.5$ は質点等価高さ 11 m より変形角 1/123 rad に相当する。このクライテリア（ダンパー無しの状態の $\mu=2.5$ ）に対応する応答値を、図-7、図-8 に破線で重ねて示す。ここで、応答加速度についてはせん断力を質点質量で除した換算値を表す。このクライテリア（破線）を、ダンパー量(F_{Dy}/F_{Fy})を変化させることで満足出来るか否かを各ダンパーについて判定する。

図-7、図-8 によれば、応答塑性率（変位）については、各ダンパーとも、ダンパー降伏せん断力比(F_{Dy}/F_{Fy})をある程度増加すればクライテリアである破線以下に抑えることは十分に可能である。しかし、応答せん断力と応答加速度については、FD と NB では(F_{Dy}/F_{Fy})を幾ら増加してもクライテリアを下回ることは困難である。これに対して、VFD では Case2 で(F_{Dy}/F_{Fy})を概ね 0.35 以上にすれば応答せん断力と応答加速度のクライテリアも満足させることが可能である。

以上より、VFD は強震時の RC 構造の応答変位だけでなく応答せん断力と応答加速度の低減にも有効であることが解析的に示されたといえる。

4.4 VFD の適用における留意点

VFD の適用の際には、ある応答振幅を想定して VFD の可変特性を設定する必要がある。このとき、想定を上回る入力を受けてダンパー変位が指向点を超える場合には、VFD による制御効果が低下することに留意が必要である。また、VFD の応答せん断力の低減効果は、RC 主架構の特性、例えば降伏後剛性にも依存する。本解析では主架構降伏後剛性比を $\alpha_3=0.05$ としたが、 α_3 がさらに小さく 0 に近いときには VFD の制御効果が低下する可能性があることを付記しておく。

5. まとめ

本研究では、ダンパー変位の増加に応じて摩擦耐力が低下する可変摩擦ダンパー（VFD）を有する鉄筋コンクリート（RC）構造の強震時の応答性状と制御効果を把握するため、1 自由度系モデルの非線形時刻歴解析を行っ

た。応答変位、応答せん断力、応答加速度の低減効果について、VFD、従来型摩擦ダンパー（FD）、鋼材ダンパーを想定したノーマルバイリニア型ダンパー（NB）をそれぞれ設置する場合について比較検討した。本解析の範囲内で得られた知見を以下に纏める。

- (1) 応答変位（塑性率）の低減効果は、同じダンパー降伏せん断力で比べた場合、FD が最も高い。
- (2) 応答せん断力と応答加速度の低減効果は、同じダンパー降伏せん断力で比べた場合、VFD が最も高く NB が最も低い。
- (3) 各ダンパーとも、ダンパー降伏せん断力・付加系初期剛性を同時により大きく設定するほど、応答変位（塑性率）の低減に効果がある。
- (4) VFD では、ダンパー降伏せん断力・付加系初期剛性を同時により大きく設定するほど、応答せん断力と応答加速度の低減に効果がある。一方、このような低減効果は FD と NB では得られない。

以上より、VFD は強震時の RC 構造の応答変位だけでなく応答せん断力と応答加速度の低減にも有効であることを明らかにした。

既存 RC 構造の補強に VFD を適用すれば、ダンパー新設に伴う応答せん断力の増加を生じさせずに応答変形を制御できるため、基礎構造への負荷を抑制しつつ上部構造の耐震性を向上することが可能になると期待している。ただし、VFD の可変特性を設定する際には、想定を上回る入力・応答レベルでは制御効果が低下することに留意が必要である。

参考文献

- 1) 日本建築学会 構造委員会 鉄筋コンクリート構造運営委員会：東日本大震災における鉄筋コンクリート建物の被害と分析，2012 年度日本建築学会大会（東海）構造部門（鉄筋コンクリート構造）パネルディスカッション資料，pp.11-19, 57-64, 2012.9
- 2) 白井和貴，佐野剛志，鈴木康正，蔭山満，菊地優：変位依存型の可変減衰力特性を有する摩擦ダンパーの開発，日本建築学会技術報告集，18, 38, pp.85-90, 2012.2
- 3) 佐野剛志，鈴木康正，勘坂幸弘：制震・免震用ブレーキダンパーの紹介と実建物への適用事例，大林組技術研究所報，67, pp.1-4, 2003
- 4) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第2版，2005.9
- 5) 白井和貴，蔭山満，五十子幸樹，井上範夫：履歴型ダンパーを有する鉄筋コンクリート造架構の等価線形系伝達関数に基づく最適ダンパー降伏耐力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，76, 666, pp.1433-1442, 2011.8