

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	硬化型非線形復元力をもつ制振架構の振動応答
Title(English)	Vibration Response of a Passively Controlled Frame Having Nonlinear Restoring Force of Hardening Type
著者(和文)	佐藤大樹, 舩木 尚己, 川股 重也
Authors(English)	Daiki Sato, Naoki Funaki, Shigeya Kamata
出典(和文)	日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 11, , pp. 1649-1654
Citation(English)	, Vol. 11, , pp. 1649-1654
発行日 / Pub. date	2002, 11

硬化型非線形復元力をもつ制振架構の振動応答 Vibration Response of a Passively Controlled Frame Having Nonlinear Restoring Force of Hardening Type

佐藤大樹¹, 船木尚己², 川股重也³

¹東京工業大学人間環境システム専攻, 大学院生 工修

Daiki Sato, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, daiki@enveng.titech.ac.jp

²東北工業大学建築学科, 講師 博士(工学)

Naoki Funaki, Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, funaki@tohtech.ac.jp

³東北工業大学大学院建築学専攻, 教授 工博

Shigeya Kawamata, Graduate School, Tohoku Institute of Technology, kawamata@tohtech.ac.jp

SUMMARY

In this paper, a new form of vibration controlled frame having nonlinear restoring force of hardening type is proposed to produce uniform interstory drift and provide efficient energy dissipation by the dampers. In this purpose, a viscoelastic damper with displacement limiter is devised, in which the latter limits the stroke of the damper within a specified value. In a small range of the damper stroke, usual viscoelastic resistance is exerted. For large input, excessive displacement of the damper is avoided and the story stiffness increases by the action of limiter.

The purpose of this paper is to investigate the vibration response characteristics of a 3-storied test frame provided with the dampers based on test and to verify the effectiveness of the proposed vibration control system.

キーワード: 制振フレーム, 変位リミッター, 振動台試験, 衝撃応答

Key words: Vibration controlled frame, Displacement limiter, Shaking table test, Impulsive response

1 はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震以降、建築物には、大地震発生の際に人命を保護するだけでなく、機能を維持することや、構造体および非構造体の損傷を軽減することが要求されるようになった。このような要求に応えるものとして、免震構造と並んで、建物の中にエネルギー吸収装置（ダンパー）を組み込んだ制振構造が注目され始め、実建物への適用も進んでいる。

筆者らは、新たな制振システムとして、建物の層間変位を均一化して、エネルギー消費を能率化する、硬化型非線形復元力をもつ制振架構（以下、硬化型制振架構と呼ぶ）を提案した。また、硬化型制振架構を可能とする制振装置として、粘弾性ダンパーの変位ストロークに変位制御機構を併設した、変位リミッター機構をもつ粘弾性ダンパー（以下、変位リミッター付ダンパーと呼ぶ）を作製した¹⁾。このダンパーのストロークが小さい範囲、つまり、速度が最大となる付近で、速度依存型のダンパーである粘弾性ダンパーによって振動エネルギーを吸収する。一方、ダンパ

ーのストロークが大きくなると、変位リミッターが作動することによって、ダンパーの過大変形を防止するとともに、ダンパーを組み込んだブレース材がフレームと一体となって抵抗し、その層の剛性を高めることができる。

変位リミッター機構を多層フレームに導入した場合、入力された地震動によって大きな層間変位を生じた層から、次々と変位リミッターが作動し、剛性が増加するため、各層の層間変位が均一化され、ダンパーによるエネルギー消費を効率良く行うことができると期待される。

本論は、提案した硬化型制振架構の振動応答特性を明らかにすることを目的とし、3 層のフレーム試験体に変位リミッター付ダンパーを組み込んで行った、静的加力試験および振動台による加振試験の結果について報告する。

2 試験体概要

2.1 3 層フレーム試験体

本論で対象とした試験体は、総質量 1364kg、スパン 1750mm、階高 1025mm の 3 層の鋼製フレームである。試

験体の形状および寸法を Fig.1(a),(b)に示す。

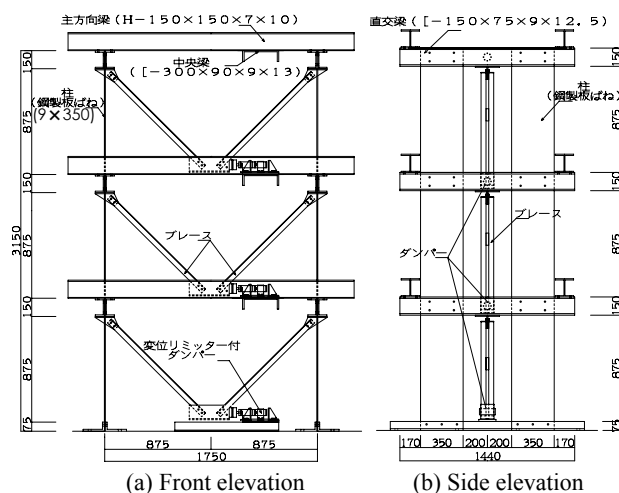


Fig.1 3-storied test frame [unit:mm]

柱に幅 350mm、厚さ 9mm の鋼製板ばねを使用し、加力方向の梁には、H 形鋼を用いることにより、せん断形のフレームとなっている。また、直交方向の梁は、2 つのみぞ形鋼を使用し、柱の板ばねを挟む形で固定されている。

V 字型のブレース先端と、加力方向の梁に固定された中央梁との間にダンパーを組み込むことができる。ダンパーは、フレームの変形の際に生じる、ブレースと中央梁との相対変形によって水平方向に駆動される。

2.2 変位リミッター付ダンパー

変位リミッター付ダンパーの形状および寸法を Fig.2 に示す。

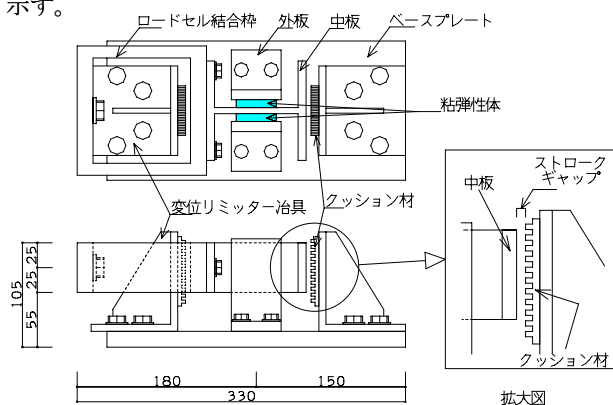


Fig.2 Viscoelastic damper having displacement limiter [unit:mm]

V 字型のブレース先端に、ダンパーの荷重を計測するためのロードセルを介して、ダンパーの中板を取り付ける。また、外板と変位リミッター治具が固定されたベースプレートは、フレームの中央梁に取り付ける。

ダンパーの外板と中板の間にアクリル系高分子材料の粘弾性体を、長さ 40mm、高さ 20mm、厚さ 8mm の寸法で充填している。ダンパーの設置状況を Photo.1 に示す。

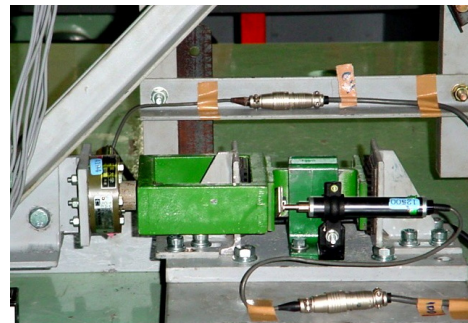


Photo.1 Installation of damper

ダンパーには、過大な変形を防止する、変位リミッター機構が設けられている。ダンパーが変位し、中板が変位リミッター治具に当たると、ダンパーはそれ以上変位せず、変位リミッターが作動する。変位リミッターが作動すると、ブレースとフレームが一体化することによって、構造形式がラーメン構造からトラス構造へと変化し、その層の剛性を高めることができる。

変位リミッターが作動する際の衝撃を緩和するために、変位リミッター治具の中板との接触面に、厚さ 8mm で、楕円断面のクッション材を貼り付けている。中板がクッション材に接するまでの可動範囲をストロークギャップ (Gap) と呼ぶ。ギャップ幅は、変位リミッター治具を移動することにより自由に変更することができる。

2.3 変位リミッター機構の作用

Fig.3 は、フレーム試験体への入力が次第に大きくなった場合のダンパーの状況と、変位リミッター作動による層剛性の変化を表わしたものである。

フレーム各層の層間変位がストロークギャップの範囲内に留まっている場合、変位リミッターは作動せず、フレームは粘弾性ダンパーのもつエネルギー吸収能力を利用

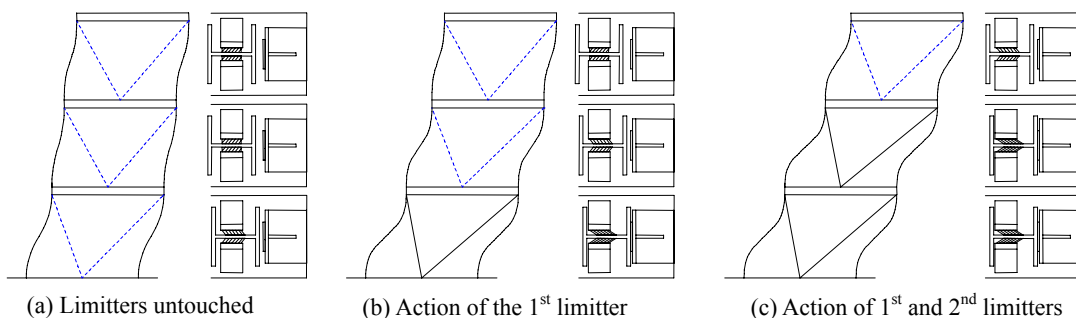


Fig.3 Change of the story stiffness with the action of displacement limiters

する制振構造として機能する (Fig.3(a))。Fig.3(b)は、1 層に変形が集中し、1 層のみ変位リミッターが作動した状況を表わしている。この時、1 層がトラス機構を形成して剛性が高まるため、その層の変形の増大が抑制される。Fig.3(c)は、1, 2 層の変位リミッターが作動した場合を示している。下層の変位リミッターが作動することにより最上層に強制される変形が増大し、各層の層間変位が均一化することによって、全層のダンパーをより効果的に機能させることができる。

3 静的加力試験

変位リミッターが作動した場合の、フレームの剛性変化を把握するために、静的加力試験を行った。試験結果の代表例として、3 層の水平加力試験より得られた荷重-層間変位曲線を Fig.4 示す。各層のストロークギャップは 6mm に設定している。

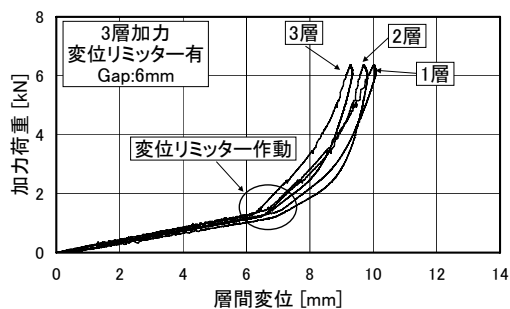


Fig.4 Load-interstory drift curve

変位リミッターが作動し、クッション材が圧縮されることで、層間変位 6mm 付近から剛性が徐々に増加しているのがわかる。また、変位リミッター作動後の P- δ 曲線がループを描いていることから、クッション材の圧縮変形に伴いエネルギー吸収が行われていることが確認できる。

4 正弦波加振試験

4.1 試験条件

提案した制振システムの動的な応答特性を明らかにするために、振動台による正弦波加振試験を行った。本論で行った正弦波加振試験は、振動台の加速度最大値(以下、加振レベルと呼ぶ)を一定にして、加振振動数を変化させる方法で行った。

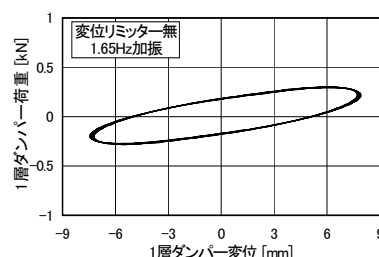
ここでは、変位リミッターの有無による応答特性の差について述べる。Table 1 に比較の対象とするケースの試験条件を示す。

Table 1 Test parameters

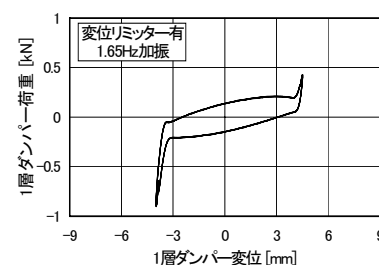
	粘弾性 ダンパー	変位リミッター	加振レベル
Case1	有	無	20gal
Case2		有 (Gap:3mm)	

4.2 履歴ループの比較

Fig.5(a),(b)に Case1 および Case2 の試験より得られた、加振振動数 1.65Hz での、1 層ダンパーの変位-荷重履歴ループを示す。



(a) Case without displacement limiter



(b) Case with displacement limiter

Fig.5 Relation between load and displacement of damper

Fig.5(b)の変位リミッターを付けた場合の試験結果より、ダンパーの変位が 3mm 以下の範囲の履歴ループは、部分楕円を描き、粘弾性抵抗により振動エネルギーを吸収していることがわかる。また、ダンパーの変位が 3mm を越えた付近から変位リミッターが作動することでダンパーの抵抗が増大し、変位は小さく抑えられている。これは、ブレースが梁、柱と結合され、トラス部材としての弾性抵抗が生じたためと考えられる。また、変位リミッター作動後もクッション材によりエネルギー吸収が行われていることが確認できた。

4.3 応答変位の比較

Fig.6 に変位リミッターが有る場合と無い場合の各層の層間変位を比較する。層間変位は、それぞれの場合の共振点での値をプロットした。

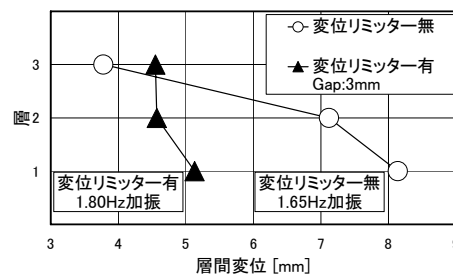


Fig.6 Interstory drift

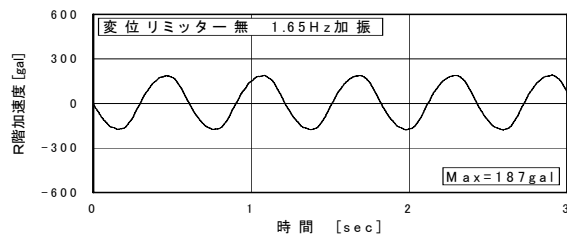
Fig.6 より、変位リミッターを付けていないフレームでの試験では、1, 2 層に変形が集中しているのに対し、変

位リミッターを付けることにより変形量が小さく抑えられ、かつ層間変位が均一化されていることが確認できる。

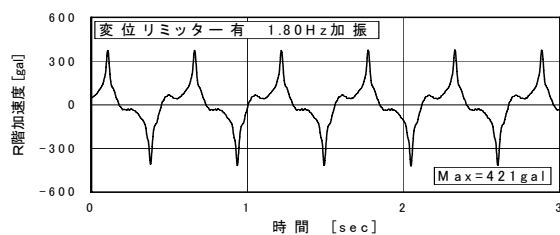
また、変位リミッターが作動し、剛性が増加したため、共振振動数が 1.65Hz から 1.80Hz に増加した。

4.4 応答加速度の比較

Fig.7 に共振点での最上階の加速度時刻歴波形を示す。



(a) Case without displacement limiter

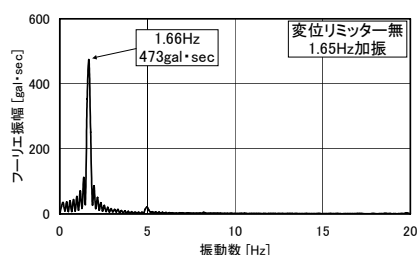


(b) Case with displacement limiter

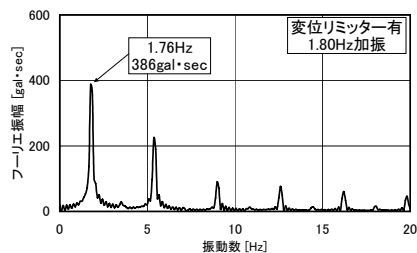
Fig.7 Time history of acceleration of top floor

Fig.7(b)の変位リミッターを付けたフレームの試験では、変位リミッターが作動した際の衝撃により、加速度がパルス的な応答を示し、応答加速度の値も、Fig.7(a)の変位リミッターを付けていない場合の値と比べて、2倍以上に増加していることが確認できる。

応答加速度に含まれる周波数成分を調べるために、Fig.7(a),(b)の最上階の加速度波形に対し、フーリエ解析を行った結果をそれぞれ Fig.8(a),(b)に示す。



(a) Case without displacement limiter



(b) Case with displacement limiter

Fig.8 Fourier spectrum of acceleration of top floor

Fig.8(a)より、変位リミッター無の加速度に含まれる周波数成分は、共振成分のみが卓越しているのに対し、Fig.8(b)の変位リミッター有の加速度に含まれる周波数成分は、共振成分以外のピークを高振動数側に見ることができる。また、(a)と(b)の共振成分の値を比較すると、(b)の変位リミッター有の値の方が、(a)の変位リミッター無の値に比べて小さな値を示していることが確認できる。これは、変位リミッターが作動する事により、応答加速度の最大値は、高周波成分の影響により増加するが、共振成分の値は逆に低減することを示している。

5 地震波加振試験

5.1 試験条件

本研究で用いた入力波は、1995 年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 NS 記録（神戸 NS）、1978 年宮城沖地震 東北大建設系 1 階 NS 記録（宮城 NS）、1940 年 Imperial Valley 地震 El Centro NS 記録（El Centro NS）である。Table 2 に計測された振動台の加速度最大値を示し、Table 3 に実施したフレームの条件を示す。なお、入力波は、フレームの固有周期を考慮して時間軸を 1/2 に縮小している。

Table 2 Maximum acceleration of input

加振レベル	神戸 NS	宮城 NS	El Centro NS
小	42.9gal	18.3gal	48.8gal
中	81.1gal	41.7gal	103gal
大	197gal	99.4gal	209gal

Table 3 Test parameters

	粘弾性 ダンパー	変位リミッター	加振レベル
Case1	無	無	小
Case2	有		中
Case3			大
Case4		有	中
Case5		Gap:3mm	大

5.2 応答倍率

Fig.9 に振動台の変位で各層の層間変位を基準化した層間変位応答倍率を示し、Fig.10 に振動台の加速度で各階の加速度を基準化した加速度応答倍率を示す。例として神戸 NS 波で加振した試験より得られた結果を示す。

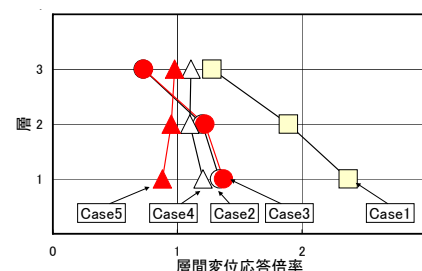


Fig.9 Response ratio of interstory drift (Kobe NS)

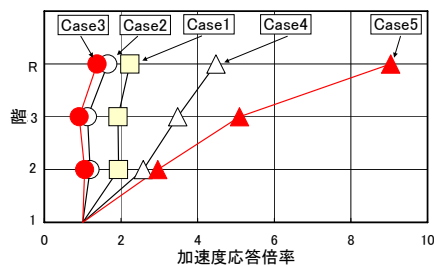


Fig.10 Response ratio of acceleration (Kobe.NS)

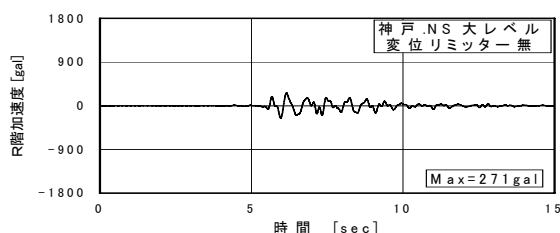
Case1 と Case2 (又は、Case3) の比較より、ダンパーを組み込むことによって、層間変位 (Fig.9) および加速度 (Fig.10) の応答倍率が低減していることが確認できる。

Fig.9 より、変位リミッターを付けることで、さらに層間変位応答倍率を低減し、かつ各層で均一の値となることがわかる。また、Case4 と Case5 の比較より、加振レベルが大きいほど、より応答倍率が低減していることがわかる。

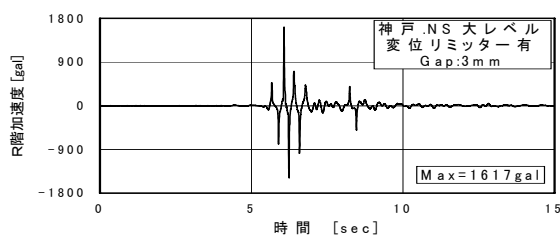
Fig.10 より、変位リミッターの作動した際の衝撃により、加速度応答倍率は著しく上昇していることが確認された。

5.3 応答加速度の比較

Fig.11(a),(b)に、Case3 及び Case5 の試験より得られた最上階の加速度時刻歴波形を示す。例として入力波が神戸.NS の場合を示す。また、Fig.11(a),(b)の加速度波形に対してフーリエ解析を行った結果を Fig.12 に示す。



(a) Case without displacement limiter



(b) Case with displacement limiter

Fig.11 Time history of acceleration of top floor (Kobe.NS)

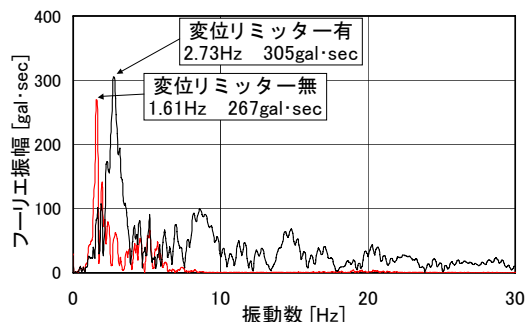


Fig.12 Fourier spectrum of acceleration of top floor (Kobe.NS)

Fig.11 の(a)と(b)を比較すると、Fig.11 (b)の変位リミッターを付けたフレームの最上階加速度の値は、変位リミッターが作動した衝撃により、大幅に増大していることがわかる。しかし、正弦波加振試験の結果と同様に、加速度はパルス的な応答を示しているため、高周波成分が多く含まれていることが Fig.12 より確認できる。また、Fig.12 において卓越している振動数が、1.61Hz から 2.73Hz に増加していることがわかる。その値を比較してみると、変位リミッター有の共振成分の値は、応答加速度が大幅に増大しているにも関わらず、変位リミッター無の共振成分と比べて、さほど増加していない。これは、変位リミッターの効果により、フレームの固有周期が時々刻々と変化する事により、入力波との共振を低減しているためだと思われる。

5.4 層せん断力の比較

神戸.NS 波の大レベルに対する、各層の最大層せん断力をプロットしたものを Fig.13 に示す。層せん断力は、試験より得られた、各階の絶対加速度測定値から算定した。

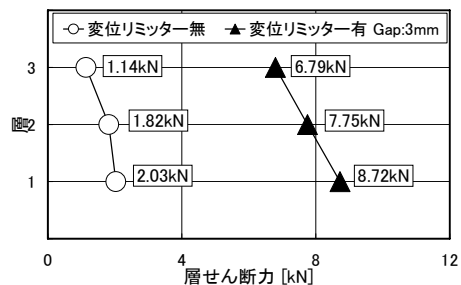


Fig.13 Shear force (Kobe.NS)

変位リミッターが作動したことにより、加速度最大値が増加したため、層せん断力も大きく上昇していることが確認できる。

フレームの降伏層せん断力に対する余力度を検討する際には、変位リミッターが作動することにより、フレームの構造形式が変化し、降伏耐力が増加することを考慮する必要がある。つまり、変位リミッターが作動するまでは、純粋なラーメン構造であり、構造物に入る層せん断力は、主として柱の曲げ変形で抵抗するが、変位リミッターが作動すると、フレームはトラス構造へと変化し、層せん断力をブレースの圧縮又は引張軸力で抵抗する。

Table 4 に本報で使用した試験体の降伏耐力を計算した結果と、加振試験より得られた 1 層の最大層せん断力に対する試験体の降伏余力度を示す。変位リミッターの付かないフレームの降伏耐力は、柱材端の曲げ降伏で算定し、変位リミッター付きのフレームの降伏耐力はブレース材の引張降伏で算出した。なお、変位リミッター付きのフレームの降伏層せん断力は、ブレースから柱に伝達される軸力による、柱材の座屈についても考慮した値である。

Table 4 Story shear at yield point and safety factor

変位 リミッター	降伏 層せん断力	最大 層せん断力	降伏余力度
無	10.0kN	2.03kN	79.7%
有	249kN	8.72kN	96.5%

変位リミッターが作動することにより、フレームの降伏層せん断力が大きく増加している。それにより、最大層せん断力は増加するが、フレームの降伏耐力も大きく増大するため、降伏に対する余力度は、変位リミッターを付けたフレームの方が大きいことが確認された。

5.5 ダンパーの消費エネルギー

ダンパーの消費エネルギーは、地震波加振試験より得られたダンパーの変位-荷重履歴ループの面積を計算して求めた。例として Table5 に、変位リミッターの有無による消費エネルギーの差について示す。入力波は神戸.NS の大レベルである。

Table 5 Consumption of energy by dampers (Kobe.NS)

	変位リミッター	
	無	有
3 層ダンパー 消費エネルギー (ダンパー変位)	7.03 [N・m] (4.37 [mm])	17.2 [N・m] (5.08 [mm])
2 層ダンパー 消費エネルギー (ダンパー変位)	17.1 [N・m] (7.27 [mm])	24.8 [N・m] (5.13 [mm])
1 層ダンパー 消費エネルギー (ダンパー変位)	18.8 [N・m] (8.12 [mm])	25.2 [N・m] (5.30 [mm])
合計 消費エネルギー	42.9 [N・m]	67.2 [N・m]

Table 5 より、変位リミッターの無い試験でのダンパーの変位は 1, 2 層のみが大きく、3 層のダンパー変位が小さいため、消費エネルギー量も 1, 2 層に比べて小さい値を示した。変位リミッターを付けることにより、各層のダンパー変位は均一化され、全層で効率よくエネルギーを消費していることが確認できる。また、合計の消費エネルギーも変位リミッター無に比べて、変位リミッター有の方が大きい値を示した。これらの結果より、地震波のようなランダム波に対しても、変位リミッター機構が有効に機能していることが確認できた。

さらに、変位リミッターを付けたダンパーの変位は、変位リミッターを付けていないダンパーの変位に比べて小さいにも関わらず、大きなエネルギーを消費していることが確認できる。これは、クッション材の圧縮変形に伴い、エネルギーを消費したことと、変位リミッターが作動した衝撃により、粘弾性ダンパーに入力される速度が高まり、粘弾性抵抗が増大したことが理由として考えられる。

6 まとめ

本論では新たな制振システムとして提案した、硬化型非線形復元力をもつ制振架構の振動応答特性を明らかにするために、3 層の鋼製フレームに、変位リミッター付ダンパーを組み込み、静的加力試験および振動台による加振試験を行い、その結果について報告した。以下に、試験より得られた知見を述べる。

- (1)変位リミッターが作動することにより、その層の剛性が増大し、変位リミッター作動後もクッション材がエネルギー吸収を行っている。
- (2)ダンパーの変形が小さい範囲では、粘弾性体によってエネルギーの吸収を行い、変形が大きくなると、変位リミッターが作動するとことによって、ダンパーの過大変形を防止することができる。
- (3)変位リミッターの効果によって、各層の層間変位を均一化することができ、全層のダンパーで効率よくエネルギー吸収を行うことができる。
- (4)変位リミッターが作動した衝撃により、応答加速度に高周波成分が加わり、応答加速度の最大値は増加するが、その加速度に含まれる共振成分の値は逆に低減する。
- (5)変位リミッターが作動し、フレーム全体の剛性が変化することによって固有周期が一定せず、入力波との共振を低減できる可能性がある。
- (6)変位リミッターが作動することにより、層せん断力は、増加するが、フレームの抵抗様式が変化するため、変位リミッターを付けたフレームの方が、変位リミッターを付けないフレームに比べて、降伏に対して余力が大きい。

以上のように、硬化型非線形復元力をもつ制振架構の振動応答特性を実験的に明らかにすることができ、制振システムの新しい可能性を示すことができた。

なお、提案した制振システムの振動応答解析については、別紙にて報告する予定である。

謝辞

本研究の実験は、東北大学工学部建築学科建築構造学研究室と合同で実施したものであり、井上範夫教授、堀則男助手、康在完氏には、御協力と貴重な御助言を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1)佐藤大樹,鈴木智子,康在完,堀則男,船木尚己,李皓,井上範夫,川股重也: 変位制御機構を有する制振フレーム試験体の振動特性(その 1 ~ 4),日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸),2002,(発表予定)