

減衰機構の差が 地震応答の制御特性に及ぼす研究

家村 浩和¹・五十嵐 晃²・高橋 良和³・水谷 知則⁴

¹フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 修士 (工学) 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

本論文は、付加減衰装置により地震のエネルギーを積極的に吸収することで、構造物の動的応答を制御し、強震動に対する構造物の性能を飛躍的に向上させることにある。このため、強震時における構造物の動的応答が大きく塑性域に及ぶことなくその機能を保てるようなダンパーの性能を数値シミュレーションにより追求した。ダンパーの種類としては、粘性型・摩擦型・降伏型を採用し、各々のダンパーの性質を検出するとともに、それらダンパーの特徴をとらえ、特性に見合った応用法を提案した。その結果、特に粘性ダンパーは中小の地震に、摩擦ダンパーは構造物にかかる力を主眼においた場合に、また、最大粘性力制御型ダンパーの優位な点として、大きい揺れに対しては、摩擦ダンパーに近い制御力を持ち、さらに小さい揺れに対しても効果的に応答を低減することが判明した。

Key Words : dynamic response control, energy dissipation devices, saturation damper

1. はじめに

兵庫県南部地震は、多数の犠牲者を出すとともに住宅や公共の建物の倒壊や火災、道路や鉄道の橋脚部の破壊、水道・ガス・電気などの地上・地下埋設管の破壊によるライフラインの断絶、岸壁・護岸などの港湾施設の破壊など様々な構造物に甚大な被害を及ぼし、長い間都市機能を麻痺させてしまった。そこで、本研究の目的は、付加減衰装置により地震のエネルギーを積極的に吸収することで構造物の動的応答を制御し、強震動に対する構造物の性能を飛躍的に向上させることにある。このため、強震時における構造物の動的応答が大きく塑性域に及ぶことなくその機能を保てるようなダンパーの性能を数値シミュレーションにより追求した。ダンパーの種類としては、主に、粘性型・摩擦型・降伏型を採用し、各々のダンパーの性質を検出するとともに、それらの各種ダンパーの特徴をとらえ、特性に見合った応用法を提案した。

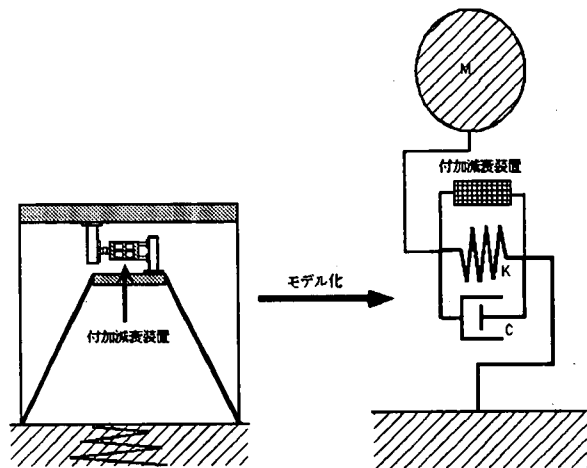


図-1 対象構造物とモデル化

表-1 構造物のパラメータ

質量	20.9574 (ton)
剛性	367.71 (KN/m)
固有周期	1.5 (sec)
構造物の減衰	2 (%)

2. 構造物のモデル化

K型ブレースを取り付け、ブレース頂部と構造物との間に各種付加減衰装置を取り付けた構造物を考え、これを一自由度線形構造物と仮定してモデル化を行う。モデルについては図-1に示す。構造物の諸元については、表-1に示す。

3. 各種付加減衰装置の履歴復元力特性

付加減衰装置として、粘性型・摩擦型・降伏型・最大粘性力制御型ダンパーの四種類を用いる。粘性ダン

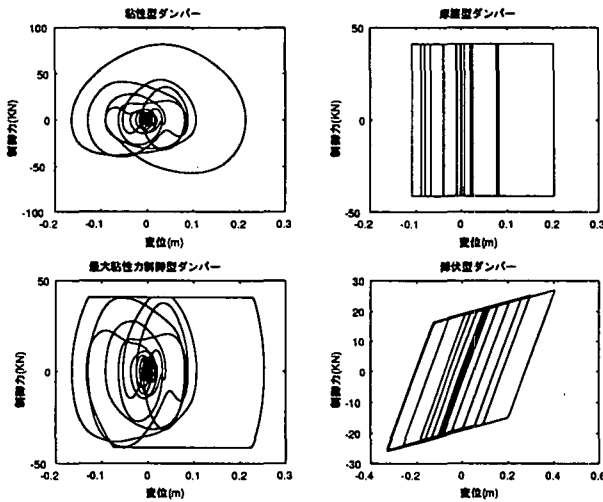


図-2 各種付加減衰装置の履歴復元力特性

パーは、速度に比例した制御力を出すダンパーであり、摩擦ダンパーはクーロン型の摩擦力を採用し、動摩擦係数と静摩擦係数は同じと仮定し、摩擦係数の大きさによって制御力が変化するものとする。最大粘性力制御型ダンパーは、粘性ダンパーと同様に速度に比例した制御力を出す、一定以上の制御力で滑るように設計されたダンパーである。降伏型ダンパーは、バイリニア型の履歴ループを描く。それぞれの履歴復元力特性は図-2に示すとおりである。

4. シミュレーションの概要

(1) 入力地震波

入力地震波としては、兵庫県南部地震(1995)の際の神戸海洋気象台記録のNS成分と、Imperial Valley地震(1940)のEl Centro記録のNS成分を用いている。入力加速度の加速度波形は図-3に示す。

両地震波の特徴として、神戸海洋気象台記録のNS波は、比較的低周波数で卓越しており、中・長周期の構造物に対して大きな影響を与えるものと思われる。エルセントロ記録のNS波は、比較的高周波数域で卓越しており、短周期の構造物に対し大きな被害をもたらすと考えられる。

(2) 評価項目

a) 最大応答加速度

最大応答加速度を抑えることで、構造物への作用力を抑えることができる。また、構造物に居住する者にとって加速度を低減することは安全に居住する上で重要である。

b) 最大応答変位

特に長周期の構造物に対して重要であり、構造物の許容変形量を満たす範囲内に抑えるためには最大応答

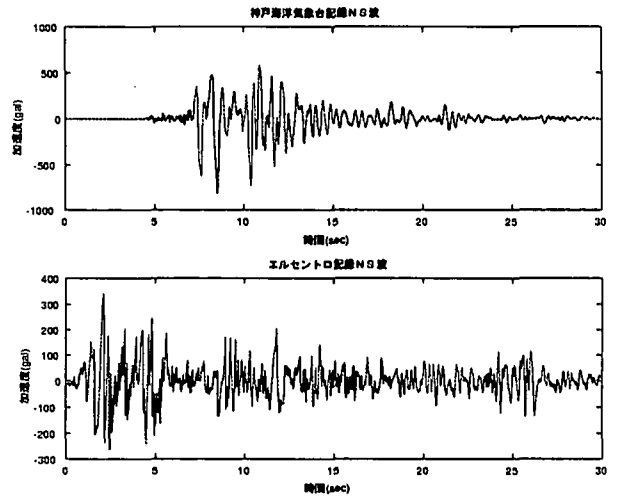


図-3 入力地震波形

変位も抑えることが必要となってくる。また、変位を抑えることで主構造物の部材にかかる力も抑えることができる。

c) エネルギー吸収量

構造物の運動方程式は次のように示され、

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + f(\dot{x}, x) = -m\ddot{z} \quad (1)$$

$$c = 2h\sqrt{\frac{k}{m}}m \quad (2)$$

ここに

- m : 質量
- h : 減衰定数
- k : 剛性
- $f(\dot{x}, x)$: 付加減衰装置による復元力
- \ddot{z} : 入力地震加速度
- \ddot{x} : 構造物の相対加速度
- \dot{x} : 構造物の相対速度

である。

エネルギー吸収量を求めるためには、運動方程式、式(1)の両辺に $dx = \dot{x}dt$ をかけ、時刻 $t=0$ から $t = t_0$ まで積分する。

$$\int_0^{t_0} m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^{t_0} c\dot{x}\dot{x}dt + \int_0^{t_0} kx\dot{x}dt + \int_0^{t_0} \dot{x}f(\dot{x}, x)dt = -\int_0^{t_0} m\dot{x}\ddot{z}dt$$

さらに、定積分を実施すると、

$$\frac{1}{2}m\dot{x}(t_0)^2 + c \int_0^{t_0} \dot{x}^2 dt + \frac{1}{2}kx(t_0)^2 + \int_0^{t_0} f(\dot{x}, x)\dot{x}dt = -m \int_0^{t_0} \dot{x}\ddot{z}dt$$

となり、右辺が構造物に入力されたエネルギーの総和、すなわち入力地震エネルギーである。そして、左辺の第1項は時刻 t_0 における運動エネルギー、第2項は時刻 t_0 までに構造物の減衰によって吸収されるエネルギー量、第3項は時刻 t_0 における構造物の弾性歪みエネルギー、第4項が付加ダンパー装置で時刻 t_0 までに吸収したエネルギーを表す。

ダンパーが吸収したエネルギー量が多ければ構造物にかかる負担を抑えることができる。

d) 主構造物部材にかかる力

主構造物部材にかかる力は、式(1)において、第2項と第3項の和

$$2h\sqrt{\frac{k}{m}}m\dot{x} + kx \quad (3)$$

である。

主構造物部材にかかる力を制することで、構造物が弾性範囲内にとどまることができ、地震後も構造物がその機能を失うことなく機能することができる。構造物が弾性範囲内に残るよう設計するのが理想だが、ここでは、構造物が線形であると仮定しているため主構造物部材にかかる力をできるだけ抑えることを目的とする。

5. 解析結果

(1) 粘性ダンパーと摩擦ダンパーの比較について

粘性ダンパーと摩擦ダンパーの出す最大制御力を41kNで一定とし、周期が1.5秒の構造物に神戸波を入力した図-4で比べてみると、最大応答加速度はほぼ同じ値となっているが、入力地震波の弱いところでは、摩擦ダンパーよりも粘性ダンパーの方が応答を低減している。これは、摩擦ダンパーが入力地震波の弱いところでは、ダンパーが滑らずにエネルギー吸収性能を出していないのに対し、粘性ダンパーはエネルギー吸収性能を出していることが確認されている。

また図-4より、摩擦ダンパーの方が粘性ダンパーよりも変位を低減していることがわかる。同様に図-5より、主構造物部材にかかる地震力も、摩擦ダンパーの方が粘性ダンパーよりも低減していることがわかる。

(2) 最大粘性力型ダンパーと摩擦ダンパー

摩擦ダンパーと最大粘性力制御型ダンパーの出す最大制御力を20.5kNで一定とし、周期が1.5秒の構造物に神戸波入力した図-6を比べると、最大応答加速度はほぼ同じ値となっているが、粘性ダンパーと同じく入力地震波の弱いところで、最大粘性力制御型ダンパーの方が摩擦ダンパーよりも応答加速度を低減している。これも粘性ダンパーの時と同じく、摩擦が滑らずに入力地震波を低減できていないところで最大粘性力制御

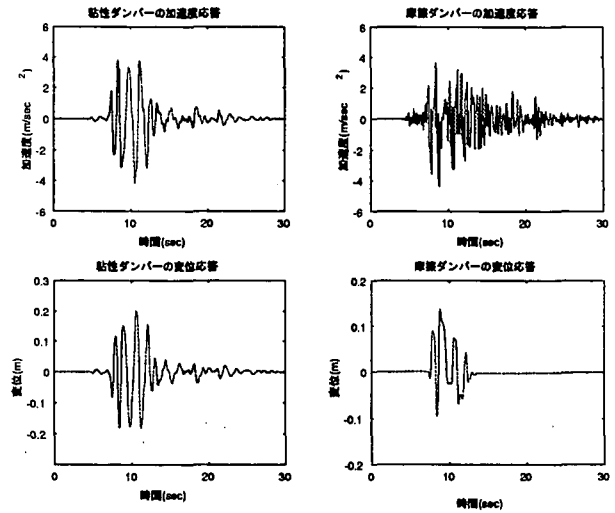


図-4 粘性ダンパーと摩擦ダンパーが応答変位と加速度に及ぼす影響

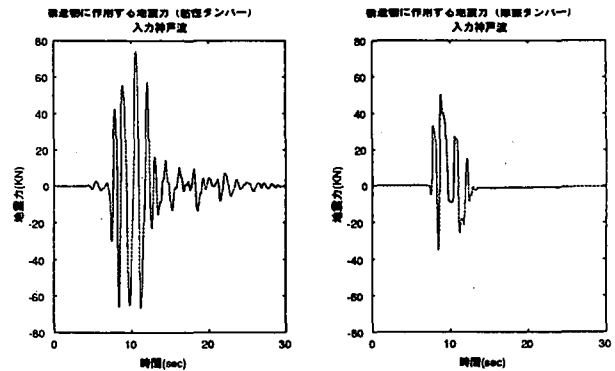


図-5 粘性ダンパーと摩擦ダンパーが部材力に及ぼす影響

型ダンパーが応答を低減できていることがわかる、また摩擦ダンパーは応答加速度が最大粘性力制御型ダンパーに比べ高周波になっている。また、エルセントロ波入力した図-7を比べると、応答加速度は同じような結果になったが、変位については摩擦ダンパーの方が低減している。これは、最大粘性力制御型ダンパーが、入力地震波が弱くなった分、粘性ダンパーとして機能している部分が大きいためだと考えられる。

図-8より、ダンパーのエネルギー吸収量に関して、入力が神戸波だとほとんど吸収エネルギー量は同じである。入力がエルセントロ波になると、最大粘性力制御型ダンパーの方が吸収エネルギー量が多くなっている。これは入力の小さいところで摩擦が滑らずにエネルギーを吸収していないところで最大粘性力制御型ダンパーがエネルギーを吸収しているためだと考えられる。

また構造物にかかる地震力は、摩擦ダンパーの方が最大粘性力制御型ダンパーよりも低減していることが、図-9よりわかる。

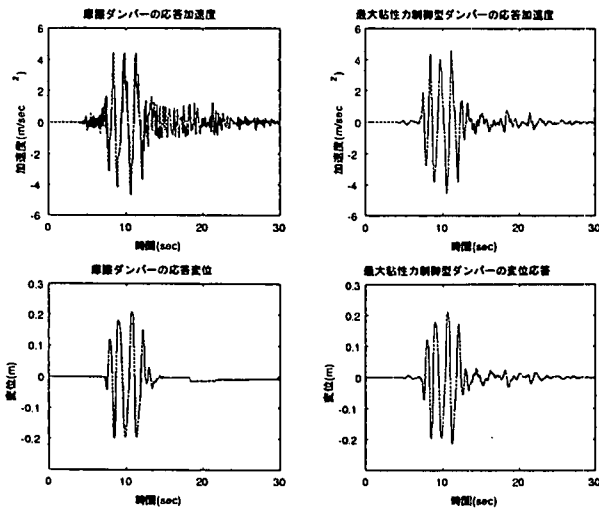


図-6 最大粘性力型ダンパーと摩擦ダンパーが応答変位と加速度に及ぼす影響 (入力神戸波)

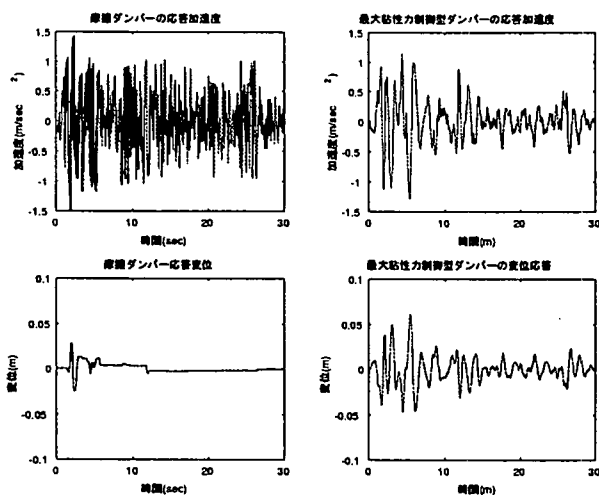


図-7 最大粘性力型ダンパーと摩擦ダンパーが応答変位と加速度に及ぼす影響 (入力エルセントロ波)

6. まとめ

すべてのダンパーについて共通の結論として固有周期が短い構造物に対しては、どの種類のダンパーを用いても、主構造物部材に作用する地震力を低減するためには大きな制御力を必要とするため、ダンパーにより制御する構造物は、固有周期が長い構造物が適していると考えられる。

粘性ダンパーについては、兵庫県南部地震のように大きな地震に対して、構造物にかかる地震力を抑えようとすると、ダンパーの性能が大きく求められることから、中小の地震や風に対する対策として用いていくのが、適していると考えられる。

摩擦ダンパーについては、ダンパーが出す制御力が常に一定であることや、構造物にかかる力を低減するのに適していることから、構造物にかかる地震力など、作用する地震力を低減するのを主眼においた設計をす

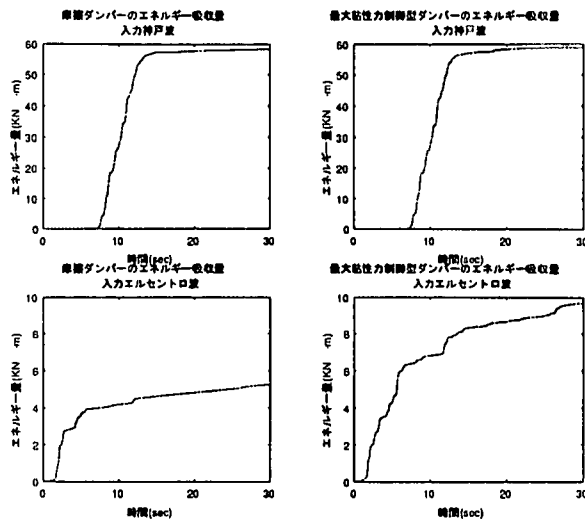


図-8 最大粘性力型ダンパーと摩擦ダンパーがエネルギー吸収に及ぼす影響

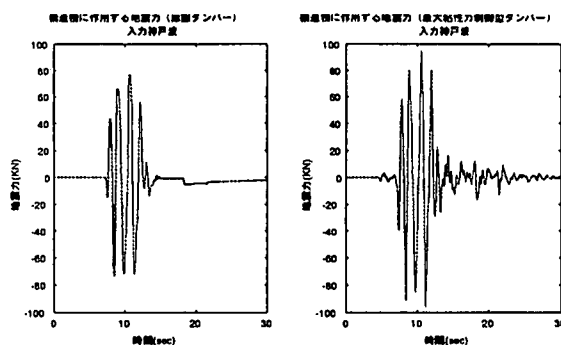


図-9 最大粘性力型ダンパーと摩擦ダンパーが部材力に及ぼす影響

るのに適していると考えられる。ただし、あまり大きすぎる制御力は、逆に小さな地震に対してや、風に対してなど、働かないことから、対象とする地震規模を明確にする必要がある。

最大粘性力制御型ダンパーについては、摩擦ダンパーよりも変位を低減することに対しては劣るが、入力地震波が大きくなったとき、粘性ダンパーよりも優れており、また、風などの小さな揺れや、地震に対しても粘性ダンパーと同等の効果を発揮している点から最大粘性力制御型ダンパーは地震の規模にたいし、適用範囲が広いダンパーであると考えられる。

参考文献

- 1) 家村浩和:極限地震動に如何に立ち向かうか? 一耐震設計から免震・制震設計へ、第10回地震工学シンポジウムパネルディスカッション、pp164-171、1998
- 2) 曾田五月ら:粘弾性ダンパーの利用における建築物の耐震設計、第10回地震工学シンポジウム、pp3027-3032、1998
- 3) 「AVS 開発チーム」:可変剛性 (AVS) 制震構法の開発、鹿島技術研究所年報、pp81-90、1991