

制震ダンパーの開発と適用による建物の耐震総合安全化

中村 豊 寺田 岳彦 堀江 竜巳 西村 拓也
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Development and Application of Vibration Control Dampers that Ensure the Comprehensive Safety of Buildings

by Yutaka Nakamura, Takehiko Terada, Tatsumi Horie and Takuya Nishimura

Abstract

Various kinds of vibration control dampers have been developed. Steel dampers and visco-elastic dampers often have been applied to buildings. One type of steel damper consists of a normal steel plate inserted between a pair of steel channels that prevent the plate from buckling. One type of visco-elastic damper utilizes a high-performance visco-elastic material that is low-temperature-dependent. The features and vibration-control effects of various dampers are reported here and examples of buildings with dampers are introduced. This study also provides an overview of the performance-based placement-design procedure of dampers and uses design examples to explain the effects of reduced earthquake damage.

概 要

これまでコストパフォーマンスに優れた鋼材系ダンパーや粘弾性系ダンパー等の種々の制震ダンパーを研究開発し、実建物に適用してきている。鋼材系ダンパーについては、普通鋼材を芯材にしてチャンネル材を座屈補剛に用いることにより低コスト化を実現している。粘弾性系ダンパーについては、温度依存性が低く、かつ高減衰性を有した粘弾性材料を開発して、高性能で低コストのブレース形式や壁型の粘弾性ダンパーを実現している。本報告では、これらの種々の制震ダンパーの特徴について述べ、制震ダンパーが適用された案件について報告を行う。合わせて、制震ダンパーの性能指定型配置設計法の概要と設計例、制震ダンパーを適用した場合の応答低減効果と地震リスク低減効果について述べる。

§ 1. はじめに

建築構造物の架構内に種々のダンパー（エネルギー吸収機構）を設置することにより、大地震に対する構造物の応答を低減する制震構法を開発し実用化している。制震ダンパーは用いられるエネルギー吸収材料により、低降伏点鋼等を利用した鋼材ダンパーと、粘弾性体や高減衰ゴム等を用いた粘弾性ダンパーに区分される。鋼材ダンパーは、鋼材の降伏

後の履歴エネルギー吸収を利用するものであり、粘弾性ダンパーは粘弾性体のせん断変形に対する粘性抵抗力を利用するものである。また、制震ダンパーはその形状からは、ブレース型、壁型、間柱型、パネル型等に大別される。いずれの形状のダンパーも、架構の変形がダンパー内のエネルギー吸収材料に伝達されることにより、制震効果が発揮される。図-1には粘弾性ダンパーのブレース型、壁型、間柱型のダンパー形状を示している。

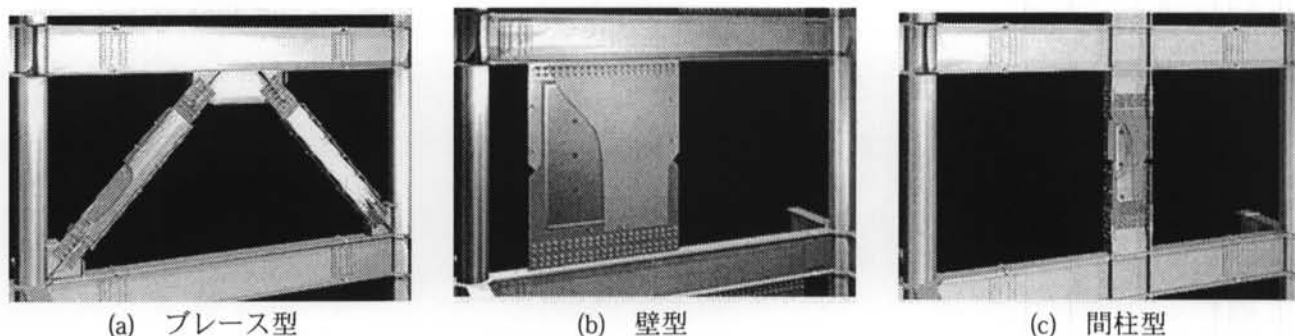


図-1 粘弾性ダンパーの形状

制震ダンパーが建築構造物に設置される目的には、地震時の建築物の躯体・仕上げ・設備等の損傷防止、居住性の改善、建物内の機器・備品の損傷防止、建物機能の維持、人的被害の防止などが挙げられる。それらの設置目的に対応する応答制約目標値が与えられた場合に、各階のダンパー必要配置量を求める制震ダンパーの性能指定型配置設計法も開発している。最近では、建物の地震リスク（予想される経済的損失）を定量的に評価することが行われている。制震ダンパーが設置される建物についても、その制震効果を地震リスクの低減効果によって評価することが可能である。

本報告では、開発し実用化した鋼材ダンパーと粘弾性ダンパーの特徴について述べる。また、制震ダンパーが適用された案件について報告を行う。次に、制震ダンパーの性能指定型配置設計法の概要と設計例について報告する。また、制震ダンパーを適用した場合の地震リスク低減効果について述べる。

§ 2. 鋼材ダンパー (CS ダンパー)

鋼材ダンパーは、鋼材の塑性化による歪エネルギーによって地震入力エネルギーを吸収するものである。鋼材は降伏後の伸び能力、すなわちエネルギー吸収能力が大きく、安価で加工性に優れており、エネルギー吸収能力は振動数や温度による変動が少なく、経年劣化もないという特徴をもっている。

外力が作用したときの鋼材の抵抗機構としては、力学的に軸抵抗、せん断抵抗、曲げ抵抗、ねじれ抵抗の4通りがあり、それぞれの抵抗機構を利用した鋼材ダンパーが提案されている。

軸抵抗は鋼材の軸方向に作用する力に対して引張または圧縮で抵抗することである。一般に鋼材は圧縮に対して座屈しやすいという性質があるが、適切な座屈拘束策を講じれば、引張・圧縮の両方について安定した紡錘形の荷重-変形関係を示す。軸抵抗の場合には鋼材の全体積にわたって一様な歪状態となるため、エネルギー吸収効率が優れている。軸抵抗型のダンパーの代表的なものとして、アンボンドブレースダンパーがあげられる。

これまで、アンボンドブレースダンパーとして鋼繊維補強コンクリート (SFRC) で座屈拘束したダンパー^{1),2)}と溝形鋼で座屈拘束したダンパー (CSダンパー)^{3)~9)}を実用化している。CSダンパーは、従来型のSFRCで被覆したアンボンドブレースダンパーに比べて軽量化とコストパフォーマンスに優れたアンボンドブレースダンパーである。ここでは、CSダ

ンパーについて、その構成、力学的特性とそのモデル化および疲労特性について述べる。

2.1 CS ダンパーの構成

CSダンパーの概略形状を図-2に示す。このCSダンパーは、芯材に低降伏点鋼LY100、LY225や普通鋼SN400Bを用い、中央部を幅狭としてこの部分に歪を集中させて先行降伏するようにしている。芯材は平板とし、両端の本体接合部でリブを取り付ける他には溶接が不要である。両端は現場施工の容易な高力ボルト十字形継手としている。芯材と溝形鋼との間には厚さ1mmのクロロプレンゴムを挟み、力の伝達を絶縁している。また、補剛材を構成する溝形鋼と平鋼 (カバープレート) による組み立てを高力ボルトによる接合とすることで、容易に品質管理できるようにしている。

このCSダンパーは、補剛用溝形鋼がゴムを介して全長にわたり芯材を座屈拘束しており、歪集中する中央部に縦横のリブを追加することで座屈拘束効果を高め、従来のSFRCで被覆したアンボンドブレースダンパーの1/2の重量と幅寸法を実現した。

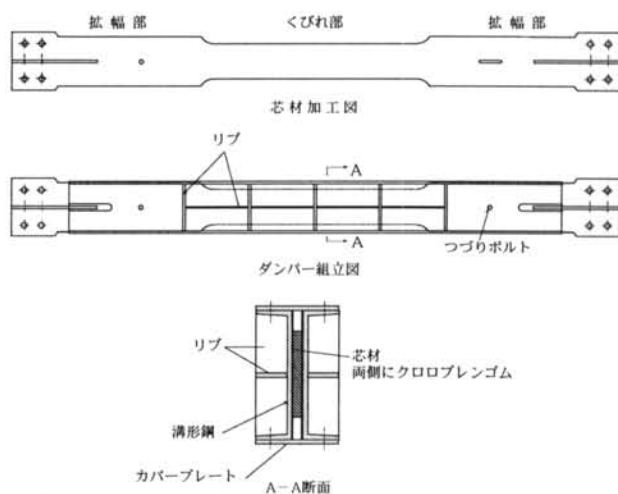
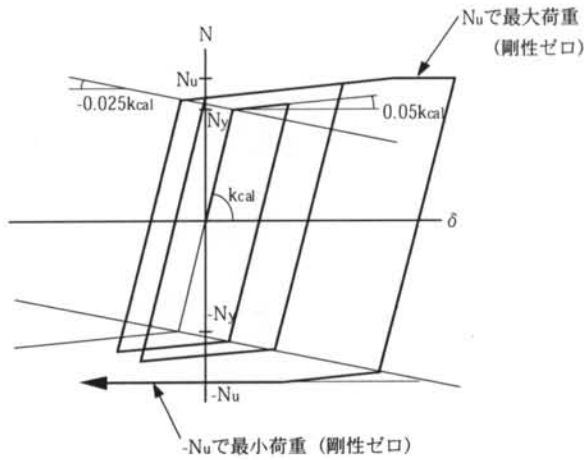


図-2 CS ダンパーの概略形状

2.2 CS ダンパーの復元力特性と力学モデル

低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースダンパーの履歴性状は微小変形から降伏し、歪硬化により普通鋼材に比べてかなり大きな耐力上昇が見られる。さらに、地震応答のようにかかなり速い10%/sec程度の歪速度になると、降伏点および引張強さが上昇する。そこで、図-3に示す履歴則を設定し実験結果と比較検討した。履歴則は、最大軸力Nuで頭打ちとするTri-Linear型としている。第2勾配は初期勾配の5%、歪硬化による耐力上昇を定義する勾配は初期勾配の-2.5%としている。動的効果による耐力上昇率

は α は、低降伏点鋼LY100で1.1、LY225で1.05とした。図-4に軸力-変位関係の実験結果と設定した履歴則を用いた履歴曲線を比較した例を示す。履歴則と実験結果とは良好な対応を示している。



$N_y = \alpha \times A_n \times \sigma_y$
 $N_u = \alpha \times A_n \times \sigma_B$
 α : 動的効果による降伏点・最大耐力の上昇率
 (歪速度を概ね1~数%/secとし、地震応答時(動的)には、
 $\alpha = 1.1$ (LY100級)
 $\alpha = 1.05$ (LY225級) とする。)
 A_n : 有効断面積
 σ_y : 降伏点 (規格値)
 σ_B : 引張強さ (規格値)

図-3 CSダンパーの履歴モデル

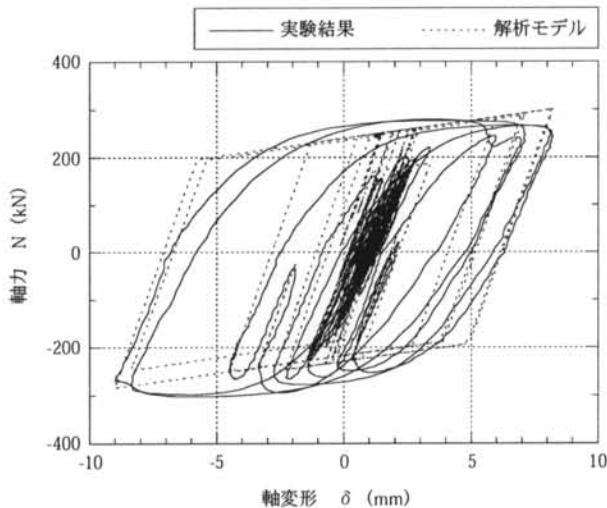


図-4 履歴モデルと実験結果との対応

2.3 CSダンパーの疲労特性

実大の1/2スケールの試験体を用い、CSダンパーの疲労特性を把握するために低サイクル疲労実験を行った。芯材の種類は低降伏点鋼LY225および普通鋼SN400Bである。試験体の一覧を表-1に示す。試験体は全部で8体である。これらの試験体の歪振幅は表に示す通りである。なお、表中に示す歪振幅は、拡幅部を含む試験体全長に対する値である。

定変位の疲労実験の試験体の破断繰返し数Nを表-1に示す。Nは引張り側の荷重が最大荷重の8割以上を保っている状態までの回数とした。歪範囲と破断繰返し数Nの関係を図-5に示す。歪範囲とNは両対数軸上でほぼ線形関係にあり、Manson-Coffin式が成立すると考えられる。式(1)および式(2)がLY225のそれぞれ試験体全長にわたる平均歪およびくびれ部の歪に着目した式である。同様に、式(3)および式(4)がSN400Bのそれぞれ試験体全長にわたる平均歪およびくびれ部の歪に着目した式である。式(1)~(4)は実験結果と良く対応している。

$$\Delta \epsilon \cdot N^{0.35} = 5.8 \quad (1)$$

$$\Delta \epsilon_c \cdot N^{0.39} = 20 \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon \cdot N^{0.37} = 6.3 \quad (3)$$

$$\Delta \epsilon_c \cdot N^{0.41} = 20 \quad (4)$$

ここで、 $\Delta \epsilon$: 試験体全長に対する歪範囲

$\Delta \epsilon_c$: くびれ部に対する歪範囲

表-1 試験体一覧

| 試験体 No. | 鋼種 | 加力方法 | 軸ひずみ振幅 (%) | 軸方向変位振幅 (mm) | 加力周波数 (Hz) | 繰返し回数 N |
|---------|--------|--------|------------|--------------|------------|---------|
| 1 | LY225 | 定変位繰返し | ±0.1 | ±4.2 | 1.0 | 20097 |
| 2 | | | ±0.2 | ±10.5 | | 3066 |
| 3 | | | ±0.5 | ±21.0 | | 160 |
| 4 | | | ±0.75 | ±10.5 | | 83 |
| 5 | | | ±1.0 | ±21.0 | | 21 |
| 6 | SN400B | 定変位繰返し | ±0.2 | ±4.2 | 0.5 | 1804 |
| 7 | | | ±0.5 | ±10.5 | | 102 |
| 8 | | | ±1.0 | ±21.0 | | 27 |

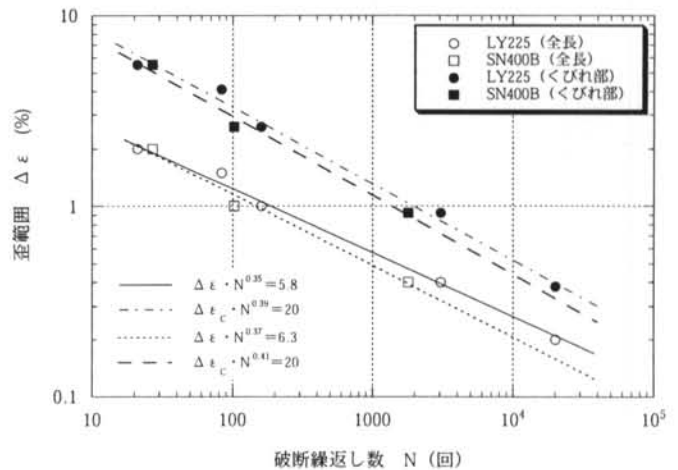


図-5 歪範囲と破断繰返し数の関係

§ 3 . 粘弾性ダンパー (VE ダンパー)

粘弾性ダンパー (Visco Elastic Damper) は、架構の層間に図-1 に示したような形式で設置される。架構の層間変形がダンパーの鋼板間に封入された粘弾性体にせん断変形として伝達され、生じた粘性抵抗抗力によりエネルギー吸収が起こり、制震効果が生じる (図-6)。そのせん断変形と粘性抵抗抗力によって描かれる履歴ループから、粘弾性ダンパーの等価剛性 K_{eq} 、等価減衰係数 C_{eq} 、等価減衰定数 h_{eq} が式(5)-(7) (図-7) に示すように求められる。

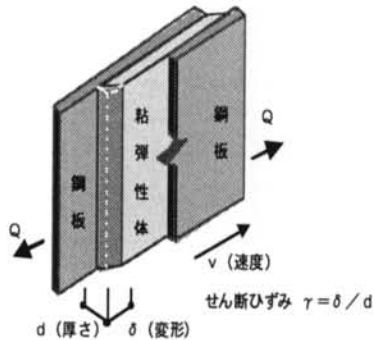


図-6 粘弾性ダンパーの基本原理

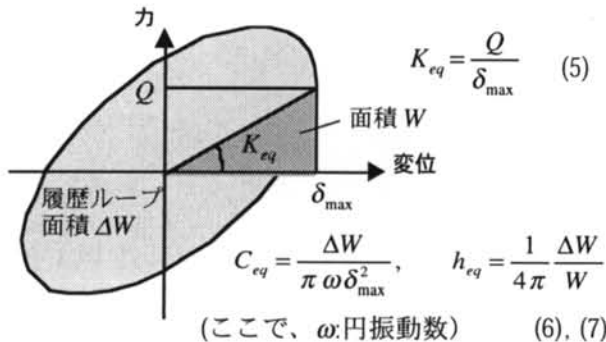


図-7 粘弾性ダンパーの履歴ループと評価

これまで、ブレース型粘弾性ダンパー (SE ダンパー) と壁型粘弾性ダンパー (MU ダンパー) の2種類を開発し実用化している。両者では封入する粘弾性体の材質を変えている。ここでは、この2つの粘弾性ダンパーについて、その構成、力学的特性とそのモデル化について述べる。

3.1 SE ダンパーの構成と特徴

SEダンパーは、粘弾性材料としてスチレン系エラストマーを用いたブレース型の粘弾性ダンパーである¹⁰⁾。その形状を図-8に示す。SEダンパーは以下の特徴を有している。

(1)鋼板と粘弾性体 (厚さ6mm) を6層に積層し、積層部最外層にはチャンネル鋼材を用いた構成になっている。鋼材などの組み立ては、溶接によらずボルトで締結される。

(2)製造には、シート状のスチレン系エラストマーと鋼板を交互に重ね合わせた後、全体を加熱してすべての粘弾性体を溶解させて鋼板に接着する「加熱溶解方式」を新たに考案し採用している。

これらにより、ダンパーのコストを低減している。

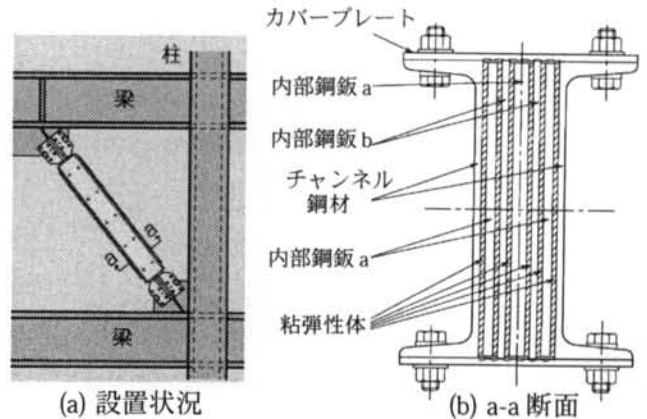


図-8 SE ダンパーの形状

3.2 SE ダンパーの力学特性とモデル化

スチレン系エラストマーは温度依存性が小さく、減衰性能が高いという特徴を有している。その力学特性は、振動数依存性と振幅依存性を有しており、等価剛性 K_{eq} と等価減衰係数 C_{eq} を、非線形4要素モデル (式(8)、図-9) によって表現している¹¹⁾。

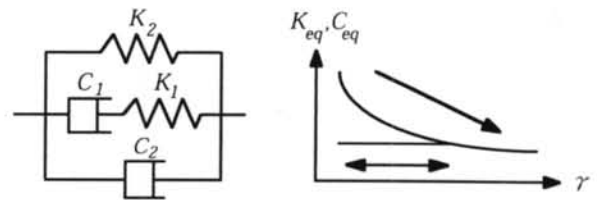


図-9 非線形四要素モデル

$$K_{eq} = \frac{\omega^2 C_1^2}{K_1^2 + \omega^2 C_1^2} K_1 + K_2, \quad C_{eq} = \frac{K_1^2}{K_1^2 + \omega^2 C_1^2} C_1 + C_2$$

(ここで、 ω :円振動数) (8)a,b

非線形4要素モデルでは、4要素 $\{K_1, K_2, C_1, C_2\}$ に振幅依存性と温度依存性を持たせることにより、 K_{eq} と C_{eq} の振動数依存性、振幅依存性、温度依存性を表現できる。なお、 $\gamma < 75\%$ では K_{eq} と C_{eq} は一定値とし、加振中はせん断歪みの増大に伴って K_{eq} と C_{eq} が一旦低下すると、その後は回復しないような履歴則を与えている。

構築した力学モデルによる力学特性を素材実験結果 (粘弾性体厚さ6mm、面積100cm²) と比較した結果を図-10に示す。また、地震応答波加力による履歴ループについて、力学モデルを用いた解析と素材実験結果を図-11に示す。構築したモデルは、粘弾性体の力学特性をよく模擬していることが分かる。

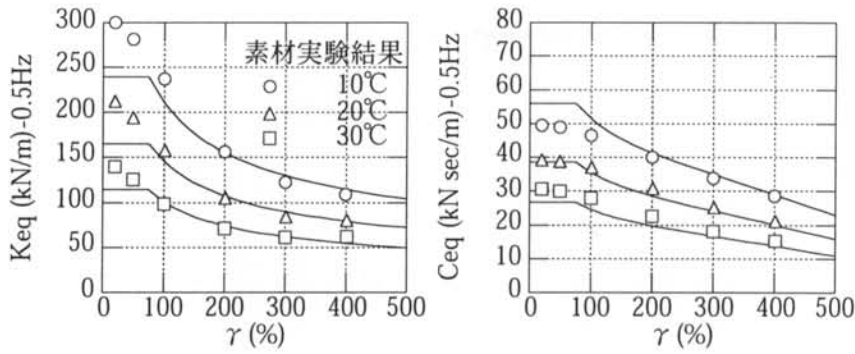


図-10 力学モデルと素材実験による力学特性の比較

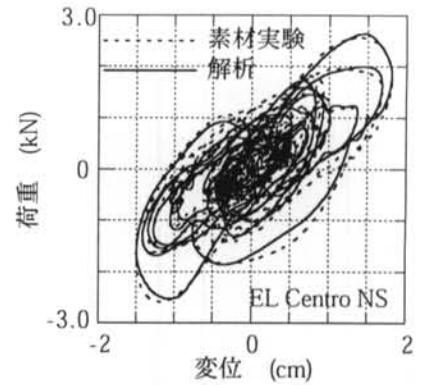


図-11 地震時応答波加振結果

3.3 MUダンパーの構成

MUダンパー(壁型)の形状および建物内へ設置された状況図を図-12に示す。MUダンパーは、外側鋼板、内側鋼板、粘弾性体の3種類の主要部材から構成される。鋼板と粘弾性体は交互に積層される。

建物に設置される場合、ダンパーの外側鋼板は上階の梁へ接続し、内側鋼板は下階の梁にボルトにて接続される。壁型ダンパーは、大容量のエネルギー吸収能力を有し、かつ、ダンパーの全厚みが60mm程度(ボルト頭部・ナットを除く)と薄いのが特徴である。

3.4 MUダンパーの力学特性とモデル化

粘弾性ダンパーの力学特性は、内挿されている粘弾性体の力学特性に依存する。MUダンパーに用いられる粘弾性体はスチレン-オレフィン系粘弾性体STD1であり、以下の特徴を有している。

- (1) エネルギー吸収効率を表す等価減衰定数 h_{eq} が大きい。(h_{eq} は0.4程度)
- (2) 等価剛性 K_{eq} と等価減衰係数 C_{eq} の温度依存性が小さい。

温度が常温20℃に対し、±10℃変動した場合、10℃/30℃の特性値の比率は1.58倍である。

(3) 構造耐用年限中に力学的性能がほとんど変化しない耐久性を有している。長期信頼性試験を実施し、動的特性の変化や鋼板との接着性能に問題がないことが確認されている。

STD1の動的特性を把握するために、2枚の鋼板に粘弾性体を挟み込んだ試験体(粘弾性体面積 $S=100\text{cm}^2$ 、粘弾性体厚み $t=0.6\text{cm}$)に動的にせん断変形を与える素材試験を行った。素材試験から得られた正弦波加振時の等価剛性 K_{eq} と等価減衰係数 C_{eq} の一例を図-13に示す。素材試験の結果を基に数値解析のための解析モデルを構築した。モデルはSEダンパー同様にバネとダッシュポットからなる非線形四要素モデルとして、周波数、歪み、温度による力学特性の変化を表した¹²⁾。地震時応答波加振時の荷重変形関係の一例を図-14に示す。解析モデルは過渡的応答に対しても実験結果を模擬できており、MUダンパーを組み込んだ構造物の応答予測に用いられている。

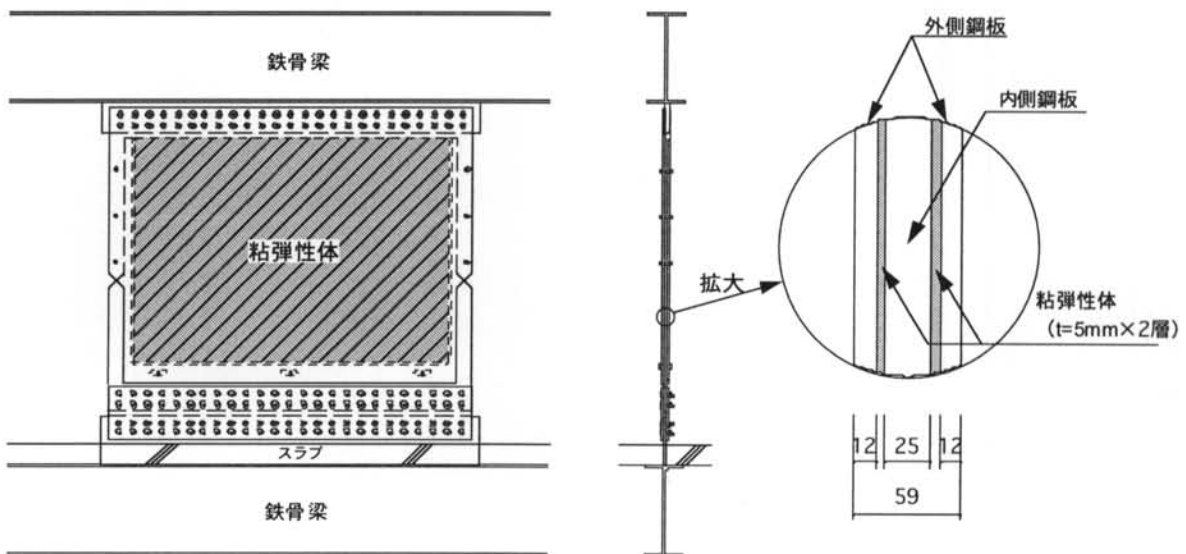


図-12 MUダンパー(壁型)の形状と建物設置状況

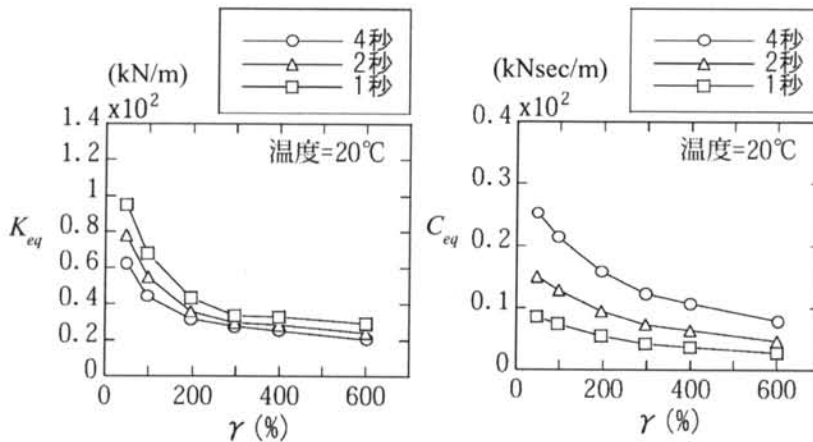


図-13 素材試験の等価剛性(K_{eq})、等価減衰係数(C_{eq})
(粘弾性体厚み1cmで基準化)

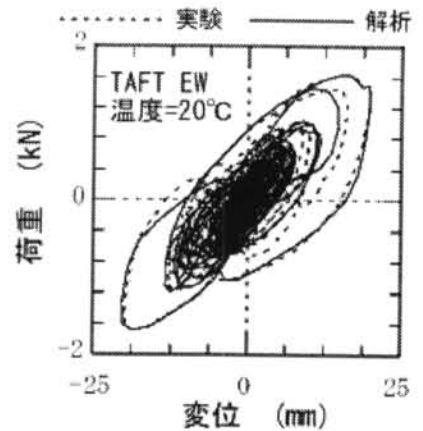


図-14 地震応答波加振結果

§ 4. 制震ダンパーの適用事例

ここでは、前述した鋼材ダンパー(CSダンパー)と2種類の粘弾性ダンパー(SEダンパー、MUダンパー)についての適用事例およびその制震効果について述べる。

4.1 CSダンパーの適用例

CSダンパーは、2000年度に実建物に適用されて以来、2004年4月現在、20棟以上の建物へ設置されている。初期は鉄骨造建物への採用が中心であった。CSダンパーは、くびれ部の形状を調節してダンパーの効果が発揮される層間変形を小さくすることが可能であるため、近年は鉄筋コンクリート造の建物へ設置する例も増えている。また、新築建物だけでなく、既存不適格建物に対する耐震性能向上のために設置する例も増えつつある。

4.1.1 超高層RC造建物への適用

CSダンパーを用いたRC造超高層住宅プロジェクトの外観を図-15に示す。本プロジェクトは3棟の超高層住宅で構成されている。

プロジェクト概要

- 階数：地下2階、地上42階
- 延べ面積：約30万 m^2
- 建築面積：約1万 m^2
- 最高高さ：141m
- 構造：鉄筋コンクリート造

極めて稀におこる地震を対象とした地震応答解析結果の例を図-16に示す。入力地震動には記録地震の他に、建設地の地盤条件を考慮して国土交通省告示に適合させた模擬地震動を用いた。模擬地震動による応答が最も大きくなるが、全層において最大層間変形角は概ね1/120以下である。



図-15 CSダンパーを設置したRC造超高層住宅

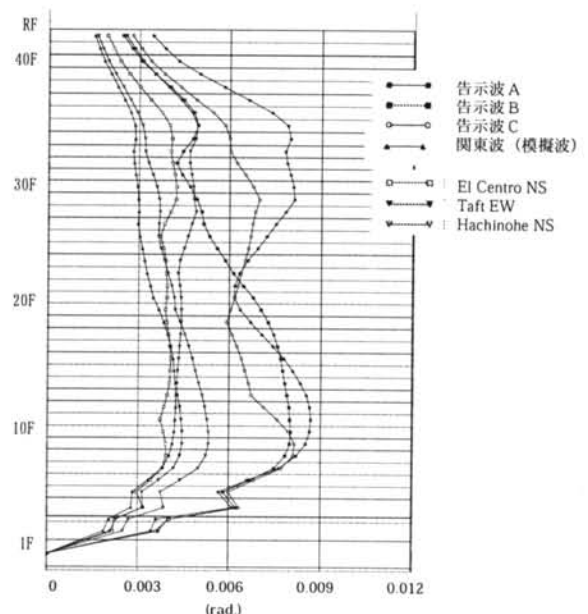


図-16 地震応答解析結果

4.1.2 既存建物の耐震改修への適用

CSダンパーは、既存不適格建物に対する耐震(制震)改修にも用いられている¹³⁾。CSダンパーの持つ剛性、耐力および減衰性能により既存不適格建物の耐震性を向上させることができる。SRC造建物へ設置した状況を写真-1に示す。枠組み鉄骨をスパン内に設置してコンクリート躯体との接合を図り、鉄骨枠組みを介しCSダンパーを設置している。

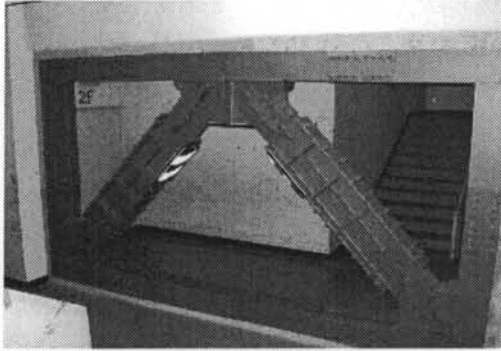


写真-1 SRC建物の耐震改修への適用例
(枠組みブレース工法)

4.2 SEダンパーの適用例

SEダンパーが設置された日本橋一丁目計画¹⁴⁾の建物パースを図-17に示す。

建物概要

階数：地下4階、地上20階
 延べ面積：約9万m²
 建築面積：約5千m²
 最高高さ：120m
 構造：柱CFT造、梁鉄骨造

本建物の耐震設計では、通常のレベル1およびレベル2地震動に加え、余裕度検討地震動としてレベル3(レベル2地震動の1.2倍)を設定している。



図-17 日本橋一丁目計画¹⁴⁾

4.3 MUダンパーの適用例

MUダンパーの適用例として、商業施設に設置された例を示す。建物概要は下記の通りである。

建物概要

階数：地下4階、地上13階
 延べ面積：約3.6万m²
 建築面積：約4千m²
 最高高さ：56m
 構造：柱CFT造、梁鉄骨造

MUダンパー(幅2.4m)の設置状況を写真-2に示す。本ダンパーは、中鋼板および側鋼板の厚さがそれぞれ25および12mm、粘弾性体厚さが5mm×2層、総厚さが59mmであり、非常に薄いものとなっている。本例のダンパー1台当たりの最大減衰力は概ね2MN(=200tf)である。

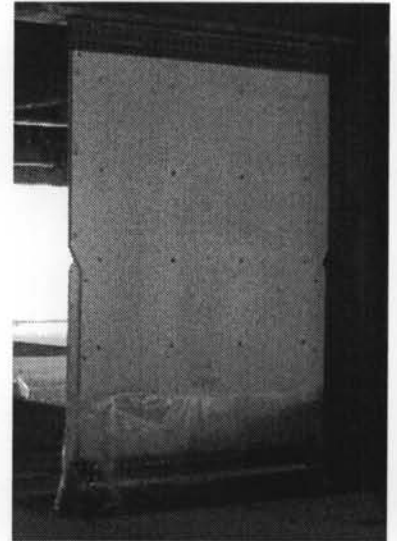
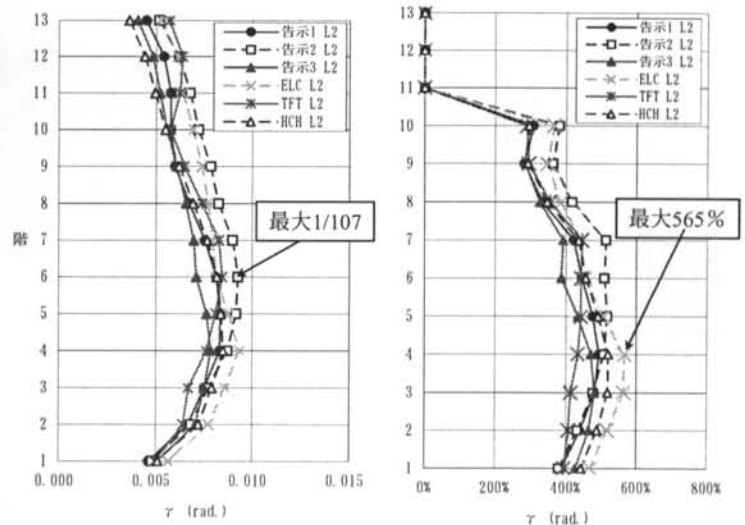


写真-2 MUダンパーの設置状況

本建物のレベル2入力に対する地震応答解析結果を図-18に示す。左が各層の最大応答層間変形角の分布、右が粘弾性体の最大せん断ひずみの分布である。粘弾性体の最大せん断ひずみは565%であり、粘弾性体の材料としての最大せん断ひずみの許容値800%に対し十分に余裕のある値となっている。



(a) 最大層間変形角の分布 (b) 粘弾性体の最大せん断ひずみの分布

図-18 MUダンパーを設置した建物の地震応答解析結果

§ 5. 制震ダンパーの性能指定型配置設計法と地震リスク制御

基本設計・構造計画段階における制震ダンパーの設置検討においては、目標の耐震性能（応答制約目標値）を実現するために、どの階にどれだけのダンパー量（台数）を配置する必要があるのかを把握する必要がある。応答制約目標値が与えられた場合に、各階のダンパー必要配置量を求める制震ダンパーの性能指定型配置設計法を開発しており^{15), 16), 17)}、ここでは、その概要と適用例について報告する。

制震ダンパーを設置することにより、建物の地震リスク（予想される経済的損失）も低減される。適用例について制震ダンパー設置による地震時応答低減量と地震リスク低減量の関係を検討している。

5.1 制震ダンパーの性能指定型配置設計法

制震ダンパーの性能指定型配置設計法^{15), 16), 17)}では、以下の手法を用いている。

(1) 制震ダンパーの線形 Voigt モデルへの置換：最大層間変形の制約値と建物の 1 次固有周期を基に、各種の制震ダンパーを線形 Voigt モデル（バネとダッシュポットの並列）に置換する（図-19）。

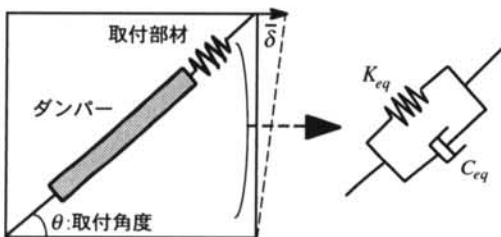


図-19 ダンパーの線形 Voigt モデルへの置換

(2) モーダルアナリシスによる応答評価：制震ダンパーが設置された建物の地震時最大応答値の評価は、ダンパーの線形 Voigt モデル置換による等価剛性と等価減衰係数が建物モデル各層の剛性と減衰係数に加算されるものとして、複素固有値解析を伴うモーダルアナリシス（拡張 CQC 法）^{18), 19)}を用いる。

制震ダンパーの性能指定型配置設計フローを図-20 に示す。

ここでは、ブレース型粘弾性ダンパー（SE ダンパー）の性能指定型配置設計例を示す。鋼管コンクリート構造 15 階建てビルを想定し、これを 1 次固有周期 2sec の 15 層せん断型構造物モデルに置換する。建物モデルの剛性は弾性とし、建物モデル自身の減衰定数は全次数で 2% 一定とした。全層の最大層間変形角を目標値に制約するために必要な SE ダンパー（粘弾性体厚さ 6mm）の各層配置量を求めた。

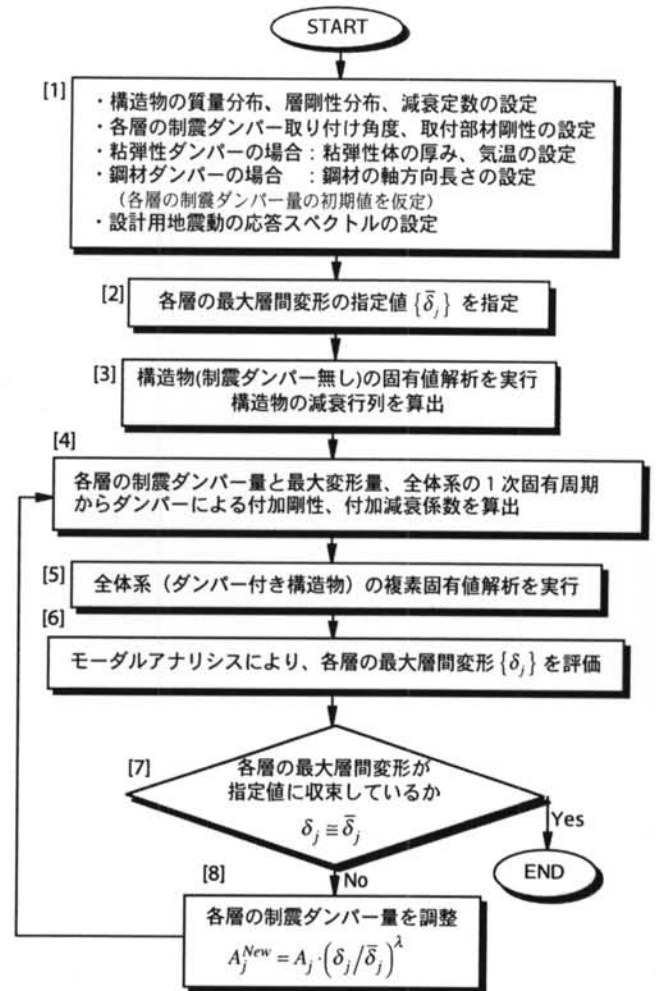


図-20 制震ダンパーの性能指定型配置設計フロー

ダンパーの取付角度は全層で 45 度とし、気温は 20℃ とした。なお、ここではダンパーの取付部材剛性は十分に大きいものとして考慮していない。

日本建築センターのレベル 2 地震動の基準応答スペクトル²⁰⁾に対して、全層の最大層間変形角を 1/100、1/120、1/140、1/160、1/180 にそれぞれ制約するために必要な各層の粘弾性体面積を図-21 に示す。各層の粘弾性体面積をダンパー 1 本当たり封入される粘弾性体面積（通常 4～5m²）で割ると必要ダンパー本数となる。

5.2 制震ダンパー配置による地震リスク制御

制震ダンパー配置による地震リスクの低減量を評価する。ここでは、制震ダンパーの性能指定型配置をした 15 階建てビルの日本建築センターのレベル 2 地震動に対する期待損失（%：初期建設コストに対する価格比）を求める。

本建物を構成する主な部位 ($i=1, \dots, n$) と初期建設コストに対する価格比 c_i (%) を次ぎのように設定する。
 $i=1$: 躯体 ($c_1=23\%$), 2 : 外装 ($c_2=15\%$), 3 : 内装 ($c_3=15\%$), 4 : 設備 ($c_4=20\%$), 5 : 昇降機 ($c_5=2\%$)。

各部位の損傷度曲線（地震時層間変形角と損傷割合の関係）は次式のように与える。

$$F(\gamma; \gamma_m, \zeta) = \Phi\left(\frac{\ln(\gamma) - \ln(\gamma_m)}{\zeta}\right) \quad (9)$$

ここで、 γ : 応答値（層間変形角）、 γ_m : 限界値、 ζ : ばらつき、 Φ : 正規確率分布の確率分布関数である。

式(9)における限界値 γ_m とばらつき ζ の設定方法としては、(1) 応答値と損傷度の関係を2点与えて決める、(2) 過去の地震被害調査や部材実験等から決める方法がある。

躯体と昇降機については、(1)の方法により、それぞれ「継続使用可（損傷度0.03）」と「補修後使用可（損傷度0.1）」に対応する層間変形角を与えて γ_m と ζ を定めている（図-22）。

外装、内装、設備については、被災モードを2つ設定し（被災モード1：軽微・部分的被害以上、被災モード2：中破以上）、(2)の方法により、各被災モードの γ_m と ζ を与えている（図-23）。

層間変形角 γ に対する損傷によって各部位に発生する損失 L （元の価格に対する損失額の比）は、以下の式で与えられる。

$$L(\gamma) = p_1(F_1(\gamma) - F_2(\gamma)) + p_2 F_2(\gamma) = \sum_k p_k \cdot f_k(\gamma) \quad (10)$$

ここで、 p_k : 被災モード k により失われるコスト比、 f_k : 被災モード k （単独）の損傷度。（躯体と昇降機については、被災モードは1つとし、コスト比 p は1.0としている。）部位 i の建物第 j 層における損失 L_{ij} は、第 j 層の層間変形角 γ_j により評価される。

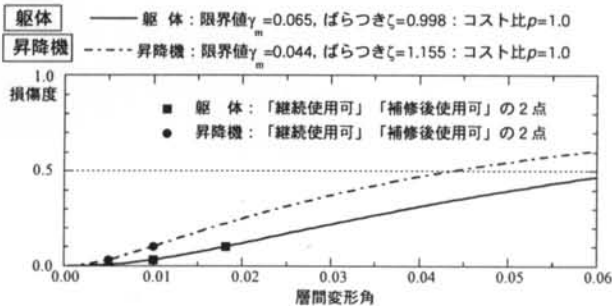


図-22 躯体および昇降機の損傷度曲線

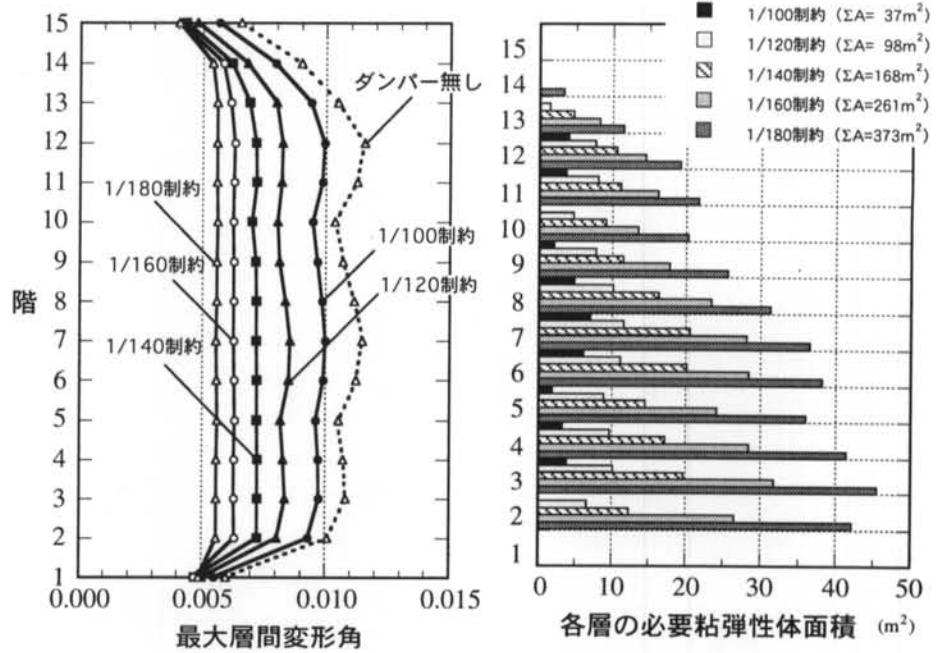


図-21 SEダンパーの性能指定型配置設計（日本建築センターレベル2地震動に対して最大層間変形角を制約）

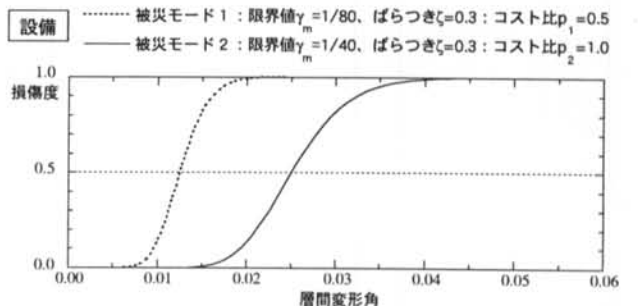
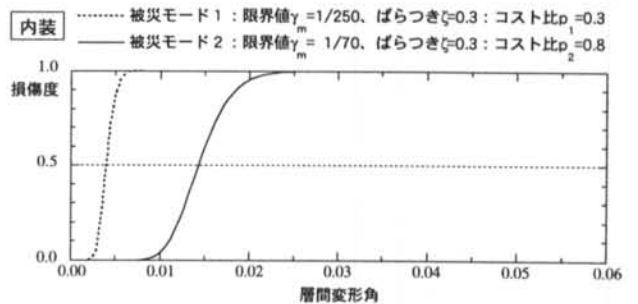
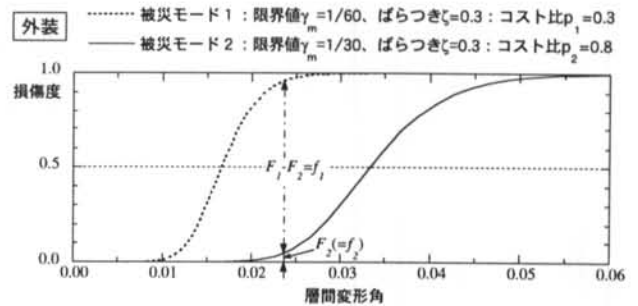


図-23 外装・内装・設備の損傷度曲線

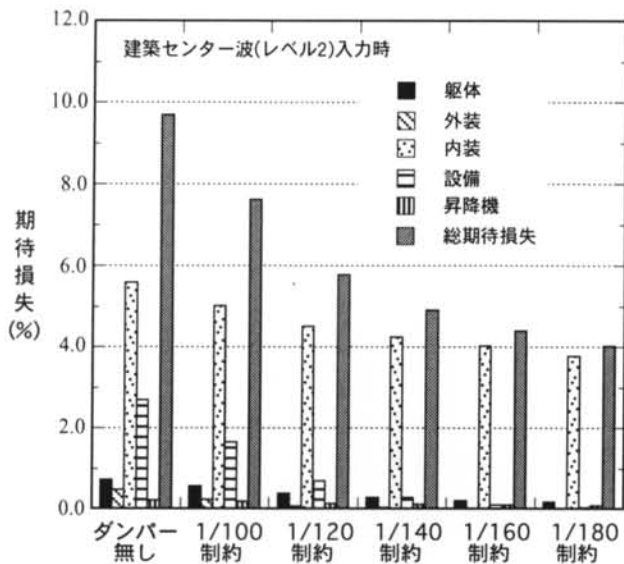


図-24 ダンパーの性能指定型配置による期待損失の低減

建物の期待損失 $C_D(\%)$ は、部位 i の第 j 層における損失 L_{ij} に、その部位の初期建設コストに占める価格比 $c_{ij}(\%)$ を乗じ、全層 (j) と全部位 (i) にわたって総和することにより、次式で評価される。

$$C_D = \sum_i \sum_j c_{ij} L_{ij}(\gamma_j) = \sum_i \sum_j c_{ij} \left(\sum_k p_{ik} f_{ijk}(\gamma_j) \right) \quad (11)$$

ここで、 p_{ik} : 部位 i の被災モード k により失われるコスト比、 $f_{ijk}(\gamma_j)$: 部位 i の第 j 層における被災モード k (単独) の損傷度。 $c_{ij}(\%)$ は、部位 i (全体) の $c_i(\%)$ (初期建設コストに対する価格比) に第 j 層の床面積比を乗じて求めている。

以上の方法により、SEダンパーの性能指定型配置設計例 (図-21) の日本建築センターレベル2地震動に対する期待損失 (%) を評価した。図-24 には、ダンパー配置により最大層間変形角を制約した設計例の各部位の期待損失とその和 (総期待損失) を示している。内装、次いで設備の損失が大きい。層間変形角の制約値を小さくするにつれ、総期待損失は小さくなり、内装の損失が支配的となる。なお、ここでは、ダンパーの初期建設コストに対する価格比は非常に小さいとして考慮していない。

(参考文献)

- 1) 真瀬伸治, 矢部喜堂, 寺田岳彦, 堀江竜巳, 岡澤岳, 堀富博, 中村庄滋: “極低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースダンパーに関する研究 (その2 低サイクル疲労実験)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1995.8.
- 2) 岡澤岳, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 兼光知巳: “極低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースダンパーに関する研究 (その4 疲労特性と累積損傷評価)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9.

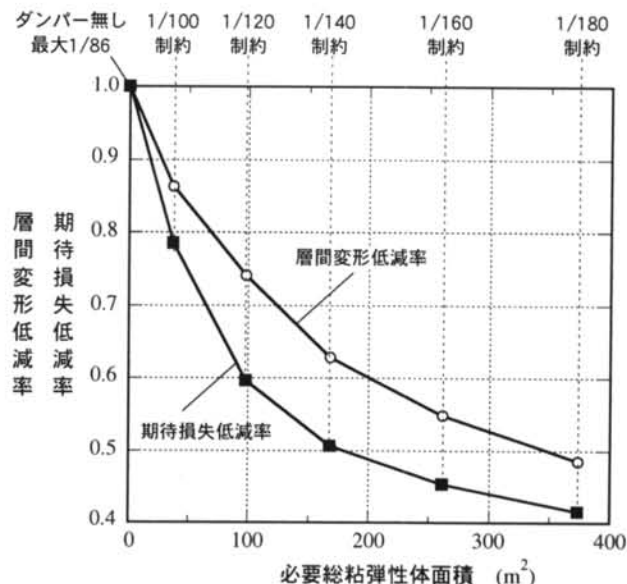


図-25 粘弾性体面積量と層間変形角および期待損失の低減率の関係

最大層間変形角を各目標値に制約するために必要なSEダンパーの総粘弾性体面積と層間変形低減率、および期待損失低減率の関係を図-25に示す。粘弾性体面積量が増えるにつれて、層間変形、期待損失共に大きく低減されるが、期待損失の低減率の方が大きい。

§ 6. まとめ

本報告では、これまでに開発し実用化した鋼材ダンパーと粘弾性ダンパーの構成と特徴、力学特性とモデル化について述べた。また、制震ダンパーが適用された建物について概要を紹介した。次に、制震ダンパーの性能指定型配置設計法の概要を延べ、適用設計例を示した。建物の地震リスク (予想される経済的損失) の評価法について説明し、制震ダンパーの地震リスク低減効果の試算結果を示した。

制震ダンパーは、新設または既存建物に適用されて、その地震時応答および地震時損傷を大きく低減させ、建物の耐震安全性を向上させることができる。

- 3) 磯田和彦, 真瀬伸治, 寺田岳彦, 佐武直紀: “溝形鋼で補剛したアンボンドブレースダンパーの開発 (その1 開発目的とダンパー部材の概要)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9.
- 4) 佐武直紀, 真瀬伸治, 寺田岳彦, 磯田和彦: “溝形鋼で補剛したアンボンドブレースダンパーの開発 (その2 実大試験体の静的漸増載荷実験)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9.
- 5) 寺田岳彦, 真瀬伸治, 佐武直紀, 磯田和彦, 広瀬景一: “溝形鋼で補剛したアンボンドブレースダンパーの開発 (その3 地震応答時の挙動評価)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9.
- 6) 磯田和彦, 佐武直紀, 真瀬伸治, 寺田岳彦, 堀江竜巳: “溝形鋼で補剛したアンボンドブレースダンパーの開発 (その4 低サイクル疲労実験)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002.8.
- 7) 寺田岳彦, 佐武直紀, 真瀬伸治, 磯田和彦, 堀江竜巳: “溝形鋼で補剛したアンボンドブレースダンパーの開発 (その5 地震応答加力実験)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002.8.
- 8) 堀江竜巳, 真瀬伸治, 寺田岳彦: “溝形鋼で補剛したアンボンドブレースダンパーの開発 (その6 芯材にSN400Bを用いた場合の低サイクル疲労実験)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003.9.
- 9) 寺田岳彦, 佐武直紀, 堀江竜巳, 真瀬伸治, 小川雄一郎, 磯田和彦: “溝形鋼で補剛された座屈拘束ブレースの低サイクル疲労特性と累積損傷度評価”, 日本建築学会技術報告集 第16号, 2002.12.
- 10) 曾根幸雄, 半澤徹也, 中村豊他: “スチレン系エラストマーを用いた粘弾性ダンパーの開発 (その1) ~ (その3)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集B 構造II, pp.815-820, 2002.8.
- 11) 金子美香, 中村豊: “振幅および振動数依存性を有する粘弾性ダンパーの力学モデルの構築”, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 44B, pp.263-270, 1998.3.
- 12) 半澤徹也, 寺田岳彦, 佐藤孝典, 西村拓也, 邵立, 堀江竜巳: “スチレン-オレフィン系粘弾性体のモデル化と制震効果”, 日本建築学会技術報告集, 第13号, pp.63~68, 2001.7.
- 13) 神野靖夫, 堀江竜巳, 川端泰造, 本多義人, 磯田和彦: “制震ブレースで補強された既存鉄筋コンクリート造架構の構造性能に関する研究”, 日本建築学会大会梗概集 (東海), 構造III, 2003.9.
- 14) 人見泰義, 川口喜三, 杉山芳博: “日本橋一丁目計画の設計と施工”, JSSC (日本鋼構造協会), No.51, 2004.1.
- 15) 中村豊, 来田義弘: “粘弾性ダンパーの性能指定型配置設計法”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.973-974, 2000.9.
- 16) 中村豊, 来田義弘: “制震ダンパーの性能指定型配置設計法”, 第2回日本制震(振)シンポジウム, pp.167-173, 2000.11.
- 17) Y. Nakamura and T. Hanzawa: “Performance-based placement design of vibration control dampers”, *Structural Engineers World Congress - SEWC 2002*, Yokohama Japan, 2002.
- 18) T. Igusa, A. Der Kiureghian and J.L. Sackman: “Modal decomposition method for stationary response of non-classically damped systems”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, pp. 121-136, 1984.
- 19) J.N. Yang, S. Sarkani and F.X. Long: “A response spectrum approach for seismic analysis of nonclassically damped structures”, *Engineering Structures*, Vol. 12, pp.173-184, July 1990.
- 20) 北川良和他: “設計用入力地震動作成手法に関する研究 (その1) ~ (その10)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集B 構造I, pp. 117-136, 1993.9.

