

# 極低降伏点鋼を用いた履歴型制震ダンパーの開発

寺田 岳彦 矢部 喜堂 真瀬 伸治 堀江 竜巳 林 章二 磯田 和彦  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計本部)

## Development of Low-yield-point Hysteretic Steel Dampers for Seismic Response Control

by Takehiko Terada, Yoshitaka Yabe, Shinji Mase, Tatsumi Horie, Syoji Hayashi and Kazuhiko Isoda

### Abstract

New types of steel dampers for controlling the earthquake response of structures have been developed. This paper reports on lateral loading tests of such dampers and the earthquake response analyses of structures combined with the dampers. The lateral loading tests were conducted using sub-structure frames containing the dampers. The specimens were subjected to incremental alternative lateral loads. Each specimen showed a stable load carrying capacity and a large inelastic energy absorption capacity. A series of elasto-plastic dynamic response analyses of frames were conducted using numerical models of the hysteresis characteristics of each type of damper. From the results, it has been cleared that the responses of the buildings to seismic activities can be reduced significantly by attaching the dampers.

### 概要

本報では、建物の地震応答を制御する制震ダンパーとして、極低降伏点鋼を用いた4種類の形状のダンパーを新たに提案している。これらのダンパーの弾塑性加力実験によりダンパーの力学的性状を把握するとともに、ダンパーを設置した建物の地震応答解析を行い建物の地震応答性状ならびにダンパーの応答低減効果を検討している。その結果、本報で提案したダンパーは、小振幅から大変形にわたり安定した履歴性状およびエネルギー吸収能力を示し、建物の地震応答の低減に有効であることを明らかにしている。

### § 1. はじめに

近年、建物に設置した制震ダンパーによって地震時のエネルギー入力を吸収して架構全体の地震応答を制御し、建物の耐震安全性の向上を図ろうとする制震架構が開発され、実際に建設されている<sup>1)</sup>。

また、1998年6月の建築基準法の性能規定化に伴い、建物の耐震性能を明示することが今後要求されていくと考えられる。制震ダンパーを設置した建物、すなわち制震架構は、今までの建物に比べその崩壊形やエネルギー吸収能力が把握しやすいため、建物の耐震性の評価も容易である。したがって、制震ダンパーを設置した建物の建設は、今後ますます増加していくものと考えられる。

制震架構の実現において最も重要な要素の一つに、高性能な制震ダンパーの開発がある。高性能なダンパーを建物に設置することで、建物の持つ耐震性は向上し、かつ経済性も高めることができる。

本報は、これらを背景に遂行された極低降伏点鋼を用いた制震ダンパーの開発に関して行なわれた一連の実験ならびに解析的な検討の結果を報告するものであ

る。なお本研究の一部は、既に文献2)から4)において報告している。

### § 2. 制震ダンパーの概要

本研究で新たに提案した制震ダンパーの架構への組み込み状況を図-1に示す。いずれのダンパーともに建物の層間せん断変形がダンパーに強制変形として作用するものである。

以下に各ダンパーの概要を述べる。

(a) プレキャスト(Pca)壁内蔵型アンボンドブレースダンパー：極低降伏点鋼製の平鋼ブレースを内蔵したPca壁のダンパーである。極低降伏点鋼ブレースとPca壁の間は絶縁され、Pca壁には極低降伏点鋼の芯材の座屈拘束機能のみが期待されている。座屈を防止することで極低降伏点鋼ブレースは圧縮および引張力により軸降伏し、軸方向の塑性ひずみによりエネルギーを吸収するものである。芯材が平鋼ブレースであるため、Pca壁を薄くすることができる。そのため、ホテル等の戸境壁として設置することが可能である

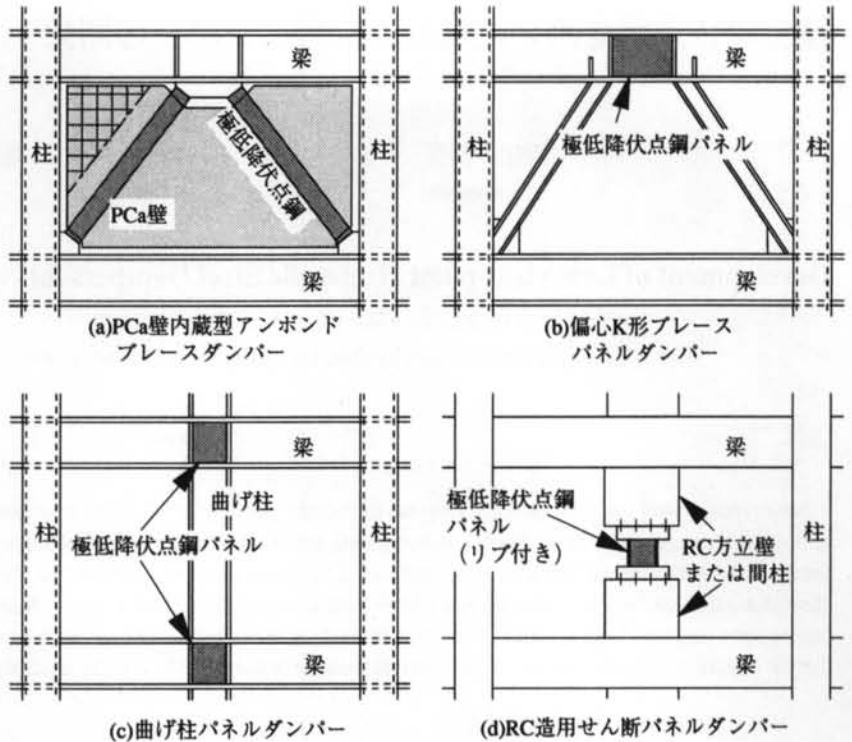
(b) 偏心 K 形ブレースパネルダンパー：偏心 K 形ブレース架構のシアリンク部分のウェブに極低降伏点鋼パネルが設置されている。地震時には、この部分がせん断降伏することにより地震エネルギーを吸収する。偏心 K 形ブレース架構は、シアリンク部分の長さ（ブレースの角度）を変更することにより架構の耐力ならびに剛性を調節することができる。そのため、本ダンパーにおいてもシアリンク部の長さを変えることでダンパーを有する偏心 K 形ブレース架構の剛性や耐力を調節することができる。

(c) 曲げ柱パネルダンパー：軸力を負担しない曲げ柱（間柱）と梁との接合部パネルを極低降伏点鋼とし、地震時にはパネルのせん断降伏によりエネルギーを吸収する。この形式は、周囲の柱や梁に比べパネル部の耐力が低いウィークパネルであるが、曲げ柱が軸力を保持していないため接合部パネルの降伏が建物の鉛直支持能力に影響を及ぼすことはない。また、建物の外周部に曲げ柱を設置することができ、平面計画上の制約が少ない形式のダンパーである。

(d) 鉄筋コンクリート（RC）造用せん断パネルダンパー：図—1に示すように RC 造方立壁ないし間柱を介して建物各層に設置される。層間変形によりダンパーはせん断降伏し、エネルギーを吸収する。方立壁ないし間柱により層間変形角が増幅されてダンパーのせん断変形角となるため、ダンパーが降伏する時の層の変形を小さく設定できる。そのため、小さい応変形時からダンパーの効果を発揮させることができ、早期にひび割れが生じやすい RC 建物への対応が可能となっている。

いずれのダンパーともに極低降伏点鋼の軸降伏ないしせん断降伏によりエネルギーを吸収するものである。ダンパーの降伏機構が軸降伏ないしせん断降伏の場合、ダンパー全体にわたりほぼ一様なひずみ分布になるため、効率のよいエネルギー吸収が期待できる。また、極低降伏点鋼は、降伏点が 100~120MPa 程度であり普通鋼の半分以下である。しかし、材料の伸び能力が極めて高いため、小振幅から大変形領域にわたって安定してエネルギーを吸収する特性を持っている。

なお、(a) から (c) の制震ダンパーは主に鉄骨（S）造建物への設置を、(d) のダンパーは主に鉄筋コンク



図—1 建物への各ダンパーの組み込み状況

名称	ダンパー種類	スケール	ダンパー寸法 (mm)
W-1	PCa壁内蔵アンボンドブレース	1/2.5 ~1/3	t11, 幅110
K-2	偏心K形パネル		t8-250 × 400
F-1	曲げ柱パネル		t8-250 × 300
WI	RC造用パネル	実大	t6-240 × 240 (2枚)

表—1 試験体一覧

リート（RC）造建物への設置を想定している。ただし、(d) RC 造用せん断パネルダンパーであっても S 造への適用は可能である。

### § 3. 制震ダンパーの弾塑性加力実験

本章では、各ダンパーの力学的性状を把握するため、ダンパーおよびその周辺部材の弾塑性加力実験を行う。

#### 3.1 実験概要

##### 3.1.1 試験体

表—1に試験体の一覧を示す。試験体は4体であり、それぞれ図—1に示す (a) から (d) の各ダンパーに対応する。

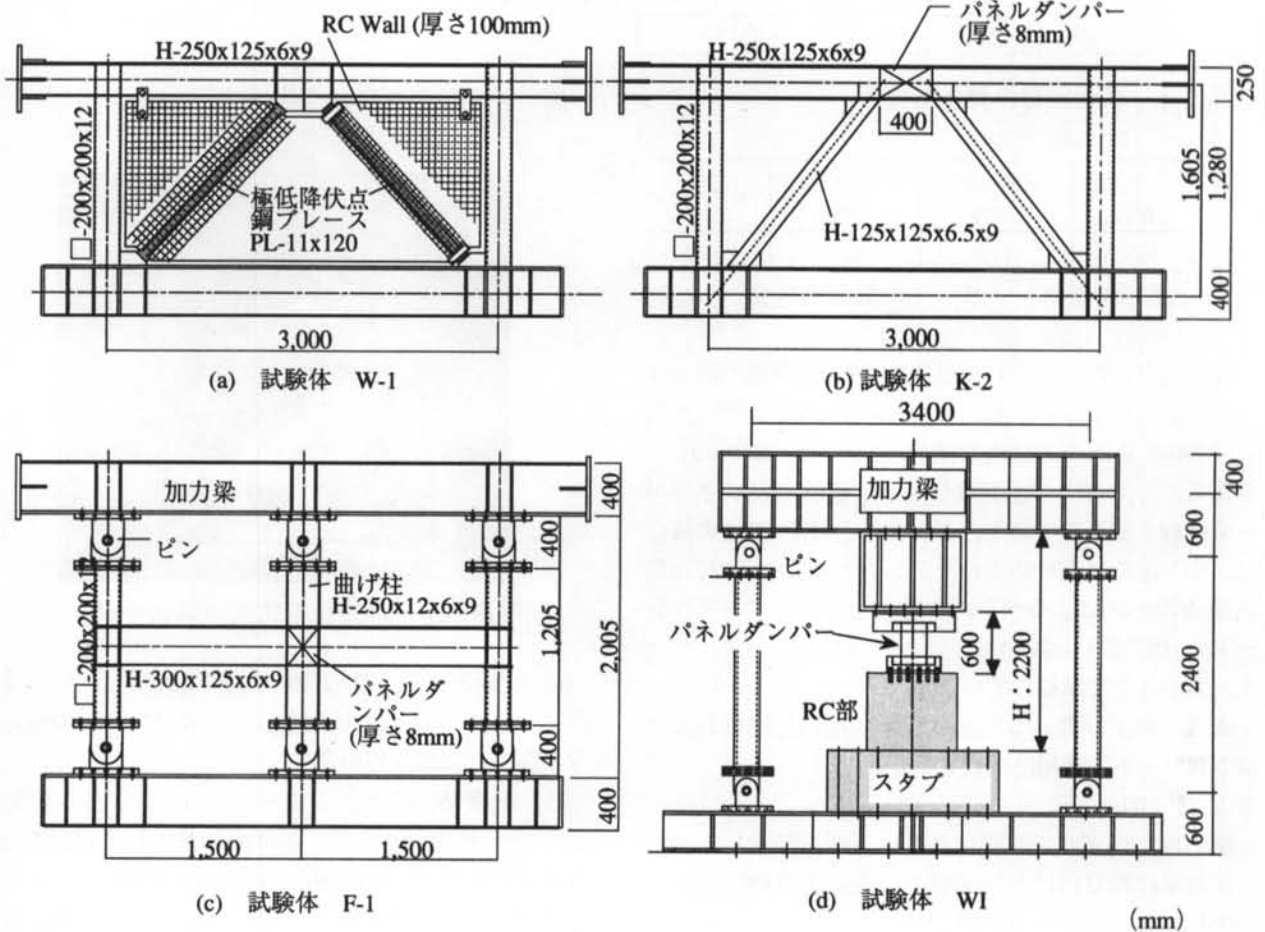
各試験体の形状・寸法を図—2に示す。試験体 W-1、K-2 および F-1 は概ね実大の 1/2.5~1/3 程度、試験体

WI は実大スケールである。各試験体の極低降伏点鋼のダンパー部分の寸法は表—1に示す通りである。

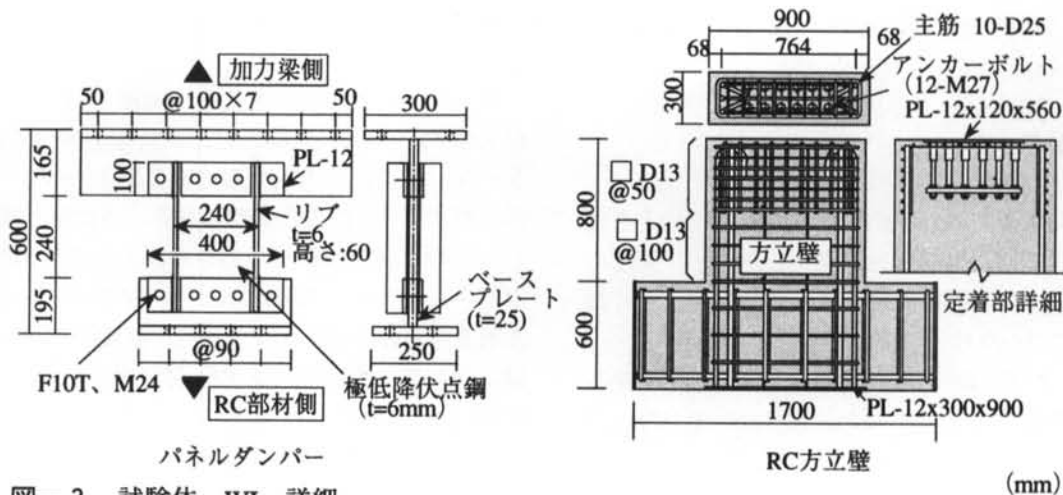
試験体 W-1 および K-2 は上下階の梁間を、試験体 F-1 は上下階の柱反曲点間を試験体として設定している。試験体 F-1 の上下のピン部材の位置が柱反曲点位置に相当する。試験体 WI はダンパーと RC 方立壁を直列につないで試験体を構成しているが、図—1 (d) に示す上下の方立壁のうち、下部の方立壁のみを試験

体の一部とし上部の方立壁は鋼製の加力治具としている。

本実験では、ダンパーのみでなくその周辺部材も含めて試験体を構成している。このことにより、ダンパーの力学的性状およびエネルギー吸収能力だけでなく、周辺部材ならびに周辺部材とダンパーとの接合部の挙動や周辺部材が及ぼすダンパーの力学的性状への影響の把握も目的としている。



図—2 各試験体の形状・寸法



図—3 試験体 WI 詳細

材料	降伏点 (MPa)	引張強さ (Mpa)	伸び (%)	使用試験体および使用部位	
極低降伏点鋼	t11	117	246	42	W-1 ダンパー
	t8	85	238	50	K-2、F-1 ダンパー
	t6	123	258	56	WI ダンパー
SM490	t6	379	546	24	W-1、K-2、F-1 柱および梁
	t9	403	546	24	
	t12	401	547	22	
鉄筋	D13	332	488	31	WI フープ
	D25	379	566	35	WI 主筋

表-2 使用鋼材の機械的性質

設計基準強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
36	43.3	32.6	0.222

表-3 使用コンクリートの機械的性質

RC 用ダンパーを用いた試験体 WI の詳細を図-3 に示す。このダンパーは、板厚 6mm の極低降伏点鋼に SS400 のリブを隅肉溶接し、240mm×240mm の矩形のパネル部分が塑性変形することで地震エネルギーを吸収するものである。ダンパーと RC 部との接合は、RC 部分に埋め込まれたアンカーボルト(M27、埋込長 270mm)によりダンパー取り付け用のベースプレートを RC 部材に接合し、ベースプレートとダンパーを高力ボルトで緊結している。

表-2 および表-3 に各試験体に用いた鋼材およびコンクリートの機械的性質を示す。

### 3.1.2 加力方法

加力は、いずれの試験体ともに下部を固定し、上部の加力梁に取り付けた油圧ジャッキにより静的に水平力を与える。

加力プログラムを図-4 に示す。上下の梁間の層間変形角  $R$  でジャッキのストロークを制御し、所定の変位で 2 回ずつ繰り返す変位制御の二定変位の漸増交番载荷としている。

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 最終状況

(a) 試験体 W-1 : 層間変形角  $R=1/100$  程度のときに圧縮ブレース端部に局部座屈が発生した。水平変形の増大に伴い徐々に局部座屈による面外変形が大きくなり、最終的にコンクリート部分が割裂破壊した。

(b) 試験体 K-2 :  $R=1/50$  加力時までダンパーパネル部には面外変形は生じなかった。 $R=1/30$  加力時にパネル中央にせん断座屈が発生し、耐力がわずかに低下した。

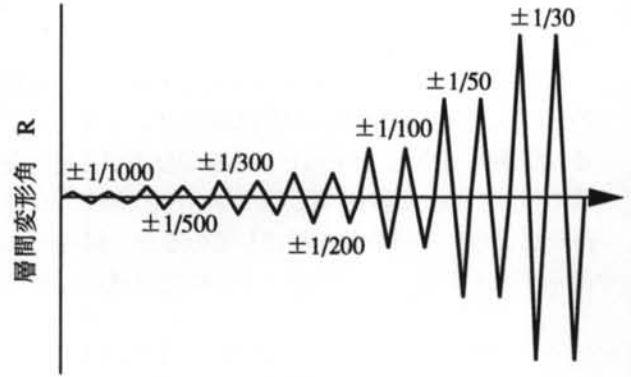


図-4 加力プログラム

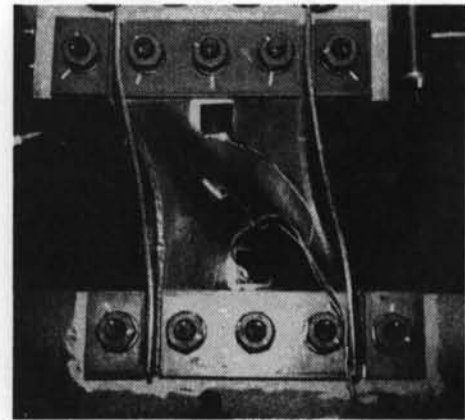


写真-1 加力後の状況 (試験体WI)

(c) 試験体 F-1 :  $R=1/30$  加力時までダンパーパネル部には面外変形は生じなかった。 $R=1/30$  加力時に梁フランジに局部座屈が発生した。

(d) 試験体 WI : ダンパーパネル部の面外変形は  $R=1/200$  程度から生じ、最終的にパネル部に顕著な面外座屈が生じた。RC 部には微小なひび割れは生じたものの、大きな損傷は生じていなかった。写真-1 に試験体 WI の加力後のダンパーの状況を示す。平板部に面外座屈が生じていること、面外座屈の発生により斜張力場が形成されていることが分かる。

### 3.2.2 荷重—変形関係

各試験体のせん断力と変形の間を関係を図-5 に示す。試験体 W-1 および K-2 は、試験体全体 (柱およびブレース) のせん断力と変形の関係およびブレースのみの負担するせん断力と変形の関係の両者を、試験体 F-1 については試験体全体のせん断力と変形の関係およびパネルダンパー部のパネルモーメントとパネルのせん断変形角の関係を示す。また、試験体 WI については、ダンパー部分および RC 部分のせん断力と変形の間を分けて示す。

いずれの試験体ともにせん断力と変形の間は安定した紡錘形の履歴を描いていることが分かる。試験体



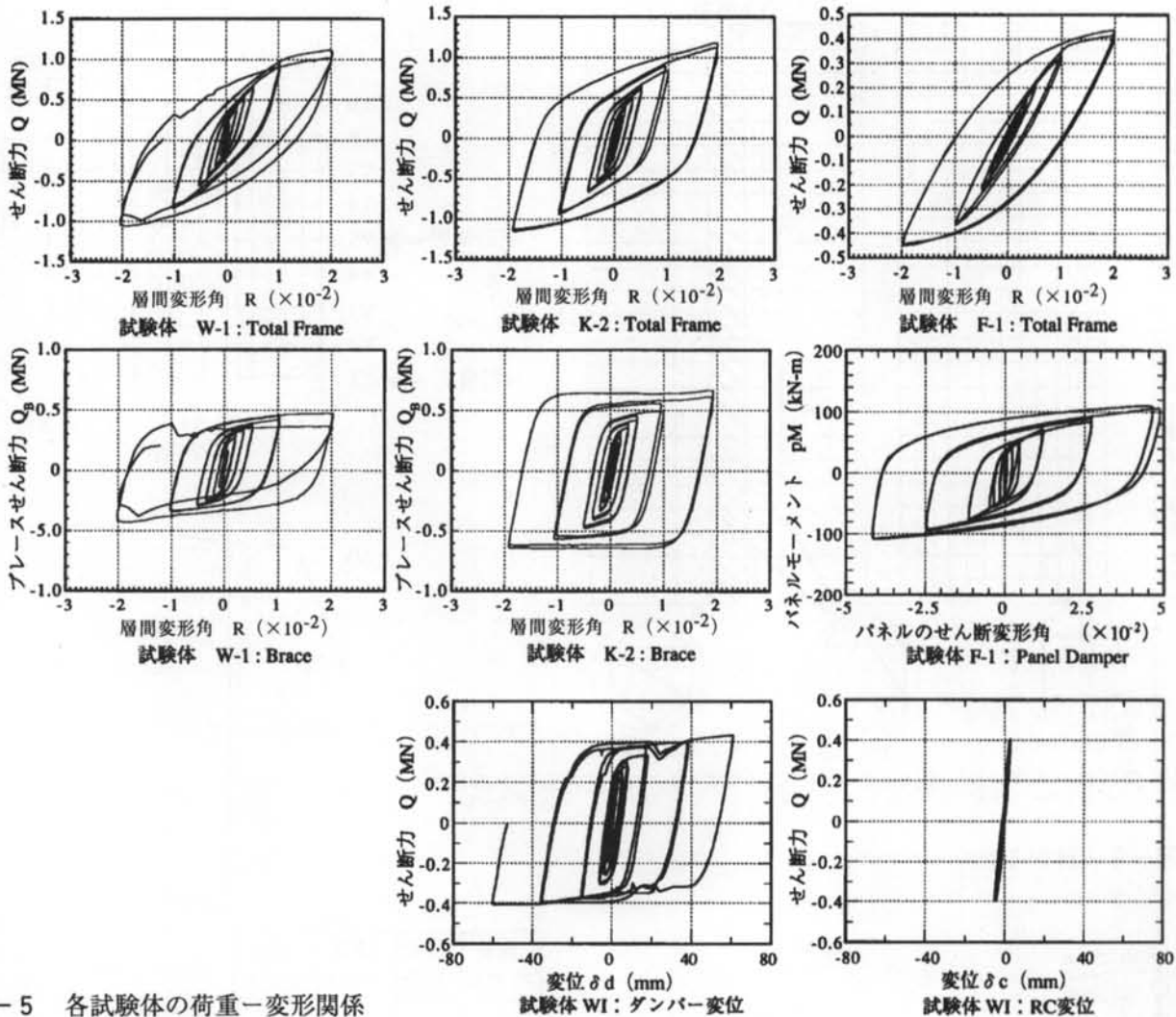


図-5 各試験体の荷重-変形関係

W-1 では、最終的にブレース端部に局部座屈が生じたため、大変形時のブレースの耐力が低下しているが、層間変形角  $1/100$  までは耐力低下は生じていない。試験体 K-2 および F-1 については、本実験の範囲、すなわち層間変形角  $1/30$  までは耐力低下等の不安定現象は生じていない。

試験体 WI は、ダンパー部分と RC 部とは直列に接続されているため、両者の変形を合わせたものが全体の変形に相当する。図-5 に示されるように RC 部がほぼ弾性挙動であるのに対しダンパー部が大きく塑性履歴を描き、ダンパーによってほとんどのエネルギーが吸収されていることが分かる。なお、ベースプレートを固定したアンカーボルトの抜け出し等は見られず、強制変形として与えた変形のほとんどがダンパーの変形となっている。

以上、ダンパーおよびその周辺部材の弾塑性加力実験により、いずれのダンパーともに安定した履歴を示すこと、ならびに各ダンパーは効率よくエネルギーを吸収することが明らかになった。

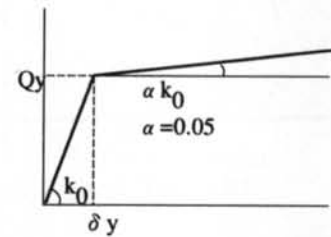
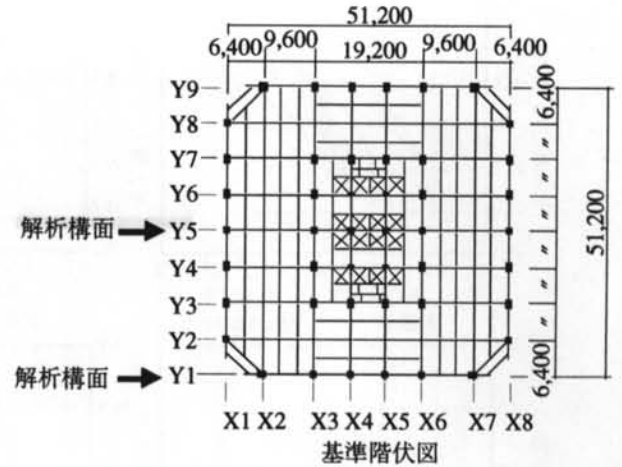
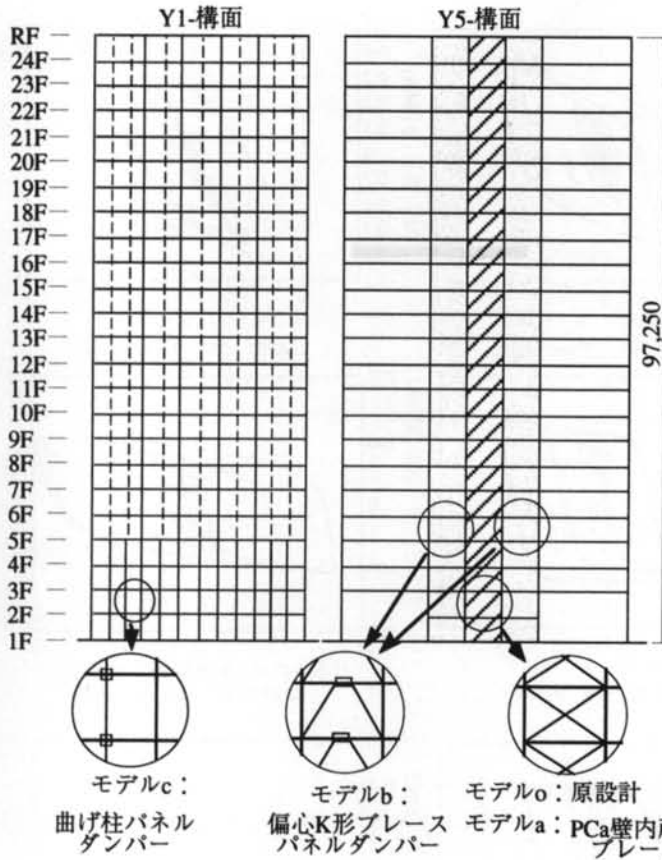
#### § 4. 制震ダンパーを設置した建物の地震応答解析

制震ダンパーの効果を検証するために、制震ダンパーを設置した建物の地震応答解析を行う。

##### 4.1 解析概要

解析モデルの一覧を表-4 に示す。ダンパーの種類に応じて S 造および RC 造の 2 棟の建物を想定した。これらの建物はいずれも現行の設計基準に則って設計されたものである。

S 造建物および RC 造建物の解析モデルを図-6 および図-7 にそれぞれ示す。ダンパーを S 造の建物に適用する場合には、ダンパーの種類 (モデル a, b および c) をパラメータにし、RC 造建物への適用に当たってはダンパーの設置箇所数 (モデル d-1, d-2 および d-3) をパラメータにしている。また、それぞれの建物ともに比較のため、ダンパーを設置しない原設計モデルの地震応答解析も行っている。



モデルa~cのダンパーの復元力

図-6 解析モデル (モデルa~c)

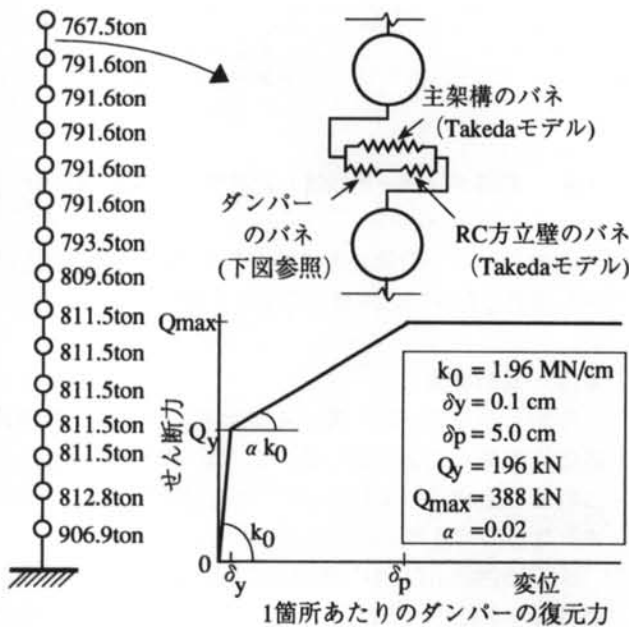


図-7 解析モデル (モデルd-1~d-3)

S造の建物にダンパーを設置する場合は、原設計の耐震要素(鉄骨ブレース)をダンパーに置換したモデルとし、鉄筋コンクリート造の建物については原設計にダンパーを付加したモデルとしている。

解析モデル	想定建物	建物モデル	主構造復元力	ダンパー種類	ダンパー復元力
a	S造 24階 事務所	部材系	Bi-Linear (柱, 梁)	PCa壁内蔵アンボンドブレース	Bi-Linear
b				偏心K形ブレースパネル	
c				曲げ柱パネル	
d-1	RC造 15階 集合住宅	質点系	Takedaモデル	RC用パネル (12箇所/層)	Tri-Linear
d-2				RC用パネル (24箇所/層)	
d-3				RC用パネル (48箇所/層)	

表-4 解析モデル一覧

部材系の解析モデルの作成にあたっては、図-6に示す Y1 および Y5 構面を取り出し、この 2 構面の対応する節点の変位をリンクさせている。各構面の柱および梁を材端パネにモデル化し、その復元力特性は Bi-Linear 型とする。

質点系のモデル化に際しては、各層のパネは主架構のパネとダンパーを表すパネを並列に配し、かつダンパーのパネは、鋼材ダンパーのパネと取り付け RC 方

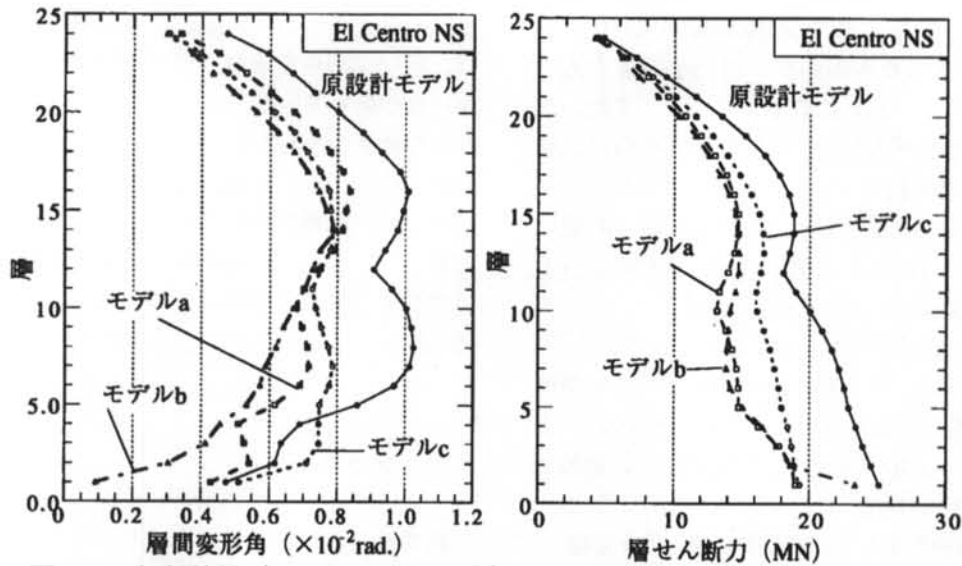


図-8 解析結果 (モデルa、bおよびc)

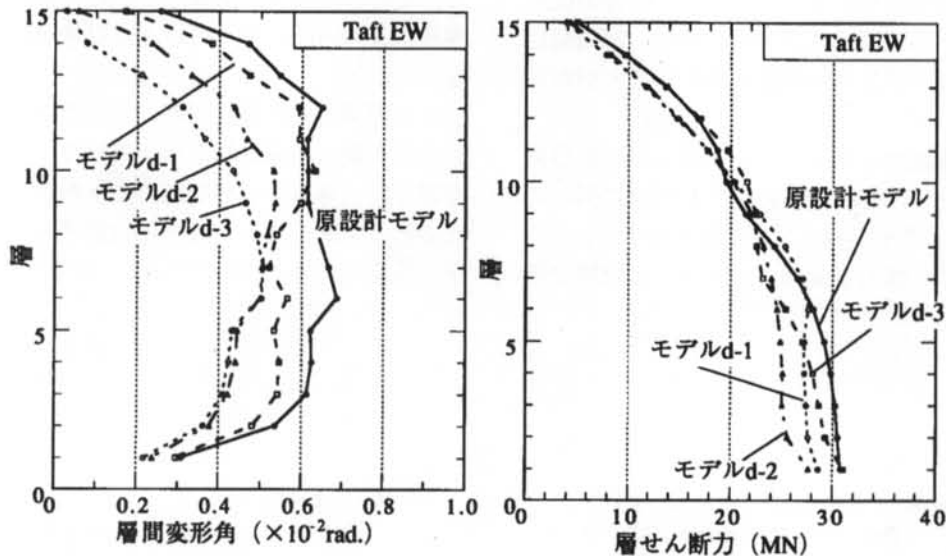


図-9 解析結果 (モデルd-1~d-3)

立壁のパネを直列につないでいる。ダンパー 1 台あたりの復元力は、実験結果に基づき図-7に示す Tri-Linear 型を用い、主架構およびダンパー取り付け RC 部材の復元力は Takeda モデル<sup>5)</sup>とする。なお、RC 造建物の各階の床面積は約 500m<sup>2</sup>、階高は 2.9~3m である。

部材系の応答解析には当社保有の SERA を、質点系については DAC3N を用いる。

入力地震動は、設計における動的な検討で用いられている標準的な地震動 (El Centro NS、Taft EW、Hachinohe NS) の最大速度を 50 cm/sec (レベル 2) に基準化して用いる。減衰は、1 次固有周期に対応する減衰定数を 2%とする瞬間剛性比例型とする。数値積分は Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ )を用い、時間刻み 0.01sec で 30sec (3000Step) について解析する。

#### 4.2 解析結果

解析結果を図-8および図-9に示す。図-8が S 造建物への設置を想定したモデル a、b および c の結果を、図-9が RC 造への設置を想定したモデルの結果を表す。図-8および図-9ともにそれぞれのモデルで最も応答が大きくなった地震動の結果を表し、図-8は El Centro NS 動、図-9は Taft EW 動を入力した結果である。また、各図ともに左が最大層間変形角、右が最大層せん断力の分布を表している。層せん断力は、主架構とダンパーの負担するせん断力を足しあわせたものである。

原設計モデルに対し、最大層間変形角および最大層せん断力ともに応答が低減されていることが図-8および図-9から分かる。

S 造建物への設置を想定したダンパーの場合(図—8)、原設計モデルの最大応答層間変形角が約1%(1/100)程度であったものがダンパーを設置することにより約0.8%(1/125)に低下している。また、ダンパーを設置したモデルの最大応答層間変形角は、第14層から第16層の付近で生じ、ダンパーの種類に関わらずその値はほぼ同じである。しかし、第10層以下の最大層間変形角の分布はダンパーの種類によって大きく異なる。本解析では、モデルc<モデルa<モデルbの順に応答の低減効果が大きくなっている。

層間変形角と同様、層せん断力に関しても応答が低減している。応答の低減効果に関しては、モデルcよりもモデルaおよびbが大きく、層間変形角の低減効果とほぼ対応したものとなっている。

RC造への適用を想定した解析結果(図—9)では、ダンパー設置箇所数を増やすに従い原設計モデルに比べ各層の最大層間変形角が低減している。応答の低減効果はモデルd-1<d-2<d-3の順に大きく、層間変位を減らすためには、ダンパーの数を増やすことが有効であると言える。

ダンパーの設置箇所を増やすに従い最大層間変形角が減少したのに対し、各層の応答層せん断力に関しては、モデルd-2の応答値が最も低い結果となっている。このことは、層せん断力を低減させる場合と層間変形

角を低減させる場合では最適なダンパー設置箇所数が異なることを示している。すなわち、本解析の範囲では、層間変形角を低減させるためにはダンパーの設置箇所数が最も多いモデルd-3が適当であるが、層せん断力を低下させるためには、モデルd-2のダンパーの設置が最も適当であると言える。

ダンパーの種類や設置箇所数によって応答低減効果は異なっているが、本研究で提案した制震ダンパーはいずれも良好な応答低減効果を有していることが地震応答解析により検証することができた。

## § 5. まとめ

鉄骨造ならびに鉄筋コンクリート造建物への設置を想定した極低降伏点鋼製の複数の制震ダンパーを提案し、その弾塑性加力実験ならびに地震応答解析により制震ダンパーの力学的特性および地震応答の低減効果を検討した。

その結果、本研究で提案した制震ダンパーは、小振幅から大変形領域にわたって良好な力学的性状を示し安定したエネルギー吸収能力を保有すること、ならびにこれらのダンパーを建物に設置することにより良好な応答低減効果を発揮できることを示した。

## <参考文献>

- 1)例えば、「耐震設計の新しい方向」シンポジウム実行委員会：“耐震設計の一つの新しい方向”，1995.10
- 2)矢部喜堂，堀江竜巳，柴慶治 他：“中高層鉄骨建物用の履歴型制震架構の開発（その1）～（その3）”，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造II，pp.919-924，1998.9
- 3)寺田岳彦，黒瀬行信，堀江竜巳 他：“鉄筋コンクリート建物用の履歴型制震架構の開発（その1），（その2）”，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造II，pp.943-946，1998.9
- 4)Tatsumi Horie, Yoshitaka Yabe, Shinji Mase, Keiji Shiba and Takehiko Terada：“Vibration Control of Steel Building Combined with Low-Yield-Point Steel Dampers”，Second World Conference on Structural Control，1998.1
- 5)Takeda et al.：“Reinforced Concrete Response to Seismic Earthquakes”，Jour. Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, 1970