

# 論文 鋼材ダンパーを用いた鉄筋コンクリート造制震架構に関する研究

寺田岳彦\*1・矢部喜堂\*2・黒瀬行信\*3・堀江竜巳\*4

**要旨:**本報では、鉄筋コンクリート造建物を対象とした制震架構を提案する。この架構に用いる鋼材ダンパーの弾塑性加力実験および疲労実験によりダンパーの力学性状を把握するとともに地震応答解析により提案した制震架構の地震応答特性を明らかにしている。さらに実験および解析結果に基づいてダンパーの累積損傷度を算定することにより、地震時のダンパーの安全性を検証し、提案した制震架構の耐震性、実現性について検討している。  
**キーワード:** 鋼材ダンパー、制震架構、弾塑性加力実験、疲労実験、地震応答解析

## 1. はじめに

地震時の建物への入力は、エネルギーとして捉えることができる<sup>1)</sup>。建物へ投入されたエネルギーを建物内部で効率的に吸収することで建物の耐震性は確保できる。近年このような見地から、建物に設置されたエネルギー吸収装置、いわゆる制震ダンパーに積極的にエネルギーを吸収させ、建物の耐震性の向上を図ろうとする架構が開発され実建物に適用されている<sup>2)</sup>。ただし、その適用建物は主に鉄骨造である。

本研究は、このような架構方式を鉄筋コンクリート(RC)造建物に適用することを目的に行われたものである。

本研究では、エネルギー吸収装置として提案した鋼材ダンパーの力学性状を実験により明らかにするとともに、地震応答解析により架構の地震応答特性を把握する。さらに鋼材ダンパー

の破壊に着目し、鋼材ダンパーの累積損傷度に基づいてダンパーの安全性を検討し制震架構の有効性および実現性を検証するものである。

本研究で想定した制震ダンパーの建物への組み込み例を図-1に示す。このダンパーは、材料に極低降伏点鋼を用い、鉄筋コンクリート造の方立壁ないし間柱により建物の各層に設置される。地震時の層間変形がダンパーに強制変形として作用し、ダンパーが塑性変形することでエネルギーを吸収するものである。

## 2. 鋼材ダンパー部材の弾塑性加力実験

### 2.1 試験体

まず、鋼材ダンパーの力学性能を把握するため、弾塑性加力実験を行う。

本実験では、実大のダンパーおよび躯体に取り付けるためのRC部材により試験体を構成す

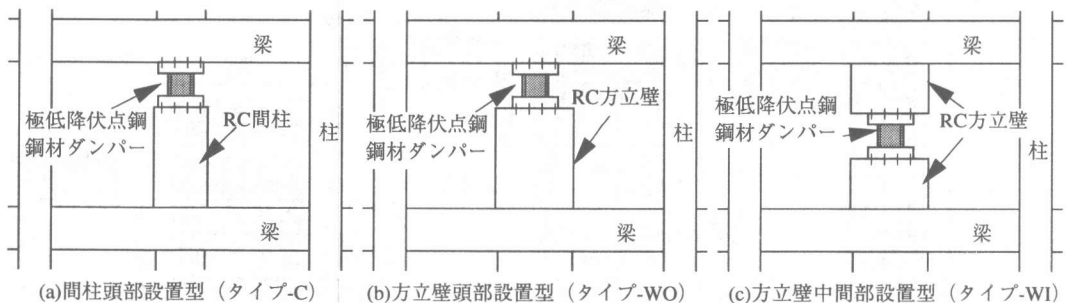


図-1 ダンパーの組み込み例

\*1 清水建設(株) 技術研究所 博士(工学) (正会員)  
 \*2 清水建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)  
 \*3 清水建設(株) 設計本部 工博 (正会員)  
 \*4 清水建設(株) 技術研究所 工修

る。このことにより、ダンパーの力学性状およびエネルギー吸収能力のみでなく、RC部分および接合部の力学性状の把握も目的とする。

試験体の一覧を表-1に示す。試験体は3体であり、それぞれ図-1に示す設置方法に対応する。パラメータはRC部分の形状およびダンパーの設置位置である。RC間柱の場合には柱頭に、方立壁の場合には壁頭および中間部にダンパーを設置することを想定している。なお、中間部に設置するNo.3は、壁頭部に設置するNo.2よりもRC方立壁脚部の曲げ応力が緩和されるため、同一のダンパー2台をベースプレートの表裏に取り付けている。ただし、コンクリート強度および鉄筋強度も割り増している。

鋼材ダンパーおよびRC部材の形状・寸法を図-2および図-3に示す。極低降伏点鋼製のダンパーは、中央の240mm×240mm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。パネル部の両側には面外変形を防止するためのリップ(SS400)が隅肉溶接されている。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する。

表-2および表-3に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。

## 2.2 加力方法

加力装置を図-4に示す。ピン部材を4箇所配置し、加力梁が常に平行を保つようにして静的

表-2 使用鋼材の機械的性質

材料	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	伸び (%)	使用部位	
極低降伏点鋼	123	258	56	ダンパー	
鉄筋	D13	332	488	31	全試験体フープ
	D25	379	566	35	No.2、3主筋
	D29	408	588	28	No.1主筋

$\sigma_y$  : 降伏点,  $\sigma_B$  : 引張強さ

表-3 使用コンクリートの機械的性質

Fc (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	Ec (GPa)	$\nu$	使用試験体
24	32.2	27.7	0.202	No.1、2
36	43.3	32.6	0.222	No.3

Fc : 設計基準強度,  $\sigma_B$  : 圧縮強度,  
Ec : ヤング係数,  $\nu$  : ポアソン比

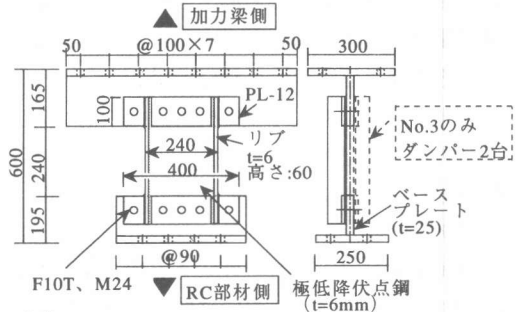


図-2 鋼材ダンパーの形状・寸法 (mm)

表-1 試験体一覧

No.	タイプ	RC部材	ダンパー位置	ダンパー部材
1	C	間柱	柱頭	1台
2	WO	方立壁	壁頭	
3	WI		中間	2台

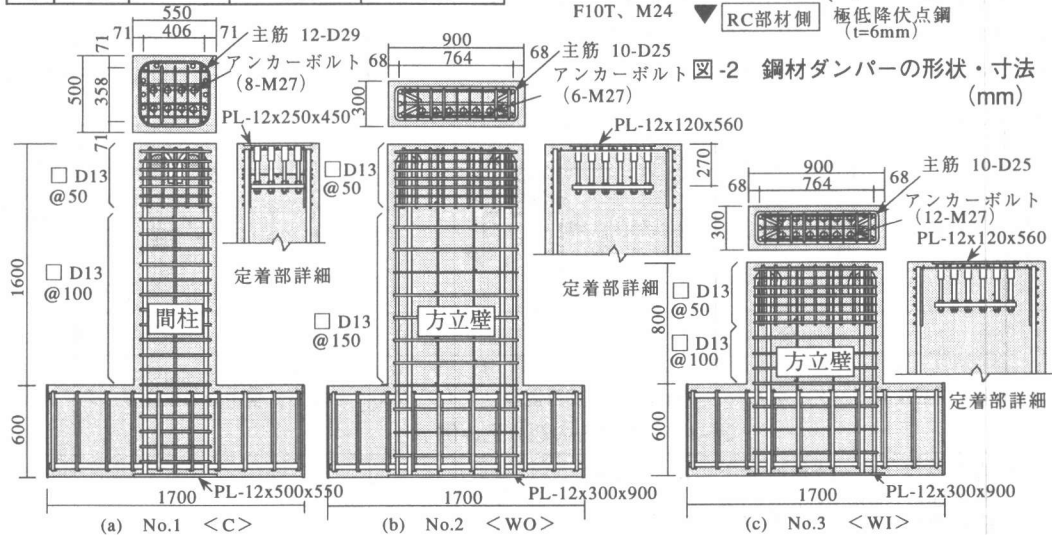


図-3 RC部材の形状・寸法 (mm)

に加力する。加力は、図-4に示すスタブ上面から加力梁の下面までの高さ $H(=2200\text{mm})$ に対する変形角 $R$ で制御し、同一の変位で2回づつ繰り返す。設定した $R$ は、以下の通りである。

$R = \pm 1/1000 \rightarrow \pm 1/500 \rightarrow \pm 1/300 \rightarrow \pm 1/200 \rightarrow \pm 1/100 \rightarrow \pm 1/50 \rightarrow \pm 1/30$  ただし、 $R$ は試験体ごとに下式による。

(試験体No.1および2)

$$R = \frac{\delta d + \delta c}{H} \dots\dots\dots (1.1)$$

(試験体No.3)

$$R = \frac{\delta d + 2\delta c}{H} \dots\dots\dots (1.2)$$

ここに、 $\delta d$ :ダンパー変位、 $\delta c$ :RC変位  
 なお、 $H$ は実建物の梁下高さに相当する。

### 2.3 実験結果

(1) 最終状況 写真-1に加力後のダンパースタットの状況を示す。

パネル部に顕著な面外座屈が生じている。また、いずれの試験体ともに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い。なおパネル部の面外変形は、 $R$ が $1/200$ 程度から生じていた。

(2) 荷重-変形関係 各試験体の荷重-変形関係をダンパーおよびRC部に分けて図-5に示す。

RC部は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いている。各試験体ともに顕著な耐力低下は生じなかったが、ジャッキのストロークが限界に達したため、加力を終了している。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生じていない。

### 3. 鋼材ダンパーの低サイクル疲労試験

#### 3.1 試験概要

地震時には鋼材ダンパーが早期に降伏し、かつ、繰り返しによって鋼材ダンパーが疲労破断することが考えられる。そのため、鋼材ダン

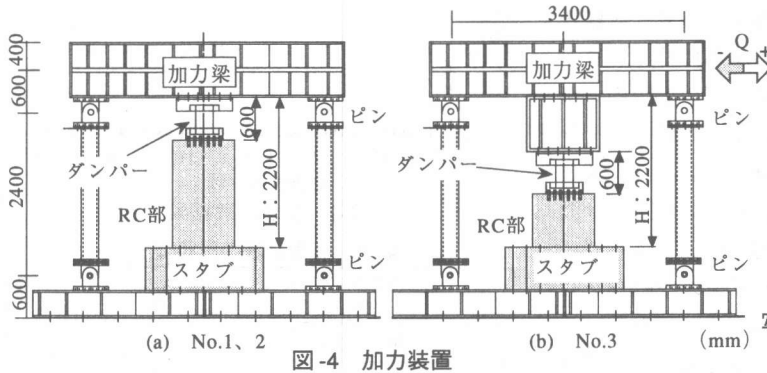


図-4 加力装置

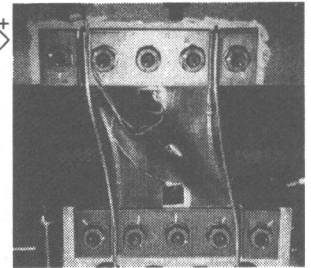


写真-1 ダンパーの最終状況 (試験体 No.3)

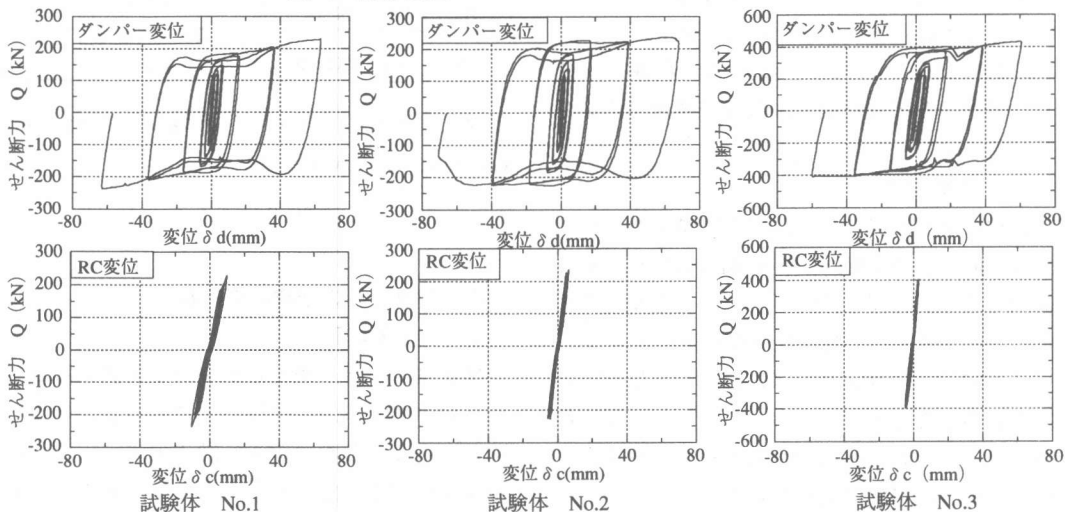


図-5 ダンパー部とRC部の荷重-変形関係

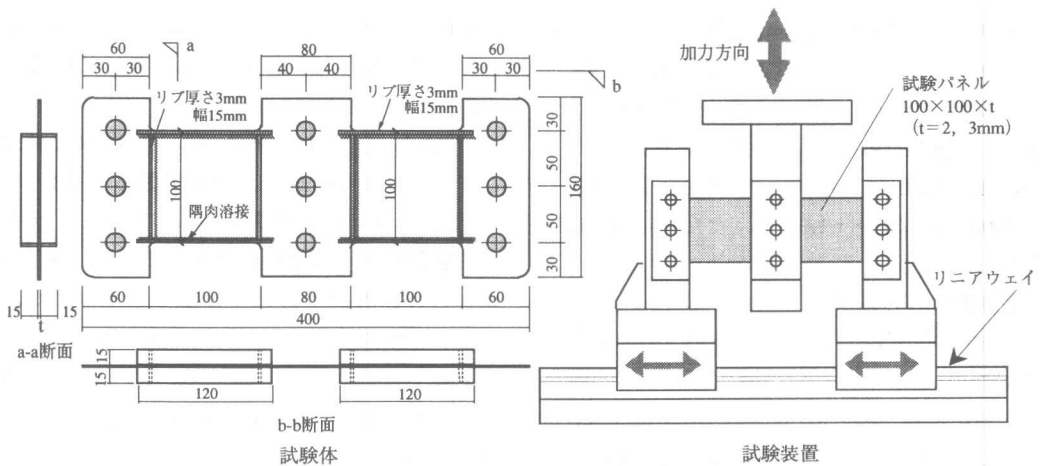


図-6 試験体および試験装置 (A-1およびA-2シリーズ)

パーの低サイクル疲労試験を行い、ダンパーの疲労特性を把握する。

試験体は表-4に示す3シリーズを設定した。Aシリーズ(A-1およびA-2)がパネル部の寸法を100×100mmとし板厚を2ないし3mmとしたものである。A-1およびA-2の試験体形状および試験装置を図-6に示す。試験装置の底部にリニアウエイを設置し、変形に伴うパネル部の引張応力が発生しないようにした。Bシリーズは、実ダンパーと相似形(スケール5/6)とし、Aシリーズと同様の加力装置を用いたが、リニアウエイは設けていない。そのため大変形に伴いパネル部には引張応力が発生する。Aシリーズで純粋なせん断疲労を、Bシリーズで本ダンパーに特有の挙動を把握する。AシリーズおよびBシリーズとも、材料は表-2に示す極低降伏点鋼である。

試験装置をアムスラー型疲労試験機に設置し、所定のひずみ振幅で試験体が破断するまで連続的に加力した。

### 3.2 試験結果

試験結果を図-7に示す。図の縦軸はせん断ひずみ範囲 $\Delta\gamma$  (P-P値, %), 横軸は破断繰返し数 $N_f$ である。ただし $N_f$ は「ピーク荷重が定常荷重の75%に低下した時の繰返し数」とした。

各試験データはシリーズに関わらずほぼ一直線上にあることが図-7から分かる。本試験の範囲では、疲労特性へ及ぼすスケール、板厚および引張応力の影響は認められない。

図-7に示す結果から、本研究で対象としてい

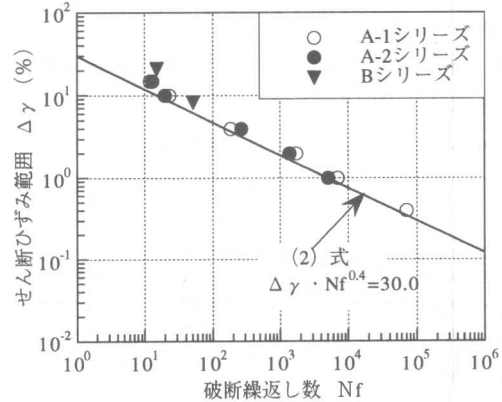


図-7 疲労試験結果

表-4 疲労試験の試験体

シリーズ	パネル寸法 (mm)	備考
A-1	100×100, t=2	リニアウエイにより大変形に伴う引張力を処理。
A-2	100×100, t=3	
B	200×200, t=5	実ダンパーと相似形, (スケール5/6)

るダンパーの設計用の疲労曲線としてManson-Coffin型<sup>3)</sup>の(2)式を設定する。

$$\Delta\gamma \cdot N_f^{0.4} = 30.0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

## 4. 制震架構の地震応答解析

### 4.1 解析概要

解析モデルは、現行基準に則って試設計された15層RC構造物をモデル化した曲げせん断型モデルである。解析モデルを図-8示す。この建物は集合住宅を想定したものであり、各階の床面積は約500m<sup>2</sup>、階高は2.9~3mである。

各層のバネは、主架構のバネとダンパーを表すバネを並列に配している。なおダンパーのバネは、鋼材ダンパーのバネと取り付けRC部材のバ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-8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>4)</sup>とした。

解析ケースを表-5に示す。パラメータは、1層あたりのダンパーの設置台数とした。設置台数は、第1層から第15層の全ての層で同一としている。なお、本解析で設定したダンパーは図-1に示すタイプ-WIとし、1箇所当たり2台のダンパーの設置を想定している。

各モデルの1次固有周期は表-5に示す通りである。ダンパーの設置台数に応じて固有周期が短くなっていることが分かる。最も多くのダンパーを設置したケース3の固有周期は0.688secとなり、ダンパーを設置していないケース0の固有周期の約7割となっている。

入力地震動には、現在の建築物の動的設計で用いられている標準的な地震動<sup>9)</sup>のうち、解析モデルの応答が最も大きくなるTaft EW(1952)の最大速度を50cm/secに基準化した記録を用いた。数値積分にはNewmarkの $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用い、時間刻み0.01secで30secについて解析した。減衰は、1次の減衰定数を2%とする瞬間剛性比例型とした。

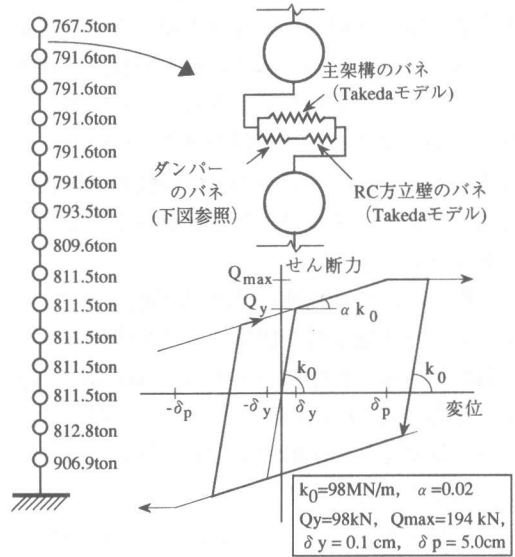
#### 4.2 解析結果

(1) 総エネルギー入力 各モデルへの総エネルギー入力の等価速度 $V_E$ <sup>1)</sup>を表-5に示す。 $V_E=138\sim 147\text{cm/sec}$ であり、各モデルへの総エネルギー入力はほぼ等しくなっている。

(2) 各層の最大層間変位 各層の最大応答層間変位の分布を図-9に示す。

ダンパー台数を増やすに従い応答が低減していることが分かる。応答の低減効果はケース1<ケース2<ケース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。

(3) 各層の応答層せん断力 各層の最大層せん断力の分布を図-10に示す。層間変位に比べ、応答の低減効果は少なくなっている。



1台あたりのダンパーの復元力

図-8 解析モデル

表-5 解析ケース

解析ケース	ダンパー設置台数	1次固有周期(sec)	$V_E$ (cm/sec)
0	なし	0.964	138.3
1	12	0.865	139.9
2	24	0.805	142.0
3	48	0.688	147.2

$V_E$  : 総エネルギー入力の等価速度<sup>1)</sup>

ダンパーの台数が多い程応答層間変位が低減したのに対し、第6層以下の層せん断力に関してはケース2の応答値が最も低い。このことは、層せん断力を低減させる場合と層間変位を低減させる場合では最適なダンパー台数が異なることを示している。本解析の範囲では、層せん断力を低下させるためには、ケース2のダンパー台数が最も適当であると考えられる。

最大層せん断力 $Q$ に占めるダンパーのせん断力 $Q_d$ の負担率 $Q_d/Q$ を図-11に示す。ダンパー台数が多い程負担率は大きくなっている。ただし、最もダンパー台数の多いケース3の場合でも下層部の負担率は概ね2割以下である。

(4) ダンパーの吸収エネルギーの負担率

層の吸収エネルギー $W_p$ に占めるダンパーの負担率 $W_{pd}/W_p$ を図-12に示す。図-11に示すダンパーのせん断力の負担率と同様、ダンパーの台数を増やす程、吸収エネルギーの負担率は増加している。ただし、ダンパーの吸収エネルギー

の負担率は、上層を除き層せん断力の負担率よりも大きく、ダンパーはせん断力の負担率以上にエネルギーを吸収していることが分かる。上層においてダンパーの負担率が小さいのは、応答層間変位が小さくダンパーの塑性化の程度が小さいため、エネルギー吸収量が小さくなったためである。

### 4.3 ダンパーの破壊に対する検討

ダンパーの安全性を疲労に基づき検討する。

設計用の疲労曲線を(2)式とし、Miner則<sup>6)</sup>を用い、累積損傷度D値を算定する。Miner則では、下式で算定されたD値が1に達した時にダンパーは、破壊するとされている<sup>6)</sup>。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $n_i$ ：あるひずみ範囲 $\Delta\gamma_i$ における頻度  
 $N_i$ ：設計曲線により求められるひずみ範囲 $\Delta\gamma_i$ に対応する疲労寿命

地震応答解析により得られたダンパーのせん断ひずみの時刻歴および(3)式により各層のダンパーのD値を求め、図-13に示す。なお、ランダム応答波形からひずみ範囲の頻度分布を求める際、レインフロー法<sup>6)</sup>を用いた。

各層のD値は、ケース1の場合最大で0.25程度、ケース2では0.15、ケース3では0.1以下である。この結果、本建物に想定したダンパーはTaft EW(レベル2)入力に対しても十分な安全性を持っていることが解析的に実証できた。

### 5. まとめ

RC造の制震架構に用いるダンパーの力学性能を実験的に把握するとともに、制震架構の地震応答解析を行った。さらにダンパーの累積損傷度に基づき安全性を検証した。その結果、本研究で提案したダンパーを用いたRC造制震架構の地震応答特性および実現性を明らかにした。

### 謝辞

地震応答解析にあたりまして清水建設(株)設計本部・北村佳久氏の協力をいただきました。

### 参考文献

- 1) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大学出版会，1987.9
- 2) 例えば，「耐震設計の一つの新しい方向」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
- 3) 日本機械学会：金属材料疲労強度の設計資料IV 低サイクル疲労強度，1983.3
- 4) Takeda et al.：Reinforced Concrete Response to Seismic Earthquakes, Jour., Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, 1970
- 5) 日本建築センター：高層建築物の動的解析用地震動について，ビルディングレター，pp.49-80, 1986.6
- 6) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4

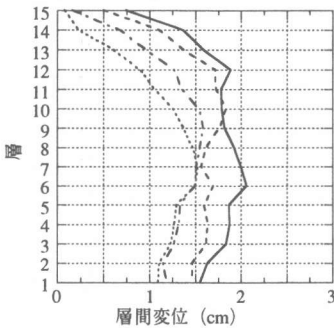


図-9 最大応答層間変位の分布

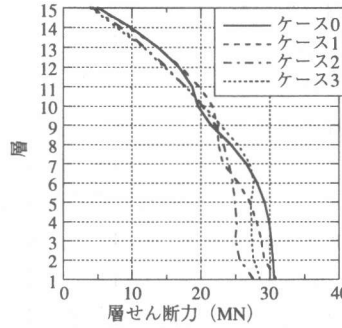


図-10 最大応答層せん断力の分布

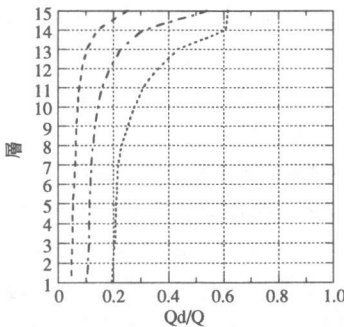


図-11 層せん断力に占めるダンパーの負担率

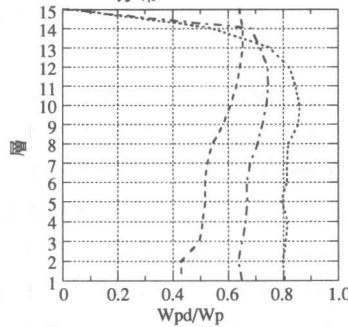


図-12 層の吸収エネルギーに占めるダンパーの負担率

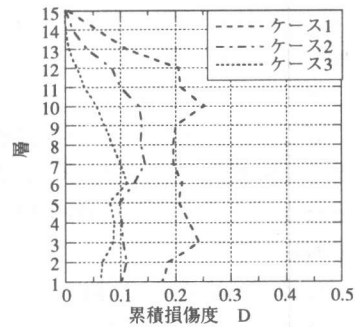


図-13 ダンパーの累積損傷度の分布