

ダンパーの耐力ならびに剛性偏心を パラメーターとした1層立体骨組の 振動台実験

その1 実験概要

山田 哲¹・薩川恵一²・和田智子³・竹内悦男⁴
小川信行⁵・北村春幸⁶・和田 章⁷・秋山 宏⁸

¹博士(工学) 東京工業大学助教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

²博士(工学) 東京理科大学助手 理工学部建築学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

³ 東京工業大学大学院生 環境理工学創造専攻 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

⁴博士(工学) 物質・材料研究機構 (〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1)

⁵工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁶博士(工学) 東京理科大学教授 理工学部建築学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

⁷工博 東京工業大学教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

⁸工博 日本大学教授 総合科学研究所 (〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)

After the Hyogoken-Nanbu earthquake, building which used the damper as an earthquake resistant member is increasing. The damper is used for not only new construction but also seismic repair. In case of the seismic repair, strength eccentricity or stiffness eccentricity may occur in damper system by the constraint of floor planning. It become an important problem to evaluate the effect of the eccentricity in the damper system on the earthquake performance of the building structures. In this study, in order to clarify this problem experimentally, a series of full-scale shaking table test of 1 story steel frame is carried out. Main parameter in this experiment is strength eccentricity and stiffness eccentricity in the damper system. In this part, outline of the experiment is reported.

Key Words: *Shaking Table Test, Steel Building Structure, Eccentricity, Hysteresis Damper*

1. 序

兵庫県南部地震においては、多くの鋼構造骨組の梁端接合部において破断被害が発生した。その後、被害の原因解明に関する研究^{1)~3)}などが精力的に行われ、接合部形状の改良や鋼材の靱性確保などの破断被害回避のための対策が提案され、一部実用化もされている。しかしながら、大地震時において梁の塑性化により、地震によってもたらされるエネルギーを吸収する設計の問題点も明らかにされた。第一には、応力集中箇所である接合部を積極的に塑性化させることは、破壊力学の観点から破断被害の早期発生を

促進する結果となっていることである。また、重力を支える主体構造の構成部材である梁が塑性化することで、地震後の補修が困難となること、そして骨組全体の変形が大きくなることで、内外壁などの非構造材や什器類の被害も大きくなる。さらには、接合部形状の改良や鋼材の靱性確保などの対策は、新規建築には適用できても膨大な社会資本のストックとなっている既存建築物へは適用できないことも大きな問題である。

このように問題の多い従来型の耐震構造に対して、図-1に示すように、重力を支える主体構造と地震によってもたらされるエネルギーを吸

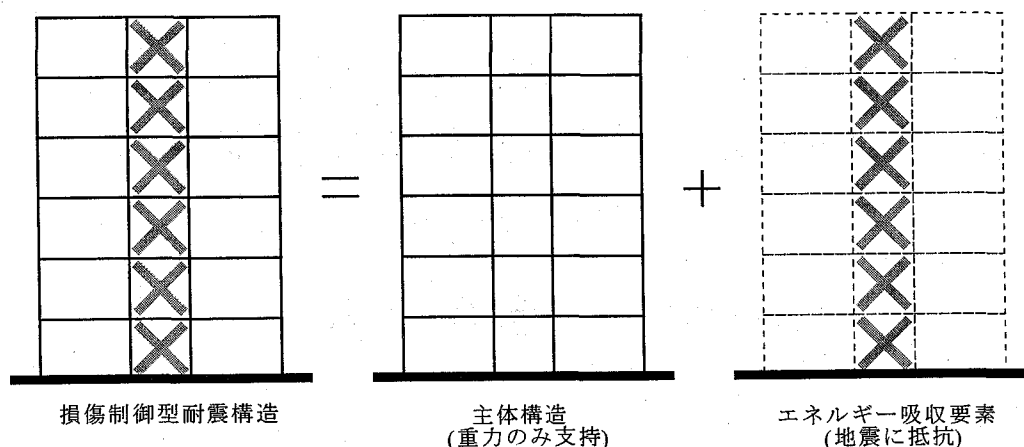


図-1 損傷制御型の耐震構造の概要

収する部材を分離し、地震時においても主体構造を弾性範囲に留めることで、地震後の補修を容易にするだけでなく、骨組全体の変形が抑制されることで内外壁などの非構造材や什器類の被害の発生も抑えられる、損傷制御型の耐震設計が実用化され普及している。この新しい耐震設計法では、既存の建物においても後施工でエネルギー吸収部材を設置することで適用が可能である。損傷制御型の耐震構造についてもこれまで多くの研究^{4)~6)}などが行われているが、敷地の形状によって平面的に整形で無い建物等に適用するような場合に偏心の影響をどの程度抑えられるかについては、残された大きな課題となっている。

本研究では、エネルギー吸収要素の剛性偏心あるいは耐力偏心が鋼構造骨組の耐震性能に与える影響を検証することを目的とし、ブレース型の履歴ダンパーを組み込んだ実大レベルの1層立体骨組の振動台実験を行った。実験では試験体である骨組の左右に配するダンパーの性能を調整することにより、剛性と耐力の偏心量を変化させた。本報その1では、実験の概要について報告する。

2. 試験体

本実験では、試験体として2/3スケールの1層1スパン立体鋼構造骨組を用いた。試験体の概要を図-2に示す。この試験体は、多層骨組の1層部分を取り出したと想定したものであり、柱間距離を4000mm、階高を2500mmとし、上部には約330kNの錘(鋼板)をPC鋼棒で緊結した。試験体のうち主架構は柱降伏型となっており、変形要

素が逆対象曲げを受ける柱だけと見なせるよう、梁や基礎梁だけでなく柱脚部のベースプレート等接合箇所も柱に対して十分剛強になるように設計している。そして、柱の断面性能が骨組のねじれ挙動に及ぼす影響を排除するため、方向性の無い円形鋼管(○-114.3x6.0:STK400)を用いた。主架構の変形要素である柱の降伏点は368(Mpa)(ミルシート値)であり、柱の全塑性モーメントを用いて計算した主架構のみの降伏せん断力係数は0.29、弾性剛性は2.75(kN/mm)、主架構のみの固有周期は0.69(sec)となっている。

一方、本研究では、層内におけるダンパーの剛性偏心と耐力偏心によって生じるねじれ挙動が骨組の耐震性能に及ぼす影響を実験的に検討することを目的とすることから、パラメーターとなるダンパーについては、骨組の加振方向に平行な2構面に弾性剛性と降伏耐力をパラメーターとしたブレース型の履歴ダンパーを組み込んだ。本研究で用いたダンパーは、図-3に示すように、H型鋼のウェブにスリットプレートを組み込んだ履歴型ダンパーであり、ストラットの本数 n_s を一定($n_s=3$)として、材質と板厚 t 、ストラットの幅 B 、ストラットの長さ H_f を変化させ、性能の異なる4種類のスリットプレートを設計した。表-1にスリットプレートの形状及び特性の予測値を示す。スリットプレート部の降伏軸力の予測値 $P_{ys,cal}$ および降伏軸変形の予測値 $\Delta_{ys,cal}$ は、文献7)における提案式(1)および(2)により求めた値であり、スリットプレート部の弾性剛性(軸剛性)の予測値 $K_{s,cal}$ はこれらの値から求めた値である。なお、ブレースに用いたH型鋼はスリットプレートに比べ十分強く、弾性範囲に留まる。

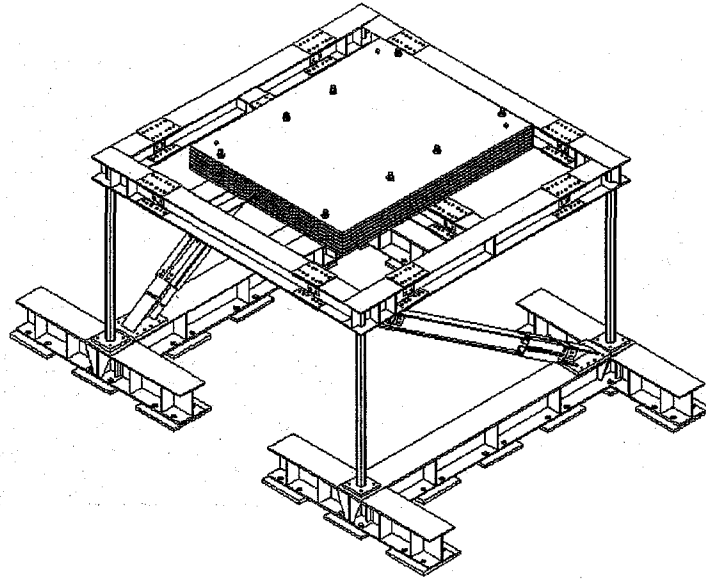


図-2 試験体

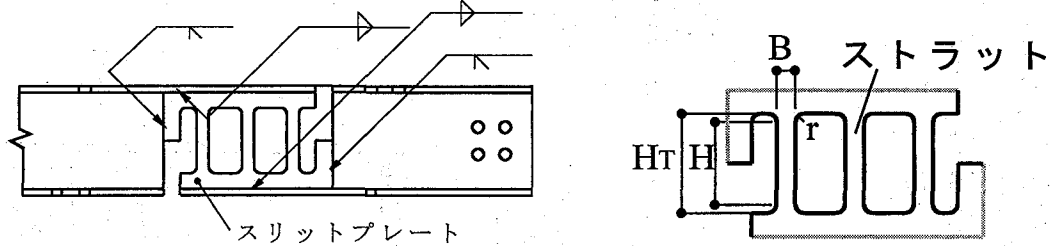


図-3 ブレースのダンパー部

$$P_{ys,cal} = n_s \cdot \frac{\sigma_{ys} \cdot B^2 \cdot t}{2 \cdot H'}$$

$$\Delta_{ys,cal} = \frac{3 \cdot \sigma_{ys} \cdot H_T \cdot B}{4 \cdot E \cdot H'} \cdot \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right]$$

ここで、 n_s :ストラットの本数(片側)
 σ_{ys} :ストラット材の降伏耐力
 B :ストラットの幅
 t :ストラットの板厚
 $H' = H + (2r^2/H_T)$
 H :ストラットの平行部の長さ
 r :ストラットの R 部の半径
 $H_T = H + 2r$:ストラットの全長

表中には、スリットプレートを組み込んだブレース型ダンパーとしての降伏軸力の計算値 $P_{yb,cal}$ と軸剛性の計算値 $K_{b,cal}$ 、 $P_{yb,cal}$ の層せん断力としての換算値 $Q_{yb,cal}$ と $K_{b,cal}$ の層剛性としての換算値 $K_{bf,cal}$ も併せて示す。 $P_{yb,cal}$ と $P_{ys,cal}$ と同じ値であり、 $K_{b,cal}$ は、 $K_{s,cal}$ とブレース軸部の弾性剛性、そして接合用のスプライスプレートの弾性剛性を直列バネとして計算した値である。ブレース軸部

- (1) の弾性剛性については、スリットプレート部も含めた全長(柱フェイス中心-梁フェイス中心間距離)を用いて計算した。
- (2)

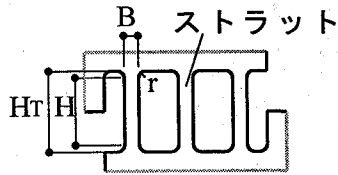
本実験では、ダンパー A が基準となるダンパーであり、ダンパー B は弾性剛性は同等であるが降伏耐力が約 1/2 となるように、ダンパー C は降伏耐力は同等であるが弾性剛性が約 1/2 となるように、そしてダンパー D は降伏耐力・弾性剛性共に約 1/2 となるようにそれぞれ設計した。これら 4 種類のダンパーの組み合わせで AA, AB, AC, AD, BC, DD の計 6 体の試験体を設定した。実験においてはスリットプレートがブレースの軸方向にのみ変形するように、図-4 に示すようににアングルによるガイドを装着した。ガイドに用いたアングルと、軸材である H 型鋼の間には 2mm 程度のクリアランスを設け、その隙間にはテフロンシートを挟むことで摩擦の発生を防いでいる。ブレース端部の接合部については、軸力のみを伝達し構面内外の両方向に対して抵抗しないピン接合とするため、図-5 に示すように、ウェブのみをスプライスプレート 1 枚を介して接合した。

表-1 ダンパーおよびスリットプレートの寸法と特性

スリットプレート

名称	鋼種	σ_{ys}^* (MPa)	n_s	B (mm)	t (mm)	H (mm)	r (mm)	$\Delta_{ys, cal}$ (mm)	Ks, cal (kN/mm)	$P_{ys, cal}$ (kN)
A	SM490A	444	3	22	12	100	10	1.01	37.8	38.1
B	SS400	283	3	18	9	70	10	0.43	39.6	17.1
C	SM490A	374	3	21	16	130	10	1.36	22.1	30.1
D	SS400	283	3	20	9	100	10	0.69	21.7	15.0

*ミルシート値



ダンパー

名称	スリット プレート	$P_{yb, cal}$ (kN)	Kb, cal (kN/mm)	$Q_{yb, cal}$ (kN)	Kbf, cal (kN/mm)
A	A	38.1	33.5	32.8	24.8
B	B	17.1	34.9	14.7	25.8
C	C	30.1	20.9	25.9	15.5
D	D	15.0	20.2	12.9	14.9

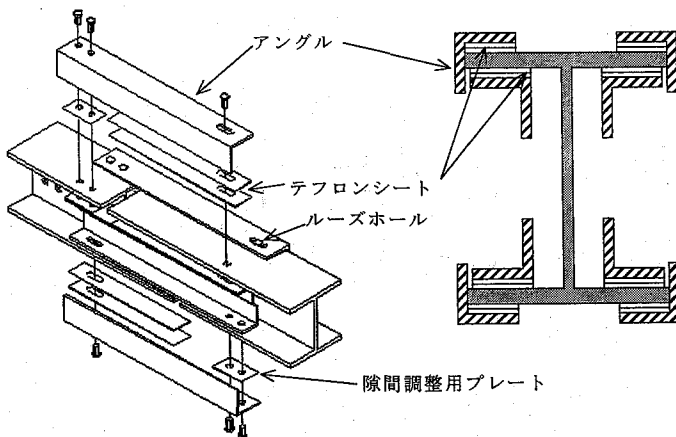


図-4 アングルによるガイド

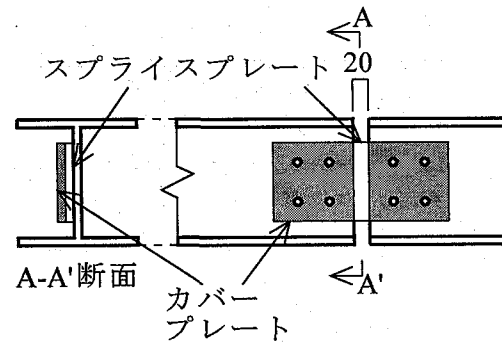


図-5 ブレース材端接合部

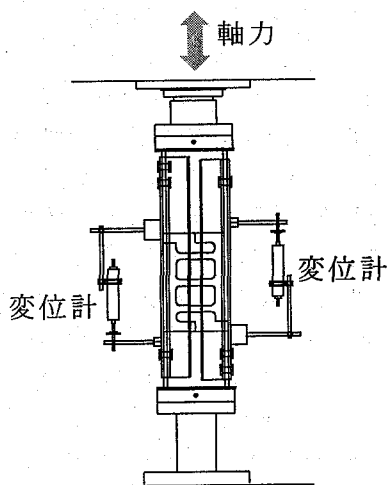


図-6要素試験セットアップ

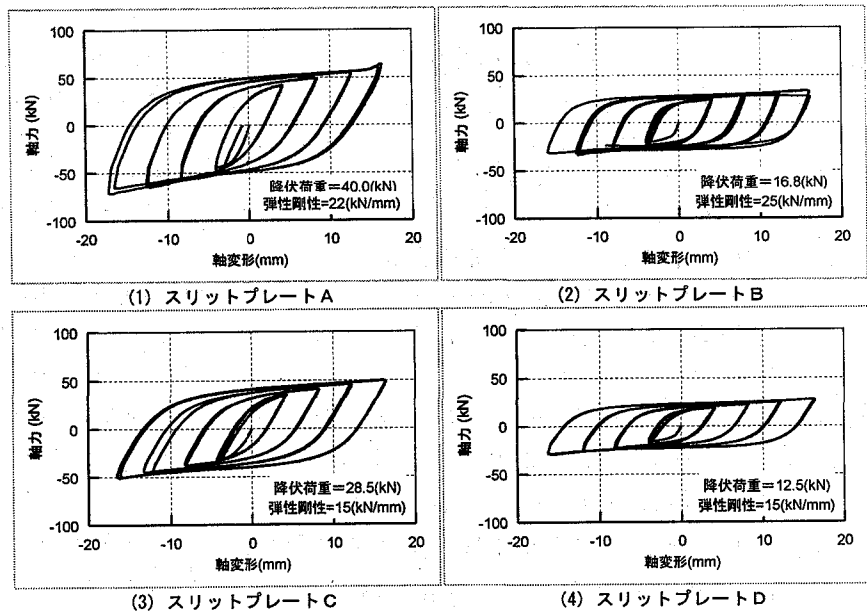


図-7 要素実験結果

本試験体の主たる変形要素であるスリットプレートについては、図-6に示すようにダンパーから切り出した要素試験体を用いて、軸方向漸増変位振幅繰り返し載荷実験を行った。要素試験体は、ダンパーにおいてアングルで拘束された区間を切り出し、エンドプレートを溶接したものである。要素実験結果を図-7に示す。要素試験体の降伏軸力の実験値は、式(1)で予測したスリットプレートの降伏軸力の予測値 $P_{ys,cal}$ と良い対応を示しているが、第1サイクルでの除荷剛性から求めた弾性剛性については、式(2)による予測値に比べかなり低い値となった。これについては、ストラット周辺の拘束が小さかったことが原因ではないかと考えた。

3. 実験方法

(1) 加振手順

本実験では、(独)防災科学技術研究所(茨城県つくば市)の電気油圧サーボ式大型振動台を用いた。入力波としては1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分(以下神戸NS波)と1968年十勝沖地震八戸港湾記録EW成分(以下八戸EW波)を用い、入力レベルを以下のように設定した。

まず、両構面に最も弱いダンパーDを装着した、耐力偏心も剛性偏心も無い試験体DDについて応答解析を行い、主架構が弾性範囲に留まる限度と予測される入力レベルを求め、これをLelel2の入力とした。Lelel2における入力波の最大速度は、神戸NS波で20kine、八戸EW波25kineとなった。そして、入力波の最大速度がLelel2の半分となる入力をLelel1の入力とした。

加振手順であるが、各試験体毎に、先ず小振幅(1mm)のパルス波を入力したパルス加振を行い、試験体を含む実験装置全体を自由振動させて固有周期と減衰を計測した後に、ダンパー及び主架構が弾性範囲内で挙動すると思われる入力レベルでの加振(弾性加振)を行ってから、神戸NS波と八戸EW波のそれぞれについて1回Lelel1の加振を行い、引き続き神戸NS波と八戸EW波のそれぞれについて1回のLelel2の加振を行った。

(2) 計測

本実験における主要計測点は、振動台の加速度 $\ddot{x}_0$ 、重心の水平変位 x 、 y と回転角 θ 、加速度 $\ddot{x}$ 、 $\ddot{y}$ と

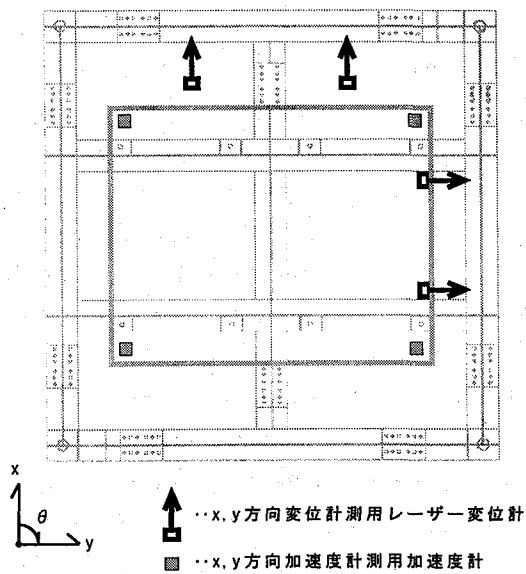
角加速度 $\ddot{\theta}$ 、スリットプレートの軸変形 Δ_s 、ブレースに作用する軸力 P_b 、柱に作用するせん断力 Q_α 、 Q_γ である。 $\ddot{x}_0$ については振動台上に設置した加速度計により計測し、 x 、 y 、 θ については、図-8(1)に示すように試験体の下部に試験体とは独立して設置した計測フレームからレーザー変位計により計測した試験体側のターゲットの動きから算出した。各構面の層間変位は x (y)と θ から剛床を仮定して算出し、ブレースの軸変形については層間変形にブレースの取り付け角の余弦を掛けることで求めた。また、 $\ddot{x}$ 、 $\ddot{y}$ と $\ddot{\theta}$ については、錘上の図-8(1)に示す位置に設置した加速度計により計測し、 Δ_s については、図-8(2)に示すようにスリットプレートを挟み込むように設置した差動トランス型変位計により、 P_b については、図-8(2)に示すようにスプライスプレートの表裏に貼付した歪みゲージにより、 Q_α 、 Q_γ については、図-8(3)に示すように柱の3断面に貼付した歪みゲージによりそれぞれ計測した。

4. 結び

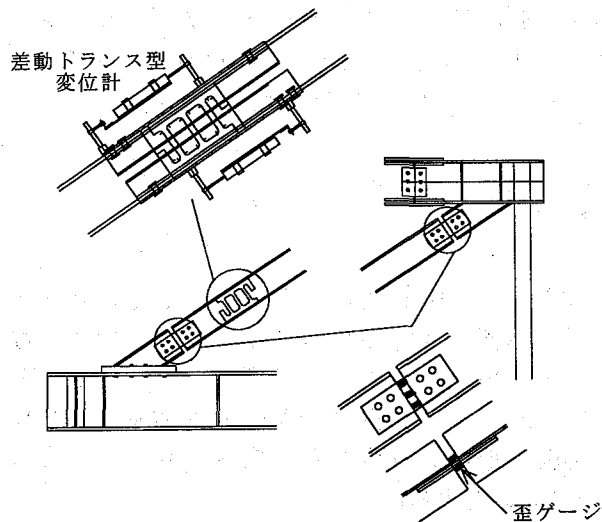
エネルギー吸収要素の剛性偏心あるいは耐力偏心が鋼構造骨組の耐震性能に与える影響を検証するために行った、履歴型ダンパーを装着した実大レベルの損傷制御型一層立体骨組の振動台実験の概要を報告した。実験結果についてはその2で報告する。

参考文献

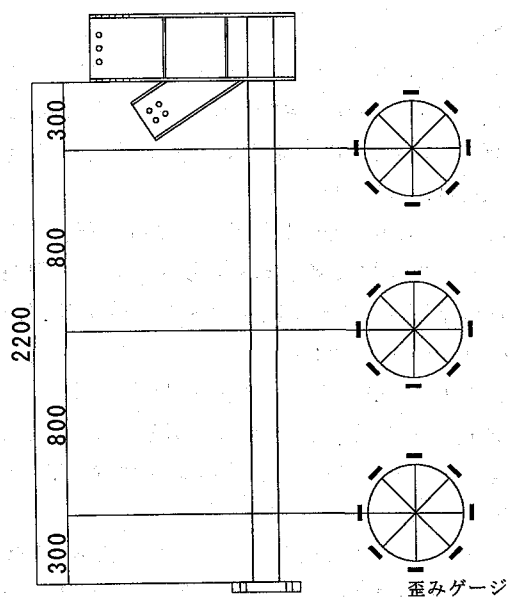
- 1) 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 小倉桂治, 北村春幸: 実大振動台実験による柱梁接合部の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第512号, pp.165-172, 1998年10月.
- 2) 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 大竹章夫, 杉本浩一: 実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊-脆性破壊遷移, 日本建築学会構造系論文集 第522号, pp.105-112, 1999年8月.
- 3) 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 竹内 徹, 杉本浩一: 鋼構造柱梁改良接合部の終局耐震性に関する実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 第551号, pp.141-148, 2002年1月.
- 4) 山口路夫, 山田 哲, 松本由香, 谷川敬祐, 小野森司, 竹内 徹, 小川信行, 秋山 宏: 座屈拘束ブレースを有する損傷制御構造部分骨組の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 第558号, pp.189-196, 2002年8月.



(1) 主架構の変位・加速度の計測点



(2) ブレースの計測点



(3) 柱の歪の計測点

図-8 主要計測点

5) 和田 章, 岩田 衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹:
建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998

6) 日本鋼構造協会, 鋼材倶楽部: 履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法, 1998.9.

7) Amadeo BENAVENT CLIMENT, Sang-Hoon OH and Hiroshi AKIYAMA, Ultimate energy absorption capacity of slit-type steel plates subjected to shear deformations, J. Struct. Constr. Eng., A.I.J., No.503, pp.139-147, Jan., 1998