

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2 実験結果

和田智子¹・山田 哲²・薩川恵一³・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)

²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)

³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)

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, result of the experiment is reported.

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

1. 序

実大レベルの一層立体鋼構造骨組に性能の異なる履歴型ダンパーを組み込むことにより、一層平面に対して偏心を与えた試験体を作成し、剛性偏心と耐力偏心による主架構のねじれ挙動に及ぼす影響を検証する。加振方向に平行な2構面にダンパーを設置し、その配置するダンパーの性能の違いをパラメーターとする。実験で使用する履歴型ダンパーはスリットプレート型であり、板厚、スリット幅、スリット高さを適宜変化させることにより、柱の剛性、耐力を考慮して基準とするダンパーを決定し、基準とするダンパーに対して、降

伏耐力のみを半減したもの、弾性剛性のみを半減したもの、降伏耐力・弾性剛性共に半減したものを性能目標値として4種類を製作している。そして4種類のダンパーの中から2種類を構面に組み込み、全6シリーズの試験体について実験を行う。なお入力地震波としては2種類の観測記録波を用いて、両ダンパー及び主架構が弾性範囲内で挙動する入力レベルと、両ダンパーは塑性化させるものの主架構は弾性範囲内で挙動する入力レベルの2つのレベルの実験を行った。

本論では、前報(その1)に記した一層立体偏心骨組振動実験の実験結果について述べる。

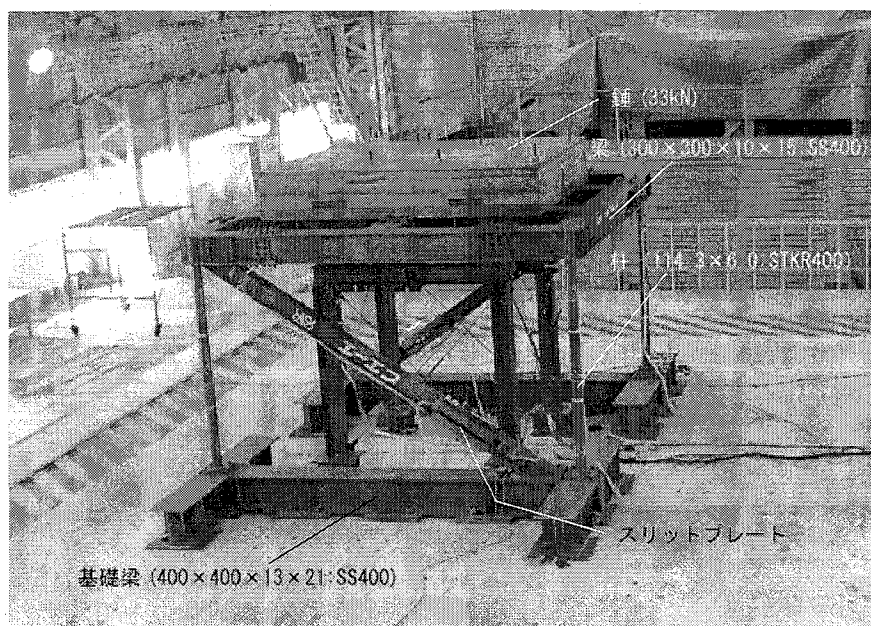


図-1 試験体セットアップ図

表-1 振動台実験結果一覧

試験体	構面	ダンパー	K_b (kN/mm)	$K_{s,f}$ (kN/mm)	Level1 神戸(NS)			Level1 八戸(EW)		
					$\delta \max+$ (mm)	$\delta \max-$ (mm)	$W_{p,b}$ (kN・mm)	$\delta \max+$ (mm)	$\delta \max-$ (mm)	$W_{p,b}$ (kN・mm)
AA	構面①	A	12.2	15.5	3.61	-2.85	191	4.86	-3.15	414
	構面②	A	13.3	15.2	3.35	-2.60	159	3.80	-3.00	331
AB	構面①	A	12.5	15.2	2.65	-2.31	91	2.55	-2.21	163
	構面②	B	13.3	15.5	3.00	-2.05	212	2.90	-1.95	200
AC	構面①	A	13.5	14.5	3.00	-2.30	137	2.75	-2.10	138
	構面②	C	10.8	13.1	3.71	-2.61	182	3.31	-2.25	184
AD	構面①	A	12.6	15.7	2.74	-2.54	143	3.39	-2.20	163
	構面②	D	10.1	10.2	5.01	-5.46	501	6.52	-3.41	501
BC	構面①	B	15.7	20.7	3.25	-1.90	223	3.66	-1.85	203
	構面②	C	10.4	11.6	3.25	-2.76	145	2.85	-2.66	203
DD	構面①	D	7.7	10.0	5.86	-4.40	467	7.01	-3.61	486
	構面②	D	10.0	10.5	4.15	-4.65	401	5.65	-3.05	442

試験体	構面	ダンパー	Level2 神戸(NS)			Level2 八戸(EW)		
			$\delta \max+$ (mm)	$\delta \max-$ (mm)	$W_{p,b}$ (kN・mm)	$\delta \max+$ (mm)	$\delta \max-$ (mm)	$W_{p,b}$ (kN・mm)
AA	構面①	A	8.57	-5.90	1213	14.93	-6.70	2368
	構面②	A	6.65	-6.96	1104	11.09	-7.10	2141
AB	構面①	A	5.80	-5.13	577	7.26	-4.10	881
	構面②	B	8.32	-10.07	2108	15.28	-7.16	2108
AC	構面①	A	5.89	-5.85	832	7.83	-4.95	1039
	構面②	C	10.28	-7.31	1461	13.74	-6.41	1751
AD	構面①	A	6.13	-5.29	666	8.20	-4.32	880
	構面②	D	12.38	-14.64	3181	17.74	-11.93	3209
BC	構面①	B	7.96	-9.97	2012	15.52	-7.31	2191
	構面②	C	7.41	-5.78	902	9.87	-5.14	1298
DD	構面①	D	14.38	-14.41	2951	16.93	-13.41	2634
	構面②	D	10.79	-13.05	2557	13.14	-12.05	2276

試験体	構面	ダンパー	Level3 神戸(NS)			Level3 八戸(EW)		
			$\delta \max+$ (mm)	$\delta \max-$ (mm)	$W_{p,b}$ (kN・mm)	$\delta \max+$ (mm)	$\delta \max-$ (mm)	$W_{p,b}$ (kN・mm)
AC	構面①	A	9.73	-12.39	2666	17.06	-9.64	3621
	構面②	C	16.25	-15.87	4995	28.32	-12.72	6053
AD	構面①	A	8.19	-13.27	2135	15.96	-10.35	2391
	構面②	D	29.49	-24.74	9501	32.28	-25.25	9026

2. 実験結果

図-1 に試験体セットアップ図を示す。6 パターンの試験体のうち、試験体 AC と試験体 AD に関しては神戸 NS 波、八戸 EW 波共に Level3 の加振まで行った。Level3 の目標最大速度は、Level2 の 1.5 倍、すなわち神戸 NS 波が 30kine、八戸 EW 波が 37.5kine とした。また、試験体 AA の加振結果により入力地震波レベルの検討をしたため、試験体 AA についてのみ、Level1 八戸 (EW) の目標最大速度が 15kine、Level2 八戸 (EW) の目標最大速度が 30kine となっている。

実験結果一覧を表-1 に、各試験体の周期、減衰、剛性・耐力のバランスを表-2 に示す。表-1 で、 K_b は各構面のブレースの軸剛性 (弾性剛性) の実験値、 $K_{s,r}$ は荷重変形関係における除荷剛性から求めたスリットプレート の軸剛性である。また、 δ_{max} は各加振において各構面に発生した正負それぞれの最大層間変形、 $W_{p,b}$ は各構面のブレースで吸収した履歴エネルギーを示す。

$K_{s,r}$ については、スリットプレート A について平均 15.2 (kN/mm)、B について平均 18.1 (kN/mm)、C について平均 12.4 (kN/mm)、D について平均 10.2 (kN/mm) と、前報 (その 1) 中の式 (1), (2) による計算値や要素実験結果に比べかなり低い値となっている。これはアングル等によるスリットプレート周辺の拘束が、要素実験よりもさらに低く、ストラットに軸力が作用しにくくなっていたためと考えた。さらに K_b については、A について平均 12.8 (kN/mm)、B について平均 14.5 (kN/mm)、C について平均 10.6 (kN/mm)、D について平均 9.3 (kN/mm) とさらに低い値となっているが、これはスリットプレートを除くブレース及び接合部分の剛性が寄与した結果である。

また、表-2 で T はパルス加振結果から求めた試験体の 1 次固有周期、 h は減衰、 $R_{y,k}$ は剛性偏心率、 $R_{y,q}$ は各構面のダンパーの耐力比を示す。

ここでダンパー耐力比 $R_{y,q}$ は、両構面のダンパーの降伏軸力の比をとったものである。各試験体で降伏軸力の小さい方のダンパーの値を大きい方の値で除した値を示す。この値が小さいほど両構面のダンパーの耐力バランスの差が大きい。

なお減衰 h は 6.52 ~ 9.61% とかなり大きな値となっているが、これはスリットプレートをブレースの軸方向のみに変形させるために装着したアングル (前報 (その 1) 内図-4) において摩擦抵抗が発生したためと考える。

図-2 に、 K_b の平均値を用いて求めたダンパーの

表-2 周期、減衰、剛性・耐力のバランス

試験体	$T(\text{sec})$	$h(\%)$	剛性偏心率 $R_{y,k}$	ダンパー耐力比 $R_{y,q}$
AA	0.263	6.52	0.00	1.00
AB	0.237	9.61	0.14	0.45
AC	0.200	8.23	0.17	0.79
AD	0.273	6.56	0.32	0.39
BC	0.255	7.33	0.31	0.50
DD	0.388	9.08	0.00	1.00

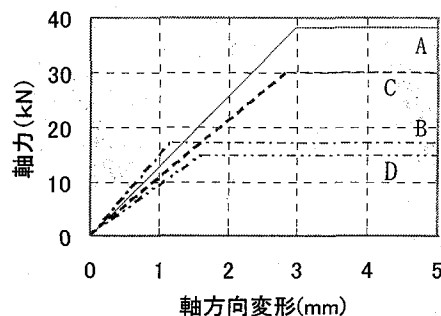


図-2 各ダンパーの荷重変形関係

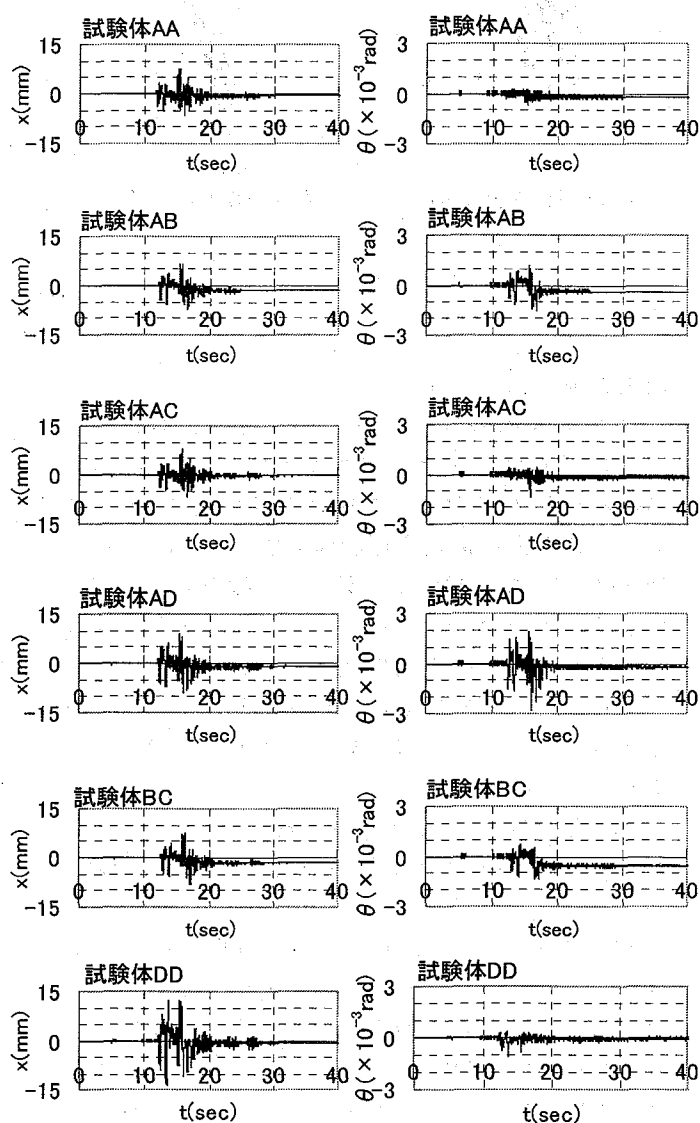


図-3 Level2 神戸 (NS) における並進変位 x と層回転角 θ の時刻歴

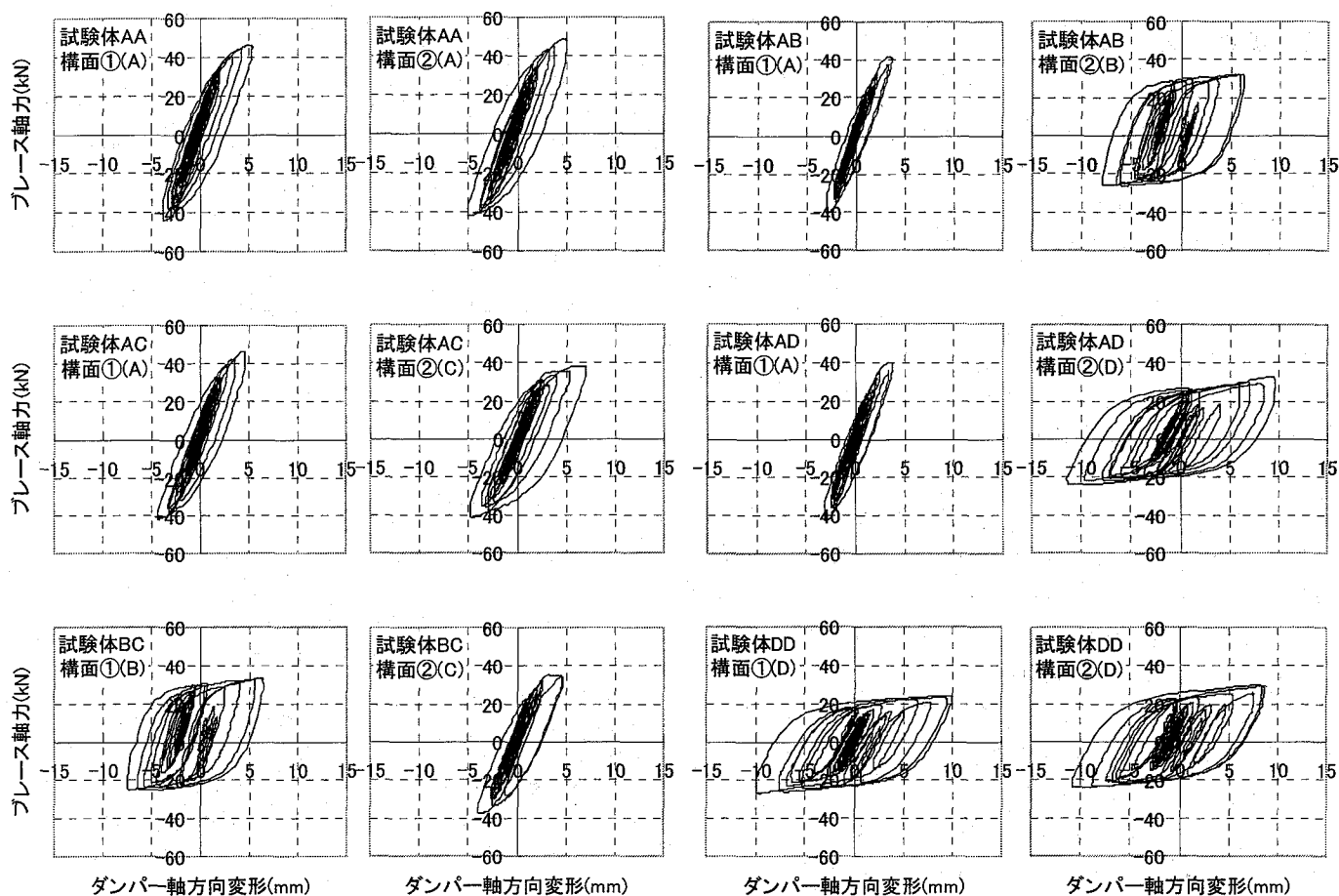


図-4 Level2 神戸 (NS) 加振時の各試験体のダンパー荷重変形関係

荷重変形関係を示す。

また試験体の履歴挙動については、代表して Level2 神戸 (NS) における並進変位 x と層回転角 θ の時刻歴を図-3 に、各試験体の各加振におけるダンパーの軸方向荷重変形関係を図-4～6 に示す。図-6 において、構面②のダンパー軸方向変形 20mm 付近より荷重が上がっているのは、スリットプレートが大きく軸方向に変形したため、ブレースに装着したアングル（前報（その1）内図-4）にあけたルーズホールの限界まできてしまったためである。

なお、フレームは全ての加振において弾性挙動を示し、1フレームあたりの剛性は 1.21 (kN/mm) であった。

試験体 AD については、Level2 加振の後 Level3 神戸 (NS) → Level3 八戸 (EW) → Level3 神戸 (NS) と加振した。最終加振の途中でスリットプレート D が音をたてて破壊し、フレームが大きく揺れ動いた。破壊したスリットプレートの様子を図-7 に示す。

3. 実験結果の比較

実験結果を基に、性能の異なる各試験体の挙動について比較を行う。

1) 試験体 AA と試験体 AB の比較

試験体 AA は偏心のない試験体であるのに対し、試験体 AB は剛性は両構面ほぼ等しいが、ダンパー B の耐力が A の半分程度の耐力偏心した試験体である。この性能の違いにより、Level1 加振において試験体 AA は両構面とも弾性挙動をするが、試験体 AB のダンパー B は塑性化する。また、特に Level2 八戸波加振において試験体 AA の両ダンパーは大きく塑性化するが、試験体 AB については Level2 加振でもダンパー A はほとんど塑性化しない。一方ダンパー B は Level2 八戸波加振で最大変位 12mm 以上と大きく変形し、エネルギー吸収量も大きい。図-3 の時刻歴で層回転角が生じているのは、両ダンパーの耐力の偏りによるものである。

2) 試験体 AB と試験体 AC の比較

実験計画の際は、試験体 AB は耐力偏心した試験

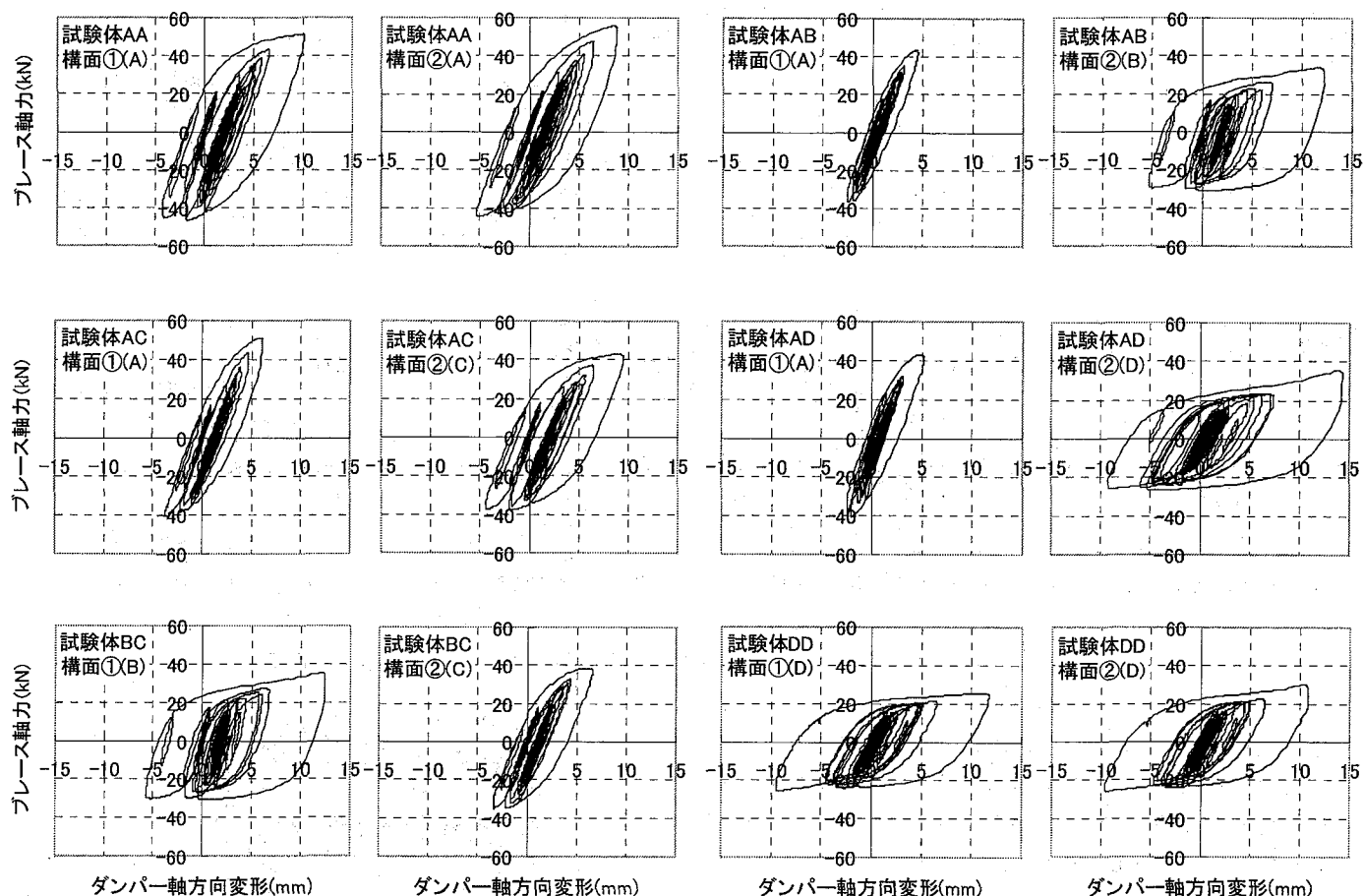


図-5 Level2 八戸 (EW) 加振時の各試験体のダンパー荷重変形関係

体、試験体 AC は剛性偏心した試験体として両者の挙動を比較することを目的としていた。しかし、前述の理由によりダンパーの剛性が全体的に低下した。その結果、試験体 AC において A の半分を目標値としていた C の剛性が、A の 2 割弱減に留まった。よって試験体 AC は、C が A と比較して剛性・耐力とも少しずつ小さい試験体である。Level1 加振では、試験体 AB のダンパー B が塑性化するのに対し、試験体 AC ではダンパー C の方が変形は大きく出るものの両構面ほぼ弾性挙動を示す。Level2 加振では、試験体 AC においては試験体 AB ほど両構面の挙動に差はないが、ダンパー C の塑性化が進み、A と比較してエネルギー吸収量が多い。これには両構面の耐力の偏りが影響していると思われる。また、図-3 で試験体 AC に生じた層回転角は、試験体 AB に比べ小さくなっている。

3) 試験体 AC と試験体 AD の比較

試験体 AC と同パターンで、剛性と耐力の偏りをさらに大きくしたのが試験体 AD である。Level1 加振時には、試験体 AC は両構面弾性挙動を示すのに対し、試験体 AD では耐力の小さいダンパー D は塑

性化し、ダンパー A に比べて大きく変形している。Level2 加振では、試験体 AD のダンパー A は試験体 AC の場合に比べ最大荷重、最大変形共小さく、吸収エネルギーも小さいが、ダンパー D は非常に大きく変形し、吸収エネルギーも大きい。試験体 AC のダンパー A は、試験体 AA の場合と比較して吸収エネルギーが小さく抑えられているが、試験体 AD のダンパー A ではさらに小さくなっている。また図-2 より、今回の 6 パターンの試験体の中で最も大きなねじれを生じたのが、試験体 AD である。

4) 試験体 BC と試験体 AB の比較

ダンパー B と比較して、ダンパー A と C は剛性が低く耐力が大きいという同等の性質とみなせる。よって両試験体は同パターンとみなせるが、試験体 BC については剛性はダンパー C が B の 0.7 倍、耐力はダンパー B が C の 0.6 倍と、ほぼ計画通りの試験体となっている。Level1 加振では、両試験体共ダンパー B のみ塑性化する。Level2 加振では、試験体 BC のダンパー C の方が試験体 AB のダンパー A に比べ耐力が小さいため、変形が進み、エネルギー吸収量も大きくなっている。

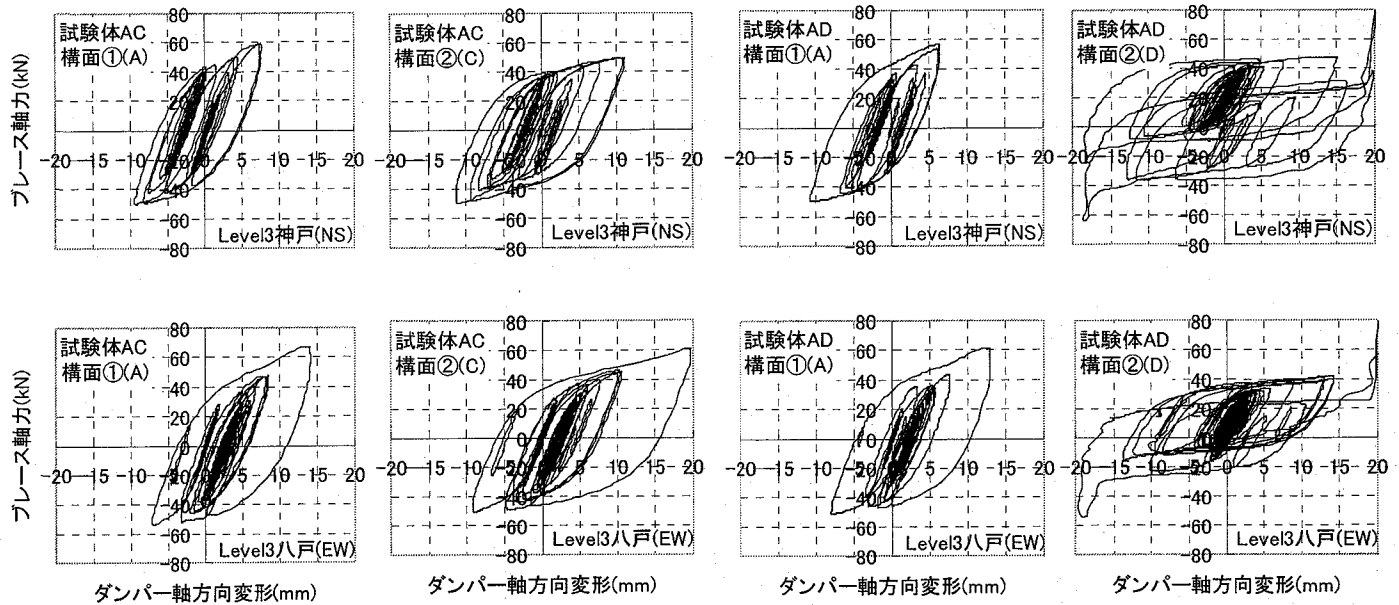


図-6 Level3 神戸 (NS) , 八戸 (EW) 加振時の各試験体のダンパー荷重変形関係

5) 試験体DD と試験体AD の比較

試験体DD は、4 種類のダンパーの中で剛性・耐力とも最も小さいダンパーを2 構面に入れた試験体である。剛性・耐力共ダンパーAの方が大きい、試験体AD のダンパーD の挙動と比較すると、最大変形が小さく吸収エネルギーも小さい。このことは、弱いダンパーを偏りなく入れた時よりも、強いダンパーと弱いダンパーを入れた時のほうが、ダンパーが大きなダメージを受ける場合があることを表している。

6) Level3 加振

図-6 に示されるように、Level3 加振時には、試験体AC, AD 両構面でさらに塑性化が進む。弱い側のダンパーでは荷重が頭打ちになってくるが、特に偏心の大きい試験体AD においては、ダンパーD は激しく変形し、骨組は大きくねじれ挙動をする。

4. 結び

性能の異なる履歴型ダンパーを組み込むことにより、一層平面に対して偏心を与えた試験体を作成し、一層立体偏心骨組振動実験を行った。

ブレース接合部等の剛性が寄与した結果、スリットプレートの剛性の差が目標より小さくなり、剛性偏心の顕著な影響を見ることは出来なかったが、ダンパーの耐力の偏りが骨組のねじれ挙動に大きな影響を及ぼすことが判った。

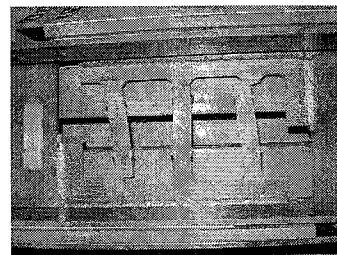


図-7 破壊したスリットプレートの様子

その3では、本実験結果と応答解析結果の比較検討を行う。

参考文献

- 1) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版株式会社, 1981
- 2) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計 第2版, 東京大学出版会, 1987