

### 3.2.2 累積塑性変形に基づく構造損傷評価

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

首都圏で長周期地震動が発生した場合、多大な被害の発生が想定される高層建物を対象にし、その耐震性能評価および被害軽減を目的として、長周期地震動が高層建物にもたらす被害を国民に明らかにする。また、本実規模実験で検証される実践的な応答低減手法に関する研究成果を建築関連団体と連携し指針を取りまとめるとともに、各種業界と本研究成果を共有し、安心・安全な高層建物の広い普及を最終目標とする。

本研究では、高層建物の損傷過程と安全余裕度の評価が可能な累積塑性変形に基づく構造損傷評価手法を開発・提案し、耐震設計、構造の耐震補強等の性能向上を目指す。

##### (b) 平成21年度業務目的

本年度実施のE-ディフェンス実験から入力エネルギーと制振機構のエネルギー吸収の関係を定量評価する。さらに、その実験データを整理・分析し、地震動による建物への入力エネルギーに対応する工学量として、累積塑性変形倍率を用いた制振機構の性能評価を行う。

また、初年度行った微動計測に基づく建物の損傷評価法の研究の高度化を図るため、本年度実施のE-ディフェンス実験から高層建物試験体の建設時から振動台破壊実験により倒壊に至るまでの微振動測定を行う。さらに、その計測データを整理分析ならびに初年度と昨年度の成果を併せて、微動計測による損傷評価法の高度化を図る。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京理科大学 理工学部建築学科	教授	北村 春幸
	客員准教授	金澤 健司
	助教	佐藤 大樹

#### (2) 平成21年度の成果

##### (a) 業務の要約

- ・本年度実施のE-ディフェンス実験から入力エネルギーと制振機構のエネルギー吸収の関係を定量評価した。
- ・実験データを整理・分析し、地震動による建物への入力エネルギーに対応する工学量として、累積塑性変形倍率を用いた制振機構の性能評価を行った。
- ・初年度行った微動計測に基づく建物の損傷評価法の研究の高度化を図るため、本年度実施のE-ディフェンス実験から高層建物試験体の建設時から振動台破壊実験により倒壊に至るまでの微振動測定を行った。
- ・計測データを整理分析ならびに初年度と昨年度の成果を併せて、微動計測による損傷評価法の高度化を行った。

## (b) 業務の成果

平成 21 年 9 月 14 日から平成 21 年 10 月 3 日にかけて行われた制振機構を適応した超高層建物試験体の振動台破壊実験の計測データを整理・分析し、地震動による建物への入力エネルギーに対応する工学量として累積値である塑性履歴エネルギー吸収量や累積塑性変形倍率を用いた架構や部材の損傷評価を行った。表 1 と図 1 に試験体名称、制振ダンパーの種類と設置範囲を示す。実験において各モデルに地震波を入力し、制振ダンパーによる応答低減効果の検討およびエネルギーに着目した損傷評価を行った。

表 1 試験体名称

	試験体名称	ダンパーの種類	ダンパー配置範囲	その他
2007年度	F-07	-	-	-
2009年度	H-2/3	鋼製ダンパー	実架構部分 + 縮約層5,6層	梁端部接合部補強
	H-1/5	鋼製ダンパー	実架構部分のみ	
	V-1/5	オイルダンパー	実架構部分のみ	
	F-09	-	-	

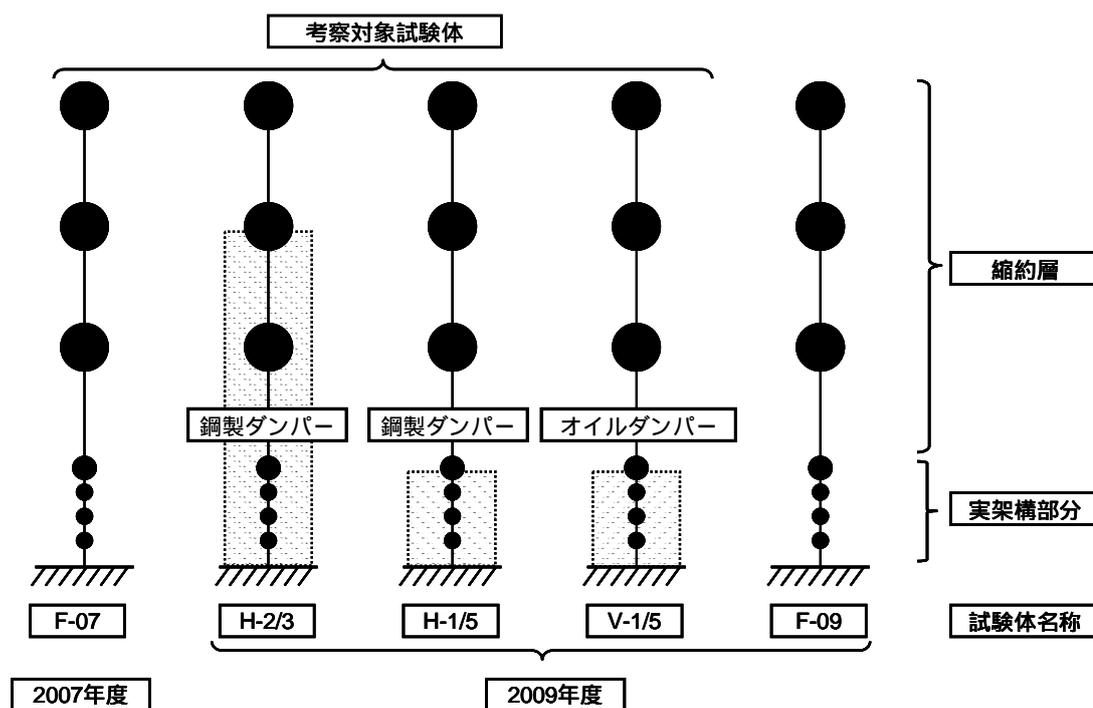


図 1 試験体名称

### 1) 入力エネルギーと制振機構のエネルギー吸収の関係を定量評価

#### a) エネルギーの釣合の検証

地震動終了時刻( $t = t_0$ )での慣性力を用いて算出した各加振ごとの吸収エネルギー $W(t_0)$ と、速度波形(加速度波形を積分)を用いて算出した入力エネルギー $E(t_0)^1$ を表 2 に示す。なお、吸収エネルギーには減衰によって吸収されたエネルギー、および部材の塑性化によって吸収されたエネルギー(塑性履歴エネルギー)が含まれている。なお、算出方法は文献 1 を参考されたい。

表2 各加振時入力エネルギーと吸収エネルギーの一覧

event	入力波	加振方向	X dire.					Y dire.					
			Max Acc.	W(t <sub>0</sub> )	ΣW(t <sub>0</sub> )	E(t <sub>0</sub> )	ΣE(t <sub>0</sub> )	Max Acc.	W(t <sub>0</sub> )	ΣW(t <sub>0</sub> )	E(t <sub>0</sub> )	ΣE(t <sub>0</sub> )	
			(gal)	(kN・m)	(kN・m)	(kN・m)	(kN・m)	(gal)	(kN・m)	(kN・m)	(kN・m)	(kN・m)	
H-2/3	1	TYO (25%)	XYZ	10.3	1	1	0	0	12.6	1	1	0	0
	2	W-1 (20%)	XY	42.4	82	82	79	79	46.6	79	80	72	73
	3	W-2 (40%)	XY	94.9	366	448	371	449	98.2	329	409	317	390
	4	W-3 (60%)	XY	161.5	920	1368	918	1367	157.6	715	1123	700	1090
	5	EL1	XY	126.8	107	1475	102	1470	238.9	147	1270	149	1239
	6	EL2	XY	269.5	566	2040	571	2041	468.2	627	1898	644	1883
	7	Sweep-Y	Y	0.0	0	2040	0	2041	25.8	168	2066	167	2050
	8	TOK	XY	383.2	453	2494	497	2538	272.5	460	2526	440	2490
	9	HOG	XY	205.1	1014	3508	1041	3579	140.8	365	2891	366	2856
	10	TYO	XYZ	56.1	4	3512	1	3581	54.0	6	2897	3	2859
	11	W-2 (40%)	XY	95.0	389	3902	400	3981	99.9	314	3211	298	3157
	12	SAN_10	XY	154.0	2325	6226	2374	6355	216.9	2663	5874	2733	5890
	13	SAN_08	XY	171.7	4594	10821	4652	11006	209.5	5655	11529	5766	11656
	14	SAN_06	XY	193.4	2506	13326	2599	13605	259.3	4895	16424	4982	16639
	15	W-2 (40%)	XY	95.5	348	13674	346	13951	99.1	305	16729	292	16931
H-1/5	16	W-1 (20%)	XY	44.9	81	13755	79	14030	47.0	75	16804	67	16998
	17	W-2 (40%)	XY	105.4	358	14113	350	14380	100.8	300	17104	295	17294
	18	W-3 (60%)	XY	169.0	827	14940	802	15182	160.7	711	17815	708	18002
	19	Elcentro-Lv1	XY	127.4	249	15189	239	15421	240.3	156	17971	159	18161
	20	Elcentro-Lv2	XY	270.2	865	16054	866	16288	462.8	652	18622	659	18820
	21	Sweep-Y	Y	0.0	0	16054	0	16288	27.2	208	18830	206	19026
	22	TOK	XY	404.5	413	16467	438	16725	282.9	448	19278	440	19466
	23	HOG	XY	203.3	1207	17674	1240	17965	150.1	989	20267	985	20451
	24	TYO	XYZ	56.9	5	17679	3	17968	56.5	7	20273	5	20456
	25	W-2 (40%)	XY	106.8	359	18038	347	18316	103.1	304	20577	299	20755
	26	SAN_10	XY	155.5	4144	22182	4161	22477	215.6	4247	24824	4357	25112
	27	W-2 (40%)	XY	102.0	332	22514	323	22800	99.5	308	25132	302	25414
	28	W-1 (20%)	XY	43.0	85	22600	83	22883	46.5	88	25220	76	25490
	29	W-2 (40%)	XY	98.3	346	22946	344	23226	101.0	345	25564	319	25809
	30	W-3 (60%)	XY	166.5	799	23744	790	24016	155.5	788	26352	741	26550
31	Elcentro-Lv1	XY	124.2	222	23966	229	24245	244.1	162	26515	155	26705	
32	Elcentro-Lv2	XY	267.9	770	24737	802	25048	470.1	657	27172	645	27350	
33	Sweep-Y	Y	0.0	0	24737	0	25048	24.6	267	27439	251	27601	
34	TOK	XY	428.0	512	25248	544	25591	283.4	526	27965	497	28098	
35	HOG	XY	203.7	1274	26523	1374	26965	149.1	1708	29673	1635	29733	
36	TYO	XYZ	61.1	10	26532	7	26972	59.1	14	29688	10	29743	
37	W-2 (40%)	XY	99.5	347	26879	344	27316	102.1	350	30037	320	30063	
38	SAN_10	XY	149.4	4592	31471	4593	31909	209.6	5509	35546	5412	35475	
39	W-2 (40%)	XY	95.0	356	31827	352	32261	100.1	357	35904	330	35804	
40	W-1 (20%)	XY	45.7	86	31914	77	32338	49.6	84	35987	66	35871	
41	W-2 (40%)	XY	99.1	381	32295	340	32678	103.9	336	36324	303	36174	
42	W-3 (60%)	XY	162.0	879	33174	782	33459	164.7	793	37116	738	36912	
43	Elcentro-Lv1	XY	131.1	223	33397	231	33690	247.1	155	37272	146	37058	
44	Elcentro-Lv2	XY	268.6	619	34016	610	34301	478.4	585	37857	578	37636	
45	Sweep-Y	Y	0.0	0	34016	0	34301	26.5	277	38134	260	37896	
46	W-2 (40%)	XY	96.8	396	34412	345	34646	104.4	360	38494	322	38219	
47	TOK	XY	415.7	558	34970	505	35151	283.4	591	39085	549	38768	
48	HOG	XY	193.4	1083	36053	1093	36244	146.7	2288	41373	2344	41112	
49	W-2 (40%)	XY	92.3	395	36448	342	36587	105.0	371	41744	332	41443	
50	SAN_10	XY	143.0	6271	42719	6312	42898	215.0	6303	48047	6164	47608	
51	W-2 (40%)	XY	97.3	406	43125	349	43248	106.7	353	48400	315	47923	
52	TYO	XYZ	58.0	9	43134	4	43251	57.7	12	48411	5	47928	
53	W-2 (40%)	XY	102.8	404	43538	375	43626	107.9	347	48759	313	48241	
54	SAN_10	XY	114.4	3915	47453	3885	47511	178.6	4422	53180	4397	52638	
55	W-2 (40%)	XY	96.4	394	47848	371	47882	102.9	335	53516	306	52944	
56	SAN_10	XY	136.5	5037	52884	5164	53046	217.0	9102	62618	9102	62046	
57	W-2 (40%)	XY	96.2	386	53270	362	53408	105.5	333	62951	301	62347	
58	SAN_10	XY	137.1	5163	58433	5372	58780	215.2	10371	73322	10331	72678	
59	W-2 (40%)	XY	97.4	360	58793	346	59126	104.2	389	73711	348	73026	
60	SAN_10	X	146.2	5481	64274	5654	64780	0.0	0	73711	0	73026	
61	W-2 (40%)	XY	98.4	340	64614	326	65105	104.4	387	74098	345	73371	
62	SAN_10	X	142.7	5344	69957	5394	70500	0.0	0	74098	0	73371	
63	W-2 (40%)	XY	96.6	325	70283	296	70796	103.2	384	74482	342	73713	

なお、表 2 の入力波の略称は、Elcentro-Lv.1(EL1)、Lv.2(EL2)、気象庁波(TOK)、東扇島波(HOG)、首都直下波(TYO)、三の丸波(SAN)、ホワイトノイズ加振(W-1,2,3)、スイープ波加振 (Sweep-Y) を意味している。また、Max.Acc.は縮約層最上階の応答である。

F-07、H-1/5、V-1/5 の各モデルで SAN 入力時の 3 層の履歴曲線 (Y 方向) を図 2 に示す。  $W(t_0)$  を求める際にはこの履歴面積より算出している。さらに、さらに、各加振ごとの  $E(t_0)$ 、 $W(t_0)$  をそれぞれ合計した累積値  $\Sigma E$ 、 $\Sigma W$  のグラフを図 3 に示す。

これらの結果より制振ダンパー設置の有無、設置範囲によらず、入力エネルギーと吸収エネルギーが釣合っており、精度良く変位・加速度が計測されていることが確認できる。

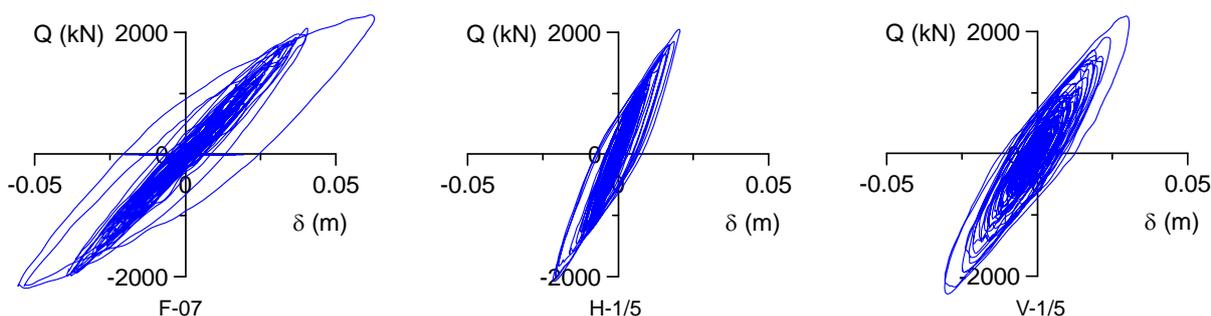


図 2 SAN 入力時慣性力-層間変位関係 (3 層)

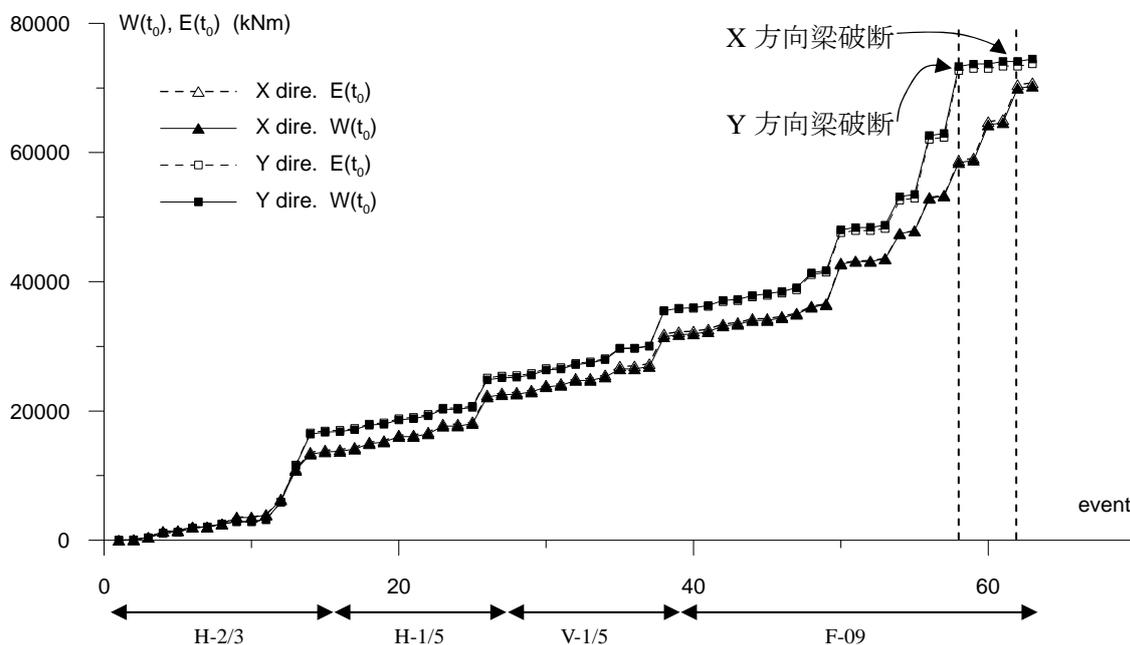


図 3 累積エネルギーの変化

## b) 鋼製ダンパーによる制振効果の検討

### 1) 鋼製ダンパーによる応答低減効果の検討

F-07、H-2/3、H-1/5 の3つの試験体について応答結果を比較する。各階応答値は、想定した21層建物に置換したときに、等価な層<sup>2)</sup>にプロットする。図4に、高さ方向の応答分布を示す。図4より、絶対加速度ではHOG、SAN入力時にH-2/3、H-1/5でF-07に比べ応答が低減されている。しかし、EL2入力時では、低層で応答が低減されているが、中層ではF-07に比べ、増大しているため、応答低減効果は見られなかった。絶対速度では、H-2/3、H-1/5共に、ダンパーの設置により応答が低減されており、H-1/5では、ダンパー非設置の縮約層でも応答低減効果が見られる。層間変形角では、ダンパーを設置することで、H-2/3、H-1/5は、全ての地震動入力時に、応答が0.01 rad (1/100)程度まで低減された。特に、SAN入力時のH-2/3では、全層にわたり0.005 rad (1/200)以下に抑えられた。これには、ダンパー設置に伴う固有周期の変化によって、後述する入力エネルギーが減少した効果も含まれている。H-1/5では、いずれの地震動入力時にもダンパーを設置した実架構部分(1~4層)で、層間変形角は大きく低減したが、ダンパーを設置していない縮約層では、ほとんど変化は無かった。ダンパー設置層と非設置層での変わり目の層で、層間変形角の変化が大きくなるが、ダンパーを部分的に配置したことでF-07の応答を超えることは無かった。

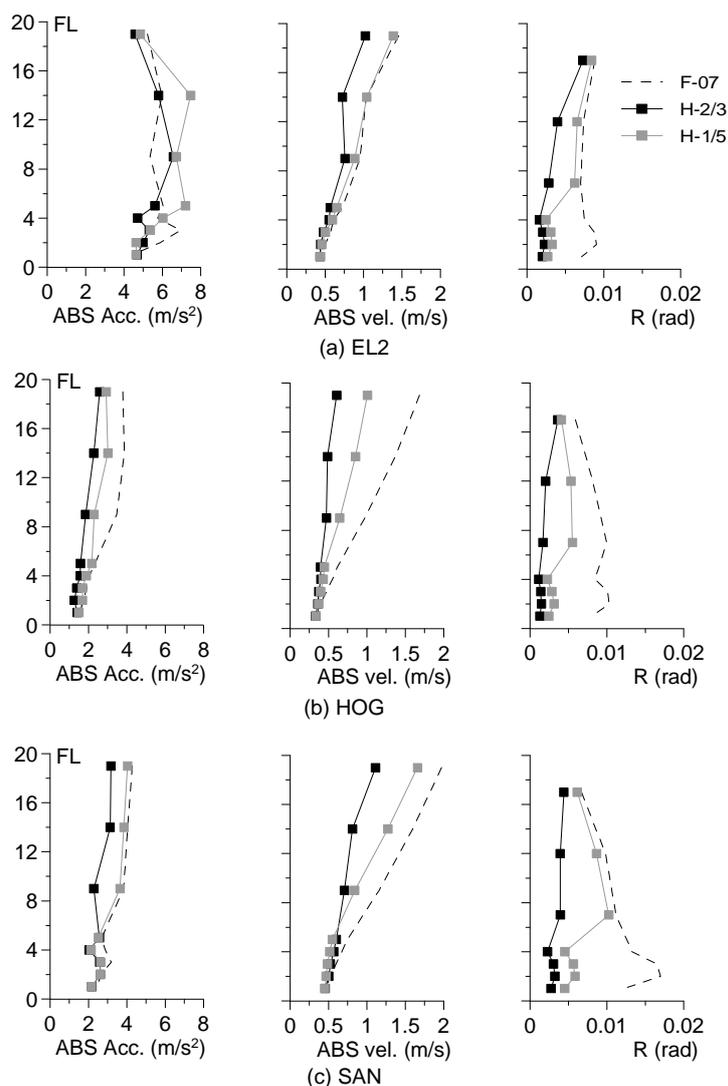


図4 最大応答値高さ方向分布

### ）鋼製ダンパー設置時のエネルギーの比較

本項では、EL2 入力時と、長周期地震動のうち最も応答が大きかった SAN 入力時に着目して、ダンパーを設置したことによるエネルギー吸収量、エネルギー分布の変化を比較する。

図 5 に、F-07、H-2/3、H-1/5 の加振終了時刻  $t_0$  の入力エネルギー  $E(t_0)$  を示す。図 5 より、EL2 入力時は、全ての試験体において、ほぼ同等のエネルギーが入力された。また、SAN 入力時の入力エネルギー量を見ると、F-07 に比べ H-2/3、H-1/5 の入力エネルギー量が減少した。これは、「特定の周期帯」<sup>3), 4)</sup> にエネルギースペクトルのピークをもつ SAN の場合、周期変動による影響が大きいためである。ダンパーを設置したことにより、建物固有周期が短周期化したため、 $E(t_0)$  が H-2/3 では 1/2 程度、H-1/5 では 2/3 程度まで減少した。

図 6 に、吸収エネルギー量の高さ方向分布を示す。図 6 より、EL2 入力時に、H-2/3 は、F-07 に比べ低層でエネルギーが吸収されず、中層でエネルギー吸収量が増大した。また、SAN 入力時では、ダンパーを設置したことにより、低層でエネルギー吸収量が低減された。F-07、H-2/3、H-1/5 共に、高層ではほぼ同等のエネルギーが吸収されていた。

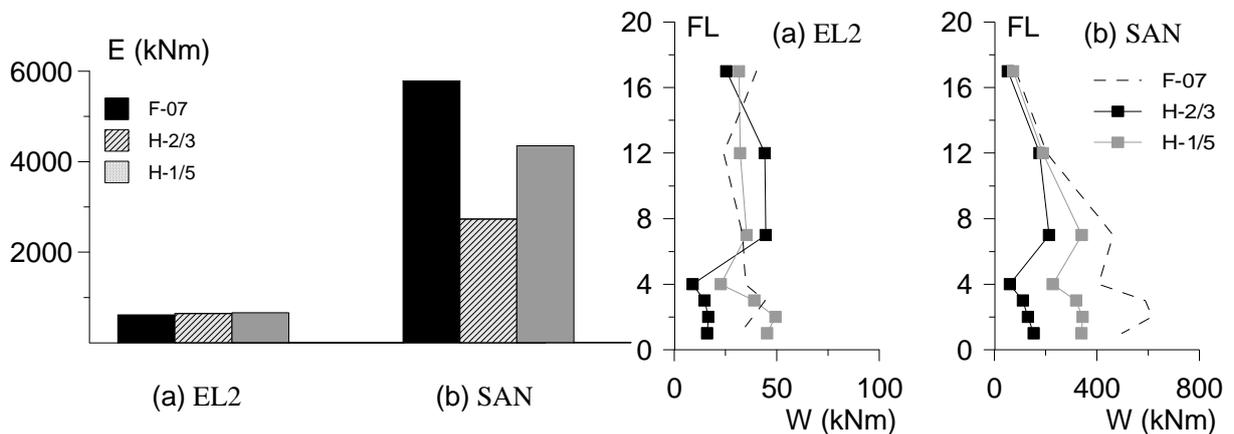


図 5 入力エネルギー量の比較

図 6 吸収エネルギー量高さ方向分布

c) 粘性ダンパーによる制振効果の検討

1) 粘性ダンパーによる応答低減効果の検討

F-07 と、V-1/5 の計測記録から、絶対加速度、絶対速度、層間変形角の最大応答値比較を行う。また、部分的に制振ダンパーを配置した際の効果と影響について考察する。最大応答値比較には、EL2、HOG、SAN の3つの地震動を用いる。図7に、Y方向の最大応答値の比較を示す。絶対加速度では、HOG 入力時に、ダンパー非設置の縮約層においても応答が低減していることが確認できる。SAN、EL2 入力時において、顕著な応答低減は見られなかった。先の H-1/5 で見られた、下層に部分的にダンパーを設置することにより上層部において加速度応答が増大する傾向は見られなかった。絶対速度では、EL2、HOG 入力時には、部分的にダンパーを設置することで、ダンパー非設置の縮約層においても、応答が低減されている。ここで、SAN 入力時に、縮約層2層目の応答が大きくなっているが、これは実験中に、縮約層2層目の塑性化装置が破損した影響であると考えられる。

層間変形角については、ダンパーを付与した実架構部分において、応答が大きく低減されている。特に、SAN 入力時には、F-07 で2層、3層において層間変形角が 1/75 を超えているが、ダンパーを設置することにより、層間変形角は 1/100 以下に抑えられている。実験時に、塑性化装置の取付部が破損した影響から、層間変形角についても、縮約層2層目の変形が大きく、直下階の縮約層1層目も大きく振られて変形が大きくなっていることが分かる。

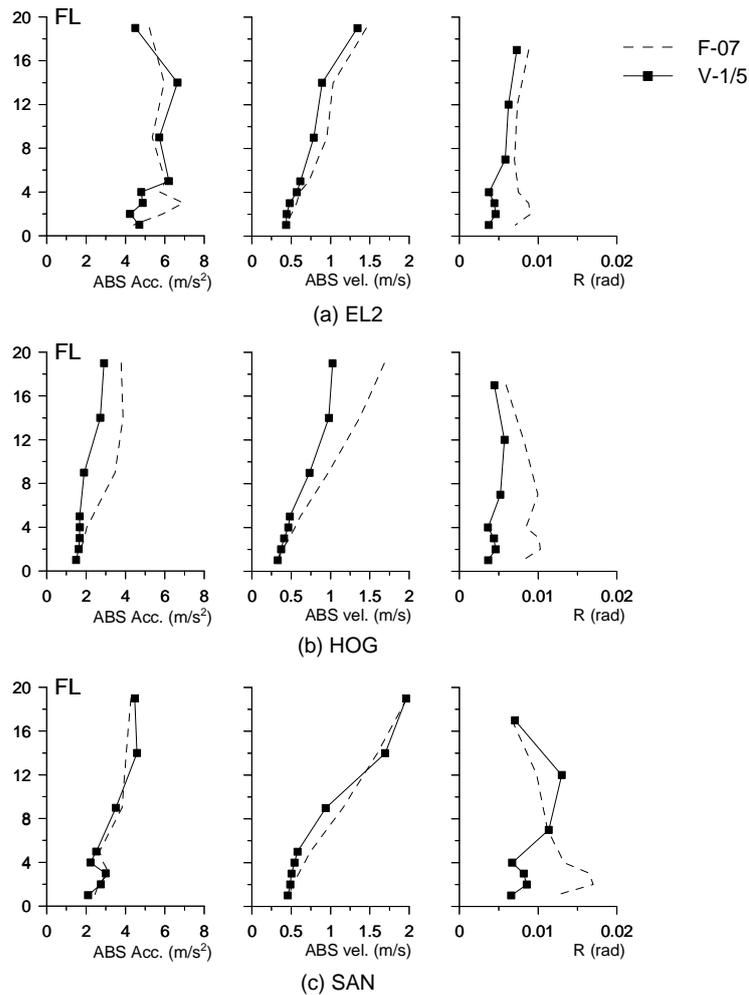


図7 最大応答値の高さ方向分布

）粘性ダンパー設置時のエネルギーの比較

表 3 から、オイルダンパーによる制振補強では、SAN 入力時には周期はあまり変化しない。そのため V-1/5 においては、H-2/3 や、H-1/5 のように SAN 入力時における、周期変動による入力エネルギーの増減はあまり見られない。全体の吸収エネルギー量と実架構部分の吸収エネルギー量の比較を図 8 に示す。図中、 $W_{1-7}$  は 1 層から 7 層までの吸収エネルギーの和、 $W_{1-4}$  は実架構部分 1 層から 4 層までの吸収エネルギーの和である。実架構部分の吸収エネルギーの占める割合は、F-07 では約 3 割に対し、V-1/5 では約 6 割となっており、V-1/5 では、設置したダンパーがエネルギーを吸収することで、実架構部分での吸収エネルギー量が大きくなっていることが分かる。図 9 に、求めた各層の吸収エネルギー量の高さ方向分布を F-07、V-1/5 でそれぞれ地震波ごとに示す。図 9 より、V-1/5 ではダンパーを配置した実架構部分で大きくエネルギーを吸収し、ダンパー非設置層への入力エネルギーを低減していることが分かる。

表 3 固有周期 (sec)

試験体名称	F-07	V-1/5	H-1/5
EL2	2.32	2.28	2.02
HOG	2.52	2.28	2.14
SAN	2.67	2.56	2.30

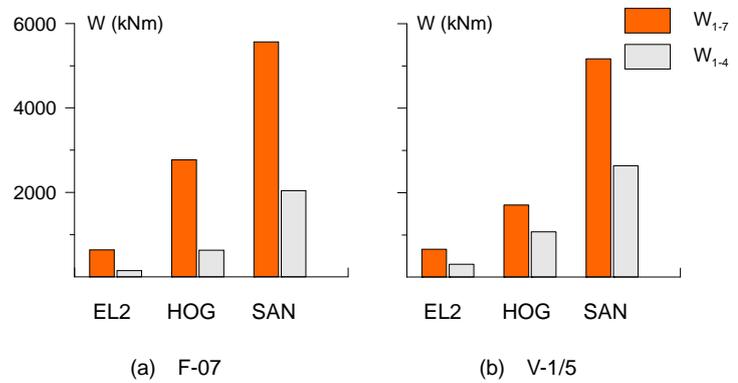


図 8 吸収エネルギー量の比較

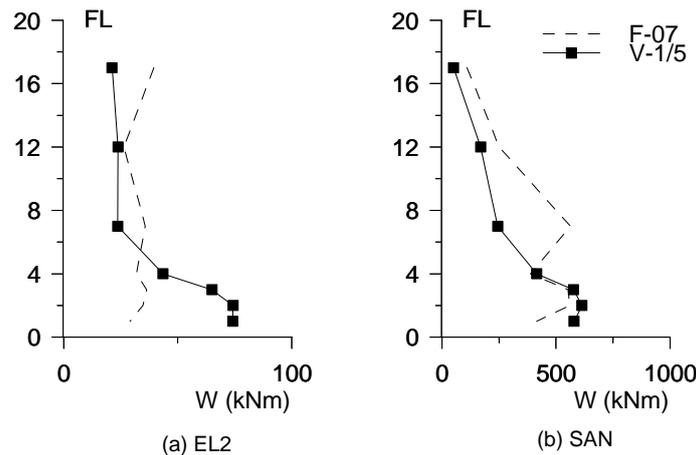


図 9 吸収エネルギー量高さ方向分布

## 2) 累積塑性変形倍率を用いた制振機構の性能評価

### a) 鋼製ダンパーの吸収エネルギーに基づく損傷評価

本節では、H-2/3とH-1/5のダンパーのエネルギー吸収量と、エネルギー分布について比較する。図10に、実架構部分の鋼製ダンパーにおいて、減衰力-変位関係の履歴曲線を示す。図10は、3階B通りのダンパーの履歴曲線である。また表4に、 $dF$ と $dU$ の履歴面積より算出したダンパーの吸収エネルギー量を示す。縮約層のU型ダンパーの吸収エネルギー量は、U型ダンパーの復元力特性<sup>5)</sup>を持たせたバネに、計測された層間変形の時刻歴波形を強制変形として入力し、解析より求めた。

図10より、EL2、SAN共に、H-2/3に比べH-1/5の履歴曲線の方がダンパーの変位が大きく、エネルギーを多く吸収していることが確認できる。これは縮約層のU型ダンパーを取り外したことにより、実架構部分の変形が大きくなったためだと考えられる。EL2、SAN入力時の試験体全体のエネルギー吸収量 $W$ とダンパーのエネルギー吸収量 $dW$ の比較を図11に示す。図11より、縮約層のU型ダンパーによるエネルギー吸収量が、どちらの地震動においても試験体全体のエネルギー吸収量の大半を占めており、フレームへのエネルギー入力を抑えることを確認した。

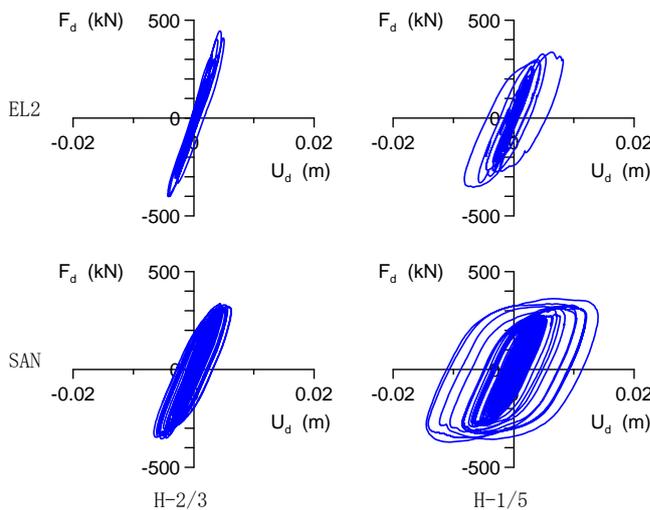


表4 ダンパー吸収エネルギー量 (kNm)

FL	EL2		SAN	
	H-2/3	H-1/5	H-2/3	H-1/5
7	-	-	-	-
6	182.2	-	804.0	-
5	165.3	-	836.9	-
4	4.3	11.2	23.6	137.5
3	11.3	25.2	71.0	237.5
2	13.7	34.6	91.5	268.4
1	21.8	42.7	116.6	284.1
total	398.7	113.7	1943.5	927.5

図10 ダンパー減衰力-変位関係 (3階B通り)

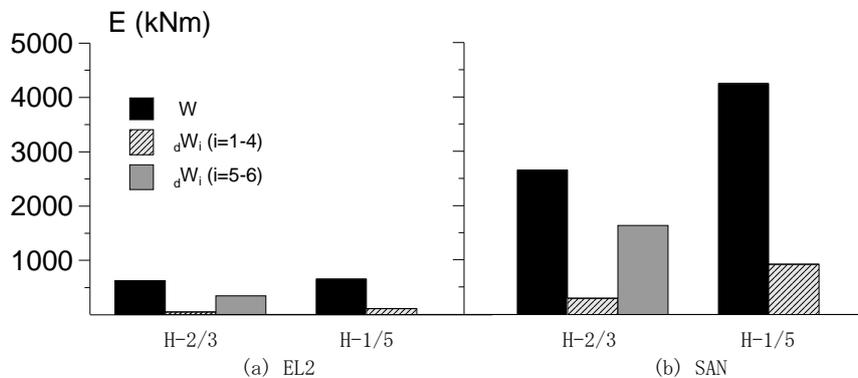


図11 試験体全体およびダンパーのエネルギー吸収量の比較

## b) 粘性ダンパーの吸収エネルギーに基づく損傷評価

EL2、SAN 入力時の、3 階 B 通りのオイルダンパーの減衰力-変位関係の履歴曲線を図 12 に示す。またダンパーの吸収エネルギー量時刻歴を図 13 に示す。ダンパーの吸収エネルギー量は、ダンパー減衰力  $F_d$  とダンパー変位  $U_d$  の履歴面積から求める。図 13 より EL2 に比べ、長周期地震動の SAN では地震動の継続時間も長く、ダンパーは約 10 倍ものエネルギーを吸収していることが分かる。求めた Y 方向での全ダンパー8 基の吸収エネルギー量の和  ${}_dW$  と、実架構部分での吸収エネルギー  $W_{1-4}$  との比較を EL2、HOG、SAN で図 14 に示す。図 14 より、V-1/5 では実架構部分で負担するエネルギーの約 7 割がダンパーで吸収されており、ダンパーが効率よくエネルギーを吸収していることが分かる。

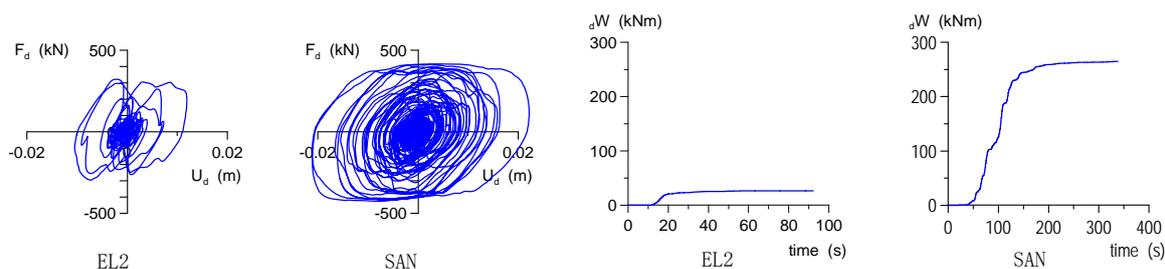


図 12 ダンパー減衰力-変位関係 (3 階 B 通り) 図 13 ダンパー吸収エネルギー (3 階 B 通り)

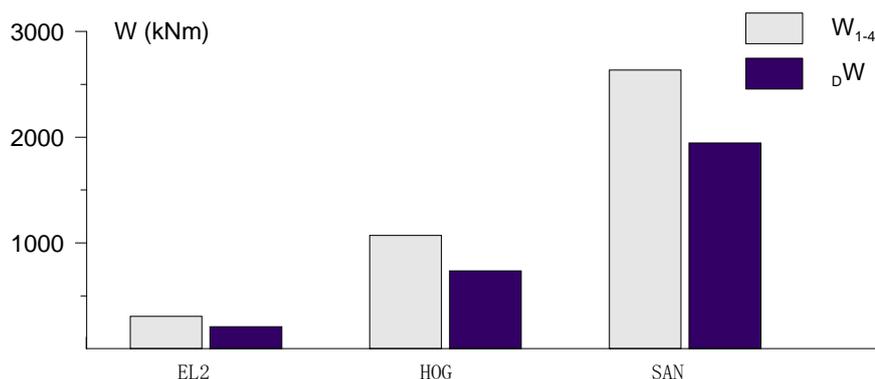


図 14 実架構部でのダンパー吸収エネルギー量

長周期地震動では長時間にわたりダンパーは大振幅の揺れにさらされる。地震動の振動エネルギーを内封油の熱に変換する粘性系のダンパー性能は、累積の吸収エネルギー量による変化が小さいため、長継続地震動に有効である。しかし、エネルギー吸収により、内部温度が上昇するため、温度上昇に伴う内封油の体積膨張をダンパーが許容できることが重要である。図 15 に EL2、SAN 入力時の 3 階 B 通りのダンパーの表面温度の時刻歴を示す。SAN 入力時には、温度上昇が見られたが、約  $10^{\circ}\text{C}$  の上昇にとどまることが確認された。

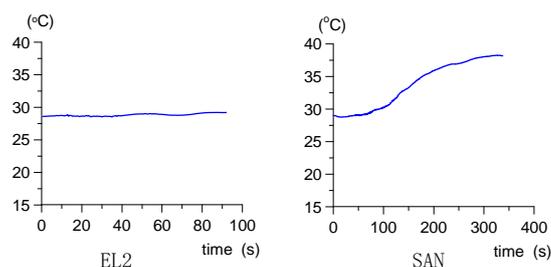


図 15 ダンパー表面温度

### 3) 試験体製作時から震動実験終了までの微振動測定データの整理分析

振動特性評価に基づく鉄骨建物の構造ヘルスマニタリング技術の実証に係わる知見を得ることを目的として、微振動データと震動台実験データを用いて試験建物の振動特性の変遷過程を詳細に分析した。特に、微振動データの計測に関しては、2008年3月に実施された前回の高層建物実験との整合性を図るため、前回と同様に、鉄骨建方時の建設初期段階から震動台実験を経て、解体・撤去されるまでの長期間にわたる連続的な測定を試みた。

#### a) 微振動観測概要

試験建物の鉄骨建方終了時から解体に至るまで、微振動の長期連続モニタリングを実施した。観測は、計11台の三成分加速度計を用いて、2009年7月15日から10月7日まで行った。収録装置のサンプリング周波数は200Hzで、1時間ごとに観測記録を保存した。図16に、観測装置の設置地点を示す。加速度計は試験建物の南側中柱を中心として、各階柱脚に配置した。さらに、試験建物のロッキング振動を把握するために基礎コンクリート上にも、4台の加速度計を配置した。なお、試験建物の建設開始から床スラブ打設後までは各階の床版が存在せず、床上での計測ができないことから、当該箇所の大梁端部の下フランジに治具を用いて床の下側から加速度計を取り付けた。打設後は床上に移設した。

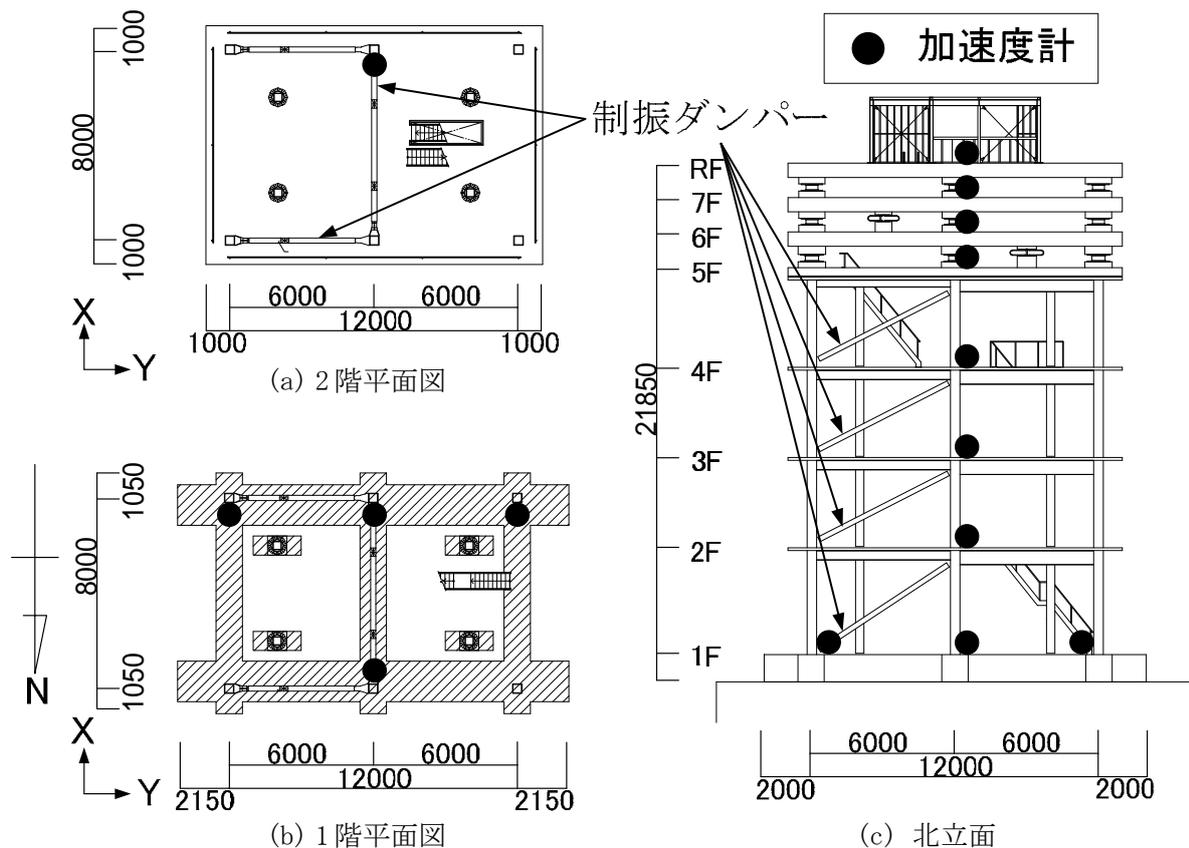


図16 試験建物の平面図と断面図および微振動計測点

## b) 評価方法

2009年7月15日から10月7日までの微振動の長期モニタリングの観測記録を用いて、試験建物の振動特性を同定した。これらの観測記録に対して1時間毎の記録を5分間のサンプルデータに分割した後、それぞれのサンプルデータに対してARMA-Burg法<sup>6)</sup>を適用して、5分毎の固有値（固有振動数と減衰定数）を同定した。さらに、全観測点の観測記録を用いて、複素固有モード（以下、モード）を同定した。

ARMA-Burg法の適用条件は、R階のセンサにおけるX方向およびY方向の加速度記録を基準として振動特性を同定した。建物に縮約層が載る前の4階鉄骨建物のとき（7月15日から9月7日）には、AR次数を40次とし、デシメーション数は8とした。一方で、7層となった9月8日以降においては、AR次数を20次とし、デシメーション数は32とした。これは、試験建物が4層から7層へと変更されて長周期化したことに対応するための処置であり、デシメーション数を上げることで試験建物の低振動数領域に着目し、振動特性の変化を把握するためである。

ARMA-Burg法を用いるとAR次数の数だけ固有値の候補値が得られるため、その中から有意な振動特性のみを精度良く選定する必要がある。本研究ではMAC関数を用いた固有値の選定法を適用する。

c) 長期間にわたる振動 特性評価の結果と考察

図 17 に、前節の評価手法を用いて算出した 2009 年 7 月 14 日から 10 月 6 日までの試験建物の 1 次固有振動数を示す。なお、Y 方向においては 2 種類の 1 次固有振動数の値が検出されることがあるが、一方は Y 方向の並進モード、もう一方はねじれモードである。

図 17 の固有振動数の変動を見ると、7 月 22 日の床スラブ打設により固有振動数が急激に減少し、その後ゆるやかに増加していることがわかる。詳細には、打設前の 2.5Hz から打設後には 1.6Hz となり、約 35%の減少がある。そして、その後 1.9Hz まで増加し安定した。これは、床スラブ打設により建物重量が増加したことによって固有振動数が減少し、その後のコンクリート硬化に伴い建物剛性が増加することで固有振動数も増加したためである。また、7 月 30 日における 5 階嵩上げコンクリート打設時においても、固有振動数が 1.95Hz から 1.55Hz となり、約 22%減少し、コンクリート打設に伴う建物重量の増加による影響が見られた。しかし、その後のコンクリート硬化による固有振動数の増加は見られなかった。これは、5 階床スラブと嵩上げコンクリートの間にはスチレンフォームが設置されており、嵩上げコンクリートによる 5 階床スラブおよび大梁の剛性上昇を防止しているためであり、その効果が意図した通りに発揮されたためである。

8 月 31 日から 9 月 2 日にかけて鋼材ダンパーが設置された。この段階では、縮約層が設置されていないため、1 階から 4 階までの実架構部のみに取り付けられた。この制振ダンパーの効果により試験建物の建物剛性が増加し、それによる固有振動数の増加が見られた。詳細には、取り付け前の 1.5Hz からダンパーの効果により 2.3Hz になり、約 1.5 倍の増加が確認できる。このように、鋼材ダンパーの設置が建築物の微震動時の剛性を増加させることを確認できた。

月	7																															8																															9																															10									
日	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	-	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																													
骨組	鉄骨建方																																																														縮約層設置																															解体									
床	床コン打設																															5F嵩上げコン打設																																																														縮約層撤去									
制振装置																																																															UBB取り付け 縮約層ダンパー撤去																															UBB オイル オイル撤去									
試験体	計測開始																																																														試験体移設																															加振日 加振日 加振日 加振日									
散振動長期モニタリング																																																																																														計測終了									

(a) 試験建物の施工行程

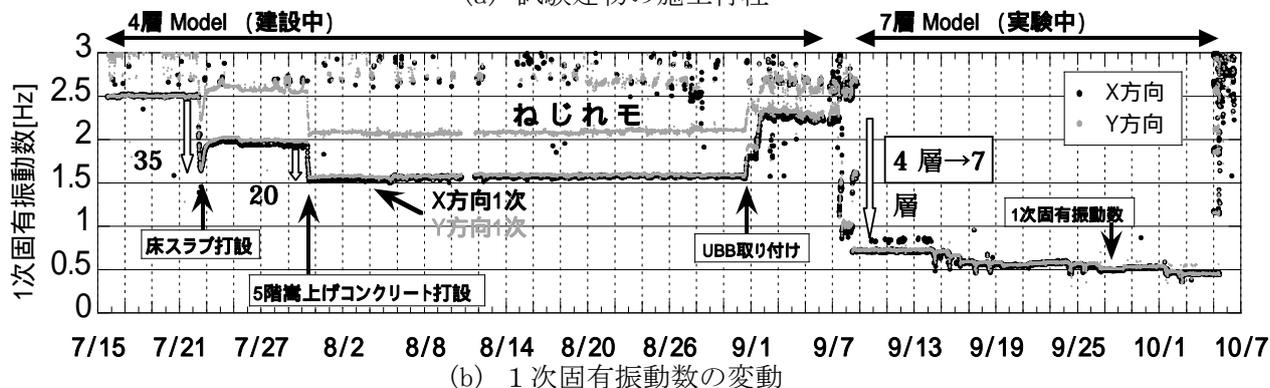


図 17 試験建物の施工工程および 1 次固有振動数の長期的変動

9月7、8日には、縮約層の設置が行われた。縮約層が下層から順に設置されるに従い固有振動数が減少する傾向が確認できる。固有振動数は、縮約層設置前の2.3Hzから設置後には0.72Hzに減少した。

以上のように微振動の長期モニタリングから試験建物の建設に伴う固有振動数の変動を捉えることができた。次節では、加振実験期間に着目して考察を行う。

#### d) 加振実験期間における振動特性評価の結果と考察

微動観測を行うことで加震により発生した損傷を検知することができた。ここで、制振補強には、鋼材ダンパーとオイルダンパーが使われ、そのダンパーの種類・配置により4つの試験建物ケースにおける制振効果の検証を行った。試験体ケースは以下のように設定した。まず、最初のケースは、実架構部と縮約層の5層と6層に鋼材ダンパーを組み込んだ試験体(UBB-1)であり、次に縮約層のダンパーを取り外し、実架構部のみに鋼材ダンパーを組み込んだ試験体(UBB-2)、そして、鋼材ダンパーの代わりにオイルダンパーを組み込んだ試験体(OIL)である。最後に、実架構部のダンパーを全て取り外し、ダンパーを組み込まない試験体(FRAME)とした。

表5に震動台実験における加振実験工程を示す。入力地震動として試験建物ケースごとにElcentro-Lv.1(括弧内は略称を示す:EL1)、Lv.2(EL2)、気象庁波(TOK)、東扇島波(HOG)、首都直下波(TYO)、三の丸波(SAN)の加振を行い、各試験建物ケースにおける応答が確認された。また、地震波加振の他に、試験建物の弾性性状を確認することを目的としたホワイトノイズ加振およびスイープ波加振(Y方向のみ)が行われた。また、10月2日には、梁が破断するまで複数回の加振を続け、3回目の三の丸波100%加振でY方向の梁端部が破断、その後、梁破断が確認されなかったX方向のみに三の丸波100%加振を2回繰り返し行った。その結果、X方向の梁端部にも破断が発生した。本文では、10月2日の最初の三の丸100%加振(加振番号54番)以降を限界性能確認試験、それ以前の加振を耐震性能確認試験と呼ぶ。

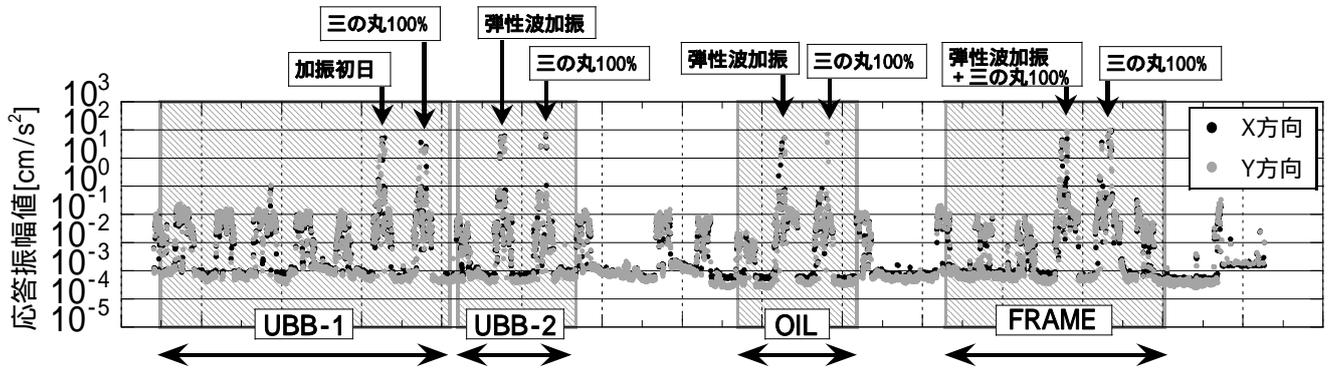
図18に加振期間を含んだ9月8日から10月5日までの応答振幅値及び1次固有振動数を示す。応答振幅値はR階の加速度記録のRMS値である。

表 5 加振実験工程

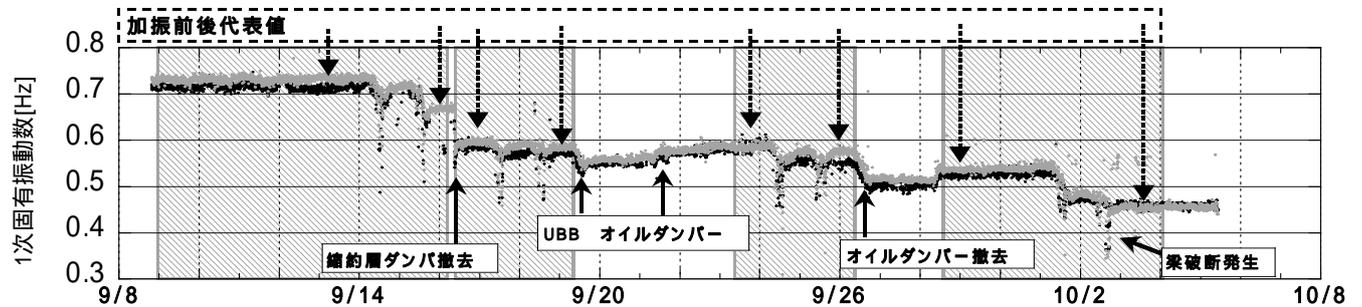
UBB-1			UBB-2			OIL			FRAME		
9月14日			9月17日			9月24日			10月1日		
No.	name	dir									
1	東京都庁波 25%	XYZ	16	ホワイトノイズ 20%	XY	28	ホワイトノイズ 20%	XY	40	ホワイトノイズ 20%	XY
2	ホワイトノイズ 20%	XY	17	ホワイトノイズ 40%	XY	29	ホワイトノイズ 40%	XY	41	ホワイトノイズ 40%	XY
3	ホワイトノイズ 40%	XY	18	ホワイトノイズ 60%	XY	30	ホワイトノイズ 60%	XY	42	ホワイトノイズ 60%	XY
4	ホワイトノイズ 60%	XY	19	Elcentro-Lv1	XY	31	Elcentro-Lv1	XY	43	Elcentro-Lv1	XY
5	Elcentro-Lv1	XY	20	Elcentro-Lv2	XY	32	Elcentro-Lv2	XY	44	Elcentro-Lv2	XY
6	Elcentro-Lv2	XY	21	Sweep-Y	Y	33	Sweep-Y	Y	45	Sweep-Y	Y
7	Sweep-Y	Y	22	気象庁波	XY	34	気象庁波	XY	46	ホワイトノイズ 40%	XY
8	気象庁波	XY	23	東扇島波	XY	35	東扇島波	XY	47	気象庁波	XY
9	東扇島波	XY							48	東扇島波	XY
9月15日			9月18日			9月25日			10月2日		
No.	name	dir									
10	東京都庁波 25%	XYZ	24	東京都庁波 25%	XYZ	36	東京都庁波 25%	XYZ	52	東京都庁波 25%	XYZ
11	ホワイトノイズ 40%	XY	25	ホワイトノイズ 40%	XY	37	ホワイトノイズ 40%	XY	53	ホワイトノイズ 40%	XY
12	三の丸 100%	XY	26	三の丸 100%	XY	38	三の丸 100%	XY	54	三の丸 100%	XY
13	三の丸 80%	XY	27	ホワイトノイズ 40%	XY	39	ホワイトノイズ 40%	XY	55	ホワイトノイズ 40%	XY
14	三の丸 60%	XY							56	三の丸 100%	XY
15	ホワイトノイズ 40%	XY							57	ホワイトノイズ 40%	XY
									58	三の丸 100%	XY
									59	ホワイトノイズ 40%	XY
									60	三の丸 100%	X
									61	ホワイトノイズ 40%	XY
									62	三の丸 100%	X
									63	ホワイトノイズ 40%	XY

(鋼材ダンパー：1-4層) (鋼材ダンパー：1-4層, 縮約5.6層) (オイルダンパー：1-4層) (オイルダンパー：1-4層) (ダンパー無し)

限界性能試験



(a) 応答振幅値



(b) 1次固有振動数の変動

図 18 加振期間における試験建物の応答振幅値および固有振動数の変動

e) 加振期間における固有振動数の変化

図 18-(b)より、試験建物の加振期間中における 1 次固有振動数の変動の傾向を分析してみる。9 月 14、15 日の UBB-1 の加振では、固有振動数が大きく減少している。14 日と 15 日では 15 日の方が大きく減少していることがわかる。詳細には、加振未経験の状態の約 0.72Hz から加振後には約 0.67Hz になり、約 10%減少した。これらのことから、加振未経験の状態からより大きな加振を経験することで試験建物の性状が変化すると考えられる。

一方、その後の UBB-2 と OIL の加振実験前後には固有振動数の減少は見られなかった。これは、これらの状態において先に実施された UBB-1 の耐震性能確認試験を超える応答が発生しなかったため鉄骨フレームには変化が起こらなかったことが原因と考えられる。

そして、FRAME の状態では、再び大きく固有振動数が減少した。これは、制振装置が取り外され鉄骨のフレーム状態になったことで、ダンパー設置時に経験した応答よりも大きな応答を受けたことにより試験建物の剛性が変化したためと考えられる。

10 月 2 日の加振最終日では、三の丸波 100%加振により梁端部に破断が発生した。図 19 に加振最終日の応答振幅値と 1 次固有振動数の変動を示す。加振前と加振後を見ると、固有振動数は X 方向では 0.47Hz から 0.46Hz、Y 方向では 0.49Hz から 0.45Hz にそれぞれ減少している。Y 方向が X 方向よりも減少量大きいのは、Y 方向の損傷箇所が X 方向に比べて多いためと考えられる。

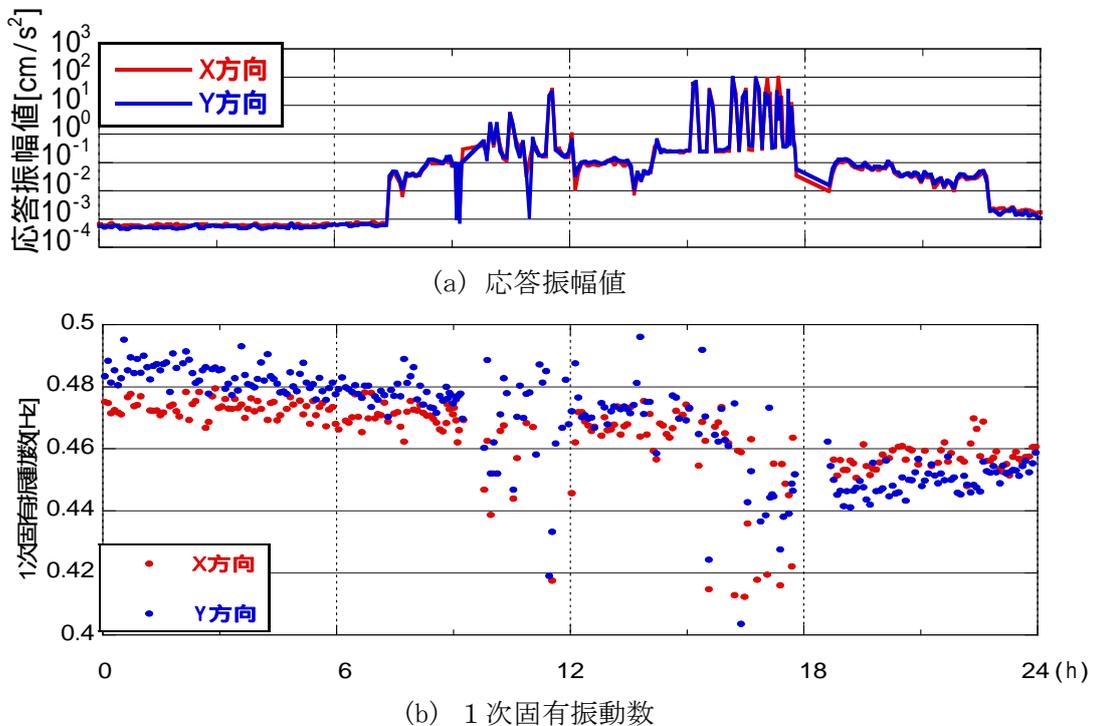


図 19 加振最終日の応答振幅値と 1 次固有振動数の経時変化

#### f) 試験建物ケースにおける比較

次に各試験建物ケースでの固有振動数の比較を行う。図 19 より UBB-1 と UBB-2 では、縮約層のダンパーを取り外したことにより固有振動数の減少が確認できる。詳細には、ダンパー撤去前の 0.67Hz からダンパーを取り外したことで 0.59Hz に減少した。一方で、UBB-2 と OIL 時の固有振動数にはほとんど差は見られなかった。このことから、微振動レベルの振動時には、鋼材ダンパーとオイルダンパーが建物剛性に与える影響がほぼ同じであることがわかる。そして、オイルダンパーを取り外し OIL から FRAME へ試験体が切り替わった後に、固有振動数が減少する傾向も確認できる。

#### 4) 微動計測による損傷評価法の高度化

初年度に行った評価と同様に試験建物の剛性を評価した。本研究では、3種類の計算手法を用いて評価をおこない、試験建物の加震による損傷課程を詳細に把握している。また、計測点を間引いた4質点縮約モデルでの評価を行うことで、より現実的な観測方法の妥当性を示す。

##### a) 剛性の評価手法

本研究では、図20に示す計算法A、B、Cの3種類の異なる方法を用いて荷重-変位関係から試験体の層剛性を評価した。

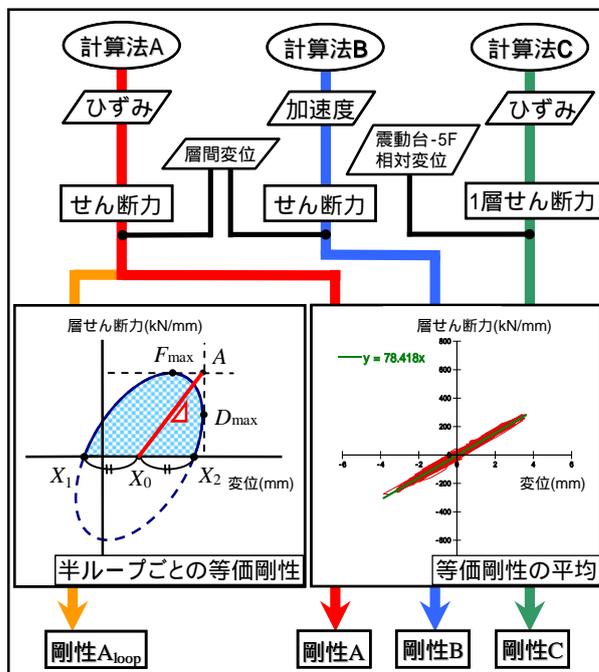
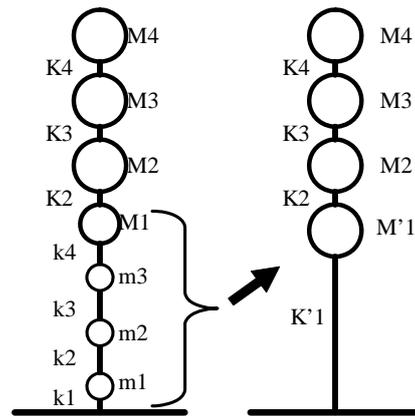


図20 各計算方法のフロー



(a) 既存モデル (b) 4質点モデル

図21 4質点縮約モデルの作成概要

） ひずみを用いた算定法(計算法 A)

柱に取り付けられたひずみゲージから得られたひずみより柱表面の応力を求め、この応力から柱上部と下部のモーメントを算出する。これら 2 点のモーメントより柱のせん断力を求め、各層 6 本の柱のせん断力を足し合わせることで層せん断力を求めた。その層せん断力と層間変位記録から、図 20 のような荷重-変位関係を各層について得る。その関係から、最小二乗法により等価剛性を算出した。以上の手順による計算法 A からは、純粋な鉄骨フレームとしての結果が得られる。

） 加速度を用いた算定法(計算法 B)

各層の加速度記録と重量から慣性力を求め、この慣性力と層間変位記録を用いて層せん断力を算出する。この層せん断力から、前節の計算法 A の場合と同様に等価剛性を算出した。以上の手順による計算法 B からは、鉄骨フレーム剛性にダンパーの付加剛性を加味した結果が得られる。

） 1~4 層を 1 質点に縮約した算定法(計算法 C)

ひずみデータを使用する点や計算過程は i) と同様であるが、第 1 層の層せん断力と震動台から 5 階までの相対変位を用いて等価剛性を求めた。以上の手順による計算法 C からは、図 21 に示すように試験体下部の実架構鉄骨フレーム 4 層分を 1 つにまとめた縮約剛性が得られる。

） 履歴半ループごとの瞬間的な剛性の算定法

計算法 A と B から得られた荷重-変位関係における半ループごとの等価剛性を図 20 の定義に基づき算出する。すなわち、荷重-変位関係の荷重が 0 となる点 X 1 から、次に荷重が 0 となる点 X 2 までの半ループに着目し、その中で変位が最大となる点  $D_{max}$  と、荷重が最大となる点  $F_{max}$  の交点を点 A とする。さらに、X 1 と X 2 の中点を X 0 とし、線分 X 0 A の傾きをこの半ループにおける等価剛性とした。以上の手順により、試験体の瞬間的な層剛性が得られる。

b) 各計算法に基づく全試験日程における剛性の推移

以下、損傷程度が大きかったY方向の剛性に着目して分析する。

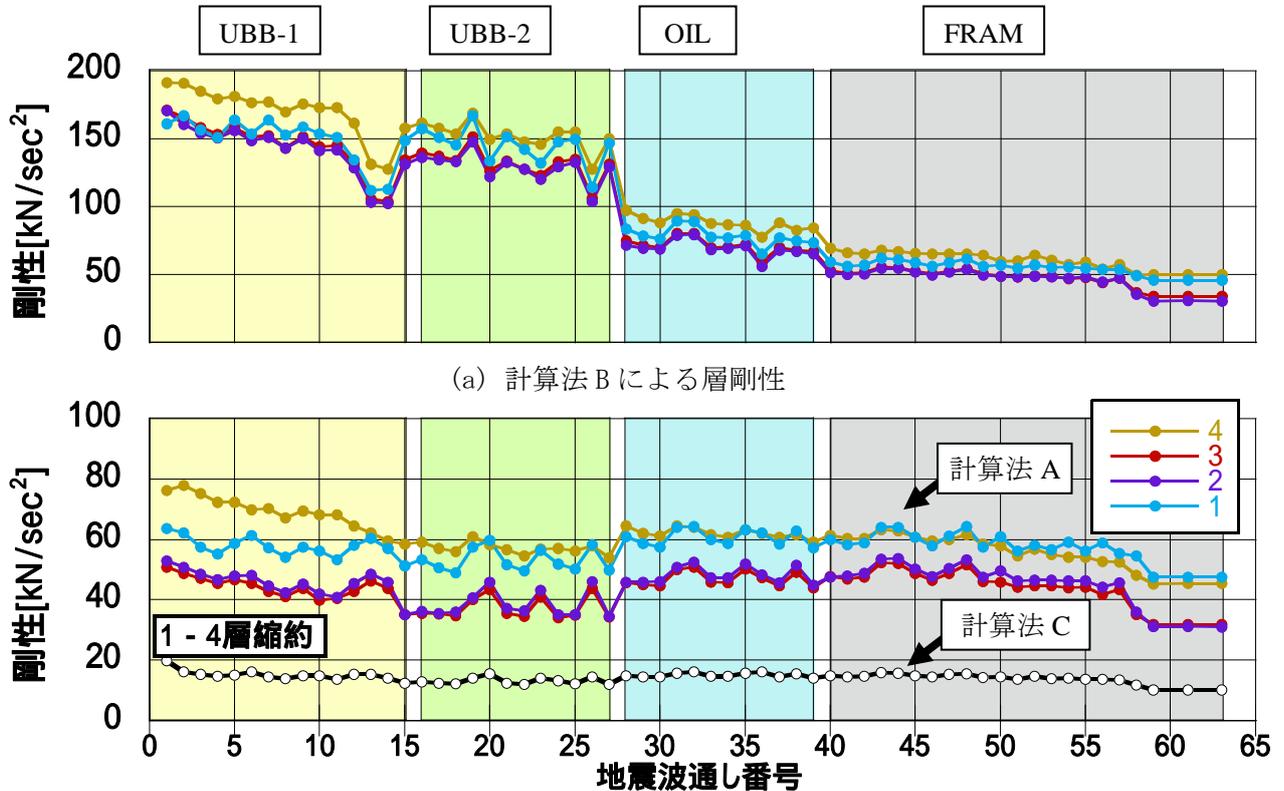


図 22 全加振日程における剛性の変化

まず、計算法 A と B を比較すると、ダンパーの設置されている UBB-1、UBB-2 および OIL の期間には計算法 A よりも B の剛性が高く、その後ダンパーを取り外した FRAME の期間にはどちらも近い値を示している。この剛性の差はダンパーの付加剛性を示している。また、計算法 A よりも B の方が剛性の変動が大きくなっている。例えば、計算法 B の UBB-1 と UBB-2 の期間では三の丸波のような大加振時において前後のホワイトノイズ加振よりも剛性が低くなる傾向があるが、計算法 A による剛性にはそのような変動はほとんど認められない。このことから、剛性の振幅依存性はダンパーには存在するが鉄骨架構にはほとんど存在しないと考えられる。

次に、計算法 A と C を比較すると、どちらの剛性も同様に推移していることから、縮約剛性の推移を調べることで鉄骨架構の平均的な剛性の変化が追跡できるものと考えられる。図 22-(b)によれば、縮約剛性は実験が進むにつれて概ね単調に低下している。詳細には、UBB-1 の期間と限界性能試験において剛性の低下が顕著であり、UBB-2、OIL および FRAME の耐震性能試験の期間 (加振番号 15~41) には急激な剛性低下は認められない。

### c) 加振経験による剛性の変化

耐震性能試験と限界性能試験の各シリーズでの始めと終わりのホワイトノイズ 40 %加振の計算法 A と C による剛性の計算値を用いて、各試験体での剛性の低下率を算定した結果を図 23 に示す。また、耐震性能試験と限界性能試験の各シリーズで経験した最大層間変形角を図 24 に示す。

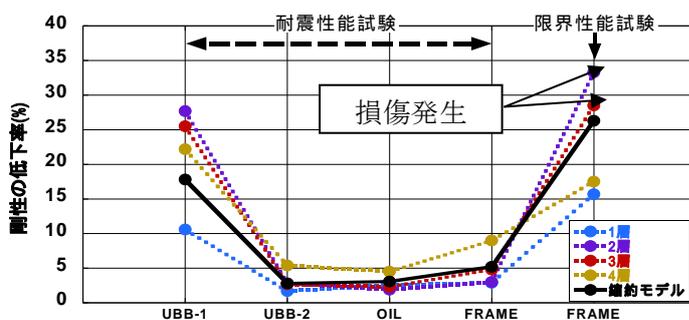


図 23 各試験シリーズでの剛性低下率

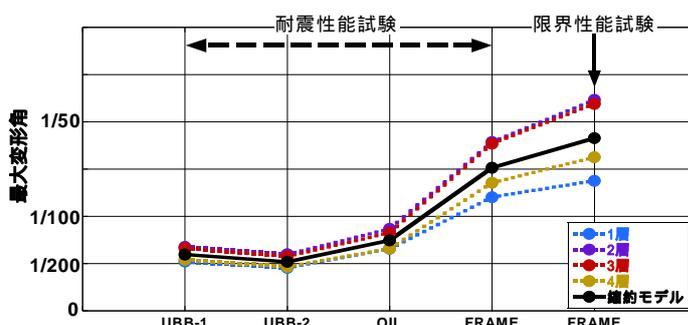


図 24 各試験シリーズでの最大変形角

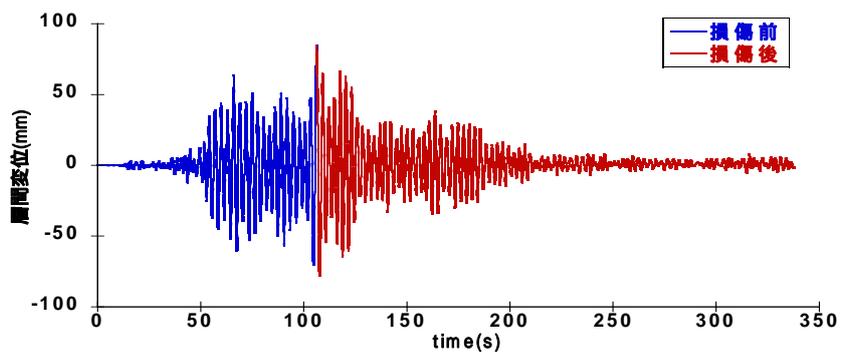
図 23 の耐震性能試験での縮約モデルの結果に着目すると、UBB-1 での低下率が 17.8 % で最も大きく、UBB-2 では 2.8 %、OIL では 3.1 %、FRAME では 5.2 %であった。これらの剛性低下率を図 24 の最大変形角と合わせて分析すると、最大変形角が大きくなるほど剛性低下が進行する傾向は認められるものの、初期の加振経験による剛性低下率が最も大きく、その後の最大変形角の増大に対する剛性低下率の感度は鈍くなる傾向が読みとれる。この原因は、試験体が初めて加振を経験することでコンクリートスラブに微小なひび割れが入り、剛性が低下する一方で、その後の変形に対してなじみをもった試験体への加振では、ひび割れが進展することはない、剛性は変化しなかったものと思われる。

### d) 梁破断時の剛性の変化

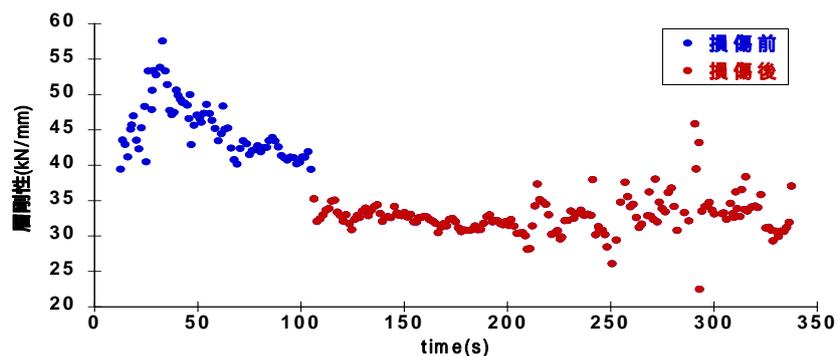
図 23 によれば、梁端部の破断が発生した前後における剛性低下率は、縮約剛性で 26 % に達し、各層別では 2 層と 3 層の剛性低下率が他の層よりも大きくなる結果となった。これらは、大梁の破断位置と概ね整合している。

この剛性の低下をより詳細に分析するため、三の丸波 100 %加振における 2 層での半ルー

プごとの等価剛性を算出した。図 25 に三の丸波 100 %加振の 2 層の層間変位波形と剛性の時刻歴変化を示す。ここで、剛性が著しく低下した時刻までを損傷前として青色で、その後を損傷後として赤色で示した。図 25 によると、振幅が最大に達し、2 層の Y 方向の梁端部が破断した加振開始から約 106 秒後に、剛性が大きく低下していることが確認できる。



(a) 三の丸波 100%加振の 2 層の層間変位波形



(b) 加振中における剛性の推移

図 25 梁破断時の 2 層における半ループごとの等価剛性

### (c) 結論ならびに今後の課題

本報では、F-07 と、鋼製ダンパーを設置した H-2/3、H-1/5、V-1/5 の実験結果を比較することで、応答性状の違いを述べた。

鋼製ダンパーの設置によって絶対速度、層間変形角で、応答低減効果が確認できた。応答を比較した場合、H-2/3 に対し、H-1/5 では低減効果は小さいが、ダンパー非設置の縮約層でも応答が低減したことより、H-1/5 でも長周期地震動に対して応答低減効果が確認できた。しかし、特定の周期帯を持つ長周期地震動では、鋼製ダンパーの設置による建物固有周期の変動で、入力エネルギーの変化が大きい。本実験でも SAN において、吸収エネルギー量、エネルギー分布の多大な変動が確認できた。そのため同程度のエネルギーが入力された F-07 の SAN 入力時と H-2/3 の SAN08 入力時を比較することで、鋼製ダンパーの設置による応答低減効果を確認した。層間変形角では、低層で大きく応答を低減し、全ての層で 0.01 rad を超えないことを確認した。

オイルダンパーは鋼製ダンパーと比べ、非設置階との変わり目の層での、最大層間変形角の急激な増大は見られなかった。続いて、試験体全体でのエネルギー吸収量の割合から、鋼製ダンパーに比べ、オイルダンパーでは部分的に設置した下層階で大きくエネルギーを吸収することを確認した。

オイルダンパーは、長周期地震動の大振幅の繰り返しの振動により内封油の温度上昇が懸念されたが SAN 入力時においても、ダンパー表面温度で約 10°C の上昇に留まることが確認された。

振動特性評価に基づく鉄骨建物の構造ヘルスマニタリング技術の実証データを得ること目的として、試験建物の微振動データと震動台実験データを用いて試験建物の震動特性の変遷過程を詳細に分析した。その結果、地震経験に伴う建物振動特性に係わる知見として、梁端部が破断するような甚大な損傷を受けることで試験体の固有振動数や剛性が大きく変化すること、それらの変化は微振動データと震動台実験のいずれによっても検出可能であること、建設直後の加振未経験の状態から微小加振を経験する過程でも固有振動数や剛性が低下すること、微小加振を経験して固有振動数や剛性がある程度低下した後は最大層間変形が 1/100 程度の地震応答を経験したとしても甚大な損傷が発生しなければ、その地震前後で固有振動数や剛性に大きな変化は現れないことなどを確認した。また、これらの加振経験に依存した鉄骨建物の振動特性の変化がコンクリート床スラブの剛性に起因したものである可能性があることについても述べた。特に、本研究の試験体は実建物とほぼ同じスケールであり、微振動データが実際の建物のひずみレベルと同等であると見てよいため、微振動レベルでの剛性や固有振動数が地震損傷によっていかに変化するかを考察する上で、極めて貴重なデータならびに知見であるといえる。

今回の検討と前回の振動台試験での検討を通して、固有振動数や剛性を損傷指標とする構造ヘルスマニタリング技術によって、梁端の破断などの鉄骨建物にとって致命的な損傷や劣化の有無、層単位での損傷位置の検出が可能であることを示唆する実証データを得ることができた。しかし、その一方で、加振未経験の状態から微小地震を経験することで固有振動数や剛性が低下することも同時に観察された。このことは、固有振動数や剛性が低下したとしても、その低下量が小さければ健全な場合もあることを示唆しており、甚大な

損傷を見分けるためには固有振動数や剛性の閾値が必要であると考えられる。本報告の範囲では、その閾値を提示するには至っていないが、今回と前回の震動台実験のデータをより詳細に分析することで、それらの閾値の目安が得られる可能性がある。また、鉄骨建物の地震経験による剛性低下のメカニズムについては、不明な点があり、構造ヘルスマモニタリングの実用にあたってはこれらの点を解明しておく必要があるが、この点に関しても、今回と前回の震動台実験データの分析を進めることで新しい知見が得られる可能性がある。近い将来に危惧される東海、南海、東南海地震などでは、大地震の経験に乏しい高層建物にも大きな揺れが長時間にわたり発生する恐れがあり、被災後にそのような建物の健全度を迅速に評価し安全性を担保することができる構造ヘルスマモニタリングの早期実用化が望まれる。

#### (d) 引用文献

- 1) 長江拓也 他：高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実験－その 1～11、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.823-832、pp.873-884 2008.9
- 2) 長江拓也、鐘育霖、島田侑、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛、斉藤大樹、北村春幸、福和伸夫、日高桃子：超高層建物の耐震性能を検証する大規模実験システムの構築－E-ディフェンス震動台実験－、日本建築学会構造系論文集、第 640 号、pp.1163-1171、2009.6
- 3) 秋山宏、北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応、日本建築学会構造系論文集、第 598 号、pp.141-147、2005.12
- 4) 日本建築学会・東海地震等巨大地震への対応特別調査委員会：巨大災害による長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性と今後の課題、2006 年日本建築学会大会研究協議会、2006.9
- 5) 新日本製鉄株：カタログおよび技術資料
- 6) 森本真史、金澤健司、桐田史生、北村春幸：耐震補強における低層鉄筋コンクリート造建物の振動特性の経時変化、構造工学論文集、Vol.54B、p493-500、2008

#### (e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国際・国内の別
E-ディフェンス実験における高層建物試験体の累積損傷評価－その 1, 2 口頭発表	島田侑, 大内隼人, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴	東北学院大学 2009 年度日本建築学会大会（東北）	2009 年 8 月	国内

	仁, 中島正愛			
E-ディフェンス高層建物試験体の長期モニタリングーその1,2 口頭発表	森本真史, 金澤健司, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛	東北学院大学 2009年度日本建築学会大会(東北)	2009年8月	国内
長周期地震動を受ける制振補強高層建物のE-ディフェンス実験ーその1-3 口頭発表	野崎康行, 大下優作, 大内隼人, 島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 中島正愛	建築会館 2009年度日本建築学会関東支部研究報告会	2010年3月	国内
E-ディフェンス高層建物試験体の長期モニタリングーその3,4 口頭発表	尾野勝, 飯野夏輝, 金澤健司, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也	建築会館 2009年度日本建築学会関東支部研究報告会	2010年3月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文(論文題目)	発表者氏名	発表場所 (雑誌等名)	発表時期	国際・国内の別
超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討ー長周期地震動を想定した耐震改修ー	島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 齊藤大樹, 福和伸夫, 日高桃子	日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第649号	2010.3	国内
大震動台実験における高層建物試験体の振動特性評価	尾野勝, 金澤健司, 森本真史, 佐藤大樹, 北村春	構造工学論文集	2010.3	国内

	幸, 長江拓也			
--	---------	--	--	--

マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

**(3) 平成 22 年度業務計画案**

- ・平成 21 年度には、制振部材を採用した補強を施した超高層建物の実験を E-ディフェンスで実施したが、その超高層建物の地震応答解析を行い、震動台実験による実験データと比較することで、実験時の試験体の揺れ（応答）を再現できる解析手法を確立する。
- ・解析結果と実験結果を比較・分析し、建築構造体の累積塑性変形倍率などによる損傷評価や制震部材の累積塑性ひずみエネルギー吸収量などによる性能評価を行い、既存超高層建物に対する制振補強を行った際の性能評価手法を構築し、平成 23 年度に作成するガイドラインに資する基礎資料を整備する。