

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とともに、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・共有し指針を取りまとめ、安心・安全な高層建物の広い普及を目指すことは重要な課題である。

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 22 年度業務目的

- ・平成 21 年度に実施した E-ディフェンス震動実験で用いた超高層建物試験体の地震応答解析を行うとともに、震動台実験による実験結果と比較・分析し、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。
- ・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。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京理科大学 理工学部建築学科	教授	北村春幸	kita-h@rs.noda.tus.ac.jp
	客員准教授	金澤健司	kanazawa@criepi.denken.or.jp
	助教	佐藤大樹	daiki-s@rs.noda.tus.ac.jp

(2) 平成 22 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・平成 21 年度に実施した E-ディフェンス震動実験結果を分析し、最大値だけでなく累積値であるエネルギーの分布について考察した。
- ・実験データから架構とダンパーのエネルギー分担率について評価を行った。
- ・実験データに基づき、実験時の試験体の応答を再現できる解析手法を確立した。
- ・作成した解析モデルによる解析結果と実験結果とを比較・分析し、本手法の精度を検証した。

(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、応答性状や、エネルギーの分担に着目し、ダンパーによる制振改修の効果について検討を行った。

また、平成 20 年 3 月 17 日から平成 20 年 3 月 21 日にかけて行われた超高層鋼構造建物

の試験体の応答を再現できる解析手法を確立し、作成した解析モデルによる解析結果と実験結果とを比較・分析し、本手法の精度を検証した。

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。試験体は、実大架構の下層 4 層を実架構部、上層部分を縮約層と呼び、2007 年度の試験体を F-07、2009 年度の試験体において、鋼製ダンパーを実架構部分と縮約層の 5、6 層に設置した試験体を H-2/3、鋼製ダンパーまたはオイルダンパーを実架構部分のみに設置した試験体を H-1/5、V-1/5 と定義する(表 1、図 1)。

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	-	-	

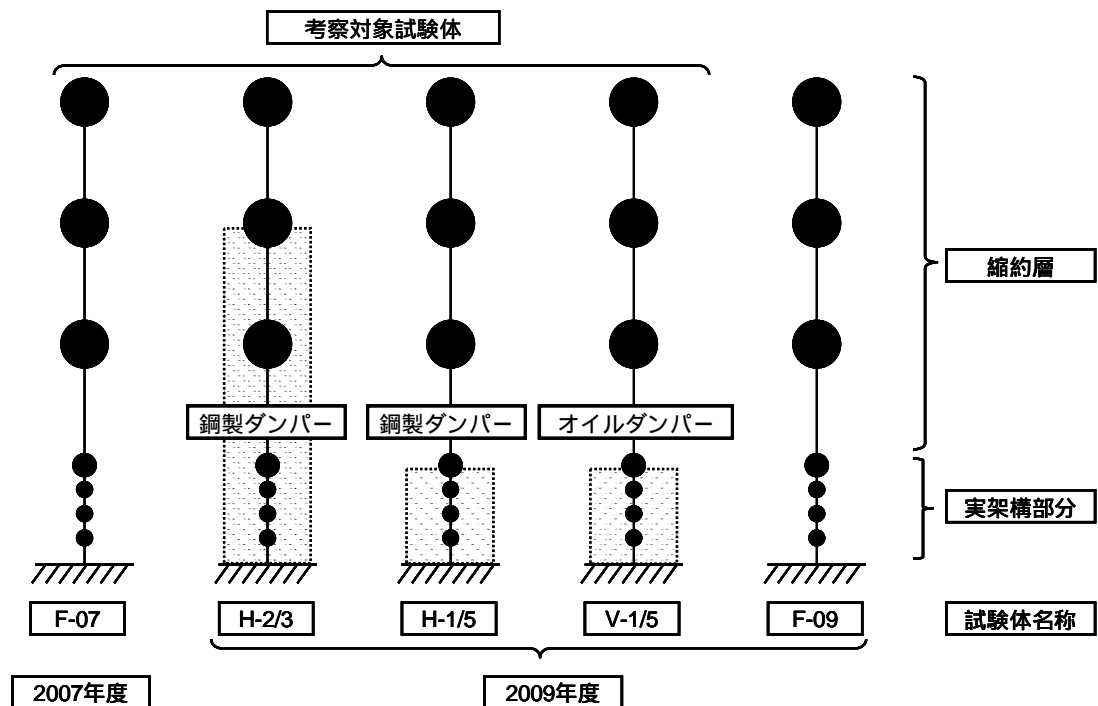


図 1 試験体名称

1) 入力エネルギーと制振機構のエネルギー吸収の関係

a) エネルギーの釣合の検証

地震動終了時刻での慣性力を用いて算出した加振ごとの各層吸収エネルギー W_i 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 ¹⁾、 E の速度換算値 V_E 、試験体頂部加速度と震動台加速度の伝達関数より得られる1次固有周期 T を表2に示す。ここで、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及び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 地震動毎のエネルギー等算出結果

(a) X方向

	F-07				H-2/3						H-1/5				V-1/5				
	FL	EL2	TOK	HOG	SAN	EL2	TOK	HOG	SAN	SAN08	SAN06	EL2	TOK	HOG	SAN	EL2	TOK	HOG	SAN
W_i (kNm)	7	109	115	166	431	88	122	332	206	367	313	119	107	285	325	85	69	166	251
	6	135	110	270	1110	187	147	156	652	1290	856	168	118	212	827	114	102	158	828
	5	274	128	576	2777	182	139	233	865	1795	896	253	112	336	1494	165	77	230	1187
	4	21	42	15	450	13	6	25	85	187	76	48	7	51	269	76	46	136	468
	3	30	35	37	720	23	11	53	141	285	114	75	15	86	383	108	71	196	638
	2	25	20	41	700	28	8	75	160	308	117	84	15	96	413	112	74	203	659
	1	20	24	29	512	27	12	72	166	295	110	76	18	93	394	97	71	179	599
E (kNm)	652	410	1247	6429	562	502	1000	2351	4605	2585	847	434	1225	4109	789	543	1361	4588	
V_E (m/s)	1.23	0.97	1.70	3.85	1.14	1.08	1.52	2.33	3.26	2.44	1.40	1.00	1.68	3.08	1.35	1.12	1.77	3.25	
T (s)	2.34	2.18	2.30	2.43	1.82	1.72	1.80	1.87	1.87	1.93	2.18	2.05	2.15	2.22	2.05	2.26	2.22	2.38	

(b) Y方向

	F-07				H-2/3						H-1/5				V-1/5				
	FL	EL2	TOK	HOG	SAN	EL2	TOK	HOG	SAN	SAN08	SAN06	EL2	TOK	HOG	SAN	EL2	TOK	HOG	SAN
W_i (kNm)	7	199	158	263	500	121	114	98	259	437	500	149	88	120	362	109	51	98	280
	6	126	130	628	1180	211	142	101	873	1506	1498	159	113	215	921	117	78	211	966
	5	173	151	1336	2633	215	112	116	1078	2325	1932	167	147	339	1680	122	79	313	1327
	4	33	36	126	403	8	14	7	56	220	168	21	18	46	204	50	52	187	508
	3	40	36	164	576	14	24	8	104	326	239	37	27	77	293	72	77	260	682
	2	36	27	173	591	16	23	7	124	360	250	47	27	86	322	82	83	279	722
	1	31	26	141	463	19	28	15	155	359	232	46	33	95	329	77	82	266	673
E (kNm)	611	513	2825	6064	636	434	365	2721	5767	4967	650	438	987	4340	637	494	1646	5382	
V_E (m/s)	1.19	1.09	2.55	3.74	1.21	1.00	0.92	2.50	3.65	3.38	1.22	1.00	1.51	3.16	1.21	1.07	1.95	3.52	
T (s)	2.39	2.20	2.44	2.41	1.61	1.60	1.69	1.79	1.73	1.87	2.02	2.02	2.14	2.05	2.18	2.11	2.15	2.30	

2) 鋼製ダンパーによる制振補強試験体におけるエネルギー吸収と分担率

a) 実験値に基づくエネルギーの評価

1) 吸収エネルギーおよび入力エネルギーの評価

EL2、HOG および SAN の慣性力 Q_i -層間変形 δ_i の履歴曲線から吸収エネルギー $W_i(t)$ を求め、入力エネルギー $E(t)$ の時刻歴とともに図 2 に示す。 $W_i(t)$ は対象とする層より下層までの和で示している。

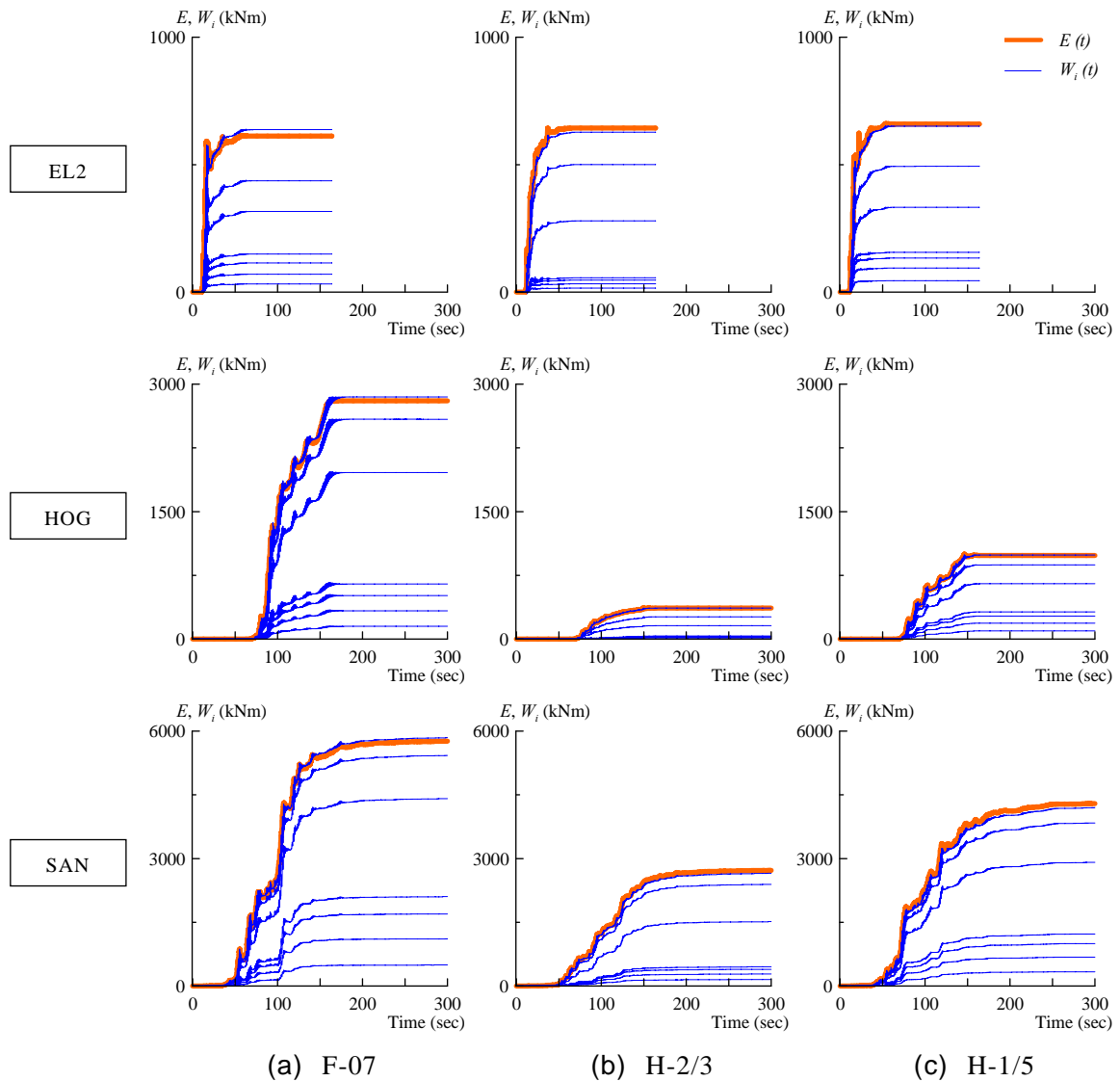


図 2 入力エネルギーと吸収エネルギーの時刻

いずれの入力においても地震動終了時刻 t_0 での $E(t_0)$ と $W(t_0)$ は良い対応を示している。また、事前解析で予想された通り、長周期地震動である、HOG や SAN では、特に H-2/3 で入力エネルギーが大幅に低減されている。図 3 に、H-2/3 においても F-07 と同等のエネルギーが入力されるように作成した SAN08 と SAN06 の加振結果を SAN と並べて示す。

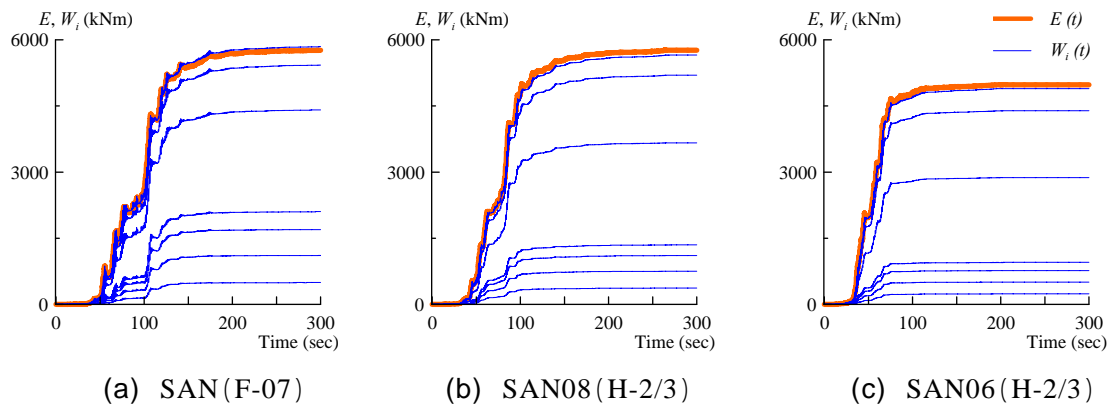


図3 SAN 圧縮波の入力エネルギーと吸収エネルギーの時刻歴

図3より、SANのスペクトルのピークをずらした地震波SAN08は、入力エネルギーがF-07と同等であった。この結果を入力エネルギーとスペクトルの関係から考察する。

エネルギースペクトル ($h = 10\%$) と実験値の対応

本節では前節で求めた入力エネルギー E を用いて、各加振での E の速度換算値 $V_E^{(1)}$ と減衰定数 $h = 10\%$ でのエネルギースペクトルを比較する。エネルギースペクトルと実験値の企画を図4(a)、(b)に示し、実験値の V_E をプロットする。実験値は各加振から得られた1F、RFLの加速度の伝達関数の1次固有周期を、架構の塑性化により変動する有効周期を用いてプロットした。

図4(a)に示したEL2、HOG、SANのいずれの入力においても実験値のプロットは $h = 10\%$ としたエネルギースペクトルと良い対応を示していることが確認できる。このことは鋼製ダンパーを用いた制振構造においても、有効周期が特定できれば試験体に入力されるエネルギーを、 $h = 10\%$ としたエネルギースペクトルから予測できることを意味している。図4(b)のSAN、SAN08、SAN06での結果についてもSANおよびSAN08では実験値はエネルギースペクトルと良い一致を示していることが確認できる。ただし、SAN06での実験結果(図中◆)は、有効周期での V_E を25%ほど下回る結果となった。これは、長周期化によって有効周期がスペクトルのピークを超えて入力エネルギーが減少する過程で、エネルギースペクトルが平滑化されることが一因と考えられる^{1)、2)、3)}

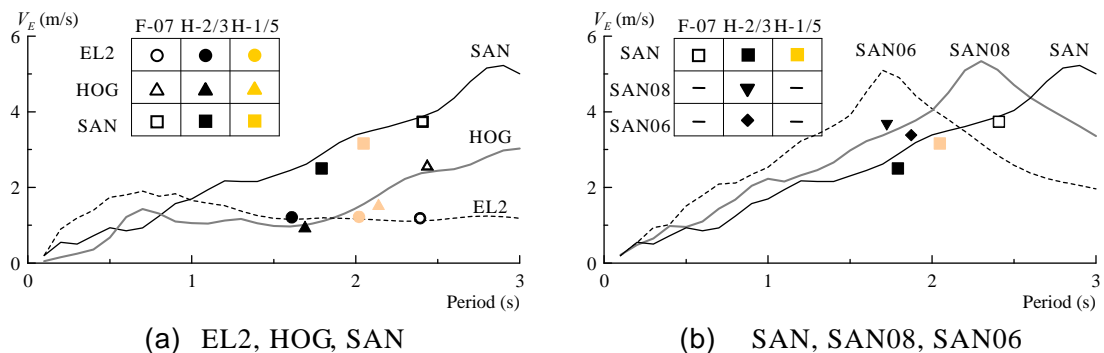


図4 エネルギースペクトルと実験値の比較

b) 吸収エネルギーの分担の検証

1) 吸収エネルギーの高さ方向の分布

本項では、建物全体での吸収エネルギーの高さ方向での分布を示す。図 5 に(a)EL2 および(b)SAN と SAN08 入力時の最大層間変形角 R_i の高さ方向分布を想定 21 層建物と等価な値に変換して示す⁴⁾。

図 5(a)を見ると、EL2 は、いずれの試験体に対しても同等のエネルギーが入力されている（図 4(a)）。最大層間変形角は、F-07、H-1/5、H-2/3 の順で小さくなり、H-2/3 の場合は、高さ方向の変形角分布がなめらかになっている。H-1/5 においてダンパーを設置していない層に変形の抑制効果はほとんど認められない。ダンパーを組み込んだ下層は、F-07 に比べて変形角が 1/3 程度まで抑制されている。

図 5(b)のさらに大きな変形レベルを見ていく。F-07 における SAN と入力エネルギーが等しくなった、H-2/3 の SAN08 を見ると、ダンパーを設置している層では、ダンパーによる制振効果によって応答が低減していることが確認できる。下層の実架構部分では、EL2 と相当の効果であるが、縮約層では EL2 に比べ低減効果が小さい。これは縮約層の耐力比 $d\beta$ および、ダンパー量 $d\alpha_y$ を、架構の 50~70%とした影響であると考えられる。一方、H-2/3 および、H-1/5 の SAN と比較すると、ダンパーを設置することにより H-2/3 で約 60%、H-1/5 で約 30%入力エネルギーが低下した効果（図 4(a)）が加わることで、変形角が EL2 より顕著に抑制されている。高さ方向の変形分布の傾向は H-2/3、H-1/5 とともに EL2 の場合と等しい。

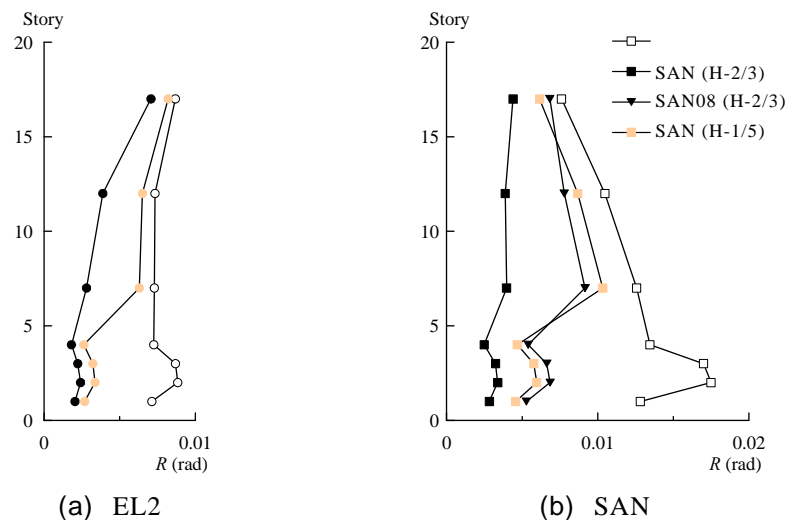


図 5 層間変形角高さ方向の比較

図 6 に(a)EL2 および(b)SAN と SAN08 入力時の吸収エネルギー W_i の高さ方向分布を想定 21 層建物と等価な値に変換して示す 4)。

図 6(a)EL2 の結果を見ると、いずれの試験体に対しても入力エネルギーが同等であるが H-2/3 では、縮約層のダンパーが実架構部のダンパーよりも早い段階で降伏することで、エネルギーを吸収し、その大半のエネルギーを吸収している。H-1/5 では、実架構部のダンパーが降伏に至り、実架構部において F-07 よりも多くのエネルギーを吸収していることが分かる。図 6(a)SAN でも同様に、F-07 の SAN と、H-2/3 の SAN08 は入力エネルギーがほぼ同等であるが (図 4(b))、その分布形状は縮約層のダンパーが、実架構部のダンパーよりも早い段階で降伏しエネルギーを吸収することで、H-2/3 の SAN08 では縮約層のエネルギー吸収量が大きく、実架構部分では低減されている。一方、H-2/3 および、H-1/5 の SAN と

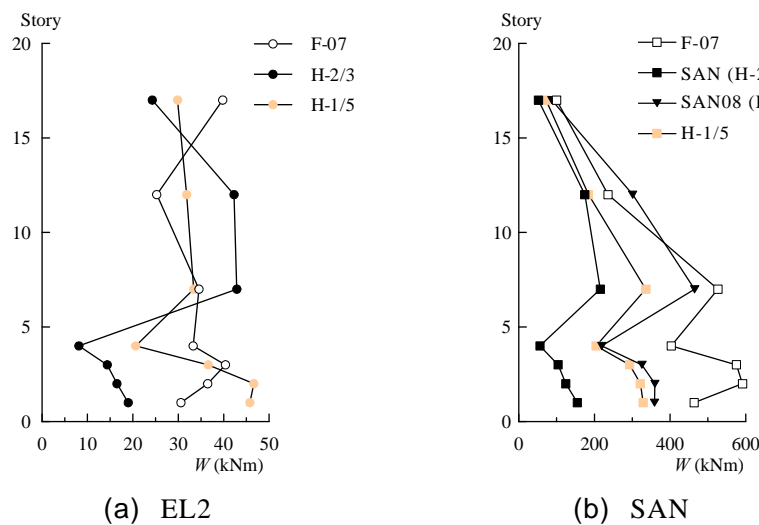


図 6 吸収エネルギー高さ方向の比較

比較すると、入力エネルギーの低下とともに全体的に吸収エネルギーも低下する様子が見られる。

実架構部分における吸収エネルギーの分担

ダンパーの履歴曲線

本項では、実架構部分での吸収エネルギーが、どの箇所でどの程度負担されているのかを検討する。まずは、図 7 に H-2/3 での SAN、SAN08 入力時のダンパーの軸方向の変位-荷重履歴曲線を、図 8 に H-1/5 での EL2、SAN の時のダンパーの軸方向の変位-荷重履歴曲線を示す。図には、剛性 $d k$ と、塑性化部断面 $d A_c$ と降伏応力度 $d \sigma_y$ から求めた降伏強度 $d F_y$ を赤線で同時に示している。ここで、ブレース型鋼製ダンパーの軸方向剛性 $d k$ は次式により算出した。

$$d k = \frac{E \cdot d A_c}{d L} \frac{d \lambda_A}{1 + d \lambda_L (d \lambda_A - 1)} \quad (1)$$

ここで、 E : ヤング係数、 $d L$: ダンパー長さ、 $d \lambda_A$: ダンパーの塑性化部断面積 $d A_c$ に対する弾性部断面積 $d A_b$ の比 ($= d A_b / d A_c$)、 $d \lambda_L$: ダンパー長さ $d L$ に対する塑性化部長さ $d L_c$ の比 ($= d L_c / d L$) である。

いずれの加振においても $d\mathbf{k}$ 、 dF_y ともによく対応しており、計測の精度が信頼できるものであることを示している。また、H-2/3の最初のSANから、H-1/5のSANまで加振を繰り返したが（表2）、ダンパーの性能は劣化することなく、保持されており、安定してエネルギーを吸収していることが確認できる。図7のSANとSAN08を比較すると、SAN08では入力エネルギー量が大きく、ダンパー変位も大きくなり、降伏に伴い多くのエネルギーを吸収していることが分かる。

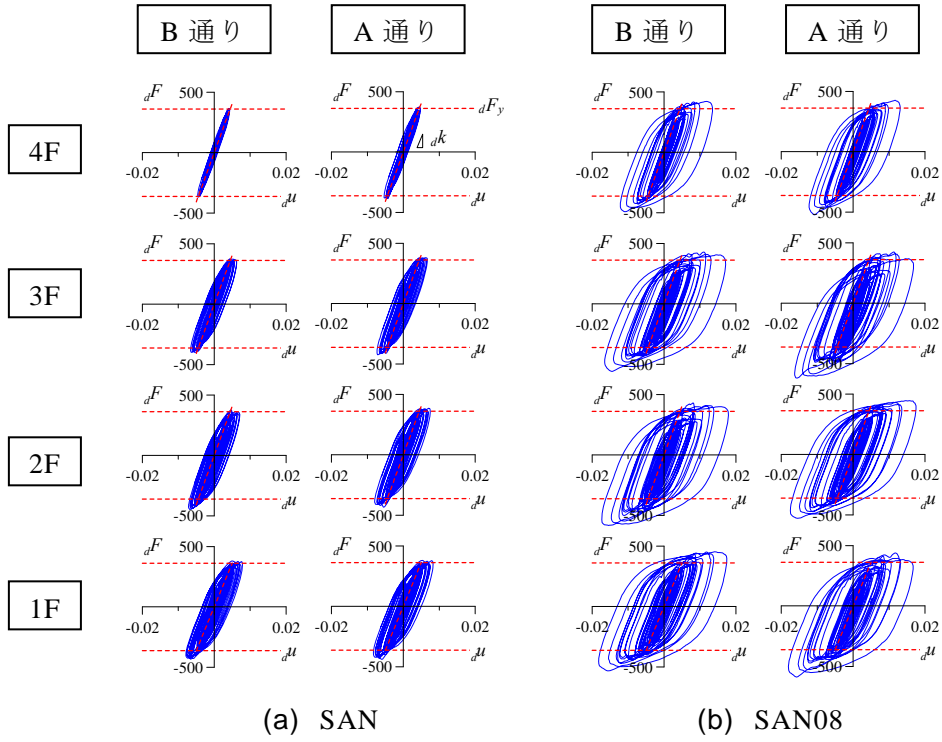


図7 ダンパー変位-荷重履歴曲線 (H-2/3)

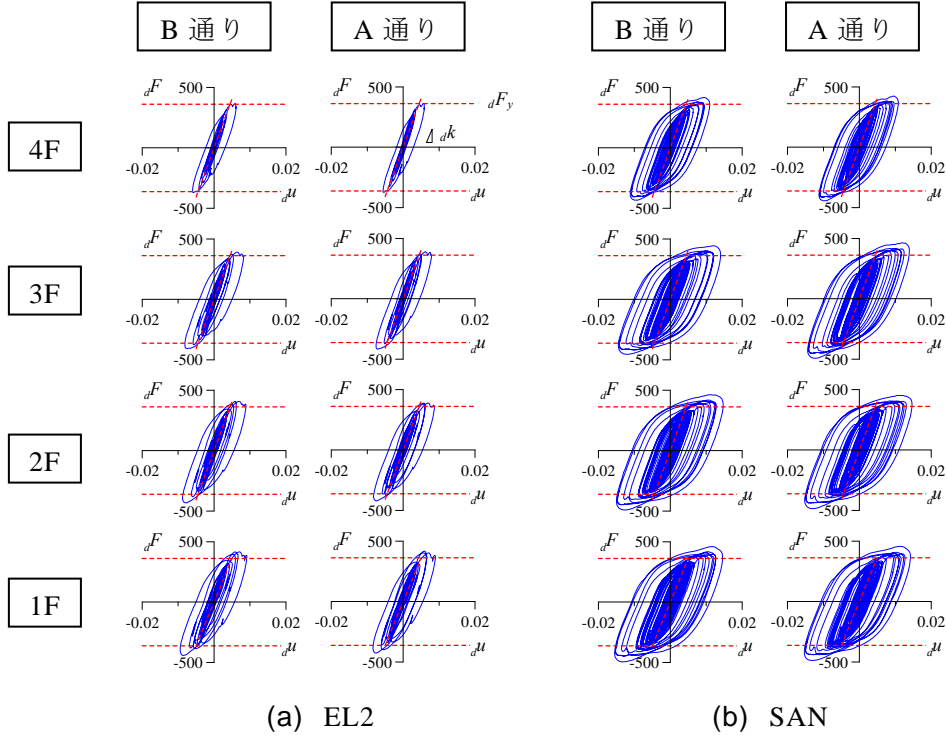


図8 ダンパー変位-荷重履歴曲線 (H-1/5)

ダンパーの実架構部内での変形特性

図 9 には、実験で得られたダンパーの実効変形比 α_e を示す。ここで、ダンパーの実効変形比とは、それぞれ実験で計測された最大層間変形 δ に対するダンパーの最大変形の水平方向成分 (実効変形) $d\delta$ の割合である。得られた実効変形比は約 0.75 付近の値を示している。超高層建物の場合、建物の全体曲げの影響により、ダンパーの実効変形が減少することは知られているが⁵⁾、本試験体は、超高層建物の架構を部分的に取り出しているため、建物の全体曲げ変形を忠実に再現できていない。このことから、図 9 に示す本実験における実効変形比の低下はガセットプレートや周辺架構の局所的な変形が主な要因と考えられる。

次に、力と変形の関係からそのような状況を分析する。図 10(a)~(c)に、SAN 加振時の H-1/5 の 2 層における層間変位 $\delta(t)$ と、(a)全体架構のせん断力 $Q(t)$ 、(b)ダンパーの水平方向荷重 $dQ(t)$ 、(c)フレームのせん断力 $rQ(t)$ の履歴をそれぞれ示す。なお、 $rQ(t)$ は、 $Q(t)$ からダンパー水平方向荷重を層で合算した $dQ(t)$ を引いて求めている。図 11 は図 10(a)~(c) の関係を模式的に表したものであり、 bK は層間変形に対してダンパー以外の変形を表現するバネである。 bK と dK の直列系を付加系 aK と呼ぶ⁶⁾。図 10(b) の履歴の横軸を層間変形 δ で表しているため、履歴の弾性剛性は aK を表し、ダンパーのみの剛性 dK に比べて実効変形比の低下の分だけ低減する。図 10(c) には F-07 実験より得られた弾性範囲での 2 層の主架構の層剛性を破線 ($rK(F-07)$) で重ねて示している⁷⁾。図 10(c) の履歴より得られる剛性は F-07 に比べ 7%ほど剛性が高いが、これは柱梁接合部に設置したガセットや梁端の補強によって層の剛性が増加したためと思われる。図 10(c) の主架構の履歴は概ね弾性に留まっていることから、全体架構で吸収したエネルギーの大半がダンパーで吸収された様子が見て取れる。吸収エネルギーについては次節で詳しく述べる。

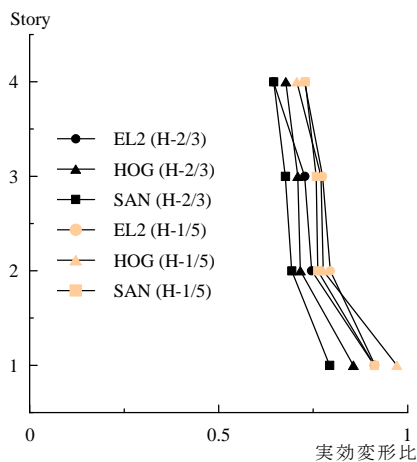


図 9 ダンパーの実効変形比

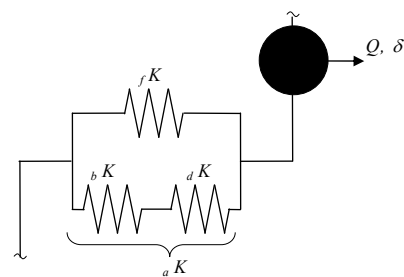


図 11 各層剛性の関係

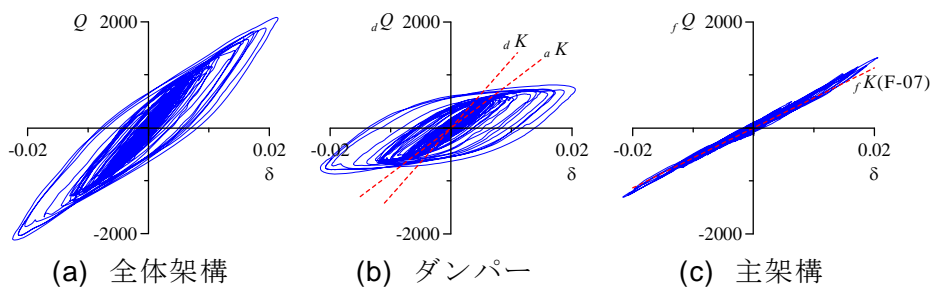


図 10 力と変形の関係 (SAN (H-1/5) 2 層) (単位:kNm, m)

梁端の吸収エネルギー

図 12 に H-2/3 および、H-1/5 の SAN 加振において、G1 梁の B 構面で計測された曲げモーメント ${}_G M$ —回転角 ${}_G \theta$ の履歴曲線を同位置での F-07 の結果と重ねて示す。図 12 より F-07 は大きな塑性変形となっているが、H-2/3 および、H-1/5 は、ともに F-07 に比べ回転角が小さく、概ね弾性の履歴を示していることが確認できる。図 13 には吸収エネルギー

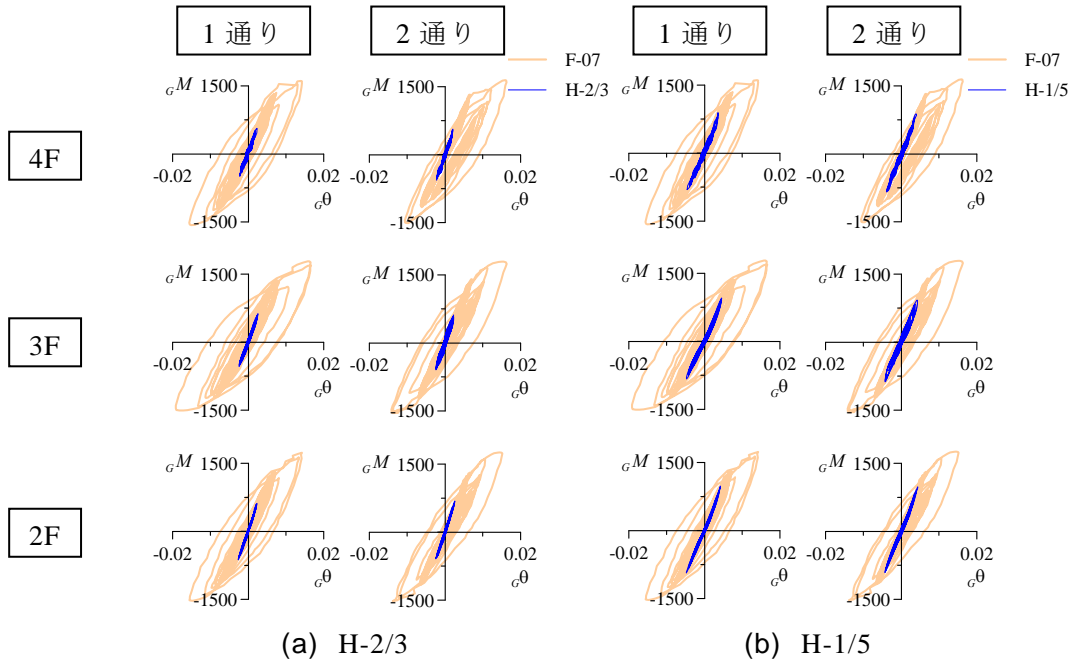


図 12 G1 梁端履歴曲線 (SAN 加振時) (B 構面)

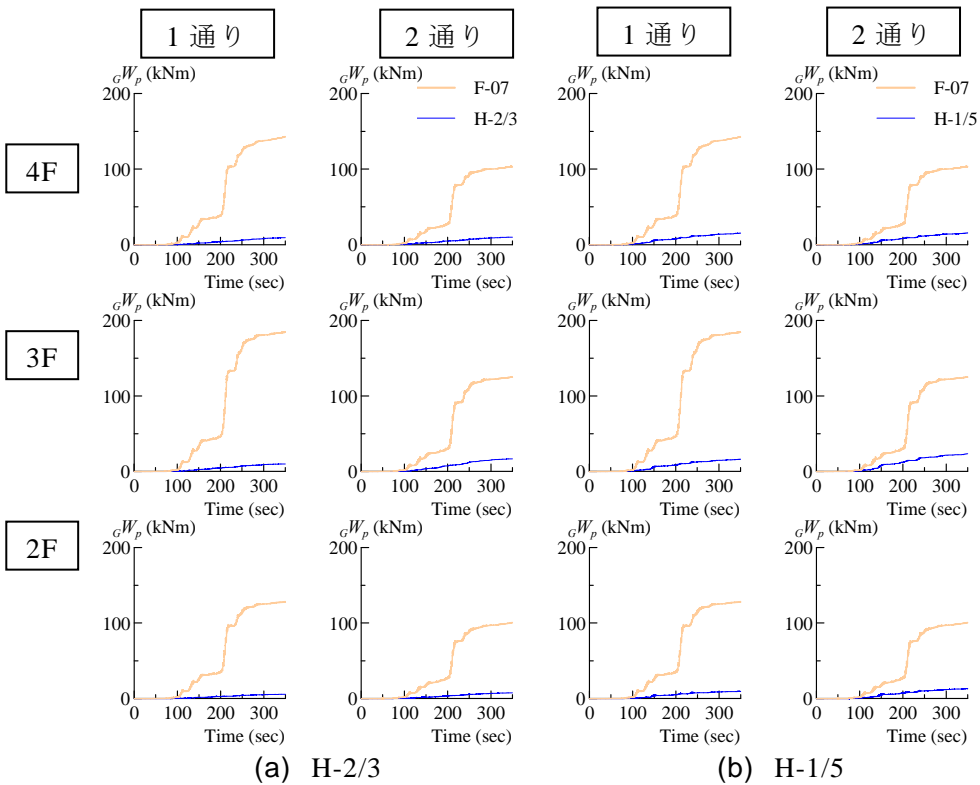


図 13 G1 梁端吸収エネルギー時刻歴 (SAN 加振時) (B 構面)

一の時刻歴を示す。

吸収エネルギーは梁端の曲げモーメント cM —回転角 $c\theta$ の履歴面積より算出する。図 13 より cW は最大で、H-2/3 では F-07 の 6%、H-1/5 では F-07 の 15% となり梁端の損傷が大幅に減少していることが分かる。

ここで、H-2/3 および H-1/5 では G1 梁端の吸収エネルギーは小さく、G2 梁端ではさらに小さいと考えられるため、G2 梁端の吸収エネルギーは無視して検討を進める。

）実架構部分における吸収エネルギーの分担率

実架構部でのエネルギーの分担について検討する。実架構内の Y 方向に設置されている全てのダンパー（2 本×4 層）での吸収エネルギーの合算値を dW_{1-4} と呼ぶこととする。同様に、全体架構の層吸収エネルギーの実架構部での合算値を W_{1-4} と呼ぶ。また、 W_{1-4} から dW_{1-4} を引いたものを、主架構での吸収エネルギー fW_{1-4} と呼ぶ。図 14 に、実験より得られた SAN (F-07、H-2/3、H-1/5)、SAN08 (H-2/3) および SAN06 (H-2/3) での W_{1-4} と、そのなかの dW_{1-4} と fW_{1-4} の分担率を示す。ダンパーを設置していない F-07 の場合は $W_{1-4} = fW_{1-4}$ である。図 14 より、F-07 に比べ、H-1/5 および H-2/3 での実架構部の全体架構で吸収しているエネルギー W_{1-4} はダンパー設置による周期変動によって小さい値となっている。 W_{1-4} に占めるダンパーによる吸収エネルギー dW_{1-4} の割合は 67~75% となっている。また、 fW_{1-4} を比較すると、H-2/3、H-1/5 での fW_{1-4} は F-07 の fW_{1-4} に対し 7~19% である。さらに加振の順序にしたがって W_{1-4} の累積値 ΣW_{1-4} および dW_{1-4} の累積値 ΣdW_{1-4} も合わせて示した。ここで扱うダンパーを有した 4 回の加振における ΣW_{1-4} は、ダンパーのない F-07 が SAN を 1 回受けた際の fW_{1-4} に対して約 2 倍に達している。一方、主架構での吸収エネルギーの累積値 ΣfW_{1-4} は、F-07 の fW_{1-4} に対して約 40% となる。

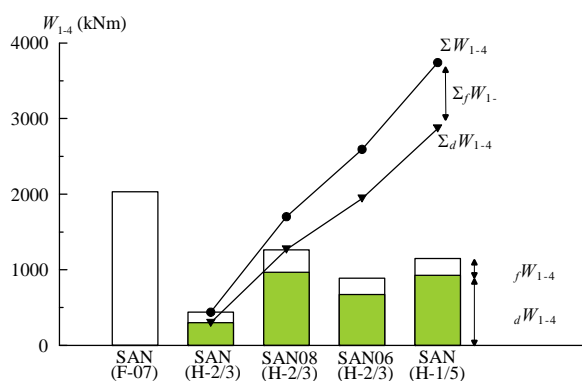


図 14 実架構部分でのエネルギー配分

F-07では、主架構の吸収エネルギーの90%程度が梁の端部に集中していた。図15には、実架構部での吸収エネルギー W_{1-4} に対する、ダンパーによる吸収エネルギー dW_{1-4} および梁端での吸収エネルギー合算値 gW_{1-4} の分担率を示す。図15より、鋼製ダンパーを設置したH-2/3、H-1/5では、 dW_{1-4} は W_{1-4} の70~80%を分担しており、残りの大半は梁端で吸収している。しかし、その gW_{1-4} は、F-07と比べると大幅に低減されている。エネルギーの釣合い⁸⁾に基づく、それ以外は内部減衰やコンクリートスラブのひび割れ等の損傷によるものと思われる。

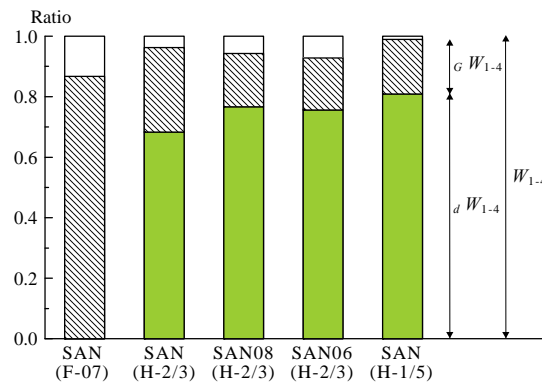


図15 実架構部分でのエネルギー分担率

）梁端吸収エネルギーの累積値

図16に2B12位置と3B12位置の梁端の、ここで扱うダンパーを有した4回の加振における吸収エネルギーの累積値 ΣgW_2 および、 ΣgW_3 を示す。図14に示したように、実架構部分の吸収エネルギー W_{1-4} はH-2/3とH-1/5を通して、F-07の2倍以上となっている。しかし図16で梁端の累積エネルギーを見ると、 ΣgW_3 ではF-07の40%程度となり、図14の主架構の関係と等しい。このように、実架構部にダンパーを設置することで、複数の地震動から大きな入力エネルギーがあたえられた場合において、梁端の損傷が安定的に抑制された。

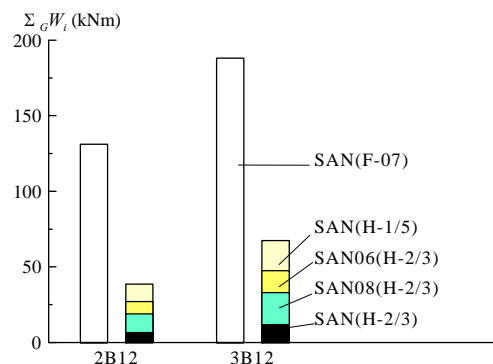


図16 梁端吸収エネルギーの累積値

）ダンパーの保有性能について

前節までに示すように、ダンパーを設置することで応答低減や、主架構への入力エネルギーの低減などダンパーによる制振効果は長周期地震動に対しても有効である。しかし、その制振効果は、ダンパーが有効に機能していることが必要である。よって本節では、ダンパーの保有性能について検討する。

まず図 17 に各層でのダンパー1 基の累積塑性変形倍率 $d\eta$ を累積した値 $\Sigma d\eta$ を示す。SAN08 を受けた際の H-2/3 の 2 層において最も大きな $d\eta$ が生じ、89.7 となっている。EL2 において記録された $d\eta$ は 4.6 であり、それと比べると約 19.4 倍である。さらに、図 17 に示す複数の長周期地震波を入力した際の 1 基当たりの 2 層のダンパーの累積値は、 $\Sigma d\eta = 268.6$ となった。

このときのダンパー履歴は、図 7 および図 8 に示しているが、H-2/3 の最初の SAN から、H-1/5 の SAN まで加振を繰り返したが、ダンパーの性能は劣化することなく、保持されており、安定してエネルギーを吸収しており、十分にダンパーの性能が保持されていることが確認できた。

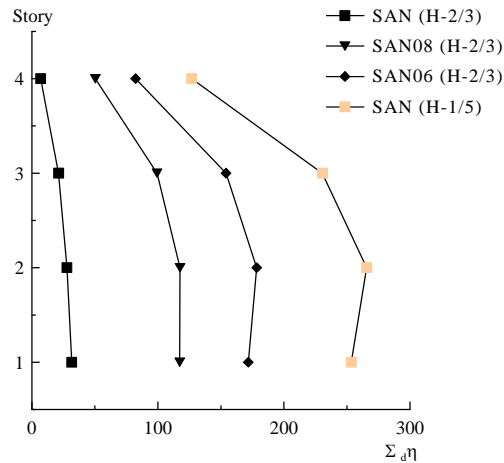


図 17 ダンパーの累積塑性変形倍率

次に、各条件と保有性能の関係を概観する。本実験で用いたような座屈拘束型のダンパーについて、定振幅変位加力実験より得られた **Manson-Coffin** 則に基づく、全塑性化部歪 $\Delta\varepsilon_p$ —破断繰り返し数 N_f の関係を示した疲労曲線が数多く提案されている。図 18 には、文献 6)、9) の中で、SN 材を芯材に用いた疲労曲線を示している。ランダム振動時の保有性能の評価する手法も提案されているが¹⁰⁾、ここでは、簡便な手法として塑性化部歪の最大値 $d\varepsilon_{pmax}$ を用いた繰返し数 N_{eq} によって傾向をとらえる。

$$N_{eq} = \frac{d w(t_0)}{4_d A_c \cdot d L_c \cdot \varepsilon_{pmax} \cdot d \sigma_y} \quad (2)$$

ここで、 $d w(t_0)$ は、1 本のダンパーで吸収したエネルギーである。図 18 に、H-2/3 での **SAN08** と **EL2** について、上式より評価した全てのダンパーにおける N_{eq} と $\Delta\varepsilon_p (= 2 d\varepsilon_{pmax})$ をプロットした結果を示す。これらの単独加振からそれぞれの要求性能が与えられたと考えれば、本実験条件におけるダンパーは **EL2** に対しては繰返し数の観点から **1000** 倍以上の保有性能を有することが確認でき、一方で、**SAN08** に対しては **10** 倍程度の繰返し数で保有性能に達する。すなわち、長周期地震動に対しては、振幅と繰返し数が同時に大きくなるため、疲労曲線に急激に近づくことが示されている。本実験において記録された全ての累積塑性歪を先の H-2/3 の最大振幅によって整理して、同様にプロットすると、その数倍の繰返し回数で限界に達していたと評価される。本疲労曲線は安全側の評価になる³⁵⁾ ことも踏まえれば、ダンパーが最後まで健全性を保ったことが裏付けられる。

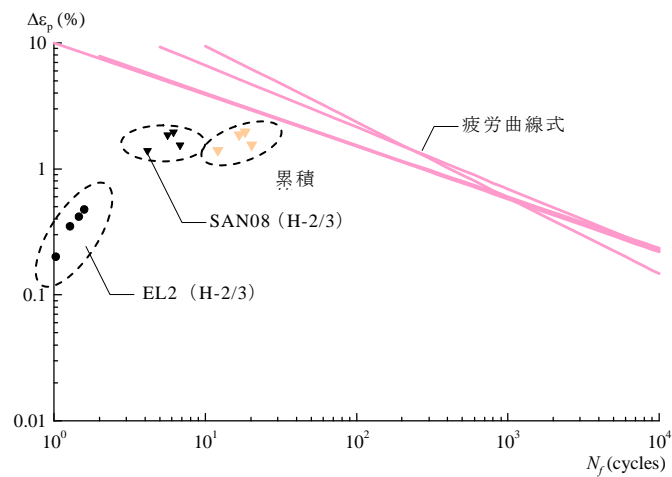


図 18 ダンパーの累積歪と保有性能

3) オイルダンパーによる制振補強試験体におけるエネルギー吸収と分担率

a) 実験値に基づくエネルギーの評価

) 吸収エネルギーおよび入力エネルギーの評価

EL2、HOG および SAN の慣性力 Q_i –層間変形 δ_i の履歴曲線から吸収エネルギー $W_i(t)$ を求め、入力エネルギー $E(t)$ の時刻歴とともに図 19 に示す。 $W_i(t)$ は下から 1、2、～7 層の値であり、対象とする層より下層までの和で示している。

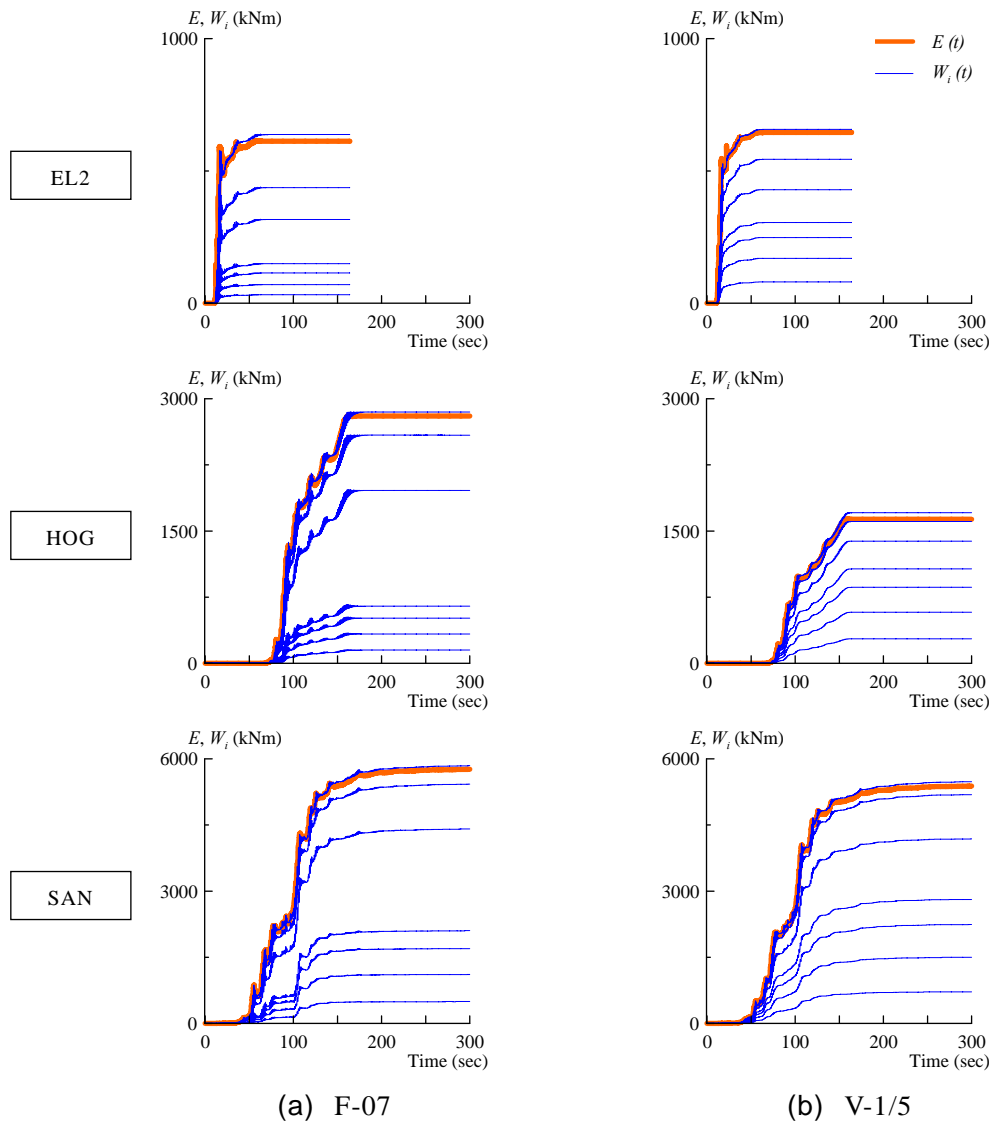


図 19 入力エネルギーと吸収エネルギーの時刻歴

いずれの入力においても地震動終了時刻 t_0 での $E(t_0)$ と $W(t_0)$ は良い対応を示している。 $W_i(t)$ を見ると、V-1/5 では、EL2、HOG および SAN とともに 1~4 層での値が F-07 に比べ大きくなっている。これはオイルダンパーを設置することで、架構の変形が小さい範囲からエネルギーを吸収し始めるためであると思われる。 $E(t)$ を見ると、EL2 および SAN では、ほぼ同等のエネルギーが入力されているが、HOG では、試験体の短周期化によって入力エネルギーが低減されている。これはオイルダンパー設置により、主架構が塑性化せず、固有周期が F-07 のように延びなかったことによると考えられる。エネルギースペクトルと実験値の関係を次節で検証する。

) エネルギースペクトル ($h = 10\%$) と実験値の対応

本節では前節で求めた入力エネルギーを用いて、各加振での E の速度換算値 V_E と減衰定数 $h = 10\%$ のエネルギースペクトルを比較する。エネルギースペクトルと実験値の比較を図 20 に示し、実験値の V_E をプロットする。実験値は各加振から得られた 1F、RFL の加速度の伝達関数の 1 次固有周期を、架構の塑性化により変動する有効周期を用いてプロットしている。

図 4(a) に示した EL2、HOG、SAN のいずれの入力においても実験値のプロットは $h = 10\%$ としたエネルギースペクトルと良い対応を示していることが確認できる。このことは、前章で示した鋼製ダンパーを用いた制振構造同様に、オイルダンパーを用いた制振構造においても、有効周期が特定できれば試験体に入力されるエネルギーを、 $h = 10\%$ としたエネルギースペクトルから予測できることを意味している。

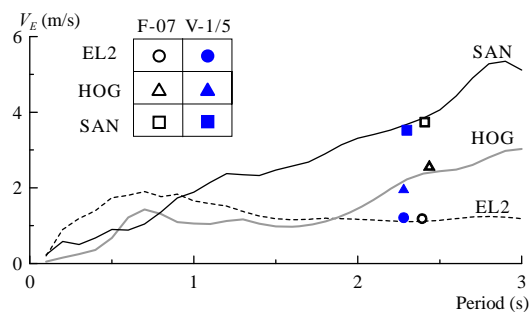


図 20 エネルギースペクトルと実験値の比較

b) 吸収エネルギーの分担の検証

) 吸収エネルギーの高さ方向の分布

本項では、建物全体での層間変形角、吸収エネルギーの最大値の高さ方向での分布を示す。図 21 に (a)EL2、(b)HOG および (c)SAN 入力時の最大層間変形角 R_i の高さ方向分布を、塑性化装置の破損を考慮して実架構部分のみ示す。

図 21(a) より、同等のエネルギーが入力されている EL2 の V-1/5 と F-07 をみると、最大層間変形角では、V-1/5 は F-07 に比べ、およそ半分にまで低減されていることを確認できる。図 21(b)HOG では、入力エネルギーの低減も相まって 4 割程度まで低減されている。変形レベルの大きい、図 21(c)SAN においても 4 割程度まで低減されていることが確認できる。

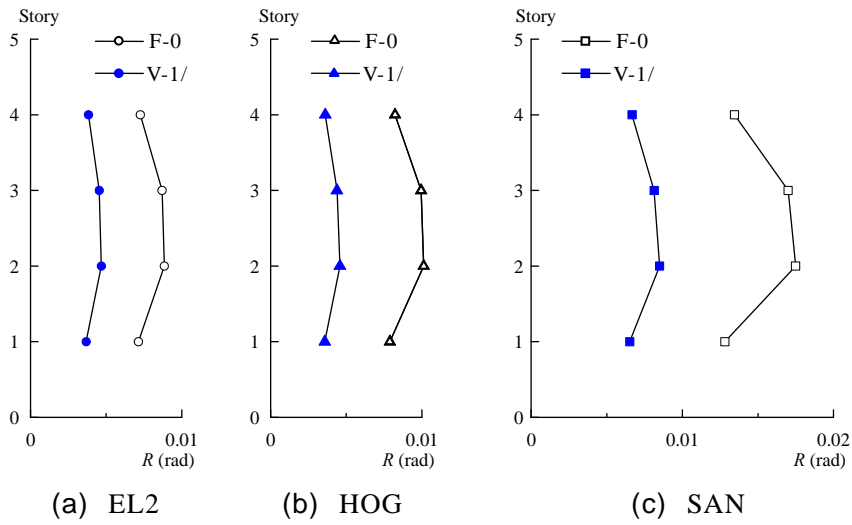


図 21 層間変形角高さ方向の比較

図 22 に(a)EL2、(b)HOG および(c)SAN 入力時の吸収エネルギー W_i の高さ方向分布を実架構部分のみ示す。

図 22(a)EL2 の結果を見ると、いずれの試験体にたいしても入力エネルギーが同等であるが、(b)HOG、(c)SAN では、V-1/5 は F-07 に比べて入力エネルギーは小さい。しかし、図 22 を見ると、EL2、HOG および SAN で、V-1/5 が F-07 に対して、全層で吸収エネルギーが大きい。このことは、図 19 の吸収エネルギーの時刻歴からも確認できる。オイルダンパー設置により小さい変位からエネルギーを吸収することによる。

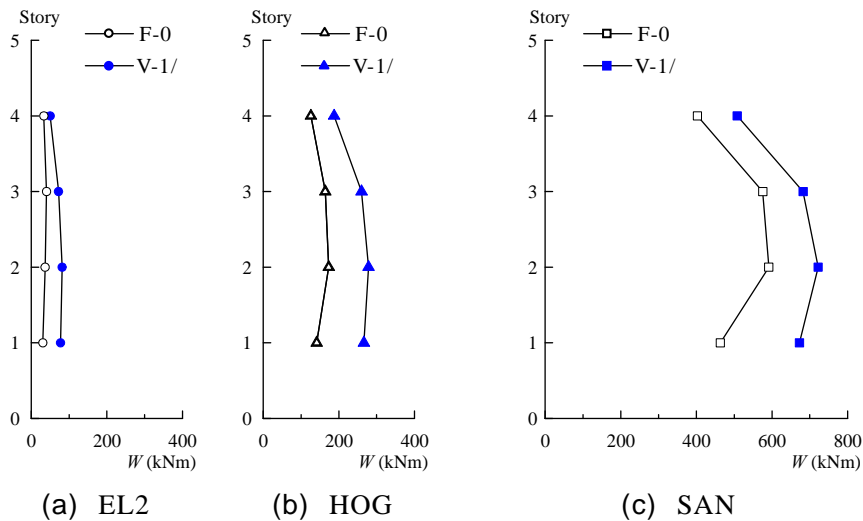


図 22 吸収エネルギー高さ方向の比較

）実架構部分における吸収エネルギーの分担

ダンパーの履歴曲線

本項では、実架構部分での吸収エネルギーが、どの箇所でどの程度負担されているのかを検討する。まずは、図 23 に V-1/5 での EL2、HOG および SAN の時のオイルダンパーの軸方向の速度 \dot{u} - 荷重 dF 履歴を示す。図には、設計値を赤線で示している。図 23 より、本実験において、いずれの加振においても、全てのダンパーがよく設計値と対応しており、オイルダンパーは設計通りの挙動を示していることが確認できる。図 24 には V-1/5 での EL2、HOG および SAN の時のオイルダンパーの軸方向の変位 - 荷重履歴曲線を示す。図 24 より、オイルダンパーは変位によらず、安定してエネルギーを吸収していることが確認できる。図 23、24 から HOG や SAN ではリリーフ機構⁶⁾が機能している様子も確認できる。

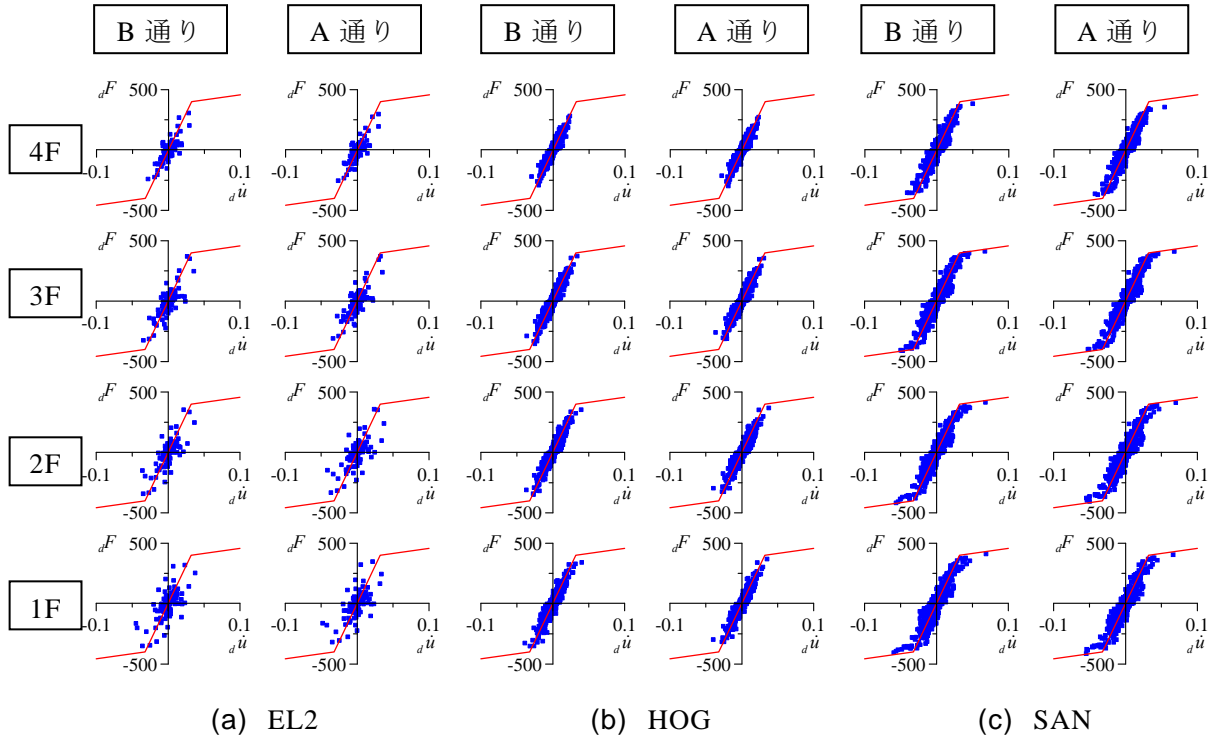


図 23 オイルダンパー速度－荷重履歴(単位:kN, m/s)

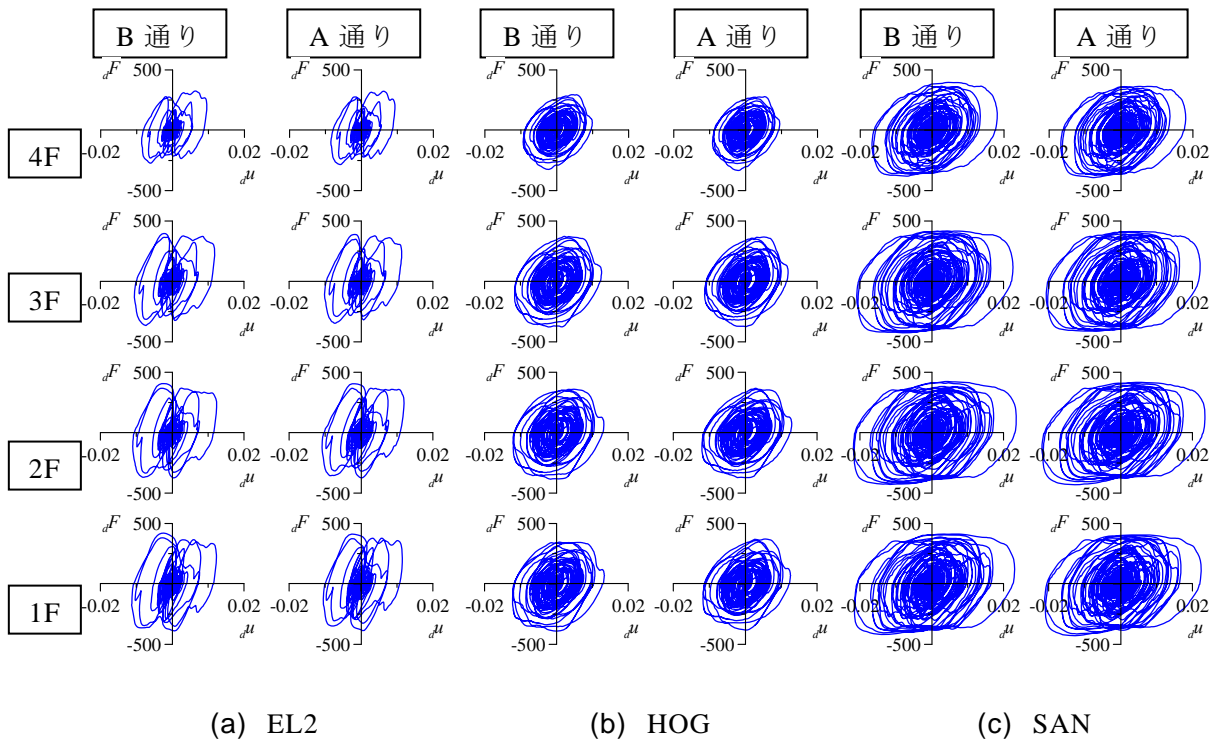


図 24 オイルダンパー変位－荷重履歴曲線 (単位 : kN, m)

ダンパーの実架構部内での変形特性

図 25 には、実験で得られたダンパーの実効変形比 α_e を示す。得られた実効変形比は約 0.80 付近の値を示している。前章での鋼製ダンパーの結果に比べると少し高い値となった。

次に、力と変形の関係からそのような状況を分析する。図 26(a)~(c)に、SAN 加振時の V-1/5 の 2 層における層間変位 $\delta(t)$ と、(a)全体架構のせん断力 $Q(t)$ 、(b)ダンパーの水平方向荷重 $dQ(t)$ 、(c)フレームのせん断力 $fQ(t)$ の履歴をそれぞれ示す。なお、 $fQ(t)$ は、 $Q(t)$ からダンパー水平方向荷重を層で合算した $dQ(t)$ を引いて求めている。図 26(c)には F-07 実験より得られた弾性範囲での 2 層の主架構の層剛性を破線 ($fK(F-07)$) で重ねて示している。図 26(c)の履歴より得られる剛性は、F-07 と同程度の値となっている。H-1/5 では、F-07 よりも層の剛性が高かったため、加振を繰り返すことにより、床スラブにひび割れが生じ、V-1/5 は H-1/5 に比べ剛性が低下したと考えられる。剛性は低下しているものの、図 26(c)の主架構の履歴は概ね弾性に留まっていることから、全体架構で吸収したエネルギーの大半がダンパーで吸収された様子が見て取れる。吸収エネルギーについては次項で詳しく述べる。

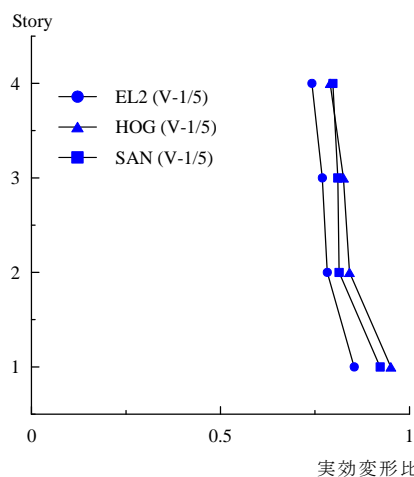


図 25 ダンパーの実効変形比

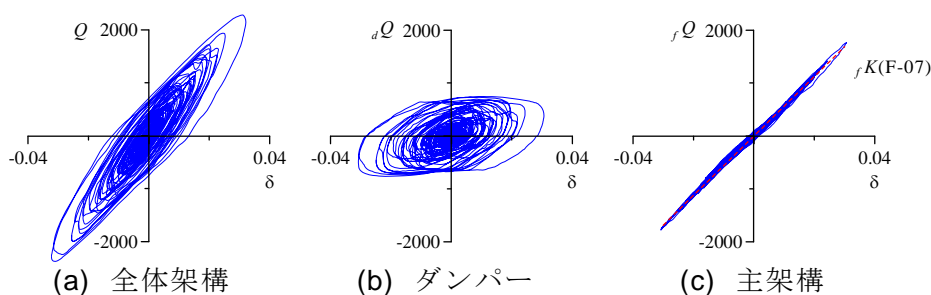


図 26 力と変形の関係 (SAN(V-1/5) 2 層) (単位: kNm, m)

梁端の吸収エネルギー

図 27 に V-1/5 の HOG および SAN 加振において、G1 梁の B 構面で計測された曲げモーメント σM —回転角 $\sigma\theta$ の履歴曲線を同位置での F-07 の結果と重ねて示す。図 27 より F-07 の SAN は大きな塑性変形となっているが、V-1/5 は F-07 に比べ回転角が小さく、概ね弾性の履歴を示していることが確認できる。図 28 には吸収エネルギーの時刻歴を示す。

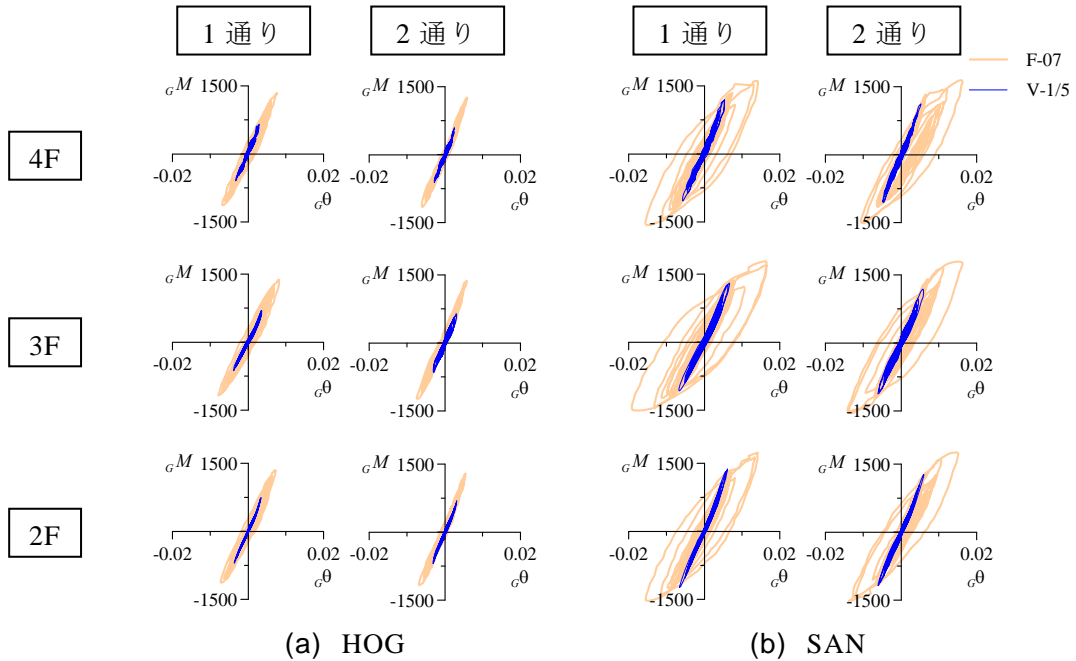


図 27 G1 梁端履歴曲線 (B 構面)

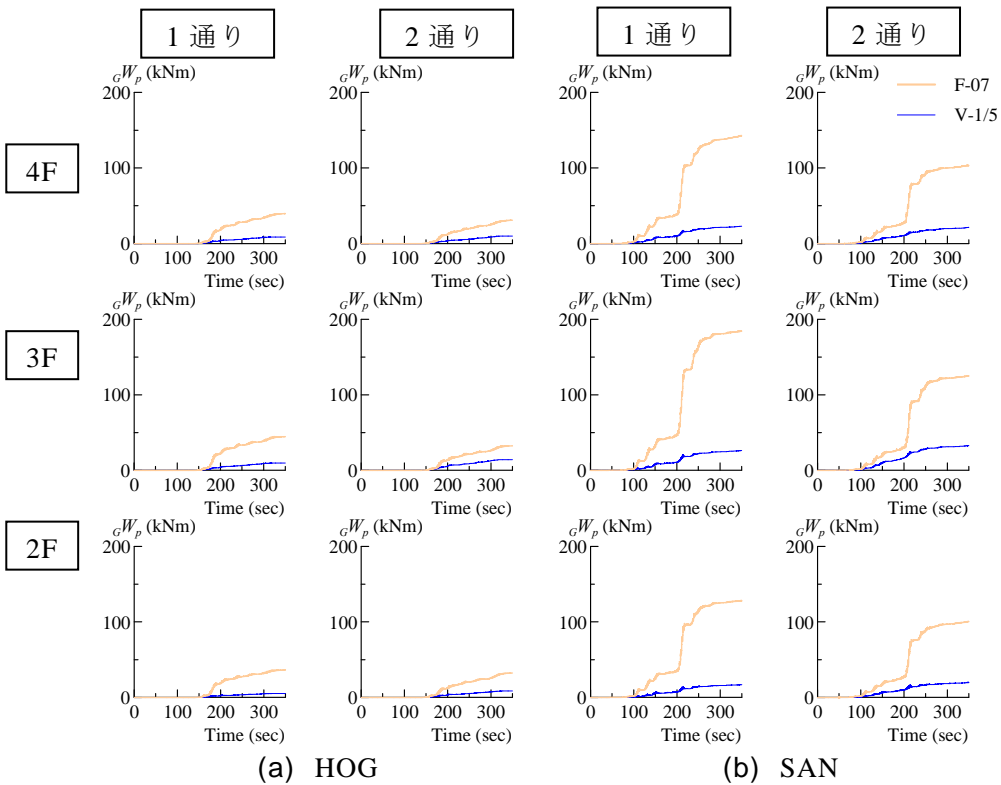


図 28 G1 梁端吸収エネルギー時刻歴 (B 構面)

吸収エネルギーは梁端の曲げモーメント cM —回転角 $c\theta$ の履歴面積より算出する。図 28 より SAN では、 cW は最大で、F-07 の 26% となり梁端の損傷が大幅に減少していることが分かる。

ここで、本章においても G1 梁端の吸収エネルギーも小さく、G2 梁端ではさらに小さいと考えられるため、G2 梁端の吸収エネルギーは無視して検討を進める。

）実架構部分における吸収エネルギーの分担率

実架構部でのエネルギーの分担について検討する。実架構内の Y 方向に設置されている全てのダンパー（2 本×4 層）での吸収エネルギーの合算値を dW_{1-4} と呼ぶこととする。同様に、全体架構の層吸収エネルギーの実架構部での合算値を W_{1-4} と呼ぶ。また、 W_{1-4} から dW_{1-4} を引いたものを、主架構での吸収エネルギー fW_{1-4} と呼ぶ。図 29 に、実験より得られた SAN (F-07、V-1/5)、EL2、TOK、HOG での W_{1-4} と、そのなかの dW_{1-4} と fW_{1-4} の分担率を示す。ダンパーを設置していない F-07 の場合は $W_{1-4} = fW_{1-4}$ である。図 29 より、各地震波において W_{1-4} に占めるダンパーによる吸収エネルギー dW_{1-4} の割合は 78～83% となっている。また、 fW_{1-4} を比較すると、SAN(V-1/5)での fW_{1-4} は F-07 の fW_{1-4} に対し 21% である。さらに加振の順序にしたがって W_{1-4} の累積値 ΣW_{1-4} および dW_{1-4} の累積値 ΣdW_{1-4} も合わせて示した。ここで扱うダンパーを有した 4 回の加振における ΣW_{1-4} は、ダンパーのない F-07 が SAN を 1 回受けた際の fW_{1-4} に対して約 2.2 倍に達している。一方、主架構での吸収エネルギーの累積値 ΣfW_{1-4} は、F-07 の fW_{1-4} に対して約 35% となる。

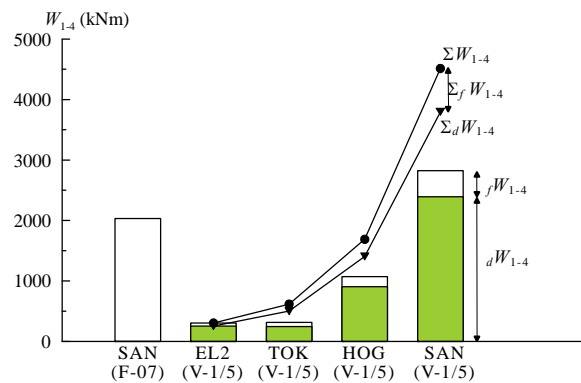


図 29 実架構部分でのエネルギー配分

図 30 には、実架構部での吸収エネルギー W_{1-4} に対する、ダンパーによる吸収エネルギー dW_{1-4} および梁端での吸収エネルギー合算値 gW_{1-4} の分担率を示す。図 30 より、オイルダンパーを設置した V-1/5 では、 dW_{1-4} は W_{1-4} の 78~83% を分担しており、残りの大半は梁端で吸収している。しかし、その gW_{1-4} は、前章の鋼製ダンパーと同様に F-07 と比べると大幅に低減されている。エネルギーの釣合い⁸⁾に基づくと、それ以外は内部減衰やコンクリートスラブのひび割れ等の損傷によるものと思われる。

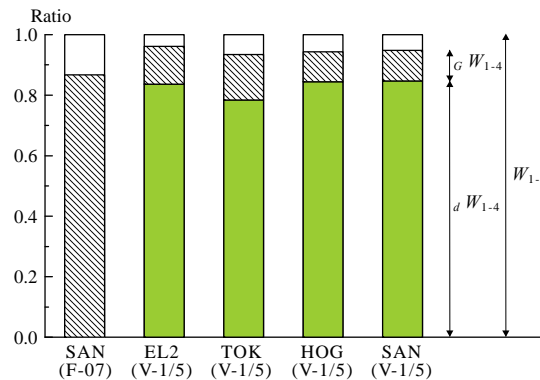


図 30 実架構部分でのエネルギー分担率

）梁端吸収エネルギーの累積値

図 31 に 2B12 位置と 3B12 位置の梁端の、ここで扱うダンパーを有した 4 回の加振における吸収エネルギーの累積値 ΣgW_2 および、 ΣgW_3 を示す。図 29 に示したように、実架構部分の吸収エネルギー W_{1-4} は、F-07 の 2 倍以上となっている。しかし図 31 で梁端の累積エネルギーを見ると、 ΣgW_3 では F-07 の 25% 程度となり、図 29 の主架構の関係とほぼ等しい。実架構部にダオイルンパーを設置することで、前章の鋼製ダンパーと同様に、複数の地震動から大きな入力エネルギーがあたえられた場合において、梁端の損傷が安定的に抑制された。

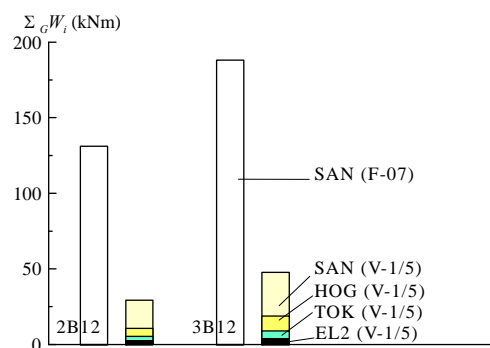


図 31 梁端吸収エネルギーの累積値

）ダンパーの保有性能について

前節までに示すように、オイルダンパーを設置することで応答低減や、主架構への入力エネルギーの低減などダンパーによる制振効果は長周期地震動に対しても有効である。しかし、その制振効果は、ダンパーが有効に機能していることが必要である。よって本節では、オイルダンパーの保有性能について検討する。

オイルダンパーは、振動エネルギーを内封油の熱に変換して消散させるため、累積のエネルギー吸収量に影響を受けないことが大きな特徴であり、長継続地震動にきわめて有効な制振デバイスであるが、地震時の瞬間的な温度上昇および、それに伴う内封油の体積膨張を許容できることが重要である¹¹⁾。参考文献 6)によると全てのダンパーは、体積膨張に備えオイルの逃げ場所リザーバタンクを設けており、ダンパーの性能を規定するものは、ダンパーのシール材の耐熱性である。各社繰り返し加振試験を行い検討しており⁶⁾、約100°C以上までダンパーが使用可能であると示している。

本実験では、架構に組み込んだオイルダンパーが長周期地震動を受けた場合の温度上昇について検討を行った。ダンパー部分の表面に熱電対センサを貼付し、加振中の温度を測定した。図 32 に EL2、HOG および SAN 加振時の、2 階 B 通りのダンパーの表面温度時刻歴を示す。

図 32 に示す通り、F-07 においては、梁端を破断に至らしめた SAN 加振時においてもダンパーの温度上昇は 10°C 程度であり、オイルダンパーは長周期地震動に対して非常に有効な制振デバイスであることを、実大規模実験からも確認できた。

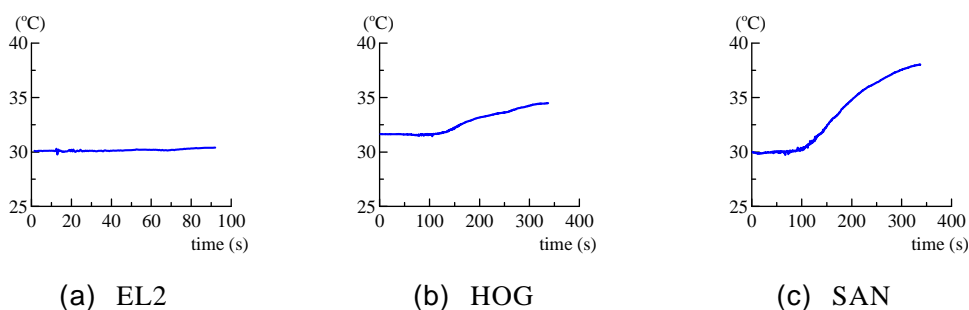


図 32 オイルダンパー表面温度時刻歴

4) E - ディフェンス震動台実験結果に基づくせん断モデルの作成

a) 静的解析に基づくせん断モデルの作成方法

本章では、設計で用いられる静的解析に基づき、せん断モデルを作成する。動的解析を行う事で、部材レベルモデルの解析結果を、せん断モデルがどの程度再現できるかを検証する。3次元の部材レベルモデルは、F-07 試験体の設計図及び実験結果のデータをもとに作成した。解析モデルは、弾性範囲での各層の層せん断力 Q_i - 層間変形角 R_i の履歴曲線より、最小二乗法により求めた層剛性が、弾性範囲に留まる加振結果と一致するように、2~4階床スラブの合成効果による梁の剛性増大率 ϕ を 1.7 とし、5階床においては梁上コンクリート錘の影響により $\phi = 3.7$ としている。縮約層の単体積層ゴムと塑性化装置は設計値を参照し、せん断ばねでモデル化した。上記の解析モデルを用い静的解析を行った。結果を図 33 に示す。

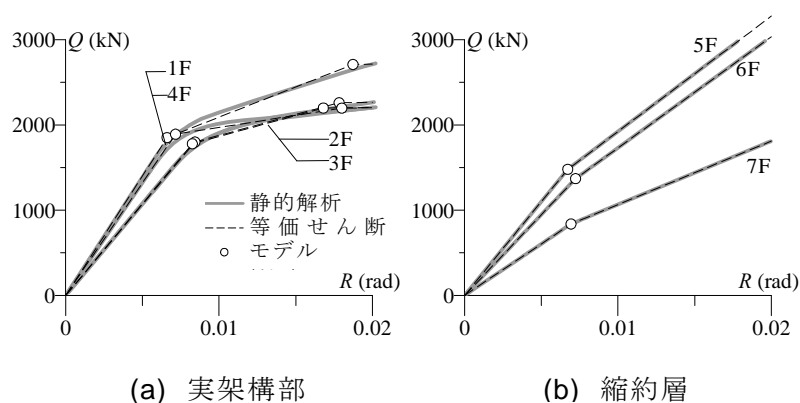


図 33 静的解析結果のモデル化

）せん断モデルの作成方法

下層 4 層の実架構部のモデル化は、静的解析結果の層せん断力 Q_i - 層間変形角 R_i 関係に対し、トリリニア置換を行う¹²⁾。各折れ点のせん断力 Q_{yi} 、層間変形角 R_{yi} は次のように定める。まず、第 1 折れ点は、いずれかの部材が全塑性モーメントに達した際の、層せん断力 Q_{y1} と、その時の層間変形角 R_{y1} で定める。次に、第 2 折れ点の層せん断力 Q_{y2} は、終局状態を仮定し、各層の層間変形角が $R_i = 1/50$ に達した際の層せん断力とする。初期剛性は、第 1 折れ点によって決定され、各層のいずれかの部材が降伏モーメントに達するまでの、弾性剛性である。2次剛性は、層間変形角が $R_i = 1/50$ に達した時点で、面積等価となるような値を定める。これにより、第 2 折れ点が定まる。3次剛性については、初期剛性の 1/100 と定める。縮約層については、部材レベルモデルでせん断ばねを使用してモデル化していることから、せん断モデルにおいても同様のばねを用いた。図 33 に、作成したせん断モデルの復元力特性を、静的解析の解析結果と共に示す。

）動的解析による精度検証

前節で作成したせん断モデルに対して、部材レベルモデルの動的解析と同じ、名古屋三の丸波を入力し、時刻歴応答解析による検証を行う。図 34 に、解析結果から得た Q_i-R_i 関係の履歴曲線を、図 35 に各層が吸収したエネルギーの時刻歴を示す。図 34、35 より、静的解析結果から作成したせん断モデルは、部材レベルモデルによる動的解析を精度良く再現できることを確認した。

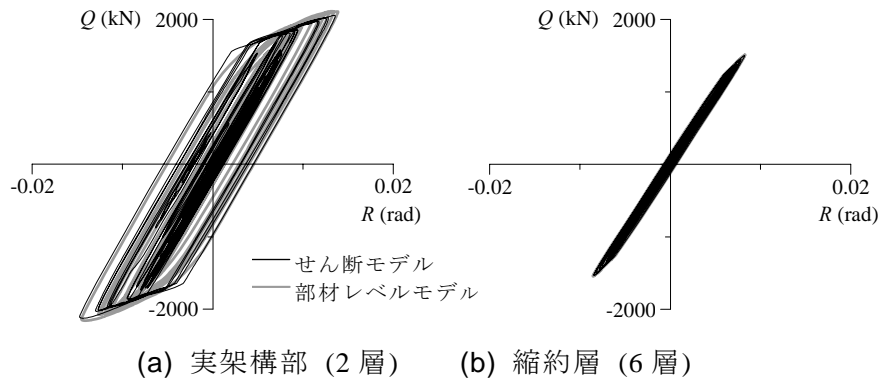


図 34 履歴曲線

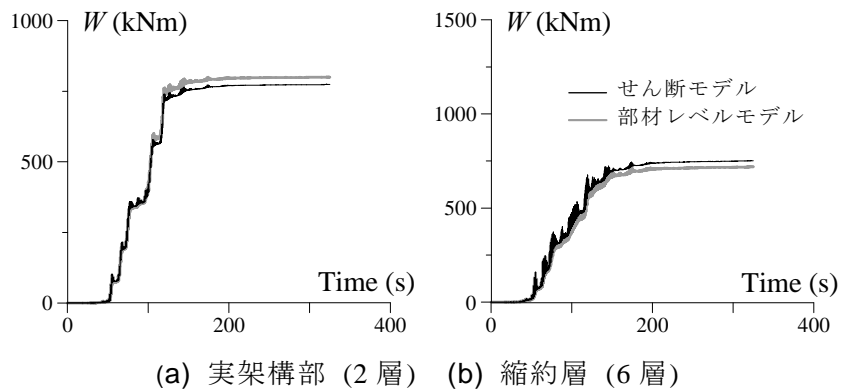


図 35 吸収エネルギー時刻歴

b) 実験結果に基づくせん断モデルの作成方法

前章は、静的解析結果に対してモデル化をおこなった。同じモデル化手法を実験結果に対して行い、作成したせん断モデルの精度の確認をする。また、より高い精度で実験を追跡出来る解析モデルの作成を行い、その具体的方法について述べる。

1) 実験結果のモデル化

前章同様の手法でモデル化を行う。ただし、静的解析に相当する試験体の Q_i-R_i 関係が実験からは得られないことから、文献 13)の手法を加振時の Q_i-R_i 履歴曲線に適用して算出したスケルトンカーブを用いる。スケルトンカーブの妥当性を確認するため、前節で使用した部材レベルモデルの動的解析結果の Q_i-R_i 履歴曲線から、スケルトンカーブを作成し、静的解析結果と比較し、図 36 に示す。図 36 より両者は良く一致していることが分かり、スケルトンカーブが、静的 Q_i-R_i 曲線と等価であると言える。

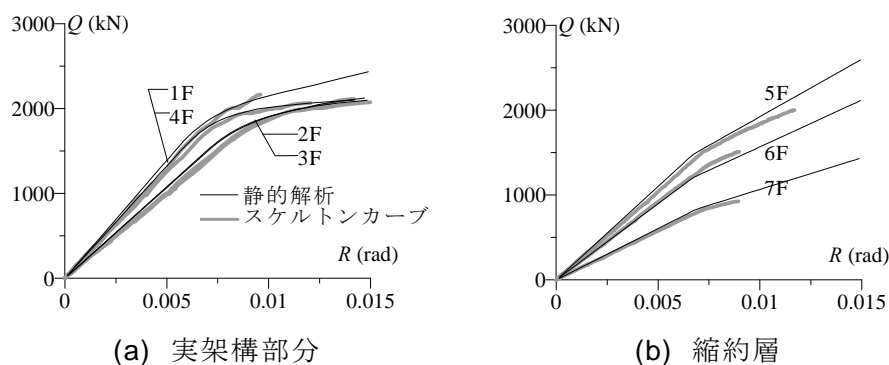


図 36 スケルトンカーブと静的解析の対応関係

上記の検討から、スケルトンカーブを用いて各層の Q_i-R_i 関係を算出し、これに対して前節と同様のトリリニア置換を行う。第 1 折れ点は、梁端が降伏したと判断できる層せん断力に達した点で定める。これを図 37 に (×) で示す。降伏までの履歴曲線を黒線で示し、全履歴曲線を灰色線で示した。

第二折れ点は、試験体が終局状態に達していないことから、スケルトンカーブの最大荷重の点として定めた。また縮約層は、積層ゴムの単体試験から得られた水平剛性と、ダンパーのカタログ値から算出した、バイリニアの復元力を各層に与えている。

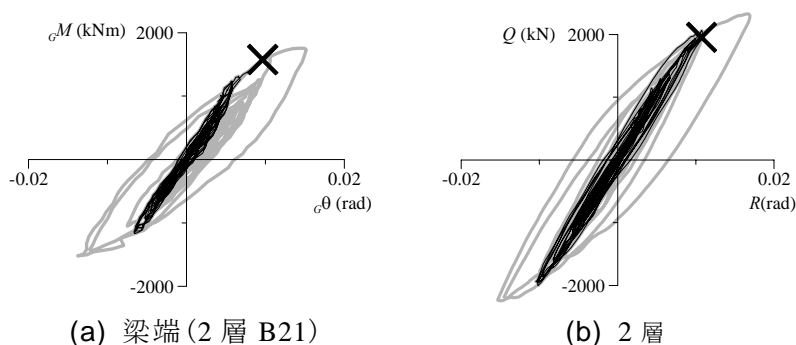


図 37 梁端の降伏と層降伏の確認

動的解析による精度検証

前節の方法で作成したせん断モデルで、動的解析を行い、実験結果と比較する。減衰は実験値から求めたレーリー減衰で、 $h_1=1.94\%$ 、 $h_2=3.44\%$ とした。図 38 に Q_i-R_i 履歴曲線、図 39 に吸収エネルギーの時刻歴を示す。図 38、39 から、モデルは、概ね良い精度で実験値を再現したと言える。

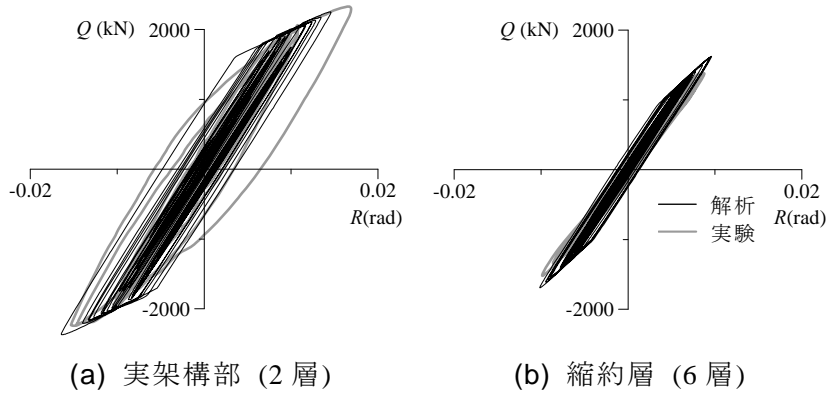


図 38 履歴曲線

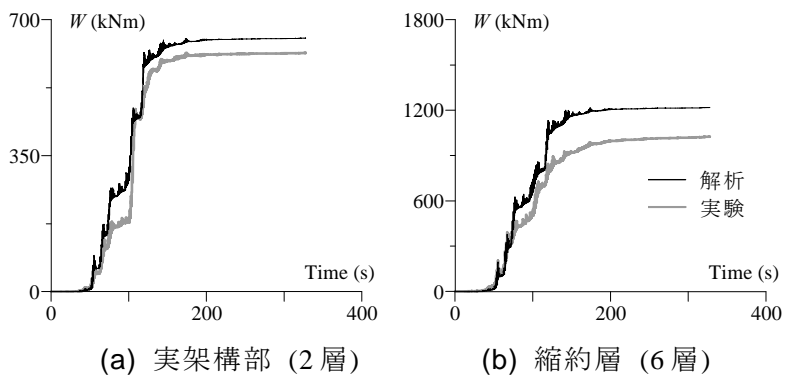
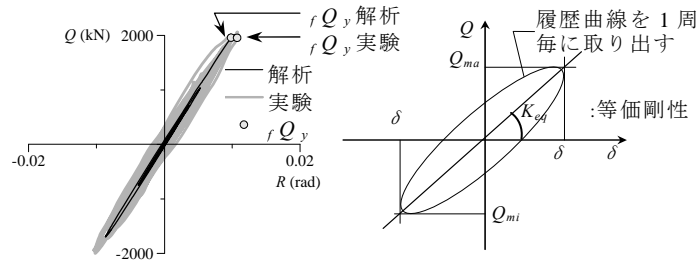


図 39 吸収エネルギー時刻歴

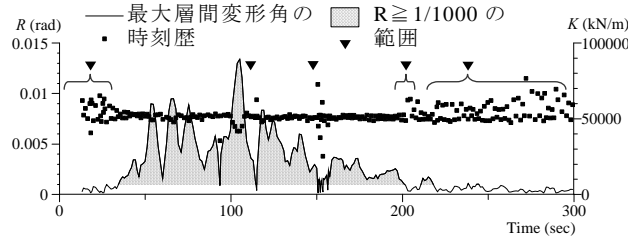
）修正モデルの作成

前節までの検討で、せん断モデルは試験体の応答性状を概ね再現出来ることが分かる。ここでは、せん断モデルを用いて更に予測精度を向上させる場合、どのようなモデル化が考えられるかを、前節のモデルを修正することで示していく。

以下に解析モデルが模擬していない試験体の応答性状を指摘し、その評価とモデル化について述べる。図 40 に微小変形範囲の剛性と履歴曲線を示す。図 40(a)より、実験の履歴曲線は梁端降伏前においても非線形であるが、解析モデルはこれを模擬していないことが挙げられる。これを評価するために、図 40(b)に示す手法で等価剛性 K_{eq} を履歴曲線の 1 周毎に算出し、層間変位の時刻歴と重ね、剛性の振幅依存性を確認した。結果を図 40(c)に示し、層間変形角 $R=1/1000$ を境に剛性が低下することが確認できる。これを基に、修正モデルでは層間変形角 $R=1/1000$ の微小変形範囲に折れ点を設け、微小変形範囲を模擬することを目的とする。これは通常の「第 1 折れ点」と異なる意味合いであるので、混同を避けるため、「第 0 折れ点」と呼ぶ。またこの範囲の剛性を「0 次剛性」とする。剛性は、層間変形角 $R=1/1000$ 以内での履歴曲線から、最小二乗法により求める。



(a) $f Q_y$ までの履歴曲線 (b) 等価剛性の求め方



(c) 層間変形角と層剛性の関係

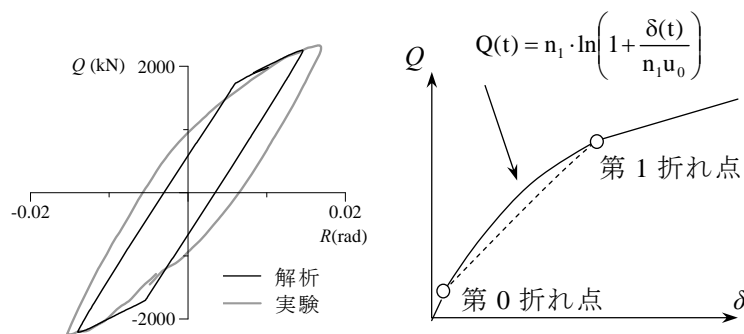
図 40 微小変形範囲における非線形性の評価

次に、第 1 折れ点を修正する。 $f Q_y$ は、図 40(a)の (○) に示すようにスケルトンカーブの性質上、変位に多少の誤差を生じることがある。修正モデルではこの差をなくすため、第 1 折れ点を、梁端が降伏する時刻での層せん断力と層間変形の値を直接用いることとする。同様にスケルトンカーブの最大荷重の点も、変位に誤差を生じるので、2 次剛性は、実験で観測された最大荷重の点と第 1 折れ点とを結ぶ線分の傾きとして定める。第 2 折れ点を検討する。図 37(a)に示す層の履歴曲線から、層剛性が完全に失われておらず、試験体は

終局状態に達していないと判断できる。このため、一般的に行われるような、第 2 折れ点を終局状態に達する点とするモデル化は妥当でない。よって本報では、実験結果の最大層間変形角を記録した点を第 2 折れ点として定め、これより大きな変形範囲で終局状態を仮定し、3 次剛性を初期剛性の 1 / 100 で定めた。

縮約層は、単体試験結果から積層ゴムをモデル化し、塑性化装置は、層全体で実験値に一致するように試行錯誤的にモデル化した。

図 41(a)は、最大荷重時の履歴曲線を 1 周だけ取り出し、実験と解析で比較している。これにより、実験は解析と異なり曲線を呈していることが分かる。よって、修正モデルでは、第 0 折れ点と第 1 折れ点の間を、次式で曲線補間し、実験を模擬することとした。



(a) 実験と解析の比較 (b) 丸みをもつ解析モデル

図 41 履歴曲線の丸み評価

時刻歴応答解析による精度の検証

前節で述べた方法によって、修正したせん断モデルを用いて、同様の時刻歴応答解析を行い、精度の検証を行う。解析結果と実験値の比較を示す。図 42 に履歴曲線、図 43 に吸収エネルギーの時刻歴、図 44 に第 1 折れ点までの履歴曲線を、それぞれ示す。図 42 に示す履歴曲線の結果から、修正したモデルによる予測結果は、実験値をより忠実に追跡している事が確認できる。図 43 の吸収エネルギーの時刻歴においても同様に実験値を精度良く追跡できた。

図 44 より、微小変形範囲においても、本手法による解析モデルが高い精度で実験値を追跡できる事を確認できた。

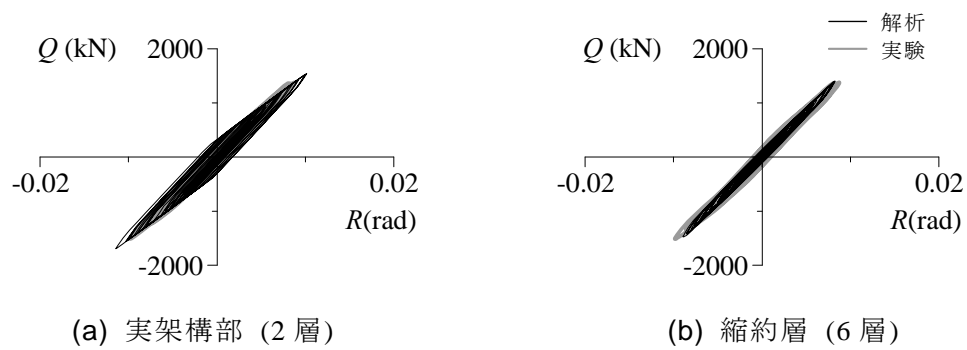


図 42 履歴曲線

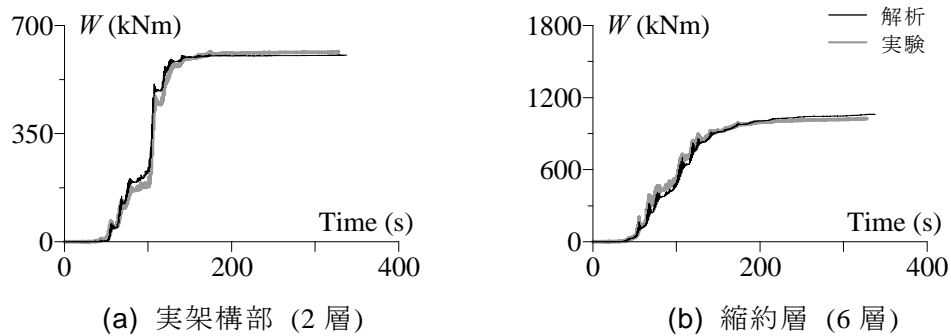


図 43 吸収エネルギー時刻

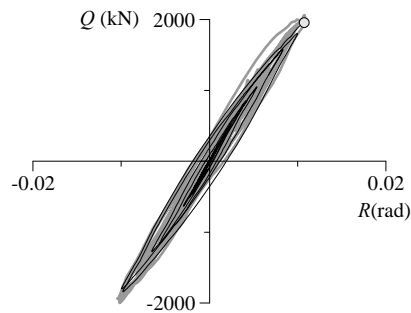


図 44 履歴曲線

(c) 結論ならびに今後の課題

本報では、ダンパーを設置した H-2/3、H-1/5 および V-1/5 の制振補強試験体を、累積値であるエネルギーの分布について考察し、架構とダンパーのエネルギー分担率について評価を行った。さらに、実験データに基づき、実験時の試験体の応答を再現できる解析手法を確立し、作成した解析モデルによる解析結果と実験結果とを比較・分析し、本手法の精度を検証した。

鋼製ダンパーを設置した試験体から得られた結論

試験体に入力されるエネルギーは、耐震構造だけではなく、制振構造であっても減衰定数 10% のエネルギースペクトルから概ね評価できることを示した。ただし、周期変動によりスペクトルの値が大きく変化する場合には、ある周期の幅を持ってエネルギースペクトルの値を平滑化した値となる可能性がある。

建物の固有周期に対して、長周期側にエネルギースペクトルのピークがある場合、鋼製ダンパーを設置することによる試験体の短周期化によって、入力エネルギーは低減される。さらにダンパーのエネルギー吸収による制振効果が加わり、両者の効果により主架構の損傷が低減される。

鋼製ダンパーを設置することで実架構部分での吸収エネルギーを約 70~80% をダンパー負担した。それに伴い主架構へのエネルギー入力も低減されることとなった。ダンパー未設置の試験体では梁端において実架構部分への入力の約 90% を吸収していたが、ダンパーを設置することにより 20~30% 程度まで低減される。

架構に設置された鋼製ダンパーは、複数の長周期地震動を受けても履歴形状において剛性や耐力の低下が見られず、十分な性能を発揮した。それに呼応して梁端の損傷が大幅に低減されており、ダンパーによる架構の損傷低減効果の様相を確認できた。

H-2/3 における全ダンパーについて、提案される疲労曲線（保有性能）に実験結果（要求性能、 N_{eq} と $\Delta\epsilon_p$ ）をプロットすると、EL2 入力時には保有性能が要求性能の概ね 1000 倍程度となったのに対し、SAN08 入力時には、その 1/100 の余裕度となり、概ね 10 倍程度の関係となった。その（10 倍という）関係は、入力エネルギーの違いから説明できる。

オイルダンパーを設置した試験体から得られた結論

架構に設置されたオイルダンパーは、建物の固有周期に影響を及ぼさない。これは、試験体の固有周期が、長周期地震動の「特定の周期帯」より長周期側にある場合には鋼製ダンパーを設置することで短周期化し、入力エネルギーが増大するが、オイルダンパーは周期変動がないことが利点となる。

オイルダンパーは変位が小さい範囲からエネルギーを吸収するため、建物に対して部分的に設置した場合、オイルダンパーが効率的にエネルギーを吸収し、非設置層の吸収エネルギーを低減させる効果が認められた。

オイルダンパーを設置することで架構部分での吸収エネルギーを約 80% をダンパー負担した。それに伴い主架構へのエネルギー入力も低減されることとなった。ダンパー未設置の試験体（F-07）では梁端において実架構部分への入力の約 90% を吸収していたが、ダンパーを設置することにより 20% 程度まで低減された。

オイルダンパーは累積の吸収エネルギー量の影響を受けないため、長周期地震動に対して非

常に有効な制振デバイスである。内部のシール材に温度の制限はあるものの、ダンパー未設置の試験体（F-07）では梁端を破断に至らしめた名古屋三の丸波を受けても、オイルダンパーの表面温度で約 10℃の上昇であった。

せん断モデルの作成から得られた結論

静的解析結果の Q_i-R_i 曲線から作成したせん断モデルは、3次元部材レベルモデルの動的解析結果を、高精度に再現できる。

文献 3) によるスケルトンカーブは、層の Q_i-R_i 履歴に適用することで、静的解析に相当する Q_i-R_i 曲線を与える。また、これを静的解析結果と見なし、トリリニア置換したせん断モデルは、元の実験結果を高い精度で再現する。

せん断モデルを用いて試験体の予測精度を追求する場合は、微小変形範囲における、試験体の非線形挙動を模擬すること。試験体の丸みをモデル化すること。降伏後の剛性を的確に評価すること等が求められることがわかった。また、これら进行评估したせん断モデルは、実験結果をより忠実に追跡することができた。

上記の知見から、実験結果を精緻に評価し、モデル化することで、せん断モデルによる時刻歴応答解析で、試験体の応答を精度良く追跡することが可能である。しかし、静的増分解析から得た、せん断モデルも、試験、実験の履歴から得たスケルトンカーブに置き換えて同様のモデル化をしたせん断モデルは、最大応答だけでなく吸収エネルギーの時刻歴に対しても高い精度を示した。このことから、現行のモデル化手法が実験に対しても有効であると言える。更なる予測精度の向上には、部材レベルモデルでの検証が必要と考える。

(d) 引用文献

- 1) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999.11
- 2) 北村春幸、野村綾、川崎恵、壇一男、佐藤俊明：長寿命鋼構造建物が遭遇する複数の地震動を想定した累積損傷評価法の提案—名古屋三の丸地区で想定される地震動を対象として—、日本建築学会構造系論文集、第 642 号、pp.1443-1452、2009.8
- 3) 秋山宏、北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答、日本建築学会構造計論文集、第 608 号、pp.37-43、2006.10 スペクトルの対応
- 4) 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実架構実験システムの構築—Eーディフェンス振動台実験—、日本建築学会構造系論文集、第 640 号、pp.1163-1171、2009.6
- 5) 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、斉藤大樹、福和伸夫、日高桃子：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—長周期地震動を想定した耐震改修—、日本建築学会構造系論文集、第 649 号、pp.549-557、2010.3
- 6) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第 2 版、2005.9
- 7) 大内隼人、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：Eー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 2 解析モデルを用いた累積損傷評価
- 8) 佐藤大樹、島田侑、大内隼人、長江拓也、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛：長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率—部分切り出し架構に対するEーディフェンス振動台実験—、日本建築学会構造系論文集、第 653 号、pp.1217-1226、2010.7
- 9) 建築研究所：鋼構造建物へのエネルギー法活用マニュアル—平成 17 年度国土交通省告示第 631 号「エネルギーの釣合に基づく耐震設計法」に準拠して—、技報出版、2008.9
- 10) 鍾育霖、長江拓也、梶原浩一、福山國夫、井上貴仁、中島正愛、北村春幸、日高桃子：鋼構造架構の破壊形式と保有性能—高層建物の耐震性能評価に関するEーディフェンス実験—その 6、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.873-874、2008.9
- 11) 竹内徹、井田茉莉、山田哲、鈴木一弁：変動歪振幅における座屈拘束ブレースの累積塑性変形予測、日本建築学会構造系論文集、第 586 号、pp.203-210、2004.12
- 12) 株式会社日建設計東京オフィス構造設計室：建築物の性能設計と検証法、2002.9
- 13) 加藤勉、秋山宏、山内泰之：鋼材の応力—ひずみ履歴曲線に関する実験測、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp.937~938、1973.10

(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ー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ーその1-3 口頭発表	島田侑、佐藤大樹、長江拓也、大内隼人、大下優作、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛	富山大学 2010年度日本建築学会大会（北陸）	2010年9月	国内
Eー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	富山大学 2010年度日本建築学会大会（北陸）	2010年9月	国内
性能評定シートによる既存超高層鋼構造建物の耐震性能評価ーその1、2 口頭発表	助村浩太郎、中川真里奈、佐藤大樹、大下優作、北村春幸、長江拓也、佐野剛志	建築会館 2010年度日本建築学会関東支部研究報告会	2011年3月	国内
Eーディフェンス実験に基づくエネルギー法を用いた損傷配分評価 口頭発表	大下優作、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也	建築会館 2010年度日本建築学会関東支部研究報告会	2011年3月	国内
Eーディフェンス震動台実験結果に基づくせん断モデルの作成 口頭発表	須賀貴之、佐藤大樹、大内隼人、北村春幸、長江拓也	建築会館 2010年度日本建築学会関東支部研究報告会	2011年3月	国内
Eー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5、6 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 2010年度日本建築学会関東支部研究報告会	2011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
Vibration-based Damage Detection of a High-rise Steel Building before and after the E-defense Shaking Table Test	Kenji Kanazawa , Haruyuki Kitamura , Daiki Sato, Masashi Morimoto , Masaru Ono, Takuya Nagae	World Conference on Structural Control and Monitoring	2010.7	国外
長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率一部分切り出し架構に対するE-ディフェンス振動台実験	佐藤大樹、島田侑、大内隼人、長江拓也、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛	日本建築学会構造系論文集、第75巻、第653号	2010.7	国内
履歴型ダンパーを部分配置した超高層建物のE-ディフェンス振動台実験	佐藤大樹、島田侑、長江拓也、北村春幸、中島正愛	日中建築構造技術交流会論文集	2010.9	国内
地震損傷を受ける鉄骨高層建物の剛性モニタリング	飯野夏輝、金澤健司、尾野勝、佐藤大樹、北村春幸、長江拓也	日本地震工学シンポジウム論文集	2010.11	国内

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23年度業務計画案

- ・平成23年度は、平成19年度と平成21年度に実施した高層建物試験体のEーディフェンス実規模実験による実験結果と比較・分析することにより、実験時の試験体の揺れ（応答）を再現できる簡便な解析モデル用いた多質点系弾塑性解析手法に加えて詳細な解析モデルを用いた部材レベルの立体弾塑性解析手法を確立する。さらに、これらの解析手法を地震動による高層建物の揺れ（応答）を再現する。
- ・既存高層建物の耐震性能調査に基づき作成した代表的な高層建物モデル等を用いて、サブプロジェクト①でとりまとめられる首都直下地震で想定される地震動と首都圏、名古屋、大阪の各地域で想定される長周期地震動による応答解析を行う。その解析結果より、建築構造体の最大値と累積値の基づく損傷評価や制震部材のエネルギー吸収性能等による性能評価を行い、地震動のサイト特性を含めた総合的な構造被害状況の検討を行う。これらの成果をもとに、既存高層建物に対する耐震性能評価手法を構築する。