

3.2.4 応答低減装置を組み込む高層建物実大架構切り出し試験体の設計と予備解析

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

長周期地震動を受ける高層建物群の被害状況は依然として明らかでなく、損傷過程、終局状態を適切に表現する実験資料を積み重ね、想定される被害を総合的に評価する必要がある。

既存高層建物の安全性確保、高機能性確保の観点から、長周期地震動を受ける高層建物の地震時応答評価や効率的な応答低減技術に関わる検討・検証を行うため、E-ディフェンスを活用した実験を実施する等、架構の損傷評価、応答低減技術による損傷軽減効果の定量的評価および機能保持・避難性等に関わる研究開発を進め、安心・安全な高層建物の広い普及のための基礎データを得る。

(b) 平成20年度業務目的

既存高層建物の地震時応答の効率的な低減技対策技術として最も有効性が高いと期待されるがダンパー（制振装置）の被害軽減効果、損傷過程、終局状態を適切に表現する実験資料を蓄積するため、前年度の震動台実験に対する検証を踏まえ、応答低減装置を組み込む実大架構切り出し試験体の設計と予備解析を実施する。

すなわち、試験体は19年度に実施した実験に用いられたものを基本とし、効率的にデータを取得するための試験体設計と実験手順を検討する。また、数値解析を通じて、応答性状を整理し期待される効果を検証する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター	主任研究員	長江 拓也
	客員研究員	福山 國夫
	企画室長	井上 貴仁
	主任研究員	梶原 浩一
	センター長	中島 正愛
東京理科大学理工学部建築学科	助教	佐藤 大樹
	教授	北村 春幸
	上席研究員	斉藤 大樹
独立行政法人建築研究所	教授	福和 伸夫
名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻		
京都大学防災研究所	准教授	日高 桃子

(2) 平成20年度の成果

(a) 業務の要約

21年度に実施する実験の試験体にダンパーを組み込むに当たって、そのコンセプトを整理した。架構にはブレースダンパーを、縮約層にはモデル化されたダンパーを組み込むこととし、その詳細を設計した。試験体は19年度に実施した実験に用いられたものを基本としており、架構の場合、層としての剛性比、強度比が、実際の設計で用いられる程度となるように、ブレースの配置、断面を決定した。鋼製ダンパーとオイルダンパーのそれぞれに対してその効果を検証することとした。鋼製ダンパーの場合に、高さ方向の2/3の範囲、高さ方向の1/5の範囲を補強することによる効果の比較を行う。高さ方向の1/5の範囲を補強する場合に、鋼製ダンパーとオイルダンパーの効果を比較する。これにダンパーの無い、無補強の場合を加えて、効率的にデータを取得する実験手順を計画した。これらの条件において、数値解析を実施し、期待される効果を検証した。

(b) 業務の成果

1) 実験手法

a) 試験体のコンセプトと実験計画

19年度に実施された実験に採用された試験体を基本とし、ダンパーを組み込む試験体を設計する。図1に試験体のコンセプトを示す。基本となる試験体は、振動台上に下層階を想定した鋼構造の骨組みを作製し、上層階はコンクリートスラブ・積層ゴムによって表現するものである。試験体に、超高層建物群の平均的な力学特性を与えるために、想定する高さ80m、21階建ての超高層建物に対して、試験体用の21層モデルを設定し、これを縮約モデルに置換し、試験体に展開した。1980年以前の初期において特に主流であった鋼構造の超高層建物を対象とし、柱梁接合詳細等を再現した床スラブ付きの実架構に、超高層建物の地震応答を与えることを意図した。19年度の実験では、その妥当性が確認されている。

ダンパーを組み込む実験では、上記と同様に上部を縮約する考え方に基づき、高層建物実大架構切り出し試験体にダンパーを組み込み、長周期地震動を受ける超高層建物の地震応答を再現する。図2に実験計画を示す。

- (ア) 想定建物において高さ方向に下層2/3の範囲を鋼材ダンパーで補強
- (イ) 想定建物において高さ方向に下層1/5の範囲を鋼材ダンパーで補強
- (ウ) 想定建物において高さ方向に下層1/5の範囲をオイルダンパーで補強
- (エ) ダンパーによる補強がない

上記4種類の試験体条件に対して、19年度実験とほぼ同様の加振を実施し、ダンパーによる応答の抑制効果を検証する。下層骨組みには、実物のブレースダンパーを組み込む。ダンパーは鋼材ダンパーとオイルダンパーとする。(ア)2/3の範囲を鋼材ダンパーで補強する場合には、縮約層にモデル化したダンパーを組み込む。

下層階では、骨組内に組み込まれたダンパーのエネルギー吸収特性を検証する。特に、(イ)と(ウ)の1/5の範囲を補強する場合には、鋼材ダンパーとオイルダンパーを組み込み、長時間にわたる多数回の繰り返し変形を受けるダンパーに要求される性能と保有性能の関係を調べる。さらに、部分的なダンパーの挿入が建物全体の応答に与える影響を調べる。そこでは、鋼材ダンパーを組み込んだ場合とオイルダンパーを組み込んだ場合の応答性状違いを合せて調べる。(エ)ダンパーによる補強がない場合における架構の損傷を観察し、これらを合せて、ダンパーによる被害軽減効果を具体的に調べる。

また、骨組の変形に及ぼすダンパーの影響に加えて、床応答振幅の低減効果にも着目する。試験体の屋上(想定21階建物の19階に対応)には、室内実験用のペントハウスを設置し、床応答の違いが室内の被害状況にどのような影響を与えるのか調べる。

b) 設計

試験体の全景を図3に示す。試験体の立面図、平面図を図4に示す。骨組み内のダンパーは、骨組とダンパーの剛性比、強度比が、実際の設計で用いられる程度となるように配置し、断面を決定した。桁行方向のブレースは、A、B通りの2構面に対して1本ずつ、各層に2本(②通り・③通り間)配した。梁間方向のブレースは、②通りの1構面の中央で接続するハの字形とし、桁行方向と同様、各層に2本配した。

縮約層の鋼材ダンパーは、U形ダンパーによってモデル化した。縮約層の1層目と2層目に2基ずつ配し、5層分のブレースダンパーを縮約した剛性と降伏強度となるように、ダンパーの組み合わせを選択した。剛性は5層の直列、強度は5層の平均に相当するものとして、もとの積層ゴムと塑性化装置から与えられる剛性と強度との比が、それぞれ、架構において採用された比と近くなることを意図した。

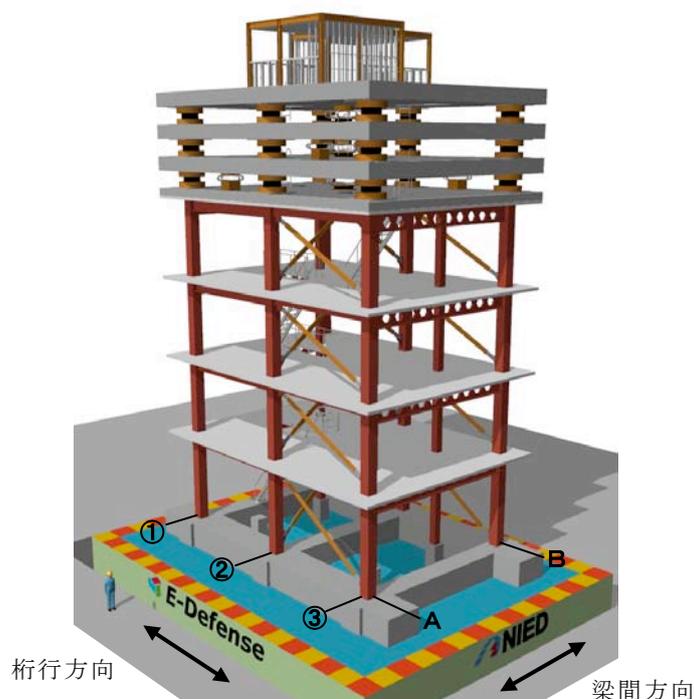
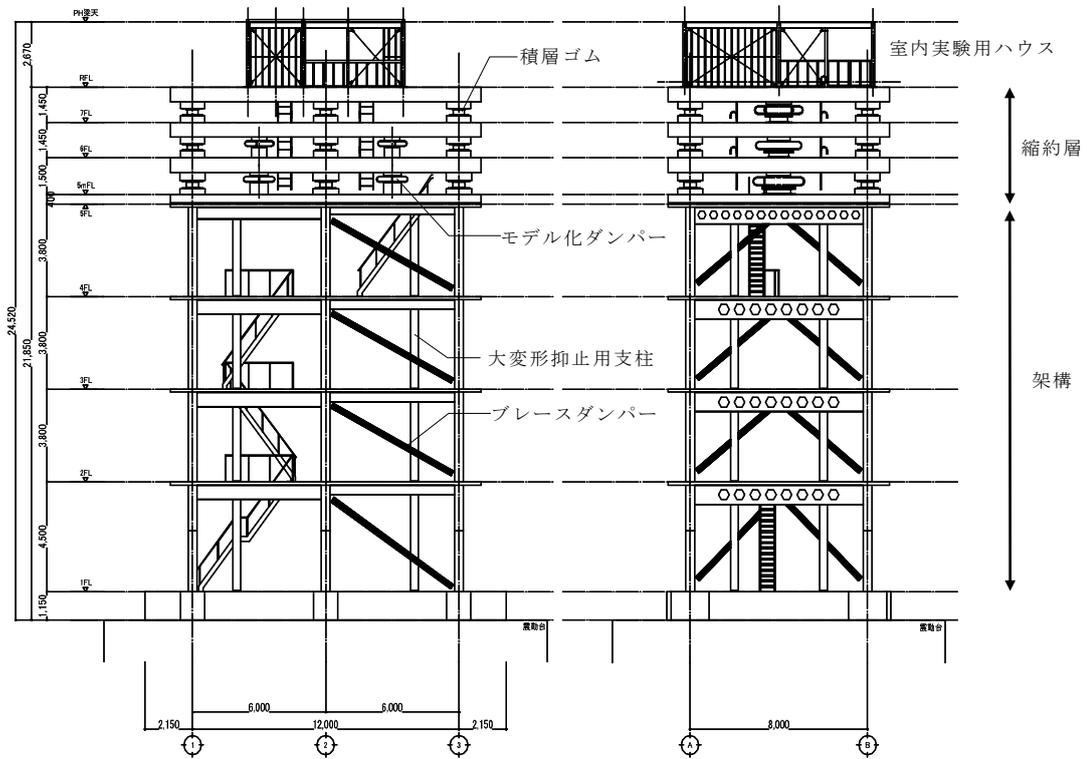


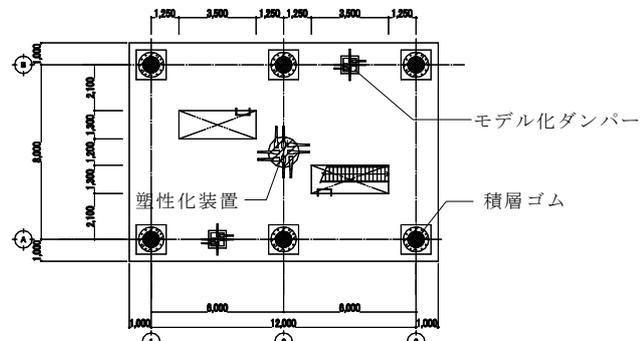
図3 振動台上の試験体(パース)

骨組内におけるブレースの取り付け詳細を図5に示す。本実験では、既存超高層建物の耐震改修を想定しており、骨組とブレースを接続するガセットは、現場にて骨組に溶接される。各階の上部のガセットは、柱と梁の両方に溶接され、鉛直力は主に柱が、水平力は

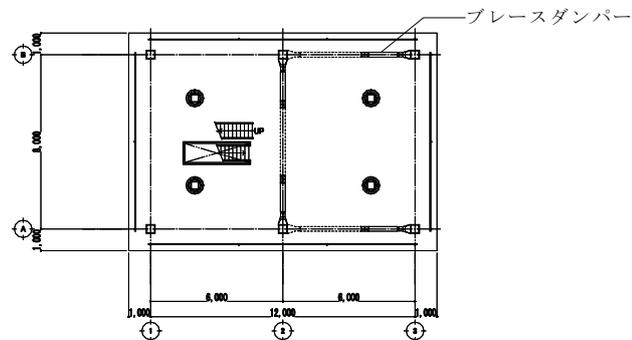


(1) 桁行方向立面図

(2) 梁間方向立面図



(3) 縮約層1層目平面図



(4) 架構2階平面図

図4 試験体図面

主に梁が負担するものとして設計した。一方、下部のガゼットは、床スラブの存在を考慮して、柱のみに溶接することとした。柱は鉛直力と水平力を負担し、水平力は柱を通して床スラブ直下の梁に伝達されるものとして設計した。

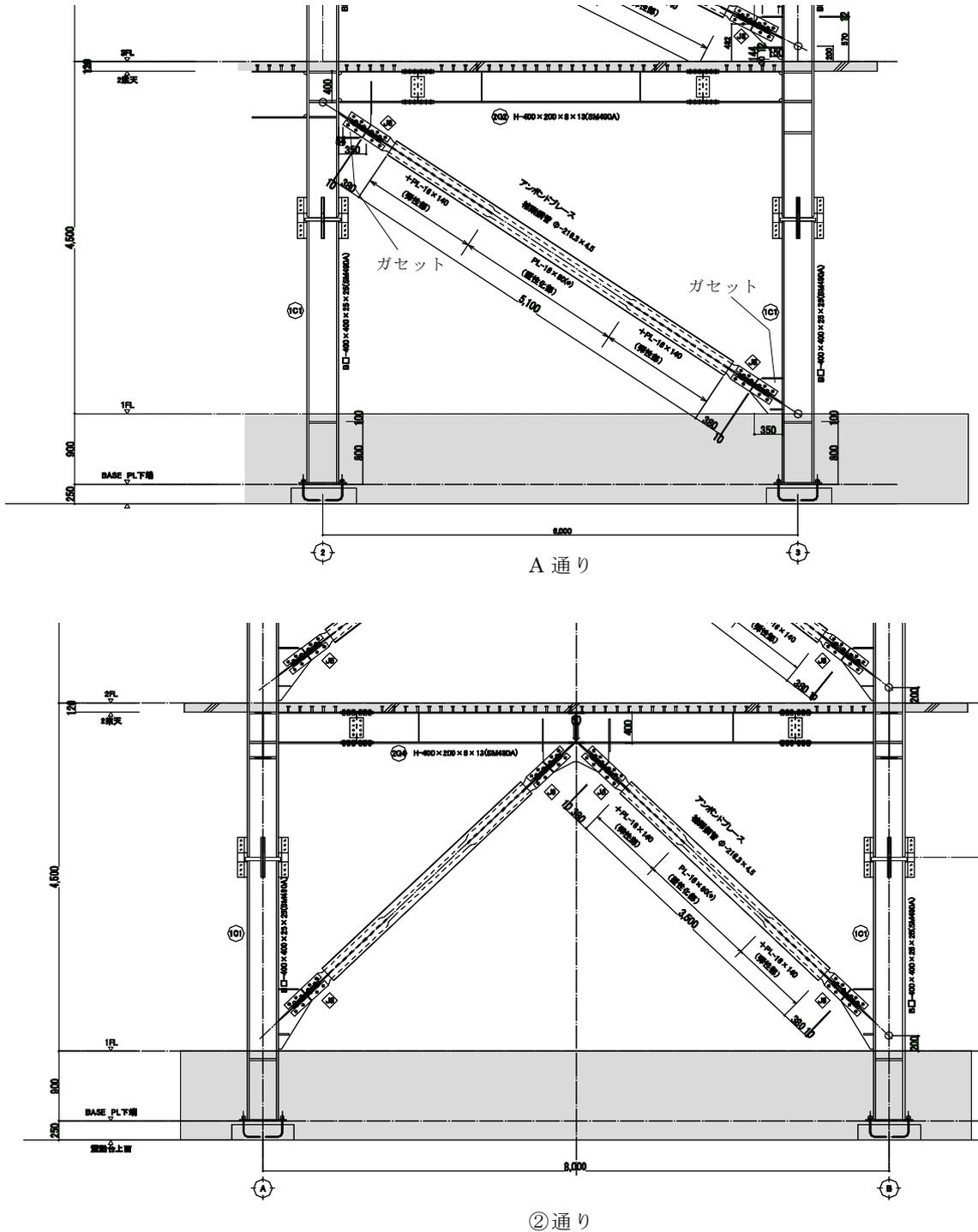


図5 架構内ダンパー取り付け図（鋼製ダンパー）

縮約層の詳細を図6に示す。もとの縮約層は、剛性と強度が積層ゴムと塑性化装置から与えられている。塑性化装置は、U形ダンパーと積層ゴムを直列に接合し、U形ダンパーの

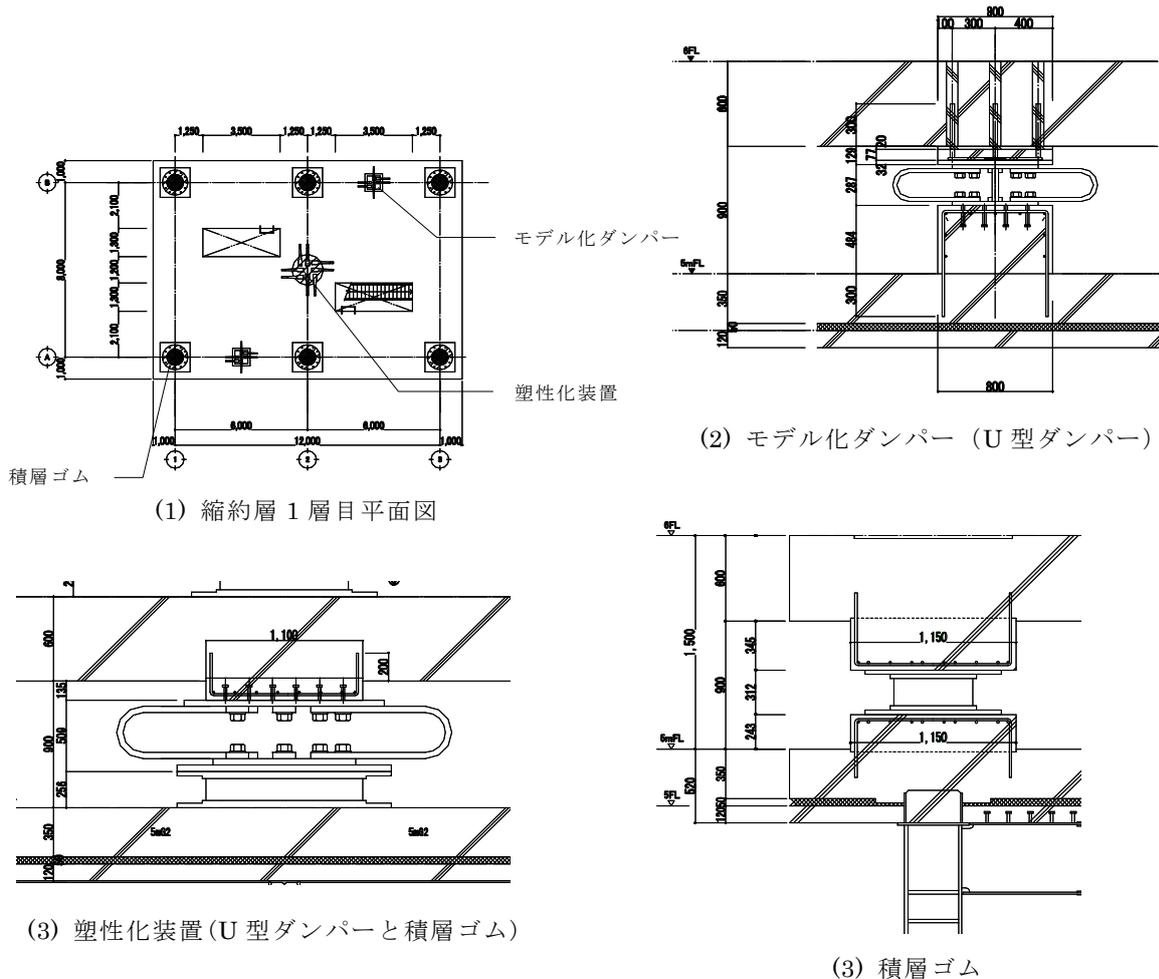


図 6 縮約層の詳細 (鋼製ダンパーの挿入を想定)

降伏時の水平変形を調整した。階高 3.8 m の 5 層分の高さ と水平変位の比から計算する降伏時変形角は約 0.004 rad になり、骨組の降伏時変形角を適切に表現している。座屈拘束ブレースの負担水平力をモデル化した U 形ダンパーには、縮約層の水平変位が直接与えられるように、コンクリートの台座を介して、上下の垂スラブに固定している。同様の考え方で、5 層分の高さ と水平変位の比から計算する U 形ダンパーの降伏時変形角は約 0.001 rad になる。骨組みの降伏変形角と比べれば、1/4 程度の変形角でダンパーが降伏するという、通常的设计で採用される条件が表現できている。

一連の実験では、先に述べたように、まず、(ア) 下層 2/3 の範囲を鋼材ダンパーで補強する場合について加振を実施する。その後、縮約層のモデル化ダンパーを取り外し、(イ) 下層 1/5 の範囲を鋼材ダンパーで補強する場合について加振を実施する。

(ウ) 下層 1/5 の範囲をオイルダンパーで補強する場合は、鋼材ダンパーを取り外し、同じガセットにオイルダンパーを接合する。オイルダンパーを図 7 に示す。オイルダンパーは、リリース弁を有しており、最大減衰力が、鋼材ダンパーとほぼ同等なるものを選択する。

設計では、骨組内のブレースダンパーについて、鋼材ダンパーの降伏強度、オイルダンパーの最大減衰力をそれぞれ複数設定した。表 1 に、ダンパーの諸元をまとめる。

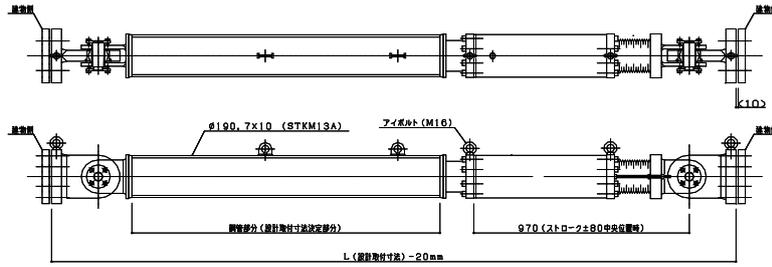


図 7 オイルダンパー

表 1 ダンパーの諸元

(1) 縮約層

縮約層	型式	降伏せん断力 Q_v (kN)	初期剛性 K_1 (kN/m)	2次剛性 K_2 (kN/m)	弾性限界範囲 d_v (mm)	限界変形 d_u (mm)
2層目	NSUD40x4	112	5920	100	18.9	550
1層目	NSUD40x6	168	8880	150	18.9	550

縮約層	型式	数量	剛性比 K_d/K_f	強度比 $Q_d/(Q_f+Q_d)$
2層目	NSUD40x4	2	1.2	0.14
1層目	NSUD40x6	2	1.5	0.18

(2) 骨組

(a) 鋼材ダンパー (ブレース各層 2 本) ; 2 種類

Case	塑性化長さ*1	鋼材*2	板厚 (mm)	塑性化部の幅 (mm)	降伏強度 (kN)
Steel_d_288	1/4l	Ly225	16	80	288
Steel_d_450				125	450

*1 l: 両端長さ *2 降伏強度: 225 N/mm²

桁行方向	Case	剛性比 K_d/K_f	強度比 $Q_d/(Q_f+Q_d)$
	Steel_d_288	1.5	0.20
	Steel_d_450	1.9	0.29

梁間方向	Case	剛性比 K_d/K_f	強度比 $Q_d/(Q_f+Q_d)$
	Steel_d_288	1.6	0.18
	Steel_d_450	2.1	0.26

K_d : ダンパーの水平弾性剛性

K_f : フレームの水平弾性剛性

Q_d : ダンパーの水平耐力

Q_f : フレームの水平耐力 (変形角 0.01rad)

(b) オイルダンパー (ブレース各層 2 本) ; 2 種類

Case	1次減衰係数 (kN sec/m)	2次減衰係数 (kN sec/m)	支持材剛性 (kN/m)	リリース荷重 (KN)
Oil_d_294	24400	244	109800	294
Oil_d_490				490

2) 数値解析

数値解析では、設計で与えられた条件をモデル化し、さらに複数のケースを加えて、実験を予定する地震動に対してその効果を検討する。ここでは、実験で採用する地震動の中で、最も大きな入力エネルギーを試験体に与える名古屋三の丸波に焦点を当てる。その EW

方向成分を桁行方向に、NS方向成分を梁間方向に入力して、ダンパーに関する条件を変化させて応答性状を考察する。ダンパーによって抑制された層間変形角の絶対値と、最大層間変形角の分布、エネルギー吸収の分布を取り上げる。変形角が、ダンパーを入れる層とそうでない層の境界で急変すると、実際の骨組では柱の負担が大きくなることが予測され、なるべく滑らかな変形分布が望ましい。

a) 鋼材ダンパー

i) 解析条件

試験体の各構面を2次元フレームに置換する。縮約層の1層目、2層目は表1(1)のNSUD40x6, NSUD40x4を各層2基ずつせん断ばねに置換する。骨組内の1~4層のブレースダンパーは座屈拘束ブレースの塑性化部以外を剛域(両端に1/4 I)とし、塑性化部分をLY225(降伏強度225N/mm²)のバイリニアの軸ばねでモデル化する。板厚を16mmとし、幅を80, 100, 125mm(降伏強度で288, 360, 450 N/mm²)の3種類とした。以降では、それぞれのダンパー条件を降伏強度から、Steel_d_288, Steel_d_360, Steel_d_450と表記する。

次に、縮約層のダンパーの配置を変化させてその影響を見る。上記の通り骨組および縮約層の1層目と2層目にダンパーを配すものをAAA(先の2/3補強)、骨組および縮約層の

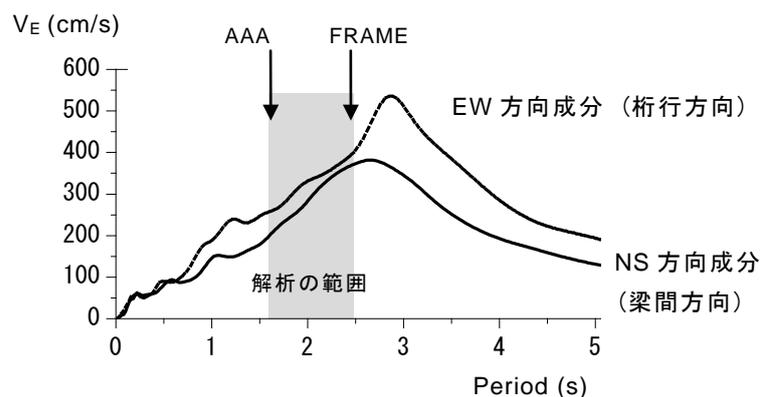


図8 三の丸波のエネルギースペクトル

表2 解析モデル固有周期

X	Steel_d_228				Steel_d_360			Steel_d_450			
	FRAME	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA	
モード	1	2.43	1.71	1.96	2.25	1.69	1.94	2.23	1.67	1.93	2.22
	2	0.94	0.80	0.80	0.88	0.79	0.79	0.87	0.78	0.78	0.86
	3	0.71	0.43	0.56	0.57	0.43	0.55	0.57	0.42	0.54	0.56
Y	80				100			125			
	FRAME	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA	
モード	1	2.53	1.72	1.97	2.26	1.70	1.95	2.24	1.68	1.93	2.22
	2	0.97	0.81	0.81	0.88	0.79	0.79	0.87	0.78	0.78	0.87
	3	0.63	0.44	0.56	0.57	0.43	0.55	0.57	0.42	0.54	0.56

2層目のみダンパーを配すものをNAA、骨組のみにダンパーを配すものをNNA(先の1/5補強)と表記する。ダンパーの無い場合はFRAMEと表記する。

減衰は剛性比例とし、1次固有周期に対する減衰定数を2%とした。図8に三の丸波のエネルギースペクトルを示す。表2に固有値解析から求めた固有周期をモデルごとに示す。ダンパーを全層配置したものはいずれも固有周期が7割以下となる。なお、実験、解析においてEW成分をY方向に、NS成分をX方向に入力している。解析の周期範囲を網掛けで示す。

ii) 解析結果

地震応答解析における入力エネルギーと吸収エネルギーを表3に示す。

桁行方向、梁間方向のいずれも、吸収エネルギーWが入力エネルギーEは、ほぼつりあっている。桁行方向の場合はその差が1%以下である。梁間方向においても、その差は8%以下で、解析はエネルギーの釣り合いという観点から、妥当な結果を示しているといえる。

入力エネルギーの絶対量は、ダンパーの配置に強く影響を受けている。Steel_d_450について見てみると、ダンパーの無いFRAMEの量に対して、AAAの量は、桁行方向で約60%、梁間方向で約30%となっている。こうした傾向は、図8のエネルギースペクトルにおける、周期とスペクトル振幅の関係と整合しており、三の丸波のスペクトルピーク（3秒付近）より短い周期帯に位置する本試験体の場合、鋼材ダンパーを組み込むと、周期が短くなりスペクトルの山を下るため、入力エネルギーが小さくなることが影響に含まれる。

図9に最大層間変形角を示す。縮約層は、5層分の等価な変形角に置換してプロットしている。図中の網掛けは、ダンパーの配置範囲を表す。FRAMEの場合、桁行方向、梁間方向のいずれも下層部において変形が大きくなる傾向を示している。桁行方向の場合は、骨組において、約0.018 radの最大値を示している。これをAAAとして、骨組内のダンパーをSteel_d_450とすれば、最大値を0.005radにまで抑えることができる。最大値は、配置の範囲が小さくなるほど、骨組み内のダンパーの降伏強度が小さくなるほど、大きくなるが、骨組のみにダンパーを入れるNNAでは、ダンパーの降伏強度を大きくすると骨組内の層間変形角が抑えられるが、そのうえの層間変形角は抑えられず、ダンパーを挿入した層とそうでない層の境界における層間変形角の変化が大きくなる。ダンパーの降伏強度が最も小さいSteel_d_288の場合は、骨組内の層間変形角が0.01radを超えてしまうが、変形分布の形状は滑らかである。

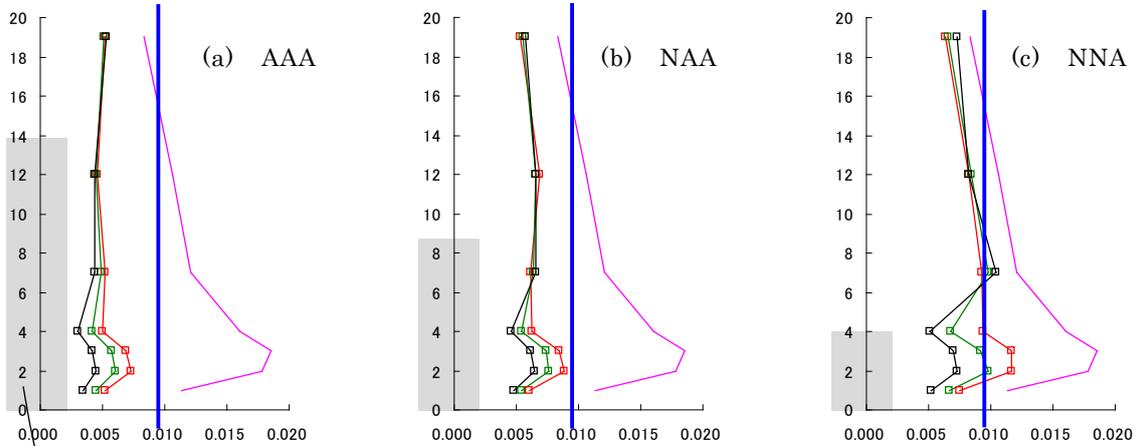
各層の吸収エネルギーの分布を図10に示す。ここでは、最大層間変形角が大きい桁行方向を示している。縮約層の場合は、5層分の平均として、示している。いずれの場合も下層において吸収エネルギーが相対的に大きくなっている。AAAの場合は、入力エネルギーが小さいため、すべての層で、FRAMEよりもダンパーを入れた場合の吸収エネルギーが小さくなっている。骨組のみにダンパーを入れるNNAの場合は、下層の吸収エネルギーが大きくなる傾向が顕著で、下層ではFRAMEよりも大きな吸収エネルギーを示している。一方、骨組内のダンパーの断面積を増やせば、吸収エネルギーは小さくなる。

表 3 解析モデルの入力エネルギー E と吸収エネルギー W

桁行方向	Steel_d_228				Steel_d_360			Steel_d_450		
	FRAME	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA
W	6278	4460	4960	5899	4110	4693	5624	3675	4518	5014
E	6242	4440	4941	5880	4088	4673	5610	3652	4496	5004
W/E	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00

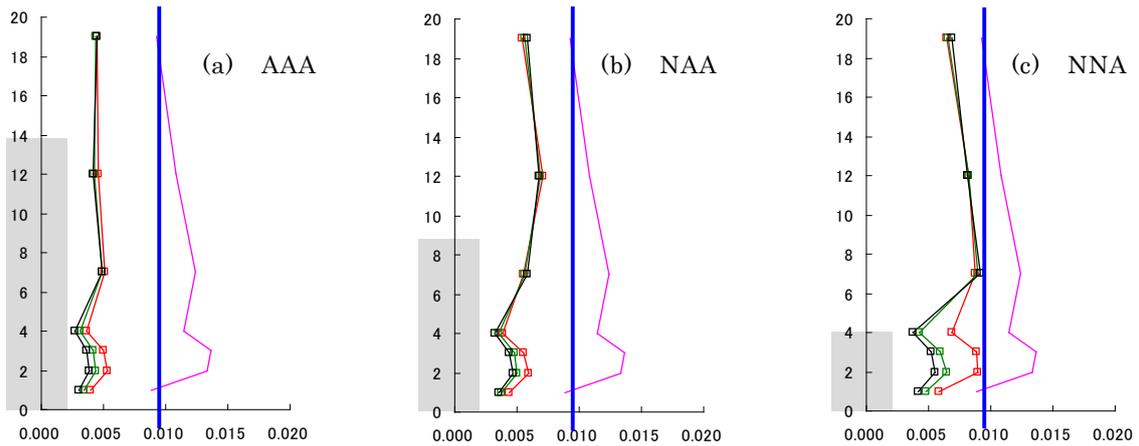
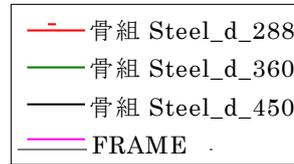
梁間方向	Steel_d_228				Steel_d_360			Steel_d_450		
	FRAME	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA	AAA	NAA	NNA
W	5457	2408	3459	4985	2180	3217	4668	2057	2964	4268
E	5906	2533	3583	5259	2319	3325	4865	2191	3059	4475
W/E	0.92	0.95	0.97	0.95	0.94	0.97	0.96	0.94	0.97	0.95

Story



ダンパー配置範囲

(1) 桁行方向



(2) 梁間方向

R_{max} (rad)

図 9 最大層間変形角

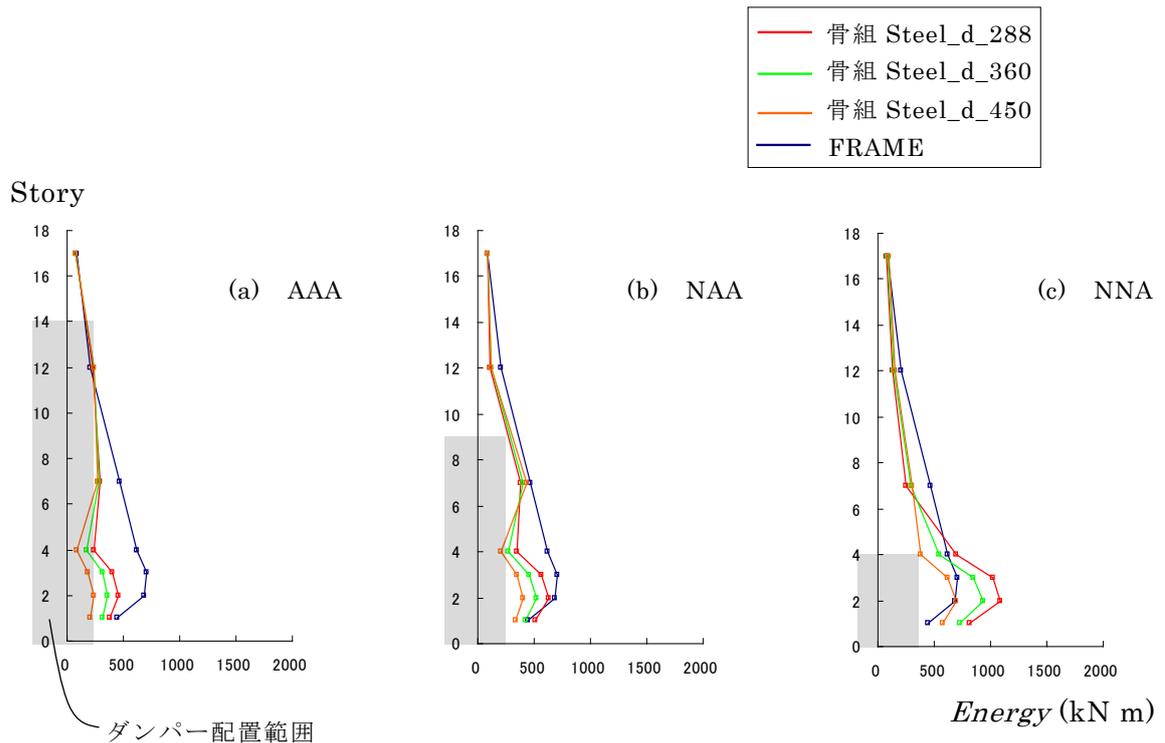


図 10 吸収エネルギー（桁行方向）

a) オイルダンパー

i) 解析条件

本解析では、骨組のみにオイルダンパーを組み込む条件とする。

オイルダンパーのモデルを図 11 に示す。図中の記号は、以下に示すとおりである。

C1: 1次減衰係数,

C2: 2次減衰係数, (=0.01・C1)

KB: 支持材剛性 (=4.5・C1)

KD: オイルの圧縮剛性

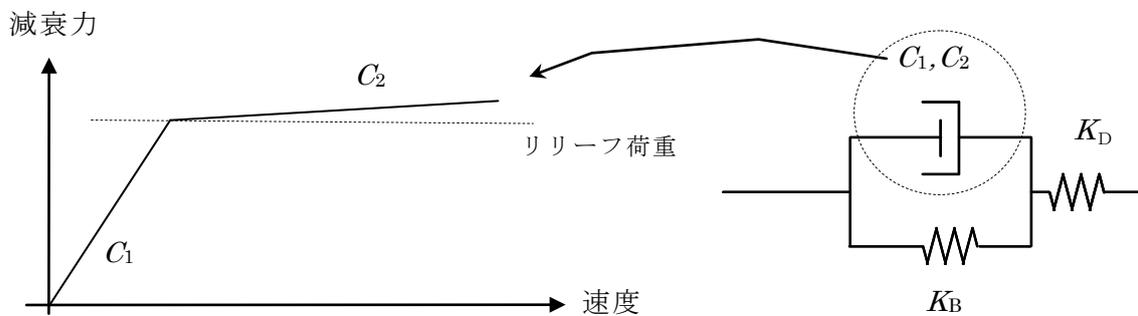


図 11 オイルダンパーのモデル化

また、条件として、 $C_1 \cdot \omega / K_f = 1$ とする。

ω : フレームのみの 1 次固有振動数

K_f : 1 層のフレームのみの層剛性

オイルの圧縮剛性は 0 とする。先の表 1 に示したオイルダンパーの諸元はこれらの条件を反映したものである。そのリリース荷重は 294, 490 kN とし、それぞれ骨組各層に 2 本ずつ配した 2 ケース、Oil_d_294、Oil_d_490 (表) について解析結果を整理する。

入力地震動は、鋼材ダンパーと同様とし、三の丸波 (図 8) とする。

ii) 解析結果

Oil_d_490 の場合について、各層の層せん断力と層間変形の履歴を図 12 に示す。オイルダンパーを組み込んだ骨組は、小さな変形レベルより紡錘形の形状を示し、効率的にエネルギーを吸収していることがわかる。一方、ダンパーを配していない、縮約層は、形状が細長く、骨組が吸収することを想定した程度の履歴形状となっている。

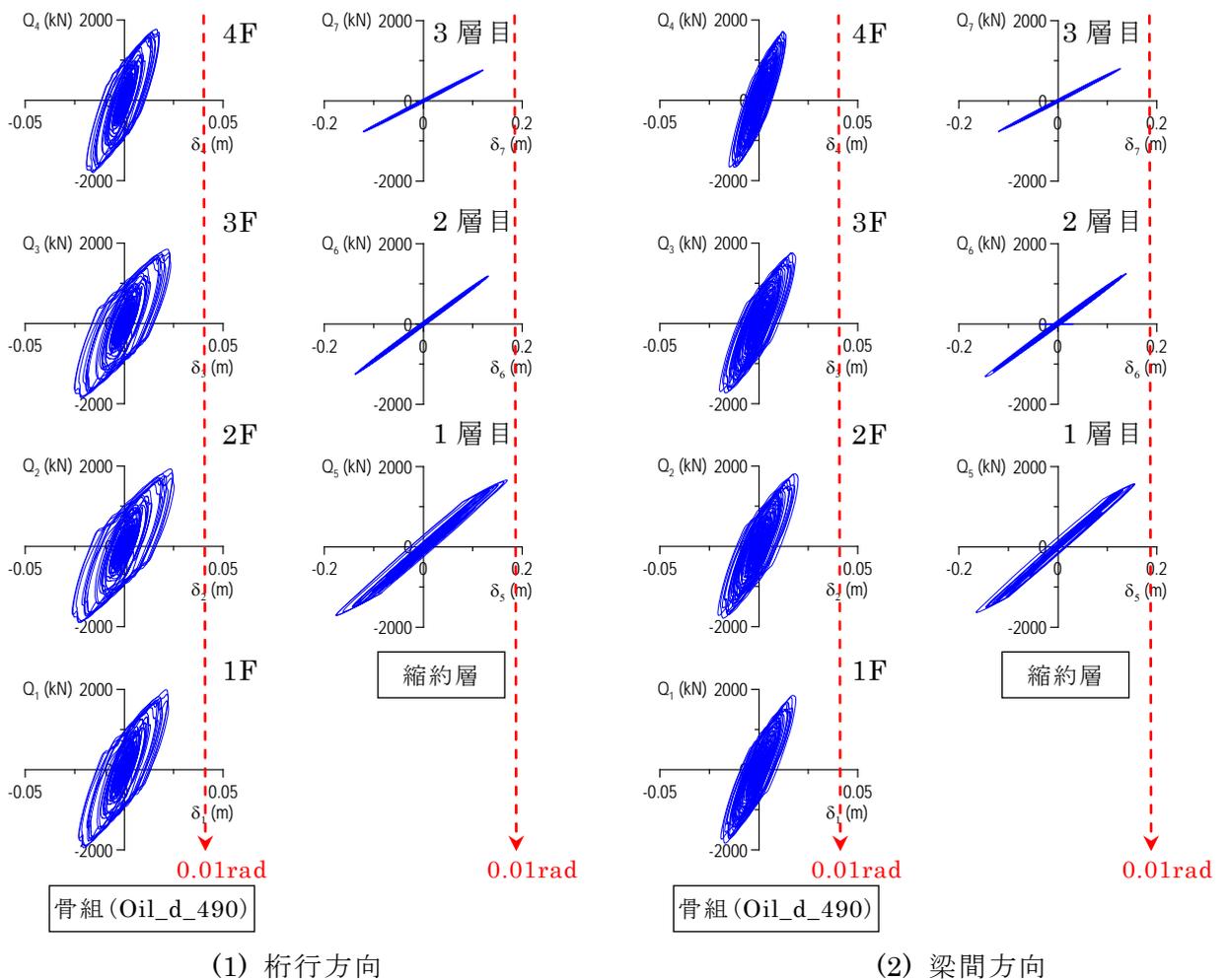


図 12 層せん断力と層間変形の履歴 (Oil_d_490)

最大層間変形角の分布を図 13 に示す。ダンパーを配さない FRAME と比較すると、Oil_d_490 の場合、Oil_d_294 の場合ともに、ダンパーを配していない縮約層の最大値が 30%程度抑えられている。ダンパーを配した骨組は、リリース荷重が大きくなることにより、最大値が小さく抑えられる。Oil_d_490 の場合の最大値は、約 0.006rad であるが、Oil_d_294 の場合の最大値は、0.01rad を若干超えている。ただし、ダンパーを配さない縮約層の最大値は、ほぼ等しい。従って、鋼材ダンパーと同様、ダンパーの抵抗力が大きくなると、ダンパーを挿入した層とそうでない層の境界における層間変形角の変化が大きくなる。

各層の吸収エネルギーの分布を図 14 に示す。ここでは、最大層間変形角が大きい桁行方向について、骨組、および骨組をモデル化した縮約層が吸収した W_f と、ダンパーが吸収した W_d を分離して示している。Oil_d_490 の場合、Oil_d_294 の場合ともに、骨組み内の

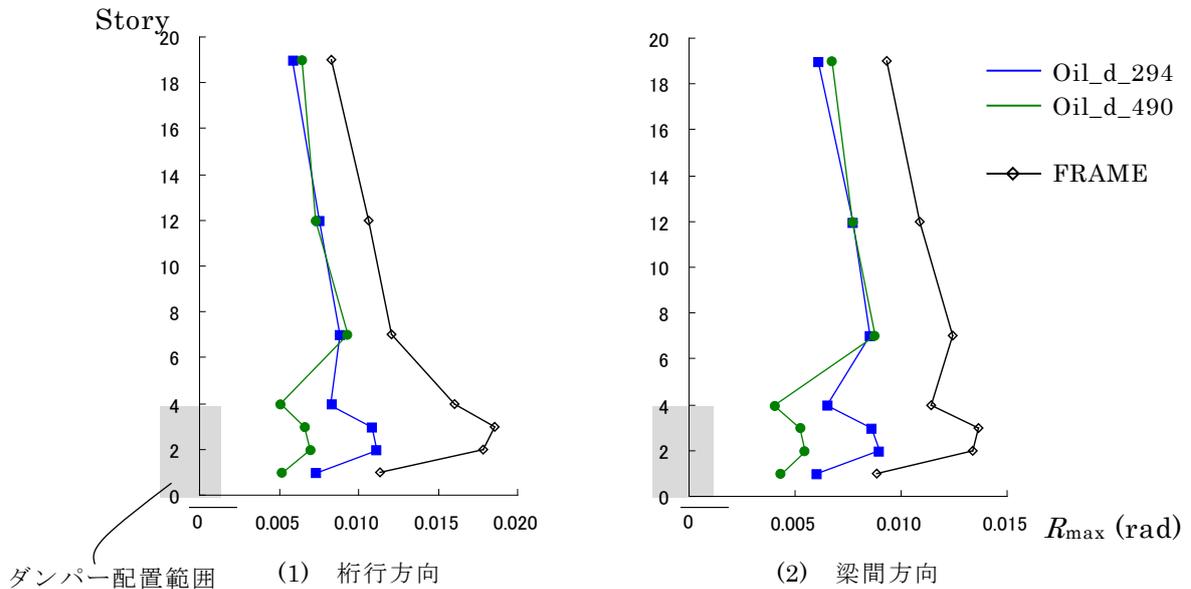


図 13 最大層間変形角

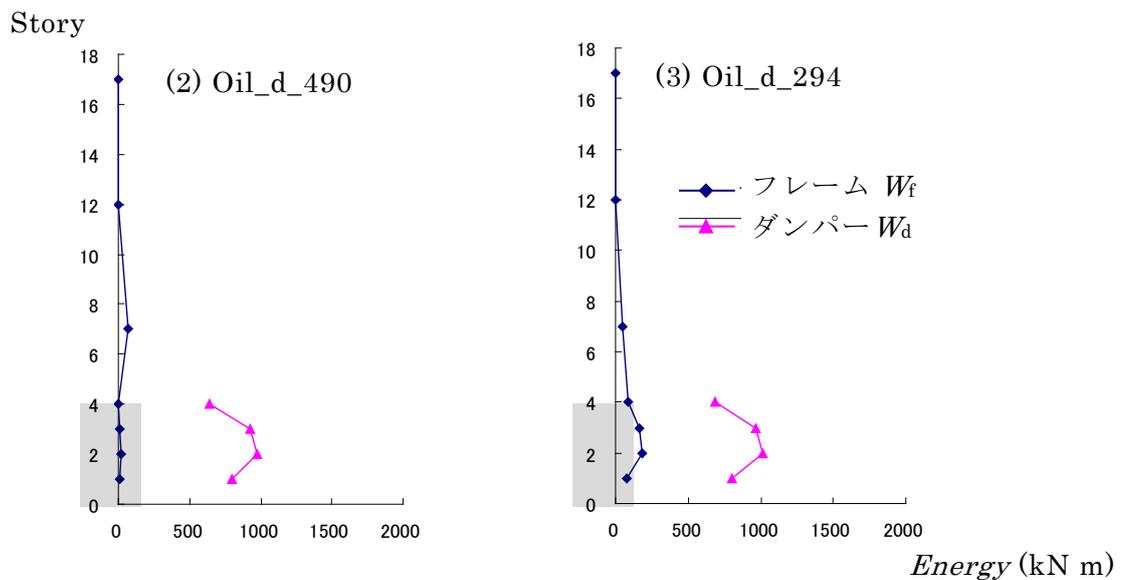


図 14 吸収エネルギー（桁行方向）

ダンパーによって大半のエネルギーを吸収している。Oil_d_294 の場合は、骨組の最大層間変形角が 0.01rad に達しており、各層ダンパーの吸収する量の 20% 程度のエネルギーを吸収している。Oil_d_490 の場合、骨組のエネルギー消費はほぼ無い。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成 21 年度は、長周期地震動を受ける超高層建物にダンパーを組み込むことを想定し、E-ディフェンスを用いた実験を実施する。試験体は 19 年度に実施した実験に用いられたものを基本としており、下層の骨組に、層としての剛性比、強度比が、実際の設計で用いられる程度となるように、ブレースの配置、断面を設計した。縮約層にはモデル化されたダンパーを組み込むこととした。鋼製ダンパーとオイルダンパーのそれぞれに対して、効果を検証する計画とし、鋼製ダンパーの場合に、高さ方向の 2/3 の範囲（縮約層を等価な 5 層と数える）、高さ方向の 1/5 の範囲（下層の骨組みのみ）を補強する。高さ方向の 1/5 の範囲を補強する場合に、オイルダンパーを組み込み、効果を調べる。これにダンパーの無い、無補強の場合を加えて、包括的なデータ取得を計画した。これらの条件において、数値解析を実施した。解析の結果によると、高さ方向の 2/3 の範囲に鋼材ダンパーを配すると、全体の応答が抑えられ、変形の分布も滑らかになる。骨組のみにダンパーを配置する（1/5 の範囲の）補強は、ダンパーの抵抗力を大きくすると、骨組の変形は抑えられるものの、上層部の変形は変化しないため、ダンパーを挿入した層とそうでない層の境界における層間変形角の変化が大きくなる。これは、鋼製ダンパーの場合もオイルダンパーの場合も同じ傾向で、鋼製ダンパーの降伏強度とオイルダンパーのリリーフ荷重が近い場合に、近い変形分布を示した。いずれも、抵抗力を低下させれば、変形角の変化は緩和されるが、骨組の最大変形角自体は大きくなる。解析により、これらのバランスを見極めつつ抵抗力を決定するためのバックグラントを得ることができた。ただし、1/5 層の補強で応答は 70% 位まで低減できる可能性がある。

(d) 引用文献

なし

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

なし

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

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 2 1 年度業務計画案

付加的な実験装置を用いる振動台実験手法の考え方を適用した実験手法を、制振機構を組み込む応答低減実験へと発展させる実験が 21 年度に計画されている。その実験手法の考察と検証を引き続き実施する。