T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	
著者(和文)	佐藤大樹, 島田侑, 長江拓也, 北村春幸, 中島正愛
Authors(English)	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Masayoshi NAKASHIMA
出典(和文)	第9回日中建築構造技術交流会論文集, , , pp. 109-118
Citation(English)	, , , pp. 109-118
発行日 / Pub. date	2010, 9

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

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[1)]，島田侑[2)]，長江拓也[3)]，北村春幸[4)]，中島正愛[5)]
Daiki SATO [1)], Yu SHIMADA [2)], Takuya NAGAE [3)], Haruyuki KITAMURA [4)] and Masayoshi NAKASHIMA [5)]

1)　東京理科大学理工学部建築学科　助教・博士(工学)
2)　鹿島建設株式会社（元 東京理科大学 大学院生）
3)　(独)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・博士(工学)
4)　東京理科大学理工学部建築学科　教授・博士(工学)
5)　(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター センター長・Ph.D.

Abstract

Recently, it has been equipped with damping devises for improving the seismic resistant performance in case of long-period grand motion caused by huge earthquake. The purpose of this study is to examine the effects of response reduction and energy absorption capacity in case that the hysteresis dampers are partially-installed in the high-rise building subjected to long-period ground motion having the specific period rang. The analyses results show that the response characteristics of the 40% partially-installing system are almost same as the full installed damper system. In addition, real-scale experiments are carried out in E-Defense, energy distributions and response decreases are evaluated.

Keywords: high-rise building, long-period ground motion, dynamic response analysis, response reduction, retrofit, energy absorption

１．はじめに

長周期地震動は，これまでの設計用地震動とは異なる揺れを超高層建物に与え，塑性変形を多数回生じさせる可能性がある。大都市を中心に存在する超高層建物に重度の被害が発生すれば，社会に与える影響は甚大である。既存超高層建物の耐震性を検証する必要があり，その結果多くの建物が耐震改修を要することも予測される。応答低減には制振ダンパーの導入が期待されるが，建物全層に採用するとなると経済的負担が大きくなり耐震改修に踏み切るのは容易ではない。建物の高さ方向に対して部分的にダンパーを配置[1],[2]することで耐震性を向上させることができれば，多くの既存超高層建物での耐震改修の促進が期待できる。

長周期地震動においては，建物内に累積される塑性変形が問題となる。さらに，震源特性と地盤構造に起因したスペクトルのピークが「特定の周期帯」[3]に存在することから，履歴型ダンパーを設置する場合にはその周期変動による影響も考慮して耐震性を評価する必要がある。

本研究では，長周期地震動を受ける超高層建物の下層階に履歴型ダンパーを部分配置した際の効果と影響を示すことを目的とする。21 層および 35 層の下層部に部分的にダンパーを設置したモデルを作成し、様々な地震波を用いた解析による検討を行った。さらに、実大規模の建物の下

層部を取り出し、上層は錘と積層ゴムによって超高層建物の応答を再現した試験体[4],[5]による、E-ディフェンスでの実大規模実験でも検討を行った。

２．検討対象建物および入力地震動

2.1 建物概要およびモデル化

検討対象建物を図 1 に，部材断面を表 1 に示す。1980 年以前に建設された初期の純ラーメン構造の超高層鋼構造建物を想定した 21 階建てと 35 階建てを対象とし､部材レベルでモデル化した[2]。以降、それぞれを 21-Fおよび 35-Fと呼ぶこととする。21-F, 35-Fの 1 次固有周期T_1は、それぞれT_1 = 2.41 秒, 4.01 秒である。減衰はT_1に対し 2%となる剛性比例型とした。ダンパーは鋼製の座屈拘束型ブレースを想定し完全バイリニア型でモデル化した。ダンパー全層配置（D100）と下層 40%（D40）および 20%（D20）配置を用意した。各層のダンパー耐力$_dQ_{yi}$は図 2 に示すように，Ai分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに 4 段階とした｡図 2 の横軸は第 1 層のダンパー量$_dQ_{y1}$に対する

表１　部材断面一覧

21-F	柱	□-450x450x16x16 ～ □-600x600x40x40
	大梁	BH-600x250x12x19 ～ BH-600x300x12x32
35-F	柱	□-600x600x16x16 ～ □-700x700x85x85
	大梁	BH-700x200x12x19 ～ BH-800x350x14x40

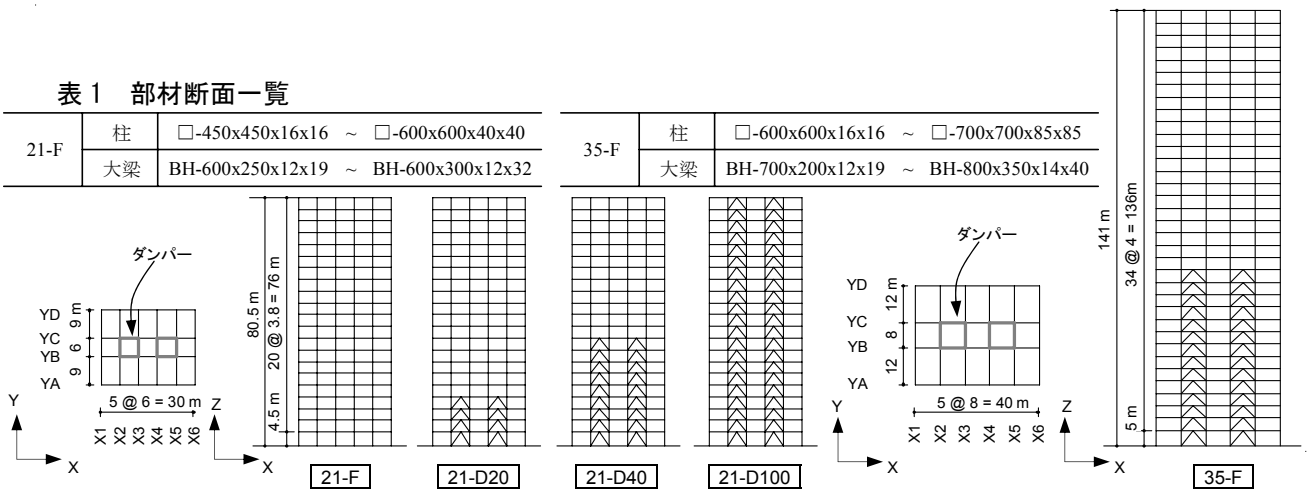
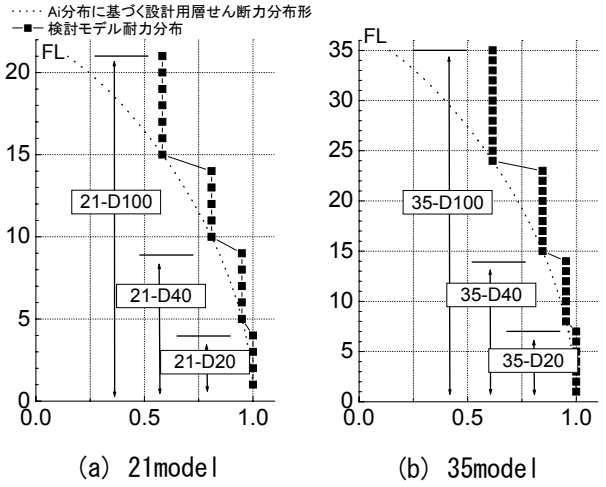


図１　検討建物の平面と軸組

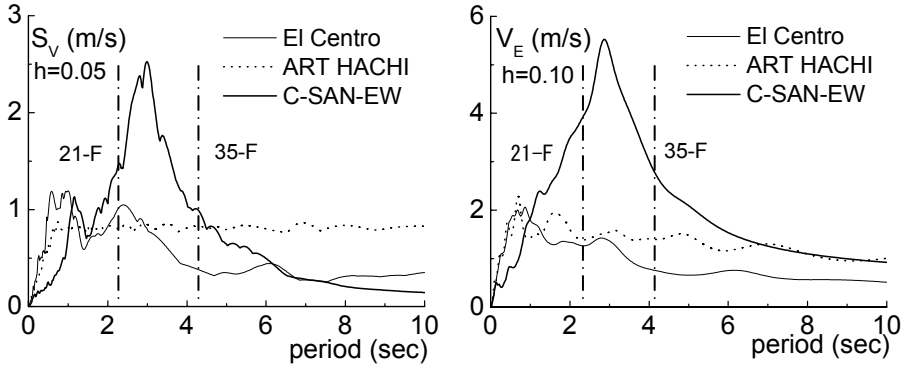


(a) 21model　　(b) 35model

図２　各層ダンパー耐力の高さ方向に対する比率

2.2 入力地震動

本解析では，ダンパー設置による固有周期の変化が入力エネルギーに及ぼす影響を考察するため，「特定の周期帯」を有する長周期地震動であるC-SAN-EW[6]を採用した。また，比較する設計用地震動として最大速度を 50 kineに基準化したEl Centro 1940 NS（以下El Centro），模擬波ART HACHINOHE（位相特性：HACHINOHE 1968 EW，以下ART HACHI）を採用した。図 3 に，地震動のエネルギースペクトル[7]を示す。図中には，21-Fと 35-Fの 1 次固有周期T_1も併せて示す。

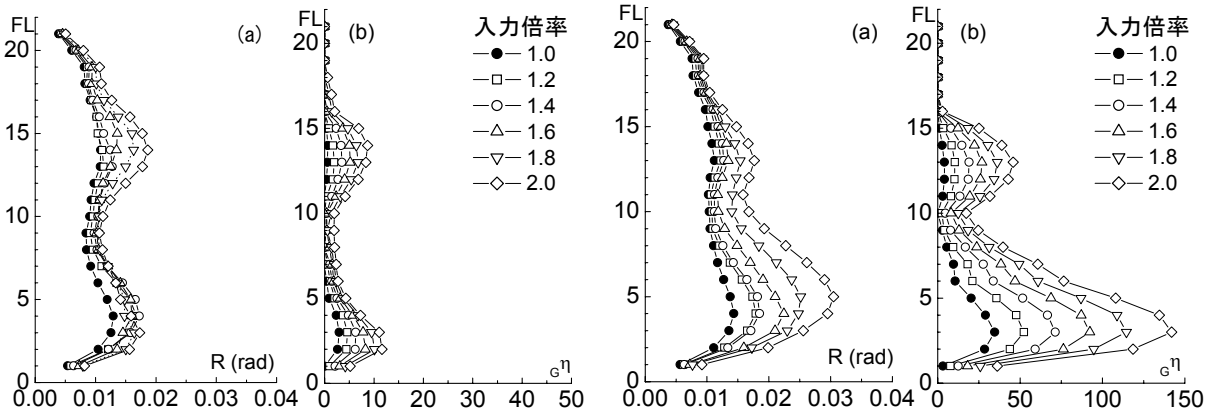


(a) 速度応答スペクトル　　(b) エネルギースペクトル

図 3　地震動のスペクトル比較

2.3 フレームモデルの応答性状

地震動の応答倍率を 1.0 倍～2.0 倍まで変化させた解析を実施し、21-F, 35-Fの応答性状を検討する。図 4 に，層間変形角Rと梁の累積塑性変形倍率${}_G\eta$を示す。図より，(ⅰ)El Centro入力時の応答を見ると 1.0 倍入力のとき，大きな損傷集中は発生していないが，入力レベルを増大させたときには，高層と低層で応答が大きくなることが確認できる。一方，(ⅱ)C-SAN-EW入力時には 1.0 倍入力のときの応答の傾向に大きな差はないが入力レベルが増大した際には低層で大きな応答を示している。また，入力レベルが増大した際には，損傷を受けた特定の層にさらに大きなエネルギーが入力され${}_G\eta$の増大が顕著となる。紙幅の都合上ここでは示さないが、35-Fでも同様の傾向が確認されている。



（ⅰ） El Centro 入力時　　（ⅱ） C-SAN-EW 入力時

図 4　21-Fの高さ方向の応答分布（(a) 層間変形角 R, (b) 梁の累積塑性変形倍率 ${}_G\eta$）

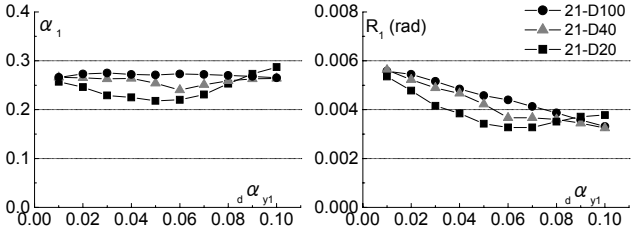
３．ダンパーの設置状況が応答に与える影響

3.1 ダンパー量の違いによる応答の変化

第 1 層のダンパーの降伏せん断力係数${}_d\alpha_{y1}$を変化させて，C-SAN-EW（1.0 倍）を入力地震動とした際の第 1 層の最大せん断力係数α_1，第 1 層の層間変形角R_1が最小となるときのダンパー量を確認する。図 5 に，21modelでの結果を示す。21-D100 では，2 つの応答が最も低減されている${}_d\alpha_{y1}$ = 0.06 を以降の解析に採用する。部分配置モデルでのダンパー量の違いによる応答の変化に着目すると，21-D40, 21-D20 ともに明確な最小値は見られない。そこで，ダンパーの塑性履歴エネルギー${}_dW_p$および主架構の塑性履歴エネルギー${}_fW_p$を，全体の塑性履歴エネルギーW_pに対する割合として図 6 に示す。21-D100, 21-D40 は，${}_d\alpha_{y1}$の増加に伴い${}_fW_p/W_p$が減少し，${}_d\alpha_{y1}$ = 0.04 以上において主架構が無損傷（${}_fW_p$ = 0）となる。21-D20 でも，${}_d\alpha_{y1}$の増加で主架構の損傷が抑えられる傾向にあるが，${}_d\alpha_{y1}$ = 0.06 でほぼ頭打ちとなる。以上より，部分配置モデルにおいても，${}_d\alpha_{y1}$ = 0.06 のダンパー量とした。

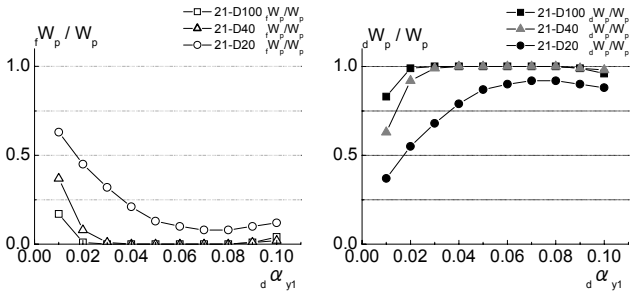
35modelの場合は，ダンパー配置による短周期化に伴い，入力エネルギーが増大するため，${}_d\alpha_{y1}$を変化させたときに，α_1, R_1が明確な最小値とならなかった。そこで，本研究では 21-D100 と同じ耐力比（ = ${}_dQ_{y1}/{}_fQ_{y1}$，${}_fQ_{y1}$：第 1 層のいずれかの部材が全塑性モーメントに達したときのせん断力）となる${}_d\alpha_{y1}$を用いることとし，35-D100, 35-D40, 35-D20 では${}_d\alpha_{y1}$ = 0.026 とした。

表 2 に，各モデルでの 1 次固有周期および各地震動入力時のV_Eを示す。ダンパーを設置することで周期変動によるV_Eの変化の幅をみると，特定の周期帯を持つC-SAN-EWでの変動が大きいことが分かる。35modelのように、ダンパーを設置することで，建物固有周期が地震動のもつ特定の周期帯に近づく場合，ダンパーを部分配置にすることで周期変動を小さくし、入力エネルギーの増大が緩和できる。



(a) 層せん断力係数 α_1　　(b) 層間変形角 R_1

図 5　異なるモデルにおけるダンパー耐力と応答の変化



(a) ${}_fW_p$ / W_p　　(b) ${}_dW_p$ / W_p

図 6　ダンパー耐力と塑性履歴エネルギー分担率（C-SAN-EW）

表 2　解析モデル名称・固有周期・
入力エネルギーの速度換算値

階数	ダンパー配置階	モデル名称	一次固有周期 (sec)	入力エネルギーの速度換算値V_E (m/s)		
				El Centro	ART HACHI	C-SAN-EW
21	-	21-F	2.41	1.38	1.12	3.66
	1-21	21-D100	1.75	1.35	1.83	2.78
	1-9	21-D40	1.93	1.38	1.70	3.42
	1-4	21-D20	2.15	1.29	1.30	3.49
35	-	35-F	4.07	1.61	2.56	3.67
	1-35	35-D100	3.19	2.20	2.94	5.99
	1-14	35-D40	3.44	1.86	2.60	5.31
	1-7	35-D20	3.70	1.75	2.64	4.60

3.2 ダンパーの変形とエネルギー吸収

曲げせん断モデルを作成する際に用いられる手法[8]を用いて，層間変形δ_{Ti}に対するせん断変形δ_{si}を求め，せん断変形比（δ_{si} / δ_{Ti}）を評価する。さらに，層間変形に対するダンパー変形の水平方向成分の割合を，ダンパー周辺架構の影響を反映したダンパーの変形効率（実効変形比）も評価する。図 7(a), (b)に，せん断変形比と変形効率の高さ方向の分布を示す。上層でせん断変形比・変形効率ともに低下していることが確認できる。図 7(a)のせん断変形比の評価では，ダンパー周辺架構の局所的な変形を評価できていないため，図 7(b)の変形効率に比べ上層ほど値が小さくなる傾向が鈍い。すなわち，図 7(a)から作成した曲げせん断モデルでは，ダンパーの変形を過大に評価することになり，超高層建物にダンパーを配置する場合には，部材レベルでの解析により変形効率を検証しておく必要がある。図 7(b)より、ダンパーを部分配置した 21-D40，21-D20 では，下層のダンパー設置層において変形効率が増加し，全層配置（21-D100）に比べてダンパー1 基当たりの効率が向上していることが確認できる。しかし、ダンパー1 基当たりに蓄積される疲労も大きくなる点に注意する必要がある。

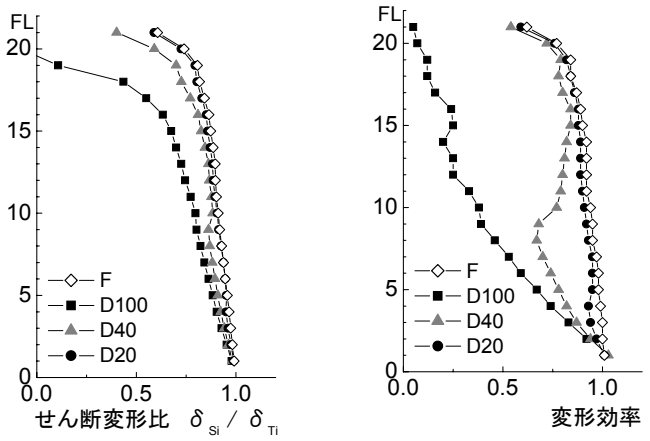


図 7　21model のダンパー効率

3.3 層間変形と梁端損傷

図 8(ｉ), (ⅱ）に 21 および 35modelでの、C-SAN-EW入力時の各層の(a)層間変形角Rと(b)梁端の累積塑性変形倍率$_G\eta$の最大値を示す。21modelの応答結果より，ダンパーを配置することに応答が低減していることが確認できる。特に$_G\eta$の低減は顕著である。これは，ダンパーによる制振効果と、ダンパー設置による周期変動（短周期化）による入力エネルギーの低減（表 2）によるものである。ただし，21-D20 では，設置範囲が十分でないためフレームに損傷が生じている。一方、35modelでは，図 3 からも分かるように、ダンパー配置に伴う短周期化により入力エネルギーが増加する条件下にあるため，ダンパー配置によるRの低減がさほど見られず，むしろダンパーを全層配置した 35-D100 の$_G\eta$は，ダンパーのない 35-Fに比べて増大している。特定の周期帯を有する地震動に対しては、ダンパー設置による周期変動に注意する必要がある。また、図 8 より，ダンパー設置層と非設置層の変わり目の層で層間変形角の変化が大きくなっていることが確認できる。図 9 に，21-D20 および 21-D40 での上下層のRの変化率R'を示す。入力の種類に関わらず，21-D20 の場合は 1.2 程度，21-D40 の場合は 1.4 程度となっている。これらの値は 1 階柱脚の固定度が高いことによる生じる最下層の値よりは小さいが，ダンパーを部分配置する際に，境界となる層の柱の塑性化に対して十分な注意が必要である。なお，35-D20 および 35-D40 でも同様の傾向であることを確認している。

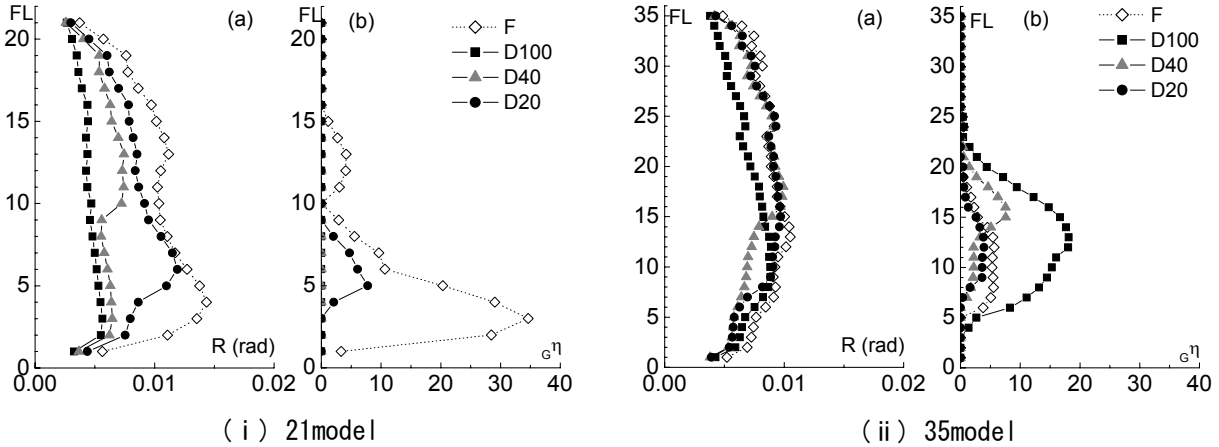


図 8　C-SAN-EW 入力時の高さ方向の応答分布　（(a) 層間変形角 R ，(b) 梁の累積塑性変形倍率 $_G\eta$）

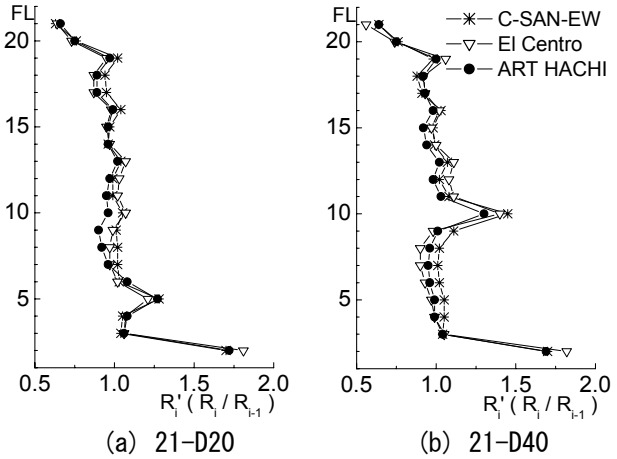
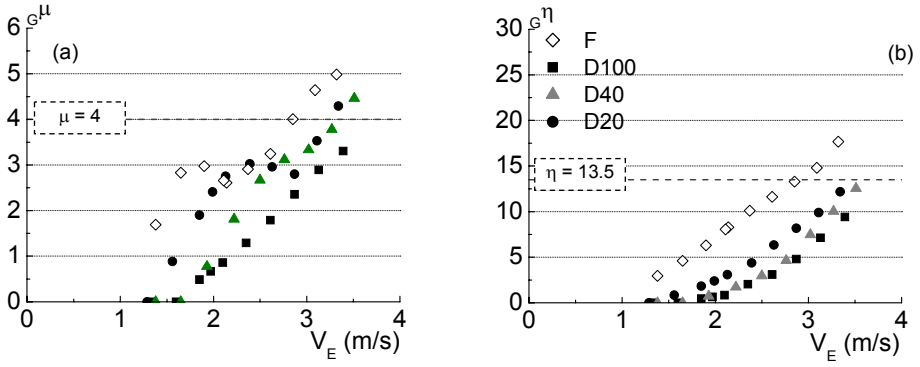


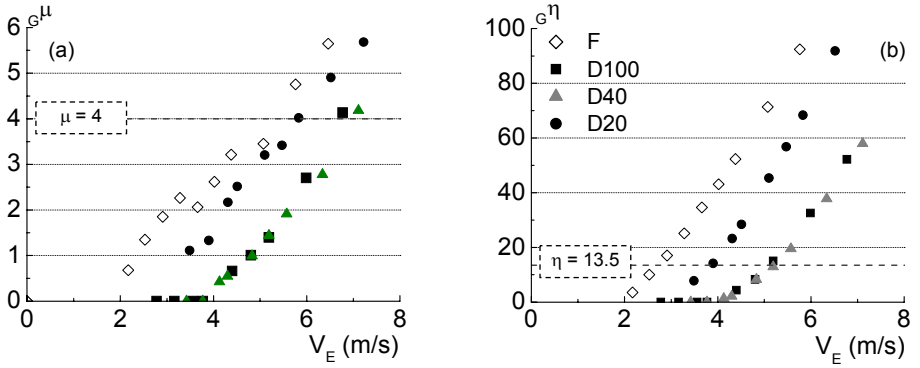
図 9　層間変形の変化率

3.4 入力倍率を漸増させた際の限界時入力エネルギー

地震動の入力倍率を漸増させて解析を行い，安全限界値に達するときの入力エネルギーを指標として耐震性能の検討を行う。安全限界値は，既往の研究[9]を参考に$_G\eta$ = 13.5，$_G\mu$ = 4 とした。図 10 に，V_Eの増加による梁の応答量の変化を示す。図中の破線は安全限界値を示している。El Centro では$_G\mu$と$_G\eta$がほぼ同じV_Eで安全限界値に達しているのに対し，長周期地震動であるC-SAN-EWでは，$_G\mu$より相当先に$_G\eta$が安全限界値を超えていることが確認できる。安全限界値V_Eについて，21-F と 35-Fの値に対する比を耐震性能として図 11 に示す。C-SAN-EWに対して、ダンパー40%配置（D40）は全層配置（D100）と同等の耐震性能を示していることが確認できる。

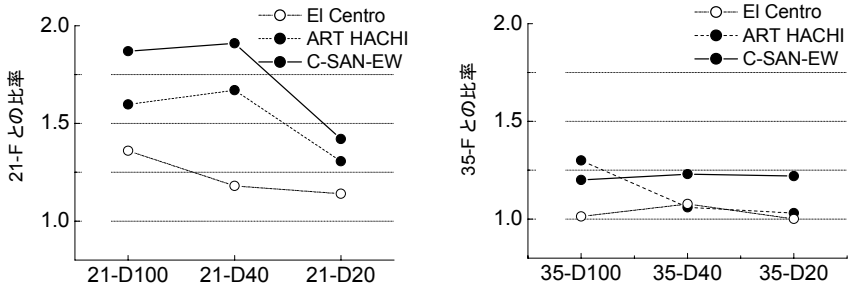


（ｉ） El Centro 入力時



（ii） C-SAN-EW 入力時

図 10　入力を漸増させた解析結果（(a) 梁の塑性変形倍率 $_G\mu$，(b) 梁の累積塑性変形倍率 $_G\eta$）



(a) 21model　　(b) 35model

図 11 21-F，35-Fに対する限界時入力エネルギーの比（○は$_G\mu$，●は$_G\eta$で決まる地震動）

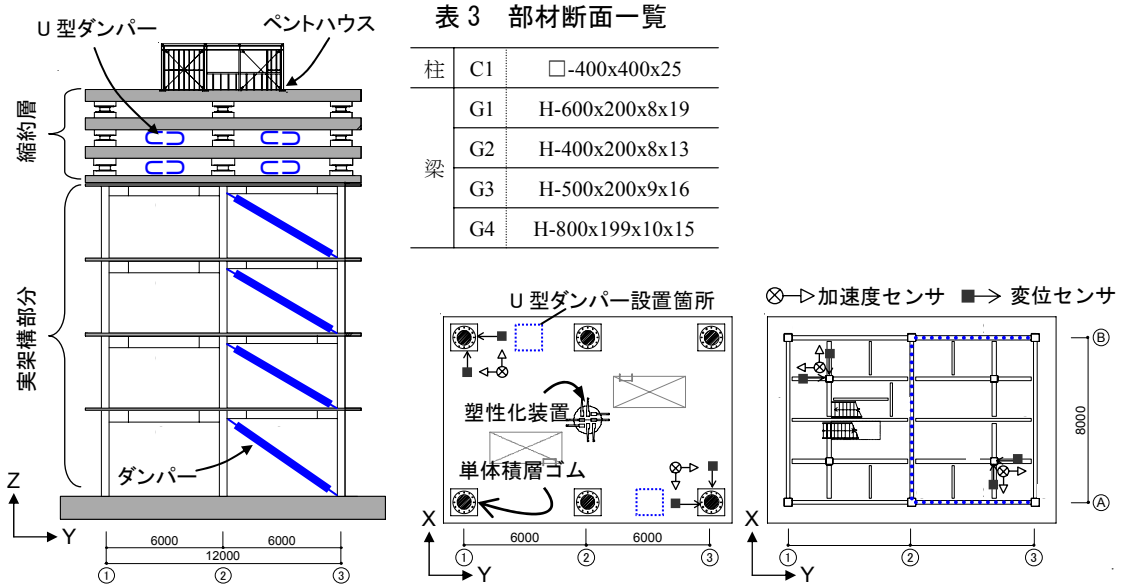
４．E-ディフェンスを用いた振動台実験

4.1　既存超高層建物を再現した試験体の概要

本研究では，E-ディフェンスにおいて行われた既存超高層建物を再現した実大規模実験[4],[5]を対象とし，実験からダンパー部分配置時の変形効率，応答低減効果を検証する。実験では，下層 4 層を実大規模架構，上層にコンクリート錘と積層ゴム・ダンパーを配置して超高層建物の応答を再現できる試験体を用いて，応答性状の検証を行っている。実験では，フレーム試験体（F-07）と高さ方向に 2/3 と 1/5 の範囲に履歴型ダンパーを配置した試験体（H-2/3，H-1/5）で加振を行っている。図 12 に試験体伏図・軸組図を，表 3 に部材断面を示す。図中には加速度・変位センサの設置位置も併せて示す。本研究では，Y方向の応答に着目して検証を行う。設計用地震動である El Centro レベル 2 地震動（EL2）と名古屋三の丸波[6]（SAN）の 2 つの応答結果について検証する。

表 3　部材断面一覧

柱	C1	□-400x400x25
梁	G1	H-600x200x8x19
	G2	H-400x200x8x13
	G3	H-500x200x9x16
	G4	H-800x199x10x15



(a)　軸組図　　(b)　縮約層平面図　　(c)　実架構部分平面図

図 12　試験体概要　（単位：mm）

4.2 ダンパー設置数の違いによる入力エネルギーの変化

図 13 に，各試験体にEL2 とSANを入力した際の，実験結果より算出した入力エネルギー[5]の速度換算値V_Eをエネルギースペクトルにプロットして示す。なお、プロットは，1FLとRFLの加速度の伝達関数より求めた周期でプロットしている[5]。図より，EL2 入力時には各試験体のV_Eは大き

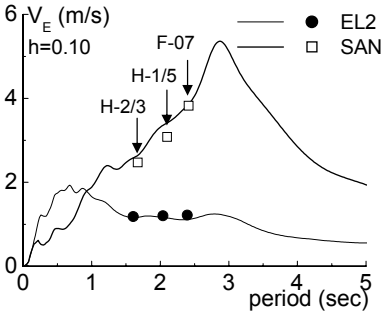


図 13　エネルギースペクトルの対応

く変化していないことが分かる。しかし，特定の周期帯を有するSANでは，ダンパー配置による周期変動で各試験体のV_Eが大きく変化していることが分かる。また，V_Eとエネルギースペクトル（h=10%）は良い対応を示し，文献 5 で行ったダンパー非設置の試験体と同様に、制振ダンパーを設置した試験体においても入力エネルギーの安定性と実用性が示された。

4.3 ダンパー部分配置時の応答性状

図 14 に，H-2/3 と H-1/5 のダンパーの変形効率を示す。EL2，SAN のどちらの地震動においても，下層 1/5 に部分配置した H-1/5 の方が H-2/3 に比べ変形効率が上昇している。これは，解析と同じ傾向であり，部分配置により下層のダンパーで効率が上昇していることが実験でも確認できた。図 15 に，層間変形角 R の高さ方向の応答分布を示す。応答値は 21 層に置換した際の等価な層にプッロトしている。EL2 では各試験体の入力エネルギーが同程度であるが，部分配置により応答が低減されている。SAN では，ダンパーによる制振効果と入力エネルギーの減少により応答が低減されており、ダンパーの部分配置による制振補強効果が確認できた。

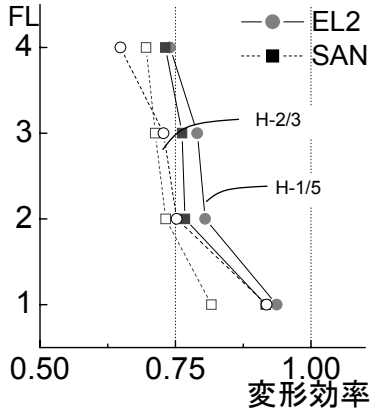


図 14　ダンパー変形効率

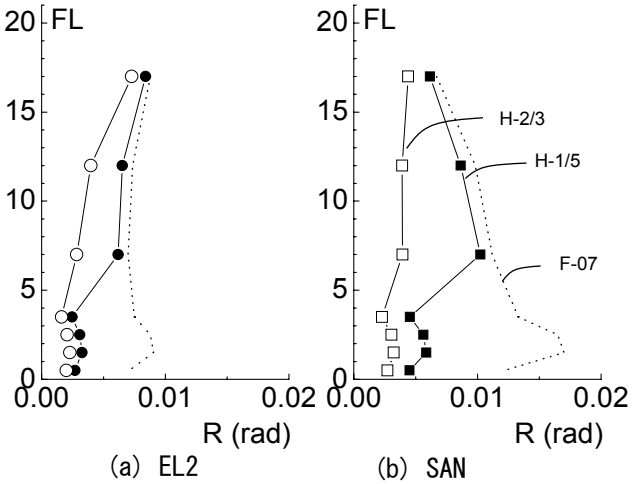


図 15　応答の高さ方向分布

５．まとめ

本研究では，長周期地震動を受ける超高層建物の下層階に履歴型ダンパーを部分配置した際の効果と影響について検証を行った。解析モデルを用いた時刻歴応答解析，実大規模実験から，得られた知見を以下に述べる。

中層から低層にかけてダンパーを部分的に配置すると曲げ変形の影響が低減されることでダンパーの効率的・集中的なエネルギー吸収が行われることが確認できた。

ダンパーを部分的に配置することで，ダンパー設置層での応答低減が確認された。非設置層においては，大きな応答低減は確認されなかったが，ダンパーのないモデルの応答を越えることはなかった。

解析において，ダンパー非設置層と設置層との変わり目の層で層間変形の変化率が 1.4 程度となった。柱脚の固定度が高いことによる最下層部の値よりは小さな値となったが，その付近の柱の塑性化には注意が必要である。

既存の超高層建物の下層部にダンパーを部分配置すると，安全限界までのエネルギー吸収能力

が増加する。本解析モデルでは，下層 40%にダンパーを配置した場合と全層にダンパーを配置した場合は同等となった。

実大規模の振動台実験においても、解析結果と同様の結果が得られ、ダンパーを部分配置することによる制振補強効果が確認できた。

謝辞

本研究は文部科学省が推進する「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の一環として行われたものです。（独）防災科学技術研究所内に設置された「都市施設の耐震性評価・機能確保研究運営委員会（委員長：和田章，東京工業大学教授）」において多くの貴重なご助言をいただきました。

参考文献

[1] 平田淳二，寺本隆幸：各種ダンパーを用いた鋼構造建物の応答性状に関する研究－ダンパー配置による影響－，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.569-570，2008.9

[2] 島田侑，佐藤大樹，長江拓也，北村春幸，福山圀夫，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 75 巻，第 649 号，pp.549 -557，2010 年 3 月

[3] 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性，2007.12

[4] 長江拓也，鍾育霖，島田侑他：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 74 巻，第 640 号，pp.1163-1171，2009.6

[5] 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-ディフェンス振動台実験－，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 653 号，pp.1217-1226，2010.7

[6] 愛知県建築住宅センター：名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版），(財)愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計用入力地震動検討部会，pp.1-48，2004.6

[7] 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

[8] 武藤清：耐震設計シリーズ／応用編　構造物の動的設計，丸善，1977.1

[9] 北村春幸，宮内洋二，浦本弥樹：性能設計における耐震性能判断基準値に関する研究－JSCA 耐震性能メニューの安全限界値と余裕度レベルの検討－，日本建築学会構造系論文集，第 604 号，pp.183-191，2006.6