

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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：その1 E-ディフェンス実験概要(構造)
Title	
著者(和文)	野崎 康行, 大内 隼人, 島田 侑, 佐藤 大樹, 長江拓也, 北村春幸, 中島正愛
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Masayoshi NAKASHIMA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 80, , pp. 349-352
Citation(English)	, Vol. 80, , pp. 349-352
発行日 / Pub. date	2010, 2
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110008729971

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

その1 E-ディフェンス実験概要

構造一振動

準会員 ○ 野崎康行^{*1} 正会員 大内隼人^{*1} // 島田侑^{*1}
 // 佐藤大樹^{*1} // 長江拓也^{*2} // 北村春幸^{*1}
 // 中島正愛^{*2}

高層建物 長周期地震動 震動台実験

制振構造 エネルギー

1. はじめに

大都市に建設されている超高層建物が、海溝型の巨大地震によって発生する長周期地震動を受けた場合、建物に入力されるエネルギーは、これまでの設計で標準的に用いられていた検討用地震動より大きい値となる可能性が示唆されている。東京、名古屋、大阪などの大都市を中心に数多く存在する超高層建物は、社会の中核機能を担っているものが多く、社会全体が長周期地震動により甚大な被害を受ける恐れがある。

そこで、2007年度3月にE-ディフェンスにおいて、初期の超高層建物を模擬した実大規模の試験体で実験¹⁾が行われた。実験から、長時間繰り返し変形することにより、柱梁接合部が破断し、超高層建物の長周期地震動への耐震性能向上の必要性が確認された。

このような背景のもと、2009年度9月に同試験体を用いて、ダンパーによる制振補強効果を検証する実験が行われた。本報では、2009年度と2007年度の実験結果を比較し、ダンパーの導入による応答低減効果検証を目的とする。本報その1では、2009年度のE-ディフェンス実験の概要、ダンパー種別、配置による固有周期及び、エネルギーの変化について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体の縮約手法

試験体は、初期(1965~1980年)の平均的な規模の高層建物として地上21階(高さH=81m, 1次固有周期T=2.4s)を想定する。しかし、E-ディフェンス震動台の制約上、全体を再現することは不可能なため、加振可能な規模まで縮約されている¹⁾。試験体は、下層4層を実大規模架構とし、5~7層は5層分の重量を持たせたコンクリート錘を3層積層する。錘の間には5層分の復元力特性を再現できるように、各層に「単体積層ゴム6基」と「積層ゴムと鋼製U型ダンパーを直列に結合した塑性化装置1基」を組み込んでいる。これにより、試験体に超高層建物の応答を再現させている。6FL, 7FL, RFLは、それぞれ想定21階建物の9階、14階、19階の応答に対応する。

2.2 試験体概要

鋼材は、初期の高層建物によく用いられたSM50Aに近いSM490Aを用いる。また、初期の高層建物の部材を参照し、梁せいや、フランジ、ウェブの幅厚比が近くなるように部材断面を選択した。

図1(a), (b)に試験体軸組図, (c)に平面図を示す。実大架構部分において、架構平面は桁行方向2スパン、梁間方向1スパンで、 $C_0=0.3$ に対する許容応力度設計により決定される。設計時に梁のスラブの合成効果は剛性には考慮し、強度は無視した。

2007年度3月の実験を踏まえ、2009年度の実験体では梁端に18箇所補強を施した。図1での▽部分が補強箇所である。また、実架

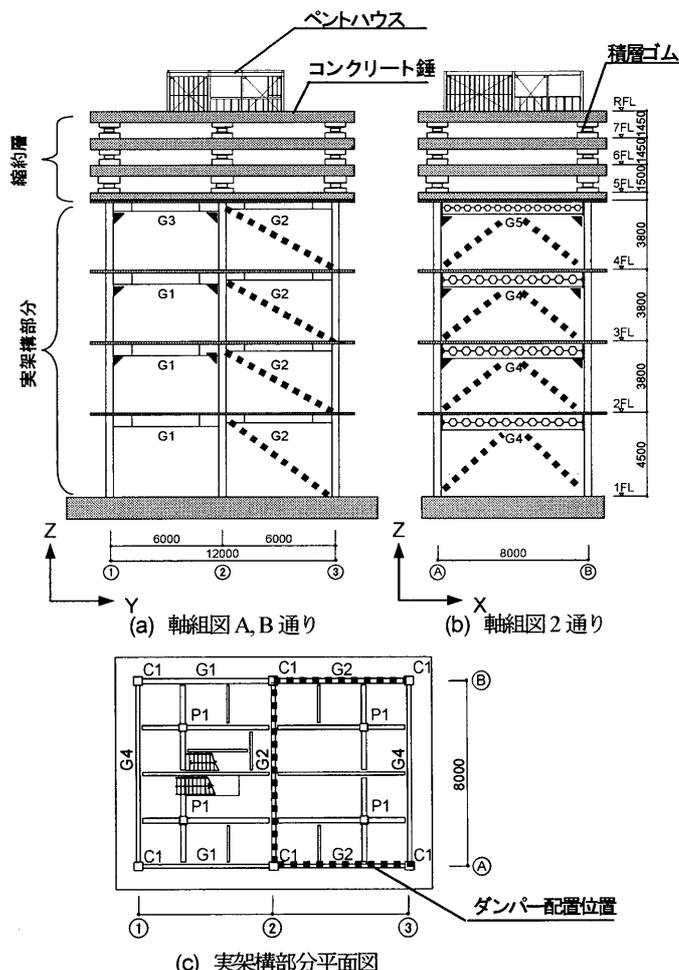


図1 試験体図 (単位: mm)

構部分および縮約層にダンパーを設置した。図1および図2(a)の中に、合わせてダンパーの設置箇所を示す。制振機構として、鋼製ダンパー(SN400B)とオイルダンパー(400 kN)を使用する。また、縮約層の鋼製ダンパーにはU型ダンパーを用いる。本年度の実験では、試験体屋上に室内の被害状況を確認するためにペントハウスが設置されている。

2.3 計測概要

図2に、計測機器設置箇所を示す。本実験では、各階加速度、層間変形、柱・梁とダンパーの歪みを中心に800ch程度の計測している。ここでは、エネルギーの算出に使用した計測項目のみ述べる。図2(a), (b)に示す位置に床加速度(絶対加速度)および層間変形を計測するためのサーボ型加速度センサおよびレーザー変位センサを設置している。実架構部の層間変形は、上階の小梁(H-400x200x8x13)に剛接した角形鋼管柱(ϕ 350x350x16, P1)をターゲットとし、床スラブに設置した変位センサで計測する。加振において試験体の振れがほとんど確認されなかったため、本報ではA-3通側(図2)で計測された絶対加速度および層間変形を代表値として用いることとする。なおダンパーの計測概要はその2, その3で述べる。

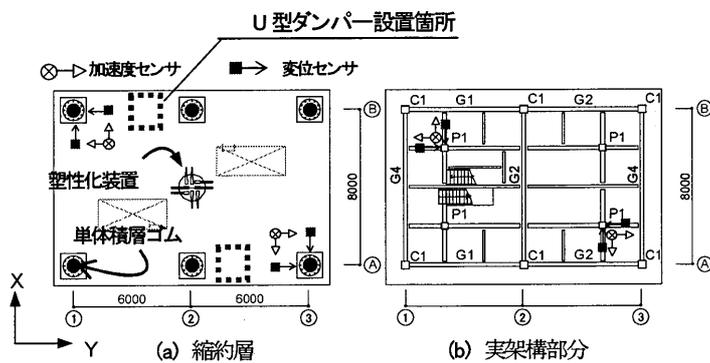


図2 計測センサ設置位置 (単位: mm)

2.4 試験体名称の定義

表1と図3に試験体名称、ダンパーの種類と配置範囲を示す。ダンパーの配置範囲として、鋼製ダンパーを実架構部分と縮約層の5, 6層に設置する場合(H-2/3)、鋼製ダンパーを実架構部分のみに設置する場合(H-1/5)、オイルダンパーを実架構部分のみに設置する場合(V-1/5)で加振を行った。また、ダンパーを設置しない場合(F-09)でも加振を行った。2007年度の試験体は、F-07と呼ぶ。

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	-	-	

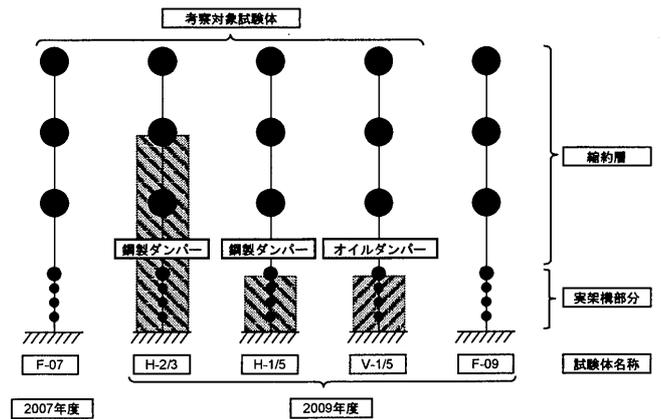


図3 試験体名称

2.5 入力地震動概要

地震動は、標準波のEl centro レベル2地震動(最大速度を50kineに基準化) (EL2), 長周期地震動である東京気象庁波(TOK), 東京東扇島波(HOG), 名古屋三の丸波(SAN)を用いて2方向同時入力を行う。入力方向はEL2, TOK, HOG, は長辺方向(Y方向)にNS成分, SANはEW成分を入力している。

図4に、地震動の加速度波形を示す。図中の e_{50} は加速度波形より求めた実効継続時間であり⁴⁾, SANはEL2に比べ約4.8倍の e_{50} を有している。

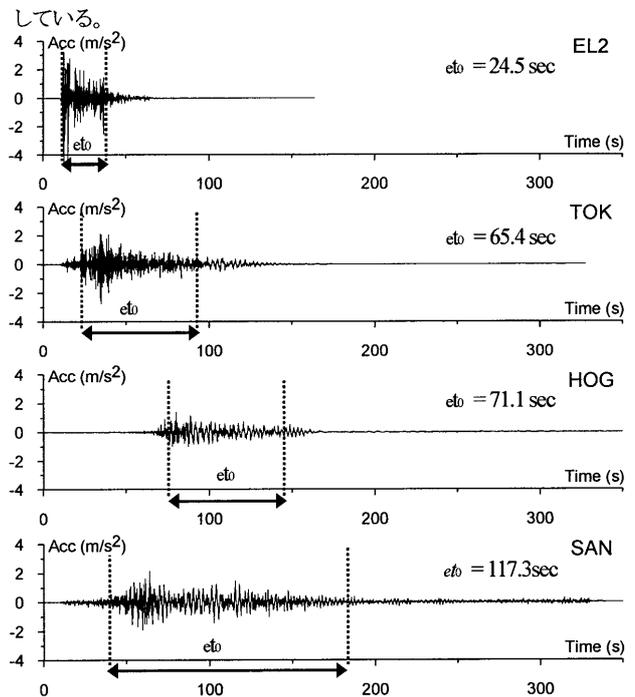


図4 地震動の時刻歴波形

図5に、地震動の(a)速度応答スペクトル($h = 5\%$), (b)エネルギースペクトル($h = 10\%$)を示す。スペクトルは、各地震動入力時に試験体基礎上で計測された加速度記録を用いて描いている。図5より、長周期地震動であるHOG, SANは、3秒付近にスペクトルのピー

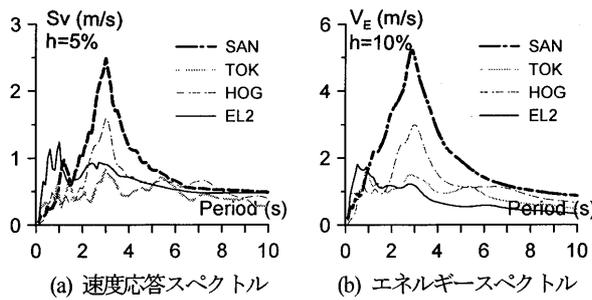


図5 入力地震動のスペクトル

クを有していることがわかる。

3. 事前解析

長周期地震動においては、震源特性と地下構造に起因したスペクトルのピークが「特定の周期帯」^{4), 5)}に存在することが知られていることから、ダンパーを設置する場合にはその固有周期変動による影響を考慮して耐震性能を評価する必要がある。

3.1 試験体のモデル化

実験を行う前に、立体解析モデルを作成し、事前解析を行った。解析モデルは、2007年度実験結果をもとに作成し、2009年度の実験に用いるダンパーを配置した解析モデルを作成した。図6に、解析モデルの(a)基準階伏図、(b)軸組図を示す。各部材の強度は、表2に示す材料試験結果をもとに設定する。2007年度試験体の弾性範囲での実験結果より層せん断力、層間変形の履歴曲線を求め、そこから求まる各層剛性の値と合致するように、解析モデルでは、スラブの合成効果による剛性増大率 ϕ を1.4-1.8の範囲で設定した。ただし、5層の梁は、実験結果より直上のコンクリート錘の影響を受けていたため、 ϕ を7.0-9.9の範囲に設定した。縮約層は、設置した積層ゴムと塑性化装置の復元力特性を、MSSでバイリニア型にモデル化した。

表3に、固有周期、表4に、層剛性の解析と2007年度実験値の比較を示す。

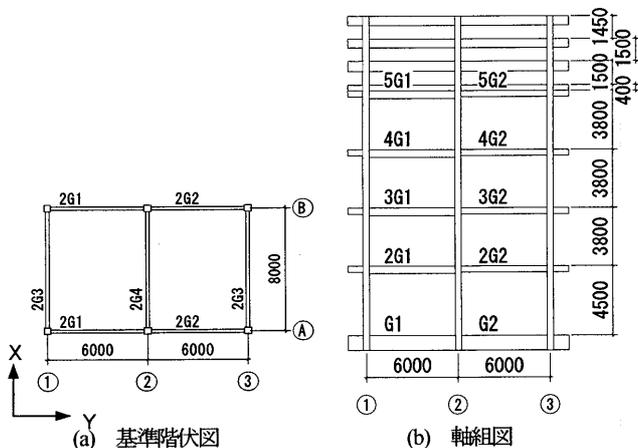


図6 解析モデル概要 (単位:mm)

表2 材料試験結果 (単位N/mm²)

	□-400	H-600	H-400	H-500	H-800	H-650
降伏強度	343	357	426	366	373	344
引張強度	515	532	576	532	526	514

表3 固有周期の比較 (単位:sec)

	X			Y		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
実験	2.22	0.84	0.53	2.22	0.83	0.53
解析	2.14	0.85	0.55	2.16	0.86	0.55

表4 層剛性の比較 (単位:kN/cm)

層	X			Y		
	実験	解析	実験/解析	実験	解析	実験/解析
7	74.1	73.1	1.01	73.4	73.2	1.00
6	105.5	117.0	0.90	117.1	117.1	1.00
5	153.8	150.4	1.02	150.5	150.5	1.00
4	790.8	794.7	1.00	697.0	695.3	1.00
3	563.5	587.7	0.96	558.1	567.3	0.98
2	564.1	578.8	0.97	552.9	562.1	0.98
1	638.7	660.6	0.97	610.8	623.0	0.98

3.2 ダンパーのモデル化

図7に、鋼製ダンパーの変位-荷重関係を、図8に、オイルダンパーの速度-荷重関係を示す。鋼製ダンパーは、座屈拘束ブレースを想定し、中心鋼材はSN400、両端L/4ずつを剛域長さとしてモデル化した。オイルダンパーの解析モデルは、取付部材等の剛性をバネ要素とするMaxwell型の減衰モデルとした。また、リリース荷重は400kNとする。

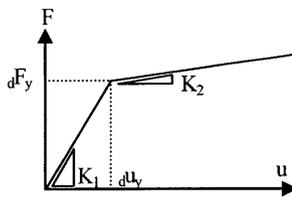


図7 鋼製ダンパー 変位-荷重関係

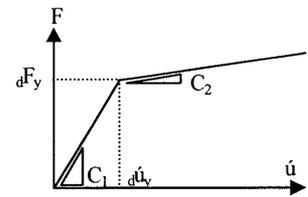


図8 オイルダンパー 速度-荷重関係

- 1次剛性 $K_1 = 816 \text{ kN/cm}$
- 1次粘性係数 $C_1 = 125 \text{ kNsec/cm}$
- 2次剛性 $K_2 = 8.16 \text{ kN/cm}$
- 2次粘性係数 $C_2 = 8.5 \text{ kNsec/cm}$
- 降伏耐力 $dF_y = 300 \text{ kN}$
- 取付部材等剛性 $dK = 4.5C_1$
- 降伏変位 $d\delta_y = 2.72 \text{ cm/sec}$
- リリース荷重 $dF_y = 400 \text{ kN}$
- リリース速度 $d\dot{\delta}_y = 3.2 \text{ cm/sec.}$

3.3 ダンパー配置による周期の変化

表5に、事前解析によって求めた、ダンパーを配置した際の解析モデルの1次固有周期を示す。表5から、オイルダンパーを設置したV-1/5は、フレームのみモデル(表2、解析)に対して、固有周期は変化しないが、鋼製ダンパーを設置したH-2/3では約25%、H-1/5では約8%、固有周期が短くなっていた。

表5 解析による1次固有周期 (単位: sec)

	H-2/3	H-1/5	V-1/5
X	1.64	1.99	2.14
Y	1.63	1.99	2.16

H-2/3 と F-07 の固有周期が大きく異なるため、3秒付近に「特定の周期帯」^{4), 5)}を有する SAN では、H-2/3 の入力エネルギーが F-07 より小さい値となる(図 5(b))。そこで、本研究では、H-2/3 と F-07 で同程度にエネルギーが入力されるよう地震動を作成した。ダンパー配置による周期の変動に合わせて、地震動の時間刻み Δt を圧縮し、スペクトルのピークを調整する。このとき Δt を圧縮した影響でエネルギーが減少するため、圧縮倍率の逆数を地震動の加速度に乗じた。 Δt の圧縮倍率が 0.8 倍のものを SAN08, 0.6 倍のものを SAN06, また、通常の三の丸波は SAN と呼ぶ。

図 9 に、調整した三の丸波の地震動時刻歴波形を、図 10 に、エネルギースペクトルを示す。図 9 から、 e_{t0} は、SAN08, SAN06 それぞれで SAN に比べ、約 0.8 倍、0.6 倍になっていることが確認できる。図 10 から、SAN08, SAN06 はそれぞれのピーク位置が SAN に比べ、短周期側に移動し、かつ V_E の値は SAN と等しいことが確認できる。

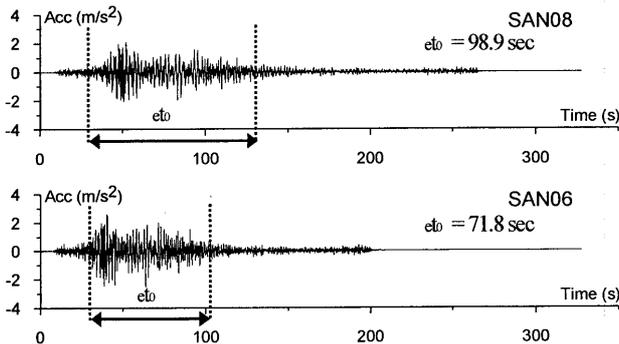


図9 SAN08, SAN06 地震動時刻歴波形

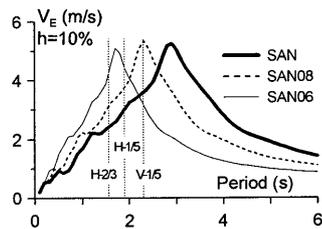


図10 三の丸波縮小によるスペクトルの変動

4. 実験結果におけるエネルギーの算出方法

以下に実験より入力エネルギーと、各層の吸収エネルギーを算出する手法を述べる。

時刻 t のときの入力エネルギー $E(t)$ は、下式で求まる。

$$E(t) = - \sum_{i=1}^N \int_0^t \dot{x}_i(t) m_i \ddot{z}_0(t) dt \quad (1)$$

ここで、 N : 層数、 $x_i(t)$: i 層の相対変位、 m_i : i 層の質量、 z_0 : 地動変位である。また、絶対加速度と質量から求めた層せん断力 $Q_i(t)$,

および層間変形 δ_i との履歴の面積より得られる i 層の吸収エネルギー $W_i(t)$ は、それぞれ次式の如く表される。

$$Q_i(t) = - \sum_{j=1}^N m_j \ddot{x}_j(t) \quad , \quad W_i(t) = \int_0^{\delta_i(t)} Q_i(t) d\delta_i \quad (2a, b)$$

ここで、 $\ddot{x}_i(t)$: i 層の絶対加速度である。全層の吸収エネルギー $W(t)$ は、下式で求まる。

$$W(t) = \sum_{i=1}^N W_i(t) = - \sum_{i=1}^N \int_0^t \dot{x}_i(t) m_i \ddot{x}_i(t) dt \quad (3)$$

ここで求まる $W(t)$ には、減衰により吸収されるエネルギーも含まれている。なお $\dot{x}_i(t)$ は、各層で計測された絶対加速度 \ddot{x}_i に 0.1Hz~10Hz のフィルターをかけた後、周波数領域で積分して絶対速度を求め、震動台加速度 \ddot{z}_0 から算出した速度 \dot{z}_0 を引くことで得ている。以降、その 2, 3 では式(1), (2a, b)よりエネルギーを算出している。

5. まとめ

本報その 1 では、2009 年度で使用した試験体の概要について述べた。ダンパーを設置することで固有周期が変化するため、スペクトルのピークを短周期側にずらした入力波を作成した。

その 2 以降から実験での結果を用いて、考察を行っていく。

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。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)において多くのご助言をいただきました。大林組 佐野剛志氏, 鹿島建設 田上淳氏, 清水建設 寺田岳彦氏, 大成建設 木村雄一氏, 竹中工務店 山本雅史氏には多大なご協力をいただきました。

参考文献

- 1) 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, 斎藤大樹, 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
- 2) 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, 斎藤大樹, 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,
- 3) 秋山広, 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) (社)日本建築学会: 長周期地震動と建築物の耐震性
- 6) 新日本製鐵(株): カタログおよび技術資料

*1 東京理科大学理工学部建築学科

*2 独) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター