

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	柱間隔の異なる超高層建物の長周期地震動に対する応答特性 その2 鋼製ダンパーによる制振補強
Title	
著者(和文)	助村浩太郎, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 佐野剛志
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, TUYOSHI SANO
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2039
Citation(English)	, Vol. 83, , 2039
発行日 / Pub. date	2013, 3
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/110009769786

柱間隔の異なる超高層建物の長周期地震動に対する応答特性
その3 粘性ダンパーによる制振補強

構造—振動

準会員 ○ 加藤 翼^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1} 同 助村浩太郎^{*1} 同 橋本奨吾^{*1}
同 北村春幸^{*1} 同 吉江慶祐^{*2} 同 石井正人^{*2} 同 宮崎 充^{*3}
同 佐々木和彦^{*3} 同 岩崎雄一^{*3}

超高層建物 長周期地震動 時刻歴応答解析
制振補強 鋼製ダンパー 粘性ダンパー

1. はじめに

本報その3では、その1で示した既存超高層鋼構造建物モデルに対してブレースタイプの粘性ダンパーを用いて制振補強を施し、その応答低減効果の検討を行う。さらに、その2で示した結果を用いて、鋼製ダンパーと粘性ダンパーの制振効果の比較し、その制振性能の違いを評価する。解析用入力地震動は、その1に示す KANTO, OSKH02 を採用する。

2. 粘性ダンパー概要

制振部材は、鋼管型粘性せん断ダンパー¹¹⁾(以後、粘性ダンパー)を使用し、ダンパー配置は、その2と同様とする。本報その3では、ダンパーの投入量として第1層のダンパーのせん断力係数 ${}_d\alpha_1$ を用いる。第1層のダンパーのせん断力 ${}_dQ_1$ (kN)は、式(1)より定まる。

$${}_dQ_1 = {}_d\alpha_1 \sum_{i=1}^N m_i g \quad (1)$$

ここで、 g : 重力加速度、 m_i : i 層の質量、 N : 層数である。第1層以上の i 層のダンパー投入量 ${}_d\alpha_i$ は、その2と同様に、図1の地震層せん断力係数の分布係数(Ai 分布)に基づく設計用層せん断力比分布を基に、5段階分布を用いた。図1の横軸は第1層のダンパーのせん断力 ${}_dQ_1$ に対する i 層のダンパーのせん断力 ${}_dQ_i$ (kN)の比率である。ダンパー1本当りの軸方向粘性抵抗力 F_{di} (kN)は、1層当りの設置ダンパー本数20本より、ダンパーの取り付け角度 θ_i を用い、式(2)より定める。

$$F_{di} = \frac{{}_dQ_i}{20 \cos \theta_i} \quad (2)$$

F_d とダンパーの軸方向速度 V_d の関係は図2で表され、 F_d は1次粘性係数 C_{d1} 、2次粘性係数 C_{d2} 、 V_d を用いて式(3a,b)で表される¹¹⁾。

$$F_d = C_{d1} V_d^{0.59} \quad |V_d| < 10d \quad (3a)$$

$$F_d = C_{d2} V_d^{0.4} \quad |V_d| \geq 10d \quad (3b)$$

ここで、 d : せん断隙間(=0.003m)である。 C_{d1} 、 C_{d2} は、せん断面積 S (m^2)および粘性体温度 t (=20°C)を用いて、式(4a,b)によりそれぞれ表される¹¹⁾。

$$C_{d1} = 41.16e^{-0.043t} (S/d^{0.59}) \quad (4a)$$

$$C_{d2} = 41.16e^{-0.043t} (S/10^{-0.19} d^{0.4}) \quad (4b)$$

本報では、1層の層間変形角が $R_1=1/100$ (rad)に達した時の軸方向速度 ${}_0V_{d1}$ を用いて、式(1)の ${}_d\alpha_1$ を定義する。 $R_1=1/100$ (rad)時の層間変位 ${}_0\delta_1$ (m)、主架構のみでの1次固有振動数 $f_1\omega_1$ (rad/s)、 θ_1 を用いて

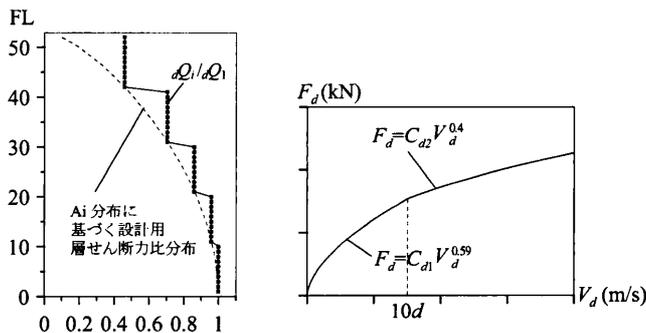


図1 ダンパーのせん断力比分布

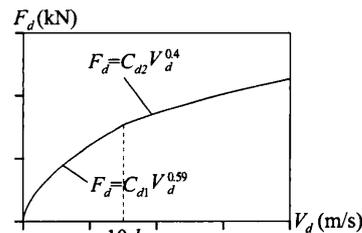


図2 粘性抵抗力

式(5)より算出される。

$${}_0V_{d1} = \frac{{}_0\delta_1 f_1 \omega_1}{\cos \theta_1} \quad (5)$$

3. 粘性ダンパーの制振効果の検討

本章では、ダンパー量 ${}_d\alpha_1=0.003\sim 0.030$ を用いて、粘性ダンパーによる応答低減効果の検討を行う。検討項目は、最大層間変形角 R 、層の最大塑性率 ${}_f\mu$ 、梁の最大塑性率 ${}_G\mu$ 、梁の累積塑性変形率 ${}_G\eta$ の全層における最大値に加え、入力エネルギー E に対する主架構のエネルギー吸収量の割合 ${}_fW_p/E$ 、ダンパーのエネルギー吸収量の割合 ${}_dW_p/E$ であり、その解析結果を図3に示す。ここで図3(a)-(d)中の破線は安全限界値を示しており、本報その1と同様に $R=1/100$ (rad)、 ${}_f\mu=2.0$ 、 ${}_G\mu=4.0$ 、 ${}_G\eta=13.5$ と定めた。

はじめに、層レベルの損傷について考察する。図3(a)より、最大層間変形角 R の低減率(${}_d\alpha_1=0.0$ における応答値に対する ${}_d\alpha_1=0.030$ における応答値の割合)に着目すると、KANTO 入力時では、3.2mモデルで60%、6.4mモデルで54%、OSKH02 入力時では、3.2mモデルで55%、6.4mモデルで36%程度であり、6.4mモデルに比べ3.2mモデルの方が、ダンパーを設置することによる R の低減効果は大きい結果となった。両モデルともに、KANTO 入力時では ${}_d\alpha_1=0.015\sim 0.030$ で、OSKH02 入力時では ${}_d\alpha_1=0.020\sim 0.030$ で、安全限界値である $R=1/100$ 以下に収まることを確認した。図3(b)の層の最大塑性率 ${}_f\mu$ より、OSKH02 入力時の ${}_d\alpha_1=0.020$ における応答値を見ると、最大層間変形角 R は同程度であった(図3(a))のに対して、層の最大塑性率 ${}_f\mu$ については3.2mモデルが6.4mモデルを上回っていることが分かる。これは全塑性に達する層間変形角が3.2mモデルの方が小さいためである(本報その1)。両モデルともに ${}_d\alpha_1=0.015\sim 0.030$ において、KANTO, OSKH02 入力時に安全限界値である ${}_f\mu=2.0$ 以下に収まることを確認した。

次に、部材レベルの損傷について考察する。図 3(c)の梁の最大塑性率 $g\mu$ に着目すると、KANTO 入力時については、 $d\alpha_1=0.030$ において、両モデルともに全層で $g\mu=0$ となり、弾性となることを確認した。OSKH02 入力時において、 $g\mu$ の低減率について見ると、3.2m モデルで 61%、6.4m モデルで 42% 程度であり、6.4m モデルに比べ 3.2m モデルの方が $g\mu$ の低減効果は大きい結果となった。図 3(d) より、梁の累積塑性変形倍率 $g\eta$ の低減率に着目すると、OSKH02 入力時において 3.2m モデルで 81%、6.4m モデルで 85% 程度であり、 $g\eta$ は、上記の応答値に比べて、ダンパー設置による応答低減効果が大きく、 $g\eta$ の低減効果については、6.4m モデルが 3.2m モデルを上回る事が確認された。OSKH02 入力時における 3.2m モデルでは $d\alpha_1=0.030$ で、6.4m モデルでは $d\alpha_1=0.020-0.030$ において安全限界値である $g\eta=13.5$ 以下に収まっており、3.2m モデルの方が安全限界値以下に抑えるのに多くのダンパー量を必要とすることが分かった。

続いて、吸収エネルギーについて考察する。図 3(e),(f) より、ダンパー量の増加に従って、主架構のエネルギーの吸収量の割合は減少し、それに伴いダンパーのエネルギー吸収量の割合は増加していくことを確認した。ダンパーのエネルギー吸収量の割合については、6.4m モデルが 3.2m モデルを上回っており、これは後述する実効変形比 α_e が、6.4m モデルの方が大きく、ダンパーが効率的に移動していることが影響していると考えられる。

以上より、最大層間変形角 R 、層の最大塑性率 $f\mu$ 、梁の最大塑性率 $g\mu$ における最大値に関する応答値については、3.2m モデルの方が低減効果大きいことが分かった。これは、3.2m モデルの $d\alpha_1=0.0$ における応答値が大きいことも影響していると考えられる。それに対して、梁の累積塑性変形倍率 $g\eta$ における累積値に関する応答値については、6.4m モデルの方が低減効果が大きく、ダンパーのエネルギー吸収量の割合から見ても、6.4m モデルの方が、ダンパーのエネルギー吸収効率が高いことが確認された。

4. 鋼製・粘性ダンパーの制振性能評価

鋼製ダンパーを配置したモデル(以後、HD モデル)と粘性ダンパーを配置したモデル(以後、VD モデル)の応答性状を比較することで鋼製・粘性ダンパーの制振性能の違いを評価する。ダンパー量は、

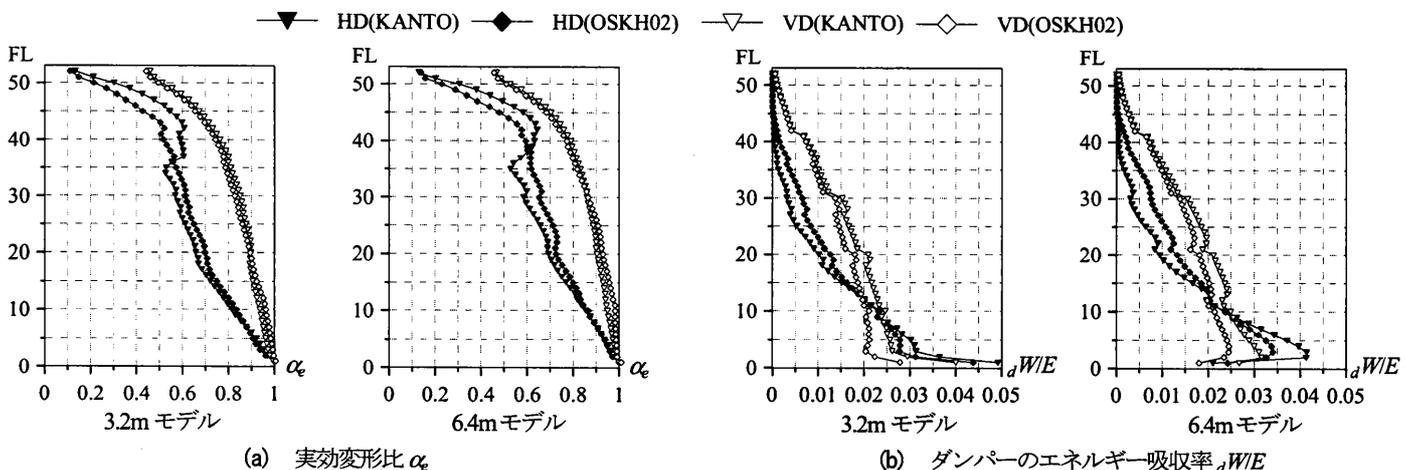


図 4 ダンパーの制振効果

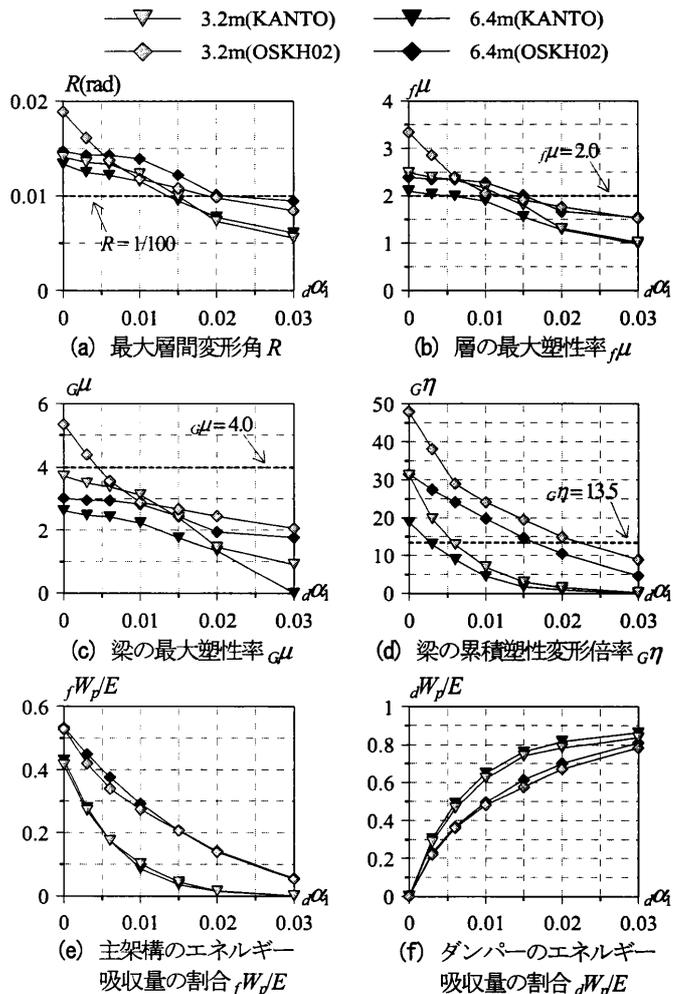


図 3 ダンパー量に伴う応答変化

表 1 各モデル入力エネルギー(3.2mモデル)

3.2mモデル	入力地震波	MFモデル	HDモデル	VDモデル
入力エネルギー E (kJNm)	KANTO	527430	290600	377250
	OSKH02	745120	477960	655620

表 2 各モデル入力エネルギー(6.4mモデル)

6.4mモデル	入力地震波	MFモデル	HDモデル	VDモデル
入力エネルギー E (kJNm)	KANTO	391040	303020	361550
	OSKH02	731710	526960	644990

本報その2の結果を踏まえ、鋼製・粘性ともに0.020を採用する。本章の図には、比較対象として、耐震モデル(以後、MFモデル)における応答値も併記する。KANTO, OSKH02 入力時における各モデルの入力エネルギー E (kNm)を表1, 2に示す。

はじめに、ダンパーの制振効果について考察するため、実効変形比 α_e およびダンパーのエネルギー吸収率 dW/E (各層のダンパーのエネルギー吸収量 dW を入力エネルギー E で除した値)の高さ方向分布を図4(a), (b)に示す。図4(a)の実効変形比 α_e に着目すると、全層にかけてVDモデルがHDモデルを上回っており、粘性ダンパーが鋼製ダンパーに比べて効率的に移動していることが分かる。VDモデルにおける α_e は、入力地震動によらず同等の値を示すのに対して、HDモデルの α_e は、入力地震動によって異なる値を示すことが確認

----- MF(KANTO) ——— MF(OSKH02) ▼ HD(KANTO)

できる。これは、鋼製ダンパーの等価剛性が変形に依存して変化することが原因と考えられる。図4(b)のダンパーのエネルギー吸収率 dW/E に着目すると、下層部においては、HDモデルの dW/E が、VDモデルの dW/E を上回っている。一方で、10層付近より上層においては、HDモデルの dW/E が、下層に比べ大きく低減し、VDモデルの dW/E を大きく下回る結果となった。なお、 α_e と dW/E は、3.2mモデルと6.4mモデルで比較すると、大きな違いは見られなかった。

次に、最大加速度 A 、最大層せん断力 Q 、最大層間変形角 R 、層の最大塑性率 $f\mu$ 、梁の最大塑性率 $g\mu$ 、梁の累積塑性変形倍率 $g\eta$ の高さ方向分布を図5(a)-(f)に示す。図5(a)の最大加速度 A に着目すると、3.2mモデル、6.4mモデルともにMFモデルと比べて、VDモデルでは、特に上層部と中層部における加速度が大きく抑えられてい

◆ HD(OSKH02) ▽ VD(KANTO) ◇ VD(OSKH02)

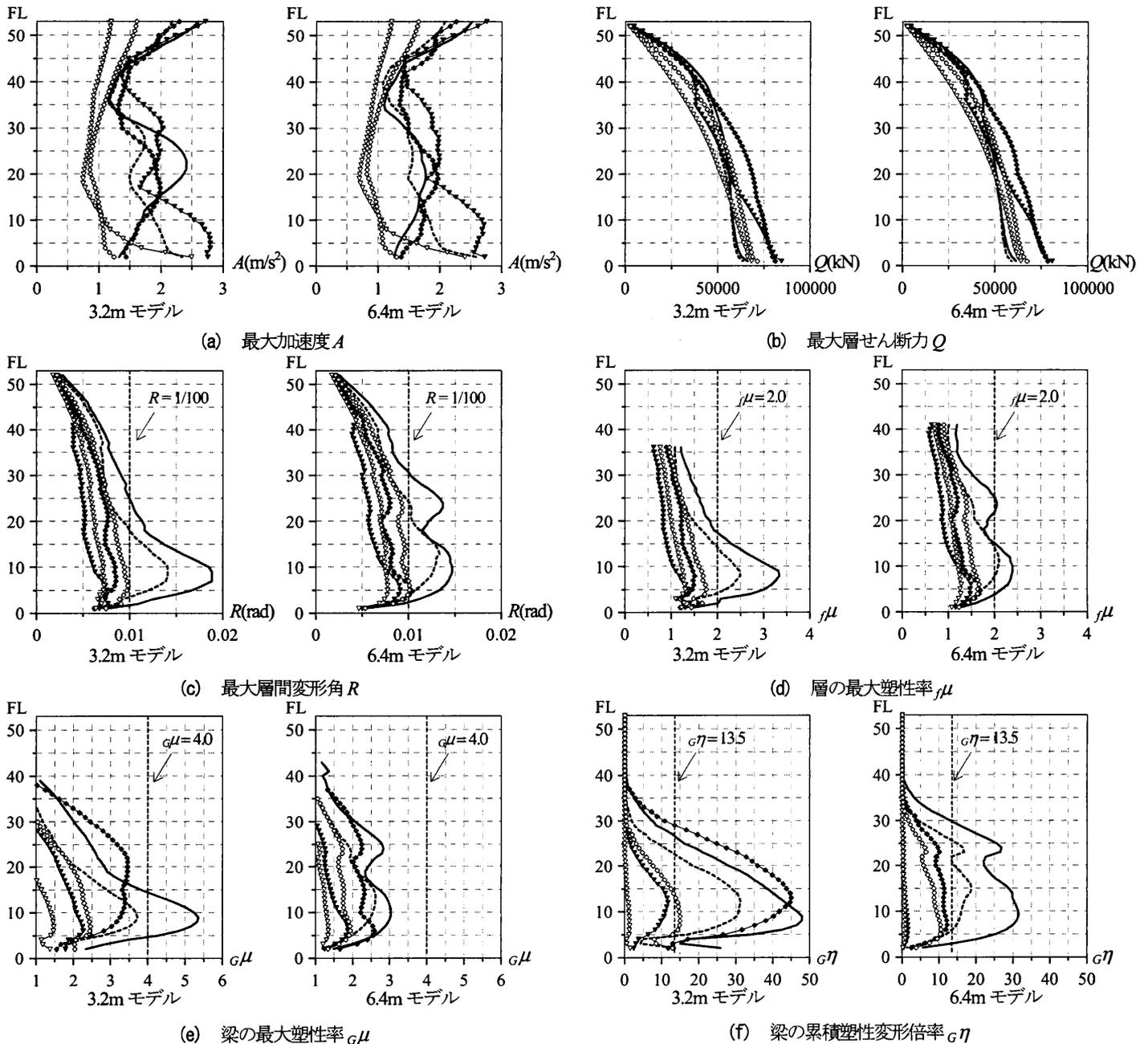


図5 応答性状の高さ方向分布

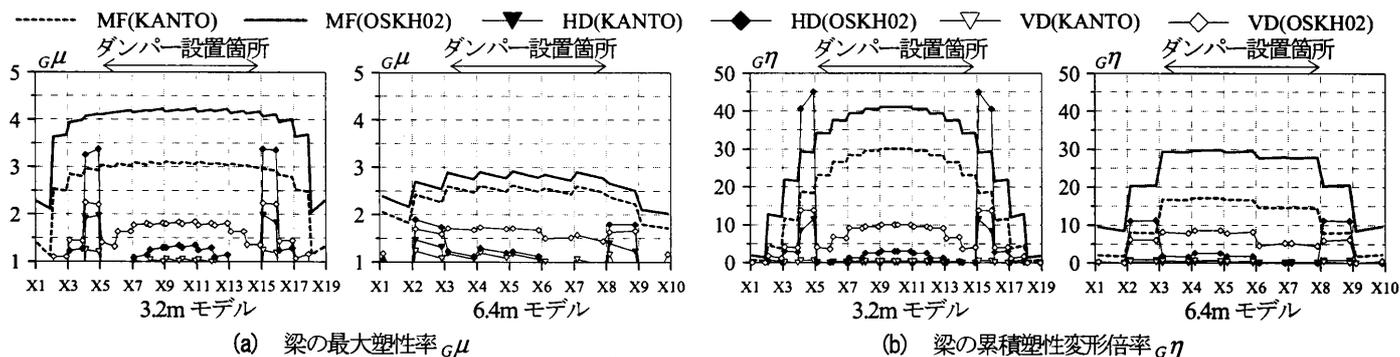


図6 損傷の平面方向分布(13FL)

ることがわかる。HDモデルにおいて、OSKH02入力時では、加速度に大きな変化は見られないが、KANTO入力時では、全層にかけて加速度が増大していることがわかる。VDモデルの頂部における加速度についてHDモデルと比較すると、両モデルともに、OSKH02入力時では70%、KANTO入力時では44%程度の加速度であり、VDモデルが小さな値を示すことが確認できる。図5(b)の最大層せん断力 Q に着目すると、両モデルともにVDモデルは、HDモデルに比べて、全層で小さなせん断力を示している。HDモデルについては、MFモデルに比べて特に下層部のせん断力が増大していることを確認した。HDモデルにおける A 、 Q の増大については、鋼製ダンパー設置による剛性増大による影響であると考えられる。

続いて、層レベルおよび部材レベルの損傷について考察する。図5(c)、(d)より、最大層間変形角 R 、層の最大塑性率 μ に着目すると、両モデルともにVDモデルは、HDモデルより全体的に大きな応答値を示している。図5(e)、(f)より、梁の最大塑性率 $g\mu$ 、梁の累積塑性変形倍率 $g\eta$ に着目すると、VDモデルの方がHDモデルより小さな応答値を示しており、3.2mモデルについては、KANTO入力時において、第18層以上の梁を全て弾性に留めている。3.2mモデルのHDモデルにおいて、OSKH02入力時に $g\mu$ 、 $g\eta$ が特出している層が見られ、 $g\eta$ については、MFモデルと同程度の応答値を示している。そこで $g\mu$ 、 $g\eta$ の平面方向分布を図6(a)、(b)に示し、HD・VDモデルにおける部材の損傷の特性を考察する。図6(a)の梁の最大塑性率 $g\mu$ に着目すると、3.2mモデルについては、HDモデルでダンパー設置箇所の両端の梁(以後、境界梁)に損傷が集中していることがわかる。VDモデルでは、OSKH02入力時のみ境界梁への損傷集中が見られるが、HDモデルの60%程度の $g\mu$ に収まっている。6.4mモデルについては、HDモデルにおいても3.2mモデルほど目立った損傷集中は見られなかった。図6(b)の梁の累積塑性変形倍率 $g\eta$ に着目すると、応答の傾向は $g\mu$ と同様だが、3.2mモデルのHDモデルにおける境界梁への損傷集中はより顕著になり、OSKH02入力時ではMFモデルの応答値を超える結果となった。VDモデルにおいては、HDモデルほどの増大は見られず、OSKH02入力時でHDモデルの30%程度の応答となっている。以上より、ダンパーを設置することによる損傷の低減効果について見ると、層レベルの損傷については、鋼製ダンパーの方が低減効果が大いと言えるが、部材レベルの損傷低減については、粘性ダンパーの方が効果的であるという結果が得られた。

5. おわりに

本報その3では、その1で示した既存超高層鋼構造建物モデルに対して、粘性ダンパーを用いて制振補強を施し、その応答低減効果を検討を行い、その2で示した結果を用いて、鋼製ダンパーと粘性ダンパーの制振性能の比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 粘性ダンパーによる応答低減効果は、ダンパー量の増加に伴い増加し、OSKH02入力時における3.2mモデルでは $g\alpha_1=0.030$ で、6.4mモデルでは $g\alpha_1=0.020\sim 0.030$ において、安全限界値として定めて値以下の応答値に抑えられることを確認した。
- (2) 最大値に関する応答値については、3.2mモデルの方が低減効果は大きいですが、累積値に関する応答値については6.4mモデルの方が大きい結果が得られ、ダンパーのエネルギーの吸収量の割合の結果と併せて、6.4mモデルの方がダンパーのエネルギー吸収効率が高いことが分かった。
- (3) 鋼製ダンパーは、層間変形を低減し、層の損傷を大きく抑えられることに加えて、下層部におけるダンパーのエネルギー吸収率が優れている。しかし、加速度、層せん断力の増大および境界梁への損傷集中を招く危険性があり、上層部においてダンパーの稼働効率が著しく低下することを確認した。
- (4) 粘性ダンパーは、加速度および梁の損傷を大きく抑えることができ、全層にかけてダンパーの稼働効率が高く、中層部から上層部にかけて、鋼製ダンパーを上回るエネルギー吸収率を示すことを確認した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性，2007.12
- 2) 土木学会，日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言，2006.11
- 3) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011.7
- 4) 長江拓也，鐘育霖，島田侑，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正受，有藤大樹，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
- 5) 日本建築学会長周期地震動WG：長周期地震動に対する公開研究集会，対象とする巨大地震動と地域，2011年3月
- 6) 平成23年度建築基準整備推進事業：超高層建築物への長周期地震動の影響に関する検討
- 7) 武藤清 監修，久田俊彦 編：超高層建築2 構造編，鹿島出版社
- 8) 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
- 9) 栗林晃司，佐藤大樹，北村春幸，山口路夫，西本晃治：実行変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの割合に基づく応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第76巻，第661号，543-552p，2011.3
- 10) 松宮智央，鐘育霖，長江拓也：現場接合形式を用いた超高層建物柱梁接合部に対するRC床スラブ付き耐震補強実験，日本建築学会構造系論文集，第653号，pp.1343-1350，2010.7
- 11) 沖村明彦，長島和央，持丸昌己，鈴木清春，鋼管型強性せん断ダンパー(CVD) その1ダンパー特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.101-102，2004.8

*1 東京理科大学 *2 (株)日建設計 *3 オイレス工業(株)