

E-ディフェンス実大 10 層試験体 8 階の建築設備の地震応答特性に関する研究
 (その1) 天吊りダクトの地震応答特性

Study on seismic response characteristics of building equipment on the 8th floor
 of the E-Defense ten-story steel specimen

(Part 1) Seismic response characteristics of hanging air ducts

技術フェロー ○水谷 国男 (元東京工芸大学・三建設備工業) 正会員 村田 孝友 (フジモリ産業)
 正会員 廣井 秀明 (フジモリ産業) 非会員 松本 龍之介 (フジモリ産業)
 非会員 藤原 淳 (防災科学技術研究所) 非会員 西 峻汰 (防災科学技術研究所)

Kunio MIZUTANI *1 Takatomo MURATA *2 Hideaki Hiroi*2 Ryunosuke MATSUMOTO*2
 Jun FUJIWARA *3 Ryota NISHI *3

*1 Former Professor, Tokyo Polytechnic Univ. / Sanken Setsubi Kogyo Co. Ltd. *2 Fujimori Sangyo Co. Ltd. *3 NIED

This report describes the results of verification experiments on air-conditioning ducts during an earthquake using the surplus space on the 8th floor of the " Shake-table test for assessing dynamic characteristics of building structures using a 10-story steel office building" conducted by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

1. はじめに

本報および次報では、防災科研による「10 層鉄骨造オフィス試験体による建物の動的特性評価実験」の試験体内 8 階の余剰空間を利用して、地震時の空調ダクトに関する検証実験を行った結果について報告する。

オフィスビルや工場などの空調設備は、一般に空調機器単体ではなく、ダクト等が繋がったシステム全体で機能を発揮しており、その一部分だけが損傷しても、空調設備全体の機能喪失もしくは大幅な機能低下を招く可能性がある。

そこで、我々は 10 層鉄骨造オフィス試験体の 8 階に、ダクトを実際に近い形で施工し、地震時のダクト設備の挙動を確認するとともに、実際の地震における損傷等の発生原因の推察や、現状の設備耐震設計・施工指針の妥当性検証に役立つデータ収集を目的として、2023 年 2/15~2/24 に震動実験を行った。

2. 試験体の概要

実験用鉄骨造オフィス試験体建物の骨組と実験に用いた地震波を図 1 に示す。試験体 8 階の実験対象ダクトの設置状況を図 2 に示す。

実験に用いたダクトの仕様を表 2 に示す。ダクトは鉄板ダクト、GW ダクト、発泡樹脂パネルダクト¹⁾ (以下 PIR ダクト) の 3 種類のダクトを施工した。ダクトの耐震支持間隔は、鉄板ダクトと GW ダクトは建築設備の耐震設計・施工指針 2014 年版²⁾ (以降、センター指針) の規定 (12m 以内に 1 か所) に従って 12m とした。

PIR ダクトは耐震支持間隔を 12m (PIR ダクト①) と 6m (PIR ダクト②) の 2 ケースとし、耐震支持間隔 6m のケースは自重支持間隔も 6m とした。

なお、詳細は後述するが、PIR ダクトの支持を全ねじボルトからワイヤー支持に変更した場合についても実験した。

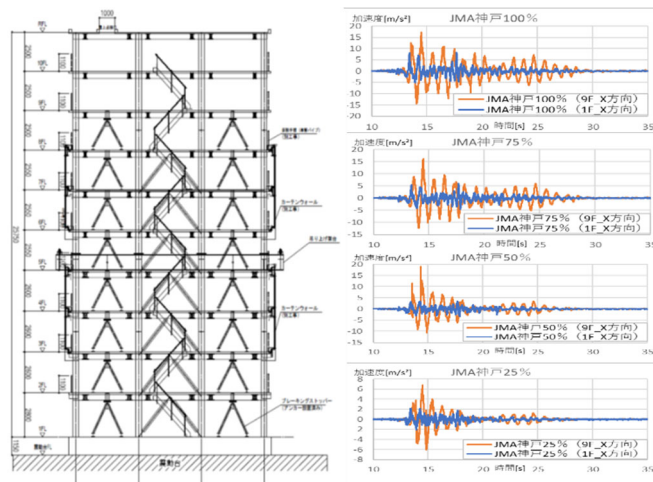


図1 試験体建物の骨組と実験に用いた主な地震波

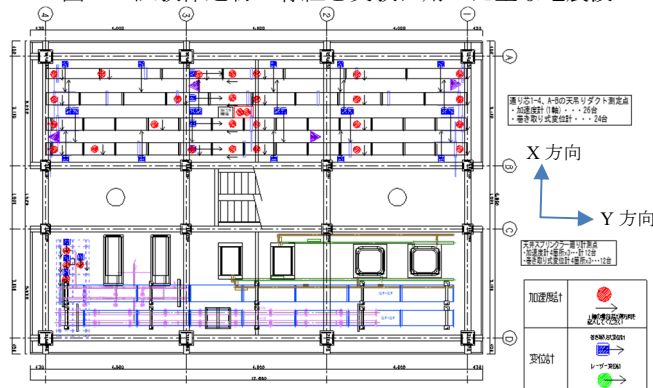


図2 8階の実験対象ダクト設備配置図

表2 実験に用いたダクトの仕様

ダクト	板厚 [mm]	接続方法	自重支持間隔	耐震支持種別・間隔
鉄板ダクト	0.5	1.74m 毎に共板工法	3m	A種 12m
GWダクト	25	1.23m 毎に接着材 + アルミテープ巻	2m	B種 12m
PIRダクト①	20	0.91m 毎に角コナール + コーキング + アルミテープ巻	3m	B種 12m
PIRダクト②			6m	B種 6m

*ダクトサイズは全て内径 300mm×300mm、天井スラブからダクト底部までの吊り長さは 1000mm

3. 実験結果

3.1 自由振動による各ダクトの振動特性

図4に各ダクトを自由振動させたときの加速度波形とスペクトル分布を示す。鉄板ダクトは、中央部（軸直角方向）の加速度ピーク周波数が1.65Hzで、軸方向のピーク周波数が1.70Hzであった。軸方向のピーク周波数が低い原因は、A種耐震支持材の軸方向の振れ止めが不十分であったためと考えられる。

GWダクトは、中央部（軸直角方向）の加速度ピーク周波数が1.37Hzであったが、2.8Hz付近や10Hz以上にもピークがみられ、ダクトの2次モードや吊ボルトの振動の影響が考えられる。GWダクトの軸方向ピーク周波数は14.1Hzで、低周波数にはピークがみられない。

PIRダクト①は、中央部（軸直角方向）の加速度ピーク周波数が1.98Hzで、軸方向のピーク周波数は14.53Hzであった。なお、軸方向には2Hz付近にもピークがみられた。

PIRダクト②は、中央部にもB種耐震支持が施工されているため、中央部（軸直角方向）の加速度ピーク周波数は8.91Hzと高くなっており、中間部も同様であった。また、軸方向のピーク周波数は15.14Hzで、PIRダクト①やGWダクトと同様であった。

3.2 ランダム波加振時の結果

図5にランダム波加振時の床およびダクト加速度の周波数分布（X方向＝ダクト軸直角方向）を示す。1階床の振動台では、0.1～10Hzの間で10～20galの加速度であるが、9階床（8階天井スラブ）では、1.14Hzを中心に加速度が増幅しており、建物の固有周波数が1.14Hz程度と考えられる。

鉄板ダクトおよびGWダクト中央部の加速度のピークは、天井スラブと同じく1.14Hzであるが、天井スラブよりも加速度が大きくなっており、特に1～3Hzの間の増幅率大きい。

PIRダクトの加速度は、0.1～5Hzの間は天井スラブと同じ値であるが、7～13Hzの間については、PIRダクト②が天井スラブとあまり変わらないのに対して、PIRダクト①の加速度は天井スラブの3～5倍大きくなっている。

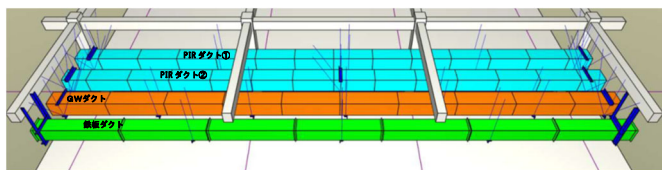
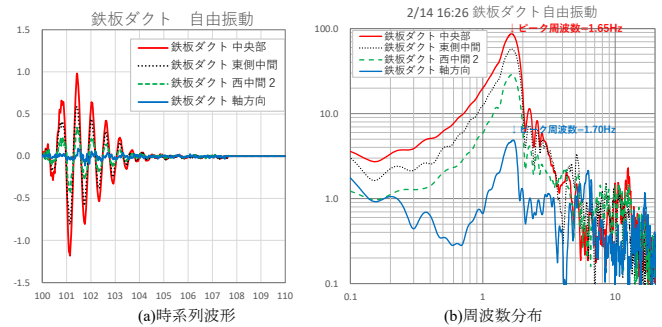
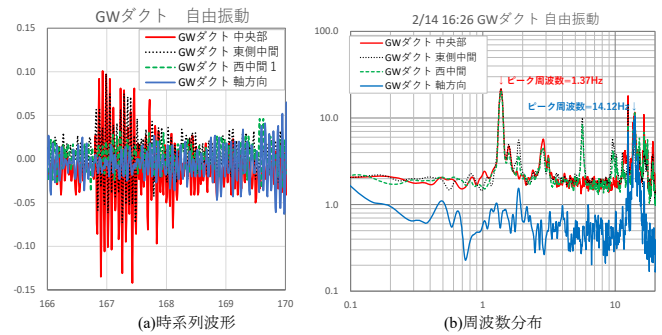


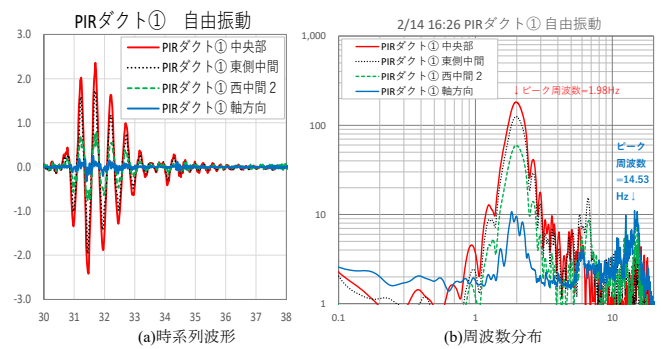
図3 各ダクトの自重支持・耐震支持状況



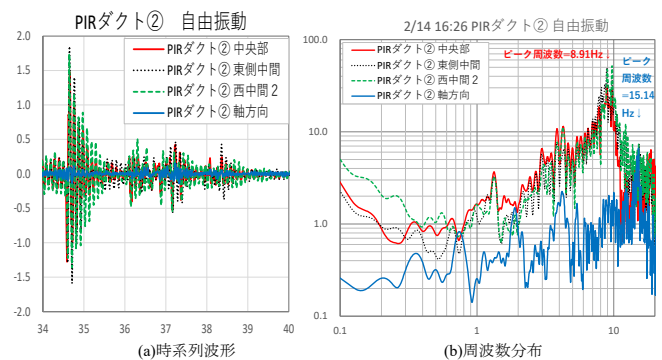
(1) 鉄板ダクト



(2) GWダクト

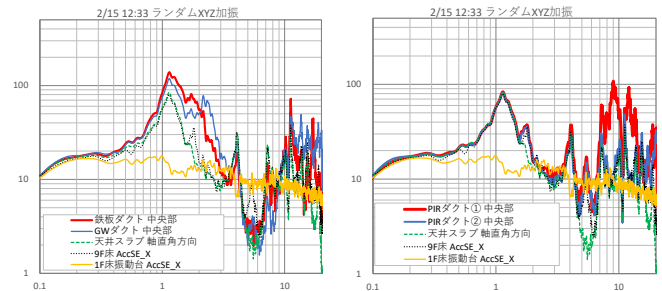


(3) PIRダクト①



(4) PIRダクト②

図4 自由振動時の加速度波形と周波数分布



(1) 鉄板ダクト・GWダクト

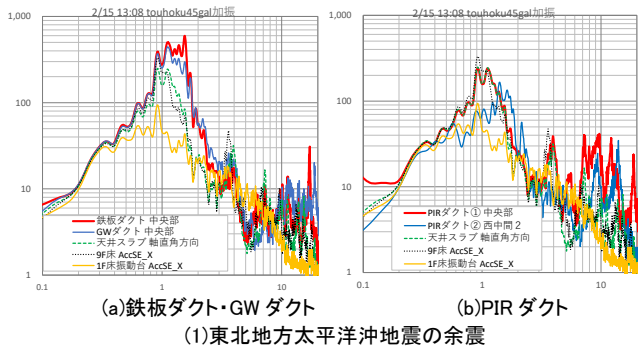
(2) PIRダクト

図5 ランダム波加振時の加速度周波数分布

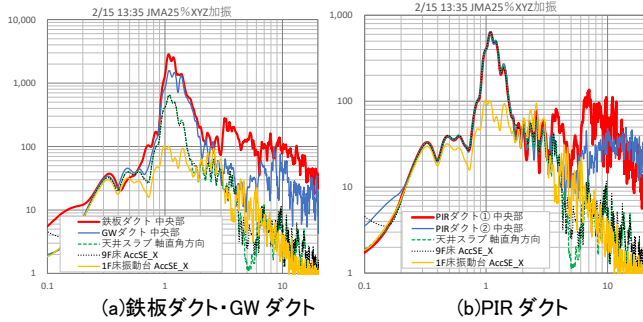
3. 3 地震波加振時の加速度周波数分布

図6に各地震波による加振時の床およびダクト加速度の周波数分布（軸直角方向）を示す。東北地方太平洋沖地震の余震（図6(1)）は、ピーク周波数0.9Hzで1階床の加速度が100gal程度に対して、9階床（8階天井スラブ）の加速度が200gal程度であった。

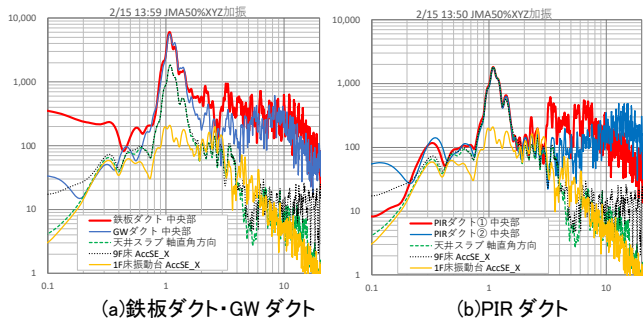
JMA神戸波（図6(2)~(4)）は、ピーク周波数が1Hz程度であり、1階床と9階床のピーク加速度は、25%時が100galと600gal、50%時が200galと2000gal、75%時が300galと3000galになっており、1階床の加速度



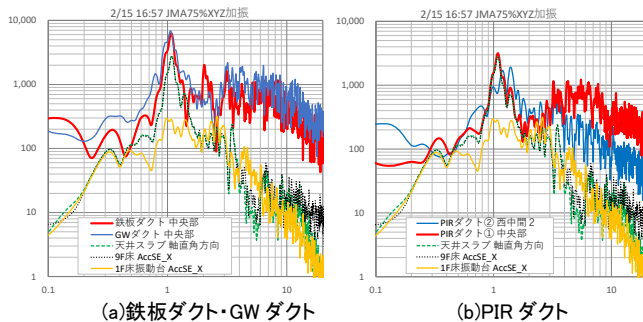
(1)東北地方太平洋沖地震の余震



(2)JMA神戸波 25%



(3)JMA神戸波 50%



(4)JMA神戸波 75%

図6 各地震波による加速度の周波数分布

が200gal以上では9階床のピーク周波数の加速度が1階床の加速度の10倍近くになっている。ダクトの加速度の周波数分布は、ランダム加振時と同様に、鉄板ダクトおよびGWダクトの加速度が1Hz以上で9階床より高くなっており、PIRダクトは3Hz以上で高くなっている。なお、鉄板ダクトのJMA50%および75%のピーク周波数の応答倍率（9階床の加速度に対する倍率）が比較的小さくなっているのは、加速度センサーの測定上限（5G）を超えたためと考えられる。

3. 4 建物1階床に対する9階床の最大加速度応答

図7に各実験ケースの振動台の最大加速度に対する8階天井スラブ（9階床）の最大加速度を示す。1F床（振動台上）の最大加速度はJMA神戸25%ではX方向Y方向ともに200cm/s²程度であったが、JMA神戸100%ではX方向が800cm/s²、Y方向が1200cm/s²とY方向の方が大きかった。

1階床に対する9階床の加速度応答倍率は、Y方向が2倍程度であるのに対して、X方向は5倍になるケースがみられ、X方向の方が応答倍率が大きい。

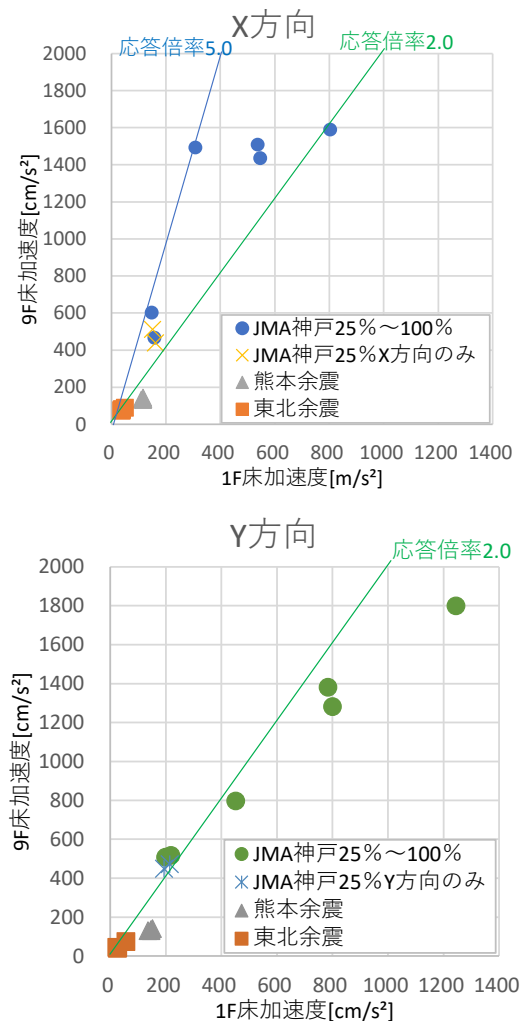


図7 建物の1階床に対する9階床の最大加速度応答

3. 5 地震波加振時の最大加速度と最大変位

図 8 (1) に 9 階床に対する各ダクトの最大応答加速度の関係を散布図で示す。鉄板ダクトは、中央部で加速度が大きく増幅し、天吊りによる加速度応答倍率が 10 倍近いケースも見られた。このため、JMA 神戸 50% (9F 床加速度 500cm/s²程度) で鉄板ダクト中央部の変位が増大して柱に衝突し損傷した。

図 8(2) に各ダクト中央部の加速度 (軸直角方向) と変位の関係を示す。鉄板ダクトは、JMA 神戸 50% 以降において、変位の計測ができなかったが、JMA 神戸 25% など低い加速度でも大きく変位している。

GWダクトは、JMA 神戸 50% で、変位が 800mm を超えて中央部のダクト接続部でアルミテープの亀裂が発生し、JMA 神戸 75% (9F 床加速度 1500cm/s²程度) で変位が 900mm を超えて中央部のダクト接続部でアルミテープが切れてダクトが断裂した。

そのため、それ以降の実験では鉄板ダクトと GWダクトの中央に耐震支持 (軸直角方向のみ) を追加して、耐震支持間隔を 6m とした。その結果、鉄板ダクトと GWダクト最大加速度の天井スラブに対する応答倍率は 3 倍以下で、変位も許容範囲内となった。

PIRダクトは、JMA 神戸 100% (9F 床加速度 1800cm/s²程度) において、ダクト中央部の加速度が 3000cm/s²以上となったが、耐震支持間隔 12m も 6m も、ともに応答倍率は 3 倍以下、変位は 300mm 以下で、損傷・断裂することはなかった。

3. 6 PIRダクトをワイヤーで支持した場合

実験最終日 (2/24) において、PIRダクト②の支持を全ねじボルトからワイヤー支持に変更した (写真 1・2)。図 7 にワイヤー支持した PIRダクト②の最大加速度と最大変位測定結果を示す。

JMA 神戸 75% 時で比較すると、ワイヤー支持は全ねじボルト支持に対して応答倍率が 2 倍以下と小さくなるが、変位は 150mm 以上と大きくなった。

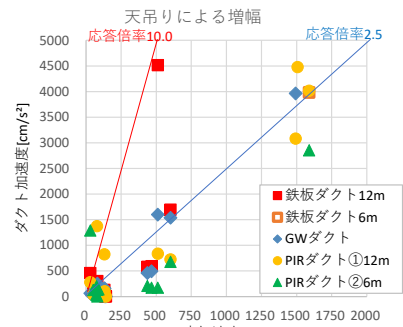
4. まとめ

鉄板ダクトは、耐震支持間隔 12m では固有周波数が 1.6Hz 程度であり、建物の固有周波数に近いため JMA 神戸波などの地震波で、天井スラブに対する応答倍率が 10 倍近くになり、150mm 以上離れた柱に衝突するなど、大きな変位を生じた。

GWダクトは、天井スラブに対する加速度応答倍率が 2.5 倍程度であったが、JMA 神戸波 50% 加振時に中央部のダクト接続部に亀裂を生じ、JMA 神戸波 75% で断裂した。

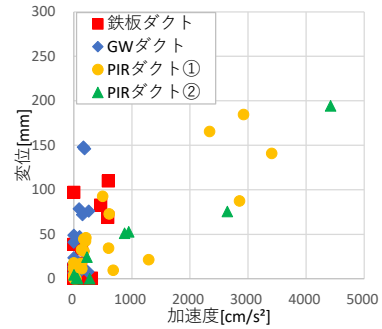
PIRダクトは、天井スラブに対する加速度応答倍率は GWダクトと同程度であったが、ダクト重量が GWダクトの約 1/2 程度であるため、変位も小さく、損傷しにくいことが分かった。

また、PIRダクトをワイヤーで支持した場合も、ダクトが損傷することはなかったが、全ねじボルトで支持した場合より変位が大きくなる傾向がみられた。



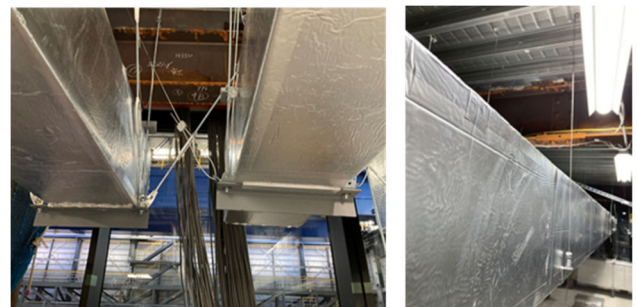
(1) 最大加速度応答

ダクト中央の加速度と変位の関係



(2) 最大変位

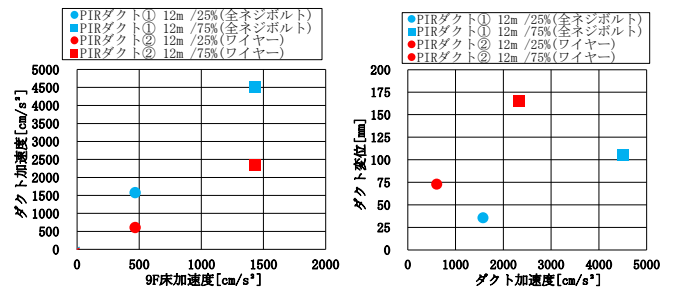
図 8 各ダクトの最大加速度応答と変位



(1) B種耐震支持

(2) 自重支持

写真 1 ワイヤーによる PIRダクト支持の状況



(1) 最大加速度応答

(2) 最大変位

図 7 PIRダクトのワイヤー支持と全ねじボルト支持の比較

【参考文献】

- 1) 村田 孝友、水谷 国男、望月 勇佑、山崎 柚輔、京井 貴史、廣井 秀明：樹脂パネルダクトの強度と耐震性に関する研究 (第 1 報) (第 2 報)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、第 10 巻、2020.9、pp. 369-376
- 2) 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針 2014 年版、2014.9
- 3) 梶原ら、包括的耐震性能評価実験 その 10：実大 10 層鉄骨造オフィスビルを対象とした震動台実験計画、日本建築学会大会学術講演梗概集、投稿中