

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	E-ディフェンスを用いた実大鉄骨造体育館試験体実験の屋根面の応答性状-加速度2階積分による屋根ブレース軸変位量の分析-
Title(English)	
著者(和文)	和田穂月, 佐藤大樹, 鈴木理恵, 佐々木智大, 青井淳, 梶原浩一, 田川浩之
Authors(English)	Hotsuki Wada, Daiki Sato, Rie Suzuki, Tomohiro Sasaki, Jyn Aoi, Koichi Kajiwara, Hiroyuki Tagawa
出典(和文)	日本地震工学会第12回年次大会梗概集, , , P1-17
Citation(English)	Proceedings of the 12th Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering, , , P1-17
発行日 / Pub. date	2016, 9



E-ディフェンスを用いた実大鉄骨造体育館試験体実験の屋根面の応答性状 —加速度 2 階積分による屋根ブレース軸変形の分析—

和田穂月¹⁾、佐藤大樹²⁾、鈴木理恵³⁾、佐々木智大⁴⁾

青井淳⁵⁾、梶原浩一⁶⁾、田川浩之⁷⁾

- 1) 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系建築学コース、大学院生
e-mail : wada.h.ag@m.titech.ac.jp
- 2) 正会員 東京工業大学未来産業技術研究所、准教授・博士（工学）
e-mail : sato.d.aa@m.titech.ac.jp
- 3) 学生会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻、大学院生
e-mail : suzuki.r.ba@m.titech.ac.jp
- 4) 正会員 国立研究開発法人防災科学技術研究所地震減災実験研究部門兵庫耐震工学研究センター、研究員 博士（工学）
e-mail : tomo_s@bosai.go.jp
- 5) 株式会社竹中工務店技術研究所地震工学部地震リスクグループ、研究員 修士（工学）
e-mail : aoi.atsushi@takenaka.co.jp
- 6) 国立研究開発法人防災科学技術研究所地震減災実験研究部門兵庫耐震工学研究センター、部門長 博士（工学）
e-mail : kaji@bosai.go.jp
- 7) 武庫川女子大学生活環境学部建築学科、准教授 Ph.D.
e-mail : tagawa@mukogawa-u.ac.jp

要 約

大地震時に避難拠点となる学校体育館は、天井落下被害などでその機能を満たさない事例が報告されている。天井の設計用外力を推定するためには屋根面の応答を確認する必要がある。本報では、E-ディフェンスを用いた実大体育館試験体の振動実験より、屋根ブレースの軸変形の分析を行う。加速度波形に含まれるトレンドを除くためのハイパスフィルターの値を加速度 2 階積分から算出した軸変形とひずみ計記録から算出した軸変形の比較より決定し、加振波の入力レベルによる梁間、桁行、鉛直方向の変形比率の変動を分析した。

キーワード： 鉄骨造体育館、実大試験体加振実験、屋根ブレース、E-ディフェンス

1. はじめに

避難拠点となる学校体育館等の大規模建築物は、大地震発生の際も使用可能であり余震に耐えうる施設であることが求められている。しかし、2011年東日本大震災では本震に加え多数回発生した最大震度6弱以上の余震により、学校体育館では柱脚の損傷やブレース材の破断等の構造部材の被害および天井材

の非構造部材や照明の設備機器の落下被害が発生し、災害発生後の避難拠点として機能を満たさない事例が報告されている²⁾。また、天井の落下被害に関しては死傷者の発生も報告されており、人命保護の観点から最優先で対策されるべき課題である。

天井の落下被害のメカニズムを解明するうえで、地震時の屋根面の挙動は天井に直接伝わるため、屋根面の応答を解明し分析することは非常に重要である。屋根面の応答に関する解析³⁾⁴⁾や剛な屋根を用いた実験⁵⁾は行われているが、実大試験体を用いた振動実験による例はなく、屋根面の応答が天井に与えている影響に関してはいまだに解明されていないことが多い。

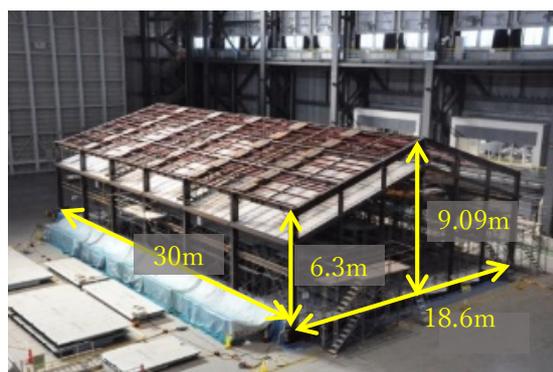
本研究は、屋根面の応答を解明することで、天井の設計用外力を提案することを目的としている。そこで本報では、E-ディフェンスを用いた実大鉄骨造体育館試験体の振動実験より、屋根面のブレース材の振動特性を把握するため、加振波の入力レベルごとにおける梁間、桁行、鉛直方向の変形比率の分析を行う。

2. 実験概要

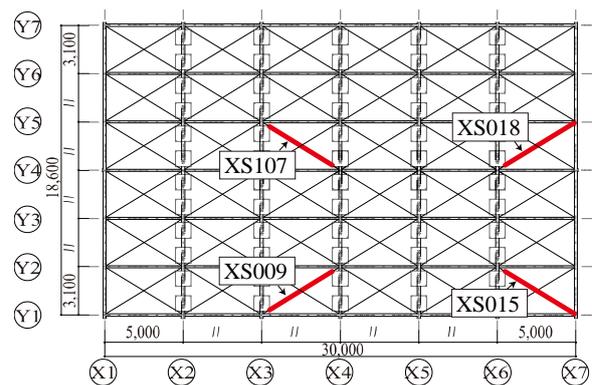
2.1 試験体概要

試験体写真と屋根階平面図を図1に、試験体の主な仕様を表1に、主要な構造部材のミルシートおよび材料試験の結果を参照した機械的性質を表2に示す。試験体は鉄骨構造体育館の平屋建てである。平面寸法は平均的な屋内運動施設⁶⁾や東北地方太平洋沖地震で天井の全面脱落被害が多い20m以上のスパンの体育館⁷⁾¹⁰⁾を参考とし、E-ディフェンス振動台(15m×20m)を大きく超える18.6m×30mとした。屋根は既存の体育館で多く採用されている山形形状とし、東日本大震災における被害との関連を分析した結果からライズスパン比を0.15、屋根勾配を10:3とした。試験体の最高高さは9.09mである。

建物試験体内部には、吊り天井を設置した。実験期間中に天井の張り替えを行い、2種類の天井で実験を行った。1つは、国土交通省による技術的助言が出された平成13年以前の考え方で設計・施工された地震に対する対策のない既存の天井を模した未対策天井¹¹⁾、もう1つは平成26年4月1日より施行されている技術基準¹²⁾に基づく脱落防止対策が施された耐震天井¹³⁾¹⁴⁾である。また吊り天井の振動時の動きが外部から確認しやすいよう、屋根、外壁材は省略し、屋根材においては等価の質量分を持つ鋼板(1m×1m×64mm)を大梁の上に60枚設置し、実際の体育館の挙動を再現できるよう調節した。これは屋根の質量が建物の振動特性に与える影響が大きいためである。



(a) 試験体写真



(b) 屋根階平面図

図1 試験体概要図

表 1 建物試験体の主な仕様¹⁾

項目		仕様
構造, 階数		鉄骨構造 平屋建て
質量	上部建物	71t(屋根垂は除く)
	屋根垂	30t
	全構造部材 合計	230t
最大高さ		9.090m
平面寸法		30.0m×18.6m (6スパン×6スパン)
設計		許容応力度設計(C0=0.2) 地震時保有水平耐力による 照査を実施

表 2 構造部材の機械的性質¹⁾

部材 (鋼種)		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
柱 (SS400)		299	443
大梁 (SS400)		330	444
ブレース材 (SNR400B)	M27	313	482
	M20	314	480
	M16	291	446

2.3 加振実験

本報では耐震天井試験体に関して検討を行った。本報で用いた加振計画を表 3 に示す。加振実験では 2011 年東北地方太平洋沖地震において防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) の仙台観測点で観測された加振度記録 (K-NET 仙台波) および 1995 年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された加速度記録 (JMA 神戸波) を用いる。入力方向は、K-NET 仙台波、JMA 神戸波いずれも梁間方向に NS 成分、桁行方向に EW 成分、上下方向に UD 成分とした。K-NET 仙台波 100%の時刻歴応答波形を図 2 に、減衰定数を 5%として得られる加速度応答スペクトルを図 3 に示す。実験では、加速度振幅を適切なレベルに縮小または拡大を行って入力した。ただし、K-NET 仙台波 100%は加振機の性能限界のため、20Hz のローパスフィルター (Low Pass Filter、LRF) でフィルター処理を行った。

表 3 加振計画¹⁾

実施日	天井試験体	加振波	入力 レベル	振動台加速度 (梁間方向)	震度
2014/2/27	耐震 天井	K-NET 仙台波	5%	0.76m/s ²	震度4
			25%	3.79m/s ²	震度5強
			50%	7.59m/s ²	震度6弱
2014/2/28			80%	12.14m/s ²	震度6強

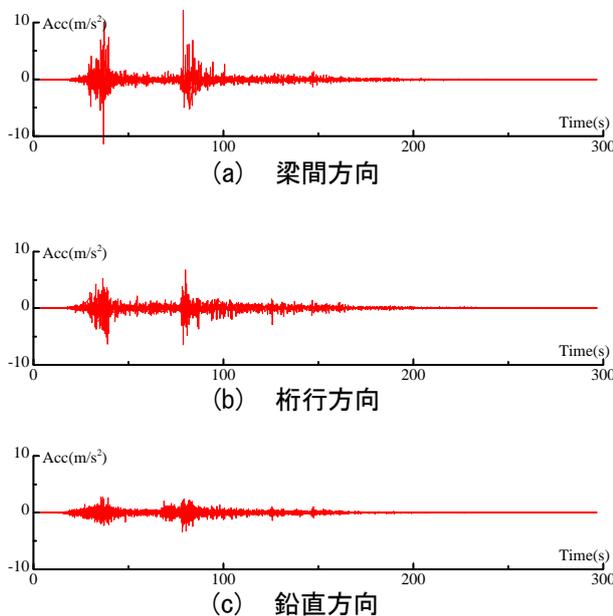


図 2 入力地震動 (K-NET 仙台波 100%)

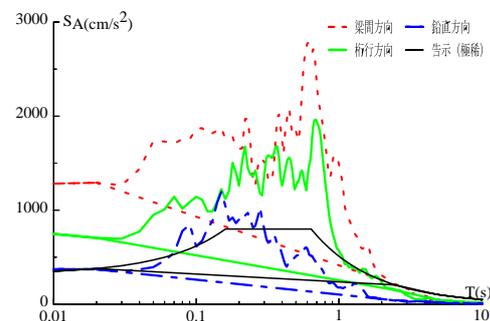


図 3 加速度応答スペクトル (5%減衰)

2.4 計測計画

屋根面の加速度計位置を図4、屋根面のひずみ計位置を図5に示す。図面ではX方向が桁行方向、Y方向が梁間方向、Z方向が鉛直方向としているが、計測方向は梁間方向をX方向、桁行方向をY方向、鉛直方向をZ方向とした。3.1節で用いるX、Y、Z方向は計測方向に準ずる。

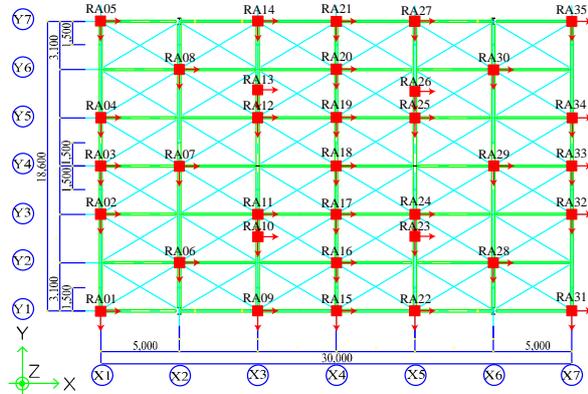


図4 屋根面加速度計位置図

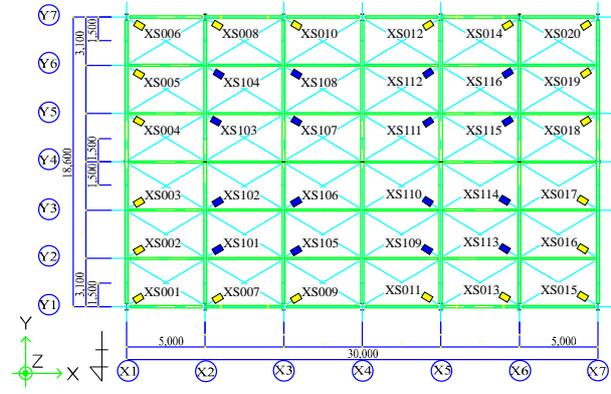


図5 屋根面ひずみ計位置図

3. 加速度2階積分からの変位の算出方法

3.1 軸変形の算出方法

加速度から算出した軸変形が適切であるか判断するために変位計が設置されている壁ブレースにおいて実験データの加速度2階積分からの軸変形の算出方法を示す。計測値には高周波成分のノイズを取り除くため、ローパスフィルター (Low Pass Filter、 LRF) 100Hz をかけ、はじめの1秒間の平均値が0になるようオフセットしたものをを用いて検討を行っている。詳しくは参考文献15)を参照し、本報では算出式を示す。

加速度計はブレース端部に設置されているため、端部を i 、 j 点とおく。各点における加速度を周波数領域における積分法によって2階積分を行い、相対変形 X 、 Y 、 Z 方向で求める。2階積分の式を以下に示す。 $(i, j$ 点は同様の方法で求められるため、以下では i 点のみ示す。)

$${}_i u_x(t) = \iint {}_i \ddot{u}_x(t) dt^2, \quad {}_i u_y(t) = \iint {}_i \ddot{u}_y(t) dt^2, \quad {}_i u_z(t) = \iint {}_i \ddot{u}_z(t) dt^2 \quad (1a-c)$$

ここで、 ${}_i \ddot{u}_x(t)$: i 点における X 方向の加速度、 ${}_i \ddot{u}_y(t)$: i 点における Y 方向の加速度、

${}_i \ddot{u}_z(t)$: i 点における Z 方向の加速度

${}_i u_x(t)$: i 点における X 方向の変形、 ${}_i u_y(t)$: i 点における Y 方向の変形、

${}_i u_z(t)$: i 点における Z 方向の変形

であり、加速度計が設置位置の X 、 Y 、 Z 座標に求めた変形を加えて変位座標とする。変位座標の式は以下で求める。

$${}_i X(t) = {}_i u_x(t) + {}_0 X, \quad {}_i Y(t) = {}_i u_y(t) + {}_0 Y, \quad {}_i Z(t) = {}_i u_z(t) + {}_0 Z \quad (2a-c)$$

ここで、 ${}_0 X$: 加速度計が設置位置の X 座標、 ${}_0 Y$: 加速度計が設置位置の Y 座標、

${}_0 Z$: 加速度計が設置位置の Z 座標

$_i X(t)$: i 点における X 方向の変位座標、 $_i Y(t)$: i 点における Y 方向の変位座標、
 $_i Z(t)$: i 点における Z 方向の変位座標
 である。次に端部の変形の差からブレースにおける X、Y、Z 方向の変形を算出する。

$$\delta_x(t) = _i X(t) - _j X(t), \quad \delta_y(t) = _i Y(t) - _j Y(t), \quad \delta_z(t) = _i Z(t) - _j Z(t) \quad (3a-c)$$

ここで、 $\delta_x(t)$: ブレースにおける X 方向の変形、 $\delta_y(t)$: ブレースにおける Y 方向の変形、
 $\delta_z(t)$: ブレースにおける Z 方向の変形
 $_j X(t)$: j 点における X 方向の変位座標、 $_j Y(t)$: j 点における Y 方向の変位座標、
 $_j Z(t)$: j 点における Z 方向の変位座標
 である。最後に、部材の軸変形 $\delta(t)$ を求めるため、次式を用いる。

$$\delta(t) = \sqrt{\delta_x(t)^2 + \delta_y(t)^2 + \delta_z(t)^2} - L \quad (4)$$

ここで、 L : ブレース長さ
 である。

3.2 ハイパスフィルターの検討

加速度波形に含まれるトレンドを除くため、2階積分を行う際、ハイパスフィルター (High Pass Filter、以下 HPF とする) をかける。屋根ブレース XS107 (図 1(b)参照) に関して加速度 2階積分から得られたブレース軸変形とひずみ記録から得られたブレース軸変形を比較し、HPF の最適値の検討を行う。入力波は K-NET 仙台波 5% とし、HPF の値を 0.5、1.0、1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1 とし検討を行った。HPF の値によって比較した最大値比率を図 6 に、相関係数を図 7 に示す。なお最大値は、ひずみ計から算出した変位を基準として基準化し、加速度 2階積分から得られた軸変形を除いたものである。式 (5) にひずみ計記録を用いた軸変形の算出方法を示す。

$${}_s \delta(t) = \varepsilon(t) \times L \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon(t)$: ひずみ計記録

${}_s \delta(t)$: ひずみ計記録から算出した軸変形
 である。

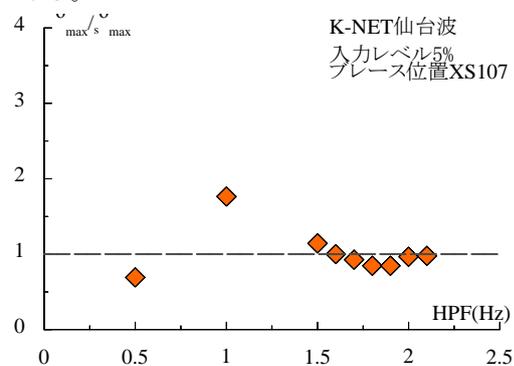


図 6 最大値比率

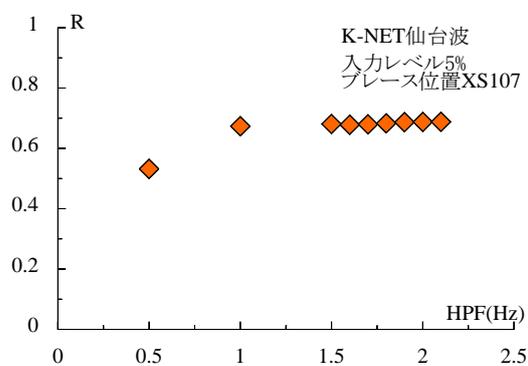


図 7 相関係数

図 6 より、最大値比率は HPF1.0Hz では 2 倍ほどであるが、HPF1.5Hz 以上では非常に小さくなることが確認できる。HPF1.5Hz のとき約 1.1 倍とほぼ 1 に近い値である。図 7 より、相関係数は HPF の値を大きくするほど相関係数は高い値を示し、HPF1.0Hz 以上ではほぼ横ばいの 0.7 程度と高い値であることが確認できる。

以上より、K-NET 仙台波 5%において 1.5Hz より HPF の値をあげても精度の向上はみられないことから、本報では加速度 2 階積分を行う際に 1.5Hz の HPF をかける。以降、他の入力レベルに対しても HPF1.5Hz とした。

4. 屋根ブレースの軸変形の分析

加速度 2 階積分を行い算出した軸変形に関して、入力波のレベルによって梁間、桁行、鉛直方向の変形比率の変動を分析する。屋根ブレース XS009、015、018、105 (図 1(b)参照) において 3 章で示した算出方法で加速度記録から 2 階積分を行った。入力波は K-NET 仙台波 5%、25%、50%、80%とし、最大変形比率を図 8 に示す。なお、変形成分は桁行方向の最大値 δ_y を基準とし、梁間方向の最大値 δ_x と鉛直方向の最大値 δ_z をそれぞれ除したものである。なお梁間方向の最大変形比率 δ_x / δ_y 、鉛直方向の最大変形比率 δ_z / δ_y とする。

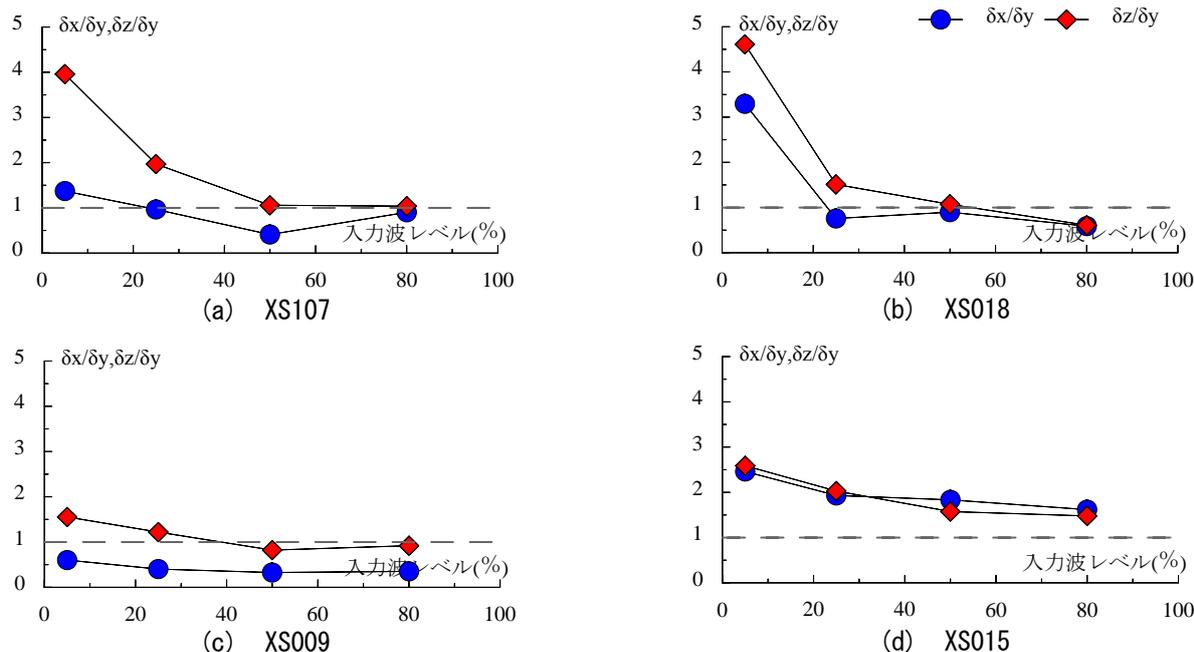


図 8 最大変形比率

図 8(a)~(d)より、全体で入力レベルが小さいときに鉛直方向の最大変形比率が大きいことが確認できる。これは、大空間においてスパンが大きいと水平地震動によっても上下振動が発生しやすい¹⁷⁾ことが要因であると考えられる。

図 8(a)より、屋根ブレース XS107 において鉛直方向の最大変形は、桁行方向に比べて入力レベル 5% では 4 倍ほど大きく、25% では 2 倍ほど大きいことが確認できる。50% 以上では桁行方向とほぼ同じである。梁間方向の最大変形は、桁行方向と比べて入力レベル 5% では 1.5 倍ほど大きい。25、80% ではほぼ同じであるが、50% では桁行方向が梁間方向を上回ることがわかる。全体的に、入力レベルを大きくするほど、桁行方向が大きくなる。図 8(b)より、屋根ブレース XS018 において鉛直方向の最大変形は入

カレベル 80%で桁行方向が上回るが、XS107の最大変形に類似していることが確認できる。梁間方向の最大変形は、入力レベル 5%では桁行方向と比べて 3 倍ほど大きく、50%以上では桁行方向が上回る。図 8(c)より、屋根ブレース XS009 において鉛直・梁間・桁行方向の最大変形はほぼ同じであることが確認できる。図 8(d)より、屋根ブレース XS015 において鉛直・梁間方向の最大変形はほぼ同じであるが、桁行方向は全ての入力レベルにおいて小さい。

Y4-5 通り（図 1(b)参照）に配置されている図 8(a)XS107 と図 8(b)XS018 を比較すると入力レベル 5%において、XS018 の桁行方向に対する梁間方向の最大変形が大きいことがわかる。これについては、XS018 は X6-7 通りに位置し、壁ブレースを有する X7 通りは X6 通りに比べ梁間方向の変位が小さいため、X6 通りと X7 通りの梁間方向における相対変位が大きいと考えられる。これは Y1-2 通りに配置されている XS009 と XS015 に関しても同様である。また X3-4 通りに配置されている図 8(a)XS107 と図 8(c)XS009 を比較すると入力レベル 5%において、XS009 の桁行方向に対する梁間方向の最大変形が小さいことがわかる。これは壁ブレースを有する Y1 通りは Y2 通りに比べ桁行方向の変位が小さいため、梁間方向に対する桁行方向の最大変形が大きいと考えられる。

5. まとめ

本報では、E-ディフェンスを用いた実大鉄骨造体育館試験体の振動実験より、屋根面のブレース材の振動特性を把握するため、加振波の入力レベルごとにおける梁間、桁行、鉛直方向の最大変形の分析を行った。

屋根ブレースの変形比率の分析より、入力レベルが小さいとき屋根ブレースは鉛直方向の最大変形が大きいことを確認した。これは、大空間においてスパンが大きいと水平地震動によっても上下振動が発生しやすいことが要因であると考えられる。また、壁ブレースを有する構面と壁ブレースを有さない構面に配置されている屋根ブレースは、最大変形比率が大きいことが確認された。これは、壁ブレースを有する構面は構面方向の変位が壁ブレースを有さない構面よりも小さいため、壁ブレースを有さない構面との相対変位が大きくなったためと考えられる。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のためのE-ディフェンス加振実験報告書-大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験-、第391号、2015年2月
- 2) 山田哲、松本由香、伊山潤、五十子幸樹、吉敷祥一、池永昌容、島田侑子、小山毅、見波進、浅田勇人：東北地方太平洋沖地震等で被災した鉄骨構造文教施設の調査—調査の概要—、日本建築学会技術報告集、第18巻、第40号、2012年、pp.935-940
- 3) 三宅由祐、鈴木光雄、曾根拓也：鉄骨トラス屋根体育館における地震時の屋根面応答に関する検討：I 市体育館を例とした振動解析 その1、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014年9月、pp.869-870
- 4) 三宅由祐、鈴木光雄、曾根拓也：鉄骨トラス屋根体育館における地震時の屋根面応答に関する検討：I 市体育館を例とした振動解析 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014年9月、pp.871-872
- 5) 飯塚信一、脇山善夫、金川基、藤堂正喜、渡壁守正、稲井慎介、桑素彦、石原直：地震被害を受けた体育館の天井脱落挙動に関する実験研究 その1 屋根勾配を有する天井試験体の振動台実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、2010年7月、pp.49-50
- 6) 文部科学省：学校施設の屋内運動場等の天井等に関する実態調査結果(速報)について、学校施設における非構造部材の耐震対策の推進に関する調査研究、第2回会議資料、資料2、2012年
- 7) 山田哲、伊山潤、島田侑子、松本由香、長谷川隆、清家剛、中野達也、吉敷祥一：東北地方太平洋沖および余震による学校体育館の構造被害、日本建築学会報告集、Vol. 20、No. 44、2014年、pp. 133-138
- 8) 清家剛、江口亨、熊谷亮平、佐藤孝一、名取発、脇山善夫、井上朝雄、山田哲、島田侑子、：東北地方太平洋沖および余震による学校体育館の構造被害、日本建築学会報告集、Vol. 20、No. 44、2014年、pp. 405-410

- 9) 山田哲、江口亨、松本由香、清家剛、伊山潤、熊谷亮平、島田侑子：東北地方太平洋沖および余震による学校体育館の構造被害、日本建築学会報告集、Vol. 20、No. 46、2014年、pp. 981-986
- 10) 江口亨、清家剛、熊谷亮平、松本由香、伊山潤、山田哲、椛山健二、楠浩一：東北地方太平洋沖および余震による学校体育館の構造被害、日本建築学会報告集、Vol. 20、No. 47、2015年、pp.55-59
- 11) 佐々木智大、青井淳、田川浩之、梶原浩一、荒井智一、金井貴浩、高岡昌史、岩下裕樹：E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その2 試験体構造設計および未対策天井の設計、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014年9月、pp.999-1000
- 12) 一般社団法人 建築性能基準推進協会：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説、2013年
- 13) 金井貴浩、白崎了悟、佐々木智大、青井淳、田川浩之、梶原浩一、荒井智一、高岡昌史、岩下裕樹：E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その3 1.1G 耐震天井の設計、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014年9月、pp.1001-1002
- 14) 梅野友里、荒井智一、佐々木智大、青井淳、田川浩之、梶原浩一、金井貴浩、高岡昌史、岩下裕樹：E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その4 2.2G 耐震天井の設計、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014年9月、pp.1003-1004
- 15) 鈴木理恵、佐藤大樹、佐々木智大、青井淳、梶原浩一、田川浩之：実大鉄骨造体育館のE-ディフェンス震動台実験—その2 加速度2階積分におけるブレース変形算出方法の検討—、日本建築学会関東支部研究報告集(CD-ROM)、2109、2016年3月、pp.657-660
- 16) 鈴木理恵、佐藤大樹、佐々木智大、青井淳、梶原浩一、田川浩之：E-ディフェンス震動台実験による実大鉄骨造体育館の屋根面の応答性状、日本地震工学会第11回年次大会梗概集、2015年11月、P3-13
- 17) 日本建築学会：空間構造の動的挙動と耐震設計、2006年3月、p.19