

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	E - ディフェンス振動台実験による実大鉄骨造体育館の屋根面の応答性状
Title(English)	
著者(和文)	鈴木理恵, 佐藤大樹, 佐々木智大, 青井 淳, 梶原浩一, 田川 浩之
Authors(English)	Rie Suzuki, Daiki Sato, Tomohiro Sasaki, Jyn Aoi, Koichi Kajiwara, Hiroyuki Tagawa
出典(和文)	日本地震工学会第11回年次大会梗概集, , , P3-13
Citation(English)	Proceedings of the 11th Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering, , , P3-13
発行日 / Pub. date	2015, 11



Eーディフェンス振動台実験による実大鉄骨造体育館の屋根面の応答性状

鈴木理恵¹⁾、佐藤大樹²⁾、佐々木智大³⁾、青井淳⁴⁾、梶原浩一⁵⁾、田川浩之⁶⁾

- 1) 学生会員 東京工業大学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
- 2) 正会員 東京工業大学応用セラミックス研究所建築物理研究センター、准教授 博士(工学)
e-mail : daiki-s@serc.titech.ac.jp
- 3) 正会員 国立研究開発法人防災科学技術研究所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
- 4) 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
- 5) 独立行政法人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 博士(工学)
e-mail : kaji@bosai.go.jp
- 6) 武庫川女子大学生活環境学部建築学科、准教授 博士(Ph.D.)
e-mail : tagawa@mukogawa-u.ac.jp

要約

東日本大震災では避難拠点ともなる学校体育館での非構造部材、特に天井落下被害により、人的被害や全面的な機能低下につながった。Eーディフェンスを用いての実大体育館の振動台実験から、天井脱落被害軽減技術の対策・提案のひとつとして屋根面の応答性状を明らかにする。実験結果より、梁間方向、上下方向の絶対最大加速度は軒側で小さく、棟側に近づくに従い大きくなる傾向がある。また屋根面中央部との相関係数においては低い入力レベル時よりも高い入力レベル時のほうが低下することが分かった。

キーワード： 鉄骨造体育館、Eーディフェンス、屋根面応答、実大振動実験

1. はじめに

大地震発生時の地域の避難拠点ともなる学校体育館等の大規模建築物には、災害発生後も避難拠点として使用可能であり、余震にも耐えうる施設であることが求められている。しかし、本震に加え震度6弱以上の余震が多数回発生した東日本大震災では、学校体育館等の柱脚の損傷やブレース材の破断など構造部材の被害、および天井材等の非構造部材や設備機器の落下被害等により、地震後の避難拠点としての機能を満たさない事例が報告されている¹⁾。天井による落下被害におい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、あつてはならない事象であるため最優先で対策されるべき課題である²⁾。

これに対し近年では体育館を対象とした研究^{3)~6)}や天井を対象とした研究^{7)~9)}も精力的に行われている。しかし天井脱落被害の実態は複雑であり、天井脱落のメカニズムはいまだ明らかにされていない。また、天井に作用する荷重を評価するためには地震時における屋根面の挙動を詳細に分析する必要がある。しかし体育館の実大実験による研究はほとんど行われていないうえ、大空間構造の屋根面の応答特性を把握・評価・反映するにはいたっていない。

防災科学技術研究所による「学校施設における大空間建築物の実験研究プロジェクト」では学校施設の体育館をモデル化した大規模空間を有する試験体の加振実験を行った。屋根は水平だけでなく上下にも空間的に複雑な連成をしながら変形することから、本報ではEーディフェンスを用いた大規模空間吊り天井の体育館において、加振波K-NET仙台波入力時における屋根面の応答性状の把握を目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

学校施設における大空間建築物の実験研究より平成25年度の実験では、鉄骨造試験体を用いた。Eーディフェンス加振実験において、震動台を大きくはみ出した実大試験体である。試験体写真を図1に、試験体の主な仕様を表1、地震時保有水平耐力の照査を表2に示す。

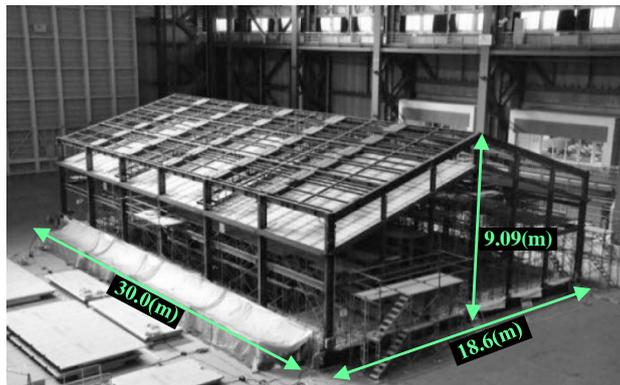


図1 実大体育館試験体¹¹⁾

表1 建物試験体の主な仕様¹¹⁾

項目	仕様	
構造、階数	鉄骨造 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(C ₀ =0.2) 地震時保有水平耐力による照査を実施	
使用部材	柱(妻面は除く)	H400×200×8×13(SS400)
	妻面の柱	H250×125×6×9(SS400)
		H300×150×6.5×9(SS400)
	大梁	H400×200×8×13(SS400)
		H248×124×5×8(SS400)
	鉛直ブレース	M20,M27(SNR400B) T.B.付き(パイプ式)
水平ブレース	M16(SNR400B) T.B.付き(パイプ式)	

表2 地震時保有水平耐力の照査¹¹⁾

方向	階	Ds値	基準 保有 耐力 Q _{ud}	必要 保有 耐力 Q _{un}	保有 耐力 Q _u	Q _u /Q _{un}
桁行	1	0.45	835kN	376kN	631kN	1.68
	2	0.45	1014kN	456kN	776kN	1.68
梁間	1	0.4	835kN	334kN	809kN	2.42
	2	0.4	1014kN	406kN	983kN	2.42

試験体の平面寸法はEーディフェンス震動台(15m×20m)を大きく超える18.6m×30mとした。これは東北太平洋沖地震における被害の調査分析¹⁰⁾より天井の全面脱落被害はスパン20m以上の体育館で発生していることに起因し20mに近い寸法とした。

試験体の屋根は、既存の体育館で採用例の多い山形屋根とした。ライズスパン比は東日本大震災にお

ける被害との関連の分析結果より0.15とし、屋根勾配を10:3とした。試験体の高さは最も高いところで9.09mである¹¹⁾。

試験体内部には吊り天井を設置し、吊り天井の動きが外部から確認しやすいよう、屋根と外壁材は省略した。ただし、屋根材の質量分については振動特性に与える影響が大きいことから、これと等価な質量を持つ鋼板(1m×1m×64mm)を大梁の上に60枚(以下、これを屋根錘とする)設置し、試験体の応答が実際の体育館の挙動を再現できるように調整した。

2.2 加速度計測計画

屋根面加速度計測計画を図2に示す。前述したように屋根面は勾配を有するが、加速度計は水平に設置してある。また、Y1～Y4部分を北側、Y4～Y7部分を南側とする。

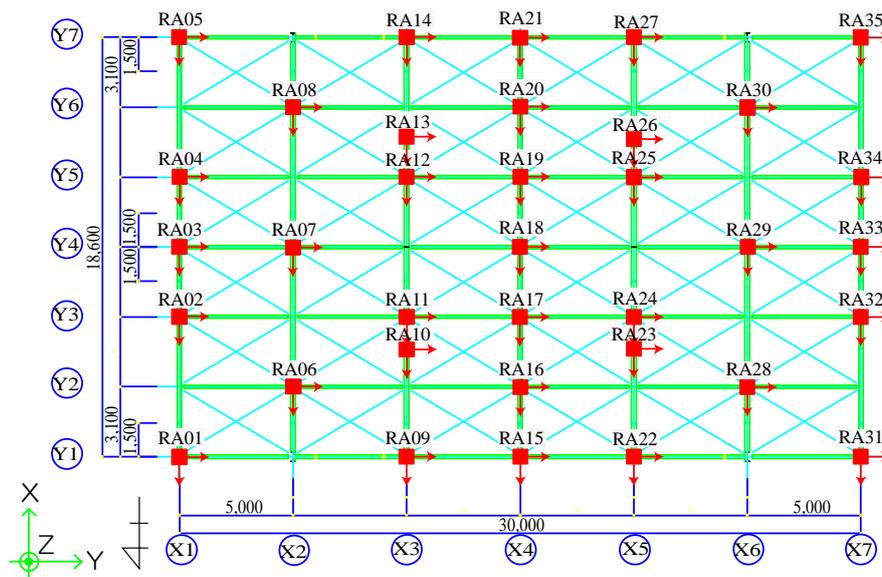


図2 屋根面加速度計測計画¹²⁾

屋根面の応答性状を検討するにあたり、屋根面に設置した錘の鋼板が母屋材等に接触し衝撃を与える等による高周波数成分を取り除くため屋根面加速度データにはローパスフィルター(Low Pass Filter, LPF)をかける。天井面で計測された加速度応答データに対して検証した結果、主要な加速度応答を取り除かずに不要なノイズを取り除くLPFの値として100Hzが最適であると判断した¹²⁾。よって3章での検討はLPFをかけた屋根面加速度応答について検討を行っている。

2.3 加振計画

表3に本報で用いた加振計画を示す。

表3 加振計画¹²⁾

実験日	加振波	入力レベル	震動台加速度 (梁間方向)	震度
2014/2/27	K-NET 仙台波	25%	3.79m/s ²	震度5強
2014/2/28		100%	13.41m/s ²	震度6強

加振実験では加振波として2011年東北地方太平洋沖地震において防災科学研究所の強震観測網(K-NET)の仙台観測点で観測された加速度記録(K-NET 仙台波)を用いた。入力方向は、梁間方向(X方向)にNS成分、桁行方向(Y方向)にEW成分、上下方向(Z方向)にUD成分とした。震動台中央部で計測された3方向の加速度波形を図3に、加速度応答スペクトルを図4に示す。それぞれ左側に入力レベル25%時、右側に入力レベル100%時の波形を示す。実験においては加速度振幅を適切なレベルに縮小もしくは拡大

して入力した。仙台波100%は、加振機の性能限界のため20HzのLPFでフィルター処理して入力した。

図3の震動台中央部の加速度波形より、入力波の最大加速度を比較する。入力レベル25%時ではX方向で3.74m/s²、Y方向で1.68m/s²、Z方向で0.76m/s²であり、X方向はY方向での2.23倍、Z方向での4.95倍となる。入力レベル100%時ではX方向で12.2m/s²、Y方向で6.91m/s²、Z方向で3.42m/s²であり、X方向はY方向での1.76倍、Z方向での3.56倍となる。

図4の加速度応答スペクトル図より、X、Y、Z方向について加速度スペクトル値の比較を行う。試験体の固有周期は、3軸同時入力によるランダム加振により得られた応答加速度の震動台上での入力加速度に対する伝達関数から同定した。1自由度系の伝達関数の理論式を最小二乗法によるフィッティングにより求めた固有周期は、梁間方向(X方向)で0.415秒、桁行方向(Y方向)で0.358秒、上下方向(Z方向)で0.332秒と推定される¹²⁾。入力レベル25%時での各々での固有周期時の加速度は、X方向で406.5cm/s²、Y方向で282.9 cm/s²、Z方向で167.8 cm/s²であり、X方向の加速度はY方向での1.44倍、Z方向での2.42倍となる。入力レベル100%時ではX方向で1600.8cm/s²、Y方向で1674.9cm/s²、Z方向で673.3cm/s²であり、X方向の加速度はY方向での0.96倍、Z方向での2.38倍となる。

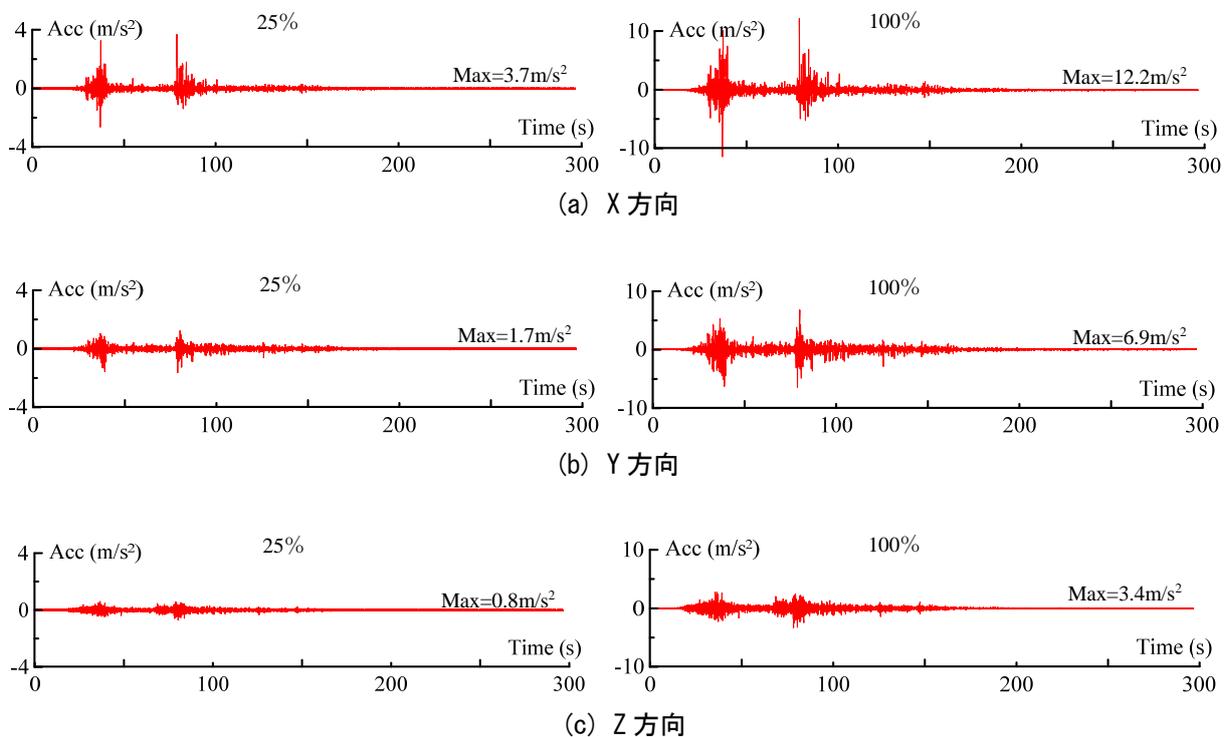


図3 加速度波形(振動台中央部)

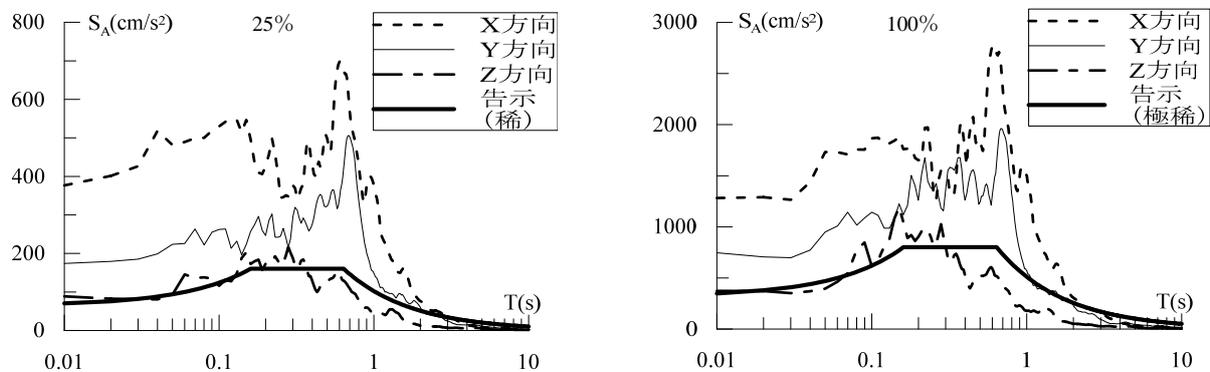


図4 加速度応答スペクトル(5%減衰)

3. 屋根面の応答性状

3.1 最大加速度

屋根面での計測位置におけるX、Y、Z方向の加速度の最大値をそれぞれ図5～図7に示す。いずれの図も(a)に25%の結果、(b)に100%の結果である。なお平均最大加速度とは、各計測地点における絶対最大加速度値の35地点の平均値のことである。

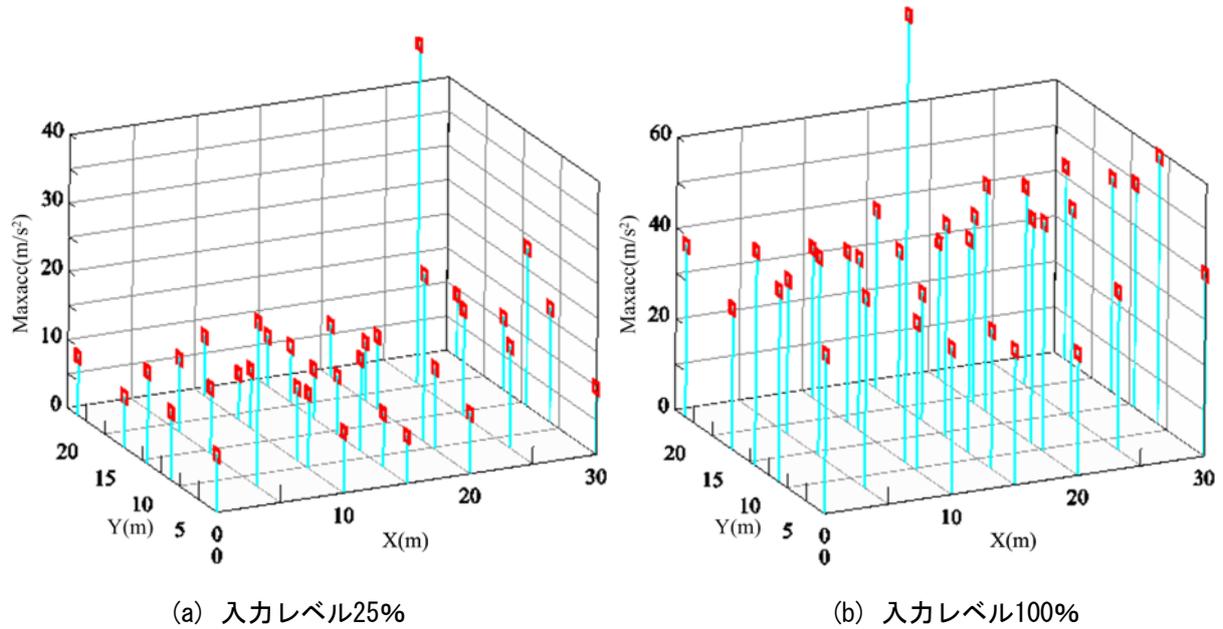


図5 屋根面加速度X方向の最大値分布

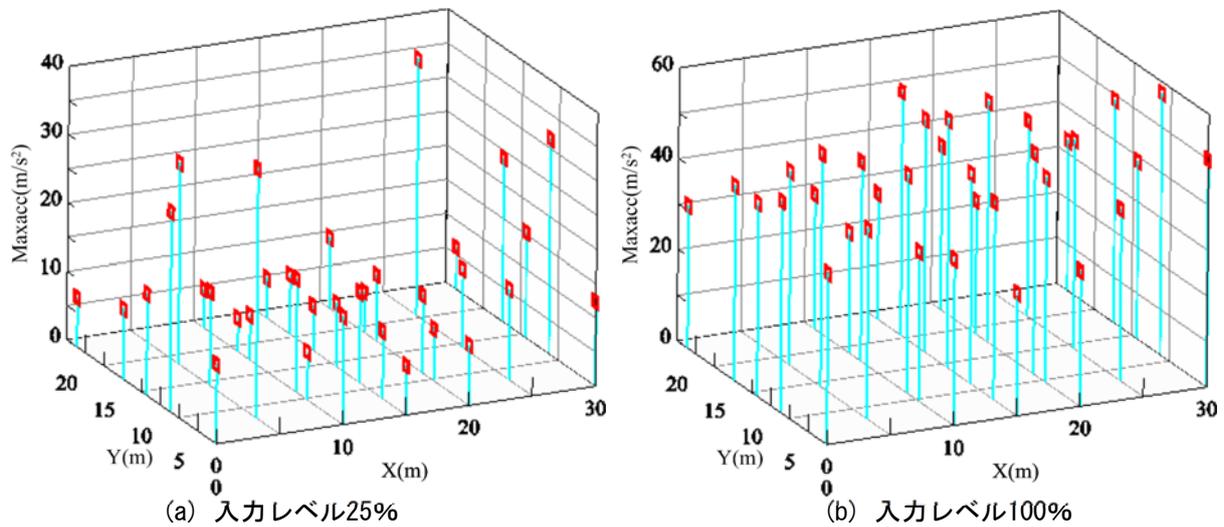


図6 屋根面加速度Y方向の最大値分布

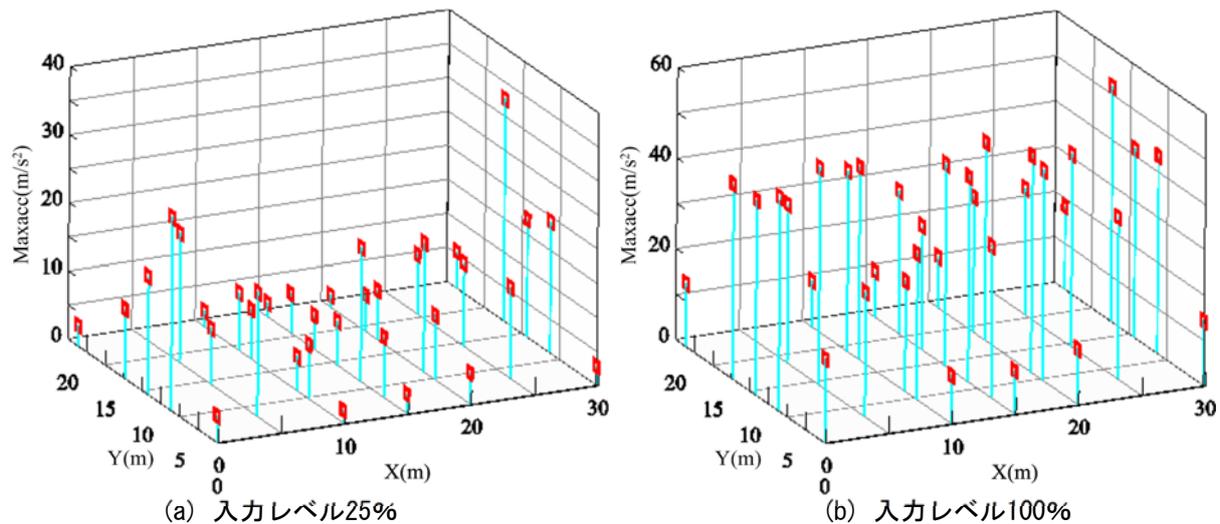


図7 屋根面加速度Z方向の最大値分布

X方向25%の結果である図5(a)では平均最大加速度 12.3m/s^2 であり、RA30の値のみ異常に高い数値を示した。それを除いた部分ではY3通りの値が比較的大きく、全体としてはやや軒側より棟側のほうが大きな値を示す傾向にあった。100%の(b)では平均最大加速度 41.4m/s^2 であり、一番高い値を示したRA11も含めた北側の棟側に近いY3通りで大きな値を示すものが多かった。反対に軒側のY1通り中央部であるRA15、RA22では小さな最大加速度を示し、傾向としては棟側では大きな最大加速度で、軒側では小さな最大加速度となることが分かった。図5(a)、(b)を比較すると大きな値が現れた位置は異なるが、軒側より棟側のほうが大きな値を示す傾向は共通した。

Y方向25%の結果である図6(a)では平均最大加速度 13.6m/s^2 であり、北側のほうが南側よりも全体的に大きな値であった。RA30で 37.5m/s^2 と一番大きな値を示し、頂部であるY4通りよりもY3通りが大きな値を示す傾向となった。100%の(b)では平均最大加速度 41.5m/s^2 であり、Y3通りで大きな最大加速度、Y7通りで小さな最大加速度となった。X4通りについては軒側より棟側のほうが大きな最大加速度となっている。図6(a)、(b)を比較するとRA32は共通して大きな値をとり、RA13、RA21は共通して小さな値をとった。Y5通りよりY3通りの値の方が若干大きいのは共通だが、屋根面全体としての性状はあまり類似していない。

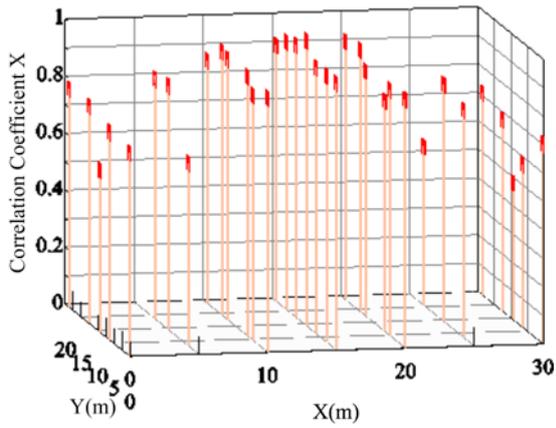
Z方向25%の結果である図7(a)では平均最大加速度 10.1m/s^2 であり、RA34、RA02で大きな最大加速度となった。Y3通りの値は大きくY1、Y7通りの値は小さいことから軒側より棟側の最大加速度が大きくなる傾向となった。100%の(b)では平均最大加速度 31.7m/s^2 であり、X,Y方向同様にY3通りで大きな最大加速度となり、Y1、Y7通りのX3、X4、X5通りで小さな値となった。図7(a)、(b)を比較するとY1通り、Y7通りが小さい値であり軒側より棟側のほうが大きな値を示す傾向は共通した。

図5～図7より、X方向とZ方向の加速度は軒側であるY1、Y7通りで小さく、棟側であるY4通りに近づくに従い大きくなる傾向が確認された。

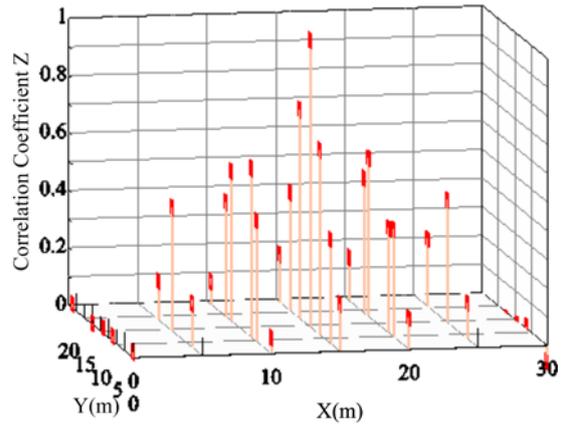
本節では各点の波形の最大値による比較を行った。次節ではより詳しく比較をするために、波形の相関関係を相関係数の比較から求め、理解を深める。

3.2 相関係数

屋根面の加速度波形において中央RA18(図2参照)を基準として求めた各々の計測位置におけるX、Y、Z方向の相関係数をそれぞれ図8～図10に示す。いずれの図も(a)に25%の結果、(b)に100%の結果である。

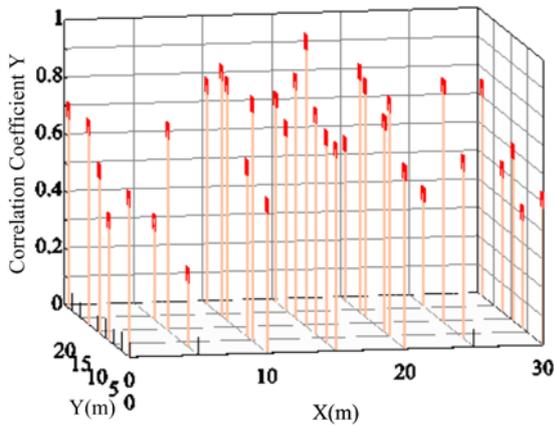


(a) 入力レベル25%

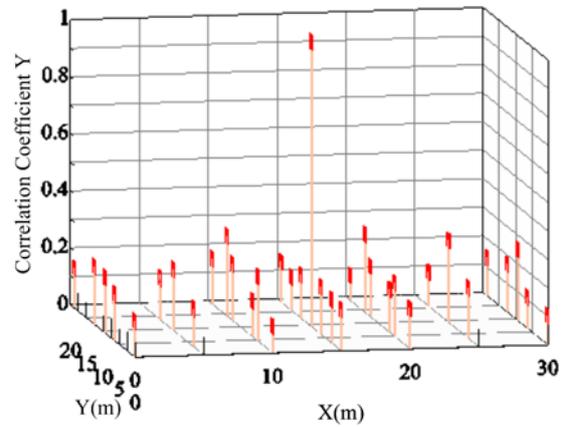


(b) 入力レベル100%

図8 屋根面加速度X方向の相関係数分布

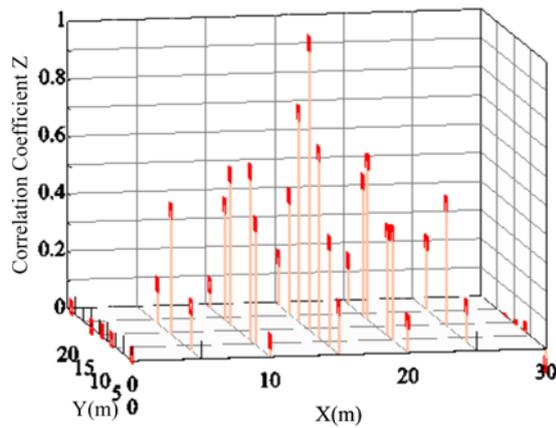


(a) 入力レベル25%

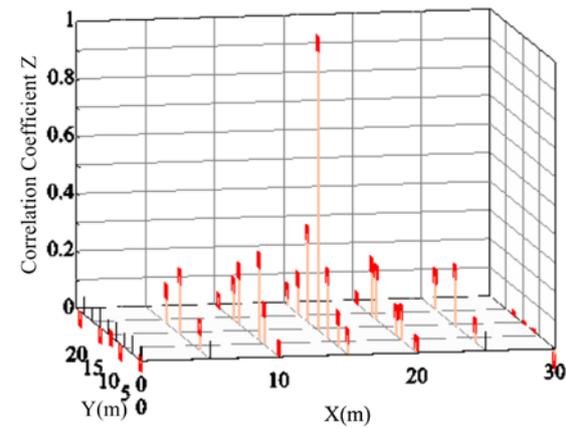


(b) 入力レベル100%

図9 屋根面加速度Y方向の相関係数分布



(a) 入力レベル25%



(b) 入力レベル100%

図10 屋根面加速度Z方向の相関係数分布

X 方向 25%の結果である図 8(a)では基準である RA18 を含む X4 通りの相関係数の値が高い。特に相関の高かった RA19 と基準となる RA18 の波形の重ね合わせを図 11(a)に示す。上段には全体波形、下段には 2 番目のピーク付近 5 秒間を拡大して示したものとす。また、RA18 と同じ頂部であっても妻面である X1、X7 通りの RA03、RA33 は相関係数の値が他に比べて低い値となっている。X2～X6 通りは棟側が高く、軒側が低い傾向であるのに対し、X1 と X7 通りでは逆の棟側が低く軒側が高い傾向であった。100%の(b)では X4 通りで高い値を示した。特に相関の低かった RA03 と基準となる RA18 の波形の重ね合わせを図 11(b)に示す。図中の構成は(a)と同様である。X4 通り以外は Y4 通りの棟側が小さく、Y1、Y7 通りの軒側に近づくに従い大きくなる傾向がある。図 8(a)、(b)を比較すると他の位置と比べて相関係数の高い値が X4 通りに集中するのは共通であり、X4 通りから遠い X1、X7 にいくほど相関係数の値が低くなるのが分かった。

Y 方向 25%の結果である図 9(a)では一貫した傾向は見られず、相関係数が高いのは南側である RA13、RA19、RA26 であった。RA13 と基準となる RA18 の波形の重ね合わせを図 12(a)に示す。他の位置と比べて低い値を示した RA08、RA06、RA30 は RA18 と等間隔の位置であった。100%の(b)では全体的に相関係数が低く、棟側が高く軒側が低い傾向であった。特に相関の低い RA27 と RA18 の波形の重ね合わせを図 12(b)に示す。図 9(a)、(b)を比較し共通することは RA13 と RA26 が他の位置と比べて高い値を示すことであった。

Z 方向 25%の結果である図 10(a)において、他の地点と比べて最も相関係数の高い値を示した RA19 と基準となる RA18 の波形の重ね合わせを図 13(a)に、他の地点と比べて最も相関係数の低い値を示した RA35 と RA18 の波形の重ね合わせを図 13(b)に示す。図 13(b)のグラフからは RA35 と RA18 の波形は逆位相になっていることが分かる。図 10(a)より屋根面全体の傾向として Y4 通りの棟側が高く、Y1、Y7 通りの軒側に近づくに従い小さくなるのが分かった。また、RA18 を含む X4 通りが他の通りに比べ高い値を示し、妻面の X1、X7 通りに近づくに従い小さくなる傾向であった。100%の(b)でも(a)と同様の傾向が見られた。(a)と比べても全体的に相関係数が低いことがわかる。図 10(a)、(b)を比較すると RA11、RA17、RA19 が共通して同じ入力レベル時の他の地点と比べて高く、RA31、RA35 が共通して同じ入力レベル時の他の地点と比べて低かった。屋根面全体としての傾向も類似していた。

図 8～図 10 より 25%時よりも 100%時のほうが相関係数の値は低下することが分かった。これは周辺の水平ブレースによる塑性化の影響であると思われる。このことについては今後検討のうえ、理解を深める。

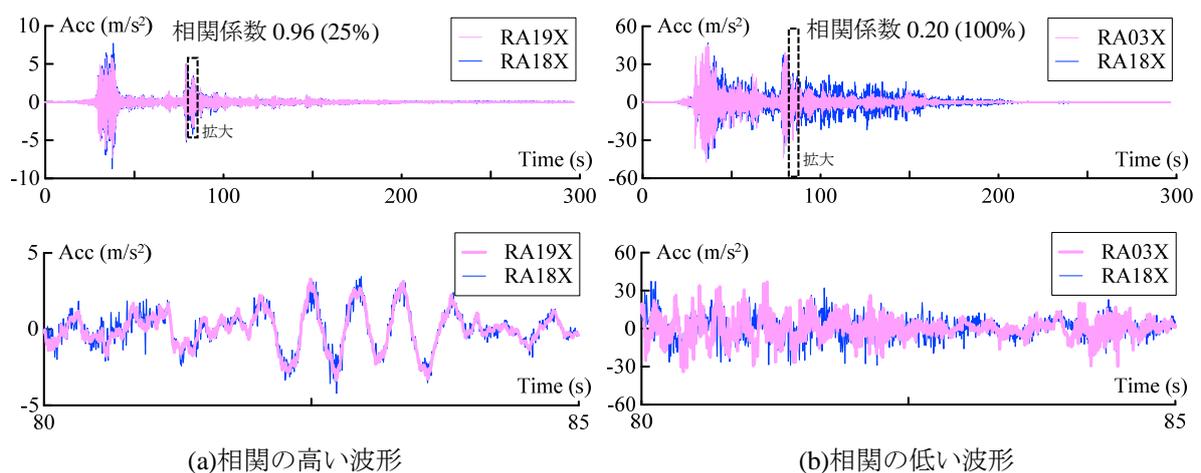


図11 X方向での加速度波形重ね合わせ

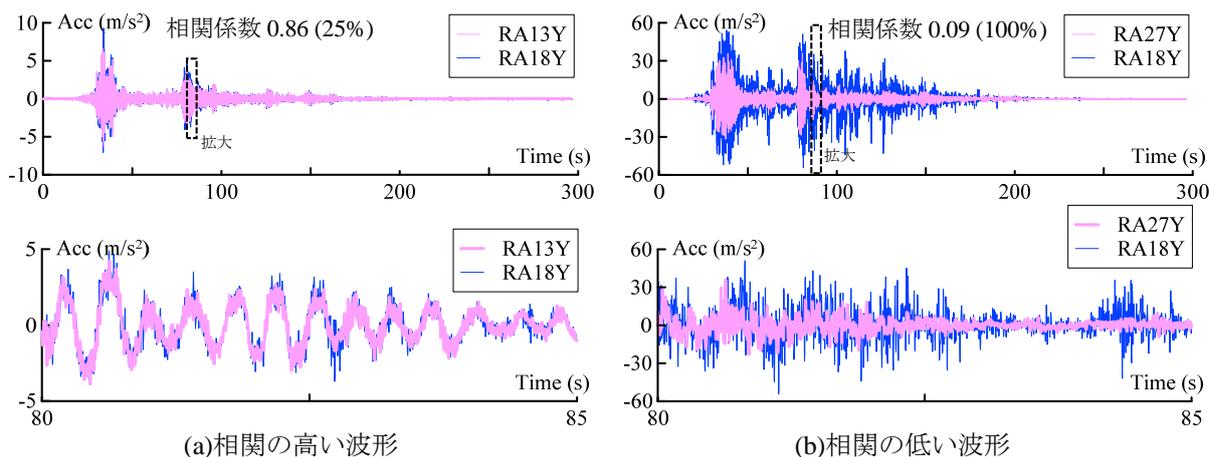


図12 Y方向での加速度波形重ね合わせ

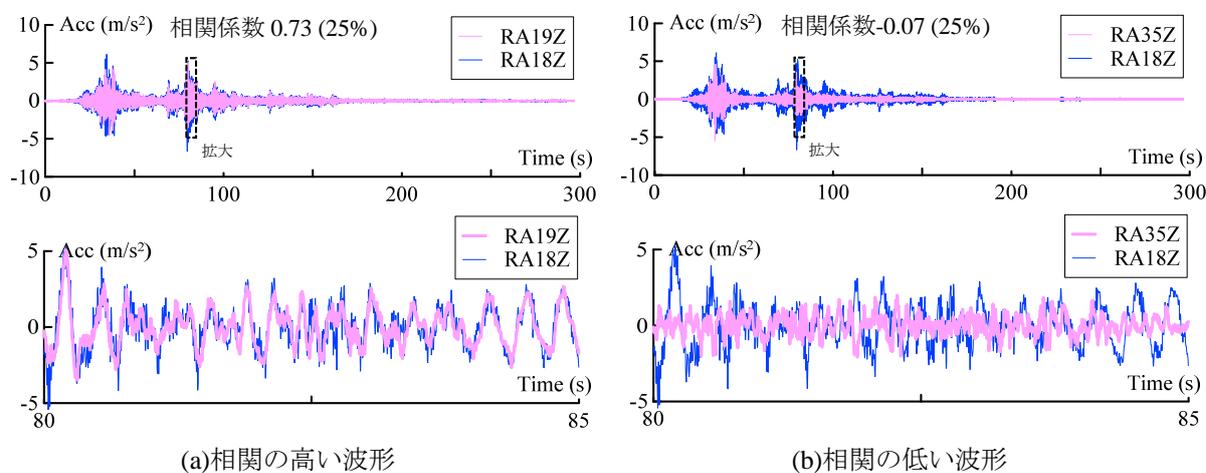


図13 Z方向での加速度波形重ね合わせ

4. まとめ

Eーディフェンスを用いた大規模空間吊り天井の体育館において、加振波K-NET仙台波入力時における屋根面の応答性状を、計測位置における最大加速度と屋根面中央部の加速度波形との相関係数それぞれの比較により明らかにした。以下に知見を示す。

- (1) 梁間方向(X方向)と上下方向(Z方向)の加速度は軒側であるY1、Y7通りで小さく、棟側であるY4通りに近づくに従い大きくなる傾向がある。
- (2) 屋根面中央部のRA18と各々の計測位置における加速度波形の相関係数の値は25%時よりも100%時のほうが低下することが分かった。上下方向(Z方向)においては入力レベルが25%、100%で異なっても相関係数分布の傾向は類似していた。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 梶原浩一、佐々木智大、青井淳、田川浩之、壁谷澤寿海、清家剛、山田哲、福山洋：Eー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1プロジェクト概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、2014年9月、pp.997-998。
- 3) 成田和彦、竹内徹、松井良太：鉄骨屋根体育館におけるRC片持壁付架構の応答評価、日本建築学会

- 構造系論文集、第 80 巻、第 708 号、2015 年 2 月、pp.273-283.
- 4)竹内徹、堤友紀、熊谷知彦、小河利行：制振部材を用いた鉄骨造学校体育館の耐震改修および屋根部の地震応答、日本建築学会構造系論文集、第 656 号、2010 年 10 月、pp.1891-1900.
 - 5)竹内徹、湯澤優登、熊谷知彦、小河利行：制振部材を用いた鉄骨造体育館における屋根面架構の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第 669 号、2011 年 11 月、pp.1989-1995.
 - 6)金子健作、元結正次郎：鉄骨造平屋建てにおける屋根面柔性を考慮した水平方向振動特性の簡易評価手法、日本建築学会構造系論文集、第 706 号、2014 年 12 月、pp.1805-1815.
 - 7)小林俊夫、由利隆行、荒井智一：鋼製下地を用いた吊り天井の耐震性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 630 号、2008 年 8 月、pp.1295-1302.
 - 8)森大、川口健一、荻芳郎、小澤雄樹、中楚洋介、細見亮太：人体指標を用いた天井材の安全評価に関する基礎的研究-その 4 石膏ボード実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、2013 年 8 月、pp.1003-1004.
 - 9)元結正次郎、佐藤泰章：鋼製下地在来工法天井における野縁方向水平剛性評価法、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 703 号、2014 年 9 月、pp.1395-1403.
 - 10)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：東北地方太平洋沖地震および余震による学校体育館の構造被害、日本建築学会技術報告集、vol.20、No.44、2014 年、p.133-138.
 - 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ー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)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ー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.