

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	E - ディフェンス実験に基づく鉄骨体育館の固有振動数とモード形状の分析
Title(English)	Evaluation of Natural Frequency and Mode Shape of Steel Gymnasium based on E-defense Shaking Table Tests
著者(和文)	佐藤大樹, 和田穂月, 佐々木智大, 青井淳, 梶原浩一
Authors(English)	Daiki Sato, Hotsuki Wada, Tomohiro Sasaki, Atsushi Aoi, Koichi Kajiwara
出典(和文)	第15回日本地震工学シンポジウム論文集, vol. 15, , pp. 804-813
Citation(English)	The Japan Earthquake Engineering Symposium, proceedings, vol. 15, , pp. 804-813
発行日 / Pub. date	2018, 12

E-ディフェンス実験に基づく鉄骨体育館の固有振動数とモード形状の分析

佐藤大樹¹⁾, 和田穂月²⁾, 佐々木智大³⁾青井淳⁴⁾, 梶原浩一⁵⁾

1) 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

2) 巴コーポレーション立体設計部 (元 東京工業大学 大学院生), 修士 (工学)

e-mail : h_wada@tomoe-corporation.co.jp

3) 大林組技術研究所 (元 防災科学技術研究所), 博士 (工学)

e-mail : sasaki.tomohiro@obayashi.co.jp

4) 竹中工務店技術研究所, 修士 (工学)

e-mail : aoi.atsushi@takenaka.co.jp

5) 防災科学技術研究所地震減災実験研究部門, 部門長 博士 (工学)

e-mail : kaji@bosai.go.jp

要 約

本研究では、E-ディフェンス振動台を用いた実大鉄骨造体育館試験体の加振実験のデータを用いて、屋根面の応答性状を把握し、天井の設計用外力の提案を行うことを目的としている。その基礎的な検討として筆者らは、複数回加振を行った試験体の損傷によって固有振動数が低下することを確認した。本報では、試験体屋根面における加速度計から計測された加速度応答からFDD法を試験体損傷による減衰定数とモード形状の分析を行った。減衰定数は試験体が損傷すると上昇し、試験体の1次のモード形状は、損傷しても大きく変化しないことを確認した。

キーワード： E-ディフェンス, 鉄骨造体育館, 実大試験体加振実験, モード形状, 加速度線形補間

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¹⁾。また、天井の落下において死傷者の被害も報告されており、人命保護の観点から天井脱落のメカニズムを解明することは喫緊の課題である。

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。国土交通省は天井に関する基準を制定したが、天井の吊り元となる屋根面は剛床仮定を前提とし、地震時における屋根面の複雑な挙動は考慮されていない。屋根面の研究では、金子らが屋根面の柔軟性を考慮した実用上有効である簡易な振動特性の評価法を示し、学校体育館を例題として手法の妥当性を検討している²⁾。しかし解析モデルの検証に留まっており、実挙動との対応については議論されていない。また地震時応答特性を定量的に調査した検討事例

は極めて少ない^{例えば 3)}。

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 2014 年に実大三次元震動破壊実験施設（以下、E-ディフェンス）において体育館を想定した大空間建築物実験が実施された⁴⁾⁵⁾。筆者らはこれまで、体育館の構造躯体の損傷と固有振動数および山形形状を有した屋根面の応答性状を分析し⁶⁾⁷⁾、固有振動数の変化を再現できる解析モデルの構築⁸⁾を行ってきた。

本報では屋根面の設計用外力の提案を目指した基礎的な研究として、振動特性のモード形状と減衰定数に着目し、試験体の構造躯体の損傷により固有振動数が低下したときのモード形状と減衰定数の変化を確認することを目的としている。

2. 試験体および解析モデルの概要

2.1 試験体概要

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⁹⁾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¹⁾¹⁰⁾¹²⁾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。そのため、基礎梁ははみ出し梁となっている。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⁵⁾。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¹³⁾、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¹⁴⁾に基づく脱落防止対策が施された耐震天井¹⁵⁾¹⁶⁾である。なお、本報では耐震天井のみ検討を行っている。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。図 1 に試験体全体写真、図 2 に屋根面の加速度計位置図を示す。図 2 より、屋根面の屋根ブレース端部には RA01～35 の 3 軸計測（X：桁行方向、Y：梁間方向、Z：鉛直方向）が行える加速度計が屋根ブレース端部に設置されているが、全てに設置されていない。本報では、加速度計が設置されていない位置を点 A～R（図 2）とおく。

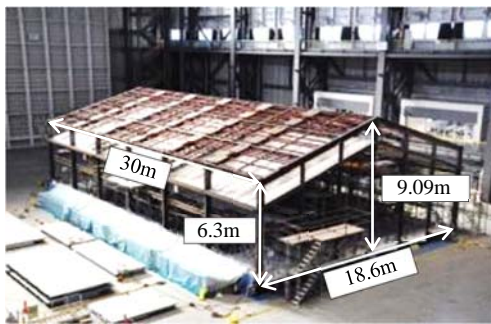


図 1 試験体写真

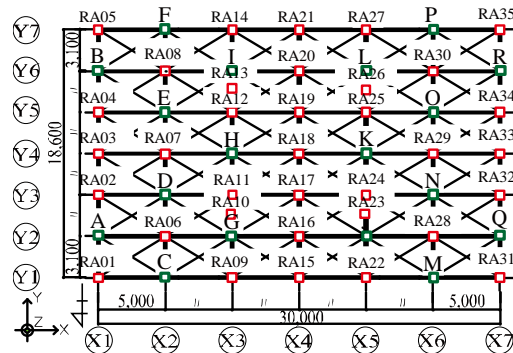


図 2 屋根面加速度計位置

2.2 加振計画

加振計画を表 1 に示す。試験体には K-NET 仙台波と JMA 神戸波、ランダム波の全 37 ケースの加振を行い、耐震天井の実験では、K-NET 仙台波を 5%、25%、50%、80%、100% の順で入力した後、JMA 神戸波を 100%、150% で加振した。ランダム波は、0.1～35 Hz の成分が含まれたランダム波で、最大加速度が 0.6 m/s² 程度となるよう調整した波形であり、入力方向は梁間、桁行、鉛直方向の各方向と 3 方向同時である。なお、伝達関数から算出した無損傷時（No.21）の固有振動数は、1 次：2.47Hz（梁間方向）、2

次：2.87Hz（桁行方向），3次：3.08Hz（鉛直方向）である⁵⁾。試験体の固有振動数は，K-NET仙台波50%（No.27）加振後に梁間，桁行方向が低下し，K-NET仙台波80%（No.30）加振後に桁行方向が約43%低下した⁵⁾。また，K-NET仙台波80%（No.30）から屋根ブレースの塑性化がはじまり，K-NET仙台波100%（No.32）では8割以上の屋根ブレースの塑性化を確認している⁵⁾⁶⁾。

2.3 解析モデルの概要

大空間建築物試験体設計図を元に作成した鉄骨造体育館試験体の解析モデルを図3に示す。モデルの鋼材種は，ブレース材をSNR400とし，その他をSS400のJIS規格とする。ブレース材はターンバックルブレース材であるが，モデルでは円柱とし，引張り専用要素とする。なお，本報において，本解析モデルは3章で示す加速度未計測位置での加速度を付近の加速度計記録から線形補間する手法の妥当性検証に用いられる。

表1 加振計画

実験日	2014/2/27											2014/2/28																												
天井	耐震天井																																							
加振No.	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
入力波形	ランダム波梁間	ランダム波桁行	ランダム波鉛直	ランダム波3軸	仙台波5%	ランダム波3軸	仙台波25%	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	仙台波50%	ランダム波3軸	ランダム波3軸	仙台波80%	ランダム波3軸	仙台波100%	ランダム波3軸	神戸波10%	ランダム波3軸	ランダム波3軸	神戸波15%	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸	ランダム波3軸			

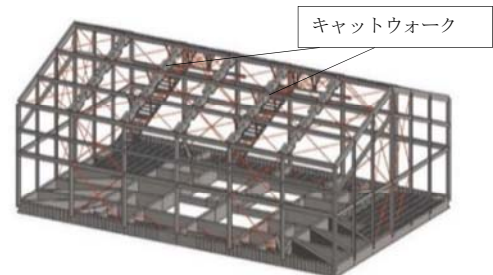


図3 解析モデル図

3. 線形補間法による加速度応答の算出

3.1 時刻歴応答解析結果を用いた加速度補間精度の検証

屋根面全体のモード形状を把握するためには，屋根面全体での加速度応答記録が必要となる。そこで，加速度計が設置されていない位置の加速度応答を線形補間から算出する。解析モデルを用いて，屋根面加速度計位置（図2）の加速度計が設置されていない点A～Rと加速度計位置RA03，15～21，33に関して，隣接する点から線形補間を行い，加速度応答を算出する。補間方法の整合性を確かめるため，桁行方向に補間を行う方法と梁間方向に補間を行う方法を示す。入力波として試験体無損傷時（加振No.21）のランダム波3軸方向（表1参照）を解析モデルに入力し算出する。その際，フィルター処理としてローパスフィルター（Low Pass Filter, 以下LPF），ハイパスフィルター（High Pass Filter, 以下HPF）はLPF 5.0Hz，HPF 0.50Hzとした任意の時刻 t における2点（ i, j 点）の加速度を $\ddot{x}_i(t)$ ， $\ddot{x}_j(t)$ とおくと，線形補間法から求めたい点 k における時刻 t の加速度応答 $\hat{\ddot{x}}_k(t)$ は以下の式で求められる。

$$\hat{\ddot{x}}_k(t) = \frac{\alpha \ddot{x}_i(t) + \beta \ddot{x}_j(t)}{\alpha + \beta} \quad (1)$$

ここで， α, β ：任意の係数比である。

算出した加速度応答 $\hat{\ddot{x}}_k(t)$ に関して解析モデルから得られる加速度データ $\ddot{x}_k(t)$ との適合率を算出する。以下に適合率（FIT[%]）の式を示す¹⁷⁾。

$$\text{FIT} = \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^N (\hat{\ddot{x}}_k(t) - \ddot{x}_k(t))^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^N (\ddot{x}_k(t) - \bar{\ddot{x}}_k)^2}} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここで $\bar{\ddot{x}}_k$ は次式で求められる。

$$\bar{\ddot{x}}_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ddot{x}_k(t) \quad (3)$$

図4に、式(3)で算出した各節点の適合率を示す。なお、図の横軸は加速度位置の節点 No.を示し、横軸左側は適合率、右側は最大加速度応答を示している。

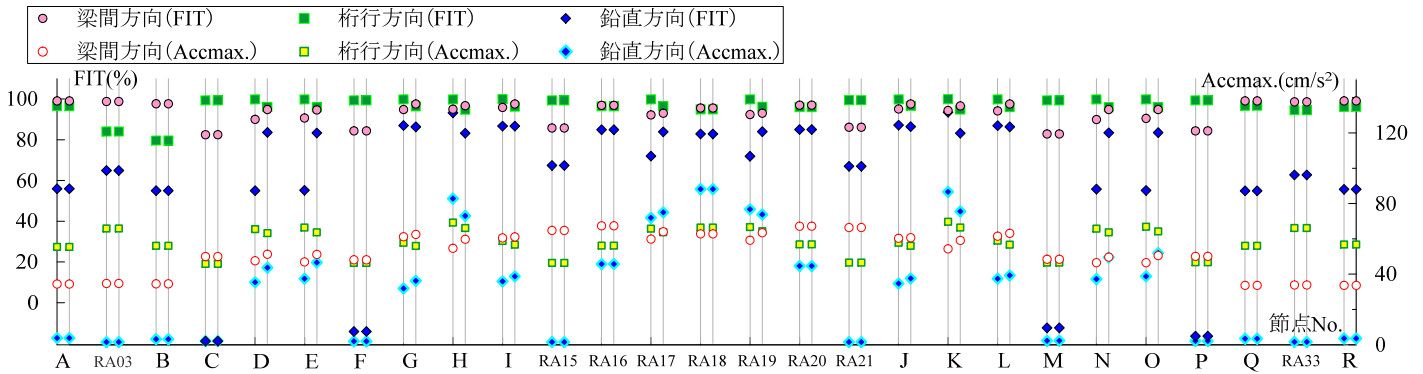


図4 解析値を用いた適合率（各位置につき、左から桁行補間、梁間補間の順）

図4より、梁間、桁行方向の適合率は、2つの手法において全ての点で80%以上であり、精度よく補間が行えた。鉛直方向は柱頭に位置する点A~C, F, M, P~R, RA03, 15, 21, 33で適合率が低いが、最大加速度応答が小さいため、屋根面のモード形状を求めるうえで大きな影響を与えないと考えられる。点D, E, N, Oにおいて鉛直方向の適合率が高いため、梁間方向に補間を行う方法を採用し、以降の検討を進める。

3.2 振動台加振実験結果を用いた加速度補間

3.1節の補間法が実験で計測された加速度応答においても妥当か検討を行う。入力波は、試験体無損傷時の加振No.21、試験体の固有振動数の低下があらわれた後の加振No.28、試験体の固有振動数が大幅に低下した後の加振No.31のランダム波3軸方向とする。試験体屋根面の線形補間の加速度応答と計測された加速度応答の比較が行えるRA03, 15~21, 33の適合率を図5に示す。なお、図5の各点のプロットは、左から加振No.21, 28, 31とする。

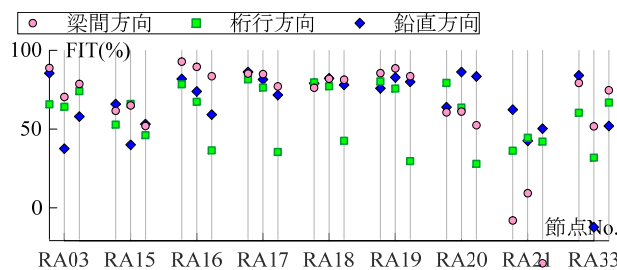


図5 適合率（各位置につき、左から加振No.21, 28, 31の順）

図5より、試験体無損傷時（加振No.21）における中央部の梁間、桁行方向は、適合率が平均で73%であり、最低でも60%以上となり、解析モデルと比べると最大で3割程度低下する。鉛直方向は、外周部での適合率が低いが、中央部は80%程度であり、全ての方向で概ね補間できている。加振No.28における梁間方向の適合率は、RA21で大きな低下がみられるが、加振No.21と概ね同様の適合率である。桁行方向も加振No.21と概ね同様の適合率を示し、鉛直方向中央部で50%以上となった。加振No.31における梁間、鉛直方向の適合率は、殆ど低下はみられない。

4. FDD 法を用いた固有振動数，減衰定数およびモード形状

4.1 FDD 法の概要

モーダルパラメーターの同定手法として Frequency Domain Decomposition (FDD) 法¹⁸⁾が挙げられる。FDD 法は，固有値が接近している場合でも応答加速度から精度よく動特性を推定できる。FDD 法により応答加速度から特異値曲線を求め，それぞれの固有振動数に相当するピーク周波数の付近の特異値ベクトルから，モード形状を推定する。

4.2 鉄骨造試験体屋根面の固有振動数の変化

FDD 法を用いて屋根面の特異値を算出し，特異値曲線のピーク周波数から固有振動数を推定する。入力波は加振 No.18~20 の各方向のランダム波と加振 No.21~37 中の 3 軸方向ランダム波(表 1)とし，屋根面の加速度計から計測された加速度応答から特異値曲線を算出する。加速度計が設置されていない位置は，3 章の補間方法により加速度を求めた。試験体無損傷時(加振 No.21)における梁間方向の X3 通りに位置する加速度応答の特異値曲線を図 6 に示し，特異値曲線から求めたランダム波の各方向 1 次の固有振動数を図 7 に示す。

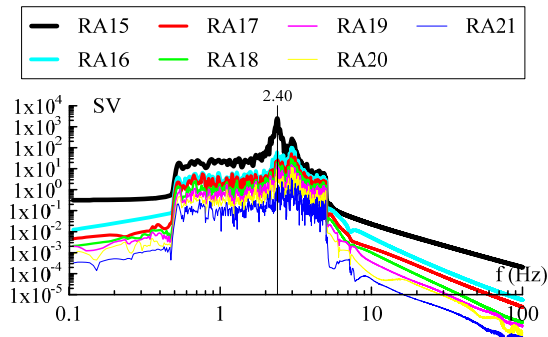


図 6 特異値曲線(梁間方向，加振 No. 21)

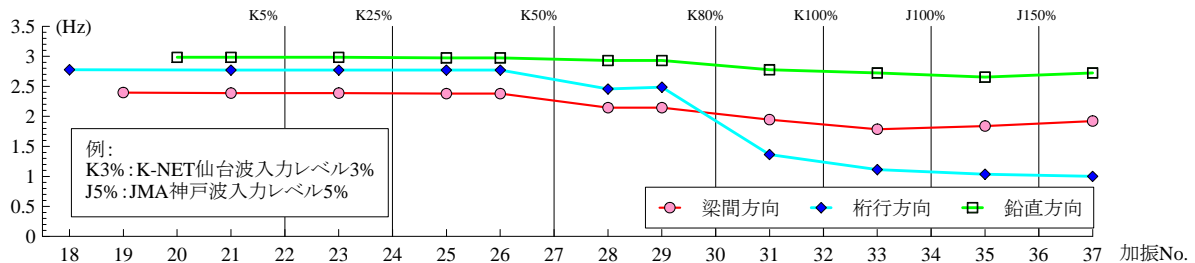


図 7 FDD 法から推定した固有振動数

図 6 より，FDD 法から推定した特異値のピーク周波数から，梁間方向の 1 次の固有振動数が 2.39Hz であることがわかる。これは，伝達関数から算出した固有振動数⁹⁾と近い値であることを確認した。

図 7 より，梁間方向の固有振動数は，K-NET 仙台波 50% から低下していることが確認できる。桁行方向も梁間方向と同様に K-NET 仙台波 50% 加振後で固有振動数が低下し，K-NET 仙台波 80% の加振後に大幅に固有振動数が低下しており，加振前後の低減率は 45% である。鉛直方向を見ると地震動加振後で多少の増減はあるが，他の方向に比べ大きな固有振動数の変化は見られない。固有振動数の低下の大きな要因は，壁ブレースの塑性化であると考えられる^{5),6)}。また，全ての方向において伝達関数から求めた固有振動数と，FDD 法から推定した固有振動数は，良い対応を示しており，精度よく同定が行えたことを確認した。

4.3 試験体屋根面の減衰定数の変化

特異値における各次数の範囲内 FDD 法を用いて算出した特異値曲線のピーク周波数に関してフィルター処理を行い、逆フーリエ変換して得られた自己相関関数の波形より、広義減衰を求める。4.2 節で算出した特異値曲線のピーク周波数に関して 0.9~1.1 倍のバンドパスフィルターをかけ、逆フーリエ変換して自己相関関数を算出する。自己相関関数を自由振動数の理論曲線に当てはめ、減衰定数の推定を行う。図 8 に FDD 法より求めた自己相関関数（実線）と自由振動の理論曲線（破線）を示し、図 9 に推定した減衰定数を示す。なお、図 8 における各曲線は、加振 No.18~20 のランダム波 1 軸加振と加振 No.21, 28, 31 のランダム波 3 軸加振を入力した際の自己相関関数を示している。

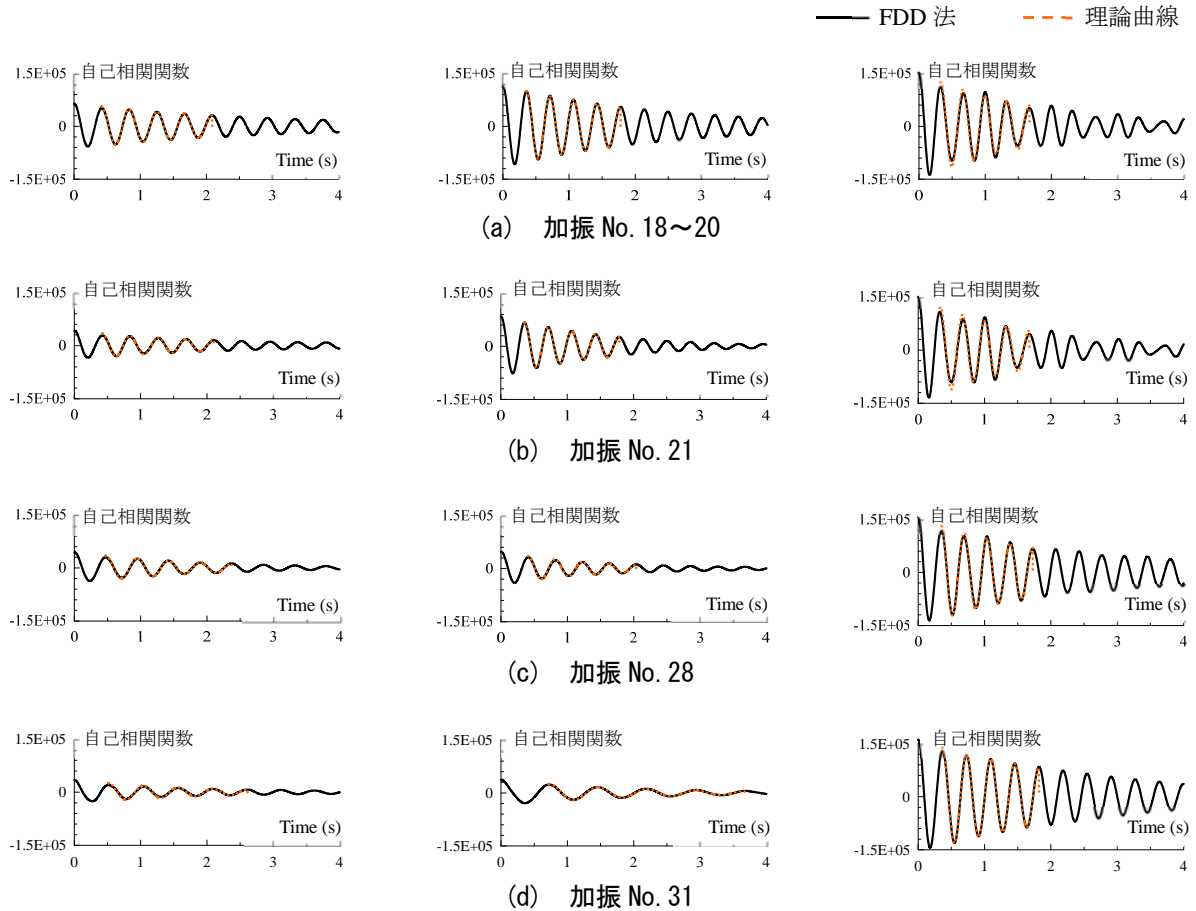


図 8 自己相関関数（各図左から梁間，桁行，鉛直を示す）

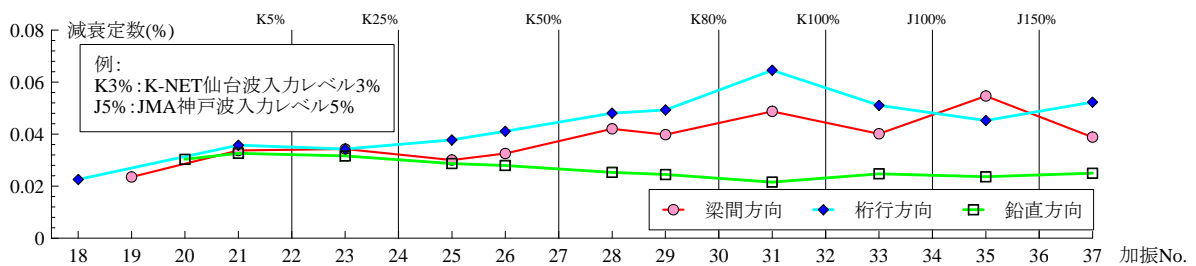


図 9 FDD 法から推定した減衰定数

図 8 より，梁間，桁行方向の自由振動の理論曲線は，試験体が損傷しても自己相関関数とよく一致しており，精度よく同定を行えたことがわかる．梁間方向の自由振動の理論曲線は，自己相関関数のピークを一部とらえてない場合もあるが，概ね一致していると判断できる．

図 9 より梁間方向の減衰定数は，固有振動数の低下を確認した K-NET 仙台波 50%加振後に上昇が確認できる．桁行方向の減衰定数は，梁間方向と同様に K-NET 仙台波 50%加振後に上昇が確認でき，固有振動数が大幅に低下した K-NET 仙台波 80%加振後で減衰定数が上昇していることが確認できる．鉛直方向は，固有振動数と同様に概ね変化はみられない．

4.4 無損傷時の試験体屋根面のモード形状

4.2 節で推定した特異値のピーク周波数における特異値ベクトルから振動モードの同定を行う．はじめに，本節では無損傷時の実験結果を用いて同定手法の妥当性を検証する．入力波は，試験体無損傷時の加振 No.21 のランダム波 3 軸方向とし，屋根面の加速度計から計測された加速度から特異値ベクトルを算出する．モード形状は試験体の中央に位置する RA18 を基準とし，各方向で基準化することにより推定する．各方向の 1 次のモード図を図 10 に示す．

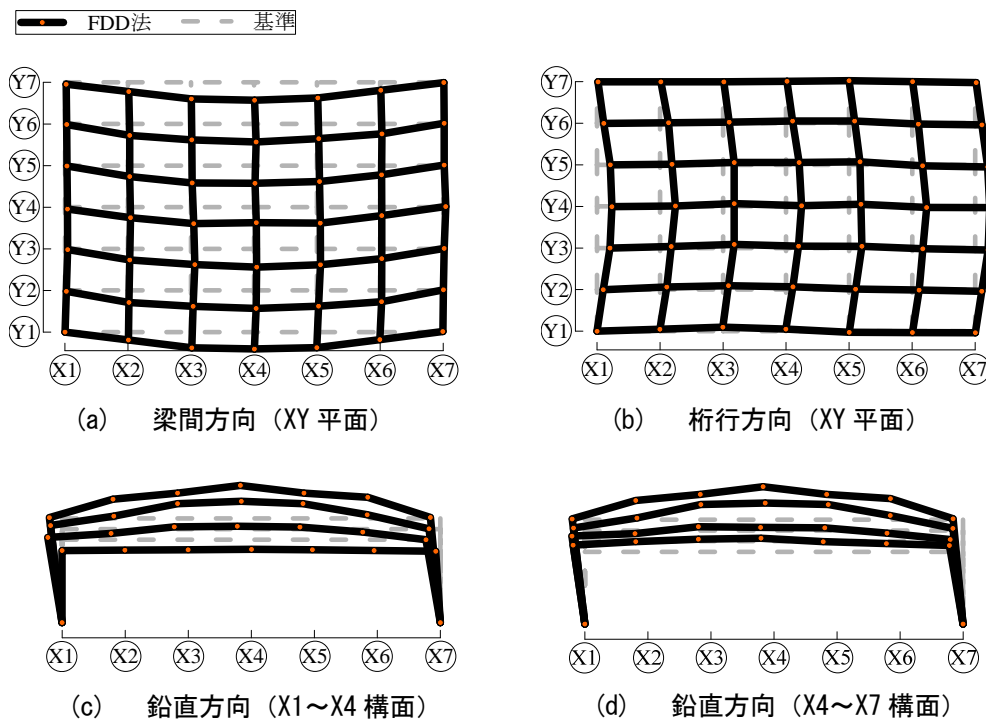


図 10 FDD 法から推定した固有振動数

図 10 より，FDD 法により同定した結果は，概ね対称の形状となった．これは事前に行った解析モデルの固有値解析結果のモード形状と比べて，一部異なる箇所があるが概ね一致することを確認している．また，バンドパスフィルターを用いた同定¹⁹⁾で得られたモード形状も一致することも確認している．以上より，本同定結果は妥当であると考えられる．

5. 試験体損傷によるモード形状の変化

加振 No.21（無損傷時）、37（損傷時）のランダム波による実験結果を用いて、4章の算出方法から試験体の損傷によるモード形状の変化を検討する。図11に加振波を比較したモード図を示す。ここでは、梁間方向はX4構面、桁行、鉛直方向はY4構面（図2）を示す。図中の実線は無損傷時、破線は損傷時の結果である。

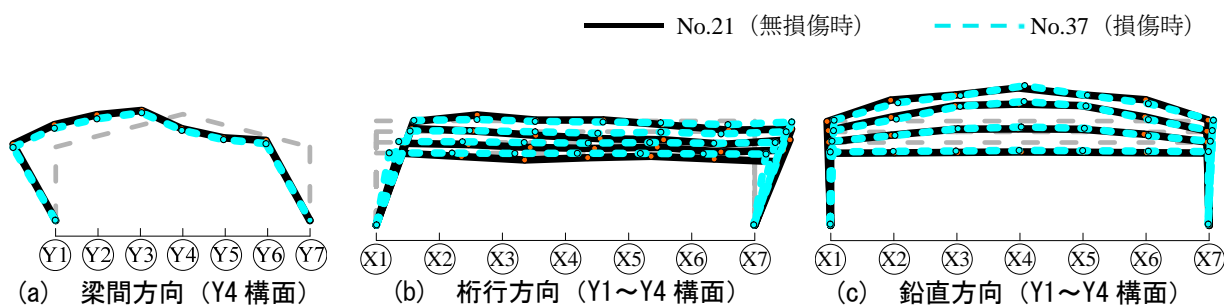


図11 FDD法から推定したモード形状

図11より、壁、屋根ブレースが塑性し、4.3節で示したように、固有振動数が梁間方向で19%、桁行方向で64%低下したにもかかわらず、各方向の1次のモード形状は大きく変化しないことが確認できる。これは、フィルターを用いた同定¹⁹⁾で得られたモード形状も一致することを確認した。また、損傷時においても1次固有振動数における屋根面でのコヒーレンス値が高いことを確認しており²⁰⁾、モード同定結果の信頼性は高いものと考えられる。

6. 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加振実験より、振動特性のモード形状と減衰定数に着目し、試験体の構造躯体の損傷により固有振動数が低下したときのモード形状と減衰定数の変化の確認を目的とした。以下に得られた知見を示す。

1. 加速度計が設置されていない位置の加速度応答を線形補間から算出した。中央部に位置する加速度応答の算出は、適合率が高く補間を行えた。
2. FDD法を用いて同定した固有振動数は、ブレースの塑性化による試験体の固有振動数の低下を捉えることができた。これは既報⁶⁾で示した伝達関数から算出した固有振動数の変化と良い対応を示した。
3. 梁間、桁行方法の減衰定数はブレースの損傷に伴い上昇した。一方、鉛直方法の減衰定数に大きな変化は見られなかった。
4. 試験体屋根面の1次のモード形状は、屋根ブレースが塑性化しても大きく変化しないことを確認した。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」で公開されている平成25年度「大空間建築構造体における非構造部材の実験」のデータを用いました。ここに記して、感謝の意を表します。

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, 見浜進, 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, pp.935-940, 2012.10
- 2) 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79巻, 第706号, pp.1805-1815, 2014.12
- 3) 渡壁守正, 脇山善夫, 石原直, 岩田善裕, 稲井慎介, 石岡拓, 石田琢志: 東北地方太平洋沖地震を経た体育館の振動特性, 日本建築学会技術報告集, 第18巻, 第40号, pp.865-870, 2012.10

- 4) 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，2015.2
- 5) 佐々木智大，青井淳，田川浩之，梶原浩一，佐藤大樹，壁谷澤寿海，清家剛，山田哲，福山洋：実大鉄骨造体育館試験体の設計および応答の概要 E-ディフェンスを用いた吊り天井を有する体育館の天井脱落被害再現実験 その 1，日本建築学会構造系論文集，第 82 巻，第 736 号，pp.831-841，2017.6
- 6) 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-ディフェンスを用いた実大鉄骨造体育館加振実験における固有振動数の変化と損傷の分析，構造工学論文集，Vol.63B，pp.241-250，2017.3
- 7) 佐々木智大，佐藤大樹，鈴木理恵，田川浩之，青井淳，梶原浩一：実大体育館加振実験における加振速度の二重積分による変位算出法の精度検証，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 54 号，pp.427-432，2017.6
- 8) 鈴木理恵，佐藤大樹，佐々木智大，青井淳，梶原浩一，田川浩之：実大鉄骨造体育館実験のブレースの塑性率に基づきブレースの剛性を变化させた解析モデルの固有値解析による固有振動数，日本建築学会関東支部研究報告集（CD-ROM），2089，pp.617-620，2017.3
- 9) 文部科学省：学校施設の屋内運動場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
- 10) 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，pp.405-410，2014
- 11) 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，pp.981-986，2014
- 12) 江口亨，清家剛，熊谷亮平，松本由香，伊山潤，山田哲，梶山健二，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，pp.55-59，2015
- 13) 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），pp.999-1000，2014.9
- 14) 一般財団法人 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
- 15) 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），pp.1001-1002，2014.9
- 16) 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），pp.1003-1004，2014.9
- 17) 足立修一：制御のための上級システム同定，p.12-13，2004.3
- 18) Brincker, R., L. Zhang, P. Andersen: Modal Identification from Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition, Proc. of 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, TX, pp.625-630, 2000.2
- 19) 和田穂月，佐藤大樹，鈴木理恵，佐々木智大，青井淳，梶原浩一：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 21 加速度記録を用いた 1 次モード応答の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.965-966，2017.8
- 20) 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 20 周波数領域における屋根面応答の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.963-964，2017.8

Evaluation of Natural Frequency and Mode Shape of Steel Gymnasium based on E-defense Shaking Table Tests

SATO Daiki ¹⁾, WADA Hotsuki ²⁾, SASAKI Tomohiro ³⁾,
AOI Atsushi ⁴⁾ and KAJIWARA Koichi ⁵⁾

- 1) Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
- 2) Tomoe Corporation, M. Eng.
- 3) Obayashi Corporation, Dr. Eng.
- 4) Takenaka Corporation, M. Eng.
- 5) Manager, Earth Science and Disaster Resilience, Dr. Eng.

ABSTRACT

This study aims to grasp the response characteristics of the roof surface and propose external forces for designing the ceiling based on the data of E-defense shaking table test data by using real size steel gymnasium specimen. As a fundamental study, the authors confirmed that natural frequency decreases due to damage of specimen subjected to multiple excitation. In this paper, the mode shape is estimated from the value measured from the accelerometer on the roof surface of the specimen using the FDD method, and the mode shape due to damage is evaluated.

Keywords: Earthquake, Engineering, Reinforced concrete, Shear