

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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 変化させた解析モデルの固有値解析による固有振動数
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, Atsushi Aoi, Koichi Kajiwara, Hiroyuki Tagawa
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 617-620
Citation(English)	, , , pp. 617-620
発行日 / Pub. date	2017, 3

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変化させた 解析モデルの固有値解析による固有振動数

構造—振動

正会員 ○ 鈴木理恵*1

正会員 佐藤大樹*2

〃 佐々木智大*3

〃 青井淳*4

鉄骨造体育館 実大振動実験 E—ディフェンス

〃 梶原浩一*5

〃 田川浩之*6

固有振動数 ブレース 塑性率

1. はじめに

避難施設としての役割を担う学校施設の体育館において、東北地方太平洋沖地震では吊り天井の脱落被害が生じたことが報告されている¹⁾。天井脱落のメカニズムを解明することは緊結の課題であるが、構造躯体との共振によって吊り天井の応答が増幅されたと考えられるものもある^(例えば2)ことから、体育館の構造躯体について把握することは重要であるが、実建物における体育館の構造躯体についての分析例はいまだ少ない^(例えば3)。そこで2014年に実大三次元震動破壊実験施設(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。本研究では、基礎的な研究として体育館の構造躯体の損傷と固有振動数について検討を行っている⁴⁾。本報では実験の試験体の設計図を参考に解析モデルを構築し、実験時の固有振動数の変化をブレースの塑性率により剛性を変化させた解析モデルの固有値解析により再現することを目的とする。

2. 実験概要

試験体は体育館を想定した吊り天井を有する実大鉄骨造建築物である。吊り天井の動きが外部から確認しやすいよう、屋根、外装材は省略しているが、屋根材の質量分は振動特性に与える影響が大きいことから、屋根垂を設置している⁵⁾。図1に試験体全体写真、図2に北立面、図3に東立面、図4に1階伏図、図5に屋根伏図を示す。X軸を桁行方向、Y軸を梁間方向、Z軸を鉛直方向と呼ぶ。また用いたブレース材の概要を表1に示す。屋根面に設置されているブレース材のことを屋根ブレースと呼ぶ。



図1 試験体全体写真

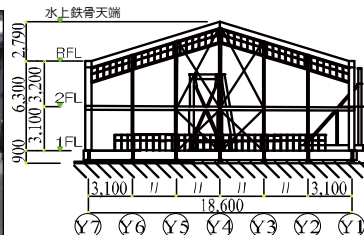


図2 北立面

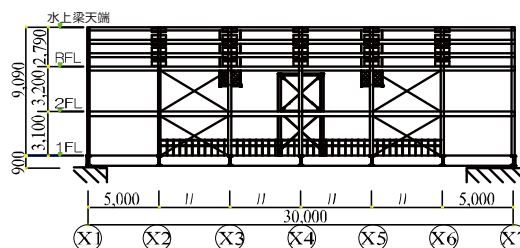


図3 東立面

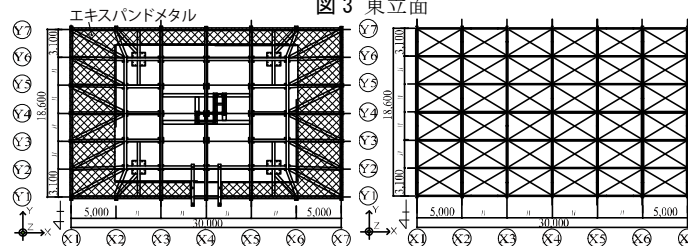


図4 1階伏図

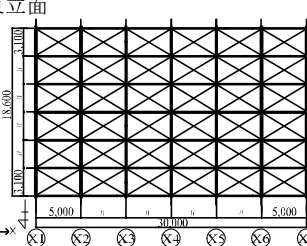


図5 屋根伏図

表1 ブレース材の概要と材料試験結果

	壁ブレース		屋根ブレース
	妻面	桁面	
ブレース径	M20	M27	M16
降伏点[N/mm ²]	314	313	291
降伏ひずみ[μ]	1531.7	1526.8	1419.5

試験体には加振レベルを変えた K-NET 仙台波と JMA 神戸波を連続で入力しており、加振の前にはランダム波 3 軸加振が行われている⁴⁾。本報では耐震天井試験体⁵⁾を対象とし、試験体の固有周期は梁間(Y)方向で 0.415s、桁行(X)方向で 0.358s、鉛直(Z)方向で 0.332s であった。

3. 解析モデルの概要

大空間建築物試験体設計図⁶⁾を元に作成した鉄骨造体育館試験体の解析モデルを図6に示す。

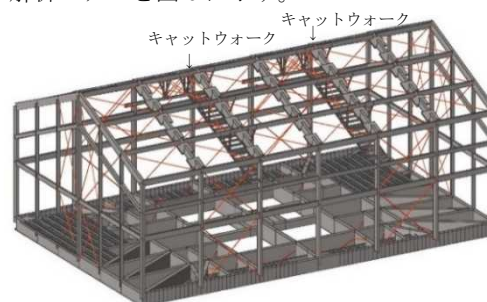


図6 解析モデル図

部材の鋼材種を、ブレース材は SNR400、その他の材は SS400 の JIS 規格とした。解析モデルの概要について以下に示す。

- (1) モデル化にあたり、天井試験体と天井の吊り元となる母屋材、スチフナーは省略した。
- (2) 柱の柱脚はすべてピン接合とした。
- (3) 屋根垂は直方体 1m×1m、高さ 64mm の柱部材でモデル化し、屋根の大梁の中央節点 (A 点) に設置し、A 点と B 点を剛体連結とした (図 7)。
- (4) ブレース材はターンバックルブレース材であるが、モデル化では円柱とし、引張り専用要素とした。ただし、引張り専用要素としたブレース材は、固有値解析において引張り同様、圧縮側でも剛性を有することからブレース材のヤング係数 (弾性係数) は SNR400 の 1/2 の 102.5 kN/mm² とした。
- (5) 屋内仮設通路 (キャットウォーク) の手すりの質量は、屋内仮設通路の手すりが配置されている小梁に等分布荷重としてかけた。
- (6) 1 階および屋内仮設通路 (キャットウォーク) の床であるエキスパンドメタルは床荷重とした。

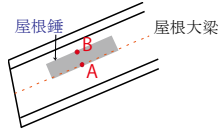


図 7 屋根垂詳細図

4. 実験と解析モデルの質量と固有振動数の比較

4.1 質量の比較

本報のモデル化で使用した材のみを考慮した試験体の質量の積算結果を表 2 に示す。ただし、ブレース材の質量については、鋼材 7850 kg/m³ の円柱と仮定し質量を算出している。表 2 より試験体の質量のおよそ 6 割を基礎部分が占め、次に屋根部分の質量が 3 割程度占めていることが分かった。

表 2 試験体の質量の積算結果

	基礎部分	1,2階部分	屋根部分 (垂あり)	キャット ウォーク	合計
質量 (ton)	104.95	16.27	53.71	3.01	177.93
割合 (%)	58.98	9.14	30.18	1.69	

解析モデルの質量の合計値と試験体の質量の比較を表 3 に示す。表 3 より実験において積算した試験体の質量の合計と解析モデルの質量合計はわずか 1.3% である。

表 3 実験と解析モデルの質量の比較

	試験体	解析モデル
質量合計(ton)	177.93	180.30

4.2 一次固有振動数の比較

耐震天井試験体の地震動入力前に実施した 3 軸同時入力ランダム波時の一次固有振動数 (以下、固有振動数) を実験の固有振動数の初期値とする。実験と解析モデルの固有値解析における固有振動数の初期値の比較を表 4 に示す。固有振動数はパワースペクトル密度の比で算出した伝達関数より推定した⁴⁾。表 4 より桁行方向と鉛直方向の初期値は概ね一致していることが分かる。しかし梁間方向の初期値について、解

析モデルは実験よりも約 3 割程度低い振動数となっている。この要因としては基礎梁の張り出しが関係していると思われるが、今後の検討課題である。

表 4 実験の固有振動数⁴⁾と解析モデルの固有振動数の初期値の比較

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
実験(Hz)	2.470	2.870	3.080
解析(Hz)	1.910	2.768	3.041

5. ブレースの塑性率と剛性の倍率の関係

5.1 実験におけるブレースの塑性率

実験ではブレースにひずみ計が設置されている⁵⁾。ひずみの時刻歴波形の結果を用いて塑性率を算出し、塑性率に応じて解析モデルのブレースの剛性の値を変え、固有振動数の変化の再現を試みる。まず、実験においてどの塑性率まで固有振動数が変化しないかを明らかにする。文献 4 を参照し耐震天井試験体の固有振動数の変化を図 8 に示す。

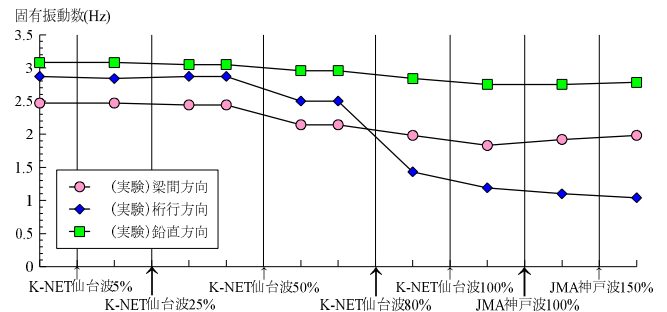


図 8 固有振動数の変化 (耐震天井試験体)

図 8 より K-NET 仙台波 25%加振の前後において固有振動数の低下は見られないことから K-NET 仙台波 25%加振時における塑性率の範囲ではブレースの剛性は低下していないと仮定することができる。

K-NET 仙台波 25%加振時における壁および屋根ブレース材の塑性率の最大値はそれぞれ 0.436, 0.485 であった。ブレースは試験体全体の変形の大きさから、圧縮座屈を生じている可能性はあるが、全体の剛性に与える影響がないことから塑性率が 0.5 未満であればブレースの剛性は初期状態でよいと判断することとする。

5.2 ブレースの塑性率と解析モデルのブレースの剛性

実験のブレースの塑性率と図 8 を参考にし、解析モデルのブレースの剛性の値を表 5 に示す。表 5 で表している塑性率と剛性倍率を図 9 に示す。表 5 の左列の K-NET 仙台波加振とは、ひずみ計が設置されていたブレース材 52 本の塑性率の最大値の範囲である。5.1 節より、塑性率 0.5 未満はブレースの剛性倍率を 1.0 とした。図 8 および表 5 より、K-NET 仙台波 50%においてブレースは塑性率 1.0 未満にも関わらず、固有振動数は低下していることが分かる。このことから引張りひずみが降伏に達していない塑性率 1.0 未満では圧縮座屈が生じ⁴⁾、剛性が低下していると考えられる。これより、塑性率 0.05 ごとに区切った 1/18 刻みで剛性倍率が減少するとした。また、引張りひずみが降伏に達した塑性率 1.0 以上は一律に剛性を 1/7 倍とした。塑性率と剛性の関係は試行錯誤により決定した。

表5 ブレースの塑性率と剛性倍率

K-NET 仙台波加振		塑性率	剛性倍率	弾性係数 [kN/mm ²]
25 %	50 %	0.40	1	102.5
		0.50	17/18	96.806
		0.55	8/9	91.111
		0.60	5/6	85.417
		0.65	7/9	79.722
		0.70	13/18	74.028
		0.75	2/3	68.333
		0.80	11/18	62.639
		0.85	5/9	56.944
		0.90	1/2	51.250
		0.95	4/9	45.556
		80 %	100 %	1.00
1.05				
1.10				
1.15				
1.20				
1.20				

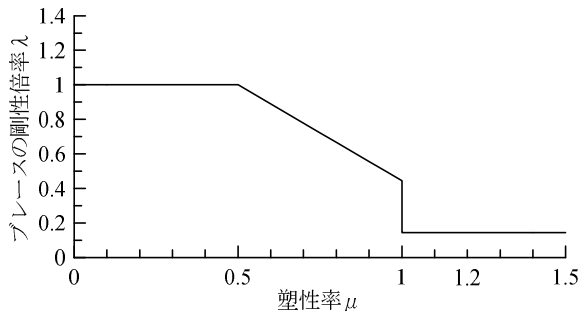


図9 ブレースの塑性率と剛性倍率の関係図

$$\lambda = 1.0 (\mu < 0.5) \quad (1a)$$

$$\lambda = -\frac{10}{9}\mu + \frac{14}{9} (0.5 \leq \mu < 1.0) \quad (1b)$$

$$\lambda \approx 0.14 (\mu \geq 1.0) \quad (1c)$$

6. 塑性率によりブレースの剛性を変化させた解析モデルの固有振動数と実験の固有振動数の比較

K-NET 仙台波 50%, 80%, 100%加振において、実験時の各加振におけるブレース材の塑性率を算出し、塑性率に応じてブレースの剛性を変化させた解析モデルの固有振動数の検討を行う。解析モデルにおいてブレースの剛性を変化させる際は材の弾性係数を変化させた。また、壁および屋根ブレース材においてすべてのブレース材にひずみ計は設置されていない。しかしすべて X 型で配置されているため、ひずみ計が設置されていないブレースの場合は対となるブレースの結果と

同様であるとし、X 型の両ブレース材にひずみ計が設置されている場合は大きな塑性率の結果を反映することとする。

6.1 K-NET 仙台波 50%

解析モデルにおいて K-NET 仙台波 50%時のブレースの剛性の倍率を塑性率に伴い表 5 のように変化させ、実験の固有振動数と比較する。実験における固有振動数の変化と倍率を表 6、固有値解析における固有振動数の変化と倍率を表 7 に示す。ここで言う倍率とは、実験および解析モデル各々の初期値に対する変化後の固有振動数の比率である。桁行方向と鉛直方向の固有振動数の変化は概ね良い対応を示している。また、倍率については 3 方向とも誤差は 3%未満である。

表6 実験の固有振動数と倍率 (K-NET 仙台波 50%)

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
初期値(Hz)	2.47	2.87	3.08
K-NET 仙台50%後のランダム波3軸(Hz)	2.14	2.50	2.96
倍率(%)	86.64	87.11	96.10

表7 固有値解析の固有振動数と倍率 (K-NET 仙台波 50%)

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
初期値(Hz)	1.91	2.77	3.04
ブレース剛性変化後(Hz)	1.68	2.38	2.98
倍率(%)	88.03	85.98	97.92

6.2 K-NET 仙台波 80%

6.1 節と同様に、K-NET 仙台波 80%時のブレースの剛性の低下を塑性率で判断し、解析モデルに反映させ固有値解析を行った。実験における固有振動数の変化と倍率を表 8、固有値解析における固有振動数の変化と倍率を表 9 に示す。梁間方向の固有振動数は異なる値を示しているが、桁行および鉛直方向は実験の固有振動数の変化と良い対応を示している。

表8 実験の固有振動数と倍率 (K-NET 仙台波 80%)

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
初期値(Hz)	2.47	2.87	3.08
K-NET 仙台80%後のランダム波3軸(Hz)	1.98	1.43	2.84
倍率(%)	80.16	49.83	92.21

表9 固有値解析の固有振動数と倍率 (K-NET 仙台波 80%)

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
初期値(Hz)	1.91	2.77	3.04
ブレース剛性変化後(Hz)	1.32	1.37	2.85
倍率(%)	69.23	49.65	93.62

6.3 K-NET 仙台波 100%

6.1 節と同様に、K-NET 仙台波 100%時のブレースの剛性の低下を塑性率で判断し、解析モデルに反映させ固有値解析を行った。実験における固有振動数の変化と倍率を表 10、固有値解析における固有振動数の変化と倍率を表 11 に示す。表 10、表 11 を比較すると、固有値解析において実験の固有振動数の変化を再現できていないことが分かる。塑性率に伴いブレースの剛性を変化させたにも関わらず、固有振動数は実験

ほど低下していない。K-NET 仙台波 100%において、実験時の柱脚部は数回全塑性曲げ耐力に達していた⁵⁾。K-NET 仙台波 100%ではブレースの剛性の低下に加え、柱脚部の塑性化を加味する必要がある。しかし本解析モデルでは柱脚部の塑性化を考慮していないため、今後の検討課題とする。

表 10 実験の固有振動数と倍率 (K-NET 仙台波 100%)

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
初期値(Hz)	2.47	2.87	3.08
K-NET仙台100%後のランダム波3軸(Hz)	1.83	1.19	2.75
倍率(%)	74.09	41.46	89.29

表 11 固有値解析の固有振動数と倍率 (K-NET 仙台波 100%)

	梁間方向	桁行方向	鉛直方向
初期値(Hz)	1.91	2.77	3.04
ブレース剛性変化後(Hz)	1.28	1.22	2.83
倍率(%)	67.26	44.05	93.18

7. 実験と固有値解析の固有振動数の変化と倍率の変化

実験の固有振動数の変化(図8)に第6章で求めた固有値解析の固有振動数をプロットしたものを図10に示す。プロットはK-NET 仙台波 80%までとし、K-NET 仙台波 50%加振後については実験と同様にするため同じ結果を2つプロットした。桁行方向および鉛直方向においては実験の固有振動数の変化とほぼ同等であることが分かる。梁間方向についても初期値である解析モデルの振動数が低いため、固有振動数の値に差は見られるが、K-NET 仙台波 50%までの固有振動数の変化はおおよそ実験と類似している。図11に初期値の固有振動

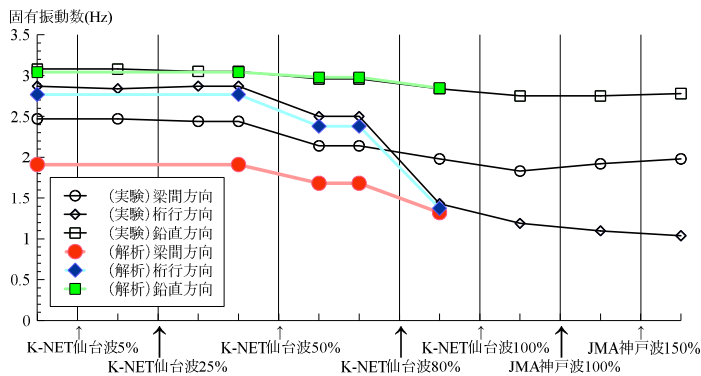


図 10 実験と固有値解析の固有振動数の比較

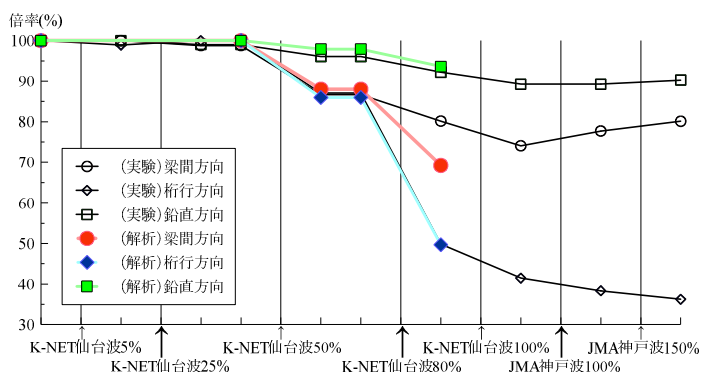


図 11 実験と固有値解析の固有振動数の倍率の比較

数を基準に、変化後の固有振動数の倍率を示す。K-NET 仙台波 80%の梁間方向以外においては実験と解析モデルは同様の倍率の変化を示している。桁行方向および鉛直方向においては、ブレースの剛性を変化させることで試験体の固有振動数の変化を表現できるが、梁間方向においてはブレース以外も検討する余地があると考えられる。

8. まとめ

E-ディフェンスを用いた実大鉄骨造体育館加振実験の試験体設計図を参考に解析モデルを構築し、実験時の固有振動数の変化をブレースの塑性率により剛性を変化させた解析モデルの固有値解析により再現することを行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) ブレースのひずみ計より、引張り降伏に達していない塑性率 1.0 未満においてもブレースの剛性は低下し全体の固有振動数の低下に影響を与えることが分かった。
- (2) 塑性率 0.5 未満まではブレースの剛性 1 倍、塑性率 0.5 ~ 1.0 までは剛性を徐々に低下させることで実験の固有振動数の変化を再現することができた。また、塑性率 1.0 以上において、ブレースの剛性を約 0.14 倍としたところ、桁行方向と鉛直方向については実験の固有振動数を再現できた。しかし梁間方向については、固有振動数の変化を再現できず、ブレース以外の影響についても考慮する必要がある。

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, pp.935-940, 2012.10
- 2) (財)日本建築防災協会: 川崎シンフォニーホール震災被害調査報告書, pp.11.2~11.4, 2012.3
- 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) 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, 2017.3 掲載予定
- 5) 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
- 6) 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: 大規模建築物試験体 設計図.

-
- *1 東京工業大学大学院生
 - *2 東京工業大学大学院准教授・博士(工学)
 - *3 防災科学技術研究所研究員・博士(工学)
 - *4 株式会社竹中工務店研究員・修士(工学)
 - *5 防災科学技術研究所部門長・博士(工学)
 - *6 武庫川女子大学准教授・Ph.D.