

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 27 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560679

研究課題名(和文)天井等の水平要素の落下防止機構を有する中規模空間構造の人的安全性と耐震社会の実現

研究課題名(英文) Human safety of medium spatial structures with fall-preventing mechanism of ceilings and realization of aseismic performance society

研究代表者

石川 浩一郎 (Ishikawa, Koichiro)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50168192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：学校体育館に取り付く2段組みブレースを用いた次の在来工法天井を対象としている。すなわち、建築用鋼製下地材を用いて下地を組み、石膏ボード等で天井面を構成する在来工法による吊り天井を用いた工法である。張間方向に水平地震動を受ける対象とする在来工法天井の振動性状においては、下段ブレースの応力に伴う吊ボルトの座屈に起因して天井板や野縁等の天井面がロッキング応答する。研究成果は、ブレース応力に伴う吊ボルトの座屈に起因するロッキング応答を含む地震応答性状の分析に基づき最大鉛直地震力の発生位置や震度、応答スペクトル法を用いた水平応答値の予測法等を提案したものである。

研究成果の概要(英文)：Large span structures such as a gymnasium and an exhibition hall often use ceilings because of enhancing sound effects and reducing heating bills. The ceiling member fell down on a large scale due to the seismic motion according to the past great earthquake disaster reports. The purpose of this study is to investigate the vibration characteristics and propose the response performance evaluation method of the steel base conventional method ceiling in the school gymnasium based on the microtremor measurement and the time history analyses. The validity of the proposed practical method has been shown in comparison with the analyses.

研究分野：建築構造

キーワード：中規模空間構造 学校体育館 非構造要素 天井 落下防止 応答性能評価 静的地震力 地震応答性状

1. 研究開始当初の背景

(1) 多数建つスパン 30m ほどの中規模空間構造物の屋根部における水平要素すなわち天井等の非構造要素や梁等の構造要素を対象とする。そして、それらが地震を受けた時にその水平要素の崩落から生命を守る人的安全性について保障することを研究の主な目的とする。曲面構造を有する大スパン建築物の地震時安全限界の尺度として屋根崩落すなわち鉛直荷重支持能力に着目する。

(2) 天井の工法として次の構造形式を有する学校体育館がしばしば建設されている。建築用鋼製下地材を用いて下地を組み、石膏ボード等で天井面を構成する在来工法による吊り天井（以降、在来工法天井と略記する）を用いた構造形式である。また、天井懐が大きな場合、鉛直ブレースを 2 段組みに設置された工法とされる場合がある。張間方向に水平地震動を受ける在来工法天井の振動性状においては、下段ブレースの圧縮軸力に伴う上段吊ボルトの座屈に起因して天井板や野縁等の天井面がロッキング応答する。この応答により天井下地材やクリップ等に衝撃的な地震力が作用することが予見される。したがって、ロッキング応答を考慮した地震応答性状に基づく耐震性能評価法が必要であると考えられる。既往の研究論文や報告等に基づき検討した結果、上記の課題については、以下のような研究がなされていることがわかった。すなわち、2 段組みブレースを用いた在来天井に関して、地震力の伝達経路、吊ボルトの座屈に起因する天井下地材の損傷や吊ボルトに圧縮補強を施した動の実験に関する研究（引用文献①、②）がなされ、対象構造における施工上の注意点や補強後の耐力等について有用な知見を与えている。しかし、本研究で着目するロッキング応答に起因する地震応答性状の分析や定量的に応答を評価する方法については十分な知見が得られているとは言えない。

2. 研究の目的

(1) 本研究の主な目的は、まず曲面構造特有の鉛直振動と積雪荷重により励起される地震応答増幅を考慮した設計用震度を明確に示す。次に、水平要素の崩落現象を経験工学的な視点からも解明する。具体的な目的は以下のとおりである。

(2) 本研究では、天井構成部材の非線形性に起因するロッキング応答が地震応答性状に及ぼす影響の分析を行う。更に、地震応答性状を考慮して地震動に対する応答性能評価法の提案をすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、2 段組みブレースを用いた在来工法天井を有する学校体育館の張間方向を対象とする。構造躯体及び在来工法天

井の構造図を図 1 及び図 2、構造躯体と在来工法天井を一体とした解析モデルを図 3 に示し、本解析モデルに対して固有値解析を行った結果を表 1 に示す。

解析モデルをピン接合モデルとし、トラスの幾何学的非及び材料非線形を考慮した時刻歴応答解析を行う。ただし、在来工法天井の地震応答性状を対象としているため、構造躯体については弾性要素とした。入力地震動は、建築基準法告示スペクトル、第 2 種地盤、減衰定数 5% を目標とした損傷限界人工地震波 5 波を用いる。減衰マトリクスはレイリー減衰を採用し、1 次と 2 次の減衰定数を 2% としている。表 2 に人工地震波の位相特性及び地表最大加速度（以降、PGA と記す）を示す。なお、水平加速度と鉛直加速度は同時刻に発生していない為、時刻歴応答解析の結果は水平加速度については水平加速度が最大時、鉛直加速度については鉛直加速度が最大時における結果を示す。

山形鉄骨トラス梁構成部材 (SS41)
 2L-90×90×10 (上・下弦材) 4L-50×50×6 (束材: 中央, 1/4)
 2L-50×50×6 (ラチス材, 束材) 2L-50×50×4 (A の範囲)

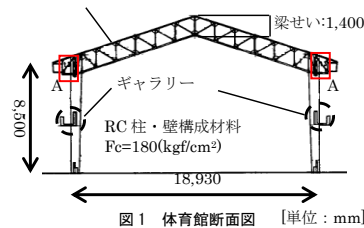


図 1 体育館断面図 [単位: mm]

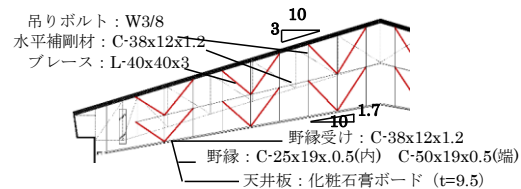


図 2 在来工法天井構造図

4. 研究成果

(1) ここでは、表 2 に示した損傷限界人工地震波 5 波の PGA に対し、PGA 調整係数 λ を乗じることにより入力地震動の最大入力加速度を大きくしていき各地震動レベルでの応答を確認していく（引用文献③）。図 4 から図 6 に PGA 調整係数 λ を増大させた場合の各地震動レベルに対する応答の最大値を示している。

図 4 は天井面の最大鉛直応答加速度である。座屈を起こした吊ボルト下部において局所的に大きな鉛直応答加速度が作用することが確認された。図 5 は天井面の最大水平加速度、図 6 は天井面の最大水平変位である。図から損傷限界レベルの応答値からほぼ線形的に応答が増幅しているのが確認できた。

(2) 応答性能評価法の提案及び例題解析

ここでは、時刻歴応答解析結果を考慮し、性能評価法の提案を行う。表 3 に示すように、

地震動レベルに対する応答を地震応答解析結果に基づき定め、対象構造における応答評価法の提案を行う。

(3) 在来工法天井の構造形態や本提案法に関する例題解析を行い、時刻歴応答解析結果と比較することで、本提案法の分析・検討を行った。図7に損傷限界レベル及び安全限界レベルにおける本提案法の応答値と時刻歴応答解析の比較を示す。

図7より、水平応答変位については安全限界レベルでの算定値が水平加速度と比べると小さく算定される結果となり、吊ボルトの非線形性による影響であると考えられる。鉛直震度は、モデル1で6.6、モデル2の天井群A及びCで5.4、モデル2の天井群Bで7.9となり、ばらつきが見られるものの平均値は6.6となった。水平応答加速度については、対象構造における応答値をおおよそ推定出来る可能性を示した。鉛直震度については、損傷限界レベルでは震度1程度であり、安全限界レベルでは震度7程度であることを示した。ただし、本鉛直震度については、他の破壊形式や天井の形状等を考慮してさらにデータを蓄積していく必要があるものと考えられる。

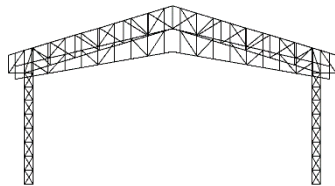


図3 解析モデル図

表1 各次振動数及び有効質量比

一体モデル		
モード	振動数(Hz)	有効質量比
1	3.60	0.68
2	5.81	0.17
3	7.12	0.00
4	8.42	0.00
5	13.00	0.03

表2 使用人工地震波の位相特性及び地表最大加速度

位相特性	Elcentro -NS	Hachinohe -NS	Kobe -NS	Taft -EW	Tohoku -NS
PGA	112	120	133	129	102

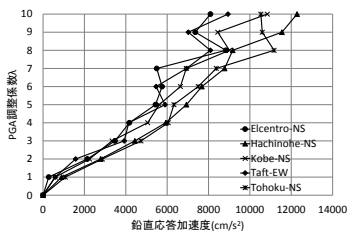


図4 最大鉛直応答加速度

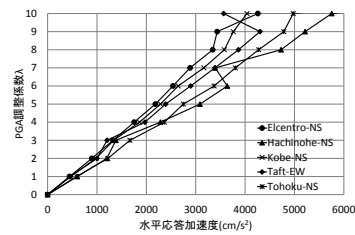


図5 最大水平応答加速度

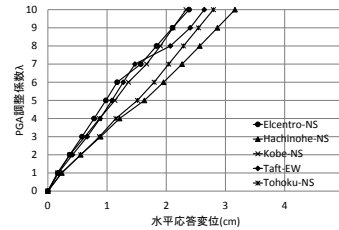
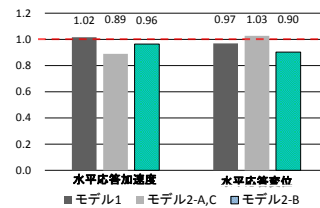


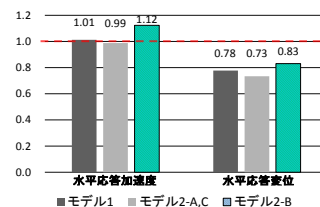
図6 最大水平応答変位

表3 応答性能評価法

地震動レベル	応答評価法		
	鉛直加速度	水平加速度	水平変位
損傷限界レベル λ=1	鉛直震度1以上	振動モードを用いた 応答スペクトル法	等価静的地震力を作用 させた静的解析
安全限界レベル λ=5	鉛直震度7以上	損傷限界レベルから線形的に推定	



(A) 損傷限界レベル(λ=1)



(B) 安全限界レベル(λ=5)

図7 本提案法における例題解析

(4) 本研究成果をまとめると以下のとおりである。学校体育館に取り付く在来天井を対象とした。構造形式は、天井懐が大きく2段組みブレースが設置されたものである。したがって、吊ボルトの座屈が発生した際、天井面に衝撃的な鉛直地震力が作用する懸念がある。このような特徴を有する本構造のロッキング応答が地震応答性状に及ぼす影響に関する知見を以下のとおり与えることができた。

・水平地震動を受けることにより下段ブレースから吊ボルトに圧縮力が作用し、吊ボルトの座屈に起因するロッキング応答の発生により、損傷限界レベルにおいて鉛直震度が最

大で1程度となることが確認できた。
 ・ロッキング応答による鉛直応答加速度の増幅により、座屈を起こした吊ボルト下部及び天井面の勾配が変化している棟部で大きな応答を示すことが確認できた。
 ・入力時震動を増大させた場合、水平応答加速度、水平応答変位についてはおおそ線形的に増大していき、一定の地震動レベルにおける応答の予想がある程度出来る可能性を示すことができた。
 ・本提案法と時刻歴応答解析結果の比較・検討により応答値の妥当性を例題解析により確認した。
 ただし、本評価法は、構造躯体は弾性体とし、破壊形式が限定された、天井モデルでの検証に基づいたものであり、適用範囲については留意する必要がある。

<引用文献>

- ① 櫻庭記彦：損傷制御方法の実態(実務・動の実験等による知見)、日本建築学会大会(東海)研究協議会資料 頻発する天井の落下事故防止に向けて、pp67-78、2012.9
- ② 大森直樹、小林俊夫 他：懐寸法の大きな天井を対象とした振動台実験、日本建築学会学術講演梗概集(近畿)、2014.9
- ③ 石川浩一郎、井土拓己：多雪地域に建つ学校体育館の妻壁に起因する屋根型単層ラチスシェルの水平地震時鉛直応答の分析と保有水平耐力評価、日本建築学会構造系論文集 第80巻 第709号、pp.435-444、2015.3

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ①石川浩一郎、松下千裕、屋根型単層ラチスシェルの地震荷重伝達能力に限界づけられるトラスアーチ架構の動的挙動と保有耐力評価、日本建築学会構造系論文集、査読有、78巻、2013、101-109

②K. Ishikawa、C. Matsushita、Horizontal Seismic Force Transmission Capacity of EP Type Single layer Lattice Shell Ceilings with Arch Truss Frames、Proceedings of IASS-APCS, Seoul Korea、査読有、Vol.1、2012、CD-R 8pages

③K. Ishikawa、Practical Static Calculation Method for Estimating Elasto-Plastic Dynamic Responses of Sace Frames、Proceedings of 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)、Seoul Korea、査読有、Vol.1、2012、CD-R 8pages

④K. Ishikawa、The Seismic Response of Interaction between Truss Arch Frames and Ceilings、Proceedings of the International Association for Shell and

Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, Wroclaw, Poland、査読有、Vol.1、2013、CD-R、8 pages

⑤K. Ishikawa、Practical Static Calculation Method for Estimating Elasto-Plastic Dynamic Responses of Sace Frames、Proceedings of 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)、査読有、Barcelona Spain、査読有、Vol.3、2014、2762-2773

⑥野々村 巧、石川 浩一郎、井上 圭一、常時微動測定と時刻歴応答解析に基づく学校体育館在来天井の振動特性と部材耐力余裕度、第14回日本地震工学シンポジウム論文集、査読無、2014、2582-2591

⑦石川 浩一郎、井土 拓己、多雪地域に建つ学校体育館の妻壁に起因する屋根型単層ラチスシェルの水平地震時鉛直応答の分析と保有耐力評価、日本建築学会構造系論文集、査読有、80巻、2015、435-444

[学会発表] (計15件)

①松下千裕、石川浩一郎、トラスアーチ架構へ地震力を伝達する屋根型単層ラチスシェルの動的崩壊性状と保有耐力評価、2012年度日本建築学会大会(東海)学術講演会、2012年09月12日~2012年09月14日、名古屋

②井土拓己、石川浩一郎、積雪地に建つトラスアーチ架構に取付く天井の地震応答性状と作用地震力、2012年度日本建築学会大会(東海)学術講演会、2012年09月12日~2012年09月14日、名古屋

③松下千裕、石川浩一郎、トラスアーチ架構へ地震力を伝達する屋根型単層ラチスシェルの動的崩壊性状と保有耐力評価、日本建築学会北陸支部大会、2012年07月22日~2012年07月22日、長野

④井土拓己、石川浩一郎、水平地震動を受けるトラスアーチ架構に作用する地震力分布と算定法、日本建築学会北陸支部大会、2012年07月22日~2012年07月22日、長野

⑤井土 拓己、野々村 巧、石川 浩一郎、天井を有するトラスアーチ架構の振動性状に基づく地震力 その1. トラスアーチ架構の振動特性と等価静的地震力の分布、2013年度日本建築学会大会(北海道)学術講演会、2013年08月30日~2013年09月01日、札幌

⑥野々村 巧、井土 拓己、石川 浩一郎、天井を有するトラスアーチ架構の振動性状に基づく地震力 その2. 地震応答性状と天井に作用する地震力の算定法、2013年度日

本建築学会大会（北海道）学術講演会、2013年08月30日～2013年09月01日、札幌

⑦井土 拓己、野々村 巧、石川 浩一郎、天井を有するトラスアーチ架構の振動性状に基づく地震力分布 その1. トラスアーチ架構の振動特性と等価静的地震力の算定法、日本建築学会北陸支部大会、2013年07月18日～2013年07月19日、金沢

⑧野々村 巧、井土 拓己、石川 浩一郎、天井を有するトラスアーチ架構の振動性状に基づく地震力分布 その2. 地震応答性状と天井に作用する地震力の算定法、日本建築学会北陸支部大会、2013年07月18日～2013年07月19日、金沢

⑨野々村 巧、石川 浩一郎、太田 誠、井上 圭一、学校体育館の鋼製下地天井の耐震性に関する研究 その1. 常時微動測定に基づく振動特性、日本建築学会北陸支部大会、2014年07月12日～2014年07月13日、富山

⑩石川 浩一郎、野々村 巧、太田 誠、井上 圭一、学校体育館の鋼製下地天井の耐震性に関する研究 その2. 弾性地震応答性状と部材耐力余裕度の分析、日本建築学会北陸支部大会、2014年07月12日～2014年07月13日、富山

⑪井土 拓己、石川 浩一郎、多雪地域に建つ学校体育館の妻壁に起因する屋根型単層ラチスシェルの水平地震時鉛直応答の分析と保有耐力評価、2014年07月12日～2014年07月13日、富山

⑫野々村 巧、石川 浩一郎、学校体育館の鋼製下地在来工法天井の弾性地震応答性状と部材耐力余裕度、2014年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸

⑬井土 拓己、石川 浩一郎、多雪地域に建つ学校体育館の妻壁に起因する屋根型単層ラチスシェルの水平地震時鉛直応答の分析と保有水平耐力評価 その1. 地震応答性状の分析と等価静的地震力の算定法、2014年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸

⑭石川 浩一郎、井土 拓己、多雪地域に建つ学校体育館の妻壁に起因する屋根型単層ラチスシェルの水平地震時鉛直応答の分析と保有水平耐力評価 その2. 崩壊機構の分析とベースシア耐力係数、2014年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸

⑮野々村 巧、石川 浩一郎、井上 圭一、常時微動測定と時刻歴応答解析に基づく学校体育館在来天井の振動特性と部材耐力余裕度、2014年度日本建築学会大会（近畿）学術講演会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 浩一郎 (ISHIKAWA, Koichiro)
福井大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：50168192