

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04427

研究課題名(和文)積雪期に地震動を受ける中小規模空間制振構造の限界雪荷重と厳冬期避難施設の機能確保

研究課題名(英文) Safe limit snow loads of small and medium-sized spatial structures subjected to earthquake motions and securing function for evacuation facilities during snow season

研究代表者

石川 浩一郎 (Ishikawa, Koichiro)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：50168192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：多雪地域に建つ二層立体トラスドームの鉛直荷重支持耐力を考慮した水平地震荷重伝達性能の評価法：中小規模屋根型曲面トラスドームの動的崩壊に及ぼす雪荷重の影響に関して部材の連鎖座屈等を弾塑性地震応答解析により解明している。本ドームの動的崩壊機構に及ぼす雪荷重や偏分布を考慮してベースシア耐力係数の推定法を鉛直支持耐力に基づいた概念を用いて提案している

水平地震動を受ける二層立体トラス壁の動的崩壊機構の制御：アルミニウム合金をトラス構造の構成材料として扱って構造全体の急激な耐力の劣化を防ぐヒューズ型の設計法を提案した。本ヒューズ型接合部を有する本トラス壁の崩壊機構を制御する手法の適用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非積雪期及び積雪期における本屋根構造の地震応答性状や地震荷重伝達性能に及ぼす雪荷重による付加質量の影響の解明に寄与する本一連の研究は、多雪地域に建つ学校体育館等を避難施設としての活用に応用できる実用的価値を有するものと言える。ヒューズ型接合や損傷制御型屋根及び壁曲面状立体トラス構造の応答低減によるガラスや在来天井・壁等の非構造材の無損傷化を目指した構造・非構造要素の一体型の性能設計法の提案と安心・安全な耐震社会の実現を可能にできるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study deals with an evaluation method of performance to transmit horizontal seismic loads to substructures of double layer truss domes and walls built in heavy snowfall region considering the vertical load resistant capacity. Based on the dynamic response, the practical calculation method is shown to predict the equivalent static load for the earthquake-proof design of the dome and the wall. The collapse mechanism and the axial stress of the dome subjected to the static loads show a good agreement with the earthquake response analyses subjected to the earthquake motions. The accuracy is also verified by a good agreement with the earthquake response analysis of the dome subjected to the artificial vertical and horizontal earthquake motions varying the PGA. The proposed method can be used to predict the performance to transmit horizontal seismic loads by means of the elastic static analysis of the truss dome and wall subjected to the equivalent static load.

研究分野：建築構造

キーワード：二層立体トラスドーム 鉛直荷重支持耐力 水平地震荷重伝達性能 水平地震動 上下地震動 二層立体トラス壁 動的崩壊機構 損傷制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 単位面積当たりの自重の金属系空間構造では雪荷重が設計を大きく支配することが知られている。過去においては冬季に地震が発生して複合災害が起きている。また、多雪時に直下型地震動も発生しており、建築物の地震被害が報告されている。例えば、1614年11月26日京都南部(M7.7)、1666年2月1日越後西部(M6.7~6.8、積雪4~4.5m)、1793年2月8日西津軽(M6.9~7.1)、1833年12月7日羽前、羽後、越後、佐渡(M7.5、中魚沼郡で積雪約1m)、1918年11月11日大町地震(M6.1、M6.5、直下型、雪中地震)、1927年3月7日北丹後地震(M7.3、直下型)、1961年2月2日長岡地震(M5.2、直下型)、1992年12月27日新潟県南西部地震(津南町)(M4.5、直下型)、1993年1月15日釧路沖地震(M7.8)、1993年2月7日能登半島沖地震(M6.6)、1994年12月28日三陸はるか沖地震(M7.6)、1995年1月17日兵庫県南部地震(M7.3)などである。したがって、大屋根を有する空間構造物の応答性能に及ぼす雪荷重分布や最深積雪量等の影響については多雪時に直下型地震が発生したときを想定しておくべきことと考えられる。

(2) 過去の豪雪による鉄骨構造物の被害例の報告から崩壊の原因として以下のことが挙げられる。①設計用雪荷重と実際の雪荷重との差異すなわち雪荷重が設計荷重を大幅に超えたこと、②雪荷重分布については必ずしも屋根上に一様に分布するとは限らず、むしろ風や日照等により偏分布して積雪することが多い。そのために部材応力が設計時の応力と異なったことが挙げられる。

(3) 2007年新潟県中越地震の学校体育館等の被害調査では次のような報告がなされている。避難所として使用できなかった体育館は、その2/3が非構造部材の被害が原因であった。調査対象学校の耐震化状況は、116校(46.4%)が昭和56年以前に建設された体育館で、そのうち27校が耐震診断を実施、そして9校が耐震補強を実施していた。したがって、学校体育館等を避難所として活用するためには、天井等の水平要素落下防止対策が極めて多数建設されている学校体育館や幼稚園・保育所の遊戯室等の中小規模空間構造で求められていると言える。

(4) このような経験工学や学術的背景から核心をなす学術的な「問い」を次のように立てた。曲面型立体トラス構造の崩壊機構のひとつである部材の連鎖座屈にともなう接合部節点移動の挙動である。すなわち、雪荷重や地震荷重の外乱を受けて曲面構造特有の面外方向の地震応答増幅を受けて部材の連鎖座屈破壊が生じる危険性が想定される。そして、壁外装材のガラスや天井パネルなどを支持している接合部節点の移動によってそれらの脱落の起因となるのか(塑性力学や破壊形式)? また、申請者が提案しているヒューズ型接合部を用いることで部材座屈を回避させてその節点移動を制御し、パネル落下防止を実現できるのか(座屈論や振動制御論)?

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の学術的な独自性は、ヒューズ型接合部の破壊形式制御要素や座屈拘束部材の履歴エネルギー吸収要素を連動させた損傷低減機構を活用することにある。そして、ガラスや木毛セメント、ALCパネル、在来金属系下地天井のパネル等を有する幼稚園や保育園の遊戯室、学校体育館、スポーツホール等の20mから60mほどまでの中小規模空間構造の一体型制振システムの創造的な構築及び実現化を目的とする。すなわち、非構造要素と構造要素を統合した構造全体を研究の対象とし、損傷制御要素の駆使により非構造要素のパネルの落下防止を実現するために必要となる性能設計法すなわち、ヒューズ型接合による崩壊形式の制御法やダンパー等によるエネルギーの授受、等価静的地震力に基づくベースシア耐力係数等を提案する。そして、本統合型制振システムを創造的に構築する。ヒューズ型接合や座屈拘束部材を用いた屋根型や壁型曲面状立体トラス構造の応答低減によるガラスや在来天井・壁等の非構造材の無損傷化を目指す。多雪地域に建つ大スパン立体トラスなどの空間構造の設計は雪荷重に支配されることが多い。多雪地域では過去の降雪記録や被害調査等のデータを用いた設計用雪荷重が長期設計で用いられていることもあり、多雪地域での雪荷重にともなう大スパン建築構造の被害は近年においては比較的少ないと考えられる。一方、積雪地域に近い一般地域である雪中間地帯と呼ばれる地域で大スパン建築物の豪雪被害が多い。本中間地帯では局地的な風向や気圧配置の変化等の気象条件によって想定外の最深積雪量になることが知られている。特に、多雪地域に近い地域の場合については設計用雪荷重を増大させて、部材や接合部、支持部等に耐力の余裕をもたせる検討が必要であると考えられる。一般地域では雪荷重を短期荷重として扱い検定するのに対して、多雪地域では長期荷重として扱い部材応力や鉛直変形について検定している。偏分布の積雪については、ドームの形状や風向、日射等により影響を受けるものと考えられる。また、支持部の設計においては、支持部を介して自重や雪荷重は下部構造に伝達されるので、部材耐力余裕度と同等以上の耐力余裕度が求められる。しかし、このような検討に際しては応答と限界のデータ蓄積が十分ではないと言える。

(2) 福井県や新潟県などのような多雪地域で地震が起きた場合、雪荷重は付加質量となり特に学校体育館等の中小規模空間構造に作用する地震力は増大することが予見できる。また、厳冬期

の過酷な複合災害時の避難所として役割を期待されている中小規模空間構造を対象として、壁型や屋根型のむくりのある構造特有の面外方向振動や雪荷重の付加質量の影響を考慮したガラスや木毛セメント、ALC のパネル、在来金属系下地天井のパネル等の応答性状を解明する必要がある。しかしながら、この種の研究の蓄積はいまだ十分ではなく耐震設計や耐震診断、耐震補強等に寄与できていない。特に、多雪地域においては断熱用に多様なパネル吊材が用いられている。このことは工費及び合理的な設計について問題を含んでいると言える。したがって、パネル吊材等に作用する合理的な設計用震度計算法の提案や本研究で得られる学術的な知見を反映させて、曲面構造及びパネル吊材等を一体とした構造設計法の確立及び簡便で実用的な検証法の構築を本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 多雪地域や一般地域に建つスパン 20m から 60m ほどの二層立体トラス置屋根型ドームと壁型の曲面立体トラス構造 (図 1) を対象として、水平・上下地震動を受ける中小規模空間構造の動的崩壊に及ぼす最深積雪量や雪荷重分布の影響を弾塑性地震応答解析により以下のように研究を進める。

① 損傷・安全限界地震動を受ける中小規模屋根型曲面トラス構造の動的崩壊に及ぼす雪荷重の影響に関して部材の連鎖座屈や支持部材反力等を弾塑性地震応答解析により解明する。② また、本トラス構造の動的崩壊機構に及ぼす雪荷重や偏分布を考慮して限界雪荷重の推定法を提案する。さらには、大屋根を有する曲面立体トラス構造の雪荷重の割増や部材耐力の余裕度をどの程度まで保有させるかについてのデータも蓄積できる。③ そして、地震荷重との組合せ時における設計用雪荷重や許容応力度設計に対する学術的な知見を与える。

(2) これを要するに、偏分布雪荷重や最深積雪量の割増率や必要部材・支持部の耐雪及び耐震性の必要余裕度を本トラス制振構造について提案する。また、過去の多雪時の直下型地震すなわち複合災害の被害事例に基づき厳冬期の避難施設の機能確保や耐震化のあり方についても併せて提言する。

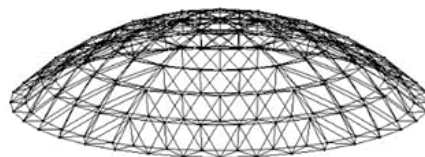


図 1. 屋根・壁一体型構造の面外方向の崩壊機構制御によるガラスパネルの落下防止機構の確立

### 4. 研究成果

(1) 多雪地域に建つ二層立体トラスドームの鉛直荷重支持耐力を考慮した水平地震荷重伝達性能の評価法

損傷・安全限界地震動を受ける中小規模屋根型曲面トラスドーム (図 1) の動的崩壊に及ぼす雪荷重の影響に関して部材の連鎖座屈や支持部材反力等の新しい事象を弾塑性地震応答解析により解明している。また、本トラスドームの動的崩壊機構に及ぼす雪荷重や偏分布を考慮してベースシア耐力係数の推定法を鉛直支持耐力に基づいた新しい概念を用いて提案している。本研究の成果は、大屋根を有する曲面立体トラス構造の雪荷重の割増や部材耐力の余裕度をどの程度まで保有させるかについて予見しうる手法を提案したものである。したがって、地震荷重との組合せ時における設計用雪荷重や許容応力度設計に対して今後の発展に影響を及ぼし波及効果も期待できると言える。非積雪期及び積雪期における本屋根構造の地震応答性状や地震荷重伝達性能に及ぼす雪荷重による付加質量の影響の解明に寄与する本一連の研究は、多雪地域に建つ学校体育館等を避難施設としての活用に貢献できる実用的価値を有するものと考えられる。

(2) 水平地震動を受ける二層立体トラス壁の動的崩壊機構の制御

アルミニウム合金をトラス構造の構成材料として扱っているが、高強度のアルミ合金は熱処理により強度を高めた熱処理合金が主であるため、接合部の溶接による入熱によって強度および性能が低下するなどの鋼製にはない特徴を有している。このような点も考慮して接合部のボルトを先行降伏させることにより構造全体の急激な耐力の劣化を防ぐヒューズ型の設計法を提案した。また、接合部の構成要素の実験データに基づいて具体的な数値検定法も示した。そして、トラス壁の斜材降伏後の挙動に関して、トラス節点が面内方向だけでなく面外方向へも変位することにより、トラス壁の面内せん断変形が進展することも新しい事象として明らかにした。さらに、ボルト先行降伏型の部材構成によるトラス壁の塑性変形性状を理論・解析により解明した。また、ボルト降伏や部材座屈に起因する節点変位から得られる部材回転角に着目し、部材回転角の応答低減に関する本ヒューズ型接合部の有効性も新しい概念として明らかにした。そして、本ヒューズ型接合部を有する本トラス壁の崩壊機構を制御する手法の提案及びその適用性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Ishikawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Vibration shapes of symmetric space frame dome	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 11th International Congress and Exhibition - Symmetry: Art and Science	6. 最初と最後の頁 130-134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Ishikawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Control of dynamic collapse mechanism of double layer truss walls by means of fuse type connections subjected to earthquake motion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 7th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation	6. 最初と最後の頁 157-161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1201/9780429426506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石川浩一郎、長坂 光	4. 巻 84
2. 論文標題 多雪地域に建つ二層立体トラスドームの鉛直荷重支持耐力を考慮した水平地震荷重伝達性能の評価法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1325-1335
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.84.1325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 石川浩一郎	4. 巻 2018
2. 論文標題 Earthquake Response Control of Double-Layer Truss Walls by means of Innovative Fuse Connections	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2018/1425672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 石川浩一郎, 井藤健徳, 山下哲郎, 大久保昌治	4. 巻 83
2. 論文標題 水平地震動を受ける二層立体トラス壁の動的崩壊機構の制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1655-1663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.83.1655	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 長坂 光, 石川浩一郎, 加藤友才
2. 発表標題 多雪地域に建つ二層立体トラスドームの鉛直荷重支持耐力を考慮した水平地震荷重伝達性能の評価法
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川浩一郎, 長坂 光
2. 発表標題 多雪地域に建つ二層立体トラスドームの鉛直荷重支持耐力を考慮した水平地震荷重伝達性能の評価法
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ishikawa
2. 発表標題 Vibration shapes of symmetric space frame domes
3. 学会等名 11th International Congress and Exhibition - Symmetry: Art and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ishikawa
2. 発表標題 Control of dynamic collapse mechanism of double layer truss walls by means of fuse type connections subjected to earthquake motion
3. 学会等名 The 7th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長坂 光、石川浩一郎、藤田祥平
2. 発表標題 水平地震動を受ける二層立体トラスドームの雪荷重を考慮した地震荷重伝達性能評価
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤友才、石川浩一郎、長坂 光
2. 発表標題 上下地震動を受ける二層立体トラスドームの耐震性能に及ぼす偏分布雪荷重の影響
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井藤健徳、石川浩一郎、山下哲郎
2. 発表標題 水平地震動を受ける二層立体トラス壁の動的崩壊機構の制御
3. 学会等名 2018年度日本建築学会大会(東北)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田祥平、石川浩一郎、長坂 光
2. 発表標題 水平地震動を受ける二層立体トラスドームの雪荷重を考慮した地震荷重伝達耐力評価
3. 学会等名 2018年度日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井藤健徳、石川浩一郎、山下哲郎
2. 発表標題 水平地震動を受ける二層立体トラス壁の動的崩壊機構の制御
3. 学会等名 2018年度日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川浩一郎
2. 発表標題 Innovative connections to control dynamic collapse mechanism of spatial truss wall structures
3. 学会等名 the International Scientific Workshops of the Innovative Structural Systems in Architecture (ISSA2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------