

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06305

研究課題名(和文) 格子状壁面を用いた新しい耐震構造実現のための基礎的研究

研究課題名(英文) Basic study for realization of new seismic-resistant structures using latticed walls

研究代表者

山下 哲郎 (Yamashita, Tetsuo)

工学院大学・建築学部(公私立大学の部局等)・教授

研究者番号：80458992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来屋根に用いられてきた単層および複層格子構造を、建物の壁面に用いて軽量、高剛性で高い意匠性を有する新しい耐震構造を実現するための基礎的研究である。壁は地震力に抵抗する強力な耐震要素であり、地震の際には繰返しせん断力を受ける。またエネルギー吸収も期待される。従って本研究では、単層および複層格子平板に塑性域に及ぶ繰返しせん断変形を与える実験や地震応答解析を実施し、力学的特性、特に座屈による崩壊挙動と変形性能を観察すると共に、耐力、剛性といった耐震設計上の基本的な諸量の定量的評価方法を見出した。

研究成果の概要(英文)：This is a basic study for realization of new light, stiff and beautiful seismic-resistant structures employing single or double layer latticed structures for building walls. Walls are quite effective seismic-resistant elements and subjected to cyclic shear deformation during earthquake. Energy dissipation is also expected. Therefore, in the present study, inelastic cyclic shear tests of single or double layer latticed plates and seismic response analysis were conducted to observe the response behavior especially collapse due to buckling and deformation capacity. Method for quantitative evaluation on the basic values in seismic design, i.e. strength or stiffness, were also found.

研究分野：空間構造、鋼構造

キーワード：格子 耐震壁 せん断座屈 変形性能

1. 研究開始当初の背景

従来、屋根の構造に使用されてきた単層、複層の格子平板を重層構造の耐力壁として使用する建築物が近年建設されている。日本など地震の多い地域では壁は重要な耐震要素となるため、格子の壁面は地震荷重に抵抗することが必要である。地震荷重は繰返し荷重で、大地震時には構造体を塑性化させてエネルギーを吸収することも必要になる。しかしながら繰返し荷重に対する格子構造の力学的特性、とりわけ塑性域での挙動や変形性能に関する研究は現状では極めて少なく、地震応答や繰返し荷重に対する構造特性は定性的にも定量的にも明らかにされていない。

2. 研究の目的

従って本研究は、鋼材など金属材料による単層および複層の格子壁面を用いた新しい耐震構造を実現するための基礎的研究として、実験および解析により、格子で構成された壁面の、地震荷重に対する弾塑性座屈特性と、耐力、塑性変形性能などの主要な耐震性能を明らかにし、可能な限り定量的に評価する方法を確立することを目的とする。具体的には

- (1) 繰返しせん断力を受ける単層格子耐震壁の座屈挙動と構造特性を実験と解析により解明し、耐力、剛性など、耐震設計に必要な諸量の定量的評価を試みる。
- (2) 複層立体トラス耐震壁についても同様に繰返し加力実験を実施し、解析を併用して耐力、剛性の評価を試みる。
- (3) 数値解析により複層立体トラス壁面の動的崩壊機構の解明を試み、ヒューズ型接合部の有効性を示す。

3. 研究の方法

(1) 単層格子耐震壁の座屈特性
 研究代表者による三角形格子鋼板の繰返しせん断加力実験の既往研究では、繰返し振幅の増大に伴う耐力劣化はほとんど無いものの、比較的小さなせん断変形角から個材、全体ともに顕著な座屈変形が生じ、実際の建築で直接的に耐震壁として利用するには問題があることが判明した。
 従って今回の研究では、曲げ支配型で座屈を生じにくく、剛性が高い割に座屈を生じにくいと推測された六角形格子鋼板の繰返しせん断加力実験を実施した。試験体は三角形格子と同様に鋼板をくり抜いて製作し、同じ加力治具を使用した。図1に実験装置を示す。試験体(図2)は1484x1284mmのくり抜き鋼板4体であり、H1,2は正六角形、H3は不等辺六角形、H4はボロノイ分割を採用して不規則性を導入した格子パターンである。油圧ジャッキで静的に±1/900から±1/25まで振幅漸増繰返しせん断変形角を与える。
 また有限要素解析で実験結果をトレースし、試験体の挙動を分析するとともに、解析

による座屈耐力と剛性の評価を試みた。

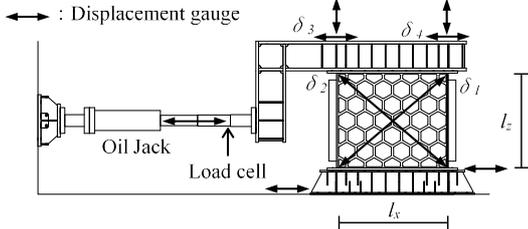


図1 実験装置

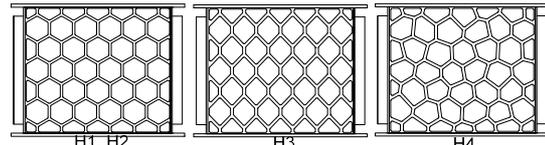


図2 単層格子耐震壁試験体

(2) 複層立体トラス耐震壁の座屈特性

既往の研究分担者による一般的な四角錐体の複層立体トラス平板のせん断加力実験では、せん断力を負担するトラスの腹材が連鎖的に座屈を生じ、同時にトラス平板が面外方向にも大きな変形を生じた。従って今回は、2層の格子面のうち直接的にせん断を負担する外弦材を45度傾斜した斜交格子とし、腹材と内弦材は水平・垂直の直交格子としてせん断力に対して直接1次的な応力が生じず、外弦材の構面外補剛材として働くような構成の試験体とした(図3)。

せん断力を負担する外弦材には軽量溝型鋼を用い、接合プレートと偏心接合として偏心による変形性能の改善を期待した。腹材には試験体1はダブル材の平鋼、試験体2は座屈耐力の極めて低い単材の平鋼を用い、下弦材は軽量溝型鋼である。試験体3には腹材、下弦材を省略した。トラス周辺の枠材は剛性の高いH形鋼を用いた。以上部材相互の接合にはガセットプレートを用いた。油圧ジャッキで静的に±1/900から±1/50まで振幅漸増繰返しせん断変形角を与えた。

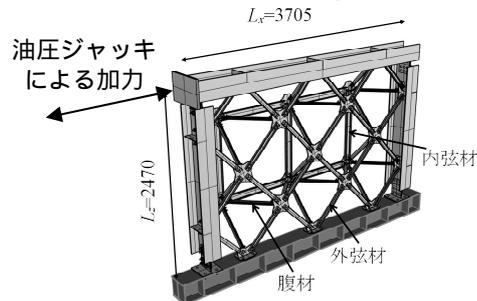


図3 複層立体トラス耐震壁試験体

4. 研究成果

(1) 単層格子耐震壁の座屈特性
 4つの試験体で異なる座屈挙動が観察された。正六角形格子のH1, H2試験体については、せん断変形角 =1/25まで構面外座屈を生じず、極めて安定した挙動を示した。不等辺六角形のH3試験体は =2/75の加力サイクルにおいて顕著な構面外座屈を生じ、その後 =1/25サイクルにおいて垂直材が破断した

(図4) ポロノイ六角形の試験体 H4 では、最終の $\gamma=1/25$ サイクルで構面外座屈を生じ、また数か所で断面を貫通する亀裂が観察された。これは、縦材端部に生じるヒンジの回転角がせん断変形角の倍以上に増幅され、曲げひずみが累積することが原因であることを理論的にも説明した。

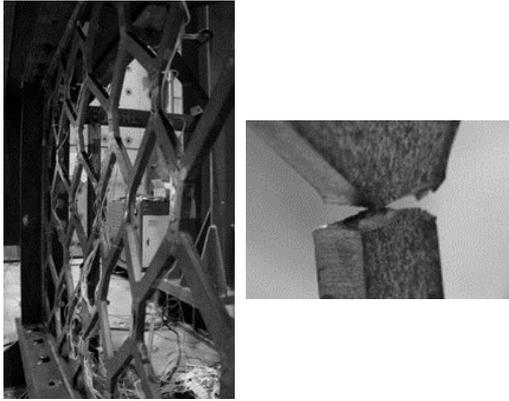


図4 H3 試験体の座屈と部材破断

図5に4体の荷重変形曲線を示す。いずれも紡錘形の履歴形となり、三角形格子の実験で観察されたスリップ型とならない。また耐力上昇が顕著で、亀裂や破断を生じる原因となった曲げひずみが大きいことが伺える。

図6には実験における最大構面外変形と、式(1)の正規化細長比 Λ_c との関連を示す。

$$\Lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cr}^{lin}} \quad (1)$$

P_{cr}^{lin} は解析で得た線形座屈荷重、 P_y は降伏荷重である。また図7には、既往の三角形格子の実験結果も含め、座屈が最初に生じるせん断変形角と正規化細長比の関係を示す。図中の曲線は、鋼材せん断パネルダンパーの座屈変形角の推定式を援用したものであり、実験結果を概ね近似している。このように正規化細長比は座屈変形を評価する指標であり、概ね0.3以下であれば構面外座屈は生じない。

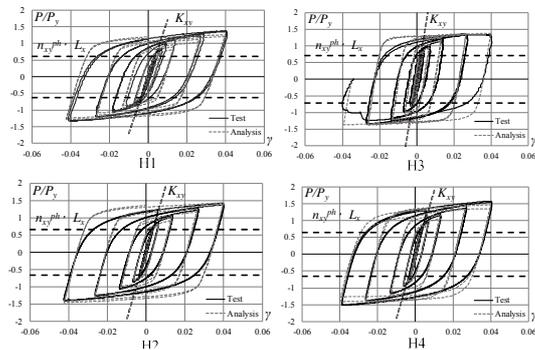


図5 荷重変形曲線

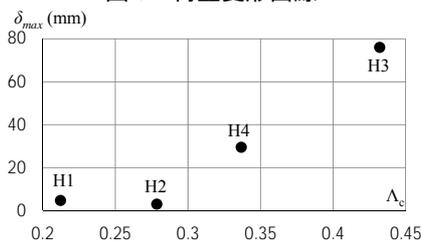


図6 最大構面外変形と細長比

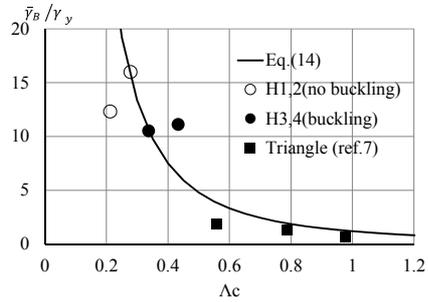


図7 座屈を生じる変形角と細長比

(2) 複層立体トラス耐震壁の座屈特性

3体の試験体のいずれも、せん断変形角 $\gamma=1/300$ 付近より外弦材に座屈を生じたが、腹材と内弦材で補剛された試験体1,2はトラスの形状自体はゆがむことなく、外弦材の個材座屈のみが生じた(図8)。また既往の立体トラスの実験のように、せん断力を負担する部材が連鎖的に座屈を生じることはなく、座屈は数本の部材に集中的に生じた(図9)。これは、斜めに直列に繋がれた部材のうち1本が座屈すると同じ列にある他の部材の応力はそれ以上上昇しないためと考えられる。単層の試験体3については座屈波長が部材長より長い構面外座屈が生じた。

試験体2



図8 外弦材の座屈 ($\gamma=1/50$)

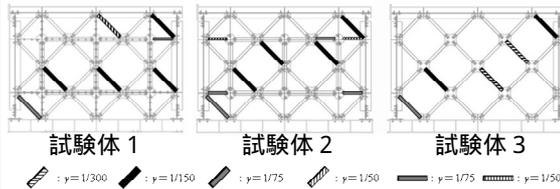


図9 外弦材の座屈箇所

荷重変形曲線を図10に示す。圧縮側の個材座屈は顕著に生じるが、周辺の枠材の剛性が高いため引張側が効き、座屈後の耐力劣化はほとんど生じていない。

弾性剛性は、腹材と下弦材は無視し、外弦材の軸剛性に偏心の影響を考慮して求めた理論解と良好に一致した。次に有限要素解析で線形座屈解析を実施し、座屈時の軸力より座屈長さを求めた。この際、接合部と部材の偏心を考慮し、また接合部のガセットプレートを部材とは別の梁要素でモデル化した。求めた座屈長さは試験体1,2に関しては概ね実験と一致(両端ボルト間距離)したが、補剛のない試験体3については明らかに実験より長くなった。また外弦材の梁要素を弾塑性として Pushover 解析を実施すると、座屈耐

力直後までは試験体 1,2 についてはほぼ実験結果と一致したが、試験体 3 については実験より高い座屈荷重となり、線形座屈解析とは逆の結果となった。立体トラス構造は現在、構造設計の際単純なトラス部材でモデル化されることが多いが、接合部など様々な要素と塑性化を考慮した精度の高い耐力評価と解析は単純ではなく、詳細な研究を要する。

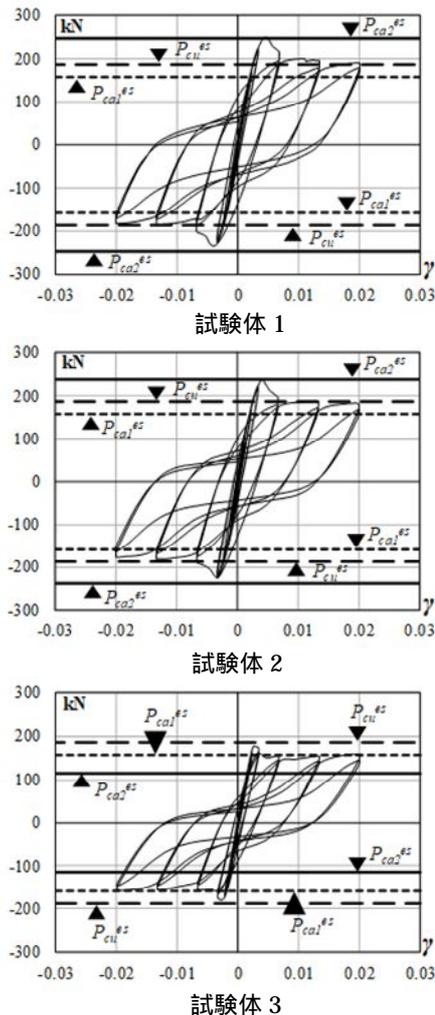


図 10 複層立体トラス耐震壁の荷重変形曲線

(3) 数値解析による複層立体トラス壁面の動的崩壊機構の解明

ここでは、前述の斜交立体トラスではなく、通常の四角錐体で構成される立体トラスを耐震壁に使用することを想定し、自重及び壁の上部に質量を設定して非線形動的応答解析によりその動的崩壊メカニズムを明らかにするとともに、研究分担者が以前より提案するヒューズ型接合部の耐力設定方法を定めた。耐震壁の形状は平板および緩やかな曲率を有する円筒である。

ヒューズ型ボルトの降伏を先行させ、かつ斜材のボルト耐力を弦材のボルトの0.3倍以下とすると、ボルト降伏も応答と入力との線形性が保持され、応答スペクトル法の適用が可能になる。また、部材の座屈が生じるとトラスに大きな構面外変形と部材端部に回転が

生じる。設計上の安全限界を、腹材の全ボルトが引張降伏する時の変位を入力波の変位応答スペクトル SD で除した値の 1/1.3 とすれば脆性的な崩壊を避けることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

(1)宮澤良丞、山下哲郎、石川浩一郎：2 層斜交立体トラス耐震壁の繰返しせん断加力実験、日本建築学会技術報告集、(掲載決定)、査読有

(2) T.Yamashita, H.Oyobe, R.Miyazawa: Out-of-plane buckling of steel latticed walls subjected to cyclic shear deformation, Proceedings of the IASS Symposium 2017, Hamburg, No.9594/ (in USB), 査読有

(3) R.Miyazawa, T.Yamashita, H.Oyobe, Cyclic shear tests of steel hexagonal latticed plates Part II: Evaluation of test result using FEA, IASS Symposium 2016, Tokyo, No.110 (in USB), 2016 査読有

(4) H.Oyobe, T.Yamashita, R.Miyazawa, Cyclic shear tests of steel hexagonal latticed plates part1: Experiment overview, IASS Symposium 2016, Tokyo, No.109 (in USB), 109, 2016 査読有

(5) K. Ishikawa, T. Ito : Evaluation method of earthquake resistant capacity of double layer truss wall based on the dynamic collapse mechanism, Proceedings of the IASS Symposium 2016, Tokyo, 1-7 2016 年 09 月 査読有

(6)山下哲郎、白鳥和希、栗田慧里子、2 方向に圧縮力を受ける斜交格子平板の座屈荷重、構造工学論文集、日本建築学会、62B 45-50, 2016 査読有

〔学会発表〕(計 17 件)

(1)宮澤良丞、山下哲郎、石川浩一郎：複層立体トラス耐震壁の非弾性せん断座屈実験、鋼構造シンポジウム、2017.11

(2)井藤健徳、石川浩一郎、山下哲郎：二層立体トラス壁における部材の連鎖座屈に起因する動的崩壊機構と耐震性能評価法の提案、2017 年度日本建築学会大会

(3)山下哲郎、宮澤良丞、石川浩一郎：複層立体トラス耐震壁の非弾性せん断座屈実験 その 1 実験装置と試験体、その 2 実験結果と耐力評価、2017 年度日本建築学会大会

(4)蔭山快、山下哲郎：軸圧縮を受ける直交異方性円筒格子シエルの座屈解析、2017 年度日本建築学会大会

(5)及部宏幸、山下哲郎、宮澤良丞：六角形格子鋼板の非弾性せん断座屈実験 その 3 不規則形状を含む六角形格子鋼板の実験概要、その 4 塑性化後の挙動に注目した実験結果の分析、2016 年度日本建築学会大会

(6)山下哲郎、朱健りょう：直交異方性を有する六角形格子平板の古典座屈荷重 その 1 部材応力の仮定に基づく有効剛性の誘導、その 2 面内力に対する六角形格子平板の古

典座屈荷重と線形座屈解析、2015年度日本建築学会大会

など

〔図書〕(計1件)

日本建築学会：ラチスシェル屋根構造設計指針、2016 9-10,28-32,89-109,181-190

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 哲郎 (Yamashita Tetsuo)

工学院大学・建築学部・教授

研究者番号：80458992

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし