

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04443

研究課題名（和文）引張ブレースで補剛されたラチスシェルの座屈耐力

研究課題名（英文）Buckling strength of grid shells stiffened with tension braces

研究代表者

山本 憲司（Yamamoto, Kenji）

東海大学・工学部・教授

研究者番号：70311884

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：圧縮力を抵抗しない引張ブレースで面内補剛した二方向格子シェルの座屈挙動を実験と数値解析により明らかにした。ブレースは座屈前変形時には外力に抵抗しないものの、座屈後変形を拘束する効果があるために比較的高い耐力を有することを、実験、数値解析ともに確認することができた。このシェルの座屈挙動を正確に把握するには、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した解析により座屈後挙動を追う必要があるが、座屈挙動を簡便にモデル化し、線形座屈解析により予測する手法を提案した。いくつかのモデルに適用し、手法の有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二方向格子シェルを圧縮抵抗できない引張ブレースで補剛した場合でもあっても、比較的高い座屈耐力を有することを明らかにした。この事実は、通常三角形分割され煩雑な接合部を持って建設されることの多いラチスシェルを、接合部のディテールがより簡素な二方向格子シェルとすることができ、ローコストな構造形式としての普及が期待できる。

また、座屈解析の煩雑さや座屈挙動の分析が容易となるように、線形座屈解析結果を用いて座屈耐力を簡便に予測する手法を提案した。この手法は、座屈挙動の難しい引張ブレース補剛された格子シェルを構造設計するうえで大きな助力になり得る。

研究成果の概要（英文）：The buckling behaviors of a two-way grid shells stiffened with tension braces, which do not resist compressive forces, were clarified by experiments and numerical analysis. It was confirmed experimentally and numerically that the braces do not resist external forces during pre-buckling deformation, but do resist external forces during post-buckling deformation, thus the shells have high buckling strength. In order to understand the buckling behavior of the shells accurately, it is necessary to follow the post-buckling behavior by the analysis considering the material nonlinearity and geometric nonlinearity. We proposed a method for predicting buckling behavior by linear buckling analysis without the complicated nonlinear analysis. The method was applied to several models, and its usefulness was confirmed.

研究分野：建築構造力学

キーワード：座屈解析 格子シェル 引張ブレース 非抗圧性 線形座屈 非線形座屈 プレストレス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1)二方向に曲率を持ち、全体座屈が問題となりそうな比較的扁平な単層ラチスシェルが建設される場合、曲面は多くの場合、三角形の網目状に分割されることが多い。曲面を二方向格子で分割し、各格子に細長比が大きな引張ブレースで面内補剛された格子シェルは一見ありふれた構造形式に見えるが、ブレースにプレストレスを導入した事例を除くと建設例は殆ど見られない。シェル面が外力に対して主に圧縮力で抵抗するため、圧縮抵抗できない引張ブレースは外力に抵抗できず有効ではないと考えるためだと思われる。一方で、研究室では一部のモデルで数値解析を行い、引張ブレースは設計外力に対して抵抗しないが、座屈モードの変形を拘束する効果があり、引張ブレースで補剛されたラチスシェルは高い座屈耐力を有している可能性に気がついた。

2. 研究の目的

(1)プレテンションの導入されていない引張ブレースで補剛された格子シェルの座屈耐力を調査する。座屈挙動を数値解析と模型実験により詳細に分析し、引張ブレースの補剛効果を明らかにする。もし、十分な補剛効果があり、高い座屈耐力が確認できれば、接合部が三角形網目のシェルと比べてローコストな構造を実現できる。

(2)プレテンションの導入されていない引張ブレースで補剛された格子シェルの座屈挙動の分析を容易とするために、引張ブレースの非抗圧性を考慮した線形座屈解析手法を提案し、有効性を調査する。もし、簡単な座屈耐力の予測法が提案できれば、構造設計時の大きな助力となる。

3. 研究の方法

(1)プレテンションを導入しない引張ブレースで補剛されたラチスシェルの座屈挙動を数値解析と模型実験により明らかにする。引張ブレースの非抗圧性を材料非線形性によりモデル化し、EP曲面、球形、円筒形といった代表的な形状の格子シェルモデルに対し、複数の設計外力時の座屈挙動について解析を行い、その座屈挙動を詳細に分析する。引張ブレースにプレストレスを導入したモデルの挙動との比較も行い、プレテンションを導入しない場合の補剛効果を明らかにする。また、研究対象とするのは複雑な非線形座屈挙動であり、数値解析の結果が実際の座屈挙動と異なる可能性もある為、模型実験により数値解析の妥当性について検証を行う。

(2)引張ブレースの非抗圧性を考慮した線形座屈解析の手法を提案する。非線形釣合式を線形座屈解析に対応するように大変形剛性行列の影響を無視し、幾何剛性行列が荷重係数に比例するものとして近似する。接線剛性行列の固有値がゼロであると同時に釣合式を満たすことを条件として、シェル面のどのブレースが引張抵抗するかを線形固有値解析の結果のみを用いて算出する。本研究では、外力分布、シェル形状をパラメータとして、提案手法の適用性について詳細に調査を行う。具体的には、積雪時を想定した偏在荷重を与えたモデル、主経路上で引張、圧縮となるブレースが混在するモデル、などについて検討を行う。

4. 研究成果

(1)引張ブレース補剛された EP 曲面形状の格子シェルに対して、ブレースにプレストレスを導入した場合とプレストレスを導入しない場合の座屈耐力の比較を行った(図1)。プレストレスの大きさをパラメータとし、0, 23.5, 47, 78.3, 156.6 N/mm²のプレストレスを与えた5種類のモデルで解析を行った。プレストレスの弛緩を考慮し、さらに格子材、ブレース材の材料降伏を考慮した弾塑性座屈解析と、材料降伏を考慮しない弾性座屈解析の2通りについて解析を行った。また外力分布は、等分布荷重と、2種類の偏在荷重とし、偏在率もパラメータとして3通りの解析を行った。これら多くの数値解析結果を用いてブレースのプレストレス有無による格子シェルの座屈耐力の違いを詳細に分析した。その結果、プレストレスを導入することで最も座屈耐力が高かったモデルに対し、プレストレスを導入しなかった場合の座屈耐力は7割程度の耐力であり、プレストレスを導入しなくても比較的高い座屈耐力を持つことを明らかにすることができた。

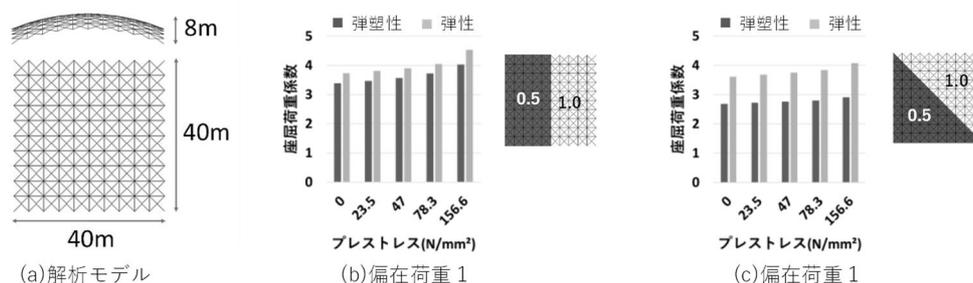


図1 引張ブレース補剛された格子シェルの座屈荷重

(2)引張ブレース補剛されたドーム状の格子シェルに対しても上記(1)と同様の検討を行い、プレストレスの有無が座屈耐力に及ぼす影響を調査した。ドーム形状の場合でも、EP 曲面形状の場合と同様に、プレストレスを導入しなかった場合の座屈耐力はプレストレスを導入した場合と同程度であることを明らかにした。また、引張ブレースにわずかな緩みがある場合や、固定荷重による初期ひずみが、座屈耐力に与える影響を調査した。これらの影響は、実際に設計を行う上では大きな影響は無いことを確認した。

(3)引張ブレースは格子シェルを建設した後に取り付けられると想定される為、格子材には固定荷重による初期応力を受けるが、ブレースは初期応力を殆ど受けない。この為、固定荷重による初期応力の有無が弾性座屈挙動に与える挙動について調査した。また、施工時にブレースに緩みが残るケースも考えられる。この影響も調査した。この結果、施工上発生しうると想定されるブレースの初期応力や初期歪では、座屈挙動に与える影響はごく小さいことが分かった。

(4) 引張ブレース補剛された格子シェルの模型実験を行った(写真1)。試験体は格子材に塩ビパイプを、ブレースにステンレスワイヤーを用いて作成した。ブレースにプレストレスを導入した試験体とプレストレスを導入しない試験体、ブレース補剛しない試験体の3体についてそれぞれ加力実験を行い、座屈挙動の比較を行った。その結果、実験で扱った試験体では、ブレース補剛しない試験体に比べ、ブレース補剛した試験体は2体とも2倍近く耐力が上昇し、また、プレストレスを導入した試験体とプレストレスを導入しない試験体の座屈耐力はほぼ同じであり、プレストレスの有無による座屈耐力の違いは殆どないことを実験と数値解析により確認することが出来た。



写真1 実験の様子

(5)プレテンションの無い引張ブレースで補剛された格子シェルモデルに対し、偏在荷重を受ける場合の弾性座屈荷重を、申請者らが考案したブレースの非抗圧性を考慮した線形座屈解析手法(以下、非抗圧線形座屈解析)を用いて、解析を行った。詳細な定式化を示し、基本的な形状のモデルへの適用例を示し、その有効性を確認した。

(6)提案している非抗圧線形座屈解析では、定式化の際に座屈点が生じることを仮定している。このため、厳密には偏在荷重を受けて極限点型の座屈を生じるケースには厳密には適用できない。このため、極限点型の座屈を生じる偏在荷重を受けるモデルに適用して、近似的にでも評価可能であるか検討を行った。その結果、やはり荷重の偏在率が大きいほど非抗圧線形座屈解析の結果は弾性座屈荷重との誤差が大きくなる傾向があることが確認できた。偏在率 0.7 で弾性座屈荷重が 1.7 倍程大きく評価されるケースがあり、偏在荷重に対して精度よく予測することは難しいことが分かった。

(7)座屈前変形時に圧縮、引張状態が混在するモデルに対して非抗圧線形座屈解析を行った。座屈前変形時にブレースの応力状態が変化しないモデルであれば、ブレースの応力分布に関わらず、非抗圧線形座屈解析は比較的精度よく弾性座屈荷重を予測できることが分かった。一方で、ドーム状の格子シェルなど、座屈前変形時に一部のブレースの応力状態が変化するモデルが存在することを確認しており、このようなケースでは、非抗圧線形座屈解析では弾性座屈荷重の予測は困難になることがわかった。

(8)以上の成果により、プレテンションの導入されていない引張ブレースで補剛された格子シェルが座屈耐力の高い優れた構造形式であることを示すことが出来た。現状では、提案の非抗圧線形座屈解析では座屈荷重を精度良く予測出来ないケースがあり、設計時に座屈耐力の評価に難しさがあるが、ローコスト化の見込める十分実現可能な有用な構造形式であり、期待が持てる。

<引用文献>

王龍盛, 山本憲司: 引張ブレースで補剛された格子シェルの座屈解析, 構造工学論文集, Vol.67B, pp.225-234, 2021.3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 山本憲司, 打樋勇人	4. 巻 64B
2. 論文標題 引張ブレースで補剛されたラチスシェルの非抗压性を考慮した線形座屈解析 その2提案手法の再整理と適用範囲の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 541-550
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 王龍盛, 山本憲司	4. 巻 67B
2. 論文標題 引張ブレースで補剛された格子シェルの座屈解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 225-234
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 Kenji Yamamoto, Hayato Utebi	4. 巻 Vol. 62
2. 論文標題 LINEAR BUCKLING ANALYSIS CONSIDERING NO-COMPRESSION PROPERTY OF METAL GRID SHELLS STIFFENED BY TENSION BRACES	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Yamamoto, H. Utebi
2. 発表標題 Linear Buckling Analysis Considering No-Compression Property of Metal Grid Shells Stiffened by Tension Braces
3. 学会等名 IASS Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Yamamoto
2. 発表標題 Linear Buckling Analysis Considering No-Compression Property of Reticulated Shells Stiffened by Tension Braces
3. 学会等名 the 12th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures-APCS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 王龍盛, 山本憲司
2. 発表標題 引張ブレースで補剛された格子シェルの座屈解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 王龍盛, 山本憲司
2. 発表標題 引張ブレースで補剛された格子シェルの座屈解析 その2弾塑性座屈荷重の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021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
---------	---------