

折板構造で構成されたアーチ架構の座屈性状に関する基礎的研究
 -ライズ・スパン比および板厚が座屈性状に及ぼす影響について-
Basic Study on Buckling Behavior of Arch-Shaped Folded Plate Structures
-Effects of Rise-Span Ratio and Plate Thickness on Buckling Behavior-

○内山乃衣³, 宮里直也¹, 鴛海昂¹, 岡田章², 永井佑季⁴
 *Noi Uchiyama³, Naoya Miyasato¹, Akira Oshiumi¹, Akira Okada², Yuki Nagai⁴

Abstract: Folded plate structures are lightweight structures that achieve high strength and rigidity by folding thin plates and assembling them into three-dimensional forms. This study focuses on arch-shaped folded plate structures. In the design of such structures, it is necessary to evaluate buckling phenomena, including plate buckling and overall buckling of the arch. However, little research has been done on the latter, overall buckling. From this point of view, this study performs numerical analyses taking into account geometric and material nonlinearities, and investigates the sequence of occurrence between plate buckling and overall buckling, as well as the post-buckling behavior of this structure.

1. はじめに

折板構造は、薄い平板を折り曲げることで、見掛けの断面せいを大きくすることが可能で、軽量で高い曲げ剛性と耐力を獲得可能である。荷重に対して応力は薄板面内に生じ、このことによる立体抵抗性能が特徴である。折板構造を応用した建築事例として、折板構造によるアーチ形状の屋根架構^[1]や壁と屋根架構が一体となった事例が挙げられる。

本報では、形状やスパンの適用性が高いと考えられるアーチ形状の折板構造を取り上げる。このアーチ型折板構造の設計時には、パネルの板座屈やアーチ架構の全体座屈などの座屈現象を評価する必要があるが、後者の全体座屈に関する検討は限られているのが現状である。

以上の観点から、本報告では幾何学的非線形と材料非線形を考慮した数値解析を行い、本構造の板座屈と全体座屈および塑性化の発生順序や座屈後の挙動等について分析し、構造計画に有用な基本資料の蓄積を目標とするものである。

2. 数値解析概要

数値解析モデルをFig.1, 数値解析概要をTable 1に示す。本報における検討モデルは、大さん橋国際ターミナル^[1]を参考にしながら、『吉村折り』^[2]を用いてアーチをスパン(X)方向に5分割したモデル(Fig.1(b))である。スパンは20mとし、桁行(Y)方向にユニットが連続することを想定した(Fig.1(a))。本報では対称条件を考慮して中央の1ユニットを抜き出したモデル(Fig.1(c))により検討を行う。

解析は汎用解析プログラムADINA(Ver.9.8)を用いて、幾何学的非線形と材料非線形を考慮し、線形座屈解析

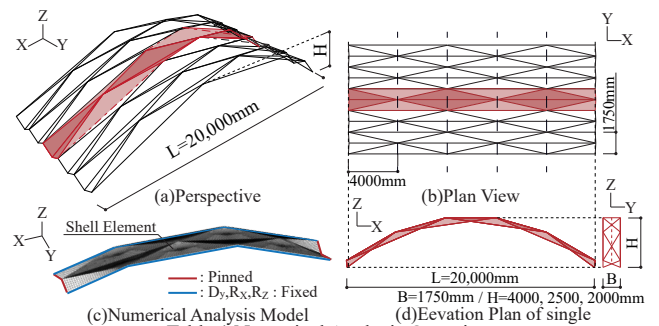


Table 1 Numerical Analysis Overview

| Material Specification / Structure Conditions | |
|--|---|
| Main Material (Shell Element): Steel Plate | |
| Material Data | Elastic / Elastic - Plastic SS400 ($E=205000\text{N/mm}^2, \nu=0.3, \sigma_y=235\text{N/mm}^2$) |
| Boundary Conditions between Units: D_y, R_x, R_z : Fixed | |
| Boundary Conditions for The Legs: All Lines at Both Ends: Pinned | |
| Loading Condition: Uniformly Distributed Load | |
| Parameters (H) | $H=4000, 2500, 2000\text{mm}$ ($H/L=1/5, 1/8, 1/10$) |
| Parameters (Plate Thickness) | $t=6 \sim 32\text{mm}$ (JIS standards for steel materials) |

(固有値解析)により求めた座屈モードを初期不整とした弧長増分解析を行った。なお、初期不整量の最大値はスパンの1/1000とした。パネルは鋼板を想定し、解析ではシェル要素でモデル化し、1辺150mmとしてメッシュ分割した。また、弾塑性による影響を把握するため、弾性材料と弾塑性材料の2ケースを材料諸元として設定した。

ユニット間の境界条件(Fig.1(c)青実線)は、ユニットの連続性を考慮して、Y方向変位およびX, Z軸回りの回転を拘束した。支持部の境界条件は、両端の辺をそれぞれピン接合とした。また、荷重条件は全面鉛直下向き(-Z方向)の等分布荷重として、面荷重で載荷した。検討パラメータは、ライズ(H)および板厚(t)とした。ライズ $H=4000, 2500, 2000\text{mm}$ ($H/L=1/5, 1/8, 1/10$)の3ケースとし、板厚は $t=6 \sim 32\text{mm}$ の内、鋼材JIS規格に準拠した板厚とした。

1: 日大理工・教員・建築 2: 日大名誉教授 3: 日大理工・院(前) 4: 佐々木睦朗構造計画研究所

3. 数値解析結果

3-1. 座屈性状の把握

ライズ毎の座屈荷重-板厚関係をFig.2に示す.なお,図中の座屈荷重は線形座屈解析(固有値)の結果である.

Fig.2より,板座屈および全体座屈の発生が確認された.また,全てのライズ(H)において,板厚が薄いと板座屈,板厚が厚いと全体座屈が先行して生じる.さらに,Hが大きい場合,アーチ効果により,座屈荷重は大きく,全体座屈へと移行する板厚も大きくなることを把握した.また,H=4000mmの場合,板厚の増加に伴い,板座屈の座屈荷重は非線形的に増加するのに対して,全体座屈は線形的に増加することが把握された.

3-2. 板座屈および全体座屈の構造挙動について

板厚の変化に伴う座屈荷重の変化が大きかったライズH=4000mm(H/L=1/5)のうち,板座屈が生じる最大板厚(t=19mm)および全体座屈が生じる最小板厚(t=22mm)について,詳細な分析を行った.解析は,初期不整を考慮した弾性および弾塑性材料,初期不整のない弾性材料の3種類のモデルを用いて行った.荷重-鉛直変位関係をFig.3,同図の低荷重域(青破線の範囲)の拡大図をFig.4,弾塑性モデルにおけるステップ毎のミーゼス応力をFig.5に示す.なお, Fig.5におけるa), b)はFig.4と対応している.

まず,板厚19mm, 22mmにおいて,初期不整を考慮した弾性および弾塑性材料はいずれもFig.2の座屈固有値解析と同様,それぞれ板座屈と全体座屈が生じており,最大荷重値は22mmの方が大きい.

Fig.3より,初期不整ありの弾性材料は,初期不整なしのモデルから分岐して座屈が生じている.一方,初期不整ありの弾塑性モデルは弾性モデルに比べて最大荷重の低下が見られた.また, Fig.5の応力状態より,座屈に先行して塑性化が生じており,これにより,最大荷重の低下が生じたと考えられる.

Fig.4, 5より,板厚19mmでは塑性化発生後も荷重は増大し,板座屈が生じた後に荷重低下が生じた.その後,中央部と左右部のパネルの稜線付近が塑性化して,M字形に架構全体が大きく変形した.一方,板厚22mmでは,初期降伏後,S字形状を呈する分岐型の全体座屈が生じ,荷重が低下した.その後,変形の進行と共に,塑性領域が拡大する性状が得られた.

また, Fig.4より,板座屈を生じる板厚(t=19mm)では最大荷重からの荷重低下が緩やかであるのに対して,全体座屈を生じた板厚(t=22mm)では,最大荷重後に急激な荷重低下が見られた.加えて,弾塑性座屈荷重は,板厚19mmで9,463kN, 22mmで11,083kNであり,それ

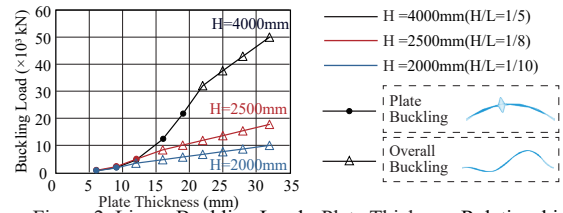


Figure 2 Linear Buckling Load - Plate Thickness Relationship

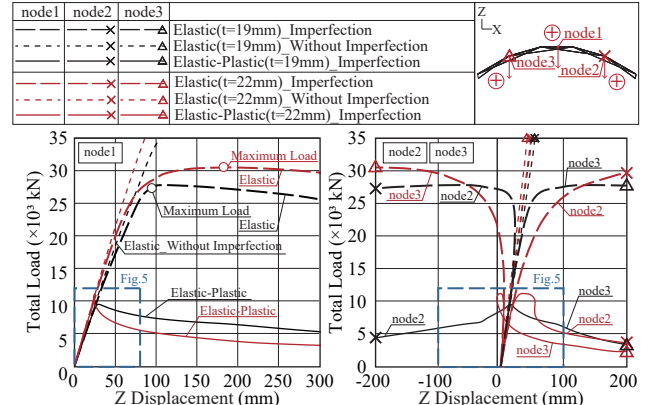


Figure 3 Total Load - Displacement Relationship

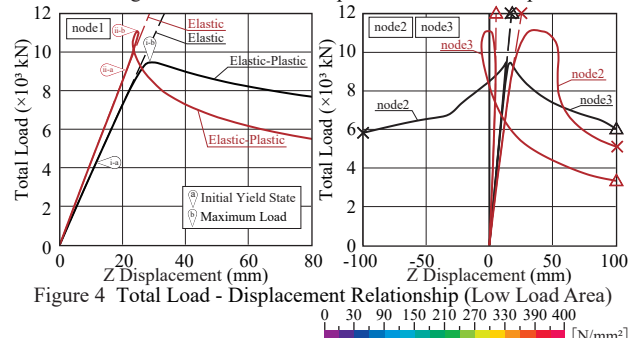


Figure 4 Total Load - Displacement Relationship (Low Load Area)

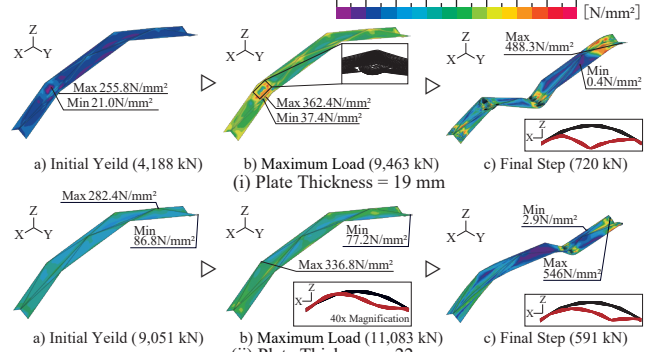


Figure 5 Mises Stress (Elastic-Plastic)

ぞれ自重(19mm : 66kN, 22mm : 76kN)に対しての約143倍および約146倍であり,板座屈が生じる19mmでも自重に対しては十分な安全率を有している.

以上より,折板構造で構成されるアーチ架構は,板座屈を考慮した座屈安全率の設定が重要であることが確認できた.

4. まとめ

本報では,折板構造で構成されたアーチ架構のモデルについて,幾何学的非線形と材料非線形を考慮した数値解析を行い,パネルの板座屈,アーチ架構の全体座屈,塑性化などの発生順序に着目した分析を行った.

【参考文献】

- [1] 日本建築学会:「日本の構造デザインガイドブック」大さん 楯国際ターミナル,p.35, 建築技術, 2023.11
- [2] 田中浩也, 館知宏:「コンピュータショナル・ファブリケーション「折る」「詰む」のデザインとサイエンス」, 彰国社, 2020.6