

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：55401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011 年度～2012 年度

課題番号：23760538

研究課題名（和文） 軽量かつ高強度のラチスシェル設計に関する基礎的研究

研究課題名（英文） A Basic Study for Designing of Light-Weight Latticed Shells with High Strength

研究代表者

仁保 裕 (NIHO YUTAKA)

呉工業高等専門学校・建築学分野・准教授

研究者番号：10346687

研究成果の概要（和文）：

本研究は複数荷重を受けるラチスシェルを分析対象とし、そのラチスシェルの設計手法を示した。この手法はまず部材曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化によりラチスシェルの形態を定めた後、そのラチスシェルの部材断面算定を行うものである。本研究では、この手法によりラチスシェルを設計することにより、ラチスシェルの重量が低減するとともに、そのラチスシェルが十分な耐力を有するものとなることを示した。

研究成果の概要（英文）：

This paper shows a procedure for structural design of single layer latticed shells subjected to several non-uniform loadings. The procedure consists of combination between a form finding method and a member proportioning method. This paper concludes that the present procedure is considered to be useful to design single layer latticed shells subjected to several non-uniform loadings

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,000,000	300,000	1,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：ラチスシェル、形態最適化、部材曲げ応力度最小化、部材断面算定

1. 研究開始当初の背景

ラチスシェルは棒状の部材を曲面に沿って組み合わせることにより形作られる構造物である。ラチスシェルは比較的軽量ながらもその強度が高く、これまで多数の施工実績がある。一方でラチスシェルの力学的特性を踏まえた設計法が確立されれば、これまでによりもさらに軽量のラチスシェルを実現でき、ラチスシェル施工における資源節約に役立つと期待される。

ラチスシェルは主に面内力により荷重を支点到に伝えるいわゆる三次元シェルの性質をもち、この性質によって比較的軽量の構造となる。ただし、三次元シェルの性質を

実現するためには支点的の水平移動を拘束し曲げ応力度の発生を抑制する必要がある。支点的の水平移動を拘束できない場合はラチスシェルの形態最適化が代替案として考えられる。

ラチスシェルの形態最適化に関する研究は数多く行われているものの、形態最適化されたラチスシェルの部材断面算定に関する研究がなく、結果としてラチスシェルの形態最適化により、ラチスシェルの重量がどの程度低減するかについては十分な議論がなされていない。このため、ラチスシェルの設計法確立に向けた分析に、いまだ余地があると言える。

2. 研究の目的

以上を受け、本研究では等分布荷重を含めた複数の荷重を受けるラチスシェルを分析対象とし、部材曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化によりラチスシェルの重量がどの程度低減されるかを分析する。また、ラチスシェルの最大耐力が設計荷重を上回るかどうかを確認し、軽量でありながらも強度の高いラチスシェルが設計できることを示す。以上の結果を踏まえ、本研究で示した手法が軽量でありながらも強度の高いラチスシェルを設計する有用な手段であることを示す。

3. 研究の方法

(1) 複数の荷重をうけるラチスシェルの形態最適化を実施する。本研究実施に当たり、まず複数個の荷重を考慮し、部材曲げモーメント最小化を目的としたラチスシェルの形態最適化を行う。

本研究で用いるラチスシェルの形態最適化手法は次式で表される関数 U^* の最小化を目的とする。

$$U^* = U + W \quad (1)$$

ただし、

$$U = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{LO} \sum_{k=1}^{MEM} \left\{ \frac{A_k l_k}{E_k} \left(({}_l\sigma_k^{(1)})^2 + ({}_l\sigma_k^{(2)})^2 \right) \right\} \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{NODE} (K_{si} \cdot \delta_i^2) \quad (3)$$

である。 U と W は、それぞれ、目的関数とペナルティ関数である。また、 ${}_l\sigma_k^{(i)}$ は部材 k の i 端 ($i=1\sim 2$) の曲げ応力度である。 A_k , l_k , および E_k は、それぞれ、部材 k の断面積、長さ、およびヤング係数である。 MEM は部材数、 $NODE$ は節点数、 LO は設計荷重の総数である。 δ_i は節点座標初期値 (X_{iG} , Y_{iG} , Z_{iG}) と形態探索の結果として得られる節点座標 (X_i , Y_i , Z_i) の間の距離である。 K_{si} は節点 i の軸ばねの剛性であり、次式で表される。

$$K_{si} = \begin{cases} 0 & (f_i \geq 0) \\ K_s & (f_i < 0) \end{cases} \quad (4)$$

ただし、

$$f_i = 1 - \frac{1}{R_i} \cdot \delta_i \quad (5)$$

(2) (1) で述べた形態最適化手法の妥当性を確認する。(1) で述べた手法によりラチスシェルの形態最適化を行うことにより、形態最適化を実施しない場合と比べ部材曲げ応力度が低減するかどうかを分析する。分析結

果を踏まえ、手法の妥当性を検討する

(3) 部材曲げ応力度最小化がラチスシェルの重量に与える影響を分析する。部材断面算定の前に形態最適化を実施することによるラチスシェルの重量の変化を分析し、曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化がラチスシェル重量の低減に有用であることを示す。なお、本研究で用いるラチスシェルの部材断面算定法はこれまでいくつかの研究論文等によりその妥当性が明らかとされているものである。

(4) 部材曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化がラチスシェルの最大耐力に与える影響を分析する。(1) で述べた手法は部材曲げ応力度を最小化するのみであり、ラチスシェルの最大耐力が設計荷重を上回ることは保証しない。よって部材断面算定の前に形態最適化を実施したラチスシェルの最大耐力を弾塑性解析により計算し、その最大耐力が設計荷重よりも大きいかどうか分析する。

(5) 分析モデルの初期の形状は図 1 に示される円弧長 $B=34.6\text{m}$ の部分円筒形の単層ラチスシェルとする。基準部材長 $l_0=4\text{m}$ であ

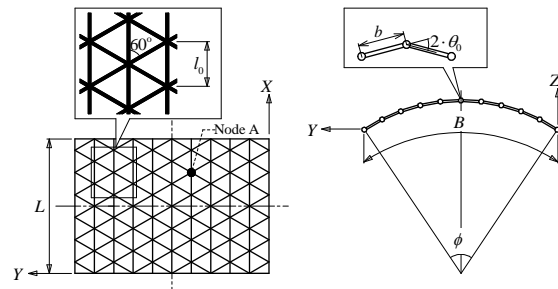


図 1 分析モデルの初期形態

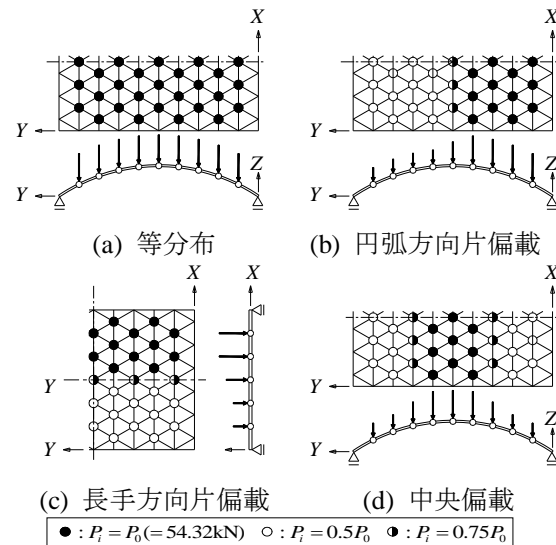


図 2 設計荷重

る。 θ_0 は円弧縁上の部材半開角であり、 $\theta_0 = 2^\circ, 3^\circ$, および 4° とする。また、長さ L もパラメータとし、ここでは、24m, 32m, 40m および 48m とする。部材は円形鋼管とし、その細長比 $\lambda_0 = 40, 50$, および 60 とする。

設計荷重として図2に示す4種類の荷重を採用する。境界条件は周辺単純支持とする。

4. 研究成果

(1) 本研究において示された手法により最適化されたラチスシェルを形態を表1に示す。

表1 ラチスシェルの形態

	$\theta_0 = 2^\circ$	$\theta_0 = 3^\circ$	$\theta_0 = 4^\circ$	
初期				
λ_0	40			
	50			
	60			
	60			

(2) 表2は部材断面算定を行っていないラチスシェルの部材曲げ応力度のダイアグラムを示す。ただし、表2には初期形状ラチスシェルの部材曲げ応力度最大値で正規化した値を示している。紙面の都合上、ここでは $L=24\text{m}$, $\theta_0 = 2^\circ$, $\lambda_0 = 60$ の結果のみ示すが、他のラチスシェルについても同様の結果が得られている。形態最適化を行うことにより、

表2 部材曲げ応力度分布一覧
($L = 24\text{m}$, $\theta_0 = 2^\circ$, $\lambda_0 = 60$)

設計荷重	初期形態	形態最適化実施
等分布		
円弧方向片偏載		
長手方向片偏載		
中央偏載		

部材曲げ応力度が小さく抑えられていることが表2により確認できる。

(3) ラチスシェルの重量を図3に示す。図中、○は初期形態ラチスシェル、●は形態最適化ラチスシェルそれぞれの重量を表す。部材断面算定を行う前に形態最適化を行うことにより、ラチスシェルの重量が低減する。

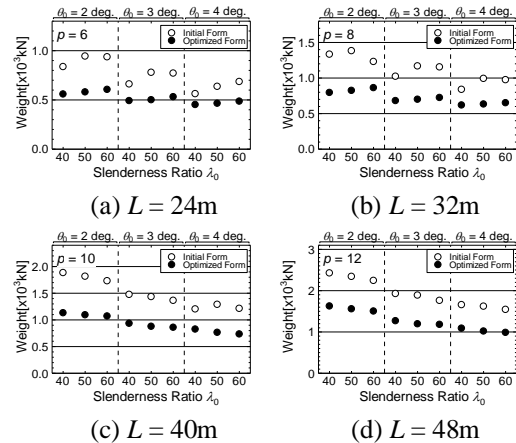


図3 ラチスシェルの重量

(4) 形態探索されたラチスシェルの設計荷重に対する部材応力度の最大値を図4に示す。なお、部材応力度は幾何非線形・材料線形を仮定して計算されており、また図4では次式(6)により係数 v_k に変換して示されている。

$$v_k = \frac{|N_k|}{\sigma_c \cdot A_k} + \frac{M_k}{\sigma_p \cdot Z_{ek}} \quad (6)$$

ただし、 N_k と M_k は、それぞれ、部材 k の軸力と曲げモーメントである。 σ_c は部材断面算定に用いた部材圧縮強度である。 Z_{ek} は部材 k の弾性断面係数である。この図より、形態探索されたラチスシェルの部材断面算定において使用された部材強度は妥当であったと判断できる。

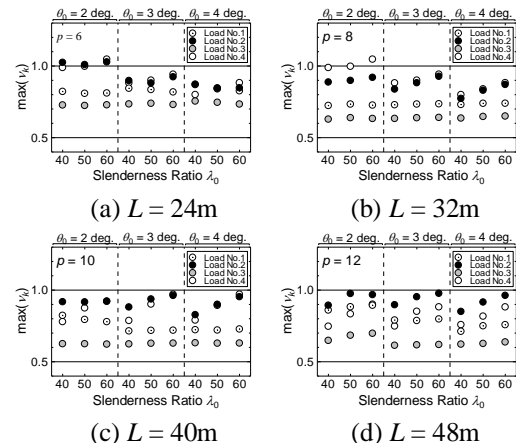


図4 ラチスシェルの部材応力度

(5) 形態最適化されたラチスシェルの最大耐力を図5に示す。この図において最大耐力は設計荷重に対する比として表されている。また、最大耐力と設計荷重はともにラチスシェル全体にかかる荷重量である。この図から明らかなように、ラチスシェルの最大耐力は設計荷重よりも大きい。

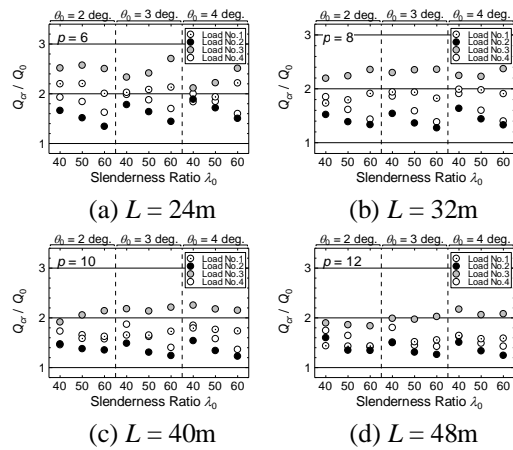


図5 ラチスシェルの最大耐力

(6) 以上の結果を要約し、本研究の成果を述べる。

- ① 形態最適化を行うことにより部材曲げ応力度はより小さく抑えられた。従って、本研究において構築し使用した形態最適化手法は妥当なものであったと考えられる。
- ② 部材断面算定前に部材曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化を行うことにより、ラチスシェルの重量がより小さくなった。従って、部材曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化がラチスシェルの軽量化に有効であることが明らかとされた。
- ③ 部材断面算定に用いた部材強度は妥当なものであると判断された。従って、本研究における分析モデルに関して、その部材断面は妥当なものとなったと考えられる。
- ④ ラチスシェルの最大耐力は、設計荷重の分布に関係なく、設計荷重よりも大きいことが確認された。すなわち、本研究において示された手順により、十分な耐力を有するラチスシェルが設計された。

以上より、部材曲げ応力度最小化を目的とした形態最適化が軽量かつ十分な耐力を有するラチスシェルを設計するために有力な手段となり得ることが本研究の結果により確認されたと言える。

(7) 今後の課題を以下に述べる。

- ① 本研究では、ラチスシェルの部材断面を算定するに当たり、すでに提案されている手法を援用している。一方で、ラチスシェルの座屈挙動はラチスシェルの形状により異なるため、形態最適化されたラチスシェルの部

材断面算定法を改めて提案する必要がある。

② 本研究では部材曲げ応力度最小化を目的として形態最適化を行った。一方で、曲げ応力度だけでなく、部材軸力も最小化することを目的としてラチスシェルの形態を定めれば、ラチスシェルのさらなる軽量化が期待できよう。この点は今後の課題である。

③ 既往の研究において座屈荷重最大化を目的とした形態最適化手法が提案されているが、この手法がラチスシェルの軽量化にどの程度寄与するかは明らかではない。この点についても今後検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

① 仁保裕, 加藤史郎, 曲げ応力度最小化を目的として形態探索されたラチスシェルの部材断面算定, 日本建築学会大会(東海), 2012年9月, 名古屋

② Yutaka NIHO, Shiro KATO and Eka Satria, A Study for Structural Design of Single Layer Latticed Shells Subjected to Several Non-Uniform Loadings, IASS-APCS 2012 Symposium, May 21- 24, 2012, Seoul, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仁保 裕 (NIHO YUTAKA)

呉工業高等専門学校・建築学分野・准教授
研究者番号: 10346687