

自由曲面コンクリートシェルの形状・型枠一貫設計支援システムの開発

Development of integrated design support system for free-form concrete shell structure and its formwork

名古屋市立大学大学院芸術工学研究科 講師 木村俊明

（研究計画ないし研究手法の概略）

はじめに

構造解析や設計技術の飛躍的な発展と相まって、自由形状の鉄筋コンクリート(RC)シェル構造が実現できるようになった。力学的に合理性を持つ大スパン構造物の形状を数理的に探索する研究はこれまで活発に行われている。実施設計に構造最適化を応用した事例も見られる。これらの施工計画を見ると、施工性や仮設資材の省資源化といった課題は施工段階において解決する傾向にある。施工性を改善した形状を探索する研究も行われている。近年ではサステナブルな建築が志向されており、建設資材の省資源化を積極的に実現させる傾向にある。特に仮設の簡略化・省略化は重要であり、デジタル技術を応用し、軽量の仮設材を用いてシェル屋根を建設する方法も活発に研究されている。

本研究は、既存の自由曲面シェル構造の形状設計手法を拡張し、型枠設計まで一貫した新しい設計支援システムを構築することを目的としている。構造最適化により構造安全性の向上を図る他、曲面型枠の効率性も同時に最適化し、廃棄物・コスト削減、さらには現場作業の簡略化による工期の短縮につなげることを意図している。

本研究は、まず、力学的に最適化された RC 自由曲面シェルを対象として、数値解析を行い、型枠製作と力学性能上必要とされるシェル曲率の関係を整理した[1]。次に既存の自由曲面シェル構造の形状最適化手法と型枠工法を拡張し、力学性能と型枠施工性を考慮した形状設計手法を構築した[2, 3]。最後に最適化の過程で得られたシェル形状に関する型枠のモックアップを製作し、施工性を確認した[4]。

多目的最適化を用いた形状設計手法

曲面型枠は、現場施工を簡略化できるユニット型枠を想定する。対象となるシェルの平面を 910 mm×1820 mm 以下のグリッド（基準グリッド）で分割し、箱形状のユニットを m 個配置する。各ユニットではシェル形状に沿って配置された直線状のリブ ($t=24$ mm) に合わせてせき板 ($t=12$ mm) を配置する。曲率半径が小さい部位では、せき板を大きく曲げる必要が生じ、施工に過大な労力・コストが生じる。

本研究では、型枠の施工性を最適化するため、シェルの曲率を抑え、ユニットせき板面を平坦に近づける。基準グリッドをシェルの曲面形状に投影する。 i 番目ユニットの隅部の点 j ($j=1,2,3,4$) における u 方向（ユニット短辺方向）、 v 方向（長辺方向）の法曲率をそれぞれ κ_{uij} , κ_{vij} とする。逆数を曲率半径として R_{uij} , R_{vij} と表す。本研究では隅部の曲率半径の最小値をユニットせき板面の曲率半径 R_{ui} , R_{vi} とする。

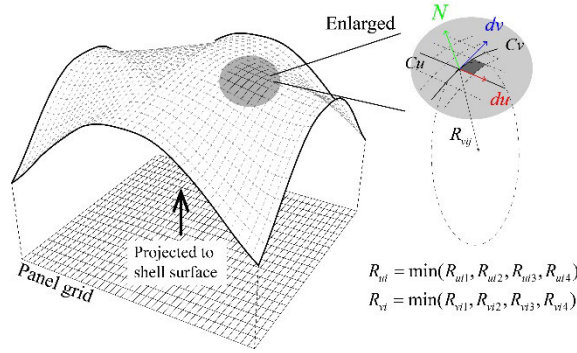


図 1 基準グリッド及びせき板表面と曲率半径の関係

本研究では NURBS 制御点の z 座標を集めたベクトル $\mathbf{P}_z$ を設計変数とする。型枠ユニットを構成するせき板面の曲率半径の最小値の最大化とひずみエネルギーの最小化を行う。多目的最適化問題は次式のように表すことができる。

$$\text{Minimize } \mathbf{f}(\mathbf{P}_z) = \begin{cases} f_1(\mathbf{P}_z) = -\min_{i \in \{1, m\}} (R_{ui}, R_{vi}) \\ f_2(\mathbf{P}_z) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \end{cases} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{d}$ および $\mathbf{K}$ はそれぞれ節点変位ベクトルおよび全体剛性マトリクスを表す。本研究では、構造解析は Karamba 3D²⁾、式(1)は Walaccei³⁾を用いて解く。

モックアップ施工実験

最適化過程で得られた形状に関して、型枠のモックアップを作成し、工法の手順や合理化の効果を検証する。2022 年 2 月下旬～3 月上旬に CNC ルーターを持つ曲面型枠製作会社が型枠の製作を行い、同 3 月 7・8 日に現場（名古屋市立大学北千種キャンパス）で実験を行った。経験年数 10 年の熟練技能者が組立て作業を一人で行い、各作業の所要時間を測定した。高所作業など危険を伴う作業は必要に応じて複数人が補助した。完成後に型枠の座標を測量し、設計段階で作成した 3D モデルと比較し、施工誤差を評価した。

モックアップの工法はユニット型枠工法を想定した（図 2）。形状は、最適化過程で得られたシェル形状から 3000 mm×4500 mm の範囲で抽出した。合板の定尺寸法を考慮して、せき板の割付は 750 mm×1500 mm とした。2.6 m の高低差を踏まえ、ユニットの総数は 12 個（3 段構成×4 分割）とした。

本実験で用いたユニットは、設計段階の曲面形状の最適化だけでなく、型枠設計段階でもパネル割やディテール等について極力自動化できるようにルール化して作成した。各ユニットの枠（縁梁）は梁成 200 mm とし、直線部材に近似した。せき板面を平坦に近づける最適化と対応を図り、型枠の製作性を向上させた。また、ユニットの中央に十字形に中間梁を設けた。縁梁を組み立てた後、枠内にはめ込んで組み立てる作業を意図した。堰板は直線部材に沿って設けており、線織面になっている。この他、堰板ユニット裏面からでも組立の精度が分かるよう、隣接するパネルの接する縁梁の底辺を同一ラインとした。各段のユニットを支える大引きの底面は水平ラインとし、パイプサポートの高さを一定として、パイプサポート高さ調整の工程を省力化した。その他、大引きとパネルの接合部など機械的に接合できるようにして現場の作業性を向上させた。これらの部材の設計は 3DCAD（Rhinceros）で行われ、CNC ルーターによって部材をカットし、曲面の傾きに依じて縁梁の天端を職人の手作業で加工された。なお、本型枠の製作工程では、型枠モデリングからカットデータ作成までの設計工程に 14 時間、CNC 加工に 10 時間、組み立ておよび仮組試験に 17.5 時間、合計

41.5 人・時間を要した。型枠の製作費は金物やサポート含めて 554,400 円であった。

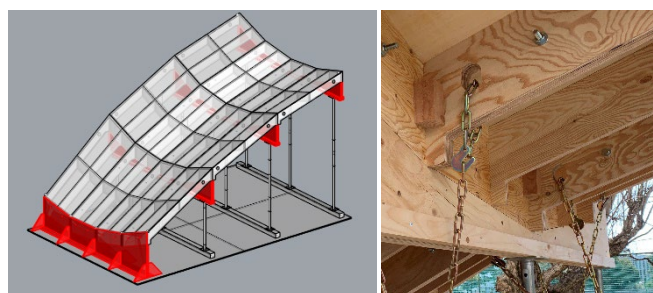


図 2. モックアップモデルと大引-パネルの接合部

組み立て作業の手順は以下の通りとした（図 3）。

- (1) 床形状を確認し、水平レベル出しを行う
- (2) 設置位置確認後部材セットし、各部材水平出し作業
- (3) 下段から順に型枠部材を設置
 - 1 段目から 3 段目の順に (i) ～(v)を繰り返し行う
 - (i) サポートの設置
 - (ii) セット用大引をサポート上端に設置
 - (iii) 各段パネルを大引上に内側から順に設置
 - (iv) サポート高さ調整によるレベル調整
 - (v) ユニット同士をボルトによる固定方法で仮締め
- (4) サポートなどの緩みを確認後サポートレベル調整
- (5) サポート根がらみの固定・各所本締め
- (6) ユニットのズレを確認後ターンバックルで調整



図 3. 組み立て作業手順

（実験調査によって得られた新しい知見）

数値解析結果

最適化対象は脚部で固定支持された $29.25\text{ m} \times 28.50\text{ m}$ の矩形平面を持つ裁断球形シェルとする。材料はコンクリート (F_c24)、シェル厚は 0.2 m とする。外力は自重および積載荷重 1 kN/m^2 を想定する。 P_z を設計変数とし、ひずみエネルギー最小化により得られた解（図 4 (a)）を初期形状 (IS) とする。式(1)の最適化を Case 1 とする。比較のため、Case 2 とし

て、次式に示す多目的最適化問題(2)を解き、得られる解の特徴を考察する。

$$\text{Minimize } \mathbf{f}(\mathbf{P}_z) = \begin{cases} f_3(\mathbf{P}_z) = -\min(\sum_i^m R_{ui} / m, \sum_i^m R_{vi} / m) \\ f_2(\mathbf{P}_z) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \end{cases} \quad (2)$$

個体数を 25、世代数を 500 として最適化を実行した。Case 1 の目的関数空間における最終世代の非劣解集合を図 4 に示す。

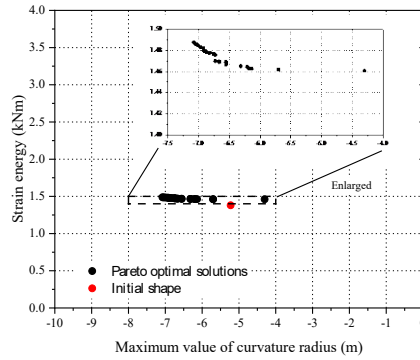


図 4 目的関数空間における非劣解集合の分布 (Case 1)

非劣解において、 $f_2(\mathbf{P}_z)$ は同様の値を示している。IS に比べて、最大変位は微増している。非劣解集合より取り出したシェル形状とユニットせき板面における曲率半径の分布の一例を図 5, 6 に、曲率半径の最小値、最大値及び平均値を表 1, 2 に示す。カラーマップは各ユニットのせき板表面における曲率半径(R_{ui}, R_{vi})を示している。図 5, 6 および表 1, 2 を見ると、ユニットせき板面の曲率半径の最大化により、型枠において、限りなく平坦なせき板面を持つユニットを多数有するシェル形状が得られている。Case 1 では曲率半径の最小値が IS より増加している。Case 2 では IS と比べて曲率半径の平均値、最大値が増加している。一方、いずれのケースも自由縁の頂部は小さな曲率半径となる。特に Case 2 は最小値が小さく、小さい曲率半径となる型枠ユニットが増加している。

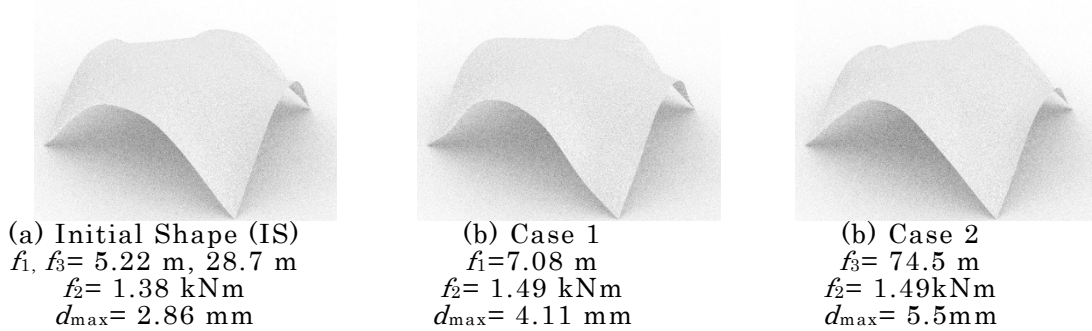
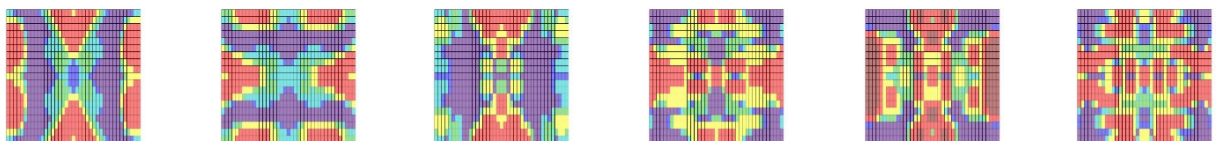


図 5 非劣解のシェル形状の一例



(a-1) IS u 方向 (a-2) IS v 方向 (b-1) Case1 u 方向 (b-2) Case1 v 方向 (c-1) Case2 u 方向 (c-2) Case2 v 方向

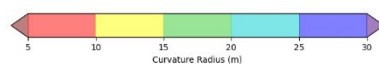


図 6 非劣解のユニットせき板面における曲率半径の分布の一例

表 1 u 方向曲率半径の最小・最大値および平均値 (m)

R_u	IS	Case 1	Case 2
Min.	5.22	7.08	2.70
Max.	286	290	2.69E+03
Average	28.8	32.8	74.5

表 2 v 方向曲率半径の最小・最大値および平均値 (m)

R_v	IS	Case 1	Case 2
Min.	6.16	7.14	6.31
Max.	167	134	1.60E+04
Average	28.7	20.9	98.6

実大試験結果

全作業時間（287 分 30 秒）を組み立て作業（③-i, ③-ii, ③-iii, ③-iv, ③-v, ④, ⑥）、調整作業（①, ②, ③-iv, ④, ⑥）、固定作業（③-v, ⑤）に分類すると調整作業（123 分 40 秒）に大きく時間を要している。特に①水平レベル出し、⑥ターンバックルの調整が大きな割合を占めている（図 7）。

まず、低い段から順に行った型枠パネルの敷設・組み立て時間に注目する。組み立て時間は下から順に 45 分 0 秒（1 段目）、49 分 4 分 0 秒（2 段目）、51 分 30 秒（3 段目）となった。上段ほど作業時間を要したことが分かる。特に、パネルの設置に注目すると、1 段目（15 分 40 秒）に対して、3 段目は 22 分 50 秒となり、1.5 倍の時間を消費している。3 段目は高所作業となったため、多くの時間が必要となったと考えられる。

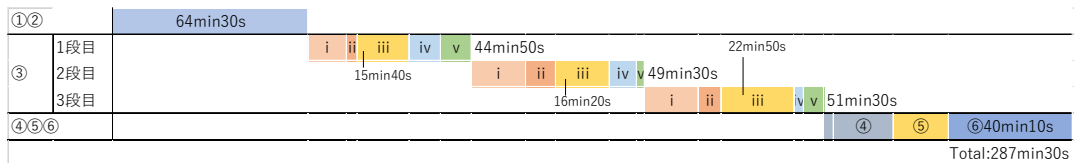


図 7 各作業の所要時間

次に、型枠表面の座標（約 200 mm 毎、合計 235 か所）をレーザー測量機で測定し（図 8）、測定値と設計サーフェスの座標と比較した。図 8 を見ると、各点の高さ誤差絶対値の最大値は 11.7 mm となる。平均値は 5.8 mm となった。各段の誤差に注目すると 3 段目が最も大きい値を示している。

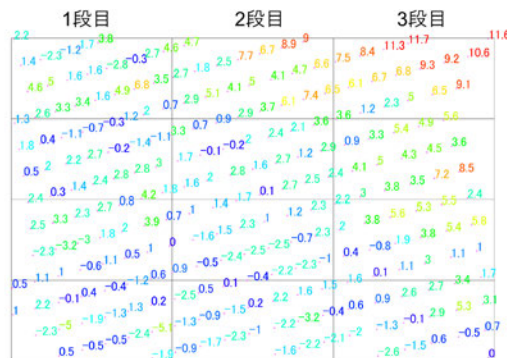


図 8 曲面の形状誤差測定結果

最後に、単位面積あたりの組み立て作業の人工を評価する。本実験での現場での施工面積当たりの組み立て時間は 0.35 人時間/㎡となり、在来工法の場合の 1/7 となった。一方、作成した試験体の工場での製作時間は 3.1 人時間/㎡で、これは在来工法の現場での単位施工面積当たりの組み立て時間（2.35 人時間/㎡）を上回っている。

また、ユニットの製作費を含めた材料費は総額 554,400 円（41,060 円/㎡）、労務費は 1,080

円/m²，トータルの施工費は 42,140 円/m²となり，在来工法の約 2 倍となった。ユニットを工場で製作したことで精度が向上した一方，単位面積当たりの製作コストが上昇した。

結

力学性能と型枠施工性を考慮した自由曲面 RC シェル構造の形状最適化手法を提案した。ひずみエネルギーの最小化と各ユニットを構成するせき板の表面の曲率半径の最大化を目的とした多目的最適化問題を定式化し，得られた解の特徴について考察した。また，実大試験によりその施工性を確認した。得られた知見は以下の様に要約できる。

- せき板に関するグリッドを導入し，ユニットせき板面における法曲率を評価指標とした最適化問題を定式化した。ひずみエネルギー最小化と曲率半径の最小値の最大化を行う多目的最適化問題を定式化し，力学性能を制御しつつ，ユニットせき板面の曲率半径を大きくし，できる限り平坦なせき板面を設けることを意図したシェルの形状を求めることができる。
- 最適化と連動したユニット型枠工法を想定し，型枠モックアップモデルの施工実験を行った。高精度で施工性を向上したユニット型枠が実現できることを確認した。在来工法と比べて現場作業が簡略化できる一方，工場での製作を含めた製作時間や製作コストは上昇する。

（ 発 表 論 文 ）

- [1] 木村俊明, 力学的に最適化された RC 自由曲面シェルの曲率分布性状に関する考察, 2021 年度日本建築学会大会 (東海), pp.767-768, 2021.
- [2] 小川修平, 木村俊明, 型枠施工性を考慮した RC 自由曲面シェル構造の形態創生, 第 16 回コロキウム構造形態の解析と創生 2021, pp.83-88, 2021.
- [3] 木村俊明, 林盛, 武藤達哉, 権藤智之, 山崎康造, 小川修平, 堺雄亮, 力学性能と型枠の施工性の多目的最適化を用いた RC 自由曲面シェル構造の形状設計法に関する研究 その 1 多目的最適化手法の提案, 2022 年度日本建築学会大会 (発表予定)
- [4] 林盛, 木村俊明, 武藤達哉, 権藤智之, 山崎康造, 小川修平, 堺雄亮, 力学性能と型枠の施工性の多目的最適化を用いた RC 自由曲面シェル構造の形状設計法に関する研究 その 2 実大試験による施工性の確認, 2022 年度日本建築学会大会 (発表予定)