開口を有する逆転懸垂型 RC シェルの力学的性状

異なる荷重モードにおける開口位置の影響

THE MECHANICAL BEHAVIORS OF THE REVERSED CATENARY REINFORCED
CONCRETE SHELL WITH OPENINGS

The effect of the position of openings under the different loading modes

鈴木直哉*, 高山 誠**

Naoya SUZUKI and Makoto TAKAYAMA

In this paper, the experiments were performed to investigate the effect of position of the opening on the mechanical behaviors of the free-formed shells. And the effect of the opening under the different loading modes was also investigated. The reversed catenary surface was adopted as the shape of the free-formed shell. Three types of the model with openings at different position, including without opening, were tested under two loading modes and the results were compared each other. The results indicate that the position of openings affects not only the ultimate load and the stiffness, but also the mode of displacement and the stress flow. Especially, in case of the openings on the diagonal line, the deflection is amplified by the central partial loading. So, such situation should be avoided in the design of the reversed catenary shell.

Keywords: RC Shell, Reversed Catenary Shell, Opening, Loading Mode, Failure Experiments

鉄筋コンクリートシェル、逆転懸垂型シェル、開口、荷重モード、破壊実験

1. はじめに

スイスの H. Isler¹⁾がヨーロッパにおいて数多く建設してきた自由曲面シェルの一種である逆転懸垂型シェル構造は、その形状が重力に対する構造物の応答そのものなので、幾何学的に形づくられる円筒シェル等のシェル構造よりも力学的合理性に優れ、自重タイプの荷重に対してシェル全面で面内圧縮力が支配的な効率の高い構造であるといえる。一方、これらのシェルは合理的な形態であるがゆえに、様々な不整に対して感度の高い構造となっている。そのため、開口等による断面欠損や、積雪等による荷重モードの変化により、シェル効果の低減や剛性、耐力等に大きな影響を受けることも考えられる。

RC シェルに関する研究は、文献2) の実験資料集にまとめられているように、坪井、青木による円錐シェルの実験³⁾や裁断球殻の実験⁴⁾、また、同資料集には収録されていないが、加藤、榎並、西村⁵⁾による円筒シェルの実験など、1950 年代以降多くの研究がなされてきた。また、近年においても、皆川ら⁶⁾による実物の円筒シェルの破壊実験や真下ら⁷⁾⁸⁾による繊維補強コンクリート造のシェルに関する実験など多くの研究があるが、逆転懸垂型シェルに関する研究はほとんど行われていない。そこで、筆者らは数年前より逆転懸垂型シェルの力学的性状を調べるための様々な研究⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を行ってきており、その結果、逆転懸垂型シェルはシェル全面で面内圧縮力が支配的で力学的合理性が高いが、荷重モードやシェル形状などの乱れに敏感に反応して、剛性、耐力などが大きく変化すること、また、支持部の固定度が剛性に大きく影響することなどが明らかと

なった。

一方、逆転懸垂型シェルでは、採光などの目的でシェル面に開口を設けることも多く、Camorino のガーデンセンター¹⁾のように、頂部に一個の開口を有するものや、Wangen bei Olten の COOP 配送施設¹⁾のように、シェル面に複数の開口が分散配置されているものなど様々な場合があり、この開口がシェルの力学性状に大きく影響することが考えられる。そこで、2002 年以降、特に開口の影響を調べるための実験¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を行ってきた。その結果、シェル頂部に開口をもつ試験体¹³⁾¹⁴⁾については、開口周りにコンプレッションリングが形成されることにより、剛性、耐力への開口の影響は少ないという結果が得られた。一方、開口の数や位置が違う試験体¹⁵⁾¹⁶⁾については、開口の位置の違いが変形状、応力性状に影響を与える可能性があることが明らかとなったが、十分な結果を得るに至らなかった。

そこで、本研究では上記のことをふまえ、開口の位置の違いが逆転懸垂型シェルの力学的性状に及ぼす影響を調べることに、及び、異なる荷重モード下で、この開口の影響がどのように変化するかを調べることを目的として、実験的検討を行った。実験パラメータは開口の位置とし、開口を有する試験体については、対角線上に4つ配置したもの、稜線上に4つ配置したものの2試験体に、比較のための無開口を含む3タイプの試験体について実験を行った。また、積雪時に部分的に雪が滑落した時等に生じる部分荷重のように、荷重モードが異なった場合に、開口の影響がどのように変化するかを調べるため、2種類の荷重モード下で検討することとした。

* ㈱ Ando 構造設計

** 金沢工業大学建築学科 教授・工博

Ando Structural Design

Prof., Dept. of Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.

2. 形状決定法

逆転懸垂型シェルの曲面形状決定法として、H.Isler¹⁾は布を垂らす方法により実験的に様々な曲面を求めているが、本研究では、既往の研究⁹⁾において著者らが提案した手法、すなわち、幾何学的非線形を考慮した有限要素法による数値解析の手法により曲面形状を求めた。また、幾何学的非線形については Karman の大変形理論を用いている。

この数値的形状決定過程において、逆転懸垂曲面の形状は、平面形状寸法 80cm×80cm で、4 隅点支持の矩形平面とし、ライズ/スパン比を 20%とした。矩形平面膜の材料特性は、極めて柔らかな線形弾性 $[E=1\text{ N/mm}^2, \nu=0.17]$ としており、厚みは 8mm とした。境界条件は、隅点をピン支持とし、周辺は自由としている。また、計算時間の短縮のため曲面形状の 1/4 について解析を行い、対称軸上で対称性を考慮した境界条件を採用した。

形状解析手法を Fig.1 に示す。第一段階として、隅部 4 点をピン支持した矩形平面膜に鉛直等分布荷重を加え、中央点の変位が 16cm(ライズ/スパン比 20%)になるように変位制御で増分解析を行う。鉛直等分布荷重により得られた曲面は、放物曲面であって懸垂曲面ではないため、出力された曲面を基に自重相当分の荷重を算出し、その荷重(自重)を各要素に与え再度解析を行い、形状値を算出した。ここで得られた形状値が、逆転懸垂曲面となる。更に、解析で得た形状値に、分割された区間に対して、各々異なった多項式で構成される滑らかな区分多項式(スプライン関数)を用い、最終的な曲面形状を求めた。

Fig.1 Shape Finding Process

Fig.2 Shape and Dimensions of the Model

3. 実験概要

3.1 試験体概要

試験体形状、寸法及びシェル厚詳細図を Fig.2 に示す。シェルの平面形状は 80cm×80cm の 4 点支持シェルで、ライズは 16cm(ライズ/スパン比: 20%)を基準とした。シェル厚は中央部 8mm を基準とし、応力が集中する支持部にかけて 16mm となるよう滑らかに厚さを変化させている。

試験体名称及び諸元を Table1 に示す。また、Table1 にはシェル厚実測値も併せて示した。実験パラメータは、荷重モードと開口位置の 2 種類のパラメータを組み合わせしており、Fig.3 に示すように対角線上に開口を 4 つ設けたもの、稜線上に 4 つ設けたもの、及び無開口の 3 タイプの試験体に対して、積雪の状況を想定した全体載荷と中央部分載荷の 2 種類の荷重モードで実験を行った。なお、シェル厚、支持条件等は全試験体とも同様とし、開口形状、開口径も同一である。

Table1 Names and Properties of the Models

Model	Position of the Opening	Loading Area	Thickness [mm]
CR16NW	No opening	Whole Area	8.64±0.84
CR16DW	on the Diagonal	Whole Area	9.26±1.27
CR16RW	on the Ridge	Whole Area	8.44±0.91
CR16NC	No opening	Center Area	8.89±0.88
CR16DC	on the Diagonal	Center Area	8.67±0.94
CR16RC	on the Ridge	Center Area	9.12±1.01

Fig.3 Position of the Opening and Loading Mode

Fig.4 Steel Arrangement

Fig.5 Testing Apparatus

Fig.6 Loading Point

試験体材料のコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用し、骨材の最大粒径 1.2 mm以下のマイクロコンクリートとした。水セメント比は 57%、セメントと骨材の調合は C : S=1 : 3 とする。シェル鉄筋は、全試験体において、φ 1.2 mmの普通鉄線を直線状に引き伸ばしたものを使用した。コンクリート及び鉄筋の材料特性を Table 2 に示す。シェルの配筋は、対角線方向の直交格子状配筋とし、配筋間隔は 40 mmのシングル配筋とした。(シェル一般部の鉄筋比=0.35%) ただし、シェル厚の厚い支持部付近についてはダブル配筋としている。また、開口部周辺には開口補強筋を配している。配筋図の例を Fig.4 に示す。逆転懸垂型シェルは、鉛直荷重下ではシェル全面にわたって面内圧縮力が支配的であるので、理論上はほとんど鉄筋を必要としないこととなるが、ここでは、ACI 規準¹⁷⁾(鉄筋間隔≤シェル厚×5、鉄筋比≥0.35%)を参考に配筋間隔を決定した。また、既往の実験結果^{13)~16)}から、開口周囲での際立った応力集中は認められていないが、ここでは、用心筋として開口補強筋を配した。

3.2 加力方法及び測定方法

加力方法を Fig.5 に示す。加力方法は、分割トーナメント方式の載荷装置を用い、油圧ジャッキにより鉛直方向下向きに単調載荷した。各試験体とも支持点はシェル4隅角部とし、鉄骨土台の上にならしモルタルを敷き、その上に試験体を設置した。鉄骨土台と試験体の隙間にはモルタルを埋め、スラストによる移動等を生じないようにした。試験体の支点はこのモルタルのみで固定されているが、支点では軸圧縮力が支配的であるので、破壊の生じる直前までは固定支持の状態にあると考えられる。

Table2 Properties of Concrete and Steel of the Models

Model	Concrete				Steel [φ 1.2mm]		
	Compressive Strength F_c [N/mm ²]	Tensile Strength F_t [N/mm ²]	Young's Modulus E_c [kN/mm ²]	Poisson's Ratio $[\nu]$	Young's Modulus E_t [kN/mm ²]	Yield Strength σ_y [N/mm ²]	Ultimate Strength σ_u [N/mm ²]
CR16NW	36.6	2.97	20.4	0.204	226	356.3	419.9
CR16DW	28.7	2.82	19.5	0.205			
CR16RW	25.5	2.73	16.9	0.203			
CR16NC	29.4	2.83	19.3	0.188			
CR16DC	31.6	2.79	19.2	0.180			
CR16RC	29.0	3.01	20.0	0.208			

加力点位置を Fig.6 に示す。加力点は、シェル端部から 50 mm、各点間 100 mm の間隔で、均等に配置しており、中央部分載荷の場合は、4 つの隅角部で各 3 点を非載荷とした。これは、勾配の急な隅角部で雪が滑落した状態を想定している。加力点位置は 3 タイプとも同様である。

変位及び歪の測定方法は、主要点の鉛直変位を変位計で、また、歪を試験体表裏に貼付した 3 方向ストレングージにより測定した。破壊とひび割れの状況は、実験終了後にこれらの変位計を取り除いた後、目視により観察、記録した。さらに、水平投影面において縦横 50 mm 間隔で引いたグリッドの交点でのシェル厚を、実験終了後に測定した。また、シェル形状については、全試験体同一の型枠を用いているので、試験体型枠の形状を、頂点を原点として、形状計測装置を用いて 1/100 mm の精度で測定した。

4. 解析方法

実験結果の検証を目的として、有限要素法による弾性解析を行った。Fig.7 に各タイプの要素分割を示す。対称条件を考慮して、稜線を対称軸とした 1/4 の部分について解析を行っており、開口については、Fig.7 に示すように円形を八角形で近似した。また、実験における試験体の支持状態より、支持部での境界条件は固定支持としている。要素としては、4 辺形のアイソパラメトリック退化シェル要素を用いており、形状関数については、9 節点 Heterosis 要素を採用した。シェル厚やシェル形状は、全モデル同一の設計値としており、材料定数についても、実験で得られた値の平均値を统一的に用いた。

Fig.7 Finite element mesh of the models

5. 実験結果及び考察

5.1 最大耐力

最大耐力一覧表を Table 3 に示す。最大耐力は、全体載荷では、無開口の CR16NW が最も高く、以下 CR16DW、CR16RW となった。しかし、中央部分載荷では、稜線部に開口を持つ CR16RC が最も耐力が高く、続いて CR16NC、CR16DC の順となった。CR16NC と CR16DC は、全体載荷と比べて耐力の低下が認められるが、CR16RC では全体載荷と比較すると耐力低下はみられず、逆に若干上昇する結果となった。

5.2 荷重－変位関係及び変形状

全体載荷での各試験体シェル頂部の荷重－変位曲線を Fig.8、変形モードの実験結果を Fig.9 に示す。Fig.9 は同一荷重時 (78.4 kN) における、対角線方向断面の変形モードを 3 タイプ重ねて示したものである。荷重－変位曲線 (Fig.8) において、CR16RW 以外は、各試験

Table 3 Ultimate of the Models

Model	Ultimate Loads [kN]
CR16NW	101.82
CR16DW	89.38
CR16RW	86.24
CR16NC	64.88
CR16DC	46.26
CR16RC	88.40

Fig.8 Load-Displacement Curves (whole loading ; Experiment)

Fig.9 Deflection Modes (whole loading ; Experiment)

Fig.10 Deflection Modes (whole loading ; Analysis)

体とも荷重が進むにつれ徐々に剛性が低下していることがわかる。しかし、CR16RW では、荷重に対して変位の増加が少ない。これは、稜線方向に開口を設けた試験体は、シェル頂部と支持部の中間部の断面が開口により小さくなっており、その部分の剛性が相対的に低下しているため、Fig.9 の変形モード図からもわかるように、この部分が大きく沈み込んで頂部を押し上げるような挙動を示し、その結果、頂部での変位が少なくなったものと考えられる。一方、対角線上に開口を有する CR16DW は、3 タイプの中で最も剛性が低い。これは、対角線方向に開口を設けたことによりアーチ効果が低

下したため、変形モード図(Fig.9)からもわかるように、開口の位置(±20cm 付近)から急激に沈み込んでいる様子が伺える。これに対して無開口の CR16NW は端部から頂部にかけて全体的に徐々にたわむ変形モード(Fig.9)を示しており、Fig.8 の荷重-変位曲線でも中間的な剛性を示している。Fig.10 は、Fig.9 に対応した変形モードの解析結果である。支持部付近で浮き上がりが見られる点が実験結果と異なっているが、稜線に開口を設けたモデルで、シェル頂部と支持部の中間部が頂部より大きく沈み込んでいる点や、対角線に開口を設けたモデルでは、開口部分から急激に沈み込んでいる様子など、実験結果と一致しており、これらの変形モードが開口の影響であることがわかる。

中央部分載荷での各試験体シェル頂部の荷重-変位曲線を Fig.11、変形モード図(39.2 kN 時)を Fig.12 に示す。荷重-変位曲線(Fig.11)において、Fig.8 に見られたような開口タイプによる曲線形状の違いは見られず、各試験体とも徐々に剛性が低下する同様の曲線形状を示している。ただし、前節の最大耐力でも述べたように、稜線部に開口を有する CR16RC の方が、無開口の CR16NC より高い剛性を示した。Table1 に示すように CR16RC は中央部分載荷の試験体の中では最もシェル厚が大きい、この剛性の高さはシェル厚のみでは説明できない。また、Fig.12 においても、Fig.9 に見られるようなモードの大きな違いは見られず、全試験体ともシェル頂部が沈み込むのに対して、支持部の近辺(非載荷部分)では、あまり変化しないか、または、浮き上がるような変形モードとなっている。全試験体が同様のモードを示したことから、この変形モードは荷重モードの影響によるものと考えられる。特に、対角線に開口を持つ CR16DC においては、このモードが極端に現れており、頂部が大きく沈み込み、逆に非載荷部分が大きく浮き上がるモードを示した。これは、前述の荷重モードの影響による変形モードと、Fig.9 に示した開口の影響による変形モードが以た形となったため、変形が増幅されたものと考えられ、これが、Fig.11 で CR16DC の剛性が低くなった原因である。一方、前述の CR16RC については、Fig.9 と Fig.12 の比較からわかるように、開口の影響(Fig.9)で最も大きく沈み込んだ部分が、荷重モードの影響(Fig.12)で変位が少なくなっている。即ち、Fig.9 と Fig.12 で逆の変形モードを示しており、お互いに変形をキャンセルしたため、全体に変形が少なくなり、その結果、Fig.11 で剛性が高くなったものと思われる。このように、開口の位置によって、変形モードや剛性に違いが現れること、及び、荷重モードによって、この変形がキャンセルされる場合と、逆に増幅される場合があることが明らかとなった。Fig.13 は、Fig.12 に対応した変形モードの解析結果である。ここでも、対角線に開口を持つモデルで、頂部が大

きく沈み込み、非載荷部分が大きく浮き上がる変形モードとなっていることや、稜線に開口を設けたモデルで、全体載荷時のシェル頂部と支持部の中間部が沈み込むモードが見られないことなど、Fig.12 の実験結果と一致しており、上述の現象が解析結果からも裏付けられている。

Fig.14 は、各タイプの荷重モードによる荷重-変位曲線の違いを比較したものである。無開口 (a) と対角線開口 (b) においては、全体載荷に対して中央部分載荷の場合は剛性、耐力が低下するが、曲線のモードの違いは見られない。一方、稜線開口のタイプ (c) においては、上述の変形モードの変化に対応して、荷重-変位曲線のモードも変化していることがわかる。

Fig.11 Load-Displacement Curves (center loading ; Experiment)

Fig.12 Deflection Modes (center loading ; Experiment)

Fig.13 Deflection Modes (center loading ; Analysis)

(a) No opening

(b) Openings on the Diagonal lines

(c) Openings on the Ridge lines

Fig.14 Load-Displacement Curves (Comparison of whole Loading and center Loading ; Experiment)

Fig.15 Principal Stresses(Experiment)

Fig.16 Principal Stresses(Analysis)

5.3 主応力分布

全試験体の主応力分布図を Fig.15 に示す。ここで、CR16DW のみシェル裏面の歪を測定することができなかったため、シェル表面での主応力を表している。各試験体ともシェル全面に圧縮力が働き、特に対角線方向に大きな圧縮力が働き、アーチ作用が効果的に働いていることがわかる。また対角線方向の応力は、支持部に進むにしたがって大きくなっている。開口を有する試験体では、開口を避ける形で応力が流れている。また、中央部分荷重では変形モード (Fig.12) で見られた非荷重部が押し出される動きに対応して、非荷重部分で対角線直交方向に比較的大きな引張力が生じている。

Fig.16 は、解析より得られた主応力分布である。実験では、測定誤差や試験体の不整による乱れなどもあるため、細かな点では解析結果との違いも見られるが、対角線方向の力の流れや、開口を避ける力の流れ、また、非荷重部分での対角線直交方向の引張力など、全体的な応力分布の状況は実験結果とほぼ一致している。

5.4 ひび割れと破壊の状況

全試験体のひび割れ図を Fig.17 に示す。全体荷重の試験体では、各試験体とも最も応力の働いた支持部付近が陥没した。また、この支持部の陥没に伴い、対角線方向に大きなひび割れが入り、折れ曲がるように破壊した。中央部分荷重では、各試験体とも、荷重と非荷重の境界部分で特に大きなひび割れが入っている。また、対角線上に開口をもつ試験体では、開口につながる大きなひび割れも認められ、開口に沿って折れ曲がる破壊挙動を示した。さらに中央部分荷重では、この開口部分が荷重と非荷重の境界に近いことが耐力の低下にも影響したと考えられる。

Fig.17 Crack Patterns [Upper Surface]

6. 結論

本論文では、3 タイプの試験体について、2 種類の荷重モードで実験を行った。全体載荷では耐力には大きな差が認められなかったが、変形モードには各タイプの特徴が表れ、それに伴って剛性にもかなり違いが見られた。それに対し、中央部分載荷では、各試験体とも載荷と非載荷の境界部分から大きく変形する性状となり、ここでは開口の影響より荷重モードによる影響が大きいことがわかった。しかし、開口を有する逆転懸垂型シェルでは、開口が対角線上にある場合、全体載荷での変形モードが、中央部分載荷での荷重モードにより決まる変形モードと一致し、変形がより増幅されて、剛性、耐力を大きく低下させるのに対して、開口が稜線上にある場合は、各載荷モードで逆の変形モードを示すことにより、変形がお互いにキャンセルし、あまり剛性、耐力が低下しないなど、開口の位置による影響と荷重モードによる影響が相互に関連して剛性、耐力にも大きく影響してくることがわかった。このことは、主応力分布（5.3 節）に見られるように、4 隅の支点を結ぶ対角線に沿った力の流れが支配的であることも関連しており、このタイプのシェルの設計においては、対角線上の開口設置は避けるべきであろう。

参考文献

- Ekkenhard Ram und Eberhard Schunck : Heinz Isler Schalen, Karl Kramer Verlag Stuttgart, 1986.
- 日本建築学会構造委員会 シェル・空間構造運営委員会：第 2 回 新「シェル・空間構造」セミナー ―連続体シェルの過去、現在、未来―、日本建築学会、2003 年 3 月
- 坪井 善勝、青木 繁：殻構造について（その 2）（円錐型シャーレンの模型実験）日本建築学会研究報告 22 号、pp. 101-102、昭和 28 年 5 月
- 坪井 善勝、青木 繁：実験による裁断球殻の特性の考察（その 1）、日本建築学会研究報告 31 号、pp. 211-212、昭和 30 年 5 月
- 加藤 渉、榎並 昭、西村 敏雄：シャーレン屋根の破壊機構に関する研究（その 4）、日本建築学会関東支部、昭和 31 年 2 月
- 皆川 洋一、足立 宏和、倉田 勝弘、土井 義則：甘木郵便局鉄筋コンクリート造円筒シェル屋根の載荷破壊実験、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp. 1263-1264、昭和 62 年 10 月
- 熊田 陽志、真下 和彦、境 晋太郎：開口部付き炭素短繊維補強コンクリート造半球殻の力学的性状、その 1. 終局耐力、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp. 727-728、2003 年 9 月
- 境 晋太郎、真下 和彦、熊田 陽志：開口部付き炭素短繊維補強コンクリート造半球殻の力学的性状、その 2. 破壊形態、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp. 729-730、2003 年 9 月
- 中川 智也、芦田 泰成、高山 誠、半谷 裕彦：鉄筋コンクリート任意形状シェルの弾塑性性状、日本建築学会構造系論文集、第 513 号、pp. 127-134、1998 年 11 月
- 高山 誠、芦田 泰成、林 信実：逆転懸垂曲面を有する鉄筋コンクリートシェルの力学挙動、平成 11 年度京都大学防災研究所共同研究会 シェル・空間構造の耐震、耐風、耐雪、耐火を考えた性能設計と解析（論文集）、1999 年 11 月
- 林 信実、高山 誠：形状の違いが鉄筋コンクリートシェルの力学的性状に及ぼす影響、日本建築学会北陸支部研究報告集 第 43 号、pp. 113-116、2000 年 7 月
- 芦田 泰成、林 信実、高山 誠：鉄筋コンクリート逆転懸垂型シェルの支持条件に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 544 号、pp. 85-91、2001 年 6 月
- 鈴木 直哉、高山 誠：逆転懸垂型シェルの力学的性状に及ぼす開口の影響、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 45 号、pp. 89-92、2002 年 6 月
- 鈴木 直哉、高山 誠：逆転懸垂型シェルの力学的性状に及ぼす開口の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp. 721-722、2002 年 8 月
- 鈴木 直哉、高山 誠：逆転懸垂型シェルの力学的性状に及ぼす開口の影響 その 2：開口の数と位置の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp. 733-734、2003 年 9 月
- 鈴木 直哉、高山 誠：逆転懸垂型シェルの力学的性状に及ぼす開口の影響 その 2：開口の数と位置の影響、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 46 号、pp. 29-32、2003 年 7 月
- ACI Committee 318 : Proposed Revisions to Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77) and Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77), Concrete International, Vol. 4, No. 12, Dec., pp. 38-127, 1982.

（2004 年 8 月 13 日原稿受理、2005 年 1 月 27 日採用決定）