長覚院本堂に関する構造工学的考察

―建築家中原暢子の研究　第２報―

金子　雄太郎[1]　深石　圭子[2]　金子　高裕[3]

標記の建物は、中原暢子（東京家政学院大学元教授）設計、温品鳳治（東京藝術大学元教授）構造設計によるものである。昭和37年建設の鉄筋コンクリート造HPシェル構造であり、曲線、曲面を表示する設計図書の製作には多大な労力を要し、また、強度計算、建設工事においては、限定された条件における計算を補い、かつ、その条件に適応するような構造を求めている。

本稿では、設計・構造デザインにおける工夫について推測するとともに、それらの特徴ある工夫を、有限要素法応力解析の手法を用いて検証した。結果として、薄膜理論に基づく設計計算を補う構造計画により、安全な構造体を求めていることが確認された。

キーワード：シェル構造　薄膜理論　有限要素法応力解析　構造デザイン

諸言

昭和37年に建設された鉄筋コンクリート造HPシェル構造について、設計図書、および工事記録が得られ、これに係わる構造設計、施工について検討する機会が得られたので、その概要を示すとともに、解析・設計計算に関連した応用技術の特徴について考察する。

対象とする建物は、設計・中原暢子（東京家政学院大学元教授）、構造設計・温品鳳治（東京藝術大学元教授）によるもので、当時は大型コンピュータが導入されつつあったものの、現在のように手短に利用することは出来ず、曲線、曲面を表示する設計図書の製作には多大な労力を要し、建設工事においては、限定された条件のもとでの強度計算、その条件に適応するような構造を求めることが必要とされたと思われる。

本研究においては、往時の、構造計画・構造デザインにおける工夫について推測するとともに、それらの特徴ある工夫を、現代における解析手法を用いて検証するものである。

１．シェル屋根、及び構造図の再現

１－１　HP曲面の再現

工事記録写真（Fig. 1a ～ c）に見られるように、直線材を交差させて曲面下地を形成しており、屋根面はHPシェルとして構成されていることが分かる。具体的な形状は設計図書にては明らかでなく、又、構造計算書に記載されている図形も、現存するものを正しく表していないので、計測値に従って形状を求めた。

HP曲面は、隅部の高さが異なる４辺形として定義される。Fig. 2a は、対向する２点を屋根頂点、他の２点を屋根脚部の高さとした形状を表す。この図において対角方向に現れる曲線が計測値と一致するよう、隅部の高さを調節することによって、HPシェル曲面が得られる。(Fig. 2a ～ c)HPシェル屋根面を有限要素法解析モデルに置き換え、構造設計に関する検討を進める。

Fig. 3a は単独のシェル面、Fig. 3b は４面組み合わせたシェル面を表わす。

1　東京家政学院大学名誉教授
2　東京家政学院大学現代生活学部生活デザイン学科
3　株式会社金子雄太郎構造事務所

Fig. 1a　直線材による曲面型枠

Fig. 1b　直線材による曲面型枠

Fig. 1c　コンクリート打設時

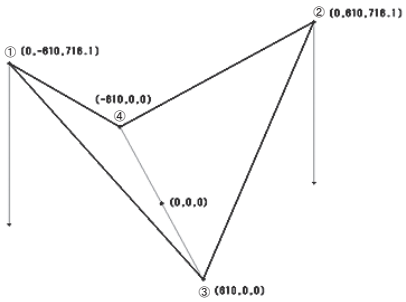

Fig. 2a　HP 曲面の定義と計測値

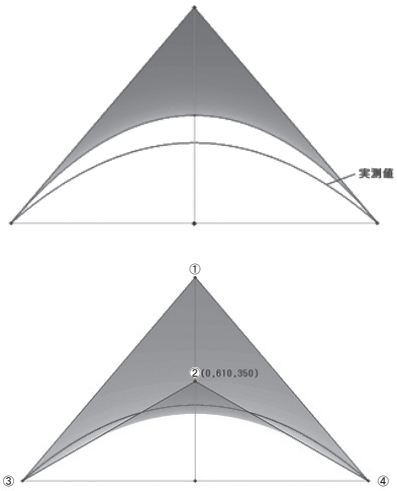

Fig. 2b　高さの調整

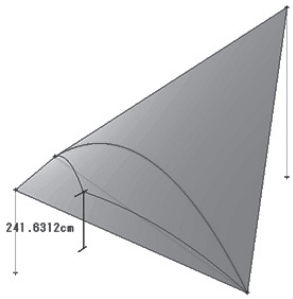

Fig. 2c　HP シェル屋根面

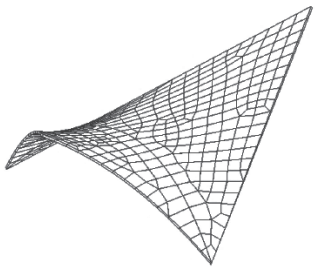

Fig. 3a　HP シェル解析モデル

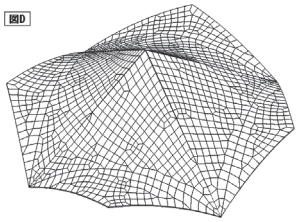

Fig. 3b　4 面組み合わせ HP シェル面

１－２．境界梁、柱、及び基礎構造

本建物を形成する構造躯体は、ＨＰシェル屋根、屋根面を支持する登り梁、梁を支える柱、柱を相互に緊結する鋼製横架材、および、回廊床である。回廊床は、基礎・腰壁とともに、柱脚部を補剛する。これらを３次元構造モデルとして再現したものを Fig. 4a ～ e に示す。

２．薄膜理論に基づく設計計算の検証

構造計算書にみられるシェル応力解析は、Nx、Ny、Nxy の面内応力のつり合い条件に従って、断面の強度設計を行なっているが、これは所謂、薄膜理論に従うもので、Fig. 3a においては、境界位置にてピン支持であることを条件にしている。

この理論をもとに構造設計を進めるため、Fig. 3b に表される組合せシェルにおいては、屋根部分に梁を設けることが必要となる。この方法は、当時のシェル構造の設計手法として、容易に想像できるものであるが、解析理論と設計条件を整合させることにより、曲面の強度を活用した構造物としていることが伺われる。

構造設計者が意図するもの（構造計画、あるいは構造デザイン）を更に推測すると、梁を柱にて支持し、ラーメン構造を形成すること、交差するラーメンの面外変形をおさえる為、横つなぎ材を用いること、柱脚の補剛の為、回廊部分を鉄筋コンクリートとする、等により、シェル理論を生かしつつ、躯体強度を確実なものとしている。
Fig. 4a~e は建物の現状を調査し、構造図を再現することによって得たものであるが、これらの意図が反映されていると言える。

通常の手法を用いて、この構造設計を行なう場合、現代においては、面内力ばかりでなく、面外曲げモーメントも考慮した応力解析を行なうことになり、その視点から判断すると、設計計算が不十分であり、信頼性が低いものとされることは否めないが、それを補う工夫が見られる点、この時代の技術の片鱗を見る思いである。

薄膜理論にては、面外曲げモーメントは無視されるが、シェル面の設計計算においては、それに対応する曲げ強度を必要とする。

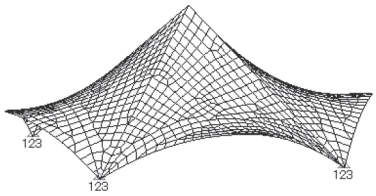

Fig. 4a　シェル屋根

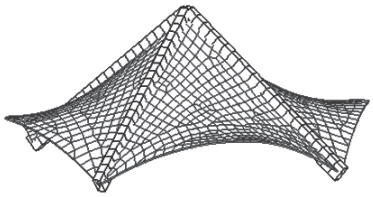

Fig. 4b　境界梁付きシェル屋根

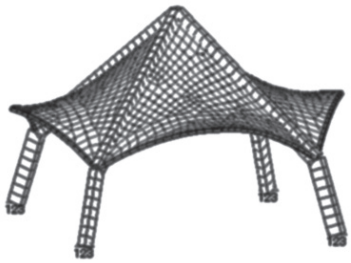

Fig. 4c　フレーム支持シェル屋根

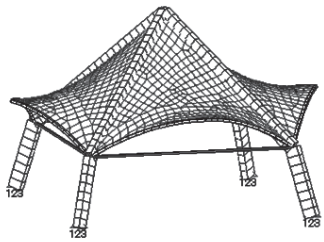

Fig. 4d　横繋ぎ材による補剛

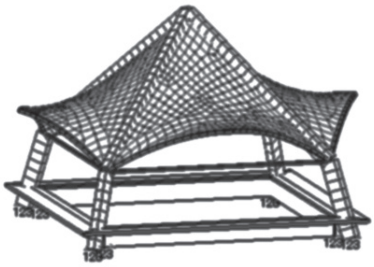

Fig. 4e　柱脚固定支持

有限要素法応力解析の手法を用い、シェルの必要厚さを求めることで、構造設計者が意図した条件の妥当性（シェル厚 7.0cm）を検証する。

２－１．シェル厚逆算プロセスについて

曲面に生ずる応力を求め、構造部材として形成される面材が、その応力に対して十分な強度を有することを検証することで構造設計がなされるわけであるが、面材の強度は材料強度と板の厚さによるため、応力解析の結果にしたがって必要板厚を導くことが可能である。

文献 1、2 にて、材料の許容応力に従って誘導される必要板厚の特徴と、その必要板厚が曲面形状に関与することを示したが、本報では、曲げ強度が微小である曲面の必要板厚を算定することにより、薄膜理論に基づいて設計された曲面、および薄膜理論を前提とした構造計画を検証する。

２－２．HP シェルの必要板厚

薄膜理論に基づいて設計される曲面は曲げ強度を有さない条件のもとで安定することが前提である。長覚院本堂の屋根に用いられている HP シェルについて、その 1/4 部分を取り出し、境界部位を支持とした場合の解析結果を Fig. 5a ～ d に示す。シングル配筋の鉄筋コンクリート板であることを考慮し、許容応力度は、面内圧縮 = 60 kgf/㎠、面内引張 = 30 kgf/㎠ 、面内せん断 = 30 kgf/㎠ と設定した。面内曲げ応力に対する許容値を 1 kgf/㎠ 、又は 4 kgf/㎠ とすることにより、曲げモーメントの影響を受ける部位が、板厚の変化によって視覚化される。

シェル屋根の 1/4 部分についての解析結果を示す。Fig. 5a は構造計算書と同様、支持条件をピン支持とした場合の必要厚、Fig. 5b は固定支持とした場合の必要厚である。

いずれの場合も、境界付近で曲げの影響が表れており、薄膜理論を適用することが必ずしも十分ではないことを示しているが、許容値 4 kgf/㎠ としたときの必要板厚は設計値 7cm を下回っている。

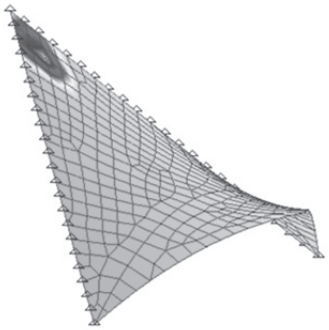

Fig. 5a　ピン支持 曲げ強度 1 kgf/㎠

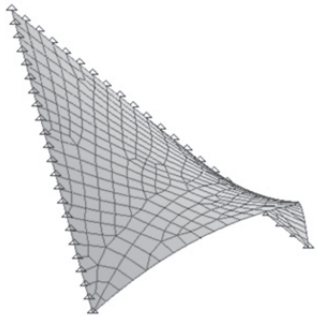

Fig. 5b　ピン支持 曲げ強度 4 kgf/㎠

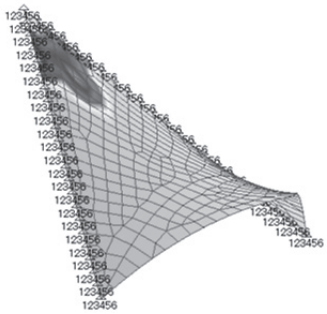

Fig. 5c　固定支持 曲げ強度 1 kgf/㎠

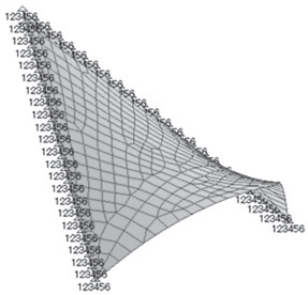

Fig. 5d　固定支持 曲げ強度 1 kgf/㎠

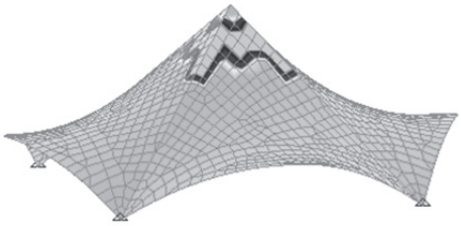

Fig. 6a　曲げ強度 1 kgf/㎠

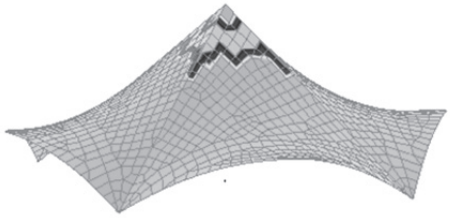

Fig. 6b　曲げ強度 4 kgf/㎠

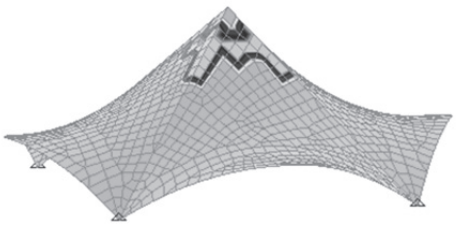

Fig. 6c　曲げ強度 7 kgf/㎠

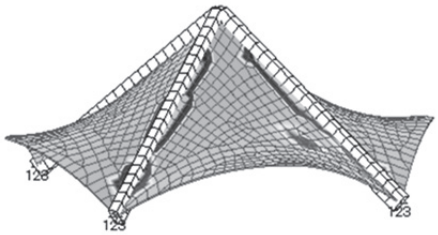

Fig. 7a　曲げ強度 1 kgf/㎠

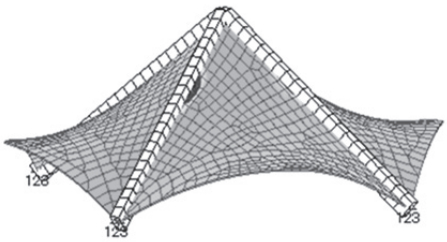

Fig. 7b　曲げ強度 4 kgf/㎠

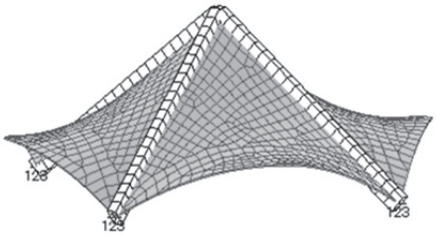

Fig. 7c　曲げ強度 7 kgf/㎠

２－３．組み合わせＨＰシェルの必要板厚

長覚院本堂の屋根は、ＨＰシェルを組み合わせることによって構築されている。Fig. 6a ～ c に、HP シェル単体と同様に必要壁厚を求めた結果を示す。

Fig. 6a ～ c は、いずれの場合も頂部付近で板厚が大きくなっており、この部分で曲げ強度を必要とすることが分かる。これは、組み合わせ HP シェルが、薄膜理論を逸脱する力学性状を有するためである。

２－４．長覚院本堂屋根の検証

２－４－１．境界梁の効果

長覚院本堂・屋根においては、境界梁を設けている。この条件のもとで解析した結果を、Fig. 7a ～ c に示す。

境界梁を有する場合においても曲げモーメントの影響が消滅するわけではないが、微小な曲げ強度（4kgf/㎠～ 7kgf/㎠：コンクリートの引張強度以下）を付与することにより、板厚 7cm にて安定している。

２－４－２．フレームの剛性維持

登り梁と斜め柱にて形成される支持フレームは、屋根重量の影響により、シェル脚部（境界梁・柱交差部）にて外周方向に向かう水平変位を生ずる。

Fig. 8a ～ c は、横架材を有さない場合について解析したものである。シェル脚部における水平移動の影響が大きく、Fig. 8a に示されるように、板厚が増大しており、薄膜理論が適用できない状況であることが言える。Fig. 8b も同様の結果である。

Fig. 8c では板厚 7cm にて安定している。

Fig. 9a ～ b は、鋼製横架材により水平変位が拘束される場合について解析したものである。

Fig. 9a にては、局所的に板厚が増大しているが、Fig. 9b では曲げ強度 4 kgf/㎠の条件のもと、板厚 7cm にて安定している。

3. シェル構造設計に関する工学的考察

本建築物は、薄膜理論に基づき、理論の前提となる諸条件に対応する解を求めて、構造計画を遂行しているものである。構造設計者が意図したことを推測するとともに、それを、現代における計算機能を活用して検証を行なった。

結果として、構造計画・設計は、薄膜理論の信頼性を高める上で、効果をもたらしている。

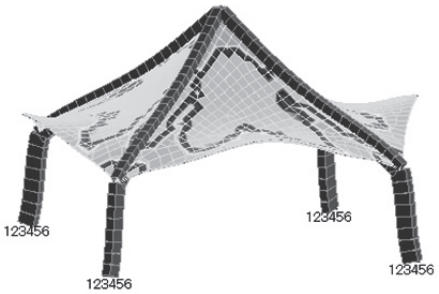

Fig. 8a　曲げ強度 1 kgf/㎠

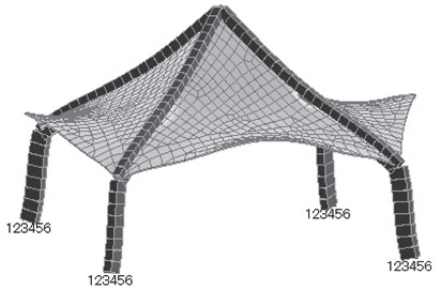

Fig. 8b　曲げ強度 4 kgf/㎠

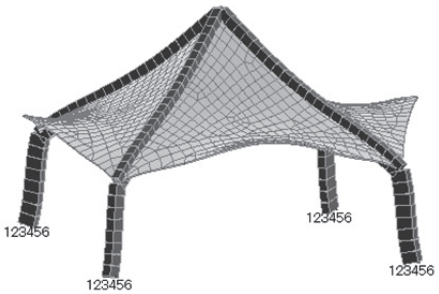

Fig. 8c　曲げ強度 7 kgf ㎠

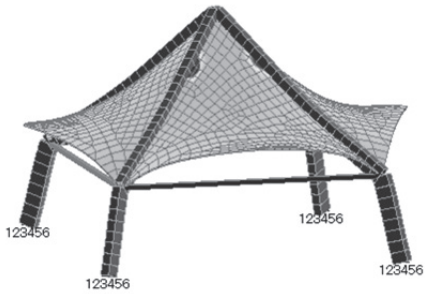

Fig. 9a　曲げ強度 1 kgf ㎠

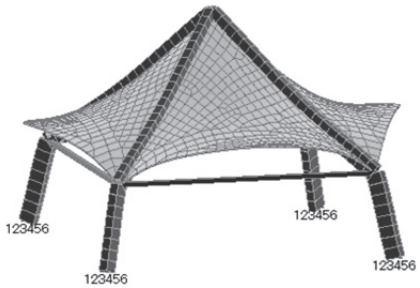

Fig. 9b　曲げ強度 4 kgf/㎠

謝辞

建築家・中原暢子研究をテーマとする一連の活動（本学・生活デザイン学科）の中で、昭和 37 年に実施された本建物の設計図書、および、建設記録に接することが出来、往時の構造設計・建設と強度計算との関連について考察する機会が得られた。杉本茂先生より、調査資料の提示、及び、多くのアドバイスを頂きましたことを記して、謝辞と致します。

参考文献

1）金子雄太郎 「幾何学非線形解析によるイスラー型シェル面の生成とその強度特性に関する研究」東京家政学院大学紀要第 52 号 2012

2）金子雄太郎、照沼捺季、成田秀美 「幾何学非線形解析によるイスラー型シェル面の生成とその強度特性に関する研究（第 2 報）―均等応力断面の生成プロセスによる複合曲面の強度特性検討―」 東京家政学院大学紀要第 53 号 2013

（受付　2016.3.23　受理　2016.7.11）