

H 形鋼部材で構成された 4 スパンドームの曲げ振り座屈解析

正会員	○SOR	SOMETA*
正会員	加藤	史郎**
正会員	中澤	祥二**

近似梁モデル	H 形鋼	曲げ振り座屈
球形ドーム	弾塑性座屈	反り変形

1. はじめに

構造物では、外荷重に対しては軸力、せん断力、曲げモーメントで抵抗する。H 形鋼断面を用いた場合の座屈解析では、文献 1, 2) が分析したように、従来の梁要素の方法と比べ、曲げ振じれ、曲げモーメントによるせん断力による幾何非線形性の影響も考慮すると、部材の座屈荷重が大きく低下して座屈モードも顕著に異なっていることを確認できた。文献 1) では、梁材の連続体理論の定式化を用いて有限要素（複合要素）を提案し、反りと振る変形を伴う座屈解析が可能であることを示した。また、文献 2) では、近似的方法であるが、H 形鋼断面を 3 部分に分解（近似梁モデル）して従来の梁要素用の汎用プログラムを使用すれば、曲げ振り座屈を検討できることを示した。

本稿では、i) 複合要素¹⁾、ii) 近似梁モデル²⁾、iii) 従来の梁要素（H 形鋼断面を分解せず、断面単体のまま）の 3 種類の要素モデルを使用して 4 スパンドームの曲げ振り座屈解析を実施し、それぞれの要素モデルによる結果の違いを検討する。

2. ドームの概要

ドーム形状：図 1(1)のように 4 スパンドームの形状を示す。放射線上では、頂点からそれぞれの方向に部材長さ 600cm の H-600x200x9x16（断面積 $A=115.1\text{cm}^2$ 、サンブナン振り定数 $J=68.8\text{cm}^4$ 、強弱軸の断面二次モーメント $I_y=68326.4\text{cm}^4$ と $I_z=2136.8\text{cm}^4$ ）を 2 本用い、部材半開角 θ_0 を 3° 、 4° とする。外周のテンションリングは早期に降伏や座屈を避けるため、H-798.4x200x27x48 を用いるとする。ただし、計算の容易のため、すべての外周のテンションリング H 形鋼部材における上下フランジ間の距離を圧縮材 H-600x200x9x16 のものと同じとする。

要素モデル：以降の解析では、すべての H 形鋼部材を 6 等分割（従来の梁要素）あるいは 6 個の単位要素（近似梁モデルと複合要素）でモデル化する。従来の梁要素は建築の構造分野で一般に使用されているので、ここではこの要素についての詳細を省略する。複合要素では、文献 1) に示したように、初期変位をゼロとして定式化し、線形座屈解析に限定されるが、本稿では、この方法を延長し

て初期変位も考慮した増分ひずみエネルギーを誘導し、非線形増分解析も可能な計算方法を展開し活用する。以降の解析では、本要素モデルでは上フランジ、ウェブ、下フランジの断面をそれぞれ 10 等分割とする。また、近似梁モデルの分解方法や要素特性の算定等の詳細は文献 2) に参照されたい。なお、ヤング係数 $E=20500\text{kN/cm}^2$ 、降伏応力度 $\sigma_y=23.5\text{kN/cm}^2$ とする。

接合部と支持端：すべての接合部については、図 1(2)に示すように、隣接する部材の位置では、下フランジは同一節点、ウェブと上フランジはそれぞれ相互に十分剛な梁要素（以降、接合部材）で接続する。支持端では、外周のテンションリングにおけるすべての接合部位置で下フランジ節点の上下移動を拘束し、かつ、ドームの平面上をローラー支持とする。

荷重条件：6 本の H 形鋼部材からできた 7 箇所の接合部位置ですべてのウェブ位置の鉛直下方向に 1.0kN の節点荷重を作用する。

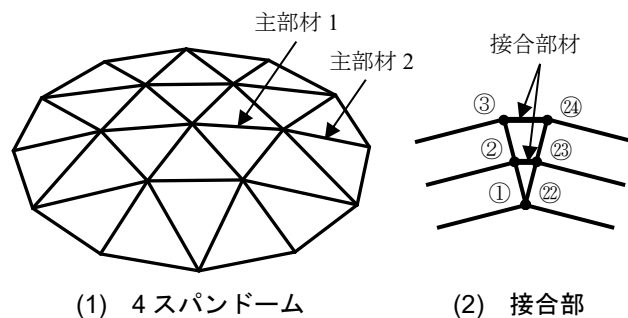


図 1 解析モデルの概要

3. ドームの線形座屈解析

3 種類の要素モデルを用いて線形座屈解析を実施し、1 次モードの節点当たりの線形座屈荷重 P_{cr}^{lin} と線形座屈モードをそれぞれ、表 1 と図 2 に示す。

表 1 より、複合要素による P_{cr}^{lin} を精解とすると、近似梁モデルは概ね誤差なく高い精度を確保できる。一方、従来の梁要素では、i) $\theta_0=3^\circ$ の場合で 11%、ii) $\theta_0=4^\circ$ の場合で 6% 程度過大評価となる。 θ_0 が大きいほど、3 つとも要素モデルによる結果の差は小さくなる傾向が見られる。それは、ドームのライズが高くなると、曲げモーメント

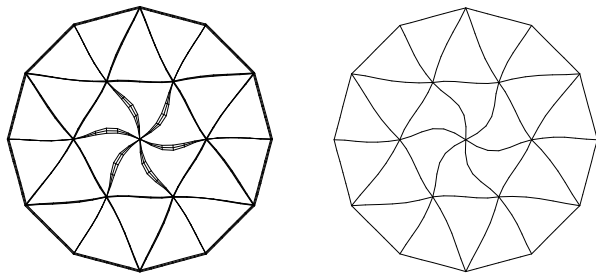
が小さくなるため、それによる幾何非線形性を無視できるほど小さくなるためである。

座屈モードに関しては、近似梁モデルと複合要素は θ_0 と関わらず同様なモードが得られる。図 2(1)に示すように、頂点の 6 本の部材（主部材 1）は曲げ振り座屈が起きている。従来の梁要素はオイラー的な（曲げ）座屈モードが得られるが、振り変形は発生しない。ただし、主部材 2 が座屈しないのは、i) 主部材 2 の曲げモーメントの勾配が複曲率となる、ii) 外周のテンションリングの弱軸の曲げ拘束（剛性）が大きいからである。

表 1 ドームの座屈荷重 [kN] (θ_0 : 部材半開角)

P_{cr}^{lin} : 線形座屈荷重, P_{cr}^{el-pl} : 弾塑性座屈荷重

θ_0	複合要素		近似梁モデル		従来の梁要素	
	P_{cr}^{lin}	P_{cr}^{el-pl}	P_{cr}^{lin}	P_{cr}^{el-pl}	P_{cr}^{lin}	P_{cr}^{el-pl}
3°	658	391	666	430	731	550
4°	819	524	815	580	872	696



(1) 近似梁と複合要素 (2) 従来梁要素
図 2 線形座屈モード（平面上）

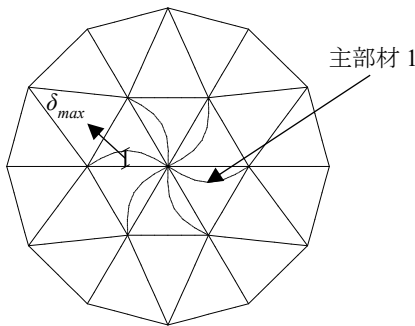


図 3 形状初期不整 ($\delta_{max}=0.6\text{cm}$)

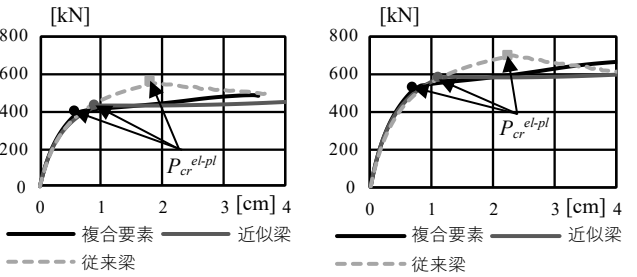
4. ドームの弾塑性座屈解析

次に、4 スパンドームの弾塑性座屈解析を実施する。形状初期不整としては、図 3 に示すように、6 本の主部材 1 はそれぞれの部材座標系で弱軸（横）方向に 1 波のサイン曲線に比例し、最大振幅 δ_{max} を 0.6cm ($l_0/1000$) と仮定する。結果より、3 種類の要素モデルによる弾塑性座屈荷重 P_{cr}^{el-pl} を表 1、荷重-変位関係を図 4 にまとめる。ただし、

図 4 では、縦軸はドームの頂点に作用する荷重、横軸は主部材 1 の中央ウェブ節点の弱軸（横）方向の変位である。

表 1 より、近似梁モデルによる P_{cr}^{el-pl} は複合要素より約 10%だけ高くなり、概ね妥当な結果が得られる。一方、従来の梁要素では、複合要素と比べ、i) $\theta_0=3^\circ$ の場合で 41%、ii) $\theta_0=4^\circ$ の場合で 33%過大評価となる。

図 4 では、 P_{cr}^{el-pl} に至るまでの剛性は、3 種類の要素モデルとも同程度となるが、それぞれの座屈後の挙動は若干に異なっている。近似梁モデルは複合要素と概ね同様な荷重-変位曲線が形成されている。また、 P_{cr}^{el-pl} に達したときの変位は複合要素と概ね同じであり、塑性化以降の耐力は殆ど低下しない。一方、従来の梁要素では、 P_{cr}^{el-pl} に対応する変位は、他の要素モデルと比べ 2 倍程度大きくなり、塑性化以降の耐力は徐々に低下していく。



(1) $\theta_0=3^\circ$ (2) $\theta_0=4^\circ$
図 4 荷重-変位関係図（弾塑性座屈解析の結果）

5. まとめ

本稿で取り上げた 4 スパンドームでは、軸力及び曲げモーメントが比較的に大きく発生する構造物であるため、曲げ振り座屈の影響が無視できないほど大きいことを示した。そのため、曲げ振じれによる幾何非線形性を考慮しない従来の梁要素だけを用いると、構造物の座屈モードは適切に定められず、座屈耐力も危険側に評価されることとなる。一方、近似梁モデルは、複合要素による座屈解析の結果との比較により、多少の誤差を許容すれば、十分な精度を確保できて便利に曲げ振り座屈を検討できる。H 形鋼部材でできた中大規模の球形ドームの曲げ振り座屈解析の詳細分析を今後の課題としたい。

参考文献

1) 加藤史郎, 中澤祥二, Sor Someta, 瀧内雄二: T 形等の開断面部材の複合座屈要素の提案および空間構造における座屈解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.812, pp.1441-1452, 2023 年 10 月
2) SOR SOMETA, 加藤史郎, 中澤祥二: 曲げ振りを考慮した H 形鋼の近似梁モデルの提案及び座屈解析への応用, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.70B (2024 年 4 月発表)

* 中日本建設コンサルタント (株)
** 豊橋技術科学大学

* Nakanihon Engineering Consultants Co., Ltd.
** Toyohashi University of Technology