

円弧トラス屋根を有する体育館の設計

その2 円弧トラスの幾何学的非線形性を考慮した構造安定性検討

正会員
同○鈴木光雄*
小俣慶太*

円弧トラス

座屈

幾何学的非線形

1. はじめに

その1で報告した体育館屋根の円弧トラスは、軽快な表現を目指し比較的にスレンダーな部材で構成されている。このため、円弧トラスの安定性や個材の座屈に対する余裕度の確認のため、不安定化に至る過程の追跡検討を行った。以下に検討概要を報告する。

2. 解析の概要

(1) 解析方法

解析には、各節点の変位を未知数として、有限変位を考慮した全ポテンシャルエネルギーの最小値を探索するエネルギー法を採用した。最小値探索には Davidson-Fletcher-Powell (DFP) 法を用いた。DFP 法は極小値探索法であり、本検討では荷重増分解析を行い各荷重状態近傍の極小値を最小値とみなし、逐次適用するものとしている。

(2) 解析モデル

ロッドは線材にモデル化し、下弦材とポストは、線材で構成された直方体トラス構造を連続させたモデルに置換し、部材の軸剛性と曲げ剛性を適合させるよう、断面寸法と構成要素の断面積を決定した。また、構成要素は軸力のみを負担するものとした (図1)。

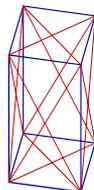


図1 直方体トラス構造(ユニット)

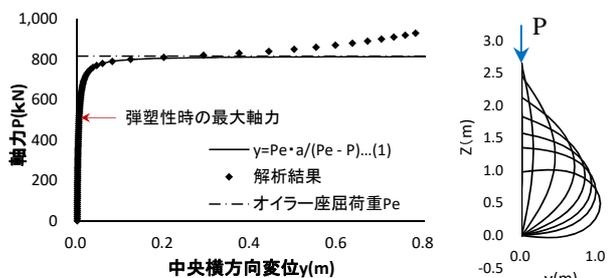
直方体トラス構造によるモデル化の妥当性確認のため、ポストの弾性座屈解析を行った。部材長 2650mm (20 分割)、両端を回転自由とし、部材中央で 1/1000 の正弦半波形の初期不整 (中央変位 $a=2.65\text{mm}$) を与えたときの、荷重 P と部材中央の横方向変位 y の関係および、変形状態を図2に示す。P-y 関係のオイラー座屈荷重 P_e に至るまでの結果は、有限変位を考慮した線形化式 (図中 (1) 式) とよく一致している。また、図中には弾塑性解析とした場合の最大軸力も示している。

トラスの解析モデルを図3に示す。ポストには、部材中央で 1/1000 の正弦半波形の初期不整 (中央変位を X 軸正側に設定) を与えた。直方体トラス構造のモデル化については、ポストを 10 分割、下弦材はポスト間を 5 分割とした。なお、本モデルでは、上弦材の曲げ変形の寄与が少なくポスト上部をピン接合の線材とし、軸力のみを考

慮した。境界条件は、アンボンドブレースで支持される○部分を XYZ 拘束とし、□部分は屋根面が剛性の大きい水平ブレースで配置されていることから、XY 拘束とした。直交梁と交差するポストの上部は、直交梁の曲げ剛性を評価した鉛直ばねを設置した。

各部材は、降伏耐力後の剛性を初期剛性の 1/100 とし、ロッド材は圧縮剛性を 0 としている。

なお、本解析では、各部材の軸ひずみは 5% 以下であり、部材の破断については考慮していない。



(a) 軸力—変位関係

(b) 変形図

図2 ポストの座屈解析結果

(3) 荷重条件

増分解析では長期荷重が作用した状態を初期条件として、長期荷重に比例した下向き荷重を載荷した (Case1)。下弦材は T 形鋼で比較的重量が大きく、水平地震動で面外の変形が比較的大きくなる。このため、鉛直 (Z) 方向、水平 (X) 方向同時に同じ震度の水平力を作用させた解析も行った (Case2)。荷重増分は、長期荷重の 0.165 倍とした。

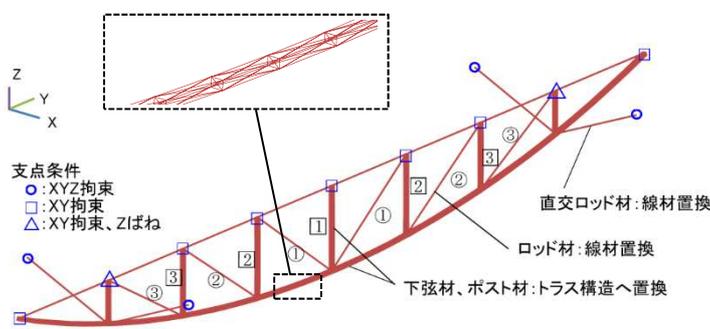


図3 トラス解析モデル

3. 解析結果

増分解析による中央ポスト頂部の鉛直変位および、中央ポストと下弦材の交点の X 方向変位を図 4、5 に示す。また、Case1 の斜材とポストの軸力を図 6、7 に示す。変位、軸力は長期荷重状態からの値である。

Case1、2 ともに震度 2 付近で斜材③、震度 5~6 付近で斜材②が降伏した。Case1 では、震度 15 付近でポスト③、②、斜材②とほぼ同時に座屈が生じ、震度 30 付近でポスト①が座屈し鉛直変位が大きく増加した。Case2 も同様な過程をたどり、ポストの座屈は Case1 にくらべ早期に生じる (図 4)。Case2 では水平変位がかなり大きい (図 5) にもかかわらず、鉛直変位は Case1 とほぼ同じ結果となっている。これは、ポスト上部が XY 変位を拘束された状態で、水平力に抵抗する上下弦材の反力に上方成分が生じるためと考えられる。また、Case1 では、ポストの座屈に伴い震度 15 付近で下弦材の面外変形が生じている (図 5)。

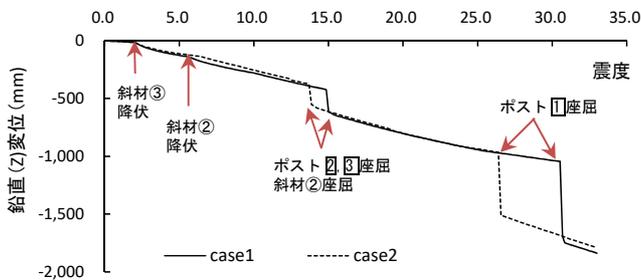


図 4 鉛直(Z)変位-震度関係

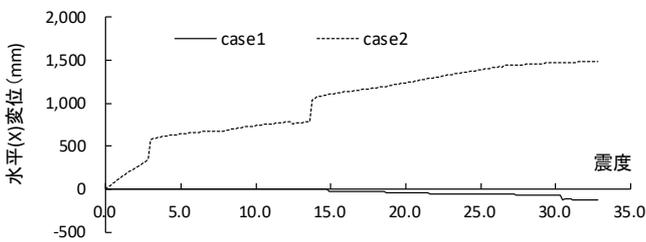


図 5 水平(X)変位-震度関係

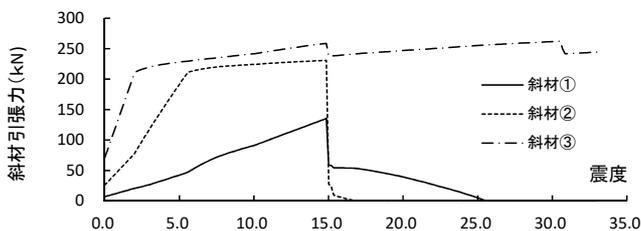


図 6 斜材軸力-震度関係 Case1 (正: 引張、負: 圧縮)

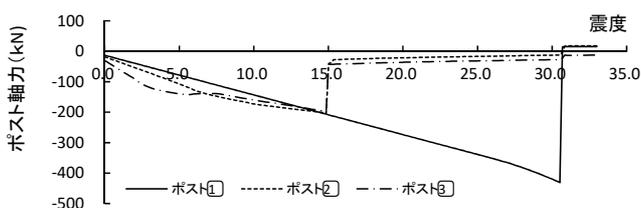


図 7 ポスト軸力-震度関係 Case1 (正: 引張、負: 圧縮)

ポスト①は部材長が長いので、先行して座屈するものと想定されていたが、部材長が短いポスト③、②の座屈が先行した。これは、図 8 に示すように、斜材が降伏後、下弦材が荷重伝達のために直線状に変形したため、剛接合されたポストの端部が強制変形を受け、面内に曲げ変形が生じ、座屈が誘因されたためと考えられる。

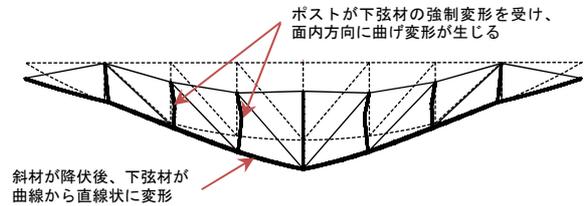


図 8 Case1 変形図

ポスト①~③が座屈した後の Case1、2 の変形状態を図 9、10 に示す。

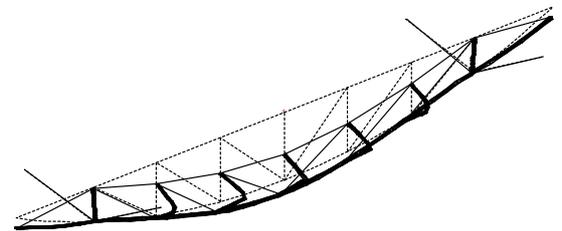


図 9 Case1 変形図 (ポスト①~③座屈後)

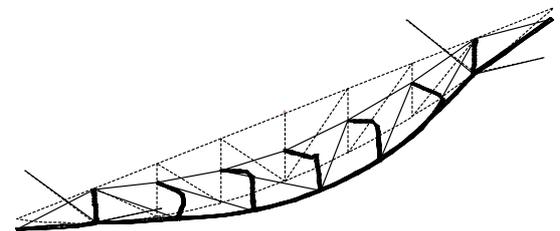


図 10 Case2 変形図 (ポスト①~③座屈後)

4. まとめ

円弧トラスの幾何学的非線形を考慮した荷重増分解析を行い、斜材の降伏およびポストの座屈が進行する過程を確認した。

本設計では斜材の降伏後、上下弦材が鉛直荷重を支持する機構へと変化し、その後ポストが座屈し急激な鉛直変位のギャップが生じる。最初のポストが座屈するときの震度は水平荷重を考慮しても 13 程度であり、安定性に対し十分な余裕度を有していることを確認した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針 1996
- 2) H. A. Buchholt, "An introduction to cable roof structures", Cambridge University Press, 1985
- 3) 渡辺力、名取亮、小国力：Fortran77 による数値計算ソフトウェア, 丸善, 1989