

## 平行弦ラチスアーチの耐荷特性に及ぼすウェブ材の節点偏心の効果

### EFFECT OF JOINT ECCENTRICITY OF WEB MEMBERS ON LOAD BEARING CAPACITY FOR PARALLEL CHORD LATTICE ARCH

建築構造学分野 高岡良輔  
Structural Engineering Ryosuke TAKAOKA

ラチス構造の生産性向上のため、節点構成の簡易化方法の一つとして偏心節点がある。ラチス構造に偏心節点を用いると耐力および剛性が大きく低下するため、本研究では、架構方法による偏心節点の影響について検討した。上弦材および下弦材の軸力が直接境界へ伝える支持方法をもつ平行弦ラチスアーチとすることで、節点偏心による耐力および剛性の低下を抑えることができた。中規模体育館の屋根を想定した設計では、部材断面を変更せず偏心節点を用いることができると確認した。Eccentric joint is one of the simple joint to improve productivity of latticed structure. Lattice beam with eccentric joints is smaller strength and rigidity than one with non-eccentric joints, so we studied effect of joint eccentricity by framing system. The parallel chord lattice arch with supporting method that upper chord member and lower chord member transmit axial force to boundary suppress the loss of strength and rigidity by joint eccentric. In design assumed for a latticed roof of moderate-scale sports arena, we confirmed the latticed roof with eccentric joints has enough load bearing capacity using the same member section as the latticed roof with non-eccentric joints.

#### 1. 序論

ラチス構造の節点は生産性を考慮すると、節点構成が簡単なものが望ましく、簡単な節点構成として偏心節点が挙げられる。既論<sup>1)</sup>では平行弦ラチス梁に偏心節点を取り入れた研究で、偏心節点をもつラチス梁は偏心節点をもたないラチス梁よりも耐力および剛性が大幅に下回ると述べられている。その要因としては偏心節点に曲げモーメントが発生し、平行弦ラチス梁が偏心節点にてせん断破壊が生じたためである。これにより、偏心節点をもつラチス構造は偏心節点でのせん断力に対する補強、もしくは偏心節点にせん断力が生じない架構方法をとることが必要とされる。

一方で、既論<sup>2)</sup>では個材の耐力によってトラス構造全体の耐力が決定する脆性破壊の改善という点から、偏心接合を提案している。立体トラス平板を偏心接合することで、支持条件によっては脆性的破壊が改善され、かつ最大耐力が偏心のないモデルを上回ることが述べられている。しかし、耐力が増加したモデルの節点構成は、かえって複雑になり施工性が低下することとなるため、生産性の向上と耐力および靱性の確保が両立できていないのが現状である。

本論では、節点偏心の大きさを示す偏心率  $e$  を図1のアーチの成  $h$  とウェブ材同士の軸交点と弦材との距

離  $h_e$  を用いて  $e=h_e/h$  と定義する。そして平行弦ラチスアーチを対象として、節点偏心による耐力および剛性の低下を抑えることができるか検証した。

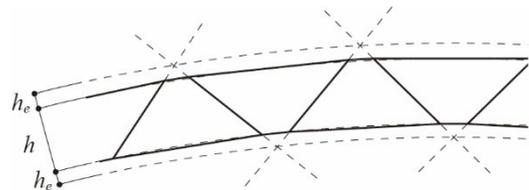


図1 節点偏心

#### 2. 平面ラチスアーチ

##### 2.1 解析モデル概要

平面ラチスアーチにおけるアーチ開角および境界条件による節点偏心の効果を考察する。図2のようにスパン  $L$  を 30m, 下弦材とウェブ材の角度  $\theta$  を  $45^\circ$ , アーチ開角  $\Phi$  を  $60^\circ, 90^\circ$ , 偏心率  $e$  を  $0\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%$  とする。境界条件は下弦材の両端をピン・ローラー支持とした PR モデル, 下弦材の両端をピン支持した 2P モデル, 下弦材と上弦材の両端を支持した 4P モデル, アーチ先端を剛棒で構成する三角フレームに置き換えて支持した TF モデルとする。モデル名は境界条件とアーチ開角で示す。接合部の強度および剛性は十分であり、節点は剛節とする。解析は SPACE を用いた幾

何学的非線形性を考慮した静的弾塑性解析を行い、上弦材節点に鉛直下向きに载荷させる。部材は一部材四要素とし、円形鋼管を用いる。部材諸元は表 1 に示す。

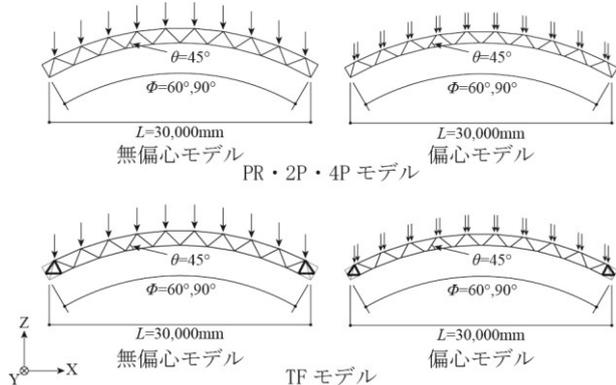


図 2 平面ラチスアーチ

表 1 部材諸元

部材	断面寸法 $\phi \times t$ (mm)	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	断面二次モーメント $I$ (mm <sup>4</sup> )
弦材	96.1×1.68	500	55.8×10 <sup>4</sup>
ウェブ材	69.1×2.38	500	27.9×10 <sup>4</sup>
ヤング係数	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )		205,000
せん断弾性係数	$G$ (N/mm <sup>2</sup> )		79,000
降伏応力度	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )		235
ポアソン比	$\nu$		0.3
単位体積重量	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		7,850

## 2.2 解析結果

解析結果から下弦材中央の荷重変位関係図を図 3 に、境界条件による比較として、代表となる応力図および変形図を図 4～図 7 に示す。PR モデルおよび 2P モデルでは、節点偏心が生じると偏心節点に大きな曲げモーメントが発生するため、耐力および剛性が大きく低下し、最大耐力後の急激な耐力劣化を防ぐことができないことがわかった。4P モデルと TF60 では、節点偏心が生じて偏心節点に生じる曲げモーメントが小さく、初期降伏荷重の低下を抑えることができる。また、偏心節点の曲げ変形によって軸力が分散されるため、最大荷重においては無偏心モデルを上回り、最大耐力後においても、複数の偏心節点が塑性化することで急激な耐力劣化のない安定した弾塑性挙動を示した。しかし、TF90 では、耐力および剛性は低下し、耐力劣化についても若干改善されているほどである。これはアーチの形状によりアーチの端部からスパンの 1/4 の付近で大きなせん断力が生じるため、TF60 に比べて耐力および耐力劣化の改善がみられない結果となった。

各支持モデルの節点偏心による荷重の増減率を図 8 に示す。PR モデルおよび 2P モデルのような下弦材両端のみの支持方法では、ウェブ材を介して、上弦材に作用する荷重を下弦材へ伝達させる必要があるため、偏心節点に大きなせん断力がはたらき、節点偏心による影響が大きくなる。一方で、4P モデルおよび TF モデルのように、上弦材および下弦材の軸力がウェブ材に介すことなく境界へ伝えることのできる支持方法で

は、節点偏心の影響が小さくなることがわかった。

どの偏心モデルにおいても節点偏心が小さいほど耐力および剛性の低下は小さいが、アーチ中央の変位は偏心節点の曲げ変形によるものであるため、偏心節点の部材歪が大きくなることに注意しなければならない。

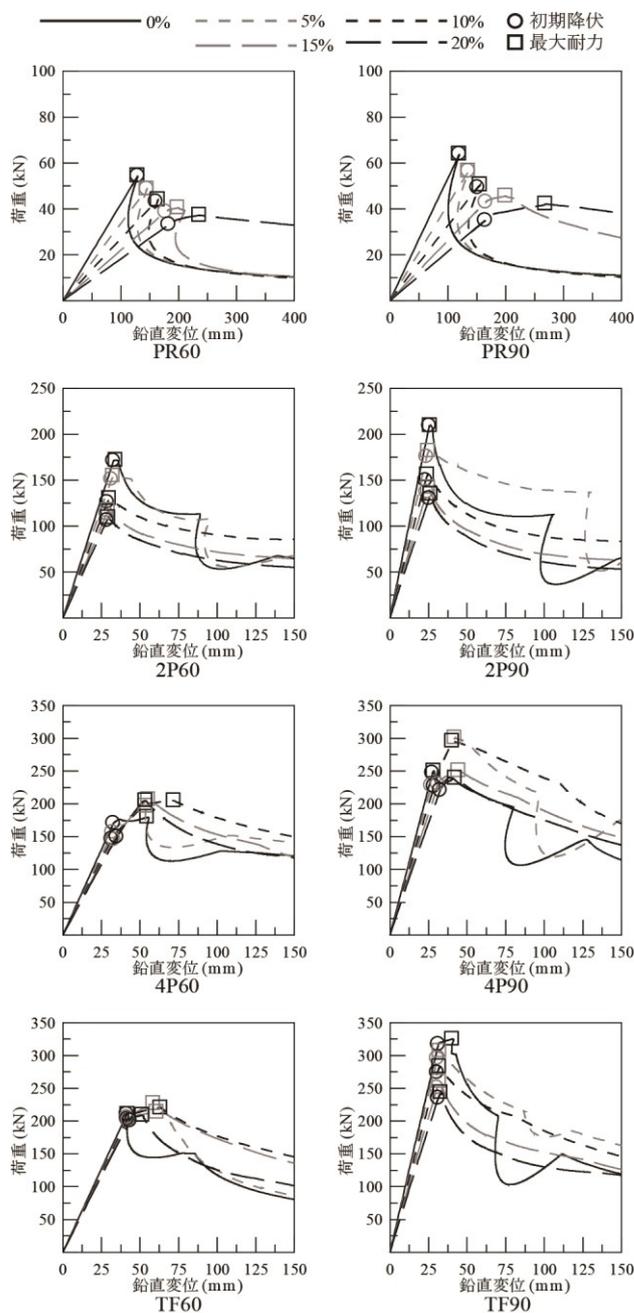


図 3 平面ラチスアーチの荷重変位関係図

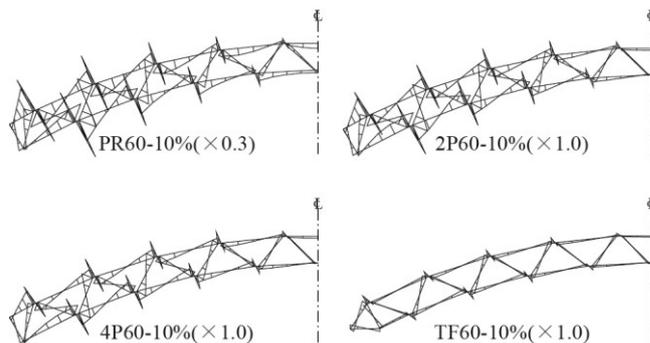


図 4 各偏心モデルの曲げモーメント図

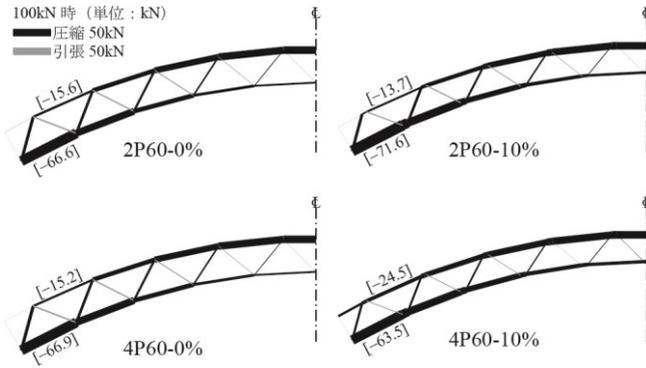


図5 2Pモデルと4Pモデルの軸力図

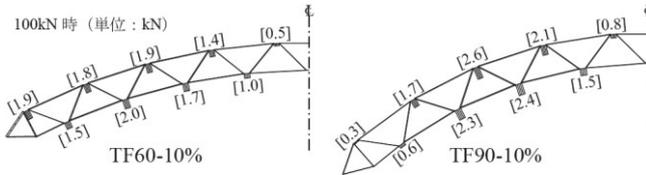


図6 TF60モデルとTF90モデルのせん断力

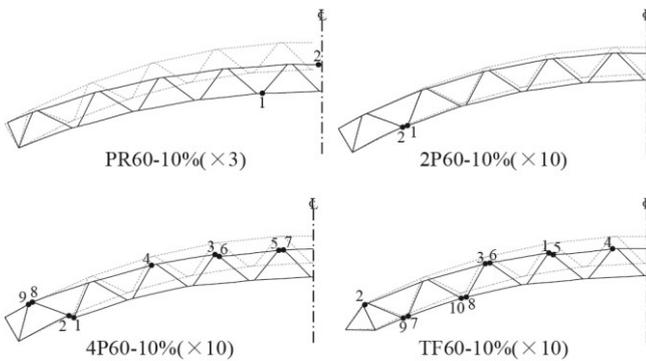


図7 各偏心モデルの変形図と塑性ヒンジ位置

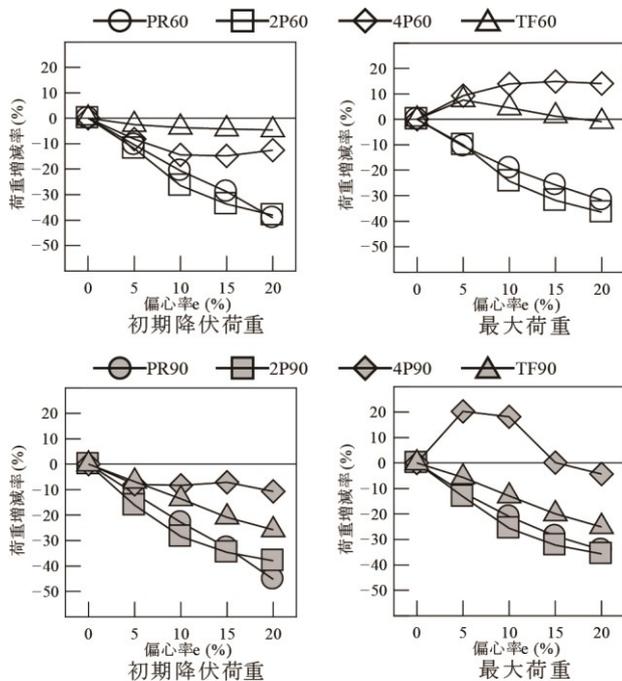


図8 荷重増減率

### 3. 二方向ラチスの偏心節点交差部

#### 3.1 解析モデル概要

二方向ラチスにおける、偏心節点の交差位置による耐力への影響を考察する。偏心節点の交差部は図9のように偏心節点同士が下面で交差するLモデル、上面で交差するUモデル、偏心節点同士が交差しないNモデルがある。対象とするのは、ラチス梁を直交交差させたラチス平板とし、図10のようにスパン $L$ を12m、下弦材とウェブ材の角度 $\theta$ を $45^\circ$ 、偏心率 $e$ を0%,5%,10%とする。境界条件は下弦材の周辺ローラー支持とする。接合部の強度および剛性は十分であり、節点は剛節とする。解析はSPACEを用いた幾何学的非線形性を考慮した静的弾塑性解析を行い、上弦材節点に鉛直下向きに荷重させる。部材は一部材二要素とし、部材諸元は表1のものとする。また一部では、耐力下がらないモデルがあったため、初期降伏時の変位から3倍となる状態を最大耐力と定義する。

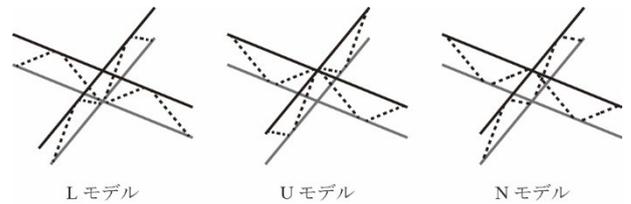


図9 二方向ラチスにおける節点交差部

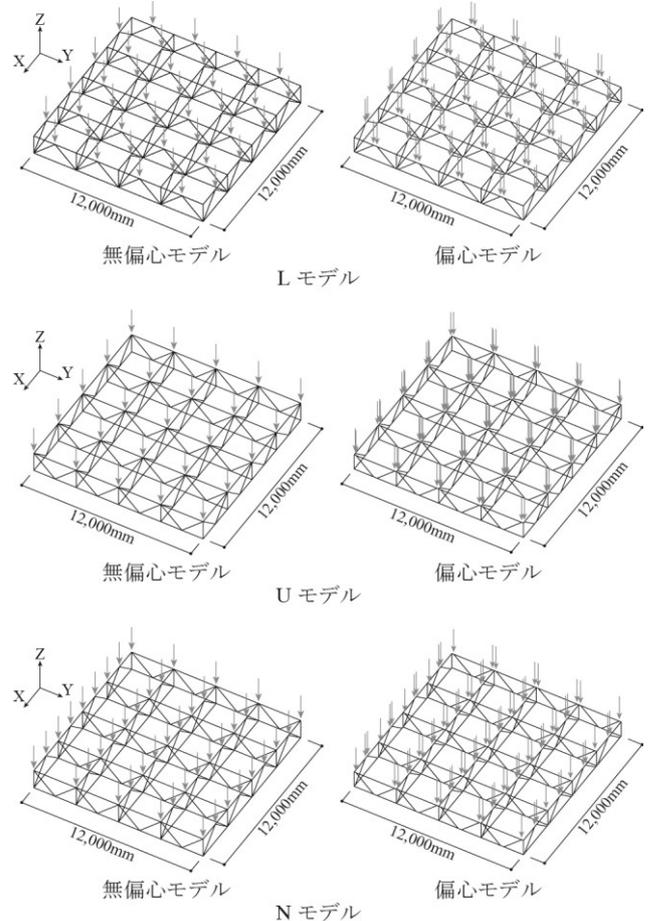


図10 ラチス平板

### 3.2 解析結果

解析結果から、下弦材中央の荷重変位関係図を図 11 に、変形図を図 12 に示す。本解析モデルの中央の部材配置として、Lモデルは曲げ座屈が起こり得る圧縮材、Uモデルは引張材、Nモデルは圧縮材と引張材となった。これにより無偏心節点モデルでは、個材の曲げ座屈破壊が生じたLモデルの初期降伏荷重が最も小さくなった。Nモデルは圧縮材が直交方向のウェブ材の拘束によって曲げ座屈を拘束できるため、急激な耐力劣化を防ぐことができる。ただし、曲げ座屈破壊が生じなかった交差モデルにおいても、Lモデルと同等の大きな軸力が生じるため、グリッドの分割方法などの条件によっては個材の曲げ座屈が起こり得るため注意しなければならない。

偏心モデルでは、すべての交差モデルにおいて偏心節点の大きな曲げモーメントによるせん断ずれ型の破壊が生じるため、耐力および剛性が大きく低下した。最大耐力後を見ると耐力劣化は緩やかとなっているが、無偏心モデルにおいても急激な耐力劣化が生じない、またはすぐに劣化勾配が緩やかとなるため、靱性の確保という点においても有効性は得られない。

図 13 に初期降伏荷重と節点偏心による荷重の減少率を示す。初期降伏荷重の値を比較すると、無偏心モデルでは大きい値からUモデル・Nモデル・Lモデルとなった。一方で、偏心モデルでは大きい値からNモデル・Uモデル・Lモデルとなり、UモデルとNモデルが入れ替わることとなった。一方で、各交差モデルの節点偏心による初期降伏荷重の減少率では、Uモデル・Nモデル・Lモデルの順に偏心節点の影響による荷重の低下が大きいことがわかった。節点偏心が大きくなるほど、同じ偏心率モデルの荷重の差が小さくなっていく。これは、節点偏心が大きくなると、境界付近の偏心節点でせん断破壊が生じ、平板ラチスの耐力が偏心節点のせん断力によって決定されるためである。本解析では、発生するせん断力は許容せん断応力度を超えず、せん断降伏は生じない。

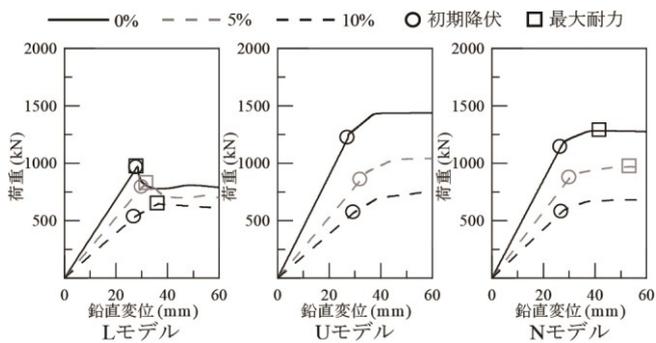


図 11 ラチス平板の荷重変位関係図

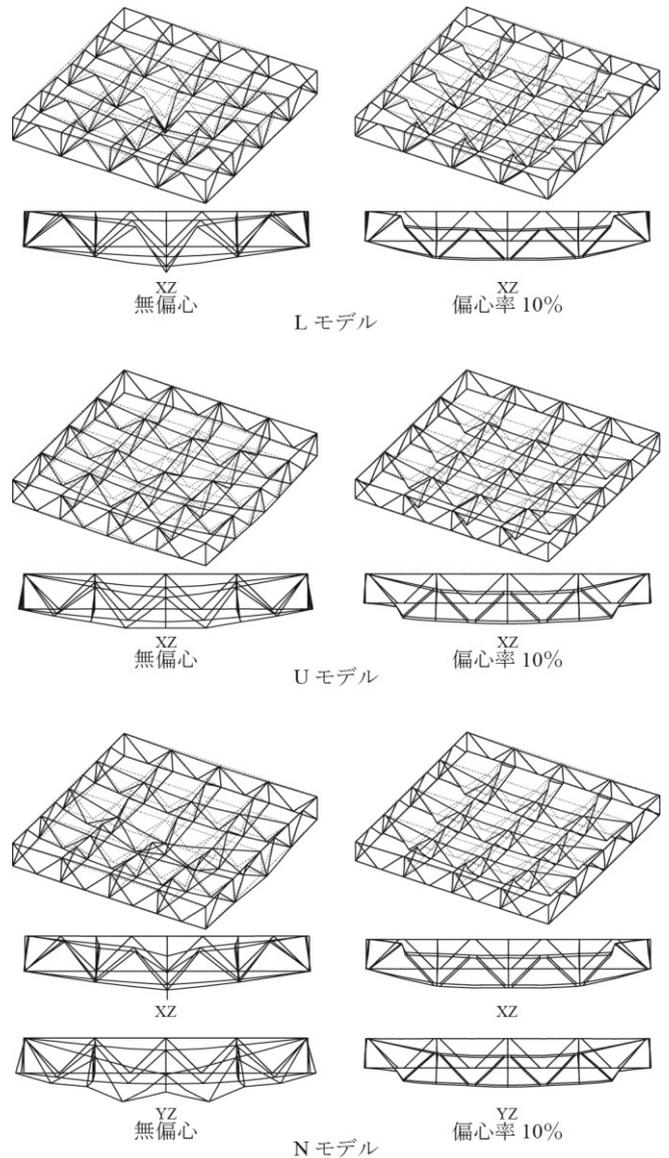


図 12 ラチス平板の変形図

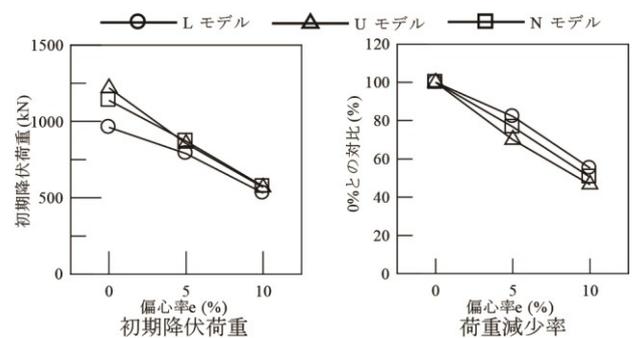


図 13 初期降伏荷重と減少率

### 3.3 初期剛性の比較

本解析条件のような等荷重では、交差モデルによって総荷重に対する支持点上の荷重の割合が異なるため、支持点上に載荷させないように平板中央に一点の集中荷重を与えた場合と周辺部を除いた等分布荷重を与えた場合で初期剛性の比較を行う。図 14 にそれぞれの荷重条件における平板中央の荷重変位関係図を示す。変位をみる節点は部材変形を含まないよう部材接合部の

変位をみるとする。

集中荷重下では、下弦材中央でみると N モデルの剛性が高いようにみえるが、同じ中央の上弦材をみると剛性が低くみえる。一点集中荷重を与えると片方のラチス梁に軸力が作用するが、他方のラチス梁には軸力が作用しない状態となるため、局所的に平板厚さが小さくなっていることを示している。等分布荷重下では両方向のラチス梁に軸力が作用するため、同位置の上面と下面に変位の差は生じなくなる。これにより N モデルの剛性は L モデルおよび U モデルよりも下回ることがわかった。N モデルは節点構成を最も簡単にできるが、載荷方法によっては、ラチス全体でなく片方のラチス梁のみで荷重に抵抗している状態になることに注意しなければならない。

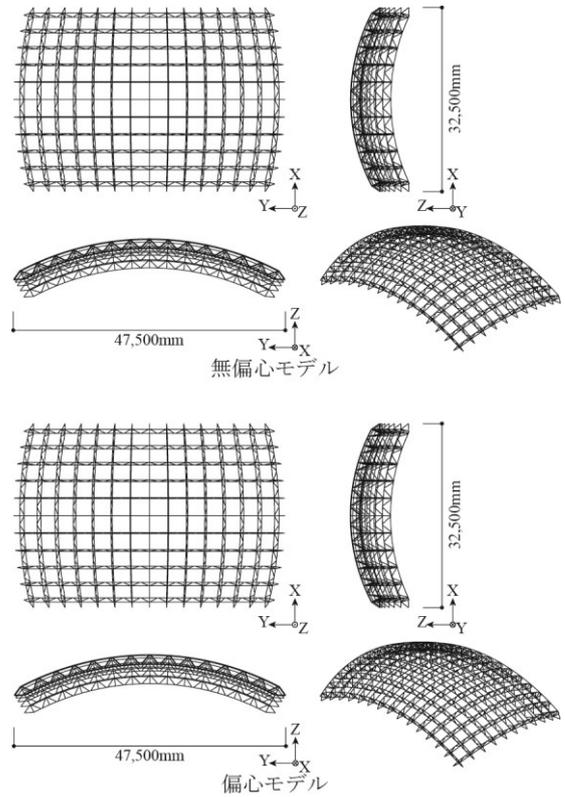


図 15 二方向ラチスアーチ

表 2 部材断面

部材	断面寸法 $\phi \times t$ (mm)	断面積 $A$ ( $\text{mm}^2$ )	断面二次モーメント $I$ ( $\text{mm}^4$ )
弦材	89.1×3.2	863.6	79.8×10 <sup>4</sup>
ウェブ材	60.5×3.2	576.0	23.7×10 <sup>4</sup>

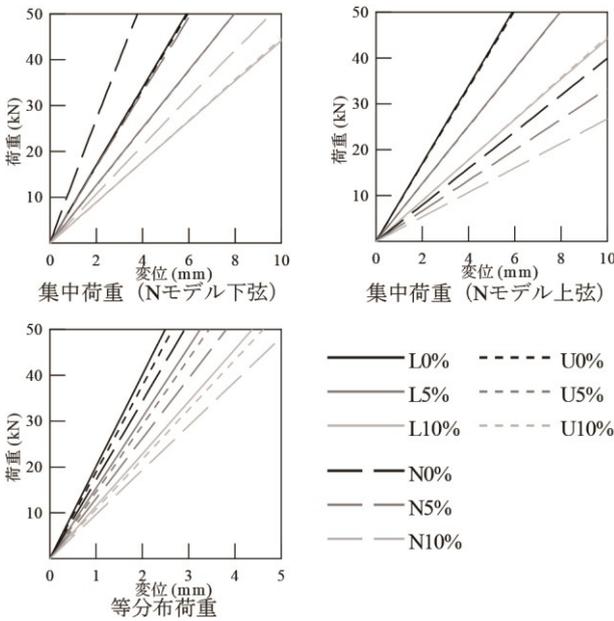


図 14 ラチス平板の初期剛性

## 4. 二方向ラチスアーチ

### 4.1 設計条件

偏心節点を実施設計に適用できるかを確認するため、中小規模の体育館の屋根を想定した二方向ラチスアーチの設計を行う。対象とするものは、図 15 のように 47.5m×32.5m のトラス型<sup>3)</sup>のラチス屋根とし、節点偏心の影響が最も小さかったアーチ開角 60°三角フレーム支持、ラチスアーチの交差部は非交差型を採用する。設計方法は、短期許容応力度設計<sup>4)</sup>を行い、使用部材の部材断面を決定する。設計用荷重は、固定荷重(構造材重量 76.9 kN/m<sup>3</sup>+仕上げ材重量 0.5 kN/m<sup>2</sup>)+積載荷重(0.6 kN/m<sup>2</sup>)+積雪荷重(0.6 kN/m<sup>2</sup>)とし、上弦材とウェブ材との節点すべてに鉛直下向きの等分布荷重として作用させる<sup>5)</sup>。偏心節点を取り入れても部材断面を変更することなく短期許容応力度設計を満たすことができ、部材断面を表 2 に示し、その他の部材諸元については表 1 のものとする。

### 4.2 静的弾塑性挙動

SPACE を用いた静的弾塑性解析により、二方向ラチスアーチの力学挙動および耐荷性能を検討する。解析結果から、設計荷重  $P_S$  で無次元化した初期降伏荷重  $P_Y$  と最大荷重  $P_U$  を表 3 に、荷重変位関係図を図 16 に、変形図を図 17 に示す。二方向ラチスアーチに偏心節点を取り入れても部材断面を変えることなく耐力および剛性の低下を抑えることができる。平面ラチスアーチでは、節点偏心によって大きな曲げモーメントが発生していたが、二方向ラチスアーチでは、節点偏心が生じても境界付近を除き曲げモーメントの増加は小さく、偏心節点に局所的に大きな曲げモーメントが発生することもなくなっている。しかし、無偏心モデルにおいても弦材の中央で他方向のアーチが交差することによって、弦材に曲げモーメントが発生することに注意しなければならない。偏心節点に他の部材と比べ大きなせん断力が発生するが、短期許容応力度設計による検定値への影響はかなり小さいため、せん断力に対する補強の必要なく偏心節点を取り入れることができる。

表 3 初期降伏荷重と最大荷重

モデル	$P_S$ (kN)	$P_Y/P_S$	$P_U/P_S$
無偏心	2682	2.60	3.09
偏心	2677	2.48	2.94

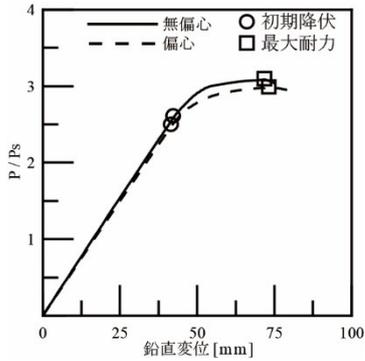


図 16 二方向ラチスアーチの荷重変位関係図

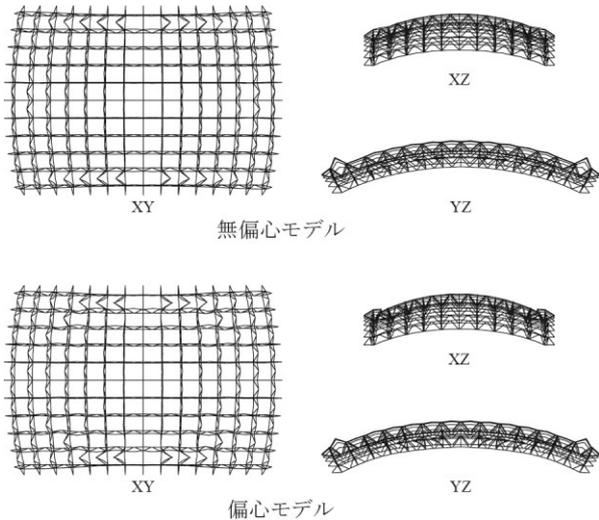


図 17 二方向ラチスアーチの変形図

表 4 弾性座屈荷重

モデル	$P_S$ (kN)	$P_E$ (kN)	$P_E / P_S$
無偏心	2682	8923	3.33
偏心	2677	8580	3.20

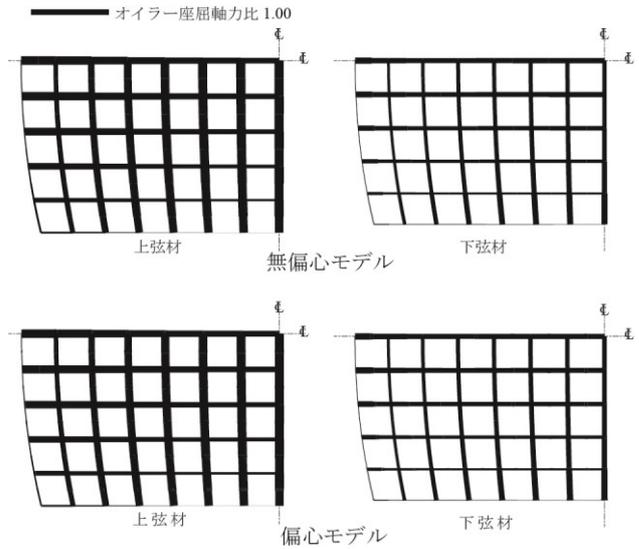


図 18 オイラー座屈軸力比

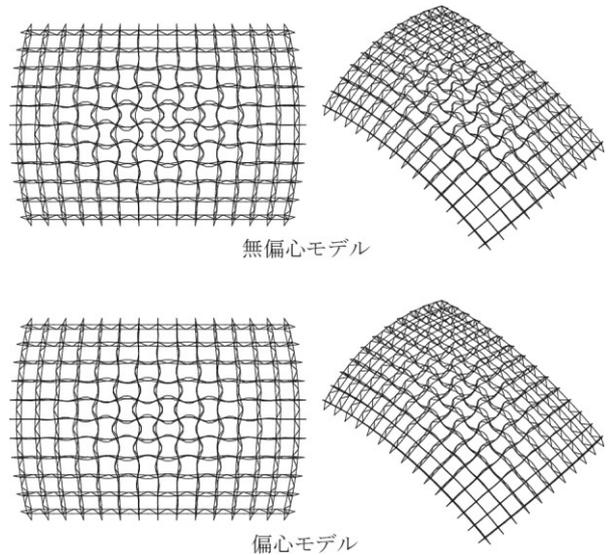


図 19 座屈モード

### 4.3 弾性座屈挙動

サブスペース法による固有値解析を行い、弾性座屈荷重  $P_E$  を算出したものを表 4 に示す。解析結果から、節点偏心が生じても座屈耐力の低下を抑えることができ、弾性座屈荷重は最大耐力を上回った。図 18 のオイラー座屈軸力比より、アーチの交差部を非交差型とすることで、交差するアーチ部材によって、最も軸力が大きくなる短辺方向の上弦材の個材座屈を防ぐことができるため、短辺方向の上弦材にオイラー座屈軸力を大きく上回る部材が多く存在する。無偏心モデル・偏心モデルともに、図 19 のような屋根中央にて面外座屈が生じる座屈モード形状をとりオイラー座屈軸力比にも差はみられない。

### 5. 結論

本研究は平行弦ラチスアーチを対象とし、ラチスの形状、境界条件および二方向ラチスにおける偏心節点交差部によるウェブ材の節点偏心の効果について考察を行った。また偏心節点を実施設計に適用できるかを検討するために、中規模の体育館の屋根を想定した設計を行った。その結果、ウェブ材に軸力が作用しないように上弦材および下弦材の軸力が直接境界へ伝達させる支持方法にすること、対象物を単弦アーチに置き

換えせん断力の小さな形状とすることで、節点偏心が小さくしすぎると部材歪が大きくなることに注意すること、軸力が大きくなる弦材が座屈しにくいように非交差部の向きを決定することで、偏心節点を用いることによる耐力および剛性の低下を抑えることができる。

#### [参考文献]

- 1) 高岡良輔, 谷口与史也, 吉中進「平行弦トラス梁の耐荷特性に及ぼすウェブ材の節点偏心の効果について」日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.153~154, 2016.8
- 2) 鈴木敏郎, 石原直「圧縮弦材を偏心接合した立体トラス平板の力学特性に関する研究」日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, pp.73-78, 2000.8
- 3) 奥山仁嗣, 谷口雄基, 谷口与史也, 吉中進「トラス型二層立体ラチス構造の全体形状と接合部種類について」日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.685-686, 2015.9
- 4) 日本建築学会「鋼構造設計規準 - 許容応力度設計法 -」2005.9
- 5) 日本建築学会「建築物荷重設計指針・同解説 (2015)」 2015.2