

軽量材料を主構造に用いた簡易施工構造物の 開発に関する研究

中原 浩之*・新垣 和明**

Feasible study for developing easy set up structures by light weight material

Hiroyuki NAKAHARA* and Kazuaki ARAKAKI**

The authors have proposed a new light-weight structure which is built through easy construction. The material of expanded polystyrene (EPS) was chosen as the main structure of the proposed structure. The shape of the structure was cylindrical shell which is constructed by connecting half-circular arches longitudinally. Each arch was masonry of hexahedron EPS which has trapezoidal section. The masonry arch specimens were made as the constructing test and were conducted to loading test. The arch specimens were success to be made by introducing tensile force to the rope rapping the arch. In this procedure, the trapezoidal EPS pieces meet each other by the tensile rope. The arches were subjected to vertical force and investigated to their structural properties.

Key words : *light-weight structure, expanded polystyrene, masonry arch, ring tension*

1. はじめに

EPS (Expanded Polystyrene) は、一般に発泡スチロールと呼ばれている。この材料は、断熱性に優れ、軽量であることが特徴で、冷凍や冷蔵された食材を運搬する容器として広く利用されている。また、EPS は、建材としても利用されてきており、主に屋根や壁の断熱材として使用されている。

本研究では、断熱性能と簡易施工が必要な建物を想定して、主構造に EPS を用いたシェル構造物の開発を行う。具体的には、簡易型農業用円筒シェルと准簡易型倉庫用円筒シェルの 2 通りの構造物を提案する。これらの構造物の施工実験と加力実験を実施して、提案構造物の実現可能性について検討する。

図 1 に、実用化を目指す円筒シェルを示す。モデルの寸法は、内部での作業性を考えて、図 1 に示すように設定した。主構造の半径は 4000mm とし、厚さを 375mm とした。EPS は、工場で作成されるため、一つのピースの大きさに上限がある。九州内で見学可能であった、某工場の施設では、作成可能な EPS ピースの最大金型サイズは、図 2 のようになっている。従って、本研究における構造要素は、厚さが 400mm 以下になる。

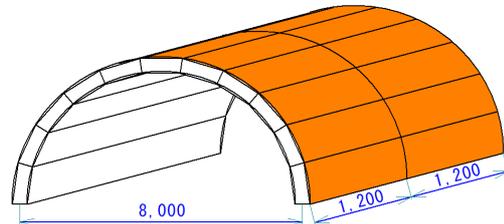


図 1 実用スケールの寸法

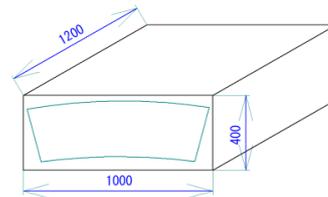


図 2 EPS 金型最大寸法

こうした構造物の場合、シェル全体の座屈が懸念されるが、現時点では EPS シェルの詳しい研究は進んでおらず、暫定的に、厚さの 10 倍程度の半径にした。図 1 に示しているとおり、このシェルは、半円アーチを並べることで構成される。このアーチの奥行きは、図 2 から 1200mm と決まる。

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

断熱性は、気密性に関係するので、これらアーチ同士の連結は重要である。これに関しては、写真1に示す形を提案している。写真1には、3Dプリンターを使用した試作品を示している。このピースのモデル図、設計図をそれぞれ図3、図4に示す。このような、凹凸を付けたピースを作成すれば、アーチ同士の機密性を保った連結が可能と考えられる。しかしながら、以降の実験では、単独アーチのみの試験体を対象としているため、アーチ同士の連結部は作成していない。

研究着手時には、テーブルサイズの1/50模型を用いて、実験試験体の製作法について検討した。完成するアーチの半径は80mmである。

施工手順を写真2に示す。写真2(a)のように台形の発泡スチロール製ブロックの長辺を上にして並べて、互いに上面をテープ等で連結する。写真2(b)のように、両端のブロックを近づけると発泡スチロール製ブロックは上に持ち上がり、写真2(c)のようにアーチが形成される。すなわち、写真2のような水平反力が導入されれば、簡単に所定の形状が作成できると考えられる。このように提案した施工法が、実現可能かどうかを調べるために、徐々にサイズを上げて施工実験を実施し、併せて、製作された試験体の構造性能について実験により調べる。本報では、半径が1000mmと1250mmの試験体の実験について述べる。

2. 1000mm 試験体の実験

本研究では、まず、実大の1/4モデルの半径1000mmのEPSアーチの実験を行った。

試験体は、図5に示す2体を作成した。実験変数は、台形ピースの数で、図5(a)の試験体が8ピース、図5(b)の試験体が7ピースからなる。EPS材の厚さ t は、250mmとした。各ピースの自重を計測して密度を計算したところ、約30kg/m³であった。

試験体は、円弧アーチであるので、その曲率半径 ρ は、円の半径 a と等しい。このアーチを台形のEPS材料で構成すると、半径 ρ は、次の式(1)のように表わすことができる。

$$\left| \frac{1}{\rho} \right| = \frac{\Delta s_i + \Delta s_o}{aut} \quad (1)$$

ここで、 t : EPS材の厚さ、 Δs_i 、 Δs_o : 基本ピースの基準長さ au に対する縮小分長さ Δs_i と拡大分長さ Δs_o である。このようにして、指定した曲率のアーチに必要な各ピースの寸法を定める。寸法は図5(a)で長辺、短辺それぞれが439mm、341mmとなり、図5(b)で長辺、短辺それぞれが501mm、389mmとなった。これらを2000mm×500mm×1200mmの市販の標準サイズ直方体から切り出した。

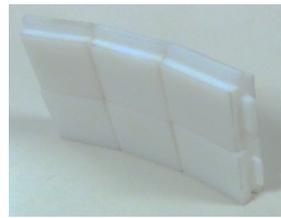


写真1 連結した模型

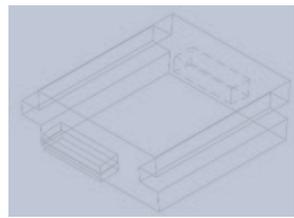


図3 ピースモデル図

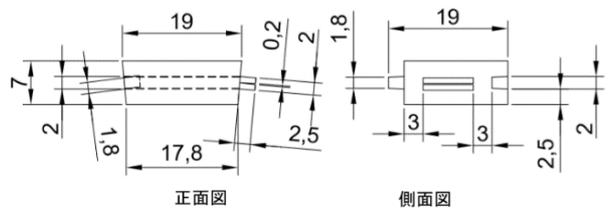


図4 連結に適した型の設計図



(a) 手順1

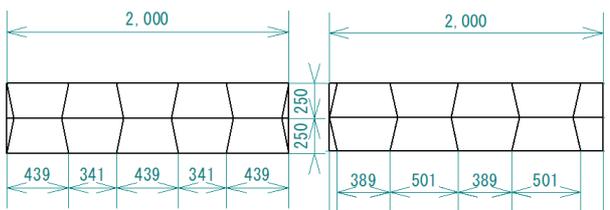
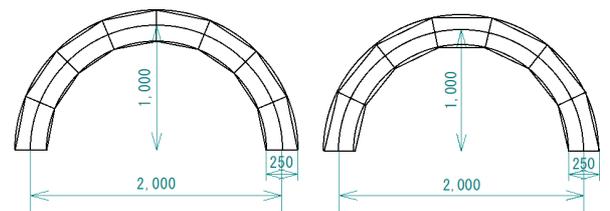


(b) 手順2



(c) 手順3

写真2 1/50模型による施工手順



(a) 8ピース試験体

(b) 7ピース試験体

図5 1000mm 試験体

2.1. 施工実験

パイロット実験の施工法に倣って半径 1000mm の EPS アーチの施工実験を実施した。施工実験の概要を図 6 に示す。

パイロット実験のように、台形の発泡スチロール製ブロックの長辺を、上にして並べて、互いに上面をテープ等で連結した。両端のブロックを人力により近付けることは難しかったので、全体にひもを回して、ウインチで巻き取ることで、アーチの形成を試みた。しかしながら、自重によりブロックが落下し、ウインチのみでの施工は断念した。そこで、各ピースを下からバルーンで支え上げる案を考え、ウインチによる緊縛と、バルーンの膨張を同時に行い、この試験体を作成することに成功した。

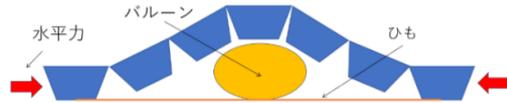


図 6 施工概要図

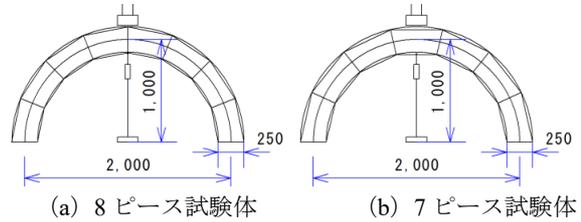


図 7 荷重試験概要図

2.2. 加力実験

上記の様に製作した試験体の耐荷性能を確認するため、加力実験を実施し、EPS アーチの力学的特性を調べる。荷重方法は、図 7 のように、アーチ頂部に集中荷重を載荷した。加力点に位置に 200kN ロードセルを設置して、荷重を計測し、アーチの中央部に設置した変位計で下向き変位を計測した。試験体は、試験装置に緊結することなく、じかに置いて実験を実施した。ただし、両端を施工時に使用したひもで結んでおり、広がる方向の変形を止めている。

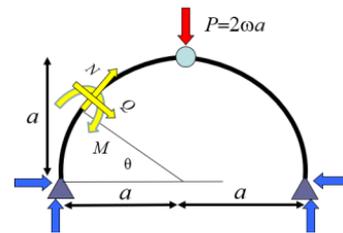


図 8 実験の荷重条件

実験では、中央にヒンジが発生すると仮定して、図 8 に示すように 3 ピンアーチの条件で、断面力図を計算してみた。結果を図 9 に示す。図では、 $\omega=1\text{N/m}$ 、 $a=1\text{m}$ としている。図 8 から、 $\theta=\pi/4$ (45 度)、 $3\pi/4$ (135 度) で圧縮応力が最大となり、最終的にこの部分が破壊して最大耐力に達すると予想された。

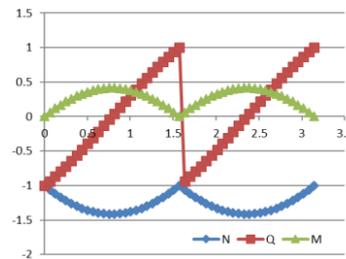


図 9 断面力図

2.3. 実験結果

実験で得られた鉛直荷重と鉛直変位の関係を図 10 に示す。図 10 から、8 ピース試験体アーチの耐荷重が約 1500N、7 ピース試験体アーチの耐荷重が約 2000N となり、それぞれ自重の 6.5 倍、8.5 倍の荷重を耐えることが分かった。実用化にあたり想定している荷重は自重の 4 倍程度であり、この実験の結果から耐荷性能についての問題ないことが確認できた。ただし、8 ピース試験体アーチと 7 ピース試験体アーチでは、最大耐力時変位に 30mm 以上の差が出ており、変形制限を考えると、偶数ピース試験体の実用化は難しいことが分かった。これは、試験体が、荷重頂部での曲げ引張側が大きく開き、この部分で圧縮降伏に伴う変形が進行したためと考えられる。

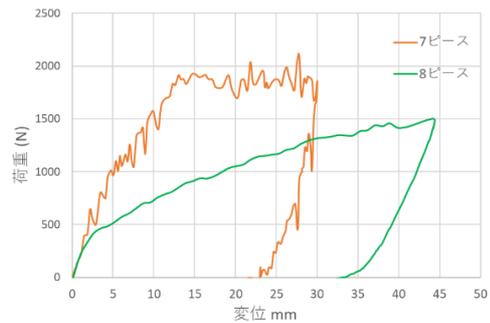


図 10 荷重/自重-変位関係

8 ピース試験体アーチの実験耐力について考察する。この試験体に使用した EPS 密度は、およそ 30kg/m^3 であった。図 11 に示す EPS の応力-ひずみ関係¹⁾ からこの密度の EPS は約 0.20N/mm^2 の圧縮応力で降伏すると仮定する。

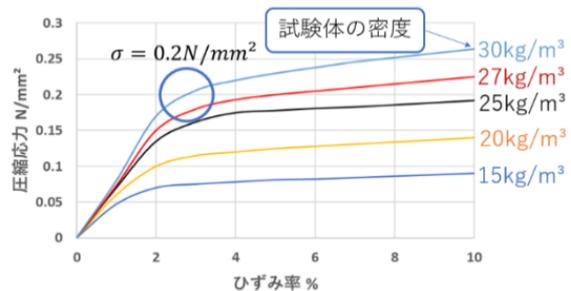


図 11 応力-ひずみ関係

載荷後の圧着部分を写真3に示す。図12のように、圧着部分に三角形の応力分布を仮定すると、破壊時の載荷頂部の圧着長さ X_n は7mmと計測され、アーチ頂部の軸力 N は700Nと計算される。載荷荷重 P は、アーチ頂部の軸力 N の2倍の1400Nと計算された。これは、実験で計測された最大強度1500Nと安全側に評価できている。一方、7ピース試験体アーチは圧着長さが8ピース試験体アーチより大きかったため、より大きい荷重を負担できたと考えられる。この知見から、以降の実験では、中央部のヒンジを誘発する偶数ピース試験体を避けて、奇数ピースの実験のみを実施することにした。

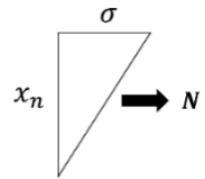


写真3 載荷後の圧着部分 図12 応力分布図

3. 1250mm 試験体の実験

前節において、EPS アーチは施工可能であるものの、自重による落下対策が必要であることが分かった。一方で、加力実験では不安定な挙動も見られず安全に実験が実施でき、かつ基礎的な荷重-変形関係を得ることができた。これを受けて、半径を1000mmから1250mmに大きくしてEPSアーチを作成し、同様な加力実験を実施した。アーチの寸法を図13に示す。(1)式を用いて各ピースの寸法を決定している。1000mm試験体では、はじめて行う加力実験の安全性を考えて、厚さを半径の1/4倍の250mmにしていた。1250mm試験体では、実用モデルの厚さに近づけて厚さを半径の1/10以下の100mmにした。

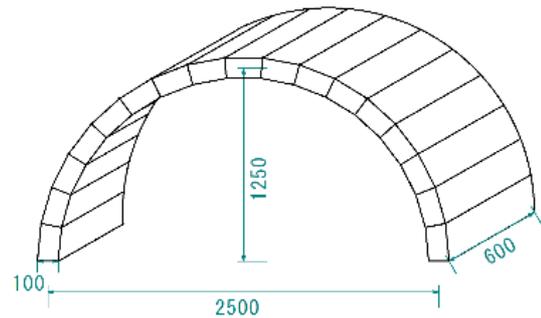


図13 1250mm 試験体

3.1. 施工実験

1250mm試験体の施工手順を図14に示す。台形EPSピースの長辺(アーチの外側になる部分)にテープを貼る。その後、外周をひもで緊縛し、そのひもをウィンチに固定する。ウィンチを巻き上げる事により台形同士が圧着して、アーチが形成される。この方法により、17ピース試験体を2体作成した。1000mm試験体との相違点は、ウィンチの巻き上げ開始時において、各台形ピースの長辺が、下を向いているところである。これにより自重によるピースの落下は無くなったものの、最終的に試験体をひっくり返す手順が増え、実大になった場合の施工性に課題を残している。

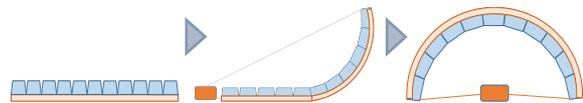


図14 施工方法

3.2. 加力実験

図15のようにロードセル、変位計、ひずみゲージを設置し載荷実験を行った。1250mm試験体では1000mm試験体よりアーチの厚さが半分以下になったため、耐荷重が低下する。これを考慮し、ロードセルのキャパシティーを下げて、精度を上げた。ロードセルは図16のように許容荷重が2kNのロードセルを4つ設置し、合計のキャパシティーが8kNになるようにした。変位計は100mm計測可能なものを使用し、アーチ中心部の下向き変位が70mmに達するまで実験を実施した。施工時に使用した紐には、ひずみゲージを貼付けた鋼材に連結されており、導入した初期張力と、載荷中の水平反力を測定した。

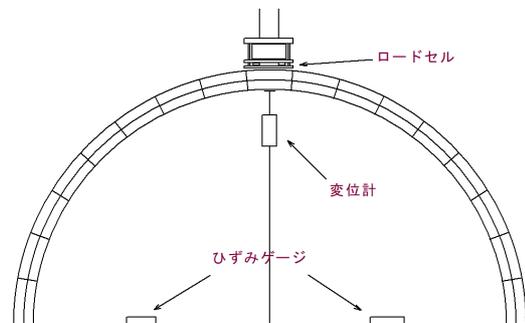


図15 載荷試験機

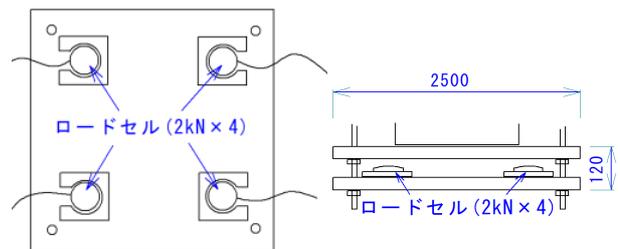


図16 ロードセル設置図

3.3. 実験結果

1250mm 試験体の実験では図 17(a)(b)に示すように、アーチの端部を固定しないモデルと固定するモデルの二つを用意し、支持条件を変えて、加力実験を実施した。両端ピン支持試験体は図 17(a)に示すように、アーチをそのまま地面に置いた。両端固定支持試験体は図 17(b)のように、アーチの端部に H 形鋼を取り付け、アーチ端部の回転を拘束した。実験では、分布荷重を載荷することが難しいので、図 18 に示すように、集中荷重 P を載荷した。

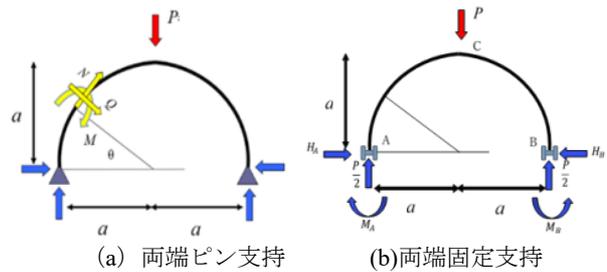


図 18 実験の荷重条件

両端ピン支持の実験の荷重-変位関係を図 19 に示す。図 19 の橙線からわかるように両端ピン支持の最大荷重は 406N である。両端固定支持の実験の荷重-変位関係を図 20 に示す。図 20 の緑線からわかるように両端固定支持の最大荷重は 635N である。いずれの実験も 70mm に達した時点で除荷している。また、両端ピン支持は自重の 5.9 倍、両端固定支持は自重の 9.2 倍の荷重に耐えることができると分かった。この荷重まで、座屈等の不安定な現象も発生していない。

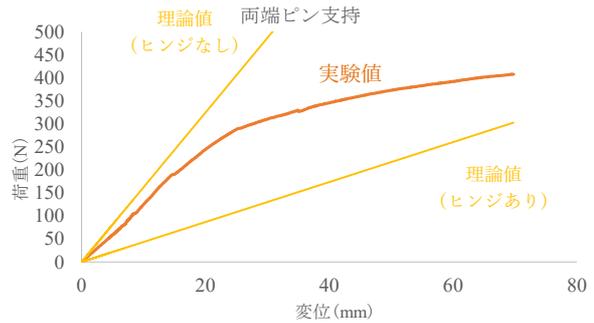


図 19 荷重-変位関係 (両端ピン支持)

図 19 の黄線は、曲げ変形のみを考慮して計算した初期剛性 k_t を表している。計算された k_t は 16.2N/mm となり、実験のそれよりも大きい結果となった。ここで、試みにアーチ中央にヒンジができたと仮定して k_t を計算してみると、 $k_t=4.34\text{N/mm}$ となった。この結果も図 19 に示されている。実験値はヒンジがある場合とない場合の間に位置している事が分かった。同様に、図 20 の青線は、両端固定支持の計算による k_t を表している。ヒンジなしモデル、ヒンジありモデルで k_t はそれぞれ 26.3N/mm, 7.36N/mm となった。両端固定支持も実験値はヒンジがある場合とない場合の間に位置している事が分かった。また、これらの結果の数値を表 1 にまとめる。実際の設計では、これらを参照して、各ピースが完全圧着していないことによる剛性低下を考慮する必要がある。

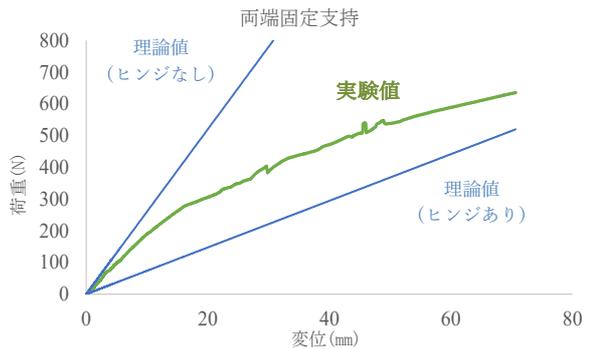


図 20 荷重-変位関係 (両端固定支持)

両端ピンの試験体の水平反力の推移を図 21 に示す。初期導入軸力は、50N である。載荷により発生する水平反力は P/π と計算できるので、最大荷重 $P=406\text{N}$ に達したときの水平反力は 130N となる。計算では、水平反力は上記を足して 180N となると予測される。一方で、実験では 149N となった。実験値は、20%程度計算を下回っている。これは、荷重が大きくなるにつれて、剛性が低下し、予想よりも反力が小さくなったためと考えられる。実験と計算の挙動は、ほぼ一致しており、想定通りの実験が実施できた。

表 1 理論値と実験値の初期剛性

	実験値	理論値
両端ピン	10.8	4.34 16.2
両端固定	17.6	7.36 26.3

ヒンジあり
 ヒンジなし

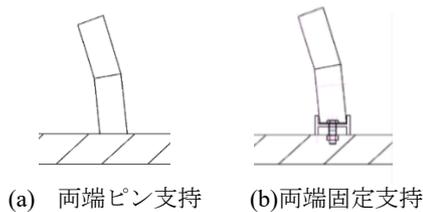


図 17 アーチ端部の詳細

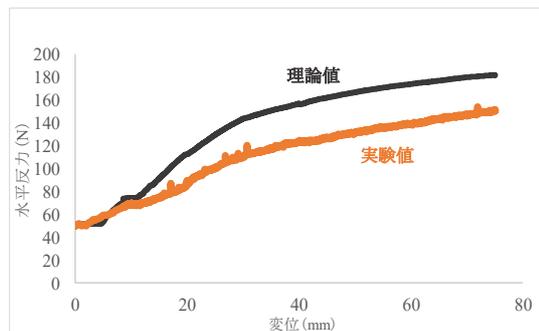


図 21 水平反力-変位関係

施工時にひもで緊縛することによりアーチ構造物を作成するため、完成時のアーチ試験体は図 22 のような応力状態になっている。ひもの張力は、水平反力と見なすことができ、その値は qa となる。

図 22 の施工時応力状態での軸力 N_θ 、曲げモーメント M_θ は以下の式で表すことができる。

$$N_\theta = -qa(\sin \theta + 1) \quad (2)$$

$$M_\theta = qa^2 \sin \theta \quad (3)$$

図 18(a)の荷重条件における両端ピン支持の N_θ 、 M_θ は以下の式で表すことができる。

$$N_\theta = -\frac{P}{2} \left(\frac{2}{\pi} \sin \theta + \cos \theta \right) \quad (4)$$

$$M_\theta = \frac{Pa}{2} \left(\frac{2}{\pi} \sin \theta + \cos \theta - 1 \right) \quad (5)$$

式(2)(3)から得られる断面力図を図 23(a)に示す。計算には、実寸 $a=1.25\text{m}$ 、奥行き 0.6m を代入している。まず、式(4)から q を計算する。初期張力を導入時、 $qa=50\text{N}$ であるので、 $q=67\text{N/m}^2$ となる。

さらに、式(4)(5)から得られる断面力図を図 23(b)に示す。ここで、計算には実寸と $P=406\text{N}$ を代入している。 P は等分布荷重に換算すると、 271N/m^2 となる。

図 23(c)には、施工時と荷重時の断面力を合成した力 N_θ と M_θ を示している。図 23 から分かるように、施工時応力によって、最大荷重時の中央曲げモーメントが、内側引張から外側引張に移行している。このアーチは内側に引張抵抗するテープのようなものを設けていないので、この設定は重要な検討事項である。

また、軸圧縮力も全体的に大きくできることが分かる。断熱性能を確保するには、EPS ピース同士が圧着していることが必要となる。導入張力と負担予想鉛直力を適宜設定することで、EPS ピース同士を密着させて断熱性能を保持できる構造物の建設が可能となる。今回の実験では、施工時のひもの張力は、最大荷重時の水平反力の $1/3$ になっている。これが設計の一つの目安となる。

図 18(b)の荷重条件における両端固定支持の N_θ 、 M_θ は以下の式で表すことができる。

$$N_\theta = -\frac{P}{2} \left(\frac{8-2\pi}{\pi^2-8} \sin \theta + \cos \theta \right) \quad (6)$$

$$M_\theta = \frac{Pa}{2} \left(\frac{8-2\pi}{\pi^2-8} \sin \theta + \cos \theta - \frac{12+2\pi-2\pi^2}{\pi^2-8} \right) \quad (7)$$

図 24 に、図 23(a)の施工時と図 18(b)の支持条件での荷重時の断面力を合成した力 N_θ と M_θ を示している。ここで、計算には実寸と $P=635\text{N}$ を代入している。 P は等分布荷重に換算すると、 423N/m^2 となる。

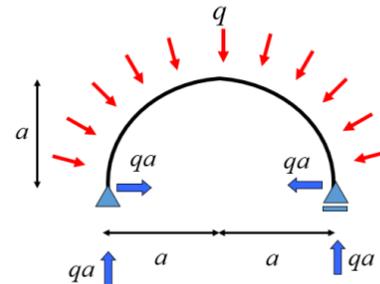
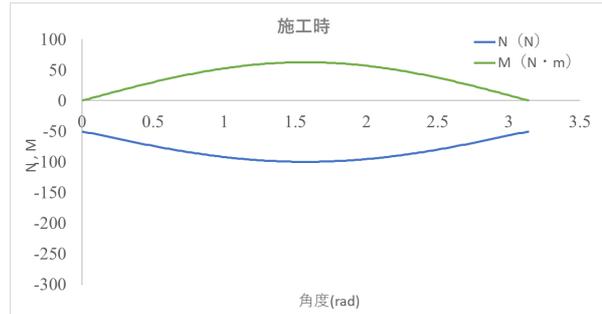
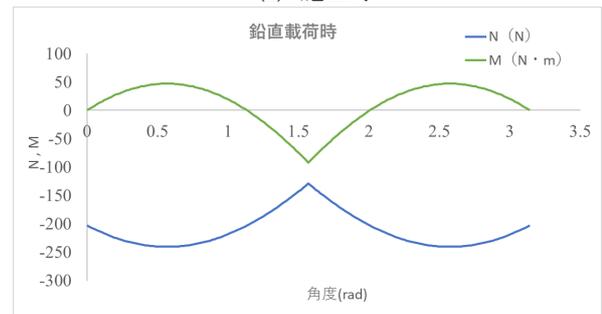


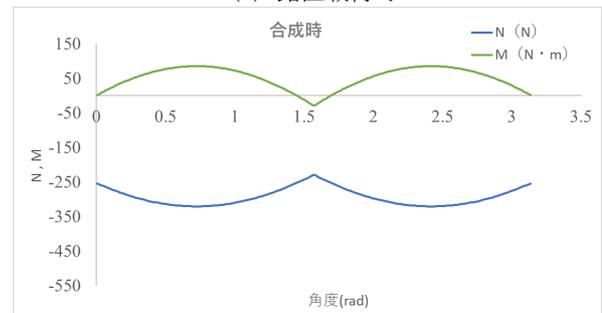
図 22 施工時の応力状態



(a) 施工時



(b) 鉛直載荷時



(c) 合成時

図 23 断面力図 (図 18(a)の条件)

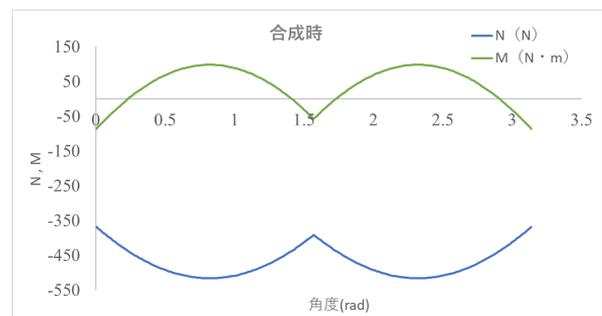


図 24 断面力図 (図 18(b)の条件)

施工時の導入軸力は支持条件によらず同一であるため、図 24 は、図 23 の(c)に対応する状態についてのみ示している。図 24 においても、施工時応力によって、最大荷重時の中央曲げモーメントが、内側引張から外側引張に移行し、軸圧縮力も全体的に大きくできる。ピン支持と固定支持を比較すると、両者の最大曲げモーメントの大きさはほぼ等しい。一方で、最大軸力は後者が 1.5 倍以上の大きさとなっている。図 19 と図 20 を比較すると、最大荷重時の剛性低下はほぼ同じ程度にとどまっており、この構造は軸力が剛性に及ぼす影響が小さいと推定できる。

4. まとめ

・1000mm 試験体の実験について

- 1) 1/50 パイロット実験で提案した両端のピースを引き寄せる方法に、下からバルーンで支え上げる方法を追加して、1/4 スケール試験体を製作することが出来た。
- 2) 2 体の実験試験体について、加力実験を実施し、最大荷重を得ることができた。8 ピース試験体では 1500N、7 ピース試験体では 2000N 弱の最大荷重を負担できた。これは、自重の 6.5 倍、8.5 倍に相当する。偶数ピース試験体では、中央部のヒンジを誘発するため、奇数ピースの試験体よりも剛性および耐力が低下することが分かった。

・1250mm 試験体の実験について

- 1) 1/4 スケール試験体の製作時の台形ピースの上下を逆転させることで、バルーンなしで、およそ 1/3 スケール試験体を製作することが出来た。
- 2) 支持条件を変えた 2 体の試験体について、加力実験を実施した。両端ピン支持の試験体では、自重 5.9 倍、両端固定支持の試験体では、自重の 9.2 倍の荷重を負担できた。

- 3) 実験の初期剛性は、曲げ変形のみを考慮した弾性理論から得られる計算値では過大評価となった。一方で、破壊状況を考慮し模擬的にヒンジを挿入した構造モデルにおいて、計算した剛性は、安全側の評価となった。
- 4) 施工時応力によって、最大荷重時の中央曲げモーメントが、内側引張から外側引張に移行し、軸圧縮力も全体的に大きくできる。

5. 今後の課題

実験では、加力装置の関係上、鉛直力を集中荷重として載荷するにとどまっている。しかしながら、本構造を実用化するには、水平力に対する検討も必要である。本構造は、軽量なので、地震荷重は問題にならず、実際には自重と風荷重の組み合わせを考慮すればよいと考えられる。これについては、次報で検討する。

また、実験から最大耐力時のアーチ試験体は相当に変形が進み、剛性も低下している。本構造を実用するにはある程度の変形制限を設けるなど、検討すべきことは多い。本報告では、この問題を指摘するにとどめて、詳しい検討は、今後の課題とする。

謝辞

本研究では、(株)ツジデン元代表取締役社長・大西威徳氏から研究全般にわたり多大なご協力とご支援を得た。ここに記して、甚深の謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 発泡スチロール協会 EPS 建材推進委員会: EPS 断熱建材ガイドブック, 2016.1