

(10) 竹の形態構造から学ぶ円筒系構造の最適化問題

Optimization problem of cylindrical structure applied the geometrical structure of a bamboo

有尾 一郎* ・ 中沢 正利**

Ichiro ARIO and Masatoshi NAKAZAWA

*博士(工学) 広島大学助手 工学部第四類(建設系) (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

**工博 東北大学助教授 工学部土木工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

It has been studied the several approach to archive the method of least weight or stiffness maximization design. In this paper, the bamboo structures which realize the rational profile in the biomechanical sense, are applied in the viewpoint of mechanical properties of cylindrical structures. Firstly, the configuration and stiffness of the bamboo and it's nodal diaphragm are investigated experimentally, and these are reflected on the bamboo structural pier model. Secondly, the feedback model is applied to the cylindrical steel pier which is buckled locally by Hyogoken-Nanbu earthquake. The local buckling strength of this pier, the bamboo model and the feedback model are compared to find out the optimization problem for cylindrical structure with nodal diaphragm.

Key Words : bamboo, cylindrical structure, biomechanics, symmetric structures, optimization problem

1. はじめに

近年、生体における最適化則については、Roux²⁾による骨の形態形成をもとに考えたといわれる「最小材料最大強度説」や Hertel⁴⁾による「Light Structure」などの各種生体材料の形態や構造特性の点から構造物を創造・設計する試みが行なわれてきた。また、生物の構造組織にみる最適化設計の試みは、いくつかの工学的成果を挙げている。自然界ではあらゆる生物があらゆる環境下で適応している。そのような生物の形態や材料組織は一般にきわめて複雑で、それらの創生メカニズムはほとんど未知であるが、長い年月を経てきていることからある意味で最適化則に準じているととらえられている¹⁾。そのような最適化則のモデルとして、尾田^{5),6)}によって竹材真かん部における最適化設計モデルが考案された。これは竹材真かん部断面の維管束鞘分布と引張強さとの関係を詳細に調べたものである。自然界で受ける風雪等を外力として、竹材の維管束鞘を一種の強化繊維とモデル化し、重量最小化の設計目的で繊維含有率分布を求め、生体の観察による工学的なアプローチとして興味深い研究である。

本研究は、この尾田の研究を基に、竹(モウソウチク)の構造形態の観察を通して、その構造の力学的役割をさらに理解し、円筒橋脚の設計に利用することを試みるものである。特に、自生している竹の円筒構造の仕組みを工学的に理解することは、円筒系シェル構造物の座屈耐荷力向上や最適設計思想に適する鍵が隠されているものと考えられる。また、竹には独特の節構造が存在することで、橋梁のダイヤフラム構造と類似する力学的役割を担って

いるものと概念的には考えられているが、生体構造の研究や具体的な設計法に応用するまでには至っていない。

我々はモウソウチクの組織構造に形態形成や座屈防止効果の仕組みが備わっているものと考え、特に、阪神大震災では鋼製円筒橋脚の局部座屈現象が確認されており、この竹の形態特性を利用することにより、円筒形構造物の最適化設計の一例を試みるものである。すなわち、生体の円筒節構造の構造形態の特性を調べ、竹の最適化則に基づく鋼製円筒橋脚の工学的設計に利用する方法を提案するものである。

2. 竹の形態と構造特性

竹の組織構造はいくつかの文献^{7)~9)}等によって詳細に調べられている。この章ではモウソウチクの構造形態の観察を通して、竹材を一つの理想構造物とし、生物の形態や材料組織の創生メカニズムを知る一つの手がかりを得るために、この生体の構造特性を調べることにする。

2.1 モウソウチクの形状

自然のモウソウチクの高さは10m~25mに成長するが、今回実験に用いた竹は全長 $H=17.6\text{m}$ ほどであった。このモウソウチクのかん部全体の形状を図-1に示す。これは根元の節からカウントし、節の外径および内径の一部を根元の最大値で正規化しプロットしたものである。最初に枝が発生する節は下から38/74番目の節で高さ9.39mの位置であった。真かん部の断面はほぼ円筒形断面であり、観測の結果より、竹筒厚さ t はかん基部に近いほど厚かったが、ほぼその高さに対応する外径の1割程度の

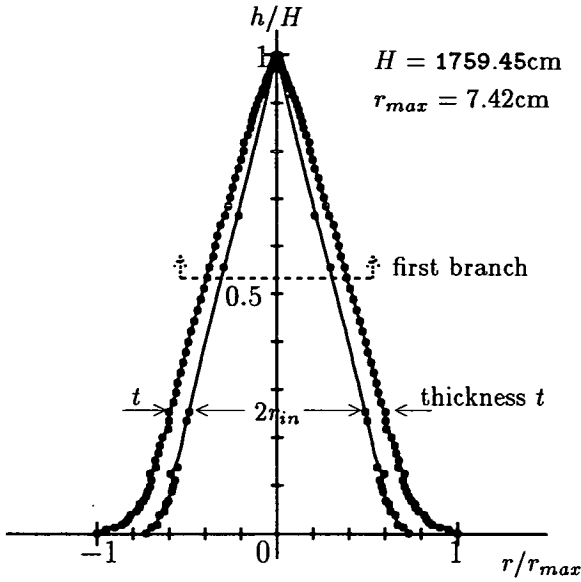


図-1 かん部の形状

大きさであった。この形状の特徴は、根元付近の節の多さと断面の拡がり、地表に接するような滑らかな形状であった。力学的に理想的な円錐形の形態である。

また、節部の断面形状から断面積、断面係数、断面二次モーメントの分布を基部での値で正規化したものと細長比の逆数の分布を図-2に示す。半径 r は竹の高さ方向にほぼ線形に減少する。厚さ t は半径 r に線形に比例すると近似できるので、断面係数 W が r^3 に、断面二次モーメント I が r^4 に比例しており、かん部の曲げ剛性は高さに応じて非線形な関係にある。このほか、節間長を節部で支持された柱モデルとしたときの細長比の逆数も計算し、根元付近は耐荷性能が非線形的に高い傾向にあることが確かめられた。

2.2 竹かん部に作用する荷重の算定

本節ではその環境下における最適な力学的均衡を持つものとして考え、材料特性および構造特性より、抵抗力を概算する。モウソウチクを観察すると、若竹の発芽期にはヤング係数が低く、過分の外力で容易に折れてしまう。現実にはこの時期に根元付近から折れるモウソウチクは少なくない。この時期が竹の軸方向力に対して最も負荷が大きく、一方、成長した時期には風等による曲げ外力が竹の耐荷力に大きく影響しているものと考えられる。発芽期に成長した竹はその後ほとんど形状が変わらない。我々は得られた断面諸量から外力を算定することとする。

根元から i 番目の節の圧縮側の端応力は

$$\sigma_i = \frac{w_i}{A_i} + \frac{M_i}{W_i} \leq \sigma_m \quad (1)$$

で得られる。ここに w_i はその節 i より上部の自重を、 M_i は節 i でのモーメントを、 σ_m は材料強度を表す。この変

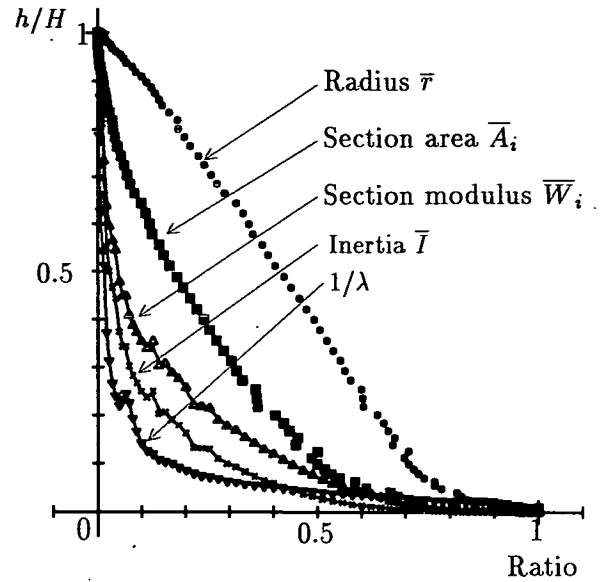


図-2 かん部の面積、断面係数、断面二次モーメントの比率および細長比の逆数の分布

数 w_i を発芽期のかん部の重量として近似すると、

$$\begin{aligned} w_i &= \rho \sum_{j=i}^n dV_j = \rho \sum_{j=i}^n dA_j dL_j \\ &\simeq \frac{1}{3} \rho A_i z, \quad z = H - h \end{aligned} \quad (2)$$

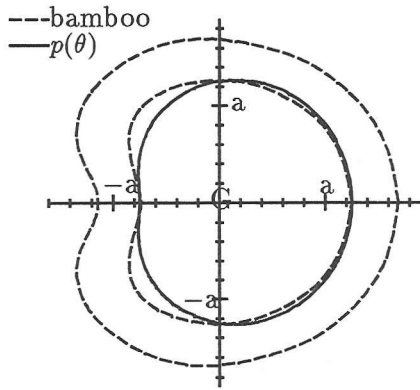
となる。これを式(1)に代入し、材料強度 σ_m を限度とすると最大曲げモーメント $M(h)$ は

$$\begin{aligned} M(h) &\leq \left(\sigma_m - \frac{\rho z}{3} \right) W(h) = \left(\sigma_0 + \frac{\rho h}{3} \right) W(h), \quad (3) \\ \sigma_0 &\equiv \sigma_m - \frac{\rho H}{3} = \sigma_m - \frac{w_0}{A} \end{aligned}$$

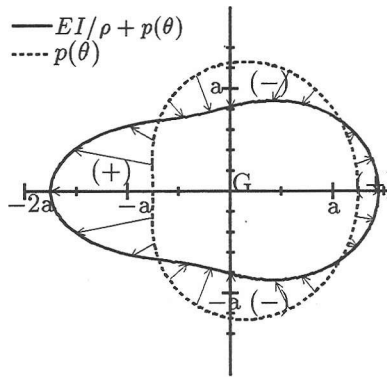
となる。ここに σ_0 は変数 h に関与せず、材料強度と竹の自重による圧縮応力との差として表される。また、 $W(h)$ は図-2の関数形を持つ。例えば、 σ_0 が 0 に近く材料強度が自重と釣り合うようなときには節間長分布のように中間付近で $M(h)$ が最大値を持つこととなり、根元の抵抗曲げモーメントが低く抑えられる。逆に、 σ_0 が材料強度に近く自重が無視できるようなときには根元で最大となる抵抗曲げモーメント分布となる。このモーメント分布から連続した荷重強度分布 $q(h)$ が求められ、真かん部における最大抵抗力の概算を知ることができる。

2.3 枝分かれ付近の断面

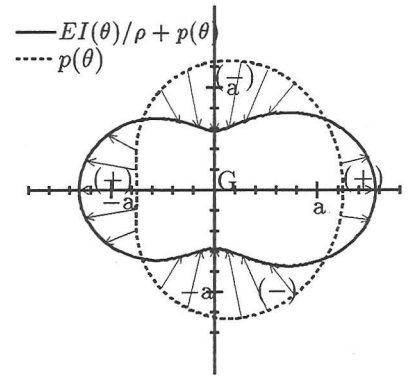
モウソウチクの枝はある程度の高さの節から2本ずつ枝分かれする。枝の付け根の方向は各節毎にほぼ 180° の反転して、交互に存在する。この節間に注目すると枝の付け根から主幹に2つの筋を持つ凹みが上側の節まで伸びている。凹みの大きさは上側の節に近づくにつれ小さくなる傾向にある。写真-1に枝付け根付近の断面を示す。ここではこのような枝の発生に伴う対称性の破れに伴う断面剛性の変化を考えることとする。



(a) 断面形状の近似



(b) $M(\theta)$ の増減変化



(c) $M(\theta)$ の増減変化 ($I(\theta)$ を考慮)

図-4 断面剛性ダイヤグラム

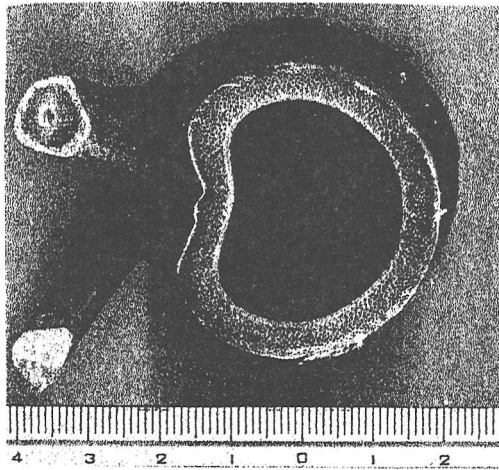


写真-1 枝分かれ付近の断面

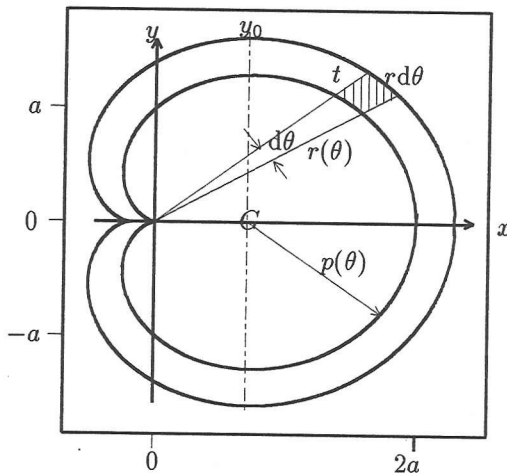


図-3 カージオイド曲線

(1) 対称性の喪失に伴う断面剛性

枝分かれ部の断面は写真-1 この断面の形状はカージオイド曲線

$$r(\theta) = a(1 + \cos \theta), \quad a > 0 \quad (4)$$

表-1 x および y 軸に関する断面係数と断面二次半径

	y	x_{right}	x_{left}
断面係数	$\frac{7\pi}{3\sqrt{3}}a^2t$	$\frac{11\pi}{10}a^2t$	$\frac{11\pi}{8}a^2t$
断面二次半径	$0.829 a$	$0.935 a$	

によく一致し、厚さもほぼ一定と見なせるので、図-3の中空断面モデルを考える。極座標系上の重心位置は

$$G_r = M_r/A = \frac{2a^2t \int_0^\pi (1 + \cos \theta)^2 d\theta}{2at \int_0^\pi (1 + \cos \theta) d\theta} = \frac{3}{2}a \quad (5)$$

となるので、 x 方向の重心位置 G_x は

$$G_x = G_r \cos \theta = G_r(G_r/a - 1) = \frac{3}{4}a \quad (6)$$

と求められる。

y_0 軸に関する断面剛性 I_G は

$$\begin{aligned} I_G &= \int_A (r \cos \theta - G_x)^2 dA \\ &= t \int_0^{2\pi} \left(r \cos \theta - \frac{3}{4}a \right)^2 r d\theta = \frac{11\pi}{8}a^3t \end{aligned}$$

が求められる。同一の厚さを持つ半径 a の中空円断面の剛性と比較すると

$$\frac{I_G}{I_{\text{circ.}}^G} = \frac{11\pi a^3t}{8} \frac{1}{\pi a^3t} = 1.375 \quad (7)$$

と剛性が向上する。同様に、 x 軸に関する断面剛性 I_y は

$$I_y = \int_A (r_y(\theta))^2 dA = a^3t \int_0^{2\pi} r^3 \sin^2 \theta d\theta = \frac{7\pi}{4}a^3t$$

となり、その比率は $I_y/I_{\text{circ.}}^G = 1.75$ となる。中空円断面と比較して x および y 軸に関する断面剛性の大きいことが数値的にも確認できた。すなわち竹の枝分かれ部の構造も、枝に作用する風荷重等の負荷に対して剛性を高く確保する構造が自然に（自発的に）形成されていると言える。この断面における力学的諸量を表-1にまとめた。

(2) 断面内の抵抗曲げモーメント

竹の枝が発芽することにより、風や自重等の外力をかん部に伝えるが、竹自身にとっては作用力を受けること

になる。この枝の大きさや分岐位置や方向等は竹の全体構造と密接な関係があると考えられる。

節部直下の断面はほぼ円筒形を成し、枝分かれ後の真かん部の断面はカージオイド形を成していると仮定し、我々はこの断面形成の力の釣合いを考えてみたい。

カージオイド形の重心位置を座標系の中心とすると、内径距離 $p(\theta)$ は

$$p(\theta) = \sqrt{(r \sin \theta)^2 + (r \cos \theta - G_x)^2} \tag{8}$$

と定義できる。図-4(a)はこの関数 $p(\theta)$ と実際の竹の形状を重ねて描いたものである。 $p(\theta)$ については内径のみ示した。この関数を θ に沿って微分し、近似的に曲率 ρ と抵抗曲げモーメントの関係

$$-\frac{1}{\rho} \approx \frac{d^2 p(\theta)}{d\theta^2} = \frac{M(\theta)}{EI} \tag{9}$$

を利用すると、

$$M(\theta) = -\frac{EI}{\rho} \tag{10}$$

となり、さらに θ に関する断面二次モーメントを考慮すると

$$M(\theta) = -\frac{EI(\theta)}{\rho} \tag{11}$$

が得られる。このモーメント分布を図-4(b) および (c) にそれぞれ示す。図-4(b) は EI が一定のときの $M(\theta)$ の増減分布のダイアグラムであり、図-4(c) は $\dot{I}(\theta)$ も考慮したときの $M(\theta)$ である。それぞれ形状 $p(\theta)$ を基準として θ まわりに $M(\theta)$ をプロットしたものである。このように $M(\theta)$ が最大値を示す箇所は、枝分かれ部の方に一致する。すなわち、枝分かれ部では竹の断面変化(偏平化)によって抵抗力が増加し、材料強度内で抵抗できるように最適な形状を形成していることがわかる。

3. モウソウチクの強度実験

我々は生態系の円筒形構造を持つモウソウチクの材料力学的特性を理解するために、モウソウチクの座屈実験および解析を行なった。実験は軸圧縮試験を行い、同時に弾性座屈解析を行なうことにより検証した。

3.1 軸圧縮座屈試験

供試体は次の3タイプの円筒形構造に分けた。1つは両端部に節が2つ存在する Type A、中間部に節が1つ存在する Type B、およびはじめから節を含まない Type C の3種類の供試体について実験を行った。円筒形のような周期構造は境界条件に敏感に影響することから、各供試体の端部はカンナ等を用いて水平に仕上げた。実験での測定は、軸荷重と軸変位を記録し、変位制御による載荷方法で実験を行った。

各タイプの平均軸応力-軸ひずみ曲線を図-5に示す。試験結果より、3タイプの軸方向の弾性係数は $E_c = 6750 \text{ kgf/cm}^2$ であるが、最大軸圧縮応力は Type A が

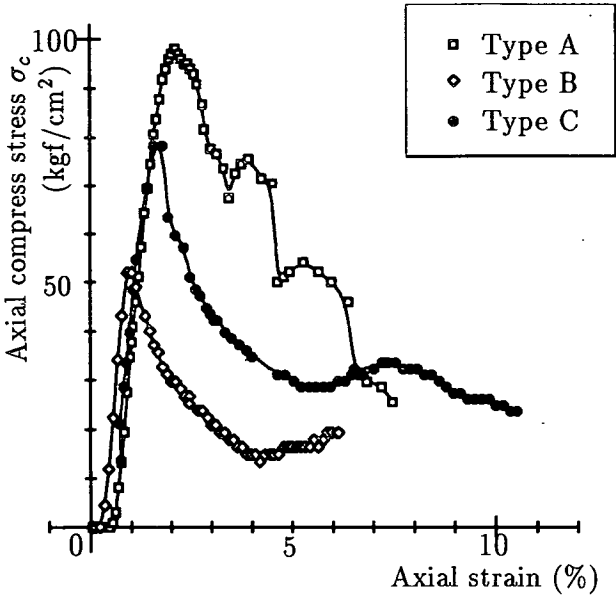


図-5 各タイプの平均軸圧縮応力-軸ひずみ曲線

表-2 軸圧縮試験結果

種類	Type A	Type B	Type C
供試体高さ $L(\text{cm})$	26.8	36.5	22.9
平均厚さ $t(\text{cm})$	0.855	0.705	0.625
半径 $R(\text{cm})$	3.225	3.280	3.140
断面 $A = 2\pi Rt(\text{cm}^2)$	17.3	14.5	12.3
形状			
平均最大荷重 (kgf)	1921	700.4	1261
最大応力 (kgf/cm ²)	98.0	51.9	78.3

98.0kgf/cm²、Type B が 78.3kgf/cm²、および Type C が 51.9kgf/cm²で、境界条件に鋭敏な感度を持つ結果を得た。各タイプの変形状態を以下に述べる。Type C は境界部で大きく変形し、上側の境界付近に発生した凸型変形が下側の境界付近では凹型の変形を発生させていた。またこの逆側の変形も確かめられ、エレファントフット型の座屈変形を確認した。

Type B は供試体の高さ中央部分に節が存在することにより、中間部の側方変位および座屈変形がどのように進行するのを見ることを実験目的とした。この供試体の上端の断面積は下端の0.851倍であった。供試体の座屈変形は上端の境界部付近で断面がほぼ2軸方向に対称に変形し始め、その後軸ひずみが1%に達したあたりから供試体の組織が縦に割れたが、中間部の節以下の組織に対する座屈変形は見受けられなかった。このように節が存在することにより断面変形を拘束し割裂の進行を防ぎ、全体の崩壊を抑制して局部座屈で留めていると考えられる。

両端に節を残した Type A では幾何学的特徴を持つ座

表-3 各手法による座屈荷重と降伏荷重

座屈荷重 (kgf)	Type A	Type B	Type C
実験値	1921	700	1261
有限要素 (0.3 倍)	2665	—	—
P_{min}	1545	866	604
P_Y	1935	1033	1318

屈変形となった。上端部の節の下部で面外変形が現れ、軸方向に1波と周方向に2波の座屈波形を確認した半波長は周方向に10cm、軸方向に12cm程度であった。座屈変形の状態は2軸方向に対して鏡映面を持ち、最終的に座屈変形の峰に沿って組織が割けた。

3.2 円筒節構造の弾性座屈解析

竹の座屈強度の再現性を確かめるにあたり、実際の竹筒は初期形状や材料分布の不整が存在するが均一な材料から成る完全系モデルとして解析することとする。また竹材は異方性材料であるが、ここでは簡便性を優先して等方性体と仮定し、Marc¹⁰⁾を用いて軸力載荷による円筒節構造の弾性座屈解析を行なった。

座屈実験において両端に節を持つ Type A を有限要素法の円筒シェルモデルとして取り扱う。要素番号75番の4節点要素を用い、メッシュ分割は周方向に36分割、高さ方向に20分割とし、実験で用いた供試体に基づいて筒厚さおよび円筒半径を高さに応じて一致するように要素を作成した。両端の節モデルは下端部では回転と変位を拘束した剛な節とし、上端部では断面変形を生じない剛要素を設定し z 方向変位以外の自由度は拘束した円筒竹節構造の座屈解析モデルを作成した。

解析結果は最小値の臨界荷重8885kgfを算出し、古典座屈理論と同様に0.3倍で耐荷力を失うとすると2665kgfと求められた(表-3参照)。座屈波形の半波数は周方向および軸方向とも2であり、上部の筒厚さと半径が下部より小さいために、波形位置が上半部に発生している。この解析結果は実験の座屈波形とよく類似し、境界部の節による断面拘束効果がよく現れていると言える。このように竹の円筒節構造の座屈波形の再現が確かめられた。

円筒座標系 (r, θ, z) に関する軸荷重 P のみが作用する座屈微分方程式より、最小座屈荷重 P_{min} は

$$P_{min} = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \times 4$$

で与えられる。また、円筒径厚比による材料の降伏荷重算定を求めるにあたり、Plantema¹²⁾より径厚比 R/t と材料の降伏応力の関係式

$$\frac{R}{t} \leq \frac{E}{16\sigma_Y}$$

を利用すると、参考とすべき降伏荷重は表-3のように求められる。

表-4 最小固有値の解析結果

	$\times 10^7(\text{kgf})$		
作用力	神 P585 上り	竹モデル	還元モデル
圧縮力(P_{cr})	2.56	2.94(1.14)	3.14(1.23)
圧縮と水平力($P \& H = P/3$)	0.67	0.66(0.99)	0.60(0.90)
水平力(H_{cr})	0.25	0.25(1.00)	0.23(0.92)
圧縮と水平力($H \& P = 3H$)	0.22	0.22(1.00)	0.20(0.91)

4. 竹かん基部構造を応用した円筒橋脚の検討

図-1に示す竹のかん基部の構造形態を理想の最適構造物と仮定し、震災で局部座屈を起こした鋼製橋脚「神 P585 上り」に適用し、このときの竹モデルおよびその特性をフィードバックさせた還元モデルの局部座屈に対する耐荷力を調査し、生物学的な観点からその環境下で最適な構造設計の一例を検討することとする。

橋脚番号「神 P585 上り」の円筒柱部(図-6(a))を解析の対象とし、これと同一の部材重量となるように円筒半径、板厚およびダイヤフラム間隔を実際の竹かん基部の形状(竹の基部から6パネル分を取り出した)に相似的に適合させ、図-6(b)に示すような橋脚モデルを作成した。すなわち、かん基部の1節間長はダイヤフラム間隔に相当し、円筒半径および板厚の変化はモウソウチクのかん基部の半径および筒厚さに対応させた。さらにこのかん基部モデルを橋脚「神 P585」の一定な円筒半径に還元したときの還元モデル(図-6(c))についても併せて構造解析を行なった。

解析は軸圧縮力 P 作用下の線形座屈解析、上端部に水平力 H が作用したときの座屈解析、および $P/H = 3$ の荷重分配比率を考慮した線形固有値解析を行なった。また、図-7,8,9には、それらに対応する座屈モードをそれぞれ示す。圧縮力に対しては、橋脚上部での周方向への局部座屈波形が認められ、水平力が加わると、橋脚下部での曲げ座屈に支配されていることが分かる。

表-4に各種モデルを各荷重作用下における最小固有値を示す。()内の数値は橋脚「神 P585」の値に対する比率を表す。橋脚 P585 をもとに体積一定の条件下で設計を試みた結果、竹かん基部モデルに水平力および圧縮と水平力が作用したときの固有値は橋脚の値とほぼ変わらない耐荷力を示すが、圧縮力については1.14倍に向上した。この設計では生物の形態構造を実際に橋脚に具現化することにより、軸圧縮力作用下の座屈耐荷力を高めた一例といえることができる。また、円筒半径を変化させることによる製作上の困難を考慮して、橋脚 P585 と同一の一定半径に還元させたモデルでは、圧縮耐荷力については改善されているが、水平力が作用するとその座屈耐荷力が低下している。これは竹のかん基部構造そのものから半径のみ変化させただけでは、やはり円筒の半径、肉厚、ダイヤフラム間隔の総合的なバランスが崩れてし

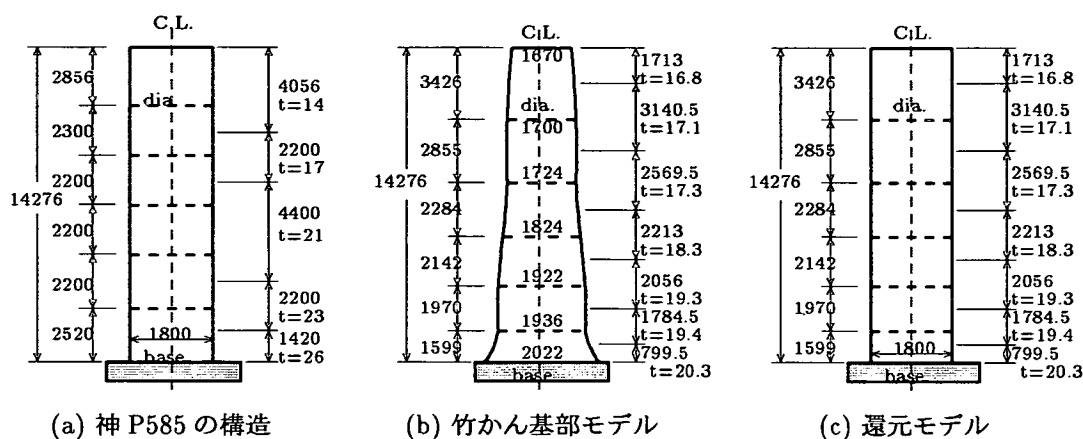


図-6 鋼製円筒橋脚解析モデル

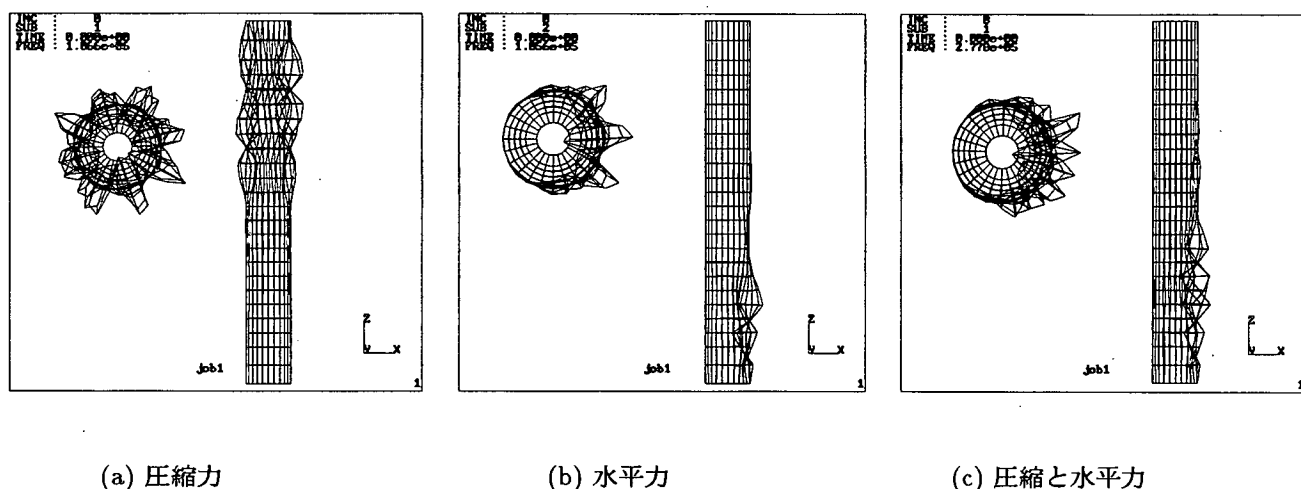


図-7 「神 P585 上り」における最小固有値の座屈変形モード

まうためと考えられる。

以上のように、本来の材料特性が鋼と異なる竹材の最適形状を鋼製橋脚に適用することが強度的なメリットを得ることになるか否かは疑問であったが、このような手法でも工学的な成果を得ることができた。特に竹かん基部モデルは最も大きい耐荷性能を示すが、神 P585 橋脚もそれに次ぐ性能を有し、本研究で行った線形座屈解析の範囲内では最適設計の達成度は両者とも比較的高いと言える。一方、還元モデルでは圧縮座屈耐力はかなり向上しているが、水平荷重に対する曲げ座屈耐力は不足しており、円筒橋脚の肉厚やダイヤフラム間隔に対するさらなる検討が必要と考えられる。

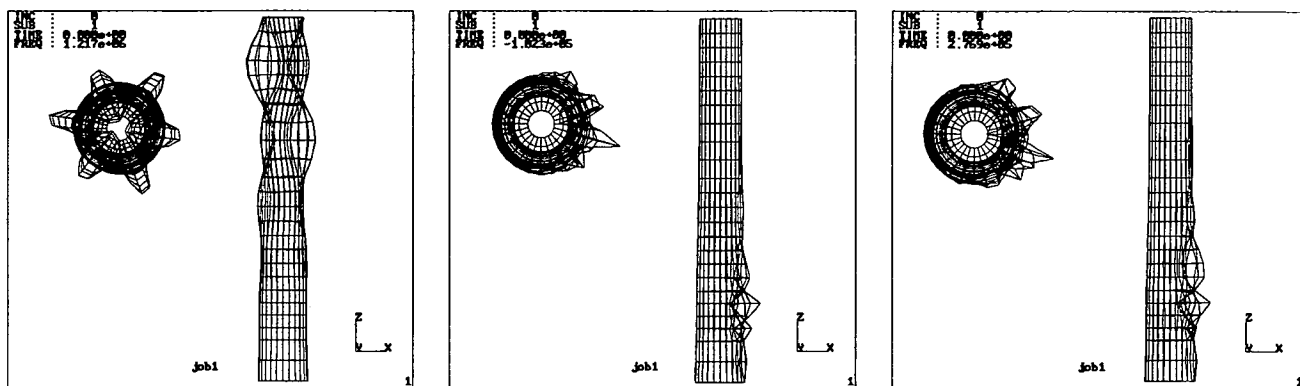
5. 結語

本研究は、モウソウチクの生体構造の観察を通して、円筒節構造の形態と強度特性を関連づけて以下の結果を得た。

1. モウソウチクの形状および枝分かれ部に対して力学的な考察を行い、かん部においては座屈実験と解析を通して竹の形態構造の最適性を理解した。
2. 竹の円筒節構造や節の不等間隔による構造形態は、その環境下で外力と平衡した結果として最適化された理想的な形状であった。これを鋼製円筒橋脚に適用することにより大きな耐荷性能を得ることができた。また、製作上の困難さを考慮して一定半径にフィードバックさせた還元モデルでは、竹かん基部モデルほどの性能は得られなかったが、テーパ肉厚分布やダイヤフラム間隔の改良によって耐荷力の向上が期待できる。

謝 辞

本研究で用いた「神 P585 上り」橋脚の詳細については、土木学会構造工学委員会構造工学震災調査特別委員会 WG2「非線形構造解析による鋼製橋脚のシミュレーション」(主査：依田照彦教授)を経て、阪神高速道路公団から図面の提供を頂いた。ここに謝意を表する。

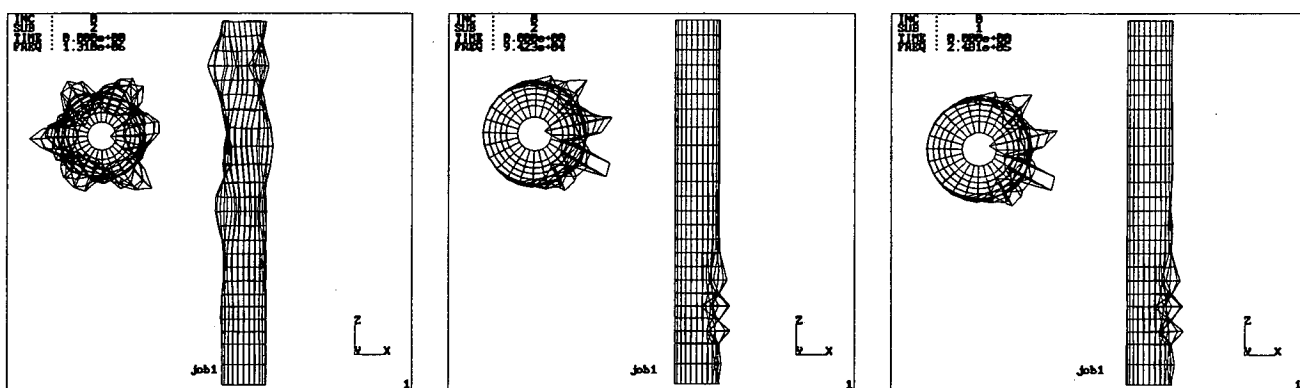


(a) 圧縮力

(b) 水平力

(c) 圧縮と水平力

図-8 竹かん基部モデルにおける最小固有値の座屈変形モード



(a) 圧縮力

(b) 水平力

(c) 圧縮と水平力

図-9 還元モデルにおける最小固有値の座屈変形モード

あとがき

本研究では、竹の形態構造の仕組みを工学的に理解することに力点をおき、完全軸対称系円筒断面についての線形座屈解析のみで検討したが、本来シェル構造は初期不整に敏感であることが知られており、また橋脚の耐力は、静的な強度のみならず動的な耐震性をも考慮して検討されなければならない。これらについては今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) バイオメカニズム学会編, 生物に学ぶバイオメカニズム, 工業調査会, 1987.
- 2) Roux, W. : Gesammelte Abhandlungen einer Entwicklung-mechanick der Organismen, Iu. II, Engelmann, 1895.
- 3) Wainwright, S. A. : Mechanical Design in Organisms, Edward Arnold, 268, 1976.
- 4) Hertel, H. : Structure-Form-Movement, Reinhold Pub. Co., 6, 1963.
- 5) 尾田 十八 : 竹のバイオメカニクス, バイオメカニズム学会誌, 5-1, pp.7-13, 1981.
- 6) Oda, J. : Minimum weight design problems of fiber-reinforced beam subjected to uniform bending, Trans. ASME., Ser. R., 107-1, pp.88-93, 1985.
- 7) 島地 謙・須藤 彰司・原田 浩 : 木材の組織, 216, 森北出版, 1976.
- 8) 佐伯 浩 : 走査電子顕微鏡図説 木材の構造, 日本林業技術協会, 1982.
- 9) 原田 浩, 木材の科学 1 木材の構造, 文永堂出版, 1990.
- 10) Marc マニュアル K6, Vol. A ~ E, 日本マーク (株), 1995.
- 11) 座屈設計のガイドライン作成小委員会 : 座屈設計のガイドライン, 土木学会鋼構造委員会 技報堂出版, 1988.
- 12) Plantema, F.J. : Report 280, Nat. Luchtvaartlaboratorium, Amsterdam, 1946.

(1997 年 8 月 29 日 受付)