

構造形態と人間感覚に関する考察

Basic Considerations on the Optimal Configuration of structures and Human Impressions

長谷川 明

Akira HASEGAWA¹

¹工博 八戸工業大学教授 工学部土木工学科 (〒031 青森県八戸市妙字大開88-1)

There are many configurations for structures. We can find the optimal configuration of the structure, for example, the optimal positions of the supports of beam which give us the minimum of the bending moment, or give us the minimum of the strain energy in the beam. On the other hand, we, human, have some impressions for the structure. According to the configuration, we feel that the structure is dangerous, safe or economical et al..

In this study, we treat two beams (one has two supports and another has three supports in the beams) and trusses (four kinds of two member trusses) as the structures, and we consider the relation of the optimal configurations obtained by the mechanical conditions and the configurations obtained from questionnaires. We discuss the position of the supports in case of the beams and the angles between two members in case of the trusses.

key words : configurations of structures, human impressions, optimal configurations

1. はじめに

構造物の形態は、その構造物が果たす役割、力学的な条件あるいは周辺との景観など様々な観点から検討する必要がある。実際の構造物の形態や寸法は、構造物の機能性、安全性、経済性および美観などの多くの条件を満足するものとして設計される。従来、これら形態の決定は、与えられる機能を有する形態の中から、経済性と安全性を照合し、周辺環境との調和を考慮する手順で実施されてきている。しかし、このような構造物が人間社会の中に調和して存在するためには、構造物の形態に対する人間の印象や感覚を考慮する必要があると考えられる。従来考慮されてきた力学的計算に基づく安全性や経済性などの判断基準とともに、この構造形態から受ける人間の感覚についても検討が必要と考える。これまでの構造景観に関する研究においては、特に美しいという感覚について検討されてきているが、構造物の役割を考えると、安心や不安などの印象を人間は受けると考えられる。このため、人間の感覚における力学的な要素の安心や不安という感覚を与える形態の力学的な検討が必要である。このような構造形態に対する人間の感覚は、生まれながらにして有する部分と、成長に伴う学習による部分からなると考えられる。このため、年齢や性別によって、その感

覚は異なることが考えられる。

そこで、本論は、構造として力学的条件が簡単なはりトラスを選び、安全性や経済性と関係が深い力学的条件から望ましい形態と人間が感覚的に優れていると考える形態を、それぞれ計算とアンケートから求め、比較考察したものである。

2. 対象モデル

対象モデルは、ごく簡単なモデルとし、図-1に示す支点数の異なる2種類のはりと、集中荷重を受ける4種類の2部材トラスである。

a) はりA

2つの支点を持つ等分布荷重を受ける等断面張り出しはりである。左右対称構造とし、張り出し部 a が全長 L に対してどのような値であればよいかを検討することとする。設計変数を支間比 a/L と考える。

b) はりB

はりAと同様のはりであるが、中間にも支点を持ち、両脇の支点を含め3つの支点を対称にもつ。はりAと同じく、設計変数を支間比 a/L と考える。

c) トラスA

水平面に立てられた2本の部材で鉛直荷重を支える構造である。荷重載荷点の高さ H が固定されており、部

材角 θ を設計変数と考える。

d) トラスB

壁面に取り付けられた2本の部材で鉛直荷重を支える構造である。荷重載荷点と壁面の間隔 L が固定されており、部材角 θ を設計変数と考える。2本の部材は水平面から $\theta/2$ だけそれぞれ傾いている。トラスAと同じ置き方をすれば、トラスAは鉛直荷重、トラスBは水平荷重を受けている点で異なっている。

e) トラスC

壁面に取り付けられた2本の部材で鉛直荷重を支える構造である。荷重と壁面の間隔 L が固定されており、部材角 θ を設計変数と考える。下側の部材は壁面に対し垂直に取り付けられている。

f) トラスD

壁面に取り付けられた2本の部材で鉛直荷重を支える構造である。荷重載荷点と壁面の間隔 L が固定されており、部材角 θ を設計変数と考える。上側の部材は壁面に対し垂直に取り付けられている。

3. 人間感覚から求められる形態

(1) アンケートの方法

人間が形態からどのような感覚を受けるかについてはアンケートによって調査した。アンケートでは6種類の構造形態について、はりでは支間比を0.1ずつ異なる図から、トラスでは部材角が 10° ずつ異なる図からそれぞれ該当するものを選ぶ方法で回答する方法をとった。トラスでは鋭角な部材角を避け θ を 10° から 60° とした。6種類それぞれの構造について、1) 一番安心な感じがするもの、2) 一番お金がかかりにくいもの、および3) 一番不安な感じがするものを選ぶものとした。また、それぞれ選択理由についても選択肢を設け選ぶものとした。図-2は、はりAのアンケートで使用した図の一部である。等分布荷重は自動車を並べて表示した。

アンケートの対象については、回答が性別や年齢に影響あることが考えられるため、これらを考慮した選択を行った。アンケートの有効回答数は798件で、こ

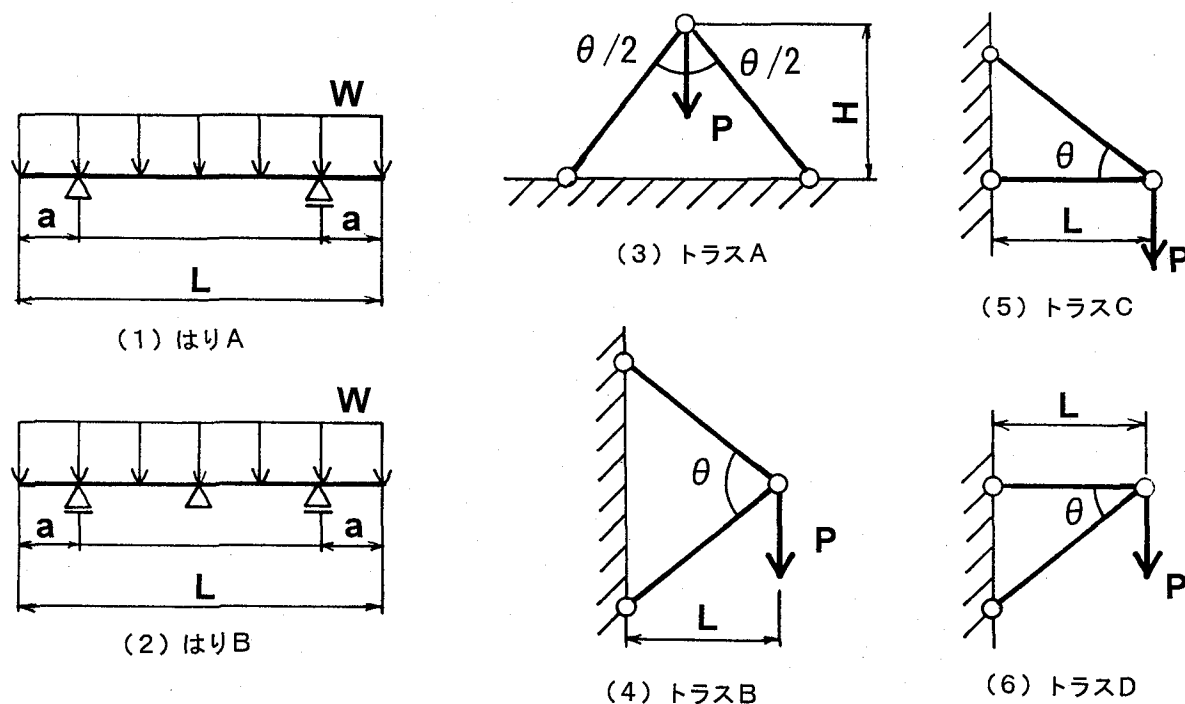


図-1 対象とした6種類の構造

表-1 アンケート回答者構成

	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代	計
男	42	118	25	101	16	47	11	360
女	48	130	56	130	12	48	7	431
計	90	248	81	231	28	95	18	791

配布数916 うち有効回答数791 有効回答率86.4%

れは配布数916に対し87.1%の回答率となっている。回答者の構成を表-1に示す。これによると50代と70代の回答数がそのほかの年代に比べ少ない。

(2) アンケートの結果

ここではアンケート集計の中から得られた主な結果について述べる。

1) 図-3 (a) は、はりAについて一番安心な感じがする形態の回答結果である。この図によると性別に関わらず、支間比 $a/L=0.2$ を選んだものが最も多く、次に0.1が多いことが示されている。この選択理由としては71%の人がバランスが良いことをあげてい

る。この平均値は0.16である。性別および年齢別の平均値を示した右図を見ると、0.13(10代男子)から0.21(50代女子)まで幅のある結果となっているが、若年層が小さな値をとっている。

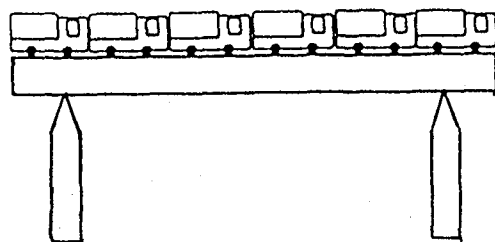
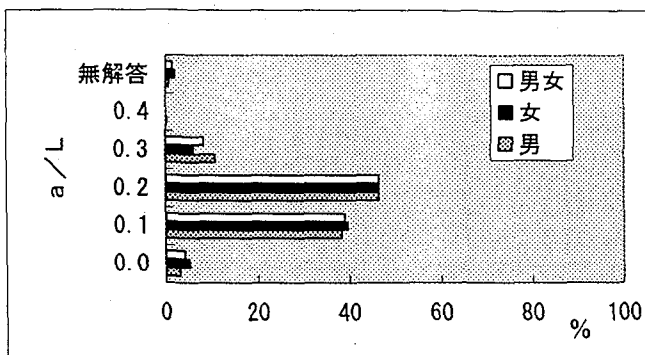
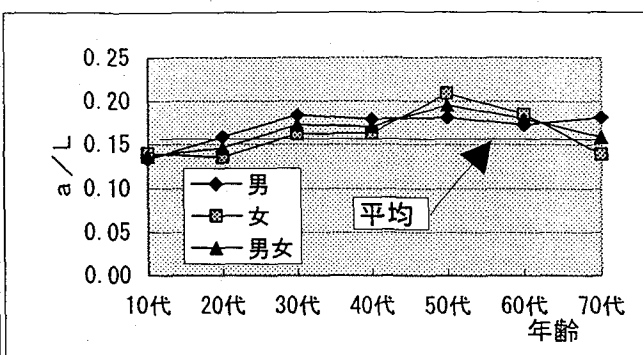


図-2 アンケートの一例 (はりAの場合)

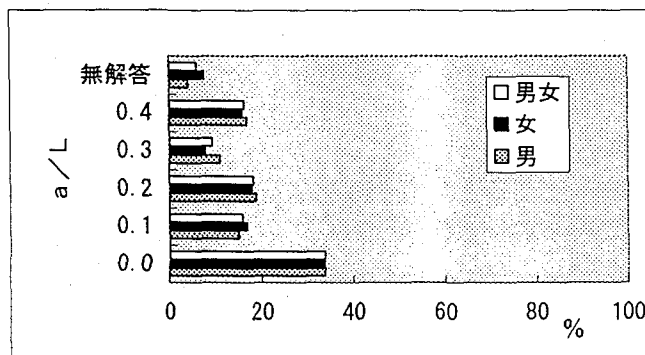


回答状況

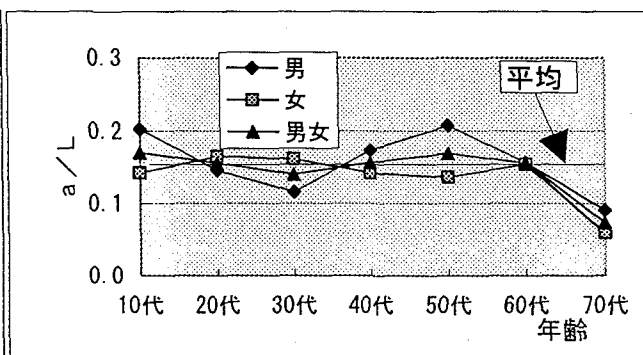


回答の平均値

図-3 (a) はりA 最も安心な形態

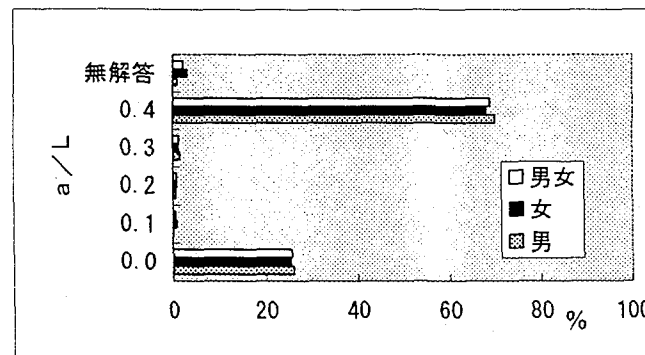


回答状況

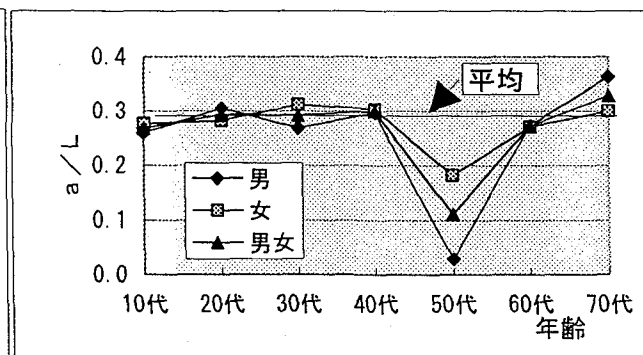


回答の平均値

図-3 (b) はりA 最も経済的な形態



回答状況



回答の平均値

図-3 (c) はりA 最も不安な形態

2) 図-3 (b) から、はりAについて一番経済的と答えた支間の平均値は、ほぼ一番安心な感じがする支間比と同一であったが、支間比の選択にはばらつきが大きいことが示されている。このため、選択理由も、間隔が広い (29%)、バランスがよい (24%)、間隔が狭い (17%) など卓越した回答理由は見あたらない。

3) 図-3 (c) から、はりAについて一番不安な感じがするものとしては、69%の人が、2つの支点が中央に寄っている支間比0.4を選んでいることがわかる。この理由としては、わずかな荷重の変化で転倒することを意識して回答していると考えられる。一方26%の人が支点が両端にあるとき、すなわち単純ば

りの形態を不安であると答えている。これは、支点がはずれる不安から選ばれたものと考えられる。

4) 3支点を有するはりBの場合を、はりAの場合と比較すると、安心な感じがする支間比では図-4のように0.1を選んだ回答が70%を占め、図-5に示すように、はりAに比べ小さな支間比を選んでいることが示されている。一方、不安な感じがする支間比では、81%の回答が3支点が中央に寄った形態を選び、両端に支点がある形態を選ぶ回答は、はりAに比べ半減している。これは、はりBでは両端に支点がある場合でも3番目の支点が中央にあるため不安感を与えないことによるものと考えられる。

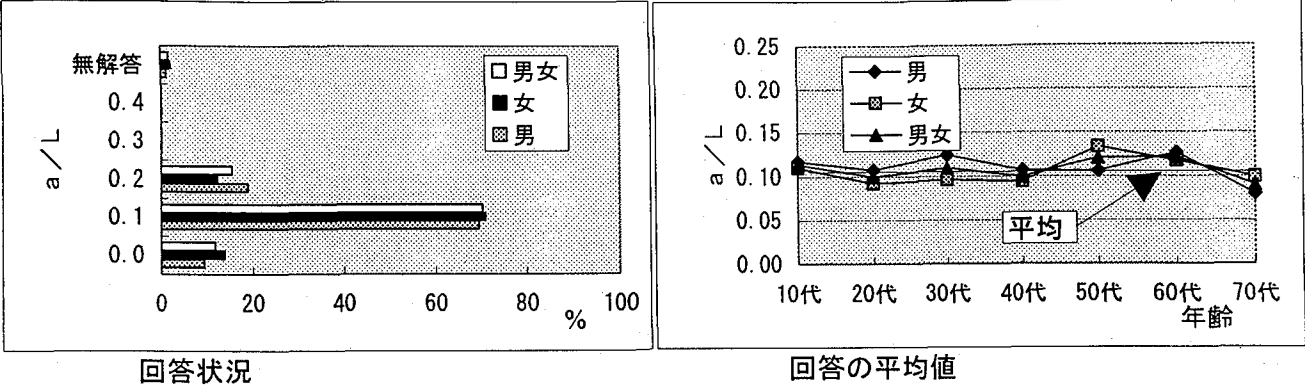


図-4 はりB 最も安心な形態

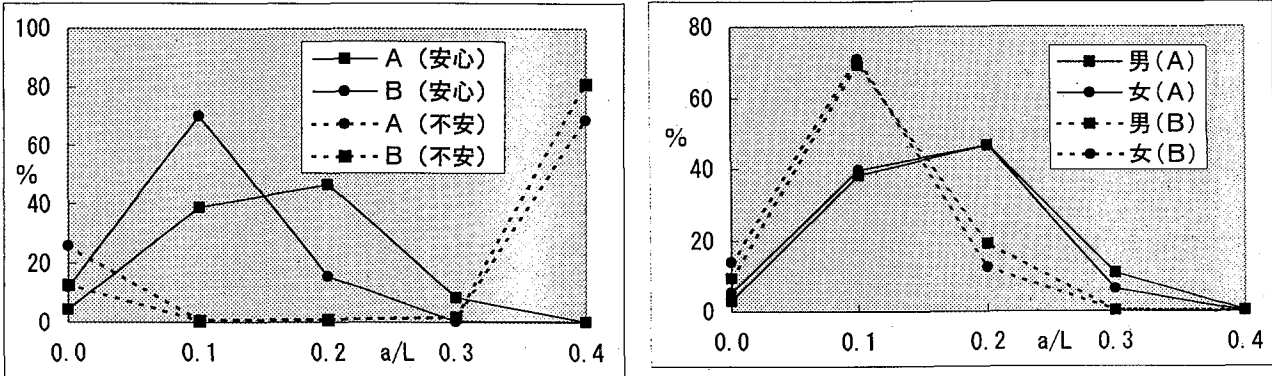


図-5 安心な形態と不安な形態 (はりAとB, 全回答)

図-6 はりAとBの安心な形態の男女別回答状況

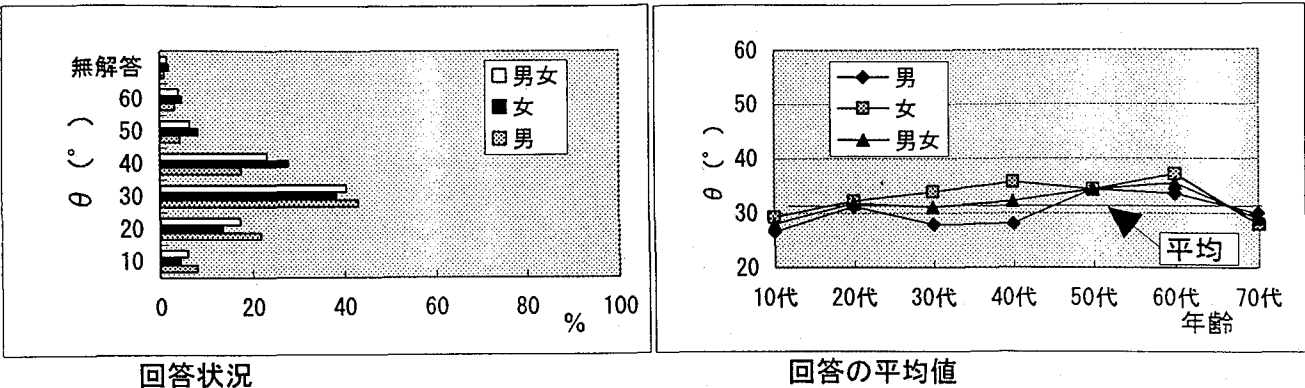


図-7 トラスA 最も安心な形態

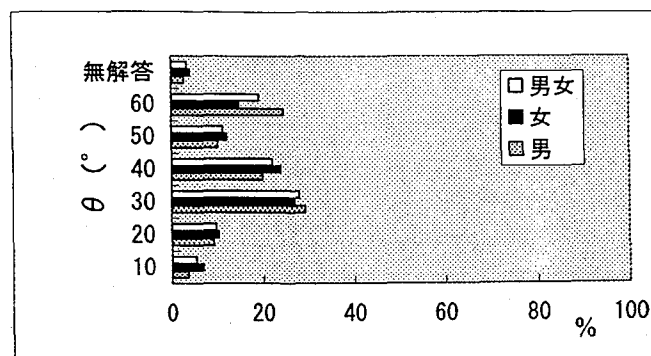
図-6に、はりA、Bの最も安心な支間比の男女別回答状況を示す。この図によれば、わずかながら男子の方が大きな支間比を選択していることが示されている。

5) トラスAでは、安心な感じを与える部材角として 30° を選ぶ回答が図-7に示すように41%で最も多い。経済的な部材角としては、61%が部材長が最も短い 10° を選んでいる。不安な部材角としては 60° が68%、 10° が25%となっており、 60° を回答したものは底面の滑動を、 10° を選んだものは部材の転倒をそれぞれ不安な理由として考えたことが推測される。

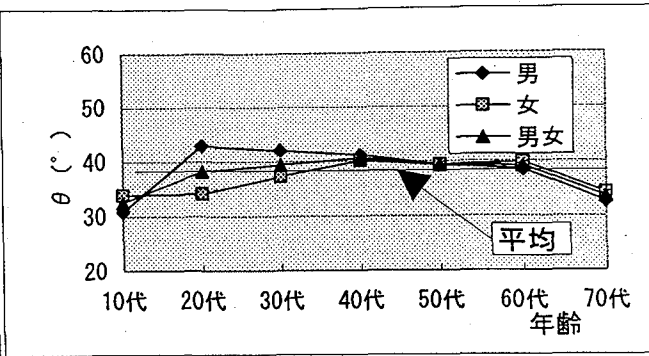
6) トラスBは、壁面に取り付けられたトラスである。

図-8に示すように、得られた回答は、安心な角度としては 30° 、経済的な角度としては 10° であって、ほぼトラスAと同じ結果となっている。しかし、不安な角度として選ばれたのは 10° が61%、 60° が29%で、トラスAの場合とは逆の選択となっている。なお、10代の男女と70代女子が他の年代とは異なった回答を寄せている。

7) 図-9、10にトラスC、Dに対し最も安心な形態の回答を示す。70代の回答を除くと両者の回答は非常に近いことがわかる。トラスCとDは、部材の軸力の圧縮・引っ張り異なるだけの構造である。2つの構造に対する回答はいずれも同様に安心な感じを与

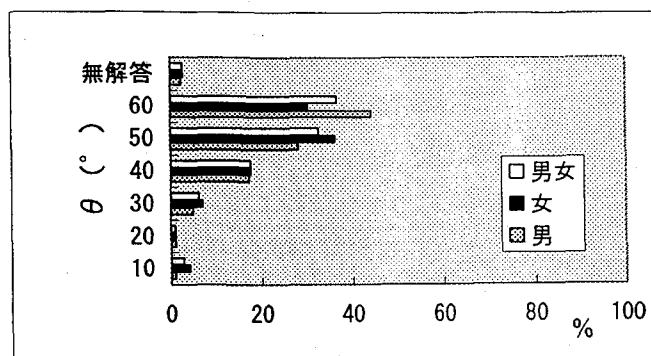


回答状況

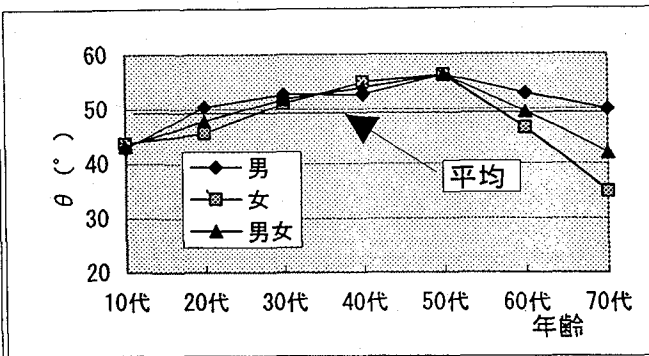


回答の平均値

図-8 トラスB 最も安心な形態

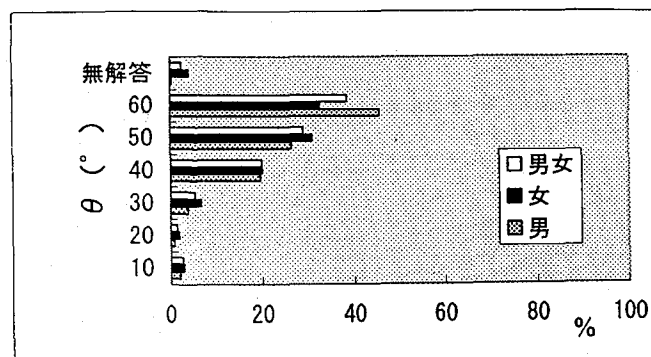


回答状況

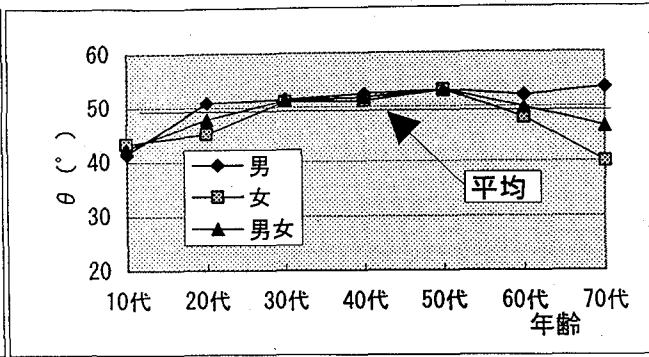


回答の平均値

図-9 トラスC 最も安心な形態



回答状況



回答の平均値

図-10 トラスD 最も安心な形態

えるものは 60° 、経済的なものは 10° 、不安な感じを与えるのは 10° でそれぞれ最も多い回答があった。この2つの構造に対する回答には他の4つの構造の回答にあるような大きく分散した回答は見られない。

安心な角度の平均値はいずれも 49.2° で一致した回答が得られた。なお、10代男女の安心な感じを与える形態に関する回答は、トラスC、Dのいずれの場合も他の年代に比べて平均値で 7° から 10° 小さい角度を選んでいる。

また、図-11に示すトラスC、Dの最も安心な形態および最も不安な形態の年齢別回答平均値を見ると、若年者と高齢者の回答が近い値を示し、中間年齢層とは異なっていることがわかる。この図によれば、中間年齢層の方が安心な形態と不安な形態を明確に区別していると考えられる。

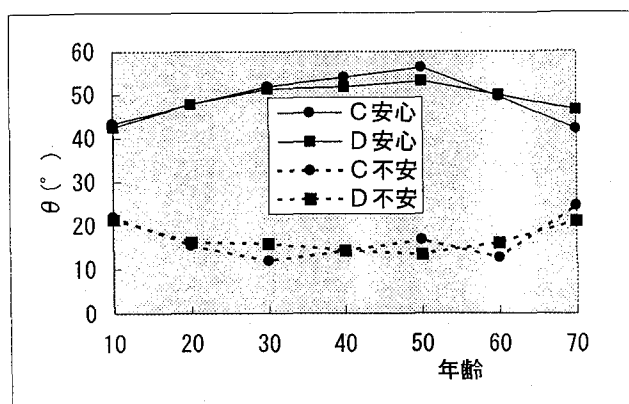


図-11 トラスC、Dの安心、不安な形態の年齢別回答平均値

4. 力学的な計算による最適な構造形態

力学的な条件による最適な構造形態を図-1で示した6種類の構造形態について計算した。最適な構造形態としては、次の2つの力学的な基準を設けた。

1) 許容応力から必要とされる断面を求め、構造が最小重量で設計される形態。はりの場合には、等断面ばりと考えていることから、はりに発生する最大曲げモーメントが最小となる形態である。また、トラスでは軸力によって計算される必要な部材体積が最小となる形態である。ここでは**最小重量形態**と呼ぶ。なお、許容応力は圧縮、引っ張りともに同一の値をとり、一定値であるとしている。

2) 与えられる荷重によって発生するひずみエネルギーが最小となる形態。ここでは**最小ひずみエネルギー形態**と呼ぶ。

(1) はりの場合

a) 最小重量形態

曲げ応力 σ が曲げモーメント M と弾性係数 w から、

$$\sigma = M/w \quad (1)$$

で計算されることから、はりに発生する曲げモーメント M が最小となる形態を求めればよいことになる。図-12は、はりAの支間比 a/L を変化させたときの曲げモーメント図を描いたものである。また、図-13ははりBの支間比 a/L を変化させたときの曲げモーメント図を描いたものである。計算によると、最小重量形態を与える支間比 a/L は、はりAで0.207、はりBで0.117である。

b) 最小ひずみエネルギー形態

はりに発生するひずみエネルギー U を曲げモーメント M によるものと考え、曲げ剛性 EI と部材長 l から、

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{EI} dx \quad (2)$$

として計算される。はりA、はりBの支間比を変化さ

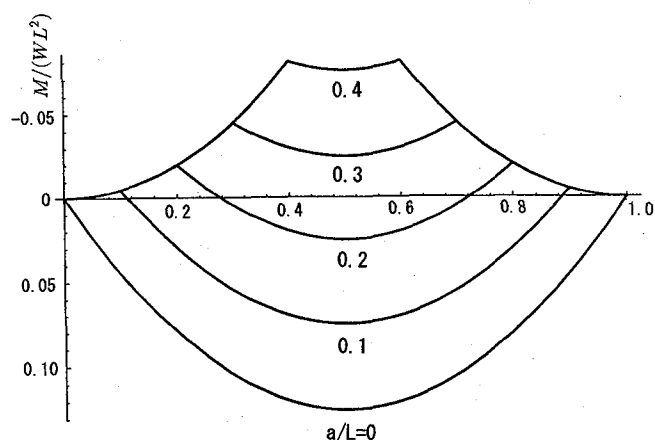


図-12 はりAの支間比 a/L を変化させたときの曲げモーメント図、縦軸は曲げモーメント M を WL^2 で除した数値

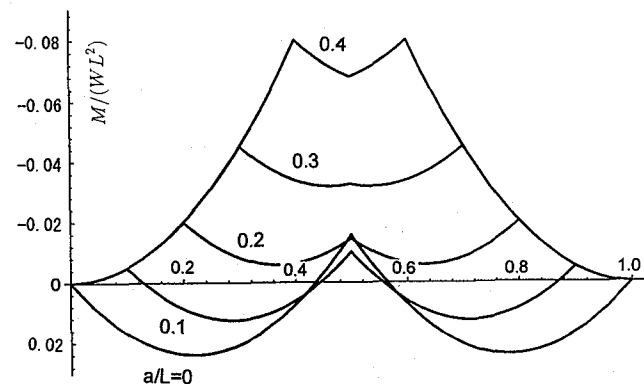


図-13 はりBの支間比 a/L を変化させたときの曲げモーメント図、縦軸は曲げモーメント M を WL^2 で除した数値

せたときのひずみエネルギーを描くとそれぞれ図-14, 15となる。この計算から、はりAおよびはりBに発生するひずみエネルギーが最小となる支間比は、それぞれ0.224および0.146であることが示されている。

(2) トラスの場合

a) 最小重量形態

トラスの応力は、軸力 N_i と断面積 A_i から

$$\sigma = N_i / A_i \tag{3}$$

と計算されることから、必要とする体積は部材数 n 、部材長 l_i および許容応力 σ_a を使って、

$$V = \sum_{i=1}^n N_i l_i / \sigma_a \tag{4}$$

となる。この体積を部材角 θ で微分して、最小体積を与える部材角を求めると、トラスA, B, CおよびDで、それぞれ 0° , 90° , 54.7° および 54.7° となる。トラスCとDでは部材力は圧縮と引っ張りの違いだけで絶対値は同一である。

b) 最小ひずみエネルギー形態

トラスのひずみエネルギーは、軸力によって次のように計算される。

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2AE} \tag{5}$$

このため、部材の応力が許容応力 σ_a で設計されていると、

$$U = \frac{\sigma_a^2}{2E} V \tag{6}$$

となり、許容応力 σ_a と弾性係数 E が一定であるときは、部材の体積に比例することがわかる。このため、トラスの最小ひずみエネルギー形態は最小重量形態と同一となる。

(3) 力学的最適値と人間感覚の比較

表-2にアンケートの平均値と力学的最適値の比較を示す。この表から次のことが言える。

- 1) はりA, はりBの結果から最も安心な支間比は、力学的な最適値に比べ小さい値をとっている。これは、はりに発生する曲げモーメントが正側すなわち下向きに凸となる変形を起こす支間比を選んでいることを意味する。
- 2) トラスA, トラスBの力学的最適値は、不安を感じさせる角度に近いものとなっており、アンケートから得られる安心できる角度や経済的な角度とは大きく異なっている。
- 3) トラスC, トラスDの安心できる部材角は、力学的最適値に近い値となっている。

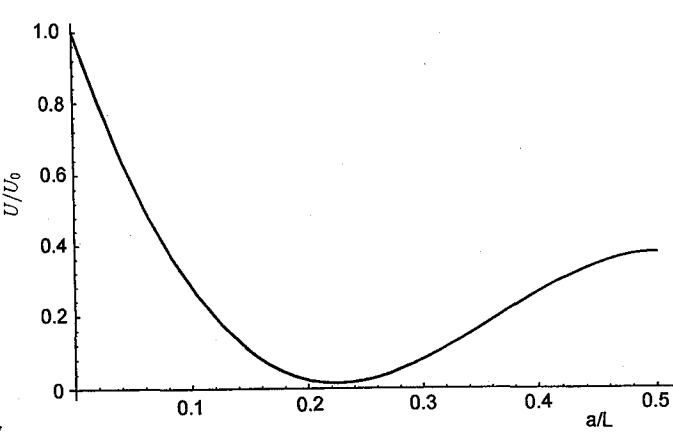


図-14 はりAの支間比 a/L を変化させたときのひずみエネルギー、 U_0 は単純ばりの時のひずみエネルギー

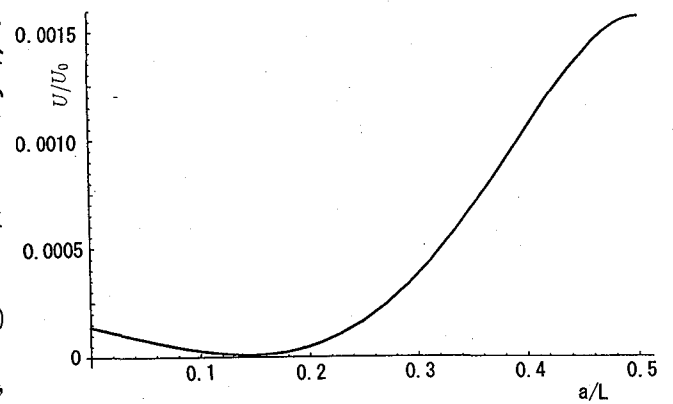


図-15 はりBの支間比 a/L を変化させたときのひずみエネルギー、 U_0 は単純ばりの時のひずみエネルギー

表-2 力学的最適値とアンケートの平均

構造の種類	人間感覚	力学的最適値
はりA a/L	安心 0.160	最小重量 0.207
	経済的 0.156	最小ひずみエネルギー 0.224
	不安 0.289	
はりB a/L	安心 0.105	最小重量 0.117
	経済的 0.164	最小ひずみエネルギー 0.146
	不安 0.343	
トラスA $\theta (^\circ)$	安心 31.9	最小重量 0.0
	経済的 20.3	最小ひずみエネルギー 0.0
	不安 46.2	
トラスB $\theta (^\circ)$	安心 38.6	最小重量 90.0
	経済的 22.9	最小ひずみエネルギー 90.0
	不安 27.0	
トラスC $\theta (^\circ)$	安心 49.2	最小重量 54.7
	経済的 25.1	最小ひずみエネルギー 54.7
	不安 15.5	
トラスD $\theta (^\circ)$	安心 49.2	最小重量 54.7
	経済的 24.3	最小ひずみエネルギー 54.7
	不安 16.1	

5. 結論

本研究は、力学的条件からみた最適な構造形態と人間の感覚から得られる望ましい構造形態を、ごく簡単な構造について、それぞれ計算とアンケートによって求め比較検討したものである。本研究をまとめると次のようになる。

- 1) 安心な支間比については、力学的な最適値より張り出し部が小さな支間比を選んでいる。これは、はりに発生する曲げモーメントが正側すなわち下向きに凸となる変形を起こす支間比を選んでいることを意味する。2支点のはりでは若年層がより小さい値を選んでいる。
- 2) 不安なはりとしては、支点が中央に寄ったはりに多くの回答（2支点で69%、3支点で81%）が集まった。その一方で、両端に支点がある場合を選んだ回答が2支点、3支点でそれぞれ26%、13%あった。
- 3) 経済的と考える支間比は、安心なはりや不安なはりとは異なって、回答が分散していた。
- 4) はりAとはりBの回答によれば、支点数を考慮した回答が寄せられていることがわかった。
- 5) トラスAとトラスBでは、安心できる部材角として 30° を選ぶ回答が最も多いが、不安な角度としては 10° と 60° に回答が分かれた。
- 6) トラスCとトラスDに対し、安心できる部材角の平

均値は一致し、力学的最適値よりやや小さい値をとった。

7) トラスCとトラスDの回答には、他で見られた大きく分散した回答はなかった。

8) 構造によっては、安心な形態や不安な形態として選ばれた形態に、性別あるいは年齢による違いを示すものが見られた。

今回のアンケートでは、基礎的な構造に対する安全や経済性の感覚が、性別や年齢によってどのような違いがあるかを調査の対象とした。このことについては、アンケート結果の一部に若干違いが見られるものの、明確な傾向は明らかではない。今後さらに分析する必要があると考えている。

謝辞： 本アンケートは、八戸市立旭ヶ丘小学校、八戸短期大学、八戸老人福祉大学および八戸工業大学第一高等学校の協力を得て実施したものである。また、アンケートの集計、整理について八戸工業大学学生の協力を得た。ご協力いただいた各位に対して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 阿部雅人, 山下葉, 篠原修: 非対称橋梁の形態特性とデザイン手法, 構造工学論文集, vol.37A, pp.733-745
- 2) 加藤雅史, 田中信治, 大場邦弘: アンケートに基づく橋梁の景観評価に関する一考察, 構造工学論文集, vol.36A, pp.535-542

(1995年9月18日 受付)