

トラス梁の試設計—載荷実験によるモデル化手法の検証と数値解析シミュレーション—

亀井 陽慧¹, 田村 駿²

¹ 洛南高等学校, ² 兵庫県立神戸高等学校

要旨

トラス構造は軸力のみを受ける棒部材から成る、剛性と強度の高い骨組を経済的に構成できる⁽¹⁾ 構法である。トラス構造は駅などの大空間建築物を始めとして身の回りの様々な構造物に利用されている。

本研究では、まずバネを用いた実験と構造解析ソフトウェアによる数値解析を通してトラスの基本的特性を理解するとともに、構造解析ソフトウェア上でのモデル化手法を検証した。

検証したモデル化手法を用いてトラス梁を試設計し、一定条件下で効率よくたわみを低減できる部材構成を検討した。その結果、梁の桁高を高くすることにより効果的にたわみが減少した。また、斜材を追加する位置を工夫することでもたわみを制御できることがわかった。

重要語句：トラス構造、載荷実験、構造解析、たわみ、許容応力度

序論

建築物には、その自重や積載荷重を常時支持する一方、地震などの短期的外力に対しても効率よく抵抗する目的で様々な構法が採用される。今回検討の対象とするトラス構造は広く用いられる構造形式であり、高い剛性と強度を経済的に得ることができる。しかしながら、そのようなトラス構造の利点を享受するためには、設計者がその特性を深く理解することが必要不可欠である。

近年、建築物の構造設計はコンピュータおよび計算手法の発達により構造解析ソフトウェアを用いて行うことが一般的である。構造解析にあたっては、対象とする建築物を適切にモデル化する必要があり、建築物のモデル化方法を、実験的に得られた部材や建築物全体の挙動と比較検討する研究も広く行われている。^{例えば(2)}

本研究では、バネにより構成した簡単なトラス構造の模型実験を行った。次に、実験結果と比較することにより、構造解析ソフトウェアにおけるモデル化手法を検証

した。さらに、実大トラス梁の試設計と挙動解析を行い、合理的なトラス梁の設計方法について検討した。

バネを用いたトラスの載荷実験

概要

バネを用いて簡易なトラスを作成し、節点に荷重を作用させる。節点での変位を測定し、実測で得られた鉛直変位を数値解析シミュレーション結果と比較する。

バネ単体の力学挙動

バネを部材として用いた理由は、バネは軸方向力に対して線形弾性的に挙動し、かつ低剛性であり変形が大きく、変位等が測定しやすいためである。

今回使用するバネに対して、150 g, 200 g, 300 g, 400 g, 450 g, 500 gのおもりを吊り下げ、その伸びを測定した。試験の結果、図1のグラフが得られた。なお、図ではおもりの重さを引張力としてN(ニュートン)で表している。図に点線で示した直線は、最小二乗法によって求めた近似直線である。

使用したバネは、引張軸力に対しては伸びをそのまま測定できる図2(A)が、圧縮時においてたわみが生じる図2(B)ため補剛材を挿入して圧縮時のたわみを抑制した図2(C)。

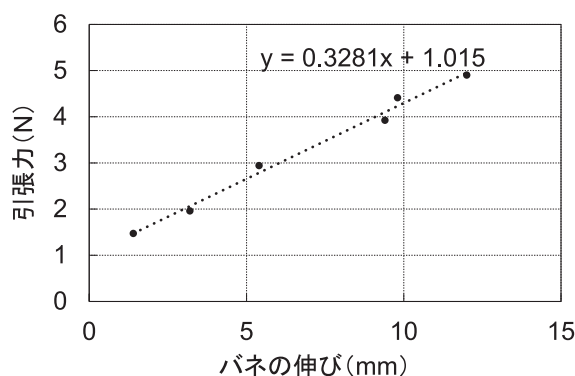


図1. バネの伸びと引張力 (おもりの重さ) の関係

内容に関する連絡先：

西山 峰広 (京都大学大学院工学研究科)

mn@archi.kyoto-u.ac.jp

なお、今回使用した構造解析ソフトウェアはSNAP Ver.6である。

载荷実験

図3に示すようなバネ2本からなる基本的なトラスを製作した。2本のバネが接合される節点に1～4Nの鉛直荷重を1N刻みで作用させ鉛直変位を測定した。測定結果を図4に示す。

使用したバネは、図1のようにほぼ線形に挙動するので鉛直荷重と鉛直変位は小さい変位の範囲では比例するはずである。しかし、直線関係とはならなかった原因として、節点が完全なピンとなっていなかったこと、バネと木製パネルとの摩擦の影響が存在すること、変位の大きい範囲では非弾性挙動となることが挙げられる。

数値解析

図3のトラスを数値解析ソフトウェア上でモデル化し、鉛直下向き荷重1N、2N、3N、4Nに対する水平及び鉛直変位を計算した。バネ定数には、図1で得られた0.328 N/mmを用いた。なおバネの自重は無視した。

数値解析の結果のうち4N時の変形図を図5に示す。

比較・評価

実測値と解析での値を比較して図6に示す。

実験において、バネ両端にある直線部に局所的な変形が見られた(図7)。これにより測定値が解析値よりも大きくなったと考えられる。解析結果から得られる鉛直変位は鉛直荷重に比例している。

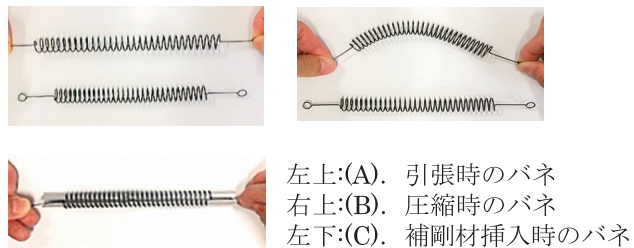


図2. 実験で使ったバネ

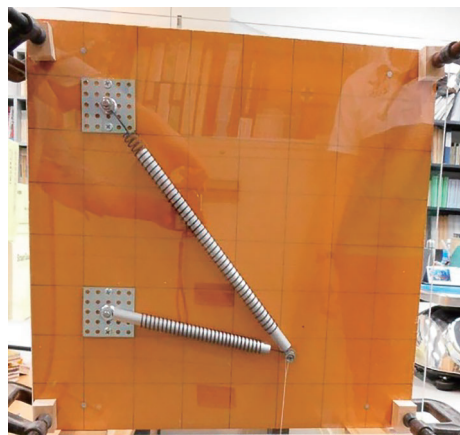


図3. 作成したトラス

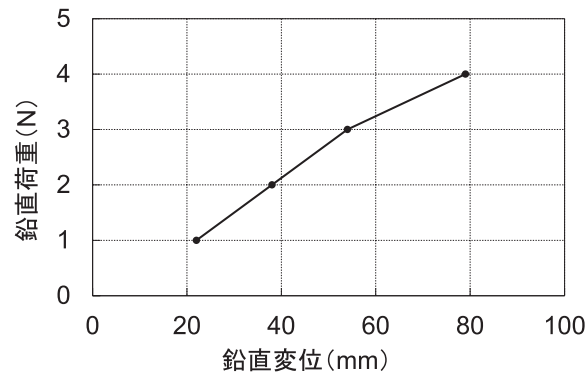


図4. トラス節点に対する鉛直荷重と鉛直変位

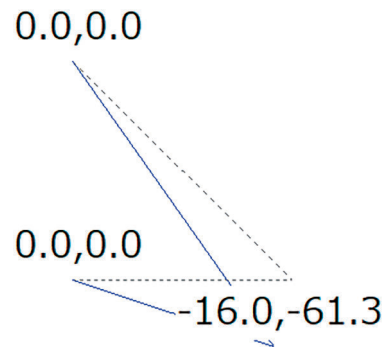


図5. 4N時の解析結果

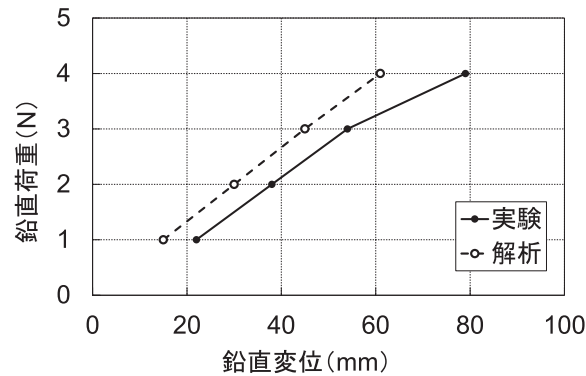


図6. 実測値と解析結果の比較

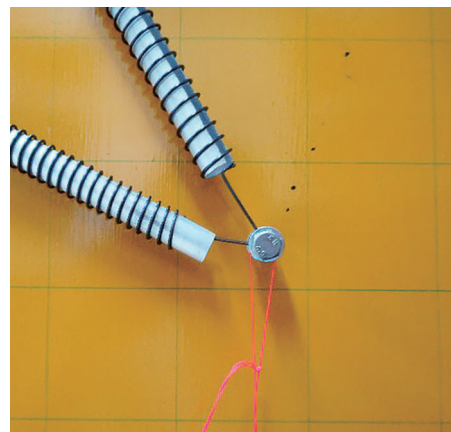


図7. バネの局所的な変形

トラス梁の試設計

概要

以下のような設計条件を満足するようなトラス梁を試設計した。

- ・ 鋼管によって構成されるスパン 10 m の単純支持梁とする。
- ・ 50 kN/m の鉛直荷重に対し、梁中央でのたわみをスパン長の 1/300 (33 mm) 以下に制限する。
- ・ 各部材に生じる応力を許容応力度以下とする。圧縮側については座屈を考慮した許容応力度を用いる。
- ・ トラス梁下辺の隣り合う節点間の中央までをその節点の支配長さとし、その支配長さに比例した鉛直荷重が各節点に作用する。

なお各部材の許容引張応力度 f_t 、および許容圧縮応力度 f_c は、 $F=235\text{MPa}$ として、(1)～(3)式で算定した。

$$f_t = \frac{F}{1.5} \quad (1)$$

$$f_c = \frac{\left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right\}F}{\nu} \quad (\lambda \leq \Lambda) \quad (2)$$

$$f_c = \frac{0.277F}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2} \quad (\lambda > \Lambda) \quad (3)$$

ここで

$$\nu = \frac{3}{2} + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2, \quad \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

λ : 細長比

E : ヤング係数 ($2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)

Λ : 限界細長比

検討に用いたモデルを図8～17に示す。正三角形を組み合わせたモデル[1]を基本形とした。モデル[1]の桁高を変更したモデル[2]および[3]、三角形の形状を変更した[4]および[5]、2本の斜材を追加した[6]～[10]を作製し、荷重が作用した際の挙動を比較した。

すべてのトラス材に外径216.3 mm、厚さ8 mmの鋼管(図18)を用いた。

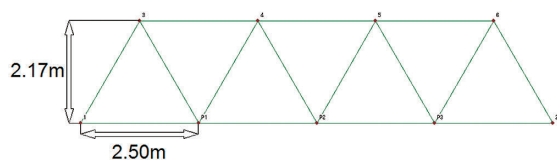


図8. モデル[1]

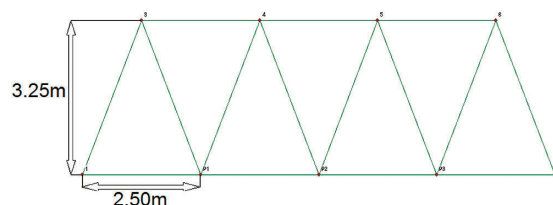


図9. モデル[2]

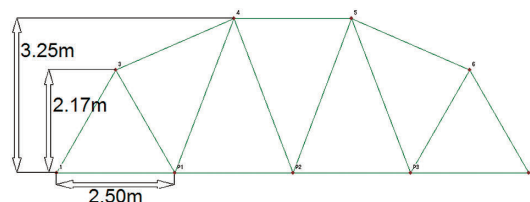


図10. モデル[3]

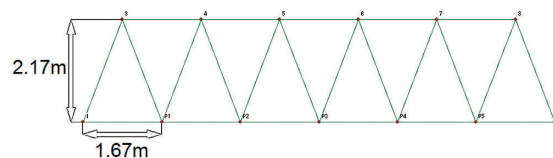


図11. モデル[4]

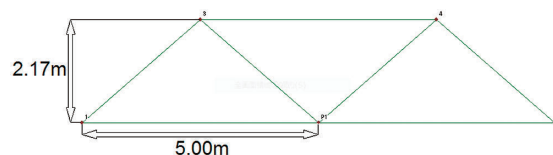


図12. モデル[5]

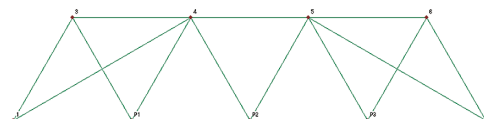


図13. モデル[6]

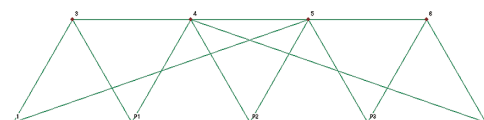


図14. モデル[7]

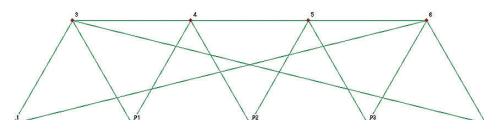


図15. モデル[8]

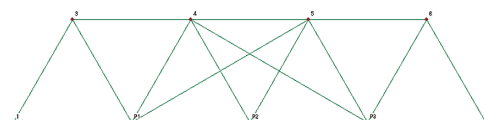


図16. モデル[9]

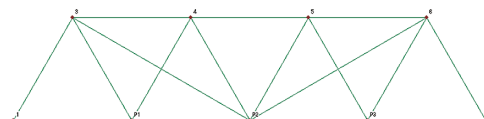


図17. モデル[10]

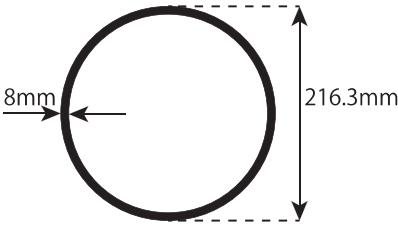


図 18. 外径216.3 mm, 厚さ 8 mm の鋼管

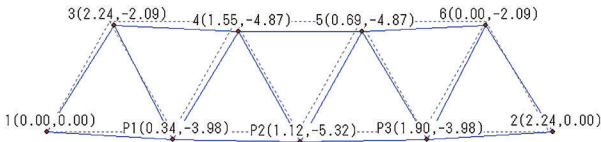


図 19. モデル [1] での変形挙動

解析結果

各モデルの中央たわみおよび鋼材使用量を表 1 にまとめる。鋼材使用量は部材の総延長から算出し、モデル [1] との比で示した。なお、モデル [1] の鋼材使用量は重量に換算すると約 1.30 t となる。また、表中の括弧内に示す値はモデル [1] のたわみとの比である。モデル [1] でのたわみは 5.32 mm となり、たわみを 1/300 以下に抑える条件を満たした。モデル [2] および [3] においてはそれぞれ 3.87 mm, 3.13 mm となり、[3] は鋼材使用量が [2] に比べ少ないにも関わらずたわみが減少した。[2] において水平材にあたるトラス部材が [3] においては斜材となり、荷重の鉛直成分も負担できるようになったことが理由として考えられる。

モデル [4] および [5] のたわみはそれぞれ 5.09 mm, 8.46 mm となり、斜材の間隔が短い [4] で [1] よりたわみが減少し、間隔が長い [5] で増加した。

モデル [6] ～ [10] のたわみ、最大圧縮応力と最大引張応力はそれぞれ表 1・表 2 に示す通りであり、[6] のたわみが最も小さくなった。斜材を加える箇所を適切に選択することによってたわみは減少する。

なお、試設計したモデルではすべてのトラス材に同じ鋼管を用いているが、一部では作用している荷重に対して使用した鋼管の強度が過大であり、これらを許容応力度とたわみを考慮しつつより軽量の部材、すなわち断面積の小さな部材に交換することで鋼材使用量の抑制も可能である。

結論

様々な工夫によってトラス梁の剛性と強度を増大させることが可能であるが、特に桁高さを増大させることによってたわみを効果的に減少させることができた。また斜材を加える箇所を変更することによってもたわみの大きさを制御できた。

表 1. 各モデルのたわみと鋼材使用量

モデル	たわみ	鋼材使用量
[1]	5.32 mm (1.00)	1.00
[2]	3.87 mm (0.73)	1.20
[3]	3.13 mm (0.59)	1.12
[4]	5.09 mm (0.95)	1.23
[5]	8.46 mm (1.58)	0.81
[6]	4.57 mm (0.86)	1.23
[7]	4.88 mm (0.92)	1.35
[8]	5.25 mm (0.98)	1.48
[9]	5.27 mm (0.99)	1.23
[10]	4.88 mm (0.92)	1.23

()内はモデル [1] との比

表 2. 各モデルの最大圧縮応力と最大引張応力

モデル	最大圧縮応力	最大引張応力
[1]	68.9 (0.44)	62.0 (0.43)
[2]	51.2 (0.33)	46.0 (0.32)
[3]	55.2 (0.35)	41.4 (0.28)
[4]	61.3 (0.39)	58.2 (0.40)
[5]	110.3 (0.70)	55.2 (0.38)
[6]	68.9 (0.44)	62.0 (0.43)
[7]	49.5 (0.32)	67.7 (0.46)
[8]	62.5 (0.40)	66.9 (0.46)
[9]	64.4 (0.41)	64.2 (0.44)
[10]	68.9 (0.44)	53.3 (0.36)

単位はすべて N/mm²

()内は用いた鋼管の許容圧縮・引張応力度との比

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学大学院工学研究科－建築学専攻－建築構法学講座の西山峰広教授、野村昌弘技術職員、TA であった大学院生の井戸裕勇樹氏、真下智士氏、高橋毅氏には温かいご指導を賜りました。半年間ありがとうございました。

また、本研究は ELCAS を通じて JST グローバルサイエンスキャンパス事業の支援を受けて行われたものです。御礼申し上げます。

参考文献

- 1. 日本建築学会：構造入門教材　ちからとかたち．丸善出版．(1998)．
- 2. 鈴木芳隆，小鹿紀英，高橋元美ほか：振動台実験における試験体挙動のシミュレーション解析：鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発（その 14），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp.1219-1220．(2015.7)．

Trial Design of Truss Beams—Verification of Modeling Method by Loading Tests and Numerical Simulation—

HITOSHI KAMEI¹ & SHUN TAMURA²

¹RAKUNAN High School, ²Hyogo Prefectural Kobe High School

Abstract

The truss structure consists of linear members that sustain only an axial force and is a structural system that can economically construct frames with high stiffness and strength. The truss structure is used for various structures around us, including large-scale space buildings, such as stations.

In this research, the fundamental characteristics of the truss structure were captured through experiments using springs and numerical analyses using structural analysis software. The modeling method in the structural analysis software was also discussed.

Truss beams were designed by using the modeling method, and member configurations that could efficiently reduce deflection were examined. As a result, by increasing the beam height beam deflection was effectively reduced. It was also found that deflection could be controlled by the position where the diagonal members are added.

Key words: Truss Structure, Loading Test, Structural Analysis, Deflection, Allowable Stress