

## トラス橋の最適設計における設計荷重について

熊本大学工学部 正 員 ○小林一郎

熊本大学大学院 学主員 西野豊浩

熊本大学工学部 正 員 三池亮次

1. まえがき 平面トラス橋の主橋の最適設計において、設計荷重としては、次のようなものが多く用いられている。(a)等分布荷重全載(以下、慣用法と呼ぶ)。(b)いくつかの載荷パターンをあらかじめ想定し、部材ごとに応力の最大値を求める。(c)定められた骨組構造について、前もって影響線解析を行い軸力を算定する。

筆者らは、先に影響線マトリックスによる最大部材断面力の算出法とこれを用いたトラス橋の最適設計について報告した<sup>1)</sup>。これは、(c)の方法を発展させ自動的に影響線解析を行い、最適断面形状を求めようとするものである。(b)の方法は、どのような載荷パターンを選択するかが困難であるので、トポロジーも含めた最適設計には使用できない。(c)の方法は、不静定構造には適用不可能である。筆者らの方法(影響線法)では、静定、不静定に問わず解析可能であり、骨組形状の最適化においても影響線解析が可能である。

本報告は、慣用法と影響線法について、軸力及び最適解と比較検討し、最適設計における設計変数および荷重の取り扱いについて若干の考察を行うものである。

2. 最適設計 最小重量設計を行うものとし、設計変数は、部材幅 $B$ と板厚 $t_1$ 、部材高 $H$ と板厚 $t_2$ とする。ただし、 $B$ は全部材共通の変数とする。断面形状は図-1に示す通り、上下弦材及び斜材の圧縮材は箱型、斜材の引張材は、H型を用いる。制約条件としては、

$$\bullet \text{応力制限} \quad \sigma_c(\lambda) \leq \sigma \leq \sigma_t \quad (1)$$

$$\bullet \text{細長比制限} \quad \lambda \leq 120 \text{ or } 200 \quad (2)$$

$$\bullet \text{板厚制限} \quad t_1 \text{ and } t_2 \geq 0.8 \text{ cm} \quad (3)$$

$$\bullet \text{部材の面外座屈防止} \quad I_y > I_x \quad (4)$$

$$\bullet \text{部材高の制限} \quad H \leq \frac{L}{10} \quad (5)$$

を用いる。ただし、 $\sigma$ は部材応力度、 $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$ は圧縮と引張についての許容応力度、 $\lambda$ は細長比、 $I_x$ ,  $I_y$ は面内及び面外回りの断面2次モーメント、 $L$ は部材長である。

軸力の大きい部材は、式(1)の応力制限より断面積が決定されるが、軸力の小さい部材は、式(3)の板厚制限のために応力設計とはならない。一般に圧縮材は、式(4)の制限により断面が決められるが、この時は、細長比の下限を与えるものである。また、部材幅 $B$ は、圧縮材のひとつが、正方等厚( $B=H$ ,  $t_1=t_2=0.8 \text{ cm}$ )になることによって決定される。

3. 数値計算例 図-2は、10パネル平行弦ワーレントラス(モデル1)。図-3は、5パネルダブルワーレントラスで5次の内的不静定である(モデル2)。図-4は、3径向連続トラスで2次の外的不静定である(モデル3)。なお、図-2から図-4において、

④は部材番号、①は節点番号である。使用鋼材はすべてSS41とし、S-LP法によって解析する。

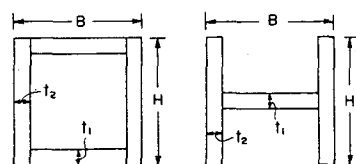


図-1 断面形状

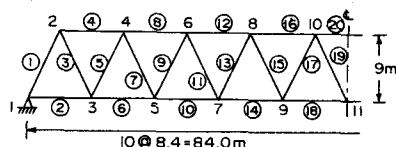


図-2 モデル1 (平行弦ワーレントラス)

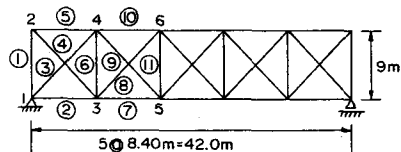


図-3 モデル2 (ダブルワーレントラス)

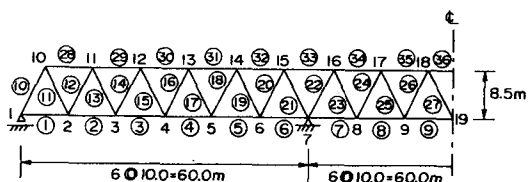


図-4 モデル3 (3径向連続トラス)

以下の表において、 $A$ 、 $N$ は断面積の最適値とそのときの軸力を示す。また、添字の1は影響線法、cは慣用法の結果であることを示す。B、Wは部材幅と主構重量の最適値を示す。

〔モデル1〕 表-1の $A_c'$ 、 $N_c'$ は、慣用法の荷重を5%増したときの結果である。上下弦材の軸力は数パーセント慣用法が小さいが、5%増では、ほぼ等しい。斜材の軸力の小さなものは、その差が大きくなるが、板厚制限があるため、 $A_1$ との比は、ほぼ1に近い。鋼重は $W_c/W_c' = 0.95$ 、 $W_c'/W_c = 0.99$ とナリ。両者の間に大きな差は見られない。

〔モデル2〕 表-2に示す通り、いくつかの部材の軸力は、大きな差がある。本来、最適設計においては、これらの余り材は不用であり、断面積がゼロになったとき最小重量となる。ここでは、板厚制限と部材幅Bをひとつの変数として

表-1 モデル1の最適解と軸力の比較

| No.                              | $A_1$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_1$ (ton) | $A_c/A_1$                          | $N_c/N_1$ | $A_c'/A_1$                           | $N_c'/N_1$ |
|----------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------|
| 1                                | 226.2                    | -272.8      | 0.95                               | 0.94      | 0.98                                 | 0.99       |
| 2                                | 99.3                     | 115.4       | 0.97                               | 0.94      | 1.03                                 | 0.99       |
| 3                                | 196.1                    | 274.5       | 0.94                               | 0.94      | 0.98                                 | 0.98       |
| 4                                | 184.7                    | -230.7      | 0.95                               | 0.94      | 0.98                                 | 0.98       |
| 5                                | 184.7                    | -216.4      | 0.94                               | 0.92      | 0.97                                 | 0.97       |
| 6                                | 228.3                    | 319.7       | 0.95                               | 0.94      | 0.99                                 | 0.99       |
| 7                                | 154.5                    | 216.3       | 0.92                               | 0.92      | 0.97                                 | 0.97       |
| 8                                | 321.5                    | -410.2      | 0.95                               | 0.94      | 0.98                                 | 0.99       |
| 9                                | 148.9                    | -159.8      | 0.94                               | 0.89      | 0.98                                 | 0.94       |
| 10                               | 337.6                    | 472.6       | 0.95                               | 0.95      | 0.99                                 | 0.99       |
| 11                               | 114.1                    | 159.8       | 0.98                               | 0.89      | 0.94                                 | 0.94       |
| 12                               | 419.7                    | -538.4      | 0.95                               | 0.94      | 0.98                                 | 0.99       |
| 13                               | 126.1                    | -104.8      | 0.94                               | 0.82      | 0.98                                 | 0.86       |
| 14                               | 410.2                    | 574.3       | 0.95                               | 0.95      | 0.99                                 | 0.99       |
| 15                               | 81.8                     | 104.8       | 0.99                               | 0.82      | 1.03                                 | 0.86       |
| 16                               | 478.6                    | -615.3      | 0.95                               | 0.94      | 0.98                                 | 0.99       |
| 17                               | 114.2                    | -51.3       | 0.98                               | 0.56      | 1.03                                 | 0.58       |
| 18                               | 446.3                    | 624.8       | 0.95                               | 0.95      | 0.99                                 | 0.99       |
| 19                               | 102.0                    | 51.3        | 0.97                               | 0.56      | 1.03                                 | 0.58       |
| 20                               | 498.2                    | -640.9      | 0.95                               | 0.95      | 0.98                                 | 0.99       |
| $W_c = 64.25t$<br>$B_c = 53.2cm$ |                          |             | $W_c' = 61.01t$<br>$B_c' = 51.5cm$ |           | $W_c'' = 63.60t$<br>$B_c'' = 55.0cm$ |            |

表-2 モデル2の最適解と軸力の比較

| No.                          | $A_1$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_1$ (ton) | $A_c/A_1$                    | $N_c/N_1$ |
|------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|-----------|
| 1                            | 70.5                     | -43.8       | 0.98                         | 0.92      |
| 2                            | 55.0                     | 67.6        | 1.00                         | 0.92      |
| 3                            | 151.7                    | -99.1       | 0.93                         | 0.92      |
| 4                            | 62.8                     | 59.9        | 1.00                         | 0.91      |
| 5                            | 67.6                     | -40.9       | 0.98                         | 0.92      |
| 6                            | 56.2                     | 36.0        | 1.00                         | 0.80      |
| 7                            | 87.8                     | 122.9       | 0.93                         | 0.93      |
| 8                            | 80.4                     | -28.5       | 1.00                         | 0.75      |
| 9                            | 62.8                     | 58.4        | 1.00                         | 0.88      |
| 10                           | 152.8                    | -145.1      | 0.93                         | 0.93      |
| 11                           | 56.2                     | 14.7        | 1.00                         | 0.51      |
| 12                           | 62.8                     | 20.1        | 1.00                         | 0.55      |
| 13                           | 108.0                    | 151.2       | 0.94                         | 0.94      |
| 14                           | 175.2                    | -167.9      | 0.94                         | 0.93      |
| $W = 17.37t$<br>$B = 25.1cm$ |                          |             | $W = 16.79t$<br>$B = 25.1cm$ |           |

あるため、両者とも、断面積が制限されるため、同一の大きさとなり、鋼重比は $W_c/W_c' = 0.97$ で差はなくなっている。

〔モデル3〕 上下弦材と斜材の一部の解を表-3に示す。外的不静定トラスでは一般に、上下弦材の影響線図も正負両方の値を持ち、その面積はかなり近い大きさである。このため、活荷重の配置の差が軸力に影響する。板厚制限のため重量の差は緩和され $W_c/W_c' = 0.90$ となっており、全応力設計であるとするれば、20%以上の差が出るようである。従って、このモデルにおいては、影響線解析を行い、設計変数も板厚等を加えて最適設計を行なうべきである。

#### 4. おまけ 以上のことをまとめると、次のことがいえる。

- 1) 静定トラスについては、慣用法で全応力設計を行えば充分であり、より厳密な解が必要ときも、慣用法の荷重を数パーセント増にすればよい。
- 2) 内的不静定については、板厚制限等も追加して解析すれば慣用法を用いても差異は生じない。
- 3) 外的不静定については、軸力は影響線解析より求めなければならない。慣用法による解は許容応力を越えている。
- 4) トラスの部材断面の最適(sizing)においても、断面積のみでなく、板厚あるいは断面二次モーメント等を変数として追加して解析すべきである。

#### 1) 上弦材

| No. | $A_1$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_1$ (ton) | $A_c/A_1$ | $N_c/N_1$ |
|-----|--------------------------|-------------|-----------|-----------|
| 28  | 148.4                    | -156.0      | 0.87      | 0.85      |
| 29  | 217.5                    | -234.7      | 0.85      | 0.83      |
| 30  | 219.4                    | -236.8      | 0.82      | 0.80      |
| 31  | 155.0                    | -163.5      | 0.75      | 0.70      |
| 32  | 78.3                     | 57.6        | 0.97      | 0.52      |
| 33  | 180.1                    | 252.1       | 0.97      | 0.97      |
| 34  | 78.3                     | 84.9        | 0.98      | 0.83      |
| 35  | 103.9                    | -86.6       | 0.86      | 0.38      |
| 36  | 121.2                    | -123.9      | 0.79      | 0.54      |

#### 2) 下弦材

| No. | $A_1$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_1$ (ton) | $A_c/A_1$ | $N_c/N_1$ |
|-----|--------------------------|-------------|-----------|-----------|
| 1   | 78.3                     | 77.9        | 0.98      | 0.85      |
| 2   | 137.7                    | 192.8       | 0.85      | 0.85      |
| 3   | 165.0                    | 231.0       | 0.83      | 0.83      |
| 4   | 140.2                    | 196.3       | 0.77      | 0.77      |
| 5   | 78.3                     | 87.1        | 0.98      | 0.48      |
| 6   | 141.3                    | -147.7      | 0.95      | 0.93      |
| 7   | 154.7                    | -163.1      | 0.98      | 0.96      |
| 8   | 91.2                     | -44.0       | 0.98      | 0.43      |
| 9   | 78.3                     | 100.7       | 0.98      | 0.50      |

表-3 モデル3の最適解と軸力の比較

(3) 斜材

| No.                          | $A_1$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_1$ (ton) | $A_c/A_1$                    | $N_c/N_1$ |
|------------------------------|--------------------------|-------------|------------------------------|-----------|
| 10                           | 145.7                    | -153.8      | 0.87                         | 0.85      |
| 11                           | 110.7                    | 154.9       | 0.84                         | 0.84      |
| 12                           | 103.0                    | -85.5       | 0.91                         | 0.73      |
| 13                           | 67.7                     | 85.5        | 0.98                         | 0.73      |
| 14                           | 67.7                     | 27.9        | 0.98                         | 0.21      |
| 15                           | 90.7                     | -27.9       | 0.98                         | 0.21      |
| 16                           | 67.6                     | 92.2        | 0.98                         | 0.80      |
| 17                           | 105.9                    | -92.2       | 0.92                         | 0.80      |
| 18                           | 114.1                    | 159.7       | 0.89                         | 0.89      |
| 19                           | 150.8                    | -159.7      | 0.91                         | 0.89      |
| 20                           | 163.7                    | 229.1       | 0.92                         | 0.92      |
| 21                           | 211.3                    | -229.1      | 0.93                         | 0.92      |
| 22                           | 182.4                    | -196.1      | 0.89                         | 0.87      |
| 23                           | 140.1                    | 196.1       | 0.87                         | 0.87      |
| 24                           | 121.9                    | -126.3      | 0.91                         | 0.81      |
| 25                           | 90.2                     | 126.3       | 0.81                         | 0.81      |
| 26                           | 93.5                     | -59.1       | 0.95                         | 0.58      |
| 27                           | 67.7                     | 59.1        | 0.98                         | 0.58      |
| $W = 68.64t$<br>$B = 38.1cm$ |                          |             | $W = 61.60t$<br>$B = 37.0cm$ |           |

参考文献 リン・三池: 単純トラスの最適設計への応用-影響線法による最適設計, 土木工学研究報告第1号, 1982 2) 菊池・戸田: 鋼橋設計, オーム社, pp.105~120 3) 小川・長: 最適設計における計算の効率化に関する研究, 土木学会論文報告集, 277号, 1980