

鋼トラス橋の冗長性に関する数値的検討

Numerical Consideration on Redundancy of Steel Truss Bridges

高橋岳太*

Gakuta TAKAHASHI

*構造強度学研究室（研究指導教員：斉木 功 助教授）

Since collapse of Mississippi river bridge in 2007, redundancy has become of importance as one of the performance of bridges. However, enough research on the redundancy has not been conducted because the redundancy has not been regarded as primary capability of structures so far. Consequently, focusing on floor slabs and gusset plates, we numerically examine their contribution to the redundancy of steel truss bridges by a series of nonlinear finite element analyses.

Key Words : steel truss bridge, redundancy, nonlinear static analysis, gusset plate, floor slab

1. はじめに

近年，米国のミネソタ州の鋼トラス橋において，部材の破断が原因による橋梁崩壊が起きた．また国内でも，三重県の本曾川大橋や秋田県の本荘大橋のような 2 つの鋼トラス橋で，部材の激しい損傷や破断が発見された．静定構造であるトラス橋に部材の破断が発生しても，本曾川大橋等で構造全体の崩壊が起きなかったことから，それらの橋梁に相当の冗長性が備わっていたと言えるが，その冗長性がどのような要素からどの程度生じるかは明確にされていない．しかし橋梁の維持管理などを考えると，その橋梁に備わっている冗長性をあらかじめ把握しておくことは，非常に重要である．これに関して，例えば宮森ら¹⁾は，ガセットプレート結合点を取り上げて弾塑性有限要素解析を行った他，吉岡ら²⁾は実在の損傷を有する鋼トラス橋で振動実験を行い，振動解析の結果と照らし合わせて損傷を評価している．しかし，鋼トラス橋のどこかに焦点を当て，それが様々な状態の橋梁全体に及ぼす影響を調べるケーススタディは未だ不十分である．本研究では鋼トラス橋の床版とガセットプレートに焦点を当て，健全な状態な橋梁および損傷を有する橋梁への影響を，非線形有限要素解析を行い評価する．

2. 解析モデル

三重県に既設の本曾川大橋を参考に作成した，全長 70.63m，長さ 10.09m，幅員 8.6m，高さ 10m の下路式鋼トラス橋を解析対象とした．床組は 3 本の縦桁と 2 本の下弦材，そして 8 本の横桁から成り，トラスの格点を結ぶ下横構も配置されている．下弦材と同じ断面形状をもつ上弦材が 2 本あり，7 本の支材と，支材および上弦材の中点を結ぶ上横構が配置されている．斜材は，引張

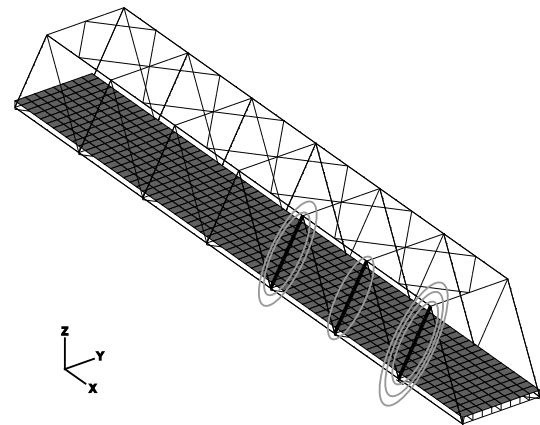


図-1 基本モデル

りが I 型，圧縮が箱型と，断面形状が異なっている．横桁の上フランジ上に，厚さ 230mm の鉄筋コンクリート床版が載っており，鋼材はすべて SM400 である．以上をもとに作成した解析モデルを基本モデルと呼び，図-1 に示す．そして，モデルの部材に破断または損傷を与えた場合と解析結果を比較検討する．損傷の与え方としては，図-1 の楕円で囲った 3 本の斜材のうちのどれかの断面積を 1/2 または 1/4 にするか，その部材ごと取り去る．図-1 の一重楕円の位置を基本位置，二重楕円を中央，三重楕円を端と定義し，それぞれの部材に対して破断または損傷を与える．例えば図-1 の二重楕円の部材の断面積を 1/2 にする場合は，中央 1/2 モデルと呼ぶこととする（一重楕円に破断なら，基本破断モデルである）．平板要素を用いて床版をモデル化し，後の部材にはすべて梁要素を用いた．部材間の結合は，床版と床組間および床組と下横構間を並進運動のみを伝えるオフセット要素を用いて結合させ，残りの全結合点は剛結とした．

上で述べた鋼トラス橋を対象として、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮した静的有限要素解析を行う。解析には汎用有限要素解析ソフトNX NASTRANを用いた。鋼材の材料特性値は、Young率が $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、Poisson比が0.3、質量密度が 7850kg/m^3 であり、von Misesの降伏関数を採用した。塑性係数はYoung率の1%として、 $2.1 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ と設定した。床版のコンクリートは弾性体とし、Young率は $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、Poisson比は0.17である。荷重については、活荷重および死荷重をモデルに載荷する。活荷重は、道路橋示方書³⁾のL荷重を採用した。ただし要素分割の都合から、 P_1 荷重の橋軸方向幅を10.09m、 P_2 荷重の橋軸直角方向幅を5.35mとした。これらの荷重を、すべて平板要素を用いてモデル化した床版上に、圧力として載荷する。そして P_1 荷重は、常にスパン中央に載荷する。死荷重の重力加速度は 9.8m/s^2 とする。 P_1 荷重 = 11760N/m^2 、 P_2 荷重 = 3430N/m^2 を基準に、それに対する倍率を荷重パラメータと定義し、荷重の大きさを表すこととする。

3. 損傷の程度の影響

損傷部材、および部材の破断の、全体挙動への影響を調べるために、基本モデル、基本破断モデル、基本1/2断面モデル、そして基本1/4断面モデルの内の最大圧縮ひずみを比較する。引張りひずみは、必ず損傷部材で発生することと、上弦材の座屈がより重要な破壊であることから、引張りひずみは検討しないこととする。結果を図-2に示す。基本破断モデル以外はすべて、上弦材の座屈による圧縮ひずみの値であった。破断のない3つのモデルでは、荷重パラメータが1.200付近になると上弦材の座屈が進行し、圧縮ひずみの増加率が上昇する。この3つのモデルの最大ひずみの値にそれほど差がないことから、荷重が大きい段階ならば、基本位置での損傷の程度は上弦材の座屈にそれほど影響しないことがわかる。

また図-2から、基本破断モデルが、荷重パラメータ1.200付近の時に圧縮ひずみの増加率を大幅に上げていることがわかる。これは、荷重パラメータが1.200までは最大圧縮ひずみは縦桁で生じていたが、1.200を超えると上弦材に移るためだと考えられる。ここで荷重パラメータが1.225の時の、基本破断モデルの相当塑性ひずみの分布図を図-3に示す。この図は、床組を見やすくするために本来存在する床版を描いておらず、変形は10倍で描いている。また描かれているダイアグラムは、1つの梁要素につき8つある積分点の中の1つから算出された相当塑性ひずみを表示している。この図より、縦桁に大きな塑性ひずみが生じていることが分かる。これは、本来ならば斜材が受け持つ力を縦桁の曲げによって抵抗するというメカニズムを有していることになる。こ

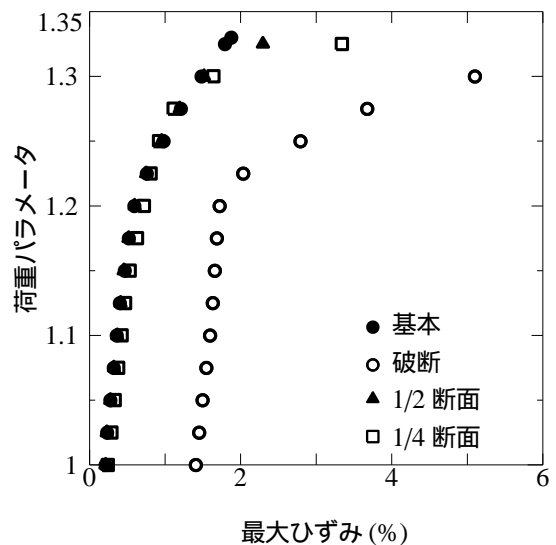


図-2 基本位置部材の損傷と圧縮ひずみの比較

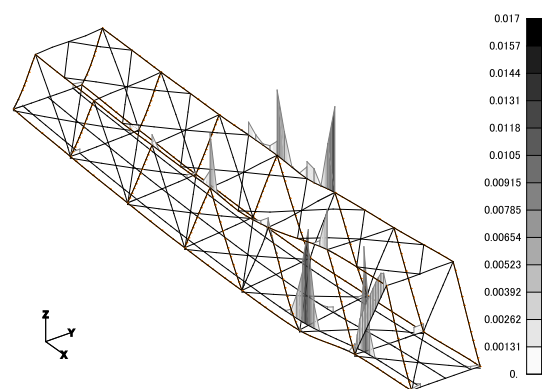


図-3 荷重パラメータ 1.225 での基本破断モデルの塑性ひずみ

れより、基本位置の破断は、構造全体の挙動に大きな影響を与えること、またその際は縦桁の曲げという冗長性が発揮されることが分かった。

4. 部材の破断および損傷位置の影響

次に、損傷および破断の位置を変えて、最大引張りひずみの検討をする。図-4にそれぞれのモデルの結果を示す。損傷の場合、位置の影響はそれほど大きくは現れていない。対して、破断は特に端位置での違いは大きく現れている。よって、鋼トラス橋にとって、端位置での斜材の破断は、クリティカルであることがわかった。また、50%程度の断面減少は、1本では位置に関わらず、全体の挙動にさほど影響を及ぼさないことも分かった。

5. 床版の有無の影響

基本モデルと基本1/2断面モデルから、床版をすべて取り去ったモデルを作成し、それらをそれぞれ床版な

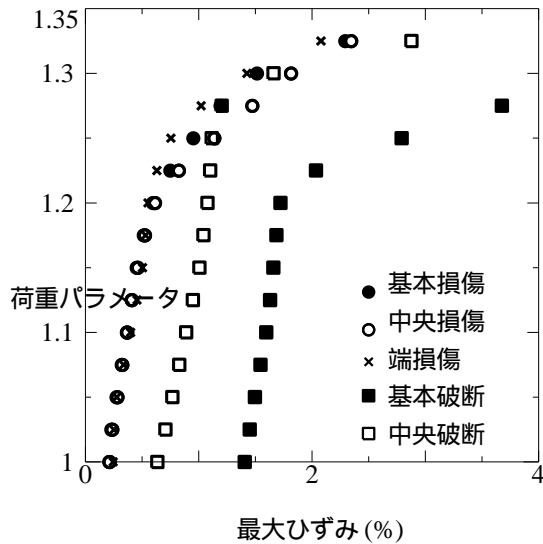


図-4 損傷および破断の位置の影響

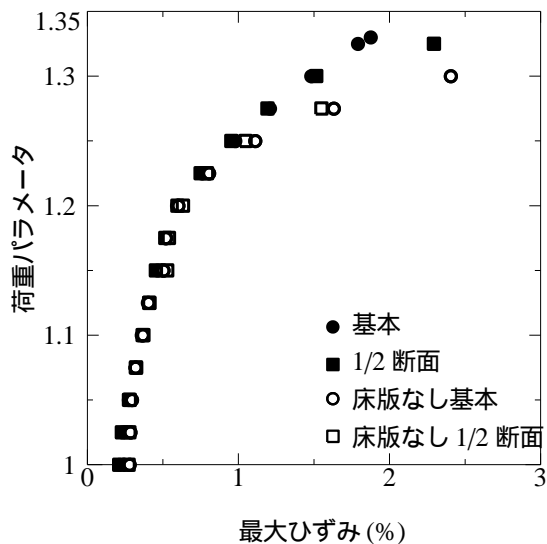


図-5 基本モデルおよび 1/2 断面モデルにおける床版の有無の影響

し基本モデル，床版なし 1/2 断面モデルと呼ぶこととする．．荷重のかけ方は，以下の手順で行う．まず，床版ありのモデルで用いていた平板要素が，骨組要素と接していた節点に，全回転自由・全並進拘束の支承を取り付け，活荷重および死荷重を作用させて線形静的解析を行う．そして，ここで得られた支点反力に対応する荷重を，今まで床版と接していた全節点に載荷する，というものである．この 4 つのモデルの解析結果を比較し，床版が全体挙動に及ぼす影響を評価する．

4 つのモデルの，各荷重パラメータにおける最大圧縮ひずみを図-5 に示す．この図を見ると，荷重パラメータが 1.200 付近になるまでは 4 つのモデルの最大圧縮ひずみの値は非常に接近しているのが分かる．よって荷重が小さい段階では，床版の影響は構造全体の挙動にあまり影響を及ぼさないとと言える．しかし，荷重が大きくな

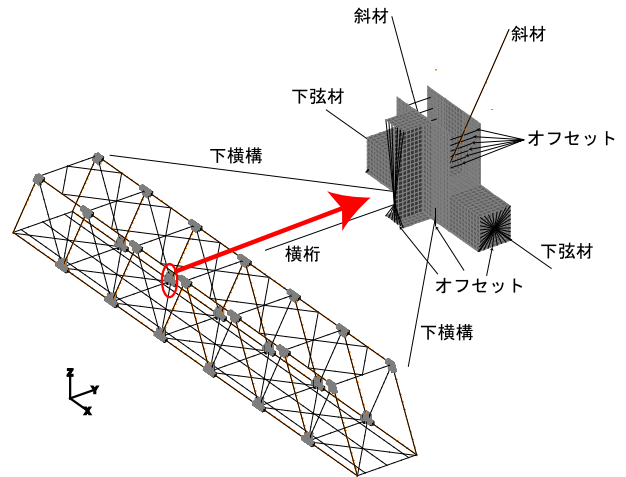


図-6 荷重パラメータ 1.225 での基本破断モデルの塑性ひずみ

り，ひずみの増加率が上昇していくと，床版のないモデルには，床版のあるモデルよりもより大きな圧縮ひずみが生じることが分かる．これは，上弦材の座屈に影響している．つまり荷重が増加してひずみの増加率が上昇するのは，上弦材の座屈が進行し，端部に局所的な曲げが作用するためである．ここで床版がある場合は，床版が面内曲げに対してある程度抵抗するために，床版がない場合に比べてひずみの増加が抑えられるのである．床版なし基本モデルではその他にも，荷重が増加すると縦桁に横倒れ座屈が生じ，それに追従して横桁や斜材にたわみが発生するなど，床版のあるモデルとは異なる挙動を見せた．よって，床版は荷重が大きい段階では構造全体の挙動に対して大きな影響を与える，ということができる．

6. ガセットプレート結合の影響

本研究では，斜材の格点付近での平板要素を用いたガセットプレート結合のモデル化を行った．モデルを行ったのは，支承部以外の全ての斜材の格点であり，下弦材での結合点のモデル化を図-6 に示す．平板要素と梁要素との結合には，並進運動のみを伝えるオフセット要素を用いた．図にあるように，弦材同士は断面にある全節点で結合させ，斜材とガセットプレートは両側のガセットプレートと橋軸直角方向に 6 点で結合させた．なお，下弦材と下横構は剛結させた．このガセットプレート結合を基本モデルと基本 1/2 断面モデルに適用する．それぞれ，ガセット付き基本モデル，ガセット付き基本 1/2 断面モデルと呼ぶこととする．ガセットプレートのついていない 2 つのモデルと，計 4 モデルでの最大圧縮ひずみの比較を図-7 に示す．荷重パラメータが 1.200 以下の範囲でしか比較検討することができないが，4 モデルの最大引張りひずみの値は非常に接近していることが分か

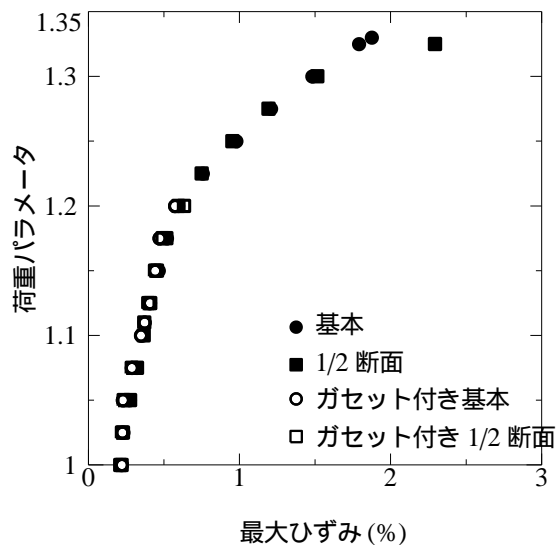


図-7 基本モデルおよび1/2断面モデルにおけるガセットプレート結合の有無の影響

る。よく図を見てみると、基本モデル、基本1/2断面モデルともに、ガセット付きの方がひずんでいないことが分かる。これはつまり、ガセット付きの方が上弦材の座屈が進んでいないということである。ここで、図-8に平板要素によるガセットプレートの von Mises ひずみを示す。この図から分かるように、上弦材の座屈によって局所的にひずんでいるのは、ガセットプレートではなく、ガセットプレートの切れ目付近の上弦材である。あたかもガセットプレートの長さ分、上弦材の部材長が短くなっているような上弦材の挙動が分かる。図-8を見る限り、ガセットプレートには、上弦材の座屈に追従するようなひずみが生じていない。よって上弦材の座屈長がガセットプレートの橋軸方向長さ分短くなったことになり、これが床版ありガセット付き基本モデルの圧縮ひずみを減少させる原因と考えられる。

参考文献

- 1) 宮森他：：鋼トラス橋のリダンダンシー評価手法の検討（その3），第63回年次学術講演会，土木学会，2008.9.
- 2) 吉岡 勉，原田 政彦，山口 宏樹，伊藤 信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討，構造工学論文集，Vol.54A，pp.199-208，2008.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編II 鋼橋編，

(2009年2月5日提出)

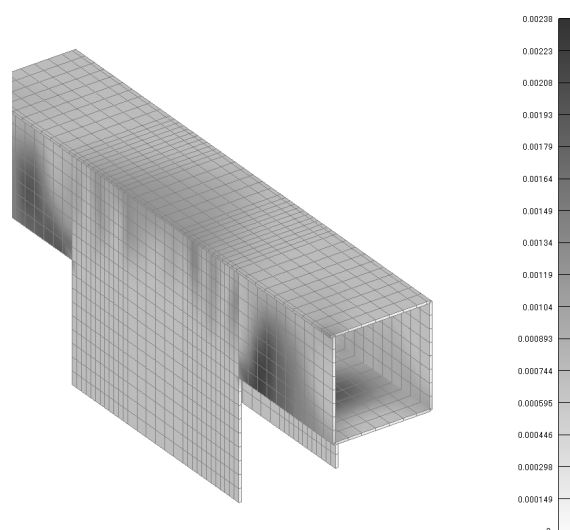


図-8 スパン中央の上弦材のガセットプレート結合の von Mises ひずみ