

冗長性を考慮した鋼トラス橋の設計に関する一考察

A consideration on redundancy based design of steel truss bridges

村上和也*

Kazuya MURAKAMI

*構造強度学研究室（指導教員：斉木功 准教授）

Since collapse of the truss bridge over Mississippi river in 2007, redundancy has become of importance as one of the performance of bridges. Although a lot of researches on redundancy has been conducted since then, redundancy evaluation based on nonlinear analysis and redundancy based design are still undeveloped. In this context, we propose a design of a typical steel truss bridge based on redundancy evaluated by nonlinear finite element analysis. As a result, redundancy of the proposed bridge can be improved without increase of steel weight.

Key Words : *redundancy, steel truss bridge, nonlinear finite element analysis, design*

1. 序論

2007 年 8 月, 米国のミネソタ州の鋼トラス橋である I-35W 橋において, 部材の破断により橋梁全体が崩壊する事故が起きた¹⁾. これを受けて日本でも鋼トラス橋の点検が各地で行われ, 三重県の本庄大橋や秋田県の本庄大橋の斜材の破断が発見されたが, これらの橋梁は落橋を免れている. 理論上では静定トラス橋の主構部材が破断するとトラス構造は崩壊する. しかし, 本庄大橋は静定トラス構造であるにもかかわらず橋梁全体の崩壊には至らなかった. これは, 格点部がピン結合ではなくガセットプレートによって結合されていること, 床組が主構に作用する荷重を受け持つことなどにより橋梁が冗長性を備えていたためと考えられている²⁾.

I-35W 橋の崩壊事故以降, 冗長性の研究が盛んに行われている. 例えば, Hao, S.¹⁾は I-35W 橋の橋梁全体と崩壊の原因となったガセットプレート周辺を非線形有限要素解析を行い, ガセットプレートの耐荷力を上げることを提案している. しかし, 具体的な設計方法については述べられていない. 笠野ら³⁾は I-35W 橋の崩壊メカニズムを解析した. ただし, この解析は格点部のみに非線形有限要素解析を行い, 橋梁全体の解析は線形の有限要素解析を用いている. URS corporation⁴⁾は有限要素解析を用いて I-35W 橋について冗長性の評価を試みている. しかし, 解析には非線形性が考慮されていない. 永谷ら²⁾は有限要素解析により本庄大橋の冗長性を評価している. しかし, 非線形解析は格点部の詳細なモデルに限られており, 橋梁全体の解析には線形解析を用いている.

以上の研究事例を踏まえ, 本研究では非線形有限要素解析を用いて鋼トラス橋が持つ冗長性を定量的に評価し, その評価に基づいた新たな設計手法を提案する.

2. 対象橋梁と有限要素解析モデル

(1) 対象橋梁

三重県木曾川大橋と同規模の橋梁を対象とした. 木曾川大橋は, 格間長 10.09m, 支間長 70.63m であり, 主構, 床組, 上横構, 下横構, 橋門構, ストラット, RC 床版からなる下路式単純鋼ワーレントラス橋である. 橋梁の対称性から支間長の半分までの主構部材を冗長性評価の対象とした. 図-1 に示すように, 端部側から支間中央に向けて順に斜材を D1 ~ D7, 下弦材を L1 ~ L4, 上弦材を U1 ~ U3 と呼ぶこととする.

(2) 基本解析モデル

RC 床版を板要素によりモデル化し, それ以外の部材を梁要素によりモデル化したものを基本解析モデルと呼ぶこととし, これを図-2 に示す. コンクリートの材料モデルは弾性体とした. 鋼材は等方線形硬化弾塑性体とし, von Mises の降伏基準を用い, 硬化係数は Young 率の 10^{-2} 倍とした. 解析に用いる活荷重は道路橋示方書にある B 活荷重の L 荷重とし, 床版上に圧力として載荷した. 本研究では後述の実際の余裕度を求めるため活荷重を漸増させて解析を行う必要があるが, このとき死荷重と活荷重を同時に載荷すると活荷重のみを漸増載荷することができない. そこで, 先に死荷重のみを載荷したモデルを解析し, その後に活荷重を漸増載荷する方法で解析を行った. この解析には汎用有限要素解析ソフト NX NASTRAN を使用している.

3. 冗長性の定量評価

本研究では部材, あるいは構造システムが持つ冗長性を定量的に表現するため, 部材の設計時の余裕度, 部材

の実際の余裕度，システムの実際の余裕度の3つの余裕度を定義した．

部材の設計時の余裕度 s_L^m は，従来の設計手法により設計した部材断面への作用応力と許容応力の比によって

$$s_L^m = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

と定義した．ここに， σ_a は部材の許容応力， σ_m は部材断面に作用する応力である．部材の設計時の余裕度は対象の部材断面が従来の設計でどの程度の余裕を見込んだ寸法であるかを定量的に示し，部材断面寸法が応力度による照査を満たしていれば，部材の設計時の余裕度は1.0以上の値となる．また，その値が大きいほど安全側の設計となる．

部材の実際の余裕度は非線形有限要素解析による当該部材の破壊時の荷重倍率である．本研究では部材の実際の余裕度を解析する場合の荷重は

$$W^m = W_D + f^m \times W_L^m$$

とした．ここで， W_D は死荷重， W_L^m は道路橋示方書⁵⁾に基づいて，着目する部材に対し最も不利になるよう配置した活荷重， f^m は活荷重倍率である．この f^m を漸増させながら解析を行い，相当塑性ひずみが2%を超えたときを破壊と定義した．また，このときの活荷重倍率 f_{fail}^m を用いて部材の実際の余裕度 s_{NL}^m を

$$s_{NL}^m = f_{fail}^m$$

と定義した．

本研究では橋梁を構成する部材のうち，その部材の破壊が橋梁全体の崩壊につながるものをクリティカルな部材と定義する．2.で述べた基本解析モデルの当該部材を切断して死荷重のみを載荷し，橋梁を構成する部材のいずれかが降伏したとき，当該部材はクリティカルな部材であると判断する．そして，橋梁システムにおけるクリティカルな部材の実際の余裕度の中の最小値によってシステムの実際の余裕度 S_{NL} を

$$S_{NL} = \min_{m \in \text{critical}} (s_{NL}^m)$$

と定義した．

4. 冗長性評価に基づく設計案

道路橋示方書に従った従来の設計手法による設計を基本設計案とし，基本設計案と冗長性評価に基づいた設計案のシステムの実際の余裕度の解析結果を比較する．それぞれの設計案の各部材の実際の余裕度を求める解析を行ったときの，最初に破壊が生じた部材，着目した部材の設計時の余裕度と実際の余裕度を表-1，2に示す．

なお，表-1の斜材D1の実際の余裕度の解析をした場合のように，着目した部材と破壊する部材が一致しない

場合がある．この場合，着目部材の実際の余裕度は他の部材の破壊時の活荷重倍率 f_{fail} 以上とする．

また，両設計案のクリティカルな部材の解析による部材降伏時の死荷重倍率を表-3に合わせて示した．

(1) 基本設計案の評価

表-1に示すように，基本設計案では各部材の設計時の余裕度を1.0に極力近づけた．しかし，支間中央部の斜材D5，D6，D7では必要板厚が最小板厚の8mmを下回っており，設計時の余裕度が特に高くなっている．これを反映して，部材の実際の余裕度も高くなっており，支間中央付近の斜材が過剰設計となっていることがわかる．なお，基本設計案で使用した鋼材量は161.93tである．

基本設計案で最も実際の余裕度が小さいクリティカルな部材は上弦材U2であり，その値は4.05であった．よって，この設計案のシステムの実際の余裕度は4.05となる．上弦材U2の破壊箇所を図-3に示す．この図は変位を4倍にして表示している．この図から，上弦材U2が座屈していることがわかる．U2以外のクリティカルな部材は表-3から斜材D1，D2，下弦材L1，L2，L3，上弦材U1，U3であった．また，破壊した部材は斜材D2と上弦材U2，U3のみであった．以上から，解析結果に基づいて基本設計案を修正する場合は斜材D2，上弦材U2，U3の設計時の余裕度を意図的に上げるようにすれば良いと考えた．

(2) 冗長性評価に基づいた設計とその評価

本研究で行った設計のフローチャートを図-4に示す．主構を構成する各部材の実際の余裕度を求め，クリティカルな部材を選別し，システムの実際の余裕度を求めた．この結果を踏まえ，鋼板の最小板厚の制約により実際の余裕度が過剰になることが避けられない部材以外に関して，実際の余裕度が特に高い部材は鋼材量を減らし，その分の鋼材を実際の余裕度が低い部材へ与えることで，使用鋼材量の増加を抑えつつ橋梁のシステムの実際の余裕度を大きくするように設計を行った．

冗長性評価に基づいた設計案を作成する過程で，下弦材の設計時の余裕度を1.0以下とした試作案を作成した．この試作案では下弦材が他の部材と同水準の実際の余裕度を有していた．これは下弦材に作用する力の一部を床組が受け持ったことによる影響であると考えられ，既往の研究²⁾の考察内容と合致する．

次に，下弦材に使用する鋼材を削減し，クリティカルな部材に使用する鋼材量を増加させた．これにより，使用する鋼材量を基本設計案と同じ水準に保ちつつ，橋梁システムの余裕度の向上を目指した．使用した鋼材量は161.42tで基本設計案の99.7%であった．

表-2から，この設計案で最も実際の余裕度が小さいクリティカルな部材は上弦材U1であり，その値は4.40

であった。よって、この設計案のシステムの実際の余裕度は4.40である。このときの破壊が生じた箇所を図-5に示す。この図は変位を4倍にして表示している。上弦材U1が座屈した変形形状を示しており、端柱側の付け根部分が破壊している。冗長性評価に基づいた設計案のシステムの実際の余裕度は基本設計案から8.6%向上した。上弦材U1以外のクリティカルな部材は、表-3から斜材D1, D2, D3, D4, 下弦材L1, L2, L3, L4, 上弦材U2, U3であった。また、破壊した部材は斜材D3, 上弦材U1, 床桁であった。下弦材の鋼材を減らしたため床桁に負荷がかかり、破壊するようになったと考えられる。

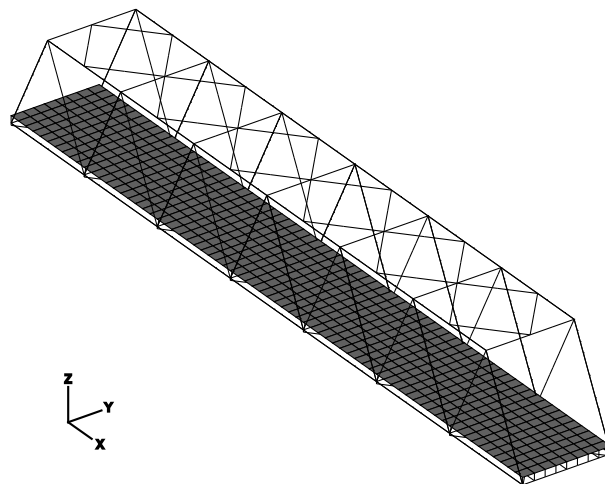


図-2 基本解析モデル

5. おわりに

冗長性評価に基づいた設計案では基本設計案よりも使用する鋼材量が少ないが、各部材の実際の余裕度が総じて向上しており、効率のよい設計ができたと言える。これにより、冗長性評価に基づいた設計の可能性が確認できた。

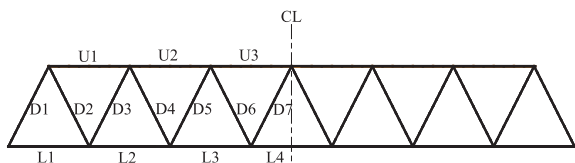


図-1 主構部材名称

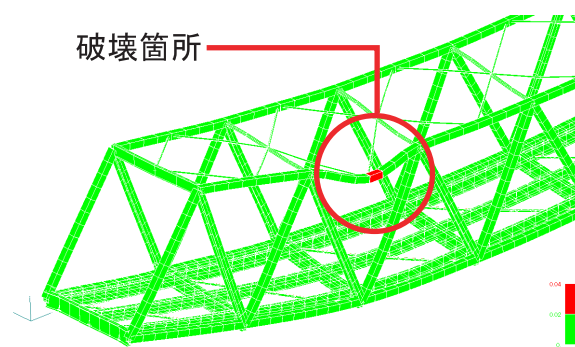


図-3 基本設計案 U2 破壊時変形図

表-1 基本設計案の余裕度解析結果

影響線載荷 着目部材	破壊 部材	実際の余裕度 s_{NL}^m	設計時の余裕度 s_L^m
D1	D2	4.40 以上	1.12
D2	D2	4.40	1.01
D3	U2	4.10 以上	1.20
D4	U2	4.10 以上	1.05
D5	U3	4.70 以上	2.04
D6	U3	4.70 以上	1.78
D7	U2	5.05 以上	6.06
L1	D2	4.40 以上	2.41
L2	U2	4.05 以上	1.02
L3	U3	4.15 以上	1.07
L4	U3	4.20 以上	1.06
U1	D2	4.40 以上	1.04
U2	U2	4.05	1.10
U3	D2	4.60 以上	1.03

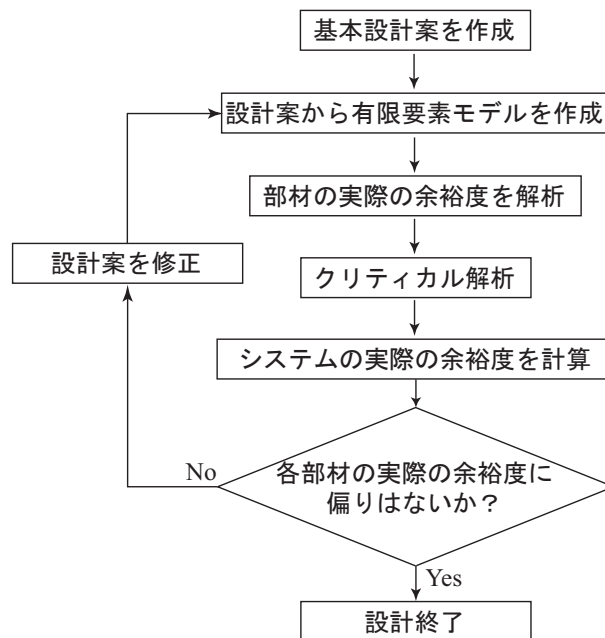


図-4 冗長性評価に基づく設計手順

参考文献

- 1) Hao, S.: A Note of the I-35W Bridge Collapse, *Journal of Bridge Engineering*, in press.

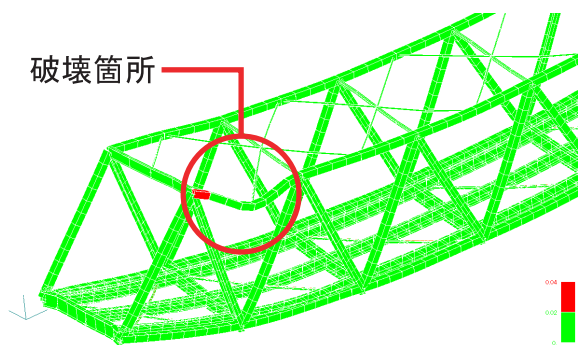


図-5 冗長性評価に基づいた設計案 U1 破壊時変形図

表-2 冗長性評価に基づいた設計案の余裕度解析結果

影響線載荷 着目部材	破壊 部材	実際の余裕度 s_{NL}^m	設計時の余裕度 s_L^m
D1	U1	4.40 以上	1.18
D2	U1	4.40 以上	1.19
D3	D3	4.90	1.20
D4	D3	4.90 以上	1.44
D5	床桁	5.70 以上	2.04
D6	床桁	5.70 以上	1.79
D7	U1	5.78 以上	6.06
L1	U1	4.40 以上	2.36
L2	U1	4.55 以上	0.89
L3	U1	4.75 以上	0.65
L4	床桁	5.05 以上	0.59
U1	U1	4.40	1.03
U2	U1	4.63 以上	1.18
U3	U1	4.90 以上	1.21

表-3 クリティカルな部材の解析結果

切断 部材	基本設計案 降伏時死荷重倍率	冗長性評価に基づいた設計案 降伏時死荷重倍率
U1	0.8	0.4
U2	0.6	0.7
U3	0.6	0.7
L1	1.0	1.0
L2	0.8	0.8
L3	1.0	0.9
L4	降伏せず	1.0
D1	0.7	0.6
D2	0.8	0.7
D3	降伏せず	0.9
D4	降伏せず	1.0
D5	降伏せず	降伏せず
D6	降伏せず	降伏せず
D7	降伏せず	降伏せず

- 2) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2, pp.410-425, 2009.
- 3) 笠野英行, 依田照彦: 米国ミネアポリス I-35W 橋の崩壊メカニズムと格点部の損傷評価, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, pp.312-323, 2010.
- 4) URS corporation: *Fatigue evaluation and redundancy analysis*, Bridge No.9340, I-35W over Mississippi river, Draft report, 2006.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2002.

(2011年2月7日提出)