

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760416

研究課題名(和文)非線形マルチスケール解析に基づく鋼橋の冗長性最大化設計

研究課題名(英文)Design for redundancy maximization of steel bridges based on nonlinear multiscale analysis

研究代表者

齊木 功(Saiki, Isao)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40292247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：鋼トラス橋の冗長性を確保することを目的として、対象橋梁の健全時と部材破断時を想定し、格点部に要求される性能について考察した。その結果、健全時の冗長性の向上のためには、斜材の軸力だけでなく、横桁がガセットプレートへ及ぼす面外方向への影響にも考慮する必要があることがわかった。また、斜材破断時の冗長性の向上にはガセットプレートの面内曲げ耐力の向上が有効であることがわかった。これらの検討に用いられる非線形有限要素解析の計算負荷軽減のために、格点部を詳細にモデル化した全体構造モデルの解析結果を用いたズームング解析を提案し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to ensure the redundancy of steel truss bridges, the performance required for joints is examined in the cases of intact and damaged conditions of a target bridge. As a result, it can be concluded that, for the improvement of the redundancy of the intact bridge, not only the axial force of the diagonal member but also the effect of the floor beams on the gusset plates should be considered. It can also be remarked that the increase of the in-plane bending capacity is effective for the improvement of the redundancy of the damaged bridge. Moreover, hybrid zooming method, which is a zooming analysis utilizing the result of the global model with refined mesh by plate elements for joints, is proposed in order to reduce the computational cost of nonlinear finite element analysis.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鋼構造 鋼トラス橋 冗長性 非線形有限要素法 崩壊メカニズム 維持管理 余耐力 設計

## 1. 研究開始当初の背景

我国における社会的背景から、既設構造物の維持管理の重要性が増している。さらに、2007年8月に米国で起きた鋼トラス橋の落橋事故が起き、構造物の維持管理、特に、健全度評価と健全度評価に基づく余耐力・余寿命評価、の2点の重要性と困難さが改めて認識された。この落橋事故を受け国内で行った点検により、木曾川大橋および本荘大橋において腐食が原因とみられる斜材の損傷・破断が発見された。これらの橋梁において斜材が破断したにも関わらず崩壊に至らなかったことから、構造物における冗長性の重要さが認識されるようになった。しかし、現在の設計法は部材の照査を基本としており、構造物全体の冗長性を考慮するには至っていない。

このような背景から、構造物、特に鋼トラス橋の崩壊のメカニズムに関する数値解析的な研究、鋼トラス橋の冗長性に関する数値解析的な研究が近年報告されている。これらの鋼トラス橋の崩壊過程や冗長性の解析においては、構造物全体を板要素でモデル化した非線形解析を行うことが理想であるが、現代の計算機をもってしても現実的ではないため、骨組要素でモデル化し、部材の荷重負担状態に応じて剛性を変化させる線形解析を行っており、厳密な意味での終局状態を再現できていない可能性がある。鋼トラス橋の崩壊までを解析するための手法として、このような骨組要素による弾塑性解析は、現時点ではもっとも説得力のある方法であろう。その一方で、米国の落橋事故の主な原因の一つとして、格点部の不適切な設計が報告されているが、格点部が原因となるような崩壊過程を再現するためには、格点部をシェル要素でモデル化した非線形解析が必須となる。先に挙げた先行研究においても、格点部のみを取り出し、シェル要素でモデル化した非線形解析を行っており、リベットホールまでモデル化する必要があると結論付けている。

以上から、現状では、骨組要素による弾塑性解析が妥当であるが、格点部が弱点となるような場合は、正確な挙動が再現できない。骨組要素による解析結果を格点部のみを取り出した局所的モデルに反映することは可能である(ズーム解析)が、局所的なモデルが損傷や大変形することによる荷重の再分配などの挙動が全体解析にフィードバックされず、もっとも重要な崩壊直前の挙動に大きな誤差が生じる可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、研究の背景を鑑み、以下の3点とする。

- (1) 構造物設計のための非線形解析に適した有限要素モデルおよび解析手法の提案。

現状の全体解析と局所解析の相互

作用が考慮できないという問題を解決し、以下の目的を達成するために必要かつ十分なモデル化および非線形解析手法を開発する。

- (2) 構造物の冗長性発揮のメカニズム解明と冗長性評価。

(1)で提案したモデル化および手法を用いて、構造物の崩壊メカニズムを明らかにし、構造物の冗長性評価手法を確立する。

- (3) 構造物の冗長性を最大化する設計法の確立。

(2)で構築した構造物の冗長性評価手法により構造物全体の崩壊に対する照査を行い、現行の部材の設計要件を満足しつつ、構造物の冗長性を最大化する設計法を確立する。

## 3. 研究の方法

- (1) 単純トラス橋の冗長性の向上

単純トラス橋の健全時と部材破断時を想定し、格点部に作用する荷重を明らかにした上で、対象橋梁の冗長性が十分に確保されるために、格点部に要求される性能について述べる。

木曾川大橋と同等の規模の単径間鋼下路式ワーレントラス橋の数値モデルを用いる。図1に示すように、上・下弦材、横桁、縦桁などは梁要素によってモデル化しているが、実橋梁の挙動を精度良く再現するために格点、格点付近は板要素で詳細にモデル化している。部材は端部から支間中央へ向けて斜材をD1、D2、D3とし、上弦材をU1、U2、下弦材をL1、L2、格点部をJ1、J2と呼ぶこととする。橋梁の健全時と斜材D2破断時を想定して解析を行う。解析には汎用解析ソフトを用い、幾何学的および材料非線形性を考慮した静的非線形有限要素解析を行った。RC床版は弾性体とし、板要素を用いた。鋼材はすべてSM400を想定し材料パラメータを設定した。荷重は、死荷重(D)および活荷重(L)を

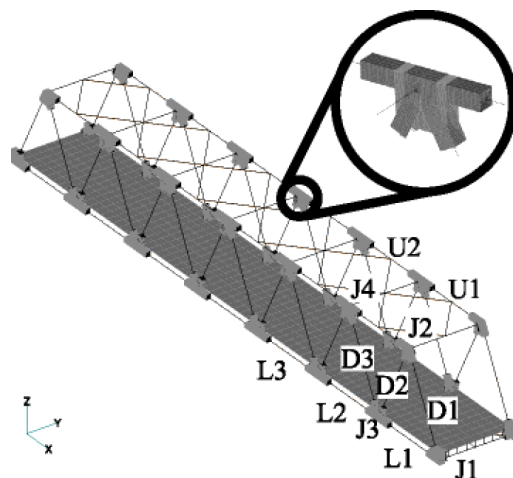


図1 トラスの解析モデルと部材名称

解析モデルに荷重する。活荷重は、道路橋示方書に準じ、 $L$  荷重を床版に圧力として荷重した。この  $L$  に対する倍率で荷重パラメータ  $f$  を定義し、荷重の大きさを  $D+fL$  とし、 $D$  を先行して荷重した後、 $f$  をゼロから漸増させた。相当塑性ひずみが 2% に達したときとときの  $f$  を終局限界荷重  $f_c$  とする。

## (2) 非線形解析の計算負荷軽減

(1) で用いた鋼トラス橋を解析対象とした。床版以外の全ての部材に骨組要素を用いたモデルを全体骨組モデルと呼び、全体骨組モデルの格点部を板要素でモデル化したモデルを全体複合モデルと呼ぶ。さらに、図 2 に示すように、全体複合モデルから格点部のみを取り出したモデルを局所モデルと呼ぶ。有限要素解析の詳細は、(1) と同様である。

まず、全体複合モデルに荷重を載荷し線形解析を行い、得られた部材力を局所モデルの各部材に作用させ、荷重パラメータ  $f$  をゼロから漸増させる。本研究ではこの解析を格点部の耐荷力評価手法として提案し、これを複合ズームング解析と呼ぶ。

次に、全体骨組モデルに荷重を載荷し線形解析を行い、得られた部材力を局所モデルの各部材に作用させ  $f$  をゼロから漸増させる。従来からのズームング解析として、これを標準ズームング解析と呼ぶ。

最後に、全体複合モデルに荷重を載荷し、非線形解析を行う。本研究では、この解析により得られた結果を参照解とする。

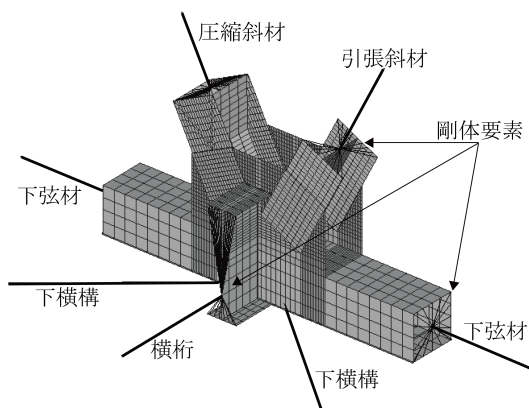


図 2 局所モデル

## 4. 研究成果

### (1) 単純トラス橋の冗長性向上

表 1 に解析結果をまとめた。鋼材をすべて弾塑性体として解析したモデル（以降、基本モデル）の結果は、健全時も斜材 D2 破断時も格点部が先行して塑性変形していることがわかる。そこで、格点部の塑性変形が起こらない場合を考えるために格点部の板要素のみを弾塑性体とした橋梁モデル（以降、格点弾性モデル）の解析を行った。から、健全時は格点弾性モデルの  $f_c$  が基本モデルよりも 0.39

(10%) 向上していることがわかる。このとき、格点部 J3 はせん断による塑性変形を生じた。また、斜材 D2 が破断した場合は、基本モデルに対して、格点弾性モデルの  $f_c$  は 0.34 (45%) 向上した。このとき、上弦材 U1 が曲げによって塑性変形した。これは、斜材 D2 が破断したことにより、トラス構造の三角形が D1, U1, D3, L1 による平行四辺形の構造へと変化したためと考えられる。

つまり、現状の単純トラス橋の耐荷性能は格点部が先行して破壊しないような設計を行うことにより、健全時、D2 破断時のそれぞれの基本モデルと比べて  $f_c$  が向上する可能性があることを示している。格点弾性モデルの健全時と D2 破断時の  $f_c$  を目標として格点部の性能向上を図る。

基本モデルの健全時は格点部 J3 のガセットプレートの斜材 D2 の接続部と、ダイアフラム接続部の間でせん断力による塑性ひずみが増加する結果となった。加えて、格点弾性モデルの場合と同様に D2 斜材において車道側に凸となる曲げが生じた。そこで、格点部 J3 のガセットプレートの板厚を 9 mm から 11 mm に変更したモデル（改善案 1）を用いて、格点部 J3 の塑性変形を防ぎ、健全時の冗長性の向上を試みた。改善案 1 の  $f_c$  は 4.06 となり、基本モデルから 0.37 (10%) 向上し、格点弾性モデルと同等の  $f_c$  に改善することができた。改善案 1 では、格点 J2 のガセットプレートが斜材 D2 が引張によって塑性変形した。以上から、健全時の冗長性の向上のためには、斜材の軸力だけでなく、横桁がガセットプレートへ及ぼす面外方向への影響にも考慮する必要があることがわかった。

D2 破断時の基本モデルは上弦材の上フランジと下フランジにおいて塑性ひずみが増加した。これは格点弾性モデルの D2 破断時と同様に上弦材 U1 に曲げが生じ、より曲げモーメントの大きい格点 J2 付近で局部座屈したと考えられる。そこで、ガセットプレートの面積を大きくし、曲げ耐力の向上を試みた（改善案 2）。これにより曲げひずみの減少を図ることができ、改善案 2 の  $f_c$  は 1.02 となり、基本モデルから 0.27 (36%) の向上を達成した。以上から、斜材破断時の冗長性の向上にはガセットプレートの面内曲げ耐力の向上が有効であることがわかった。

表 1 格点部の性能による冗長性の変化

解析モデル	$f_c$	破断部材
基本 (健全)	3.69	J3 (せん断)
格点弾性 (健全)	4.08	D2 (曲げ)
基本 (D2 破断)	0.75	J2 (曲げ)
格点弾性 (D2 破断)	1.09	U1 (曲げ)
改善案 1 (健全)	4.06	J2 (引張)
改善案 2 (D2 破断)	1.02	J3 (曲げ)



## (2) 非線形解析の計算負荷軽減

ここでは  $p_1$  荷重をスパン中央部に載荷し、格点 J3 に注目する。

まず、荷重パラメータ  $f$  とモデル中で最大となる点の相当塑性ひずみの関係を図 3 に示す。全体複合モデルと複合ズーム解析の荷重-相当塑性ひずみ関係はよく一致しているのに対し、標準ズーム解析の相当塑性ひずみの最大値は、全体非線形解析および複合ズーム解析のそれよりも常に大きかった。これは、標準ズーム解析における損傷箇所が、全体非線形解析および複合ズーム解析におけるそれよりも、塑性化がより進行しやすいためと考えられる。

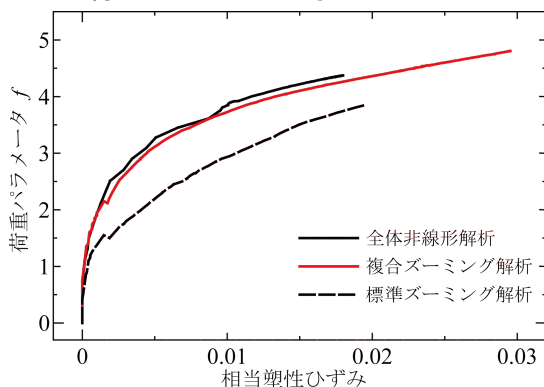


図 3 荷重-相当塑性ひずみ関係

次に、全体非線形解析・複合ズーム解析・標準ズーム解析における着目格点の相当塑性ひずみ分布をそれぞれ図 4、図 5、図 6 に示す。図 4、図 5 に示したように、全体非線形解析と複合ズーム解析では、主に引張斜材とガセットプレートの接合部で塑性変形が生じた。一方、標準ズーム解析では、横桁の下フランジと下弦材の接合部付近で大きな塑性変形が生じていることが図 6 より確認できる。これは、格点部を剛結とした場合、実際よりも剛性が大きくなり、横桁に作用する鉛直方向軸回りの曲げが過大評価されたことによって、横桁と下弦材の接合部で応力が集中したためと考えられる。

以上から、標準ズーム解析のように、格点部を剛結とした場合、格点部に作用する部材力が実際とは異なる場合があり、格点部の破壊モードおよび耐荷力を正確に把握できない可能性がある。したがって、ズーム解析による格点部の破壊モードおよび耐荷力評価を行う際は、格点部の剛性を考慮した全体構造モデルが必要であると言える。

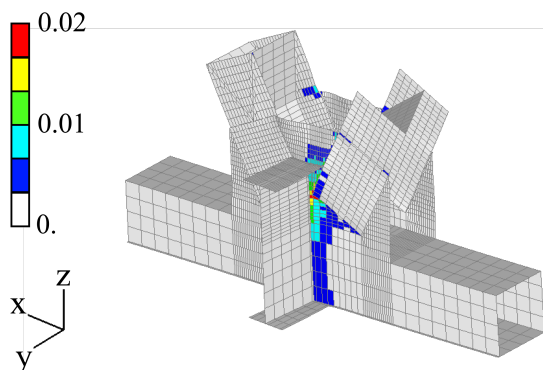


図 4 全体複合モデル格点部の相当塑性ひずみ分布

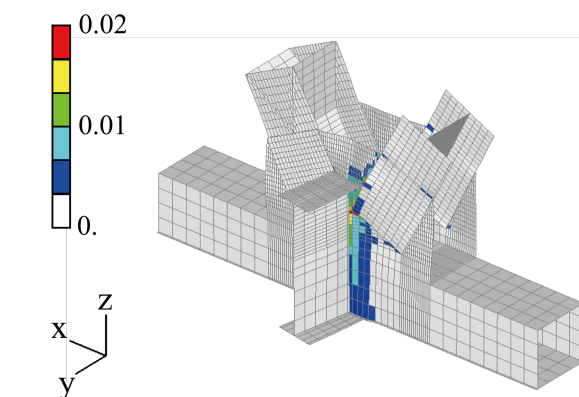


図 5 複合ズーム解析の相当塑性ひずみ分布

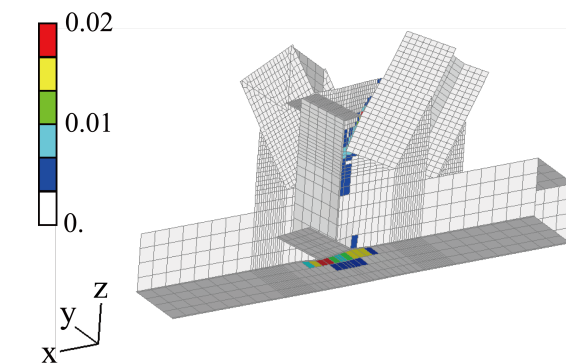


図 6 標準ズーム解析の相当塑性ひずみ分布

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

- 1 山田真幸, 齋木 功, 岩熊哲夫, 鋼コンクリート界面の付着強度評価のためのトルク型せん断試験に関する基礎的検討, 土木学会構造工学論文集, 査読有, Vol.59, pp.37-46, 2013.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/structcivil/59A/0/\\_contents/-c](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/structcivil/59A/0/_contents/-c)

- har/ja/  
2 齋木 功, 鏝 一彰, 山田真幸, 瀬戸川敦, 岩熊哲夫, 非均質な Timoshenko 梁の平均物性評価, 土木学会論文集 A2, 査読有, Vol.68, 1161-1169, 2012.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejam/68/2/\\_contents/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejam/68/2/_contents/-char/ja/)

〔学会発表〕(計6件)

- 1 川村航太, 齋木 功, 岩熊哲夫, 山田真幸, 非線形有限要素解析による鋼ランガー橋のリダンダンシーに関する基礎的考察, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2014年3月8日, 八戸工業大学.
- 2 瀧本耕大, 齋木 功, 川村航太, 山田真幸, 岩熊哲夫, 鋼トラス冗長化のための格点部の性能に関する一考察, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2014年3月8日, 八戸工業大学.
- 3 川村航太, 齋木 功, 岩熊哲夫, 山田真幸, 非線形有限要素解析によるトラス格点の耐荷力に関する一考察, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 東北大学.
- 4 福田 健, 齋木 功, 山田真幸, 岩熊哲夫, 鋼トラス橋格点部のモデル化が冗長性に与える影響, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2012年3月3日, 秋田大学.

〔その他〕

ホームページ等

<http://mechanics.civil.tohoku.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋木 功 (SAIKI, ISA0)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40292247