

# 格点を考慮した鋼トラス橋のリダンダンシー評価

Redundancy evaluation of steel truss bridges with a detailed numerical model of panel points

福田 健\*  
Ken FUKUDA

\*構造強度学研究室（研究指導教員：斉木 功 准教授）

Since the accident of the I-35W Mississippi river bridge in 2007, the importance of redundancy of bridges has been recognized. After the accident, many studies on redundancy by linear or nonlinear numerical analyses with frame elements have been conducted. However, numerical model with frame elements is not appropriate for redundancy evaluation involving ultimate state analysis. In this paper, a series of redundancy analyses of a typical steel truss bridge are conducted by numerical models with plate elements for panel points. Based on the results, appropriate model for redundancy analysis and structural details that ensure redundancy are proposed.

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

## 1. はじめに

近年，米国で鋼トラス橋の落橋事故を契機に国内のトラス橋において斜材破断が発見された．米国のケースと異なり，国内のトラス橋が落橋に至らなかったのは，設計において考慮されていないリダンダンシーが発揮されたためではないかと考えられる．このことから，リダンダンシーの重要性が認識され，その評価のための数値的な研究が行われるようになった<sup>1)</sup>．それらで用いられる解析モデルでは，微小変形の範囲内では実測とよく一致することから<sup>2)</sup>格点部を剛結としているが，リダンダンシーを評価する際には塑性変形まで考慮する必要がある．また，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<sup>3)</sup>ことを考えると，格点部が原因となるような崩壊過程を再現するためにも，格点部をモデル化した非線形解析が必要となる．そこで本論文では，全体解析の計算負荷を抑えつつ，相互作用の考慮が可能となるモデルとして，格点部のガセットプレートや接続する部材を板要素でモデル化を行った．このモデルを用いた非線形解析により，設計では考慮されていない鋼トラス橋のリダンダンシーについて考察した．

## 2. 解析対象および解析手法

### (1) 解析対象

斜材の破断損傷事例が報告された三重県の本曾川大橋と同規模（全長 70.63 m，幅員 8.6 m，高さ 8.5 m）の単径間鋼下路式ワーレントラス橋を設計し解析対象とした．対象橋梁の一般図を図-1 に示す．そして，図中左の固定支点側から支間中央に向けて順に上弦材を U1 ~ U3，斜材を D1 ~ D7，下弦材を L1 ~ L4，格点部を J1 ~ J8 と呼ぶこととする．なお，対象橋梁は橋軸方

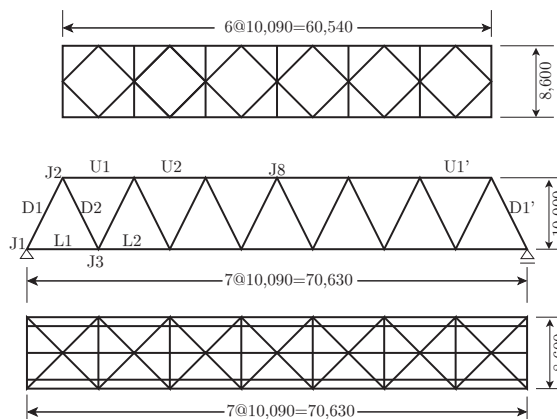


図-1 解析対象の一般図（単位：mm）

向において支間中央で左右対称となる構造である．また，対称な位置にある部材には（ ）' をつけて U1' や D1' などと呼ぶ．斜材断面は，引張りが H 型，圧縮が箱型とした．

### (2) 有限要素モデル

本解析で用いた 3 次元有限要素モデルは，梁要素と板要素，剛体要素で作成した．従来の研究で用いられているものと同じように格点部を剛結とし，床版以外のすべての部材に梁要素を用いたモデルを骨組モデルと呼び，図-2 に示す．また，本研究ではトラス格点部の挙動をより精度よく再現したいので，図-3 に示すようにガセットプレートとその近傍の連結部材を板要素によりモデル化したこのモデルを詳細モデルと呼び，図-4 に示す．ガセットプレートと弦材のウェブは一体化した構造としているため，ガセットプレートの板厚は各弦材毎にウェブ板厚と等しくしている．なお，斜材軸力より算出される設計上の必要板厚は弦材ウェブ厚よりも約 1/9

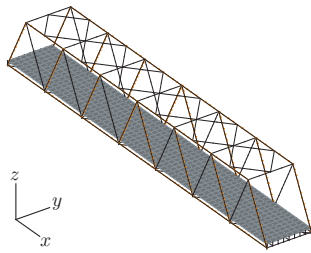


図-2 骨組モデル

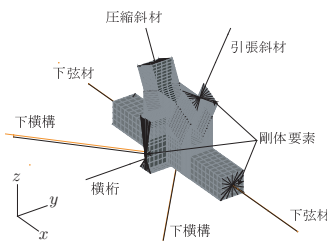


図-3 板要素による格点部のモデル化

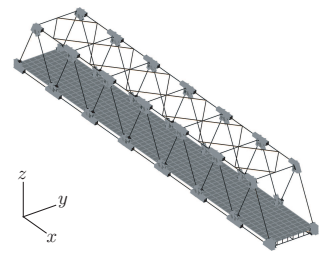


図-4 詳細モデル

～ 8/9 と小さかった．境界条件は固定側を橋軸直角方向軸回りの回転のみ自由とし，可動側を橋軸方向並進と橋軸直角方向軸回りの回転を自由となるようにしている．

数値解析には，汎用有限要素解析ソフト NX NASTRAN を用い，幾何学的および材料非線形性を考慮した．RC 床版はいずれのモデルも弾性体とし，板要素を用いた．鋼材はすべて SM400 を用いた弾塑性体として，von Mises の降伏条件，線形等方硬化則を用いて，初期降伏応力を 235 MPa 硬化係数を Young 率の  $10^{-2}$  倍としている．荷重は，道路橋示方書<sup>4)</sup>に準じ，死荷重と活荷重を与える．活荷重 (L) は，規定の荷重を床版上に載荷する．本研究では，死荷重は変えず，活荷重 (L) のみ任意倍した．この活荷重 (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 を先行して載荷した後， $f$  をゼロから漸増させた．こうした一連の繰り返し収束計算には，弧長増分法を用いた．本研究では部材の破断をモデル中の最大相当塑性ひずみが 2% を超えた場合と定義し，この時の荷重パラメータを  $f_c$  とする．

### 3. 解析結果

#### (1) 健全時の破壊モード

ここでは  $p_1$  荷重を支点側に寄せた場合で検討する．この時の荷重パラメータ  $f$  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-5 に示す．相当塑性ひずみの最大値は，骨組モデルでは D2 で生じ，詳細モデルでは J3 のガセットプレートで生じたが，詳細モデルの D2 の相当塑性ひずみは骨組モデルのそれよりも常に大きかった．これは，格点部をモデル化したことにより部材長が減少したことで 2 次応力が増加したためと思われる．破壊時の荷重パラメータについては，骨組モデルでは  $f_c$  が 5.4 であり，詳細モデルでは  $f_c$  が 4.7 であった．両モデルの破壊時の相当塑性ひずみ分布を図-6，7 にそれぞれ示す．図-6 からわかるように，骨組モデルではほぼ D2 のみで塑性変形が生じている．図-7 から，詳細モデルでは D2 と横桁の間の広い範囲で塑性変形が生じていることが確認された．

#### (2) 部材破断時の破壊モード

##### a) 引張斜材 D2 の破断ケース

先に述べた D2 が破断したケースで検討する．部材破断は，対象部材をすべて削除した状態から解析を始

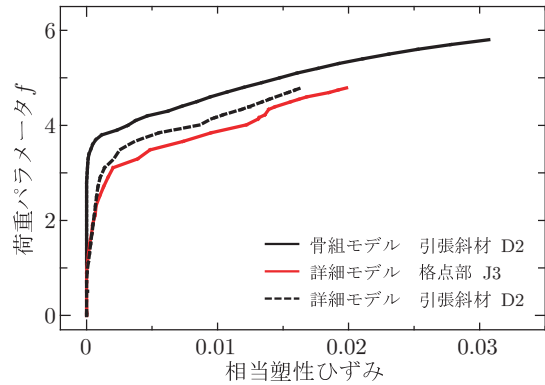


図-5 健全時の荷重 - 相当塑性ひずみ関係

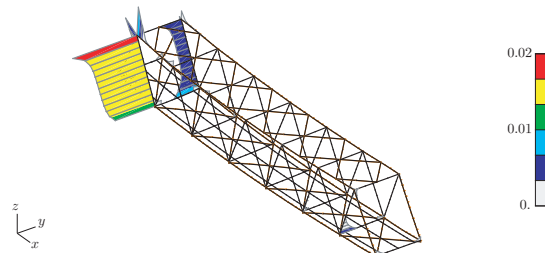


図-6 健全時骨組モデルの相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 5.4$ , 変形 10 倍)

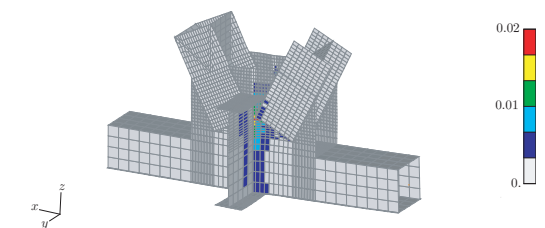


図-7 健全時詳細モデル格点部 J3 の相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 4.7$ , 変形 10 倍)

めた．ここでは  $p_1$  荷重を支点側に寄せた場合で検討する．骨組モデルの  $f_c$  は 1.1 であり，この時の相当塑性ひずみ分布を図-8 に示す．破断斜材の反対側の引張斜材下部で相当塑性ひずみが 2% を超えた．縦桁や斜材・弦材に曲げが生じ，破断した斜材が受け持つ部材力が反対側に伝達されている．詳細モデルの  $f_c$  は 0.7 と小さく．図-9 に示すように上弦材 U1 とガセットプレートの連結部で局部座屈が生じており，ガセットプレートを超

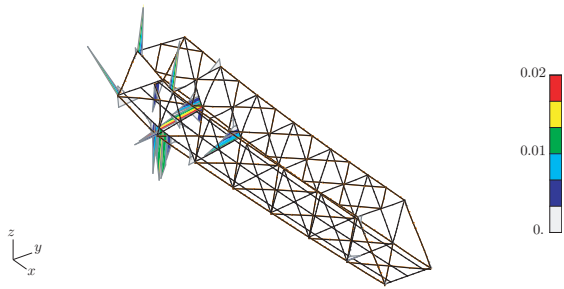


図-8 引張斜材 D2 破断時骨組モデルの相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 1.1$ , 変形 10 倍)

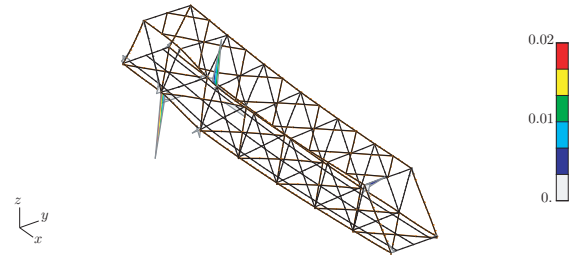


図-11 引張斜材 D4 破断時骨組モデルの相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 2.6$ , 変形 10 倍)

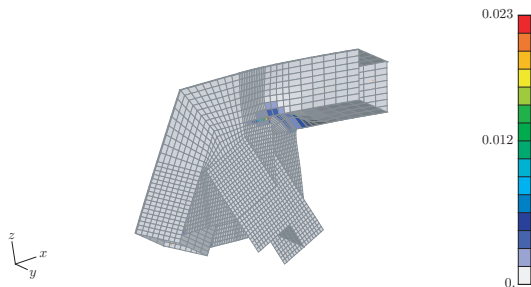


図-9 引張斜材 D2 破断時詳細モデル格点部 J2 の相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 0.7$ , 変形 10 倍)

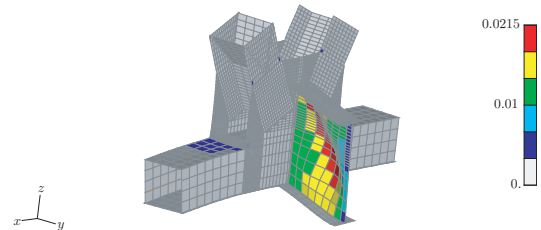


図-12 引張斜材 D4 破断時詳細モデル格点部 J3 の相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 2.1$ , 変形 10 倍)

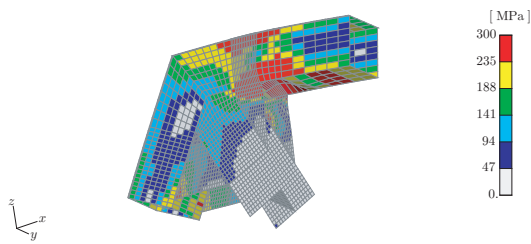


図-10 引張斜材 D2 破断時詳細モデル格点部 J2 の Mises 相当応力分布 ( $f_c = 0.7$ , 変形 10 倍)

点とした破壊が生じると考えられる。この時、健全時に比べて上弦材の軸力は低下しているが、引張斜材がないことで生じる曲げの影響を強く受けるため、上弦材の局部座屈や、それに伴うガセットプレートの面外変形が大きくなる結果となった。図-10 の Mises 相当応力の分布からも、上弦材やガセットプレートが曲げを受けて広い範囲で降伏していることがわかる。また、圧縮斜材 D3 の断面を絞っている箇所でも局部座屈が発生していた。しかし、骨組モデルで相当塑性ひずみが増加した斜材は、詳細モデルではほぼ弾性域内であった。

#### b) 引張斜材 D4 の破断ケース

次に D4 が破断したケースで検討する。ここでは  $p_1$  荷重をスパン中央部に寄せた場合で検討する。骨組モデルの  $f_c$  は 2.6 であり、図-11 に示したように、部材がなくなったことで弦材と斜材で囲まれた部分の曲げ変形が大きくなるため、格点部近くの下弦材で塑性ヒンジを形成すると考えられる。しかし、詳細モデルでは  $f_c$  が 2.1 と小さくなり、図-12 から J3 に連結された横桁のウェブで塑性化が進行し、せん断座屈が生じた。J5

に連結された横桁のせん断力を負担するため、下弦材と縦桁間でせん断力が大きくなったと考えられる。しかし骨組モデルでは横桁は塑性化していなかった。これは Timoshenko はりでモデル化しているとは言え、せん断剛性・強度ともに過大評価したためだと考えられる。

以上から、部材破断を伴うような極めて変形が大きくなるような場合、骨組モデルと詳細モデルでは異なった崩壊までの過程が得られた。

#### (3) ガセットプレートに着目した破壊モード

詳細モデルでは、ガセットプレートの板厚は各弦材のウェブ厚と等しくしているが、道路橋示方書に示される設計式で得られる板厚を用いた時に、リダダンシーにどのような影響を示すのかを検討する。この時のモデルを設計板厚モデルと呼び、表-1 に格点部毎のガセットプレートの板厚を示す。

まず、 $p_1$  荷重を L3 の範囲に寄せた場合での設計板厚モデルを検討する。この時、図-13 に示したように、J4 において圧縮斜材側のガセットプレートの座屈が生じた。この時の  $f_c$  は 2.8 で詳細モデルより 30% 低下した。これは、詳細モデルと比べてガセットプレートの板厚が半分以下であるため、道路橋示方書では想定していない局部座屈を引き起こす結果となった。その他の格点部のガセットプレートはほぼ弾性域であり、J4 のみ塑性化した。この荷重配置では、他の荷重配置に比べて D3・D4 の軸力が大きくなるため、J4 のガセットプレートの変形がより顕著になっている。

次に、 $p_1$  荷重をスパン中央部に寄せた場合での設計板厚モデルを検討する。この時、図-14 に示したように、 $f$  が 2.6 の時、J6 や J6' において圧縮斜材側のガセットプレートの座屈が生じた。これは、先に述べた

表-1 ガセットプレート板厚 (単位: mm)

格点部	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
詳細モデル	10	9	13	14	14	13	17
設計板厚モデル	8	8	6	6	4	4	2

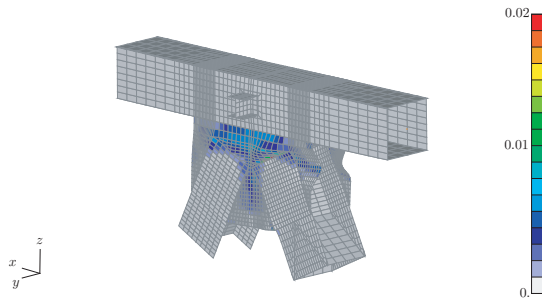


図-13 設計板厚モデル格点部 J4 の相当塑性ひずみ分布 ( $f_c = 2.8$ , 変形 10 倍)

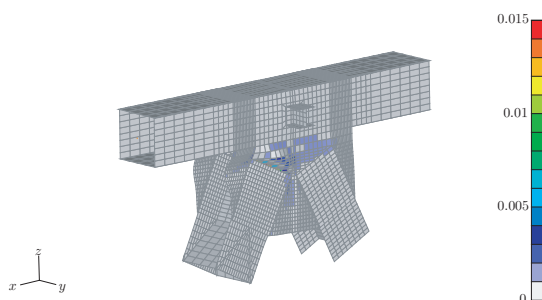


図-14 設計板厚モデル格点部 J6 の相当塑性ひずみ分布 ( $f = 2.6$ , 変形 10 倍)

ケース同様, 局部座屈を引き起こす結果となった. この荷重配置では, 他の荷重配置に比べて D5・D6 の軸力が大きくなるため, より J6 のガセットプレートの変形が顕著になっていると考えられる. また, J6・J6' に比べれば比較的小さいが, J2・J4 でもガセットプレートの塑性化が進行していた.

以上から, 設計板厚では格点部のガセットプレートの座屈によりわずかな荷重パラメータの増加に対して急激に相当塑性ひずみが増加し, 崩壊に至ることが考えられる. それに対し, 詳細モデルでは J4・J6 とともに荷重パラメータが大きくなって, ほぼ弾性域を維持している. よって, 設計式のみに従った板厚ではガセットプレートの座屈を早期に引き起こし, 格点部の座屈がクリティカルになる破壊モードを取る可能性がある.

#### (4) 格点補強モデル

荷重パラメータが最も小さい段階で崩壊に至る可能性がある D2 破断時の詳細モデルのリダンダンシー向上のための補強方法を提案する. 破壊モードとして格点部 J2 の上弦材下フランジやガセットプレートの局部座屈が生じることから, それぞれの内側に補剛材を取り付けて局部座屈を抑制させる. また, 圧縮斜材の絞り部での局部座屈を防ぐため, ウェブを絞らず, 箱型のままハンドホールを設けた状態でガセットプレートに連結させる. 荷重パラメータ  $f$  が 1.1 の時の相当塑性ひずみ分布

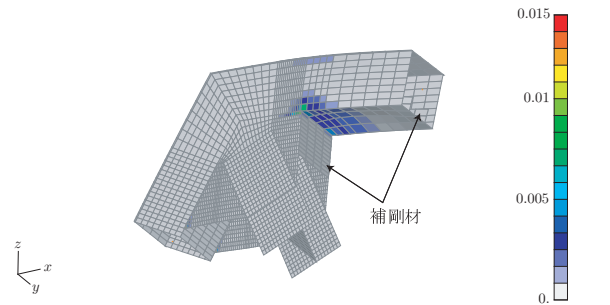


図-15 格点補強モデル格点部 J2 の相当塑性ひずみ分布 ( $f = 1.1$ , 変形 10 倍)

を図-15 に示す. 図-9 と比べ, 荷重パラメータが大きいにも関わらずガセットプレートに生じている相当塑性ひずみが最大でも 1% 以下に抑えられていることがわかる. また, 上弦材の下フランジの局部座屈も発生していない. このような補強により  $f_c$  は 0.7 から 1.1 以上に改善した. よって補剛材を適切に配置させることで面外方向の剛性が増すため, 格点部の局部変形を抑制し, リダンダンシーを向上させることが可能であると言える.

#### 4. おわりに

本論文では, 以下のことを結論づける.

- 格点部を詳細にモデル化することにより格点部を剛結とした場合と比べて荷重の分配が異なり, ガセットプレートの塑性化がより早く顕著に現れるため, 実橋の挙動を再現するためには格点部を詳細にモデル化することが重要である. また, 剛結とした場合, リダンダンシーを過度に高く評価してしまう可能性がある.
- 従来の結合部を剛結とする場合, 梁要素の部材長が実際よりも長くなるため, 曲げが斜材に作用する時の塑性変形を過小評価してしまう可能性がある.
- 本研究で対象とした様なトラス橋において, ガセットプレートの板厚が付加要素によって必要以上に設定されるため, 橋梁全体のリダンダンシーを相当付加していると言える.

#### 参考文献

- 1) 永谷秀樹, 赤石直光, 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.
- 2) 吉岡 勉, 山口宏樹, 伊藤 信, 原田政彦: 鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響, 土木学会構造工学論文集, Vol.55A, pp.295-305, 2009.
- 3) National Transportation Safety Board: *Highway Accident Report, Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota August 1, 2007*, NTSB/HAR-08/03, Washington, D. C., 2008
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 2002.

(2012 年 2 月 8 日 提出)