# 弾塑性解析によるトラス橋の部材破断時のリダンダンシー評価に関する一考察

豊田高専　正会員　川西直樹　　名古屋工業大学　フェロー　後藤芳顯

## 1. はじめに

トラス橋の部材破断時の安全性を簡易に評価するため現在では静的な弾性微小変位解析に基づいたリダンダンシー解析[1)]が行われるのが一般的であり，部材破断による衝撃の影響を考慮するため静的な部材照査式の値($R$値)の増分量に衝撃係数を乗じてこの影響を考慮した$R$値を算定し，安全性の評価がなされている．文献2)で著者らは，弾性時刻歴応答解析により部材破断時の衝撃係数を調べ，1)部材破断による高速な縦振動による衝撃（一次衝撃）はリダンダンシー評価に及ぼす影響はないこと，2)照査上重要となる静的応力増分の大きな部材の衝撃係数はほぼ一様な値となり，収束値が存在し，その値は 1 自由系から推定される値(1.85)以下となることを明らかにしている．この検討は，弾性微小変位解析に基づいたリダンダンシー解析において利用する衝撃係数に着眼したものであり，衝撃係数を算定する手法は弾性微小変位時刻歴応答解析に基づいている．このため，部材破断の衝撃により部材が塑性化する場合の応答を予測するまでには至っていない．

本報告では，弾塑性有限変位時刻歴応答解析を用いて下路式鋼トラス橋の引張り斜材破断時の応答特性を調査し，1)一次衝撃の影響が弾塑性応答に与える影響を明らかにし，2)弾塑性応答による$R$値と弾性応答予測による$R$値の差について具体に考察する．

## 2. 検討方法

(1)検討対象と破断ケース：　検討対象（図1）は，文献2)でも用いた支間長72.8mの下路式ワーレントラス橋を3次元はり要素(ABAQUS:B31)でモデル化し，全ての格点とも剛結合とする．質量については床版，鋼材の自重分を考慮し，破断想定部材に対して影響線載荷したB活荷重についても質量として考慮する．なお，床版剛性については無視する．鋼材の材料構成則はMisesの降伏基準に従い，等方硬化則とし，分布質量を考慮する．ひずみ硬化については図2の多直線近似モデルとする．要素分割については二次衝撃のみを考慮した近似モデルでは1部材あたり30分割とするが，一次衝撃を考慮するモデルでは高速な縦振動を考慮するため，破断箇所の周辺の部材については1部材あたり400分割(精密モデル)とし，小さな時間増分(<4.0$^{-6}$ sec.)を用いて弾塑性時刻歴応答解析を実施する．なお，部材破断過程の数値解析上の取り扱いについては文献2)と同様な方法である．粘性減衰については一次衝撃の影響を調べる検討では無視し，二次衝撃による$R$値を算定する検討では5%のRayleigh減衰を考慮する．

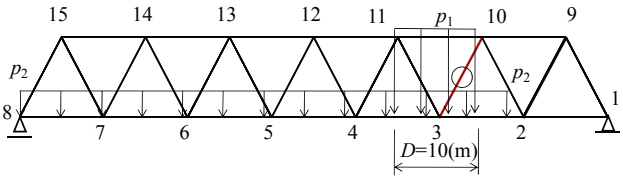


図1 検討対象(下路式ワーレントラス)

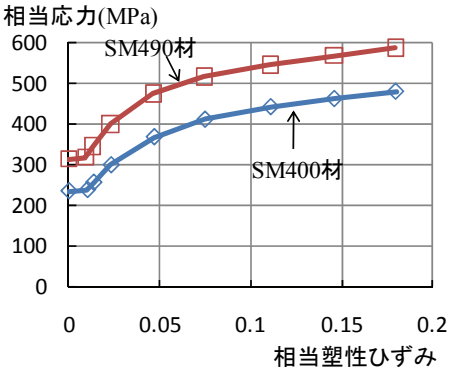


図2　鋼材のひずみ硬化

破断ケースについては引張斜材の部材 3-10 が瞬間的に判断するケースを想定する．このケースについて文献2)の弾性解析による検討結果では応力の衝撃係数の収束値は1.8であり，部材破断後クリティカルになる部材2-3での最大発生応力は降伏応力の3倍を超えており，弾塑性応答が生じるケースである．

(2)部材照査：　軸力$N$と曲げモーメント$M$が同時に作用する部材の照査式は文献1)などと同様に次式を用いることとする．

軸力$N$が引張の場合　$R = N/N_y + (M/M_p)_I + (M/M_p)_O$　(1)

軸力$N$が圧縮の場合　$R = N/N_{cr} + 1/(1-N/N_E)_I (M_{eq}/M_p)_I + 1/(1-N/N_E)_O (M_{eq}/M_p)_O$　(2)

キーワード：トラス橋，部材破断，衝撃係数，弾塑性解析，リダンダンシー
連絡先：〒471-8525 豊田市栄生町2-1，TEL:0565-36-5883，FAX:0565-36-5883

ただし，弾塑性有限変位解析では付加曲げに関する項 $N/N_E$ については無視して $R$ 値を算定する．上式において，下添字 $I,O$ は曲げに関する面内，面外成分を表し，$M_p$，$M_{eq}$ は全塑性モーメント，等価換算モーメント，$N_y, N_{cr}$ は全断面降伏軸力，圧縮力による座屈を考慮した部材の圧縮耐力を表す．$N_E$ はオイラー座屈荷重である．ここでは主構部材について上式による $R$ 値を算定し，（死荷重＋活荷重）状態において，静的解析における部材破断前の値を $R_0$，部材破断後の値を $R_1$ と表し，さらに，時刻歴応答解析における照査値の最大を $R_{\max}$ と表現する．

## 3. 検討結果

(1)一次衝撃による影響：　図 3 には部材 2-3 の応答応力を示す．弾性解析と弾塑性解析の結果のそれぞれについて，一次衝撃の影響を考慮した精密モデルと二次衝撃の影響のみを考慮した近似モデルの結果を比較すると，近似モデルでは一次衝撃の縦振動による高周波振動の再現が不十分ではあるものの，この差は小さく，二次衝撃の評価に占める一次衝撃の割合は小さいといえる．とくに，弾塑性解析の結果では 0.3sec.以降に材料の履歴減衰の影響で一次衝撃による高周波振動はほぼ消散し，それ以降精密モデルと近似モデルの応力の応答値に差はないことが分かる．

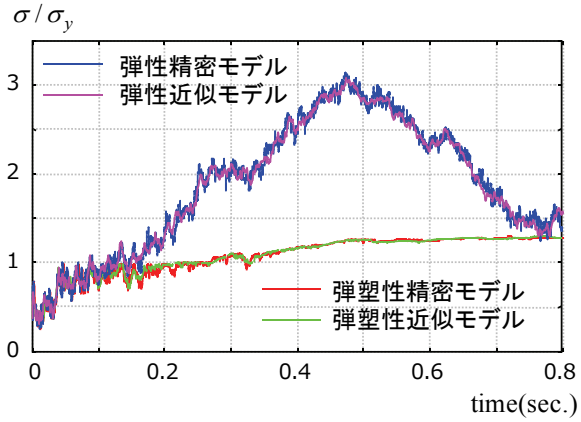


図 3　部材 2-3 の応答応力(減衰無視)

(2)二次衝撃による部材照査値 $R$：　ここでは文献 2)と同様に，部材破断の二次衝撃による $R$ 値の散布状況について確認する．図 4 には，$R_{\max}$ が大きな部材について静的な $R$ 値の変化量($R_1-R_0$)と動的な $R$ 値の変化量($R_{\max}-R_0$)の関係をプロットしている．これより，弾性解析および弾塑性解析の両者については原点を通る直線関係がそれぞれ同様に認められ，その直線勾配（$R$ 値の衝撃係数）を比較すると，弾性解析結果 1.8 に比べ，弾塑性解析結果では 1.4 と小さくなるのが特徴的である．これは材料の降伏後の応力上昇が低下することと，塑性化によるエネルギー吸収があることによると考えられる．

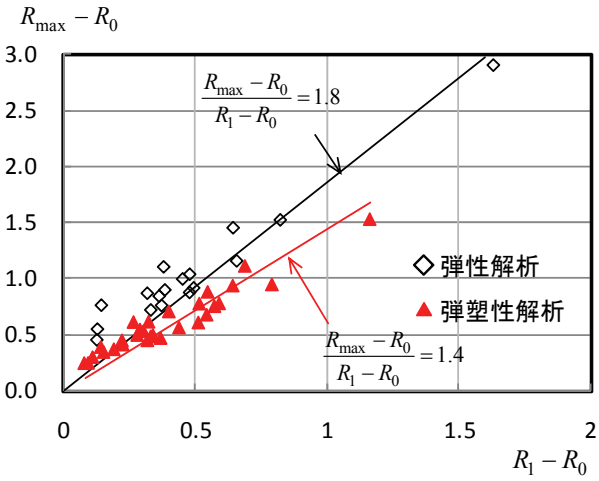


図 4　静的および動的な $R$ 値の変化量の関係

表 1 は，弾塑性解析の結果 $R_{\max}>1$ となる部材について，$R_{\max}$ が大きい部材順に弾性解析の結果 $R_{\max,e}$ と弾塑性解析の結果 $R_{\max,p}$ の値を具体に比較したものである．なお，部材番号に上添字(')が付されたものについては，破断部材がない主構面の部材であることを示している．この表より多くの部材で弾塑性解析の $R_{\max}$ 値の方が弾性解析の結果に比べ小さくなっているものの，部材によっては逆の関係になるものもあり，その大小関係については容易に結論付けできない．これは，弾塑性解析では塑性域に入った部材の剛性低下に伴う応力の再配分が考慮されるため，弾性解析に比べ応力が小さくなるだけでなく，大きくなる部材も存在するためと考えられる．

表 1　$R_{\max}$ の比較

| 部材番号 | $R_{\max,e}$ | $R_{\max,p}$ |
|---|---|---|
| 2 - 3 | 3.44 | 2.08 |
| 7 - 15 | 2.32 | 1.82 |
| 7' - 15' | 1.58 | 1.71 |
| 2 - 9 | 1.57 | 1.65 |
| 2' - 9' | 1.56 | 1.53 |
| 2 - 9 | 2.00 | 1.53 |
| 3' - 10' | 2.08 | 1.28 |
| 4 - 11 | 1.31 | 1.09 |
| 4' - 11' | 1.49 | 1.09 |
| 11 - 12 | 1.44 | 1.08 |
| 10 - 11 | 1.52 | 1.07 |
| 4 - 12 | 0.93 | 1.05 |
| 8 - 15 | 1.15 | 1.00 |

参考文献：1) 永谷ら：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.410-525, 2009.　2) 後藤ら：リダンダンシー解析における鋼トラス橋の引張り斜材破断時の衝撃係数，構造工学論文集，Vol.56A, pp.792-805, 2010.