

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560490

研究課題名（和文） 部材破断によるトラス橋の実用的安全照査法の開発と崩壊メカニズムの解明

研究課題名（英文） Evaluation of safety and the collapse mechanism caused by sudden failure of members in truss bridges

研究代表者

川西直樹（KAWANISHI NAOKI）

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：60300589

研究成果の概要（和文）：

部材破断した構造物の安全性の評価は部材破断による増幅効果を衝撃係数として考慮したリダンダンシー解析が行われており、この係数の取り扱いが重要である。本研究では、部材破断による衝撃による動的増幅効果を詳細に検討した。これらの結果から、部材破断時の衝撃係数は部材毎に広く分布するものの、安全照査上クリティカルとなる部材については1.4～1.8の間で収束することが分かった。このような衝撃係数の収束値を実務上簡単に予測するための方法としてRMS法に基づいた簡便な方法を提案し、その適用性について検証した。

研究成果の概要（英文）：

The dynamic stress amplification resulting from a sudden failure of a member has a considerable influence on a progress to the overall collapse. Therefore, this dynamic effect must be included in the conventional static redundancy analysis as an impact factor. The calculated values of the impact factor vary widely from member to member. However, the impact factors for critical members in the redundancy analysis take almost a constant value that ranges from 1.4 to 1.8. In order to predict approximately the magnitude of the member impact factors without carrying out the dynamic response analysis, a simplified method based on the RMS mode combination method is proposed. The accuracy of the member impact factors calculated by this simplified method is moderate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
22年度	2,100,000	630,000	2,730,000
23年度	1,200,000	360,000	1,560,000
24年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：トラス橋，リダンダンシー，衝撃係数，進行性破壊

## 1. 研究開始当初の背景

近年、国内外において老朽化した鋼トラス橋の落橋事故や引張り材破断などの事故が相次いで発生したため、老朽化したトラス橋の合理的な補修計画を策定することが重要となっている。このため、現場レベル

において迅速にトラス橋の安全性を適切に照査しうる手法を開発しておくことが肝要となる。また、橋の崩落原因のメカニズムを解明しておくことは、適切で効果的な維持管理の点検法を確立する上で重要である。トラス橋の部材に破断が生じると、破断前

の部材力が瞬間的に解放され、構造系が変化するため、橋全体が振動し、単なる構造系の変化による静的つり合い状態よりもさらに大きな変形が生じるため、部材破断による構造系全体の安全性を確認するためには、この動的増幅効果を見込んでおく必要がある。

現状の実務では、この動的効果を静的解析に基づいたいわゆるリダンダンシー解析によって検討がなされている。リダンダンシー解析では破断を想定する部材を除いた上で死荷重や活荷重を考慮した静的な構造解析で得られる応力増分や断面力増分に破断時の衝撃係数を乗じて動的な応答値を予測し、応答値が許容される限界値以内にとどまっているか否かの照査がなされているが、静的なリダンダンシー解析により安全性を照査するには部材破断の動的増幅効果を考慮するために用いられる衝撃係数を正確に評価することが非常に重要となる。この衝撃係数の取り扱いについて既往の研究や実務現場でみると、構造減衰 5%を考慮した一自由度系の振動から算出される 1.85 という全部部材一律の衝撃係数を用いるという非常に単純な考えに基づいて動的増幅効果が考慮されている。しかし、トラス橋のように多くの部材で構成される構造物の一つの部材が破断した場合には複数の振動モードが連成した振動現象が生じるため、上記のような単純な考え方により評価されている衝撃係数の妥当性には疑問がある。

上記のようなリダンダンシー解析による構造全体系の安全性照査は、補修計画を策定する上で有効ではあるものの、トラス橋の崩壊についての原因を具体的に究明することはできず、崩壊原因やそのメカニズムを解明するためには、トラス橋の崩壊過程を正確に追跡可能な高度な非線形解析が必要となる。とくに、トラス橋の崩壊の原因は、一部材の破断だけによるものではなく、破断後の振動によりさらに他の部材が破断する連鎖的な破壊の進行（進行性破壊）が関与しているものと推察される。土木分野における構造物の進行性破壊についてのシミュレーションは大地震時の動的応答の検討など最新の研究事例でごくわずかに見受けられるものの、部材破断にともなうトラス橋の進行性破壊を検討した事例は現在までのところ国内外において全く認められず、未解明な状況である。

## 2. 研究の目的

本研究では、まず、鋼トラス橋の引張り斜材破断時の動的な挙動を検討するための正確な数値解析法を検討する。つぎに実在上路式と下路式鋼トラス橋を対象に、

斜材破断時の詳細な時刻歴応答解析を実施し、リダンダンシー解析に用いる衝撃係数の特性について考察する。また、時刻歴応答解析を行わずに衝撃係数を予測する簡易的な手法を提案し、その精度について検討する。さらに、リダンダンシー解析に考慮すべき妥当な衝撃係数について実務的な観点から考察する。

## 3. 研究の方法

ここでは、実在の単純支持形式のトラス橋をモデル化した図-1 に示す支間 72.8m の下路式ワーレントラス橋を検討対象とする。全ての格点では部材がそれぞれ剛結されていると考える。コンクリート床版については、非合成として設計されているため、いずれのトラス橋でもその質量のみを考慮し、床組の格点に等価な集中質量を配置する。活荷重については B 活荷重を破断想定部材に影響線載荷した状態で荷重を隣接格点に等価な集中質量として振り分ける。これらの質量に重力加速度を作用させることで、死荷重と活荷重の載荷状態を表す。

部材を離散化する要素としては軸力に加え、曲げの影響を考慮するために汎用構造解析ソフトで計算モデルを構築し、部材破断時の動的応答を弾性微小変位時刻歴応答解析により算定する。部材破断直後の縦振動による一次衝撃の影響を精度よく解析するため、破断部材および周辺部材については一部材あたり 200~400 分割とする細密な要素分割とする。周辺以外の部材については縦振動の影響が小さいので一部材あたり 24~30 分割とする。また、動的解析の時間増分については、Courant 条件を満足するような非常に小さな時間増分を採用する。

二次衝撃のみを対象とした近似解析では破断部材の縦振動の影響を無視できるので、一部材あたりの分割数は 24~30、時間増分は  $2.0 \times 10^{-2}(\text{sec.})$  で十分であり、計算時間は大幅に低減される。

減衰としては、現在リダンダンシー解析で用いられている衝撃係数と比較すること

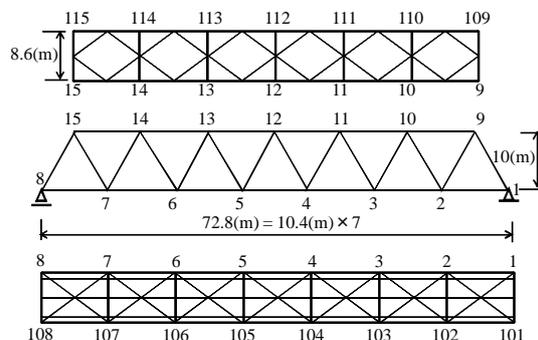


図-1 下路式ワーレントラス橋

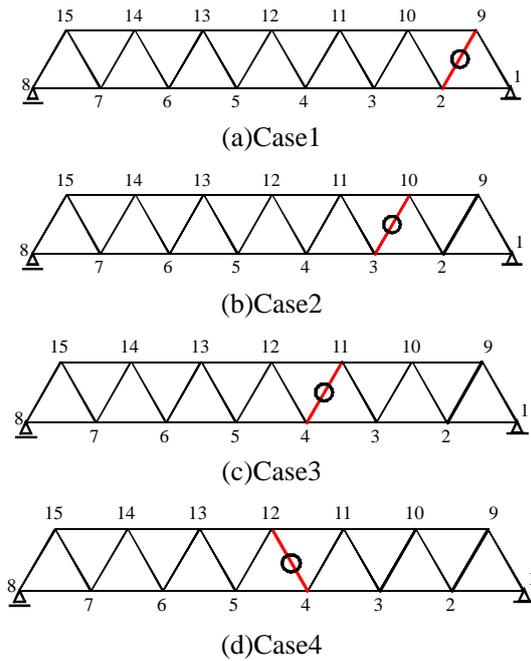


図-2 部材破断ケース

を一つの目的としていることから、この算定に用いられている構造減衰 5%に相当する Rayleigh 減衰を考慮する。Rayleigh 減衰係数  $\alpha$ 、 $\beta$  は部材が破断したトラス構造のたわみ振動に関して支配的な固有振動モードとして有効質量が一番大きいモードと二番目のものの減衰が 5% という条件から決定する。なお、破断部材の縦振動については安全側の検討を行うため減衰を考慮しない。

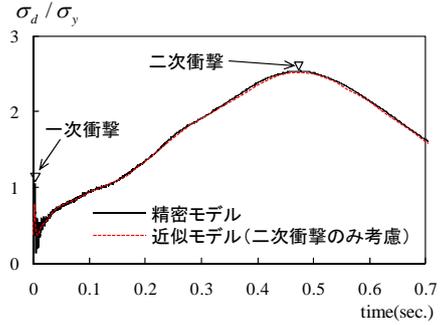
破断を想定する部材は、もっとも腐食しやすい引張り斜材とする。そして、破断は部材の中央から発生すると仮定する。対象とする引張り斜材の位置については各トラス橋について図-2 のように 4 ケースを設定する。

本研究では、さらに簡易な衝撃係数の算定方法として、モーダルアナリシスと応答スペクトルを組み合わせ、地震時の最大応答値を近似的に予測する方法とほぼ同様な手法で部材破断による衝撃係数を予測する簡易算定法を提案する。この手法と時刻歴応答解析の結果を比較することで簡易法の適用性について検討する。

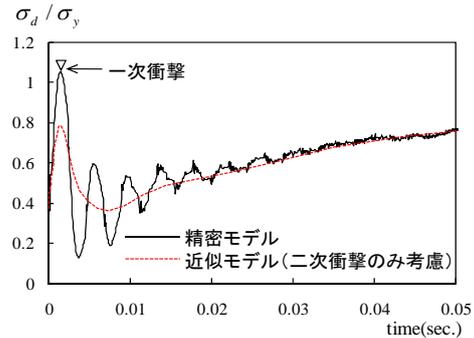
#### 4. 研究成果

一次衝撃を無視した近似解析ではこれを考慮した正確な解析に比べ計算時間が約 1/5000 に低減でき、しかも衝撃係数算定に重要な二次衝撃による応答を精度良く解析できることが判明し、有効な解析手法であることが分かった(図-3)。

近似解析により、二次衝撃により生じる



(a)一次衝撃と二次衝撃による応答応力



(b)一次衝撃近傍の応答応力の詳細

図-3 部材 2-3 の応答応力 (Case2)

衝撃係数と部材破断による静的応力増分の各部材の散布状況を図-4 に記す。この図より、部材破断による静的な応力増分の絶対値が小さい部材応力評価点の衝撃係数は大きくばらつき、衝撃係数も非常に大きな値となる場合がある。しかし、静的応力増分が大きくなると衝撃係数は急速に減少し、ある一定値に収束する傾向を示す。さらに具体的に見ると、最も支点に近い斜材が破断する Case1 では衝撃係数の収束値は約 1.8 で URS Corporation が提案する衝撃係数 1.854 に近い。破断部材が支点から遠ざかるにつれて収束値はやや減少し、Case2, Case3 ではそれぞれ約 1.6 と 1.5 となる。Case4 については静的応力増分の値が  $0.5 \sigma_y$  以下で小さく、収束値は必ずしも明瞭ではないが、再び 1.8 に近づいている。衝撃係数が各部材ごとに異なり、構造系の差異や部材破断位置によっても異なるという数値解析の結果は、部材破断時のトラス橋の振動現象が 1 自由度系のモデルでは十分に表せないことを示している。

つぎに、簡易な衝撃係数の算定法を提案する。提案する簡易法では部材が破断した構造系について予め固有値解析を行う。ここで計算される第  $n$  次モードの固有円振動数、固有モードベクトルとする。つぎに、部材が破断した構造系を基準として、破断部材の両端の格点に破断前の部材力を静的に作用させ、部材破断前の状態を再現した

ときに生じる変位について、固有モードベクトルで展開し、モーダル変位を求める。部材破断により生じる振動のモーダルアナリシスでは、このモーダル変位を初期振幅とした各モードの自由振動を重ね合わせるにより応答値が得られる。

衝撃係数を求めるのに必要な最大応答値の予測にはRMS法を用いる。

図-5には簡易算定法で得られた各部材の衝撃係数を斜材の破断ケースごとにの関係として示す。図-4と5を比較することで衝撃係数の簡易算定法の精度を検討する。これより、部材破断による静的応力増分が小さい部材の衝撃係数は大きくばらつき、衝撃係数も非常に大きな値となる。また、静的応力増分が大きくなると衝撃係数は急速に減少し、ある一定値に収束する傾向を示す。さらに、衝撃係数の収束値の大きさは破断部材の位置に影響され、破断部材がトラス橋の支点に近いとやや大きくなる傾向にあるが、上路式トラス橋では、部材破断位置によらずほぼ一定である。以上のよ

うな、簡易算定法で得られた衝撃係数の特性は時刻歴応答解析で計算された図-4の衝撃係数の特性を良く表している。

衝撃係数の値は静的応力増分の絶対値が大きくなるとほぼ一定値に収束するが、簡易算定法によるこの収束値は時刻歴応答計算結果による値のほぼ良い近似となっていることが分かる。

衝撃係数の値をより詳しく検討するために静的応力増分の大きな重要な部材に対して時刻歴応答解析による衝撃係数と簡易法による衝撃係数の相関関係を2種類のトラス橋のCase2の部材破断ケースについて図-6に示す。図中のrは相関係数である。ここで示した点は各トラス橋に対して静的応力増分の絶対値が大きい上位5%の重要な部材応力評価点の衝撃係数である。図-6より、時刻歴応答解析を行わない簡易法でも比較的妥当な衝撃係数の値が算定されることがわかる。実務上で衝撃係数を危険側の評価としないためには簡易法で算定される衝撃係数を10%程度割増しすれば、図-

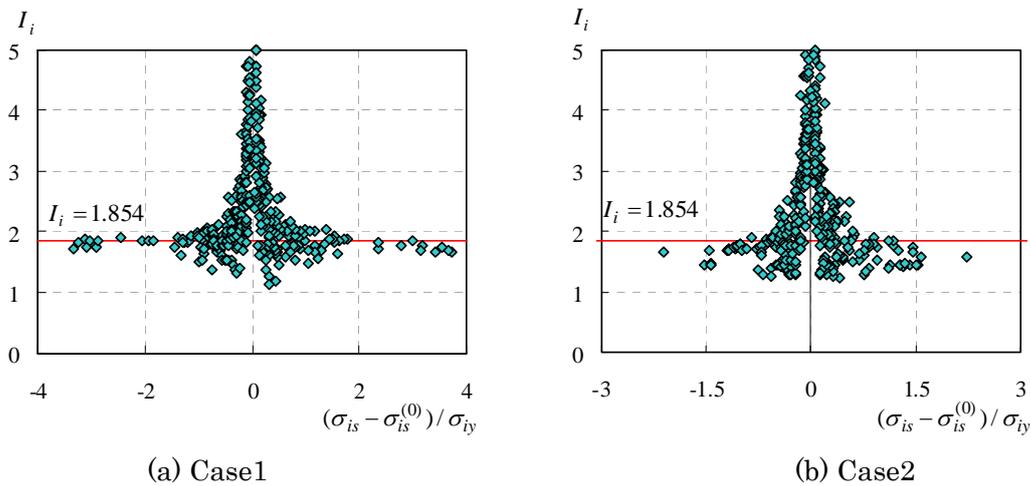


図-4 応答解析による  $I_i \sim (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}$  の関係

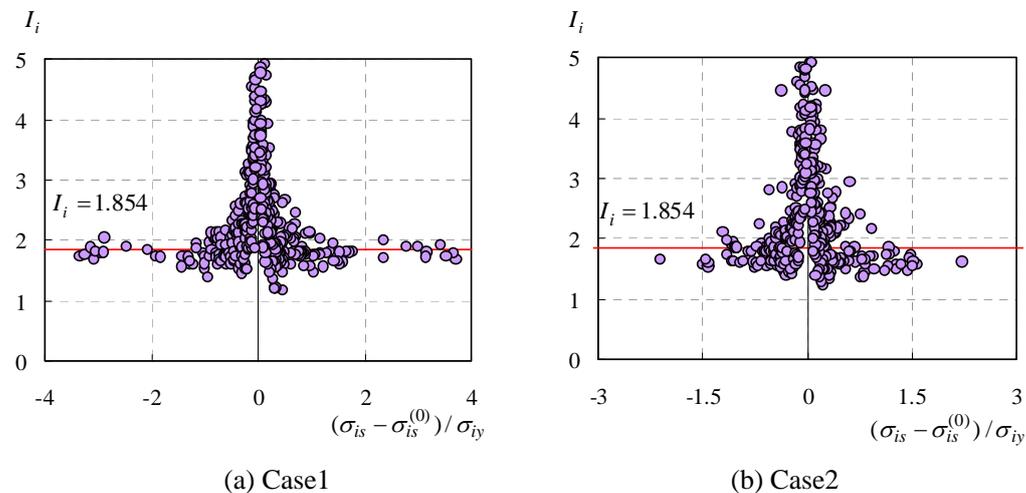


図-5 提案した簡易法(RMS法)による  $I_i \sim (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}$  の関係

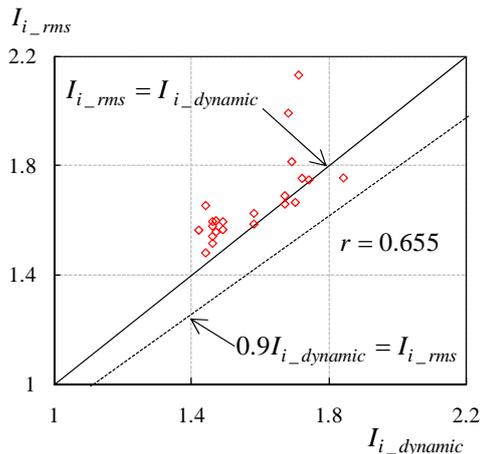


図-6 簡易法と応答解析の相関関係 (Case2)

6の破線のようにほぼ安全側となる。なお、詳細については割愛するが、RMS法において総和する固有モードの次数を減らしていた場合、当然ながら時刻歴応答解析による衝撃係数との相関は悪化するものの、簡易法で予測される衝撃係数の値は若干大きくなる傾向にあり、結果として、衝撃係数の評価はより安全側のものとなる。両橋とも総和する固有モードの次数が100次程度であれば簡易法により衝撃係数は安全側の値となることについてはすでに確認している。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 引張り斜材が脆性的に破断する場合、破断時にひずみが突如解放される。この結果、まず、ひずみは縦波として高速で部材両端方向に伝搬し破断部材の格点に一次衝撃を与える。つぎに、部材破断による構造系全体の剛性低下により新たなつり合い状態への動的な移行により二次衝撃が発生する。
- 2) 一次衝撃による応力の動的増幅は二次衝撃による応力の増幅に較べて小さい。また、一次衝撃と二次衝撃の発生には時間差があり両者の連成の影響は無視できる。すなわち、リダンダンシー解析では衝撃係数として二次衝撃によるもののみを考慮すればよい。
- 3) 一次衝撃、二次衝撃を同時に精度良く解析するには一次衝撃でのひずみ伝播における縦波の波長が非常に短く、伝播速度が速いので、細密な要素分割と時間増分となり、時刻歴応答解析では膨大な計算時間を要する。ここでは衝撃係数への一次衝撃の影響が無視できることから、二次衝撃のみを精度良く解析できる近似解析法を提示した。この手法により大幅に計算時間を短縮で

きる。

- 4) 衝撃係数は部材破断による静的な応力増分の絶対値が小さい部材では大きくばらつき、その値が非常に大きくなる部材もある。しかしながら、静的な応力増分の絶対値が増加すると衝撃係数は急激に減少し、ある一定値に収束する傾向を示す。
- 5) 部材破断による静的な応力増分の絶対値が増加すると衝撃係数はある一定値に収束する傾向を示す。
- 6) 構造減衰5%に相当するRayleigh減衰を考慮した時刻歴応答解析から得られる衝撃係数の収束値は下路式トラス橋の時刻歴応答解析から部材破断位置により1.5~1.8の範囲をとる。この上限値は5%の減衰を考慮した1自由度系により近似的に求められている衝撃係数の値1.854に近い。
- 7) 時刻歴応答解析によらず固有値解析のみからRMS法で最大応答値を近似的に求め、衝撃係数を算定する簡易法を提示した。簡易法により算定された衝撃係数は構造系や破断部材の位置の違いにより変動する特性を再現している。さらに、簡易法による衝撃係数の値は、部材破断時の静的な応力増分値が大きな重要な部材において、時刻歴応答解析による正確な衝撃係数の良好な近似値となる。
- 8) 通常のリダンダンシー解析では部材によらず一定の衝撃係数を用いるのが実際的である。この衝撃係数の値としては部材破断による静的な応力増分が大きい部材応力評価点での値に対応する収束値(一定値)を用いるのが妥当である。これは、部材破断時の静的な応力増分の絶対値が大きい部材では動的な応力増分も大きく、安全性照査において重要な部材になるからである。

#### 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1件)

Yoshiaki Goto\*, Naoki Kawanishi, and Issei Honda\*: Dynamic Stress Amplification Caused by Sudden Failure of Tension Members in Steel Truss Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.137, pp.850-861

[学会発表] (計2件)

本多一成, 後藤芳顕, 川西直樹: リダンダンシー解析における鋼トラス橋部材破断時の衝撃係数の特性とその推定法, 第65回土木学会年次講演会, I-540, pp.1079-1080, 2010.

川西直樹, 後藤芳顯: 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, 土木学会第 66 回年次講演会, I-526, pp.1051-1052, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川西直樹 (KAWANISHI NAOKI)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・  
准教授

研究者番号: 60300589