

# リダンダンシー解析におけるワーレントラス橋の部材破断時の衝撃係数

豊田高専 専攻科 広浜佑麻, 豊田高専 正会員 川西直樹, 名工大 正会員 後藤芳顕

## 1. 研究背景と目的

近年, 国内外において鋼トラス橋の老朽化による落橋事故や引張材の破断などの事故が相次いで発生し, 既設橋の部材破断が全体系の崩壊に対する安全性を確認するためのいわゆるリダンダンシー解析が橋梁の合理的な補修計画を策定するのに重要になってきている。

実務におけるリダンダンシー解析は, ある部材について破断を想定し, この部材を除いた上で, 死荷重や活荷重を考慮して静的な構造解析を行い, 得られた応力増分や断面力増分の結果に対して破断時の衝撃係数を乗じることで動的な応答値を予測し, 応答値が許容される限界値の範囲内にとどまるかどうかの照査がなされる。部材破断から構造系全体の崩壊への進展はいわゆる動的な進行性破壊現象であり, 静的なリダンダンシー解析により崩壊に対する安全性を照査するには, 衝撃係数を正確に評価することが非常に重要となる。

鋼トラス橋の引張部材の破断は, 腐食や疲労亀裂などが原因で生じた応力集中部の延性亀裂などを起点として生じるため, 殆んど塑性伸びのない脆性的な破壊である。このため破断前に作用している引張力が破断面で突如解放されることで, 構造系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伴いたわみ振動に起因した動的増幅が生じる。この動的増幅による衝撃について, 文献1)では減衰5%を考慮した一自由度系の振動から算出される動的増幅率1.854を衝撃係数として考慮する方法が採られている。この方法は, 部材破断後の振動形状を静的解析から得られる破断前後の変形増分に限定したものであるが, 鋼トラス橋のような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, 上記のような簡易な方法による衝撃係数の値の妥当性には疑問である。

本研究では, 実在する下路式の鋼トラス橋を対象に, 引張部材破断時の振動を時刻歴応答解析により調査することでリダンダンシー解析に考慮すべき衝撃係数について考察する。また, 衝撃係数の簡易算定法を提示し, この適用性について検討する。

## 2. 部材破断時の動的増幅の算定方法

### (1) 部材破断による衝撃の解析法

部材破断の再現方法としては, 破断位置の要素節点を分離し, 破断前の断面力を外力として作用させ破断前の状態を再現する。つぎに破断ステップでは上記の断面力と大きさの等しい逆向きの外力を瞬間的に作用させることで脆性的な部材破断を再現する。これは完全に脆性的な部材破断を表しており最も大きな衝撃が発生すると考えられる。

### (2) 動的増幅の評価

本研究では,  $i$  部材の軸方向応力に関する衝撃係数  $I_i$  を次のように定義し算定する。

$$I_i = (\sigma_{idm} - \sigma_{is}^{(0)}) / (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) \quad (1)$$

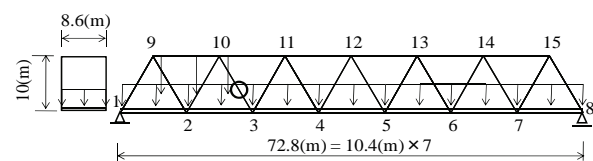
$\sigma_{idm}$  :  $i$  部材について動的解析における部材破断時の絶対値が最大となる応力

$\sigma_{is}^{(0)}$  :  $i$  部材の静的つり合い状態の応力

$\sigma_{is}$  :  $i$  部材の部材破断後の静的つり合い状態の応力

### (3) 検討対象と数値解析モデル

対象となる構造は図1に示す支間72.8mの単純支持形式の下路式ワーレントラス橋で, 引張部材3-10が破断する場合について検討する。ここでは曲げの影響を考慮するため, 汎用構造解析ソフトABAQUS Ver.6.5を用いて3次元はり要素(B31)による立体骨組みとして解析モデルを構築し, 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。トラス部材の格点はすべて剛結合とし, 減衰として構造減衰5%に相当するRayleigh減衰を考慮する。質量については, 鋼部材には分布質量, 床版の質量は隣接格点への集中質量としてモデル化する。活荷重についてはB活荷重を破断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, 重力加速度を作用させた集中荷重として載荷し, 破断前の状態を再現する。動的解析の時間増分については,  $\Delta t = 2 \times 10^{-2}(\text{sec.})$  と



○印は破断位置を示す。  
\* (下流側の格点番号は、上流側の格点番号の+100とする。)

図1 検討対象 (下路式ワーレントラス橋)

する。

(4)時刻歴応答解析法によらない衝撃係数の簡易算定法

破断した構造系について固有振動解析より衝撃係数を予測するための簡易算定法として、RMS 法<sup>2)</sup>を用いた次式で評価する。

$$I_i = \sqrt{\sum_n \left\{ \exp\left(\frac{-\pi h_n}{\sqrt{1-h_n^2}}\right) \tilde{\sigma}_{i,n} q_n \right\}^2} / \left| \sum_n \tilde{\sigma}_{i,n} q_n \right| + 1 \quad (2)$$

$h_n$  :  $n$ 次モードの減衰定数

$q_n$  :  $n$ 次モードの部材破断による静的モーダル変位

$\tilde{\sigma}_{i,n}$  :  $n$ 次モードの固有モードにより  $i$ 部材に生じる応力

なお、ここでは時刻歴応答解析の結果と比較して提案する簡易法の精度検証するため、Rayleigh 減衰に対応するように各固有モードの構造減衰  $h_n$  を定める。ここで、式(2)において総和する固有モードの次数は 1000 次までとする。

3. 動的応答解析結果

時刻歴応答解析結果について、部材破断時の動的増幅による各部材の衝撃係数  $I_i$  と静的な応力増分  $(\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}$  との関係を図2に示す。図3には時刻歴応答解析の部材破断による最大動的反動応力と静的変動応力の関係を示している。なお、参考のため5%の減衰を考慮した一自由度系による衝撃係数  $I_i=1.854$ <sup>1)</sup>の直線も描いている。

図2の結果より、部材破断による静的な応力増分の絶対値  $|(\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}|$  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場合がある。しかしながら  $|(\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}|$  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。また、図3より衝撃係数の収束値は約  $I_i=1.6$  となり、URS Corporation<sup>1)</sup>の提案値に比べやや小さくなっていることが分かる。このように、衝撃係数が部材ごとに異なるということから、構造系や部材破断位置により異なるということから、部材破断時のトラス橋の振動現象が URS Corporation<sup>1)</sup>の提案モデルのような単純な1自由度系のモデルでは一般に表せないことを示している。

図4は提案した RMS 法に基づいた簡易な衝撃係数の算定法により求められた衝撃係数の散布状況を示している。この結果は、図2の結果と比較的よく一致しており、衝撃係数の収束値もほぼ同様な値となっていることが分かる。これらの結果より、提案した衝撃係数の簡易算定法は、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ことが分かる。

参考文献：1) URS Corporation : Fatigue evaluation and

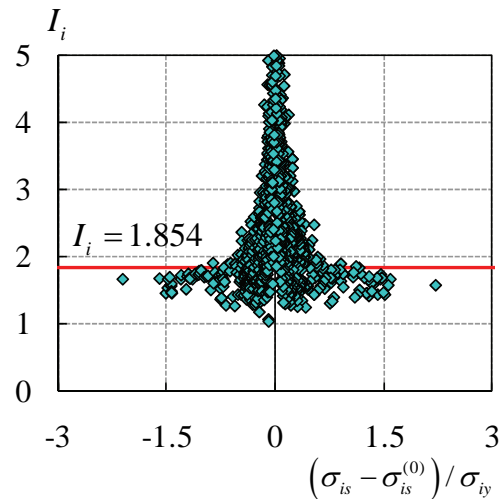


図2 動的解析による  $I_i - (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}$  の関係

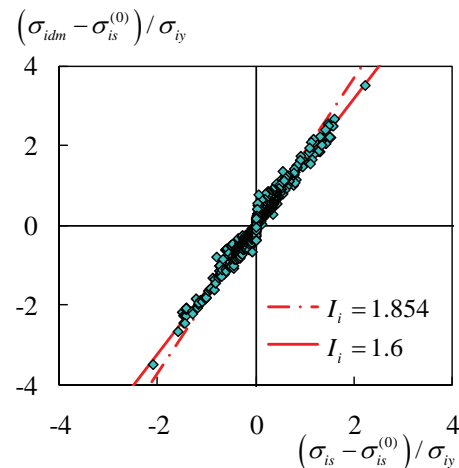


図3 部材破断による最大動的反動応力と静的変動応力の関係

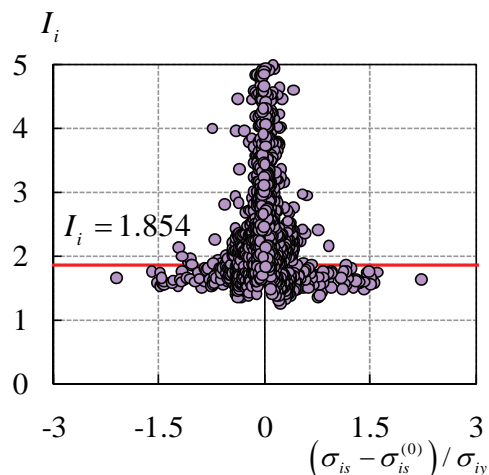


図4 RMS 法による  $I_i - (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}$  の関係

redundancy analysis Bridge No.9340 I-35W over Mississippi River,2006

2) 土岐憲三 (土木学会編) : 新体系土木工学 11 構造物の耐震解析, p.145-147, 技法堂, 1981.