

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

○名古屋工業大学 学生会員 本多一成 名古屋工業大学 フェロー会員 後藤芳顯
豊田工業高等専門学校 正会員 川西直樹

1. まえがき

部材破断が全体系の崩壊につながらないことを確認するための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上で重要になっている。通常の静的な線形弾性解析に基づくリダンダンシー解析¹⁾では、破断想定部材を除いた上で死荷重と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、これが許容される限界値以内か否かを照査する。このため、破断時の衝撃係数を正確に評価することが重要となる。URS¹⁾の提案では、部材破断による衝撃係数は一自由度系から算定される値1.854(減衰5%)が提案されているが、著者らの動的応答解析を用いた検討²⁾によると、衝撃係数の値は構造系や破断部材の場所により変化することが明らかになっている。文献2)の衝撃係数は許容応力度設計を念頭に応力に関して算定されたものであるが、限界状態設計などの断面力照査においては断面力や照査式に基づいて衝撃係数を算定することが必要となる。本研究では、文献2)の動的応答解析法を用い、3種類の定義による衝撃係数について考察する。さらに、文献2)で提案した動的応答解析によらない衝撃係数の簡易算定法を改良した手法を提案し、妥当性を検討する。

2. 衝撃係数の算定方法

(1) 検討対象と数値解析法： 文献2)と同様に、対象構造は図1に示す支間87.6mの単純支持形式の上路式鋼トラス橋とし、引張り部材2-20(図1の○印)の中央部分が破断する場合について検討する。ここではABAQUSの三次元はり要素(B31)により立体骨組としてモデル化し、部材破断時の応答を弾性微小変位動的解析により算定する。トラス格点はすべて剛結とし、構造減衰として5%に相当するRayleigh減衰を考慮する。質量は、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

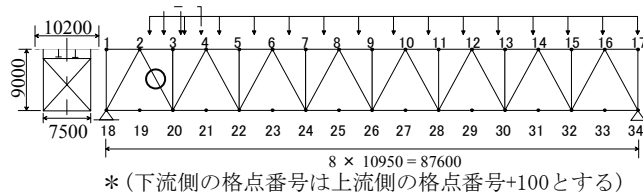


図1 検討対象(上路式鋼トラス橋)

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(図1)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静的に作用させて、破断前の状態を再現する。

部材破断の再現方法として、まず、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、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と、最も衝撃が大きくなる脆性的な部材破断を再現する²⁾。

(2) 各種衝撃係数の定義： 表1に応力、断面力照査式および断面力に基づいたときのそれぞれの衝撃係数の定義をまとめて記す。また、断面力照査式の値(以下、R値と称す)の算出方法は、以下のとおりとする。

①軸力が引張りの場合：

$$R = \frac{N_i}{N_{ip}} + \frac{M_{xi}}{M_{xiut}} + \frac{M_{yi}}{M_{yit}} \tag{1}$$

ここに、 N_{ip} は塑性軸力、 (M_{xiut}, M_{yit}) は引張り側に着目した各軸周りの曲げ耐力

②軸力が圧縮の場合：

$$R = \left(\frac{N_i}{N_{iu}} \right) + \frac{1}{1 - (N_i / N_{iEx})} \left(\frac{M_{xieq}}{M_{xiuc}} \right) + \frac{1}{1 - (N_i / N_{iEy})} \left(\frac{M_{yieq}}{M_{yiuc}} \right) \tag{2}$$

(M_{xieq}, M_{yieq}) =部材破断後の応答解析から得られる各軸回りの換算曲げモーメント

(N_{iEx}, N_{iEy}) =各軸回りのオイラー座屈強度

N_{iu} =圧縮耐力

(M_{xiuc}, M_{yiuc}) =圧縮側に着目した曲げ耐力

3. 解析結果

(1) 衝撃係数の傾向： 応力に基づく $I_i \sim (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)}) / \sigma_{iy}$ の関係、式(2)の断面力照査式による $I_{sci} \sim (R_{is} - R_{is}^{(0)})$ の

表1 各変数に基づいた衝撃係数の定義

	衝撃係数
応力	$I_i = (\sigma_{idm} - \sigma_{is}^{(0)}) / (\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)})$
断面力照査式	$I_{sci} = (R_{idm} - R_{is}^{(0)}) / (R_{is} - R_{is}^{(0)})$
断面力	$I_{Ni} = \frac{N_{idm} - N_{is}^{(0)}}{N_{is} - N_{is}^{(0)}}, I_{Mxi} = \frac{M_{xidm} - M_{xis}^{(0)}}{M_{xis} - M_{xis}^{(0)}}, I_{Myi} = \frac{M_{yidm} - M_{yis}^{(0)}}{M_{yis} - M_{yis}^{(0)}}$
備考	・変数 X_{idm} は、評価点 i の動的応答の最大値 ・変数 X_{is} は、評価点 i の部材破断後の静的応答値 ・変数 $X_{is}^{(0)}$ は、評価点 i の部材破断前の静的応答値

キーワード：トラス橋、部材破断、衝撃係数、動的解析、リダンダンシー解析
連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町、TEL:052-735-5021, FAX:052-735-5563

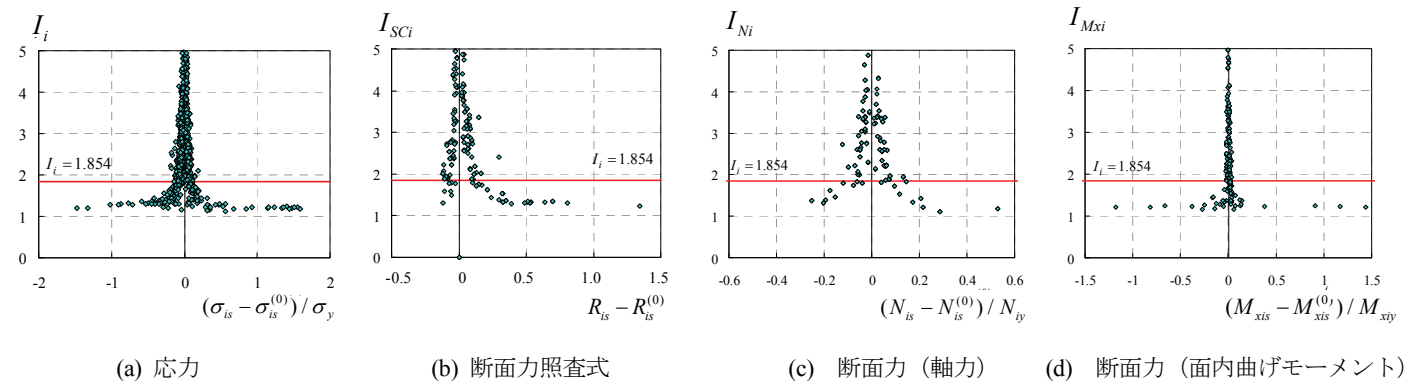


図2 時刻歴応答解析における衝撃係数の散布図

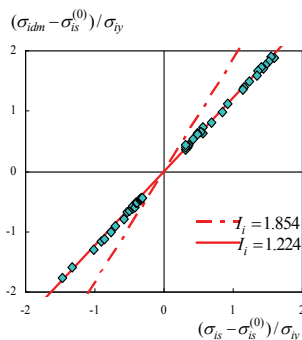


図3 部材破断による静的応力増分と動的応力増分量の関係

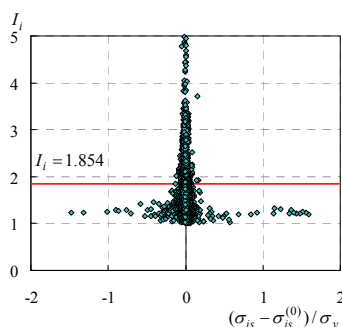


図4 簡易算定法における衝撃係数の散布図

関係、断面力による $I_{Ni} \sim (N_{is} - N_{is}^{(0)})/N_{iy}$ 、 $I_{Mxi} \sim (M_{xis} - M_{xis}^{(0)})/M_{xiy}$ の関係を図 2(a)~(d)に示す。これらの図には参考のため、1 自由度系による衝撃係数値 1.854 も記入している。図 2 より、部材破断による静的な応力増分、断面力照査 R 値増分、断面力増分が大きい重要な部材の衝撃係数について観察すると、いずれも一定値に収束する傾向を示す。

(2) リダンダンシー解析に用いる衝撃係数： 一例として静的応力増分 $(\sigma_{is} - \sigma_{is}^{(0)})/\sigma_y$ と最大動的応力増分 $(\sigma_{idm} - \sigma_{is}^{(0)})/\sigma_y$ の関係を図 3 に示す。これらの図では原点を通る直線の勾配が衝撃係数 I_i を表す。参考のために図には 1 自由度系から算定される $I_i = 1.854$ の直線を描いている。図 3 より、静的な応力増分の絶対値が大きい部材の値は原点を通る一直線上にほぼ存在する。したがって、このような、原点を通る回帰直線の傾きとして算定される衝撃係数 I_i の収束値を実用的なリダンダンシー解析で用いる一定の衝撃係数とすることが妥当である。ここでは、部材破断による静的応力増分の絶対値が大きい上位 5%の部材の平均値として衝撃係数の収束値を算定する。同様の方法を断面力照査式と断面力に関する衝撃係数についても適用する。以上の方法で 3 種類の定義による衝撃係数の収束値を求め表 2 に示す。これから分かるようにどの方法を用いても衝撃係数の収束値は 1.2 程度であることが分かる。

表2 衝撃係数の収束値

応力	断面力照査式	断面力		
		軸力	面内モーメント	面外モーメント
1.224	1.297	1.231	1.222	1.234

4. 衝撃係数の簡易算定法の提案とその適用性

リダンダンシー解析において重要な部材となる部材破断による発生応力の大きな部材の衝撃係数を、時刻歴応答解析を実施することなく簡易に算定する方法を提案する。部材破断後の橋梁系の振動は、一般に多自由度系の振動の問題となるため、衝撃係数の算定には 2. で示したような動的解析が必要となる。しかしながら、図 2,3 の結果からリダンダンシー解析において応答値の大きい重要な部材の衝撃係数は一定値に収束する傾向にある。この結果から、部材破断による実際の振動形状は静的変形モードに最も近い一つの固有モードで振動していることが推定される。この推定に基づくと、衝撃係数の収束値は動的応答解析を実施せずに次のように容易に算定できる。すなわち、部材が破断した構造系について予め固有振動解析を行い、第 m 次の固有モード一つのみを支配振動モードとして考えた場合、衝撃係数の収束値は次の推定式で表される。

$$I_{i,m} = \left(\frac{-\pi h_m}{\sqrt{1-h_m^2}} \right) \tilde{\sigma}_{i,m} q_m / \left| \sum_n \tilde{\sigma}_{i,n} q_n \right| + 1 \quad (3)$$

q_n : n 次の固有ベクトル $\vec{\phi}_n$ で展開したモーダル変位

h_n : n 次モードの減衰定数

$\tilde{\sigma}_{i,n}$: $\vec{\phi}_n$ により部材応力評価点 i に生じる応力

部材破断による静的変位モードに最も類似した 2 次の固有モードを用いて、式(3)から衝撃係数 $I_{i,2}$ を算定した結果を図 4 に示す。図 1(a)と図 4 を比較すると、衝撃係数の散布状況はよく一致していることが分かる。さらに、応力の衝撃係数の収束値は 1.234 となっており、動的解析によるものとほぼ一致していることが確認される。

参考文献： 1) URS Corporation : Fatigue evaluation and redundancy analysis, Bridge No.9340, I-35W over Mississippi river, Draft report, 2006. 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.