

リダンダンシー解析における鋼トラス橋の部材破断時の衝撃係数に関する一考察

○名古屋工業大学 学生会員 本多一成

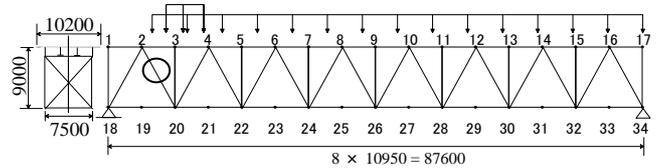
名古屋工業大学 フェロー会員 後藤芳顕
豊田工業高等専門学校 正会員 川西直樹

1. まえがき

近年、国内外において老朽化した鋼トラス橋の落橋事故¹⁾や引張り材破断などの事故が相次いで発生した。このため既設橋の部材破断が全体系の崩壊につながること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上で重要になってきている。実務などで用いられ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破断時の衝撃係数を正確に評価することが非常に重要である。

鋼トラス橋の引張り部材の破断は、疲労き裂や腐食などにより生じた応力集中部の延性き裂などを起点として生じるため、ほとんど塑性伸びのない脆性的な破壊である。このため、破断前において部材に作用している引張り力が破断面で突如解放されることにより、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格点に衝撃力を与える(一次衝撃)。つぎに、部材破断による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ともなうたわみ振動に起因した動的増幅が生じる(二次衝撃)。文献1)では、二次衝撃について、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、上記のような簡易な方法による衝撃係数の評価の妥当性は大きい疑問である。なお、この文献では一次衝撃の影響については完全に無視している。

本研究では、実在する上路式鋼トラス橋を対象に、部材破断時の挙動を詳細な時刻歴応答解析により検討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。



* (下流側の格点番号は上流側の格点番号+100とする)

図1 検討対象(上路式鋼トラス橋)

2. 部材破断時の動的増幅の算定方法

(1) 検討対象と数値解析モデル

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で、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。ここでは曲げの影響を考慮するために汎用構造解析ソフトABAQUS ver.6.5の三次元はり要素(B31)による立体骨組として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。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(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、重力加速度を静的に作用させることで破断前の状態を再現する。ここでは、部材破断直後の縦振動による一次衝撃の影響を考慮するため、破断部材および周辺部材については一部材あたり200分割とする細密な要素分割とする。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小さな時間増分($\Delta t = 1.0 \times 10^{-6}$ sec.)を採用する。周辺以外の部材については周期の短い縦振動は減衰し影響は小さいと考えられるので、一部材あたり24分割とする。

(2) 部材破断の過程の再現方法

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。これは塑性伸びが全く生じない最も厳しい場合に相当する。

(3) 動的増幅の評価

本研究では、部材破断による物理量 X の動的増幅を表す衝撃係数に相当する指標 λ_x を次のように定義す

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

る。

$$\lambda_x = \frac{X_{dm}^{(1)} - X_s^{(0)}}{X_s^{(1)} - X_s^{(0)}} \quad (1)$$

- $X_s^{(0)}$: 部材破断前の静的つり合い状態における値
- $X_s^{(1)}$: 部材破断後の静的つり合い状態における値
- $X_{dm}^{(1)}$: 部材破断後の時刻歴応答で生じる最大値もしくは最小値

なお、 λ_x の算定に用いる $X_{dm}^{(1)}$ については、式(1)の分母と分子が同符号となるよう最大値もしくは最小値を選択する。

3. 動的応答解析結果

(1) 一次衝撃の影響

一次衝撃による破断部材周辺の部材についての影響を検討するため、一次衝撃による応力の増幅が大きい部材 2-18 についての応力の時刻歴応答を図 2 に示す。これより、一次衝撃により生じる応力の変動量は部材 2-18 で降伏応力の 1%以下であるため、部材 2-20 が破断した場合の一次衝撃による応力変動が構造系全体の安全性評価としては無視してよいことがわかる。

(2) 二次衝撃による鉛直変位の動的増幅

部材破断による鉛直変位 D の応答については縦振動現象である一次衝撃の影響がほとんどないため、破断部材を除去した上で両端部の節点に破断前の部材端断面力を外力として作用させこれを瞬時に取り除くことで破断による二次衝撃の影響のみについて考慮した解析を行った。格点 2,3,5,9,13 の鉛直変位の解析結果と動的増幅率を表 1 に記す。これより、各格点の鉛直変位の動的増幅率 λ_D は一定値ではなく、格点により大きく異なることがわかる。破断部材から離れた位置の格点 9,13 などの動的増幅率は大きくなっているが、破断部材付近の増幅率は逆に小さくなっており一自由度系から算定された増幅率($\lambda=1.854$)¹⁾よりもかなり小さい。

(3) 二次衝撃による応力と動的増幅

二次衝撃により各部材に生じる発生応力と動的増幅率に関する分布図を図 3 に記す。これより、部材により動的増幅率は大きく異なっている。全体の傾向として、発生応力が小さい部材の場合は総じて動的増幅率は大きくなり、逆に発生応力が大きくなると動的増幅率は減少し一定値に収束する傾向にある。発生応力の小さい場合の増幅率は大きいですが、構造上、重要でないため、発生応力が大きい部材に注目すると発生応力が降伏応力を超える部材の動的増幅率は約 1.3 でほぼ一定値になっている。ただ、各部材において最大応答値が生じる時刻は必ずしも一致していない。以上から、応力についても、文献 1)のような手法で動的増幅率を評価するのは問題があることがわかる。

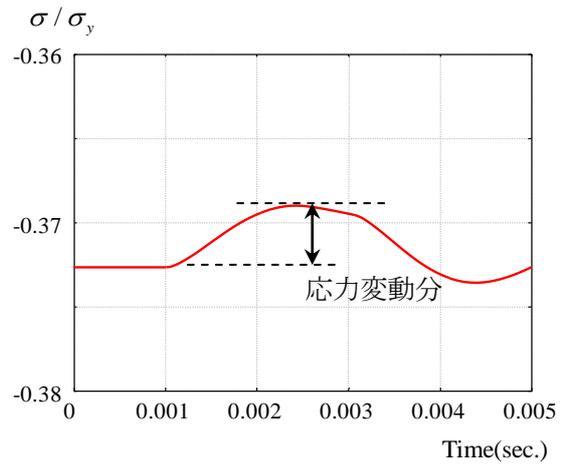


図 2 一次衝撃による部材 2-18 の応力応答

表 1 鉛直変位と動的増幅率 λ_D

格点	$D_s^{(0)}$	$D_s^{(1)}$	$D_{dm}^{(1)}$	λ_D
2	3.52	2.25	1.92	1.26
3	7.02	14.7	17.4	1.35
5	12.5	19.2	22.7	1.52
9	16.9	21.3	25.1	1.86
13	12.2	14.4	17.0	2.18

変位 D の単位は cm

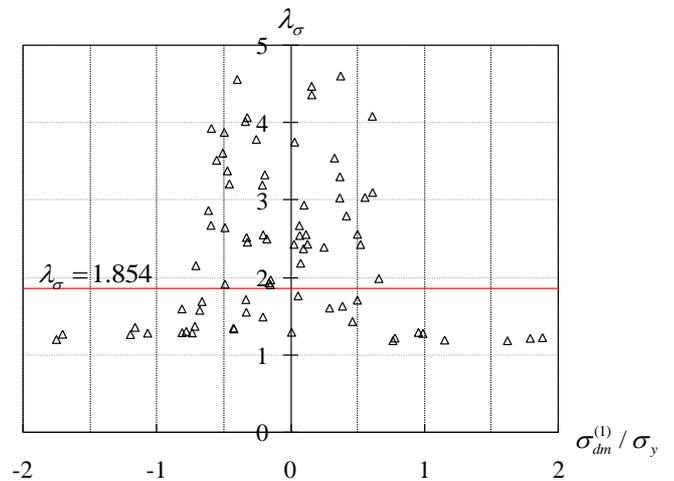


図 3 発生応力と動的増幅率 λ_σ の関係

4. あとがき

本検討でトラス部材破断時の衝撃の特性についてある程度明らかになった。これより、現在、唯一のよりどころとなっている URS の衝撃係数に問題のあることもわかった。今後、破断部材の箇所、破断時の塑性伸びや構造減衰が動的増幅に与える影響を総合的に調査し、妥当な衝撃係数の評価法を別途報告したい。

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