

リダンダンシー解析における引張部材破断時の衝撃力の評価に関する検討

山口大学大学院 学生会員○井上龍一 河村圭祐
山口大学大学院 正 会 員 麻生稔彦
エム・エムブリッジ 正 会 員 田島啓司

1. はじめに

2007 年の米国 I-35W 橋の落橋事故を契機として、耐荷力の余裕の指標であるリダンダンシーが重要視されるようになった。リダンダンシーを用いると、一部の部材が損傷しても耐荷力の余裕によって落橋や崩落を回避できるか否かの判断をすることが可能になる。

リダンダンシーを精度良く求めるには、引張部材破断時の衝撃力の影響を適切に算出する必要がある。本来この衝撃力の影響は、時刻歴応答解析によってトラス橋の全体系を考慮して算出することが望ましいが、現在は、部材破断によって開放される断面力に、衝撃係数 1.854 を乗じる簡便な方法によって、引張部材破断時の衝撃力の影響を算出する事例が多い。しかしこの方法は、減衰定数 5% の 1 自由度系振動モデルの振動性状をもとにしたものであり、引張部材破断時の衝撃力の影響を正確に表現できないこともある¹⁾。本研究では、引張部材破断時の衝撃力を振動モードから算出する手法について検討する。

2. 1 対象橋梁

表-1に対象橋梁の諸元、図-1に対象橋梁の側面図を示す。本研究では、橋長が大きく異なる2つのトラス橋を対象とした。橋梁 1 は、橋長456mの3径間連続下曲弦プラットトラス橋、橋梁 2 は橋長50mのワーレントラス橋である。部材損傷の影響を評価する損傷解析は、主構部材の1部材ずつを損傷させ、橋梁 1 が6ケース、橋梁 2 が7ケースとする。解析には構造解析ソフトSAP2000を用いて線形解析を実施した。トラス橋モデルについては、鋼部材をはり要素、コンクリート床版をシェル要素とし、部材結合条件は剛結合とした。荷重は、死荷重と引張部材破断時の衝撃力の影響を考慮した。

2. 2 断面力解析

以下に示す解析 I と II で求められる断面力を足し合わせた断面力を部材破断後の断面力とする。

- ① 解析 I (健全状態) 死荷重を载荷した解析
- ② 解析 II (部材破断状態)

破断想定部材を除いた橋梁モデルに対し、解析 I において、破断想定部材の両端に作用する断面力の反作用力を作用させた解析である。以降、この反作用断面力を“開放力 P ”と記す。破断想定部材の作用軸力が引張の場合、部材破断時の衝撃力の影響を考慮する。この衝撃力の影響は、時刻歴応答解析による方法 (Case A)、衝撃係数 1.854 を利用する方法 (Case B)、振動モードを利用する方法 (Case C) の 3 つの方法により算出する。

ここで、Case A は多自由度系の振動モデルに適応し、複数の振動モードの連成も考慮される方法である。本研究では、Case A が引張部材破断時の衝撃力の影響を最も正確に算出できる方法であると仮定した。

Case C は、部材破断時の外部エネルギー (式 (1)) と内部エネルギー (式 (2)) のつり合いに着目して算出する。部材破断時に解放力が橋梁に与える外部エネルギー E_1 は、橋梁のひずみエネルギー E_2 と運動エネルギー E_3

表-1 対象橋梁の諸元

橋梁 1	3 径間連続下曲弦 プラットトラス橋
支間長 (m)	107.2+240.0+107.2
最大構造高 (m)	28.0
床版幅員 (m)	9.0

橋梁 2	ワーレントラス橋
支間長 (m)	50
最大構造高 (m)	6.5
床版幅員 (m)	6.5

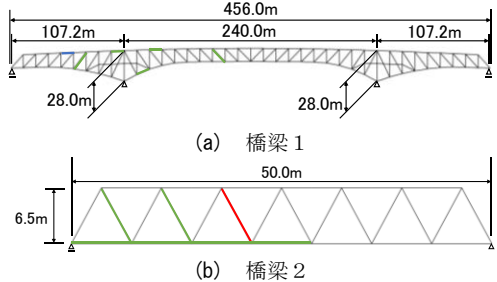


図-1 対象橋梁の側面図

キーワード トラス橋, リダンダンシー解析, 衝撃力

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 TEL 0836-85-9323

の和に置き換わるが、 $E_3 = 0$ の時に断面力が極値をとる。この時の橋梁の変位を式(3)で表現し、式(4)の条件を満たす α を振動モードごとに求めて、引張部材破断時の衝撃力の影響を算出する。ここで、振動モードを与える変位 δ_{bi} は固有値解析を20次モードまで実施し、その最大値を採用した。

$$E_1 = P_1\delta_1 + P_2\delta_2 \quad (1) \quad E_2 = \frac{1}{2}\sum f_i\delta_i \quad (2) \quad \delta_i = \delta_{ai} + \delta_{bi} \times \alpha \quad (3) \quad E_1 = E_2 \quad (4)$$

δ_{ai} ：解放力を静的に作用した時の変位、 f_i ：橋梁の変位を δ_i とした時の拘束力、 i ：接点

2.3 リダンダンシーの評価方法

リダンダンシーは式(5)、式(6)から求められる損傷度 R により評価する。損傷度 R は、既往の研究²⁾をもとに、軸力が引張の場合は式(5)、圧縮の場合は式(6)を用いる。 $R \geq 1.00$ となった部材は、全塑性状態となり、終局に達したと判断する。なお、リダンダンシーの評価対象部材は、主構部材のうち耐震構を除いたトラス橋の自立に寄与する全部材とした。橋梁1が559部材、橋梁2が69部材である。

$$R = \frac{N}{N_p} + \left(\frac{M}{M_p}\right)_{in} + \left(\frac{M}{M_p}\right)_{out} \quad (5) \quad R = \frac{N}{N_u} + \left(\frac{1}{1 - (P/0.8P_E)} \cdot \frac{M_{eq}}{M_p}\right)_{in} + \left(\frac{1}{1 - (P/0.8P_E)} \cdot \frac{M_{eq}}{M_p}\right)_{out} \quad (6)$$

N ：作用軸力、 N_p ：全塑性軸力、 N_u ：終局圧縮強度、 M ：作用曲げモーメント、 M_p ：全塑性曲げモーメント、 M_{eq} ：換算曲げモーメント、 P ：作用軸圧縮力、 P_E ：オイラー座屈強度、 in ：面内、 out ：面外

3. 解析結果

表-2に橋梁1における、Case A, B, Cで算出した損傷度 R の例(図-1に青色で示す部材を損傷させた場合の最大値)を示す。表中の相対誤差は $|R_A - R_{B,C}|/R_A$ で算出した。表-2に示す通り、損傷度 R が最大値となる部材では、 R_C が R_B よりも R_A に近い値となった。これは、Case CがCase BよりもCase Aに近い引張部材破断時の衝撃力の影響を算出できたことを意味する。同様に全部材で比較したところ、401部材(72%)で、Case CがCase BよりもCase Aに近い引張部材破断時の衝撃力の影響を算出できたことを確認した。

表-3に橋梁2における、Case A, B, Cで算出した損傷度 R の例(図-1に赤色で示す部材を損傷させた場合の最大値)を示す。表-3に示す通り、損傷度 R が最大値となる部材では、Case CがCase BよりもCase Aに近い引張部材破断時の衝撃力の影響を算出できたことがわかる。また、全部材で比較したところ、48部材(70%)で、Case CがCase BよりもCase Aに近い引張部材破断時の衝撃力の影響を算出できたことを確認した。

表-4に他の解析ケース(図-1に緑色で示す部材を損傷させた場合の最大値)においても、Case CがCase BよりもCase Aに近い引張部材破断時の衝撃力の影響を算出できた部材の割合を示す。表-4に示す通り、全解析ケースにおいて、その割合が50%以上であることを確認した。以上より、Case BよりもCase Cで引張部材破断時の衝撃力の影響を算出したほうが良いと考える。

4. まとめ

本研究において、衝撃係数1.854を利用する従来方法に替わる、振動モードを利用する引張部材破断時の衝撃力の影響の新しい算出方法を提案した。

参考文献

1) 井上龍一, 田島啓司, 麻生稔彦: トラス橋のリダンダンシー解析における部材破断時の衝撃に関する研究, 第71回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, I-7, 2019

2) 岩崎英治: 線形解析によるトラス橋のリダンダンシー評価に関するケーススタディ, 第17回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.21-32, 2014.

表-2 方法 A, B, C で算出した損傷度Rの例(橋梁 1)

最大値			相対誤差		
R_A	R_B	R_C	R_B	R_C	改善率
1.28	2.31	1.08	80%	16%	64%

表-3 方法 A, B, C で算出した損傷度Rの例(橋梁 2)

最大値			相対誤差		
R_A	R_B	R_C	R_B	R_C	改善率
0.86	0.67	0.86	22%	0%	22%

$R_{A,B,C}$: Case A, B, Cで求めた損傷度R

表-4 適切に衝撃の影響を算出できた部材の割合(%)

橋梁 1					橋梁 2					
55	69	77	70	59	51	71	77	58	55	68