

曲弦ワーレントラス橋のリダンダンシー評価に関する検討

徳島大学大学院 正会員 ○井上貴文 徳島大学大学院 フェロー 成行義文
ケミカル工事 非会員 脇田康平 四国建設コンサルタント 正会員 豊崎裕司
前エスシー企画 フェロー 加賀晃次

1. はじめに

わが国の橋梁は高度経済成長期に多く建設されており、多くの橋梁が建設から 50 年を超える。米ミネソタ州のトラス橋崩落、国内の橋梁の鋼材の腐食による斜材の破断の発見を経て、鋼トラス橋のリダンダンシー評価に大きな関心が寄せられた¹⁾。リダンダンシーを評価することにより危険な損傷シナリオの想定が可能になると考えられる。本研究では、これまでほとんど行われていない曲弦ワーレントラス橋を対象としたリダンダンシー評価のケーススタディを行う。

2. 検討方法

本研究では、永谷ら¹⁾の検討を参考に、線形解析によるリダンダンシー解析を行う。着目部材破断時における他の部材断面力を算出し、その断面力をもちいて部材照査を行い各部材が終局状態であるかを判定した。この結果を用いて検討対象の橋梁について、どの部材が破断時に橋梁を崩壊に至らしめるのに決定的である部材 FCM であるかを検討し、この部材の破断が危険な損傷シナリオであると考えた。図-1 に具体的な部材破断時の断面力算出方法を示す¹⁾。解析 A では健全状態の解析モデルに死荷重と B 活荷重が載荷している状態を示しており、B 活荷重については道路橋示方書 I 2.2.2²⁾に記載された方法に基づき載荷させた。一方、解析 B は破断想定部材を取り除いた解析モデルに、解析 A により求められた破断想定部材の断面力を逆向きに載荷させたものであり、この荷重以外の載荷は行っていない。部材破断時の断面力はこの解析 A と解析 B の重ね合わせにより求められる。本検討では部材破断による衝撃力の考慮の有無によって、リダンダンシー評価がどのように変化するのか比較のために衝撃力を考慮しない場合の解析も行った。部材照査は、各部材断面力を用いて、次に示す照査式により得られる R 値によって行い、 $R \geq 1.0$ となった場合にその部材が終局状態に達したと判断した。軸力が引張の部材の照査を行う場合、 R 値は次のようになる。

$$R = \left(\frac{P}{P_p} \right) + \left(\frac{M}{M_p} \right)_{ip} + \left(\frac{M}{M_p} \right)_{op} \quad (1)$$

ここで、添字の ip は面内、 op は面外を示しており、 P は作用軸力、 M は作用曲げモーメント、 P_p は全塑性軸力、 M_p は全塑性曲げモーメントである。また、軸力が圧縮の部材を照査する場合、 R 値は次のようになる。

$$R = \left(\frac{P}{P_u} \right) + \frac{1}{1 - (P/P_E)_{ip}} \left(\frac{M_{eq}}{M_p} \right)_{ip} + \frac{1}{1 - (P/P_E)_{op}} \left(\frac{M_{eq}}{M_p} \right)_{op} \quad (2)$$

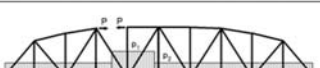
解析モデルの載荷状態		
解析 A	健全状態 (死荷重, B 活荷重)	
解析 B	部材破断状態 (解析 A で算出した破断想定部材の断面力を逆向きに載荷)	
破断想定部材破断時の断面力 (解析 A + 解析 B)		

図-1 部材破断時の断面力算出方法¹⁾を参考に作成

ここで、 P_u は道路橋示方書 II 3.2.1²⁾ に基づく座屈を考慮した終局圧縮強度、 P_E はオイラー座屈軸力、 M_{eq} も道路橋示方書 II 3.2.1²⁾ に基づく換算曲げモーメントである。これらの照査式により各部材の R 値を算出し、 $R \geq 1.0$ となった部材数が多いほど破断時の構造系全体への影響が大きい部材 FCM である。検討対象橋梁の FCM を特定することで、該当部材の破断が危険な損傷シナリオであるとする。実在する鋼曲弦ワーレントラス橋を対象として作

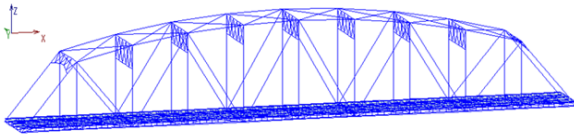


図-2 解析モデル

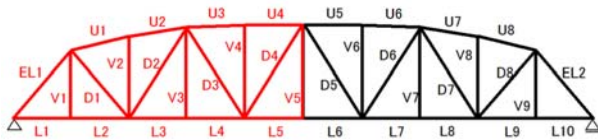


図-3 部材名称と考慮する破断想定部材

成した解析モデルを図-2 に示す。主構、主桁を構成する部材は梁要素、床版は面要素でモデル化した。また、破断想定部材として、支間中央で左右対称であるから、図左側の固定端側から支間中央までの主構を構成する部材について考慮した。図-3 に赤く示した部材を破断想定部材として考慮する。

3. リダンダンシー解析結果

表-1 に衝撃力を考慮しない場合の部材照査結果を示す。表中では $R \geq 1.0$ となった部材数とその部材名、 R 値について示しており、各破断想定部材ごとに R 値が最も大きくなった部材については赤く示した。衝撃力を考慮しない場合、上弦材、橋門構については終局状態と判定された部材が多くなっており、他の下弦材や斜材、垂直材は固定支点到近い部材ほど終局状態の部材が多くなっているが下弦材と垂直材についてはほぼ全ての部材が終局に達していない。また、 R 値の最大値を取って比較してみると橋門構、上弦材については 1.5 以上の値が見られるのに対し、D1 を除いて他の部材破断想定時には大きく 1.0 を超えている部材が見られない。これらのことから軸力の大きな部材が破断した場合には構造系全体への影響も大きくなる可能性があると考えられる。表-2 に表-1 と同様の形で衝撃力を考慮した場合の部材照査結果を示す。衝撃力を考慮した場合、終局状態と判定された部材数は全体的に増加した。また R 値についても橋門構、上弦材破断想定時のケースでは R 値が 3.0 を越える部材が見られる。これらの結果から特に注意すべきは橋門構、上弦材の破断であると考えられる。

参考文献

- 1) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 奥井義昭: 我が国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集A, Vol.65 No.2, pp.410-425, 2009.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 丸善, 2012.

表-1 部材照査結果 (衝撃力考慮なし)

破断想定部材	EL1	U1	U2	U3	U4
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 3 非破断側 3	2 3	3 3	3 4	2 5
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 V2 (1.614) V8 (1.174) D8 (1.507) 非破断側 V2' (2.121) V3' (1.137) D1' (1.806)	V2 (1.507) D8 (1.183) V2' (1.651) V3' (1.051) D1' (1.394)	V2 (1.508) V3 (1.181) D8 (1.084) V2' (1.544) V3' (1.186) D1' (1.268)	V3 (1.377) V4 (1.573) D8 (1.045) V3' (1.351) V4' (1.529) V5' (1.245) D1' (1.329)	V4 (1.628) V5 (1.408) V3' (1.162) V4' (1.579) V5' (1.471) D1' (1.191) D8' (1.081)

破断想定部材	V1	V2	V3	V4	V5
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 1 非破断側 1	1 0	1 0	0 0	0 0
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 D1 (1.170) 非破断側 D1' (1.012)	D1 (1.057) ×	D1 (1.017) ×	×	×

破断想定部材	D1	D2	D3	D4
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 3 非破断側 2	3 1	1 1	0 0
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 V1 (1.152) V2 (1.510) D8 (1.157) 非破断側 V2' (1.150) D1' (1.349)	V2 (1.076) D1 (1.084) D2 (1.050) D1' (1.101)	D8 (1.020) ×	×

破断想定部材	L1	L2	L3	L4	L5
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 1 非破断側 0	0 0	0 0	0 0	0 0
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 D8 (1.002) 非破断側 ×	×	×	×	×

表-2 部材照査結果 (衝撃力考慮あり)

破断想定部材	EL1	U1	U2	U3	U4
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 7 非破断側 6	4 4	4 5	7 7	6 7
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 V2 (3.679) V3 (1.647) V7 (1.119) V8 (2.225) V9 (1.420) D6 (1.034) D8 (2.192) 非破断側 EL1' (1.062) V2' (4.469) V3' (2.023) V4' (1.130) V8' (1.758) D1' (2.852)	V2 (3.417) V3 (1.558) V8 (1.236) D8 (1.514) V2' (3.709) V3' (2.129) V4' (1.051) D1' (2.216)	V2 (3.351) V3 (2.562) V8 (1.012) D8 (1.287) V2' (3.452) V3' (2.445) V4' (1.427) D1' (1.926)	V3 (2.992) V4 (3.445) V5 (1.858) V8 (1.133) V9 (1.369) L1 (1.045) D8 (1.287) V2' (1.577) V3' (2.731) V4' (3.504) V5' (2.529) V6' (1.169) D1' (1.993) D8' (1.004)	V3 (1.720) V4 (3.637) V5 (3.031) V6 (1.189) V9 (1.418) L1 (1.153) V3' (2.266) V4' (3.543) V5' (3.034) V6' (1.741) D1' (1.666) D5' (1.273) D8' (1.335)

破断想定部材	V1	V2	V3	V4	V5
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 2 非破断側 2	2 2	2 3	2 2	2 2
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 D1 (1.742) D8 (1.025) 非破断側 D1' (1.073) D8' (1.030)	D1 (1.402) D8 (1.056) D1' (1.247) D8' (1.071)	D1 (1.419) D8 (1.105) V3' (1.030) D1' (1.308) D8' (1.102)	D1 (1.190) D8 (1.126) D1' (1.203) D8' (1.137)	D1 (1.167) D8 (1.180) D1' (1.160) D8' (1.171)

破断想定部材	D1	D2	D3	D4
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 3 非破断側 1	3 2	2 2	2 2
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 V2 (2.387) V3 (1.131) D2 (1.343) 非破断側 D8' (1.192)	V2 (1.737) D1 (1.331) D8 (1.138) V3' (1.045) D1' (1.357)	V4 (1.489) D8 (1.096) D1' (1.137) D8' (1.158)	D1 (1.186) D8 (1.128) D1' (1.183) D8' (1.143)

破断想定部材	L1	L2	L3	L4	L5
$R \geq 1.0$ 部材数	破断側 2 非破断側 2	2 2	2 2	2 2	2 2
$R \geq 1.0$ 部材名 ()内はR値	破断側 D1 (1.010) D8 (1.057) 非破断側 D1' (1.002) D8' (1.017)	D1 (1.027) D8 (1.034) D1' (1.017) D8' (1.042)	D1 (1.285) D8 (1.102) D1' (1.278) D8' (1.097)	D1 (1.245) D8 (1.096) D1' (1.259) D8' (1.105)	D1 (1.156) D8 (1.164) D1' (1.165) D8' (1.175)