

鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会活動概要と海外の動向

Activity Summary of the Committee for Redundancy of Steel Structures in JSCE
and Trends in Redundancy Research outside Japan

奥井義昭*

Yoshiaki OKUI

ABSTRACT First, an activity summary of the committee for redundancy of steel structures in JSCE is introduced. The committee has recently completed its research activities, including (a) development of a case method for serious accidents of steel bridges, (b) survey of actual damage scenario of existing steel bridges, (c) investigation on the level of live load in a redundancy analysis, (d) development of case studies for redundancy analyses, and (e) proposal of a guideline for redundancy analysis. The second part of this paper reports trends in treatment of redundancy in bridge design, fabrication, in-service inspection in USA.

KEYWORDS : リダンダンシー, 鋼構造, 耐力評価, レイティング
Redundancy, steel structures, load rating

1. まえがき

工学の分野において、リダンダンシー（冗長性）とは、必要最低限のものに加えて本来の機能上は必要でないものが付加されていることを意味する。肯定的にとらえる文脈では、余分な情報を付加することで、信頼性や安定性を向上させることを意味する。例えば、情報工学の分野ではパリティと呼ばれる本来のデータには必要のないデータを付加することで、データ自身のチェック機能を持たせ、データの読み込み時や転送時の信頼性を向上させる仕組みがある。

構造工学の分野でリダンダンシーの明確な定義は無いが、例えば静定構造より不静定構造の方が、2主桁橋梁よりは多主桁橋梁の方がリダンダンシーのある橋梁と一般に思われている。この背景には、例えば不静定構造である連続桁の場合、中間支点上で何らかの損傷が生じても単純桁として荷重を保持できることや、多主桁橋で主桁が1本損傷しても他の主桁で機能を維持出来るといった考えがあるように思う。つまり、橋を構成する部材や部材を構成する一部に損傷が生じて、橋の機能をある程度維持できる性質を構造工学におけるリダンダンシーと考えることが出来る。

レベル II 耐震設計を除く通常の橋の設計では、各部材の安全性を照査することで橋全体の安全性を確保している。つまり部材の安全性は、すなわち橋梁全体の安全性と仮定している。しかし、実際にはこの2つの安全性のレベルは等しくない。先程のリダンダンシーの定義と合わせて考えると、リダンダンシーの有無は次のように整理できる。

リダンダンシーの無い橋 : (部材の耐荷力) = (橋システム全体の耐荷力)

リダンダンシーの有る橋 : (部材の耐荷力) < (橋システム全体の耐荷力)

*博士（工学） 埼玉大学教授 建設工学科（〒160-0001 東京都新宿区四谷1丁目）

つまり、リダンダンシーの無い橋においては、部材の破壊が即、橋全体の崩壊につながる。この2つの耐荷力の差は通常の設計では明確に期待していない余耐力であるが、暗に含まれているものである。皮肉な事であるが、橋全体を3次元非線形FEM解析で設計を行うことが進めば、設計される橋はリダンダンシーの無い橋になる可能性もある。結局リダンダンシーの問題は、今まで明確に意識していなかったシステムの強度と部材の強度の差を意識して、それをどのように取り扱うかという問題と言える。

更に、リダンダンシーに関する研究は以下の2つの観点がある。

(a) リダンダンシーをどのように評価・判定・定量化するか？

(b) リダンダンシーが無いと判定された橋に対して設計・製作・維持管理においてどのように対処するか？

本稿では、最近、報告書¹⁾を取り纏めた「鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会」の活動概要を紹介する。この委員会の研究内容は主に上記(a)のリダンダンシーの評価・判定に関わるものである。一方、(b)のリダンダンシーの無い橋にどのように対処するかについては、米国の事例を紹介する。最後に、リダンダンシーに関わる今後の方向性について私見を述べる。

2. 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会活動概要

標記の委員会では、対象を鋼橋に絞り、主に以下の検討を行った。

- (1) 過去の重大事故を学ぶケースメソッドの作成、
- (2) 実橋における損傷シナリオの調査、
- (3) リダンダンシー評価における荷重レベルの検討、
- (4) リダンダンシー解析のケース・スタディの作成、
- (5) リダンダンシー評価ガイドラインの作成

研究内容の詳細は報告書¹⁾と同じシンポジウムの関連する論文に任せ、ここでは、その概要と趣旨の説明にとどめる。

(1)ではミネアポリスのI-35W橋の落橋事故と木曾川大橋の斜材破断事故に関し、事故へ至る経緯をとりまとめた。重大事故の経緯を調べると、いくつかの要因があり、そのうちの1つを未然に防げていれば、事故そのものも防げたと思うことがしばしばある。この部分の取り纏め方を「ケースメソッド」と読んでるのは、この事故の内容を教材として利用し、橋梁における事故を回避するために何が必要か、何をすべきかを学んで欲しいと考えたためである。

(2)では過去の損傷事例を調査し、鋼橋における損傷シナリオを取り纏め、リダンダンシー評価における破断想定部材設定の基礎資料とした。次章で詳述するが、リダンダンシーの無い橋梁と判定されると米国に於いては設計上、維持管理上、様々なペナルティが課せられる。リダンダンシーのない橋梁とは、ある部材のもしくは部位の破断を想定した場合、橋梁の全体崩壊を招く橋梁である。そのため、1箱桁橋もリダンダンシーの無い橋梁と判定されるが、そもそも、1箱桁橋の引張フランジが全面にわたり破断するという損傷シナリオの発生確率は非常に低いものと思われる。しかし、米国の例では、損傷シナリオの発生確率は考慮されず、リダンダンシーの有る無しにのみ基づいて、設計上、維持管理上のペナルティが課せられる仕組みには問題があるように考えたためである。

(3)においては、リダンダンシーの評価に於いて、曖昧さを残している活荷重レベルについて検討した。リダンダンシー評価においては、ある部材が損傷を受けた後の余耐力を評価するが、初期設計時における活荷重を100%考慮しても、なお安全であるということは、本来その部材が不要だとも考えられ、過剰に安全と思われる。そのため(3)において活荷重の発生確率を検討し、リダンダンシー評価における活荷重レベルの推奨値を検討した。

(4)はケース・スタディでトラス橋、桁橋、アーチ橋についてリダンダンシーの評価事例を紹介している。これは実務において計算例として利用していただく事を想定している。現状ではリダンダンシー評価の標準的な手法は確立されておらず、評価結果は評価を行う技術者の技量に大きく依存する。

しかし、点検・維持管理の重点化や優先順位決定のためにリダンダンシー評価結果を利用するためには、標準的なリダンダンシー評価手法の確立が必要である。そのため、(5)において評価手法のガイドラインをまとめた。

3. 米国における動向

3.1 リダンダンシーの定義

著者の知る限り世界的にみて、リダンダンシーの概念を橋梁の設計・製作・維持管理に取り入れているのは米国のみであり、リダンダンシーは AASHTO 荷重抵抗係数設計基準¹⁾（以下、AASHTO LRFD と略記）では“the quality of a bridge that enables it to perform its design function in the damaged state.”と定義されている。一方、AASHTO の既設橋の維持管理・評価マニュアルである“AASHTO The Manual for Bridge Evaluation”²⁾（以下 AASHTO MBE と略記）では“the capability of a bridge structural system to carry loads after damage to or the failure of one or more of its members.”と定義されている。

ここでのリダンダンシー定義は部材の損傷もしくは破壊後でも構造全体系の耐荷力もしくは機能を維持する能力と定義しており、その意味で after-fracture redundancy と呼ばれることがある。両者のニュアンスが若干異なる所は、AASHTO LRFD が損傷後の橋の機能保持とし、AASHTO MBE が機能の内、耐荷力にのみに限定している。

しかし、リダンダンシーを定量化するために必要となる loads (荷重)としてどの荷重をどのレベルまで考えれば良いかや、damage (損傷) や failure (破壊) としてどのようなものを考えれば良いかと言った規定は必ずしも明確に基準で定められていない。文献 3)において報告されている各州の道路管理者に対するアンケート調査結果でも、リダンダンシー評価で用いられる荷重レベル等について、道路管理者と請負側のコンサルタント技術者間で協議の上決定していることが報告されている。

唯一リダンダンシーの定義において、定量的な要求性能を示しているのが文献 4)である。この文献では、以下に示す 4 つの限界状態と、この限界状態に達する時の活荷重係数 LF を定義している。

(a) 部材破壊限界状態： LF_1

橋梁全体系に荷重を増加させてゆき最初にある部材が終局状態に達した状態。

(b) 終局限界状態： LF_u

橋梁全体系としての終局状態。通常、橋梁全体系の非線形解析より算出される。

(c) 機能限界状態： LF_f

橋の機能面からみた終局状態で、たわみがスパン長の 1/100 に達した状態と仮定する。

(d) 損傷時限界状態： LF_d

部材を 1 つ除去した状態における限界耐力の状態

通常的设计では(a)の状態を橋梁全体系の終局とみなしている。(b)から(d)がリダンダンシーに関わる限界状態で、この限界状態に対して、リダンダンシーを表す指標として次の 3 つの System Reserve Ratio を定義している。

$$R_u = \frac{LF_u}{LF_1}, \quad R_f = \frac{LF_f}{LF_1}, \quad R_d = \frac{LF_d}{LF_1}$$

そして、4 本主桁の橋梁は通常リダンダンシーがあると考えられるので、4 本主桁の安全性指標を目標値として、必要な System Reserve Ratio を計算している。具体的には、以下の値をリダンダンシーのある橋梁の所要 System Reserve Ratio として提案している。

終局限界状態： $R_u \geq 1.30$ ， 機能限界状態： $R_f \geq 1.10$ ， 損傷時限界状態： $R_d \geq 0.50$

つまり、部材を1つ除去した後のいわゆる **after-fracture redundancy** では健全時の部材終局状態における活荷重係数の50%まで耐力があればよいとしている。また、この論文のもう一つ特筆すべき点は、耐力だけでなく、機能面でのリダンダンシーを要求している点と、健全な状態に於いてもシステムとしての耐力に対して、リダンダンシーの要求性能レベルを定義している点である。

ただ、この定義にも問題があり、着目部材が当初からかなり余裕を持って設計されていた場合、 LF_1 が大きくなり、これを基準に **System Reserve Ratio** を計算すると **System Reserve Ratio** が小さな値となる場合がある。実際、文献4)でも所要 **System Reserve Ratio** を満足しない橋梁でも十分なリダンダンシーを有している場合があることを示している。また、この定義がリダンダンシー解析において一般的に用いられているかどうか疑問で、実際、ミネアポリスの I-35W 橋で行われていたリダンダンシー解析⁵⁾においても、この定義は用いられていない。

3.2 新設橋梁設計時と製作時における FCB と FCM の取り扱い

前節でリダンダンシーの有り無しの判定は、細部においてあまり明確に規定されていないことを示した。その一方で、AASHTO LRFD ではリダンダンシーのある橋梁と無い橋梁の設計を明確に区分して、リダンダンシーの無い橋梁は、設計時の安全率を通常の橋梁より 5%大きくしなければならない。

具体的には、AASHTO LRFD の設計照査式は一般に次の形で表される。

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (2)$$

ここで、 η_i は荷重修正係数(load modifier)、 γ_i は荷重係数(load factor)、 Q_i は荷重効果（荷重によって生じる断面力、応力など）、 ϕ は抵抗係数、 R_n は公称耐力を表す。AASHTO LRFD では荷重修正係数、荷重係数、抵抗係数で全体の安全率を規定している。この照査式の荷重修正係数は更に3つの係数、リダンダンシー係数 η_R 、延性を考慮する係数 η_D 、重要度係数 η_I の積

$$\eta_i = \eta_R \eta_D \eta_I \quad (3)$$

で計算される。このうち、リダンダンシー係数は

リダンダンシーの無い橋梁： $\eta_R = 1.05$

リダンダンシーのある橋梁： $\eta_R = 1.00$

と定義されている。

さらに、鋼橋の場合、リダンダンシー有無は主に、崩壊危険部材(Fracture critical member, FCM)がその橋梁にあるか否かに依存する。ここで、崩壊危険部材とは、“Component in tension whose failure is expected to result in the collapse of the bridge or the inability of the bridge to perform its function.”と定義されている。つまり、引張を受ける部材もしくは部材を構成する部分で、その破壊が橋梁全体の崩壊もしくは機能障害を起こすものである。この崩壊危険部材に対しては、疲労設計で荷重の繰り返し回数を無限と設定し、疲労限度での照査が必要になる。このような配慮は設計時だけに留まらず、製作時における非破壊検査や高靱性の鋼材の使用が崩壊危険部材には義務付けられている。

崩壊危険部材を含む橋梁を **Fracture Critical Bridge (FCB** と以下略記)と呼ぶが、上述した FCB に対する設計・製作時のペナルティで、FCB で無い橋梁に較べて FCB は約 8%製作費が上昇すると言われている³⁾。

3.3 供用時検査

連邦政府の検査基準である National Bridge Inspection Standards でも FCB の供用時における定期検査期間を通常の橋梁に較べて短く設定し、かつ崩壊危険部材に関しては Hands-on inspection (近接目視検査)を義務化している。多くの場合、FCB は2年一度(短い場合毎年) Hands-on inspection を行っており、これによる FCB のライフサイクルコスト増は、製作費におけるコスト増 8%と比較して非常に大きく、通常の橋梁の2倍から5倍と報告されている³⁾。

3.4 既設橋の耐力評価

前節の National Bridge Inspection Standards (NBIS)では検査結果を用いて安全性評価を行うことが義務づけられている。具体的には橋の耐荷力を評価し、耐荷力不足の場合は補強、閉鎖、もしくは荷重制限をしなければならないと規定されている。耐荷力の大きさは参照とする設計活荷重に対し、その何倍耐荷力があるかを表す Rating Factor (RF)で表される⁶⁾。

$$RF = \frac{C - DL}{LL} \quad (4)$$

ここで、 C は部材耐力、 DL は死荷重効果（死荷重によって生じる断面力もしくは応力）、 LL は活荷重効果（活荷重によって生じる断面力もしくは応力）を表す。したがって、 RF が 1.0 以上であれば、基準としている活荷重に対し十分な安全であることを意味する。一方、 RF が 1.0 より小さい場合、基準とした活荷重に対して安全とは言えず、NBIS より、この橋の補強、閉鎖、もしくは荷重制限を実施しなければならない。式(4)において、部材耐力は次式で表される。

$$C = \phi_c \phi_s \phi R \quad (\phi_c \phi_s \geq 0.85) \quad (5)$$

ここで、 R は公称部材耐力、 ϕ_c は Condition factor(状態係数)と呼ばれ、橋梁点検の結果を受けて決定される係数で、無損傷の時が 1.0 で腐食による断面欠損など損傷がある場合は、最大 0.85 まで減じられる。 ϕ_s は System factor(構造システム係数)と呼ばれ、リダンダンシーのある橋の場合は 1.0 で、FCB 場合、0.85 となる。つまり既設橋の耐力評価においても、リダンダンシーの無い橋梁は耐荷力を 15% 低く評価される。

4. まとめと今後の課題

鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会の活動概要と、米国におけるリダンダンシーの取り扱いについて説明した。

リダンダンシーを評価することによって損傷シナリオ（部材・部位）毎の安心・安全に関わる重要度が判定できる。今後、限られた予算の中で膨大なインフラの維持管理を効率的に行うには、個々のインフラ構造の安全性にとって、どの部材・部位が重要かを特定し重点的かつ優先順位をつけて点検・補修する必要がある。その意味でリダンダンシー評価は重要であると思う。

リダンダンシーに関わる研究として、(1)リダンダンシーの有無の判定に関わる研究と (2) リダンダンシーの無い橋梁に対して設計、製作、維持管理でどのように対処するか、といった 2 つに大別できる。

(1) に関する今後の課題としては、まず第 1 に橋の機能性や第 3 者被害にとってクリティカルな部材・部位の検討を進めるべきと考える。委員会活動では時間の制約もあり、橋の終局状態のみに着目して FCM の特定を行ったが、筐子トンネルの様な事故を未然に防ぐためには第 3 者被害に対する FCM の検討が是非とも必要である。

第 2 に米国の例では、個々の損傷シナリオの発生確率は全く考慮されず、FCB であるということだけで、維持管理面で大きなペナルティが課せられるは若干疑問である。一般に狭義のリスクは

$$(\text{リスク}) = (\text{その事象の発生確率}) \times (\text{その事象が発生した場合の損失})$$

と定義されるが、米国のやり方は（損失）だけに着目し、FCB であるため大きいのでペナルティを課しているが、（リスク）としてはうまく管理出来ていないように思う。例えば、最近の 2 主桁橋では疲労損傷発生源と成る構造ディテイルそのものが少なく、引張フランジが破断する様な損傷シナリオの発生確率は、過去の多主桁橋に比べて格段に低いように思う。各損傷シナリオの発生確率を定量的に求めることは困難があると思われるが、少なくとも維持管理の現場レベルで把握している各損傷シナリオの「傷つきやすさ」を考慮に入れて、維持管理上での対応を考えるべきのように思う。

最後に、リダンダンシーや FCM の判定方法に関しては、個々の解析法の精緻化よりも、線形リダンダンシー解析のような比較的簡便な方法で、多くの実橋を FCM 判定し、トラス橋や形式別の桁橋

の何%が FCB になるといった、大まかな数字を把握した上で、次のステップである設計、製作、FCB の判定、点検、維持管理といった各段階で、どのような対処をしてリスクを軽減するかといった検討を進めるべき段階にあると思う。

謝辞

本研究の一部は、土木学会平成 25 年度重点研究課題の助成を受けて実施されました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会：インフラ構造システムのリダンダンシー評価手法の開発，土木学会調査研究課題平成 25 年度重点研究課題の成果，
http://committees.jsce.or.jp/s_research/taxonomy/term/6
- 2) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, Washington, DC, 2012
- 3) AASHTO: The Manual for Bridge Evaluation, Second Edition with Interim, MBE-2-M, Washington, DC, 2011
- 4) Connor, R.J., Dexter, R., Hussam, Md. : Inspection and Management of Bridges with Fracture-Critical Details, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP SYNTHESIS 354, 2005
- 5) Ghosn, M., Moses, F. : Redundancy in Highway Bridge Superstructures, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 406, 1998
- 6) URS corporation: Fatigue Evaluation and Redundancy Analysis, Bridge No.9340, I-35W over Mississippi river, Draft report, 2006
- 7) AASHTO: Manual for Bridge Evaluation (MBE), 2011