

リダンダンシー評価ガイドラインと今後の展望

GUIDELINES FOR REDUNDANCY AND FUTURE WORKS

吉岡 勉* , 奥井義昭**, 岩崎英治***

Tsutomu YOSHIOKA, Yoshiaki OKUI, Eiji IWASAKI

ABSTRACT This article gives an overview about the guidelines settled for establishment of standard redundancy evaluation technique in steel bridge. A kind of the redundancy analysis and a procedure and usage depending on a purpose were shown. The modeling method of load and the constitution members and the collation method and of valuation method and the specific method of FCM were explained.

KEYWORDS : 鋼橋, リダンダンシー, ガイドライン, 崩壊危険部材

Steel bridge, redundancy, guidelines, Fracture Critical Member

1. まえがき

米国ミネアポリスにおける鋼トラス橋の落橋事故や木曾川大橋の斜材破断事故を契機に、一部の部材の破断により橋全体が不安定な状態に至らないように、橋梁計画・設計・補修補強において冗長性(リダンダンシー)を確保することが指摘されている。平成24年道路示方書においても「橋全体の補完性及び代替性」として同様の性能を確保することが明文化されている。

しかしながら、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等に大きく依存する。そこで、鋼橋における標準的なリダンダンシー評価手法の確立が必要であると考え、ガイドライン(案)をまとめた。図-1に本ガイドラインの目次を示す。点検・維持管理の重点化や優先順位決定のために本ガイドラインによるリダンダンシー評価を活用されることを期待する。

鋼橋のリダンダンシー評価ガイドライン(案)

<目次>

1. 適用の範囲
 2. 用語の定義
 3. リダンダンシー解析の手順
 4. 荷重
 5. 線形リダンダンシー解析
 - 5.1 概要
 - 5.2 線形リダンダンシー解析におけるモデル化
 - 5.3 部材の照査
 - 5.4 格点部の照査
 - 5.5 リダンダンシーの評価とFCMの同定
 6. 非線形リダンダンシー解析
 7. 動的リダンダンシー解析
- 参考文献

図-1 ガイドライン(案)の目次

2. 用語の定義

冗長性などの意味をもつリダンダンシー(redundancy)を、部材破断後の耐荷性能(余耐力)と定義した。また、AASHTO LRFDの定義に従い、崩壊危険部材(Fracture Critical Member:以下FCMという)を、引張応力を受ける部材が破断することにより、橋梁が崩壊もしくは橋梁としての機能を失う部材と定義した。また、部材の一部の破壊によって崩壊に至る部位をFracture Critical Detail:FCD、FCM、FCDを含む橋梁をFracture Critical Bridge:FCBと定義した。

*工博 大日本コンサルタント(株) 東北支社技術部 主幹 (〒980-0021 仙台市青葉区中央 1-6-35)

**工博 埼玉大学大学院 教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

***工博 長岡技術科学大学 教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

3. リダンダンシー解析の手順

文献1などを参照して作成したリダンダンシー解析手法の標準的な手順を図-2に示す。線形リダンダンシー解析を標準とするが、より詳細な余耐力の評価や線形リダンダンシー解析では危険側の判断となる場合は、部材の非線形性を考慮した解析や動的リダンダンシー解析によりFCMの特定や余耐力の評価を行っても良いものとした。

線形リダンダンシー解析の目的は、FCMのように維持管理上重要な部材を同定することであり、非線形解析は、線形解析の適用が危ぶまれるような場合等の局所の評価が主目的である。また、動的リダンダンシー解析は、維持管理段階での重大損傷に対して精度の高いFCMの評価や橋全体の余耐力の評価に適している。

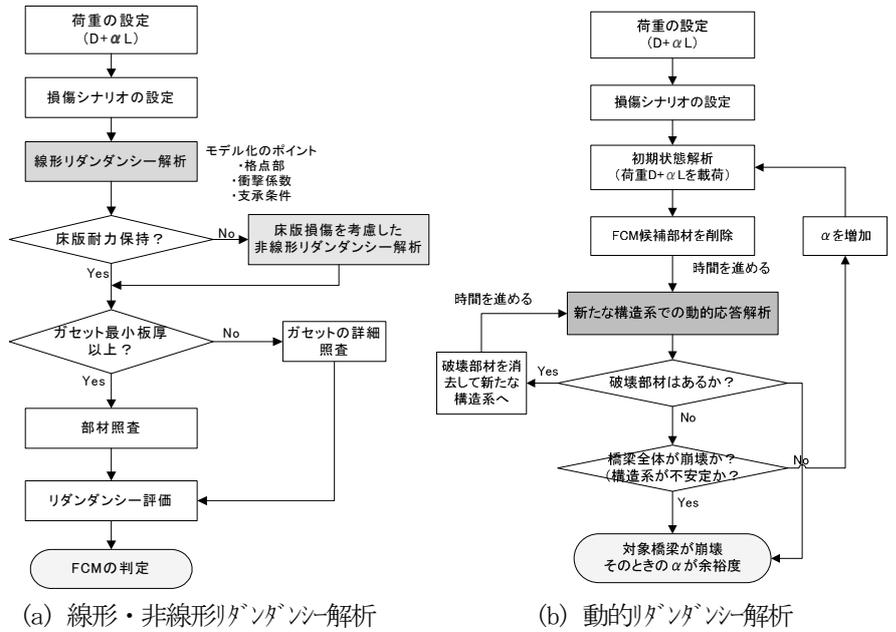


図-2 リダンダンシー解析の手順

4. 荷重

リダンダンシー解析に考慮すべき荷重は、主荷重（死荷重+活荷重+衝撃）+部材破断に伴う衝撃とすることを標準とした。死荷重については、橋梁の実重量を正しく評価できるように設定する必要がある。

リダンダンシー評価において、道路橋示方書等の設計基準に規定される活荷重を全て考慮するのは過剰であり、対象とする橋梁のある路線での交通実態にあわせた荷重を道路管理者と協議して設定することが望ましい。しかし、すべての路線における交通調査結果はなく、また渋滞列を模擬した解析は現時点で対応できる設計ソフトはなく、非常に煩雑な作業となる。したがって個別の設定が難しい場合は本研究の荷重シミュレーションによる結果²⁾からB活荷重の50%を活荷重として設定してもよいこととした。

部材破断に伴う荷重のモデル化は、図-3に示すように健全な状態における破断想定部材の断面力を逆方向に载荷して足し合わせる方法がある。また、破断に伴う衝撃係数は、1自由度系の動的応答倍率より1.854を用いている例³⁾がある。本研究においてもトラス橋の動的リダンダンシー解析を行った結果、引張部材で約1.8という衝撃係数を得ている。なお、圧縮部材には部材破断に伴う衝撃を考慮しなくてもよいものとした。

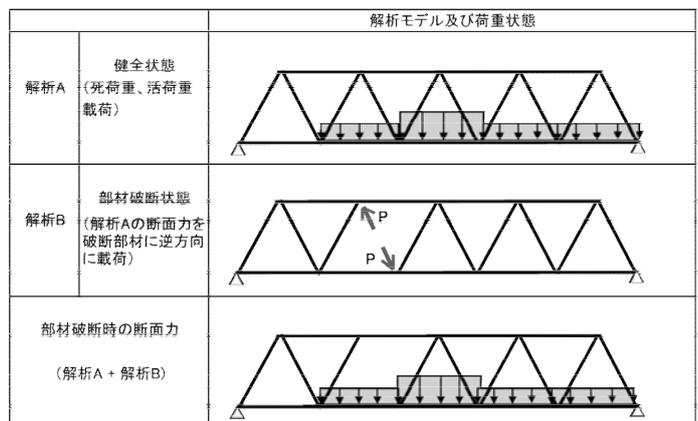


図-3 静的リダンダンシー解析での荷重の足し合わせ

5. 線形リダンダンシー解析

5.1 モデル化

線形リダンダンシー解析におけるモデル化として、トラス弦材、斜材、鉛直材は線形はり要素でモデル化し、格点部は部材同志を剛結合することを標準とした。実際、部材が破断した状態での格点部

には大きな曲げモーメントが発生し、ガセットプレート近傍の斜材において局部座屈が発生し、塑性ヒンジが形成され、剛結合からピン結合へ移行する破壊形態と考えられる。トラス橋格点部をピン結合、剛結合とした場合のケーススタディ³⁾より、剛結合とモデル化した方が終局状態に達する部材数が多くなり安全側の評価となることから、剛結モデルを基本とした。

鋼桁橋の主桁、横桁のウェブとフランジはシェル要素でモデル化し、対傾構や横構、床組についても要素でモデル化することを基本とした。また、トラス部材破断時もしくは鋼桁橋の主桁損傷時の床版にはねじれ変形が生じ、多軸応力状態となることから、これらの挙動を評価できるシェル要素でモデル化することを基本とした。床版のずれ止めは、非合成設計されたスラブアンカーであっても合成挙動することが知られ、リダダンシー解析では実挙動に近いモデル化が望ましいことから、合成効果を考慮したモデル化を行うものとした。

5.2 部材の照査

部材の耐荷性能の照査は、荷重効果が耐力以下であることを確認することで行うものとした。また、既設橋のリダダンシー評価のための部材の照査においては、腐食等による断面欠損など損傷の影響を考慮して、耐力の評価を行うことを基本とした。

部材の照査においては、鋼部材であれば鋼・合成標準示方書、コンクリート部材であればコンクリート標準示方書等を参照することでよく、これらの示方書における照査式は一般に次の形で表される。

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$S_d = \gamma_{D} S_D + \gamma_{L} S_L (1.0 + i) + S_I \quad : \text{設計荷重効果} \quad (2)$$

$$R_d = R(f_k / \gamma_m) / \gamma_b \quad : \text{設計耐力} \quad (3)$$

ここで、 γ_i は構造物の重要度を表す構造物係数、 γ_f は作用（荷重）係数、 F_k は作用（荷重）の特性値、 γ_m は材料係数、 γ_b は部材係数、 f_k は材料強度の特性値、 S_D は死荷重効果、 S_L は活荷重効果、 S_I は部材破断による衝撃の効果、 γ_{D} は死荷重係数（=1.0）、 γ_{L} は活荷重係数、 i は活荷重衝撃係数である。

線形リダダンシー解析においては、一般に $\gamma_i = \gamma_a = 1.0$ として良く、活荷重係数に関しては、設計荷重の特性値としては道路橋示方書に規定の活荷重を用いればよく、前章で示したように $\gamma_{L} = 0.5$ を本ガイドラインでは推奨している。一方、設計耐力に関しては、安全率を除いた終局強度を考えればよく、安全率を $\gamma_m = \gamma_b = 1.0$ とした設計耐力を用いればよい。

5.3 格点部の照査

トラス橋における格点部は、橋梁として全体構造系が成立するための力学的な要諦のひとつであり、その崩壊は直ちに橋梁全体系の崩壊の恐れにつながる。I-35W 橋の崩落事故後に取りまとめられた FHWA によるトラス格点部の耐荷力評価ガイド⁴⁾では、トラス橋格点部の破壊形態として図-4 に示す①～⑥を掲げている。これに、⑦ガセットプレートの自由辺と斜材や弦材等で囲まれたガセットプレートの座屈を加えた 7 つの項目の安全性を照査する必要があるとした。

道路橋示方書Ⅱ鋼橋編や鉄道構造物等設計標準では、ガセットプレートの必要板厚、ボルト間隔・縁端距離の制限によって、前述した破壊形態のうち①、②、③、⑤を回避する思想にある。また④に

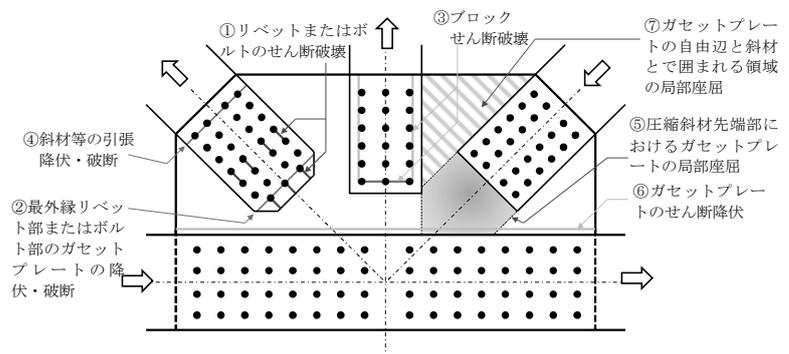


図-4 鋼トラス橋格点部における破壊形態
(文献 4), 5)に基づき再構成)

については、斜材等の部材設計によって回避される。従って、⑥、⑦に対して配慮された設計を行えば、7つの項目の耐力照査を省略してよいものとした。ガイドラインでは①～⑦の破壊強度式を明示している。

5.4 リダンダンシーの評価とFCMの同定

線形リダンダンシー解析において断面力を求め、前節までに示した方法で照査を行った結果、終局状態と判定された部材数もしくは格点部数が著しく多く、不安定な状態と判断される場合、構造系全体も終局状態に達したと判定して良いものとした。構造系全体が不安定か否かを定量的に評価する有効な方法は未確立であるが、一つの方法として終局状態と判定された部材数が内部不静定を含めた不静定次数を超過するか否かにより評価する方法がある⁶⁾

破断想定部材が引張部材の場合で、且つ、照査結果より終局状態と判定された部材数が多い場合は、このような部材をFCMと判定され、ゲルバートラス橋の場合のヒンジ点のような部位はFCDと判定される。

また、鈹桁橋についてはシェルモデル解析による損傷部周辺の主桁、横桁、床版の応力状態によりリダンダンシー評価を行うことになるが、近年の基準で設計された少数主桁橋を対象に行った弾塑性FEM有限変位解析によれば、亀裂が腹板の中央部まで進展した状態で、残留変形は大きくなるものの耐脆性破壊性能を有することが確認されている²⁾。

6. 非線形リダンダンシー解析

線形リダンダンシー解析では、弾性状態を仮定し、部材の終局を橋梁全体の終局状態と判定するため、必ずしも正しい構造系としての余耐力を評価していない。材料非線形が卓越する場合など線形リダンダンシー解析の適用が疑問視される場合や、線形リダンダンシー解析では過度に安全側の評価になる場合などは、非線形解析によってリダンダンシー解析を行って良いこととした。

非線形リダンダンシー解析では床版の非線形性を適切に考慮することが重要であり、コンクリートをソリッド要素でモデル化し、鉄筋を埋込鉄筋要素でモデル化して材料非線形性を設定する直接的な方法があるほか、積層シェル要素を用いた要素数を抑制できるモデル化方法があり、検討目的やモデル化規模に応じて適切に選択するのがよい。また、床版の合成前・合成後による剛性変化を考慮する場合は、施工ステップを考慮した解析（段階施工解析）を行う必要があるとともに、崩壊を再現する解析では荷重増分を適切な分割とする必要がある。

7. 動的リダンダンシー解析

連鎖的な部材の破断が生じ、線形リダンダンシー解析では橋全体系の安定性評価が困難な場合や、精度の高いFCMの判定が必要な場合は動的リダンダンシー解析を行うのがよい。

動的リダンダンシー解析の手順は図-2(b)に示したとおり、まず初期状態 $D + \alpha L$ を作成した後、破断想定部材（最初に破断する引張部材で、以下、トリガー部材と称す）を除去し、部材の終局状態に達した部材を順次消去していく手法を基本とする。トリガー部材消去後、連鎖的な部材破断が発生した場合、構造系が伴う大きな変形を追従して評価するため、材料非線形ならびに幾何剛性マトリックスが逐次アップデートされる有限変位解析用いて解析を実施するものとする。

破断時の衝撃力は破断速度に関係があり、たとえば、腐食劣化により部材断面の一部から徐々に破壊して最終的に破断するような比較的ゆっくりとした破断現象よりも、一瞬で応力が解放される脆性的な破断現象のほうが衝撃力は大きい。本ガイドラインでは、より危険側の評価になると考えられる脆性的な部材破断を対象とし、破断速度の影響については考慮しなくてもよいものとした。

動的解析モデルに用いる要素の選定には十分注意する必要がある。収束判定方法など解析ソフトウェア特有の特性を把握することは重要である。部材の連鎖的な破壊を考慮した解析では部材に設計では考慮していない断面力が発生するため、2軸曲げや軸力変動の影響を考慮できるファイバー要素を用いた解析モデルとすることを基本とした。

解析には適切に減衰を設定する必要があるが、一義的に減衰定数を決定することは困難であるため、減衰定数をパラメータにしたパラメトリック解析の結果から減衰の影響度を事前に調査することが望ましい。また、数値解析の精度問題として時間積分間隔はクーラン条件を満足するように設定する必要がある。

8. 今後の展望

本研究を通して残された研究課題は以下のものである。本ガイドラインを今後発展させ、鋼橋のリダダンシー評価により安全・安心のより一層の向上に寄与することを期待する。

- (1) 本研究では主に、崩壊危険部材 FCM を定義し、FCM の破断による橋全体の安定性（冗長性）について評価する方法について研究したが、維持管理段階での活用を勘案すると、使用限界に対する冗長性或第 3 者被害に対する冗長性についての研究が必要である。
- (2) トラス橋やアーチ橋のリダダンシー評価として、終局状態となる部材数や格点部数の多少により FCM を同定する方法を示したが、線形リダダンシー解析は微小変位理論のため橋全体が不安定となる状態の評価までは行えず、簡易な方法による全体安全性の評価方法について課題を残した。
- (3) 鈹桁橋の全体安定性について寄与が大きいと考えられる床版の照査方法が重要であるため、ずれ止めを含めた床版の高度なモデル化（シェル要素もしくはソリッド要素）が必要となるが、リダダンシー評価のための標準的な方法の確立が必要である。
- (4) 米国 (AASHTO MBE) では既設橋に対して 2 年に 1 回の定期検査と同時に耐力評価を義務づけ、Load Rating の方法により既設橋に対して合理的な評価方法（目標信頼性指標及び活荷重係数の低減）を規定している。一方、我が国においては、既設橋の耐力評価に関する枠組みやマニュアルがなく、橋のリダダンシー性のファクターも加えた評価方法の確立が必要である。

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研究助成を受けて「鋼構造物のリダダンシーに関する検討小委員会」の一環として実施されました。

参考文献

- 1) Transportation Research Board : Redundancy in Highway Bridge Superstructures, NCHRP synthesis 406, 1998.
- 2) 土木学会鋼構造委員会鋼構造物のリダダンシーに関する検討小委員会報告書
- 3) 永谷 秀樹, 明石 直光, 松田 岳憲, 安田 昌宏, 石井 博典, 宮森 雅之, 小幡 泰弘, 平山 博, 奥井 義昭, 我国の鋼トラス橋を対象としたリダ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.
- 4) Federal Highway Administration (FHWA) : Load Rating Guidance and Examples For Bolted and Riveted Gusset Plates In Truss Bridges, 2009.2.
- 5) (独)土木研究所・首都大学東京・早稲田大学：腐食劣化の生じた実橋梁部材を活用した鋼トラス橋の耐荷性能評価に関する研究, 国土交通省建設技術研究開発費補助金総合研究報告書, 2013.3.
- 6) 片出亮, 香月智：鋼製砂防堰堤のリダダンシー評価指標の基礎的検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, I -654, 2009.9.

リダンダンシー評価ガイドラインと今後の展望

吉岡 勉

大日本コンサルタント株式会社
NIPPON ENGINEERING CONSULTANTS CO.,LTD.

1

1.発表アウトライン

1. ガイドライン目次
2. 用語の定義
3. リダンダンシー解析の手順
4. 荷重
5. 線形リダンダンシー解析
6. 非線形リダンダンシー解析
7. 動的リダンダンシー解析
8. 今後の展望

鋼橋のリダンダンシー評価ガイドライン(案) <目次>

1. 適用の範囲
2. 用語の定義
3. リダンダンシー解析の手順
4. 荷重
5. 線形リダンダンシー解析
 - 5.1 概要
 - 5.2 線形リダンダンシー解析におけるモデル化
 - 5.3 部材の照査
 - 5.4 格点部の照査
 - 5.5 リダンダンシーの評価とFCMの同定
6. 非線形リダンダンシー解析
7. 動的リダンダンシー解析
- 参考文献

2

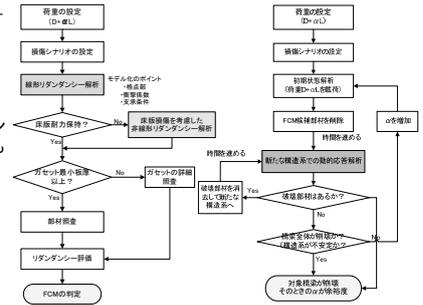
2.用語の定義

1. リダンダンシー：本ガイドラインにおけるリダンダンシーとはいわゆる after fracture redundancyを意味し、ある部材もしくは部材の一部が破断等した後の耐荷性能を意味。
2. 崩壊危険部材 (Fracture Critical Member: FCM)：引張応力を受ける部材が破断することにより、その橋梁が崩壊もしくは橋梁としての機能を失う場合、その部材を破断危険部材 (FCM) と定義。
3. Fracture Critical Detail (FCD)：部材の一部もしくはピン構造など、その部分が破壊することでその橋梁が崩壊もしくは橋梁としての機能を失う場合、その部材をFracture Critical Detail (FCD) と定義。
4. Fracture Critical Bridge (FCB)：FCMもしくはFCDを含む橋梁をFracture Critical Bridge (FCB) と定義。

3

3.リダンダンシー解析の手順

- ・線形リダンダンシー解析を標準。
- ・より詳細な余耐力の評価が必要な場合は、非線形解析や動的リダンダンシー解析を行っても良い。



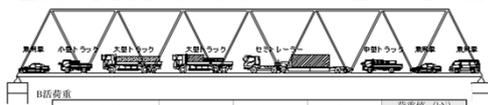
(a) 線形・非線形リダンダンシー解析 (b) 動的リダンダンシー解析

4

4.荷重 (1/2)

4.1 荷重

- ・リダンダンシー解析に用いる荷重は、①死荷重、②活荷重(衝撃を含む)、③部材破断に伴う衝撃を標準とする。
- ・活荷重は道路管理者と協議して設定すべき。B活荷重の50%としてもよい。



荷重種別	荷重 p (kN/m ²)	載荷幅 W (m)	載荷長 D (m)	荷重値 (kN)
主載荷重	p1	5.5	10	641.3
	p2	3.5	5.5	1585.3
従載荷重	p1	5	(8.6 - 5.5)	180.7
	p2	1.75	(8.6 - 5.5)	416.8
	合計			2854.1

衝撃係数 $i = 20 / (50 + L) = 20 / (50 + 70.63) = 0.166$

	B活荷重 (kN)	渋滞列 (kN)	比率 (%)
荷重合計	2854.1	1439.3	50.4

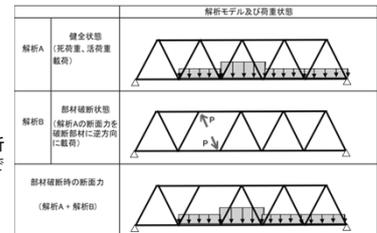
車両渋滞列 (B活荷重の50%に相当) (参考例)

5

4.荷重 (2/2)

4.2 部材破断による衝撃

- ・健全な状態における破断想定部材の断面力を逆方向に載荷して足し合わせ。
- ・破断に伴う衝撃係数は、1.854を用いている例あり。
- ・本研究においてもトラス橋の動的リダンダンシー解析を行った結果、引張部材で約1.8という衝撃係数を得ている。
- ・圧縮部材には部材破断に伴う衝撃を考慮しなくてもよい。



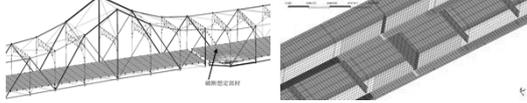
静的リダンダンシー解析での荷重の足し合わせ

6

5.線形リダンダンシー解析 (1/4)

5.1 モデル化

1. トラス弦材, 斜材, 鉛直材 : 線形はり要素でモデル化。
2. トラス格点部 : 部材どうしを剛結合することを標準。
3. 主桁, 横桁のウェブとフランジは, シェル要素でモデル化。支点部や荷重集中点の垂直補剛材は, シェル要素やはり要素などを用いてモデル化。また, 対傾構は, はり要素などを用いてモデル化。
4. 床組(縦桁, 横桁)や横構は, はり要素などを用いてモデル化。
5. 床版 : シェル要素でモデル化。
6. ずれ止め : スラブアンカー等を用いた非合成構造として設計されたトラス橋においても, 床版と主構の合成効果を反映したモデル化。
7. 支承・伸縮装置 : 実橋の調査により支承および伸縮装置の機能を確認し, モデル化。



ゲルバートラス橋の解析モデル

鋳桁橋の解析モデル

7

5.線形リダンダンシー解析 (2/4)

5.2 部材の照査

- 部材の耐荷性能の照査は, 荷重効果が耐力以下であることを確認することで行うものとする。

- 既設橋は, 腐食等による断面欠損などを考慮した耐力の評価が基本。

$$\gamma \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$S_d = \gamma_{D0} S_{D0} + \gamma_{D1} S_{D1} (1.0+i) + S_{D2} \quad ; \text{設計荷重効果} \quad (2)$$

$$R_d = R(f_k / \gamma_m) / \gamma_s \quad ; \text{設計耐力} \quad (3)$$

ここで, γ は構造物の重要度を表す構造物係数, γ_i は作用 (荷重) 係数, F_k は作用 (荷重) の特性値, γ_m は材料係数, γ_s は部材係数, f_k は材料強度の特性値, S_d は死荷重効果, S_{D0} は活荷重効果, S_{D1} は部材破断による衝撃の効果, γ_{D0} は死荷重係数 (=1.0), γ_{D1} は活荷重係数, i は活荷重衝撃係数。

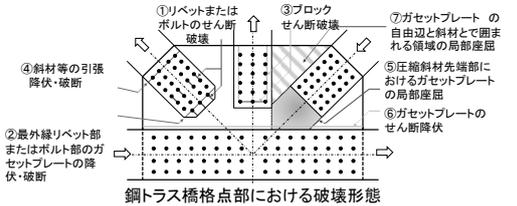
- 活荷重係数は, $\gamma_m = 0.5$ を本ガイドラインでは推奨。
- 設計耐力は安全率を除いた終局強度, 安全率 $\gamma_m = \gamma_s = 1.0$ とする。

8

5.線形リダンダンシー解析 (3/4)

5.3 格点部の照査

- トラス橋格点部の破壊形態として下図に示す①～⑦の項目の安全性を照査。
- 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編や鉄道構造物等設計標準では, ガセットプレートの必要板厚, ボルト間隔・縁端距離の制限によって, 前述した破壊形態のうち①, ②, ③, ④, ⑤を回避可能。
- ⑥, ⑦に対して配慮された設計を行えば, 7つの項目の耐力照査を省略可。
- ガイドラインでは①～⑦の破壊強度式を明示。



鋼トラス橋格点部における破壊形態

9

5.線形リダンダンシー解析 (4/4)

5.4 リダンダンシーの評価とFCMの同定

- 線形リダンダンシー解析において断面力を求め, 前節に示した方法で照査を行った結果, 終局状態と判定された部材数もしくは格点部数が著しく多く, 不安定な状態と判断される場合, 構造系全体も終局状態に達したと判定して良い。

- 破断想定部材が引張部材の場合で, 且つ, 照査結果より終局状態と判定された部材数が多い場合は, このような部材をFCMと判定してよい。
- 不安定か否かを定量的に評価する有効な方法は未確立であるが, 不静定次数により評価する方法がある。

$$m = n + s + r - 2k$$

ここで, m: 不静定次数 (m<0...不安定構造, m=0...安定で静定構造, m>0...安定で不静定構造)

n: 支点反力数の総和

s: 部材数

r: 剛結合節点数

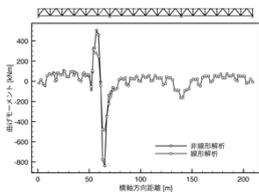
k: 節点数(自由端・支点含む)

10

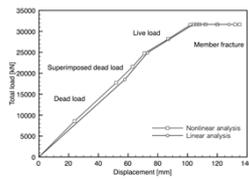
6.非線形リダンダンシー解析 (1/2)

6.1 非線形リダンダンシー解析概要

線形リダンダンシー解析では, 弾性状態を仮定しているため, 過度に安全側の評価になる場合などは, 非線形解析によってリダンダンシー解析を行って良い。



中間支点近傍の斜材(赤色部材)破断時の上弦材曲げモーメント分布の比較



非線形解析と線形解析の荷重-変位関係の比較

11

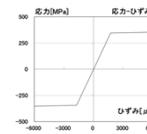
6.非線形リダンダンシー解析 (2/2)

6.2 非線形リダンダンシー解析におけるモデル化

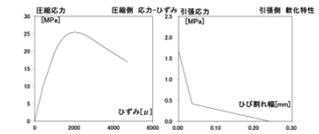
1. 材料非線形性 : 鋼材およびコンクリート材は非線形性を考慮できる要素でモデル化。局所的な破壊, 過度の座屈強度を見込まない適切な要素分割数とする。

2. 幾何学非線形性 : 崩壊や座屈現象などの構造物のひずみや変位が大きくなる場合, 幾何学非線形性を考慮。

3. 解析ステップ : 現応力状態を再現するための適切な解析ステップで, 死荷重, 活荷重を載荷。崩壊を再現する解析ステップでは, 荷重増分を適切な分割とする。



鋼材材料非線形



コンクリート材料非線形

12

7. 動的リダンダンシー解析 (1/2)

7.1 解析手法

破断想定部材が脆性的に破断する橋梁全体系の弾塑性有限変位解析を用いた連鎖崩壊型動的リダンダンシーを基本とする。

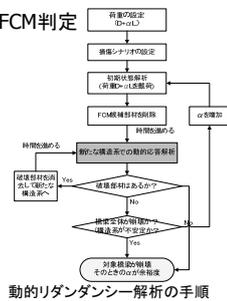
7.2 動的リダンダンシー解析におけるFCM判定

1. 部材破壊判定

- 破壊判定は部材単位で行い、判定値は解析の目的に応じて適切に設定。
- 破壊と判定された時刻以降は、構造系から消去。

2. 橋梁全体の崩壊の判定

- 橋梁としての機能を失ったときを橋梁全体の崩壊と判定する。



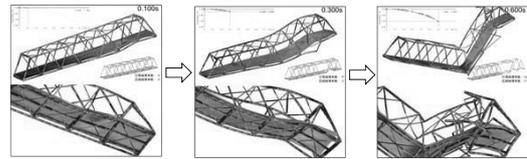
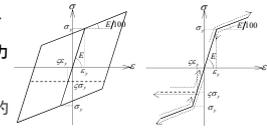
動的リダンダンシー解析の手順

13

7. 動的リダンダンシー解析 (2/2)

7.3 動的リダンダンシー解析におけるモデル化

- 解析ソフトウェアの特性を把握した上で適切なモデル化が必要。
- 構造部材は材料非線形性および軸力変動、2軸曲げを考慮できるファイバー要素を標準とする。
- 破断後の衝撃に起因する応力の動的増幅を適切に評価できるように要素分割を行い、局部座屈の影響を材料構成別に考慮。



トラス橋の動的リダンダンシー解析結果

14

8. 今後の展望

- 本研究では主に、FCMの破断による橋全体の安定性(冗長性)について評価する方法について研究したが、維持管理段階での活用を助産すると、使用限界に対する冗長性や第三者被害に対する冗長性についての研究が必要である。
- トラス橋やアーチ橋のリダンダンシー評価として、終局状態となる部材数や格点部数の多少によりFCMを同定する方法を示したが、線形リダンダンシー解析は微小変位理論のため橋全体が不安定となる状態の評価までは行えず、簡易な方法による全体安全性の評価方法が必要。
- 鉸桁橋の全体安定性について寄与が大きいと考えられる床版の照査方法が重要であるため、ずれ止めを含めた床版の高度なモデル化(シェル要素もしくはソリッド要素)が必要となるが、リダンダンシー評価のための標準的な方法の確立が必要である。
- 米国(AASHTO MBE)では既設橋に対して2年に1回の定期検査と同時に耐力評価を義務づけ、Load Ratingの方法により既設橋に対して合理的な評価方法(目標信頼性指標及び活荷重係数の低減)を規定している。一方、我が国においては、既設橋の耐力評価に関する枠組みやマニュアルがなく、橋のリダンダンシー性のファクターも加えた評価方法の確立が必要である。

15