

構造計画段階で適用可能な連続トラス橋の 危機耐性評価手法の提案

野村 一貴¹・植村 佳大²・高橋 良和³

¹ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: nomura.kazuki.35n@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震発生以後、危機耐性という概念が提唱されおり、現行の設計体系では、危機耐性について考慮すべきとされている。しかし、未だ定まった定量化手法が確立されていない。そこで本研究では、構造計画段階における連続トラス橋の危機耐性評価手法の提案を行う。本提案手法では、荷重と構造形態の関係を視覚的に把握することが可能な図式力学に着目し、図式力学における力線図が示す構造全体の力学的情報を活用する手法を考える。具体的には、既往の研究で提案されているロバストネスインデックスにより、構造物における最重要要素を特定する。次に、耐荷メカニズムへの影響度の大きい部材の集合である「力学的骨格」を定義し、それを抽出する。そして、不静定トラスを対象に実際に適用しその結果を示した。

Key Words: *anti-catastrophe, structural planning, graphic statics, truss bridge*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震を契機として、想定外の災害が生じて、構造物や社会システムが壊滅的な状況に陥らないために、予め対処可能な計画や設計しておくべきという危機耐性の概念が提唱された。しかし、危機耐性の定量化手法は確立されておらず、危機耐性を実現するための具体的な構造技術の開発や構造計画手法の提案などの例は未だ少ないのが現状である。特に、構造計画段階では、構造の大意が決まっていないため、詳細な解析を行うことができないことから、簡易かつ理解しやすい危機耐性評価手法が求められているといえる。そこで本研究では、連続トラス橋梁を例に評価手法の提案を試みる。

既往の研究でも、トラス橋梁のリダンダンシー及びロバスト性に関する検討が行われている。例えば、永谷ら¹⁾は、将来的に橋梁が老朽化することを想定して、損傷シナリオ毎の危険度を事前に評価することが重要であると考え、2つの鋼トラス橋を対象にリダンダンシー評価を行った。その際、着目部材破断時の他の部材断面力を線形解析により算出し、その断面力から各部材が終局状

態であるかの判定を行った。更に、非線形解析を行うことで線形解析の結果の妥当性についても検証している。また、梶田ら²⁾は、損傷を有する下部式鋼製トラス橋梁を対象に3方向同時加震の地震応答解析を行うことで、橋梁全体の挙動を把握し、部材の損傷種別と損傷箇所の違いによる橋梁全体の安全性に及ぼす影響について検討を行った。しかし、これらの既往研究では、部材等の詳細が既知である橋梁構造に対して検討を行っているため、構造物の大意が決まっていない構造計画段階での危機耐性評価手法として適用することができない。

以上の背景をふまえ、本研究では、構造計画段階における連続トラス橋梁の危機耐性評価手法の提案に向けて、部材等の詳細が未定である橋梁構造に対して適用可能な手法を提案する。具体的には、橋梁が重要部材や支承の損傷等の危機的な状況に陥ったとしても、最低限死荷重を支持できるような構造の実現を目的として、図式力学的な表現を活用した構造計画手法を提案する。また、提案手法の適用例を示し、危機耐性向上を目指した対策の効果を確認する。

2. 構造計画における危機耐性

(1) 構造計画の定義

土木事業を実現するためには、まず計画が立案されるが、その計画を実現するために構造物が必要となった場合、土木構造物の建設が計画される。この段階より、構造技術者が参画し、土木構造物の実現に向けた検討が行われる。構造計画は、計画理念に基づき構造物に要求される性能を確保できる構造種別や構造形式を、施工、維持管理、環境および経済性を考慮して具現化を行う行為であり、広義の意味では設計作業に含まれるものである。近年、より良い構造物を創造するためにも、設計作業の上位工程である構造計画段階での検討が最も重要であるとの認識が高まり、構造物の大要を決める構造計画と、その詳細を検討する構造設計段階を陽に区別するようになってきた。土木学会が策定した土木構造物共通示方書³⁾でも、構造計画編が独立した書籍として発刊されている。

構造物の大要とは、構造物の成立性を決定づける基本形式、構造、施工法、概算工費などを指し、特に詳細の検討となる構造設計段階で大きな手戻りがないよう、構造物の基本構造の材料、主要断面等の寸法を決めることが重要である。

(2) 構造計画における定量的評価

構造計画では、建設する土木構造物の構造種別や構造形式を決定するにあたり計画理念をいかに満足し、体現しているかを示す根拠が必要となるため、様々な提案に対する定量的な評価が必要となる。また、構造計画では、構造物の詳細ではなく、基本構造・形式に関する大まかな見積もりなどの概略解析・計算が行われる。ここで、概算といっても、正確な計算ではないという意味ではなく、構造物の特徴を表現する重要な基本構造に対して検討を行い、その実現可能性を見積もるという意味である。構造計画は構造物の大要を決定する行為であるため、詳細な断面や寸法がまだ決まっていないことから、非線形挙動などの検討を行うことは不可能である。構造物の大要に関する概算を行うことで、構造全体と部分の関係や、作用と内力の関係、抵抗メカニズムなどのマクロ的關係・挙動を理解し、構造物全体に対する理解を深めることが重要である。

(3) 構造計画における危機耐性

構造計画段階では自由度が高い(制約が少ない)検討が可能であるため、構造計画で危機耐性を検討することは効果的である。道路橋示方書⁴⁾では、「設計で考慮する地震動に対して耐震設計された橋は、これらの事象に対してある程度までは抵抗特性を発揮することができる」と

考えられるものの、極めて大きな作用に対してまで抵抗特性を確保することは困難であり、また、これらの極めて大きな作用に対しては対応できる対策にも限度がある。」と記されており、設定外の事象に対しては架橋位置や構造形式の選定により対処することが標準的な対処法とされている。また、土木構造物共通示方書(構造計画編)³⁾では、「設定外への対応は、現状の設計体系においては構造計画段階で行う必要がある」と記されており、構造物は要求性能を保持することに加えて、冗長性と頑強性を有するような構造種別や構造形式を具現化する設計を構造計画に組み込むことで、危機耐性について考慮するよう述べている。

危機耐性は、概念や考え方としては既に設計体系に取り込まれている部分も多いものの、それをいかに実現するかに関しては、未だ定まった手法はない。構造計画では、橋梁のスパン長を変化させたり、構造物の基本構造すら変化させることも可能であるため、危機耐性の検討を効果的に実現、検証することが可能である一方、構造の大要が決定していないため、詳細な解析を行うことはできないことを前提とした検討法を研究する必要がある。そこで本研究では、構造計画における概略解析・計算法を踏まえた線形解析に基づく危機耐性検討法に取り組み。

3. 構造計画における連続トラス橋の危機耐性評価手法の提案手法

(1) 提案手法の目的

通常、健全時の橋梁は、死荷重・活荷重に対して耐荷性能を満足するように設計されているが、損傷を受けた場合の耐荷性能は保証されていない。本研究で提案する危機耐性評価手法では、不静定トラス橋梁が部材・支承の損傷を受けたとしても落橋に至らないようにすることを目的とする。その際、実際、損傷のある橋梁が通常通り利用されることはないため、損傷時には死荷重のみに対して耐荷性能を満足していることを確認すれば良いと考える。

また、橋梁のどの部材や支承の損傷を想定するかについてだが、本手法では影響度合いの特に大きい部材・支承の損傷について考慮する。これは、もし影響の大きい部材が損傷すれば、他の部材が許容応力度を超えて損傷する可能性が高く、最終的には進行性破壊により落橋に至る可能性があるためである。

なお、一般的に部材損傷時でも完全な損傷でなければ、部材は力を負担するものと考えるが、本手法では、計画段階での適用を可能とするため、部材の非線形挙動は考慮せず、部材損傷は部材が消失したものとして考える。

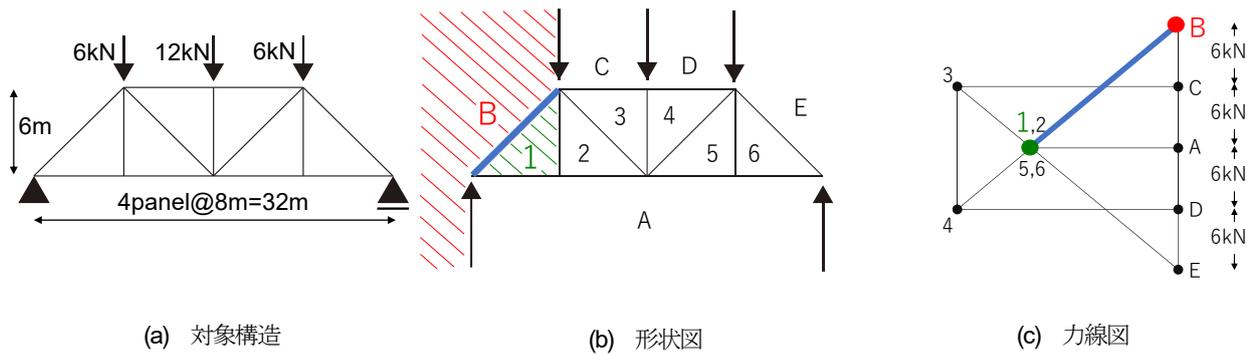


図-1 図式力学

以下、本研究における部材損傷は部材消失と呼び、支承損傷は支承消失と呼ぶ。

(2) 提案手法で利用する既往の指標及び手法

a) ロバストネスインデックス

Biondini⁹⁾らは、構造物のロバスト性を評価するための指標「ロバストネスインデックス」を提案している。Mya¹⁰⁾らは、Biondini⁹⁾らが提示したロバスト性を評価する指標（ロバストネスインデックス）を用いてトラス構造物の各部材や各支承の耐荷メカニズムへの影響の程度を評価した。その際、剛性マトリクス K 、固有周期 T 、変位 s の3種類についてのロバストネスインデックスを算出することでトラス構造物の部材・支承の重要度を指標化した。本研究では、その中でも剛性マトリクス K によるロバストネスインデックスを活用する。ロバストネスインデックスは次のように定義される。

$$\rho_c = \frac{c_0}{c_1} \quad (1)$$

$$c = \frac{\max_i \lambda_i(K)}{\min_i \lambda_i(K)} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_i(K)$ は剛性マトリクス K の i 番目の固有値を示す。また、添字の0は健全時、添字の1は損傷時を示す。それぞれのロバストネスインデックスは、健全時と損傷時の値の比をとることで定義される。また、この指標は値が0に近ければ、耐荷メカニズムへの影響が大きいことを示し、一方で値が1に近ければ、耐荷メカニズムへの影響が小さいことを示す。このような指標を用いた構造物のロバスト性の評価を構造計画に組み込むことができれば、構造計画段階での危機耐性についての定量的な評価につながるといえる。

b) 図式力学

本提案手法では、構造物に作用する荷重と構造形態の関係をベクトルを用いて図式化する図式力学を活用する。

図式力学は、構造形状と作用する外力を示した「形状図」と構造全体の力の流れを示した「力線図」という2つの図によって構成されている。形状図の情報を元に力線図を描き、力線図上の線分の長さや角度から、特定の部材の力学的性状を把握することができる。ここで、図-1(a)の静定トラス構造を例に図式力学に利用方法を示す。図-1(a)の静定トラス構造の図式力学は、図-1(b)(c)のように描ける。ここで、形状図には、領域内に記号が割り振られているが、それらは力線図上の番号に対応している。例えば、図-1(b)の形状図上で青線で示す部材は、図-1(c)の力線図上で青線で示す線分に対応している。このように、形状図上の領域や線分は、力線図上の点や線分に対応している。

本来、図式力学は、解析手法や計算機が未発達であった時代において、力の流れや荷重と構造形態の関係を視覚的に捉えることで、部材力の厳密解を算出するために利用された。一方で、部材力の厳密解を算出するという以外にも、図式力学を用いることで、構造全体の外力に対する耐荷メカニズムや、ある特定の部材が構造全体の耐荷メカニズムにおいて担っている役割など、構造全体および構造部材に関する力学的情報や、力の流れと構造形態の関係等を視覚的に捉えることも可能である。そのため、近年、図式力学を活用した設計手法や最適化手法の提案が盛んに行われている。例えば、Beghini⁷⁾は、図式力学を用いた構造の位相最適化を行い、建築構造物の構造設計に対する適応を検討している。この研究の中で、従来の最適化の手法と比較して、部材の合成や力の釣り合いなどを計算する必要がなく設計変数を少なくできる利点を示している。また、Mele⁸⁾は、解析的な検討によってではなく、幾何学的な性状から構造物の形状を決定することを目指し、図式力学の重要性を事例とともに分析している。さらに、Akbarzadeh¹¹⁾は、従来の形状図と力線図の二次元で考えられていた図式力学による手法を構造を直感的に把握できるツールと考えた。そこでは、図式力学を三次元に拡張し、荷重などの外的

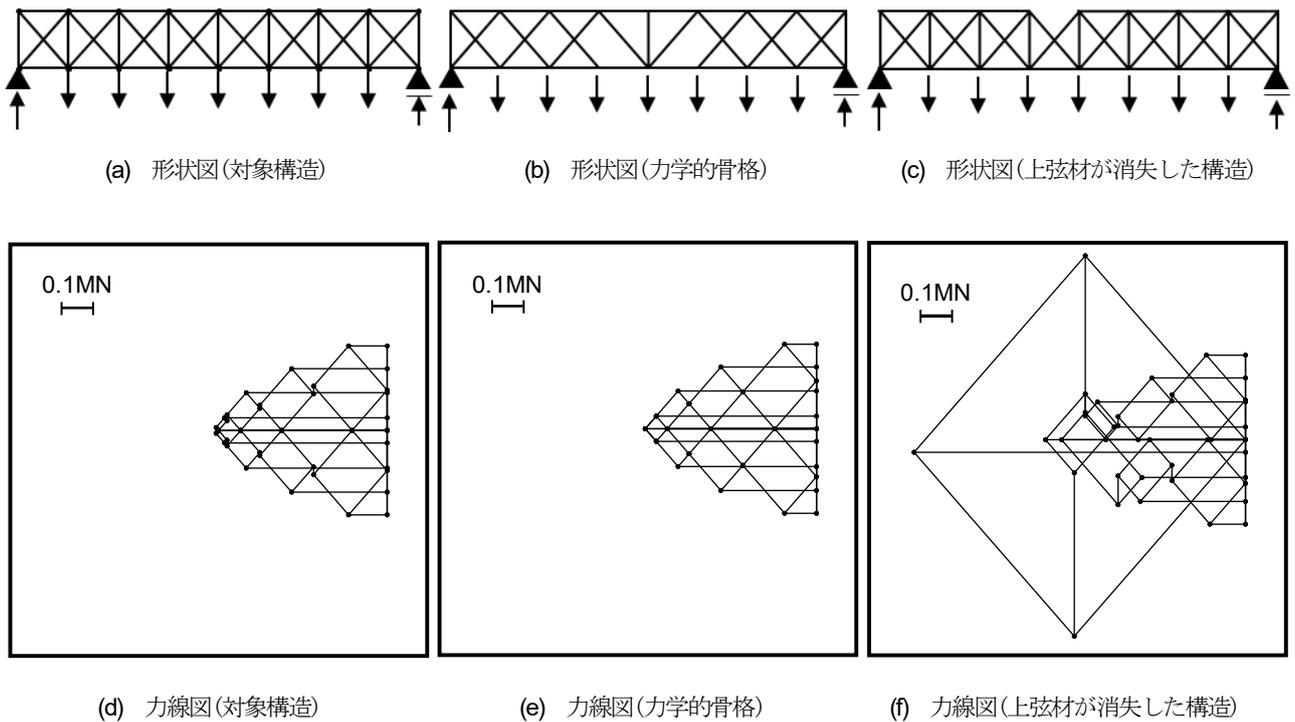


図-2 力学的骨格

要因を考慮した構造設計への適用を提案している。

そこで本研究でも、図式力学により力の流れと構造形態の関係等を視覚的に表現することで、部材の損傷前後の力の流れを可視化し、損傷が構造物の耐荷メカニズムへ与える影響を確認することとした。

(3) 力学的骨格の定義

本研究では、耐荷メカニズムに対して影響の大きい部材の集合を「力学的骨格」と定義する。力学的骨格の構成部材の損傷は耐荷メカニズムへ大きな影響を与えるため、力線図の形状変化も大きくなる。一方、力学的骨格でない部材は消失しても耐荷メカニズムへ大きな影響を与えず、消失時の力線図の形状変化は小さい。

ここで、力学的骨格の具体的な抽出方法について述べる。まず、構造全体から軸力の絶対値が小さい部材から消失させ、力線図の変化を確認する。その際、もし部材の消失により力線図の形状が大きく変化すれば、その部材はたとえ軸力の絶対値が小さい場合でも、構造内では大きな影響を持っていると判断できる。そのため、力線図が大きく変化する場合は、その部材は消失させず、次の部材の消去へ移る。以上の作業を繰り返すことで、最終的にどの部材を消失させても力線図が大きく変化してしまう構造が抽出でき、これを対象構造の力学的骨格とする。

例として、図-2(a)に示す不静定トラス構造に死荷重を模擬した力を作用させた時の力学的骨格を抽出すると、

図-2(b)のような構造形式となる。ここで、元の不静定トラス構造と力学的骨格のみで形成されたトラス構造の力線図を比較すると(図-2(d)(e))、両図は類似していることがわかる。

また、図-2(a)に示す不静定トラス構造から中央付近の上弦材を消去した構造(図-2(c))の力線図を描くと図-2(f)となる。元の不静定トラス構造の力線図と比較すると、図形が大きく変化したことが確認できる。このことから、消去した上弦材は力学的骨格を構成する部材であることがわかる。

(4) 提案手法の手順

a) 手順1: ロバストネスインデックスを算出して、キーエレメントを特定する

部材消失や支承消失によるロバストネスインデックス ρ_c は、ある荷重条件に対するその部材の重要性を示すと考えられ、本研究では、式(1)に示す ρ_c が最も0に近い部材・支承をキーエレメントと定義する。そこで、本手法ではまず、トラス橋を構成する全部材・全支承のロバストネスインデックス ρ_c を算出し、キーエレメントを特定する。なお、本手法ではキーエレメントが消失した場合のみを考慮する。これは、先述したように、キーエレメントでない部材や支承が損傷を受けた場合では、構造全体の耐荷メカニズムへの影響は小さく、落橋に至る可能性は低いと考えられることから、全要素の損傷について検討する必要はないと考えたためである。

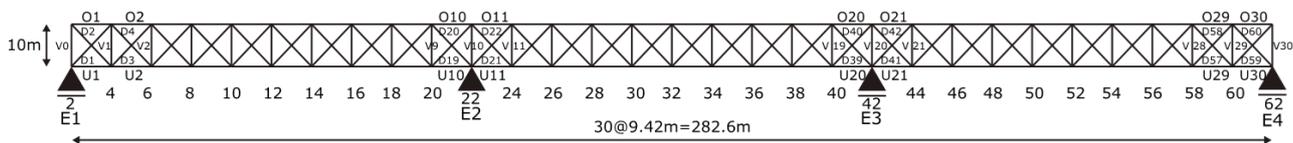


図-3 解析対象となる3径間複斜材式トラス

b) 手順 2 : キーエレメントを消去した構造に死荷重が作用した際の力線図を描く

手順1で特定したキーエレメントが消失する状況は、トラス橋の死荷重支持性能を維持する上で最も危機的な状況であるといえる。そこで、キーエレメントを消去した構造に死荷重が作用したときの各部材の軸力を数値解析で算出し、その結果を元に死荷重作用下における対象構造の力線図を描く。その際、構造計画段階では各部材の詳細な情報が確定していないことを考慮し、線形解析により、各部材の軸力を算出する。

c) 手順 3 : キーエレメントを消失した状態での死荷重作用時の対象構造における力学的骨格を抽出する

本手法では、キーエレメントが消失した状態で死荷重が支持できる構造の概算を目的としているが、例えば、手順2での結果を元に、許容応力度以上の応力が発生している全部材を補強すると、「キーエレメントが消失したとしても全ての構造部材に損傷が発生しない」ことを目指すこととなり、不静定構造物の補強法としては、コスト面から考えて過度な対策となってしまう。そこで、本手法では手順2での解析結果において、許容応力度以上の応力が発生している全部材を補強するのではなく、3. (3) で述べた力学的骨格を構成する部材が確実に機能することを確認し、必要に応じて補強を行う。そこで手順3では、キーエレメントが消失した状態での、対象構造の死荷重に対する力学的骨格を抽出する。

d) 手順 4 : 力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較し、対策を講じる

力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較する。そして、部材に生じている応力が許容応力度を超えている場合、その部材の断面積の増大や、新たな部材の追加、構造形式の変更など、状況に応じた適切な対策を講じる。

e) 手順 5 : 補強後の構造に対して数値解析を実施し、補強効果を確認する

補強後の構造に対し、手順2と同様の数値解析を行って対象構造の力線図を描くとともに、各部材に発生している応力と許容応力度を比較することで、手順4における補強の効果を確認する。もし、補強後、発生している応力が許容応力度内に収まっていない部材がある場合は、再度対策を講じる。この手順を力学的骨格を構成する全部材の応力が許容応力度内に収まるまで繰り返す。

4. 提案手法の適用例

(1) 対象構造及び解析条件

本検討の対象構造は、既往の研究⁶⁾を参考に図-3で示す3径間複斜材トラスとした。対象構造の部材断面は表-1に示す通りであり、Node22は固定支承、Node2とNode42とNode62は移動支承である。また、解析の際は、トラス構造の節点は全てヒンジとしてモデル化し、鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ 、鋼材の質量を 7.75 t/m^3 として、全ての部材の自重の合計 436.46 t を死荷重とした。その際各部材の断面積を考慮し、Node2からNode62の偶数番号の節点に相応の荷重を載荷した。

(2) 提案手法の適用結果

a) 手順 1 : ロバストネスインデックスを算出して、キーエレメントを特定する

Mya⁶⁾は、本検討の対象構造である3径間複斜材トラスに対し、式(1)によるロバストネスインデックスを算出している(図-4)。その際、Myaらは部材間を接合するガセットプレートの影響を考慮し、部材を梁要素としてモデル化してロバストネスインデックスを算出している。そのため、部材をトラス要素でモデル化している本検討の解析モデルに対して算出されるロバストネスインデックスとは厳密には一致しないと考えられる。しかしながら、ロバストネスインデックスの大小の傾向に大差はないと判断し、本検討でもこの計算結果を基にキーエレメントを特定することとする。縦軸がロバストネスインデックス ρ_c 、横軸が節点の番号を示しており、部材や支承の大まかな位置を示している。図より、部材と比較して支承のロバストネスインデックス ρ_c のほうが0に近いことが確認できる。また、本対象構造の実際の建設地点では、支承E1付近に断層が存在している。このように、建設地点の状況を踏まえ、本検討では、Node2の支承E1をキーエレメントとし、支承E1が消失した場合を考える。

b) 手順 2 : キーエレメントを消去した構造に死荷重が作用した際の力線図を描く

3径間複斜材トラスの支承E1消失時の図式力学における形状図を図-6(a)に、力線図を図-6(b)に示す。また、比較のため、死荷重作用下における3径間複斜材トラスの支承E1消失前(健全時)の図式力学における形状図及び

力線図を図-5(a)(b)に示す。図-5、図-6より、健全時の力線図と比較すると、支承 E1 消失により力線図が大きく変化していることが確認できる。ただ、支承消失は橋梁にとって大きなダメージであることは自明なことであり、一見すると対策の余地がないように見える。しかし、死荷重と活荷重が作用する 3 径間複斜材トラスの支承 E1 消失前(健全時)の図式力学における力線図 (図-5(c)) と図-6(b)とを比較すると、一部の部材では軸力増加が見られるものの、ほとんどの部材では軸力が明確に増大していないことが確認できる。このことから、支承損傷による落橋防止策では、一部部材についてのみの対策で済むことから、コスト面でも現実的な範囲で対応できる可能性が高いと言える。なお、活荷重は既往の研究¹⁰⁾より 7.5t/m とし、死荷重同様、Node2 から Node62 の偶数番号の節点に相応の荷重を載荷した。

c) 手順 3 : キーエレメントを消失した状態での死荷重作用時の対象構造における力学的骨格を抽出する

この手順によって抽出された力学的骨格の図式力学における形状図を図-7(a)に、力線図を図-7(b)に示す。特定された力学的骨格は、元の構造から31の部材が消失した構造となっているが、その力線図は元の力線図と類似した形をしていることがわかる。

ここで、力学的骨格が特定される直前の構造、すなわち元の構造から30本の部材を消失させた構造に対し、本来消去すべき部材(本検討では部材V13)ではなく、部材V13の次に軸力の絶対値が小さい部材V11を消失させた場合の力線図の変化を参考として示す(図-8(a)(b))。図より部材V11消去後の力線図(図-8(b))では、図形の右下の部分で力線図の形状変化が明確にわかる。このように消失する部材が力学的骨格に含まれる場合、力線図が大きく変化することがわかる。

d) 手順 4 : 力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較し、対策を講じる

力学的骨格を構成する各部材に生じている応力と許容応力度を比較する。許容引張応力度は1200N/cm²、許容圧縮応力度は表-2に示すものを用いた。表中で※で表示している箇所は、既往の研究⁹⁾から値を得ることができなかった箇所である。比較の結果、部材U9と部材U12で許容応力度を超える応力が発生しており、部材U9と部材U12に生じる応力を低減させるための対策を講じる必要があることがわかった。

そこで本検討では、その対策として、トラス構造に吊り弦材を追加する方法と支承の位置を変更する方法という2種類の対策を適用し、それぞれの効果を検討することとした。

表-1 対象橋梁の各部材断面積

	部材名	断面積 (cm ²)
上弦材 (O)	1,2,8-14,17,23,29,30	548.02
	15,16	577
	3,28	643.6
	7,24	692.6
	6,25	756.2
	4,5,26,27	800.8
下弦材 (U)	1,9,13,18,22,30	400.6
	12,19	409
	14,17	425.8
	8,23	438.4
	2,15,16,29	497.8
	10,21	551.8
	11,20	610.6
	7,24	626.6
	3,28	668.6
	6,25	723.8
鉛直材 (V)	1-9,11-19,21-29	153.84
	0,30	484.64
	10,20	1322.6
	7-10,51-54	97.14
斜材 (D)	29-32	111.48
	11,12,49,50	133.14
	5,6,27,28,33,34,55,56	138.78
	13,14,25,26,35,36,47,48	171.41
	4,24,37,57	192.78
	3,23,38,58	198.78
	17,26	222.78
	1,16,45,60	225.4
	22,39	239.82
	2,21,40,59	243.4
	17,18,43,44	271.42
	19,42	333.02
	20,41	333.42

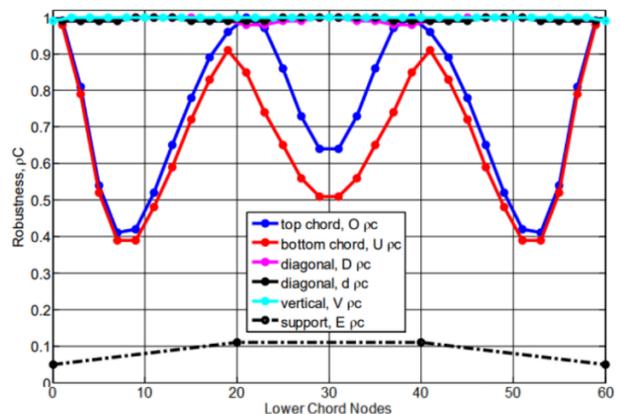


図4 剛性マトリクスによるロバストネスインデックス(Myra[®])の計算結果

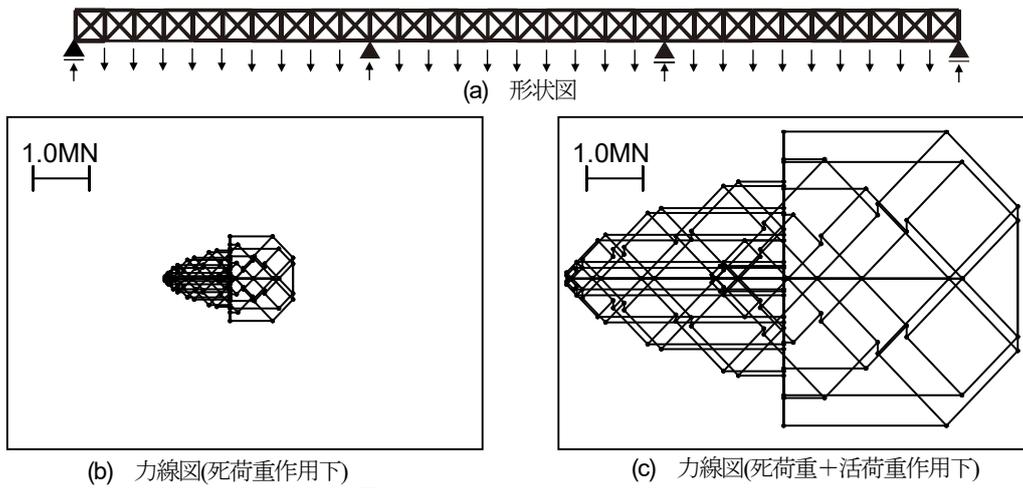


図-5 健全時の形状図及び力線図

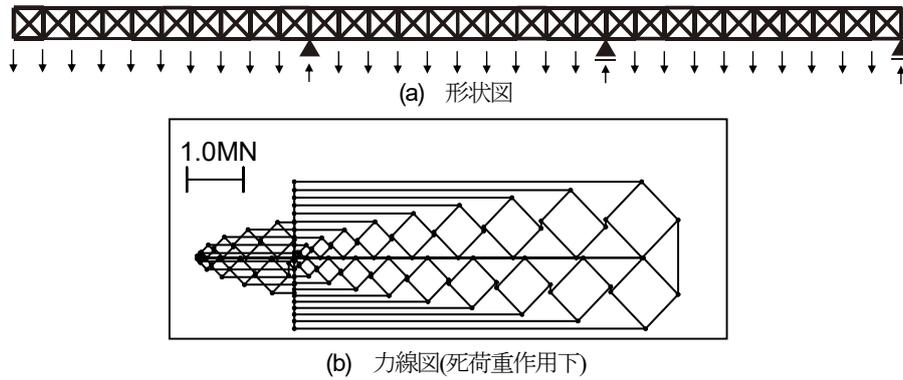


図-6 支承 EI 消失時の形状図及び力線図

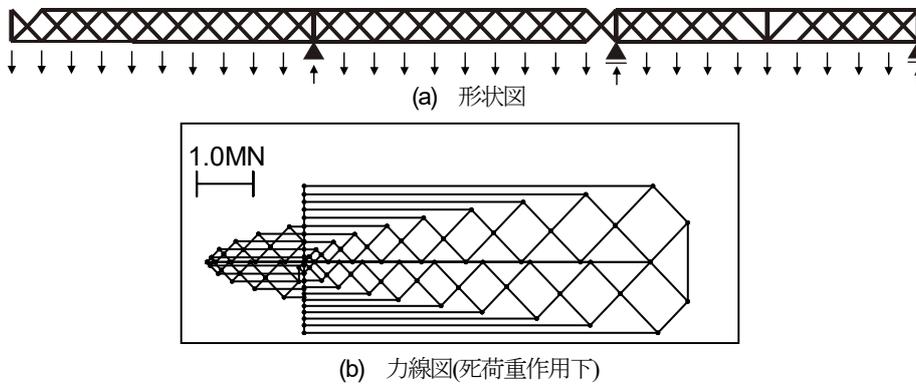


図-7 支承 EI 消失時における力学的骨格の形状図及び力線図

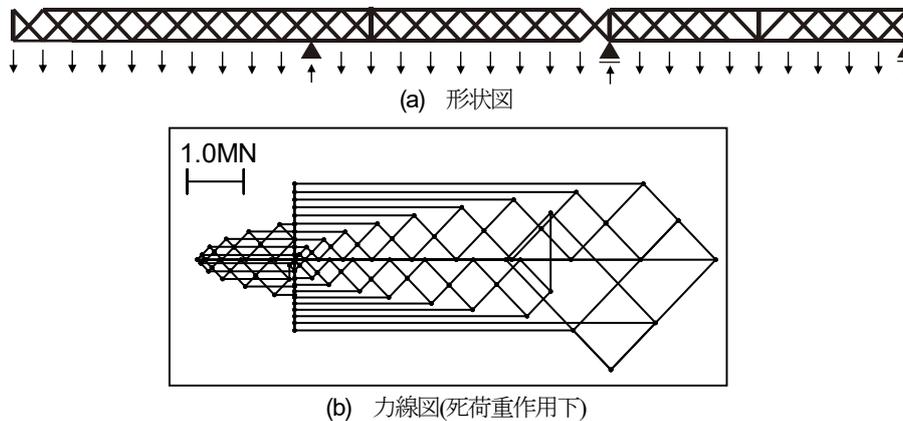
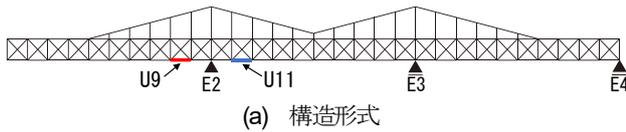
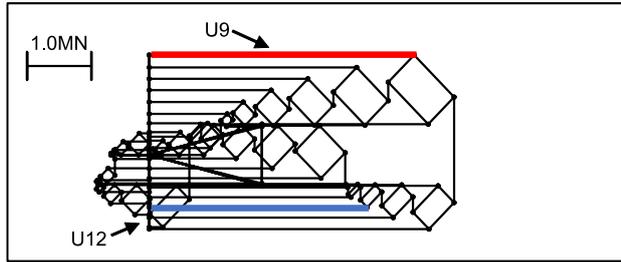


図-8 支承 EI 消失時における力学的骨格の形状図及び力線図



(a) 構造形式

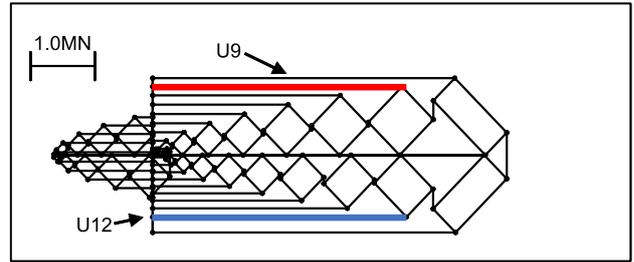


(b) 力線図

図-9 吊り弦材の導入



(a) 構造形式



(b) 力線図

図-10 支承E1の移動

e) 手順5：補強後の構造に対して数値解析を実施し、補強効果を確認する

手順4で提示した2つの対策の効果を検討する。具体的には、各対策を講じた構造に対し、手順2と同様の数値解析を行い、対象構造の形状図と力線図を描くとともに、各部材に発生している応力と許容応力度を比較した結果を示す。

まず、トラス構造に吊り弦材を追加する方法について検討を行う。Myaらの研究⁹で解析対象に用いられた鴨緑江橋梁を参考に、吊り弦材を追加する対策について検討する(図-9(a))。追加した吊り弦材にも、同様の鋼材と同様のものを用いることとし、吊り弦材の断面積は、主塔部分を1322.60cm²、ケーブル部分を513.28cm²、ハンガー部分を123.76cm²とした。また、この構造では吊り弦材の質量を考慮した荷重をかけているが、その合計は、541.58tである。橋梁構造における新たな構造の導入は、構造設計段階では行うことができず、構造全体の詳細が決定していない構造計画段階ならでの対策であるといえる。図-9(b)に、吊り弦材を追加した構造の力線図を示す。対策前の力線図(図-7(b))と比較すると、吊り弦材を追加することで力線図の変化が小さくなっており、吊り弦材による効果が力線図上で確認できる。これは、支承消失がもたらす耐荷メカニズムへの影響波及を、吊り弦材が抑制しているということを意味する。実際、部材の応力と許容応力度とを比較すると、力学的骨格を構成する全部材で許容応力の範囲内にあることが確認できた。

次に、支承の位置を変更する方法についての検討を行う。支承E2をNode22からNode20に移動させた場合(図-10(a))に対して検討を行った。橋梁構造における支承位置の変更も、構造設計段階では行うことができず、構造全体の詳細が決定していない構造計画段階ならでの対策であるといえる。Node20に移動させた場合の力線図を図-10(b)に示す。まず、対策前の力線図(図-7(b))と支承

表-2 対象橋梁の各部材許容圧縮応力度

	部材名	許容圧縮応力度(N/cm ²)
上弦材 (O)	1,2,8-14,17-23,29,30	-1151.37
	15,16	-1153.76
	3,28	※
	7,24	※
	6,25	※
下弦材 (U)	4,5,26,27	-1144.33
	1,9,13,18,22,30	-1150.62
	12,19	-1150.89
	14,17	※
	8,23	-1151.58
	2,15,16,29	-1147.38
	10,21	-1145.75
	11,20	-1148.5
	7,24	※
	3,28	※
鉛直材 (V)	6,25	※
	4,27	※
	5,26	-1142.75
斜材 (D)	1-9,11-19,21-29	※
	0,30	※
	10,20	-1106.011
	7-10,51-54	-967.09
	29-32	-967.48
	11,12,49,50	※
	5,6,27,28,33,34,55,56	※
	13,14,25,26,35,36,47,48	-1027.12
	4,24,37,57	-1004.71
	3,23,38,58	-1002.41
	17,26	-993.92
	1,16,45,60	-1013.89
	22,39	-1011.80
	2,21,40,59	-1000.94
	17,18,43,44	-1025.45
19,42	-1021.27	
20,41	-1015.61	

E2をNode20に移動させた場合の力線図(図-10(b))を比較する。図より、支承移動前の力線図と比較して、Node20への移動後の力線図は縮小したことが確認できる。ここで、部材の応力と許容応力度とを比較すると、力学的骨格を構成する全部材で許容応力の範囲内にあることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、構造計画における連続トラス橋の危機耐性評価手法を提案した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 構造計画段階では、構造の大要が未定であることのために詳細な解析ができず、概算が重要となることを踏まえ、本研究では線形解析を前提とした危機耐性評価手法を提案した。
- 本検討では、不静定トラス構造内で耐荷メカニズムへの影響度合いが大きい部材の集合を「力学的骨格」と定義した。そして、既往の手法である図式力学における力線図を利用して、力学的骨格を特定する方法を示した。
- 本研究で提案した連続トラス橋の危機耐性評価手法の手順は以下の通りである。まず、対象のトラス構造を構成する各部材・各支承のロバストネスインデックスを計算することで、キーエレメントを特定する。そして、キーエレメントが消失した構造に対し、力学的骨格を特定し、その構成部材の応力と許容応力度を比較する。許容応力度に収まっていないことが確認された場合は、それに合わせた対策を講じる。
- 提案手法の適用例を示し、キーエレメントが消失した構造物が崩壊しないための具体的な対策案を示した。その際、構造計画段階であることから、支承位置の変更や構造形式自体の変更といった自由度の高い対策を講じた。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 1410-1425, 2009.
- 2) 梶田幸秀, 大塚久哲, 坂口和弘：損傷を有する下部式鋼製トラス橋の耐震性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.65, No.1, 1317-1324, 2009.
- 3) 土木学会：土木構造物共通示方書(構造計画編), 2016.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2017.
- 5) F.Biondini, S. Restelli, *Damage propagation and structural robustness, Life-Cycle Civil Engineering*, Taylor & Francis Groups, 2008.
- 6) Wai, M.S., Takahashi, Y.: Robustness Evaluation of Double Diagonal Ten Panel Three Span Continuous Air-raid Proof bridge, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake)*, Vol. 76, No.4, pp.320-336, 2020.
- 7) L.L.Beghini, J.Carrion, A.Beghini, A.Mazure, W.F.Baker : Structural optimization using graphic statics, *Struct Multidisc Optim* 49, pp.351-366, 2014.
- 8) T.V.Mele, L.Lachauer, M.Rippmann, P.Block : Geometry-based understanding of structures : *Journal of The International Association for Shell and Spatial Structure*, 2013.
- 9) M.Akbarzadeh, T.V.Mele, P.Block : On the equilibrium of funicular polyhedral frames and convex polyhedral force diagrams, *Computer-Aided Design*, Vol.63, pp.118-128, 2015.
- 10) 小田彌之亮：複斜材式構ノ應力, Vol.1, 丸善. 1941.

EVALUATION METHOD FOR ANTI-CATASTROPHE PERFORMANCE OF CONTINUOUS TRUSS BRIDGES IN STRUCTURAL PLANNING

Kazuki NOMURA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

Since the 2011 Tohoku Earthquake, the concept of anti-catastrophe has been proposed, and the current design system should consider it. However, the evaluation method has not been established yet. This paper proposes a method to evaluate the anti-catastrophe of continuous truss bridges in the structural planning stage. The proposed method focuses on the graphic statics, which can visually grasp the relationship between load and structural form. We try to utilize the information of the forces exerted on the whole structure. Specifically, the most important element of the structure are identified by the robustness index, which has been proposed in previous studies. Next, we define and extract the "key structure," which is a set of members that have a large impact on the load-bearing mechanism. The anti-catastrophe of a statically indeterminate truss is evaluated by the proposed method and the result is shown.