

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18882

研究課題名(和文)戦時下における橋梁研究の技術史的評価と耐落橋性能の高い次世代耐震技術への応用

研究課題名(英文)History of Bridge Engineering Researches in World War II and its Application to Earthquake Resistance

研究代表者

高橋 良和 (Takahashi, Yoshikazu)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10283623

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：戦争時に爆撃の対象となる重要構造物である橋梁について、昭和10年代に行われた耐弾性能を高めるための技術的検討を整理し、内的・外的不静定、吊構造などの異なる技術の組み合わせ(多様性)を推奨していたこと、また高次不静定橋梁の構造計算は、近似的解法による一次応力の算出だけではなく、曲げによる二次応力も算出し、その精度が極めて高いことを証明した。また、設計基準外事象に対する長大トラス橋梁の倒壊に関するロバスト性評価を行い、その評価結果に基づく構造改良対策に資する、新たな損傷影響線を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

第二次世界大戦下の朝鮮半島で開発された新しい形式の橋梁はほとんど資料が残っておらず、これらを技術史論的に整理したことは、学術的に意義が高い。また、上記橋梁の爆撃による落橋しにくさを評価するために開発した損傷影響線に基づくロバスト性評価法は、地震のような設計想定と異なる作用に対する橋梁の耐落橋性能を評価することにも利用でき、社会的意義も高い。

研究成果の概要(英文)：As the engineering history, double diagonal truss bridges in the Korean Peninsula during the end of World War II were newly developed as an air raid resistant structural type by Railway Bureau of the Government-General of Chosen, Japan. To improve the air raid resistant performance, diversity (combination) of different technologies such as internal and external statically-indeterminant, suspension structure and etc. was strongly recommended. As the robustness evaluation and development of robust structure for the air-raid proof bridge, the effect of damage of structural components on the performance of the air-raid proof double diagonal truss bridge with regarded to the different robustness indices of structure are inspected. The influence lines of damaged structure are proposed to evaluate the real acting stresses of the detected members and to consider the improvement based on the robustness assessment.

研究分野：耐震工学・技術史

キーワード：橋梁 技術史 第二次世界大戦 ロバスト性評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災以降、耐震設計において考慮すべき設計地震動に対して構造物に求められる性能を確保するよう照査するだけでなく、その設計段階で想定していなかった事象においても、構造物が単体またはシステムとして破滅的な状況に陥らないような性質を危機耐性と定義し、設計行為において、構造技術者が構造物の危機耐性を高めるよう配慮することの重要性が認識されてきた。

危機耐性は設計上想定していない作用に対する構造性能であるため、設計行為の中でどのように配慮できるか、またすべきかについて、現在活発に議論されている。一方、構造技術者が設計想定外の作用について、また設計上の終局状態以降の挙動に真剣に向き合うことが求められていた時代があった。戦時下である。特に第二次世界大戦末期には、我が国における近代橋梁工学の泰斗といわれる技術者が第一線で活躍しており、戦時下において、空襲による爆撃でも橋梁を落橋させないための論考が紙面上で発表されている。これらはまさに危機耐性を高めるための論考であり、現在の耐震設計にも応用可能であると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、今まで顧みられた事例は少ない戦時下における橋梁研究について、文献・現地調査に基づく科学的評価を行うとともに、そこで考慮されてきた検討を、現在の不確定性の高い地震作用に対する耐震技術の選択と設計法へと応用しようとするを目的とするものである。

第二次世界大戦末期には、我が国における近代橋梁工学の泰斗といわれる技術者が第一線で活躍しており、戦時下において、空襲による爆撃でも橋梁を落橋させないための論考が紙面上で発表されている。これらはまさに危機耐性を高めるための論考であり、現在の耐震設計にも応用可能であるものの、戦時下の研究、また朝鮮・旧満州間の橋梁であったことから、その技術資料も限定的であり、また戦後に顧みられた事例はほとんどないのが現状である。

本研究は、戦後に逸散した資料の探索も行う必要があることから、萌芽的、また探索的な意味合いが強い。一方で、戦時下では、現在にも通用する構造力学的知識のもと、不確定性の高い爆撃に対する耐落橋性能が検討されていた事実は、地震による耐落橋性能を考える上で有用な情報であり、危機耐性を高めるための橋梁形式選定など、構造計画に反映できる事項は極めて多い研究と考える。

3. 研究の方法

本研究は、第二次世界大戦下の橋梁研究に対する技術史的评价、およびその結果を踏まえた将来の橋梁に対する耐震設計への応用からなる。本研究を実施するための方法を以下に示す。

まず、第二次世界大戦下の橋梁研究、特に通常の設計外力と異なる外力(主に空爆)に対して橋梁が落橋させないようにするための技術的検討に関する橋梁研究について、戦時下の技術雑誌において発表された文献による机上調査を行う。さらに、上記の設計思想を実現した事例として、当時の朝鮮総督府鉄道局が昭和11年以降に新設した長大橋梁がある。このうち、中国と北朝鮮国境である鴨緑江の鴨緑江橋梁は、旧橋の横に耐弾構造を採用した新橋が架けられ、朝鮮戦争時の空爆を受け、旧橋は一部を残して落橋したものの、新橋は空爆に耐え、現在も国際橋梁として活躍している。この橋梁周辺は近年、観光資源としても利用されるようになり、現地を訪問することが可能となっており、現地調査を行う。

文献・現地調査した結果を踏まえ、当時は構造力学的に設計されていた橋梁に対し、現在の数値解析を適用することにより、その耐落橋性能を再評価する。特に、落橋という事象に対する口バスト性・冗長性の観点に着目した評価を行う。

以上、文献調査、現地調査さらに数値解析検討を通じ、戦時下における耐爆橋梁の技術史的评价を取りまとめる。

4. 研究成果

(1) 第二次大戦下の橋梁研究に対する技術史的评价

本研究では、第二次世界大戦末期に朝鮮半島で建設された複斜材型トラス橋梁について、朝鮮総督府鉄道局の小田彌之亮技師による回顧や当時の雑誌等の記述を組み合わせることにより、その開発の経緯を整理した。戦争時に爆撃の対象となる重要構造物である橋梁について、昭和10年代に行われた耐弾性能を高めるための技術的検討を整理し、内的・外的不静定、吊構造などの異なる技術の組み合わせ(多様性)を推奨していたこと、また高次不静定橋梁の構造計算は、近似的解法による一次応力の算出だけでなく、曲げによる二次応力も算出し、その精度が極めて高いことを証明した。また、中国と北朝鮮間の国際橋梁である鴨緑江橋梁について、その設計、架設状況について整理するとともに、実際の被害を踏まえた耐弾性能について検証した。

- a) 戦争時に爆撃の対象となる重要構造物である橋梁について、昭和10年代に行われた耐弾性能を高めるための技術的検討を整理した。不静定次数を高めることが耐弾性能を高めることが効果的であることは認識されていたものの、合理的な構造設計をすることの困難さもあり、全面的に推奨されていた状況ではなかった。しかし、極めて厳選した長大橋梁においては、単に不静定次数を高めるのではなく、内的不静定、外的不静定、吊構造などの異なる技術の組み合わせ(多様性)を推奨された。

- b) 複斜材型トラス橋梁の構造計算は、朝鮮総督府鉄道局の小田を中心として、近似的解法による一次応力の算出だけでなく、三瀬による弾性変位解法により曲げによる二次応力も算出し、合理的な設計が行われた。また、コンピュータによる数値解析により、部材応力の影響線図を算出したところ、小田による計算結果とほぼ同じ結果を得、当時の設計計算能力の高さを確認した(図1)。

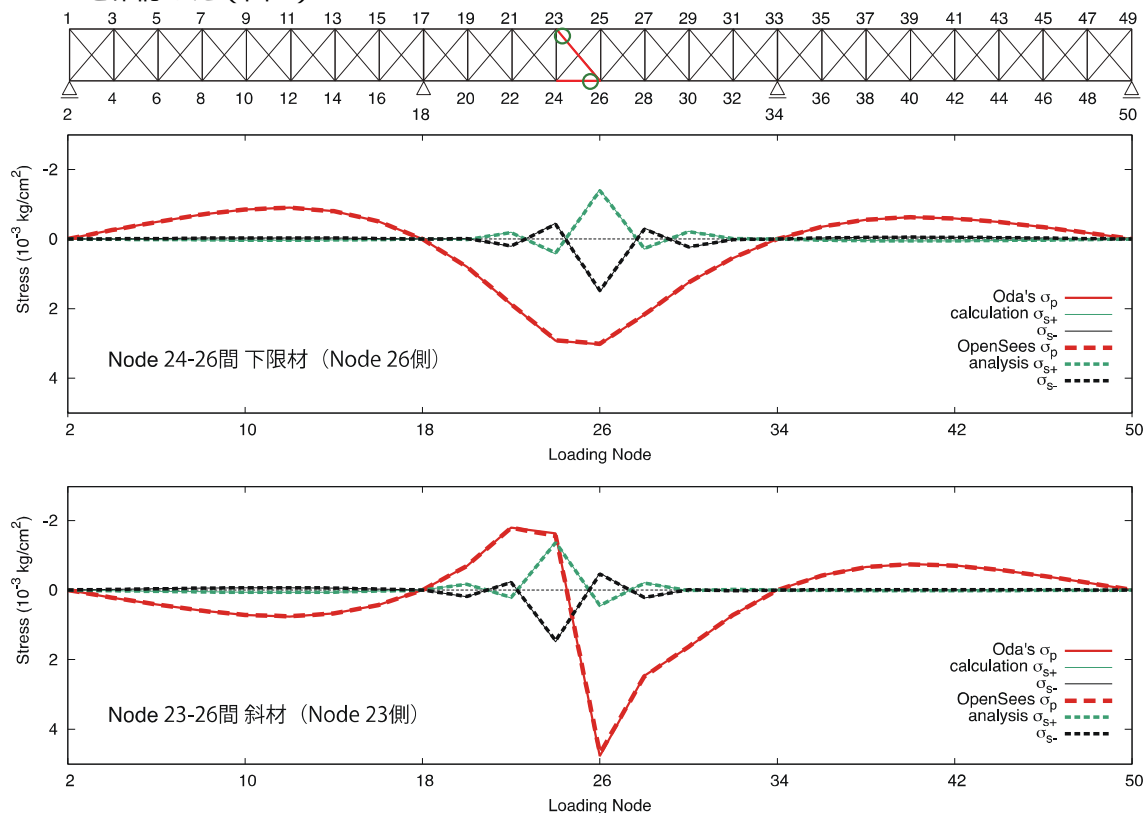


図1：部材応力影響線の比較(小田による計算結果とコンピュータによる数値解析結果))

- c) 耐弾橋梁の中でも特に特徴的である鴨緑江大橋について、現地での調査(図2,3)および検閲などの不完全な当時の資料を重ね合わせるにより、その架設の状況を明らかにすることができた。特に不静定構造の欠点と考えられた支点変位による内部応力の発生を逆に利用して、適切に初期の応力を作用させたことは、設計計算の正確さに支援され、非常に効果的であったと判断できる。また、調査の結果、建設会社で収集されていた資料の中から設計者の欄に小田彌之亮の署名がある昭和期の鴨緑江大橋の設計図面(図4)を発見、特定した。



図2：鴨緑江大橋全景(左側が中国, 右側が北朝鮮, 撮影: 高橋, 2018年3月)



図3：鴨緑江大橋(左側)

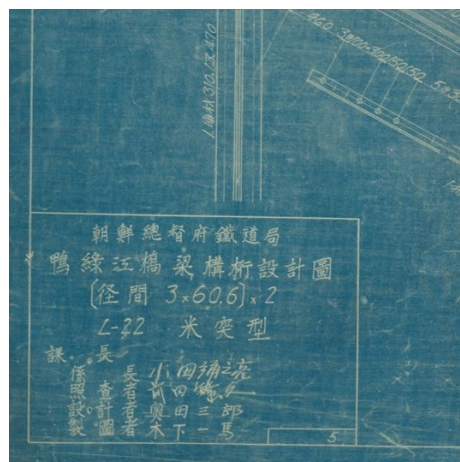


図4：特定した鴨緑江大橋設計図面

- d) 実際の爆撃被害情報を収集し、耐弾性能を検証した。第二種耐弾構造である連続複斜材型トラス橋梁であれば、損傷しても落橋しにくいものの、中間橋脚が破壊されると落下してしまう。しかし本構造形式は剛性が高く、桁が落下しても再利用できる事例が多く、早期の復旧を実現できている。また吊弦材付3径間連続複斜材型トラス橋梁である鴨緑江橋梁では、損傷したものの落橋を免れた。またトラス桁部の補修において、吊弦材があるために仮設ベントの設置が不必要であり、早期の復旧を実現できた。

(2) 損傷影響線を用いた長大トラス橋のロバスト性評価

大川を跨ぐ長大トラス橋梁を対象に、建設時の地震による倒壊事例および空爆による落橋防止対策として戦時中に開発された耐弾橋梁に関する分析を踏まえ、設計基準外事象に対する長大トラス橋梁の倒壊に関するロバスト性評価を行い、その評価結果に基づく構造改良対策に資する、新たな損傷影響線を提案した。

- a) 大川を跨ぐ長大トラス橋梁を対象に、建設時の地震による倒壊事例および空爆による落橋防止対策として戦時中に開発された耐弾橋梁に関する分析を踏まえ、設計基準外事象に対する長大トラス橋梁の倒壊に関するロバスト性評価を行った(図5)。

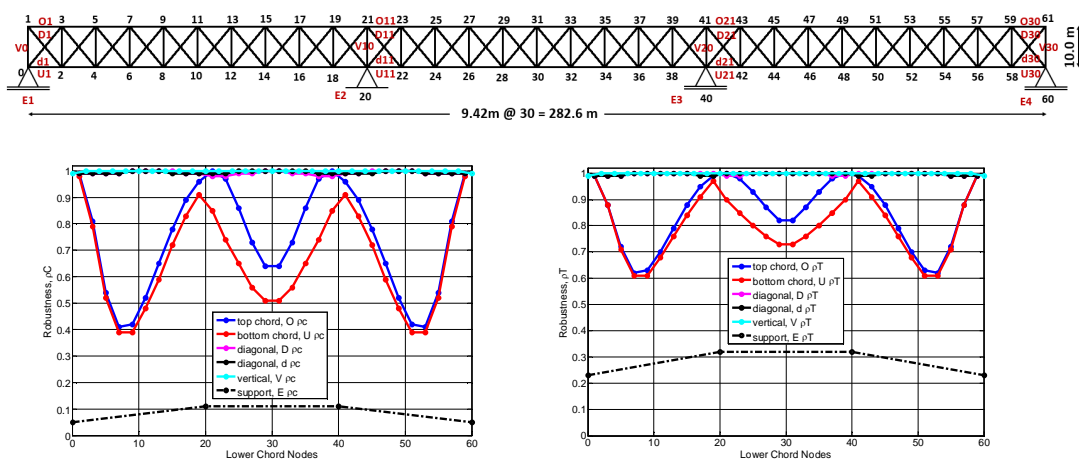
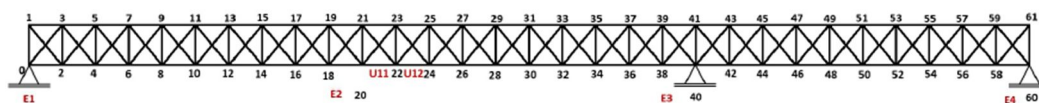
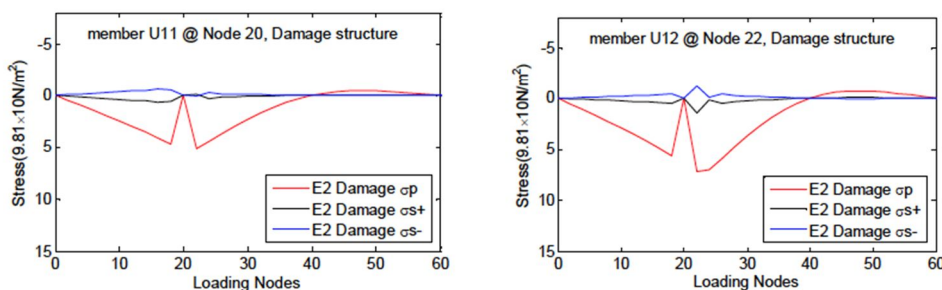


図5：3径間連続複斜材式トラス橋梁の部材損傷によるロバスト性評価結果

- b) 構造部材が損傷した影響を図式表現する損傷影響線を新たに提案(図6)し、橋梁のロバスト性低下に最も大きな影響を与える部材を特定した上で、損傷影響線を用いた部材損傷後の荷重支持能力の把握、そして構造改良検討に至る一連のロバスト性評価・改良法を提案した。具体的事例として、単純複斜材式トラス橋梁を対象に、ロバスト性指標により耐落橋性に最も影響の大きなトラス下限材を特定し、その部材が損傷した際には構造物の自重による死荷重支持能力が喪失してしまうものの、桁中央部の斜材を補強しておけば、最も影響の大きな下限材が損傷しても死荷重を支持することが可能であることを、またその状態で設計活荷重の4.3%を支持することが可能であることを、損傷影響線を用いて評価した。



(a) Damage structure (E2 damage) of double diagonal ten panel three span continuous truss bridge

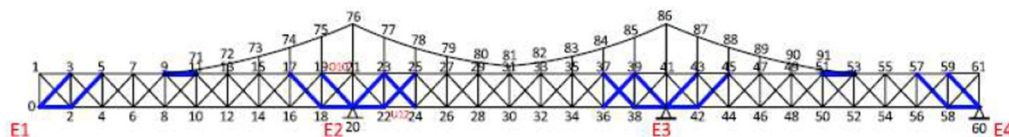


(b) Influence lines of damage structure for members U11 and U12

図6：3径間連続トラス橋梁の中間支承が損傷した影響を示す損傷影響線

- c) 連続複斜材式トラス橋梁を対象としたロバスト性評価・改良法を検討し、耐落橋性に最も影

響の大きなトラス部材が損傷したとしても、他の部材を改良することで落橋は防止できるものの、橋梁を支持する支承が損傷すると、現実的な補強では死荷重のみでも支持できず、落橋に至ることを示した。さらに連続複斜材式トラス桁に吊弦材を付加した橋梁(鴨緑江大橋)を対象としたロバスト性評価・改良法を検討している。内的・外的不静定を高めた対策に加え、吊弦材を付与することにより、桁端部の橋梁支承が損傷しても死荷重を支持することが可能であり、落橋を防止できることに加え、5%程度ではあるものの活荷重支持能力が残存していることを示した。また、吊弦材は、通常時の活荷重も分担しており、単なるフェールセーフ部材ではなく、構造部材として機能していることを明らかにした。



(a) Damage structure (E1 damage) of ten panel three span continuous truss with third countermeasure and estimated cross sections

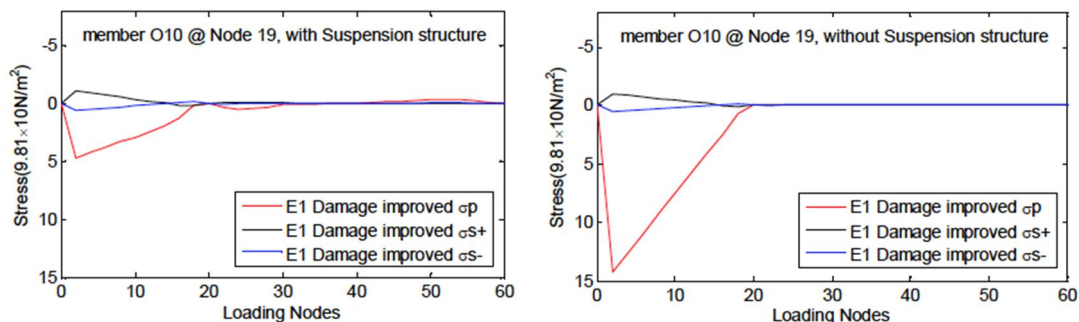


図7：桁端部支承(E1)が損傷した3径間連続トラス橋梁の吊弦材の有無による発生応力の相違(損傷影響線による表示)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高橋 良和, 小嶋 進太郎, Mya San WAI	4. 巻 76
2. 論文標題 朝鮮総督府鉄道局による複斜材型トラス橋梁の開発と耐弾性能	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集D2	6. 最初と最後の頁 16-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejhsce.76.1_16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mya San WAI and Yoshikazu TAKAHASHI	4. 巻 76
2. 論文標題 ROBUSTNESS EVALUATION OF DOUBLE DI-AGONAL TEN PANEL THREE SPAN CONTINU-OUS AIR-RAID PROOF BRIDGE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 to be published
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋良和
2. 発表標題 朝鮮総督府鉄道局による複斜材型トラス橋梁の開発と建設
3. 学会等名 土木史研究
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小嶋進太郎
2. 発表標題 設計想定と異なる作用に対して落橋を防ぐ構造についての研究
3. 学会等名 土木学会第73回年時学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mya San Wai
2. 発表標題 Robustness Evaluation of Double Diagonal Ten Panel Three Span Continuous Air-Raid Proof Bridge
3. 学会等名 土木学会第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Yoshikazu Takahashi http://yt.kuciv.kyoto-u.ac.jp http://dynamics.kuciv.kyoto-u.ac.jp

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考