

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

高橋 良和¹・小嶋 進太郎²・Mya San WAI³

¹正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

²正会員 鹿島建設 技術研究所 (〒 182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
E-mail: kojimash@kajima.com

³学生会員 京都大学博士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: mya.wai.85r@st.kyoto-u.ac.jp

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、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。

Key Words : *double diagonal truss bridge, Government-General of Chosen, air raid resistant bridge, Yalu river bridge*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

朝鮮半島に初めて鉄道が開設されたのは京仁線が開通された1899(明治32)年であるが、1894(明治27)年の日清戦争以降、朝鮮半島を巡る複雑錯綜を極める国際競争において、日本の国策樹立の基礎を定めるため、単に経済的機能のためではなく、軍事的機能が強く意識され、朝鮮半島縦貫鉄道が実現された¹⁾。1905(明治38)年には京城(ソウル)と釜山間を結ぶ京釜線が開通、1906(明治39)年には京城と新義州間を結ぶ京義線が開通し、朝鮮半島では早期に鉄道の縦貫ルート(図-1)が実現されていた¹⁾。1910(明治43)年の朝鮮併合により朝鮮総督府が設立して以降、1917(大正6)年から1925(大正14)年までの南満州鉄道株式会社による経営期を除き、1945(昭和20)年の終戦まで、朝鮮総督府鉄道局(1943(昭和18)年に交通局に改編)が朝鮮鉄道の運営を担当した。総督府設立以前も含め、鉄道局により多くの資料²⁾⁻⁵⁾が取りまとめられている。

一方、1937(昭和12)年の支那事変が勃発、1927(昭和2)年から進められてきた既存路線の改良工事が拡大、京釜、京義線複線工事が急速に進められ、工事の規模と技術的内容は従来の改良工事に比べて質、量とも大型となった。改良工事の本格的な実施は1940(昭和15)年~1945(昭和20)年であったが、鉄道局による朝鮮鉄道

史は、1940(昭和15)年発行の朝鮮鉄道四十年略史⁵⁾が最後であり、終戦までの5年間における成果の公表は極めて限定的であり、かつ情報が不完全であるものがほとんどであるのが現状である。

1936(昭和11)年以降、空爆による交通網の遮断が現実的な問題となり、通常の設計荷重(死荷重や活荷重など)とは異なる状況を想定せざるを得ず、その対策が橋梁技術者に求められた。空爆を受けることを想定した上で桁が墜落しにくいように配慮された耐弾橋梁が開発、建設され、世界でも例をみない構造であった⁶⁾ことは広く知られていない。これら戦時下における橋梁研究を、設計想定と異なる作用に対する落橋対策として耐震設計を考えるための有用な情報と考え、高橋が文献調査を行った⁷⁾が、実際に建設に至った事例は紹介されていない。本論文は、朝鮮総督府鉄道局が主体となり、当時の官民学の橋梁技術者がその開発に携わった複斜材型トラス橋梁の開発、建設を取りまとめることを目的とするものである。

(2) 調査の方法

複斜材型トラス橋梁の開発経緯は文献調査に基づいている。具体的な橋梁名を含む基礎調査には朝鮮総督府鉄道局職員の同窓会である鮮交会(1996年解散)による『朝鮮交通史』⁸⁾および『朝鮮交通回顧録(工務・港湾編)』⁹⁾を用いた。

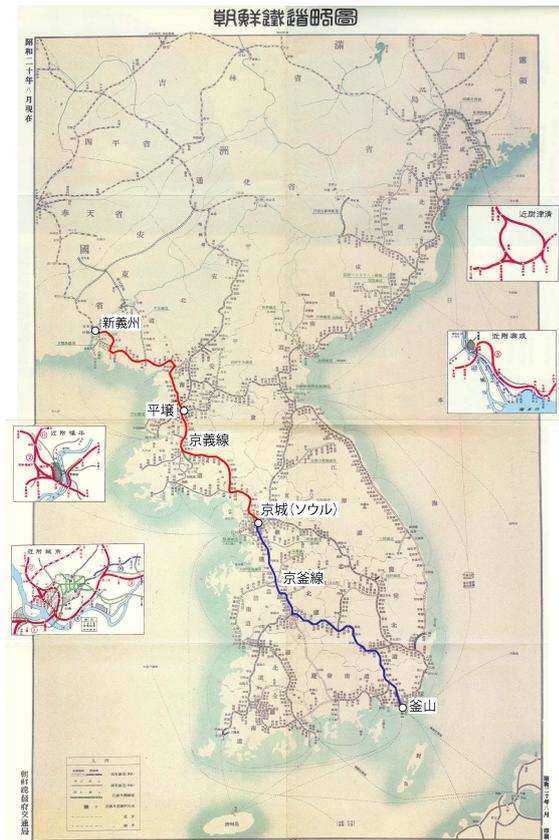


図-1 朝鮮鉄道略図(2本の路線と3ヶ所の地名は筆者加筆)

また、1945(昭和20)年以前に公表された資料として、朝鮮総督府鉄道局技師による『複斜材構ノ應力』^{10)~12)}に加え、雑誌『道路』、『土木技術』、『土木ニュース』、『科学朝日』および大学紀要『九州帝国大学工学彙報』などから複斜材型トラス橋梁の開発に関する記述が確認された報文を抽出したが、これらには具体的な位置や橋梁名が類推できる記述は検閲等により記されていない。これら報文の内容を、史実との整合性を確認するとともに確証の内容について補完した。

2. 耐弾橋梁

橋梁の使命(性能)は、第一に利便、第二に耐久力、第三に外観である。平時において、橋梁は交通の要諦であることは勿論であるが、それが故に、戦時下では橋梁は恰好の爆撃目標となる。しかも故意に破壊させようとするため、橋梁の損傷は避けられないことが前提であり、戦時下では、橋梁の墜落、崩壊が生じにくい性能が求められた。このように爆撃(主に空爆)を想定した耐墜落性能を有する橋梁を耐弾橋梁(または耐爆橋梁)と呼ぶ。

耐弾橋梁は、日本本土の空爆が現実的な脅威となった第二次世界大戦後半に広く議論され、鷹部屋福平^{13)~17)}

をはじめとする研究者、技術者が、各誌においてその論考を発表しており^{13)~20)}、鉄道院総裁官房研究所において、沼田政矩らが鉄道橋梁の耐爆試験を実施していたことも報告されている²¹⁾。特に朝鮮半島では、東南端の釜山から北西端の新義州までの約950km(京釜線・京義線、図-1)には地形上大河川が多く、橋梁の全長が1km前後となる長大橋が必要であり、これら橋梁を新築するにあたり、耐弾橋梁とすることが求められた。朝鮮総督府では、「爆撃その他の原因で桁の一部が折損しても、桁が墜落し難いようなものは出来ないのか。若しそのような抵抗の強い構造のものが考えられるならば、その条件は満たされることになる。しかし当時はこんな課題に関する資料も文献もなかったが、しかも当面の重大な懸案なので、前記の橋梁学の3教授に指導を仰ぐことにした。」²²⁾とある。この述懐をしたのは鉄道局技師である小田彌之亮であり、朝鮮鉄道橋梁開発の中心的な役割を果たした。また指導を仰いだ3教授とは、東京帝国大学教授の田中豊、京都帝国大学教授の高橋逸夫、そして九州帝国大学教授の三瀬幸三郎である。

3. 複斜材型トラス橋梁の開発に関わった技術者

(1) 小田彌之亮

1927(昭和2)年に九州帝国大学を卒業し、技手として朝鮮総督府鉄道局に入局、1933(昭和8)年に技師に昇格、1934(昭和9)年に本局建設課へ異動した²³⁾。1936(昭和11)年建設課工事係長²⁴⁾、1937(昭和12)年建設課設計係長²⁵⁾として、建設課所管の橋梁を担当した。当時の主要橋梁は建設課所管よりむしろ京釜京義線の改良工事関係が多かったため、1940(昭和15)年より建設課設計第二係長²⁶⁾として橋梁建設を担当するとともに、改良課・保線課の技師も兼務、建設・改良双方の橋梁を設計から製作まで一貫して担当した。1943(昭和18)年に朝鮮総督府の組織が改変され、鉄道局所管業務は交通局の所管となり、技術研究所が設置されると所長²⁷⁾として、鋼桁の設計、製作監督、架設計画まで担当一貫して実施した。また1942(昭和17)年より京城帝国大学理工学部講師²⁸⁾として、施工法の講義を担当した。終戦後、工務店自営や住宅団地造成事業に関わる²⁹⁾一方、1964(昭和39)年に福岡大学に土木工学科が設立されるのを機に、1972(昭和47)年まで構造研究室教授として後進の教育に尽力された³⁰⁾。

小田は耐弾橋梁である複斜材型トラス橋梁の開発を主導し、その成果を書籍『複斜材構ノ應力-I』第1巻に取りまとめ、第2巻には一次応力近似解法の誤差、数種の形の複斜材構の比較、細部構造に関する問題等を、



図-2 小田彌之亮³¹⁾

そして第3巻には特殊研究が記載される三部作が計画された。1941(昭和15)年に第1巻¹⁰⁾、1943(昭和18)年に第2巻¹¹⁾が発刊されたが、第3巻は終戦の混乱のためか発刊されなかったようである。前記の第2巻の内容を主論文とし、参考論文として第1巻を添付して、東京帝国大学に博士論文『複斜材構ノ應力』¹²⁾として提出、1944(昭和19)年1月13日、工学博士の学位が授与された。

(2) 田中豊

1913(大正2)年に東京帝国大学を卒業、鉄道院に奉職。初期のころは鉄道路木一般の設計に従事し、関東大震災が発生するに及び、新設の帝都復興院に兼務となり、土木局橋梁課長として、永代橋、清洲橋など隅田川諸橋の建設にあたり、独自の構想に成る構造形式を生み出した。1925(大正14)年からは復興院、鉄道省技術研究所に加えて東京帝国大学教授も兼ね、土木工学第三講座(橋梁工学)を担当した。日本の橋梁技術が欧米の模倣を脱して独自の歩みを始め、今日世界最高の水準に至るまでの指導的役割を果たしたのが田中の最大の功績と言える³²⁾。

耐弾橋梁については、橋梁の爆撃とその対策について、1942(昭和17)年頃より、雑誌『道路』^{33),34)}や『土木技術』³⁵⁾において発表しており、墜落後の復旧性に関する検討も行っている。また、米国で行われた係留された軍艦に対する投下爆弾の命中率をもとに、田中は橋梁に対する爆弾命中率を概算し³⁵⁾、投下高度の低い時、急降下投弾の時(角度が小さい時)は比較的命中率が高くなり、幅員に比例するが、投下高度が高い場合、命中率は比較的小さく、橋梁の一部材を切断することは極めて稀と判断している。

(3) 高橋逸夫

1913(大正2)年に京都帝国大学を卒業後、ただちに京都帝国大学講師に任ぜられ、1914(大正4)年に助教授に昇任した。助教授時代には独・仏・米各国における留学を経験し、ベルリン工科大学でミューラー・プレス

ラウ教授に師事して橋梁工学の理論を研究し、1925(大正14)年3月より1948(昭和23)年1月まで京都帝国大学教授として、土木工学第一講座(橋梁工学)を担当した^{36),37)}。同教授は、橋梁の強度、合成を実験によって測定するための装置を考案した³⁸⁾。これは撓度記録器・応力記録器・水平振動記録器であって、鉄道省、朝鮮総督府鉄道局および南満州鉄道などで広く実地の橋梁試験に使用された。

耐弾橋梁について、1940(昭和15)年の第四回日本工学会大会³⁹⁾において講演しており、ラチス型トラスを含む橋梁の耐弾構造や朝鮮総督府鉄道局において採用された形式について、雑誌『道路』⁴⁰⁾や『土木ニュース』⁴¹⁾において発表している。

(4) 三瀬幸三郎

1911(明治44)年に東京帝国大学を卒業後、ただちに九州帝国大学工科大学講師に任ぜられ、翌年助教授に昇任した。1915(大正4)年土木工学研究のため米国に3年間留学し、1919(大正8)年には九州帝国大学教授となり、新設の構造力学講座を担当した。1923(大正12)年から橋梁工学講座を担当し、1946(昭和21)年停年退官まで学生の教育と研究にあたる傍ら、九州帝国大学評議員、弾性工学研究所所長、工学部長を歴任するなど大学運営にも指導的役割を果たした⁴²⁾。

耐弾橋梁について、特に小田ら朝鮮総督府鉄道局による開発に最も密接に関わり、1940(昭和15)年の第四回日本工学会大会³⁹⁾において講演している。また、三瀬の特筆すべき研究業績に、構造物の弾性変形に関する理論⁴³⁾があり、高次不静定トラス構造の応力算定に威力を発揮するもので、実際に朝鮮鉄道の数多くの複斜材型トラス橋梁の設計に活用された^{10),11)}。さらに連続トラス橋の鋼材量を大幅に節約できる初応力調整法を考案、雑誌『道路』⁴⁴⁾で発表するとともに、『科学朝日』において朝鮮における複斜材型トラス橋梁の建設時の状況を詳しく紹介している⁴⁵⁾。

4. 耐弾橋梁を成立させるための技術

(1) 不静定構造の採用と課題

部材の一部が欠損したとしても直ちに橋桁の墜落を防止するためには、不静定次数を高めることが有用であることは構造技術者としては常識であるが、当時の時代背景を踏まえて議論することが必要である。昭和10年代まで、鉄道橋梁に広く採用されていたのは単純トラス桁である。高橋は橋梁発達の歴史を踏まえて考察しており⁴⁰⁾、鉸桁から三角形網からなるトラス桁が発達したが、長径間の橋に対しては、縦桁の長さが大きくなって不経済になるため、斜材を交叉させた複式

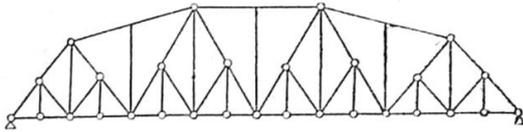


図-3 昭和10年代の最新トラス形式⁴⁰⁾

トラスが採用されるようになったが、格点の数が多いため、図-3に示す主トラスの格間に副構造を挿入して作った分割格間を有するトラス桁が「最新様式として採用されるやうになった」⁴⁰⁾と述べている¹²⁾。しかしこれらは静定構造であるため、一部材が切断すると、力学上からは不安定となり、構造全体が破壊するため、耐弾構造としては不適である。そこで、単純トラス桁の内的不静定を高めた構造として、腹部材に冗長部材を追加する方法や、下弦部材を強大にする方法などが提案されていた。

ただし、静定構造に余分の部材を追加することは有効であるものの、もしその余剰部材が単にフェールセーフの目的のみに使用されるのであれば、橋梁はその分重く、また高価となることから、余剰部材が平常においても主構造の一部材として有効に働く形式の方が不経済とならない⁴⁰⁾ことも指摘している。小田は、「高橋逸夫教授の『なるべく網目のような形(ラッチース型)がよいだろう』との御意見にヒントを得て、一応ワーレン型トラスを二組重ねた形のダブルワーレン型を考えた。然しこれも欠点があるので」⁴⁶⁾と回顧している。新設橋梁に対する耐弾橋梁の設計要領を検討した田中は、「一般に不静定構造は耐弾性が大であると考えられるが、支間が特に大きくない限り、構造効率が低下することは必然である。故に静定構造を選び、これになるべく主要応力に関係ない補剛部材を取り付ける方法を講じるのが推奨すべき一策である。」³³⁾と述べており、不静定次数を高めることは理念としては同意できるものの、当時の設計技術では不静定構造を合理的に部材を設計、材料を利用することは困難であったという事情を踏まえた設計を提案している。

(2) 多様性のある対策の組み合わせの推奨

耐弾橋梁として、どの形式を選択するかについては、径間長や地質地形などの条件および国防上の重要性によって種々の形式が考えられるが、三瀬は冗長性に関わる補強工作をどれだけ施すかによって、第一種、第二種、第三種耐弾橋梁に分類している^{47), 48)}。

a) 第一種耐弾構造

腹材補強で内的不静定を高めるか、もしくは支点を増やして外的不静定を高めるか、いずれか一つの補強

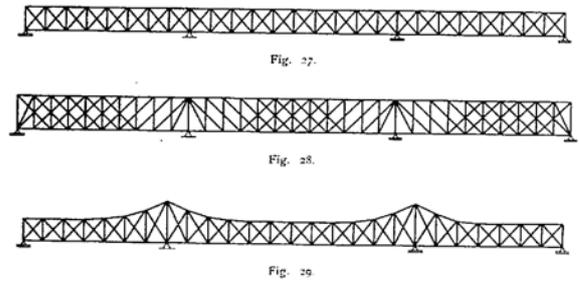


図-4 第二種耐弾橋梁の例⁴⁷⁾

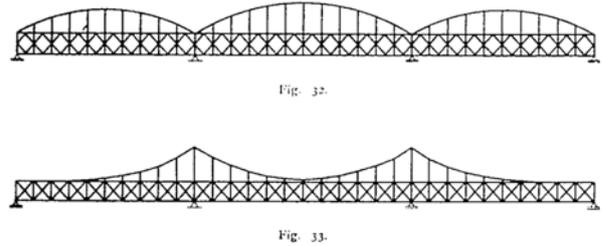


図-5 第三種耐弾橋梁の例⁴⁷⁾

工作を施すものであり、耐弾橋梁として設計すべき程の長大橋であれば、第一種補強工作として、是非とも外的補強の連続構造を採択すべきであるとしている。

b) 第二種耐弾橋梁

内外補強の二工法を併用するもの(図-4)であり、第一弾に連続橋を取ったとすれば、これによって弦材は一二破損してもその形を維持するのに差し支えないため、第二段の補強工作としては腹部材の増強を図るべきとしている。

c) 第三種耐弾橋梁

内外補強の異なる3種類以上の補強工法を合わせ用いるものである(図-5)。前記の二工法で十分とはせず、更に万全を期して安全を確保するために第三弾の補強工作を施すものである。先の第二種耐弾橋梁をさらに補強しようとするのであれば、次には第三弦を追加することになり、これには直弦、鉸アーチそして吊弦の三式がある。このうち、直弦式は平行弦のものには応力作用上、また外観上からも推奨できず、また中立面に近いため、常時有効に働かず不経済になると指摘している。残るアーチ弦式(図-5上)と吊弦式(同図下)について、アーチ弦式は径間の中央において高さが高くなり、最も剛性を必要とする径間の中央で多くの吊材は長くなり、剛度が減るが、吊弦式では径間の中央に近く吊材が短いので優れている等の理由から、吊弦式を採用すべきであると指摘している。

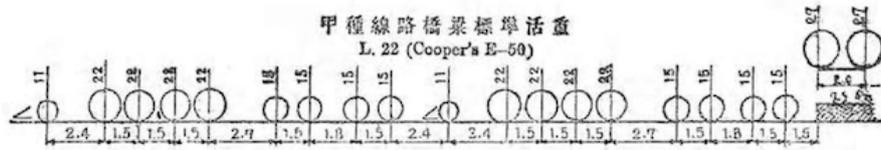


図-6 LS-22 活荷重⁴⁹⁾

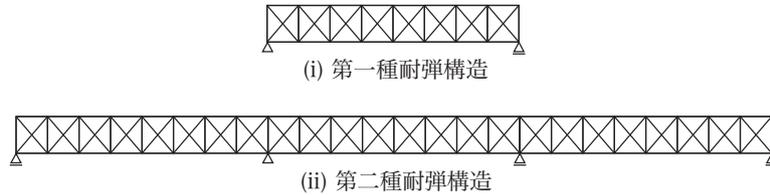


図-7 複斜材型トラス橋梁

5. 複斜材型トラス橋梁の開発

(1) 設計条件

朝鮮鉄道は南満州鉄道と接続することから、広軌軌道が採用された。当時、南満州鉄道は1934(昭和9)年11月より大連・新京間(704.4 km)を8時間30分で走る「あじあ」を運転しており、日本鉄道省においては、東京・下関間(1,092 km)を広軌線による10時間運転のいわゆる「弾丸列車」の建設計画が具体化される機運にあり、将来はさらに朝鮮海峡トンネル案の構想もあった⁵⁰⁾。京釜・京義幹線もこれに対応し、予算の範囲内において、多少なりとも優秀な規格の線路建設を企画し、橋梁に対しては次のような条件が求められた⁵¹⁾。

- 国際幹線橋梁として、国防上高度の耐弾構造たるべきこと。
- 時局に鑑み、極力鋼材を節約すること。
- トラス桁強度はLS-22(図-6)以上とすること(文献⁵²⁾によると、改良課の計画担当によって将来的に輸送力の増強の必要性が指摘され、活荷重L-22とL-25では鋼材の増加は大きくはなかったため、表面上はL-22のまま、実質はL-25に設計修正された。)
- 外観美を考慮すること。

ここで、これら条件が誰による要請であったかを考える。1926(大正15)年に陸軍省で取り交わされた公文書「鴨緑江橋梁増設に関する申合の件」⁵³⁾によると、朝鮮軍参謀長である林仙之は、陸軍次官に対し、将来明治期に建設された鴨緑江橋梁を増設する場合、次のように鉄道局長と申し合わせたことを照会した⁵³⁾。

- 現在橋ヲ道路橋ニ改メ別ニ複線鐵道橋ヲ現在橋ノ上流ニ新設スルコト
- 新設鐵道橋ト現在橋トノ中心間隔ハ三十米トスル

コト

これに対する陸軍次官からの回答案として、軍部としては概ね異なるものの、以下の2点を希望する旨を回答している⁵³⁾。

- 複線鐵道橋ハ単線鐵道橋二個トスルヲ可トス
 - 橋梁ノ間隔ハ成ルヘク之ヲ廣カラシムルヲ可トス
- また、この公文書には付箋による注記があり、爆撃投下の影響に関する統計を根拠に、橋梁の間隔は少なくとも約350mを必要とすること、安全のために約400m間隔とすることが望ましいが、300m以下に縮めることも可とする、ことも記載されている。つまり、橋梁の爆撃の影響を踏まえて軍部が要請していることは、橋梁の間隔を広くすることのみである。これより、橋梁構造そのものを耐弾構造とすることは、朝鮮総督府鉄道局の技術力を背景とした、独自のさらに高い要求性能を設定したものと考えられる。

(2) 基本構造と特徴

耐弾橋梁に関する検討を踏まえ、小田ら朝鮮総督府鉄道局では、図-7に示す構造形式を基本とする耐弾橋梁を開発し、これを複斜材構(複斜材型トラス桁)と呼んだ。本トラス桁は、外観上は垂直材があるワーレントラスを二重にした構造、あるいはプラットトラスとハウトラスを重ねたようにも見え、古くから橋梁のみならずその他の構造にも見られる複式トラス構造であるが、昭和10年代、このような構造に対して完全にその力学的性質が究明されておらず、全ての部材が合理的に設計されてはいなかった。小田らは本構造形式の研究を進め、中間垂直材を有する複斜材型トラス橋である第一種耐弾構造を基本に様々な検討(図-8)が行われ、三瀬による提案により、基礎が良好な地点では3径間連続複斜材型トラス橋梁(第二種耐弾構造)を採

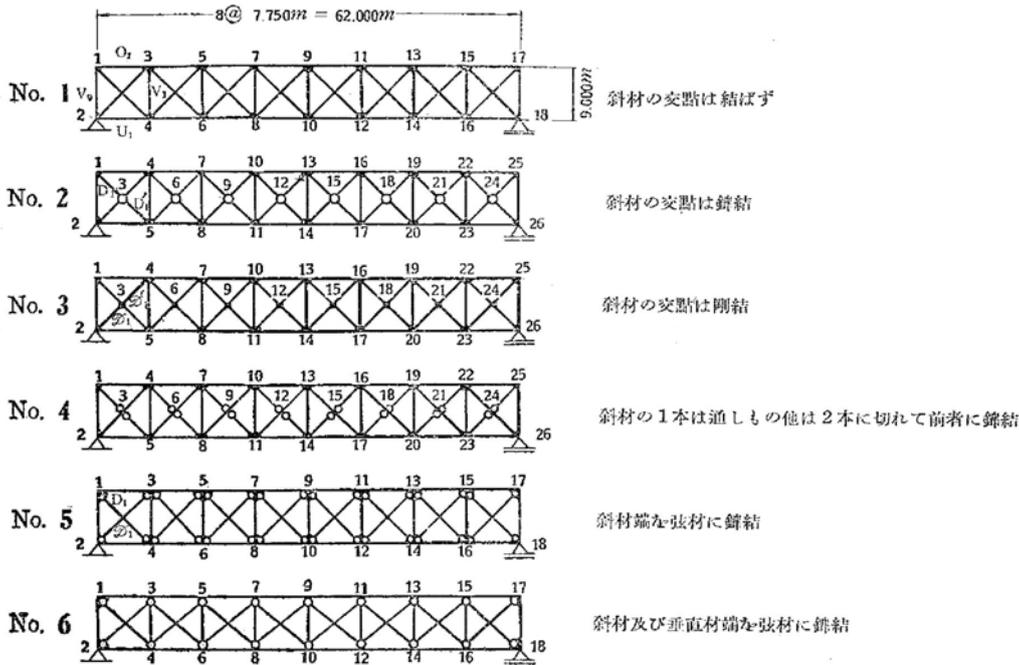


図-8 複斜材型トラス橋梁の検討ケース事例¹⁰⁾

用することになった。昭和前期までに日本国内において鉄道院が設計した鋼鉄道橋について、小西ら⁵⁴⁾が整理しているが、国有鉄道最初の本格的な3径間連続トラス(外的不静定)が設計されたのは1932(昭和7)年であり、続く外的不静定トラスの設計は1938(昭和13)年である。つまり、1936(昭和11)年頃、高次不静定トラス橋梁を標準形式として設計、建設すること自体、大きなチャレンジであったことが理解できる。

小田¹²⁾、三瀬⁴⁸⁾の記述による複斜材型トラス橋梁の特徴、利点を整理すると以下の通りである。

- 部材の分布が均等であり、しかも各格間に2つの斜材があって強剛安定であること。
- 各格点左右対称であるから、構造詳細が簡易であり、外観もよいこと。
- 他の複式構造に比べて応力作用が明瞭であり、相対する弦材には他のトラスと異なり大体同等の応力を生じ、交叉する斜材も又略同等の応力を受けること。
- 連続橋で逆応力が発生するが、正負のせん断を2つの斜材で分担するから楽であること。
- 長大橋となれば一般に斜材が長くなり、抗压材の設計が厄介であるが、それを複斜材式を採用すると、材長が短くなり設計が容易となること。
- 中間垂直材があるので腹材応力の配分がよく、2つの斜材は概ね同様の応力を受けること。
- 垂直材は橋脚上の外は、その応力がおおよそ同じとなるので同様の断面を適用し、これに取り付け

る床桁も全て同じものを採用することができて好都合であること。

- 他の複式構造に比べて二次応力が小さいこと。
- トラスが桁の代用としての構造なる点から言えば、単斜材、複斜材トラスのうち最も桁に近いトラスであること。

(3) 構造設計

トラス桁構造の設計にあたっては、当時のダブルワレントラス桁のような内的不静定である複式トラス構造の設計では、2組の単斜材トラス構造に分け、斜材応力はその格間のせん断力を2斜材平等に負担するとするJohnson et al.による近似的解法⁵⁵⁾が採用されていた。それは、従来の構造力学では応力法を基本とし、高次不静定を解くのは非常に困難であるためであり、またJohnson et al.による近似的解法による誤差も些少であるとされていたためであるが、耐弾橋梁のような大きな構造、しかも大量の橋桁を一度に建設する場合には正しい解析をすることが求められ、本構造設計においては、三瀬が開発した弾性変位解法⁴³⁾が適用された。三瀬の方法は現在のFEMで用いられるような変位法であり、各格点の水平・鉛直変位(p, q 値)を変数とする高次連立方程式を解く必要がある。一方、変位法では連立方程式の数は格点の数に依存し、部材の数に依存しない。そのため、複斜材型トラス桁のように多くの部材が配置されたとしても、構造計算の困難さは変化せず、また中間支点が増えると解くべき方程式の数は



図-9 複斜材型トラス桁のパネル部図面 (所蔵：安藤ハザマ)

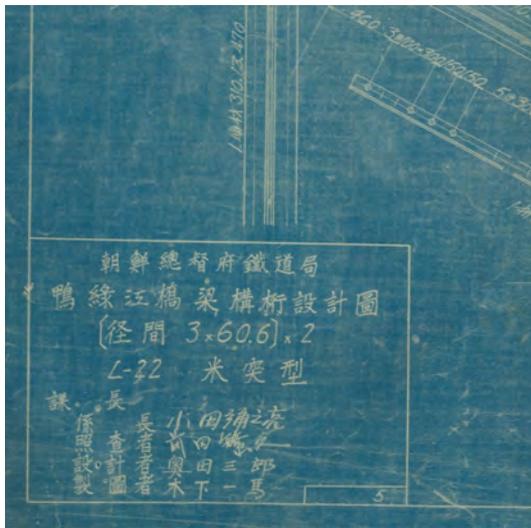


図-10 複斜材型トラス桁のパネル部図面 (図-9) 左下の署名部拡大

減るため、本構造形式の計算に適するものであった。

設計計算完了後の実施設計図の作成は、橋梁の種類が多いため莫大な図面数となり時間を要した⁵²⁾と記載されているが、現在まで、その部材図面は1枚のみ発見しているのみである(図-9)。本資料は、『間組百年史』⁵⁶⁾のために間組(現在、安藤ハザマ)が収集したものであるが、年代の記述がなく、『間組百年史』でも本

資料について触れられていない。著者の一人である高橋が確認したところ、設計者の欄に小田彌之亮の署名がある(図-10)ことから、本論文の対象である昭和期の鴨緑江大橋の図面であることを特定したものである。詳細図面はこれのみであるものの、小田による『複斜材構ノ應力』^{10),11)}において掲載されている各部材の部材長、断面積、断面二次モーメントなどの諸量が記された部材表を確認すると、『朝鮮交通史』⁸⁾で紹介されている1936(昭和11)年以降に建設された橋梁一覧の一般図(部材寸法のみ)と類似、一部一致していることを確認した。つまり、『複斜材構ノ應力』の記載は、設計計算結果を記載していると考えられることは妥当であると判断する。『複斜材構ノ應力』には、三瀬の弾性変位解法⁴³⁾を適用し、格点の変位、軸力などの一般解(影響線)が算出されている。弾性変位解法では、まず各格点をヒンジ結合と仮定して各格点の水平・鉛直変位を求め、次に各格点を剛結と仮定して、部材両端の変形に適合するように部材の曲げたわみ変形を特定する。複斜材型トラス橋梁では、合理的に部材を設計するためにも、部材軸力による一次応力のみならず、トラス部材の両端を剛結とした場合に発生する曲げモーメントによる曲げ応力(二次応力)も算出されているところに特徴がある。

(4) 構造設計の検証

設計当時は手回し式計算機を使用するほかなく、方程式を解くためには並々ならぬ努力と忍耐を要することであり、小田は「方程式数が70程度ものを初めイテラチオン法により試験的に計算したところ、6ヶ月間を費やし未熟のためもあって終に目的を達せず、後幾回繰り返せばよいか見当が就かず、途中にて放棄して了った。次にこれに消去法を試みたところ15日間にて最初のpを得た。消去法に依るときは毎日幾個宛かを消去し得て、努力すればするだけ終極の目標に近づき、常に現在の進行程度と終極の目標が明確であり、従って希望を持ちながら計算を進行せしむることを得た。」¹⁰⁾と回顧している。小田らの計算結果を検証するため、カリフォルニア大学バークレー校で開発が進められている構造解析フレームワーク OpenSees⁵⁷⁾でモデル化し、各格点に単位荷重を載荷させた静的解析を実施した。数値解析モデルでは、各格点は剛結としている。その結果のうち、第二種耐弾橋梁である3径間連続複斜材型トラス橋梁の中央部の下弦材および斜材の応力に関する影響線図の比較を図-11に示す。点線が OpenSees による計算結果であるが、ほぼ小田らの計算結果と一致していることが分かる。下弦材には一次応力のほぼ半分に近い二次応力が発生していることも正しく計算されており、複斜材型トラス橋梁を合理的に設計するた

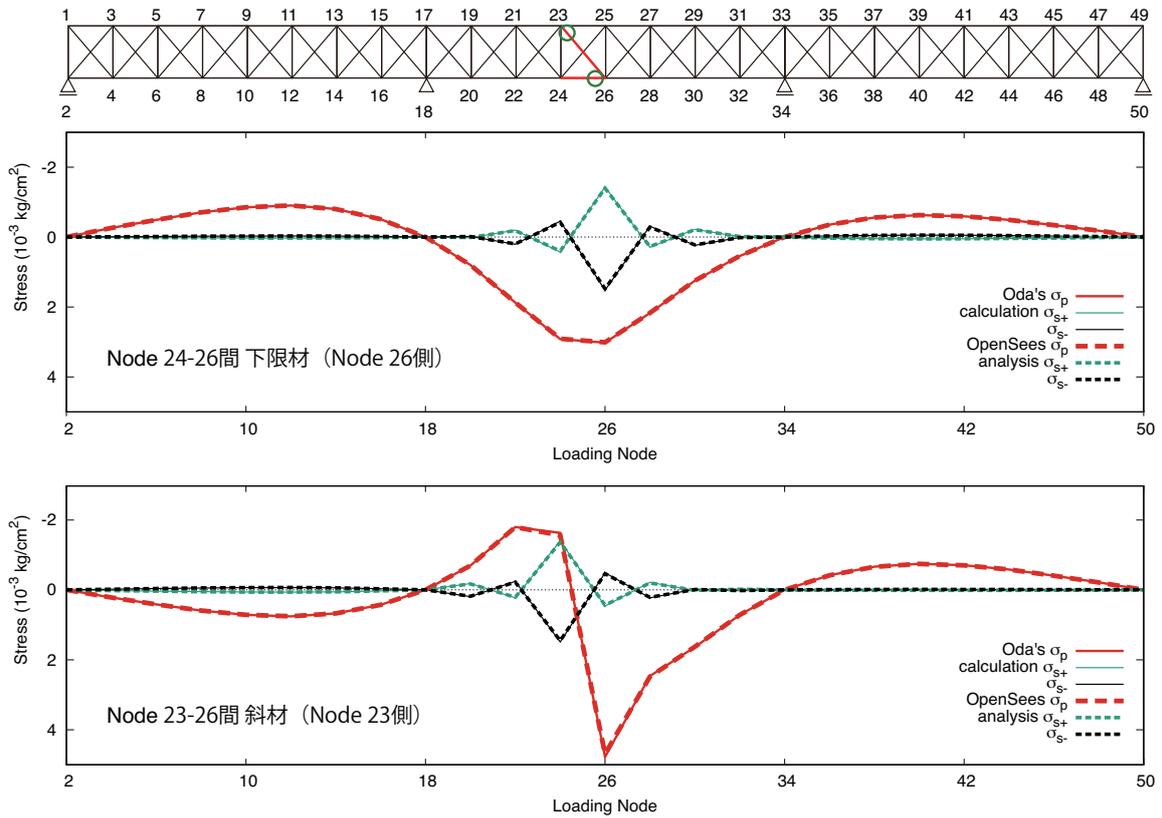


図-11 部材応力影響線の比較 (σ_p :一次応力, σ_s :二次応力 (+上縁, -下縁), 二次応力は緑丸で示した格点側)

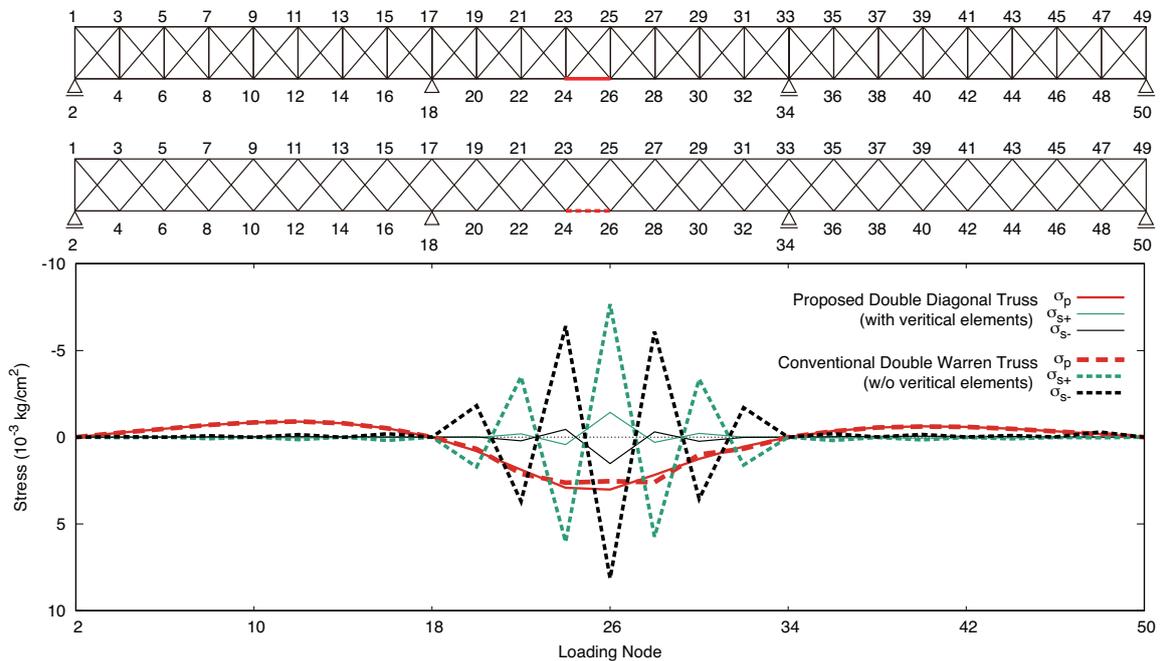


図-12 複斜材型トラス橋梁と従来型ダブルワーレントラス橋梁の計算結果の比較 (σ_p :一次応力, σ_s :二次応力 (+上縁, -下縁))

めにも、二次応力を踏まえた合成応力による設計が重要であることが、改めて確認できる。

また、三径間連続複式トラス橋について、垂直材の有無による部材応力計算結果の比較を図-12に示す。鉛直

材がないものは、従来より用いられていたダブルワーレン型トラス橋梁である。垂直材を有する複斜材型トラス橋梁を比較すると、一次応力はほぼ同じでありながら、ダブルワーレン型トラス橋梁は大きな二次応力

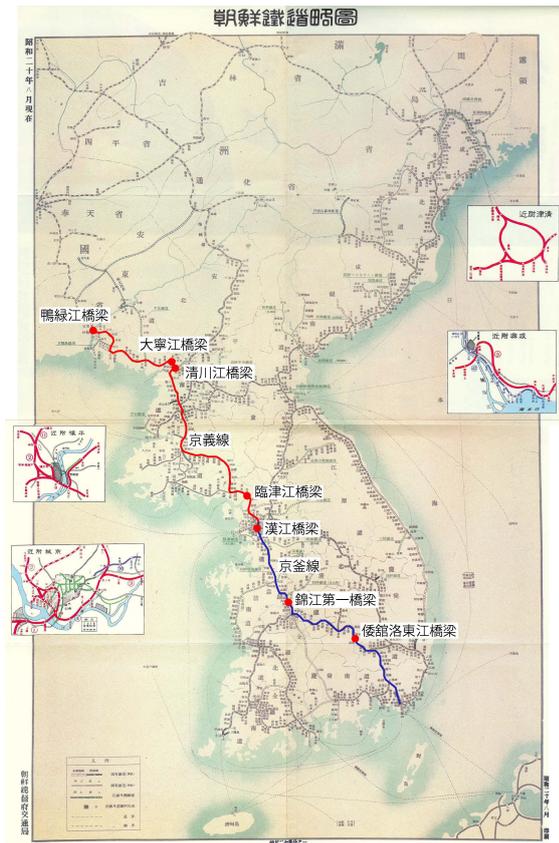


図-13 改築された主要橋梁（朝鮮鐵道略図に路線と橋梁名を筆者加筆）

を示し、その大きさは一次応力を遙かに上回るとともに、移動荷重に対して頻繁に正負が入れ替わる。このように合理的に設計計算された結果を踏まえ、中間垂直材を配置することの有利性など、5.(2)で示した特徴を有する複斜材型トラス橋梁の開発が進められたのである。

6. 鴨綠江橋梁の建設

(1) 朝鮮總督府による橋梁改築工事

朝鮮東南端の釜山から北西端の新義州までの約 950 km(京釜線・京義線)には地形上大河川が多く、特に京城(元ソウル)以北に長大橋図-13が必要となる。これらの橋梁の改築に当たっては耐弾性能が求められたが、京釜線は先行して複線化が進められたため、複斜材型トラス構造の開発が間に合わず、倭館洛東江橋梁(2径間(45m)連続トラス桁5組)や錦江第一橋梁(図-14, 単径間(62m)トラス桁4連)では、分格間を有するダブルワーレン型トラス構造が採用された。これは、耐弾橋梁の開発に当たり、小田はまず、ダブルワーレン型を考えていたこと⁴⁶⁾、また図-3にみられる分格間を配置することがスパンの大きな橋梁の最新トラス形式に採用されていたことから、複斜材型トラス構造の開発が



図-14 錦江第一橋梁（撮影：高橋, 2019年10月）



図-15 鴨綠江橋梁（左が複斜材型トラス橋梁, 右は旧橋である単純トラス橋梁, 撮影：高橋, 2018年3月）

間に合わない状況では、最善の形式として採用したものとする。

結果的に複斜材型トラス構造が採用されたのは、鴨綠江橋梁、清川江橋梁、漢江橋梁(上下線)、臨津江橋梁(上下線)、大寧江橋梁の7橋であり、この中で、当時朝鮮(当時は大日本帝国の一部)と満州国間の国境河川である鴨綠江を跨ぐ鴨綠江橋梁は最重要橋梁であり、また唯一の第三種耐弾構造であることから、その建設の状況を資料より整理する。

(2) 構造形式

鴨綠江橋梁(図-15, 16)は1909(明治42)年に架けられた単線橋である単純トラス橋梁(以後、旧橋と呼ぶ)に並列して新たに複線橋として架設された。鴨綠江橋梁は旧橋の70 m上流に、径間62 mの3径間連続複斜材型トラス橋梁2連(6径間)及び径間94 mの吊弦式3径間連続複斜材型トラス橋梁2連(6径間)から成る全



図-16 鴨緑江橋梁全景 (左側が中国, 右側が北朝鮮, 撮影: 高橋, 2018年3月)

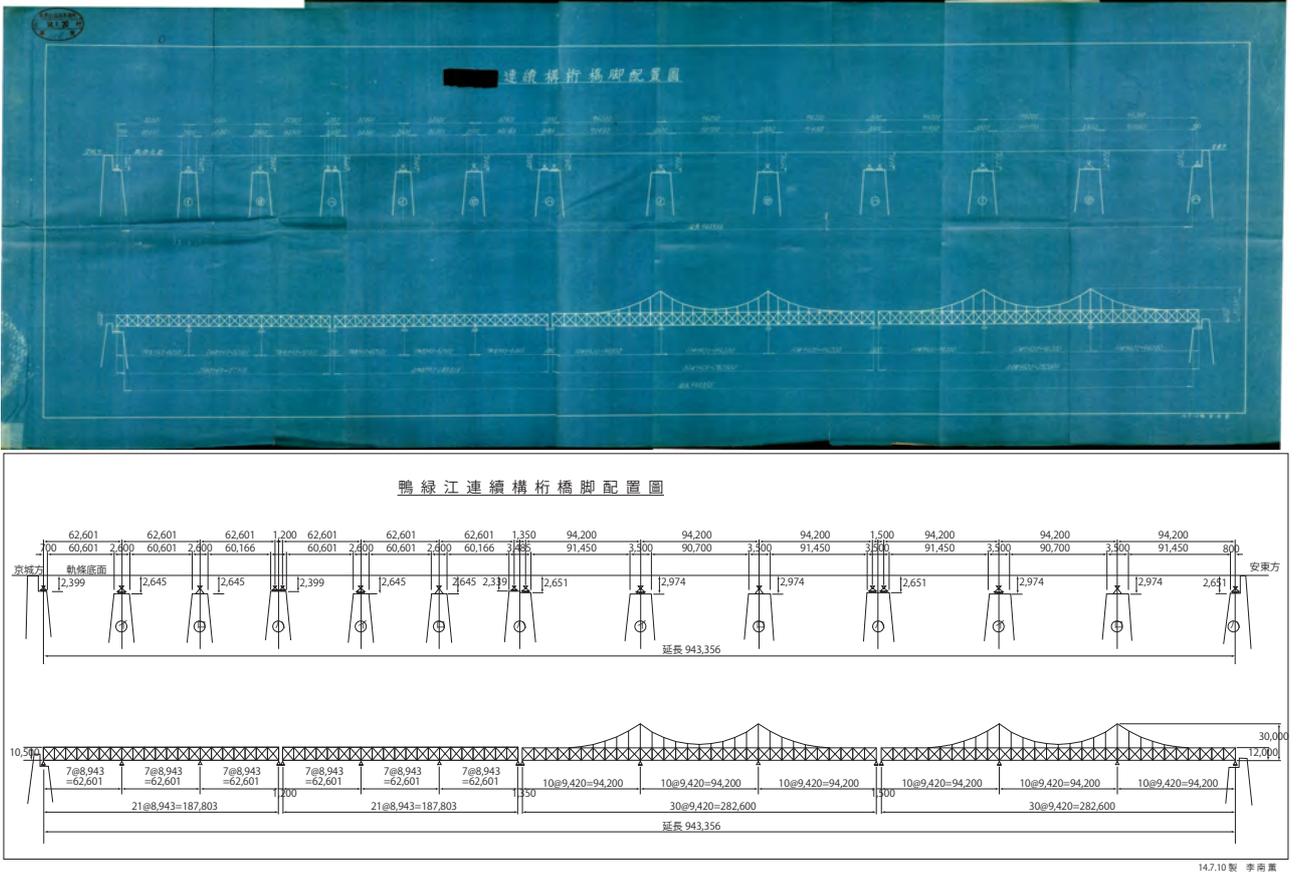


図-17 鴨緑江橋梁とみられる青焼き図面¹²⁾と復元図

長 943 m の巨大な橋梁が架設された。5.(1)で示したように、大正末期の鴨緑江橋梁の増設に関する軍部の要請は、単線鉄道橋 2 個と橋梁の間隔をなるべく広くすること⁵³⁾であったが、耐弾橋梁の開発により、当初の申し合わせ通り、旧橋を道路橋に、新橋は上流側に複線鉄道橋が建設されたことになる。ただ、当初の申し合わせよりも、やや橋梁の間隔は広げられている。

鴨緑江橋梁のスパン割は、洪水時の流水を考え、旧橋と同じとされた。支間長が長い径間 94 m の桁には、朝鮮と満州間の国際橋梁としての重要性を考慮し、第三弦として吊弦材を上弦材の上方に添加して、トラス桁全体を補強した第三種耐弾橋梁が採用された。小田の博士論文の付図として、添付されていた青焼き図面が図-17であり、橋梁名は切り取られていたものの、特徴的な吊弦式 3 径間連続複斜材型トラス橋梁であることから、鴨緑江橋梁であると特定できる。

全体の形は吊り橋に見えるがトラス橋であり、吊弦材はロープではなく型鋼である(図-18)。その目的はトラスの部分的破損に対する安全度を更に増強することにあつた。もし斜材や吊材が破損したとしても、隣り合う部材が協調しあい、速度制限しながら列車を走らせることが可能であり、もし上弦材や下弦材の一つが破損したとしても、仮材で補強することで、速度制限しながら列車を走らせることができる。さらに連続トラス桁の橋脚が損傷したとしても、仮橋脚を設置することで供用可能となる。このように例え破損したとしても桁が落下しにくくすることで、修理が容易となり、早期の再供用が可能となるのである。

(3) 架設について

本橋架設についての公式記録は発見されていないが、『科学朝日』⁴⁵⁾に掲載されている橋梁架設中の写真には



図-18 鴨緑江橋梁の吊弦材, 上弦材, 鉛直材 (撮影:高橋, 2018年3月)

鴨緑江橋梁に特徴的な吊弦材が確認できる。また、ある耐弾橋梁の初応力調整について、三瀬により詳しく報告⁴⁴⁾されているが、橋梁名等はないものの吊弦材があることが記載されており、記載されている橋梁が鴨緑江橋梁であることが分かる。この2つの資料により、架設の詳細を読み取ることができるため、ここに取りまとめる。

架橋は南新義州側より進められ、3径間連続複斜材型トラス橋(第二種耐弾橋梁)2組の架橋を1941(昭和16)年秋に完了し、1942(昭和17)年春、解氷期を待って第三種耐弾橋梁となる第一主径間の杭打ちをはじめ、3月より組み立てにかかり、5月末に本径間の組み立てが終了した。そして6月初め、最後の仕上げである初応力調整操作を行い、第一主径間を完了した(図-20)。次いで夏の洪水期を避けて9月より第二主径間の架橋を開始、11月上旬に組み立てを終えて、11月18日、19日に最後の初応力調整操作を施工、11月をもって架橋が完成した。

ここで、初応力調整とは、不静定構造であることをいかして、格点部を上下に強制変位を与えることによって、部材の応力を調整しようとする試みである。本来、不静定構造である連続桁橋梁は、支点部が沈下などの変位を生じることにより、構造物内部の応力が変化してしまうことが欠点としてとらえられていた。三瀬はこれを逆に利用して、格点位置を調整することにより最大応力が生じる部材に当初と正反対の応力をきかせて、部材に発生する応力を小さくすることで、鋼材の節約に大きく貢献した。さらに格点部を上げ下げすることの利点として、架橋組み立ての最後の桁の閉合が容易になること、吊弦材に適度な初応力を与えられることを挙げている。図-19には各格点部の下に架設足場が設けられている様子が示されている。通常の建設では、各格点部毎に足場を設ける必要はないが、初応力調整には54個の格点部にジャッキを設置したとあるため、この写真は初応力調整時の写真であると判断でき



図-19 各格点位置に足場が建設された初応力調整の状況⁴⁵⁾ (推定撮影年:1942年)



図-20 第一主径間の初応力調整を終えて最後の据付完了時⁴⁵⁾ (推定撮影年:1942年)

る。格点部に荷重を作用させることで、各部材にどのような応力が発生するかどうかは、図-11のように影響線図を作成済みであるため、予想することができる。「尚此の調整操作に因る添加初應力の検測値と計算値を比較したのでありますが、いずれも先ず満足すべき結果を得た次第であります。」⁴⁴⁾と報告されているが、本橋のような高次不静定橋梁においても、正確な設計計算ができていたことを証明するものといえる。

7. 複斜材型トラス橋梁の耐弾効果

建設された複斜材型トラス橋梁に対し、第二次世界大戦時には清川江橋梁が、朝鮮戦争時には鴨緑江橋梁、漢江橋梁、臨津江橋梁が爆撃されたことが確認されている。本章では、実際に空爆を受けた橋梁の被害状況とその耐弾効果について整理する。

(1) 清川江橋梁

北朝鮮内を流れる清川江に架かる鉄道橋(京義線)が清川江橋梁であり, その下り線の構造形式は, 上路鈹桁+複斜材型単構桁(62 m)+複斜材型3径間連続構桁(3@62 m)3組の全長1198 mの長大橋である。北朝鮮内に位置するため, 現地調査できないものの, 第二次世界大戦時に爆撃, また復旧された事例であり重要と考え、『朝鮮交通史』⁵⁸⁾より以下に引用する。

昭和20年7月31日。米軍のP-38戦闘爆撃機2~3梯団が, 京義線新安集・孟中里間の清川江橋梁下り線を爆撃を爆撃したが, そのうちの1弾(250kg爆弾と思われた)は橋脚(平壤寄り62.0 m単径間と62.0 m3径間連続桁の架設点)の真上に命中した。この爆撃のため62.0 m単径間桁(自重約600 t)は斜状に落下した。しかし一方の3径間連続桁には異状なく, また墜落した単径間の構桁の部材にも, 直接の変状も認められなかった。

(中略)この被害に対して復旧工事の対策を直ちに協議した結果, 落下桁の墜落側の上弦左右部に2組の5重滑車をそれぞれ吊り下げ, 直径35 mmのワイヤをエンドレス方式に連結し, これを「ミカサ型機関車」4重連牽引により吊り上げる方法を採用することに決定した。この方法に要する諸材料, 機器類等を準備し, 現場段取り等の完了後の8月13日には作業を開始することができた。(中略)かくて吊り作業は当日中に完了することができた。

これより, 支承部の爆撃により桁が落下したものの, 複斜材型トラス桁は剛性が高く, 桁の再利用が可能であったことが分かる。

(2) 漢江橋梁

ソウル市内に流れる漢江に架かる4本の鉄道橋(京釜線)の中で最も下流側にあるのが, 1944(昭和19)年に竣工した漢江橋梁であり, その構造形式は下路鈹桁+複斜材型単構桁(62 m)+複斜材型3径間連続曲弦構桁(55.0+78.5+55.0)3組の全長1113 mの長大橋である。ソウルという都市部に位置するため, 周囲との景観の調和上, 平行弦桁ではなく, 三径間連続桁の中央径間を長くして両端径間を短くし, そして中央径間の橋脚上の桁高を高くした曲弦型で逆アーチ型の三径間連続複斜材構が建設された。

漢江橋梁は朝鮮戦争で北朝鮮軍がソウルまで南進し, それ以上の南進を防ぐために爆撃された。単構桁は一方が落下して傾き, また3径間連続曲弦構桁の一つは



図-21 朝鮮戦争時の漢江橋梁の損傷(撮影:Gene Putnam, Harry S. Truman Library & Museumに著者加筆, 推定撮影年:1950年)



図-22 現在の漢江橋梁(撮影:高橋, 2018年7月)

中間橋脚が崩壊したため落橋した(図-21)。つまり爆撃による破壊を免れることはなかったが, 落下してもなお桁はその形状を留めていたため, 再利用して復旧され, 現在も鉄道橋として供用中である(図-22)。

(3) 臨津江橋梁

京義線はソウルから約40 km北で臨津江を渡り, その複線化に伴い, 1939(昭和14)年, 京義線の上下線として臨津江大橋が建設された。構造形式は, 上り線が上路鈹桁(18.3 m)10組+複斜材型単構桁(62 m)8組で全長706 m, 下り線が上路鈹桁(18.3 m)10組+複斜材型単構桁(62 m)+複斜材型3径間連続構桁(3@62 m)2組+複斜材型単構桁(62 m)で全長702 mである。

臨津江橋梁は朝鮮戦争時に爆撃を受け, 上り線が完全に破壊され, 下り線も一部破壊された(図-23)。上り線はいずれも単構桁であったことから, 橋脚が破壊されると落橋するが, 図-23を見ると分かるように, スパン中央で破壊され, 落下している。他の複斜材型単構桁ではこのような破壊形態は見受けられないため, 空爆ではなく直接破壊されたものと予想される。

下り線側は復旧され, 北朝鮮と韓国を結ぶ京義線の一部として, 限られた列車のみ(Demilitarized Zone(DMZ) Train)であるが, 現在も鉄道橋として供用されている(図-24)。



図-23 朝鮮戦争時の臨津江橋梁の破壊 (撮影:G. Dimitri Boria, Korean War - HD-SN-99-03066, March 10 1952. U.S. Army Korea)



図-25 朝鮮戦争時の鴨緑江橋梁への空襲 (米軍撮影, Photo No.80-G-423495, Attacks on Yalu River Bridges, November 1950. Official U.S. Navy Photograph)



図-24 現在の臨津江橋梁 (撮影:高橋, 2018年7月)

(4) 鴨緑江橋梁

新旧 2 橋は第二次世界大戦では無傷であったが、1950(昭和 25)年 6 月に勃発した朝鮮戦争において、米軍機の空爆を受けた(図-25)。鴨緑江橋梁は中国と北朝鮮との国際橋梁であったため、交戦国であった北朝鮮側のみを攻撃する限定戦略であったが、旧橋は北朝鮮側の橋桁が墜落し、橋脚の一部を水面に残すのみとなった。一方、耐弾橋梁であった鴨緑江橋梁は、橋桁が墜落しなかった。鴨緑江橋梁も旧橋と同じく落橋させるべく、米軍が空爆していたことは、『朝鮮交通回顧録』における小田の回顧より分かる。「私のもとに米占領軍より朝鮮鉄道の橋梁の件で用件あり、本日何時板付飛行場に来いと連絡があった。指定通りに行く東京第五空軍司令部から一大佐(名を記憶しない)が来て新義州鴨緑江橋梁を破壊するため相当の犠牲を払って大きな爆弾多数をもって空から攻撃するが墜ちない。調べると特殊な工夫がなされておいて設計者は君ということが解った。(中略)「筆者は橋脚に穴をあけ、これを爆砕するのがよからう。橋桁はなかなか落ちないからと言った。」⁵⁹⁾ということから分かる。また、橋脚に直接破壊工作しないことには、橋桁を墜落させることはできないといったことは、空爆に対する配慮に対する

自信を感じさせる発言である。

『中国鉄路橋梁史』⁶⁰⁾には、鴨緑江大橋の損傷状況、また復旧状況がより詳細に記載されている。損傷状況を翻訳すると、「1951(昭和 26)年 5 月 31 日に米軍の爆撃を受け、トラス部材、ガセットプレートや床版が被害を受け、それぞれの桁において変形が生じた。第 2 連の桁(北朝鮮側の吊弦材付 3 径間連続複斜材型トラス桁)は 130 mm, 第 3 連, 4 連の桁(3 径間連続複斜材型トラス桁)はそれぞれ 240, 290 mm の変形が発生するとともに、第 7, 8, 10 橋脚も被害を受け、桁がねじれてずれたため、一時的に供用が停止された。」⁶⁰⁾とある(括弧内は著者による追記)。これより、部材や橋脚が損傷しても、第二種・第三種耐弾橋梁は落橋を免れている。また、復旧について、「本格的に補修されたのは 1952(昭和 27)年であるが、損傷した吊弦材付 3 径間連続複斜材型トラス橋梁の補修のため、部材の取り替えが行われたが、吊弦材があるためにベントの設置が不要であった。」⁶⁰⁾とあり、第三弦を有することにより、仮設部材を新たに設置する必要がなかったことが記されている。

さて、『朝鮮交通回顧録』には続きがある。米占領軍の大佐が鴨緑江大橋について尋ねた際、「彼は米第五空軍で高給で備うから東京へついて来いと言う。私は戦争はもう嫌だからついて行かぬとことわった。彼は鴨緑江の橋梁はどうしても墜ちないのでお前にはソ連から勲章が来るぞと冗談を言って帰った。」⁵⁹⁾とある。第二次世界大戦に大きな役割を果たす橋梁に携わった土木技術者の、技術への誇りと戦争への反省とが絡み合った複雑な想いも、後進の土木技術者も受け継ぐべき教訓だと考える。

8. まとめ

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、その開発の経緯を整理した。本研究で得られた結果をまとめると、次のようになる。

- 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。
- 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はなく、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。
- 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、現地での調査および検閲などの不完全な当時の資料を重ね合わせることで、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。
- 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。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 挑戦的研究(萌芽)18K18882番のもと実施したものである。朝鮮総督府鉄道局に関する調査にあたり、田邊家史料、特に田邊多聞（終戦時、朝鮮総督府交通局釜山局長）氏が残さ

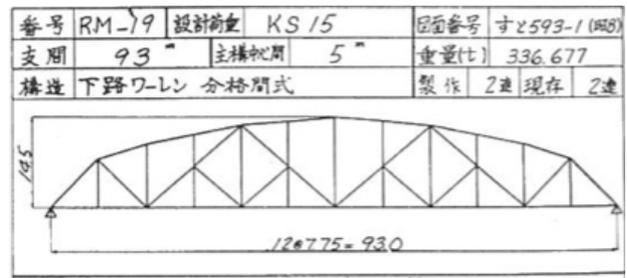


図-26 国鉄トラス橋 図面番号 すと 593-1⁶²⁾

れた資料を参考にした。田邊家史料閲覧に当たり、田邊康雄氏・謙三氏・真一郎氏の協力を得た。また、間組百年史のために収集された資料の確認について、杉山律氏（安藤ハザマ）の協力を得た。ここに深く感謝の意を表します。

補注

- [1] 朝鮮半島で早期に鉄道の縦貫ルートが実現された背景には、日清・日露戦争を含む朝鮮半島を巡る国際情勢が大きく関係しており、朝鮮鉄道の建設・改良において、軍部（陸軍）の関与が大きかったことは、朝鮮総督府による朝鮮鉄道史²⁾⁻⁵⁾からも自明である。1904(明治37)年2月6日にロシアに対して宣戦の詔勅が発せられると、京釜線と連成して部隊及び軍需品を朝鮮半島北部へと輸送するため、参謀本部は外務、陸軍、通信の各省と商議し、陸軍少将を鉄道監とする臨時軍用鉄道監部を同年2月22日に設置した。小村寿太郎外務大臣は、同年2月25日、京城の林権助駐韓公使に対する訓令のなかで、「本線の敷設は軍事上の必要に基づくが故に（以下略）」⁶¹⁾と、明確に当初の敷設目的を述べている。特に京義線は、日露戦争遂行のため、部隊や軍需品の輸送を目的とした軍用鉄道として、陸軍主導で建設された。軍事上の急需に応じるため、まずは接続することを目的に短期間で建設されたため、急な路線勾配や仮橋などが採用されたところも多く、京義線完成後も大規模な改良が必要となった。
- [2] 最新様式と言及されていることの補足として、国鉄創業以来設計されたトラス橋設計図面が整理された西村による研究⁶²⁾を示す。これによると、昭和10年代までの国鉄鋼鉄道橋において、単純トラス橋における最大支間長は93mであり、その設計図面である「すと593-1」（1933(昭和8)年）で示される下路曲弦ワーレン分格間式(図-26)が図-3と類似している。これより高橋が示した最新様式とは、当時の国鉄における最大スパンを実現する単純トラス橋様式を指すことが分かる。

参考文献

- 1) 李容相: 日本統治期の朝鮮鉄道, 東洋文化研究, Vol. 16, pp. 115-146, 2014.
- 2) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道史 全, 1915.
- 3) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道史 第一卷, 1929.
- 4) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道史 第一卷, 1937.
- 5) 朝鮮総督府鉄道局: 朝鮮鐵道四十年略史, 1940.
- 6) 成岡昌夫: 土木資料百科, pp. 96-97, 技報堂出版, 1990.
- 7) 高橋良和: 戦時下における橋梁研究文献調査から読み取る危機耐性, 第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 511-514, 2017.
- 8) 鮮交会: 朝鮮交通史, 1986.
- 9) 鮮交会: 朝鮮交通回顧録(工務・港湾編), 1973.
- 10) 小田彌之亮: 複斜材構ノ應力, Vol. 1, 丸善, 1941.
- 11) 小田彌之亮: 複斜材構ノ應力, Vol. 2, 丸善, 1943.
- 12) 小田彌之亮: 複斜材構ノ應力, 博士論文, 東京帝国大学, 1944.
- 13) 鷹部屋福平: 耐弾性新型長大径間の橋梁に就て, 土木学会誌, Vol. 27, No. 10, pp. 889-895, 1941.
- 14) 鷹部屋福平: 耐弾橋梁に就いて, 土木雑誌, Vol. 18, No. 3, pp. 3-5, 1942.
- 15) 鷹部屋福平: 防空上より観たる橋梁, 道路, Vol. 4, No. 1, pp. 27-28, 1942.
- 16) 鷹部屋福平: 戦時下に於ける橋梁設計の特殊性, 道路, Vol. 4, No. 5, pp. 4-5, 1942.
- 17) 鷹部屋福平: 橋梁建設と防空, 科学技術, Vol. 1, No. 12, pp. 68-73, 1942.
- 18) 河村協: 現戦時下の土木工法, 山海堂, 1942.
- 19) 山内寛, 岡本大一: 満鐵所管鐵道橋の概観, 土木満州, Vol. 2, No. 5, pp. 28-36, 1942.
- 20) 畑中健三: 各種橋梁の發達並に戦時下の橋梁, 理工図書, 1944.
- 21) 小野田滋: 鉄道土木権威としての沼田政矩, *RRR*, Vol. 75, No. 12, pp. 34-35, 2018.
- 22) 前掲 8), p.324.
- 23) 朝鮮総督府: 朝鮮総督府及所属官署職員録, 1934.
- 24) 朝鮮総督府: 朝鮮総督府及所属官署職員録, 1935.
- 25) 朝鮮総督府: 朝鮮総督府及所属官署職員録, 1936.
- 26) 朝鮮総督府鉄道局: 職員録, pp. 23,26,30, 1940.
- 27) 朝鮮総督府交通局: 公報 号外 (5), p. 8, 1943.
- 28) 京城帝国大学: 京城帝国大学一覽, p. 208, 1942.
- 29) 鮮交会: 鮮交, No. 125, 1973.
- 30) 福岡大学工学部土木工学科・社会デザイン工学科設立 50周年記念誌, pp. 50-53, 2015.
- 31) 日本ポルトランドセメント同業會: コンクリート講演会講演集(第七集), 1937.
- 32) 伊藤學: 田中豊(土木の100人), 土木学会誌, Vol. 68, No. 9, p. 44, 1983.
- 33) 田中豊: 橋梁の爆撃と其の対策, 道路, Vol. 4, No. 1, pp. 23-26, 1942.
- 34) 田中豊: 戦争と橋梁, 道路, Vol. 5, No. 1, pp. 20-21, 1943.
- 35) 田中豊: 橋梁の爆撃と其の対策, 土木技術, Vol. 3, No. 9, pp. 39-42, 1942.
- 36) 松本勝, 成岡昌夫: 高橋逸夫, 京大土木百年人物史, pp. 182-183, 1997.
- 37) 創立六十年記念事業會: 京都大学工学部土木工学教室六十年史, p.80, 1957.
- 38) 高橋逸夫: 撓度, 応力並に水平振動記録器就いて, 京都帝国大学工学部中央実験所講演集, Vol. 2, pp. 79-96, 1941.
- 39) 日本工學會, 第四回工學會大會記録, p. 46, 1940.
- 40) 高橋逸夫: 橋梁の耐爆構造に就て, 道路, Vol. 2, No. 11, pp. 12-14, 1940.
- 41) 高橋逸夫: 鋼構橋の耐爆構造に就て, 土木ニュース, Vol. 19, No. 5, pp. 13-14, 1943.
- 42) 太田俊昭: 三瀬幸三郎(続土木の100人), 土木学会誌, Vol. 69, No. 6, p. 42, 1984.
- 43) Mise, K.: General Solution of Secondary Stresses, *World Engineering Congress Tokyo 1929*, Vol. 10, pp. 241-261, 1931.
- 44) 三瀬幸三郎: 耐弾橋梁の初応力調整に就て, 道路, Vol. 5, No. 8, pp. 11-16, 1943.
- 45) 三瀬幸三郎: 橋梁の耐爆構造, 科学朝日, Vol. 4, No. 5, pp. 32-39, 1944.
- 46) 前掲 9), p.191.
- 47) 三瀬幸三郎: 耐弾橋梁に関する研究(其一), 九州帝国大学工学彙報, Vol. 15, No. 4, pp. 260-263, 1940.
- 48) 三瀬幸三郎: 耐弾橋梁に関する研究(其二), 九州帝国大学工学彙報, Vol. 15, No. 5, pp. 265-271, 1940.
- 49) 朝鮮国有鐵道建設規程, 官報 第312号, pp. 253-257, 1927.
- 50) 前掲 8), pp.305-382.
- 51) 前掲 8), p.323.
- 52) 小田彌之亮: 朝鮮交通回顧録(工務・港湾編), 鮮交会, pp. 186-204, 1973.
- 53) 陸軍省: 鴨緑江橋梁増設に関する申合の件, 軍事 軍事参第八号 三第七一七号(所蔵: 防衛省防衛研究所), 1926.
- 54) 小西純一, 西野保行, 中川浩一: 大正・昭和前期における鋼鉄道橋の發達とその現況, 土木史研究, Vol. 22, pp. 257-267, 2002.
- 55) Johnson, J., Bryan, C. and Turneure, F.: *The Theory and Practice of Modern Framed Structures*, John Wiley and Sons, 1895.
- 56) 間組百年史編纂委員會: 間組百年史, 1989.
- 57) University of California, Berkeley: OpenSees Web Site, <http://opensees.berkeley.edu> (2018/4/8 閲覧)
- 58) 前掲 8), p.360-361.
- 59) 前掲 9), p.204.
- 60) 中国鉄路橋梁史編纂委員會: 中国鉄路橋梁史, pp. 44-46, 中国鉄道出版社, 1987.
- 61) 前掲 2), p.273.
- 62) 西村俊夫: 国鉄トラス橋総覽, 鉄道技術研究資料, Vol. 14, No. 12, pp. 7-47, 1957.

(Received June 5, 2019)

(Accepted December 3, 2019)

DEVELOPMENT OF DOUBLE DIAGONAL TRUSS BRIDGES
BY RAILWAY BUREAU OF THE GOVERNMENT-GENERAL OF CHOSEN
AND THEIR AIR RAID RESISTANT PERFORMANCE

Yoshikazu TAKAHASHI, Shintaro KOJIMA and Mya San WAI

Double diagonal truss bridges in the Korean Peninsula during the end of World War II were newly developed as an air raid (bombing) resistant structural type by Railway Bureau of the Government-General of Chosen, Japan. The development and the construction were summarized based on memoirs by engineers of Railway Bureau and technical magazines before 1940, including the newly discovered original drawings. 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. Finally the process of design and construction of Yalu river bridge between China and North Korea and its air raid resistant performance were described.