

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

鹿島建設

正会員 ○小嶋進太郎

京都大学大学院工学研究科

正会員

高橋 良和

1. 背景

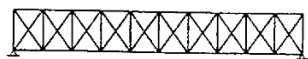
東日本大震災以降、耐震設計において考慮すべき設計地震動に対して構造物に求められる性能を確保するよう照査するだけでなく、その設計段階で想定していなかった事象においても構造物が破滅的な状態に陥らないように配慮することが求められるようになってきている。これを踏まえ、本研究では、想定と異なる事象に対する橋梁構造の研究事例として、第二次世界大戦下で朝鮮半島において実際に架設された複斜材構について、その研究を技術史として整理した。なお、複斜材構建設の事実は現代の橋梁技術者にほとんど知られていない。

2. 耐弾橋梁開発への挑戦

第二次世界大戦末期には科学技術の進歩により、航空機からの爆撃による交通網の遮断が現実的な問題となり、通常の設計荷重とは異なる状況を想定した対策が構造技術者に求められた。大日本帝国統治下の朝鮮総督府の鉄道局においても同様に、新設橋梁に対して国防上高度の耐爆構造とすること、時局に鑑み、極力鋼材を節約することが要求された¹⁾。

当時は耐弾の考慮を合理的に行うための文献も資料もなかったため、朝鮮鉄道局の小田技師は、東京帝国大学の田中豊教授、京都帝国大学の高橋逸夫教授、九州帝国大学の三瀬幸三郎教授に指導を仰いだ²⁾。

小田らは、高橋逸夫教授の「なるべく網目のような形(ラッチース型)が良いだろう」との意見にヒントを得て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が、これにも欠点があると考え、更に研究を重ねた結果、図-1のような一つの格間に斜材が二本ほどあって細い垂直材をもつ形(複斜材構)が良いという結論を得た²⁾。

図-1 単径間複斜材構³⁾

この形はトラス部材の一部を折損または欠如しても、桁の自重程度であれば、全体の形は力の平衡を維持して崩壊せず、したがって墜落し難い。また基礎地盤が良好な場合は、図-2のように橋桁を三径間連続とすれば、安定度はさらに

増し、しかも橋桁の鋼材重量も節約できる¹⁾。

図-2 三径間連続複斜材構³⁾

このようにして三径間連続の複斜材構型の新形式は当時の日本の鉄道橋の構桁(トラス桁)がすべて単径間であったのに比べ、新機軸を出した。この形式で架設された橋梁は鴨緑江橋梁、漢江橋梁、清川江橋梁(上下線)、臨津江橋梁(上下線)、大寧江橋梁の7橋である²⁾。鴨緑江大橋は図-3のように、国際橋梁であることを考慮し、更に吊弦材が加えられた。

三瀬は冗長性に関わる補強工作を何重に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³⁾。例えば、単径間複斜材構は第一種、連続式複斜材構は複斜式であることに加え、連続構造になっているため第二種、鴨緑江大橋はさらに吊弦材が加えられるため第三種にあたる。単に冗長性を高めるのみではなく、異なる機構によって多様性を高めることを意識し、新構造を開発していることが読み取れる。



図-3 鴨緑江大橋

3. 弾性変位解法を用いた構造計算について

当時、トラス桁構造の設計にあたっては、応力の解析は格点がピン結合とした近似的解法で行われるのが普通であり、その結果による誤差も些少であるとされていた。しかしこのような大きな構造で、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必要があった。それで試験的に、三瀬が開発した弾性変位解法によって62m径間8格間複斜材構について精密な解法を実施した結果は、その近似解法との誤差は必ずしも僅少なものではなく、特に斜材についての誤差は大きいことが判明した。そこで小田らは各橋梁の複斜材構について精密な解法として弾性変位解法を採用することと

した¹⁾。三瀬の考案した弾性変位解法は、現代でいう変位法に属し、広く知られていないが有限要素法の原典ともいうべきものである⁴⁾。不静定次数が高い構造を応力法で算出するのは困難であるが、変形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、複斜材式構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減るため、本構造形式の計算に適するものであった。

ただし、当時は手回し式計算機を使用するほかなく、並々ならぬ努力と忍耐を要することであった¹⁾。方程式の数が70ほどの連立一次方程式の1つ目の解を算出するために15日間かかったと報告されている⁵⁾。その計算結果の一部が複斜材構ノ應力⁵⁾として取りまとめられている。

設計図面はほとんど残っておらず、その一般図が朝鮮交通史¹⁾に掲載されている程度であった。しかし、小田の博士論文⁶⁾を調査した結果、販売されていた書籍版には添付されていない青焼きによる一般図(図-4)を発見した。朝鮮交通史には掲載されていない下部構造や支承の情報が記載されているとともに、一部、朝鮮交通史に掲載されている寸法と異なるものがあったが、写真と見比べることにより、青焼き図面の方が正しいことを確認した。

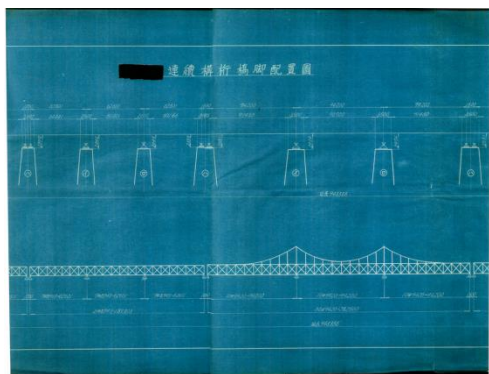


図-4 鴨緑江大橋の青焼き図面

4. 耐弾橋梁の実例 | 鴨緑江大橋

4.1 構造形式

鴨緑江大橋は1911年に架けられた単線橋(以後、旧橋と呼ぶ)の70m上流に並列して新たに吊弦式3径間連続複斜材構として架設された(図-3)。全体の形は吊り橋のような形に見えるが、吊構造以外で死荷重に耐えられるよう設計されており、吊り橋ではなかった。そして吊弦材はロープではなく型鋼であり、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った¹⁾。

4.2 架橋について

架橋に関する工夫として三瀬が考案した初応力調整が行わ

れた。初応力調整とは連続桁であることをいかして、支点の上げ下げによって部材の応力を調整しようとする試みである⁷⁾。元々、連続桁の欠点として万一基礎に沈下があった際に変位応力が生じてしまうということが挙げられていた。しかし、三瀬はこれを逆に利用して、支点位置の調整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、部材の節約に大きく貢献した⁷⁾。

4.3 耐弾対策の効果

新旧2橋は第二次大戦では無傷であったが、1950年(昭和25年)6月に勃発した朝鮮戦争の際、米軍機の空爆を受けた。旧橋は南側橋脚の一部を水面に残すのみとなったが、新橋は耐爆構造であったため崩壊することなく猛爆に耐え、現在も国際連絡橋として活躍している⁸⁾。

朝鮮交通回顧録²⁾の中の小田の記述によると、小田は朝鮮戦争中、米占領軍の東京第五空軍司令部大佐に呼び出され、鴨緑江大橋を落とすにはどこを狙えば桁を落とすことが出来るかと質問された。米軍機が相当の犠牲を払って、大型爆弾多数をもって空から攻撃しても墜落させられなかったからだ²⁾。このような記述からも鴨緑江大橋が爆撃に対して有効であったことがわかる。

5. 結び

本研究では、構造物の損傷を前提とした対策を工学的に議論していた事例として、戦時下における橋梁研究に関する文献を横断して、耐弾橋梁開発に当たっての技術的工夫を整理した。戦時下という限られた資源と知識のなかで、破壊されることを前提とした対策をすること、さらには新しい構造形式を創造しようとする姿勢から学ぶべきことは多い。

参考文献

- 1) 鮮交会：朝鮮交通史, pp.305-382 鮮交会, 1986.
- 2) 小田彌之亮：朝鮮鉄道の橋梁, 朝鮮交通回顧録(工務・港湾編), pp.186-204, 鮮交会, 1973.
- 3) 三瀬幸三郎：橋梁の耐爆構造, 科学朝日, pp.32-39, 1944.
- 4) 成岡昌夫：構造力学要論, pp.283-292, 丸善株式会社, 1974.
- 5) 小田彌之亮：複斜材構ノ應力, 第1巻, 1941.
- 6) 小田彌之亮：複斜材構ノ應力, 東京帝国大学博士論文, 1941.
- 7) 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.
- 8) 間組：間組百年史, pp.526-575, 1989.