

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

高橋 良和¹

¹正会員 工博 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）

1. はじめに

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はなく、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、鉄道構造物の耐震設計¹⁾では陽に導入されており、道路橋示方書でも同様の概念が記述されている²⁾。危機耐性は従来の耐震設計で用いられてきた概念とは異なる点が多いため、既存の耐震設計との整合性を確保しながら危機耐性に基づく耐震設計体系のための試案も検討されている³⁾。

危機耐性に対する配慮は、従来の構造技術者も設計行為の中で考えてきたことには間違いない。しかしながら、設計で陽に求められていることは、コードライターが設定した作用に対し、設計している構造物がコードライターが設定した終局状態に至らないことを照査することが必要十分であり、設計上の終局状態以降の挙動を勘案することは、場合によっては過剰な配慮とさえ見なされる可能性もある。結果、構造技術者は設計上の終局状態以降の挙動への配慮を行う意識が希薄になっているのである。

一方、構造技術者が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⁴⁻¹⁰⁾。これらはまさに危機耐性を高めるための論考であり、作用は異なるものの、耐震設計における

危機耐性を考える上での有用な情報を提供していると考えられる。本論は、戦時下における橋梁研究に対する文献調査を行い、そこから読み取る危機耐性を整理しようとするものである。

2. 戦時下の橋梁に求められる特殊性能と現代耐震設計における危機耐性の類似性

橋梁の使命（性能）は、第一に利便、第二に耐久力、第三に外観であるが、これに加え、戦時下における橋梁の使命は、運輸状態並びにその雲雨状態の変化に即応すること⁸⁾である。平時において、橋梁は交通の要諦であることはもちろんであるが、それが故に、戦時下では橋梁は格好の爆撃目標になる。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、その上で橋梁の墜落、崩壊が生じにくい性能（文献中では耐爆性能、耐弾性能）が求められる^{4,7,9,10)}。これらを現代の技術で検討するとすると、構造全体系に対する非線形解析を適用することになるが、当時の構造解析技術では不可能であり、限られた知識と技術の下、その性能を満足させるための配慮が検討されている。

耐弾性能を向上させる上で、爆弾の命中率が検討されているが、当時は飛行機による大高度からの爆弾投下が中心であり、その橋梁への命中率は極めて小と想定されている⁵⁾。壊滅的に破壊されることを想定されていないため、構造技術者が耐弾性能を高めることに寄与できる（すべき）と考えられ、検討されていた。

以上のような当時の背景、状況は、結果として、現代の耐震設計における危機耐性を考えることと類似する点が多い。それは、不確定性は高いものの、橋梁が想定とは異なる破壊が生じることを前提とし

て、もはや安全性は満足しないものの、早期の再使用を目指し、橋梁の墜落・崩壊を避けようとする配慮を構造技術者が考えることである。

3. 部材が損傷することを前提とした橋梁に対する危機耐性的配慮

本章では、文献4-10)に記載されている橋梁の墜落・崩壊対策のうち、耐震設計にも適用しうる配慮について整理する。

(1) 構造計画における配慮

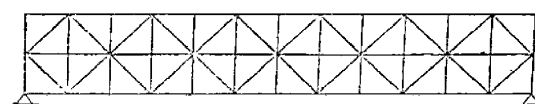
橋梁構造を墜落しにくいように改良するか、あるいは修理の容易性に立脚して対策するか、対策としては真逆であるが、両者とも危機耐性を高める点では同一である。全ての橋梁を墜落にしにくいようにすることは合理的ではなく、鷹部屋⁶⁾は、主要幹線上に架設される長大径間の橋梁には前者の対策を行い、短小径間の橋梁には、構造改良を行うよりも、被害範囲を狭くし、修理復旧の容易性を高める対策が有効であると述べる。さらに、主要幹線上に架設される長大径間の橋梁も、是非にも長大径間によって渡らなければいけないかどうか、中径間や短小径間を多数連ねることで対応できないか検討すべきとしており、構造計画において、まず復旧性向上で対応しやすい構造形式を選定した上で、極限られた数の長大径間橋梁については、応力計算が複雑となったとしても、それに対する計算努力を行い、また十分に時間と資材を惜しむことなく検討すべき⁷⁾と主張している。

(2) 構造設計における配慮

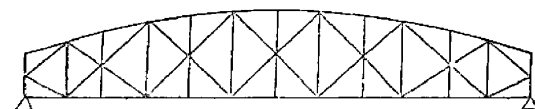
a) 不静定構造の採用

いずれの著者も、不静定構造が橋梁の墜落防止に有利であることを指摘している。特に、連続桁構造のように外的不静定とすることは、有効である。また、地盤沈下の恐れが大きい箇所においても、内的不静定を高めた構造の採用も有効である。

トラス単純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(図-1)と、下弦部材を強大にする方法(図-2)が提案されている⁴⁾。下弦材をプレートガーダーとした構造では、下弦鉸桁のみで死荷重に耐えるように設計すること、ランガー桁とした構造では、第三弦部材を有することにより、いずれかの部材が破損しても他の弦材の存在により落橋を免れることが期待されている。ただし、

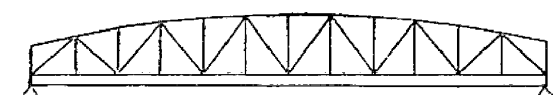


Rhombic truss with parallel chords

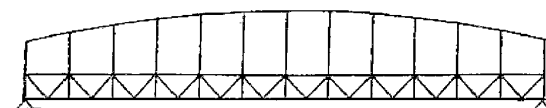


Rhombic truss with curved chord

図-1 内的不静定を高めたトラス構造例⁴⁾



Warren truss stiffened with plate girder



Langer truss

図-2 下弦材を強化したトラス構造例⁴⁾

当時でも冗長部材があるからといって落橋しないであろう、という期待だけでは不十分であり、いずれかの部材が破壊した不完全複式トラスが以前として荷重を支持しうるか検討すべきと述べている⁶⁾ことは重要な指摘である。現在の構造解析技術では、非線形解析を行うことは可能であることから、単なる期待に留まらず、非線形挙動を踏まえた上で落橋しないことを検討することは可能である。

一方、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⁴⁾ことも指摘している。物資が欠乏している戦時下における議論ではあるものの、極めて稀な事象に対して余剰部材を採用することに対する議論や、その他の有効な方法を求めることは、現在にも通用する考え方である。

b) 不安定構造の検証

静定構造の部材が失われたとすると、構造力学的に不安定となり、橋梁は墜落する。しかしながら、例えばトラス構造の交点は構造計算上ヒンジである

が、実際にはガセットプレートを用いた剛接合となっていることから、トラス一部材が切断されたとしても、直ちに落橋に至らない場合が多いことを指摘している^{4) 6)}。さらに、従来、経験によりその大きさ等が決められていたガセットプレートについて、落橋を免れることに有効であることを意識した設計をすることが望ましいと提案している⁴⁾。

c) 桁形式

主桁の形式として、鋼鈑桁橋では主桁数が多い方がよく、ラーメン桁では

(3) 落橋後の復旧性に対する配慮

筆者らは、不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略として、地震作用による機能損失に鈍感な構造（鈍構造）に求められる概念を整理し、その一つとして、落橋すること（機能を失うこと）をも許容した上で、機能回復にかかる時間を短くすることも構造性能の一つと考えることを提案している⁴⁾。つまり、現在の構造設計における復旧性を拡張し、落橋した後に路線を如何に復旧することをも構造性能と考えようとするのである。田中⁵⁾は、破壊された路線において、橋梁をどのように利用して応急復旧するかを議論している。

a) 破壊された橋梁の再利用する場合

橋脚とサンドルを用いて破壊された橋梁の主桁を再利用して道路を再構築することは、従来より多くの経験があることを指摘している。

現在でも、地震・津波被害による桁の再利用は、しばしば採用されている。

b) 他の橋梁の桁を利用する場合

同一橋梁の一部、または近くの橋梁の橋桁を利用し、応急用の橋桁も架設に用いる。特に、新設橋梁では、主径間桁の応急桁となるよう、近接径間長を定めることは有効である。また、高水敷に水が少ない場合は、土工またはサンドルでかさ上げをして対応する。

これは、標準設計が多用された時代に特に有効であったと考えられるが、現在でも、断層地帯を跨ぐ橋梁など、破壊箇所が特定しにくい場合に有効な方策であると考えられる。

c) 不通期間における対応

他のルートを利用するか、舟運の利用も考える。場合によっては、鉄道橋を利用して道路橋を復旧することも考慮すべきであり、特別な理由が無い限り、道路橋と鉄道橋は互いに近接しないようにする。

これは、道路・鉄道を一体として計画・対応することができた時代の対応策であるが、応急復旧に際

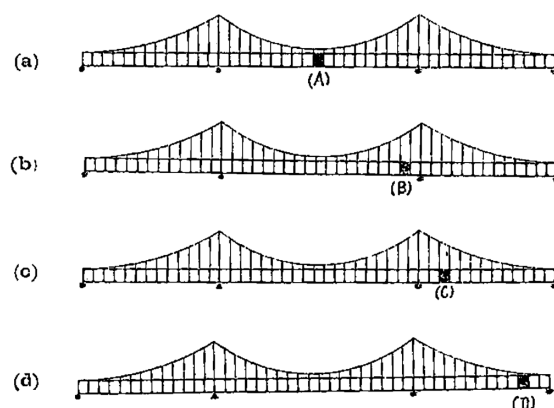


図-3 フィーレンディール連続桁を有する吊構造形式の提案と局部的破壊に対する検討例¹⁰⁾

しては、一路線や一事業者単位の利益だけでない考え方を排除すべきでないことを示唆している。

4. 新構造の提案・検討事例

爆撃により局部的破壊が避けられない状況下において生まれる新しい構造も提案されている。ここでは、鷹部屋¹⁰⁾によるフィーレンディール連続桁を吊構造により補強した形式（図-3）を紹介する。鷹部屋は、長大重要橋梁のため、ラーメン構造桁（フィーレンディール橋）を外的に補強して連続式とした上で、更にこれを吊り橋式に補強し、内的に一層不静定構造とした形式を提案している。

(1) 構造的特徴

フィーレンディール橋はそれ自体が高次不静定であり、平時において、活荷重のある値まではこのラーメン連続桁のみで抵抗し、吊構造は二次的な構造として設計される。その特徴を列挙すると、

- フィーレンディール連続桁は、曲げの伝達が可能なフレーム構造であり、内的不静定である上に外的不静定でもある。そのため、部材の損傷に対する落橋可能性が低い。
- フィーレンディール桁は斜材など微細部材がほとんど含まれず、上部横構も省略されることが多い。そのため、損傷可能性（爆弾による飛来物が当たる可能性）が低い。
- 橋梁の弱点となる支承部について、中間橋脚部の支承は左右主構桁に対し1つでよい。これにより支承面積を大きくすることができる。
- 吊り構造として補強しているため、主構桁が一径間において2ヶ所以上の損傷を受けた場合でも、

吊材・吊弦材によって安定を保持し、危機を脱することができる。

(2) 局部的破壊に対する検討

- 主構部材の破壊に対する安定性について、中央径間中央の破壊に対しては主として側径間部の張り出し梁作用と吊材作用の補助によって、中央径間橋脚部近傍の破壊に対しては主として吊材の作用と連続構造の補助により、また側径間の破壊については主として吊材の作用により、落橋を免れると考えている（図-3）。
- 吊材の破壊に対する安全性について、そもそも本形式はフィーレンディール桁が死荷重ならびに活荷重の一部を負担するよう第一次的に設計されており、吊材は活荷重の一部を負担するようにしているため、吊材の破壊が直ちに落橋につながらない。
- 吊弦材（主ケーブル）の破壊に対する安全性について、吊弦材が空襲によって損傷する可能性は極めて稀であることに加え、本形式はフィーレンディール桁は死荷重に耐えるよう設計しているため、活荷重が存在していない場合には落橋しない。
- 支承部の破壊に対する安定性について、中間橋脚上の支承はただ1つでよく、普通の桁構造に比べて大きな断面積を持つように設計できる。これにより支承部から落下する可能性も小さくできる。
- 以上より、本形式が落橋するためには、1径間中2ヶ所の主構桁の破壊と吊弦材の破壊、計3ヶ所の被害が必要となり、落橋することは極めて稀と考える。

5. 構造技術者の心意気

戦時下における資源の枯渇、また複雑な構造計算が困難な状況のなか、橋梁技術者の泰斗は志が高い。田中⁸⁾は「いたずらに応急策あるいは代表品技術のみに没頭することには特に警戒を要すべきであり、代用品技術はむしろ中年以上の技術者が担当すべき領域であって、新進の技術者は、本格的技術の研究推進に没頭すべきではないか」、鷹部屋⁷⁾は「鋼材の節約を主眼とする溶接補強も重大な意義を有するが、それらのものは必要が要求する消極的側の進歩であって、科学文明が本来要求する方策ではない」といかなる時にも本質を進展させることの重要性を説き、高橋⁴⁾は戦時という非常時の耐爆構造の検討

に際しても「複式構法は各点の数が多く美麗上からも斜材が多くて煩雑な感じを受ける」、「ランガー桁は斜材が短くできるので外観を良くする」など、構造美について言及していることは、耐震性向上のために橋梁構造美を犠牲にしがちである現在の技術者も心に留めておくべき事実である。

6. まとめ

本論は、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より、現在の耐震設計で求められる危機耐性に参考となる事項を整理した。戦時下という限られた資源や知識の中でも、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行為がなされている研究から、現在の技術者が学ぶことは多い。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計基準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012.
- 2) 高橋良和・秋山充良・片岡正次郎・本田利器：国内外の道路橋の設計指針にみられる「危機耐性」の分析, 土木学会論文集A1, Vol.72, No.4, pp. I_821-I_830, 2016.
- 3) 本田利器・秋山充良・片岡正次郎・高橋良和・野津厚・室野剛隆：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系 -試案構築にむけての考察-, 土木学会論文集A1, Vol.72, No.4, pp. I_459-I_472, 2016.
- 4) 高橋逸夫：橋梁の耐爆構造に就て, 道路, Vol.2, No.11, pp.12-14, 1940.
- 5) 田中豊：橋梁の爆撃と其の対策, 道路, Vol.4, No.1, pp.23-26, 1942.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 田中豊：戦争と橋梁, 道路, Vol.5, No.1, pp.20-21, 1943.
- 9) 三瀬幸三郎：一耐弾橋梁の初応力調整に就て, 道路, Vol.5, No.8, pp.11-16, 1943.
- 10) 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.
- 11) 高橋良和・日高拳：不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察, 土木学会論文集A1, Vol.70, No.4, pp. I_535-I_544, 2014.