

## 構造物の設計と理論



\*佐藤弘史

構造物の設計は、構造物に要求される様々な機能や性能を満足するように、その材料や諸元を決定する作業と考えられる。構造物に要求される機能や性能の中で最も重要なもののひとつが安全性である。土木構造物の場合、自重や構造物が荷うべき荷重、および地震や台風などの自然の作用に対して十分安全であることが要求される。設計ではこれらの荷重や自然の作用に対する構造物の挙動を予測し、所要の安全性を確保するように材料や諸元を決定する。構造物の挙動の予測に際し、様々な力学的理論が適用される。

### 1. 吊橋の設計理論の発展

吊橋の設計に大きな影響を与えた理論として、たわみ理論<sup>1)</sup>があげられる。吊橋の設計では、まず自重による桁とケーブルの釣り合いを求め、次に自動車などの活荷重により桁に作用する曲げモーメントを考える。この際、ハンガー張力を介してケーブルの影響が考慮されるが、それまでの弾性理論では活荷重によるケーブル張力の増加のみを考慮していたのに対し、たわみ理論では活荷重による桁およびケーブルのたわみの影響をも考慮している。この結果、桁に作用する曲げモーメントは、弾性理論による場合に比べ著しく小さくなり、理論的には桁は剛性がなくても釣り合いを満たすようになる。このたわみ理論によって解析された最初の本格的な吊橋は、マンハッタン橋(1909年完成)と言われている<sup>1)</sup>。

その後、鉛直方向の荷重の他に、風などの水平方向の荷重に対しても桁の水平方向のたわみによるハンガー張力の水平成分の影響を考慮した、3次元のたわみ理論<sup>1)</sup>が提案された。これによれば、桁の水平たわみ変形に係わる曲げモーメントも小さくなり、必要な剛性も大幅に軽減される。

これらの理論の進展に伴い、ゴールデンゲイト橋(1937年完成)等のように桁の剛性の小さな吊橋が建設されていき、タコマナローズ橋(1940年完成)の建設およびその風による落橋を迎えることとなる。

タコマナローズ橋は、3次元たわみ理論を適用して設計した吊橋であり、剛性の低いプレートガーダーを桁として採用していた。理論が示すように、自動車荷重あるいは静的な風荷重に対しては十分な安全性を有していたが、理論では考慮していなかった風による振動により落橋したと考えられている。この事故を契機として、橋梁に及ぼす風の動的な影響が研究されるようになり、また吊橋のような長大橋の設計に当たっては風に対する安全性を確認することが重要と考えられるようになった。現在の吊橋の設計は、3次元たわみ理論や風の影響に関する研究成果等を活用しつつ、安全性や経済性など様々な機能や性能を満足するように進められている。

### 2. テルフォード、ローブリッジ、エッフェルなどの時代

現在われわれが吊橋のような構造物を設計するときに、理論やそれに基づく解析なしで行うことは考えられないが、理論やその解析の恩恵に浴することのほとんど無かった先人たちは、どのようにしてこれらの構造物を設計したのだろうか。

18世紀の終わりから19世紀にかけて、イギリスのトーマス・テルフォードは数々の鋳鉄製アーチ橋を設計している。さらに、錬鉄製のチェーンを用いて、当時世界最長(支間177m)の吊橋、メナイ橋(1826年完成)を設計している。テルフォードの設計した橋の多くは現存しているが、彼は、微分法や幾何学の知識がなく、数学公式を学ばず、設計ではほとんど計算をしていなかったと言われ

独立行政法人土木研究所構造物研究グループ長\*

ている<sup>2)</sup>。その一方で、チェーンの力学的特性について実験をしたり<sup>3)</sup>、供用後の橋梁の挙動を観測したり<sup>2)</sup>していたそうである。これは、その当時の理論およびそれに基づく数学的解析の中で、実際の設計に適用できる部分が限定的であるため、理論よりむしろ実験あるいは実構造物の観測に基づく経験を重視していたものと考えられる。

トーマス・テल्フォードに続く構造技術者の巨人として、ブルックリン橋 (1883 年完成) で知られるジョン・ローブリッジ、およびエッフェル塔 (1889 年完成) で知られるグスタフ・エッフェルがあげられる。彼らは科学的な教育に信頼を置き、アカデミックな研究の可能性に敏感であったといわれている<sup>2)</sup>。ただし、エッフェルは、アーチが数学的に公式化される前に仕事をしたそうであり、ローブリッジは、ワイアーの利点が冶金学的に明らかにされる前に仕事をしたそうである<sup>2)</sup>。また、ローブリッジは、タコマナローズ橋が落橋する 100 年ほど前の論文において、嵐が吊橋の最大の敵であると主張し、吊橋の風による振動をケーブルによって抑制する方法を示している<sup>3)</sup>。実際、彼は、斜張橋においてみられるようなケーブルシステムをブルックリン橋に適用している。さらに、ローブリッジは吊橋の設計に当たり、過去の事例からどのような様な失敗が起こりうるかを可能な限り予測し、これを回避するような特徴を設計に組み込んだそうである<sup>3)</sup>。以上のように、エッフェルやローブリッジは、理論や科学に信頼をおくものの、全て理論が完成するのを待ってそれを設計に適用するのではなく、理論が完成していない部分については独自の判断に基づいて設計をしたものと考えられる。

他の工学の分野でも、技術の成功がまずあり、その後に理論的理解が生まれたケースがかなりあるといわれている<sup>3)</sup>。たとえば、蒸気機関は熱力学の成立以前に発明され、また飛行機は空気力学や空力弾性学の成立以前に開発されている<sup>3)</sup>。理論や科学の発展が技術の進歩を促す場合も多いと思われるが、以上の例によれば、技術の成功にとって、理論は必要条件になるとは限らないといえる。

### 3. 設計における理論の役割

科学や理論が進展した現在においても、土木構

造物の設計に係わるすべての分野を理論的に取り扱うことは困難と考えられる。これは、土木構造物に要求される性能が多様化していること、中には定量化できないような性能もあること等が原因として考えられる。また、定量化できる性能においても、理論を組み立てる段階、あるいは解を求める段階で二次的要因を無視することが多いため、理論の適用範囲については十分留意する必要がある。

ただし、当然のことながら、理論の適用性が確認されている問題については、理論あるいはこれに基づく解を用いることが有効である。これは、一般に実験などの方法に比べ理論に基づく解法の方が経済的であり、各要因の影響度が把握し易いためである。また、その問題に限れば、経験に基づく判断よりも客観的で精度も高いと考えられる。

したがって、土木構造物の研究者としては、設計など実務に役立つ理論を構築し、実験や実構造物の挙動把握等を通じてその理論の適用性を明らかにし、適用範囲を明示しながら理論を普及させていくことが重要であると考えられる。

また、土木構造物の設計者としては、その構造物に要求される性能や構造物の安全性を脅かす要因を幅広く捉えることがまず大切であり、理論の有効性が確認されている問題については理論およびこれに基づく解を適用し、その他の問題については類似の構造物における事例や必要に応じ実験結果などを参考に、所要の性能を発揮するような対応を設計に組み込んでいくことが重要と考えられる。

### 参考文献

- 1) 例えば、N. J. Gimsing: Cable Supported Bridges, Concept and Design, Second Edition, John Wiley & Sons
- 2) D.P. ビリントン著、伊藤學・杉山和雄監訳、(財) 海洋架橋調査会訳：塔と橋、構造芸術の誕生、鹿島出版会、2001 年 8 月
- 3) ヘンリー・ペトロスキー著、中島秀人・綾野博之訳：橋はなぜ落ちたのか、設計の失敗学、朝日選書 686、2001 年 10 月