

# コンクリート橋の歴史、コンセプトデザイン、構造デザインに関する研究

鹿島建設株式会社 鈴木 圭

## Study on Concrete Bridge History, Conceptual Design and Structural Design

### 1 序論

橋梁デザインを取り巻く社会のニーズは、対象とする環境を理解し、その環境に相応しい構造デザインを提案することが求められており、機能性、経済性のみならずデザインを含めてトータルで付加価値の高い構造が要求されるようになった。このような社会的背景においてエンジニア、またはアーキテクトに求められる能力としては、鋼、コンクリート、木、ケーブル、ガラス等、さまざまな建設材料を自由に組合せ、新しい構造を提案できることである。また、使う人の多様なニーズに応え、環境へのインパクトを考慮し、サステイナブルで低コストな構造が要求されることもある。いずれの場合においても、材料を適切に組合せ、それらが一体となって荷重に抵抗させることが、最良で高品質な構造物を実現することになる。現在、よく使われる構造形式として鋼・コンクリート複合構造物、ケーブルを使った吊り構造形式、強化ガラスを使った高欄、または集成材を使った木構造等がある。いずれも従来コンクリート構造、鋼構造、木構造といったように材料別に構造を理解するだけでは十分対応できるとはいえない状況になっている。むしろ、あらゆる材料を自由に使い、しかも構造物に要求される性能を満足することができるエンジニア、「性能設計」ができるエンジニアが求められている。

橋梁デザインは、特に、設計競技においてデザインの独自性、創造性、これまでに存在するもののコピーではないことが要求される。常に新しい構造を考え、構造力学、材料力学について十分な知識を持つと同時に、これらの歴史を学び、理解することが必要である。なぜなら、デザインや構造の歴史を知ることによって独創的なデザインを実現したいと思う気持ちが強くなること、また自分が考えた構造が本当に独創的であるのか評価する上で、容易に判断できるからである。さらに、歴史的なエンジニアの作品に触れることは、彼らの思想に興味を持つだけでなく、何故、そのようなデザインが可能であったのか、何故その社会の中で実現したのかを理解することに繋がり、デザインを通じてその国の文化を知ることになるからである。以上の社会情勢及び筆者の経験を背景として、本研究はコンクリート橋の歴史を理解することをベースとして、構造デザイン、コンセプトデザインの進め方について示し、様々な材料を自由に組合せて、社会のニーズに応える独創的なデザインを実現するプロセスを示すことが第1の意図であり、構造物に要求される性能を満足することができるエンジニア、「性能設計」ができるエンジニアの育成に資する研究となることである。以下に、各章の要旨及び研究成果をまとめる。

### 2 欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史の変遷<sup>1)</sup>

鉄筋コンクリートが19世紀後半から欧州で発展した経緯を整理し、この技術を初めて発明し特許化したフランスの功績を「0から1」と位置付け、そのアイデアを購入して、実験を通じてその成果を基準化したドイツの功績を「1から10」と位置付けた。欧州初の鉄筋コンクリート指針案は、フランスのエヌビックの発明した工法によって施工された鉄筋コンクリート製の6階建ての建物が、スイスのバーゼルにおいて1901年に崩壊した事故が切掛けとなり、スイス・エンジニア建築家協会が制定した。1903年のスイスの鉄筋コンクリート指針案では、設計荷重、設計計算法、許容応力度、施工者の資格、及び完成した構造物に関する荷重裁荷試験の実施を規定した。特に、施工者に関する規定については、鉄筋コンクリートの基本的な理論および応用を理解し、施工経験を有するものが行わなければならないという規定が設けられたこと、エヌビック式構造物の急激な増加に伴ない、

鉄筋コンクリートの十分な知識を持たない者が施工に携わるという可能性も事故の原因の一つと推察した。指針案制定の目的は、第一に、工学的な根拠に基づいた設計の推進であり、第二に施工資格を持ったエンジニアによる施工管理の実施、第三に荷重裁荷試験によって構造物が完成した後の安全性の検証を義務付けたことであったことを明らかにした。また、19世紀後半、新材料であった鉄筋コンクリートを社会に普及させるために必要なことは、第一に、新しい材料を構造物に適用しようとする個人の意志、第二に、その材料特性を明らかにするために官学民による共同研究体制の確立、第三に、それぞれの研究者達が得られた知見を相互に交換し、公開するメディアの存在が大きかったと考える。特に、ドイツ語圏においては、専門雑誌による情報公開によって、新しい技術の普及が加速した。戦後の日本において、コンクリートアーチ橋の施工法として「0～1」の技術であるアーチの片側張出施工を開発し、その後、アーチ全体を構造的に早期に安定化させるために、中央部にメラン材（鋼製部材）を先に架設し、それをコンクリートで巻きたてる工法、いわゆるピロン・メラン式架設工法が開発された背景には、阿部美樹志がアメリカにおいてメラン式工法の英訳本に触れ、自ら外濠アーチの設計を実施したことが起源となったことを明らかにした。

### 3 ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想

鉄筋コンクリート橋の様々な形式を生み出したスイスの橋梁エンジニアであるロベール・マイヤール（1872～1940）の業績を分析し、美しい造形フォルムの背景には、当時の鉄筋コンクリート規準を超える  $30\sim 45\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートを使っていたことを明らかにした。コストを安くするための対策として、アーチの分割施工を行い、アーチリブのコンクリートの重量を軽量化することによって、支保工コストを低減したこと、実橋を使った荷重裁荷試験を実施して、マイヤールが設計したコンクリート橋の性能を常に確認していたことを明らかにした。本研究はマイヤールのこれまでの研究の多くが視覚的造形美、構造美に関する評価であったのに対して、構造力学的、材料工学的評価を実施した点で重要な意味がある。また、本研究によって、マイヤールのエンジニアとしての姿勢が明らかになったことは、今後のマイヤールの研究のみならず、新しい構造デザインを考える上で、有効である。

### 4 ドイツアウトバーンの初期設計思想と橋梁景観論

ドイツ、アウトバーンのエンジニア、建築家、造園家による協働体制と、その機能について取りまとめた。エンジニアと建築家が対等な対場で互いの意見を交換し、業務の効率化を図ると同時に、若いエンジニアや建築家の育成が図られたことを明らかにした。また、橋梁景観論が体系化され、橋梁デザインを表現する言葉、形容詞が使われるようになった意義を明らかにした。19世紀後半のドイツ語圏における鋼橋の入り口に、中世の石造りの門や塔が作られた背景を考察し、1920年代から国際会議の席上で景観論が議論されるきっかけとなった背景を明らかにした。1930年代のドイツ・アウトバーンの橋梁デザインにおける建築家の役割として、橋と風景との調和を目指して、橋梁全体フォルムの計画から、ディテールの施工に至るまで造形的な責任を負うことであった。一方、技術者は、橋の構造、安全性、経済性の観点から適用可能な橋の構造を提案し、建築家は、都市景観の保全、建築的さらには都市工学的な問題を解決することが役割であることを明らかにした。

### 5 橋梁に対する一般生活者の感じ方と構造原理

橋梁デザインの基本となる2つの事項について整理した。第一は、橋梁デザインにおいて一般生活者が橋梁形式に対してどのように感じているのか、専門家の感じ方と異なるのかをビジュアルパネルを使ったアンケート調査を行い、その結果についてSD法を使って解析することにより、両者には大きな違いはないことを確認した。第二に、吊り床板橋、吊り橋、斜張橋、アーチ橋、充腹アーチ橋、II型ラーメン橋、桁橋を対象として、水平軸

に動的⇔静的，縦軸に女性的⇔男性的という 2 次元のテイストスケールにそれぞれの構造形式に関する印象を 1 対となる形容詞，例えば，洗練された⇔野性的な，近代的な⇔伝統的な，軽快な⇔重厚等で評価し，そのクロス集計分析し，その結果をテイストスケールにまとめた．第三に，それぞれの橋梁タイプ毎に，力動感，親近感，堅牢感，用途感，洗練感に代表されるレーダーチャートに専門家と一般生活者の感じ方をまとめて比較した．第四に，それぞれの構造形式とマッチングする風景を示した．これらの結果，専門家と一般生活者のそれぞれの橋梁形式に対する感じ方には大きな差異はないことを確認した．

橋梁デザインにおいてはエンジニアリングが不可欠であり，構造デザインは，橋梁の構造形式の選定から詳細デザインに至るまで常に考慮しなければならない要素である．その基本となる構造原理を楽しく理解する方法について，筆者の考案した模型を使って体感し，簡単な計算で力の大きさを知る方法を提案した．

## 6 コンセプチュアルデザイン、構造デザインと材料・施工法

橋梁デザインにおいて，重要な点は，鉄、コンクリート，ケーブル等の様々な材料特性と，どのようにそれを施工するかを理解していることが前提である．そのような能力が自分にはない場合には，他の専門家との協働作業によってそれを補うことができる．しかし，実際のデザインの状況では，コンセプチュアルデザインが初めにあって，構造デザインが次ぎにくるというような一方向的な流れでは決してない．代官山人道橋のデザインのように，最初に接続条件が決められ，構造デザインが限定されるという状況で，コンセプチュアルデザインを考える場合や，AKIBA BRIDGEのように新しい材料が開発されて，構造デザインからコンセプチュアルデザインを考える場合もあり，池田へそっ湖大橋のデザインのように，架設工法に関するアイデアから連続アーチの構造デザインが生まれる場合もある．従って，コンセプチュアルデザイン，構造デザイン，材料・施工法は相互補完的な関係にあるといえる．最後に，すべての材料に精通したエンジニアの育成のために，今後の橋梁デザインが目指すべき方向をまとめた．具体には，高強度材料，超軽量コンクリート，ケーブル材料等，新しい材料を使った構造デザインを目指すことによって，新しい構造体が生まれる可能性が高いことを示した．

## 7 代官山人道橋のデザイン

橋梁デザインを客観的に評価するためには，完成した形のみを評価するだけでは不十分である．何故なら，そのデザインを実現するに当たって，様々な制約条件があり，それをどのように克服したかを記述することが重要であり，それが今後の新しいデザインを実現する場合に活かされると考える．本研究の意義は，橋梁デザインを評価するに当たり，橋梁デザインのプロセスを 3つの段階に分けて，コンセプトリサーチ，コンセプトデザイン，デザインディベロップメントの段階で何を問題として設定し，どのように方針を立て，それをどのように解決したかを記述する指標を提示したことである．コンセプチュアルデザインは，1号橋は「透明感のある橋」，2号橋は「マッシブであるが，緊張感のある橋」で，構造デザインコンセプトは，1号橋は「非対称を活かした橋」，2号橋は「緊張感を感じさせながら，構造的に安定した橋」とした．1号橋では，狭隘な街路景観における橋の見え方が課題であったため，視覚的にコンパクトであり，揺れにくい構造フォルムを考案した(図1，図2)．2号橋は橋の接続部に荷重を掛けない構造として，ワイン立てをヒントとして構造フォルムを考案した(図3，図4)．



図1 1号橋



図2 狭隘な街路景観



図3 ワイン立てからのヒント



図4 2号橋

## 8 池田へそっ湖大橋のデザイン

長大アーチ橋のデザイン事例として池田へそっ湖大橋（図5）を取り上げ、橋梁を取り巻く風景の分析方法を整理した。また、アーチ橋のデザイン手法について、歴史的なアーチの施工法から「0から1」の技術であるアーチの両側同時張出施工の開発やメラン式工法の併用により施工の迅速化を進めたことを整理した。桁、橋脚、アーチリブ、鉛直壁等、様々な部材が存在する中で、サイコベクトルを使って、構造部材の重要度を階層化し、主桁、橋脚、アーチ、鉛直壁の順に、それぞれの面を1段階奥に配置する方法を整理することによって、アーチを美しく見せる方法を提示した。

## 9 AKIBA BRIDGE のデザイン

これまでにない独創的な歩道橋をデザインした事例がアキバブリッジである（図6）。マイヤールが挑戦したように、鉄筋コンクリートの設計規準強度を超える超高強度コンクリートを主桁に使い、歩道橋デザインの可能性を追求した事例である。特に、ITの拠点となる都市景観に相応しいデザインが求められたため、主桁にR=170mの曲線を採用し、この曲線を動的に美しく見せるための方法として、縦断勾配と平面線形R=170mを組合せ、さらに主桁のエッジ部分を強調し、高欄の存在を脇役とするコンセプトを考案した。高欄デザインは、従来とは異なる性能設計を導入し、橋上から人が転落しないこと、群集が高欄に寄りかかっても、高欄を構成する強化ガラスが破壊しないことを前提として、上段手摺と照明を兼用し、補助手摺をその下に1本として、合計2本の手摺を実現し、すっきりとした高欄デザインを実現した（図7）。

## 10 浮庭橋のデザイン

大阪、道頓堀川に架ける歩道橋のデザインコンペの事例を取り上げ、デザインコンペの条件を満足させながら、最終的な構造を提案するプロセスを整理した。また、河川軸を45度で渡ることはこれまで河川法の観点からはあり得なかったことであるが、橋を使う人々をもてなすアメニティー空間の整備を考えることによって、河川法の特例として、物販等ができるようになった初めての事例であることを示した（図8）。

## 11 結論

以上の研究成果が、様々な材料を自由に組合せて、社会のニーズに応える独創的な橋梁デザインを実現し、構造物に要求される性能を満足することができるエンジニア、「性能設計」ができるエンジニアの育成に資するとともに、橋梁デザインを評価する場合、3つのデザインプロセスを追って作品が的確に評価されれば深甚である。



図5 池田へそっ湖大橋 図6 AKIBA BRIDGE 図7 高欄の性能設計 図8 浮庭橋

### 参考文献

- 1) 鈴木 圭, 山下真樹, 欧州における鉄筋コンクリート技術の歴史的変遷, pp1~pp11, 土木史研究論文集, Vol. 25. 2006年
- 2) K. SUZUKI, H. ANDO, H. MOCHIZUKI, AESTHETIC DESIGN OF LONG SPAN ARCH BRIDGE, pp1~6, The first fib fib Congress 2002 Osaka, Japan.