

退官記念講演概要

橋の進化のあらまし

福田 武雄

橋の起原

橋の起原は、はっきりとはわからない。しかし、人類の生存に水が必要であることはいうまでもなく、原始時代においては、人類は自然の水を求めて生存し、水辺に生活をしてきたであろうから、必要に応じ、水流を横切るためになんらかの方法を講じたことは疑いなく、そのためになんらかの形の橋を架けたものと想像される。

現在でも、登山などのために山の奥に入っていくと、風水害等による倒木が谷川の上に自然の丸木橋の形になっているのに、よく出くわす。原始時代の人類も、おそらくこの種の自然の丸木橋を利用したにちがいない、それからヒントを得て人工的に木を切り倒して丸木橋を作り、つぎに、1本の丸木橋では渡りにくく危険であるので、木を2本あるいはそれ以上ならべて架け、さらに進んではその上に横に歩み板などをのせ、また手すりなどを付けるという風に進歩して、今日の桁橋になったものと思われる。

じっさい「橋」は「喬（高）い木」の意味の字で、これから「はし」になったと言われている。「橋梁」の「梁」は、現在ではだいたいにおいて「桁」と同意義の水平材の意に使われているが、元来は「水上の橋」の意味である。日本では、ものの総称として同類の意味の字を二つならべて使用する。たとえば、河川・港湾・湖沼・山岳・道路・船舶・家屋などである。これと同様に「橋梁」は主として橋の総称に使われる。「梁」と「桁」とを同意字とすれば「橋梁」と「橋桁」は同意語になるが、前述のように、前者は橋の総称に使われ、「橋桁」は橋の主要構造部分の意味として使われる。これは万葉集第1巻寄物陳志に

小壘田之、坂田乃橋之、壊者、從桁將去、莫恋吾妹

とあるように、「桁」が古くから橋の主桁の意に使われていたことによるものである。

橋の形式の一つとして吊橋がある。これも、原始時代岸から岸に自然にわたった蔦や藤のつるを伝わって、猿猴の類が川をわたることから発達したものとされている。

橋のも一つの形式のアーチは、漢字では「拱」の字が使われ、拱は両掌を合わせる合掌の意味がある。現在では鋼またはコンクリートのアーチが使われるが、その起

原はエジプト、イラン等の近東諸国において太古から発達した石工アーチで、橋に活用される以前に、建造物の入口や窓などに有史以前から使われていたものである。

このアーチも、もとは、自然の落石がアーチ形に相持ちに重なり合って崩れないことから暗示を得て発達したものと想像される。

以上の桁橋、吊橋およびアーチ橋の三つは、それが種々進化したとはいえ、現在においても、なお、橋の基本的構造形式をなすものである。

橋の上記基本形式のほかに、あるいは桁橋の1種とも考えられるが、^は芻木橋または^{はね}芻木橋と呼ばれるものがある。これは現在の片持梁の原理によるもので、おそらく山腹や絶壁に根を定着して横に張り出した樹木の耐荷力^{はね}にヒントを得て発達したものと思われる。紀元前1,100年も昔の古代ギリシャで発達した石造の corbeled arch（持送りアーチ）は、力学的にはアーチではなく、純然たる片持梁構造である。芻木橋または芻木橋は古代インド、中国などでも架けられ、この形式の橋でわが国で有名なのは甲斐の猿橋と越中黒部川の愛本橋である。これら芻木橋は主桁の一端を地中に埋め込んで固定し、突出する主桁の端の間にさらに水平の桁を架けわたす構造である。愛本橋は明治年間に鉄橋に改められ現存していないのは遺憾である。

古代の歴史あるいはエジプトや近東地域における遺跡の調査等から見て、これらの地域では紀元前2,000年または3,000年の昔に、Euphrates や Tigris 河上に橋が架けられたことは明らかであるが、信用すべき確実な記録が残っているのは、紀元前780年に Babylon において Euphrates 河上に架けられた橋が最初である。本橋は石造橋脚上の木桁橋で10.6mの幅員である。

わが国の正史で「橋」を見出すのは、日本書紀神代卷下に

「又為汝往来遊海之具。高橋浮橋及矢鳥船亦將供造。又於天安河亦造打橋。」

が最初であり、また仁徳天皇14年（西暦326年）の条に

「冬十一月、^{いかいづつ}猪甘津に橋を^{わた}為す、即ち此処を号けて^{おぼせ}小橋と曰う。」

とあるが、これは、日本の正史において橋名が明記された最初のものである。猪甘津は、現在の大阪市東成区猪

飼野町にあり、百済川（現在の平野川）に架けられたものである。猪は豚のことであり、当時、百済から日本朝廷に豚を買物として献上し、この飼育のために来朝した百済人が住んでいた所が猪甘津であり、おそらく、この橋も百済人によって架けられたものと考えられている。

ついで推古天皇の時代（610年代）には百済から工匠が来朝して南庭に呉橋（唐橋）を作るとともに、三河国矢矧橋、遠江の国浜名橋を架けたという記録がある。これらがわが国の架橋技術の進展に寄与したであろうことは疑うべくもない。

現在わが国では、特別なものを除き、道路橋はすべて政府・地方公共団体または公団が建設・維持・管理に当たっている。これと同様に、西暦701年の大宝律令によると、およそ天下の道橋は民部省が主管し、そして京都では左右京職、地方においては国司が司り、神都では官司が掌る。修営には京都では木工寮が担当し、諸国では毎年9、10両月の農閑期に修理させ、橋を架けるときには、朝廷内に造橋所を設け、臨時に造橋使を出し、工費は地方負担または没官者の資財によることにしていた。

大宝律令のこの制度により、その当時は橋の造営および維持はかなりよく行なわれたようであるが、年がたつとともにこれが空文になって橋は荒廢にまかされ、さらに戦国時代になると戦火のために橋が焼かれたり、あるいは戦略上故意に破壊せられたりして、一般人民が多量の迷わくを感じるようになった。このときに立ち上がったのは仏僧で、彼らは一般人民のために橋を架けることを計画し、括鉢奉賛あるいは勞力奉仕によって資金を集め、これによって橋を寄進し、あるいは修理した。いわゆる「勸進橋」がこれであって、当時の有名な橋はみなこれである。たとえば宇治橋は僧道登が創架し、京都の五条橋は清水寺と建仁寺の僧が架けたものである。

これと同様なことが欧州においてもあった。それは12世紀における橋梁同胞団（Fratres Pontes）である。このグループはベネディクト教団の僧侶の団体であり、ローマ時代およびその後架けられた多くの橋が戦乱のために荒廢しているのを嘆き、主として巡礼者のために各地に橋を架けたものである。この橋梁僧団は、寄付金のほかに渡橋料金を徴集して経営に当たったが、後にこれが権利化し、最初の社会奉仕の精神から逸脱して、遂には暴力団のようになってしまったといわれている。

材料と理論

原始時代の人類が架橋に利用し得た材料は主として木材と石材との2種であって、この二つの材料は、それから永い間、橋の主要材料として使われてきた。しかしながら、木材や石材では桁橋として使用すればスパンに限度があり、石造アーチにしても、主として経験によって築造せられていた関係上、あまり大きなものは造れず、

植物や動物の繊維による吊橋では長支間はもちろん渡れず、その耐荷力もきわめて小であった。このような状況の下の18世紀後半にいたって鉄材が橋に使われだし、トラス形式も案出され、さらに比較的近年にコンクリートや鉄筋コンクリートが出現し、これらが現在では橋の主要材料となっているのであるが、こうなるまでには、これら新材料の出現と同時に、橋の理論あるいは一般構造力学の発達が大きな貢献をしていることを忘れることはできない。新材料の出現と構造理論の進展とが相互に刺戟となり、両者あいまって今日の状態になったものと言える。

古代の橋はすべて人類の経験と判断のみによって築造せられたものであって、17世紀時代の橋もそれより2,000年昔の橋にくらべて大して進歩していなかったと言っても過言ではない。しかるに17世紀後半から18世紀にかけて人類は自然現象の法則の研究を開始し、近代科学の芽が発生した、すなわち物理学および化学の基本法則が発見され、工学の基礎が進展してきた。たとえば、まちがってはいいたが1638年にGalileoは初めて梁の中の応力分布の法則を発表し、1678年にはHookeが有名な応力とヒズミとの比例法則を発表した。

このとき橋の構造理論の発展に最初にしてかつ最大の誘因となったものは1716年にフランス政府が創設した橋梁道路省（Département des Ponts et Chaussées）である。この省の中に、1747年に設計学校が設置され、これが1760年に橋梁道路大学（École des Ponts et Chaussées）となり、その当時の約1世紀の間は、橋梁理論の進展にはフランスが先導をつとめていた。すなわち、Coulombは1773年に梁の中立軸が断面の重心にあることを発表し、Navierは1824年に梁のタワミの理論を確立した。かくしてNavierの弟子であるSaint-Venantは1857年に梁の強度の完全な理論を発表した。

これらフランスにおける構造力学の研究に刺激され、イギリスついでドイツにおいても、つぎつぎと新しい問題について研究が進められた。Eulerが有名な長柱理論を発表したのは1744年であり、Eulerの理論はLagrangeおよびNavier等によって拡張された。その後ドイツのFöppl父子、Otto Mohr、Müller-Breslau等によって構造理論および構造力学の基盤が築かれ、これに基づいてSchaper、Bleich等によつて橋梁設計理論の基礎が確立された。

これら橋梁力学の発展にともない、これに拍車をかけ、あるいはこれに基づいて合理的な設計をするために新しい材料の開発が行なわれた。それまでの橋は、ほとんどすべて天然資材である木材または石材によって作られていた。とくに、近東地方、エジプト等において紀元前より発達していた石工アーチの技術は、17世紀にいたるまでヨーロッパにおける橋の大部分に使われていた。この

ときにおいて、新しい材料として登場したのは鉄材である。鑄鉄の製造は 15 世紀に始まったのであるが、これが初めて橋に使用されたのは、1776 年英国の Severn 河上かけられた Coalbrookdale 橋が最初である。これに続く約 100 年間、欧州各地で多くの鑄鉄橋が架けられたが、その多くはアーチ形式であった。その理由は、鑄鉄が圧縮には強いが引張りには弱いからであって、またその脆性により損壊したものもあった。とくに鉄道橋において損壊が多かった。

鑄鉄を使用した最初の鉄道橋は 1823 年英国の Stockton and Darlington 鉄道に使われたものであるが、1847 年にいたり英国の有名な Britannia 橋を設計するに当たり、Robert Stephenson は鑄鉄と錬鉄の強度実験を広汎に行ない、錬鉄の方がはるかにすぐれていることを明らかにし、Britannia 橋を鑄鉄のアーチ橋とするかわりに、錬鉄の箱桁橋として設計した。この後しばらくは橋の主要部には鑄鉄のかわりに錬鉄が使用されるようになった。わが国における最初の鉄橋は明治 2 年 (1869 年) 横浜にかけられた「かねの橋」であるが、これは錬鉄橋である。現在はもうほとんど存在していないが、明治初期にわが国に架けられた鉄橋は大部分は錬鉄橋である。

橋に鋼材が使用されたのは、1828 年、ウィーンの径間 90m の吊橋のアイバーのチェンに使われたのが最初である。この鋼材はパッドル錬鋼であった。しかし、1855 年に Bessemer 転炉による鋼の生産、引きつづいて Siemens-Martin 平炉法が発明されるまでは橋における鋼の使用は中絶し、1880 年までの間は錬鉄が橋の主要材料としての地位を保っていた。1890 年以後は、錬鉄に変わり平炉鋼が広く使われるようになり、その後現在にいたるまでこれが橋の主要材料となったのである。この間 Bessemer 鋼は橋にはほとんど使用されなかったが、ただ、有名な英国の Forth 橋がこれによって作られたことは注目すべきことである。

現在、橋梁用鋼材として世界的に一般に使われているものは、わが国の SS 41 または SM 41 級の炭素鋼であるが、最近では、これよりも強度が大であるいわゆる高張力鋼が適材適所に多く使われるようになり、わが国においては SS 50 または SM 50 はすでに一般化し、とくに橋梁用高張力鋼といえば破壊強度が 60 ないし 80 kg/mm² 以上の鋼を意味するぐらになった。

以上のような鉄鋼材の発達にともなって変化を示したのはその結合方法である。すなわち鑄鉄または錬鉄あるいは錬鋼の時代には、結合は主としてボルト結合であったが、鋼材の使用が一般化するとともにボルトにかわってリベット結合が使われるようになった。しかしながら構造力学の進展にともない、トラスの二次応力の性質が明らかになり、ボルトまたはリベット結合の剛結構造では二次応力が大になることが判明したので、ヒンジであ

るという計算上の仮定になるべく近づけ、二次応力をできるだけ小にするために、19 世紀の末期から本世紀の初期においては、ピン結合のトラスがとくに米国において広く用いられた。しかしその結果は、ピン結合トラスはタワミと振動が大であり、しかも年月の経過とともにピンそれ自身およびピン穴が摩耗してそのためかなりの二次応力が生ずることがわかり、またその頃圧縮空気使用のリベット締めが発明されたことにもより、リベット結合が基本工法となった。1930 年頃までは、世界各国とも、鋼橋と言えばほとんどすべてリベット結合であったが、その頃から漸く溶接が台頭し、溶接技術の進歩、溶接性の良好な鋼材の生産とともに、溶接によってより合理的であり、かつ、より自由な設計が可能であり、したがって、鋼橋をより経済的に架設し得ることが判明したので、今日においては、鋼橋の接合には、とくに工場接合においては、溶接が常識となった。現場接合においては、設備器具類の不備、架設条件、環境条件等の種々の制約のために工場溶接と同様の完全さは期待しにくいので、今なおリベット結合が普通に用いられている。

この間において、今から約 10 年ほど前から、リベットのかわりに高張力ボルトを使用することが米国において研究せられた。高張力ボルト結合は、リベット結合のようにリベットのセン断または支圧によって力を伝達するものとは異なり、高張力ボルトの締め付けによる被接合部材間の摩擦により力を伝達するものであって、リベット結合や溶接のように、点または線に力が集中して作用することなく、応力の集中がなく、騒音を発せず、強度試験および実橋試験の結果ボルトのゆるみにも心配がなく、所期どおりの効果を発揮することが判明したので、今日においては、外国とくに米国においては、現場結合には、ほとんどすべて高張力ボルトが用いられている。わが国においても最近では高張力ボルトが若干用いられてきたが、わが国の現状では、リベット結合にくらべて高張力ボルト結合のほうが若干工費が大になるので、リベット結合にとつてかわるまでには至っていない。

天然セメントはかなり古い時代から橋、とくに石造橋の築造に利用されていたが、19 世紀の中頃に人工のボルトランドセメントが生産されるに至り、アーチ橋および橋の下部構造に無筋コンクリートとして広く利用せられるようになった。この後に出現した鉄筋コンクリートはコンクリート中に鉄筋を埋め込んで引張にたいする強度を与えるためのものであるが、この考え方はけっして新しいものではない。モルタルまたはコンクリート中に金属棒または木材や竹材を埋め込んで補強する工法は、すでにローマ人が墓所の屋根の築造に利用し、また万里の長城にも活用せられ、1840 頃パリでは焼石膏に鉄筋を入れて床を造る試みがなされた。ボルトランドセメントを使用する鉄筋コンクリートの構想は 1850 年に仏人の

M. Lambot によって提案せられ、彼はこれによって一隻の小舟を作ったといわれている。1854年に英国の左官師 Wilkinson, 1855年には仏人の F. Coignet がそれぞれ鉄筋コンクリートによる床の特許を得、1861年に Coignet は鉄筋コンクリートによって桁、アーチおよび管を造ることを提案し、これと同時にパリーの園芸師 Monier はコンクリートを鉄線で補強して鉢やタンクを造りはじめた。そして Coignet と Monier の両者はその製作品を 1867 年のパリーの万国博覧会に出品し、その年に Monier は彼の有名な鉄筋コンクリートの特許を得たのである。Monier の特許はその後しばらく実用には供されなかったが、1880 年頃に至ってはじめて建築物の床等に用いられるようになり、その後、種々の改良および鉄筋コンクリート理論の発達とともに、今日では、鋼材とともに永久橋の主要材料の一つとなったのである。

しかるに約 10 年ほど前から、コンクリート中に鉄筋を単に配置するというだけでなく、これに初張力を与えてコンクリート中に初圧力を生ぜしめ、それによってコンクリートの引張りキレを防止するとともに、曲げに対する抵抗を増大するといういわゆるプレストレストコンクリートが橋梁に用いられるようになり、現在のわが国においては、純然たる鉄筋コンクリート橋はほとんど架設せられず、そのかわりにプレストレストコンクリート橋が普遍化し、鋼橋とその数を競うほどになっている。

構造形式の進化

上記の橋梁理論および材料の進化ともなっており、橋の型式・細部設計の面においてもいちじるしい発展があった。橋の主要形式は現在でもなお桁橋（片持桁をふくむ）、アーチ橋、吊橋の 3 種であるが、桁橋については単純桁橋のほか連続桁橋、連続桁橋と同じ効果を有しながら静定構造であるゲルバー桁橋、あるいは桁と橋台または橋脚を剛結したラーメン橋等があり、吊橋についても昔のような無補剛吊橋にかわって補剛桁または補剛トラスを有する長大径間の吊橋が出現し、またケーブル端を地中に固定せず補剛桁に定着する自定式吊橋等の形式が生まれた。アーチ橋については、古代からの形式のようにアーチの上に通路を設ける上路アーチ橋のほか、鋼材の出現により、アーチが上方にあってこれから吊材によって橋床を吊るという下路アーチ、両端がヒンジのアーチ、あるいはアーチの水平反力を地盤に伝えずにアーチの両端を特別の吊材で連結して水平反力をバランス

させるタイドアーチ等の形式が出現した。さらにアーチは単に圧縮力だけに働き曲げモーメントは補剛桁または補剛トラスで受け持つというランガー橋、あるいはアーチおよび補剛桁または補剛トラスの両者で曲げモーメントを分担するというローゼ橋、アーチの両方に片持部を出したバランストアーチなど各種の型式が考案せられ、すべて適材適所に用いられている。

これら橋梁形式の発展とともに、ここ 10 年間とくに目立つことは、橋梁構造全体としての設計方針である。従来は、橋梁を構成する各部は、すべて、それぞれ単独にはたらくものとして設計計算をしてきた。たとえば 2 本以上の主桁が並列する上路桁橋で、かりにある一つの主桁の上に荷重が作用するときには、その桁だけがはたらく他の主桁は全然関与しないというような考え方であった。このような考え方が実際に合致しないことは明白であり、他の主桁の協力あるいは橋梁構造全体としての荷重の分担を考慮するのが適切であることを知りながらも、計算が面倒であることと、そうしない方がより安全側にあるというまちがった考え方から、構造各部を別々に計算してきたのである。しかるにこの方面における構造理論の発展とともに、ちょうど時期よく発達してきた電子計算機の出現もあって、現在では橋梁を構成する各部の協力作用を考慮して設計するのが常識となってきた。その例は格子桁である。また各部の協力作用を積極的に推進したのがいわゆる合成桁である。従来、鉄筋コンクリート床版とこれを支持する鋼桁とは、なんらの連絡がなくそれぞれ単独にはたらくものと仮定せられてきたが、合成桁においては、この両者を適切なシャーコンネクターで接合して床版と鋼桁とが一体の梁となって曲げに抵抗するように設計し架設するものである。この合成桁工法はトラスにも応用でき、すでに、上路トラスの上弦材として鉄筋コンクリート床版を活用する合成トラス橋も実際に架設されている。

以上は橋の進展の概観である。かえりみると、橋は、数千年の昔から、根本形式においてなんら新しいものはなく、原子力や宇宙開発のような画期的新発展はないが、それでも人類文化の進展とともに着実に進化してきた。現在、欧州においてはドーヴァー海峡に架橋計画があり、わが国でも、本洲と四国を結ぶ橋が真剣に考究されている。筆者は、必ずや近き将来において、これらの計画が夢物語ではなくなる時機が到来するであろうと期待して、この稿を終る。

(1963 年 3 月 6 日受理)