



構造工学進展の歩み

福田 武雄*

第 18 回オリンピックも大成功のもとに無事に幕を閉じた。これに関連して造られた各種の施設——巨大なスタジアムをはじめ、各種の競技場建設のみならず、今回のオリンピックを目標として建設された首都高速道路（もっとも、60 km/h の速度制限では、はたして高速道路といえるかどうかは疑問であるが）、国鉄東海道新幹線、羽田～浜松町間のモノレールなどの見事なできばえを見ると、構造工学の最近の進歩のすばらしさに目をみはるものである。今回のオリンピックにおいて 100 m に 9.9 秒というような新記録がたくさんでたと同様に、施設の面においても、巨大なつり屋根構造の競技場、時速 200 km の国鉄新幹線、首都高速道路の多数の曲線桁や、地下インターチェンジなどは、それぞれの分野における世界的な新記録といえるであろう。しかし、これらの新記録は、われわれの世代だけの力で達成されたものでは決してなく、競技場の新記録が、走る・跳ぶ・泳ぐなどの人類の生存に必要な基本的動作の能力向上にたいする人類創生以来の努力の結果として出現したものであるのと同様に、構造工学上の輝かしい成果も、われわれ祖先の永年の間の経験・努力・知識の蓄積の結果であって、ここに、土木学会創立 50 周年記念の講演会に際し、その進展のあとをふり返ってみたい。

土木工学のうち構造物に関する分野が、科学の一つとして、すなわち構造工学として進展するに至ったのは、今から約 200 年前の比較的近代のことであるが、それ以前においても、人類はその生命を保持するために、でき得る限りの手段を講じたであろうことはいうまでもない。まだ農耕や、牧畜によって食糧を生産することを知らず、単に野生の動植物の採集狩猟によって生命を維持していた原始時代のわれわれの祖先も、その生存のためになんらかの方法で生息の場所をつくり、雨露をしのぐためには壁をつくり屋根を掛け、水を引き、路を造るなどのことをしたのである。およそ土木工学が対象とする構造物が、すべて人間の生存と、生活のためのものであるゆえに、その進展の跡をたどって行くと、人類発生の

太古までさかのぼらねばならない。しかしながら、現在われわれが確実な史実として知っているのは、今から 2000 年ぐらい前までであって、それ以前のことは、近東やエジプト、あるいは中南米などにおける遺跡の発掘調査や、今なおアフリカや南アメリカの奥地に生息する原始的人種の調査研究によって有史以前、さらに太古における状況を推察するにすぎない。

いま、特に橋について考えると、つぎのようにいえるのではないかと思う。すなわち、人類の生存には水が必要であることはいうまでもなく、したがって、人類は水を求めて生存し、水辺に生活していたであろうから、水流を横切るためになんらかの方法を講じ、進んではなんらかの橋をつくったものと想像される。

現在でも、踏査や山登りのために山の奥には行って行くと、風水害などによる倒木が谷川の上に天然の丸木橋となっているのに、よく出くわす。原始時代の人類も、おそらくこの種の天然の丸木橋を利用したにちがいない。これから人工的に木を切り倒して丸木橋を架けることに思い付き、つぎに 1 本の木だけでは渡りにくくて危険であるので、2 本あるいはそれ以上の木をならべてわたし、さらに進んでは、その上に木の枝などを敷いて歩きやすくし、また、手すりを付けるというふうに進化して、ついに今日の桁橋になったものと考えられる。

南アフリカの奥地に棲息する猿は、川を横切るために、ある 1 匹がその尾を木の枝か根に巻き付けてぶらさがり、前肢でつぎの猿の後肢をつかんで前に出し、この第 2 番目の猿が第 3 番目の猿の後肢をつかんで前にだすというふうにして猿体の鎖をつくり、これを振り動かして先頭の猿を対岸の木に到達させて、文字どおりの猿橋をつくって種属の移動を行なうといわれている。原始人類も、おそらく、この種の人体のチェーンつり橋によって水流を横切ったのではないかと想像される。また、岸から岸へ自然にわたった蔦や藤のつるを伝わって渡る猿猴の類に見えない、人類もこれによって川を渡り、さらに

* 正会員 工博 本会会長 東京大学名誉教授

進んでは、天然のつるのかわりに、人工的につるをかけ渡し、場合によっては動物の皮革をつないで、原始的なつり橋を架けたであろう。この種の原始的なつり橋は、ペルーのアンデス山中の奥地にはインカ時代の遺跡として残存し、また、現在でも、チベットや、南アメリカの奥地の原始人種の生息地方に見られるものであり、現代の巨大なつり橋もこれから進展したものである。

このような原始時代から進化を続けた人類は、その進化の過程において、いわゆる石器時代が示すように、石材を加工利用するようになり、さらに粘土をかためて日ぼしレンガを作るようになり、紀元前 2000 年ごろからエジプトのピラミッドや、中国の万里の長城のような巨大な土石構築物が建造された。その後約 2000~3000 年の間、地球上の各地において、たとえば中国の殷時代、古代エチオピア文化、ヨーロッパで栄えたローマ文化、アンコールワットで有名なカンボジアクメール王朝、中央アメリカのマヤ文化、南アメリカのプレインカ時代、およびインカ帝国などの文化を出現し、いずれも巨大にして精巧な土石構築物の遺跡を残している。筆者も、これらのうちいくつかを見る機会を得たが、その壮大さと精巧さに驚くと同時に、これらの建造物の時代の間に、あるものは数百年、あるいは 2000~3000 年の年代の差があるにもかかわらず、現代の構造工学の見地から見て、基本的にはほとんど進歩の跡が見られないことを痛切に感じた。これらの文化が興隆しては消滅することをくり返し、その遺産である構築物の間に構造工学上の大した進歩が見られないことは、これらの構築物が工学としての所産でなく、その時代のいわゆる工匠と呼ばれる人の一つの技芸としての所産であり、その時代の文化の消滅とともに消えてしまったがためであろう。

しかるに 17 世紀の後半から 18 世紀にいたり、人類はじめて自然の現象を学問として研究することを開始し、ここにいわゆる自然科学が誕生し、それについて構築物についての学問、すなわち構造工学が進展し、材料の面においては、鉄、さらに鋼の出現、人工セメントの発明などと相まって、材料・理論・工法がたがいに関連して進歩をとげ、現在においては、ヨーロッパにおいては径間 200 m がをこえる桁橋も普通になり、ブラジル・パラグアイの国境には支間 290 m の鉄筋コンクリートアーチ橋が完成に近づき、ニューヨークにおいては支間 1300 m のつり橋が近く完工するような時代になった。

昔も今も、およそ構築物と名の付くものには実に多様な形式があるが、その基本的形式は、はり(桁)構造、トラス構造、アーチ、つり構造である。これらのうち最も原始的であり、かつ、基本的なはり構造、橋でいえば

桁橋が、天然の丸木橋から進展したことは前述のとおりであるが、これが住居その他の構築に広く使われたであろうことはいうまでもない。しかしながらエジプト、近東地方などに残存する今から 3000~4000 年前の多くの遺跡中には、はり構造を主体とするものは少ない。これは、これらの構造の主要材料である石材では、大きなはり構造の構築が無理であったがためと思われる。しかしながら、今から約 1000 年ほど前に建造されたアンコールワットの壮大華麗な建築物は、巨大な石柱や石壁の上に長大な石を水平に支持するというはり構造が主体であり、また、今から 500~600 年前のインカ文化の遺跡を見ると、石材、または日ぼしレンガの構築であるにもかかわらず、アーチはまったく使用されず、窓・出入口などの開口部は、すべて、開口部の側壁の上に水平に長い石材を載せたはり構造になっている。そして、開口部の形が長方形でなく、上に向かって幅が狭くなるように側壁を積み上げて、台形になっているのがインカ建築の一つの特徴である。これは、開口部の頂部のはりを形成する石材のスパンを、少しでも小にしようとする苦心の現われと考えられる。

桁橋について、見ると現存しているかどうかは不明であるが、小アジアの Smyrna において Meles 河に架けられた支間 12m の Caravan 橋は、1910 年頃にはそのまま使用されていて、当時において現存していた最古の桁橋といわれていた。また、イギリスの西南部にある East Dart 河に、いわゆる Stonehenge 時代に架けられたと信じられる石桁橋があった。この橋は 3 基のカコウ岩積みの橋脚上に幅 1.8 m、長さ 4.5 m の巨大なカコウ岩のスラブを載せたものである。正史に残る最古の桁橋は、バビロニアの首都 Babylon において、Semiramis または Nitocris によって Euphrates 河上に架けられた木桁橋である。Herodotus の記述によると、本橋の架設は B.C. 780 年代、石工橋脚上の幅約 10m の木桁橋であった。なお、このほか B.C. 425 年頃のギリシャでは Euboea で木桁橋が、Assos では石桁橋が架けられたという記録がある。

この当時は、いわゆるローマ時代(B.C. 510~A.D. 475)の初期であって、架橋技術に秀でていたローマ人は各地に多くの橋を架けた。このうち最も古く、かつ、最も有名なものはローマ市の Tiber 河上に架けられた Sublicius 橋である。本橋の架設は B.C. 620 年頃といわれ、くい打ち橋脚上の木桁橋であり、危急の場合には床板を撤去して外敵を防ぐように工夫されていた。本橋は、B.C. 598 年に Horatius Coles が Etruscan 人の軍勢を防いだことで有名である。戦争と橋は因縁が深い

が、B.C. 55 年にはシーザーがライン河上にわずか 10 日間で木くい橋脚の木桁橋を架けたという伝説がある。

一端固定、他端自由の片持ばりも、かなり古くから使われた構造形式の一つである。これは、山腹や絶壁に根を定着して張り出した樹木の耐荷力にヒントを得て発達したものと想像されるが、これを橋、その他の構築物に使用するには相当の知能と技術を必要とするので、古代における片持ばりの登場は、通常のはりよりはかなり後の時代であろうと考えられる。片持ばり形式の古代の橋は、木材を上下に数段に重ね合わせ、この際、上に行くにしたがって長いものを使い、これらの端部を地中になんらかの方法で固定し、これを両岸から突出させ、その先端の間に水平のはりはねを架け渡す構造であって、はね橋、またははね木橋と呼ばれるものである。この種の橋は、インドや中国の奥地においては古くから使用され、現在でもこれらの地方では実用に供されている。わが国でも、有名な昔の甲斐の猿橋、越中黒部川の愛本橋はこれである。

Gizeh のピラミッドの中の入口に使われたように、紀元前 3000 年後のエジプト王朝時代に使われ、その後の古代ギリシャ (1100 B.C.) で発達した石積みの持送りアーチは、入口や窓の開口部において、その側壁の石材を上方に行くほど中に出して開口部の幅をせばめ、頂点において両方の側壁が手を合掌したように合致するように積み上げたもので、これがローマ時代に進展した円形アーチの先駆といわれているが、力学的には、アーチよりもむしろ片持ばりに近いものといえる。

石材や日ぼしレンガを主要材料としながら、アーチの形式をまったく知らなかったインカ時代、またはマヤ時代においても、片持ばり形式についてはかなりの知識を持っていたらしく、たとえばインカの遺跡中には、片持ばりの理論を巧妙に応用した階段や、突起物があり、また、中央アメリカの遺跡の中には、側壁が直線で開口部が三角形になるように積み上げた持送りアーチに似たものがある。

片持ばり構造にしる、通常の桁構造にしる、古代においては木材、または石材が主要材料であり、その寸法に制限があるため、住居その他の構築物にしる橋にしる、建造し得る径間には制限があった。ここで当然考えつかれなくてはならないのはトラス構造であるが、トラスの発見、ならびにその実用は、今から約 400 年前の比較的近世のことである。西歴紀元後 15 世紀にいたってヨーロッパにルネサンス時代が訪れ、この時代に住居その他の構造にトラス様の骨組構造が使われたのであるが、トラス構造について詳細な論文を出し、現在用いられてい

るハウ トラスや、ワーレン トラスとほとんどちがわぬ形式のトラスを提案したのは、イタリーのアーキテクト Andrea Palladio (1518~1580) である。彼は、彼が提案したトラスを多くの小屋組や橋に実用に供したが、彼が発明したトラスが、その後約 200 年以上も注目を引かずに過ぎたことは、人類にとって不幸なことであった。

ところが 18 世紀に入り、スイス人の大工 Ulrich、および John Grubenmann 兄弟はトラスを橋に利用することを考え、兄の Ulrich は、1758 年に Schaffhausen においてライン河上に 52m と、59m の 2 径間の木トラス橋をかけ、弟の John は、ライン河の上流の Reichenau に 73m の木橋をかけた。さらに、兄弟は力を合せて 1760 年に Zürich に近い Wittengen で、Limmat 河上に 119m の木トラス橋を架けた。これらのごとによって Grubenmann 兄弟はトラス橋の始祖といわれているが、本当は Palladio が始祖であり、建築構造におけるトラスの活用は相当以前から始まっていた。

古代において、木材のように便利な構築材料が乏しく、石材が豊富な地域において、構築物の開口部をつくるためにアーチ形式が発生したのは当然である。アーチは、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考えられ、その発端はエジプトの Gizeh のピラミッド (3000 B.C.) の三角アーチ、Thebes の遺跡 (2900 B.C.) 中の持送りアーチであり、これらは真実の意味ではアーチではないが、ギリシャ、その他で広く使われていた。メソポタミヤ地方の住民もアーチを知っており、Babylonia では B.C. 1300 年に尖頭アーチの下水きょをつくった記録があり、また、Nimrod の時代 (2200 B.C.) に Babylon において Euphrates 河上に幅員 9m、スパン 200m のアーチ橋が架けられたという伝説があるが、これは全長 200 m のまちがいであると考えられる。

アーチが、力学上のアーチとして構築物に使われるようになったのはローマ時代からである。ローマ人はギリシャ、あるいはエジプトにおけるアーチの技術を習い、またローマ人の先住民である Etruscan 人からもアーチの知識を受け継ぎ、ついに、半円アーチを橋、建物、水路などのあらゆる構築物に広く利用するにいたった。ローマ時代のアーチは、すべて切石のブーソアによって造られ、目地にはモルタルが使用されていないがアーチの切石はたがいによく密着し、側壁、裏込め、水路のライニングなどには火山灰コンクリートが使われ、現在でも多数のものがそのまま残存している。

古代エジプト、近東地方に発生し、ローマ時代において大成した石工アーチの技術は中国にも伝わり、ひいてはわが国にも渡来して、中国に近い九州の各地において眼鏡橋と呼ばれる石工アーチ橋が多数建造されたことは周知のとおりである。これに反し、構造用の大形木材の乏しい中南米地方において、インカ文化やマヤ文化などが発生したにもかかわらず、石工アーチ構造がついに姿を見せなかったのは不思議であると同時に、古代においては新旧両大陸間にはなんらの文化交流が存在しなかったという説の一つの根拠でもある。

以上は材料、および形式を主として構築文化の進展について考えてきたが、今日の構造工学の進展をさかのぼって考えるときは、構造工学が科学の一分野として進展した過程を考えることが最も重要である。古代の構築物は、すべて、人類の経験と判断、失敗と模索のくり返しによって建造されたものであって、科学 (Science)、または工学 (Technology) の所産ではなく、技芸 (Art) としての所産であって、その技芸を体得した時代、または人間が、戦争、その他のために亡びれば、その所産である文化もこれとともに断絶することは、世界文化史の教えるところである。人類が自然現象の法則の研究を開始したのは、ようやく今から 250 年ほど前のことであり、これにしがたって構造工学が科学の一つとして考えられだしたのは、今から約 200 年ぐらに前のことに過ぎない。したがって、17~18 世紀の建造物は、それより 1000~2000 年前のものにくらべて、ほとんど進歩がなかったといっても過言ではない。

物体の破壊についての研究を最初にこころざしたのは、数学者の Galileo Galilei である。物体に作用する力とそれによって生ずる物体の変形との間関係についてなんらの法則も仮定的な考え方もなかった時代であるが、彼は、壁に埋め込まれた片持ばりが自重、または外力によって破壊する有様を研究した。その結果、Galilei は 1638 年に論文を出し、片持ばりが壁の面内にある一つの軸のまわりに回転しようとすることと、まちがってはいしたが、はりの中の応力の分布についての法則を発表した。

Galilei の発見は、今日から見るとつまらないものであり、かつ彼のはりの応力分布の法則はまちがいはあるが、これが動機となって力学上の二つの重要な法則が生れることになった。その一つは Hooke の法則であり、他の一つははりの曲げに関する Navier の微分方程式である。

Galilei に刺戟され、17 世紀の後半、イギリスでは Robert Hooke が、フランスでは E. Mariotte が、応力とひずみとの関係について実験的研究を進め、Hooke は、1660 年にかの有名な応力とひずみとが正比例するという法則を発見した。Hooke は、この法則の発見後さらに研究を続け、1678 年にはじめてこれを発表した。Hooke は彼が発見した法則をはりの内部応力の問題に応用することをしなかったが、この Hooke の法則とまったく同じことを単独に 1680 年に発表した Mariotte は、これをはりに応用し、はりの曲げに対する抵抗ははりの片側の伸張と反対側の短縮に関係することと、はりの半分が伸張し半分が短縮すること、したがって Galilei がいったはりの回転軸ははりの高さの中央にあると 1686 年に発表した。その後、はりについての研究が進められ、Jakob Bernoulli は 1705 年に、はりの曲げはその繊維の伸長と短縮によるものと仮定して、はりのたわみ曲線の方程式を導いた。これがはりの弾性曲線に関する最初の研究であり、その結果、はりの曲げは弾性曲線の曲率に比例する偶力によることが示され、これから曲げモーメントの観念が発生したのである。

この時代において構造力学の進展に最大の拍車をかけたのは、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、これは 1760 年に橋梁道路学校 (Écoles des Ponts et Chaussées) となり、その当時の約 1 世紀の間は、構造力学の進展にフランスがその先駆者の役をつとめた。

すなわち、C.A. Coulomb は 1773 年にはりの中立軸が断面の重心にあることを明らかにし、C.L.M.H. Navier は 1821 年に、弾性体のつりあい、および振動の基本方程式を発表するとともに、はりの弾性曲線の完全な方程式を確立した。Coulomb は薄い材片のねじり抵抗とせん断変形について研究をした最初の学者である。ただし Coulomb の結論は、材片のねじり抵抗は材片の断面二次モーメントに比例するというものであり、また彼が考慮したせん断変形は、弾性変形ではなく残留変形であった。

これらフランスにおける研究に刺戟され、イギリスやドイツにおいても、つぎつぎに新しい問題についての研究が進められた。たとえば L. Euler がフランスの Daniel Bernoulli の協力のもとに、長柱の弾性座屈理論と弾性線体の横振動についての有名な *Elastica* の理論を発表したのは 1744 年である。ヤング係数の名のもとに知られるイギリスの Robert Young は 1807 に発表し

た著作によって、Hooke の法則に物理的の意味を与えた。Young はまた弾性変形としてのせん断についても研究したが、せん断弾性係数の設定までには至らなかった。また、ポアソン比で知られる S.D. Poisson が、理論的研究の結果から、引張材の横ひずみと縦ひずみの比が $1/4$ であると発表したのは、今から 135 年前の 1829 年のことである。さらに、イギリスの G.B. Airy が、彼の名が冠せられる応力関数を発表したのは約 100 年前の 1862 年のことである。

この間およびその後、イギリスの Lord Kelvin, A., E.H. Love, フランスの Saint-Venant, Boussinesq, ドイツの Otto Mohr, C. Bach らによって物理学、または数学としての弾性力学の研究が進められ、引き続きイギリスの Rankine, ドイツの A. Föppl, Müller-Breslau らによって工学としての応用力学、構造力学が進展し、わが国では広井 勇, 井口在屋, 横田成年, 末広恭二, 柴田睦作らの諸先賢の研鑽によって今日の構造力学の基盤が敷かれた。これら応用力学、または構造力学を実際の技術に結び付け、いわゆる構造工学の今日の隆昌を導いた先駆者としては、オーストラリアの Emperger, ドイツの Mehrrens, Bleich, アメリカの Burr, Waddel, Johnson, Hool らの名をあげねばならない。

このような構造工学の進展に拍車をかけ、また、これにもとづいて合理的な設計するために、新しい材料の開発が行なわれた。特に、エジプト、近東地方など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建造物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、あらゆる構築物の様相を一変させたのは鉄材の登場である。

鑄鉄の製造は 15 世紀に始まったのであるが、たとえばこれが橋に初めて使用されたのは 1776 年イギリスの Severn 河に架けられた Coalbrookdale 橋が最初である。これに続く約 100 年間、ヨーロッパ各地で多くの鑄鉄橋が架設されたが、その多くはそれまでの石工アーチにならったアーチ橋であった。しかし、鑄鉄の脆性によって損壊したものが少なからずあった。しかるに 1847 年にいたりイギリスの有名な Britannia 橋を設計するに際し、Robert Stephenson は鑄鉄と錬鉄の強度の実験の結果、錬鉄のほうがはるかにすぐれていることを知り、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。その後、橋その他の構造物には鑄鉄のかわりに錬鉄が使用され、わが国でも明治の初期 (19 世紀の後半) に架けられた鉄橋の大部分は錬鉄橋であった。

鋼材の登場は 19 世紀の初期である。橋では、1828 年ウィーンにおいて径間 90m のつり橋のアイバーのチェーンに使われたのが最初である。このときの鋼材はパドル錬鉄であったが、1855 年にベセマー 転炉鋼、つづいてシーメンスマルチン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、前述のように 1880 年までの間は錬鉄が主要構造材料であった。しかるに、1890 年 (明治 23 年) ごろからは錬鉄のかわりに平炉鋼が広く使われるようになり、その後、現在にいたるまで鋼が構造材料の王座を保持してきた。この間ベセマー鋼は構造物にはほとんど使用されず、ただ、イギリスの有名な Forth 橋 (旧橋) がこれによって建造されたことは特筆すべきことである。

現在、構造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、最近ではこれより強度が大である高張力鋼が適材適所に活用されている。

鉄鋼材の発達にともなって変化したのはその結合方法である。鑄鉄、または錬鉄の時代には主としてボルト結合が使われたが、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、とくにアメリカにおいて広く用いられた。しかしその結果は、ピン結合トラスはたわみと振動が大であり、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、またそのころ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、再びリベット結合が基本工法になった。1930 年ごろまでは、世界各国とも、鋼構造といえばほとんどリベット結合であったが、そのころからようやく溶接が台頭し、溶接技術の進歩、溶接性良好の鋼材の生産とともに、溶接によって、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、より経済的な鋼構造物をつくり得ることが判明したので、今日においては、鋼構造物の接合には、特に工場製作の段階においては溶接が常識となった。

この間において、今から 15 年ほど前からアメリカにおいてリベットのかわりに高張力ボルトを使用することが研究せられた。高張力ボルト結合は、リベットのせん

断と支圧によって力を伝達するものと異なり、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し、リベット結合やスミ肉溶接のように点または線に応力が集中して作用することなく、騒音を発せず、強度試験、および3年間以上の鉄道橋の実橋試験の結果、ボルトのゆるみになんらの心配もなく、所期どおりの効果を発揮することが判明した。このことが1952年、アメリカ土木学会創立100周年記念のアメリカ工学100年祭において発表されて以来、アメリカにおいては鋼構造物の現場接合にはリベットはまったく姿を消して、高張力ボルトが専用され、引き続いてドイツその他の諸外国にも普及し、わが国においても最近においては現場接合には高張力ボルトの使用が広まってきた。

火山灰などによる天然セメントは、かなり古い時代から石工構造に利用されていたが、1824年に人工のポルトランドセメントが発明され、1855年に工業的に生産されるようになってから、それまでの石工構造物にかわり、アーチその他に無筋コンクリートとして広く利用されるようになった。無筋コンクリートはもちろん引張りには弱いので、これを補強するために出現した鉄筋コンクリートの考え方は、決して新しいものではない。天然セメントのモルタル、またはコンクリートの中に金属棒を入れることは、すでにローマ人が墓所の屋根の築造に利用し、木材や竹材を埋めこんで補強する工法は中国の万里の長城に活用されていた。

ポ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年フランスのM. Labotによって提案せられ、彼はこれによって一隻の小舟を造ったといわれている。1854年にはイギリスの左官師Wilkinson、1855年にはフランス人のF. Coignetがそれぞれ鉄筋コンクリート床の特許を得、1861年にCoignetは鉄筋コンクリートで桁やアーチ、および管をつくることを提案し、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つくりはじめた。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は実用に供されなかったが、1880年頃に至ってはじめて建築物の床などに用いられるようになり、その後、種々の改良と鉄筋コンクリート理論、および施工法の発達によって、すべての建築物の主要材料の一つとなったものである。

鉄筋に初張力を加えて、コンクリート中に初圧力を生ぜしめるプレストレストコンクリートの始祖は、フラン

スのFreyssinetと考えられているが、このような構想はその以前からあった。たとえば、石材とコンクリートとの間に鋼材を入れて緊張して床版を形成するという1886年のP.H. Jacksonの特許、荷重を加える前に引張応力を与えた金属棒によって床版を補強するという1888年のC.E.W. Doehringの特許などがそれぞれである。しかし、これらの工法では導入するプレストレスが小であり、コンクリートの収縮、クリープなどのために所期の効果はあがらず、実用にならなかった。その後今世紀に入って特にドイツにおいてKoenen, Lund, Mandl, Otto Grafらによってプレストレストコンクリートの実験的研究が熱心に行なわれ、アメリカのC.R. Steinerは1908年にコンクリートの乾燥収縮が終了後に再び締め直して、引張応力を与えることを提案した。しかし、この時代には通常の強度の鋼材を使用したがために実用には成功しなかった。プレストレスのために高張力ボルトを使用することを最初に提案したのは1925年のアメリカのDillであるが、これも価格その他の点で実用にいたらなかった。これからの提案や研究が進められているうち、1928年にいたり、フランス人のFreyssinetは通常の鉄筋のかわりに高張力鋼のピアノ線を使用してプレストレスを与える工法の特許を得たが、ただちには実用に供せられなかった。しかるに、1945年第2次世界大戦が終了し、戦災を受けたヨーロッパ各地における橋梁、その他の復興に際し、その当時の鋼材不足が一因となり、ピアノ線によるプレストレストコンクリート構造が採用され、その経済性と優秀性が立証されてからは、プレストレス用鋼材、その締め付け工法などについての研究や新提案、プレストレストコンクリート理論、および設計方法の進展にともない、現在においては、橋その他の構造物の主要材料として鋼とその覇を競うほどになってきた。

上記の構造理論、および材料の進化にともない、構造の形式・細部設計の面においてもいちじるしい発展が生じた。たとえば、はりとこれを支持する柱を剛結したラーメン構造が発達し、アーチ橋について見れば、通常の上路アーチ橋のほかに、ハンガーによる下路アーチ、あるいは補剛桁を有するランガー桁、ローゼ桁などの形式が出現した。これら構造形式の発展とともに、ここ15年間特に目立つことは、構造全体としての設計方針である。従来は、たとえば橋を構成する各部は、すべて、それぞれ単独に働らくものと仮定して設計計算されていた。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、構造物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、そうしない方がより安全であるというまちがった考え方と、計算が面倒であること

から、構造各部をべつべつに計算してきた。しかるに近年は、より合理的な、より経済的な構造物を建造する必要から、構造物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、橋梁でいえば、格子桁や合成桁であり、また、鋼床板箱桁橋もこれである。

このような構造計算を行なうには、数十の連立方程式を解くなど、複雑にして面倒な数値計算が必要であり、今日このような複雑な計算による設計が可能になったのは、時期よく発達してきた電子計算機のおかげである。たとえば、現在の橋梁の設計において格子桁の計算は日常茶飯事のようにになっているが、それは電子計算機の助けがあるからである。たとえば、格子桁について見れば、1908年のBasch, 1916年のHager, 1920年のSaligerの鉄筋コンクリートの著書中には、格子構造の考え方を導入した床版の理論が記述されており、R. Ganttnerは1928年のBeton und Eisen誌上に、フーリエ級数による格子桁の解法を示し、筆者も1931年から1933年にわたって、格子桁の理論と差分方程式による解法を発表したが、その当時は単に理論的の興味をひいただけで、ならんら実用に供せられなかった。しかるに、現在におい

て格子桁構造が大した苦勞もなく実用されるに至ったのは、これについて便利な実用的数表が出版されたこととともに、電子計算機による複雑な計算が可能になったからである。電子計算機は、単に格子桁のみならず、複雑なラーメン構造、不等径間不等断面の連続桁、曲線桁など従来の計算機ではほとんど計算不可能であったものを可能にし、かつ、通常の単純桁や合成桁などは設計条件さえ与えれば電子計算機が最後の部材断面まで出すという時代になってきた。電子計算機利用の範囲はますます広がり、構造形式・理論・設計計算方法などにおいて構造工学の進歩の画期的要因になるものと思われる。

以上は、構造工学進展の概観であるが、かえりみるとわれわれのすべての構築物には、原子力や宇宙開発のような画期的の新発展はなかったが、いずれも人類の文化の進展とともに、何千年、いや何十万年の昔から着実に進化してきた。現在、欧州においてはドーバー海峡に架橋計画があり、わが国でも、本州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なくなる時期が到来するであろうことを信じ、この講演を終ることにする。

(1964.11.7・東京文化会館にて講演)

呈図書目録 土木関係図書撰

工博 八十島義之助共編
奥村敏恵共編
A5・三五〇頁 定価五〇〇円
土木工学通論

奥村敏恵共編
佐々木道夫共編
B6・二〇〇頁 定価三五〇円
多層ラーメンの数値計算法

石井靖丸訳
A5・上巻三五〇頁 定価七五〇円
下巻四〇〇頁 定価八五〇円
チエボタリオフの土質工学

渡辺隆著
B6・三〇〇頁 定価四五〇円
土質調査および土質試験

池田俊雄共訳
高木秀夫共訳
B6・一一〇頁 定価二五〇円
軟弱地盤上の盛土の調査・設計・計算法

工博 石井靖丸著
B6・二五〇頁 定価四〇〇円
軟弱地盤工法

工博 飯吉精一著
B5・五九〇頁 定価二、五〇〇円
基礎とずい道の掘削

電(五八三)八五八一
振替口座東京一〇番

株式会社
技報堂