

V 材料の進歩と構造技術の進展

われわれの目にふれる土木技術の産物の主たるものは構造物である。壮大な規模、強い迫力をもつ橋梁やダムを身近に見て、その造形の美に打たれる人も多かろう。

構造物の材料としては、天然に得られる木と石が古くから使われてきた。とくに石材の特性を利用した数々のアーチは今なお歴史的構造物として残っている。わが国でも石材は石垣あるいはアーチ橋にその成果をとどめているが、主流は木構造であった。しかしながら、木材や石材は大きなあるいは複雑な構造には適せず、よりすぐれた構造材料である鋼とコンクリートの出現にともない、いまやその主役を譲ってしまった。

もちろん、木材や石材もその特色を生かした使い方でまったく捨て去ることはできないが、ここでは現代の構造材料の代表である鋼とコンクリートについて、橋梁への利用を中心として眺めてみよう。

1. 鋼 構 造

1.1 はじめに

鉄の消費量はその国の文明のバロメーターであるといわれている。わが国の鉄鋼の生産量は今や世界第3位に躍進し、高度生長をとげつつある産業の発展に役立っているが、実にその約半分は建設関係の事業に使用されている。この事実からも現在のわが国の土木技術の進展、とくにその中に占める鉄鋼の重要性がうかがえよう。

鉄の歴史は後で述べるように18世紀から19世紀へかけての鑄鉄、これにつづく錬鉄の時代を経て、19世紀末から鋼の時代に入った。強くてしなやかさに富み、しかも適当な加工性を有する鋼はその後つぎつぎに改良が加えられて、今や木材や石材に代ってコンクリートとともに最も重要な構造材料となった。

土木工学において鋼材は矢板、コンクリート型わくなどにも大量に用いられるが、われわれの目にふれる土木技術の産物としては、やはり各種の構造物をあげなくてはならない。材料の進歩に伴って、これを利用する土木技術者の側でも、理論・設計・製作・架設など各方面におけるたゆまざる研究の結果、すぐれた成果をあげてきたのである。

土木工学の分野における鋼構造としては、橋梁・鉄塔・鉄管・水門などがある。つぎにそれらの発展の状況を概観するが、1.2 以下においては最も代表的な鋼構造物としての橋梁を例にとって、そのあゆみをふり返り、かつ未来を展望してみよう。

1.2 概 説

(1) 鉄橋・鋼橋

わが国で最初に架設された鉄製の橋梁は1869年(明治2年)横浜市に架設された錬鉄製トラスの吉田橋であって、世界で最初の鉄製の橋梁であるコールブルックデル(Coalbrookdale)橋(鑄鉄製アーチ)が1776年イギリスのセバン河に架けられてから約100年後、

最初の錬鉄製のガーダーが1832年にグラスゴーに架けられてから37年後に当たる。明治時代の初期においては、構造用鉄材はすべて海外より輸入され、強度は強いが高価であり、貴重な材料であった。1872年(明治5年)に開通した東京―横浜間の鉄道の橋梁はすべて木橋であって、六郷川にはスパン16.8 m (55 ft)の木トラスを架設している。鉄製の鉄道橋は1874年(明治7年)阪神間の武庫川などに架けられたスパン21.3 m (70 ft)のポニートラスが最初であった。

1880年代に欧米では鋼が工業的に大量生産されるようになり、構造用鋼が橋梁にも使用され始めた。わが国において鋼が橋梁に使用されたのは、鉄道橋では1888年(明治21年)東海道線の天竜川に架けられたトラスの弦材に使用されたのが最初であり、道路橋では1890年(明治23年)に石狩川に架設されたアメリカンブリッジ会社の製作にかかるトラスが最初のものであった。

当時、鉄道建設が各地において行なわれ、鉄道橋の形式はトラス、プレートガーダー、I形桁であって、なかでもポーナル(Pownall)の設計にかかる定規プレートガーダーが各方面に多数使用され、1897年(明治30年)以降プレートガーダーが国内メーカーにより製作されるまでは、ほとんどすべてイギリスのメーカーに発注していた。1897年以降より漸次アメリカの進歩的技術に依存するようになり、一方、機関車重量の増大にともない、在来のイギリス型トラスは架けかえの必要を生じ、かつ、建設線の使用にあてため、各種のトラスが設計されたが、これらはアイバーを使用したプラット型ピントラスで、当時架設された170連はすべてアメリカから輸入され、わが国で製作されたのは簡単なプレートガーダー以下のものであった。

1906年(明治39年)鉄道国有化を契機として、それまでまちまちであった設計様式を統一し、橋梁技術者の養成など、わが国独自の発達をなしうる潜在勢力を築くようになった。すなわち1909年(明治42年)設計活荷重にはクーパーE33を使用することを定め、1912年(明治45年)鋼鉄道橋設計示方書が制定され、これに応じたI形桁、プレートガーダーの定規桁が定められた。やや遅れて1923年(大正12年)には鋼鉄道橋製作示方書が制定され、ここに鉄道橋においては諸般の制度が確立し、1911年(明治44年)東海道線桂川の30.5 m (100 ft)ポニーワーレントラスの製作が国内メーカーに発注され、大正初期のピントラスが鉚結トラスに代わるにおよんで、鉄道橋のトラス、プレート

ガーダーの設計製作とともに、すべて国内で行なわれるようになり、ここに外国の技術依存は終止符をうつこととなった。

この時代において道路橋は市街地などに散発的に架設され、1912 年（明治 45 年）に竣工した曲弦プラット トラスの新大橋（隅田川、最大スパン 63 m）、1914 年（大正 3 年）に竣工したわが国最初のタイド アーチである八ツ山橋（東京都品川）などもあったが、一般には橋数も少なく、統一された示方書もなく、この時代の橋梁技術は鉄道関係技術者によってリードされていた。第 1 次大戦を経て、1919 年（大正 8 年）には道路法が制定され、道路構造令が制定されたが、道路橋の車両重量が定められたにとどまり、設計示方書は 1926 年（大正 15 年）に道路構造に関する細則が定められるまで、ついに制定されずにおわった。しかし 1923 年（大正 12 年）の関東大震災につづく帝都復興事業を契機として、橋梁技術史上新しい時代を迎えることとなった。

関東大震災以降、第 2 次世界大戦に突入するまでの時代は、鉄道橋においては、これまで培われた技術力を発揮して躍進した時代であり、道路橋においては鉄道内に蓄えられた技術力をかりて一気に一人前となり、ものによっては最近に至るまで、斯界をリードする地位すら築いてしまったのである。1926 年（大正 15 年）に竣工した永代橋は中央スパン 100 m のタイド アーチであって、そのタイは強度 63 kg/mm^2 のマンガン鋼であるデュコール (Ducol) 鋼を使用しており、1928 年（昭和 3 年）に竣工した清洲橋は中央スパン 91.4 m の自定式吊橋で、その主ケーブルに相当する平板チェーンには上記デュコール鋼を使用している。また、ゲルバー ガーダーとして言問橋（中央スパン 67 m）、両国橋（中央スパン 62 m）、ラーメン橋である御茶ノ水橋などがつづいて架設されている。また道路橋設計の基本を示す示方書も、1926 年に道路構造に関する細則の第 2 章 橋梁において規定され、街路橋に対し 12 t、国道橋に対し 8 t、府県道橋に対し 6 t の自動車荷重を定めている。

この時代の特徴は高張力鋼が出現し、ともかくも使用されたこと、1932 年（昭和 7 年）頃より溶接が橋梁の一部に試用されたことであり、橋梁形式としては不静定構造物が好んで使われるようになり、やや長大スパンのものが出現するようになったことである。溶接については 1935 年（昭和 10 年）に 3 スパン ゲルバー ガーダーの田端大橋（中央スパン 53 m）、1937 年（昭和 12 年）に 3 スパン連続桁の鶴川橋（中央スパン 27 m）などがつく

られたが、試用の範囲を出なかった。この時代の不静定構造物には初めタイド アーチが多く、千住大橋（スパン 90 m）、白鬚橋（スパン 79.5 m）、旭橋（旭川市、スパン 90 m）などがあり、鉄道橋では、総武線松住町橋梁（スパン 72 m）がある。ついでランガー桁として、まず 1932 年（昭和 7 年）隅田川にスパン 96 m の総武線複線鉄道橋が架設され、つづいて道路橋では伊勢大橋（スパン 73.7 m、15 連）、尾張大橋（スパン 63.4 m、14 連）が架設された。また 2 ヒンジ アーチ、バランスド アーチなどのアーチ系のものが多く架設された。バランスド アーチの最初のものは 1928 年（昭和 3 年）に架設された高森線第一白川橋などで中央スパン 91.4 m (300 ft)、ついで 1937 年（昭和 12 年）の川口線第一只見川橋梁は中央スパン 112 m であって、最近まで国鉄における長大スパン橋であった。一方、長大スパン橋としてゲルバー トラスも好んで架けられ、1939 年（昭和 14 年）に架設された神奈川県の大師橋は、中央スパン 104 m のゲルバートラスであって、今日においてもこの形式の中では最大である。また三好橋は 1927 年（昭和 2 年）に架設された中央スパン 140 m (459 ft) の鉄筋コンクリート床版をもつ吊橋で、わが国における本格的吊橋の端緒を開いたものであった。また、1930 年大阪市に架設された桜宮橋はスパン 108 m の 3 ヒンジ アーチであり、鉄道橋では 1938 年黄河橋梁（中央スパン 164 m、側スパン 128 m のゲルバー トラス）がわが国で製作され、国鉄派遣員の指導でカンチレバー方式で架設されており、戦前における最大径間工事であった。そしてこの時代は 1940 年（昭和 15 年）に竣工したわが国最大の開閉橋である東京都の勝鬃橋（開閉部スパン 44 m）を最後として、第 2 次世界大戦に突入し、完全な空白の期間となった。

戦後、国内の工業生産施設の荒廃と資材の窮乏、これに加えるに戦時中の長い技術の空白があったにもかかわらず、公共施設の復旧の一環として、橋梁の架設が行なわれ、タイド アーチの忠節橋、多径間ゲルバー ガーダーの多摩川大橋がその初期のものであった。しかしながらこれらの橋梁はいずれも戦前の設計にならってつくられたもので、戦後新たな技術の修得の結果が実施されるようになったのは 1950 年（昭和 25 年）以降であって、新しい溶接技術の普及、高張力鋼の使用、新形式橋梁、すなわち合成桁、格子桁、箱桁、鋼床版の適用など基本的な事項の修得と実施はほぼ 1955 年（昭和 30 年）頃までに完了したと見てもよい。この短い期間に突合せ溶接を主体とした新しい溶接は 1949 年頃よりプレート ガーダーに使われ、1955 年にはトラスにも使用され、これ以後は現場の結合をリ

ベットまたは高張力ボルトでなすほかは、すべての形式の橋梁はすべて溶接によって集成されるようになったのである。高張力鋼は 1955 年（昭和 30 年）に架設された相模大橋に本格的に 50 キロ鋼が使用されてから、各所の橋梁に使用されるようになった。合成桁は 1952 年（昭和 27 年）神崎橋に使用されてから、二、三年の間に急速に普及し、現在においてはプレート ガーダーのほとんどを占めるに至った。長径間桁橋としてその特性を示している箱桁の最初のものは 1954 年に架設された大阪府の西条大橋（スパン 37 m）である。

1955 年以降は上記の基本的技術の上にさらに躍進がなされつつあり、60 キロ鋼を使用した連続合成桁である名神高速道路の長良橋（3@ 69.65 m）が生まれ、湖を横断する琵琶湖大橋のスパン 140 m の連続箱桁（95 m+140 m+95 m）の実現を見るにいった。一方、技術の水準を示す示方書の整備が鉄道橋、道路橋ともになされており、その一部は現在においても行なわれている。また、プレート ガーダー標準道路橋、東海道新幹線標準プレート ガーダーの一部には 50 キロ鋼を使用し、新しい技術を集結したものといって過言でない。このことは新旧標準設計の鋼重を比較することにより明白である。1963 年につくられた支間 32 m、幅員 7.5 m の活荷重合成桁標準設計の鋼重は 33.1 t、これに対し、1941 年（昭和 16 年）につくられた同じ支間、幅員の鋳鉄桁標準設計の鋼重は 76.0 t であって、1/2.3 に鋼重が減っている。これは溶接工法の採用、床版と桁との合成、高張力鋼の使用など軽量化への努力の結晶であって、一つの発明や発見、そして一個人の業績に帰することなどのできない多くの人々の業績の成果であろう。

戦後行なわれた軽量化への輝かしい成果のほかに、もう一つの努力がなされていることを見のがすことはできない。

これは島国であるわが国の特性にも起因する。島国であることが、大河川なく、従来最大支間の橋梁の必要性が少なかった理由でもあった。しかし経済の充実はこれらの島を結ぶ陸上交通路の開発の気運を助長しようとしている。すでに西海橋、若戸大橋のごとき海峡横断橋が完成し、天草架橋工事が着工されている。そして本州と四国とを結ぶ連絡架橋の調査が異常な熱情をもって推進されており、その他の海峡架橋の調査も開始されている。鋼材こそ、最も強く、最も軽く、最も安い材料であることは先に述べた軽量化の努力により立証されている。しかし、これらの海峡を跨ぐ長大支間橋梁を架設するときこそ

鋼材はなくてはならない材料であって、架橋の条件が厳しくなればなるほど、その真価を発揮するものである。

（2）鉄 塔

大規模な鋼構造物としては、橋梁のほかに、通信用および送電用の鉄塔がある。

1906 年（明治 39 年）、ドイツのナッエンに当時世界最高の 100 m 無線電信塔 1 基が立ち、1912 年（大正元年）には 260 m のもの 2 基が建設され、その後世界各地に高さ 200 ~ 250 m 級の鉄塔が建設された。これらはすべて支線式鉄塔であるが、自立式鉄塔としては、1915 年（大正 4 年）頃にフランスのボルドーに高さ 250 m の鉄塔 8 基が建設されている。また博覧会用として立てられ（1889 年）、後に通信用に用いられるようになったフランスのエッフェル塔は高さ 300 m で当時世界最高であった。

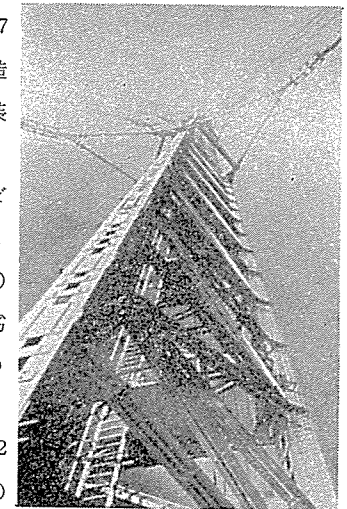
わが国の通信用鉄塔は 1910 年頃までは、外国の技術に依存していたが、このころからわが国独自の技術が発展し、刈谷、原の町などに 250 m 級の鉄塔が建設された。

さらに 1937 年（昭和 12 年）には埼玉県川口市に NHK ラジオ放送用鉄塔として、当時世界最高の川口鉄塔が建設された（写真—5.1）。高さ 312 m の鉄塔 2 基を 463 m 間隔に立て、鉄塔頂部を結んでアンテナが張られている。鉄塔は柱材中心間隔 3 m の三角形トラスで、全長が 307 m、7 段三方式の支線をもち、鉄塔基部はヒンジ構造で、ここには脚部絶縁装置および同交換用ジャッキ装置が設けられている。

最近（1960 年）、アメリカに高さが 509 m のテレビ用鉄塔、ケープ・ジラルド塔が完成したが、鉄塔は 1 基で 6 段三方式の支線式三角形トラス（一辺約 3 m）であり、川口鉄塔の規模はこの鉄塔の規模に決して劣っておらず、今日においてもなお世界的大鉄塔といえることができる。

わが国のラジオ放送用自立鉄塔は、1925 年（大正 12 年）に建設された東京愛宕山の NHK 鉄塔（高さ 45 m）が第 1 号であるが、1931 年（昭和 6 年）には NHK 大阪放送局に高さ 100 m の鉄塔が建

写真—5.1 川口鉄塔



設された。戦後テレビ放送が開始され、各地に高いテレビ用鉄塔が建設されるようになり 1954 年(昭和 29 年)名古屋に高さ 180 m の鉄塔が完成し、さらに 1958 年(昭和 33 年)、高さ 333 m の東京タワーが建設され、そのときまで世界最高を誇っていたフランスのエッフェル塔を超越して自立式鉄塔として世界最高の鉄塔となった(なお、自立式放送鉄塔は最近わが国では建築物として建造されている)。つぎに送電用鉄塔についてその概況をのべる。

1887 年(明治 20 年)、東京市内での電気供給に始まるわが国の電気事業は、市内配電時代、近距離送電時代を経て、1907 年(明治 40 年)には送電延長 100 km 以上、送電電圧 77 kV という遠距離送電時代にまで発展した。このころまでの送電支柱はすべて木柱であったが、1907 年に竣工した駒橋発電所から東京までの送電線が多摩川を横断するところには鉄塔が用いられ、また 1909 年(明治 42 年)に送電を開始した箱根塔の沢から程ヶ谷までの送電線中には、鉄塔 170 基が使用され(わが国で、相当区間にわたって鉄塔が使用されたのはこれが始めてである)、その中には、馬入川の西匂川横断鉄塔(径間 720 尺)も含まれていた。これ以来、鉄塔を使用した送電線が続々と建設されていった。

電力事業が発展し、中央電源地帯における大規模な水力開発が行なわれるようになり、1914 年(大正 3 年)には、猪苗代発電所から東京まで約 230 km、電圧 115 kV の送電線が完成、利根川横断箇所には径間 1 530 ft (466.7 m) の鉄塔が使用された。これがいわゆる大送電線網建設時代の始まりであるが、発電規模の大型化、送電距離の増大による送電電圧の上昇はますます進み、1943 年(昭和 18 年)には送電電圧 200 kV 以上という、いわゆる超高压送電時代となり、鉄塔の大型化も進行した。しかし第 2 次世界大戦までの鉄塔については風荷重、雪荷重、使用材料、基礎工法など設計合理化の面でその解決に多くの努力が払われたが、製作、建設の規模は橋梁などに比べると小さかった。

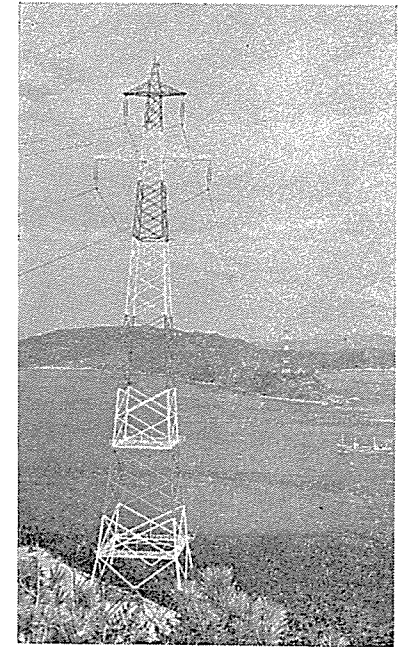
第 2 次大戦後、世界的に電力需要が増大し、これにともなって海峡、湖沼、大河川などを横断する大送電線の建設が行なわれるようになり、送電鉄塔にも大規模なものが出現した。表—5.1 に示すのは世界の代表的長径間高鉄塔である。これにあるように、わが国でも 1961 年(昭和 36 年)には鳴門・淡路連絡線が建設され、1962 年には、中国・四国連絡線が完成した。これらは径間長も世界的に長く、鉄塔の規模も世界有数のものである。鳴門・淡路連絡線は、四国と淡路島を結ぶもので海峡横断径間は 1 716 m、鉄塔の高さは鳴門側 146 m、淡路側 115 m である(写真—5.2)。鉄塔はダブル ワーレン形式で

表—5.1 世界の長径間高鉄塔

名 称	国 名	高 (m)	径 間 (m)	重 (t)	建 設 年
Messina 海峡横断線	イタリア	224	3 653	457	1956 (昭 31)
中国・四国連絡線	日 本	214	2 352	800	1962 (昭 37)
Thames 川横断線	イギリス	192	1 371	436	1961 (昭 36)
Elbe 川横断線	ドイツ	189	1 140	—	1958 (昭 33)
Severn 川横断線	イギリス	159	1 619	—	1959 (昭 34)
Bonneville 川横断線	アメリカ	152	1 145	164	1948 (昭 23)
Tacoma 海峡横断線	"	152	1 900	117	1925 (大 14)
Cadiz 湾横断線	スペイン	146	1 639	510	1960 (昭 35)
鳴門・淡路連絡線	日 本	146	1 716	220	1961 (昭 30)

主柱には内部にコンクリートを充てんした鋼管を用いている。柱材鋼管には高張力鋼 SM 50 の $500 \phi \times 13 \text{ mm}$ 溶接鋼管、 $356 \phi \times 9 \text{ mm}$ 継目無し鋼管などが用いられており、継手部には新しい構造が採用されている。中国・四国連絡線は愛媛県西条市と広島県安芸市とを結んで瀬戸内海に点在する島々を飛石伝いに 6 つの海峡を横断するため、海峡部の径間長は 1 400 m、972 m、1 154 m、2 076 m、1 423 m、2 357 m となり、鉄塔は高さ最高 226 m、重量 770 t を最大に、高さ 100 m をこえるものが 7 基におよんでいる。この鉄塔はダブル ワーレン形式で、主柱材には高張力鋼 SM 50 の溶接箱型断面部材を使用している(写真—5.3)。このように多くの海峡横断を有する架空送電線路は技術的内容と規模において世界にもその例がなく画期的な大工事で

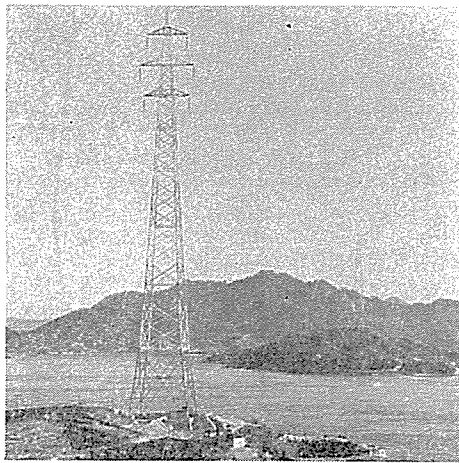
写真—5.2 鳴門・淡路連絡送電鉄塔



あった。

最後に電気鉄道の架線用鉄柱については 1914 年（大正 3 年）東京一桜木町間に電車が運転された時、従来の木柱に代り始めて鋼柱が使用された。すなわち八ツ山および横浜方面には A 型をしたセンターポール式で根元に向かってゆるいカーブをもつ鉄柱が使用され、横浜一桜木町間にはガントリー型四角鉄柱が使用された。大正末期から昭和にかけてアメリカ製ベーツ ポール、渡辺式チャンネル ポール、鋼管柱なども試用されたがその後は高架、橋梁部分、駅構内その他に主としてチャンネル柱、四角柱が使用されている。

写真-5.3 中国・四国連絡送電鉄塔



鳥坂発電所において、溶接が初めて採用されたが完全なものではなく、当分の間鋸接と溶接の混合時代がつづいていた。1937 年（昭和 12 年）国鉄信濃川発電所において規模と新技術において画期的な大工事が施工され、その豊富な内容は現在においても、なお教えられることが多い。その後、SM 41 鋼材が規格化されるまでは工場手溶接（現場仮工場を含む）、現場鋸接が主として採られた。1953 年（昭和 28 年）関西電力御嶽、打保の両発電所において工場継手に自動溶接が採用され、1954 年（昭和 29 年）中部電力東上田発電所において初めて全溶接管が誕生した。この頃からユニオンメルト工法による自動溶接が主体となり、溶接部の品質、作業性、経済性が飛躍的に増大し、佐久間（昭 30, SM 41 鋼）、

（3）水圧鉄管

水圧鉄管（ペンストック）は取水口またはサージ タンクから水車に直接導水するために設けられた工作物であって、わが国では 1892 年（明治 25 年）京都市蹴上発電所のものが最初であり、現在までに建設された約 1600 カ所の発電所の大部分にペンストックが設けられている。初期のペンストックは鋸鉄を使用した鋸接管に始まり、高落差地点においては輸入の鍛接管が使用された。1925～26 年（大正 14～15 年）中部電力中房発電所、東北電力

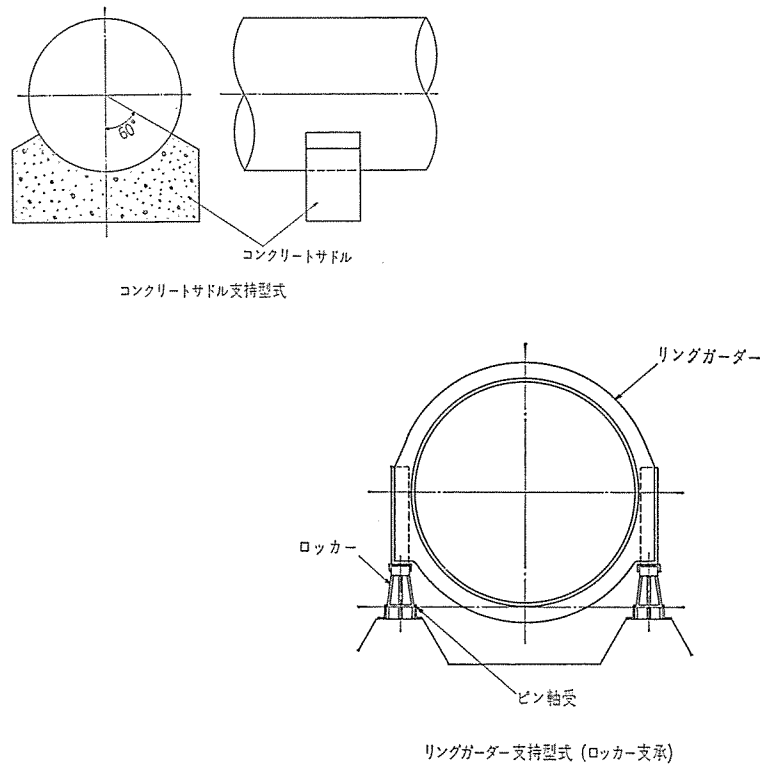
奥只見、御母衣（昭 35, 50 キロ鋼材）の各発電所では現地に焼鈍炉を設置する本格的な溶接工事が施工された。1959 年（昭和 34 年）黒部川第四発電所においては、フランス、イタリアの両国からバンデット パイプが輸入されたが、1963 年（昭和 38 年）東京電力下滝発電所において、わが国初の 80 キロ級超高張力鋼と新しい多電極自動溶接法による特殊工法がとられ、高度の技術水準を示した。

a) 技術基準について 昔の設計、製作、据付けに関する技術指針は、おもにボイラー規格と造船工作法に準拠していた。1936 年（昭和 11 年）頃から内外の文献も出版されとくに戦後はアメリカ合衆国開拓局（U.S. Bureau of Reclamation）のものが広く利用された。1953 年（昭和 28 年）には関西電力の主催により、発電所の大形化にともなう溶接ペンストックの製作信頼度を高めるための研究会が設置され、その翌年に製作を重点にした「溶接ペンストック標準示方書」が作成された。1955 年（昭和 30 年）頃からは、A.S.C.E. からのレポートもふえ、国内でも土木学会誌に講座が載るようになった。この頃に所轄官庁と電力会社から技術基準作成の要望が生じ、メーカーも深い関心をよせていたので、1957 年（昭和 32 年）社団法人水門鉄管協会において取り上げ、3 カ年におよぶ審議を経て「水門鉄管技術基準」（昭和 35 年）が作成された。現在はこの基準により計画、実施されている。

b) 安全率 古いペンストックの安全率は引張強さを基準として 3.5～4 をとっていた。しかし、水門鉄管技術基準では欧米にならって降伏点を基準にして安全率を 2 とし、SS 41 と SM 41 は 11.50 kg/cm^2 、SM 50 は 1600 kg/cm^2 、HT 60 は 2300 kg/cm^2 の許容応力をとっている。最近、压力容器に使用されだした HT 70 以上の調質高張力鋼は、高切欠じん性を有するが、降伏比が高く（80～90%）、引張り破断時の局部的しぼりが軟鋼に比し大きい割合に一樣な伸びが小さい傾向にある。したがって東京電力下滝発電所のペンストックに初めて使用された HT 80 級鋼材は、降伏点と引張強さを同時に設計基準にとるために安全率を 2.2 に高めた。この程度にとどめたのは、板厚を厚くすると溶接の立場からかえって好ましくないからである。二軸応力に対する比較応力を検討する場合は、DIN 19704 水工鋼構造物の基準を参考にして降伏点の 75% 以下におさえている。

c) 支持形式 露出部のペンストックは、アンカーブロックとその中間を図-5.1 に示す支承台によりささえられる。1937 年（昭和 12 年）頃まではすべてコンクリートサ

図-5.1 ペンストックの支持形式



ドル支持形式であったが、1928 年（昭和 3 年）東京電力佐久間発電所 ペンストックの水平部に鋼製リングを巻いたスライド支承がある（現在運転中）。応力解析の困難性とサドル付近の局部応力が大なるために 1953 年（昭和 28 年）頃までは管径 2~3 m 以下のペンストックに限定され、大口径管はリング ガーダー支持形式であった。リング ガーダー支持形式は 1911 年スウェーデンのカールソン (K. I. Karlsson) の提唱により、1921 年スウェーデンの Kungfors 発電所に始めて採用されたが、理論的解析が十分でないためにほかの国では採用されなかった。1931 年には Herman Schorer により薄肉円筒シェル構造の理論が発表され各所に採用されるようになり、わが国でも 1937 年（昭和 12 年）国鉄

信濃川発電所にこの支持形式が始めて用いられた。その後合衆国開拓局は、Herman Schorer の理論にリング ガーダーと管胴の相互作用についての連続性を補足した理論式を誘導してリング ガーダーの応力の計算式を与えたので、最近のペンストックは維持管理の容易であることから管径の大小にかかわらずこの形式が採用されている。

d) 水管橋 水管橋には鋼管自身の剛性で荷重をささえるパイプ ビーム方式と、橋梁を補剛部材として扱う補剛水管橋とがある。パイプ ビーム方式は構造が簡単のために、比較的小口径の水道用鋼管には早くから採用されていたが、板厚と径の比が $1/120$ 以上であるため（ペンストックでは一般に $1/200$ 以下）解析は、はり理論で十分間にあっていた。1943 年（昭和 18 年）日本軽金属株式会社釜ノ口補剛水管橋は管径 5.5 m、支間 50 m のワーレン トラスとして、当時わが国では最大の規模を有していた。この形式の選定理由は、当時の溶接技術が未熟のためにパイプ ビーム方式は足場なしの架設に適さないこと、鋼管の厚板の継手は構造および施工上に難点を含むこと、理論上および計算上は安全であってもなんらかの欠点があれば、ただちに全体の強度に影響をおよぼし安全度が低下すると記されている。

ペンストックにおいて水管橋の設置される位置は、上流側、すなわち内圧が小で管厚の薄い所が多い。したがってパイプ ビーム方式をとるとき、負荷後の剛性変化ならびに充水過程中的の応力の挙動を把握する必要がある。弾性理論による解法は、フーリエ級数を用いて解きうることがティモシェンコ (S. Timoshenko)、フリュゲ (W. Flügge) により示されたが、支間の大きい場合は収れんが悪く実用化されなかった。したがって、これを究明する動きとして、1955 年（昭和 30 年）頃から模型または実物の試験が行われ設計の手がかりが得られた。パイプ ビーム方式の本格化は 1955 年（昭和 30 年）東京電力切明発電所に始まり、その後各所に建設されている。しかし、この方式は大口径管で内圧による管厚が薄い場合は必ずしも経済的とはいえず、1955 年（昭和 30 年）中部電力奥泉発電所関之沢水管橋（径 4.4 m、支間 60 m）にはローゼ形式がとられ、ランガー形式もこの頃から各所に建設され始めた。1962 年（昭和 37 年）には東京電力早川第三発電所楠の木沢水路橋に両端固定のパイプ アーチ形式（径 2.8 m、支間 70 m、ライズ 8.08 m）が採用された。

e) 埋設部鉄管 最近の地下発電所の発達にともないペンストックも地下に埋設され

ることが多くなってきた。一般にろう水防止の目的でライニングする鉄管を内張管と称し、内圧を負担させる目的で埋設したものを埋設管と区別している。国鉄信濃川発電所の内張管は鉄材重量 3 300 t におよぶ大工事であり、このときに採用した工法が 18 年後の佐久間発電所内張管にも採用された。

埋設管は水圧の一部を地山にもたせることができるが、地山のヤング率とポアソン比、地山とのすき間、クリープの影響を確実に把握することが困難なため、わが国では特別の理由のないかぎり許されていない。外圧に対しては、真円でないために生ずる曲げによる繰応力が降伏点に達したときに抵抗力を失なう、とした E. Amstutz の理論が実例と一致するので、この理論が 1955 年（昭和 30 年）頃から検討され、最近に使われている。水門鉄管協会においては、埋設管に対する設計基準をたてるために実験的研究を実施中である。

f) 分岐管 分岐管は技術上ならびに経済上の理由から設けられるもので、形式上から球分岐と Y 分岐に分けられる。

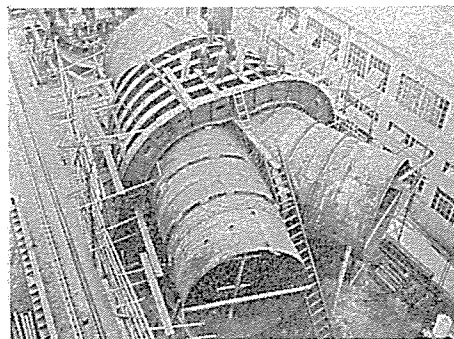
球分岐は球殻と円筒の組み合わせからなり、交截部は円であるので Y 分岐に比しシェール理論の展開が容易である。外国では早くから行なわれており、とくにフランスにおいて発達した。わが国では 1943 年（昭和 18 年）北海道電力雨竜発電所に始めて採用されたが、その後損失水頭が多いためにほとんど採用されなかった。1954 年（昭和 29 年）四国電力日野谷発電所に三分岐用として採用され、水理特性を改善する方法も研究され、シェール理論に基づく設計手法も確立されたので数年の間ブームを生じたが、最近ではその特質が認識されて適所（多分岐、非対称分岐、曲線兼用分岐、高圧部）に採用されるようになった。

Y 分岐はペンストックの設計製作上、高度の技術を必要とする異形管構造物である。これらの正確な解法は最近までなく、種々の実験の結果、測定値とほぼ一致する解法が立てられるようになった。昔の Y 分岐は管径も小さいので鋳鋼製が用いられた。Y 分岐の実例で特筆されるべきものは、やはり国鉄信濃川発電所の Y 分岐（径 6.7~4.8 m）であろう（写真—5.4）。

つぎに 1963 年（昭和 38 年）に完成した東京電力下滝発電所の 80 キロ級鋼材を使用した Y 分岐（径 3.3~2.4 m）をあげることができる（写真—5.5）。高張力鋼の発達に伴な

い Y 分岐にも利用度が増す傾向にあるが、降伏比の高い鋼材を構造上ひずみを拘束する可能性のある箇所を使用する場合は、図面どおりの十分な精度に仕上がるよう配慮すべきで、施工不十分によりさらに拘束度を増すことのないようにと奥村敏恵は警告している。

写真—5.4 国鉄信濃川発電所 Y 分岐



写真—5.5 東京電力下滝発電所 Y 分岐



g) 既設水圧鉄管（ペンストック）の取扱いについて 既設の水圧鉄管（ペンストック）は、現在までに相当数の大小事故が記録されている。これらの事故の原因となるものは、経過年数による自然老化や洪水などの不可抗力によるものが多いが、設計製作の不完全による欠陥、誤操作、保守不良の人為的条件によるものがあげられる。したがって、これらの事故を未然に防ぐために 1959~1960 年（昭和 34~35 年）に電気事業連合会において「水圧鉄管保守要領」、「水圧鉄管調査要領」が制定された。また、通産省公益事業局水力課では保守に必要な基礎資料として各電気事業者に通達して、水圧鉄管設備台帳を集成している。

（4）水 門

水門は扉体と巻上機から構成されている。これらは戦後の多目的ダムと高落差大容量発電所の出現により性能が著しく進展した。扉体の溶接化は他の鋼構造物におけるほぼ同時期に採用されたが、現場組立てを必要とする大型水門は水密性を保持するために全溶接は難があり、工場溶接、現場鉚接の手段をとっている。高張力鋼は最近において扉体の一

部に 60 キロ鋼が使用された例があるが、たわみ度に制限されて経済性が少ないので全面的な採用はまだ見受けられない。巻上機の操作方式は、昔は現場における直接操作であったが、現在では遠方操作もできるようになっている。また流量あるいは水位を一定に保つ自動操作機構を有しているものもある。このほか取水口ゲートには管路の故障にそなえて急降下装置が設けられている。ダムのクレストゲートは、昔は技術的な自信が少ないうえに小型のテンターゲートが数多く並べられたが、最近の発電用ダムにも洪水調節の使命を課せられているので、ゲートも大型化し、かつ、越流に強いローラーゲートが主体となってきた。この新機軸を画したのは 1954 年（昭和 29 年）関西電力丸山ダムであって、扉体は 2 枚物としてヒンジを設け、ローラーはロッカータイプとして荷重がピアに一樣に接触するように苦心が払われた。これを契機に、佐久間ダムなどに広く採用されるようになった。また特殊構造として浮遊物の多い貯水池、かんがい用温水放流を必要とするダムにおいては、徳島県川口ダム、電源開発秋葉ダムのように、取水口側寄りのクレストゲートに決渾板付のものが現われた。ただし、最近は温水放流の効果も顕著でないため影をひそめているようである。テンターゲートも、可動ゼキとして東京電力笹平発電所において大型化してから、クレストテンターゲートも大型化され、田子倉ダム、第二読書発電所など各所に実施例を見ることができる。またトラニオンのピン構造の基礎材に PC 工法の採用も報じられている。つぎに高圧コンジットゲートは、常用と非常用が並べて設けられるのが普通である。佐久間ダムの排水ゲートは水位 86 m、管径 3 m のコンジットに幅 3 m、高さ 2.5 m のスライドゲートとローラーゲートを併置したもので、わが国に前例のない高水深大容量のゲートである。このほか、御母衣、田子倉、井川、黒部川の各ダムにも高水深のコンジットゲートが設置されている。高水深取水口ゲートには佐久間ダムに幅 6 m、高さ 11 m、設計最大水圧 3 146 t のわが国最大のキャタピラーゲートがある。長径間ゲートにはローリングダム形式が多く径間が 30 m を越えるものもあるが、重量が大となり、かつ中央部の止水に難があるとして、シェル構造の箱型桁形式のローラーゲートも製作されている。今後は水資源の高度利用のために新しい形式が要求されるであろう。

1.3 材料の進歩

鉄材の発達には、鑄鉄、鋳鉄を経て構造用軟鋼の時代となり、ついで合金鋼、熱処理鋼も加わり、その強さは 40 kg/mm² 級から 50, 60 kg/mm²、さらに 100 kg/mm² にも達し、棒鋼、線材では 150 kg/mm²、200 kg/mm² という高強度のものが使用できるようになった。このような鋼材の進歩は、各種構造理論の展開と加工技術の発達と相まって構造界の目ざましい進展を可能とした。

(1) 鑄鉄

鑄鉄は 15 世紀に製造され始め、橋梁に用いられたのは 1776 年イギリスのセバン (Severn) 河に架設されたスパン 30.5 m (100 ft) のアーチ、コールブルックデル (Coalbrookdale) 橋が最初である。その後約 100 年ヨーロッパの諸国に鑄鉄橋が架けられたが、大部分はアーチ形式である。しかし、鑄鉄は材質がもろいため、しばしば欠陥を生じ、落橋事故も少なからずみられた。1847 年イギリスのコーンウェイ (Conway) 橋およびブリタニヤ (Britannia) 橋では、鑄鉄のアーチと鋳鉄の箱形桁とが比較され、鋳鉄がすぐれていることが認められた。アメリカではその後もしばらく鑄鉄を用いていたが、1876 年のアシュタブラ (Ashtabula) 橋の事故以来用いられなくなった。

わが国の鑄鉄橋梁としては 1873 年（明治 6 年）の大阪心斎橋（現在の新千舟橋）、1878 年（明治 11 年）の東京彈正橋（現在の八幡橋）などがあり、それらはボーストリングトラスで、上弦材は各 1 個の鑄鉄製でその他の部材は鋳鉄製であった。

鉄道橋では 1884 年（明治 17 年）にポーナルが設計した 4.6 m (15 ft) の桁が東海道線大垣一垂井間の站落川に架設された。この桁は後に鋳鉄桁に交換されたが、それが唯一の例である。

現在、鑄鉄は橋桁支承用材料、排水設備などに使用されるにとどまっている。

(2) 鋳鉄

1832 年、最初の鋳鉄桁がイギリスのグラスゴー (Glasgow) に架けられ、その後有名なブリタニヤ (Britannia) 橋（支間 40+140+140+40 m、長方形パイプ中を列車が通る箱桁橋、現存）に鋳鉄が用いられてから約 50 年、1890 年に至る間鋳鉄が構造用材料の主体となった。わが国における鋳鉄橋のあとをみると、1869 年（明治 2 年）横浜に架設さ

れた吉田橋がわが国最初の鉄橋で「かねの橋」として知られているワーレン トラスの道路橋であった。また、翌年長崎に架けられた「くろがね橋」の材質も錬鉄と推定される。鉄道橋における錬鉄桁の発展は 表—5.2 のとおりである。

表—5.2 錬 鉄 鉄 道 橋 の 概 要

年 代	径 間, 形 式	摘 要
1874 (明 7)	70 ft (支間) 複線ボニーワーレン トラス	神戸—大阪間, 武庫川, 下神崎川, 下十三川
1876 (明 9)	100ft (支間) ボニーワーレン トラス	大阪—京都間, 上十三川, 上神崎川, 茨木川, 桂川
	50 ft 複線下路プレート ガーダー	同上, 桧の尾川
1877 (明 10)	100 ft (支間) 複線ボニーワーレン トラス	東京—横浜間 六郷川
1878 (明 11)	上路プレート ガーダー	新橋, 神戸の鉄道工場で製作の記録あり
1879 (明 12)	50 ft 上路プレート ガーダー	京都鴨川, 三村により設計される
1885 (明 18)	20 ft~70 ft 上路プレート ガーダー	シュルビントン, ボーナルにより設計完了, 作錬式と称せられる
1886 (明 19)	200 ft ダブル ワーレン トラス	東北本線利根川, ボーナル設計
1888 (明 21)	100 ft 上路プラット トラス	東海道東部線第 5 相沢川, 1885 年原口要が邦人として初めてトラスを設計

表—5.3 鉄道橋より採取した錬鉄の試験結果

降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	試 験 片	備 考
26	34	8	1号 標点	1886 年(明 19)ボーナル 200 ft トラス, 東北本線利根川
29	35	12	6 "	1887 年(明 20)ボーナル 200 ft トラス, 東海道本線木曾川
28	36	16	5 "	明 30 年代, 日鉄式プレート ガーダー
23	34	11	5 "	同 上

錬鉄材は機械的性質において現在の普通軟鋼におとり(表—5.3 参照), 材質は層状をなし, その層が, はくり性のわれとなって材片内に腐食が進行するなどの欠陥はあるが, 耐食性は普通鋼に比して大きいという特長がある。錬鉄を用いた鉄道橋で, 移設, 一部補修, 補強は行なわれはしたが, 現在までまだ使用に耐えているものが相当数残存している。

錬鉄製 I 形桁(鉄道用)は, 1888 年(明治 21 年)に木桁と交換の目的で 3.7 m (12 ft), 4.6 m (15 ft), 5.5 m (18 ft) のものが設計されたが, 当時ポーナルは I 形に圧延されたものは外部から発見しにくい欠陥を含む場合が多く, 鉄道橋としては不適当である旨を説いてその実施を中止させ, これに代る錬鉄製プレート ガーダーを設計した。このような事情は溶接桁の初期における危惧と相通ずるものがある。このように官営線では錬鉄製 I 形桁は使用されなかったが, これと前後して山陽鉄道神戸—広島間 3.01 m (10 ft) 以下に, また九州鉄道門司—博多間にハーコート (Harkort) 社製のものが使用された。

(3) 軟 鋼

鋼の発達をみると, 1855 年ベッセマー (Bessemer) 製鋼法が発明されたが, これは Acidprocess でリン(P) および硫黄(S) が少ない Pig iron を必要とし, そのため高価であったので一般の構造用はまだ使用されなかった。その後 1870 年に Basic Bessemer 鋼(トマス法)が発明されてから価格も低下した。しかし両者とも技術的に十分な経験を要する製鋼法であり, 特にトマス鋼は材質に信頼性を欠き, 工場加工中にわれが入ることがあったりした。オーストリア規定で, 一般の鋼では引張強さ 36~45 kg/mm², その他のトマス鋼では 36~42 kg/mm² と最高強さを低くし, 硬いものはよくないとされていた。

1865 年シーメンス, マルチン (Siemens, Martin) によって発明された平炉鋼 (Open hearth steel) は, 1880 年代に工業的に大発展をとげ, 不純物の少ない均一性に富んだ鋼材が比較的安価に供給されるようになった。ここにおいて, 従来の錬鉄およびベッセマー鋼のように, 製造時の温度が低く鉄粒間にスラグが介在する信頼性にとぼしい材料から近代のような鋼の時代に入った。

上記の各鋼材を用いた既存桁に対する許容応力をみると, ドイツ鉄道橋では錬鉄および 1894 年 12 月 31 日以前の軟鋼で, 1400 kg/cm², 1895 年 1 月 1 日以降の軟鋼で 1500 kg/cm² とし (B.E. 1936), アメリカ鉄道橋では錬鉄で 1406 kg/cm², ベッセマー鋼で 1476 kg/cm², 平炉鋼で 1687 kg/cm² として, それぞれに対して区別している。

わが国における鋼構造の発達経過も, 前記欧米での経過とそれほどおくれることなく, 19 世紀末より鋼, 錬混合の構造から鋼へと移行している。鉄道橋におけるその推移をみると 表—5.4 のようであり, 1893 年(明治 26 年)以前の橋梁はすべて錬鉄またはベッセマー鋼と考えられる。

当時、鋳鉄桁から鋼桁になると桁断面が小となり、鉄道橋としてのたわみの増加、振動の点で問題はないかどうかが議論された。現代の高張力鋼への移行においても同様のことがとりあげられたのと考え合わせると興味がある。

道路橋では 1890 年（明治 23 年）に北海道石狩川に架設されたトラスが初めて、アメリカン・ブリッジ会社（American Bridge Co.）において製作された。

一般構造用圧延鋼材の強さは、JES 24（1925 年、大正 14 年）の S 39 A では引張強さ

表—5.4 鋼 鉄 道 橋 へ の 経 過

年 代	径 間, 形 式	摘 要
1888 (明 21)	200 ft ダブルワーレン トラス 表—5.2 の利根川と同形式	東海道本線天竜川、弦材は鋼、腹材は錬鉄 翌年、富士川、大井川等に同形式 30 連余 架設
1889 (明 22)	100 ft ワーレン トラス	湖畔線（現東海道本線）野洲川、初の鋼ト ラス
1893 (明 26)	20~70 ft } 上路プレート ガーダー	ボーン設計、補剛材の T 形および L 形 はなお錬鉄が用いられている
1894 (明 27)	80 ft } (作 30 年式)	
1895 (明 28)	3~12 ft 10 種類の I 形桁	設計が完了
1902 (明 35)	20~80 ft 上路プレート ガーダー	作 35 年式、杉 文三が設計

39~47 kg/mm² であったが、JES 430（1938 年、昭和 13 年）、JES 金属 3101（1948 年、昭和 23 年）、JIS G 3101（1952 年、昭和 27 年）と変せんし、上記は SS 41 として引張強さは 41~50 kg/mm² である。なお、臨 JES 281（1942 年、昭和 17 年）および臨 JES 740（1944 年、昭和 19 年）では、戦時特例として SS 41 が追加され、引張強さ 40~50 kg/mm² で化学成分、寸法差などが緩和されたものが一時認められた。機械的性質においては当初は引張強さ、伸びおよび曲げ試験が規定されていたが、1952 年の改訂より降伏点の規格も採用されるようになった。化学成分においては、P および S の上限値が規定され、その値は平炉または電気炉によるものと転炉によるものと区別され、後者の場合、P の値は大きかった。しかし 1959 年（昭和 34 年）の改正においてひとつの規定となり、鋼材は平炉、純酸素転炉または電気炉による鋼塊から製造することになった。

40 キロ級鋼は現在も鋼構造材料の主体となっており、その材質は次第に改善され、と

くに第 2 次大戦後の溶接構造の普及にともない、溶接性に対する諸要求が高まった。そして 1952 年（昭和 27 年）溶接構造用圧延鋼材 SM 41 および SM 41 W が JIS 規格となった（JIS G 3106）。この規格は機械的性質においては SS 41 と大差ないものであるが（伸びが 1 % 大きい）、化学成分において P、S を低目に制限し、SM 41 W では Mn/S ≧ 2.5 と規定し、Si 含有量を協定により定めることとしている。この場合 SM 41 はなおリムド鋼の場合が多いが、SM 41 W ではセミキルド鋼またはキルド鋼であって、溶接性に考慮がはらわれた。この規格は 1959 年（昭和 34 年）に改訂され、SM 41 A, B, C と分けられ、化学成分、衝撃値などに詳細な規定が設けられた。

（4）高 張 力 鋼

第 2 次大戦後わが国の復興事業の進展は目ざましく、道路、鉄道、発電事業などにおいて鋼構造物の建造もその量を増し、その構造規模は大きくなり、構造物軽量化の努力がなされた。その場合に考慮されたのが溶接工法であり、材料としては 50 キロ級鋼の採用である。

50 キロ級鋼は、すでに永代橋（1926 年、大正 15 年）、清洲橋（1928 年、昭和 3 年）などの道路橋、源助鉄道橋（1939 年、昭和 14 年）などにデュコール（Ducol）鋼が導入され、それらはタイドアーチのタイ、吊橋のチェーン、長径間ガーダーに用いらたもので、組立てはリベットまたはピンによった。しかし、戦後の 50 キロ鋼への要求は、SS 50 を用いた鉄塔、一部の鉄道橋でリベット結合のものはなおあるが、その大部分は溶接工法を考慮しなければならないものであった。

わが国の溶接性を考慮した 50 キロ級鋼は主として Mi-Si 系のものであり、引張強さ下限は 50 kg/mm²、52 kg/mm² あるいは 55 kg/mm² 程度が考えられた。これらは 1950 年代において各種の検討が進められたが、1955 年（昭和 30 年）52 kg/mm² 鋼を用いた初の橋梁である相模大橋（支間 57.76 m のゲルバー桁）は、なおリベット結合のものであり、東京神田の神田大通架道橋（1954 年、昭和 29 年）、信越線犀川の鉄道橋 トラス（1957 年、昭和 32 年）なども上記と同様な材料を用いたリベット結合の橋である。しかし、それ以後 50 キロ鋼において溶接を採用した橋梁はつぎつぎと現われ、現在では建設省土木研究所設計にかかる標準道路橋、東海道新幹線標準プレート ガーダーの一部分などがそれである。

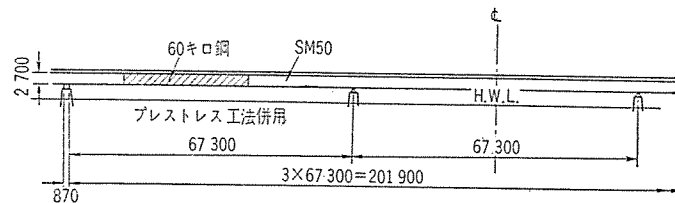
これらの材料は、1959 年（昭和 34 年）溶接構造用圧延鋼材 2 種として JIS 規格（JIS G 3106）に定められた。

上記のようにここ 10 年にして 50 キロ鋼は急速に普及したが、高張力鋼の進歩はさらに 60 キロ、70 キロ、80 キロ鋼となった。これらの鋼材は強度と同時にじん性を高め、かつ溶接性向上の目的から炭素量は比較的少量にとどめ、ほかに Si, Mn, Ni, Cr, Cu, Mo, V, Tr, Zr, B などの各種合金元素が添加され、また製鋼、圧延、熱処理の各工程でも独特の努力がなされている。調質 60 キロ鋼は 1957 年（昭和 32 年）より実用化され、各種容器類、ペンストックなどに始まり、1960 年（昭和 35 年）以降、名神高速道路の木曽川、揖斐川および長良川橋、首都高速道路の高架橋などの道路上において、つぎつぎと実用化されている（図—5.2）。

80 キロ級鋼は 1963 年（昭和 38 年）東京電力下滝発電所の Y 分岐管に用いられ、1964 年これを用いた道路橋が試作された。なお本州四国を結ぶ長大橋の計画にもこれら調質高張力鋼がとりあげられ、その各種性能について検討されている。長大スパンの橋ではどうしても自重が大きくなるため、溶接性のよい高張力鋼を用いて、できるだけ自重の増大を抑えることが望まれるからである。

このように実用しうる鋼材の強度はますます大となっているが、それとともにそれぞれの強度の鋼材において各性能はつぎつぎと改善され、50 キロ鋼でも従来の規格上の降伏

図—5.2 木 曽 川 橋



比 64% に対して 75% 以上の高降伏点鋼の実用の域に達し、また各強度の鋼材において低湿時のじん性に著しくすぐれた鋼種も作られている。

（５） 遠心力鑄鋼

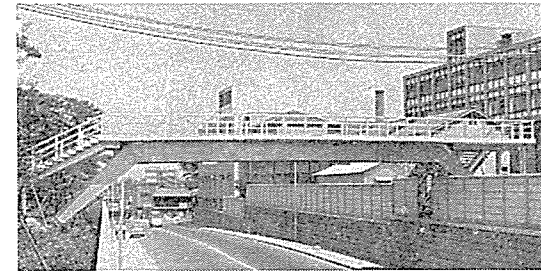
鋼材としては上記のような圧延鋼材のみでなく、溶接性においてもすぐれた遠心力鑄鋼

管も構造材料として用いられ、1962 年（昭和 37 年）より建設された国鉄新幹線大阪駅高架橋に鉄道荷重、道路荷重も受けるラーメンの柱として使われた。また地下鉄の柱、市街地道路橋の橋脚などにも用いられている。

（６） 軽 合 金

構造の軽量化に対しては、上記のような高強度鋼の採用のみならず、軽合金の使用も考慮される。1962 年（昭和 37 年）に製作された組立応急橋（支間 30 m トラス）、1963 年

写真—5.6 アルミニウム製の橋



（昭和 38 年）東京大学に作られた跨道人道橋（支間 21.418 m ラーメン、写真—5.6）にはアルミニウム合金が用いられ、前者は熱処理を施した高張力アルミニウム合金で、強度において構造用鋼にほぼ匹敵するものであり、後者は非熱処理アルミニウム合金で強度は前者に劣るが溶接性のあるものである。

構造用材料としてはこのように各種性質をもった鋼材のほか、軽合金、高強度コンクリート、軽量コンクリート、場合により合成樹脂の採用も考えることができ、それらを適材適所に組み合わせて、現代の構造物に対するいろいろな要求を満たすべく努力する必要がある、またその解決もそれによって可能であろう。

1.4 構造形式の発展

（１） 明治時代より第 2 次世界大戦まで

1.3 でのべたわが国で最初の鉄橋の吉田橋（1869 年、横浜）、弾正橋、阪神間武庫川鉄道橋など明治初年に架設された鉄橋は大部分がピン 結合ワーレン トラス、ボーストリング トラスであり、わずかに 1870 年（明治 3 年）長崎のくろがね橋が橋長 12 間の最初

のプレート ガーダーであった。この時代の設計は、イギリス人技師の指導がその発達に大きい寄与をしているが、やがて邦人技師の設計にかかる橋梁も作られるようになり、京都鴨川の鉄道橋（50 ft, 上路プレート ガーダー）は 1879 年（明治 12 年）三村周作によってとある。

1888 年（明治 21 年）構造用鋼が採用され、材料の強度は増大したが、形式的な変化はみられなかった。1897 年（明治 30 年）頃からアメリカの進歩的技術に依存するようになり、それまでのイギリス流にとって代ったのである。この時代はアイバーを使用したプラット トラスが多く見られる。しかし、明治末には国内において桁の製作が行なわれるようになり、1908 年（明治 41 年）の水道橋、1911 年（明治 44 年）の鉄道橋のトラスなどは国内メーカーに発注された。

曲弦プラット トラスの新大橋（隅田川）は 1912 年（大正元年）の竣工で、この頃からピン結合トラスはリベット結合に移ろうとしていた。またこれまでは力学的には静定構造の時代で長径間の橋梁はプラット トラスが多く、順次不静定構造へと進んでいった。東京品川の八ツ山橋はわが国最初のタイド アーチとして大河戸宗治らの設計にかけ 1914 年（大正 3 年）に竣工したものである。

前述のように、明治時代は先進諸外国の設計技術に依存してきたが、鉄道の国有化を契機（1906 年）に設計示方書が制定され、鉄道を初めとする橋梁技術者が養生されてきた。そしてついに大正時代に入って設計製作ともわが国の技術で行なわれるようになり、外国依存に終止符がうたれたのである。そしてこの大正時代において潜在的な研究と努力が、1923 年の関東震災後の復興事業の輝かしい成果として現われた。とくに隅田川橋梁の架設は現在なお不滅の構造美を示し、わが国橋梁界の技術的水準を大いに引き上げることになった（1.6 参照）。すなわちデュール鋼を使用したタイド アーチの永代橋を始めとして、自定式吊橋の清洲橋、アーチの蔵前橋、駒形橋、ゲルバー ガーダーの言問橋など、どれも中央支間 50~100 m の大きなスパンをもち、しかも形式の異なったものであった。

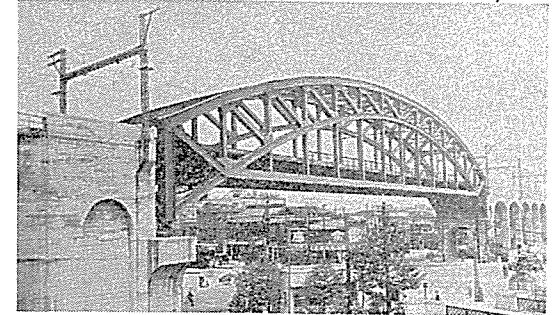
一方、この時代の鉄道橋の進歩も目ざましく、中央線（東京）にラーメン ガーダー（1926 年、大正 15 年）高森線第一白川のバランスド アーチ、そして中央線万世橋に曲線下路プレート ガーダーが架設された（1928 年、昭和 3 年）。さらに、1932 年（昭和 7 年）

鉄道大臣官房研究所の田中豊らにより総武線隅田川に支間 96 m のランガー桁、同じく松住町に支間 72 m の道床式タイド アーチ（写真—5.7）が架設された。そして 1938 年には沼田政矩らにより川口線第一只見川で、中央支間 112 m のバランスド アーチが完成された。

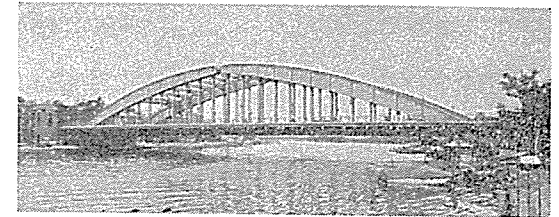
また道路橋では 1934 年（昭和 9 年）上路充腹アーチの天神橋、上路ランガー形式の平野橋、3 ヒンジ アーチの桜宮橋（写真—5.8）が大阪で架設され、一方ランガー トラス

の伊勢大橋、バランスド アーチの晩翠橋（栃木）などのように、構造理論の発展により不静定構造の形式がつつぎと出現し、構造的にも支間の増大化からも多くの業績が残された。ラーメン（御茶の水橋、外苑橋など）、フィーレンデル（豊海橋）を初めとし、その立地条件に適合した各種形式が出現した。その後、跳開橋の勝興橋、ゲルバー トラスの戸田橋、大師橋などが架設されたが、支那事変後からは鋼材使用が軍事目的以外に対して窮屈になり、ついに鋼橋の架設は僅少となってしまった。わずかに 1944 年（昭和 19

写真—5.7 タイド アーチ（松住町鉄道橋）



写真—5.8 3 ヒンジ アーチ（桜宮橋）



写真—5.9 船車連絡可動橋



年)北海道炭の鉄道輸送のため青函連絡に船車連絡可動橋が完成(写真—5.9),また,軍用可撤式組立トラスなどがつくられた。

(2) 第2次世界大戦後から現代まで

終戦後極度に衰微した国力にもかかわらず国土の復興は必要にせまられた。荒廃した橋梁の中でまず災害復旧工事が優先された。しかも鋼材は割当制であったが,その中で早くも岐阜県のタイド アーチの忠節橋,多径間のゲルバー ガーダーである国道1号線の多摩川大橋などの架設によって火ぶたが切られた。

長径間を渡るには経済性と外観美からアーチ系橋梁が多く採用されてきた。ランガー形式のものとしては1949年(昭和24年)支間70mの那珂川大橋,1953年群馬大橋,1955年支間105mの海尻橋,1959年支間90mの海門橋(352 kg/m²),1961年大阪環状線の支間120mの安治川橋,そして支間114.8mの音戸大橋(258 kg/m²)に至るまでに発展した。ランガー形式と力学的原理は同じであるが,アーチ部材にも曲げ剛性をもたせたローゼ桁としては,千歳橋(静岡),旭橋(広島)や逆ローゼの三坂大橋(群馬)などがある。

これらは補剛アーチ橋と総称されるものであるが,いわゆるアーチ橋としては,1954年(昭和29年)に2ヒンジ スパンドレル アーチ形式の熊ヶ根橋(支間110m),1955年には支間216mを有する東洋一の固定トラス アーチ,西海橋が完成された。

数ある橋梁形式の中で,吊橋は長大径間を渡るのに最も有利なものである。わが国でも1962年には中央支間367mの若戸大橋が完成し,技術的に長径間吊橋に対しての根底がつくられたといつてよいであろう。この橋の設計には,タコマ橋落橋以来問題となっている吊橋の耐風安定性に対する配慮も,平井敦などの助言によってとり入れられている。

第2次大戦後の橋梁はドイツにおける目ざましい技術の進歩に影響された面が多い。構造形式については,橋梁全体を立体的に扱うようになったことで,その一つに合成桁がある。わが国では1952年に鶴見川橋(横浜),神崎橋(大阪)などが種々研究のうえ架設されたが,その後10年を経て,道路橋 プレート ガーダーでは非合成のものは見られないといつてよく,鉄道橋でもさかんに用いられるようになった。合成桁は鉄筋コンクリート床版も主桁の一部として働かせる構造であり,溶接技術,材料の進歩と相まって,戦前のリベット結合プレート ガーダーに比して鋼重は半減された。一方,横桁の荷重分配

作用を考慮に入れた格子桁が幅員の大きな橋に用いられるようになった。

格子桁理論はさらに橋梁の鋼床版構造にも応用されている。鋼床版は従来の鉄筋コンクリート床版に代り,鋼床を縦横のリブで補強し,その上にアスファルト舗装を施したもので,軽量化という点で大きな利点があり,自動溶接の出現はさらにその発展に拍車をかけた。ただアスファルト舗装については,なかなか好結果が得られなかったが,近年本格的なグース アスファルトの出現によってこの難点が解決されつつある。わが国では東京の中里跨線橋,大阪の新六の橋,宇喜田橋などが初期の鋼床版橋である。

この鋼床版を主桁フランジとしても作用させ,主桁は箱形断面とした鋼床版箱桁橋の出現は,ねじりや横方向の力に対しても剛で死荷重も大幅に軽減されることから,ガーダー形式橋梁の適用支間の増大に画期的な寄与をなした。大戦後ドイツで復旧され,あるいは新設されたライン河橋梁には連続桁形式ではあるがスパン200mを越えるものがいくつか架設され注目を集めた。わが国でもいち早くこの種構造の開発が進められ,1959年(昭和34年)に架設されたガス橋(神奈川)は支間58.3mで単位面積あたり鋼重は303 kg/m²,城ヶ島大橋(神奈川)は,3径間連続鋼床版箱桁(70m+95m+70m)で321 kg/m²,翌年完成した甲子園橋(兵庫)は同じく3径間連続(56m+70m+56m)で295 kg/m²,さらにこれは鋼床版式ではないが合成台形箱桁の日本橋(福島)では支間51.4mで236 kg/m²,そして1964年にできた首都高速道路一号線の森ヶ崎橋梁は橋長240mの3径間連続曲線台形箱桁で262 kg/m²という鋼重となっており,死荷重の軽減化も目ざましいものがある。またガーダー形式橋梁のスパンの長大化という面では,前記の城ヶ島大橋や安治川橋(大阪),佃新橋(東京)について,1964年には主径間140mの琵琶湖大橋(滋賀県)の誕生を見るに至った。

これら三橋はいずれも連続上路桁橋であり,これも最近の橋梁の一つの特色である。連続桁形式の採用によって桁高を低くし材料を節約することができるが,これは基礎工法が進歩したため安心してこのような形式が採用されるようになったのである。また橋上を通行する自動車の走行に安心感を与え,視野を妨げないために上路式の橋をなるべく選ぶ傾向となっている。合成桁でもこの傾向は顕著で,大阪の友洲橋,毛馬橋,名神高速道路の猪名川橋などがそれで架設にはかなりの苦心が払われ,筏橋などは鋼材によりプレストレスされた橋である。鉄道橋でも1955年(昭和30年)完成した国鉄富士川橋梁は中路型

3 径間連続 プレート ガーダー (3 @ 63.5 m, 写真—5.10) などその趣旨に沿うものであった。

道路の線形に合致させて構造を設計することも最近の橋梁に対する大きな課題である。1956 年 (昭和 31 年) に架設された支間 25 m, 曲率半径 30 m の曲線プレート ガーダーの白糸橋 (神奈川, 写真—5.11), 支間 43 m, 斜角 19° の斜橋である大町橋 (大阪) を始めとして曲線橋, 斜橋が急速に増えてきた。これらは構造力学の理論の発展と製作技術の進歩によるところが大きい。

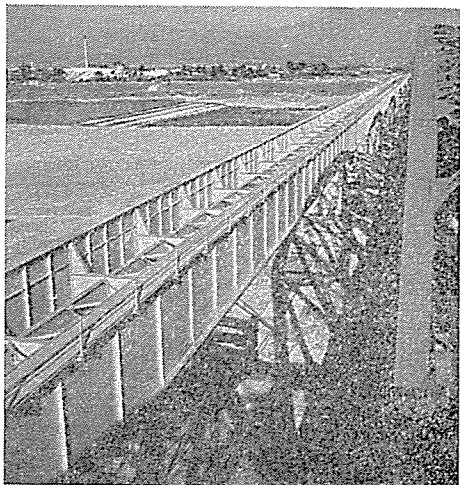
そして最近必要にせまられている都市高速道路の高架構造では、とくにこの種構造の利用度は大きい。阪神高速道路の S 字型曲線橋, 首都高速道路の鋼橋脚と一体構造となっている連続桁, ラーメン桁などは新しい立体構造を生み出し, 高架のインターチェンジなどが処理された (写真—5.12)。

戦後の目新しい橋梁形式と

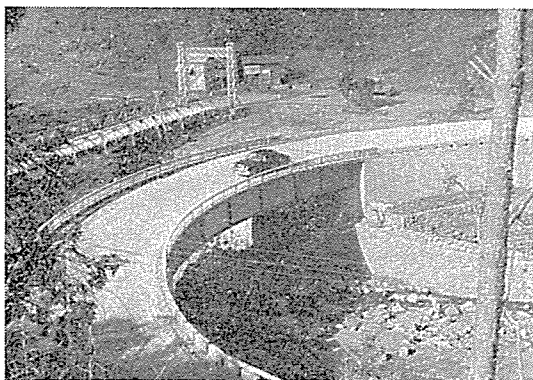
しては、ドイツで発展した斜張橋を見のがすことはできない。プレート ガーダーを塔から斜めに張ったケーブルで吊したこの橋は、わが国でも 1959 年 (昭和 34 年) 相模湖にかけられた勝瀬橋 (支間 128 m) を始めとして一、二見られるが、鋼重の節減とい

う点で利点はあるとしても、まだいくつかの問題が残されていると考えられる。1963 年完

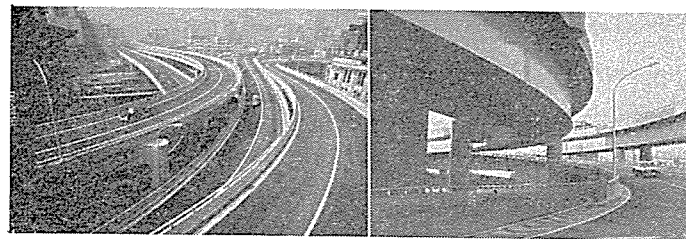
写真—5.10 国鉄富士川橋梁



写真—5.11 白 糸 橋



写真—5.12 首都高速道路インターチェンジ



成した東京都の葛西橋はゲルバー式吊補剛桁橋 (70 m + 144 m + 70 m) で、軟弱地盤という悪条件を克服した優美な橋である。

また新しい設計理念として塑性設計 (極限設計) が生まれてきた。従来の材料の許容応力を基準とした設計法に代って、構造物の実際の終局強度を基にしたこの設計法は構造物の合理性を高めるうえ新たな問題を提供して行くことであろう。すでにこの方法で第二阪神国道の跨道橋の設計がなされた。

以上述べたように、合理的かつ経済的な構造形式の開発がとみにさかんになったことは第 2 次大戦後の大きな特色であろう。設計技術の競争もさかんに行なわれるようになって、新形式橋梁の出現、鋼重の軽減、適用支間の拡大がはかられるようになった。この原因として構造力学の進歩、材料の性質の向上、技術の発展のほかに、電子計算機を駆使することによって設計能率が上り、また測定技術の進歩により模型実験や実橋の測定がさかんに行なわれ、理論の裏づけが確立されるようになったことも見のがすことはできない。一方、製作の面でも工費の低減を目的として製作工数の減少をはかることが構造形式の選定にも影響している。

1.4 リベット結合から溶接集成へ

明治時代、構造材料は鋤鉄から鋼へと進み、現代のように各種材料を駆使するに至ったが (1.3 節参照)、それらの材料を工場において集成して部材となし、また現場において構造物として組立てる方法のあとをたどるとつぎのようである。

工場では リベット結合から溶接へ

現場では ボルト、ピン結合からリベット結合へ、現代では溶接や再びボルトが用

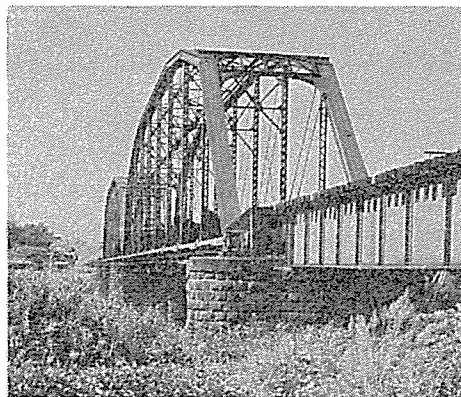
いられることがある。

すなわち、各材料のもつ能力を有効に働かせ、安全、容易で経済的な工法に対する努力が認められる。部材の継目における応力の伝達は連続的な継目になるほどすぐれており、ピン、リベットのような不連続な点から線の接続（すみ肉溶接）へ、さらに連続的な突合せ溶接あるいは高張力ボルトを用いた面接合へと進んでいる。

（１）ピン結合

明治時代に架設されたトラス橋は、写真—5.13 のように格点での部材連結をピンによったものが多い。トラスの設計計算では格点はピンと仮定して行なわれるのでピン

写真—5.13 クーパー型ピン結合トラス



スはその仮定に近いわけであるが、実際には格点部の摩擦および腐食によりピン部が回転端としての機能を失うこと、ピンおよびピン孔の摩耗によりトラス全体にゆれが生ずることなどの欠陥が生じ、とくに鉄道橋では活荷重の割合が大きく振動もはげしいので、細長比の大きなアイバーに破断するものが現われた。アイバー破断はすでに大正初期において数カ所発生したが、戦後ひきつづいて数件の事故が生じ、

またトラス全体の振動の増大、アイバーの異状振動も認められた。これらのことから、現在主要線区のピントラスはつぎつぎと架替えられており、また新しいトラスにピン結合は採用されていない。

（２）リベット結合

鋳鉄の時代から今日に至るまで、リベット結合は材片集成および部材連結の主たる方法のひとつである。リベット締めは初め人力によっていたが、アキュムレータが造船方面で早くから取り入れられていたので、水圧ジョーリベッタは相当古くから使用されたようである。1901 年（明治 34 年）クーパー（Cooper）の定めた鉄道橋示方書には、締めが終ってからその圧力が残っているものを要求している。そのような水圧ジョーリベッタに

ついでニューマチックジョーリベッタも使用されるようになり、設備が簡易であることから、後者がリベット締め機械として多くなっていた。リベット結合は鋼構造物の現場継手としては、なお大きい比率を占めている。ただ、施工時の騒音は近年その害が叫ばれ、現場締め器具として無騒音油圧式リベット締め機械なども考えられ始めた。

リベットの材料は結合する鋼材と見合うものであって、40 キロ鋼に対しては 34~41 kg/mm² の SV 34 リベットが用いられ、50 キロ鋼には 41~50 kg/mm² の SV 41 が用いられる。60 キロ以上の鋼材に対するリベット材としては 50 キロ級のものも検討されたが、現在ではまだ SV 41 が用いられている。

表—5.5 リベットの許容値の変せん（単位 kg/cm²）

年	代	適	用	母材 引張応力 (σ_a)	支圧応力 (σ_c)	せん断応力 (τ)	$\sigma_a : \sigma_c : \tau$
1901 年	(明 34)	Cooper	鉄道橋	844	1 055	633	1 : 1.25 : 0.75
1912 年	(# 45)	鉄	道 横	1 125	1 687	844	1 : 1.50 : 0.75
1928 年	(昭 3)	鉄	道 橋	1 200	1 800	900	1 : 1.50 : 0.75
1939 年	(# 14)	道	路 橋	1 300	1 900	950	1 : 1.46 : 0.73
1955 年	(# 30)	道	路橋、鉄道橋	1 300	2 200	1 000	1 : 1.69 : 0.77
1964 年	(# 39)	道	路 橋	1 400	2 200	1 100	1 : 1.57 : 0.79

リベット継手に対する橋梁における許容値は表—5.5 に示すようで、材質および施工が進歩するにしたがい許容値は大となっているが、母材の許容引張応力と比べると、その比率は支圧力においては大きくなっているが、せん断力においては往時から大して変わっていない。

写真—5.14 は代表的なりベット結合トラス橋で上弦材を格点ごとに折る構造とした

写真—5.14 利根川道路橋



のは大正末期の利根川道路橋以来である。

(3) ボルト結合

往時、リベット締め技術が未発達の時、現場における部材の連結にはボルトが使われた。ボルト締めは施工が容易である利点はあるが、ボルト孔と軸との間には間げきがあるため継手がずれたり、振動、衝撃によりナットがゆるむことがあるなどの欠点がある。したがってボルト軸に傾斜をつけ、ボルトを孔に打込むようなものも考えられていた。1888 年（明治 21 年）竣工の皇居二重橋（1964 年架かえ）は 3 ヒンジ アーチでドイツのハーコート（Harkort）社製であるが、アーチリブの現場継手は、このテーバーボルト結合である。しかし、リベット締め技術の進歩にともなう、橋梁主要部材におけるボルト締めはほとんど行われなくなり、1955 年（昭和 30 年）の道路橋示方書および鉄道橋示方書とともに「部材の連絡には、やむを得ない場合のほかボルトを使ってはならない」としている。しかし、施工の簡易さから、鋼構造物の継手へのボルトの使用は局部的に行なわれている。

上記のボルト継手におけるボルトの役目はリベットと同様に考えられたもので、その強さは 40 キロ級までが多く、強度計算はボルト軸部のせん断強さと、ボルト孔における支圧強さに基づいたものである。

(4) 高力ボルト結合

リベット継手におけるも継手材片をリベットが締め付ける力による材片間の摩擦抵抗が応力の伝達にある程度有効であることが明らかになるにしたがい、ボルトの締め付け力による材片間の摩擦抵抗によって応力を伝達することが考えられた。このためには使用するボルトは強度の大きなものを必要とする。

このように新しい考えに立つボルト継手に関する研究は、1938 年アメリカのウィルソン（Wilson）などの研究に始まり、1951 年にはアメリカで高張力ボルト継手に関する示方書が制定された。わが国における研究は 1953 年（昭和 28 年）末より始まり、翌年、高山線角川橋梁（支間 62.4 m、単線ワーレン トラス、工事用桁）の現場継手に試用された。これはドイツにおける始まりと、ほぼ時を同じくしている。この工事に使用されたボルトは、引張り強さ 60kg/mm^2 で焼入れ、焼もどしは行っていないものであったが、その後中炭素鋼を熱処理したボルトが研究され、80 キロ級および 90 キロ級のものが使

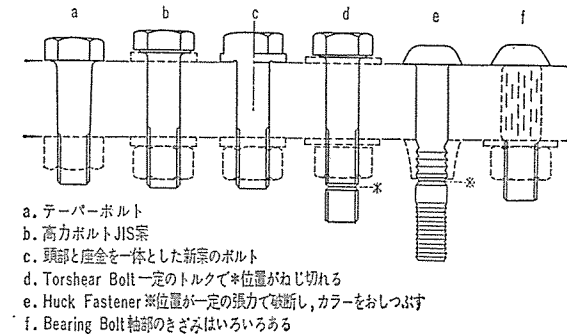
われた。前者は鉄道橋で、後者は建築関係で発達した。建築関係では 1958 年（昭和 33 年）東京のプリジストンビル増築工事に使用されたのが本格的工事の始まりで、1959 年（昭和 34 年）に設計、施工規準案が建築学会から発表された。これは引張り強さ 72kg/mm^2 および 90kg/mm^2 の 2 種類のボルトを用いた規準である。道路橋では、1960 年（昭和 35 年）、首都高速道路公団でとりあげられ、翌年設計施工指針が作られた。

使用するボルトはその後さらに高強度となり、1960 年以降 110kg/mm^2 の低合金鋼を用いたボルトが作られ、1962 年（昭和 37 年）以後鉄道橋の継手その他に多く用いられるようになった。1964 年土木建築関係の各規格を統一し、ボルトを一般化するため JIS B 1186 が制定された。この規格では引張り強さ 70, 90, 110, 130kg/mm^2 の 4 種類のボルトが規定されている。

高力ボルト摩擦継手設計上の問題点のひとつに引張部材におけるボルト孔控除の方法があり、ドイツでは孔控除計算においてリベット継手と異なった計算式を与えているが、わが国ではまだその根拠に明らかな点もあり、リベット継手と同様な方法によっている。これはアメリカにおいても同様である。

ボルトの締め付けは、ナットに加えるとトルクと導入されるボルト張力との関係がほぼ一定であることに基づいたトルク法が現在ではもっぱら行なわれている。これは施工にやや注意を要するので、さらに容易なナットを一定量回転させる方法が検討されている。なお、ボルトを引きちぎり、ナットに相当するカラーをおしつぶして締め付け力を与える新しい形式のハックボルトも近年実用化され始めている（図—5.3）。

図—5.3 いろいろなボルト



高力ボルト摩擦接合は、市街地における建築、鉄道橋、道路橋や、60 キロ鋼を用いた橋梁などに近年その使用量が増加している。

ボルト継手としては、上記の摩擦接合のほか、摩擦抵抗とボルトの支圧による抵抗とをともに考える形式や、荷重がボルト軸方向に作用する継手方式（引張ボルト継手）などが検討されており、後者はすでに建築関係に二、三実用化されている。

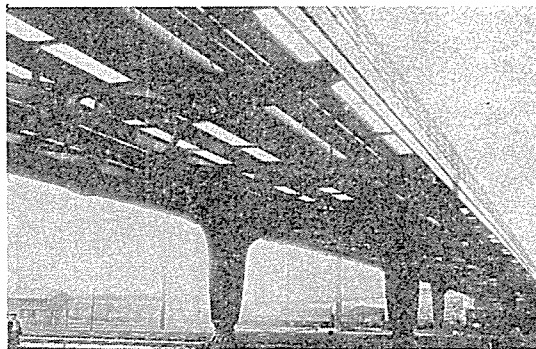
（５）溶 接

1932 年（昭和 7 年）奥羽本線松山川橋梁（上路プレート ガーダー）の溶接補強にはじまった橋梁に対する溶接の採用は 1940 年（昭和 15 年）頃までに 1 300 連余の補強工事となり、橋梁における溶接に大きな刺激となった。また 1932 年（昭和 7 年）には横浜市の水道鉄管橋にも溶接が用いられ 1934 年には同じく横浜市に瑞穂橋（鉄道用）が完成している。1935 年（昭和 10 年）山手線田端駅構内に田端大橋（ゲルバー形式、支間 40.5 + 53.0 + 40.5 m）が竣工したが、これは当時溶接ガーダーとして世界最長の支間を誇るものであった（写真—5.15）。この橋は現場継手によったもので、斜突合せ溶接と添板を用いたすみ肉溶接が主体となっていた。またフランジと腹板との溶接は断続溶接によった。

そのほか同年東京都の堤方橋（橋長 14.3 m）、翌年には長者橋（橋長 12.4 m）、末広橋（橋長 25.5 m）、1937 年（昭和 12 年）には 8 号国道の鶴川橋（3 径間連続桁）などが作られた。

鉄道橋への溶接の採用は、溶接補強の経験から慎重に徐々に行なわれ、全溶接鉄道橋としては 1941 年（昭和 16 年）可部線安第一橋梁に支間 7.2 m の集成 I 形桁が架設された。その場合、木製のステージが支間中央に桁とややすき間をとって設けられていたというように非常に用心された。このように溶接桁は、なおしばらくは試験的段階を脱せ

写真—5.15 全 溶 接 田 端 大 橋



ず、第 2 次大戦を迎えるに至った。

第 2 次大戦後、橋梁の建設工事は次第にその量を増していったが、当初はなおリベット結合の構造が多かった。しかし、戦後飛躍的に発達した新しい溶接技術は橋梁などにも大きな影響を与え、1950 年代に入り溶接の橋梁への応用が顕著になってきた。1949 年（昭和 24 年）に完成した広島県の恵川橋（11 m + 14 m + 11 m、ゲルバー桁）は戦後最初的全溶接道路橋であり、翌年には中道橋、甲武橋などが作られ、1952 年（昭和 27 年）の兵庫県養父橋では主桁の現場溶接が行なわれ、1954 年（昭和 29 年）には福岡県の諸富橋（トラス橋）が完成している。

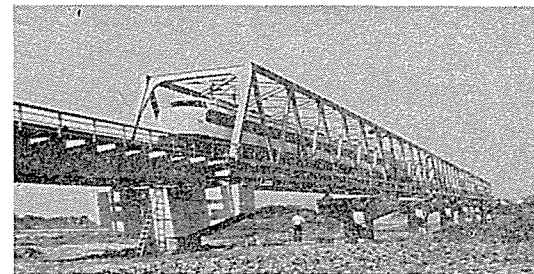
鉄道橋での溶接は、ガーダー腹板の水平添接、下路橋の縦桁（1951 年、昭和 26 年）、I 形桁、槽状桁などから始まり、これによりくり返し数の多い列車荷重に対しきびしい試験を受けてその安全性が確認された。また、上路桁ではフランジと腹板はリベットで取り付け、カバープレート、腹板、補剛材が溶接された一時期（1955 年、昭和 30 年）を経て、現在のような全溶接の桁に至った。1955 年（昭和 30 年）には飯田線天竜川に垂直材のないワーレン トラス鉄道橋が溶接で作られた。それから、現在新幹線などで標準形となっている溶接トラス（写真—5.16）となった。

溶接の採用によって設計の自由度も増し、橋桁の形状も I 形断面プレート ガーダーから箱形断面、鋼床版、曲線桁、

写真—5.16 新幹線用溶接トラス

また各種形状をもったラーメン構造など、建設条件に適したいろいろのものが作られている。

溶接方法は、1932 年（昭和 7 年）の鉄道橋補強工事当初はすべて直流アーク溶接で



あったが、1937 年（昭和 12 年）頃から溶接棒の改良にともない交流溶接も可能となり、戦後は交流がほとんどとなった。自動溶接は 1950 年代にその採用が進み、ユニオンメルト法（Union Melt）が大部分であり、Fuse Arc、C. S. Arc などを用いられる。また炭酸ガス半自動溶接も近年使用されだした。

溶接橋に対する規準は、1931 年（昭和 6 年）、当時の鉄道大臣官房研究所において作られた電弧溶接鋼構造物設計および製作示方書案があり、鉄道橋では 1954 年（昭和 29 年）までつづき、以後土木学会に設けられた溶接鋼鉄道橋研究委員会において設計・製作示方書が作られた。1931 年の示方書における許容応力度は、工場突合せ溶接に対し引張り 900 kg/cm^2 （母材の 75 %）、圧縮 1000 kg/cm^2 （母材の 83 %）とされていた。また、1940 年（昭和 15 年）の道路橋示方書では引張り 910 kg/cm^2 （母材の 70 %）、圧縮 770 kg/cm^2 （母材の 70 %）であった。しかし、現在の基準は道路橋、鉄道橋とも工場溶接に対し母材の 100 % まで可能となっている。

なお、溶接に対する規定は、一般の示方書としては 41 キロ鋼および 50 キロ鋼に対するものまでであるが、近年 60 キロ鋼あるいはそれ以上の鋼材を用いた構造物も数を増して来るに当たって、企業者あるいは研究委員会において設計、製作に対する規準が発表されるようになって来た。

現在溶接は材料の節減、設計の簡明、自由性の増加から目ざましく発展し、鋼構造物の大部分に採用されており、東海道新幹線の鉄道橋 約 90 000 t も現場継手を除きすべて溶接構造となっている。

現場溶接はなお施工の困難さなどから橋梁などではまだ少ないが、首都高速道路公団の高架橋の脚などでは 60 キロ鋼の現場溶接も行なわれるようになっている。

鋼材の切断は、初期には鋼板、山形鋼ともタガネでキズをつけ、型台の上にのせて折り曲げて割っていた。1910 年（明治 43 年）頃からシャリングマシンの 2 ft (0.61 m) 位のものが使用され始めた。ガス切断は 1915 年（大正 4 年）頃に始まり、第 2 次大戦後自動ガス切断機が大いに進み、現在鋼板は大部分これによって切断され溶接の採用とあいまち、鋼構造物のコストダウンに大いに貢献している。

1.5 構造合理化への努力

（1）構造合理化の意義

構造の合理化とは一言にしていえば、よいもの、すなわち少ない材料で大きい荷重に耐え、かつ、長く使えるものを速く、経済的につくることであるといえよう。同一量の材料で、少しずつ長い支間のものが架けられるようになることも一つの例であり、逆に同じ支

間では所要材料が次第に減ってくること、あるいはコストが下がってゆくことともいえよう。また技術的に架けることが困難であった支間が可能になるのも構造の合理化があってこそである。また、合理性をもった構造はおのずから構造美をそなえている。このことは構造の合理化への欲求は、美の追求にもつながっている。ところで構造の合理化を論ずるには、つぎのような各種の要因を考えなければならない。

- （1） 示方書、基準等の体系的整備
- （2） 構造材料の進歩、発達
- （3） 新しい構造形式の発案と設計理論の進歩、発展
- （4） 資料整理と設計作業の合理化
- （5） 応力測定技術の進歩、発達、実験的研究の発展
- （6） 製作技術、架設工法の進歩、発達
- （7） 既設橋の維持・補修法の合理化
- （8） 技術者の質と量の向上

このうち（2）と（3）についてはすでに 1.2～1.4 で紹介したので、ここではふれない。

（2） 示方書の整備

合理化の第一歩はまず技術の法律というべき示方書、基準などの体系的整備である。この変遷をたどることは各時代の建設の規模と社会的背景あるいは技術者層の厚みと技術水準を知る上においても、最も近道であろう。表—5.6 は道路橋、表—5.7 は鉄道橋示方書の年表である。鋼材の許容応力度は鉄道橋にあっては、明治後期から大正時代の鋼材に対しては 1200 kg/cm^2 程度（破壊強度 $3900 \sim 4700 \text{ kg/cm}^2$ ）をとっている。これは現在にほぼ近い値である。道路橋は、当初はなんら規準がなく鉄道橋と同じくとっていたが、1926 年（大正 15 年）の細則（案）ではっきりと 1200 kg/cm^2 とし、1939 年（昭和 14 年）に 1300 kg/cm^2 となって現在まできたが、今回の改正では品質管理の向上が著しいとして 1400 kg/cm^2 に上げている。

示方書にはこのほか設計あるいは製作に関連する事項がもりこまれ、その内容も絶えず新しい研究成果に基づいて検討がくり返されている。

表—5.6 道路橋関係示方書の変遷

年 次	西 暦	法 令, 示 方 書, 基 準
明治 19 年 8 月 5 日	1886	○国県道の築造保存法等の標準に関する訓令 (内務省訓令第 13 号) はじめて 400 貫/坪 (454 kg/m ²) の荷重が規定される。
大正 8 年 4 月 11 日	1919	○道路法 (法律第 58 号) わが国はじめての道路法制定さる。 橋は道路の付属物と規定される。
8 月 12 日		○道路構造令 (内務省令第 24 号) はじめて車両荷重を設く 車 両 { 国 道 2100 貫 (7875 kg) 荷 重 { 府 県 道 1700 貫 (6375 kg) 群集荷重貫 11 平方 ft (490 kg/m ²)
15 年 6 月	1926	○街路構造令 (内務省令第 25 号) 車両荷重 3000 貫 (11250 kg) 群集荷重 15 貫/平方 ft (560 kg/m ²) 主要橋梁は不燃質材料を用うべしと規定している。
		○道路構造に関する細則 (案) 第二章 橋梁 (内務省土木局) 先の荷重をメートル法に換算し 自動車荷重 1 等橋 (街 路) 12 t 2 等橋 (国 道) 8 t 3 等橋 (府県道) 3 t の 3 種 群集荷重 1 等橋最大 600 kg/m ² 2,3 等橋最大 500 kg/m ² と変更, かつ衝撃, 地震, 許容応力度等の規定をはじめて設ける。
10 年 11 月	1935	○道路構造に関する細則 (案) (内務省土木局) 主として道路構造一般の規定であって, 橋については建築限界線形, 勾配等のみが規定されている。 昭和 14 年の示方書はこの細則案と一連のものである。
14 年 2 月	1939	○鋼道路橋設計示方書 (案)

		(内務省土木局) わが国ではじめて設計, 細目まで整備された示方書である。 自動車荷重は 13 t (街路, 国道) 9 t (府県道) と増加した。
15 年 4 月		○鋼道路橋製作示方書 (案) (内務省土木局) 鋼道路橋設計示方書と不即不離のものとして作成されたものである。
27 年 6 月 10 日	1952	電弧溶接, 鋼道路橋設計示方書 (案) (内務省土木局) わが国はじめてのものである。
31 年 5 月	1956	○道路法 (法律第 180 号) 橋は道路の付属物でなく, 道路の一部であると定義された。
32 年 7 月	1957	○鋼道路橋設計示方書 自動車荷重は 20 t (一等橋), 14 t (二等橋) に増加。
33 年 8 月 1 日	1958	○鋼道路橋製作示方書 (日本道路協会) ○溶接鋼道路橋示方書 (日本道路協会) ○道路構造令 (政令第 244 号) 橋は永久橋とする原則がはじめてたてられた。 活荷重については昭和 31 年鋼示と同じく 20 t, 14 t が定められた。
34 年 8 月	1959	○鋼道路橋の合成桁設計施工指針 (日本道路協会)
39 年 3 月	1964	○鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会) 設計荷重はかわらない。 ○鋼道路橋製作示方書 (") ○溶接鋼道路橋示方書 (")

表—5.7 鉄道橋関係示方書の変遷

年 次	西 暦	法 令, 示 方 書, 基 準
明治 42 年 6 月 17 日	1909	○橋台, 橋脚および橋桁および橋桁設計にはクーパー E33 を使用することに制定さる。 (鉄道院達 522 号)
45 年 2 月 21 日	1912	○鋼鉄道橋設計示方書

大正 10 年 10 月 14 日	1921	(鉄道院達 111 号) わが国はじめての公定の設計示方書である。 国有鉄道建設規程 (鉄道省令第 2 号) 建築限界, 設計荷重 (E40) その他鉄道建設の主要事項を規定している。
12 年	1923	○鋼鉄道橋製作示方書制定
14 年 3 月 17 日	1925	○鋼鉄道橋製作示方書改定 (鉄道省達第 168 号)
昭和 3 年 3 月 10 日	1928	○鋼鉄道橋設計示方書 (鉄道省達第 158 号) 前示方書をメートル法に訂正したものであるが衝撃係数等を改訂。KS 荷重となる。
4 年 7 月 15 日	1929	○国有鉄道建設規程 (鉄道省令第 2 号) KS 荷重の適用ができる。
6 年 7 月 15 日		○電弧溶接鋼構造物設計及び製作示方書 (案) (鉄道省官房研究所発表) (業務研究資料 19 卷 17 号)
15 年 7 月	1940	○鋼鉄道橋標準設計示方書 (案) (土木学会)
昭和 27 年	1952	○鋼鉄道橋電弧溶接工事示方書制定
31 年 9 月 29 日	1956	○鋼鉄道橋設計示方書 (日本国有鉄道総裁達第 630 号)
38 年	1963	○鋼鉄道橋製作仕様書 (日本国有鉄道規格)
39 年	1964	○溶接鋼鉄道橋製作仕様書 (日本国有鉄道規格)

(3) 資料整理と設計作業合理化への努力

設計理論の発達为新形式の合理的な構造の開発と同時に, 構造各部の応力を明確に把握し, 所要材料を最小限にとどめることを目的とするのに対し, これは精密な理論ほど計算が面倒で, かえってその目的に违背することになりがちな矛盾を解説するため既往の資料から, あるいはあらかじめ類型的な計算をしておいてこれを図表に作成しておき実際の作業にはそれを参考に, 迅速にもっとも経済的な断面まで, くり返しの設計計算することを容易にすることを目的としている。もちろん, これのみでなく既設橋の資料整理はその維持補修には貴重なものである。この点鉄道橋の明治末期以降設計された各種図面, 設計資

料が, すべて整然と保管されていることはまことに敬服すべきことであり, また 1924 年 (大正 13 年) に出版された「鋼鉄道橋梁設計資料」は多くの技術者にその設計作業の能率向上を与えたが, これは鉄道技術者の集団である橋梁研究会の編さんになるもので, その努力は多とするに足る。道路橋においては内務省土木試験所が大正初期より「道路橋輯覧」として主要橋梁について編さんしており, 特に昭和中期青木楠男の手になったものは鋼重の統計的处理によってよりいっそうの価値を与えている。また標準設計資料として同じく土木試験所 (戦後は建設省土木研究所) より, 発表されたものは, 同様に多くの計算を行なった結果の集大成であり, 構造の合理化に寄与してきた。鉄道橋においても早くから標準設計が行なわれ, それを十分活用することによって建設の合理化と経済化がはかられてきている。

計算手段として戦後導入された電子計算機は今後の構造計算法の性格を変えるものであろう。たとえば従来 2 カ月ほど要した複雑な吊橋の計算がわずか数分の間に計算誤りもなく整然とタイプされてくる現実, まさに革命的現象である。設計図そのものが一つの数字的約束を示すものであることを思えば, 遠からず図面も自動的に製図されるか, あるいは不用の時代がやってくることは動かしがたい現実ではなからうか。

(4) 応力測定技術の変遷と実験的研究の発展

さて理論は実証されることが必要である。構造物では一般に理論計算によるたわみ, ひずみ (応力) を実橋あるいは模型において実測することがこれにあたる。応力測定としては 1909 年 (明治 42 年) に鉄道官房研究所がロイナー応力計を購入使用したのが最初であるが, その後同じく機械的ひずみ計として技研式が考案され用いられるようになった。しかし, なんといっても戦後急速に発達した抵抗線型ひずみ計によって応力測定技術は長足の進歩をなしたといえる。部材に貼布した抵抗線のひずみによる電気抵抗の変化をブリッジにより検出する方法は, 局部的に多くの点数を設置できるので, 実験的研究に不可欠なものとなっており, 理論解析の困難な問題でも実験で解決できる場合が多くなってきた。それに合成樹脂材料の発達は模型実験にまことに適当な供試体を提供してくれるようになってきた。実物大の試験桁による破壊強度, 破壊機構の研究は構造合理化のための重要な資料であるが, 本格的になってきたのは戦後である。1948 年 (昭和 23 年) に支間 12.9 m の全溶接鉄道桁 (KS 10) の静的破壊試験が行なわれた。その後, 合成桁橋, プレ

ストレスト合成桁橋あるいは曲線桁橋、斜橋などの小型模型試験のみでは構造各部ならびに構造物の極限強度を解明しにくい構造の大型試験が多く行なわれている。

(5) 既設橋の補強

鉄道橋は、日清戦争後の鉄道輸送重点主義の影響で、1897 年（明治 30 年）前後に架設されたものが最も多い。ところが荷重は表—5.8 に示すごとく、増大が顕著で大正中期に

表—5.8 機関車重量の変遷

年 代	1872 (明治5年)	1884 (明治17年)	1893 (明治26年)	1901 (明治34年)	1912 (大正元年)	1923 (大正12年)	1928 (昭和3年)	1948 (昭和23年)
形 式	150(A ₁)	1 800(B ₂)	2 100(B ₂)	9 150(F)	9 850	9 900(D ₁₀)	C 53	C 62
総重量	23.08 t	36.30	48.40	70.78	99.84	127.14	129.98	145.17
t/m	3.09	4.18	4.71	4.83	5.27	6.36	6.29	6.80
比 率	1	1.35	1.52	1.56	1.71	2.06	2.04	2.20

すでに補強を要するものが相当数に達していた。そこでまず鉚結補強がはじまり、その後 1924 年（大正 13 年）にフィンゲ補強、1929 年（昭和 4 年）に並列補強、さらに 1932 年（昭和 7 年）頃より電弧溶接補強が採用になり、これら一連の処置で荷重増大を乗り切り資金の合理的配分に貢献してきた。道路橋においては、設計荷重が仮定のものであり、満載の頻度が少ないので鉄道橋ほどの影響はないが、輪荷重で設計される床部は戦後の荷重増大に対して影響大で、そのはなはだしきものは橋の経過年限ともならみあわせ、多くは架換えによっている。コンクリート床版を鋼床版にかえた例もある。

(6) 合理化の成果と今後の問題

構造の合理化は端的に所要鋼材の重量低下となってあらわれてくる。道路橋標準設計を例にとってみると 1935 年（昭和 10 年）と 1963 年（昭和 38 年）では表—5.9 のように約 50%減になっている。これに対し自動車荷重は 8 t、13 t、20 t とかえって増大している。また腹板の高さは 1935 年（昭和 10 年）が約支間の 1/15 に対し 1963 年は 1/20 程度と低くなっている。この原因はまず主桁材料が前者は S 39 A ($\sigma_{t,a}=1\,200\text{ kg/cm}^2$)、後者は SM 50 ($\sigma_{t,a}=1\,900\text{ kg/cm}^2$) であることで、これは信頼度の高い高強度鋼が容易に入手しうようになったからである。また後者は合成桁橋としてコンクリート床版を主桁構造の一部としているからである。さらに前者のリベット構造に対し後者は溶接構造となって

表—5.9 橋 桁 鋼 重 比 較 表

幅員 7.5 m 1 等橋

支 間	20 m		24 m		28 m		32 m	
	鋼 重	%	鋼 重	%	鋼 重	%	鋼 重	%
活荷重合成桁橋 1963 年(昭和38年)*	14 462	100	19 376	100	26 529	100	33 082	100
溶接鋼橋 1957 年(昭和32年)**	25 342	175	38 257	197	48 180	182	62 773	190
鉚結鋼桁橋 1941 年(昭和16年)***	32 130	222	42 258	218	58 057	219	75 997	230
鉚結鋼桁橋 1935 年(昭和10年)****	28 575	198	38 401	198	51 021	192	64 887	196

* T-20, L-20 幅員 7.5 m の鋼重については 7.0 と 8.0 m の平均値をとった。

** T-20, L-20

*** 1939 年（昭和 14 年）鋼道路橋設計示方書、自動車荷重 13 t 支間 24 m、28 m、32 m の鋼重は 22 m、25 m、30 m より比例計算で算出した。

**** 1926 年（大正 15 年）道路構造に関する細則、自動車荷重 8 t 支間 24 m、28 m、32 m の鋼重は 32 m、22 m、25 m、30 m より比値計算で算出した。

***** 鋼重はシュー、高欄ソールプレートなど付属品鋼重を除く。

おり腹板の厚さは、支間 30 m のもので 12 m に対し 9 mm である。また支間 30 m で前者は主桁 3 カ所で後者は 2 カ所で現場添接している。これはトレーラーなど輸送機関発達の影響である。このように材料・理論・工法その他関連の分野における工業力などの合理化と技術の進歩が総合されて、この結果をもたらしたものだといえよう。

ところで今までの合理化の方向は鋼重の節減というのが主であったが、経済成長と若手労働人口の低下は工賃の上昇をうながしており、これがコストにはねかえって複雑な工作、架設方法を必要とするものは、工作、架設に要する時間も長くなることも影響して鋼重は減じてコストはかえって上昇する結果となり、この点欧米先進国型となってきている。この問題の解決策の一つとして鋼重は重いが製鉄メーカーより出荷された形鋼を最小限の加工にとどめることでコスト ダウンをはかった H 形鋼を主体とした標準橋、異形 I 型鋼を主体とした標準合成桁橋が考案された。

以上のように鋼構造の合理化は非常な勢いで進んでいるが、科学・技術の進歩ははかり

知れないものがあり、その限界というものは速断できないものである。今後の問題としては、さらに高強度の鋼材の利用、軽合金の利用、あるいは合成樹脂の活用、また構造理論の発展による安全率のそろった構造への努力、実応力の簡単な測定法の開発、疲労に対する明確な理論の確立、電子計算機の利用、コストの低い部材接合法の開発、既設橋の経済的補強法の考究、接着剤の利用、レディメード方式の採用など、これからの技術者に期待する課題が多くある。

1.6 長大径間へのいどみ

長大径間へのいどみ、それは構造技術のもっともはなはだしい自然への挑戦である。苦闘のすえにかくとくした勝利を記念する大橋梁や大建築は、人類文化の象徴として永遠にその名を歴史に記録される。橋梁においては、古代ローマの繁栄をいまに伝えるポン・デュ・ガル（水道橋）、19 世紀におけるイギリスの発展を示すフォース橋、現代アメリカの強大な国力を象徴するゴールデンゲート橋などはすなわちこれである。

長大径間へのいどみは、欧米においては、19 世紀初頭、産業革命推進のための鉄道建設とともに始まった。道路なら、河川を上流にさかのぼり、あるいは、溪谷をできるだけ谷間に降りて、小径間の橋を架ければよかったのに、鉄道では線形・縦断勾配制限のため、どうしても長径間の橋が必要になった。また道路では、経済的理由から渡船にするところにも鉄道は架橋することを要求し、なお急速に進んだ機関車の大型化、積荷の増大が橋梁の強力化を要求し、橋梁技術はめざましい発展をとげた。

19 世紀の初めまでの橋は、小径間で、ほとんどが石造かレンガ造のアーチ橋あるいは木造の単純桁橋であったが、鉄道の要求に対する木造トラス橋の進歩、鋳鉄、鍛鉄さらに鋼の使用および構造理論の発展によって、橋の径間は徐々に伸び、1850 年には、イギリスのメナイ海峡に初期鍛鉄橋を代表する支間 140 m のブリタニヤ橋が完成した。また吊橋も、鉄材の使用によって構造が急速に進歩し、1826 年、メナイ海峡に径間約 140 m の吊橋が出現、1848 年アメリカのオハイオ河に径間約 300 m のホイーリング橋、1869 年にはアメリカのナイアガラに径間約 380 m の吊橋が完成した。

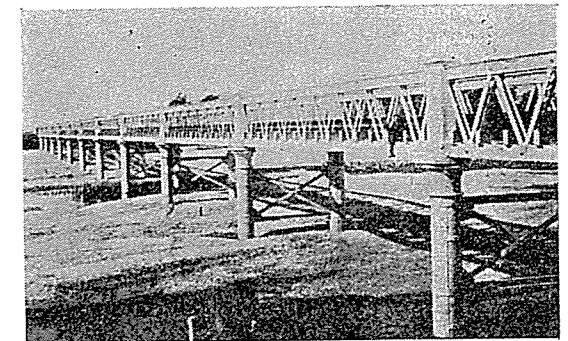
欧米の橋梁技術がこのような段階にあった 1868 年（明治元年）わが国では封建社会から資本主義社会への一大転換が行なわれ、殖産興業、富国強兵の二大スローガンを掲げ

て、産業革命が強力に押し進められ出し、1870 年（明治 3 年）、早くも鉄道建設が開始された。わが国の現代の橋梁技術はこのときに生れたのであり、その後のめざましい鉄道建設とともに橋梁技術もまた着実に育っていった。欧米の橋梁技術が、鉄道とともに発展してきたことはすでにのべたが、これとおなじ道程をわが国も約 50 年おくれてたどることになったのである。

さて、わが国最初の長大径間鉄橋といえば、1874 年（明治 7 年）に開通した神戸・大阪間鉄道の武庫川、下神崎川および下十三川に架設された支間 70 ft (21.3 m) の鍛鉄トラス橋ということが出来る（写真—5.17）。支間 70 ft の橋を長大径間橋とは、今日ではとうてい考えられないのである

写真—5.17 武庫川鉄橋

が、当時は確かに、驚異の目で見られた長大径間橋であった。この橋は、腹材に平鉄板を用いたピン結合ボニーワーレントラスで、橋端の垂直材は鋳鉄製飾柱で被覆されていた。1876 年（明治 9 年）に竣工した大阪—京都間の鉄道には、支間 100 ft (30.5 m)



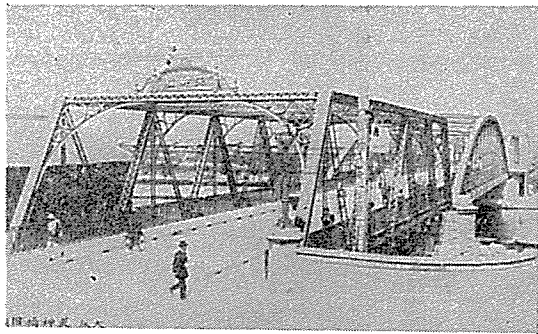
のトラス橋が架設されたが鉄道総延長が 1000 マイルを突破した 1886 年（明治 19 年）には、イギリス人ポーナルが設計したスパン 200 ft (61 m) の鍛鉄製のダブルワーレントラス橋が東北本線利根川に架設され、その翌年には、これと同じものが東海道本線揖斐、長良、木曽の三河川にも架設された。200 ft のトラス橋はピン結合下路トラスで、ピン間の高さが 17 ft 4 in (5.3 m) 主軸間隔が 16 ft 2 in (4.9 m) であった。機関車重量の増大に伴い、1897 年、イギリス人、クーパー、シュナイダーに委嘱して径間 100 ft (30.5 m)、150 ft (45.7 m)、200 ft (61 m) の上路式および下路式トラス橋、300 ft (90.5 m) の下路式トラス橋などの設計が行なわれ、300 ft 下路式トラス橋が 1908~1909 年に中央線第一、第五木曽川に、1912 年（大正元年）に奥羽線松川に架設された。

上記のものはすべて官営鉄道の橋であるが、民営鉄道にも 1899 年（明治 32 年）に、阪

鶴鉄道第二武庫川橋梁（径間 250 ft (76.3 m) のトラス橋）京都鉄道保津川橋梁（径間 280 ft (85.4 m) トラス橋），1900 年に和歌山鉄道紀の川橋梁（径間 250 ft のトラス橋）が架設されている。

このころの道路橋には、大した進歩は見られなかったが、大都市付近などに少数ではあるが長径間橋が架設された。大阪の心斎橋、天満橋、天神橋、北海道石狩川の橋などがその例である。心斎橋（1873 年、明治 6 年）は橋長 20 間 4 分のボーストリングトラス橋で

写真—5.18 天 神 橋

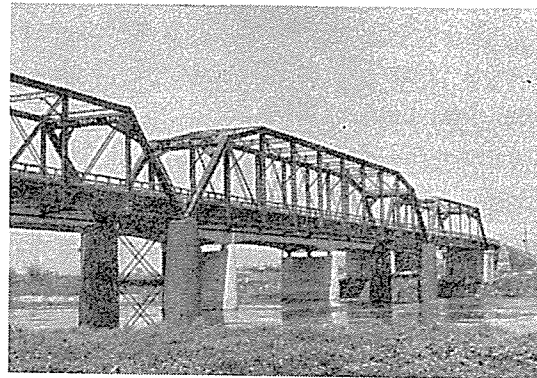


あり、天満橋 1886 年（明治 19 年）および天神橋（1886 年）はともにドイツ製の 5 径間トラス橋で、前者が橋長 120 間、幅員 6 間、後者は橋長 131 間、幅員 6 間であった。写真—5.18 はその天神橋である。また石狩川の橋（1903 年、明治 36 年）は写真—5.19 のように中央径間が側径が

150 ft のプラットトラスで橋長は 80 間 2 分であった。なお、道路橋としての吊橋には、1871 年（明治 4 年）に皇居内の道灌堀（幅 15 間）に架設された吊橋以後多くのものが架設されたが、このうち長大な

写真—5.19 石 狩 川 の 橋

ものとしては、富山県の大田橋、長 244 間（1911 年、明治 44 年）、雄神橋、長 125 間、静岡県の大竜橋、長 113 間 5 分（1911 年）、川根大橋、長 108 間 5 分（1911 年）、山梨県の早川橋、長 85 間 6 分（1900 年）岩手県の平和橋、長 77 間（1911 年）、福島県の水沼橋



長 70 間（1908 年）などがあった。しかしこれらの吊橋は幅員が狭く積載荷重も小さく、車両が通行できる本格的なものではなかった。以上のように、外国技術依存時代ともいえるこの時代の長大橋はすべてトラス橋であり、その最大径間は 300 ft (90.5 m) であったといえることができる。

第一次世界大戦後産業の発展に伴ない、自動車が普及発達し、1919 年には道路法の制定に伴う道路改良計画が作られ、幹線道路の改良、大河川架橋が意欲的に遂行されるようになった。たまたま 1923 年（大正 12 年）の関東大震災で東京が壊滅し、その復興事業として隅田川などに大橋梁の建設が開始された（図—5.4）。

この時代になると、19 世紀末から 20 世紀初期にかけて世界的に発展した不穩定構造理論の応用として、タイドアーチ橋、バランスドアーチ橋、2 ヒンジアーチ橋、ランガー橋などのアーチ構造、ラーメン構造、補剛吊橋構造などが進歩し、わが国にも長大径間の不穩定構造橋が続々と架設されるようになった。

こうして道路橋の大工事および、このころ行なわれた都市内高架鉄道工事などに伴ない、外国技術から独立したわが国の橋梁技術は一大進歩をとげ、世界に誇る大橋梁が現われるまでに成長した。

当時長径間桁橋には、好んでゲルバー式上路桁が用いられたが、隅田川にもこの形式の橋が数橋架設された。そのおもなものは、言問橋（橋長 161.9 m、幅員 22 m、最大支間 67.8 m、写真—5.20）、および両国橋（橋長 164.5 m、幅員 24 m）がある。言問橋は今日でもゲルバー桁橋中、わが国最大の径間長をもち、両国橋、天満橋（後述）とともにわが国の三大ゲルバー桁橋として知られている。

写真—20 言 問 橋

ゲルバー トラスでは荒川に 1932 年（昭和 7 年）架設の戸田橋（35.0 m + 87.5 m + 35.0 m）および多摩川に 1939 年（昭和 14 年）架設の大師橋（62.4 m + 104.0 m + 62.4 m）がある。大師橋は 写真—5.21

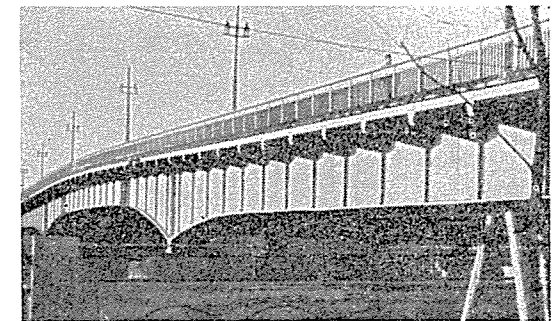


図-5.4 隅田川の橋

橋名	側面図	鋼重	架設年
千住大橋		688kg/m ²	大正14年9月 (1925) 昭和2年7月 (1927)
白鬚橋		518	昭和3年9月 (1928) 昭和5年6月 (1931)
宮間橋		518	大正14年5月 (1925) 昭和3年2月 (1928)
吾妻橋		313	昭和4年6月 (1929) 昭和6年6月 (1931)
駒形橋		626	大正13年7月 (1924) 昭和2年6月 (1927)
厩橋		603	大正15年7月 (1926) 昭和4年9月 (1929)
蔵前橋		615	大正13年9月 (1924) 昭和2年11月 (1927)
総武線 隅田川橋梁			昭和7年 (1932)
両国橋		663	昭和5年2月 (1930) 昭和7年10月 (1932)
新大橋			明治45年2月 (1912) 大震災に耐えた
清洲橋		1088	大正14年3月 (1925) 昭和3年3月 (1928)
永代橋		965	大正13年12月 (1924) 大正15年12月 (1926)
旭新橋		410	昭和39年8月 (1964)
勝間橋		919	昭和8年6月 (1933) 昭和15年6月 (1940)

のような構造で、その径間はわが国のゲルバートラス中では現在でも最長である。

つぎにアーチ構造の橋としては、図-5.4 に示すような永代橋（橋長 185.2 m, 幅員 22 m）、駒形橋（橋長 149.6 m）、厩橋（橋長 152 m, 幅員 22 m）、白鬚橋（橋長 167.6 m, 幅員 22.1 m）などがある。このうち永代橋（写真-5.22）の最大支間は 100.6 m あり、わが国の橋の最大径間はこの橋によって初めて 100 m をこえることとなった。

また、1928 年（昭和 3 年）完成の清洲橋（写真-5.23）は橋長 186.3 m, 3 幅員 22 m, 中央支間 91.4 m の径間自定式チェーン ケーブル吊橋で、当時アメリカその他の国に架設されたものと同形であったが、その中でも清洲橋は代表的ものの一つであった。

東京以外に架設された長大径間橋にはつぎのようなものがある。

桜 橋：三重県、1914 年、橋長 112.8 m 2 ヒンジ アーチ（アーチ支間 84 m）

写真-5.21 大師橋



写真-5.22 永代橋

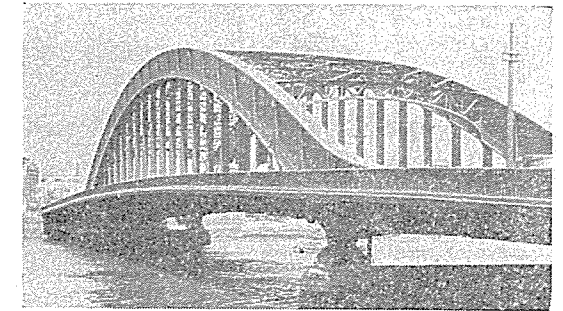
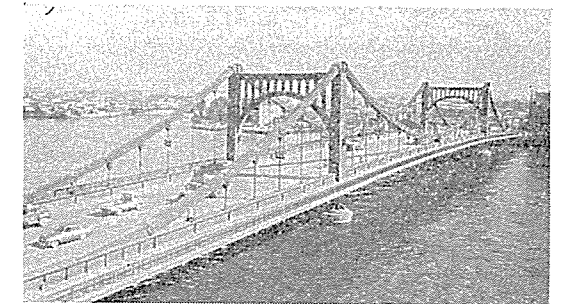


写真-5.23 清洲橋



荒川橋：埼玉県，1929 年，橋長 156.2 m バランスド アーチ

三好橋：徳島県，1927 年，橋長 798 ft 6 in (中央支間 459 ft) 吊橋

桜宮橋：大阪市，1930 年，108 m 3 ヒンジ アーチ

伊勢大橋：三重県，1934 年，橋長 1 105.7 m，ランガートラス，15 連

天満橋：大阪市，1935 年，44.5 m + 61.0 m + 44.5 m ゲルバー桁

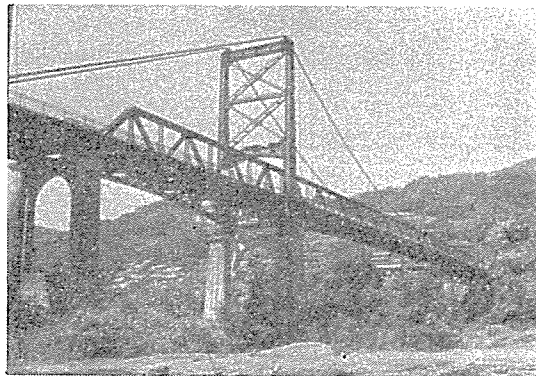
このうち，三好橋は，写真—5.24 のようなロープ ケーブル吊橋で，細部構造にはきわめて進歩的な構造が採用されており，本格的ロープ ケーブル吊橋としては，当時，わが国唯一のものであり，またわが国での最大径間橋でもあった。

以上は，道路橋であったが，1928 年(昭和 3 年)に鉄道最初のアーチ橋として高森線第一白川橋梁(中央支間 300 ft (91.5 m) 側支間 100 ft (30.5 m) のバランスド アーチ橋)が架設され，ついで 1938 年には，中央支間 112 m の川口線第一只見川橋梁が完成した。この橋は横剛性に意を用いて設計され，その支間は 1961 年(昭和 36 年)大阪環状線に安治川橋梁(支間 120 m，ランガー桁，写真—5.25)が完成するまで国鉄においては最大であった。

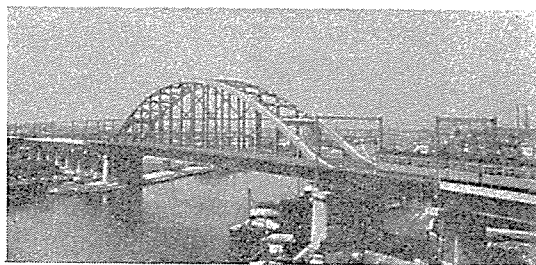
また奈良電気鉄道に 1928 年完成した濃橋川は支間 164 m のトラス橋で，単純トラスではわが国最長のものである。

1937 年(昭和 12 年)日中

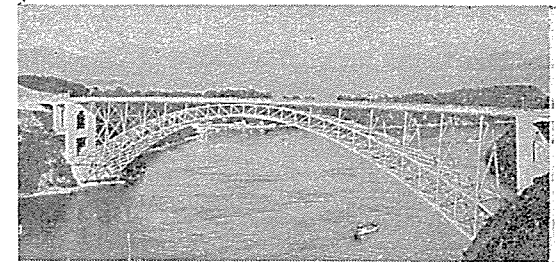
写真—5.24 三 好 橋



写真—5.25 安 治 川 橋



写真—5.26 西 海 橋



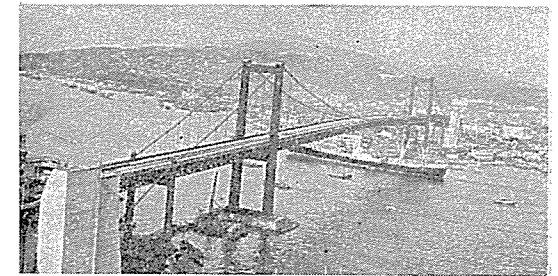
戦争，1941 年(昭和 16 年)太平洋戦争の勃発により決定的な戦争経済にはいり，この期間中の橋梁の建設工事には見るべきものがなかった。

1945 年(昭和 20 年)，敗戦後のわが国はさんたんたるものであり，深刻なインフレが進み，荒廃した国土の復旧および，頻発する台風災害などの復旧がせいっぱいの時代であった。こうして，戦前には世界の水準に達していたわが国の橋梁技術も，先進諸国に十数年の差をつけられる結果となった。

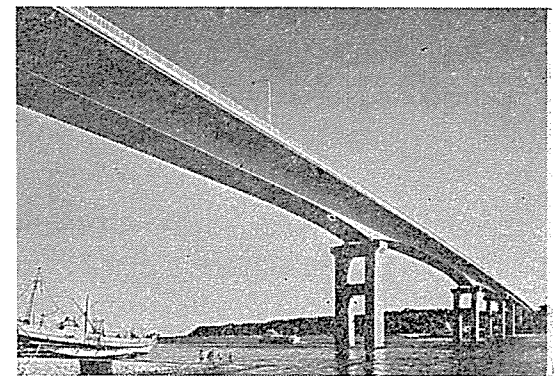
その後経済の復興発展につれて自動車が増加し，道路整備事業が大々的に行なわれるようになり橋梁技術も急速に発展していった。そうして，ほんとうの意味での長大径間へのいどみが開始された。

こうして，戦後最初に行なわれた長大径間へのいどみは，長崎県伊ノ浦の瀬戸の架橋工事であった。大河川がなく，海峡横断の要求もないため諸外国におけるような長大径間橋を必要としなかったわが国にも，いよいよ海峡横断橋が出現することとなった。

写真—5.27 若 戸 大 橋



写真—5.28 城 ケ 島 大 橋



この橋は 1955 年（昭和 30 年）西海橋として完成したが、プレスト固定アーチ橋で、支間 216 m、固定アーチ橋としては、世界第 3 位の長大橋であり、橋梁の設計、製作、架設技術に著しい進歩をもたらした（写真—5.26）。またこの橋によって、わが国の最大径間は 200 m の線をこえることとなった。

さらに、1962 年（昭和 37 年）、わが国が世界に誇る若戸大橋が福岡県の洞海湾上に完成した（写真—5.27）。この橋は、中央支間長 367 m、吊橋部全長 680 m、幅員 15 m のロープ ケーブル吊橋で、同形式吊橋としては、世界第 5 位の長大橋であった。なお、橋の下は、10 000 t 級の船舶が航行するため、桁下高さを 42 m 以上とし、吊橋の両側には、長い取付部橋梁がつづいている。わが国最初の本格的長大吊橋であり、ケーブルの材料、構造、対風・対震安定性、基礎工法、製作・架設法などについて慎重な調査研究が行なわれ、その結果に基づきわが国独自の技術によって完成されたものである。この橋によってわが国の最大径間は 300 m を大きくこえることとなった。

戦後、現われた新形式の箱桁構造は急速に進歩し、1959 年（昭和 34 年）神奈川県に架設された 3 径間連続の城ヶ島大橋（径間 70 m+95 m+70 m、写真—5.28）を経て中央径間 140 m、側径間 90 m、3 径間連続の琵琶湖大橋（滋賀県）が 1964 年に完成した。

海峡横断橋として現在工事中の天草橋は 5 つの橋を含んでいるが、その中には支間 100 m+300 m+100 m、幅員 6.5 m の 3 径間連続トラス橋が含まれている。これが完成すれば、連続トラス橋ではわが国最長のものとなり、また世界でも第 2 位のものとなるはずである。

わが国の橋梁技術は、戦中、戦後の空白を克服し、今や世界の水準に復し、さらに前進をつづけようとしている。

表—5.10 は世界とわが国の長大橋を示したものである。ここに見られるように 1 km を越えるような長大スパンを渡るには構造上・経済上の見地からも吊橋によるほかに、数 100 m のスパンには、さらにこれにアーチやゲルバートラス形式が比較の対象となる。

現在東京湾口、関門海峡、瀬戸内海などに架橋計画がありその調査が着々と進められている。このうち本州・四国連絡橋計画には支間 1 000 m 以上の大吊橋が含まれ、この架橋工事実現のためには、わが国特有の台風や地震の問題、下部構造、架設工法を解決するなど、多くの困難な問題が残されているが、わが国の土木技術は、近い将来、必らずこれ

を実現させるものと思われる。

表—5.10 (a) 日本の長大径間鉄道橋

橋 名	スパン(m)	架設年	形 式	線 名
安 治 川	120	1961	ラ ン ガ ー 桁	大 阪 環 状
隅 田 川	96	1932	ラ ン ガ ー 桁	総 武
第一只見川	112	1938	バランスドアーチ	川 口
第一白川	91	1928	バランスドアーチ	高 森
松 住 町	72	1932	タ イ ド ア ー チ	総 武
澱 川	164	1928	単 純 ト ラ ス	奈 良 電 気 鉄 道
吉 野 川	71	1933	連続ワーレントラス	高 徳

表—5.10 (b) 世界の長大径間鉄道橋

橋 名	国 名	スパン(m)	架設年	形 式
Hell Gate	U.S.A.	298	1916	ア ー チ
Forth	England	521	1889	ゲルバートラス
Quebec	Canada	549	1917	ゲルバートラス
武漢長江	中 国	128	1957	連 続 ト ラ ス
Eiffel	France	96	1947	連 続 ト ラ ス
Mosel	German	90	1955	連続プレートガーダー
Horchheimer	German	113	1961	連 続 箱 桁
Storstrom	Denmark	138	1936	ラ ン ガ ー 桁

表—5.10 (c) 日本の長大径間道路橋

橋 名	スパン(m)	架設年	形 式	県 名
若 戸 大 橋	367	1962	吊 橋	福 岡
西 海 橋	216	1955	ア ー チ	長 崎
大 師 橋	104	1939	ゲルバートラス	神 奈 川
銚 子 大 橋	107	1962	連 続 ト ラ ス	茨 城 一 千
天草一号橋	300	工事中	連 続 ト ラ ス	熊 本
日 連 橋	110	1954	単 純 ト ラ ス	神 奈 川
安 治 川 橋	100	1963	連続プレートガーダー	大 阪
琵琶湖大橋	140	1964	連続プレートガーダー	滋 賀

表-5.10 (d) 世界の長大径間道路橋

橋 名	国 名	スパン(m)	架 設 年	形 式
Verrazano Narrows	U.S.A.	1 300	工事中	吊 橋
Golden Gate	U.S.A.	1 280	1937	吊 橋
Mackinac	U.S.A.	1 158	1957	吊 橋
Gorge Washington	U.S.A.	1 068	1931	吊 橋
Firth of Forth	England	1 006	1962	吊 橋
Kill Van Kull	U.S.A.	504	1931	ア ー チ
Sydney Harbour	Australia	503	1958	ア ー チ
Mississippi River	U.S.A.	518	1958	ゲルバートラス
Vancouver 2nd Narrows	Canada	336	1960	連 続 ト ラ ス
Metropolis	U.S.A.	220	1916	単 純 ト ラ ス
Düsseldorf Neuss	German	206	1951	連続プレートガーダー

1.7 鋼橋架設法の変遷

(1) はじめに

明治の初中期における鉄橋の架設法はその詳細が明らかでないが、写真や記録の断片から察するところ、適当に木材の足場を組んでその上で組立てたものが多いと思われる。

鉄道橋としては 1874 年（明治 7 年）武庫川に 70 ft (21.3 m) のポニー トラスを足場式で架設している。日本人の手によって架設が行なわれるようになったのは 1879 年（明治 12 年）の鴨川橋梁からで、1886 年（明治 19 年）には当時日本一の大橋梁であった東北線利根川橋梁が井上鉄道頭指揮のもとに架設が行なわれ、明治天皇も栗橋に御臨場になったとのことである。

鉄橋の設計、製作が完全に日本人の手に移るとともに架設も日本人のみの力で行なわれるようになったが、架設は一般に総足場の上にゴライアス クレーンまたは三脚クレーンを走行せしめて組立てる方式が行なわれていた。

大正年代から昭和の初期にかけて、とくに鉄道橋の架設において各種の新工法が考案実施され、それがまた道路橋の架設にも応用されるようになった。さらに関東大地震後の復興工事の一環として行なわれた隅田川への多数の近代橋架設工事は鋼橋の架設技術にも新生面を用いたものである。

第 2 次大戦後道路整備にともなう多数の鋼橋の架設が行なわれるとともに、西海橋、若戸大橋など長大橋の架設が行なわれ、かつ、また新設計法、溶接工法の普及と相まって従来経験しなかった新しい架設法も行なわれるようになった。

(2) 架 設 工 法

現在までに一般に行なわれてきた架設工法は 1) 総足場式、2) 引出し式、(a. 縦引出し式 b. 移動ベント式 c. 呼取り式 d. 手延式 e. 連結式)、3) 架設トラス式、4) ケーブル式、5) 片持式、6) クレーン式、7) ポンツーン式、などに分類できる。ただしこれらの工法を組み合わせた工法もあり、またそれぞれの分類も内容的には相当の幅を持っている。これら架設工法の進歩のあとをたどるために、ここでは主として鉄道橋の架設法の推移について述べて見たい。

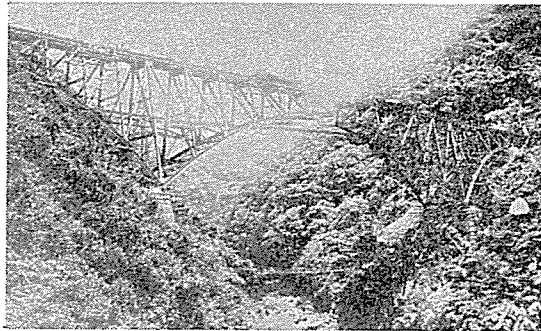
a) 新線におけるプレート ガーダー鉄道橋の架設 初期の 1) 足場式について、2) 綱渡り式 (1921 年)、3) 2 連 (1908 年) または数連 (1928 年) の桁を連結して押出す連結式、4) 那波光雄考案にかかる台車にのせたクレーン (1913 年)、または黒田武定考案にかかる操重車 (1919 年) によって架設するクレーン式、5) 2 台の台車にのせた桁の先方に架設すべきけたを連結し、前方台車上に立てた支柱から架設するけたを斜吊りして押出す 帆柱式 (1920 年)、などが国鉄によって考案実施されてきたが、1922 年（大正 11 年）中原寿一郎などによって初めて考案実施された手延式は、その後幾多の進歩改良が加えられ、現在でも操重車とともに鉄道橋の架設にさかんに用いられている。

b) プレート ガーダー鉄道橋の架替法 1) 回転式架替機 (1931 年)、2) プレート ガーダー架替機 (1947 年)、3) 横取り式、4) 操重車併用横取り式 (1951 年)、5) 下路トラスをプレート ガーダーに取替える方法 (1949 年)、などが考案実施されている。

c) トラスの架設法 古くから行なわれてきた 1) 足場式 (1874 年) について、2) エレクション トラス式 (1922 年)、3) カンチレバー エレクション (1931 年)、4) ベント式 (1929 年)、5) ケーブル エレクション (1928 年)、6) 引出し式 (a. ポンツーン式、1924 年)、6) 台車式 (1932 年)、7) 旋回式 (1928)、年 8) 横取り式、等が考案実施されてきた。

鉄道橋でカンチレバー エレクションを採用したのは 1913 年（大正 2 年）磐越西線釜の脇橋梁が初めてであってアメリカ人ワデルの発案になるものである。その後この工法は

写真—5.29 第一白川橋の架設



1928 年（昭和 3 年）に高森線第一白川橋梁のアーチ（写真—5.29）、1938 年（昭和 13 年）には川口線第一只見川橋梁（部材運搬はケーブルクレーン方式）、また同年中国の黄河鉄道橋（側支間 128 m、中央支間 164 m のゲルバートラス）にも使用されたほか、最近では東京—大阪間の

新幹線に架けられた多数の連続トラスにも使われている。

ベント式架設法は、単純にベントで橋体を支持して架設して行く工法のほかに、前述のカンチレバー エレクションを併用する工法も広く用いられている。

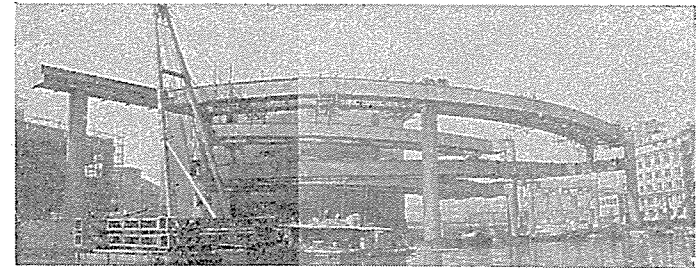
ケーブル エレクションは足場またはベントを全く用いない工法で大阪鉄工所の中田技師の発案になり、鉄道橋に最初に応用したのは 1928 年（昭和 3 年）高山線第三長良川橋梁である。当初のケーブル エレクションは斜吊り方式であったが 1933 年（昭和 8 年）には吊橋のように懸垂する方式がとられた。戦後道路橋のケーブル エレクションは 1952 年（昭和 27 年）群馬大橋の架設に初めて用いられ、今日でも谷間の深い地点、洪水の危険のある河川などの架橋に広く用いられている。

これら各種の架設法は初期の鉄橋建設当初から行なわれてきた総足場式にあきらず、時代の推移、橋の設計内容、架橋地点や出水の状況、跨道橋や跨線橋においてはその建設限界と下の交通の状況などに応じて適切な工法が考案実施されてきたのである。最近における都市高速道路橋などにおいては架設工事の条件が設計を支配している場合も多いと考えられる。写真—5.30 は首都高速道路江戸橋付近の架橋状況を示す。

（3）現場接合法の変遷

ボルトあるいはリベットは鉄橋の出現以来一般に採用されてきた現場における部材接合法の標準的手法であった。リベット締め機械としてニューマチックハンマーが導入されたのは 1909 年（明治 42 年）以降であったが 1912 年（大正元年）隅田川に架設された新

写真—5.30 首都高速道路江戸橋付近の架橋状況



大橋ではなお手締めが行なわれたという。しかし 1911 年頃から使用され始め山陰線余部の鉄道橋などがその初期といわれる。なお宮地栄次郎によれば 1914 年（大正 3 年）に仙台の名取川橋梁を架設するに際して圧縮空気によるニューマチックハンマーを鉄道省が輸入して現場の職人に使わせたがリベットの頭がうまく丸くならなかったが、1915 年（大正 4 年）の東北本線利根川橋の工事からうまく使えるようになったという。

1931 年（昭和 6 年）頃から溶接法が鋼橋に使用されるにおよび、溶接工法は鋼橋部材の現場接合にも用いられるようになった。1935 年（昭和 10 年）に開通した田端大橋では厚さ 25 mm までのフランジをもつ主桁の現場突合せ溶接も行なわれた。この工事では突合せおよび、すみ肉溶接部にきれつが発生し種々の困難をなめた。

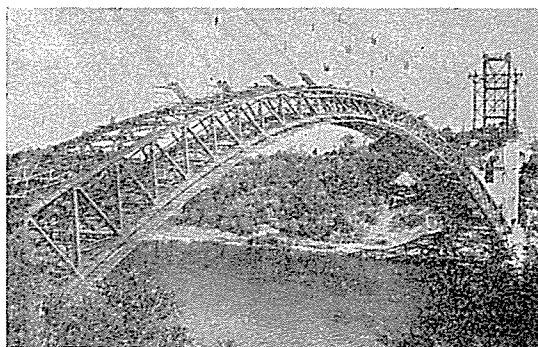
第 2 次大戦後再び鋼橋の溶接化が活発になるとともに、溶接橋は現場継手も含めて全溶接とする考え方が強く 1952 年（昭和 27 年）に完成した誉嶋橋の例のように現場継手も溶接される場合が多かったが、部材の突合せ溶接は種々の困難をとめない、工費が高つくばかりでなく、結果も不満足のことが多かったため、その後は工場製作は溶接、現場継手はリベットとするのが一般的手法となっていた。1950 年（昭和 25 年）に完成した甲武橋は、工場は溶接、現場はリベットという手法の先駆となった。

現在はさらに高力ボルトあるいは高力ハックボルトがしばしばリベットに代って使われるようになっている。

（4）鋼橋の架設例

a) 西海橋 1955 年（昭和 30 年）に完成した西海橋（写真—5.26, 5.31）は、支間 216 m の固定アーチであるためその架設にも支承部の固定性をいかした工法をとった。す

写真—5.31 架設中の西海橋



ワイヤの張力を 120 t に調整したのち格点 3 のワイヤを撤去、格点 11 まで進み 6 本のワイヤを張ってその張力を 125 t に調整し格点 15 に達したらアーチの閉合作業に移った。

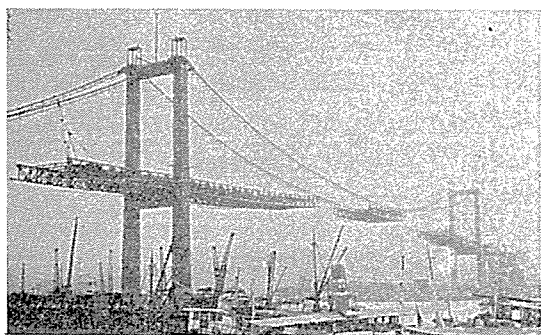
部材の運搬は支間 245 m のケーブル クレーンにより、キャリエージは 15 t 用 5 基を用いた。

アーチの閉合に際しては容量 300 t のオイル ジャッキ 8 台 を使用してアーチ部材の応力改善と上弦支承に発生する張力を打消した。

b) 若戸大橋 1962 年（昭和 37 年）に竣工した若戸大橋の吊橋部の上部構造を塔の架設とケーブル、補剛桁部の架設とに分けて簡単に紹介する（写真—5.27, 5.32）。

① 塔の架設：塔の架設は基礎コンクリート上面の余盛約 30 mm を削り取り、グラインダーで研磨仕上げることから始まった。塔は中間塔と主塔各 2 本、計 4 本からなり、中間塔の架設にはブーム長 58 m、吊上げ荷重 20 t のデリック クレーンを用い、塔体の添接はリベットによった。

写真—5.32 架設中の若戸大橋



なわち格点 0~3 を純然たるカンチレバーで架設した後格点 3 に 50 mm ϕ ロープ 4 本を取付け斜吊りし橋台上の小塔を介して後方のアンカーに固定した。ロープの張力を 80 t に調整し、ついで格点 7 まで突出した後 50 mm ワイヤ 6 本を取付け高さ 31 m の塔を介してアンカーした。このワ

戸畑主塔は海中に立つためその 1~3 段を吊上げ能力 120 t のフローティング クレーンにより、それより上 4~8 段はブーム長 20 m、巻上げ能力 40 t のクリーパー デリックによった。クリーパー デリックはこの橋のために日立造船が設計製作したもので、主塔の既設部分に取付けられ塔にそって上下することができるものである。

若松主塔は陸上にあるためその 1~2 段はクリーパー デリック用の三脚クレーンを地上に置いて組立てた後 3~8 段は戸畑主塔と同様クリーパー デリックで架設した。

塔体の添接は 22~25 mm 径のリベットを用いる設計となっており、セル構造の小部屋内でリベットを打つために必要な空気配管、リベット焼き、焼いたリベットの送給等がきわめて困難である上に、夏季には人間の作業をほとんど不可能にする暑さのため若松塔 5 段以上の現場リベットを高張力ボルトに変更した。ボルトの張力は回転角法で調整した。

でき上がった塔の偏心量は 8 mm という良い成績であった。

② メーン ケーブルと補剛トラスの架設：この工事にはメーン ケーブルとハンガーロープのプレストレス加工、測長および架設、ケーブル バンドの取付け、補剛トラスの架設、床版コンクリートと橋台前面壁のコンクリート打設、メーン ケーブルのラッピングと塗装などが含まれている。

③ メーンケーブルは片側 61 本（55 @ 61 mm ϕ + 6 @ 36.6 mm ϕ ）；長さ 700 m のスパイラル ロープよりなっている。このロープの構造伸びを除去してヤング率をあげるため 1 本につき 155 t の張力をかけて 2 時間保持した後、張力 70 t で測長とマーキングを行なって切断しソケット詰めをした。

この作業は現場取付道路およびその延長上で行なったが、実作業は最初基準とするロープを深夜間に精密に測長マーキングしておき、その基準ロープと平行してつぎのロープを同じ張力で引張ってマークする方法をとった。

この現場での実験で一度プレストレスしたロープを適当径のリールに巻いて再び巻き戻しても全長約 700 m で 10 mm 程度の差しか出ないことを確かめた。このことは将来の吊橋施工に際して他の適当な場所でプレストレスして現場に運搬してもまじつかえないことを示すものである。

メーン ケーブルはその正規位置より 800 mm 下に張ったロープ足場上を引出し、夜間規定の垂れになるように張力を調節した。

⑥ ケーブルバンドとハンガー ロープの架設；ケーブル バンドを締付けているボルトの張力は時間の経過とともに漸次低下して安定するものであるから、その点を考慮した張力に締付けた。ボルト張力はボルト全長の伸びを 1/1 000 mm 読みのダイヤル ゲージ付の測定器によって入念に測定規正した。

ハンガー ロープは正確に測長，ソケット詰めしたものをリールに巻いてはしけで取付け点真下に運び吊上げた。

⑦ 補剛トラスの架設；補剛トラス架設の順序は架設中におけるメイン ケーブルの垂れの変化が少なく，かつ風に対する安全性の高いことを目標として計算および模型実験によって決定された。部材の運搬はケーブル クレーンによった。

⑧ ラッピング；メイン ケーブルにはほぼ死荷重が満載された時期を選んでラッピング施工した。メイン ケーブルの外周にはロープとロープの間に三角形の空間が残るため，その部分に適合する形状のアルミニウム製中空棒をあて，その外周部を径 4 mm の鋼線に張力 150 kg をかけて密に巻付けた。ラッピング マシンは横河橋梁で考案製作したものを使用した。

メイン ケーブルの塗装はプライマーの上にペースト状のジंकロメート をすり込んでからラッピングし，さらにラッピング ワイヤの外周に 5 層の仕上げ塗装を施した。

2. コンクリート構造

2.1 はじめに

土木工学はすべての工学に優先する根幹工学であるが，コンクリートはこの土木界における最重要な基幹材料としてその重要性を認識されなければならない。河川，港湾，ダム，鉄道，道路など，どの土木施設をとってもコンクリートなしでは考えられないといつてよい。

東京オリンピックと同時に開通した東海道新幹線を取り上げてみよう。世界水準をはるかに越えた 200 km という営業時速の超特急をささえるまくらぎ群，橋梁群，さらに電力を連続的に供給するポール群，もし，これらの大群を形成する材料としてコンクリートが存在しなかったら，安定性や耐久性ではるかに劣ったものとなったであろう。さらにわが国木材資源のひっばく，鉄鋼原材料の外国依存を考えると国産材料であるコンクリートの重要性はいくら強調しても強調したりないと判断される。

わが国の道路を一挙に国際水準まで高めた名神高速道路においても同様のことがいえる。舗装材料としての主役はアスファルトにゆづったが，橋梁，トンネル，ガードレールとコンクリートは大量に用いられており，品質管理の行き届いたレデーミクスト コンクリートおよびコンクリート製品は，この高速道路の安定性と耐久性に大いに貢献している。

橋梁を造る場合，初期建設費だけにとらわれて鋼橋とすると，塗装費その他の維持費がかさんで結局不経済になることが多い。鉄道橋としてコンクリート橋を架設した場合，普通の有道床構造とし騒音防止，軌道保守の容易などの利点をあわせて得られるから，コンクリートを採用すべき基本的要請はさらに高まっているというべきであろう。

きびしい侵食作用にさらされる港湾施設がコンクリートを主材料としていることは当然である。電力が水主火従から火主水従に移るにつれて，発電の分野におけるコンクリートの占める位置は後退してきたかにみえるが，巨大なダム建設に当たってコンクリートの果たす役割は支配的であるし，将来の発電形式である原子力発電において放射能しゃへい壁を兼ねた压力容器材料としてはコンクリートは不可欠といえる。

地下鉄，道路を主とする東京の大改造工事も驚異的なスピードで伸びてきたレデーミクスト コンクリートにささえられているところが大きい。

土木の基幹材料コンクリートはどのようにして近代日本の国造りに参画してきたか？このことをべっ見しておくのも興味深いと思われる。

20 世紀のコンクリート構造の本命であった鉄筋コンクリートが欧州でうぶ声をあげたのは，明治維新をさかのぼること 18 年であった。しかし，本格的発展が見られたのは，フランス特許を買ったドイツでも研究が進められ，独仏合同して鉄筋コンクリートばりの理論的計算方法が確立された 1887 年以降であったから，こののちわずか 16 年で鉄筋コンクリート桁橋を神戸市に架けたわが国の消化力は相当なものだったといえよう。

コンクリートの全材料ポルトランド セメントが欧州で発明されたのは、明治維新前 44 年であったが、「外国の石と日本の金」を大量に交換するという国辱的現象に終止符をうって、国産セメント工場が誕生したのが 1872 年（明治 5 年）であり、アメリカでポルトランド セメントがつくられたのと同年であったこともわが国の新知識吸収ぶりのすばらしさを示しているといえる。以来一世紀を経た今日、わが国のセメント生産量は年間 3 000 万 t を突破して世界第 3 位の盛況を誇るとともに、セメント輸出量は 1956 年（昭和 31 年）以来一貫して世界第一位を占め強力な国民産業の一角を形成している。

コンクリートの最大欠点である引張強度の小さいことを鋼棒で補ない、耐久性において劣る鋼材の欠点をコンクリートで補った巧妙な鉄筋コンクリートは 1923 年（大正 12 年）の関東大震災でその耐震耐火性が実証されたため急速に伸びてきたが、当時ぼつぼつ現われていた旧式異形鉄筋が震災を契機として不当にも全く見捨てられたにもかかわらず、約 40 年を経た今日、形状材質に工夫をこらした新式異形鉄筋が大々的に用いられたのも、コンクリートとのより緊密な共同作用を期待できることに主因があるといえよう。

コンクリート構造物をつくるにあたり、わが国最高指針として尊重されてきた土木学会の鉄筋コンクリート標準示方書が最初に制定されたのは 1931 年（昭和 6 年）であった。こののち 1936 年（昭和 11 年）に第 1 回の改訂、1940 年（昭和 15 年）に第 2 回の改訂が行なわれたが、第 2 次大戦後 1949 年（昭和 24 年）には無筋コンクリート、道路、ダムも含めた総合的なコンクリート標準示方書が出され、わが国のコンクリート水準を高めるのに貢献したことは特筆されなければならない。標準示方書はその後 1956 年（昭和 31 年）にも大改訂がなされた。

鉄筋コンクリートでは計算上曲げ引張応力にたいし無効のコンクリート部分を持たなければならないという欠点をもっているが、この点を根本的に改良したプレストレスト コンクリート（P C）の出現は長スパン橋梁へのコンクリートの進出を決定的ならしめたものであり、1955 年（昭和 30 年）頃より急速に普及した結果、今では世界でも有数の P C 国となった。特に土木学会の P C 設計施工指針（1955 年制定、1961 年改訂）は大きい貢献をなしてきた。

これまでの「あゆみ」をふり返ってみて将来の土木界を背負う次代に率直に呼びかけたことは、今までのわが国が基本的に先進国からまなぶ（まねぶ）という姿勢を堅持して

きたことである。P C 界をとっても、たとえば鉄道橋に対する応用において欧米をはるかにしのぐ活況を呈しているが、定着方式といった実用的に最も基本的な面ではほとんど全面的に外国方式に依存するという惨状にある。これから外国から学ぶべきは学び、払うべき授業料は払ってゆくべきであるが、一方的に教えてもらうだけでなく、こちらからも基本的な面で教える点を生み出してゆくこと、これが先進国へのきびしい道をふみ出そうとするわが国に対し、エチケット上からも要請されていると判断される。

寒中コンクリートの研究、新しい引張強度試験方法、セメントあるいはフライアッシュのスラリー工法と部分的には堂々と世界に通用する研究も見受けられるし、いろいろと有望な芽が吹き出していることも確かである。これらを育てて名実ともに先進国としての道を歩むこと、国際的に本当に独自のものとして通用する日本の示方書あるいは指針を作製すること、これらのことはただちに始められなければならないと判断される。

徳川三百年の去勢政策により生み出された空白を驚異的なスピードで埋めていった先人の努力、第 2 次大戦中に生じた劣勢を一挙にはね返した先輩の奮起、こういった点を見ると、主として借入ものによったとはいえ、わが国を今日のような世界第一級のコンクリート国にひき上げてくれた先人に対し衷心より謝意をあらわさなければならないと思う。しかし、好むと好まざるとにかかわらず、自分で生んだものによって世界に貢献してゆくという新しい道にわれわれはすでにさしかかっている。この重大な転機の意味するところをわれわれは次代とともに厳しく受け取るべき使命を感じるものである。

2.2 材 料 施 工

（1）コンクリートに要求される性質

基幹材料としてのコンクリートに要求される最も重要な性質は、強度および耐久性であろう。中でも圧縮強度は、コンクリートが構造材料として存在しうるための基本条件として重視されてきたが、あまりこの点に気をとられすぎてセメントの粉末度その他で無理をしすぎると耐久的なコンクリートの得られない恐れがある。水密性はタンクその他特殊の構造物に対してだけ必要なのではなく、コンクリートを耐久とする点からも重要である。

コンクリートは常温で任意の形状に施工できるのが利点であるが、このためには材料の

分離を起こさずしかも適当な軟かさを持つこと、すなわちワーカビリティの良いたことが望まれる。強力な振動機を用いたり、適当な混和剤を用いるなどという手段を講ずることにより、単位水量を過大にしないで適当なワーカビリティを得よう考慮しなければならない。コンクリートは現場施工の占める部分が大きいから品質管理がおろそかになり、均等性を欠くという欠点を持ちやすい。コンクリート構造物の強度は、その最弱箇所の強度でまるといってよいことが多いから均等性の維持には、特に留意する必要がある。

最近の品質管理研究の普及、レデーミクスト コンクリート、コンクリート工場製品の普及はこの面で明るい見とおしを与えている。引張強度の小さいこと、乾燥収縮、硬化熱、支保工沈下などの原因からコンクリートにひびわれのはいりやすいことは耐久性、水密性の点からも不利なことであり、これを防ぐための方策は十分考えておく必要がある。型わく支保工はコンクリートのでき上がりに影響するところが大きいし、ひびわれ防止、事故防止の見地から最近重視されるようになってきた。従来、コンクリートの重量が大きいは欠点の一つとされてきた。確かに橋梁スパンの増大をはかる場合大きな障害となるので軽量化の方向で救う方法が考慮されている。しかし大は重力ダム、小はまくらぎとていうようにコンクリートの重量を活用する場合もあるし、放射能しゃへい用コンクリートのように重量を増加させるよう特に努力を払う場合もある。コンクリートに要求される性質は、その用途に応じて、千差万別であって特殊な目的あるいは特殊な条件のもとに施工されるコンクリートに対しては、特別の考慮が払われなければならないのは当然である。満足なコンクリートをつくるため、また満足なコンクリートができていのかどうかを確かめるための適当な試験方法を確立しておくことも重要である。

コンクリートと併用して威力を発揮する鉄筋あるいは P C 鋼材の進歩もコンクリート構造物の発展に影響するところが大きい。

(2) コンクリート材料および施工法の発展と展望

本章では前章であげたところのコンクリートに要求される性質の個々の事項に焦点を絞りながら、コンクリート材料および施工法の明治以降の発展状況に対し、歴史的展望を試みたいと思う。

a) コンクリートの強度 1872 年(明治 5 年)わが国にセメント製造技術が導入され、1875 年(明治 8 年)はじめてポルトランド セメントが製造されたが、その後 10 年

間はセメントの品質に関する記録がほとんど見当たらない。それ以後も今日まで数次のセメント規格および試験方法の改正変更があって、明治年代のセメントの品質を正確に現在と比較するよしもないが、明治年代のポルトランド セメントは原料調合も経験的に定められ、製造方法も幼稚であり、高価であったのに反し品質は低いものであった。当時はセメント構成成分のバランスも十分でなく、焼成も不均一で、遊離石灰なども多く、そのままでは不安定で膨張ひびわれを生ずるために、工場内に気曝室を設け、相当期間気曝して遊離石灰を消化したのち出荷したことがある。このことからみても、かなり低品質のものであったことが想像でき、強度もおそらく現在のセメントの 1/3 以下であったと推定される。セメント構成成分と強度その他の性質とが明らかにされたのは 20 世紀に入ってからで、粉砕機、ロータリー キルンなどの発達と相まって、セメントの品質は逐次向上し、安定で高強度のセメントが製造されるに至った。1929 年(昭和 4 年)には早強ポルトランド セメントが製造され始め、また 1934 年(昭和 9 年)にはダム用として中腐熟ポルトランド セメントが初めて製造された。第 2 次大戦後ポルトランド セメント製造技術はさらに飛躍的に進歩し、高強度のセメントが廉価に製造されるようになり、現在ではセメントにたいしては強度を高めるよりは、品質が安定していて常に均等質のものが供給されるよう要求する傾向が強くなっている。

コンクリートにおいて、構造上必要とする強度を満足する配合を合理的に定めることができるようになったのは、1918 年(大正 7 年)アブラムス(D.A. Abrams)によって水セメント比法則が発表されてからのことである。それまではコンクリートの配合は全く経験的に定められていて、受渡しのためにセメントに関する規格や試験方法が制定され(規格制定の最初は 1905 年、明治 39 年)セメントに関する試験は行なわれても、コンクリートの配合を決めるための試験や現場でつくられたコンクリートの強度試験はほとんど行なわれなかったようである。水セメント比法則がわが国にどのように伝えられ普及したかは明らかでないが、吉田徳次郎が「私が初めて Abrams 氏の論文を知りましたのは 1919 年(大正 8 年)イリノイ大学に行ったときで、1921 年(大正 11 年)帰朝し、水セメント比説を土産話に致しましたところ、大いに感心された方も少なくありませんでしたが、他方にはアメリカの宣伝流の学説で、まゆつばものだといわれた学者もありました。1922 年(大正 12 年)関東大震災後、復興の工事に、コンクリートおよび鉄筋コンクリートがさかん

に使用されるようになった頃から、水セメント比に関する事項がわが国の雑誌や著書にたくさん出るようになり一般の注意をひくにいたりしました」〔吉田徳次郎：「この 25 年間のわが国土木界におけるコンクリートおよび鉄筋コンクリートの回顧」セメント界彙報 321 号、昭和 9 年 12 月号〕と述べていることから当時の状況をしのぶことができる。

水とセメントとの割合すなわち水セメント比が直接コンクリートの強度を支配することはもちろんであるが、そのほかにも強度その他のコンクリートの性質に影響をおよぼす要因はきわめて多い。セメント、骨材、混和材料、など材料の品質、材料の計量、コンクリートの練りまぜ、運搬、打ちこみ、締固め、養生方法、製造および養生時の気温、湿度など、いずれもコンクリートの品質に関係するもので、実際の現場ではこれらの要因が複雑に組み合わさってくるので、きわめて複雑である。

関東大震災はコンクリートおよび鉄筋コンクリートの利点を認識させ、復興のために急激なコンクリート工事量の増加をきたしたのであるが、これを契機として、コンクリートに関する試験研究も多く行なわれるようになり、強度その他のコンクリートの品質に影響をおよぼす要因が明らかにされるようになった。同時にミキサの発達、バイブレータの出現、寒中コンクリート施工方法の発達など、コンクリート施工技術が著しく発達した。これらの成果を総合し代表するものとして、吉田徳次郎の「高強度コンクリートの研究」〔「最高強度コンクリートの製造について」土木学会誌 26 巻 11 号、昭和 15 年 11 月〕をあげることができる。

吉田徳次郎はコンクリート強度におよぼす各種要因を整理し、これらをもっとも有効に組み合わせることによって、 1000 kg/cm^2 以上もの圧縮強度をもつコンクリートをつくりうることを明らかにした。

また、この間コンクリートの試験方法に関する研究も多く行なわれるようになり、1943 年（昭和 18 年）赤沢常雄が円柱供試体を横にして加圧するコンクリート〔赤沢常雄：「コンクリートの圧縮による内部応力を求める新試験方法」土木学会誌 29 巻 11 号、昭和 18 年 11 月〕の引張強度試験方法を世界にさきがけて発見したことは、特筆されるものである。

第 2 次大戦後の戦災復興と経済の伸長とは膨大なコンクリート工事を必要とし、セメント生産量の急激な増加、セメント品質の向上をもたらす一方、コンクリート工事の合理

化、機械化が急激に進み、またコンクリート材料および施工方法の研究を促進し、コンクリートの品質は戦前に比べて著しい向上をみせた。パッチャー プラントの普及、強制練りまぜ方式のミキサの出現、コンクリート ポンプ、ロード フィニッシャー、バイブロ ドーザーなどの各種施工機械の普及は、コンクリートの品質向上に大きな貢献をしたものである。ことに 1950 年（昭和 25 年）初めてつくられたレデーミクスト コンクリートが、この十数年の間にほとんど全国に普及し、一般工事に用いるコンクリートの品質向上に寄与したことは特筆されるべきであろう。

このようなコンクリートの品質向上は鉄筋コンクリートの設計にも反映し、鉄筋コンクリートの設計に用いる曲げ圧縮応力度についてみると、戦前は $40 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 程度が普通であったのが、最近では $70 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ が普通に用いられるようになり、プレストレスト コンクリートの設計では 150 kg/cm^2 にも達している。したがって、材令 28 日において要求されるコンクリートの圧縮強度も戦前 $120 \sim 150 \text{ kg/cm}^2$ が一般であったのが、最近では $210 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$ が普通で、プレストレスト コンクリートでは 450 kg/cm^2 以上のものが用いられるに至っている。設計および施工技術の進歩は、今後ともコンクリートに対して強度の増大を要求しつづけることであろう。また、引張強度が弱く伸びが小さいというコンクリートの欠陥を改善することも、今後コンクリートの強度の面で課せられた大きな研究課題であろう。

b) コンクリートの耐久性 コンクリートは文明のもたらした人工の岩石であって、耐震耐火的であり、また気象作用や化学作用に対して耐久的事であることがもっとも大きな特長である。このことは、関東大震災において、また第 2 次大戦の災害においてももっとも深く認識され、これらの災害のつどコンクリートの工事量が飛躍的に増大し、コンクリート技術がこれら災害を契機として長足の進歩を示したことによっても知ることができる。

耐震耐火性はこれら災害のつど実証されており、なお多くの問題が残されているがここでは省略する。

気象作用に対する耐久性は、戦前まではコンクリート構造物の歴史がまだ浅く、また、わが国が比較的中庸の気象である所からとくに問題にされなかった。耐久性に関しての問題がとりあげられるようになったのは、主として第 2 次大戦後のことである。戦後ダム建

設が増加し、山間高地の比較的气象作用のはげしい地域で重要なコンクリート構造物を施工する必要が生じ、気象作用に対する耐久性についての配慮が必要となった。戦後急速に普及した AE コンクリートはコンクリートの耐久性の増加に著しい貢献をした。微小な独立した空気泡をコンクリート中に一様に分布させたコンクリートが AE コンクリートであり、AE コンクリートをつくるために用いられる混和剤が AE 剤である。AE コンクリートは、1934 年（昭和 9 年）頃アメリカで発見され、以来多くの研究が進められてその特性が明らかにされた。すなわち、AE 剤を用いてコンクリート中に 3~6% の空気泡を含ませることによって強度をそことなくコンクリートのワーカビリティを増し、耐久性、水密性を著しく改善することがわかった。わが国には戦後いち早く紹介され、電源開発工事関係を中心とするコンクリートの耐久性増加の要求から急速な普及を見た。

AE コンクリートの普及と同時に、コンクリートの耐久性に関する研究も活発に進められ、コンクリートの配合選定に当たっては、構造物のさらされる気象条件によって、その耐久性も考慮して材料を選定し、水セメント比を選ぶことが強調されるようになった。

コンクリートにできるひびわれもまたコンクリート構造物の耐久性をそことなくものであって、この 20 年間、「まだ固まらないコンクリート」にできるひびわれ、硬化後の収縮によって生ずるひびわれ、硬化にともなう生ずる発熱による熱応力によるひびわれ、などが真剣に研究された。これらの研究の成果によって、コンクリート材料の選定や、構造物の設計施工に当たり、ひびわれ防止上細心の配慮をすることが漸次行なわれるようになった。

コンクリートの内部はアルカリ性が保たれ、そのため内部の鉄筋はサビないのであるが、空気中の炭酸ガスによって中性化すると鉄筋にサビを生ずるおそれが出てくる。1935 年（昭和 10 年）頃からコンクリートの中性化と鉄筋のサビに関して真剣な研究が進められ、1960 年（昭和 35 年）から、土木学会コンクリート委員会では大規模な長期にわたる研究を計画し実施中である。

化学工場の構造物、酸性河川や温泉水に接する構造物の化学的耐久性、海水に接するコンクリートの耐久性なども研究の途上にあり、耐硫酸塩セメントの研究もあるが、これらはいずれも今後研究を要する問題であろう。

コンクリートの耐久性に関する研究は、大規模な実験計画により長期にわたる地味な試

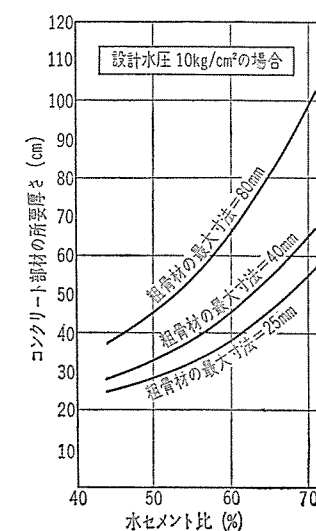
験観察が必要である。また、実験室において現場と関係のある有効な促進耐久性試験方法も見いだす必要がある。これらの点については、コンクリート技術者の地味な努力が期待されている。

c) 水密性 コンクリートまたは鉄筋コンクリート構造物がしけったり、これから水がもれたりしないものであることは地下室、水槽などの場合に必要であるばかりでなく、構造物を耐久的にすること、衛生的にすることなどのためにも大切である。また、酸、塩類あるいは凍結融解などのためにコンクリートが腐食されるおもな原因が水密性の不足による場合が多い。このように、コンクリートの水密性の重要性が認識され、諸外国においても従来数多くの貴重な研究がなされている。しかし、まだ水密性をもととして水密コンクリートの断面設計を行なえるほど研究は進んでいないようである。このため各国の標準示方書においても水密コンクリートの設計については、用いるコンクリートの品質のみを規定しているに過ぎないものが多い。しかし、コンクリート部材の水密性は用いるコンクリートの品質のみでなく、部材の厚さおよび加わる水圧の大きさに関係があることは当然であって、最近のわが国における研究はこれらの間の大体の関係を明らかにするところまで進んでいる。

図-5.5 コンクリート部材の所要厚さ

図-5.5 はその関係の一例であって、水密構造物の設計にさいし、コンクリートの厚さおよび配合の大体のめやすを得るのに実用上便利なものである。

コンクリート構造物を水密的にするためには必要に応じて防水工、防湿工などを施すことがあるが、コンクリート自体を水密にすることが最もよい方法である。構造物のコンクリートの水密性に最も大きい影響をおよぼすものは打込み締固めなどの施工の良否である。したがって、ワーカビリティのよいコンクリートを用いることが、材料の分離を少なくし工事現場において部分的な欠点の少ない均等質なコンクリートが得られやすいことから、コンクリートの水密性を増すためにきわめて重要であるといわれ



ている。

しかし、コンクリートは本質的に多孔質な材料である。約 2000 年前ローマのビトルビウス (Vitruvius) はコンクリートの床の水密性を改良する目的で豚の脂を混入した。今日わが国でも多量の防水混和剤が市販されているが、なかには防水効果が疑わしいものもあり、また防水効果はあっても水密性以外の他の性質に悪影響をおよぼすものもあり、防水混和剤は一般に信頼されていないようである。しかし、施工技術が進歩した今日、より安全にコンクリートの水密性を増す手段として再び防水混和剤について研究することは重要なことと思われる。最近つぎのような問題もある。原子力産業の発展にともない放射性廃棄物 (死の灰など) の処分が必要となる。その処分方法の一つとして海洋投棄がある。これは 2000 m 以上の深海に永久に投棄するのであって、廃棄物を封入する容器を鉄筋コンクリートで造ることが考えられている。200 kg/cm² 以上の高水圧に対して容器の水密性を確保するためには良質な防水剤の効果が期待されるのである。

d) ワーカビリティー コンクリートは軟かいほど打込み作業は容易であるが、比重、粒大が互いに相違するセメント、水、骨材が分離しやすくなり均等質なコンクリートが得がたくなる。打込みが容易にできる程度の軟かさをもち、かつ材料分離の傾向が少ないものをワーカブルなコンクリートといっている。

品質のよいコンクリートを造るためには、単位水量を少なくしなければならないことは昔ローマ人がすでに知っていたことであり、その後多少の曲折はあったが、最少単位水量のコンクリートの製造を目標としてコンクリート工学は進歩発展してきたといえよう。単位水量を減ずるとは、いいかえればコンクリートのワーカビリティーを改善することである。ワーカビリティーの改善について、この数年間に起こった特筆すべきことからは、高性能の振動機の開発と減水剤の利用とであろう。

強力な振動機の実用化は、従来困難とされていた硬練りコンクリートの施工を著しく容易にした。つまり「ワーカブルなコンクリート」の定義は少しも変わらないが、その実体は著しく変容したのである。たとえば、昭和の初期はダム工事の現場で労務者は腰まである長靴をはき、打ったコンクリートの中をズブズブ入って施工したものであるが、今日ではほとんど地下足袋のかかとの部分くらいしか沈まない程度の硬練りのものがワーカブルなコンクリートとされている。

写真—5.33 は黒部川第四

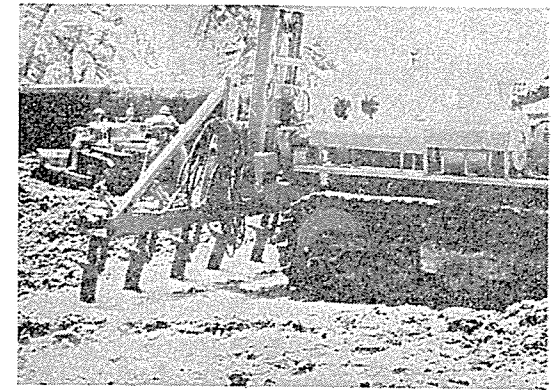
ダムにおけるコンクリートの打込み状況であって、バケットから排出されたコンクリートはただちにブルドーザーによって敷きならされ、その後を数本の強力な振動機を保持したフレームをもったブルドーザーが続き、機械的に確実な振動締固めを行なったのである。また、最近プレキャ

スト製品に即時脱型方式が採用されている。これは硬練りコンクリートを強力な振動締固めと加圧とによって成型するもので、ただちに脱わくことができ、人が乗ったぐらいではくずれない。これに用いるコンクリートは手でにぎったとき、ようやく水がにじみ出る程度のきわめて硬練りのものである。

減水剤はセメント粒子を分散または湿潤させることによってコンクリートのワーカビリティーを改善する混和剤であるが、わが国では 1955 年 (昭和 30 年) 頃からセメント分散剤という名称でしかんに用いられるようになった。良質なセメント分散剤を用いれば、これを用いないコンクリートと同じワーカビリティーを得るために必要な単位水量を 2 割近く減ずることができる。わが国における減水剤の利用の一般化だけでなく、さらに進んで優秀な国産品の製造に成功したことは意義深いことであった。

このように、新しい技術の導入、考案によってコンクリートのワーカビリティーが著しく改善され、高品質のコンクリートが容易に得られるようになったことは予想もし得なかったことであり、先人達のたゆまぬ努力の成果である。しかし、技術は限りなく進歩する。たとえば、今日実用されているコンクリートの単位水量は、少なくともセメント重量の 30 % 以上であるが、セメントの硬化だけに要する水量はその 20 % 以下程度であるから、さらに単位水量の少ない高品質のコンクリートの実用化が可能ならずであり、これはわれわれに課せられた重要な問題であろう。そのほかコンクリートのワーカビリティーはきわめて複

写真—5.33 黒部川第四ダムにおけるコンクリート打込作業



写真—5.34 V F 試験器



ート用のものである。この測定器についてなお改良すべき点も多いと思われるが、わが国独自の方法として考案され、その標準化について検討されていることは心強いことである。

e) コンクリートの均等性 コンクリートはセメント、水、細骨材(砂)、粗骨材(砂利)、混和材料を所定の割合に配合し練りまぜて固まらせた人造石である。したがって特に現場で施工されるコンクリートの場合などに品質の不均一が生じやすいという欠点を有している。構造物の品質はその最弱箇所によって左右されることを考えると、均等質なコンクリートをつくる努力の重要性を認識することができる。

明治初期の橋脚工事に当たってセメントを「たる」ごと放りこんだという話もあるくらいであり、均一に練りまぜることの必要性を現場の作業員まで浸透させるには苦心を要したと思われる(昔はたる入りセメントが用いられていた)。たとえば練りまぜを人力で行なっている限り大量のコンクリートをよく練りまぜることは非常に困難だったであろう。この意味で機械的に練りまぜるミキサの出現は、コンクリートの均等性を高めるのに飛躍的な貢献をなしたといえる。ただし、このミキサの性能によってもコンクリートの均等性は左右されるので、これについての試験方法も戦後いろいろと検討されてきた。単位水量の少ない硬練りコンクリートはブリージングその他の材料の分離が少なくて有利であるが、このようなコンクリートを均一に練りまぜるためには強制練りまぜ方式のミキサを開発する必要がある、最近このようなミキサが国産化されたことは喜ばしい。硬練りコンクリートを十分締固める振動機の使用もいよいよ本格化してきたが、この振動機の出現はミキサの出現とともにコンクリート界に革命を与えたものとして記憶されるべきである。また単位水量を減らしてもワーカビリティをそこなわない AE 剤や、セメント分散剤と呼ば

雑な性質であるため未解決な問題が非常に多く、いまだ満足な測定方法は見出されていない。今から約 40 年前アメリカで標準化されたスランプ試験方法が、今日なおワーカビリティの大体のめやすを得る方法として広く用いられている。写真—5.34 に最近わが国で考案されたワーカビリティ測定器(VF 試験器)であって、振動機を利用した硬練りコンクリ

れてきた減水剤が戦後実用に供されたことが、コンクリートの均等性を高めることも忘れてはならない。

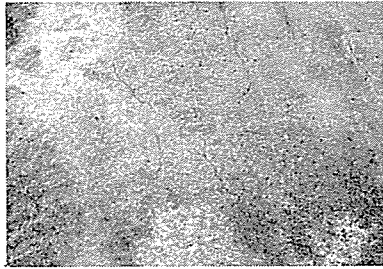
設備の完備した工場でまだ固まらないコンクリートを造り、これを現場に運んで施工することにすれば、悪条件の重なる各現場でばらばらにコンクリートを造るより均等質なコンクリートを造るのに有利なことは明白であろう。この意味で戦後急速に発達したレデミクスト コンクリートの功績はきわめて大きいといわなければならない。さらに工場でコンクリート製品をつくってしまい現場に運んで組み立てることにすればもっと有利な場合もあり、コンクリート製品界の戦後の急速な発達がコンクリートの均等性の点で有意義であったことも忘れてはならない。

現場で施工されるコンクリートから試料をとり、求めた強度試験結果を統計的に処理して品質管理を行なうことも戦後行なわれるようになり、コンクリートの均等性向上に貢献している。

f) コンクリートの重量 構造材料としてのコンクリートの欠点の一つとして、構造的な耐力に対する重量の割合が大きいことがあげられる。したがってコンクリート構造物の軽量化は、古くからコンクリート技術における課題となっている。特に最近の土木構造物では、橋梁などのスパンの増加、材料費・基礎工事費の節約、コンクリート製品による組立構造の必要性などから、軽量化は切実な問題となりつつある。

コンクリート構造物軽量化の方向として、軽量骨材や気泡コンクリートのようにコンクリートそのものの重量を軽くする方法と、プレストレスト コンクリートなどのように部材の強度を高めて部材断面を小さくし、構造全体として軽量化をはかる方法とがある。建築方面では前者のコンクリートそのものを軽くする方法の研究が、軽量化の要求と、断熱、防音、などの要求とから比較的早く始められていた。しかし、構造材としての軽量コンクリートの実用化は 1950 年(昭和 25 年)頃からのことである。建築方面では軽量コンクリートとして火山軽石が主として用いられてきたが、土木構造物では耐久性に関する配慮と火山軽石では十分な強度が得られないことから、ほとんど実用化されなかった。1960 年(昭和 35 年)頃から、粘土・頁岩・フライアッシュなどを焼成してつくる人工軽量骨材の製造に関する研究がわが国でも開始され、軽量で高強度で、しかも耐久性のあるコンクリートをつくるめやすが得られるようになり、最近各方面でさかんに研究が進めら

写真—5.35 表面に生じた乾燥ひびわれ



質に対して生体をしゃへいする必要から、重量コンクリートが使用されるようになった。1955 年（昭和 30 年）原子力研究所が設立され、1956 年（昭和 31 年）茨城県東海村に原子炉が設置されることになって、放射線しゃへい用として重量コンクリートが真剣に研究された。重量コンクリートには、磁鉄鉱・重晶石・赤鉄鉱などの重量骨材が用いられ、これらの骨材を用いたコンクリートの各種性状が研究されて、その成果として 1957 年（昭和 32 年）わが国最初の原子炉が完成した。最近では原子力発電も実用の段階に入り、大規模な原子炉を収容して放射線しゃへいも兼ねるプレストレスト コンクリートの圧力容器に関する研究が真剣に進められている。

このように、在来多く用いられてきた普通骨材にかわって重量骨材や軽量骨材が用いられるようになってきたが、これらを用いたコンクリートは、特殊な用途で用いられる場合が多く、コンクリートに要求される性質も、在来の一般コンクリート構造物に要求されてきたものにくらべると複雑になってきている。コンクリート容積中に占められる骨材の割合は 60～80 % であって、骨材の性質がコンクリートの性質を支配する点がきわめて大きい。特殊骨材を用いたコンクリートの強度のみならず、弾性・塑性・熱性質・収縮膨張などの特性は今後の研究にまつものが少なくない。これらの性質の研究の進歩にともなっ

て、特殊骨材コンクリートの用途もまた一段と広範囲になることであろう。

g) ひびわれ防止 コンクリートにひびわれの生ずることが一般的にあって好ましくないことは明らかである。しかし、鉄筋コンクリート構造物は引張りを受けるコンクリート部分にひびわれが生じうることを前提としている構造物なのに、ひびわれの防止を云々するのは矛盾しているようにみえるが、それにはつぎのような理由がある。つまり鉄筋コ

れて、土木構造物に対する実用化が期待されている。

コンクリートの重量は、重力ダム、擁壁、防波堤などでは重要な要素であるが、最近までは特に重いコンクリートをつくるという努力はほとんどなされなかった。

第 2 次大戦後、原子力の平和利用がさかんとなるにともない、原子炉その他の放射性物

ンクリート構造物は強度上はコンクリートの引張りに対する抵抗をあてにしないで、引張りに対しては鉄筋だけに頼っているため、ひびわれを生じても構造物としての耐荷力には影響しない。しかしながらひびわれの幅が大きくなると鉄筋が外気の影響を受け、さびやすくなるので、構造物の耐久性が弱まることになる。鉄筋コンクリート部材の引張り部に生じるひびわれに対しては、鉄筋の配置、鉄筋の許容応力などを適当にえらんで、ひびわれ幅が鉄筋のさびを生じるほどに広くならないように考えてある。しかしながらコンクリートの施工中に予期しない原因によってひびわれを生じると、その幅を無害な限度以下に保つことはむずかしい。したがって施工中にこのようなひびわれを生じないように十分注意しなければならない。

この種のひびわれのうちでもっとも生じやすいものに、表面からの乾燥によるひびわれがある（写真—5.35）。打設して間もないときにコンクリート表面をしめった麻布などでおおっていないで、風が吹いたり日が当たったりするとすぐこのようなひびわれを生じる。上面をならしてからなるべく早く表面をシートなどでおおって湿潤に保つことが大切である。

写真—5.36 工事敷地内でまくらぎを製作しているところ



コンクリートを打設すると間もなくその硬化熱のために温度が上昇する。単位セメント量が多いほど、部材の厚さが厚いほど、気温の高いほど温度の上昇が大きい。一定時間後は外気の冷却作用が打ちかって温度は降下するようになる。このさいに温度降下にともなうコンクリートの収縮が妨げられるとひびわれを生じることがある。これはすでに硬化して冷却したコンクリート部材に新たにコンクリートを打ちたすときにもっとも生じやすい。コンクリートの乾燥収縮もさらにこのひびわれ発生を促すことになる。この種のひびわれを防ぐために、材料をあらかじめ冷却したり、新たに打設する部分にパイプをそう入して冷却水を通して温度の上昇をおさえることがある。

コンクリート構造物が十分に自重をささえるようになる前に型わくや、支保工がゆるんでひびわれを生じた例もあるが、型わく、支保工の設計、施工を正しくさえすればこのよ

うな危険はない。

h) 型わくおよび支保工

鋳物の鋳型に相当するものがコンクリートの型わくであり、型わくによってコンクリートは硬化後に所定の形状がえられるわけである。コンクリート部材でもコンクリートぐい、柱、まくらぎなどのように工場で製作して（写真—5.36）現場まで運搬されるものもあるが、大型なものでは現場でそのままコンクリート打ちをする場合が多い。橋のように空間にコンクリートを打たねばならないときには型わくをささえる足場が必要となる。この足場を支保工という。背の低い橋では柱をたてただけの支保工ですむが、深

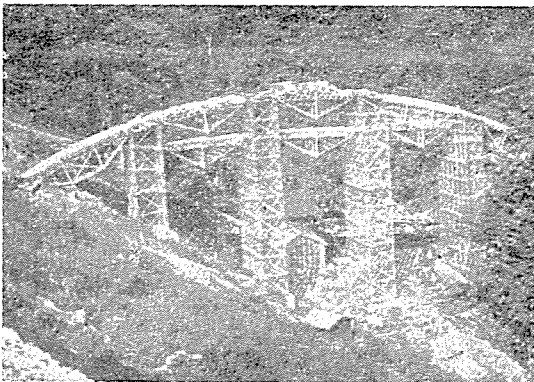
い谷、河の上にコンクリート橋をつくるときには、写真—5.37、5.38 にみるように支保工にも I ビームやトラスなどの桁を使い、それ自体が橋になるような感じがある場合もある。このような支保工を施工するには、本体のコンクリート橋に劣らないほどの設計計算を必要とすることがある。

型わく、支保工の材料としては古くから木材が用いられてきたが、ここ数年来鋼製型わく（写真—5.39）、鋼製支保工（写真—5.40、5.41）が急速に出回ってきて、木製のものをしのぐようになった。木材が鋼材よりも安いのににもかかわらず、鋼製のものが広く用いられるようになったのは、① 鋼製型わく、支保工は同じ構造物だけでなく、種々な構造

写真—5.37 河川上の支保工



写真—5.38 深い谷にかかるアーチ橋の支保工



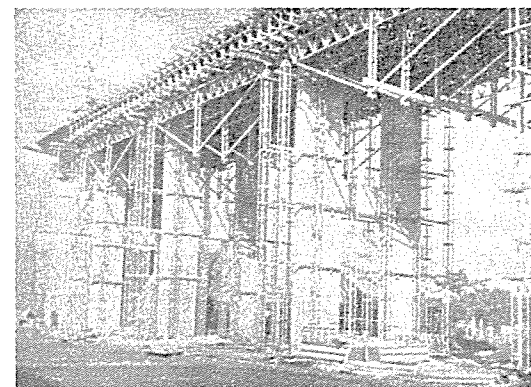
物に使用しうるように工夫されているので、何回も転用することができて結局木材製よりも経済的になること、② その組み立て、撤去が容易でまた迅速であることなどによる。最近道路に、鉄道に多くのコンクリート構造物を短い工期で大量に施工することができたのは、一つにはこれら鋼製型わく、支保工の進歩によるということができる。

i) 特殊コンクリート 寒冷季にはコンクリートの強度発現が遅れるし、凍結によって害を受ける可能性が大きいから注意して施工しなければならないのは当然である。凍害を受けにくいコンクリートを造るには、できるだけ水量を少なくしなければならないことが

写真—5.40 柱コンクリートの鋼製型わく



写真—5.39 背の高い高架橋の支保工



すでに第2次大戦中わが国で明らかにされていた。水量を少なくして硬練りコンクリートとすると締め固めにとくに留意する必要があったが、戦後わが国でも用いられるようになった AE 剤、減水剤を用いることによりワーカビリティの良いコンクリートを少ない水量で製造することが可能となってきたし、また塩化カルシウムのような硬化促進剤を適量用いることにより寒中コンクリートの施工はいっそう容易となった。古くから行なわれてきた材料加熱およびコンクリートの保温だけでは不十分な場合、コンクリートに給熱する必要があるが、戦後は便利な電氣的加熱方法を利用する傾向が強くなってきた。当初はコンクリートに直接通電する方法がとられたが、鉄筋コンクリートへの応

用が困難であったため漸次被覆電熱線を用いる間接的な方法がとられるようになった。

寒中コンクリート施工にくらべると暑中コンクリート施工にはそれほど注意が払われてこなかったようである。戦後、暑中コンクリートにも注意が払われるようになったのは、高温による急結性その他の悪影響を緩和する遅延剤あるいはフライアッシュが登場したことで、短期強度に気をとられすぎたためコンクリートにひびわれが入りやすくなり、暑中コンクリートの場合とくにこのことが目立ったことにもよっていると思われる。乾燥を防ぐことも大事であるが、プラスチック類が戦後普及したため、この作業が容易になったことは確かである。

水中にコンクリートを施工する必要にせまられることも昔から多かったわけであるが、ロートに管をつけたトレミーを用いセメントを多く用いた軟かいコンクリートを流し込む工法がやや信頼できるものとされてきただけであり、しかもこのトレミーを用いる施工も鉄筋コンクリートに対して応用することは認められていなかった。しかし戦後わが国でも行なわれるようになったプレパックドコンクリートにより、水中の施工も空中と同様にこなせるようになってきた。本州四国連絡橋の巨大な海中橋脚の施工はこのプレパックドコンクリートで行なわれるものと思われる。

プレパックドコンクリートをつくるためのグラウトには混和材料としてフライアッシュや減水剤が用いられているが、これらの新しい材料が戦後用いられだしたことがこの新しいコンクリートの出現を容易にしたのであり、新しい展開に対する新材料出現の意義の大きいことを示す好例と思われる。

プレパックドコンクリートはあらかじめ粗骨材を型わくにてん充しその間げきにモルタルを注入する工法であるが、水中コンクリートだけでなく修理補強などにも有利に応用されている。この工法は注入を巧妙に利用したものであるが、鉄粉入りの無収縮グラウト、ひびわれてん充のプラスチック、グラウト、セメント薬液同時注入工法などと戦後各方面で注入工法は新展開を示してきた。

水密コンクリートも戦後優秀な減水剤が現われて水セメント比の小さいコンクリートを施工できるようになったこと、コンクリート中からの石灰漏出を防ぐフライアッシュその他のボゾランが出現したため改善された面が多い。

以上のほか、大気圧を利用してコンクリートを締め固める真空コンクリートが戦後わが

国でも行なわれるようになったこと、すりへり作用に強いコンクリートをつくるため鉄粉入りモルタルやラテックス入りモルタルが用いられだしたことも眼につく。

戦前は吹付口付近で水と合流させてセメント、砂を吹き付けるドライな吹付工法だけが実施されていたが、戦後は練り混ぜたモルタルを吹き付けるウェットな吹付工法も行なわれるようになった。特に大量の空気を入れたソフトクリーム状のモルタルを吹き付ける工法も眼につくようになった。

1) 鉄筋 P C 鋼材 鉄筋コンクリートは今から約 100 年前に発明されたもので、1880 年（明治 13 年）頃から漸次実用化し、わが国においても 1890 年（明治 23 年）頃からその技術が導入されている。この鉄筋コンクリートが進歩し、理論が確立されてくるにつれて、鉄筋とコンクリートと付着強度が必要ことがわかり、鉄筋の表面に凹凸形状をつけたいわゆる異形鉄筋が発明された。鋼棒の表面に凹凸をつけて鉄筋とコンクリートとの付着強度をよくしようという着想は Hyatt によるもので、彼はこの考え方によって異形鉄筋の特許を 1878 年（明治 11 年）にえている。このように異形鉄筋の歴史は古く、わが国でも関東大地震以前にこの異形鉄筋が輸入され、また国産されて一部に使われていた。この異形鉄筋を用いた建物が関東大地震でかなりの被害をうけたが、当時これが異形鉄筋に原因すると考えられたために、その後異形鉄筋はほとんど用いられなくなった。実際はこの原因は鉄筋自体の性質にあるのではなくて、鉄筋の定着とか、せん断補強などといった点で構造物を耐震的にする細かい注意を怠ったアメリカ流の設計法に責任があったものである。このように一時、国内での異形鉄筋の開発は中断された形になっていたのが、戦後の 1950 年（昭和 25 年）頃から輸出を目的として異形鉄筋が生産され、また研究が行なわれてくるようになり、さらに 1960 年（昭和 35 年）頃より高張力異形鉄筋が開発されて実用化してくるようになった。高張力異形鉄筋とは、降伏点の高い鋼棒の表面に凹凸形状をつけたもので、鉄筋の強度が高く、鉄筋とコンクリートとの付着強度が大きいために、鉄筋コンクリートの適用範囲をより一歩前進させたものである。たとえば従来わが国の鉄筋コンクリート橋は普通スパン 10～20 m 以下のものに多く用いられていたが、高張力異形鉄筋を用いた場合には、その後のコンクリートの品質の改善と相いまって 30～40 m 以上の大スパンの橋梁にも鉄筋コンクリート橋が比較的容易に適用できるようになってきた。

一般に、強度の高い鉄筋を経済的に使用した鉄筋コンクリート部材はひびわれが出やす

くなる。高張力異形鉄筋は鉄筋とコンクリートとの付着強度を高めることによってひびわれの成長を抑えるように考案されたものであるが、プレストレスト コンクリートは、コンクリートを高張力鋼線で締めつけて、ひびわれが発生しないように、コンクリートにあらかじめ圧縮応力を与えておくものである。したがってプレストレスト コンクリートは降伏点のきわめて高い鉄筋を用いた鉄筋コンクリートであるといえるが、わが国ではプレストレスト コンクリートのほうが高張力異形鉄筋より以前に開発されていた。したがってその補強材である P C 鋼材はプレストレスト コンクリートと同等の歴史をもっている。

プレストレスト コンクリートは初めは P C まくらぎのように比較的にかさい部材に用いられていたため、5 mm 以下の細い P C 鋼材がまず生産された。したがって初期のポストテンション式の P C 桁もこの 5 mm 鋼線によるものが多かったが、P C 桁のスパンが大きくなるにつれて、7 mm のものが開発され、さらに $\phi 4\text{mm} \times 7$ 本より、 $\phi 3\text{mm} \times 3$ 本より、などの P C 鋼ストランドも使用されてきた。また P C 工法によっては直径の太い $\phi 32\text{mm}$ 程度の P C 鋼棒が用いられているので、この種の高張力 P C 鋼棒も開発され、その強度、性質も改善されてきた。

2.3 鉄筋コンクリート

(1) 鉄筋コンクリートの設計理論の変遷

a) はじめに 鉄筋コンクリートの発明者といわれているランボ (Lambot, フランス) は 1850 年コンクリートに鉄鋼を入れたボートを作り、パリーの植木師モニエル (Monier) は、セメント モルタルの植木鉢を鉄鋼で補強することを発明し、種々改良を加え 1867 年、格子状に鉄筋を配置する Monier 式の特許をとった。その後、仏、独、英、米などで鉄筋コンクリートの実験的および理論的研究がさかんに行なわれ、19 世紀の終わりにケネン (Koenen, ドイツ) は鉄筋コンクリートばりの理論的計算方法を発表し、1892 年エンビク (Hennebique, フランス) はスターラップおよび折曲げ鉄筋を使用した、せん断力に対する補強方法を発表し、この頃から世界各国において多くの実験と理論的研究が行なわれ次第に実用化されてきたが、特に最近においては、測定技術の進歩、ひずみ計の発達などによってもその発展がうながされ、今日の隆盛をみるに至った。

鉄筋コンクリートは、よう壁、基礎、橋梁、ダム、上下水道、発電、棧橋、防波堤、電

柱、各種のくい、煙突、水槽その他あらゆる種類の構造物に応用して、その特色を発揮する結果、工事材料として有用な地歩を占めている。

鉄筋コンクリートが初めてわが国で用いられたのは、土木関係では築港のケーソンであり、建築関係では 1904 年 (明治 37 年) 佐世保ドックのポンプ室と機関室であるとされている。わが国において「鉄筋コンクリート」の訳名が初めて紹介されたのは 1903 年広井勇が工学会誌 253 巻にのせたのが最初である。

わが国のような地震国では、耐火耐震構造上の見地からいっても鉄筋コンクリートは推奨しうる構造方式である。

b) 設計理論 コンクリートは、圧縮力に対しては強い材料であるが、引張力に対しては、その約 1/10 程度のきわめて弱い材料である。この引張力に弱いコンクリートを、構造材料として用いるために、引張力に強い鋼材 (一般に鉄筋といわれている) をコンクリート内の適当な位置に埋め込み、コンクリートが引張力に対して弱いことを鉄筋で補強し、同時にさびやすい鉄筋をコンクリートで保護したものが鉄筋コンクリートである。

鉄筋とコンクリートとが一体となって外力に抵抗する有利な構造材料となる主要な理由は、鉄筋とコンクリートの付着する力が大きく、両者の熱膨張係数がほぼ等しく、またコンクリート中に埋め込まれた鉄筋はさびないという三つの事実によるものである。

鉄筋コンクリートは主として経験と実験とに基づいて進歩発展してきたものである。鉄筋コンクリートが初めて作られてからいまままでに理論的にも実際的にも多くの変遷があり、少しずつ進歩しているが今後なお検討されなければならないことがきわめて多い。

1900 年 (明治 33 年) 以前鉄筋コンクリート部材はその極限強さに基づいて設計が行なわれていたが、1900 年頃から弾性理論が用いられるようになり、長い間これによって設計が行なわれてきた。しかし最近再び極限強さ設計法をとり入れる傾向にある。

弾性理論によって曲げモーメントまたはモーメントと軸方向力とをうける部材の断面の決定または応力度の計算を行なう場合、一般にコンクリートの引張力を無視し、維ひずみは断面の中立軸からの距離に比例するものとし、鉄筋およびコンクリートのヤング係数はそれぞれ定数であると仮定するのである。弾性理論による設計方法の欠点は、この設計方法にしたがって設計された鉄筋コンクリート部材が、破壊に対してどの程度の安全度を有しているか不明確な点である。極限強さ設計方法はコンクリートの塑性理論を取り入れ、

材料の極限強さをもととして部材を設計する方法である。これに対し軸方向だけをうける部材、曲げモーメントだけをうける断面については、その極限強さは明らかであるが、せん断力、斜引張力に関する問題とか、構造物全体としての極限強さというような問題については、まだ研究しなければならないことが数多くあると考えられる。

c) 鉄筋コンクリート標準示方書 コンクリートおよび鉄筋コンクリート構造物は逐次各地に普及しその数もようやく増加したが、設計施工は技術者の個人裁量にまかされていたので、大河戸宗治が1909年(明治42年)外国の示方書を範とし、わが国最初の鉄筋コンクリート設計施工示方書案を作った。これを基礎とし調査研究が加えられ、1914年(大正3年)7月当時は内閣の直轄であった鉄道院で鉄筋コンクリート橋梁設計心得を定めた。この規程は全8章125条よりなり、荷重、許容応力、各部設計、設計細目、材料、施工法、模型(型わく)および拱架など設計施工に関する事項を包含し、総則には鉄道橋、公道橋その他類似の構造物の設計施工に使用するものとする。表—5.11に本心得の許容応力その他に関する例を示す。

表—5.11 1914年の鉄筋コンクリート橋梁設計心得に定める許容応力度の例

1:2:4のコンクリートの許容応力度

軸方向圧縮	400
曲げ圧縮	600
せん断	
コンクリートだけで斜引張応力をうけさせる場合	60
折曲げ鉄筋またはスターラップのみを配置するとき	80
折曲げ鉄筋およびスターラップを併用するとき	140
付着	80
鉄筋の許容引張(圧縮)応力度	15 000

注 1:3:6のコンクリートは1:2:4の75%とする。単位は、lb/in²

1920年(大正9年)頃に至って、わが国の土木関係コンクリート工事は多くの経験を積み、設計施工の通則がおのずからできたが、鉄道、道路、港湾、発電などの各部門で差異があり、外国の文献を参照する場合も、米、独、英など各国の標準示方書が混然として適用され、不統一でまた不便でもあったので、これを整理し、あわせて適確な新技術の浸透をはかるため、1928年(昭和3年)9月、土木学会コンクリート調査会が設けられ、大河戸宗治を委員長として、1931年(昭和6年)にわが国最初の「鉄筋コンクリート標準

示方書」が完成した。この示方書はその後数回にわたり改訂がなされているが、骨子はそのまま残って今日に至っている。1931年の「鉄筋コンクリート標準示方書」のうち設計に関するものの大要はつぎのとおりである。

① 設計強度：構造物の各部は材令28日におけるコンクリートの抗压強度を基準として設計すべし。

② 荷重：死・活荷重のほか、水平 $g/5$ 、鉛直 $g/10$ の地震加速度を標準とし、温度変化および硬化収縮の影響を考慮すべきことを定めている。

③ 弾性係数比：鉄筋とコンクリートとの弾性係数の比(n)を断面決定、応力度算出の場合には15、不静定力、弾性変形の計算では10とすべきことを示している。

④ 許容応力度：コンクリートの許容応力度は材令28日強度を基準として、各種の場合についての値を定め、鉄筋の許容応力度は引張、圧縮ともに 1200 kg/cm^2 以下とし、地震時はすべての許容応力度を1.5倍まで増大できることになっている。

⑤ 設計細目：版、長方形桁、T形桁、柱における各部の制限寸法を定め、版および桁の支間のとり方、応力理論不明確な構造に関する標準的計算手段を明示している。

1936年(昭和11年)、第1次改訂が行なわれ、1940年(昭和15年)第2次の改訂が行なわれ、コンクリートの許容応力度の制限値が高められた。このときから吉田徳次郎が委員長となった。

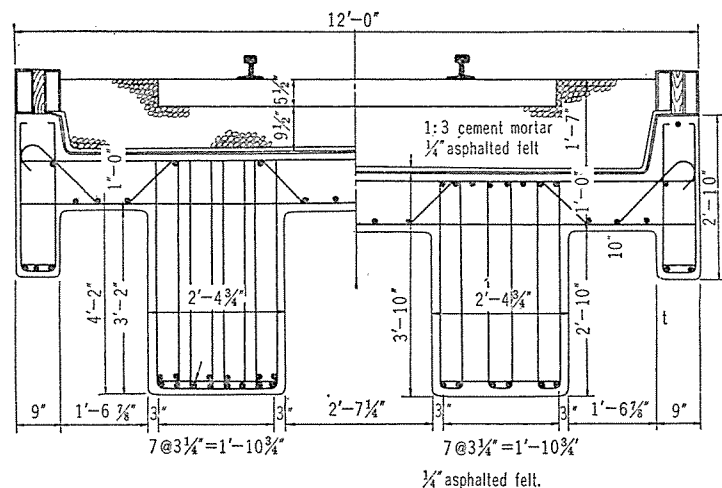
1949年(昭和24年)第3次改訂が行なわれたが、コンクリートの許容せん断応力度をコンクリートの圧縮強度の大小によって2段階に分けたこと、新しくフーチング、よう壁の設計細目が加わったことなどが改訂された内容のおもなものである。1951年(昭和26年)には第3次の不備の点を多少補正し1951年版として発表されたが、その内容は許容付着応力度を高めたこと、鉄筋の定着に関する各項に真鉄筋の定着法を加えたことなどである。

1956年(昭和31年)に第4次改訂が行なわれた。設計に関係の深いものとして、鉄筋およびコンクリートの許容応力度を高めたこと、異形鉄筋を取り入れたこと、中心軸方向圧縮力をうける部材に極限強さ設計方法を採用したことなどである。

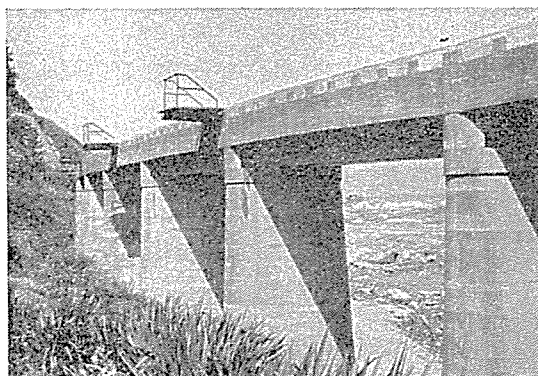
表—5.12は土木学会の示方書から許容応力度の変遷を一覧できるようまとめたものである。

(2) 鉄筋コンクリート構造物

図—5.6 山 生 橋



写真—5.42 山 生 橋

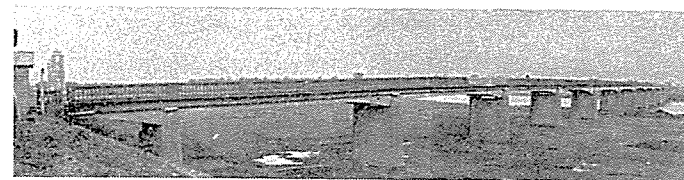


ン 32 m, 翌年宮崎県東臼杵郡の川島橋スパン 34 m があり, 1941 年(昭和 16 年)わが国で最大スパンを有する十勝大橋が完成した(写真—5.44)。

十勝大橋は帯広市十勝川にかかるスパン 41 m, 幅 18 m, 橋長 369 m, 全橋面積約 7 000

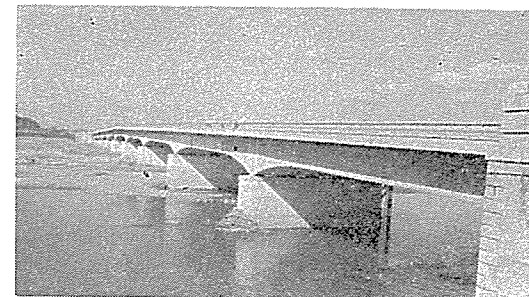
昭和になってからスパンの長大化に努力が払われ 1930 年(昭和 5 年)頃よりゲルバー桁橋が急速に普及し, 1931 年福岡県久留米市にある豆津橋(写真—5.43)は最大スパン 30 m を有するゲルバー桁橋で, 幅 6 m, 橋長 350 m, 1933 年同市の小森野橋スパン, 30.5 m, 1935 年(昭和 10 年)東京調布市の多摩川原橋ス

写真—5.43 豆 津 橋



m² という大規模のもので, 主鉄筋は直径 44 mm の丸鋼を用い鉄筋の継手には天等形鍛接法を用い可動支承には設計荷重 618 t のコンクリートロッカーが用いてある。長スパンの箱形断面の桁として 1957 年(昭和 32 年)竣工の北海道シカリベツ川に架かるスパン 25 m の鹿追橋がある。

写真—5.44 十 勝 大 橋



道路橋用の鉄筋コンクリート桁橋の標準設計として 1931 年(昭和 6 年)6 月に国道用, 1933 年 6 月に府県道用, これの改訂として 1943 年(昭和 18 年)1 月に案として内務省土木試験所報告として出された。1959 年(昭和 34 年)鉄筋コンクリート橋標準設計が幅 1.5 m, スパン 14 m までのものについて, 建設省道路局監修のもとに日本道路協会から刊行された。鉄道橋用桁橋として 1935 年頃スパン 1 m から 14.5 m までの単純桁橋の標準設計が作成され, 全国的に多数使用されてきた。1962 年 5 月新しく異形鉄筋を採り入れた標準設計図が作成されスパンも 22.1 m までとなっている。東海道新幹線の標準設計として異形鉄筋を用いたスパン 25 m までの桁橋が設計され, スパン 15 m 以上は箱形断面として死荷重の軽減がはかられている。

鉄道橋で構造形式の特殊なものの例として, 1935 年(昭和 10 年)牟岐線日佐和川橋梁スパン 13.5 m, 3 スパン連続桁橋, 1936 年大糸線第八下姫川橋梁に最大スパン 22 m のゲルバー桁橋, 1937 年二俣線にスパン 10 m の下路式鉄筋コンクリート桁橋などがある。

鉄道橋としてスパン最大のものは 1958 年施工された総武本線に架かる花見川橋梁で、中央支間 32m、側径間 16m の突桁橋である。

1950 年頃よりわが国にもプレストレスト コンクリート橋が普及し始めたので、鉄筋コンクリート桁橋のスパンの長大化に関してはこれにゆずった。しかし現場打ちコンクリート可能で、桁高に制限のない地点でスパン 20~30m 以下の中短スパンの場合には鉄筋コンクリート桁橋が経済的に有利であるといえる。

c) 鉄筋コンクリートアーチ橋 1908 年(明治41年)大連にスパン 22.5m の日本橋が架けられてより、1911 年から 1912 年にかけて京都市にスパン 49.14 尺の四条大橋、スパン 49.13 尺の七条大橋が架けられ、1912 年にはスパン 104.7 尺の市原橋ができた。大正時代にはメラン式、モニエル式などを合せて鉄筋コンクリート アーチ橋は 30 橋近く建造された。1927 年から、1929 年にかけて新潟市の 信濃川に最大スパン 42.12m の万代橋が架けられ、1931 年長野県下伊那郡にスパン 47m 姑射橋、翌 1932 年同県上伊那郡にスパン

図-5.7 坂戸橋
側面図

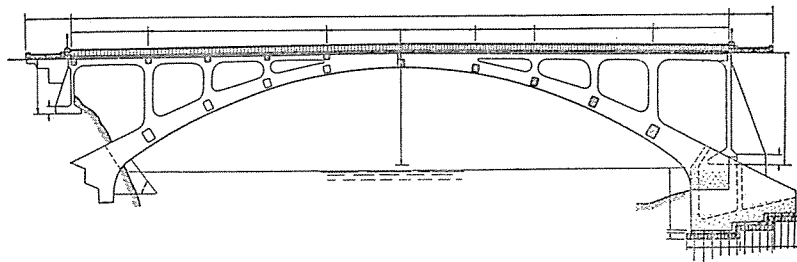
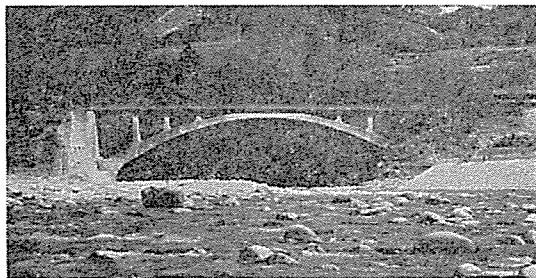


写真-5.45 坂戸橋



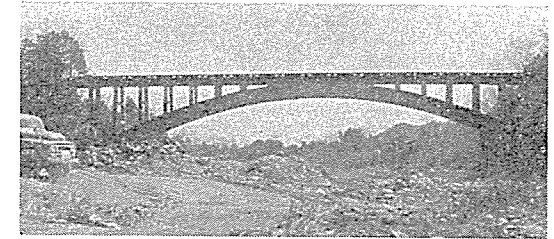
70m、ライズ 11.7m の坂戸橋が架設された (図-5.7, 写真-5.45)。

東京都青梅市にあるスパン 75.78m の万年橋は多摩川上流の溪谷景勝地に架かる 2 ヒンジ鋼構肋拱であったが、交

通車両の増加ならびに大型化と、経年による部材の一部腐食に起因して肋拱のたわみ量が増大してきたので、検討の結果 コンクリートで包含することが適当であると判断され、1943 年(昭和18年)鉄骨コンクリート固定リブ アーチと形式を改め幅員も 3.6m を 5.5m と拡張し、コンクリート アーチ橋としてわが国最大のスパンとされている (写真-5.46)。

鉄道橋として長スパン アーチ橋は 1918 年(大正7年)東北線の外濠メラン式アーチ橋(スパン 38.1m)、1925 年同線神田川アーチ橋(スパン 32.9m)の例があり、1934 年から 1940 年にかけて今坂東

写真-5.46 万年橋

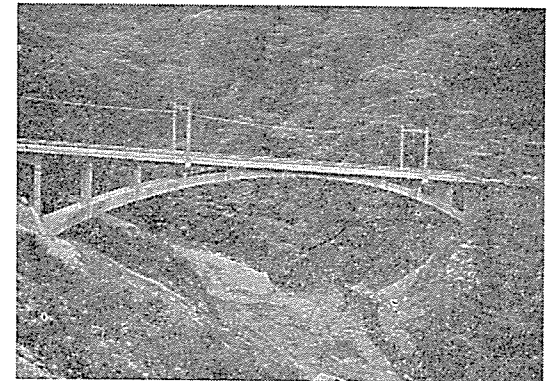


線眼鏡橋梁(メラン式スパン 34.0m)、日の影線網の瀬橋梁(スパン 45m)、川口線大谷川橋梁(スパン 45m)など 10 橋が建設された。一般にアーチ コンクリートでは 100 kg/m³ 前後の鉄筋が用いられているが、1940 年坂本線第一丹生川橋梁の場合、戦争直前のため鋼材の節減をはかり、その上部構造の鉄筋使用量はわずか 13 kg/m³ である。戦後 1952 年スパン 46m の日原川橋梁が竣工した。この工事にはフレシネ工法を用い、クラウンにジャッキをかけて応力の再配分を行なった。1963 年信越線碓氷川にスパン 70m の鉄筋コンクリート アーチ橋が架設された。

写真-5.47 碓氷川橋梁

この橋梁は国鉄のコンクリート橋として最大スパンのもので、その架設地点は 66.7% という急勾配区間中にある (写真-5.47)。

信濃川水力発電第 3 期工事で建設されたスパン 15.6m、ライズ 5m の鉄筋コンクリート アーチ真人水路橋では竣工後各アーチの拱頂と 1/4 点



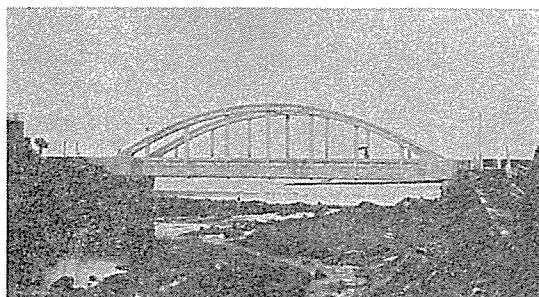
の設計の誤差および第 1 号アーチ拱軸線の実測を行なった。これによれば設計高に対して起拱点で $-27 \sim +12$ mm, 1/4 点で $-22 \sim +33$ mm, 拱頂で $-3 \sim +16$ mm の差があった。また軸線の誤差は拱頂を 0 とした場合 $-78 \sim +46$ mm となっていた。

1960 年（昭和 35 年）竣工した横黒線廻戸川橋梁（スパン 52 m, ライズ 9.5 m）では軸線の誤差は 21 cm 高い所があり断面積で 10% 大きい所があった。

もともと鉄筋コンクリート橋で長スパンに適する形式は上路開側式アーチであるが、わが国では地理的条件、その他の理由から長スパンの上路橋を架ける適当な地形が少ないので、この種のコンクリートアーチ橋の発達がおくれている。世界最大のスパンを有する鉄筋コンクリートアーチ橋は 1962 年工事中のオーストラリアのシドニーのパラマッタ（Parramatta）河に架かるスパン 1 000 ft（304.8 m）のものである。

コンクリートアーチは上路式に適するものであるが、下路式として使用される例も多い。

写真-48 吉 浜 橋

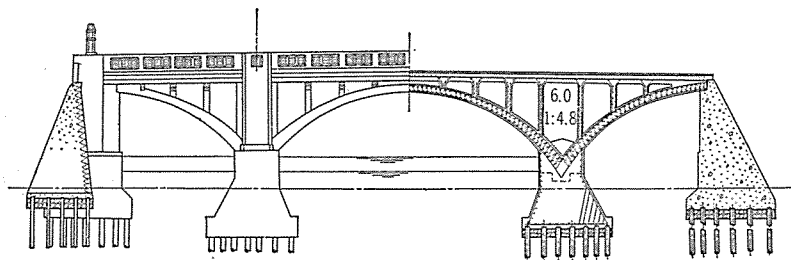


鉄筋コンクリートを下路式にすることは鋼橋と比較し不利であるといわれているが、桁下空間が制限されている箇所に道路橋として多くの実例がある。長野県の昭和橋（スパン 41.4 m）、栄橋（スパン 45 m）、1951 年（昭和 26 年）神奈川県吉浜橋（ス

図-5.8 錦 橋

側面図

縦断面図

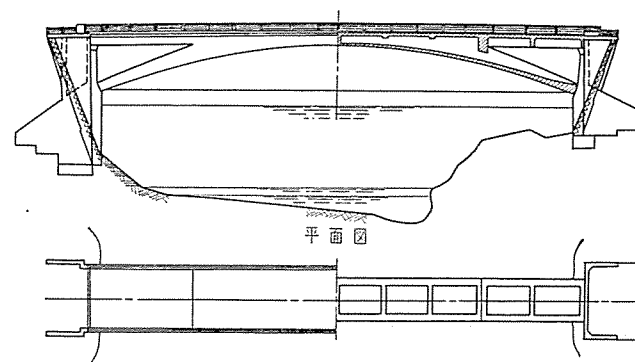


パン 30 m, 写真-5.48) などのローゼ桁, 1933 年（昭和 8 年）神奈川県湯本町にある旭橋はスパン 36 m, 幅 12 m, 約 45° の斜タイドアーチ橋である。

特殊な形式として 1926 年（大正 15 年）錦橋（図-5.8）, 1935 年宝橋スパン 45.4 m（図-5.9）などがある。

図-5.9 宝 橋

側面図



平面図

d) 鉄筋コンクリートラーメン橋 一般の橋梁、架道橋、高架橋などに用いられる。

1926 年東京中央区にある浜洲橋はスパン 40 ft（12.2 m）, 幅員 11 m の門型ラーメン橋で古いものである。これより以前 1924 年大連にスパン 13.6 m と 5.45 m との 2 スパンラーメン橋が建設されている。橋名は恵比須橋である。長スパンのものととして和歌山県堀川に架かる寄合橋でスパン 27 m の無ヒンジ脚ラーメン橋であり 1941 年竣工した。

図-5.10 亀 山 高 架 橋

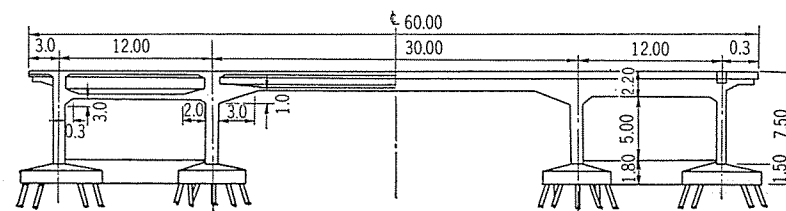


図-5.15 壁式ラーメン高架橋

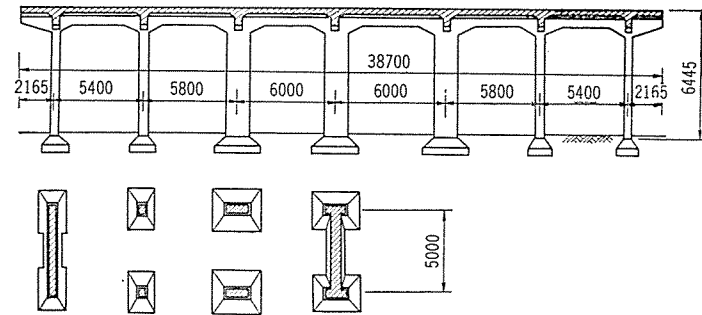
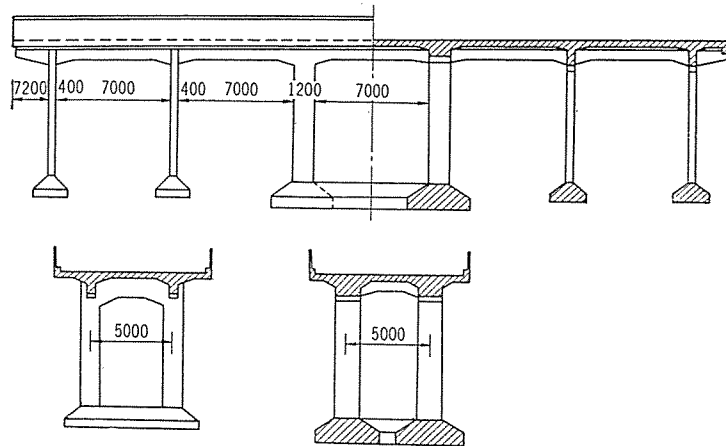


図-5.16 根岸線高架橋の例



した壁式ラーメン（または剛性ラーメン）で 1953 年から始まった秋葉原—上野間の高架橋新設に使用した。

図-5.16 はラーメンと連続桁とを組み合わせたもので、1964 年開業した根岸線の建設に使用され、写真-5.49 は壁構造と連続桁とを組み合わせた高架橋で、東海道新幹線に使用されているものでスパン 10 m を主体とし、1 ブロック全長 86 m のものである。

わが国の自動車ブームは欧米にくらべ、だいぶおくれてやってきたが、交通容量をま

写真-5.49 新幹線高架橋の例

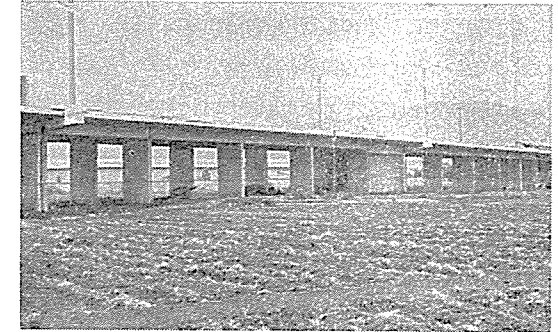


写真-5.50 登戸大橋

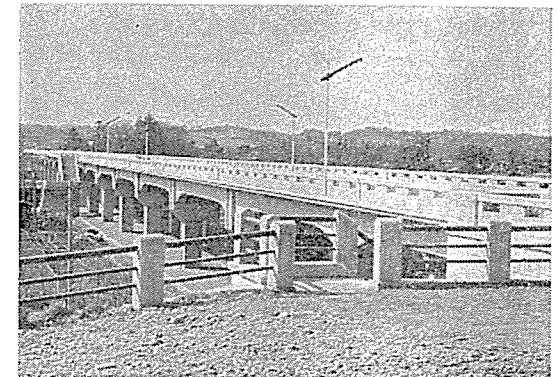


写真-5.51 名神高速道路尼崎付近高架橋



し、走行速度を高くして交通事故をへらす目的で東京—神戸間の高速道路、東京、阪神地区の都市内高速道路の建設、そのほか部分的に各地方で多くの高架構造の建設が行なわれている。写真-5.50 は神奈川県にある登戸陸橋で 1957 年竣工した橋長 443 m、3 径間連続ラーメン高架橋であり、写真-5.51 はスパン 15 m、5 径間で 1 ブロック 75 m の名神高速道路にある尼崎付近の高架橋である。

f) 橋梁下部構造物、擁壁その他 上部構造が鋼でもプレストレストコンクリートであっても、橋梁の下部構造は特殊な場合のほかほとんどコンクリート造りである。

河川の流水断面を大きくしたり、土地利用を考えたり、あるいは外観上から橋脚は断面を小さくする傾向がある。このため従来レンガや無筋コンクリート造りであった橋台、橋脚は、耐震上からも最近ほとんど鉄筋コンクリート

で造られるようになった。

橋台橋脚およびその基礎の発達をみると、明治初年には橋梁は木造であったが間もなく石積レンガの橋台橋脚が造られ、1879 年(明治 12 年)頃イギリス人の指揮によるレンガの井筒が始めて沈下された。コンクリート井筒はずっとあとで 1908 年大分線におけるものが最初である。明治末期より鉄筋コンクリート構造物が一般に施工され始め、躯体基礎工にもだんだん応用され、鴨緑江、清川江などで潜函基礎が用いられた。1921 年着工した国道 4 号線利根川橋、1923 年着工した国道 1 号線六郷川橋のトラス用橋脚には鉄筋コンクリート井筒を用い、1922 年着工した国道 1 号線富士川橋や木曾川橋ではレンガ井筒を用いていることから、この頃より鉄筋コンクリート井筒が用いられるようになったと考えられる。現在では大きい荷重をうける重要な基礎には井筒またはニューマチックケーソンが採用される場合が多い。

大正時代になってから木ぐいの代わりにコンクリートぐいが使用され始め、1919 年に施工された東京市街高架橋には八角形のらせん鉄筋コンクリートぐいが約 9300 本も用いられ、1:3 の斜ぐいにも使用された。1939 年頃より遠心力鉄筋コンクリート基礎ぐいが製造され始め、比較的安く耐久性があり所要の寸法のものが得られることなどから広く用いられている。最近建設機械の発達により、大口徑の場所打ち鉄筋コンクリートぐいが多く用いられるようになってきた。合理的基礎構造物が設計施工できることから、土質工学の発展につれてますます躍進をつづけるものと思われる。

1912 年頃京浜間の線路増設工事に当たり、品川駅付近八ツ山に国鉄最初の鉄筋コンクリートよう壁が建設された。これは地上の高さ $12' - 5\frac{1}{2}"$ の棚式よう壁であって現在でも変状が認められない。よう壁は目立たないが各地に存在し、高さが高いものはほとんど鉄筋コンクリート造りである。

鉄道の電化、ディーゼル化によって姿を消す運命にあるが往年活躍した鉄筋コンクリート構造物としてつぎのようなものがある。1932 年(昭和 7 年)室蘭に、1937 年小樽に高架石炭栈橋がつくられ、1910 年(明治 43 年)日出谷駅に円筒形給水槽が、1941 年(昭和 16 年)には下関駅に容量 250 m³ のインチ工形高架給水槽が建設された。高架給炭槽は 1913 ~ 1914 年福沢、米原、長町駅など、1938 年には容量 900 t のものが下関駅に建設された。1926 年初めて湊町駅構内で鉄筋コンクリートまくらぎが試用されたが、種々難点があり

広く使われるに至らなかった。現在ではプレストレストコンクリートまくらぎが広く用いられている。

高強度コンクリートとして国鉄関門トンネル用鉄筋コンクリートセグメントがある。関門海底トンネルのシールド工法に鑄鉄製セグメントが使用されていたが、鉄材節約のため 1940 年(昭和 15 年)からコンクリートセグメントが現場実施に移された。 $\sigma_1 = 419 \sim 637 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{28} = 589 \sim 769 \text{ kg/cm}^2$ に達し、材令 1 年で 1080 kg/cm^2 の圧縮強度を有するコンクリートを用いた。第 2 次世界大戦中には鉄筋の代用として竹を用いた。いわゆる竹筋コンクリートが仮設構造物に用いられたこともあった。

g) これからの鉄筋コンクリート 昨今は構造物に限らずすべてのことがきわめて急激に移り変わっている時代であり、この中にあっては鉄筋コンクリートに関する移り変わりは一見ごくじみで比較的小さいように思われる。しかし土木建築のあらゆる分野に欠くことのできない鉄筋コンクリートは永久構造物の使命をもって、実験、研究、経験などに基づいて、さらに着実な進歩をするものと考えられる。

2.4 プレストレストコンクリート

(1) プレストレストコンクリートの概念

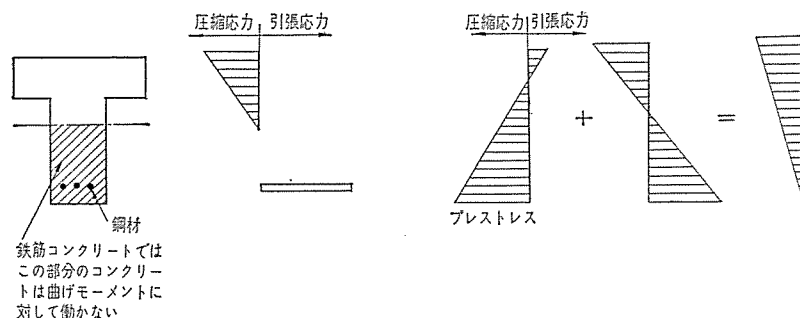
コンクリートという材料は圧縮力を受けた場合にはかなり強く、軟鋼の 1/5 ~ 1/10 程度の強度をもたせることができるが、引張力を受けた場合には非常に弱く、コンクリートの圧縮強度の 1/10 程度、軟鋼の引張強度の 1/50 ~ 1/100 程度の強度しかなく、それ自体では非常に割れやすい材料であることは衆知のとおりである。コンクリートのこの欠点を補うために、鋼を協同作用させることが考えられるようになり、これが発達して今日の鉄筋コンクリートの技術をきづくに至ったことは前に述べたとおりである。鉄筋コンクリートの発明自体が、土木技術の発展の中にあって大きな一時代を画したことはいうまでもないことであることが、文明の発展は鉄筋コンクリートだけでは満足できない場合を生じ、目的対しいっそう合理的な構造物を要求するようになってきたのである。考えてみれば鉄筋コンクリートには、つぎのような欠点があげられるのである。

a) 鉄筋のまわりのコンクリートにもしびれわれが生じてその幅が大きくなると、鉄筋の腐食、ろう水などの心配がある。製鋼技術の発達によって、高強度の鋼材が容易に得ら

図-5.17 曲げモーメントを受けたときの応力分布

鉄筋コンクリート

プレストレストコンクリート



れるようになってきたが、この鋼材を用いて高い引張応力を持たせるようにすると一時的には相当な強度を有するものをつくることができるが、コンクリートのひびわれの幅が大きくなり耐久性の面から考えるとあまり強度の高いものは実用にならない。

b) 鉄筋コンクリートではコンクリートの引張強度はあまり期待できないので、引張力を受ける部分のコンクリートを十分に利用できず、自重が大きくなりやすい。このためスパンが大きい橋梁などの場合、とくに不利になってくる(図-5.17)。

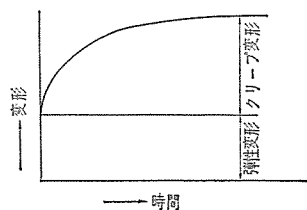
プレストレスト コンクリートは、これらの欠点をたくみに解決しており、この意味では鉄筋コンクリートが飛躍的に発展したものであるということができよう。

プレストレスト コンクリートの概念が生まれたのは、そう新しいものではなく、鉄筋コンクリートが初めて生まれてから間もなく出てきたのであるが、実用化までにはかなりの曲折を経ている。このおもな理由はコンクリートが完全な弾性体ではなく、持続して応

力を加えておくと、図-5.18 に示すように、時間とともに塑性変形(クリープ)を起こし、この量は弾性変形量の2倍程度にも達し、このため強度の弱い鋼線では、せっかく引張力を与えておいてもコンクリートのクリープによってこの力の大半が消えてしまうからである。

この関係を簡単に数値的な概念で示してみると、コ

図-5.18 コンクリートのクリープ変形



ンクリートに $\sigma=100 \text{ kg/cm}^2$ の圧縮応力を加え、コンクリートのヤング係数 E_c を $3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、クリープ変形を弾性変形の2倍(これをクリープ係数と称し、 $\phi=2$ で表わす)とすると、コンクリートの最終変形量はひずみで表わすと、

$$\frac{\sigma}{E_c} (1+\phi) = 1000 \times 10^{-6}$$

一方これだけのひずみに見合う鋼材の引張応力は鋼のヤング係数 E_s を $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ とすると、

$$E_s \times 1000 \times 10^{-6} = 2000 \text{ kg/cm}^2$$

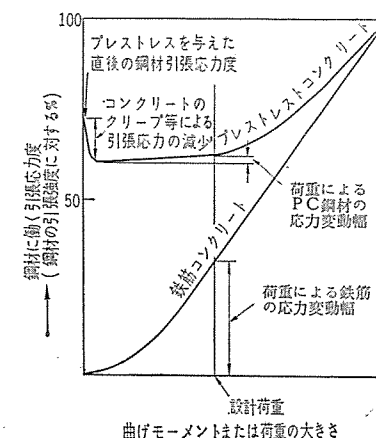
したがって、鋼材はこれより数倍高い引張応力で引張っておかなければ意味がなく、相当高い強度を有する鋼材でなければならない。

このようにコンクリートのクリープに関する性質がよくわからなかったことと、高い引張強度の鋼材を実用的に得ることができなかったことのため、プレストレスト コンクリートを実用化するにはかなりの年月を要したのである。

プレストレスト コンクリートの実用化にはこのように高強度の鋼材の出現が大きな功績となっている。しかし、高強度の鋼材の出現をまっていたのは単にプレストレスト コンクリートの分野ばかりでなく、鋼構造の分野においても同様である。しかし、鋼材の強度を高くすればそれだけ他の性質をぎせいにしなければならない。たとえば伸びが少なくなったり、静的な引張強度の増加の割には

図-5.19 荷重による鋼材の応力変動状態

疲労強度が高くないといったことで、このため高強度の鋼材を使用するためには、なお解決しなければならない問題点が残されている。実に幸いなことにプレストレスト コンクリートにおいては鋼材をもっとも高強度の得やすい線材として使用し、しかも、鋼材にかかる応力が単純な引張応力だけであること、さらに図-5.19に示すように荷重がかかったときの鋼材の応力変動が非常に小さいことなどの理由から、あまり抵抗なしに高強度の鋼材を使用

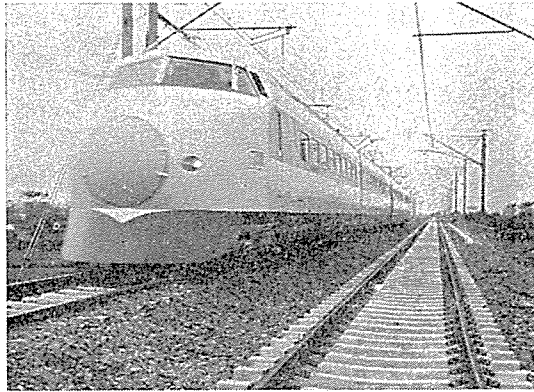


することができたのである。

(2) プレストレスト コンクリート構造物の発展と展望

a) PCの日本における発達 わが国において初めて、プレストレスト コンクリートがとりあげられたのは 1945 年（第 2 次世界大戦の終結）頃からであり、当時鉄道技術研究所において実験が行なわれていた。そして 1948 年（昭和 23 年）にはプレストレスト コンクリートの応用の対象として鉄道用のまくらぎがとりあげられ、これまでに何度か試作され、そのつどひびわれの問題で実用化できなかった鉄筋コンクリートまくらぎの代わりに、プレストレスト コンクリートまくらぎを採用しようと意図され、実験研究が行なわれたのである。そしてプレストレスト コンクリートが初めて実用化されたのもまくらぎであった。プレストレスト コンクリートまくらぎの利点は大きく、その後年々需要が増加し、東海道新幹線においてはほとんどすべてプレストレスト コンクリートまくらぎを採用している。

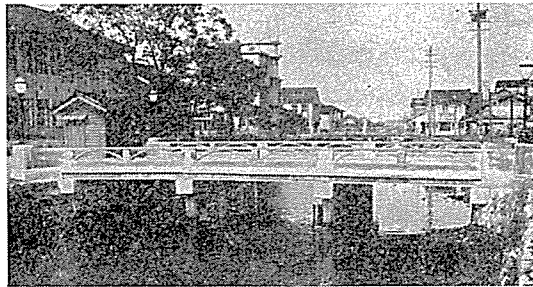
写真—53 東海道新幹線 PC きくらぎ



橋梁の分野に初めてプレストレスト コンクリートが応用されたのは、1951年（昭和 26 年）に石川県七尾市に架けられたスパン 3.82 m のプレテンション桁の長生橋（写真—5.53）である。

非常に小さな橋であり、この橋を見て、10 年後の今日にスパンが 100 m にもなるプレストレスト コンクリー

写真—5.53 わが国初めての PC 橋長生橋

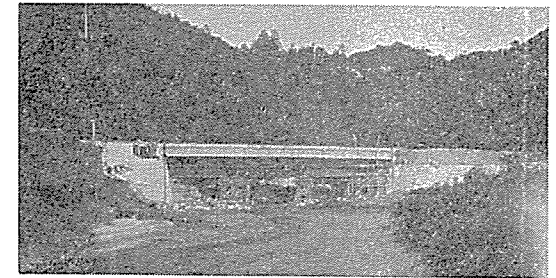


ト橋が日本でつくられるであろうとは当時一般の人々は想像もしなかったであろう。長生橋がつくられたと同じ年に国鉄では飯田線の落石覆に初めてプレストレスト コンクリートを桁として採用した。

初期の時代につくられたプレストレスト コンクリート部材は、まくらぎにしる、桁にしる、プレテンション方式であった。

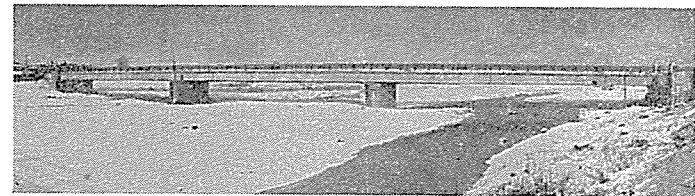
この工法は、工場において、アバット間に高強度鋼線を緊張してはりわたし、このまわりにじかにコンクリートを打って、コンクリート硬化後、高強度鋼線とコンクリートの間の付着を利用して、プレストレスを与えようとするものである。この方式は工場製品としてつくられる部材には適しているが、橋桁としては運搬の問題があるため、スパンの大きなものには適用できないのである。スパンの大きなものに対しては、ポストテンション方式といわれる工法が適し、これは、現場または現場の近くで桁を作り、コンクリートの中にあらかじめ、高強度鋼線を通す孔をあけておき、コンクリートが硬化した後に、この孔の中にそう入した鋼材に端部から緊張力を与え、コンクリートにプレストレスを与える方法である。

写真—5.54 信楽線第一大戸川橋梁



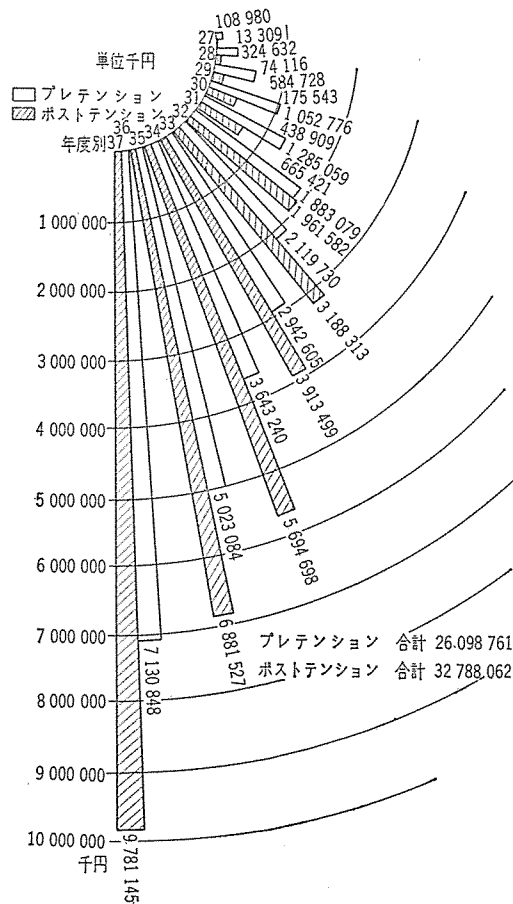
ポストテンション方式の橋として初めて架設されたのは、福井県の東十郷橋であるが、これはスパン 7 m 程度の小さいものであった。ポストテンション方式のプレストレスト コンクリート橋として、現在のプレストレストコ

写真—5.55 福島県上松川橋梁



ンクリート技術をきづくために大きく貢献したのは、鉄道橋においては信楽線に架けられたスパン 30 m の第一大戸川橋梁（写真—5.54）である。道路橋においては福島県に架けられたスパン 40.7 m の上松川橋梁（写真—5.55）である。これらはいずれも 1954 年（昭和 29 年）に工事が行なわれた。

これらの橋梁の設計、施工に当たってなされた研究の成果は、その後のわが国のプレストレスト コンクリート技術の進歩に大きく貢献している。



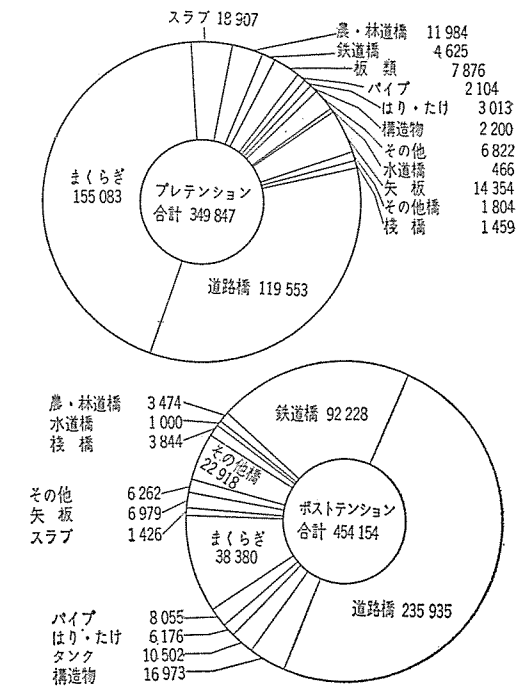
プレストレスト コンクリート技術の進歩に大きく貢献している。

1951 年に初めてスパン 3.82 m の長生橋が架けられてから、わずか 3 年後に、スパン 30~40 m の橋が架けられたことはプレストレスト コンクリート技術の発達がいかに早かったかを物語るものである。このことはプレストレスト コンクリートそのものが非常に合理的な構造であることを示すものであるが、わが国に高強度鋼線を製造する技術的な素地があったことも一つの大きな理由であるといえることができるであろう。

高強度鋼線としてのピアノ線製造工業はすでに第 2 次世界大戦中に、航空機の弁バネ、あるいは機銃用発条としてすでに国産化に成功していた。この技術的素地がもとになって現在の P C 鋼線がつくられるようになって

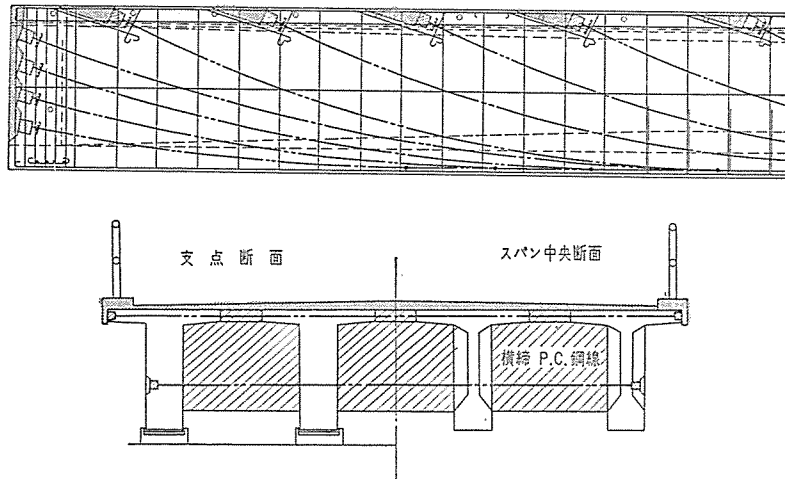
たのである。もちろん初期の頃の P C 鋼線は現在のそれとは多少異なっていた。初期の頃には線引きしたままのピアノ線が使われたが、間もなく、熱処理によってストレスリリーフ（応力除去）を加え、降伏点の高い、プレストレスト コンクリートにより適した P C 鋼線が一般化ようになった。この間に P C 鋼線を熱処理によって品質を改造した、いわゆるオイルテンパー線が比較的太い径の P C 鋼線として製造された時期があったが、これはストレスコーションを受けやすいという欠点のため、最近ではほとんど用いられなくなっているが、ヨーロッパではこの種の P C 鋼線が降伏点が高く、レラクゼーションが少ないという利点のために、さかんに使用されている。P C 鋼線の種類についても、初期の時代には 2.0~3.5 mm 程度の細いものだけであったが、現在では P C 鋼線として、5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm の太いもの、7 本より線として 124 mm 程度のもの、また P C 鋼棒としては直径 32 mm の太

図—5.21 プレストレスト コンクリートの品別生産実績



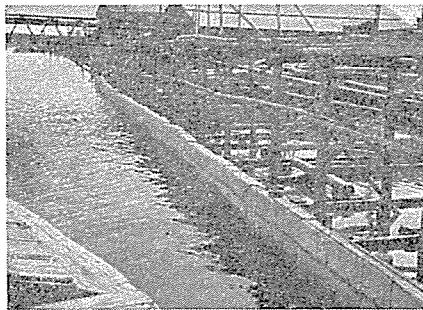
このように材料とくに P C 鋼材の生産の基礎が固められていたため、プレストレスト コンクリートの生産も年を追って急激に伸びることができた。図—5.20 はプレストレスト コンクリートの年度別生産実績を示すものである。たとえば、1962 年（昭和 37 年

図—5.22 プレキャストで製作さ



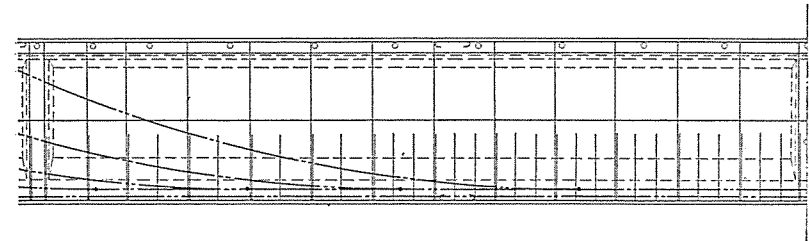
度)の生産は 1960 (35 年度) のほぼ 2 倍にも達しており、急速な発達をとげたのである。また、主として工場で生産されるプレテンション方式のものと、現場で主として生産されるポストテンション方式のものをくらべてみると、1957 年(昭和 32 年)度以降はポストテンション方式の生産が多くなっている。このことは、プレストレスト コンクリート技術の発達とともに、現場でつくられる大型の構造物とくに橋梁への応用がより著しいことを示すとみることができるであろう。図—5.21 に示すようにポストテンション方式のものう

写真—5.56 プレストレスト コンクリート矢板

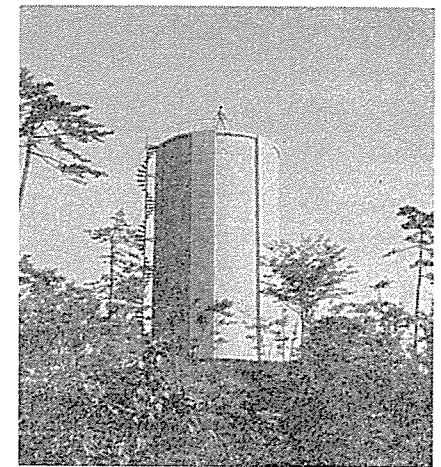


ちの 3/4 は橋梁である。しかし、図—5.21 をみてもわかるようにプレストレスト コンクリートの応用されている分野は単に橋梁、まくらぎばかりでなく、矢板(写真—5.56)、パイプ、タンク(写真—5.57) などかなり広範囲にわたっている。このほかダムなどに一部応用された例もある。橋梁、まくらぎをのぞいた分野では、プレストレスト コンクリートが応用されるようにな

れた P C 橋の断面図および配筋図



写真—5.57 プレストレスト コンクリート タンク

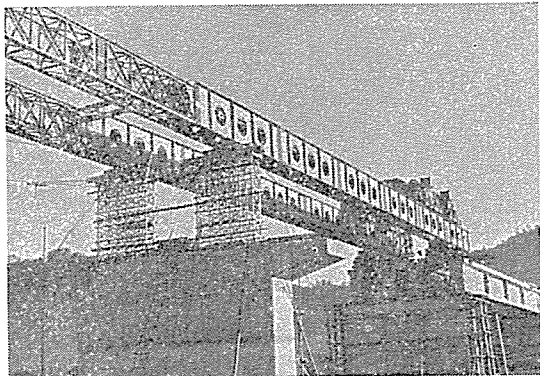


った時期が多少おくれているので、現在ではまだ大きなウエイトを占めるに至っていないが、将来はかなりのびる可能性を有している。このほか建築の分野での発展も順調に行なわれている。

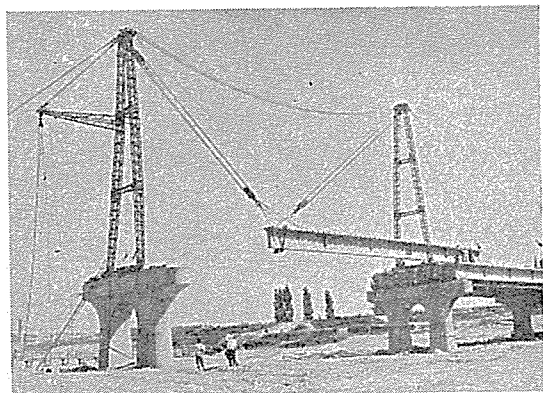
b) プレストレスト コンクリート橋について プレストレスト コンクリートがもっとも広く応用されているのは、橋梁であり、しかも、橋梁はもっとも身近に見られる土木構造物でもあるので、プレストレスト コンクリート橋梁のあゆみについて眺めてみることにしよう。

大戸川あるいは上松川において架けられたプレストレスト コンクリートの桁は図—5.22 に示すように T 型の断面をした桁を現場の近くの桁製作場で製作し、これを写真—5.58, 5.95 に示すような架設機械によって架設し、架設し終わった桁は中埋めコンクリートを打って、横方向のプレストレスを与え、一体とする方法がとられたのである。このような施工方法は、桁を移動して架設するため、できるだけ重量を小さくするように設計されている。しかし、既設の設備には、その架設能力にも限界があり、一般に桁の重量が 100 t をこえると、不可能ではないにしても、架設に困難を生じることが少なくない。一般に道路橋の場

写真—5.58 エレクション ガーダーによる PC 桁の架設



写真—5.59 エレクション タワーによる PC 桁の架設



上述のように桁の重量がふえてくるので、必ずしもこの移動架設方法は便利ではなくなってくる。一方、プレストレスト コンクリートの 橋の経済的な適用スパンがどんどん長くなってきたため、移動架設方法以外の架設方法をとらなければならなくなるケースがふえてきた。

また、橋梁のスパンが長くなり、活荷重にくらべ死荷重の占める割合が高くなると、単純桁にするより連続桁にする方法がより有利になってくる。これは連続桁の場合、死荷重のように等分布に近い荷重によるスパン中央付近における曲げモーメントは、同じスパン

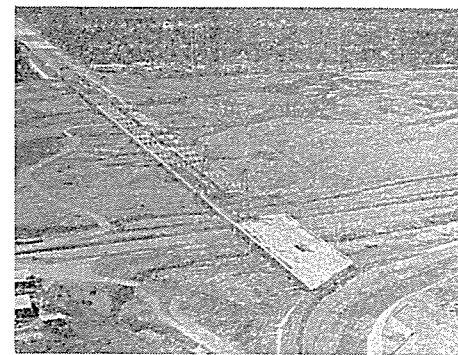
合には活荷重が小さいために桁自重も比較的軽くてすむが、それでもスパンが 45 m をこえると、1 本の桁の重量を 100 t 以下にすることは困難であり、鉄道橋の場合にはスパン 35 m になると、重量は 100 t をこえることがある。

移動架設方法は、河川をまたぐ橋の場合には洪水に無関係に、また、道路などをまたぐ橋の場合にも、下の交通をあまり阻害しないで架設することができ、非常に便利である。このため、わが国の PC 桁の架設には 写真—5.58、5.59 に示すような設備を用いて架設する例が非常に多いのである。しかし、ある程度スパンが長くなってくると、

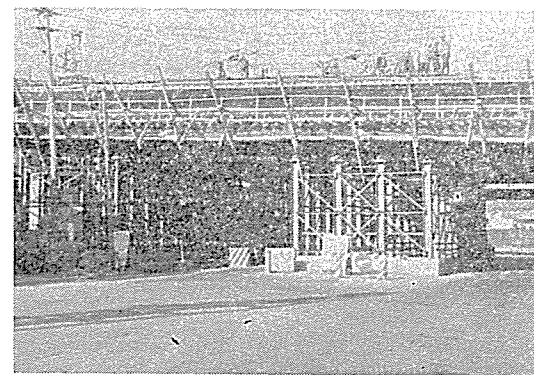
の単純桁の場合にくらべて相当小さくすることができ、その代わりに支点付近において大きくなる負の曲げモーメントを、支点の付近だけ断面を大きくして楽に抵抗させることができるからである。

連続桁をつくるのに、プレキャストで製作した桁をいったん単純桁として架設し、その後なんらかの方法によって支点を結合して連続桁とすることもできる。写真—5.60 はこのようにして製作施工された連続桁の一例で、支間 40 m の 3 径間連続合成桁である。しかし、一般にはプレキャスト桁を組み合わせで連続桁とすることはあまり有利にならないこともある。これは、先にも述べたように、連続桁として有利になるのは、重くなった死荷重を連続桁として受けさせるところにあるので、このように死荷重の大部分を占める桁自重を一度単純桁としてささえさせる方法は、連続桁の利点を十分に生かすことができないのである。写真—5.60 はこれらの短所を最小限にとどめるように計画設計施工されたものである。

写真—5.60 プレキャストの桁を後からつないで連続桁とした例(名神高速道路愛知川橋)

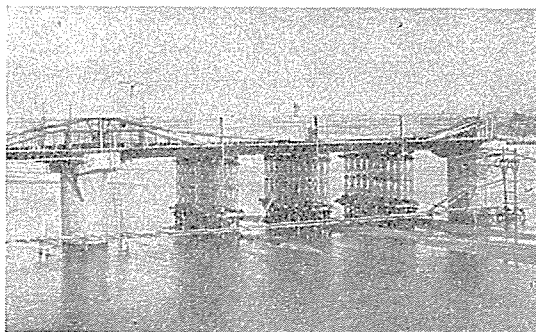


写真—5.61 首都高速道路公園のプレストレスト コンクリート連続架橋



まず、普通に考えられる方法は、PC 桁を鉄筋コンクリート同様に支保工の上で現場打ちコンクリートによって施工する方法である。支保工によって現場打ちコンクリートを

写真-5.62 支保工上で施工した新東海道本線矢作川橋梁



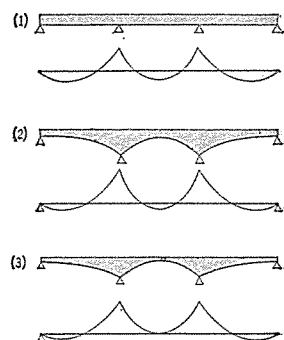
施工されたものが多い。河川をわたる橋梁でも支保工によって施工される例は少なくはないが、日本の河川では梅雨期から台風期にかけ、また地方によっては融雪期に洪水に見舞われる可能性が大きく、この時期には支保工をたてることを制限されることが少なくない。したがって河川に架かる橋で支保工の上で施工するには、湯水期に施工が可能となるような工程がたてられる場合あるいは、洪水の影響の少ないような場合でないと支保工に要する工費がかさみ、施工の安全を期することがむずかしくなる場合もある。

長スパンのプレストレスト コンクリート橋を支保工上で現場打ちコンクリートによって施工できないような条件の場合には、カンチレバー架設工法が用いられることが多い。この架設工法は単に支保工がたてられない場合のみ使用されるのではなく、スパンが 150 m 程度あるいはそれ以上になると、現在のところでは、ほとんどこの架設工法にしかよることができないといってもよいほどに有利な架設工法なのである。図-5.23 に示すように、等断面 3 径間の連続ばりにおける中間支点の曲げモーメントと中央スパン中央の曲げモーメントの比は 2 :

1 になっているが、これを (2) のように中間支点の断面を大きくすると、曲げモーメン

トは剛度の大きくなった中間支点に集まり、中央スパン中央の曲げモーメントは小さくなるので非常に大きいスパンの橋梁では連続桁とし、支点の上の断面を大きくし、スパン中間の断面を小さくするのが構造的に有利になってくるのである。図-5.23 において、(3) のように中央径間

図-5.23 断面の大きさと曲げモーメントの分布関係



トは剛度の大きくなった中間支点に集まり、中央スパン中央の曲げモーメントは小さくなるので非常に大きいスパンの橋梁では連続桁とし、支点の上の断面を大きくし、スパン中間の断面を小さくするのが構造的に有利になってくるのである。図-5.23 において、(3) のように中央径間

写真-5.63 宮崎県越之尾橋

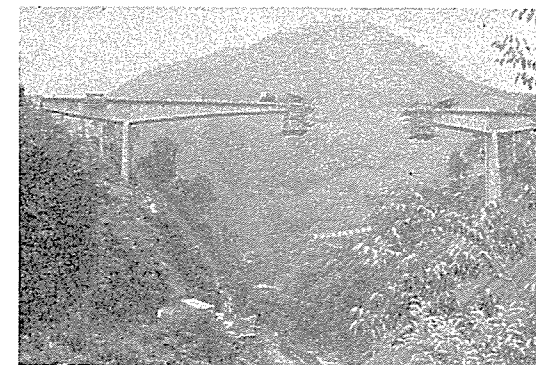


図-5.24 越之尾橋の PC 鋼棒配置図

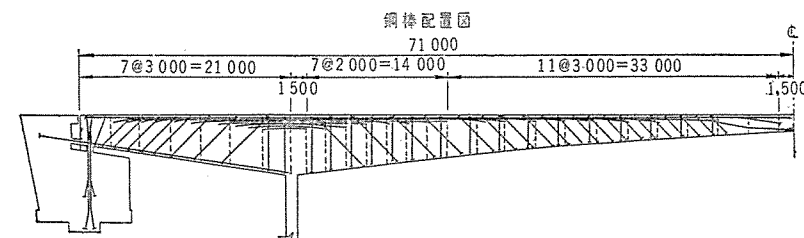


写真-5.64 首都高速道路 3 号線高架道路のカンチレバー架設

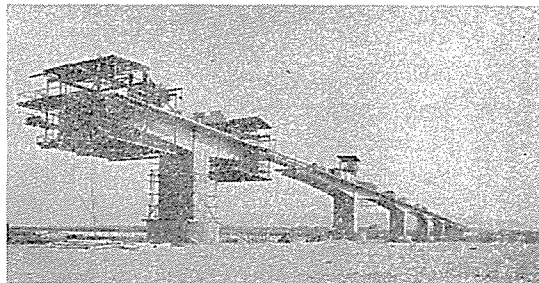


式が変わらないという点で有利な架設工法であることは容易に想像することができるであ

中央をヒンジ構造としても曲げモーメントの分布はほとんど (2) と変わらない。(3) の状態は中央径間がカンチレバーとして小さえられている。このような形式では、架設方法もカンチレバー工法によって行なうのが、架設途中の構造形式と完成後の構造形式

ろう。わが国で初めてカンチレバー架設工法によって架設されたプレストレストコンクリートの橋梁は神奈川県の嵐山橋であり、工事は1958年から1959年にかけて行なわれた。写真—5.63の越之尾橋は、これまで日本で架設されたプレストレストコンクリート橋でもっとも長いスパンのものである。

写真—5.65 名 田 橋

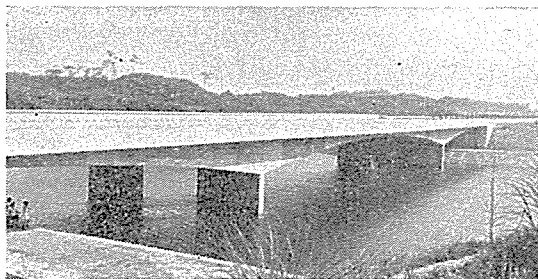


図—5.24 でわかるようにPCケーブルの配置は支点の上で多く、支点からはなれるにしたがって少なくなるので、橋をブロックに分けてつぎつぎに施工して行き、各ブロックごとに必要なくなったケーブルを定着してプレストレスを与えることができる。

写真—5.64は首都高速道路公団の高架道路の施工に当たって、下の交通を阻害しないためにカンチレバー架設工法が応用された例である。

多くのスパンがある場合には、各橋脚から対称にカンチレバーを出して行き、スパンの中央で連結することによって施工することができる（写真—5.65）。

写真—5.66 移動ステージングによってカンチレバー架設された例（名神高速道路釈迦池橋）



この種の架設工法によってさらにスパンの大きいプレストレストコンクリート橋が架設される可能性は非常に大きい。

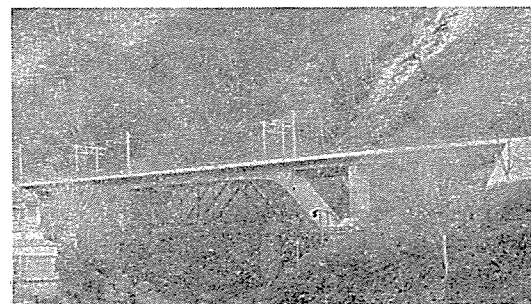
鉄筋コンクリートの長スパンの橋は、ほとんどがアーチによってつくられている。これ

写真—5.66は、写真—5.63～5.65の場合とは逆に、下から各ブロックごとにさきえてカンチレバー架設されたPC橋である。

カンチレバー架設工法によると、スパンが300m程度までの橋であれば比較的楽に架設することができるので、

は鉄筋コンクリートの断面に曲げモーメントに対して非常に大きい抵抗性をもたせることが不利となるからである。これに対してプレストレストコンクリートでは、鉄筋コン

写真—5.67 上越線第8利根川橋梁



クリートよりはるかに大きい曲げモーメントに対する抵抗性をもたせることができ、しかも自分を軽くすることができるので、施工のむずかしいアーチよりも、むしろ桁橋として長スパンのものが好んで採用されているのは、鉄筋コンクリートとプレストレスト

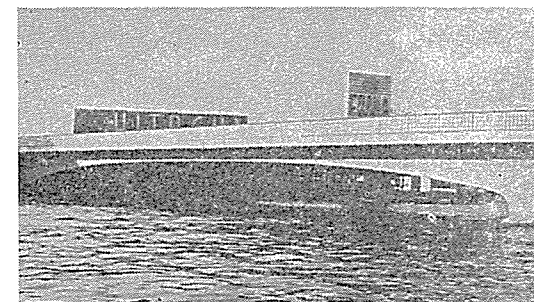
コンクリートの構造材料としての性質の違いをよく表わしているといえるであろう。しかし、プレストレストコンクリートにおいても、アーチ、あるいはこれに近い構造形式のものが全然ないわけではない。急しゅんな渓谷において、強固な岩盤が露出している場合には、このような構造形式が採用される場合もあるのである。

写真—5.67は上越線利根川に架けられたプレストレストコンクリート方柱式ラーメンでスパンは62mである。

また、2ヒンジラーメン橋もPCの特性を生じたもので、その例としては写真—5.68に示すものがある。そのほか、最近脚光をあびているモノレールにも、軌道桁としてPC桁が多く採用されている（写真—5.69）。

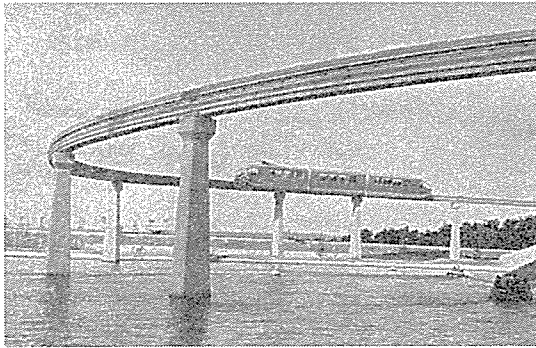
c) PCの将来と問題点 プレストレストコンクリート技術がわが国において誕生

写真—5.68 2ヒンジラーメン橋の例（穴守橋）



してからわずか 10 年余りの間に、今日の地位をきづくに至ったことは驚異といえるほど

写真-5.69 モノレール軌道橋の例



でもないであろう。プレストレスト コンクリートは鉄筋コンクリートより自重を軽くできる点に大きな特長があった。しかし、なお鋼構造物にくらべると数倍の重量となり、わが国のような地震国では重量構造物の基礎に大きな工費がかかることが少なくない。プレストレスト コンクリート構造物をさらに経済的につくるためには、軽量コンクリートあるいはさらに高い圧縮強度のコンクリートを用いて、いっそう軽量化をはかるための研究、地震力に対する設計方法に関する研究などが必要である。

また、原子力発電所の原子炉にプレストレスト コンクリートを応用することも考えられている。このためには、常温より高い温度における P C 鋼材およびコンクリートの性質などについて十分な研究が行なわれていなければならない。これらの問題についてはすでに専門の人達によって研究が始められているのである。

プレストレスを与えるという考え方は、単にコンクリートにのみしか適用できないものではないので、鋼構造物にプレストレスを与える方法も今後はかなりふえてくるのであろうことが予想される。

プレストレスト コンクリートにおける P C ケーブルの定着方法については、現在のところ、外国特許によっているものが非常に多いのであるが、最近国産の工法も使われるようになってきたので、将来は国産工法がのび、P C 鋼材とならんで外国に技術輸出が行なわれることも期待できるであろう。

の進歩である。そしてこの新しい技術をのばすためには、プレストレスト コンクリートの技術者、研究者によって行なわれた地味な基礎的研究が大きく貢献していることを見逃すわけには行かない。将来さらにこの技術が進歩発展するためにも基礎的研究の集積が大切であることはいま

参 考 文 献

- 1) 久保田敬一：本邦鉄道橋梁の沿革について、業務研究資料 22—2 (1934.1)
- 2) Bleich：Theorie und Berechnung der Eisernen Brücken
- 3) AREA：Rule for Ruting Existing Iron and Steel Bridges (1936)
- 4) 小沢久太郎：道路橋の変遷（その一、その二）道路 (1961. 6. 7)
- 5) 日本国有鉄道：鉄道技術発達史 第2編 III (1959.1)
- 6) 友永和夫：新しい青函連絡可動橋について、土木学会誌, 33—1 (1948.1)
- 7) 平井 敦：土木学会誌, 39—12, p 69 (1954.12)
- 8) 小西一郎：土木学会誌, 39—12, p 47 (1954.12)
- 9) 奥村敏恵：土木学会誌, 39—12, p 136 (1954.12)
- 10) 鉄骨橋梁協会：鉄骨橋梁年鑑 (1963)
- 11) Specification for Assembly of Structural Joints Using High Strength Bolts, 1951
- 12) 日本動力協会：日本の発電所 第1巻, p 257 (1933)
- 13) 神谷貞吉：水門鉄管 No. 22, p. 7 (1962)
- 14) 北村市太郎：土木学会第2回年次学術講演会 (1938)
- 15) 高木乙磨, 西 茂, 鈴木和久：新三菱重工技報 Vol. 4, No. 1, p. 48 (1962)
- 16) Edison Electric Institute：「Penstocks」(1936)
- 17) 武藤 清：「水圧鉄管の設計」(未発行)
- 18) Bureau of Reclamation：「Penstock Analysis and Stiffener Design」(1940)
- 19) Bureau of Reclamation：「Valves, Gates, and Steel Conduits」(1950)
- 20) Bureau of Reclamation：「Welded Steel Penstocks-Design and Construcion」(1950)
- 21) 宮地一郎：土木学会誌, 43—10, p. 29 (1958)
佐藤友光：土木学会誌, 43—11, p. 31 (1958)
- 22) Herman Schorer：“Design of Large Pipe” Proc. of A.S.C.E., (1931)
- 23) 内海清温：土木学会誌, 29—6 (1943)
- 24) S. Timoshenko：Theory of Plates and shells (1940)
- 25) W. Flügge：Statik und Dynamik der Schalen (1934)
- 26) 内田勝雄, 矢野 謙, 瀬川 剛, 秋山成興：土木学会論文集, 第 64 号 (1960)
松尾 滋：土木学会論文集, 第 75 号 (1961)
- 27) E. Amstutz：Schweizerische Bauzeitung April p. 229 (1953)
- 28) 電力技術研究所報告, 土木, 54066 (1954)
- 29) 山本善之：分岐球の設計 (未発表論文)
- 30) 矢野 謙：Y分岐の補剛術について (未発表)
- 31) 奥村敏恵：八幡製鉄 (株), 高張力鋼デザインマニュアル, ペンストック編 (1964)
- 32) 神谷貞吉：電力中央研究所 学位論文集, 11

- 33) 牧田武士：水門鉄管 No. 25 (1962)
- 34) 田原製鉄所：水門鉄管 No. 1 (1957)
- 35) 石川島重工：水門鉄管 No. 1 (1957)
- 36) 岩崎正亮：水門鉄管 No. 3 p. 6 (1958)
- 37) 石川島重工業：108 年史 (1961.2)
- 38) 宮地鉄工所：50 年の歩み (1958.10)
- 39) 全電孤熔接による田端大橋に就て，業務研究資料 第24巻19号 鉄道大臣官房研究所
- 40) 田中五郎，進藤俊爾，戸田完夫：全溶接道路橋蒼鳩橋の製作および架設について，溶接学会誌 (1952.9)
- 41) 村上永一：西海橋の工事概要，土木学会誌，(41—4) (1956.4)
- 42) 横河橋梁：50 年史 (1960.5)
- 43) 加藤真三，児玉元二，堀 保：若戸大橋の塔の製作架設工事記録，カラム No. 4，八幡製鉄 K K (1962)
- 44) 池田 肇，鈴木正一，菊野日出男：若戸大橋 その吊橋部架設工事の計画と施工について，カラム，No. 4 八幡製鉄 K K (1962)
- 45) 吉田徳次郎：鉄筋コンクリート設計方法
- 46) 日本国有鉄道：国鉄の回顧，1952
- 47) 坂 静雄：鉄筋コンクリートの研究
- 48) 日比忠彦：鉄筋混凝土の理論およびその応用
- 49) 川口輝夫：最近の鉄筋コンクリートの設計
- 50) 小沢久太郎：道路橋の変遷（その一）
- 51) 鉄道院：鉄筋コンクリート橋梁設計心得 (1914.7)
- 52) 日本道路協会：鉄筋コンクリート道路橋設計示方書（案）1963.3
- 53) 土木学会：鉄筋コンクリート標準示方書 (1931～56)
- 54) 日本国有鉄道：鉄道技術発達史 (1959.1)
- 55) 横道英雄：日本におけるコンクリート橋について，土木学会誌，39—12
- 56) 日本工学会：明治工業史土木編 (1929.6)
- 57) 内務省土木試験所：本邦道路橋輯覧 1925.12
- 58) " " (増補) (1928.3)
- 59) " " 第三輯 (1935.11)
- 60) " " 第四輯 (1939.11)
- 61) 横道英雄：コンクリート橋，技報堂
- 62) 土木学会編：土木工学ハンドブック，技報堂 (1964)
- 63) 国鉄信濃川工事事務所：信濃川水力発電工事誌
- 64) Guyon：Beton Pretontstraint
- 65) Leonhardt：Spambeton far Praxis

Ⅵ 基 礎 技 術 の 進 歩

土木技術の成果を实らせるには数々の基礎技術と，土木工学に包含される広い分野の学問の進歩が基礎になっている。

本編ではこれら基礎技術の中でも特色のあるいくつかの項目をとりあげてみた。まず，土木工学の中でもっとも重要な計測技術である測量と，すべての土木工事において切り離すことのできない土質工学・基礎工学とは，ともに最近目ざましい発展と変ぼうをとげたという点でユニークな存在である。

ダムとトンネルは自然にいとむという点で典型的な土木技術ということができよう。またこの両分野においては，わが国ではとくに太平洋戦争後，機械化施工の採用によって大革新が遂げられ，世界最大級のものが続々と完成されつつあるという点でも共通性がある。