

技術展望

鉄筋コンクリートの歴史・鉄道構造物

HISTORICAL DEVELOPMENT OF REINFORCED CONCRETE RAILWAY STRUCTURE

松本 嘉司*

By Yoshiji MATSUMOTO

1. 鉄筋コンクリートの発明

鉄筋コンクリートの発明は、歴史的にみればそう古いことではない。一般には、フランスの植木職人モニエ(J. Monier)が、1867年に金網を心とする薄いセメントモルタルの植木鉢をつくったのが始まりとされている。しかしこれより先に、すでに1850年にフランス人ランボー(J. L. Lambot)は厚さ36mmの金網入りコンクリートの小舟を造って、1855年のパリ万国博覧会に出品している。またフランスの学者コアネー(F. Coignet)は1861年にT形ばりの特許を得ている。したがって、正確にはモニエを鉄筋コンクリートの発明者ということにはならないが、モニエの功績はただ単に発明の特許を受けただけでなく、その内容を広く世の中に知らせて、実用化を計った点にある。

まずRCパイプと貯水槽の特許をとり、そして1868年にはRCスラブの、1873年にはRCアーチおよび階段の特許をとった。1875年にはその特許を実用化し、スパン15.6m、幅4.2mのRCアーチ橋を建設し、その天才ぶりと大胆さを世に示した。これらのスラブとかアーチの配筋方法は現在のものと若干異なっているところもあるが、大筋は間違っていない。彼はRC部材の構造理論を直観的に体得していたものと考えてよい。

フランスで発明された鉄筋コンクリートを理論的に完成させたのはドイツ(当時のプロシャ)である。モニエの特許はその後プロシャ人ウァイス(G. A. Wayes)に買収された。ウァイスはRC構造の強度と経済性を確

かめるため、プロシャ政府土木局の技師長ケーネン(E. M. Koenen)と共同して、大規模な実験を行った。その結果を整理して、1887年にケーネンが“Das System Monier”を発表しているが、これがRC構造についての最初の学術論文である。この論文によって、鉄筋は引張に抵抗し、圧力はコンクリートが支えるという、RC構造の基本的な考え方が初めて明らかになった。このケーネンの研究と前後して、フランス人アンネビック(F. Hennebique)はモニエ式配筋法ではせん断補強が十分でないことを指摘して、1892年に現在のスターラップに相当するU形鉄筋を、そして1893年には折曲鉄筋によるせん断補強方法を発表した。また彼は柱、壁、はり、スラブを一体のものとする、現在一般に用いられているような鉄筋コンクリートの構造形式を完成させた。この構造形式はアンネビック式とよばれ、その後の建築物、橋梁、岸壁、基礎工などに広く用いられた。橋梁についてみると、最大スパン49.5mのものを1連、スパン39mのものを2連、そのほかスパン30m前後の橋梁を数多く建設した。彼は、建築の分野でも活躍し、パリのグラン・パレ、プチ・パレなどの新しい建物の中に、RC構造の長所を生かした巧みな設計を行った。鉄筋コンクリートを広く世の中に普及させた彼の功績は大きいものといえよう。

このようなドイツ、フランスでの動きに対し、ブラハ大学のメラン教授(J. Melan)はコンクリートの中に剛性のある鉄板および山形鉄を配置した、現在の鉄骨コンクリートに近い構造のメラン式アーチ橋を発明し、大橋梁にコンクリートが用いられる端緒を開いた。この工法はオーストリアだけでなく、ヨーロッパ各国にも普及したが、なかでもイタリアのピサにあるスパン51mの

* 正会員 工博 東京大学名誉教授、東京理科大学教授
(〒278 町田市山崎2641)

Keywords: arch bridge, stiffened arch bridge, rigid frame bridge, standard design, high strength deformed bar

3スパン連続アーチ橋は著名である。

アメリカでの鉄筋コンクリートはヨーロッパとは全く別個に考案され、発達を遂げたが、そこでの最大の発明は異形鉄筋である。異形鉄筋は1878年にヒヤット (T. Hyatt) によって発明された。しかし、その後しばらくは実用化しなかったが、1890年代に入って、ランソムのねじり角棒とか、ジョンソン鉄筋、ダイヤモンド鉄筋などの各種の異形鉄筋が広く用いられるようになった。アメリカは異形鉄筋の母国といわれている。

2. わが国初期の鉄筋コンクリート鉄道橋

1894 (明治27)年に田辺朔郎が造家学会で鉄筋コンクリートを紹介する講演を行っているから、鉄筋コンクリートという工法がわが国の識者に知られるようになったのは明治20年代に入ってからであろう。広井勇が明治36年の工学会誌第25巻に、工部大学における彼の講義概要を発表しているが、そこで「鉄筋混凝土 (Le béton armé, The reinforced concrete) ハ創始尚ホ遠カラスト雖モ欧米ニアリテハ今ヤ業ニ普通の構造ニ属シ各種工事ニシテ其応用ヲ見サルナキニ至レリ。我国ノ如キ鉄材ニ乏シク而モセメントノ製出国内ノ需用ニ超過スルノ今日ニアリテ工費ノ節約ト施設ノ耐久ヲ併得セシムルモ蓋シ鉄筋混凝土ニ如クモノナカルベシ」とある。その後、このもとの用語が補強コンクリートであるということから、そのように名称を改めるべきであるという議論がなされた。しかし、結局は現在の鉄筋コンクリートという用語が土木にも建築にも定着した。

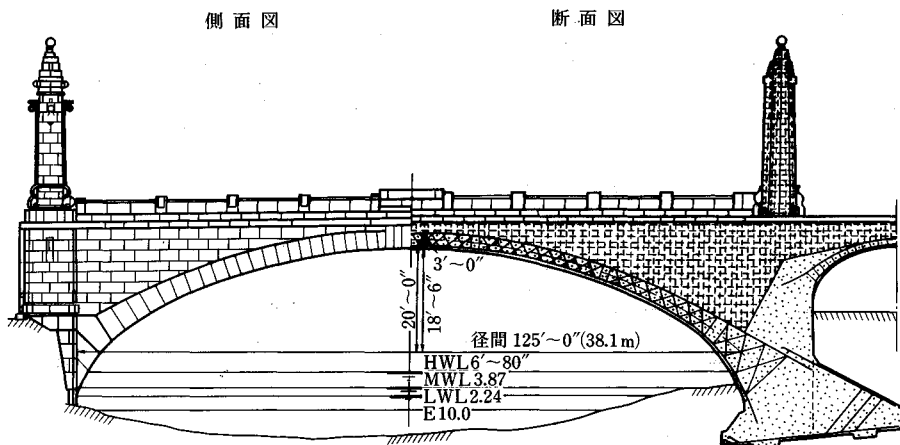
わが国での最も古い鉄筋コンクリート構造物は1903 (明治36)年に建設された神戸市若狭橋 (橋長3.7mのスラブ橋)と田辺朔郎の設計による琵琶湖疏水運河に架けられたメラン式アーチ橋 (橋長7.3m)である。鉄道橋として最も古いものは、1904 (明治37)年につく

られた山陰線島田川暗きよ (スパン1.86mのアーチ橋)である。明治時代にはその後、スパン3~7m程度の鉄筋コンクリートアーチ橋が、鉄道橋として6か所以上建設された。また明治末期には鉄筋コンクリートが下部工、井筒にも使われ始めた。

橋梁につづいて、RC構造は建築にも用いられるようになった。最初のRC構造の建築物は眞島健三郎によって1905 (明治38)年に建築された佐世保の建物といわれているが、引き続いて白石直治が神戸にRC構造の倉庫を、また1909 (明治42)年には鉄道院が国府津機関庫をRCラーメン構造として建築した。一方、土木構造物にもRCラーメン構造が用いられるようになり、1912 (大正元)年につくられた東海道線の武庫川橋梁に門形ラーメン構造のRC橋脚が建設された。この頃から、RC構造がいろいろな分野に広く使われるようになった。

このような鉄筋コンクリートの普及に対応するため、鉄道院では1909 (明治42)年に鉄筋コンクリート設計施工示方書案をつくった。その後これを推敲して、1914 (大正3)年の7月14日に、鉄道省達684号として「鉄筋コンクリート橋梁設計心得」を公示した。これがわが国の最初の鉄筋コンクリートの設計規準である。また、これは1931 (昭和6)年に制定された土木学会「鉄筋コンクリート標準示方書」のもとになっている。

大正年間から昭和初期にかけて、RC鉄道橋はだんだんと大型化してきた。アーチ橋としては、第一次世界大戦中に日豊線でスパン9.14mのものが2か所に建設されたが、規模の大きいRC橋梁の始まりは1918 (大正7)年に建設された東京-お茶の水間の外濠アーチ橋 (スパン38.1m)である。その後1925 (大正14)年に東北線神田川橋梁 (スパン32.9m)、1936 (昭和9)年に米坂線眼鏡橋梁 (スパン34m)、1937 (昭和12)年に日の



図一1 外濠アーチ橋

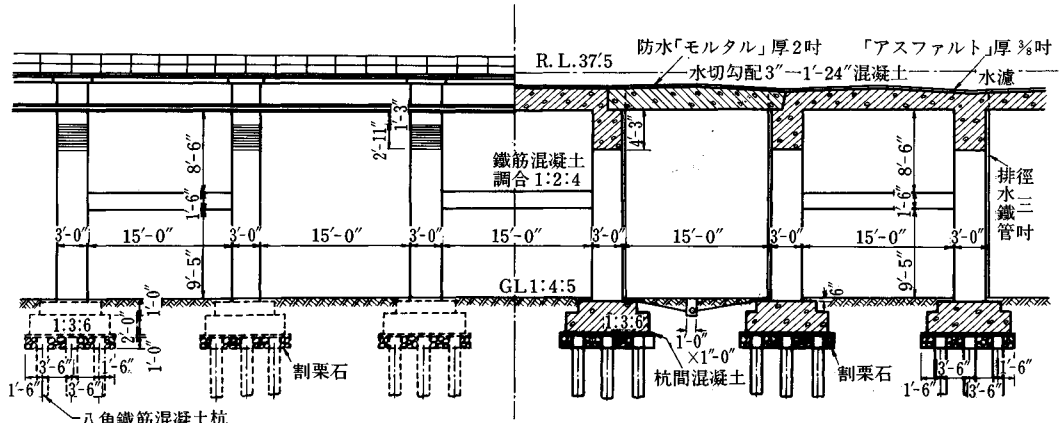


図-2 第一秋葉原一五条町間高架橋

影線網の瀬橋梁（スパン 45 m），1938（昭和 13）年に土讃線の新開および船平橋梁（スパン 40 m），1939（昭和 14）年の会津線大谷川橋梁（スパン 45 m）と長大スパンのアーチ橋の全盛時代を迎えた。また大正 4～14 年の東京付近の改良工事には、スパン 9.8 m の標準アーチ橋が数多く用いられた。

桁橋としては、1915～1919（大正 4～8）年の中央線東京一万世橋間の高架橋建設工事にスパン 5.5 m の単純桁橋が、1920～1925（大正 9～14）年の東北線東京―上野間の高架橋建設工事にスパン 4.6 m の単純桁と連続桁（第一秋葉原―五条町間高架橋など）が用いられた。その頃つくられた規模の大きい桁橋としては、1920（大正 9）年に建設された房総線山生橋梁が著名である。これはスパン 9.14 m の単純桁を 16 連用いた全長 165 m の橋梁で、海岸に近いために RC 構造したものである。工事の概要はイギリスの Concrete and Construction Engineering, Feb. 1930 に発表されている。施工も良好に行われ、現在でも健全な機能を保持している。その

後につくられた桁橋としては、1935（昭和 10）年の牟岐線日和佐川橋梁（スパン 13.5 m の 3 スパン連続桁）、その翌年につくられた深名線ウツナイ橋梁（最大スパン 16 m）、大糸線第八姫川橋梁（最大スパン 22 m）などがある。

RC ラーメン高架橋としては、1920～1925（大正 9～14）年には山手線の東京―上野間の高架橋にラーメン橋脚が、1923～1928（大正 12～昭和 3）年には大阪臨港線にスパン 5.5 m の 3 スパン連続ラーメン高架橋が、1929（昭和 4）年には秋葉原貨物駅にフラットスラブ高架橋が、その翌年には南武線に特殊ラーメン高架橋が、つづいて 1931（昭和 6）年に神戸市街高架橋（スパン 5.5 m の 3 スパン連続ラーメン）が、1932（昭和 7）年には総武線お茶の水―両国間に 3 スパン連続ラーメン高架橋が相ついで建設された。その後、わが国が急速に戦時体制になったため、主要な鉄道工事はほとんど中断した。しかしいくつかの工事はつづけられ、その間につくられた高架橋としては 1942（昭和 17）年に完成した東

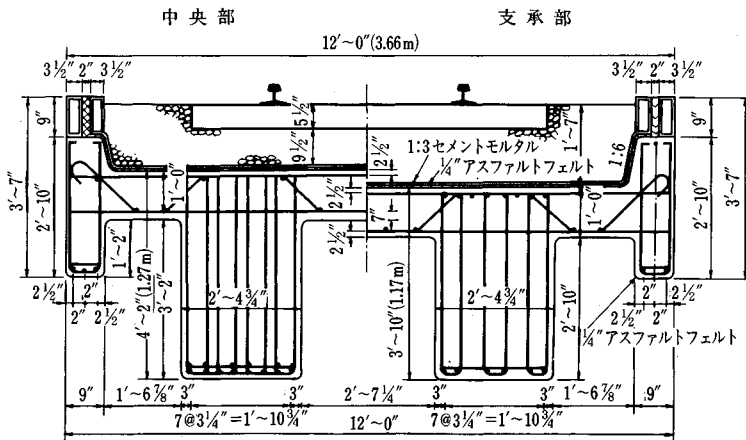
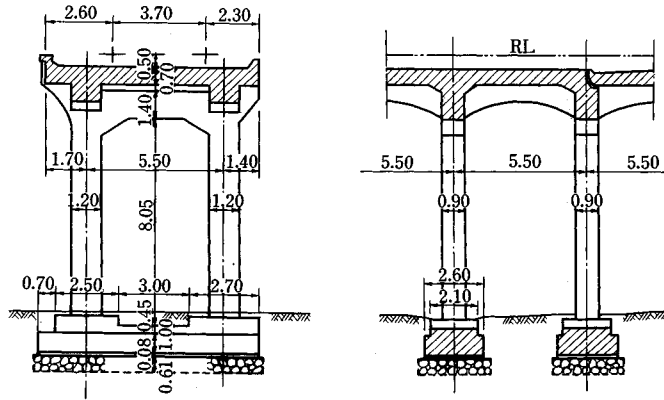


図-3 山生橋梁



図—4 神戸市街高架橋（第一期）

京一汐留間のラーメン高架橋がある。このラーメン高架橋は、ここが東京の中心部ということから、景観を考えて水平部材を変断面にしたといわれている。

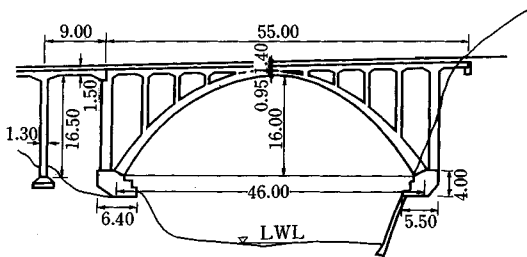
3. その後の鉄筋コンクリート鉄道橋の発達

戦後になって、鉄道の復旧工事が始まり、また改良工事などが行われるようになって、再びコンクリート橋が使われ始めた。1950年代に建設された大スパンコンクリート鉄道橋としては、小管内線の日原川橋梁（スパン46 mのアーチ）と総武線花見川橋梁（中央スパン32 mのゲルバー桁）とがある。花見川橋梁は1958（昭和33）年の完成であるが、鉄道橋のRC桁橋としては最大スパンのものである。

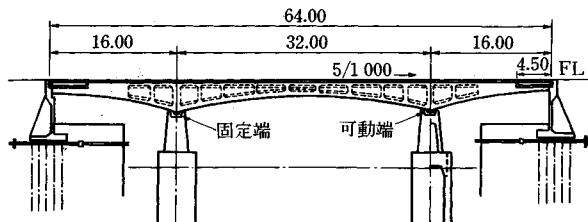
外濠アーチ橋から日原川橋梁までのRCアーチ橋は断面の大きい円形のアーチリブの上に断面の小さい柱を

立て、その上に水平部材をラーメン構造として結合する形式のものであった。このような円形アーチ橋の構造を大きく変えたのが1960（昭和35）年に完成した横黒線廻戸川橋梁（スパン52 m）である。廻戸川橋梁は全体がマッシュパな斜ラーメンアーチ橋になっており、アーチ橋の中に断面の小さい部材がないので、耐久性に優れていると考えられている。大スパンの鉄道橋をこのような構造にした例は世界的にも少ない。また景観的にもよいということから、その後1964（昭和39）年に建設された上越線第八利根川橋梁（スパン62 m）にも、PC橋梁であるが同じ形式のものが採用された。

その後アーチ橋としては、1963（昭和38）年に信越線下碓氷川橋梁（スパン70 m）、1966（昭和41）年に中央線大呼戸沢橋梁（スパン58 m）などが建設されたが、全く新しい構造のRCアーチ橋としては1974（昭和49）年に建設された大沢橋梁（スパン86 m）がある。これは逆ランガー形式のアーチ橋で、アーチリブは主として軸力をとり、水平部材が曲げ剛性を支えるという、コンクリート橋としては経済性の高い構造である。このような形式の橋梁は鉄道橋としては新しい構造であるので、研究的に設計と施工が行われたが、無事に工期どおりに完成した。この大沢橋梁の成功をもとにして、1979（昭和54）年に上越新幹線赤谷川橋梁（スパン116 m）が建設された。この橋梁は同じ形式のアーチ橋で、わが国



図—5 日原川橋梁



図—6 花見川橋梁

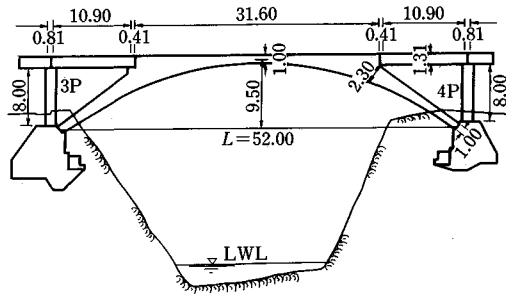


図-7 廻戸川橋梁

での最大のコンクリート鉄道橋であり、景観的にも優れている。

次に、東海道新幹線でのRC橋梁についてみてみよう。昭和30年代に入って、RC橋梁の数は少しずつ増えてきたが、これを広く普及させたのは東海道新幹線の標準設計である。ここでは、桁橋と高架橋について標準設計が行われた。

桁橋の標準設計はスラブ桁（スパン3～15m）、T形桁（スパン7～12.5m）、箱形桁（スパン15～25m）の3種類で、この標準設計図によって、新幹線のRC桁が建設された。スパン25mの最大スパンの箱形桁は全線で3連つくられた。このように標準設計図がつくられたことによって、コンクリート桁が数多く建設され、その結果、東海道新幹線でのコンクリート桁の総延長は41kmにおよんでいる。

高架橋としては、スパン3mの張出部をもつ3スパン連続ラーメン高架橋（スパン3+6+6+6+3m、高さ7～14m）を標準構造とし、その間に立体交差区間があるところには変スパンラーメン高架橋（スパン3+(6～12)+(8～30)+(6～12)+3m）を組み合わせ、一連の高架区間の構造計画ができるように標準設計図がつくられた。この結果、新幹線の高架区間はほとんどラーメン高架橋となり、その全延長は103.3kmに及んでいる。道路との立体交差区間に適用された変スパンラーメン高

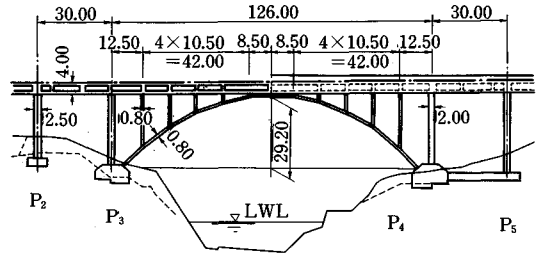


図-8 赤谷川橋梁

架橋の中で最も大きなものは、中央スパンが30mの亀山高架橋（スパン3+12+30+12+3m）である。このような東海道新幹線でのコンクリート高架橋と桁橋を合計すれば全長で144kmになる。新幹線の総延長は515km、このうちその1/4強がコンクリート橋である。高架区間は盛土、トンネルなどでその間が中断されているが、連綿するコンクリート橋としては世界最長のものであろう。その後、このような東海道新幹線の設計方式は山陽、東北、上越の新幹線建設工事に引き継がれ、また新幹線以外の国鉄、私鉄のRC橋梁にも、この標準設計の考え方が適用された。

新幹線での鉄筋コンクリートのもう1つの特徴は、大径の高張力異形鉄筋が大量に使用されたことである。

それまで、鉄筋コンクリートの棒鋼には丸鋼しか使われていなかったが、新幹線工事では、その着工に先立って大径の高張力異形鉄筋を用いたRCばりの載荷試験を行って、良質の高張力異形鉄筋で選定し、その全面的な採用を決定した。これは構造物の経済性と耐久性とを高めるためであって、この高張力異形鉄筋の採用と経済的な設計とによって、新幹線の建設費は大幅に低減した。またこの新幹線工事がきっかけになって、大径の高張力異形鉄筋が広く一般に用いられるようになった。

新幹線以外の特殊な高架橋としては、1982（昭和57）年に完成した阿佐線赤野高架橋がある。これは50スパン連続の継目のない高架橋（長さ500m）で、構造物と

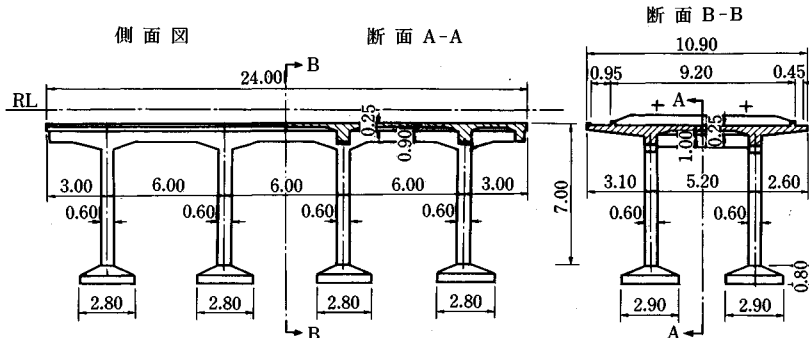


図-9 新幹線の標準ラーメン高架橋

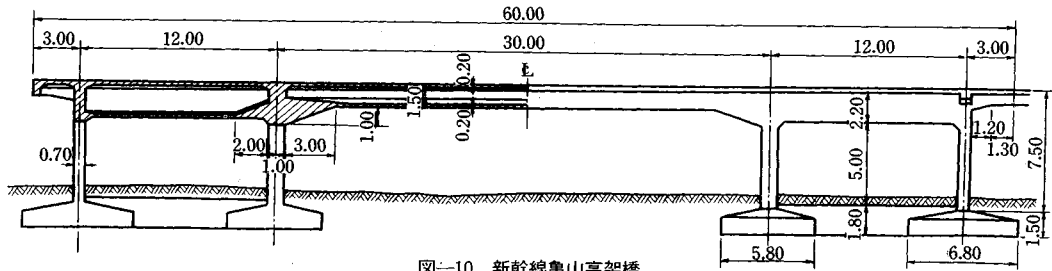


図-10 新幹線亀山高架橋

表-1 鉄筋コンクリートの歴史・鉄道構造物

年号	年 表
1867	フランス人、モニエが鉄筋コンクリートの植木鉢をつくり、特許をとった。
1875	スパン 15.6 m, 幅 4.2 m の RC アーチ橋が建設された。
1878	アメリカ人、ヒャートが異形鉄筋の特許をとった。
1880	ドイツ人、ケーネンが“Das System Monier”を発表し、鉄筋コンクリートの理論を確立した。
1890	ランソムねじり角棒、ジョンソン鉄筋、ダイヤモンド鉄筋など各種の異形鉄筋がアメリカに普及した。
1892	ドイツ人、メランが鉄骨コンクリート構造を発明した。
1892	フランス人、アンネビックがせん断補強方法を確立した。
1894	田辺朗郎が造家学会で講演し、モニエ、メランの工法を紹介した。
1903	田辺朗郎が琵琶湖跡水運河に橋長 7.3 m のメラン式アーチ橋を建設した。
1903	神戸市若狭橋に橋長 3.7 m の RC スラブ橋が建設された。
1904	山陰線島田川暗きょ (スパン 1.86 m の鉄道橋) が建設された。
1905	真島建三郎が佐世保に RC 構造の建物を、また白石直治が神戸に RC 構造の倉庫を建てた。
1909	東海道線国府津機関庫が RC ラーメン構造によって建設された。
1912	東海道線武庫川橋梁などに RC 構造の門形ラーメン橋脚が建設された。
1914	鉄道院が「鉄筋コンクリート橋梁設計心得」を制定した。
1918	東京-お茶の水間に外濠アーチ橋 (スパン 38.1 m) が建設された。
1920	房総線山生橋梁 (スパン 9.14 m の RC 桁, 16 連) が建設された。
1928	大阪臨港線にスパン 5.5 m の 3 スパン連続ラーメン高架橋が建設された。
1929	秋葉原貨物駅にスパン 5.4~6 m のフラットスラブ高架橋が建設された。
1931	土木学会が「鉄筋コンクリート標準示方書」を制定した。
1934	米坂線眼鏡橋梁 (スパン 34 m の RC アーチ橋) が建設された。
1939	会津線大谷橋梁 (スパン 45 m の RC アーチ橋) が建設された。
1953	小河内線日原川橋梁 (スパン 46 m の RC アーチ橋) が建設された。
1955	国鉄「無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート構造物設計基準」(土木学会) が制定された。
1958	総武線花見川橋梁 (中央スパン 32 m の RC ゲルバー桁橋) が建設された。
1960	横黒線廻戸川橋梁 (スパン 52 m の RC 斜脚アーチ橋) が建設された。
1960	東海道新幹線建設工事に太径の高張力異形鉄筋を用いた標準設計 (RC 桁および張出し付き 3 スパン連続ラーメン高架橋と変スパンラーメン高架橋) が行われた。
1963	信越線下碓氷川橋梁 (スパン 70 m の RC アーチ橋) が建設された。
1974	久慈線大沢橋梁 (スパン 86 m の逆ランガー形式の RC アーチ橋) が建設された。
1979	上越新幹線赤谷川橋梁 (スパン 116 m の逆ランガー形式の RC アーチ橋) が建設された。これはわが国での最大スパンのコンクリート鉄道橋である。
1982	阿佐線赤野高架橋 (スパン 10 m, 50 スパン連続ラーメン高架橋) が建設された。
1989	建造物設計標準コンクリート構造物 (鉄道総合技術研究所の改訂原案) がまとめられた。

年に完成した東海道新幹線での壁式高架橋 (長さ 86 m)、1965 (昭和 40) 年に建設された篠栗線多々良橋梁 (長さ 84 m) とか、1967 (昭和 42) 年に建設された小高瀬高架橋 (長さ 90 m) などがあるが、赤野高架橋が最長である。

鉄道橋ではないが、国鉄の信濃川水力発電所建設工事に伴って、1950 (昭和 25) 年に真人沢水路橋 (スパン 19.3 m の連続アーチ) が建設された。戦後の最初の大きな大工事であったため、この設計・施工によってコンクリート技術が大幅に進歩した。その後、1989 (平成元) 年に新しい水路が増設されたが、そこにもスパン 50.5 m 2 スパンの連続アーチ橋として源藤山沢水路橋が建設された。ローマ時代の水路橋に石工アーチが用いられたように、コンクリートアーチは荷重の大きい水路橋に適している。

最後に鉄筋コンクリートの設計規準の歴史について付記する。大正 3 年制定の「鉄筋コンクリート橋梁設計心得」において、①応力とひずみは比例すること、②断面の平面性は保持されること、③コンクリートの引張応力は無視すること、④鉄筋のヤング係数はコンクリートのヤング係数の 15 倍とすること、⑤初期応力は無視すること、といった鉄筋コンクリートとしての基本的な設計方法が定められた。この考え方は、1931 (昭和 6) 年に制定された土木学会の「鉄筋コンクリート標準示方書」に引き継がれ、また 1955 (昭和 30) 年に制定された国鉄の「無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート構造物設計基準」にも継承された。その後この設計基準は何回か改定されたが、国鉄が民営化されるまではほぼ同じ内容の規定になっていた。国鉄が 1987 (昭和 62) 年に民営分割されたことに伴って、構造物の設計方法も私鉄も含めて一本化するということになり、運輸省および鉄道総合技術研究所に研究委員会が設けられ、新しい基準の原案が 1989 (平成元) 年につくられた。ここでは、これまでの許容応力度に基づく設計方法を改訂して、限界状態設計方法が取り入れられた。これは明治以来の弾性理論に基づく伝統的な設計方法を、実験式に基づく新しい設計方法に変えるもので、大きな変革である。

しての弱点である端部を少なくするという目的で技術開発されたものである。この種の橋梁としては 1964 (昭和 39)

(1990.12.17・受付)