

# 鉄道におけるプレストレストコンクリートの役割

石橋 忠良\*1

鉄道における PC の発展の歴史と、社会的な要求とのかかわり、および PC の過去の問題点とその解決のあゆみ、および今後の展望について述べる。

キーワード：鉄道橋、プレストレストコンクリート、歴史

## 1. はじめに

鉄道は 1872 (明治 5) 年に開業した。明治時代は国産の材料は、土と木と石、レンガで、橋梁の最初は木橋である。すぐに腐食が始まったので鋼橋がイギリスや、アメリカから輸入された。大正時代から国産のコンクリートや鋼材が使われ始め、国内で設計、製作、架設が行われ始めた。コンクリート橋はスパン 30 m 以下の鉄筋コンクリート桁か、それ以上のスパンではアーチ橋が用いられた。桁橋の長大橋は鋼桁が中心であった。プレストレストコンクリート (以下 PC) が実用化されたのは戦後になってからである。

## 2. 鉄道における PC の発展

### 2.1 PC まくらぎと小スパンの桁

PC 桁の研究は、国鉄鉄道技術研究所にて戦前から始められていた。戦後、本格的に研究が進められ、1948 年にまくら木にプレストレストコンクリートを適用することの試作、研究が始まった。

1951 年に国鉄から発注された PC まくらぎがプレテンションの実用化の始まりである。また、1952 年には東京駅のプラットホームにポストテンション PC 桁が、1953 年には、大阪駅構内にスパン 4.9 m のポストテンション PC 桁とスパン 5 m のプレテンション PC 桁計 88 連が鉄道橋として施工された。

### 2.2 第一大戸川橋梁から始まる本格的な PC 橋

1954 年には、信楽高原鉄道の第一大戸川橋梁 (スパン 30 m) が最初の本格的な PC 鉄道橋として造られた。桁高 / スパンは 1/23、設計基準強度 45 N/mm<sup>2</sup> である。

また、1954 年、建築における初の PC 構造として浜松町駅上屋が着工した。

1955 年ころから PC 橋梁の I 型桁、箱桁、下路桁の標準設計が作成された。

1957 年には、最初の PC 連続桁晴海橋梁 (21.3 m × 3) が完成した。これは I 型単純桁を架設し、支点上で連結したものである。

1960 年には、3 径間連続箱桁 4 連の赤穂線吉井川橋梁 (33.2 m × 3, 4 連, 単線) がレオンハルト工法にて建設された。総足場、場所打ち工法である。

1959 年に東海道新幹線が着工された。約 400 連の PC 桁が採用された。大部分は T 型、I 型の桁を並べた方式である。

この時期在来線にも各種の PC 桁が採用された。

下路桁は、1960 年に鹿児島本線石堂川橋梁 (スパン 11 m) が、1961 年に七尾線羽昨川橋梁 (スパン 19 m) が施工された。

1962 年には、上越線第八利根川橋梁 (62 m) が方杖ラーメン橋として施工された。

同年には、東北本線鬼怒川橋梁 (30 m × 3, 33 m × 2 + 30 m, 36 m + 30 m + 33 m) がフレシネー工法による連続桁として総足場にて完成した。

また同年には、北上線鶯の巣川橋梁 (24 m + 44 m + 24 m)、1964 年には東北本線那珂川橋梁 (26.4 m + 46 m + 26 m) がディビダーク工法にて張出し施工された。

根岸線 (1961 年)、大阪環状線 (1964 年) の線増工事にはスパン 20 ~ 30 m の PC 桁が大量に施工された。

### 2.3 長大橋への PC 桁の採用

1964 年には東海道新幹線が開通した。東海道新幹線の開通により、鉄桁の列車走行に伴う騒音が大きな社会問題となり、PC 桁の長大橋への採用が山陽新幹線から一般化した。山陽新幹線の岡山までが 1972 年、博多までが 1975 年に開通した。

1965 年に完成した東北本線荒川橋梁では、鋼トラスを除く箇所にはスパン 38.6 m の単純複線下路桁が 24 連架設された。1969 年総武線中川放水路橋梁 (37.4 m + 48 m + 37.4 m) はわが国最初の PC 下路連続桁である。

また、この時期にはプレキャスト工法の開発、採用が盛んに行われた。1967 年には北陸本線名立川橋梁 (31 m × 2) が箱桁を 21 個のブロックに分割し、接合面にはエポキシ樹脂が用いられ架設された。1969 年には山陽新幹線の加



\*1 Tadayoshi ISHIBASHI

JR 東日本コンサルタンツ (株)

古川橋梁 (56 m × 3, 2 連) が、目地にエポキシ樹脂を用いプレキャストカンチレバー工法で施工された。同年に奥羽線米代川橋梁 (56.3 m × 3, 2 連) がコンクリート目地を用いてプレキャストブロック工法にて完成した。

東北・上越新幹線では、ほとんどの橋梁は PC 構造となった。

1974 年から 1975 年にかけて東北新幹線第一北上川橋梁の PC 箱桁が移動支保工により施工された。この橋梁は総延長 3 870 m となる。長大橋梁は、東北新幹線第 2 阿武隈川橋梁 (104.9 m + 105 × 3 + 104.9 m) が 1975 年に、上越新幹線太田川橋梁 (55.4 m + 110 m + 55.4 m)、吾妻川橋梁 (110 m × 2) が 1978 年に完成した。これらはいずれも箱型断面でカンチレバー工法にて施工された。1988 年には、本四備讃線の北浦港橋梁 (85 m + 120 m × 2 + 85 m + 40 m) もカンチレバー工法にて施工された。

1979 年には、上越新幹線赤谷川橋梁がスパン 126 m のコンクリートアーチ橋で完成し、三陸鉄道小本川橋梁 (45.7 m + 85 m + 45.7 m) が、斜材を PC 部材とした PC 斜張橋として施工された。

#### 2.4 国鉄分割後の PC 橋

1987 年に国鉄が民営分割され JR 各社となった。新幹線の建設は、長野新幹線、北陸新幹線、東北新幹線の盛岡以北、九州新幹線が引き続き建設された。

青森ベイブリッジ (128 m + 240 m + 128 m, 写真 - 1) は青森駅構内をオーバーする道路橋だが、国鉄, JR で設計, 施工が行われた PC 斜張橋である。



写真 - 1 青森ベイブリッジ (1992 年)

北陸新幹線の第 2 千曲川橋梁 (135 m + 135 m, 写真 - 2) は鉄道橋としては初めて斜材をケーブルとした斜張橋である。

吾妻線の第 2 吾妻川橋梁 (41 m + 111.5 m + 167 m +



写真 - 2 第 2 千曲川橋梁 (1996 年)

111.5 m, 写真 - 3) は斜材を PC 版とした橋梁である。第 3 吾妻川橋梁 (203 m, 写真 - 4) は、アーチは CFT 構造で桁は PC の複合構造である。



写真 - 3 第 2 吾妻川橋梁 (2010 年)



写真 - 4 第 3 吾妻川橋梁 (2011 年)

東北新幹線の三内丸山架道橋 (写真 - 5) は中央径間 150 m で供用中の新幹線では最大のスパンであるが、同様の構造の北陸新幹線の細坪架道橋 (2021 年予定) が 155 m で建設中である。



写真 - 5 三内丸山高架橋 (2008 年)

### 3. プロジェクトに貢献した PC と課題の解決

#### 3.1 新幹線プロジェクトの騒音対策への貢献

騒音問題で鋼橋の採用が難しくなり、長大橋も PC 橋を採用する必要が生じた。それを可能にしたのがダンパー式ストッパーの開発である。

東海道本線瀬田川橋梁 (46 m × 2) は 1967 年に完成した。ここでは各橋脚に、地震時に桁と橋脚とが移動可能な鋼角筒と、常時の固定用および地震時の桁移動を防止するため、橋脚のほぼ中間部には水平力に抵抗する機能をもつ PC 鋼棒をたすきにした構造が採用されている。その後、分散方

式をさらに改良したダンパー式ストッパー（図 - 1）が開発され、山陽新幹線およびそれ以後現在に至るまで単純桁、連続桁に多く用いられている。地震時の水平力を全橋脚で分散支持することが可能となったので、特定の橋脚が大きくなりすぎるのがなくなり、長大な連続桁の建設が経済的にも可能となった。

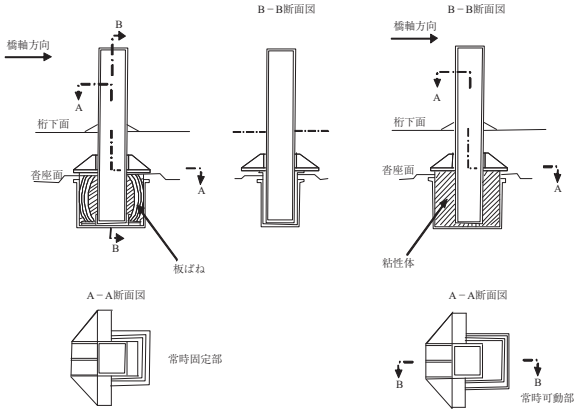


図 - 1 ダンパー式ストッパー

### 3.2 景観設計や、計画の自由度を広げた下路桁

改良工事においてはレールレベルを変えると、改良範囲が大きくなるので、レールレベルを変える必要のない下路構造が望まれる。スパンは大きくまた景観にも配慮した構造が望まれる。そのような要求にこたえて多くの下路構造が造られてきた（写真 - 6）。



写真 - 6 青い森鉄道の天間川橋梁（2006年）

### 3.3 軌道のメンテナンスを減らした PRC 桁

PRC 桁は 1982 年に桜井線のボケラ橋梁（16.2 m）で最初に施工された。その後、大宮・上野間の東北新幹線、埼京線で 46 連の PRC 桁が施工された。

鉄道ではレールの高さ管理が重要で、PC 桁のクリープによるそりで開業直後の軌道の管理に苦労していたが、PRC 桁とし、死荷重時に上縁と下縁の応力度を近い値にすることで、この問題を解決することができるようになった。

### 3.4 復旧性に優れたゴムシューと鋼製ストッパーの支承構造

橋梁の支承は、鉄製が多く使われていた。1978 年の宮城県沖地震で、多くの鉄製シューが被害を受けたことから、

ゴムシューと鋼製のストッパーの組合せに全面的に変えて現在に至っている。鉛直支持と水平支持を分離したことで、地震時の損傷は水平支持の部材のみとなり、地震後の早期復旧にも有利となった。

### 3.5 高強度コンクリート

1973 年に完成した山陽新幹線第 2 綾羅木川橋梁は、コンクリートの設計基準強度  $60 \text{ N/mm}^2$  を用いたスパン 49 m の I 型単純桁である。

1973 年には山陽新幹線岩鼻架道橋（45 m）が、またその年に三陸鉄道太田名部架道橋（24 m）が PC トラス橋として完成した。1975 年には三陸鉄道安家川橋梁（45 m × 6 + 27 m）が PC トラスト橋として完成した。いずれも設計基準強度  $80 \text{ N/mm}^2$  の高強度コンクリートを用いている。今では高性能 AE 減水剤が進歩し、高強度コンクリートは比較的容易となっている。桁高を制約された場合などに使われることが中心となっている。

### 3.6 軽量コンクリート

軽量コンクリートを用いた PC 桁として 1965 年に東北本線金山架道橋（15.8 m）がわが国で初めて施工された。1967 年～1968 年に総武線の線増工の PC 桁（16 m～31 m）に大量に採用され、また山陽新幹線の倉敷付近の軟弱地盤地帯の PC 桁（22 m～32 m）にも軽量コンクリートが採用されている。その後も東北新幹線沼宮内橋梁などに採用されている。施工性と、耐久性で扱いにくさもあり、その後あまり使われていない。

### 3.7 PC 鋼材の腐食対策

#### (1) PC の上縁定着と鉛直鋼棒の廃止

1982 年、撤去した経年 14 年の PC 下路桁を解体調査した結果、多くの鉛直 PC 鋼棒の腐食破断が発見された。鉛直 PC 鋼棒のグラウトの充填が不十分で、そこに上縁定着部の後埋め部から水が浸入し鋼棒が腐食し、内部で破断しているものが多く発見された。その結果を踏まえ、それ以降の設計では、鉛直 PC 鋼棒を原則設計に用いないこととなった。箱桁や下路桁のウェブのせん断設計は、それまでの PC 構造から鉄筋コンクリート構造となった。また、主ケーブルの定着も上縁定着をやめ、すべて端部定着か、ウェブか下スラブに定着するようになった。

#### (2) PC グラウトの改良

東海道新幹線をはじめ、多くの PC 桁の横締め鋼棒の破断が生じていた。この原因はグラウトの充填不良であった。また、解体した PC 桁から、主ケーブルにもグラウトの充填が不十分であることが発見されていた。

グラウトに関する配合、施工試験が多く実施された。ノンブリージングタイプ以外の材料は、シース内に空隙が残りやすく、またブリージングを追い出すのも非常に難しいことが分かった。その結果、グラウトの品質については、それまでのアルミ粉末の発砲による膨張でブリージングを追い出すタイプのものをやめて、ノンブリージングタイプのグラウトの使用が基本となった。

また、何本かの主ケーブルにもグラウトがまったくされていないものも発見された。1987 年の鉄道の規定では、PC グラウトのし忘れをなくすべく、1 本ごとにグラ

ウトの注入記録を義務づけるなどの管理が強化された。

JR 東日本では、鋼材の腐食破断を防ぐため、シー스는原則プラスチックシースを用いることし、グラウトキャップを用いてグラウトを施工し、その後グラウトキャップをはずして、グラウトのし忘れのないことを確認するようにしている。また、横締めなど細径の鋼材は、現場でのグラウト作業のないプレグラウト鋼材を用いることとしている。

### (3) 既設構造物の鋼棒の飛び出し対策

既に施工されている PC 構造物の横締めの鋼棒や鉛直鋼棒などは、時どき破断し、被りコンクリートを落とすとともに、飛び出すということが生じている（写真 - 7）。これらが人や物にあたる可能性のある箇所では落下しないような対策を採っている。破断した箇所については再度鋼材を配置し直している。



写真 - 7 PC 鋼棒の破断飛び出し

主ケーブルのグラウトのし忘れの箇所については、見つける都度グラウトの再注入が行われている。

### 3.8 桁の共振問題

東海道新幹線で複鉄筋スラブ桁が新幹線の車軸の繰返しと共振し、補強が行われている。その後は共振しないように、桁の剛性を上げるなど設計で配慮されてきた。長野新幹線の PRC 桁のスパン 30 m 付近のものが今共振で問題となっている。設計時に共振しない剛性とするとともに、問題が生じても対応できるように、防音壁での剛性向上が可能なような設計時の配慮が必要である。

### 3.9 温度変化が軌道の変位に影響しない構造

北陸新幹線第 2 千曲川橋梁の斜材の色は当初黒だった。試験走行中に斜材が温度変化で伸び縮みが生じ、軌道が上下に変化して高速走行ができなかった。そのため、白い塗装で覆って対処した。三内丸山高架橋も、温度変化の影響と、クリープによる影響で軌道が変位することを少なくするように、設計時点でラーメン構造から、支承を設ける構造への変更などで対応した。軌道が温度変化やクリープなどで変位しにくい構造に計画することも大切である。

## 4. 海外への展開と海外の状況

海外での鉄道高架橋は、PC 桁が多く採用されている。特徴的な施工法は、桁を 1 スパン分、工場で製作し、それを運搬架設するという方法である。

台湾新幹線では日本の建設業者も標準スパン 30 m の箱桁を工場で製作し、そのまま架設した桁上を運搬して架設するという方法で 563 スパン施工している。

中国の新幹線は 2018 年度末で 29 000 km 営業運転している。年間 2 000 km 開業しているとのことである。スパン 40 m のフルスパンのプレキャスト桁を工場で製作し、そのまま架設した桁上を運搬し架設する方法が今の主流である。2019 年の 8 月に中国の新幹線高架橋の建設中の現場を案内してもらった。その時の施工の状況を写真 - 8 に示す。



写真 - 8 建設中の新幹線高架橋（中国）

インドでの新幹線（ムンバイーアーメダバード間 500 km）建設では、入札が始まっている。そのうちの高架橋の 1 工区は 237 km である。この工区のひとつで、工場で製作した最大スパン 40 m の箱桁を上記と同様に、そのまま運搬して架設する計画である。

## 5. おわりに

鉄桁の騒音問題への対応で、今では多くの鉄道の橋梁は PC 橋である。PC 鋼材の腐食対策も、新設においては PC 鋼材や、定着具を完全に腐食から防護するシステムも実用化されている。クリープ変形の軌道に対する影響も PRC 構造により解決されている。多くの問題は解決されている。この PC 技術を用いて、新しい構造や、施工法などにチャレンジしてもらいたい。

一方、既設構造物のグラウト不良などによる鋼材腐食への対策は、まだ依然として残された課題である。

技術の進歩はプロジェクトを実施することで生じる。国内でのプロジェクトが少ない現状ではあるが、世界にはまだ多くのプロジェクトがある。海外にもチャレンジしてもらいたい。

【2020 年 11 月 20 日受付】