

## 2章 最近の複合橋梁

### 2.1 合成構造

ここでは、合成構造を、鋼とコンクリートがずれ止め等を介して一体化され、任意の断面内において平面保持の仮定が成立する構造と定義した。文献調査の結果から、この合成構造の分野において、近年、活用が顕著な橋梁形式として次の3つが挙げられる。

「合成桁」：従来からヨーロッパで用いられてきた連続合成桁橋形式が、日本においても近年建設工事コストダウンの要求から見直され、採用が増えつつある。また、合成桁の一種であるプレビーム合成桁橋形式は、近年、プレファブ工法や連続桁の実用化により、その適用範囲を大きく広げている。さらに、腹部を鋼ウェブ仕様として構造の合理化をはかる試みも行われている。

「合成床版橋」：コンクリート床版橋の引張鋼材に代えて鋼板製の引張フランジを、圧縮鋼材に代えて圧縮フランジを持つ鋼桁とコンクリートを一体化させて合成構造とした合成床版橋形式は、桁高を低くするというニーズに対応して使用実績が増えつつある。

「その他の橋」：PC箱桁橋のコンクリートウェブを鋼材で置き換えコンクリートの上下床版と合成する波形鋼板ウェブPC橋や鋼トラスウェブPC橋、鋼トラス橋の床版と弦材を合成した合成トラス橋といった多様な橋梁形式が、開発され実橋に適用されている。

以下に、それぞれの形式ごとに、構造の特徴および最近の傾向について概説する。(なお、プレビーム合成桁橋は合成構造であるが、鋼桁が鉄筋コンクリートで被覆された部材からなる構造であり、今回の分類ではSRC構造にも含まれることから、両方の分野で調査分析を行うものとした。)

#### 2.1.1 合成桁橋

##### (1) 概要

連続合成桁形式は、長支間化が可能、耐震性及び経済性に優れるといった利点を有するが、日本では、鉄道橋を除き、1980年以降施工事例がほとんど無かった。これは、過積載車輛の増加により、RC床版に生じたひび割れが大きな損傷に進展した事例が多発したため、床版破損時の補修が困難な合成桁の採用が手控えられたことによる。特に、連続桁形式については、中間支点上で負曲げモーメントによるひび割れの影響が懸念された。一方、欧米では、耐荷力が高い厚い床版やPC床版を用い、本形式の経済的な利点を生かした橋が数多く建設されてきた。日本においても、近年、建設工事のコスト縮減の要求から、経済性に優れる本形式の橋梁が再度見直され、日本道路公団(以下、JH)を中心に建設されつつある。ここでは、連続合成桁橋建設における、欧米の動向と日本の最近の状況について主に道路橋の事例を述べる。

##### (2) I桁橋

ヨーロッパでは、I桁橋は、図-2.1.1.1に示すような連続合成2主桁形式の構造が一般的に用いられている。ドイツでは、主桁間隔6m以下の場合はRC床版とし、広幅員でこれを超える場合には橋軸直角方向にPC鋼線を用いて補強することで適用範囲を拡大してきた。また、フランスにおいても広幅員の2主I桁橋が一般的に用いられているが、この場合の床版はドイツと同様に橋軸直角方向のプレストレスを導入する方法と、4m程度の間隔で主桁間および張り出し床版部に床桁を配置する方法が用いられている。

日本では、近年の建設工事コストダウンの要求から、JHで、まず、非合成の鋼2主I桁形式がホ

ロナイ川橋において採用され、数件の施工の後、合成桁形式も採用されるようになった。施工事例としては、JH の千鳥の沢川橋や利別川第一橋がある。いずれも鋼桁部分は、腹板の補剛材省略や、LP プレートの採用によって、省力化された構造となっている。床版は、移動型枠を用いて施工され PC ケーブルにて橋軸直角方向にプレストレスが導入されている。さらに、藁科川橋では 17.5m という広幅員の 2 主連続合成桁形式が採用されている。

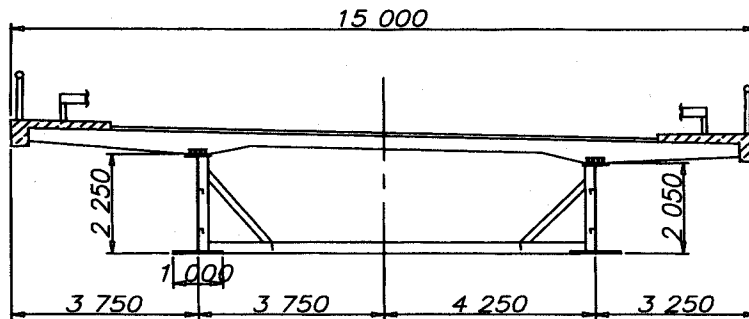
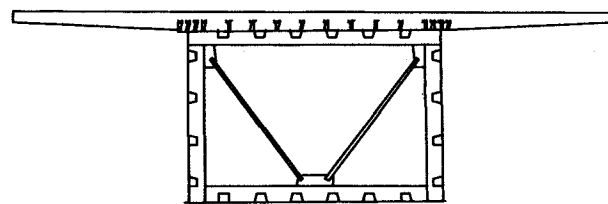


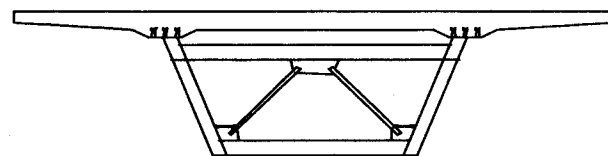
図-2.1.1.1 ドイツでの一般的な合成桁の横断面

### (3) 箱桁橋

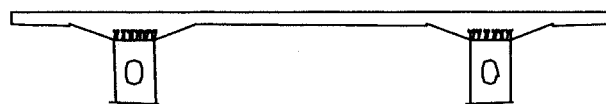
箱桁橋は、曲げ剛性が高く長支間の架橋に適していること、ねじり剛性が高く斜橋や曲線橋に適していること、といった構造上の特長に加えて、大気暴露面積が少なく塗装塗り替え費が低減できるという維持管理上の特長もあわせもっている。



(a) 閉じた鋼箱桁



(b) 開いた台形箱桁



(c) 幅の狭い 2 箱桁 (開いた鋼箱桁の場合もある)

図-2.1.1.2 合成箱桁の代表的な断面

箱桁橋の断面は、図-2.1.1.2 に示す (a) または (c) のような閉断面箱桁と、(b) の開断面箱桁に

分けられる。日本では従来、桁製作時の精度確保や架設時の部材剛性確保のため、(a)のタイプが多く用いられてきた。

しかし、閉断面箱桁の場合、鋼フランジ断面が応力的に十分利用できないことや、スタッド本数が多くなりすぎるというデメリットがある。このため、ヨーロッパでは閉断面はほとんどみられず、図-2.1.1.2 (b)のような開断面箱桁が一般的に用いられてきた<sup>1)</sup>。この場合、断面を逆台形とすることで、下フランジの幅を狭くし、板厚変化を容易にすることで、経済的な断面が得られ、橋脚の幅も小さくすることが可能となる。また、橋梁の幅員が広い場合には、図-2.1.1.2 (c)のような幅の狭い2箱桁が用いられる。

最近、日本においても、経済性追求のための鋼桁断面削減が可能なこと、床版支間が大きくとれる合成床版やPC床版などの床版形式の適用が進み、合成床版の下鋼板やハーフPC版を架設前に取り付けることにより架設時のねじり剛性が確保できることから、図-2.1.1.2 (b)や(c)のタイプの箱桁橋が施工されつつある。JHで施工された、千歳ジャンクションCランプ橋や、藁科川橋がこの事例である。

特殊な閉断面箱桁橋の例として、スイスで建設中のヴォー高架橋が挙げられる。本橋は連続合成桁であるが、2種類の鋼桁を橋軸方向に連結して一つの橋梁を構成している点に特徴がある。S字形のクロソイドを有するこの橋梁では、長支間で高橋脚となる溪谷を越える3径間部に閉断面箱桁構造を、その他の径間には2主I桁構造を採用している。閉断面箱桁構造は、送り出し架設時のねじり剛性確保にも有効である。また、閉断面箱桁部では、場所打ちPC床版の橋軸直角方向プレストレス導入に対する上フランジ拘束の影響を低減するために、スタッドジベルを群配置し桁たと床版とをプレストレス導入後に結合する工夫がなされている。

#### (4) 二重合成構造

連続合成桁橋の中間支点域において鋼桁の下フランジ側にもコンクリート床版を配置し、この領域においてのみ鋼桁の上下にコンクリート床版を有する構造形式を、二重合成という。中間支点域に下コンクリート床版を配置する目的は、鋼下フランジ厚を薄くし、補剛材を削減するとともに、桁の剛性を増すことなどである。また、この構造は、中間支点部から張り出し架設や、支間中央部を大ブロック一括架設する必要がある場合に有利であり、桁の下が使えない施工条件や架設工期短縮への対応が可能で、鋼橋の適用範囲を大きく広げるものである。

ヨーロッパでの施工事例を挙げると、ドイツのトルガウのエルベ橋では周囲の景観への配慮から桁高を低く抑え、工期短縮のための大ブロック架設が行われた。さらに、ドイツではノイエッティングのイン川橋のように、前項で述べた開断面箱桁の径間ブロックを台船を用いずに、ブロック自体を河川内に浮かべて引き出した後、先行架設した二重合成構造を用いた中間支点ブロックから吊り上げた事例もある。また、スペインのトルトーサ橋は、中間支点部でPC橋脚上部を鋼箱桁と一体化した連続合成複合箱桁橋であるが、二重合成構造を用いていたため、当初大ブロック架設で計画されていたものを、鋼断面を変えることなく、張り出し架設に変更が可能であった。このように二重合成構造は、多様な施工条件に対応できるもので、ドイツでは、DINの規定にも標準的な工法として盛り込まれつつある。

日本では、従来、プレビーム連続合成桁橋で用いられていたが、合成箱桁橋では、前述の千歳ジャンクションCランプ橋に適用されている。また、北陸新幹線の北陸道架道橋では、箱桁内の下フ

ランジに打設される防振用コンクリートを利用して支点上でこれを増厚して積極的に圧縮部材と兼ねさせようとする試みが行われており、日本においても今後の活用が期待される。

(5) 中間支点上床版コンクリートの引っ張り応力への対応

連続合成桁の中間支点上の床版に作用する引張力に対して、ドイツでは過去に、中間支点上でジャッキアップした鋼桁上に床版コンクリートを打設し、コンクリート硬化後にジャッキダウンして床版にプレストレスを導入する方法や、PC鋼材によりプレストレスを導入する工法が取られていた。しかし、1974年の鋼合成桁設計施工指針(案)の発行により軸方向鉄筋補強によるひび割れ制御が取り入れられたため、現在はプレストレスしない連続合成桁が多くなっている。また、最近スイスで施工されたロゼー高架橋では、連続合成箱桁橋の箱内にアウトケーブルを配置し、中間支点上の床版コンクリートにプレストレスを導入する方法が用いられている。

日本では、最近、連続合成桁橋が復活しはじめたところであるが、その一例である前述の千鳥の沢川橋や利別川第一橋ではジャッキアップダウン工法を用い、死荷重状態で中間支点部の床版にひび割れを発生させない構造としている。

(6) プレビーム合成桁橋

1) 概要

プレビーム桁とは、I型断面を有する鋼桁に曲げ変形を生じさせる荷重を与えた状態で、引張側フランジのまわりにコンクリートを打設し、硬化後、鋼桁に与えていた荷重を取り去ることにより、このコンクリート部に圧縮プレストレスを導入した桁である。プレビーム合成桁は、図-2.1.1.3に示すように、この桁の鋼上フランジをスラブコンクリートと合成し、ハンチ部及び腹部コンクリートで被覆したものである。これを桁橋に使用したものがプレビーム合成桁橋であり、次の特徴を持つ。

- ① 桁剛性が高いため、適用できる桁高支間比が1/20~1/33の範囲と非常に低い桁高の選択が可能である。
- ② 鋼桁がコンクリートで被覆されているため、維持管理が容易である。
- ③ 変断面やバチ桁等の構造が容易に構成できる。

プレビーム合成桁橋は、1949年にベルギーで考案され、その後、ヨーロッパの各国で施工された<sup>2)</sup>。日本では、1966年から独自に工法開発が進められ1968年に玉津橋(大阪市)が建設された。施工実績は、2001年3月末時点において道路で680橋、鉄道で29橋にのぼる<sup>3)</sup>。

以下に、日本において近年開発された分割工法、連続桁、鋼板ウェブ構造の概要について述べる。

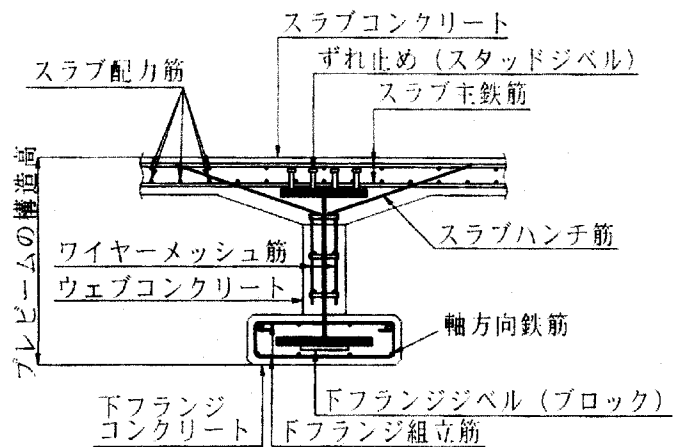


図-2.1.1.3 プレビーム合成桁の断面

## 2) 分割工法

プレビームの分割工法とは、プレストレスが導入されたプレビームを、鋼桁の連結部で解体、輸送し、現場で再度鋼桁を連結して連結部の下フランジコンクリートを施工することにより一体化する工法である。この工法は、以下に示すような特徴を持ち、1988年以降はほとんどのプレビーム合成桁橋で採用されている。

- ① 現場付近での主桁製作ヤードが不要。
- ② 現場工事の工期短縮が可能。
- ③ 各セグメント毎の架設が可能となり、架設作業を簡素化できる。

## 3) 連続桁

プレビームの連続桁は、死荷重による曲げモーメントの変曲点付近で桁を径間部材と中間支点部材の2つに分け、径間部にはプレビーム、中間支点部には鋼桁と下フランジコンクリートから構成される合成桁形式を適用したものである。最近では、5径間連続桁の建設も行われ、多径間化が進んでいる。

## 4) 鋼板ウェブ構造

従来、プレビーム合成桁橋の鋼桁腹部は、コンクリートで覆い、保護するものとしていた。しかし、1997年に「プレビーム合成げた設計施工指針」<sup>4)</sup>の改訂において、鋼桁に適切な防錆処理を施し、コンクリートと鋼桁の境界部の止水等に十分な配慮を払う場合は、コンクリートを省略してよいと規定された(図-2.1.1.4参照)。

防錆処理としては塗装、金属溶射、耐候性鋼材の使用などが提案されており、また、鋼板ウェブとコンクリートの境界部には、シリコン系シール材などを用いて止水処理を施すものとしている。

鋼板ウェブ構造を採用して施工された下岡橋(兵庫県, 2000年)では、腹部コンクリート省略による死荷重低減の効果によって、従来工法より5%のコストダウンを実現したと報告されている。

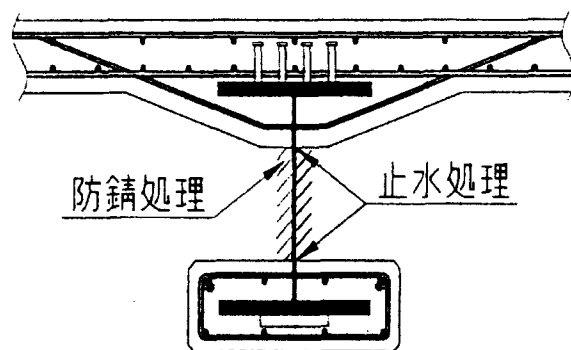


図-2.1.1.4 プレビーム合成桁鋼ウェブ構造

## 参考文献

- 1) 伊藤鉦一：ドイツにおける最近の鋼合成桁橋梁，橋梁と基礎，1993.5
- 2) プレビーム(プレビーム振興会10周年記念)，技報堂出版株式会社，1981.5
- 3) PRBEAM No.14 2001(プレビームカタログ)，プレビーム振興会，2001.5
- 4) プレビーム合成桁橋設計施工指針(第3版)，(財)国土開発技術研究センター，1997.7

## 2.1.2 合成床版橋

1980年代の後半より登場した合成床版橋は、市街地における中小河川の改修や老朽橋の架け替えに際して、取り付け道路等の関係からけた高をできるだけ低くできる構造として開発されてきた<sup>1),2)</sup>。合成床版橋の適用支間長は50m以下<sup>4)</sup>とされているが、床版厚さを含む構造高さを1/30~1/40(けた高さで1/40~1/50程度)におさめることが可能であり、厳しい構造高の制限に対応することが可能である。また、連続形式や小さい斜角を有する橋梁にも適用が可能であり、2径間連続形式や斜角30度程度の橋梁への適用例も報告されている<sup>1),3)</sup>。

合成床版橋の基本的な構造は、下フランジ鋼板とコンクリートに埋め込まれコンクリートと合成される鋼ウェブならびに上フランジから構成される。断面の形状からは、図-2.1.2.1に示すように、フラットなスラブタイプ合成床版とボックスタイプの合成床版に分類される。また、鋼げた内にコンクリートを充実する場合を充実タイプと引張側コンクリート部を中空とする中空タイプとして分類する方法もある。鋼げたでは、けた高さを低くおさえた場合、活荷重によるたわみが問題となる場合もあるが、合成床版橋ではコンクリートの剛性により支間の1/600程度に押さえられている<sup>4)</sup>。

合成床版橋のコンセプトは、合成前の鋼げたや床版の前死荷重を鋼部材が受け持ち、舗装や高欄などの後死荷重ならびに活荷重などを、鋼とコンクリートの合成断面で受け持たせることである。このことから、以下の利点が挙げられる。

- ① コンクリート打設用型枠や足場の省略を可能にし、工期を大幅に短縮すること。
- ② 強度の大きな鋼部材に合成前の荷重を受け持たせることで、鋼部材の強度を有効に活用すること。
- ③ 鋼部材の外面の凹凸を少なくすることで、塗装作業を容易にし、内面はコンクリートによる防食性を期待することで、維持管理費の低減を図ること。

合成床版橋の施工は300橋を越しているが、実際の適用例を示すと、スラブタイプの例としては、充実タイプの八木沢橋(東北地建)、中空タイプの実方橋(鹿児島県)、埋め込み鋼げたに突起付きT形鋼を使用した南線橋(帯広開建)、中空部に硬質ウレタンを充実した木津橋(京都府)、そして2径間連続形式の堀田ランプ橋(名古屋高速)などの道路橋がある。また、ボックスタイプの例としては、道路橋の八知橋(三重県)、歩道橋の水尻橋(中国地建)がある。特殊な合成床版としては、立体トラス型ジベルを使用した原田道橋(九州地建)がある。

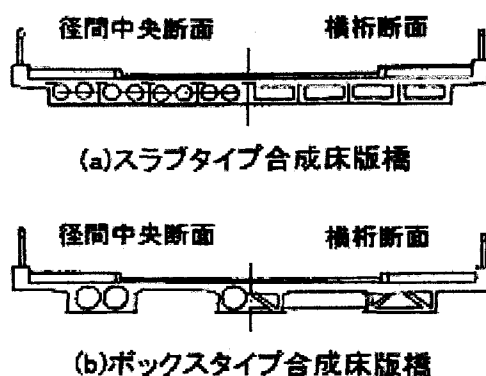


図-2.1.2.1 合成床版橋の構造

#### 参考文献

- 1) 深田, 森山, 加納, 綿引: 低桁高連続合成床版橋, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp353~358, 1989. 9, 土木学会
- 2) 広, 奥田, 山本, 近藤: 合成床版橋の設計・施工と実橋実験, 橋梁 Vo. 25, No7, pp47-55, 1989. 7
- 3) 佐藤, 田中: 斜角の小さい中空合成床版橋の構造特性と実橋への適用, 鋼構造論文集, Vol. 1, No. 2, 1994. 6
- 4) 合成床版橋研究会: 合成床版橋設計・施工指針 (案) , 1998. 8

### 2.1.3 その他の橋

#### (1) 概要

これまで鋼・コンクリート合成構造は、材料特性を活かして構造物の要求性能を合理的に満たすように様々な形態が考案されてきた。最近、PC箱桁の自重低減のため、コンクリートウェブを鋼に置き換え、鋼製の腹板とコンクリート上下床版とで合成構造とする形式が登場した。コンクリートウェブを波形鋼板に置き換えた波形鋼板ウェブ PC 橋はその代表例である。また、波形鋼板と同じくウェブを鋼トラスとした鋼トラスウェブ PC 橋もこの分類に属する橋梁である。さらに、鋼トラスウェブ PC 橋の下コンクリート床版を鋼管とした構造は、従来の合成トラス橋の特殊な形態と分類することも出来る。一方、従来の合成トラス橋にあっては、上路合成トラスが主流を占めていたが、コンクリート床版を下弦材と結合した下路式合成トラスも設計されている。また連続上路式合成トラス橋では、中間支点部付近で左右下弦材間にもコンクリートを打設して、ダブル合成効果および中央径間と側径間との重量調整を図った橋梁もある。

本節では、合成桁及び合成床版橋を除いた合成橋梁の内、特に最近注目されている波形鋼板ウェブ PC 橋、複合トラス橋およびドイツで最近試みられている合成タイドアーチ橋について紹介する。

#### (2) 波形鋼板ウェブ PC 橋

波形鋼板ウェブ PC 橋<sup>1)</sup> フランスで開発実用化された構造形式である。1986年のコニャック橋（最大支間 43m）が最初のもので、代表的なものとしてモープレ高架橋（最大支間 53.55m）、ドール橋（最大支間 80m）<sup>2)</sup>等があげられる。本形式は、上下床版のある図-2.1.3.1 に示すタイプのものと、下床版のない図-2.1.3.2 に示すタイプのものがある。

日本においては、1993年に完成した新潟県の新開橋（支間 30m）が最初である。その後、1995年に銀山御幸橋（支間 27.4~45.5m）、1998年に本谷橋<sup>2)</sup>が完成した。特に、本谷橋は、中央支間 97.2m と世界最大支間を有している。

波形鋼板ウェブ PC 橋は、先にも述べたように、PC箱桁のウェブを鋼板に置換することにより、桁重量を軽減するという発想から生まれた形式である。さらに本形式はウェブを波形にすることにより、せん断座屈強度を向上させると同時に、スティフナーを省略することができる。また、上下床版に導入するプレストレス

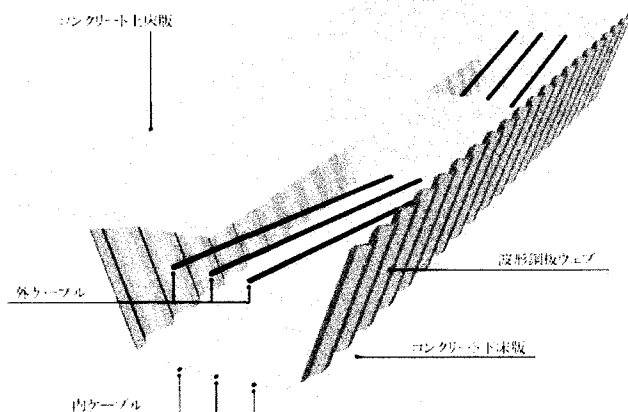


図-2.1.3.1 上下床版を有する波形鋼板ウェブ PC 橋

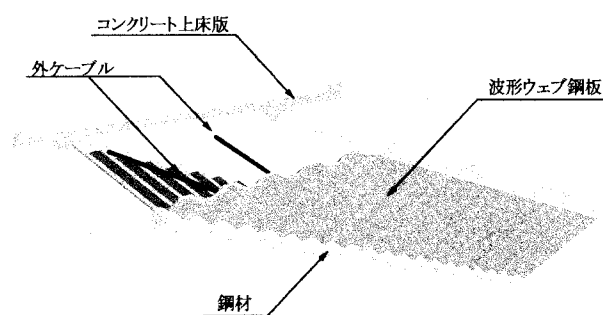


図-2.1.3.2 上床版のみ有する波形鋼板ウェブ PC 橋



に対し、波形鋼板がアコーディオンのように追従してウェブが抵抗しないためプレストレスの導入効果が極めて高いという利点も併せ持っている<sup>3)</sup>。

### (3) 複合トラス橋

トラス橋は、多数の棒部材を組み合わせてできる三角形を基本とする骨組構造で、各部材への力の伝達が軸力のみであるという力学特性を利用した橋梁形式である。従来のトラス橋は、主構部材を全て鋼製とするものが殆どであった。

近年、PC箱桁橋の重量軽減策として、コンクリートウェブを鋼トラスに置き換えた橋梁形式、更には、コンクリートの下床版を鋼部材に置き換え下弦材と腹材により立体三角トラスを構成した形式のものも出現した。

本項では、コンクリートと鋼部材の特性を有効に組み合わせたトラス形式の橋梁を総称して複合トラスと呼ぶことにした。

#### 1) 鋼トラスウェブ PC 橋

鋼トラスウェブ PC 橋は、波形鋼板ウェブ PC 橋と全く同様に PC 箱桁の重量軽減を目的として開発された形式で、箱断面型と三角トラス型のものがある。

上下コンクリート床版と鋼トラスウェブから構成される箱形形式の鋼トラス PC 橋を図-2.1.3.3に示す。腹材に沿って配置された外ケーブルおよび上下床版内に配置された内ケーブルにより、橋軸方向にプレストレスが導入される。

本形式の橋梁としては 1984 年完成のアルポア橋（最大支間 40.4m）<sup>4)</sup>、1997 年完成のブローネ橋（最大支間 110m）<sup>5)</sup>がある。日本においても第二東名高速道路の巴川橋（最大支間 119m）<sup>2)</sup>が計画中等である。

下コンクリート床版を鋼管等の鋼部材に置換し、逆三角形の鋼トラスがコンクリー

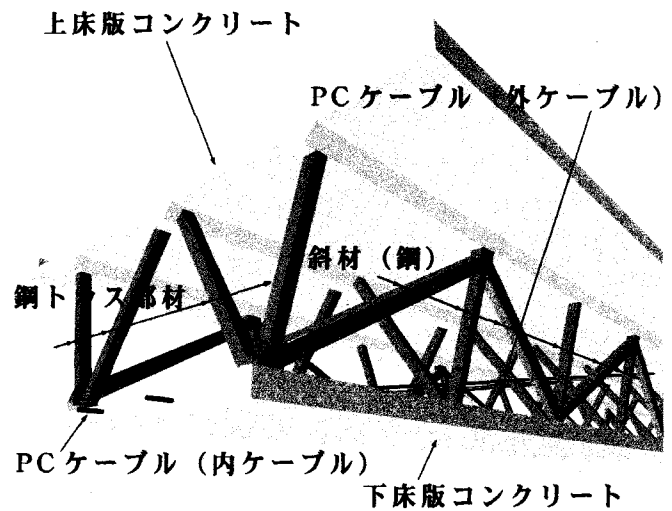


図-2.1.3.3 上下床版を有する鋼トラスウェブ PC 橋

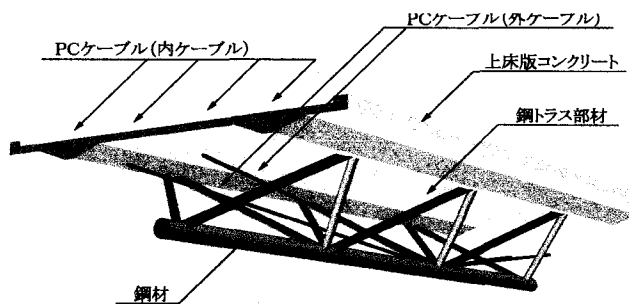


図-2.1.3.4 上床版のみ有する鋼トラスウェブ PC 橋

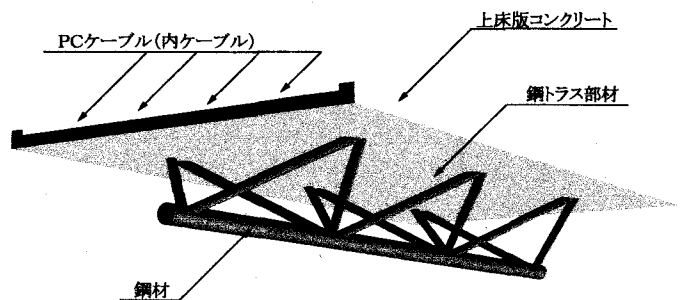


図-2.1.3.5 上床版直接三角トラスの斜材を結合した橋

ト上床版を支える構造形式を図-2.1.3.4に示す。腹材に沿って配置された外ケーブルにより、橋軸方向にプレストレスが導入されている。本形式の橋梁としては1990年に完成したロアーズ橋（最大支間40m）<sup>4)</sup>がある。

上記以外の形式として、上路のPC床版に三角トラス構造の斜材を直接結合し、床版を支える構造を図-2.1.3.5に示す。上床版のみ有する三角トラス橋に類似しているが、PCケーブルを橋軸方向に配置しない形式である。このため、せん断力の小さい斜張橋の補剛桁や下弦材を曲弦とした橋梁に、桁重量の低減や耐風安定性の向上を目的として適用された事例がある。前者の例としてはリンクウエイ橋（支間32.985m）<sup>6)</sup>、後者の例ではアントルナ橋（橋長86m、アーチ支間56m）<sup>7)</sup>がある。

## 2) 合成トラス橋

合成トラス橋は、鋼弦材とコンクリート床版を合成断面と考え、コンクリート床版側の弦材の断面力に抵抗させる形式のものである。同種の非合成鋼トラス橋に比べ、鋼重低減が期待できるとともに、騒音及び振動対策の面においても有効である<sup>8)</sup>。一般的に上路形式のものが圧倒的に多い。

合成トラス橋の設計に際しては、弦材とコンクリート床版とのシャーコネクタによる結合方法、および格点部におけるコンクリート床版から鋼トラスへの急激な応力伝播を避けるディテール等に工夫が必要である。鉄道橋を合成トラス橋とすることは、橋梁自体の鋼重軽減のみならず騒音及び振動対策の面からも非常に有効な方法の一つである。上弦材とコンクリート床版を合成した上路合成トラス橋は、図-2.1.3.6に示すように下弦材が双弦のものと、図-2.1.3.7に示す単弦のものがある。前者の施工例としてはイザール川橋、フルダ谷橋がある。また後者の施工例としてはルーリー橋がある。

図-2.1.3.8に示す下路合成トラス橋は、下弦材とコンクリート床版を合成した構造である。本形式はコンクリート床版の引張り力に対する安全性の評価方法が一般化されていないこともあり、施工事例は少ない。日本鉄道建設公団が設計、架設した井原線高梁川橋梁<sup>2)</sup>は本形式を採用した単純合成下路トラスである。

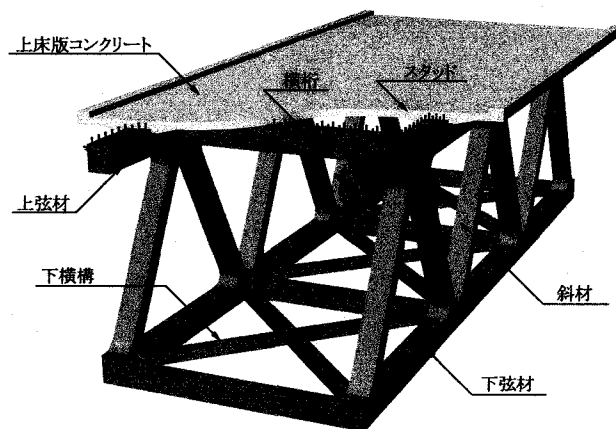


図-2.1.3.6 上弦材側合成トラス橋  
(下弦材が双弦)

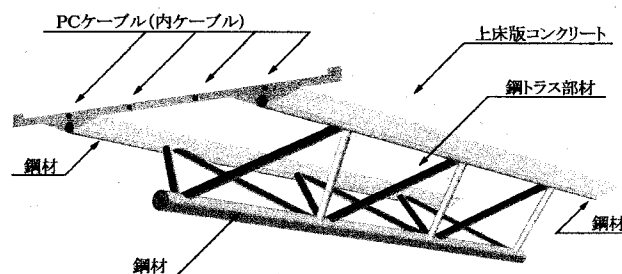


図-2.1.3.7 上弦材側合成トラス橋  
(下弦材が単弦)

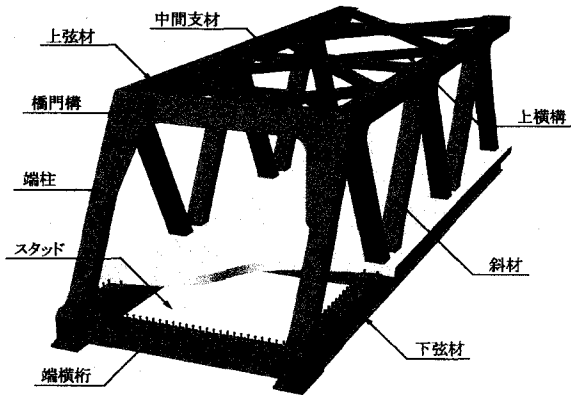


図-2.1.3.8 下弦材側合成トラス

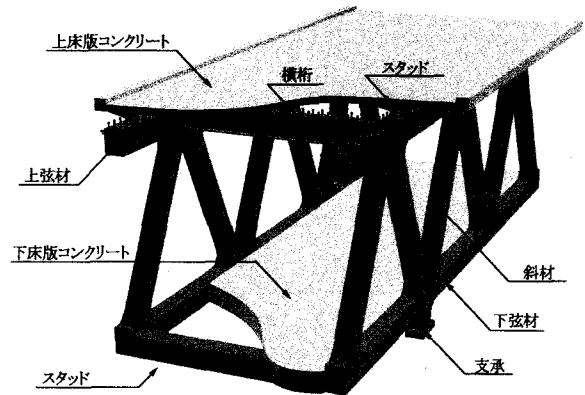


図-2.1.3.9 上下弦材合成トラス

連続トラスの中間支点部において、上下弦材の双方を鋼とコンクリートの合成構造とした形式の橋を図-2.1.3.9に示す。類似形式の橋としてドイツ連邦鉄道のナンテンバッハ橋（中央支間 208m）がある<sup>9), 10)</sup>。

### (3) 合成タイドアーチ橋

従来タイドアーチ道路橋は、タイ部材に作用する引張軸力を如何にコンクリート床版に伝達させないか、あるいは伝達されてもコンクリート床版にひび割れが発生しないようにする技術的努力が払われてきた。

最近ドイツにおいて、タイ部材を省略して

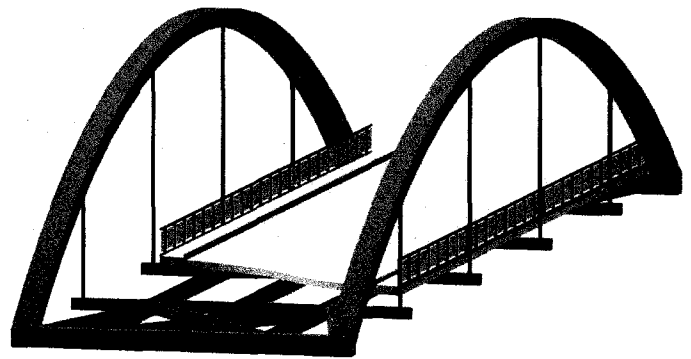


図-2.1.3.10 補剛桁を合成構造としたアーチ橋

床組に配置した縦桁と床版コンクリートを合成し、タイ部材が受け持っていた曲げとモーメントと引張軸力をこの合成桁で負担させる新しい試みがなされている。これにより経済性と耐久性が向上すると考えられている。この代表例が、1996年に完成したアンパー橋である。概略図を図-2.1.3.10に示す。

### 参考文献

- 1) 猪股俊司：プレストレスされた鋼・コンクリート組み合わせ橋梁，PC技術協会，1989.2
- 2) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造物の理論と設計，(2)応用編：設計編
- 3) NBC研究会編：新しい合成構造と橋，山海堂，1996
- 4) 野村國勝他：フランスの橋梁，技報堂出版，1994.7
- 5) 二階堂輝幸：フランスのBoulonnais高架橋，橋梁と基礎，1998 Vol.32 No.2
- 6) 春日昭夫他：SBSリンクウェイ橋の設計と施工，橋梁と基礎，1997 Vol.31 No.7
- 7) 海外文献研究グループ：フランスのアントルナ鋼管アーチ橋，橋梁と基礎，1998, Vol.32 No.1
- 8) 伊藤敏一：ドイツにおける最近の鋼合成桁橋梁，橋梁と基礎，1993 Vol.27 No.5

- 9) J. Haensel 他 : COMPOSITE CONSTRUCTION IN STEEL AND CONCRETE III, RECENT TRENDS IN COMPOSITE BRIDGE DESIGN AND CONSTRUCTION IN GERMANY, 1997.9
- 10) Reiner Saul : COMPOSITE CONSTRUCTION IN STEEL AND CONCRETE III, DESIGN AND CONSTRUCTION OF LONG SPAN STEEL COMPOSITE BRIDGES, 1997.9

## 2.2 SRC 構造および CFT 構造

ここでは、第 1 章に述べたように、SRC 構造を「鉄骨が鉄筋コンクリートで被覆された部材」で構成された構造」、CFT 構造を「鋼管にコンクリートを充填した部材」で構成された構造」として調査を行った。前者に関して、鋼の断面力とコンクリートの断面力を累加して計算する場合（累加強度方式）のみを SRC 構造と考えることもあるが、ここでは、一体化すなわち平面保持を仮定して RC 方式で設計した場合および累加強度方式で設計した場合の双方を対象とする。なお、SRC の定義等については、これまでの経緯なども含めて、後章で検討課題として取り上げる。

以下、SRC 構造および CFT 構造を使用している橋梁の最近の傾向について、SRC 構造あるいは CFT 構造を主に使用している部位により、①桁、②橋脚・橋台・主塔、および③アーチ橋の 3 つに分類して述べる。なお、具体的な一般図や構造図は 3 章を参照されたい。

### 2.2.1 桁

SRC 構造は、従来から鉄道橋では、桁高さの制約を受ける橋梁等に H 鋼埋め込み桁あるいは SRC 構造の高架橋などが多く採用されてきた。これは、最近の鉄道建設が市街地の高架や立体交差、また線路近接や線路直上のように架設が困難で、用地の制約を受ける工事が多いこと、さらに騒音と保守の軽減や急速施工が要求されていることなどが背景にあるからである。最近では、経済性を目的に主に引張領域のコンクリートを極力少なくしたマルチ T 型断面 SRC 桁が鉄道橋に採用されている。

また、過去において斜張橋の補剛桁に用いられたことがある。これは、架設で用いた支保工材（鋼桁）にコンクリートを巻いて、完成系で SRC 構造の補剛桁として用いものである。その他、プレビーム合成桁（以下、プレビーム）としても多用されている。

CFT 構造については、最近、コンクリート充填鋼管複合桁として採用され始めている。

#### (1) 溶接 H 鋼埋め込み桁およびマルチ T 型断面 SRC 桁

鉄道橋では騒音の問題からコンクリート構造が多く用いられるが、PC、RC 構造では施工が困難な道路や鉄道との交差区間や桁高制限区間等に、溶接 H 鋼埋め込み桁が概ね 20m 前後の桁として多く用いられてきた。この断面の引張領域のコンクリートは設計において断面に考慮されないため、この領域のコンクリートを極力少なくしたマルチ T 型断面 SRC 桁が開発された。このマルチ T 型断面 SRC 桁が、はじめて 2 径間連続で鉄道橋の裾花川橋梁（1994 年竣工）に採用されている。

#### (2) 支保工材を利用した SRC 構造

架設中に鋼桁を支保工材として使用し、これにコンクリート巻き立て、完成後はこの鋼桁を断面設計に考慮した SRC 構造を、斜張橋の補剛桁として用いた例がある。この橋梁はやすらぎ橋で、1981 年 9 月に完成しているが、このような形で SRC 構造が採用された事例は、その後、ほとんど見あたらない。

#### (3) プレビーム合成桁

プレビームは、鋼桁の曲げ復元力を利用して、下フランジ部のコンクリートに圧縮力（プレストレス）を導入し、コンクリート断面を有効に使うことを目指したものである。プレビームでは、鋼桁が完全にコンクリートで被覆されているため、断面剛性の増大が期待でき、たわみを減少させることが可能になる。したがって、桁高を低く押さえることができる。

1968 年に最初のプレビーム橋が施工され、1988 年に初めて連続桁として採用されて以来、連続

桁として採用されるケースが増えてきている。このプレビーム合成桁を連続化して経済性、走行性、耐震性を向上させることを期待した最初の橋として、二上大橋（1988年竣工）がある。

なお、プレビーム合成桁では、最近、ウェブの被覆コンクリートを取り去り軽量化することで経済効果を期待した構造も考案されてきているが、これについては、合成構造の章で取り扱う。

#### （4）コンクリート充填鋼管複合桁

コンクリート充填鋼管複合桁は、耐荷性能および変形性能の向上を期待してコンクリート充填鋼管を桁に用いたものである。このコンクリート充填鋼管複合桁は、比較的大きい剛性による桁高の低減、じん性の向上の他、騒音・振動の軽減、加工の省力化によるコストの低減も期待できる。コンクリート充填鋼管複合桁は最近、開発研究が行われ3径間連続コンクリート充填鋼管複合桁の北陸道架道橋（2000年竣工）で初めて用いられ、採用され始めたばかりである。

#### （5）その他（ラーメン高架橋）

SRC ラーメン高架橋は、鉄道によく利用される構造で、下記の理由により、主に駅部に採用されることが多い。

- 1) 柱と梁をスレンダーなものとし、かつ支間を大きくして空間を広く取りたい。
- 2) 他の線路等を跨いで建設されるため、架設が困難である。
- 3) 騒音を小さくしたい。

### 2.2.2 橋脚・橋台・主塔

SRC 構造は、躯体の断面を小さくするために従来から様々なケースで用いられてきたが、最近の橋脚・橋台・主塔への SRC 構造の採用は、他の複合構造と同様に、建設コストの縮減と維持管理・補修費の軽減の視点から行われている。

高橋脚においては、施工の合理化の視点から鉄骨あるいは鋼管を用いた SRC 構造が採用されており、斜張橋の主塔でも施工の省略化および耐震性の向上から鋼管を用いた SRC 構造が用いられている。一方、上下部一体ラーメン橋の橋台部において鋼支柱を用いた SRC 構造が用いられている。

#### （1）橋脚

従来から、橋脚には SRC 構造が様々なケースで用いられてきている。まず、躯体の断面を小さくするために鉄筋の代わりに鉄骨が用いられてきた。また、張出式橋脚の梁の張出し長やラーメン橋脚のスパンが大きくなり、自重が断面力に大きく影響する場合に、断面を絞る目的で SRC 構造が用いられてきた。最近の大規模な例として、鶴見つばさ橋（1994年竣工）の主塔部の橋脚が挙げられる。鶴見つばさ橋の主塔部橋脚は、上部が鋼殻構造で基部が SRC 構造で構成され、SRC 構造の鉄骨（H 形鋼）は、鋼殻部から基礎まで通す形で配置されている。

最近、山岳橋梁の高橋脚に、施工の合理化すなわち省力化、省人化、工期の短縮、施工の安全性などの視点から SRC 構造が採用されているが、その工法として次の2つがある。

- 1) 鋼管とコンクリートを一体化した複合構造で移動式型枠を上昇させながら順次施工する橋脚
- 2) 橋脚の主筋の代わりに突起付き H 形鋼を用い、型枠としてプレキャスト埋設型枠を採用し構造を単純化した橋脚

いずれも日本道路公団において施工事例があり、前者の事例として北海道縦貫自動車道の大岸橋（1996年竣工）が、後者の事例として大分自動車道の横道橋（2001年竣工）がある。

また、鋼製橋脚にコンクリートを充填した合成柱の外側をコンクリートで巻き立てた特殊な SRC 構造を採用している例もある。これは、橋脚の断面を絞るために合成柱を採用し、その外側にコンクリートを巻くことにより周辺環境との調和に配慮しているものである。

さらに、橋脚への SRC 構造の採用事例として、アーチ橋と同じようにメラン材として使用した祖山橋（1988 年竣工）がある。

## （2）橋台

上下部一体ラーメン橋では、鋼桁と RC 橋脚あるいは RC 橋台との剛結構造が採用されている。これらの構造の多くは鋼桁と RC 橋脚の複合構造で、接合部は混合構造として施工されているが、橋長が比較的小さい単純桁や 2 径間程度の橋梁では橋台部に鋼支柱を埋め込んだ SRC 構造としてあるケースがある。このように橋台部と鋼桁を剛結すると、シューレス、ジョイントレス構造となり維持管理が軽減され経済的であり、走行性や耐震性が向上する。日本道路公団では、北海道縦貫自動車道の小針岸川橋（1996 年竣工）と上信越自動車道の観音沢川橋（1996 年竣工）で施工されている。

## （3）主塔

斜張橋の主塔においても SRC 構造は用いられている。この場合の SRC 構造は、RC 構造とすると断面が大きくなってしまい、不経済となるような場合に RC 構造に代わって用いられることが多い。

2 径間連続斜張橋である奥多摩大橋（1996 年竣工）の主塔は SRC 構造を採用しており、基部から上部桁受けまでが H-428、その上が H-350 の H 形鋼を用いている。

また、ふるりきりこ橋（1990 年竣工）では、主塔に鋼管（ $\phi 508$ ）を 4 本用いており、その中にコンクリートを充填し合成構造としている。鋼管には縞鋼板を突起が内側になるように加工し、コンクリートとの付着を高めている。

最近の事例としては、橋脚に用いられてきた鋼管・コンクリート複合構造を主塔に用いている都田川橋（2000 年竣工）がある。 $\phi 1500$  の鋼管を主塔中央に 1 本用いた SRC 構造となっている。施工は総足場で行われているが施工の省力化や耐震性の向上に大きく寄与している。

### 2.2.3 アーチ橋

アーチ橋ではアーチリブに SRC 構造が採用されている場合があるが、ほとんどのケースが施工との関係で採用され、鉄骨は施工安全性から使用されるため、この断面を考慮せずに設計を行う場合もある。

アーチリブに SRC 構造ないし CFT 構造を採用したこのアーチ橋（以下複合アーチ橋と呼ぶ）は、コンクリートアーチ橋に対して、重量の軽減、施工安全性の確保、あるいは経済性の向上を図る目的で検討された結果、生み出されたものと言っても過言ではない。

わが国では、SRC 構造ないし CFT 構造がメラン部材を用いた架設および合成鋼管巻き立て工法で施工された複合構造のアーチ橋において用いられている。その他の複合構造のアーチ橋として、プレキャスト合成アーチ橋と中国で実績の多いコンクリート充填鋼管をアーチリブに用いた例がある。

#### （1）メラン工法を用いたアーチ橋

メラン工法は、複合アーチの架設方法の一つで、軽量のメラン材（鋼殻）をケーブルエレクショ

ン等で架設し、アーチを形成した後、移動式型枠を用いてメラン材をコンクリートで巻き立てて、アーチリブを完成させる工法である。したがって、この工法ではアーチリブのメラン部材部にコンクリート被覆形式の SRC 構造を用いた複合アーチができる。

このメラン工法は、トラス工法、ピロン工法などと組み合わせて用いられる。

アーチリブの鋼殻とコンクリートとの合成効果を高めるため、鋼殻の骨組化、鋼殻ウェブに溶植されたアンカーバーの増強、ならびに鋼殻ウェブへの孔明等の接合上の配慮がされている。

この施工例として、別府橋（1989年竣工）、天翔大橋（2000年竣工：旧高松大橋）などがある。

## （2）合成鋼管巻き立て工法を用いたアーチ橋

合成鋼管巻き立て工法は、採用され始めた初期の頃、クルカ（CLCA：Concrete Lapping Method with pre-erected Composite Arch）工法として始まったが、その後、合成アーチ巻き立て工法など様々な形で呼ばれている。そのため、本報告書では、資料1にしたがい、合成鋼管巻き立て工法と統一することにした。この工法は、コンクリート充填鋼管アーチリブをさらにコンクリートで被覆する構造で、鋼管は鋼殻とも呼ばれている。製品としての鋼管が鋼管で、組み立て部材としての鋼管は鋼殻という考えも出たが、ここでは、双方とも鋼管とした。

この合成鋼管巻き立て工法は、中規模橋梁（スパン 50～200m）のアーチ橋架設の合理化を目的として開発され、1989年に城址橋（新潟県）で初めて採用され、現在も使用されている工法である。アーチリブを架設する際に、まず軽量の鋼管アーチリブを架設閉合し、鋼管アーチリブ内にコンクリートを充填して合成アーチリブを形成する。次に、スプリング部を直接支保工材として移動作業車（ワーゲン）によりコンクリートを順次巻き立てて、アーチリブを完成させる。

完成系では、アーチリブが SRC 構造として機能するため、優れたじん性、および変形性能が期待できる。

以上、メラン工法を用いて架設を行った橋と合成鋼管巻き立て工法で施工した橋の特徴をまとめて表-2.2.3に示す。

## （3）その他の複合アーチ橋

その他の複合アーチ橋として、コンクリート充填鋼管アーチ橋およびプレキャスト合成アーチ橋がある。

### 1) プレキャスト合成アーチ橋

急速施工が可能なプレキャスト合成アーチ工法では、1ブロック長が4～5mの“H形鋼の下フランジにコンクリートを巻き付けた工場製作のアーチ部材”および“プレキャスト側板”を1ブロックずつ張出し架設してアーチを閉合する。その後、鋼部材にプレキャスト側板を取り付け、アーチリブ内の鉄筋を配置し、コンクリートを打設して完成させるもので、施工例として富士国際ゴルフ倶楽部5ホール連絡橋がある。

### 2) コンクリート充填鋼管アーチ橋

コンクリート充填鋼管アーチ橋は、アーチリブをコンクリート充填鋼管で構成した形式で、合成鋼管巻き立て工法のように、コンクリート充填鋼管構造をさらにコンクリートで被覆することは行っていない。

コンクリート充填鋼管アーチ橋は、充填されたコンクリートの密閉効果により、強度およびじん性が高い。この構造はチェコや中国で既に数多く建設されているものの、わが国での施工例はない。



表-2.2.3 メラン工法, および合成鋼管巻き立て工法の特徴

		メラン工法	合成鋼管巻き立て工法
適用支間		200m 以上	50~200m
設計 法	施工時	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PC 構造として設計.</li> <li>・ メラン材自重, 機材重量, 足場荷重, 温度変化, 風荷重, 地震力, および支点移動の影響考慮断面力は, 水平材・鉛直材を含めた全体架設系で照査.</li> <li>・ 施工段階毎の逐次構造系変化を考慮.</li> <li>・ メラン材自重に対してメラン両端は単純支持(一端ピン, 他端可動), メラン部最初のコンクリート打設時は両端ピン支持, 以後, 両端剛結として設計.</li> </ul>	鋼アーチ架設時: <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 道示 II 鋼橋編に準じて設計.</li> <li>・ 鋼管自重, 充填コンクリート重量, 足場荷重, 温度変化, 風荷重, 地震力, およびコンクリート充填時の側圧考慮.</li> </ul> コンクリート巻き立て時: <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 巻き立て前区間一偏心軸方向力に対し, 鋼アーチフランジを鉄筋換算した RC 計算により照査, せん断力に対し, 鋼アーチウェブで抵抗するとして照査.</li> <li>・ 巻き立て後区間一合成アーチを中空として RC 計算.</li> </ul>
	完成時	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ RC 構造として設計.</li> <li>・ クリープの影響を考慮.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 合成アーチを中空として RC 計算.</li> <li>・ クリープの影響を考慮.</li> </ul>
施工事例		別府橋 (アーチ支間 235m) 宇佐川橋 (アーチ支間 204m) 帝釈橋 (アーチ支間 145m) 泉水大橋 (アーチ支間 95m) 天翔大橋[高松大橋] (アーチ支間 260m)	城址橋 (アーチ支間 82m) 軽井沢橋 (アーチ支間 75m) 富貴畑大橋 (アーチ支間 72m) 旭橋 (アーチ支間 58m) 知原橋 (アーチ支間 94.378m) 青葉大橋 (アーチ支間 180m) 玉川温泉橋 (アーチ支間 110m) 青柳大橋 (アーチ支間 76.4m) 西風新都 1 号橋 (アーチ支間 110m)

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート長大アーチ橋の設計・施工技術の現状と将来, 構造工学技術シリーズ No.19,2000.9.

## 2.3 混合構造

混合構造を「異種部材を接合した構造」と定義し、主にRC部材と鋼部材を接合した混合構造橋梁に着目する。ここでは、混合構造橋梁を、「コンクリート桁と鋼桁を接合した混合橋梁」、「コンクリート橋脚と鋼製主桁を接合した混合橋梁」、「その他の特殊な混合橋梁」に分類する。以下に、これらの橋梁形式ごとに、構造の特徴および最近の傾向を概説する。

なお、ここで概説する橋梁や接合構造に関しては、3章「特徴ある複合構造物の構造形式」、3.3「混合橋梁」で詳細に記述してある。具体的な橋梁一般図や構造図はそちらを参照されたい。

### 2.3.1 コンクリート桁と鋼桁を接合した混合橋梁

#### (1) 斜張橋

混合橋梁の代表的な形式のひとつは斜張橋である。斜張橋においては、主径間に作用する荷重により側径間端支点到負反力が生じるため、主径間に鋼桁を、側径間にコンクリート桁を配置することにより死荷重のバランスを改善することができる。コンクリート桁と鋼桁の接合位置に関しては、両方の桁を主塔近傍で接合するのが一般的であり、施工例としては生口橋、サンマリン橋などがある。また、フランスのノルマンディー橋のように、接合点を主塔位置から中央径間側116mに配置する例も見られる。

接合位置においては鋼桁は多数のセル構造になっており、コンクリート桁内のPC鋼棒がセル内を貫通し、セル後面のダイアフラムに定着される、いわゆる後面プレート方式が一般的には用いられる。せん断力は、鋼ウェブに設置されたスタッドで伝達される。

また、斜張橋と桁橋の中間的なPC橋であるエクストラドーズド橋において、死荷重を軽減するために、中央径間中央部は鋼床版箱桁とする混合橋梁である第二名神高速道路の木曾川橋・揖斐川橋がある。コンクリート桁と鋼桁は、主径間長の1/3の位置で接合される。接合構造としては、PC鋼棒に加え、外ケーブルも併用している。

#### (2) 桁橋

鋼とコンクリートの桁どうしを接合するのが混合構造形式の桁橋である。側径間が主径間に比較して短い連続桁の場合、端支点到負反力が生じる。その際、主径間を鋼桁とし、側径間にカウンターウェイトとしてコンクリート桁を配置すれば、端支点的負反力を抑制できる。また、中央径間部の桁下空間を確保したい場合、中央径間部に鋼桁を用い、桁高さを低くするのが有効な対策である。

鋼桁とRC桁を接合させた例としては、松山自動車道の松山高架橋がある。接合部では、RC構造と鋼構造が、作用外力に対してそれぞれ単独に抵抗する安全側の設計をしている。また、応力の伝達は、スタッドを介して鋼桁からRC桁に伝達させている。

一方、鋼床版箱桁とPC箱桁を接合させた例としては、四国横断自動車道の新川橋がある。接合構造は、後面プレート方式である。また、ジベルとして孔あき鋼板ジベルを用いている。

### 2.3.2 コンクリート橋脚と鋼製主桁を接合した混合橋梁

コンクリート橋脚と鋼製主桁を剛結した上下部一体の混合橋梁に関しては、以下の3つの利点が考えられる。第1に、不静定次数が増すことによりリダンダンシーが高まり、さらに桁の落下を防

止できるため、橋梁全体システムの耐震性が向上する。第2に、剛結支点上の支承が不要なため、維持管理が減少する。第3に、中間支点部の鋼桁に発生する負の曲げモーメントに対して、鋼とコンクリートの両者に分担されるため、鋼重が減少し、経済的となる。

鈑桁あるいは箱桁をRC橋脚と接合した橋梁が建設されている。鈑桁としては、山形自動車道の阿古耶橋、上信越自動車道の観音沢川橋、高知自動車道の岡豊橋などがある。箱桁としては、上信越自動車道の北千曲川橋、第一東海自動車道の横浜緑IC・Dランプ橋、徳島自動車道の川之江東JCT・Cランプ橋などがある。また、鋼桁とRC橋台を一体化したインテグラルアバット橋梁も北海道縦貫自動車道のおふきし川橋が建設されている。この形式においても、耐震性や車両走行性の向上が期待できる。

接合の構造としては、3つの方式が用いられている。第1は、鋼主桁をRC橋脚に埋め込み、箱形式の横梁のコンクリートとRC橋脚をPC鋼棒で接合する方式である。第2は、鋼主桁をRC橋脚に埋め込み、箱形式の横梁のコンクリートとRC橋脚をスタッドで接合する方式である。第3は、鋼主桁にそれと直角方向に鋼橋脚部材を溶接し、その鋼部材をRC橋脚またはRCアバットに埋め込み、スタッドにより力を伝達する方式である。いずれも、実橋梁で採用されている。

### 2.3.3 その他の混合橋梁

#### (1) 複合主塔

フランスのノルマンディー橋の主塔では、ケーブル定着部に鋼製サドル構造を用い、その周りをRC部材が覆う混合構造となっている。主塔内のケーブル定着部は、主径間側と側径間側の両側からケーブルが入るため形状が複雑であり、また局所的な応力集中が生じやすいため鋼部材が有効である。したがって、RC構造を主体とし、定着部のみ鋼製とする混合構造は合理性があると考えられる。

首都高速湾岸線鶴見つばさ橋では、桁より下の主塔下部はSRC構造、主桁より上の主塔上部は鋼製であり、両者は剛結されている。本橋でも、ケーブル定着部の合理化および主塔上部を軽量化するために鋼製部材を有効に用いており、景観性も向上している。

#### (2) 複合橋脚

JR常磐線の第3綾瀬高架橋では、主構造をそれぞれ独立した2面のRCラーメンとし、それらを鋼製横梁で接合し、その上にRC床版をのせている。その際、鋼製横梁はRC柱頭部にPC鋼棒を用いて接合されている。主構間隔が広い場合や桁下空間が狭いときに、RC横梁を用いると梁高さが高くなるため、鋼製横梁が有効である。

秋田新幹線高架橋においては、基礎をソイルセメント合成鋼管杭、柱をコンクリート充填鋼管柱、上部桁を鉄筋鉄骨コンクリート桁とし、それらがすべて剛結されている。柱下端の接合構造は、鋼管柱を鋼管杭に差込んだ後にコンクリートを充填する「差込み接合」であり、柱上端は柱を梁に埋め込む構造としている。

#### (3) 圧延桁を用いた混合橋梁

ドイツのナーエ橋では、圧延H形鋼を主桁とし、RC橋脚間に設置した後、両側の主桁を橋脚上

で接合している。接合は、H形鋼の端部に設けた鋼板外面にスタッドジベルを配置し、橋脚上の横梁位置にコンクリートを充填する方式である。プレートガーダーに比較して鋼重は大きくなるが、圧延桁のため加工コストはかなり低くなると考えられる。また、高力ボルト接合や現場溶接に比較して、高い設置精度が要求されない利点もある。

#### (4) 複合ラーメン橋

スペインにおいては、RC橋脚を橋軸方向に張り出し、支間中央に鋼桁を配置し、両者を剛結した混合橋梁が建設されている。橋脚上の支承や伸縮装置が不必要であり、維持管理上も好ましい。また、桁の落下がないため、耐震性も優れると考えられる。