

第2回 設計 (その2)

講師：篠崎 英二*

1. はじめに

今回は、設計 (その1) としてプレストレストコンクリート (以下、PC) 橋における設計の基本理念、断面力の算出、および断面の照査方法について解説しました。今回はもう少し内容を掘り下げて、形状や鋼材の配置などといったPC特有の構造細目と、代表的なPC橋の各構造形式別の特徴について解説します。

2. PC特有の構造細目

構造物の形状や鋼材の配置といった構造細目は、設計計算上の仮定が成り立つための前提条件や局所的な応力などによって構造物に損傷を生じさせないための処置、構造上の弱点を作らないための配慮、もしくは弱点と考えられる部分の補強方法などについて、ある程度標準化できるところを基準として示しているものです。したがって、設計をするにあたって非常に重要な項目となります。ここではPC特有の構造細目について、その概要を紹介します。

2.1 PC鋼材のかぶりとおき

PC鋼材は、鉄筋やシース^{a)}などで周囲を囲まれているのが一般的です。したがって、鉄筋のかぶり^{b)}を所定の値以上に確保すれば、PC鋼材のかぶりについては問題にはなりません。また、構造物の耐久性を確保するためにも、かぶりは重要な要因となりますので、塩害^{c)}を受けるおそれがある場合には、かぶりを大きくします。道路橋示方書では、塩害の影響による最小かぶりが示されていますが、この規定には、構造や塩害の影響の度合い、および想定した水セメント比によって区分されていることに注意します。

PC鋼材あるいはシースのあき^{d)}は、PC鋼材やシースの周囲にコンクリートが十分に行きわたり、確実にコンクリートの締固めができるように設定します。PC部材には鉄筋とPC鋼材が部材内に配置されており、これらが錯綜するとコンクリートの打込みや締固めの妨げとなるため、鋼材の配置量が過密となっている箇所は、打込み用のスペースを十分に確保する必要があります。また、シースを曲線的に配置する場合には、シースの側面にプレストレス力によって支圧力 (腹圧力) が発生するため、シース間に十

分なあきを確保するのがよいとされています。これら鋼材 (シースを含む) のあきについては、道路橋示方書などの各設計要領において構造細目として数値が標準化されています。

2.2 PC鋼材の配置

プレストレス力は、緊張時においてPC鋼材とシースとの摩擦によって減少します。この減少量はPC鋼材の曲げ変化角や長さにはほぼ比例しており、PC鋼材の配置を計画するときには、摩擦によるプレストレスの損失が少なくなるように配慮します。また、コンクリート部材に局所的に大きな引張応力を生じさせたり、PC鋼材を急に曲げて配置することによる想定外の付加応力を生じさせたりしないようにするとともに、部材縁に有害なひび割れが生じさせないためにも、構造細目として次のようなことに留意する必要があります (図-1)。

- 緊張作業中にトラブルが生じないように、定着具の位置から所定の区間は、直線状に配置する。
- 曲線状に配置する箇所では、曲げの中心方向に大きな腹圧力が生じ、コンクリートに局部応力が生じたり、PC鋼材自体にも付加応力が生じるため、曲げ半径を所定の長さ以上にする。
- 荷重の載荷状態によって曲げモーメントの値が正負逆転 (交番) する断面付近においては、PC鋼材を断面の図心位置に集中させずに、部材断面の上下縁部近くに橋軸方向に分散して配置する。
- 部材の端部付近は一般にPC鋼材の本数が少なくひび割れが生じやすくなっているため、PC鋼材の一部は曲げ上げずに下縁に沿うように配置する。

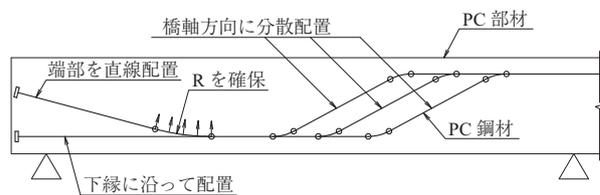


図-1 PC鋼材の配置

* Eiji SHINOZAKI: 川田建設(株) 技術部 技術課

2.3 PC 鋼材の定着

PC 鋼材を定着する定着具の設置位置は、部材に所定のプレストレスを導入できるようにするとともに、有害なひび割れが生じないように選定します。そのためには、次の点に注意して選定します。

- 部材の中間部に定着具を設置する場合は、活荷重（変動荷重）によって応力が大きく変動する単純桁の支間中央などから十分に離れた断面を選定するとともに、断面図心に近い位置、または圧縮応力を受ける位置に定着できるように配慮する。
- PC 鋼材の定着具は、部材厚の厚い主桁ウェブに設置する。やむを得ずフランジやウェブの側面などに沿わせて定着する場合には、鉄筋などで十分に補強する。特に部材厚の薄いフランジに PC 鋼材を複数まとめて定着したり、定着力の大きい外ケーブルを定着したりすると、図 - 2 のように定着部付近の部材に局所的な曲げ応力やせん断応力が作用して大きな亀裂が生じる可能性があるため、このような位置をできるだけ避けるなどの配慮も必要である。

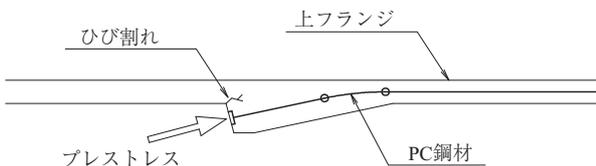


図 - 2 フランジに定着を設けた時のひび割れ

- 大きな力が集中して作用する定着具の近傍では局所的な応力が生じるため、定着具の大きさ、定着方法、定着具の配置間隔、定着具の縁端距離などを考慮して決定する。特に、斜橋の端部など定着位置が斜めになっている場合は、図 - 3 のように定着具の中心間隔 D を確保しても、必要な縁端距離 d を確保できない場合があるため、十分に注意する必要がある。

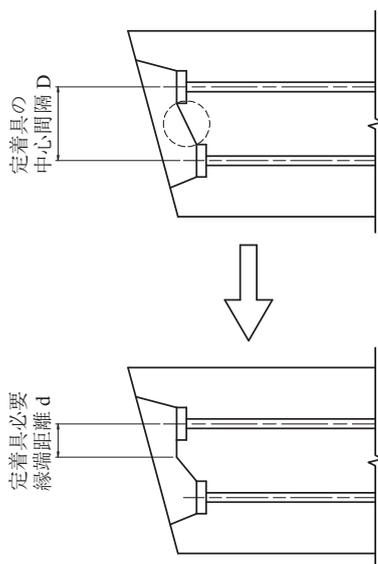


図 - 3 定着具の縁端距離の確保¹⁾

2.4 定着部の設計

定着部は PC 鋼材の緊張力に対して、支圧破壊⁶⁾や割裂破壊⁷⁾が生じないように設計する必要があります。また、導入される緊張力によって定着具が部材に「めり込む」などの過度な変形が生じないように、定着部の形状や寸法を設計時に考慮する必要があります。そのため、次のような点に注意しながら設計します。

- 定着具の配置間隔や PC 鋼材の緊張順序によっては部材端部のコンクリートに引張応力が生じることがあるため、ひび割れによって部材の性能に悪影響を及ぼさないように鉄筋で補強する。
- 部材中間部に突起や切欠きといった定着部を設ける場合には、断面形状の急変による応力の乱れが部材の断面性能に悪影響を及ぼさないような形状とし、鉄筋で適切に補強する。
- 定着部の切欠き部は、緊張に必要な作業空間を確保するとともに、十分なかぶりを確保できるように配慮する。
- アンボンド PC 鋼材や外ケーブル鋼材といった部材との付着がない鋼材の定着部は、活荷重の載荷などによる PC 鋼材の緊張力の変動が直接、定着部に伝わってしまうため、定着具を分散させて配置する構造とする。

具体的な補強方法については、「プレストレストコンクリート工法設計・施工指針」平成 3 年 3 月（土木学会）などを参照してください。また、定着具の形状や部材への定着力の伝達方法は、各種定着工法によって違いがありますので、各種工法の基準なども参照してください。

3. PC 橋の代表的な構造形式の特徴

PC 橋には、その製作方法や断面形状などによって、多種多様な構造形式があります。ここでは、特徴的となる構造形式の PC 橋をピックアップして、その特徴を紹介します。

3.1 外ケーブル構造

外ケーブル構造とは、PC 鋼材をコンクリート部材の外側に配置する構造です。従来からの PC 鋼材をコンクリート部材の内部に配置する構造は、内ケーブル構造として区別されています。外ケーブル構造における PC 鋼材の配置は、図 - 4 に示す概念図のように偏向部や横桁により支持されており、主に箱桁橋に用いられています。

外ケーブル構造では、当初から外ケーブル追加用のダクト（予備孔）を設けておけば、ケーブルの取替えや追加などの維持管理が容易になります。

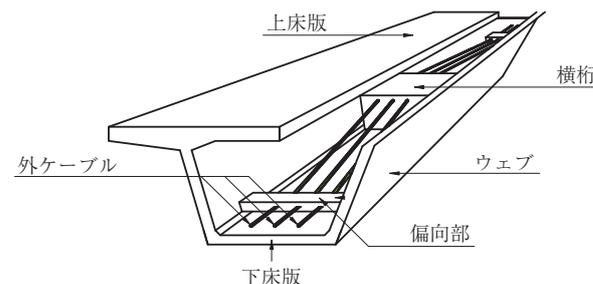


図 - 4 外ケーブル構造の概念図¹⁾

外ケーブル構造には、以下のような特徴があります。

【長所】

- ・主桁断面内に PC 鋼材を配置しないため、断面の形状寸法を薄くすることができ、主桁自重を低減することができる。
- ・部材内の PC 鋼材が減ることによってあきが確保されるため、PC 鋼材の配置やコンクリートの打設が、比較的容易となる。
- ・予備孔を設けておけば、将来的に PC 鋼材の取替えやプレストレスの追加が可能である。

【短所】

- ・上下フランジ内に PC 鋼材を配置できる内ケーブル構造と比べると、外ケーブル構造では箱桁の内空断面内に PC 鋼材を配置することになるため、PC 鋼材の偏心量が少なくなる。
- ・部材の曲げ変形が大きくなる終局荷重作用時においては外ケーブルと主桁断面との平面保持の仮定が成立しない。そのため、外ケーブルが終局荷重時における断面耐力にあまり寄与しなくなり、破壊抵抗曲げモーメントが減少する。

外ケーブル構造に使用する PC 鋼材は、すべて外ケーブルとする場合と、内ケーブルと組み合わせて配置する場合があります。内ケーブルと外ケーブルの配置比率は、構造計算結果だけでなく、施工性や維持管理などについても十分に検討して決定する必要があります。

また、外ケーブル構造は、構造物の外側に PC 鋼材を配置するために構造部材内に配置できないような大容量の PC 鋼材を使用することができます。したがって、その定着部や偏向部とその周辺を十分に補強する必要がありますことに留意します。

なお、PC 鋼材がコンクリート部材の外側に配置されるため、適切な防食方法によって外ケーブルを保護する必要があります。

3.2 プレキャストセグメント方式箱桁橋

プレキャストセグメント方式による箱桁橋とは、セグメントを、工場もしくは架設地点近接の製作ヤードで運搬可能な大きさで製作して、架設地点に運搬してからプレストレスによって一体化させる構造です（図 - 5）。その特徴から大規模工事に採用されることが多く、さまざまな架設工法が考案されています。

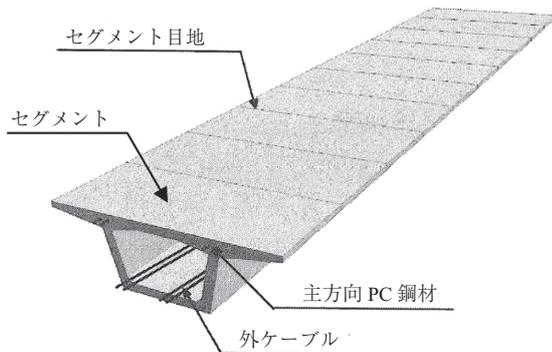


図 - 5 プレキャストセグメント方式箱桁橋の概念図¹⁾

プレキャストセグメント方式箱桁橋の特徴を、以下に示します。

【長所】

- ・セグメントの製作と架設の工程を並行できるため、全体の工期を短縮できる。
- ・工場または製作ヤードで集中的にセグメントを製作するため、品質管理が容易である。また、機械化などによる省力化、合理化が可能である。
- ・セグメントは架設までの期間、ストックヤードなどで保管されるため、架設後における乾燥収縮やクリープによる影響を小さくできる。
- ・大規模な橋梁では、大型の設備や機械装置を繰返し転用することができるため、経済性に優れている。

【短所】

- ・セグメントを製作する設備が大がかりとなるため、中小規模の工事では経済性に劣る。
- ・セグメント同士の接合部となる目地では橋軸方向の鉄筋が連続していないため、主桁に発生する引張応力度を制限する必要がある。

セグメントは製作場所によって現場製作セグメントと工場製作セグメントに大別されます。

現場製作セグメントは、製作ヤードとストックヤードを架設地点近傍に確保できる場合に採用されます。セグメントを架設地点まで公道を通らずに運搬できることから、製作と架設に適切なセグメントの重量、長さ、幅および高さの選定が可能です。

工場製作セグメントは、架設地点近傍に製作ヤードとストックヤードを確保することが難しい場合に採用されます。セグメントを工場で作成して架設地点まで公道を運搬することから、道路交通法などの関係法令や運搬経路の条件などによって、セグメント重量、長さ、幅および高さに制約を受けます。なお、近年ではセグメントの制約を軽減するために、箱桁断面の一部（コア断面）だけを工場製作セグメントにして、上床版や張出し床版などを場所打ちコンクリートとする工法も採用されています。

なお、先述の外ケーブル構造とプレキャストセグメント工法の設計・施工上の詳細については、「外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準」平成 17 年 6 月（プレレストレストコンクリート技術協会）などを参照してください。

3.3 複合橋

複合橋とは、コンクリート橋の短所となっている主桁自重の重さを低減するために、コンクリートの一部を主に鋼部材に置きかえた橋梁です。上部工重量を軽減することによって下部構造を小さくすることができ、経済性を高めることができます。また、軽量の鋼材に置きかえることによって、支間の長大化を図ることもできます。この構造は、主桁断面の一部を置きかえた「合成構造」と、橋梁の一部区間を置きかえた「混合構造」に区別されています。

1) 合成構造

合成構造とは、主桁断面形状が 2 種類以上の構造材（主に鋼材とコンクリート）によって構成され、それぞれの部

材同士が主桁断面として一体的に挙動するとみなせる主桁構造のことで、合成構造には、コンクリート箱桁のウェブを鋼材で置きかえたものも多く、波形鋼板に置きかえた波形鋼板ウェブ橋や、鋼製トラスに置きかえた複合トラス橋などがあります。

多くの実績を有している波形鋼板ウェブ橋は、その名の通り波形状に加工した鋼板をウェブに配置した構造で、波形とすることによってウェブが楽器のアコーディオンのように軸力に抵抗しないため、プレストレス力を上下床版に有効的に伝えることができる特徴があります（これを、アコーディオン効果と呼びます）。また、折り曲げられた波が補剛材¹⁾の役目も果たすため、高いせん断耐力を有しています。波形鋼板ウェブ橋の概念図を、図 - 6 に示します。

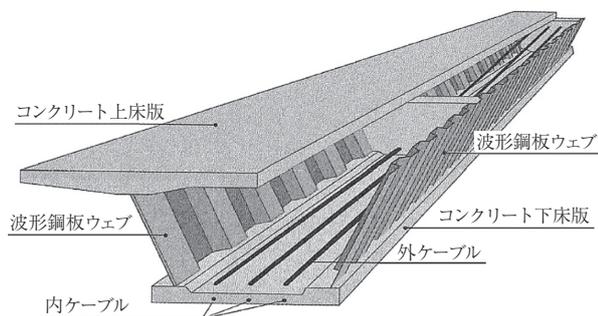


図 - 6 波形鋼板ウェブ橋の概念図¹⁾

波形鋼板ウェブ橋の主桁の高さは、一般的な PC 箱桁橋と同程度、または高めの設定になりますが、波形鋼板ウェブを採用することにより主桁自重を 15 ~ 20 %ほど軽減することができます。

2) 混合構造

混合構造とは、鋼桁部とコンクリート桁部を橋軸方向に直接結合した構造で、近年、鋼桁と PC 桁のそれぞれの長所を生かした支間割りなどによって経済性の向上を図った混合構造橋が増えつつあります。混合桁橋の接合部の例を、写真 - 1 に示します。

なお、複合橋の設計・施工上の詳細については、「複合橋設計施工規準」平成 17 年 11 月（プレレストコンクリート技術協会）などを参照してください。



写真 - 1 混合桁橋の接合部の例

3.4 PC 斜張橋

PC 斜張橋は、主塔から斜めに張られたケーブル（斜材 PC 鋼材）によって主版（主桁）を吊っている構造で、主に長大支間の橋梁に採用されます。また、主塔をもつという特殊性から、橋梁自体がランドマークとして利用できる効果もあり、歩道橋や比較的短い支間の橋梁などにも採用されています。PC 斜張橋の各部の名称を図 - 7 に示します。

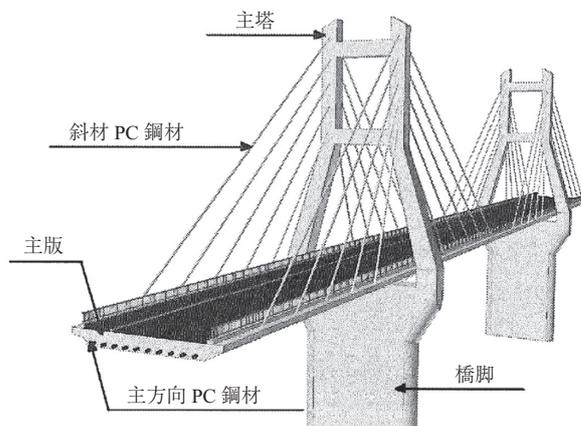


図 - 7 PC 斜張橋の概念図¹⁾

PC 斜張橋の特徴を以下に示します。

- 吊構造であるため、長大橋に適している。
- 桁高を低くすることができ、桁下空間が大きく取れる。
- 主桁応力度の制限値を満足させるために、施工中に斜材の緊張力を調整することができる。
- 斜材配置・主塔形状などの設計の自由度が高く、周囲の景観への配慮が容易である。
- 斜材を用いた張出し架設工法が可能であり、合理的な施工方法を選定することができる。

3.5 エクストラロード橋

エクストラロード橋は、主桁の上に外ケーブルを配置させた大偏心外ケーブル橋であり、PC 斜張橋と外ケーブル構造の中間的な特徴をもった比較的新しい構造形式の橋梁です。斜張橋は主桁を斜材で吊る構造ですが、エクストラロード橋は外ケーブル構造と考えます。エクストラロード橋の形状は PC 斜張橋と類似しており、構成する各部の名称についても PC 斜張橋と同じです。エクストラロード橋の例を、写真 - 2 に示します。

エクストラロード橋と PC 斜張橋の主な相違点について以下に示します。

- 斜張橋と比較して一般に低い主塔と斜材で形成されたプロポジションである。
- 斜張橋よりも主桁の剛性が高いため、たわみの管理が容易である。
- 活荷重に対して主桁が抵抗する割合が高いため、斜材の応力変動が小さく、斜材の応力制限値を大きく取れる。斜材の許容引張応力度は、斜張橋は $0.4 P_u$ (P_u : 引張強度) とするが、エクストラロード橋では $0.6 P_u$ とする 경우가多い。



写真 - 2 エクストラロード橋の例

- 斜張橋と比較して主塔が低いことから、耐風安定性に優れている。

なお、先述の PC 斜張橋とエクストラロード橋の設計・施工上の詳細については、「PC 斜張橋・エクストラロード橋設計施工規準」平成 21 年 4 月（プレストレストコンクリート技術協会）などを参照してください。

4. 練習問題

今回の講座のまとめとして、○×形式の練習問題を用意しましたので、チャレンジしてみてください（PC 技士試験における過去問題を一部アレンジして出題しています）。

- ① 緊張材を部材の中間部で定着する場合、定着具は部材断面内の引張応力が作用する部分のコンクリートに配置するのがよい。
- ② PC 鋼材のあきは、コンクリート骨材の最大寸法、PC 鋼材の直径やシースの直径、および内部振動機の挿入しやすさなどを考慮して決めなければならない。
- ③ 荷重の組合せにより、作用する曲げモーメントの正負が反転する部分では、PC 鋼材を断面の図心位置近くにまとめて配置するのがよい。
- ④ 連続橋の中間支点付近において、曲線状に配置した緊張材の内側に生じる局所的な圧縮応力を小さくするためには、緊張材の曲げ半径をできるだけ小さくするのがよい。
- ⑤ 複合トラス橋や波形鋼板ウェブ構造のような複合構造橋は、自重軽減の利点を活かして大スパン橋梁に採用されることが多い。
- ⑥ 外ケーブル構造は、短スパン橋に採用すると、かえって不経済となる場合がある。
- ⑦ エクストラロード橋は、斜材が主桁に圧縮力を与えることが主目的で配置されるため、斜張橋と比べ、一般に主塔の高さが低いのが特徴である。
- ⑧ 工場製プレキャストセグメント構造は、主桁を短いセグメントに分割するため、運搬経路を事前確認しないで採用できる。

【練習問題の解答】

① × ② ○ ③ × ④ × ⑤ ○ ⑥ ○ ⑦ ○ ⑧ ×

5. おわりに

前回と今回の 2 回にわたり、PC 構造物の設計と題して PC 橋の設計に関する説明をしました。橋梁の設計にかかわらず構造物の設計においては、設計の対象となる構造物の特徴を十分に理解しておく必要があります。そのため、設計をおこなう前に、対象構造物に定められた設計基準や指針はもちろんのこと、これまでの施工実績や維持管理計画なども調査して、設計方針を確認しておくことが大切です。

今回は、PC 構造物に使用される材料に関して説明します。

注

- a) シース：コンクリート硬化後（Post）に PC 鋼材を緊張（tension）するポストテンション方式による PC 部材において、コンクリート部材内に PC 鋼材を配置できるように、部材中にあけておく孔（ダクト）を形成するために、コンクリート中に配置される筒。鋼製またはプラスチック製のものがある。
- b) かぶり：鉄筋あるいは PC 鋼材やシースの表面とコンクリート表面の最短距離で測ったコンクリートの厚さ。コンクリートと鋼材との付着性の確保や、鋼材の腐食を防ぐなどのために必要。
- c) 塩害：海洋から飛来する塩分や、路面凍結防止剤（融雪剤）に含まれる塩化物がコンクリート内に浸透することによって、部材内部の鋼材が腐食して構造物が損傷する経年的な劣化現象。
- d) あき：互いに隣り合って配置された鉄筋あるいは PC 鋼材やシースの表面同士の純間隔。コンクリートと鋼材との付着性や、施工性の確保のために必要。
- e) 支圧破壊：PC 構造では、定着具とコンクリートとの接触面に作用する圧縮力（支圧力）によりコンクリートが押しつぶれてしまう局所的な破壊。
- f) 割裂破壊：PC 構造では、定着具背面において PC 鋼材の直角方向に引張力が生じることによってコンクリートが引き裂かれてしまう局所的な破壊。
- g) 補剛材：鋼桁橋の腹板（ウェブ）側面に水平または鉛直に配置される鋼板部材。平面寸法と比べて厚さが薄い鋼板は、強い圧縮力によって急に板がはらみ出す現象（座屈）が生じやすいために設けられる部材。

参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会：プレストレストコンクリート技術，2011

【2012 年 9 月 28 日受付】