

## 第3回 骨組解析（その2） PC 構造物への適用

講師：前田 晴人\*

### 1. はじめに

講座の第2回において、「骨組解析（その1）基礎知識・モデルの作成」と題して、PC 3径間連続ラーメン箱桁橋（主方向）を例にとり、骨組解析に必要な条件、モデル作成方法および結果の照査方法についての一連の解説が行われました。ここでは、これら一連の解析作業の中から、PC 箱桁橋に特有な留意点および説明を加えておきたい点等を抽出して、解説します。

コンクリート橋は、鋼橋と比べて部材自体の剛性が大きく変形量が小さいので、微小変形理論により設計しても実際の挙動をほぼ表現できるため、この解析理論が一般的に用いられています。微小変形理論では表現できない挙動の代表例としては、有ヒンジラーメン橋（径間中央部に曲げと軸力の連続性を断つヒンジ構造を設けた橋）のヒンジ部垂れ下がり問題があります。この問題については講座の第1回において3次元ファイバーモデルや3次元有限要素法を用いて解析することにより実際の挙動が再現できることが示されています。解析技術の進歩には目覚ましいものがありますが、この講座は構造解析の入門編であり構造解析の基礎知識を習得することを目的としているため、もっとも基本となりかつ一般的に用いられている微小変形理論に基づいた骨組解析に限定して解説することとします。

### 2. モデル作成上の留意点

#### 2.1 断面性能（剛性）計算上の留意点

道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編（平成24年3月）<sup>1)</sup> 4.1の解説(2)によると「構造部材の照査に用いる断面力は、棒部材を用いた線形解析（微小変形理論）に基づき算出する。この場合においては、部材の曲げ剛性、せん断剛性及びねじり剛性は、コンクリートの全断面を有効とし、鋼材を無視して算出した値を用いてよい」とあります。また、その理由として、「構造部材に生じる断面力は、構造物を構成する部材相互の剛性の比により定まり、剛性の大きさそのものの影響は少ない。したがって、断面力の算出にあたっては、簡略化のためコンクリートの全断面を有効として算出した断面の剛性を用いてよい。同時に、部材の剛比に及ぼす鋼材の影響は一般に小さいので、これを

無視してよい」とあります。したがって、微小変形理論により断面力を算出するさいの断面性能は箱桁断面の実際の形状寸法を基にした全断面で算出してよいこととなります。

一方で、曲げ応力度や破壊抵抗曲げモーメントを計算する場合の断面性能は、床版のせん断変形の影響によってウェブ近傍の軸方向応力がウェブから離れた位置ほど小さくなるせん断遅れ現象等を考慮した有効断面で計算することになっており注意が必要です。ただし、張出し架設を行うような長大橋の場合は（全断面）＝（有効断面）となるのが一般的ではあります。有効断面とは図-1に示すように、軸方向応力度を簡略的に一様に分布するものとみなせる幅（有効幅）までを考慮した断面を指します。

鋼橋の場合は、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（平成24年3月）<sup>2)</sup>によると「応力度と変形を計算するため」に有効断面を用いるとあります。したがって、鋼橋の断面性能は、コンクリート橋とは異なり構造解析上も有効断面を用いて計算することとなります。鋼橋は部材自体の剛性が小さく変形量が大きいため、全断面でたわみを計算すると危険側になることがこのような規定となった一因と思われます。

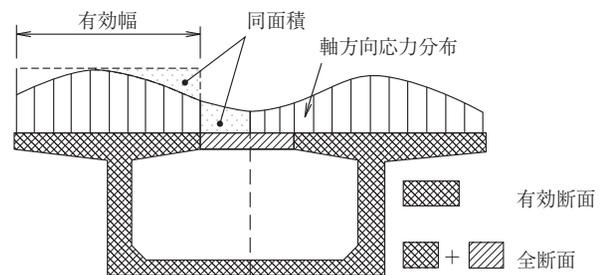


図-1 全断面と有効断面

#### 2.2 架設順序に関する留意点

解析技術が発達していなかった頃に計画された3径間連続構造の架設順序は、図-2に示すように、橋脚上に柱頭部をブラケット支保工により架設し、柱頭部を起点として移動作業車によりほぼ左右対称に張出し架設を行った後、側径間部を支保工により架設して、最後に中央径間中

\* Haruhito MAEDA：(株)日本構造橋梁研究所

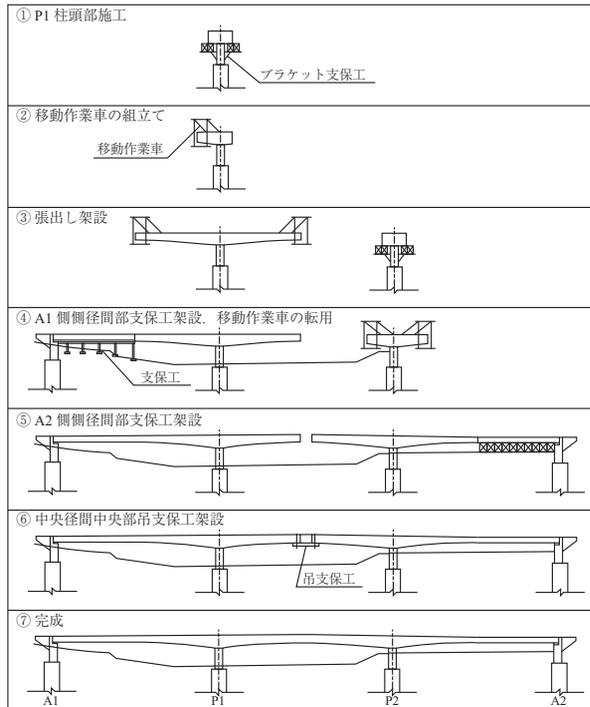


図 - 2 旧来の標準的な架設順序

中央部を吊支保工により架設閉合する順序にこだわっていました。これは架設順序を画一化することにより、不静定力の計算を画一化・簡便化するための便法でもありました。

解析技術が発達した現在では、中央径間中央部の閉合を先に行い、中央径間部を安定させたのちに側径間部を架設するなど、架設順序を現場の都合に合わせて変更することが可能となりました。側径間部の架設方法も従来は支保工架設が標準でしたが、現在では谷地形部における急斜面での固定式支保工架設を避け、吊支保工により架設することも珍しくなくなりました。

このように解析技術の発達は、架設順序を任意に選ぶことを可能にしましたが、断面力が最大となる架設状態が部材ごとに異なり複雑となることから、正しい設計を行うためには、骨組構造系の変化や荷重の状態を正確に反映させた構造解析を行うことがますます重要となってきました。

### 2.3 骨組構造系と荷重に関する留意点

架設順序を任意で設定する場合の留意点としては、実際の架設状態に一致した骨組構造系と荷重状態とを正しく表現しながら順を追って解析していくこと、をあげることができます。以下にいくつかの例を見ていきましょう。

#### (1) 移動作業車による張出し架設

張出し架設には図 - 3 に示すような移動作業車を用います。移動作業車は、つねに張出し架設された部材の先端に移動・セットされ、新たな部材を構築するための支持材となります。支持材となるメインフレームには移動作業車の自重（型枠、足場等も含む）と硬化前のコンクリートの重量が作用します。

これらの荷重は図 - 4 に示すような荷重状態として表現することができます。架設段階 A において、移動作業

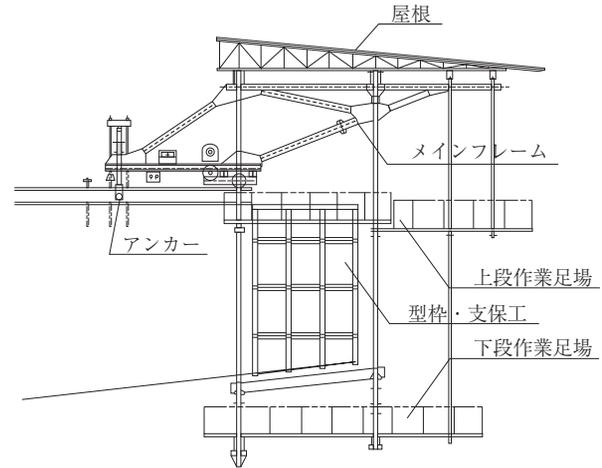


図 - 3 移動作業車の例

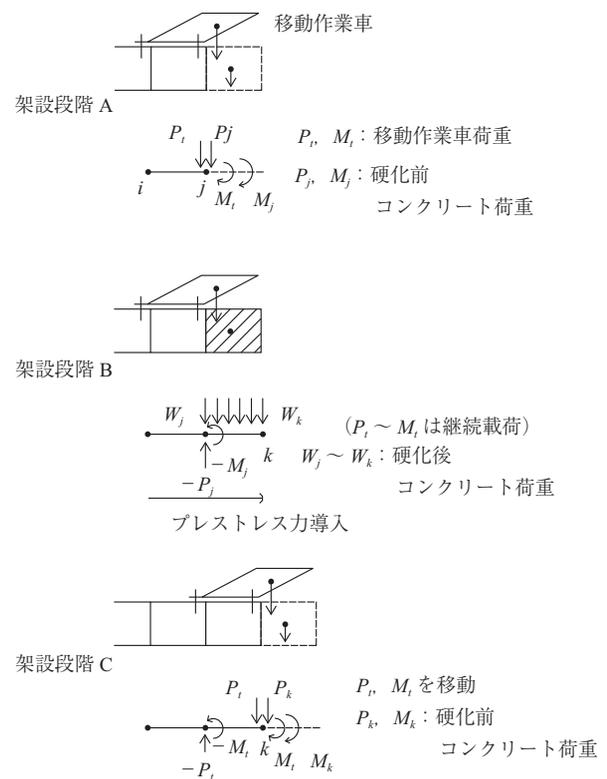


図 - 4 張出し架設中の骨組構造系と荷重状態

車自重は部材先端への鉛直力  $P_i$  とモーメント  $M_i$  として表すことができます。硬化前のコンクリートの重量も、同じく部材先端への鉛直力  $P_j$  とモーメント  $M_j$  として表すことができます。

架設段階 B はコンクリートが硬化して新たな部材が設定された状態を示しています。この段階で硬化前のコンクリート重量に対する荷重 ( $P_j, M_j$ ) を除去し、代わりに部材自重として新たに設定された部材に分布荷重 ( $w_j-w_k$ ) を作用させます。また、この時点でプレストレスを導入します。

架設段階 C は移動作業車を先端に移動し、新たなコンクリートを打設する状態を示します。移動作業車を移動す

る際は、元の位置での移動作業車荷重 ( $P_i, M_i$ ) を除去し、新たな位置で移動作業車荷重 ( $P_i, M_i$ ) および硬化前のコンクリートによる荷重 ( $P_k, M_k$ ) を作用させます。張出し架設中はこのような作業を繰り返すこととなります。

(2) 固定式支保工による側径間部の架設

側径間部の架設を固定式支保工で行う場合、硬化前のコンクリート重量は支保工で支えられているため、張出し状態の骨組構造系に作用する荷重はありません。骨組構造系の変化は、コンクリート硬化後にプレストレスを導入した時点で、図 - 5 に示すように、張出し状態から一気に側径間ができあがった状態へと変化します。荷重は、側径間ができあがった骨組構造系に対して、側径間部の主桁自重とプレストレス力とを作用させることとなります。

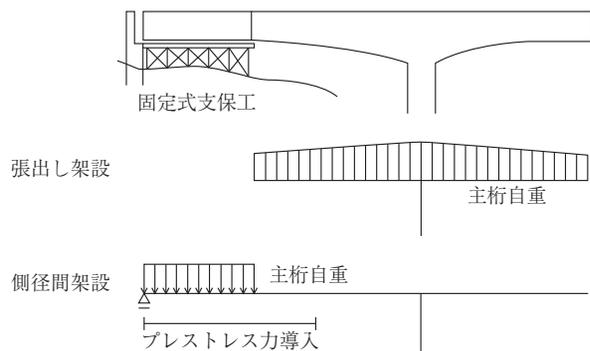


図 - 5 側径間固定式支保工の骨組構造系と荷重状態

(3) 吊支保工による側径間部の架設

側径間部の架設は、固定式支保工架設が標準でしたが、現在では谷地形部における急斜面での支保工架設を避け、吊支保工により架設する場合も見られるようになりました。吊支保工で架設する主桁の長さは、吊支保工区間に渡す架設鋼材の能力によって決まりますが、一般的には架設鋼材の流通性や運搬性を考慮して 10 m 程度としています。

側径間部の架設を吊支保工で行う場合は、固定式支保工で架設する場合とは異なり、図 - 6 に示すように、吊支保工の分担重量および硬化前のコンクリートの分担重量が、張出し状態の骨組構造系に対する荷重 ( $P_i, P_w$ ) として作用します。骨組構造系の変化は、コンクリート硬化後にプレストレスを導入した時点で、張出し状態から側径間ができあがった状態へと変化します。荷重は、側径間ができあがった骨組構造系に対して、側径間部の主桁自重とプレストレス力とを作用させ、吊支保工および硬化前のコンクリートによる分担荷重を除去する必要があります。

吊支保工および硬化前のコンクリートによる分担荷重 ( $P_i, P_w$ ) は、作用する時点と除去する時点とで骨組構造系 (不静定次数) が変化するため、架設時荷重とはいえず図 - 7 に示すように断面力の一部が永久に残ってしまうこととなります。これに対して図 - 4 に示した張出し架設中の移動作業車による荷重は、作用する時点と除去する時点とで骨組構造系 (不静定次数) に変化がないため、除去後には断面力もすべてキャンセルされることとなります。

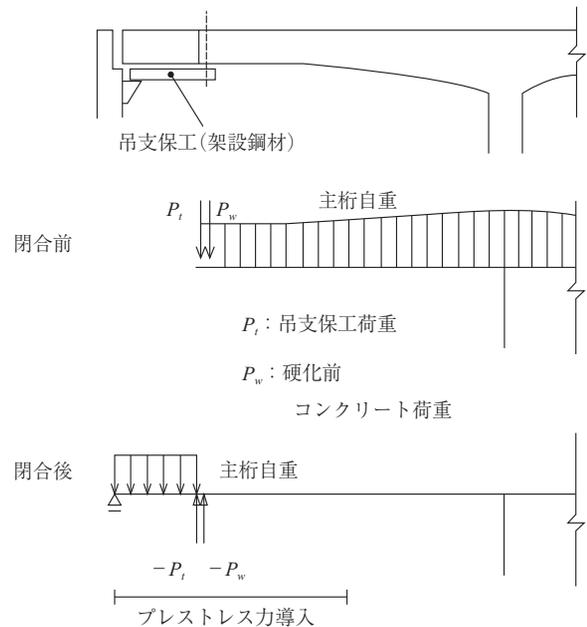


図 - 6 側径間吊支保工の骨組構造系と荷重状態

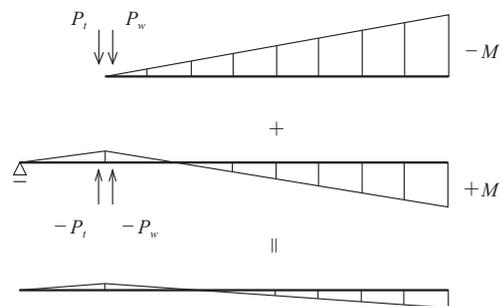


図 - 7 骨組構造系の変化による残留曲げモーメント

側径間閉合時のプレストレス力は不静定構造系に作用させることになるためプレストレスによる 2 次力を伴うこととなります。

(4) 吊支保工による中央径間中央部の架設

中央径間中央部の閉合は、移動作業車を撤去した後、架設荷重が小さくて張出し部先端の左右の変位を合せ易い吊支保工により行うことが一般的です。

中央径間中央部の架設を吊支保工で行う場合は、図 - 8 に示すように、吊支保工の分担重量および硬化前のコンクリートの分担重量が、張出し状態の骨組構造系に対する荷重 ( $P_i, P_w$ ) として作用します。骨組構造系の変化は、コンクリート硬化後にプレストレスを導入した時点で、張出し状態から中央径間ができあがった状態へと変化します。荷重は、中央径間ができあがった骨組構造系に対して、中央径間中央部の主桁自重とプレストレス力とを作用させ、吊支保工および硬化前のコンクリートによる分担荷重を除去する必要があります。

吊支保工および硬化前のコンクリートによる分担荷重は、側径間部の吊支保工架設と同様に、作用する時点と除去する時点とで骨組構造系 (不静定次数) が変化するため、断面力の一部が部材に残ることとなります。中央径間

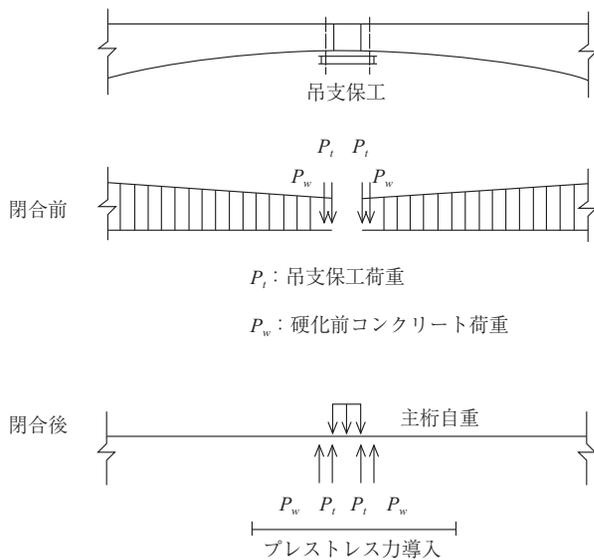


図 - 8 中央径間吊支保工の骨組構造系と荷重状態

閉合時のプレストレス力是不静定構造系に作用させることになるためプレストレスによる2次力を伴うこととなります。この2次力により一般的に中央径間部には正の曲げモーメントが発生するため、プレストレスによる効果が低減されることを念頭においてPC鋼材本数を仮定する必要があります。

(5) 移動作業車による中央径間中央部の架設

中央径間閉合を移動作業車で行う場合、図 - 9 に示すように、移動作業車の重量と移動作業車で架設するコンクリートの重量は閉合前の骨組構造系に作用させ、移動作業車を撤去する際の撤去重量は閉合後の骨組構造系に作用させる必要があります。

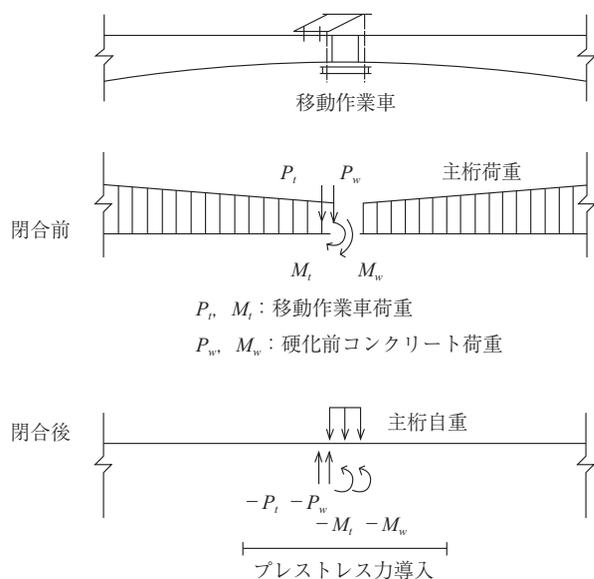


図 - 9 移動作業車による閉合時の骨組構造系と荷重状態

移動作業車による中央径間中央部の架設は、構造解析上は問題なく対応できますが、実際の架設においては張出し部先端の左右の荷重状態が異なるために変位を合せること

が難しく、高度な架設技術（上げ越し管理）が必要となります。したがって、この架設方法は、幹線道路や鉄道上で架設において、吊支保工架設への段取り替えによる落下物発生リスクを排除したい場合などに用いられています。

3. PC 橋に特有な荷重

3.1 プレストレス力とプレストレス2次力

設計で用いるプレストレス力には、プレストレッシング直後のプレストレス力と有効プレストレス力とがあることが講座の第2回で紹介されています。プレストレッシング直後のプレストレス力には主に架設中の検討に用いられます。有効プレストレス力には主に完成後の検討に用いられます。

これらのプレストレス力には、各設計断面において、PC鋼材の引張力の反作用としての軸圧縮力（ $P$ ）およびその軸圧縮力に断面図心からの偏心量（ $e_p$ ）を掛けた偏心モーメント（ $M_P = P \cdot e_p$ ）で表され、骨組構造系の如何にかかわらず算出できることから1次力と呼ばれることもあります。

単純桁のような静定構造の場合には、プレストレス力は1次力のみを考慮すればよいのですが、3径間連続ラーメン橋のような不静定構造の場合には、プレストレス力により部材の変形が拘束されるため不静定力が発生します。この不静定力を1次力に対して2次力と呼んでいます。

それではプレストレス力による断面力図といった場合どのような図が描かれているのでしょうか。なぜか1次力+2次力ではなく、わざわざ2次力のみを図を描くことが習慣となっています（講座第2回、図 - 10）。1次力を断面力図として表現しない理由として、PC橋の設計は単純桁から発展したため断面ごとに手計算できる1次力は図化する習慣がなく、また、1次力は他の荷重により発生する断面力とは異なり軸力が卓越しているために断面力での比較の必要性が薄く、断面力を飛び超えて曲げ応力度として利用されてきたためではないか、と筆者は想像しています。1次力による影響と2次力による影響は切り離せない同時に発生する現象であるにもかかわらず、曲げ応力度の表示においても項目を分けているのが一般的です。これに対してFEM解析を行った場合の曲げ応力度は一般的に1次力+2次力の値で表現されるので注意が必要です。

3.2 クリープおよび乾燥収縮の影響<sup>3)</sup>

PC橋の設計をもっとも複雑にしているものの1つが、クリープ・乾燥収縮の影響解析です。PC橋は、完成後においてもクリープ・乾燥収縮により時間とともに変形しようとし、張出し架設された連続ラーメン箱桁橋のような不静定構造物ではその変形が拘束されるために不静定力が発生します。電子計算機が発達していない時代は、1つのPC鋼材配置を決めてから、たわみ角法などの手計算により不静定力を算出するだけで1週間程度の労力を要しました。この計算を効率よく行うためにも、架設順序は図 - 2 に示すように固定されている方が望ましかったわけです。今ではマトリックス法等による電算プログラムが用意さ

れ、任意の架設順序でも数秒後には計算結果が得られるようになっていきます。

張出し架設されたラーメン橋のように架設途中で骨組構造系が変化する場合、骨組構造系が変化した後は、変化する前の骨組構造系におけるクリープ変形が拘束されるため、クリープが進行するとともに新たな不静定力が発生します。この不静定力は骨組構造系が変化する時のコンクリートの材齢から各部材のクリープ係数を求め、持続荷重による断面力を考慮して算出されます。その値は、図-10に示すように、張出し架設した場合の断面力と全体を支保工で架設した場合の断面力との範囲で変化します。

骨組構造系が変化する場合の乾燥収縮による不静定力

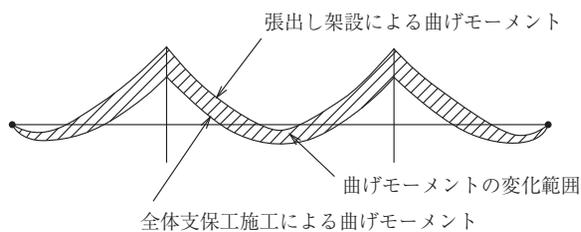


図-10 クリープの影響による曲げモーメントの変化

は、変化する骨組構造系ごとに、その架設期間に見合った乾燥収縮度を考慮して不静定力を算出し、累計していくこととなります。

プレストレス2次力およびクリープ・乾燥収縮による断面力の変化がイメージできるようになれば、PC技術者としては一人前といえるのではないのでしょうか。

#### 4. おわりに

講座の第2回と第3回でPC3径間連続ラーメン箱桁橋(主方向)を例にとり、骨組解析に必要な条件、モデル作成方法、結果の照査方法およびそれらの留意点について解説してきました。これらの内容が若手PC技術者の技術習得の一助となれば幸いです。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート橋編，pp.135-140，2012.3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋編，pp126-128，2012.3
- 3) 前田：コンクリート部材の設計法，橋梁と基礎，pp45-50，2013.5

【2015年2月18日受付】



刊行物案内

## コンクリート構造診断技術

コンクリート構造診断技術講習会テキスト

2015年4月

定 価 7,500 円／送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会