

第1回 設計(その1)

講師：篠崎 英二*

本講座の開設にあたって

プレストレストコンクリート（以下、PC）は、昭和27年わが国において初めて実用化されて以来、官学民一体の協力と努力によって発展してきました。その需要は順調に推移し、橋梁をはじめ、建築、上下水道タンク、防災施設、港湾および海洋構造物などに、その応用範囲は確実な広がりを見るに至っています（写真-1）。

PC構造物は一般のコンクリート構造物と異なり「コンクリートにプレストレスを与える」という特殊な工程が加わるため、設計・施工段階でいくつかの専門技術が必要とします。また、その良否はPC構造物の強度や耐久性などに、大きく影響します。

今回から開講する講座「わかりやすいPC技術」では、PCの計画・設計・施工および管理に関する業務に携わる技術者に必要とされる、とくに重要と思われる7項目（表-1）に分類した内容について解説をしていきます。本講座が幅広い知識をもつPC技術者を目指すきっかけになれば幸いです。（文責：講座部会）



写真-1 さまざまなPC構造物

* Eiji SHINOZAKI：川田建設(株) 技術部 技術課

表 - 1 講座内容 (予定)

項目	分類
1	設計
2	材料
3	コンクリートの施工
4	緊張
5	グラウト
6	架設
7	品質管理

1. はじめに

第1回のテーマとしているPC構造物の設計においては、①PC構造物の設計に関する一般的な知識と理解力、②工事にかかる諸条件・環境を加味し、経済性・安全性・施工性を総合的に判断する能力が技術者に要求されます。

今回の講座では、PC構造物の設計において必要とされる知識について、PC構造物が多く採用されている道路橋に着目して解説していきます。

2. 設計の基本

わが国で架橋される道路橋の設計では、技術基準として道路橋示方書（以下、道示）が用いられています。橋の設計を行ううえでつねに留意しなければならない基本的な事項として、道路橋設計の基本理念を「道示 I・共通編 1.3」において次のように示されています¹⁾。

橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の確実性及び容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。

「使用目的との適合性」とは、橋が計画どおりに利用できる機能のことで、通行者が安全で快適に使用できる供用性なども含みます。

「構造物の安全性」とは、橋梁に作用するさまざまな外力（荷重）に対して安全であることです。

「耐久性」とは、橋が経年的な劣化をしたとしても「使用目的との適合性」や「構造物の安全性」が大きく低下することなく要求される所要の性能が確保できることです。たとえば、大型車などが繰り返し載荷されることによる疲労や、鉄筋やPC鋼材の腐食などに対して十分な耐久性がなければいけません。

「施工品質の確保」は、前述の「使用目的との適合性」、「構造物の安全性」および「耐久性」を確保するために、確実な施工が行えることで、施工中の安全性も含みます。施工の良否が「耐久性」に及ぼす影響が大きいことを認識して、設計の段階で適切な施工品質を確保することが大切です。また、設計計算だけでは決定しないような鉄筋の配置や形状寸法といった構造細目についても、「耐久性」と密接に関係があるため、設計段階において慎重に検討する必要があります。

「維持管理の確実性及び容易さ」とは、供用中の日常点

検や定期点検、災害時での被災調査、劣化・損傷時での調査、補修・補強などの作業が、確実かつ合理的に行えることです。これは「耐久性」や「経済性」にも関連するため、設計段階で考慮します。また、平成24年の道示から「容易さ」に加えて「確実性」が求められており、確実な維持管理ができるように、点検が困難な箇所をできるだけ少なくなるようにするなどの配慮をすべきことが明確に示されています。橋の維持管理は、その供用期間全体にわたって点検・診断・措置のサイクルを安定して実施する必要があります。したがって、通常時において確実かつ容易に点検できることはもちろんのこと、災害時においても速やかに構造物の状態を点検などができるように、あらかじめ維持管理計画を策定する必要があります。

「環境との調和」とは、橋が架橋される地点周辺の社会環境や自然環境に及ぼす影響を低減させたり、周囲と調和させたり、あるいは周辺環境にふさわしい景観性をもたせることなどを示しています。道路橋の場合、個々の橋で判断するのではなく、路線全体で判断するなどの配慮が、設計段階で必要になります。

「経済性」に関しては、ライフサイクルコストを最小化という観点から、単に建設費を最小にするのではなく、維持管理段階で発生する費用までを含めた供用期間全体での総費用が、より小さくなるように心がけることが大切です。また、個々の橋ではなく関連する道路区間全体を考慮した経済性に配慮する必要があります。

道路橋の設計手法については「道示 I・共通編 1.6」において次のように示されています。

設計は、理論的な妥当性を有する手法、実験等による検証がなされた手法等適切な知見に基づいて行わなければならない。

平成14年の道示から性能規定型の技術基準が採用されているため、設計にはさまざまな解析手法を用いることができます。しかし、所要の性能が満足されることが検証できなければ、その解析手法の妥当性が評価できません。

一方で、さまざまな要求事項について従来の規定によらない手法を用いた場合に、それが本来要求する事項を満足するか否かの評価方法や判断基準が必要になりますが、現時点では必ずしも道示がそのような体系になっていません。このため、その判断は道示に示す方法と同等以上の性能を有することを一つの目安として、理論的な妥当性や実験などによる検証など適切な知見に基づいて行うこととされています。

なお、平成24年の道示より、構造設計上の配慮事項として、以下の事項に配慮して構造設計しなければならないと規定されています。

- (1) 橋の一部の部材の損傷等が原因となって、崩壊などの橋の致命的な状態となる可能性。
- (2) 供用期間中の点検及び事故や災害時における橋の状態を評価するために行う調査並びに計画的な維持

管理を適切に行うために必要な維持管理設備の設置。

- (3) 供用期間中に更新することが想定される部材については、維持管理の方法等の計画において、あらかじめ更新が確実かつ容易に行えるよう考慮しなければならない。

これらは、設計の基本理念とは別に、具体的な橋梁形式や構造設計の検討にあたって、少なくとも配慮することが望ましい事項として、新たに規定されました。

3. プレストレスの計算と断面力の算出

ここではPC構造物の設計において特有な項目となるプレストレスの計算と、不静定構造物を設計する場合に考慮

する断面力である不静定力について解説します。

3.1 プレストレスの計算

プレストレスングによってコンクリート構造物に導入されたプレストレス力は、以下のようなステップを追って徐々に損失（減少）していきます。

ステップ1：緊張時のプレストレス力

ステップ2：プレストレスング直後のプレストレス力

ステップ3：有効プレストレス力

図-1にプレストレスの損失の概要図を示します。

ステップ1の「緊張時のプレストレス力」はPC鋼材を緊張するとき油圧ジャッキによってPC鋼材に与えられるプレストレス力です。「プレストレスング中のプレストレス力」または「初期緊張力」とも呼びます。

ステップ2の「プレストレスング直後のプレストレス

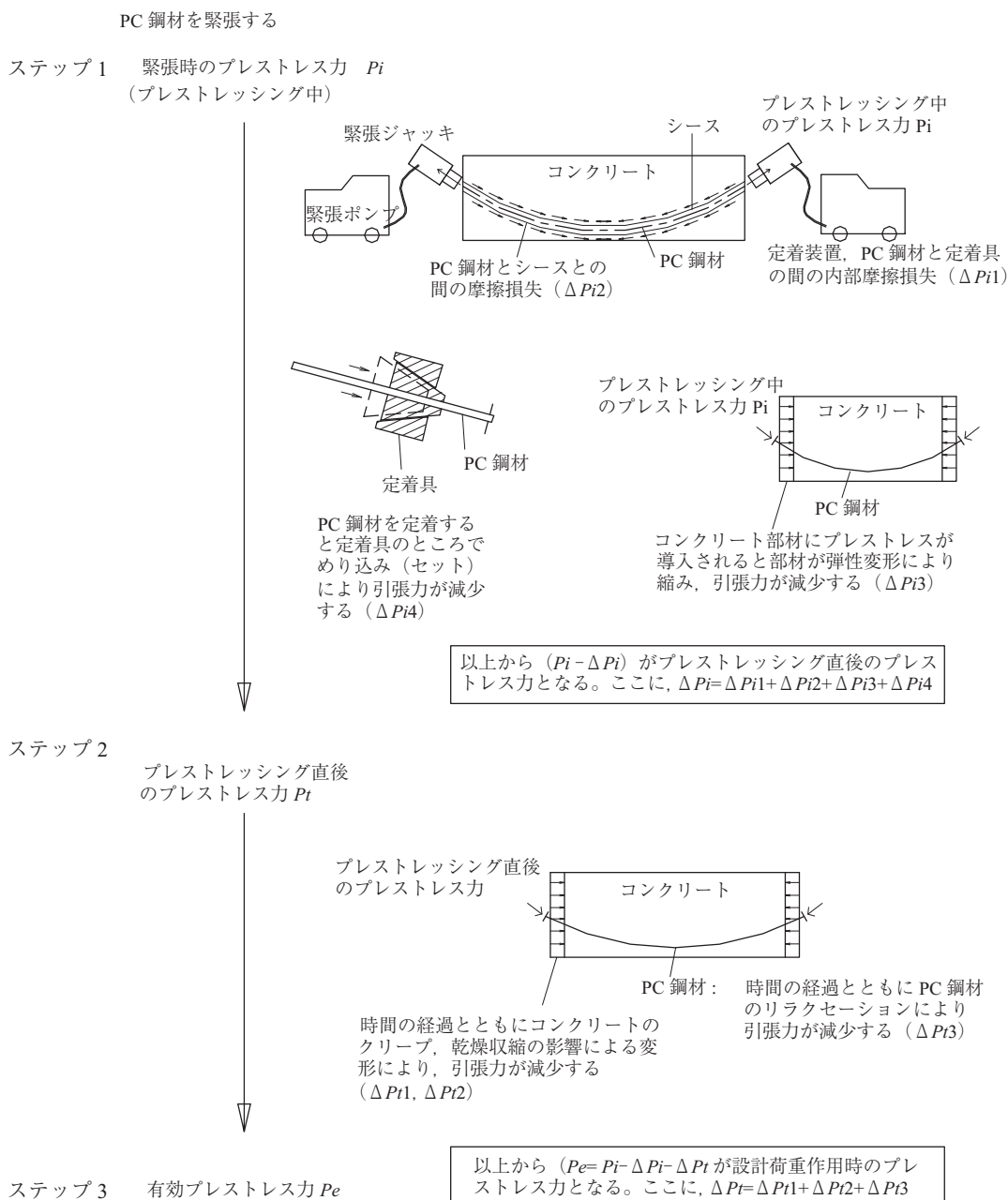


図-1 プレストレス力の損失概要図³⁾

力」は「緊張直後のプレストレス」または「導入時緊張力」とも呼びます。このプレストレス力は、ステップ1の状態から以下の影響を差し引いて算出します。

- (1) 緊張装置の内部摩擦損失およびPC鋼材と定着具との間の摩擦損失
- (2) PC鋼材とシースの摩擦損失
- (3) コンクリートの弾性変形による損失
- (4) 定着具のセットの影響による損失

プレストレス力は、油圧ジャッキに圧力を送る油圧ポンプに取り付けられた圧力計の示度によって管理されますが、この示度には、すでに(1)による損失が含まれているため、プレストレス力を算出するときには、この影響を考慮します。

また、プレストレス力によってPC鋼材が伸びる時にPC鋼材とシーソとの間に摩擦力が生じるため、この摩擦による影響として(2)による損失が生じます。この摩擦はPC鋼材を曲げて配置した位置における「角変化に関する摩擦」と直線配置した位置における「長さに関する摩擦」を考慮します。なお、外ケーブル構造の場合は、ケーブルの定着位置（定着部）と曲げ配置位置（偏向部）における「角変化に関する摩擦」の影響のみを考慮して、「長さに関する摩擦」の影響は無視します。さらに、プレストレス力によって部材は弾性変形（弾性短縮）するため、(3)による損失を考慮します。また、くさびによる定着の場合、プレストレス後にPC鋼材が戻ることによって定着具がめり込みます。このめり込み量を「セット量」または「Pull in」とよび、これによる損失として(4)を考慮します。

ステップ3の「有効プレストレス力」は、「設計荷重作用時のプレストレス力」または「有効緊張力」とも呼びます。このプレストレス力は、ステップ2の状態から以下の影響を差し引いて算出します。

- (5) コンクリートのクリープによる損失
- (6) コンクリートの乾燥収縮による損失
- (7) PC鋼材のリラクセーションによる損失

プレストレス力は、時間の経過に伴ってコンクリート部材が変形したり、PC鋼材に蓄えられていた力が変化したりすることにより徐々に変化していきます。このような変

化はコンクリートに特有の経時的な変形であるコンクリートのクリープと乾燥収縮、およびPC鋼材自体の引張力が変化していくPC鋼材のリラクセーションが原因です。

コンクリートのクリープとは、「一定な持続荷重のもとで変形が大きくなる」現象です。この変形はコンクリートが若材齢の時に大きく進行し、変化の具合は徐々に緩やかになっていきます。コンクリートの乾燥収縮とは、コンクリート中の水分が時間の経過とともに徐々に損失することによってコンクリートが縮んでいく現象です。

また、PC鋼材のリラクセーションとは、高い引張力を与えられたPC鋼材が長さが増えることなく引張力が減少していく特性のことを指します。

これらの損失を考慮してプレストレス力を算出することが、プレストレスの計算となります。図-2にプレストレスの経時的な変化の概要図を示します。

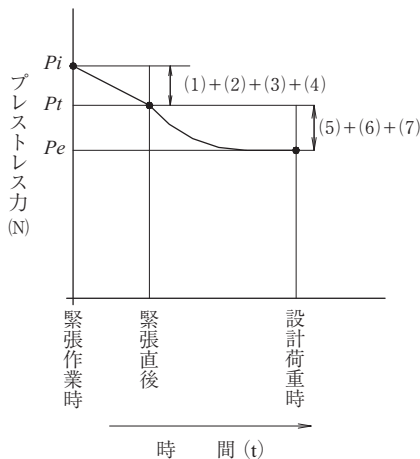
また、ステップ1～3の各段階において、PC鋼材に作用している引張応力度を照査する必要があります。

3.2 プレストレスによる不静定力

PC構造物の設計では、外力によって断面内に発生する引張応力を算出して、それを打ち消すためのプレストレスを計算するのが一般的な手順です。しかし、連続桁橋などの不静定構造物にプレストレス力を与えると、プレストレス力による主桁の変形が中間支点で拘束されるため、不静定力が生じます（図-3）。これをプレストレス2次力と一般に呼びます。この断面力は、プレストレスを計算した後でないと算出できないため、不静定PC構造物の設計では、繰り返し計算をすることによって部材断面を決定することになります。また、プレストレスによる不静定力は、桁高が変化している場合は断面変化の影響を受けるため、部材の剛性を適切に考慮する必要があります。

3.3 クリープおよび乾燥収縮による不静定力

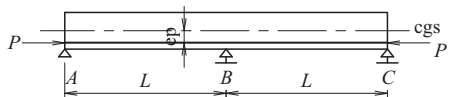
コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による変形が拘束される場合においても不静定力が生じます。この不静定力には外部拘束と内部拘束があり、前者は複数の固定支点をもつ連続橋、後者は断面を分割して製作される合成桁などが例として挙げられます。内部拘束が発生する主桁断面の事例を、図-4に示します。



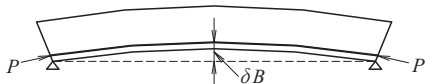
- | |
|------------------------|
| (1) 定着具の内部摩擦損失 |
| (2) PC鋼材とシーソの摩擦損失 |
| (3) コンクリートの弾性変形による損失 |
| (4) 定着具のセットの影響による損失 |
| (5) コンクリートのクリープによる損失 |
| (6) コンクリートの乾燥収縮による損失 |
| (7) PC鋼材のリラクセーションによる損失 |

図-2 プレストレス力の経時的変化

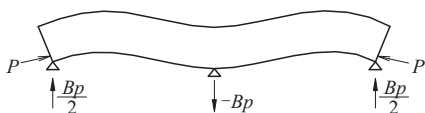
(a) 下縁に PC 鋼材を配置した場合



(b) PC 鋼材の緊張による桁上方への変位 (中間支点の拘束を無視)

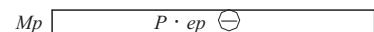


(c) 連続桁としての条件を満足させるために、中央支점에 B_p の反力を生じる ($\delta B=0$ とするための不静定力 B_p)

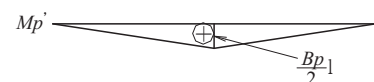


(d) プレストレス力による曲げモーメント

$$M_p = P \cdot e_p$$

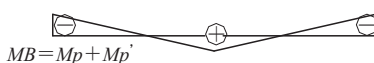


(e) プレストレス力による不静定モーメント



(f) プレストレス導入による曲げモーメント

$$M = M_p + M_p'$$



(g) せん断力 S ($B_p/2$)

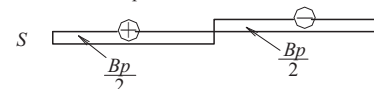
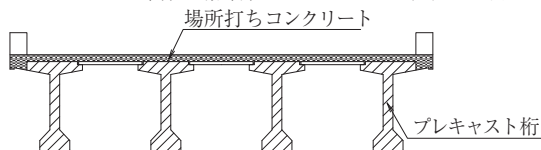


図 - 3 プレストレスにより生じる不静定力²⁾

(a) プレキャスト部材と場所打ちコンクリートを組合せた例



(b) 断面を分割施工する場合 2次施工

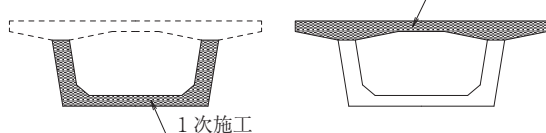


図 - 4 断面を分割する場合²⁾

また、構造物全体を一度に施工せずに、施工中の構造系と施工後の構造系が異なるような橋梁では、施工中の構造系におけるクリープ変形が、施工後の構造系で拘束されてしまう場合があります。この場合はクリープの進行とともに不静定力が大きくなっていきます。クリープによるひずみは

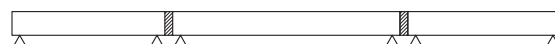
持続荷重によるひずみにクリープ係数を乗じて算出しますが、構造系が変化する場合は構造系が変化することによりクリープの影響を算出する必要があります。このように構造系が変化する橋梁形式としては、以下のような事例があります。

- (1) プレキャスト桁架設方式連続桁橋：プレキャスト単純桁を架設した後、支点上で連結させて連続桁とする桁橋 (図 - 5)。
- (2) 張出し架設工法：中間支点上から張出し施工をおこない、最後に先端を施工して連続桁を形成する工法。
- (3) 移動支保工式架設工法：連続桁を1径間ごとに、支保工を転用しながら施工していく工法。

3連の単純桁を架設する



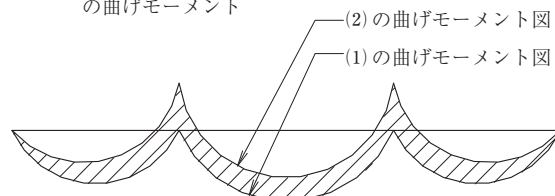
連続桁とするために接合する



(1) 各径間を単純桁として架設した場合の曲げモーメント図



(2) 各径間を支保工上で1体として架設した場合の曲げモーメント



(3) (1)の状態を施工途中で(2)の状態に構造を変更した場合、曲げモーメント図は斜線部の範囲内で変化する。

図 - 5 構造系変化によるクリープ不静定力¹⁾

4. PC 部材の照査

ここでは、道路橋の設計において基本となる道示Ⅲ・コンクリート橋編による PC 部材の照査方法の概要を紹介します。

構造物の安全性などの要求性能を確保するには、部材の強度、変形および安定について照査する必要があります。この時、照査すべき荷重の作用状態としては、設計荷重作用時と終局荷重作用時の2種類があります。

設計荷重作用時とは、構造物の施工中および供用時における荷重が作用する状態のことで、荷重により構造物に発生する応力度が許容応力度を超えていないかを照査しま

す。

終局荷重作用時とは、構造物が破壊するような荷重が作用する状態のことで、構造物に生じる断面力が部材の耐力を超えていないかを照査します。

部材に発生する断面力は、適切な解析モデルにより算出しますが、棒部材を用いた線形解析で算出するのが基本です。また、PC部材はプレストレスによって断面に圧縮力を与えることによってコンクリートにひび割れが発生しないようにしているため、断面力の解析時に必要となる部材の曲げ剛性、せん断剛性およびねじり剛性は、コンクリートの全断面を有効として算出することができます。

4.1 曲げモーメントまたは軸力が作用する部材の照査

PC部材の設計荷重作用時の照査では、以下の規定により部材の曲げ応力度を算出します。

- (1) 維ひずみ^{a)}は、中立軸（曲げ変形後も伸び縮みしない軸）からの距離に比例する。これを平面保持の法則という。
- (2) コンクリートの引張強度を考慮する。
- (3) PC鋼材とコンクリートとが一体化した後の断面係数は、PC鋼材とコンクリートのヤング係数比を考慮して算出する。
- (4) 断面内に設けられた部材軸方向のシース内のグラウト部分は強度や剛性がコンクリートよりも低いため、有効断面と見なさないものとする。

設計荷重状態には、架設時、死荷重作用時（永続的な荷重のみ載荷した状態）、または設計荷重作用時（自動車などの荷重が載荷した状態）などの各荷重状態で算出したコンクリート、鉄筋、およびPC鋼材に発生する応力度が、個々の荷重状態で規定する許容応力度以内であることを照査します。

PC部材の終局荷重作用時の照査では、軸方向力を一定とみなして、以下の規定により算出した部材の破壊抵抗曲げモーメントが、終局荷重作用時の曲げモーメントを上回っていることを照査します。

- (1) 維ひずみは、中立軸からの距離に比例する。
- (2) コンクリートの引張強度は無視する。
- (3) 破壊抵抗曲げモーメントの算出に用いるコンクリート、鉄筋、PC鋼材の応力度－ひずみ曲線は、従来より実績のある規定の応力度－ひずみ曲線を用いるものとする。

それぞれの荷重状態において、部材断面内に作用する曲げひずみと応力度の分布例を図-6に示します。

なお、PC鋼材とコンクリートとの付着が無い場合（アンボンドケーブルという）ではPC鋼材とコンクリートとの平面保持の法則が成立しないため、曲げモーメントに対するPC鋼材の抵抗分が小さくなることから、破壊抵抗曲げモーメントを付着のある場合で算出した値の70%として照査します。

また、コンクリート部材の外部にPC鋼材を配置する外ケーブル構造においては、外ケーブルとコンクリートとの平面保持の法則が成立しないことに加え、部材が変形することによって外ケーブルの位置（偏心量^{b)}）が変化するた

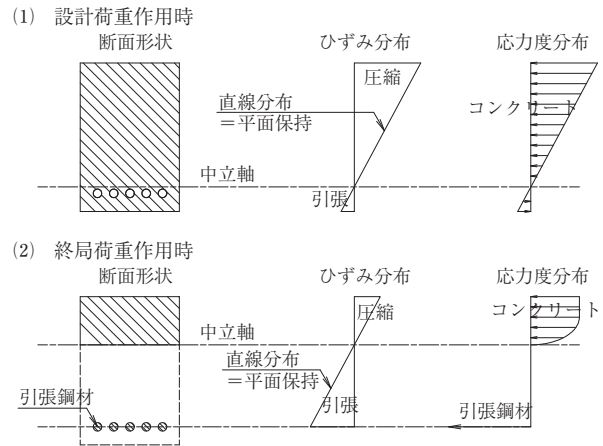


図-6 PC部材の曲げひずみ、応力度分布

め、外ケーブルの引張力を適切な方法で評価し、破壊抵抗曲げモーメントを算出する必要があります。

4.2 せん断力が作用する部材の照査

PC部材の設計荷重作用時では、せん断力によってコンクリートに斜めひび割れを生じさせないことが要求されています。設計荷重作用時では、ウェブコンクリートに発生する斜引張応力度が許容応力度を超えていないことを照査します。

PC部材の終局荷重作用時では、ひび割れの発生ではなく、部材がせん断破壊しないことが要求されています。そのため、ウェブコンクリートには斜めひび割れが発生すると考えて、トラス構造的な耐荷機構になると仮定します。終局荷重作用時ではトラス理論^{c)}に基づいて、せん断破壊に対する耐力である斜引張鉄筋（スターラップ）の降伏耐力とウェブコンクリートの圧壊耐力が終局荷重作用時に発生するせん断力以上であることを照査します。

5. 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 使用目的の適合性とは、橋梁が計画どおりに交通に利用できる機能のことであり、通行者が安全で快適に利用できる供用性などは含まない。
- ② 構造物の安全性とは、死荷重、活荷重、衝撃などの主荷重に対し、橋梁が適切な安全性を有していることを意味しており、風荷重や温度変化の影響などの従荷重は検討の対象としない。
- ③ 施工品質の確保とは、使用目的の適合性や構造物の安全性を確保するために確実な施工が行える性能を有するものであり、施工中の安全性は対象としない。
- ④ 維持管理の容易さとは、供用中の日常点検、材料の状態の検査、補修作業等が容易に行えることであり、これは耐久性や経済性とは無関係ではない。
- ⑤ アンボンドPC鋼材を用いる場合、プレストレスング直後のプレストレスから有効プレストレスを算出する

とき、コンクリートのクリープや乾燥収縮によるプレストレスの減少を考慮しなくてよい。

- ⑥ プレテンション部材の場合、プレストレス直後のプレストレスから有効プレストレスを算出するとき、PC鋼材のリラクゼーションによるプレストレスの減少を考慮しなくてよい。
- ⑦ 外ケーブル構造の場合、PC鋼材の引張端に与えた引張力からプレストレス直後のプレストレスを算出するとき、定着部および偏向部以外の自由長部では、PC鋼材とシースとの摩擦によるプレストレスの減少を考慮しなくてよい。
- ⑧ プレキャストセグメントの場合、プレストレス直後のプレストレスから有効プレストレスを算出するとき、コンクリートの乾燥収縮によるプレストレスの減少を考慮しなくてよい。
- ⑨ 支保工施工の連続橋を分割して施工する場合は、コンクリートのクリープの影響による不静定力は発生しないと考えてよい。
- ⑩ プレキャストの単純桁を運搬し、架設後に支点上でこれらを結合してPC連続桁とする場合、コンクリートのクリープ変形が拘束されて新たに不静定力が発生するので、設計上これを考慮する必要がある。
- ⑪ 構造系全体を一度に施工する場合、コンクリートのクリープにより生じる自重に対するたわみは、自重に対する弾性たわみにクリープ係数を乗じて求めることができる。
- ⑫ RC構造に使用するコンクリートと比べて、PC構造に使用するコンクリートの水セメント比は一般に小さく、乾燥収縮はRC構造と比較して小さくなるが、自己収縮は大きくなる傾向にあり、収縮を鉄筋が拘束することによるひび割れの発生について注意する必要がある。

【練習問題の解答】

①×②×③×④○⑤×⑥×⑦○⑧×⑨×⑩○
⑪○⑫○

6. おわりに

今回は、設計（その1）と題して、PC橋の設計に着目して設計の基本事項、断面力の算出および断面の照査方法などについて説明しました。次回は、設計（その2）と題して、PC橋の形状や鋼材の配置といった構造細目と、各構造形式における特徴について説明します。

注

- a) 維ひずみ：部材断面における部材軸方向のひずみ。木部材では繊維方向のひずみとなるため、繊維ひずみ（fiber strain）ともいう。
- b) 偏心量：部材の図心位置とPC鋼材の図心位置との間の距離。PC鋼材に与えた引張力に偏心量を乗じた値が、プレストレスによる曲げモーメントとして断面に作用する。
- c) トラス理論：斜めひび割れが生じたコンクリート部材において、斜め方向の引張力はせん断鉄筋（スターラップなどの斜引張鉄筋）で受け持ち、斜め方向の圧縮力はコンクリート（ウェブコンクリート）で受け持たせると仮定した理論。

参考文献

- ① 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012
- ② 日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧，1994
- ③ プレストレストコンクリート技術協会：プレレストコンクリート技術，2011

【2012年7月30日受付】



刊行物案内

東日本大震災 PC 構造物災害調査報告書

平成 23 年 12 月

定 価 9,000 円／送料 500 円
会員特価 7,000 円／送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会