

第4回 PC構造物の材料（その2）

講師：伊藤 朋紀*

1. はじめに

前回（その1）は、PC構造物の主な使用材料である、コンクリート（セメント、骨材、混和材料、水）と補強材（鉄筋やPC鋼材など）の種類と特徴について、解説しました。今回（その2）は、コンクリートの配合（調合）と硬化したコンクリートの特徴について解説します。

2. コンクリートの配合

コンクリートの材料および配合（建築分野では調合という）は、強度、耐久性、水密性、ワーカビリティなどを満足するように、製造プラントの制約条件や材料の入手し易さ、輸送コストを含めた経済性を考慮して定めなければなりません。以降、配合の定め方の流れ（図-1）に沿って説明します。

2.1 粗骨材の最大寸法の選定

コンクリート標準示方書【施工編】³⁾では、粗骨材の最大寸法は40mm以下とし、部材最小寸法の1/5、かつ、鉄筋の最小あきおよびかぶりの3/4以下とすることが規定されています。一般に、粗骨材の最大寸法が大きいほど同一スランブを得るのに必要な単位水量は少なくてすむので、同一強度を得るための単位セメント量を減らすことができます。また、乾燥収縮・クリープの低減にも有効です。したがって、打込みなどに支障のない範囲内で最大寸法の大きな粗骨材を選定することが望ましいのですが、レディーミクストコンクリート工場では、粗骨材の貯蔵施設との関係から、最大寸法が40mm、25mm、20mmに限定されている場合が一般的です。

2.2 セメントの種類、スランブ、空気量の選定

セメントの種類は、構造物の種類、環境条件、施工方法、工程などに応じて、強度発現速度、水和発熱量、収縮量などを考慮して選定します。とくにPC構造物の場合、プレストレスの導入により不具合が生じないように、緊張時のコンクリート強度を確保しなければなりませんので、強度発現速度の設定が重要となります。

コンクリートのスランブは、作業に適するコンシステンシー（固まる前のコンクリートの流動性の程度）が得られる範囲内で、できるだけ小さい値を選定します。スランブ

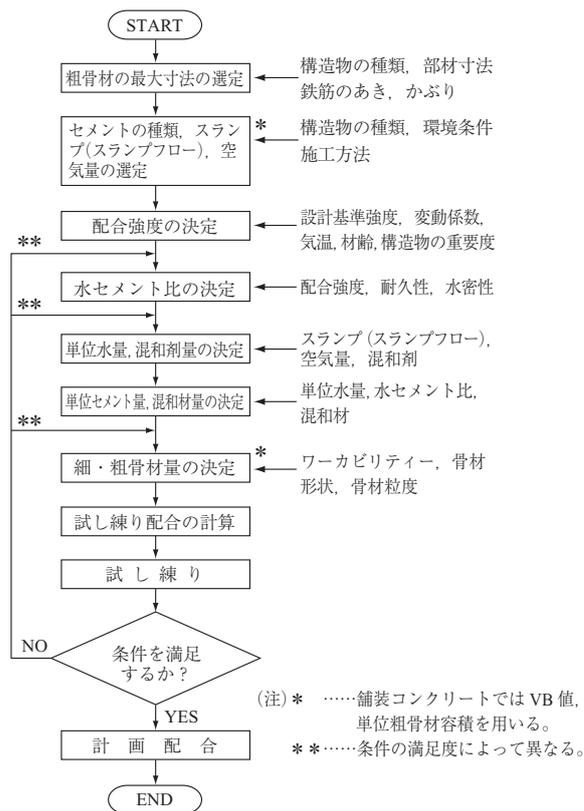


図-1 計画配合の定め方²⁾

の大きいコンクリートは、一般に材料分離が生じやすく、打込み後のコンクリートの品質が不均一となり、乾燥収縮も大きくなります。コンクリート標準示方書【施工編】では、スラブ部材、柱部材、梁部材、壁部材、PC部材における最小スランブを、施工条件（鋼材量、鋼材のかぶりまたは最小あき、締固め作業高さなど）に応じて定めています。

空気量が多いとワーカビリティの改善ができ、耐凍害性が向上しますが、強度が低下します。そのため、空気量は、要求されるコンクリートの品質に応じて定められた範囲内で選定する必要があります。コンクリート標準示方書【施工編】に空気量の標準値が示されています。

* Tomoki ITOU : (株) 安部日鋼工業 技術工務本部 技術開発部

建築分野では、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事⁴⁾ (以下、JASS5) にスランプや空気量について規定されています。JASS5 では、コンクリートの荷下ろし時のスランプは打込み箇所別に特記によることとしていますが、特記に記載がない場合は、18 cm 以下を標準としています。そのほかに軽量コンクリートや流動化コンクリート、高強度コンクリートなど、各種コンクリートについてスランプの値が規定されています。また、空気量は、普通コンクリートの場合 4.5 % を標準値としているほか、各種コンクリートについて空気量の値が規定されています。

2.3 配合強度の定め方

コンクリートの配合強度 (f'_{cr}) は、現場におけるコンクリート強度のばらつきを考慮して、設計基準強度 (f'_{ck}) に割増し係数を乗じて求めます。一般の場合、現場における圧縮強度の試験値は、設計基準強度を下回る確率が 5 % 以下となるように定めます。また、レディーミクストコンクリートの場合は、3 本 1 組の供試体の試験の平均値を 1 回の試験結果として、1 回の試験結果は購入者が指定した呼び強度値の 85 % 以上で、かつ、3 回の試験結果の平均値は購入者が指定した呼び強度値以上でなければなりません。

2.4 水セメント比の定め方

一般に水セメント比を小さくするほどコンクリートの強度、耐久性、水密性は向上します。ただし、同じスランプのコンクリートすなわち単位水量が一定の場合、水セメント比を小さくすると、単位セメント量が増大し、不経済になるとともに温度ひび割れが生じやすくなることにも注意が必要です。したがって、水セメント比は、コンクリートに要求される強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性および鋼材を保護する性能を考慮して、これらから定まる水セメント比のうちで最小の値を設定します (図 - 2)。

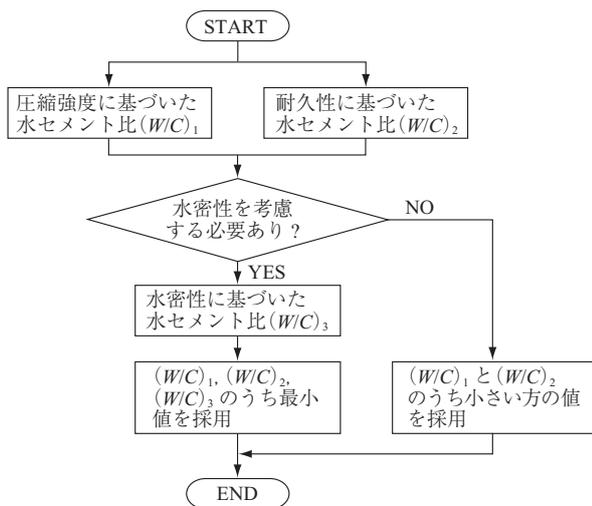


図 - 2 水セメント比の定め方²⁾

2.5 単位水量の定め方

コンクリートの単位水量は、所要のスランプを得ること

ができる範囲でできるだけ小さくなるように試し練りを行って定めます。AE 剤、減水剤などの混和剤を使用する場合には、混和剤の種類および使用量によって単位水量が変化するので注意しなければなりません。このときの単位水量は、原則として 175 kg/m³ (建築では 185 kg/m³) 以下とする必要があります。ダムコンクリートなどマッシュな構造物においては、温度応力によるひび割れを防ぐ意味からも、単位水量をできるだけ少なくして、単位セメント量を減じる必要があります。

2.6 単位セメント量の定め方

単位セメント量は、単位水量と水セメント比より定まりますが、単位セメント量が多くなると、温度応力や収縮によるひび割れが発生しやすくなり、構造物に有害な影響を与えるおそれがあります。強度の高いコンクリートを必要とする PC 構造物では、単位セメント量が大きいことが多いため、施工方法、養生方法などについて十分な検討を行う必要があります。また、道路橋示方書・同解説 III では、PC 部材の最小単位セメント量について表 - 1 を標準としています。プレテンション方式ではコンクリートと PC 鋼材の付着強度を十分に確保する必要があるため、最小単位セメント量がポストテンション方式より多く規定されています。

建築分野では、JASS5 に普通コンクリートの単位セメント量の最小値が 270 kg/m³ と定められているほか、各種コンクリートについてそれぞれ単位セメント量の最小値が規定されています。

表 - 1 最小単位セメント量 (kg/m³)⁵⁾

部材の種類		最小単位セメント量
PC 部材	プレテンション方式	350
	ポストテンション方式	300

2.7 細・粗骨材量の定め方

単位水量・単位セメント量が算定されると、コンクリートの所要の性能から空気量が定められているので、1 m³ のコンクリートを製造するために用いる材料の残りが骨材量となります。この骨材量を、細骨材率 s/a (s : 細骨材の絶対容積、 a : 全骨材の絶対容積) によって配分して、細・粗骨材量を定めます。細骨材率は、コンクリートの適正なワーカビリティを得るのにきわめて重要な要素であり、細骨材率が適正であれば、硬化したコンクリートの特性にも良好な結果をもたらします。最適な細骨材率は、骨材の形状と粒度、粗骨材の最大寸法、混和材料の有無などによって異なり、所要のワーカビリティが得られる範囲内で、単位水量が最小となるように試し練りによって定めます。

3. 硬化したコンクリート

コンクリートは、大小の骨材粒とその結合材であるセメントペーストの複合材料であり、セメントの水和反応によって、時間とともにその強度が発現していきます。そのため、硬化したコンクリートの品質は使用材料のほかにも、

配合、施工方法や養生条件などが大きく影響します。とくに PC では緊張により不具合が生じないように、緊張時に必要なコンクリートの強度は、プレストレスを与えた直後の最大圧縮応力度に対して、ある程度の余裕をもっていなければなりません。また、緊張材の定着部に大きな支圧応力が生じるため、所定の材齢における所要の強度を確保することが重要となります。さらに、変形状や体積変化の影響により、プレストレスが減少するので、これらも重要な要素となります。以下に硬化したコンクリートの特徴について述べます。

3.1 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は、一軸圧縮下における破壊強度と定義されており、水セメント比に相関があります。圧縮強度の推定式には、水セメント比説、セメント水比説、セメント空隙比説があり、コンクリートの配合決定の強度推定式では、セメント水比説が一般的に用いられています。

セメント水比説： $F_c = A + B (C/W)$

ここに、 F_c ：コンクリートの圧縮強度

C/W ：セメント水比

A, B ：定数

上式からも分かるように、水セメント比 (W/C) を小さくすると圧縮強度は大きくなります。

圧縮強度は、コンクリートの品質の確認、他の物性値(引張強度、弾性係数など)の推定、型枠取り外し時期やプレストレス導入時期の決定に用いられます。圧縮強度に影響する要因には、以下の事項があげられます。

- ① 強度はセメント強さに比例して増大し、骨材の石質、粒度、粒形、表面状態などにも影響を受けます。たとえば、川砂利より表面が粗な砕石を用いると、水セメント比が同一の場合、10～20%強度が増します。
- ② 水セメント比が同一の場合、粗骨材の最大寸法が大きくなると、また、空気量が大きくなると、強度が低下します。
- ③ 練混ぜ時間が長いほど、強度は大きくなります。
- ④ 強度は、セメントの水和反応の進行にともない、経過時間(材齢)によって増大し、材齢7～14日程度まで増加率が大きく、材齢28～90日程度で安定してきます。
- ⑤ 湿潤養生をすると強度は長期にわたって増進し、大気中に放置すると強度増進が減少します。
- ⑥ 一般に、養生温度が高いほど、初期材齢の強度が大きくなりますが、長期材齢における強度は小さくなります。

圧縮強度の試験方法は JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に規定されており、その供試体の作り方について JIS A 1132 (コンクリート強度試験用供試体の作り方) に規定されています。以下に示すとおり、供試体の寸法や形状は強度に影響を及ぼします。

- ① 供試体形状が相似であれば、寸法の小さいものほど強度は大きくなります。
- ② 供試体の直径に対する高さの比 (H/D) が小さいほど強度は大きくなります。
- ③ 角柱供試体は円柱供試体より強度が小さくなります。

- ④ 供試体製作時の不均質や充填不足、加圧面の平滑でない仕上げは、強度の低下をもたらします。
- ⑤ 試験時の荷重速度が速くなれば見掛けの強度が増大します。そのため、JIS では荷重速度を毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$ と規定しています。
- ⑥ 試験時の供試体温度が低いほど、また、表面が乾燥しているほど強度は大きくなります。

3.2 その他の強度

(1) 引張強度

引張強度は、円柱供試体を横にして、上下から加圧する JIS A 1113 (コンクリートの割裂引張強度試験方法) で求めます(図-3)。引張強度は圧縮強度の $1/10 \sim 1/13$ 程度であり、高強度になるとその比が小さくなります。

(2) 曲げ強度

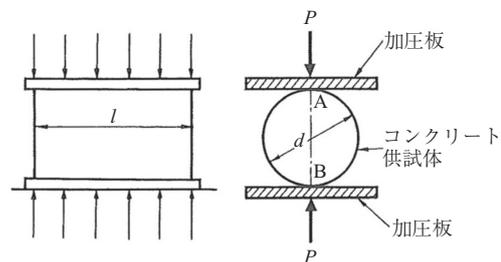


図-3 割裂引張試験²⁾

曲げ強度は、角柱供試体 ($15 \times 15 \times 53 \text{ cm}$ または $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$) を用い、3等分点荷重する JIS A 1106 (コンクリートの曲げ強度試験方法) で求めます。曲げ強度は圧縮強度の $1/5 \sim 1/8$ 程度です。

(3) せん断強度

せん断強度は、試験により直接求めることは困難ですが、圧縮強度および引張強度より、モールの応力円を用いて間接的に求めることができます。

(4) 付着強度

鉄筋とコンクリートの付着力の要素は、鉄筋とセメントペーストとの付着力、鉄筋とコンクリートとの間の側圧力に基づく摩擦力、鉄筋表面の機械的抵抗力です。コンクリートの付着強度は、水平に鉄筋を配置した場合、異形棒鋼で圧縮強度の $1/4 \sim 1/5$ 程度、普通丸鋼で $1/8 \sim 1/10$ 程度です。鉛直に配置した鉄筋の付着強度は水平鉄筋の $2 \sim 4$ 倍程度です。これはブリーディングにより、水平鉄筋の下側に空隙ができるためです。コンクリートと鉄筋との付着強度を求める試験方法として、土木学会規準 JSCE G 503 (引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法) では鉄筋の引抜き試験を規定しています。

(5) 支圧強度

橋脚の支承部や緊張材定着部などでは、局所的に圧縮力が作用します。この場合のコンクリートの圧縮強度を支圧強度といいます。支圧強度は局部加圧試験によって推定できます。

(6) 疲労強度

静的破壊強度以下の応力度でも、繰り返し作用すると破

壊に至る現象を疲労破壊といいます。繰返し回数が無限となっても破壊を生じない最大の応力度を疲労限度といい、鋼材には疲労限度はありますが、コンクリートには明確な疲労限界がないとされています。コンクリートの200万回疲労強度は、静的強度の約55～65%であるといわれています。

3.3 変形状

(1) 応力-ひずみ曲線

コンクリートは完全な弾性体でないため、応力とひずみの関係は非線形性を示します。ペーストや骨材の応力-ひずみ曲線は最大応力に達するまではほぼ直線ですが、モルタルやコンクリートは低応力の段階から曲線となります(図-4)。これはペーストと骨材の界面に発生する微破壊の進行によるものです。最大応力に達するひずみは0.2%程度、破壊に至るひずみは0.3～0.4%で、コンクリート強度によらずほぼこの程度となります。

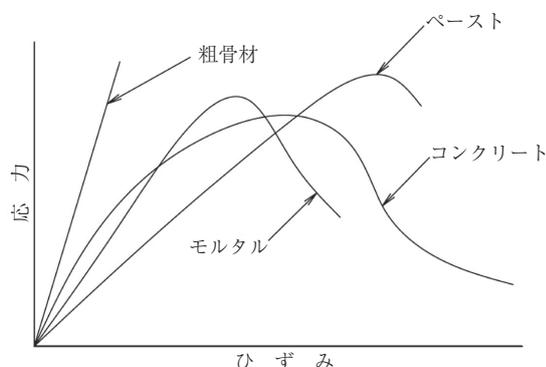


図-4 構成材料の応力-ひずみ曲線

(2) 弾性係数

コンクリートの弾性係数(ヤング係数)は、圧縮強度試験で得られた応力-ひずみ曲線から求めることができます。このような静的載荷で得られる弾性係数を静弾性係数といい、コンクリートが高強度になるほど大きくなります。JIS A 1149(コンクリートの静弾性係数試験方法)では、圧縮強度の1/3の点とひずみが 50×10^{-6} のときの点を結ぶ勾配を割線弾性係数と呼び、これを弾性係数としています。また、供試体に縦振動またはたわみ振動を与えて、その一次共鳴振動数を測定するJIS A 1127(共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数および動ポアソン比試験方法)による方法や供試体中に伝わる弾性波速度を測定する方法によって得られる弾性係数を動弾性係数といいます。一般的に、動弾性係数は静弾性係数より大きな値を示します。動弾性係数は非破壊検査の手法として利用されます。

(3) ポアソン比

ポアソン比はコンクリートが高強度になるほど小さく1/5～1/7程度ですが、一般には、弾性範囲内で0.2としています。ただし、引張を受け、ひび割れを許容する場合には0とします。

(4) せん断弾性係数

せん断力に対する弾性係数をせん断弾性係数といい、剛性率ともいいます。せん断弾性係数は静弾性係数とポアソン比から算出することができます。

3.4 体積変化

(1) クリープ

クリープは、持続荷重のもとで時間の経過とともにひずみが増大する現象であり、増大したひずみをクリープひずみといいます。クリープは圧縮持続荷重だけでなく、引張持続荷重のもとでも生じます。図-5はクリープの時間的進行を表したもので、弾性ひずみ、クリープひずみ、回復または非回復ひずみに分けられます。持続荷重による弾性ひずみに対するクリープひずみの比率をクリープ係数といいます。クリープひずみは、周辺の湿度、部材断面の形状寸法、コンクリートの配合、応力が作用するときのコンクリートの材齢などの影響を受けます。湿潤状態よりも乾燥状態のほうが大きく、載荷時の材齢が若いほど大きくなります。また、静的な破壊荷重より小さい荷重でも、持続して加えるとコンクリートが破壊にいたる場合があります。これをクリープ破壊と呼びます。PCでは、プレストレスを与えた直後からクリープによるプレストレス力の減少が生じるため、設計時にクリープの影響を考慮しなければなりません。

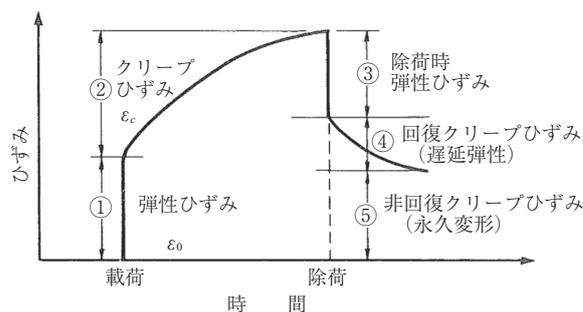


図-5 クリープ-時間曲線²⁾

(2) 乾燥収縮と自己収縮

モルタルやコンクリートは、吸水によって膨張し、乾燥によって収縮します。コンクリートの乾燥収縮は、コンクリートのペースト量、単位水量、部材寸法、相対湿度、乾燥期間などの影響を受けます。骨材による影響も著しく、また、単位水量が大きいと乾燥収縮は大きくなる傾向にあります。一方、自己収縮は、セメントの水和の進行にともなう体積変化をいい、セメント量、水セメント比などの影響を受けます。自己収縮の考慮が必要なコンクリートには高流動コンクリート、高強度コンクリート、マスコンクリートなどがあげられます。

近年、収縮に起因する有害なひび割れが全国的に問題となってきましたが、原因のひとつに、良質な骨材の枯渇してきたことがあげられています。コンクリートの収縮によりプレストレス量が減少しますので、PC構造物では、あらかじめ設計段階でこの影響が考慮されています。PRC構造などのように鉄筋量の多い場合、収縮によって過大な

応力が発生すると、有害なひび割れが生じるおそれがあり、使用するコンクリートに対しては、事前にその収縮を照査することが重要です。

(3) 水密性

コンクリートの水密性は、透水や透湿に対する抵抗性を表す性能ですが、同時に、一般のコンクリートではその緻密さを表す指標となります。コンクリートの水密性の評価指標としては、透水係数が用いられます。透水係数が小さいほど水密性が良いこと表します。

4. 演習問題

今回の講座のまとめとして、○×形式の演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アレンジしています）。

- ① 水セメント比は、配合強度、耐久性および水密性などを考慮して求めた値のうち最小のものを選定する。
- ② 単位水量の多いコンクリートでは単位セメント量が大きくなり、ひび割れが生じやすく、材料分離を起こしやすくなる。
- ③ 一般に単位水量は、スランプが同一の場合、粗骨材の最大寸法が大きいかほど少なくなる傾向がある。
- ④ 単位セメント量が多くなると、温度応力や収縮によるひび割れが発生しやすくなり、構造物に有害な影響を与えるおそれがある。
- ⑤ コンクリートのクリープ、乾燥収縮を小さくするためには、粗骨材の最大寸法はなるべく小さくするのがよい。

- ⑥ コンクリートの圧縮強度は、水セメント比を大きくすると大きくなる。
- ⑦ コンクリートの弾性係数は、コンクリートの強度によらずほぼ一定である。
- ⑧ 供試体の寸法が大きくなれば、強度は小さくなる。
- ⑨ 試験時の載荷速度が大きくなれば、見掛けの強度は小さくなる。
- ⑩ 強度試験時に供試体が乾燥している場合と、濡れている場合とでは強度が異なる。

【演習問題の解答】

①○②○③○④○⑤×⑥×⑦×⑧○⑨×⑩○

5. おわりに

前回と今回の2回にわたり、PC 構造物の材料に関する解説を行いました。こうした材料の特性を正確に理解せず使用すると、構造物に不具合が発生することがあります。使用材料やコンクリートの特性を正しく理解することが、優れた PC 構造物をつくる第一歩となります。

今回は、コンクリートの施工に関して説明します。

参考文献

- 1) 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，2011.7
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'11，2011.9
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2007 制定
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2009.2
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ，平成 24 年 3 月

【2013 年 1 月 29 日受付】



刊行物案内

PC 箱桁外ケーブルに用いる防錆被覆 PC 鋼材の性能照査指針

平成 24 年 4 月

定 価 2,800 円／送料 300 円

会員特価 2,200 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