

プレストレスト コンクリート 設 計 法 (1)

猪 股 俊 司*

1. 設計計算の方法に関する事項

(1) 一般事項

プレストレスト コンクリート部材では、土木学会プレストレスト コンクリート設計施工指針（以下単に指針と呼ぶことにする）に従って設計計算を実施しなければならない。プレストレスト コンクリート部材では、合成応力度は設計荷重による曲げ応力度とプレストレスとの和として求められるものであつて、この両応力度は互いに反対の符号を有するものであり、またこれらの両応力度は普通の場合大体同じ程度の大きさの値であるから、合成応力度の計算結果の精度は、これらの両応力度の計算値の正確さの程度に大きい関係を有するものである。すなわち鉄筋コンクリートの設計計算の場合よりも両応力度計算の基礎となる荷重状態をより一そう正しく決定することが大切である。数値計算の正確さはそれほど特別な意味を有するものでなく、普通計算尺によつて十分である。実際の応力度に大きい影響をあたえるものは構造物の実際の状態（荷重の仮定、支承の状況、等）であることをよく理解しておく必要がある。

(2) 設計荷重をうけた場合の応力度の計算

応力度の計算にあつては引張側のコンクリートも引張応力度をうけることができるものとして部材の全断面を考えて計算を実施する（28条）。これはプレストレスの作用によつて、合成応力度はコンクリートの引張強度以下となるようにしてあるから、コンクリートの引張側にもひびわれが生じないので、このように仮定して正しいのである。

各荷重状態によつておこる応力度は、これをべつべつに計算し、これらを一表として最悪の応力状態がえられるように組み合わせる方法が計算には便利である。

指針に示されているように計算すべき応力状態として、従来の鉄筋コンクリート部材と異なる新しい2つの事項を考えなければならない。すなわち、第一はプ

レストレッシングの作用による応力度であり、第二はコンクリートの乾燥収縮、クリープによつておこる応力度である。時間の経過に従つて鋼材とコンクリートとの間に応力度の移動がおり、PC 鋼線の引張応力度が減少するので、最初にあたえたプレストレスも減少する。この計算には指針4節の規定に従い、持続的に作用しているすべての荷重を考慮する必要がある。すなわち、プレストレスおよび静止荷重（または死荷重）がこのプレストレスの減少に関係するものである。

指針 32 条にいかなる状態において応力度の計算をしなければならないかが示してある。またこの際6章にあたえてある許容応力度をこえてはならないことは当然である。

(3) ひびわれにたいする安全度

ひびわれにたいする安全度を確保するには、設計荷重をうけたときの合成応力度の計算結果におこる、部材引張部の引張応力度がそれらの許容応力度を超えないようにすることが第一である。また指針 46 条、47 条、48 条、等の規定によると、この際つぎの条件を満足するような構造にしなければならない。

「パーシャルプレストレッシングが許されるためには、部材引張部に適当量の鋼材（PC 鋼線および引張鉄筋）が一樣に引張部に配置されていて、設計荷重をうけたときおこる部材引張力の全引張力を、あたえられた鋼材の許容応力度をこえない範囲でうけられるようにしなければならない。」

付着のない場合とか、付着のある場合でも PC 鋼線が部材引張部に一樣に分布されていない場合には、1.35 倍の設計荷重をうけておこるコンクリートの全引張力をうけられるように鉄筋を配置しておかなければならない。このときの鉄筋応力度としてはその降伏点応力度までが用いられる。

付着のない場合には、最小限コンクリート容積の0.3%の鉄筋（コンクリート 1m² 当り約 25 kg）を用いなければならない（40条）。付着のある場合でも部材引張部の縁に近く PC 鋼線が配置されていないときには、同様に最少限の鉄筋を用いることが望ましい。

(4) 破壊荷重の計算と破壊にたいする安全度

指針31条〔解説〕に示してあるように、プレストレスト コンクリート部材の破壊にたいする安全度は、単に設計荷重をうけたときの応力度が許容応力度をこえないという条件が満足されるだけでは十分に確保されることにはならない。曲げ破壊にたいしては 50 条の規定により、2×（静荷重+動荷重+温度変化）にたいして安全度を確かめる必要がある。

セン断破壊にたいする安全度の計算の場合には 51 条の曲げによる破壊安全度の計算の仮定と全く異なるものであつて、引張側のコンクリートをも考慮して、

*正員、極東鋼鉄コンクリート振興KK設計部長

1.75×(静荷重+動荷重+温度変化)の荷重をうけた場合の斜引張応力度を計算し(53条),これが許容応力度(表13の値)を超えるかどうかを検討する。もし,この表の許容値をこえるならば腹鉄筋を配置して,斜引張応力度をうけられるようにしなければならない。

2. 曲げモーメントをうけるプレストレストコンクリートハリの設計に用いられる近似計算式

(1) 一般

構造物は,その構造方式,外観,経済性等を考慮し,定められた荷重によつて構造物に最悪の応力度状態を生ずるように,これらを組合せた設計荷重を用いて部材の断面寸法が定められるものである。

一般の場合曲げをうけるハリでは最大曲げモーメントのおこる断面の断面寸法を決定するのが普通である。セン断の影響は一般に小さいものである。それは,コンクリート打ちおよびPC鋼線の配置に十分なだけの巾を有するように腹部巾が決定され,セン断力の大きい区間では腹部の巾を拡大することができるからである。また曲げ上げたPC鋼線を配置すると,セン断力はいちじるしく減少させられて,斜引張応力度は普通の場合許容応力度をこえることはない。

(2) 断面形状にたいする死荷重曲げモーメントと活荷重曲げモーメントとの比の影響

プレストレッシングの目的は,断面におこる最大引張応力度をなるべく全部打ち消すことができるようにすることであつて,最小の曲げモーメントをうけているときは部材引張縁に最大の圧縮応力度が作用しており,部材圧縮縁には最小の応力度(小さい圧縮応力度または小さい引張応力度)が作用しているものである。

したがつて断面寸法を決定する場合に,活荷重曲げモーメントが全曲げモーメント(死荷重曲げモーメント+活荷重曲げモーメント)に比較して大きいほど適当な断面を選定することはなかなか困難である。これは活荷重の特に大きい場合とか,スパンの短い場合などで死荷重の小さいときにおこることである。

全曲げモーメントにたいする活荷重曲げモーメントの大きさは,断面形状を定めるのにいちじるしい影響がある。すなわち,活荷重曲げモーメントが比較的小さい場合には,応力度の変化の大きさが小さいから,プレストレッシングによつて容易に引張応力度を消去することができるから部材引張部断面を小さくすることができ,一般の場合にはT形断面のような断面型式が有利である。

活荷重曲げモーメントが増加するに従つて部材引張部断面を増加させる必要がある。しかし,一般に部材圧縮部断面よりは小さいもので十分である。このよう

な場合には,腹部巾を下方に向つて拡大させたT形断面,またはI形断面,または箱型断面,等が用いられるようになる。

矩形断面はプレストレストコンクリートハリとしては一般に不適当なものである。これは断面積と断面2次モーメントとの比がプレストレストコンクリートハリにたいしては適当でないからである。T形, I形のような断面形状は力学的にはもちろん有利であるが,型ワグ費が増加する。しかし自重が小さくなる利点があるほかに,同じ断面2次モーメントの断面を考えると,プレストレッシングによつて大きい圧縮応力度を部材にあたえることができるようになるので,荷重による大きい引張応力度も容易に打ち消すことができるようになる。

矩形断面がプレストレストコンクリート断面として不利な理由は,中立軸付近の断面にもプレストレスをあたえることになるが,これは荷重による曲げ応力度については,全く役に立たないものであるからである。

(3) 近似計算式の基礎

断面は設計荷重をうけたときに許容応力度の条件を満足しなければならないと同時に,所要のひびわれにたいする安全度および破壊にたいする安全度を有するようにならなければならない。ひびわれにたいする安全度の要求は一般の場合,断面形状の決定には大きい影響をもつていない。同様に破壊にたいする安全度の要求もコンクリート断面の決定には大きい関係はなく,ただPC鋼線断面積の決定にたいして大いに関係があるものである。

したがつて所要の断面寸法決定の近似計算にあつては,設計荷重による曲げモーメントと,このときの許容応力度とを用いて計算を進めて十分である。

ごく述似的には2.5.に述べるような破壊にたいする安全度の条件を満足するようにして近似設計を実施する方法もある。これによると,部材圧縮部断面積と,PC鋼線の所要断面積とが定められるが,設計荷重をうけたときの許容応力度の条件を,満足できるようにするためには,部材引張部断面を適切に選定する必要がある。このためには設計上相当の経験が必要である。

(4) 断面寸法決定の近似式

部材の上,下,両縁においては,コンクリート応力度について,つぎの条件を満足する必要がある。

a) プレストレスと最小荷重とをうけているとき(一般にはプレストレス+死荷重の組み合わせ)下縁には最大圧縮応力度が作用している。この圧縮応力度はプレストレスをあたえたのち時間の経過にしたがつて,その大きさは次第に減少するものである。このコンク

リートの乾燥収縮，クリープ，PC 鋼線のレラクセーションが終つたのちに作用している圧縮応力度が，活荷重によつておこる引張応力度を消去するに十分な程度の大きさのものでなければならない。

b) 上縁については，普通の場合これに作用する最大圧縮応力度の大きさが断面決定の基礎となるものである。またプレストレスをあたえた直後（すなわちプレストレス+死荷重の組み合わせ）において上縁に引張応力度がおこる場合には，この引張応力度が許容値をこえないようにしなければならない。

すなわち，つぎの4つの条件式を満足できるように部材断面寸法を定める必要がある。

- (i) $\sigma_{cmax}M' + \sigma_{ce}' \leq \sigma_{cae}$
- (ii) $\sigma_{cmax}M + \sigma_{ce} > 0$ または σ_{cae}'
- (iii) $\sigma_{cmin}M + \sigma_{ct}' > 0$ または σ_{cat}'
- (iv) $\sigma_{cmin}M + \sigma_{ct} \leq \sigma_{cat}$

ここに $\sigma_{cmax}M, \sigma_{cmin}M$: それぞれ最大曲げモーメント（一般には $M_t + M_d$ ）および最小曲げモーメント（一般には M_d ）をうけたときの下縁応力度

$\sigma_{cmax}', \sigma_{cmin}'$: 上記の場合の上縁応力度
 $\sigma_{cae}, \sigma_{cae}'$: それぞれコンクリートの乾燥収縮，クリープ，PC 鋼線のレラクセーションが終つたのち，設計荷重をうけたときのコンクリート許容応力度
 $\sigma_{cat}, \sigma_{cat}'$: それぞれプレストレスをあたえた直後のコンクリート許容応力度

上式ではすべて代数和を考え，圧縮応力度は正，引張応力度は負とする。以上の (i)~(iv) 式を変形して，ごく大体の所要断面係数は次式で定められる。

$$\frac{I_c}{y_c'} > \frac{\max M - \min M}{0.925 \sigma_{cae} - \sigma_{cae}'} \dots\dots\dots (2.1a)$$

$$\frac{I_c}{y_c} > \frac{\max M - \min M}{0.775 \sigma_{cae} - \sigma_{cae}'} \dots\dots\dots (2.1b)$$

上式における許容応力度 $\sigma_{cae}, \sigma_{cae}'$ としては指針6章 表-6 の 1.2. および 表-9 の 9. にあたえられた数値を用いる。

(2.1 a) (2.1 b) から，断面係数の所定値が定まると，ある選定されたハリの高さ， $h = y_c + y_c'$ にたいして，所要の断面2次モーメントはつぎのようになる。

$$I_c = \frac{h}{\frac{1}{\left(\frac{I_c}{y_c'}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{I_c}{y_c}\right)}} \dots\dots\dots (2.2)$$

断面図心位置は，つぎの式で定められる。

$$y_c' = \frac{I_c}{\left(\frac{I_c}{y_c'}\right)} = h \times \frac{\left(\frac{I_c}{y_c}\right)}{\left(\frac{I_c}{y_c}\right) + \left(\frac{I_c}{y_c'}\right)} \dots\dots\dots (2.3)$$

コンクリート断面は上記の断面2次モーメントおよび図心位置を有するようにこれを決定しなければならない。もちろん断面積はまだ未知であるから，一義的に断面寸法を決定できることにはならないが，実際の施工上の観点から，部材引張部の面積および腹部巾などはおのづから定まるものである。それは，これらの部分には PC 鋼線，鉄筋，等が多量に集中して配置されるから，コンクリートが容易に打ち込まれ，また完全に締め固められるようにするためには，おのづから，その断面寸法が定まるものである。したがつてこれらの事情によつて部材引張部の大きさが定まると当然，上記の条件を満足する断面寸法が定まるものである。

実際の構造物においては，ケタが他と全く独立して用いられることは少ないのであつて多くの場合ケタの上突縁は構造物の床スラブとして用いられるようにされる場合が多いものである。したがつて上突縁の大きさはこの方面の応力度の要求から定まる場合もある。これら種々の事項を考慮して，所要の断面2次モーメントおよび図心位置を有するような断面寸法を決めることはなかなか困難であり，また相当の経験が必要とするものである。一般には数回計算をくり返してはじめて所望の断面がえられるようになるのである。

(5) PC 鋼線断面積および位置決定の近似計算

(2.4) において述べたように，設計荷重をうけたとき，許容応力度の条件を満足するようにするために必要な PC 鋼線最小断面積は，つぎの式でごく述似的に求まる。

フルプレストレスングにたいして

$$A_p = \frac{\max M + 30 \text{ kg/cm}^2 \times \left(\frac{I_c}{y_c}\right)}{z \sigma_{pa}} \dots\dots\dots (2.4 a)$$

パーシャルプレストレスングにたいして

$$A_p = \frac{\max M}{z \sigma_{pa}} \dots\dots\dots (2.4 b)$$

PC 鋼線の許容応力度 σ_{pa} は指針 58 条の規定によつて，つぎの値のうちの小さい方を採用しなければならない。

$$\sigma_{pa} \leq 0.60 \times (\text{引張強度})$$

$$\sigma_{pa} \leq 0.80 \times (\text{降伏点応力度})$$

(2.4) 式の z はつぎのようになる。

$$z = \frac{\left(\frac{I_c}{y_c}\right)}{A_c} + e_p = \frac{i_c^2}{y_c} + e_p \dots\dots\dots (2.5)$$

コンクリート図心位置と PC 鋼線図心位置との距離 e_p は PC 鋼線配置の方法，各 PC 鋼線間の間隔，等に

関係して定められるものであつて、最大曲げモーメントをうける断面において e_p をできるだけ大きく選ぶ。一般の場合 z は、ごく近似的につきのように仮定してよい。

- $z \approx 0.57 h$ …… 矩形断面にたいして
- $z \approx 0.65 h$ …… 対称断面で比較的厚さのあつた断面の場合
- $z \approx 0.70 h$ …… T形断面および普通の箱型断面の場合
- $z \approx 0.80 h$ …… 非常にウェブの中の大きい、腹部巾のせまい、T型断面および巾の広い箱型断面の場合

設計荷重をうけたときコンクリートの許容応力度の条件を満足するように PC 鋼線断面積を定めただけでは十分ではない。特に圧縮縁巾の大きい曲げ部材の場合とか、大きい引張応力度をうける曲げ部材の場合には、破壊にたいする安全度を確保するためには、上記の方法で定められた PC 鋼線断面積を用いたのでは不十分なことがある。これを検討する場合には 51 条によつて計算をする。有効高さ $d = y_c' + e_p$ を用いて、破壊時の内力のモーメント腕長 z はごく近似的につきのように求められる。

$$z \approx 0.9 d \dots\dots\dots (2.6)$$

破壊にたいする安全度の条件を満足させるために必要な PC 鋼線の断面積はつきのようにして定まる。

$$A_p = 2.0 \times \frac{\max M}{\sigma_{pu} \cdot 0.9 d} \dots\dots\dots (2.7)$$

この式は付着のある場合であつて付着のない場合には σ_{pu} の代りにつき値を用いなければならない (51

条 3)。

$$\sigma_p = \sigma_{pw} + 1400 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここに、 σ_{pw} : 設計荷重の作用したときの PC 鋼線の応力度

以上の (2.7) 式は、中立軸位置 x が、破壊のときに (0.40~0.50) d 以下となる場合に適用できるものである。すなわち PC 鋼線断面積がコンクリートの圧縮側断面積に比して過大でない場合に成立するものである。

PC 鋼線断面積が大きいときには、部材圧縮側のコンクリートの圧縮破壊によつて、部材は破壊をおこすものである。

このような場合には PC 鋼線断面積をどれほど増しても、部材の破壊にたいする安全度は増加するものではない。一般にこのような設計は不経済なものである。このような部材圧縮部のコンクリートが圧縮破壊をおこすときの PC 鋼線断面積比の大体の標準としてはつぎの式であたえられる。

$$\frac{A_p}{\bar{b}d} > 0.4 \cdot \frac{\sigma_{cs}}{\sigma_{pu}} \dots\dots\dots (2.9)$$

すなわち、普通に用いられる程度の材料の強度にたいしては、1% 以上のときである。


以上の近似計算法によつて断面寸法、PC 鋼線断面積、等を定めたならば、以下 3. に述べる方法によつて設計荷重をうけたときの応力度の計算を進める。

最初に仮定した断面寸法、PC 鋼線断面積、等が不適当であれば、これを多少変更して再び 3. の応力度計算をくり返す。

—— 講座 について ——

本号より猪股俊司氏の「プレストレスト コンクリート設計法」を 4~5 回にわたり連載いたします。なるべくわかりやすく執筆していただく予定ですから御期待下さい。

なお講座に対する御希望なり、御質問は編集部あてとどしどしお寄せ願います。本欄を充実させるために会員各位の御支援を願つてやみません。



第2号
キルン完成!

使つて安心

三菱セメント

本社 東京都千代田区丸の内1の4 (新丸ビル)
電話 (27) 1341-9・1441-9

工場 福岡県八幡市黒崎 (電話) 八幡 3750-2
営業所 大 阪・広 島・福 岡