

プレストレスト コンクリート
設 計 法 (2)

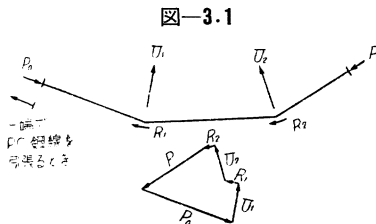
猪 股 俊 司*

3. 応力度計算法

(1) 計算の基本事項

a) プレストレスingの作用はこれを外力として取扱い応力度計算をする。すなわち、プレストレスingの作用はそれ自身で釣合の条件を満足するものであつて、静定構造物においては部材反力の変化を生じさせることはない。

b) PC 鋼線にあたえた引張力はその定着点では PC 鋼線軸方向に作用し、また PC 鋼線を折り曲げた点ではコンクリートに圧力をおよぼすとともに摩擦力を生ずる。これらは部材にたいして外力として取扱うことができる (図-3.1)。

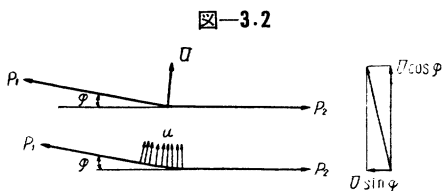


c) 摩擦はプレテンションingの場合にはおこらない。これに反してポストテンションingの場合には摩擦力の影響を考える必要がある。

d) PC 鋼線が その方向を変える 折れ曲り点において、コンクリートにおよぼす力 U は折れ曲り角の 2 等分線の方向に作用し、その値はつぎのようになる。

$$U = P \cdot \text{arc } \varphi \dots\dots\dots (3.1)$$

折れ曲り点に半径 r の円弧を挿入したときは、一樣な圧力 u をコンクリートにおよぼす (図-3.2)。



* 正員、極東鋼弦コンクリート振興KK設計部長

$$u = \frac{P}{r} = \frac{Pd \varphi}{dS} \dots\dots\dots (3.2)$$

普通のハリの場合、水平分力 $U \sin \varphi$ はこれを無視しても大きい誤りとはならない。ただ垂直方向分力だけを考え、 φ の小さい場合には U が垂直方向に作用すると考えてよい。

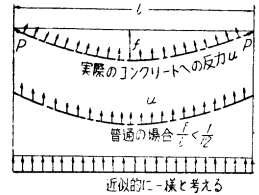
円弧の場合には一樣分布荷重として

$$u = \frac{P}{r} \dots\dots\dots (3.3)$$

を考えてよい。

放物線状の PC 鋼線を用いたときは垂直方向に一樣分布荷重 $u = \frac{8f \cdot P}{l^2}$ が作用していると考えると十分正確である。ただし、 $f/l > 1/12$ のときには u の作用する傾斜の影響を考慮する必要がある (図-3.3)。

図-3.3



e) コンクリートの乾燥収縮、クリープによる付着のある PC 鋼線応力度の減少は、各断面において異なるものでこれをべつべつに計算する。なぜならば、コンクリートのクリープは、各断面において作用しているコンクリート応力度の大きさに関係するものだからである。

(2) 曲げおよび軸方向力をうける部材断面の性質および諸元の計算

一般に、プレストレスト コンクリート構造物の応力度計算にあつては、いかなるコンクリート部分もこれを無視してはならない。

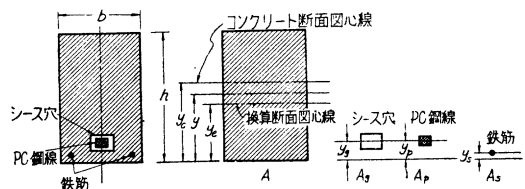
a) プレテンションingの場合：応力度を計算するときに用いられる断面の性質としては、換算断面についてこれを求める必要がある。それはプレストレスをあたえる当初から、コンクリートの PC 鋼線との間には付着があるからである。

b) ポストテンションingであつて付着をおこさせる場合：プレストレスの計算とプレストレスをあたえるときに使用している死荷重による応力度の計算には、シーの穴をさし引いたコンクリート断面についての諸元を用いる。

付着をおこさせたのちに作用する荷重にたいしては換算断面についての諸元を用いる。

c) 断面の諸元の計算方法：シーの穴断面面積はそれ

図-3.4



それぞれ図心に集中しており、それら自身の軸に関する断面 2 次モーメントは無視できるものとする (図-3.4 参照)。

A: 部材の全断面積 (シース穴, PC 鋼線, 等は無視して求めたもの)

A_g : シース穴断面積

A_p : PC 鋼線断面積

A_s : 鉄筋断面積 (普通の場合無視可能)

A_c : $A - A_g$ (コンクリート断面積)

A_e : $A + (n-1)A_p$ (換算断面積)

I: 部材の全断面 (A) について求めた断面 2 次モーメント

y : A の図心と下縁との距離

y_g : シース穴断面積 A_g の図心と下縁との距離

y_p : PC 鋼線図心と下縁との距離

y_s : 鉄筋図心と下縁との距離

y'_c : コンクリート断面 A_c の図心と下縁との距離

y'_e : 換算断面 A_e の図心と下縁との距離

コンクリート断面について:

$$A_c = A - A_g \quad y_c = \frac{Ay - A_g \cdot y_g}{A_c}$$

$$I_c = I + A(y_c - y)^2 - A_g(y_c - y_g)^2$$

断面係数 Z_c, Z_c'

$$Z_c' = \frac{I_c}{h - y_c} \quad Z_c = \frac{I_c}{y_c}$$

換算断面について:

$$A_e = A + (n-1)A_p \quad y_e = \frac{Ay + (n-1)A_p \cdot y_p}{A_e}$$

$$I_e = I + A(y_e - y)^2 + (n-1)A_p(y_e - y_p)^2$$

断面係数 Z_e, Z_e'

$$Z_e' = \frac{I_e}{h - y_e} \quad Z_e = \frac{I_e}{y_e}$$

(3) 断面の曲げ応力とプレストレスとの合成応力度

a) プレテンションニングの場合:

$$\sigma_c' = \frac{P}{A_e} + \frac{M_p + M_d + M_l}{Z_e'}$$

$$\sigma_c = \frac{P}{A_e} - \frac{M_p + M_d + M_l}{Z_e}$$

b) ポストテンションニングであるので付着をおこさせる場合

$$\sigma_e' = \frac{P}{A_c} + \frac{M_p + M_d}{Z_c'} + \frac{M_l}{Z_e'}$$

$$\sigma_e = \frac{P}{A_c} - \frac{M_p + M_d}{Z_c} - \frac{M_l}{Z_e}$$

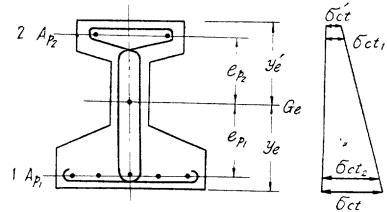
ここに M_p : プレストレッシングによる曲げモーメント $= p \cdot e_p$

PC 鋼線とコンクリートとの間に付着のある場合の鋼線応力度は、荷重によつておこる PC 鋼線位置のコンクリート応力度の n 倍となる。

コンクリートの縁維応力度の最悪の状態を求めるには、コンクリートの乾燥収縮, クリープ, PC 鋼線のレラクゼーションのおこる前およびおこつたあとの状態につき、最悪の荷重状態と組合せて応力度計算を実施する。

プレテンションニングの場合には PC 鋼線が上下 2 段に配置されることが多い (図-3.5)。このような場合のプレストレスおよび PC 鋼線応力度を求めるにはつぎのような影響係数 $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{21}$, 等を用いて計算するのが便利である。

図-3.5



ここに $\alpha_{i,j}$ は、 j 段目の PC 鋼線単位引張応力度が i 段目の PC 鋼線応力度におよぼす影響を示すものであつて、図-3.5 のような場合つぎのように表わされる。

$$\alpha_{11} = n \frac{A_{p1}}{A_e} \left(1 + \frac{A_e}{I_e} \cdot e_{p1}^2 \right) \dots \dots \dots (3.4 a)$$

$$\alpha_{12} = n \frac{A_{p2}}{A_e} \left(1 - \frac{A_e}{I_e} \cdot e_{p2} \cdot e_{p1} \right) \dots \dots \dots (3.4 b)$$

$$\alpha_{22} = n \frac{A_{p2}}{A_e} \left(1 + \frac{A_e}{I_e} \cdot e_{p2}^2 \right) \dots \dots \dots (3.4 c)$$

$$\alpha_{21} = n \frac{A_{p1}}{A_e} \left(1 - \frac{A_e}{I_e} \cdot e_{p2} \cdot e_{p1} \right) \dots \dots \dots (3.4 d)$$

以上の係数 α を用いて、各 PC 鋼線位置のコンクリート応力度, $\sigma_{ct1}, \sigma_{ct2}, \dots$ PC 鋼線応力度 $\sigma_{pt1}, \sigma_{pt2}, \dots$, 等を求める。引張台に PC 鋼線を引張るときの引張応力度を各段の PC 鋼線ごとに変化させ、 $\sigma_{p11}, \sigma_{p12}, \dots$ 等とする場合にはコンクリート応力度はつぎの式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ct1} &= \frac{1}{n} [\sigma_{p11}\alpha_{11} + \sigma_{p12}\alpha_{12} + \dots] \\ \sigma_{ct2} &= \frac{1}{n} [\sigma_{p11}\alpha_{21} + \sigma_{p12}\alpha_{22} + \dots] \end{aligned} \right\} \dots (3.5 a)$$

PC 鋼線応力度はつぎの式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{pt1} &= \sigma_{p11} - [\sigma_{p11}\alpha_{11} + \sigma_{p12}\alpha_{12} + \dots] \\ \sigma_{pt2} &= \sigma_{p12} - [\sigma_{p11}\alpha_{21} + \sigma_{p12}\alpha_{22} + \dots] \end{aligned} \right\} (3.5 b)$$

(3.5 a) 式によつて求められたコンクリート応力度から、プレストレスは直線分布であるという仮定を用いて、 $\sigma_{ct}, \sigma_{ct}'$ が計算できる。

下突縁部に数段の PC 鋼線がある場合、簡単のために、これらの下突縁部の全 PC 鋼線図心位置 e_{p1} を用いて α を計算しても大きい誤差は生じない。

(4) コンクリートの乾燥収縮, クリープ, による応力度

コンクリートの乾燥収縮，クリープによる応力度を計算するには，34条・35条の規定によつて，プレストレスをあたえるときのコンクリートの硬化の程度（コンクリートの圧縮強度で示す），部材のおかれる気象条件，等によつて定まるクリープ係数 φ を用いて計算を実施しなければならない。

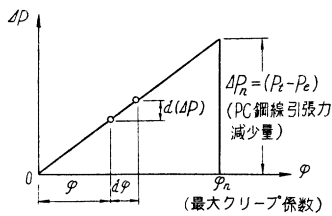
コンクリートの乾燥収縮，クリープによる付着のあるプレレスト コンクリートにおける PC 鋼線引張応力度の減少量を近似的に計算するには，つぎの方法によるのが便利である。

a) PC 鋼線が一段に配置されているとき，または大体集中して配置され，すべての PC 鋼線図心位置に全 PC 鋼線が集中していると考えられるとき：プレストレスの引張力 P_t はその有効引張力 P_e まで直線的に減少するものと仮定する（図-3.6）。

PC 鋼線位置の

図-3.6

コンクリートのプレストレスによる弾性ヒズミを ϵ_{ct} とする。コンクリートのクリープによるヒズミ増加は次式で表わされる。



$$\epsilon_{ct} \varphi_n \dots \dots \dots (3.6 a)$$

$d\varphi$ の間に PC 鋼線引張力は $d(\Delta P)$ だけ減少するから，これによる弾性ヒズミおよびクリープによるヒズミはそれぞれつぎのようになる。

$$-\epsilon_{ct} \cdot \frac{d(\Delta P)}{P_t} \dots \dots \dots (3.6 b)$$

$$-\epsilon_{ct} \cdot \frac{d(\Delta P)}{P_t} \cdot \varphi \dots \dots \dots (3.6 c)$$

図-3.6 から明らかなように

$$\frac{d(\Delta P)}{\Delta P_n} = \frac{d\varphi}{\varphi_n} \dots \dots \dots (3.7)$$

の関係が成立する。

したがつて PC 鋼線位置のコンクリートの短縮ヒズミはつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_c' &= \epsilon_{ct} \varphi - \int_0^{\varphi_n} \epsilon_{ct} \frac{d(\Delta P)}{P_t} - \int_0^{\varphi_n} \epsilon_{ct} \frac{d(\Delta P)}{P_t} \varphi \\ &= \epsilon_{ct} \varphi - \frac{\epsilon_{ct}}{P_t} \int_0^{\varphi_n} (1 + \varphi) \Delta P_n \cdot \frac{d\varphi}{\varphi_n} \\ &= \epsilon_{ct} \varphi - \frac{\Delta P_n}{P_t} \cdot \frac{\epsilon_{ct}}{\varphi_n} \left(\varphi_n + \frac{\varphi_n^2}{2} \right) \\ &= \epsilon_{ct} \varphi - \epsilon_{ct} \frac{\Delta P_n}{P_t} \left(1 + \frac{\varphi_n}{2} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.8 a)$$

持続荷重 ω_d と，コンクリートの乾燥収縮とによる PC 鋼線位置コンクリートのヒズミは (ω_d によつては伸び，乾燥収縮によつては短縮である)，つぎのようになる。

$$\Delta \epsilon_c'' = -\epsilon_{\omega_d} \varphi_n + \epsilon_s \dots \dots \dots (3.8 b)$$

ここに， ϵ_{ω_d} ：持続荷重 ω_d による PC 鋼線位置のコンクリート弾性ヒズミ

(3.8 a)，(3.8 b) 式から PC 鋼線位置コンクリートの全ヒズミ変化量はつぎのようになる。

$$\Delta \epsilon_c = -\epsilon_{\omega_d} \varphi_n + \epsilon_s + \epsilon_{ct} \varphi_n - \epsilon_{ct} \frac{\Delta P_n}{P_t} \left(1 + \frac{\varphi_n}{2} \right) \dots \dots \dots (3.9)$$

PC 鋼線ヒズミの変化 $\Delta \epsilon_p$ は，PC 鋼線引張力減少量 ΔP_n に比例する。すなわち，

$$\Delta \epsilon_p = \epsilon_{pt} \cdot \frac{\Delta P_n}{P_t} \dots \dots \dots (3.10)$$

ここに， ϵ_{pt} ：プレストレスをあたえた直後の PC 鋼線ヒズミ

(3.9) (3.10) 式を等置して， ΔP_n が求められる。

$$\frac{\Delta P_n}{P_t} = \frac{\epsilon_s + \varphi_n (-\epsilon_{\omega_d} + \epsilon_{ct})}{\epsilon_{ct} \left(1 + \frac{\varphi_n}{2} \right) + \epsilon_{pt}} \dots \dots \dots (3.11 a)$$

応力度を用いて表わすと

$$\frac{\Delta P_n}{P_t} = \frac{\epsilon_s E_p + n \varphi_n (\sigma_{ct} - \sigma_{c\omega_d})}{n \sigma_{ct} \left(1 + \frac{\varphi_n}{2} \right) + \sigma_{pt}} \dots \dots (3.11 b)$$

σ_{ct} ：PC 鋼線位置コンクリートのプレストレスをあたえた直後のプレストレス

$\sigma_{c\omega_d}$ ：持続荷重による PC 鋼線位置のコンクリート応力度

σ_{pt} ：プレストレスを与えた直後の PC 鋼線引張応力度
以上の近似解は Dischinger が微分方程式を解いて求めた結果と大差のない結果をあたえ，十分実用的なものである。

ポストテンションングであつて付着をおこさせる場合でも，上記の近似計算式を適用してよいものである。付着をおこさせることが，プレストレスをあたえてから，非常にあつた場合にはもちろん計算が異なつてくるが，普通の場合，プレストレスをあたえた直後に付着をあたえるものであるから，上式が十分適用できるのである。

b) プレテンションング部材のように PC 鋼線が上下両突縁に配置され二段になつている場合（図-3.5 に示したような場合）のコンクリートの乾燥収縮，クリープによる PC 鋼線引張応力度の減少を厳密に求めることは非常に複雑である。このような場合近似的につぎの方法を用いてよい。

コンクリート断面の任意の点の維応力度は，プレストレスをあたえた直後では， $\sigma_{ct} + \sigma_{c\omega_d}$ である。これが最後には， $\sigma_{ct} + \sigma_{c\omega_d} + \sigma_c \varphi$ となるものである。この場合の $\sigma_c \varphi$ はコンクリートの乾燥収縮，クリープによるコンクリート応力度である。これら応力度の変化は φ について直線的であると仮定する。すなわち，応力度状態の最初と最後との間に，クリープをおこす平均の応力度 σ_{cm} が

存在する。すなわち、この応力度によるコンクリートのクリープによるヒズミは

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\sigma_{cm}}{E_c} \cdot \varphi_n$$

となる。このヒズミ ε_{φ} と乾燥収縮ヒズミ ε_s とはコンクリートに付着している PC 鋼線にたいしてつぎのような応力度の減少を生ずることになる。

$$\Delta \sigma_p = (\varepsilon_{\varphi} + \varepsilon_s) E_p \quad (3.12 a)$$

$$\frac{1}{n} \Delta \sigma_p = \sigma_{cm} \varphi_n + \varepsilon_s E_c \quad (3.12 b)$$

この場合近似的に σ_{cm} はつぎのように表わされる。

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ct} + \sigma_{c\omega d} + \frac{1}{2} \sigma_{c\varphi} \quad (3.13)$$

以上の式を用いる場合に、引張応力度は負、圧縮応力

度は正、とする。実際の計算にあたっては、 σ_{cm} を仮定し、(3.12 b) 式によつて $\Delta \sigma_{p1}$, $\Delta \sigma_{p2}$ を求め、コンクリート応力度をつぎの式で求める。

$$\sigma_{c\varphi_1} = \frac{\Delta \sigma_{p1}}{n} \alpha_{11} + \frac{\Delta \sigma_{p2}}{n} \alpha_{12} \quad (3.14 a)$$

$$\sigma_{c\varphi_2} = \frac{\Delta \sigma_{p1}}{n} \alpha_{21} + \frac{\Delta \sigma_{p2}}{n} \alpha_{22} \quad (3.14 b)$$

この $\sigma_{c\varphi_1}$, $\sigma_{c\varphi_2}$ を (3.13) 式に代入して、 σ_{cm} , σ_{cm2} 等を求め、再び (3.12 b) 式に代入、これを用いて、(3.14 a), (3.14 b) 式で計算をくり返して近似度を上げてゆく方法が用いられる。(3.13) 式で σ_{cm} を見積る場合に第一近似値として、次のように仮定してよい。

$$\sigma_{cm} \approx (0.8 \sim 0.9) \times (\sigma_{ct} + \sigma_{c\omega d}) \quad (3.15)$$

以上の近似計算によつて、コンクリートの乾燥収縮、クリープによる応力度が求まる。

書 評

コンクリート及 施工方法 吉田徳次郎著 丸善刊 鉄筋コンクリート

著者の前著「鉄筋コンクリート施工法(昭和17年改訂)」以来すでに14年を経過し、その間コンクリート施工法の分野において新しい事項が次々として明らかとなり、これら新技術の現場適用がさかんとなってきた。すなわち、セメント混和材としてのフライアッシュ、ポゾリスの利用、アルカリ骨材反応の新事実、AEコンクリートの発達、プレバクトコンクリートの発明、コンクリート工事現場管理への推計学の応用、寒中コンクリート施工における電気養生の応用、レデーミックスコンクリートの利用、等多数の新技術の発達は、いちじるしいものがある。したがってこれらのすべての事項についての解説をした著書がコンクリート技術者一般から広く望まれていたところである。著者は本書において、上記各種新技術全般にわたり詳細な記述をし、新技術適用にあたって誤りがないように各項につきすみずみまで注意が払われている。すなわち、配合設計の章においては、AEコンクリート、フライアッシュを用いる場合等について例題について説明し、読者の理解を容易にしてある。AEコンクリートについては特に一

章をもうけ、AEコンクリートの一般的な性質、施工上の注意のほか空気量の測定方法について説明をし、現場技術者の便がはかられている。

レデーミックスコンクリートは、最近急速に利用されるようになってきたが、これら製造、運搬、試験、検査、等の細目について述べ、利用者に誤りのないよう注意されている。

養生の項において、膜養生、蒸気養生、電気養生、について新しい知識をもととして読者の注意をひいている。特に電気養生については、電極の配置方法、所要電力、配線、通電中のコンクリート温度測定、等につき多数の図版により説明を加え、現場技術者がただちにこれらによつて計画を作り、施工できるようになっている。

プレバクトコンクリート、真空処理コンクリート等、新工法施工法、また施工されたコンクリートの性質について説明を加えてある。

本書においては、舗装コンクリート、重力ダムコンクリート等の施工法については、特に章を別としてくわしく述べてある。従来これらの事項については、それぞれの分野の著

書のなかに簡単に述べてある程度にすぎなかつた。著者はその豊富な経験をもととして、著者の体温を感じるような記述は特に意義ふかい。

現場管理の方法への推計学応用について平易な説明を加え、現場管理の良否がいかに配合設計強度に大きい影響をおよぼすかを明らかとし、現場技術者の注意を促している。また標準示方書(現行のもの)の規定にあるように、配合設計強度を設計強度の15%増とした場合、変異係数によつて強度の保証がどのように変動するかを明らかとしている。この点は従来現場技術者にはあまり理解されていなかった点であつて、本書の説明は将来のコンクリート施工管理の上から非常に有益なものである。

最後にコンクリート試験法を述べ、現場技術者の日常試験の手引として役立つようにしてある。

以上要するに、本書は学生の教科書としてはもちろん、現場技術者のハンドブックとして非常に有益である。特に巻末の索引は便利でありまた親切である。

著者：正員(元会長)・工博・九州大学名誉教授、B5判(182×257mm・1700g)817ページ、上製函入、図版221・表117、定価1350円