報　　告

破壊終局限界状態安全度検討用図表について

猪　股　俊　司*

ま え が き

筆者は，すでに本誌 Vol. 12, No. 6 (1970) に FIP-CEB 規準による単純曲げ破壊終局限界状態検討方法に対する計算方法の一提案をした。その後土木学会の新しいＰＣ設計施工の示方書もこの FIP-CEB 規準と似た方法を採用することで，改定作業が進められている。この方法によると，コンクリート圧縮応力～ひずみ曲線はパラボラ矩形を採用するのを原則としており，実際の設計計算は相当めんどうになるものである。それで一般の設計計算にあたって，簡便に利用できる設計図表を用意することは，非常に有意義なことと考えられる。鉄筋コンクリートには，多くのノモグラムが用意されて，日常の設計計算にあたって大いに労力を節約するのに役立っている。同様なことがＰＣについても用意される必要が認められる。

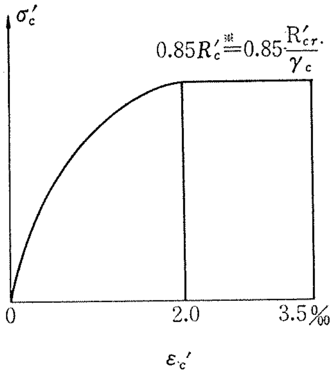
以下，筆者は将来国内でも採用されると考えられる各種計算上の仮定を用いて，破壊終局限界状態安全度の検討にあたって簡単に使用できる図表作成について論ずることとする。

1. 計算上の仮定

曲げ破壊終局限界状態検討にあたって次のように仮定する。

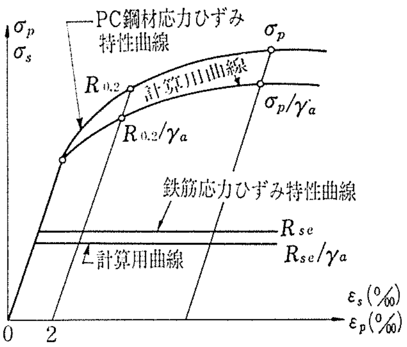
1)　平面保持の成立　コンクリート引張部分の無視。

2)　圧縮区間コンクリートの計算用応力-ひずみ曲線は図—1に示すパラボラ矩形とする。最大ひずみは 3.5‰ であり，最大圧縮応力度は $0.85\,R_c'{}^*$ とする。ここに，$R_c'{}^*$は計算用コンクリート圧縮強度であって，コンクリート設計基準圧縮強度を安全係数 γ_c で割って求められる。



図—1　計算用コンクリート応力-ひずみ曲線

3)　鋼材の計算用応力-ひずみ曲線は，応力-ひずみ曲線特性曲線を，フックの比例則直線に平行に $1/\gamma_a$ なる縮尺で縮めたものとする。γ_a は鋼材に対する安全係数である。一般的に鉄筋およびＰＣ鋼材の計算用応力-ひずみ曲線の定め方は 図—2 に示すようである。R_{se} は鉄筋降伏点応力度。



図—2　ＰＣ鋼材および鉄筋計算用応力-ひずみ曲線

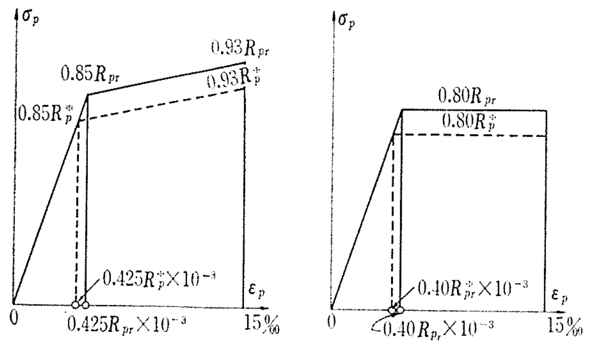
4)　鋼材ひずみの基準状態（鋼材図心位置コンクリートひずみが０となる状態）からの増加は 10‰ をこえてはならない。

以上の仮定 3) について国産のＰＣ鋼線，ＰＣ鋼より線，ＰＣ鋼棒，等 JIS G 3536-1971, JIS G 3109-1971 に規定されているＰＣ鋼材の応力-ひずみ曲線を検討した結果，近似的に 図—3 に示すように，ＰＣ鋼線，ＰＣ鋼より線およびＰＣ鋼棒１号を１つの形状に，ＰＣ鋼棒２号を別の形状にまとめてよいことが明らかである。実際には応力-ひずみ曲線は弯曲しており，それぞれ使用されるＰＣ鋼材種別，直径に応じて多数の応力-ひずみ曲線の計算用曲線を用意する必要があることになるが，これは，いたずらに設計計算を煩雑にするだけであるので，図—3 のような曲線を，近似的に利用することとした（R_{pr}：ＰＣ鋼材引張強度）。

図—4 には断面のひずみ分布の各種状態を示した。

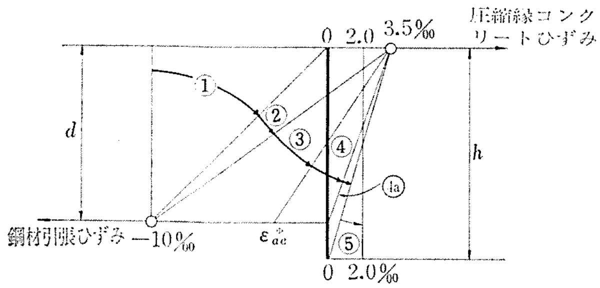
領域①：偏心の小さい軸引張を受ける場合で，全断面

＊ 工博　株式会社日本構造橋梁研究所　副社長



ＰＣ鋼線，鋼より線　ＰＣ鋼棒１号　　ＰＣ鋼棒２号

図—3　ＰＣ鋼材応力-ひずみ曲線の近似



図—4　断面のひずみ分布

が引張りとなる。

領域②：単純曲げまたは軸力と曲げをうける場合で，$\varepsilon_c' < 3.5‰$，$\varepsilon_a = 10‰$ である。

領域③：$\varepsilon_c' = 3.5‰$，$\varepsilon_a < 10‰$ であって，引張線鋼材ひずみ増は鋼材の降伏ひずみ ε_{ae}^* をこえる。

領域④：大きい偏心軸力の作用する場合で $\varepsilon_c' = 3.5‰$ となるが，鋼材最大ひずみ増加は降伏ひずみ ε_{ae}^* をこえない。

領域(4a)：全断面が圧縮をうけるまでの範囲で鋼材ひずみ変化は短縮である。

領域⑤：偏心の小さい軸力をうける場合で，全断面圧縮である。中心軸圧縮の場合，破壊時コンクリートひずみは2‰とし，偏心のある場合，最大圧縮ひずみ $\varepsilon_c'_{\max}$ と，最小圧縮ひずみ $\varepsilon_c'_{\min}$ との間には次の関係が成立する。

$$\varepsilon_c'_{\max} = 3.5 - 0.75\,\varepsilon_c'_{\min}$$

一般の曲げ部材では，ひずみ分布は領域②および③のいずれかにある。特に偏心の小さい軸圧縮を受ける場合を除いてひずみ分布が領域④にあることは，設計としては不経済なものである。

以下，一般の曲げ部材で，ＰＣ緊張材および普通鉄筋ともに，それぞれ一段に集中配置されているとみなされる場合のみを取り扱うものとする。領域②，③の境界に相当する中立軸比 $\alpha = x/d_a$ は，次のようである。

$$\frac{3.5}{10} = \frac{x}{d_a - x}$$

$$\alpha = \frac{3.5}{13.5} = 0.259\,3 \cdots\cdots (1.1)$$

領域③，④境界に相当する中立軸比

$$\alpha = \frac{3.5}{\varepsilon_{ae}^* + 3.5} \cdots\cdots (1.2)$$

2．矩形断面の破壊終局曲げモーメント

破壊終局曲げモーメントを検討するにあたって，基準状態は無載荷で，断面コンクリートが無応力の状態である。したがって，基準状態でのＰＣ緊張材引張ひずみは次のようである（図—5）。

$$\varepsilon_{p0} + \varepsilon_{p1} \cdots\cdots (2.1)$$

ここに，ε_{p0}：ＰＣ緊張材有効引張力に相当するＰＣ鋼材ひずみ

ε_{p1}：有効プレストレッシングによるＰＣ緊張材位置コンクリートひずみ。

ＰＣ緊張材引張ひずみの基準状態からの増加を ε_{p2} とすると，断面破壊時ＰＣ緊張材ひずみ ε_{pu} は，

$$\varepsilon_{pu} = \varepsilon_{p0} + \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2} \cdots\cdots (2.2)$$

となる。

（1）中立軸比 $\alpha \geq 0.259$ の場合（領域③）

この場合コンクリート最大圧縮ひずみは常に 3.5‰，コンクリート最大圧縮応力度は $0.85\,R_c'^* = R_{cu}'^*$ となる（図—6）。

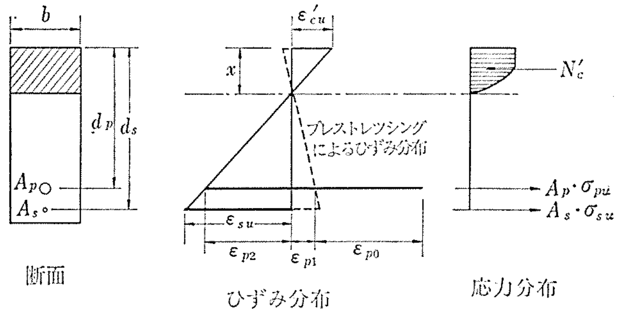
圧縮区間コンクリート応力度の合力は，

$$N_{cu}' = \psi \cdot b \cdot x \cdot R_{cu}'^* = 0.809\,5 \cdot b \cdot x \cdot R_{cu}'^*$$

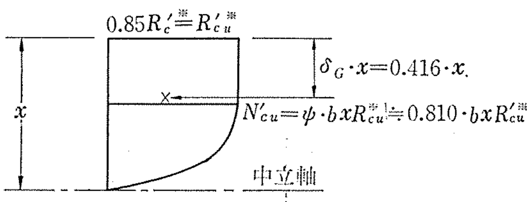
ここに，$R_{cu}'^* = 0.85\,R_c'^*$

$$\psi = 0.809\,5 \simeq 0.810$$

N_{cu}' 作用点と圧縮縁との距離と中立軸深さ x との比を δ_G（図—6）とすると，



図—5　ひずみ分布および応力分布



図—6　$\varepsilon_{cu}' = 3.5‰$ のときの圧縮応力分布

$\delta_G=0.416$

ひずみ適合条件式はＰＣ緊張材および普通鉄筋について次のようである。

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{p2}&=\frac{3.5}{1\,000}\,\frac{1-\alpha_p}{\alpha_p}\\ \varepsilon_{su}&=\frac{3.5}{1\,000}\,\frac{1-\alpha_s}{\alpha_s}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.4)$$

ここに，$\alpha_p=x/d_p$, $\alpha_s=x/d_s$

式 (2.4) を書き換えて，

$$\left.\begin{aligned}\alpha_p&=\frac{3.5}{3.5+1\,000\,\varepsilon_{p2}}\\ \alpha_s&=\frac{3.5}{3.5+1\,000\,\varepsilon_{su}}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.5)$$

領域③と④との境界は，$\varepsilon_{su}=\varepsilon_{ae}=R_{se}^*/E_s$ とおいて求められる（R_{se}^*=普通鉄筋の計算用降伏点応力度）。

③，④ 両領域境界に相当する中立軸比 $\alpha_{s\,\mathrm{crit}}$ は，式 (2.5) から次のようになる。

$$\alpha_{s\,\mathrm{crit}}=\frac{3.5\,E_s}{3.5\,E_s+1\,000\,R_{se}^*}=\frac{7\,350}{7\,350+R_{se}^*}$$

$$=\frac{1}{1+1.36\times10^{-4}R_{se}^*}\cdots\cdots(2.6)$$

鉄筋に関する安全係数を $\gamma_a=1.15$ とした場合，各種鉄筋降伏点応力度の場合，式 (2.6) による $\alpha_{s\,\mathrm{crit}}$ は表—1 に与えられるようになる。

以下，常に α_s は次の範囲にあるものと仮定して取り扱うものとする。

$\alpha_{s\,\mathrm{crit}}>\alpha_s\geq0.259$

したがって，鉄筋引張応力度は断面破壊時，常に計算降伏点応力度 $R_{se}^*=R_{se}/\gamma_a$ に達している。

ＰＣ緊張材の計算用引張応力-ひずみ曲線を，応力比-ひずみ曲線で次の関数で表わすものとする。

$$\varepsilon_p=f\left(\frac{\sigma_p}{R_p^*}\right)=f(\eta)\cdots\cdots(2.7)$$

R_p^*：ＰＣ鋼材の計算用引張強度

：（ＰＣ鋼材規格引張強度）$/\gamma_a$

基準状態におけるＰＣ緊張材引張応力度を σ_{p00}（ひずみ $\varepsilon_{p0}+\varepsilon_{p1}$ に相応する）とし，応力比を

$\eta_0=\sigma_{p00}/R_p^*$

と表わす。よって

$\varepsilon_{p0}+\varepsilon_{p1}=f(\eta_0)$

断面破壊時ＰＣ緊張材引張ひずみ ε_{pu} は，

$\varepsilon_{pu}=\varepsilon_{p0}+\varepsilon_{p1}+\varepsilon_{p2}$

であるから，式 (2.5) の第１式は，

表—1　$\alpha_{s\,\mathrm{crit}}$ の値

R_{se} (kg/cm²)	3 000	3 500	4 000	4 500
R_{se}^*(kg/cm²)	2 609	3 043	3 478	4 348
$\alpha_{s\,\mathrm{crit}}$	0.738	0.707	0.679	0.628

$$\alpha_p=\frac{3.5}{3.5+1\,000(\varepsilon_{pu}-\varepsilon_{p0}-\varepsilon_{p1})}$$

$$=\frac{3.5}{3.5+1\,000[f(\eta_u)-f(\eta_0)]}\cdots\cdots(2.8)$$

軸方向のつり合条件において上記の条件（$\alpha_s<\alpha_{s\,\mathrm{crit}}$）から，鉄筋は常に降伏しているので，断面破壊時ＰＣ緊張材引張応力度を σ_{pu} とおいて，つり合条件は次式で表わされる。

$$0.810\cdot b\cdot x\cdot R_{cu}'^*=A_p\cdot\sigma_{pu}+A_s\cdot R_{se}^*$$

書き換えて，

$$0.810\cdot\alpha_p=\frac{A_p\cdot R_p^*}{b\cdot d_p\cdot R_{cu}'^*}\cdot\frac{\sigma_{pu}}{R_p^*}+\frac{A_s\cdot R_{se}^*}{b\cdot d_s\cdot R_{cu}'^*}\cdot\frac{d_s}{d_p}$$

以下，次の記号を用い，w_p^*, w_s^* をそれぞれＰＣ緊張材および普通鉄筋の機械的比と呼ぶことにする。

$$\left.\begin{aligned}w_p^*&=\frac{A_p\cdot R_p^*}{b\cdot d_p\cdot R_{cu}'^*}\\ w_s^*&=\frac{A_s\cdot R_{se}^*}{b\cdot d_s\cdot R_{cu}'^*}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.9)$$

したがって，つり合条件式は次のようになる。

$$\left.\begin{aligned}0.810\,\alpha_p&=w_p^*\cdot\eta_u+w_s^*\left(\frac{d_s}{d_p}\right)\\ \alpha_p&=1.235\cdot w_p^*\cdot\eta_u+1.235\cdot w_s^*\left(\frac{d_s}{d_p}\right)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.10)$$

式 (2.8)，(2.10) 両式を解いて与えられた η_0, w_p^*, w_s^* に対しての α_p を求めることができる。

断面破壊時曲げモーメントは，ＰＣ緊張材断面図心に関するモーメントを求め，

$$\left.\begin{aligned}M_u^*&=0.810\cdot b\cdot x\cdot R_{cu}'^*(d_p-\delta_G\cdot x)\\ &\quad+A_s\cdot R_{se}^*(d_s-d_p)\\ m_u^*&=\frac{M_u^*}{b\cdot d_p^2\cdot R_{cu}'^*}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(2.11)$$

で表わすと，

$$m_u^*=0.810\cdot\alpha_p(1-0.416\cdot\alpha_p)+w_s^*\left(\frac{d_s}{d_p}\right)\left(\frac{d_s}{d_p}-1\right)\cdots\cdots(2.12)$$

α_p がすでに求まっておれば，式 (2.12) によって断面曲げ破壊のモーメント係数 m_u^* は求められ，式 (2.11) で，断面の破壊モーメントが定まる。

ここで取り扱ったものは $\alpha_s\geq0.259$ すなわち，コンクリートの最大圧縮ひずみは断面破壊時 3.5‰ に達している場合に限られている。

α_s と α_p とには次の関係が成立する。

$$\alpha_p=\frac{x}{d_p}=\frac{x}{d_s}\,\frac{d_s}{d_p}=\alpha_s\cdot\mu\cdots\cdots(2.13)$$

ここに，$\mu=d_s/d_p$

すでに普通鉄筋に関して次の仮定をした。

$\alpha_{s\,\mathrm{crit}}>\alpha_s\geq0.259$

表—2　領域 ③ での m_u^* 最大値 ($\mu=1$)

R_{se} (kg/cm²)	3 000	3 500	4 000	5 000
$\alpha_{\rm crit}$	0.738	0.707	0.679	0.628
m_u^*	0.4143	0.4042	0.3946	0.3758

よって α_p に関しては

$$\mu\cdot\alpha_{s\,\rm crit}>\alpha_p\geq 0.259\cdot\mu \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.14)$$

したがって，m_u^* の最少値は式 (2.12) から，

$$\begin{aligned}m_u^* &\geq 0.810\times0.259\cdot\mu(1-0.416\times0.259\cdot\mu)\\ &\quad+w_s^*\cdot\mu(\mu-1)=0.210\cdot\mu(1-0.108\cdot\mu)\\ &\quad+w_s^*\cdot\mu(\mu-1)\end{aligned}$$

$d_s=d_p$ すなわち，鋼材はすべて一段に集中配置とみなせる場合には，

$$m_u^*\geq 0.187\,3 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.15)$$

一方 $\alpha_p<\mu\cdot\alpha_{s\,\rm crit}$ であるから $\mu=1(d_s=d_p)$ の場合 $\alpha_{\rm crit}$ および m_u^* の最大値は表—2 のようになる。

以上の解法が成立する範囲は $\mu=1$ の場合，m_u^* は 0.187 3 より大で，表—2 に示す値以下の場合である。

(2)　中立軸比 $\alpha<0.259$ の場合（領域 ②）

断面破壊の終局限界状態において，鋼材の最大ひずみ変化量は常に 10 ‰ で制限され，コンクリートの最大圧縮縁ひずみは 3.5 ‰ 以下である。

以下，圧縮縁コンクリートひずみが，2 ‰ 以上の場合と，2 ‰ に達しない場合とを別々に取り扱う。

圧縮縁コンクリートひずみが 2 ‰，鋼材ひずみ増加量が 10 ‰ となるときの中立軸比は

$$\alpha=\frac{2.0}{2.0+10.0}=0.167 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.16)$$

となる。

よって，次の a), b) のように分けて考える。

a)　$0.167\leq\alpha_s<0.259$ の場合 (図—7)　この場合断面破壊時ひずみは次のようになる。

$$\varepsilon_{au}=10‰,\ 2‰\leq\varepsilon_{cu}'<3.5‰$$

コンクリートひずみが 2‰ となる位置と中立軸距離との比を λx で表わす (図—7)。

圧縮応力合力係数 ψ および合力作用位置の上縁からの距離の係数 δ_G は λ の関数で，次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\psi&=1-\frac{\lambda}{3}\\ \delta_G&=\frac{1}{4}\ \frac{\lambda^2-4\lambda+6}{3-\lambda}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.17)$$

ひずみ分布の関係から次式が求まる。

$$\frac{2‰}{10‰}=\frac{\lambda\cdot x}{d_s-x}=\frac{\lambda\cdot\alpha_s}{1-\alpha_s}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.18)$$

$$\frac{2‰}{\varepsilon_{p2}}=\frac{\lambda\cdot x}{d_p-x}=\frac{\lambda\cdot\alpha_p}{1-\alpha_p}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.19)$$

式 (2.18)，(2.19) 両式を書き換えて，

$$\alpha_s=\frac{2}{2+10\lambda}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.20)$$

$$\alpha_p=\frac{2}{2+1\,000\,\lambda\varepsilon_{p2}}=\frac{2}{2+1\,000\,\lambda[f(\eta)_u-f(\eta_0)]}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.21)$$

$\alpha_p=\mu\alpha_s$ であるから，式 (2.20) から α_p を求め，式 (2.21) と等置する。

$$\frac{2\mu}{2+10\lambda}=\frac{2}{2+1\,000\,\lambda[f(\eta)_u-f(\eta_0)]}\quad\cdots(2.22)$$

書き換えると，

$$2(\mu-1)-\lambda[10-1\,000\,\mu\{f(\eta)_u-f(\eta_0)\}]=0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.23)$$

式 (2.23) から，与えられた $\mu=d_s/d_p$ に対する λ と η との関係が求められる。

軸方向つり合条件は，鉄筋引張応力度は計算用降伏点応力度に達しているので，次のようになる。

$$\psi\cdot b\cdot x\cdot R_{cu}'^*=A_p\cdot\sigma_{pu}+A_s\cdot R_{se}^*$$

書き換えて，

$$\psi\cdot\alpha_p=w_p^*\cdot\eta+\mu\cdot w_s^*\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.24)$$

式 (2.17) から，$\psi=1-\lambda/3$，式 (2.20) から $\alpha_p=2\mu/(2+10\lambda)$ を代入すると，

$$\left(1-\frac{\lambda}{3}\right)\cdot\frac{2\mu}{2+10\lambda}=w_p^*\cdot\eta+\mu\cdot w_s^*\quad\cdots(2.25)$$

式(2.23)，(2.25) を解いて λ および η が求められる。

ＰＣ緊張材断面図心に関するモーメントをとって，破壊終局モーメントは次のようになる。

$$\begin{aligned}M_u^*&=\psi\cdot b\cdot x\cdot R_{cu}'^*\cdot(d_p-\delta_G\cdot x)\\ &\quad+A_s\cdot R_{se}^*\cdot(d_s-d_p)\end{aligned}$$

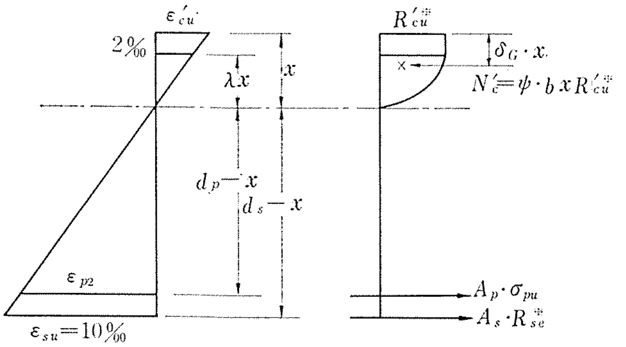
すなわち

$$\begin{aligned}m_u^*&=\frac{M_u^*}{b\cdot d_p^2\cdot R_{cu}'^*}=\psi\cdot\alpha_p\cdot(1-\delta_G\cdot\alpha_p)\\ &\quad+w_s^*\cdot\mu\cdot(\mu-1)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.26)\end{aligned}$$

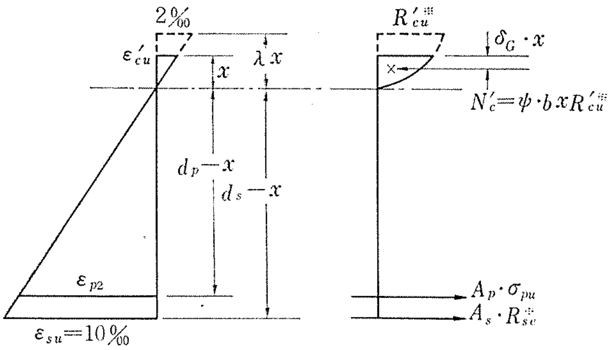
以上の解が成立するには，$d_s=d_p(\mu=1)$ の場合，モーメント係数 m_u^* は，式 (2.15)で与えた 0.187 3 以下で，かつ次の値以上となる。

$\lambda=1.0$ のとき，$\alpha=0.167$

$\psi=1-1.0/3=0.667$



図—7　$0.167\leq\alpha<0.259$ の場合



図—8　$\alpha < 0.167$ の場合

$$\delta_G = 0.375$$

$$m_u^* = 0.667 \times 0.167 \times (1 - 0.375 \times 0.167)$$
$$= 0.1042$$

すなわち，m_u^* の範囲は次のようである。

$$0.1042 \leq m_u^* < 0.1873$$

b)　<u>$0 < \alpha_s < 0.167$ の場合 (図—8)</u>　　すなわち，

$\varepsilon_{au} = 10$‰, $0 < \varepsilon_{cu}' < 2$‰

である。圧縮応力合力係数 ψ，および合力作用点位置の係数 δ_G は，λ の関数で次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} \psi &= \frac{3\lambda - 1}{3\lambda^2} \\ \delta_G &= \frac{1}{4} \cdot \frac{4\lambda - 1}{3\lambda - 1} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (2.27)$$

ひずみ分布の適合条件式としては，式(2.20)～(2.22)がそのまま成立する。

つり合条件として式(2.24)が成立し，ψ を式(2.27)から用いて次式が得られる。

$$\frac{3\lambda - 1}{3\lambda^2} \cdot \frac{2\mu}{2 + 10\lambda} = w_p^* \cdot \eta + \mu \cdot w_s^* \quad \cdots\cdots (2.28)$$

式 (2.22), (2.28) 両式を解いて，λ, η が求められる。

ＰＣ緊張材断面図心に関するモーメントをとって，破壊終局モーメント係数 m_u^* は次のようである。

$$m_u^* = \frac{3\lambda - 1}{3\lambda^2} \frac{2\mu}{2 + 10\lambda} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{2\lambda - 1}{3\lambda - 1} \frac{2\mu}{2 + 10\lambda} \right)$$
$$+ w_s^* \cdot \mu \cdot (\mu - 1) \cdots\cdots\cdots\cdots (2.29)$$

3．計算用図表の作成と設計計算法

以下，計算用図表の作成を容易ならしめるため，ＰＣ緊張材および普通鉄筋などの引張側引張鋼材は，すべてその断面図心に一段配置と仮定する。

一般の設計計算にあたっては，上記のように仮定することが可能である。これによる誤差は一般の場合無視できる。

以下，計算の便のため圧縮縁コンクリートひずみ ε_{cu}'，中立軸比 α，圧縮応力合力係数 ψ，および破壊終局限界状態モーメント係数 m_u^* の関係を求める。

すなわち $\varepsilon_{cu}' < 3.5$‰ の範囲で引張側鋼材ひずみ増は 10‰ であると仮定し，ε_{cu}' を変えると，中立軸比 α は，ひずみ分布の関係式(2.19)から求められる。よって

表—3　m_u^*, α, ψ, ε_{cu}' の値

ε_{cu}' ×1000	ψ	α	m_u^*
0.0	0	0	0
0.05	0.0248	0.0050	0.0001
0.10	0.0492	0.0099	0.0005
0.15	0.0731	0.0148	0.0011
0.20	0.0967	0.0196	0.0019
0.25	0.1198	0.0244	0.0029
0.30	0.1425	0.0291	0.0041
0.35	0.1648	0.0338	0.0055
0.40	0.1867	0.0385	0.0071
0.45	0.2081	0.0431	0.0088
0.50	0.2292	0.0476	0.0107
0.55	0.2498	0.0521	0.0128
0.60	0.2701	0.0566	0.0150
0.65	0.2898	0.0610	0.0173
0.70	0.3092	0.0654	0.0198
0.75	0.3281	0.0698	0.0223
0.80	0.3467	0.0741	0.0250
0.85	0.3648	0.0783	0.0278
0.90	0.3825	0.0826	0.0307
0.95	0.3998	0.0868	0.0336
1.00	0.4167	0.0909	0.0367
1.05	0.4331	0.0950	0.0398
1.10	0.4492	0.0991	0.0430
1.15	0.4648	0.1031	0.0462
1.20	0.4799	0.1071	0.0495
1.25	0.4948	0.1111	0.0528
1.30	0.5093	0.1150	0.0562
1.35	0.5231	0.1189	0.0596
1.40	0.5366	0.1228	0.0630
1.45	0.5498	0.1266	0.0664
1.50	0.5262	0.1304	0.0699
1.55	0.5748	0.1342	0.0734
1.60	0.5867	0.1379	0.0769
1.65	0.5981	0.1416	0.0803
1.70	0.6093	0.1453	0.0838
1.75	0.6197	0.1489	0.0872
1.80	0.6300	0.1525	0.0907
1.85	0.6398	0.1561	0.0941
1.90	0.6490	0.1597	0.0975
1.95	0.6582	0.1632	0.1009
2.00	0.6667	0.1667	0.1042
2.05	0.6748	0.1701	0.1074
2.10	0.6825	0.1736	0.1107
2.15	0.6899	0.1769	0.1138
2.20	0.6970	0.1803	0.1170
2.25	0.7037	0.1837	0.1202
2.30	0.7101	0.1870	0.1232
2.35	0.7163	0.1903	0.1263
2.40	0.7222	0.1935	0.1293
2.45	0.7279	0.1968	0.1323
2.50	0.7333	0.2000	0.1352
2.55	0.7386	0.2032	0.1381
2.60	0.7436	0.2063	0.1409
2.65	0.7484	0.2095	0.1438
2.70	0.7531	0.2126	0.1466

ε_{cu}' ×1000	ψ	α	m_u^*
2.75	0.7576	0.2157	0.1494
2.80	0.7619	0.2188	0.1521
2.85	0.7661	0.2218	0.1548
2.90	0.7701	0.2248	0.1575
2.95	0.7740	0.2278	0.1601
3.00	0.7778	0.2308	0.1627
3.05	0.7814	0.2337	0.1653
3.10	0.7849	0.2366	0.1678
3.15	0.7884	0.2395	0.1703
3.20	0.7917	0.2424	0.1729
3.25	0.7949	0.2453	0.1753
3.30	0.7980	0.2481	0.1778
3.35	0.8010	0.2509	0.1802
3.40	0.8039	0.2537	0.1825
3.45	0.8068	0.2565	0.1849
3.50	0.8095	0.2593	0.1873
3.50	0.8095	0.2650	0.1909
3.50	0.8095	0.2700	0.1940
3.50	0.8095	0.2750	0.1971
3.50	0.8095	0.2800	0.2003
3.50	0.8095	0.2850	0.2034
3.50	0.8095	0.2900	0.2064
3.50	0.8095	0.2950	0.2095
3.50	0.8095	0.3000	0.2120
3.50	0.8095	0.3050	0.2156
3.50	0.8095	0.3100	0.2186
3.50	0.8095	0.3150	0.2216
3.50	0.8095	0.3200	0.2246
3.50	0.8095	0.3250	0.2275
3.50	0.8095	0.3300	0.2304
3.50	0.8095	0.3350	0.2334
3.50	0.8095	0.3400	0.2363
3.50	0.8095	0.3450	0.2392
3.50	0.8095	0.3500	0.2421
3.50	0.8095	0.3550	0.2449
3.50	0.8095	0.3600	0.2478
3.50	0.8095	0.3650	0.2506
3.50	0.8095	0.3700	0.2534
3.50	0.8095	0.3750	0.2562
3.50	0.8095	0.3800	0.2590
3.50	0.8095	0.3850	0.2617
3.50	0.8095	0.3900	0.2645
3.50	0.8095	0.3950	0.2672
3.50	0.8095	0.4000	0.2699
3.50	0.8095	0.410	0.2753
3.50	0.8095	0.420	0.2806
3.50	0.8095	0.430	0.2858
3.50	0.8095	0.440	0.2910
3.50	0.8095	0.450	0.2961
3.50	0.8095	0.460	0.3011
3.50	0.8095	0.470	0.3061
3.50	0.8095	0.480	0.3110
3.50	0.8095	0.490	0.3158
3.50	0.8095	0.500	0.3206

ψ は，式(2.17)，(2.27)から求められ，m_u^* は式(2.26)と式(2.29)から計算される。

$\varepsilon_{cu}'=3.5‰$ の範囲では $\alpha>0.259$ となるので，α を変化させ，式(2.12)によって m_u^* を計算する。

以上の結果は，**表—3** および **付図—1** に示してある。

計算用図表は次の順序で作成する。

（1） 断面破壊時中立軸比 α と PC 緊張材引張応力比 η との関係

a) $\alpha_{\mathrm{crit}}\geq\alpha\geq0.259$　ここに，α_{crit} は **表—1** に示す値である。

この範囲内の中立軸比に対して，普通鉄筋は計算用降伏点応力度をこえており，引張鋼材ひずみ変化は 10‰ 以下である。

α と η との関係は式(2.8)で与えられる。

$$\alpha=\frac{3.5}{3.5+1\,000[f(\eta_u)-f(\eta_0)]} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2.8)$$

よって断面破壊時のPC緊張材引張応力度比 η_u を変えて，α と η_u との関係図を与えられた η_0 について求める。PC鋼材計算用応力比-ひずみ曲線を **図—3** のように仮定すると，

1)　PC鋼線，PC鋼より線およびPC鋼棒1号に対し，応力度比 (σ_p/R_p^*) とひずみ ε_p との関係は次のように与えられる。

$$\left.\begin{array}{l} \varepsilon_p\leq\varepsilon_{pe}^*=0.425\,R_{pr}\times10^{-3}(‰) \text{ に対し，} \\ \quad \varepsilon_p=\dfrac{R_p^*}{E_p}\cdot\eta \\ \varepsilon_p>\varepsilon_{pe}^* \text{ に対して，} \\ \quad \varepsilon_p=\varepsilon_{pe}^*+\dfrac{(15-\varepsilon_{pe}^*)}{0.08}(\eta-0.85) \end{array}\right\}\cdots(3.1)$$

ここに，R_{pr}：PC鋼材引張強度規格値

R_p^* および ε_{pe}^* は **表—4** のようである。

よって，式(2.8)で，η を変化させ式(3.1)で ε_p を求めると，$\alpha\sim\eta_u$ の関係曲線が与えられる。この場合，基準状態でのPC緊張材引張応力度比 η_0 を，0.5，0.6，0.7 と変化させた。

表—4　R_p^*，ε_{pe}^*

PC 鋼 材 種 別			$R_p^*=R_{pr}/1.15$ (kg/cm²)	ε_{pe}^* (‰)
PC鋼線	直径 (mm)	2.9	16 960	7.21
		5	14 350	6.10
		7	13 480	5.73
		8	13 040	5.54
PC鋼より線	SWPR-7 A(15.2以外)		15 220	6.47
	SWPR-7 A(15.2)		14 350	6.10
	SWPR-7 B		16 520	7.02
PC鋼棒1号*	A	種	8 260	3.51
	B	種	9 570	4.07
	C	種	10 870	4.62
	D	種	12 610	5.36

* 異形PC鋼棒を含む。

α の計算結果は **表—5，6** のように与えられる。**表—5** には，仮定 η に対するPC鋼線，PC鋼より線の平均 α 値が，**表—6** にはPC鋼棒1号，A～D種の平均 α 値がそれぞれ与えてある。

以下，設計計算の便を考慮してPC鋼線，PC鋼より線をすべて一括して，平均 α と η との関係曲線を描き，**付図—2** のように与える。またPC鋼棒1号の各種をすべて一括して，平均 α と η との関係曲線を **付図—3** のように与えるものとする。

平均 α 値を用いることによる破壊終局モーメント係数 m_u^* に対する誤差の程度はあとで論ずる。

2)　PC鋼棒2号については計算用応力-ひずみ曲線は完全弾塑性材料のそれと同じであり，降伏性限ひずみは次のようである。

$$\varepsilon_{pe}^*=0.40\cdot R_p^*\times10^{-3}(‰) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.2)$$

$\eta=0.8$ となる場合の α の最大値を式(2.8)で求める。すなわち，式(2.8)の分母を最少ならしめる。$f(0.8)\equiv$

表—5　PC 鋼線，PC 鋼より線に対する $\eta-\alpha$

η	PC鋼線直径 (mm)				PC鋼より線			平均 α
	2.9	5	7	8	7A	7A (15.2)	7B	
	$\eta_0=0.5$							
0.92	0.263	—	—	—	—	—	0.262	0.263
0.90	0.309	0.303	0.300	0.299	0.305	0.303	0.308	0.304
0.88	0.373	0.374	0.375	0.375	0.374	0.374	0.373	0.374
0.86	0.470	0.492	0.499	0.503	0.484	0.492	0.474	0.488
0.85	0.541	0.582	0.597	0.606	0.568	0.582	0.548	0.575
0.84	0.549	0.589	0.604	0.612	0.576	0.589	0.555	0.582
0.82	0.564	0.603	0.618	0.626	0.590	0.603	0.570	0.596
0.80	0.579	0.619	0.634	0.641	0.606	0.619	0.585	0.611
0.78	0.596	0.635	0.649	0.657	0.622	0.635	0.602	0.628
0.76	0.614	0.652	0.667	0.673	0.640	0.652	0.619	0.645
0.74	0.632	0.670	0.684	0.692	0.658	0.670	0.639	0.664
0.72	0.652	0.689	0.703	0.710	0.677	0.689	0.658	0.684
0.70	0.673	0.709	0.722	0.729	0.697	0.709	0.680	0.703
	$\eta_0=0.6$							
0.92	0.281	0.268	0.263	0.261	0.272	0.268	0.279	0.270
0.90	0.334	0.324	0.319	0.317	0.326	0.323	0.332	0.325
0.88	0.410	0.406	0.404	0.403	0.407	0.406	0.409	0.406
0.86	0.531	0.547	0.551	0.555	0.541	0.547	0.534	0.544
0.85	0.623	0.662	0.674	0.682	0.648	0.662	0.629	0.654
0.84	0.633	0.670	0.684	0.690	0.658	0.670	0.639	0.663
0.82	0.653	0.689	0.701	0.709	0.677	0.689	0.659	0.682
0.80	0.674	0.710	0.722	0.728	0.697	0.710	0.680	0.703
	$\eta_0=0.7$							
0.92	0.302	0.283	0.277	0.274	0.289	0.283	0.299	0.287
0.90	0.363	0.345	0.340	0.337	0.351	0.345	0.360	0.349
0.88	0.455	0.442	0.438	0.436	0.446	0.442	0.453	0.445
0.86	0.610	0.615	0.617	0.618	0.613	0.615	0.610	0.614
0.85	0.734	0.764	0.776	0.781	0.754	0.764	0.738	0.759

表—6　PC 鋼棒 1 号に対する $\eta-\alpha$

η	A 種	B 種	C 種	D 種	平均 α
	$\eta_0=0.5$				
0.91	0.258	0.262	0.265	0.270	0.264
0.90	0.289	0.291	0.294	0.298	0.293
0.88	0.378	0.377	0.377	0.375	0.377
0.86	0.549	0.534	0.522	0.506	0.528
0.85	0.709	0.676	0.648	0.613	0.662
0.84	0.614	0.682	0.654	0.619	0.667
0.82	0.726	0.694	0.668	0.634	0.681
0.80	0.740	0.709	0.682	0.649	0.695
0.78	0.753	0.722	0.697	0.664	0.709
0.76	0.766	0.737	0.713	0.681	0.724
	$\eta_0=0.6$				
0.91	0.266	0.271	0.277	0.284	0.275
0.90	0.299	0.304	0.308	0.315	0.307
0.88	0.396	0.398	0.400	0.402	0.399
0.86	0.586	0.577	0.568	0.556	0.572
0.85	0.773	0.745	0.720	0.689	0.732
0.84	0.780	0.753	0.728	0.697	0.740
0.82	0.794	0.768	0.745	0.716	0.756
	$\eta_0=0.7$				
0.91	0.275	0.282	0.289	0.300	0.287
0.90	0.310	0.317	0.324	0.334	0.321
0.88	0.415	0.421	0.426	0.434	0.424
0.86	0.629	0.626	0.622	0.618	0.624
0.85	0.850	0.829	0.810	0.787	0.819

表—7　PC 鋼棒 2 号 $\eta=0.8$ に対する最大 α 値

	$\eta_0=0.5$	$\eta_0=0.6$	$\eta_0=0.7$
A　種	0.719	0.794	0.897
B　種	0.692	0.763	0.871
C　種	0.665	0.748	0.856
平　均	0.692	0.768	0.875

表—8　$f(\eta_0)+10‰$ に対する η の値

PC 鋼材種別		$\eta_0=0.5$	$\eta_0=0.6$	$\eta_0=0.7$
PC鋼線	直径 (mm) 2.9	0.922	0.931	0.940
	5	0.917	0.924	0.930
	7	0.916	0.922	0.928
	8	0.915	0.921	0.926
PC鋼より線	SWPR-7 A(15.2以外)	0.919	0.926	0.933
	SWPR-7 A(15.2)	0.917	0.924	0.930
	SWPR-7 B	0.921	0.930	0.938
	平　均	0.918	0.925	0.932
PC鋼棒1号	A　種	0.910	0.912	0.915
	B　種	0.911	0.914	0.918
	C　種	0.912	0.917	0.921
	D　種	0.915	0.920	0.925
	平　均	0.912	0.916	0.920
PC鋼棒2号 A, B, C 種		0.800	0.800	0.800

$\varepsilon_{pe}{}^*$ とおけばよい。計算結果は 表—7 のようになる。

結果は 付図—3 に示すように，α の最大値までは α の値に関せず，常に $\eta=0.80$ の水平線となる。

表—7 に示す α より大きい α についても計算をし，A, B, C 種についての平均 α 値と η との関係を求め，付図—3 には示してある。

b) $0.259>\alpha$　この範囲では引張鋼材ひずみ変化量は 10 ‰ である。よって α の値に関せず，η は一定値となる。式(3.1)によって $\varepsilon_p=\varepsilon_{p0}+\varepsilon_{p1}+10(‰)$ に対する η を求めると 表—8 のように与えられる。

よって平均 η 値を用いると付図—2，3 のようになる。平均 η 値を用いることによる $m_u{}^*$ に対する誤差はあとで検討する。

（2）　つり合条件式 α, $w_p{}^*$, $w_s{}^*$ の関係

a) $\alpha_{\mathrm{crit}}\geq\alpha\geq0.259$　つり合条件式は式 (2.10) で与えられる ($d_s=d_p$)。

$$\alpha=1.235\cdot w_p{}^*\eta_u+1.235\cdot w_s{}^* \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2.10)$$

式 (2.10) は 付図—2，3 の原点を通る直線を示す。よって $\eta=1.0$ の横座標上に $w_p{}^*$ の座標をとり，原点とこの与えられた $w_p{}^*$ 点とを結ぶ直線

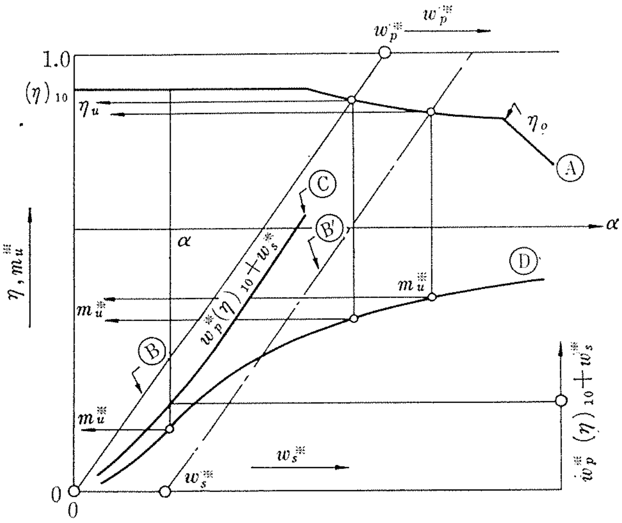
$$\alpha=1.235\,w_p{}^*\eta \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.3)$$

は，PC緊張材のみの場合のつり合条件を示す直線となる。

もし普通鉄筋が併配されているならば，$\alpha=0$ 横座標に $1.235\,w_s{}^*$ 点を選び，式 (3.3) で与えられる直線に平行線を描けば，これはつり合条件式を示す直線となる。これらの作図方法は 図—9 に示してある。

b) $0.259>\alpha$ の場合　この場合，引張鋼材ひずみ増加は常に 10 ‰ となるから，$\eta-\alpha$ 曲線は 付図—2，3 において水平線で与えられる。このときの η_u を $(\eta)_{10}$ で表わすものとする (図—9)。

つり合条件式は，



図—9　設計用図使用法説明図

$$\psi\cdot\alpha = w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^* \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3.4)$$

となる。よって，表—3から，$\psi\cdot\alpha$ を求め，α の関数として表わすと，つり合条件式が表わされる。

この曲線を 付図—2, 3 に記入してある。

図—9 において曲線©は，$\alpha < 0.259$ 範囲に対する断面のつり合条件を与える曲線である。

つり合条件式を表わすものとして，図—9 の®または®′ 直線と © 曲線との2つがある。いずれのつり合条件の曲線を使用するかは，鋼材の機械的比に関係するものである。

曲線©を用いる場合の最大

$$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^*$$

の値は，0.2096 であるから，次のようにつり合条件曲線は使用する必要がある。

（1）　$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^* \leq 0.2096$
　　図—9 の © 曲線
（2）　$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^* > 0.2096$
　　図—9 の ® または ®′ 直線　　…(3.5)

（3）　ひずみ適合と釣合との両条件を満足する α

式 (3.5) の条件の (1) の場合には与えられた鋼材の機械的比（$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^*$）に対する曲線上の点から鉛直線を引いて α を定めることができる。Ⓐ曲線との交点はもちろん $(\eta)_{10}$ である。

式 (3.5) の条件の (2) の場合には Ⓐ 曲線と直線 ® または ®′ との交点をとおる鉛直線と α 軸との交点は α を与える。交点をとおる水平線と η 軸との交点は η を与える。

（4）　図表による設計法

a）　鋼材断面積が既知の場合，破壊終局限界モーメント $M_u{}^*$ を計算する

（1）　与えられた材料強度を用いて，PC緊張材および鉄筋の機械的比 $w_p{}^*$, $w_s{}^*$ を計算する。式 (2.9) 参照。

（2）　式 (3.5) の条件を検討する。

もし，式 (3.5) の第1の場合であれば，図—9 において与えられた η_0 に対する $(\eta)_{10}$ を用い，$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^*$ 座標点から水平線を描き，曲線©との交点を通る鉛直線と曲線Ⓓ（$m_u{}^*$ と α との関係曲線で表—3 で与えられる）との交点をとおす水平線の $m_u{}^*$ 座標を読み取る。

もし，式 (3.5) の第2の場合であれば，図—9 において，Ⓐ曲線と直線®（PC緊張材のみの場合）または®′（普通鉄筋も併配）との交点を求め，これをとお鉛直線と曲線Ⓓとの交点の $m_u{}^*$ 座標を読み取る。

以上によって $m_u{}^*$ が求まれば $M_u{}^*$ は，

$$M_u{}^* = m_u{}^*\cdot b\cdot d^2\cdot R_{cu}{}'^*$$

で求められる。

b）　破壊の終局限界モーメント $M_u{}^*$ の与えられたとき必要な鋼材断面積を求める

（1）　与えられた $M_u{}^*$ を用い $m_u{}^*$ を計算する。

（2）　与えられた $m_u{}^*$ に対応する点を曲線 Ⓓ 上にとる。これをとおる鉛直線を描き，

もし©曲線と交われば，この点の座標を $w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^*$ 軸上で読み取る。

もし©曲線と交わらなければ，Ⓐ曲線との交点を求めこの交点と原点とを結ぶ直線の延長線と $\eta=1.0$ 座標との交点の $w_p{}^*$ を読み取る。もし，これではPC緊張材断面積が過大となるとすれば，普通鉄筋も併用する。この場合，仮定した鉄筋断面積から，$W_s{}^*$ を計算し，$\eta=0$ 座標上に $w_s{}^*$ を定め，これとすでに定めたⒶ曲線上の交点をとおる直線に平行に原点をとおる直線を描き，$\eta=1.0$ 座標上の $w_p{}^*$ を読み取れば，与えられた $w_s{}^*$ に対して必要な $w_p{}^*$ は求まる。

以上の方法で前者の場合は，

$$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^*$$

が求まるので，与えられた η_0 に対する $(\eta)_{10}$ を用いて，いずれか一方を仮定すれば，他方が定められる。

同様に後者の場合にも，$w_s{}^*$, $w_p{}^*$ いずれか一方を仮定すれば，他方が定められる。

以上で鋼材の機械的比が定まるから，式 (2.9) で，鋼材断面積もそれぞれ決定される。

（5）　図表の誤差

付図—2, 3 を用意するにあたって，$\eta-\alpha$ 曲線を求めるため，使用PC鋼材の種別に関せず，PC鋼線，PC鋼より線を直径にかかわらずひとまとめとし，PC鋼棒1号および2号をそれぞれ種別にかかわらず，それぞれひとまとめとして，平均 α 値と η との関係図が描いている。これらは 表—5, 6 に示してある。

$\alpha < 0.259$ の範囲では，図—9 の曲線©がつり合条件式を表わすものである。このつり合条件式の $\psi\cdot\alpha$ 値に対する誤差はPC緊張材のみを用いる場合がもっとも大きく，$(\eta)_{10}$ の誤差がそのまま $\psi\cdot\alpha$ に対する誤差となる。$(\eta)_{10}$ の平均値に対するそれぞれのPC鋼材の場合についての誤差は 表—5 よりも明らかなように 0.8% をこえることはない。したがって，付図—2, 3 において，$w_p{}^*(\eta)_{10} + w_s{}^*$ 曲線が α に対して与える誤差は同じく約 0.8% をこえることはなくなる。いま安全側に α の誤差に 1% を与えるとするとき $m_u{}^*$ に生ずる誤差を 表—3 によって計算すると，表—9 のようである。

すなわち，α に 1% の誤差があっても $m_u{}^*$ に対する誤差は 2% をこえることはなく，一般に用いられる断面では 1.5% をこえることはない。$(\eta)_{10}$ の平均値を用いることによる誤差は一般の設計に用いられる $\eta_0=0.6$ 程

表―9　α に ±1% の誤差のある場合 m_u^* に与える誤差（表―3 による）

α 値	m_u^* 値	α に ±1% の誤差あるときの α	α の 1% 誤差による m_u^* 値	m_u^* の誤差 (%)
0.0741	0.0250	0.0748 0.0734	0.0255 0.0246	+2.0 −1.6
0.0909	0.0367	0.0918 0.0900	0.0374 0.0360	+1.9 −1.9
0.1304	0.0699	0.1317 0.1291	0.0711 0.0687	+1.7 −1.7
0.1667	0.1042	0.1684 0.1650	0.1058 0.1026	+1.5 −1.5
0.2000	0.1352	0.2020 0.1980	0.1370 0.1334	+1.3 −1.3
0.2593	0.1873	0.2619 0.2567	0.1889 0.1851	+0.9 −1.2

度では 0.6% 程度であるから，m_u^* の誤差も 1.5% 程度にすぎないものとなる。

$\alpha>0.259$ の範囲でＰＣ鋼線，ＰＣ鋼より線およびＰＣ鋼棒１号において $\eta \geq 0.85$ の範囲では，表―5 に示す，各 $\eta \sim \alpha$ 曲線はほとんど一致するので，平均 α 値と η との関係曲線を用い，与えられた鋼材の機械的比に対応する座標原点をとおる直線Ⓑまたは Ⓑ′（図―9）との交点から α を求めても誤差は無視できる。

$\eta<0.85$（付図―2）または $\eta<0.8$（付図―3）の場合には，平均 α 値～η 曲線と，本文で検討された範囲での極限の曲線とは相当離れたものとなる。しかし，この区間では，$\alpha \sim \eta$ 曲線と直線 Ⓑ または Ⓑ′ とは図上で 90° に近い角度で交わるので，α 値に対する誤差は両極限曲線を用いたとき，平均曲線に対して 3.0% 程度となる。

一方 $\alpha>0.259$ 範囲での m_u^* はＰＣ緊張材のみのとき，

$$m_u^*=0.810\,\alpha(1-0.416\,\alpha)$$

で与えられる。よって，誤差は，

$$\frac{\Delta m_u^*}{m_u^*}=\frac{1-0.832\,\alpha}{1-0.416\,\alpha}\cdot\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$$

となる。平均曲線に対して極限曲線の離れの大きくなる範囲は $\alpha>0.60$ 程度のところである。よって，上式で $\Delta\alpha$ と Δm_u^* との関係を求めると次のようである。

$\alpha=0.60$　$\Delta m_u^*/m_u^*=0.667(\Delta\alpha/\alpha)$

$\alpha=0.65$　$\Delta m_u^*/m_u^*=0.629(\Delta\alpha/\alpha)$

$\alpha=0.70$　$\Delta m_u^*/m_u^*=0.589(\Delta\alpha/\alpha)$

すなわち α の誤差の 67% 以下の誤差が m_u^* には生ずるものである。よって α の誤差を最大 3.0% とすれば，m_u^* に生ずる誤差は 2.0% 以下である。

以上，要するに本文に示した計算図表を用いた場合，期待される誤差（ＰＣ鋼材種別，直径，などによる差を無視することによるもの）は 2% 以下である。すなわち通常の設計計算上は十分であるといえる。

（6）計算例

使用状態での最大曲げモーメント $M_s=250$ t·m

版の厚さ $h=0.9$ m，鋼材配置有効高 $d=0.81$ m

設計で基準としたコンクリート圧縮強度 $R_{cr}'=350$ kg/cm²

ＰＣ鋼材は直径 7 mm のＰＣ鋼線で，規格引張強度は $R_{pr}=15\,500$ kg/cm²

$\eta_0=0.6$ とする。

荷重作用に対する安全係数 $\gamma_s=1.5$，材料に関するそれを，コンクリートに対して $\gamma_c=1.5$ 鋼材に対して $\gamma_a=1.15$ と仮定する。以上の場合に必要なＰＣ緊張材断面積を求める。

$$M_u^*=\gamma_s\cdot M_s=1.5\times250=375 \text{ t·m}$$

$$m_u^*=M^{n*}/bd^2R_{cu}'^*=375/1\times0.9^2\times1980=0.234$$

ここに，

$$R_{cu}'^*=0.85\,R_c'^*=0.85\times R_{cr}'/1.5$$
$$=0.85\times350/1.5=198 \text{ kg/cm}^2$$

付図―2 の m_u^* 曲線で，$m_u^*=0.234$ に対する α を求めると，$\alpha=0.365$ が得られる。$\eta \sim \alpha$ 曲線の $\eta_0=0.6$ に対する交点は $\eta=0.897$，よって原点と，$\eta_0=0.6$ 曲線上の $\alpha=0.365$，$\eta=0.897$ 点とを結ぶ直線を延長して，w_p^* 座標との交点を求めると，

$$w_p^*=0.303$$

$$R_p^*=15\,500/1.15=13\,480 \text{ kg/cm}^2$$

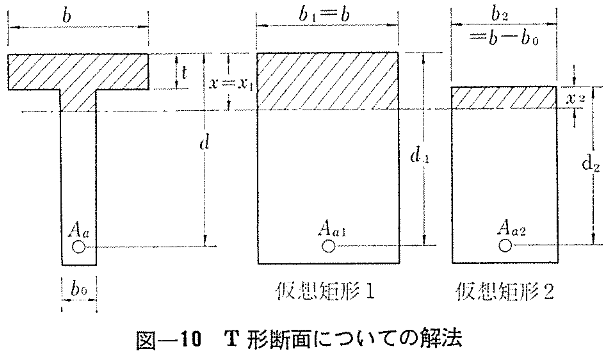
$$A_p=w_p^*\cdot bd\cdot\frac{R_{cu}'^*}{R_p^*}=0.303\times100\times90\times\frac{198}{13\,480}$$
$$=40.06 \text{ cm}^2$$

4. T 形断面破壊終局限界状態の検討

T形断面または箱断面では 図―10 のように仮想矩形断面１および２の差と考える。したがって，すでに述べた矩形断面に関する計算図表がそのまま利用できることになる。

ＰＣ緊張材および普通鉄筋はすべて一段に集中配置されているものと考える。

鋼材断面積を $A_a=A_p+A_s$ とし，各矩形に対してそれぞれ，$A_{a1}=A_{p1}+A_{s1}$，$A_{a2}=A_{p2}+A_{s2}$ とする。



図―10　T 形断面についての解法

矩形断面1および2の破壊終局モーメントを M_{u1}^*, M_{u2}^* とすると，T形断面については，

$$M_u^*=M_{u1}^*-M_{u2}^* \quad \cdots\cdots(4.1)$$

モーメント係数を次のように書く。

$$m_u^*=M_u^*/bd^2R_{cu}'^*$$
$$m_{u1}^*=M_{u1}^*/b_1d_1^2R_{cu}'^*$$
$$m_{u2}^*=M_{u2}^*/b_2d_2^2R_{cu}'^*$$

よって式(4.1)は次のように書ける。

$$m_u^*\cdot bd^2R_{cu}'^*=m_{u1}^*\cdot b_1d_1^2R_{cu}'^*-m_{u2}^*\cdot b_2d_2^2R_{cu}'^*$$

$b_1=b,\ d_1=d$ であるから，

$$m_u^*=m_{u1}^*-m_{u2}^*\left(\frac{b_2}{b}\right)\left(\frac{d_2}{d}\right)^2=m_{u1}^*-m_{u2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)^2 \quad \cdots(4.2)$$

各矩形断面に関する中立軸比を $\alpha_1=x_1/d_1,\ \alpha_2=x_2/d_2$ とすると，

$$\alpha_1d_1=\alpha_2d_2+t$$

すなわち，

$$\left.\begin{aligned}\alpha_2&=\alpha_1\left(\frac{d_1}{d_2}\right)-\left(\frac{t}{d_2}\right)=\frac{\alpha_1}{1-(t/d)}-\frac{(t/d)}{1-(t/d)}\\ \alpha_2&=\frac{1}{1-(t/d)}\left(\alpha_1-\frac{t}{d}\right)\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4.3)$$

（1）　**M_u^*が与えられたとき必要な鋼材断面積の算定**

以下の順序で計算を進める。

1)　m_{u1}^* を仮想矩形1について求める。

$$m_{u1}^*=M_u^*/b_1d_1^2R_{cu}'^*=m_u^* \quad \cdots\cdots(4.4)$$

表—3，**付図—1** などを用いて，m_{u1}^*に対応する α_1 を求める。

$\alpha_1>t/d_1$：中立軸はウエブ内にある。

$\alpha_1\leq t/d_1$：中立軸は圧縮フランジ内にある。よって矩形断面についての解法が適用できる。

以下 $\alpha_1>t/d_1$ としてT形断面の解法を示す。

2)　m_{u1}^* を上記の α_1 より大きい α_1 を仮定して求める。

α_2 を次式で求める。

$$\alpha_2=\frac{\alpha_1-(t/d)}{1-(t/d)} \quad \cdots\cdots(4.5)$$

この α_2 に対応する m_{u2}^* を **表—3** または **付図—1** から求める。

次に，

$$m_{u1}^*-m_{u2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)^2 \quad \cdots\cdots(4.6)$$

を計算し，必要な m_u^* と一致すれば，仮定 α_1 は正しいことになる。もし一致しないならば，α_1 の仮定値を変えて同様な計算を繰り返し，式(4.6)が所要 m_{u*} を与えるまで繰り返す。

3)　上記で $\alpha_1,\ \alpha_2$ が定まった場合 α_1 の値に応じて次のように分けて計算を進める。

<u>**a)**　$\alpha_1>0.259$ の場合</u>　　この場合，鋼材最大ひずみ増加は10‰以下であって，圧縮縁ひずみは，$\varepsilon_{cu}'=3.5$‰となる。PC緊張材引張応力度は ηR_p^*，鉄筋引張応力度は R_{se}^* となる。よって矩形1に対する必要鋼材断面積は次式で与えられる。

$$\eta w_{p1}^*+w_{s1}^*=0.810\cdot\alpha_1 \quad \cdots\cdots(4.7)$$

仮想矩形2に対する最大圧縮コンクリートひずみは，

$$\varepsilon_{cu2}'=\frac{3.5}{1\,000}\,\frac{\alpha_1-(t/d)}{\alpha_1} \quad \cdots\cdots(4.8)$$

この ε_{cu2}' に対応する ψ_2 値を **表—3** または **付図—1** から求め，仮想矩形2のつり合条件を求める。この場合PC緊張材引張応力度は ηR_p^* であることを考慮する。

$$\eta w_{p2}^*+w_{s2}^*=\psi_2\cdot\alpha_2 \quad \cdots\cdots(4.9)$$

式(4.7)，(4.9)両式を満足する $w_{p1}^*,\ w_{p2}^*,\ w_{s1}^*,\ w_{s2}^*$ を用いて，

$$\left.\begin{aligned}w_p^*&=w_{p1}^*-w_{p2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)\\ w_s^*&=w_{s1}^*-w_{s2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4.10)$$

ただし，$w_p^*,\ w_s^*$ が負とならないように $w_{p1}^*,\ w_{p2}^*,\ w_{s1}^*,\ w_{s2}^*$ を定める必要がある。

必要な鋼材断面積は次式で求められる。

$$\left.\begin{aligned}A_p&=w_p^*\frac{bdR_{cu}'^*}{R_p^*}\\ A_s&=w_s^*\frac{bdR_{cu}'^*}{R_{se}^*}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4.11)$$

<u>**b)**　$\alpha_1\leq 0.259$ の場合</u>　　この場合PC緊張材引張応力度は常に $(\eta)_{10}\cdot R_p^*$ となる。よってつり合条件式は，

$$\left.\begin{aligned}(\eta)_{10}\cdot w_{p1}^*+w_{s1}^*&=\psi_1\cdot\alpha_1\\ (\eta)_{10}\cdot w_{p2}^*+w_{s2}^*&=\psi_2\cdot\alpha_2\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(4.12)$$

$\psi_1,\ \psi_2$ はそれぞれ定められた $\alpha_1,\ \alpha_2$ に対して **表—3** または **付図—1** から求められる。

式(4.12)を満足する $w_{p1}^*,\ w_{p2}^*,\ w_{s1}^*,\ w_{s2}^*$ を定め，式(4.10)，(4.11)によって，$A_p,\ A_s$ は求められる。

（2）　**鋼材断面積が与えられたときの M_u^* の算定**

1)　与えられた $A_p,\ A_s$ から，式(4.11)によって $w_p^*,\ w_s^*$ を計算する。

2)　中立軸比 $\alpha_1(>t/d)$ を仮定し，式(4.5)で α_2 を求める。

仮定 α_1 値の値に応じて次のように分ける。

<u>**a)**　$\alpha_1>0.259$ の場合</u>　　仮定 α_1 に対する η 値を **付図—2，3** などで求める。また計算 α_2 に対する ψ_2 を表

—3，付図—1 などで求める。

よってつり合条件式として，

$$\left.\begin{aligned}\eta w_{p1}^*+w_{s1}^*&=0.810\cdot\alpha_1\\ \eta w_{p2}^*+w_{s2}^*&=\psi_2\cdot\alpha_2\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.13)$$

が成立し，式(4.13)を満足する w_{p1}^*, w_{p2}^*, w_{s1}^*, w_{s2}^* を求め，これらが，次の条件を満足すれば，仮定 α_1 は正しかったことになる。

$$\left.\begin{aligned}w_{p1}^*&=w_{p2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)=w_p^*\\ w_{s1}^*&-w_{s2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)=w_s^*\end{aligned}\right\}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.14)$$

もし，式(4.14)が満足されないならば，あるいは式(4.13)，(4.14)両式を満足する負ならざる w_{p1}^*, w_{p2}^*, w_{s1}^*, w_{s2}^* が求められなければ，ふたたび α_1 の仮定を変えて計算を繰り返す必要がある。

b) $\alpha_1\leq 0.259$ の場合　仮定 α_1 に対応する α_2 を式(4.5)で求め，図表を用いて，ψ_1, ψ_2 を求める。

つり合条件式は，次のようである。

$$\left.\begin{aligned}(\eta)_{10}\cdot w_{p1}^*+w_{s1}^*&=\psi_1\cdot\alpha_1\\ (\eta)_{10}\cdot w_{p2}^*+w_{s2}^*&=\psi_2\cdot\alpha_2\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(4.15)$$

式(4.14)，(4.15)両式を満足する負ならざる各鋼材機械比が求まれば，仮定 α_1 は正しいことになる。

3)　α_1, α_2 に対応する m_{u1}^*, m_{u2}^* を図表で求める。

$$M_u^*=m_u^*\cdot bd^2R_{cu}'^*$$
$$=\left[m_{u1}^*-m_{u2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)^2\right]$$
$$\cdot bd^2R_{cu}'^*\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.16)$$

によって M_u^* は計算される。

(3)　T 形断面設計用図表

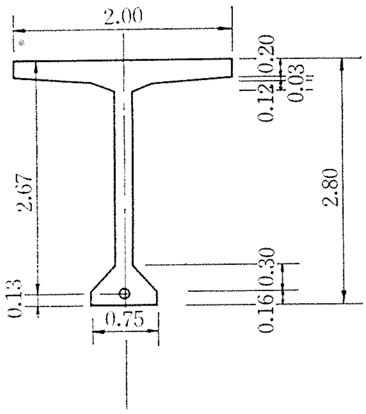
すでに **4 (1)**，**4 (2)** で述べた方法によって矩形断面に関する図表を用いて設計することができる。**付図—4**，**5** は，まったく同様な方法で求めたもので，**付図—4** は $\alpha_1\leq 0.259$ の範囲で，α_1 に対する α_2 を与えられた t/d に応じて求める曲線が与えてある。よって，α_1 を仮定すれば α_2 が求められ，α_1, α_2 に対する m_{u1}^*, m_{u2}^* を定めることができる。$\psi\cdot\alpha$ 曲線も図示してあるので，α_1, α_2 に対する $\psi_1\cdot\alpha_1$；$\psi_2\cdot\alpha_2$ も求められ，つり合条件式(4.15)が，ただちに求められる。

付図—5 は $\alpha>0.259$ の範囲での m_{u1}^*, m_{u2}^* を与えられた (t/d) に対して，ただちに書き取れるようにしてある。この図中には与えられた α_1 に対して $\psi_2\cdot\alpha_2$ がただちに読み取れる曲線も与えてあるので，容易に式(4.13)が求められる。

(4)　計　算　例

図—11 に示す断面の終局限界状態安全度を検討する。

コンクリート設計基準圧縮強度 $R_{cr}'^*=400\ \mathrm{kg/cm^2}$



図—11　計　算　例　題

ＰＣ鋼材は鋼より線で規格引張強度 $R_{pr}=17\,500\ \mathrm{kg/mm^2}$

使用時曲げモーメント $M_s=1\,477\ \mathrm{t\cdot m}$

基本状態でのプレストレッシング力 $N_{p\infty}=732\ \mathrm{t}$

ＰＣ緊張材のみが配置されていると仮定する。

$\gamma_s=1.5$；$\gamma_c=1.5$；$\gamma_a=1.15$

$R_{cu}'^*=0.85\times 400/1.5=227\ \mathrm{kg/cm^2}$

$R_p^*=17\,500/1.15=15\,220\ \mathrm{kg/cm^2}$

$M_u^*=1.5\times 1\,477=2\,220\ \mathrm{t\cdot m}$

プレストレッシング力に対する安全係数 $\gamma_p=0.9$ とすると，基準状態でのＰＣ緊張材引張応力度は，

$\gamma_p\cdot N_{p\infty}/A_p=0.9\times 732\,000/78.05=8\,440\ \mathrm{kg/cm^2}$

$\eta_0=8\,440/15\,220=0.555$

a)　必要な最小ＰＣ緊張材断面積

$$m_u^*=\frac{M_u^*}{b_1d_1^2R_{cu}'^*}=\frac{2\,220}{2.0\times 2.67^2\times 2\,270}=0.0686$$

圧縮フランジ平均厚 $t=(0.20+0.23)/2=0.215\ \mathrm{m}$

$m_{u1}^*=0.068\,6$ に対する α_1 は **付図—4** から，0.129 である。

$t/d_1=0.215/2.67=0.080\,5$

よって $\alpha_1>(t/d_1)$ であるから，中立軸はウエブ内にある。

α_1 を 0.129 より少しく大きい値に選ぶ。いま，α_1 を 0.149 とすると **付図—4** から $t/d=0.080\,5$ に対して，$\alpha_2=0.075$ と読める。よって，$\alpha_1=0.149$, $\alpha_2=0.075$ に対する m_u^* を **付図—4** で求めると，

$m_{u1}^*=0.0873$, $m_{u2}^*=0.025\,3$

と求まる。よって次の計算をする。

$$m_{u1}^*-m_{u2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)^2$$
$$=0.087\,3-0.025\,3\times 0.90\times 0.845\,4=0.068\,1$$

これは $m_u^*=0.068\,6$ と一致しない。よって，さらに α_1 を 0.150 と仮定すると，$\alpha_2=0.076$,

$m_{u1}^*=0.088\,3$, $m_{u2}^*=0.026\,0$

よって，

$$m_{u1}^*-m_{u2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)^2=0.068\,5$$

よって所要 $m_{u1}^*=m_u^*$ とほとんど一致する。

よって，$\alpha_1=0.150$, $\alpha_2=0.076$ とする。

$\alpha_1\leq 0.259$ であるから，式(4.12) を用いて，w_{p1}^*, w_{p2}^* を定める。

ＰＣ鋼より線を用い，$\eta_0=0.555$ であるから，**付図—2** より $(\eta)_{10}=0.922$ となる。α_1, α_2 に対する $\psi\cdot\alpha$ を **付図—4** から求めると次のようになる。

$$\psi_1\cdot\alpha_1=0.093\,6$$

$$\psi_2\cdot\alpha_2=0.027$$

よって，式(4.12) は次のようになる（鉄筋は配置しない)。

$$0.922\cdot w_{p1}^*=0.093\,6$$

$$0.922\cdot w_{p2}^*=0.027$$

すなわち，$w_{p1}^*=0.101\,5$, $w_{p2}^*=0.029\,3$

よって式(4.10)より，

$$w_p^*=0.101\,5-0.029\,3\times0.90\times0.919\,5=0.077\,3$$

$$A_p=0.077\,3\times\frac{200\times267\times227}{15\,220}=61.56\ \mathrm{cm}^2$$

実際に配置されているＰＣ緊張材断面積は $78.05\ \mathrm{cm}^2$ であるから十分安全である。

b) $A_p=78.05\ \mathrm{cm}^2$ に対する M_u^* の計算

$$w_p^*=\frac{A_p\cdot R_p^*}{bdR_{cu}'^*}=\frac{78.05\times15\,220}{200\times267\times227}=0.097\,9$$

α_1 の第1近似として $\alpha_1=0.265$ とする。**付図—4** から，$\psi_2\cdot\alpha_2$ を $(t/d)=0.080\,5$ に対して求めると，

$$\psi_2\cdot\alpha_2=0.147$$

η の値は **付図—2** で $\alpha=0.265$ に対して $\eta_0=0.555$ につき，$\eta=0.92$ となる。よって，式(4.13) は，

$$0.92\cdot w_{p1}^*=0.810\times0.265$$

$$0.92\cdot w_{p2}^*=0.147$$

よって，$w_{p1}^*=0.233$, $w_{p2}^*=0.160$

式(4.14) は，

$$w_{p1}^*-w_{p2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)$$

$$=0.233-0.160\times0.90\times0.919\,5=0.101$$

よって $w_p^*=0.0979$ と異なる。

ふたたび α_1 を 0.250 と仮定すると，**付図—4** を用いて，$\alpha_2=0.185$, よって **付図—4** の $\psi\cdot\alpha$ 曲線から，

$$\psi_1\cdot\alpha_1=0.200$$

$$\psi_2\cdot\alpha_2=0.131$$

付図—2 から $\eta_0=0.555$, $\alpha=0.250$ に対し $(\eta)_{10}=0.922$ よって，w_{p1}^*, w_{p2} は式(4.12) から，求められる。

$$w_{p1}^*=0.217,\ w_{p2}^*=0.142$$

$$w_{p1}^*-w_{p2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)=0.099\,5$$

さらに α_1 を変えて，$\alpha_1=0.230$ とすると，$\alpha_2=0.163$ $\psi_1\cdot\alpha_1=0.179$, $\psi_2\cdot\alpha_2=0.107$ が **付図—4** から求められる。$(\eta)_{10}=0.922$ を用いて，式(4.12) から，

$$w_{p1}^*=0.194,\ w_{p2}^*=0.116$$

が求められる。

$$w_{p1}^*-w_{p2}^*\left(1-\frac{b_0}{b}\right)\left(1-\frac{t}{d}\right)=0.098\,0$$

よって $w_p^*=0.097\,9$ と一致する。$\alpha_1=0.230$, $\alpha_2=0.163$ に対する m_{u1}^*, m_{u2}^* を **付図—4** から定める。

$$m_{u1}^*=0.162,\ m_{u2}^*=0.101$$

よって式(4.16) から，

$$M_u^*=[0.162-0.101\times0.9\times0.919\,5^2]\times2.0\times2.67^2\times2\,270=2\,756\ \mathrm{t\cdot m}$$

これは $r_s\cdot M_s=1.5\times1\,477=2\,220\ \mathrm{t\cdot m}$ より大であるから安全度は検討された。

む　す　び

ＰＣ部材破壊終局限界状態検討用図表を作成し，かつこれが使用方法について述べたものであって，ＰＣの設計が，ＲＣの場合と同様に図表によって実施可能となり，設計計算の労力を節約することができる。

【付図—1～5 は巻末参照】

1973.6.20・受付