

## (1) P P C構造最適設計のための検討項目の定性的, 定量的評価

八千代エンジニアリング(株)

同 上

同 上

同 上

正会員 ○ 齊藤 昇

関東支店 正会員 市川弘一

関東支店 正会員 河瀬日吉

岡田稔規

### 1. はじめに

P P C構造の最適設計とは, 終局, 疲労, 使用の各限界状態に対する各検討項目を「必要かつ十分」に満足するように部材断面寸法, P C鋼材および鉄筋量の最適値を決定することである。

その第一段階として, 曲げ部材の最適設計のための検討項目 ① 終局時の設計断面力, ② 疲労に対する鋼材変動応力度, ③ 永久荷重作用時のコンクリート応力度, ④ 曲げひびわれ幅, ⑤ たわみ度 の5項目の制限値に対し「必要かつ十分」な部材断面寸法, P C鋼材および鉄筋量の最適値を決定することとする。

本小論は以上の検討項目の設計値と制限値の比に着目し, この比と部材寸法, P C鋼材および鉄筋量との間の関係の定性的, 定量的評価を行い, P P C構造の最適設計へのかけ橋としたい。

なお, 設計の原則, 用語, 記号などは土木学会の平成3年版「コンクリート標準示方書」設計編<sup>1)</sup>による。(以下「土示」と略記) また, P P C構造の検討対象をP P C橋かつ単純けたとする。

### 2. 検討項目に対する安全性表示

#### 2.1 「土示」による安全性の尺度表示式

##### (1) 終局限界状態に対する検討

「土示」式(6.1.2)より 設計断面耐力  $R_d = R(f_d) / \gamma_b$

(6.1.3)より 設計断面力  $S_d = \sum \gamma_s S(F_d)$

したがって(6.1.1)の安全性の尺度表示式はつぎの①式で示される。

$$\frac{\gamma_b \gamma_i \sum \gamma_s S(F_d)}{R(f_d)} \leq 1.0 \quad \text{①}$$

##### (2) 疲労限界状態に対する検討

「土示」8.2より, 設計変動応力度 $\sigma_{r,d}$ , 設計疲労強度 $f_{r,d}$ として, 式(8.2.1)の安全性の尺度表示式はつぎの②式で示される。

$$\frac{\gamma_b \gamma_i \sigma_{r,d}}{f_{r,d}} \leq 1.0 \quad \text{②}$$

##### (3) 使用限界状態に対する検討

終局, 疲労限界状態同様安全性の尺度表示式を統一して示せば

##### i) 永久荷重時のコンクリート応力度の検討

コンクリートの乾燥収縮およびクリープによる緊張材引張応力度の減少量は, 実用解として猪股博士の「Ⅲ種プレストレストコンクリート」の(21), (22)式で示される連立方程式による<sup>2)</sup>。したがって少なくとも永久荷重時のコンクリート応力度 $\sigma_c$ に対し, 設計引張強度 $f_{t,d}$ を制限値とすれば, 安全性の尺度表示式はつぎの③式で示される。

$$\frac{\sigma_c}{f_{t,d}} \leq 1.0 \quad \text{③}$$

##### ii) 曲げひびわれの検討

「土示」式(7.3.1)表(7.3.2)より異形鉄筋に対する曲げひびわれ幅の計算値は次式で示される。

$$w = \{4C + 0.7(C_s - \phi)\} (\sigma_{s0} / E_s + \varepsilon'_{cs})$$

一般の環境の場合  $w_s = 0.005C$

腐食性環境の場合  $w_s = 0.004C$

したがって、曲げひびわれ幅の安全性の尺度表示式はつぎの④式で示される。

$$\frac{w}{w_s} = \alpha_0 \left\{ 1 + \frac{0.175(C_s - \phi)}{C} \right\} \left( \frac{\sigma_{s0}}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right) \leq 1.0 \quad \text{④}$$

ここに、一般の環境の場合  $\alpha_0 = 800$

腐食性環境の場合  $\alpha_0 = 1,000$

### iii) 変位, 変形量の検討

曲げひびわれによる剛性低下を考慮した換算断面二次モーメント  $I_o$  は「土示」式(解7.4.2)より

$$I_o = \left[ \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 I_g + \left( 1 - \left( \frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^3 \right) I_{cr} \right] \leq I_g$$

ここで、 $m = (M_{crd} / M_{dmax})^3$  とすれば、剛性低下率  $I_o / I_g$  はつぎのように示される。

$$\frac{I_o}{I_g} = m + (1 - m) \frac{I_{cr}}{I_g} \leq 1.0$$

したがって、 $I_o$  を用いた撓み度の設計計算値  $(\delta / l)$  に対し、その制限値を  $(\delta / l)_s$  とすれば、撓み度の安全性の尺度表示式はつぎの⑤式で示される。

$$\frac{(\delta / l)}{(\delta / l)_s} \leq 1.0 \quad \text{⑤}$$

以上の検討項目に対する安全性の尺度表示式 ①~⑤ を以下簡単のため、安全率  $\leq 1.0$  と略称する。

## 2.2 安全率の総括座標図

式①~⑤の安全率の数値をまとめて示すために図-1の正五角形を用いて座標表示することが考えられる。

中心点が安全率 = 0 (③のみ0以下) を示し、各頂点が式①~⑤が等号の場合、すなわち座標尺度1を示す。したがって直径1を10等分に目盛っておくと、検討項目の安全率の五角形を画くのに便利であり、この五角形により各検討項目の安全率の対比が一目瞭然となる。

なお、参考のため後述の計算仮定モデルの代表二例を図示した。

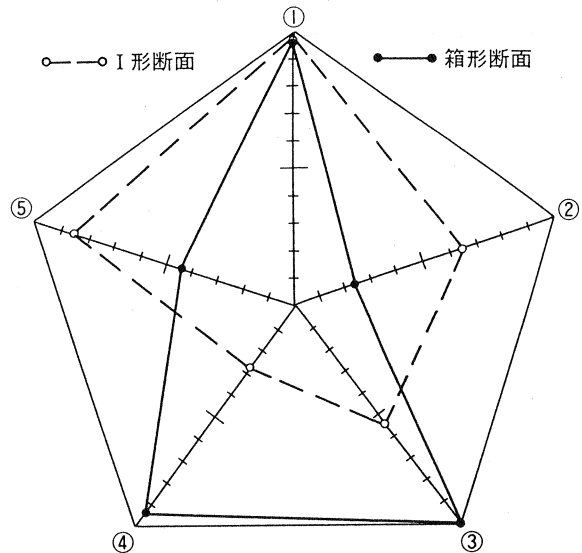


図-1 安全率の総括座標図

## 3. 検討項目の検討手順

断面形状が与えられ、PC(旧I種, II種)の場合の検討手順を既知とする。

### (1) PCケーブルの必要最小本数 $N_1$

式③ = 1より導入緊張力の最小値  $P_0$  を求める。(文献6)の(1)式参照)ケーブル本数は整数なので  $P_1 (\geq P_0)$  に相当する  $N_1$  本が求める必要最小本数となる。

### (2) 付加すべき鉄筋量 $A_{s1}$

ケーブル本数  $N_1$  とし、式① = 1を満足させる付加鉄筋量  $A_{s0}$  を求める。(文献7)の2.2.1参照)ただし、鉄筋径、配置本数は整数なので設計上の使用鉄筋量は  $A_{s1} (\geq A_{s0})$  となる。

以上の検討手順は図-2のようにまとめられる。すなわちPCケーブル本数, 鉄筋量の算定手順は, 式③, ①に対し, 図中のI→II→IIIの手順を経てIVに至ることが図上に示されている。なおPCの場合はI→IIが対応している。

(3) 鋼材量の決定

(1), (2)より求めたPCケーブル本数 $N_1$ 本, 鉄筋量 $A_{s1}$ を用いて, 他の検討項目②, ④, ⑤の安全率を求める。

i) 式②, ④, ⑤とも1

を超えなければ図中のIVに相当するPCケーブル本数 $N_1$ , 鉄筋量 $A_{s1}$ が設計上の最適値となる。

ii) 式②, ④, ⑤の少なくとも一つが1を超えるときは, 1となるような鉄筋量 $A_{s2}$  ( $\geq A_{s1}$ )を試算する。その結果図中のVの点が最適値を与えることになる。

ただし, この鉄筋量 $A_{s2}$ が部材断面に配置不能の場合は, ケーブル本数を( $N_1 + 1$ )本とし, かつ①=1を満足する鉄筋量 $A_{s4}$  ( $\leq A_{s1}$ )とする。その結果は図中のVIに相当する。

iii) なお, 式②, ④, ⑤の検討上の共通事項として, ひびわれ断面の中立軸を求めることが前提となる。その無次元した一般式は

$$\left[ \frac{M}{P_0 d_p} \left\{ \frac{1 + \frac{N d_p}{M} \left( \frac{d_s}{d_p} - 1 \right)}{1 - \frac{N}{P_0}} \right\} - 1 \right] = \left[ \frac{I_{cx}}{Q_{cx} d_p} \left\{ \frac{1 + \frac{n I_{sx}}{I_{cx}}}{1 - \frac{n Q_{sx}}{Q_{cx}}} \right\} - \frac{x}{d_p} \right] = F \left( \frac{x}{d_p} \right)$$

で示され, かつ $x/d_p$ と $F(x/d_p)$ の関係については, 文献6)の図-4により概算値が示されている。

4. 検討項目の定性的, 定量的評価

検討項目に対する各安全率の値は当然ながら断面形状寸法, PC鋼材量, 鉄筋量, 設計基準強度などの数値の与え方によって変動する。以下次の計算仮定モデルにより試算する。

4.1 計算仮定モデル

(1) 試算のための計算仮定モデル

断面形状	スパン (m)	桁高 (m)	プレストレッシング度	引張鉄筋比	ケーブル本数	各検討項目に対する設計曲げモーメント (tf-m)					
						①	②	③	④	⑤	
箱形断面	28.7	1.3	0.52~0.60	0.0015~0.0073	15~18	5,128	2,695	2,121	2,601	2,562	
		1.7	0.52~0.63	0.0014~0.0069	11~14	5,266	2,736	2,220	2,700	2,645	
		2.1	0.48~0.62	0.0013~0.0047	8~11	5,403	—	2,318	2,798	2,743	
I形断面	24.2	1.4	0.60~0.83	0.0009~0.0057	3~5	768	606	434	520	606	
		29.2	1.6	0.77~0.94	0.0009~0.0055	4~6	1,085	866	640	753	866
		34.2	2.0	0.61~0.91	0.0016~0.0051	4~6	1,437	1,146	842	994	1,146

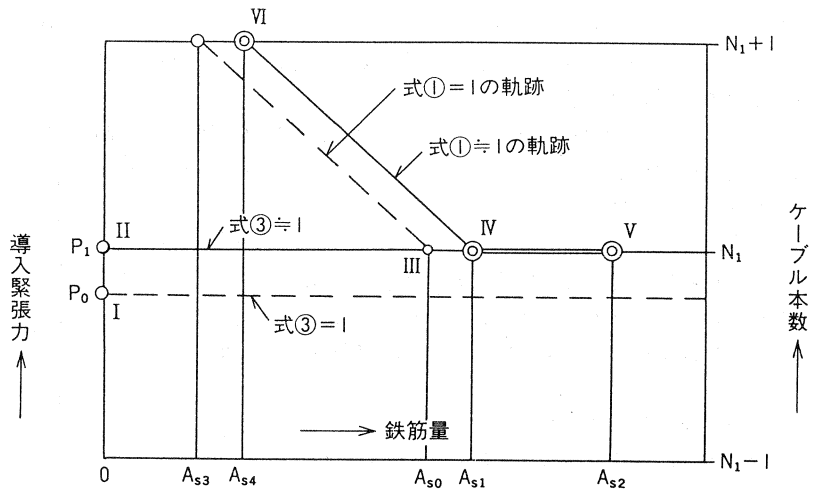


図-2 鋼材決定モデル図

(2) 計算結果のみ使用した計算仮定モデル

断面形状：T形，橋長：20～45m，スパン／桁高：14～18，ケーブル本数：4～6本，プレストレッシング度：0.71～0.79，下縁配置鉄筋断面積／部材断面積：0.0032～0.0072

(3) 主たる共通の計算仮定

コンクリートの設計基準強度：400kgf/cm<sup>2</sup>，P C鋼材の種別：SWPR 7 B-12T12.7

4.2 定性的評価

(1) 断面形状の特性

i) 種別表示式

断面形状の種別分けを示す無次元尺度としては、断面効率にも関係する  $\sqrt{I / (A h^2)}$  が適当であろう。計算仮定モデルによる桁高 h との関係図を図-3に示す。

ii) 検討項目に対する有意差

各検討項目に対する安全率の代表例を図-1に示した理由は、断面形状による有意差を示したかったからである。すなわち安全率 = 1 となる検討項目は、箱形断面の場合、式①および③であるのに対し、I形またはT形断面の場合は、式①と②または⑤となり、断面形状による有意差は明らかである。このことは下縁幅の有効度の差であることを示している。

(2) 鋼材量と安全率

i) P C鋼材量を増加させれば、式①～⑤はすべて安全側に変動する。ただし、式③、⑤はほぼ直線的に変化するが、式①、②、④は曲線的な変化を示す。

ii) 鉄筋量の増加による安全率の変動は定性的にはほぼ i) と同様であるが、注意すべきことは式③のみ危険側に変動することである。その一例を図-4に示す。このことは配置鉄筋は原則として応力計算上常に考慮にいれなければならないことを意味している。

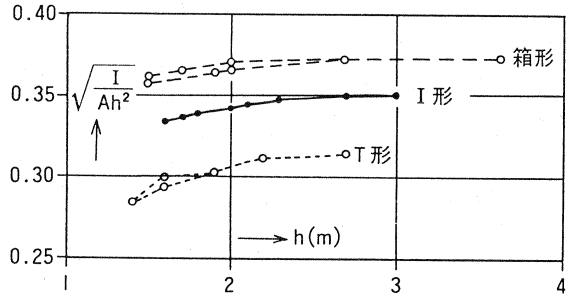


図-3 断面形状の種別分け図

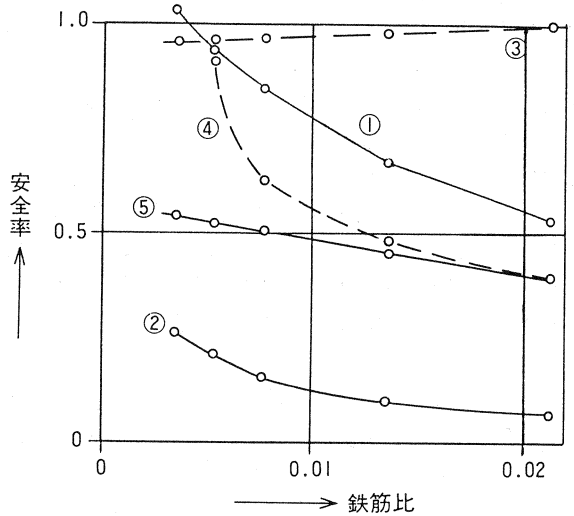


図-4 鉄筋比と安全率のモデル図

4.3 定量的評価

設計計算書の照査を行う立場で考える。それは安全率の余裕が図-2中のIV点のように止むを得ない理由によるものかどうかの確認を行う。もし、余裕が過大ならば当然ケーブル本数の減少、または設計基準強度の低下の可能性が生じる。

4.3.1 定量的評価式

(1) 式①の定量的評価式

設計断面耐力を、ケーブル本数  $N_p$  本の場合  $[R_d]_0 = [R(f_d)]_0 / \gamma_b$

”  $(N_p - 1)$  本の場合  $[R_d]_{-1} = [R(f_d)]_{-1} / \gamma_b$

とし、それぞれに対する安全率を①<sub>0</sub>、①<sub>-1</sub>とすれば式①より

$$\textcircled{1}_0 = \frac{\gamma_b \gamma_i [\gamma_a S(F_d)]}{[R(f_d)]_0}$$

$$\textcircled{1}_{-1} = \frac{\gamma_b \gamma_i [\gamma_a S(F_d)]}{[R(f_d)]_{-1}}$$

となる。また、両式の分母の関係式を補正係数 $\alpha_1$ を用い

$$[R(f_d)]_{-1} = [R(f_d)]_0 \times \frac{N_p - 1}{N_p} \alpha_1$$

とおけば 
$$\frac{\textcircled{1}_{-1}}{\textcircled{1}_0} = \frac{N_p}{(N_p - 1) \alpha_1} \quad \text{⑥}$$

となる。したがって $(N_p - 1)$ 本の可否の境界値は、式⑥において $\textcircled{1}_{-1} = 1$ ,  $\textcircled{1}_0 = \alpha_1'$ とおくことにより

$$\alpha_1' = (N_p - 1) \alpha_1 / N_p \quad \text{⑥}'$$

と求められる。 $\alpha_1'$ は計算仮定モデルより試算計算により仮定する。

(2) 式③の定量的評価式

式③に対しては、 $\sigma_c = 0$ の場合を考慮して、 $\sigma_c$ の定量的評価に着目する。すなわち永久荷重時のコンクリートの下縁応力度を ケーブル本数 $N_p$  本の場合を $[\sigma_c]_0$   
 "  $N_p - 1$ 本の場合を $[\sigma_c]_{-1}$

とし、 $[\sigma_c]_0$ に対する導入プレストレスを $[\sigma_{c,pt}]_0$ 、補正係数を $\alpha_3$ とすれば $[\sigma_c]_{-1}$ の概算値は

$$[\sigma_c]_{-1} = [\sigma_{c,pt}]_0 \frac{N_p - 1}{N_p} + \{ [\sigma_c]_0 - [\sigma_{c,pt}]_0 \} \times \alpha_3 \quad \text{⑦}$$

$\alpha_3$ は計算仮定モデルより試算計算により仮定する。

4.3.2 安全率 $< 1$ の場合の評価

(1) 式① $< 1$ の場合

計算モデルにより式⑥'の計算結果を図示すると図-5が得られる。したがって式①の値がどの領域にあるかによって、検討項目①の評価が定められる。すなわち領域Iにある場合：使用ケーブル本数は適切であることを示す。

領域IIIにある場合：安全率の余裕は過大で、ケーブル一本は減少可能であることを示す。

領域IIにある場合：ケーブル減少の可否は微妙で精算により判定すべきことを示している。

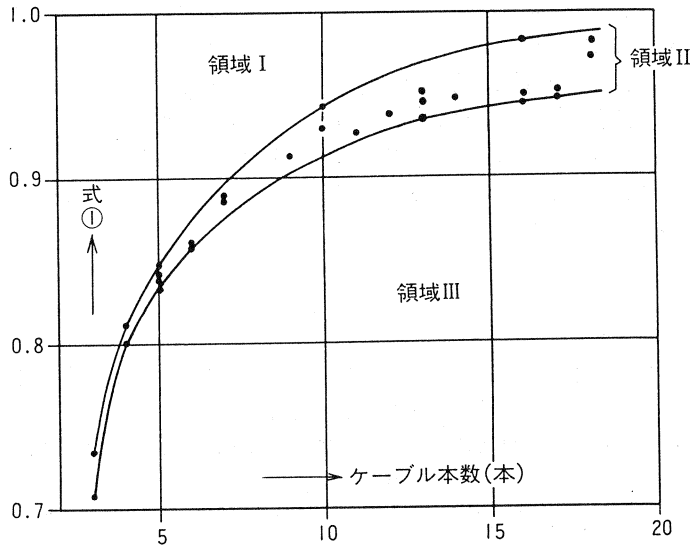


図-5 式①の評価図

(2) 式③ $< 1$ の場合

余裕の程度によりケーブル本数の減少の可否を式⑦より $\alpha_3$ 値を仮定することにより概算できる。それには計算仮定モデルの試算により $\alpha_3$ 値を逆算してみると図-6が得られる。

したがって、箱型断面の場合は $\alpha_3 = 0.96$ 、I型断面の場合は $\alpha_3 = 0.87$ として式⑦より $[\sigma_c]_{-1}$ を求め $f_{td}$ と比較してケーブル本数減少の可否を決定する。

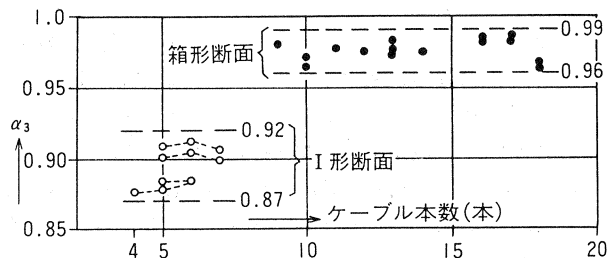


図-6 式③評価用 $\alpha_3$ 図

(3) 設計基準強度と安全率

式①または③の安全率に余裕があるが、(1)および(2)の試算結果ケーブル本数を減少させることが不可能の場合、次善案としてコンクリートの設計基準強度を低下させられないかという問題が生じる。

ここでは、設計基準強度  $f'_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$  を  $300 \text{ kgf/cm}^2$  に低下させた場合、安全率①～⑤にどの程度の影響を与えるかを箱型断面の計算仮定モデルによって対比してみた結果をつぎに示す。

安全率①, ③, ⑤はそれぞれ危険側に, ②, ④は安全側に変動している。

変動比率は, ①は1%以下, ②は4%以下, ③は18%~19%, ④は3%以下, ⑤は10~11%程度であった。したがって, 式③ = 0.8以下の場合には設計基準強度の低下を考えるべきである。

## 5. おわりに

本論文はP P C構造の最適設計へのかけ橋の第一段階として, P P C単純けたの曲げ部材設計法に対して「土示」に示されている各限界状態の安全性の検討結果の定性的, 定量的評価を, 試設計のデータを基にまとめたものである。本研究によって得られた成果を要約すれば以下のようにまとめられる。

(1) 使用限界状態に対する安全性の検討の尺度表示式を, 終局および疲労限界状態に対する安全性の検討の尺度表示式①および②との統一を図り, 式③, ④, ⑤とした。また, 式①～⑤の数値表示の総括としては, 図-1の五角形による座標表示により簡明化させた。

(2) 断面形状の種別分けとしては, 断面効率を兼ねた,  $\sqrt{I/Ah^2}$  が適当である。(図-3)

(3) 式①～⑤の安全率の余裕の程度を知るため, 定量的評価式⑥および⑦による具体的な数値例を示し, これにより設計照査の一助になることを期待したい。

最後に, 問題点と今後の発展方向について補足すると

(1) 式②, ④, ⑤についても定量的評価式を示したい。

(2) 曲げのみでなく, せん断, ねじりを含めた検討項目の安全性の尺度表示式を提示したい。

(3) 猪股先生の統一設計法の立場での検討項目の安全性の評価への影響度の対比などが考えられる。

## 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書〔平成3年版〕設計編 6章6.1 7章7.3.4, 7.4.3, 8章8.2, 1991・9
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物, 6章6.1 7章7.2.2, 7.3.2, 7.4.2, 8章8.2, 1992・11
- 3) 猪股俊司: Ⅲ種プレストレストコンクリート, コンクリートジャーナル, VOL12, No.9 PP11~12, 1974・9
- 4) 日本国有鉄道構造物設計事務所: 計算例1, 付着のあるケーブルを用いる場合, PRCけた設計指針(案) PP27~47, 1987・2
- 5) 斉藤, 市川, 河瀬, 岡田: コンクリート構造物の統一設計法への道, 第3回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, PP19~24, 1992・10
- 6) 斉藤, 市川, 河瀬, 岡田: パーシャルプレストレストコンクリートの最適設計への道, 93' FIPシンポジウム論文集 P235~242, 1993・10
- 7) 斉藤, 市川, 河瀬, 岡田: P C桁及びP P C桁設計における計算仮定に対する計算精度の評価と選定法について, 第4回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, PP224~225, 1994・10