

## (9) 実務者の立場からみた設計上と施工上の統一理論 への対応と提言

八千代エンジニアリング（株） 正会員 齊藤 昇

### 1. 設計上、特に RC・PC の統一理論への対応

まえがき 猪股、六車両博士が RC と PC の統一設計法を提唱され、<sup>1) 2)</sup> 特に猪股博士がその理論式を公表されている。近い将来、統一理論が主流となり、その簡易解、特殊解として、現在の RC、PC の設計法が位置づけられよう。ただ 実務者の立場からまず理解したいのは、現設計法との実例による対比結果で、その結果を踏まえ、統一理論の周知、発展に寄与したい。なお、統一理論の焦点は現在、曲げ部材の使用限界状態に対するもので、問題点は結局、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の計算上の考え方にしぼられるようで、本報告もそれに従って対比した。

#### 1.1 構造コンクリート曲げ部材使用限界状態に対する計算仮定の対比

構造コンクリートの現分類	曲げひびわれ限界状態	断面諸元	クリープ、乾燥収縮による 応力度変化	計算仮定の 精度の評価
		計算上考慮する 軸方向筋	計算式	
P C	引張応力発生 限界状態	無 視	従 来 式	E
	曲げひびわれ発生 限界状態			
P P C o r P R C	曲げひびわれ幅 限界状態	最 下 段 (一 段)	鉄筋を PC 鋼材に 換算して、従来式	D
			従来式を拡張し、 鋼材位置別に連立 方程式を解く。	C
		上 縁 腹 部 最 下 段 } (三 段)	統一設計法 <sup>1)</sup>	B A
R C		主鉄筋	$n = 15$	F

1) 猪股俊司 構造コンクリート曲げ部材使用限界状態の統一設計計算法 コンクリート工学 VOL.26 No.12

2) 六車 熙 建築構造物とパーシャルプレストレスコンクリート ———— VOL.25 No.7

1.2 猪股論文数値計算例<sup>1)</sup>についての対比

(1)単純曲げをうける複鉄筋RC部材断面(応力度単位: kg/cm<sup>2</sup>)

位置 材料別応力度	設計法種別	永久荷重載荷直後	コンクリートのクリープ、乾燥収縮終了時	変動荷重作用時
上縁 コンクリート応力度	統一設計法	63.1	29.9	83.4
	現設計法	48.2		88.9
下縁 鉄筋応力度	統一設計法	980	989	1810
	現設計法	997		1840

(2)単純曲げをうけるPPC部材断面の上下縁コンクリート応力度(kg/cm<sup>2</sup>)

コンクリート 応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	①永久荷重作用 状態でプレスト レッシング直後	②グラウト注入後 変動荷重載荷	③変動荷重撤去	④クリープ、乾 燥収縮、レラク セーション終了時	⑤変動荷重載荷	
上縁	A	41.5	78.2	43.5	38.5	73.0
	B		←変動荷重作用せず→		37.1	74.8
下縁	A	-14.1	(-212.5)	-25.5	-35.0	(-182.2)
	B		←変動荷重作用せず→		-22.7	(-237.8)

( ): 参考値

1.3 実橋PPCIげたについての対比

主な検討条件

桁	高	H = 1.7 <sup>m</sup>
永久荷重	M <sub>d</sub>	= 646 <sup>t-m</sup>
変動荷重	M <sub>l</sub>	= 282 "

クリープ係数	: φ = 2.6
乾燥収縮度	: ε <sub>s</sub> = 2 × 10 <sup>-4</sup>
レラクセーション率	: r = 5%
緊張力	: P <sub>t</sub> = 135.5 <sup>t</sup> × 4

鉄筋配置(三段の場合)

上縁	y = 16.5 <sup>cm</sup>	As = 31.8 <sup>cm<sup>2</sup></sup>
腹部	103 "	11.9 "
最下段	162.6 "	50.0 "

コンクリート 応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	①永久荷重作用 状態でプレスト レッシング直後	②グラウト注入後 変動荷重載荷	③変動荷重撤去	④クリープ、乾 燥収縮、レラク セーション終了時	⑤変動荷重載荷		
上縁	A	74.6	←変動荷重作用せず→	142.0	76.0	71.6	142.4
	B			71.0	141.3		
	C			81.9	省略		
	D			80.1			
	E			80.5			
下縁	A	12.7	←変動荷重作用せず→	(-209.9)	4.8	-17.7	(-250.4)
	B			-13.8	(-252.8)		
	C			-13.9	省略		
	D			-5.0			
	E			-7.4			

## 1.4 対比結果総括と統一理論への対応

### (1) 対比結果総括

統一設計法（A）と現設計法（B～F）の対比結果、数字上の差は当然あるが、実用上問題となる程ではないようだ。このことはクリープ係数、乾燥収縮度、レラクセーション率などの、ばらつきを考慮すれば、両者の差の問題は一層なくなってくる。

### (2) 統一理論への対応

i) 学者の先生方は、コンクリート構造物の統一設計法を確立され、学会などに認知させるとともに、学校教育の段階から統一設計法をまず理解させた上で、その両極端に現在のRC・PCの設計法が位置づけられていると教えていただきたい。

ii) 我々実務者は、実際の設計、施工業務を通し、PPCの合理性、経済性を示すとともに設計手法の難解、複雑化に対し、電算化、ノモグラム等による設計の効率化を図る。

iii) 統一理論が認知されるまでは、その時点の統一設計法と現設計法（B）との併用により対応する。

## 2. 施工上、特に導入緊張力決定の統一理論への提言

まえがき プレストレッシング管理の大前提である導入緊張力決定方法に、統一理論が必要なことは明らかである。しかるに最近 イ) 摩擦係数の再検討<sup>3)</sup> ロ) 緊張管理グラフの適用解釈<sup>4)</sup> など統一理論上、明確化すべき点が生じている。そこでこれらの点も含め、実例によって統一理論を再確認してみる。

### 2.1 統一理論のための前提と検討モデル

土木学会コンクリート標準示方書 施工編 25章 25.5.4 プレストレッシングの管理（1）～（5）項目は<sup>5)</sup>（以下、引用の場合「土示（ ）項」と略記）統一理論のための前提そのものであるとよい。実務者としては特に「（5）摩擦係数および緊張材の見掛けのヤング係数は、現場において試験により、これを求めるのを原則とする。」に着目し、かつ その実施例から より具体的な統一理論のための基本事項を再確認したい。

実施例としては、最も基本的なフレシネー工法の単純けたで、1主桁当りケーブル本数12本中のNO.8ケーブルを選ぶ。（形状寸法は図-1参照）

設計計算書に示されたスパン中央に必要な緊張力は、弾性変形による減少を考慮して  $P_j = 43.6^t$  である。

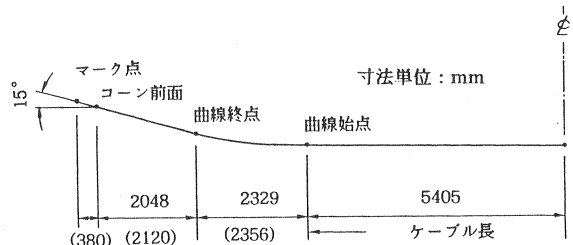


図-1 ケーブル形状寸法

## 2.2 試験緊張実施例

### 2.2.1 測定結果と関係式

圧力計示度を緊張側  $\sigma_{m2}$ 、固定側  $\sigma_{m1}$ 、PC鋼材伸び量を  $\Delta \ell$  とし、「土示(2)項」より、 $\sigma_{m2} - \sigma_{m1}$  および  $\sigma_{m2} - \Delta \ell$  の関係が直線になっていることを確認の上、最終値  $\sigma_{m2} = 350 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_{m1} = 275 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\Delta \ell = 112 \text{ mm}$  を読みとる。 $(\Delta \sigma_m = 0)$

測定値間の関係式は、

$$A_m \cdot \sigma_{m2} = f(x_i) \cdot P_j$$

$$P_j = f(x_i) \cdot A_m \cdot \sigma_{m1}$$

$$\sigma_{m2} = [f(x_i)]^2 \cdot \sigma_{m1}$$

$$\Delta \ell = \frac{f/A}{A_p \cdot E_p}$$

ここに  $A_m$  : 圧力計断面積 ( $157.8 \text{ cm}^2$ )

$f/A$  : 緊張力分布面積

$A_p$  : PCケーブル断面積 ( $4.618 \text{ cm}^2$ )

$E_p$  : PC鋼材ヤング係数

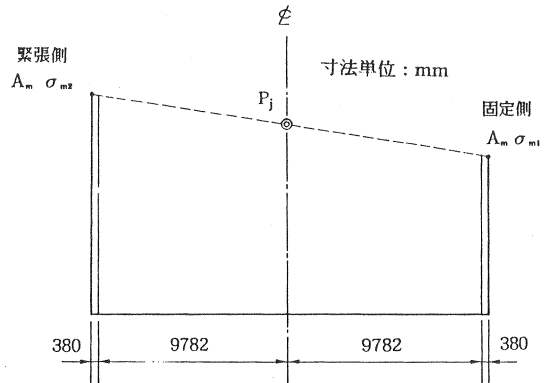


図-2 緊張力分布曲線

### 2.2.2 解析手順と結果一覧

- (1) 測定結果より、 $f(x_i) = \sqrt{\sigma_{m2} \div \sigma_{m1}} = \sqrt{350 \div 275} = 1.128$
- (2)  $f(x_i)$  の関数形および  $\lambda$  値を仮定すれば、 $\mu$  値が求められる。
- (3)  $\mu$  が求まれば 緊張力分布曲線がきまり、その面積  $f/A$  が求められる。
- (4) したがって 測定された  $\Delta \ell$  に対応する  $E_p$  が求められる。
- (5) 計算結果一覧表

計算上の仮定			計算仮定からの計算値		
分類	$f(x_i)$ の関数形	$\lambda/\mu$	$\mu$	$f/A$ (t-m)	$E_p$ (kg/cm <sup>2</sup> )
①	$(1 + \gamma) \exp(\mu \alpha + \lambda \ell)$	0.0133	0.207	$20.35 P_j$	$1.96 \times 10^6$
②		0	0.310	"	"
③	$(1 + \gamma)(1 + \mu \alpha + \lambda \ell)$	0.0133	0.215	"	"
④		0	0.324	"	"

### 2.2.3 試験緊張結果の意味づけ

- (1) 測定値間の軌跡の直線性と  $f(x_i) = 1.128$  の意味
  - i)  $f(x_i)$  は測定値  $\sigma_{m2}$ 、 $\sigma_{m1}$  の軌跡の傾斜角の大きさを表わす。
  - ii)  $f(x_i)$  を構成する個々の値は不明であるが、それぞれが一定値であることは確かである。したがって摩擦係数もある一定値になっている。
  - iii) スパン中央を1としたとき、桁端で12.8%増の緊張力を与えればよいということの意味している。この意味で  $f(x_i)$  を総合摩擦係数とでも名付けるのがよい。

(2) 緊張力分布曲線について

始点  $A_m$   $\sigma_{m1}$  から、中点  $P_j$  を経て終点  $A_m$   $\sigma_{m2}$  に至る経路は、 $f(x_i)$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  値の与え方で無限に存在する。ただし  $\sigma_{m2}$ 、 $\sigma_{m1}$  の関係が定数で既知ならば、 $f(x_i)$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  値の与え方に関係なく実用上の精度で、 $1/A$  は一定、したがって  $E_p$  も一定であると考えられる。

2.3 緊張管理グラフの適用解釈について

前述の試験緊張を他の代表ケーブルについて、方向性、順序性を考慮して実施した結果統計学の力を借り、所定の緊張力を導入したと推定できる母集団を求める。<sup>6)</sup> いま その母平均  $\bar{\mu}$ 、 $\bar{E}_p$  に対する圧力計示度が  $\sigma_{m0}$ 、PC 鋼材伸び量が  $\Delta \ell_0$  になったとする。(図-3)

統計手法による管理グラフ	推定母集団の簡易化		統計量の表示方法
	第一段階	第二段階	
	$\bar{\mu}$ 、 $\bar{E}_p$ の網目 	$\bar{E}_p$ の下限 	$\bar{\mu}$ $\left[ A'B' \text{ 線上 (一般に } E_p = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{) の } \bar{\mu} \text{ 値} \right]$
	$\delta_1$ による同心円 		

図-3 緊張管理グラフの簡易化

2.4 統一理論のための基本事項

(1) 二つの基本値

測定値の直線性を確認の上、導入緊張力決定に必要な基本値は、総合摩擦係数ともいふべき  $f(x_i)$  と PC 鋼材伸び量に対応する PC 鋼材の見掛けのヤング係数  $E_p$  である。

(2) 摩擦係数  $\mu$  および  $\lambda$  について

i)  $f(x_i)$  を分解する時、 $\lambda$  を仮定して  $\mu$  のみ変数と考えるのが簡明で、実用上十分である。したがって以上の定義で求めた  $\mu$  は  $\bar{\mu}$  で表わし、本来の  $\mu$  と区別するのがよい。

ii)  $\lambda$  値にこだわる場合は、試験緊張より最小二乗法により算出すればよい。 $\lambda \neq 0$  かどうかはそれにより実証される。

### (3) PC鋼材ヤング係数について

現場においてPC鋼材の伸び量を求めるための $E_p$ と、材料試験成績表の $E_p$ とに有意差があつて当然である。なぜなら両者の測定の現状をみれば、ばらつきの原因が質、量ともに違つているからである。我々の知りたいのは、もちろん前者の $E_p$ である。したがつてこの $E_p$ に対し、見掛けのヤング係数という呼び名とともに、記号も $\dot{E}_p$ と区別するのがよい。

### (4) 緊張管理グラフについて

i) 緊張管理グラフによつて最終緊張力を決定する場合、工学的実用性からいつて、二変数が適切で、その二変数として上述の $\ddot{\mu}$ および $\dot{E}_p$ が最適である。

ii) 統計的手法による推定母集団は、実用上から簡易化を試みると図-3に示す二方法が考えられる。ただし 何れも圧力計示度とPC鋼材伸び量による管理手法あであることは共通で、ただ 統計量の表現方法が二通りあるということである。7) 8)

## 2.5 むすびと今後の課題

### (1) 異なる意見、考え方、方法論などへの対応

i) 互いに解析可能なように、具体的データを公開しあい対比できるような習慣が望まれる。そのためには 学会とか協会の中に研究会などを設けるのがよい。

ii) 共通の土俵を 対比の前提とすること ( $\delta x$  測定値の軌跡の直線性)

iii) 第一段階として 簡単な実例で対比する。(  $\delta x$  単純けた, 対称ケーブル)

### (2) 今後の課題

i) 測定値の軌跡が非直線性の場合の処置。(「土示(2)項」参照)

ii) 試験緊張の場合  $\sigma_{m2}$ 、 $\sigma_{m1}$  の測定値の軌跡が必ずしも原点を通るとは限らず、 $\Delta\sigma_m$  のズレを生ずる場合がある。この場合 解析式はやや複雑となる。6)

iii) くさび定着の場合のセット量の影響対策の明確化。

iv) 不静定構造物の場合、対称ケーブル配置としても、その対称の中心点と不動点(摩擦係数のばらつきに無関係に、常に緊張力が一定の点)は一般に一致しない。このような場合も含め 緊張端と不動点との関係および任意点を不動点とした場合の緊張管理の考え方については 文献7)にふれているが、特に 緊張端と不動点の組合せによる違いについて、機会あれば実例によつて示したい。

## 2. に対する主なる参考文献

3) 安井昌幸：プレストレス導入における摩擦係数の再検討 プレストレスコンクリート VOL.30, NO.2

4) コンクリート工学 VOL.28 No.5 構造設計に関するQ & A

5) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 25章 25.5.4 プレストレッシングの管理

6) 齊藤 昇：プレストレス管理体系化のための基本事項 プレストレスコンクリートVOL.28, NO.3

7) ——：緊張管理グラフと導入緊張力についての考察 PC協会 26回研究発表会

8) 野口 功：プレストレスの施工および管理 土木施工 VOL.5, NO.11