

(5) コンクリート構造物の統一設計法への道

八千代エンジニアリング(株) 技術本部	正会員	○齊藤 昇
同 上	首都圏事業部	正会員 市川弘一
同 上	同 上	正会員 河瀬日吉
同 上	同 上	岡田稔規

1. はじめに

猪股、六車両博士がRCからPCまでの統一設計法を提唱されるとともに、曲げ部材使用限界状態に対して猪股博士、終局限界状態に対して六車博士が理論式を発表されている。^{1) 2) 3)}

すなわち、RC、PCの現設計法から見ると統一設計法はRCとPCの中間的存在となるが、統一設計法が認知されればコンクリート構造物設計法の一般解を統一設計法が与え、その特殊解、簡略解として現在のRC、PC設計法が位置づけられよう。

設計実務者としては、まず簡単な事例による対比より、統一設計法と現設計法との関係を理解した上で、統一設計法から現設計法への移行過程を実証する足がかりを掴みたい。本報告は曲げ部材使用限界状態のクリープ、乾燥収縮の解析方法に重点をおいて対比を試み、特に、① RC設計法におけるn=15の定量的意味づけ、② 統一設計法におけるエージング係数κの標準値0.8の妥当性 ③ クリープ解析上、全断面有効と仮定できる境界値 ④ 計算上考慮する軸方向筋の考え方の差、などについて解明を行い、統一設計法の周知、発展への第一歩としたい。

2. 計算結果対比のための前提事項

2. 1 プレストレストコンクリートの種別対比

土木学会標準示方書 設計編(以下「土示」と略記) 11.3 使用限界状態に対する検討において、プレストレストコンクリートの種別分けが明示されている。⁴⁾これを「プレストレッシング度」⁵⁾という尺度と関係づけると次の表-1のようにまとめられる。

表-1 プレストレッシング度とプレストレストコンクリート種別対比表

プレストレッシング度 κ		1.0		1.0 > κ > 0		0			
		PC				PPC or PRC		RC	
「土示」 プレストレスト コンクリート の種別	昭和53年版	I種		II種		III種		IV種	
	平成3年版	引張応力度にならない 限界状態		設計引張強度の60% を超えない限界状態		許容ひびわれ巾を超えない 限界状態			
クリープ、乾燥収縮による 緊張材引張応力度の減少量 を求めるための算定式		「土示」11.2 プレストレスト力				「解説」		省略	
		$\Delta\sigma_{pcs} = \frac{n\phi(\sigma'_{cd} + \sigma'_{cpt}) + E_p \cdot \epsilon'_{cs}}{1 + n \frac{\sigma'_{cpt}}{\sigma'_{pt}} \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)}$				ひびわれの影響を 考慮して別途検討			

2. 2 クリープ、乾燥収縮に対する解析方法対比

現設計法と統一設計法との考え方の根本的相違は、クリープ、乾燥収縮に対する解析方法を成立させる前提条件にある。このことを含め両者の関係は次頁の表-2のようにまとめられる。

表-2 クリープ、乾燥収縮に対する設計法対比表

設計法		現 設 計 法			統 一 設 計 法			
プレストレッシング後 PC鋼材に生ずる応力変化		導入プレストレスのみが 変化するものとする。			応力変化を生ぜしめる荷重 作用によるものとする。			
クリープなどの 進行時期に対す る作用荷重	進行開始前	永 久 荷 重 の み			変動荷重も作用する			
	進 行 中				永久荷重のみ			
断面諸元を求 めるための前提	有効断面	全 断 面			圧 縮 部			
	原 点	重 心 軸			上 縁			
計算上考慮する軸方向鉄筋 の位置		無 視	下縁 ($i=1$)	下縁、上縁 ($i=2$)	下縁、腹部 上縁($i=3$)	下縁 ($i=1$)	下縁、上縁 ($i=2$)	下縁、腹部 上縁($i=3$)
ヤング係数比		$n_p = \frac{E_p}{E_c}$	$n_p = \frac{E_p}{E_c}, n_s = \frac{E_s}{E_c}$		$\bar{n}_p = (1 + \chi\phi) n_p$ $\bar{n}_s = (1 + \chi\phi) n_s$			
クリープ、乾燥収縮による 緊張材引張応力度の減少量 を求めるための考え方と算 定式		ひずみの釣合い条件を求める位置			参考文献 2) 参照			
		PC鋼材重心 位置。したがって従来 式(表-1 参照)より 求める。	PC鋼材と鉄 筋の合成重 心位置。し たがって従 来式を適用 する。	PC鋼材と鉄筋のそれぞ れの重心位置。 したがって従来式を拡 張した連立方程式を解 いて求める。				
		鉄筋拘束力の影響を考慮する						
計算仮定精度の評価		D	C	Bi	Ai			
参考文献の計算例			7)	6)	2)			

2. 3 統一設計法の前提事項

統一設計法の考え方、記号、計算式などの詳細については参考文献2)を参照されたい。ここでは考え方の前提となる、時間、検討状態に対する作用荷重、抵抗断面などの関係について次の表-3にまとめた。

表-3 統一設計法の前提事項

時間 対比項目	$t=t_0$ (クリープ開始前)			$t=t_\infty$ (クリープ終了後)	
	検討状態	[1] プレストレス導入時	[2] グラウド後 変動荷重載荷	[3] 変動荷重 除去	[4] クリープ、乾燥 収縮など終了時
作用荷重など	①プレストレス ②永久荷重	①プレストレス ②永久荷重 ③変動荷重	①プレストレス ②永久荷重	①プレストレス ②永久荷重 ④クリープなど	①~③ ⑤基本状態での 鋼材応力度
断面諸元 A, Q, I	鉄筋換算断面 A_{es}, Q_{es}, I_{es}	鉄筋、PC鋼材換算断面 A_{ep}, Q_{ep}, I_{ep}		コンクリート純断面 A_c, Q_c, I_c クリープ換算断面 $\bar{A}_e, \bar{Q}_e, \bar{I}_e$	鉄筋、PC鋼材 換算断面 A_{ep}, Q_{ep}, I_{ep}
中立軸決定次数	—————	3次方程式		5次方程式	3次方程式

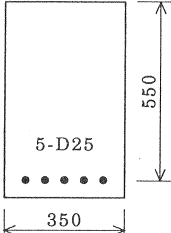
3. 実例による計算結果対比

3.1 RCの場合

簡単のため、曲げモーメントのみを受けるRC部材を考えれば、統一設計法の一般式において、²⁾軸力、PC鋼材量、レラクセーション率などが0とおけるから計算は相当簡単となる。特に $t=t_0$ のとき、中立軸位置は現設計法と同様に、二次方程式を解くことにより予め決定できる。

計算条件と図-1の断面形状寸法に対する計算結果は次の表-4のようにまとめられる。

表-4 計算結果対比表

$E_c = 25 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $E_s = 210 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $M_g = 12.1 \text{ tf}\cdot\text{m}$ $M_q = 10.2 \text{ tf}\cdot\text{m}$ $A_s = 25.33 \text{ cm}^2$ $\phi = 2.5$ $\chi = 0.8$ $\epsilon_{sh} = 2 \times 10^{-4}$							
				図-1 (単位: mm)			
応力度	時間 荷重 設計法 n	t_0		t_∞ (クリープ、乾燥収縮終了時)			
		永久荷重のみ		RC		統一	
		RC	統一	RC	統一	RC	統一
σ_c (kgf/cm ²)	8.4	(70.1)	70.1	(70.1)	—	(129)	110
	15.0	58.6	—	58.6	—	108	—
	25.2	(51.1)	—	(51.1)	50.2	(94)	—
σ_s (kgf/cm ²)	8.4	(992)	992	(992)	—	(1828)	1880
	15.0	1026	—	1026	—	1892	—
	25.2	(1063)	—	(1063)	1068	(1958)	—

3.2 PCの場合

持続的応力変化を考える場合、統一設計法では現設計法で使用していないエージング係数 χ を考慮している。 χ の値は一般に0.5~1.0といわれ、普通0.8を標準値としているようである。本例は $\chi=0.5, 0.8, 1.0$ と変化させ現設計法と対比させた。

計算条件と図-2の断面形状寸法に対する計算結果は次の表-5.1、5.2のようにまとめられる。

表-5.1 計算条件と断面形状寸法

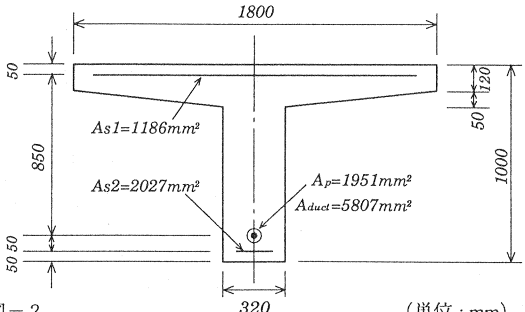
$E_c = 35 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $E_s = 210 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $E_p = 200 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_{pt} = 1.14 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ $\Delta\sigma_{PR} = 0.05\sigma_{pt}$ $\phi = 2.6$ $\chi = 0.5, 0.8, 1.0$ $\epsilon_{sh} = 2 \times 10^{-4}$ $M_g = 104.5 \text{ tf}\cdot\text{m}$ $M_q = 33.8 \text{ tf}\cdot\text{m}$	
	図-2 (単位: mm)

表-5.2 計算結果対比表

時間	検討状態	上縁応力度 $\sigma_{co}(kgf/cm^2)$				下縁応力度 $\sigma_{ch}(kgf/cm^2)$			
		統一設計法		現設計法		統一設計法		現設計法	
t_0	[1] プレストレス導入時	27.0		27.0		68.7		68.7	
	[2] 変動荷重載荷	48.7		↓		23.4		↓	
	[3] 変動荷重除去	28.2				62.7			
t_∞	クリープ、乾燥収縮 [4] リラクセーション 終了時	32.8	31.6	31.1	32.4	18.1	28.5	33.4	40.7
	[5] 変動荷重載荷	53.3	52.1	51.6	52.9	-21.2	-10.8	-5.9	1.4
クリープなどの影響による変動([4]-[3])		4.6	3.4	2.9	5.3	-44.6	-34.2	-29.3	-28.0
χ		0.5	0.8	1.0	-	0.5	0.8	1.0	-

3.3 PPCの場合

(1) 全断面有効と仮定できる境界値

計算条件、断面形状寸法などは3.2と同一とする。ただし、PC鋼材量のみ変化させ全断面有効と仮定できる境界値を、プレストレスング度によって対比する。計算結果を表-6に示す。

表-6 計算結果対比表

プレストレスング度		0.61		0.75		0.87		1.0	
$A_p(cm^2)$		11.15		13.94		16.73		19.51	
検討状態	[3]	$y_n(cm)$	58.7	-	-	-	-	-	-
		$\sigma_{co}(kgf/cm^2)$	46.0	43.3	-	38.2	33.2	28.2	
		$\sigma_{ch}(kgf/cm^2)$	-32.4	-16.5	-	10.2	36.6	62.7	
	[4]	$y_n(cm)$	51.0	-	85.0	-	-	-	
		$\sigma_{co}(kgf/cm^2)$	43.2	40.9	37.9	37.7	34.6	31.6	
		$\sigma_{ch}(kgf/cm^2)$	-41.5	-24.1	-6.7	-6.0	11.5	28.5	

表-7 計算結果対比表

(2) 軸方向鉄筋の考え方対比

第一回シンポジウムにおける報告のなから、実橋PPCげたについての対比結果より⁸⁾検討状態[4]-[1]、[4]-[3]に着目し、かつ表-2の計算仮定精度、 A_i, B_i, C, D と対応させれば表-7のようにまとめられる。同表から明らかなことは、クリープ開始前の変動荷重作用の有無の仮定の差であろう。

対比項目	コンクリート応力度 (kgf/cm^2)			
	上縁		下縁	
	[4]-[1]	[4]-[3]	[4]-[1]	[4]-[3]
精度 A_3	-3.0	-4.4	-30.4	-22.5
B_3	-3.6	—	-26.5	—
B_1	+5.0	—	-26.6	—
C	+3.2	—	-17.7	—
D	+4.2	—	-22.9	—

4. おわりに

4. 1 計算結果対比よりの推論

4. 1. 1 RCの場合における、 $n=15$ への移行過程

理論的にはコンクリートのクリープ、乾燥収縮による断面力再分配をもとめるため、統一設計法に従うべきであるが、計算労力の簡略化を図るため、3. 1の対比結果により類推される図-3の対比モデル図によって段階的な推論を試みる。

(1) 第1段階 ヤング係数比 n をクリープ進行時期、作用荷重別に次の一定値をとるものとする。

- i) クリープ開始前、永久荷重作用時に対し $n_0 = E_s / E_c$ とする ($a \doteq a'$)
- ii) クリープ終了後、永久荷重作用時に対し $n_1 = (1 + \chi \varphi) n_0$ とする ($b \doteq b'$)
- iii) クリープ終了後、変動荷重作用時に対し $n_2 = (1 + \chi \varphi / 2) n_0$ とする ($c \doteq c'$)

(2) 第2段階 永久荷重時の応力を単なる参考値とし、ヤング係数比をクリープ進行時期、作用荷重別に無関係な次の一定値とする。

$$n_2 = (1 + \chi \varphi / 2) n_0 \quad (d' \doteq c')$$

(3) 第3段階 $\chi = 0.8$ 、 $\varphi = 2.5$ と定め、ヤング係数比は設計基準強度 f'_{ck} のみの関数とする。

$$n_3 = 2n_0$$

(4) 第4段階 $f'_{ck} = 180, 240, 300$ kgf/cm^2 に対し $n_3 = 19, 17, 15$ となるが数字を丸めて $n_4 = 15$ と割切る。

4. 1. 2 PC~PCCの場合

(1) エージング係数 χ の標準値

表-5.2より図-4の対比モデル図が得られるものとするれば、コンクリート応力度の上、下縁値のバランスを考慮すれば、 $\chi = 0.8$ が標準値として適切である。

(2) 全断面有効と仮定できる境界値

プレストレスング度を尺度とし、表-6より図-5の対比モデル図が得られるものとするれば、 $\kappa = 0.75$ 程度が理論上の境界値を示すが、実用上の簡略値としては、 $\kappa = 0.7$ 程度が全断面有効の境界値と考えられる。

(3) 設計上考慮する軸方向筋の位置

表-7より、 $A_3 \doteq B_3$ となり (B_1, C, D) は別グループとなる。よってB方式三段配置と考える。

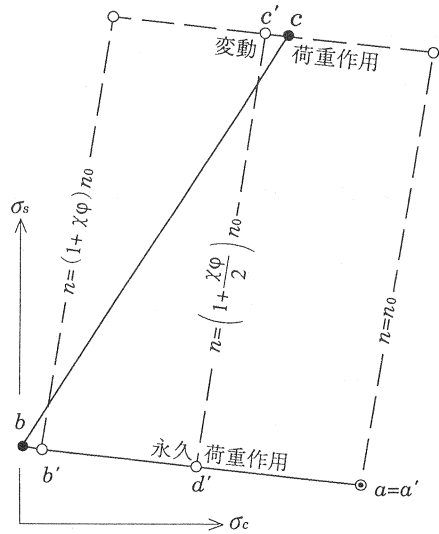


図-3 RCの場合の対比モデル図

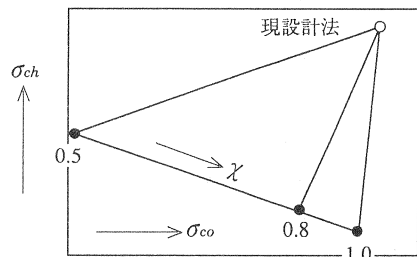


図-4 χ の対比モデル図

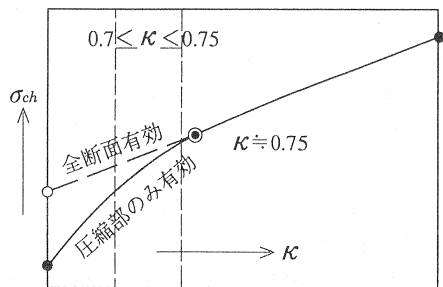


図-5 $\kappa - \sigma_{ch}$ モデル図

4. 2 問題点と今後の発展方向

本報告は1でふれたように統一設計法への道の第一歩に過ぎない、したがって引続き検討を継続しなければならぬ問題点および新しく開拓しなければならない問題点を多く抱えている。以下箇条書的に記すと、

(1) 対比事例の追加と数式同志の対比

たとえば、曲げモーメントと軸方向力を受けるRC部材、PCCの実施設計例などに対する対比を行い、

4. 1の対比モデル図よりの推論が常に成立つかどうか、できれば数式自体の対比により実証したい。

(2) PC, PPCの場合、コンクリート応力度のみに着目した対比モデル図によって推論してきたが、鋼材応力についても同様な結論が得られるかどうかの確認をする必要がある。

(3) 4. 1の定性的推論を定量的推論としたい。たとえばRCの場合、 $n=15$ への段階的移行に対して、どの程度の誤差を伴っているのか、即ち、1%か5%か、はたまた10%なのか明示すべきであろう、それでこそ簡略化の妥当性が裏付けられよう。

(4) クリープ解析上、クリープの進行度と変動荷重の作用時期との関係を明示すべきであろう。なぜなら、全断面有効の仮定を成立たさせるための主要条件となるからである。

(5) 本報告の対比条件として、曲げ部材使用限界状態のクリープ、乾燥収縮の影響を主眼に対比してきた。したがって今後は、ひびわれ幅、変形などのほか、せん断、ねじりに対する検討はもちろん、終局限界状態、疲労限界状態などについても対比を行い、統一設計法の主体制を確立すべきであろう。そこで始めて統一設計法に対する最適設計法への道が拓かれることになる。

(6) 統一設計法の唯一の欠陥は、現設計法に較べ計算過程が複雑なことである。しかしコンクリート構造物としてPPCが最適値を与えることを思えば、統一設計法自体の簡略化を図り、実用化への道を探るべきであろう。たとえば数式の無次元化により、ノモ化、グラフ化、電算化の開発を目指したい。

最後に、統一設計法が土木、建築の両分野で共通に認知されるよう、またそれに伴って用語、記号などの統一を願いながら今回の報告を終わる。

参考文献

- 1) 六車 熙: 建築構造物とパーシャリープレストレストコンクリート、コンクリート工学、VOL,25 NO.7, PP13~18, 1987.7
- 2) 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算法、コンクリート工学、VOL,26 NO.12, PP95~105, 1988.12
- 3) 六車 熙: プレストレス導入理念の拡大と応用、第20回PC技術講習会「PC技術の役割と発展」、PP15~25, 1992.2
- 4) 土木学会コンクリート委員会: 11.3 使用限界状態に対する検討、コンクリート標準示方書、設計編、PP124~125, 1991.9
- 5) 猪股俊司: PPCの勧め、プレストレストコンクリート技術協会、最近のプレストレストコンクリート構造物と30年の歩み、PP2~4, 1986.1
- 6) 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)、PP27~48, 1987.2
- 7) 米田利博: 単純PRC箱桁橋(道路)、新示方書によるコンクリート構造物の設計例シリーズ、第1巻コンクリート橋の設計、PP230~251, 1987.1
- 8) 齊藤 昇: 実務者の立場からみた設計上、施工上の統一理論への対応と提言、第1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、PP39~41, 1990.10