

V-100 膨張セメントコンクリートのクリープに関する基礎的考察

徳島大学工学部 正員 荒木謙一
同 同 〇戸川一夫
広島県庁土木部 同 田原克尚

1. まえがき

膨張セメントの膨張特性を積極的に利用する方向として、ケミカルプレストレストコンクリートがある。この場合、初期の膨張によって導入されるコンクリートのプレストレス量と長期間にわたって消失されるプレストレス量を正確に算定することがもっとも問題となり、それには膨張セメントコンクリートのクリープ特性、弾性特性あるいは乾燥収縮特性を知る必要がある。

膨張性混和材(以下CSAと称す)を添加したコンクリートのクリープは普通コンクリートにくらべて膨張作用をおこすエトリンジヤイトの強度ならびに剛性がセメント水化物より小さいため大きくなることが予想される。その程度はCSAの添加量、養生方法、導入時の材令およびコンクリートの配合などによって左右されると思われる。

本研究はCSAを添加したコンクリート(以下CSAコンクリートと称す)について、CSA無添加の普通セメントコンクリートと対比させて、そのクリープ特性、弾性特性などを実験的に把握し、CSAコンクリートのケミカルプレストレスと応力緩和を理論的に考察し、実測値と比較検討した。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は粗骨材として徳島県大麻産砕石、最大寸法20mm、細骨材は吉野川産川砂を用いた。膨張材はデンカCSAを使用した。コンクリートの配合を表-1に示す。クリープ試験ならびに乾燥収縮測定用供試体は10×10×40cmの角柱供試体である。供試体

表-1 コンクリートの配合

配合 種別	粗骨材 最大寸法 Ms (mm)	スランプ SL (cm)	空気量 Air (%)	セメント W/C or W/CSA (%)	水 率 (%)	単位重量 (kg/m ³)					混和材料	
						W	CSA	β	G		CSA	AE増量
I-0	20	2.5	4	40	38	153	380	674	1100	—	0.95	
I-13	20	2.5	4	40	38	153	380	674	1100	49.4	0.95	
I-15	20	2.5	4	40	38	153	380	674	1100	570	0.95	

は各2本作り測定値は各2本の平均である。持続荷重にはφ12mm(鉄筋比0.98%)のPC鋼棒を使用した。普通のコンクリートのクリープ、乾燥収縮試験については一般に行なわれている方法であるが、CSAコンクリートのクリープは所定の材令までφ12mmのPC鋼棒で供試体を拘束したまま水中養生し、PCジャッキで持続荷重を導入して水中のクリープを測定する場合、水中養生(20°C±2deg)空中のクリープは温度20°C±2deg、湿度60%の恒温恒湿室内で行なった。CSAコンクリートの乾燥収縮測定用供試体は各々のクリープ試験供試体と同一条件でクリープ試験開始まで存置し、クリープ試験開始とともに拘束をとり非載荷状態で空気中で乾燥収縮を測定した。長さ変化の測定はコンパレータ法を用い、材令1日を基長とした。圧縮強度および弾性係数測定用供試体にはφ10×20cmの内柱供試体を各3個つくり、CSAコンクリートの場合はあらかじめ打設時に供試体中央部にφ12mmの真ちゅう棒を通して孔をつくっておき、翌日φ11mm(鉄筋比1.0%)のPC鋼棒を孔に挿入して、クリープ試験供試体とほぼ同一鉄筋比で拘束を行なった。

CSAコンクリートの拘束膨張量を測定する供試体はクリープ試験供試体と同一形状のものであり、φ12mmあるいはφ18mmのPC鋼棒で拘束して水中養生を行なった。

3. 実験結果

図-1に材令3日, 14日および28日に
に載荷したCSA添加率15%のコンクリ
ートとCSA無添加の普通コンクリート
との単位応力あたりのクリープ試験結果
を示す。CSAコンクリートおよび普通
コンクリートともに載荷時材令が若いと
クリープ変形量は大きくなっている。図
-2に推定最終クリープ係数を示してい
るがCSAコンクリートのクリープ係数
と普通コンクリートのクリープ係数を比

較するとその比は載荷時材令に
よって多少変化し1.5~2.1倍く
らいCSAコンクリートのクリ
ープ係数が大きい。さらにこれ
を図-3に示すように圧縮強度
の面からみると同一圧縮強度で
約1.3~1.5倍くらいCSAコン
クリートのクリープ係数が大き
いことがわかる。これはエトリ
ンジヤイトの強度ならびに剛性
がセメント水和物にくらべて小
さく塑性変形量が多いことに
結びついているものと考えられ
る。つぎに図-4に材令1日で
載荷したCSAコンクリートと
普通コンクリートのクリープ試
験結果を示すが、CSAコンク
リートの場合水中のクリープが

空中でのクリープよりも大きくなっている。これはCSAコンクリートのエトリンジヤイトの生成が
水中養生したときの方が空中養生のときよりも活発なために水中のCSAコンクリートのクリープ変
形量が大きくなったと思われる。なお普通コンクリートの場合は水中養生したコンクリートの方が空
中養生したものよりクリープ変形量は小さく、一般に報告されている諸説と同様の結果を示している。

また材令1日で載荷したコンクリートのクリープ係数が材令3日で載荷したものより小さいがこれ
は前者の弾性係数が小さいためである。

4. ケミカルプレストレス量の理論的算定

図-1 単位応力あたりのクリープ量と載荷期間との関係

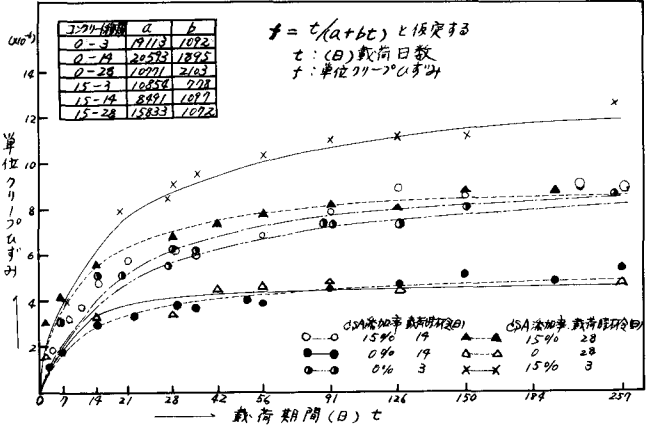


図-2 載荷時材令と推定最終クリープ係数

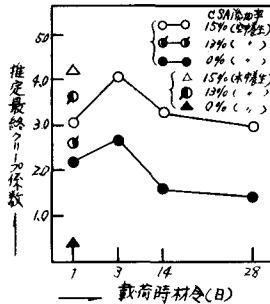


図-3 圧縮強度と推定最終クリープ係数

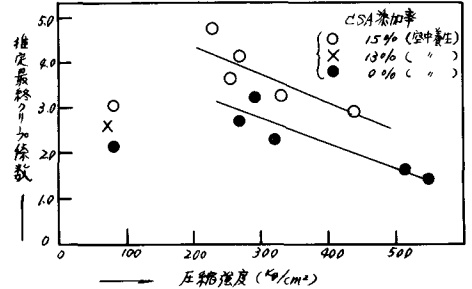


図-4 載荷時材令1日の単位応力あたりのクリープと載荷持続日数との関係

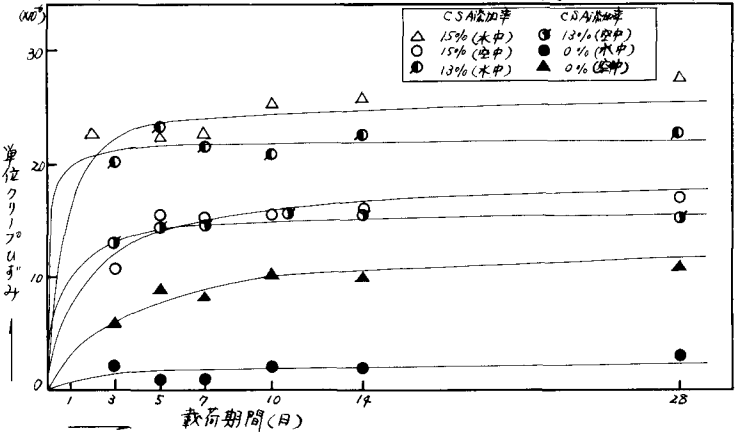


図-5に示すように拘束された膨張量はC S Aコンクリートの自由膨張からクリープ変形量と弾性変形量を差引いたもので表わされると考える。微小時間 Δt_i に弾性変形することによって減少する拘束膨張ひずみ δ_{pti} とコンクリートに導入される力 P_{pti} は

$$\delta_{pti} = \delta_{ti} - \frac{1}{E_{cti}} \cdot \frac{P_{pti}}{A_c} \quad (1)$$

$$P_{pti} = \delta_{pti} \cdot E_s \cdot A_s \quad (2)$$

ここに δ_{ti} : t_i 時の自由膨張ひずみ, E_s : PC鋼棒の弾性係数

E_{cti} : t_i 時のコンクリートの弾性係数, A_c : コンクリートの断面積, A_s : PC鋼棒の断面積,

で表わされる。

t_i 時にコンクリートに生じる応力 σ_{pti} は

$$\sigma_{pti} = \frac{P_{pti}}{A_c} \quad (3)$$

t_i 時にコンクリートに生じる弾性ひずみ ϵ_{cti} は

$$\epsilon_{cti} = \frac{\sigma_{pti}}{E_{cti}} \quad (4)$$

この応力 σ_{pti} による微小時間 Δt_i のコンクリートのクリープ変形 ϵ_{pcti} は

$$\epsilon_{pcti} = \frac{\eta_{ti} \cdot \sigma_{pti} \cdot \Delta t_i}{\{1 + \eta_{ti} \cdot \rho(1 + \eta_{ti}/2)\} E_s} \quad (5)$$

ここに η_{ti} ; $\eta_{ti} = E_s/E_{cti}$ において $i=1$ 、すなわ

t_1 時の弾性係数比

ρ_{ti} ; $\rho_{ti} = (E_{cti} - E_{cti-1}) \div 1/E_{cti-1}$ において $i=1$ すなわ t_1 時にあけるクリープ係数は式(5)中 $1/E_{cti-1}$ は単位応力あたりの弾性ひずみ

ρ ; 鉄筋比

(5)式は持続荷重によるコンクリートのクリープ変形、ポレストレスカの減少によるコンクリートのクリープひずみならびにPC鋼材応力変化による弾性ひずみを考慮したクリープ変形量を示す。

したがって Δt_i 時間に生じる変形量 $\epsilon_{ti} (= \delta_i)$ は(4)式と(5)式との和で表わされる。

$$\epsilon_{ti} = \epsilon_{cti} + \epsilon_{pcti} \quad (6)$$

つきに微小時間 Δt_2 に生じる拘束変形量 ϵ_{t2} を算定する。

$$\begin{aligned} \delta_{pt2} &= \delta_{t1} - \epsilon_{t1} + \delta_{t2} - \delta_{t1} - \frac{1}{E_{ct2}} \cdot \frac{(P_{pt2} - P_{pt1})}{A_c} \\ &= \delta_{t2} - \epsilon_{t1} - \frac{1}{E_{ct2}} \cdot \frac{(P_{pt2} - P_{pt1})}{A_c} \quad (7) \end{aligned}$$

$$P_{pt2} = \delta_{pt2} \cdot E_s \cdot A_s \quad (8)$$

ここに δ_{pt2} : $t_1 \sim t_2$ 時の弾性変形による拘束膨張ひずみ

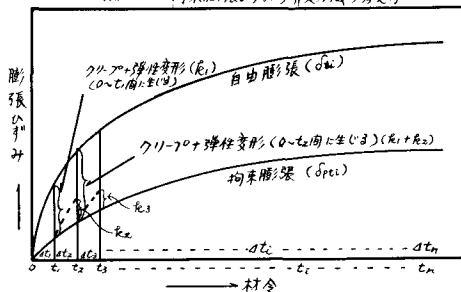
δ_{t2} : t_2 時の自由膨張ひずみ

E_{ct2} : t_2 時のコンクリートの弾性係数

P_{pt2} : $t_1 \sim t_2$ 時にコンクリートに導入される力

上式は t_1 時から t_2 時の拘束膨張量は t_1 時の $\delta_{t1} - \epsilon_{t1}$

図-5 拘束膨張ひずみの算定方法の考え方



の膨張から、自由膨張伏試体の自由膨張割合と同一の割合で膨張すると仮定して、 t_2 時の自由膨張量を求め、その膨張によって生じる応力によって弾性変形ならびにクリープ変形がおこるとしている。

$$\sigma_{pt2} = \frac{P_{pt2}}{A_c} \quad (9)$$

$$\epsilon_{ct2} = \frac{\sigma_{pt2} - \sigma_{pt1}}{E_{ct2}} \quad (10)$$

$$\epsilon_{pct2} = \frac{\eta_{t2} \cdot \sigma_{pt2} \cdot \Delta t_2}{\{1 + \eta_{t2} \cdot \rho(1 + \eta_{t2}/2)\} E_s} \quad (11)$$

$$\epsilon_{t2} = \epsilon_{ct2} + \epsilon_{pct2} \quad (12)$$

0~ t_2 時間に生じた全拘束変形量 δ_{t2} は $\epsilon_{t1} + \epsilon_{t2}$ となる。同様にして任意の時間までの全拘束変形量 δ_n を求める。

$$\delta_{ptn} = \delta_{tn} - (\epsilon_{t1} + \epsilon_{t2} + \dots + \epsilon_{tn-1}) - \frac{1}{E_{ctn}} \cdot \frac{(P_{ptn} - P_{ptn-1})}{A_c} \quad (13)$$

$$P_{ptn} = \delta_{ptn} \cdot A_s \cdot E_s \quad (14)$$

$$\sigma_{ptn} = \frac{P_{ptn}}{A_c} \quad (15)$$

$$\epsilon_{ctn} = \frac{\sigma_{ptn} - \sigma_{ptn-1}}{E_{ctn}} \quad (16)$$

$$\epsilon_{pctn} = \frac{\eta_{tn} \cdot \sigma_{ptn} \cdot \Delta t_n}{\{1 + \eta_{tn} \cdot \rho(1 + \eta_{tn}/2)\} E_s} \quad (17)$$

$$\epsilon_{tn} = \epsilon_{ctn} + \epsilon_{pctn} \quad (18)$$

したがって

$$\delta_n = \epsilon_{t1} + \epsilon_{t2} + \epsilon_{t3} + \dots + \epsilon_{tn} \quad (19)$$

なお P_{ptn} は(13)、(14)式から δ_{ptn} を消去すると、

$$\begin{aligned} P_{ptn} &= \{ \delta_{tn} - (\epsilon_{t1} + \epsilon_{t2} + \epsilon_{t3} + \dots + \epsilon_{tn-1}) + \frac{P_{ptn-1}}{E_{ctn} A_c} \} \\ &\quad + \{ \frac{1}{A_s E_s} + \frac{1}{E_{ctn} A_c} \} \quad (20) \end{aligned}$$

以上の式を計算する際、徳島大学の電子計算機TOSBAC-3400を使用した。ここでは Δt_i は1/100日としている。

5. 本実験における拘束膨張量の実測値と理論値との比較検討

図-6, 7に拘束したCSAコンクリートの実測膨張量と計算によつて求められた理論膨張量を示す。両者は比較的良好に一致していると思われる。また文庫¹⁾の近似式も本実験によつてえられたクリープ係数ならびに弾性係数を代入することによつてかなりよく実測値にあつてゐる。したがつてCSAコンクリートのクリープ特性および弾性特性を正確にみつめることができれば拘束したCSAコンクリートの膨張量を本理論式あるいは六車¹⁾の近似式によつてかなり正確に推定することができるようである。

なお本実験の場合、CSA添加率15%で $\phi 12\text{mm}$ ($\rho=0.98\%$) および $\phi 18\text{mm}$ ($\rho=2.43\%$) で拘束した場合にコンクリートに導入されるケミカルプレストレス量は材令7日でそれぞれ実測値 13.2kg/cm^2 、理論値(本理論 13.2kg/cm^2 、六車 13.3kg/cm^2)、実測値 24.2kg/cm^2 、理論値(本理論 23.9kg/cm^2 、六車 23.4kg/cm^2) であり、また添加率13%のときはそれぞれ実測値 9.5kg/cm^2 、理論値(本理論 9.1kg/cm^2 、六車 8.3kg/cm^2)、実測値 19.0kg/cm^2 、理論値(本理論 18.1kg/cm^2 、六車 15.1kg/cm^2) であつた。

また長期間の応力緩和によるプレストレス量の損失を推定すると、たとえば材令14日で水中よりとりだして空中養生したとすればCSA添加率15%で鉄筋比 $\rho=2.43\%$ のCSAコンクリートの損失プレストレス量は当実験室でえられたクリープ係数 $\phi_c=3.3$ ならびに乾燥収縮量約 15×10^{-5} 、そして鋼材のリラクゼーション3%を考慮すると約 6.3kg/cm^2 となり、最終残留プレストレス量はおよそ 18kg/cm^2 程度となる。したがつてケミカルプレストレストコンクリートとしてCSAコンクリートを利用する場合プレストレス量の比較的小なくてすむPC舗装などには有効であらう。

6. あとがき

CSAコンクリートの拘束膨張量はCSAコンクリートのクリープ特性および弾性特性を正確にみつめることができるならば本理論あるいは六車の式によつてかなり正確に推定することができるようである。

参考文献

- 1) 六車: CSAコンクリートの有効膨張ひずみに関する研究(第1報) 電化社報告42.5.

図-6 CSAコンクリートの理論拘束膨張と実測値との比較

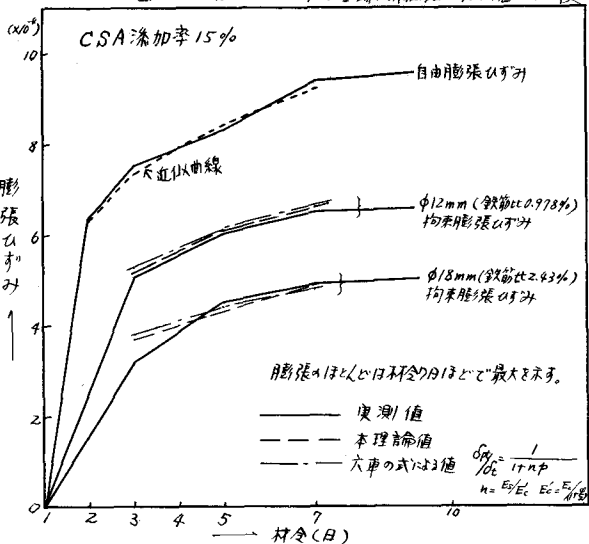


図-7 CSAコンクリートの理論拘束膨張と実測値との比較

