

膨張セメントコンクリートのケミカルプレスト レスに関する研究

戸 川 一 夫*

荒 木 謙 一**

1. ま え が き

近年、欧米ならびにわが国でもカルシウムサルフォアルミネート系の膨張性混和材が市販され、この種の膨張性混和材を実際に使用した構造物^{1)~5)}もいくつか報告されている現状である。

膨張性混和材の使用目的を大別すれば、モルタルおよびコンクリートの収縮ひびわれ防止と、膨張を積極的に利用したケミカルプレストレスの自動的導入である。

後者のケミカルプレストレスングを目的とする場合、膨張性混和材を混入したコンクリート（以下膨張セメントコンクリートという）の強度特性はもちろん考慮するとして、初期の膨張を拘束することによって膨張セメントコンクリートに導入される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必要となり、それには膨張セメントコンクリートの膨張・収縮特性はもとより、クリープ特性および弾性特性についても明らかにしなければならないと考えられる。

膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレス量に関しては国内では岡田⁶⁾、六車⁷⁾、長滝⁸⁾ら、外国では、L. Benuska⁹⁾、S. Aroni¹⁰⁾、A. Klein¹¹⁾らによって実験的には求められているが、理論的な算定方法は六車⁷⁾の報告をのぞいては、ほとんどみられないようである。

なお、六車はケミカルプレストレス量の理論値と実験値との間には、かなり差がみられたと報告し、その原因をたとえば、膨張ひずみの遊び、あるいは、クリープならびに弾性係数の見積りの不正確さなどにあるとしている。

本研究は膨張セメントコンクリートを一軸拘束した場合のケミカルプレストレス量の理論的な算定方法を提案し、算定に必要な膨張セメントコンクリートの膨張・収縮特性、圧縮クリープ特性ならびに弾性特性を普通コ

ンクリートと対比させながら把握し、ケミカルプレストレス量の理論的推定値と実験値との比較検討をあわせ行なったものである。

2. 実 験 概 要

(1) 使用材料、各種供試体の形状寸法ならびに作製方法

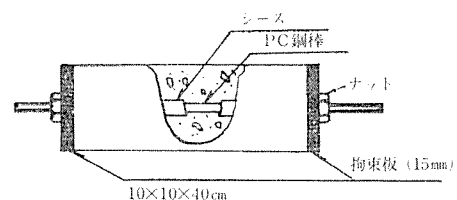
セメントは普通ポルトランドセメント（日本セメント（株）製）、粗骨材は昨今の川砂利の欠乏および膨張性混和材のコンクリート舗装への利用などを考慮して、砕石（徳島県大麻産、比重 2.60、最大寸法 20 mm）、細骨材は川砂（徳島県吉野川産、比重 2.60）を使用した。

膨張性混和材はカルシウムサルフォアルミネート系のデンカ CSA（電気化学工業（株）製、以下 CSA という）を用いた。AE 減水剤としてポゾリス No. 5 LA をセメント重量の 0.25% 添加した。コンクリートの配合は硬練りとし、スランプ 2.5 cm、空気量 4%、単位セメント量（セメント+CSA）380 kg、水セメント比 40%（一部に 45%、50% を用いている）および細骨材率 38%である。

CSA 添加率はセメント重量の内割とし、本実験では CSA 添加率 0% のいわゆる普通コンクリートと、十分な膨張が得られることが確かめられている添加率 11, 13, 15, および 17% とした。この添加率をコンクリートに対する単位添加量（仮称）になおすと、それぞれ 41.8, 49.4, 57.0 および 64.6 kg/m³ となる。

普通コンクリートおよび膨張セメントコンクリートのクリープ試験ならびに乾燥収縮測定用供試体は、10×10×40 cm の角柱供試体（図-1 参照）であり、各供試体

図-1 クリープ試験ならびに膨張拘束用供試体



* 和歌山工業高等専門学校 土木工学科
 ** 工博 徳島大学教授 工学部土木工学科

は2本ずつ用意し、測定値は2本の平均値を用いた。

上記の供試体の作製は成形前に硬質ゴム管をシースとして型わく端板(そのまま拘束端板となる,厚さ 15 mm)間にわたして,供試体断面中央部に持続荷重載荷用の $\phi 12$ mm のP C鋼棒(第4種P C鋼棒,鉄筋比 0.98%)がそう入できるようにして,コンクリートを打込んだ。

本実験では型わく端板をそのまま膨張拘束端板として使用することによって,コンクリート打込み時から起るコンクリートの膨張を拘束して,コンクリートと拘束板とのすきまをなくし,膨張のにげがなくなり,P C鋼棒の変形量とコンクリートの変形量とが一致するように配慮した。

また,比較用圧縮強度供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を各3個準備し,膨張セメント コンクリートの場合にはあらかじめ打設時に供試体断面中央部に $\phi 12$ mm の真ちゅう棒をとおして孔をつくっておき,翌日 $\phi 11$ mm のP C鋼棒(第4種P C鋼棒,鉄筋比 1.0%)を孔にそう入して,クリープ試験供試体あるいはこのあと述べる拘束膨張量測定用供試体とほぼ同一鉄筋比(膨張セメント コンクリートの場合,拘束程度の違いによって得られるコンクリート強度に差が生じると考えられる)で拘束を行なった。

膨張セメント コンクリートの自由膨張量ならびに拘束膨張量を測定する供試体は上述したクリープ試験供試体と同一形状のものを2本作製し,拘束には $\phi 12$ mm あるいは $\phi 18$ mm のP C鋼棒(第4種P C鋼棒,鉄筋比 2.43%)を使用した。 $\phi 12$ mm (鉄筋比 0.98%)は一般にP C部材によく用いられる鉄筋比であり, $\phi 18$ mm (鉄筋比 2.43%)はいくぶん過大鉄筋比のものである。

すべての供試体はコンクリート打込み後,ただちに恒温恒湿養生室(温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ deg.湿度 60%)に移し,材令1日で脱型し,所定の材令まで水中養生(水温 $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ deg.)を開始した。長さ変化の測定はコンパレータ法を用い材令1日(水中養生開始直前)を基長とした。したがって,本実験ではコンクリート打込み時から材令1日までの膨張は測定していない。

クリープ試験の载荷にはP Cジャッキを用いた。なお,クリープ試験では持続载荷応力を一定に保つたために,载荷時材令から数えて,1,3,5,7,14,21,28,42,56,および91日においてP C鋼棒の引き直しを行なった。

(2) 圧縮クリープ試験方法

普通コンクリートのクリープは,持続载荷供試体の全変形量から乾燥収縮供試体の変形量を差引いて求めることができる。

しかしながら,膨張セメント コンクリートは,膨張拘

束供試体と膨張無拘束供試体とはコンクリートの内部組成ひいては変形特性が異なるので,膨張セメント コンクリートの乾燥収縮測定用供試体はクリープ試験開始までクリープ試験供試体(膨張拘束供試体)と同じ拘束養生を行なわねばならないと考えられる。

本実験では,次のような方法でクリープ試験を行なった。なお,膨張セメント コンクリートのクリープ試験方法は種々考えられ,たとえば長滝¹²⁾らの報告もある。

a) 水中での圧縮クリープ試験方法 膨張セメント コンクリートの水中養生中の膨張によるケミカルプレストレス量を求めようとするとき,水中でのクリープ特性を求める必要がある。

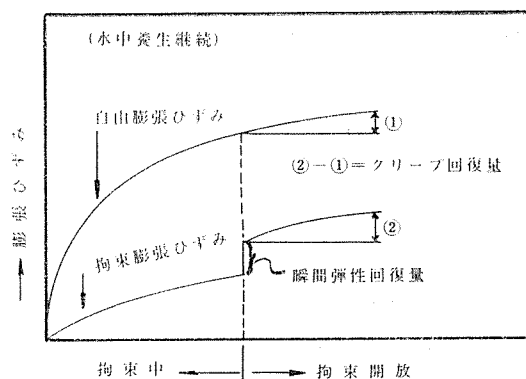
普通コンクリートのクリープは水中養生中の無応力供試体と応力供試体の変形量との差を求めて算定した。

膨張セメント コンクリートのクリープは,水中養生中の膨張自由供試体の変形量から持続载荷供試体の変形量を差引いて求めた。なお,水中でのクリープ試験は材令1日ではじめ,载荷応力はそのときの圧縮強度の30%とした。

b) 空気中の圧縮クリープ試験方法 膨張セメント コンクリートの長期のケミカルプレストレス量の消失を算定するには空気中のクリープ特性を明らかにしなければならない。

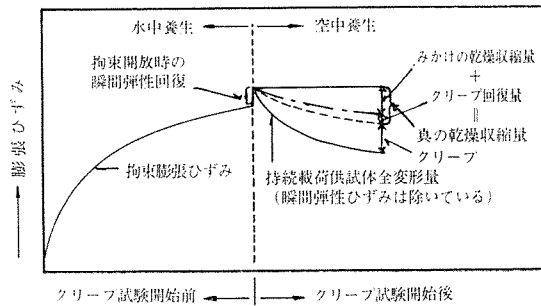
膨張セメント コンクリートの乾燥収縮供試体は所定のクリープ試験開始日までクリープ供試体と同一条件で拘束養生し,クリープ試験開始と同時に拘束をといて,恒温恒湿養生室で空中養生し乾燥収縮量(みかけ)を測定した。しかしながらこの乾燥収縮供試体の収縮量はみかけの値である。膨張セメント コンクリートの乾燥収縮供試体は水中養生期間中拘束応力(本実験では拘束応力はたかだか 30 kg/cm^2 程度であり,コンクリートの圧縮強度の10%以下で,低応力クリープの範囲である)を受けているために,無拘束にして空中養生を開始すると,クリープ回復を生じることになる。したがって,このクリープ回復量は図-2に示す考え方で,水中養生の

図-2 膨張セメント コンクリートの乾燥収縮測定用供試体の拘束開放後のクリープ回復量の求め方



膨張自由供試体の変形量と、クリープ試験開始まで拘束した供試体の拘束をといてからの変形量との差から求めた。求めたクリープ回復量とみかけの乾燥収縮量を加えて、真の乾燥収縮量を算定し、図-3 に示すように膨張セメントコンクリートのクリープを求めた。クリープ試験の載荷時材令は 3, 14 および 28 日であり、載荷応力はそのときのおおのこのコンクリートの圧縮強度の 20% である。

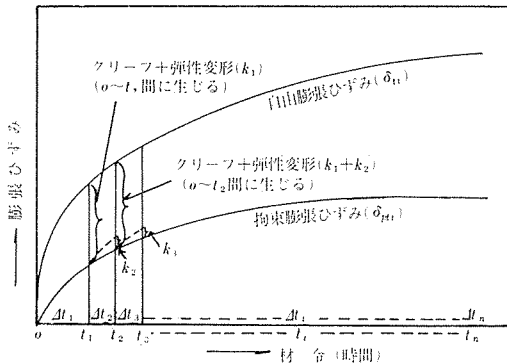
図-3 膨張セメントコンクリートのクリープの求め方



3. ケミカルプレストレス量の理論的算定方法

図-4 に示すように拘束された膨張量は膨張セメント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。ただし、次の 2 つの仮定をおいている。

図-4 拘束膨張ひずみの算定方法の考え方



- 1) コンクリートのクリープは Whitney および Davis Glanville の法則にしたがう。
 - 2) P C 鋼棒のレラクセーションは無視する。
- 微小時間 Δt_1 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_{pt1} とコンクリートに導入される力 P_{pt1} は

$$\delta_{pt1} = \delta_{t1} - \frac{1}{E_{ct1}} \cdot \frac{P_{pt1}}{A_c} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{pt1} = \delta_{pt1} \cdot E_s \cdot A_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- δ_{t1} : t_1 時の自由膨張ひずみ、
- E_s : P C 鋼棒の弾性係数 (kg/cm²)

- E_{ct1} : t_1 時のコンクリートの弾性係数 (kg/cm²)
- A_c : コンクリートの断面積 (cm²)
- A_s : P C 鋼棒の断面積 (cm²)

で表わされる。

t_1 時にコンクリートに生じる応力 σ_{pt1} は

$$\sigma_{pt1} = \frac{P_{pt1}}{A_c} \quad \dots\dots\dots (3)$$

t_1 時にコンクリートに生じる弾性ひずみ ϵ_{et1} は

$$\epsilon_{et1} = \frac{\sigma_{pt1}}{E_{ct1}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この応力 σ_{pt1} による微小時間 Δt_1 のコンクリートのクリープ変形量 $\epsilon_{p\phi t}$ は

$$\epsilon_{p\phi t} = \frac{n_{t1} \cdot \phi_{t1} \cdot \sigma_{pt1}}{\{1 + n_{t1} \cdot p(1 + \phi_{t1}/2)\} \cdot E_s} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$n_{t1} : n_{ti} = \frac{E_s}{E_{cti}}$ において $i=1$, すなわち t_1 時の弾性係数比

$$\phi_{t1} : \phi_{ti} = (\epsilon_{cti} - \epsilon_{cti-1}) \div 1/E_{cti-1}$$

において $i=1$, すなわち、 t_1 時におけるクリープ係数

なお、式中 $1/E_{cti-1}$ に単位応力あたりの弾性ひずみ

p : 鉄筋比

式 (5) は持続荷重によるコンクリートのクリープ変形、プレストレス力の減少によるコンクリートのクリープひずみ、ならびに P C 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_1 時間に生じる変形量 $k_1 (=S_1)$ は式 (4) と式 (5) との和で表わされる。

$$k_1 = \epsilon_{et1} + \epsilon_{p\phi t1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

次に微小時間 Δt_2 に生じる拘束変形量 k_2 を算定する。

$$\begin{aligned} \delta_{pt2} &= \delta_{t1} - k_1 + \delta_{t2} - \delta_{t1} - \frac{1}{E_{ct2}} \cdot \frac{(P_{pt2} - P_{pt1})}{A_c} \\ &= \delta_{t2} - k_1 - \frac{1}{E_{ct2}} \cdot \frac{(P_{pt2} - P_{pt1})}{A_c} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

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

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 (kg/cm²)

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 $\delta_{t1} - k_1$ の膨張から、自由膨張供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起こるとしている。

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

$$\varepsilon_{et2} = \frac{\sigma_{pt2} - \sigma_{pt1}}{E_{ct2}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\varepsilon_{p\varphi t2} = \frac{n_{t2} \cdot \varphi_{t2} \cdot \sigma_{pt2}}{\{1 + n_{t2} \cdot p(1 + \varphi_{t2}/2)\} \varphi \cdot E_s} \dots\dots\dots(11)$$

$$k_2 = \varepsilon_{et2} + \varepsilon_{p\varphi t2} \dots\dots\dots(12)$$

0~ t_2 時間に生じた全拘束変形量 S_2 は $k_1 + k_2$ となる。同様にして任意の時間までの全拘束変形量 S_n を求める。

$$\delta_{ptn} = \delta_{t_n} - (k_1 + k_2 + \dots + k_{n-1}) - \frac{1}{E_{ctn}} \cdot \frac{(P_{ptn} - P_{ptn-1})}{A_c} \dots\dots\dots(13)$$

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

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

$$\varepsilon_{ctn} = \frac{\sigma_{ptn} - \sigma_{ptn-1}}{E_{ctn}} \dots\dots\dots(16)$$

$$\varepsilon_{p\varphi tn} = \frac{n_{tn} \cdot \varphi_{tn} \cdot \sigma_{ptn}}{\{1 + n_{tn} \cdot p(1 + \varphi_{tn}/2)\} E_s} \dots\dots\dots(17)$$

$$k_n = \varepsilon_{ctn} + \varepsilon_{p\varphi tn} \dots\dots\dots(18)$$

したがって、

$$S_n = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \dots\dots\dots(19)$$

なお P_{ptn} は式 (13), (14) から δ_{ptn} を消去すると

$$P_{ptn} = \left\{ \delta_{t_n} - (k_1 + k_2 + \dots + k_{n-1}) + \frac{P_{ptn-1}}{E_{ctn} \cdot A_c} \right\} \div \left\{ \frac{1}{A_s E_s} + \frac{1}{E_{ctn} \cdot A_c} \right\} \dots\dots\dots(20)$$

ここに、

P_{ptn} : 任意の時間 t_n までにコンクリートに導入される力 (kg)

δ_{t_n} : 時間 t_n での自由膨張ひずみ

k_n : 拘束応力によって時間 t_{n-1} から t_n 間に生じるクリープ変形量と弾性変形量との和

P_{ptn-1} : t_{n-1} 時までコンクリートに導入される力 (kg)

E_{ctn} : t_n 時のコンクリート弾性係数 (kg/cm²)

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

4. 本実験結果の検討と考察

(1) 膨張セメント コンクリートの膨張・収縮特性

図-5 に膨張セメントコンクリートの7日間(打込み時からは材令8日になる)水中養生した場合の自由膨張ひずみならびに一軸拘束膨張ひずみを示す。なお、膨張ひずみは CSA 添加率が変わっても水中養生期間7日程

度でほぼ最大膨張ひずみに達していた。

膨張セメントコンクリートの膨張ひずみは自由、拘束ともに CSA 添加率の増加とともに増加し、また拘束量が多いものは膨張ひずみは小さくなっている。

自由膨張ひずみにたいする拘束膨張ひずみの発現比率を図-6 に示すが、CSA 添加率が大きくなるにしたがって小さくなり、拘束鉄筋比 0.98% の場合、CSA 添加率 17% のものは自由膨張ひずみに対して拘束膨張ひずみは 50% となり、添加率 15% では 65%、13% で 75%、11% で 80% となっている。また、拘束力(鉄筋量)が増せば、当然拘束ひずみの発現比率は低下している。

図-5 膨張セメントコンクリートの自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみ

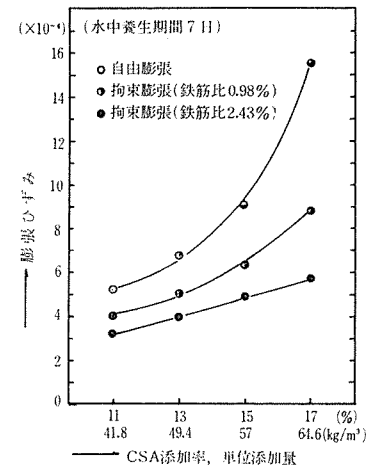


図-6 膨張セメントコンクリートの自由膨張ひずみに対する拘束膨張ひずみの発現比率

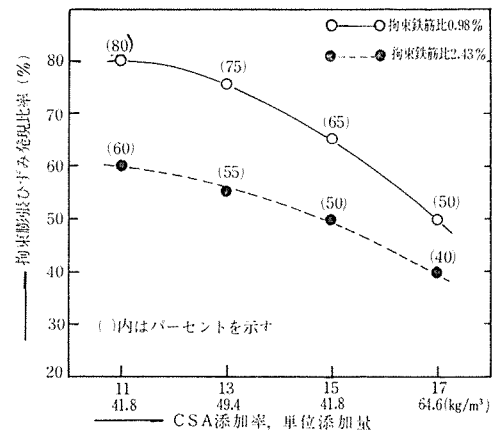
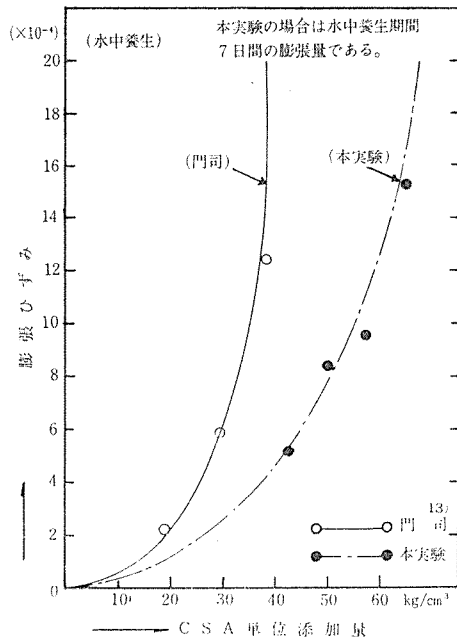


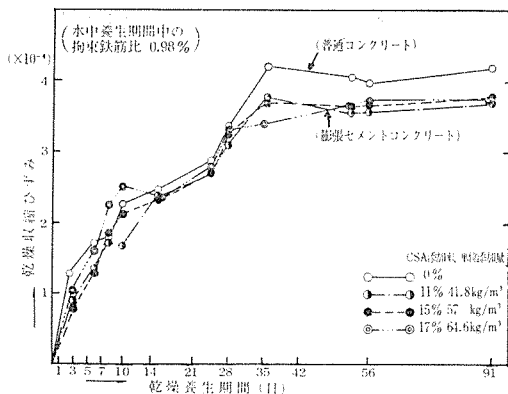
図-7 に膨張セメントコンクリートの自由膨張ひずみと CSA 単位添加量 (1 m³ のコンクリートに対する CSA 添加量 (kg)) との関係を示すが、両者の間には相関性がみられるようであり、今後膨張セメントコンクリートの自由膨張量は CSA 単位添加量によって推定したほうが合理的であるように思われる。なお、門司¹³⁾の報告と若干異なっているが、これは用いた膨張性混和材、膨張ひずみの測定方法ならびに測定期間などが異なるためと考えられる。

図-8 に水中養生期間中拘束した場合の膨張セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの一例を示しているが、

図一七 膨張セメント コンクリートの自由膨張ひずみと CSA 単位添加量との関係



図一八 材令 14 日まで水中養生した膨張セメント コンクリートならびに普通コンクリートの乾燥収縮ひずみの一例



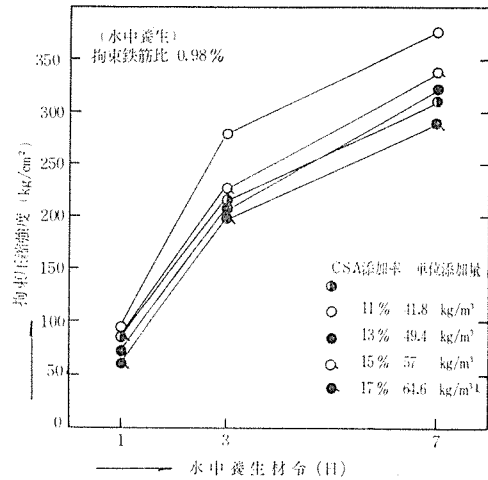
CSA 添加率が変わっても推定最終収縮ひずみはあまり大差なく、 4.1×10^{-4} 程度になっている。この値は普通コンクリート (4.7×10^{-4}) より 13% 程度小さいようであり、また、無拘束で水中養生した膨張セメント コンクリート (CSA 添加率 11%) の乾燥収縮ひずみと同程度の結果を得ている¹⁴⁾。

(2) 若材令における膨張セメント コンクリートの強度、弾性特性

図一九 に若材令の膨張セメント コンクリートの一軸拘束圧縮強度 (鉄筋比 0.98%) を示す。

膨張セメントコンクリートは無拘束の場合、一般に CSA の添加を増せば各強度はしだいに低下するといわれているが、拘束をした場合、本実験範囲内では CSA 添加率 15% までは普通コンクリートと比べて強度低下

図一九 拘束した膨張セメント コンクリートの若材令の圧縮強度

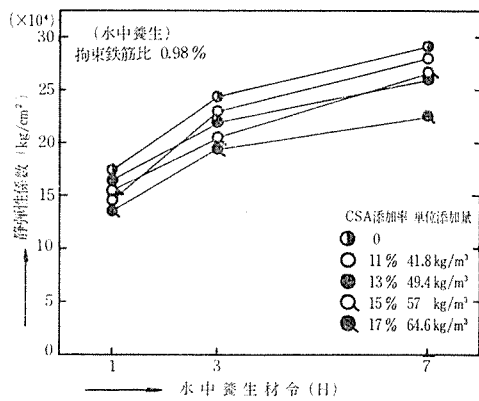


がみられず、CSA 添加率 11% では逆に普通コンクリートよりも 1.2 倍程度強度増が示されている。また、CSA 添加率 17% になると、普通コンクリートよりも強度が低下している。上記の結果は拘束量の違いによってするであろうが、拘束鉄筋比 1% 程度では CSA 添加変化率を 15% 程度まで増加しても、膨張セメント コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートと比べてそんな色ないと考えてよいであろう。これに対して岡田⁶⁾ は、CSA 添加率 13% までならば、膨張セメント コンクリートの一軸拘束圧縮強度は普通コンクリートの強度より低下しないと報告し、一見本実験と異なった結果を示しているようであるが、ここで前述したように CSA 添加率を CSA 単位添加量になおしてみると、本実験での CSA 添加率 15% は単位添加量にすれば 57 kg/m^3 であり、岡田らの場合 (セメント+CSA= 445.7 kg/m^3) は CSA 添加率 13% で 57.9 kg/m^3 となり、単位添加量で比較すると、まったく一致した結果を報告していることになる。したがって、ここでも CSA の添加量はコンクリートに対する単位添加量で示すほうが適切であることを強調したい。

また、本実験の CSA 添加率 17% は、CSA 単位添加量 64.6 kg/m^3 にあたり、岡田の CSA 添加率 15% は 66.9 kg/m^3 になり、両実験とも、CSA 添加量がこの程度まで増加すると強度はかなり普通コンクリートより低下することになる。いいかえれば、CSA 単位添加量の多少によって膨張セメント コンクリートの拘束強度特性は支配されるといってよいであろう。

次に膨張セメント コンクリートの弾性係数について図一十 に示すが、CSA 添加率が増加すれば、しだいに弾性係数は低下するようであり、CSA 添加率 15% の場合、約 15% 程度の低下がみられる。これは CSA の膨張成分であるエトリンジャイトの剛性が小さいこと

図—10 拘束した膨張セメント コンクリートの
若材令の静弾性係数

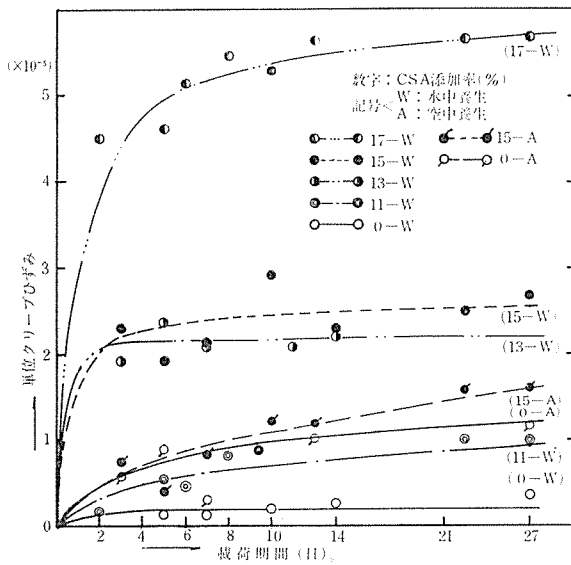


によると考えられる。

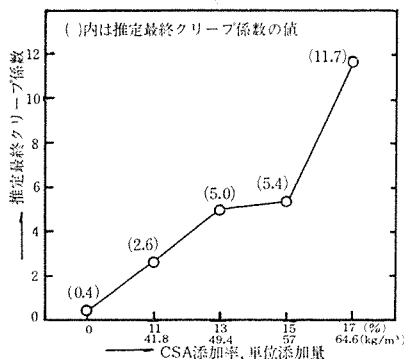
(3) 水中での膨張セメント コンクリートの圧縮
クリープ特性

膨張セメント コンクリートの単位クリープひずみ、ならびに推定最終クリープ係数は普通コンクリートと比べるとかなり大きく (図—11, 12 参照), また, CSA 添

図—11 水中での膨張セメント コンクリートの
クリープひずみ (載荷時材令 1 日)



図—12 水中での膨張セメント コンクリートの
推定最終クリープ係数
(載荷時材令 1 日)



加率が増加すると, 膨張セメントコンクリートの単位クリープひずみ, ならびに推定最終クリープ係数は増加し, CSA 添加率 17% では極端に大きくなり, 載荷期間 27 日で CSA 添加率 11% のクリープひずみの 5 倍程度になっている。

これは CSA 添加率が大きくなり, 膨張ひずみの大きいコンクリートほどコンクリートの内部組織が疎になり非回復性クリープのシーページ作用が大きくなるからであると推定される¹⁵⁾。また, 上記の結果は 図—6 にみられるように CSA 添加率が増加すると, 自由膨張ひずみに対して拘束膨張ひずみの発現比率がしだいに低下することの説明にもなると思われ, 自由膨張ひずみが非常に増加しても, 拘束膨張ひずみの増加には, ある程度限界があることを示しているといえよう。

ところで, 膨張セメント コンクリートのクリープ特性が普通コンクリートと異なっている点は, CSA 添加率 15% にみられるように, 水中養生中のクリープのほうが, 空気中のクリープよりも大きくなることである。普通コンクリートでは一般に知られているように空気中のクリープが水中のクリープより大きくなっている。

これは膨張セメントコンクリートの膨張成分であるエトリンジャイトの生成が水中養生したときのほうが空中養生したときよりも活発になり, 膨張に遊びが存在すること, このエトリンジャイトの剛性はセメント水和物より小さいために, 水中の膨張セメントコンクリートのクリープが大きくなったと思われる。

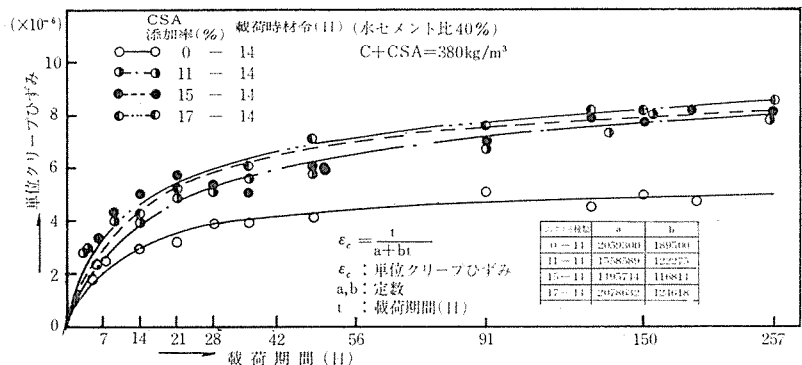
(4) 空気中での膨張セメント コンクリートの圧縮
クリープ特性

a) 圧縮クリープと CSA 添加率との関係 図—13

に単位応力あたりの圧縮クリープひずみと載荷期間 (載荷材令 14 日) との関係を示す。

空中養生中の膨張セメント コンクリートのクリープは普通コンクリートのクリープよりも大きく, 載荷期間 257 日でみると, CSA 添加率が 11, 15, 17% と変化してもクリープひずみはほとんど大差なく, 普通コンク

図—13 膨張セメント コンクリートの圧縮クリープと
CSA 添加率との関係(空気中でのクリープ)



リートの約1.8倍程度となっている。空気中では水中と違って、CSA 添加率を変化させても膨張セメント コンクリートのクリープがあまり変わらないのは膨張を拘束した膨張セメント コンクリートはコンクリートの内部組織が密になり、CSA 添加率を11~17%の範囲(CSA 単位添加量 41.8~64.6 kg/m³ にあたる)で変化させても、拘束圧縮強度にそれほど差がみられなかったことによると考えられる。また、普通コンクリートに比べて膨張セメント コンクリートのクリープが大きくなるのは、当研究室で膨張セメントコンクリートのクリープのレオロジー解析をした結果、普通コンクリートのクリープよりも、非回復性のシーページ作用ならびに局部破壊が大きいことに帰因していることが、ほぼ明らかとなっている¹⁵⁾。

次に推定最終クリープ係数を 図-14 に示す。CSA 添加率が11~17%の範囲では膨張セメントコンクリートの推定最終クリープ係数は2.8~3.1となり大差がなく、普通コンクリート(1.6)より大きく、約1.8~1.9倍程度であり、長滝らの報告¹²⁾とほぼ同様である。

b) 圧縮クリー

プと載荷時材令との関係
と載荷期間との関係を示す。

膨張セメント コンクリート (CSA 添加率 15%), 普通

図-14 膨張セメント コンクリートならびに普通コンクリートの推定最終クリープ係数 (空気中でのクリープ)

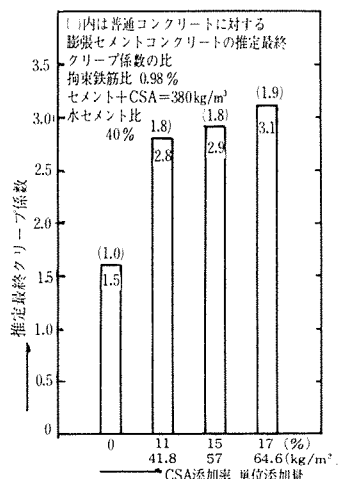
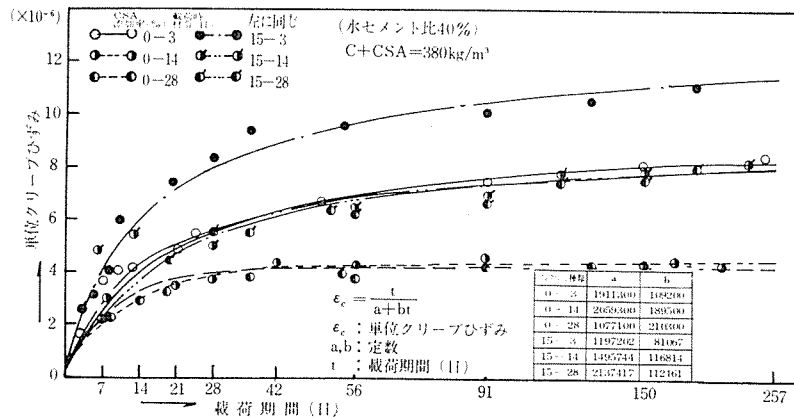
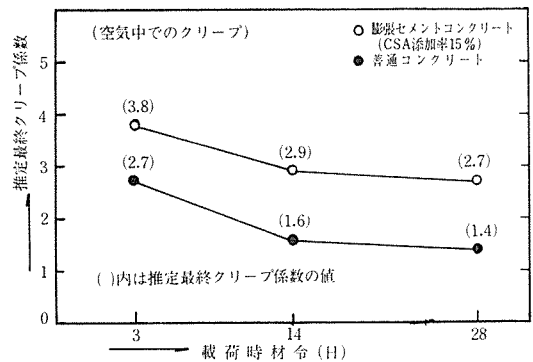


図-15 膨張セメント コンクリートならびに普通コンクリートのク
リープにおよぼす載荷時材令の影響 (空気中でのクリープ)



コンクリートともに、載荷時材令が大きいものはクリープは小さくなっている。したがって、膨張セメント コンクリートの場合も、材令が進んでセメントの水和が進むとクリープは小さくなることを示している。また、推定最終クリープ係数は載荷時材令が若いものほど大きく、同一載荷材令で比較すると、膨張セメントコンクリートの推定最終クリープ係数は普通コンクリートよりもつねに大きいようである (図-16 参照)。

図-16 膨張セメント コンクリートと普通コンクリートの推定最終クリープ係数 (載荷時材令が変化した場合)



c) 圧縮クリープと水セメント比との関係

水セメント比 (セメント量一定、スランプは一定でない) を変化させた場合の単位応力あたりのクリープひずみと載荷期間との関係を 図-17 に示す。また、図-18 に水セメント比と推定最終クリープ係数との関係を示す。膨張セメントコンクリート、普通コンクリートともに水セメント比 (単位水量) が増加すれば、クリープひずみならびに推定最終クリープ係数も大きくなる。したがってできるだけ得られたケミカルプレストレス量の低下を防ぐには、コンクリートの単位水量は少なくすることが望ましいといえる。

(5) ケミカルプレストレス量の理論的推定値と実験値との比較

図-19 に膨張セメント コンクリート (CSA 添加率 15%) の実測膨張ひずみと本理論ならびに、六車の理論による推定ひずみとの関係の一例を示す。なお、CSA 添加率 11.13 および 17% についても同様の結果を得ているので省略する。

ここに六車の報告している理論⁷⁾ を若干変形して記すと、

$$\partial p_t / \partial t = \frac{1}{1 + (1 + \phi/2) p \cdot E_s / E_c}$$

ここで、

図-17 膨張セメント コンクリートならびに普通コンクリートのクリープにおよぼす水セメント比の影響 (空气中でのクリープ)

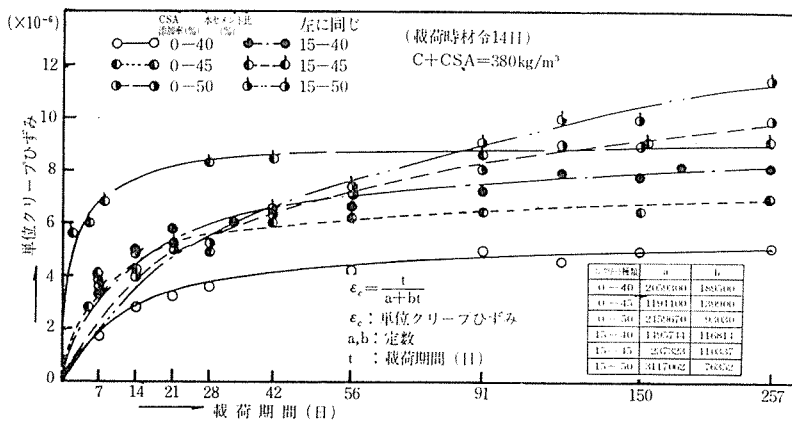


図-18 膨張セメント コンクリートと普通コンクリートの推定最終クリープ係数 (水セメント比が変化した場合)

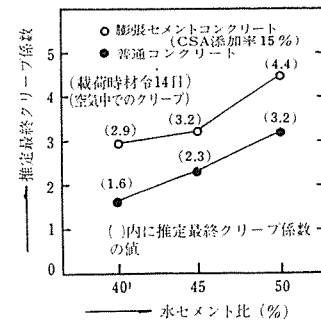
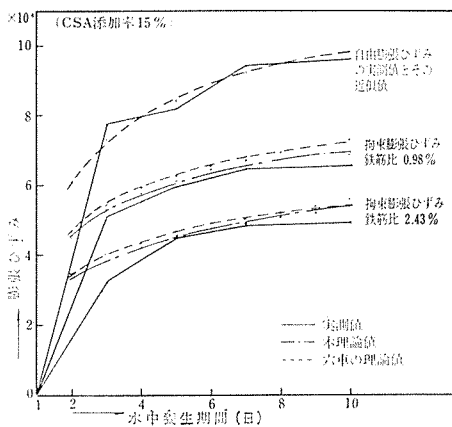


図-19 膨張セメント コンクリートの拘束膨張ひずみの理論値と実測値との比較



δ_{bt} : 拘束膨張ひずみ

δ_t : 自由膨張ひずみ

E_s, E_c : P C鋼棒ならびにコンクリートの弾性係数 (kg/cm²)

φ : コンクリートのクリープ係数

ρ : 鉄筋比

図から明らかなように、実測値は拘束量が変化しても本理論式ならびに六車の式を用いて、かなり正確に推定

できる可能性が示されたといえ、膨張セメントコンクリートのクリープ特性および弾性特性を正確に見積れば膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレス量を算定できると考えている。

なお、本理論値 (式 (20) による) と六車の値とがよく一致する理由は、膨張セメントコンクリートの膨張作用は短期間で終了し、クリープ変形は長期間継続するためであろう。

図-20 に材令 7 日まで水中養生した膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレス量の理論的推定値と実測値との関係を示すが、両者はよく一致しているようであり、CSA 添加率ならびに拘束量が増加するにつれて、得られるケミカルプレストレス量は増加している。

図-20 ケミカルプレストレス量の 実測値と理論値との比較

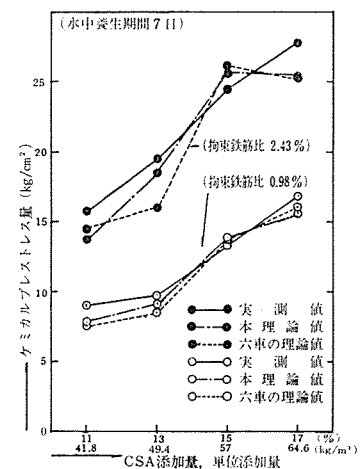


表-1 膨張セメント コンクリートのケミカルプレストレス量の実測値、理論値ならびに推定最終プレストレス量

コンクリート種類 CSA 添加率 (%)	ケミカルプレストレス量の実測値 (kg/cm ²)		ケミカルプレストレス量の本理論値 (kg/cm ²)		ケミカルプレストレス量の六車の理論値 (kg/cm ²)		推定最終ケミカルプレストレス量 (kg/cm ²)	
	0.98 %*	2.43 %*	0.98 %*	2.43 %*	0.98 %*	2.43 %*	0.98 %*	2.43 %*
11	8.37	15.80	7.77 (93)	13.85 (88)	7.53 (90)	14.49 (92)	0	5.44
13	9.77	19.50	9.04 (93)	18.48 (95)	8.62 (88)	16.01 (82)	0.66**	9.93**
15	13.03	24.51	13.84 (106)	25.54 (104)	13.73 (105)	26.21 (107)	3.26	13.99
17	16.83	27.67	15.51 (93)	25.39 (92)	16.23 (98)	25.31 (91)	6.19	16.43

() 内は実測値に対する理論値の比率 (%)

* 拘束鉄筋比

** クリープならびに乾燥収縮は推定値を用いる。

また、表一1 に膨張セメントコンクリートを材令 14 日まで水中養生した場合の膨張セメントコンクリートの最終残留プレストレス量の推定値を示す。

ここで空中養生した場合コンクリートの乾燥収縮、クリープならびに P C 鋼棒のリラクゼーションによる P C 鋼棒の引張応力度の減少量は次式¹⁰⁾によって算定した。

$$\sigma_{pc} = \frac{n \varphi \sigma_{cp} + E_s \varepsilon_s}{1 + n \rho \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pt} - \sigma_{pc} - K \sigma_{pt}$$

ここに、K：リラクゼーションによる減少率を 3 % としている。

表一1 より CSA 添加率ならびに拘束量の大きいものほど推定最終残留プレストレス量は大きく、たとえば、CSA 添加率 15% では、鉄筋比 2.43% で拘束すると最終的に約 14 kg/cm² のプレストレス量が残留することになる。

6. あとがき

本実験範囲で次のようなことがいえると考えられる。

1) 膨張セメントコンクリートの膨張ひずみは膨張性混和材 (CSA) のセメント重量に対する添加率よりもコンクリートに対する単位添加量 (仮称) によって推定するのが合理的であるように思われる。

2) 膨張セメントコンクリートの載荷時材令 1 日の水中での圧縮クリープは、空気中でのクリープよりも大きく、また、CSA 添加率が増加するにしたがって著しく大きくなる。

3) 膨張セメントコンクリートの空気中での圧縮クリープは、CSA 添加率 11~17% (CSA 単位添加量 41.8~64.6 kg/m³) の範囲では大差がなく、載荷時材令 14 日の場合、推定最終クリープ係数は普通コンクリートより大きく、約 1.8~1.9 倍程度である。

4) 膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスは膨張セメントコンクリートの膨張特性、収縮特性、クリープ特性および弾性特性を正確に見積れば、本理論式あるいは六車の式によって算定することが可能である。

5) 膨張性混和材 (CSA) をケミカルプレストレスの目的で使用する場合、強度特性ならびに膨張特性を考え合せると、CSA の単位添加量は 57 kg/m³ (本実験では CSA 添加率 15% に相当する) 程度が適当であり、拘束量は大きく、コンクリートの単位水量は、できるだけ少なくするのがよい。

6) CSA 単位添加量 57 kg/m³ で拘束鉄筋比 2.43% のとき、コンクリートの推定最終プレストレス量は 14 kg/cm² 程度期待できる。

本実験では打込み時からのプレストレス量を測定していないので、実際にはもうすこし大きなプレストレス量が得られているのであろうが、いずれにしろ、この程度のプレストレス量では一般の P C 部材の場合不十分であり、プレストレス量の比較的少なくてすむ P C 舗装ならびにプレハブ P C 舗装板¹⁷⁾ などへの利用が考えられる。ただし、膨張セメントコンクリートの膨張は十分な水分を必要とするので、その点、現場養生では実験室で得られるようなプレストレス量を再現するのは無理かもしれない。

なお、今後、膨張性混和材をうまくケミカルプレストレスコンクリートに利用する方向として、2軸、3軸拘束を行なうか、骨材に保水性のよい人工軽量骨材を用いるか、あるいは高温養生 (60 °C 程度) したり、早強型のセメントを用いて膨張セメントコンクリートの強度をさきに出させて、いいかえれば、クリープおよび弾性変形のできるだけ小さいコンクリートにしておいて、その後で膨張を起させるような方法がよいのではないかも考えられる。

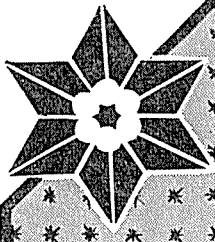
本研究の一部は昭和 46 年度文部省科学研究費によって行なったものである。

参 考 文 献

- 1) ACI Committee 223 : Jour. of ACI, Aug. (1970)
- 2) 山根, 他 : コンクリートジャーナル, 7 月, (1970)
- 3) 益子, 他 : コンクリートジャーナル, 8 月, (1968)
- 4) 大野, 他 : Proc. of the Fifth Inter. Sympos. on the Chemistry of Cement, part IV, (1969)
- 5) 新材料新工法紹介 : コンクリートジャーナル, 6 月, (1968)
- 6) 岡田, 他 : セメント技術年報 XXV, (1971)
- 7) 六車, 他 : CSA コンクリートの有効膨張ひずみに関する研究 (第 1 報) 5 月, (1967)
- 8) 長滝, 他 : セメント技術年報 XXII, (1968)
- 9) Benuska, L., 他 : Jour. of PCI Mar.-Apr. (1971)
- 10) Aroni, S., 他 : Jour. of PCI Oct. (1968)
- 11) Klein, A., 他 : Jour. of ACI Sept. (1963)
- 12) 長滝, 他 : 土木学会年次学術講演会概要集, 第 5 部, 10 月, (1971)
- 13) 門司, 他 : セメント技術年報 XXV (1971)
- 14) 戸川, 他 : セメントコンクリート, 12 月, (1971)
- 15) 未発表
- 16) 猪股 : コンクリートパンフレット第 76 号, セメント協会, (1968)
- 17) Hargett, R. : Jour. of PCI, Feb. (1970)

1972.2.29 : 受付

東京製網製品



PPC

JIS G 3536

鋼線・鋼より線
BBR工法鋼線
多層鋼より線 (19~127本より)

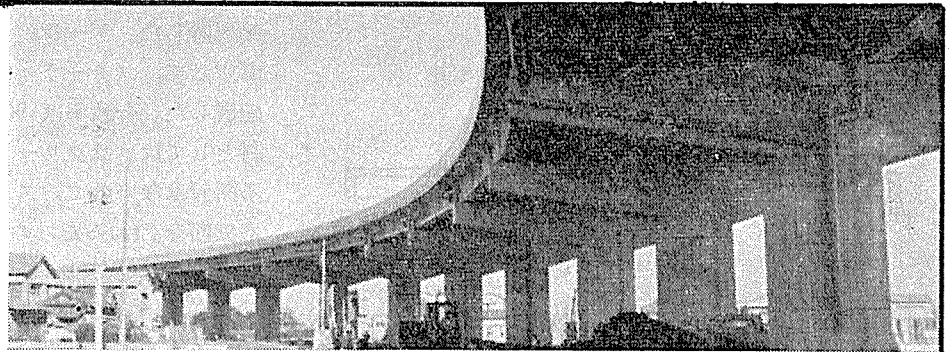
製造元 東京製網
発売元

東京都中央区日本橋室町2丁目8番地 古河ビル四階
電話 (211) 2851 (大代表)



鋼弦コンクリート

設計
施工
製造



首都高速道路7号線

富士ピー・エス・コンクリート株式会社

取締役社長 山崎 鋼 秋

- | | |
|-------|---|
| 本店 | 福岡市天神二丁目12番1号 天神ビル (〒810) |
| | 電話 福岡(092)76-5027・74-2374・74-0291 (75-6031-内線317・346・347) |
| 福岡支店 | 福岡市天神二丁目14番2号 証券ビル (〒810) |
| | 電話 福岡(092)74-7963・78-3961・75-1343 (75-1961-内線235・230) |
| 建築事業部 | 福岡市天神二丁目12番1号 証券ビル (〒810) |
| | 電話 福岡(092)77-4029 (75-1961-内線222) |
| 大阪支店 | 大阪市北区芝田町9-7 新梅田ビル (〒530) |
| | 電話 大阪(06)372-0382~0384 |
| 東京支店 | 東京都港区新橋四丁目24番8号 第二東洋海事ビル (〒105) |
| | 電話 東京(03)432-6877~6878 |
| 営業所 | 大分営業所・宮崎営業所・広島営業所 |
| 工場 | 山家工場・大東工場・関東工場・下淵作業所・筑豊工場・甘木工場・夜須分工場・大村分工場 |