

セメント協会研究所 正員 村 田 芳 樹
 正員 国 府 勝 郎
 正員 佐 藤 智 泰

1. まえがき

膨張コンクリート部材の性能評価や設計を行うためには、水和膨張反応の結果生じるケミカルプレストレスを精度よく推定することが必要である。その方法としては、既に発表されているように対象部材と同時に打設した同一養生条件の拘束膨張供試体の膨張率測定値を基にして、部材に導入されるケミカルプレストレスを計算するのがよいと考えられる。本報告では、計算手法として、膨張コンクリート部材をバネおよびはり要素でモデル化した系によってケミカルプレストレスを得る方法とこの近似解法とを提案する。

2. 実験方法

ケミカルプレストレス計算方法の検討に用いた供試体の形状および配合の代表例、膨張エネルギーおよびヤング率を図-1および表-1に示す。

なお、JISに規定するA法拘束供試体の膨張率を測定し、膨張エネルギー K ($=\alpha_p \epsilon$)を解析に用いた。供試体は、すべて湿潤養生を行なった。

3. 鉄筋コンクリート部材のケミカルプレストレス推定式

(1) 解析のモデル化

解析モデルは、図-2に示すような偏心拘束に伴う曲げの影響を考慮した軸方向バネ要素およびこれを連結する要素として曲げ剛性 $\bar{\kappa}$ のはりを仮想し、これに鉄筋位置において膨張拘束ひずみに相当する力 $\epsilon E_s A_s$ が作用すると考える。鉄筋の膨張拘束力 P_i ($=\epsilon_i E_s A_{si}$)が曲げ剛性 $\bar{\kappa}$ に応じてコンクリートの反力(ケミカルプレストレス σ_{cp})を生じ、膨張エネルギー K 、膨張率 ϵ およびケミカルプレストレス σ_{cp} との間に次の関係が成立すると仮定する。

$$K = \sigma_{cp} \epsilon (= p_0 E_s \epsilon_0^2) = \text{一定}$$

(p_0 および ϵ_0 は、一軸拘束膨張供試体の鉄筋比および膨張率を示す。)

この場合、膨張コンクリートの膨張は、養生条件によって著しく変化するので、解析対象の部材と一軸拘束膨張供試体との養生は、同一条件とする必要がある。モデル系の釣合関係には、三連モーメントの定理を適用し、節点反力と鉄筋の膨張拘束力とに関する多元連立一次方程式の解として弾性的反力を求め、膨張エネルギーに基づく膨張率を得るものである。

(2) ケミカルプレストレス推定式の適合性の検討

材令14日における一軸拘束供試体の膨張エネルギーを用いて係数 k ($=\frac{p_0^3 E_c}{6 \bar{\kappa}}$)を変化させた場合の計算値を図-3に示す。なお、計算に必要な膨張エネルギー K およびコンクリートのヤング率 E_c は、表-1に示す実測値を用いた。

図-3に示す供試体No.1016を例にとれば、膨張率分布の計算結果は k が大となるほど鉄筋間のコンクリートの膨張率計算値が大となって凸形の分布を呈する。計算結果と実測値との膨張率分布を最も良好に近似している k の値は、 $2.5 \sim 5.0 \times 10^{-6}$ であり、計算値は実測値の約90%であった。供試体EX34およびEX56においても、 2.5×10^{-6} とした場合に、計算値と実測値との膨張率分布は、良好な近似を得る結果となっている。

表-1 コンクリートの配合、膨張エネルギー K およびヤング率 E_c

供試体番号	最大骨寸(mm)	W/C(%)	単位量(kg/m ³)	スランプ(cm)	K($\times 10^3$ kgf/cm ²)	E _c ($\times 10^3$ kgf/cm ²)
No.1016	25	45	158 301 50 767 1111	6.5	40.0	2.54
EX 34	25	50	146 252 40 733 1163	12.5	29.77	2.91

(普通ポルトランドセメント、川砂・川砂利、膨張材は、No.1016でCSA系、EX34・EX56で石灰系を使用)

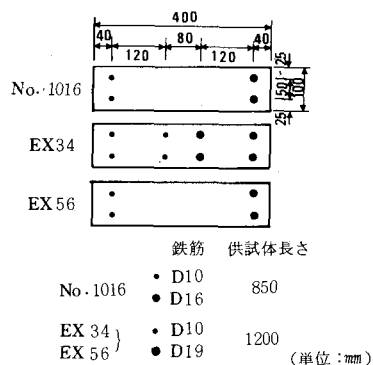


図-1 供試体寸法

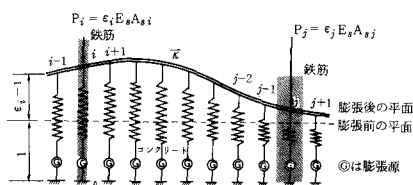


図-2 部材のモデル化

これらの計算値と実測値との対比からわかるように、ケミカルプレストレスの導入過程は、フレッシュコンクリートの塑性的状態から硬化した後の弾性的状態への移行過程のため、膨張コンクリート部材断面が通常の弾性体の曲げに関する法則に従がわない要素があることを示している。

すなわち、 k を0.0とすることは、反力分布を直線と見なすことであり、 k を大きな値とするほど反力分布は曲線的に変化する。なお、 k を 2.5×10^{-6} とした場合、応力の直線分布からの相違は 1 kgf/cm^2 以内であった。

これらのことから、膨張率が直線分布と考えるより、力の分布が直線と考えた方が実際に良く近似しているものと考えられる。

(3) 簡易計算式 上記で述べたように、 k を 2.5×10^{-6} とすると精度よく膨張率分布が得られることがわかったが、ケミカルプレストレスの値は、 k を0.0とした場合の計算値と大きな差がなかった。

したがって、 k を0.0としてケミカルプレストレス分布が直線的に分布すると仮定すれば、以下に示す簡易計算式を導くことができる。膨張コンクリートのケミカルプレストレス導入過程は、換算断面に力が作用するのでなく、鉄筋が荷重を生じ、これをコンクリート断面が受けることができる。

鉄筋位置のコンクリート断面に生じているケミカルプレストレス σ_{cpi} は、 $\sigma_{cpi} = \sigma'_{cp} + \frac{\sigma_{cp} - \sigma'_{cp}}{h} \times d_i$
鉄筋位置におけるコンクリートの膨張率 ϵ_{si} は、 $\epsilon_{si} = \frac{k}{\sigma_{cps i}}$

ここに、 σ'_{cp} 、 σ_{cp} : コンクリート断面に生じるケミカルプレストレスの縁応力
 h : 断面の高さ d_i : 鉄筋までの有効高さ

4. 拘束条件の変化によるケミカルプレストレスの挙動

コンクリートの膨張が安定したのち供試体を切断することによって拘束条件を変化した場合の挙動を図-4に示す。切断後の供試体断面が対称拘束されている供試体 EX 3 および 4 のひずみは、切断前の膨張率分布の勾配が緩和される変化が生じた。EX 4 のひずみ分布は、切断前の分布勾配が小さかったため一様な値となった。EX 56 は切断によって拘束の図心は核半径 ($h/6 = 20/6 = 3.3 \text{ mm}$) の外に存在する。このため鉄筋の拘束ひずみはいずれの側でも減少の傾向を示し、鉄筋のない側の縁は、伸びが生じた。いずれの供試体においても、拘束条件が変化することによる挙動は弾性論に基づく計算値と一致した。

5. 外的载荷によるケミカルプレストレスの確認

ケミカルプレストレスの値が安定したのち、曲げ試験におけるひびわれ荷重を基にしてケミカルプレストレスの値を検討した。膨張コンクリートおよび普通コンクリートのひびわれ強度の差が、ケミカルプレストレスと考えれば、ケミカルプレストレス計算値は、一部に実測値より約 10 kgf/cm^2 小さいものもあったが、全体には $\pm 5 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で比較的良好な近似を示していることが確認された。

したがって、ここに提案したケミカルプレストレスの算定方法は、膨張コンクリート部材の設計に活用できるものと考えられる。

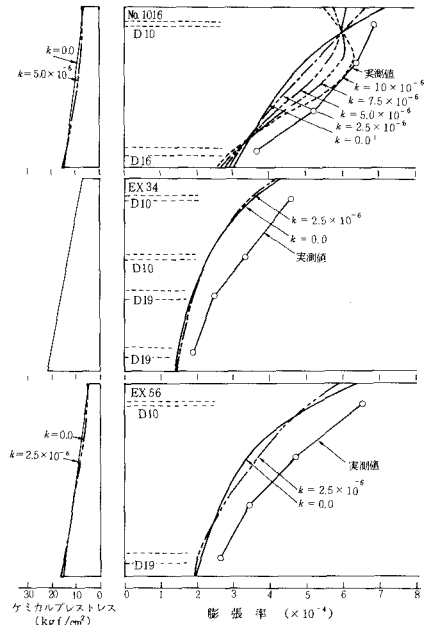


図-3 係数 k が膨張率分布計算値に与える影響

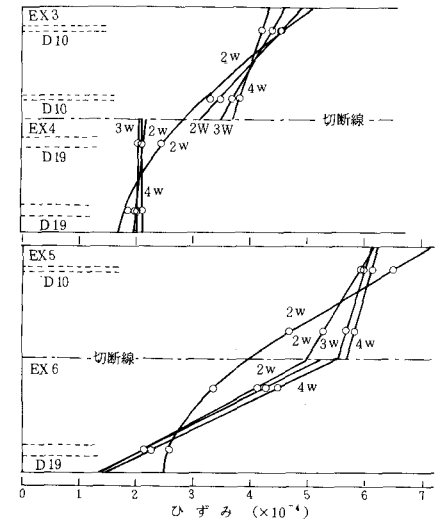


図-4 供試体の切断による拘束条件の変化にともなう膨張ひずみの変化