

# 論文 [1062] 膨張コンクリートの弾塑性を考慮した仕事量の概念について

正会員 辻 幸和 (群馬大学工学部)  
 正会員○落合 光雄 (住友セメント(株))  
 黒澤 隆 (石川島建材工業(株))  
 岩崎 和義 (竹中工務店)

## 1. まえがき

膨張コンクリートの膨張量およびケミカルプレストレスの推定方法には、無拘束状態で測定された膨張量より予測する方法、潜在膨張量を一定として求める方法<sup>1)</sup>、“単位体積当りの膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量”の概念を用いて推定する方法<sup>2)</sup>などがある。仕事量の概念を用いると、膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレス等を簡便に推定することができる。しかしながら、膨張コンクリートに対する拘束量が増加するに従って、クリープおよび弾性変形の影響が大きくなるため、実際に測定された膨張ひずみから求まる仕事量は、小さくなる傾向がある。

本研究では、一軸方向に拘束を受ける膨張コンクリートについて、まず、膨張により生じたケミカルプレストレスによって発生するクリープおよび弾性変形によるひずみの損失分を考慮した仕事量の算定方法を提示する。その後この仕事量が拘束の程度にかかわらず一定となるか否かについて検討した結果を報告する。

## 2. 実験の概要

膨張コンクリートの拘束には、図-1に示す端板と鋼棒を溶接した一軸拘束器具を用いた。拘束鋼材は、直径が10.9mm, 15.8mm, 22.2mm, 32.1mm, 46.1mmの5種類とし、拘束鋼材の断面積をコンクリートの断面積で除した拘束鋼材比は、それぞれ、0.9%, 2.0%, 3.9%, 8.1%, 16.7%である。膨張コンクリートの膨張作用により生じる膨張ひずみは、端板に溶接したゲージプラグ間の長さ変化を、ダイヤルゲージで測定することにより求めた。

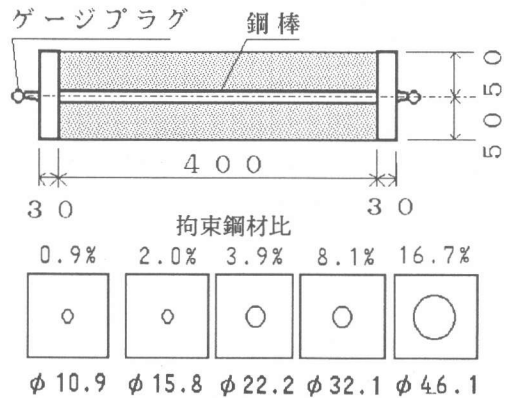


図-1 実験に使用した供試体

用いたコンクリートの配合を表-1に示す。

表-1 配合表

配合名	セメントの種類	W(%) C+E	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	E	S	G
A 1	普通	5.0	4.0	165	285	45	745	1143
A 2	普通	5.0	4.0	165	270	60	745	1147
A 3	普通	5.0	4.0	165	260	70	745	1147
A 4	普通	4.0	4.0	165	353	60	717	1104
A 5	普通	6.0	4.0	165	215	60	762	1174
B 1	早強	5.0	4.0	165	300	30	747	1141
B 2	早強	5.0	4.0	165	285	45	746	1140
B 3	早強	5.0	4.0	165	270	60	746	1138

セメントは普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを、膨張材はエトリンガイト系の膨張材を、それぞれ使用した。単位水量は165kg/m<sup>3</sup>と一定とし、水結合材比を40%, 50%, 60%の3種類に、単位膨張材量を30kg/m<sup>3</sup>から70kg/m<sup>3</sup>の4種類に変化させた。コンクリートの打込みは20±2℃の恒温室で行い、20時間後に脱型を行い、その後水温が20±1℃の水中養生を所定の材令まで行った。

### 3. 解析方法

測定される膨張ひずみには、膨張作用による全膨張ひずみと、それにより膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレスによって生じたクリープおよび弾性変形とが合算されている。そこで、ケミカルプレストレスによって生じたクリープひずみおよび弾性変形量を予測し、それらによる損失分を考慮した仕事量を、以下のように算出した。

ケミカルプレストレスは、材令の経過とともに増加していくため、応力一定のクリープ予測式をそのまま適用することができない。そこで、図-2に示すように、膨張コンクリートに導入された材令j日のケミカルプレストレス $\sigma_{cp}(j)$ により、測定材令ごとのケミカルプレストレスの増分 $\Delta\sigma(j)=\sigma_{cp}(j)-\sigma_{cp}(j-1)$ をとり、重ね合わせの原理が膨張コンクリートについても成り立つと仮定し、所定の材令までに生じるクリープひずみを計算した。応力導入材令がk日、所定の材令がj日の場合のクリープ係数を $\phi(k, j)$ とすると、材令k日のケミカルプレストレスの増分 $\Delta\sigma(k)$ によって材令j日までに生じるクリープひずみ $\Delta\epsilon_{cr}(k, j)$ は、

$$\Delta\epsilon_{cr}(k, j) = \Delta\sigma(k) \times \frac{\phi(k, j)}{E_0(j)} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $E_0(j)$ ：材令j日のヤング係数

で与えられる。また、材令k日に生じたケミカルプレストレスの増分 $\Delta\sigma(k)$ とクリープひずみ $\Delta\epsilon_{cr}(k, j)$ より、所定の材令j日までに生じた仕事量の損失分は、

$$\Delta U_{cr}(k, j) = \Delta\sigma(k) \times \Delta\epsilon_{cr}(k, j) \quad \dots\dots(2)$$

となり、材令j日までに生じたクリープによる仕事量の損失分の総和は、式(3)により与えられる。なお、クリープ係数の予測式は、Bazantによる方法<sup>3)</sup>を用い、普通コンクリートと同等であると仮定した。ただし、Bazantの予測式では、応力導入材令1日におけるクリープ係数が、材令2日以降の場合と比較して極端に大きな値として算出されるため、ここでは、応力導入材令が2日と3日におけるクリープ係数から直線で外挿することにより、応力導入材令1日のクリープ係数とした。

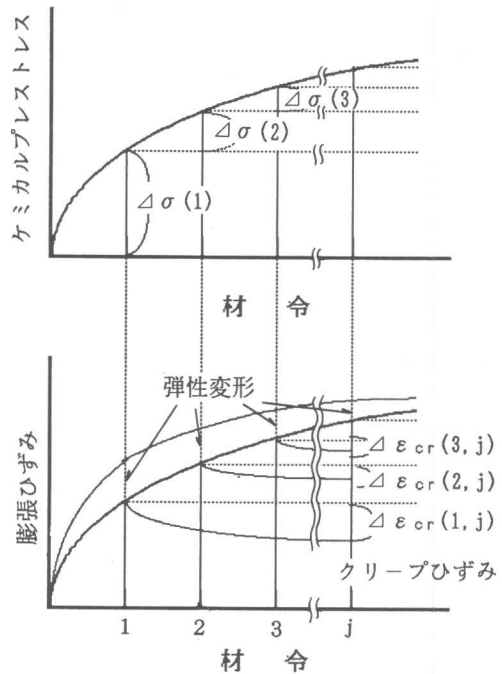


図-2 クリープおよび弾性変形の算定方法

$$U_{cr}(j) = \sum_{k=1}^{j-1} \Delta U_{cr}(k, j) \quad \dots\dots\dots(3)$$

導入されたケミカルプレストレスによって、膨張コンクリートも弾性変形をする。このため、膨張作用により生じた膨張ひずみの全てが拘束体の鋼棒に導入されず、弾性変形による分だけ実際に生じた膨張ひずみは小さく測定される。したがって、材令k日におけるケミカルプレストレスの増分 $\Delta\sigma(k)$ と弾性変形 $\Delta\varepsilon_{e1}(k)$ により生じた仕事量の損失分は、式(4)により求まる。

$$\begin{aligned} \Delta U_{e1}(k) &= \frac{1}{2} \Delta\sigma(k) \times \Delta\varepsilon_{e1}(k) \\ &= \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma(k)^2}{(E_o(k)+E_o(k-1))/2} \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

そして、材令j日までに生じた弾性変形による仕事量の損失の総和は、式(5)により与えられる。

$$U_{e1}(j) = \sum_{k=1}^j \Delta U_{e1}(k) \quad \dots\dots\dots(5)$$

以上より、クリープおよび弾性変形を考慮した仕事量は、

$$U_o(j) = \frac{1}{2} p E_s \varepsilon_s(j)^2 + U_{cr}(j) + U_{e1}(j) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $\varepsilon_s(j)$  : 材令j日に生じた膨張ひずみ (実測値)

p : 拘束鋼材比

$E_s$  : 拘束鋼材のヤング係数

により、算出できる。

#### 4. 膨張性状およびケミカルプレストレス

各種拘束鋼材比の膨張ひずみの経時変化を示したのが図-3である。単位膨張材量が $60\text{kg/m}^3$ の場合である。材令が1日~5日の間で活発な膨張作用が生じ、その後はほぼ一定の膨張ひずみを保持している。また、拘束鋼材比が増加するに従って、実測された膨張ひずみは小さくなっている。

図-4には、膨張ひずみの実測値より計算したケミカルプレストレスの経時変化を示す。ケミカルプレストレスは、一般に、拘束鋼

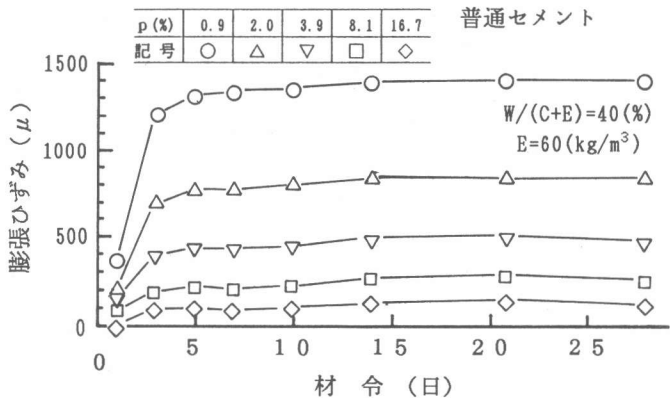


図-3 膨張ひずみの経時変化

材比が大きくなるに従って増加しているが、拘束鋼材比が8.1%から16.7%に増加しても、ほぼ同程度か、逆に小さくなっている場合もある。

材令14日におけるケミカルプレストレスを縦軸に、拘束鋼材比を横軸にとり、図示したのが図-5～図-7である。普通ポルトランドセメントを用いた場合には、拘束鋼材比が1%から2%程度までは、ケミカルプレストレスは増加するが、それより大きな拘束鋼材比になると、クリープ等の影響が大きくなることなどのため、ケミカルプレストレスはほとんど増加しない。早強ポルトランドセメントを使用した場合においても、普通ポルトランドセメントを使用した場合より、拘束鋼材比の増加にともなうケミカルプレストレスの増加は、一般に顕著である。しかしながら、拘束鋼材比が16%となると、ケミカルプレストレスはほとんど増加せず、逆に低下する場合がある。

単位膨張材量を  $45\text{kg/m}^3$  から  $60\text{kg/m}^3$  に増加させると、ケミカルプレストレスは2倍以上に増加した。しかしながら、 $70\text{kg/m}^3$  と増加させても、コンクリートの品質の低下などによりほとんど増加せず、拘束鋼材比が大きくなると逆に減少する場合も認められる。また、水結合材比を増加させると、ケミカルプレストレスは低下する傾向が認められた。

一軸拘束状態では、膨張コンクリートに対する拘束度を増加しても、また、使用する膨張材の量を

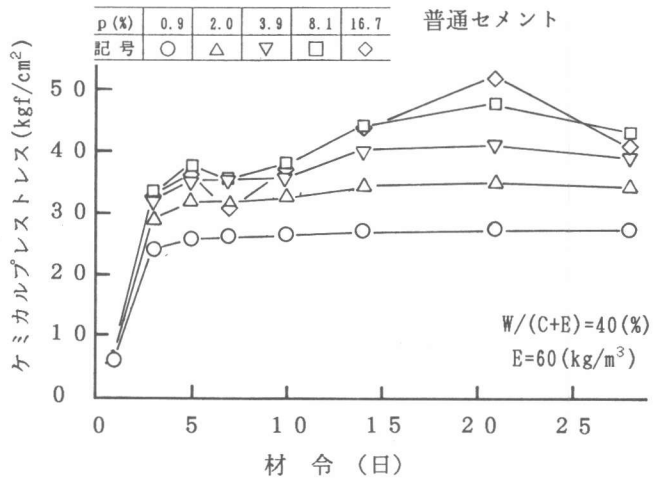


図-4 ケミカルプレストレスの経時変化

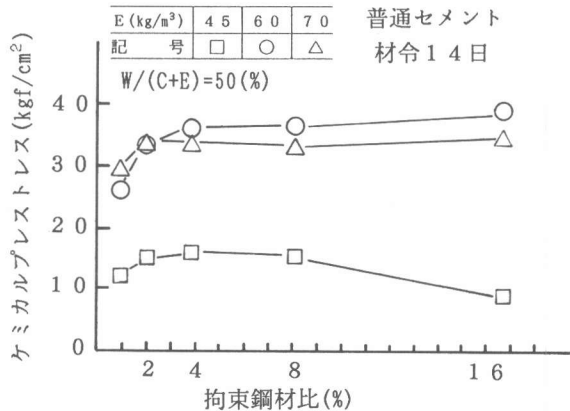


図-5 ケミカルプレストレスと拘束鋼材比  
(単位膨張材量を変化)

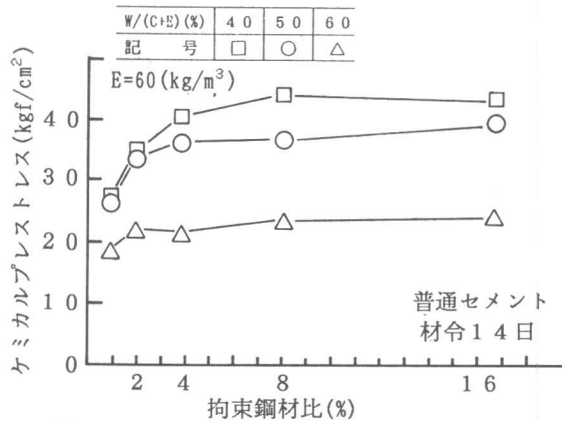


図-6 ケミカルプレストレスと拘束鋼材比  
(水結合材比を変化)

増加させても、コンクリートに導入されるケミカルプレストレスが増加しない限界値のあることが示される。

### 5. 仕事量

仕事量の概念を用いるケミカルプレストレスの推定方法によれば、単位体積当りの膨張コンクリートが拘束体に与える膨張エネルギーは、拘束の強さによらず一定であると仮定することにより、基準となる拘束鋼材比  $p_0$  における膨張ひずみ  $\varepsilon_0$  を測定することから、任意の拘束鋼材比  $p_x$  の膨張ひずみ  $\varepsilon_x$  を以下の式のように簡便に推定することができる。

$$\varepsilon_x = \left\{ \frac{p_0}{p_x} \right\}^{0.5} \varepsilon_0$$

クリープおよび弾性変形による損失を考慮した仕事量が、拘束鋼材比にかかわらず一定であると仮定することができれば、仕事量の概念を用いる推定方法の適用範囲を拡大することが可能となる。

ケミカルプレストレスによるクリープおよび弾性変形を考慮した場合と考慮しない場合の、仕事量と拘束鋼材比の関係を図-8～図-10に示す。膨張ひずみの実測値より求めた仕事量は、拘束鋼材比が増加するに従って、下向きに凸な曲線を示している。クリープおよび弾性変形を考慮した仕事量は、考慮しない場合に比べて、すべて大きな値となっている。

普通セメントを用いた場合には、拘束鋼材比が増加するに従って導入される仕事量は、クリープおよび弾性変形を考慮しない場合と同様に下向きに凸な曲線となっているが、拘

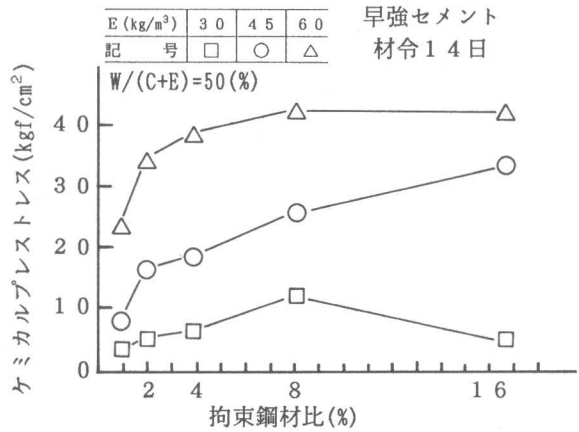


図-7 ケミカルプレストレスと拘束鋼材比 (早強セメントを使用)

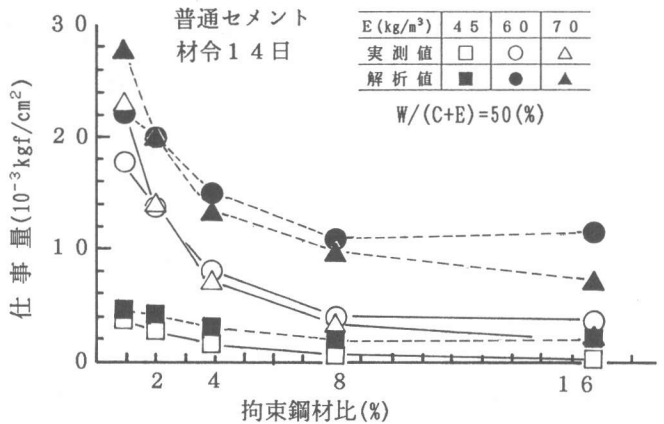


図-8 仕事量の実測値と解析値 (単位膨張材量を変化)

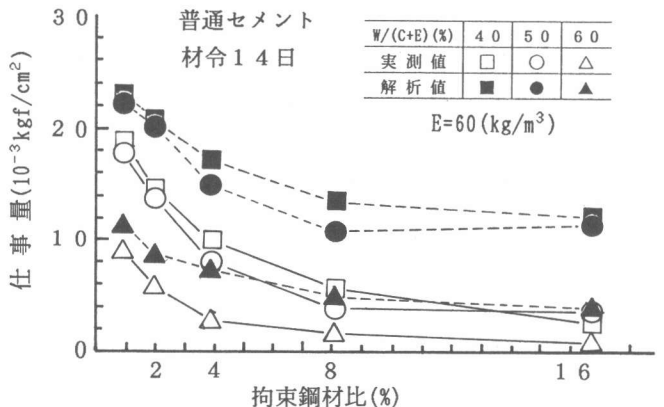


図-9 仕事量の実測値と解析値 (水結合材比を変化)

束が増加することに伴う仕事量の減少率は小さくなっている。早強ポルトランドセメントを用いた場合には、クリープおよび仕事量を考慮した仕事量は、拘束が増加しても減少は見られず、ほぼ一定値か、少し増加する傾向が認められた。

膨張コンクリートの強度等は、単位膨張材量、拘束の程度および方法、水結合材比などにより、普通コンクリートに比べて増加または減少することが報告されているが、強度増加または強度低下が、今回の実験においてはどの程度であったのか定量的

に求めることができなかった。したがって、解析に使用した材令と強度発現等の曲線は、すべて膨張材を用いない普通コンクリートと同一のものを使用しており、クリープ係数やヤング係数を過大にあるいは過小に評価したため、これらの影響を考慮した仕事量に一定の傾向が認められなかったものと思われる。今後、膨張作用の活発な若材令時における膨張コンクリートの強度、ヤング係数およびクリープ係数を把握していくことが肝要である。

## 6. 結論

膨張コンクリートの弾塑性を考慮した仕事量についての解析結果を、膨張ひずみから求まる仕事量と比較検討した。クリープおよび弾性変形を考慮した仕事量は、考慮しない場合に比べてすべて大きな値となり、拘束鋼材比が増加することにもなる仕事量の減少率は小さくできた。また、使用セメントや配合により、拘束鋼材比にかかわらず仕事量が一定と見なせる場合、逆に仕事量が拘束鋼材比とともに増加する場合も得られた。仮定した膨張コンクリートのクリープ係数およびヤング係数については、今後検討していかなければならないが、本研究で提案した仕事量の概念に基づけば、ケミカルプレストレス等の推定が、これまで以上に精度よく、また適用範囲を拡大して、行うことができるものと思われる。

## 参考文献

- 1) 岡村 甫, 国島正彦: 膨張コンクリートの複合モデル化について, セメント技術年報 No. 27, pp. 303~305.
- 2) 辻 幸和: ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法, コンクリート工学 No. 6, June, 1981, pp. 99~105.
- 3) Bazant, Z. P., and Panula, L.: Practical prediction of time-dependent deformations of concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol. 11-No. 65, 1978, No. 66, 1978, No. 69, 1979.

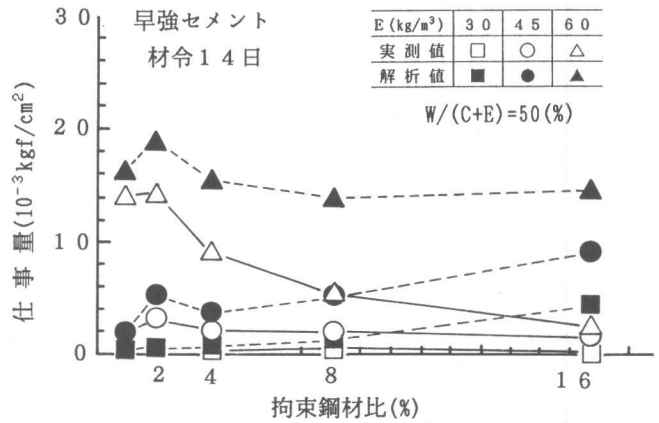


図-10 仕事量の実測値と解析値 (早強セメントを使用)