

[93] 多軸拘束を受ける膨張コンクリートの複合モデル

正会員 ○先村 律雄 (長岡技術科学大学大学院)
 正会員 丸山 久一 (長岡技術科学大学工学部)
 正会員 橋本 親典 (長岡技術科学大学工学部)
 正会員 辻 幸和 (群馬大学工学部)

1, まえがき

膨張コンクリートをコンクリートの収縮補償用あるいは、ケミカルプレストレストコンクリート用として使用する場合、膨張量あるいは導入されるプレストレス量を精度良く予測しなければならない。これまでに種々の予測式あるいは膨張モデルが提案されているが、大部分は、一軸方向のみの膨張量しか扱っていないため、二軸方向あるいは三軸方向に配筋されている実構造物に適用する場合には必ずしも充分とは言えない。

本研究は、既往の複合モデル¹⁾に界面摩擦力の概念を取り入れることにより、二軸拘束あるいは三軸拘束状態を受ける膨張コンクリートの膨張性状を予測できる複合モデルを提案するものである。

2, 界面摩擦力

2-1 界面摩擦力 τ_f の定義

図-1は、自由膨張と拘束膨張の一例を示したものである。自由膨張状態では、単位膨張材量が 50kg/m^3 の膨張コンクリートは、材令7日で $10000\ \mu$ 程度膨張する。ところが、拘束鋼材比が1%で一軸方向に拘束すると、拘束方向の膨張量は $500\ \mu$ 、拘束直角方向の膨張量は $4000\ \mu$ 程度に減少する。これまでの複合モデルでは、この拘束直角方向の膨張量の減少を計算することができなかった。ここで提案する複合モデルでは、拘束直角方向膨張量の減少を内的拘束要素の圧縮部分である圧縮要素と膨張要素の界面に存在する摩擦力によるものと考えた。

図-2に、本複合モデルで新しく導入した界面摩擦力の概念を示す。拘束直角方向に作用する界面摩擦力 τ_f は、界面摩擦係数 μ とその界面に作用する垂直応力 σ_n の積として、(1)式で表されるものとする。

$$\tau_f = \mu \cdot \sigma_n \quad (1)$$

ここに、
 μ : 界面摩擦係数
 σ_n : 垂直応力

なお、図-1に示すように、本複合モデルは、既往の複合モデル¹⁾と同様に、モデル全体を1辺1の立方体とし、膨張要素を1辺 α の立方体としている。

2-2 界面摩擦係数 μ の定式化

界面摩擦係数 μ は、材令とともに大きくなると考え、(2)式で与えられると仮定した。

$$\mu = -m k * (m k 1^{-t} - 1) \quad (2)$$

ここに、 $m k$ は上限値を、 $m k 1$ は速度項を意味し、それぞれ実験により定まる値とした。

2-3 垂直応力 σ_n の定式化

垂直応力 σ_n は、拘束方向の拘束の度合いが大きくなる程、増大すると考えられる。この拘束の程度は、拘束鋼材によって潜在的にその膨張コンクリート全体に蓄積された物理量と考え、自由膨張量と拘束膨張量の差に比例するとし、ひずみの次元を有するものと仮定した。従って、垂直応力 σ_n は、拘束の程度を用いて、拘束鋼材との力の釣合条件から、(3)式で与えられる。

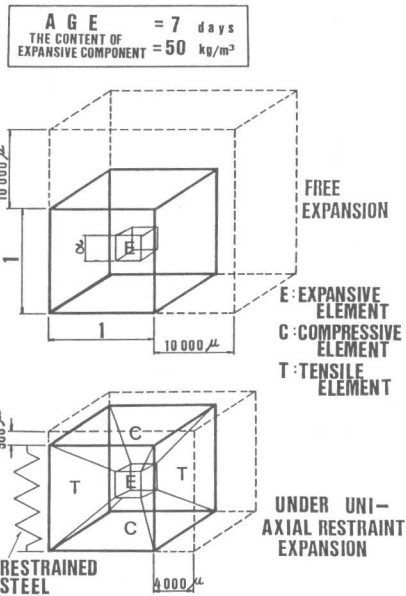


図-1 自由膨張と拘束膨張の関係

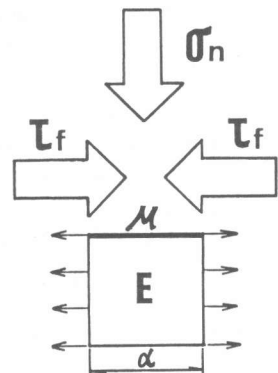


図-2 界面摩擦力の概念図

$$\sigma_n = \{ \Delta \epsilon_{free}(t) - \Delta \epsilon(t) \} \cdot E_s \cdot p \quad (3)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_{free}(t)$: 同一配合における材令 t 日の増分自由膨張ひずみ

$\Delta \epsilon(t)$: 同一配合における材令 t 日の増分拘束膨張ひずみ

E_s : 拘束鋼材の弾性係数 p : 拘束鋼材比

2-4 既往の複合モデルとの関係

既往の複合モデルでは、次式に示すようなひずみの適合条件式(4)~(6)式と力の釣合条件式(7),(8)式によって構成されている。

$$\Delta \epsilon_e = \Delta \epsilon_{e0} + \Delta \epsilon_{ee} \quad (4)$$

$$1 \cdot \Delta \epsilon = \Delta \epsilon_t \cdot l_t \quad (5)$$

$$1 \cdot \Delta \epsilon = \Delta \epsilon_c \cdot \alpha + \Delta \epsilon_c \cdot l_c \quad (6)$$

$$\Delta \epsilon_t \cdot E_t \cdot A_t + \Delta \epsilon_c \cdot E_c \cdot A_c = -\Delta \epsilon \cdot p \cdot l \cdot E_s \quad (7)$$

$$\Delta \epsilon_{ee} \cdot E_e \cdot A_e = \Delta \epsilon_c \cdot E_c \cdot A_c \quad (8)$$

ここに、(4)式は Δt 時間の間に増分潜在膨張ひずみ($\Delta \epsilon_{e0}$)が生じ、内的及び外的拘束により増分潜在膨張ひずみ($\Delta \epsilon_{ee}$)が縮むことにより、膨張要素の増分膨張ひずみ($\Delta \epsilon_e$)が発生することを意味する。(5)式は、モデル全体の変位($1 \cdot \Delta \epsilon$)は引張要素の増分平均ひずみ($\Delta \epsilon_t$)と引張要素の長さ(l_t)の積に等しいことを、(6)式は、モデル全体の変位($1 \cdot \Delta \epsilon$)は圧縮要素の増分平均ひずみ($\Delta \epsilon_c$)と圧縮要素の長さ(l_c)の積と膨張要素の増分膨張ひずみ($\Delta \epsilon_e$)と膨張要素の長さ(α)の積を加えものに等しいことを意味する。(7)式は、拘束鋼材の力の増分量($-\Delta \epsilon \cdot p \cdot l \cdot E_s$)は引張要素と圧縮要素の力の増分量の和($\Delta \epsilon_t \cdot E_t \cdot A_t + \Delta \epsilon_c \cdot E_c \cdot A_c$)と等しく、(8)式は、圧縮要素の力の増分量($\Delta \epsilon_c \cdot E_c \cdot A_c$)は膨張要素の力の増分量($\Delta \epsilon_{ee} \cdot E_e \cdot A_e$)と等しいことを意味する。なお、 E_e, E_t, E_c は、 Δt 時間後における膨張、引張、圧縮各要素の弾性係数を示し、 $A_t = \{2(1-\alpha^3)/3\}$, $A_e = \alpha^2$, $A_c = \{(1-\alpha^3)/3\}/(1-\alpha)$ は、各要素の面積を示す。

本研究で、新たに導入した界面摩擦力 τ_f は、5条件式中、内の拘束に関する力の釣合条件式(8)式に取り入れられ(9)式で表される。

$$\Delta \epsilon_{ee} \cdot E_e \cdot A_e = \Delta \epsilon_c \cdot E_c \cdot A_c - 2 A_e \cdot \tau_f \quad (9)$$

以上のモデル化により、一軸拘束における拘束直角方向の膨張量が求めることが可能となる。さらに、本複合モデルを多軸に拡張する場合は、(9)式を拘束方向の膨張量を決定するひずみの適合条件式、力の釣合条件式に代入し、収束計算することにより求めることができる。図-3に計算のフローチャートを示す。

3、膨張要素及び内的拘束要素の特性値

図-4に界面摩擦係数を示す。摩擦係数は、単位膨張材量の違いにより変化するものとした。潜在膨張ひずみは、膨張コンクリートの膨張エネルギーにより異なると思われるが、

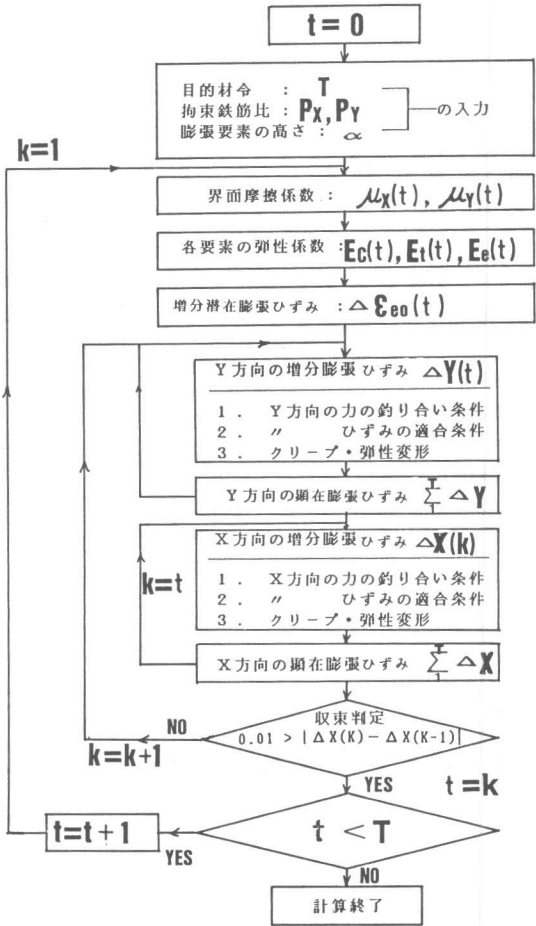


図-3 二軸用フローチャート

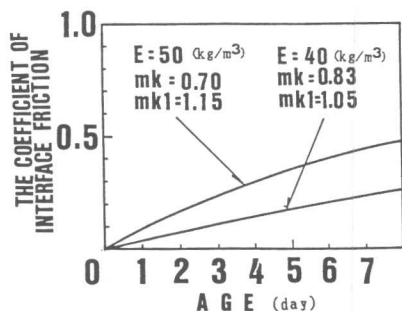


図-4 界面摩擦係数

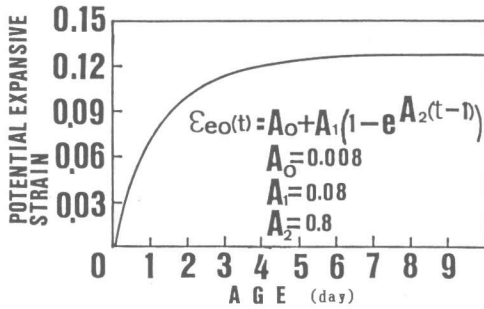


図-5 潜在膨張量

本研究では、図-5に示すように単位膨張材量にかかわらず、一定とした。なお、単位膨張材量の影響は、膨張要素の高さ α で考慮するものとした。

図-6に膨張要素と内部拘束要素であるコンクリート部分の弾性係数を示す。膨張要素の弾性係数は、単位膨張材量や拘束の影響を受けず材令により変化するものとした。内的拘束要素には、比較的簡単な式である阪田の式²⁾を用いた。また、引張要素と圧縮要素の弾性係数は同じと仮定した。

図-7に本複合モデルに用いた膨張要素のクリープ係数を示す。Rossの式³⁾を適用した。

図-8に内的拘束要素の基礎クリープ特性を示す。阪田の式²⁾を用い、乾燥クリープは考慮していない。

なお、図-1に示した膨張要素の高さ α は、コンクリートの配合のうち特に、単位膨張材量によって異なるものと考えられるが、本研究では、自由膨張量の解析値と実験値がほぼ一致するように定め、実験定数として考えた。

4, 実験概要

複合モデルを検証するために、本研究ではまず基本となる一軸拘束状態を受ける膨張コンクリートの拘束方向及び拘束直角方向の膨張量を、自由膨張量と対比して測定した。配合を表-1に示す。水結合材比 $W/(C+E)$ はすべて50%とし、単位水量 W はすべて 200kg/m^3 とした。単位膨張材量は、 $40, 50, 80\text{kg/m}^3$ の3種類とした。

図-9に供試体の形状寸法を示す。一軸拘束にはJISの呼び名 9.2mm のPC鋼棒を用いた。端板と鋼棒の拘束には、端板の両側をナットで締付けた。拘束鋼材比 A_s/A_c はすべて1%とし、拘束方向のひずみは、拘束鋼材に貼付したストレインゲージで、拘束直角方向のひずみはコンクリート表面に埋込んだ標点よりマイクロメーターで測定した。

ストレインゲージは、漏水を防ぐ為防水シートを巻き型枠セット後から測定し、拘束直角方向は打設10時間後の脱枠から毎日同時間に測定した。

単位膨張材量が 80kg/m^3 の供試体は、自由膨張状態(材令2日)で 20000μ 以上膨張し自己崩壊した。一軸拘束状態においても拘束方向は材令2日で

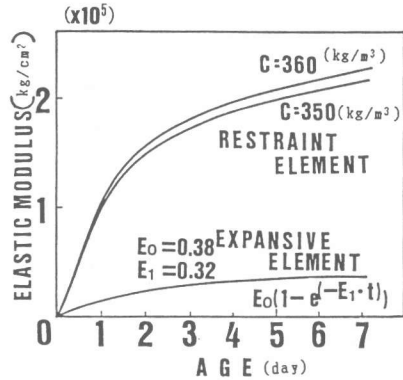


図-6 各要素の弾性係数

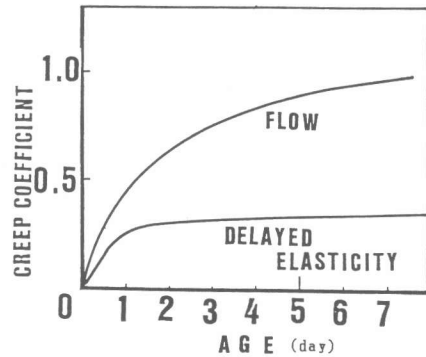


図-7 膨張要素のクリープ係数

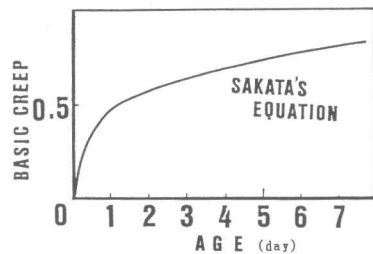


図-8 内的拘束要素の基礎クリープ

表-1 示方配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 W/(C+E) (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m³)					空気量 (%)
			水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
15	50	41	200	360 350 320	40 50 80	703	1023	1.5

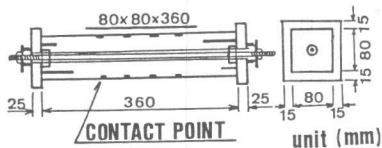


図-9 ナット式固定による
一軸拘束供試体

1300 μ 程度膨張し、それ以降からクリープを起しはじめ、拘束直角方向は拘束方向がクリープを起しはじめてから急激に膨張し材令3日には、拘束方向に沿って目に見えるクラックが発生し自己崩壊した。よって単位膨張材量が80kg/m³の供試体は、2軸以上の実験でなければ適さないと思われる。解析には、材令2日までの自由膨張状態のみ考えた。

なお、養生はすべて水中養生(20 $^{\circ}$ C)で行った。

5. モデルと実験値の比較

図-10に、膨張ひずみと材令の関係($E=50\text{kg/m}^3$)を、また図-11に膨張ひずみと材令の関係($E=40\text{kg/m}^3$)の実験結果を、本研究で提案した界面摩擦力を考慮した複合モデルによって算定した解析結果と比較して示す。

拘束方向、拘束直角方向の膨張ひずみとも、材令3日以降は、解析値と実験値はよく一致しているといえる。しかし、材令1~2日の若材令時では、拘束方向、拘束直角方向ともに、解析値が実験値より下まわっている傾向にある。

拘束方向に関しては、解析に用いた膨張要素の潜在膨張量の特値が、実験に使用した膨張材のそれに較べて、膨張発現の遅いものであったと考えられる。また、拘束直角方向については、供試体のコンクリート表面に埋込んだ測定用のコンタクトポイントが、初期若材令時において、コンクリート自体が柔かく測定誤差が発生しやすいと思われる。

図-12は、本複合モデルで用いた、膨張要素の高さ α と単位膨張材量の関係を示したものである。膨張要素の高さ α は、未だに理論的根拠が乏しく、膨張コンクリートの配合と結びついた定量化は確立していないが、本複合モデルでは、配合要因のうち、単位膨張材量と密接な関係が存在すると仮定し、実験結果からその関係を決定した。

6. 結論

既往の複合モデルでは不可能であった多軸拘束を受ける膨張コンクリートの膨張量を計算する複合モデルを提案した。このモデルは、膨張要素と拘束圧縮要素の界面に摩擦力の概念を導入することによって、外的拘束直角方向の拘束程度を評価できるものである。

今後の課題としては、膨張要素のクリープ係数、弾性係数、高さ α 等の諸係数に関する理論的検討が必要である。

7. 参考文献

- 1)岡村甫他：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XV II, pp303-305
- 2)阪田憲次他：コンクリートのクリープの予測に関する研究、土木学会論文報告集第340号, pp185-191
- 3)ROSS, A. D.: Concrete creep data, The Struct. E., London, pp314-326. 1937

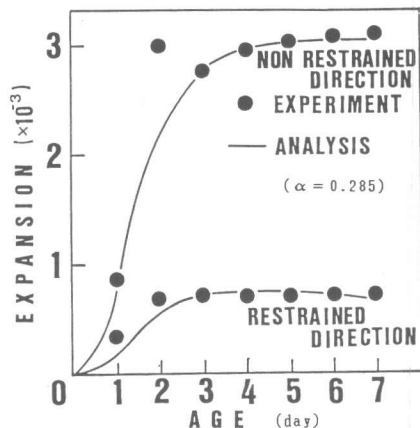


図-10 膨張ひずみと材令の関係
(単位膨張材量: 50kg/m³)

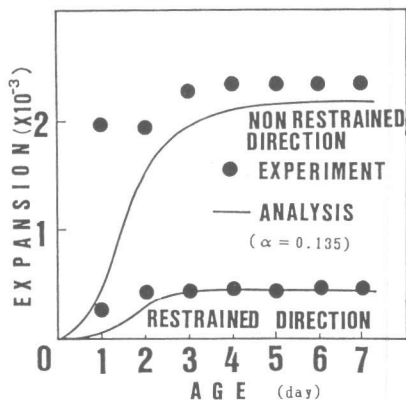


図-11 膨張ひずみと材令の関係
(単位膨張材量: 40kg/m³)

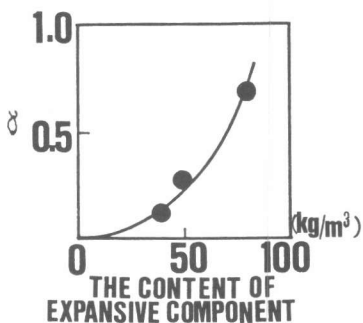


図-12 膨張要素高さ α と
単位膨張材量の関係