二軸拘束下における膨張コンクリートの 特性に関する実験的研究[†]

岡 田 清* 太 田 誠** 永 淵 強***
矢 田 篤**** 玉 井 撰 郎*****

Characteristics of Expansive Concrete under Bi-Axial Restraint

by

Kiyoshi OKADA, Makoto OHTA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Tsuyoshi NAGAFUCHI

(Denki Kagaku Kogyo Co. Ltd., Niigata)

Atsushi YATA

(Kansai Electric Power, Co. Ltd., Osaka)

and Setsurou TAMAI

(Japan Nuclear Fuel Service, Co. Ltd., Tokyo)

The expansion characteristics of expansive concrete are greatly dependent upon the restraint condition of concrete itself. In this study, the restrained expansive strains of main (longitudinal) and lateral reinforcing steels embeded in expansive concrete as well as the relations between them were investigated experimentally and theoretically. Authors reported previously the method of calculating the restrained strains of expansive concrete having only longitudinal reinforcement, that is, under uniaxial restraint. But under biaxial restraint, the chemical prestressing in one direction due to the restraining steel reduces the expansion in another direction. By considering the poisson's effects, the next equation was proposed.

$$\varepsilon_{RX} = \varepsilon_{RX0} - K_x \times \varepsilon_{RY} + \nu \times \varepsilon_{cey}$$

where, ε_{RX} , ε_{RY} ; restrained expansive strains under biaxial restraint in the direction of X and Y , respectively,

ε_{RX0} ; restrained expansive strains under uniaxial restraint,

ν ; poisson's ratio (=0.2),

ε_{cey} ; elastic strain caused by chemical prestressing,

K_x ; expansion reducing coefficient.

The results obtained from experiments and theoretical analysis are summarized as follows.

(1) The restraint expansive strain of main (longitudinal) reinforcement are not strongly affected by the lateral reinforcement.

(2) Chemical prestressing in the direction of main reinforcement reduces the expansion in the direction of lateral reinforcement and the expansion reducing coefficient K may be expressed as a function of lateral reinforcement ratio.

(Received July 24, 1982)

キー・ワード：膨張コンクリート，二軸拘束，拘束膨張ひずみ，膨張抑制係数

1 緒 言

膨張コンクリートの使用目的としては①収縮ひびわ

れ防止（収縮補償）と，②ケミカルプレストレス（以下 CP と略記）の導入という二つに大別される．使用目的によって膨張材の使用量は異なり一般的に①に対しては単位量として 20～30 kg/m³ であり，②に対しては 50～70 kg/m³ である．また，②を目的とする場合，養生条件とともに拘束条件について特に考慮する必要があると考えられる．一般のコンクリート構造部材に

[†] 原稿受理 昭和57年7月24日

* 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 正 会 員 電気化学工業(株) 新潟県西頸郡青海町

**** 関西電力(株) 大阪府北区中之島

***** 日本原燃サービス(株) 東京都千代田区

Table I. Mix proportion of concrete.

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
					C	W	S	G	CSA	5 L
25	14±1	3	45	40	360	158.4	648	1087	60	3 6

おける配筋状況などの拘束条件を考えると膨張コンクリートの多軸拘束下における特性, 特に拘束膨張ひずみの発現状況について明らかにする必要がある。筆者らはすでに一軸拘束下の拘束膨張ひずみに関し実験および理論的な解釈を行ったが, 本論文ではその延長として二軸拘束下の膨張コンクリートの特性, 特に拘束膨張ひずみについて実験および理論の両面から検討を行い拘束膨張ひずみの算定理論式を示すものである。

2 実 験

2・1 使用材料

セメント: D社製普通ポルトランドセメント

比重 3.17

膨 張 材: デンカ CSA #20 比重 2.9

粗 骨 材: 黒部川産砂利 Gmax 25 mm

比重 2.61 吸水率 0.9%

F.M. 7.14

細 骨 材: 黒部川産川砂 比重 2.52 吸水率1.3%

F.M. 2.59

減 水 剤: ポゾリス No.5L 溶液比重 1.0

鉄 筋: D10, D13, D16 材質 S D35

2・2 示方配合および練りまぜ

示方配合を Table I に示す。表中 W/C は水セメント比であり水結合材比は38%となる。減水剤はセメントの1%を使用した。本実験では膨張材を外割として砂と置き換えている。

練りまぜは強制パンミキサ (容量 100 l) で行い dry mix 30 秒間, 水および減水剤投入後 1 分 30 秒間練りまぜた。

2・3 供試体形状, 寸法

Fig. 1 に供試体形状, 寸法を示す。全供試体とも15×50×50 cm の版状供試体である。主筋方向鉄筋比はいずれも2.12%で一定である。供試体は一軸方向のみ鉄筋を配置し端板を用いて拘束を与えてあるもの (供試体名 U-0), 二軸方向とも鉄筋は配置してあるものの主筋端部のみ端板で拘束を与えているもの (U-10, U-20, U-50), 二軸方向に鉄筋が配置されいずれの方向も端板を用いて拘束を与えているもの (B-10, B-20, B-50) の3種類である。配力鉄筋比は U-10, B-10 が 0.286%, U-20, B-20 が 0.476%, U-50, B-50 が 1.183% である。

2・4 測定方法

供試体はすべて室内 (室温約20℃, 75% RH) で湿

Fig. 1. Test specimen.

布養生した。拘束膨張ひずみの測定は主筋, 配力筋とも端部から供試体長の 1/8, 1/4, 1/2 位置に貼布したストレインゲージ (検長 2 mm) で行った。配力筋をもたぬ U-0 供試体では主筋と直角方向の拘束膨張ひずみはホイットモア型コンタクトゲージによって測定した。なお, 測定は主筋, 配力筋とも中央部 3 本について行いその平均値を測定値とした。

3 理 論

3・1 理論式の概念

本論文で示す理論式は筆者らがすでに報告した一軸¹⁾拘束下における拘束膨張ひずみの予測法の延長であり, 一軸方向の CP によってそれと直角方向は膨張水和生成物の膨張が制限をうけ直角方向の膨張ひずみが減少させられるとするものである。すなわち, 拘束鉄筋軸方向を x 軸とし, それと直角方向を y 軸とすると以下の式が成立するものと仮定する。

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} - K \times \varepsilon_{Rx}$$

ここで ε_y : y 軸方向拘束膨張ひずみ

ε_{y0} : CP による制限を受けない場合の y 軸方向膨張ひずみ

K : 膨張抑制係数

ε_{Rx} : x 軸方向拘束膨張ひずみ

一方, 二軸拘束が成立している場合, ポアソン効果による項を付加する必要があると考えられ, この場合は次の式が成立するものとする。

$$\varepsilon_{Rx} = \varepsilon_{Rx0} - K_x \times \varepsilon_{Ry} + \nu \times \varepsilon_{cey}$$

$$\varepsilon_{Ry} = \varepsilon_{Ry0} - K_y \times \varepsilon_{Rx} + \nu \times \varepsilon_{cex}$$

ここで, ε_{Rx} , ε_{Ry} : 各々 x 方向, y 方向の二軸拘束下での拘束膨張ひずみ

ε_{Rx0} , ε_{Ry0} : 各々 x 方向, y 方向のみの一軸拘束下としたときの拘束膨張ひずみ

K_x , K_y : 各々 x 方向, y 方向膨張抑制係数
 ν : ポアソン比

ε_{cex} , ε_{cey} : 各々 x 方向, y 方向のみの一軸拘束としたときの CP による弾性ひずみ

また以上の理論の前提として次の仮定をしている。

(1) 膨張コンクリートの膨張は3次元的であるとし, その膨張能力(無拘束下における理論膨張ひずみ)はいずれの方向とも等しい。

(2) 拘束下における膨張コンクリートの弾性係数, クリープ係数は配合によって決定されるものとし一軸拘束, 二軸拘束で大差はないとする。

(3) 任意方向の CP によるそれと直角方向の膨張ひずみの減少分は, $K \times$ (その軸と直角方向の拘束膨張ひずみ) で計算されるものとする。ここで K を膨張抑制係数とよぶこととし, 拘束鉄筋比の関数であるとする。

3・2 計算式

3・2・1 一軸拘束下の膨張ひずみの計算式 二軸拘束下の拘束膨張ひずみの算定の根本となる一軸拘束下の拘束膨張ひずみについて文献 1) に提示した算定法を要約する。そこではまず次の仮定を行った。

(拘束膨張ひずみ) = (膨張能力)
- (CP による弾性ひずみ)
- (膨張クリープひずみ)

弾性係数 (E_c), クリープ係数 (φ_c) については実験より材令の関数として次式で表示した。

$$\begin{cases} t < 24 \text{ hr. } E_c = \exp(0.249t + 6.41) \\ T \geq 1 \text{ day. } E_c = (0.49 \log T + 2.4) \times 10^5 \end{cases}$$

(t : 時間, T : 日, E_c : kg/cm²)

$$\varphi_c = \frac{T}{0.425 + 0.227T} \quad (T: \text{日})$$

CP によるクリープ (膨張クリープ) を考慮し差分法で拘束膨張ひずみ (ε_R) を算出する。

○ t_1 時

$$\varepsilon_{Rt1} = \varepsilon_{et1} - \varepsilon_{\varphi t1} = (A_{t1} - B_{t1}) \times \varepsilon_{0t1}$$

ここで, ε_{et1} : 弾性ひずみ

$\varepsilon_{\varphi t1}$: クリープひずみ

ε_{0t1} : 膨張能力

$$A_{t1} = \frac{1}{1 + n_{t1} \cdot p} \quad B_{t1} = \frac{n_{t1} \cdot p \cdot \varphi_{t1}}{1 + n_{t1} \cdot p \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{t1}}{2}\right)}$$

p : 拘束鉄筋比

n_{t1} : 弾性係数比

○ t_n 時

$$\varepsilon_{Rtn} = (A_{tn} - B_{tn}) \times (\varepsilon_{0tn} - \varepsilon_{0tn-1}) + (1 - B_{tn}) \times \varepsilon_{R0tn-1}$$

3・2・2 二軸拘束下の膨張ひずみの計算式 主筋, 配力筋とも Fig. 2. に示すように差分法で計算を行った。

Fig. 2. Assumed expansive strain versus age relationship.

ここで ε_{0ti} : t_i 時の膨張能力

ε_{cet1} : t_1 時の一軸拘束下の弾性ひずみ

$\varepsilon_{\varphi t1}$: t_1 時の膨張クリープひずみ

ε_{R0t1} : t_1 時の一軸拘束下での拘束膨張ひずみ

ε_{Rt1} : t_1 時の二軸拘束下での拘束膨張ひずみ

主筋方向を x , 配力筋方向を y とする。

○ t_1 時

$$\varepsilon_{Rx t1} = \varepsilon_{Rx0 t1} - K_x \cdot \varepsilon_{Ry t1} + \nu \cdot \varepsilon_{cey t1} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Ry t1} = \varepsilon_{Ry0 t1} - K_y \cdot \varepsilon_{Rx t1} + \nu \cdot \varepsilon_{cex t1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cex t1} = \frac{n_{t1} \cdot p_x}{1 + n_{t1} \cdot p_x} \cdot \varepsilon_{0t1} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cey t1} = \frac{n_{t1} \cdot p_y}{1 + n_{t1} \cdot p_y} \cdot \varepsilon_{0t1} \quad (4)$$

式(3), (4)を式(1), (2)に代入して整理すると

$$\varepsilon_{Rx t1} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Rx0 t1} - K_x \cdot \varepsilon_{Ry0 t1} - \left(K_x \cdot \frac{n_{t1} \cdot p_x}{1 + n_{t1} \cdot p_x} - \frac{n_{t1} \cdot p_y}{1 + n_{t1} \cdot p_y} \right) \cdot \nu \cdot \varepsilon_{0t1} \right\}$$

$$\varepsilon_{Ry t1} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Ry0 t1} - K_y \cdot \varepsilon_{Rx0 t1} - \left(K_y \cdot \frac{n_{t1} \cdot p_y}{1 + n_{t1} \cdot p_y} - \frac{n_{t1} \cdot p_x}{1 + n_{t1} \cdot p_x} \right) \cdot \nu \cdot \varepsilon_{0t1} \right\}$$

○ t_n 時

$$\varepsilon_{cextn} = \frac{n_{tn} \cdot p_x}{1 + n_{tn} \cdot p_x} \cdot (\varepsilon_{0tn} - \varepsilon_{0tn-1})$$

$$\varepsilon_{ceytn} = \frac{n_{tn} \cdot p_y}{1 + n_{tn} \cdot p_y} \cdot (\varepsilon_{0tn} - \varepsilon_{0tn-1})$$

となるから

$$\varepsilon_{Rxtn} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Rx0tn} - K_x \cdot \varepsilon_{Ry0tn} - \left(K_x \cdot \frac{n_{tn} \cdot p_x}{1 + n_{tn} \cdot p_x} - \frac{n_{tn} \cdot p_y}{1 + n_{tn} \cdot p_y} \right) \cdot \nu \cdot (\varepsilon_{0tn} - \varepsilon_{0tn-1}) \right\}$$

$$\varepsilon_{Rytn} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Ry0tn} - K_y \cdot \varepsilon_{Rx0tn} - \left(K_y \cdot \frac{n_{tn} \cdot p_y}{1 + n_{tn} \cdot p_y} - \frac{n_{tn} \cdot p_x}{1 + n_{tn} \cdot p_x} \right) \cdot \nu \cdot (\varepsilon_{0tn} - \varepsilon_{0tn-1}) \right\}$$

コンクリートの膨張能力は測定不可能であるため本方法では拘束鉄筋比0.95%の一軸拘束ひずみの実測値から膨張能力を逆算して求めている。

4 結 果

4・1 実験結果

U-0, B-10, 20, 50の各供試体について供試体長の1/2位置での主筋ひずみと材令の関係を図3に示し、Uシリーズ、Bシリーズの各供試体について材令7日、14日における主筋および配力筋ひずみと配/主筋比の関係を図4, 5に示す。また材令14日における主筋および配力筋ひずみと端部からの距離の関係を図6, 7に示す。これらにより次のことがいえる。

(1) 図3, 4より一軸拘束に比して二軸拘束の方が主筋ひずみが50~60×10⁻⁶程度小さくなっており

Fig. 3. Relation between restrained expansive strain of main reinforcement and age.

Fig. 4. Relation between expansive strain of main reinforcement and lateral reinforcement ratio.

Fig. 5. Relation between expansive strains of lateral reinforcement and lateral reinforcement ratio.

Fig. 6. Relation between expansive strains of main reinforcement and distance from the edge of specimen.

Fig. 7. Relation between strains of lateral reinforcement and distance from the edge of specimen.

配力筋の影響と考えられる。

(2) 二軸拘束供試体では配／主筋比が10～50%の範囲では主筋ひずみが僅かではあるが増加する傾向がみられこれは過去の報告と逆になっている²⁾。

(3) 一方, Fig. 5 より主筋方向 CP の配力筋方向膨張ひずみに及ぼす影響は顕著であり, 配力鉄筋比 0, 0.286, 0.476, 1.183% について実測膨張ひずみと一軸拘束としたときの計算値の比較を Table II に示すが, その比が 0.018, 0.18, 0.27, 0.72 となり配力鉄筋比が小さいもの程配力筋方向の膨張が抑制されていると考えられる。

(4) Fig. 7 より特に U-20, U-30 では配力筋について, 端部から供試体長の約 1/2 の距離で測定されたひずみでも, B-20, B-30 に比べてかなり小さく, 異形鉄筋の付着のみで拘束を与える場合は端板を用いて拘束を与えるものとは拘束状態が大きく異り, 端部のすべりだけでなく中央部のひずみの値も小さくなるようである。

(5) 端板で固定されている主筋のひずみについてはいずれの供試体でも端部からの距離の違いによる顕著な差はみられない。

4・2 計算結果

3・2 節に示した計算式に従って計算を行ったが, 膨張抑制係数 K の値は Fig. 8 に示す実験データより鉄筋比の関数と考えて後述する式で定めた。

B-50 の場合の主筋ならびに配力筋ひずみと材令の関係について実測値と計算値の比較を Fig. 9 に, B-10, B-20, B-50, および U-0 の主筋ならびに配力筋ひずみについて実測値と計算値の比較を Table III に示す。これから次のことがいえる。

(1) Fig. 8 より, 膨張抑制係数と鉄筋比の関係は一

つの関数で近似可能と考えられ, 本実験の場合

$$K = \frac{2.92}{P} - 1.61$$

となる。

(2) Fig. 9 より, 本実験供試体は水和熱の影響が出る程度の寸法となっているが, 二軸拘束状態では一軸拘束状態に比して早い時期に膨張が平衡状態に至ると考えられる。

(3) 配／主筋比が増加する程, 主筋ひずみがわずかに増加する傾向がみとめられるが, この理由としては配力鉄筋比が増加することにより配力筋方向に膨張し

Fig. 8. Relation between expansive reducing coefficient K and lateral reinforcement ratio p .

Fig. 9. Comparison of measured and calculated strains of reinforcements (B-50)

Table II. Reduced expansion of lateral reinforcement due to chemical prestress in longitudinal direction.

Lateral reinforcement ratio (%)	Measured $\epsilon_{Rs} \times 10^{-6}$	Calculated (under uni-axial restraint) $\epsilon_{Rcal} \times 10^{-6}$	$\epsilon_{Rs} / \epsilon_{Rcal}$
U-0 0	2084	116419*	0.018
B-10 0.286	1105	6037	0.18
B-20 0.476	971	3533	0.27
B-50 1.183	910	1267	0.72

* Theoretical free expansive strain.

Table III. Measured and calculated strains of reinforcements.

Specimen Age 14 days	Restrained expansive strain of main reinforcement			Restrained expansive strain of lateral reinforcement		
	Measured ϵ_{pmea} ($\times 10^{-6}$)	Calculated ϵ_{pcal} ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{pmea}/\epsilon_{pcal}$	Measured ϵ_{lmea} ($\times 10^{-6}$)	Calculated ϵ_{lcal} ($\times 10^{-6}$)	$\epsilon_{lmea}/\epsilon_{lcal}$
B-10	560	575	0.97	1105	1050	1.05
B-20	579	576	1.00	971	1010	0.96
B-50	586	581	1.01	910	901	1.01
U-0	635	583	1.09	—	—	—

くくなり、主筋方向への膨張移行が卓越してくるため
にと考えられる。

5 考 察

本実験範囲内で以下のことがいえる。

(1) 二軸拘束供試体において、配／主筋比が50%以内の場合、主筋ひずみに対する配力筋の影響は顕著ではなく、0%すなわち一軸拘束との差で高々 70×10^{-6} 程度である。逆に、配力筋ひずみに対する主筋方向CPの抑制効果はかなり大きく、配力筋の鉄筋比の小さいもの程その抑制率が大い。そして、この抑制効果は膨張抑制係数という形で表せそうであり本論文では鉄筋比の関数としてとらえた。

(2) 二軸拘束の場合、任意の方向からそれと直角方

向への膨張ひずみの移行を考慮する必要がある、本報告ではそれをポアソン効果で近似してみた。その結果、配力筋方向の拘束膨張ひずみが良い精度で計算できた。

(3) ポアソン比、膨張抑制係数は時間の関数としてとらえる必要があり今後の課題としたい。

(昭和57年5月14日 第36回セメント技術大会にて一部講演)

参 考 文 献

- 1) 岡田 清, 太田 誠, 矢田 篤, 玉井 撰郎, 永淵 強, 第36回セメント技術大会講演要旨, p.106 (1982).
- 2) 飯田秀雄, 門司 唱, 土木学会論文報告集, **22**, No.5, 85 (1974).
- 3) 長滝重義, 遠道達己, 河村達男, 第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, p.217 (1982).