

仕事量一定則に基づいた膨張材料の自由膨張ひずみモデルに関する一考察

名城大学 学生会員 ○林 陸太 名城大学大学院 学生会員 柴田 要 名城大学 正会員 石川 靖晃

1. はじめに

近年, ASR による膨張劣化の問題が各所で生じている。一方で, 膨張材によるひび割れ制御の試みがなされている。著者らは膨張材料の変形挙動を予測する理論モデルを構築してきた¹⁾。提案されたモデルにおいては, 拘束鋼材になす仕事量とコンクリート自身になされた仕事量の和が一定であるという仮定と, 各主応力方向について仕事量一定則が成立するという仮定がされているが, その仮定の妥当性については, 十分な検討が必要である。

そこで本研究では, 構築したモデルに使用した仮定の妥当性を検討することを目的とした。まず, 膨張コンクリートの二軸拘束試験を行い, 拘束ひずみから各方向の仕事量を求め, 方向性の影響について検討を行った。次に提案モデルから得られた拘束ひずみ解と実測値との比較検討を行った。

2. 膨張コンクリートの二軸拘束実験

図-1 に示すように, 二軸拘束状態における膨張コンクリートの膨張挙動の測定を試みた。実験装置は四方を鋼板で囲まれた膨張コンクリート内部に埋めこまれた拘束丸鋼から構成されている。そして, すべての拘束丸鋼の軸ひずみを経時的に測定することにより, 方向毎の仕事が評価される。実験ケースとして表-1 のよ

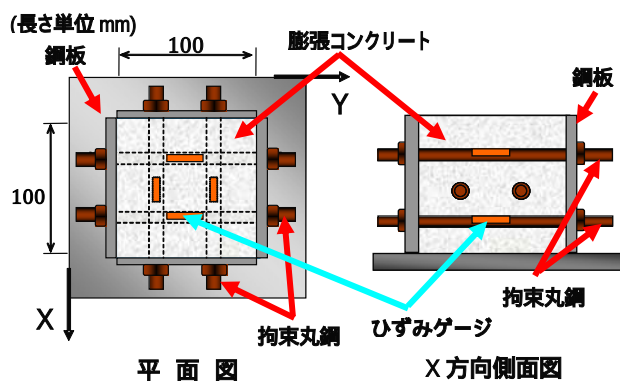


図-1 二軸拘束状態での膨張試験装置概要

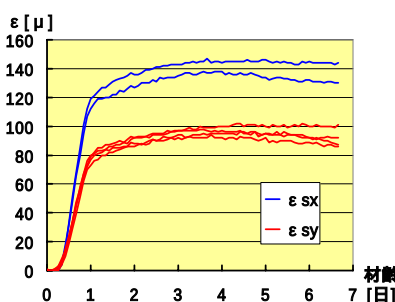


図-2 拘束ひずみの経時変化

表-1 実験ケース

ケース	拘束鋼材比[%]	
	X方向	Y方向
1	1.02	2.05
2	1.02	4.74
3	2.31	2.05
4	2.31	4.74

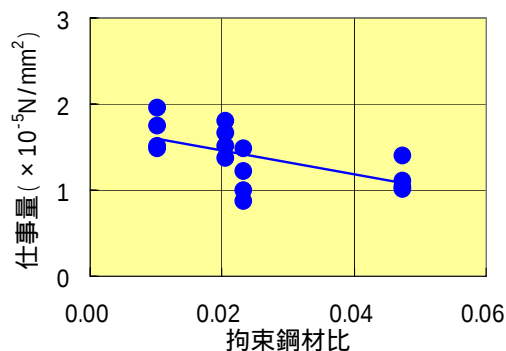


図-3 鋼材の仕事量と拘束鋼材比との関係

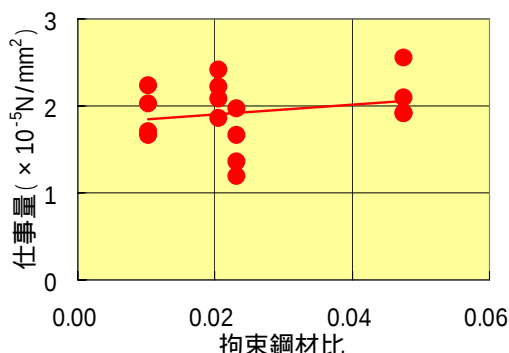


図-4 鋼材 + コンクリート自身の仕事量と拘束鋼材比との関係

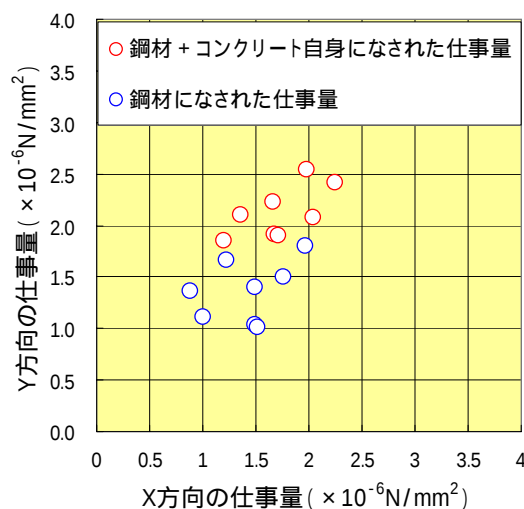


図-5 方向ごとの仕事量の関係

うに4 ケース設定した。各方向の拘束ひずみの経時変化の一例を図-2 に示す。図より本実験装置を用いて測定した各鋼材の拘束ひずみは, 方向毎にほぼ同様な値を示しており, 本実験方法による拘束ひずみの測定は妥当であると思われる。図-3 ~ 図-5 に各方向の仕事量を示す。但しプロット点はひずみピーク時での仕事量である。仕事量の評価は次式で行うことにする。

$$U_{sx} = \frac{1}{2} \rho_x E_s \varepsilon_{sx}, \quad U_{sy} = \frac{1}{2} \rho_y E_s \varepsilon_{sy} \quad (1)$$

$$U_{cx} = \sum \left\{ \left(\rho_x \Delta \varepsilon_{sx} - \nu \rho_y \Delta \varepsilon_{sy} \right) \rho_x \frac{E_s^2}{E_c} \varepsilon_{sx} \right\} \quad (2)$$

$$U_{cy} = \sum \left\{ \left(\rho_y \Delta \varepsilon_{sy} - \nu \rho_x \Delta \varepsilon_{sx} \right) \rho_y \frac{E_s^2}{E_c} \varepsilon_{sy} \right\} \quad (3)$$

ここで U_{sx}, U_{sy} は X, Y 各方向の拘束鋼材がなされた仕事量, U_{cx}, U_{cy} は X, Y 各方向のコンクリート自身になされた仕事量, ρ_x, ρ_y は X, Y 各方向の拘束鋼材比, E_s は拘束鋼材のヤング係数, E_c はコンクリートのヤング係数, ν はコンクリートのポアソン比, $\Delta \varepsilon_{sx}, \Delta \varepsilon_{sy}$ は X, Y 各方向の鋼材のひずみ増分である。

この結果より, 拘束鋼材になす仕事量とコンクリート自身になされた仕事量の和が一定であるという仮定と, 各主応力方向について仕事量一定則が成立するという仮定は, 共に妥当であると思われる。

3. 仕事量一定則に基づいた膨張材料の自由膨張ひずみの定式化

上記 2 つの仮定を主応力方向 3 方向に適用することにより膨張材料の自由膨張ひずみの定式化が行われている¹⁾。その概要を以下に示す。主応力方向に生じる自由膨張ひずみ成分 $\mu_i^{che} (i=1,2,3)$ は, 主応力 λ_i および主応力方向の膨張材料固有の単位体積仕事量 U_i^{che} を用いて次式で定義される。

$$\begin{aligned} \Delta \mu_1^{che} &= \Delta U_1^{che} / \lambda_1 \\ \Delta \mu_2^{che} &= \Delta U_2^{che} / \lambda_2 \\ \Delta \mu_3^{che} &= \Delta U_3^{che} / \lambda_3 \end{aligned} \quad (4)$$

また, 主応力テンソル $\sigma_{ij}^* (= diag\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\})$ と全体座標系に対応する応力テンソル σ_{ij} 間において

$$\sigma_{ij}^* = Q_{ki} \sigma_{kl} Q_{lj} \quad (5)$$

で定義される変換行列 Q_{ij} を用いて, 主応力方向に生じる自由膨張ひずみを変換することにより, 全体座標系に対応する自由膨張ひずみ成分 $\Delta \varepsilon_{ij}^{che}$ は次式で表される。

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{che} = Q_{ik} \Delta \mu_{kl}^* Q_{jl} \quad (6)$$

ただし, $\Delta \mu_{ij}^* = diag\{\Delta \mu_1^{che}, \Delta \mu_2^{che}, \Delta \mu_3^{che}\}$ である。

式(6)を初期ひずみとして通常の 3 次元非線形有限要素解析プログラムに導入することで, 仕事量一定則に基づいた膨張材料の変形解析が可能となる。

4. 解析結果と実測値の比較

実験より得た鋼材とコンクリート自身になされた仕事量の和 U を, 3 次元非線形有限要素解析プログラムに与え, ひずみの実測値との比較を行った。 U は全ての実測値について X, Y 方向を含めて平均することにより次式で与えた。

$$U = 2.329 \times 10^{-5} \{1 - \exp(-1.303 t^{3.154})\} \quad (7)$$

ただし, U の単位は $[N/mm^2]$, t は材齢[日]である。これを入力値として実験に対する変形解析を行った。

その結果を図-6 に示す。この図は横軸に各方向の拘束ひずみの解析値を, 縦軸にその実測値をプロットしたものである。両方向共に, 拘束ひずみの解析値は実測値を大凡捉えており, このことから 2 つの仮定の妥当性が示されたと言える。

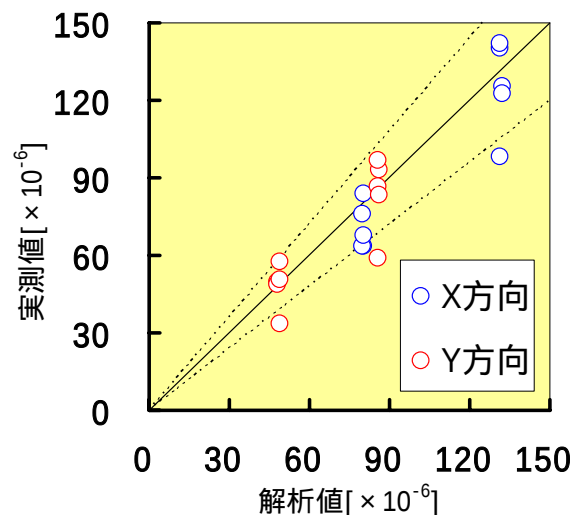


図-6 拘束ひずみの実測および解析値との比較

5. おわりに

以上より, 「鋼材および膨張コンクリート自身の仕事量の和が一定となる」, および, 「方向ごとに, その一定性が成立する」といった膨張材料における 2 つの仮定が正しいことを確認した。さらにこれらの仮定の元に構築されたモデルは, 二軸拘束試験結果を大凡良く再現することも示された。

謝辞

本研究を進めるにあたり 実験データを提供していただいた名城大学理工学部生の大村英治さん, 河村翔太さん, 久世夏子さんに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 柴田要, 石川靖晃: 仕事量一定則に基づいた膨張材料の自由膨張ひずみに関する理論モデルの構築, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, V-588, pp.1175-1176, 2007