

論文 仕事量一定則に基づく膨張コンクリートの変形挙動に関する基礎的研究

石川 靖晃^{*1}・柴田 要^{*2}

要旨：本論文では、まず二軸拘束状態下の膨張コンクリートの拘束方向毎の拘束ひずみを測定することで、拘束鋼材および膨張コンクリート自身になされる仕事量を評価することを試みた。その結果、これらの仕事量の和は拘束方向毎に独立して一定となることが実験的に確認された。次に、上記の知見を元に、仕事量一定則に基づく自由膨張ひずみ成分の理論モデルを構築し、既往の膨張コンクリートの応力測定実験結果と解析解との比較を行った。その結果、実験値と提案したモデルによる解析解はよく一致することが確認され、弾性の範囲で提案したモデルの妥当性が示された。

キーワード：膨張コンクリート，仕事量一定則，自由膨張ひずみ

1. はじめに

温度ひび割れなどの初期ひび割れ抑制対策の一つとして、膨張材の使用が挙げられる。一方で、膨張材の変形挙動においては未解明な部分も多いため、ひび割れ抑制に対する効果については、不明な点も多い。よって、膨張挙動の正確な予測方法の確立がなされた場合、膨張材の使用は、ひび割れ制御に対する有力な方策として期待されると思われる。

膨張材料の変形挙動についてはいくつかの考え方が提案されている。まず、一軸応力状態下においては、膨張コンクリートが拘束鋼材になす仕事量が一定であるという考え方（仕事量一定則）が辻によって提案されている¹⁾。また、通常の応力解析まで言及したところでは、内田ら、および三谷らの研究がある²⁾³⁾。内田らは、RC はり部材に対して辻が提案した仕事量一定則に基づき有効自由膨張ひずみ履歴を算定している²⁾。この考え方は、橋梁のようなはり構造については有効であるかもしれないが、一般的な構造に対しては適用できないと思われる。また、三谷らは、力の釣り合い条件から拘束ひずみと拘束鋼材比との関係を測定し、測定された関係を曲線補間することにより、みかけの自由膨張ひずみを評価する手法を構築している³⁾。この方法は、仕事量一定則と有機的に繋がっておらず、膨張コンクリートの変形挙動を統一的に表現しているとは言い難い面がある。よって、全般的には、膨張コンクリートの変形挙動については十分解明されていないといえる。

本論文では膨張コンクリートの変形挙動を統一的に且つ精度良く予測するための基本解析手法の確立を目的とし、以下のことを行った。

まず、拘束された膨張コンクリートの仕事量につい

て理論的考察を行った後、二軸拘束状態における膨張コンクリートについて、拘束ひずみの測定を行った。そして、拘束方向に対して仕事量一定則がどのように成立するかについて検討を行った。次に、検討結果から得られた知見を元に、自由膨張ひずみの理論モデルの構築を行った。提案したモデルの特長は任意の三次元構造体に適用可能であり、かつ仕事量一定則に厳密に基づいていることである。最後に、既往の膨張コンクリートの応力測定実験結果と提案したモデルによる解析解について比較検討を行った。

2. 二軸拘束状態下における膨張コンクリートの仕事量一定則に関する検証

2.1 仕事量一定則に関する理論的考察

柴田らは、仕事量一定則自身に関する理論的考察を行っている⁴⁾。以下にその概要を示す。

図 1 に示すような、構造体中の一部の領域 c のみにおいて体積膨張が生じた場合を考える。ただし、構造体は弾性体で構成され、また、構造体には他の要因の初期ひずみは発生しないと仮定する。 V_c およ

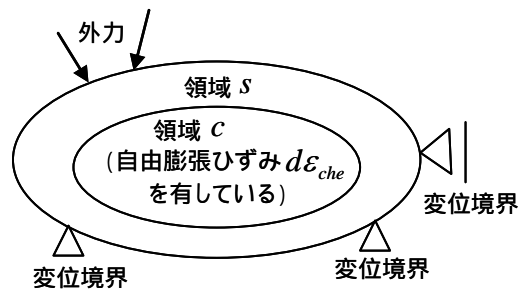


図 1 膨張する領域と膨張しない領域から構成される構造体

*1 名城大学 理工学部建設システム工学科准教授 工博 (正会員)

*2 名城大学大学院 理工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

び V_s はそれぞれ c および c 以外の領域 s の体積とする。領域 c が領域 s になした仕事を ξ_s , 領域 c 自身になされた仕事を ξ_c , 領域 c 固有の化学エネルギーを ξ_{che} とすると, これら仕事量の関係は時間増分形で次式のように表される。

$$d\xi_{che} = d\xi_s + d\xi_c \quad (1)$$

ただし,

$$d\xi_s = \int_{V_s} \sigma_s d\varepsilon_s dV_s \quad (2)$$

$$d\xi_c = \int_{V_c} \sigma_c d\varepsilon_c dV_c \quad (3)$$

$$d\xi_{che} = - \int_{V_c} \sigma_c d\varepsilon_{che} dV_c \quad (4)$$

ここで σ_c , ε_c は, それぞれ領域 c に生じる応力, 弾性ひずみであり, σ_s , ε_s は, それぞれ領域 s に生じる応力, 弾性ひずみである。さらに, ε_{che} は, 領域 c における自由膨張ひずみである。式(1)~式(4)の誘導の詳細については文献 4)を参照されたい。

領域 c を膨張コンクリート, 領域 s を拘束鋼材などに置き換えることにより, 上記の問題は鋼材などで拘束されている膨張コンクリートの膨張挙動の問題に置き換えることができる。辻らが提唱している仕事量一定則は, 厳密には膨張コンクリート固有の化学エネルギー量が一定であることを意味しているが, 実際には, 拘束鋼材になされる仕事 $d\xi_s$ が一定であるとしても充分適用可能であるといわれている。

一方, 柴田らは, 上記の考察に続き, 膨張コンクリート自身になされる仕事を無視した場合, 応力解が無限に発生することも解析的に指摘している⁴⁾。さらに, 柴田らは, 既往の一軸膨張試験結果を分析検討することにより, 鋼材になされる仕事量よりもむしろ鋼材になされる仕事量と膨張コンクリート自身になされる仕事量の和が拘束鋼材比に拘らず一定性を保つことについても報告している⁴⁾。

しかしながら, 多軸拘束状態下において仕事量一定則がどのように成立するかについての実験的検討は未だ行われていない。次節でその検討を試みる。

2.2 二軸拘束状態下における膨張コンクリートの拘束ひずみ測定実験および仕事量の評価

(1) 実験概要

図 2 に二軸拘束状態における膨張コンクリートの仕事量測定装置を示す。本装置の特徴は, 二方向に直交する拘束鋼材に生じる拘束ひずみを測定することにより, 二方向から仕事量を評価できることである。二本の拘束鋼材で拘束する方向を x 方向, 四本で拘束する方向を y 方向と称する。各拘束鋼材には膨張コンクリートとの付着が生じないようにビニールテープが巻かれている。一本当たりの拘束鋼材のひずみ分布は, ほぼ一樣になることは三谷ら⁵⁾によって確認されているため, 各拘束鋼材の中央部のみに一枚のひずみゲージが貼付されている。次に, 鋼材両端をボルトで用いて定着させた後, 膨張コンクリートを打設し, 打設後 2 時間から拘束ひずみの経時変化の計測を開始した。計

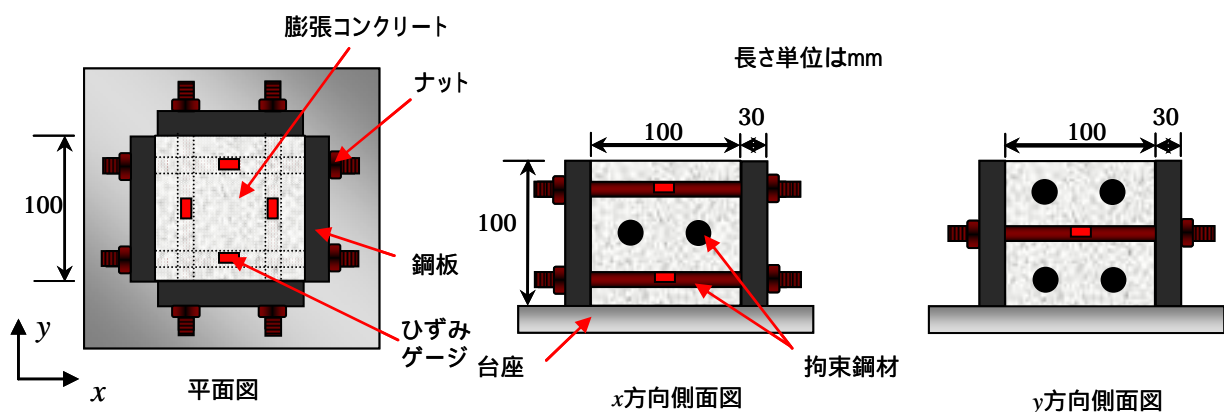


図 2 二軸拘束状態多における膨張コンクリートの拘束ひずみ測定装置概要

表 1 膨張コンクリートの示方配合

最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					W	C	EX	S	G	混和剤	
										A 剤*	B 剤*
20	15±2.5	4.5±1.5	55	47	175	298	20	830	951	3.82	0.0155

* A 剤は高性能 AE 減水剤, B 剤は空気量調整剤

表 2 混和材料の特性

材料	記号	物性等
膨張材	EX	水和熱抑制型膨張材 密度 3.16 (g/cm ³), 比表面積 3450(cm ² /g)
空気量調整剤	B 剤	変性ロジン酸化合物系 密度 1.02 ~ 1.06 (g/cm ³)
高性能 AE 減水剤	A 剤	ポリカルボン酸エーテル系 密度 1.04 ~ 1.11(g/cm ³)

表 3 実験ケース

実験ケース	拘束鋼材比(%)		実験ケース	拘束鋼材比(%)	
	x	y		x	y
X8Y8(1)	1.02	2.05	X8Y12(1)	1.02	4.74
X8Y8(2)			X8Y12(2)		
X12Y8(1)	2.31	2.05	X8Y12(3)		
X12Y8(2)			X12Y12(1)		
X12Y8(3)			X12Y12(2)		

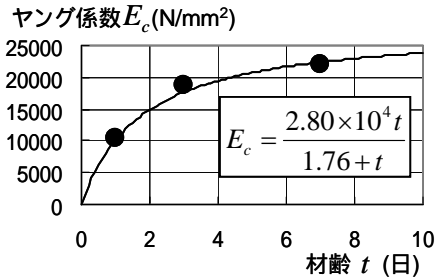


図 3 膨張コンクリートヤング係数の経時変化

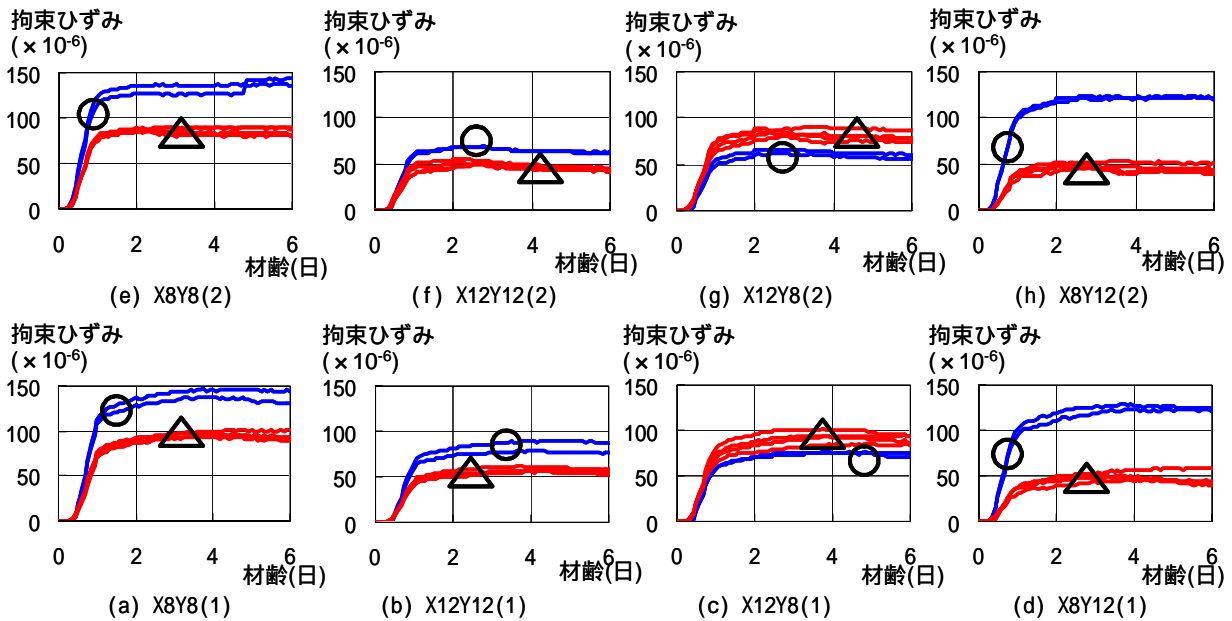
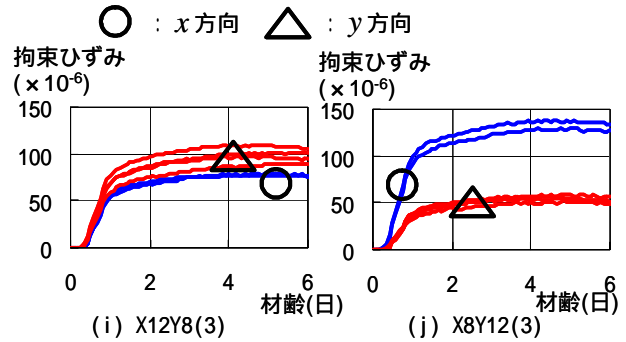


図 4 全ての実験ケースにおける拘束ひずみの経時変化

測は、2 時間間隔で行い、期間は拘束ひずみが安定するまでとした。環境条件は、室温 20±1，相対湿度 90%RH である。

表 1 に膨張コンクリートの示方配合を示し、表 2 に混和材料の特性を示す。セメントは普通ポルトランドセメントである。また、図 3 に、同配合の膨張コンクリートのヤング係数の経時変化を示す。なお、拘束鋼材のヤング係数は 2.06×10⁵N/mm² である。

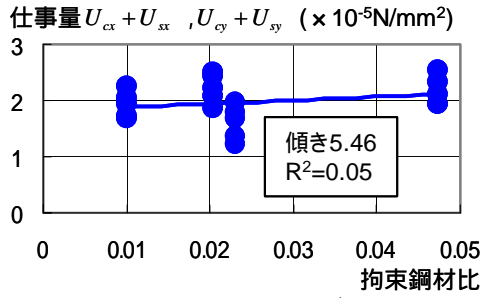
実験ケースは、各方向の拘束鋼材比を変化させた 4 種類である。ケース毎に 2~3 回、同一の実験を行った。各ケース名と拘束鋼材比を表 3 に示す。

図 4 に全ての実験ケースにおける拘束方向ごとの拘束ひずみの経時変化を示す。いずれのケースも、材齢 3~4 日程度で拘束ひずみは最大値に達し、その後はわずかであるが応力緩和により低下している。

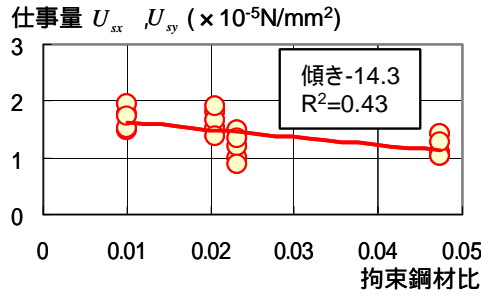
(2) 仕事量の評価

前項で測定された拘束ひずみの経時変化を用いて、拘束鋼材および膨張コンクリート自身になされる仕事量の経時変化を x, y 方向について独立に算定した。

拘束鋼材は弾性体であると仮定することにより、x, y 方向の拘束鋼材になされる仕事量 U_{sx}, U_{sy} は、それぞれ次式で与えられる。



a) 膨張コンクリートおよび拘束鋼材になされた仕事量



b) 拘束鋼材になされた仕事量

図 5 各仕事量と拘束鋼材比の関係

$$U_{sx} = \frac{1}{2} \rho_x E_s \varepsilon_{sx}^2, \quad U_{sy} = \frac{1}{2} \rho_y E_s \varepsilon_{sy}^2 \quad (5)$$

ここに、 ρ_x, ρ_y はそれぞれ x, y 方向の拘束鋼材比、 $\varepsilon_{sx}, \varepsilon_{sy}$ は、 x, y 方向の拘束ひずみ、 E_s は拘束鋼材のヤング係数である。

また、膨張コンクリートも弾性体であると仮定すると、 x, y 方向の膨張コンクリート自身になされる仕事量 U_{cx}, U_{cy} は、力の釣合条件からポアソン比 ν の影響を考慮することで、最終的に次式で評価される。

$$U_{cx} = \sum \rho_x \frac{E_s^2 \varepsilon_{sx}}{E_c} (\rho_x \Delta \varepsilon_{sx} - \nu \rho_y \Delta \varepsilon_{sy}) \quad (6)$$

$$U_{cy} = \sum \rho_y \frac{E_s^2 \varepsilon_{sy}}{E_c} (\rho_y \Delta \varepsilon_{sy} - \nu \rho_x \Delta \varepsilon_{sx}) \quad (7)$$

図 5 に拘束鋼材になされる仕事量と拘束鋼材比の関係、および拘束鋼材および膨張コンクリート自身になされる仕事量の和と拘束鋼材比の関係について示す。各仕事量として材齢 3 日の仕事量の値が用いられている。なお、コンクリートのポアソン比は、0.2 とした。図中では、 x, y 方向毎に区別せずに各仕事量と拘束鋼材比の関係がプロットされている。さらに、最小二乗法により直線近似した各仕事量と拘束鋼材比における補間直線も図中に示されている。なお、補間直線の傾きの単位は 10^{-5}N/mm^2 である。図 5 から、拘束鋼

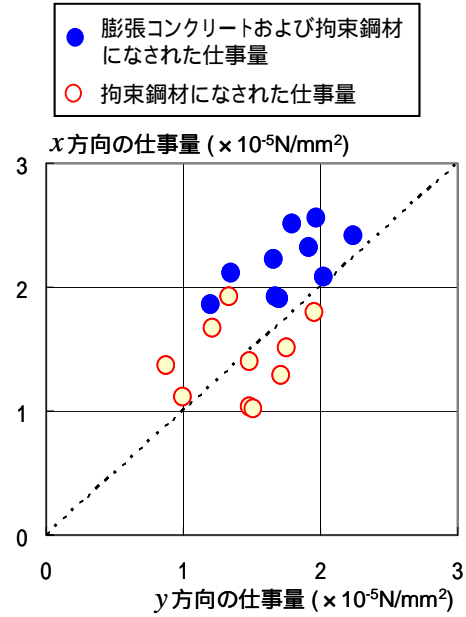


図 6 各仕事量と拘束方向との関係

材になされる仕事量に比べ拘束鋼材および膨張コンクリート自身になされる仕事量の和の方が、拘束鋼材比に依らず一定であることが示された。

また、図 6 に x, y 方向と各仕事量の関係について示す。この図より、いずれの仕事量も大体一ヶ所に集中していると思われる。

したがって、二軸拘束状態においては、拘束鋼材および膨張コンクリート自身になされる仕事量の和が一定となり、さらに、それは拘束方向毎に概ね独立して成立すると思われる。

3. 仕事量一定則に基づく自由膨張ひずみ成分の理論モデルの構築

前章で得られた知見を基に膨張コンクリートの自由膨張ひずみ成分のモデル化を行う。本論文では簡単のため、膨張コンクリートは等方材料であると仮定する。

前述の考え方を主応力方向に適用した場合、単位体積当りの膨張コンクリート固有の化学エネルギー ΔU_{che} は、主応力方向にそれぞれ生じる自由膨張ひずみ成分 $\Delta \varepsilon_{che,i}$ ($i = 1, 2, 3$) および主応力 σ_i ($i = 1, 2, 3$) を用いて、主応力方向ごとに次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_1 \Delta \varepsilon_{che,1} &= -\Delta U_{che} \\ \sigma_2 \Delta \varepsilon_{che,2} &= -\Delta U_{che} \\ \sigma_3 \Delta \varepsilon_{che,3} &= -\Delta U_{che} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで注意することは、 ΔU_{che} は必ず正値であるが、 $\Delta \varepsilon_{che,i}$ は解析上、符号の異なる 2 つの解として得られることである⁴⁾。ゆえに実際には、解析対象の材料

に応じて正負の符号の判断を行う必要がある。解析対象が膨張コンクリートである場合は $\Delta\varepsilon_{che,i}$ が正值となるように計算中に制約を与える必要がある。

次に、主応力テンソル $\sigma_{ij}^*(=diag\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\})$ と全体座標系に対応する応力テンソル σ_{ij} 間において

$$\sigma_{ij}^* = Q_{ki} \sigma_{kl} Q_{lj} \quad (9)$$

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、全体座標系での自由膨張ひずみ成分 $\Delta\varepsilon_{ij}^{che}$ は次式で表される。

$$\Delta\varepsilon_{ij}^{che} = Q_{ik} \Delta\varepsilon_{kl}^* Q_{jl} \quad (10)$$

ただし $\Delta\varepsilon_{ij}^* = diag\{\Delta\varepsilon_{che,1}, \Delta\varepsilon_{che,2}, \Delta\varepsilon_{che,3}\}$ である。

式(10)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により、理論的には、膨張コンクリートのみならず、仕事量一定則に基づいた膨張あるいは収縮材料の変形解析を実施することができる。なお、本論文では、膨張コンクリートを対象としているため、 $\Delta\varepsilon_{che,i}$ は常に正值であるという制約条件を課すことになる。

本解析手法の特徴は、仕事量一定則に厳密に沿っており、極めて一般性が高いことである。さらには提案したモデルにおける入力パラメータは、単位体積あたりの膨張コンクリート固有の仕事量の経時変化だけである。次章で、提案したモデルの妥当性を検討する。

4. 既往の膨張コンクリートの応力測定実験結果⁶⁾と提案モデルによる解析解との比較検討

錦織は、地山中に埋設される発電所の水圧鉄管と地山との間が膨張コンクリートで充填される場合のケミカルプレストレスの効果を、実測や様々な模型実験を実施することにより定量的に評価している⁶⁾。本論文では、これらの実験の一部を対象とし、本提案モデルによる解析解との比較検討を試みた。図7に解析対象の模型実験試験体の形状並びに寸法および解析メッシュ図を示す。解析対象の試験体は形状別に3種類であり、図中では、それぞれ標準試験体、外管厚変化試験体、偏心試験体と称されている。いずれの試験体も内管(鋼製)、外管(鋼製)およびその隙間に打設される膨張コンクリートから構成されている。偏心試験体では、標準試験体に比べ内管中心が外管中心と一致していない。また、外管厚変化試験体では、標準試験体に比べ外管厚が一様ではない。

各試験体においては、実験ケースとして膨張材(AGP)混入量50, 55および60kg/m³の3つが設定されている。

試験体に打設された膨張コンクリートの配合は、基本的には同一であり、スランプは15cm、水結合材比は47%、単位水量は165kg/m³である。さらに、減水剤が使用されている。また、材齢28日での圧縮強度は、膨張材(AGP)混入量が50kg/m³のときは29.4N/mm²、55kg/m³のときは26.6N/mm²、60kg/m³のときは23.5N/mm²である。なお、内外管のヤング係数は 2.1×10^5 N/mm²であり、ポアソン比は0.3である。

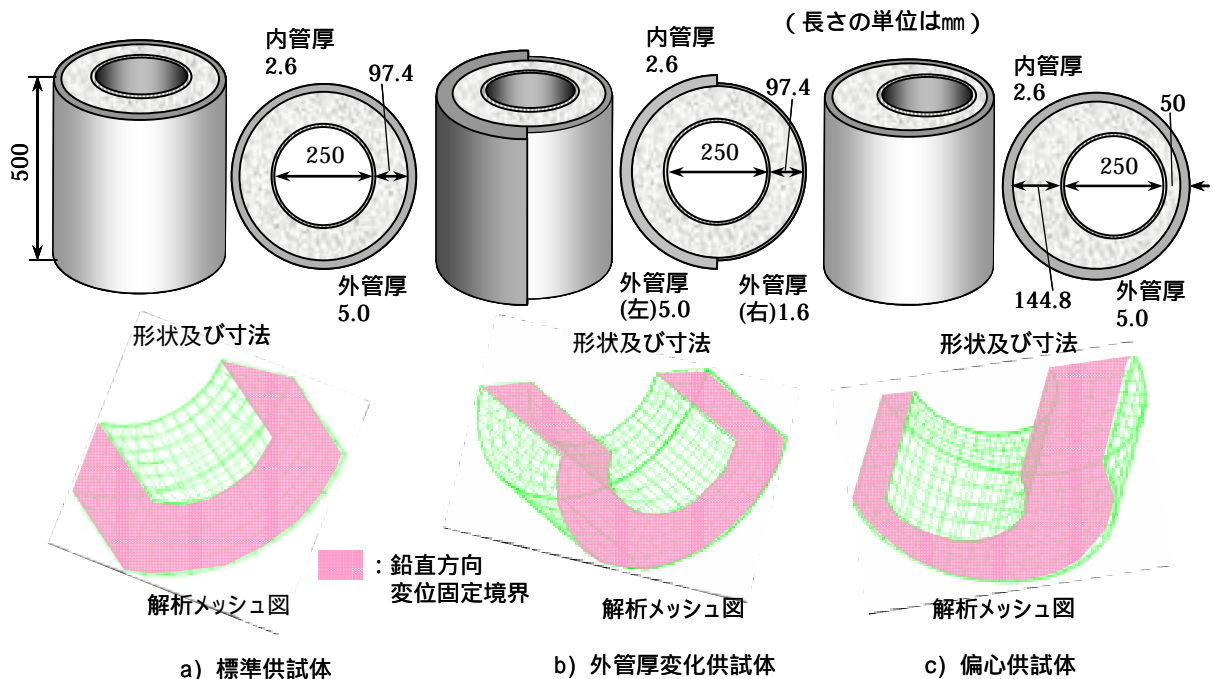


図7 解析対象供試体および解析メッシュ図

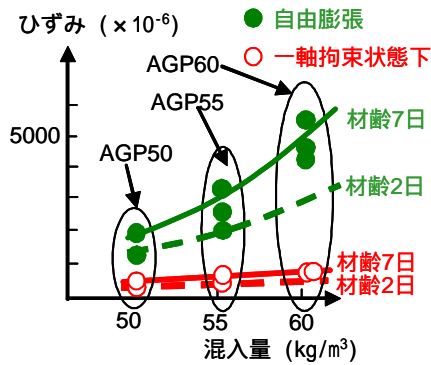


図 8 一軸拘束膨張試験結果

さらに、膨張コンクリート自身については別途、同配合にて一軸拘束試験が実施されている。試験は自由に膨張する条件および拘束鋼材比 1.6% の条件下にて 2 通り行われている。その結果を図 8 に示す。

膨張コンクリートを打設後、各供試体について、内外管の周方向応力の経時変化が材齢 9 日まで測定されている。図 9 に、材齢 7 日目における内外管の周方向応力の測定結果および提案したモデルにより得られた解析解を印にて示す。解析に用いるパラメータとして、ヤング係数、ポアソン比および一軸拘束試験結果から得られた仕事量がある。このうち、内外管のヤング係数およびポアソン比は実験値をそのまま用いた。膨張コンクリートのポアソン比は、コンクリート標準示方書⁷⁾から 0.2 とし、ヤング係数と材齢との関係については、28 日強度と示方書から推定した。

図より、実測値と解析値は概ね一致していることがわかる。一方、図 8 に自由膨張ひずみを直接初期ひずみとして与えた膨張解析結果(図 9 中の印)を示す。ただし、後者の解析では AGP 混入量が 55 および 60 kg/m³ のときは、膨張コンクリートに引張強度を大きく超える応力が発生した。このことは現実的ではないため、これらのケースについてはプロットしていない。プロットされているケースにおいても、実験値と解析値は全く異なっている。クリープの影響などについて考慮する必要はあるが、後者の解析は、引張応力が発生する時点で非現実的であると思われる。以上より、弾性範囲では、本提案モデルの妥当性がある程度示されたと思われる。今後、多くの実測値との比較検討を行いたいと考えている。

5. おわりに

以上より以下の結論を得る。

- 二軸拘束状態下においては、拘束鋼材および膨張コンクリート自身になされた仕事量の和が一定であることに加え、それは、拘束方向毎に独立して成立することが実験的に示された

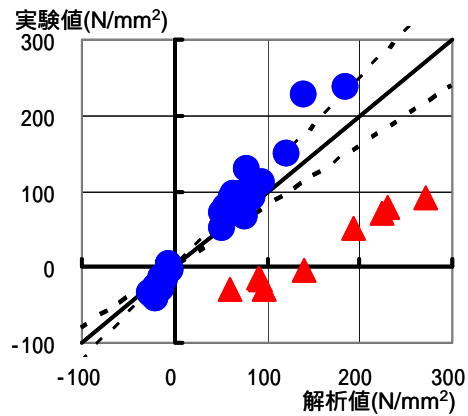


図 9 実験値と解析値との比較

- 上記の知見を元に構築した膨張コンクリートの自由膨張ひずみ成分モデルの妥当性が、弾性範囲内である程度示された。

謝辞

本研究の一部は文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業(平成 19 年度)による助成を受けて行われました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 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，Vol.19，No.6，pp.99-105，1981.6
- 内田大介，塩永亮介，高瀬和男，坂根秀和：鋼橋床版の温度応力解析における膨張材効果の評価方法に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.633-638，2004
- 三谷裕二，谷村 充，松本健一，佐竹紳也：マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1295-1300，2006.7
- 柴田要，石川靖晃，田辺忠顕：一軸拘束状態下における膨張コンクリートの仕事量に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.501-506，2007.7
- 三谷裕二，谷村充，佐久間隆司，佐竹紳也：マスコンクリート様の温度履歴を受けた膨張コンクリートの応力評価法，マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，No.8，pp.49-56，2005.8
- 錦織達郎：膨張コンクリートの内張鉄管への利用に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.282，pp.129-142，1977.6
- 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002