

論文 コア削孔によるコンクリートの膨張ひずみ測定に関する実験的研究

石田 雅大^{*1}・伊藤 始^{*2}・松井 淳史^{*1}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の力学性能を精度よく評価するためには、体積変化などによる内部ひずみを考慮することが重要である。本研究では、コンクリートの体積変化に着目し、膨張コンクリートの拘束実験およびコア削孔実験を行うことで、コア削孔による膨張ひずみの測定手法を検討した。拘束実験では、本実験の拘束条件における膨張材量や鋼材比と拘束鋼材ひずみの関係を把握した。コア削孔実験では、コア削孔による表面ひずみと拘束鋼材ひずみの変化を定量的に把握するとともに、表面ひずみからコンクリート内部のひずみを推定できる可能性を確認した。

キーワード：膨張コンクリート, 拘束実験, コア削孔, 解放ひずみ, 自由膨張ひずみ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物（RC 構造物）には、様々な外力が作用し、乾燥収縮や膨張コンクリートの使用などで体積変化が起こるため、内部ひずみと内部応力が蓄積している。RC 構造物の現有の力学性能を精度よく評価するためには、このような内部ひずみを考慮することが重要である。例えば、膨張コンクリートでは、想定したおりの膨張ひずみがコンクリート構造物に導入されているかどうかを力学性能を左右することとなる。

既存の構造物に蓄積した内部ひずみや内部応力を測定する手法が提案されており、そのうち、微破壊で精度の高い手法に応力解放法がある。三木ら¹⁾は、コンクリートカッターを用いてコンクリート表面に矩形の切り欠きを作ることで、応力解放を図っている。また、野永らは²⁾、コア削孔により円形の切り欠きを用いており、特殊なコアドリルを使用することで連続計測を可能にしている。伊東ら³⁾は、二軸応力の測定や測定の省力化について研究している。

一方、体積変化のうち膨張コンクリートについて、いくつかの研究が行われており、鋼材の拘束量による膨張ひずみの違いや膨張エネルギー一定則などの知見が得られている^{4),5)}。

以上のことを踏まえ、本研究ではコンクリートの体積変化に着目し、コア削孔による内部ひずみの測定手法を開発することを目的とした。体積変化には膨張コンクリートを用いた。これにより、RC 構造物の膨張による現在までの自由膨張量や膨張エネルギー、鉄筋応力度を推定する。

研究では、図-1 のように、はじめに膨張コンクリート製の拘束供試体および角柱供試体を製作した。そして、それらの供試体を用いて拘束実験および膨張実験を行い、自由膨張ひずみや膨張エネルギー等を比較した。次

に、拘束供試体を対象にコア削孔実験を実施し、解放された表面ひずみと自由膨張ひずみ等の比較を行った。

2. 膨張コンクリートの拘束実験

2.1 実験方法

(1) 実験ケース

拘束実験は、膨張コンクリート製の拘束供試体において、拘束された鋼材のひずみとコンクリート表面の膨張ひずみを測定することで行った。実験ケースは、表-1 に示すように、拘束鋼材比（鉄筋種類）、膨張材量、後述のコア削孔実験で使用するコア径の7ケース8体とした。膨張コンクリートの自由膨張量は、角柱供試体を用いて測定した。

(2) 拘束供試体の製作

拘束供試体は、鋼製型枠で膨張コンクリートを囲むことで、拘束条件下に置いた供試体である⁵⁾。供試体は、鉄筋を平面上の2方向に各4本配置し、端部を鋼板（厚さ20mm）で拘束する構造とし、寸法は270×270×150mmになるようにした。供試体の鉄筋および下部鉄板に図-2 のような処理を施すことで、水平方向の付着力を極力取り除き、膨張コンクリートの膨張ひずみを側面の鉄板に一軸状態で作用させた。鉄筋には丸鋼を使用し、表面に油粘土を巻き、その上からラップを巻いた。下部鉄板

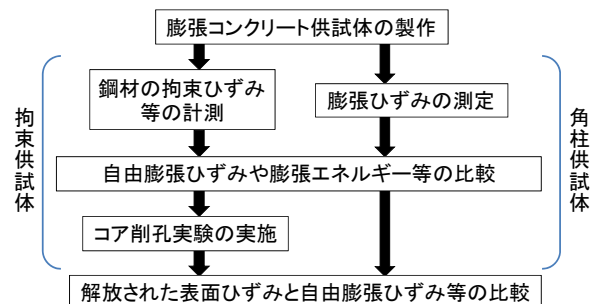


図-1 膨張量測定の流れ

*1 富山県立大学 短期大学部専攻科 環境システム工学専攻 (正会員)

*2 富山県立大学 短期大学部専攻科 環境システム工学専攻 准教授 (工学部環境工学科 兼任) 工博 (正会員)

表-1 実験ケース一覧

ケース	実験条件				材料試験結果		膨張試験結果			
	鉄筋径 (mm)	鋼材比 (%)	膨張材量 (Kg/m ³)	コア径 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	膨張ひずみ X方向 ($\times 10^{-6}$)	膨張ひずみ Y方向 ($\times 10^{-6}$)	膨張エネルギー X方向 (N \cdot m/m ³)	膨張エネルギー Y方向 (N \cdot m/m ³)
1	10	0.78	40	50	11.6	20923	648	556	486	358
2	10	0.78	40	75	11.6	20923	582	654	392	495
3	10	0.78	40	100	11.0	19052	619	609	453	439
4	10	0.78	20	75	26.8	26845	152	152	24	24
5	13	1.31	40	50	11.6	20923	413	336	423	279
6	13	1.31	40	75	11.6	20923	388	355	373	312
					11.0	19052	330	377	278	363
7	13	1.31	20	75	26.8	26845	121	101	31	22

の表面にはテフロンシートを置きグリスを挟むようにして再びテフロンシートを重ねた。

(3) 使用材料と自由膨張ひずみの測定

拘束供試体には、表-2 に示す配合条件のコンクリートを用いた。セメントは、普通ポルトランドセメントを用いた。水粉体比 W/P を 57%一定として、膨張材をコンクリート 1m³ 当たり 20kg と 40kg (以下、20kg, 40kg と記す) でセメントと置換し、練り混ぜを行った。膨張材量 40kg では、標準添加量 20kg の 2 倍の量を添加した。その影響で表-1 に示すように圧縮強度が小さくなったものの、供試体の表面上の変状は見られなかった。

膨張コンクリートの自由膨張ひずみは、角柱供試体で計測した。角柱供試体は、寸法 100×100×400mm の型枠に膨張コンクリートを打込むことで製作した。測定方法として、コンタクトチップを 3 個用いて、コンクリート打込み面、長手方向の直列 2 区間で膨張変位を計測した。加えて、膨張材量 20kg と 40kg のそれぞれの角柱供試体において、埋込み型ひずみ計を供試体の長手方向中心に配置してひずみを計測した。

(4) 実験方法

拘束実験は、鉄筋とコンクリートのひずみを 16 日間計測することで行った。鉄筋には、8 本すべてにひずみゲージを貼り、2 時間間隔で計測した。コンクリート表面のひずみは、1 ケースに 3 組のコンタクトチップを図-3 のように貼付した。ひずみは、コンタクトメータを用いて、3 箇所の変位を計測し、基長で除すことで求めた。測定は、図-4 に示す頻度で行った。

拘束供試体および角柱供試体は、製作後、表面をアルミテープでシールし、温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室内に静置した。打込みから 18 時間程度でコンタクトチップを貼付し、24 時間で基長を計測した。

2.2 実験結果

(1) 拘束鋼材ひずみ

拘束供試体で測定した拘束鋼材のひずみ履歴の一例を図-5 に示す。図はケース 3 (膨張材量 40kg, 鋼材比 0.78%) とケース 4 (膨張材量 20kg, 鋼材比 0.78%) の X 方向の鉄筋ひずみの履歴である。ケース 3 の拘束鋼材ひずみは 2 日目で約 640×10⁻⁶ に達した。ケース 4 の拘束鋼

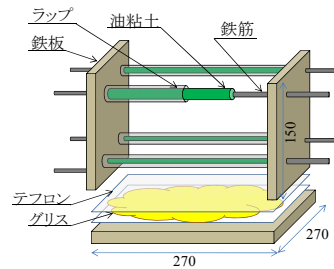


図-2 拘束型枠

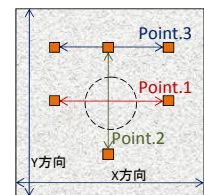


図-3 チップ位置

表-2 配合表

W/P	W/C	C	W	E	S	G
(%)	(%)	単位量(kg/m ³)				
57	60	288	174	20	806	965
	65	268		40		

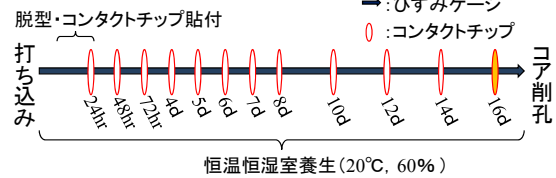


図-4 ゲージ,コンタクトチップ計測頻度

材ひずみは 2 日目で約 170×10⁻⁶ に達した。いずれのケースも 16 日目にかけて緩やかに低下した。膨張材量を増やすと、それに伴って拘束鋼材ひずみは増加する結果となった。

膨張後の拘束鋼材ひずみを図-6 に示す。図の値は 16 日目の X Y 方向ごとの平均値である。膨張材量 40kg で鋼材比 0.78% のとき、拘束鋼材ひずみが 600×10⁻⁶ 程度であった。それに対して、1.31% のとき拘束鋼材ひずみが 400×10⁻⁶ となっている。同じ自由膨張ひずみであれば、鋼材比が増えると、拘束鋼材ひずみは減少することが分かる。膨張材量 20kg でも同様の傾向であった。

(2) 自由膨張ひずみと膨張エネルギー

コンクリートの打込み後から膨張の終了までに、どれだけの体積変化および膨張エネルギーが生じたかを定量的に比較する必要がある。そのため、拘束鋼材ひずみから自由膨張ひずみを推定することを検討した。自由膨張と拘束膨張の膨張ひずみの概念図を図-7 に示す。自由膨張ひずみの算定には、拘束膨張ひずみと自由膨張ひずみの関係ならびに力のつり合いから得られる以下の

式を用いた。

$$\epsilon_{exp} = \frac{A_s E_s + A_c E_c}{A_c E_c} \epsilon_{sx} \quad (1)$$

$$E_c(t) = \varphi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (2a)$$

$$f'_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} \times 1.11 \times f'_{ck}(t) \quad (2b)$$

$$U = \frac{1}{2} \rho E_s \epsilon_{sx}^2 \quad (3)$$

(1) 式で、 ϵ_{exp} は自由膨張ひずみ、 ϵ_{sx} は鋼材ひずみ、 A_c はコンクリート断面積 (mm^2)、 A_s は鉄筋の断面積 (mm^2)、 E_c はコンクリートのヤング係数 (N/mm^2)、 E_s は鉄筋のヤング係数 (N/mm^2) である。膨張コンクリートの膨張は、図-5 でも見られたように、打込み0~2日の若材齢で生じる。そのため、ヤング係数には、以下の式を用いて材齢1日のヤング係数を推定して用いることとした⁶⁾。

(2a.b) 式で、 $E_c(t)$ は材齢 t 日における有効ヤング係数 (N/mm^2)、 $\varphi(t)$ はクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数 (材齢 3 日まで $\varphi(t) = 0.73$)、 $f'_c(t)$ は圧縮強度 (N/mm^2)、 f'_{ck} は設計基準強度 (N/mm^2) である。計算より E_c は、膨張材量 20kg で 9300N/mm^2 、同 40kg (ケース 1, 2, 5, 6-1) で 7000N/mm^2 、同 40kg(ケース 3, 6-2) で 6600N/mm^2 とした。

拘束鋼材ひずみから推定した自由膨張ひずみを図-8に示す。自由膨張ひずみの傾向は、図-6 の拘束鋼材ひずみと同様の傾向を示した。また、自由膨張ひずみは拘束鋼材ひずみよりも 2 割程度大きくなった。

次に、単位体積当たりの膨張エネルギー U の算定には、

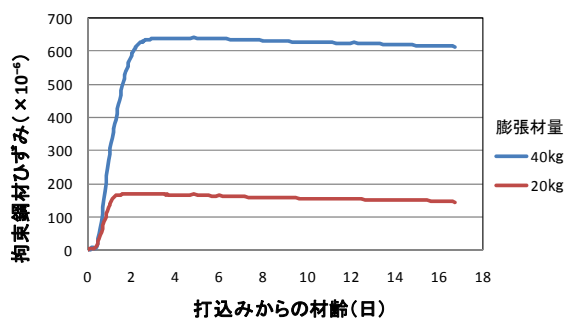


図-5 拘束鋼材のひずみ履歴

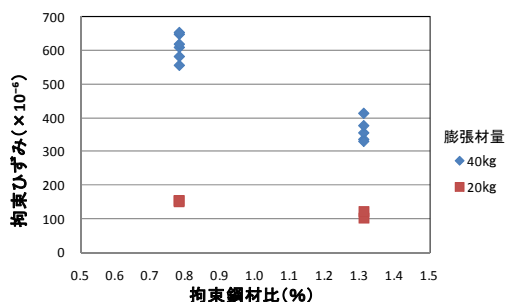


図-6 拘束鋼材ひずみ

(3) 式を用いた。 ρ は拘束鋼材比(= A_s/A_c)である。

単位体積当たりの膨張エネルギーを図-9に示す。膨張材量 20kg のケースで U が $24\sim 31\text{ N} \cdot \text{m/m}^3$ であり、膨張材量 40kg のケースで U が $300\sim 500\text{ N} \cdot \text{m/m}^3$ 程度であった。既往の研究⁴⁾において、膨張材量 20kg で U が $25\text{ N} \cdot \text{m/m}^3$ 程度、膨張材量 40kg では U が $400\text{ N} \cdot \text{m/m}^3$ 程度であったため、本実験でも適切な膨張エネルギーが得られたと判断できる。

(3) 自由膨張量の比較

角柱供試体の埋込み型ひずみ計で計測した自由膨張ひずみの履歴を図-10に示す。膨張材量 40kg の自由膨張ひずみは 16 日目で 3800×10^{-6} 程度に達した。膨張材量 20kg の自由膨張ひずみは 16 日目で 300×10^{-6} 程度に達した。膨張材量を増やすと、それに伴って自由膨張ひずみは大きく増加した。図-5 と図-10 のひずみ立ち上がり材齢の差異は、図-10 角柱供試体の製作に、鋼製型枠を用いたことが要因と考えられる。型枠脱型は打込みから約 15 時間に行っており、図-10 の自由膨張ひずみが急激に増加していることが分かる。

角柱供試体の自由膨張ひずみは、拘束供試体のひずみから推定した自由膨張ひずみに比べて大きくなった。これは、コンクリートのヤング係数をコア削孔時の材齢の圧縮強度試験の結果から材齢 1 日の値を推定したことが一因と考えられる。両者の自由膨張ひずみから、適切なヤング係数を逆算すると、膨張材量 20kg で 1000N/mm^2 程度、同 40kg で $300\sim 400\text{N/mm}^2$ と非常に小さい値となり、既往の知見と異なる値となった。そのため、自由膨張ひずみの推定には、ヤング係数の設定を含め、他の要因についても検討する必要がある、今後の課題とした。

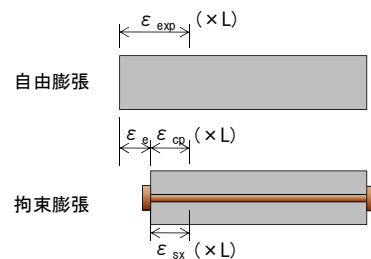


図-7 膨張ひずみの概念図

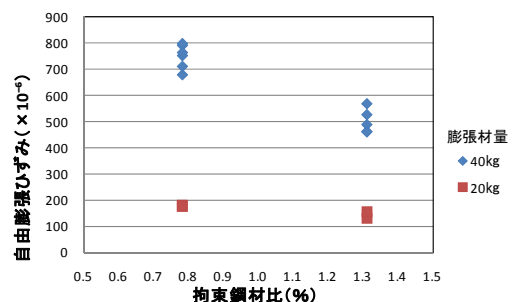


図-8 自由膨張ひずみ (計算)

3 コア削孔実験

3.1 実験方法

コア削孔実験は、拘束供試体のコンクリート表面中央部を削孔することで行った。実験ケースは、表-1 に示すとおりであり、コア径は直径 50, 75, 100mm の 3 水準とした。実験は、削孔前に図-11 に示すようにコンクリート表面にひずみゲージを貼りつけ、コアドリルを用いて、削孔深さを確認しながら削孔することで行った。

コアの削孔時は、コア削孔部に注水しながら削孔することや段階的に削孔および計測を行うことで、コンクリートの温度上昇を極力抑えることにした。また、削孔深さは 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110, 130, 150mm において、拘束鋼材ひずみおよびコアによる切欠き円内側と外側のコンクリートひずみを測定した。切欠き円内側のコンクリートひずみは、削孔時にリード線をデータロガーから取り外し、計測時に接続することで計測した。

3.2 実験結果

コア削孔実験におけるコア削孔深さとコンクリート表面ひずみおよび鉄筋ひずみの関係の一例を図-12 に示す。図は、ケース 3 (膨張材量 40kg, 鋼材比 0.78%, コア径 100mm) の X 方向に貼付したひずみゲージの測定値を表している。凡例のコア内側とは、コアによる切欠き円の内側のひずみ、X 軸上とは切欠き円外側の法線方向のひずみ、45 度軸上とは X 軸から 45 度方向でのひずみ、Y 軸上とは切欠き円外側の接線方向のひずみを表す。鋼材平均とは X 方向の鉄筋 4 本の平均ひずみを表す。ここのひずみは、正側が膨張、負側が収縮である。

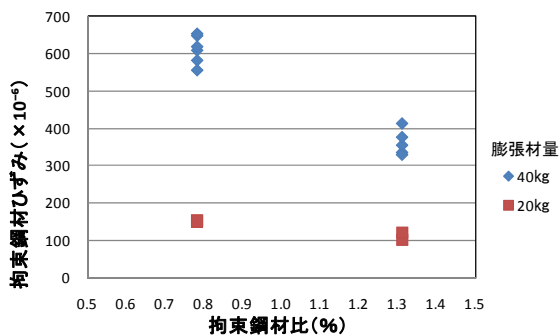


図-9 単位体積当たりの膨張エネルギー

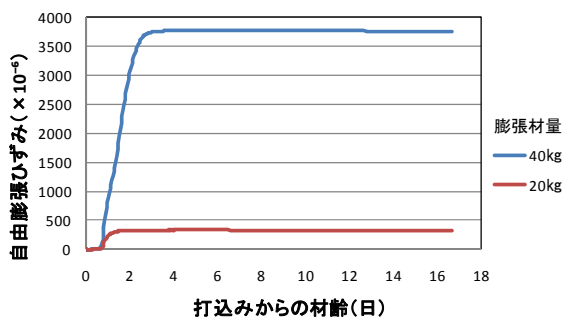


図-10 自由膨張ひずみ履歴 (角柱供試体)

図-12 のコア内側と X 軸上のひずみは、コア削孔深さ 20mm 程度で大きく増加し、 40×10^{-6} 程度まで達した。Y 軸上のひずみは、10~40mm にかけて負側に増加した。また、鋼材平均のひずみは、緩やかに負側に増加し、 -10×10^{-6} 程度に達した。他のケースの表面ひずみも実験条件による違いはあるものの、同様の傾向を示した。

図-13 に実験から得られた表面ひずみの変化傾向をまとめる。コア内側のひずみは、拘束されたひずみが解放されることによって増加 (膨張) した。コア切欠き円の法線方向のひずみも同様に、拘束されたひずみが解放されることで増加した。反対に、コア切欠き円の接線方向のひずみは、切欠き円が生じて拘束による荷重を受けるコンクリートの断面積が小さくなることで、応力が増加し、ひずみが負側に増加 (収縮) した。45 度軸上の X 方向・Y 方向のひずみは、上記 2 つの両方の作用を受けることから、実験条件に依存する結果となった。

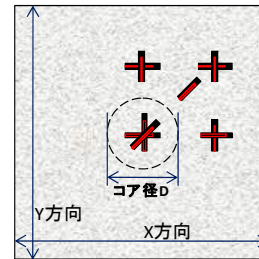


図-11 コア削孔時のゲージ貼付位置

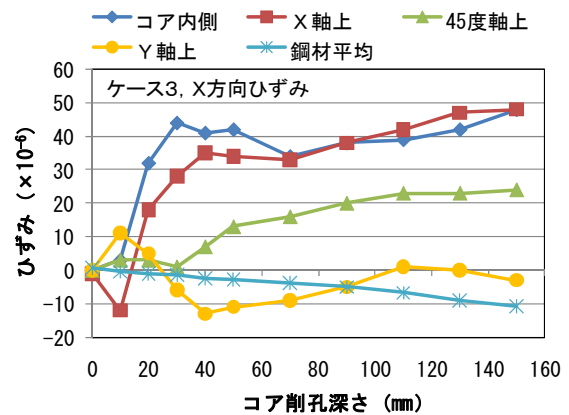


図-12 コア削孔深さとひずみの関係(ケース 3)

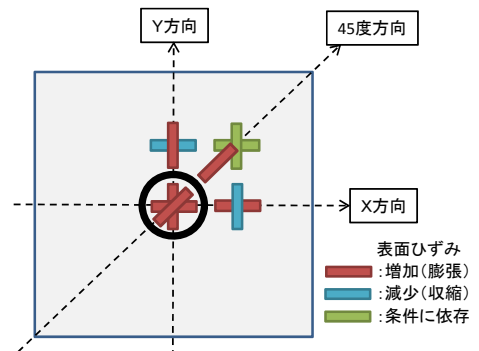


図-13 コア削孔による表面ひずみの変化傾向

3.3 実験要因が表面ひずみに与える影響

本実験では、コア削孔時の表面ひずみがコア径、膨張材量、拘束鋼材量の3つの実験要因に受ける影響について検討した。

(1) コア径

コア径は50, 75, 100mmと設定しており、図-14にコア径と解放ひずみの関係を示す。ここでの解放ひずみは、削孔深さ150mmのときのひずみである。また、図にはコア内側およびコア外側・法線方向の結果を表す。結果は、膨張材量40kg、鋼材比0.78%のものである。

コア内側のひずみは、コア径50mm・X方向で 110×10^{-6} 程度と大きいものの、それ以外の値は $40 \sim 70 \times 10^{-6}$ 程度の範囲の値となった。コア外側・法線方向のひずみは、コア径100mm・Y方向で 10×10^{-6} 程度と小さいものの、それ以外の値はコア内側と同様に $40 \sim 70 \times 10^{-6}$ の範囲の値となった。特に、コア内側・75mm, コア内側・100mm, コア外側・75mmの条件では、最大値と最小値の差が 15×10^{-6} 以下となった。2点のばらつきの要因は、切欠き孔とひずみゲージの位置関係の影響が考えられ、これらから、ばらつきの大きい2点を除けば、安定した計測が可能であることが確認できた。削孔位置のズレが解放ひずみに与える影響が検討課題である。また、コア径50mmのケースでは、コア径75mmと100mmのケースに比べ

て、コア内側のひずみが大きくなる傾向にあることやひずみのばらつきが大きくなることが確認できた。

(2) 膨張材量

図-15に膨張材量および鋼材比と解放ひずみの関係を示す。結果は、コア径75mmのものである。横軸を膨張材量とし、凡例にはゲージ方向と鋼材比を示した。ゲージ方向では、X方向と45度方向のひずみとして、いずれもコア切欠き円の法線方向のひずみとした。

コア内側のひずみは、膨張材量40kgのケースで $40 \sim 60 \times 10^{-6}$ 程度、膨張材量20kgのケースで $0 \sim 40 \times 10^{-6}$ 程度であった。この結果から膨張材が多く混入された場合、拘束された弾性ひずみが大きくなり、解放ひずみが大きくなることが確認でき、想定した結果となった。

(3) 拘束鋼材量

図-15の鋼材比に着目すると、コア内側と外側ともに、鋼材比1.31%のX方向の解放ひずみは、膨張材量が40kgから20kgとすることで 60×10^{-6} 程度減少した。これに対して、鋼材比0.78%のX方向の解放ひずみは、 $10 \sim 20 \times 10^{-6}$ 程度減少した。X方向のひずみが拘束の影響を直接受けることに対して、45度方向のひずみは、前述の通り実験条件に依存してひずみが生じるため、明確な傾向は得られなかった。

想定では拘束鋼材量が多くなると拘束される弾性ひ

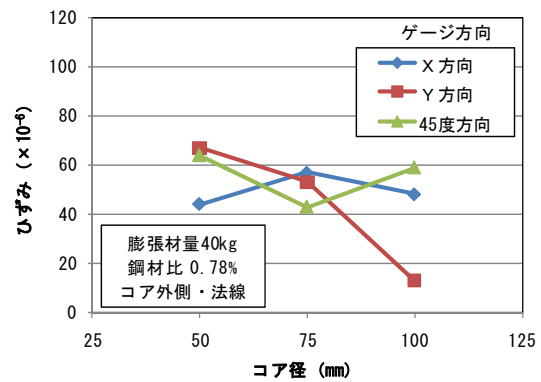
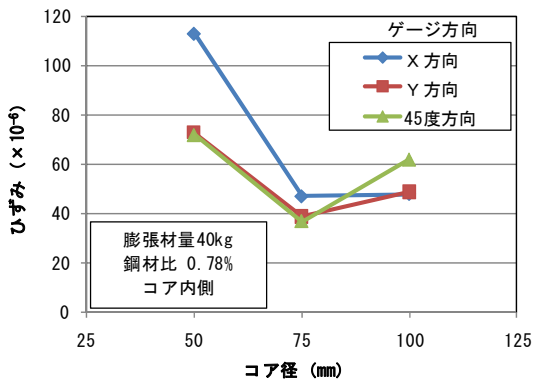


図-14 コア径と解放ひずみの関係 (左: コア内側, 右: コア外側・法線方向)

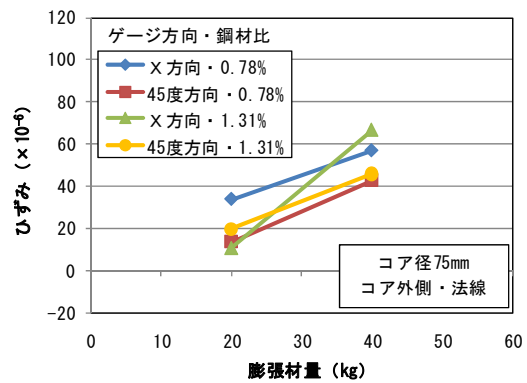
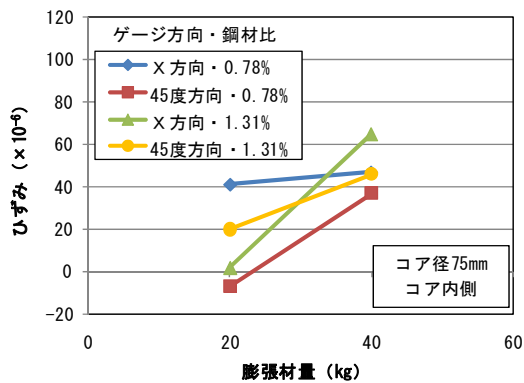


図-15 膨張材量および鋼材比と解放ひずみの関係 (左: コア内側, 右: コア外側・法線方向)

ずみが大きくなり、解放ひずみが大きくなる考えた。膨張材量 40kg のケースでは、想定した結果となったが、膨張材量 20kg のケースでは、鋼材比 1.31% のケースの解放ひずみがほぼゼロとなった。この結果から、膨張材の混入が少なく、拘束鋼材比が大きい場合には、解放ひずみが小さくなることを確認できた。

3.4 解放ひずみと拘束鋼材ひずみおよび自由膨張ひずみの関係

図-16 に拘束鋼材ひずみと解放ひずみの関係を示す。拘束鋼材ひずみは、拘束供試体における鉄筋 8 本の膨張後のひずみの平均値であり、解放ひずみは、削孔時のコア内側 3 方向の表面ひずみの平均値である。コア径 50mm のケースと拘束鋼材ひずみ 600×10^{-6} の点を除くコア径 75mm のケースで、拘束鋼材ひずみの増加に伴い解放ひずみが増加する傾向が見られた。

図-17 に自由膨張ひずみと解放ひずみの関係を示す。自由膨張ひずみは、埋込みひずみ計を用いた角柱供試体膨張後のひずみである。拘束鋼材ひずみと同様に、自由膨張ひずみの増加に伴い解放ひずみが増加する傾向が見られた。

解放ひずみはコンクリート表面のひずみであり、拘束鋼材ひずみや自由膨張ひずみはコンクリート内部のひずみであるため、直接比較はできないものの、ある程度の相関関係が見られた。また、コンクリート内部に蓄積されている弾性ひずみは、鉄筋ひずみや自由膨張ひずみと相関がある。これらのことから、コンクリート表面の解放ひずみからコンクリート内部の弾性ひずみや鉄筋ひずみを推定できる可能性が確認できた。

4. まとめ

本研究で実施した膨張コンクリート製拘束供試体を用いた拘束実験およびコア削孔実験を通して、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 膨張コンクリートの体積変化による拘束鋼材ひずみの変化を計測し、膨張材量や鋼材比と拘束鋼材ひずみの関係を把握した。単位体積あたりの膨張エネルギーから判断すると、膨張材による拘束鋼材のひずみは妥当な値であることが確認できた。
- 2) コア削孔実験における表面ひずみは、コア内側とコア切欠き円・法線方向のひずみが増加し、コア切欠き円・接線方向のひずみが減少することが確認できた。
- 3) 膨張材が多く混入された場合、拘束される弾性ひずみが大きくなり、解放ひずみが大きくなることを確認できた。一方、膨張材の混入が少なく、拘束鋼材比が大きい場合には、解放ひずみが小さくなることを確認できた。
- 4) コア削孔による解放ひずみは、弾性ひずみと相関があ

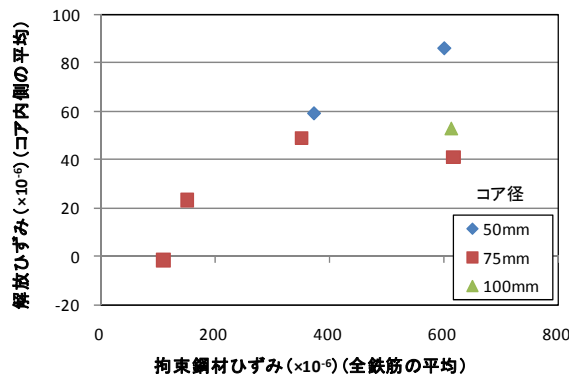


図-16 拘束鋼材ひずみと解放ひずみの関係

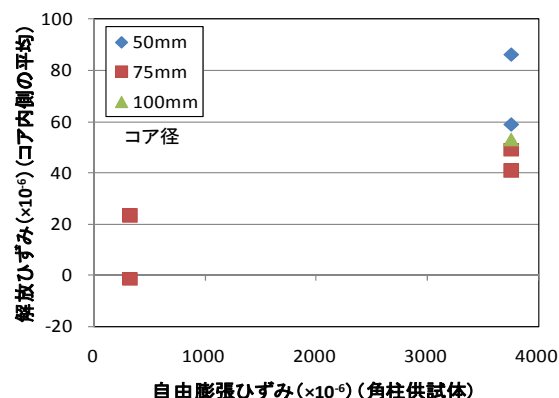


図-17 自由膨張ひずみと解放ひずみの関係

る拘束鋼材ひずみや自由膨張ひずみに対して、ある程度の相関関係が見られた。これによりコンクリート表面の解放ひずみからコンクリート内部の弾性ひずみや鉄筋ひずみを推定できる可能性が確認できた。

参考文献

- 1) 樋口嘉剛, 神田亨, 三木千尋: コンクリート部材中の応力推定法, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.11-18, 1998.2
- 2) 野永健二, 深沢且典, 伊藤始, 佐原晴也, 関塚真, 平嶋健一: 小径コアによるコンクリート部材の現有応力測定法に関する試験研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, VI-216, pp.431-432, 2002.9
- 3) 伊東敏彦, 久保田克寿, 瀬下雄一, 溜幸生: 二軸圧縮状態のコンクリート試験体を用いた応力解放法に関する実験的検証, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, VI-325, pp.649-650, 2007.9
- 4) 林陸太, 石川靖晃: 二軸拘束状態下での膨張コンクリートの仕事量に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 5) 石川靖晃, 柴田要: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008.7
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 2007