

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解析的研究

伊藤 始^{*1}・石田 雅大^{*2}・高島 依里^{*2}・若井 航^{*3}

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模擬した応力解析を実施した。その結果、拘束実験の解析では、鉄筋ひずみやコンクリートひずみの解析値と実験値がほぼ一致することを確認した。コア削孔実験の解析では、コア削孔による解放ひずみが拘束膨張で蓄積された弾性ひずみと一致することを確認した。加えて、コア削孔実験の解析値と実験値に差異が生じることを把握し、その要因について考察した。

キーワード：膨張コンクリート, コア削孔, 応力解析, 解放ひずみ, 弾性ひずみ

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。

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、理論モデルの解析への導入などの知見が得られている³⁾。

以上のことを踏まえ、著者ら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て研究を行っている。既報⁴⁾では、拘束された膨張コンクリートに対するコア削孔実験において、表面解放ひずみが鉄筋ひずみや自由膨張ひずみとある程度の相関関係があることを確認した。そして、本研究ではコア削孔による解放ひずみを、弾性ひずみを介して鉄筋ひずみや自由膨張ひずみと関連づける方法として3次元応力解析の適用を検討した。

本研究では、図-1のように、はじめに膨張コンクリートを用い、4辺を鋼板で拘束した供試体（拘束供試体）

を用いて拘束実験を実施し、それを模擬した応力解析を行った。次に、拘束供試体を対象にしたコア削孔実験を実施し、それを模擬した応力解析を行った。これらの結果から、実験との整合性を検証するとともに、実験値と解析値との差異が生じる要因を確認した。加えて、実験では得られない内部応力の挙動を把握し、解析を用いて表面的な計測値から内部応力値を推定することの可能性を検討した。

2. 実験方法の概要

2.1 膨張コンクリートの拘束実験

(1) 実験ケース

拘束実験は、膨張コンクリートの拘束供試体において、コンクリートが膨張するときの鉄筋ひずみを測定することで行った。実験ケースは、表-1のように拘束鉄筋比（鉄筋径）、膨張材量、後述のコア削孔実験で使用するコア径を変化させた7ケースとした。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³⁾。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

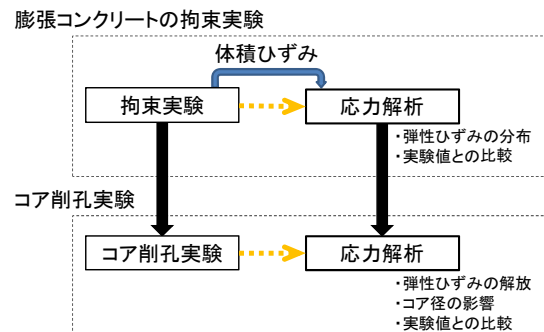


図-1 研究の流れ

*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 准教授（工学部環境工学科 兼任）工博(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
 *3 富山県立大学 工学部 環境工学科

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 (×10 ⁻⁶)	膨張ひずみ Y方向 (×10 ⁻⁶)	膨張エネルギー X方向 (N・m/m ³)	膨張エネルギー Y方向 (N・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	1	1.31	40	75	11.6	20923	388	355	373	312
	2				11.0	19052	330	377	278	363
7	13	1.31	20	75	26.8	26845	121	101	31	22

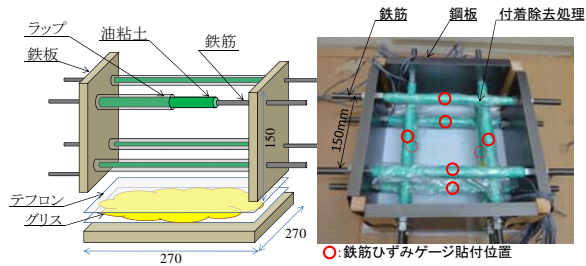


図-2 拘束型枠 (左: 一方向の詳細図, 右: 組立状況)

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		

さ 20mm) で拘束する構造とし、内側寸法は 270×270×150mm になるようにした。図-2 のように供試体の鉄筋および下部鋼板に油粘土、グリス、およびテフロンシートで処理を施すことで、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力を側面の鋼板を介して鉄筋に一軸状態で作用させた。

(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。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。膨張コンクリートの自由膨張ひずみは、角柱供試体 (100×100×400mm) に埋込み型ひずみ計を配置して計測した。自由膨張ひずみの最終値は、膨張材量 20kg で 317×10⁻⁶, 40kg で 3757×10⁻⁶ となった。圧縮強度試験は、円柱供試体 (φ100×h 200mm, 封かん養生) を用い、コア削孔時に実施した。

膨張材量 40kg の各供試体において表面上の変状は見られなかったものの、膨張材を標準添加量の 2 倍添加した影響で表-1 のように圧縮強度が小さくなった。そのため、コンクリートは内部に微細ひび割れ発生の可能性があり、通常の状態でないことに留意いただきたい。

(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、図-2 のように 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。

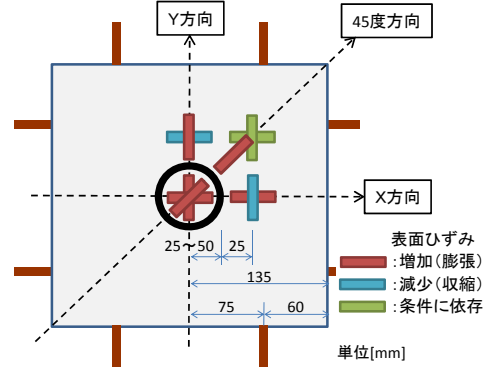


図-3 ひずみゲージ位置およびコア削孔による表面ひずみの変化傾向 (実験)

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。

2.2 コア削孔実験

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、コンクリート表面に図-3 のようにひずみゲージ (ゲージ長 30mm) 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。削孔深さ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110, 130, 150mm において、鉄筋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. 解析方法

膨張コンクリートの拘束実験の解析は、コンクリート要素に膨張ひずみを与えることで実験をモデル化した。コア削孔実験の解析は、膨張ひずみを与えたコンクリート要素に対して、その中央の切欠き部の要素を順次削除することで実験をモデル化した。解析では膨張ひずみが大きく、ひずみの変化傾向が比較しやすい膨張材量 40kg のケースを対象とした。

解析モデルは図-4 のとおりであり、膨張コンクリートの拘束実験およびコア削孔実験の供試体を 1/4 対称モデルとした。要素寸法は同図のようにコンクリート部で

5~10mm とし、それ以外の部分では 20mm 程度とした。モデルの拘束条件は、表面を除く 5 面について、面と直角方向への移動を拘束する条件とした。

解析モデルで使用した要素は表-3 に示すとおりである。このうちコンクリートと鋼板の界面にはインターフェイス要素を採用することとし、鋼板に対して垂直の応力のみを伝達するモデルとした。内部鉄筋による拘束効果は、鋼板の背面に設置したソリッド要素③で表現した。すべての要素は完全弾性体として、鉄筋のヤング係数 E_s とコンクリートのヤング係数 E_c は、表-4 に示す値を用いた。ソリッド要素③のヤング係数 E_{elem} は、実験の鉄筋と解析のソリッド要素③が等しい荷重を受けるときに、鋼板の変位増分が等しくなるように設定した (式(1))。

$$E_{elem} = \frac{A_s}{A_{elem}} \frac{L_{elem}}{L_s} E_s \quad (1)$$

ここで、 A_s は鉄筋断面積 (mm^2)、 A_{elem} は要素③の断面積 (mm^2)、 L_s : 鉄筋長さ (mm)、 L_{elem} : 要素③の長さ (mm) である。解析コードは、全ひずみ、体積ひずみ、弾性ひずみを同時に出力できる ASTEA-MACS⁵⁾ を使用した。

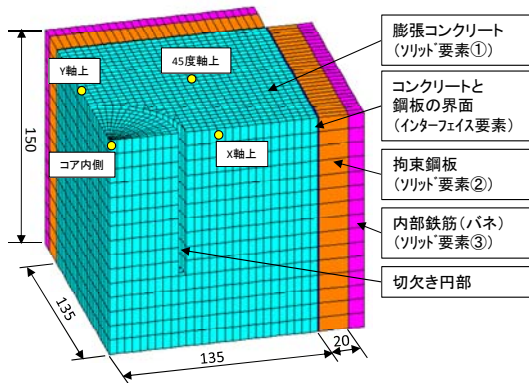


図-4 応力解析モデル

表-3 解析の使用要素

部位	使用要素
膨張コンクリート	8節点ソリッド要素①
拘束鋼板	8節点ソリッド要素②
内部鉄筋(バネ部)	8節点ソリッド要素③
コンクリートと鋼板の界面	インターフェイス要素

4. 拘束実験を模擬した応力解析

4.1 実験結果の概要

拘束実験では、拘束供試体で測定した鉄筋ひずみ ϵ_{sx} と鉄筋ひずみから算定した自由膨張ひずみ ϵ_{exp} を求めた。自由膨張と拘束膨張のひずみの概念は図-5 に示すとおりである。図中の ϵ_e が弾性ひずみであり、削孔により解放されるひずみ (解放ひずみ) である。図の関係から式 (2) を用いて自由膨張ひずみ ϵ_{exp} を算定した。

$$\epsilon_{exp} = \frac{A_s E_s + A_c E_c}{A_c E_c} \epsilon_{sx} \quad (2)$$

ここで、 A_c はコンクリート断面積 (mm^2) である。膨張コンクリートの膨張は、打込み 0~2 日の若材齢で生じた。そのため、ヤング係数には、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾の強度発現式を用いて材齢 1 日のヤング係数を推定して用いることとした。計算より E_c は、膨張材量 20kg で 9300N/mm^2 、同 40kg (実験ケース 1, 2, 5, 6-1) で 7000N/mm^2 、同 40kg (実験ケース 3, 6-2) で 6600N/mm^2 とした。鉄筋ひずみと自由膨張ひずみを図-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 で鉄筋比 0.78% のとき、鉄筋ひずみが約 600×10^{-6} であった。それに対して、1.31% のとき鉄筋ひ

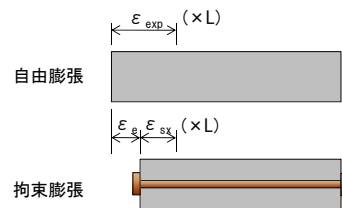


図-5 自由膨張と拘束膨張のひずみの概念図

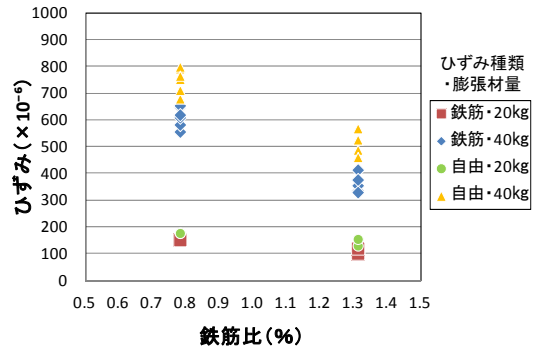


図-6 鉄筋ひずみと自由膨張ひずみ

表-4 拘束実験の実験結果と解析結果

	材料条件				実験結果				解析結果			
	鉄筋		コンクリート		鉄筋		コンクリート		鉄筋		コンクリート	
	断面積 A_s (mm^2)	ヤング係数 E_s (N/mm^2)	断面積 A_c (mm^2)	ヤング係数 E_c (N/mm^2)	ひずみ ϵ_s ($\times 10^{-6}$)	全ひずみ ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	体積ひずみ ϵ_v ($\times 10^{-6}$)	弾性ひずみ ϵ_e ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ϵ_s ($\times 10^{-6}$)	全ひずみ ϵ_c ($\times 10^{-6}$)	体積ひずみ ϵ_v ($\times 10^{-6}$)	弾性ひずみ ϵ_e ($\times 10^{-6}$)
$\phi 10$	285	200000	40500	7000	611	611	734	-123	623	623	734	-112
$\phi 13$	507	200000	40500	7000	366	366	497	-131	377	377	497	-120
備考					実験値	ϵ_s と一致	ϵ_s から算定	$\epsilon_v - \epsilon_c$	解析出力値	解析出力値	入力値(実験値と一致)	解析出力値

※ひずみ 正側: 膨張(引張), 負側: 収縮(圧縮)

ずみが約 400×10^{-6} となっている。自由膨張ひずみの傾向は、鉄筋ひずみと同様の傾向を示した。また、自由膨張ひずみは鉄筋ひずみよりも2割程度大きくなった。

4.2 解析結果

(1) 解析による検討の方法

膨張コンクリートの拘束実験の解析は、鉄筋径 10mm と 13mm の両ケースで行い、コンクリートに膨張材 40kg を使用したときの膨張側の体積ひずみを与えることで実施した。体積ひずみには実験時の自由膨張ひずみを与え、その値は表-4 のように鉄筋径 10mm で 734×10^{-6} を与え、鉄筋径 13mm で 497×10^{-6} とした。

(2) 解析の内部ひずみ

解析で得られた弾性ひずみのコンターを図-7 に示す。図は鉄筋径 10mm の結果である。コンクリート要素全体が凡例-120~-105 $\times 10^{-6}$ (μ) の区分となっており、均等に弾性ひずみが生じていることが分かる。図中の表面・中心・底面の部分において中央部から鋼板方向への分布を図-8 に示す。中央部(距離 0mm 付近)では中心および底面で負側に大きく、上部に解放面があり拘束の影響が小さい表面部で小さいことが分かる。また、表面のひずみは、全体の变形量を合わせるように中央部から端部にかけて負側に大きくなる傾向を示した。これらの傾向があるものの、弾性ひずみは-116~-110 $\times 10^{-6}$ の範囲であり、おおむね均等に分布していることが確認できた。

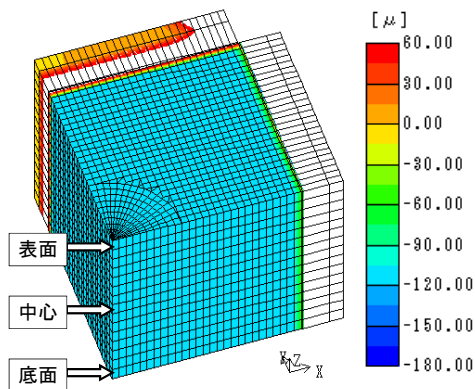


図-7 弾性ひずみコンター (鉄筋径 10mm)

(3) 解析値と実験値の比較

実験と解析で得られた各ひずみを表-4 に示す。実験から直接得られた値は鉄筋ひずみであり、その他のひずみは鉄筋ひずみから算定した。解析の入力値は、実験の体積ひずみとして、その他のひずみは解析の出力値である。解析の鉄筋ひずみはバネ部のひずみから算定し、全ひずみはコンクリート部の変位から算定した。

表-4 の解析の鉄筋ひずみおよびコンクリートの全ひずみ、弾性ひずみは、実験で得られた各ひずみとほぼ同じ値になった。この結果から、境界条件等の設定が妥当であることが確認でき、以降の検討でも、この解析モデルを使用することとした。

5. コア削孔実験を模擬した応力解析

5.1 実験結果の概要

7 ケースのコア削孔実験から得られた表面ひずみの変化傾向を図-3 (前掲) にまとめている。コア内側およびコア切欠き円の法線方向のひずみは、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。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。

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-9 (a) に示す。同図における正

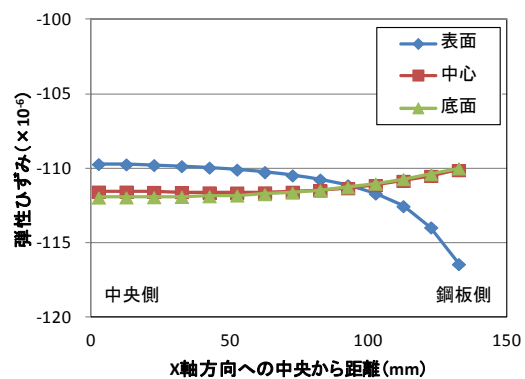
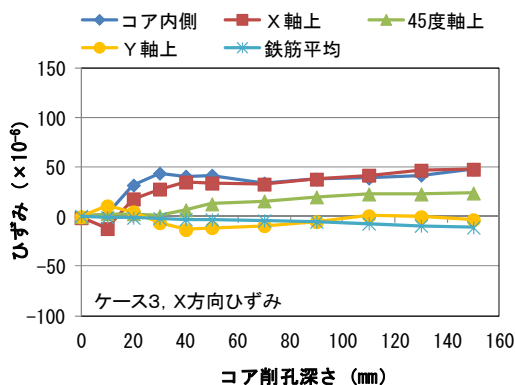
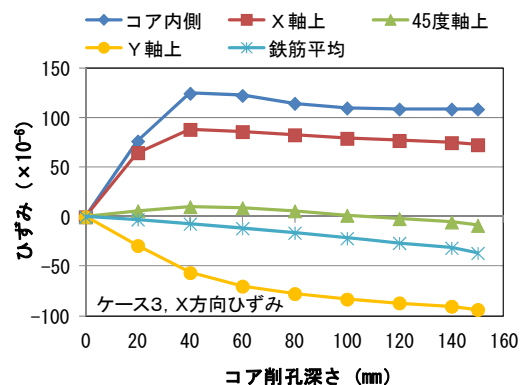


図-8 弾性ひずみ分布 (鉄筋径 10mm)



(a) 実験値



(b) 解析値

図-9 コア削孔深さと解放ひずみの関係 (実験ケース 3)

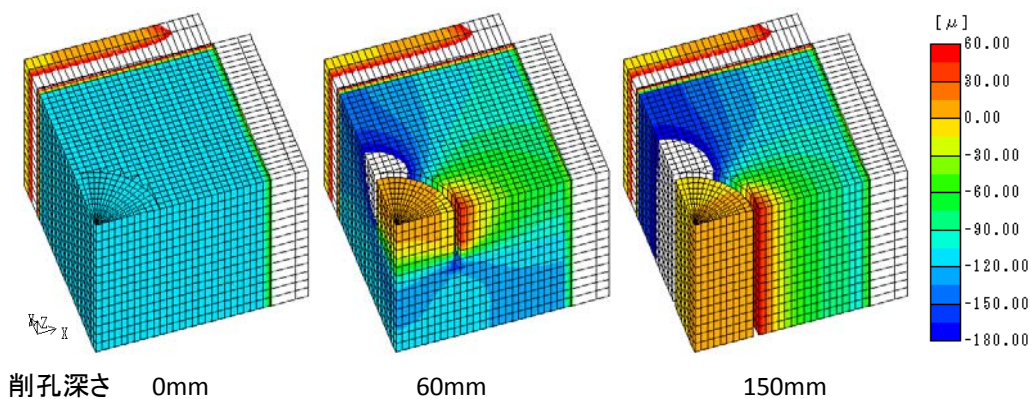


図-10 削孔深さごとの弾性ひずみコンター (X方向ひずみ)

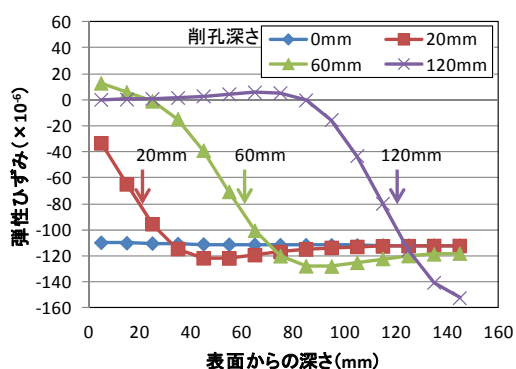


図-11 削孔深さごとの内部ひずみ分布 (解析)

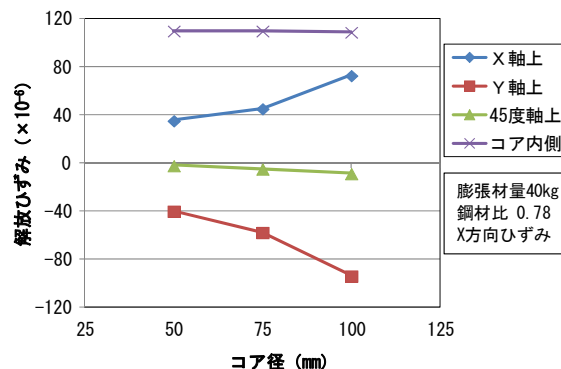


図-12 コア径と解放ひずみの関係 (解析)

のひずみは、解放ひずみが増加 (膨張) することを表している。図は、実験ケース3 (膨張材量40kg, 鉄筋径10mm, 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。測点の位置を図-4に示す。また、ここでのひずみは正側が膨張、負側が収縮である。

図-9(a)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、 50×10^{-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、鉄筋平均のひずみは、緩やかに負側に増加し、 -10×10^{-6} 程度に達した。

5.2 解析結果

(1) 解析による検討の方法

コア削孔実験の解析は、前述(4章)の体積ひずみ(膨張)を与えたコンクリート要素に対して、図-4のように、中央の切欠き円部の要素を深さ20mm単位で削除することで実施した。解析は実験ケース3を基本に行い、コア径50, 75mmについても実施した。解析上の切欠き円部の幅は5mmと設定した。

(2) 弾性ひずみの解放

図-10に削孔深さ0mm, 60mm, 150mmのときのX方向の弾性ひずみコンターを示す。コア内側中央の弾性ひずみは、削孔深さ0mmのとき $-120 \sim -105 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、削孔深さ60mmと150mmのとき $0 \sim 15 \times 10^{-6}$ の範囲にあるため、 120×10^{-6} 程度の弾性ひずみが解放されたことが分かる。また、X軸上の切欠き円外側の近い部

分でも弾性ひずみが約 0×10^{-6} 以上になっており、解放されている。

図-11に削孔深さごとのコア内側における内部の弾性ひずみの変化を示す。矢印の位置がその時点の削孔深さであり、矢印より横軸0mm側が解放された部分、150mm側が拘束された部分を表す。削孔深さ60mmでは表面からの深さ30mm程度まで、同120mmでは90mm程度まで、弾性ひずみが 0×10^{-6} 付近にあり、ひずみが解放されている。これらの深さの差はいずれも30mmであったことから、今回の弾性ひずみ 100×10^{-6} 程度であれば深さ30mm以上を削孔することで表面ひずみは解放されると考えられる。この知見は既往の研究¹⁾で測定区間長Lと測定深さDの比が0.3以上とする知見と一致するものである。しかしながら、全てのグラフで深さと弾性ひずみの勾配が同じであることを考えると、削孔前の弾性ひずみの大きさにより、必要な削孔深さが変化すると考えられた。

(3) コア径の影響

コア径がコア削孔時の表面ひずみに与える影響について解析的に検討した。図-12にコア径と解放ひずみの関係を示す。コア外側のX軸上とY軸上の測点は、図-3と図-4のようにコア径によらずコア切欠き円から外側に25mmの点に設定し、45度軸上はそれらの点をY・X軸方向に結んだ点とした。

コア内側の解放ひずみは、コア径に係わらず一定の値

を示すことが分かる。コア外側 X 軸ではコア径が大きくなると解放ひずみが大きくなり、Y 軸上と 45 度軸上では負側に大きくなった。コア外側でコア径の影響を受ける要因は、コア径が小さくなるとひずみが解放される円周距離(図-10・150mm の正ひずみの範囲)が小さくなり、X 軸方向への広がり小さくなることであった。この結果から、コア外側の結果を用いる場合には、コア径の影響を考慮する必要があることが確認できた。

(4) 解析値と実験値の比較

削孔深さごとの解放ひずみの変化を図-9(b)に示す。ここでコア内側と X 軸上のひずみは増加し、鉄筋ひずみは減少している。図-9(a)の実験値と比較すると、コア内側、X 軸上、鉄筋について、ひずみの増減の方向やひずみが大きく増減する削孔深さは一致することが確認できた。しかしながら、実験値に対する解析値は、コア内側で 2.1 倍、X 軸上で 1.4 倍、鉄筋ひずみで 3.1 倍となり、絶対値が大きく異なった。

この解析値と実験値の差異については、弾性ひずみと解放ひずみの違いが考えられた。図-13 に弾性ひずみと解放ひずみの関係を示す。解析値は、図-11 でも見られたように全ての弾性ひずみが解放され、一致することが確認された。これに対して実験(膨張材量 40kg)の解放ひずみは、弾性ひずみの 3 割から 7 割となっている。

この要因として表面部の弾性ひずみが中心部の弾性ひずみに比べて小さかったことが考えられた。この差異は、実験においてコンクリート表面を封緘したものの乾燥収縮ひずみの影響が十分に取除けなかったこと、膨張材の膨張エネルギーが供試体上部の非拘束面方向に卓越したこと等の影響が考えられた。

一方、今回の解析では、コンクリート膨張時のヤング係数とコア削孔時のヤング係数を同一としており、物性の経時変化を考慮していないことの影響も考えられた。

鉄筋コンクリート部材での計測値を解析に入力して内部ひずみを知るためには、これらの要因を再現する解析方法やこれらの要因を取り除く計測方法、通常の鉄筋コンクリートでの鉄筋による拘束効果の再現等について、今後検討する必要がある。

6.まとめ

本研究の膨張コンクリートの拘束実験およびコア削孔実験を模擬した解析を通して、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 実験の体積ひずみを解析入力値とした拘束実験の解析において、鉄筋ひずみおよびコンクリートの全ひずみと弾性ひずみの解析値は、実験値とほぼ同じ値になった。
- 2) 拘束実験の解析において、コンクリートの内部ひずみ

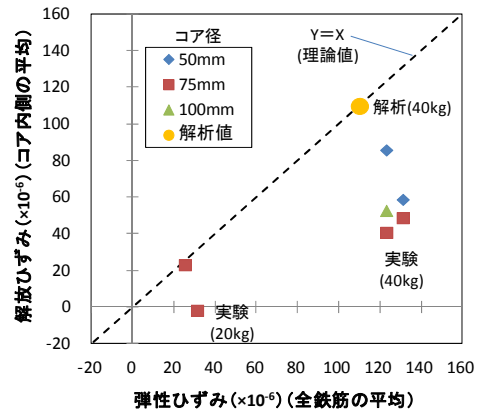


図-13 弾性ひずみと解放ひずみの関係

は、おおむね均等に分布することが確認できた。

- 3) コア削孔実験の解析において、コア削孔による解放ひずみが拘束膨張で蓄積された弾性ひずみと一致することが確認できた。
- 4) コア削孔実験の解析において、削孔深さに対する解放ひずみの増減の方向や解放ひずみが大きく増減する削孔深さは実験結果とおおむね一致した。
- 5) コア削孔実験の解析値と実験値の差異は、実験の弾性ひずみと解放ひずみの差異に起因すると考えられた。差異の要因は乾燥収縮ひずみや膨張エネルギーの方向性により、表面部の弾性ひずみが小さかったことが考えられた。

謝辞

本研究の一部は科学技術費補助金(若手研究(B) 23760409)により行った。ここに記して謝意を表す。また、解析の実施にあたりご協力を頂きました(株)計算力学研究センターに感謝いたします。

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) 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
- 4) 石田雅大, 伊藤始, 松井淳史: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.7
- 5) 計算力学研究センター: ASTEA-MACS 資料, 2010
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, pp.340-341, 2007