論文 埋込みセンサを用いた膨張コンクリートの解放ひずみ測定に関する 実験的研究

若井 航^{*1}·伊藤 始^{*2}·西野 哲史^{*3}·高畠 依里^{*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。本研究では膨張コンクリートの拘束膨張実験およびコア削孔実験を行うことで、 コア削孔による解放ひずみの測定手法を検討した。その結果、埋込みセンサを用いた内部ひずみ測定法で安 定した解放ひずみが得られること、ならびに一軸拘束状態の供試体では膨張による拘束ひずみと削孔による 解放ひずみがおおむね一致することが確認できた。

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,拘束ひずみ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物(RC 構造物)には、多様な 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 構造物が有する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と おりの膨張ひずみがコンクリート構造物に導入されて いるかどうかが力学的性能を左右することとなる。

そのため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 で精度の高い測定手法に応力解放法がある。この手法を 用いた研究事例として、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欠きを作るこ とで、応力解放を図っている。また、野永ら²⁾はコア削 孔により円形の切欠きを用いており、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。

以上を踏まえて、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^{3),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およ び応力解析において、コア削孔時のコンクリート表面の 解放ひずみが内部に蓄積した拘束ひずみとある程度の 相関関係があることを確認した(後述:Sシリーズ)。し かしながら、解放ひずみが拘束ひずみよりも小さい傾向 にあった。その要因は乾燥収縮や膨張エネルギーの方向 性により表面部の拘束ひずみが小さかったこと、拘束ひ ずみの算定に用いたヤング係数が小さかったことが考 えられた。また、RC 構造物は応力状態が複雑であると ともに端面の影響を受けやすいことから、構造物内部の ひずみを測定することが必要と考えられた。

本研究では、コンクリート内部の解放ひずみを計測す

*1 富山県立大学 工学部 環境工学科 (正会員) *2 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博(工)(正会員) *3 北電技術コンサルタント株式会社 土木部 設計第二グループ

ること、および表面部の拘束ひずみが小さいことの課題 を解決することを目的に、埋込みセンサを用いた内部ひ ずみの測定方法を提案し、コア削孔実験への適用を検討 した。加えて、これまでの表面ひずみの実験結果と新た に実施した内部ひずみの実験結果を対象に、ヤング係数 の与え方を見直すことで再整理し、拘束ひずみと解放ひ ずみを比較するとともに、相違点を考察した。

2. 研究方法

2.1 検討したひずみ測定方法

本研究ではコア削孔による解放ひずみの測定にあた り,図-1(a)のようにコンクリートの表面部の解放ひ ずみを測定する方法(表面ひずみ測定法)と図-1(b) のように中心部の解放ひずみを測定する方法(内部ひず み測定法)を検討した。表面ひずみ測定法は簡易に計測 できる特徴がある。一方で内部ひずみ測定法は実構造物 において,計測を鉄筋位置ででき拘束ひずみが蓄積され やすいこと,乾燥収縮ひずみと膨張エネルギーの方向性 の影響を極力取り除くことができることの特徴がある。

内部ひずみ測定法の手順は、図-1 (b)のように先行 して小径のコア (インナーコア)を削孔し、コア内にひ ずみ計 (埋込みセンサ)を設置し、モルタルを充填する。 モルタルの硬化後に、インナーコアの外側に一回り大き いコア (アウターコア)を削孔する。アウターコアの削



	型枠種類	実験条件				材料試験結果		膨張試験結果(削孔材齡時)			
ケース	計測方法	鉄筋径	膨張	削孔	コア径	圧縮	ヤング	自由膨張	鉄筋ひずみ	体積ひずみ	拘束ひずみ
	(シリース)	*2	11111111111111111111111111111111111111	И₩□		强度	1杀致	ひりみ	(計測)	(訂昇)	(訂昇)
	*1	(mm)	(kg/m^3)	(日)	(mm)	(N/mm²)	(kN/mm^2)	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$	$(\times 10^{-6})$
S-1	鋼製型枠 表面ひずみ (Sシリーズ)	10	40	16	50	11.6	20.9	3753	602	647	45
S-2					75	11.6	20.9	3753	618	664	46
S-3					100	11.0	19.1	3753	614	664	50
S-4			20		75	26.8	26.8	315	152	161	9
S-5		13	40		50	11.6	20.9	3753	374	421	47
S-6					75	11.0	19.1	3753	353	402	49
S-7			20		75	26.8	26.8	315	111	122	11
R-1	鋼製型枠 内部ひずみ (Rシリーズ) 合板型枠 内部ひずみ (Nシリーズ)	13	40	14	100	18.7	24.3	7036	619	686	67
R-2		10		14		18.7	24.3	7036	901	958	58
R-3		13		28 14 28		19.5	25.5	6991	492	543	51
N-1		13				18.7	24.3	7036	428	553	125
N-2		10				18.7	24.3	7036	622	729	107
N-3		13				19.5	25.5	6991	434	555	121

表-1 実験ケース一覧

*1:Sシリーズ:普通ポルトランドセメント, R・Nシリーズ:早強ポルトランドセメント *2:鉄筋比:鉄筋径13mmのとき1.31%,鉄筋径10mmのとき0.78%

孔時に埋込みセンサのひずみを深さごとに測定するこ とで,解放ひずみを得る。

2.2 検討の流れ

内部ひずみ測定法の検討の流れを図-2 に示す。まず 膨張コンクリートを用いた拘束供試体の拘束膨張実験 を実施し,鉄筋ひずみを継続的に計測した。次に,拘束 供試体の内部に埋込みセンサを設置し,コア削孔実験を 実施した。最後に,拘束膨張実験の鉄筋ひずみから計算 した拘束ひずみと,コア削孔実験から得られた解放ひず みを比較した。表面ひずみ測定法の検討の流れは,図中 の「埋込みセンサの設置」を除いたものである。

3. 膨張コンクリートの拘束膨張実験

3.1 実験方法

(1) 実験ケースと実験手順

拘束膨張実験の実験ケース一覧を表-1 に示す。実験 ケースを型枠種類とひずみ測定方法による実験シリー ズとして分類した。Sシリーズが鋼製型枠と表面ひずみ, Rシリーズが鋼製型枠と内部ひずみ,Nシリーズが合板 型枠と内部ひずみの実験ケースである。Sシリーズでは 鉄筋径,膨張材量,コア径を変えた7ケースを実施した。 RシリーズとNシリーズでは鉄筋径,コア削孔材齢を変 えた各3ケースを実施した。

(2) 拘束供試体の製作

S・R シリーズの拘束供試体は、図-3 のように鋼製型 枠および丸鋼鉄筋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。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、内側寸法は270×270×150mm になるように した。底面からの鉄筋の配置高さをX方向で30mm と 120mm,Y方向で50mm と100mm とし、水平方向の間 隔を150mm とした。

N シリーズの拘束供試体は、図-4 のように合板型枠 内に異形鉄筋を配筋することで拘束条件下に置いた供 試体である。合板型枠の内側寸法は 270×270×150mm



図-4 合板型枠(Nシリーズ)

とした。鉄筋は曲げ加工して端部を溶接で接合すること で正方形に閉合した形状とした。水平方向の間隔を 150mm,曲げ内半径を35mmとし,底面からの鉄筋の配 置高さを50mmと100mmとした。

(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。セメントにはSシリーズで普通ポルトランド セメント, R・N シリーズで早強ポルトランドセメント を用いた。膨張材をコンクリート 1m³ 当たり 20kg また は 40kg でセメントと置換し,練り混ぜを行った。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**表-1**のとおりとなった。

(4) 実験方法

拘束膨張実験は鉄筋とコンクリートのひずみを所定 の材齢(14日,16日,28日)まで計測することで行っ た。鉄筋の8箇所にひずみゲージを貼り,鉄筋ひずみを 1時間間隔で計測した。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。

R・N シリーズの実験手順を図-5 に示す。コンクリートの打込み後,材齢7日にインナーコアの削孔と埋込みセンサの設置を行い,材齢14日にアウターコアの削孔を行った。R-3とN-3では材齢21日と28日とした。

3.2 実験結果

拘束膨張実験で測定した R-1 と R-3 の鉄筋ひずみを図 -6 に示す。鉄筋ひずみは材齢 4 日ごろまでに大きく増 加し,その後緩やかに減少した。削孔材齢時の鉄筋ひず み ϵ_{xx} を用いて図-7 の関係から拘束ひずみ ϵ_r を算定し た。拘束ひずみ ϵ_r は弾性ひずみ ϵ_e とクリープひずみ ϵ_{crr} を足し合わせたものとした。

クリープひずみ ε_{cre} は膨張材による膨張ひずみが鉄筋 の拘束を受けることで生じるケミカルプレストレスに よるものである。ケミカルプレストレスの予測手法には 仕事量一定則による手法や Step by Step 法による応力解 析手法が提案されている^{5), 6), 7)}。今回の実験では拘束体 が鉄筋であり,鉄筋比が通常範囲であることから,仕事 量一定則による手法(式(1),(2))を用いた⁵⁾。

$U = 0.5 \cdot p \cdot E_s \cdot \varepsilon_{sx,t}^2$	(1)
$\sigma_{cna.t} = (2 \cdot p \cdot E_s)^{0.5} \cdot U^{0.5}$	(2)

式(1), (2)で, Uは単位体積あたりの膨張コンクリートが 拘束鋼材に対してなす仕事量(Nmm/mm³), pは拘束鋼 材比(= A_s/A_c), $\varepsilon_{sx,t}$ は材齢 t 日の拘束鋼材のひずみ, $\sigma_{cpa,t}$ は材齢 t 日のケミカルプレストレス(N/mm²), E_s は鉄筋 のヤング係数(N/mm²), A_c はコンクリート断面積(mm²), A_s は鉄筋の断面積(mm²) である。

R シリーズの鉄筋径 13mm の R-1 と R-3 について,ケ ミカルプレストレスとクリープひずみを計算した。クリ ープひずみは土木学会コンクリート標準示方書(以下, 示方書)⁸⁾の方法を用いた。計算には乾燥クリープひず みを考慮せず,載荷開始材齢を鉄筋ひずみがピークとな る材齢4日とした。ケミカルプレストレス $\sigma_{cpa,t}$ は R-1 で 1.62N/mm², R-3 で 1.29N/mm²となった。これらの応力に よるクリープひずみ ε_{cre} は R-1(材齢14日)で 34.7×10⁻⁶, R-3(材齢28日)で 52.3×10⁻⁶となった。これらの値は, 図-6の最大ひずみからの減少量に近い値を示し,この 減少がクリープを要因に生じたことが確認できた。

表-2 配合表





コア削孔により解放される拘束ひずみ $\epsilon_{sx,t}$ (材齢 t 日) は、式(3)のようにケミカルプレストレスによる応力をコ ア削孔時のヤング係数(材齢 t 日)で除した値を用いた。 コンクリートのヤング係数 E_c (N/mm²)の発現式には示 方書の算定式を用いた。なお、拘束条件の上下対称性か ら応力の分布は断面内で一様とした⁵⁾。

$$\varepsilon_{r,t} = \frac{\sigma_{cpa,t}}{E_{c,t}} \tag{3}$$

また、N シリーズのコンクリート断面積は、図-8 の ように鉄筋からコンクリートへの支圧力を想定し、鉄筋 位置からコア削孔位置へ 45°の角度に広がる面積と仮 定して与えた。角度は実験を模擬した 2 次元弾性応力解 析における主ひずみ σ_2 の方向および鉄筋と平行な圧縮 ひずみの断面内の広がりに基づいて仮定した。この方法 を用いると、拘束供試体の断面積は 15000mm² (150× 100mm)となる。

R・Nシリーズの鉄筋ひずみ(左軸)と拘束ひずみ(右軸)を図-9に示す。図の値は削孔時のX・Y方向ごとの平均値である。鉄筋ひずみはRシリーズで大きくNシリーズで小さくなった。拘束ひずみはNシリーズで大きくなった。材齢14日のケースを比較すると鉄筋比が1.31%のとき鉄筋ひずみが小さくなり、拘束ひずみが大きくなったことから、鉄筋比が大きく拘束が大きいときに拘束ひずみが蓄積されやすいことが確認できた。

4. コア削孔実験

4.1 Sシリーズの実験方法

コア削孔実験は拘束供試体のコンクリート中央部を 直径 50,75,100mm のコアを削孔することで行った。 実験は削孔前にコンクリート表面にひずみゲージを貼 りつけ,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。

4.2 R・N シリーズの実験方法

(1) 埋込みセンサの製作

コンクリート中心部のひずみを計測することを目的 に埋込みセンサを製作した。製作にあたり深さとひずみ 計のX・Y方向を精度よく設置できることに留意して形 状を決めた。図-10に埋込みセンサの概要を示す。まず 半円形の凹部を持つ20×20×10mmの直方体のモルタル を製作し、凹部に検長30mmのひずみ計を挟み込み、モ ルタルをエポキシ樹脂で接着した。これをひずみ計が直 交するように2段重ねた。

(2) コア削孔と埋込みセンサ設置

コア削孔および埋込みセンサ設置の方法は2章(図-1)で述べたとおりである。埋込みセンサの設置にあた り、インナーコアの直径を50mmとして、深さ100mm 程度となるように削孔した。次にインナーコア内にモル タルを充填し、上記の埋込みセンサを設置した。

アウターコアの削孔は直径 100mm のコアビットを用 いて,削孔深さを確認しながら行った。コアの削孔時に リード線のコネクタをデータロガーから取り外し,計測 時に接続することでひずみを計測した。削孔深さ 0,10,



図-11 コア削孔深さと解放ひずみの関係(S-3)

30, 50, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 150mm にお いてひずみを計測した。

4.3 実験結果

(1) S シリーズ

図-11 にコア削孔実験の結果の一例として、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 係を示す。図はケース S-3(膨張材量 40kg,鉄筋径 10mm, コア径 100mm)のコア切欠き円内側のコンクリート表面 および鉄筋に貼付したひずみゲージの X・Y 方向の測定 値を表している。鉄筋ひずみは各方向の鉄筋 4 本の平均 ひずみである。ここで正側が膨張,負側が収縮である。

図-11の表面ひずみは、コア削孔深さ20mm 程度で大きく増加し、40×10⁶ 程度まで達しており、深さ150mmで50×10⁶の解放ひずみが得られた。

図-12にSシリーズ・各ケースの実験終了時の解放ひ ずみ(最終値)を示す。ケースS-1やS-5のように膨張 材量が1m³当たり40kgと多く混入された場合,拘束さ れる拘束ひずみが大きくなり解放ひずみが大きくなる こと、ならびにケース S-7 のように膨張材量が同 20kg と少なく拘束鋼材比が 1.31%と大きい場合には解放ひず みが小さくなることが確認できた。

(2) R シリーズ

図-13 に R シリーズのコア削孔深さとコンクリート 内部ひずみおよび鉄筋ひずみの関係を示す。図はケース R-2(鉄筋径 10mm,材齢 14 日)のX・Yの2方向に設 置した埋込みセンサおよび鉄筋に貼付したひずみゲー ジの測定値を表している。図中のセンサ位置とは埋込み センサ(中心)の設置深さを表しており,X方向のひず みは深さ65mm,Y方向のひずみは深さ85mmで計測し たことを表している。センサ計測範囲はセンサ直径 12mmの範囲を表しており,X方向では上縁深さ59mm, Y方向では同79mmとなる。

図-13 の X 方向の内部ひずみはコア削孔深さ 70mm で大きく増加し, 深さ 100mm で 60×10⁻⁶ 程度まで達し てそれ以降は安定的に推移した。Y 方向の内部ひずみは コア削孔深さ 80mm でX 方向のひずみに追従するように 大きく増加し, 80×10⁻⁶ 程度まで達した。鉄筋ひずみは わずかに負側に推移した。

内部ひずみが増加しはじめる削孔深さは、センサ計測 範囲(上縁)と 0~10mm の差異であることが確認でき た。また、内部ひずみが増加しはじめてから安定するま での深さは 30~40mm であった。図-11 の表面ひずみ S-3 のグラフと同様の傾向を示しており、今回検討した 埋込みセンサを用いた内部ひずみの測定は、これまで実 施した表面ひずみの測定^{3,4)}や既往の研究¹⁾と同様の結 果が得られ、適切に測定可能であることが確認できた。

図-14にR・Nシリーズ・各ケースの解放ひずみの最 終値を示す。RシリーズではX方向とY方向の解放ひず みの差異が12~17×10⁻⁶と同程度となった。各ケースの 平均値も73~79×10⁻⁶と安定した値が得られた。

(3) N シリーズ

図-15 に N シリーズのコア削孔深さとコンクリート 内部ひずみおよび鉄筋ひずみの関係を示す。図はケース N-2 (鉄筋径 10mm, 材齢 14 日)の測定値を表している。 凡例の「鉄筋(上・X)」とはコンクリート内の鉄筋のう ち,上段の鉄筋の X 方向のひずみを表している。他の鉄 筋ひずみも同様となる。

図-15 の X 方向の内部ひずみはコア削孔深さ 70mm で大きく増加し,深さ 100mm で 80×10⁶ 程度まで達し た。その後深さ 120mm と 150mm で大きく増加している。 深さ 150mm では供試体を貫通後にコアがビット内を回 転することがあったため,深さ 130mm の値を用いて以 降の検討を行った。Y 方向の内部ひずみはコア削孔深さ 80mm で X 方向のひずみに追従するように大きく増加し,





深さ 130mm で 100×10⁶程度まで達し,安定した解放ひ ずみが得られた。深さ 70mm から 100mm の X 方向と Y 方向の内部ひずみを見ると,深さに対するひずみの勾配 が同様であることや深さ方向に 20mm 程度の間隔を保っ ていること, R シリーズよりも勾配が緩やかであること が特徴的である。また,鉄筋ひずみは鉄筋配置深さ 50mm と 100mm の付近で減少しはじめ,4 本とも約 -40×10⁶ に収束した。

図-14のNシリーズ・各ケースの解放ひずみの最終値 を見ると、N-2とN-3のX方向とY方向の差異が大きく なった。また、N-1の値はN-2とN-3の値に比べて小さ くなった。Rシリーズの拘束供試体は単純化のためにコ ンクリートを鉄板で囲むことで一軸拘束状態に置いた ため、安定した挙動が得られたと考えられる。しかしな がら、実際のRC部材を模擬したNシリーズの拘束供試 体は内部に鉄筋を配置し、図-8のように鉄筋の支圧力 により拘束状態に置いた供試体である。加えて、異形鉄 筋がコンクリートと付着し、コンクリート内のひずみ分 布やひずみ解放挙動が複雑である。これらのことから、 今回のばらつきが生じたと考えられる。

5. 拘束ひずみと解放ひずみの比較

図-16 に全 13 ケースの拘束ひずみと解放ひずみの関係を示す。図には拘束ひずみと解放ひずみが一致した時の直線(理論値)を示した。S-1 では解放ひずみが理論値より48×10⁻⁶大きくなり,N-1では71×10⁻⁶小さくなった。残りの11ケースの解放ひずみと拘束ひずみはおおむね一致する結果となった。

S-1 では切欠き円内側 45°方向のひずみが 72×10⁻⁶, 切欠き円外側の法線方向のひずみが 44×10⁻⁶と 67×10⁻⁶ であり,Y方向のひずみ (73×10⁻⁶) に近い値を示した。 また,コア径が 50mm であるため切欠き円内側のひずみ が敏感に応答したと考えられた。解放ひずみをY方向の ひずみのみとすることで図中の「補正 S-1 (△印)」とな り,他ケースに近い値となった。N-1 については膨張時 の拘束ひずみは妥当な値が得られているため,削孔時の 計測値に問題があったと考えられる。

以上を踏まえて、拘束ひずみおよび解放ひずみを適切 に検討するためには、コンクリートの強度発現を考慮し た材齢にともなうヤング係数の増加やクリープの変化 を考慮することが重要である。加えて、実構造物への適 用には RC 構造物特有の端面や鉄筋による支圧力の影響 を考慮することも必要である。そのため、今回の内部ひ ずみ計測法の使用による改善に加え、3 次元応力解析に より数値を補正することが今後の課題と考えている。

6. まとめ

本研究を通して、得られた知見を以下にまとめる。

- 埋込みセンサを用いたコンクリートの内部ひずみの 測定は、表面ひずみの測定と同様に適切な測定が可 能であることが確認できた。特に内部ひずみ測定法 では安定した解放ひずみが得られた。
- 2) 一軸拘束状態に置いた鋼製型枠の拘束供試体のケースにおいて、拘束ひずみと解放ひずみがおおむねー



致することが確認できた。

3)鉄筋コンクリート部材を模擬した拘束供試体のケースにおいて、1ケースを除き拘束ひずみと解放ひずみがおおむね一致した。ただし、仮定した支圧面積から拘束ひずみを算定したことや解放ひずみの方向による差異が大きいことなどの検討すべき課題が残る。

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。

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
- 4) 伊藤始,石田雅大,高畠依里,若井航: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,コンクリート工学年次論文集,Vol.34, No.1, 2012.7
- 5) 辻幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレス の利用に関する基礎研究, No.235, pp.111-124, 1975.3
- 6) 百瀬晴基, 閑田徹志, 溝渕利明, 三橋博三:膨張材を 用いたコンクリートのクリープ性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.608, pp.1-7, 2006.10
- 7)田辺忠顕:初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解 析法とプログラム,技報堂出版,2004.3
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書,設計編,2007