

論文 リングゲージによるコンクリート内部の挙動評価に関する研究

加藤 定良^{*1}・山谷 敦^{*2}・趙 唯堅^{*3}・小澤 啓明^{*4}

要旨：高水圧を受ける比較的マッシブなコンクリート内部のひび割れ発生挙動を把握する目的で、ひずみゲージを貼付した炭素繊維リングシートをコンクリート内に埋設した RC 試験体の水圧載荷実験、および非線形 FEM 解析によるシミュレーション解析を行なった。その結果、実験で得られた変位や鉄筋ひずみ計測から、リングゲージによってコンクリート内部のひずみを精度良く計測できることがわかった。また、鉄筋比の違いがコンクリート内部のひび割れ発生挙動に影響を及ぼすことがわかり、鉄筋比が引張の限界鉄筋比程度の 0.6% では、ひび割れの制御が十分に期待できることがわかった。

キーワード：リングゲージ、高水圧、低鉄筋比、非線形 FEM、マスコンクリート

1. はじめに

地下空洞内に設置される揚水発電所の水車・発電機は、約 5,000 m³ のコンクリート（以下発電機廻りコンクリートという）によって支持されている。この発電機廻りコンクリート内部には、最大径約 2m のケーシング鋼管が収納されており、ケーシング鋼管内に作用する常時 8.0N/mm² 程度の高水圧が発電機廻りコンクリートの設計における支配的な荷重となっている。このような荷重を受ける比較的マッシブなコンクリート構造体の現行設計は、弾性設計に基づいており、今後、性能設計の導入を考えた場合には、高水圧が作用した時のコンクリート内部のひび割れ発生状況やその進展を把握することが重要な課題と考えられる¹⁾。

本研究では、高水圧を受ける比較的マッシブなコンクリート構造物内部の挙動を把握することを目的に、ケーシング鋼管を埋め込んだコンクリート直方試験体を用い、ケーシング内から高水圧を作用させてコンクリート内部のひずみを空間的に計測する実験を行なった。コンクリ

ート内部のひずみは、ひずみゲージを貼付した炭素繊維リングシート（以下リングゲージという）を用いて計測した。また、リングゲージによるひずみ計測と併せて試験体全体の変位や鉄筋ひずみの計測も行なった。この実験では、コンクリート内部のひび割れ性状が鉄筋比によってどのように変化するかを検討するため、鉄筋比を 0.0%（無筋）、0.1%、0.6% とした、3 試験体を用いた。さらに、非線形 FEM 解析による実験シミュレーション解析を実施し、コンクリート内部の挙動についての解析的検討も行なった。

2. 水圧載荷実験によるコンクリート内部のひずみ計測

2.1 実験概要

写真-1 及び **図-1** に実験に用いた試験体の概要を示す。試験体は、幅 1.2m×1.2m、高さ 0.93m の直方体であり、中央に内径 25.5cm、板厚 5mm の鋼製ケーシングを埋め込んである。鋼製ケーシングは、降伏応力 590N/mm² 級の高強度ガス

*1 東電設計（株）技術開発本部土木技術部構造評価グループ 工修（正会員）

*2 東電設計（株）技術開発本部土木技術部構造評価グループ 工博（正会員）

*3 大成建設（株）技術センター土木技術研究所土木構造研究室 工博（正会員）

*4 東京電力（株）建設部土木建築技術センター地下構造物グループ 工修

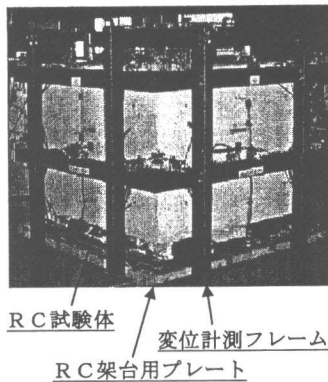


写真-1 試験体の概要

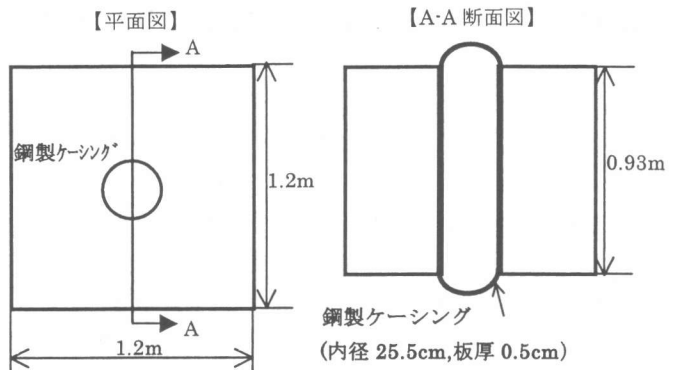


図-1 試験体の概要

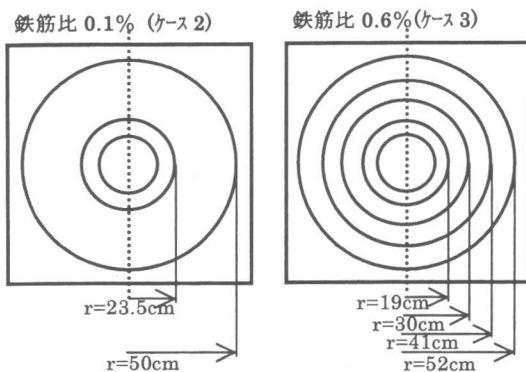


図-2 試験体の配筋図

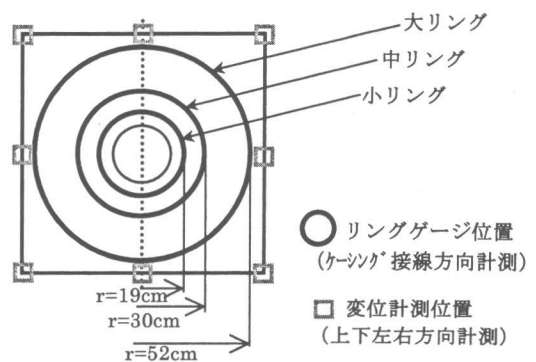


図-3 試験体の計測位置

ボンベ用容器を、本実験用に加工したものである。試験体は、設置面の摩擦を除去するために、硬質クロムメッキ処理を施したプレートとテフロンシートを介して、RC製の架台の上にセットした。コンクリートの圧縮強度は 28N/mm^2 を目標とし、その打設に当たっては、冬場打設となったため、散水養生は行わずに、コンクリート打設後の11日間を、脱型せずに養生マットにより養生した。

図-2に試験体の配筋図を示す。この実験では、ケーシング鋼管内からの加圧によってケーシング円周方向が引張応力場となることから、鉄筋もその方向に配置した。実験ケースは、鉄筋比0.0%のケース1、鉄筋比0.1%のケース2、および鉄筋比0.6%のケース3の3ケースであり、ケース2、ケース3の試験体高さ方向の鉄筋配置は、順に31cm間隔で3段、11cm間隔で9段となっている。鉄筋比0.6%は、ひび割れと同

時に鉄筋が降伏する、引張側の限界鉄筋比にほぼ等しい。また、鉄筋比0.1%のケース2は実験に先立つ予備解析において鉄筋比0.1%と0.0%の挙動に差異がみられたことから、実験でそれを確認することを目的としている。水圧の载荷は、 20MPa に加圧したガス圧を、水圧変換容器により水圧に変換し、この高水圧をケーシング内に送る方法で行なった。最大水圧は 15MPa である。なお、本载荷に先立って、圧力 2MPa の载荷・除荷により鋼製ケーシングとコンクリートとの密着性を確認した。载荷速度は 0.05MPa/min とした。

2.2 計測概要

本実験では、コンクリート内部の挙動を計測するためのリングゲージによるひずみ計測と併せて、試験体全体の変位の計測、鉄筋ひずみの計測も実施した。

(1) リングゲージによるひずみ計測

図-3にリングゲージによるひずみ計測位置を示す。このリングゲージは、リング状の炭素繊維リングシート (CFRP シート、幅 2.5cm、厚さ 1.4mm) にひずみゲージ (検長 60mm) を連続的に貼付して、本実験用に作製したものであり、コンクリートとほぼ同等の弾性係数を有している。リングゲージは、コンクリート内部のひずみ状況を全体にわたって把握する目的で、小リング、中リングおよび大リングと3重に配置した。各リングに貼付したひずみゲージの個数は、小、中、大で順に 20 個 (60mm 間隔)、20 個 (94mm 間隔)、36 個 (91mm 間隔) となっている。

コンクリート内部のひずみを精度良く計測することは非常に困難であり、特に、実験においてひび割れ後のコンクリートのひずみが計測されることは極めてまれである。本実験で作製したリングゲージは、CFRP シートやひずみゲージといった、ごく一般的な材料と計器を用いたものであり、加工性にも優れている。このことから、本実験によりその有効性が確認された場合には、今後種々のマスコンクリート構造物のひずみ計測に用いることが可能になるものと考えられる。

(2) 変位計測

図-3に試験体の変位計測位置を示す。試験体全体の挙動を把握するため、RC 架台に計測フレーム (写真-1 参照) を設置し、その位置を不動点として試験体の変位を計測した。計測は、試験体の高さ中央を主とした。

2.3 実験結果

水圧-コンクリートひずみの関係を図-4に示す。なお、同図のコンクリートのひずみは、小リングで計測した 20 点の平均である。同図には、解析結果を併せて示しているが、これについては、3 で後述する。同図から、実験結果は、加圧に伴って、コンクリートのひずみが増加するが、ケース 1、ケース 2 では、それぞれ 7.3MPa、7.5MPa からひずみが急増している。これは、ひび割れが試験体表面近くまで到達した時とほぼ一致するものである。ケース 1 とケース 2 では、水圧-コンクリートひずみの関係に差異はほとんどみられず、鉄筋比 0.1% という超低鉄筋比構造の挙動が無筋の場合とほとんど変わらない結果となった。ケース 3 では、ケース 1、2 に比較して、ひずみの急激な増加は 9.2MPa 時点と荷

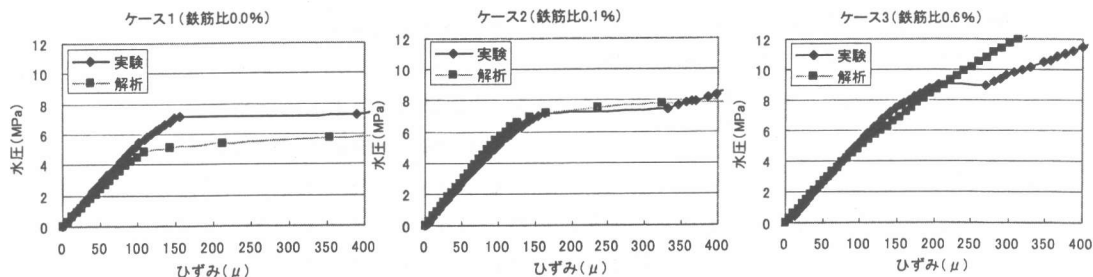


図-4 水圧-コンクリートひずみ関係 (小リングの結果)

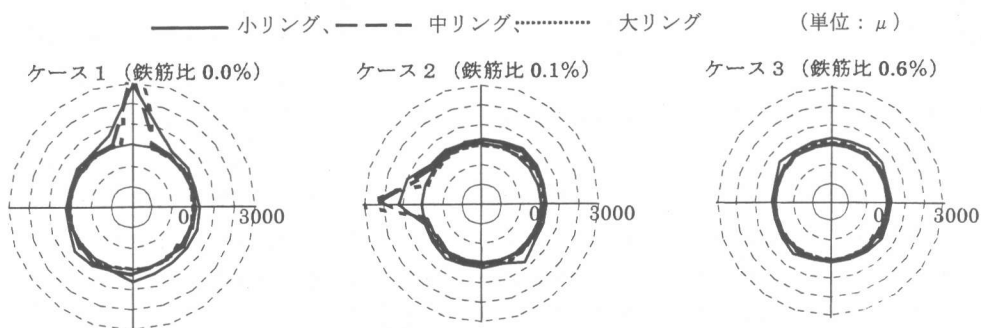


図-5 コンクリートひずみ分布 (水圧 7.5MPa)

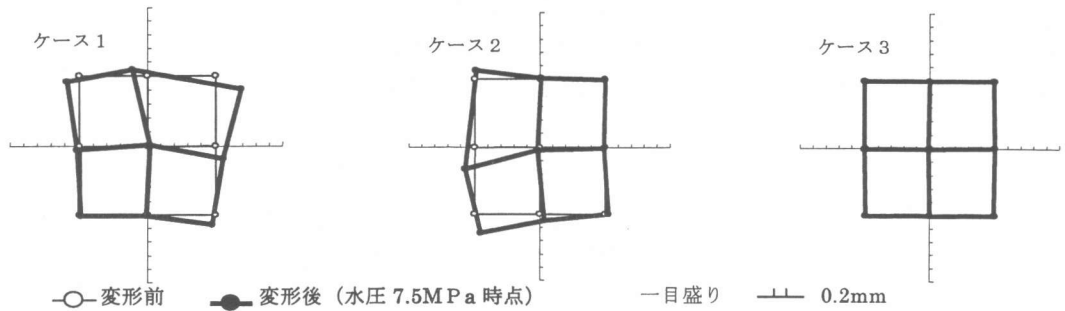


図-6 試験体の変位計測結果 (水圧 7.5MPa における平面図)

重レベルが高く、またひずみの増加の程度も急激ではなく、その後の水圧に対するひずみの増加も比較的小さい。ケース3では、実験後に試験体表面まで貫通したひび割れが明確には見られなかったこと、また一方で、実験前の試験体観察によれば、3試験体の中で最も乾燥収縮によるひび割れが顕著であったことから、9.2MPa時のひずみ増加には、このような初期欠陥が影響していたものと考えられる。以上から、0.6%程度の鉄筋比でひび割れの制御が十分に可能であることが示唆された。

水圧 7.5 MPa 時のリングゲージで得られたひずみ分布を、小リング、中リング、大リングを重ねて図-5に示す。同図から、ケース1およびケース2では、それぞれ図中の上側と左側のひずみが増大しているが、ひび割れが試験体表面近くまで到達していないケース3では、ひずみ分布は均一になっていることがわかる。

水圧 7.5MPa 時の変位計測結果を図-6に示す。同図から、ケース1では図中の上側に試験体表面に達するひび割れが入ったことで、試験体の変形は左右に広がり、ケース2では左側にひび割れが入ったことで上下に変形しているが、これらの結果は、図-5に示したリングゲージによるひずみの局所化の方向と整合していることがわかる。

図-7にケース3の水圧-鉄筋ひずみ関係を示す。鉄筋ひずみ計測位置は、リングゲージのうち中リングと一致していることから、同図には中リングによる計測結果をコンクリートひず

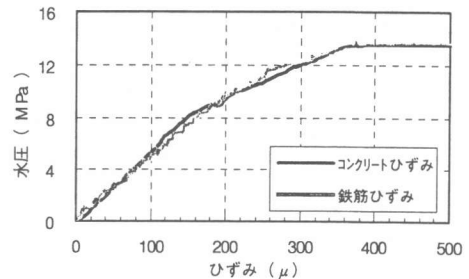


図-7 水圧-鉄筋ひずみ関係 (中リング位置)

みとして示した。同図から、リングゲージによるコンクリートのひずみは鉄筋ひずみと一致していることがわかる。

以上より、今回考案したリングゲージによるコンクリート内部のひずみ計測の信頼性が確認できたと判断される。

3. 非線形 FEM による解析的検討

3.1 解析手法および解析モデル

高水圧を受ける比較的低鉄筋比の RC 構造体のひび割れ挙動を解析的に検討するために、非線形 FEM による実験シミュレーションを行なった。解析に用いたプログラムは、岡村・前川らによる「WCOMD-SJ (Ver. 7.2)」である²⁾。

図-8に解析モデルを示す。本実験においては、高さ方向2箇所で行なったリングゲージの計測結果に差異がほとんどみられなかったことから、試験体の中央断面付近がほぼ平面応力状態にあると考え、解析はこの平断面を対象に二次元平面応力モデルで行なった。解析モデルは平面内の対称性を考慮して 1/4 モデルとし、コンクリート部分は8節点アイソパラメトリック

要素を用いた RC 要素，ケーシング鋼管は弾性要素とした。要素分割は，内水圧作用時の主応力の流れを考慮して，ケーシング鋼管に対して円周状と放射状とした。境界条件は，側方および下方をそれぞれ鉛直および水平ローラーとした。

また，図-9 に示すように，鉄筋比 0.1% のケース 2 については，その鉄筋配置から，鉄筋とコンクリートの付着が期待される RC ゾーンと期待できないプレーンゾーンに分けてモデル化した。RC ゾーンの範囲については，An らが提案した式³⁾に基づき 12cm とした。鉄筋比 0.6% のケース 3 では，試験体全体を付着が期待できる RC ゾーンとした。解析で用いた材料物性値については，表-1 に示す値を用いたが，これらは，本実験に際して実施した材料試験結果を基に設定したものである。

3.2 非線形 FEM による解析結果

水圧 7.5 MPa 時のひび割れ状況を図-10 に示す。同図に示すひび割れは，主引張ひずみの大きさをその直交方向で表示したものである。同図から，いずれのケースも，ケーシング廻りではひび割れが放射状に発生していることがわかる。

鉄筋比の違いによるひび割れ性状を比較すると，ケース 1 およびケース 2 では，ひび割れが一箇所に集中する傾向がみられ，ケース 1 では，最大主引張ひずみが 2800μ に達している。一方，ケース 3 では，その傾向は見られず，ひび割れの分布が均一に広がっていることがわかる。

水圧-コンクリートひずみ関係を示した図-

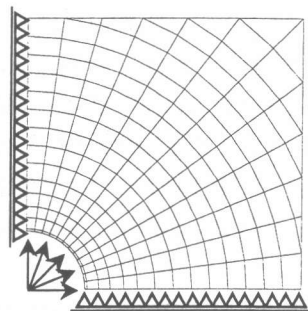


図-8 解析モデル

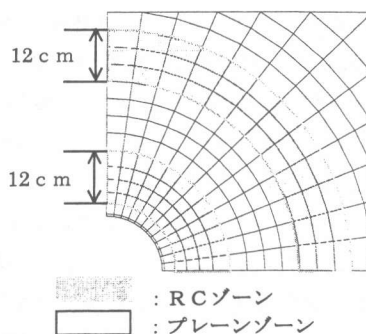


図-9 鉄筋比 0.1% の RC ゾーンの範囲

表-1 解析用材料物性値

【コンクリート】				
	圧縮強度	引張強度	単位体積重量	ポアソン比
ケース1(鉄筋比0.0%)	23N /mm ²	2.2N /mm ²	23.5kN /m ³	0.2
ケース2(鉄筋比0.1%)	26N /mm ²	2.4N /mm ²		
ケース3(鉄筋比0.6%)	26N /mm ²	2.4N /mm ²		
【鉄筋】			弾性係数 189000N /mm ²	
			降伏強度 384N /mm ²	
			単位体積重量 76.9kN /mm ³	
【ケーシング鋼管】			弾性係数 170000N /mm ²	

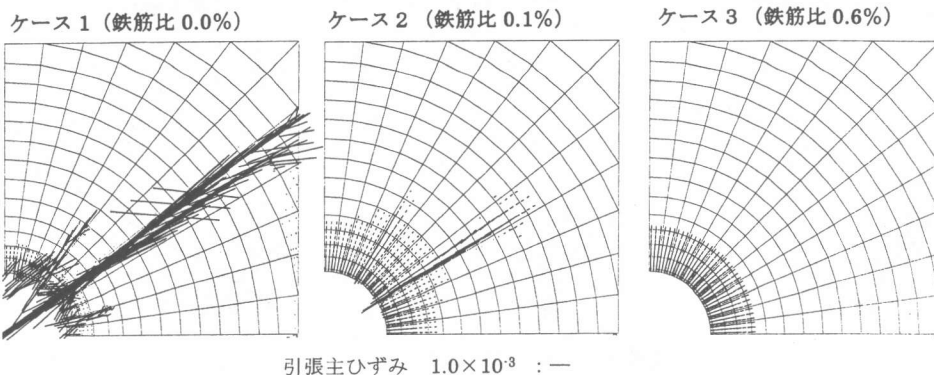


図-10 鉄筋比の違いによるひび割れ図 (水圧 7.5MPa)

4 から、解析結果は各ケースとも、水圧の増加に伴いコンクリートのひずみは増加するが、ケース 1 およびケース 2 では、ひび割れが試験体表面近くまで到達するのに伴って 4.8 MPa および 7.2 MPa からコンクリートのひずみが急増している。ひび割れが試験体表面近くまで到達するのに伴いひずみが急増する傾向は、実験結果と良く一致している。ただし、解析は、最終的にひび割れが局所化する方向については実験結果を再現できなかった。また、実験ではケース 1 とケース 2 で、ひずみが急増する荷重レベルにほとんど差異がみられなかった（ケース 1 で 7.3 MPa、ケース 2 で 7.5 MPa）が、解析では、両者の荷重レベルに違いがみられた。この理由としては、無筋コンクリートにおけるテンションソフトニングモデルの適用性に課題がある可能性が考えられる。

図-11 にケース 2 の水圧の増加に伴うひび割れの状況を示す。同図に示すとおり、ひび割れが試験体の表面近くまで到達した時にひずみが急激に増加している。一方、ケース 3 の解析では、このようなひずみが急増する傾向はみられない。以上より、高水圧を受ける比較的马ッシブなコンクリート構造では、引張側の限界鉄筋比相当の鉄筋（今回の場合 0.6%）が配置されていれば、ひび割れの分散性、すなわち、ひび割れ制御を十分期待できることが解析結果からも確認された。

4. まとめ

- ① リングゲージをコンクリート内部に埋設す

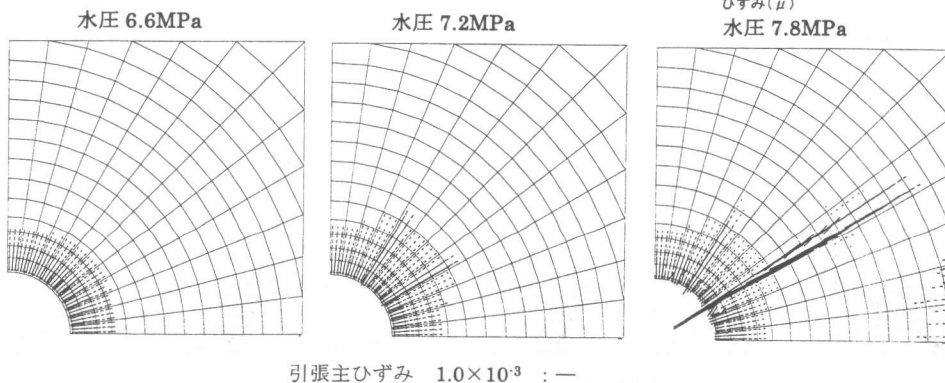


図-11 荷重の増加に伴うひび割れ性状と水圧-コンクリートひずみ関係との対応（ケース 2）

ることで、コンクリート内部のひずみを精度良く計測することができた。今回考案したリングゲージによるひずみ計測方法は、他のマスコンクリート構造物のひずみ計測に応用できるものと考えられる。

- ② 実験およびシミュレーション解析から、高水圧が作用した場合における、コンクリート内部のひずみを評価することができ、鉄筋比の違いによるひび割れ性状を把握することができた。また、鉄筋比が引張の限界鉄筋比程度の 0.6% では、ひび割れの制御が十分に期待できることが示唆された。

謝 辞 東京大学前川宏一教授には貴重なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤、飯塚、小山、南部：高水圧を受けるコンクリート構造物の非線形性状について、コンクリート工学年次論文集，2000.6
- 2) 岡村、前川：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版，1991
- 3) 安、前川：SHEAR RESISTANCE AND DUCTILITY OF RC COLUMNS AFTER YIELD OF MAIN REINFORCEMENT、土木学会論文集，1998.2