

論文 円筒型 RC 構造物の局所変形箇所における画像計測

酒井理哉*1・松尾豊史*1・鬼束俊一*2・原田光男*3

要旨: 大型の構造実験における局所的な変形挙動を捉えるために、高精度の画像データを利用した格子法による画像計測システムを開発した。円筒型 RC 構造物 (LNG 地下タンク躯体模型) の水平載荷試験に適用し、変位計測との比較により計測精度を検証し、円筒側面のひずみ分布の可視化から、ひずみが局所化する詳細な挙動を明らかにした。

キーワード: 格子法, 画像計測, ひずみ可視化, LNG 地下タンク, ひずみの局所化

1. はじめに

比較的大きなスケールでの構造実験においては、変位計測を密にしても局所化する変形を完全に捉えることは難しく、また破壊に至るような大変形域ではひずみゲージなどを用いて直接計測することは不可能である。このため、破損モードを正しく把握するためには非接触の計測方法の開発が必要である。

一方、近年 CCD センサーなどの改良が進み、画素数の多いデジタルカメラ (以下、デジカメ) や走査線数の多い高品位 TV (いわゆるハイビジョン; 以下、HDTV) などの登場により精細な画像撮影ができるようになった。また、計算機の性能向上が著しいため、画像データの処理や複雑な画像解析手法も容易に扱えるようになってきた。

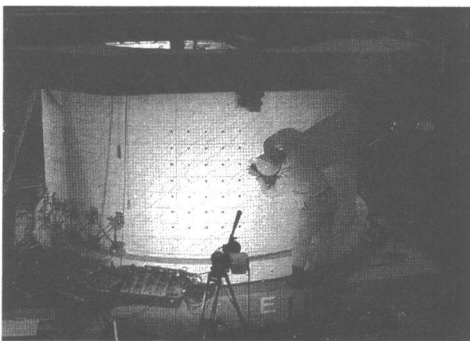


図-1 ターゲット取り付け状況

このような状況を踏まえ、本論ではデジカメと HDTV カメラを用いて撮影した高精度画像を利用し、格子法¹⁾による画像計測手法を開発した。円筒型 RC 構造物 (LNG 地下タンク躯体模型約 1/20 スケール; 以下円筒試験体) の水平載荷試験に適用し、変位計測との比較により精度を検討した。円筒試験体側面に生じる変形を計測し、ひずみの局所化する状況を明らかにした。

2. 画像計測方法

格子法によるひずみ計測は、被写体に取り付けたターゲットの動きをデジカメなどで撮影し、画像処理により位置を測定して変位・ひずみを算出する方法である。この方法では被写体に取り付けたターゲット間の平均的なひずみを測定することになるが、変形が集中する箇所の周辺を面状に捉えることができ、破壊に至る大変形域まで計測が可能である。計測手順は次の通りである。

2.1 画像撮影・取り込み

図-1 に示すように円筒試験体にターゲットを格子状に取り付け、表-1 に示すカメラを用いて、その移動量を撮影した。ターゲットはプラスチック製の赤色の円盤 (直径 26mm) で、

*1 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所 構造部 (正会員)

*2 東電設計 (株) 技術開発本部土木技術部 (正会員)

*3 東京電力 (株) 建設部土木・建築技術センター 火力原子力土木技術グループ (正会員)

簡単に剥離しないように、コンクリート用ねじで試験体にしっかり定着させた。撮影した画像データは画像処理用の計算機に静画像で取り込んだ。

表一 撮影に用いたカメラ

カメラ	画素数(ピクセル)
デジカメラA	1146×1528
デジカメラB	1536×2048
HDTVカメラ	1076×1920

2.2 画像処理

画像処理によりターゲットのみを抽出し、その重心座標を求める。画像処理には汎用ライブラリーを使用し、図-2に示すような手順によりターゲット座標を求めた。画像上の円形のターゲットには面積があるため、重心座標は画素サイズより小さいサブピクセルの精度で算出可能である。

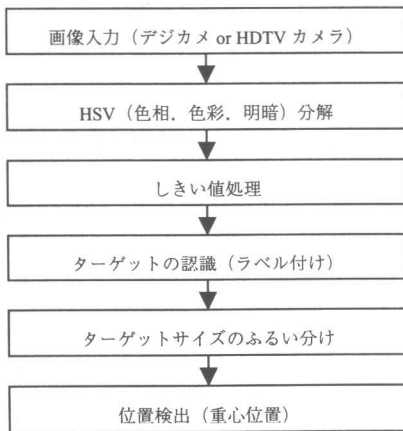


図-2 画像処理手順

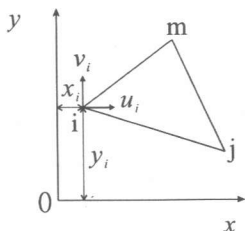


図-3 定ひずみ三角形要素

2.3 ひずみの算出

得られたターゲット座標位置を節点とする定ひずみ三角形要素を用いた有限要素モデルによりひずみを算出する(図-3参照)。

ひずみの算出には以下の式(1)を使用した。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

求められたひずみは、成分毎にコンター図などで図化処理を行う。ひずみの図化まで含めたデータの処理は、汎用可視化ソフト上に機能追加して行った。

3. 計測の概要

3.1 計測対象

東京電力が実施した円筒試験体の水平載荷試験に、本画像計測を適用した。本論は、画像計測によるひずみ測定を主眼としているため、試験の内容は概要のみ示す。図-4に示すような形状の鉄筋コンクリート製の円筒試験体について、試験体上面に載荷用フレームを取り付け、ジャッキとアクチュエータを併用して水平力を繰り返し載荷する。

円筒試験体は2体使用し、表-2に示すような2ケース(正負交番載荷, 直交2方向載荷)で載荷を行った。

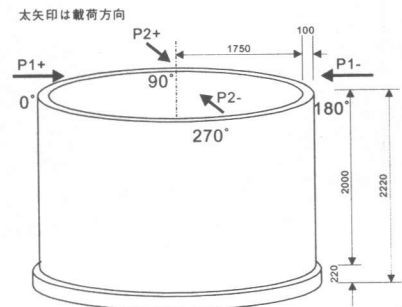


図-4 円筒試験体 (単位 mm)

表-2 荷重パターン

試験体	荷重方法	荷重方向 (繰返し回数)
No.1	正負交番	0° -90° (1.5 サイクル)
No.2	直交2方向	P1: 0° -180° (1 サイクル) P2: 90° -270° (1.5 サイクル)

3.2 計測範囲

図-5~6に示すような範囲を対象に画像計測を行った。計測範囲は、前述の荷重方向を考慮して、最終的にせん断変形が大きくなると予測される箇所を着目し、No.1 試験体は荷重軸 (0° -180°) 方向から 90° 離れた円筒側面、No.2 試験体では 180° ~225° 付近について、それぞれのひずみの分布状況を面状にカバーした。表-3 に各計測範囲に使ったカメラと、撮影解像度を示す。この計測範囲内にターゲットを 160mm ピッチで配置した。なお、No.1 試験体では、荷重軸に対して対称な位置に設置した、変位計による計測結果との比較を行い、画像計測

精度の検証も行った。

表-3 使用カメラと撮影解像度

計測箇所	使用カメラ	1画素当たりの面積 mm ²
①	HDTV カメラ	0.25
②	デジカメラA	0.39
③	デジカメラA	0.39
④	デジカメラA	0.39
⑤	デジカメラB	0.22
⑥	デジカメラB	0.22

4. 計測結果

4.1 変位計計測結果との比較

No.1 試験体で計測された、画像計測と変位計により得られたせん断ひずみ履歴の比較について図-7に示す。せん断ひずみは頂部相対変位に比例した応答をしており、画像計測結果は変位計の計測とよく一致した。

図-8 に変位計と画像計測で得られたひずみ

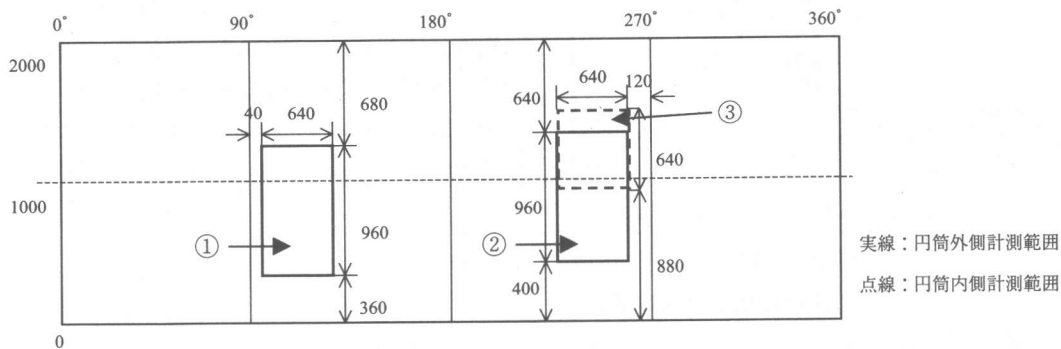


図-4 : No.1 試験体計測範囲 (展開図: 単位 mm)

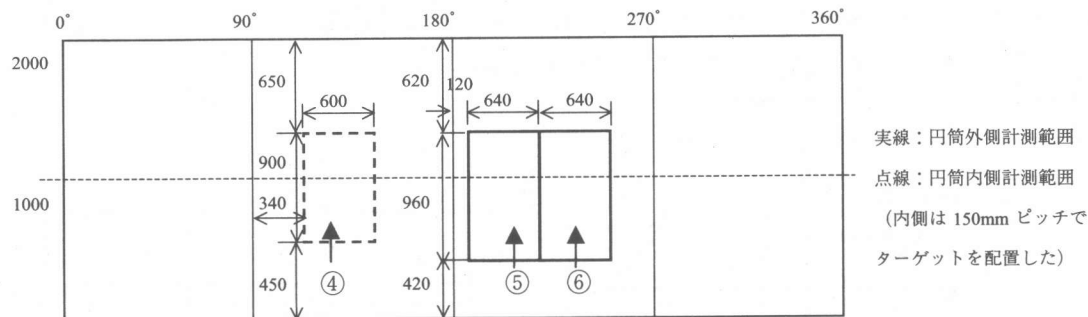


図-5 : No.1 試験体計測範囲 (展開図: 単位 mm)

(せん断, 主引張) の比較を示す。引張主ひずみは, 変位計によるひずみよりやや大きめの結果が得られているが, 概ね一致している結果になった。

圧縮主ひずみについてのひずみ履歴を図-9に示す。圧縮主ひずみについては, 画像計測箇所に対応した計測範囲で得られた結果とは一致

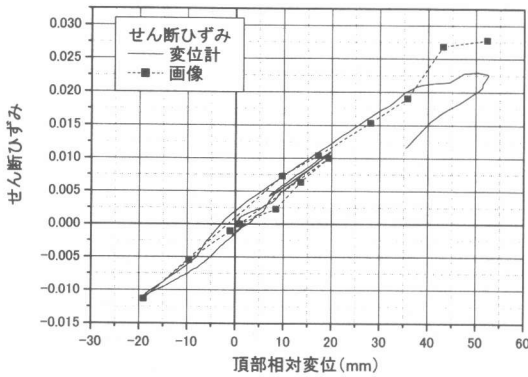


図-7 ひずみ履歴 (せん断ひずみ)

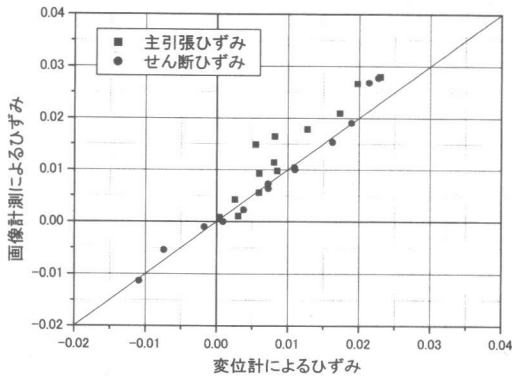


図-8 変位計と画像計測によるひずみの比較

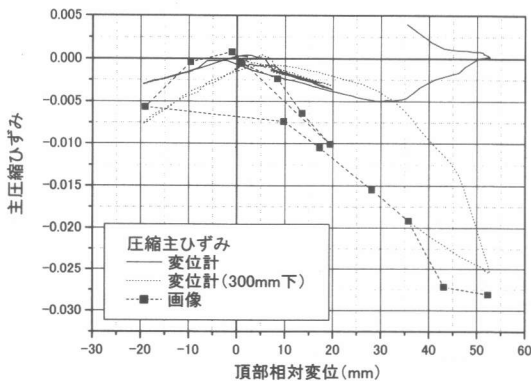


図-9 ひずみ履歴 (主圧縮ひずみ)

せず, そこより 300mm 下側で計測された変位計測結果と比較的良好な整合を示した。円筒試験体の変形は载荷軸に対し完全に対称でなく, さらに圧縮主ひずみの局所化の影響によりこのような結果になったものと思われる。

画像計測の計測精度は, ターゲットを認識する際に撮影画像の解像度の影響を受けるため, 現状の手法では多少の誤差を含んでいる。より高精度な画像を撮影できるカメラを使用し, ターゲット認識方法を改良するなど, 今後は精度向上の検討が必要である。また, 円筒状の試験体に対し平面に写像してひずみを算出しているための誤差も存在するが, 今回の円筒試験体は半径が十分大きいいため, 計測範囲ではそれほど曲率の影響を受けないとみなした。複雑な変形計測へ本手法を適用する場合には3次元座標計測への拡張が必要である。

4.2 ひび割れ幅とひずみの関係

No.1 試験体の 270° 円筒試験体外側に発生したひび割れについて, クラックと直交する方向に取り付けた π ゲージによる計測結果と, 画像計測より得られた引張主ひずみの比較を行った結果を図-10に示す。なお, π ゲージで測定された変位はゲージ長 50mm で割ってひずみに換算した。

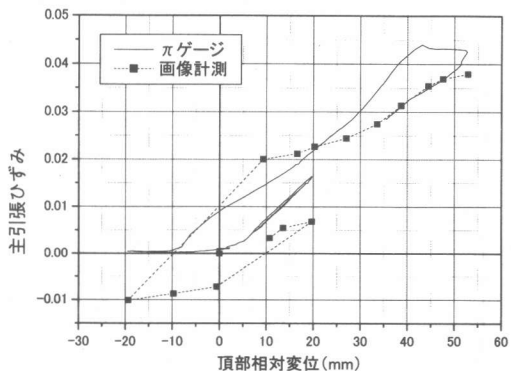


図-10 π ゲージとの比較

画像計測によるひずみは、160mm ピッチで配置したターゲット間の平均的なひずみであり、ゲージ長の異なる π ゲージから得られたひずみと比較することは難しいが、傾向を捉える程度の計測はできた。画像計測によりひび割れ幅を評価するには、計測精度の向上とターゲット間隔を密に配置するなどの工夫が必要である。

4.3 試験体の変形とひずみ分布

(1) No.1 試験体

No.1 試験体の水平載荷試験では図-11 のような荷重変位曲線が得られた。図中の番号に対応する変形状況について、ひずみのコンター図を用いて示す。

円筒試験体内側 (270° 付近) の主圧縮ひずみの分布図を図-12 に示す。最大荷重付近では -2% 程度の大きさで一様に分布しているが、荷重低下後には円筒試験体の中央断面付近に局所化し、-4% 程度まで達しているのが分かる。

図-13 に円筒試験体外側 (270° 付近) のせん断ひずみ分布図を示す。最大荷重時には 3% 程度のせん断ひずみを生じているが、広い範囲でせん断ひずみが分布し、著しく局所化していく様子は見られない。最大荷重後には、計測範囲の中央よりやや下側に、初期の 45° の傾きで発生したひび割れより緩やかな角度で、7% 程度のせん断ひずみの集中域が顕在化した。

荷重が低下した主な原因は、円筒試験体にこれらの変形が局所的に集中し、破壊が生じたためと思われる。

270° 円筒外側について、最大荷重後のひび割れの様子と主ひずみの分布を図-14 に示す。荷重履歴を受けているため主ひずみの向きは複雑な分布になっているが、せん断変形の集中域ではひび割れに直交した向きに主ひずみが大きく分布している。この主ひずみによりひび割れが拡幅したことが分かる。

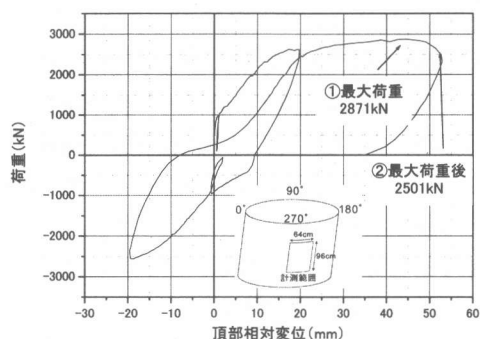


図-11 荷重変位関係 (No.1 試験体)

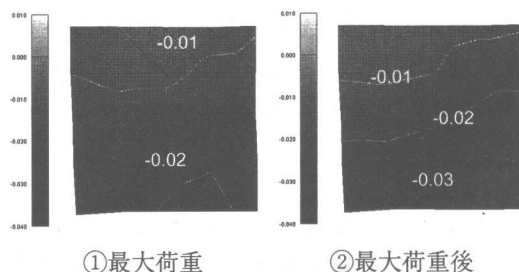


図-12 270° 内側計測点のひずみコンター (主圧縮ひずみ)

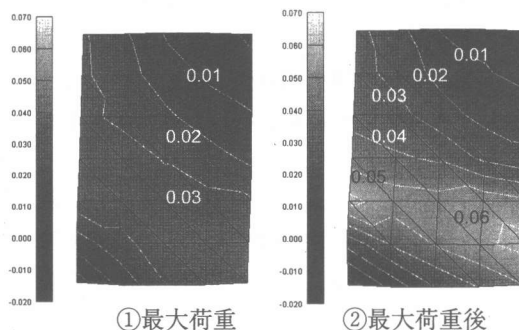


図-13 270° 外側計測点のひずみコンター (せん断ひずみ)

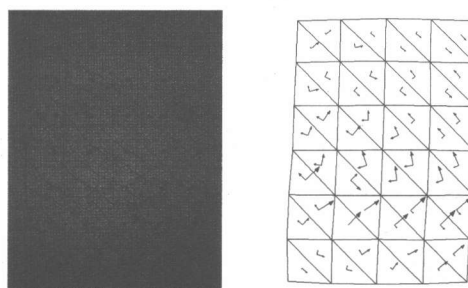


図-14 ひび割れ状況と主ひずみ分布図 (②最大荷重後)

(2) No.2 試験体

No.2 試験体については、直交2方向荷重のうちP2荷重のみ計測し、最終的な変形挙動について調べた。図-15にP2荷重時の荷重変位関係を示す。同図中に番号で示した時点でのせん断ひずみ分布を図-16に示す。

せん断変形の様子はNo.1試験体の結果と同様の傾向を見せているが、ひずみの大きさは10%以上(変形の向きが逆のため、正負が反転している点に注意)まで達した。また、表面が剥離した部分も見られ、計測画像も一見して損傷程度が大きく、多方向荷重による影響が出ているものと思われる。

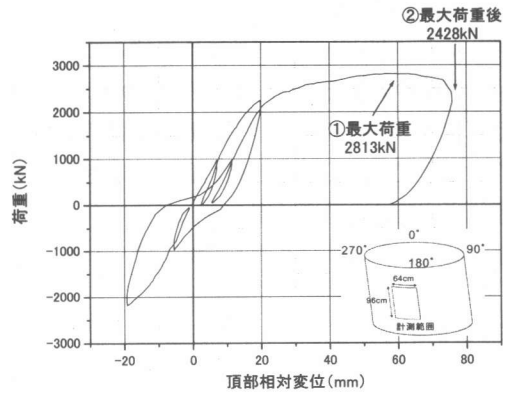


図-15 荷重変位関係 (No.2 試験体)

5. まとめ

格子法による画像計測システムを開発し、円筒型 RC 試験体水平荷重試験に適用した。結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 変位計計測結果との比較により計測の精度を確認し、開発した手法がほぼ妥当であることを示した。
- (2) 円筒試験体の側面部の変形挙動について、ひずみ分布の可視化を行い、局所化する様子を明らかにした。

大型の構造実験において局所化する変形を把握するためには、従来の変位計による計測方法ではコストがかかり、機器の設置に労力が必要であったが、デジタル画像技術を応用することで、比較的容易に詳細な計測が可能になった。今後は精度向上と3次元計測への拡張が課題である。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)電力計算センターの山崎氏に多大な協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢川, 松浦, 安藤: 点認識画像処理を用いた非接触ひずみ解析法, 日本機械学会論文集 (A

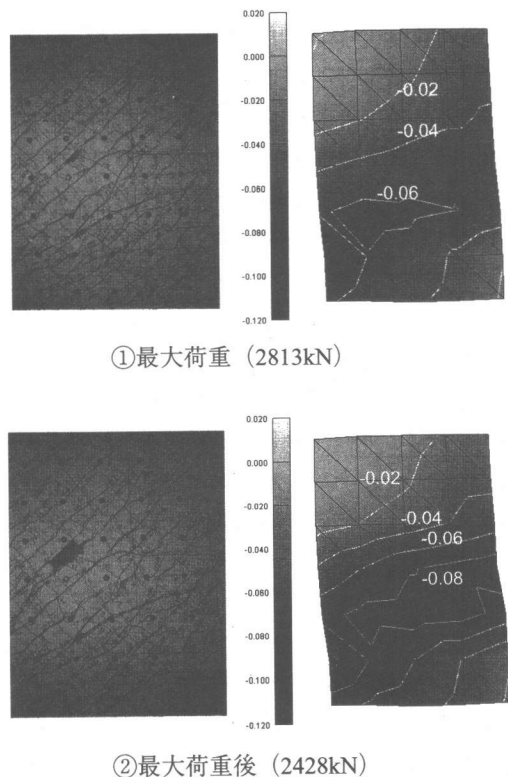


図-16 せん断ひずみコンター図

編), 第49巻447号, pp.1435-1443. (1983)