

# 論文 画像計測法を用いた RC はりの変形特性の測定

宮内 克之<sup>\*1</sup>・荒川 裕介<sup>\*2</sup>・秋本 圭一<sup>\*3</sup>・服部 進<sup>\*4</sup>

**要旨**：鉄筋コンクリートはりに対する載荷試験を行い、デジタル画像を用いた計測法による変形特性の測定の可能性および測定精度について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。(1)画像計測法により十分な精度で変形量および曲率が測定可能である。(2)コンクリート表面に計測用のターゲットを貼り付けても実用上十分な精度で変形量および曲率が測定可能である。(3)基準板の測点間の距離を基準としてバンドル調整を行っても実用上問題ない精度が得られる。

**キーワード**：画像計測, デジタルカメラ, RC はり, 変形, 曲率

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の耐震設計, 特に性能規定型の設計や耐震補強法を精度良く確立するためには, 部材の塑性域での変形性状を詳細に検討, 把握しておくことが必要である。ところが, RC 部材の載荷試験を実施する際には, 荷重および載荷点変位が計測されるのが一般的であり, 曲率, 柱部鉄筋の基礎からの拔出し量などは, 通常では測定が難しいことに加えて, 経費と労力がかかり, 詳細に計測される機会は少ない。しかし, これらの変形特性は RC 部材の塑性域での挙動を解明するためには, その詳細を知る必要がある。写真測量を応用した画像計測法を用いると, 同時に多数の測定点を観測でき, この問題の解決策の一つとして有望と考えられる。

そこで本研究は, 画像計測法を用いることによる RC 部材の変形特性の測定の可能性と測定精度について, はり部材を対象に検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因

計測の対象としたのは, 表-1 に示す 2 体の RC はりである。実験要因は, せん断補強筋の有無およびスケール調整を行うための基準尺の有無とした。引張鉄筋には D16 (SD345,  $f_{sy}=395 \text{ N/mm}^2$ ), せん断補強筋には D6 (SD295A) を使用した。また, コンクリートには呼び強度 24 のレディーミクストコンクリートを使用した。試験体の形状寸法の一例 (B-1) を図-1 に示す。

載荷は万能材料試験機に曲げ試験用の載荷台をセットして行った。載荷方法は, 引張鉄筋が降伏するまでは荷重制御とし, 引張鉄筋が降伏した後はスパン中央のたわみを基準とした変位制御とした。載荷中はスパン中央, 載荷点および両支点の変位 (S-1 においては載荷点を省略) を変位計により測定した。

表-1 実験要因

試験体	引張鉄筋	せん断補強	基準尺
B-1	2-D16	D6-100mm	無
S-1	2-D16	—	有

\*1 福山大学 工学部建設環境工学科教授 博士 (工) (正会員)

\*2 福山大学 大学院工学研究科土木工学専攻

\*3 四国職業能力開発大学校 生産電子システム技術科教授 博士 (工)

\*4 (有) 画像計測研究所 代表取締役社長 工博

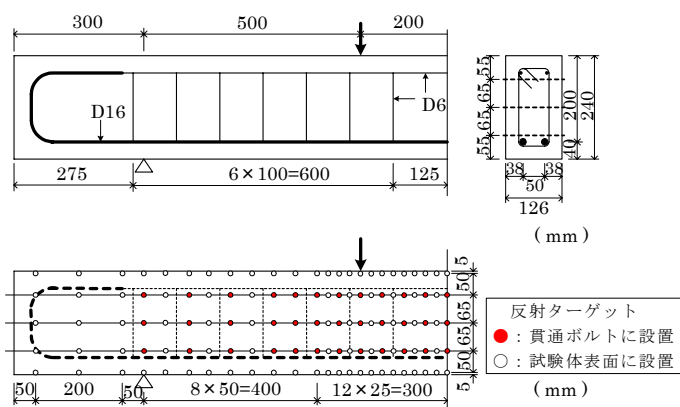


図-1 試験体の形状寸法およびターゲットの設置位置

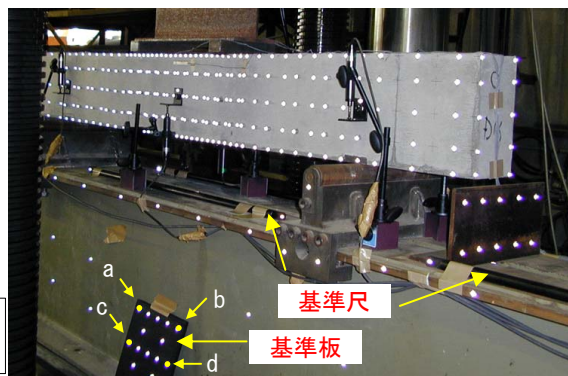


写真-1 試験の様子 (S-1)

## 2.2 測定点の設置

RCはりの変形量を計測するための測定点は、表側には、はり高中央、上下縁から55 mmの位置にφ6 mmの全ネジボルトをはりに貫通して設置し、これに直径5 mmの専用の反射ターゲットを貼り付けた。はりの上下縁から5 mm、はり高中央および上下縁から55 mmの位置にはコンクリート表面にも反射ターゲットを貼り付けた。はりの裏側に関しては、はり高中央、上下縁から5, 55 mmの位置に、軸方向に100 mm間隔で貼り付けた。さらに、載荷前後の相対変形量を求める際の不動点とするため、載荷台にも表裏合わせて72点の測定点を設置した。また、表裏で撮影された写真を接続するために、はりの両端断面およびその傍らに設置した鋼材にも測定点を設けた(図-1、写真-1参照)。

基準尺を設置した場合とそうでない場合との測定精度を検証するため、試験体S-1に関しては、基準尺を6本(長さ約1000 mmの尺2本、約500 mmの尺2本、約300 mmの尺2本)設置した。

## 2.3 撮影方法

外部標定を行うための基準板(写真-1中の黒板)を試験体の傍らに設置し、左斜め約60°の上下、左斜め約40°の上下、正面、右斜め約40°の上下、右斜め約60°の上下の9ヵ所から2枚ずつ、計18枚の写真を撮影した。なお、同一位置の撮影においては、カメラパラメータ算

定の精度向上のため、それぞれカメラを90°回転させた。はりの裏側についても同様に撮影を行い、計36枚の写真を1セットとした。撮影距離は約2~4mである。写真の撮影は、載荷前の状態(以下、基準状態)および所定のたわみについて行った(計測段階については図-3参照)。使用したカメラは、約600万画素のデジタルカメラで、撮影スペースの関係で焦点距離が18mmのレンズを採用した。撮影は絞りをできるだけ絞り、ストロボを用いて行い、画像を撮影段階で可能な限り2値化し精度の向上を図った。撮影に要した時間は、1セット36枚で3~5分程度であった。

## 3. 変形量の計算方法

### 3.1 座標計算の方法

各段階における1セット36枚の写真から、以下の手順<sup>1)</sup>により各測定点(ターゲットの中心)の三次元座標値を算出した。

#### (1) 外部標定要素の取得

基準板(写真-1中の黒板)に設置された16点のターゲット(座標はあらかじめ測定されている)の像から、以下の手法により各々の写真の外部標定を行った。

- 1) DLT(Direct Linear Transformation)によって、16点のターゲットの空間座標から外部標定要素の初期値を得る。
- 2) DLTの結果を初期値として単写真標定を行

い、外部標定要素を決定する。

### (2) ターゲット像の重心座標の計算

- 1) 前方交会法により全写真についてターゲット像の重心座標を計算する。
- 2) カメラパラメータも同時に求める自己校正付バンドル調整により、全ターゲットの三次元座標値を計算する。

### (3) 座標系の変換

基準板の座標系に基づいた各ターゲットの三次元座標値を、試験体の XYZ 座標系に変換する。

## 3.2 変形量の計算

荷重が作用しても、載荷台はほとんど変形が生じないことから、この部分の測定点（像の状態が良い 20 点）の座標を不動点として、基準状態（載荷前の状態）に対する各変形時における測定点の相対座標値（変形量）を最小二乗法によって算出した。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 測定精度（内的精度）の確認

#### (1) 座標値の算定精度

バンドル調整を行う際には、各測定点の座標

値を算定する像の数（写真の枚数： $n$ ），および写し込まれている各測定点の像の良否が座標値算定の精度に大きく影響を及ぼす。ここでは、写真の枚数に関しては  $n > 2$  について行った。また、像の良否に関しては残差（CCD 画面上における像の、共線条件式 [カメラレンズの中心、像、計測点が同一直線上にある] からのずれ）の大きさによって管理した。

図-2 は、 $n > 2$  の場合に関して、残差の大きさによる除去レベル（閾値）を下げた場合の、全ての像の X 座標値に関する残差の分布と、誤差の要因となっている像の状態の一例を示したものである。これより  $n > 2$  の場合、閾値が  $0.0015 \text{ mm}$  であれば不良な像による大誤差もほとんど除去され、実用的な精度が得られることがわかる。残差の 2 乗平均の平方根は約  $0.03 \sim 0.04 \text{ mm}$  程度であった。なお、 $n$  の値を大きくし、閾値を下げれば座標値がより精度良く算定されると思われるが、逆に変位計や載荷点の陰になって像の数が少ない測定点に関しては座標値が得られなくなる。したがって、以下においては、 $n > 2$ 、閾値が  $0.0015 \text{ mm}$  の場合の算定結果を使用することとした。

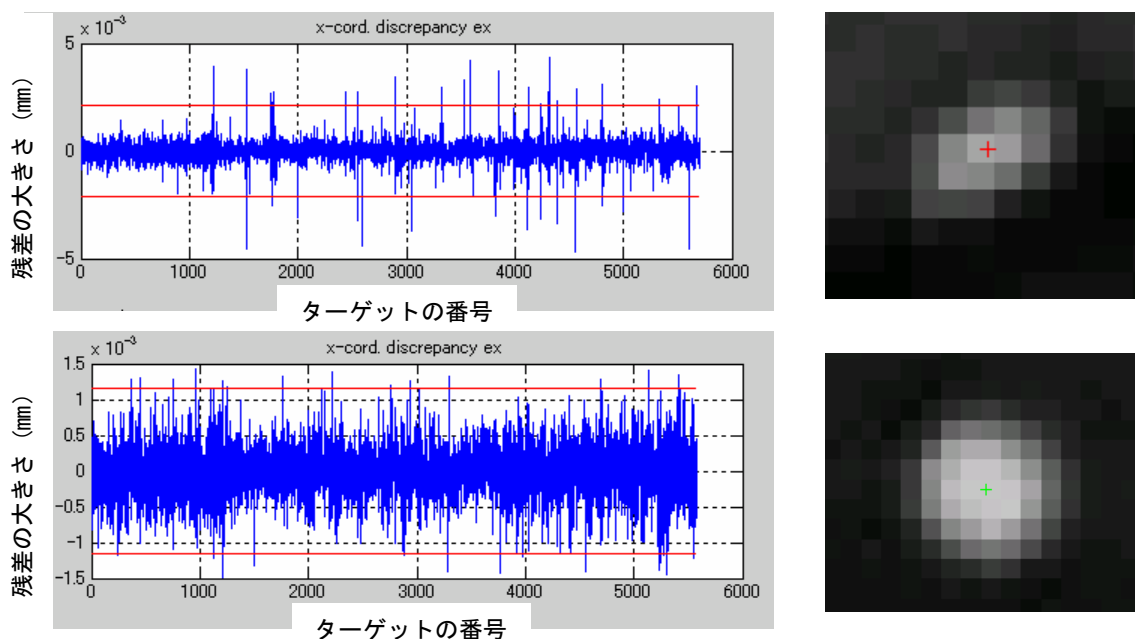


図-2 残差の分布 (X 座標値) と像の状態の一例

(残差の分布：上：閾値  $0.005 \text{ mm}$ ，下：閾値  $0.0015 \text{ mm}$  像の状態：上：不良，下：良好)

## (2) 変形量の算定精度

変形量を求めたのは、図-3 に示す計 7 段階 (B-1 : 4 段階, S-1 : 3 段階) である。今回の実験の場合、前面が開放型の装置による実験<sup>2)</sup>とは異なり、支柱等の障害物が存在するため、測定精度は低下することが考えられる。しかしながら、基準状態に対する不動点の重合わせの誤差は $\sigma = 0.022 \sim 0.033$  mm 程度であった。本研究における各測定点の変形量の算定精度は概ね $\sigma = 0.03$  mm 程度と考えられ、実用上十分な精度で計測ができています。

### 4.2 基準尺を用いない場合の測定精度

基準尺を使用せずに基準板の測点間の距離 (a-b : 198.900 mm および c-d : 198.725 mm : 写真-1 参照) を基準としてバンドル調整を行った場合の精度を、S-1 に関して基準尺の寸法との比較により行った。得られた座標値から算定される基準尺の長さ、基準尺の実長さとの比は、平均で 0.9993~0.9996 の範囲であった。基準尺を使用せずに基準板の座標値を用いてバンドル調整を行った場合でも、かなりの高精度で座標値が算定できていることがわかる。この種の試験であれば基準尺を使用せず、基準板の測点間の距離を長さの基準としてバンドル調整を行っても、実用上問題が無いものと考えられる。したがって以下においては、S-1 に関しては基準尺を用いた場合の、B-1 に関しては基準尺を用いない場合の値を使用した。

### 4.3 たわみ測定の精度 (外的精度)

画像計測法により、はりのたわみがどの程度正確に計測できているかどうかの確認を、図-3 に示す各段階に関して変位計による測定値との比較により行った。図-4 は、画像計測法と変位計の測定値の比較をスパン中央に関して示したものである。たわみが大きくなると両測定法による差が若干大きくなる傾向はあるものの、画像計測法による測定によって、たわみは精度良く測定されているものと思われる。

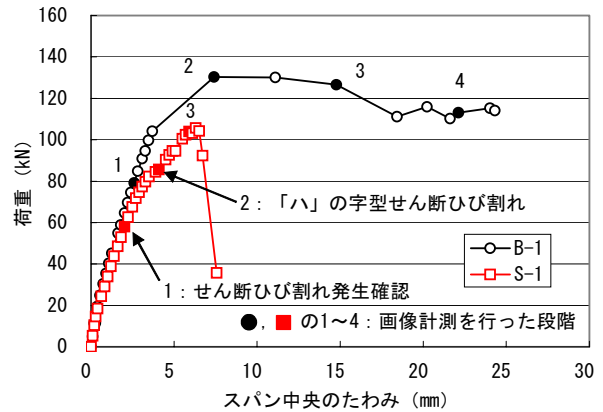


図-3 荷重～たわみ関係と計測段階

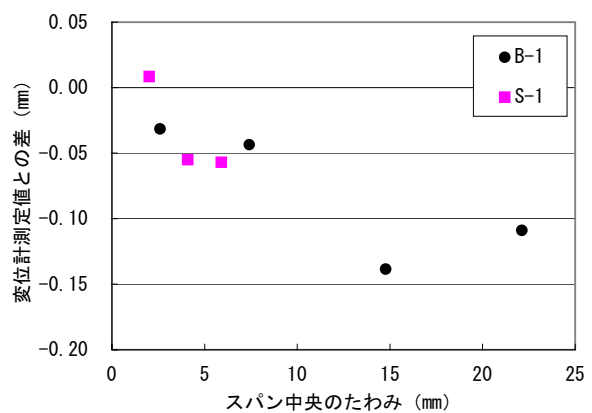


図-4 変位計の測定値との差

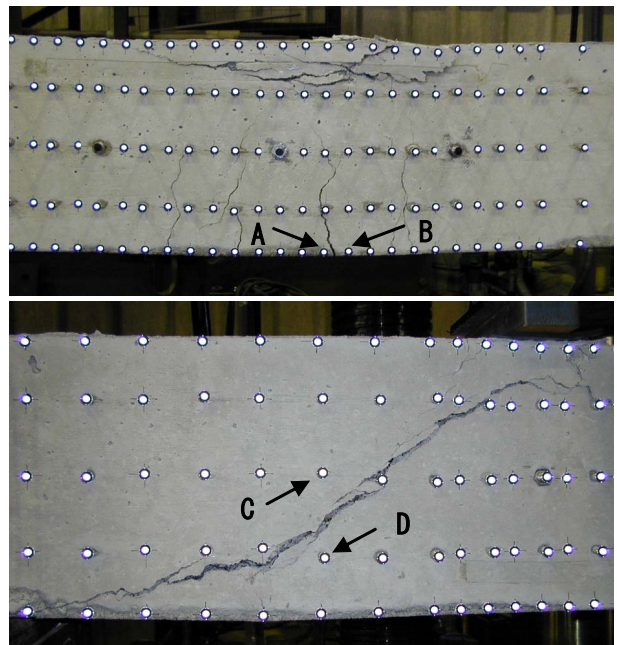


写真-2 破壊状況 (上 : B-1, 下 : S-1)

#### 4.4 破壊状況と変形特性

写真-2 に各はりの破壊状況を示す。また、図-5 に B-1 の曲げひび割れ幅(写真-2 における A-B 間の距離) の変化の様子を、図-6 に S-1 のせん断ひび割れ幅の垂直成分(写真-2 における C-D 間の距離) の変化の様子を示す。B-1 は曲げひび割れが大きく発達した後、圧縮側コンクリートが圧縮破壊した。S-1 は典型的なせん断破壊を示した。

図-7 は各はりの破壊前のたわみ分布を示したものである。B-1 に関しては、せん断スパンにおいては、はり高さ方向による差はほとんど無く、せん断ひび割れが発達していないことが伺われる。一方曲げスパンにおいては、上縁の測定点のたわみが小さくなっており、この部分でコンクリートが圧縮破壊し、上方にはらみ出していることがわかる(写真-2 参照)。

S-1 に関しては、せん断スパンにおいてたわみ曲線にずれが生じている。さらに、そのずれもはりの上方へ行くに従ってスパン中央よりで生じており、せん断ひび割れが斜め方向に発生していることがたわみ分布からも推察される(写真-2 参照)。

#### 4.5 曲率分布

図-8 に曲率分布の一例を示す。写真-2 に示す曲げひび割れの位置と曲率の増大位置が良く一致していることがわかる。曲率 $\phi$ は、ターゲットの座標値および変位量を用いて次式により算定した。

$$\phi = \frac{\Delta x_b - \Delta x_t}{D \cdot \Delta b} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta x_b, \Delta x_t$  : 計測区間における測定点の水平方向の相対変位、 $D$  : 測定点間の鉛直距離、 $\Delta b$  : 測定点間の水平距離

##### (1) 測定点の設置条件の差の影響

図-9 は、B-1 の計測段階 4 について、はりの上下縁から 55 mm の位置において、埋め込みボルトに設置したターゲットと、はりのコンクリート表面に貼付したターゲットそれぞれの測定

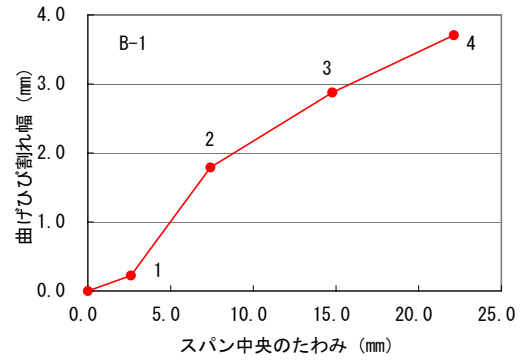


図-5 曲げひび割れ幅の変化 (B-1)

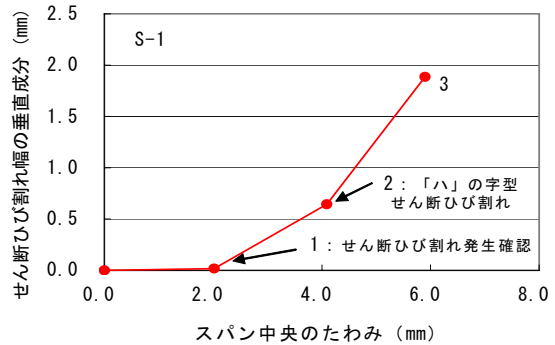
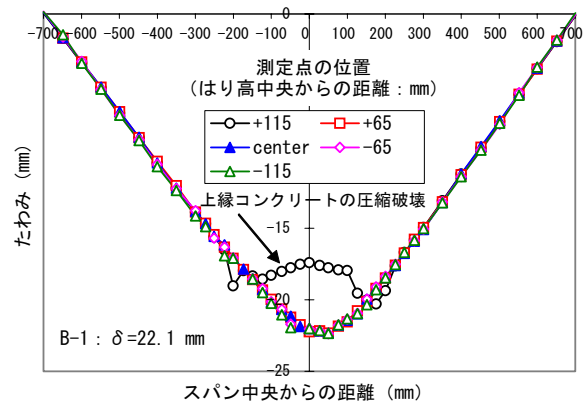
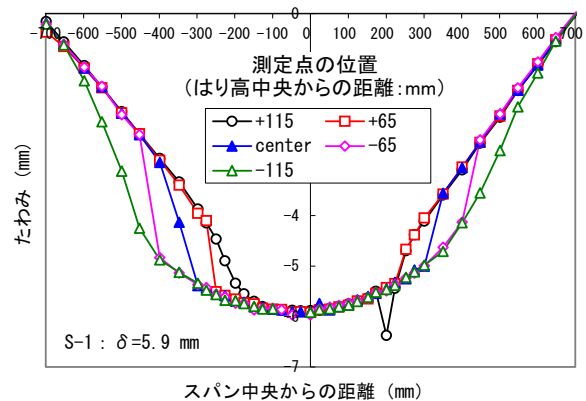


図-6 せん断ひび割れ幅の垂直成分の変化 (S-1)



(a) B-1 : 段階 4



(b) S-1 : 段階 3

図-7 たわみ分布の一例

値を用いて算定した曲率分布の様子を、曲げスパンに関して比較したものである。これより測定位置の差によるずれはあるものの、両者の間にはほとんど差はなく、コンクリートの表面にターゲットを貼付して変形量を測定しても問題ないことが確認できた。

## (2) 測定点の設置間隔が曲率分布の把握に及ぼす影響

測定点の設置間隔が曲率分布の把握に及ぼす影響を検討するために、測定点の設置間隔と曲率分布との関係の一例（B-1：計測段階4）を図-10に示す。測定点の設置条件による差が無ことから、埋め込みボルトに設置したターゲットと、コンクリート表面に貼付したターゲットの両方の測定結果を用いた。図より、測定点の間隔が25、50 mmの場合には、ひび割れ発生等に伴う曲率の変化の様子が十分に把握できている。しかし、間隔が100 mmの場合には変化の様子が十分には把握できていない。本実験の範囲では、有効高さの概ね1/4以下の間隔で曲率を測定すれば、ひび割れ発生等に伴う曲率の変化の様子が十分に把握できるものと考えられる。

## 5. まとめ

画像計測法を用いることによるRC部材の変形特性の測定の可能性と測定精度について、はり部材を対象に検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 画像計測法により十分な精度で変形量および曲率が測定可能である。
- (2) コンクリート表面にターゲットを貼り付けても実用上十分な精度で変形量および曲率が測定可能である。
- (3) 基準板の測点間の距離を基準としてバンドル調整を行っても実用上問題ない精度が得られる。
- (4) 有効高さの1/4以下の間隔で測定点を設置すれば、曲率の変化の様子が十分に把握できる。

## 参考文献

- 1) 秋本圭一，宮内克之，服部進：画像計測法によるコンクリート試験片の変位計測，日本写真測量学会平成15年度年次学術講演会発表論文集，pp.53-54，2003.6
- 2) 宮内克之，秋本圭一：画像計測法を用いたRC柱の変形特性の測定，土木学会第58回年次学術講演会概要集，V-415，pp.829-830，2003.9

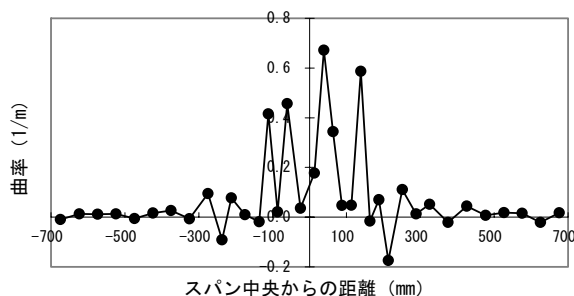


図-8 曲率分布の一例（B-1：段階4）

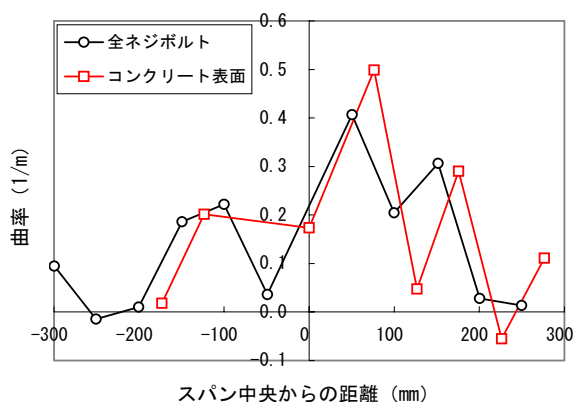


図-9 測定点の設置条件の影響（B-1）

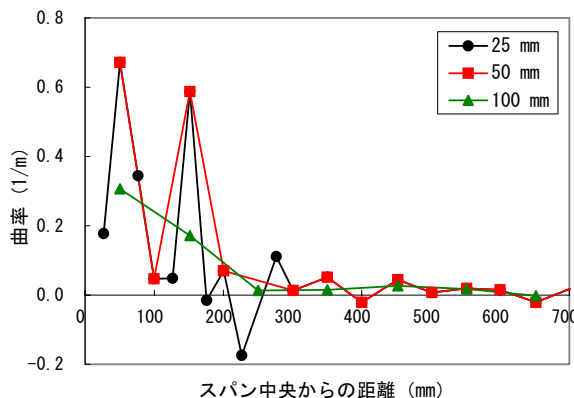


図-10 測定点の設置間隔の影響（B-1）