

論文 計測画像を活用した RC 造柱部材の損傷状態調査法の基礎的検討

若松 諒*1・向井 智久*2・渡邊 秀和*2・衣笠 秀行*3

要旨: 大地震が発生した際には被災建物の調査件数が膨大になることが予想され、現場での目視による調査では時間を要することや立入りが危険な建物の調査が行えないなどの問題がある。本研究では効率的な損傷状態調査法の確立を目的として、ピロティ柱を模擬した試験体を対象に、高解像度写真および点群データを用いた損傷計測を行い、コンクリートのひび割れ幅および浮き剥落の計測手法に関する基礎的検討を行った。高解像度写真計測は 0.50mm 以上のひび割れに対して概ね精度良く計測でき、点群データ計測は概ね実際の損傷状態を捉えており、精度良く計測できることを確認した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 高解像度写真, ひび割れ幅, 点群データ, 浮き, 剥落

1. はじめに

わが国では、近い将来、南海トラフ地震、首都直下地震といった大規模地震の発生が予想されており、膨大な数の被災建物の発生が予想される。一般に地震で建物に被害が発生すると、様々な目的で被災調査が実施されるが、特に大地震後は被災建物の調査件数が膨大になることが予想され、現場での目視による調査では時間がかかりかかるとかや立入りが危険な建物での計測が行えないなどの問題があり、早期の被害復興を実現するための迅速な被災建物の調査方法を構築することが望まれる。

そこで本論では、熊本地震で被害を受けたピロティ柱¹⁾を模擬した試験体を対象に、近年土木測量分野で活用されている高解像度カメラやレーザースキャナーを用いて損傷計測を行うことによって、短時間かつ遠距離からのコンクリートのひび割れ幅および浮き剥落の計測手法に関する基礎的検討を行い、その特徴や発展性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

本検討で対象とする柱試験体 1 体で、熊本地震で被害を受けたピロティ形式建物の 1 階柱¹⁾を縮小したもので

ある。本論では、そのうちの 1 体を対象に写真を活用した損傷計測の検討を行った。変位制御による正負交番漸増増荷を行い、加力サイクルは層間変形角 $R=1/3200(\text{rad})$ を 1 サイクル行い、その後 $R=1/1600, 1/800, 1/400, 1/200, 1/100(\text{rad})$ をそれぞれ 2 サイクルずつ行った。軸力は上下のスタブを平行に保つように鉛直ジャッキを制御し、正荷時には圧縮軸力を、負荷時には引張軸力を作用させた。図-1 に載荷装置、表-1 に試験体概要、図-2 に試験体断面、図-3 に試験体立面をそれぞれ示す。

表-1 試験体概要

| | |
|---|---------------------------------|
| B: 柱幅 (mm) | 475 |
| D: 柱せい (mm) | 475 |
| ho: 内法高さ (mm) | 1025 |
| 柱主筋 | 16-D13 (SD345) |
| 柱主筋比 (%) | 0.898 |
| 柱帯筋 (面内) | 2-D6@40 (SD295A) (帯筋比0.333%) |
| 柱帯筋 (面外) | 4-D6@40 (SD295A) (帯筋比0.667%) |
| Fc: コンクリート 設計基準強度 (N/mm ²) | 27 |
| せん断スパン比 | 1.17 |
| 軸力比 (N/BDFc) | -0.06, 0.40 |

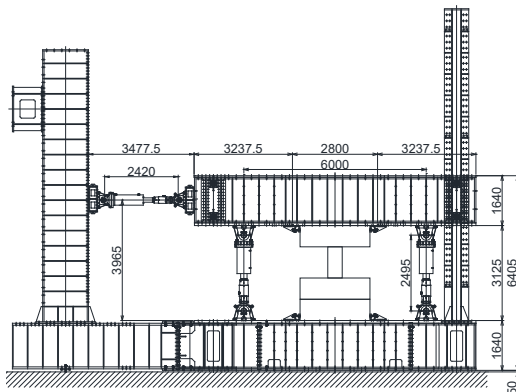


図-1 載荷装置図 (単位: mm)

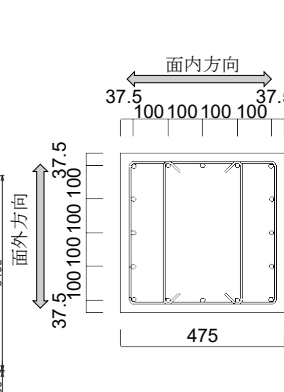
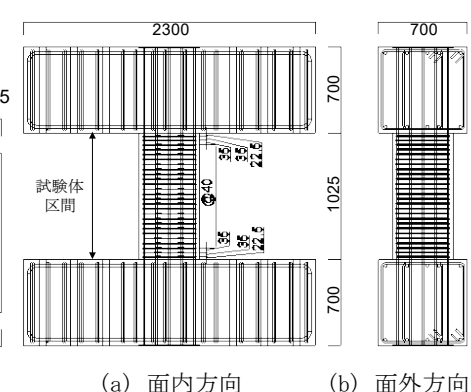


図-2 断面図 (単位: mm)



(a) 面内方向

(b) 面外方向

図-3 立面図 (単位: mm)

*1 東京理科大学 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 国立研究開発法人建築研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

3. 高解像度カメラを用いた計測手法

3.1 高解像度写真撮影概要

2章で説明した柱試験体を対象に、約1.5億画素の高解像度カメラを用いて、撮影距離12m(正対)と15m(斜め)の2地点からそれぞれ撮影を行った。カメラスペックを表-2に、撮影条件設定を表-3に示す。各カメラの焦点距離(カメラ1は150mm, カメラ2は240mm)により瞬間視野が決まり、焦点距離が長いほど瞬間視野は小さくなり、試験体に対する分解能はカメラ2の方が高くなっている。

表-2 カメラスペック

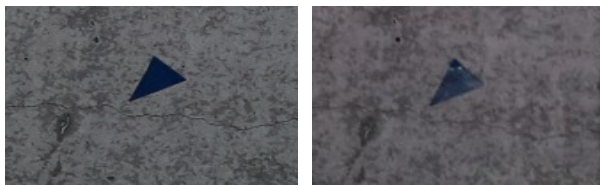
| 名称 | メーカー | 機種名 | センサーサイズ | 画素数 |
|------|----------|--------------|-----------|---------------|
| カメラ1 | PHASEONE | iXM-RS150F | 53.4×40mm | 14204×10652px |
| カメラ2 | | XF IQ4 150MP | | |

表-3 撮影条件設定

| 名称 | 撮影距離 | ISO感度 | シャッタースピード | 焦点距離 | 柱面分解能 |
|------|-------|--------|-----------|-------|-----------|
| カメラ1 | 12.0m | ISO200 | 1/8秒 | 150mm | 0.30mm/px |
| カメラ2 | 15.0m | | | 240mm | 0.24mm/px |

3.2 高解像度写真によるひび割れ確認

高解像度写真によるひび割れの認識可否を確認するため、目視計測において0.00mm, 0.05mm, 0.10mm, 0.15mm以上のひび割れ幅(それぞれ9か所, 10か所, 8か所, 17か所)を対象に比較を行った。例えば、写真-1は目視計測にて幅0.15mmであったひび割れだが、いずれの撮影距離においてもひび割れを認識できていることが分かる。表-4にひび割れ幅の認識率(写真からひび割れを認識できたものの確率)を示す。なお、ひび割れ幅0.00mmとは目視計測にて0.05mm未満の極めて小さなひび割れのことである。また、本検討では目視計測において写真-1のようにマークを付けたひび割れの認識評価を行っている。撮影距離12.0mでは0.10mm以上のひび割れを100%確認でき、撮影距離15.0mでは0.15mm以上のひび割れを100%確認できた。認識率に与える影響として撮影角度の違いと分解能の違いの2つの影響因子が考えられる。カメラ2は撮影角度が45度



(a) 撮影距離 12m (b) 撮影距離 15m

写真-1 ひび割れ拡大写真

表-4 ひび割れ幅認識率

| ひび割れ幅(mm) | 認証率(%) | |
|-----------|---------|---------|
| | 撮影距離12m | 撮影距離15m |
| 0.00 | 33 | 22 |
| 0.05 | 80 | 70 |
| 0.10 | 100 | 75 |
| 0.15以上 | 100 | 100 |

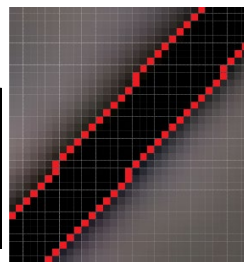


図-4 ひび割れ境界点

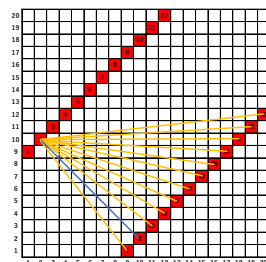


図-5 境界点座標化概念

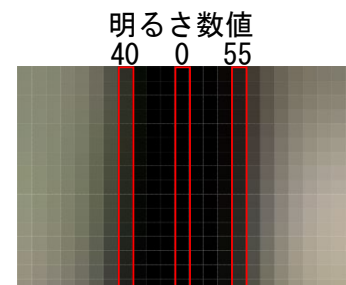


図-6 クラックスケール画像

なっていることで、正対時の画素数に違いが生じることによる影響と思われる。カメラレンズ性能の影響については別途詳細に検討する必要がある。

3.3 高解像度写真を用いたひび割れ幅計測手法

工藤ら²⁾では耐震壁試験体を対象に高解像度写真を用いたひび割れ幅評価を行っている。本検討では、2章で示す柱実験にその評価法を適用する。撮影距離12mの地点からカメラ1で撮影した写真を現像し、解像度を0.05mm/pxに設定することで、1ピクセルのサイズを0.05mmに統一し、座標化したひび割れ幅の距離(ピクセル数)を特定しやすくした。そのデータ中のひび割れ幅の計測を行った。ここで、そのデータ中のひび割れを構成するピクセルのうち明るさもしくは輝度を表す数値が一定以上増加したものをひび割れの境界と定義する。図-4に写真上にプロットしたひび割れの境界上の点分布を示す。これらの点を図-5に示すように座標化し、境界両端のピクセル間の最小距離からひび割れ幅を算出し、その中の最大値を最大ひび割れ幅とした。

3.4 明るさ数値を用いたひび割れ幅計測方法

明るさ数値を用いたひび割れ幅計測は、ひび割れ画像の明るさ分布からひび割れ幅の測定を行う。ここで、明るさ数値とは、画像から三原色である赤、緑、青の各成分の明るさをピクセル毎に数値化(0~255)し、それらの数値からピクセルの明るさを算出したものである。高解像度写真には試験体に貼り付けたクラックスケールも写っており、0.05mm~1.50mmの各クラック線を構成するピクセルの明るさ数値の差を用いて、ひび割れ境界線を定義する。本論における明るさ数値差とは、それぞれのクラック線の幅からそのクラック線の両境界のピクセルを特定し、その境界にあるピクセルの明るさ数値と、クラック線の最も暗いピクセルの明るさ数値の差のうち大きい方とする。ここでは対象とする試験体のひび割れを構成するピクセルの中で最も暗いピクセルから、先ほど求めた明るさ数値差の分大きくなったピクセルをひび割れの境界として定義し、試験体に発生するそれぞれのひび割れ幅の計測を行った。また、本試験体の計測面の明るさ数値の平均は116である。例として図-6に試験体に貼り付けた0.50mmのクラックスケールを示す。幅が0.50mmなので水平方向に10ピクセル分を考える。最も

暗いものが0であり、境界部分が40もしくは55であり、明るさ数値差55となる。それぞれのひび割れ幅の明るさ数値差の一覧を表-5に示す。本検討のひび割れ計測のパターン分け方法を表-6に示す。本検討では工藤ら²⁾の検討で、比較的精度の良かったパターン分けの方法を用いている。

表-5 クラックスケールの明るさ数値差の一覧

| ひび割れ幅(mm) | 明るさ数値差 | ひび割れ幅(mm) | 明るさ数値差 |
|-----------|--------|-----------|--------|
| 0.05 | 0 | 0.7 | 43 |
| 0.1 | 2 | 0.75 | 36 |
| 0.15 | 6 | 0.8 | 58 |
| 0.2 | 14 | 0.85 | 57 |
| 0.25 | 18 | 0.9 | 54 |
| 0.3 | 16 | 0.95 | 62 |
| 0.35 | 26 | 1 | 61 |
| 0.4 | 43 | 1.1 | 56 |
| 0.45 | 44 | 1.2 | 58 |
| 0.5 | 55 | 1.3 | 64 |
| 0.55 | 44 | 1.4 | 56 |
| 0.6 | 48 | 1.5 | 54 |
| 0.65 | 44 | | |

表-6 ひび割れ計測のパターン分け方法

| | クラックスケールの線幅(mm) | 明るさ数値差平均 | 標準偏差 |
|-------|-----------------|----------|-------|
| パターン1 | 0.05~0.5 | 24 | 17.55 |
| パターン2 | 0.55~1.0 | 50 | 8.42 |
| パターン3 | 1.1~1.5 | 57 | 3.44 |

3.5 輝度数値を用いたひび割れ幅計測方法

輝度数値を用いたひび割れ幅計測では、写真を輝度分布の作成に適したRGBの統一された白黒画像に変換する。次に、計測を行うべきひび割れに対して、垂直方向の輝度分布を求め、最大輝度点から最低輝度点までを近似3次曲線としてグラフ化し、求めた3次曲線における変曲点の輝度数値のピクセルをひび割れ境界として定義

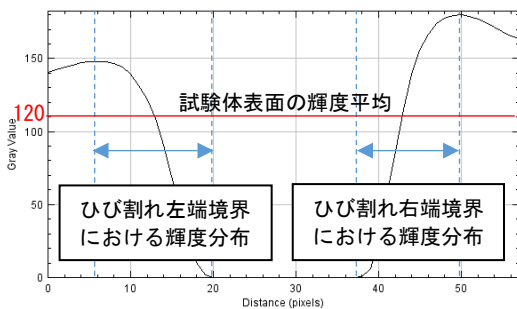


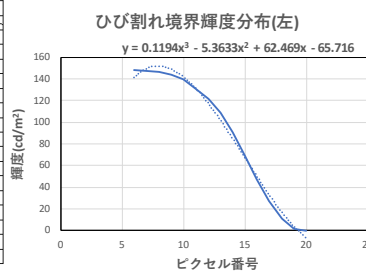
図-7 ひび割れ境界部の輝度分布

する。つまり、輝度数値を用いたひび割れ幅計測方法は、ひび割れの輝度分布から変曲点を求め、その変曲点情報からひび割れ幅を推定する方法である。図-7にひび割れ境界部の輝度分布を示し、図-8に1.50mmのひび割れ境界における輝度分布の近似三次曲線を例示する。両端境界の変曲点X座標の差は約30であり、1座標が0.05mmなので、逆算して幅が1.50mmとなることを確認した。また、本試験体の計測面の輝度平均値は120cd/m²である。

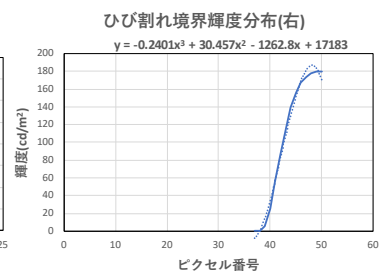
3.6 各計測手法によるひび割れ幅計測結果

表-7に各計測方法における0.05mm以上および1.50mm以下のひび割れに対する目視計測値に対するピクセル計測値の精度(ピクセル計測値/目視計測値)と標準偏差を示す。ここでの精度はそれぞれのひび割れに対する「単体の精度」を基に算出した各ひび割れ幅区間における平均の精度を表している。図-9に3.4節で示した明るさ数値を用いたひび割れ幅の計測結果を、図-10に3.5節で示した輝度数値を用いたひび割れ幅の計測結果を示す。また、図-9、図-10に全ひび割れに対する精度と標準偏差を示す。

明るさ数値を用いた計測では、ひび割れ幅 $x \leq 0.50\text{mm}$ の比較的小さいひび割れ幅に対しての精度は1.92とやや過大に評価している。一方、 $0.50\text{mm} < x \leq 1.00\text{mm}$ の中間程度のひび割れ幅に対しての精度は0.90、 $1.00\text{mm} < x \leq 1.50\text{mm}$ の大きなひび割れ幅に対しての精度は1.00となり、精度がよく標準偏差も小さくばらつきが小さい。全ひび割れ幅に対しての精度は1.43、標準偏差は0.13であり、工藤ら²⁾の検討結果の精度1.54、標準偏差0.13と比較するとばらつきが小さくなることはなかったが、精度の評価に関して向上したことがわかる。



(a) 左端境界



(b) 右端境界

図-8 ひび割れ境界における輝度分布の近似三次曲線

表-7 各計測手法における精度および標準偏差

| 計測方法 | 評価 | ひび割れ幅 | | | | | | | |
|--------|------|------------------------|-------------|--|------------|--|------------|-------------|-------------|
| | | $x \leq 0.50\text{mm}$ | | $0.50\text{mm} < x \leq 1.00\text{mm}$ | | $1.00\text{mm} < x \leq 1.50\text{mm}$ | | 全体 | |
| | | 本検討 母数11 | 昨年度 母数12 | 本検討 母数8 | 昨年度 母数6 | 本検討 母数3 | 昨年度 母数4 | 本検討 母数22 | 昨年度 母数22 |
| 明るさ数値 | 精度 | 1.92 | 1.95 | 0.90 | 1.04 | 1.00 | 1.07 | 1.43 | 1.54 |
| | 標準偏差 | 0.16 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.00 | 0.10 | 0.13 | 0.13 |
| 輝度数値計測 | 精度 | 2.39 | 2.58 | 0.98 | 1.05 | 0.89 | 1.09 | 1.66 | 1.90 |
| | 標準偏差 | 0.22 | 0.24 | 0.10 | 0.12 | 0.31 | 0.22 | 0.20 | 0.21 |

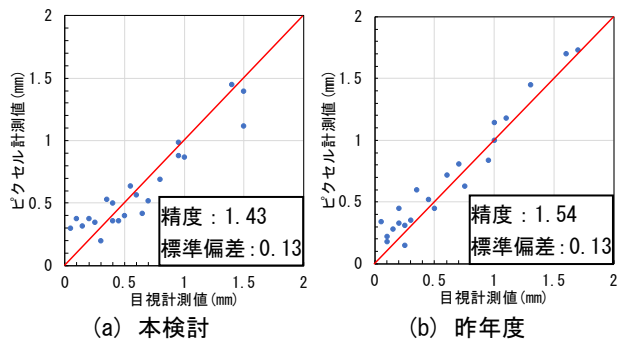


図-9 明るさ数値計測結果

輝度数値を用いた計測では、ひび割れ幅の小さい $x \leq 0.50\text{mm}$ のひび割れ幅に対しての精度は 2.39 と過大評価し、ばらつきも大きい結果となった。カメラ 1 で撮影した写真の分解能が 0.30mm/px であったが、解像度を 0.05mm/px に設定しひび割れ幅を精度よく計測できるか試みたが、 0.30mm 以下のひび割れ幅の画像は結果的にぼやけてしまい、計測の精度は低いままだった。次に $0.50\text{mm} < x \leq 1.00\text{mm}$ のひび割れ幅に対しての精度は 0.98 でばらつきも小さく、 $1.00\text{mm} < x \leq 1.50\text{mm}$ のひび割れ幅に対しての精度は 0.89 でばらつきは大きかった。全ひび割れ幅に対しての精度は 1.66、標準偏差は 0.20 であり、工藤ら²⁾の検討結果の精度 1.90、標準偏差 0.21 と比較するとばらつきの評価に関しては大きな向上は見られなかったが、精度の評価に関して向上したことがわかる。

この結果より、高解像度写真を用いたひび割れ幅計測方法としては明るさ数値を用いた計測の方が輝度数値を用いた計測よりも精度よく、標準偏差も小さくばらつきが小さいことが分かる。また、 0.50mm 未満の小さなひび割れに対する高解像度写真での計測には限界があり、安全側ではあるが精度はやや過大評価となり、ばらつきも大きかった。

4. レーザースキャナーを用いた計測手法

4.1 レーザースキャナー計測概要

2 章で説明した柱試験体を対象に、レーザースキャナ

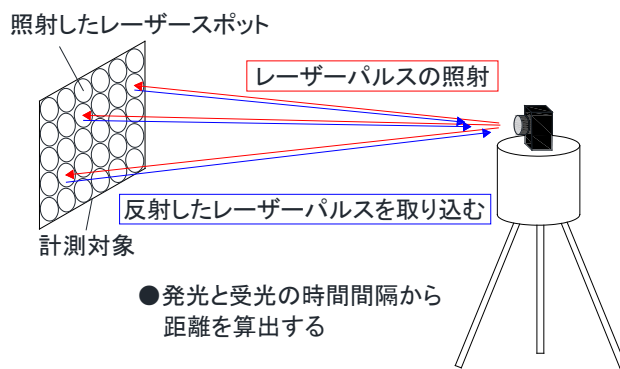


図-11 レーザースキャナーイメージ図

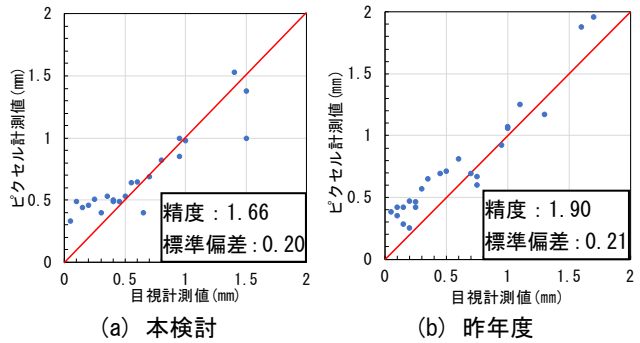


図-10 輝度数値計測結果

を用いた損傷計測を行った。レーザースキャナーは赤外線レーザーと高速スキャンを駆使した非接触による 3 次元座標データ収集を可能とする装置である。その原理は本体から発射したレーザー光が計測対象物との間を往復する時間と角度から対象物の 3 次元座標を計測するもので、それぞれが 3 次元座標を持つ点群として出力する。イメージ図を図-11 に示す。

本研究では、点群データから得られる試験体の浮き・剥落部分の検出方法を提案し、目視計測によるひび割れ図より確認できる試験体の浮き・剥落との比較を行い、点群データから得られる損傷評価手法の精度を確認する。図-12 に、本検討対象とした部材角 $1/100(\text{rad})$ の負荷荷除荷時の目視計測によるひび割れ図を示す。斜線で示されている部分が浮き、ハッチで示されている部分が剥落である。これらの浮き・剥落部分の点群データにおける検出および面積の算出を行う。

4.2 点群データを用いた浮き剥落計測手法

点群データを用いた損傷計測では浮き剥落を対象に点群の密度に着目し輪郭を定めるための点の抽出を行う。計測面表面の密度平均は $1.0 \times 10^6(\text{点}/\text{m}^2)$ であり、浮き剥落部の密度平均は $0.7 \times 10^6(\text{点}/\text{m}^2)$ であった。ここでは、剥落 1 での計測を例に説明する。剥落 2、浮きそれぞれの抽出、面積の算出も同様の手順で行う。

(1) 浮き・剥落部分の抽出方法

図-13 に浮き・剥落などの損傷がみられる $1/100\text{rad}$ の負

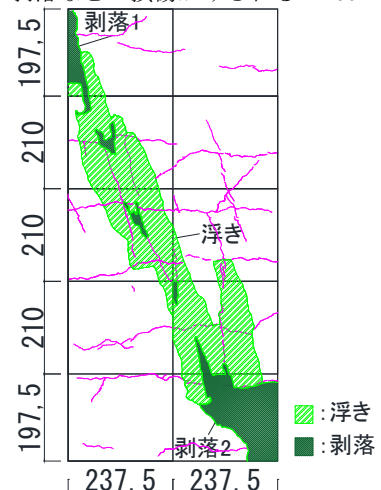


図-12 ひび割れ図

荷重除荷時の柱試験体の点群データを示す。まず、損傷が確認できている試験体表面部分の点を抽出する。断面方向から見ると、図-14のように柱表面にも点群データの厚みがみられ、さらに、浮き・剥落の断面部分が確認できる。この浮き・剥落部分の抽出を行う。平常時の試験体表面の点群データにおいて、図-14(a)に示した線2本(ア)、(イ)それぞれの基準面を求める。これに対して、浮き・剥落部分の点を決定する。図-14(b)に示す浮き・剥落がみられた段階の点群データにおいて、浮きを求めるには(イ)の基準面より手前の点群を抽出し、剥落を求めるには(ア)の基準面より奥側の点群を抽出する。実際に剥落部分を抽出した際のデータを正面から見たものを図-15(a)に示す。ここで図左上の部分が今回検出を行う剥落1であるが、剥落1と推定される箇所には

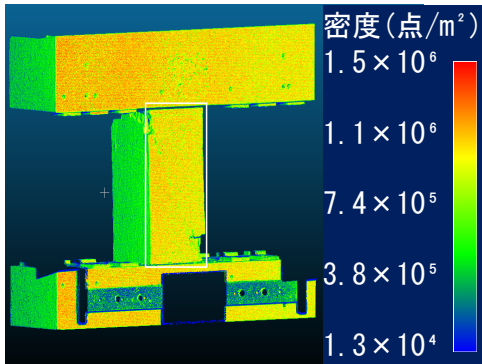


図-13 損傷を有する柱部材の点群データ

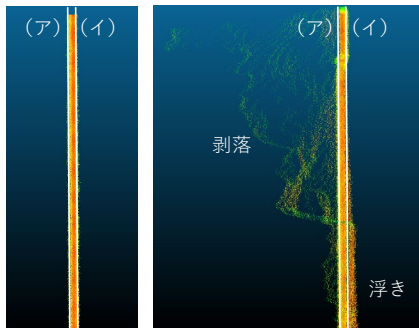
ノイズと思われる点群も存在しており、これらを除去する方法が必要となる。

(2) ノイズ処理の方法

(1)で示した方法で生じたノイズを省くために、点群の密度を検討する。ここで、密度が大きい点群は微小な円内における点の計測が正確に行われたことを意味しており、密度が小さい点群は、測定器の精度誤差やデータ重ね合わせのズレ、試験体の凹凸等が原因で測定にノイズが生じたことを意味している。図-15(b)に示すように、ノイズと思われる点群は、青に近い色の点で表されており、浮き剥落部の密度平均は 0.7×10^6 (点/m²) と比較すると密度が小さいという特徴を持っている。そこで、本検討では、密度 0.3×10^6 (点/m²) 以下の点をノイズと定義し、削除し剥落部分のみの抽出を行う。

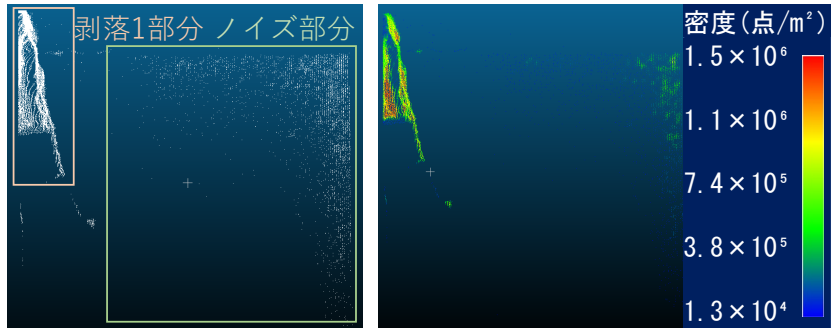
(3) 浮き・剥落部分の面積の算出方法

次に、剥落部分の面積を算出するために、正面から見た剥落部分の境界を求める。抽出した点を含む最小の集合となるように輪郭を定め、面積を算出する。図-12に示されている剥落1、剥落2、浮きの面積を、前述の方法を用いて求めた剥落1、剥落2・浮きの抽出結果を図-16に示す。



(a) 荷重前 (b) 1/100 荷重除荷時

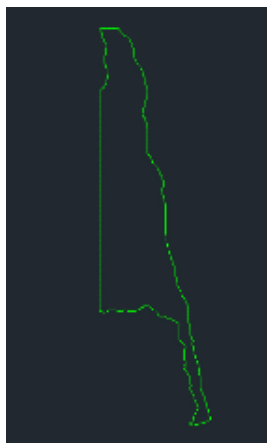
図-14 ひび割れ図



(a) ノイズ確認

(b) 密度表示

図-15 剥落部分抽出データ



(a) 剥落1



(b) 剥落2



(c) 浮き

図-16 浮き・剥落部分の抽出結果



図-17 ひび割れ図と点群データの比較

4.3 浮き剥落面積の計測結果

本検討で点群データから求めた剥落 1、剥落 2・浮き部分とひび割れ図から求まる当該部分を並べた結果を図-17 に示す。また、目視計測によるひび割れ図から算出した面積と点群計測から算出した面積の結果および点群計測の目視計測に対する精度を表-9 に示す。

点群データから求めた浮き・剥落の面積とひび割れ図から求めた浮き・剥落の面積の誤差について、剥落 2 の点群データを見ると、右下部分の面積が大きく足りておらず、全体的に面積も小さくなっている。剥落 2 の軽側面の直交方向（柱幅面）から見た損傷状態を写真-2 に示す。撮影方向から見た際に、柱正面の隅角部の剥落が、黄色の丸で囲まれた部分のように側面側にまで完全に剥落しており、点群計測ではその部分を認識できなかったことが原因と考えられる。

剥落 1、浮きの点群データからの計測結果が目視計測結果と比べてわずかに大きくなった原因の一つとして、目視計測の方法が考えられる。本検討を行った柱試験体の実験において、目視によるひび割れおよび浮き・剥落の計測は OHP シートにそれら損傷部分を上からなぞるという方法を用いていた。本検討で対象とした 1/100rad. の負荷荷除荷時には浮き・剥落が大きく生じており、柱表面が膨らみ、OHP シートになぞる作業が難しくなり、正確な計測が出来なかった可能性が考えられる。しかし、剥落 1、浮きにおいては、わずかに点群データからの算定結果の方が上回っているものの比較的精度は良く、概ね実際の浮き・剥落状態を捉えているといえる。

5. まとめ

柱実験時に撮影を行った高解像度写真および点群データを用いた損傷評価を行い、以下の知見を得た。

- (ア) 高解像度写真を用いた損傷計測
- ・高解像度写真を用いたひび割れ幅計測方法としては明るさ数値を用いた計測の方が輝度数値を用いた計測よりも精度よく、標準偏差も小さくばらつきが小さかった。
 - ・0.50mm 以上のひび割れに対して、精度良く計測できた。0.50mm 未満の小さなひび割れに対する高解像度写

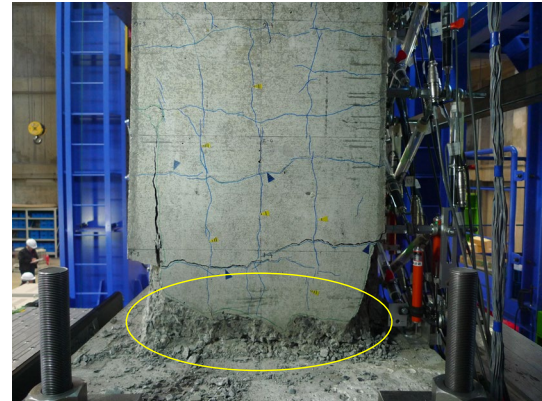


写真-2 計測面直交方向から見た剥落 2 部分

真での計測には限界があり、安全側ではあるものの、やや過大評価となった。

(イ) 点群データを用いた損傷計測

- ・点群データを用いた浮き・剥落の計測は剥落 1、浮きに対する計測は概ね実際の損傷状態を捉えており、精度が良いことを確認した。
- ・剥落部分が奥行方向まで連続して発生している場合など、ここで示した分析法では剥落を認識できない可能性がある損傷があることが分かり、あらゆる損傷に適應できる分析法の検討が必要である。

謝辞

本研究は、官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) 革新的建設・インフラ維持管理技術/革新的防災・減災技術 (統括: 田代民治) における「仮設・復興住宅の早期整備による応急対応促進 (PD: 緑川光正)」, および建築研究所指定研究課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」の一環として実施した。ここに関係各位に謝意を示します。

参考文献

- 1) 建築研究所: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震建築物被害調査報告 (速報), 建築研究資料 No.173, 2016.9
- 2) 工藤陸ら: 躯体改造後の既存壁式鉄筋コンクリート造建物の構造的な性能評価 その 5 耐力壁に対して高解像度写真を用いたひび割れ幅評価, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), 構造 IV, pp.163-164, 2019.9