

論文 曲げ破壊する RC 梁部材のひび割れ計測結果に基づく損傷評価

中村 隆大^{*1}・田嶋 和樹^{*2}・白井 伸明^{*3}

要旨：耐震性能評価指針では，コンクリート強度の違いが損傷度の評価に及ぼす影響に関する検討が十分になされていない。そこで，ひび割れ計測を併用した RC 梁部材の曲げ破壊試験を実施し，コンクリート強度の差異による影響を検証した。その結果，コンクリート強度はひび割れ分散性状に影響を及ぼすことが分かった。また，かぶりコンクリート圧壊後安全限界状態に到達するまでの残余エネルギー吸収能力も大きく異なることが確認された。

キーワード：ひび割れ幅，損傷度，コンクリート強度，RC 梁部材，曲げ破壊，画像処理

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下，RC）構造物の耐震性能を確認・評価する手法の 1 つとして，日本建築学会から「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）」¹⁾（以下，耐震性能評価指針）が示されている。しかし，耐震性能評価指針の適用範囲は「新築の設計段階にある建物」であるため，我が国が抱える膨大な既存 RC 構造物や大地震において震災を受けた RC 構造物には適用することができない。既存 RC 構造物あるいは震災 RC 構造物の残余耐震性能を評価し，適切な補修・補強を施すためには，RC 部材の損傷評価手法の構築が必要不可欠である。

一方，前田ら²⁾は震災を受けた RC 構造物の被災度の物理的意味を明確にするため，部材に生じた残留ひび割れ幅から残余耐震性能あるいは被災度を評価する手法を提案している。しかし，コンクリート強度や部材寸法がひび割れ幅に及ぼす影響について言及しておらず，これらに着目した検証実験が必要であると思われる。また，ひび割れ幅の計測にクラックスケールを使用しているため，計測精度の問題にも目を向ける必要がある。

本研究ではコンクリート強度がひび割れ幅に及ぼす影響に焦点を当て，2 種類のコンクリート

強度を有する RC 梁部材の曲げ破壊試験を実施し，その損傷状況をひび割れ幅の計測結果に基づいて考察する。なお，ひび割れ幅の計測には，筆者らが開発を進めている高精度のひび割れ計測手法³⁾を用い，ひび割れ計測手法に関する検討も併せて実施する。

2. RC 梁部材の曲げ破壊試験とひび割れ計測

2.1 RC 梁部材の曲げ破壊試験

図 - 1 に供試体概要を示す。供試体は単純梁形式に支持された 1 点集中載荷を受ける RC 梁部材である。載荷には 1900kN アムスラー試験機を使用し，荷重はロードセルによって検力した。載荷点変位は，検長 50mm，1/200mm 精度の変位計を用いて測定した。主筋およびあばら筋のひずみは，ひずみゲージを貼付して計測した。

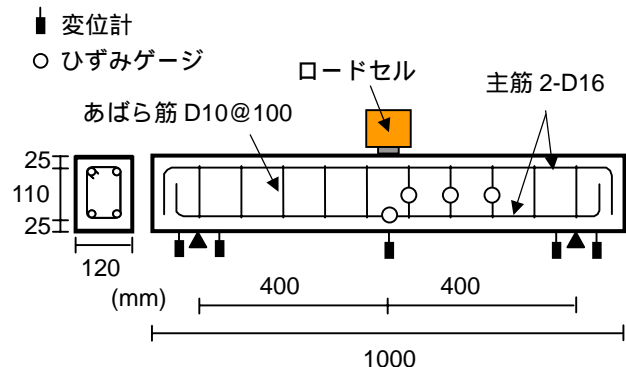


図 - 1 供試体概要

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科助手 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表 - 1 にコンクリートの材料特性, 表 - 2 に鉄筋の材料特性を示す。表 - 3 に試験パラメータの一覧を示す。供試体は, 単調載荷および繰返し載荷によって破壊した。

図 - 2 および図 - 3 に供試体破壊状況および荷重 - 載荷点変位関係を示す。BM21 のみ曲げ降伏後のせん断破壊となったが, その他の供試体は全て曲げ破壊となった。なお, 曲げ破壊は引張主筋の降伏により判定した。また, 図 - 3 から BC21 の初期剛性は BC30 より低く, 主筋降伏時付近の BC21 の耐力は BC30 に比べ約 2 割程度小さいことが分かる。BC21 では, 主筋降伏以前に, 載荷点付近にまで達するせん断ひび割れが見られ, せん断剛性の低下が生じたと考えられる。また, せん断ひび割れの伸展により, 圧縮域では傾斜した圧縮応力が作用し, 梁断面に垂直な圧縮応力成分による合力位置は梁中央に移動し, 応力中心間距離が小さくなり, BC30 よりも小さい荷重で主筋降伏が生じたと考えられる。

表 - 1 コンクリートの材料特性

| 圧縮強度 (MPa) | 圧縮強度時歪 (μ) | 弾性係数 (MPa) | 引張強度 (MPa) |
|------------|------------------|--------------------|------------|
| 21.0 | 2345 | 1.97×10^4 | 1.600 |
| 30.5 | 2548 | 2.45×10^4 | 2.414 |

表 - 2 鉄筋の材料特性

| 使用鉄筋 | 降伏点強度 (MPa) | 降伏歪 (μ) |
|-------------|-------------|---------------|
| D16 (SD345) | 391.8 | 1865 |
| D10 (SD295) | 375.2 | 1788 |

表 - 3 試験パラメータ

| 供試体名称 | 載荷方法 | コンクリート強度 (MPa) | P_t (%) | P_w (%) |
|-------|------|----------------|-----------|-----------|
| BM21 | 単調 | 21.0 | 2.46 | 1.19 |
| BM30 | | 30.5 | | |
| BC21 | 繰返し | 21.0 | | |
| BC30 | | 30.5 | | |

P_t : 主筋比, P_w : せん断補強筋比

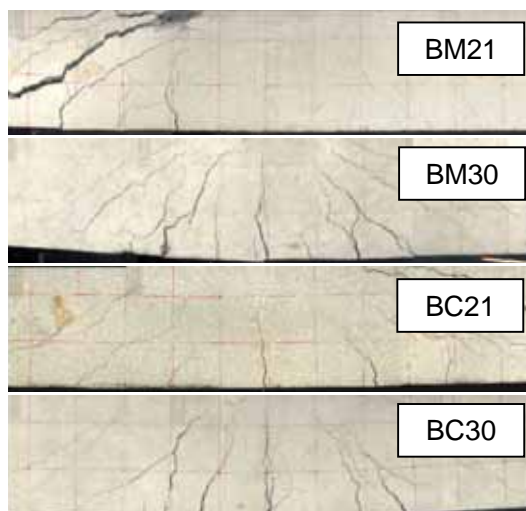


図 - 2 供試体最終破壊状況

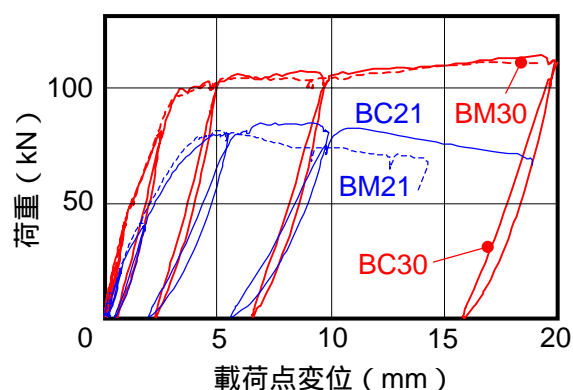


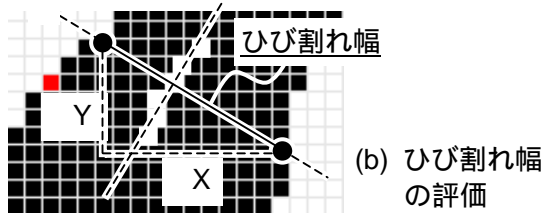
図 - 3 荷重 - 載荷点変位関係

2.2 スキャナを用いたひび割れ幅計測手法

筆者ら³⁾は, スキャナを用いてデジタル画像を取得し, 2 値化した画像の黒画素数を計上する方法によってひび割れ幅を評価する方法を開発している (図 - 4)。本手法では, 既存のひび割れ計測手法における精度上の問題点を回避するため, スキャナの読取り解像度に着目した。解像度とは, 画像データの単位長さあたりの画素数を示す値であり, その単位は dpi (dot per inch) である。解像度を高く設定することにより, 詳細なひび割れ画像を取得することが可能となる。既往の研究では読取り解像度を 2400dpi に設定し, 約 1/100mm 精度でひび割れ幅計測を行っている。つまり, 黒画素数を計上する時点で若干の誤差が生じたとしても, RC 部材の損傷評価の対象となる 1/10mm 程度のひび割れ幅を評価するのに十分な精度を有していると判断した。



(a) 2 値化によるひび割れの境界の明確化



(b) ひび割れ幅の評価

図 - 4 ひび割れ幅計測手法

2.3 しきい値および読取解像度の検討

スキャナを用いてひび割れ幅を計測する場合、計測誤差は 2 値化の際に設定するしきい値の影響が支配的である。図 - 5 に示すように、画素の濃度 (256 段階) に応じて白と黒の 2 色に変換する 2 値化では、しきい値によって 2 値画像が異なる。一方、計測精度は読取解像度によって決定される。読取解像度が高いほどより鮮明なひび割れ画像を取得できるが、画像取得に要する時間も画像データの容量も膨大になってしまうという欠点も有している。本手法を用いてひび割れ幅の計測を行う場合には、ひび割れ幅の評価に適したしきい値ならびに読取解像度を明確にしておく必要がある。そこで本研究では予備試験を実施することにより、しきい値および読取解像度に関する検討を行った。

予備試験では、図 - 1 に示した供試体の中央下部に生じる曲げひび割れを計測対象とし、クリップゲージ (精度 1/600mm) を設置してひび割れ開口変位 (以下、COD) を計測した。図 - 6 に荷重 - COD 関係を示す。一方、スキャナの読取解像度を 5 通り (300, 600, 1200, 1600, 2400dpi) 設定し、図 - 6 の印の地点で残留ひび割れの画像を取得した。

(1) しきい値の検討

予備試験において、COD 値を真のひび割れ幅であると仮定したならば、既知量である画素寸

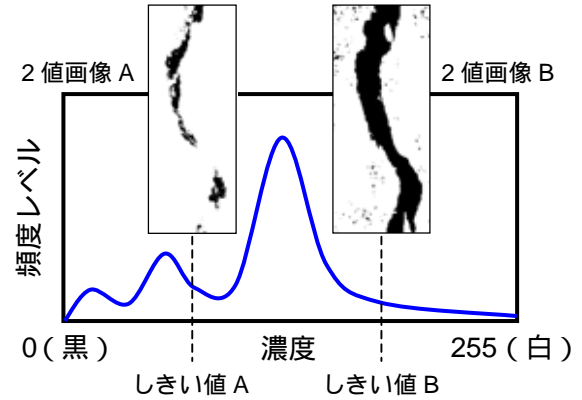


図 - 5 2 値化の概念図

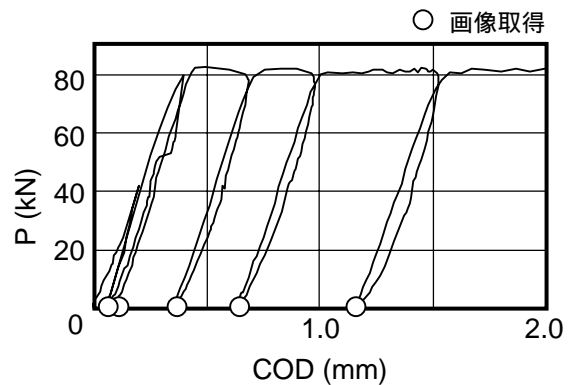


図 - 6 荷重 - COD 関係

法で COD 値を除すことにより、COD 値を導くための黒画素数が求められることができる。本検討では、ひび割れ画像の 2 値化によって得られるひび割れ最下部の黒画素数が、COD を導くための黒画素数と一致したときのしきい値を最適なしきい値として判断することにする。なお、COD 値は精度 1/600mm で計測されるのに対し、本検討において最も精度が高い解像度 2400dpi のスキャナを用いた場合であっても、計測精度は 1/100mm 程度ある。このことから、若干の計測誤差を含んでいる可能性はあるものの、COD 値を真のひび割れ幅として仮定することに大きな問題はないと思われる。

図 - 7 にしきい値 - ひび割れ幅関係を示す。全体的な傾向として、計測対象とするひび割れ幅が小さいほどしきい値は大きい。ひび割れ幅が大きくなるにつれてしきい値は小さくなるが、ひび割れ幅がおよそ 0.6mm に達してからは、概ね一定値に収束している。本研究では、この結果に基づいて、しきい値 - ひび割れ幅関係を 2

直線で近似し、近似式に基づいてしきい値を設定することにする。以下に近似式を示す。

・ $w < 0.65$ mm の場合

$$T = -82.7 w + 171.8 \quad (1)$$

・ $w \geq 0.65$ mm の場合

$$T = 118 \quad (2)$$

ここで、 w : ひび割れ幅 (mm), T : しきい値。

(2) 読取解像度の検討

ひび割れ幅の計測目的に応じた適切な読取解像度を設定するためには、読取解像度の違いがひび割れ幅の評価に及ぼす影響について検討しておく必要がある。

図 - 8 に異なる解像度(300, 600, 1200, 2400dpi)で取得して2値化したひび割れ画像を示す。画像取得時の COD 値は 0.084mm であり、画像最下部の黒画素が COD に対応している。ここでは極めて微細なひび割れを評価する場合の読取解像度について検討する。なお、各解像度における画素の寸法は、それぞれ 0.085mm (300dpi), 0.042mm (600dpi), 0.021mm (1200dpi) および 0.011mm (2400dpi) である。解像度が大きいほどひび割れ形状を詳細に表現しており、1200dpi および 2400dpi の場合はひび割れ形状を良好に表現していると判断できる。600dpi の場合は、概ねひび割れ形状を模擬しているものの、ひび割れを画素 1 つで表現している部位があるなど画像の荒さが認められる。300dpi にいたっては、ひび割れ形状すら模擬できていない。

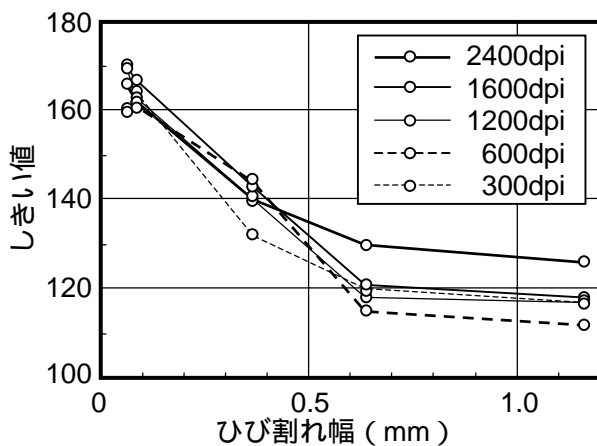


図 - 7 しきい値 - ひび割れ幅関係

以上のことから、0.1mm 以下の微細なひび割れ幅を評価する場合には、1200dpi 以上の解像度を設定することが望ましいと思われる。

図 - 9 に COD 値が 0.365mm の時に取得したひび割れ画像の2値画像を示す。読取解像度は 300, 600 および 2400dpi である。ここでは、被災度区分判定基準⁴⁾において損傷度に対応付けられている残留ひび割れ幅(0.2~1.0mm)を評価する場合の読取解像度について検討する。300dpi の場合、先に示した微細なひび割れ幅の評価に関する検討よりもひび割れ幅が大きいにも関わらず、ひび割れ形状を十分に模擬できていない。一方、600dpi の場合は 2400dpi の場合よりも若干画像の粗さが認められるものの、ひび割れ形状を十分に模擬しており、ひび割れ幅の評価も可能であると思われる。以上のことから、0.2mm 以上のひび割れ幅を評価する場合、読取解像度は 600dpi 以上を推奨する。なお、今回の RC 梁部材の曲げ試験におけるひび割れ幅計測では、読取解像度を 600dpi に設定した。

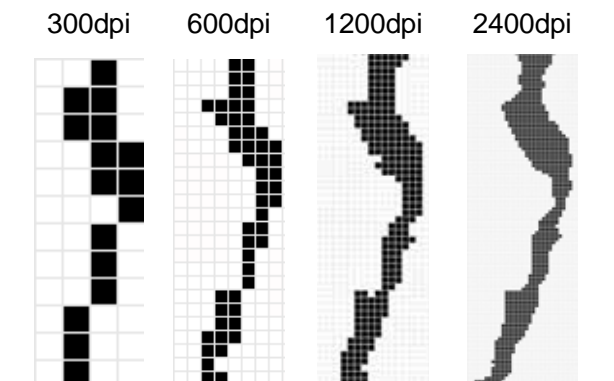


図 - 8 ひび割れ幅に及ぼす解像度の影響
(COD=0.084mm)

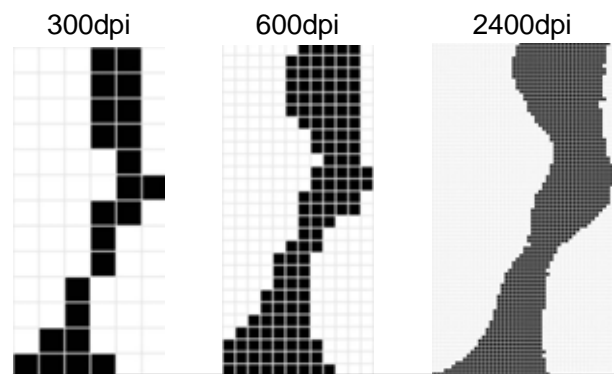


図 - 9 ひび割れ幅に及ぼす解像度の影響
(COD=0.365mm)

3. ひび割れ計測に基づく損傷評価

3.1 ひび割れ幅 - 主筋ひずみ関係

図 - 10 に本試験で得られた主筋位置のひび割れ幅 - 主筋ひずみ関係を示す。コンクリート強度に関係なく、主筋降伏前後で傾きの異なる 2 直線で近似できると考えられる。このことは、主筋位置の残留ひび割れ幅から主筋ひずみの推定が可能であることを示している。なお、本試験で得られた載荷時ひび割れ幅と残留ひび割れ幅の比は表 - 4 に示すとおりである。一部の比が大きくなっているが、載荷時ひび割れ幅は残留ひび割れ幅の概ね 1.2 倍と考えることができる。

供試体が限られている本試験の結果から一般式を導くことはできないが、主筋位置のひび割れ幅 - 主筋ひずみ関係ならびに載荷時 / 残留ひび割れ幅比を利用することにより、残留ひび割れ幅から載荷時のひび割れ幅を推定するとともに、主筋の降伏の判定や主筋に生じたひずみの最大値の予測も可能になると思われる。

3.2 損傷評価に及ぼすコンクリート強度の影響

既存 RC 構造物の設計基準強度 (F_c) の変遷を調査した既往の研究⁵⁾によると、1950 年代には $F_c = 15\text{MPa}$ 程度であったが、1970 年代後半からは $F_c = 21\text{MPa}$ が主流となっている。コンクリートの品質改善に伴って、RC 構造物に用いられるコンクリートも年々高強度化している。そのため、既存 RC 構造物の損傷評価を行う上で、コンクリート強度の影響について検討する必要がある。図 - 11 に本試験で得られたせん断力 - 部材角関係を示す。両供試体とも最大耐力の 8 割ま

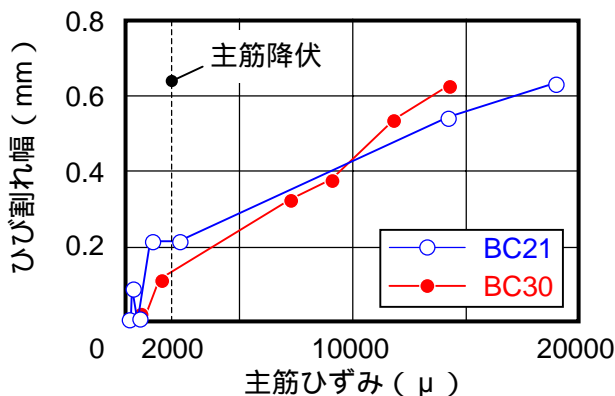


図 - 10 主筋位置ひび割れ幅 - 主筋ひずみ関係

表 - 4 載荷時 / 残留ひび割れ幅比

| 供試体名称 | W (mm) | W _r (mm) | W / W _r |
|-------|--------|---------------------|--------------------|
| BC21 | 0.210 | 0.090 | 2.33 |
| | 0.631 | 0.540 | 1.17 |
| BC30 | 0.375 | 0.324 | 1.16 |
| | 0.623 | 0.533 | 1.17 |

W : 載荷時ひび割れ幅, W_r : 残留ひび割れ幅

で耐力が低下した地点を目安として実験を終了する予定であったが、BC30 に関しては耐力の低下が見られず、実験器具の破損の恐れがあったため、途中で載荷を中止した。図 - 12 に部材角 1/40 における供試体のひび割れ状況および除荷後の残留ひび割れ状況を示す。部材角 1/40 に達した供試体は、かぶりコンクリートの圧壊が始まった段階にある。被災度区分判定基準⁴⁾に従うならば、損傷度 Ⅲの状態であると考えられる。

ここで、部材の残余エネルギー吸収能力²⁾に着目し、両供試体の比較を行う。図 - 11 に示したせん断力 - 部材角関係から評価した全エネルギー吸収能力に対する残余エネルギー吸収能力の割合を比べてみると、BC30 はまだ全体の 80% 以上のエネルギー吸収能力を有しているのに対し、BC21 では 64% しか残っていない。このことから、BC30 よりも BC21 の方が損傷を受けていると判断することができる。

次に、最大残留ひび割れ幅に着目すると、BC21 で 0.64mm、BC30 では 1.05mm であった。なお、供試体中央下部に生じるひび割れの最下端の幅を最大残留ひび割れ幅とした。この最大残留ひび割れ幅に基づいて損傷評価を行った場合、BC21 は損傷度 Ⅲ、BC30 は損傷度 Ⅱとなり、エネルギー吸収能力による評価とは逆に、BC30 の方が損傷を受けているという結果となった。図 - 12 から分かるように、BC30 では供試体中央下部の曲げひび割れ部分に破壊が集中したのに対し、BC21 では供試体下部に生じた複数の曲げ・せん断ひび割れに破壊が分散したことが原因であると考えられる。このひび割れ分散性状の違いは、コンクリート強度の違いが主筋との

付着特性に影響を及ぼしたために生じたものと考えられる。

本研究では、既存 RC 構造物および震災 RC 構造物の耐震性能を評価する際に問題になると考えられるコンクリート強度の違いに着目した。その結果、コンクリート強度の違いは、外力を受けた際に生じるひび割れの分散性状に影響を及ぼすことが確認された。そのため、最大ひび割れ幅を用いた場合、既存 RC 構造物の損傷度を

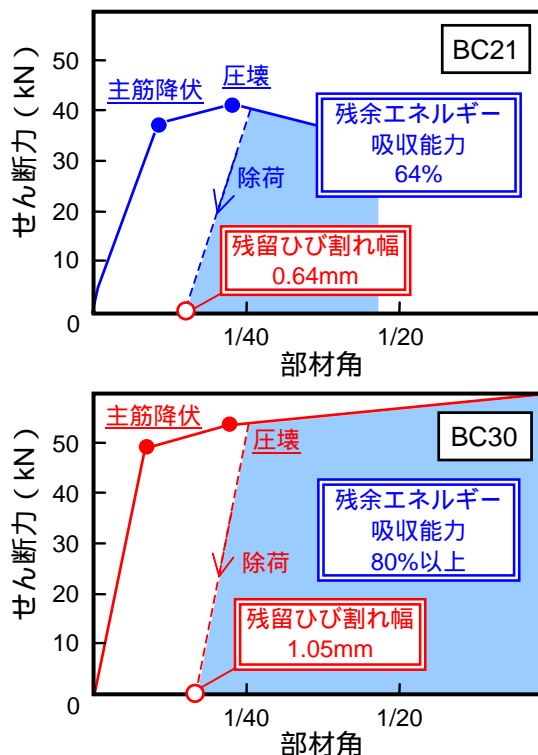


図 - 11 せん断力 - 部材角関係



(b) 除荷時の残留ひび割れ状況

図 - 12 供試体の破壊状況 (部材角 1/40)

精度良く評価できるとは言い難い。今後、精度良く既存 RC 構造物の損傷度を評価するためには、コンクリート強度の違いを考慮するパラメータを用いる必要があると思われる。

4. まとめ

- (1) 2 値化する際のしきい値は解像度による影響があまり見られなかった。また、しきい値とひび割れ幅には相関関係が見られた。
- (2) 主筋位置のひび割れ幅は、主筋ひずみを推定する上で有効なパラメータになり得る。
- (3) コンクリート強度の違いは付着特性に影響を及ぼすため、ひび割れの分散性状にも違いが生じたものと思われる。その結果、最大ひび割れ幅で判定される損傷度の評価にも影響を及ぼすことが確認された。

謝辞

本研究は、平成 16 年度文部科学省学術フロンティア推進事業 (日本大学理工学部：継続)「環境・防災都市に関する研究」(研究代表者：石丸辰治)の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説，2004
- 2) 文野正裕，前田匡樹，長田正至：部材の残余耐震性能に基づいた震災 RC 構造物の被災度評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1447-1452，2000
- 3) 田嶋和樹，白井伸明：コンクリートのひび割れ幅の計測と予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.145-150，2004
- 4) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2001
- 5) 坂巻健太，広沢雅也，清水泰，周建東：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究 - (その 1) 設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 分冊，pp.801-802，2001