

論文 鉄筋コンクリート部材の損傷状態を考慮した損傷量評価

キム キョンミン^{*1}・高橋 典之^{*2}・塩原 等^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート造建築物の耐震修復性能を評価するには、損傷評価が不可欠である。そこで、鉄筋コンクリート部材のひび割れ図の画像処理から、ひび割れ、コンクリートの剥落など異なる損傷状態を考慮した損傷量を測定し、部材変形角との関係の検討を通じて、具体的な損傷量を定量的に指標化する損傷量評価手法の特性を検討した。

キーワード：ひび割れ、損傷量評価、損傷指標

1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以下 RC 造)建築物の耐震修復性能の評価において地震時に対する損傷評価は欠かせない。鉄筋コンクリート構造物の損傷評価に関する研究には、残存耐震性の度合いを示す損傷指標に関する研究と、ひび割れ幅に関する実験的研究があるが、RC 造建築物のひび割れなど具体的な損傷量の推定からその指標化まで統合して評価した研究^{1),2)}など多くない。本研究は、RC 部材の損傷状態を考慮したひび割れ量測定方法と損傷量の指標を統合的に検討する損傷量評価手法を検討した。

2. 損傷度・損傷指標と損傷量指標

RC 造建築物の損傷評価に、よく用いられる「損傷度・損傷指標」には、消費変形能力³⁾、消費エネルギー吸収能力⁴⁾、消費変形能力と消費エネルギー吸収能力の線形和⁵⁾、剛性低下率⁶⁾など、基本的に図-1のような力学特性により直接定義される残存耐震性を表わすものが多い。しかし、これらは損傷を定量的には評価していない。従って、補修費用などを算出するための目安としては不適当である。補修費用を推定するなら、鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅、長さ、欠損(剥落)面積など具体的な損傷量、もしくはそれに直接対応する「損傷量指標」の方が合理的である。

的である。

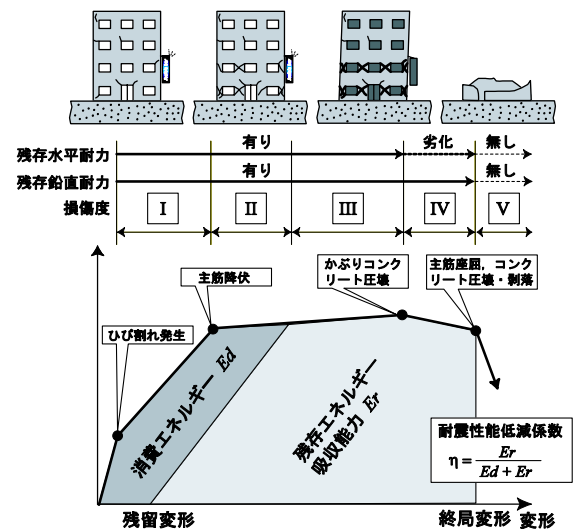


図-1 損傷指標と損傷度の概念

3. 画像処理によるひび割れ図計測

鉄筋コンクリート部材のように、ひび割れ、剥落などの異なる損傷状態が混雑しているものについて既往の実験データを活用して損傷を大量かつ客観的に定量化するには、画像処理法が必要となる。そこで、ひび割れ図を元にして画像処理を行い、ひび割れ長さ、欠損面積、フラクタル次元などの損傷量を推定する方法について検討する。図-2は、ここで用いた損傷量推定プログラムの主な流れである。以下でこれについて詳しく説明する。なお、ひび割れ図のひ

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 博士課程 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻助教授 工博 (正会員)

ひび割れ線の幅は実際のひび割れ幅と一致しないため、ひび割れ幅は測定しない。

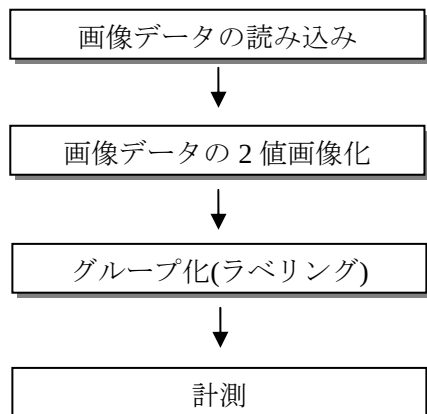


図-2 損傷量測定プログラムの流れ

3.1 画像データの扱い

ここでは、表-1 から表-3 に示されているようなひび割れ図を用いる。コンクリートのかぶり落下部分は白の塗りつぶしで表現されているものとする。

ひび割れ図からなる画像データは、処理の高速性を考え、損傷を表す部分とそうではない部分の二つに分ける必要がある。そのため、読み込んだ画像を輝度 1 か 0、すなわち白か黒(損傷部分が白、その他の部分が黒)からなる 2 値画像化を行う。

但し、ひび割れ図を画像データ化する際、その解像度に注意する必要がある。ここでは、部材のせいを 200 ピクセル程度になるようにするのを標準の解像度とした。

3.2 グループ化

損傷量を測定するためには、まず、各損傷部分に入っている点(画素)をグループ化する。図-3 のようなサイズ 3×3 のウインドの中心にある画素 x_0 から隣接する周りの 8 画素(8 近傍画素)から輝度値が白となる画素を探す。8 画素の中で最初に見つかった白い値を持つ画素を新しい中心 x_0 として同じ処理を繰り返す。このような走査を画像データ全領域に行うと、白い領域のグループ化が行われる。16×16 の画像データをグループ化した例を図-4 に示す。

x_4 ($m-1, n-1$)	x_3 ($m-1, n$)	x_2 ($m-1, n+1$)
x_5 ($m, n-1$)	x_0 (m, n)	x_1 ($m, n+1$)
x_6 ($m+1, n-1$)	x_7 ($m+1, n$)	x_8 ($m+1, n+1$)

図-3 走査ウインド

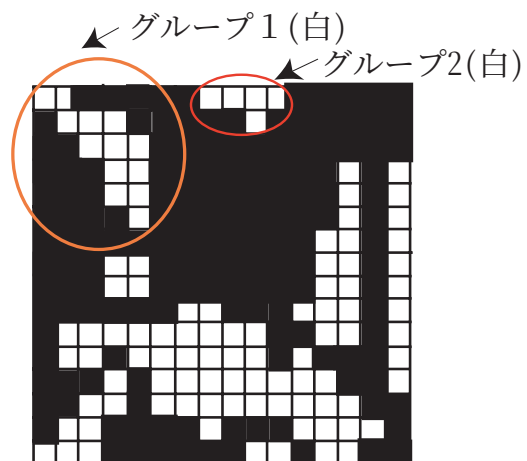


図-4 画像のグループ化例

3.3 計測

3.2 節でグループ化した白い領域をひび割れに該当する線と、剥落に該当する面に分類し、それぞれの長さや面積を計測する。まず、線と面は以下のような基準で分類する。

・線：次の式(1)、(2)の内一つを果たしているグループを線と判断する。

$$a \leq 1/4 \quad \text{or} \quad a \geq 4 \quad (1)$$

ここに、 a は、グループ内の X 座標値と Y 座標値を足した値が最大になる点と最小になる点を結んだ直線の傾きで、図-5(a) の a である。

$$A_{\text{group}} \leq A_{\text{max}} / b \quad (2)$$

ここに、 A_{group} は、グループの面積でグループに入っている画素の数に相当する。 A_{max} は、グループの最大面積で

$$A_{\text{max}} = (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) \cdot (Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}) \quad (3)$$

ここに、 X_{max} , X_{min} は、それぞれグループ内の最大 X 座標値と最小 X 座標値、 Y_{max} , Y_{min} は、それぞれグループ内の最大 Y 座標値と最小 Y 座標値で、 b は定数である。 $(b$ 値は、画像データで描

いている線の太さに応じて決める。本論文では、ひび割れ線が4ピクセルの直線で成っているため、 $b=3$ を用いた。)グループ内の2点の距離の最大値を線の長さとする。

・面：線以外のグループを面と判断する。グループに属するピクセル数に基づいて面積を求める。

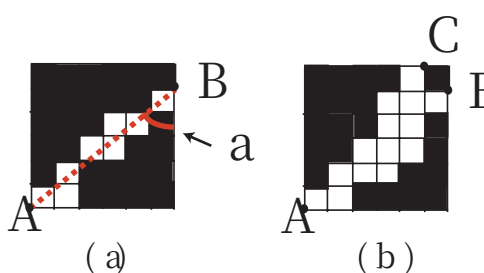


図-5 線と面の区分別

図-5 を例に考えると(a)の場合、 $a=1.2$ になるが、 $A_{\text{group}}=8$ 、 $A_{\text{max}}=30$ 、 $b=3$ で式(2)を満足するため、線と見なす。(b)の場合、点 B を最大点とする場合は、 $a=0.833$ で、点 C を最大点とする場合は、 $a=1.25$ になる。また、 $A_{\text{group}}=14$ 、 $A_{\text{max}}=36$ 、 $b=3$ になり、式(2)の範囲ではないので、面と見なす。

但し、この方法では、ひび割れ図のひび割れと剥落部分が連続した一つのグループとなる場合に線と面を正確に分類させるのは難しいため、あらかじめ自動的にグループ化させるように、ひび割れとひび割れが繋がっている部分や、ひび割れと剥落が繋がっている部分を切って置いた。そうすることによって線と線、線と面をより正確に分類できる。

損傷量をフラクタル次元で評価する場合は、ボックスカウンティング法によった⁷⁾。

4. ひび割れ図計測による損傷量指標

4.1 損傷量指標

3 章の画像処理法によって推定された損傷量と部材変形角との関係から、損傷量指標を以下のように定義する。

- ・ひび割れ率(m/m^2)：部材表面積に対する総ひび割れ長さの割合
- ・欠損率(m^2/m^2)：部材表面積に対する欠損面積

(剥落面積)の割合

- ・フラクタル次元：損傷の伸展度合いを表すと予想される。

以下に、実験で得られたひび割れ図を基に破壊モード別に損傷量の推定から指標化までの損傷量評価手法を検討する。吉岡⁸⁾による WS シリーズ、前田¹⁰⁾による C シリーズ、大成建設⁹⁾による FC シリーズについて行った。また、部材表面積は表-1 から表-3 に示されているひび割れ図での「クリアスパン長さ×部材せい」とした。

4.2 曲げ破壊試験体の損傷量指標

吉岡⁸⁾による WS シリーズの試験体の内、曲げ破壊した 7 体の試験体のひび割れ図を画像データとして用いた。その中で WS6A のひび割れ図(画像サイズ：400×1590)を表-1 に、損傷量指標を荷重変形関係と合わせて図-6 に示す。

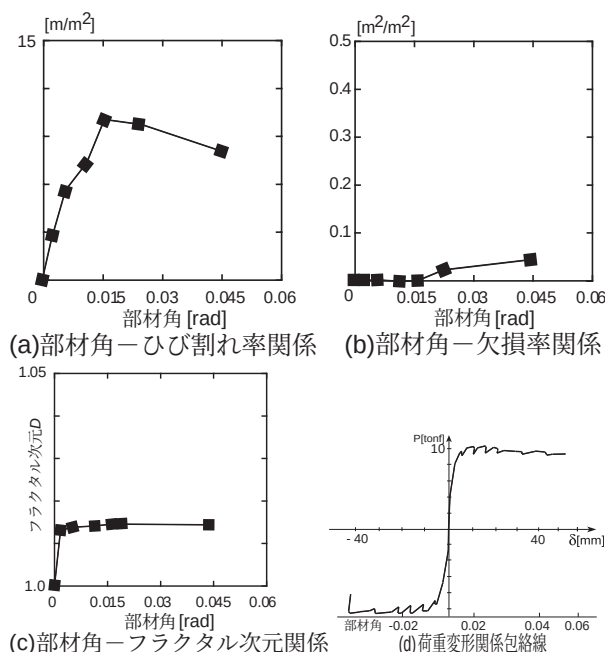
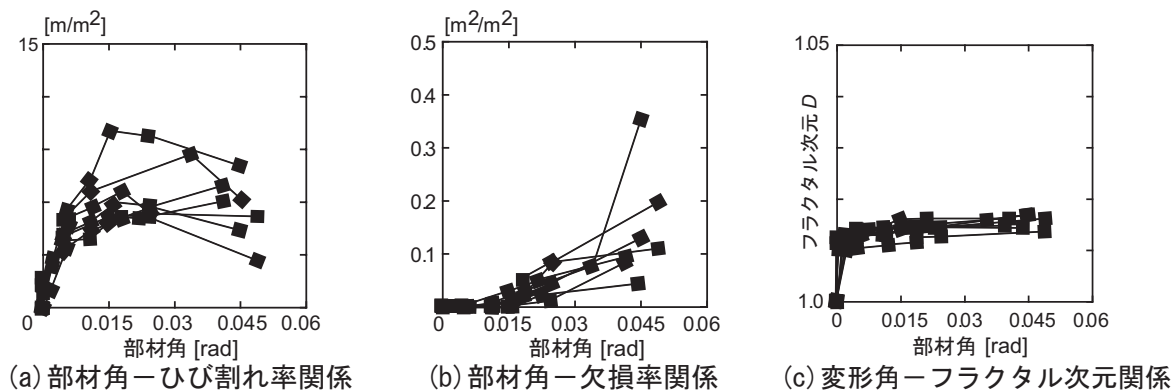


図-6 WS6A の損傷量指標と荷重変形関係

最大荷重を超えたあたり(変形角 0.0165)からひび割れ率が低下する一方で欠損率が増加している。フラクタル次元は、ほぼ一定の値となり、損傷が局部に限られていると考えられる。同様に得られた WS6A を含む全試験体の損傷量指標を図-7 に示す。ばらつきはあるものの、ほとんどの試験体で WS6A と類似な傾向が見られた。



図－7 曲げ破壊試験体の損傷量指標

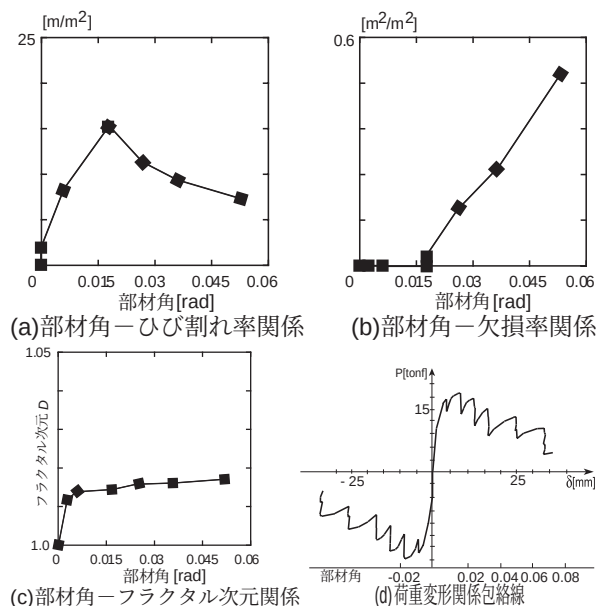
表－1 試験体 WS6A のひび割れ図

変形角(rad)	0.00195	0.0055	0.0110	0.0165	0.0220	0.0440
塑性率 ^{*1}	0.355	1.0	2.0	3.0	4.0	8.0
ひび割れ図						

(^{*1}. 塑性率 = δ_i / δ_y , ここに, δ_i : 荷重階 i での変位, δ_y : 降伏変位である。)

4.3 セン断破壊試験体の損傷量指標

吉岡⁸⁾による WS シリーズの試験体の内, セン断破壊した 4 体の試験体と大成建設⁹⁾による FC シリーズの試験体の内, セン断破壊した 3 体の試験体のひび割れ図を画像データとして用いた。その中で WS5B のひび割れ図(画像サイズ: 400×790)を表－2 に, 損傷量指標を荷重変形関係と合わせて図－8 に示す。最大荷重を超えたあたり(変形角 0.0176)からひび割れ率が低下する一方で欠損率が急増していることがわかる。同様に得られた WS5B を含む全試験体の損傷量指標を図－9 に示す。破線は曲げ降伏後セン断破壊した試験体である。欠損率が急激に増加している。フラクタル次元グラフの勾配は, 曲げ破壊時に比べ, 少し急になっているが, 全体的に大きな変化は見られなかった。



図－8 WS5B の損傷量指標と荷重変形関係

4.4 付着割裂破壊試験体の損傷量指標

吉岡⁸⁾による WS シリーズの試験体の内, 付着割裂破壊した 3 体の試験体と前田¹⁰⁾による C シリーズの試験体の内, 付着割裂破壊した 5 体の試験体のひび割れ図を画像データとして用いた。その中で WS7A0.33 のひび割れ図(画像サイズ: 400×1590)を表－3 に, 損傷量指標を荷重変形関係と合わせて図－10 に示す。最大荷重を超

えたあたり(変形角 0.019)からひび割れ率が低下する一方で欠損率が急増していることがわかる。2 回目の繰り返し加力時はひび割れ率も欠損率も増加している。フラクタル次元はほぼ直線的に変化しているが、ひび割れの部材全体への広がりと共に少しずつ増加している。同様に得られた WS7A0.33 を含む全試験体の損傷量指標を 図-11 に示す。破線は曲げ降伏後付着割裂破壊した試験体を表す。他の破壊モードより、特に WS シリーズにおいて大きなばらつきが見られた。

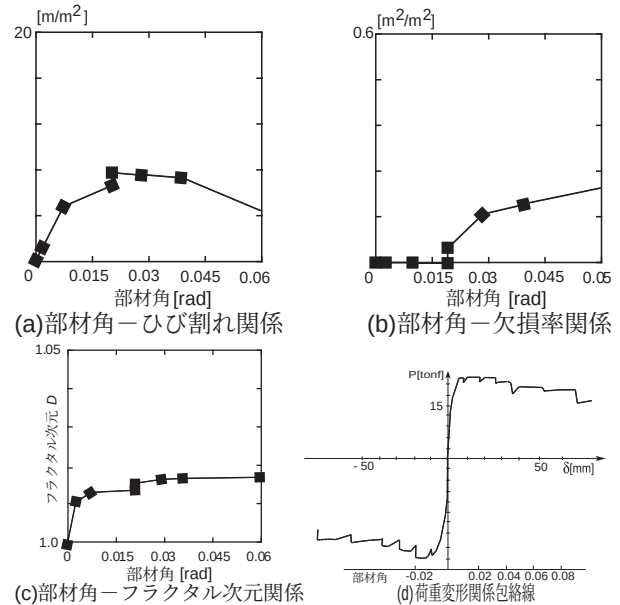


図-10 WS7A0.33 の損傷量指標と荷重変形関係

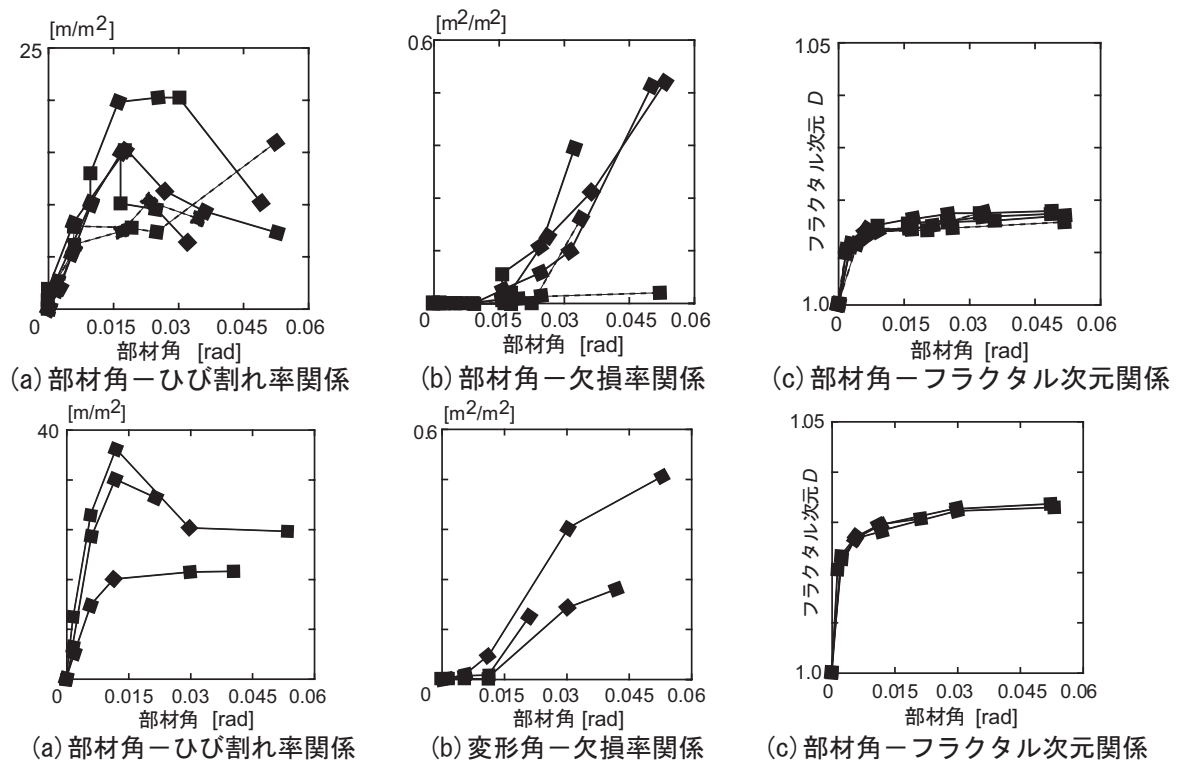


図-9 せん断破壊試験体の損傷量指標(上: WS シリーズ, 下: FC シリーズ)

表-2 試験体 WS5B のひび割れ図

変形角(rad)	0.0027	0.0088	0.0176	0.0176	0.0264	0.0352	0.0528
塑性率	0.307	1.0	2.0	2.0	3.0	4.0	6.0
ひび割れ図							

4.5 破壊モードによる違いの考察

全体的にどのモードでもひび割れ率の減少と共に欠損率の増加する傾向が見られた。フラクタル次元は、他の損傷量指標と違って、全破壊モードではほぼ同じ形となった。一方、付着割裂破壊の場合、特に WS シリーズにおいて、他の破壊モードよりも、ひび割れ率と欠損率が大きくばらついた。せん断破壊と曲げ破壊を比べると、せん断破壊する部材の方が欠損率の増加の度合いが大きい。

5. まとめ

RC 部材のひび割れ図を元に画像処理法を用いたひび割れ長さ、剥落面積などの損傷量の推定から、損傷量指標まで統合して考慮した損傷

量評価手法を曲げ破壊、せん断破壊、付着割裂破壊など破壊モード別に適用し特性の違いを検討した。

参考文献

- 1) 田中康介ほか：震災鉄筋コンクリート建築物の残存耐震性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1225-1230，2003.
- 2) 加藤大介ほか：RC 造柱のひび割れ幅の評価法（その1 曲げひび割れ幅），（その2 せん断ひび割れ幅），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.137-140，2003.
- 3) N.M.Newmark and E.Rosenblueth: Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1971.
- 4) G. H. Powell and R. Allahabadi: Seismic Damage Prediction by Deterministic Methods: Concepts and Procedures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp.719-734, 1988.
- 5) Y. J. Park and A. HS. Ang: Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of St. Eng., ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, Apr. 1985.
- 6) J. M. Lybas and M. A. Sozen: Effect of Beam Strength and Stiffness on Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Coupled Walls, Dept. of Civil Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Jul. 1977.
- 7) 日野幹雄：スペクトル解析ハンドブック，朝倉書店，近刊
- 8) 吉岡研三：鉄筋コンクリート柱の強度と変形能，東京大学学位論文，1978.
- 9) 大成建設：高強度コンクリートを用いた短柱の他数回繰返し実験，大成建設技術研究所報，1974.
- 10) 前田匡樹：鉄筋コンクリート部材の付着割裂破壊に関する研究，東京大学学位論文，1994. 3.

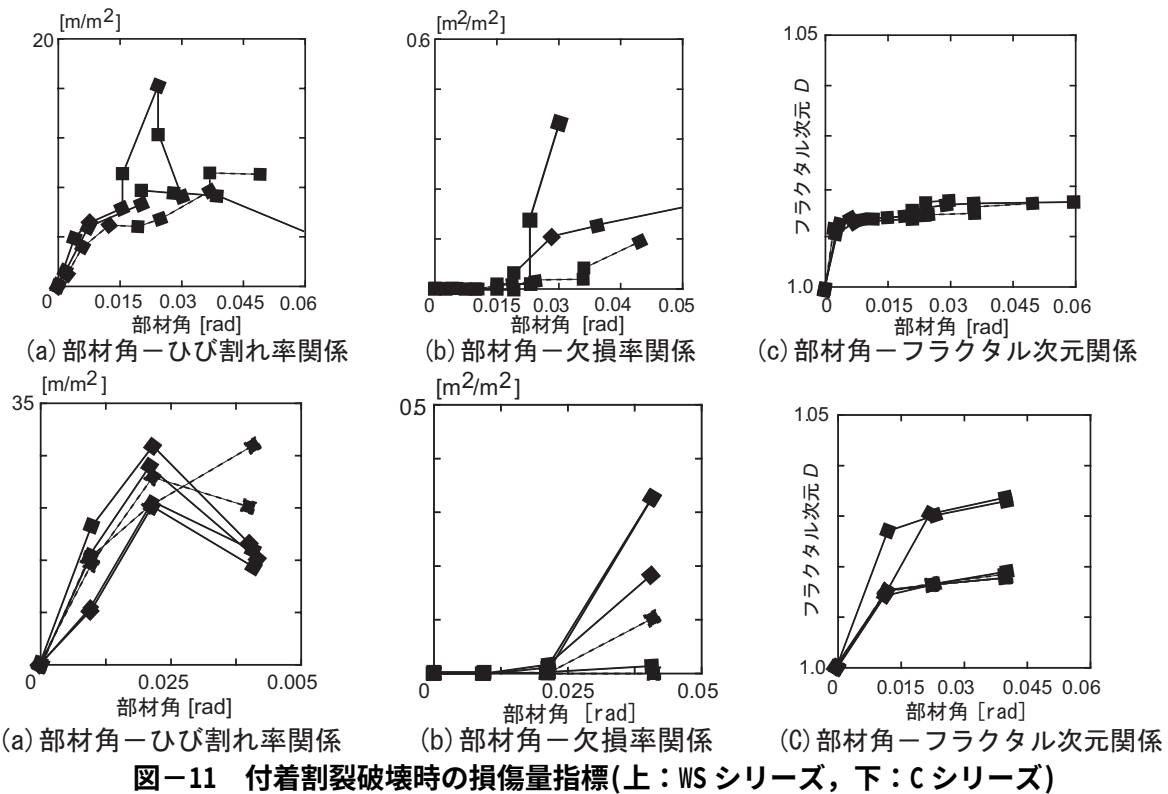


表-3 試験体 WS7A0.33 のひび割れ図

変形角(rad)	0.0022	0.0095	0.0190	0.0190	0.0285	0.0380	0.076
塑性率	0.232	1.0	2.0	2.0	3.0	4.0	8.0
ひび割れ図							