コンクリートの破面解析に用いる主要特徴量に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON MAJOR PARAMETERS OF FRACTOGRAPHY FOR CONCRETE

佐藤 あゆみ*, 山田 寛次**, 石山 智***
Ayumi SATOH, Kanji YAMADA and Satoru ISHIYAMA

This study discusses experimentally the relationship between the major nine parameters used for fractography of concrete and the mechanical properties of the specimens. The authors employed 18 types of specimens made of different mix proportions of concrete with a different maximum size, a different quantity, a different fineness modulus and the brand of aggregates, but the water-to-cement ratio is about the same. They include not only monolithic specimens made of cement paste or mortar, but also jointed specimens with placing joint at the center. The authors obtained mechanical properties and fractographic parameters with testing and analyzing such various types of concrete specimens. The findings are as follows:

1. The nine fractographic parameters are closely related to each other reflecting the extent of crack paths and the depth of fracture process zone, though they have the different viewpoints with focusing on the extreme points (i.e., the height or its derivatives), the increase of the length or the area from the projected ones, or the local curvature.
2. The most consistent fractographic parameter to the mechanical properties is R_s (the ratio of the fractured surface to the projected one) among the parameters analyzed in this study, which is considered to be the results of the extent of crack paths and the depth of fracture process zone. Other 8 parameters are closely related parameters to R_s .

Keywords: Concrete, Fractography, Fracture Energy, Fractal

コンクリート, 破面解析, 破壊エネルギー, フラクタル

1. はじめに

コンクリートは国土の基盤構築にとって最も重要な建設材料の一つであり、その時々から多くの課題が要求されてきた。構造に関するものとして、近年では、都市の高層化に対する材料強度向上、耐震性や破壊時の安全性向上のための靱性向上、また経年劣化に伴う補修時の界面付着性能向上などが、コンクリートの材料的課題として挙げられる。実はこれら課題は材料技術的には同じひびわれ伸展抵抗性に関しており、その解決にはひび割れ伸展に関する本質的な研究が有効である。その際、ひびわれ伸展の結果である破壊面に着目し、破面解析によって検討を行うことが有力な方法の一つであると考えられる。

破面解析は、主に金属材料の破断面を調査して、破壊機構や破壊原因の究明を行い問題の解決を図るものとして発達した¹⁾。コンクリートの場合、金属に比し極めて非均質であるため、その適用に注意を要する。つまり、コンクリートでは破断に先立ち安定な微細ひび割れによる破壊進行領域(FPZ)が生じ、ある瞬間それら微細ひび割れを縫うようなひび割れとなって破面を形成する²⁾。このように複

雑なプロセスを含むが、リガメント領域の非均質性は破壊エネルギーの増加をもたらす、非均質性により迂回するひび割れ伸展により形成される破面の特徴量に間接的に反映されると考えられる。従って最終的な破面に着目しても破壊エネルギーとの関係を論じられると考えられる。さらに強度は破壊途上で生じるが、その時のひび割れの状態が複雑なほど破壊強度に達した実面積が大きいことを意味し、その形態は最終的な破面に残っている。これらのことから、コンクリートにおいて力学特性値と破面解析を結びつけようとする既往の研究は多い。表1に、既往の研究で用いられた代表的な特徴量の名称とそれを扱った文献名^{3~30)}を示す。このように、コンクリートの破面は不規則な形状を示すため、フラクタル次元のように波形の単純化を扱う研究が多いことが分かる。これらの研究では単一の特徴量を元に説明しようとしており、様々な特徴量を元にその相互関係を包括的に調べた例は少ない。またそれら既往の研究では、特定の調査による一体打ちコンクリートの破面を対象にしており、本研究で対象とするような異なる種類と粒度の骨材を使用し、また打継ぎなどの界面を有するなど、幅広い試験体を対象にした例はない。

* 熊本大学自然科学研究科環境共生工学専攻
助教・博士(工学)

** 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科
教授・博士(工学)

*** 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科
助教・博士(工学)

Research Assoc., Architectural and Civil Engineering, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University
Prof., Dept. of Architecture and Environment Systems, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University
Research Assoc., Dept. of Architecture and Environment Systems, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University

以上の背景の元で、著者らは、破面解析によってひび割れ伸展への抵抗(強度)とそれに伴う靱性発現の本質に迫ることを目的に研究を進めている。本研究では、コンクリートの破面解析で求められる特徴量がどのように材料の力学特性値と関連するのかについて実験的な考察を行う。まず、コンクリートにおける既往の破面解析で使用された特徴量をレビューし、その中から強度と靱性に深く関係すると考えられる主要な特徴量を9つ選択した。その後、これらを一体打ち試験体(18種類)および打継ぎ試験体(25種類)により求め、それらの相互関係を実験的に明らかにし、その特徴量がどのような関係で力学特性値と結びつくかを考察する。

2. 既往の研究

破面の特徴量として、破面の増分に関する割増率があり、例えば面積割増率 R_s は実測した破面の表面積を投影面積で除することで得られる特徴量である^{3~8)}。Chupanit ら⁸⁾は骨材種類、骨材寸法を変えたコンクリートのコンパクトテンション試験を行い、破壊エネルギーと R_s との間に比例関係があると報告している。割増率は比較的簡便に評価できるが、測定解像度への依存が大きく、測定間隔を小さくするほど破面中の細かい凹凸が観察され、同一破面であっても特徴量は大きくなってしまふことが欠点である。

測定間隔の影響を受けにくく、同様の測定法で評価できる特徴量にフラクタル次元がある^{3, 4, 7, 9~19)}。フラクタル次元は破面の自己相似性に着目して、複数の測定間隔の結果を用いて算出され、次元が大きいほど破面が複雑であることを表す特徴量である³¹⁾。フラクタル次元と機械的性質との関連を論じた研究として、三橋らの研究⁴⁾が先駆的で、フラクタル次元の測定手順を比較したほか、骨材粒径の異なるコンクリートの破面の複雑さが破壊エネルギーと直接的な関係にあることを明らかにしている。

その他、JIS 規格の表面粗さパラメータ³²⁾によって破面を評価した研究^{20, 21)}もみられる。例えば、田嶋ら²⁰⁾は水セメント比と材齢が破面と力学特性値に及ぼす影響を算術平均粗さ R_a で評価した。 R_a は表面性状パラメータの一つであり、基準長さにおける高さの絶対値の平均値である。また、破面の凹凸を測定し2次元フーリエ変換を行ってその周波数特性から破面の形態を特徴付けようとする研究²⁴⁾など、破面周期や角度に着目した研究^{24~27)}もある。骨材とモルタルとの界面面積など構成要素の破壊面積率^{4, 28~30)}によって破面を評価した研究も見られる。

著者ら²²⁾は新しい破面の特徴量として破面高さ分布の標準偏差 S_d に着目している。 S_d は全測定点に対する平均面からの高さの標準偏差である。つまり、その面からの全測定点に対する二次モーメントの平方根である。その結果、他の特徴量と同じく、 S_d は力学特性値と正の相関があることを示した。その他にも、試験体の分離抵抗性が破面局所の曲率半径に表れると予想し、曲率半径に着目した特徴量 R_r を提案した²³⁾。

以上のレビューより、線分割増率 R_L 、面積割増率 R_s 、走査線フラクタル次元 D_1 、面フラクタル次元 D_2 、算術平均粗さ R_a 、最大断面高さ P_t 、また著者が提案した高さ分布の標準偏差 S_d 、曲率半径の分布割合 R_r 、最大高さ H_m の合計9つの特徴量を、破面解析の主要特徴量として決定した。3章以降の特徴量評価では、これら9つの特徴量によって破面を評価していく。

3. 実験

3.1 試験体作製

破面解析の特徴量間の関係を調べるために、様々な条件を持つ試験体で実験を行った。本研究では、表2に示す18種類の調査を用いて梁型試験体を作製した。全ての調査でセメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)を使用し、混和剤はメタクリル酸ポリマー高性能 AE 減水剤を使用した。粗粒率 FM は細骨材と粗骨材全体の値であり、C、B493 や H494 が標準的な骨材粒度分布を持つ調査である。表3に使用した骨材の名称と物性値を示す。

これら調査を用いて、一体打ち試験体と打継ぎ試験体を作製した。すべての試験体寸法は、 $100\times100\times400\text{mm}$ の梁形とし、各水準3体ず

表1 コンクリートの破面状態を示す定量的な特徴量

特徴量の名称		主要文献
割増率	線分割増率 R_L	3)
	面積割増率 R_s	3), 4), 5), 6), 7), 8)
フラクタル次元	線フラクタル次元 D_1	3), 4), 7), 9), 10), 11), 12), 13), 14)
	面フラクタル次元 D_2	4), 15), 16), 17), 18), 19)
高さ分布	算術平均粗さ R_a (JIS規格)	20), 21)
	高さ分布の標準偏差	22)
曲率半径	曲率半径の割合 R_r	23)
破面周期、角度	スペクトル	24), 25)
	確率密度分布	26), 27)
構成要素の破壊面積率	骨材界面面積率	4)
	骨材破壊面積率	28)
	破壊面積率	29), 30)

表2 調査表

調査名	W/C (%)	骨材最大粒径(mm)	骨材量 (L/m^3)	粗粒率 FM	圧縮強度 (N/mm^2)	使用骨材
C	51.4	25.0	706	4.93	42.0	N_s, N_G
S50	51.4	25.0	703	4.92	45.4	N_s, N_G, S_s
S100	51.4	25.0	700	4.94	46.3	N_G, S_s
B493	51.4	25.0	706	4.93	52.0	N_s, N_G
B524	51.4	25.0	706	5.24	52.8	
B456	51.4	25.0	706	4.56	50.8	
B422	51.4	25.0	706	4.22	37.3	
B356	51.4	10.0	706	3.56	42.1	
B234	51.4	5.0	526	2.34	58.9	N_s^*
H494	50.0	20.0	709	4.94	46.3	H_s, H_G
H528	50.0	20.0	709	5.28	45.1	
H473	50.0	20.0	709	4.73	46.5	
H425	50.0	20.0	709	4.25	43.0	
H263	50.0	5.0	512	2.63	47.5	H_s^*
H419	50.0	5.0	512	4.19	45.2	
H343	50.0	5.0	512	3.43	56.9	
H188	50.0	1.2	512	1.88	48.7	
CP50	50.0	-	0	-	41.6	無し**

*:モルタル, **:セメントペースト

表3 使用骨材

骨材種類	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)
N_s : 秋田県産普通細骨材	2.49	1.97
N_G : 秋田県産普通粗骨材(砕石)	2.60	2.49
H_s : 埼玉県産高強度細骨材(硬質砂岩砕砂)	2.64	1.48
H_G : 埼玉県産高強度粗骨材(硬質砂岩砕石)	2.68	1.01
S_s : 高炉スラグ細骨材	2.64	1.09

(a) 一体打ち試験体

(b) 打継ぎ試験体

図1 一体打ち試験体と打継ぎ試験体の寸法

図2 破壊靱性試験

つ作製した。打継ぎ試験体は、先打ち部の打設および養生後に表面処理を施し、打継ぎを行った(図1参照)。表面処理として、目荒し、打継ぎシートなど複数種類を行ったが³³⁾、本稿ではまとめて打継ぎ試験体として表示する。試験体作製方法の詳細は既報の論文³³⁾に示すとおりである。

3.2 破壊靱性試験

所定的水中養生後、3点曲げによる破壊靱性試験をスパン 300mmで行い(図2参照)、荷重およびクリップゲージによる開口変位(以下、CMOD)を測定した。本研究ではスパン中央部に高さ 50mmの切欠きを入れ、また自重の影響を防ぐためカウンターウェイトを取付けている。なお、力学特性として曲げ強度 F_b 、荷重-CMOD 曲線下の面積から求められる破壊エネルギー $GF_{(WOF)}$ を評価した²³⁾。

4. 破面解析

4.1 破面の測定

破壊靱性試験後、分離した破面を 1cm 厚程度に切り出して絶乾後デシケータで保存した。それら破面のリガメントに対して、レーザー光式の非接触三次元形状測定装置によって破面高さの測定を行った。レーザー光は x 方向に走査させ、順次 y 方向の位置をずらすことで、破面全体を測定した。測定間隔は x, y 方向ともに 50 μ m であり、三次元の座標を有する点群として記録される。測定によって得られた三次元データは、点群処理ソフトウェアによって、200 μ m 間隔に間引き、三角形のメッシュに変換した。三角形のメッシュに変換することで図3に示す破面の鳥瞰図が得られ、鳥瞰図をもとに破面の高さ分布マップと曲率半径の分布マップを作成した。

また、高さ分布に関する特徴量を求める際、本研究で考慮した点として、基準面の設定方法がある。試験体の多くは、粗骨材によるひび割れ偏向の影響を受けて、図4(a)のように切欠きの直上からはずれた位置に破面が生じる。既往の研究は図4(a)のように切欠き面

図3 コンクリート破面のマップ

(a) 切欠き面基準

(b) 平均面基準

図4 基準面の位置

を基準に破面の高さを算出しているが、本研究では図4(b)に示すとおり、破面の平均面を基準面に用いる方法(ベストフィット)を採用した。これは JIS 規格³²⁾の表面性状特徴量が、実測の高さ分布からうねりを除いて粗さを算出しているのに着想を得たものである。リガメント部分のベストフィットによる平均面を基準にして、下記の特徴量を求めた。

4.2 破面の特徴量の算出

本研究では破面の測定結果から得られたデータを元に、破面の特徴量として2章で述べた9種、つまり(1)割増率(R_L , R_S), (2)フラクタル次元(D_1 , D_2), (3)破面の高さ分布に関する特徴量(R_a , P_t , H_m , S_d), (4)曲率半径の分布割合($Rr1$)を求めた。以下に特徴量の求め方を示す。なお、断面曲線は各破面につき3断面測定し、それらから算出される特徴量の平均値を採用した。

(1) 割増率

線分割増率 R_L は、図5に示すように実測の断面曲線長 L を投影長さ L_0 で除すること($R_L = L/L_0$)で求めた。同様に面積割増率 R_S は実測した破面の表面積 S を投影面積 S_0 で除すること($R_S = S/S_0$)で求めた。ここでは 50 μ m のメッシュで測定し、200 μ m で間引いた三角形メッシュの総面積を S としている。

(2) フラクタル次元

断面曲線を扱う走査線フラクタル次元 D_1 の場合、図5のデバインド

一法もしくはボックスカウンティング法で算出することができる。
本研究では、デバイダー法を用いてフラクタル次元 D_1 を推定した^{34,35)}。この時、フラクタル次元 D_1 は(1)式で表すことができる。

$$N(r) = kr^{-D_1} \quad (1)$$

ここで r : 被覆するデバイダー線分長, $N(r)$: r で被覆したときのデバイダー数, k : 正の定数, D_1 : 走査線フラクタル次元である。

これらの式に従って、段階的に r の長さを変えた $N(r)$ の計測結果を縦軸に, r を横軸に両対数グラフに描いた場合、破面に自己相似性があれば両者には一次の関係が得られる。この関係の勾配が走査線のフラクタル次元 D_1 に該当する。

また、破面の表面積を扱う面フラクタル次元 D_2 も断面曲線の場合と同じで、測定間隔 r を変えたメッシュで破面を被覆し(2)式で求められる。

$$S(r^2) = S_0 \cdot (r^2)^{-\frac{D_2-2}{2}} \quad (2)$$

ここで, $S(r^2)$: メッシュ間隔を r で測定した実面積, S_0 : 投影面積, D_2 : 面フラクタル次元である。

(3) JIS 規格の表面粗さ特徴量

算術平均粗さ Ra は JIS 規格³²⁾の表面性状特徴量の一つであり、図 6 の基準長さ(L_r)における高さの断面曲線($Z(x)$)の絶対値の平均値として、(3)式として求められる。

$$Ra = \frac{1}{L_r} \int_0^{L_r} |Z(x)| dx \quad (3)$$

また、基準長さ(L_r)における最高高さと最低高さの差が、最大断面高さ Rz (本稿では P_t)である。

(4) 破面高さ分布の標準偏差 S_d

高さ分布の標準偏差である S_d は、破面高さ分布の確率密度関数から導出が可能である。確率密度関数は基準面を基準にした場合の高さ分布を水平投影面上に等間隔で測定して、図 7 の模式図に示すように破面全体として一つの確率密度関数を構成するように表したものである。破面の高さ分布の分散 Var と標準偏差 S_d は次式で求められる。

$$Var = \int_{-\infty}^{\infty} (y - \mu)^2 f(y) dy, \quad sd = \sqrt{Var} \quad (4)$$

ここで, y : 平均面からの高さ, μ : 平均値, $f(y)$: 確率密度である。

また、最大断面高さと同様の考えで、破面全体の最高高さと最低高さとの差を最大高さ H_m として定義することができる。

(5) 曲率半径に関する特徴量の測定

著者らは、試験体の分離抵抗性が破面局所の曲率半径に表れると予想し、曲率半径に着目した特徴量を提案した。本研究で使ったプログラムでは、測定点のメッシュ上で、曲率半径 R を計算する点を中心に正負方向に平均的に合計 11 点を取り二次曲線に近似し、下式から曲率半径 R を計算している。このとき x , y 二方向について

図 5 割増率とフラクタル次元の測定方法

図 6 破面の粗さ曲線

図 7 破面高さの確率密度関数

計算し、小さい方をその点の R とする。

$$R = \left[1 + (f'(x))^2 \right]^{3/2} / f''(x) \quad (5)$$

ここで, R : 曲率半径, $f(x)$: 近似曲線の関数である。

本研究では破面の微小な形状の曲率半径の分布を求め、曲率半径が 1mm 以下の結果が破面全体に占める割合を $Rr1$ とした。

5. 結果および考察

5.1 破面の特徴量と力学特性値との関係

図 8 に破面の特徴量と曲げ強度 Fb との関係を示す。図 9 に破面の特徴量と破壊エネルギー $GF_{(WOF)}$ との関係を示す。図 8 と図 9 には骨材の種類も異なり、また一体打ちと打継ぎ試験体の両方を含むが、それぞれの特徴量と相関関係があり、破面の特徴量が大きいほど力学特性値が高いことが判明した。

図 8 破面の特徴量と曲げ強度との関係

今回用いた試験体の一部を用いて行った断面内応力分布のモデル化と引張軟化曲線の形態を調べた既往の研究³⁶⁾で、 F_b は材料の引張強度(F_t)と一次の比例関係にあり、 $GF_{(wof)}$ は F_t と二次の比例関係にあることが示唆された。また、ひび割れの状態が複雑なほど破壊強度に達した実面積が大きく F_t は大きいと考えられる。従って、 F_b は各特徴量と一次関係の回帰関数を、 $GF_{(wof)}$ は二次および確認のために一次の両方で回帰関数を計算した。さらに F_b と $GF_{(wof)}$ とも回帰関数は原点を通らないと仮定している。これは例えば、平滑で特徴量が 0 であっても化学的な結合力などで抵抗力は生じ、その結果 $GF_{(wof)}$ も生じると考えたためである。

図 8 と図 9 の相関係数を求めた結果を表 4 に示す。この時、 R_L と D_1 は取り得る最小値が 1 であるため、二次関数の頂点は $x=1$ の軸上にあるように決めた。同様に D_2 は頂点が $x=2$ の軸上にあるように

図 9 破面の特徴量と破壊エネルギーとの関係

決めた。破面の特徴量は断面線に関するものと全面に対するものに分けられ、また高さに直接関係するものと高さに間接的に関係するものに分けられるのでそのように分類して示す。なお、ここで用いた相関係数は回帰曲線のカイ二乗を含む次式により計算した。

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (6)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{\sum_i \sigma_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

ここで、 χ^2 : カイ二乗、 (x_i, y_i) : i 番目の x および y のデータポイントの値、 σ_i : 重み(標準偏差)、 R : ピアソンの相関係数、 $(\bar{x}, \bar{y})$: x および y それぞれのデータの平均値である。

表 4 Fb および GF_(WOF) と破面解析特徴量との相関係数

対象	断面線				全面					回帰 関数
	高さ		高さに関係		高さ		高さに関係			
	Pt	Ra	R _L	D ₁	Hm	Sd	R _s	D ₂	Rr1	
	(mm)	(mm)	(-)	(-)	(mm)	(mm)	(-)	(-)	(-)	
Fb	0.793	0.795	0.751	0.868	0.647	0.760	0.851	0.670	0.836	一次
GF _(WOF)	0.933	0.925	0.804	0.882	0.819	0.902	0.929	0.615	0.791	一次
	0.935	0.919	0.771	0.882	0.851	0.916	0.932	0.481	0.722	二次

表 5 破面特徴量間の相関係数

	Pt	Ra	R _L	D ₁	Hm	Sd	R _S	D ₂	Rr1
Pt	1.000	0.986	0.821	0.859	0.897	0.962	0.898	0.595	0.801
Ra		1.000	0.808	0.838	0.912	0.985	0.899	0.591	0.797
R _L			1.000	0.918	0.657	0.765	0.865	0.727	0.745
D ₁				1.000	0.700	0.797	0.890	0.666	0.829
Hm					1.000	0.937	0.782	0.497	0.705
Sd						1.000	0.874	0.565	0.789
R _S							1.000	0.604	0.787
D ₂								1.000	0.708
Rr1									1.000

D₁-D₂, R_L-R_S だけは二次関数で回帰, 他は一次関数で回帰

表 4 から GF_(WOF) の相関係数が Fb のそれよりも全体的に高めであることが分かる。GF_(WOF) が内部欠陥の分布状態で影響を受ける結果、破面の特徴量に現れるのに対して、強度は内部欠陥の分布状態よりもその大きさによって影響を受けると考えるとこの傾向は理解できる。また GF_(WOF) では近似関数が一次でも二次でも、D₂ を除いて相関係数は大差ないことが分かる。D₂ では(2)式から分かるように面積に関する特徴量であるため、さらに二次関数で近似することは意味がないことを示している。

5.2 破面の特徴量間の関係

(1) 一次元特徴量と二次元特徴量間の関係

図 10 は一次元特徴量と二次元特徴量間の関係について見たものである。R_S-R_L 関係は予想されるように二次の関係である。Hm-Pt の関係は、一対一の対応からずれており、断面線が必ずしも最大高さの部分を含んでいないことを示している。D₂-D₁ 関係はきわめて曖昧であるが、これは表 4 にも現れているように D₂ がばらついてい

(2) 主要特徴量間の関係

図 11 は代表的な破面の特徴量間の関係を示す。また、全ての破面の特徴量間の相関係数を計算した結果を表 5 に示す。ここでは前項と同じ理由により R_S-R_L 関係は x=1 の軸上に頂点がある二次関数で回帰した。また D₂-D₁ 関係は物理的な意味が曖昧であるが一次関数よりも二次関数の方で相関係数がわずかに高かったため、同様な二次関数で相関係数を求めた。他の関係は一次関数で回帰している。これから Sd-Hm や Sd-Pt 間のように、高さの特徴量同士の間には強い相関関係がある。一方で、本研究では骨材の種類が様々であるため、骨材のエッジを対象とする Rr1 では全体的に他の特徴量との相関係数が小さい。また、Pt や Hm のようなピークだけの値ではなく統計処理を行った Ra や Sd で相関係数が高くなっていることが分かる。図 11(f) は D₁-R_L 関係である。既往の研究⁴⁾でも示されたように D₁-R_L には強い相関関係がある。D₁-D₂ の関係は前述の理由により D₂ のばらつきが大きかったが、いずれにしても表 5 に掲げる特徴量同士は、程度の差はあるがお互いに密接な関係にあると言える。

5.3 破面解析特徴量の意義

著者が考察してきた 9 種類の破面特徴量を分類すると表 6 に示す

図 10 一次元と二次元の破面の特徴量間の関係

図 11 破面の特徴量間の関係

表 6 破面特徴量の分類

対象	破壊した経路とその影響範囲				
	到達点		増加		局所
	高さ	統計量	増加率	増加傾向	
断面曲線	Pt	Ra	R_L	D_1	
全破面	Hm	Sd	R_S	D_2	Rr1

図 12 破面の特徴量の因果関係

とおりである。高さに着目した特徴量では、異常値を排除できる Ra や Sd が改善された特徴量で、表 4 に示す力学特性値との相関係数の高さに現れている。それらは破壊進展経路の最大到達点(高さ)に着目したものであるのに対し、微分的な視点から断面線や面積の増加率に着目した R_L や R_S が存在する。それらがデバイダー長さを変えることによって変化するのに対して、増加の傾向を一つの特徴量に置き換えたフラクタル次元があり、表 4 に見るようにこれらの中には Ra や Sd よりも力学特性値との相関係数の高いものがある。特に破面面積の増加率 R_S は Fb にも $GF_{(WOF)}$ にも相関係数が高く、注目される。

以上の考察をもとに破面特徴量と力学特性値との因果関係を推定すると、図 12 のように表される。つまりコンクリートの非均質性に由来してひび割れは方向転換が多くなることで破面の高低差は高くなり、それに伴い破面の長さや面積の増加傾向が大きくなり、最終的に破面に現れる実長や面積が大きくなるのである。それぞれに対応して破面特徴量が計算されていると考えることが出来る。最終的に破壊した領域が広ければ投影面積当たりの強度が高く、破壊進行領域が広いことを意味し、破壊表面積の増加に伴う消散エネルギーの増大により $GF_{(WOF)}$ が高くなると考えられる。断面線を対象にするよりも、全破面を対象にした特徴量が適切であることは当然考えられる。つまり、 R_S が力学特性値に最も近い特徴量と推定され、表 4 でも R_S において力学特性値との相関係数が高い結果となっている。フラクタル次元もフラクタル性がデバイダー長に拘わらず全領域で成立すれば同じ結果となると考えられるが、本研究のように骨材最大粒径に比して小さい領域を対象にした場合、多種多様のコンクリート破面では結果的にフラクタル性の推定に困難を来たして、 D_2 の推定に大きな誤差を生じ、相関係数が小さくなってしまう場合もある。

6. 結論

本研究ではコンクリートの破面解析に用いられる 9 種類の特徴量と力学特性値との関係を実験的に考察した。試験体に用いたコンクリートは、骨材量と骨材の最大粒径、銘柄、粗粒率が異なり、水セ

メント比が 50%程度の 18 水準であり、その中にはセメントペースト、モルタルも含んでいる。また試験体は一体打ちだけではなく、打継ぎを行ったものも含まれている。そのような多種多様なコンクリートの破壊靱性試験と破面解析を行い、力学特性値と破面解析特徴量を算出した。その結果、下記の点が明らかになった。

(1) 9 種類の特徴量は、高さという到達点に着目するか、投影長さや投影面積からの増加に着目するか、局所的な曲率に注目するかの違いだけではあるが、結局破壊した経路とその影響範囲を表しているため、お互いは密接な関係にある。

(2) コンクリートの非均質性に由来するひび割れ伸展経路とその影響範囲の広がり、検討した特徴量の中では、最終的に破面の面積増加率(R_S)でより良く表され、本研究では力学特性値と最も対応が良かった。

なお、本論文の破面解析は、試験体ごとに異なる破面を一般化して定量値(破面特徴量)とし、それと力学特性値とが間接的な相関関係にあるということを示すものである。つまりそこでは、ひび割れ伸展の過程の考察は出来ず、また特徴量に対して力学特性値を直接的に結びつけられない。しかし、著者は続報においてコンクリートの非均質性を一般的なモデルに表して有限要素解析することで、破面解析の拡張を試みる予定である。

謝辞

本論文の最後のまとめにあたり、熊本大学・村上聖教授にご指導を頂いた。さらに、本論文の基となる筆頭著者の学位論文執筆にあたり、岐阜大学・六郷恵哲教授、秋田県立大学・小林淳教授、東北大学・三橋博三名誉教授にご援助を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小寺沢良一：フラクトグラフィ(1)(破面解析)，材料，Vol.23，No.248，pp.412-421，1974.5
- 2) 三橋博三，梅岡俊治，三浦悟：セメント硬化体の破面解析に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集 No.445，pp.19-25，1993.3
- 3) G. Prokopski and B. Langier: Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 9, pp. 1427-1433, 2000
- 4) 三橋博三：骨材粒径を変えたコンクリートの破面解析，日本建築学会構造系論文報告集，第 453 号，pp. 1-7，1993.11
- 5) D. Zampini, H. M. Jennings and S. P. Shah: Characterization of the paste-aggregate interfacial transition zone surface roughness and its relationship to the fracture toughness of concrete, Journal of Materials Science, Vol. 30, No. 12, pp. 3149-3154, 1995
- 6) T. Ficker, D. Martišek and H. M. Jennings: Roughness of fracture surfaces and compressive strength of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 40, No. 6, pp. 947-955, 2010
- 7) 国枝稔，林承燦，鎌田敏郎，六郷恵哲，栗原哲彦：コンクリートの破断面の表面積とフラクタル次元，土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部，Vol. 52，pp. 720-721，1997
- 8) P. Chupanit and J. R. Roesler: Fracture energy approach to characterize concrete crack surface roughness and shear stiffness, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, No. 275, pp. 275-282, 2008
- 9) L. T. Dougan and P. S. Addison: Estimating the cut-off in the fractal scaling

- of fractured concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 7, pp. 1043-1048, 2001
- 10) V. E. Saouma, C. C. Barton and N. A. Gamaleldin: Fractal characterization of fracture surfaces in concrete, Engineering fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1-3, pp. 47-53, 1990
  - 11) M. A. Issa, A. M. Hammad and A. Chudnovsky: Correlation between crack tortuosity and fracture toughness in cementitious material, International Journal of Fracture, Vol. 60, No. 2, pp. 97-105, 1993
  - 12) B. Chiaia, J. G. M. van Mier and A. Vervuurt: Crack growth mechanisms in four different concretes: Microscopic observations and fractal analysis, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 1, pp. 103-114, 1998
  - 13) K. Wu, A. Yan, J. Liu, D. Zhang and W. Yao: Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 6, pp. 981-987, 2000
  - 14) L. Czarnecki, A. Garbacz and J. Kurach: On the characterization of polymer concrete fracture surface, Cement and Concrete Composites, Vol. 23, No. 4-5, pp. 399-409, 2001
  - 15) Y. Wang and S. Diamond: A fractal study of the fracture surfaces of cement pastes and mortars using a stereoscopic SEM method, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 10, pp. 1385-1392, 2001
  - 16) M. A. Issa, M. A. Issa, M. S. Islam and A. Chudnovsky: Fractal dimension - a measure of fracture roughness and toughness of concrete, Engineering fracture Mechanics, Vol. 70, No. 1, pp. 125-137, 2003
  - 17) A. Yan, K. Wu, D. Zhang and W. Yao: Influence of concrete composition on the characterization of fracture surface, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, No. 1, pp. 153-157, 2003
  - 18) Y. -S. Roh and Y. Xi: The fracture surface roughness of concrete with different aggregate sizes and loading rates, American Concrete Institute Special Publication, Vol. 201, pp. 35-54, 2001
  - 19) V. Mechtcherine: Fracture mechanical behavior of concrete and the condition of its fracture surface, Cement and Concrete Research, Vol. 39, No. 7, pp. 620-628, 2009
  - 20) 田嶋和樹, 白井伸明, 森泉和人, 渡部憲: 水セメント比と材齢の異なるコンクリートの引張軟化特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 169-174, 2002
  - 21) 安江正文, 金子林爾: 各種高強度コンクリートの水平打継ぎ面粗さが破壊特性に及ぼす影響 その2: 引張軟化曲線による評価と供試体破断面のフラクトグラフィー, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第42号, pp. 141-144, 2004
  - 22) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 破面解析に基づく高さの確率密度関数を用いた新旧コンクリート界面における機械的性質の新しい評価指標, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第655号, pp.1587-1594, 2010.9
  - 23) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの打継ぎ界面の力学特性値と破面特徴量との関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.2, pp.55-60, 2010
  - 24) 佐藤良介, 和田俊良, 上田正生: 2次元フーリエ変換を用いたコンクリート亀裂面の形状解析手法の開発ーコンクリート亀裂面の周波数特性に関する解析的研究 その1ー, 日本建築学会構造系論文集, 第589号, pp. 105-112, 2005.3
  - 25) 中村裕, 三橋博三: コンクリート破面特性の定量的評価方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp. 989-990, 1995
  - 26) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定手法の開発とデータの2次元分析手法の提案ーコンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究 (その1)ー, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp. 179-188, 1996.12
  - 27) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 182pages, 1991
  - 28) K. Wu, J. Liu, D. Zhang and A. Yan: Rupture probability of coarse aggregate on fracture surface of concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 12, pp. 1983-1987, 1999
  - 29) A. B. Nichols and D. A. Lange: 3D surface image analysis for fracture modeling of cement-based materials, Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 6, pp. 1098-1107, 2006
  - 30) 辻幸和, 古沢政夫, 長谷川幹央, 森脇貴志: ポリマーセメントモルタルを用いた新旧コンクリートの打継ぎ施工, コンクリート工学年次論文報告集, 第11号, 1巻, pp. 721-726, 1989
  - 31) B. B. Mandelbrot, D. E. Passoja and A. J. Paullay: Fractal character of fracture surfaces of metals, Nature, Vol. 308, pp. 721-722, 1984
  - 32) 日本規格協会編: JIS B 0601(2001), 製品の幾何特性仕様(GPS)
  - 33) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 引張軟化曲線と引拔だぼモデルによる新旧コンクリート界面の強度と靱性の関係についての考察, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第637号, pp. 417-424, 2009.3
  - 34) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, 186pages, 1986
  - 35) 石村貞夫, 石村園子: フラクタル数学, 東京図書, 259pages, 1990
  - 36) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 鉛直打継ぎ面をもつコンクリート梁の断面内応力分布モデルの提案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 30, No. 1, pp. 399-404, 2008

(2013年9月9日原稿受理, 2014年1月8日採用決定)