

論文 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

佐藤 あゆみ^{*1}・山田 寛次^{*2}・石山 智^{*3}

要旨: 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について検討した。打継ぎ時間と、高炉スラグによる骨材置換量の異なる打継ぎ試験体を作製し、破壊靱性試験を行った結果、打継ぎ界面の強度と靱性に対して、高炉スラグ細骨材による顕著な効果が現れた。さらに破面の特徴量として、今回、新たに高さと曲率半径の分布を評価した。これらの特徴量は力学特性値と密接に関係し、破面を評価する新しい指標となり得ることが確認された。

キーワード: 高炉スラグ細骨材, 界面, 強度, 破壊エネルギー, 破面解析, 曲率半径

1. はじめに

コンクリート構造物には打継ぎ面などコンクリート界面が必然的に生じるが、硬化後のコンクリートと新しく打足すコンクリートとの付着性能を向上させることは重要な課題である。特に、コンクリート構造物の長期耐用が求められ、構造物にコンクリートを打足す補修や補強工事が増加している現在、その課題克服の要求が高まっている。本研究では、界面の強度と靱性を含む力学特性値の向上を図ることを第一の目的としている。既報では、通常調合コンクリートについて、破面情報や応力分布モデルを用いた詳細な破壊機構の考察を行った^{1),2)}。

一方で、潜在水硬性を有する高炉スラグは長期強度に対する増進作用を持ち、微粉末について多くの研究が進んでいる。さらに、高炉スラグを細骨材として用いた硬化コンクリート中の化学分析によって、高炉スラグ細骨材の周囲に水和反応層が観察され、その層の生成が強度増進に影響するという報告もある^{3),4)}。

本稿は、上記の高炉スラグの特性から、高炉スラグ細骨材を砕砂細骨材に代替して、打継ぎ界面に期待される補強効果を検討したものである。さらに、破壊試験後の破面に対して、三次元測定を行い、新たな破面の特徴量を提案しその力学特性値との関係を考察した。

2. 実験

2.1 実験材料

本実験に用いた細骨材は、高炉スラグ細骨材および砕砂の2種類である。高炉スラグ細骨材は、製鉄メーカーの高炉水砕スラグである。粗骨材は砕石を、セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を使用した。

表-1 に使用した骨材の名称と物性値を示す。また図-1 は2種類の細骨材の粒度分布であり、破線は JASS5 に規

定される粒度分布範囲である。なお、全ての調合で混和剤は、メタクリル酸ポリマー高性能 AE 減水剤を、セメント質量に対して 0.5% 使用した。

2.2 調合および試験体

調合は砕砂細骨材を使用した B 調合、細骨材質量の 50% を高炉スラグ細骨材によって置換した S50 調合、同じく 100% 置換した S100 調合の 3 種類である(以下、それぞれ B, S50 および S100 と略記する)。調合表を表-2 に示す。なお、表-2 において細骨材の単位質量の表記が僅かに異なるが、これは各調合の空気量をもとに厳密に計量したことによる。

それぞれの調合に対して、破壊靱性試験用の一体打ち試験体と打継ぎ試験体を作製した。試験体寸法は、100×100×400mm の梁形とし概要を図-2(a) に示す。一体打ち試験体は 28 日材齢と 90 日材齢の 2 種類、打継ぎ試験体は先打ち打設後 1 日、28 日、90 日に打継ぎを行った 3

表-1 骨材物性値

| 骨材名称 | 種類 | 表乾密度 g/cm ³ | 吸水率 % | 粗粒率 |
|--------|---------|---------------------------|----------|------|
| 細骨材BFS | 高炉水砕スラグ | 2.64 | 1.09 | 2.47 |
| 細骨材S | 矢島産砕砂 | 2.49 | 1.97 | 2.62 |
| 粗骨材G | 矢島産砕石 | 2.59 | 2.49 | 6.70 |

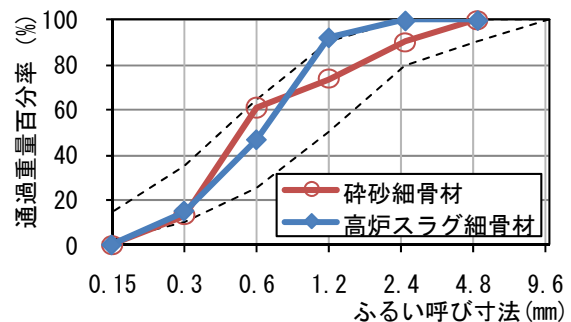


図-1 細骨材の粒度分布図

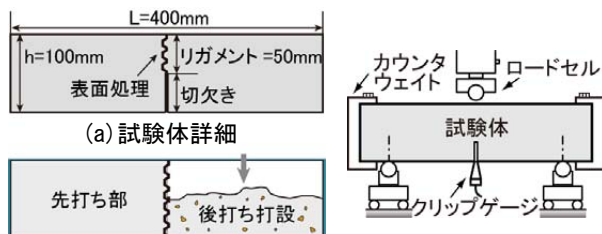
*1 秋田県立大学大学院 システム科学技術研究科 日本学術振興会特別研究員 工修 (正会員)

*2 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 工博 (正会員)

*3 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 工博 (正会員)

表-2 調査表

| 調査名 | W/C (%) | s/a (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 絶対容積 (L/m ³) | | | | 質量 (kg/m ³) | | | | 混和剤 (kg/m ³) | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|------|---------|---------|---------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-------------------------|-----|-----|------|--------------------------|-----------|---------|
| | | | | C | S | BFS | G | C | S | BFS | G | | | |
| B | 51.4 | 43.0 | 177 | 109 | 295 | - | 390 | 344 | 733 | - | 1010 | 1.68 | 21.1 | 3.0 |
| S50 | 51.4 | 42.3 | 175 | 108 | 146 | 138 | 386 | 340 | 363 | 363 | 1000 | 1.67 | 18.4 | 4.8 |
| S100 | 51.4 | 41.6 | 176 | 108 | - | 276 | 387 | 341 | - | 729 | 1003 | 1.67 | 16.0 | 5.3 |



(b) 打設方法

図-2 打継ぎ試験体の概要

表-3 試験体一覧

| 試験体名 | 調査 | 打設方法 | 材齢 (日)* | |
|------------|------|---------|---------|-----|
| | | | 打継ぎ時 | 破壊時 |
| BN-28 | B | 一体打ち | - | 28 |
| BN-90 | | | - | 90 |
| BR-0128 | B | 目荒し後打継ぎ | 1 | 29 |
| BR-2828 | | | 28 | 56 |
| BR-9028 | | | 90 | 118 |
| S50N-28 | S50 | 一体打ち | - | 28 |
| S50N-90 | | | - | 90 |
| S50R-0128 | S50 | 目荒し後打継ぎ | 1 | 29 |
| S50R-2828 | | | 28 | 56 |
| S50R-9028 | | | 90 | 118 |
| S100N-28 | S100 | 一体打ち | - | 28 |
| S100N-90 | | | - | 90 |
| S100R-0128 | S100 | 目荒し後打継ぎ | 1 | 29 |
| S100R-2828 | | | 28 | 56 |
| S100R-9028 | | | 90 | 118 |

* 一体打ちもしくは先打ち部の材齢

種類の試験体を作製した(以降、打継ぎ時の材齢は全て先打ち部のものとして表記を省略する)。試験体名および特徴を表-3に示す。試験体は各水準3体ずつ作製した。

2.3 試験体作製および荷重試験

コンクリートの混練方法は3調査全て同じとし、一体打ち試験体の打設は所定の材料を用いて、荷重方向と同方向に行った。打継ぎ試験体は、はじめに先打ち部を打設し、24時間後に脱型を行い、打継ぎ時の材齢まで水中養生を行った。所定の材齢時に、打継ぎ面に対して流水を掛けながら、ワイヤブラシによって2分間目荒しを行った。目荒し処理後の打継ぎ面は材齢の進行によって大きく異なり、材齢1日では粗骨材が見える程度に、材齢90日では細骨材が見える程度にモルタルもしくは硬化セメントペーストが除去された。その後、図-2(b)に示すように残る片側に打設した。後打ち部の打設後は試験体によらず28日間の水中養生を行なった。

所定の水中養生後、RILEM推奨の破壊靱性試験⁵⁾を行い、荷重およびクリップゲージによって開口変位(CMOD: Crack Mouth Opening Displacement)を測定した。

表-4 コンクリートの力学的性質

| 調査名 | 密度 g/cm ³ | 弾性係数 GPa | 圧縮強度 | | 引張強度 MPa |
|------|----------------------|----------|---------|---------|----------|
| | | | 28日 MPa | 90日 MPa | |
| B | 2.31 | 26.99 | 41.98 | 44.22 | 3.47 |
| S50 | 2.31 | 22.71 | 45.39 | 49.29 | 3.62 |
| S100 | 2.30 | 24.54 | 46.32 | 49.89 | 3.92 |

さらに図-3に示すように自重の影響を防ぐためカウンターウェイトを取付け、ひび割れを集中させるために荷重点下に高さ50mmの切欠きを入れた状態で荷重した。なお切欠きは、一体打ち試験体ではダイヤモンドソーを用い、打継ぎ試験体では先打ち部にテープを貼ることで入れた。また圧縮および割裂引張試験によって材料強度を調べた結果を表-4に示す。

2.4 破面解析

破壊靱性試験の後、界面の物理的特徴量を求めるために、分離したリガメントに対して、レーザー光式の非接触式三次元測定機によって高さ測定を行った。レーザー光はx方向に走査させ、順次y(リガメント高さ)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(一部200)μmピッチであり、三次元の座標を有する点群として記録される。その後、250μmピッチのフィルターでデータ数を減じた。

3. 高炉スラグ細骨材が強度と靱性に及ぼす影響

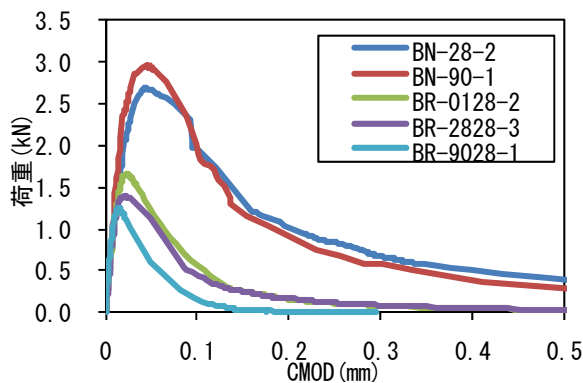
3.1 細骨材の違いが及ぼす一体打ち試験体への影響

破壊靱性試験で得られた荷重-CMOD曲線のBとS100の代表例を図-4(a), (b)に示す。また表-5に、荷重-CMOD曲線から求めた力学特性値を、3体の平均値として示す。表-5において、fbは曲げ強度、GF_(WOF)は破壊エネルギー、さらにCMOD_{px}、CMOD_{cr}は、それぞれ最大荷重時と荷重が0になった点のCMODである。なお、fbは最外縁の応力としての物理的意義は持たないが、部材としての強さを比較するために評価の対象とした。

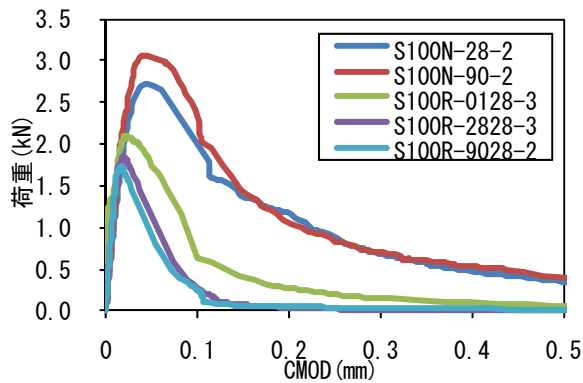
図-4および表-5より、一体打ち試験体のfbは、S50Nが他の2調査と比較すると低い結果となったが、材齢28日に比べ90日のfbが高くなる傾向は3調査に共通であった。対して、一体打ち試験体のGF_(WOF)については、BN-90は強度増進による脆化でBN-28より約1割低下する傾向にあったが、高炉スラグ細骨材を用いたS50NとS100Nでは、材齢の進展によってGF_(WOF)も増加する結果となった。CMODには明確な傾向や水準間の差が見られ

表-5 試験体の力学的性質

| | fb MPa | GF _(WOF) N/mm | CMOD _{px} mm | CMOD _{cr} mm |
|------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| BN-28 | 4.79 | 0.1088 | 0.0436 | 1.849 |
| BN-90 | 5.20 | 0.0971 | 0.0438 | 1.603 |
| BR-0128 | 3.42 | 0.0325 | 0.0274 | 1.058 |
| BR-2828 | 2.59 | 0.0264 | 0.0237 | 0.832 |
| BR-9028 | 1.98 | 0.0087 | 0.0126 | 0.264 |
| S50N-28 | 4.29 | 0.1059 | 0.0492 | 1.934 |
| S50N-90 | 4.95 | 0.1113 | 0.0461 | 4.537 |
| S50R-0128 | 3.95 | 0.0341 | 0.0260 | 0.927 |
| S50R-2828 | 3.19 | 0.0160 | 0.0179 | 0.382 |
| S50R-9028 | 2.46 | 0.0109 | 0.0131 | 0.315 |
| S100N-28 | 4.89 | 0.1027 | 0.0445 | 1.836 |
| S100N-90 | 5.18 | 0.1141 | 0.0458 | 4.267 |
| S100R-0128 | 3.78 | 0.0407 | 0.0260 | 1.081 |
| S100R-2828 | 3.45 | 0.0205 | 0.0183 | 0.582 |
| S100R-9028 | 3.14 | 0.0215 | 0.0191 | 1.090 |



(a) B 調合試験体



(b) S100 調合試験体
図-4 荷重-CMOD 曲線

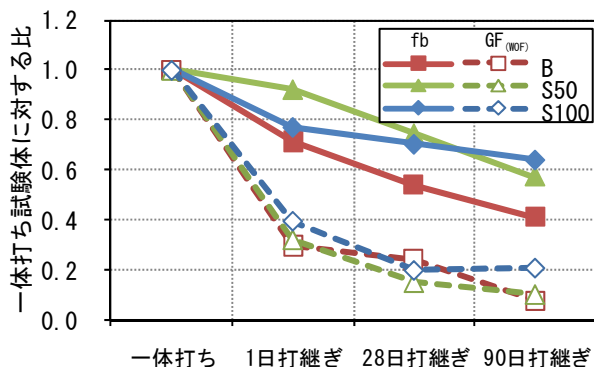


図-5 曲げ強度と破壊エネルギーの一体打ちに対する比

なかったが、材齢 90 日で打継いだ試験体では、高炉スラグ細骨材の置換量に比例して、CMOD_{px}、CMOD_{cr}共に増加傾向にあることが分かる。

3.2 細骨材の違いが及ぼす打継ぎ試験体への影響

(1) 打継ぎによる力学特性値の低下傾向

図-5 は、各調合の一体打ち試験体(28 日材齢)を元にした、打継ぎ試験体の fb と GF_(WOF)の比率を示す。図-5 の実線は fb の打継ぎによる低下率であり、打継ぎ材齢が進むほど、fb が低下する傾向が見られる。特に砕砂のみを用いた B では顕著な低下が見られ、材齢 90 日で打継いだ試験体は、一体打ち試験体の 4 割程度まで低下している。一方、高炉スラグ細骨材を用いた S50 と S100 の低下の程度は、比較的緩慢であり、S50 は材齢 1 日で打継いだ場合に 9 割以上も fb を保持した。また S100 は、材齢 90 日に打継いだ場合に 6 割以上の fb を保持しており、その比率は B の材齢 1 日打継ぎ(BR-0128)に比肩するものであった。

fb と同様に、GF_(WOF)の比率を図-5 に破線として示す。GF_(WOF)は fb と比べると、打継ぎによる低下は極めて大きく、材齢 1 日打継ぎでは、全調合で 4 割を切るまで低下した。打継ぎ時の材齢が進むほど、GF_(WOF)は低下していくが、fb の場合と同じく B と比較すると、特に S100 において低下傾向は緩やかである。

(2) 砕砂と高炉スラグ細骨材との比較

さらに、fb と GF_(WOF)の傾向を整理するため、図-6 では、B に対するスラグ試験体の fb と GF_(WOF)の割合を、試験体の作製方法(一体打ち、打継ぎ材齢)毎に示した。図-6 から、分かることは以下の通りである。

図中の実線は、fb についてまとめたものであり、一体打ち試験体(材齢 28 日)は、3 種類の調合ともほぼ同程度である。高炉スラグ細骨材の置換によって差が生じるのは、打継ぎ試験体であり、材齢 28 日で打継いだ試験体は、B に対して S50 と S100 とも 1.2 倍以上であった。S50 の B に対する fb の増加割合は、打継ぎ時の材齢が進んでも大差なく、1.2 倍程度で頭打ちであった。一方で、S100 の増加割合は、打継ぎ時の材齢が進むほど顕著になり、材齢 90 日で打継いだ場合には、1.6 倍となった。

同じく図-6 の破線は、GF_(WOF)をまとめたものであり、fb と類似した結果であるが、調合による差はより明確である。28 日打継ぎでは、他の打継ぎ材齢と異なる結果が生じているが、高炉スラグ細骨材の置換率が高いほど、打継ぎ試験体の GF_(WOF)は高いことが分かる。図中で注目されるのは、材齢 90 日で打継いだ試験体であり、B に対して S50 では 1.25 倍、S100 では 2.46 倍の GF_(WOF)であった。打継ぎ試験体の GF_(WOF)が、一体打ち試験体と比較すると極めて低い値ではあるが、高炉スラグ細骨材によって 2 倍以上もの差が生じたことは、特筆すべきである。

4. 破面の特徴量による打継ぎ界面の力学特性値の評価

4.1 破面の高さと同率半径の分布

各水準3体のうち、中間的な力学特性値が得られた試験体1体(一部は2体)の破面に対して、非接触式レーザー三次元測定機によって測定を行った。三次元データによる測定点はM社の点群処理ソフトウェアによって三角形のメッシュに変換し、その結果を元にデータ処理を行った。図-7(a)~(i)は、破面の高さ分布と同率半径の分布を示したものである。破面の高さ分布は、切欠き平面を基準とした高さを表している。これらの図から、一体打ち試験体の破面では、高低差が大きいこと、小さな曲率半径の占める領域が多いことが分かる。これに対し、打継ぎ試験体では、打継ぎ時の材齢が進むほど、破面の高低差が小さくなり、青色で表される曲率半径が7mm以上の滑らかな部分が明らかに増加することが分かる。

4.2 破面の特徴量と力学特性値との関係

(1) 曲率半径と力学特性値との関係

著者の既往の研究⁹⁾では破面の特徴量として破壊面積率(Φ)を定義し、力学特性値と密接な関係があることを示した。ただし Φ は主に目視に頼って分類しており、一

体打ち試験体では、遷移帯を明確に分離出来ずに全て同値(1.0)としていた。そこで今回、新たに曲率半径が3mm以下の部分の面積率を Φ に替えて評価を行った。最大高さと同率分布を元にした指標は目視による誤差を含まず、客観的であると考えている。なお曲率半径の閾値として3mmを選んだのは次節の考察の結果である。

曲率半径が3mm以下であるような小曲率部の面積比と f_b とを比較したものが図-8(a)である。なお、以下の図で、白抜きのプロットは一体打ち試験体である。この図から、3種類全ての調査で打継ぎ試験体、一体打ち

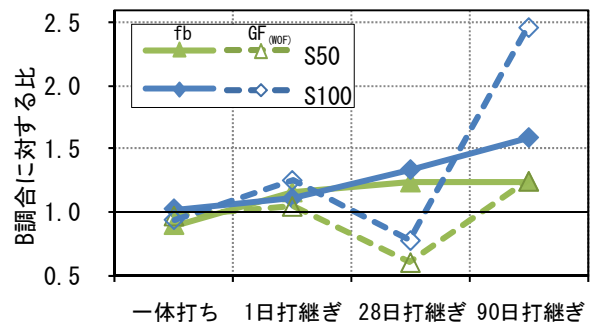
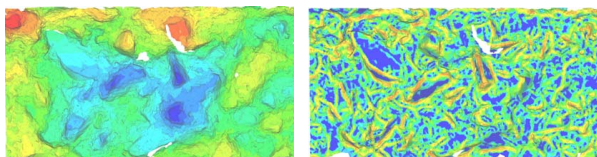
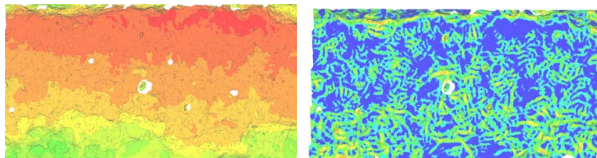


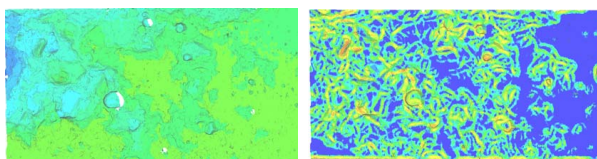
図-6 曲げ強度と破壊エネルギーのB割合に対する比



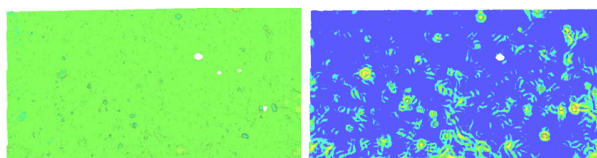
(a) BN-90-1



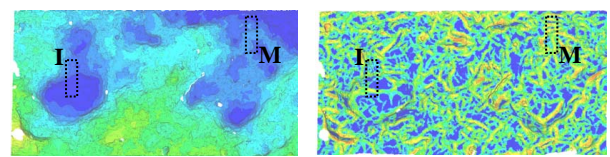
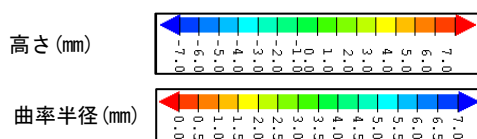
(c) BR-0128-3 後打ち側破面



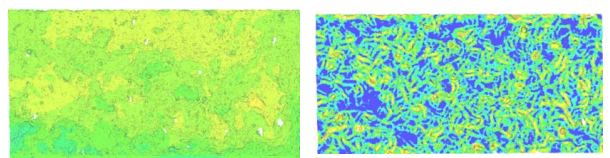
(e) BR-2828-2 後打ち側破面



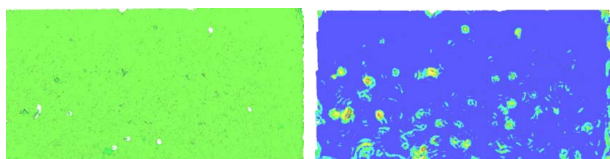
(g) BR-9028-1 後打ち側破面



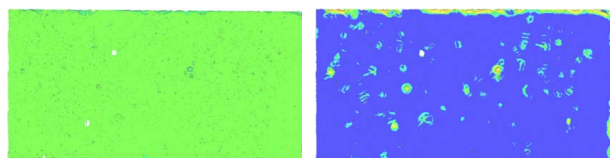
(b) S100N-28-2



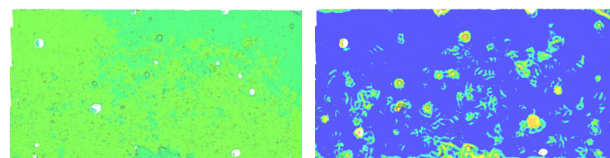
(d) S100R-0128-1 後打ち側破面



(f) S50R-2828-1 後打ち側破面

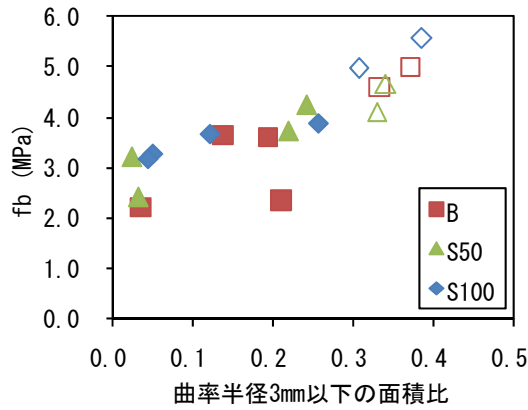


(h) S50R-9028-2 後打ち側破面

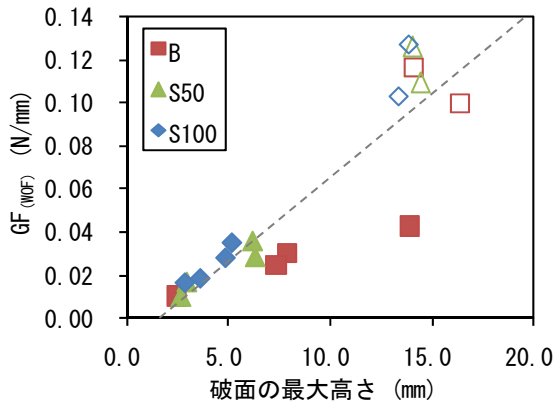


(i) S100R-9028-2 後打ち側破面

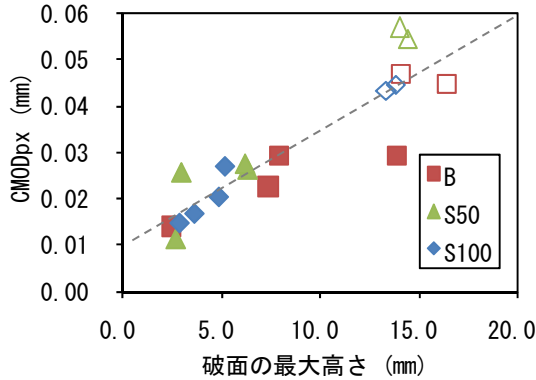
図-7 破面の三次元測定結果 (左:高さ分布, 右:曲率半径分布)



(a) 曲率半径と曲げ強度との関係



(b) 最大高さと破壊エネルギーとの関係



(c) 最大高さとCMODpxとの関係

図-8 破面の特徴量と力学特性値との関係

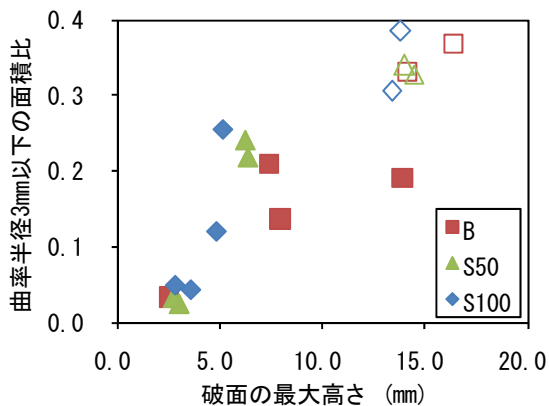


図-9 最大高さと曲率半径分布との関係

試験体に関係なく、小曲率部の面積比が増加すると、 f_b も増加する傾向にあることが分かる。

(2) 最大高さと力学特性値との関係

一方、既往の研究で明らかのように、特定の走査線上の破面最大高さが破壊進行領域(Fracture Process Zone: FPZ)⁷⁾の深さ方向の広がりや密接な関係があり、特に $GF_{(WOF)}$ と良く対応することが知られている⁶⁾。本研究ではリガメント全域における最大高さとの対応を図-8(b)に示す。

図-8(b)より、最大高さと $GF_{(WOF)}$ とは、非常に強い関係があり、材齢の違いに加え、一体打ちか打継ぎかに関係なく、1本の近似直線にはほぼプロットされる。このように、 $GF_{(WOF)}$ が最大高さに依存することは、 $GF_{(WOF)}$ を支配する破壊進行領域(FPZ)の広さと、最大高さとが密接な関係にあることを示している。この最大高さとの相互関係は、図-8(c)に示す最大高さと $CMOD_{px}$ との関係により強く表れている。この関係は $CMOD_{cr}$ に至るまで大きく崩れることはないと思われ、破面の高低差が直接 $CMOD$ と関係している結果、 $GF_{(WOF)}$ に影響したと考えられる。

しかしながら、図-8(b)と(c)において、Bの打継ぎ試験体(BR)は直線下方に分布する傾向が見られた。この分布傾向の差も、砕砂と高炉スラグ細骨材の違いが現れているものだと考えられる。

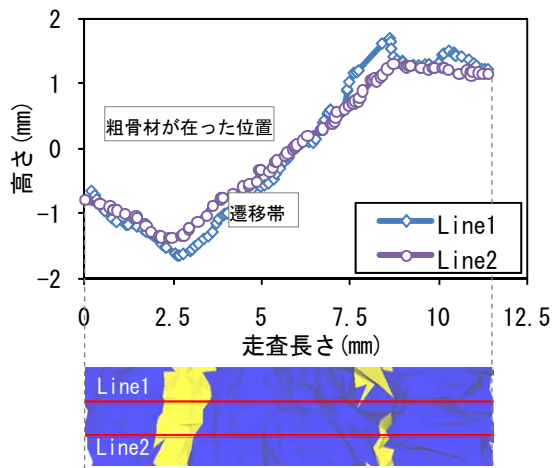
(3) 最大高さと曲率半径との関係

図-9は、破面の最大高さと小曲率部の面積比との関係を見たものである。この図から、両者にはとても良い相関があり、最大高さが高い試験体の破面は、曲率半径の小さな凹凸をより多く持った形状であると言える。従って、力学特性値との関係は二つの特徴量で酷似した結果となったと考えられる。

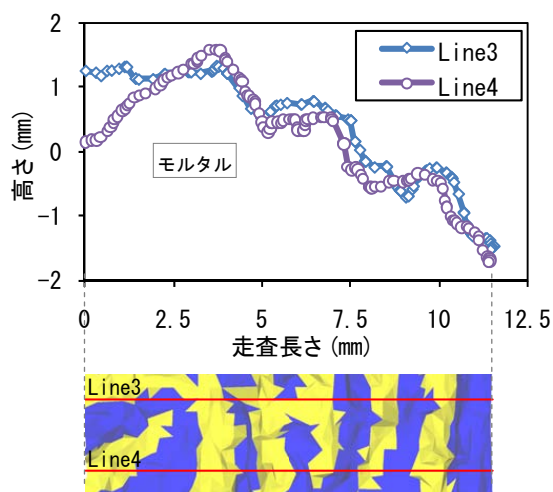
4.3 破面特徴量と破壊性状および力学特性値との関係

図-10は、S100N-28-2の局所の断面曲線と曲率半径の分布を示している。断面曲線の下に示した図が曲率半径の分布で、黄色で示す部分は曲率半径の3mm以下の部分である。図-10(a)は前掲の図-7(b)において破線Iで囲まれた部分であり、粗骨材が引き抜けた跡の遷移帯部である。同じく図-10(b)は破線Mで示す部分であり、モルタルが破壊した部分である。

ここで、曲率半径3mmという値は細骨材の最大粒径(直径5mm)とほぼ対応し、これを閾値として用いれば、遷移帯などの平坦な場所を除き、かつ細骨材の影響を加味することができる。つまり角張った部分として何らかの効果が持った部分を表していると考えられる。この事が図-8(b)に示すように $GF_{(WOF)}$ に関係しているのである。しかし、この閾値ではモルタル破壊部分を主に評価し、粗骨材は稜線などの角張った部分およびモルタル



(a) 粗骨材が持ち去られた遷移帯部分



(b) モルタルが破壊した部分

図-10 S100N-28-2の局所の断面曲線と曲率半径の分布

に接して曲率が変化する部分を主に評価する(図-10(a)参照)ことから、粗骨材を過小評価する。特徴的なのはモルタル破壊部であってもその小曲率部が、縞状に分布している点である。その理由は不明であるが、モルタル下層の骨材の影響や剪断応力による影響が考えられる。なお、同じ高低差を持つ図-10(a)と(b)が全く異なる曲率半径の分布を持っていることから、局部的には最大高さと同曲率半径とは無関係である。しかし図-9に現れたようにリガメント全体を見れば両者には密接な関係がある。このことは、最大高さに現れているFPZの深さ方向の広がり、遷移帯部分などの平坦部を除いた角張った領域面積とに密接な関係がある事を示唆している。

以上述べたことは、高炉スラグ細骨材以外の試験体でも当てはまると考えられ、今後追究する予定である。

5. まとめ

本稿では、高炉スラグ細骨材によって骨材置換されたコンクリートの打継ぎ試験体に対して破壊靱性試験を行

った。また非接触式三次元測定機を用いて破面の高さおよび曲率半径の分布を測定した。その結果、得られた知見は以下の2点である。

(1) 高炉スラグ細骨材によって骨材置換した打継ぎ試験体は、砕砂細骨材を用いたものより曲げ強度、破壊エネルギー共に向上する。特に、打継ぎ時の材齢が進むほどその影響が顕著に現れる。

(2) リガメントの最大高さ及び3mm以下の曲率半径が占める面積比は、力学特性値と密接な関係がある。これらは、人為的な誤差を含まない新しい指標となり得る。

今後は、破面の特徴量のより詳細な測定を行うに加え、EPMAなど化学分析を行う予定である。

謝辞

本研究は、新日本製鐵(株)名古屋製鉄所から高炉スラグ細骨材の提供を受けて行われた。また破面の測定にあたり、岩手県工業技術センターの和合主任専門研究員にご指導を頂いた。さらに、破面解析では(株)ニコンの幾島氏にご援助を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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, 2008.7
- 2) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 打継ぎコンクリート界面の破壊エネルギーと破壊面積の関係, コンクリート工学年次論文報告集, vol.31, No.2, pp.91-96, 2009.7
- 3) 國府勝郎, 下山善秀: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの20年試験結果, セメント・コンクリート, No.714, pp.27-32, 2006.8
- 4) 長滝重義, 米山紘一, 高田誠: 高炉スラグ水砕砂を用いたコンクリートの諸性状について, コンクリート工学年次論文報告集, vol.1, pp.193-196, 1979
- 5) 日本コンクリート工学協会編: JCI 規準集 2004, 日本コンクリート工学協会, pp.550-558, 2004
- 6) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: 新旧コンクリート界面の破壊部における表面性状のパラメータと限界ひび割れ幅との関係, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系, 日本建築学会東北支部, 第72号, pp.27-30, 2009.6
- 7) 例えば, 大塚浩司, 勝部宏明: コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.109-116, 1993