

X線CT画像解析によるUHPFRC内繊維分布・配向と 疲労寿命の関係の検討

Examination on the relation between internal fiber dispersion and fatigue life of UHPFRC by X-ray CT image analysis

北海道大学工学部 ○学生員 ダヤンツルモン チルーゲン (Dayantsolmon Chiluugen)
 中南大学 鄧 朋儒 (Pengru Deng)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

超高性能繊維補強コンクリート(Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete、以下 UHPFRC)は、鋼短繊維による補強が施されているため、高い強度・靱性を有している。RC 床版の上面補修などに用いることで、超高強度特性により RC 床版の疲労寿命の延命化を図ることができる。一方、UHPFRC の特徴の一つに、自己充填型のコンクリートであるため、打設時のコンクリートの流動による繊維の配向性が有意に現れることがある。繊維の分布や配向は UHPFRC の強度や破壊挙動に影響を与えることがわかっており、打設方法や繊維の沈降が分布や配向に与える影響に関して研究が行われている¹⁾。

既存の研究において、UHPFRC の四点曲げ疲労試験により得られた S-N 曲線(応力比と疲労寿命の関係)では、1 万回以下と 200 万回以上の供試体に大きく分かれており、中間寿命の供試体が得られなかった²⁾。これは UHPFRC 中の繊維分布や配向の偏りが疲労寿命に影響していると考えられる。内部の繊維分布と配向を定量的に把握し、疲労寿命との関係を明らかにすることが望まれる。

そこで本研究では、UHPFRC 内の繊維分布・配向を把握し、疲労寿命との関係を評価するため、四点曲げ疲労試験によって破壊まで载荷された供試体に X 線 CT 撮影を行い、CT 画像について画像解析を実施した。

2. 画像解析概要

2.1 供試体

本研究は、四点曲げ疲労試験で破壊後の UHPFRC 供試体の中から、疲労寿命が 1 万回以下の供試体と、200 万回以上の供試体をそれぞれ 3 体選別し、合計 6 体の供試体を対象に行った。図 1 に供試体寸法、供試体製作時のコンクリート打込み方向、供試体名称及びその疲労寿命を示す。また、図 1 に示すように X、Y、Z 軸を設定した。供試体名の頭文字の S、L はそれぞれ供試体の疲労寿命が 1 万回以下と 200 万回以上であったことを示す。

2.2 画像処理

X 線 CT で撮影された画像を、画像解析ソフト FIJI を用いて、XY 断面の画像を連続的に繋げることで別方向である YZ 断面、XZ 断面の供試体断面画像を作成し、破壊箇所の特定、目視観察に利用した。各断面の画像例を図 2 に示す。CT 画像では黒色の部分が空気、灰色の

部分がコンクリート、白色の部分が鋼繊維である。

2.3 解析方法

まず、XY 断面の繊維総断面積 A_f を Z 軸上で求め、供試体全体の内部繊維分布を観察する。FIJI を用いた A_f の算出方法は、CT 画像の繊維のみを他の材料との輝度の違いによって抽出し、それにあたるピクセル数から断面積を算出している。その際に輝度の範囲として輝度閾値を設定する。本解析では、輝度閾値を全供試体で統一し、結果を比較可能にした。また、供試体が曲げ破壊によって Z 軸方向より曲がっているが、その角度は小さく、垂直に切断した際の断面積に及ぼす影響は小さいとみなし、それによる誤差を無視した。

次に Y 軸上での XZ 断面の繊維分布を観察する。供試体の Z 軸方向からの曲がりの修正や破壊部分と非破壊部分の区別を可能にするため、供試体の Z 軸の 60mm から 180mm までの区間を幅 20mm ごとの 6 ブロックに分け、それぞれのブロック下縁から XZ 断面での繊維総断面積を求めることで、Y 軸上の繊維分布を観察した。

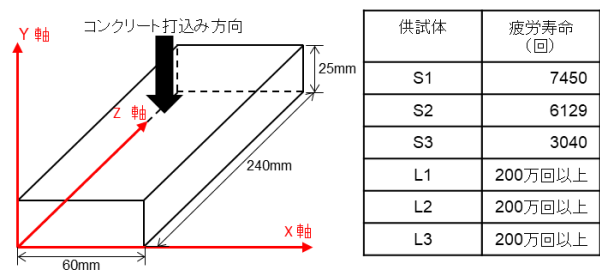


図 1 供試体寸法、名称及び疲労寿命

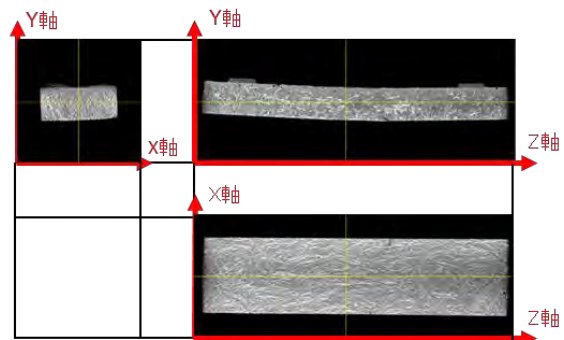


図 2 各断面の供試体画像例

3. 画像解析結果

3.1 Z軸上のXY断面内繊維分布

XY断面内の繊維総断面積 A_f をZ軸上で求めた結果の例として供試体 S3 を、供試体のひび割れの発生箇所との範囲とともに図3に示す。Z軸上の繊維は中央付近に最も多く分布しており、型枠面付近で減少していることが確認できた。これは、UHPFRCを打設する際のコンクリート全体の流動による分布であると考えられる。また、ひび割れ発生箇所と同位置の A_f との関係が見られず、Z軸上のXY断面内の繊維総断面積 A_f が低い箇所でもひび割れが発生する傾向はみられなかった。

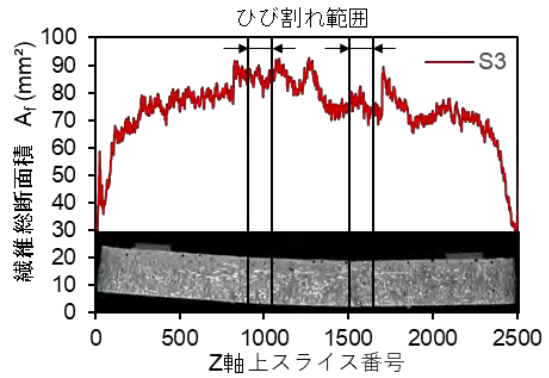


図3 繊維総断面積 A_f とひび割れ箇所 (S3)

3.2 Y軸上のXZ断面内繊維分布

XZ断面内の繊維総断面積 A_f をY軸上で求めた結果を、供試体 S群とL群について、図4、図5に示す。

Y軸上の繊維分布の特徴として、供試体の A_f は下縁付近に繊維が多く、上縁に行くほど減少傾向にある。これは、打設時に比重の差で鋼繊維が沈降するためだと考えられる。

また、沈降量の度合いには個体差があるが、疲労寿命の長い供試体についてはY軸沿いの A_f の減少が比較的穏やかである傾向があり、供試体の中立軸の下側全体に繊維が多く分布している。一方、疲労寿命の短い供試体では、下縁での A_f のピーク値は大きい但其の後急激に減少するため、引張応力が作用する領域内で繊維量の偏りがあると考えられる。

以上より、引張縁から入ったひび割れが進展し、Y軸上で繊維分布が下縁側に偏っている場合にそのひび割れが局所化し、そうでない場合にひび割れは局所化せず、分散するために長寿命になる可能性が考えられる。

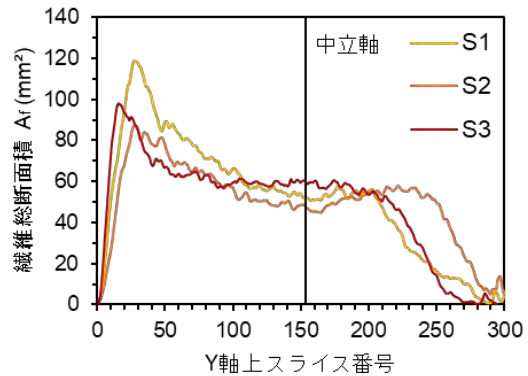


図4 Y軸上の繊維総断面積 A_f (S群)

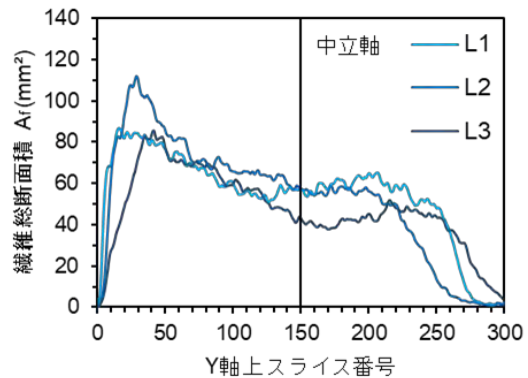


図5 Y軸上の繊維総断面積 A_f (L群)

3.3 CT画像の目視観察

画像処理で繋げたCT画像で、供試体下部に発生したひび割れ箇所を観察した。ひび割れ画像の例を図6に示す。ひび割れの経路は、ひび割れと直交する繊維が少ない領域を結ぶように発生している。つまり、供試体内の繊維の少ない箇所や繊維が平行になる箇所でひび割れが発生し、荷重の繰り返し作用によってひび割れが進展することで供試体が破壊に至ると考えられる。

3. まとめ

本研究では、UHPFRC内部の繊維の分布や配向についてX線CT画像解析を行うことでUHPFRCの疲労寿命との関係を検討した。

UHPFRCのZ軸上のXY断面内繊維分布はひび割れとの関係が見られなかった。一方、Y軸上のXZ断面内繊維分布では下縁側への偏りに違いが見られ、これが疲労寿命の差異を説明できる可能性がある。また、繊維分布と配向の目視観察では、ひび割れ経路が繊維補強の少ない箇所であることを確認した。

謝辞

本研究は公益財団法人鹿島学術振興財団国際共同研究援助金により実施された。ここに謝意を示す。



図6 ひび割れ発生箇所の例

参考文献

- 1) 酒井瑠花, 松本高志, 鄧朋儒: X線CTスキャンと画像解析によるUHPFRC内繊維の分散性評価, 土木学会北海道支部論文報告集, 78, A-16, 2022.
- 2) 桑垣潤也, 松本高志, 鄧朋儒: 四点曲げ疲労によるUHPFRCの疲労挙動の検討, 土木学会北海道論文報告集, 78, A-17, 2022.