

マトリクスおよび繊維架橋の特性値がひずみ硬化挙動に与える影響に関する一考察

名古屋大学 学生会員 ○杉本勝哉

名古屋大学大学院 正会員 国枝 稔, 中村 光, 上田 尚史

1. はじめに

超高強度ひずみ硬化型セメント系材料(以下 UHP-SHCC)は引張応力下においてひずみ硬化挙動を示し、圧縮、曲げ、引張破壊時の靱性を大幅に向上させた材料である。既往の研究¹⁾により、セメントマトリクスの強度分布および、繊維とマトリクスの付着力や繊維の配置に依存したひび割れ間の繊維による伝達力(以下、架橋力)の分布が、ひずみ硬化挙動に大きく影響を与えることが明らかとなっている。本研究ではマトリクスの引張強度分布、架橋力の分布の両者に着目し、実験的に得られたデータを参考に解析用パラメータを設定するとともに、それらがひずみ硬化挙動に与える影響について解析的に検証した。

2. 実験によるパラメータの同定

2.1 実験概要

本研究で用いた UHP-SHCC の配合は、 $W/B=0.22$ とし、繊維は、長さ 6mm の高強度ポリエチレン繊維 (直径 0.012mm)を用い、体積比で 1.5%混入した。実験で用いた供試体諸元を図-1 に示す。供試体は 10 体作製し、試験日の違いによる個体差を無くすために、打設後の供試体に温水養生 (40℃) を施し、材齢 1 ヶ月以上経過した時点で試験を実施した。供試体寸法は、 $50 \times 13 \times 150\text{mm}$ とし、供試体中央部に長さ 10mm の切欠きを導入した。変位制御にて引張荷重を与える一軸引張試験を行い、荷重と切欠き開口変位をそれぞれ計測した。

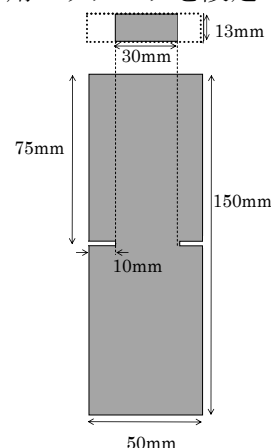


図-1 供試体諸元

2.2 実験結果

一軸引張試験より得られた架橋応力 - ひずみ関係を図-2 に示す。ひび割れ発生強度の平均値は 4.15MPa、標準偏差は 1.19MPa である。また、ひび割れ発生後に応力が最大となった点を、架橋応力とすると、架橋応力の平均値は 7.43MPa、標準偏差は 2.07MPa であった (表-1 参照)。

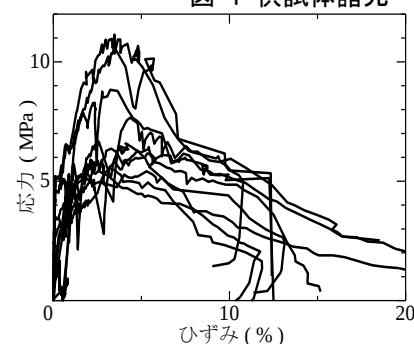


図-2 架橋応力-ひずみ

3. 解析用パラメータの推定と引張破壊解析

3.1 解析概要

ひび割れの発生および進展を直接的に表現できる構造解析手法として、3次元 RBSM を用いた。詳細は文献 1 を参照いただきたい。特徴としては解析対象となる要素中に所定の混入率となるように繊維を離散化してモデル化している点にある。図-3 に解析用のモデル (要素分割) を示す。解析モデルは $30 \times 13 \times 120\text{mm}$ の UHP-SHCC をモデル化しており、解析モデルに強制変位を与え、100mm の区間における応力とひずみを算出した。なお、マトリクスの要素分割は、引張試験を対象としているため、直方体のメッシュとし、要素寸法は既往の実験において確認された供試体のひび割れ発生間隔よりも小さい 1mm とした。繊維については実験同様、PE 繊維を体積比で 1.5%混入した。

マトリクスの引張強度分布および架橋応力の分布の両者に着目した解析を行うにあたり、表-2 のケースについて検討した。Case1 と Case2 はマトリクスの引張強度の分布の違いに着目したものであり、Case1 は前述の実験より得られた平均値および標準偏差を使用した。Case2

表-1 マトリクス強度と架橋応力

	平均値	標準偏差
マトリクス強度 (MPa)	4.15	1.19
架橋応力 (MPa)	7.43	2.07

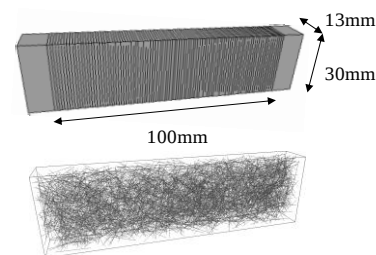


図-3 解析モデル

は前述の実験では切欠き部の応力集中により引張強度が低く評価されていることを考慮し、実験で得られたひび割れ発生強度の平均値が、95%信頼区間の下限値となるような平均値（標準偏差は実験値と同様）を求めて使用した。なお、Case1 と Case2 における繊維の配置は、供試体内に乱数を用いてランダムに配置した場合に相当している。Case3 と Case4 は図-4 に示すように供試体軸方向の繊維本数の分布を変化させ、みかけの架橋応力の分布の違いを再現したものである。具体的には、Case3 では前述の実験値の架橋応力の平均値および標準偏差が同程度となるような繊維本数とした。さらに Case4 では、ダンベル供試体を用いた実験の引張強度が約 7.5MPa であり、終局時の破壊位置は架橋応力の最小断面であると推察されることから、実験で得られた架橋応力の平均値(7.43MPa)が 95%信頼区間の下限値となるように設定した。

3.2 解析結果

図-5 に、マトリクスの引張強度が異なる Case1 および Case2 における応力 - ひずみ関係を示す。また、図中に示されている実験結果は、本実験と同様の配合により作製された検長区間 30×13×100mm のダンベル型供試体の一軸引張試験の結果である。Case1 の解析結果は、実験値と比較してかなり小さい値で初期ひび割れが生じ、強度および終局ひずみとも実験値に比べて過大に評価している。マトリクスの引張強度を大きくした Case2 においては、初期ひび割れ強度は実験値に近いが、強度および終局ひずみは依然として過大評価のままであった。次に図-6 に示すように、架橋力のばらつきを大きく設定した Case4 では、ばらつきの小さい Case2 に比べて大幅に強度および終局ひずみが小さくなり、さらにばらつきの大きな Case3 では顕著となっている。図-7 に Case2～4 の終局時のひび割れ図を示す。特に、終局ひずみの低減は、ひび割れ本数の低減と対応していることが分かる。なお、乱数を用いてランダムに配置した Case2 よりも、実験値の架橋応力、およびその分布を参考に決定した繊維本数である Case3 および Case4 の方が終局ひずみが実験値に近くなった。これらの解析結果から、高靱性な材料開発においては、マトリクスの引張強度の分布を大きくすること、架橋応力の分布を小さくすることが重要であることが推察される。

4. 結論

本研究では、実験により求められたマトリクスの引張強度の分布、架橋応力の分布から解析用パラメータを推察し、それらの分布を参考にすることでより実験に近い UHP-SHCC のひずみ硬化挙動を再現でき、これらの知見が材料開発にまで発展できる可能性が示された。

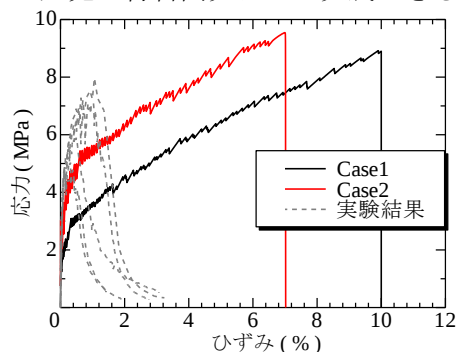


図-5 マトリクス強度が異なる供試体の応力-ひずみ関係

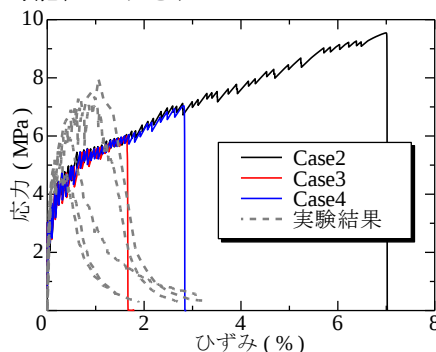


図-6 繊維分布が異なる供試体の応力-ひずみ関係



図-7 各 Case の終局時におけるひび割れ性状

参考文献

- 1) 国枝稔, 小澤国大, 小倉大季, 上田尚史, 中村光: 短繊維を離散化した 3 次元メゾスケール解析手法によるひずみ硬化が他モルタルの引張破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.66(2010), No.2, PP.193~206