

論文 繰返し載荷を受ける短繊維の付着挙動のモデル化に関する基礎検討

筒井 将輝*1・國枝 稔*2

要旨：ポリプロピレン(PP)繊維と鋼繊維の単繊維の繰返し引抜き試験により得られた各繊維の付着特性を再評価し、メゾスケール解析用の繰返し載荷時の構成則の開発を行った。PP 繊維の構成則では、繰返し荷重を受けることで繊維表面が損傷し、引抜き抵抗力が低下することや、圧縮力を受けることで繊維が変形し、圧縮力への抵抗力が著しく減少することを解析的に表現した。鋼繊維においては、繰返し載荷における除荷過程と再載荷過程で確認された摩擦抵抗や、繰返し回数の増加による繊維の引抜き抵抗力の低下が少ないことを解析的に表現した。

キーワード：短繊維補強コンクリート, PP 繊維, 鋼繊維, 付着, メゾスケール解析, 繰返し載荷

1. はじめに

繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete, FRC)を対象とした研究は数多く行われており、構造部材の力学性能を評価するための実験や解析が数多く行われてきた。巨視的な力学挙動を評価するだけでなく、材料の応答をより詳細に解明することで、より高精度な部材の破壊が予測できるだけでなく、新たな材料開発などへの展開も可能となる。その中で、短繊維やマトリクスの力学特性だけでなく、両者の付着特性の評価は繊維補強コンクリートにおいて重要な視点であり、単繊維の引抜き試験により評価する試みがなされている。

Naamman¹⁾は、短繊維の付着特性と複合材料の材料設計の関係について体系的に示し、特に繊維形状の改良による付着特性の改善と、複合材料の性能改善について実験的に検証している。また、Li⁵⁾⁷⁾も短繊維の付着特性を直接的に材料設計に反映させ、特にひずみ硬化挙動を得るための条件を導き出している。

Li⁸⁾や Kanda⁹⁾は、埋込み角度を持つ短繊維の引抜き試験を行い、埋込み角度が大きいほど引抜き抵抗力が大きくなるスナビング効果、ならびに埋込み角度が大きいほどみかけの繊維強度が低下する効果を実験的に明らかにしている。

一方、短繊維を離散化し数値解析で取り扱う研究に関して、Bolander¹⁰⁾は、離散化した短繊維をはり要素を用いて再現し、マトリクスとの付着をリンク要素を用いて破壊解析を行っている。また、Bolander¹¹⁾や Kunieda^{12),13)}は、短繊維とマトリクスの相互作用を、サイズゼロのリンク要素を用いて再現し、自由度を増やすことなく解析する手法を開発している。また、小倉¹⁴⁾は、鉄筋補強された FRC の引張破壊に対してメゾスケール解析を行い、精度よくその挙動を再現している。

FRC の優位性を発揮させる構造利用として、耐震補強

など、繰返し荷重を受ける部材がある^{15),16)}。有限要素法などに適用できるマクロな応力-ひずみ関係の構成則の検討は行われているものの、著者らが検討しているメゾスケール解析における短繊維とマトリクスの付着に関するモデル化については、繰返し荷重下での知見は少ないのが現状である。中家¹⁷⁾は、ごく限られた条件ではあるものの、ポリプロピレン(PP)繊維と鋼繊維に関して繰返し載荷での単繊維の付着試験を実施し、データの蓄積を行っている。

本研究では、メゾスケール FRC 破壊解析の高度化を図るため、既往の研究における結果を用いて繰返し載荷を受ける単繊維の引抜きメカニズムについて再度考察を行い、その上で、繊維の繰返し引抜き試験を対象としたメゾスケール解析を行うことを可能とする付着構成則を開発することを目的とする。

2. 単繊維の繰返し引抜き試験結果の考察

2.1 実験概要¹⁷⁾

本研究では、モデル化にあたって中家¹⁷⁾によって実施された単繊維引抜き試験の結果を用いた。実験では、単繊維に対して、引抜き力に加えて、押込み力を与えるため、短繊維が配置されたマトリクスに切欠きを入れ、引張力を与えてひび割れを発生させる方法を適用した。この際、切欠きの位置を変えることで短繊維の埋込み長を調整した。

実験には表-1 ならびに写真-1 に示すインデント付き PP 繊維(以下、PP 繊維)とストレート鋼繊維(以下、鋼繊維)を用いた。通常用いられる鋼繊維は両端がフック状のものも多いが、その引抜き挙動におけるメカニズムは複雑であると推察されることから、供試体の作製段階でフックを切り落とし、まずはストレート形状のものを対象とした実験を行った。

*1 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

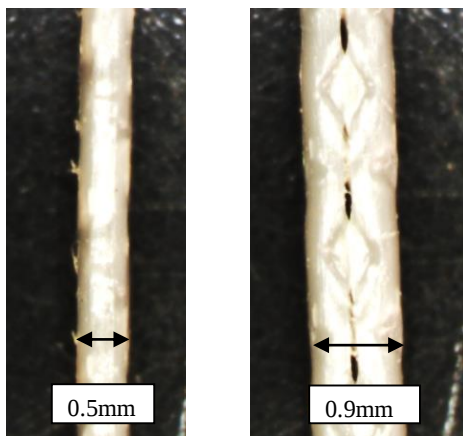
*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 使用した短繊維の諸元等

短繊維	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	弾性 係数 (GPa)	破断 強度 (MPa)
PP 繊維	0.5×0.9	48	10	530
鋼繊維	0.62	30	210	1,270



PP 繊維と鋼繊維の概形（上：PP 繊維，下：鋼繊維）



PP 繊維の拡大写真（左：側面幅 0.5mm，右：正面幅 0.9mm）

写真-1 使用した短繊維

2.2 供試体の作製

供試体の作製手順は、まず型枠に短繊維を水平に配置し、水セメント比 50% のセメントペーストを流し込むことで平板供試体を作製した。発生したブリーディングはウェスを用いて除去した。その後、マイクロカッターを用いて図-1、2 に示すように、PP 繊維の場合で $20 \times 35 \times 10 \text{ mm}$ 、鋼繊維の場合で $20 \times 25 \times 10 \text{ mm}$ の供試体寸法で供試体を切り出した。切り出した後の供試体端部において繊維の端部断面が観察されたが、この繊維の断面に切断に伴う潰れや変形が生じておらず、引抜き挙動に影響しないと推察した。短繊維の埋込み長は、切欠き位置を変えることで調整した。切欠きの深さは、PP 繊維ではひび割れが生じる断面積（リガメントの面積）がおよ

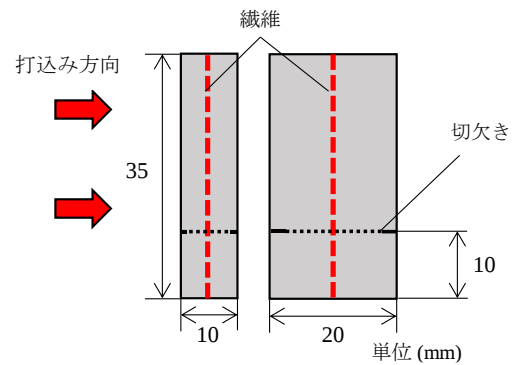


図-1 供試体概要 (PP 繊維)

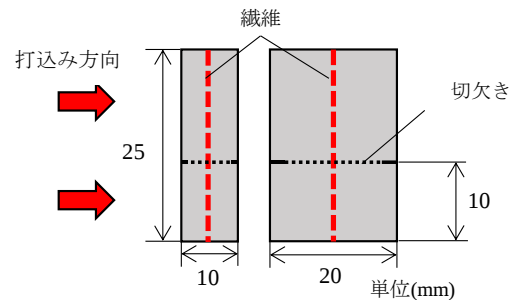


図-2 供試体概要 (鋼繊維)

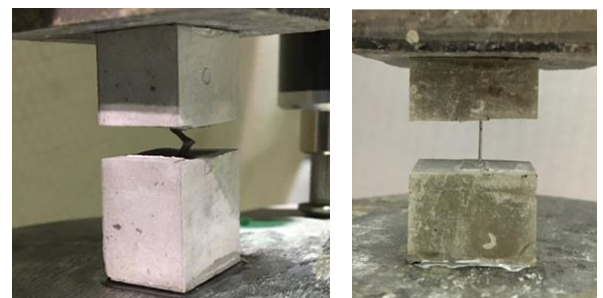


写真-2 繰返し引抜き試験の様子（左：PP 繊維，右：鋼繊維）

そ 100 mm^2 、鋼繊維の場合は 25 mm^2 となるように側面の 4 面に加えた。鋼繊維は PP 繊維に比べみかけの付着強度が小さく、マトリクスのひび割れ発生時の衝撃で鋼繊維の付着剥離が生じることが懸念されたため、鋼繊維においてのみリガメントは極力小さくした。繊維の埋込み長は、いずれも 10mm とした。

2.3 実験方法

短繊維が埋め込まれた供試体に繰返し荷重を与えるために、ジャッキにより引張りまたは圧縮力を与えた。繰返し载荷は、引張方向の最大変位が 1mm 増加する毎に圧縮方向へ载荷し、所定の圧縮力に到達後、再度引張方向へ载荷した。载荷速度が引抜き挙動に与える影響が考えられるが、本実験では 1 mm/min .¹⁷⁾ を目安とした。試験の様子を写真-2 に示す。

2.4 試験結果とモデル化にあたっての考察

(1) PP 繊維

実験により得られた、PP 繊維の繰返し引抜き挙動の例を図-3 に示す。また、PP 繊維の繰返し引抜き抵抗挙動

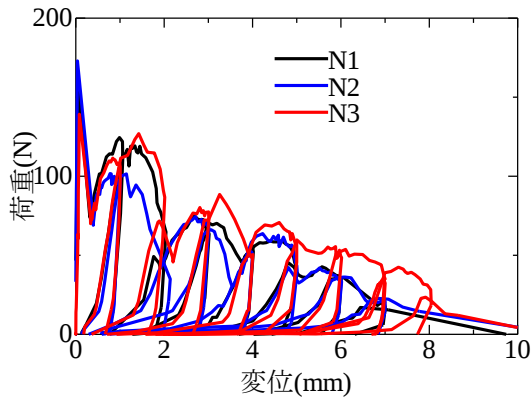


図-3 PP 繊維繰返し引抜き挙動の例¹⁷⁾

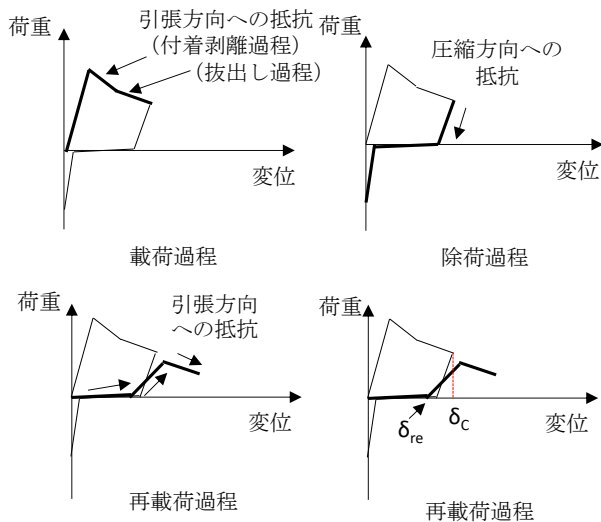


図-4 抵抗挙動の模式図 (PP 繊維)

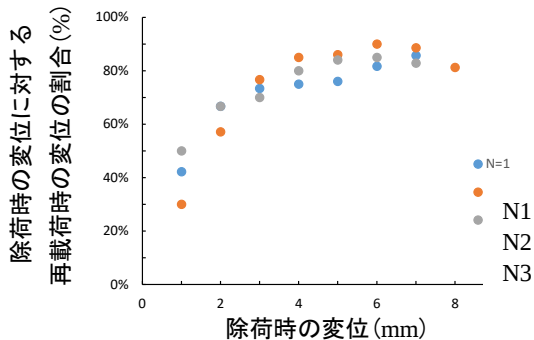


図-5 除荷時の変位 δ_c に対する再載荷時の変位 δ_{re} の割合 (PP 繊維)

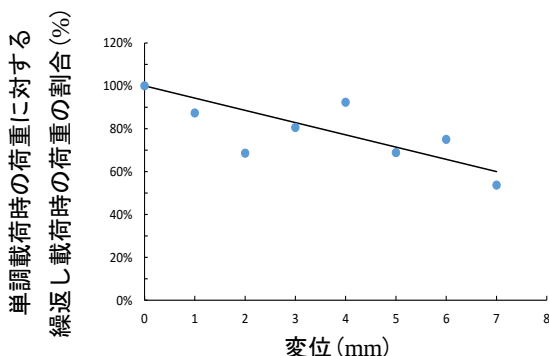


図-6 単調載荷時の荷重に対する繰返し載荷時の荷重の割合 (PP 繊維)

の模式図を図-4 に示す。繊維の引抜き挙動の特徴として、図-4 の右上図より引張過程から除荷過程に移行するにあたり、圧縮力を受けることで繊維が変形し、PP 繊維はほとんど抵抗を示さないことが確認された。また、図-6 より繰返し回数が増えることによって、引抜き抵抗が低下することも確認された。また、図-4 より繰返し回数が増えることによって、引抜き抵抗が低下することも確認された。

なお、除荷時の最大変位を δ_c とし、再載荷時の荷重が 0N から上昇する際の変位を δ_{re} とした場合、 δ_c 、 δ_{re} の関係を図-5 に示す。サイクル数が増えると δ_{re}/δ_c がおよそ 80% に収束していくことが確認できる。また、繰返し回数の増加に伴い荷重の低下が著しくなる点に関して、各すべり量に対して、単調載荷時の荷重に対する繰返し載荷時の荷重の割合を図-6 に示す。

これによると、引抜き量の増加に伴い荷重低下の割合が大きく、低下量は近似すると線形的に大きくなり、最大で 6 割程度にまで低下することが明らかとなった。

(2) 鋼繊維

実験により得られた、鋼繊維の繰返し引抜き挙動の例 (3 本の試験結果) を図-7 に示す。また、鋼繊維の繰返し引抜き抵抗挙動の模式図を図-8 に示す。鋼繊維の繰返し引抜き挙動の特徴として、図-8 右上より繰返し載荷における除荷過程および再載荷において、摩擦による抵抗が確認された。また、図-7 より繰返し回数の増加による繊維の引抜き抵抗の低下が小さいことが確認された。なお、摩擦による抵抗は引張方向および圧縮方向の双方において生じており、その大きさは最大荷重の 1/3 から 1/4 程度であった。なお、摩擦による抵抗の大きさは、繊維表面の形状およびマトリクスの強度などに影響を受けていると推察される。再載荷時の荷重が摩擦抵抗に達し、その後荷重が増加していく時の変位を δ_{re} とし、除荷開始時の最大変位を δ_c とした場合の δ_{re}/δ_c の関係 (いずれも平均値を用いた) を図-9 に示す。繰返し回数が増えると δ_{re}/δ_c がおよそ 80% に収束していくことが確認できた。

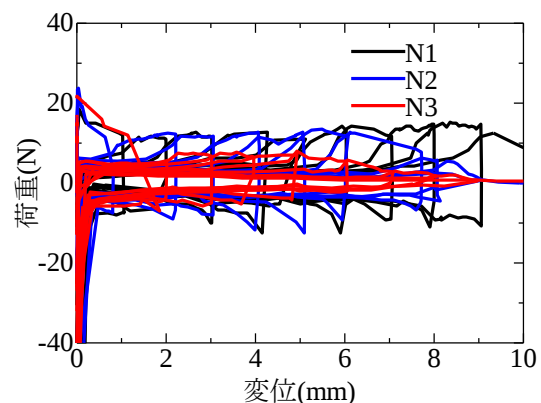


図-7 鋼繊維繰返し引抜き挙動の例¹⁷⁾

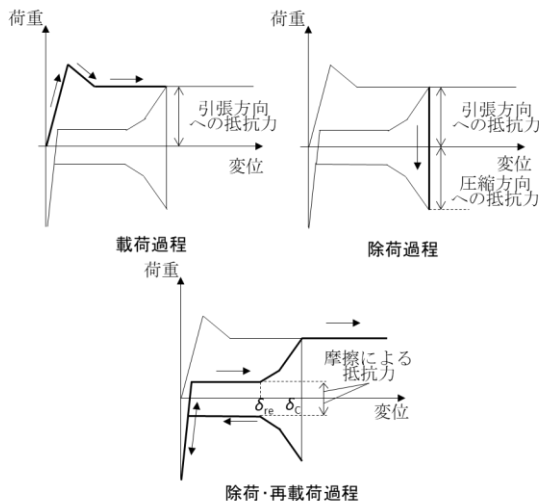


図-8 抵抗挙動の模式図（鋼繊維）

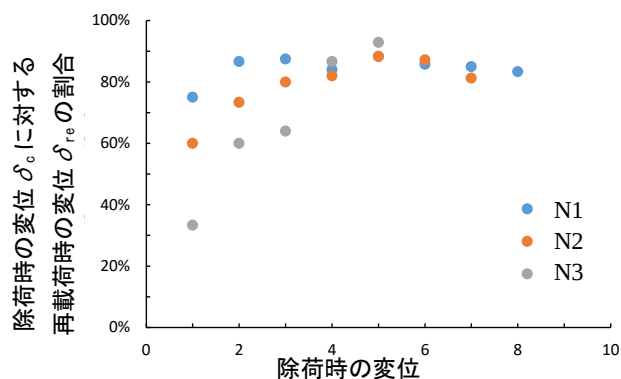


図-9 除荷時の変位 δ_e に対する再載荷時の変位 δ_{re} の割合

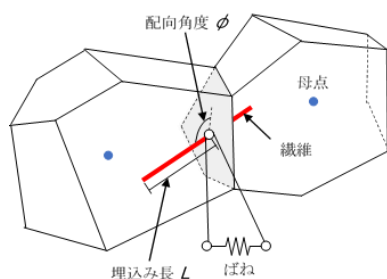


図-10 繊維の離散化モデル

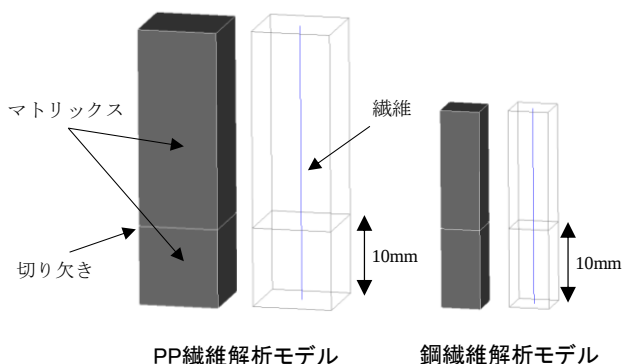


図-11 解析モデル図

3. 繊維の付着パラメータの同定と繊維の繰返し引抜き挙動の再現解析

3.1 解析概要

解析には、3次元剛体ばねモデル（Rigid-Body-Spring-Model, RBSM）を用いる。RBSM解析では、あらかじめ対象を有限個の要素に分割し、隣接する要素をばねによって接合する。要素には6自由度を与え、剛体間にばねは3種類（垂直方向：1、平行方向：2、回転：3）設置する。解析の際には、各要素を剛体要素と仮定しばねに材料特性に応じた応力を作用させる。繊維補強による効果を繊維離散化モデルにより再現する方法が提案されており^{12), 13)}、本研究においても同様の手法を用いる。解析対象となる試験体の領域内に、所定の長さ、繊維径の短繊維モデルを所定の混入率となるように乱数を用いてマトリクス内に配置する。繊維の離散化モデルの例を図-10に示す。一般には、マトリクス内のひび割れの要素分割依存性を低減するためにVoronoi多角形分割が用いられ、マトリクス要素境界面を跨ぐ繊維位置に長さ0のばねを配置し、このばねにひび割れ幅に応じた繊維の架橋力を作用させるモデルである。

3.2 実験のモデル化

構成則および各パラメータの同定を行うために、実験を模擬した解析を行った。本研究では繊維1本あたりの繊維-マトリクス間の付着を解析的に表現し、実験におけるひび割れ発生後の不連続面を再現するため、矩形の要素分割を用いて供試体のモデル化を行った。また、実験におけるマトリクスのひび割れ発生強度のばらつきが大きく、本研究ではリガメントのひび割れ発生後の引抜き挙動のみを対象とすることから、切欠き部のマトリクスの引張強度は0と仮定した。図-11に解析モデルと繊維のモデル図を示す。試験体のリガメントの面積を再現するため、供試体寸法をPP繊維の場合で10×10×35mm、鋼繊維の場合で5×5×25mmとした。また、繊維の埋込み長は10mmとした。ただし、切欠き部のマトリクスの引張強度は0と仮定した。また、上部の分割要素中の母点に強制変位を付与することで繰返し引抜き試験を再現した。実験の荷重条件と同様、引張方向の最大変位が1mm増加する毎に圧縮方向に荷重し、変位が0.01mmになった段階で、再載荷を行った。

3.3 PP繊維の応答

2.4で考察したとおり、除荷過程において圧縮方向への抵抗力はほとんど確認できなかったため、本研究では除荷直後には荷重が0となるようにモデル化した。さらに、再載荷時には、 $S_{re}/S_c=80\%$ になる点までは荷重を0とし、その後初期の除荷点を指向した剛性をもって引張抵抗を示すようにモデル化した。なお、今回の検証では、マトリクスの初期ひび割れ発生および、ひび割れの閉口時にPP繊維がひび割れに挟み込まれ

て圧縮側において抵抗する挙動あるいはそれに伴う繊維の損傷については再現していない。

基本となる単調載荷における単繊維の付着応力-すべり関係を図-12に、パラメータを表-2に示す。また、実験値と解析値の比較を図-13に示す。なお、繊維のセメント-マトリクス間の付着は、化学的な結合力による化学付着と繊維とマトリクスとの摩擦による摩擦付着に大別され¹⁸⁾、図-12、14に示すように化学付着強度 τ_s と摩擦付着強度 τ_i をそれぞれ定義した。 τ_s となるすべり量を超えると付着剥離過程から摩擦付着過程に入り繊維が引き抜け始める。また、除荷時にはすべり量 S_c で荷重が急激に0Nになり、再載荷時にすべり量 S_{re} に達す

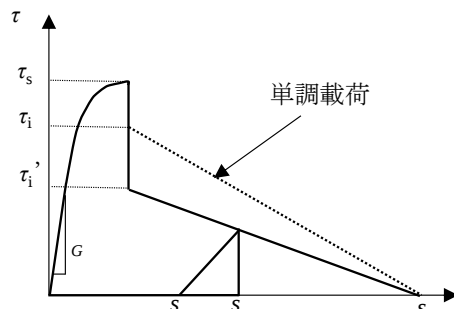


図-12 PP 繊維の付着応力-すべり関係

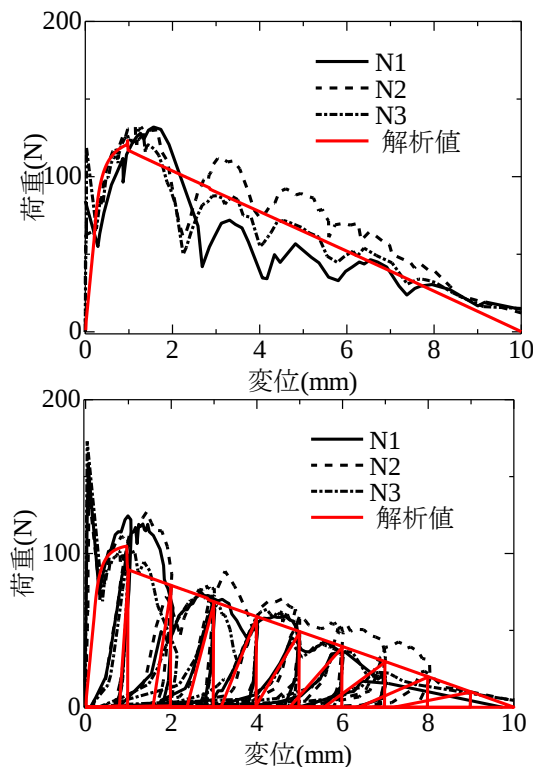


図-13 実験値と解析値の比較
(上：単調載荷，下：繰返し載荷)

表-2 繊維の付着に関するパラメータ（単調載荷）

化学付着強度 τ_s (MPa)	摩擦付着強度 τ_i (MPa)	付着剛性 G (MPa/mm)
7.5	5.5	80

ると摩擦付着過程に戻る。また、本研究では摩擦付着過程において一定勾配で表現しているが、将来的には摩擦による界面の損傷やインデントによる軟化域での複雑な付着挙動（曲線の凹凸で表される）を再現するため、より汎用性のある数値解析で同定を行った。解析における荷重-変位関係については、軟化挙動については再現できている。繰返し載荷における実験値と解析値の比較を図-13に示す。なお、繰返し載荷による引抜き抵抗の低下は図-6における低下率となるように、図-12における摩擦付着強度 τ_i 'のみを75%まで低下させることとした。解析結果は、実験における最大荷重、軟化域における引抜き挙動、再載荷挙動、除荷挙動を概ね捉えることができています。

3.4 鋼繊維の応答

2.4で考察したとおり、繰返し載荷における除荷過程および再載荷過程において摩擦力が作用し、引張側も圧縮側も同程度の大きさであった。また、PP 繊維と違い、繰返し回数の増加による繊維の引抜き抵抗力の低下が少なかった。除荷、再載荷過程ともに摩擦抵抗が確認できるため、除荷時にはX軸に対して対象となる包絡線を定義することとした。

基本となる単調載荷における単繊維の付着応力-すべり関係を図-14に、パラメータを表-3に示す。また、繰返し載荷における実験値と解析値の比較を図-15に

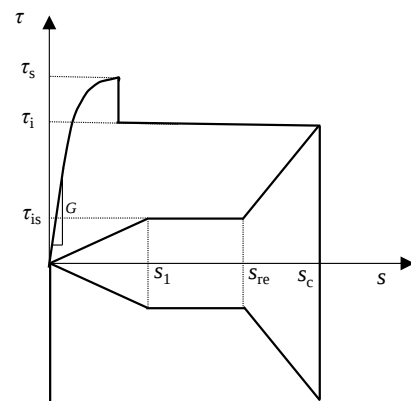


図-14 鋼繊維の付着応力-すべり関係

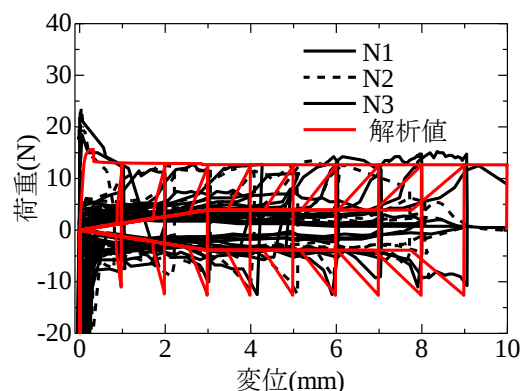


図-15 解析結果と実験値の比較（鋼繊維）

表-3 繊維の付着に関するパラメータ（単調載荷）

化学付着強度 τ_s (MPa)	摩擦付着強度 τ_i (MPa)	付着剛性 G (MPa/mm)
1.3	0.65	40

示す。なお、繰返し載荷に伴う引抜き抵抗力の低下は、低減後の摩擦付着強度 τ_{is} を 0.3MPa、摩擦力が低下する滑り量 S_1 を 3.0mm とすることで考慮した。解析結果は、実験における最大荷重、軟化域における引抜き挙動、摩擦を含む再載荷挙動、除荷挙動を概ね捉えることができています。

4. まとめ

本研究では、本研究では、インデント付き PP 繊維およびストレート鋼繊維の繰返し引抜き試験を対象に、メゾスケール解析を行い、繰返し載荷を受ける繊維の構成則の開発を行った。

- (1) PP 繊維においては、繰返し載荷において繊維表面が損傷し、引抜き抵抗力が低下することや、圧縮力を受けることで繊維が変形し、圧縮力への抵抗力が著しく減少することを解析的に表現した。また、除荷時の変位の最大履歴 δ_c に対する再載荷時の引張抵抗が再び増加する点 δ_{re} の割合を 80% とすることで、およその初期載荷による残留変位の値が再現できた。
- (2) 鋼繊維においては、除荷過程および再載荷過程における摩擦抵抗や、繰返し回数の増加に伴う強度低下が小さいことを解析的に再現できた。

今後の課題としては、各種繊維への適用性の確認に加えて、繰返し載荷の履歴による影響について確認していく必要がある。

参考文献

- 1) Naaman, A. E. : Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, J. of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 241-252, 2003.
- 2) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W. : Setting the stage: Toward performance based classification of FRC composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Proc. of the 4th Int. RILEM Workshop, pp. 1-4, 2003.
- 3) Naaman, A. E. : Toughness, ductility, surface energy and deflection-hardening FRC composites, Proc. of Int. Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC-2002), pp. 33-57, 2002.
- 4) Naaman, A. E. : Fibers with slip-hardening bond, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites

- (HPFRCC3), Proc. of the 3rd Int. RILEM Workshop, pp. 371-385, 1999.
- 5) Li, V. C. : On engineered cementitious composites (ECC) - A review of the material and its applications, J. of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, pp. 215-230, 2003.
- 6) Li, V. C. : From micromechanics to structural engineering - The design of cementitious composites for civil engineering applications, J. of Struct. Mech. Earthquake Eng., No. 471/I-24, pp. 37s-48s, 1993.
- 7) Li, V. C. : Reflections on the research and development of engineered cementitious composites (ECC), Proc. of Int. Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC-2002), pp. 1-21, 2002.
- 8) Li, V. C., Wang, Y. and Backer, S. : Effect of inclining angle, bundling, and surface treatment on synthetic fiber pull-out from a cement matrix, Composites, Vol. 21, No. 2, pp. 132-140, 1990.
- 9) Kanda, T. and Li, V. C. : Interface property and apparent strength of a high strength hydrophilic fiber in cement matrix, J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 5-13, 1998.
- 10) Bolander, J. E. and Saito, S. : Discrete modeling of short-fiber reinforcement in cementitious composites, Advanced Cement Based Materials, Vol. 6, pp. 76-86, 1997.
- 11) Bolander, J. E. : Spring network model of fiber-reinforced composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC3), Proc. of the 3rd Int. RILEM Workshop, pp. 341-350, 1999.
- 12) Kunieda, M., Ogura, H., Ueda, N. and Nakamura, H. : Tensile fracture process of strain hardening cementitious composites by means of three-dimensional meso-scale analysis, Cement and Concrete Composites, Vol. 33, pp. 956-965, 2011.
- 13) 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型モルタルの引張破壊解析, 土木学会論文集, Vol. 66, No. 2, pp. 193-206, 2010.
- 14) 小倉大季, 国枝稔, 中村光 : 鉄筋補強した繊維補強セメント系複合材料の引張破壊解析と架橋力に着目した破壊挙動評価, 土木学会論文集 E2, Vol. 72, No. 3, pp. 249-267, 2016.
- 15) 幸左賢二, 小川敦久, 合田寛基, 脇田和也 : 高靱性セメント巻き立て厚に着目した耐震補強実験高靱性セメント巻き立て厚に着目した耐震補強実験, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1024-1035, 2009.
- 16) 平田隆祥, 石関嘉一, 竹田宣典 : 「ユニバーサルクリート」の橋梁への適用性評価, 大林組技術研究所報, No. 75, pp. 1-6, 2011.
- 17) 中家康宏, 国枝稔 : 繰返し載荷を受ける短繊維の引抜き抵抗性の評価, 土木学会論文集, Vol. 76, No. 2, pp. 55-64, 2020.
- 18) Li, V. C. and Stang H. : Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites, Advanced Cement Based Materials, Vol. 6, pp. 1-20, 1997.