

単繊維引抜き挙動における鋼繊維形状の影響

○東京大学 正会員 川崎 紘誉
東京大学 正会員 松本 高志

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートの力学的特性を支配する架橋則は、個々の鋼繊維がマトリクスから引抜ける挙動に支配される。本研究では直線と曲線により構成される線形形状を有する鋼繊維を用いて、線形形状が引抜き荷重 - 変位関係に及ぼす影響を実験的に検証し、その結果を解析で再現することにより引抜き挙動メカニズムを把握し、より合理的な形状設計手法を構築することを目的とした。そこで、本研究では様々な線形形状を有する鋼繊維を用いて単繊維引抜き試験を行った。また、Gilles¹⁾に基づく解析モデルを用いて実験結果の再現と支配メカニズムの把握を行った。

2. 単繊維引抜き試験

様々な線形形状を持つ鋼繊維をモルタルに20mm埋め込んだ供試体を作成し、繊維を完全に引抜く実験を行った。試験装置を図1に示す。載荷速度は0.03mm/secである。使用した繊維は直径0.75mmである。線形形状を図2に示す。端部に波形状を配置したものが2種類、(wL0、wM0) wL0と同一の波形状を半分の長さにしたもの(wL0h) wM0と同一の波形状を内側に9mmずらしたもの(wM9) 端部にフック形状を配置したもの(h1) 及び直線(st)である。モルタルの配合は母材強度を変えるため2種類用いた。それぞれ(水セメント比、セメント細骨材比)が(30%、1:1)(50%、1:2.5)であり、圧縮強度は39.5MPa、76.0MPaであった。

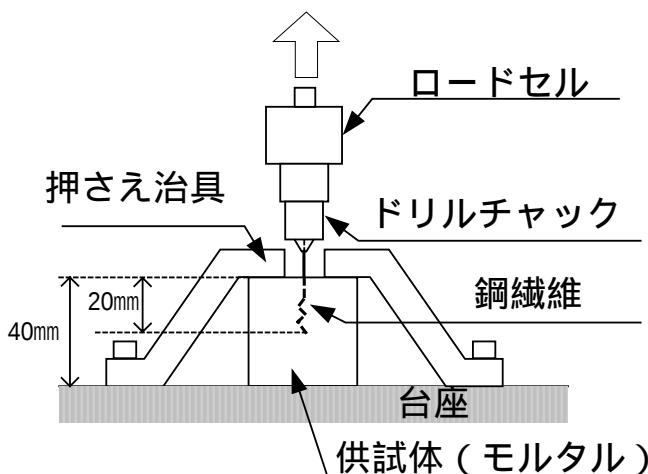


図1 試験装置概要

名称	線形形状模式図 図中の数字は端部からの距離(mm) ← 埋め込み側端部	波高(mm)
wL0		0.35
wL0h		0.35
wM0		0.26
wM9		0.26
h1		1.8
st		0

図2 鋼繊維の線形形状

3. 解析モデル

繊維の線形形状の影響を反映できるモデルにより解析を行なった。モデルの概要を以下に述べる。引抜き前の繊維は全長にわたりモルタルと化学的結合により付着しているが、引抜き時には化学的結合が切れ、付着によるせん断抵抗力は弱まっていく。次に曲線部においては、軸力の偏向により繊維 - モルタル界面に垂直抗力が生じ、それに比例する摩擦抵抗力が生じる。さらに繊維は経路の曲率変化点を引抜けて通過する際に塑性変形し、変形エネルギーを消費する。以上を考慮し力学的エネルギー保存により繊維の微小要素に対する荷重増分の式(1)を得る。

$$dP = (\tau_0 \cdot p + f \cdot P \cdot C + M \cdot C') ds \quad (1)$$

ただし、 dP ：荷重増分、 τ_0 ：付着定数、 p ：繊維周長、 f ：摩擦定数、 P ：軸力、 C ：曲率、 M ：モーメント、 C' ：曲率変化率、 ds ：繊維の微小要素長である。また、 τ_0 と f は引抜き変位のみの関数である。これにより繊維の形状を入力変数として引抜き荷重—変位関係が導かれる。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート、繊維形状、単繊維引抜き挙動

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 TEL：03-5841-7455 FAX：03-5841-7496

4. 実験結果及び解析結果

実験結果及び解析結果を図3に示す。それぞれ複数の実験結果をプロットしてある。wM0のみ母材強度小のケースがない。解析はst、wL0の結果より(1)の τ_0 、 f をキャリブレーションし、他形状へ適用した。

実験結果より以下のことがわかる。母材強度が大きいほうが引抜け荷重が大きく結果のばらつきも小さい。

直線形状に比べて曲線部を有するもののほうが全引抜き変位にわたって引抜け荷重が大きい(stと他形状の比較)。曲線長が長いほうが最大引抜け荷重が大きい(wL0とwL0hの比較)。曲線部が内側に寄せられた形状では、引抜け変位が大きな領域まで荷重を大きく保つ(wM0とwM9の比較)。繊維末端が直線部に達するに相当する引抜け変位までは引き抜け荷重が大きい(全般)。また、解析の結果は、概ね実験結果の傾向と一致しており、モデルの有効性が示された。ただしwM9では過大評価、h1では過小評価の傾向が見られた。

実験時の観察によると、引抜け後の鋼繊維は完全な直線とは言わないまでも、曲線部がほぼ伸展していた。これにより、解析において塑性変形を考慮することは妥当だと考えられる。ただしなかには繊維埋め込み部付近の表面のモルタルが破壊し、曲線部が伸ばされずに引き抜けたケースも見られた。これは母材強度の低いケースにより多く見られた。また、wM9の引抜け後の繊維を観察すると曲線部より埋め込み側端部の直線部分は変形履歴を受けていないような形状であった。すなわちこのケースでは引抜き経路が変形している可能性が考えられる。総じて3節のモデルの適用性が高いのは、母材強度が大きく、曲線部が端部にあり、波高がそれ程大きくないケースであった。これは、これらの条件を満たすとモルタルの引抜き経路の損傷が少なく、経路が変形しないというモデルの状態に近い引抜け挙動が起こっているためであろう。

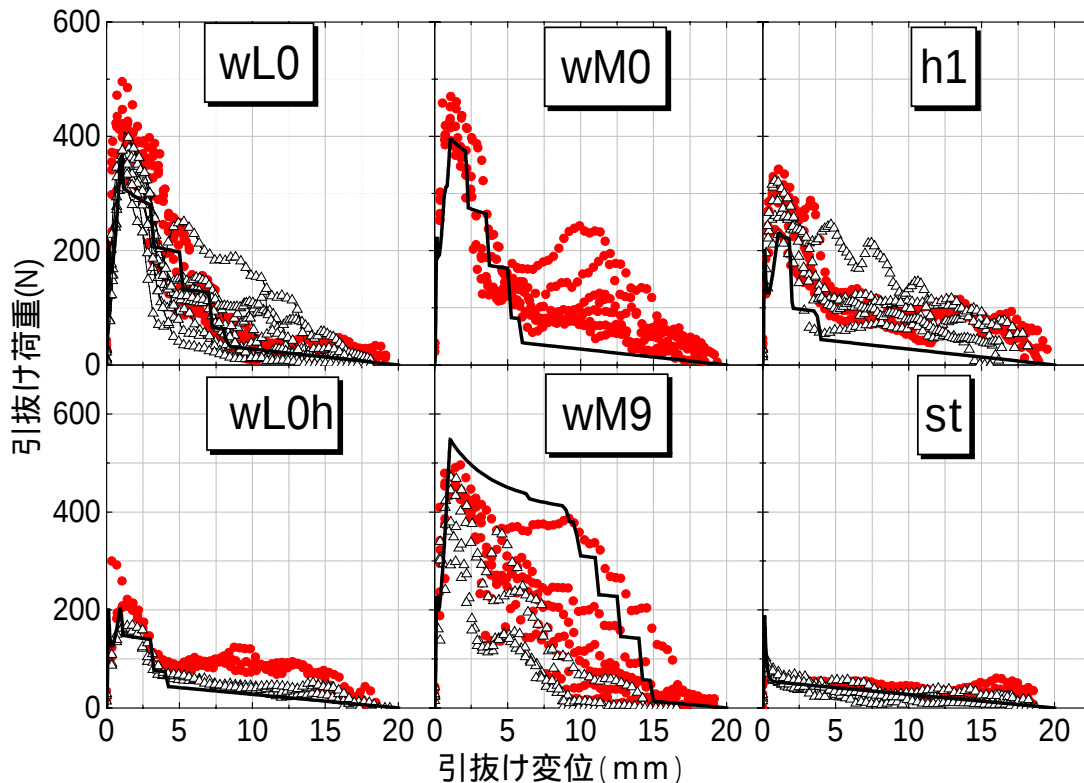


図3 実験結果及び解析結果

< ● : 実験 (母材強度大) ○ : 実験 (母材強度小) — : 解析 >

5. まとめ

本研究では直線部と曲線部で構成される線形を有する鋼繊維の形状が単繊維引抜け挙動に与える影響を実験的に検証し、解析モデルの適用性を検討した。結果として、鋼繊維の曲線長、曲率、曲線部の配置を変えることにより引抜け荷重—変位関係をコントロールできうることが実験的に示された。また、設計手法として界面の付着、摩擦、繊維の変形を考慮したモデルが有効であることが示され、その適用範囲も明らかとなった。今後の課題としては埋込み角度、母材強度の影響をさらに調べる必要があると考えられる。

最後に実験器具の提供を頂いた㈱ブリヂストン、㈱鹿島建設に謝意を表します。

参考文献

1) Gilles Chanvillard, Modeling the pullout of wire-drawn steel fibers, Cement and Concrete Research 29, 1999, pp.1027-1037.