

論文の内容の要旨

論文題目 鋼繊維と PET 繊維補強モルタルの引張応力下における力学特性

氏名 宮崎 晋行

繊維補強コンクリート／モルタル (Fiber Reinforced Concrete / Mortar, 以下 FRC / FRM と呼ぶ) とは, マトリックス (母材) と呼ばれるコンクリート／モルタルの中に, 補強材として繊維を一様分散させたものである. FRC の実用化を目指した研究が開始されてから 40 年が経過した. FRC の最大の特徴は延性的であり, 破壊に多くのエネルギーを要することである. そのため, ひび割れが生じた後も耐荷能力を直ちに失うことはなく, 大地震や岩盤崩落など災害時における人的被害の縮小に貢献する. また, ひび割れ幅が目視できるほどになってからようやく最終破壊に至るので, 構造物に利用した場合, どの部位が危険であるかを早期に知るセンサーの役割も果たし, 保守・点検が容易になる. 現在, トンネル覆工や高架橋からの破片落下をひとつの契機として, 徐々に FRC の土木や建築などさまざまな分野で利用が拡大しつつあり, 今後を着実に発展していくと思われる.

FRC の力学特性について多くの研究がなされてきたが, 未だ不明な点が残されており, 現場の技術者が経験に基づいて適宜対処せざるを得ない場合があるのが現状である. ひび割れ面間で伝達する荷重とひび割れ幅の関係が明らかになれば, 曲げ特性を推定することができるが, 従来, この関係は規格などで定められた曲げ試験から逆解析的に推定されるなどの手法によって求められ, 必ずしも明らかではない. その理由のひとつとして, 繊維の引抜特性が明らかにされていないことが挙げられる. FRC の特徴である延性は, ひび割れ面間で伝達される荷重によってもたらされ, これはひび割れ面を貫く繊維の引抜特性に起因するものである. 従って, 繊維の引抜特性は FRC の最も基本的な力学特性といえ, 繊維の引抜特性を求めることによって上記の特性を見積もることも可能と考えられる.

以上を勘案して, 本研究の目的を以下のように設定した.

- ①コンクリートやモルタルに繊維を混入するのは引張応力下における力学特性を改善するためであり, 具体的な構造物では曲げ応力を受けるはりが代表的といえる. はりの曲げ試験結果は寸法効果等のために, 寸法や形状の異なった構造部材に直接適用することができない. また, 一軸引張応力下の特性を実験的に直接求めることは困難であるため, 曲げ試験結果から一軸引張応力下における特性を推定して, その推定結果から構造物の力学特性を求めることが多い. しかしながら, この方法は手間がかかる上に信頼性が今ひとつ低い. そこで, 本研究では試験方法の開発を含めて, 引張応力下における FRC の特性を総合的に評価するシステムの開発を行った.
- ②現実の FRC では, 経済性を重視して, 繊維の体積混入率は 0.5 % 以下であることが多い.

このような低い体積混入率では、繊維間の相互作用は比較的小さいので、1本の繊維の引抜特性から FRC の力学特性を推定できる可能性が高い。そこで、安価にかつ迅速に実施できる引抜試験方法の開発をひとつの目的とした。この際、特に注意したのは、繊維が完全に引抜かれるまでの、いわば完全引抜抵抗-変位曲線が必要なことである。この要求を満たす引抜試験方法はこれまでにない。

③引抜試験結果から一軸引張応力下での力学特性を求める手法の開発を次なる目的とした。なお、一軸引張応力下での力学特性から、はりの力学特性を求める手法については既に提案されている。

④中でも古くより使用されている鋼繊維と、最近開発されたため特性がよくわかっていない PET 繊維（ポリエチレンテレフタレート繊維）を主たる対象として、開発した試験方法および提案した推定方法を検証する。あわせて特性の全くわかっていない PET 繊維補強モルタル（PET-FRM）の力学特性を明らかにして、その将来性について検討する。

本論文は9つの章で構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、FRC の発展経緯を概説し、FRC の基本特性に関する従来の研究のレビューと今後の発展に必要な研究課題を述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、コンクリートや繊維の諸性質、繊維の分散と配向およびそれらが FRC におよぼす影響について述べた。また、比較的早くから実用化されている鋼繊維や最近開発された PET 繊維の発展経緯、現在までに得られている主な知見およびそれらを混入した FRC の適用事例などについて概説した。

第3章では、FRC の最も基本的な力学特性ともいえる1本の繊維の引抜特性を得るために開発した試験方法について述べた。引抜抵抗がピークを越えて0となるまでの引抜抵抗曲線が得られれば、一軸引張応力下や曲げ応力下における FRC の挙動が推定できると考える。しかし、これまで引抜特性に関する研究はある程度見られるものの、ピーク強度以降の領域まで行われたものはほとんど無い。また、引抜試験結果の妥当性を確認するため、この試験方法により求めた鋼繊維の引抜特性から、SFRM の一軸引張応力下におけるひび割れ後の応力を計算したところ、過去に行われた一軸引張特性を定量的に説明できることがわかった。

第4章では、最近開発された PET 繊維とプラスチック繊維の中でも特に使用実績の多いポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維と呼ぶ）に対して、第3章の引抜試験を適用し、鋼繊維を含めた3繊維の引抜特性について比較・検討した。その結果、鋼繊維と比較するとプラスチック繊維では、①荷重の小さいうちから繊維が伸びるために、最大引抜抵抗となる時の変位が大きいこと、②試験結果のばらつきが小さいこと、③最大引抜抵抗以降の引抜抵抗曲線は繊維表面に施されたインデントと同じ周期で波打つが、全体的にはほぼ直線的に減少していること、などが特徴的であった。

第5章では、繊維の引抜過程における載荷速度依存性について実験的に検討した。構造物

の長期安定性を考える上で、構造部材の時間依存性挙動の検討は欠かせない。FRCの場合、ピーク強度以前における時間依存性は長期耐久性と関連が深く、ピーク強度以降の時間依存性はひび割れ発生後に補修工事などの対策を施すための時間的余裕と関連が深いと考えられる。しかし現在までのところ、引抜特性の時間依存性に関する知見は、重要であるにもかかわらずほとんどない。特にプラスチック繊維である PET 繊維では粘弾性的な伸びが懸念される。なお、比較対象として、PET 繊維と同様に PP 繊維も対象とした。鋼繊維の引抜過程における載荷速度依存性は、ばらつきが大きかったものの、モルタルの一軸圧縮強度に関するそれより小さかった。プラスチック繊維では鋼繊維よりも載荷速度依存性は大きかったが、最大引抜抵抗付近ではモルタルの一軸圧縮強度に関するそれと同程度であった。

第6章では、繊維の引抜特性と関連が深い FRM の一軸引張特性を求めた。特にひび割れ後の特性を正確に得ることを目的とした。鋼繊維や PET 繊維の混入により、ひび割れ後も繊維の引抜抵抗に起因する応力が観察できた。ひび割れ後において、PET-FRM の応力が極大となる変位は SFRM の数倍にもなること、PET-FRM の応力低下の方が SFRM よりも緩慢であること、などがわかった。しかし、一軸引張試験方法はある程度試験に習熟する必要があり、また一軸圧縮試験と比較するとかなりの手間を要した。そこで、第3章と第4章に基づいてひび割れ後の応力を推定したところ、試験結果とほぼ一致した。このことから、第3章で開発した引抜試験は、FRM の力学特性の中でも特に重要な一軸引張特性を見積もるのに有効であるといえる。

第7章では、実用上重要な PET-FRM の曲げ試験を行い、SFRM との比較を行った。SFRM でも PET-FRM でも、ひび割れ後の特性はプレーン・モルタルよりもかなり改善される。両者で比べると、曲げ強度は SFRM の方が大きい。ひび割れ後に荷重が極大となるときのたわみは PET-FRM の方が数倍程度大きいことがわかった。また試験中に撮影した画像からき裂長さやき裂開口幅を求めたところ、荷重の増減とき裂の発生や進展などとの間に密接な関係があることを確認した。

第8章では、SFRM の長期耐久性について述べる。SFRM は導入された直後から、一定期間経過すると鋼繊維が発錆するのではないかと懸念があった。これまでの研究では、腐食しやすい環境下での加速試験が主に行われていたが、本章では、条件が大きく異なる3地点における実施工での長期暴露試験を行い、鋼繊維の錆、SFRM の中性化や力学特性などを中心に検討したところ、地下の坑道や地表の法面では鋼繊維は十分な耐久性を示すこと、海岸飛沫帯のように厳しい環境下（塩害が主な問題となる環境下）ではステンレス繊維や高分子の繊維を用いることが望ましいこと、などがわかった。

第9章では、本研究の結論を述べた。

本研究の成果をまとめると、①引張応力下における FRC の特性を総合的に評価するシステムの開発を目指して研究に着手し、引抜試験から曲げ試験までの関連づけに対して一定

の知見を加えた。②引抜試験方法を開発して、これまでの試験方法では不可能であった繊維が完全に引抜かれるまでの、いわば完全引抜抵抗-変位曲線を求めることに成功した。③引抜試験結果から一軸引張応力下での力学特性を求める手法を提案した。④鋼繊維とPET繊維を主たる対象として、引抜試験、一軸引張試験および曲げ試験を実施して、3者の関係を明らかにした。あわせて特性の全くわかっていないPET-FRCの力学特性を明らかにして、その将来性について提言した。⑤簡単・迅速に実施できる引抜試験方法が確立できた。この方法は鋼繊維、PET繊維のみならず、その他のコンクリート補強用繊維にも応用できると考える。