

金沢大学 正会員 ○五十嵐心一
 金沢大学 正会員 川村 満紀
 金沢大学大学院 学生会員 田口 雅紀

1. まえがき

鋼繊維補強モルタルの靱性を支配する繊維の脱付着および引き抜き過程におけるエネルギー吸収機構としては、繊維とマトリックスの界面領域における付着破壊エネルギーと剥離界面に作用する摩擦抵抗に対する引き抜き仕事、およびマトリックスの強度により決定されるマトリックスの圧壊に要するエネルギーとそれとともなう付加的な摩擦抵抗仕事、および繊維の塑性変形エネルギーが挙げられる[1]。著者らはこれまで鋼繊維とセメント系マトリックスの付着特性を界面領域の破壊靱性と剥離界面の摩擦応力により評価することを試みてきたが[2]、その結果、シリカフェームを混入することにより緻密な界面領域が形成されるが、破壊靱性は著しく低下することを報告した[2]。鋼繊維の付着破壊過程において影響を受ける領域は比較的広範囲であることを考えると[3]、そのような領域に短繊維を分散させて靱性の増大を図ることにより鋼繊維の付着特性は改善され、その結果、鋼繊維補強モルタルの靱性が向上する考えられる。

本研究は、以上のような観点により、鋼繊維近傍のマトリックスの破壊靱性の増大を目的として短炭素繊維を混入した鋼繊維補強モルタルの力学的特性を鋼繊維の付着特性の改善との関連において実験的に検討したものである。さらに、シリカフェームを混入した場合における鋼繊維補強モルタルの靱性の向上と鋼繊維の引き抜き過程におけるエネルギー吸収機構との関係について明かにする。

2. 実験概要

(1) 使用材料およびモルタルの配合 使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。また、シリカフェームのセメント重量に対する置換率は10%である。細骨材には川砂を使用した。また、使用した鋼繊維は異形加工のなされていない繊維（直径:0.6mm、長さ:20mm）であり、炭素繊維はピッチ系炭素繊維（長さ:3mm）である。繊維補強モルタルの水セメント比は0.55、砂セメント比は1.5である。鋼繊維および炭素繊維の混入率は容積百分率でそれぞれ1%および0.5%である。

(2) 曲げ強度試験 4×4×16cmの繊維補強モルタル供試体を作製し水中養生を行った。材令28日において中央集中載荷（スパン:10cm）により曲げ強度試験を行い、荷重-たわみ曲線下のたわみ1mmまでの面積を曲げタフネスとした。

(3) 切欠きはりの曲げ試験 各モルタルマトリックスの靱性を評価するために、4×4×30cmの供試体を作製して水中養生を行った。材令28日において、中央集中載荷（スパン:24cm）により切欠きはりの曲げ試験を行い破壊エネルギー G_F を求めた。

(4) 鋼繊維の引き抜き試験[2] 図-1に示すように、厚さ0.3mmのシリコンチューブを装着した鋼繊維（長繊維）を埋め込み長さが30mmとなるように配置してモルタルを打設して4×4×15cmの供試体を作製した。供試体脱型時にこのシリコンチューブを取り除くことにより鋼繊維-モルタルマトリックス界面に切欠きを導入した後水中養生を行った。切欠き長さを変化させた供試体について材令28日において鋼繊維の引き抜き試験を行い、荷重-変位曲線を記録した。得られた荷重-変位曲線の変化から界面領域の限界エネルギー解放率(G_{11c})を求め、また剥離界面に作用する摩擦応力を一定と仮定して、最大引き抜き荷重後の曲線下の面積から剥離界面における摩擦応力(τ_f)を求めた。

3. 結果および考察

表-1に鋼繊維の引き抜き試験により求めた鋼繊維-モルタルマトリックス界面領域の破壊靱性と剥離界面の摩擦応力を示す。シリカフェームを混入することにより G_{11c} は著しく低下し、摩擦応力についてはほとんど変化がない。すなわち、シリカフェームの

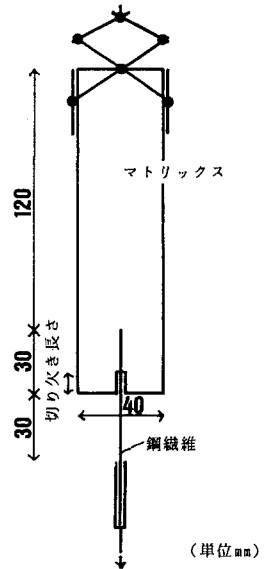


図-1 引き抜き試験供試体と載荷方式

表-1 各モルタルにおける鋼繊維の付着特性

	G_{11c} (kgf/cm)	τ_f (kgf/cm ²)
普通モルタル	0.0063	6.6
炭素繊維0.5%	0.0109	14.5
シリカフェーム-4.10%	0.0017	5.9
シリカフェーム-4.10%/炭素繊維	0.0120	14.9

混入は前述のように鋼繊維-モルタルマトリックス界面領域の付着特性を改善するものではないことがわかる。しかし、炭素繊維を混入すると G_{II} および摩擦応力は増大し、マトリックスの靱性の増大により鋼繊維の付着特性が改善されることがわかる。特に、シリカフェーム混入モルタルマトリックスに炭素繊維を混入した場合は、シリカフェームの混入による界面領域の破壊靱性の低下もなく、破壊靱性は著しく増大することが認められる。

図-2(a)~(d)は曲げ強度試験時に得られた各繊維補強モルタルの代表的な荷重-たわみ曲線の例を示したものである。普通モルタルマトリックスに炭素繊維を0.5%混入すると、普通モルタルマトリックスの場合に認められるような初ひびわれの発生にともなう荷重の低下はほとんど認められず弾塑性的な挙動を示すようになる。表-2に示すように、炭素繊維の混入によりマトリックス自体の G_F は増大していることから、ひびわれ後の耐荷力には炭素繊維の架橋効果も含まれると考えられる。しかし、その繊維長さ、混入率および大きなたわみに至るまでの耐荷力の保持を考えると、このような弾塑性的な挙動は炭素繊維の混入による鋼繊維の付着・引き抜け特性の変化の影響が大きいと考えられる。シリカフェームを混入した場合は、初ひびわれ後に荷重は若干低下するが、その後は著しい荷重の増大が認められかなり大きな耐荷力を示す。シリカフェームを混入した場合は、界面領域の破壊靱性と剥離界面の摩擦応力に改善が認められないにもかかわらずこのようなひびわれ後耐荷力の増大を示すのは、マトリックスの強度が増大することによるマトリックスの圧壊エネルギーおよび付加的な摩擦仕事および繊維の塑性変形エネルギーの増大のためと考えられる。シリカフェームと炭素繊維の両者を混入した場合は、上述のいずれの場合よりも大きな初ひびわれ荷重に至るまで荷重は直線的に増大し、その後は荷重の低下を示すことなくたわみとともに荷重は急激に増大してかなり大きな耐荷力にいたり、その耐荷力は大きなたわみにいたるまで保持されている。これは炭素繊維とシリカフェームの両者を混入した場合は、炭素繊維による鋼繊維-マトリックス界面領域の破壊靱性の増大と剥離界面の摩擦応力の増大に加えて、シリカフェームを混入することによるマトリックスの圧壊エネルギー、付加的な摩擦仕事および繊維の塑性変形エネルギーの増大およびシリカフェームによる炭素繊維の分散性の改善により鋼繊維の脱付着および引き抜き過程におけるエネルギー吸収能を増大させたためであると考えられる。

4. まとめ

- (1) 鋼繊維-モルタル界面領域のマトリックス自体の靱性の増大を目的として短い炭素繊維を混入すると、鋼繊維の付着特性は改善される。
- (2) シリカフェームと短炭素繊維をマトリックスに混入すると鋼繊維補強モルタルの強度および靱性は著しく改善される。

[謝辞] 本研究を行うにあたり土木学会吉田研究奨励金の交付を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献 [1]Brandt, A.M., J. Mat. Sci., 20, 3831-41, 1985. [2]五十嵐心一、川村満紀、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.1, pp.773-778, 1991. [3]川村満紀、五十嵐心一、第46回セメント技術大会講演集、1992.

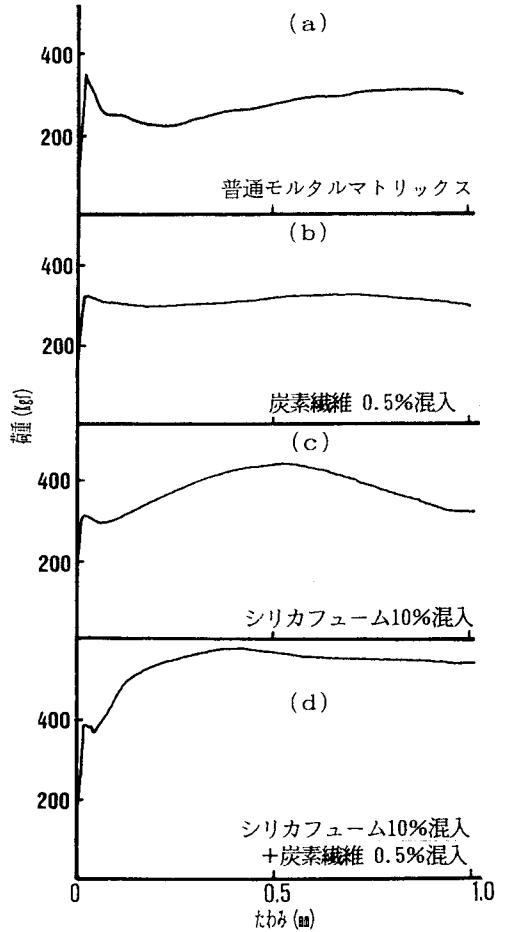


図-2 鋼繊維補強モルタルの荷重-たわみ曲線

表-2 各供試体の強度および靱性

鋼繊維 (vol.%)	0		1.0	
	G_F (kgf/cm)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	フネス (kgf·cm)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
普通モルタル	0.079	79	24	84
炭素繊維0.5%	0.173	64	29	76
シリカフェーム10%	0.073	72	35	92
シリカフェーム/炭素繊維	0.193	76	48	106