

論文

[1114] 炭素繊維補強コンクリートの練り混ぜと強度特性

正会員 ○小 泉 徹 (石川工業高等専門学校)
 正会員 榑 場 重 正 (石川工業高等専門学校)
 高 桑 信 一 (石川工業高等専門学校)

1. まえがき

セメントコンクリートに各種繊維を混入することによりその特性を改良しようという試みが続けられてきた。その結果、(1)引張強度、曲げ強度の増加、(2)衝撃強度の増加、(3)ひびわれとひびわれ発生後の荷重保持などに効果の高いことが示され、その有効な利用がのぞまれている。セメント、コンクリート中に混入される繊維としては、鋼繊維、ガラス繊維、有機繊維、炭素繊維などがあるが、炭素繊維は、ポリプロピレンやポリエチレンなどの有機繊維に比べて、高い剛性や引張強度をもつことや、アルカリ状態に対して不活性であることより、ガラス繊維よりも有効であると考えられ、その効果が期待される。

炭素繊維を混入したコンクリートに関する研究は、ここ数年いくつか見られるようになったものの、^{1)、2)} 当初繊維が他にものに比べて高価なことや、セメント、コンクリート中に混入されたときに、フロックを形成しやすい等の問題により、その使用範囲が限られていた。

従来、フロックの形成を防ぐため練り混ぜ方法などに工夫がなされてきたが、本研究では、粒度の極めて細かな細骨材を使用し、そのモルタル分が繊維のフロック中に入り込めば、繊維が解繊されると考え、このより細かな骨材を使用した炭素繊維補強コンクリートの二、三の特性について述べる。

2. 使用材料、配合、実験方法

使用した材料は、セメントは市販普通ポルトランドセメントであり、細骨材Aは石川県辰口産陶土、細骨材Bは石川県手取川産川砂(比重 2.56、FM 3.02)、粗骨材は石川県手取川産碎石(比重 2.59、最大寸法 15mm)である。炭素繊維はK社製(比重 1.65、直径 18.0 μm、弾性係数 30 GPa、引張強度 590 MPa)で、繊維長6、10、25mmの三種類のものである。細骨材Aは陶器用材料として使用されている土の不要部分(残土)であり、その物理的性質、化学成分を表1に、粒度分布を図1に示す。

実験はモルタル、コンクリートについて行ないモルタルの配合は水セメント比を100%、セメント：細骨材Aを1：2、炭素繊維混入率を容積比で0、0.5、1.0、2.0%としたもので、その配合を表2に示す。コンクリートの配合は単位セメント量を400 kg/m³とし、繊維混入率はモルタルに同じく、水セメント比を90、80、70%の三種類、細骨材材率を70%、細骨材A：Bを容積比で1：1とした。

一般に繊維をコンクリートに混入すると繊維の拘束によりコンクリートのワーカビリティーが悪く

表 1 細骨材Aの物理的性質と化学成分

| 物理的性質 | | 化学成分(%) | |
|---------|------|--------------------------------|------|
| 砂分(%) | 33.0 | SiO ₂ | 84.4 |
| シルト分(%) | 50.7 | Al ₂ O ₃ | 9.9 |
| 粘土分(%) | 16.3 | Fe ₂ O ₃ | 1.6 |
| 液性限界(%) | 30.3 | CaO | 0.1 |
| 塑性限界(%) | 23.0 | MgO | 0.2 |
| 塑性指数 | 7.3 | K ₂ O | 2.3 |
| 比重 | 2.67 | Na ₂ O | 0.2 |

なる。また本研究で用いた炭素繊維は、コンクリートが十分ワーカブルでなければ解繊されないため、モルタルではセメント重量の3%、コンクリートでは水セメント比90%、80%、70%のものでそれぞれセメント重量の1%、3%、5%の高性能減水剤（F社製空気非連行性）を練り混ぜ水に加えて使用した。コンクリートの配合を表3に示す。

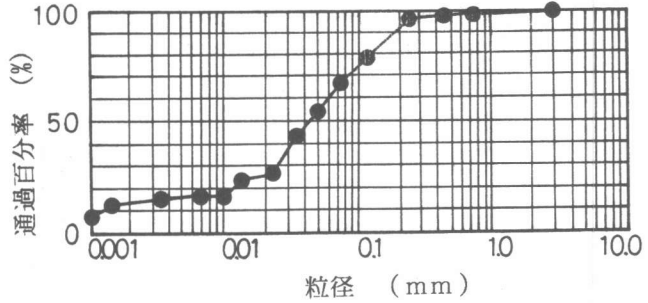


図 1 細骨材Aの粒度分布 (0.074mm以下は篩分析による)

モルタルの練り混ぜは、モルタルミキサー（回転数60rpm）にセメント、細骨材A、炭素繊維を入れ、30秒間空練りを行ない、引き続き所定量の水を加えて更に90秒間練り混ぜた。モルタルの試験は4×4×16cmの供試体を突き棒によりフロー値より定められる回数で突き固め、20℃水中養生後、材令7日と28日において JIS R5201「セメントの強さ試験」によって、曲げ強度と圧縮強度を調べた。

コンクリートの練り混ぜは、強制混合ミキサーにセメント、細骨材A、細骨材B、炭素繊維を入れ、30秒間空練りを行なった後、水を加えモルタルとして60秒間練り混ぜ、最後に粗骨材を加えて更に60秒間練り混ぜた。練り混ぜ後、ただちに空気量とスランプを測定した。コンクリートの締め固めは棒状バイブレーターで行ない、強度試験は圧縮、引張強度ではφ10×20cmの円柱供試体、曲げ強度試験では10×10×40cmの角柱供試体で、いずれも材令28日まで20℃水中養生の後、行なった。曲げ強度試験ではJCI-SS4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に従い曲げタフネスを求めた。JCI-SS4では曲げ試験における荷重点でのたわみ速度を規定しているが、本研究で用いられた試験機では、たわみ速度を規定値内に制御できず、試験機のクロスヘッドの変位速度が毎分0.2mmとして試験を行なった。またタフネスはたわみ2mmまでで求めるとしているが、ここでは使用した試験機の性能上、たわみ1mmまでで評価した。

3. 実験結果および考察

表 2 モルタル示方配合

(1) モルタル

炭素繊維を混入したモルタルのフロー試験の結果を図2に示す。図より炭素繊維の混入率が大きくなるとフロー値は指数的に減少を示し、特に混入率2%では0.5%や1%に対して大きく低下し、繊維のからみによるワーカビリティの悪化が見られた。繊維長による影響は繊維の短いものほどフローの低下が大きい。

これより、繊維がモルタルを拘束する力は繊維の長さよりも、ある断面において存在する繊維の量によって決まるといえる。

図3に曲げ強度試験の結果を示す。図より、プレーンモルタルに対し繊維混入モルタルは繊維混入率0.5%では強度の増加を示さないものの、混入率1%では材令7日で26~59%増、材令28日では16~27%増、混入率2%では材令7日で85~100%、材令28日で59

| 炭素繊維 混入率 (%) | 単位重量 (kg/m ³) | | | | |
|-----------------|---------------------------|-----|------|-------|-------|
| | セメント | 水 | 細骨材A | 混和剤 | 炭素繊維 |
| 0 | 484 | 484 | 968 | 14.58 | 0 |
| 0.5 | 482 | 482 | 963 | 14.45 | 8.25 |
| 1.0 | 479 | 479 | 958 | 14.37 | 16.50 |
| 2.0 | 474 | 474 | 948 | 14.23 | 33.00 |

表 3 炭素繊維補強コンクリート示方配合

| 炭素繊維 混入率 (%) | W/C (%) | 単位重量 (kg/m ³) | | | | | | |
|--------------------|------------|---------------------------|-----|------|------|-----|-----|-------|
| | | セメント | 水 | 細骨材A | 細骨材B | 粗骨材 | 混和剤 | 炭素繊維 |
| 0 | 90 | 400 | 360 | 470 | 451 | 391 | 4 | 0 |
| 0 | 80 | 400 | 320 | 507 | 486 | 422 | 12 | 0 |
| 0 | 70 | 400 | 280 | 545 | 522 | 453 | 20 | 0 |
| 0.5 | 90 | 400 | 360 | 457 | 438 | 378 | 4 | 8.25 |
| 0.5 | 80 | 400 | 320 | 498 | 478 | 414 | 12 | 16.50 |
| 0.5 | 70 | 400 | 280 | 522 | 500 | 433 | 20 | 33.00 |
| 1.0 | 90 | 400 | 360 | 451 | 433 | 376 | 4 | 8.25 |
| 1.0 | 80 | 400 | 320 | 494 | 474 | 409 | 12 | 16.50 |
| 1.0 | 70 | 400 | 280 | 517 | 495 | 430 | 20 | 33.00 |
| 2.0 | 90 | 400 | 360 | 442 | 424 | 368 | 4 | 8.25 |
| 2.0 | 80 | 400 | 320 | 485 | 465 | 401 | 12 | 16.50 |
| 2.0 | 70 | 400 | 280 | 507 | 486 | 422 | 20 | 33.00 |

～108%増と大きな値を示し、炭素繊維のひびわれを拘束する力の大きいことが示された。繊維長による曲げ強度の違いは、繊維の長い25mmのものの強度が最も大きく、繊維長の長いものが十分な付着力を発揮して強度を増加させたと考えられる。しかし、10mmと6mmでは6mmの強度が大きな値を示した。これはモルタル中の繊維の分散性や方向性、強度の変動によるものと考えられる。これに対して圧縮強度では図4に示すように、プレーンに対し、材令7日において5～18%の強度の増加が見られるものの、材令28日では、繊維長6mmは混入率1%と2%でプレーンより小さな強度であり、他にもプレーンと変わらない強度であった。

(2) コンクリート

スランプ試験の結果を図5～7に示す。各コンクリートのスランプは繊維混入率の増大により低下を示し、モルタルと同様混入率2%ではその低下が極めて大きく、プレーンで約25cmであるものが各水セメント比で0～6cmとなった。

水セメント比90%のものはスランプの低下が大き

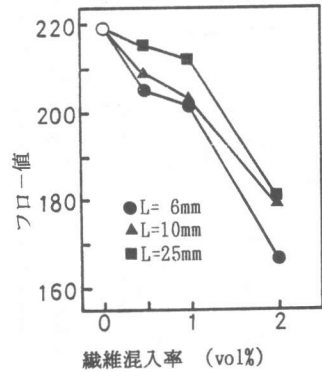


図 2 繊維混入率とフロ-値の関係

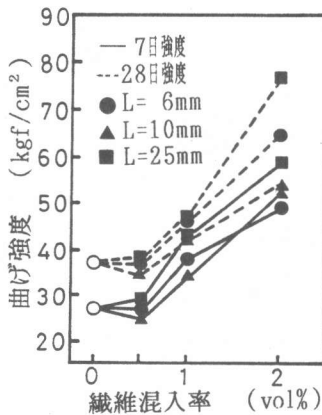


図 3 繊維混入率と曲げ強度の関係

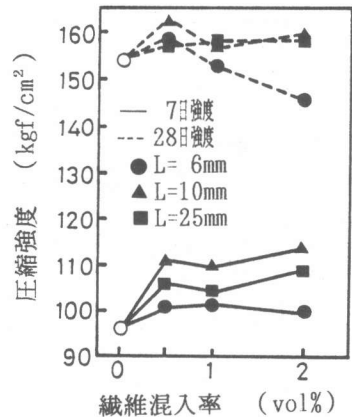


図 4 繊維混入率と圧縮強度の関係

いが、これは90%での減水剤の使用量がセメント重量の1%と他のものよりも少ないためである。水セメント比80、70%では繊維混入率0.5、1%で90%のものよりもスランプが大きく、混入率2%においても5cm前後の値を示した。

同時に測定された空気量試験の結果では、プレーンコンクリートの空気量が0.8~2.0%であるのに対し、炭素繊維補強コンクリートでは繊維のからみあいにより、1.3~4.2%の空気が存在した。これは練り上がったコンクリートを棒状パイプレーターで締め固めたものの、繊維が持ち込んだ空気を十分に追い出すに至っていないためと考えられる。

図8~10に圧縮強度試験の結果を示す。図より、いずれの水セメント比においても強度は繊維混入率が大きくなると低下を示した。炭素繊維の弾性係数は約30万kgf/cm²と一般のコンクリートと同じオーダーのものであるが、コンクリートでの圧縮強度に対しては、繊維表面でのモルタルとの付着強度が小さく、クラックの発生が繊維表面から起こるため、強度が減少すると考えられる。

図11~13に引張強度試験の結果を示す。図より、繊維混入により水セメント比90%においては引張強度はプレーンよりも大きな値を示すものの、繊維混入率が增大しても強度の増加が見られなかった。これに対し水セメント比80、70%では、混入率の増大とともに引張強度が増加した。80%の繊維混入率2%では、プレーンに対して51~56%増、70%では37~57%増となり、炭素繊維がひびわれの発生を拘束していることがうかがえる。水セメント比

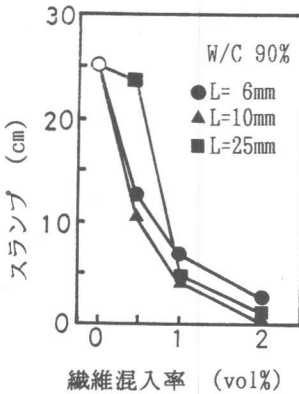


図 5 繊維混入率とスランプの関係

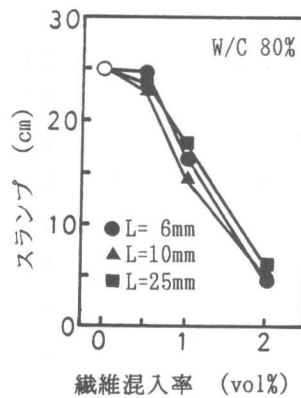


図 6 繊維混入率とスランプの関係

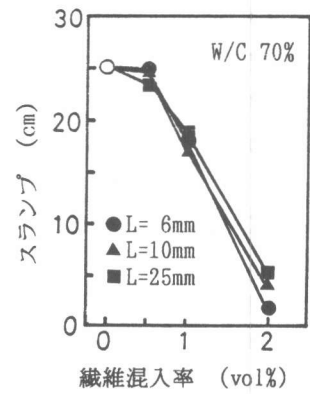


図 7 繊維混入率とスランプの関係

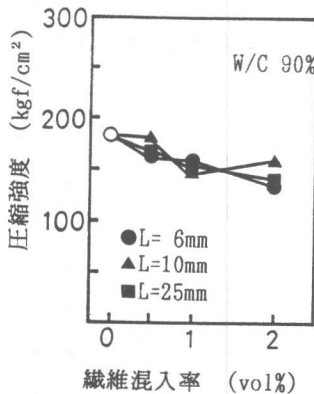


図 8 繊維混入率と圧縮強度の関係

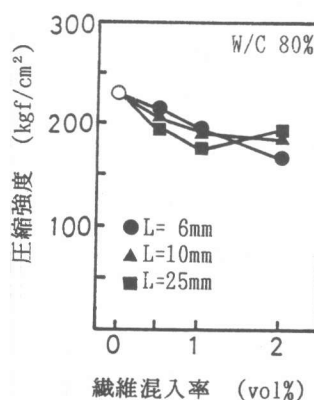


図 9 繊維混入率と圧縮強度の関係

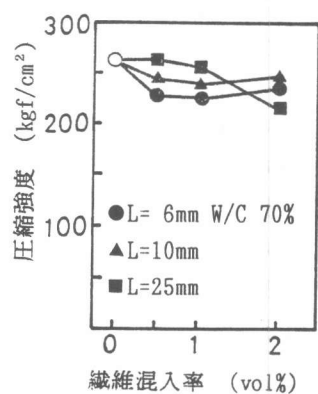


図 10 繊維混入率と圧縮強度の関係

90%で繊維混入による強度の増加が見られなかったのは、減水剤の使用量が1%と小さく、コンクリートが十分ワーカブルでなかったためと考えられる。

図14～16に曲げ強度試験の結果を示す。図より、曲げ強度はいずれの水セメント比においてもプレーンよりも大きな値を示し、水セメント比90%では最大52%、80%では最大75%、70%では最大50%の増加を示した。しかし、繊維混入率2%のものの中に強度が他に比べて伸びないものが見られた。これは繊維混入率2%のコンクリートでは打設時にワーカビリチーが悪く、型枠へ詰める時十分締め固めが行なわれず、コンクリート中に大きな気泡が存在したためと考えられる。したがって、炭素繊維補強コンクリートではどこまで十分にコンクリートを締め固められるかが重要といえる。繊維長が曲げ強度におよぼす影響はいずれの水セメント比においても明確な差は見られなかった。

図17に曲げ強度試験から得られた曲げ荷重～たわみ線図の一例を示す。これらより、たわみ1mmまでのタフネスを求めた結果を図18～20に示す。水セメント比90%と70%では繊維混入率0.5%と1%ではプレーンに対し、タフネスがやや減少、または同程度の値となったが、繊維混入率2%では、プレーンの50～100%増のタフネスを示した。水セメント比80%では繊維混入率の増加によりタフネスが大きくなり、最大でプレーンよりも200%以上大きくなった。

モルタルとコンクリートの曲げ強度を比較すると、モルタルの強度はコンクリートの強度よりも大きな値を示すものが多い。水セメント比はモルタルが100%であるのに対し、コンクリートは90～70%と少ないのに、曲げ強度が小さい。これは、コンクリートの粗骨材の影響で繊維が上下方向へ向くなど配向が乱され、曲げに対して有効に働かないためと考えられる。本研究で用いた粗骨材の最大寸法は15mmであったが、粗骨材が存在する場合の繊維の配向を力の流れに沿った有効方向へ変える手段の検討が必要といえる。

4. まとめ

炭素繊維は有機繊維などに比べて高い弾性係数をもつことなどにより、これをコンクリート中に混入すれば曲げ強度などの改

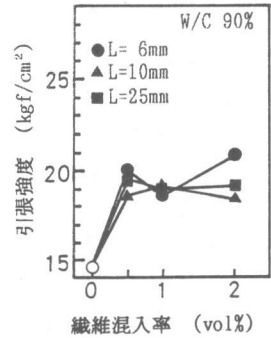


図11 繊維混入率と引張強度の関係

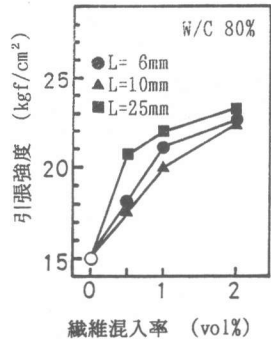


図12 繊維混入率と引張強度の関係

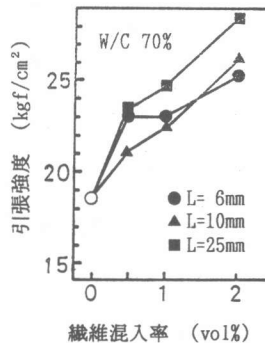


図13 繊維混入率と引張強度の関係

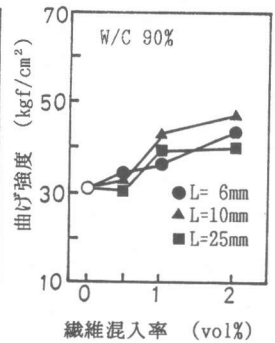


図14 繊維混入率と曲げ強度の関係

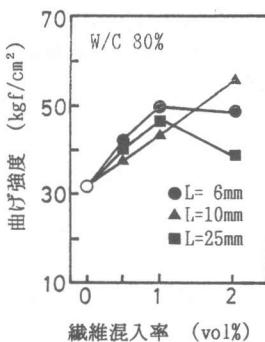


図15 繊維混入率と曲げ強度の関係

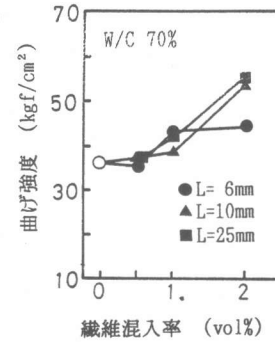


図16 繊維混入率と曲げ強度の関係

善の効果が期待された。

このためにはコンクリート中に繊維が十分分散し、なおかつ有効な配向を持つことが望まれる。本研究では炭素繊維がフロックを形成せずにコンクリート中に分散することを目的として、粒度の細かな細骨材を使用した

モルタル、コンクリートの強度特性などを調べた。

得られた結果を要述すると以下の通りである。

(1) 炭素繊維の特性上、一般の細骨材を使用したコンクリートでは固体粒子間の流動性が悪く、繊維の解繊が困難であった。本研究では細粒分を加えることで流動性を改善し、炭素繊維のフロック化を防ぐことが可能となった。

(2) 繊維混入率が2%になるとモルタル、コンクリートとも、フロー値、スランプの低下が大きく、特にコンクリートでは締め固めが困難なものが見られた。

(3) 圧縮強度は、モルタルではプレーンとあまり差がないのに対し、コンクリートでは繊維混入率が大きくなると強度が低下した。

(4) コンクリートの引張強度は繊維の混入により大きく改善された。

(5) モルタル、コンクリートの曲げ強度は繊維混入率の増大によって強度の増加を示したが、コンクリートの強度はモルタルよりも小さく、これは粗骨材によって繊維の配向が有効方向でなくなったためと考えられる。

(5) コンクリートの曲げタフネスは繊維混入により大きく改善される。

参考文献

1) 秋浜、小林、末永、中川、鈴木：炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の実験的研究 (その4) CFRC供試体の形状・寸法と曲げ特性の関係について 鹿島建設技術研究所年報 第32号 P71~78 昭和59年6月
 2) 古川、宮本、辻：短炭素繊維で補強したモルタルの力学的性状 セメント技術年報 P455~458 昭和62年

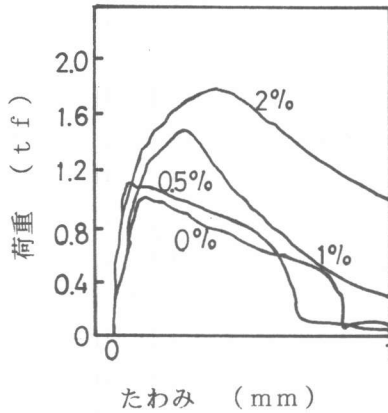


図17 荷重～たわみ線図の一例

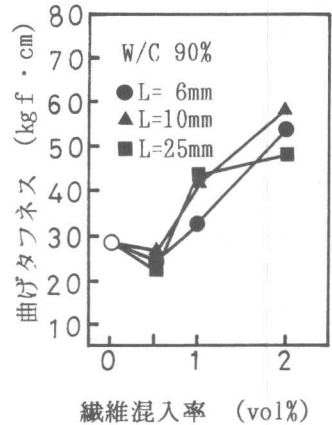


図18 繊維混入率と曲げタフネスの関係

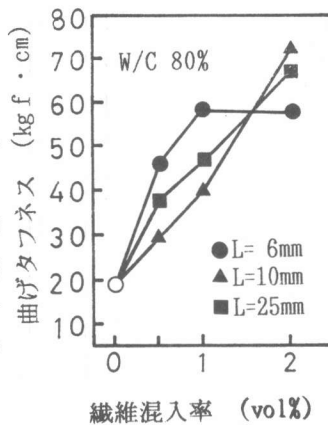


図19 繊維混入率と曲げタフネスの関係

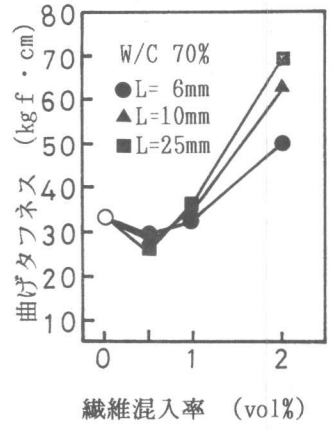


図20 繊維混入率と曲げタフネスの関係