論文 二重らせん構造型 PET 繊維の補強性能に関する研究

林 承燦*1・鈴木 俊雄*2・古屋 力*3・木村 定雄*4

要旨:本研究では,直径や長さが異なる二重らせん構造のPET 繊維を用い,練混ぜ後のフレッシュ性状並び に硬化後の力学的特性や繊維の架橋効果に伴う曲げ靭性について評価を行った。その結果,繊維混入率の増 加に伴ってスランプは低下するが,空気量や圧縮強度への影響は小さいこと,繊維長さが短い30mmでは繊維 経が太い繊維の曲げ靭性が高まること,繊維長が長い50mmでは,繊維径が太くなると曲げ靭性が高まるもの のバラツキが若干大きくなることがわかった。また,破断面の観察から,繊維の引抜けや破断によるものと 判断される繊維先端の束が解れていることが確認された。

キーワード:繊維補強,架橋効果,PET繊維,二重らせん構造,曲げ靭性係数

1. はじめに

繊維補強コンクリートは、コンクリートのひび割れ発 生後においても、繊維の架橋によって外力に抵抗するこ とができることから、通常のコンクリートに比べて曲げ 靭性の向上が期待できる。これより、部材の高靭性化や はく落防止を目的とした適用に加え、高強度コンクリー トの火災時の爆裂防止および乾燥収縮等によるひび割れ 抑制などを目的とした適用も積極的に進められている¹⁾ ²⁾。

繊維補強コンクリートは, 1970年代から精力的に研究 が行われ,1990年代までは鋼繊維がほとんどで、繊維長 としては 30~50 mm, 直径が 0.5 mm程度のものが多く用い られた。1990年代後半からは、鋼繊維に比べて高価では あるが,耐腐食性が高く,軽量である等の特徴からポリ ビニルアルコール繊維、ポリプロピレン繊維およびアラ ミド繊維等の有機繊維が適用され始めた¹⁾。一方,ポリ エチレンテレフタレート繊維は安価であるが、他の有機 繊維に比べて引張強度や引張弾性率が 1/10 程度以下と 小さい等の理由より研究や適用が非常に少ないのが現状 である。このため、近年では、直径数十マイクロメート ル以下の微細繊維複数個を束ねることで太径状に形成さ せ,その太径の繊維二本を二重らせん構造に巻き込んだ PET 繊維が開発されている。複数の微細繊維を束ねるこ とにより太径にすることで見かけの引張強度が大幅に改 善されるとともに,

型として開発された PET 繊維は,他の有機繊維や鋼繊維 に比べて素材が柔軟で,かつ安価であることは,繊維補 強コンクリートの作業性や経済的に有効であると考えら れる。

本研究では,直径や長さが異なる二重らせん構造型 PET 短繊維(以下,PET 繊維と呼ぶ)を混入した繊維補強 コンクリートのフレッシュ性状および繊維の架橋効果に 伴う曲げ靱性等の力学特性等について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

試験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。近年,道路上での交通規制時間短縮等の目的で超速硬セメントを用いた繊維補強セメントが多く用いられることから、本研究でもセメントには超速硬セメントを用いた。 粗骨材は砕石(表乾密度=2.60g/cm3,最大骨材寸法=25mm),細骨材は陸砂(表乾密度=2.58g/cm3,粗粒率=3.05,吸水率=2.29%)とした。混和剤には高性能減水剤を用いた.また,超速硬セメントの可使時間を確保する目的で酒石酸系遅延剤を用いた。

PET 繊維は直径数十マイクロメートル以下の微細繊 維複数本を樹脂材で束ねることで太径の一本の糸状に形 成,その太径の糸二本を機械的に二重らせん構造に巻き 込み,その後,表面に樹脂コーティングを行ったもので

二重らせん構造の 繊維束にすること で付着強度の改善 が期待できる。とく に,二重らせん構造

表-1	コンク	リー	トの配合
-----	-----	----	------

水セメン	細母状家	単位量 (kg/m3)					
卜比	和百切中 s/a	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	遅延剤
W/C	574	W	С	S	G	А	D
31.8	55.4	158	520	879	711	13	1.08

*1 ㈱デーロス・ジャパン 工博 (正会員)

*2 中日本高速道路㈱ 金沢支社 敦賀保全・サービスセンター

*3 金沢工業大学 大学院 環境土木工学科

*4 金沢工業大学 環境土木工学科教授 工博

表一2 PET 繊維の物性					
繊維種類	引張強度(N/mm ²)	引張弾性率(N/mm²)	繊維径(nm)	繊維長さ(㎜)	
PET	60	3500	0.3,0.4,0.5	30,40,50	

繊維	繊維	繊維混入率	スランプ、空気	
直径	長さ	(vol%)	量、圧縮試験	
0.3mm	30mm	1.27	<u>4ш.</u>	
	40mm	1.27	無	
	50mm	0.5,0.75,1.0,1.27	有	
0.4mm	30mm	1.27	無	
	40mm	0.5,0.75,1.0,1.27	有	
	50mm	1.27	無	
0.5mm	30mm	0 5 0 75 1 0 1 27	有	
	40mm	0.3,0.73,1.0,1.27		
	50mm	1.27	無	

表-3 PET 繊維の寸法と混入率

ある。また、繊維表面にはらせん状に沿って若干のくぼ みが形成されており、柔軟性に優れたものである。写真 -1 と表-2 に二重らせん構造型 PET 繊維の形状と物性 を示す。

2.2 試験ケース

表-3に試験ケースごとの PET 繊維の寸法並びに混入 率を示す。試験に用いた繊維の寸法は、長さ 30 mm, 40 mm, 50 mmに対する直径 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mmの合計 9 種 類とした。繊維混入率は、繊維の寸法ごとに混入率 1.27vol%のみのケースと混入率が 0.5 vol%, 0.75 vol%, 1.0 vol%, 1.27vol%のケースとした。なお、比較のために 繊維を混入しない無混入のケースも設けた。

2.3 練混ぜおよびフレッシュ状態の試験方法

繊維補強コンクリートの練混ぜには強制一軸ミキサを 用いて、セメントと骨材を空練りした後、水を投入し、 ベースコンクリートを練り上げ、その後に繊維を投入し た。練混ぜ時間は、空練りを10秒、ベースコンクリート 練りを30秒間とし、繊維投入後の練混ぜ時間を3分と した。高性能減水剤と遅延材は、練混ぜ水に混合した状 態で投入した。なお、減水剤量はすべての配合で同じと し、遅延剤量は20℃環境で可使時間40分程度を基準と した。

フレッシュ性状の評価には、スランプ試験と空気量試 験とし、繊維無混入と混入率 0.5~1.27vol%のケースにお いて、ケースごとに1回の試験を行った(表-3)。

2.4 圧縮および曲げタフネス試験

圧縮強度試験に用いる供試体は、φ100×200mmの円柱 供試体とし、材齢3時間で脱型し、材齢28日まで室内気 中養生を施した後に圧縮強度試験を行った。なお、圧縮 供試体の作製は繊維無混入と混入率 0.5~1.27vol%のケ



写真-1 二重らせ構造 PET 繊維



ースのみ(表-3)とし,3本の平均値を圧縮強度とした 曲げタフネス試験供試体の寸法は100×100×400 mmとし, 材齢3時間で脱型し,材齢28日まで室内気中養生(温度 20±3℃,湿度55±10%)を行った。その後,JSCE-G552 に準拠し曲げタフネス試験を行った。曲げタフネス試験 は,曲げ載荷スパンが300 mmの3等分点曲げ載荷試験と し,ロードセルより荷重の測定を,高感度変位計より支 点および中央点の変位の計測を行った。曲げタフネス試 験概要を図-1に示す。

3. 試験結果および考察

3.1 スランプおよび空気量

写真-2 と図-2 にフレッシュ状態におけるスランプ 試験状況と結果を示す。

繊維混入率とスランプとの関係においては、繊維混入 率 0.5vol%でのスランプは 18 cm以上と繊維無混入とほぼ 同程度のスランプが得られたが、繊維混入率の増加に伴 い急激にスランプが低下する傾向を示した。

繊維混入率の増加に伴うスランプ低下が最も顕著で あったのは、直径 0.3mm で長さ 50mm のケースであり、 繊維混入率が 1vol%で若干の繊維塊が見られ, 1.27vo%で は多くの繊維塊が観察された(写真-3)。他の寸法では、 いずれの混入率においても、目視や手触りにより短繊維 の塊等がなく、均等に分散されていることを確認された. なお、繊維混入率の増加に伴うスランプの低下程度が最



写真-2 スランプ 写真-3 繊維の 試験状況 発生状況

小さくなる結果であった。

も小さくなったのは、繊維径が最も太い直径 0.5 mmの長 さ30 mmのケースであった。一方、長さ40 mmの場合、繊 維径の違い(直径 0.4 と 0.5 mm)によるスランプの差はほと んどない結果であった。なお、繊維寸法の違いによるス ランプの差は、繊維混入率が多くなる混入率 1.0vol%以 上で顕著な差が認められ、繊維長が長いほどスランプも

以上より、繊維長が長いほど繊維と繊維の重ね継ぎ手 の長さが長くなり、繊維混入率の増加に伴う繊維の絡み 合いも生じやすくなると考えられる。これより、コンク リートの流に対する繊維の拘束力が増加したため、繊維 長が長いほどスランプが小さくなり、繊維混入率の増加 に伴うスランプの低下も大きくなったと考えられる。

図-3 に空気量試験結果を示す。空気量においては, 繊維混入率や寸法の違いによる明らかな傾向はなく,繊 維無混入の空気量の±0.5%範囲内であった。一般的に, モルタルの場合,繊維混入に伴い繊維が空気を巻き込み, 空気量が増加する傾向であることが知られている³⁾。本 試験に用いた繊維は,モルタルに混入する繊維(直径 0.04 mm程度,長さ10 mm程度)²⁾に比べ,長さが数倍程度で, 直径が10倍程度以上と太径の長い繊維である。これよ り,繊維混入や混入率の増加に伴う空気量の増加傾向が ないことは,モルタルに混入する繊維に比べて寸法が大 きい繊維であること等が考えられるが,繊維混入量を本 試験より多くした場合,空気量が増加する可能性も考え られるので検討が必要である。

3.2 圧縮強度

図-4に繊維混入率と平均圧縮強度との関係を示す。

平均圧縮強度はおいても、空気量と同様に繊維混入率 や寸法の違いによる明らかな差がない結果であった。し かし、繊維混入供試体の平均圧縮強度は、繊維無混入供 試体の平均圧縮強度 64N/mm² とほぼ同等あるいは若干 大きくなる結果で、繊維混入率の増加とともに圧縮強度 も若干であるが増大の傾向が見られた。また、前述より 繊維混入による空気量の増加は無いことが空気量試験に より確認されている。なお、既存の研究においでも、繊 維混入量 1.0vol% (繊維の直径 0.5 mm程度、長さ 30 mm程



度)以下では、繊維混入による空気量の変動は 0.5%程度 で、圧縮強度の低下も殆どないと報告されている^{4) 5)}。 これより、繊維混入率の増加に伴う圧縮強度の増大傾向 は、圧縮試験における混入繊維のひび割れ抵抗等の影響 も考えられ、圧縮試験時の応力—ひずみ関係やアコース ティックエミッション(AE)法による破壊傾向等の検討が 必要である。

3.3 曲げ荷重—荷重曲線の特徴

(1) 繊維の寸法と曲げ荷重-変位曲線

図-5に繊維混入率 1.27Vol%における繊維の寸法ごとの曲げ荷重-変位関係を示す。また、本文中の初期ひび

割れ発生荷重,初期ひび割れ発生後の最大荷重時とその時の変位及び標準偏差は平均値である。

すべての供試体において,初期ひび割れ発生直後に荷 重の低下が見られたが,その後の変位の増加とともに荷 重が増加する傾向であった。この様な初期ひび割れ発生 後の荷重の増加は繊維の架橋効果によるものと考える。

繊維長さと曲げ荷重-変位関係においては,長さ30mm の場合、全ての繊維径において初期ひび割れ発生荷重は 17kN 程度とほぼ同程度であるが, 初期ひび割れ発生後の 最大荷重は直径 0.5 mm(16.8kN), 0.4 mm(17.4kN)及び 0.3 mm 19.0kN)順に繊維径が細いほど大きくなる結果であった。 なお,初期ひび割れ発生後の最大荷重時の変位は,直径 0.3 mm(0.6 mm), 直径 0.4 mm(0.84 mm)及び直径 0.5 mm(1.5 mm) 順に繊維径が太いほども大きく、その後の荷重の低下も 緩やかであった。繊維長さ40mmの場合,全ての繊維径に おいて初期ひび割れ発生荷重は 16.5kN 程度とほぼ同程 度であるが、初期ひび割れ発生後の最大荷重は直径 0.3 mmと 0.4 mm (22kN 程度) に比べ 0.5 mm(19kn 程度)のほう が若干小さい結果であった。一方、初期ひび割れ発生後 の最大荷重時の変位は、直径 0.3(0.6 mm)、直径 0.5 mm (1.0 mm)および直径 0.4 mm(1.3 mm)順に大きく, その後の荷 重の低下も同順に緩やかであった。繊維長さ 50 mmの場 合,全ての繊維径において初期ひび割れ発生荷重は15kN 程度と他の繊維長さに比べ若干小さいが、初期ひび割れ 発生後の最大荷重は 20.5kN 程度と長さ 40 mmと同程度で あった。なお、初期ひび割れ発生後の最大荷重時の変位 においては、直径 0.3mmと 0.5mm(1.1 mm程度)に比べ直 径 0.4 mm(1.5 mm)ほうが大きくなる結果であった。一方, 初期ひび割れ発生後の最大荷重のバラツキにおいては, 直径 0.3 mmの場合,初期ひび割れ発生後の最大荷重の標 準偏差は 2.5kN 程度と繊維長さ 30 mmと 40 mmのケースと 同程度であるが, 直径 0.4 mmの標準偏差は 3.5kN, 直径 0.5 mmの標準偏差は 4.3kN と繊維径が太いほど初期ひび 割れ発生後の最大荷重のバラツキが大きくなる傾向であ った。以上より、初期ひび割れ発生後の繊維の架橋効果 に伴う荷重の増大には、繊維長 30 mmに比べ繊維長 40 mm や50mmが有効であるが、繊維長50mmの場合、太径の繊 維径において初期ひび割れ発生後の最大荷重のバラツキ が大きくなる結果であった。

(2) 繊維混入率と曲げ荷重-変位曲線

図-6 に繊維混入率と曲げ荷重—変位関係を示す。すべての繊維混入率において、初期ひび割れ発生後に急激な荷重の低下が見られた。初期ひび割れ発生に伴う荷重低下後の最低荷重は、混入率 0.5vol%で 8kN 程度, 0.75vol%で 9kN 程度, 混入率 1.0vol%で 10kN 程度, 1.27vol%で 12kN 程度と混入率の増加とともに最低荷重も高くなる傾向であった。しかし、長さが最も短い 30 mm



(直径 0.5 mm)の場合,繊維混入率 1vol%以下では,同繊維 混入率の他の寸法に比べ最低荷重が 2~3 割程度低くな る結果であった。一方,初期ひび割れ発生に伴う荷重低 下後においては,直径 0.5 mm,長さ 30 mmの混入率 0.5vol% の場合,荷重の増加はないが,その他の場合,変位の増 加とともに荷重も増加する傾向であった。また,その荷 重増加後の最大荷重は繊維混入率が多いほど大きくなる 結果であった。

繊維の寸法よる影響においては、長さが最も短い 30 mm (直径 0.5 mm)の場合,他に比べて初期ひび割れ発生に伴う 荷重低下後の荷重増大が緩やかであり,増加率も小さい。 また,最大荷重に達した後の荷重の低下も緩やかであっ た。繊維長 40 mmの場合は,細径の 0.4 mmの繊維混入率 1 vol%において,初期ひび割れ発生後の最大荷重の標準偏 差が 5.4kN と他の 2 倍程度のバラツキとなった。



3.4 曲げタフネス

図-7 に荷重-変位曲線から変位 2.0mm までの曲げ タフネスを算出した曲げ靭性係数を示す。

繊維混入率 1.27Vol%の場合,繊維径が最も小さい 0.3 mmにおいて,繊維長の違いによる曲げ靭性係数の差が最も大きく,繊維径の増大に伴いその差が小さくなる傾向



であった。なお、繊維径の増大に伴い繊維長 30 mmの場合、曲げ靭性係数の大きくなったが、繊維長さ 50 mm場合、曲げ靭性係数が小さくなる結果となった。一方、繊維長 40 mmの場合は、繊維径の増大に伴い曲げ靭性係数 も増加したが、再び低下する結果であった。

繊維混入率と曲げ靭性係数との関係においては,繊維 寸法による大きな違いがなく,繊維混入率の増大ととも に曲げ靭性係数も大きくなる傾向であった。

3.5 曲げ試験後の破断面

写真-4 に曲げ試験後の破断面の写真を示す。破断面 の写真は繊維径 0.3 と 0.5 mmでのそれぞれの繊維長 30 と 50 mmの繊維混入率 1.27vol%の供試体である。全ての破断 面において繊維の先端における繊維束の解れが生じてい る繊維が多く観察された。先端に繊維束の解れが生じて いる繊維のコンクリート破断面からの突出長さは約数ミ リ程度であった。また,破断面には,丸い穴が多く発生 しており,その原因は練混ぜ時の巻込みエアーと考える が,混入繊維の直径とほぼ同程度の正円形も観察された。 なお,繊維束の解れ繊維や正円形の穴の位置関係を破断 面の対称面(左右の面)より観察すると,対称面の同位

置の左右面とも繊維束の解れ が生じている繊維が突出して いるケースと, 左面には繊維束 の解れが生じているが右面に は正円形の穴が発生している ケースも観察された。これよ り,繊維先端での繊維束の解れ の原因は,曲げ試験時の引張応 力のよる繊維の引抜け又は破 断によるものと考える。また, 引抜けと判断される繊維も繊 維束の解れが発生しているこ とより, 正円形の丸い穴の内部 に引抜け繊維の一部が残って いる可能性等も考えられ、今 後,検討が必要である。なお, 破断面での繊維の引抜けや破 断による繊維束の解れは, 二重 らせん構造の繊維表面形状に よる、繊維とコンクリートの付 着力の向上によるものとも考 えられる。



写真-4 曲げ試験後の破断面の写真(混入率 1.27%)

一方,破断面からの突出長さが比較的に長く,繊維先 端での繊維束の解れ等の外観上の損傷がない繊維も観察 された。このような繊維が観察される位置と同位置の対 称面の破断面には,繊維の側面と同形の痕跡(細長いら せん形の形状)が発生していった。試験に用いた PET 繊 維は柔軟で曲がれやすいため,曲がれた状態では配向さ れたからであると考えられる。

4. まとめ

本試験では,直径や長さが異なる二重らせん構造型 PET 短繊維を混入した繊維補強コンクリートのフレッシ ュ性状および繊維の架橋効果に伴う曲げ靭性等の力学特 性等について検討を行った。得られた結果は,以下のと おりである。

- (1) 繊維混入率の増加に伴いスランプが低下する傾向で、 その低下程度は繊維径に比べて長さの影響が大きい と判断された。繊維寸法の違いによるスランプの差は、 繊維混入率 1.0vol%以上で顕著であった。
- (2) いずれの繊維寸法や混入率においても空気量および 圧縮強度の差はほとんどない結果であった。
- (3) 曲げ荷重-変位関係や曲げ靭性係数の結果より,繊維径が同じである場合は、繊維長が長いほど曲げ靭性 係数も大きくなる結果であった。しかし、繊維長さが 短い 30 mm場合、太径の繊維が架橋効果の向上に有効 であったが、繊維長が長い 50 mm場合は、繊維径が大き

いほど曲げ靭性係数が小さくなり,曲げ荷重変位―曲 線のバラツキも若干大きくなる結果であった。

(4) 全ての破断面において、繊維先端に繊維束の解れが 生じている繊維が多く観察された。これは、曲げ試験 時の引張応力のよる繊維の引抜け又は破断によるも のと考える。

参考文献

- 国枝稔:土木構造物への適用例-短繊維の変遷を踏 まえて-,コンクリート工学, Vol 50, No.5, pp.451-456, 2012.5
- 2) 牛田耕悟,上原匠,梅原秀哲,深津章文:鋼繊維の 形状が高流動・高強度繊維補強コンクリートに及ぼ す影響,コンクリート工学論文集,Vol.26,No.1, pp.273-278,2004
- 3) 閑田徹志,平石剛紀,永井覚,丸田誠:実機練混ぜ による自己充てん型 ECC の性能に関する実験的検 討,高靭性セメント複合座右に関するシンポジウム, pp.125-132,2003,12
- 4) 浦野登志雄,松田学,松本康資:短繊維補強された コンクリート製集水蓋の開発,熊本高等専門学校, 研究紀要,第8ご号,pp.19-25,2016 宮坂商樹,網野貴彦,羽渕貴士:再生 PET 短繊維補 強コンクリートによる剥落防止技術の基礎的検討, 土木学会大 58 回年次学術講演会,V-568,pp.1133-1134,2003