

論文 合成短繊維混入コンクリートの靱性評価に関する研究

黒野 薫^{*1}・佐藤 嘉昭^{*2}・大谷 俊浩^{*3}・濱永 康仁^{*4}

要旨：本論文ではこれまで提案されている靱性評価方法を合成繊維少量混入コンクリートに適用し、合成短繊維混入コンクリートに最適な曲げ靱性の評価方法について検討を行った。その結果、ASTM C1018で示されている残存強度係数がごく少量の合成短繊維混入コンクリートの靱性評価方法に適していることを示した。

キーワード：合成短繊維、曲げ強度試験、靱性評価、残存強度係数

1. はじめに

現在、コンクリートの剥落や収縮ひび割れ抑制の事前対策として合成短繊維を0.05vol%程度とごく少量混入したコンクリートに関する事例が報告¹⁾されている。合成繊維を少量混入することにより、コンクリートのフレッシュ性状はほとんど変化することなく、コンクリートの靱性の向上とひび割れ抵抗性を付加することが期待できる。そこで、筆者ら²⁾は、合成繊維を繊維補強材料としてではなく、コンクリート用材料の1つとして位置付け、合成繊維をごく少量混入したコンクリートの諸物性に関する実験を行い、合成繊維を混入することによって曲げ靱性が向上することを確認してきた。しかしながら、その靱性の指標となる曲げ荷重-たわみ曲線は、鋼繊維混入コンクリートと大きく異なる。特に、ひび割れ発生後の挙動には試験機の制御条件(open-loop or closed-loop)によって不安定なひずみ軟化領域として知られている現象が現れ、測定結果に対して誤差や誤解を招くことが指摘³⁾されている。したがって、鋼繊維補強コンクリートを対象として提案されている曲げ靱性評価指標値^{4),5),6),7)}が、ごく少量の合成短繊維を混入したコンクリートに適用可能かどうか確認する必要がある。

以上のことから、本論文ではナイロン繊維を

混入したモルタルおよびコンクリート供試体を用いて曲げ強度試験を行い、これまで提案されている各種曲げ靱性評価方法を適用し、最適な評価方法の検討を行った。また、その検討結果に基づき、ポリプロピレン繊維混入コンクリートの曲げ靱性評価を行い、本論文が提案する評価方法について検証した。

2. 曲げ強度試験

2.1 実験計画

実験計画を表-1に示す。本実験ではナイロン繊維を用いて合成繊維少量混入コンクリートの曲げ靱性評価方法について検討を行うため、粗骨材の影響を取り除いたモルタル供試体とコンクリート供試体を用いて曲げ強度試験を計画した。使用したナイロン繊維(以下、N-1繊維)の物性を表-2に示す。使用した基準モルタルおよびコンクリートの調合および使用材料を表-3に示す。基準コンクリートにはレディーミクストコンクリート(24-18-20N)を用い、基準モルタルは基準コンクリートの粗骨材を除いた調

表-1 実験計画

	繊維混入率 (%)	供試体寸法 (mm)	供試体 本数 (本)	試験 材齢 (日)
モルタル	0,0.02,0.04,0.06,	100×100×400	6	28
コンクリート	0.08,0.1,0.2		7	

*1 ㈱ヤマックス (大分大学大学院博士後期課程) 工修(正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博(正会員)

*3 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース助手 博士(工学)(正会員)

*4 大分大学大学院工学研究科博士後期課程 工修(正会員)

合とした。練混ぜには強制二軸ミキサ(容量100ℓ)を用い、繊維投入後30秒間練混ぜを行った。供試体は全て材齢1日で脱型し、その後水中養生(温度 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$)とした。

2.2 曲げ強度試験方法

曲げ強度試験はJIS A 1106に準じて行った。曲げ強度試験用供試体には $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い、支点間距離を300mmで3等分点载荷とした。試験機には最大容量2000kNの油圧式万能試験機を用い、最大荷重後のたわみの挙動を精度よく測定するために、载荷速度を0.1mm/minに設定した。

曲げ荷重-たわみ曲線下の面積で表されるエネルギーによって曲げ靱性を厳密に評価する場合、ひび割れ発生点のたわみの測定を行う必要がある。そこで、切欠きはりを用いて、ひび割れ発生位置を限定し、その位置におけるたわみの測定を行うこととした。本実験では、強度試験の前日にコンクリートカッターを用いて供試

表-2 繊維の物理的性質

	長さ (mm)	直径 (μm)	密度 (g/cm^3)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)	吸水率 (%)
N-1	12	19	1.17	550	4200	4.5~8

表-3 基準コンクリートの調合および使用材料

	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位質量(kg/m^3)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
モルタル	53.5	—	305	570	1338	—
コンクリート	53.5	46.6	183	342	803	942

セメント: 普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)
 細骨材: 山砂(表乾密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$)
 粗骨材: 砂利(表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$)、砕石(表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$)
 混和剤: AE減水剤標準形I種

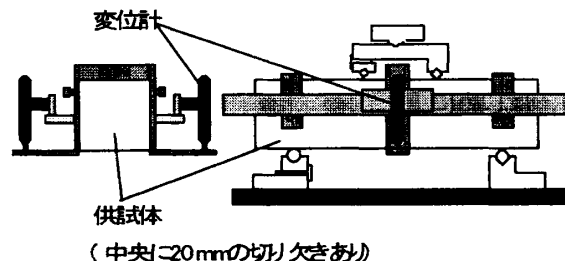


図-1 曲げ試験装置の概略図

体中央部に深さ20mm、幅3mmの切欠きを入れた。たわみ測定装置としては、図-1に示すよ

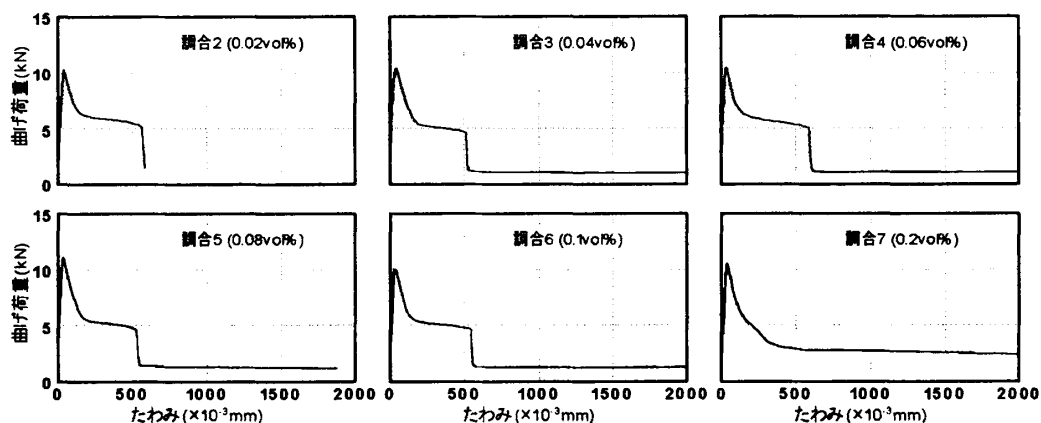


図-2 曲げ荷重-たわみ曲線(モルタル供試体)

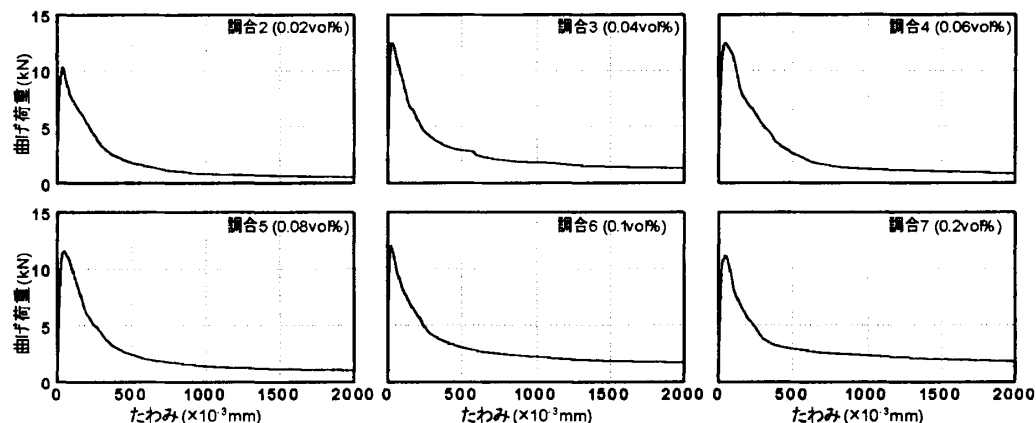


図-3 曲げ荷重-たわみ曲線(コンクリート供試体)

うなスパン中央点の位置を測定するものとし、両側に取り付けた変位計において曲げ強度試験時の変位を動ひずみ計にて測定した。なお、変位の測定間隔は5msecとしている。

2.3 曲げ荷重－たわみ曲線

図－2および図－3にモルタル供試体およびコンクリート供試体の曲げ荷重－たわみ曲線の測定結果の一例を示す。合成短繊維を用いている既往の研究⁸⁾と同様に、ナイロン繊維を混入した供試体は、最大荷重後急激に荷重は低下するが、破断に至らず荷重を保持している。また、保持している荷重は、繊維混入率の増加に伴い増加している。モルタル供試体の繊維混入率0.2vol%とコンクリート供試体においては、最大荷重後緩やかな曲線を描きながら荷重が低下しているが、モルタル供試体の繊維混入率0.02～0.1Vol.%では、最大荷重後、ひずみは進行し

ているが荷重が停滞する領域がある。合成繊維混入コンクリートの荷重－たわみ曲線にはこのような不安定なひずみ軟化領域⁴⁾が現れることが知られており、曲げ靱性を評価する上ではこの影響について十分に検討する必要がある。

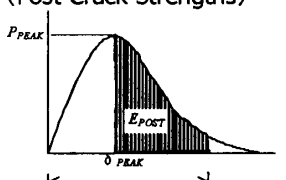
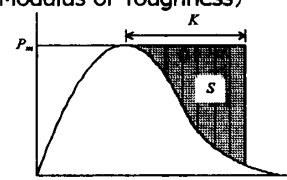
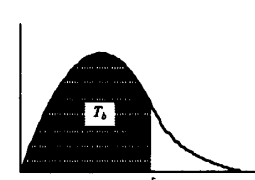
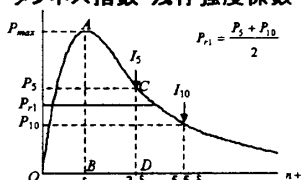
3. 曲げ靱性評価

3.1 既往の評価方法

ここでは表－4に示す4つの方法を用いて曲げ靱性評価を行った。

PCS⁴⁾は、最大荷重以降の曲げタフネスを最大荷重以降のたわみで除して求めた平均荷重を強度に換算して算出する。ここでは、たわみの限界点(L/m)はJCIの換算曲げ強度と同様にスパンの1/150の2mmとした。タフネス指数MOT⁵⁾は、変形の進行に伴う耐力の低下の度合いを示す指標として梅山らより提案されたものである。こ

表－4 曲げ靱性評価方法

1) PCS (Post-Crack Strengths)	2)タフネス指数 MOT (Modulus of Toughness)	3)JCI 曲げ換算強度	4)ASTM タフネス指数・残存強度係数
 $PCS = \frac{E_{POST}}{L/m - \delta_{PEAK}} \times \frac{L}{bh^2}$ L:スパン(mm) b:破壊断面の幅(mm) h:破壊断面の高さ(mm)	 $MOT = 100 \frac{2S}{P_m \cdot K} + 200$ P_m:基準荷重(kN) K:基準荷重以後のたわみ増分	 $\text{換算曲げ強度} = \frac{T_b}{\delta_{ib}} \cdot \frac{L}{bh^2}$ L:スパン(mm) b:破壊断面の幅(mm) h:破壊断面の高さ(mm)	 タフネス指標 n=5の時 $I_5 = \frac{OACD}{OAB}$ 残存強度係数 n₁=5, n₂=10の時 $R_{5,10} = \frac{100 \cdot P_{r1}}{P_{max}}$

表－5 曲げ靱性評価結果一覧

供試体	繊維混入率(vol%)	曲げ強度(N/mm ²)	最大荷重時		PCS(N/mm ²)	MOT	JCI		ASTM	
			荷重(kN)	たわみ(mm)			曲げタフネス(N・mm)	換算曲げ強度(N/mm ²)	I ₇₀	R _{65,70} (%)
モルタル	0.00	3.16	10.99	0.027	0.351	249.0	2547	0.376	13.34	0.00
	0.02	3.01	10.53	0.031	0.515	311.9	3660	0.537	16.60	0.00
	0.04	3.36	11.30	0.029	0.562	321.8	3976	0.585	17.58	3.83
	0.06	3.27	10.56	0.031	0.608	335.5	4259	0.631	16.09	7.57
	0.08	3.18	10.88	0.026	0.733	348.9	5075	0.752	19.18	11.16
	0.10	3.16	10.40	0.036	0.752	342.2	5254	0.775	17.50	12.24
	0.20	3.23	10.93	0.030	0.922	343.0	6332	0.940	18.70	22.23
コンクリート	0.00	3.29	11.12	0.038	0.402	308.9	2967	0.441	9.53	0.00
	0.02	3.29	10.93	0.045	0.566	337.2	4078	0.598	13.41	3.83
	0.04	3.09	10.70	0.036	0.546	341.3	3943	0.577	12.63	5.12
	0.06	3.05	10.36	0.035	0.554	339.8	4182	0.616	14.08	9.70
	0.08	3.16	10.95	0.038	0.690	335.1	5006	0.722	14.37	10.79
	0.10	3.34	11.42	0.031	0.719	338.5	5103	0.749	14.75	12.57
	0.20	3.38	11.45	0.036	0.871	329.3	6117	0.902	16.30	15.90

ここでは基準荷重 P_m を最大荷重とし、たわみを2.0mm(スパンの1/150)まで測定できていないものもあったため、たわみ増分 $K=1.0\text{mm}$ とした。JCIの換算曲げ強度⁹⁾は、載荷スパンの1/150までの曲げ荷重-たわみ曲線下の面積を用いて算出するものである。ASTMの評価方法⁷⁾は、ある限界点までの曲げ吸収エネルギーと初期ひび割れ発生点までの曲げ吸収エネルギーの比で表されるタフネス指標(Toughness Index)と、残存強度係数(Residual Strength Factor)で評価されている。たわみの限界点は、最大荷重点のたわみ δ の倍数とし、 $(n+1)\delta/2$ で求め、その時のタフネス指標を I_n として表記し、残存強度係数は $R_{n1,n2}$ として表記している。曲げ荷重-たわみ曲線が2.0mmまで到達していないデータもあることから、ここでは、たわみ限界点が1.5mm程度になるように $n=70$ としてタフネス指標を求め、残存強度係数においては $n_1=65$ および $n_2=70$ として算出した。

3.2 評価結果の比較

表-4の算出方法を用いて計算した結果を表-5に示す。曲げ靱性評価比と繊維混入率の関係を図-4に示すが、曲げ靱性評価比とは、算出した評価値を基準(繊維無混入)の値で除した値のことである。なお、ASTMの残存強度係数 $R_{65,70}$ は基準の値が0であるため、データは記載していない。モルタル供試体では、PCSおよびJCIの換算曲げ強度が繊維混入率の増加に伴い増加しているが、MOTおよびタフネス指標 I_{70} はほぼ横ばいとなった。コンクリート供試体では、繊維混入率0.02~0.06vol%で値の変化があまり見られないが、MOT以外は、繊維混入率の増加に伴い増加している。

次に、ASTMの残存強度係数と繊維混入率の関係を図-5に示す。モルタルおよびコンクリート供試体ともに、繊維混入率の増加に伴い残存強度係数の大幅な増加が確認できた。これは残存強度係数が、前述した荷重が急激に低下する不安定なひずみ軟化領域を除いたところで評価しているためである。

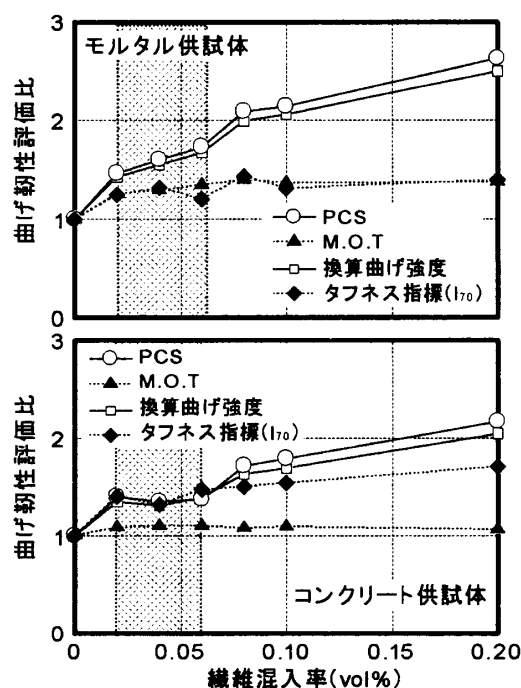


図-4 繊維混入率と曲げ靱性指標値の関係

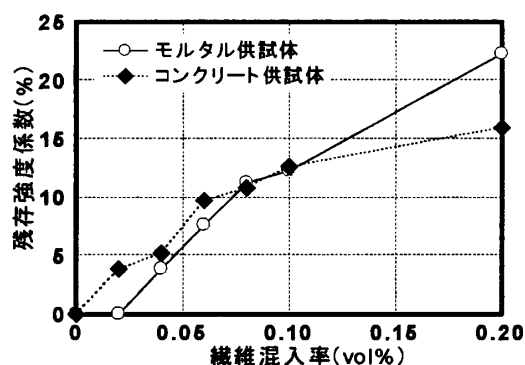


図-5 繊維混入率と残存強度係数の関係

本論文では、合成繊維少量混入コンクリートの曲げ靱性指標値の選定にあたって、1)N-1繊維の標準使用量である0.04vol%付近の靱性を明確に表していること、2)合成繊維混入率の増加に伴う曲げ靱性の増加を明確に表していること、を考慮することにした。MOTおよびタフネス指標 I_{70} は0.2vol%までの範囲では繊維混入率の影響が明確に表れていない。PCSやJCIの換算曲げ強度は0.02~0.06vol%の範囲内において顕著な差が見られておらず、0.06vol%以上になると繊維混入率の影響が明確に表れている。一方、ASTMの残存強度係数は、その他の指標値と比較すると0.02~0.06vol%の繊維混入率の靱性を明確に表していることから、ASTMの残存強度

係数がごく少量の合成短繊維混入コンクリートの曲げ靱性評価方法として適しているものと思われる。以下では、残存強度係数の適用方法について検討した。

3.3 残存強度係数による評価方法の提案

残存強度係数の値は3.1項で述べたように、 n_1 、 n_2 によって変化し、いずれも任意に設定できることから、最適な設定値を求めることとした。

本実験結果や既往の研究³⁾で示されているように合成短繊維を混入したコンクリートの荷重-たわみ曲線は、鋼繊維混入コンクリートと異なり、たわみが1.5mm程度までしか測定できないものがある。また最大荷重直後に不安定なひずみ軟化領域が生じる場合もある。そこで、これらのことを考慮し、ひずみが安定した領域で、かつ、たわみが1.5mm以下となる範囲で n_2 を設定することとし、ここでは $n_2=60$ (たわみ限界点1.0mm程度)とした。

次に、 $n_2=60$ として n_1 を5~60まで変化させた場合の残存強度係数と n_1 の関係について検討し、 n_1 の設定値を定めることとした。 n_1 と残存強度係数の関係を図-6に示す。これによると n_1 の値が n_2 に近くなるほど残存強度係数は小さくなり、ほぼ一定値に収束する傾向が見られる。モルタル供試体においては図-2に示すように不安定なひずみ軟化領域があり $n_1=45$ までは繊維混入率の影響が明確に表れていない。コンクリート供試体においては、繊維混入率0.04vol%において $n_1=30$ までは繊維混入率0.02vol%よりも残存強度係数の値が下回っている。これらのことから、安定した指標値を得るためには、 $n_1=45\sim55$ までの範囲が適しているものと思われる。

本論文では、以下の考察においては残存強度

係数が収束し始めた $n_1=45$ を用いて残存強度係数を算出することとした。

4. ポリプロピレン繊維への適用

N-1繊維において残存強度係数が曲げ靱性評価係数として適していることが分かったので、表-6に示すポリプロピレン繊維(以下、PP繊維)を用いたコンクリートに適用し、その曲げ靱性について考察を加えることとした。

実験に使用した繊維の形状は全て棒状で繊維長を12mmに統一している。PP繊維は繊維径や表面処理の異なる2種類の繊維を用い、N-1繊維

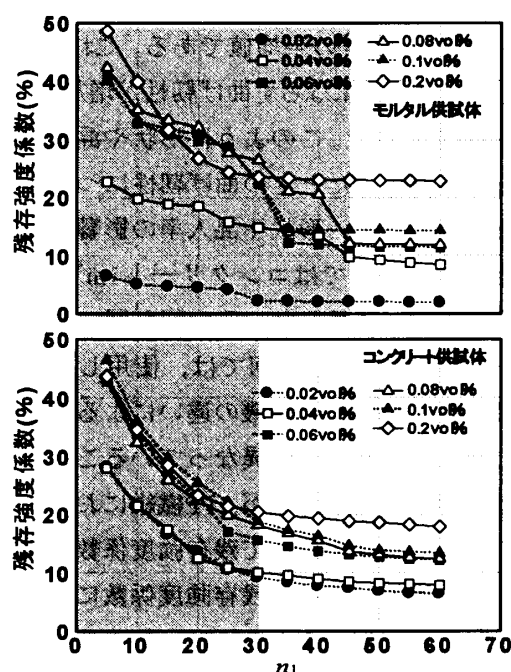


図-6 残存強度係数と限界点の関係

表-6 繊維の物理的性質

種類	長さ (mm)	直径 (μm)	密度 (g/cm^3)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)	吸水率 (%)
PP-1	12	63.5	0.91	530	5000	—
PP-2	12	5~15	0.91	670	4000	—
N-2	12	13	1.17	550	4200	4.5~8

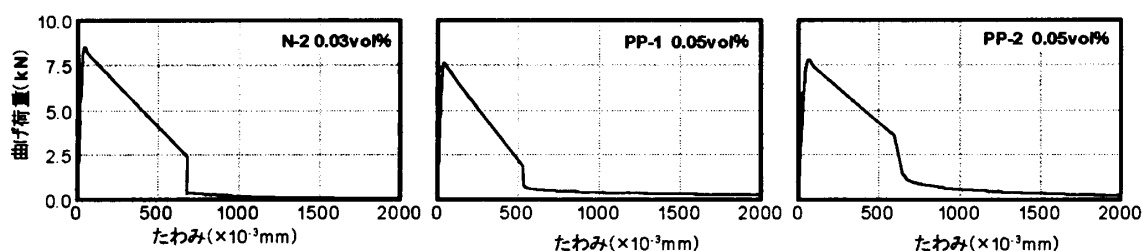


図-7 荷重-たわみ曲線(繊維種類の影響)

より繊維径の小さいN-2繊維も用いて同様な実験を行った。曲げ強度は最大荷重250kNのねじ式精密万能試験機を用い、3等分点載荷で曲げ強度試験を行った。曲げ強度試験用供試体および載荷速度は2.2項と同様とし、変位の測定間隔を50msecとした。なお、使用したコンクリートは表-3と同様であるが打設日が異なっている。

図-7に曲げ荷重-たわみ曲線の測定結果の一例を示す。図-3と同様に最大荷重到達後急激に荷重が低下しているが破断に至らず荷重を保ちながら変位だけが進行している。

これらの結果を基に残存強度係数を算出した。算出した結果の一覧を表-7に示す。なお表中の値は供試体5本の平均値である。これらの結果より、繊維の種類によらず曲げ靱性が増加していることが確認できた。このように形状や混入率の異なる繊維を用いたときの曲げ靱性について考察することとした。形状や混入率の影響を取り除くために、ここではコンクリート1m³当たりの繊維の本数に着目した。その図が図-8である。表-4の実験結果と今回では、使用した試験機が異なっており、試験機の違いによる影響や使用したコンクリートが異なっていることなどからばらつきは見られるが、PP繊維においても繊維の本数の増加に伴って残存強度係数が増加しており、繊維の本数と残存強度係数に相関性が見られ、曲げ靱性の向上にはコンクリート中の繊維の本数を増加させることが有効であるものと思われる。

5. まとめ

本論文では、合成短繊維少量混入コンクリートの曲げ靱性評価方法を提案することを目的とし、モルタルおよびコンクリート供試体の曲げ強度試験の結果を基に、これまでに提案されている曲げ靱性評価方法を用いて検討を行った。その結果、不安定なひずみ軟化領域の影響を除いて評価できるASTMの残存強度係数はごく少量の混入率(0.02~0.06vol%)の曲げ靱性をより適切に評価できることが分かった。そこで、本研

表-7 靱性評価結果一覧

繊維種類	混入率(vol%)	曲げ強度(N/mm ²)	最大荷重時		残存強度係数 R _{65,70} (%)
			荷重(kN)	たわみ(mm)	
基準	0	2.43	8.34	0.041	0.00
PP-1	0.05	2.61	9.60	0.048	2.79
PP-2	0.05	2.75	9.45	0.049	4.45
N-2	0.03	2.75	9.10	0.045	5.04

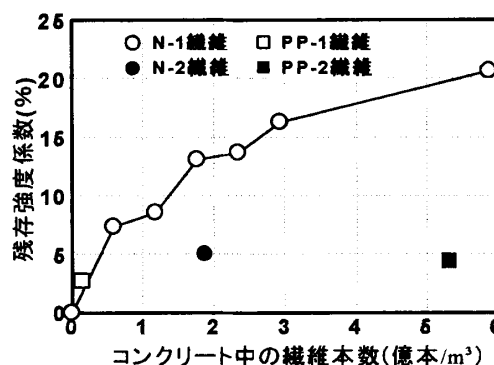


図-8 コンクリート中の繊維本数と残存強度係数の関係

究では合成繊維少量混入コンクリートの曲げ靱性評価方法として、ASTMの残存曲げ強度係数を用いるものとし、その適用範囲は、 $n_1=45$ 、 $n_2=60$ とすることを提案する。

参考文献

- 1) 細田 暁ほか：合成短繊維添加によるコンクリート片の剥落対策，コンクリート工学年次論文集，第25巻，第1号，pp.275-280，2003.7
- 2) 上田 賢司ほか：ナイロン繊維混入コンクリートの諸特性に関する研究(その1，その2)，日本建築学会研究報告会九州支部，第40号・1，構造系，pp.89-96，2001.3
- 3) C.D.Johnston：Fiber-Reinforced Cements and Concretes, GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS, 2001
- 4) Nemkumar Banthia and Jean-Francois Trottier：Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part2:Toughness Characterization, ACI Materials Journal, Vol.92, pp.48-57, 1995
- 5) 梅山和成ほか：鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性の評価方法，コンクリート工学年次講演会講演論文集，第1巻，pp.201-204，1979
- 6) JCI-SF4 繊維補強コンクリートの曲げ強度試験および曲げタフネス試験方法，繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準，pp.11-18,1984
- 7) American Society for Testing Materials：Standard ASTM C-1018-98, Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete, ASTM, 1998
- 8) 細田 暁ほか：合成短繊維補強コンクリートの曲げタフネスと収縮ひび割れ抑制効果，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.413-418，2005.2