

ナイロン繊維混入コンクリートの曲げ靱性評価

(その1. 既往の曲げ靱性評価方法の検討)

正会員 ○林田 健二*1 同 條本 和宏*1 同 黒野 薫*2 同 佐藤 嘉昭*3
同 清原 千鶴*4 同 大谷 俊浩*5 同 上田 賢司*6

1. はじめに

筆者ら¹⁾は、これまでナイロン繊維をコンクリートの構成材料の一つとして位置づけ、ナイロン繊維を少量添加したコンクリートの諸物性に関する実験を行ってきた。これまでの実験結果より、ナイロン繊維を0.04～0.1vol%程度混入することによって靱性が向上することが確認できたが、材料特性の観点からナイロン繊維のコンクリート用材料としての可能性を明らかにするためには曲げ靱性の評価を的確に行うことは重要な課題の一つである。

そこで本報告では、繊維補強コンクリートに対してこれまでに提案されている曲げ靱性評価方法について考察を加えることにした。以下はその報告である。

2. 実験

2.1 実験計画

本実験では、ナイロン繊維混入コンクリートの曲げ強度試験方法ならびに曲げ靱性評価方法について検討を行うために、繊維混入率0, 0.04, 1.0vol%のコンクリートの曲げ強度試験を計画した。曲げ強度試験では、切欠きを入れた供試体と切欠きのない供試体の2種類を用いた。また、比較のために鋼繊維補強コンクリートを用いて同様な実験を行った。本実験の実験項目を表-1に示す。

2.2 コンクリートの使用材料および調合

表-2にコンクリートの使用材料、表-3にベースとなるコンクリートの調合を示す。ナイロン繊維および鋼繊維ともにベースコンクリートに後添加するため、繊維混入による調合補正は行っていない。繊維混入によるスランプの低下を防ぐためベースコンクリートの調合は繊維の種類により異なっている。練り混ぜには傾胴ミキサを使用し、すべての材料を投入後3分間練り混ぜ、繊維を混入後さらに1分間練り混ぜた。練り混ぜ後直ちにスランプ、空気量、単位容積質量および温度の測定を行った。供試体はすべて材齢1日で脱型し、所定の材齢まで20℃水中養生を行った。

表-1 実験項目

繊維の種類	繊維混入率	寸法	本数
ナイロン	0, 0.04, 1.0vol%	10×10×40cm	10本
鋼	0, 1.0vol%		10本

※ 10本のうち、5本は切欠きを持つ供試体

表-2 使用材料一覧

使用材料	種類	性質または成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3270cm ² /g
細骨材	陸砂	表乾密度: 2.60g/cm ³ 吸水率: 1.86%, 粗粒率: 2.58
粗骨材	石灰石碎石	表乾密度: 2.70 g/cm ³ 吸水率: 0.38%, 粗粒率: 6.63
混和剤	AE 減水剤 標準型 I 種	主成分: リグニンスルホン酸化物 およびポリオール複合体
繊維	ナイロン	繊維長: 12mm, 直径: 19μm 密度: 1.17g/cm ³ ヤング係数: 4.2×10 ³ N/mm ²
	鋼	異形カットワイヤー 繊維長: 30mm, 直径: 0.6mm ヤング係数: 200×10 ³ N/mm ²

表-3 調合

繊維の種類	W/C (%)	単位質量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
ナイロン	55	182	331	802	965	3.31
鋼	50	230	460	931	644	—

2.3 使用したコンクリートの物性

使用したコンクリートのフレッシュ性状一覧を表-4に示す。表-5に材齢28日における圧縮強度およびヤング係数の測定結果を示す。各調合とも2バッチずつ打設を行っており、表中の①、②はバッチ数を示している。ナイロン繊維1.0vol%においてスランプが大幅に低下している。これは、繊維混入による曲げ補強効果について検討を行うため、鋼繊維と同様な添加量である1.0vol%混入することにしたが、ナイロン繊維の標準混入量である0.04vol%と比較すると多量に混入した結果である。

Study on the Evaluation of Flexural Toughness of Concrete Containing Nylon Fiber
(Part.1 Previous Method for the Evaluation of Flexural Toughness)

HAYASHIDA Kenji, JOMOTO Kazuhiro, KURONO Kaoru, SATO Yoshiaki, KIYOHARA Chizuru, OTANI Toshihiro and UEDA Kenji

2.4 曲げ強度試験方法

供試体には10×10×40cmの角柱供試体を用い、支点間距離を300mmで3等分点載荷とした。切欠きのない供試体においては下部の中央に60mmのひずみゲージを貼り付けてひずみの測定を行い、供試体中央部(2箇所)の変位の測定を行った。スパン中央部に深さ20mmの切欠きをつけた供試体では、クリップゲージを用いて開口変位の測定を行い、同時に供試体中央部(2箇所)の変位測定も行った。図-1に曲げ強度試験装置を示すが、供試体のたわみ測定方法の検討を行うため、本実験では変位測定治具を供試体下部で固定する装置(A)および供試体上部で固定する装置(B)の2種類の曲げ装置を用いた。

3. 実験結果

(1)曲げ強度試験装置の比較: 図-1に示す曲げ強度試験装置(A)においては、供試体下部に測定板を取り付けているため、ひび割れ発生時に測定板が緩み正確なたわみの測定がされていないことが懸念された。そこで曲げ靱性評価の実験を行うにあたり、曲げ強度試験装置による荷重-たわみ曲線の比較を行った。図-2に曲げ強度試験装置(A)および(B)を使用した場合の曲げ荷重-たわみ曲線の一例を示す。他の混入率の場合でも同様な傾向を示しており、本実験においては測定方法による影響は認められなかった。そこで、以後の実験において切欠きを持つ供試体については装置(B)を用いて測定を行うこととした。

(2)荷重-たわみ曲線および荷重-開口変位曲線: 図-3および図-4に切欠き供試体の3等分点曲げ強度試験結果を示す。これらの図から繊維を混入することにより、破壊エネルギーが大きくなり、靱性の向上が確認できる。鋼繊維補強コンクリートにおいてはひび割れ発生後の荷重の低下が見られず、その後荷重は増大し、ピーク時の荷重は無混入のコンクリートと比較して2.0倍程度になっている。さらに、ピーク後の荷重の低下も緩やかな曲線を描いている。ナイロン繊維混入コンクリートの場合ひび割れ発生直後の荷重が低下しているが、少量の混入でも破壊までは至らず、たわみ2mmまで曲げ耐力を保持していることがわかる。荷重-たわみ曲線には混入した繊維の強度、ヤング係数や付着力などが大きく影響することが考えられるが、ナイロン繊維混入コンクリートにおける

表-4 フレッシュコンクリートの性状

繊維の種類	測定項目	混入率(vol%)					
		0-①	0-②	0.04-①	0.04-②	1.0-①	1.0-②
ナイロン	スランプ(cm)	18.8	19.8	17.9	18.1	0.7	0.7
	空気量(%)	4.5	4.2	4.2	5.0	2.9	2.6
	単位容積質量(kg/l)	2.29	2.28	2.28	2.27	2.29	2.28
	温度(°C)	25.5	25.5	26.0	26.0	26.5	27.0
鋼	スランプ(cm)	22.0	22.5	/		21.4	20.2
	空気量(%)	3.3	3.7			4.0	4.0
	単位容積質量(kg/l)	2.21	2.18			2.23	2.23
	温度(°C)	27.0	27.0			27.0	27.0

表-5 圧縮強度試験結果

繊維の種類	混入率(vol%)	最大応力(N/mm ²)	ヤング係数(×10 N/mm ²)
ナイロン	0-①	33.67	2.63
	0.04-①	36.49	2.77
	1.0-①	37.64	2.68
	0-②	36.68	2.77
	0.04-②	36.33	2.82
	0.04-②	29.43	2.54
鋼	0-①	38.95	2.51
	1.0-①	39.08	2.51
	0-②	39.20	2.60
	1.0-②	40.13	2.59

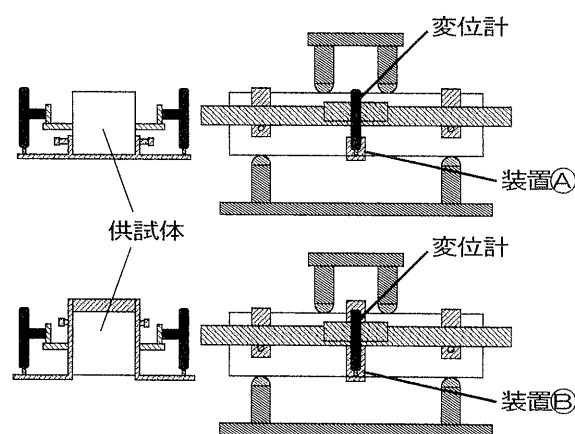


図-1 曲げ強度試験装置

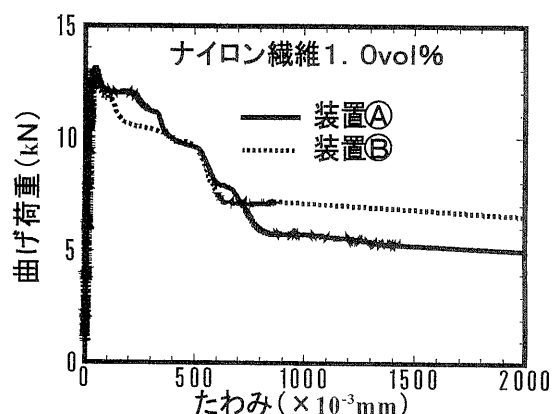


図-2 曲げ荷重-変位曲線(装置(A), (B)の比較)

ひび割れ発生直後の荷重の低下は、ナイロン繊維自体のヤング係数が、コンクリートのヤング係数よりも小さいことによるものと思われる。なお、繊維無混入のコンクリートの荷重-たわみ曲線に大きな差が見られるが、これはコンクリートの調合が異なり、鋼繊維の場合ベースコンクリートが比較的高強度になっており、そのため若干脆性的な挙動を示したことによると思われる。

4. 曲げ靱性評価

繊維補強コンクリートの曲げ靱性評価は、一般に荷重-たわみ曲線におけるひび割れ発生時とそれ以降の吸収エネルギー(タフネス)を定量的に評価する方法と、破壊力学を適用し、応力拡大係数 K_{Ic} 、エネルギー解放率 G_c および限界J積分値 J_c などの破壊靱性のパラメータを用い、ひび割れの拡大に対する材料の抵抗について評価を行う方法が行われている。ここでは、これまで提案されている曲げ荷重-たわみ曲線下の靱性の評価方法を用いて、ナイロン繊維が曲げ靱性に及ぼす影響について検討を行うこととした。

靱性指標値は図-3に示した曲げ荷重-たわみ曲線から算出を行うが、ここでは表-6²⁾に示す4つの方法で曲げ靱性評価を行った。ひび割れ発生点は、原点から接線を引きその直線が、荷重-たわみ曲線から外れた点をひび割れ発生点として算出を行った。これら4つの方法で靱性指標値を算出した結果を表-7に示す。なお、表中には限界応力拡大係数 K_{Ic} の算出結果も示しているが、これは3等分点スパン内において純曲げを受けているものと仮定して算出した値である。

図-5に各種靱性指標値と混入率の関係を示す。JCIが提案する換算曲げ強度では正確な荷重-たわ

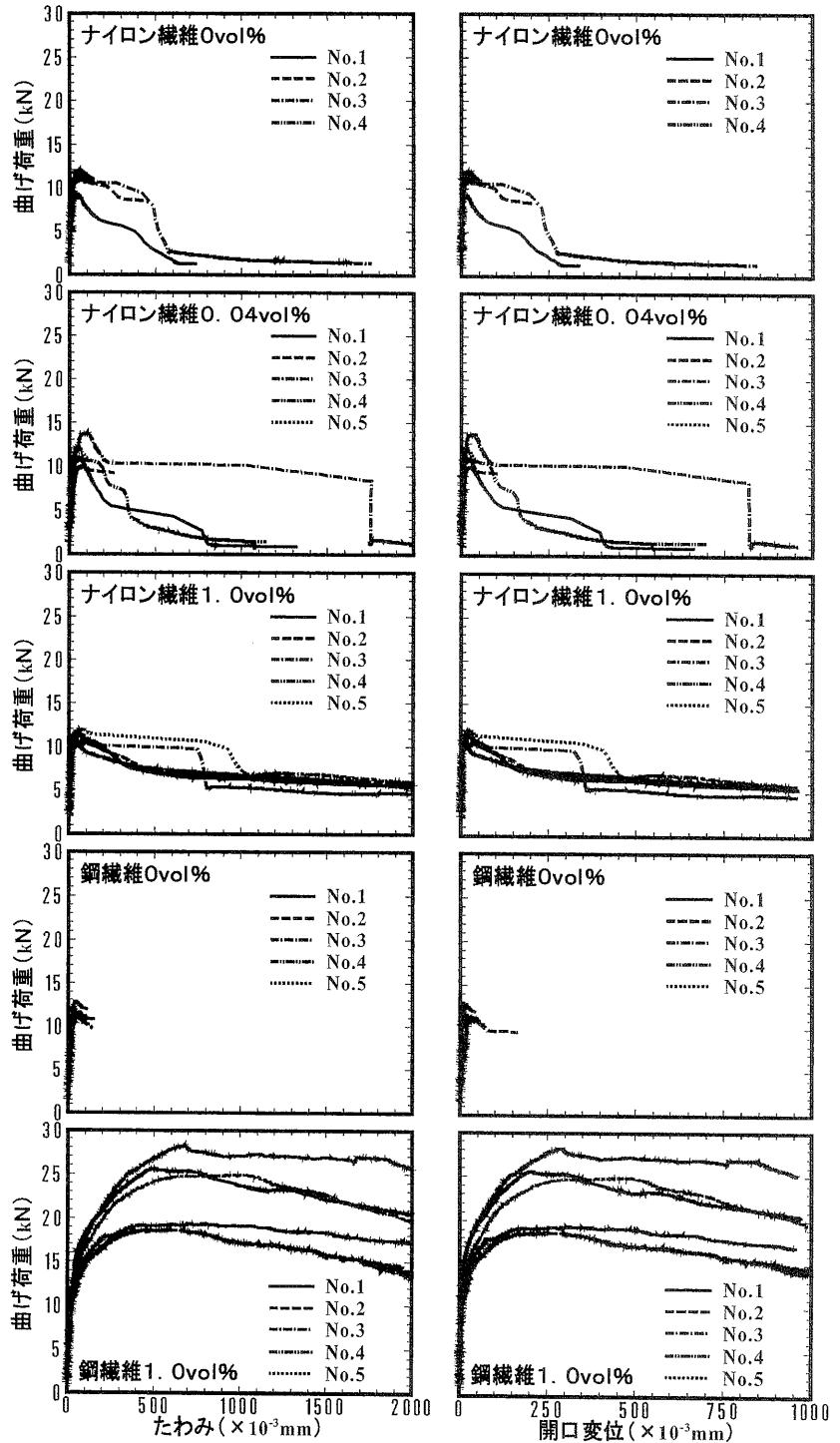


図-3 曲げ荷重-たわみ曲線

図-4 曲げ荷重-開口変位曲線

み曲線が得られれば、繊維混入率の影響を的確に評価できるものと思われる。ACIの靱性指標 T.I.はひび割れ発生点の変位の大小が T.I.の値に大きく影響することが指摘されているが、ひび割れ発生点の確認が容易ではなく、測定誤差が多く含まれているものと思われる。吸収エネルギーを用いた計算では、荷重-たわみ曲線を目的に応じて分割し、これらの関

係を定量的に評価できる。ここでは、限界点に至るまでの平均耐力と、ピーク後の荷重の低下が急激であるかどうかの程度を表す耐力低下比について示しているが、この手法を用いればいくつかの限界点までの曲げ吸収エネルギーを基に新たな靱性パラメータを定義することが可能である。また、本実験の範囲内においては M.O.T の値に繊維混入率の影響が明確には表れなかった。

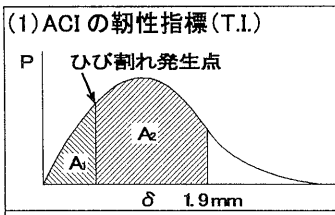
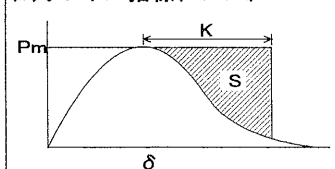
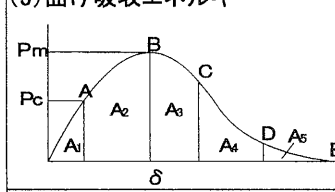
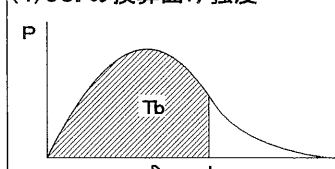
5.まとめ

本報告では、ナイロン繊維を混入したコンクリートの曲げ靱性評価方法を確立するために、切欠き供試体と切欠きのない供試体を用いて曲げ強度試験を行い、たわみ測定方法について確認を行うとともに、曲げ荷重-たわみ曲線より既往の曲げ靱性の評価方法について検討を行った。今後、破壊靱性のパラメータについても検討を行い、ナイロン繊維を混入したコンクリートの靱性評価方法を確立する予定である。

【謝辞】実験の実施にあたり、本学工学部卒業生：奥平義徳君・塩田恵太郎君に協力を得た。付記して謝意を表す。

【参考文献】

1)上田賢司, 佐藤嘉昭:ナイロン繊維混入コンクリートの諸物性に関する研究(その1, その2), 日本建築学会九州支部研究報告第40号・1, pp.89~96, 2001.3

表-6 曲げ靱性評価方法	
(1)ACIの靱性指標(T.I.) 	(ASTM C-1018) T.I.= $\frac{A_1 + A_2}{A_1}$
(2)タフネス指標(M.O.T.) 	M.O.T.= $100 \frac{2S}{P_m \cdot K} + 200$
(3)曲げ吸収エネルギー 	A1 + A2 + A3 + A4 + A5 A:ひび割れ発生点 B:最大耐力点 C:P=0.8Pm D:限界変位点 E:供試体破断点
(4)JCIの換算曲げ強度 	換算曲げ強度= $\frac{T_b \cdot l}{\delta \cdot b \cdot bh^2}$ l:スパン b:破壊断面の幅 h:破壊断面の高さ

2)浦野登志雄：鋼繊維補強コンクリートの引張特性を考慮した部材設計に関する研究,熊本大学博士論文, 1996.9

表-7 靱性評価結果一覧

繊維の種類	混入率 (vol%)	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm ²)	限界応力拡大係数 (N/mm ²)·√cm	JCI		ACI T.I.	M.O.T.*1	吸収エネルギー	
					曲げタフネス (N·mm)	換算曲げ強度 (N/mm ²)			平均耐力*2 (N)	吸収エネルギー比
ナイロン	0	9.32	2.77	7.311	4132.16	0.491	44.21	136.25	1652.6	8.757
	0.04	11.64	3.4	8.974	6202.61	0.696	68.34	117.96	2381.3	11.009
	1.0	11.72	3.45	9.106	14371.39	1.977	145.59	140.86	6725.2	28.859
鋼	0	12.86	3.79	10.003	1237.62	0.171	11.47	199.23	579.0	2.581
	1.0	25.68	7.43	19.611	41854.87	6.516	355.09	153.62	22526.5	20.623

*1 K=1.5mm で S を計算。変位増分までに破断した供試体は破断点までの S を算出。

*2 限界点(変位2mm)までの曲げ吸収エネルギー/2mm。変位2mm までに破断した供試体は破断点で計算。

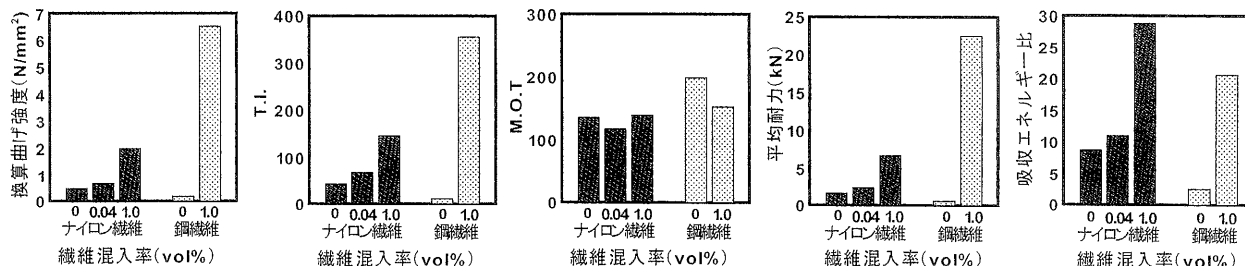


図-5 各種靱性指標値と混入率の関係

*1大分大学大学院博士前期過程

*2(株)ヤマックス 工修

*3大分大学工学部建設工学科 教授・工博

*4大分大学工学部建設工学科 助手・工修

*5大分大学工学部福祉環境工学科 助手・工修

*6(株)さとうベネック 博士(工学)

Graduate Student, Master's Course of Architectural Eng., Oita Univ.

Graduate Student, Doctor's Course of Environmental Eng., Oita Univ., M. Eng. (YAMAX Corporation)

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

Research Associate, Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng.

Research Associate, Dept. of Human Welfare Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng.

SATO BENEC Co., Ltd., Dr. Eng.