

正会員 ○梅山和成 (東京大学)

正会員 岡村雄樹 (日本大学)

正会員 小林一輔 (東京大学)

1. まえがき

近年、鋼纖維補強コンクリートをトンネルの覆工や舗装等に適用しようとする試みが活発化するに従ってその性能の評価試験方法を確立する必要性が高まっている。

本研究は、鋼纖維補強コンクリートの最も重要な特性の1つである曲げ性能をとりあげ、曲げ強度試験ならびに曲げ靱性を取扱ったものである。なお、ここで言う曲げ強度とは、曲げ破壊係数のことである。本研究では、まず、練り混ぜ方法及び、供試体の成形方法について実験的検討を行ない、その結果に基づいて供試体を作製して供試体寸法や載荷方法（載荷速度、載荷方法等）と曲げ強度との関係を明らかにした。以上の検討においては、曲げ強度を平均値及び変動の2つの観点からとらえた。次に、曲げを受ける鋼纖維補強コンクリートのたわみを測定することにより、曲げ靱性の評価方法について検討した。

2. 使用材料

鋼纖維は、 $0.5 \times 0.5 \times 30 \text{ mm}$ のせん断品を用い、細骨材は、富士川産の川砂、粗骨材は最大寸法 10 mm 及び 15 mm の秩父両神産の砕石で、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

3. 実験概要

3. 1 供試体の作製方法に関する実験

(1) 練り混ぜ方法の影響を調べる実験；以下に示すような2種類の練り混ぜ方法が曲げ強度に及ぼす影響を検討した。

A : (骨材、セメント、及び水)を2分間練り混ぜた後、鋼纖維を加えて所定時間練り混ぜる方法

B : (骨材、セメント、及び鋼纖維)を2分間練り混ぜた後、水を加えて2分間練り混ぜる方法

練り上がった試料は、その中の鋼纖維の配向と分散が出来る限り乱されないように注意して2層に詰め、木づちを用いて型枠側面を打撃して締固めた。

(2) 締固め方法の影響を調べる実験；以下に示すような3種の締固め方法が、曲げ強度に及ぼす影響を検討した供試体の作製に際しては、試料を2層に分けて詰め、所定の方法で締固めた。

a) 突き棒による締固め方法：突き棒により各層を 10 cm について1回の割合で突き固め、これによって生じた突き穴がなくなるまで型枠の側面を軽くたたく。

b) 振動台による締固め方法：各層について5秒間、振動台(6000 rpm)によって振動締固めを行なう。

c) 木づちによる締固め方法：各層について型枠側面を木づちによって約30回打撃する。

以上の検討に用いた鋼纖維補強コンクリートの配合は、水セメント比5.0%、細骨材 60% 、粗骨材の最大寸法 10 mm 、繊維混入率1%及び2%で、スランプの値が 8 cm となるようにこれを定めた。また、練り混ぜには強制攪拌式ミキサ(容量 100ℓ)を使用し、鋼纖維の混入は、鋼纖維分散機を用いた。供試体は、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ のものを用い、載荷はスパン 30 cm 、三等分点二点載荷で実施した。

3. 2 供試体寸法ならびに載荷方法に関する実験

(1) 供試体寸法の影響を調べる実験；図1に示すような5種類の供試体を用い、供試体の断面ならびに載荷点間距離が曲げ強度に及ぼす影響を検討した。なお、載荷速度は、 9 kg/cm/min (JIS A 1106の規定)とした。

(2) 載荷速度の影響を調べる実験；載荷速度を線応力度の増加が、毎分 9 kg/cm/min 及び 64 kg/cm/min に変化させた場合について、これらが曲げ強度に及ぼす影響を検討した。供試体寸法は、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ とし、載荷は、

スパン 30 cm、三等分点二点載荷で実施した。

(3) 載荷方向の影響を調べる実験：通常行なわれている打込み面を側面にして載荷する方法と打込み方向から載荷する方法の 2 種の載荷方法が曲げ強度に及ぼす影響を検討した。供試体は図-1 に示す A、B、C 及び D の 4 種を用い、載荷速度は、 $9 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ とした。

(4) 中央集中載荷と三等分点二点載荷の比較に関する実験：供試体寸法は、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ とし、載荷はスパン 30 cm、載荷速度は、 $9 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ で行なった。

以上の検討に用いた鋼纖維補強コンクリートの配合は、水セメント比 5.0%、細骨材率 7.7%、粗骨材の最大寸法 15 mm、纖維混入率 2% でスランプの値が 8 cm となるようにこれを定めた。また、比較のための普通コンクリートの配合は、水セメント比、粗骨材の最大寸法ならびにスランプは、鋼纖維補強コンクリートと同一にして、細骨材率を 5.2% とした。練り混ぜ順序は、3.1 の A とし、鋼纖維を混入した後の練り混ぜ時間を 3 分 30 秒とした。また、供試体の締固めには振動台を用いた。載荷は、(4) の一部を除きすべて三等分点二点載荷により行なった。

4. 練り混ぜ方法ならびに締固め方法が曲げ強度に及ぼす影響

表-1 に練り混ぜ順序と締固め方法が曲げ強度に及ぼす影響に関する実験結果を示す。この表より、1) 練り混ぜ順序 A と B のいずれによっても曲げ強度及びその変動には殆ど差のないこと 2) 締固め方法が曲げ強度に及ぼす影響については、振動台による方法と木づちによる方法とでは、殆ど差がないが、突き棒を用いる方法では、前二者の場合に比べて曲げ強度が小さくなること、などがわかる。突き棒で締め固めた場合の曲げ強度が小さくなる理由については

i) 突き棒周辺の鋼纖維が突き棒の挿入方向に配向すること ii) 突

き棒を挿入した部分に鋼纖維が殆どなくなることなどによると考えられる。

図-2 は、練り混ぜ時間と曲げ強度及びその変動との関係を示したものである。この図から、纖維混入率が 1% 程度の場合には、練り混ぜ時間は曲げ強度及びその変動に殆ど影響を及ぼさないことがわかる。これは、纖維混入率が 1% 程度では比較的短時間の練り混ぜで、鋼纖維をコンクリート中に分散させ得ることを意味する。しかし、纖維混入率が 2% 程度となると、曲げ強度の平均値は、大きく変わらないが、一方その変動は練り混ぜ時間が長くなるに従って小さくなる。即ちこの結果は、鋼纖維をコンクリート中に均等に分散させるためにはある程度の練り混ぜ時間が必要であることを意味している。

5. 供試体寸法が曲げ強度に及ぼす影響

図-3 は、断面寸法及びスパンの異なる供試体を用いて行なった曲げ強度試験の結果である。この図より、次の 3 つのがわかる。1) スパンが長くなる程曲げ強度は低下する。2) スパンが長くなる程曲げ強度の変動は小さくなる。3) 断面寸法が大きくなると曲げ強度は低下する。これらの原因を明らかにするために、破壊断面引張域における纖維本数を測定した。図-4 は、その結果を示したもので、これより破壊断面引張域の纖維本数は、曲げ強度と高い相関のあることがわかる。次に、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 断面の各供試体について破壊断面引張域における纖維本数の平均値及び標準偏差を表-2 に示した。これによると、破壊断面引張域における纖維本数の平均値及び変動はスパンが長くなるに従って小さくなることがわかる。図-5 は、供試体の任意断面引張域における纖維本数の分布を示したものであるが、この図と表-2 を比較

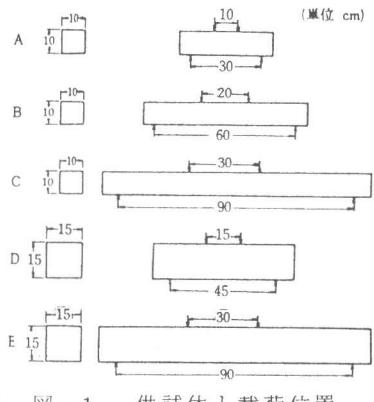


図-1 供試体と載荷位置

表-1 供試体作製方法の影響

—供試体数 10 本—			
練り混ぜ順序	締め固め方法	曲げ強度 (kg/cm^2)	標準偏差 (kg/cm^2)
A	振動台を用いた場合	109.8	12.3
	突き棒を用いた場合	89.7	7.8
	木づちを用いた場合	107.2	12.3
B	木づちを用いた場合	110.1	12.8

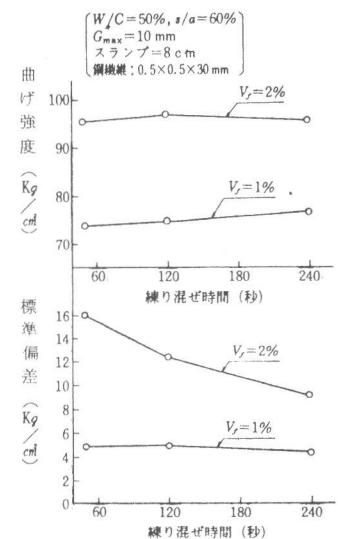


図-2 練り混ぜ時間の影響

すると、一般に破壊断面の繊維本数は任意断面の繊維本数より少ないとわかる。以上、図-4, 5 及び表-2 より明らかになった事実に基づいて前述の1)2)の性質を説明することができる。即ち、鋼繊維補強コンクリートの断面力は、繊維本数によって大きく影響を受けるが、鋼繊維が各断面に均等に分散していないためはりの断面力にはある分布が生じている。一方、曲げ破壊は、等モーメント区間中の最弱断面で起こるためスパンが長くなるに従って強度の平均値及びその変動が小さくなる。3)の特性は、普通コンクリートの場合にも見られるが、鋼繊維補強コンクリートにおいては、繊維の配向という新たな要因が加わっている。即ち、型枠近傍の鋼繊維が型わくによって強制的に配向されるため曲げ引張に対する鋼繊維の補強効果は、断面寸法が小さい程大きくなるのである。¹⁾ 瞑好らは、この効果を配向係数によって表し、 $10 \times 10 \text{ cm}$ 断面で 0.84, $15 \times 15 \text{ cm}$ 断面で 0.52 としている。

6. 載荷方法が曲げ強度に及ぼす影響

(1) 載荷速度による影響

表-3 に、縁応力を $9 \text{ kg/cm}^2/\text{mm}$ と $64 \text{ kg/cm}^2/\text{mm}$ の割合で増加させた場合の曲げ強度試験結果を示した。これによれば、載荷速度が大きいと曲げ強度は大きくなっている。この傾向は普通コンクリートの場合と同じである。

(2) 載荷方向による影響

表-4 に普通コンクリート及び鋼繊維補強コンクリートにおける載荷方向別の曲げ強度試験結果を示した。これによると普通コンクリート及び鋼繊維補強コンクリートの両者において A 載荷（打込みの上面から載荷）は、B 載荷（打込み面を側面として載荷）より大きい曲げ強度となる。又、A 載荷における鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度の変動は、B 載荷の場合より小さい。これらは、ブリーシングやセメント粒子の沈降等の影響で打込み下面のコンクリートが比較的密になること、ならびに A 載荷と B 載荷では引張域における繊維の分散や配向が異なることによるものと思われる。

(3) 中央集中載荷と 3 等分点載荷による影響

中央集中載荷と 3 等分点載荷による曲げ強度試験結果を表-5 に示した。この表より、曲げ強度の変動は両方法ともほぼ同じであるが、平均値は中央集中載荷による方法が 3 等分点載荷の場合よりも大きいことがわかる。これは、普通コンクリートの場合も同様である。

7. 鋼繊維補強コンクリートの曲げ剛性

(1) 供試体寸法の違いによる影響

図-6 は、寸法の異なる供試体（図-1 A, B, C, E）の曲げ試験における荷重-たわみ曲線である。又、図-7 は、図-6 を書き換えたものであり図中の曲線の傾きは曲げ剛性を表している。この 2 つの図より最大荷重に達する以前の曲げ剛性は、供試体寸法によって殆ど変わらないことがわかる。これは、初期クラック荷重と最大荷重とあまり差がないことに因る考えられる。一方、最大荷重に達した後の挙動は、1 本のひびわれが進展する過程であるため供試体寸法によ

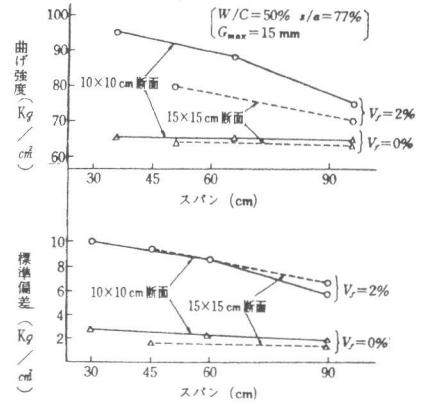


図-3 供試体寸法の影響

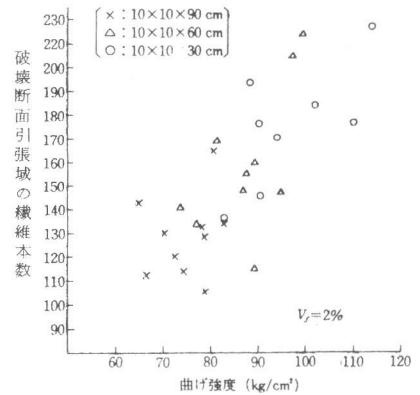


図-4 曲げ強度と繊維本数との関係

表-2 破壊断面における繊維本数

スパン (cm)	平均繊維本数	標準偏差
3 0	1 8 1	2 8 . 8
6 0	1 5 9	2 9 . 0
9 0	1 2 9	1 6 . 4

— $V_f = 2\%$ — — 試料数 10 —



表-3 載荷速度の影響 ($V_f = 2\%$)

荷重速度	曲げ強度 ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{mm}$)	標準偏差 ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{mm}$)
$9 \text{ kg}/\text{cm}^2/\text{mm}$	95.5	9.95
$64 \text{ kg}/\text{cm}^2/\text{mm}$	105.8	10.30

— 供試体数 10 本 —

— 供試体数 10 本 —

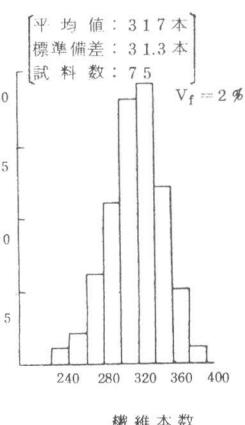


図-5 繊維本数の分布

って大きく影響されることがわかる。

(2) 曲げタフネスの評価方法について

A C I 544 委員会では、曲げタフネスを評価するためタフネス インデックス (Toughness Index) なる値を用いることを提案しているが、これは荷重 - たわみ曲線の図む比例限までの面積 (A_1) と最大荷重の 80% もしくは、1.9 mm たわみ時 ($10 \times 10 \times 30 \text{ cm}$) までの面積 (A_2) との比 A_2/A_1 をもって表される。しかし、この指標には次のような問題点があると思われる。第 1 に、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の供試体を用いスパン 30 cm で載荷すると比例限におけるたわみが非常に小さいため（一般に、0.04 mm 程度）その測定値は種々の誤差を受けやすいこと、また比例限度を正確に求めることが困難なことなどである。第 2 の問題点は、たわみの測定位置とひびわれ位置との関係によって測定されるたわみ量がかなり異なることである。従って鋼纖維補強コンクリートの曲げタフネスの評価については今後さらに検討を要すると思われる。

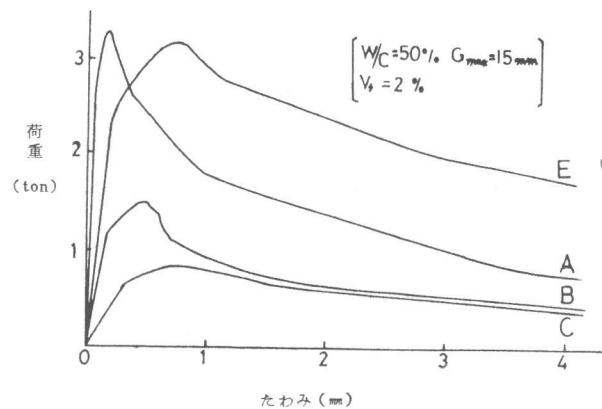


図-6 荷重 - たわみ曲線

表-4 載荷方向による影響 一供試体数 10 本

	供試体寸法 (cm)	載荷方向	曲げ強度 (kg/cm)	標準偏差 (kg/cm)
鋼纖維 補強 コンクリート ($V_f = 2\%$)	$10 \times 10 \times 40$	A	100.3	7.84
		B	95.5	9.95
	$10 \times 10 \times 60$	A	90.7	5.20
		B	88.5	8.58
	$10 \times 10 \times 90$	A	82.3	6.25
		B	74.7	5.83
普通 コンクリート	$15 \times 15 \times 45$	A	83.5	7.45
		B	76.6	9.34
普通 コンクリート	$10 \times 10 \times 40$	A	69.2	2.92
		B	63.9	2.89

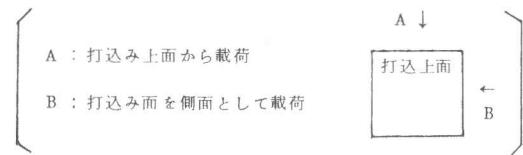
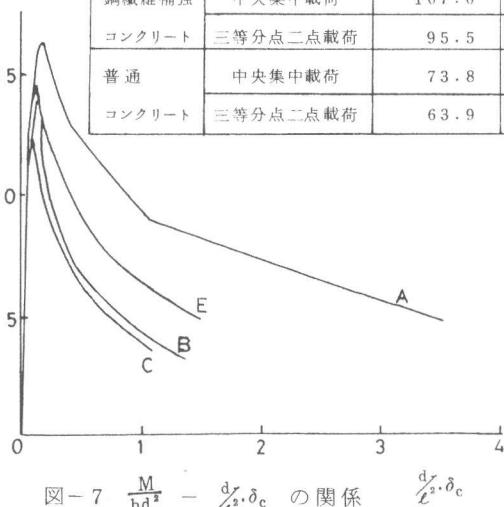


表-5 載荷方法による影響 一供試体数 10 本

種別	載荷方法	曲げ強度 (kg/cm)	標準偏差 (kg/cm)
鋼纖維補強 コンクリート	中央集中載荷	107.6	9.78
	三等分点二点載荷	95.5	9.95
普通 コンクリート	中央集中載荷	73.8	1.91
	三等分点二点載荷	63.9	1.89



8. まとめ

鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度試験方法について検討した結果をとりまとめると次の通りである。

1) 鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度試験用供試体の作り方について

(1) 材料の投入順序は、本研究で検討した 2 つの方法、即ち、初めにコンクリートのみを練り混ぜ、次に鋼纖維を投入する方法及び鋼纖維、骨材及びセメントを練り混ぜた後に水を供給する方法のいずれを用いても曲げ強度に有意な差を生じない。

(2) 練り混ぜ時間は、曲げ強度の変動に影響を及ぼし纖維混入率が大きい程、練り混ぜ時間がある程度長くする必要がある。

2) 鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度及びその変動は、断面寸法やスパンが大きくなるに従って小さくなる。

3) 鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度は、載荷速度が速くなるに従って高い値を示すが、普通コンクリートに比べて特に考慮を要する程の変化ではない。

4) 鋼纖維補強コンクリートの曲げ強度及びその変動は、載荷方向によって異なる。即ち、打込み方向から載荷した場合の方が、打込み面を側面として載荷した場合より平均強度は高く、また変動が小さい。