

鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度試験方法に関する実験的研究

Experimental Study on Method of Test for Flexural Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete

小林 一輔*・岡村 雄樹**・梅山 和成*

Kazusuke KOBAYASHI, Yuki OKAMURA and Kazusige UMEYAMA

1. ま え が き

近年、鋼繊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鋼繊維補強コンクリートの性能を評価するための試験方法を確立する必要性が高まっている。

本研究では、鋼繊維補強コンクリートの最も重要な特性の一つである曲げ強度をとりあげ、その試験方法について検討を加えたものである。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、練り混ぜ方法および供試体の成形方法について実験的検討を行い、これらの結果に基づいて供試体を作製し、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、曲げ強度は、平均値およびその変動の二つの観点からとらえた。

2. 使用材料

鋼繊維は $0.5 \times 0.5 \times 30$ 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 および 15 mm の秩父両神産の碎石で、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、セメントおよび水を2分間練り混ぜた後鋼繊維を加えて所定時間練り混ぜる方法。

B：骨材、セメントおよび鋼繊維を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、その中の鋼繊維の配向と分散ができ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め固めた。

(2) 締め固め方法の影響を調べる実験：以下に示すような3種の締め固め方法が曲げ強度に及ぼす影響を検討した。供試体の成形にさいしては、試料を2層に分けて詰め、所定の方法で締め固めた。

(a) 突き棒による締め固め方法：突き棒により各層を 10 cm^2 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叩く。

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

(c) 木づちによって締め固め方法：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繊維補強コンクリートの配合は水セメント比50%、細骨材率60%、粗骨材の最大寸法10 mm、繊維混入率1%および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100 l）を使用し、鋼繊維の混入には鋼繊維分散機を用いた。供試体は $10 \times 10 \times 40$ 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

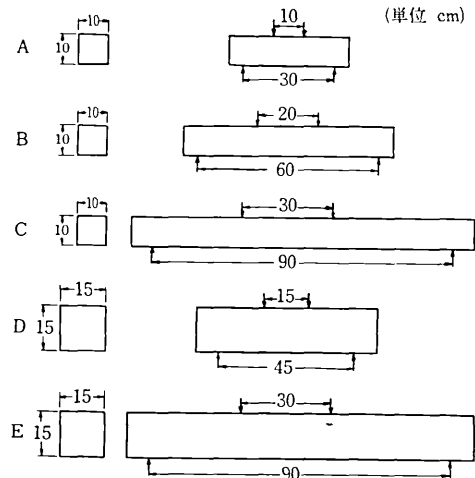


図1 供試体の種類と載荷位置

*東京大学生産技術研究所 第5部

**日本大学大学院学生

研究速報

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/cm²/min (JIS A 1106の規定)とした。

(2) 載荷速度の影響を調べる実験：載荷速度を緑応力度の増加が毎分9 kg/cm²/min および64 kg/cm²/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10×10×40 cmとし、載荷はスパン30 cmで実施した。

(3) 載荷方向の影響を調べる実験：通常行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 kg/cm²/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10×10×40 cmとし、載荷はスパン30 cm, 載荷速度は9 kg/cm²/minで行った。

以上の検討に用いた鋼繊維補強コンクリートの配合は、水セメント比50%, 細骨材率77%, 粗骨材の最大寸法15 mm, 繊維混入率2%で、スランプの値を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繊維補強コンクリートと同一にし、細骨材率を52%とした。練り混ぜ順序は3・1のAとし、鋼繊維を混入した後の練り混ぜ時間を3分30秒とした。また供試体の締め固めには振動台を用いた。載荷は(4)の1部を除き、すべて三等分点二点載荷により行った。

4. 練り混ぜ方法ならびに締め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め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およびその変動には殆んど差がないこと。2)締め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の間では殆んど差がないが、突き棒を用いる方

表1 鋼繊維補強コンクリートの練り混ぜ順序および供試体の締め固め方法が曲げ強度およびその変動に及ぼす影響 (V_f = 2%)

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

—供試体数 10本—

法では前二者の締め固めを行った場合に比べて曲げ強度が小さくなること、などがわかる。突き棒による方法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)突き棒の周辺の鋼繊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繊維が殆んどなくなることなどによるものと考えられる。

図2は練り混ぜ時間と曲げ強度およびその変動との関係を示したものである。この図から、繊維混入率が1%程度の場合には、練り混ぜ時間は曲げ強度およびその変動には殆んど影響を及ぼさないことがわかる。このことは、繊維混入率が1%程度では比較的短時間の練り混ぜで、鋼繊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、繊維混入率が2%程度となると、曲げ強度の平均値は練り混ぜ時間によって大きく変化しないが、その変動は練り混ぜ時間が長くなる程小さな値となる。

すなわちこの結果は、繊維量が2%程度になると、鋼繊維をコンクリート中に均等に分散させるのに要する練り混ぜ時間を或る程度長くする必要のあることを示している。

5. 供試体寸法が曲げ強度に及ぼす影響

図3は断面寸法およ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

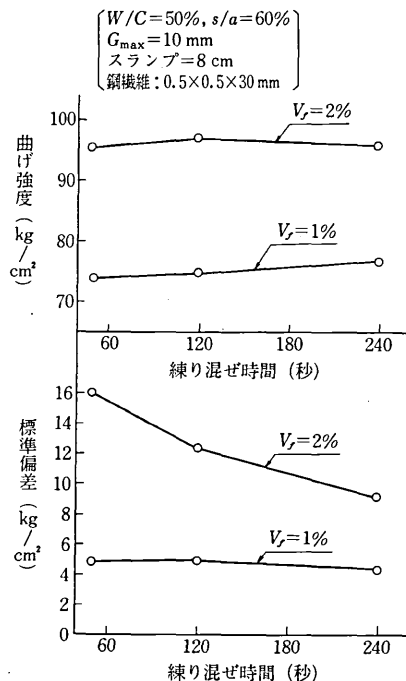


図2 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度およびその変動に及ぼす練り混ぜ時間の影響

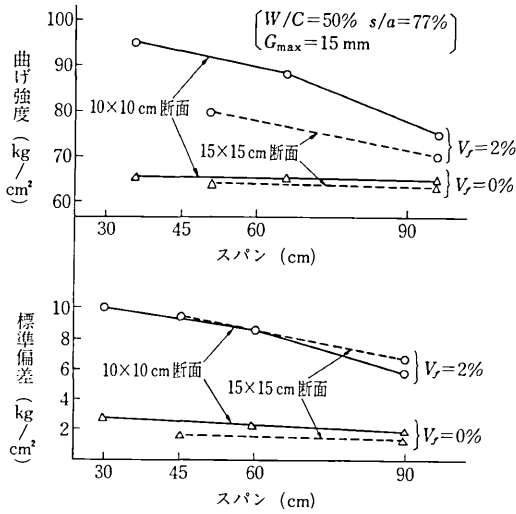


図3 供試体寸法が曲げ強度に及ぼす影響

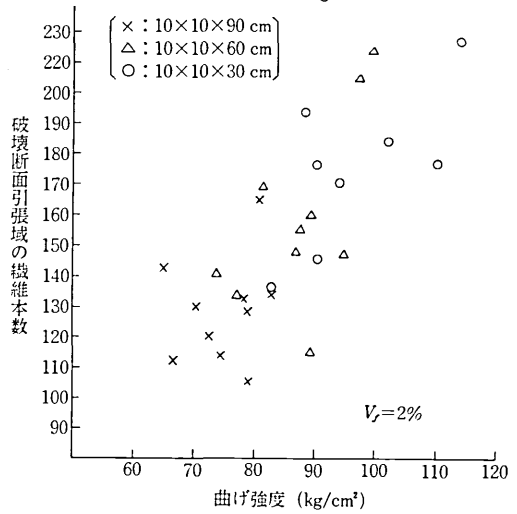


図4 曲げ強度と繊維本数との関係

つのがわかる。(1)スパンが長くなるほど曲げ強度は低下する。(2)スパンが長くなるほど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繊維本数を測定した。図4は、その結果を示したもので、これより、破壊断面引張域の繊維本数は、鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度と高い相関(相関係数: 0.70)があることがわかる。次に、 $10 \times 10 \times 40$ cm断面の各供試体について、破壊断面引張域における繊維本数の平均値およびその標準偏差を表2に示した。これによると、破壊断面引張域における繊維本数の平均値およびその変動は、スパンが長くなるに従って小さくなっている。図5は供試体の任意断面引張域における繊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ことがわかる。以上、図4、5および表2より明らかになった事実に基づいて前述の(1),(2)の特性を説明することができる。すなわち、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およ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みられるが、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。すなわち、型わく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、曲げ引張力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。睦好ら¹⁾は、この効果を

表2 破壊断面における繊維本数 ($V_f=2\%$)

スパン(cm)	平均繊維本数	標準偏差
30	181	28.8
60	159	29.0
90	129	16.4

— 試料数: 10 —

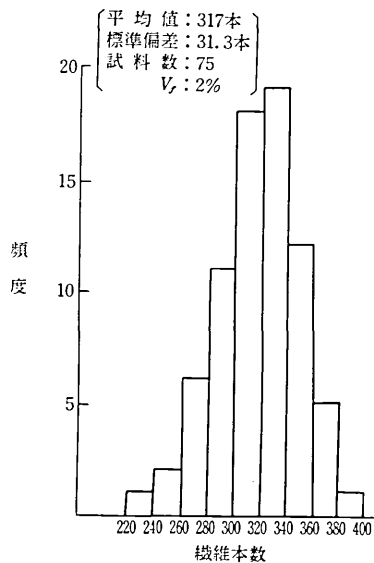


図5 任意断面における繊維本数の分布

研究速報

配向係数によって表し、10×10cm断面で0.52、15×15cm断面で0.84としている。

7. 荷重方法が曲げ強度に及ぼす影響

(1) 荷重速度による影響

表3に、縁応力を9kg/cm²/minと64kg/cm²/min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、荷重速度が大きいと曲げ強度は大きくなっており、この傾向は普通コンクリートの場合と同じである。

(2) 荷重方向による影響

表4に、普通コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートにおける荷重方向別の曲げ強度試験結果を示した。これによると、普通コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの両者において、A荷重（打込み上面から荷重）は、B荷重（打込み面を側面として荷重）より大きい曲げ強度となる。また、A荷重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荷重の場合より小さい。これらは、ブリージングやセメント粒子の沈下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荷重とB荷重では引張域における鋼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) 中央集中荷重と3等分点二点荷重による影響

中央集中荷重と3等分点二点荷重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、曲げ強度は中央集中荷重による

表3 荷重速度が曲げ強度に及ぼす影響

($V_f = 2\%$)

荷重速度(縁応力)	曲げ強度(kg/cm ²)	標準偏差(kg/cm ²)
9 kg/cm ² /min	95.5	9.95
64 kg/cm ² /min	105.8	10.30

— 供試体数 10本 —

表4 荷重方向が曲げ強度に及ぼす影響

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

— 供試体数 10本 —

表5 中央集中荷重および三等分点二点荷重と曲げ強度との関係

種別	荷重方法	曲げ強度 (kg/cm ²)	標準偏差 (kg/cm ²)
鋼繊維補強 コンクリート	中央集中荷重	107.6	9.78
	三等分点二点荷重	95.5	9.95
普通コンクリート	中央集中荷重	73.8	1.91
	三等分点二点荷重	63.9	2.89

— 供試体数 10本 —

方法が3等分点二点荷重の場合よりも大きい。これは、普通コンクリートの場合と同様である。

8. ま と め

鋼繊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) 鋼繊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

(a) 材料の投入順序は、本研究で検討した二つの方法、すなわち、初めにコンクリートのみを練り混ぜ、後に鋼繊維を混入する方法および鋼繊維と骨材およびセメントを練り混ぜ、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の差を生じない。

(b) 練り混ぜ時間は、曲げ強度の変動に影響を及ぼし繊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はある。

(c) 供試体の締め固め方法は振動台による短時間の締め固めまたは木づちによる型枠側面の打撃による締め固めがすぐれており、突き棒を用いる締め固めはコンクリート中における鋼繊維の配向と分散に悪影響を及ぼすので好ましくない。

(2) 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度およ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傾向がある。

(3) 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度は、荷重速度が大き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とくに考慮を要するほどの変化ではない。

(4) 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度およびその変動は、荷重方向によって異なる。すなわち、打込み方向から荷重した場合の方が打込み面を側面として荷重した場合より平均強度は高く、また変動が小さい。

(1978年11月27日受理)

参 考 文 献

1) 睦好・富田・小林・高木：鋼繊維補強コンクリートにおける繊維の配向に関する研究，生産研究，Vol.30 No. 10 (1978)