鋼繊維補強コンクリートの振動締固めと加圧養生*

河 野 清** 川 崎 末 和***

Vibrating Compaction and Pressure Curing of Steel Fiber Reinforced Concrete

by

Kiyoshi KOHNO

(Faculty of Engineering, Tokushima University, Tokushima)

and Suekazu KAWASAKI

(Shikoku Regional Construction Bureau, the Ministry of Construction, Takamatsu)

The vibrating compaction, pressure compaction and pressure curing of fiber reinforced concrete were investigated for the purpose of utilizing steel fiber to concrete products. In the vibrating compaction, the adoption of high frequency or high vibrating accelerator was profitable to improve the quality of fibrous concrete. The pressure compaction and pressure curing of steel fiber reinforced concrete were very effective to obtain high flexural strength and to improve the impact resistance. As the effect of reinforcement is increased by the pressure method, it is possible to reduce the fiber content for a given required strength.

(Received Aug. 20, 1979)

キー・ワード：鋼繊維補強コンクリート，振動締固め，加圧養生，蒸気養生

1 緒 言

セメント系材料のモルタル・コンクリートは曲げ強度や引張強度が低く，タフネス，ひびわれ抵抗性，衝撃抵抗性などが劣るので，これらの欠点を改善するために，コンクリート中に鋼，ガラスなどの短繊維を加えた繊維補強コンクリートについての研究が近年進められ，舗装，トンネルライニング，¹⁾ 炉材，コンクリート製品などに実用されはじめている。

本研究では，コンクリート中で腐食しにくいので土木用に適しているといわれている鋼繊維をとりあげ，今後の有力な利用分野の一つとしてコンクリート製品を考え，まず，成形の際の振動締固め条件が品質に及ぼす影響を調べたのち，繊維による補強効果を一層高めるために，加圧成形・加圧養生を行い，その際の加圧力，繊維混入率などが曲げ強度，圧縮強度，動弾性係数などに及ぼす影響を調べ，衝撃抵抗性についても検討を行ったので以下に報告する。

2 使用材料とコンクリートの配合

2・1 使用材料

鋼繊維は薄鋼板をせん断して製造し，波状にクリンブしたせん断ファイバーを使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを用い，混和材料として一部の

配合にフライアッシュを添加した。また，粗，細骨材には吉野川産の砂，砂利を用いた。これらの使用材料を一括して Table I に示す。

2・2 コンクリートの配合

使用した鋼繊維補強コンクリート（以下SFRCという）は，粗骨材の最大寸法 10mm，目標スランプは施工性を考慮して製品用としてはやや高目の 10cm とし，繊維混入率を 0～1.6%/vol の間で変えた Table II に示す配合とした。

3 供試体の作製と養生

3・1 コンクリートの練りまぜ

容量 50 l で強制練りのジェットミキサーを使用して，まず，細骨材とセメントとを投入したのち水を加え鋼繊維を散布しながら 1 分間練りまぜを行った。ミキサーを止めて粗骨材を投入したのち，コンクリートとしてさらに 1 分 30 秒間練りまぜを行った。なお，目標スランプ 10 cm に対して 9～11 cm の範囲に入るようにフレッシュコンクリートのスランプ試験によって配合管理を行った。

3・2 振動台による締固め成形

□10×10×40cm のはり型枠にコンクリートを一層に詰め，不平衡重すい式の振動台を用いて，Table III に示す振動締固め条件を用いて締固め成形を行い，振動数と振動加速度の影響を調査した。

3・3 加圧成形および加圧養生

* 原稿受理 昭和54年8月20日

** 正 会 員 徳島大学工学部 徳島市南常三島町

*** 建設省四国地方建設局 高松市福岡町

Table I. Materials used.

Materials	Main properties
Steel fiber	0.21×0.60×25 mm produced by shearing sheet. Cripmed fiber
Cement	Specific gravity=7.8, Aspect ratio (L/d)=62.4, Tensile strength=124(kgf/mm ²)
Fly ash	Ordinary Portland cement. Specific gravity=3.15, Blaine's value=3 100 (cm ² /g)
Coarse aggregate	Specific gravity=2.03, Blaine's value=3 280 cm ² /g, SiO ₂ =55.3%
Fine aggregate	Yoshino river gravel. Maximum size=10 (mm), Specific gravity=2.62, F. M.=6.00
	Yoshino river sand. Specific gravity=2.60, Absorption=1.26 (%), F. M.=3.00

Table II. Mix date of steel fiber reinforced concrete.

Mix No.	Fiber content (°/vol)	Maximum size (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight per volume (kg/m ³)					
						Water	Cement	Fly ash	Sand	Gravel	Fiber
No. 1	0	10	10±1	60	60	205	342	—	1 025	689	0
No. 2	0.9	10	10±1	60	64	227	348	—	1 008	572	70.2
No. 3	1.0	10	10±1	60	66	230	383	—	1 044	542	78.0
No. 4	1.2	10	10±1	60	67	235	392	—	1 043	518	93.6
No. 5	1.6	10	10±1	60	70	240	408	—	1 056	456	124.8
No. 6	0	10	10±1	60	60	198	264	66	1 032	693	0
No. 7	0.9	10	10±1	60	64	219	292	73	1 065	604	70.2
No. 8	1.2	10	10±1	60	66	227	302	76	1 041	517	93.6
No. 9	1.6	10	10±1	60	70	236	314	79	1 055	455	124.8

Table III. Vibrating conditions in compaction.

Vibrating frequency (vpm)	Amplitude (mm)	Accelerator (g)	Vibrating time (sec)
3 000	1.21	6.6	15
4 500	1.04	10.0	15
6 000	0.96	18.5	15

加圧成形による供試体の作製は、Fig. 1 に示す加圧成形型枠を用いて、振動台の最適振動数で締固め成形したのち、100 t 万能試験機を用いて 5~20 kgf/cm² の範囲内で加圧力を 3 分間加え、ナットを締付けて加圧力を保持し、そのまま蒸気養生槽に入れて、前養生 + 温度上昇 + 等温養生 + 徐冷期間が 2+3 (17℃/h) + 5 (80℃) + 14h の条件で加圧養生（圧力養生、加圧蒸気養生などともいう）を行った。翌日脱型を行い、1 日強度を試験し、材令 28 日の供試体は 18~20℃ の水

Fig. 1. Mold for pressure compaction and pressure curing.

中養生に移した。

3・4 標準養生および蒸気養生

加圧養生と比較し、養生方法の影響を調べる目的で、加圧成形を行わない普通のやり方供試体について、標準養生ならびに蒸気養生槽を使用して 2+3 (17℃/h) + 5 (80℃) + 14h の蒸気養生を行い、これらの材令は 7 日および 28 日とした。なお、振動締固め条件の影響を検討する供試体は成形後 20℃ 恒温室に静置したのち、翌日脱型を行い、材令 7 日まで 18~20℃ の水中で標準養生を行った。

4 実験方法

4・1 タフネスおよび曲げ強度試験

所定材令になった □10×10×40 cm はり供試体を JIS A 1106 に準じて打込み面を側方にして 載荷装置にのせ、スパンは 30cm にとり中央集中載荷法によって曲げ試験を行った。中央に 1/100 mm ダイアルゲージを 2 個配置してたわみを測定し、荷重～たわみ曲線からタフネスを求めた。

なお、曲げ試験の前に供試体寸法と重量をはかり、ソニック法で共鳴周波数を求め動弾性係数を算出した。

4・2 圧縮強度試験

はり折片より 10 cm 立方供試体を切りとり、100 t 万能試験機によって圧縮強度試験を行った。なお、載荷面は打込み方向に直角の型枠側板の面とした。

4・3 衝撃抵抗試験

Fig. 2 に示すような衝撃試験装置を製作し, $10 \times 10 \times 40$ cm はり供試体をスパン 30 cm にとって固定し, 高さ 5 cm の位置から質量 11.4 kg の重しを中央に落下させてひびわれ発生打撃回数とひびわれが上面まで達したときの破壊打撃回数を調べて衝撃抵抗性を検討した。

Fig. 2. Apparatus for impact resistance test.

5 実験結果とその考察

5・1 振動台の振動数の影響

振動締固め条件として振動台の振動数を 3 000, 4 500 および 6 000 vpm の 3 種にかえて成形したコンクリートはりの単位重量, 曲げ強度, 圧縮強度などの材令 7 日における試験結果を Table IV に示す。

Table IV. Effect of vibrating condition on the properties of steel fiber reinforced concrete.

Vibrating frequency (vpm)	Unit weight (kg/m ³)	Flexural strength (kgf/cm ²)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Toughness (kg-mm)	Deflection at max. load ($\times 10^{-2}$ mm)
3 000	2.35	49.7	195	1 170	45.1
4 500	2.37	58.3	203	1 570	42.3
6 000	2.39	66.0	217	1 340	41.6

Note) Concrete mix: No.1 (Fiber 1.2°/vol), Age of concrete: 7 days

この結果にみられるように振動数を高くして振動加速度を大きくすると, 単位重量, 強度などが増加し, コンクリートの締固め効果はよくなる。コンクリートを振動台に載せた状態で水平(横)方向および垂直(縦)方向にカッターで切断してその断面を観察すると, 一例を示した Fig. 3 にみられるように, 振動台で締固めを行った場合に鋼繊維が多少水平方向にねる傾向が認められる。Edgington²⁾も振動締固めの際に鋼繊維が振動方向に対して垂直な面に並ぶ傾向のあることを指摘している。

振動数を 3 000 から 6 000 vpm に上げると振動加速度が 6.6 から 18.5 g (Table III 参照) に増大し, 圧

(a) Horizontal face

(b) Vertical face

Fig. 3. Cutting surfaces of steel fiber reinforced concrete. (Vibrating frequency=6 000 rpm, Fiber=1.2°/vol)

縮で約 11%, 曲げで約 33% の強度増加を示している。強力な締固めにより曲げ強度の向上が著しいのは, 前述の配向の影響のほか, 繊維とマトリックスとの付着の改善も考えられる。

結局, SFRC の振動台による締固め効果を高めるためには, 振動数あるいは振幅を大きくとり, 振動加速度を大きくするのが有利である。

5・2 加圧成形の際の加圧力の影響

吉田徳次郎博士によって開発された高強度コンクリートのえられる加圧工法は, SFRC に対してもきわめて効果的の工法と考えられるので, 繊維混入率 1.2°/vol の No. 4 配合を用いプレーンコンクリートと比較して加圧の効果について検討した。加圧成形の前の振動締固め条件は 6 000 vpm で 15 秒とし, 加圧力を 0, 5, 10, 15 および 20 kgf/cm² にとり成形し, その加圧力を保持して加圧養生を行い, 養生直後の材令 1 日で曲げ強度および圧縮強度を試験した結果を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。

Fig. 4 にみられるように, 加圧力の増加とともに明らかに曲げ強度は増大し, SFRC では 10 kgf/cm² の

Fig. 4. Effect of pressure in compaction and curing on the flexural strength of concrete.

Table V. Water cement ratio, unit weight and dynamic modulus of elasticity of concrete made by pressure compaction and pressure curing.

Pressure in molding (kgf/cm ²)		0	5	10	15	20
Plain concrete	W/C (%)	60	58	57	56	54
	Unit weight (t/m ³)	2.31	2.36	2.38	2.39	2.39
	E_D ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	33.3	34.0	34.4	34.5	35.2
Fiber reinforced concrete (1.2 ^o /vol)	W/C (%)	60	58	57	56	55
	Unit weight (t/m ³)	2.37	2.45	2.47	2.47	2.48
	E_D ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	35.7	37.0	37.3	37.4	37.6

加圧で24%, 20 kgf/cm² では44%の強度増加がえられている。また, Table V に示したように加圧によって水がしぼり出されコンクリートの水セメント比が低下し, 一方, 単位重量や動弾性係数が増加してより密なコンクリートがえられている。なお, プレーンコンクリートに対しても加圧成形, 加圧養生による曲げ強度改善の効果は顕著であるが, 繊維混入率1.2^o/volのSFRCは各加圧力を通してプレーンコンクリートに比べ68~79%, 平均73%強度が高く, 鋼繊維の混入は曲げ強度の向上にきわめて効果的であることを示している。

一方, 圧縮強度については Fig. 5 にみられるように曲げ強度以上に加圧による強度増加が顕著であり, 20 kgf/cm² の場合 SFRC で79%, プレーンコンクリートで72%の増加率となっている。また, 同一水セメント比の配合としているので, SFRCは単位セメント量が多くなり, プレーンコンクリートより平均20%高い圧縮強度がえられている。

Fig. 5. Effect of pressure in compaction and curing on the compressive strength of concrete.

なお, 加圧力の異なる各種のコンクリートの代表的な荷重-たわみ曲線を示すと Fig. 6 のようになる。タフネスの計算については種々の見解が報告されている^{4)~6)}が, 本研究では除荷時のひびわれ幅が0.2 mm程度を考慮し, 荷重-たわみ曲線において最大荷重の2/3までの面積でタフネスを求め, 図中に記入した。加圧養生を行うと弾性係数が増し, 荷重-たわみ曲線が立ち上がる傾向がみられるが, 加圧養生を行ったものの中では加圧力とともにタフネスは大となっている。

結局, 加圧成形・加圧養生を行うと, 補強効果が増し, 曲げ強度はかなり増大するので, 同一強度に対しては繊維混入率を低減することが可能になる。

Fig. 6. Typical load-deflection curves of steel fiber reinforced concrete.

5.3 繊維混入率の影響と養生方法の比較

繊維混入率 4^o/vol までは, 曲げ強度は混入率とともに増加することが報告されている⁴⁾。しかし, 鋼繊維は高価であり, できるだけ経済的な配合を考える必要がある。0.9, 1.2 および 1.6^o/vol の3種混入率の配合を用いて, 20 kgf/cm² での加圧養生, 加圧成形しない振動台のみの締固め成形による供試体での蒸気養生および標準養生の3種養生方法を用いて各材令の曲げ強度および圧縮強度を比較した結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

各種養生方法の場合とも, 繊維混入率とともに明らかに曲げ強度は高くなり, 混入率を0.9から1.6^o/volに増量すると, その強度増加率は平均で, 加圧養生37%, 蒸気養生36%, 標準養生31%となっており, 繊維混入率0.1^o/volの増加に対して曲げ強度はおおよそ5%の増大を示している。一方, 繊維混入率による圧縮強度の増加は曲げ強度ほど顕著でなく, 0.9から

Fig. 7. Effects of curing method and fiber content on the flexural strength of concrete.

Fig. 8. Effects of curing method and fiber content on the compressive strength of concrete.

1.6%/vol にすると、前述の各養生に対しそれぞれ平均で10%, 7%および5%の値を示している。

各種養生方法を比較すると、SFRC を加圧養生することにより養生直後の材令1日で標準養生28日の値がえられる。ごく初期材令で所要強度のえられることから加圧養生はコンクリート製品には適した工法の一つと考えられる。蒸気養生を行った場合の SFRC の曲げ強度は Fig. 7 にみられるように標準養生はより大となっており、SFRC の蒸気養生による曲げ強度発現は良好である。これは、繊維とマトリックスとの付着強度の影響も考えられ、この原因については今後さらに究明する必要がある。一方、圧縮強度については、

従来の蒸気養生に関する研究報告⁷⁾⁸⁾に指摘されているように、材令28日では標準養生強度より蒸気養生の値が低くなっており、90~94%の値となっている。

つぎに、フライアッシュを内割で20%添加した配合 No. 6 から No. 9 のコンクリートを用いて、加圧養生1日、蒸気養生および標準養生7日の曲げ強度試験結果をプレーンコンクリートと比較して Fig. 9 に示す。

Fig. 9. Effect of fly ash on the flexural strength of steel fiber reinforced concrete.

この結果でも加圧養生は早期強度発現にきわめて効果的であることがわかる。また、各養生方法の場合とも繊維混入率が多くなると、フライアッシュコンクリートの強度がプレーンコンクリートと同程度か、あるいは逆転して高くなるものもあり、フライアッシュ混入の効果がみられている。Kesler⁹⁾は SFRC にはフライアッシュの添加が効果的であることを指摘しており、フライアッシュその他混和材料の有効利用による経済配合の選定については今後さらに検討したい。

5・4 衝撃抵抗について

重すい落下法で衝撃抵抗試験を行い、はり供試体の下面に初めてひびわれを発生する打撃回数をひびわれ発生打撃回数、そのひびわれが進行し供試体の上面に達すると落下した重すいがほとんどはね返らなくなるがこのときまでの打撃回数を破壊時打撃回数として求めた結果を Table VI に示す。

これらの試験結果にみられるように SFRC は明らかに衝撃抵抗性が改善され、加圧成形・加圧養生したものは大幅に破壊までの打撃回数が増加しており、衝撃抵抗性の改善にきわめて有効であるのがわかる。これは、コンクリート中にランダムに分散された繊維がマトリックスとの付着によってひびわれの進展に対して著しく抵抗するためで、中西¹⁰⁾も繊維を混入することにより耐衝撃性が大幅に向上すると述べている。したがって、SFRC は空港の滑走路の舗装、基礎くいなど使用上あるいは施工上耐衝撃性を要求するコンクリートに使用すると有効である。

6 結 言

鋼繊維補強コンクリートに対する振動締固め条件の

Table VI. Test results of impact resistance.

Mix No.	Used concrete				Unit weight (t/m ³)	Number of blows		Compressive strength (kgf/cm ²)	Dynamic modulus of elasticity (kgf/cm ²)
	Fiber (/vol)	Press (kgf/cm ²)	W/C (%)	Slump (cm)		First crack	Failure crack		
No. 1	0	0	60	10.2	2.38	3	4	292	32.8×10 ⁴
		20	57	10.2	2.45	3	5	401	36.2×10 ⁴
No. 3	1.0	0	60	10.5	2.44	13	29	322	35.5×10 ⁴
		20	56	10.5	2.50	69	99	430	36.8×10 ⁴

Note) Steam curing: 2+3 (17°C/h)+5 (80°C)+14 h, Age of concrete: 28 days

影響を調べ、主として加圧成形・加圧養生が品質に及ぼす影響についてプレーンコンクリートとも比較して検討した本研究の結果を要約すると次のようになる。

(1) 振動台で締固め成形を行う場合、高振動数で振動加速度が大きいほど曲げ強度は大となり、よい締固め効果がえられる。

(2) 品質向上には加圧成形・加圧養生の使用がきわめて有効であり、加圧とともに強度は増大し、単位重量、動弾性係数なども増加する。

(3) 10kgf/cm² の加圧養生で加圧しないものに比べて24%程度の曲げ強度増加がえられ、同一強度とする場合には繊維混入率の低減も可能である。

(4) 加圧養生を行うと初期曲げ強度の発現が顕著であり、脱型時の材令1日で標準養生28日に相当する強度をえることができる。

(5) 一般に製品工場に用いられる蒸気養生の効果は、プレーンコンクリートよりも顕著であり、とくに曲げ強度発現が良好である。

(6) 加圧成形・加圧養生を行った鋼繊維補強コンクリートの衝撃抵抗性は著しく改善される。

(昭和51年10月10日 土木学会第31回年次学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 河野 清, 材料, **26**, 1061 (1977).
- 2) Edgington, J., and D. J. Hannant, Mater. Struct., **5**, 41 (1974).
- 3) 吉田徳次郎, 土木学会誌, **26**, 103 (1940).
- 4) ACI Committee 544, Proc. Am. Conc. Inst., **70**, 729 (1973).
- 5) Taylor, M. A., ACI-Publication SP44-17, 299 (1974).
- 6) ACI Committee 544, Proc. Am. Conc. Inst., **75**, 283 (1978).
- 7) ACI Committee 517, Proc. Am. Conc. Inst., **60**, 953 (1963).
- 8) 河野 清, コンクリートジャーナル, **4**, No. 4, 22 (1966).
- 9) Kesler, C. E., Conference Proceeding M-28, CERL, 28 (1972).
- 10) 中西正俊, 高木隼二, 奈良穂徳, セメント技術年報, **31**, 305 (1977).