

[59] ガラス繊維補強コンクリートに対する産業副産物の利用

正会員 河野 清 (徳島大学工学部)  
 正会員 ○堀井克章 (阿南工業高等専門学校)

1. まえがき

ガラス繊維補強コンクリート(以下GFRCと略記)は、ぜい性材料であるコンクリートの引張強度、せん断強度、ひびわれ抵抗性、靱性などの改善に有効な複合材料として注目されている。しかし繊維の価格が高いこと、施工時に繊維の吸水やほぐれが生じ、コンクリートのワーカビリティが著しく悪化すること、通常用いられる耐アルカリ性ガラス繊維の耐アルカリ性が完全でなく、コンクリート中の強アルカリ成分に侵食され、その補強効果が材令とともに低下することなど、同種の複合材料である鋼繊維補強コンクリートに比較して、経済性、施工性及び耐久性の点に問題があり、GFRCに関する調査報告は非常に少ない。

そこで本研究では、ガラス繊維のアルカリ劣化の抑制対策として、産業副産物の有効利用によりコンクリートのアルカリ度を低下させることに着目し、耐久性に重点をおいたGFRCの品質改善のために、副産物であるフライアッシュ及び高炉スラグ微粉末(以下スラグと略記)を混和材としてセメントの一部に代替して用いた場合の、GFRCの諸性状に及ぼす副産物代替率及び養生条件の影響について、実験を行い検討をくわえた。

2. 実験概要

(1) 実験計画

本実験は、副産物代替率に関する実験A、湿潤養生と乾燥養生に関する実験B及び蒸気養生時の最高温度に関する実験Cの3種からなる。このうち蒸気養生は、GFRCの製品への利用に関する検討とGFRCの長期材令での物性の評価のために行ったものである。

(2) 使用材料とコンクリートの配合

本実験の主な使用材料及びコンクリートの配合を、表-1及び表-2にそれぞれ示す。使用した2種のガラス繊維は

表-1 使用材料

分類	材料名	主要な性質	実験シリーズ
セメント	普通セメント(1)	比重:3.16、ブレン値:3130cm <sup>2</sup> /g	A
	普通セメント(2)	比重:3.16、ブレン値:3150cm <sup>2</sup> /g	B
	普通セメント(3)	比重:3.15、ブレン値:3130cm <sup>2</sup> /g	C
副産物	フライアッシュ(1)	比重:2.25、ブレン値:3360cm <sup>2</sup> /g	A,B
	フライアッシュ(2)	比重:2.30、ブレン値:3830cm <sup>2</sup> /g	C
	スラグ(1)	比重:2.90、ブレン値:3760cm <sup>2</sup> /g	A,B
	スラグ(2)	比重:2.90、ブレン値:3900cm <sup>2</sup> /g	C
細骨材	吉野川産川砂(1)	比重:2.66、吸水率:1.25%、粗粒率:2.97	A,B
	吉野川産川砂(2)	比重:2.60、吸水率:1.02%、粗粒率:2.12	C
粗骨材	吉野川産豆砂利	比重:2.62、吸水率:1.46%、粗粒率:5.97	A,B
	吉野川産玉砕石	比重:2.61、吸水率:1.78%、粗粒率:5.97	C
繊維	英国産ガラス繊維	比重:2.70、長さ:25mm、チョップストランド	A
	日本産ガラス繊維	比重:2.70、長さ:25mm、チョップストランド	B,C
混和剤	標準型減水剤	粉体、リゲニンスルホン酸塩系	A,B,C

表-2 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの試験結果

実験シリーズ	配合の種類	繊維混入率 Vf (vol%)	副産物代替率 (%)	粗骨材の最大寸法 Ms (mm)	水結合材比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE減水剤 (C%)	試験結果			
							水 W	結合材 C		粗骨材 G	繊維 GF		コンクリート温 (°C)	スランプ S.L. (cm)	空気置 Air (%)	
								セメント	副産物							細骨材 S
A	GF1.5*-FA00	1.5	0	10	60	65	312	520	0	810	430	40.5	0.25	16.5~20.2	9.0~12.6	3.9~4.0
	GF1.5*-FA10		10				308	462	51					16.4~20.1	10.0~11.1	3.5~4.1
	GF1.5*-FA20		20				304	405	101					16.2~20.1	9.2~10.8	3.7~3.9
	GF1.5*-FA30		30				299	349	150					16.1~20.0	8.0~11.2	3.6~3.8
	GF1.5*-FA40		40				295	295	197					16.2~20.0	9.2~11.0	3.0~3.5
	GF1.5*-BS00	1.5	0	10	60	65	312	520	0	810	430	40.5	0.25	15.3~20.7	8.0~11.0	3.8~4.3
	GF1.5*-BS15		15				311	440	78					15.1~20.0	8.3~12.0	3.6~3.8
	GF1.5*-BS30		30				309	361	154					15.1~19.8	7.6~10.7	3.6~3.7
	GF1.5*-BS45		45				308	282	231					15.2~19.8	8.6~9.6	3.4~3.7
	GF1.5*-BS60		60				306	204	306					15.3~19.7	8.4~11.2	3.2~3.4
B	GF1.5**-OPC	1.5	0	10	60	65	300	500	0	823	436	40.5	0.25	13.2	7.0~8.0	4.6
	GF1.5**-FA20		20				292	390	97					13.3	7.2~7.8	3.6
	GF1.5**-BS60		60				295	196	295					12.8	8.2~9.0	4.7
C	GF1.0**-OPC	1.5	0	10	60	68	270	450	0	932	440	27.0	0.25	21.8~23.9	10.0~11.4	4.8~5.2
	GF1.0**-FA20		20				264	350	88					15.9~19.0	11.9~13.9	4.0~4.3
	GF1.0**-BS45		45				267	245	200					18.4~20.9	10.6~11.2	4.4

注) 配合の種類記号FAはフライアッシュ、BSはスラグを示す。また、\*印は英国産ガラス繊維、\*\*は国産ガラス繊維を示す。

いずれも耐アルカリ性のもので、実験Aでは従来からの英国産ガラス繊維、また実験B及び実験Cでは経済性を考慮して、シラスを有効利用した比較的安価な日本国産ガラス繊維を使用した。

### (3) 実験方法

GFRCの練りませには、容量50ℓの強制練りミキサを用いた。まず細骨材、結合材（セメントと副産物）及び混和剤を混入した水をミキサに投入し、30秒間モルタルとして練り、引き続き繊維を手でほぐして投入しながらかくはんし、次にミキサを止めて粗骨材を投入し、さらに60秒間練りませを行った。練りませ終了後、直ちにスランプ試験と空気量試験をJISの規定に従って行った。

強度試験用の $10 \times 10 \times 40$ cmはり供試体は、はり型枠にGFRCを一層に詰めて振動台（振動数：6000rpm、振幅：1mm）で20秒間締固め、型枠のまま恒温室（室温： $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）あるいは蒸気養生槽へ移して表面仕上げを行い、翌日脱型して作製した。

養生は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中湿潤養生（標準養生）、材令7日まで標準養生した後恒温室（室温： $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度：60～80%）で行う空中乾燥養生及び蒸気養生槽を用いて図-1に示す条件のもとで行う蒸気養生の3種の方法を用いた。

所定材令に達した供試体を用いて、まずスパン30cmの中央集中荷法による曲げ強度試験を行い、次に曲げ試験後のはり切片を用いて、JIS A 1114の規定に従って圧縮強度試験を行った。なお一部の供試体については、曲げ強度試験時に、変位計を用いてスパン中央点でたわみがスパンの $1/150$ （2mm）になるまでの荷重-たわみ曲線を計測し、鋼繊維補強コンクリートの試験方法に関するJCI規準に準じて、曲げ靱性係数を算定した。また曲げ強度試験後のはり切片の一部を用いて、表乾重量と炉乾燥後の絶乾重量を測定し、GFRCの吸水率を求めた。供試体数は一種につき3個とし、これらの平均値を試験値とした。

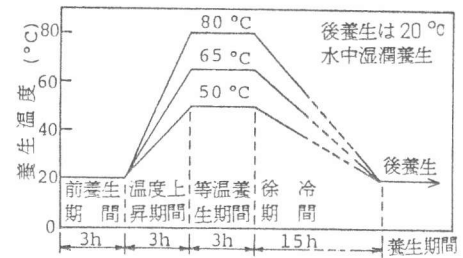


図-1 蒸気養生条件（実験C）

## 3. 実験結果と考察

### (1) フレッシュコンクリートの性状

本実験で用いた各配合のフレッシュコンクリートの各試験結果は、表-2に示すとおりである。

繊維を混入しない通常のコンクリートにフライアッシュやスラグを用いると、それらの使用量の増加とともに連行空気量が減少し、同一空気量を得るためのAE剤量を増す必要があるといわれている<sup>1)2)</sup>。GFRCに関する本実験でも、表-2から明らかなように、この傾向が認められ、いずれの副産物の場合も、副産物代替率の増加に伴い連行空気量が減少する。

フライアッシュは、ガラス質の球状粒子であるために、通常のコンクリートのワーカビリティ改善に有効な混和材となる。本実験では表-2に示すように、各結合材の比重を考慮して、各実験で単位骨材容積一定で配合設計を行ったため、副産物代替率の増加に伴い単位水量を低減したが、スランプは同程度の値を示しており、さらに空気量を一定とするためAE剤量を調整すれば、一層の単位水量の低減が可能になると思われる。従ってフライアッシュの使用は、GFRCのワーカビリティ改善に効果があるといえる。

### (2) 硬化コンクリートの性状

フライアッシュ及びスラグの代替率とGFRCの圧縮強度及び曲げ強度との関係を、図-2及び図-3にそれぞれ示す。また図-4は、材令3年での副産物代替率とGFRCの吸水率との関係を示したものである。

図-2及び図-3から明らかなように、材令28日では、圧縮及び曲げ強度は副産物代替率の増加に伴い低下する傾向がある。しかし湿潤養生を行うことにより、フライアッシュのポゾラン反応とスラグの潜在水硬性による強度増進の傾向が材令とともに徐々に現れ、材令3年では、副産物を用いないGFRCと比較して、フライアッシュを40%代替したものは圧縮強度で約1.15倍及び曲げ強度で約1.34倍の値となり、またスラグを60%代替したものは圧縮強度で約1.39倍及び曲げ強度で約1.32倍の値を示す。なおGFRCの曲げ強度は、フライアッシュを40%またはスラグを60%代替したものを以外で、材令1年以降低下する傾向を示し、その割合は代替率の低いものほど大きくなっている。また副産物を用いないGFRCの曲げ強度は、材令28日以降増進傾向をほとんど示さず、逆に材令1年から3年にかけては、10%程度その値が低下する。以上の現象は、ガラス繊維のアルカリ劣化に起因するものと考えられ、GFRCの曲げ強度低下の抑制ま

たは防止のためには、早期強度発現に有害とならない範囲で、できるだけ高い代替率でフライアッシュやスラグを利用することが望ましいと思われる。

また図-4から明らかなように、長期材令でのGFRCの吸水率は、副産物代替率の増加に伴い減少する傾向があり、フライアッシュやスラグは、GFRCの吸水性の改善に効果があるといえる。

図-5に標準養生及び乾燥養生を行ったGFRCの圧縮強度と曲げ強度の経時変化を示す。

この図からも前述したように、湿潤養生を行うGFRCの長期強度の増進に副産物が有効であることがわかる。また材令7日以降空中乾燥養生に移したGFRCの圧縮及び曲げ強度は、どの配合のGFRCも、材令28日で、湿潤養生を続けたものに比べて高い値を示す。なお乾燥養生したGFRCの曲げ強度は、材令91日以降どの配合のGFRCでも変動がなくなり安定状態になる。このことから繊維のアルカリ劣化に伴う曲げ強度の低下の抑制策の一つとして、比較的早期材令でGFRCを湿潤状態から乾燥状態へ移すことも有効な手段であると考えられる。

蒸気養生したGFRCの圧縮強度の経時変化及び曲げ強度の経時変化を、図-6及び図-7にそれぞれ示す。また表-3は、蒸気養生したGFRCの材令2年での曲げ靱性係数を示す。

蒸気養生は、コンクリートの初期強度増進のために行われる。通常その際の最高温度を高くするほどコンクリートの初期強度発現は良好となるものの、長期材令への強度増進率は小さくなるといわれている<sup>3)</sup>。しかしGFRCに関する本実験では、図-6及び図-7から明らかなように、材令1日から2年の範囲内で、圧縮及び曲げ強度はいずれも蒸気養生の際の最高温度が高いものほど小さくなる。これは、GFRCのワーカビリティが著しく悪いため、締固めが不十分になることや単位水量を多くする必要などにより、体積変化の大きい空隙や自由水の占める割合が大きくなることに起因するものと考えられる。なおこれらの図から、蒸気養生を行うGFRCの強度の増進にも副産物が有効であることがわかる。

図-6及び図-7に示した蒸気養生に関する強度試験結果からは、前述したガラス繊維のアルカリ劣化に伴う曲げ強度の低下の傾向が明確には見られないが、これは繊維混入率が1.0<sup>o</sup>/volと比較的低いことによるものと思われる。しかし表-3から明らかなように、GFRCの曲げ靱性係数は、副

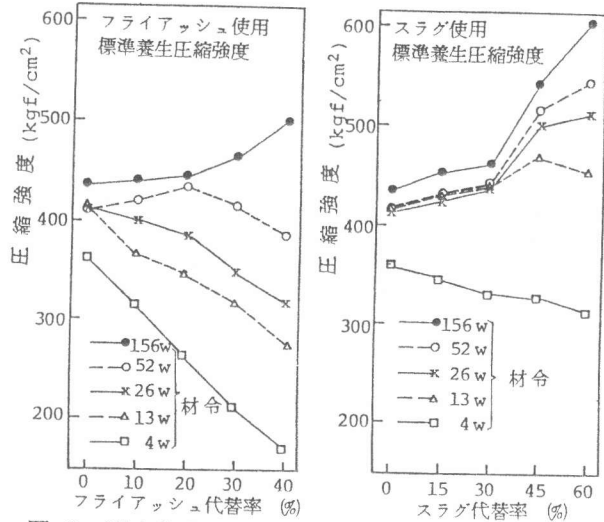


図-2 副産物代替率と圧縮強度との関係 (実験A)

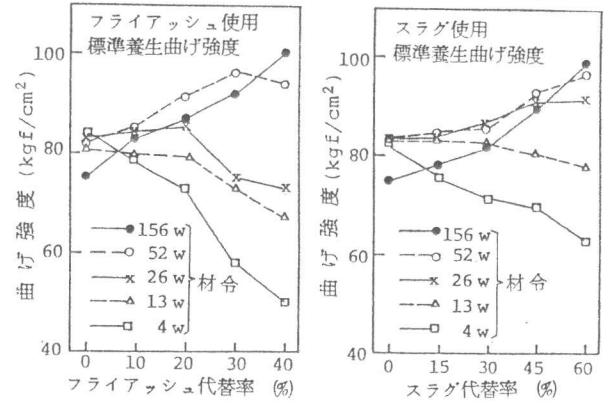


図-3 副産物代替率と曲げ強度との関係 (実験A)

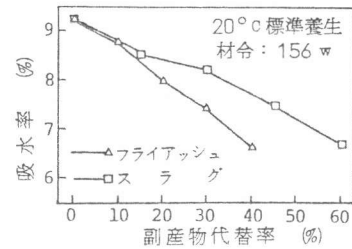


図-4 副産物代替率と吸水率との関係 (実験A)

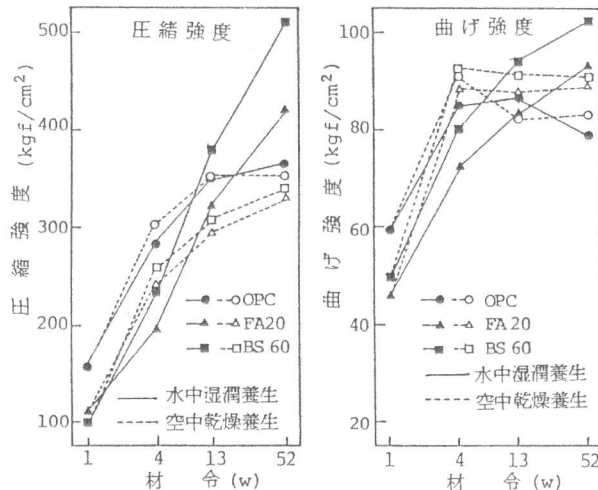


図-5 圧縮強度及び曲げ強度の経時変化 (実験B)

産物を用いない場合及び蒸気養生の際の最高温度が高い場合に小さい値を示している。また曲げ靱性係数が全体的に小さい値を示す副産物を用いないGFRCでは、曲げ強度試験において、最大荷重に達した直後にひびわれが発生し、急激に破壊するという繊維を混入しない通常のコンクリートに似た挙動を示しており、このことから、GFRCの長期材令での物性に対するフライアッシュ及びスラグの有効性が認められる。

#### 4. むすび

GFRCに産業副産物であるフライアッシュ及びスラグを混和材としてセメントの一部に代替して利用した本研究の結果を要約すると、本実験の範囲内で、以下のようなになる。

- ① フライアッシュ及びスラグの代替率の増加に伴い、GFRCの連行空気量は減少する。
- ② フライアッシュのセメントに対する代替使用は、GFRCのワーカビリティ改善に有効である。
- ③ フライアッシュ及びスラグの代替率の増加に伴い、GFRCの初期強度は低下する。
- ④ ガラス繊維のアルカリ劣化により、GFRCの長期材令での曲げ強度は低下する。
- ⑤ GFRCの曲げ強度低下の抑制には、フライアッシュ及びスラグの使用あるいは比較的早期材令での乾燥状態への移行が効果的である。
- ⑥ フライアッシュ及びスラグの使用は、GFRCの長期材令での強度、靱性及び吸水性の改善に有効である。
- ⑦ 高温養生は、GFRCの強度発現をそこなうので、蒸気養生を行う場合には、最高温度をできるだけ低く抑えるかあるいはフライアッシュ及びスラグをセメントの一部に代替して使用するのが良い。

#### 【参考文献】

- 1) 大槻ら、セメント・コンクリート、No. 443、1984、pp. 43~49.
- 2) 小林ら、コンクリート工学、Vol. 14、No. 9、1976、pp. 23~30.
- 3) 河野、コンクリート製品、No. 191、1969、pp. 10~17.

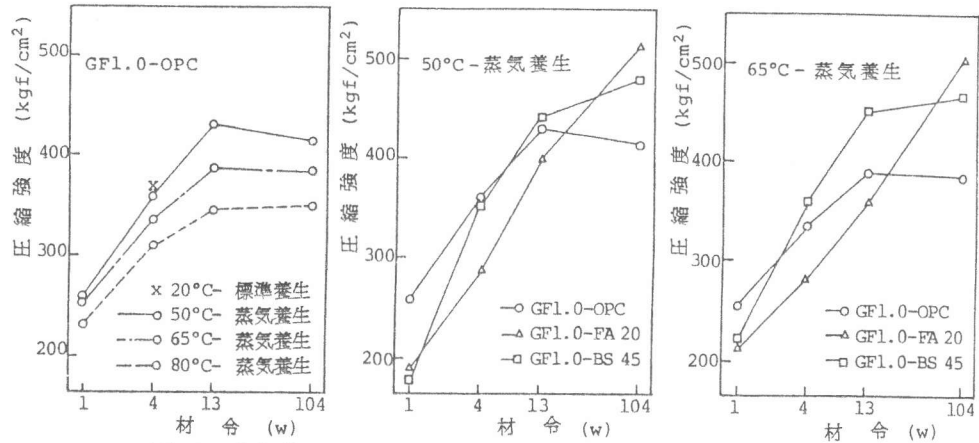


図-6 蒸気養生したGFRCの圧縮強度の経時変化(実験C)

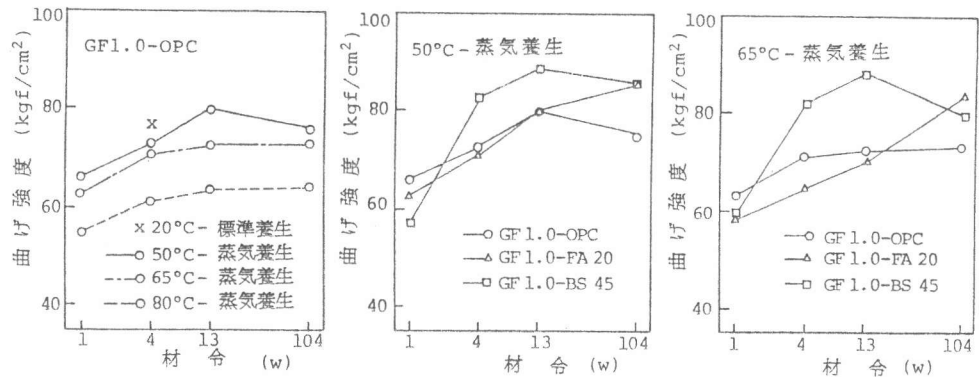


図-7 蒸気養生したGFRCの曲げ強度の経時変化(実験C)

表-3 蒸気養生したGFRCの曲げ靱性係数(実験C)

養生	配合	GF1.0	GF1.0	GF1.0
		-OPC	-FA20	-BS45
50°C-蒸気養生		6.6	13.4	9.3
65°C-蒸気養生		6.1	11.6	7.0
80°C-蒸気養生		6.0	-	-