

論文 石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作

佐藤 隆恒*¹・大木 信洋*²・東原 実*³・上原 元樹*⁴

要旨: 普通ポルトランドセメントを使用せず、短繊維としてポリビニルアルコール (PVA) を 2.0Vol.%, ポリプロピレン (PP) を 1.5Vol.%, あるいはアラミド (AR) を 1.0Vol.% 添加することで引張鉄筋比を低減したジオポリマー (GP) 短まくらぎを試作し、曲げ試験および埋込栓引抜き試験を行った。その結果、それら GP 試験体は両試験ともにその保証荷重 (29.4kN) でひび割れが生じず短まくらぎの要求性能を満たすことを確認した。また、有筋試験体のひび割れ発生荷重を市販のコンクリート短まくらぎと比較して、曲げ試験時および引抜き試験時のひび割れ発生荷重の比がそれぞれ 0.85~0.92, 0.77~0.91 と市販品に近いことを確認した。

キーワード: ジオポリマー, 石炭灰, 短まくらぎ, 短繊維補強, ステンレス鉄筋

1. はじめに

ジオポリマー (GP) 硬化体とは、ケイ酸アルカリ溶液と非晶質粉体との反応により、非晶質ではあるがゼオライト類似のアルミノシリケート構造が生じて硬化したものである。これは、ポルトランドセメント硬化体 (主に Ca シリケート水和物) と比較しておよそ 80% の CO₂ 削減効果があること¹⁾、アルカリシリカ反応や酸に対する耐性に優れていること²⁾等が知られている。筆者らは、この CO₂ 削減効果に加えて、産業副産物の有効利用の観点から、石炭灰を原料とした GP 硬化体の研究を行い、その圧縮強度がアルカリ/H₂O (モル) (以下、A/W と記す) とおよそ比例関係を有すること²⁾、また石炭灰の非晶質量、Ca 量、Al 量と圧縮強度に正の相関が存在すること等を明らかにした³⁾。また、石炭灰を原料としたプレストレストコンクリート (PC) ジオポリマーまくらぎを試作し、それが JIS E 1202「ポストテンション式 PC まくらぎ」の要求性能を満たすことを示した⁴⁾。

一般的なまくらぎはプレストレストコンクリートであるが、軌道コンクリートに埋め込まれた別々のブロック状まくらぎで左右のレールを支える、いわゆる短まくらぎは鉄筋コンクリートである。この短まくらぎは、地下鉄等トンネル内で使用されることが多いため、漏水対策等、高い化学的耐久性が要求される場合もある。そこで、筆者らは、塩害や酸劣化等の化学的耐久性が要求される地域用の短まくらぎを想定し、実用化を目指して開発を行った。開発に当たり、セメントコンクリートに替わる材料として GP を、鉄筋のひび割れ抑制効果機能に替わる材料として有機ポリマー繊維を用い、主たる荷重に対しては、ステンレス鉄筋と有機ポリマー繊維が複合

的に抵抗することを GP 短まくらぎの開発コンセプトとした。

本研究では、GP 硬化体を短まくらぎに適用できるようその作製配合および種々のポリマー繊維を用いた GP 硬化体の諸特性を検討した。また、その結果を踏まえて短繊維で補強して引張鉄筋比を低減した GP 短まくらぎを試作し、その性能確認試験を行った。以下にその結果を報告する。

2. GP 硬化体の基本配合の選定

GP 短まくらぎの配合決定に当たり、養生後の目標圧縮強度を設計基準強度である 50MPa 以上とした。かつ、曲げ強度が大きくなる配合を検討した。

2.1 GP 硬化体の配合選定試験

出発材料は、活性粉体として JIS I 種フライアッシュ (FA) および高炉スラグ微粉末 (BS) (4000 ブレーン) を用いた。加えるケイ酸アルカリ溶液は、NaOH, KOH および JIS 1 号水ガラス (WG) を表-1 の配合となるよう調製して用いた。

練混ぜ方法は以下のとおりである。まず初めに FA, BS と細骨材 (S: 最大粒径 2.5mm, 密度 2.63g/cm³) を 1 分間空練りし、その後ケイ酸アルカリ溶液を投入して 3 分間攪拌し、φ 5cm×10cm および 4cm×4cm×16cm のモールドに充填密封し 85°C で 10 時間養生した。脱型後、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて圧縮強度を、JIS A1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」の中央点載荷法に準じて曲げ強度を測定した。

2.2 GP 硬化体の配合選定試験結果

表-1 に各配合と試験結果を示す。圧縮強度は上原の

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究員 修士 (工学) (正会員)

*2 (株) 安部日鋼工業 鉄道事業本部 鉄道技術課 (正会員)

*3 (株) 安部日鋼工業 鉄道事業本部 鉄道技術課 (正会員)

*4 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

表-1 各配合と圧縮強度・曲げ強度

試番	A/W	Si/A	H ₂ O/粉体	圧縮強度	曲げ強度
	モル比		質量比	MPa	
1	0.150	0.25	0.283	80.1	7.48
2		0.30	0.289	87.6	11.35
3		0.35	0.286	86.9	11.34
4		0.40	0.300	84.8	9.76
5	0.175	0.25	0.292	88.7	9.06
6		0.30	0.295	91.3	10.11
7		0.35	0.278	93.7	11.11
8		0.40	0.289	94.5	10.69
9	0.200	0.25	0.286	93.8	10.00
10		0.30	0.278	105.3	9.82
11		0.35	0.274	104.3	12.33
12		0.40	0.294	105.9	10.05

各配合の使用量・・・FA:607.5g, BS:67.5g, S:砂岩碎石 1350g

報告²⁾と同様に A/W が大きいほど大きくなる傾向が認められた。また、Si/アルカリ比(以下、Si/A と記す)が、0.25 のときは、同一 A/W で、他と比較して圧縮強度および曲げ強度とも小さくなる傾向が認められた。一方、Si/A が 0.30 以上では、同一 A/W において、圧縮強度の変化が小さいことは、既報告と同様であったが、曲げ強度に関しては、その変化は小さいものの、Si/A が 0.35 近傍で大きくなる傾向が認められた。

3. 短繊維補強 GP 硬化体の基本特性

3.1 短繊維補強 GP 硬化体の作製

GP 硬化体において、ケイ酸アルカリ溶液として、アルカリ源を Na 単独とした場合、可使時間が短くなる。田村他⁵⁾が示したように、粉体として FA を単独で用いた場合は、使用溶液を温める等、練混ぜ温度の管理で可使時間の延伸が可能であるが、BS を添加した場合、K 系アルカリ源の添加が必要であった。今回、ケイ酸アルカリ溶液の Si 源として、シリカフェーム (SF) を使用し、かつこれを練混ぜ時に後添加することにより、アルカリ源が Na 単独でも、2 時間程度の可使時間が得られることを確認したため、本試験では KOH を使用せず GP 硬化体を作製した。なお、小さな恒温槽と比較して蒸気養生では 1 割程度圧縮強度が低下する事例もあること⁶⁾から、

表-2 繊維補強 GP モルタルの基本配合

A/W	Si/A	H ₂ O/粉体
0.165	0.350	0.292

表-3 使用繊維の物性

繊維	直径	標準長	密度	引張強度	弾性係数
	μm	mm	g/cm ³	MPa	MPa
PVA	300	15	1.30	975	26000
PP	1000	30	0.91	500	10000
AR	500	30	1.39	3500	7400

A/W を表-1 の試番 3 の配合よりやや大きく 0.165 とし (表-2)、ポリビニルアルコール (PVA)、ポリプロピレン (PP)、アラミド (AR) の各繊維 (表-3) を用いて、表-4 に示した各試験水準で繊維補強の効果の確認を行った。

短繊維補強 GP の練混ぜ手順は、図-1 に示すとおりである。練混ぜ後、排出したフレッシュ GP は、φ10cm × 20cm および 10cm × 10cm × 40cm のモールドに充填、85℃で 10 時間蒸気養生した。

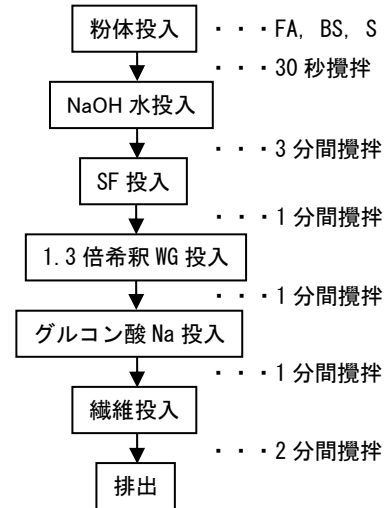


図-1 短繊維補強 GP 硬化体の練混ぜ手順

3.2 短繊維補強 GP 硬化体の性状試験

各供試体は脱型後、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、曲げ強度に関しては、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1149「コンクリートの静弾性

表-4 短繊維補強効果確認試験水準とフロー値

試料	FA	BS	S	SF	NaOH	水	JIS1号WG	グルコン酸Na	繊維種	繊維添加率 (Vol.%)	フロー(0打) (mm)
A	574.1	101.3	1350.8	32.1	67.3	185.6	17.1	13.5	無	0.0	190 × 193
B	565.6	99.8	1330.9	31.6	66.4	182.9	16.8	13.3	PVA	1.5	120 × 140
C	559.9	98.8	1317.6	31.3	65.7	181.1	16.7	13.2	PVA	2.5	110 × 140
D	565.6	99.8	1330.9	31.6	66.4	182.9	16.8	13.3	PP	1.5	170 × 185
E	551.5	97.3	1297.6	30.8	64.7	178.3	16.4	13.0	PP	4.0	130 × 160
F	568.4	100.3	1337.5	31.8	66.7	183.8	16.9	13.4	AR	1.0	150 × 180
G	565.6	99.8	1330.9	31.6	66.4	182.9	16.8	13.3	AR	1.5	110 × 130

単位量 (kg/m³)

係数試験方法」, JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」, JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠し, ひび割れ発生強度(割裂引張試験でのひび割れ発生時の強度)に関しては, コンクリートライブラリー113号 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁷⁾に準拠して測定した。

3.3 短繊維補強 GP 硬化体の性状試験結果

図-2 および図-3に, 各試料の圧縮強度, 静弾性係数と繊維添加率との関係を示す。今回圧縮強度を確認した材齢は2日と7日である。

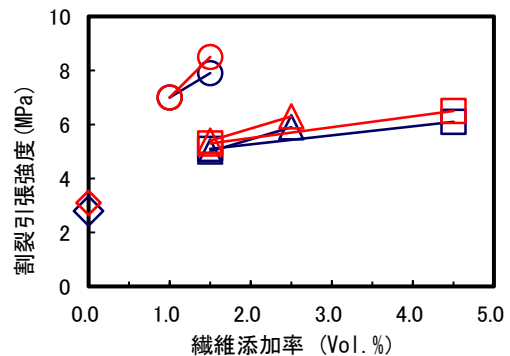
圧縮強度は材齢2日において, 60.1~72.2MPaと繊維添加試料も含めて, 全ての供試体で目標強度である50MPa以上を満たすことがわかった。また, 繊維の添加による圧縮強度の変化量は小さく, PP添加試料で10MPa程度の強度減少は認められたが, 添加率に対する強度変化は小さかった。

材齢7日の強度は, 2日と比較してわずかに増加する傾向が認められたが, 材齢の違いによる強度増進効果は小さく, 本試験条件におけるGP硬化体の強度評価は比較的若材齢の強度を基準として良いことがわかった。

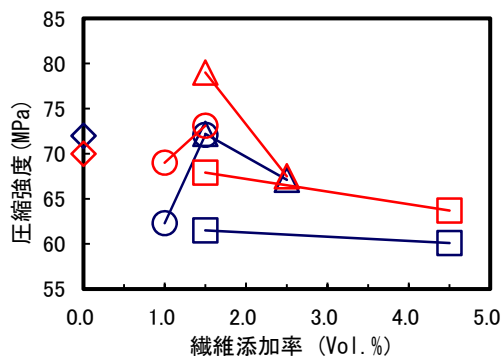
静弾性係数に関しては, 繊維を添加することによる大

きな変化は特に認められなかった。

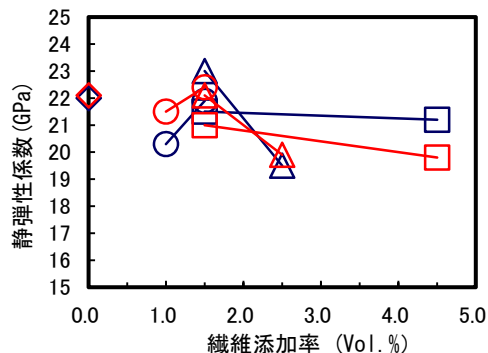
図-4 および図-5に各試料の割裂引張強度, ひび割れ発生強度と繊維添加率との関係を示す。繊維無添加の試料では, ひび割れ発生強度と割裂引張強度が同じであったが, 繊維添加により割裂引張強度の増進が認められた。また, 全体的な傾向として繊維添加率が増加すると割裂引張強度も高くなる傾向が認められ, 特にARを添加した試料では添加量が少量でも強度増進効果は大きかった。一方, ひび割れ発生強度はARやPVAを添加した試料で, わずかに増加する傾向が認められたが, その影響は小さかった。



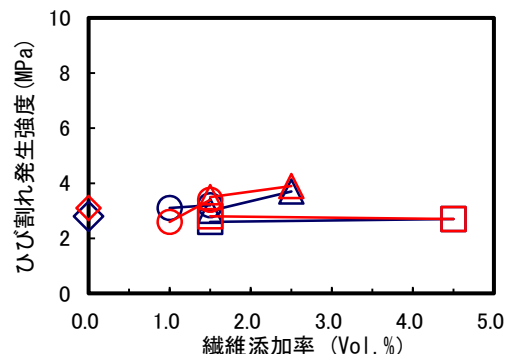
◆: 無添加 2日 ▲: PVA 2日 □: PP 2日 ○: AR 2日
◆: 無添加 7日 ▲: PVA 7日 □: PP 7日 ○: AR 7日
図-4 割裂引張強度と繊維添加率との関係



◆: 無添加 2日 ▲: PVA 2日 □: PP 2日 ○: AR 2日
◆: 無添加 7日 ▲: PVA 7日 □: PP 7日 ○: AR 7日
図-2 圧縮強度と繊維添加率との関係



◆: 無添加 2日 ▲: PVA 2日 □: PP 2日 ○: AR 2日
◆: 無添加 7日 ▲: PVA 7日 □: PP 7日 ○: AR 7日
図-3 静弾性係数と繊維添加率との関係



◆: 無添加 2日 ▲: PVA 2日 □: PP 2日 ○: AR 2日
◆: 無添加 7日 ▲: PVA 7日 □: PP 7日 ○: AR 7日
図-5 ひび割れ発生強度と繊維添加率との関係

写真-1は各供試体の割裂引張試験後の割裂断面の様子である。目視により, 各繊維共にファイバーボールの形成や繊維の偏りはなく全体的に分散していることがわかった。また, 各繊維共にGP硬化体との付着は良好と考えられ, 硬化体から繊維が抜ける挙動はあまり認められず, 繊維の引張強度が大きいAR繊維および線径が大きく1本当たりの強度が大きいPP繊維では, 割裂時にGP硬化体部分が破壊され脆弱化した。一方, PVA繊維添加試料は割裂試験後の断面が平坦であることから割裂時に

繊維が破断していることが示唆された。

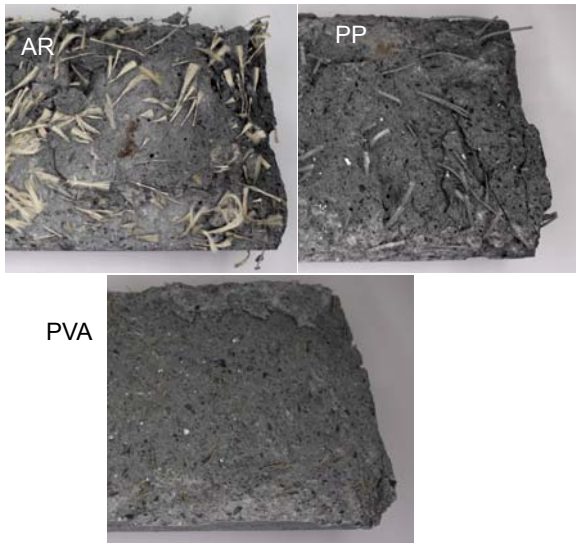


写真-1 割裂引張試験後の各供試体

図-6 および図-7 に材齢 7 日の各試料の曲げ強度、曲げひび割れ発生強度と繊維添加率の関係を示す。曲げ強度は繊維の添加に応じて増加する傾向が認められた。一方、PVA の曲げひび割れ発生強度は、添加率に応じて大きくなったが、PP と AR の曲げひび割れ発生強度は、添加率による影響が小さかった。

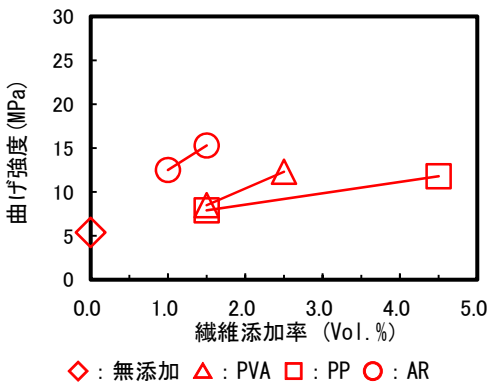


図-6 曲げ強度と繊維添加率との関係

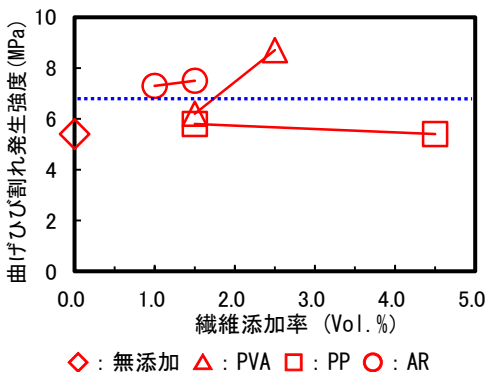


図-7 曲げひび割れ発生強度と繊維添加率との関係

ここで、図-7 中の曲げひび割れ発生強度 6.7MPa に引かれた破線は、採用したまくらぎの要求性能の一つである曲げ試験におけるひび割れが生じてはならない荷重（保証荷重）29.4kN 載荷時の引張縁力に相当する値である。曲げひび割れ発生強度と繊維添加率との間に直線関係が成り立つとした場合に、この値を達成できる繊維添加率として PVA が 1.8Vol.%, AR が 0.8Vol.%, PP は達成できる添加率無しとの結果となった。その結果をもとに、若干の余裕を加味して、短繊維補強 GP 短まくらぎを試作するための各繊維の添加率を PVA は 2.0Vol.%, AR は 1.0Vol.% とした。PP は添加量により圧縮強度や曲げ試験時のひび割れ発生強度が低下する傾向が認められたことから 1.5Vol.% を選定した。

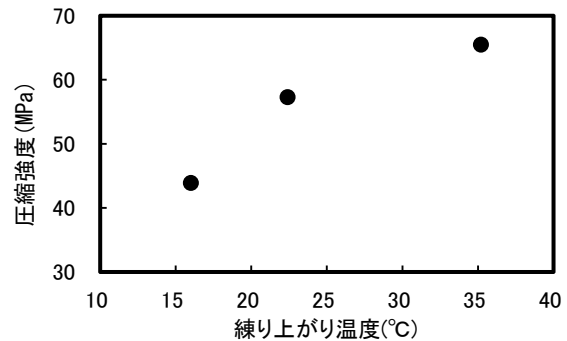


図-8 SF 後添加法で作製した GP モルタルの練り上がり温度と圧縮強度との関係

図-8 は、骨材等の材料の温度を冷蔵庫で冷して練り上がり温度を調整することにより、SF 後添加法における練り上がり温度と 80°C 10 時間養生直後の圧縮強度との関係を検討した結果である。図に示されるように SF 後添加法の場合、練り上がり温度と圧縮強度とに相関があり、練り上がり温度が低いと強度が得られないため、60MPa 程度の強度を得るためには 30°C 以上の練り上がり温度が必要であることがわかった。

4. 短繊維補強 GP 短まくらぎ

4.1 短繊維補強 GP 短まくらぎの試作

前項で選定した配合、繊維添加率に応じて GP 短まくらぎを試作した。なお、今回、短まくらぎ試作時の周囲温度が 5°C 程度と低く、練り上がり温度の低下が懸念された。一方、圧縮強度は表-1 に示されるようにその A/W に応じて大きくなる。そこで、図-8 のように 20MPa 程度の強度低下を起こしても所定の強度が得られるよう、A/W を 0.190 とした。試作短まくらぎの水準は、表-5 に示すとおりである。また、性能評価の比較として、市販のコンクリート短まくらぎも合わせて作製した。

表-5 試作した短まくらぎ

試験体名	組合せ			
	繊維種	添加率 (Vol.%)	鉄筋	
			種類	強度区分
PVA 無筋	PVA	2.0	SUS304-SD	295A
PP 無筋	PP	1.5		
AR 無筋	AR	1.0		
PVA 有筋	PVA	2.0		
PP 有筋	PP	1.5	SD295	295A
AR 有筋	AR	1.0		
コンクリート	無	0.0		

採用した短まくらぎは、営業線で用いられている短まくらぎの中で要求性能が高い水準のものを選定した。選定した短まくらぎの要求性能を表-6 に示す。試作した GP 短まくらぎの軸方向鉄筋の配筋は、ステンレス鉄筋と有機ポリマー繊維が複合的に抵抗することと配筋性能を考慮し表-7 のとおりとした。

表-6 要求性能

試験項目	曲げ試験	埋込栓 引抜き試験
保証荷重	29.4 kN	29.4 kN
外観	ひび割れのないこと	ひび割れのないこと
概要図		

表-7 配筋の概要 (短まくらぎ中央断面)

PVA 無筋, PP 無筋, AR 無筋	PVA 有筋, PP 有筋, AR 有筋	コンクリート
単位: mm		

配合は表-4 を基準とし、図-7 における繊維添加量と曲げ試験時のひび割れ発生強度の関係および図-8 の練り上がり温度と圧縮強度との関係を考慮して、表-8 のとおりとした。作製方法は図-1 に準拠し、短まくらぎの締固めでは、空隙が生じないように木づちや突き棒を用いて振動を加えて充填した。

また、短まくらぎ作製時にφ10cm×20cm および 10cm×10cm×40cm の供試体を採用し、各供試体は脱型後、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」、JIS A 1106

「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠し、圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度を測定した。

表-8 GP 短まくらぎの作製配合 (kg/m³)

試験体名	PVA 無筋, PVA 有筋	PP 無筋, PP 有筋	AR 無筋, AR 有筋
FA	549.7	552.5	555.3
BS	97.0	97.5	98.0
S	1293.3	1299.9	1306.5
SF	37.2	37.4	37.6
NaOH	76.3	76.7	77.2
水	178.6	179.4	180.4
JIS1 号 WG	14.9	14.5	14.7
ゲルコ酸 Na	12.9	13.0	13.1
繊維種	PVA	PP	AR
繊維添加量	26.0	13.7	13.9
繊維添加率	2.0	1.5	1.0

※繊維添加率は Vol. % 表示

4.2 短繊維補強 GP 短まくらぎの性状試験結果および性能確認試験結果

繊維を添加した GP のフレッシュ性状と硬化後の性状試験結果を表-9 に示す。割裂引張試験後の GP 試験体内部を確認した結果、フロー値が小さいにもかかわらず大きな空隙もなく充填不良は認められなかった。したがって、GP の流動性が普通セメントのそれとは異なることにより、フロー値が小さくても振動等により充填性能が確保されたと考えられる。一方、各試料とも目標圧縮強度である 50MPa を大きく上回り、図-2 から想定される圧縮強度よりやや大きくなった。これは周囲温度が 5℃程度と低いことから A/W を 0.190 とやや高くしたにもかかわらず、現場で NaOH 粉末を溶解して溶液を作製したため、その溶解熱で溶液温度が 60℃程度以上と高くなり、結果として練り上がり温度が高くなったためと考えられる。

表-9 GP のフレッシュ性状と硬化後の性状試験結果

試験体名	フレッシュ性状		硬化後の強度			
	フロー (mm), スランプ (cm)	練り上がり温度 (°C)	圧縮 (MPa)		割裂引張 (MPa)	曲げ (MPa)
			2 日	7 日	7 日	7 日
PVA 無筋 PVA 有筋	100×120	35	100.8	101.9	7.08	10.53
PP 無筋 PP 有筋	130×140	34	90.8	91.7	6.42	8.42
AR 無筋 AR 有筋	120×120	31	88.8	88.0	7.73	10.41
コンクリート	11.5	21	61.4	66.7	3.22	7.03

※目標圧縮強度 50MPa

繊維を添加した GP 短まくらぎの性能確認試験結果を表-10 に示す。PVA 無筋, PP 無筋, AR 無筋の曲げ試験結果は, 全試料とも繊維添加率試験において想定した保証荷重 29.4kN 付近でひび割れが生じ, PVA 無筋に関してはその保証荷重を満した。しかし, AR 無筋はひび割れ発生荷重が想定荷重よりやや小さくなった。この相違は供試体作製時と短まくらぎ試作時における繊維配向の程度が異なることによると考えられるが, 詳細は今後検討していく必要がある。

一方, PVA 有筋, PP 有筋および AR 有筋の曲げ試験結果は, 保証荷重 29.4kN を満足した。また, それらのひび割れ発生荷重を市販のコンクリート短まくらぎと比較すると, その比は 0.85~0.92 となり, 市販のコンクリート短まくらぎに近い性能を有する結果となった。埋込栓の引抜き試験結果は, 全 GP 短まくらぎが保証荷重を満足した。また, ひび割れ発生荷重を市販のコンクリート短まくらぎと比較すると, その比は 0.77~0.91 となり, 曲げ試験と同様に市販のコンクリート短まくらぎに近い性能を有する結果となった。

表-10 GP 短まくらぎの性能確認試験結果

試験体名	曲げ試験		埋込栓引抜き試験	
	保証荷重 29.4kN	ひび割れ発生 荷重 kN	保証荷重 29.4kN	ひび割れ発生 荷重 kN
PVA 無筋	○	30.0 (0.52)	○	62.0 (0.89)
PVA 有筋	○	52.9 (0.92)		
PP 無筋	×	27.6 (0.48)	○	54.0 (0.77)
PP 有筋	○	48.5 (0.85)		
AR 無筋	×	28.0 (0.49)	○	64.0 (0.91)
AR 有筋	○	50.4 (0.88)		
コンクリート	○	57.4 (1.00)	○	70.0 (1.00)

注1: 保証荷重 29.4kN 載荷時にひび割れが発生しないものを合格(○), ひび割れが発生するものを不合格(×)とする。

注2: 埋込栓の引抜き試験は引張鉄筋の有無が関係ないと考えられるため, 無筋の試験体で行った。

注3: () 内数値は, コンクリートの試験結果との比を示す。

注4: 試験は N=1 で行った。

5.まとめ

普通ポルトランドセメントを使用せず, 石炭灰とケイ酸アルカリ溶液を重合硬化反応させる GP 法により, ポリマー繊維で補強し, 引張鉄筋比を低減した短まくらぎ

を試作, 性能確認試験を行った。以下にその過程で得られた知見を記す。

- (1) GP 作製配合において, A/W が圧縮強度に大きく影響すること, Si/A は曲げ強度に影響し, 本試験では 0.35 近傍で曲げ強度が大きくなることが確かめられた。
- (2) PVA, PP, AR のポリマー繊維を添加した GP 硬化体の圧縮強度は, 無添加の GP 硬化体と比較して, 同等かやや低下した。一方, 曲げ強度, 割裂引張強度は繊維添加により大きく向上した。
- (3) PVA を 2.0Vol.%, 1.5Vol.%, あるいは AR を 1.0Vol.% 添加した有筋の GP 短まくらぎは, 曲げ試験および埋込栓の引抜き試験において, 保証荷重 29.4kN でひび割れが生じず短まくらぎの要求性能を満した。今後, 短繊維補強 GP 短まくらぎの耐久性などの性能評価を行い, 実用化を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 相原直樹, 辻村太郎, 上原元樹, 土屋広志: 鉄道用材料のLCAによる環境評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.6, pp.5-10, 2009.
- 2) 上原元樹: ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.4, pp.41-46, 2008.
- 3) 上原元樹, 佐藤隆恒, 杉本行弘: ジオポリマー硬化体の強度に影響するフライアッシュの反応性評価, 無機マテリアル学会第121回学術講演会講演要旨集, pp.64-65, 2010.
- 4) 上原元樹, 東原 実, 横川勝則: ジオポリマー法による環境負荷低減PCまくらぎの作製, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, pp.735-736, 2009.
- 5) 田村康将, 上原元樹, 佐藤隆恒, 山崎淳司: 石炭灰を主原料としたジオポリマーペーストの凝結特性, 無機マテリアル学会第123回学術講演会講演要旨集, pp.78-79, 2011.
- 6) Hardjito, D. and Rangan, B. V.: Development and Properties of Low-Calcium Fly ash-based Geopolymer Concrete, Reserch Report GC1, Faculty of Engineering Curtin University of Technology, pp.37-64, 2005.
- 7) 土木学会コンクリート委員会, 超高強度繊維補強コンクリート研究委員会: コンクリートライブラリー 113号 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), pp.11-12, 2004.