

# ジオポリマー法による繊維補強短まくらぎの試作

上原 元樹\* 佐藤 隆恒\*

Experimental Fiber Reinforced Short Sleeper by the Geopolymer Method

Motoki UEHARA Takatsune SATO

We fabricated two types of short sleepers using fiber-reinforced geopolymers instead of ordinary Portland cement with reduced use of steel rods which provide tensile reinforcement, and without any steel rods. Plug pull-out tests and bending tests on the fabricated short sleepers showed that the first type of sleepers, containing 1.5 vol% steel fibers, met the performance requirements of short sleepers without any steel rods, and the second type of sleepers, containing 1.5 vol% polyvinyl alcohol (PVA) fibers, 2.0 vol% polypropylene (PP) fibers, and 1.0 vol% aramid (AR) fibers, met the performance requirements of short sleepers with reduced use of steel rods.

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、非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液との反応により、ゼオライト類似のアルミニウム (Al) とケイ素 (Si) からなる無機ポリマー構造が生じてできる硬化体であり、その生成過程が岩石のそれと類似するためジオポリマー (GP) と名付けられた。その外観は、一般的なコンクリートと大差ないが、セメントコンクリートがカルシウム (Ca), Si を主成分とするのに対して、GP 硬化体がナトリウム (Na) あるいはカリウム (K) と Si, Al を主要成分とする点で大きく異なる。

GP 硬化体は、普通ポルトランドセメントを使用せず、その主原料が石炭火力発電所の副産物である石炭灰 (フライアッシュ, 以下 FA) や鉄鋼製造工程において副産物として発生する高炉スラグ (以下, BS) であることから、セメントコンクリートと比較しておよそ 80% の CO<sub>2</sub> 削減効果があり、かつ産業副産物を有効利用できることから低エネルギー社会への貢献も期待されている<sup>1)</sup>。また、GP 硬化体は、セメント硬化体の劣化要因であるアルカリシリカ反応、酸劣化、火災等に対する耐性が高いことが知られており<sup>2)</sup>、今までセメントコンクリートが使えなかった環境での使用も期待されている。

筆者らは、石炭灰を主原料とした GP 硬化体の研究を行い、その圧縮強度が使用溶液中の Na あるいは K 量を表すアルカリ量と水のモル比 (以下, A/W と記す) とおよそ比例関係を有すること<sup>2)</sup>、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<sup>3)</sup>。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) GP 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<sup>4)</sup>。

ここで、一般的なまくらぎは PC であるが、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、漏水対策等において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。

表 1 配合適正試験の配合

A/W	Si/A	水 / 粉体
0.150	0.25	0.283
	0.30	0.289
	0.35	0.286
	0.40	0.300
0.175	0.25	0.292
	0.30	0.295
	0.35	0.278
	0.40	0.289
0.200	0.25	0.286
	0.30	0.278
	0.35	0.274
	0.40	0.294

粉体：骨材=1:2 (質量比), A/W: アルカリ量と水のモル比, Si/A: Si 量とアルカリ量のモル比, 水 / 粉体: 水と粉体の質量比

\* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

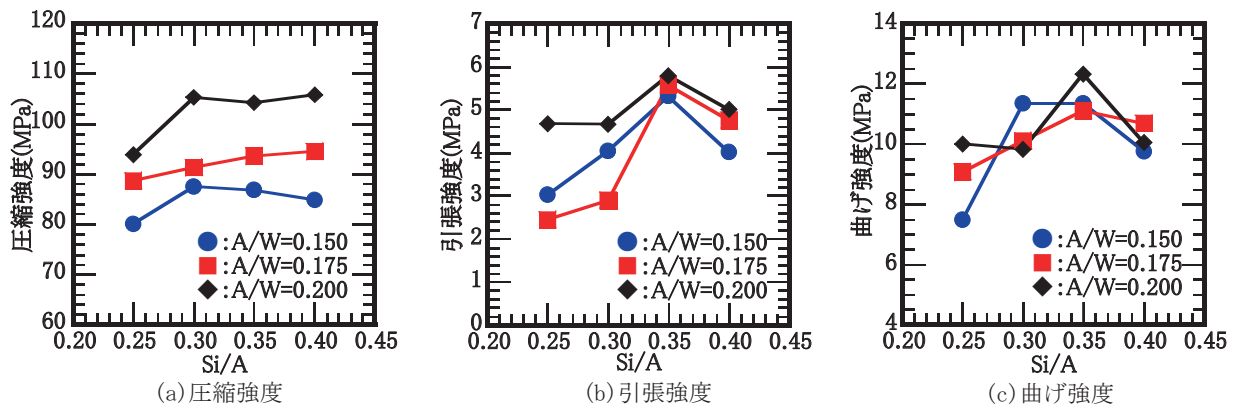


図1 各 A/W における圧縮、引張、曲げ強度と Si/A との関係

## 2. GP 硬化体の配合試験

### 2.1 試験方法

短まくらぎを作製する際、その規格の1つとして曲げ試験および埋込栓引抜き試験における保証荷重（規定載荷時にひび割れ発生しない）を満たすことが要求される。したがって、繊維補強のみ、もしくは鉄筋量を減らした短まくらぎを想定したとき、曲げ強度の大きい配合が望まれる。一方、GP 硬化体の圧縮強度に関しては A/W との相関があることがわかっている<sup>2)</sup>ものの、曲げ強度や引張強度と配合との関係が明らかになっていない。そこで、GP 硬化体の配合、すなわち各 A/W、Si と Na あるいは K 量とのモル比である Si/ アルカリ（以下、Si/A）と曲げ強度・引張強度との関係を明らかにし、短まくらぎに適する配合を選定するための試験を以下のように行った。

出発材料は、活性粉体として JIS I 種 FA および 4000 ブレーン BS を 85:15 の質量比で用いた。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) 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 A1113 「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて引張強度を、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 試験結果

図1に A/W、Si/A と各強度の関係を図示する。圧縮強度は、A/W に応じて高くなること、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、これまでの報告<sup>1)</sup>と一致する。一方、引張強度および曲

げ強度に関しては、A/W に関わらず Si/A が 0.35 付近で大きくなることがわかった。また、今回の配合では Si/A が 0.25 付近では、圧縮、引張および曲げ強度の低下が認められた。したがって、短まくらぎの試作では、曲げ強度の比較的高い Si/A=0.35 の配合を基本とした。

## 3. GP 硬化体における短繊維補強効果

繊維補強短まくらぎの試作に当たり、GP 硬化体における短繊維補強効果を検討した。ここで、繊維には様々な材質・特性があり、添加量、分散状況や配向性によっても硬化体の物性は異なってくる。そこで、本研究では、セメントコンクリート用補強材料として入手可能な種々の材質、繊維径、繊維長の短繊維を添加した GP 硬化体を作製し、繊維補強効果の基礎物性を検討した。

表2 試験配合、養生条件

繊維種	A/W	Si/A	水 / 粉体	養生
鋼	0.150	0.393	0.325	80°C -8h
PVA-A				
PVA-B	0.165	0.350	0.292	85°C -10h
PP				
AR				

粉体：骨材=1:2（質量比）、A/W：アルカリ量と水分量のモル比、Si/A：Si量とアルカリ量のモル比、水 / 粉体：水分量と粉体との質量比

表3 各繊維の性能

略称	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
鋼	13	0.16	2000	210000	7.85
PVA-A	18	0.20	975	27000	1.30
PVA-B	15	0.30	975	26000	1.30
PP	30	1.00	500	10000	0.91
AR	30	0.50	3500	74000	1.39

鋼：鋼繊維、PVA-A：ビニロン繊維 A、PVA-B：ビニロン繊維 B、PP：ポリプロピレン繊維、AR：アラミド繊維

### 3.1 短繊維補強 GP 硬化体の作製

表2に試験配合と養生条件を示す。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<sup>5)</sup>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、金属シリコン等を製造する際に、副産物として生成される超微粒子であるシリカフューム(SF)を使用し、かつこれを練混ぜ時に添加する(これをSF添加法とする)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、表2におけるA/W=0.165の試験ではK系材料を使用せずにGP硬化体を作製した。ただし、SF添加法では、数%程度圧縮強度が低下する傾向が認められることからA/Wは0.165とやや高めに設定した。一方、A/W=0.150の試料に関しては、その作製時期の関係から水ガラスを用いた一般的な作製法(以下、従来法とする)を用いた。

短繊維補強GP硬化体の作製に使用した各繊維の性能を表3に示す。鋼繊維はいわゆる超高強度用コンクリートに用いられるものである。ポリマー繊維は、繊維長の異なるビニロン繊維を2種類(以下PVA-A, PVA-B)、ポリプロピレン繊維1種類(以下PP)、アラミド繊維1種類(以下, AR)を用いた。これら短繊維と、BSで質量比として15%置換したJIS I種FAを原料とし、表2の配合のとおり、GP硬化体を作製して種々の実験に供した。SF添加法の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)を1分間空練りし、その後NaOH溶液を投入して2分間攪拌し、その後SFを投入し1分間、最後に流動化・遅延材としてグルコン酸Na粉末を投入し1分間攪拌後、φ10cm×20cmおよび10cm×10cm×40cmのモールドに充填密封し85°Cで10時間養生した。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」の三等分点載荷試験法に準拠し、圧縮強度、引張強度、曲げ強度を測定した。

### 3.2 実験結果

鋼繊維およびPVA-Aを使用したGP硬化体の各強度を図2に示す。鋼繊維を添加した試料は無添加試料と比較して、その添加量に応じて圧縮強度がやや増加した。一方、PVA-Aに関しては少量添加でやや増加し、添加量が多くなると、やや低下する傾向が認められた。引張・曲げ強度に関して鋼繊維は繊維添加量に応じて大きく向上したが、PVA-Aの増加量は小さかった。また、鋼繊維に関して、各ひび割れ発生強度に対して、引張・曲げ強度が大きく増進したが、PVA-Aはひび割れ発生強度とそれぞれの強度とにほとんど差がなかった。

図3はポリマー繊維に関して、やや繊維径の大きなPVA-B, PP, ARを添加したGP硬化体の各強度と繊維添加率との関係を示す。図3においては無添加のものと比較して、圧縮強度はPVA-BあるいはARを1.5vol%添加した試料を除いて、やや低下する傾向を示した。一方、引張・曲げ強度は、各ポリマー繊維添加により大きく増加し、ひび割れ発生強度はPVA-BやARを添加した試験体で、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。

図4および図5は鋼繊維およびPVA-Aを使用したGP硬化体の曲げ靱性試験結果である。それぞれの曲げ靱性係数は両繊維共に繊維量に応じて大きくなったが、特に鋼繊維の曲げ靱性係数は大きかった。なお、鋼繊維を2.0vol%添加したものは練り混ぜの段階でファイバボール(繊維同士が絡まってできるだま)を形成していたことから、曲げ強度、曲げ靱性が低下したと考えられる。

図6は、PVA-B, PP, ARを添加したGP硬化体の曲げ靱性試験結果である。なお、ここでの繊維添加量は、図3の試験における最低繊維添加量を基準としたが、PVA繊維に関しては、図3(c)における赤破線(短まくり試験に求められる保証荷重から計算された引張線

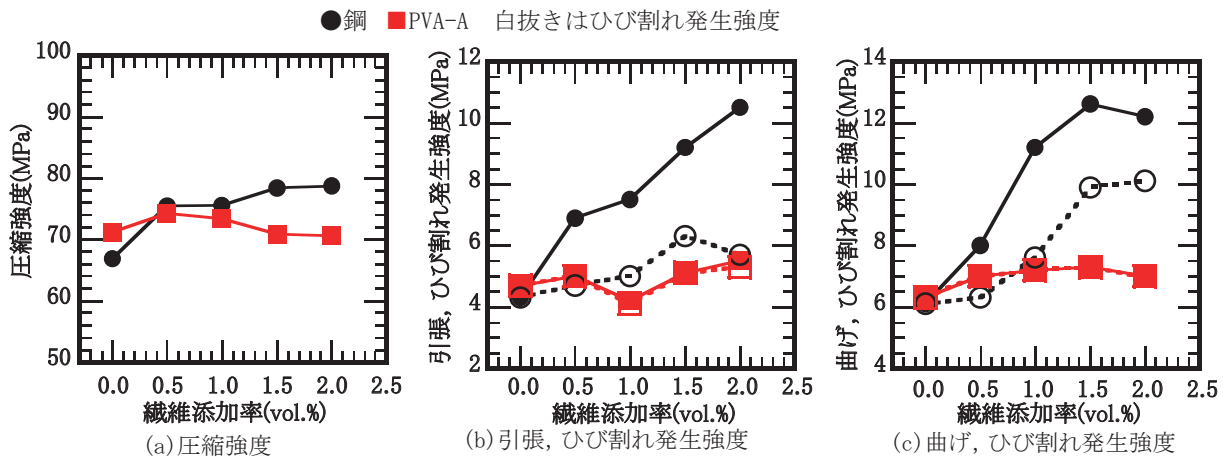


図2 鋼繊維およびPVA-A使用時の圧縮、引張、曲げ強度と繊維添加率との関係

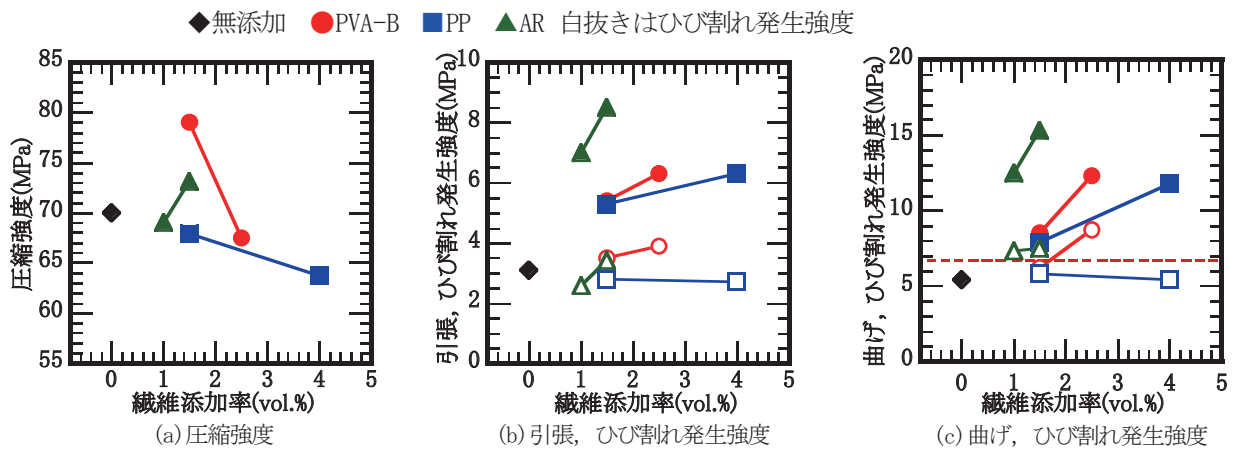


図3 各ポリマー繊維使用時の圧縮, 引張, 曲げ強度と繊維添加率との関係

応力に相当する値) を超える 2.0vol.% を選定した。AR および PVA-B は, ひび割れ発生時の荷重より大きな荷

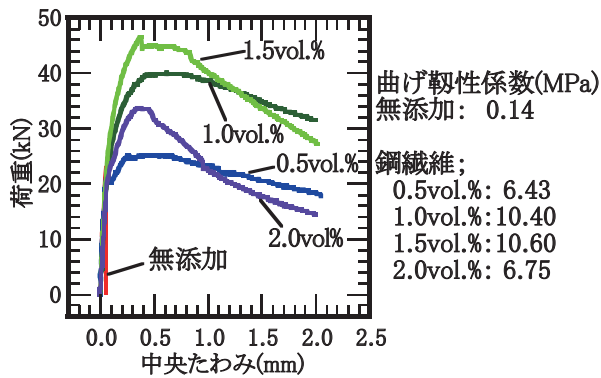


図4 鋼繊維使用時の荷重と中央たわみの関係

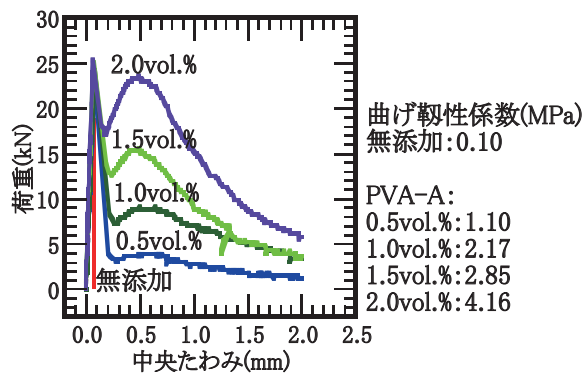


図5 PVA-A 使用時の荷重と中央たわみの関係

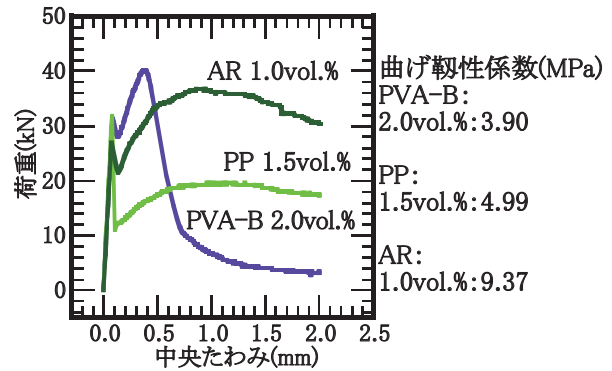


図6 各ポリマー繊維使用時の荷重と中央たわみの関係

重がそれ以降に観測されたが, PVA-B は比較的少ないたわみ量で荷重が小さくなった。一方, AR, PP に関しては, 比較的大きな荷重を維持した。これは, AR や PP では繊維が破断せず GP 硬化体の付着部分が破壊され脆弱化するまで荷重を維持したのに対して, 付着力が特に強く, 線径や繊維長が細く, 短い PVA-B は, 繊維の破断あるいは, すべり量が増大したときに強い化学的結合が喪失して引き抜きが生じるためと考えられる。

以上のことから, GP 硬化体の繊維補強に関して, 一般的なセメントコンクリートと同様に, 曲げ靱性の向上が可能であること, 繊維径等の選定により, 曲げ強度や引張強度の増進も見込めることがわかった。

表4 配筋の様子(短まくらぎ中央断面)

補強繊維種	鋼, PVA-B, PP, AR	鋼, PVA-B, PP, AR	市販短まくらぎ, 無添加
鉄筋の有無	無筋	有筋(引張鉄筋比低減)	有筋
配筋状況	単位: mm	単位: mm	単位: mm

表5 短まくらぎの配合 (kg/m<sup>3</sup>)

試験体名	無添加有筋	鋼無筋	無添加有筋 (低減)	PVA-B 無筋, PVA-B 有筋 (低減)	PP 無筋, PP 有筋 (低減)	AR 無筋, AR 有筋 (低減)
FA (フライアッシュ)	545.8	537.4	560.9	549.7	552.5	555.3
BS (高炉スラグ)	96.3	94.84	99.0	97.0	97.5	98.0
S (細骨材)	1284.2	1264.5	1319.7	1293.3	1299.9	1306.5
SF (シリカヒューム)	---	---	38.0	37.2	37.4	37.6
NaOH	---	---	77.9	76.3	76.7	77.2
KOH	72.2	71.14	---	---	---	---
水	139.5	137.3	182.2	178.6	179.4	180.4
JIS1 号 WG	111.7	110.0	14.9	14.3	14.5	14.7
減水剤	8.56	8.42	---	---	---	---
グルコン酸 Na	---	---	13.2	12.9	13.0	13.1
繊維量	0.0	117.8	0.0	26.0	13.7	13.9
繊維添加率 (vol.%)	0.0	1.5	0.0	2.0	1.5	1.0
アルカリ / 水 (モル)	0.150	0.150	0.190	0.190	0.190	0.190
Si/ アルカリ (モル)	0.393	0.393	0.350	0.350	0.350	0.350
水 / 粉体 (重量)	0.325	0.325	0.292	0.292	0.292	0.292
作製法*	従来法		SF 添加法			

\*：従来法とは水ガラスとアルカリ溶液を最初に混合  
SF 添加法とは水ガラスのケイ素成分を SF で補い後添加する方法

#### 4. 繊維補強短まくらぎの試作

##### 4.1 作製方法

作製した GP 短まくらぎの配筋の様子および配合を表 4 および表 5 に示す。今回試作した短まくらぎの規格は、営業線で実際に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。ポリマー繊維補強短まくらぎの軸方向の配筋は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」に従い最小鉄筋量の規定を満たした上で配筋性能を考慮している。ここで、「無添加有筋」は、市販コンクリート短まくらぎと同じ鉄筋・配筋のもの、「鋼無筋」は鋼繊維を添加し、かつ無筋構造のもの、「無添加有筋 (低減)」は引張鉄筋比を減らし、ステンレス鉄筋を使用したもの、「PVA-B 無筋」、「PP 無筋」、「AR 無筋」は、それぞれポリマー繊維 PVA-B, PP, AR を使用して無筋としたもの、「PVA-B 有筋 (低減)」、「PP 有筋 (低減)」、「AR 有筋 (低減)」は各繊維で補強し、引張鉄筋比を減らしてステンレス鉄筋を使用したものである。ポリマー繊維添加短まくらぎにおける繊維添加量は、短まくらぎの曲げ試験に求められる保証荷重 29.4kN 載荷時の引張縁応力に相当する値 6.7MPa (PP に関しては 6.7MPa を満たさなかつたため 2.0vol.% を選定) を超える繊維添加量を、図 3 (c) の曲げひび割れ発生強度から算出して決定した。なお、Si/A は、3 章の繊維添加試験時と同様の値とした。ここで、PVA-B, PP, AR 繊維を添加した試料の A/W は繊維添加試験時よりやや大きくした。これは、SF 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ず 30℃以上の温度が必要であ

ることに起因する。すなわち、これら繊維を使用して短まくらぎを試作した時の周囲温度が 0℃～5℃程度と低く、強度低下が懸念されたことから、短まくらぎを試作する配合は、性状試験時と比較して Si/A は同様としたが、A/W を 0.190 とやや大きくし、かつ水ガラスを少量使用することとした。

##### 4.2 試験結果

作製した GP 短まくらぎおよび市販コンクリート短まくらぎのフレッシュ性状と硬化後の性状試験結果を表 6 に示す。各試料とも目標圧縮強度である 50MPa を大きく上回り、ポリマー繊維に関しては図 3 から想定される

表6 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)	練り上がり温度 (°C)	圧縮 MPa	引張 MPa	曲げ MPa
			7 日	7 日	7 日
無添加有筋	243	5.0	66.9	4.30	6.10
鋼無筋	110	9.0	76.7	9.20	12.6
無添加有筋 (低減)	191	36	70.0	3.10	7.10
PVA-B 無筋 PVA-B 有筋 (低減)	110	35	101.9	7.08	10.5
PP 無筋 PP 有筋 (低減)	135	34	91.7	6.42	8.42
AR 無筋 AR 有筋 (低減)	120	31	88.0	7.73	10.4
市販コンクリート まくらぎ	11.5*	21	66.7	3.22	7.03

※目標圧縮強度 50MPa \*：スランプの値 (cm)

特集：材料技術

圧縮強度よりやや大きくなった。これは0～5℃と低い周囲温度を想定してA/Wを0.190とやや高くした上に、かつ現場で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℃以上と高くなり、結果として練り上がり温度が高くなって大きな強度が得られたためと考えられる。

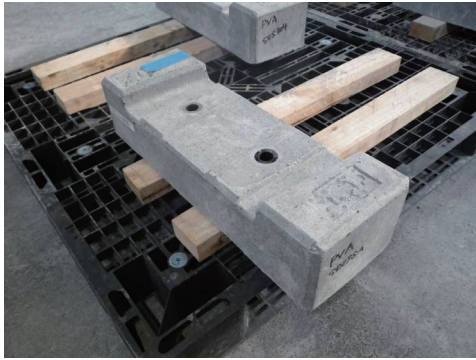


図7 GP短まくらぎの外観

図7に、試作したGP短まくらぎの外観を、表7にGP短まくらぎの性能確認試験結果を示す。「鋼無筋」短まくらぎは、曲げ試験および埋込栓引抜き試験共に、要求性能を満たした。また市販品と比較して、ややひび割れ発生荷重が低下したが、保証荷重である29.4kNと比較して1.5倍以上であり、無筋構造でも十分に短まくらぎとして成立することがわかった。

PVA無筋、PP無筋、AR無筋の曲げ試験結果は、全試料とも3章の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たした。しかし、AR無筋はひび割れ発生荷重が図3から想定される荷重より小さくなった。

表7 繊維補強短まくらぎの性能試験

試験体名	曲げ試験 (kN)		埋込栓引抜き試験 (kN)	
	ひび割れ発生荷重	保証荷重 29.4kN	ひび割れ発生荷重	保証荷重 29.4kN
無添加有筋 (多)	58.0	○*1	53.0	○*1
鋼無筋	45.0	○*1	79.0	○*1
無添加有筋 (低減)	43.2	○*1	41.7	○*1
PVA-B 無筋	30.0	○*1	62.0*2	○*1
PVA-B 有筋 (低減)	52.9	○*1		
PP 無筋	27.6	×*1	54.0*2	○*1
PP 有筋 (低減)	48.5	○*1		
AR 無筋	28.0	×*1	64.0*2	○*1
AR 有筋 (低減)	50.4	○*1		
市販短まくらぎ	57.4	○*1	70.0	○*1

合格：○，不合格：×

\*1 保証荷重時にひび割れが発生しないものが合格。

\*2 埋込栓引抜き試験は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。

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(低減)、PP有筋(低減)、AR有筋(低減)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鉄筋量の多い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。したがって、ポリマー繊維を使用した場合は、鉄筋数を減らしても、短まくらぎとして十分に成立することがわかった。

5. まとめ

普通ポルトランドセメントを使用せず、石炭灰を主原料としたGP法により、鋼繊維あるいはポリマー繊維で補強して、無筋あるいは引張鉄筋比を低減した短まくらぎを試作した。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、使用溶液のA/Wが圧縮強度に大きく影響すること、Si/A比は曲げ強度に影響し、本配合では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) GP硬化体において鋼繊維やポリマー繊維に関して一般的なコンクリートと同様な補強効果が得られた。
- (3) 無筋、あるいは鉄筋を減らした繊維補強GP短まくらぎにおいて、鋼繊維およびPVA-B繊維に関しては無筋で、その他の繊維では鉄筋量を減らした状態で、短まくらぎの要求性能を満足することを確かめた。

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