

# 論文 短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討

東原 実<sup>\*1</sup>・大木 信洋<sup>\*2</sup>・上原 元樹<sup>\*3</sup>

**要旨：**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ジオポリマー (GP) 法によるポリビニルアルコール (PVA) 短繊維補強 GP 短まくらぎの実用化に向け、GP の配合およびその製作方法を検討した。また、繊維量および鉄筋量を変えた矩形試験体を製作し、曲げ試験を行い、その力学的性状、補強効果を検討した。その結果、配合ではシリカフェーム添加法を適用し、高炉スラグ微粉末の置換率が 20~40%の範囲で実用的に製作可能となり、練混ぜ時間も短縮した。矩形試験体の曲げ試験では、PVA 繊維の補強効果が引張鉄筋比に換算して 0.5%程度であることを確認した。

**キーワード：**ジオポリマー、石炭灰、短まくらぎ、ポリビニルアルコール短繊維

## 1. はじめに

ジオポリマー (以下、GP と称する) 硬化体とは、石炭灰等のアルカリ活性な非晶質粉体とそれを活性化させるケイ酸アルカリ溶液 (以下、AS と称する) を混合し、その重合反応を利用して硬化させたものである。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 CO<sub>2</sub> 削減効果があること<sup>1)</sup>、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<sup>2)</sup>等が知られている。また、石炭灰や高炉スラグ微粉末 (以下、BS と称する) 等の産業副産物を有効利用できる観点から環境負荷低減効果が大きい。筆者らは、この GP 硬化体を利用してプレストレストコンクリート 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確認している<sup>3)</sup>。

一般的なまくらぎはプレストレストコンクリート製であるが、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製である。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、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短繊維 (ポリビニルアルコール、ポリプロピレン、アラミド) を用い、主たる荷重に対しては、鉄筋と有機短繊維が複合的に抵抗する短繊維補強 GP 短まくらぎを試作した。その結果、短まくらぎに要求される性能を満たすことを確認している<sup>4)</sup>。

本検討では、短繊維補強 GP 短まくらぎの実用化に向け、各種短繊維の中から強度、製作性、コスト面等を考慮して、ポリビニルアルコール (以下、PVA と称する)

短繊維を選択し、GP 配合およびその製作方法を改良した。また、改良した GP 硬化体の製作方法に基づいて、矩形試験体を製作し、曲げ試験を行った。以下にその結果を報告する。

## 2. GP 硬化体の製作方法

### 2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。

表-1 使用材料

材料名	記号	規格, 性質, 成分など	
フライアッシュ	FA	I 種 (JIS A 6201)	
高炉スラグ微粉末	BS	ブレン値 4000cm <sup>2</sup> /g (JIS A 6206)	
ケイ酸アルカリ溶液	AS	NaOH+水	
	SF	シリカフェーム (JIS A 6207)	
混和剤	SP	流動・遅延剤 (オキシカルボン酸塩系)	
繊維	ポリビニルアルコール	PVA	長さ 15mm, 直径 0.3mm 引張強度 975N/mm <sup>2</sup> 密度=1.3g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	絶対乾燥状態の質量に 2%加水	

### 2.2 改良の方針

本検討では、練混ぜ時間の短縮や可使時間の確保等の作業性に着目して、GP 配合の改良と GP 硬化体の製作方法の改良を行った。配合の改良は、ケイ酸アルカリ溶液に溶解するケイ素 (以下、Si と称する) 源について従来、JIS 1 号水ガラス (以下、WG と称する) とシリカフェーム (以下、SF と称する) を併用していたが、より可使時間の延長が期待できる SF のみ (以下、SF 添加法<sup>5)</sup>と称する) とした。製作方法の改良は、既往の報告<sup>6)</sup>を基本

\*1 (株) 安部日鋼工業 鉄道事業本部 鉄道技術課 (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 (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)

に図-1 に示すとおりとした。今回、SF の投入を FA, BS, S と同時に行い、SP と PVA 短繊維を同時に投入することで、材料投入の簡潔化が図れ、かつ練り混ぜ時間の短縮を図ることとした。

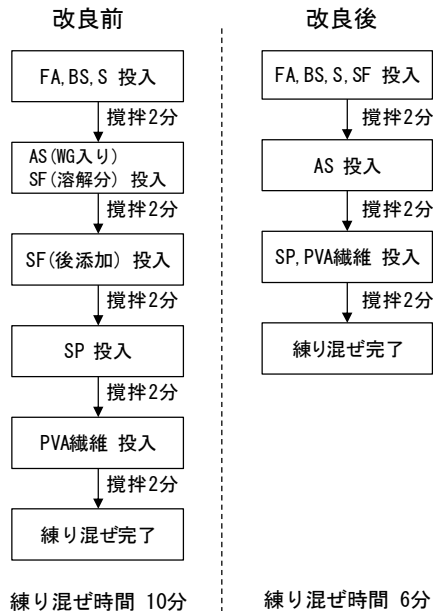


図-1 製作方法

### 2.3 配合

配合を表-2 に示す。短まくらぎの設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  以上の圧縮強度を得るためには、既往の研究<sup>4)</sup> からアルカリ水比 (モル比, 以下, AL/W と称する) は 0.15 程度で十分である<sup>4)</sup>。しかし, WG を使用せず, SF を混合攪拌時に溶解させる手法とした場合, 十分に SF を溶解させるためには, より AL/W が大きい方が望ましいことから AL/W=0.20 を選定した。また, 筆者らが報告した短まくらぎの試作事例において, 高炉スラグ微粉末置換率は, WG を併用していたことから, 可使時間を考慮して 15~25% (質量比) としていた。しかし, GP 硬化体の BS 置換率を大きくすると遮塩性が高まる<sup>5)</sup>こと, WG を使用しない方法では BS 置換量が多い場合でも十

分な可使時間が得られることから, 従来より BS 添加率を大きくし, 20%, 30%, 40%とした。ケイ素アルカリ比 (モル比, 以下, Si/AL と称する) は, Si/AL=0.25~0.40 の範囲で BS 置換率=15%の条件において Si/AL が 0.35 近傍で曲げ強度が大きくなる傾向が確認されている<sup>4)</sup>が, SF 添加法では BS 置換率に応じて必ずしもそうならないことも報告されている<sup>5)</sup>。本検討では, BS 置換率が 15% 以上の場合の Si/AL との関係把握するため, Si/AL を 0.15, 0.25, 0.35 とした。

### 3. 短繊維補強 GP 硬化体の基本特性

#### 3.1 短繊維補強 GP 硬化体の製作

短繊維補強 GP 硬化体の製作は, 図-1 に従い, 二軸強制練りミキサー (公称容量=0.06m<sup>3</sup>) で攪拌したのち, 型枠に充て込んで 80°C で 10 時間の蒸気養生 (上昇: 80°C / 3 時間, 降下: 除冷) を行った。

#### 3.2 短繊維補強 GP 硬化体の性状試験

フレッシュ性状試験は, JIS R 5201「セメントの物性試験方法」に準拠し, フロー試験を実施した。硬化後の性状試験は, 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」, JSCE-G522「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 (案)」, JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に準拠し, 圧縮強度, 割裂引張強度, 曲げ強度, 乾燥収縮ひずみを測定した。各試験に用いた供試体は,  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  (圧縮強度, 割裂引張強度, 乾燥収縮ひずみ),  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$  (曲げ強度) とした。なお, 各強度試験の材齢は 7 日とした。

#### 3.3 短繊維補強 GP 硬化体の性状試験結果

##### (1) フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-3 に示す。また, 配合 7 のフロー (15 打) を写真-1 に示す。筆者らが過去, 短繊維補強 GP 硬化体製作時の外気温度は 5°C で,

表-2 配合

配合	BS 置換率 (%)	Si/AL	AL/W	PVA (vol. %)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					FA+BS	AS	SF	SP	S	W
1	20	0.15	0.20	3	654.4	98.7	22.7	26.6	1117.5	218.4
2		0.25			648.2	97.9	37.5	26.4	1107.1	216.4
3		0.35			642.9	97.0	52.0	26.2	1097.8	214.6
4	30	0.15			666.1	98.7	22.7	26.6	1117.5	218.4
5		0.25			660.0	97.9	37.5	26.4	1107.1	216.4
6		0.35			654.4	97.0	52.0	26.2	1097.8	214.6
7	40	0.15			678.5	98.7	22.7	26.6	1117.5	218.4
8		0.25			672.2	97.9	37.5	26.4	1107.1	216.4
9		0.35			666.5	97.0	52.0	26.2	1097.8	214.6

※BS 置換率 (質量比) : BS/(FA+BS)

60N/mm<sup>2</sup>程度の圧縮強度を得るために練り上がり温度を30℃以上確保する必要があった<sup>4)</sup>。そのため、AS 温度を70℃程度で管理していた。本検討では、練り混ぜ時の外気温度が30℃であったため、急激な凝結を避ける対策として、AS 温度を常温で使用することとした。フローに関しては、配合1～9 共に170mm 程度の流動性が確保でき、型枠への充てん等の作業が容易であることを確認した。



写真-1 配合7のフロー(15打)

表-3 フレッシュ性状試験結果

配合	CT (°C)	フロー(mm)	
		0打	15打
1	38[29]	125×140	170×185
2	30[25]	120×140	160×180
3	35[26]	130×135	170×175
4	35[28]	135×155	160×190
5	32[25]	120×130	160×175
6	34[28]	135×150	170×180
7	36[28]	130×150	170×180
8	31[25]	125×125	160×170
9	36[28]	135×155	170×185

※[ ]内数値は、練り混ぜに使用したAS 温度を示す。

## (2) 硬化後の性状試験結果

強度試験結果を表-4 に示す。各試験の平均値を用いて、各強度、BS 置換率とSi/AL の関係を図-2, 3, 4 に示す。本検討では、図-1 に基いて、SF をFA, BS と同時に添加した。その結果、練混ぜ時間を4分短縮しても表-4 に示すように目標とする圧縮強度が得られた。また、圧縮強度は、既往の研究<sup>5)</sup>と同様にBS 置換率が

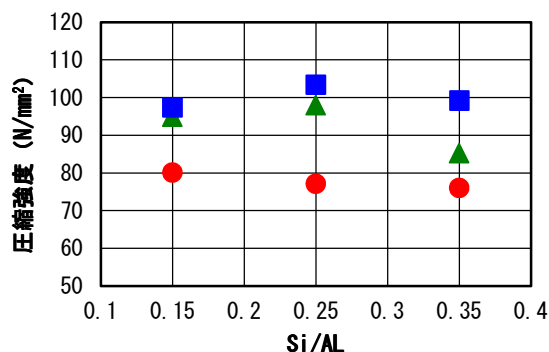


図-2 圧縮強度とSi/AL の関係

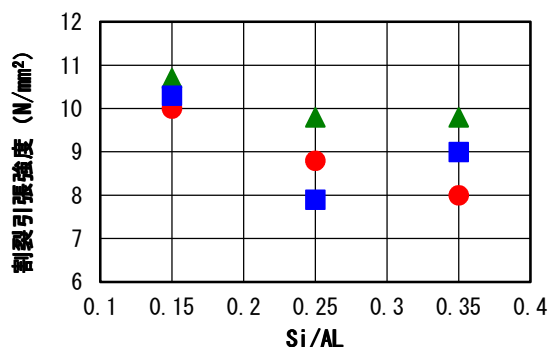


図-3 割裂引張強度とSi/AL の関係

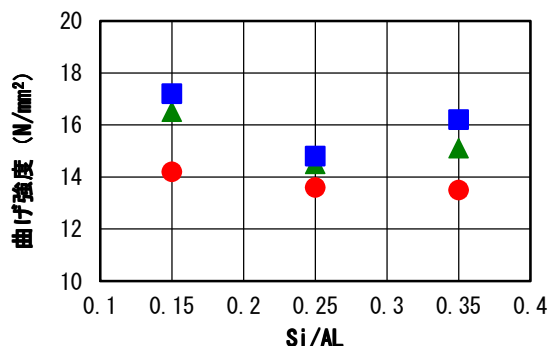


図-4 曲げ強度とSi/AL の関係

表-4 強度試験結果 (材齢7日)

配合	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )				曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
	No. 1	No. 2	No. 3	平均値	No. 1	No. 2	No. 3	平均値	No. 1	No. 2	No. 3	平均値
1	82.0	78.7	79.7	80.1	9.04	10.50	10.60	10.05	15.3	13.1	14.2	14.2
2	76.6	77.8	76.8	77.1	8.13	9.41	8.96	8.83	14.5	12.3	14.0	13.6
3	76.8	75.3	75.9	76.0	7.37	9.17	7.48	8.01	13.8	13.4	13.4	13.5
4	95.2	92.1	97.3	94.9	10.20	11.81	9.96	10.66	17.9	16.6	15.0	16.5
5	100.4	99.7	93.5	97.9	11.27	9.90	8.24	9.80	15.2	15.5	12.8	14.5
6	87.9	80.3	87.3	85.2	11.06	9.01	9.25	9.77	14.5	16.1	14.7	15.1
7	95.4	100.4	96.4	97.4	11.36	7.97	11.57	10.30	17.8	18.2	15.7	17.2
8	105.4	102.2	102.6	103.4	8.51	7.32	8.04	7.96	15.0	15.2	14.2	14.8
9	99.5	99.1	99.0	99.2	8.09	9.15	9.66	8.97	16.3	15.1	17.1	16.2

きくなるほど、大きくなる傾向が得られた。しかし、Si/AL に対して圧縮強度は、BS 置換率毎に最も大きくなる配合が異なった。割裂引張強度は、BS 置換率が 30% で強度が大きくなる傾向となり、特に BS 置換率に対する傾向が他の強度と異なった。これは、PVA 繊維の配向性や、BS から生成する物質と FA から生成する GP 物質と PVA 繊維との付着強度の相異によるとも考えられるが、詳細は今後さらに検討する必要がある。曲げ強度は、BS 置換率が大きくなるほど、強度も大きくなる傾向が得られた。なお、繊維補強をせず WG を用いて作製した既往の研究では、Si/AL=0.25~0.40 の範囲で曲げ強度が 0.35 近傍で大きくなる傾向であった<sup>4)</sup>が、今回、0.15 で大きくなる傾向が認められた。これは、今回 WG を使用しておらず、硬化前の粘性が異なることや GP 硬化体と繊維との相互作用が、Si/AL によって異なるためと考えられるが、詳細はさらに検討する必要がある。

短繊維補強 GP 硬化体の乾燥収縮ひずみ測定結果を図-5 に示す。短繊維補強 GP 硬化体の乾燥収縮ひずみは、BS 置換率が大きくなるほど、小さくなる傾向が得られた。また、乾燥収縮ひずみに与える影響は、Si/AL よりも BS 添加率の方が大きいことがわかった。なお、PVA 繊維で補強した GP 硬化体の乾燥収縮ひずみは、水中浸漬を行った場合、PVA 繊維補強しない GP 硬化体よりも大きいことが報告されている<sup>7)</sup>。これは、試験開始前に行う水中養生時に PVA 繊維が水分を吸水したことが試験結果に影響していると推察されている。一方、繊維補強しない GP 硬化体において、BS 置換率の範囲は異なるが、本試験ほど乾燥収縮ひずみと BS 置換率との相関は明確ではない<sup>5)</sup>。したがって、BS 置換率が大きくなり緻密化することで、水中浸漬期間における水分浸透量が少なくなり、すなわち PVA 繊維の水分吸水量が小さくなるため、BS 置換率と乾燥収縮ひずみの相関が明確になったものと考えられる。

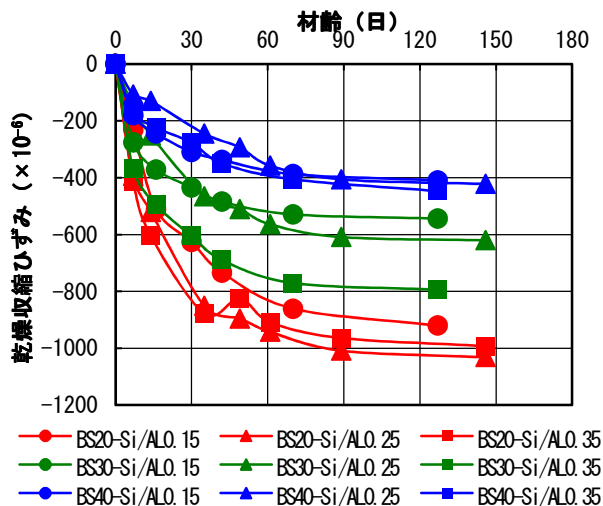


図-5 乾燥収縮ひずみ測定結果

#### 4. 短繊維補強 GP 矩形試験

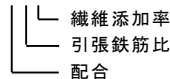
##### 4.1 矩形試験体の製作

矩形試験体の製作条件を表-5 に示す。配合は、図-4、図-5 の結果から、比較的良好な強度、乾燥収縮特性が得られた BS 置換率が 40% で Si/AL が 0.15, 0.35 である 7 と 9 を選定した。繊維添加率は、繊維の補強効果を確認するため、0vol.%, 3vol.% とした。鉄筋の種別は、短まくらぎで使用されている SD295A とし、引張鉄筋比は、D10 を用いて 1%, 2% を設定した。矩形試験体の断面は、短まくらぎに近い形状 (図-6) とした。

表-5 矩形試験体製作条件

試験体	配合	引張鉄筋比	PVA 繊維添加率 (vol.%)	製作数量 (体)
710	7	1%	0	1
713			3	3
720		2%	0	1
723			3	3
910	9	1%	0	1
913			3	3

例: 710



単位: mm

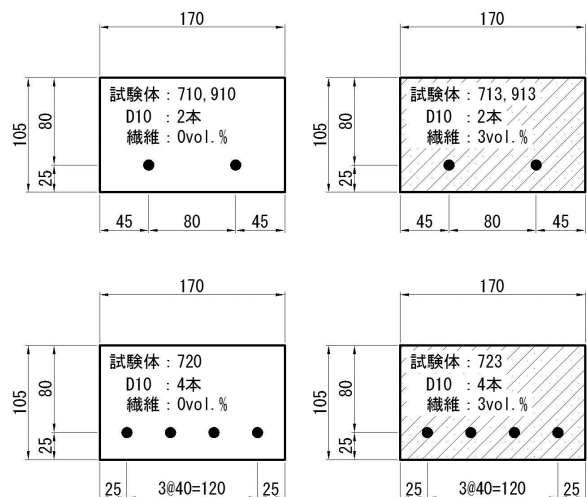


図-6 断面図

##### 4.2 矩形試験体の性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-6 に示す。材齢 7 日における圧縮強度試験結果を表-7 に示す。本試験体製作時の外気温度は 22°C であった。今回、練り上がり温度が 27°C 以上の場合には、AS を常温で使用しても所定の強度が得られることがわかった。

表-6 フレッシュ性状試験結果

試験体	CT (°C)	フロー(mm)	
		0打	15打
710, 720	27[22]	185×190	215×230
713, 723	29[22]	125×140	160×170
910	29[22]	205×205	230×235
913	32[23]	130×140	160×180

※[ ]内数値は、練り混ぜに使用したAS温度を示す。

表-7 圧縮強度試験結果 (材齢7日)

試験体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
	No. 1	No. 2	No. 3	平均値
710, 720	98.8	110.0	101.3	103.4
713, 723	102.7	100.4	102.0	101.7
910	104.4	106.5	109.6	106.8
913	100.2	97.6	99.7	99.2

### 4.3 矩形試験体の曲げ試験

#### (1) 試験概要

曲げ試験概要を図-7に示す。載荷方法は、一般的なコンクリート製まくらぎの曲げ試験が中央一点載荷であることから、本試験も同様とした。曲げ試験の-spanは、曲げやせん断に対する補強効果を把握するため、引張鉄筋比1%である試験体710, 910が曲げ破壊、引張鉄筋比2%である試験体720がせん断破壊となるように650mmとした。

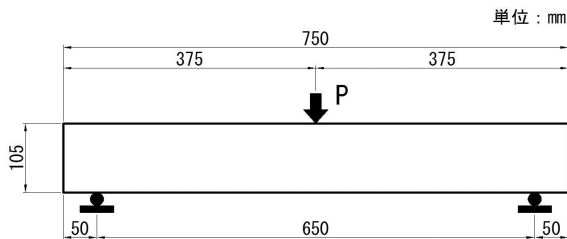


図-7 試験概要

#### (2) 試験結果

曲げ試験結果を表-8に示す。曲げ耐力およびせん断耐力の計算値は、GP硬化体を一般的なコンクリートとみなして算出した値である。試験体710, 720, 910の破壊荷重は、それぞれ計算値を上回った。また、破壊形態は、試験体710, 720が曲げ破壊、試験体910がせん断破壊となり、計算値から想定した破壊形態と一致した。このことから、今後、GP硬化体の応力-ひずみ曲線を検討する必要があるが、繊維補強しないGP硬化体も一般的なコンクリートと同様に計算してもよいことがわかった。

試験体710, 713, 720の荷重と中央変位の関係を図-8に示す。試験体713-No.3は、同一の配合による試験体を3体測定した中の破壊荷重最小値である。繊維の補強効果は、試験体破壊時の荷重が概ね試験体710と720の中間値であることから、引張鉄筋比に換算して0.5%程度となった。図-10に示すように試験体720と723の試験体破壊時のひび割れ形態を比較した場合、試験体720は、せん断破壊であったが、試験体723は、曲げ破壊となった。また、試験体713, 913に斜めひび割れがなかったことから、繊維補強効果は、引張鉄筋比1%, 2%ともにせん断補強にも現れた。

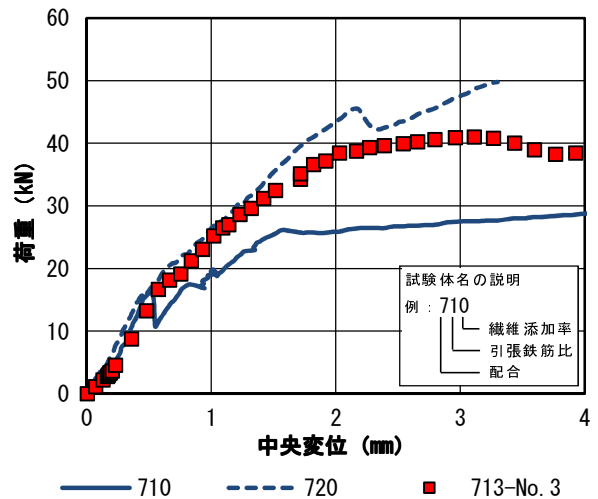


図-8 荷重と中央変位の関係 (試験体713の最小値)

表-8 曲げ試験結果 (材齢7日)

試験体	配合	引張鉄筋比	繊維添加量 (%)	計算値			実測値				
				耐力(kN)		破壊形態	破壊荷重(kN)				破壊形態
				曲げ	せん断		No. 1	No. 2	No. 3	平均値	
710	7	1%	0	24	30	曲げ	29[18]			29[18]	曲げ
713			3				43[30]	44[28]	41[27]	43[28]	曲げ
720		2%	0	47	38	せん断	50[26]			50[26]	せん断
723			3				69[37]	72[36]	70[44]	70[39]	曲げ
910	9	1%	0	24	30	曲げ	30[18]			30[18]	曲げ
913			3				46[29]	38[28]	40[25]	41[27]	曲げ

※[ ]内数値は、ひび割れ発生荷重を示す。

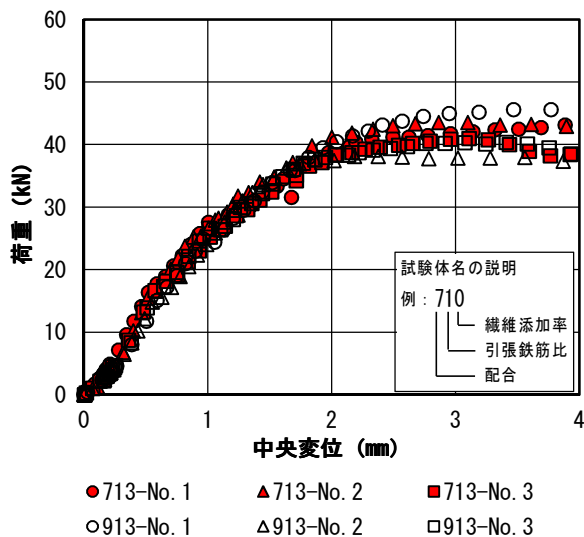


図-9 荷重と中央変位の関係 (試験体 713, 913)

試験体 713, 913 の荷重と中央変位の関係を図-9 に示す。試験体 713 と 913 の荷重と中央変位の関係は、同一の配合による試験体におけるばらつきも少なく、概ね一致する結果となった。このことから、Si/AL が 0.15, 0.35 による力学的な差異が小さいため、今後、乾燥収縮ひずみ等の結果を踏まえ、Si/AL を選定すればよいことがわかった。

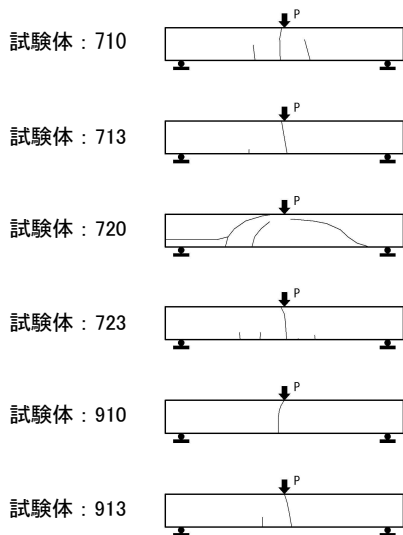


図-10 試験体破壊時のひび割れ

## 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 法によるPVA短繊維補強GP 短まくらぎの実用化に向け、GP 配合およびその製作方法を検討した。また、繊維量および鉄筋量を変えた矩形GP試験体を製作し、曲げ試験を行い、その力学的性状、補強効果を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 従来はSFを練り混ぜ時に後添加していたが、FA、BSと同時に添加することで練混ぜ時間を40%短縮しても同様の強度が得られた。
- (2) 短繊維補強GP 硬化体の乾燥収縮ひずみは、本試験の範囲では、BS 置換率が大きくなるほど、小さくなる傾向が得られた。また、乾燥収縮ひずみに与える影響は、Si/AL よりもBS 置換率が大きいことがわかった。
- (3) 矩形試験体の曲げ試験において、BS置換率40%でSi/ALが0.15, 0.35の荷重と変位曲線が概ね一致する結果となった。このことから、Si/ALが0.15, 0.35による力学的な差異が小さいため、今後、乾燥収縮ひずみ等の結果を踏まえ、Si/ALを選定すればよいことがわかった。
- (4) 矩形試験体の曲げ試験において、引張鉄筋比1%のPVA短繊維の補強効果は、引張鉄筋比に換算して0.5%程度であった。また、引張鉄筋比1%、2%のPVA短繊維の補強効果は、せん断補強にも現れた。

今後、本検討で得られたGP配合および製作方法を用い、短まくらぎを試作し、その耐荷力等を確認していく予定である。

## 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, 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, pp.735-736, 2009
- 4) 佐藤 隆恒, 大木 信洋, 東原 実, 上原 元樹: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2024-2028, 2013
- 5) 上原 元樹, 南 浩輔, 松林 卓, 梶田 秀幸: ジオポリマー硬化体の配合と諸性質, 土木学会第69回年次学術講演会, pp.97-98, 2014
- 6) 東原 実, 大木 信洋, 上原 元樹: 繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎試験, 土木学会第69回年次学術講演会, pp.95-96, 2014
- 7) 南 浩輔, 松林 卓, 船橋 政司: ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 1957-1962, 2013