

論文 異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度発現性および簡易注入試験に関する研究

五百蔵 沙耶*1・伊藤 彰利*2・畑中 重光*3

要旨: 本研究では、ジオポリマーは凝結時間が短く、耐候性および耐酸性などに優れるという点に着目して、ひび割れ注入材としての活用を目指す。本報では、比表面積が異なる高炉スラグ微粉末を3種類使用し、フロー値、凝結時間、圧縮強度を確認した。その後、塩ビ板による簡易注入試験を行った。その結果、比表面積が大きい程、圧縮強度は大きく、凝結時間は短くなることが確認された。注入試験の結果は、溶液粉体比が0.5の場合、ひび割れ幅0.2mmには5cm程度の注入深さだったが、溶液粉体比が0.7の場合、25cm以上注入可能となった。また、浸透速度は比表面積が大きい程早くなる傾向が見られた。

キーワード: ジオポリマー、ひび割れ注入材、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、比表面積

1. はじめに

コンクリート構造物にひび割れが発生すると、美観・外観を損なうだけでなく、雨水の浸透などの影響で、構造物自体の耐荷力・耐久性低下の原因となる¹⁾。ひび割れ注入工法には、エポキシ樹脂やアルリル樹脂等の有機系材料と、ポリマー系の無機系材料が使用されている。一般的に使用されるエポキシ樹脂は、付着やひび割れ追従性能が優れている。しかし、紫外線抵抗性、耐火性に劣り、施工時の湿潤面での接着不良が生じやすく、引張強度、熱膨張係数および弾性係数などがコンクリートとは同等ではないため、補修部と既存部の相違が生じるなどの問題がある。ポリマーセメント系の場合は、セメントの水和生成物としてのCa(OH)₂結晶やC-S-Hゲルが存在し、耐酸性や耐火性などが劣ることが挙げられる²⁾。

ジオポリマー(以下、GPと記す)は、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などのアルミナシリカ粉末と、珪酸ナトリウム水溶液(水ガラス)や水酸化ナトリウム水溶液などのアルカリシリカ溶液との縮重合反応によって得られる無機系材料である。GPはセメントを使用せず、産業廃棄物・副産物を主原料としているので、近年、環境配慮型の新建築材料として注目されている。さらにGPは凝結時間が短く、既存コンクリートおよび鉄筋との接着が良い、耐酸性、耐熱性、塩分浸透抵抗性が極めて優れているという特徴がある。したがって、GPには、これまでセメントコンクリートが適用できなかった環境下での利用が期待されている³⁾。

本研究では、GPのひび割れ注入材として利用することを目標とし、本実験では、高炉スラグ微粉末(以下、BSと記す)の粒子の細かさに着目し、異なる比表面積のBS(4000, 6000, 8000)を使用した場合のフロー値、凝結

時間、圧縮強度を測定した。また、簡易的にひび割れ注入性能を調べるため、塩化ビニル板(以下、塩ビ板と記す)で0.2mm幅の擬似的ひび割れ試験体を作成し、GPの注入実験を行い、GPのひび割れ注入性能を確認した。

2. 実験概要

本実験では、文献⁴⁾⁵⁾をもとに、4000ブレーンのBSで、30N/mm²以上の圧縮強度および凝結の始発時間がJIS R 5210「ポルトランドセメント」で規定される1時間以上を満たす配(調)合を選択し、BSが粉体に占める割合(以下、BS置換率と記す)、BSの比表面積を変えた場合のフロー値、圧縮強度、凝結時間について実験を行い、その後注入実験を行う。

2.1 要因と水準

表-1に、実験の要因と水準を示す。BS置換率を0, 20, 40%の3水準、BSの比表面積を4000, 6000, 8000の3水準設けた。溶液粉体比(以下、W/Pと記す)は0.5

表-1 要因と水準

粉体比 FA:BS (%)		BS 比表面積	溶液粉体比 W/P	溶液比
FA 100	BS 0		0.5	2:1
FA 80	BS 20	4000		
		6000		
		8000		
FA 60	BS 40	4000	0.5	
		6000	0.7*1	
		8000		

*1: フロー試験, 圧縮強度試験, 注入試験のみ

*1 三重大学工学部建築学科 大学生 (学生会員)

*2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

表—2 使用材料

	記号	材料名	比表面積 (cm ² /g)
粉体 (P)	FA	フライアッシュ I種 (JIS A 6201)	5650
	BS	高炉スラグ微粉末 4000 級 (JIS A 6206)	4120
		高炉スラグ微粉末 6000 級 (JIS A 6206)	6100
		高炉スラグ微粉末 8000 級 (JIS A 6206)	8000
溶液 (W)	WG2	水ガラス 2号 原液	
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	

に、溶液の種類は WG2:NH=2:1 で一定とした。フロー試験、圧縮強度試験、注入試験は、BS 置換率 40% の場合のみ、W/P=0.7 についても行った。

2.2 使用材料および配(調)合

表—2 に、実験の使用材料を示す。活性フィラーとして、JIS A 6201 に規定されているフライアッシュ JIS I 種 (以下、FA と記す)、JIS A 6206 に規定されている 3 種類の BS ブレーン 4000 級、6000 級および 8000 級 (以下、それぞれ 4000、6000、8000 と記す) を使用した。使用した活性フィラーの粒度分布を 図—1 に示す。使用溶液として、水ガラス 2号の原液 (以下、WG2 と記す) および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下、NH と記す) を使用した。粒度分布の図から、ピークの値が一番細かい粉体は FA ということが分かる。

表—3 に W/P=0.5 の場合、表—4 に W/P=0.7 の場合に使用したジオポリマーの配(調)合表を示す。BS はすべてのブレーン値で同じ配(調)合を用いた。

2.3 試験項目および試験方法

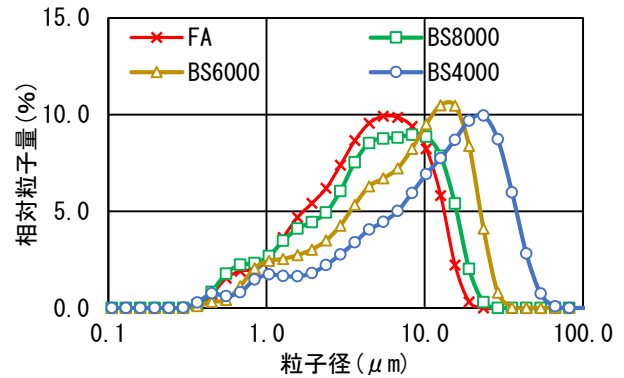
溶液を入れる前に粉体を予め空練りし、溶液を投入し、60 秒間練り混ぜた。その後 30 秒間掻き落としを行い、さらに 120 秒間練り混ぜた。溶液は 2 種類を予め混合した状態で粉体に投入した。

(1) フロー試験

JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のモルタルフロー試験に準拠して測定した。

(2) 凝結時間試験

JISA 1147「コンクリートの凝結時間試験方法に準拠したプロクター貫入抵抗試験」に基づき測定した。プロクター貫入抵抗試験の貫入針は、断面積が 25mm² のものを使用し、試験容器は、φ160×160mm の円筒容器を使用した。ここでは、凝結の始発時間はコンクリートと同様、



図—1 粒度分布

表—3 配(調)合表 (W/P=0.5)

記号 (粉体比)	単位量 (g/L)			
	FA	BS	WG2	NH
FA100	1265.8	0.0	421.9	211.0
FA80BS20	1036.7	259.2	432.0	216.0
FA60BS40	796.5	531.0	442.5	221.3

表—4 配(調)合表 (W/P=0.7)

記号 (粉体比)	単位量 (g/L)			
	FA	BS	WG2	NH
FA60BS40	670.7	447.1	521.6	260.8

貫入抵抗値が 3.5N/mm² の時点、終結時間は、同値が 28N/mm² の時点とした。

(3) 圧縮強度試験

硬化後の供試体に対して、材齢 1, 7, 28 日における圧縮強度試験を行った。材齢 1 日は 60℃ で 27 時間の加温養生とし、材齢 7, 28 日は 20℃, 60%RH の環境で養生を行った。供試体は φ50×100mm の円柱供試体に各調査 9 本ずつ打ち込んだ。

(4) 注入試験

図—2 に試験体の寸法を、図—3 に試験体断面図を、実際の試験体を写真—1 に示す。既往の研究を参考にし、簡易的なひび割れ幅を作製した。作製方法は、塩ビ板 (厚さ 5mm) の間に設定ひび割れ幅である 0.2mm のテフロンシートを挟み、ボルトでしっかりと締める。その後、12 個のクリップを周囲に止めた後、スケールルーペで注入口の幅を測定し、所定の幅となっているかを確認する。確認後、シーリングをし、翌日、注入試験を行った。ゴムで圧力を加え、注入圧力は 0.2MPa とし、温度は実験室内温度 (約 8℃~13℃) の条件下で行った。測定項目は、所定のひび割れ幅への注入の可否と 5cm ごとの

到達時間を調べた。本実験では、ひび割れ注入工法は、幅 0.2~1.0mm の範囲で適用されることから、ひび割れ幅を 0.2mm に設定し、実験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 フロー値

図—4 (a) に W/P=0.5 における 15 打フロー試験結果を、(b) に粉体比 FA60BS40 における 0 打フロー試験結果を示す。(a) から、比表面積が同じで、BS 置換率が 20~40% までの場合、BS 置換率のフロー値への影響はほとんど見られなかった。また、比表面積が大きいほど、フロー値は減少する傾向が見られる。これは、比表面積が大きくなるほど溶液との接触面積が増えたためだと考えられる。(b) から、W/P が大きくなるとフロー値は増加した。これは、溶液量が増えたためだと考えられる。また、0 打フロー値とビデオ映像から判断するフロー速度には相関の関係があったため、0 打フロー値の大小から粘性

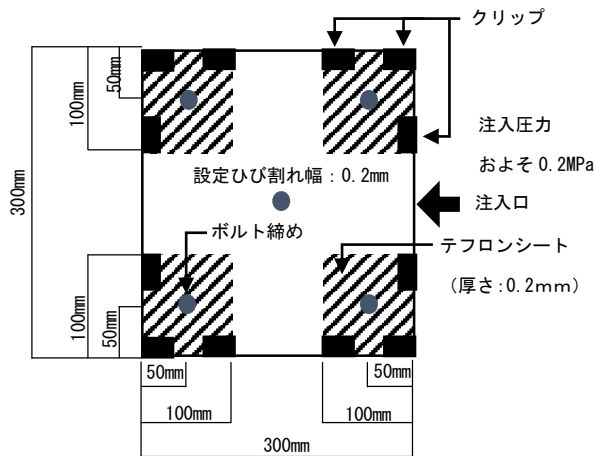
の評価ができるかと判断した。

3.2 凝結時間

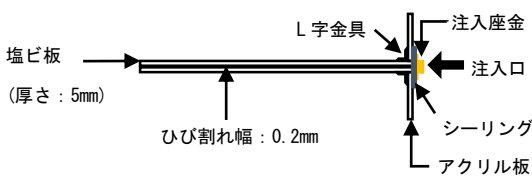
表—5 に、各種配(調)合について、凝結の始発時間・終結時間の結果を示す。また、図—5 に貫入抵抗値の時刻歴、図—6 に圧縮強度と凝結時間の関係を示す。図—5 は (a) に FA100% の場合、(b) に粉体比 FA80BS20, FA60BS40 の場合の貫入抵抗値の時刻歴を表す。凝結時間は BS 置換率が大きいほど、比表面積が大きいほど短くなっている。始発後の抵抗値の変化量は、BS 置換率が大きいほど大きく、急激に抵抗値が増している。これは、BS が早期強度発現性を有しているためだと考えられる。一方、同じ BS 置換率では、比表面積の影響は、BS 置換率が 40% の場合よりも 20% の場合の方が顕著である。図—6 より圧縮強度と始発・終結時間の関係は、反比例の関係にあり、かなり強い相関性が確認され、既往の研究⁴⁾と同様の傾向が見られた。

3.3 圧縮強度

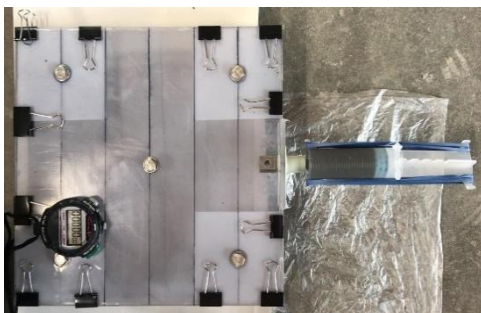
図—7 に W/P=0.5 の場合の材齢 28 日(常温養生)の圧縮強度試験結果を示す。FA8020 の粉体比の場合、比表面積



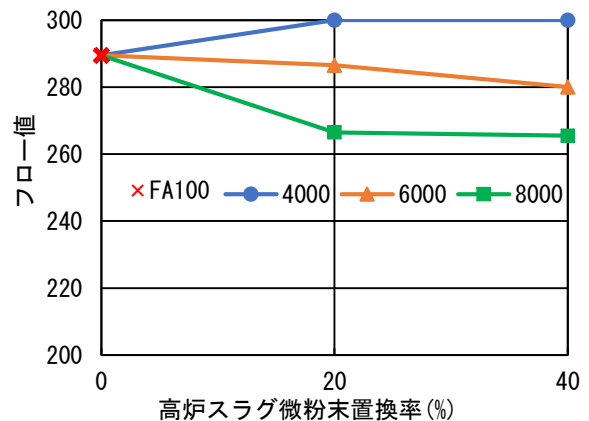
図—2 塩ビ板試験体寸法



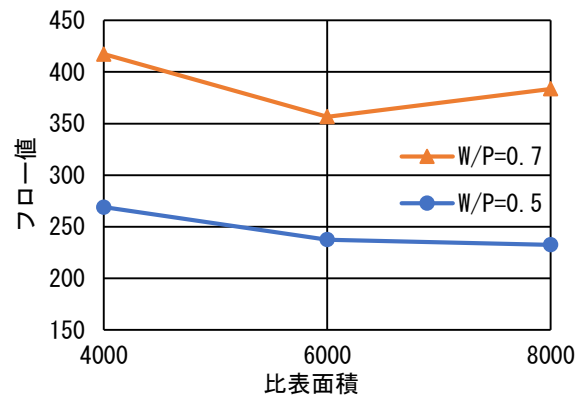
図—3 試験体断面図



写真—1 ひび割れ注入試験体



(a) W/P=0.5 (15 打)

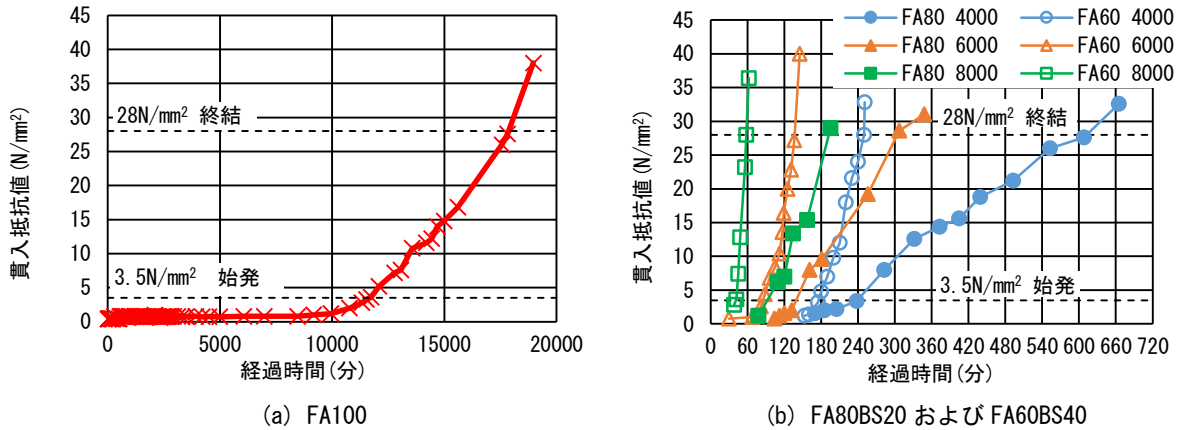


(b) FA60BS40 (0 打)

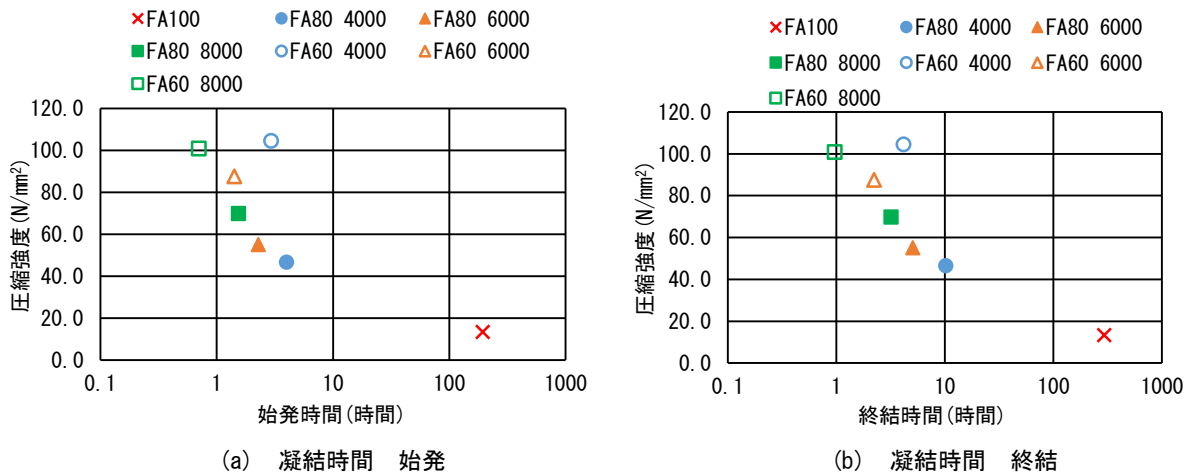
図—4 フロー試験結果

表—5 プロクター貫入試験結果

	FA100	FA80			FA60		
		BS4000	BS6000	BS8000	BS4000	BS6000	BS8000
始発時間	194 時間	3 時間 59 分	2 時間 17 分	1 時間 32 分	2 時間 56 分	1 時間 25 分	42 分
終結時間	294 時間	10 時間 13 分	5 時間 4 分	3 時間 12 分	4 時間 10 分	2 時間 14 分	58 分



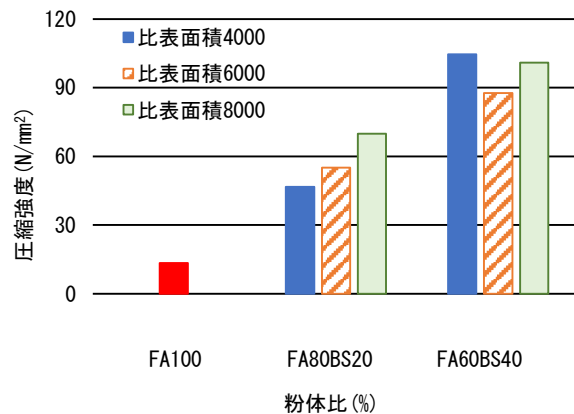
図—5 貫入抵抗値の時刻歴



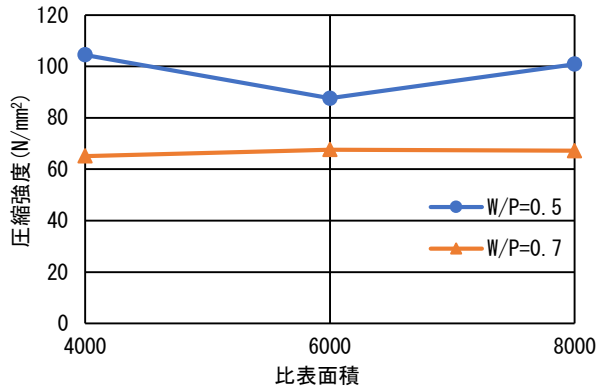
図—6 圧縮強度(材齢 28 日)と凝結時間の関係

積が大きくなるにつれて圧縮強度も大きくなり、線形の関係となっている。しかし、FA60BS40 の粉体比の場合、比表面積の影響が見られない。また、BS 置換率が大きくなるとともに、圧縮強度も大きくなることが確認された。

図—8 に粉体比 FA60BS40 の W/P=0.5 および 0.7 における圧縮強度試験結果を示す。W/P が大きくなると圧縮強度は低下したが、すべての比表面積において 30N/mm² 以上で実用性に問題のない強度であることが確認できた。また、比表面積が圧縮強度に及ぼす影響は見られなかった。



図—7 圧縮強度試験結果(材齢 28 日)



図—8 FA60BS40 圧縮強度試験結果 (28 日)

3.4 注入試験

(1) W/P=0.5 の場合

表—6 に注入深さの結果、写真—2 に注入試験結果を示す。赤い線は最終到達深さを表す。この結果より、本実験で用いた GP は、0.2mm のひび割れ幅に入るが 5-10cm 程度の注入性能であることが分かった。表—6 の×印は、5cm まで注入できなかったものを表す。注入深さが浅かった原因として、粘性が高かったこと、可使時間が短かったことが考えられる。

(2) W/P=0.7 の場合

W/P=0.5 では、粘性が高く注入深さが浅い可能性があるため、粘性を下げる手法として溶液量を増やすことを考えた。そこで W/P=0.5, 粉体比 FA60BS40 の場合において、圧縮強度が 30N/mm² を大きく上回っていたため、粉体比 FA60BS40 の場合のみ W/P を 0.7 に変更し、注入試験を行った。図—8 より、W/P=0.7, FA60BS40 における圧縮強度は 30N/mm² 以上であることが確認できた。表—7 に W/P=0.7 で行った注入試験結果を、写真—3 に注入実験の様子を示す。赤い線は最終到達深さを示す。BS の比表面積に関わらず全配(調)合において最大 30cm まで注入可能であった。W/P=0.5 を W/P=0.7 に変更し、溶液量が増えたことで粘性が低下し、より深くまで注入できたと考えられる。

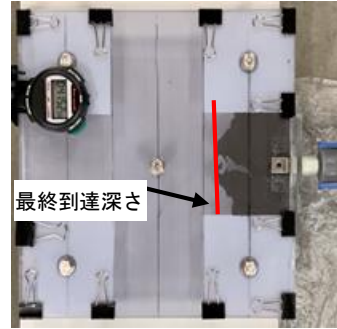
到達時間と注入深さの関係を図—9 に示す。この結果より、注入完了 (30cm) までの浸透速度は、比表面積が大きいほど速いということが確認された。また、浸透速度は、最初の 5cm まではあまり差はないが、注入深さが深くなるにつれて比表面積が小さい方が、遅くなる傾向が見られた。

(3) 注入試験まとめ

今回は、W/P を変化させて注入実験を行った。この 2 つの実験から、粘性は平滑な面での注入の可否・深さに影響する 1 つの要因であることが確認できた。ひび割れ幅 0.2mm の場合、W/P を大きくすることで、注入可能深

表—6 注入深さの試験結果 (W/P=0.5)

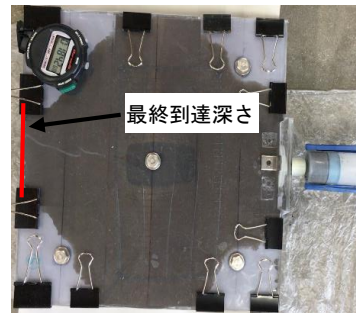
	FA100	FA80BS20			FA60BS40		
		4000	6000	8000	4000	6000	8000
注入深さ	5cm	5cm	×	5cm	5cm	10cm	5cm



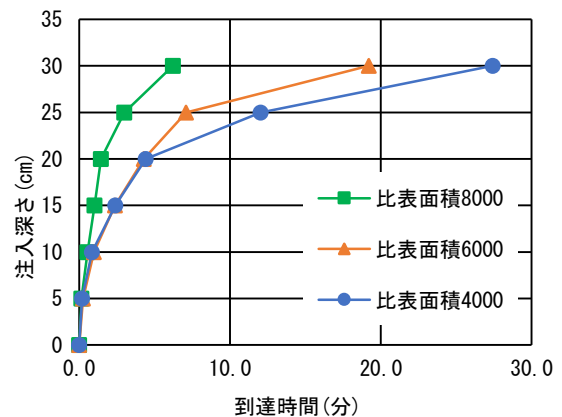
写真—2 注入試験結果
FA80BS20 4000 (W/P=0.5)

表—7 注入試験結果 (W/P=0.7)

	FA60BS40		
	4000	6000	8000
注入深さ	30cm	30cm	30cm



写真—3 注入試験結果
FA60BS40 4000 (W/P=0.7)



図—9 注入深さと到達時間の関係

さが深くなることから、粘性が低い方が注入性状に優れるといえる。浸透速度については、比表面積が小さい方が遅くなる傾向が見られた。浸透速度と0打フロー値との間に相関が見られなかったため、比表面積が小さいほど浸透速度が遅くなる原因について、今後も引き続き検討したい。

4. まとめ

本研究では、ジオポリマーの粉体としてフライアッシュ(JIS I 種)および異なる比表面積の高炉スラグ微粉末(4000, 6000, 8000 級)を、溶液として水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液の混合溶液を用いたジオポリマーペーストについて、それらのフロー値、凝結特性、圧縮強度、注入性能について調べた。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) BS の比表面積が大きくなるほど、溶液との接触面積が増えることより、フロー値は減少する。しかし、BS の比表面積が同一の場合、BS 置換率 20~40% の範囲では置換率の影響はほとんど見られず、同程度のフロー値となった。
- (2) BS の比表面積が大きく、BS 置換率が大きいほど、凝結時間は短くなり、圧縮強度は大きくなる傾向がある。また、BS 置換率に関係なく、比表面積が大きいほど始発時間は早くなる傾向が見られた。
- (3) 簡易的なひび割れ注入試験の結果、W/P=0.5 に比べ、W/P=0.7 の時、溶液量の増加による粘性の低下によって、比表面積に関わらず注入深さは深くなった。
- (4) W/P=0.7 の場合、BS の比表面積が大きいほど浸透が早く進む傾向が見られた。

なお、注入試験において今回は溶液粉体比 W/P のみを変化させて行った。今後は、溶液の種類および溶液の比率の影響についての検討、実際のコンクリートに注入し、注入性能を確認する必要がある。

【謝辞】

本研究に際し、ボンマハーサイパラミ氏（三重大学大学院生）のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究（B）17H03291（研究代表者：一宮一夫・大分高専教授）によった。付記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 佐藤晋也，臼杵匠，伊代田岳史：簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討，第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会，V-22，2013
- 2) 北田達也，李柱国：コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2059-2064，2017
- 3) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 4) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1957-1962，2015
- 5) 三島直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーの圧縮強度に関する基礎的研究(その 2：水ガラス/粉体比，粉体の混合使用，および養生条件の影響)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.1385-1386，2013.8

