

ジオポリマーの鉄筋コンクリート構造用補修材への
適用に関する基礎的研究

三重大学博士学位論文

2020年9月

PHOMMAHAXAY PALAMY

「ジオポリマーの鉄筋コンクリート構造への補修材としての適用に関する基礎的研究」

—目次—

第1章 序論

1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	6
1.3 本論文の構成.....	8
[第1章の参考文献].....	10

第2章 既往の研究

2.1 はじめに.....	12
2.2 GP の基本事項.....	12
2.2.1 使用材料.....	12
2.2.2 固化機構.....	15
2.2.3 製造および養生.....	15
2.2.4 フレッシュ性状.....	16
2.2.5 CO ₂ 排出の削減効果.....	17
2.2.6 力学特性.....	18
2.2.7 耐久性.....	19
2.2.8 GP の適用事例.....	20
2.2.9 GP の補修材としての実用化に関する研究.....	20
2.3 RC 造の補修.....	22
2.3.1 概要.....	22
2.3.2 補修工法.....	22
(1) ひび割れ注入工法.....	22
(2) 断面修復工法.....	24
2.4 市販補修材と GP のコスト比較.....	26
2.5 まとめ.....	30
[第2章の参考文献].....	32

第3章 GP の基礎物性およびヤング係数の推定式

3.1 はじめに.....	39
3.2 実験方法.....	39
3.2.1 使用材料.....	39
3.2.2 供試体の作製方法.....	42
3.2.3 実験方法.....	43

3.3	実験結果および考察	43
3.3.1	GP ペーストの圧縮特性	43
3.3.2	GP モルタルおよびコンクリート	47
3.4	複合則理論によるヤング係数の評価	52
3.4.1	複合則理論について	52
3.4.2	ペーストおよびモルタルのヤング係数	53
3.4.3	骨材のヤング係数	53
3.4.4	複合則理論による推定結果	54
3.4.5	推定結果と実験結果の比較評価	55
3.5	まとめ	56
	[第3章の参考文献]	57

第4章 シリカフェームを添加した GP の基礎的性能

4.1	はじめに	59
4.2	実験方法	60
4.2.1	使用材料	60
4.2.2	供試体の作製方法	64
4.2.3	試験方法および準拠規準	64
4.3	実験結果および考察	65
4.3.1	練混ぜ可否の状況	65
4.3.2	フレッシュ性状	65
4.3.3	硬化後の形状	66
4.3.4	空隙性状	70
4.3.5	圧縮特性	71
4.3.6	硬化生成物および硬化体内の状態	75
4.4	まとめ	99
	[第4章の参考文献]	100

第5章 GP のひび割れ注入材としての適用

5.1	はじめに	102
5.2	実験方法	103
5.2.1	要因と水準	103
5.2.2	使用材料および調合	103
5.2.3	試験方法	106
5.3	実験結果および考察	108
5.3.1	フロー試験	108

5.3.2	粘度.....	108
5.3.3	注入性能.....	110
5.4	まとめ.....	113
	[第 5 章の参考文献].....	114
第 6 章 GP の断面修復材としての適用		
6.1	はじめに.....	115
6.2	GP の断面修復材としての性能に関する基礎的実験.....	115
6.2.1	実験方法.....	115
(1)	使用材料および調合.....	115
(2)	供試体作製方法.....	117
(3)	試験項目および試験方法.....	117
6.2.2	実験結果および考察.....	117
(1)	凝結時間.....	117
(2)	フレッシュ性状.....	118
(3)	各種強度特性.....	119
(4)	長さ変化率.....	120
(5)	付着性状.....	120
6.3	GP で断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験.....	123
6.3.1	実験方法.....	123
(1)	使用材料および調合.....	123
(2)	RC 梁供試体概要および作製方法.....	125
(3)	試験項目および試験方法.....	127
6.3.2	実験結果および考察.....	128
(1)	材料特性.....	128
(2)	ひび割れ発生および破壊状況.....	129
(3)	曲げ耐力.....	132
6.3.3	曲げ断面解析による曲げ耐力の算定.....	135
(1)	解析手法および材料構成モデル.....	135
(2)	複合則理論による GP 補修モルタルのヤング係数の推定.....	137
(3)	曲げモーメント-曲率関係の推定結果.....	140
6.4	まとめ.....	146
	[第 6 章の参考文献].....	147
第 7 章 結論および今後の課題		
7.1	結論.....	148

7.2 今後の課題.....	151
研究業績.....	152
謝辞.....	153

第 1 章 序論

- 1.1 研究背景
 - 1.2 研究目的
 - 1.3 本論文の構成
- [第 1 章の参考文献]

1.1 本研究の背景

1.1.1 セメントと CO₂ の排出

地球温暖化の原因となっている温室効果ガスに影響度がもっと大きいものは二酸化炭素 (CO₂) である。建設分野において、コンクリートは世界中で多用される材料の一つであり、一般的にそのコンクリートで使用される結合材はポルトランドセメントである。しかし、そのセメントの製造工程において、石灰石の熱分解とエネルギー消費によって CO₂ が大量に排出することが問題視されている。1 トンのセメントを製造する際に約 1 トンの CO₂ を排出し¹⁻¹⁾、日本国内でセメント産業からの CO₂ 排出量は日本の CO₂ 排出量の約 4%となっている¹⁻²⁾。また、セメント産業が世界中で排出する CO₂ の量は人為排出量の約 6%¹⁻³⁾、全世界のグリーンハウスガス排出量の約 7%を占める¹⁻⁴⁾。

一方、今後新興国・途上国を中心にセメント需要が伸び続けると、セメント生産量は 2050 年には 50 億トンを超えると予想され、CO₂ の排出量も倍増するとされている (図 1-1, 1-2 参照)¹⁻³⁾。したがって、CO₂ 排出量の削減、環境への貢献を維持・発展させていくには、使用可能な廃棄物・産業副産物の有効活用を含め、多くの技術開発が必要となっている¹⁻²⁾。

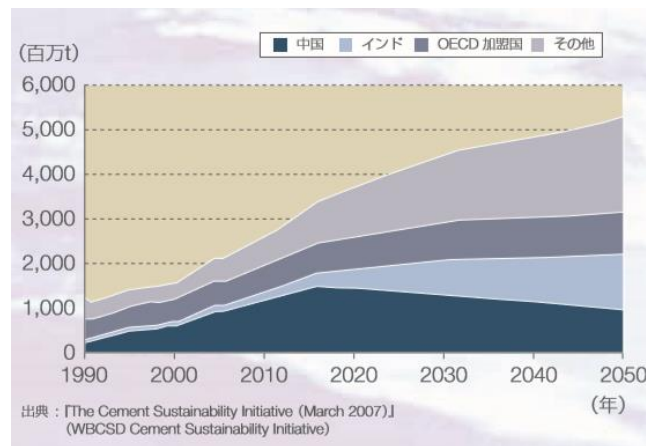


図 1-1 世界のセメント生産量¹⁻³⁾

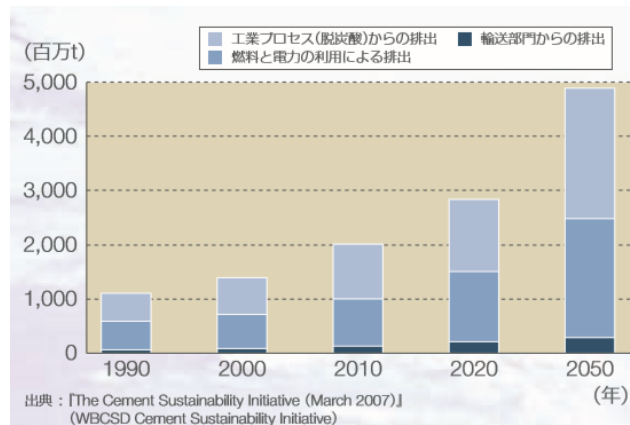


図 1-2 世界のセメント産業の CO₂ 排出量の予測¹⁻³⁾

1.1.2 建築物の長期使用

持続可能な社会を実現するために、建築物を長期にわたり良好な状態で使用することを実現するための具体的方策の提案は、建築分野に与えられた大きな課題である¹⁻⁵⁾。

日本ではかつて老朽化や劣化をした構造物への一般対処として、スクラップアンドビルド形式で既存のものを解体して新しく建替える傾向にあった。しかし、スクラップアンドビルドは建設工事に伴い、大量の廃棄物や温室効果ガスの発生、建築竣工時・解体時のエネルギー消費増大などで環境問題を悪化させる。また、解体から完成させるまでは膨大な費用がかかる。

1950年代の半ばから1970年代前半にかけての高度経済成長期においては、急激な人口の増加などにより需要に応じてコンクリート構造物が盛んに建設された。しかし、建設ラッシュの当時は、生産性の向上による工期短縮やコスト縮減、技能技術者や良質な材料の不足の影響で低品質のコンクリート構造物ができてしまい、早期劣化現象が起きて社会問題になっていた¹⁻⁶⁾。また、かつては従来のコンクリート構造物が耐久性に優れ、メンテナンスフリーでも半永久的に使用できると認識していたが、実際の既存建築物の調査結果によると、コンクリート構造物でも経年劣化が起きて進行し、適切なメンテナンスや補修補強を施さなければ長く維持することができないことが明らかになった^{1-6)・7)}。このため、高度経済成長期に建設された構造物は、現在では老朽化を迎え、より長く使い続けるためにメンテナンスや更新をして延命化する必要がある。

日本は現在不景気な状態が続いているだけでなく、人口減少や高齢化社会が到来すると推測されている。このような財政面や環境面等の要求を受け、日本はスクラップアンドビルドのようなフロー型社会から省資源のストック型社会へ転換しつつあり、大量にストックされていた既存構造物の延命化や今後建設される構造物の長寿命化を強化している。このため、適切な維持管理、補修工法・技術および材料の選定が住宅や建築物の長寿命化において重要となっている。

1.1.3 鉄筋コンクリート構造補修の現状

鉄筋コンクリート構造(RC)の補修には表1-1¹⁻⁸⁾のように劣化原因や度合いに応じて様々な工法があるが、本研究ではひび割れ注入工法および断面修復工法を取り扱う。コンクリート構造物の補修作業において広く使用される補修材料は、図1-3¹⁻⁸⁾に示すように一般にエポキシなどの樹脂を主成分とした有機系および(ポリマー含有を含む)セメントを主成分とした無機系が挙げられる。このような補修材料にはいくつかの問題点が挙げられる。有機系の場合は、紫外線などに弱く耐候性や耐火性が劣ること、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良、またコンクリートとの引張強度、熱膨張係数及び弾性係数などの性質に相違があることなどの問題点がある^{1-9)~1-13)}。一方、無機のセメント系の場合は、コンクリートと同等の材料特性を有し、紫外線などによる劣化に対する抵抗性が高く耐久性に優れているが、セメントの水和生成物として

の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶とC-S-Hゲルで耐酸性や耐火性などが悪いこと、乾燥面でのドライアウトの影響を受けやすいことなどが問題点として挙げられる¹⁻⁹⁾¹⁻¹⁴⁾。さらに、両者とも高価で経済的な面でのデメリットもある。

表1-1 補修工法¹⁻⁸⁾

劣化要因	補修方針	補修工法
塩 害	・ Cl^- に汚染されたコンクリートの除去 ・ 補修後の、 Cl^- 、水分、酸素の浸透抑制	・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(遮塩)
	・ Cl^- の除去	・ 電気化学的脱塩工法
	・ 鉄筋の電位制御	・ 電気防食工法
中性化	・ 中性化したコンクリートの除去 ・ 補修後の CO_2 、水分の浸透抑制	・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法
	・ アルカリ性付与	・ 電気化学的再アルカリ化工法
凍 害	・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 補修後の水分の浸透抑制 ・ コンクリートの凍結融解抵抗性の向上	・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(防水)
アルカリ シリカ反応	・ 水分の浸透抑制 ・ 内部水分の逸散促進 ・ アルカリ金属イオンの浸透抑制	・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(撥水)
	・ 水分の浸透抑制 ・ アルカリ金属イオンの浸透抑制	・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法 ・ 表面保護工法(遮水)
	・ リチウムイオンの供給	・ 亜硝酸リチウムの圧入工法
化学的侵食	・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 有害化学物質の浸透抑制	・ ひび割れ注入工法 ・ 断面修復工法(耐酸モルタル) ・ 表面保護工法(耐酸ライニング)
疲 勞	・ 軽微な場合にはひび割れ進展の抑制 (大半は補強に該当する)	・ ひび割れ注入工法 (補強工法)

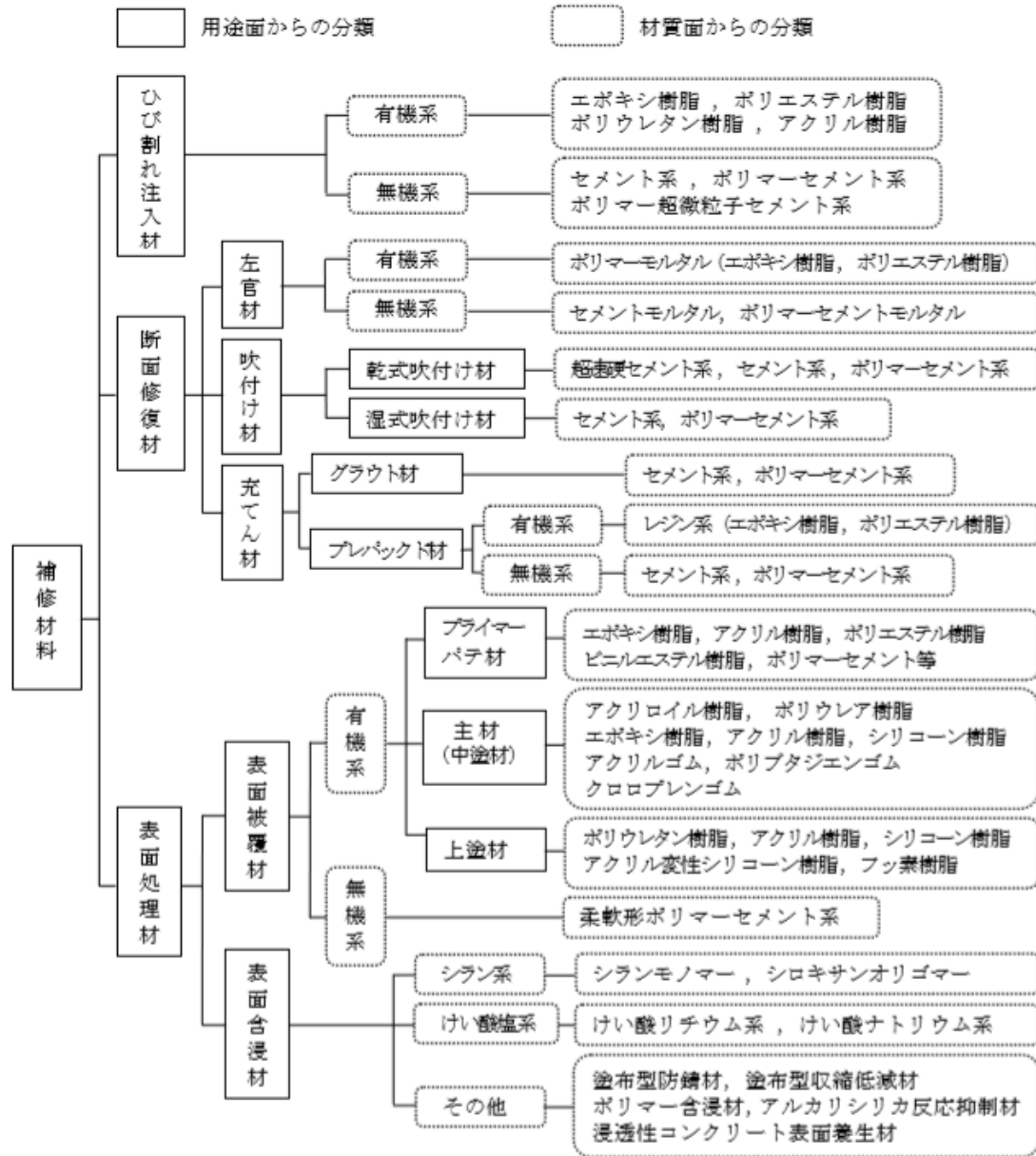


図1-3 補修材料¹⁻⁸⁾

1.1.4 ジオポリマー

ジオポリマー（以下、GP）とは、1970年代にフランスの Joseph DAVIDIVITS により提唱された用語であり、無機質ケイ酸塩の縮重合体を示している。その由来は、出発材料として使用したメタカオリンとアルカリ溶液を混合させることで、天然ゼオライトの構造に類似した非晶質のアルミのケイ酸塩の縮重合体を生成するためであるとされている¹⁻¹⁵⁾。

しかし、GPに関する現在の研究においては、メタカオリン以外にもより安価なフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした活性フィラー（粉体）を使用した検討がなされており、それに伴い反応機構および反応生成物の構造が異なっている。そこで、日本コンクリート工学会では、GPの定義に関して、粉体の相違で分類することとし、GPとは「セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液（アルカリ溶液）の少なくとも1種類を用いて硬化させたもの」と定義している¹⁻¹⁵⁾。

セメントの代わりに産業副産物を用いた GP を建設分野で使用するにより、産業副産物の有効利用が図れ、セメントの製造過程における CO₂ 排出量を大きく削減でき、反応生成物がセメントと異なって優れる耐久性を発揮することが期待できるため、低炭素・資源循環型社会実現のための建設材料として様々な適用可能な用途が期待されている。最近では、トラックヤードの舗装、道路の境界ブロック、排水用水路のブロック¹⁻¹⁶⁾¹⁻¹⁷⁾、クリークの擁壁¹⁻¹⁸⁾やまくらぎ¹⁻¹⁹⁾などの適用事例がある。

また、GPはセメントを用いた硬化体と同等レベルの圧縮強度を発現することが可能な他、耐硫酸性や高温抵抗性などの耐久性に優れ、鋼材や母体セメントコンクリートとの高い付着性能を有することに着目し、近年はコンクリート構造物の補修材料としての適用に関する研究開発が進められている^{1-20)~1-28)}。

1.2 本研究の目的

産業副産物を有効利用するGPは、低炭素・持続可能な社会の構築に大きく貢献すると考えられる。既往の研究によると、GPはポルトランドセメントを用いた一般のコンクリートと同等なレベルまで強度発現可能で、可使時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があることが分かっている¹⁻¹⁵⁾。そのため、土木分野および建築分野におけるGPの利用が期待されているが、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能については、今後さらに解明を続ける段階にある。

そこで本研究では、GPをコンクリート構造物への補修材料として活用を考え、基礎物性や補修材としての要求性能を調べることを目的とした。また、実構造物への補修を試し、補修材としてのGPの実用性についても検討を行う。図 1-4 に本研究の位置づけを示す。

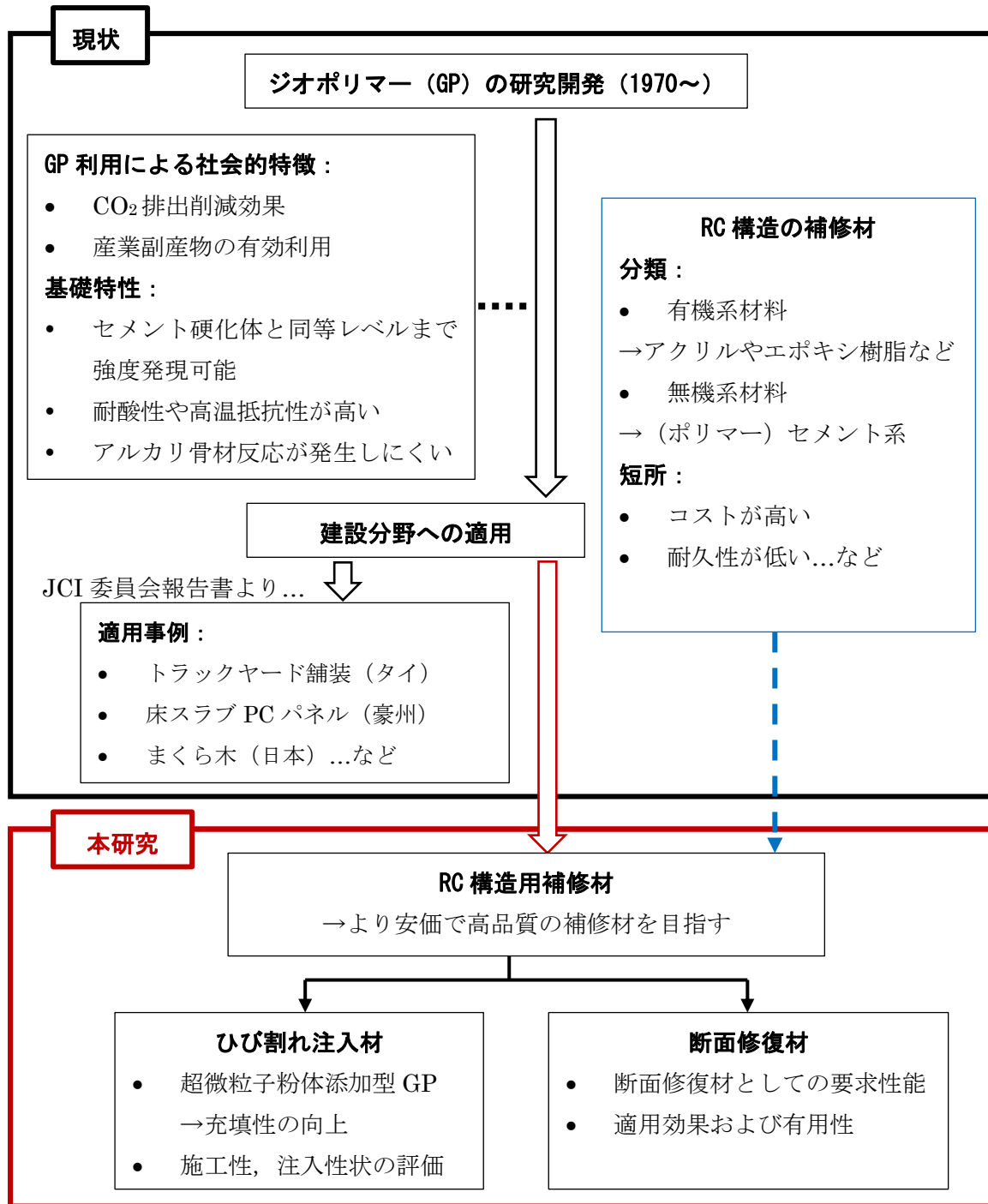


図 1-4 本研究の位置付け

1.3 本論文の構成

本論文は全 7 章で構成されている。各章の概要および主な内容を下記にまとめる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的を述べる。

第 2 章では、既往の研究における文献調査を行う。GP の基本事項として、使用材料、製造方法、硬化メカニズム、力学性状、耐久性、特徴および応用などに関する既往の研究を調査し整理する。また、GP を補修材として適用することに先立ち、現在行われている RC 構造の補修工法の概要、補修材料の特徴および要求性能について調査し整理する。

第 3 章では、GP 硬化体に関する研究の多くは初期強度を促進するために高温養生を行っているため、本研究では補修作業の現場を考慮して常温養生におけるフライアッシュ系 GP 硬化体の力学特性に関する実験的検討を行う。フライアッシュに対する高炉スラグ微粉末の置換率および骨材含有率を変化させ、フレッシュ性状、割裂引張強度、圧縮強度とヤング係数およびそれらの関係を検討する。また、硬化体に含まれる構成材料の割合とその材料特性を考慮した複合則理論を用い、GP 硬化体のヤング係数を推定し、実験結果との比較評価を行う。

第 4 章では、GP をひび割れ注入材として適用する場合を想定し、ひび割れ内部への充填性を向上させるために、超微粒子のシリカフェームを添加し、その GP の基礎的性能に関する実験的検討を行う。本実験では、基礎段階としてシリカフェームを添加した場合の GP のフレッシュ性状、硬化後の力学性状および生成物などについて検討する。

第 5 章では、GP ペーストを RC 構造物のひび割れ注入材として適用するための実験的検討を行う。GP のひび割れ注入材としての性能を調べ、塩化ビニル板を用いた疑似ひび割れを用いた注入試験を行い、GP のひび割れ注入材としての使用可能性を調べる。

第 6 章では、GP モルタルを RC 構造物の断面修復材として適用するための実験的研究を行う。断面修復材として適用するには、作業性が高いこと、既存コンクリートと同等以上の強度・ヤング係数を有すること、収縮率が小さく母材コンクリートと高い付着力を有することなどの性能が要求される。そこで GP モルタルがそれらの性能を満足するか否かを評価するための実験的検討を行い、市販の補修材およ

び公的機関が提案した補修材に求められる要求性能と比較し、GP の補修材としての有用性を検討する。また、材料特性に関する実験結果を踏まえ、次のステップとして、断面欠損させた RC 梁の補修材料として GP モルタルを用い、補修したその RC 梁の曲げ試験を行い、無補修 RC 梁および市販の補修材を用いた RC 梁の耐力、破壊性状と比較し、GP を用いた場合の補修効果を検討する。

第 7 章では、本研究の範囲における結論および今後の課題をまとめる。

【第 1 章の参考文献】

- 1-1) Ferreira LFB, et al: Precast alkali-activated concrete towards sustainable construction, Magazine of concrete research, 66(12), pp.618-626, 2014
- 1-2) 細谷俊夫：セメント産業における CO₂ 排出削減の取り組み, コンクリート工学, Vol.48, No.9, 2010.9
- 1-3) 太平洋セメント：低炭素社会に向けて, セメント産業のセクトラルアプローチを推進, Taiheiyo cement CRS report, 2008
<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/csr/pdf/2008/01.pdf>
- 1-4) Metz B., et al: Climate change 2007, Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp.447-496, 2007
- 1-5) 独立行政法人建築研究所：建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究, 建築研究資料, No.145, 2013.8
- 1-6) CES コンサルタント技術士事務所, 高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の早期劣化状況の調査方法
<http://www.ces-consult.net/concrete-rekkachousa.html>
- 1-7) 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査 WG 主査 野口貴文：高度経済成長期以前の鉄筋コンクリートの現状, 2015
- 1-8) 若杉三紀夫：ポリマーセメント系補修材の開発と無機系複合表面処理工法の ASR 抑制効果に関する研究, 京都大学博士課程学位論文, 2014.9
- 1-9) 繊維補強協会：断面修復工法の紹介, 会報, 2013
- 1-10) 斉藤弘志：エポキシ樹脂接着剤の土木分野への利用について, 熱硬化性樹脂, Vol.10, No.4, 1989.
- 1-11) 池尻忠夫：エポキシ樹脂の電気的特性に及ぼす紫外線の影響, 材料, Vol.20, No.214, pp.886-891, 1963
- 1-12) 井上真澄, Saphouvong khamhou, 児島孝之：アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究, 材料, Vol.56, No.12, pp.1183-1188, 2007.12
- 1-13) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編], pp.247-253, 2012
- 1-14) 江口和雄, 片脇清士：補修・補強材料入門①ひび割れ注入材, コンクリート工学, Vol.52, No.6, pp.540-544, 2014
- 1-15) 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, 2017.9
- 1-16) 一宮一夫：ジオポリマーの研究開発の現状, コンクリート工学論文集, Vol.55,

- No.2, pp.131-137, 2017.2
- 1-17) 甲本達也ほか：フライアッシュ・ベース・ジオポリマーを用いた水路斜面保護擁壁の設計・施工例，地盤環境および防災における地域資源の活用に関するシンポジウム，地盤工学会九州支部，pp.49-54,2010
- 1-18) 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，コンクリート工学会年次論文集，Vol.35, No.1, pp.2023-2028, 2013.7
- 1-19) T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridtirud, S. Hatanaka, P. Chindaprasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, Construction and building materials, Vol.98, pp.482-488, 2015.8
- 1-20) Hani Alanazi, Mijia Yang, Dalu Zhang, Zhili (Jerry) Gao: Bond strength of PCC pavement repairs using metakolin-based geopolymer mortar, Cement and concrete composites, pp.75-82, 2016.1
- 1-21) Yung-Chin Ding, Ta-Wui Cheng, Yu-Sheng Dai: Application of geopolymer paste for concrete repair, International federation for structure concrete, pp.561-570, 2017.1
- 1-22) 北田達也ら：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, 2017.7
- 1-23) 上原元樹ら：左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調整と諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.1939-1944, 2019.7
- 1-24) Hawa A., Tonnyayopas D., Prachasaree W., Taneerananon P.: Development and performance evaluation of very high early strength Geopolymer for rapid road repair, Advance in Materials science and Engineering, Vol.2013, pp.1-9, 2013.8
- 1-25) Sulaem M. L., et al: A study on the performance of damaged RC members repaired using ultra-fine slag based geopolymer mortar, Construction and building materials, Vol.217, pp.216-225, 2019.8
- 1-26) P. Balaguru : Geopolymer for repair and rehabilitation of reinforced concrete beams, Geopolymer institute, 1997
- 1-27) Ghasan F. H., et al: Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review, Renewable and sustainable energy reviews, 80, pp.54-74, 2017

第 2 章 既往の研究

2.1 はじめに

2.2 GP の基本事項

2.3 RC 造の補修

2.4 市販補修材と GP のコスト比較

2.5 まとめ

[第 2 章の参考文献]

2.1 はじめに

本章では、ジオポリマー（GP）の基本事項として、使用材料，製造方法，硬化メカニズム，力学性状，耐久性，特徴および適用事例などに関する既往の研究を調査し整理する。また，GP を補修材として適用することに先立ち，現在行われている RC 構造物の補修工法の概要，補修材料の特徴および性能について調査し整理する。

2.2 GP の基本事項

2.2.1 使用材料

GP の作製に用いられる主な材料としては，粉体にはフライアッシュ，高炉スラグ微粉末およびメタカオリンなどの活性フィラー，アルカリ溶液には水ガラスおよび苛性ソーダなどが使用される²⁻¹⁾。

1) 粉体（活性フィラー）

- **フライアッシュ (FA)** : 火力発電所における微粉炭燃焼によって発生する石炭灰のうち，燃焼ガスとともに煙道へ排出されて浮遊している粒子を電気集塵機により捕集したものである。FA の品質として JIS A 6201 では，粉末度，未燃カーボンの指標となる強熱減量，フロー値比，活性指数などから，I ~IV種が規定されている（表 2-1）²⁻²⁾。表 2-2 に 6 種類の JIS II種 FA の品質及び化学組成分析例を示す。FA は Si 及び Al を主成分とするガラス相であること，また，日本国内の FA (ASTM Class F) は欧州や東南アジア等で一般的に使われる高カルシウム (CaO 含有量 10%以上) FA (ASTM Class C) に比べ CaO 含有量が少ないことが特徴である。図 2-1 に一例として FA の SEM 画像を示す。

表 2-1 フライアッシュの品質規定²⁻²⁾

項目	種類	フライアッシュ I 種	フライアッシュ II 種	フライアッシュ III 種	フライアッシュ IV 種
二酸化けい素	%	45.0以上			
湿 分	%	1.0以下			
強 熱 減 量 ⁽¹⁾	%	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下
密 度	g/cm ³	1.95以上			
粉末度 ⁽²⁾	45μmふるい残分 (網ふるい方法) ⁽³⁾ %	10以下	40以下	40以下	70以下
	比表面積 (ブレン方法) cm ² /g	5000以上	2500以上	2500以上	1500以上
フ ロー 値 比	%	105以上	95以上	85以上	75以上
活 性 度 指 数 %	材齢28日	90以上	80以上	80以上	60以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上	70以上

注 (1) 強熱減量に代えて，未燃炭素含有率の測定をJISM8819又はJISR1603に規定する方法で行い，その結果に対し強熱減量の規定値を適用してもよい。

(2) 粉末度は，網ふるい方法又はブレン方法による。

(3) 粉末度を網ふるい方法による場合は，ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

表 2-2 フライアッシュの化学組成分析例²⁻³⁾

略号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	平均粒径 (μm)	化学組成 (wt%)				
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
JISII規定	1.95以上	2500以上	5.0以下		45.0以上				
FA0	2.29	3.740	2.2	12.38	59.70	28.45	4.38	2.10	0.95
FA1	2.30	3.690	2.3	11.93	59.95	28.83	4.17	1.80	0.81
FA2	2.25	3.750	2.5	13.23	67.07	23.62	4.10	1.60	0.88
FA3	2.31	3.800	2.3	11.94	59.00	28.95	4.55	2.18	0.98
FA4	2.29	3.690	2.2	12.71	59.10	28.38	4.77	2.47	0.95
FA5	2.27	3.870	2.5	13.42	64.57	24.56	4.28	1.81	0.91

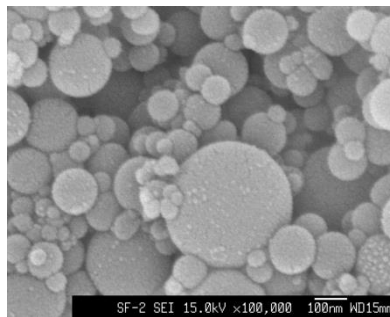


図 2-1 フライアッシュの走査型電子顕微鏡写真 (例)²⁻⁴⁾

- 高炉スラグ微粉末 (BFS)： 高炉 (溶鋳炉) にて銑鉄を製造する際に副産される熔融状態の高炉スラグを水で急冷し微粉碎したものであり (図 2-2), JIS A 6206 によりその品質が規定されている (表 2-3)²⁻⁵⁾。BFS は FA と異なり, Si, Al に加え Ca 成分が多く含むことが特徴である。図 2-3 に一例として BFS の SEM 画像を示す。

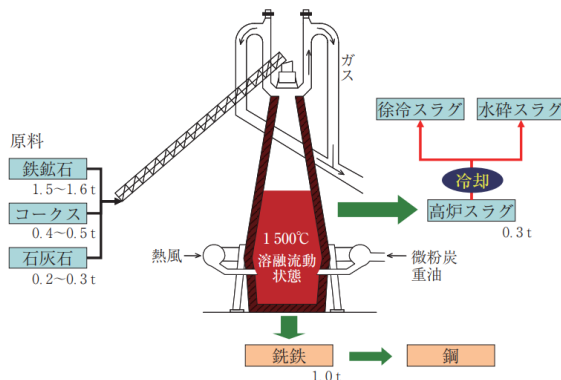


図 2-2 高炉スラグ微粉末の製造イメージ²⁻⁵⁾

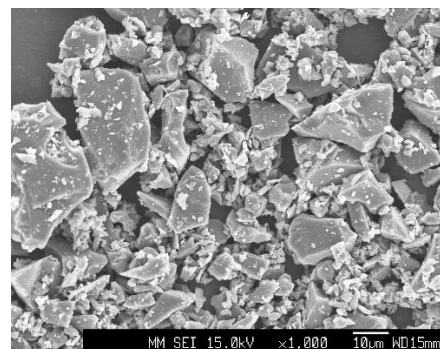


図 2-3 高炉スラグ微粉末の走査型電子顕微鏡写真 (例)²⁻⁴⁾

表 2-3 高炉スラグ微粉末の品質基準 (JIS A 6206) ²⁻⁵⁾

		3000	4000	6000	8000
粉末度	cm ² /g	2 750 以上	3 500 以上	5 000 以上	7 000 以上
		3 500 未満	5 000 未満	7 000 未満	10 000 未満
活性度	材齢 7 日	—	55 以上	75 以上	95 以上
	材齢 28 日	60 以上	75 以上	95 以上	105 以上
	材齢 91 日	80 以上	95 以上	—	—
フロー値比	%	95 以上	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウム	%	10.0 以下			
三酸化硫黄	%	4.0 以下			
強熱減量	%	3.0 以下			
塩化物イオン	%	0.02 以下			

- メタカオリン**：カオリナイト ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) やハロイサイト ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$)、パイロフェライト ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) などケイ素・アルミニウムを主成分とする材料を加熱し、完全に脱水させたものである。表 2-4 に一例として高性能コンクリートの混和材として使用される市販のメタカオリンの化学成分を、図 2-4 にその粉体の写真を示す。

表 2-4 メタカオリンの化学成分 (一例) ²⁻⁶⁾

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
52.1	45.3	0.60	1.64	0.05	0.21	0.16	0.10	0.51



図 2-4 メタカオリン粉体の写真 ²⁻⁶⁾

- その他のフィラー**：上記以外にもジオポリマーを生成するためのフィラー材料としては、ライスハスクアッシュ、パームオイルフライアッシュ、都市ごみ焼却灰、下水汚泥灰などが用いられる ²⁻¹⁾。

2) アルカリ溶液

- **水ガラス**：ケイ砂と炭酸ソーダあるいは苛性ソーダと反応させ、水に溶解させることで生産される。
- **苛性ソーダ**：化学式で NaOH と表記される無機化合物であり、常温常圧ではナトリウムイオンと水酸化物イオンからなるイオン結晶である。
- **その他の溶液**：上記の溶液の他に珪酸カリウム，苛性カリ，炭酸塩や硫酸塩を用いる研究が多くなされている。

2.2.2 固化機構

図 2-5 に、FA やメタカオリンなどの活性フィラーから作製される GP の簡単な反応概念図を示す。活性フィラーとアルカリ溶液を混合させることで、活性フィラーからケイ素イオン (Si^{4+}) とアルミイオン (Al^{3+}) が溶出し、それらがアルカリ溶液中のケイ酸塩イオンと縮重合反応してポリマー化し、ゼオライト (図 2-6) に類似する 3 次元構造フレームワークを形成する²⁻¹⁾。

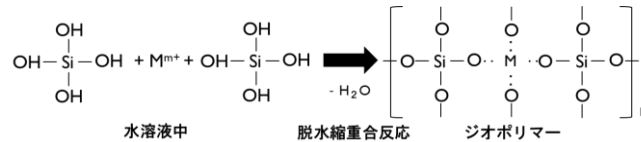


図 2-5 ジオポリマーの反応概念図²⁻¹⁾

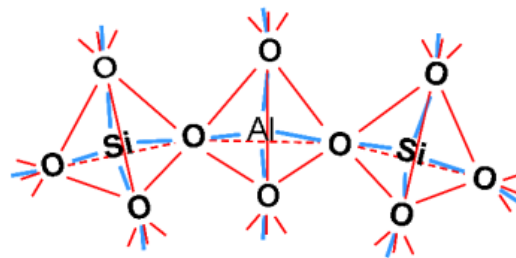


図 2-6 ゼオライトの基本構造²⁻⁷⁾

2.2.3 製造および養生

GP の配 (調) 合設計手法はまだ確立されておらず²⁻¹⁾，BFS の置換率²⁻⁸⁾，水/GP 固形物 (水=アルカリ中の水分と後添加の水分の総和，GP 固形物=粉体，水酸化ナトリウムや珪酸ソーダ水溶液中の固形分の総和)²⁻⁹⁾，アルカリ/水比²⁻¹⁰⁾ を GP の配 (調) 合設計手法として提案した事例がある。

GP の練混ぜには、セメントの場合と同様にモルタルミキサ、パン型ミキサおよび強制二軸ミキサなどを使用することができるが、GP は粘性が高いため傾動式ミキサでは練り混ぜが困難な場合がある。材料を投入する順番もセメントの場合と同様に、最初に粉体および骨材を投入して空練りを行い、その後アルカリ溶液を投入して本練りを行う²⁻¹¹⁾。練混ぜ時間に関しては、圧縮強度と強い関係があり、練混ぜ時間が長くなるほど圧縮強度が増加する傾向があるという報告がある²⁻¹²⁾。

常温環境下における GP 化反応は非常に緩慢で、脱型可能な強度を得るまでに長い時間を要する。そこで、GP の性能を十分に発揮させるために、給熱養生が施されることが多い^{2-13) ~2-14)}。また、常温環境下で GP の性能を発揮させるには BFS などのカルシウム成分を多く含む粉体の混和が有効であるという報告がある^{2-15)~2-17)}。

2.2.4 フレッシュ性状

GP の流動性に影響する要因として、FA を主成分とした場合の FA 量に対する BFS の置換率およびアルカリ濃度やアルカリ溶液の構成とその比率が挙げられる。

FA に対する BFS の置換率が大きいほどフロー値が低下し、その低下の度合いも大きくなる^{2-18) ~2-21)}。また、経過時間に対するフローの低下度合いも BFS の置換率が高いほど大きい傾向がある²⁻²⁰⁾。

文献²⁻²²⁾では、水ガラスと水酸化ナトリウムの混合比を変化させた場合のモルタルフローを検討し、水ガラスが増えるとモルタルフローは大きくなる傾向にあるとしている。また、60分経過後も安定した可使用性の流動性を得るには、水ガラス：苛性ソーダの比は 2 : 1 ~ 3 : 1 が望ましいと報告している。また、アルカリ溶液に水酸化ナトリウムと水ガラスを混合させて利用した場合と比べ、水ガラスを単独で利用した場合ではフローが小さく、水ガラスの一部に珪酸カリウムで置換した場合はフローが大きくなる²⁻²³⁾。水ガラスの種類については、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ モル比が大きくなるほどフローが低下する傾向がある²⁻²¹⁾。

GP の流動性にはアルカリ溶液と粉体の比率が影響し、セメントの場合と同様に溶液比が大きいほどフローは大きくなる傾向がある^{2-22) 2-24) 2-25)}。

GP の凝結に及ぼす要因として、粉体やアルカリ溶液の種類、粉体構成比、カルシウム成分の含有量やアルカリ濃度などが挙げられる^{2-26) 2-27)}。低カルシウムの FA のみを用いた GP の凝結時間は非常に長くなる^{2-28) 2-29)}。一方、FA に対し BFS を置換した場合は GP の凝結時間が短くなり²⁻³⁰⁾、30%以上置換した場合の始発時間は 30 分以下となる報告もある²⁻³¹⁾。

L-酒石酸ナトリウムやグルコン酸ナトリウムなどの凝結遅延剤は GP に効果があるが、圧縮強度に影響を及ぼすことがあるという報告がある²⁻³²⁾。また、シリカフェーム (SF) を添加した GP は、可使時間が延長でき、BFS を多用して凝結が早くなって練り混ぜられなくなる場合にも、SF の添加によって練混ぜが可能になることが報告されている^{2-33),2-34)}。また、硫酸塩に対して抵抗性が高いこと、硫酸イオンの浸入遅延作用が期待できることなど

の特徴もある²⁻³⁵⁾。SF を FA の一部に置換した GP に関する既往の研究によれば、SF 置換率が大きくなるほど、流動性やワーカビリティが低下し、GP モルタルおよび GP コンクリートの場合、圧縮、引張および曲げ強度が若干増加するが、GP ペーストの場合には、これらの強度が低下する傾向が見られている^{2-36)~2-42)}。

2.2.2 CO₂ 排出の削減効果

GP は、FA や BFS などといった産業副産物の有効活用、および石灰石の焼成を行わないため製造段階における二酸化炭素排出量を大きく削減できることから、低炭素・資源型社会実現のためのセメント代替材料として建設分野における構造物への有効利用が期待され、注目を集めている。FA のみを主粉体とした GP コンクリートの CO₂ の排出は普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を用いたコンクリートより 75~90% 減少するという報告がある²⁻⁴³⁾。また、輸送や GP の作製に行われていた高温養生による CO₂ の排出量は OPC を使用する場合より少なく、その OPC コンクリートの約 50~60%（表 2-5 と表 2-6）であるという報告もある^{2-44)~2-47)}。

表 2-5 調合例²⁻⁴⁵⁾

	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4
Fly ash	84	91	85.2	78
NaOH	11	7.2	7.6	11
Sodium silicate	0	1.8	7.2	0
Silica fume	5	0	0	9
Gibbsite	0	0	0	2

表 2-6 GP と OPC との CO₂ 量とコストの比較例²⁻⁴⁵⁾

	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4
GP CO ₂ -eq (kg/t binder)	404	271	310	425
Blended OPC CO ₂ -eq (kg/t binder)	760			
Difference	47%	64%	59%	44%
Cost (\$/t binder)	152	118	140	176
OPC Cost (\$/t binder)	120			
Difference	-21%	7%	-11%	-39%

2.2.6 力学特性

(1) 圧縮強度

GP の圧縮強度に影響を及ぼす要因として、FA の品質、BFS の種類及び置換率、アルカリ溶液の濃度や構成、または溶液粉体比などが挙げられる。FA の品質では、中の非晶質量、鉄分、カルシウム、アルミニウム、未燃カーボンや強熱減量などの化学的性質、または比表面積や粒径などの物理的性質が圧縮強度に影響を及ぼす^{2-48) 2-49)}。粉末度が大きく比表面積が小さい FAIV を用いた場合のジオポリマーの強度を FA I 種または II を用いた場合と比較すると、FAIV 種の GP の強度が 20% 小さくなる²⁻¹⁸⁾。FA の一部に BFS を置換する場合、その置換率が大きくなるほど圧縮強度が大きくなることが一般的に知られている。また、BFS の比表面積が大きいほど強度が大きくなり、特にその置換率が小さい範囲においてその傾向が顕著に現れることも報告されている²⁻¹⁹⁾。

また、水酸化ナトリウム水溶液の濃度が高くなるほど強度の増加が見られた。そして、アルカリ溶液に水ガラスを水ガラス/水酸化ナトリウム=2.0~3.0 の範囲で用いることにより比較的高い強度を得ることができる^{2-50)~2-53)}。また、アルカリ溶液粉体比が大きいほど、強度が小さくなる傾向にあり、セメントコンクリートと同様な傾向を示している²⁻¹⁶⁾²⁻²⁴⁾。

(2) 引張強度

GP コンクリートの引張強度は、その圧縮強度と比べて、およそ 1/17~1/9 (圧縮強度の範囲は約 20~60N/mm²) であることが報告されており、同一圧縮強度で比較した場合、セメントコンクリートよりも小さい傾向にある^{2-54)~2-56)}。

(3) 曲げ強度

GP コンクリートの曲げ強度は圧縮強度の約 1/7~1/5.5 の範囲にあり、セメントコンクリートと同程度である²⁻⁵⁷⁾²⁻⁵⁸⁾。一方、GP モルタルの場合は、曲げ強度が圧縮強度の約 10% 程度となる場合もあり、セメントモルタルより小さいという報告もある²⁻²²⁾。

(4) ヤング係数

GP のヤング係数は、セメント硬化体の約 50~80% であり、同一強度のセメント硬化体に比べヤング係数が低くなることが多く報告されている。南ら²⁻⁵⁴⁾は GP コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には相関性が認められ、一般的なセメント系材料を用いた硬化体と同様に、圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができると報告している。同様に、永井ら²⁻⁵⁹⁾は GP コンクリートの静弾性係数と圧縮強度との間に高い相関性が認められ、供試体の単位容積質量が大きいほど静弾性係数が大きくなる傾向が見られると報告している。

(5) 鋼材との付着特性

GP は、丸鋼および異形鉄筋との付着強度がセメント硬化体と比較して同等レベルあるいはそれ以上であると報告されている^{2-60)~2-62)}。また、GP と黒錆がある鉄板や離型剤の塗布された鉄板との付着強度は、酸洗いをした良好な鉄板との付着と比較してセメントの場合は 50%程低下したのに対し、GP は大きく変化しなかった。強度が同程度の場合、GP の方がセメント硬化体より付着強度が大きい結果となったと報告されている²⁻⁶³⁾。

2.2.7 耐久性

GP は、BFS 無置換、もしくは低い BFS 置換率で低カルシウムの FA やメタカオリンを用いた場合、原料中のカルシウムが極めて少ないため、GP の反応生成物は硫酸塩と反応せず、石膏やエトリンガイトが生成しないため、高い硫酸塩抵抗性を有することが報告されている^{2-64) 2-65)}。

活性フィラーに FA, BFS または SF を、溶液に水ガラスと水酸化ナトリウムを用いた GP は、常温気中養生の環境下において硬化体の表面に乾燥収縮などに起因するひび割れが生ずることが多く報告されている^{2-66) 2-67)}。

GP の加熱後の質量減少率は、セメントの場合と比べ加熱温度が 500°C を超えてもほとんど変わらないが、カルシウムを多く含む BFS の置換率が大きいと質量減少率が大きくなる。また、加熱温度が 800°C 以上でもセメント硬化体より圧縮強度や引張強度の残存率が大きい結果となる²⁻⁵⁰⁾。これは、GP はセメントと違って高温による水和物の脱水分解が生じず、GP の高温における脱水量が少ないことなどにより、高い耐熱性を有することが考えられると報告されている²⁻⁶⁸⁾。また、Provis ら²⁻⁶⁹⁾ は単位水量やナトリウムシリケートが増加すると耐熱性が低下し、FA よりもメタカオリンを用いた GP の方が耐熱性が高まると報告している。

FA のみを使用した GP の乾燥収縮ひずみは、セメント硬化体と比較して、加温養生で加温時間が長いほど小さく、気中養生では大きくなる傾向があることや、GP に含有するカルシウムが多ければ収縮ひずみが大きくなり、またアルカリ溶液の種類によって収縮特性が異なると報告されている^{2-70) 2-71)}。FA と BFS を併用した GP の場合、BFS の置換率が大きいほど、アルカリ溶液中の水ガラス/水酸化ナトリウムが小さいほど、常温養生における GP の収縮ひずみが小さくなる傾向がある²⁻⁷²⁾。一方、Kamal ら²⁻⁷³⁾ は、気中養生で作製した GP コンクリートとセメントコンクリートは、同一強度であれば乾燥収縮も同程度となることや、強度が高くなると収縮が小さくなる傾向を示すと報告している。

GP のアルカリ性について、上原ら²⁻⁴⁸⁾によれば、BFS の置換率が高くなるほど、GP の pH が高くなる傾向を示し、その値が 11.9~12.5 であり、セメントコンクリート (pH=12~13) より若干低い、同等の値を示していることが分かる。また、GP コンクリートの中酸化抵抗性は、OPC コンクリートと同等あるいはそれ以下であると報告されている^{2-30)2-74)~2-76)}。

GP の中性化特性に関する多くの研究は、フェノールフタレイン溶液噴霧による試験方法で行われているが、無色域と変色域の見分けが困難な場合が多く、また無色域の場合でも実際の中性化域と合致しない可能性があるという報告もある²⁻⁷⁷⁾。また、最初に無色域となった場所が、時間の経過とともに変色する場合があります、その推測としては炭酸化した無色域が高アルカリ性を有すると考えられる。一方で、S. Li ら²⁻⁷⁷⁾ は、常温養生で作製した GP コンクリートの中性化抵抗性は OPC コンクリートのそれより低い傾向にあることを示している。さらに、BFS の置換率や比表面積および水酸化ナトリウム/水ガラス比が大きくなるほど、アルカリ溶液粉体比や水/アルカリ比が小さいほど GP コンクリートの中性化抵抗性が高まる傾向にあると報告している。

2.2.8 GP の適用事例

セメントの代替品として産業副産物を用いた GP を建設分野で使用することにより、産業副産物の有効利用が図れ、セメントの製造過程における CO₂ 排出量を大きく削減できる。さらに、反応生成物がセメントと異なり、優れた耐久性を発揮する一面も期待できるため、低炭素・資源循環型社会実現のための建設材料の一つとして様々な適用が期待されている。最近では、トラックヤードの舗装、道路の境界ブロック、排水用水路のブロック、クレークの擁壁やまくらぎなどの適用事例がある²⁻¹⁾。

2.2.9 GP の補修材としての実用化に関する研究

北田ら²⁻⁷⁸⁾は GP の産業副産物の有効利用、耐久性などに着目して GP ペーストのひび割れ注入材としての活用を検討した。遅延剤添加型 FA-BFS 系 GP の各種性能を調べた。結果、粘度が 3000 mPa・s 以下、可使時間が 60 分以上、圧縮強度が 36 MPa 以上、硬化収縮が 1% 以下、接着強さが 4.0 MPa 以上の性能を持つ GP 系ひび割れ注入材を作製することが可能であることを報告している。

上原ら²⁻⁷⁹⁾は室温養生による左官用 GP モルタルの諸特性について調べた。溶液に水ガラスを用いず、水酸化ナトリウム単独で何種類かの SF 添加型 GP モルタルを作製した。その結果として、アルカリ水比が 0.15、ケイ素/アルカリの比が 2.0 の場合は良好な施工性が得られ、高い酸劣化抵抗性が見られた。また、十分な作業性があり、セメントモルタル板と高い付着強度が得られたことを示している。

GP ペーストおよび GP モルタルの既存セメントコンクリートとの付着強度は、市販の補修材と同等以上の強度を有することが多く報告されている^{2-80)~2-86)}。

文献²⁻⁸⁷⁾は GP を接着剤として用いて炭素繊維シートで補強した RC 梁の曲げ挙動を検討している。結果として、GP は有機系接着剤と比較して母体コンクリートと炭素繊維シートとの間に良好な付着性状を示した。

また、曲げ損傷した RC 梁を GP ペーストまたは GP モルタルで補修し、GP の補修材としての活用について検討した文献²⁻⁸⁸⁾によれば、補修 3 日後と 28 日後の耐荷能力がそれ

ぞれ無補修梁の最大荷重の約 89%, 98%を示し, ポリマーセメント系補修材を用いた場合より回復が優れていると報告している。

さらに, 文献 2-86)によれば, GP モルタルは市販の補修材に比較して低コストで高い耐久性を有することに加え, RC 構造用補修材として適用するための力学特性が十分に発揮できると報告している。しかし, 補修材として実際の構造部材に適用した場合に関する検討がまだ十分ではないと言える。

2.3 RC 造の補修

2.3.1 概要²⁻⁸⁹⁾

補修とは、劣化した部材あるいは構造物の構造の劣化進行を抑制し、耐久性の回復・向上と第三者影響度（劣化した構造物の周囲において、はく落コンクリートなどが人および器物に与える傷害などの影響度をいう）の除去または低減を目的とした対策である。なお、補修では、一般に、補修工事による耐荷性の回復・向上は目的としていない。しかし、建設時に構造物が保有していた程度まで、力学的な性能を回復させるための対策を補修と考える場合もある。

2.3.2 補修工法²⁻⁸⁹⁾

補修工事は、部材または構造物の劣化要因、劣化程度に応じた適切な補修工法や材料を選定して、実施されなければならない。現在実施されている補修工法は図 2-7 のように分類される。本研究ではひび割れ注入工法および断面修復工法を取り扱う。

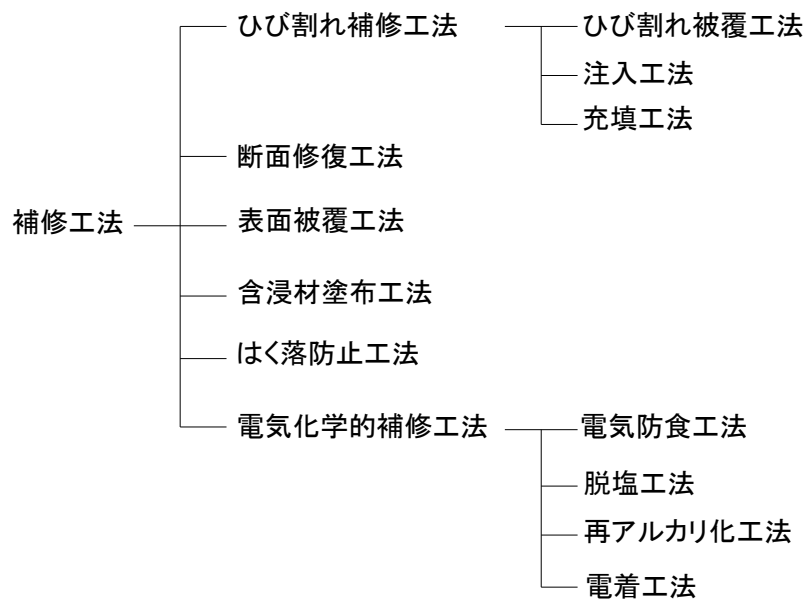


図 2-7 主な補修工法の分類²⁻⁸⁹⁾

(1) ひび割れ注入工法

ひび割れ注入工法は、防水性および耐久性を向上させる目的のほかに、使用材料によっては、躯体の一体化を図ることも可能なため、コンクリート構造全般に発生したひび割れの補修工法としてもっとも普及している²⁻⁸⁹⁾。注入材料には、エポキシ樹脂やアクリル樹脂などの高分子有機系と、セメント系（ポリマーを含む）がある。高分子有機系には、硬質形、軟質形、水膨潤形があり、ひび割れ幅の挙動の大きさや進行の有無によって使い分けている²⁻

90)。

ひび割れ注入材の種類の中には、エポキシ系が製品全体の 60~70%程度を占め、セメント系、アクリル系やポリウレタン系などそれぞれ全体の 10%となり、エポキシ系注入材がもっとも広く使用されていることが分かる。また、高分子有機系とセメント系注入材の割合は 7:3 程度となっている²⁻⁹⁰⁾。

高分子有機系注入材は、コンクリートや鋼材との接着性に優れ、躯体との一体化を図ることができる。また、圧縮強度と曲げ強度はほぼ同じ強さで、引張強度はコンクリートの 10~20 倍を有し、靱性に優れる。さらに耐酸性に優れ、耐久性は補修後から約 30 年といわれている。しかし、施工時に留意しなければならない点はいくつかある。それは漏水や湿潤の状態にある場合は接着不良を起こす可能性があること、気温が 5℃以下を下回ると硬化不良となりやすいこと、温度が 60℃以上となる場合には軟化すること、可燃物であること、熱膨張係数が大きいことおよび紫外線によって劣化することなどである²⁻⁹¹⁾。

セメント系の注入材は、ポリマーが入っていない無機系セメント材料とポリマーセメント系材料に分類され、接着力による躯体の一体性の回復が必要な場合には主にポリマーセメント系材料が使用される。ポリマーセメント系材料は、一般のセメントスラリーの練混ぜ水の一部をセメント混和用ポリマー（合成樹脂エマルジョンや合成ゴムラテックス）で置換し、接着性や劣化因子（水、酸素、塩化物イオンなど）の遮断性能など耐久性を改善したものである。ポリマーセメント系材料には、近年平均粒径が 10 μm 以下の超微粒子セメントを使用し、ひび割れ幅が 0.1mm 以下のひび割れにも注入可能な注入材も開発されている。また、エポキシ樹脂注入材に比較して安価であり（表 2-7 と図 2-8）、熱膨張率がコンクリートに近く、湿潤箇所でも適用できるなどの特徴がある。しかし、セメント系注入材の場合はドライアウトの影響を受けやすく、施工時に注意する必要がある^{2-91) ~2-93)}。

表 2-7 ひび割れ注入材のコスト

種別	No.	比重	単価 (円/kg)	コスト (万円/m ³)
エポキシ樹脂系	①	1.08	3800	410.4
	②	0.98	5000	490.0
	③	1.10	3600	396.0
	④	1.15	3800	437.0
(ポリマー) セメント系	⑤	1.64	1400	136.5
	⑥	1.58	1333	211.2
	⑦	1.60	781	124.9
	⑧	1.80	490	88.2
	⑨	1.27	784	99.6

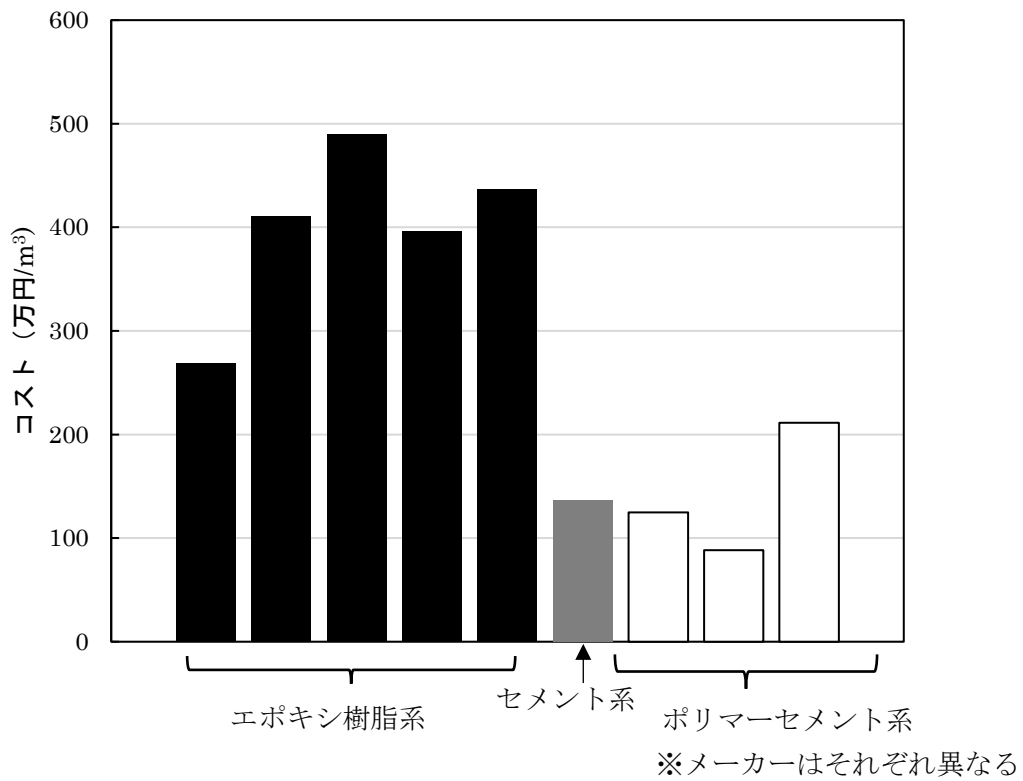


図 2-8 市販ひび割れ注入材のコストの比較

(2) 断面修復工法²⁻⁸⁹⁾

断面修復工法は、コンクリート構造物が劣化により元の断面を喪失した場合の修復や、中性化、塩化イオンなどの劣化因子を含むかぶりコンクリートを撤去した場合の断面修復を目的とした工法である。

断面修復工法に要求される性能は、修復部材、環境条件、施工方法などにより様々であるが、一般には以下に示すような性能が要求される。

- ◆ 圧縮、曲げおよび引張強度等が既存コンクリートと同等以上であること
- ◆ 熱膨張係数、弾性係数およびポアソン比等が既存コンクリートと同等であること
- ◆ 乾燥収縮が小さく、接着性が高いこと
- ◆ 現場施工であるため、作業性が良いこと

断面修復工法に用いられる材料は、主に無機系材料である(ポリマー)セメント系と有機系材料であるエポキシ樹脂に大別されており²⁻⁹³⁾、その性能の比較を表 2-8²⁻⁹⁴⁾に示す。エポキシ樹脂系は、高い曲げ強度、引張強度、付着強度あるいは高い防水性、遮塩性、炭酸ガス遮断性などの特徴を有するが、表 2-9 と図 2-9 に示しているようにセメント系材料と比べてコストが高く、また熱膨張係数がセメントコンクリートの 2~3 倍と大きく、母体コンクリートと補修材との付着界面に温度応力が発生する恐れがあり、剥落につながる場合が

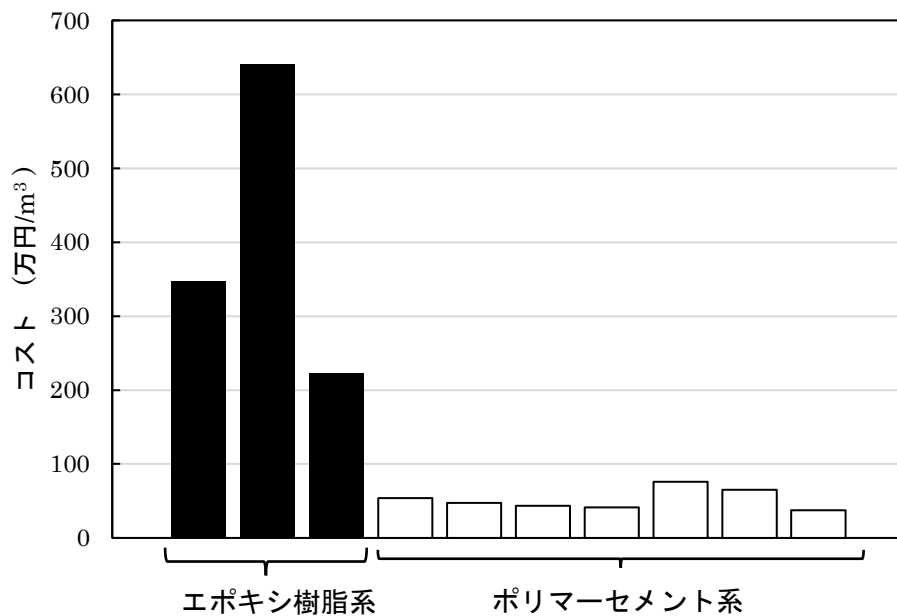
あるため、大断面に使用する場合は注意が必要である²⁻⁹³⁾。そのため、大断面補修を行う場合にはポリマーセメントモルタルが使用される。しかしながら、ポリマーセメントモルタルを施工する際には、ドライアウトによる影響がないよう十分に水湿し処理やプライマー処理を行う必要がある²⁻⁹⁵⁾。

表 2-8 ポリマーセメント系と樹脂系モルタルの諸特性の比較²⁻⁹⁴⁾

項目	ポリマーセメント系モルタル	樹脂系モルタル
各種強度	一般的に、コンクリートと同程度であるが、ポリマーの種類や混入量によって異なるものもあるので、使用目的に応じ、適切な材料を選定する必要がある。	一般的に、圧縮強度、引張強度/圧縮強度、曲げ/圧縮強度ともコンクリートより大きい。
弾性係数		一般的に、コンクリートよりやや小さく変形しやすい。
熱膨張係数		コンクリートより大きい。
耐火、耐熱性		温度が高くなると軟化や変形が起こる。
耐候性		紫外線の影響を受ける場合がある。表面被覆材を併用する必要がある。
接着性（付着性）	良好であるが、混和されるポリマーの種類によって若干異なる。	通常良好な接着性を示すが、低温時等施工条件によっては、性能が低下する。
施工性	湿潤面の施工が可能。取り扱いが容易で左官・充てん・吹付け施工が可能。大断面の施工にも適している。	従来、湿潤面への施工は接着性の面から困難であったが、湿潤面施工用のエポキシ樹脂が開発され、湿潤面への施工も可能。施工方法は左官施工に限定される。また、取り扱いに関しては、エポキシ系のため、施工時の換気等に注意を要する。
強度発現性	普通、早強、速硬とセメントのタイプにより数時間～数日と幅広い強度発現速度範囲がある。	一般的に早く、硬化剤の種類により硬化速度を調整できる。ただし、温度依存性が大きく低温時に硬化しにくいものもある。

表 2-9 断面修復材のコスト

種別	No.	比重	単価 (円/kg)	コスト (万円/m ³)
エポキシ樹脂モルタル	①	1.26	2750	346.5
	②	1.6	4000	640.0
	③	1.35	1650	222.7
ポリマーセメントモルタル	④	2.09	300	54.0
	⑤	2.19	250	47.5
	⑥	2.10	200	43.5
	⑦	2.29	206	41.2
	⑧	1.55	491	76.1
	⑨	1.85	420	65.1
	⑩	1.99	220	37.4



※メーカーはそれぞれ異なる

図 2-9 断面修復材のコストの比較

2.4 市販補修材と GP のコスト比較

本節では、本研究において補修材としての活用で作製した GP のコストを試算し、市販の補修材料との比較検討を行う。本調査に用いた市販補修材のコストの情報は、一般社会法人コンクリートメンテナンス協会より引用したものであり、その調査結果を上記の 2.3.2 (表 2-7 と表 2-9) に記載している。

表 2-10 に本調査の試算に用いる原材料の原価を示す。また、表 2-10 には比較用の普通ポルトランドセメントおよび生コンクリートの原価も示す。表 2-10 より分かるようにフライアッシュの単価がもっとも安く、シリカフェームがもっとも高い。また、アルカリ溶液のコストが非常に高いことが分かる。しかし、海外の文献^{2-96) 2-97)}によれば、アルカリ溶液のコストは水酸化ナトリウム水溶液が約 30~35 円/kg、珪酸ソーダ溶液が約 35~40 円/kg で本調査より安く入手していることが分かる。坪内²⁻³⁾の調査では、セメントペーストや同一強度のセメントコンクリートに比べ、GP の価格は 2~3 倍高くなると報告している。また、文献²⁻⁹⁶⁾でも同様に GP モルタルのコストが母材コンクリートの約 5 倍高くなることが分かる。

本研究の第 4 章および第 6 章で作製したジオポリマーのコストの試算結果を表 2-11 および表 2-12 に示す。また、図 2-10 に市販ひび割れ注入材と GP ペーストのコスト比較を、図 2-11 に市販断面修復材と GP モルタルのコスト比較を示す。図より、GP は市販補修材よりコストが非常に低く、補修材として適用する場合高い経済性を有すると言えよう。文献²⁻⁹⁶⁾においても同様な傾向を示している。

表 2-10 原料のコスト

材料	単位	コスト (円)	出典
フライアッシュ (FA)	kg	3.8	鉄道・運輸機構 大阪支社 2020 年 6 月号
高炉スラグ微粉末 (BFS)	kg	15	鉄道・運輸機構 北海道新幹線建設局 2020 年 6 月号
シリカフェーム (SF)	kg	80	鉄道・運輸機構 大阪支社 2020 年 6 月号
水ガラス 2 号 (WG2) 45 珪酸ソーダ	kg	280	本学納入価格
水酸化ナトリウム 水溶液 (10mol/l) (NH)	kg	610	本学納入価格
細骨材 (s)	m ³	4,000	建設物価 2018 年 2 月号
普通ポルトランド セメント	kg	10.1	建設物価 2018 年 2 月号
Fc=24 生コンク リート	m ³	16,600	名古屋生コンクリート協同組合 標準価格表 2020 年 1 月

表 2-11 ジオポリマーペーストのコスト

No.	Powder composition ratio	Unit weight (g/L)					コスト (万円/m ³)
		FA	SF	BFS	NH	WG	
①	FA100-SF0-BS0	1265.8	0.0	0.0	211.0	421.9	25.16
②	FA80-SF20-BS0	1013.1	253.3	0.0	211.1	422.1	27.21
③	FA60-SF40-BS0	760.2	506.8	0.0	211.2	422.3	29.25
④	FA40-SF60-BS0	507.0	760.6	0.0	211.3	422.5	31.30
⑤	FA20-SF80-BS0	253.6	1014.6	0.0	211.4	422.7	33.35
⑥	FA0-SF100-BS0	0.0	1268.8	0.0	211.5	422.9	35.41
⑦	FA80-SF0-BS20	1036.7	0.0	259.2	216.0	432.0	26.05
⑧	FA60-SF20-BS20	777.9	259.3	259.3	216.1	432.2	28.15
⑨	FA40-SF40-BS20	518.9	518.9	259.4	216.2	432.4	30.24
⑩	FA20-SF60-BS20	259.6	778.7	259.6	216.3	432.6	32.34
⑪	FA0-SF80-BS20	0.0	1038.8	259.7	216.4	432.8	34.43
⑫	FA60-SF0-BS40	796.5	0.0	531.0	221.3	442.5	26.99
⑬	FA40-SF20-BS40	531.3	265.6	531.3	221.4	442.7	29.13
⑭	FA20-SF40-BS40	265.8	531.5	531.5	221.5	443.0	31.28
⑮	FA0-SF60-BS40	0.0	797.7	531.8	221.6	443.2	33.43
⑯	FA40-SF0-BS60	544.3	0.0	816.4	226.8	453.6	27.97
⑰	FA20-SF20-BS60	272.3	272.3	816.8	226.9	453.8	30.16
⑱	FA0-SF40-BS60	0.0	544.8	817.3	227.0	454.0	32.36
⑲	FA20-SF0-BS80	279.1	0.0	1116.5	232.6	465.2	28.99
⑳	FA0-SF20-BS80	0.0	279.3	1117.1	232.7	465.4	31.25
㉑	FA0-SF0-BS100	0.0	0.0	1432.3	238.7	477.4	30.08

表 2-12 ジオポリマーモルタルのコスト

No.	Unit weight (g/L)					コスト (万円/m ³)
	FA	BFS	WG	NH	S	
①	449	64	216	92	1436	12.15
②	360	155	217	92	1442	12.28
③	454	143	159	80	1515	9.95
④	410	130	180	90	1515	11.11
⑤	375	119	198	99	1515	12.14

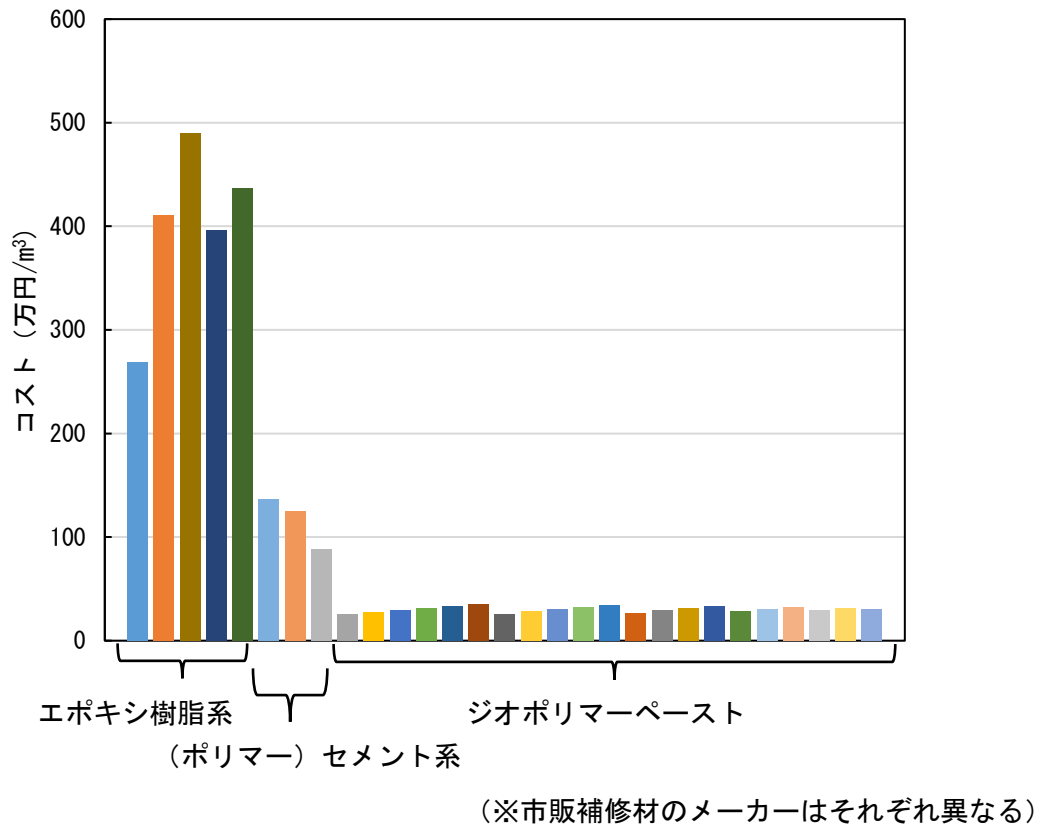


図 2-10 市販ひび割れ注入材とジオポリマーペーストのコスト比較

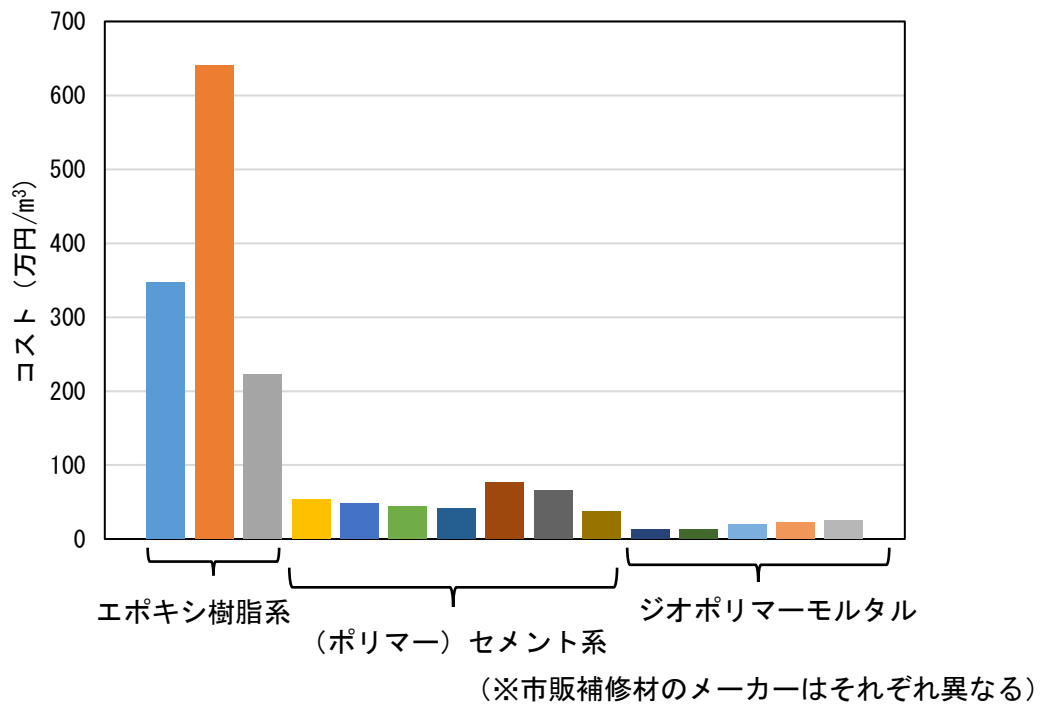


図 2-11 市販断面補修材とジオポリマーモルタルのコスト比較

2.5 まとめ

本章では、ジオポリマーの RC 造補修用材としての適用に関する研究を行う前段階として、GP の基本事項、特徴および適用事例などに関する既往の研究、また、RC 造の補修工法（ひび割れ注入工法と断面修復工法）、補修材料およびその特徴について調査し整理した。

GP は、セメントを使用しないため、セメントの製造過程における二酸化炭素の排出量の低減が期待できるセメントの代替材料である。また、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの産業副産物を有効活用することで持続可能な社会の構築に大きな貢献を寄与することが期待できる。これまでの既往の研究によると、セメントを用いた場合と同様に GP の配（調）合の基準がまだ確立されず、国内外を問わず研究者や研究機関によって使用する材料とその構成が異なる。

また、GP は普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴がある。GP の実用化に向けて国内外を問わず GP の用途開発に関する研究が盛んに行われてきている。GP は給熱養生により反応が促進され早期の強度発現が促され、脱型時間の短縮や高強度化が可能となるため、工場で作製される 2 次製品としての適用事例が多い。しかしながら、高炉スラグ微粉末を混和することで常温環境下でも硬化を促進して実用強度を発揮させることができる。したがって、現場で練り混ぜて実際に施工することが可能となる。また、近年は補修材としての適用に関する研究が増えてきている。しかし、その多くは断面修復材としての適用を目的としており、強度特性などに関する報告が多く、ひび割れ注入材への適用に関する検討や実構造部材に補修を施した後の構造部材の性能あるいは補修効果に関する研究はまだ少ないのが現状である。また、市販の補修材と比較して補修用 GP はコストが低く経済的である。

現在 RC 造の補修に使用される材料は、ひび割れ注入材と断面修復材ともに高分子有機系とセメント系に分類され、それぞれの材料には短所と長所があり、これらを考慮したうえで適切な材料を選定し適切な場所に使い分ける必要がある。

そこで、本研究では GP の優れた耐久性（耐酸性、高温抵抗性など）および補修材として適用する場合のコストパフォーマンスが高いことに着目して、RC 造用のひび割れ注入材と断面修復材としての適用可能性について基礎的検討を行っていく。本研究と既往の研究との関係を表 2-13 に示す。

表 2-13 既往研究と本研究の関係

ジオポリマー(GP)	既往の研究	本研究	本論文
基礎特性	<ul style="list-style-type: none"> ● 養生方法として、化学反応を促進させるために加温養生が多く行われる。補修現場では、常温養生となるが、常温養生における GP 硬化体に関する研究はまだ少ない。 ● 骨材量が GP 硬化体に及ぼす影響はまだ検討されていない。 ● 圧縮強度-ヤング係数の間に高い相関が認められるが、推定方法はまだ確立していない。 ● シリカフェーム添加型 GP に関する研究はまだ少ない(置換率が小さい範囲のみ)。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 常温養生において、高炉スラグ微粉末の置換率および比表面積、溶液粉体比、骨材量が GP 硬化体の基礎特性に及ぼす影響を検討する。 ● 構成材料による複合則理論に基づいたヤング係数推定方法を提案する。 ● シリカフェームの置換率が大きい範囲における GP 硬化体の基礎的性能を検討する。 	<p>第 3 章 第 6 章</p> <p>第 3 章</p> <p>第 4 章</p>
ひび割れ注入	<ul style="list-style-type: none"> ● GP 系ひび割れ注入材に関する研究はほとんどない。唯一の先行研究では、ある範囲における基礎特性について検討したが、注入性状については検討していない。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 塩化ビニール板を用いた簡易的注入試験を行い、GP の注入性状を検討する。 	<p>第 5 章</p>
断面修復	<ul style="list-style-type: none"> ● 補修材としての強度特性、付着性状に関する先行研究が多く、実構造物・部材への補修効果についての検討は行われていない。 	<ul style="list-style-type: none"> ● RC 梁の断面修復に GP を適用し、曲げ試験により補修効果を実験的に検討する。また、GP の基礎物性を用いることでその RC 梁の曲げ挙動を理論的に検討する。 	<p>第 6 章</p>

【第 2 章の参考文献】

- 2-1) 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，2017.9
- 2-2) 出典：日本フライアッシュ協会
<http://www.japan-flyash.com/fquality.html>
- 2-3) 坪内徹朗：石炭灰の品質がジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響に関する実験的研究，平成 29 年度三重大学修士論文
- 2-4) 日本のコンクリート 100 年デジタルアーカイブ，
https://www.jci-net.or.jp/photo/archive/detail_db.php?id=226&page=1
- 2-5) 檀康弘：高炉スラグ微粉末，コンクリート工学，Vol.52, No.5, pp.387-392, 2014.
- 2-6) 高性能コンクリート混和材，メタカオリン
http://chemiusjapan.co.jp/wp-content/uploads/2014/04/b_metakaolin.pdf
- 2-7) ゼオライト，東京工業大学理学院化学系科学コース小松研究室，
<http://www.chemistry.titech.ac.jp/~komatsu/pages/zeolite.html>
- 2-8) 一宮一夫ら：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011
- 2-9) Hardjito D. and Rangan B. V.,(2005), Development and properties of low calcium fly ash-based geopolymer concrete, Research report GCI, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at espase@curtin.org.
- 2-10) 佐藤隆恒ら：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, pp.2023-2028, 2013
- 2-11) 原田耕司ら：耐酸性に優れた低炭素型新材料「ジオポリマー」の開発と施工実績について，土木学会西部支部平成 27 年度技術発表会論文集，pp.1-6, 2015.11
- 2-12) J. Davidovits, Geopolymer chemistry and application 4th edition, Geopolymer institute, 2015
- 2-13) 菊池道生ら：結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2283-2288, 2016
- 2-14) 太田周ら：フライアッシュの品質と加熱養生条件がジオポリマーモルタルの強度に与える影響，土木学会第 70 回年次学術講演会，pp.1117-1118,2015
- 2-15) 太田周ら：強熱減量が高いフライアッシュのジオポリマーへの適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1981-1986, 2015
- 2-16) 市川敬悟ら：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの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.38, No.1, pp.2271-2276, 2016
- 2-17) 木村亨ら：酸化カルシウム含有率が異なる活性フィラーを用いたジオポリマーモルタルの各種諸特性，Vol.38, No.1, pp.2295-2300, 2016

- 2-18) 一宮一夫ら：フライアッシュ 4 種を用いたジオポリマーモルタルの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1900-1905, 2012
- 2-19) 原田耕司ら：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.2236-2241, 2014
- 2-20) 原田耕司ら：蒸気養生を行わないジオポリマーコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度特性について，土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集，pp.1399-1400, 2016
- 2-21) 市川敬悟ら：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
- 2-22) 一宮一夫ら：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011
- 2-23) 一宮一夫ら：フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.2230-2235, 2014
- 2-24) 坪内徹朗ら：アルカリシリカ溶液の濃度が高炉スラグ使用ジオポリマーの物性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2277-2282, 2016
- 2-25) 本間雅人：ジオポリマーコンクリートの調合設計に関する基礎的研究，日本建築学会学術講演概要集，北海道，pp.241-242, 2013
- 2-26) I. Perna, T. Hanzli.: The setting time of a clay-slag geopolymers matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method, J. Clean. Prod., pp.1150-1155, 2016
- 2-27) I. Balczar, T. Korim, A. Dobradi: Correlation of strength to apparent porosity of geopolymers. Understanding through variations of setting time, Constr. Build. Master., 93, pp.983-988, 2015
- 2-28) C. Chen, W. Wong, W. Lutze, I. I. Pegg: Kinetics of fly ash geopolymerization, J. Mater. Sci., 46, pp.3073-3083, 2015
- 2-29) Hui Xu, et al: Duralith geopolymer waste form for Hanford secondary waste: Correlating setting behavior to hydration heat evolution, Journal of Hazardous Materials. 278, pp.34-39, 2014
- 2-30) 原田耕司ら：ジオポリマーの諸特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1894-1899, 2012
- 2-31) 田村康将ら：Ca, Al 成分の添加がジオポリマーペーストの凝結特性に及ぼす影響，無機マテリアル学会第 125 回学術講演会講演要旨集，pp.66-67, 2012
- 2-32) 岡田ら：ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.371, No.1, pp.1975-1980, 2015
- 2-33) 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, pp.2023-2028,

2013.7

- 2-34) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，鉄道総研月例発表会要旨，pp.1-4，2016.1
- 2-35) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュ II 種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015.7
- 2-36) Hisham M Khater: Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials, International journal of advanced structural engineering, 2013
- 2-37) Manjunath S. Sontaki, Sawapnil B. Cholekar: Strength performance studies on ambient cured silica fume based geopolymer concrete, International research journal of engineering and technology (IRJET), Vol.2, No.7, 2015.10
- 2-38) F.N. Okoye, J. Durgaprasad, N.B. Singh: Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete, Ceramics international, Vol.42, pp.3000-3006, 2016.10
- 2-39) Debabrata Dutta, Suresh Tholchom, Partha Ghosh, Somnath Ghosh: Effect of silica fume addition on porosity of fly ash geopolymers, ARPN journal of engineering and applied sciences, Vol.5, No.10, pp.74-79, 2010.10
- 2-40) Suresh Thokchom, Debabrata Dutta, Somnath Ghosh: Effect of incorporation silica fume in fly ash geopolymers, World academy of science, engineering and technology international journal of civil and environmental engineering, Vol.5, No.12, pp.750-754, 2011
- 2-41) F.A. Memon, Muhd Fadhil Nuruddin, Nasir Shafiq: Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete, International journal of minerals metallurgy and materials, Vol.20, No.2, pp.1-9, 2013.2
- 2-42) D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal: Effect of nano silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar, Construction and building materials, Vol.70, pp.453-459, 2014
- 2-43) J. Davidovits: False Values on CO₂ Emission For Geopolymer Cement/Concrete Published In Scientific Papers, Technical Paper #24, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org, 2015.
- 2-44) J. Davidovits: A review on GP cement, Geopolymer Institute (<http://www.geopolymer.org/>), pp.1-10, 2003.1
- 2-45) B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Arie van Riessen, and G. D. Corder: Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement, Journal of Cleaner Production, Vol.19, pp.1080-1090, 2011
- 2-46) M. Weil, D. K. Ombrowski, and A. Buchwald: Life-cycle analysis of geopolymers,

- In: Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J. (Eda.), *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, pp.194-210, 2009
- 2-47) G. Habert, J. B. d'Espinose de Lacaillerie, N. Roussel: An environment evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production*, Vol.19, pp.1229-1238, 2011
- 2-48) 上原元樹ら : ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.1987-1992, 2015.7
- 2-49) 坪内徹朗ら : フライアッシュ JIS2 種の化学的および物理的性質の違いがジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1, pp.2071-2076, 2017
- 2-50) Subhash V. Patankar, et al: Effect of Concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar, *Indian Journal of Materials Science*, Vol.2014, 2014
- 2-51) A. M Mustafa AI Bakri, et al: Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement, *Journal of Engineering and Technology research*, Vol.3(2), pp.44-49, 2011
- 2-52) Siti Fatimah Azzahran Abdullah, et al: Effect of alkali concentration on fly ash geopolymers, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017
- 2-53) Mohd Mustafa AI Bakri Abdullah, et al: Effect of Na₂SiO₃/NaOH ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly ash-based geopolymer, *ACI Materials Journal*, Vol.109(5), pp.503-508, 2012
- 2-54) 南浩輔ら : 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, pp.1987-1992, 2013
- 2-55) 一宮一夫ら : 高炉スラグ微粉末を添加したフライアッシュベースのジオポリマーの高温下における物性変化, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.1269-1274, 2016
- 2-56) 佐川康貴ら : ジオポリマーコンクリート梁の曲げ耐荷性状に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1, pp.2095-2100, 2017
- 2-57) 東原実ら : 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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.1963-1968, 2015
- 2-58) 太田周ら : 強熱減量が高いフライアッシュのジオポリマーへの適用性に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.1981-1986, 2015
- 2-59) Nagai, T., Li, Z., Takagaito, H., Suga, A. : Experimental study on mechanical properties of fly ash and blast furnace slag blended geopolymer concrete, *Proceedings of the Japan concrete institute*, 39(1), 2077-2082, 2017 (in Japanese)

- 2-60) A. Castel, et al: Bond strength between slag and class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, *Cement and Concrete research*, 72, pp.48-53, 2015
- 2-61) P. Sarker: Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete, *Material and Structures*, 44, pp.1021-1030, 2011
- 2-62) 太田周ら：ジオポリマーモルタルの鉄筋との付着特性に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.2313-2318, 2016
- 2-63) 山村和也：フライアッシュを用いたジオポリマーペーストの鋼板に対する付着性能に関する基礎的研究, 三重大学平成 28 年卒業論文
- 2-64) Palomo A., et al: Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin, *Cem. Concr. Res.*, Vol.29, pp.997-1004, 1999
- 2-65) Bakharev T.: Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cem. Concr. Res.*, Vol.35, pp.1233-1246, 2005
- 2-66) N. K. Lee, et al: Setting and mechanical properties of alkali activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature, *Construction and building materials*, 47, pp.1201-1209, 2013
- 2-67) 河尻留奈ら：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011
- 2-68) Pan Z., et al: Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures, *Construction and building materials*, Vol.36, pp.365-372, 2012
- 2-69) Provis J., et al: *Geopolymers structure, processing , properties and industrial applications*, CRC Press, 2009
- 2-70) Wallah S. E., et al: Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Long-term properties, Research report GC2, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, available at space@curtin or www.geopolymer.org., 2006
- 2-71) Charoencha R., et al: Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers, *International journal of minerals, Metallurgy and materials*, Vol.18, No.1, pp.100-104, 2011
- 2-72) ParthaSarathiDeb, et al: Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature, *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*, Vol.125, pp.594-600, 2015
- 2-73) Kamal N.: Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of Portland cement in concrete industry, *Mechanics materials*, 103, pp.110-122, 2016
- 2-74) K. Pasupathy, et al: Carbonation of a blended slag-fly ash geopolymer concrete in

- field conditions after 8 years, *Construction and building materials*, Vol.125, pp.661-669, 2016.10
- 2-75) A. A. Adam, et al: Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete, Doctoral thesis of RMIT University Melbourne, Australia, 2009
- 2-76) 山口典男ら：ジオポリマーコンクリート製造技術の開発，長崎県窯業技術センター研究報告，pp.21-29，2015
- 2-77) Sha Li, et al: Neutralization resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete, *コンクリート工学会年次論文集*, Vol.39, No.1, pp.2023-2028, 2017.7
- 2-78) 北田達也ら：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
- 2-79) 上原元樹ら：左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調整と諸特性，*コンクリート工学年次論文集*，Vol.41, No.1, pp.1939-1944, 2019
- 2-80) T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridthirud, S. Hatanaka, P. Chindaprasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, *Construction and building materials*, Vol.98, pp.482-488, 2015.8
- 2-81) Fernando C. C. F., et al: Concrete beams repaired with geopolymer mortar, *Revistamateria*, Vol.23, No.3, 2018
- 2-82) 伊藤彰利，ポンマハーサイ パラミ，畑中重光：傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性に関する基礎的研究，*日本建築学会東海支部研究報告集*，Vol.56，pp.73-76，2018.2
- 2-83) Sanjay Pareek, 鹿島大雄, 丸山一平, 荒木慶一：各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究，*コンクリート工学会年次論文集*，Vol.40, No.1, pp.1839-1844, 2018.7
- 2-84) Hani Alanazi, Mijia Yang, Dalu Zhang, Zhili (Jerry) Gao: Bond strength of PCC pavement repairs using metakolin-based geopolymer mortar, *Cement and concrete composites*, pp.75-82, 2015
- 2-85) Yung-Chin Ding, Ta-Wui Cheng, Yu-Sheng Dai: Application of geopolymer paste for concrete repair, *International federation for structure concrete*, pp.561-570, 2017.1
- 2-86) Ghasan F. H., et al: Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 80, pp.54-74, 2017
- 2-87) P. Balaguru : Geopolymer for repair and rehabilitation of reinforced concrete

- beams, Geopolymer institute, 1997
- 2-88) Sulaem M. L., et al: A study on the performance of damaged RC members repaired using ultra-fine slag based geopolymer mortar, *Construction and building materials*, Vol.217. pp.216-225, 2019
- 2-89) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編], pp.247-253, 2012
- 2-90) 若杉三紀夫：ポリマーセメント系補修材の開発と無機系複合表面処理工法の ASR 抑制効果に関する研究, 平成 26 年京都大学博士論文
- 2-91) 江口和雄, 片脇清士：補修・補強材料入門, ①ひび割れ注入, *コンクリート工学*, Vol.52, No.6, pp.540-545, 2014.6
- 2-92) 柿澤雅樹：コンクリート構造物の補修用樹脂材料の性能評価, 平成 28 年度岐阜大学博士論文
- 2-93) 江口和雄, 片脇清士：補修・補強材料入門, ①断面修復材と表面被覆材, *コンクリート工学*, Vol.52, No.7, pp.601-606, 2014.7
- 2-94) 繊維補強協会：断面修復工法の紹介, 会報, 2013
- 2-95) セメント協会：すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識, 第 2 版, 2011
- 2-96) Tanakorn Phoo-ngernkham, et al: Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue, *Construction and building materials*, 247, 2020
- 2-97) J. Thaarrini, et al: Comparative study on the production cost of geopolymer and conventional concretes, *International Journal of Civil Engineering Research*, Vol.7, No.2, pp.117-124, 2016

第 3 章 GP の基礎物性および ヤング係数の推定式

- 3.1 はじめに
- 3.2 実験方法
- 3.3 実験結果および考察
- 3.4 複合則理論によるヤング係数の評価
- 3.5 まとめ

[第 3 章の参考文献]

3.1 はじめに

既往の研究³⁻¹⁾によると、GP の価格は普通ポルトランドセメントを用いた場合の約 1.5~3 倍程になるが、普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、凝結時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる。GP に関しては、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明する段階にあるが、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。

フライアッシュ（以下、FA）のみを用いた GP は、凝結時間が遅く初期強度発現性に劣り、実用的な強度発現性を得るには加温養生が必要とされている。したがって、常温硬化型の GP とするために、高炉スラグ微粉末（以下、BFS）と FA を併用する検討例が比較的多い³⁻²⁾。市川ら³⁻³⁾によれば、高炉スラグ微粉末の添加量を大きくすると圧縮強度が比較的に増加する傾向がある。

しかし、GP の場合、同一強度のセメント硬化体に比べヤング係数が低くなることが報告されている³⁻⁴⁾³⁻⁵⁾。南ら³⁻⁶⁾は、GP コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には相関性が認められ、一般的なセメント系材料を用いた硬化体と同様に、圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができると報告している。ヤング係数は、その部材の剛性や変形を評価する際に用いられる。配（調）合条件よりヤング係数を推定できれば GP を構造部材へ利用する際に設計上寄与するものと考えられる。

セメントコンクリートのヤング係数の評価方法としては、骨材および混和剤による係数、単位容積質量および圧縮強度をパラメータとする建築学会式などの実験式と、セメントペーストと骨材のヤング係数とそれらの構成比を用いて算出する複合則を用いた理論式による推定方法があるが、後者による評価方法のほうが適切であろう³⁻⁷⁾。

本章では、BFS が粉体の全容積に占める割合（以下、BFS 置換率）と骨材率を変化させた GP 硬化体のヤング係数を実験的に調べ、複合則理論によるヤング係数の推定方法について検討を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 使用材料

表 3-1 に使用材料を、表 3-2 に蛍光 X 線分析（XRF）による粉体の化学組成を示す。GP の粉体としては、JIS A 6201 に規定されている FA II 種および JIS A 6206 に規定されている 4000 ブレーンの BFS を使用した。アルカリ溶液には、水ガラス 2 号（以下、WG2）および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液（以下、NH）を使用した。比較用のセメント硬化体の粉体には、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には三重県町屋川産川砂を使用し、粗骨材には三重県志摩産砕石 5 号と 6 号を質量比 1 : 1 で混合させたものを使用した。

表 3-3 に実験の要因と水準を示す。セメント硬化体の調合は、水セメント比を 0.5 と

第 3 章 GP の基礎物性およびヤング係数の推定式

し、細骨材および粗骨材容積率を変化させ、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの供試体を作製した。セメントモルタルの場合は、細骨材容積率（モルタル全容積に対する細骨材の割合）を 0%（ペースト）から 60%まで 10%ずつ増加させ、7 種類のセメントモルタルの供試体を作製した。セメントコンクリートの場合は、粗骨材容積率を 0%（細骨材容積率 50%のセメントモルタル）から 50%まで 10%ずつ増加させ、6 種類のセメントコンクリートの供試体を作製した。

GP の調合は、アルカリ溶液と粉体の質量比を 0.5 とし、アルカリ溶液は、質量比で WG2:NH=2:1 となるように混合したものを使用した。FA のみを用いた GP は、凝結時間が遅く初期強度発現に劣り、実用的な強度発現を得るには加温養生が必要とされている。したがって、常温硬化型の GP とするために、BFS と FA を併用する検討例が多く報告されている³⁻¹⁾。市川ら³⁻²⁾によれば、BFS の添加量の増加に伴い、圧縮強度が増加すると報告している。そのため、本実験では主粉体とした FA の一部を BFS に置換したことによる影響も調べた。BFS 置換率を 0%, 10%, 20%の 3 水準とし、GP 硬化体の種類（ペースト、モルタルおよびコンクリート）、細骨材および粗骨材容積率はセメントと同様とした。

表 3-1 使用材料

種別	記号	材料名	密度(g/cm ³)
粉体	OPC	普通ポルトランドセメント	3.15
	FA	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	BFS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
アルカリ溶液	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	1.35
細骨材	S	三重県町屋川産川砂 (吸水率 2.15%)	2.59
粗骨材	G1	三重県志摩産5号碎石 (吸水率 0.93%)	2.66
	G2	三重県志摩産6号碎石 (吸水率 1.29%)	2.66

表 3-2 活性フィラーの化学組成

成分	FA(%)	BFS(%)
Al ₂ O ₃	23.64	14.94
SiO ₂	60.49	34.04
CaO	2.90	42.72
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35
K ₂ O	1.21	0.26
MgO	0.53	5.81
Na ₂ O	0.49	0.26
Ig.loss	3.05	0.00
合計	96.99	98.38

表 3-3 実験の要因と水準

種別		要因	水準
モルタル	GP	V _{BFS} (%)	0, 10, 20, (40, 60, 80)
	セメント	V _s (%)	0 (ペースト), 10, 20, 30, 40, 50, 60
コンクリート	GP	V _{BFS} (%)	0, 10, 20
	セメント	V _g (%)	0 (V _s =50%のモルタル), 10, 20, 30, 40, 50
V _{BFS} : FAに対するBFS置換率 (容積比) V _s : 細骨材容積率, V _g : 粗骨材容積率			

3.2.2 供試体の作製方法

GP 硬化体を作製する際に用いたアルカリ溶液は前日に WG2 と NH を質量比で 2:1 となるように混ぜ、20℃、60%RH の養生室で保管したものとした。

セメントおよびGPペーストの練混ぜには、ハンドミキサーを用いた。練混ぜ方法としては、特にGPペーストの場合は、最初にハンドスコップで粉体のみを空練りした後、アルカリ溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜ、30秒間掻き落としをした後、再び120秒間練り混ぜた。硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。その後、φ50×100mmのプラスチック製型枠に打ち込んだ(図3-1)。打ち込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留め、材齢28日まで20℃、60%RHの環境で養生を行った。

モルタルおよびコンクリートの練混ぜには、セメント、GPともにオムニミキサ(図3-2)を用いた。練混ぜ方法は、粗骨材、細骨材、粉体(セメントあるいはGPの場合はFAとBFSを事前に混ぜた粉体)の順に投入し、30秒間空練りを行った。次に、水あるいはアルカリ溶液を投入し60秒間練り混ぜた後、掻き落としを行い、高速で120秒間の練混ぜを行った(図3-1)。打ち込む前にスランプと空気量の試験を実施した。供試体は、モルタルの場合にはφ50×100mmの円柱供試体、コンクリートの場合にはφ100×200mmの円柱供試体とし、材齢28日まで20℃、60%RHの環境で型枠内封かん養生とした。所定材齢に達した後に脱型した供試体は、コンクリート研磨機を用いて端面を平滑に整えた。

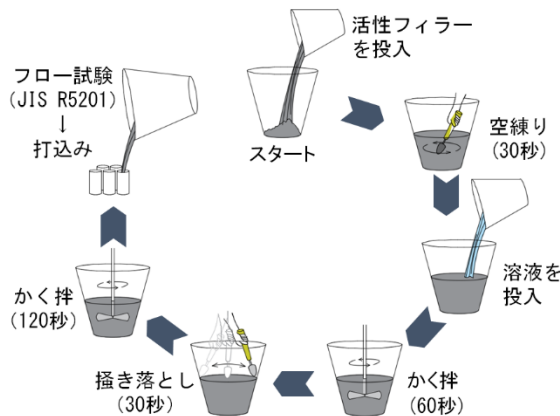


図3-1 練混ぜ手順



図3-2 オムニミキサ

3.2.3 実験方法

圧縮試験および割裂引張試験はそれぞれ JIS A 1108 および JIS A 1113 に準拠した。各調合につき 3 本ずつの供試体を用いて試験を行った。また、ヤング係数の測定に関しては、JIS A 1149 に従い、圧縮試験を行い、圧縮応力-ひずみ曲線を描き、ヤング係数を求めた。ここで、コンクリート供試体にはコンプレッソメータを、ペーストおよびモルタル供試体にはワイヤストレーンゲージを用いて縦ひずみの測定を行った。

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 GP ペーストの圧縮特性

(1) 圧縮強度

図 3-3 に圧縮試験結果を示す。なお、同図には過去のデータ（白丸）およびセメントの圧縮強度も併示してある。図より、BFS 置換率が増加するに従い、圧縮強度も増加する傾向がみられ、過去の実験結果と一致している。また、圧縮強度と BFS 置換率の間に相関が認められ、以下の式 (1) のような線形式で近似することができるといえる。

$$F_c = a \cdot V_{BFS} + b \quad (1)$$

ここに、 F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

V_{BFS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

a, b は実験係数 (本実験の範囲では $a=1.3$, $b=31.8$)

しかし、BFS を 80% 置換したものについては、高い圧縮強度を得たものの、近似線より大きく外れている。これは、BFS の添加量が大きく、瞬結が起これ (写真 3-1)、打込んでいる途中で硬化し、充填不良な部分があったため、予想した強度より低い結果が得られたと考えている。

また、同一溶液粉体比のセメントペーストと比較すると、BFS 置換率 20% 以上の GP ペースト硬化体がセメントペースト硬化体の圧縮強度を上回った。

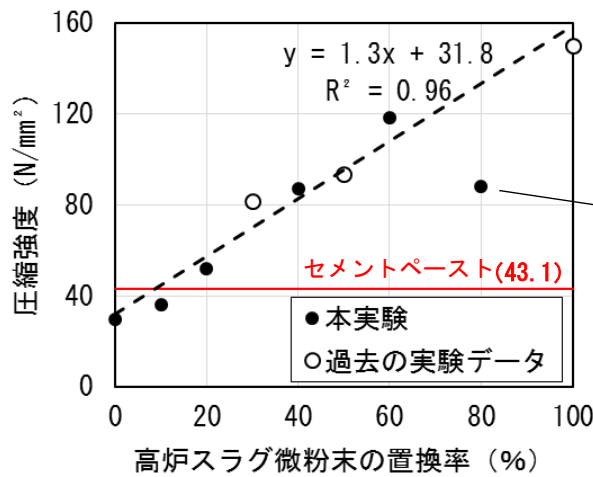


図3-3 圧縮試験の結果



写真3-1 BFS置換率80%の脱型後の供試体

(2) ヤング係数

図 3-4 にヤング係数の結果を示す。同図には、清原ら³⁻⁸⁾のセメントペーストの推定式(式(2))による計算結果も示す。図より、高炉スラグ微粉末の置換率が大いほど増加する傾向がみられるが、同一溶液粉体比のセメントペースト硬化体と比較すると、置換率 40% で同等なヤング係数の値が得られ、置換率 40% 以上のものはセメントを上回っている。

$$E_p = a + b \log(C/W) \quad (2)$$

ここに、 E_p はセメントペーストのヤング係数 (kN/mm²)

$$a = -3700 + 4200 \log(t)$$

$$b = 39500 - 2276 \log(t)$$

t は供試体の材齢(日)

C/W はセメント水比

また、GP ペーストのヤング係数と高炉スラグ微粉末の置換率の間に相関が認められ、以下の式(3)のような線形式で表すことができた。

$$E_p = a \cdot V_{BFS} + b \quad (3)$$

ここに、 E_p は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BFS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

a, b は実験係数 (本実験では $a=243.2, b=4483$)

今回のヤング係数の実験結果と清原ら³⁻⁸⁾の推定式により算出した結果と比較すると、セメントの場合は計算値が実験値の約80%でほぼ近い結果が得られるが、GPペースト硬化体の場合は、同一溶液粉体比においても高炉スラグ微粉末の置換率によって圧縮強度とともにヤング係数が異なるため、式 (2) と同様な推定は適切でないといえる。

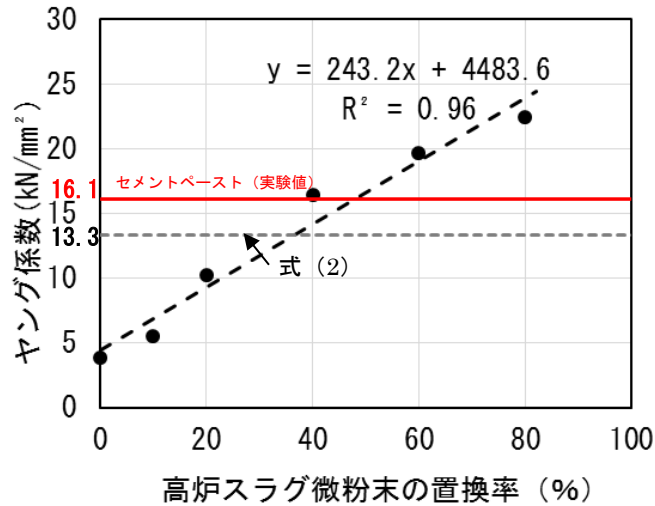


図 3-4 ヤング係数の結果

(3) 圧縮強度とヤング係数の関係

図 3-5 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。同図には OPC ペーストと既往の研究結果³⁻⁷⁾も示す。南ら³⁻⁶⁾は、GP モルタルならびに GP コンクリートのいずれも、圧縮強度とヤング係数の関係は圧縮強度を指標とする指数関数で表している。これに対し、図 3-5 によると、GP ペーストを対象とした本実験の範囲では、既往の研究と同様に圧縮強度とヤング係数との間に線形的な相関がみられ、その関係を式 (4) のように表すことができる。しかし、本実験のヤング係数が既往の研究より小さく、その理由は既往の研究では主粉体としてカルシウムを多く含む FA を使用したからだと考えられる。

$$E_c = k \cdot F_c \quad (4)$$

ここに、 E_c は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

k は実験係数 (本実験の範囲では $k=173.5$)

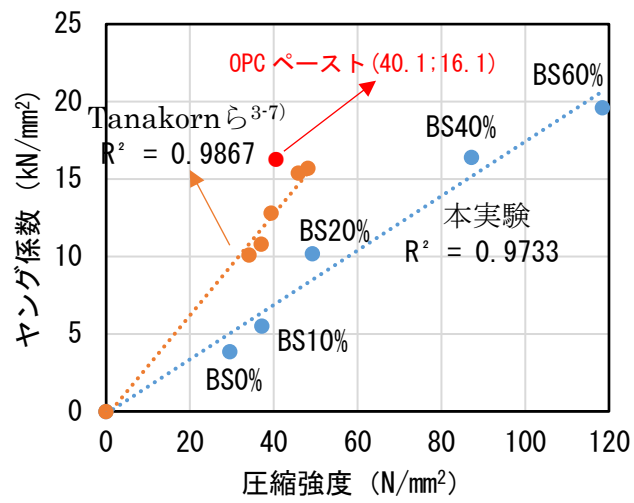


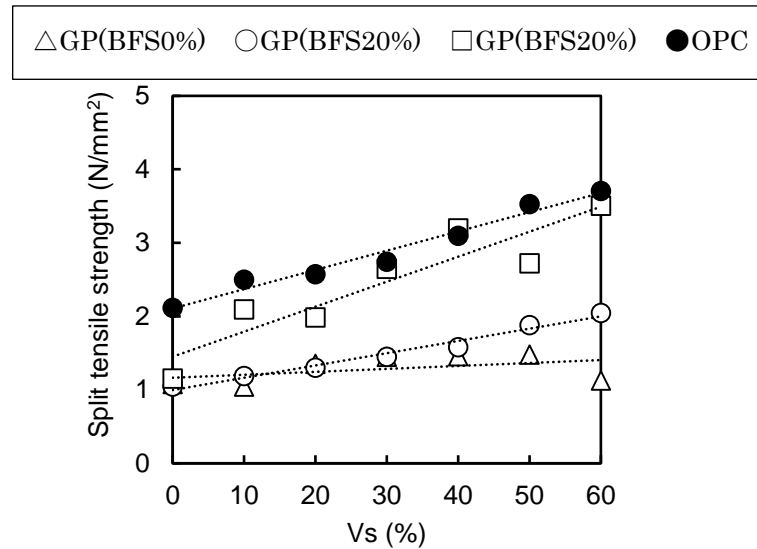
図 3-5 圧縮強度－ヤング係数の関係

3.3.2 GPモルタルおよびコンクリート

(1) 割裂引張強度

図3-6にモルタルおよびコンクリートの割裂引張試験結果を示す。図3-6 (a) より細骨材容積率(V_s)が大きくなるほど、モルタルの割裂引張強度がOPC, GPともに増加する傾向にあり、その増加の程度はGPではBFS置換率が増加するほど大きくなると言える。

図3-6 (b) より粗骨材容積率(V_g)が大きくなるほどOPCコンクリートおよびBFS置換率0%のGPコンクリートの割裂引張強度が低下するのに対し、BFS置換率10-20%のGPコンクリートのそれが大きく変化せずほぼ一定となっていることが確認された。Yoshiokaら³⁻⁸⁾によれば、骨材量を増加させた際のモルタルの割裂引張強度が大きくなる要因としては、結合材骨材間の内部的拘束効果によるものとみられ、また、反対にコンクリートの場合の割裂引張強度の低下は骨材量の増加によるモルタル分の減少、内部拘束の低下および骨材と結合材との間の遷移帯層の増加が起因すると考えられると報告している。



a. Mortar

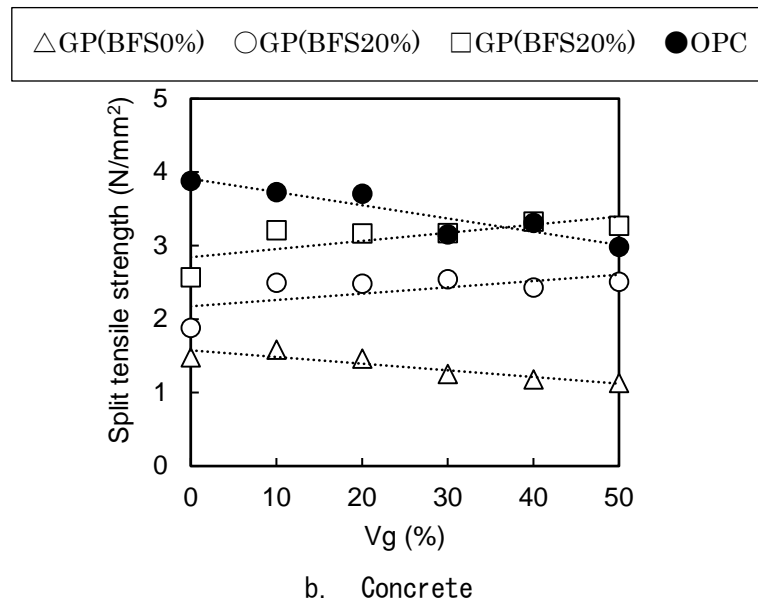


図 3-6 割裂引張強度と骨材量の関係

(2) 圧縮強度

図 3-7 に、モルタルの圧縮強度と細骨材容積率の関係を示す。セメントモルタルは、細骨材容積率 0% (ペースト) の圧縮強度が最も大きく、細骨材容積率を 20%まで増加させるに伴って圧縮強度がわずかに減少するが、20%と 50%の間ではほぼ等しく、細骨材率が 50%を超えると圧縮強度が大きく低下した。川上ら³⁻¹⁰⁾の過去の実験結果と同様な傾向である。これは、細骨材率 60%のセメントモルタル供試体ではセメントモルタルの充填不良に伴う内部空隙の増加によるものと考えられる。

一方、GPモルタルの場合、特にBFSを置換したものでは、細骨材容積率を0%から10%に増加させたとき、セメントの場合と異なり、圧縮強度の増加がみられた。また、BFS置換率 0%と10%のとき、細骨材容積率を大きくするに伴って圧縮強度が低下したのに対し、BFS置換率20%では細骨材容積率が40%を超えるまで圧縮強度の低下が確認されなかった。これはBFS置換率の増加によってC-S-H系の生成物が増加し、GPペーストの強度が大きくなることに起因すると考えられる。

図3-8に、コンクリートの圧縮強度と粗骨材容積率の関係を示す。セメントコンクリートは、粗骨材容積率を10%増加させたことにより、圧縮強度がわずかに増加したが、10%を超えると圧縮強度が徐々に低下した。過去の研究には、粗骨材容積率と圧縮強度の間にほぼ直線的な関係が認められると報告されている³⁻¹¹⁾。本実験結果においては、粗骨材容積率10%以上の場合に同様の傾向が確認された。一方、GPコンクリートは、粗骨材容積率10%においてはセメントコンクリートと同様に圧縮強度が増加し、10%を超えると粗骨材容積率の増加に伴い圧縮強度の低下が見られたが、その低下の程度はわずかであり、セメントコンクリートほど大きくない。この理由として、GPコンクリートの場合、モルタルと粗骨材の間の付着がセメントよりも優れているのではないかと考えられ、今後の検討課題としたい。

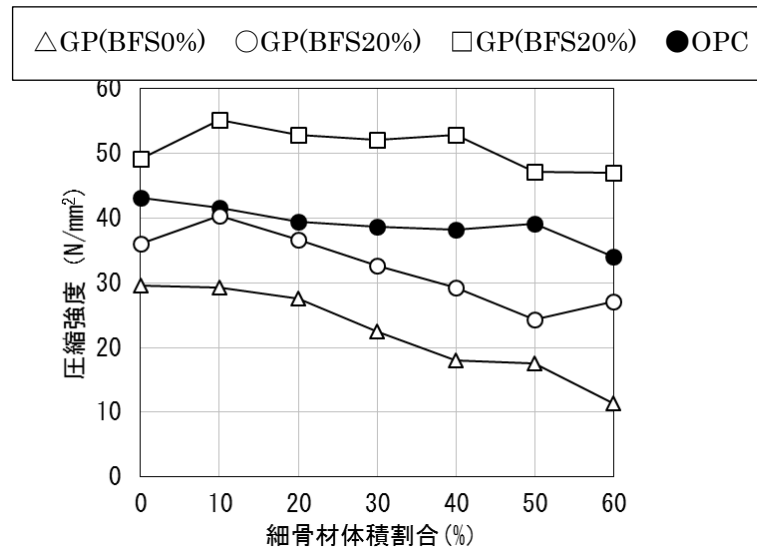


図 3-7 モルタルの圧縮強度と細骨材容積率の関係

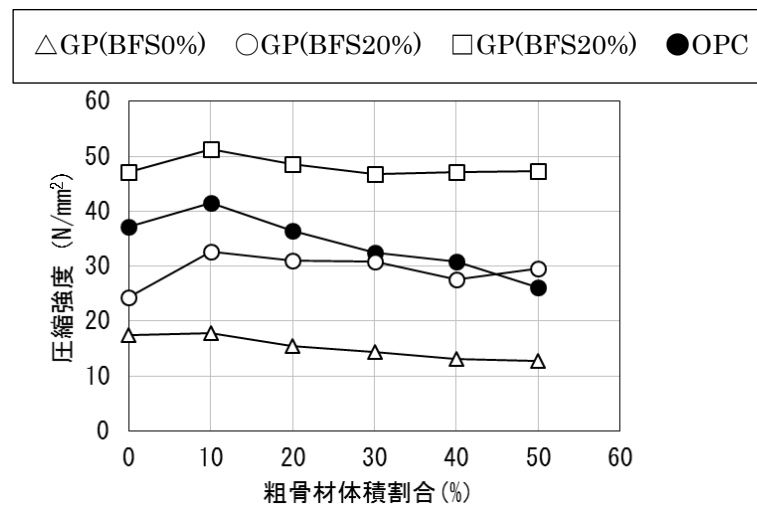


図 3-8 コンクリートの圧縮強度と粗骨材容積率の関係

(2) ヤング係数

図 3-9 にモルタルのヤング係数と細骨材容積率の関係を、図 3-10 にコンクリートのヤング係数と粗骨材容積率の関係を示す。

図 3-9 より、セメントモルタルのヤング係数は細骨材容積率が 60%まで増加するに伴ってほぼ直線的に増加している。また、GP モルタルの場合も細骨材容積率の増加とともにヤング係数の増加がみられ、その増加量は BFS 置換率が大きいほど大きくなる。しかし、細骨材容積率が 40%を超えると GP モルタルのヤング係数に若干の低下が見られた。

図 3-10 より、セメント、GP コンクリートともに粗骨材容積率の増加に伴いヤング係数は増加するが、BFS 置換率 0%の GP コンクリートの場合だけはその増加の程度が極くわずかなのである。また、セメント、GP コンクリートともに粗骨材容積率が 40%を超えるとヤング係数が低下した。

セメント、GP 硬化体ともに骨材容積率の増加に伴いヤング係数が増加するが、ある割合（本実験では約 40%）を超えると、施工性の低下に伴う充填の不良や母材マトリックスと骨材との境界面の影響を受け、ヤング係数の増加が頭打ちとなる。

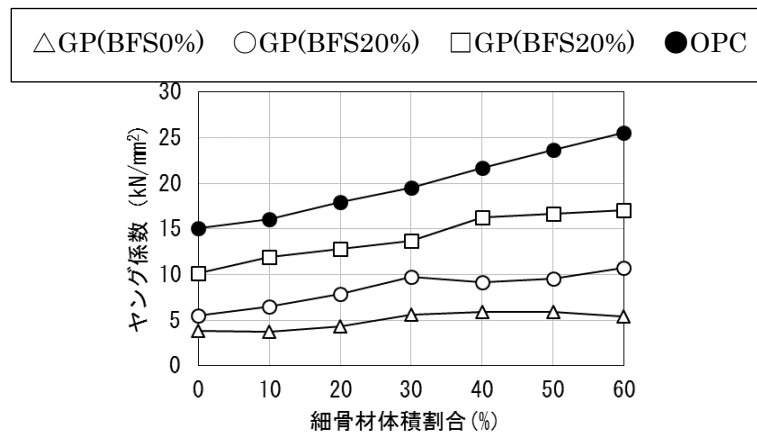


図 3-9 モルタルのヤング係数と細骨材容積率の関係

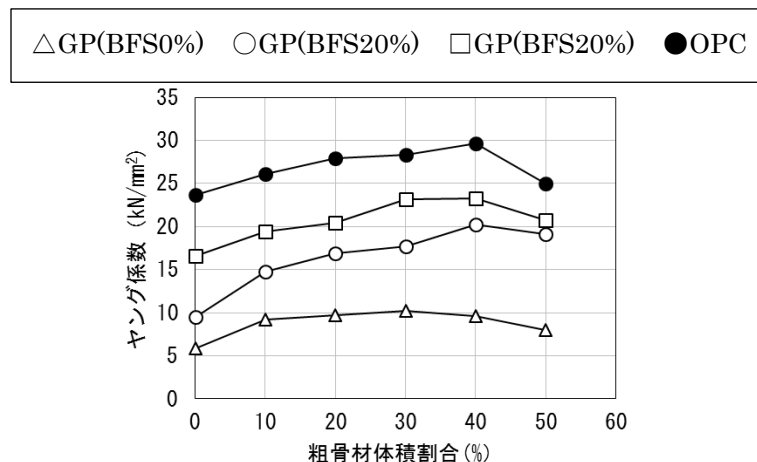


図 3-10 コンクリートのヤング係数と粗骨材容積率の関係

(3) 圧縮強度 - ヤング係数の関係

図3-11に、GP硬化体のヤング係数と圧縮強度の関係の一例を示す。GPペーストおよびGPモルタルの場合は、BFS置換率が増加するほど、圧縮強度、ヤング係数ともにほぼ直線的に増加し、圧縮強度とヤング係数の間に直線的な関係が認められた。一方で、GPコンクリートの場合は、セメントコンクリートと同様に圧縮強度とヤング係数の間には、非線形の関係が見られ、南ら^{3,6)}の試験結果と同様な傾向を示している。

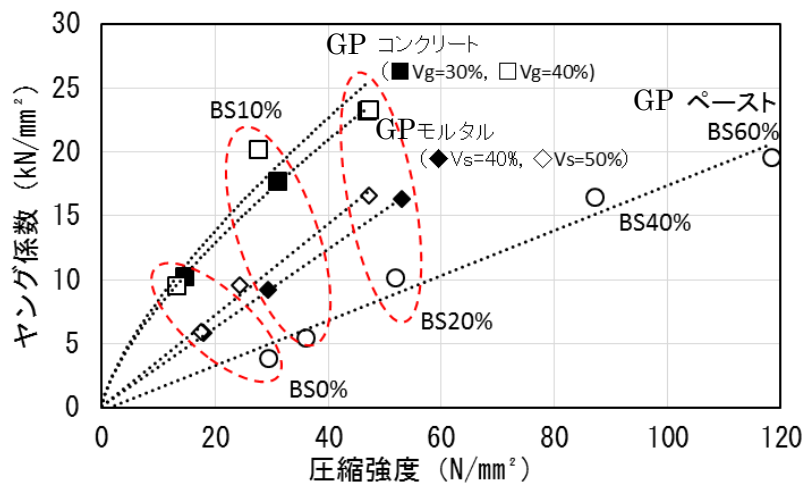


図 3-11 ヤング係数と圧縮強度の関係

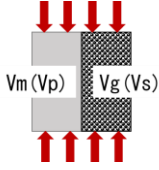
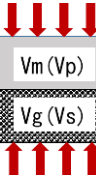
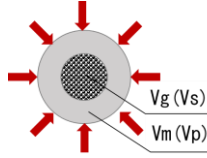
3.4 複合則理論によるヤング係数の評価

3.4.1 複合則理論について

コンクリートのような複合材料の弾性係数を評価するために、複合則理論に基づいていくつかの力学モデルが提案されてきた。それを用いて普通セメントモルタルあるいはコンクリートおよびポーラスコンクリートのヤング係数を精度よく推定できたという^{3-9)~3-16)}。

本研究では、そのなかの簡易的な直列と並列モデルおよび比較的精緻とされる Hashin-Hansen モデルを用いて検討を行った。各モデルの計算式を表 3-4 に示す³⁻¹²⁾。ここで、モルタルの場合はペーストと細骨材の 2 相複合体として、コンクリートの場合は細骨材含有率 50%のモルタルと粗骨材の 2 相複合体として取り扱うこととする。

表 3-4 複合則モデル³⁻¹²⁾

Models	Equations	Schematic diagram
Parallel	$E_{c(m)} = E_{g(s)}V_{g(s)} + V_{m(p)}E_{m(p)}$	
Serial	$E_{c(m)} = \frac{1}{\left(\frac{V_{g(s)}}{E_{g(s)}} + \frac{V_{m(p)}}{E_{m(p)}}\right)}$	
Hashin-Hansen	$E_{c(m)} = E_{m(p)} \times \frac{[V_{m(p)} E_{m(p)} + (1 + V_{g(s)}) E_{g(s)}]}{[(1 + V_{g(s)}) E_{m(p)} + V_{m(p)} E_{g(s)}]}$	

$E_{c(m)}$, $E_{m(p)}$, $E_{g(s)}$: Elastic modulus of concrete, mortar (or paste), coarse aggregate (or fine aggregate), respectively

$V_{m(p)}$, $V_{g(s)}$: Volume ratio of mortar (or paste), coarse aggregate (or fine aggregate)

3.4.2 ペーストおよびモルタルのヤング係数

セメントペーストのヤング係数は、清原ら³⁻⁹⁾の推定式(式(4))により求めた。また、GP ペーストについては、アルカリ溶液粉体比が 0.5 のとき、GP ペーストのヤング係数と BFS 置換率の間に式(5)の関係が GP ペーストの結果から得られている。したがって、今回の GP ペーストのヤング係数は式(5)により求めることとした。

$$E_p = a + b \log(C/W) \quad (4)$$

ここに、 E_p : セメントペーストのヤング係数 (kN/mm²)

a, b : 材料係数 ($a = -3700 + 4200 \log(t)$,

$b = 39500 - 2276 \log(t)$)

t : 供試体の材齢 (日)

C/W : セメント水比

$$E_p = 243 V_{BFS} + 4480 \quad (5)$$

ここに、 E_p : GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BFS} : BFS 置換率 (%)

また、コンクリートの母材モルタル ($V_s=50\%$) のヤング係数は、式(4)あるいは式(5)により求められたペーストのヤング係数と後述する式(6)により求められた細骨材のヤング係数を Hashin-Hansen モデル式に代入して算出した値を用いた場合、後述する図 3-11 に示しているように計算値が実験値より大きい結果となったため、今回は圧縮試験より求められた実験値を用いた。

3.4.3 骨材のヤング係数

細骨材および粗骨材のヤング係数は、直接求めることは困難であった。よって、今回は、清原ら³⁻⁹⁾が骨材の吸水率をパラメータとして提示した実験式(式(6))を用いて求めることとした。その結果、細骨材のヤング係数 E_s は 4.98×10^4 N/mm² となった。粗骨材に関しては、今回の実験では 5 号と 6 号碎石の 2 種類を 1 : 1 で用いたため、まずそれぞれの吸水率を使って碎石のヤング係数の推定値を求めた。次に、式(7)により 5 号および 6 号碎石のヤング係数の推定値にコンクリート中の両者の絶対容積比を乗じて全粗骨材のヤング係数 ($E_g=5.78 \times 10^4$ N/mm²) とした³⁻⁹⁾。

$$E_a = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \quad (6)$$

ここに、 E_a : 骨材のヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm²)

μ : 吸水率 (%)

$$E_g = V_{g1} E_{g1} + V_{g2} E_{g2} \quad (7)$$

ここに, E_{g1} , E_{g2} : 5 号, 6 号碎石のヤング係数

V_{g1} , V_{g2} : 5 号, 6 号碎石の骨材率

3.4.4 複合則理論による推定結果

複合則理論により推定したモルタルおよびコンクリートの計算結果を, それぞれ図 3-12 および図 3-13 に示す。図 3-13 には, 建築学会 (AIJ) 式により算出したコンクリートのヤング係数も併示した。

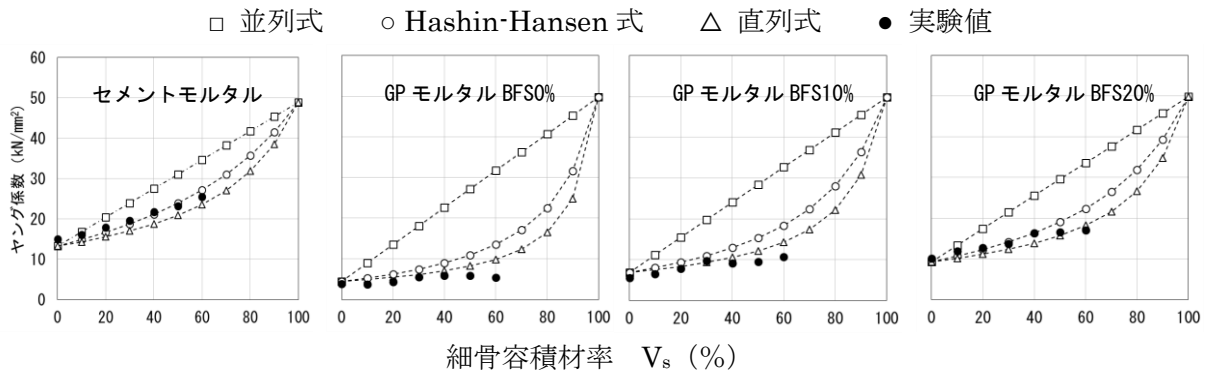


図 3-11 モルタルのヤング係数の実験値と推定値の比較

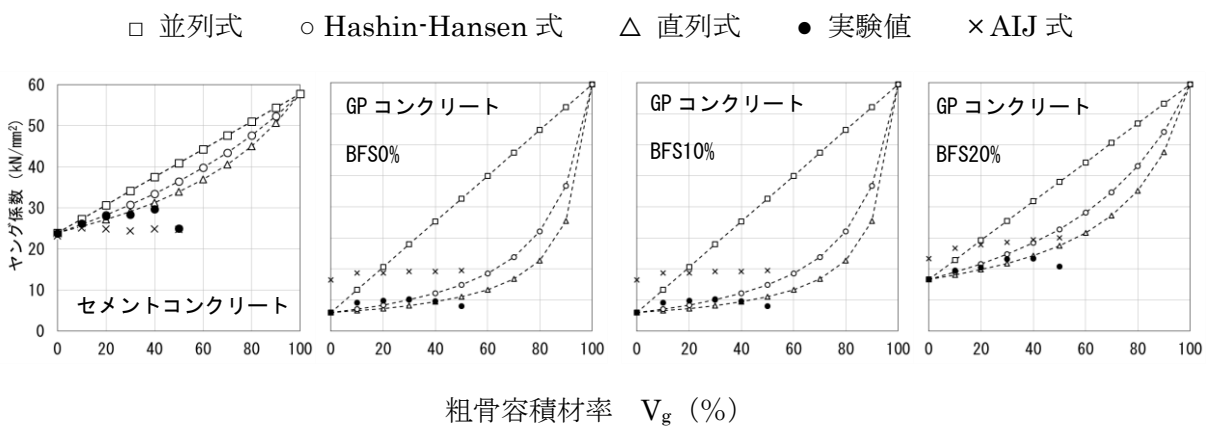


図 3-12 コンクリートのヤング係数の実験値と推定値の比較

3.4.5 推定結果と実験結果の比較評価

図 3-12 によれば, Hashin-Hansen 式によるセメントモルタルおよび BFS 置換率 20% の細骨材率 0~40% の GP モルタルのヤング係数の推定結果は, 実験結果とほぼ一致している。一方, GP モルタルは, 直列モデルで概ね推定することが可能であるが, 実験値に比べ計算値のほうが大きく, その差は BFS 置換率が大きいほど小さくなる。これは酸化カルシウム成分の多い BFS の添加によって GP モルタルがより緻密になることが一因と考えられる。また, 細骨材率の増加に伴い, その割合が 40% を超えると実験値が計算値を大きく下回る。この傾向は細骨材率の増加に伴いペーストと骨材との界面に生じるマイクロクラックや遷移帯の増加および充填不良に起因するものと考えられる。

図 3-13 によれば, Hashin-Hansen 式によるセメントコンクリートのヤング係数の推定結果は, 粗骨材容積率が 0~30% では実験値とほぼ一致する。一方, 粗骨材容積率が約 30% を超えたセメントコンクリート, GP コンクリートともに, たとえ直列モデルを用いた場合でも計算値が実験値より大きく, その差は粗骨材容積率が大きいほど大きくなる。また, GP コンクリートの場合, BFS 置換率が大きいほどその差は小さくなっている。これらの傾向は, モルタルの場合と類似している。複合則理論を用いてセメントモルタルおよびコンクリートのヤング係数を評価している既往の研究^{3-13) 3-1)}によれば, より精度よく推定するためにペーストと細骨材あるいは母材モルタルと粗骨材の境界面(遷移帯)の影響や骨材を混入させることにより巻き込まれた空隙の影響などを考慮する必要があると報告されている。したがって, GP 硬化体においてもそれらの影響を考慮し, 推定式に反映させる必要があると考えられる。また, BFS を置換すると置換しないものと比べて生成物が異なり, 硬化体の構造がより緻密になる。GP の硬化体の特性が複合則理論による推定に与える影響についての詳しい検討は今後の課題としたい。

3.5 まとめ

FAの一部として置換するBFSの量, および細骨材あるいは粗骨材率を変化させたGP硬化体の圧縮特性について実験的に調べ, 複合則理論に基づいてヤング係数を推定した。本実験の範囲において以下の知見が得られた。

- (1) 高炉スラグ微粉末の置換率を大きくするにつれて, 圧縮強度が大きくなることが, 過去の実験と同様に確認できた。また, その関係を以下の線形式で表した。

$$F_c = a \cdot V_{BFS} + b$$

ここに, F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

V_{BFS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

a, b は実験係数

- (2) 高炉スラグ微粉末の置換率を大きくするにつれて, 圧縮強度とともにヤング係数も増加する。その関係を以下の線形式で表した。

$$E_p = a \cdot V_{BFS} + b$$

ここに, E_p は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BFS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

a, b は実験係数

- (3) GPペーストの場合でも圧縮強度とヤング係数の間に相関が認められ, 以下の線形式で表すことができる。

$$E_c = k \cdot F_c$$

ここに, E_c は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

k は実験係数

- (4) 細骨材容積率の増加に伴い GP モルタルの圧縮強度が低下する。その低下の程度は BFS 置換率が大きいほど小さくなる。
- (5) 粗骨材容積率の増加に伴い GP コンクリートの圧縮強度が低下する。しかし, その低下の程度はセメントコンクリートと比較して小さい。
- (6) 骨材容積率の増加に伴い, GP モルタルおよびコンクリートのヤング係数は増加するが, 骨材率が 40%を超えると充填不良によると思われる空隙の増加の影響や遷移帯の増加などによりヤング係数が増加しなくなる, もしくは低下する。
- (7) BFS の置換がある場合 (10~20%) の GP 硬化体のヤング係数は, 骨材容積率 40%以下においては複合則理論により概ね推定することが可能である。

【参考文献】

- 3-1) 坪内徹朗：石炭灰の品質がジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響に関する実験的研究，平成 29 年度三重大学修士論文
- 3-2) 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
- 3-3) 市川敬悟：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究，三重大学平成 27 年修士論文
- 3-4) 永井伴英，李柱国，高垣内仁志，菅彰：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの力学性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2077-2082，2017.7
- 3-5) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011.7
- 3-6) 南浩輔，松林卓，舟橋政司：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，pp.1987-1992，2013.7
- 3-7) Yoshioka, K., Yoshitake, I., Ebitani, Y., Hamada, S. (2005) Split tensile strength characteristics of young-aged expanded concrete with different coarse aggregate contents, *The 60th proceeding of annual meeting of the Japan society of civil engineers*, 719-720. (in Japanese)
- 3-8) P. N. Tanakorn, et al: High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol.20, pp.310-318, 2013.8
- 3-9) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，上田賢司：コンクリートのヤング係数の推定式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.601-606，1999
- 3-10) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，三橋博三：複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定式に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.576，pp.7-14，2004.2
- 3-11) 川上英男，脇敬一，中村いずみ：セメントモルタルのヤング係数評価，福井大学工学部研究報告，Vol.43，No.2，1995.9
- 3-12) 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究（その 1），日本建築学会論文報告集，No.166，pp.19-27，1969.12
- 3-13) 川上英男：コンクリートの弾性係数と複合理論の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.619-624，1999.6
- 3-14) 趙力采，小林一輔：コンクリートの弾性係数における複合特性，コンクリートジャーナル，Vol.12，No.7，pp.23-34，1974.7
- 3-15) 塚原絵万，魚本健人：多相複合理論に基づいたモルタルのヤング係数に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.481-486，2000.6

- 3-16) 齋藤俊克, 出村克宣: 複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.723, pp.825-832, 2016.5

第 4 章 シリカフュームを添加した GP の基礎的性能

- 4.1 はじめに
- 4.2 実験方法
- 4.3 実験結果および考察
- 4.4 まとめ

[第 4 章の参考文献]

4.1 はじめに

GP はセメントを用いた硬化体と同等レベルの圧縮強度を発現することが可能な他、耐硫酸性や高温抵抗性などの耐久性に優れ、鋼材や母体セメントコンクリートとの付着特性が通常のコンクリートあるいは市販の補修材と同等またはそれ以上であることが報告されている^{4-1)~4-4)}。また、GP はコンクリート構造物の補修材としての利用が有効であることも確認されている^{4-2),4-5),4-6)}。

現在、ひび割れ補修材にはエポキシ樹脂やウレタン樹脂などの有機系材料および（ポリマーセメントを含む）セメント系の無機系材料が使用されている。有機系材料は、付着やひび割れ追従性能などが良いことから、多く活用されているが、紫外線による劣化や耐火性に劣る点、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良、低粘度によるタレ、またコンクリートとの熱膨張係数や引張強度の差異が生じるなどの問題がある。また、その価格が高く、経済的な面で多量の使用には不適切である。一方、無機系材料は、母材コンクリートに近い材料特性を有するが、有機系材料に比べ充填性が劣ることや母材コンクリートに水分を吸収されるようなドライアウト現象の影響を受ける場合がある^{4-7)~4-9)}。

本研究では、無機系材料であり、ドライアウトの影響を受けにくく⁴⁻³⁾、耐久性、付着特性に優れたGPのひび割れ注入材としての活用について調べる。また、粒径の細かさが注入深さに関係する⁴⁻¹⁰⁾ことから、微細なひび割れへの充填が期待できる超微粒子のシリカフェーム（以下、SF）をGPの活性フィラーの一つとして用いる。

SFは金属シリコンおよびフェロシリコンをアーク式電気炉で製造する際に発生する排ガス中のダストを集じんしたものであり、世界各国でコンクリート用混和材として利用されている。SFの粒子はセメントやフライアッシュなどよりはるかに小さな球形であり、非晶質のSiO₂を主成分として構成されている。セメントコンクリートに用いることでコンクリート硬化体がより緻密になり、圧縮強度、付着強度および耐摩耗性が改善され、鉄筋の腐食防止にも効果的であることが知られている。

SFを添加したGPは、可使時間が延長でき、BFSを多用して凝結が早くなって練り混ぜられなくなる場合にも、SFの添加によって練混ぜが可能になることが報告されている^{4-11),4-12)}。また、硫酸塩に対して抵抗性が高いこと、硫酸イオンの浸入遅延作用が期待できることなどの特徴がある⁴⁻¹³⁾。SFをFAの一部に置換したGPに関する既往の研究によれば、SF置換率が大きくなるほど、流動性やワーカビリティが低下し、GPモルタルおよびGPコンクリートの場合、圧縮、引張および曲げ強度が若干増加するが、GPペーストの場合には、これらの強度が低下する傾向が見られている^{4-14)~4-20)}。

本実験の目的は、超微粒子によるひび割れ追従性に期待し、SFを活性フィラーとして大幅置換したGPペーストのRC構造物へのひび割れ注入材を開発することである。本章では、研究の第一段階としてSFをGPペーストの主要な活性フィラーとして使用した場合のジオポリマーのフレッシュ性状、硬化後の力学性状および生成物について検討する。なお、本研究では、活性フィラーにFAのみを使用する場合を基本とし、これをSFまたは

BFS で置換するという表現を用いる。

4.2 実験方法

4.2.1 使用材料

表 4-1 に使用材料を、表 4-2 に実験要因を、図 4-1 に活性フィラーの構成比を示す。本実験では、粉体には FA II 種 (JIS A 6201), BFS4000 (JIS A 6206), および SF (JIS 6207) を使用した。アルカリ溶液には、水ガラス 2 号 (以下, WG2) の原液および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH) を使用した。また、アルカリ溶液と粉体の質量比 (以下, W/P) を 0.5, 溶液の構成比は WG2 : NH = 2 : 1 で一定とし、粉体の構成比率のみを変化させた。ただし、練混ぜが出来なかった調合に関しては、粉体の乾燥部分が無くなり十分にペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。

表 4-3 に蛍光 X 線分析 (XRF) による粉体の主な化学組成を、表 4-4 に調合を、図 4-2 に粉体の粒度分布を示す。

FA は Al_2O_3 がおよそ 25%, SiO_2 がおよそ 60%, BFS は CaO がおよそ 43%, SiO_2 が 34%, Al_2O_3 が 15% で構成されている。SF は約 98% が SiO_2 である。また、粉体の平均粒径は、FA が $13.7\mu\text{m}$, BFS が $8.9\mu\text{m}$, SF が $2.6\mu\text{m}$ である。

表 4-1 使用材料

	Code	Materials	Density (g/cm^3)
Active Powder (P)	FA	Fly ash II (JIS A 6201, Blaine value 3700)	2.29
	BFS	Ground granulated Blast furnace slag 4000 (JIS A 6206)	2.90
	SF	Silica fume (JIS 6207)	2.30
Solution (W)	WG2	Water glass No.2	1.45
	NH	Sodium hydroxide solution(10mol/L)	1.35

表 4-2 実験の詳細

Factors	Details
Kind of powders	FA, BFS, SF
Powder Composition ratio※	Shown in Fig.2
Alkali solution-powder ratio※	W/P=0.5
Kind of solution	WG2, NH
Alkali solution composition ratio※	WG2:NH=2:1
[note] ※: mass ratio	

表 4-3 化学成分 (質量比)

	FA (%)	BFS (%)	SF (%)
Al ₂ O ₃	23.64	14.94	0.23
SiO ₂	60.49	34.04	97.75
CaO	2.90	42.72	0.23
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35	0.10
K ₂ O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na ₂ O	0.49	0.26	0.09
Ig.loss	4.03	0.25	0.28

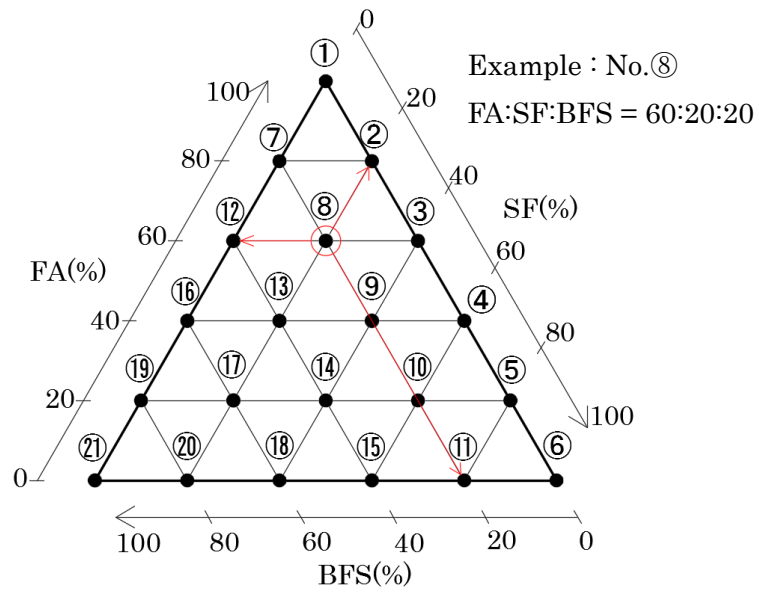


図 4-1 粉体構成

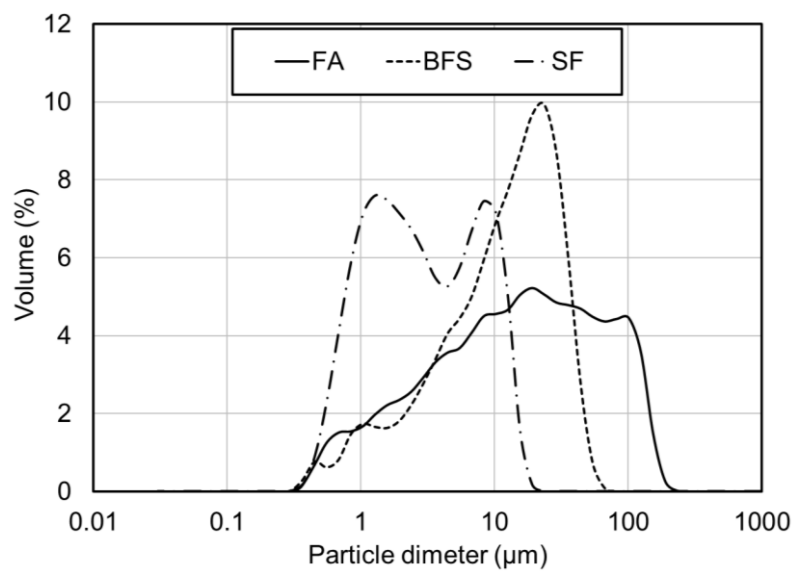


図 4-2 粉体の粒度分布

表 4-4 調合表 (W/P=0.5)

No.	Name of specimens (Powder composition ratio)	Unit weight (g/L)				
		FA	SF	BFS	NH	WG
①	FA100-SF0-BFS0	1265.8	0.0	0.0	211.0	421.9
②	FA80-SF20-BFS0	1013.1	253.3	0.0	211.1	422.1
③	FA60-SF40-BFS0	760.2	506.8	0.0	211.2	422.3
④	FA40-SF60-BFS0	507.0	760.6	0.0	211.3	422.5
⑤ ^{*1}	FA20-SF80-BFS0	253.6	1014.6	0.0	211.4	422.7
⑥ ^{*2}	FA0-SF100-BFS0	0.0	1268.8	0.0	211.5	422.9
⑦	FA80-SF0-BFS20	1036.7	0.0	259.2	216.0	432.0
⑧	FA60-SF20-BFS20	777.9	259.3	259.3	216.1	432.2
⑨	FA40-SF40-BFS20	518.9	518.9	259.4	216.2	432.4
⑩ ^{*1}	FA20-SF60-BFS20	259.6	778.7	259.6	216.3	432.6
⑪ ^{*1}	FA0-SF80-BFS20	0.0	1038.8	259.7	216.4	432.8
⑫	FA60-SF0-BFS40	796.5	0.0	531.0	221.3	442.5
⑬	FA40-SF20-BFS40	531.3	265.6	531.3	221.4	442.7
⑭	FA20-SF40-BFS40	265.8	531.5	531.5	221.5	443.0
⑮ ^{*1}	FA0-SF60-BFS40	0.0	797.7	531.8	221.6	443.2
⑯	FA40-SF0-BFS60	544.3	0.0	816.4	226.8	453.6
⑰	FA20-SF20-BFS60	272.3	272.3	816.8	226.9	453.8
⑱ ^{*1}	FA0-SF40-BFS60	0.0	544.8	817.3	227.0	454.0
⑲	FA20-SF0-BFS80	279.1	0.0	1116.5	232.6	465.2
⑳	FA0-SF20-BFS80	0.0	279.3	1117.1	232.7	465.4
㉑	FA0-SF0-BFS100	0.0	0.0	1432.3	238.7	477.4
[Note] ※1: W/P=0.6; ※2: W/P=0.8						

4.2.2 供試体の作製方法

(1) 練混ぜ方法

アルカリ溶液は、前日にWG2とNHを質量比で2：1となるように混ぜ、20℃、60%R.H.の養生室で保管したものを用いた。

まず粉体をハンドスコップで空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用いて60秒間練り混ぜ、30秒間掻き落としを行った後、再び120秒間練り混ぜた。なお本実験では1バッチの練混ぜ量を2Lとした（図4-3）。

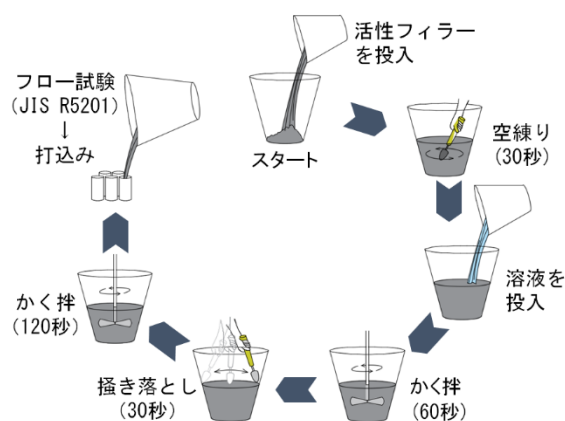


図4-3 練り混ぜ方法

練り上がったフレッシュ GP ペーストは、材齢 1, 28 日において圧縮強度試験を各調合 3 本ずつ行えるよう、φ50×100mm のプラスチック製円柱供試体型枠に打ち込んだ。

(2) 養生条件

打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下のような 2 つの温湿度条件とした。すなわち、60℃で 27 時間の加温養生と、材齢 28 日まで 20℃、60%R.H.の常温養生とした。GP の場合は、加温で縮重合反応が促進され、早期の強度発現が促されると報告されている。そのため、本実験では基礎特性として、加温養生の影響も調べることにした。

4.2.3 試験方法および準拠規準

硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。養生後、研磨機により端面を平滑に処理した。また、膨張が発生した供試体は、膨張した部分をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形になるように整形した。その後、JIS A 1108 に準拠して圧縮試験を行った。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 練混ぜ可否の状況

図4-4に、W/P=0.5での練混ぜの可否および瞬結の状況を示す。SF置換率が40~100%の範囲で練混ぜが行えなかった調合があった。そのため、所定の練混ぜ時間を経過し、容器内でペースト化しなかったり、ダマ状になったりして練混ぜが適切にできていなかった場合(図中×印)は、ペースト化するまでアルカリ溶液を加えて実験を行った。その結果、FAとBFSを含まないSF100の調合No.⑥はW/P=0.8で、調合No.⑤、⑩、⑪、⑮、⑱はW/P=0.6で練混ぜが適切にできた。これはSFの比表面積が大きく、溶液と接触する粒子の表面積が多くなり、溶液を早く吸収するためであると考えられる。溶液を加えることにより変更したW/Pの値を図中の□印に示している。

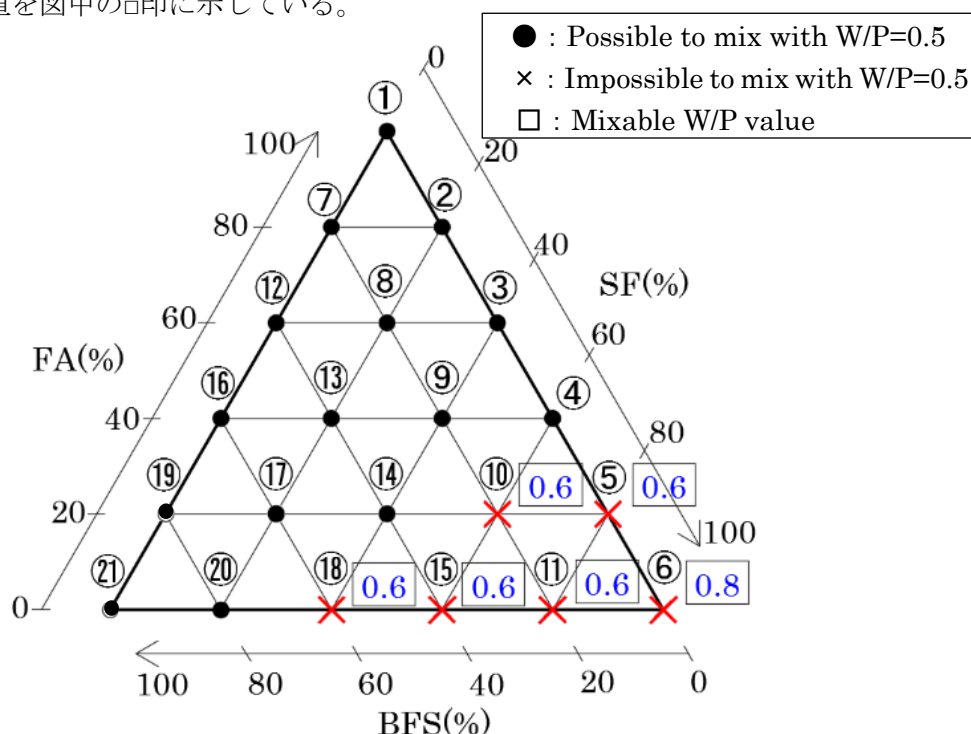


図4-4 練混ぜ状況 (W/P=0.5)

4.3.2 フレッシュ性状

図4-5および図4-6にフロー試験の結果を示す。SF置換率が大きいほど、フロー値が低くなる傾向が見られた。この結果は、既往の研究と同様な結果であった。例えば、セメントコンクリートにおいては、比表面積が大きいSFの使用量を増やすと、フレッシュコンクリートの流動性が低下する現象が見られる^{4-22),4-23)}。また、GPコンクリートにおいても同様に、SF置換率が大きくなるほど、粘性が高くなるとともに流動性が低下することで、フレッシュコンクリートのワーカビリティが低下すると報告されている⁴⁻¹⁹⁾。これらを含め、SFが比表面積の大きい超微粒子のため、溶液と接触する粒子の表面積が多くなること、凝集による団粒部分が溶液を吸収しやすいことなどが上記の結果の原因であると考えられる。

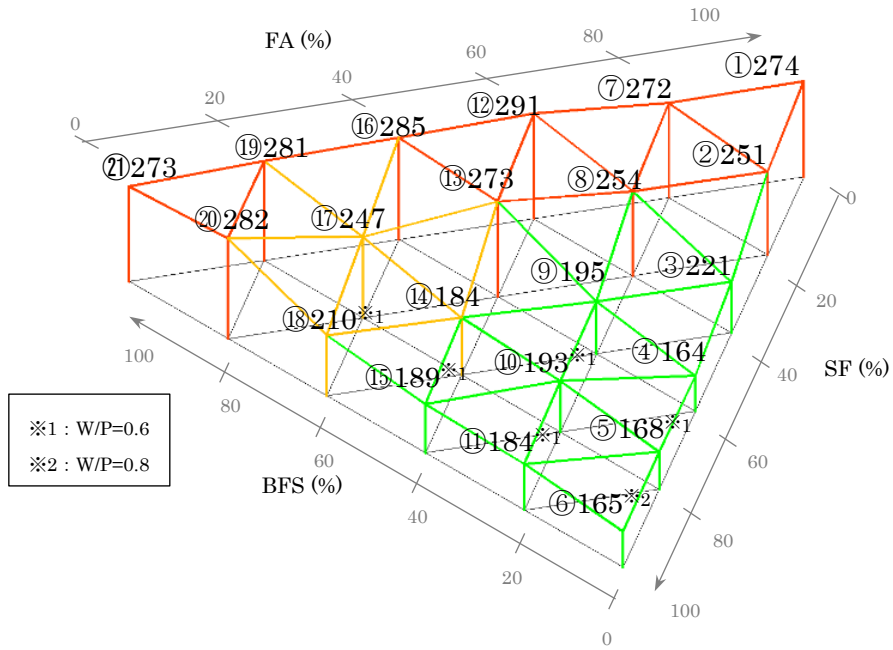


図 4-5 フロー試験結果

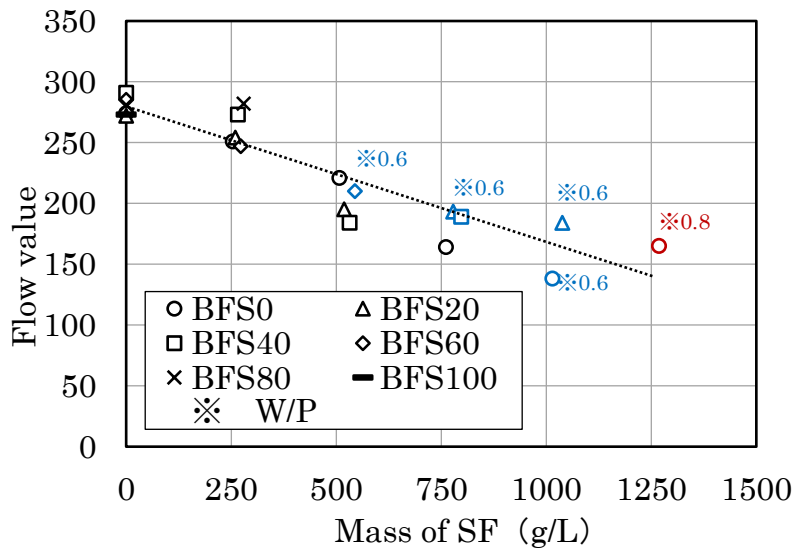


図 4-6 フローと SF 量の関係

4.3.3 硬化後の形状

本実験では、多くの供試体の硬化時において、膨張現象が見られた。図 4-7 および表 4-5 は、その膨張現象についてまとめたものである。

図 4-7 (a) は加温養生、(b) は常温封かん養生における膨張の有無を示したものである。両条件において、SF を置換しなかった FA-BFS 系の調合には膨張が生じなかったものの、SF を置換した場合には膨張した調合があった。このことから、膨張は主に SF の置換によって生じたと考えられる。また、SF 置換率が大きい範囲かつ BFS 置換率が小さい範囲で膨張する傾向が見られた。なお、FA20SF40BFS40(No.⑭)および FA0SF60BFS40(No.⑮)において加温養生の条件下で膨張しているのに対して、常温封かん養生の場合、いずれも膨張が生じていない。

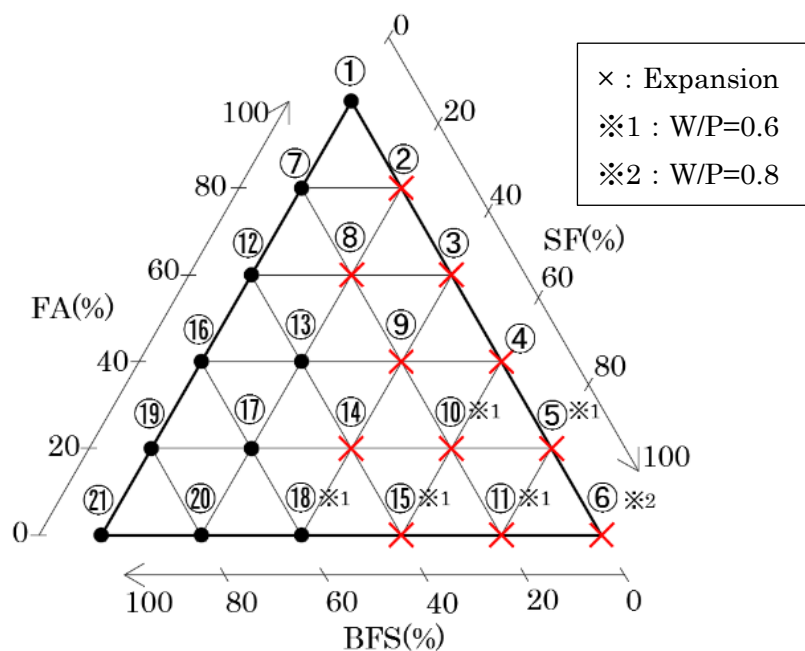
膨張の様子を示した表 4-5 によれば、SF100 の供試体が最も膨張量が大きくなったことがわかる。また、どちらの養生条件下でも SF 置換率が大きいほど膨張量が大きく、BFS 置換率が大きいほど膨張量が小さくなった。さらに、養生条件の違いに着目すると、BFS を使用しない SF100 の場合、加温養生による膨張のほうが封かん養生の膨張量より大きく、BFS20 では SF 置換率にかかわらずほぼ同等な膨張の程度であった。その膨張の程度は BFS 置換率が小さいほど、かつ養生温度が高温になるほど大きくなる傾向があるといえる。膨張の要因について、現時点では、SF による GP ペーストの膨張の原因明らかに出来ていないが、SF の粒子が超微細粒子 (0.1~10 μ m) で反応しやすい形態であること、金属シリコン、金属アルミ、炭素などの含有があればアルカリ溶液と反応し、水素ガスなどの気体が発生する可能性も推察される。

FA に対して SF を置換した GP に関する既往の研究によれば、SF 置換率が大きくなるほど、また養生温度が上昇することで硬化後、GP 中の細孔空隙が増加し、膨張量が增大している。その理由として、式(1)のような過程で SF に含まれている金属シリカと水の化学反応による水素ガス (H₂) の発生に起因することが考えられると報告している^{4-24,4-25})。式(1)は高温になるほど化学反応が促進される。後述する 4.3.5 の図 4-12 に SF 原料の X 線回折結果を示す。本実験で使用した SF は文献 4-25) と同様に角度 2 θ が 28°付近で金属 Si と推測されるピークがわずかではあるが確認された。また、SF100 の No.⑥では、そのピークがなくなり、膨張したことから、溶液中の水と反応したと考えられる。したがって、本実験の範囲における膨張は、文献^{4-24~4-25}) と同様に SF の置換により硬化過程で発生した水素ガスによるものではないかと考えられる。

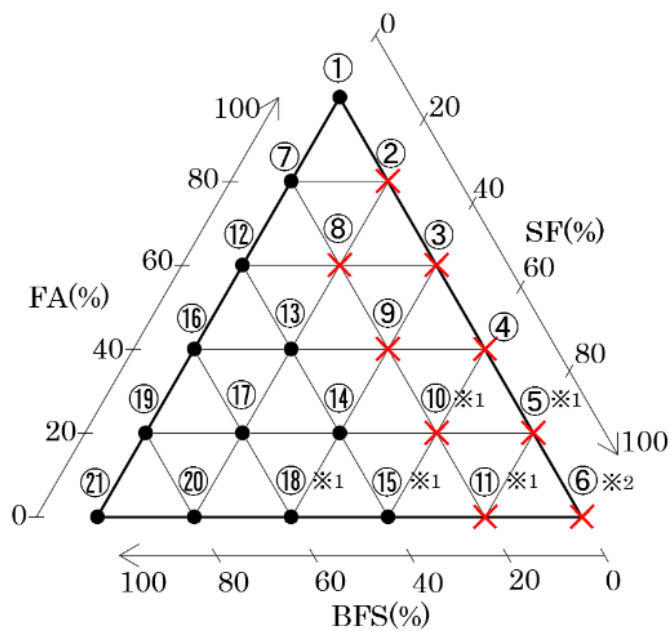


以上のことから、BFS 置換率が小さい範囲では養生温度が高温になるほど反応が促進されるため、ガス発生に伴う体積膨張の程度が大きくなる傾向があると思われる。しかし、BFS 置換率が大きい範囲で膨張が起きなかった理由としては、SF の置換が小さいためガス

の発生量が少ないことや、BFS の置換により硬化が早くなり膨張が生じる前に硬化したことが考えられる。



(a) High temperature curing 1d (60°C)



(b) Normal temperature curing 28d (20°C 60%R. H.)

図 4-7 硬化後の膨張発生可否

表 4-5 膨張した供試体の様子

No.	②	③	④	⑤	⑥
FA-SF-BFS (%)	80-20-0	60-40-0	40-60-0	20-80-0	0-100-0
High temperature curing (60°C)					
Normal temperature curing (20°C 60%R.H.)					
No.	⑧		⑨	⑩	⑪
FA-SF-BFS (%)	60-20-20		40-40-20	20-60-20	0-80-20
High temperature curing (60°C)					
Normal temperature curing (20°C 60%R.H.)					
No.	⑭		⑮		
FA-SF-BFS (%)	20-40-40		0-60-40		
High temperature curing (60°C)					

4.3.4 空隙率

図4-8に推定空隙とSF置換率の関係を示す。ここで、推定空隙は、ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)(JCI-SPO2-1)の質量法を参考にして計算した。質量法による空隙率 A_t (%) は、空気が全くないものとして調合の構成から計算した GP ペーストの単位容積質量 T (kg/m^3)、および膨張部分を切断して円柱供試体に整形したあとの単位容積質量 W (kg/m^3) を用い、式(2)により算出した。

$$A_t = \frac{T-W}{T} \times 100 \quad (2)$$

図4-8より、BFS置換率が40%以下の範囲では、SF置換率が大きくなるにつれて空隙率が比例的に増大することが分かる。このことから、SF置換率が大きくなると、含まれている金属シリカの量が多くなり、アルカリ溶液中の水およびポリマー化の過程で生じた水と反応して排出された水素ガスの量も多くなることから、硬化体中の空隙量が増加したのではないかと考えられる。

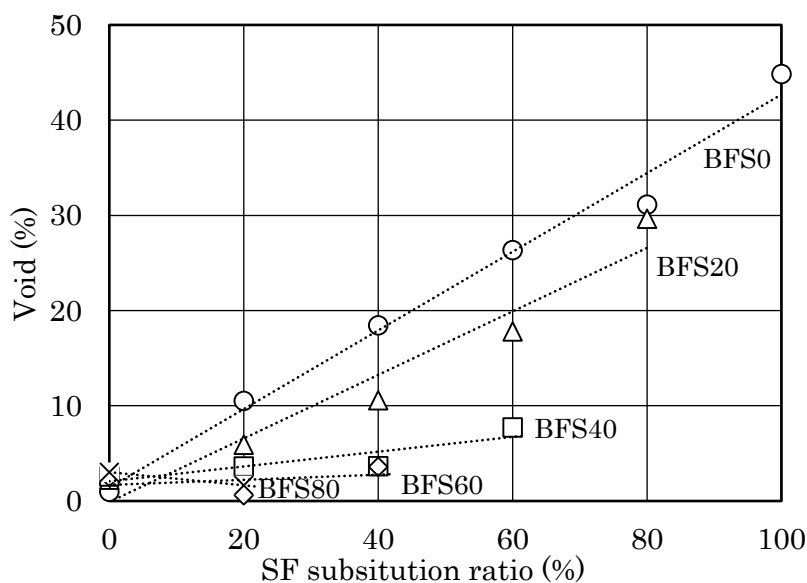


図4-8 空隙率とSF置換率の関係

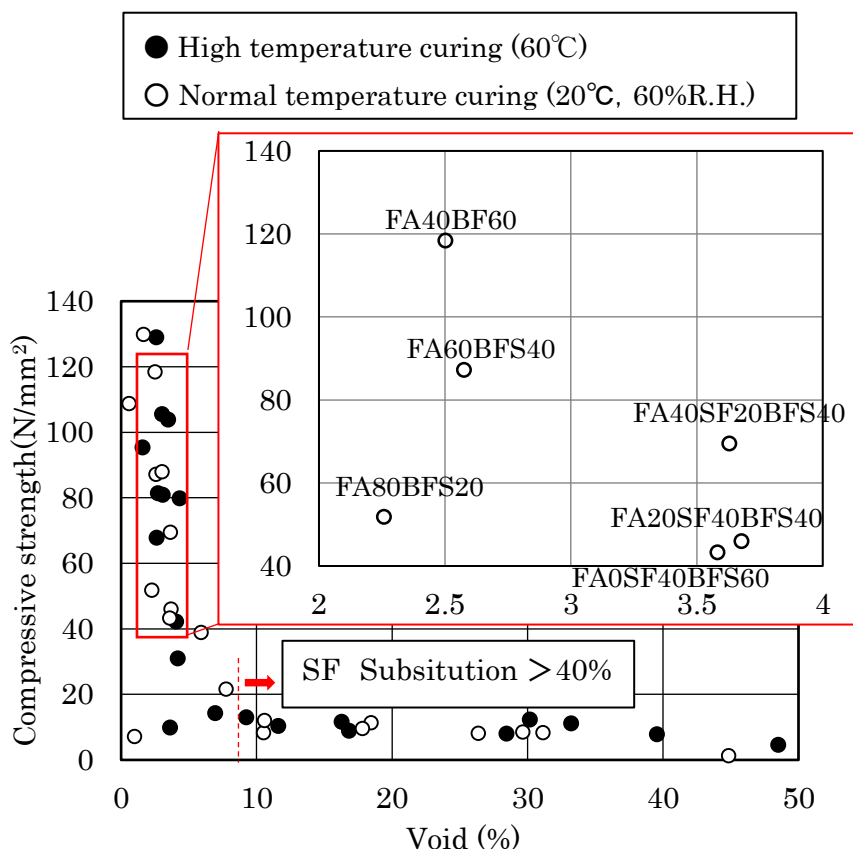


図 4-9 圧縮強度と空隙率の関係

4.3.5 圧縮特性

図 4-9 に圧縮強度と推定空隙の関係を示す。図 4-10 および図 4-11 に加温養生および常温封かん養生供試体の圧縮強度試験の結果を示す。

図 4-10 および図 4-11 によれば、BFS 置換率が大きいほど圧縮強度が高く、SF 置換率が大きいほど圧縮強度が低い傾向を示した。これらの理由として、BFS 置換率が増加した場合では C(A)SH の生成物が増加するとともに硬化体の緻密性が向上するためと考えられる。一方、SF 置換率が増加することにより FA および BFS が含有するカルシウムおよびアルミナの量が相対的に減少するため、硬化過程におけるアルミノシリケートゲルや C(A)SH ゲルの生成が抑えられたことが推測される。それに加え、図 4-9 に示すように硬化体中の空隙量の増加が圧縮強度の低下の要因になることも考えられる。ここでいう空隙は、打設時に巻き込まれた空気と、上記の (3) で述べた、SF の置換によって SF が含有する金属 Si が水と反応してガスの発生に伴う空隙の総合空隙を示す。写真 4-1 に示している膨張供試体の断面の写真から空隙が全体的に生じたことが確認された。このことから、BFS 置換率が小さい範囲かつ SF 置換率が大きいほど、水素ガスの発生が多くなり、硬化体が膨張するとともに硬化体中の空隙が増加することによって、みかけ密度が小さくなって圧縮強度が低下したと考えられる。

また、BFS100のNo.⑳とFA20BFS80のNo.㉑の場合、打ち込み最中に流動性を失い、供試体に未充填部が存在していたため、圧縮強度が落ちたり(図4-10参照)研磨時にこれに起因する破壊が生じたりした(図4-11参照)。既往の研究⁴⁻²¹⁾においても、同様な現象がみられており、BFSを極端に多量に使用すると反応が早くなり、適切な可使用時間を保つことが困難になる。そのため、遅延効果のある混和剤を適用するなどの措置が望まれる。

本実験で用いたSF-BFS系のGPでは、BFS置換率が20%のとき、養生方法に関わらず圧縮強度は10N/mm²程度と低く、80%で急激に上昇し、その圧縮強度は130N/mm²程度となった(図4-10, 図4-11参照)。一方、FA-BFS系のGPでは、BFS置換率が20%のとき加温養生供試体において80N/mm²近く、常温封かん養生であっても50N/mm²以上が得られている。また、FA-SF系のGPでは、圧縮強度がもっとも低い結果となった。図4-9から分かるように空隙率が同等の範囲(例えば2~4%)において圧縮強度に大きな差があることから調合によってGPペーストの固体部分の強度が異なることがわかる。このことより、粉体の組み合わせによって反応性および生成物に違いがあることが確認できた。

FAとBFSを活性フィラーとし、水ガラスと苛性ソーダを混合させた溶液で作製したGP硬化体は、BFS置換率の大きい範囲および加温養生によって強度発現が良好となることが報告されており^{4-1),4-26)}、本実験の結果と同様となった。N. K. Leeらは、FAの一部をSFで置換することによって、非晶質やガラス質のSiO₂を含有するFAとアルカリ溶液との反応が低下し、非晶質SiO₂を有するSFとアルカリ溶液との反応が増加するとともに、スラグとアルカリ溶液との反応が増加するとしている。また、SFから溶出されたSiとスラグから溶出されたAlがアルミノシリケートゲルおよびC(A)SHゲルの生成に寄与し、硬化体の圧縮強度の増加に影響を与えると報告している⁴⁻²⁷⁾。この点を踏まえると、本実験では、3種類の粉体を使用したGPにおいて、BFS置換率が小さい範囲ではアルミノシリケートおよびC(A)SHゲルの生成に必要なAl, Caの供給が不足することとガスの発生によって強度が低くなり、BFS置換率が大きい範囲では強度が高くなったものと考えられる。一例としてNo.㉒のXRD結果より、C(A)SHの生成が確認できた(図4-12参照)。

BFS-SF系のGPにおいては、BFS置換率が多くなるほど、圧縮強度が増加する理由はC(A)SHが多く生成されたことが考えられる。一例としてSF-BFS系のNo.㉓では、SFあるいは水ガラスに由来すると思われる非晶質のブロードピークの他に、新たに生成されたCalciteが確認されているが、これはC(A)SHの炭酸化による生成物だと考えられる(図4-12参照)。一方、FA-SF系のGPにおいては、FAと比較して微粒子で非晶質が主成分となるSFが多く反応するため、FAより溶出されるAlが少なくアルミノシリケートゲルの生成が少ないことと発泡したことが原因で強度が低いことが考えられる。FA-SF系のNo.③のXRD結果より、FAに由来するQuartzとMulliteが確認された。

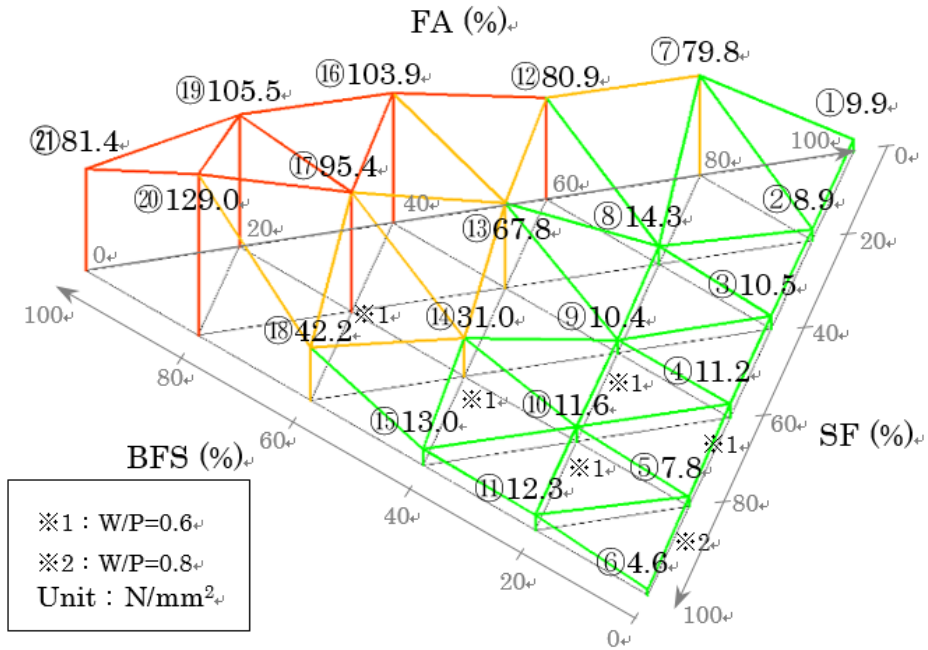


図4-10 圧縮強度結果1日 (高温養生 60°C)

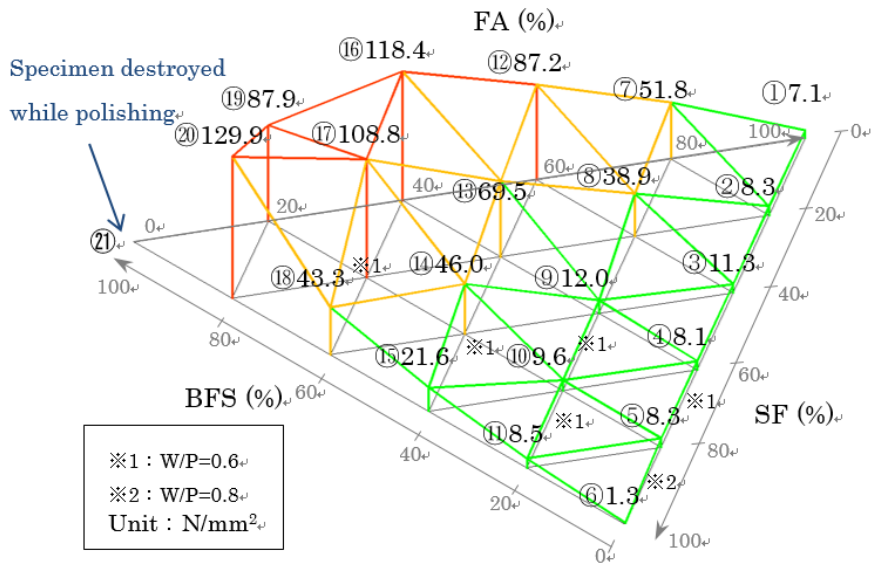


図4-11 圧縮強度結果28日 (常温養生, 20°C, 60%R. H.)

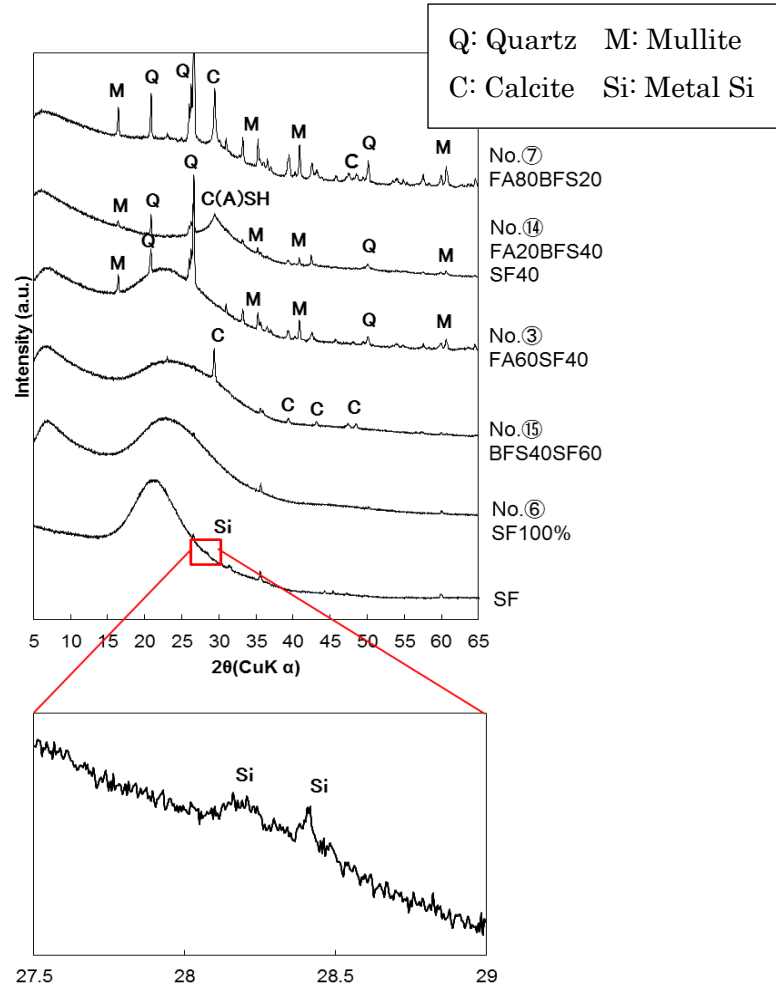


図 4-12 常温封緘養生した一例の GP 硬化体および SF 粉体の XRD 分析結果

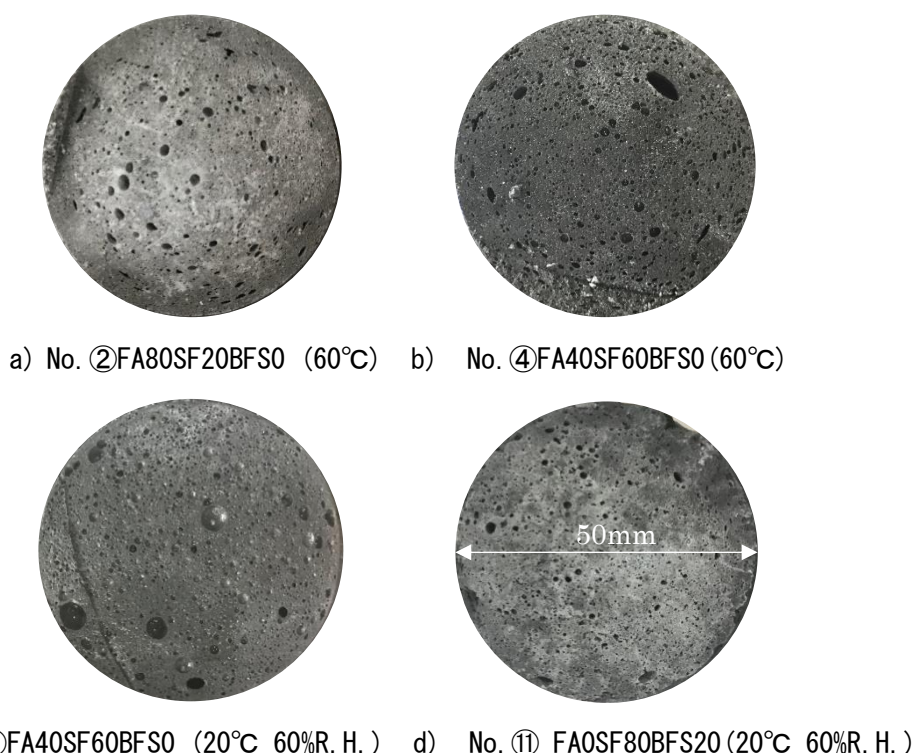
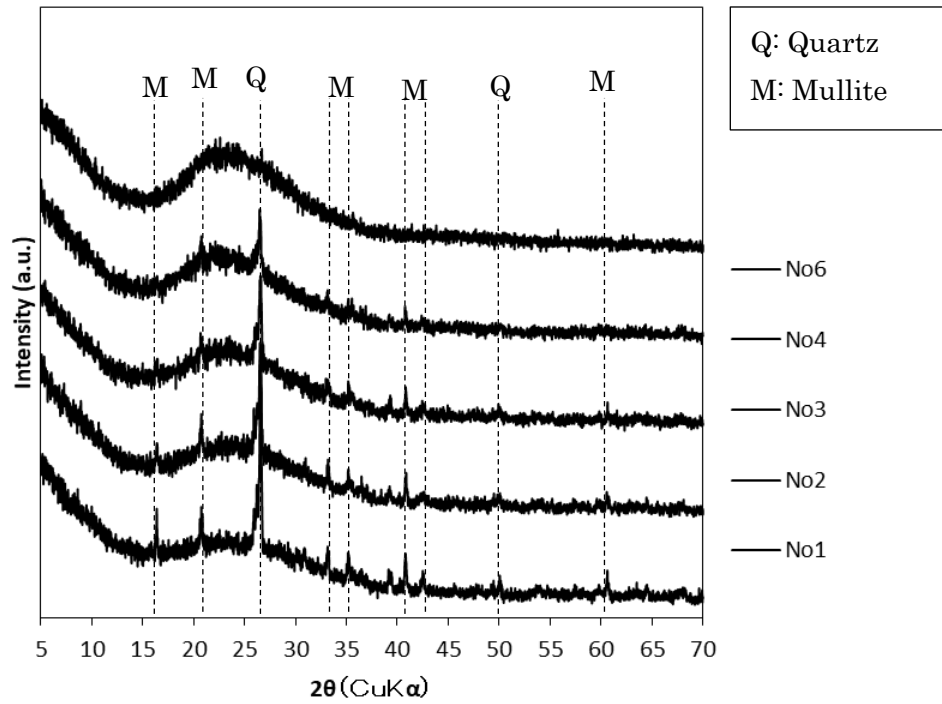


写真 4-1 膨張した GP 硬化体の断面写真（一例）

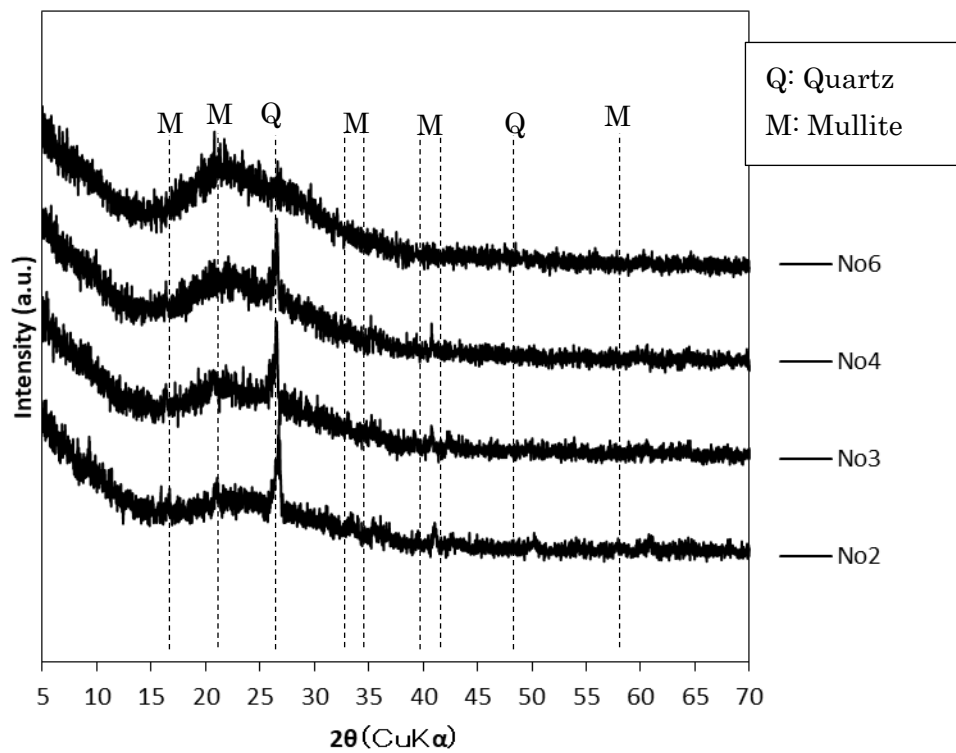
4.3.6 硬化生成物および硬化体内部の状態

図 4-13～図 4-16 に GP 硬化体の XRD 分析結果を示す。図より、高温養生、常温養生ともに同様な XRD 回析結果を示していることが分かる。また、FA および SF を使用した硬化体に関して $2\theta=15\sim35$ で非晶質 SiO_2 によるブロードピークが確認された。FA を配合した調合においては、Quartz や Mullite などガラス化した結晶のピークが確認され、これは FA 粉体に存在しているものでアルカリ溶液と反応しなかったとみている（図 4-13, 図 4-14, 図 4-16）。さらに、BFS を配合した調合においては、 $2\theta=30$ 付近で C(A)SH のピークが確認され、BFS 置換率が多くなるほどそのピークが大きくなって C(A)SH の生成が多くなり硬化体の強度が高くなることに寄与する。

表 4-6～表 4-8 に GP 硬化体の SEM 画像を示す。表より、どの GP 硬化体の内部においても微細なひび割れが確認された。SF の添加のある調合は養生条件にかかわらず SF を添加しない調合と比べてひび割れが大きくなることが観察された。また、常温養生より高温養生の方がひび割れの発生が顕著に確認できた。これは、SF を添加することにより、化学反応に伴って発生する水素ガスにより、GP が硬化すると同時に体積膨張するため内部にひび割れが生じたと考えられ、強度が低くなる一つの要因であるとみている。FA-BFS 系 GP は常温養生の場合では乾燥収縮が大きいと報告されている⁴⁾¹⁾。本実験の範囲においても同様な傾向が確認され、高温養生では BFS 置換率が高くなるにつれて硬化体が緻密になって発生するひび割れが少ないのに対し、常温養生の FA-BFS 系 GP では乾燥収縮に起因すると思われる微細なひび割れが顕著に発生していることが確認された。

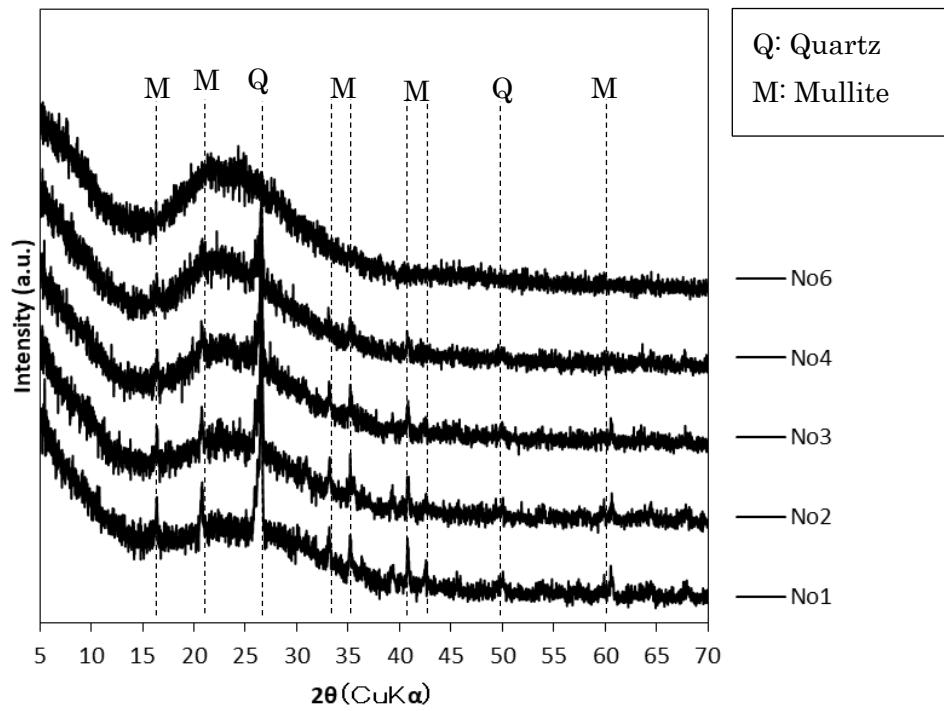


a. 60°C高温養生, 材齢1日



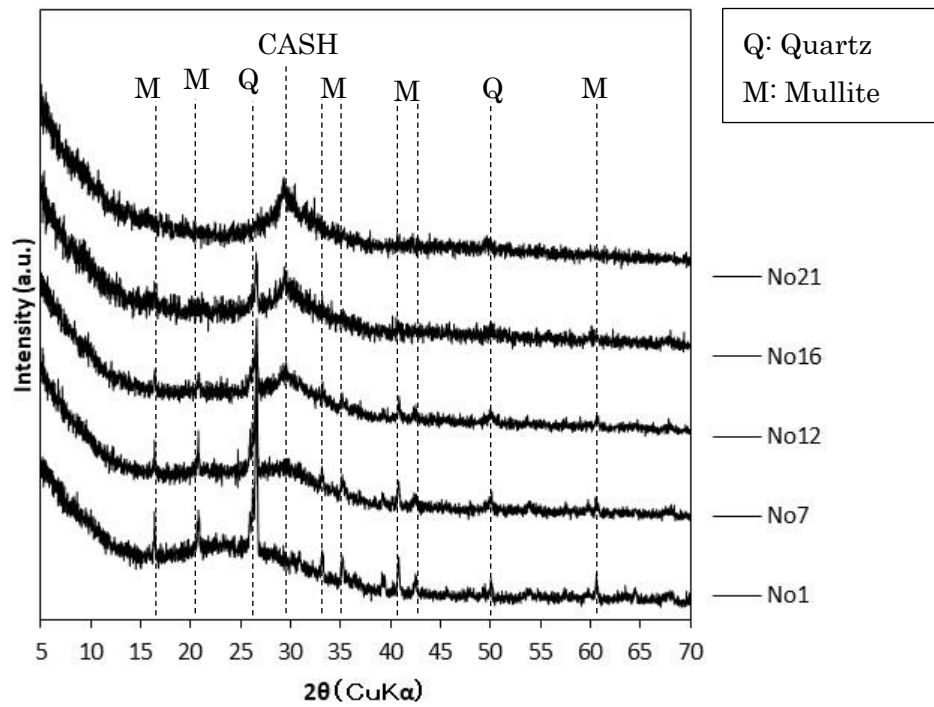
b. 常温封緘養生 (20°C, 60%R.H.), 材齢7日

(注: No. 1 は材齢7日で完全に硬化していないため未測定である)

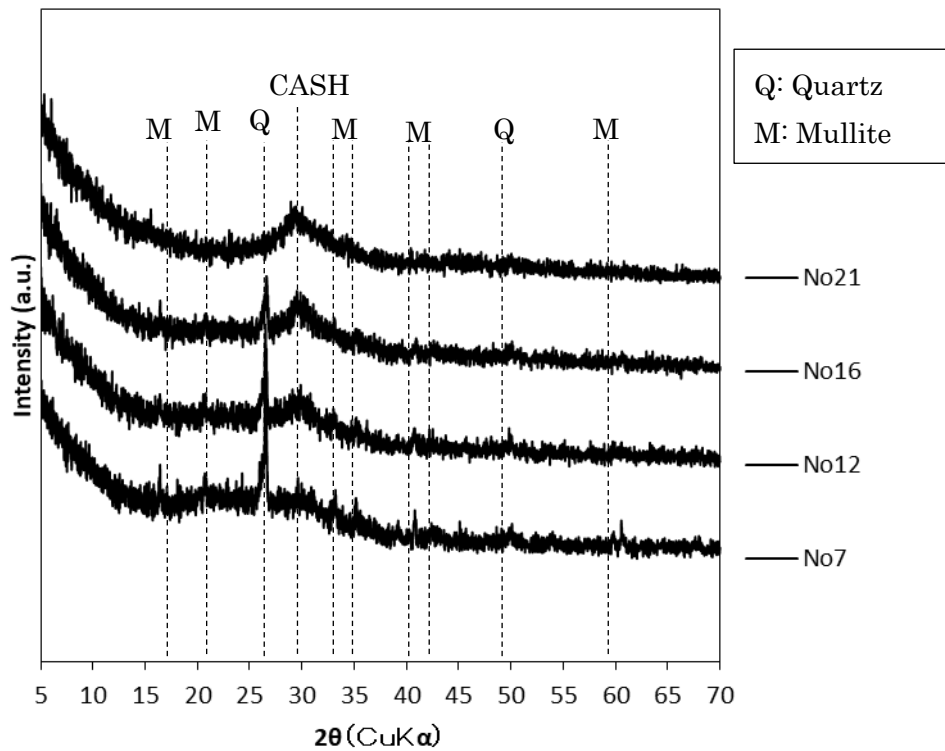


c. 常温封緘養生 (20°C, 60%R. H.), 材齢 28 日

図 4-13 FA-SF 系 GP の XRD 回析結果

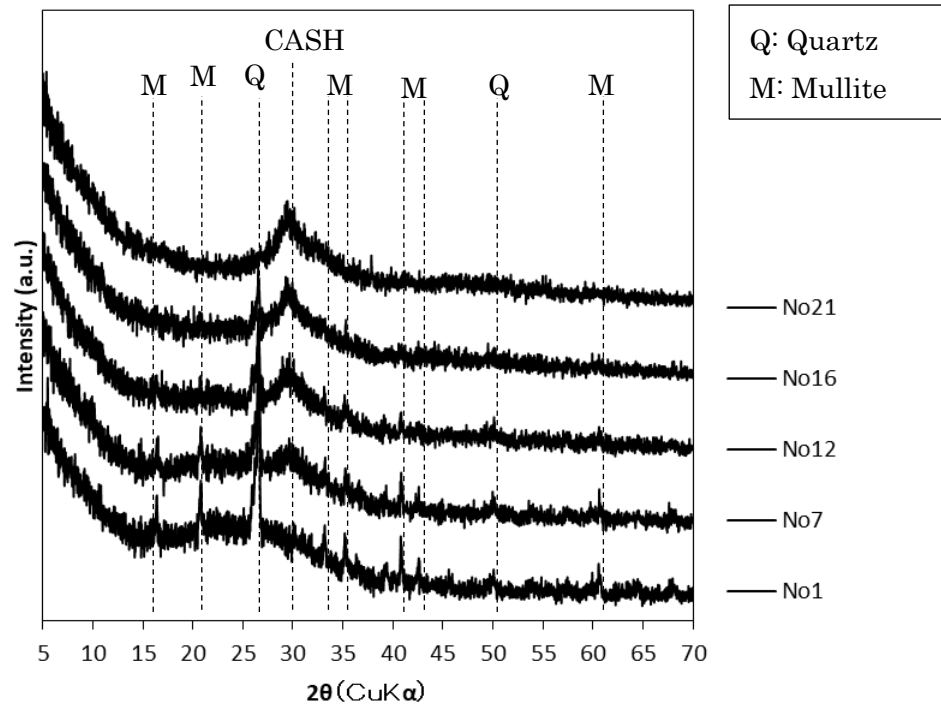


a. 60°C高温養生, 材齢 1 日



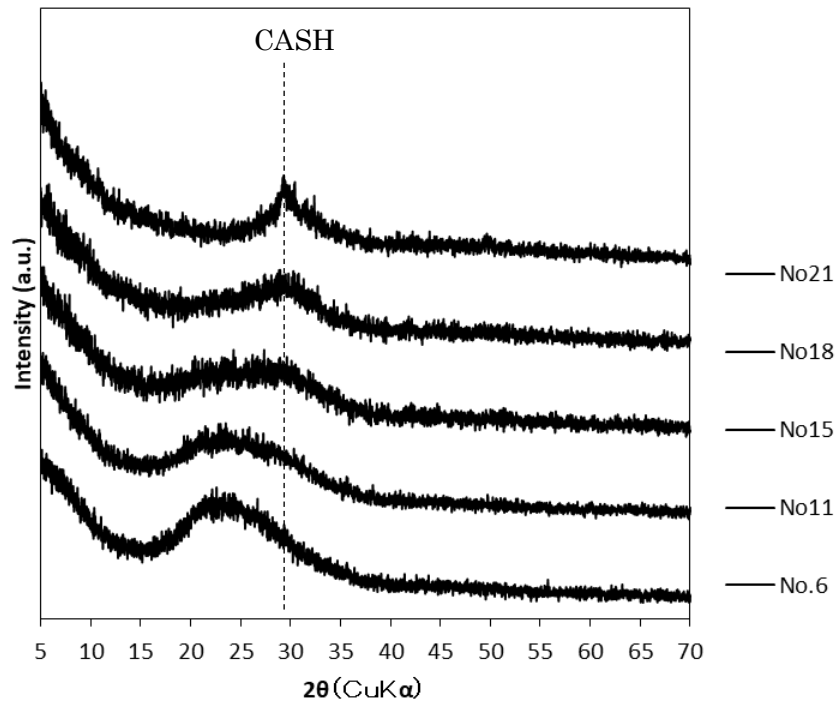
b. 常温封緘養生 (20°C, 60%R. H.), 材齢 7 日

(注: No. 1 は材齢 7 日で完全に硬化していないため未測定である)

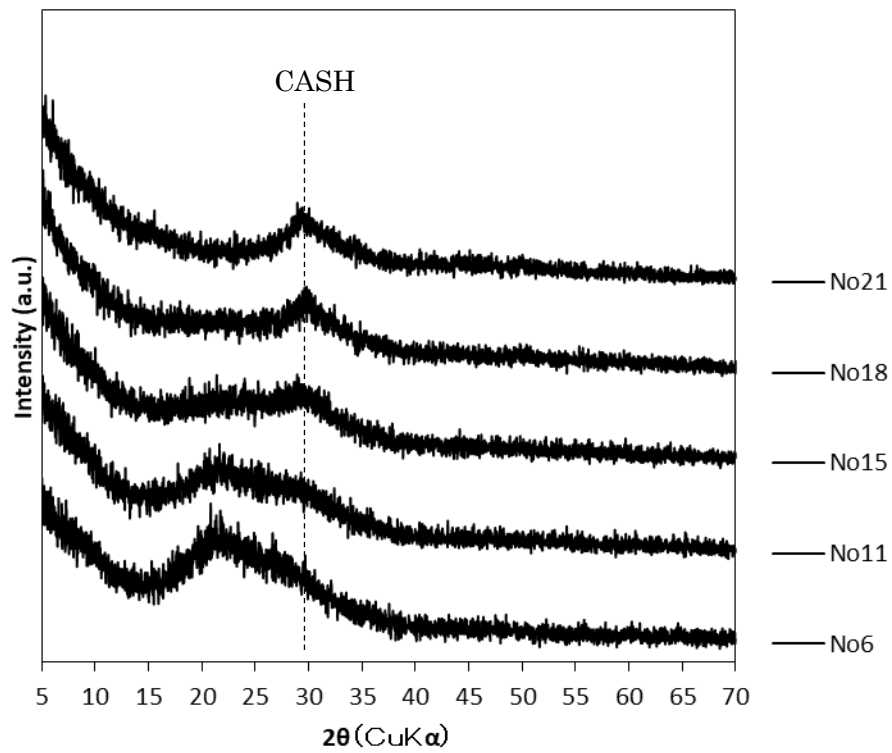


c. 常温封緘養生 (20°C, 60%R. H.), 材齢 28 日

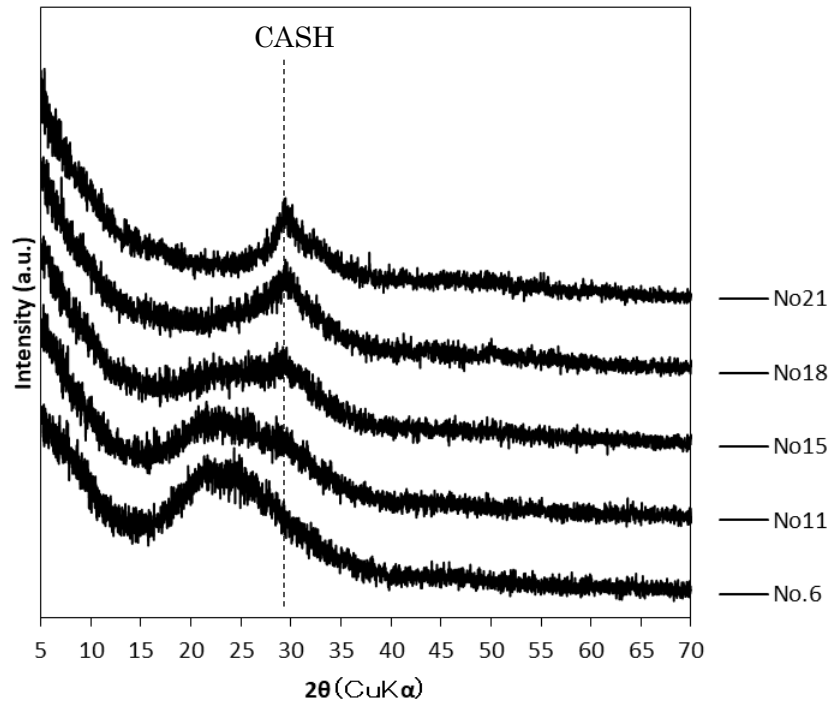
図 4-14 FA-BFS 系 GP の XRD 回析結果



a. 60°C高温養生, 材齢1日

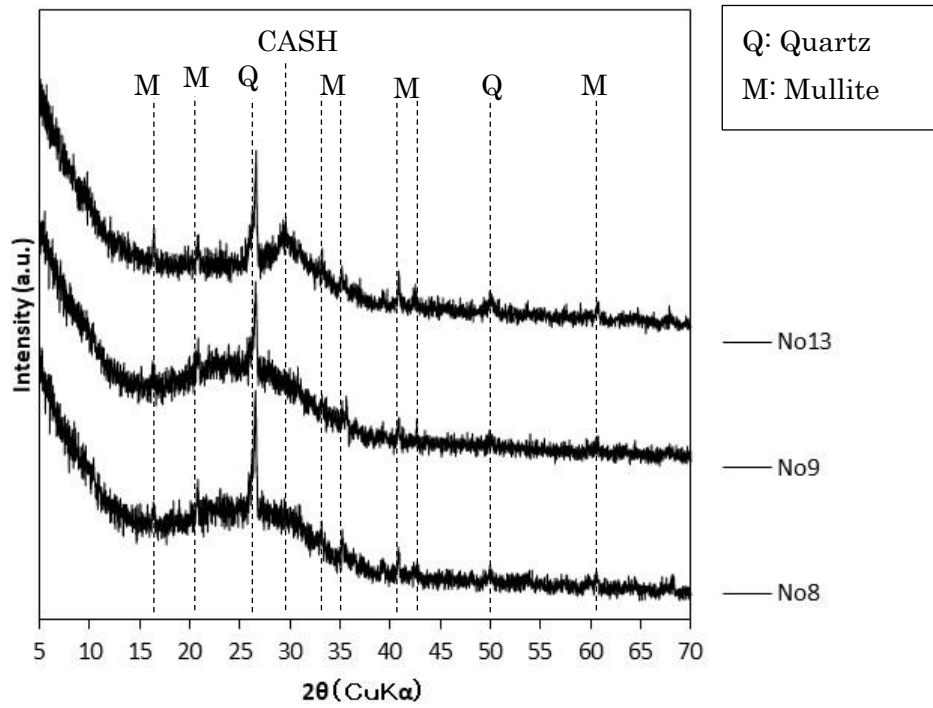


b. 常温封緘養生 (20°C, 60%R. H.), 材齢7日

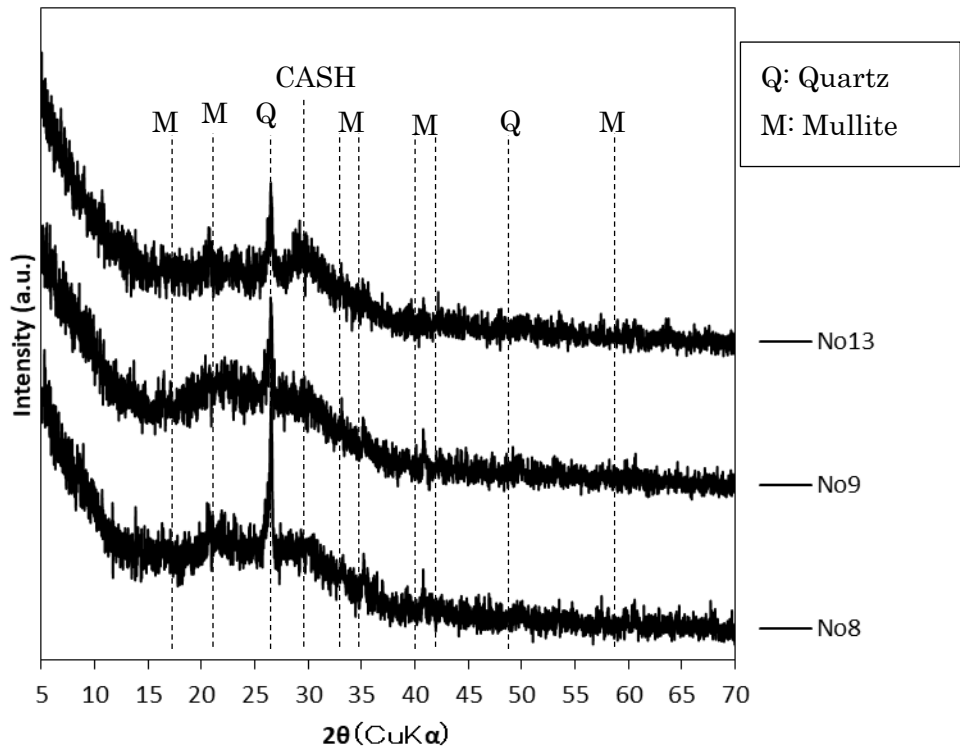


c. 常温封緘養生 (20°C, 60%R. H.), 材齢 28 日

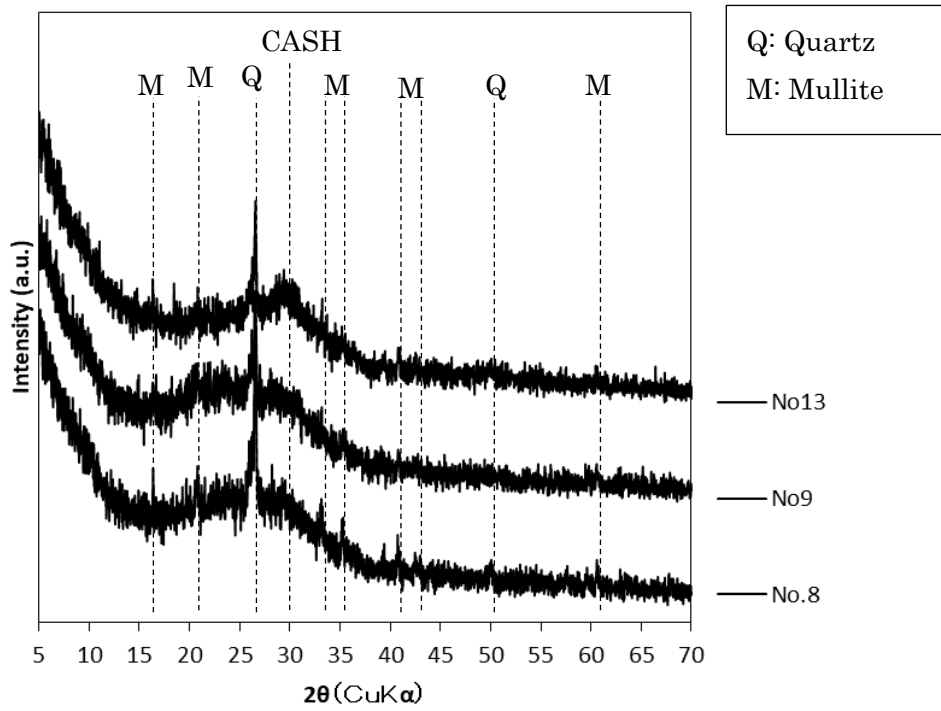
図 4-15 SF-BFS 系 GP の XRD 回析結果



a. 60°C高温養生, 材齢1日



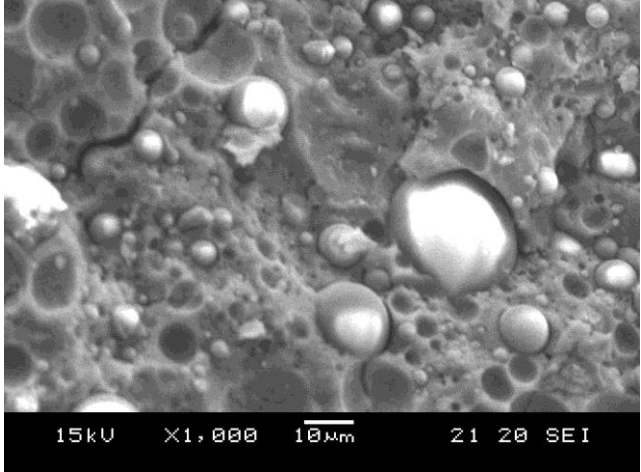
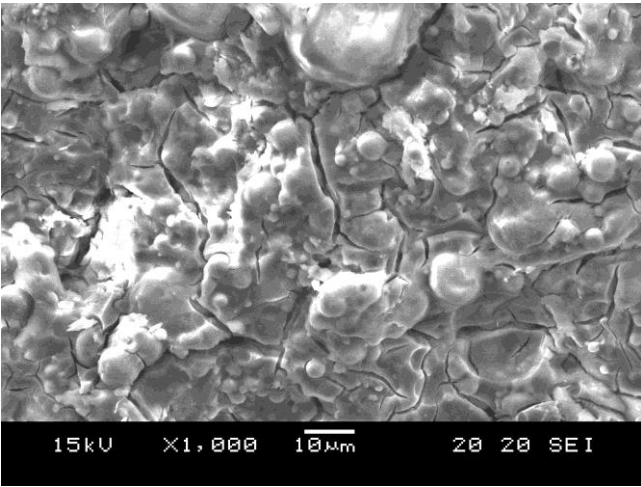
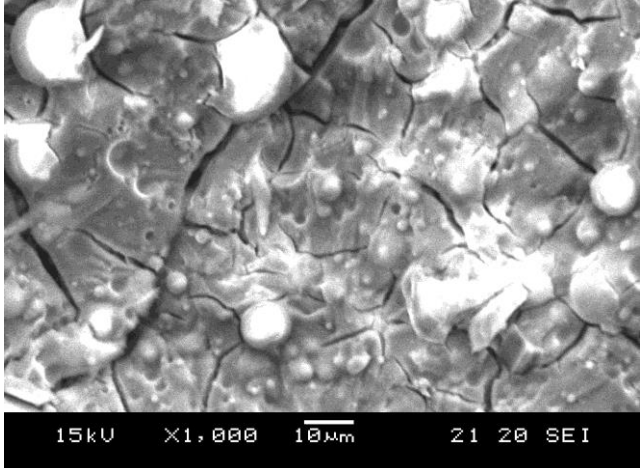
b. 常温封緘養生(20°C, 60%R. H.), 材齢7日

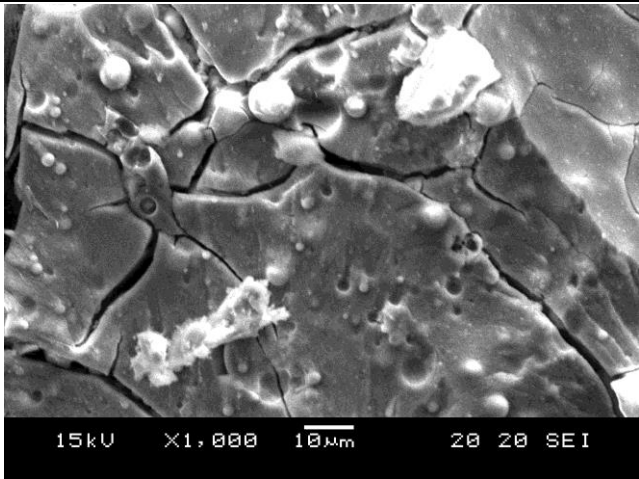
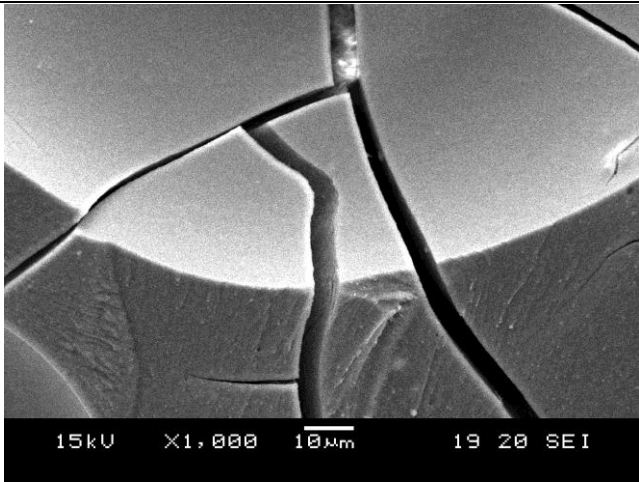
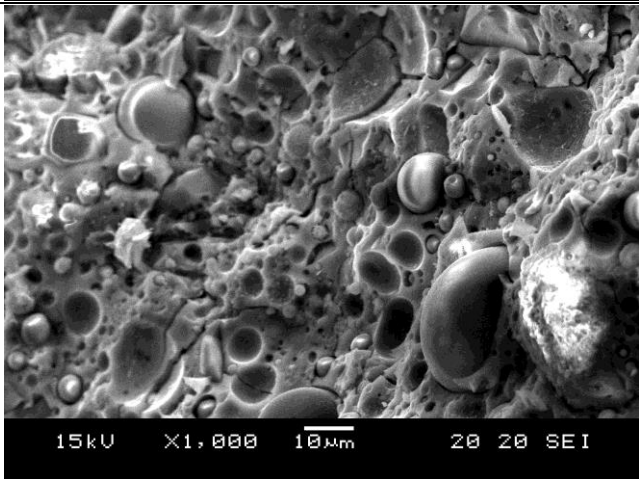


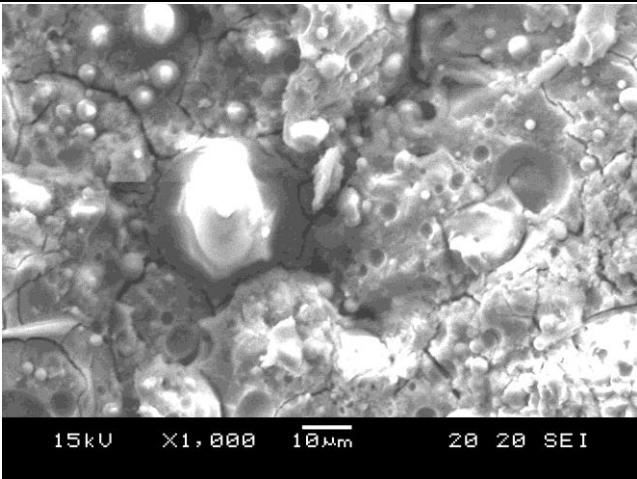
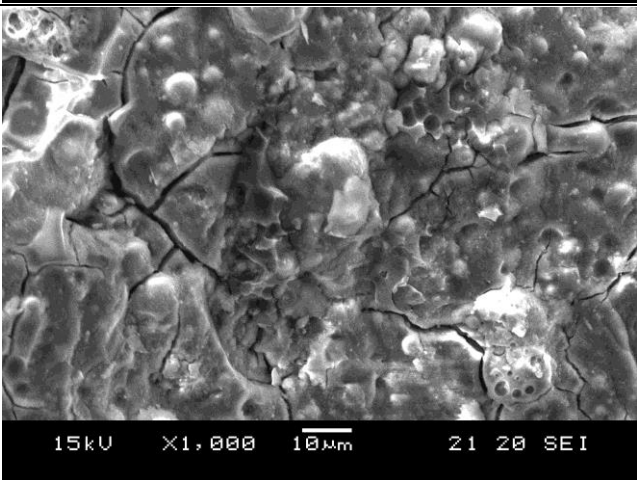
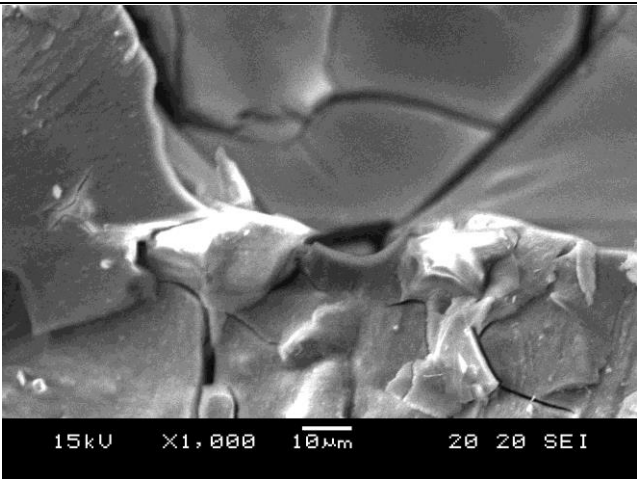
c. 常温封緘養生 (20°C, 60%R. H.), 材齢 28 日

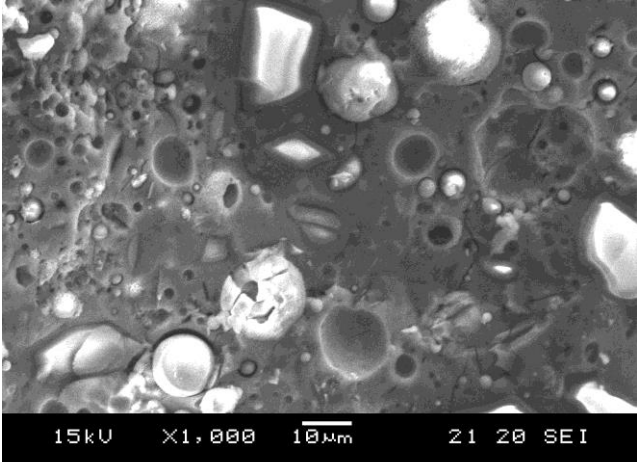
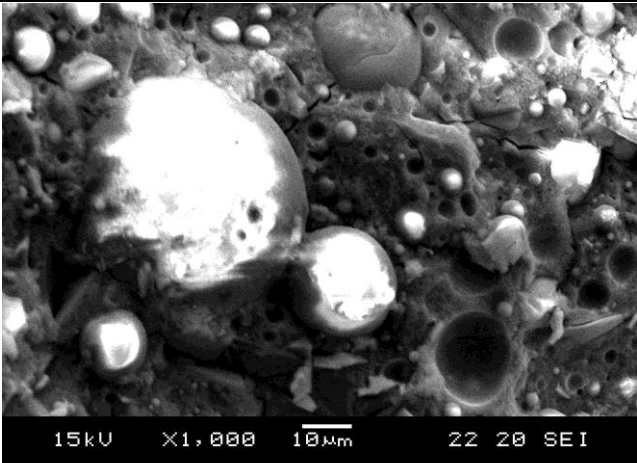
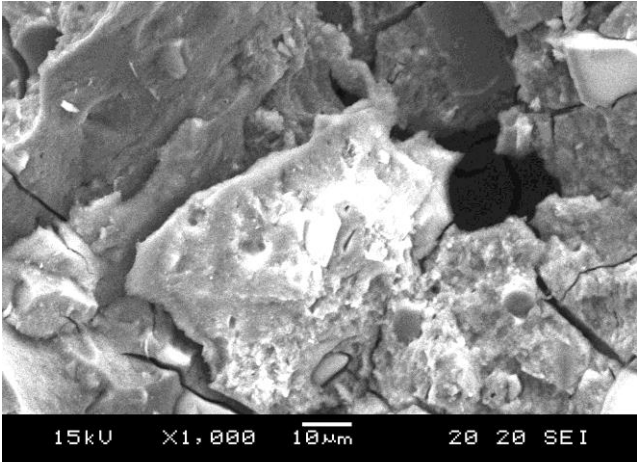
図 4-16 FA-SF-BFS 系 GP の XRD 回析結果

表 4-6 に GP 硬化体の SEM 画像 (1 日高温養生)

No.	Name of specimens (Powder composition ratio)	SEM画像
①	FA100-SF0-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
②	FA80-SF20-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 20 20 SEI</p>
③	FA60-SF40-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>

④	FA40-SF60-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 20 20 SEI</p>
⑤ ^{*1}	FA20-SF80-BFS0	
⑥ ^{*2}	FA0-SF100-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 19 20 SEI</p>
⑦	FA80-SF0-BFS20	 <p>15kV X1,000 10μm 20 20 SEI</p>

<p>⑧</p>	<p>FA60-SF20-BFS20</p>	
<p>⑨</p>	<p>FA40-SF40-BFS20</p>	
<p>⑩^{*1}</p>	<p>FA20-SF60-BFS20</p>	
<p>⑪^{*1}</p>	<p>FA0-SF80-BFS20</p>	

<p>⑫</p>	<p>FA60-SF0-BFS40</p>	
<p>⑬</p>	<p>FA40-SF20-BFS40</p>	
<p>⑭</p>	<p>FA20-SF40-BFS40</p>	
<p>⑮^{*1}</p>	<p>FA0-SF60-BFS40</p>	

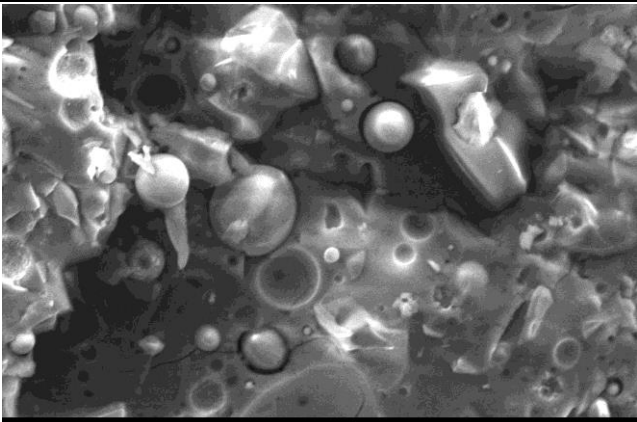
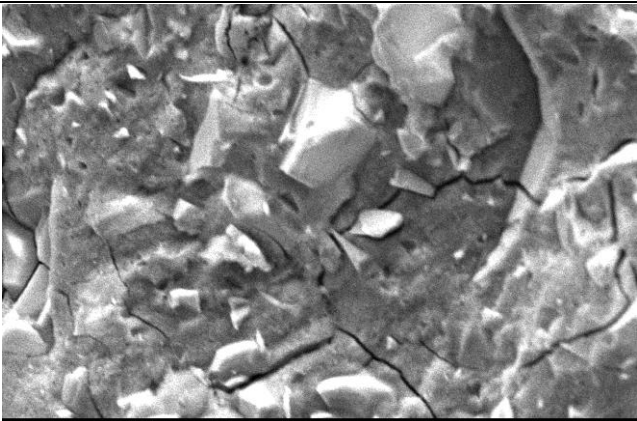
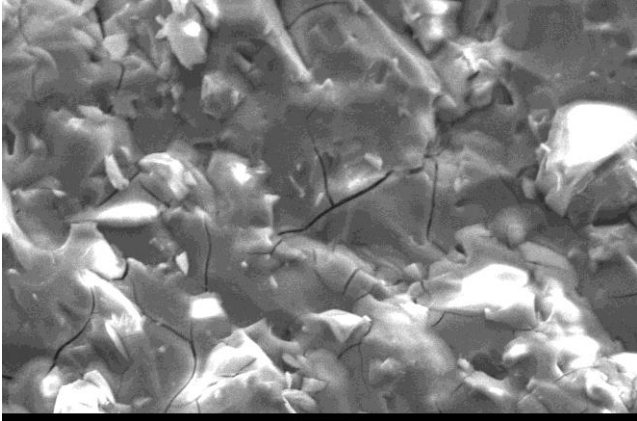
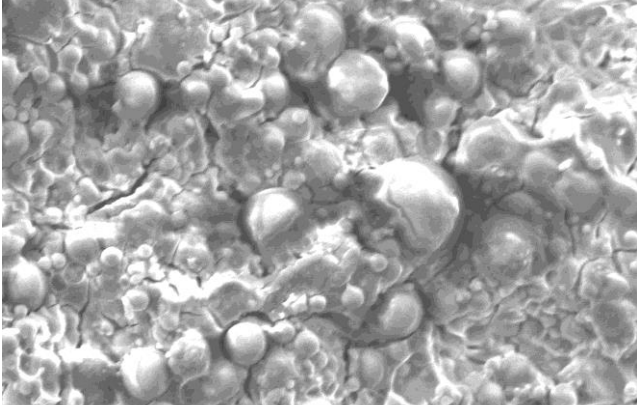
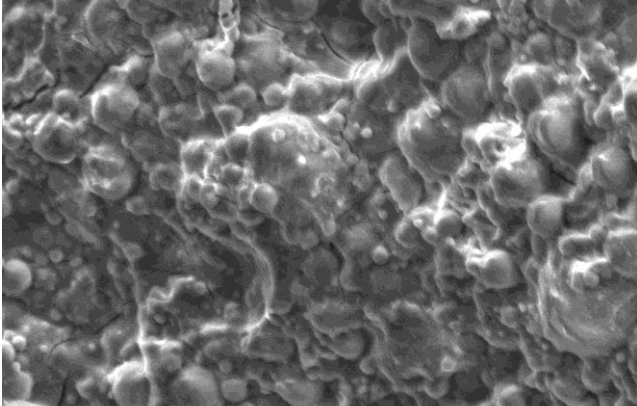
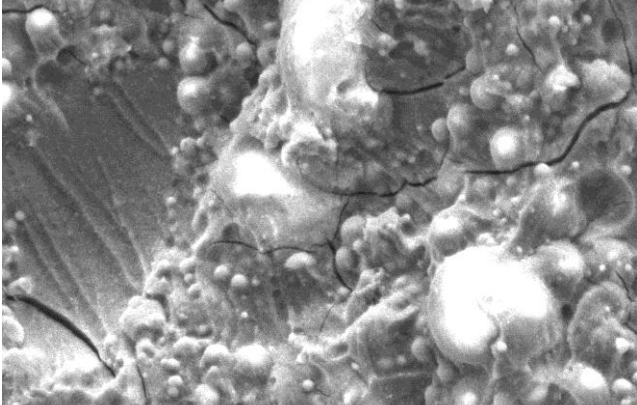
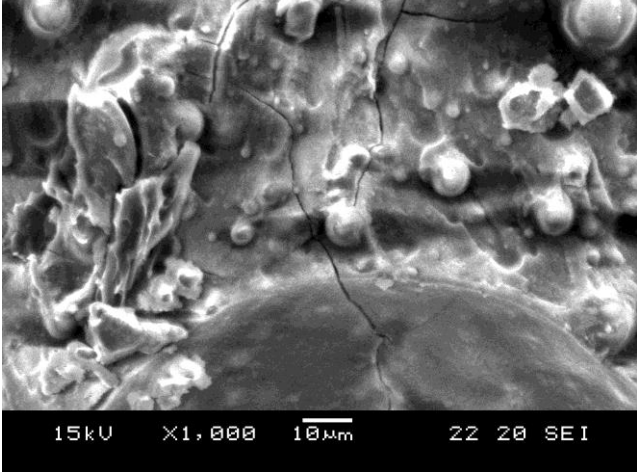
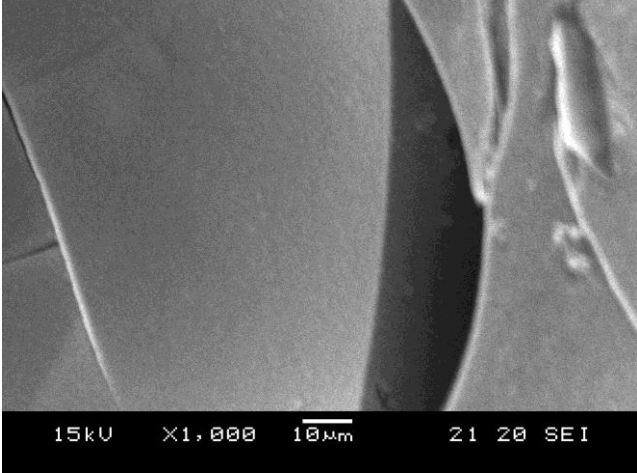
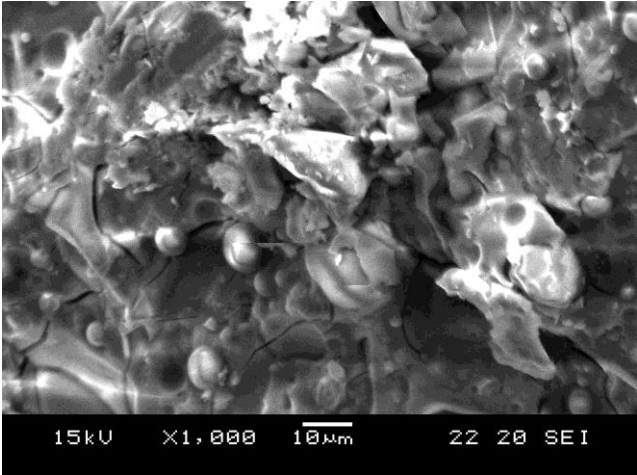
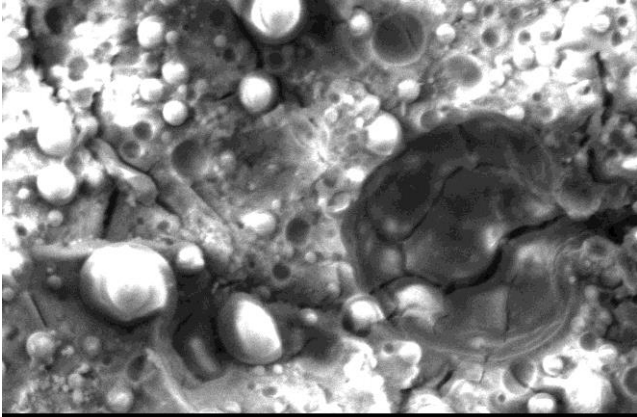
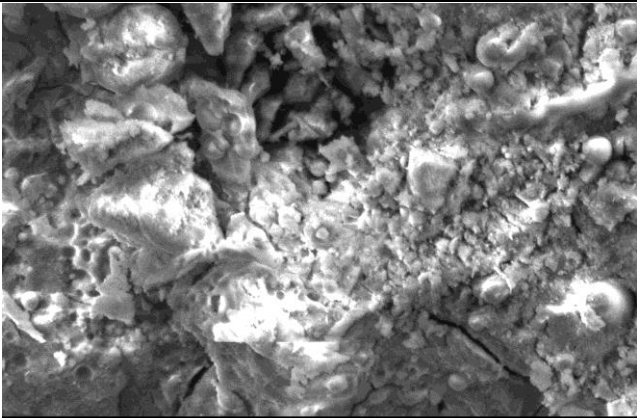
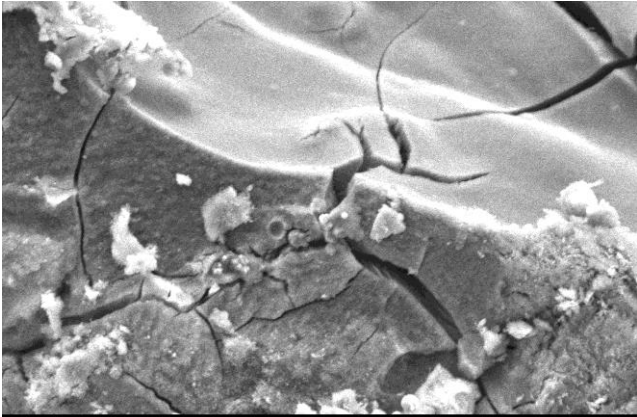
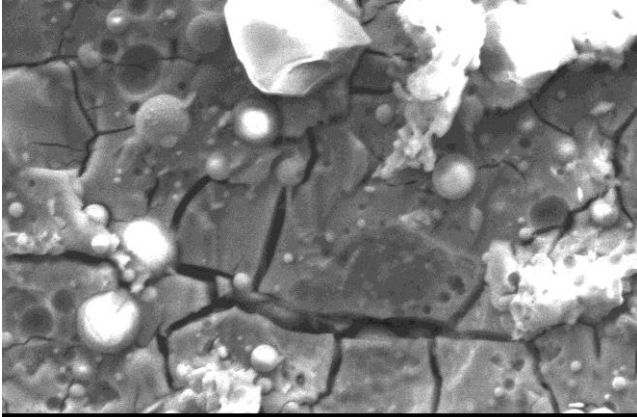
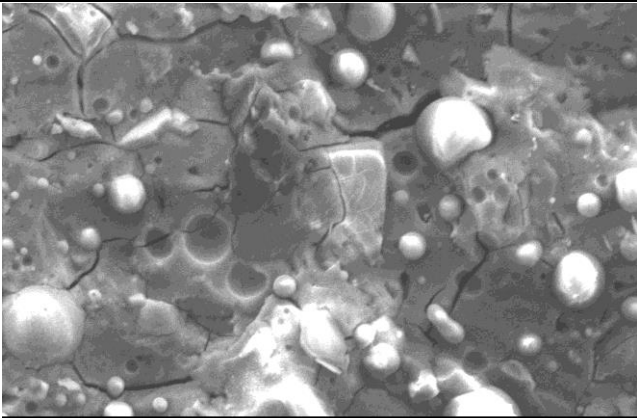
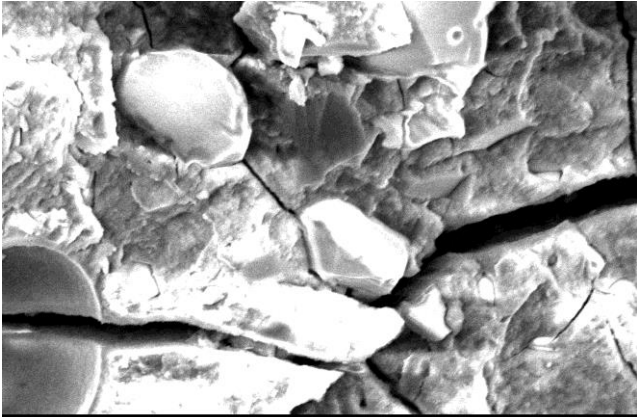
⑯	FA40-SF0-BFS60	 <p>15kV X1,000 10μm 22 20 SEI</p>
⑰	FA20-SF20-BFS60	
⑱※1	FA0-SF40-BFS60	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
⑲	FA20-SF0-BFS80	
⑳	FA0-SF20-BFS80	
㉑	FA0-SF0-BFS100	 <p>15kV X1,000 10μm 22 20 SEI</p>
[Note] ※1:W/P=0.6; ※2:W/P=0.8		

表 4-7 に GP 硬化体の SEM 画像 (7 日常温養生)

No.	Name of specimens (Powder composition ratio)	SEM画像
①	FA100-SF0-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
②	FA80-SF20-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
③	FA60-SF40-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>

④	FA40-SF60-BFS0	
⑤ ^{*1}	FA20-SF80-BFS0	
⑥ ^{*2}	FA0-SF100-BFS0	
⑦	FA80-SF0-BFS20	

⑧	FA60-SF20-BFS20	 <p>15kV X1,000 10μm 22 20 SEI</p>
⑨	FA40-SF40-BFS20	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
⑩ ^{*1}	FA20-SF60-BFS20	
⑪ ^{*1}	FA0-SF80-BFS20	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>

<p>⑫</p>	<p>FA60-SF0-BFS40</p>	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
<p>⑬</p>	<p>FA40-SF20-BFS40</p>	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
<p>⑭</p>	<p>FA20-SF40-BFS40</p>	
<p>⑮^{*1}</p>	<p>FA0-SF60-BFS40</p>	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>

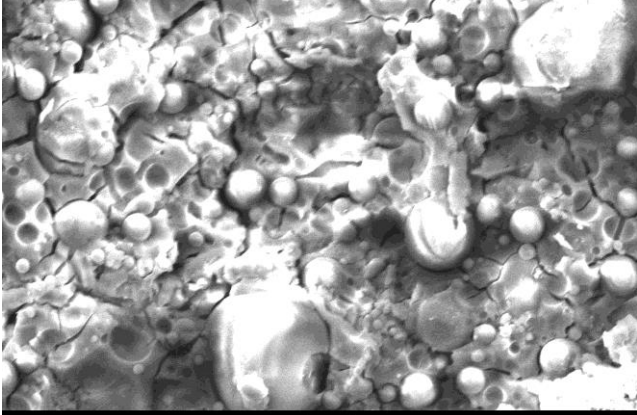
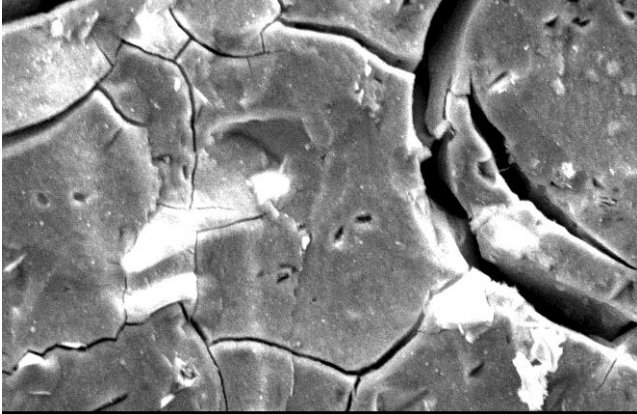
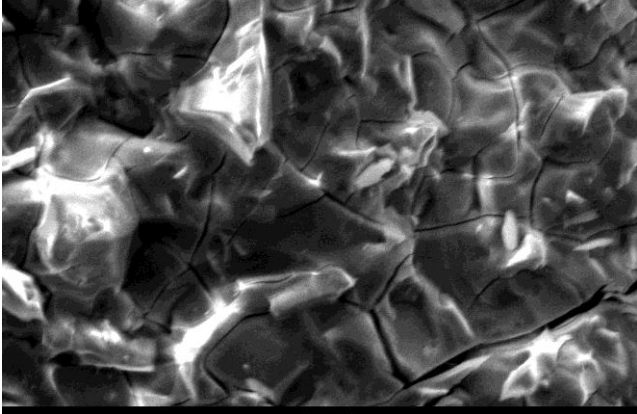
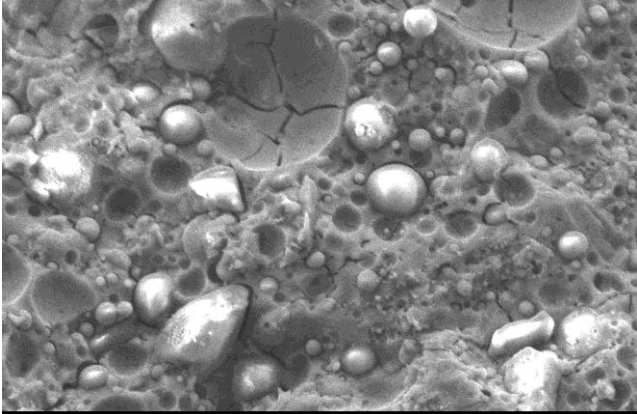
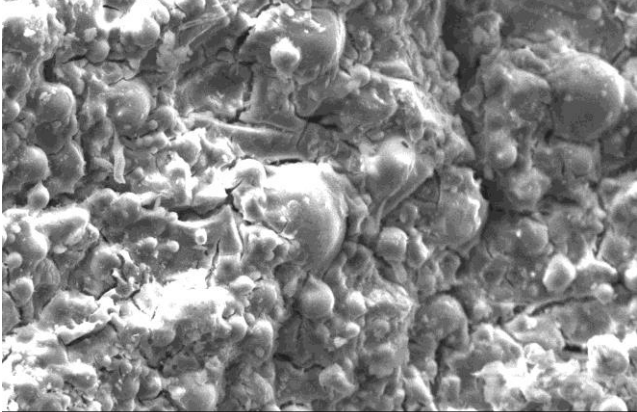
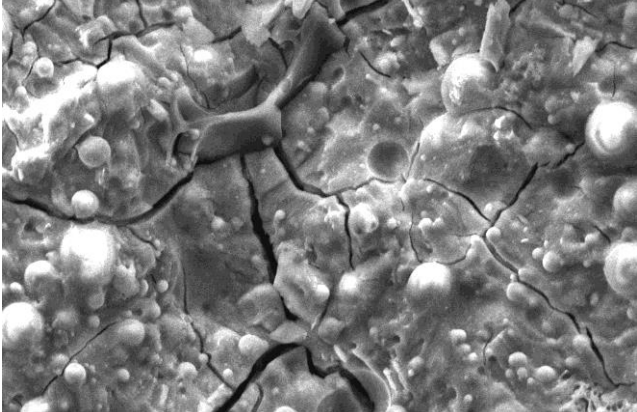
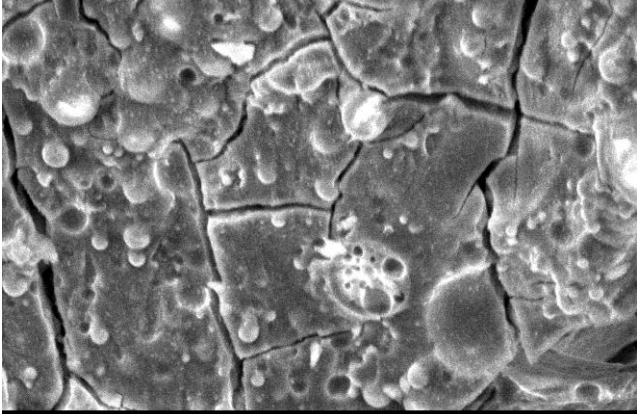
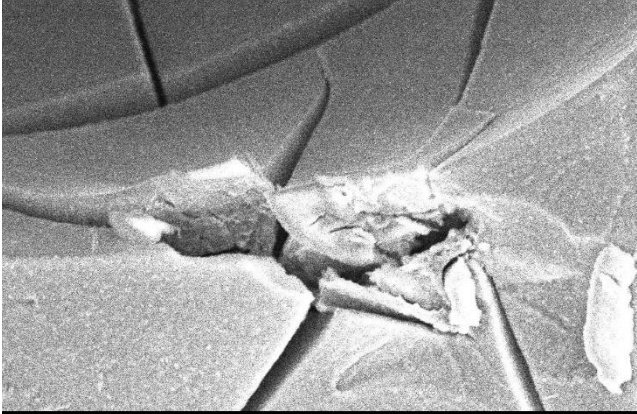
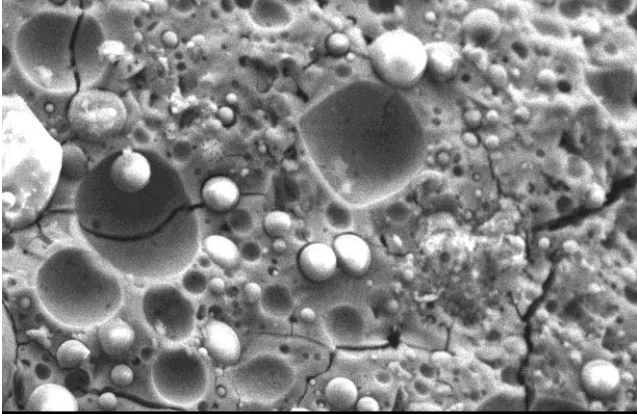
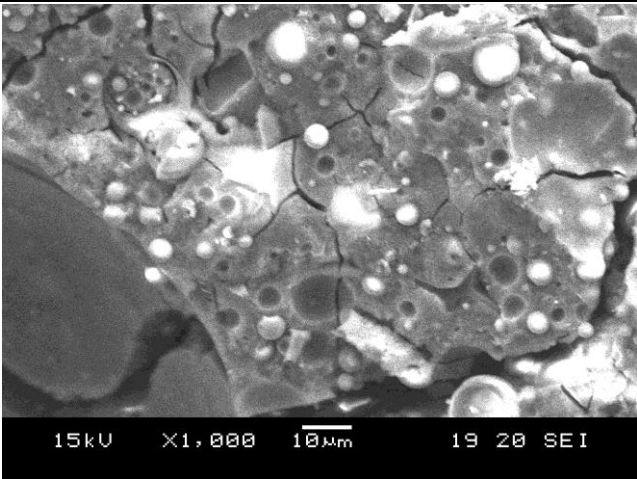
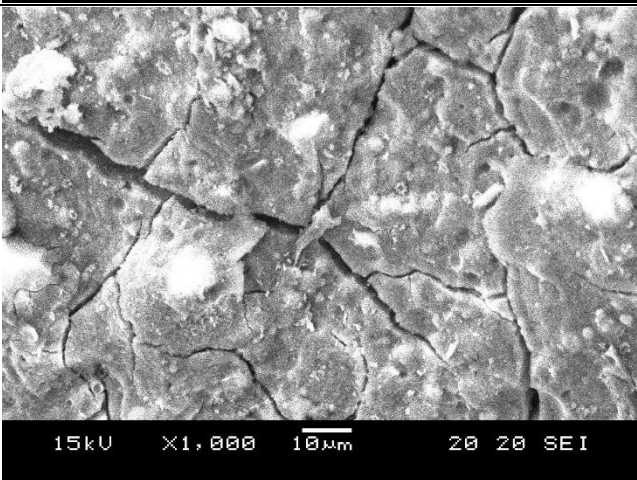
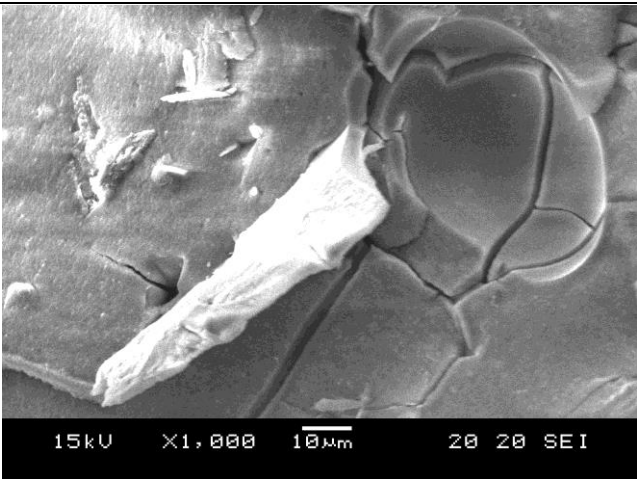
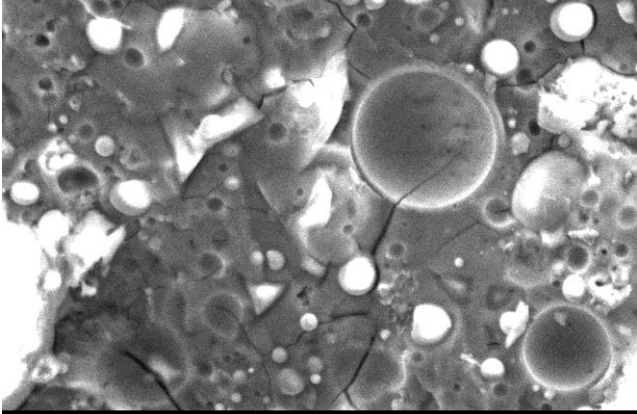
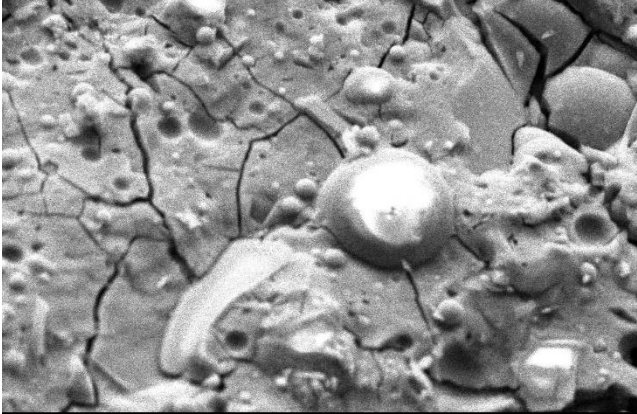

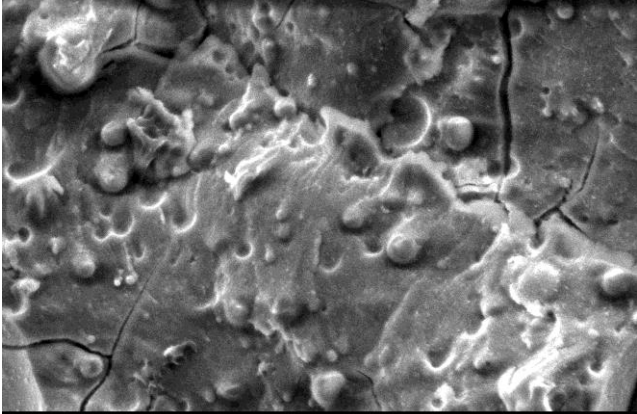
⑯	FA40-SF0-BFS60	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
⑰	FA20-SF20-BFS60	
⑱※1	FA0-SF40-BFS60	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
⑲	FA20-SF0-BFS80	
⑳	FA0-SF20-BFS80	
㉑	FA0-SF0-BFS100	 <p>15kV X1,000 10μm 22 20 SEI</p>
<p>[Note] ※1:W/P=0.6; ※2:W/P=0.8</p>		

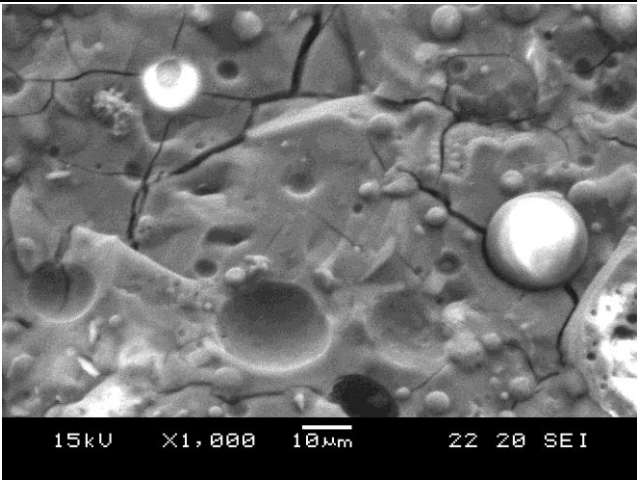
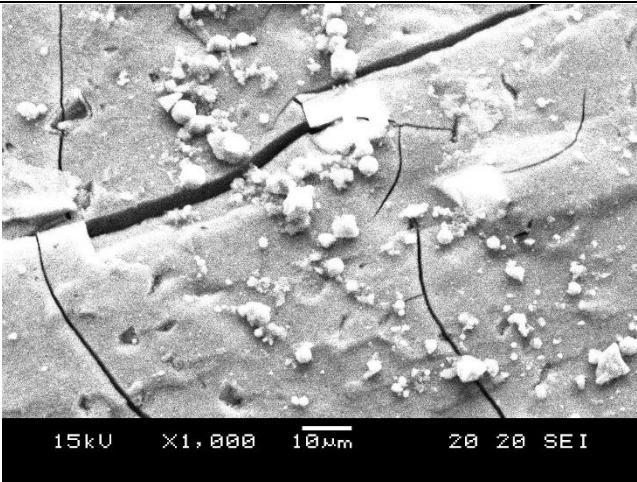
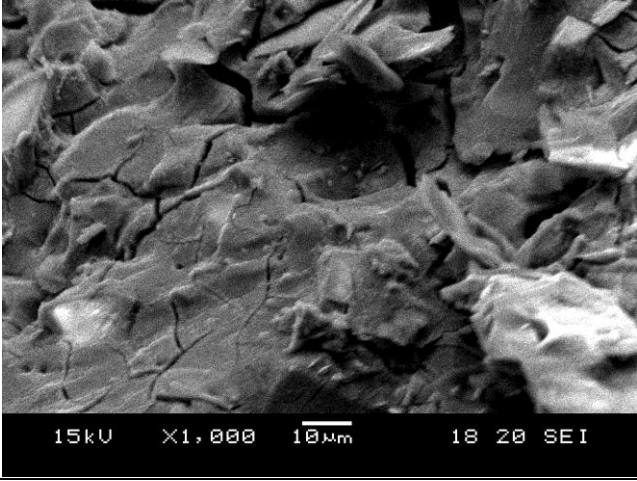
表 4-8 に GP 硬化体の SEM 画像 (28 日常温養生)

No.	Name of specimens (Powder composition ratio)	SEM画像
①	FA100-SF0-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 20 20 SEI</p>
②	FA80-SF20-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 18 20 SEI</p>
③	FA60-SF40-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>

④	FA40-SF60-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
⑤ ^{*1}	FA20-SF80-BFS0	
⑥ ^{*2}	FA0-SF100-BFS0	 <p>15kV X1,000 10μm 20 20 SEI</p>
⑦	FA80-SF0-BFS20	 <p>15kV X1,000 10μm 19 20 SEI</p>

⑧	FA60-SF20-BFS20	
⑨	FA40-SF40-BFS20	
⑩ ^{*1}	FA20-SF60-BFS20	
⑪ ^{*1}	FA0-SF80-BFS20	

<p>⑫</p>	<p>FA60-SF0-BFS40</p>	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>
<p>⑬</p>	<p>FA40-SF20-BFS40</p>	 <p>15kV X1,000 10μm 19 20 SEI</p>
<p>⑭</p>	<p>FA20-SF40-BFS40</p>	
<p>⑮^{*1}</p>	<p>FA0-SF60-BFS40</p>	 <p>15kV X1,000 10μm 21 20 SEI</p>

⑯	FA40-SF0-BFS60	
⑰	FA20-SF20-BFS60	
⑱ ^{※1}	FA0-SF40-BFS60	
⑲	FA20-SF0-BFS80	
⑳	FA0-SF20-BFS80	
㉑	FA0-SF0-BFS100	
[Note] ※1:W/P=0.6; ※2:W/P=0.8		

4.4 まとめ

本実験では、ジオポリマーのひび割れ注入材としての活用を最終目標とし、粉体に一般的に用いられているフライアッシュ (FA) に対し、高炉スラグ微粉末 (BFS) および超微粒子であるシリカフェーム (SF) を置換し、練混ぜの可否、フロー値、および圧縮強度についての基礎的実験を行った。得られた結果 (図 4-17) を以下に示す。

- 1) 活性フィラーの一部に置換する SF の量を増加させると、SF が有する大きな比表面積の影響を受け、GP ペーストのフロー値が減少し、SF 置換率が大きいほど練混ぜが困難になることが確認された。
- 2) SF 置換率が小さく、かつ BFS 置換率を大きくするほど GP の圧縮強度が増加するが、極端に BFS 置換率が大きい場合、凝結時間が短くなり、練混ぜが困難になる。
- 3) SF 置換率が大きいほど、かつ BFS 置換率が小さくなるほど (40%以下)、硬化過程における化学反応に伴って発生する水素ガスにより、硬化後の GP 供試体が膨張し、圧縮強度が低下する傾向がある。
- 4) SF を置換した GP 硬化体は、BFS 置換率が 40% 以下では FA や SF などに由来する非晶質のブロードピークと結晶質の quartz や mulite が確認されるが硬化体の強度への影響が小さい。しかし、BFS 置換率が 40% 以上では、CASH のピークが確認され、その BFS 置換率が高くなるにつれてその CASH のピークも大きくなり、GP 硬化体が高い強度を得ることに影響している。
- 5) SF を置換した GP 硬化体の内部には、SF を置換しないものに比較して体積膨張などの要因で大きな微細ひび割れが生じていることが確認された。また、SF を置換しなかった場合、高温養生より常温養生の GP の方が内部に発生したひび割れが顕著に確認された。

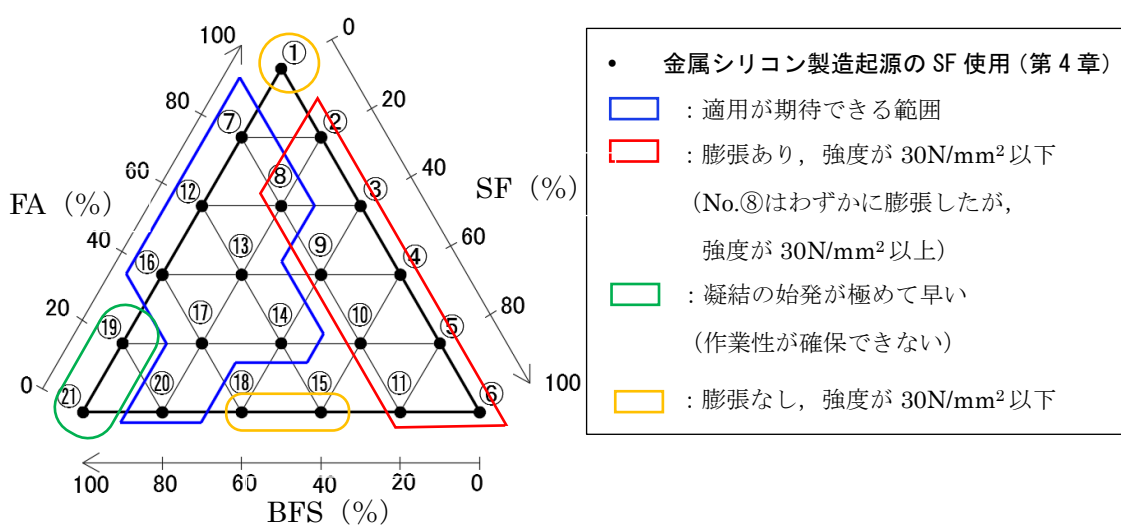


図 4-17 本章のまとめ

【参考文献】

- 4-1) 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，2017.9
- 4-2) T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Riddirud, S. Hatanaka, P. Chindapasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, *Construction and building materials*, Vol.98, pp.482-488, 2015.8
- 4-3) 伊藤彰利, ポンマハーサイ パラミ, 畑中重光：傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性に関する基礎的研究, *日本建築学会東海支部研究報告集*, Vol.56, pp.73-76, 2018.2
- 4-4) Sanjay Pareek, 鹿島大雄, 丸山一平, 荒木慶一：各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究, *コンクリート工学会年次論文集*, Vol.40, No.1, pp.1839-1844, 2018.7
- 4-5) Hani Alanazi, Mijia Yang, Dalu Zhang, Zhili (Jerry) Gao: Bond strength of PCC pavement repairs using metakolin-based geopolymer mortar, *Cement and concrete composites*, pp.75-82, 2015
- 4-6) Yung-Chin Ding, Ta-Wui Cheng, Yu-Sheng Dai: Application of geopolymer paste for concrete repair, *International federation for structure concrete*, pp.561-570, 2017.1
- 4-7) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2003
- 4-8) 井上真澄, Saphouvong khamhou, 児島孝之：アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究, *材料*, Vol.56, No.12, pp.1183-1188, 2007.12
- 4-9) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編], pp.247-253, 2012
- 4-10) 飯坂武男, 鷺見高典, 梅原秀哲：無機系補修材料の注入性に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, No.599/V-40, 49-57, 1998.8
- 4-11) 佐藤隆恒, 大木信洋, 束原実, 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, pp.2023-2028, 2013.7
- 4-12) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発, *鉄道総研月例発表会要旨*, pp.1-4, 2016.1
- 4-13) 合田寛基, 原田耕司, 津郷俊二, 日比野誠：フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.1993-1998, 2015.7
- 4-14) Hisham M Khater: Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials, *International journal of advanced structural engineering*, 2013
- 4-15) Manjunath S. Sontaki, Sawapnil B. Cholekar: Strength performance studies on ambient cured silica fume based geopolymer concrete, *International research*

- journal of engineering and technology (IRJET), Vol.2, No.7, 2015.10
- 4-16) F.N. Okoye, J. Durgaprasad, N.B. Singh: Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete, *Ceramics international*, Vol.42, pp.3000-3006, 2016.10
- 4-17) Debabrata Dutta, Suresh Tholchom, Partha Ghosh, Somnath Ghosh: Effect of silica fume addition on porosity of fly ash geopolymers, *ARP journal of engineering and applied sciences*, Vol.5, No.10, pp.74-79, 2010.10
- 4-18) Suresh Thokchom, Debabrata Dutta, Somnath Ghosh: Effect of incorporation silica fume in fly ash geopolymers, *World academy of science, engineering and technology international journal of civil and environmental engineering*, Vol.5, No.12, pp.750-754, 2011
- 4-19) F.A. Memon, Muhd Fadhil Nuruddin, Nasir Shafiq: Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete, *International journal of minerals metallurgy and materials*, Vol.20, No.2, pp.1-9, 2013.2
- 4-20) D. Adak, M. Sarkar, S. Mandal: Effect of nano silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar, *Construction and building materials*, Vol.70, pp.453-459, 2014
- 4-21) 市川敬悟：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究，三重大学平成27年修士論文，2016.2
- 4-22) 長滝重義，大即信明，久田真，水野和彦：シリカフェームの品質とその評価に関する研究，*土木学会論文集*，Vol.28, No.520, pp.87-98, 1995.8
- 4-23) 松藤泰典：資源の有効利用とコンクリート/第6回 シリカフェームを用いたコンクリート，*コンクリート工学*，Vol.34, No.5, pp.70-75, 1996.5
- 4-24) Y. Luna-Galiano, C. Leiva, C. Arenas, C. Fernandez-pereira: Fly ash based geopolymeric foams using silica fume as pore generation agent-Physical, mechanical and acoustic properties, *Journal of non-crystalline solids*, Vol.500, pp.196-204, 2018
- 4-25) Frantisek Skvara, Rostislav Sulc, ZDENEK Tisler, PETR Skricik, Vit Smilauer, Zuzana Zlamalova Cilova: Preparation and properties of fly ash-based geopolymer foams, *Ceramics-Silikaty*, Vol.58, No.3, pp.188-197, 2014
- 4-26) 松田明，丸山一平：FA及びBFSを用いたジオポリマーにおける反応生成物と物性に関する検討，*日本建築学会東海支部研究報告書*，Vol.56, pp.69-72, 2018.2
- 4-27) N. K. Lee, G. H. An, K. T. Koh, G. S. Ryu: Improved Reactivity of fly ash-slag geopolymer by the addition of silica fume, *Hindawi publishing corporation, Advances in materials science and engineering*, pp.1-11, 2016.3

第 5 章 GP のひび割れ注入材 としての適用

5.1 はじめに

5.2 実験方法

5.3 実験結果および考察

5.4 まとめ

[第 5 章の参考文献]

5.1 はじめに

第4章ではジオポリマー（GP）のひび割れ注入材への適用を目的として、超微粒子であるシリカフェーム(SF)を添加したGPの基礎的性能について調べた。その結果として、SFを添加するほど、フロー値が低下して流動性が低下する結果となった。また、高炉スラグ微粉末（BFS）置換率が小さい範囲でGP硬化体が膨張し、圧縮強度が低下することが確認された。これは今回使用したSFは金属シリコンの生産過程で排出されたものであり、金属Siが含まれ、アルカリ溶液の水分と反応してH₂ガスを発生したと思われる。図5-1に第4章で得られた結果を示す。図中に青枠で囲まれている部分は、普通セメントコンクリートと同等以上の圧縮強度（30N/mm²以上）が確保でき、大きな体積膨張を生じず注入材としての適用が期待できる範囲を示す。

また、既往の研究⁵⁻¹⁾によれば、電融ジルコニア製造時に排出されるSFを用いた場合、BFS置換率の小さい範囲（図5-1の赤い点線の部分）においても30N/mm²以上の圧縮強度が得られ、膨張が見られず注入材としての適用が期待できると考えられる。

そこで、本章ではその範囲の中からいくつかの調査（図5-1のNo.⑫とNo.⑮）を選び、実際にひび割れ注入試験を行い、GPの注入性能を検討する。

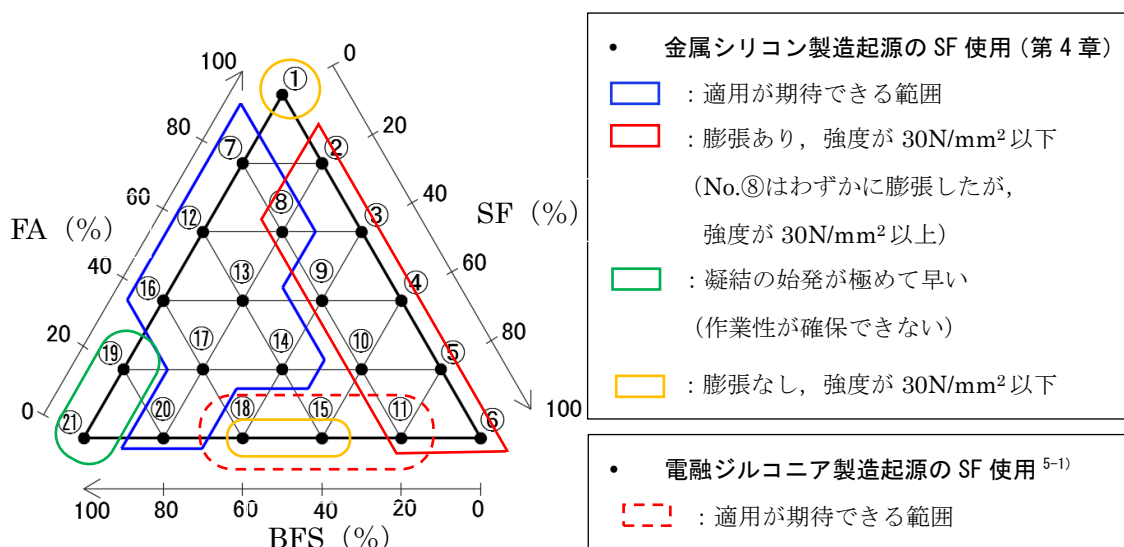


図 5-1 適用可能な範囲

5.2 実験方法

5.2.1 要因と水準

表 5-1 に実験の要因と水準を示す。今回の実験では、フライアッシュ (FA) に BFS を置換した FA-BFS 系と、SF と BFS を用いた SF-BFS 系の 2 水準とした。BFS の置換率は 40% とし、BFS の比表面積は 4000, 8000 の 2 水準設けた。また、W/P は FA-BFS 系については 0.5, 0.7, 0.9 の 3 水準、SF-BFS 系については 0.5, 0.7 の 2 水準とした。比較のため、市販の有機系および無機系ひび割れ注入材も用いて注入試験を行う。

表 5-1 要因と水準

注入材料	粉体 (容積比) FA : BFS : SF (%)		BFS 比表面積 (cm^2/g)	溶液粉体比 W/P ^{*1}	溶液比 WG2 : NH ^{*1}
	GP	FA-BFS 系	FA60BFS40 (図 5-1 の No. 12)	4000	0.5, 0.7, 0.9
			8000		
SF-BFS 系		SF60BFS40 (図 5-1 の No. 15)	4000	0.5, 0.7	
			8000		
無機系	①	ファインショットマイクロ : 超微粒子高性能ポリマーセメント系注入材			
	②	太平洋スラリー : 超微粒子ポリマーセメント系無機注入材			
有機系	ボンド E206S : 土木建築用エポキシ樹脂				

*1 : 質量比

5.2.2 GP の使用材料および調合

表 5-2 に使用材料を示す。また、活性フィラーの蛍光 X 線元素分析法 (XRF) による化学成分分析結果を表 5-3 に、粉体の粒度分布を図 5-2 に示す。活性フィラーとして、充填性の向上を期待するため、本実験では第 3,4 章で使用した JIS II 種より粒子が細かい JIS I 種の FA と、ブレン値 4000 級および 8000 級の 2 種類の BFS を使用した。また、本実験で使用する SF は第 4 章で使用したものと異なり、膨張が生じない中国産の電融ジルコニア製造時に排出される SF を用いた。

表 5-3 より、FA は SiO_2 が約 64%、 Al_2O_3 が 23% で構成されており、BFS は CaO が約 43% で、次いで SiO_2 が 36%、 Al_2O_3 が 13% であった。BFS はブレンでの化学組成の差はほとんど見られない。アルカリ溶液として、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) を混合させたものを使用し、構成や作製方法は第 3 章や第 4 章と同様とした。

図 5-1 に使用した活性フィラーの粒度分布を示す。粒度分布は、レーザー回折・散乱法で測定を行った。粒子径のピークから、規格通り BFS はブレン 8000 が 4000 より粒径が細かい。また、FA は BFS8000 と同等またはより細かい粒径であり、SF は最も細かい材料である。

表 5-2 GPの使用材料

種別	略号	材料名	比表面積 (cm ² /g)
粉体 (P)	FA	フライアッシュ JIS I種	5000以上
	BFS4000	高炉スラグ微粉末 (JIS A 6206)	4000
	BFS8000		8000
	SF	シリカフューム (JIS A 6207)	
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)	

表 5-3 活性フィラーの化学組成 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂ + HfO ₂
FA	63.38	22.16	3.77	1.04	0.03	2.53	1.32	0.55	1.44	—
BS4000	35.6	13.05	0.42	0.44	0.07	43.49	5.51	0.09	0.33	—
BS8000	36.35	13.47	0.27	0.44	0.08	43.56	5.52	0.15	0.16	—
SF	96.50	0.26	0.27	0.02	—	0.03	0.02	0.01	0.10	2.34

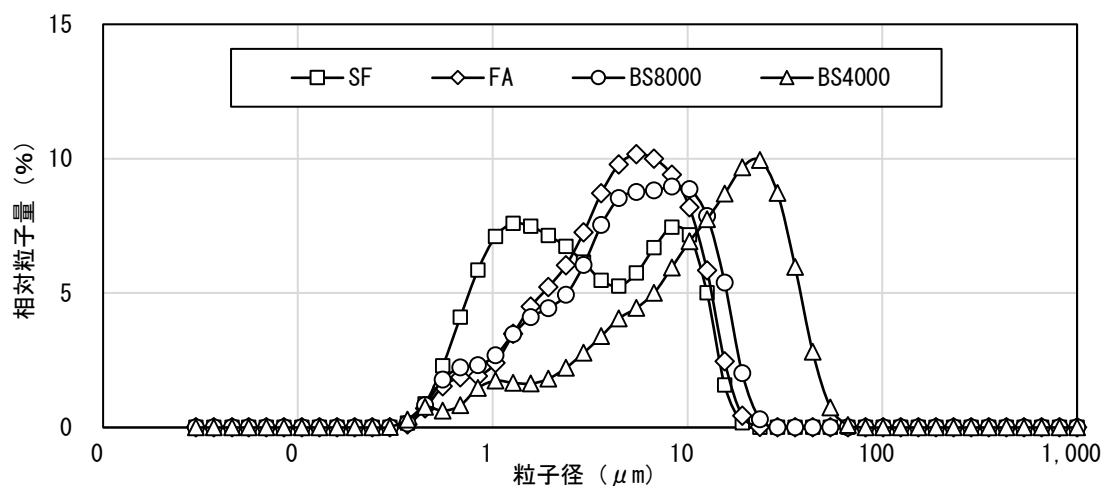


図 5-1 粒度分布

表5-4に今回注入材として使用するGPの調合表を示す。BFSはすべてのブレン値で同じ調合を用いた。表5-5に比較用の市販無機系ひび割れ注入材の調合表を示す。メーカーによれば、注入幅によって調合が異なるため、本実験で注入ひび割れ幅0.2~0.5mm用の調合で行った。また、表5-6に市販の有機系ひび割れ注入材の調合表を示す。

表5-4 GPの調合表

	記号 (粉体比)	単位量 (g/L)							W/P
		FA	SF	BFS	WG2	NH	P	W	
FA-BFS系	FA60BS40	796.5	0.0	531.0	442.5	221.3	1327.5	663.8	0.5
SF-BFS系	SF60BS40	0.0	797.7	531.8	443.2	221.6	1329.5	664.8	
FA-BFS系	FA60BS40	670.7	0.0	447.1	521.6	260.8	1117.8	782.5	0.7
SF-BFS系	SF60BS40	0.0	671.5	447.7	522.3	261.2	1119.2	783.5	
FA-BFS系	FA60BFS40	526	0	444.2	582.2	291.1	970.3	873.2	0.9

表5-5 市販の無機系ひび割れ注入材の調合表

材料	構成	調合比
ポリマーセメント系①	粉体:混和液:水	7.5:1:3
ポリマーセメント系②	粉体:混和液	1:0.6

表5-6 市販の有機系ひび割れ注入材の調合表

材料	構成	調合比
樹脂系	主剤:硬化剤	2:1

5.2.3 試験方法

(1) 練混ぜ方法

GPの練混ぜ方法は前章の実験と同様に、溶液は前日にWG2とNHを質量比で2:1となるように混ぜ、20℃、60%R.H.の養生室で保管したものをを用いた。溶液を入れる前に粉体のみを予め空練りした後、溶液を投入し、手練りで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秒間手練りした。

比較用の市販無機系ひび割れ注入材の練混ぜ方法は、容器に混和液(と水)を入れ、粉体を投入し、市販のハンドル・ミキサーで粉体の玉がなくなるまで攪拌した。その後、細かい気泡が無くなるまで静置した。また、有機系のひび割れ注入材の練混ぜ方法も主剤と硬化剤を容器に投入して同様に攪拌した。

(2) フロー試験

GPの流動性を評価するため、練混ぜ後のフレッシュ性状についてフロー値の測定を行った。フロー試験は、0打モルタルフロー試験に基づいて測定を行った。

(3) 粘度試験

B型粘度計によって粘度を測定した。粘度試験は、ロータを回転させてから粘度が安定するおおよそ15秒後の値を読み取った。温度は20±3℃の条件下で行い、測定は、練上がり直後に行った。

(4) 塩ビ版注入試験体

図5-2に試験体の概要を、図5-3に試験体断面図を、実際の試験体を写真5-1に示す。既往の研究^{5-2)~5-3)}を参考にし、簡易的なひび割れを作製した。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(写真5-1参照)、ボルトでしっかりと締める。その後、12個のクリップで周囲を止めた後、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確認した。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に設定した。

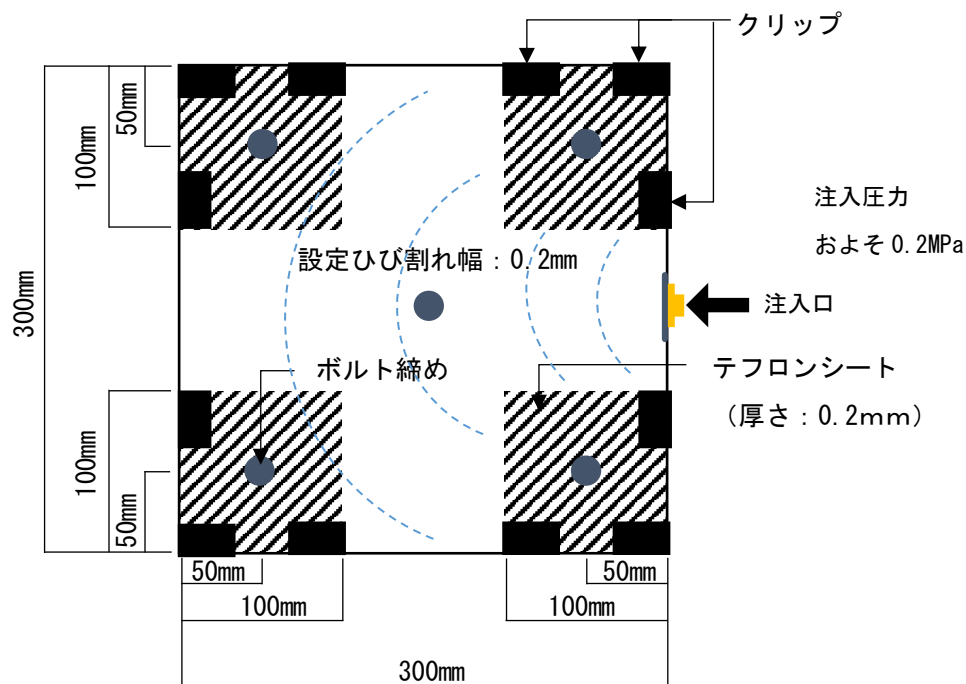


図 5-2 ひび割れ試験体の概要図

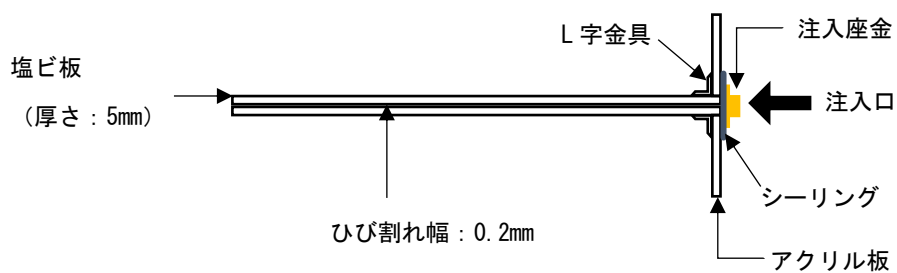


図 5-3 試験体断面図

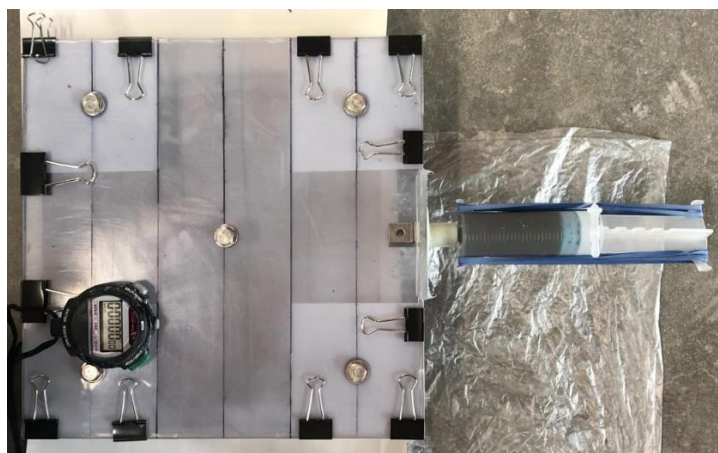


写真 5-1 擬似ひび割れ試験体

5.3 実験結果

5.3.1 フロー試験

表5-7に練混ぜ直後のフロー試験結果を示す。表よりアルカリ溶液の量が増加し、W/Pが大きくなるにつれてフロー値が大きくなり、流動性が改善されることが分かる。FA-BFS系とSF-BFS系を比較すると、W/P=0.5ではFAを用いた場合はSFを用いた場合よりフロー値が小さく、BFS8000でその差が顕著になった。文献5-4) 5-5)では、FA-BFS系GP(BFS30%)のFA一部にSFを置換した場合は、SFを置換しない場合に比べて凝結時間が長くなり、流動性が高くなる傾向にあると報告されている。よって、本実験ではW/Pが小さい場合においてアルカリ溶液の刺激によりSF-BFS系の反応よりFA-BFS系の方が早くなること、SFの微粒子によるボールベアリング効果が発揮することなどがW/P=0.5のSF-BFS系のフロー値が大きくなったことに起因するのではないかと考えられる。一方、W/P=0.7ではFAを用いた場合の方がフロー値は若干大きくなった。これは、SFはFAより粒子が細かいためと考えられる。

また、各調合においてBFSの比表面積が大きいほど、フロー値が減少する傾向が見られた。これは、粒径が細かいほど溶液との接触部分が大きくなり、溶液が多く吸収されること、また、アルカリ溶液との反応が早くなって粘性が上昇したことなど考えられる。

表5-7 フロー試験結果

材料	W/P	調合	BFS ブレーン	フロー値	平均フロー値
FA-BFS系	0.5	FA60BFS40	4000	289×296	293
			8000	183×189	186
	0.7		4000	380×370	375
			8000	380×370	375
	0.9		4000	460×450	455
			8000	460×410	435
SF-BFS系	0.5	SF60BFS40	4000	300×305	303
			8000	285×285	285
	0.7		4000	340×345	343
			8000	330×325	328
ポリマーセメント系②				370×375	373

5.3.2 粘度

表5-8に練混ぜ直後の粘度の測定結果を示す。FAより粒子の細かいSFを用いた場合の方が粘度は若干大きくなる。また、BFSの比表面積が大きいほど、W/Pが小さいほど大きくなることから分かる。これは、粒子が細かく溶液との接触部分が大きくなるためであると考えられる。本実験範囲の粘度の結果はポリマーセメント系⁵⁻⁶⁾もしくはエポキシ樹脂系⁵⁻⁷⁾⁵⁻⁸⁾ひび割れ注入材などの既往の研究と比較し、W/P=0.9のGPは低粘度、W/P=0.7の場合には中粘度、W/P=0.5の場合には高粘度のものに近い粘性であると言える。

また、図5-4に一例としてFA-BFS系の粘度の経時変化を示す。同図に市販のひび割れ注入材の結果も併示する。溶液投入から数分間の粘度の減少が見られたものもあるが、全体的にある一定の時間までは一定の値をとり、その後急激に増加した。BFSの比表面積が大きいほど、またW/Pが小さいほどその急激に増加する時間が早まる。これは、粘度が若干減少するまたは一定の値をとる範囲では、アルカリ溶液の刺激により活性フィラーからSiやAlが溶けだし、モノマーが生成されるためであり、粘度が上昇するのはモノマー同士が結合しポリマー化して硬化していくためであると考えられる⁵⁻⁹⁾。

表5-8 粘度試験結果

材料	W/P	調合	BFS ブレーン	粘度 (Pa・s)
FA-BFS系	0.5	FA60BFS40	4000	19.1
			8000	-*
	0.7		4000	4.0
			8000	7.0
	0.9		4000	1.1
			8000	1.5
SF-BFS系	0.5	SF60BFS40	4000	16.6
			8000	19.6
	0.7		4000	4.4
			8000	6.8
市販	ポリマーセメント系②			0.7
	樹脂系			0.4

*：粘度が練り混ぜ直後から急上昇のため測定不能である。

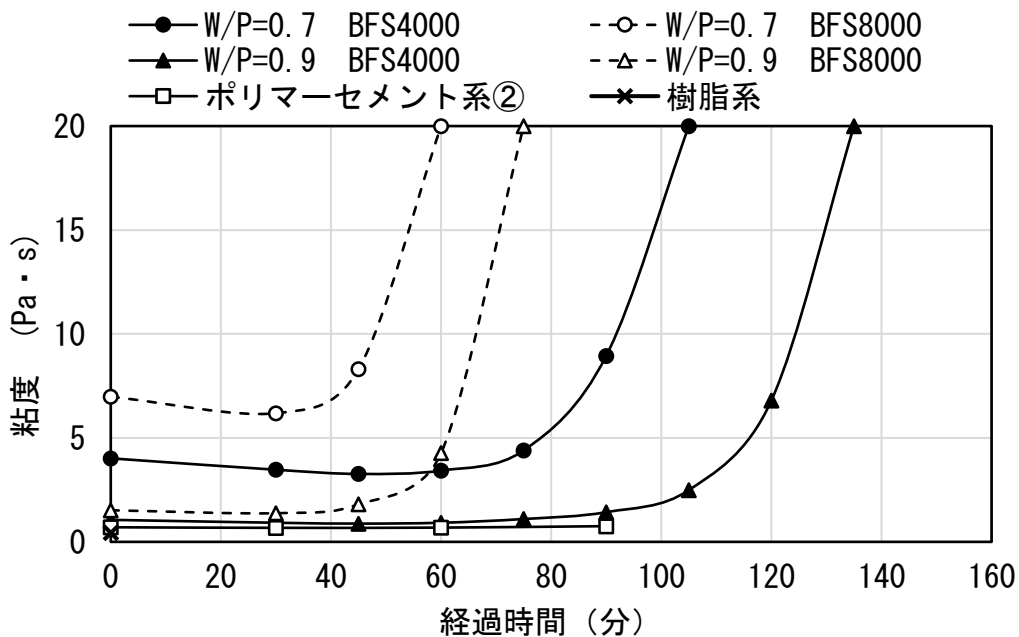


図5-4 粘度-経過時間の関係

三重大学 工学研究科

5.3.3 注入性

表 5-9 に疑似ひび割れ注入の実験結果を示す。また、一例として注入完了時の様子を写真 5-2 に示す。結果より、本実験で用いた GP は、塩化ビニール板を用いたひび割れ幅 0.2mm のひび割れ試験体に 30cm 以上注入することが可能であると言える。ただし、FA-BFS 系では W/P=0.5 の場合、約 5cm 程度までしか入らなかった。注入深さが少なかった原因として、流動性に乏しかったこと (表 5-7 参照)、粘性が高かったこと (表 5-8 参照)、凝結が早く可使時間が短かったことが考えられる。一方で、SF-BFS 系では W/P=0.5 でも約 20cm まで注入することができた。これは、SF の微粒子効果によるものなのではないかと考えられる。

図 5-5 に注入深さと到達時間の関係を示す。図 5-5 (a) には FA-BFS 系として、W/P=0.7 の 4000, 8000 ブレーンの各 2 回の結果と比較のために市販のポリマーセメント系注入材の結果を、図 5-5 (b) には SF-BFS 系として、BFS4000 ブレーンの W/P=0.5, 0.7 の結果と比較のために同じく FA-BFS 系 BFS4000 ブレーンの W/P=0.7 の結果および市販のポリマーセメント系注入材の結果を示す。

図 5-5 (a) によれば、同じ深さまでの到達時間は、W/P が大きいほど早い結果となった。また、BFS の比表面積による影響を見てみると、W/P=0.9 ではわずかな差が見られるが、W/P=0.7 では注入深さが深くなるにつれてその差が顕著となった。これは、W/P=0.7 では BFS の比表面積が大きいほど粘度が高く、硬化反応が早まるためと考えている。

図 5-5 (b) によれば、W/P=0.7 の SF-BFS 系と FA-BFS 系の結果を比較すると、SF-BFS 系は FA-BFS 系より若干流動性が低く、粘度が同等レベルであるが、浸透速度は FA-BFS 系よりも速く (BFS8000 を用いた場合の 20cm 以降は漏れにより SF-BFS 系の浸透速度が低下し、FA-BFS 系より遅くなった)、市販で用いられているポリマーセメント系注入材に近い結果となった (約 15cm まで)。このことから、粒径の大小が浸透速度に影響を与えていると言える。また、図 5-6 (a), (b) とともに、市販で用いられている無機系のポリマーセメント系注入材の浸透速度が最も速い結果となった。

表 5-9 注入試験結果

材料	W/P	調合	BFS プレーン	注入深さ
FA-BFS 系	0.5	FA60BFS40	4000	約 5cm ^{*1}
			8000	約 5cm ^{*1}
	0.7		4000	30cm
			8000	30cm
	0.9		4000	30cm
			8000	30cm
SF-BFS 系	0.5	SF60BFS40	4000	約 20cm ^{*2}
			8000	約 18cm ^{*1}
	0.7		4000	約 20cm ^{*2}
			8000	約 28cm ^{*1}
市販	ポリマーセメント系①			30 cm
	ポリマーセメント系②			約 18cm ^{*2}

*1: 硬化反応が早まり、途中で粘性が急に増加し、注入性能を失った。
 *2: シーリング不備による漏れがあるため、注入完了したが全長深さ 30cm に到達しなかった。

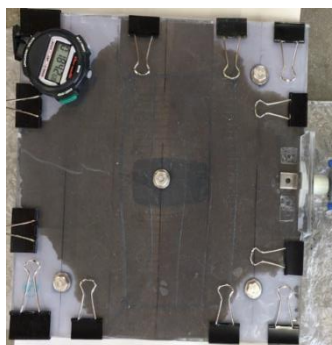
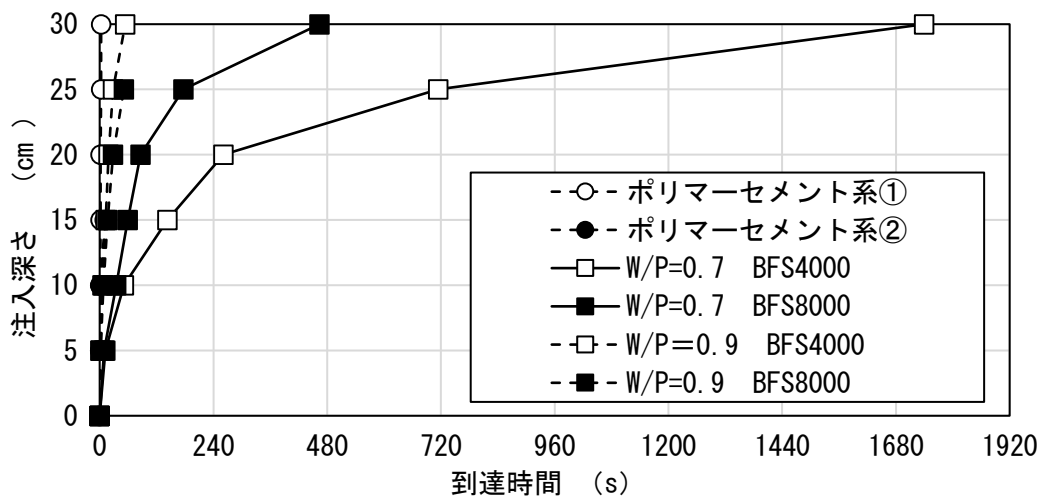
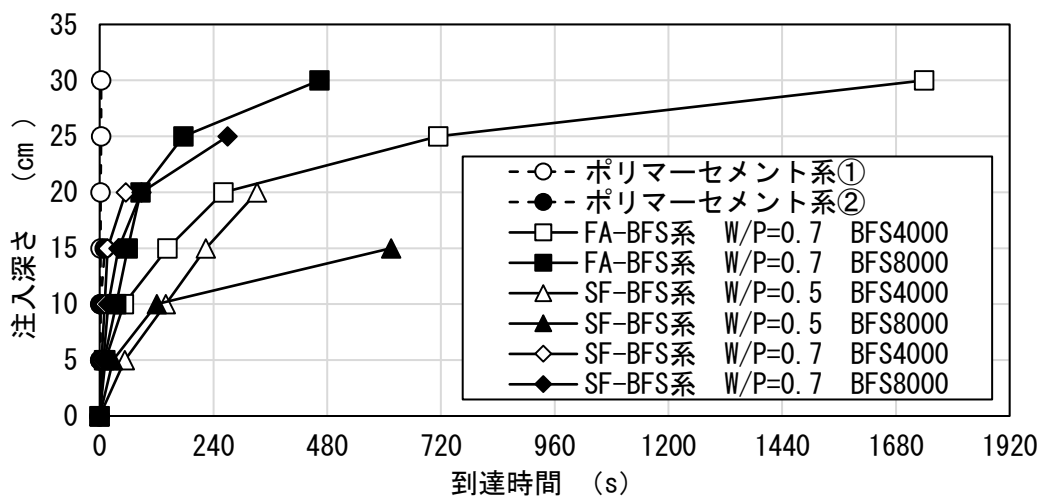


写真 5-2 注入実験終了時状況 FA-BFS 系 (BFS4000, W/P=0.7)



(a) FA-BFS系 (FA60BFS40)



(b) SF-BFS系 (BFS4000)

図5-5 注入深さ-到達時間の関係

5.4 まとめ

本章では、ひび割れを簡易的にモデル化し、塩ビ板を用いた擬似ひび割れ注入実験を行った。本章では以下のような知見が得られた。

- 1) W/Pが小さいほど、粉体の粒子が細かいほどフロー値が減少して流動性が低く、練混ぜ直後の粘性は大きくなる。また、BFSの比表面積が大きいほど粘度が増加する時間も早くなる。
- 2) W/P=0.5FA-BFS系の場合、0.2mmの塩ビ板擬似ひび割れ試験体への注入深さは5cm程度であったが、W/P=0.7, 0.9では深さ30cmまで注入できた。溶液粉体比を増やすことで、流動性が高くなり、粘性が低下して注入性能が向上した。
- 3) 擬似ひび割れ試験では、FA-BFS系の場合、W/Pが小さいほど、注入深さが深くなるにつれてBFSの比表面積による浸透速度への影響が確認された。
- 4) 本実験の範囲では活性フィラーにJIS I種のFAを用いた場合より、SFを用いた場合の方が浸透速度は速くなる傾向がみられた。

【第5章の参考文献】

- 5-1) 伊藤彰利：微粒子粉体を用いたジオポリマーのひび割れ補修材としての活用に関する基礎的研究，平成30年度三重大学大学院修士論文
- 5-2) 佐藤晋也，臼杵匠，伊代田岳史：簡易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
- 5-3) 若杉三紀夫：ポリマーセメント系補修材の開発と無機系複合表面処理工法のASR抑制効果に関する研究，平成26年京都大学博士論文
- 5-4) C. Jithendra, et al: Effect of silica fume on workability and compressive strength properties of aluminosilicate based flowable geopolymer mortar under ambient curing, *Silicon* (2020) 12, pp.1965-1974, 2019.11
- 5-5) S. K. Das, et al: Fresh , strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash, *Journal of Building Engineering*, 2020.8
- 5-6) 上松泰介：コンクリートのひび割れ注入工法の性能比較試験，ひび割れの状態に応じた補修方法の選定に向けて，中部電力技術開発ニュース，No.158, 2018.2
- 5-7) 毛利聡ら：可視化試験体を用いたひび割れ補修材の注入性状の評価技術，日本建築学会技術報告集，No.21, Vol.47, pp.29-34, 2015.2
- 5-8) 公益社団法人日本建築工学会：コンクリート診断技術'12[基礎編],pp.248, 2012.2
- 5-9) Cao, V. D., et al.: Influence of microcapsules size and shell polarity on the time-dependent viscosity of geopolymer paste, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018

第 6 章 GP の断面修復材 としての適用

- 6.1 はじめに
 - 6.2 実験方法
 - 6.3 実験結果および考察
 - 6.4 まとめ
- [第 6 章の参考文献]

6.1 はじめに

本章ではGPモルタルを断面修復材として適用するための実験的研究を行う。断面修復材として適用するには、作業性が高いこと、既存コンクリートと同等以上の強度・ヤング係数を有すること、収縮率が小さく母材コンクリートと高い付着力を有することなどの性能が要求される。そこでGPモルタルがそれらの性能を満足するか否かを評価するための実験的検討を行い、市販の補修材および公的機関が提案した補修材に求められる要求性能と比較し、GPの補修材としての有用性を検討する。また、材料特性に関する実験結果を踏まえ、次のステップとして、断面欠損させたRC梁の補修材料としてGPモルタルを用い、補修したそのRC梁の曲げ試験を行い、無補修RC梁および市販の補修材を用いたRC梁の耐力・破壊性状と比較し、GPを用いた場合の補修効果を検討する。

6.2 GPの断面修復材としての性能に関する基礎的実験

本節では無機系材料であるGPの優れた耐硫酸性や高温抵抗性などの耐久性、コンクリートおよび鉄筋との高い付着特性に着目してGPのコンクリート構造物の補修材への適用を検討することを目的としている。本論文では、溶液粉体比及び高炉スラグ微粉末の比表面積がGPモルタルのフレッシュ性状、力学特性、長さ変化率、付着特性などの断面修復材としての要求性能に及ぼす影響について検討する。

6.2.1 実験方法

(1) 使用材料および調合

表6-1にGPモルタルの使用材料を示す。活性フィラーとしては、フライアッシュ2種（以下、FA）、高炉スラグ微粉末4000、6000、8000級（以下、BFS4、BFS6、BFS8）の3種類を使用する。本章で使用した粉体は、第3章～第5章まで使用したものと同一種類である。アルカリ溶液には、水ガラス原液2号（以下、WG2）および10mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液（以下、NH）を使用し、WG2とNHの質量比がWG2:NH = 2:1となるよう混合した。細骨材には川砂を使用した。

表6-2に活性フィラーの蛍光X線元素分析法（XRF）による化学成分分析結果を示す。FAはSiO₂が約60%、Al₂O₃が約24%で構成されており、BFSはCaOが約41～44%で、次いでSiO₂が34～36%、Al₂O₃が13～15%であった。

表6-3にGPモルタルの調合表を示す。BFSはすべての比表面積で同じ調合とし、BFS置換率を20%（容積比）とした。また、比較用の市販補修材にはポリマーセメントモルタル（リペアミックス、PCM）を用いた。

表 6-1 使用材料

Material		Property	Code
Active Powder (P)	Fly ashⅡ (JIS A 6201)	Density = 2.29 g/cm ³ Blaine value = 3700 cm ² /g	FA
	Ground granulated Blast furnace slag (JIS A 6206)	Density = 2.90 g/cm ³ Blaine value = 4120, 6100, 8000, cm ² /g	BFS4 BFS6 BFS8
Solution (W)	Water glass No.2	Density = 1.45 g/cm ³	WG2
	Sodium hydroxide solution	Molarity = 10 mol/L Density = 1.35 g/cm ³	NH
Fine aggregate	River sand	water absorption = 2.15% Density = 2.59 g/cm ³	S
Polymer cement mortar		Density = 2.43 g/cm ³	PCM
High-early strength Portland cement		Density = 3.15 g/cm ³	C

表 6-2 活性フィラーの化学組成 (%)

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂
FA	23.64	60.49	2.90	4.68	1.21	0.53	0.49	3.77
BFS4	14.94	34.04	42.72	0.35	0.26	5.81	0.26	0.44
BFS6	12.85	35.2	41.8	0.3	0.19	6.14	0.13	0.38
BFS8	13.47	36.35	43.56	0.27	0.16	5.52	0.15	0.44

表 6-3 Mix proportions of GP mortar

No.	Unit weight (g/L)					W/P
	FA	BFS	WG2	NH	S	
GPM1	454	143	159	80	1515	0.4
GPM2	410	130	180	90	1515	0.5
GPM3	375	119	198	99	1515	0.6

(2) 供試体作製方法

練混ぜにはモルタルミキサーを用いた。粉体と細骨材を溶液投入前に予め約 30 秒間空練りを行った。その後、搔落としをし、溶液を投入して 60 秒間本練りを行い、再び搔落としをした後 120 秒間練り混ぜた。

(3) 試験項目および試験方法

フロー試験は JIS A 5201 に準拠した。また、凝結時間は JIS A 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。ここでは、凝結の始発時間はコンクリート同様、貫入抵抗値が 3.5N/mm^2 の時点、終結時間は、同値が 28N/mm^2 の時点とした。

圧縮試験は JIS A 1108、割裂引張試験は JIS A 1113、ヤング係数は JIS A 1149 に準拠して行い、試験結果はすべて $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体の 3 本の平均値とした。曲げ試験は $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を作製し、JIS A 1106 に準拠した 3 等分点載荷を行った。

長さ変化率試験は、各調合につき 3 体ずつの $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を作製し、測定は JIS A 1129-2 に準拠して行った。GP モルタルは打設後材齢 1 日より測定を開始した。また、セメントペースト(W/C=0.5)・モルタル(W:C:S=1:2:6)及びポリマーセメントモルタルも作製し、材齢 7 日まで水中養生を行った後、測定開始を行った。測定の間は 20°C 、60% RH の環境で放置した。

付着試験は、予め作製した土台コンクリートに厚さ 10mm の各種補修モルタルを打設し、材齢 28 日に 40mm 角の切込みを入れ、日本建築仕上げ学会認定の油圧式簡易引張試験機により測定を行った。

6.2.2 実験結果および考察

(1) 凝結時間

図 6-1 に凝結試験結果を示す。図 6-1 より BFS の比表面積が大きいほど始発時間、終結時間ともに短くなる傾向が確認できた。これは比表面積が大きいことで溶液との接触面積が増え、反応量が増すことで強度発現が早くなったと考えられる。また、W/P が小さいほど始発時間、終結時間ともに短くなる傾向が確認された。

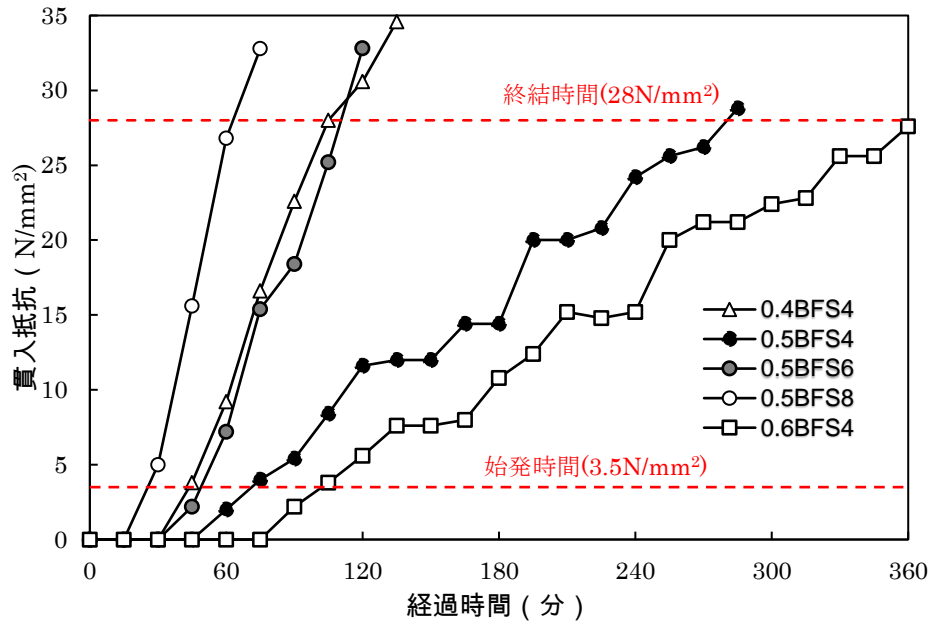


図 6-1 凝結時間

(2) フレッシュ性状

図 6-2 にフロー試験の結果を示す。図 6-2 より W/P が増加すると、フロー値も増加する傾向が確認できた。既往の研究⁵⁻²⁾では、比表面積が大きいほど、GP ペーストのフロー値は減少する傾向が見られていたが、本実験では、BFS の比表面積とフロー値には相関関係がみられなかった。

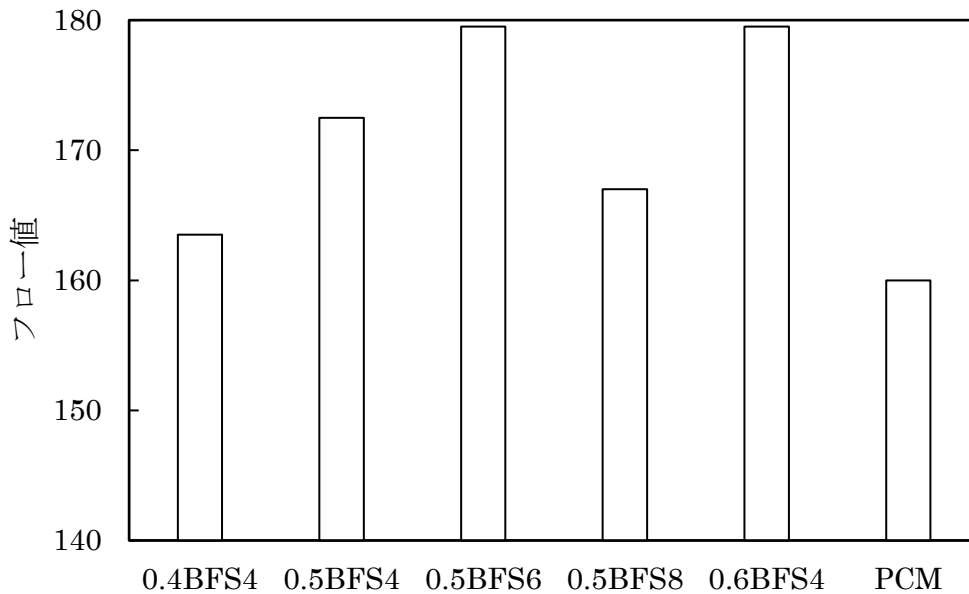


図 6-2 フロー試験結果

(3) 各種強度特性

図6-3と図6-4に各種強度の試験結果を示す。圧縮、曲げ、引張強度ともにW/Pが大きくなるほど小さくなる。また、BFSの比表面積が大きくなるほど各種強度が僅かであるが増加する傾向がみられた。PCMに比べ、今回用いたGPモルタルは同等以上の圧縮強度を有するものの、曲げ、引張及びヤング係数がPCMのそれらより小さい結果となった(0.4BFS4を除く)。しかし、本実験における強度試験の結果においては断面修復材として十分な強度特性を有すると考えられる。

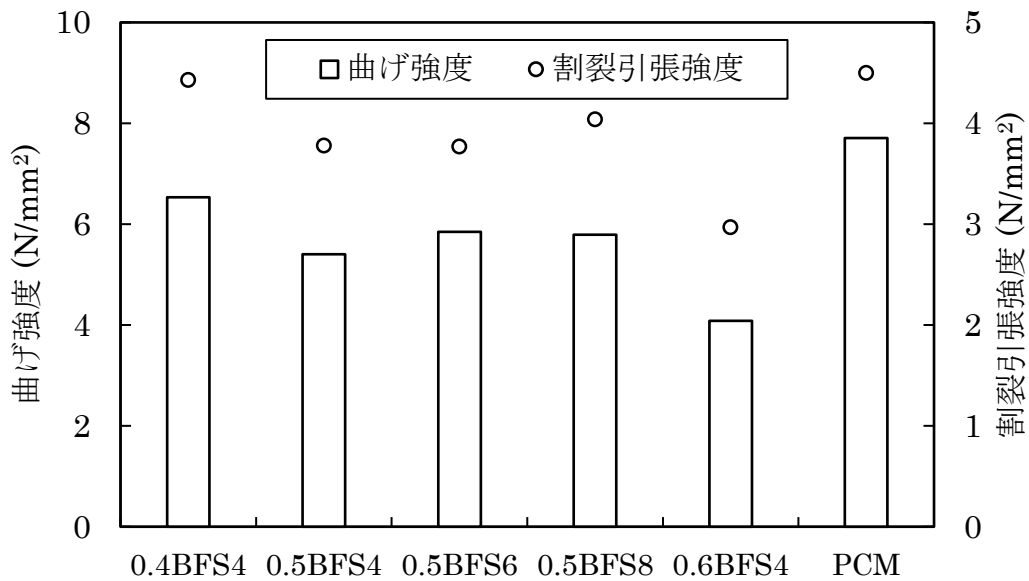


図6-3 曲げ強度および割裂引張強度の結果

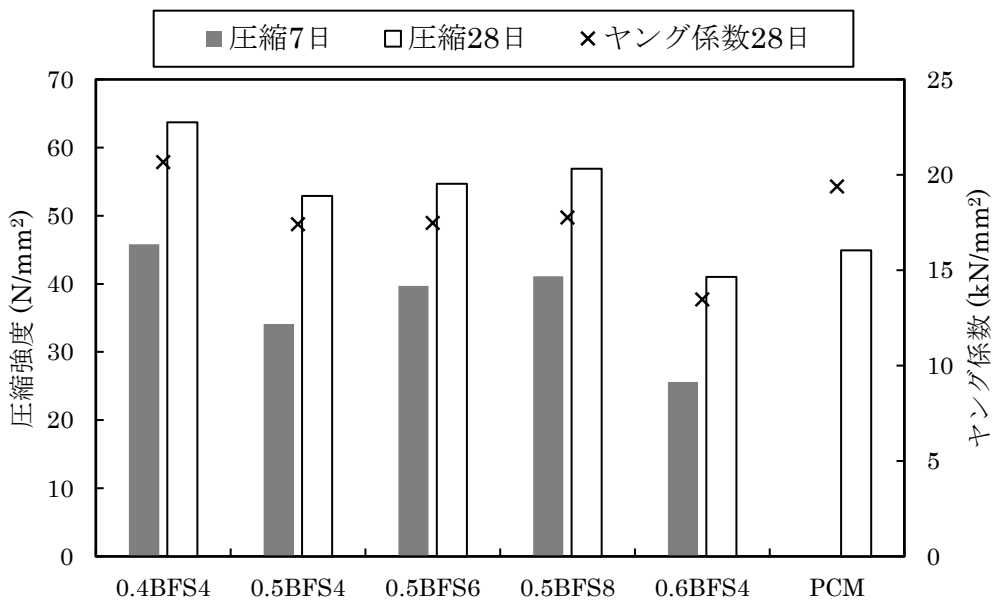


図6-4 圧縮強度およびヤング係数の結果

(4) 長さ変化率

図 6-5 に長さ変化率の結果を示す。材齢 28 日時点での収縮ひずみは、セメントペーストが約 2500×10^{-6} 、セメントモルタルが約 1300×10^{-6} 、PCM が 800×10^{-6} 程度となった。一方、すべての GP モルタルにおいて材齢 28 日時点では 3500×10^{-6} 以上と大きな値を示しており、実用するには改善が必要である。また、W/P 及び BFS 比表面積の違いによる影響はあまり明確になっていなかったものの、W/P=0.6 は 0.4 と 0.5 より、BFS6 および BFS8 は BFS4 より材齢 28 日時点での収縮ひずみが若干大きくなっている。

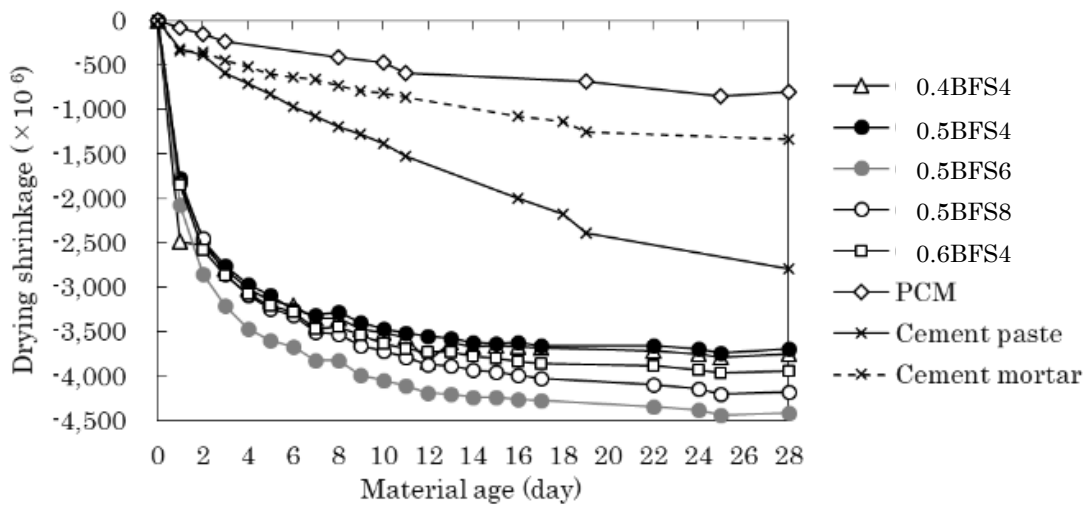


図 6-5 長さ変化率結果

(5) 付着性状

図 6-6 に付着試験の結果を、図 6-7 に付着試験の破壊形式を、図 6-8 に付着界面の SEM 画像を示す。GP モルタルの付着強度は、材齢 7 日では適用可能な下限値とされている付着強度 (1.5N/mm^2) より小さく、PCM の約 20~35%程度であったが、材齢とともに増加し、材齢 14 日時点で付着強度 1.5N/mm^2 以上を示した。また、破壊形式に着目すると、BFS4 を使用したすべての W/P では GP 母材で破壊するのに対し、BFS6 と BFS8 の場合は付着界面で破壊した (図 6-7)。これは、図 6-8 に示すように BFS6 と BFS8 の場合は界面に隙間が観察されたことから、超微粒子による自己収縮が内部で生じたことが一因であると考えられる。一方で、W/P=0.6BFS4 は GP 母材で破壊したが、図 6-8 (e) に示しているように付着界面において大きな隙間が確認された。

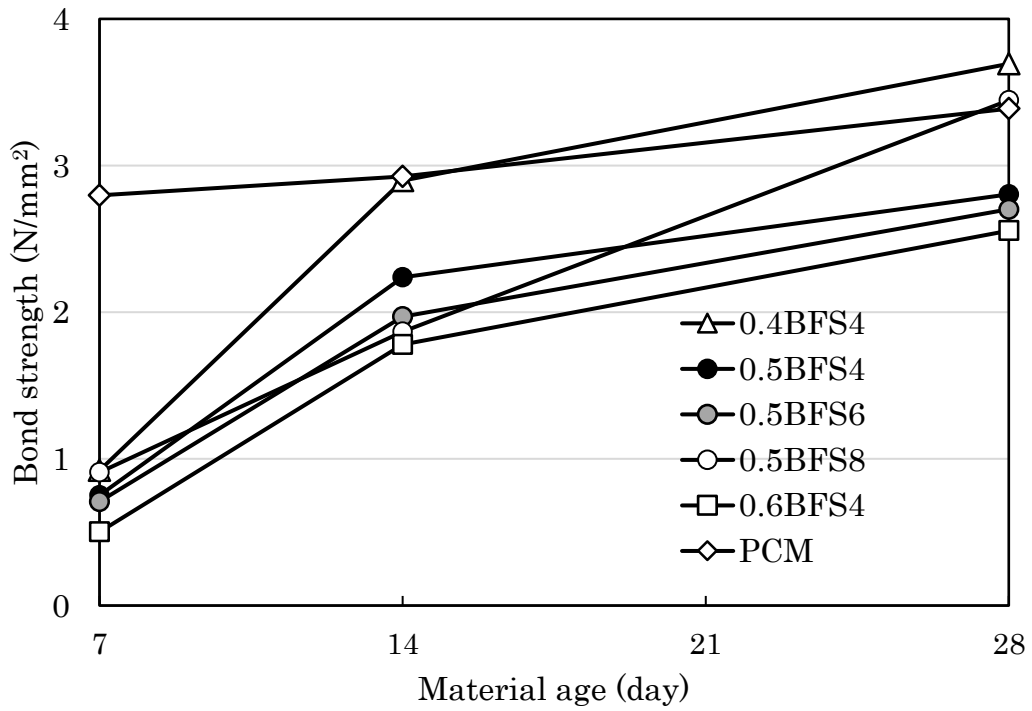


図 6-6 付着試験における破壊形態

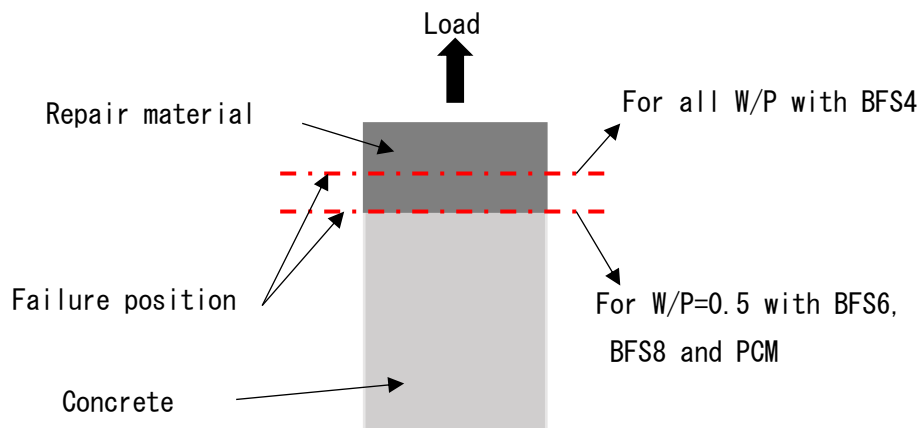


図 6-7 付着破壊性状

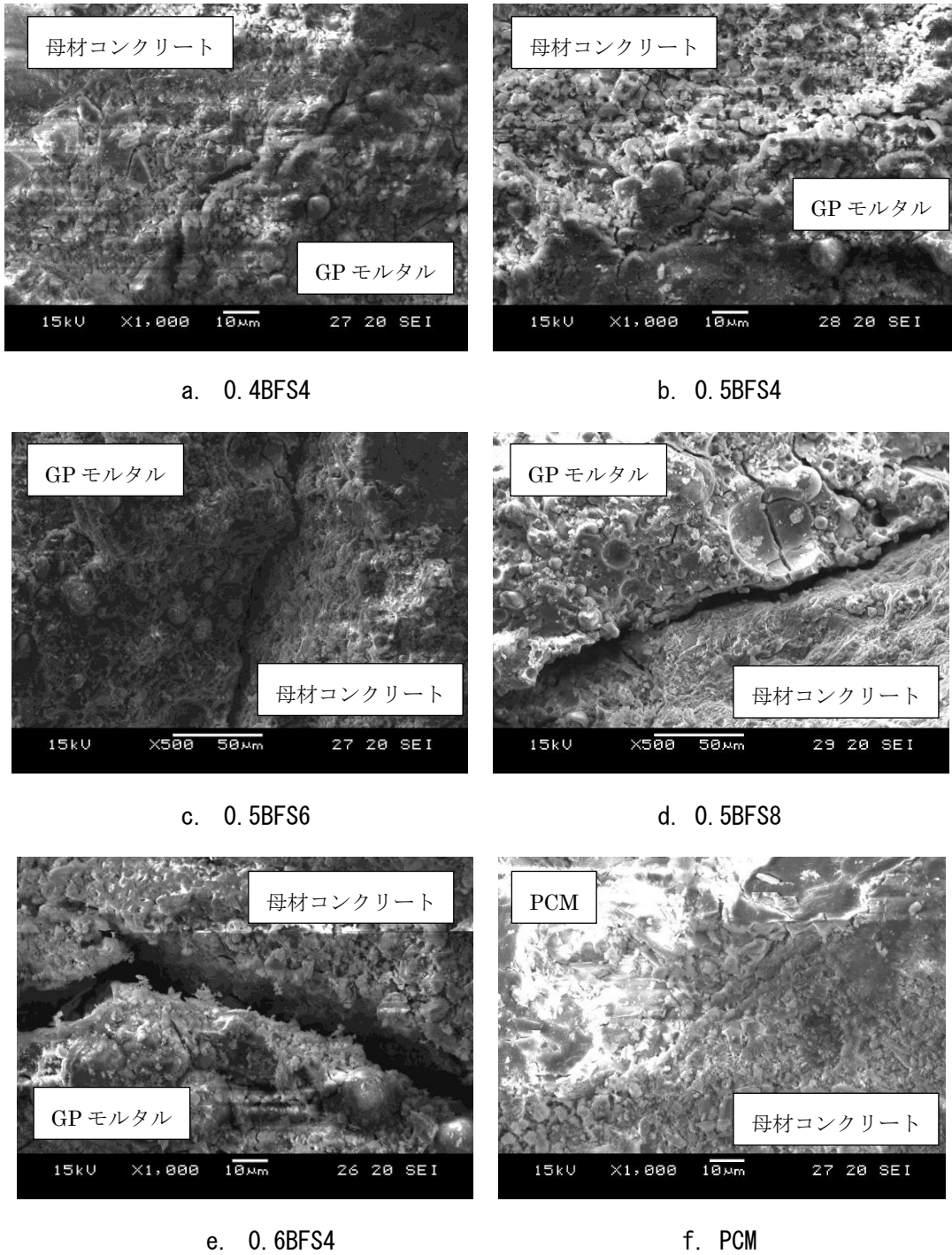


図 6-8 母材コンクリートと補修モルタルとの付着界面の SEM 画像 (×1000)

6.3 GPで断面修復したRC梁の曲げ挙動に関する実験

6.3.1 実験方法

(1) 使用材料および調合

表 6-4 に GP モルタルの使用材料を、表 6-5 に蛍光 X 線分析 (XRF) による活性フィラーの主な化学組成を示す。本実験では、6.2 と同じ材料を使用する。活性フィラーには FA (JIS A 6201, II 種), BFS (JIS A 6206, 4000 級) を使用した。表 6-5 によれば, FA は Al_2O_3 が 24%, SiO_2 が 60%, BFS は CaO が 43%, SiO_2 が 34%, Al_2O_3 が 15% でおおよそ構成されていることが分かる。アルカリ溶液には、水ガラス 2 号 (以下, WG2) の原液および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH) を使用し、溶液の構成比は WG2 : NH = 2 : 1 とした。また、細骨材には三重県町屋川産川砂を用いた。GP モルタルには、強度が異なる 2 種類を用意し、その調合を表 6-6 に示す。

また、比較用の市販補修材には、無収縮モルタルを使用し、その調合を表 6-7 に示す。母材コンクリートの調合およびフレッシュ性状は、表 6-8 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

鉄筋は、引張側の軸方向鉄筋に D16 (SD345), 圧縮側に D10 (SD345), せん断補強筋に D6 (SD345) を使用した。

表 6-4 GP モルタルに使用した材料

Material		Property	Code
Active Filler (P)	Fly ash II (JIS A 6201)	Density = 2.29 g/cm ³ Blaine value = 3700 cm ² /g	FA
	Ground granulated Blast furnace slag (JIS A 6206)	Density = 2.90 g/cm ³ Blaine value = 4000 cm ² /g	BFS
Solution (W)	Water glass No.2	Density = 1.45 g/cm ³	WG2
	Sodium hydroxide solution	Molarity = 10 mol/L Density = 1.35 g/cm ³	NH
Fine aggregate	River sand	water absorption = 2.15% Density = 2.59 g/cm ³	S

表 6-5 Chemical compositions of FA and BFS (Mass ratio %)

	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	Ig.loss
FA	23.64	60.49	2.90	4.68	1.21	0.53	0.49	4.03
BFS	14.94	34.04	42.72	0.35	0.26	5.81	0.26	0.25

表 6-6 Mix proportion of GP mortar

F (N/mm ²)	W/P	bfs/p	fa/p	Unit weight (kg/m ³)					Flow value (mm)
				Active filler (P)		Solution (W)		S	
				FA	BFS	WG2	NH		
30	0.6	0.1	0.9	449	64	216	92	1436	239
60	0.6	0.3	0.7	360	155	217	92	1442	246

[Note] F: Design strength, W/P: Solution powder ratio (Mass ratio), bfs/p: Blast furnace slag replacement ratio (Volume ratio), fa/p: Fly ash replacement ratio (Volume ratio)

表 6-7 Mix proportion of non-shrink mortar

F (N/mm ²)	W/B	S/B	Unit weight (kg/m ³)			Flow value (mm)
			W	B	S	
30	0.4	2.5	213	532	1329	127.4

[Note] F: Design strength, W/B: Water binder ratio, S/B: Sand binder ratio, W: Water, B: Premix non-shrink mortar powder

表 6-8 Mix propotion of concrete

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					Fresh properties		
			W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	Tc (°C)
24	53.8	45.6	178	331	799	966	3.3	16.5	5.5	22

[Note] Fc: Design strength, W/C: water cement ratio, s/a: Fine aggregate ratio, W: Water, C: Cement, S: Fine aggregate, G: Coarse aggregate, SP: High performance AE water reducing agent, SL: Slump, Tc: Temperature

(2) RC 梁供試体概要および作製方法

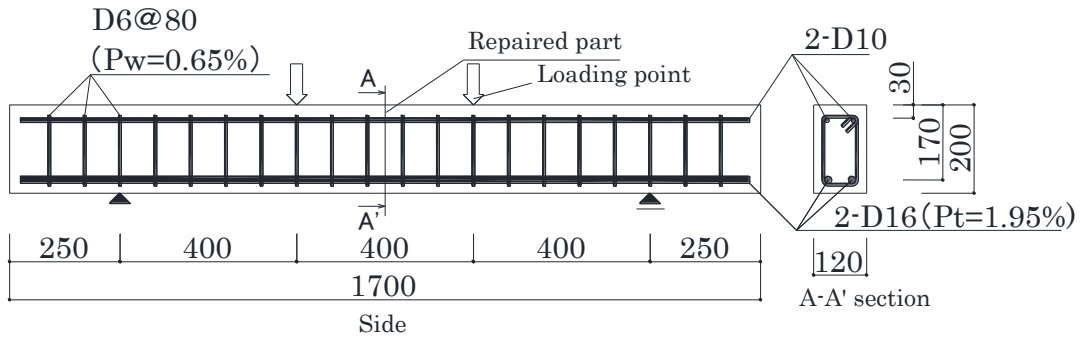
表 6-9 に本実験の各梁供試体の詳細を示す。実験の要因としては、補修材料の種類、補修深さおよび補修界面の処理の違いを取り上げた。

RC 梁供試体の形状、寸法および配筋の状況を図 6-8 に示す。今回の実験に使用したすべての RC 梁供試体は、全長 1700 mm、幅 120mm、高さ 200 mm、そして等曲げモーメント区間を 400 mm とした。引張側の主筋には D16 を 2 本、圧縮側の主筋には D10 を 2 本、そしてせん断破壊を防ぐためのせん断補強筋には D6 を間隔 80 mm で配筋した。全 RC 梁供試体は、最終破壊形式を曲げ破壊となるように設計した。補修を施す箇所は梁中央の圧縮縁とし、力を負担する重要な部位に断面欠損が発生したことを想定した。補修箇所の形状は台形とした。補修部分の寸法は、幅を梁幅と同様で 120mm、上面の長さを 300mm で一定とし、補修厚さをかぶり厚さに相当する 30mm および鉄筋の下までの 60mm の 2 水準を設けた。

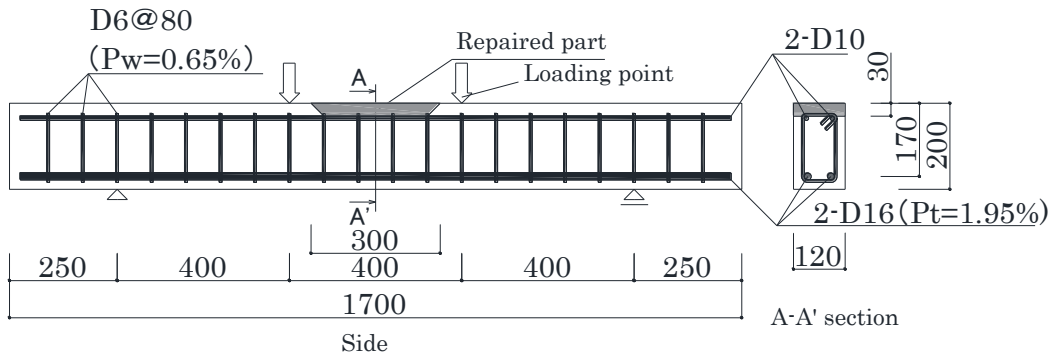
供試体作製は、事前に補修を施す箇所に予めスタイロフォームを設置し、本来供試体の圧縮縁となる側を型枠の底面として打設した。その後、打設面を濡れた布で覆い、さらに供試体全体をビニルシートで覆って養生した。また、脱型まで適度に水分を供給した。材齢 7 日後に脱型し、スタイロフォームを除去し、補修界面を処理し、補修材を打設した。ここで、現実性にかけるが、付着の良否が及ぼす影響をより明快に捉えるため、供試体 GPM30-D および NSM30-D (表 6-9 参照) に関しては打設の段階で補修界面を平滑に仕上げ、水分の供給を行わずに補修を行った。その他の供試体は、補修界面をワイヤブラシで処理し、十分に吸水させてから補修した。

表 6-9 Test specimens

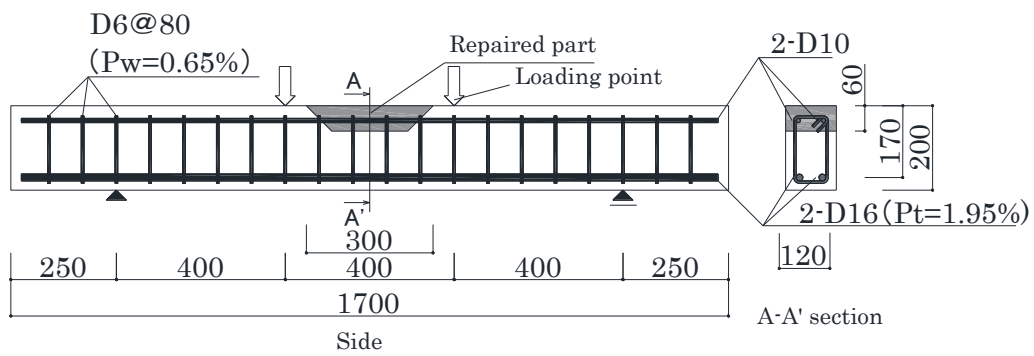
Specimen code	Detail of specimens				
	Repairing		Repair material		Bonding surface treatment
			Type	Strength	
N	Non-repaired		-		-
GPM60	Repaired	Depth 30mm	GP mortar	High (Fc60)	Grinding + wetting
GPM30			Non-shrink mortar	Normal (Fc30)	
NSM30			GP mortar		
GPM30-60		Non-shrink mortar			
NSM30-60		Depth 60mm	GP mortar	Non-grinding + non wetting	
GPM30-D		Non-shrink mortar			
NSM30-D		Depth 30mm	GP mortar		



(a) For N specimen



(b) For GPM30, GPM60, NSM30, GPM30-D and NSM30-D



(c) For GPM30-60 and NSM30-60

図 6-8 Outline of beam specimens (Unit: mm)

(3) 試験項目および試験方法

図6-9に曲げ試験の概要図を示す。曲げ試験において、载荷には万能試験機を用い、スパン1200mm、等曲げモーメント区間400mmの3等分点载荷とした。なお、载荷方法は载荷速度0.4kN/sの単調漸増载荷とし、最大耐力に到達して明らかな耐力低下が生じるまで载荷を継続した。また、曲げひび割れが発生するまでの初期段階における荷重の増加量は、最大荷重の1/50(約2.5kNに相当)程度とした。その後は、荷重の増加量を最大荷重の1/25(約5kN)程度とし、各荷重段階においてひび割れ発生状況や進展、及び破壊性状を記録した。

梁中央部のたわみ量は、梁供試体のスパン中央部に設置したレーザー変位計と両支点に設置した高感度変位計により求めた。中央断面のひずみ分布は、ワイヤーストレインゲージを図6-10のように貼り付けて測定した。

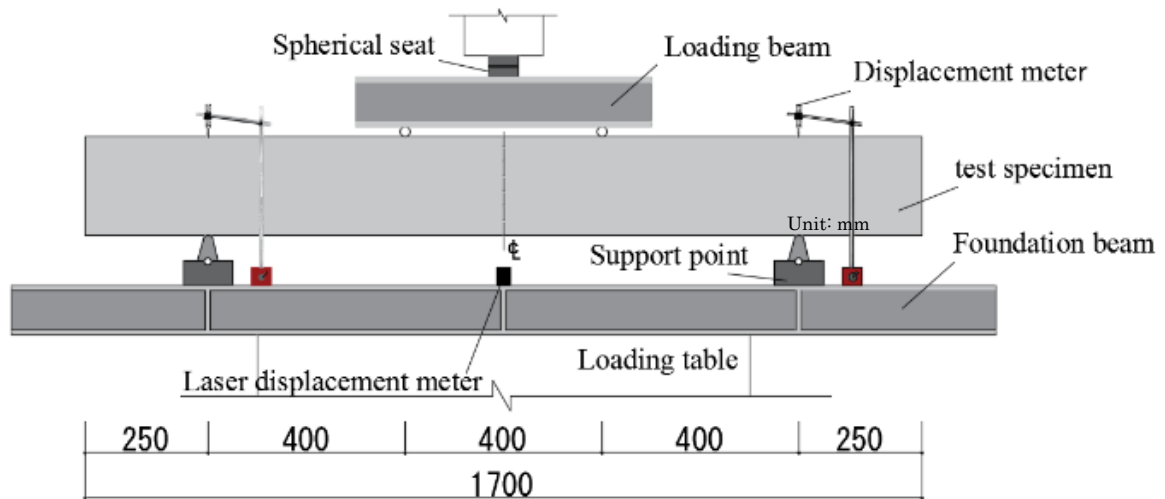


図6-9 Outline of bending test

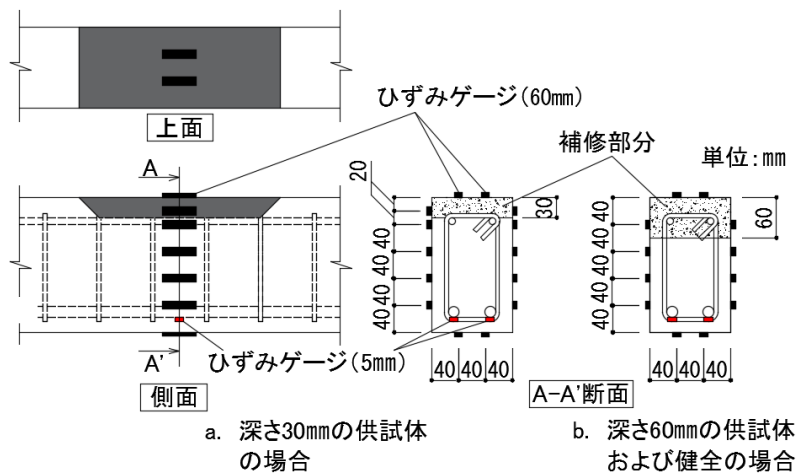


図6-10 Strain gauges position

6.3.2 実験結果および考察

(1) 材料特性

表 6-10 に鉄筋の物性値を、表 6-11 には母材コンクリートおよび各種補修材の材料特性を、図 6-11 に母材コンクリートおよび各種補修材の圧縮試験より求められた応力-ひずみ関係を示す。普通強度の GP モルタルのヤング係数は、コンクリートの約 69%，無収縮モルタルの約 54%で、同一強度のコンクリートおよび無収縮モルタルと比較して GP モルタルのヤング係数が小さいことが分かる。一方、高強度 GP モルタルのヤング係数は、今回用いた普通強度のコンクリートと同程度である。

表 6-10 Properties of rebars

Rebar	Yield strength (N/mm ²)	Young's Modulus (× 10 ⁴ N/mm ²)
D6 (SD345)	370	17.4
D10 (SD345)	363	21.0
D16 (SD345)	345	21.0

表 6-11 Properties of material

Material	Compressive strength (N/mm ²)	Splitting tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)
Concrete	30.4	2.9	22.1
Non-shrink mortar	32.0	3.7	28.0
GP mortar (Fc30)	33.4	2.9	15.2
GP mortar (Fc60)	56.8	4.1	18.9

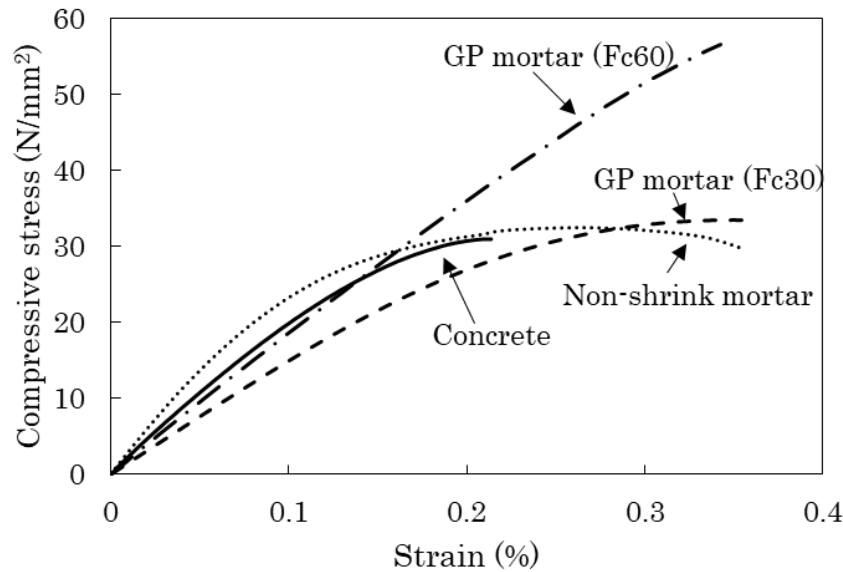


図 6-11 Compressive stress – strain relationship

(2) ひび割れ発生および破壊状況

図 6-12 (a) ~ (h) に実験終了時の破壊状況を示す。各梁供試体は、まず梁下縁に曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに圧縮側に進展し、圧縮縁中央のコンクリートあるいは補修箇所が圧壊（一部は付着破壊）し、耐力が低下して終局破壊に至るといった典型的な曲げ破壊をした。

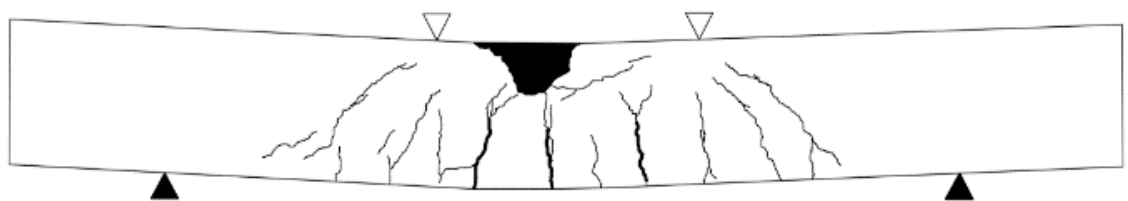
無補修供試体 N は荷重約 20kN で、供試体 NSM30 は約 17.5kN で最初のひび割れの発生が確認された。それと比べ、GP モルタルで補修した供試体 GPM60 と GPM30 において最初ひび割れが若干低い荷重で確認された。曲げ降伏に達した後、供試体 GPM30 は中央変位が約 8mm、その他の梁供試体は約 12mm に達したところで補修界面にひび割れが発生し、曲げ変形の増大とともにひび割れ幅が増大して補修界面が剥がれ、補修箇所の破壊につながった。ここで、補修界面の剥がれた理由の一つは、補修深さ 30mm の場合では付着界面がちょうど圧縮鉄筋の位置にあり、鉄筋の座屈による影響⁵⁾³⁾を受けたことが考えられる。その後、その補修箇所の下部分の母材コンクリートの圧壊が生じた (図 6-12 (a) ~ (d))。

圧縮縁から深さ 60mm まで補修を施した供試体 GPM30-60 と NSM30-60 は、ほぼ同様な破壊性状が得られた。降伏後、両者ともに補修箇所付近の母材コンクリートの損傷や傾斜界面が剥離したことが確認できたが、補修界面の深い部分の付着がまだ良好な状態にあり、最終的に補修モルタルに亀裂が入って破壊に至った (図 6-12 (e) と (f))。

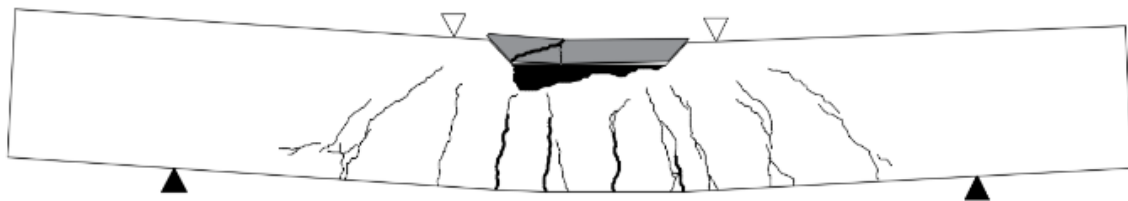
補修界面を平滑に仕上げ、さらに乾燥させた供試体 NSM30-D と GPM30-D の場合は、降伏前はそれぞれ供試体 NSM30 と GPM30 と類似した損傷状況がみられた。しかし、降伏後、供試体 NSM30-D および GPM30-D ともにはたわみが約 8mm に達したところで補修界面と補修モルタルにひび割れが発生し、急速に進展した。付着界面の処理が悪いことと

圧縮鉄筋の座屈により、補修界面全体が剥がれ、補修部分が上に押し出される状態となり、補修下部のコンクリートが圧縮破壊をするとともに終局に到達した（図 6-12 (g)と(h)）。

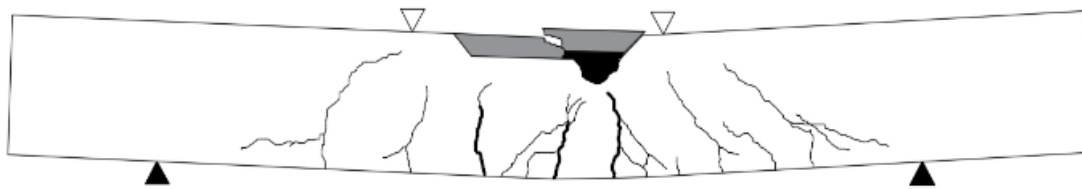
GP を用いた場合、母材コンクリートとの付着界面が平滑かつ乾燥していてもその影響を受けにくいと報告されている⁵⁻⁴⁾。しかし、今回の RC 梁部材の曲げ実験においてはセメント系無収縮モルタルを用いた場合と同様に GP モルタルを用いた場合においては補修界面処理の違いにかかわらず、補修界面での付着破壊が生じたため、界面処理の破壊性状への影響は明確に確認されなかった。



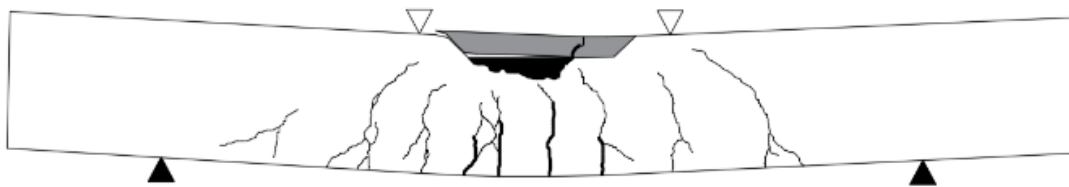
(a) N



(b) GPM60



(c) GPM30



(d) NSM30

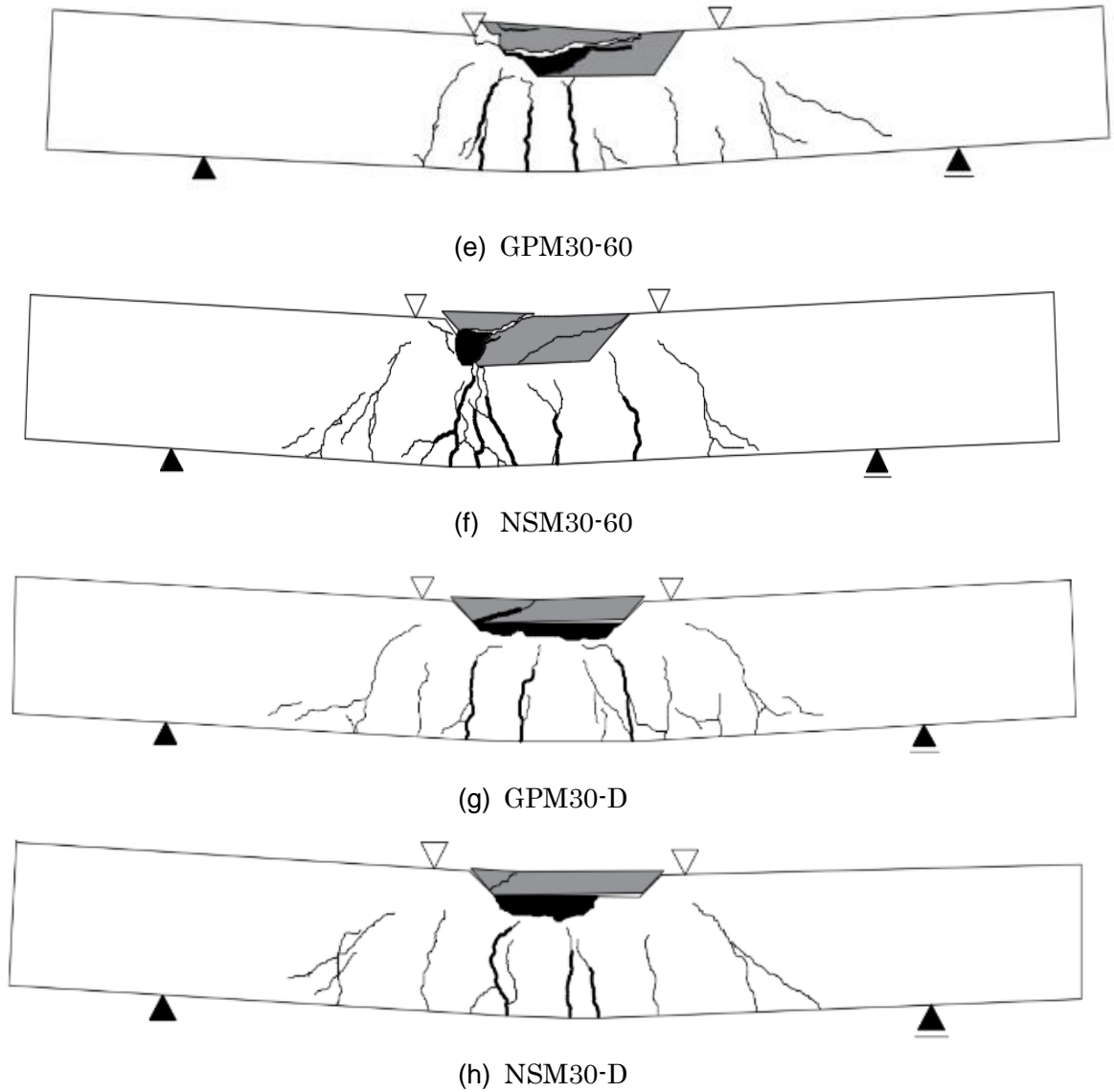


図 6-12 曲げ実験終了時の破壊性状

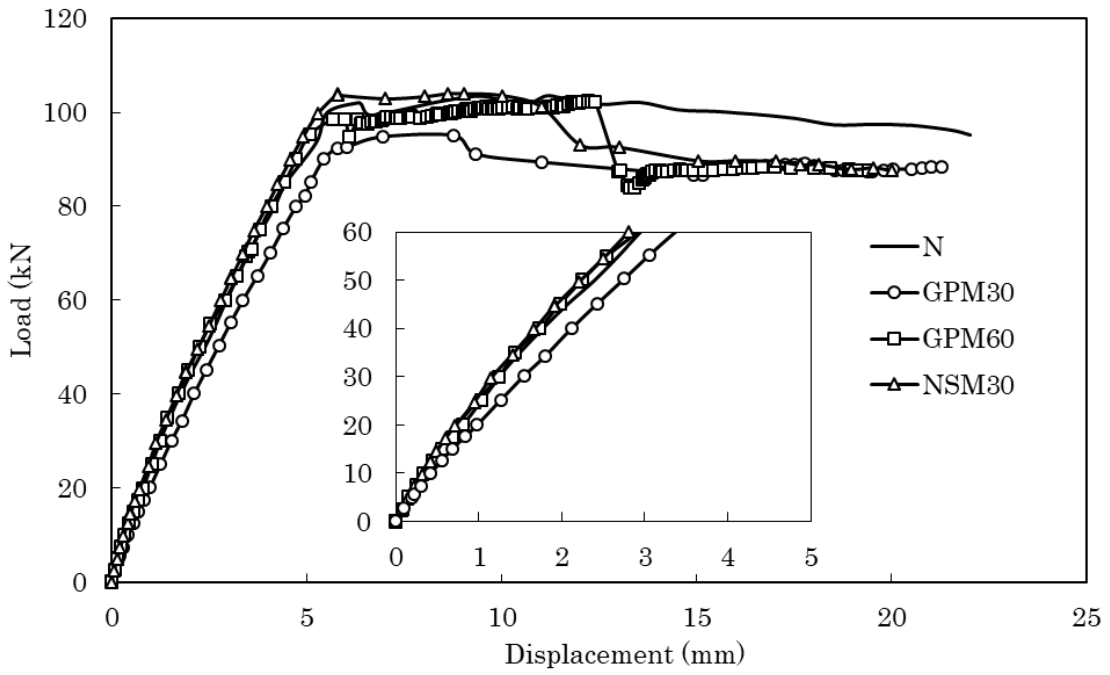
(3) 曲げ耐力

図 6-13(a)～(c)に各梁供試体の荷重－たわみ関係を示す。図より、普通強度の GP モルタルで断面修復した供試体は、無補修供試体 N および無収縮モルタルで断面修復した供試体と比較して、降伏荷重および最大荷重が若干小さい結果となった。また、降伏に達する前の曲げ剛性が低くなることが確認できた。これは、GP モルタルの低いヤング係数に起因すると考えられる。例えば、図 6-14 に示している梁中央断面のひずみ分布の結果によると、ヤング係数の低い GP モルタルの場合は同じ荷重のときの中立軸が無補修供試体や無収縮モルタルを用いた供試体の場合より低い位置にあり、曲げ剛性あるいは曲げ耐力がやや低い結果になったことが理解できる。

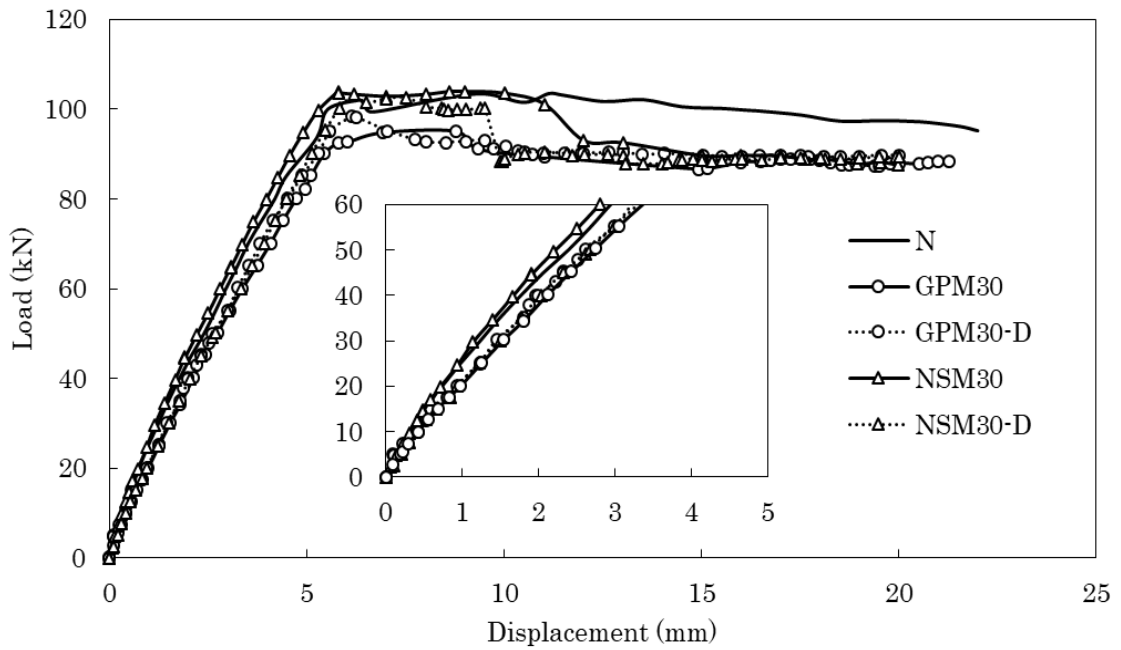
図 6-13(a)より、母材コンクリートと同程度のヤング係数を有し、強度がそのコンクリートの約 2 倍となる GP モルタルで補修した供試体 GPM60 は、無補修供試体 N 及び供試体 NSM30 と同等の曲げ剛性を有する。また、それらの供試体に比べて GPM60 の降伏時点の耐力が若干低いが、降伏後も耐力が徐々に増加し、最大耐力は供試体 N と NSM30 と同等レベルに達した。しかし、その直後、90kN まで耐力が急激に低下し横ばいとなった。この理由としては、(2) で述べたように GP モルタル自体の破壊と母材コンクリートと GP モルタルの間に付着破壊が生じたこと（図 6-13(b)を参照）が考えられる。

また、補修界面の処理の違いを見てみると、図 6-13(b)から分かるように供試体 GPM30 と GPM30-D の荷重－たわみ関係はほぼ同様な曲線を描いたことより、GP モルタルを用いた場合における界面処理の違いによる影響が見られなかった。一方で、供試体 NSM30-D は供試体 N および NSM30 に比べて降伏前の曲げ剛性が低い。また、降伏後には、たわみ 10mm 前後で大きな耐力低下がみられ、供試体 NSM30 と比較して耐力の低下が早い段階に起きたことが分かる。このことより、セメント系の無収縮モルタルで補修した場合は、平滑でかつ乾燥させた付着界面が曲げ剛性の低下および降伏後の耐力低下を引き起こしたと言える。

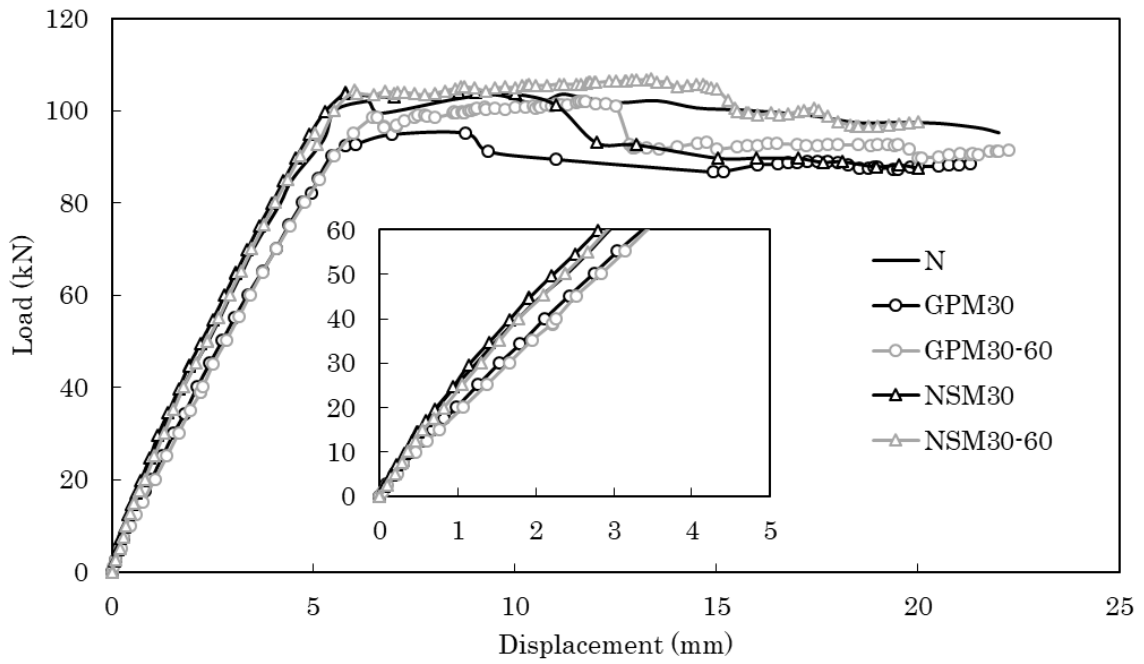
また、図 6-13(c)より、圧縮側の鉄筋の下部分まで補修を施した供試体 GPM30-60 は、無補修供試体 N や無収縮モルタルを用いた供試体と同程度の最大耐力が得られた。また、降伏後から圧縮縁の補修モルタルが破壊するまで耐力の増加が確認できたものの、補修モルタルが破壊した時点での耐力の低下現象が急激であった。この耐力の低下は補修に用いた GP モルタルの局所的な破壊によるものと考えられる。それに対し、供試体 NSM30-60 は供試体 N と NSM30 と同等な曲げ剛性、降伏荷重を示し、さらに最大耐力はそれらの供試体より若干大きくなっている。また、降伏後の耐力が徐々に増加し、最大耐力に達した後は無補修供試体 N と同様に緩やかな耐力低下を呈した。



(a) Difference in repair material



(b) Difference in bonding surface treatment



(c) Difference in depth of repair part

図 6-13 Comparison of Load-displacement relationships

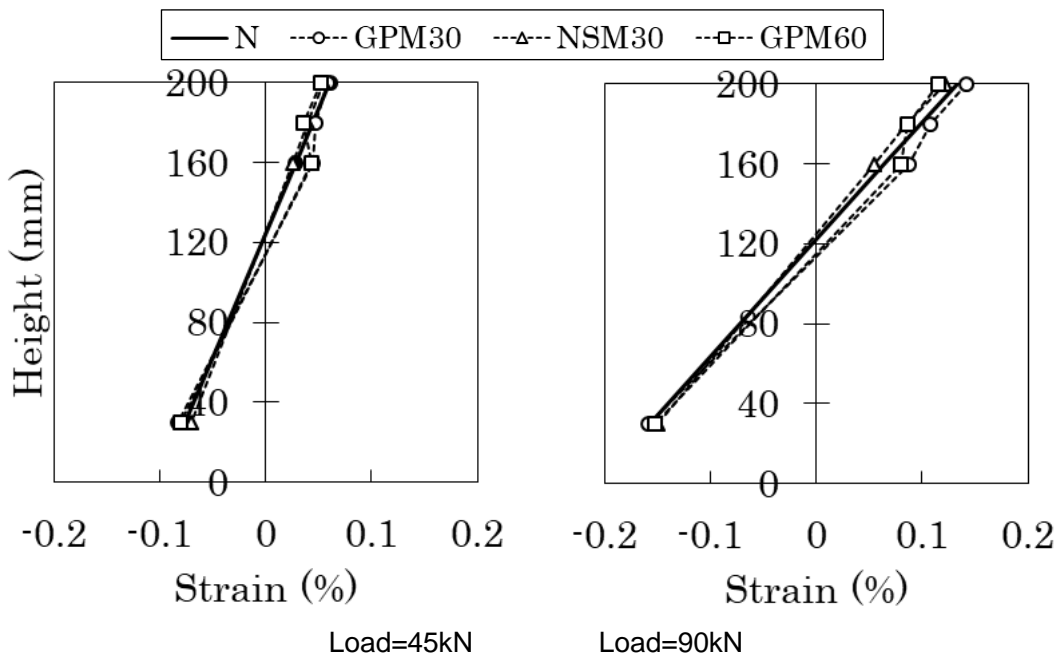


図 6-14 Strain distribution of section at mid-span

6.3.3 曲げ断面解析による曲げ耐力の算定

(1) 解析手法および材料構成モデル

本研究では、平面保持の成立、母材コンクリートと補修モルタルおよび鉄筋との完全付着を仮定した上で、断面内の力の釣り合いから曲げモーメントおよび曲率を求める。図 6-15 に仮定した断面内のひずみおよび応力の分布を示す。コンクリート、各種補修モルタルおよび鉄筋の応力-ひずみ曲線を図 6-16 に示した簡明なバイリニアモデル（コンクリートの終局ひずみ $\epsilon_{cu}=0.35\%$ ）に単純化した。コンクリートおよび各種補修モルタルが最大圧縮応力に到達するときのひずみ ϵ_0 は、それぞれの設計強度とヤング係数との関係より決定した。なお、ヤング係数 E は、実験値と推定値を用いた場合とを比較するため、推定値には AIJ 式（式 (1)）により計算した値を用いた。ここで、表 6-12 に示すように、AIJ 式により推定したコンクリートと無収縮モルタルのヤング係数は実験値に近い値となったが、GP モルタルのヤング係数の実験値は計算結果より小さく、過大評価される。そのため、GP モルタルのヤング係数に関しては、次の (2) に記述する方法で求めることとした。

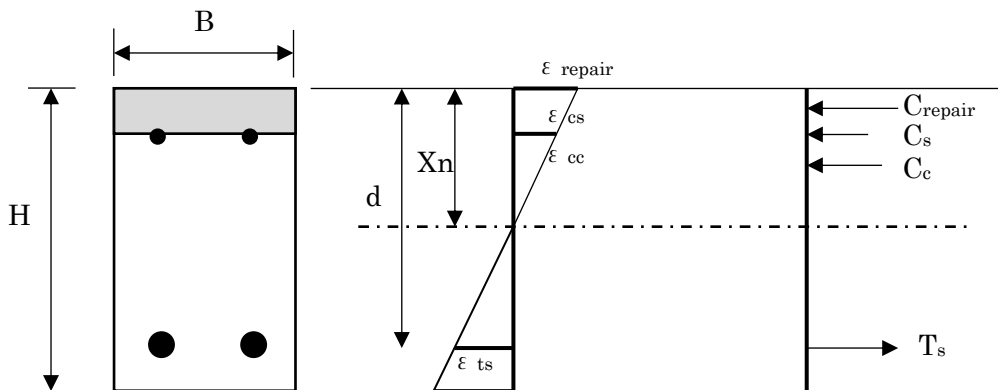
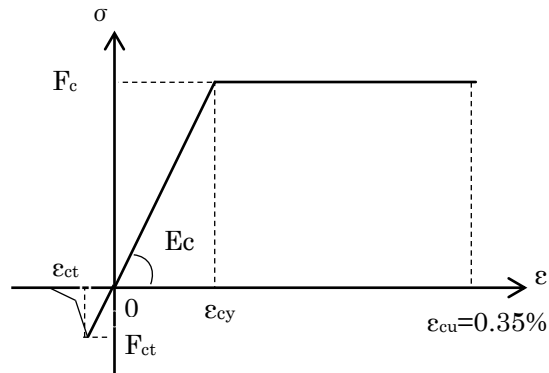
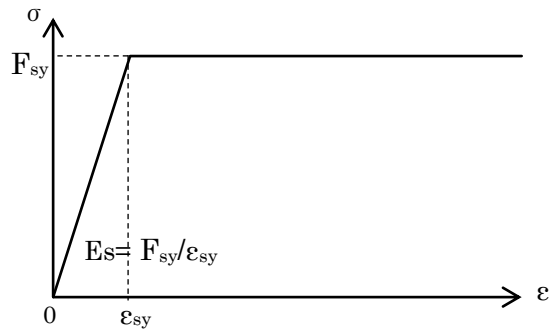


図 6-15 断面内のひずみおよび応力分布



a. Concrete and repair material



b. Rebar

図 6-16 Stress-strain model

$$E_c = 33.5 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで, E_c : ヤング係数 (kN/mm^2), γ : 単位容積質量 (t/m^3)
 F_c : 圧縮強度 (N/mm^2)

表 6-12 Comparison between experimental and calculated results of Young's modulus of each material

Material	Young's modulus E (kN/mm^2)		
	Experiment E_1	Calculation E_2	E_2/E_1
Concrete	22.1	24.6	1.11
NSM30	28.0	27.2	0.97
GPM30	15.2	24.4	1.61
GPM60	18.9	29.3	1.55

(2) 複合則理論による GP 補修モルタルのヤング係数の推定

コンクリートのような複合材料の弾性係数を評価するために、複合則理論に基づいていくつかの力学モデルが提案されてきた。著者らは、第 3 章で GP モルタルおよび GP コンクリートのヤング係数が複合則理論により概ね推定することが可能であることを示した。本節では、本実験で用いた GP モルタルのヤング係数を複合則理論により推定する。

ここでは、第 3 章の推定方法と同様にそのなかの簡易的な直列と並列モデルおよび比較的精緻とされる Hashin-Hansen モデル⁵⁻⁶⁾⁵⁻⁷⁾を用いて検討を行う。各モデルの計算式を表 6-13 に示す。ここで、モルタルの構成は GP ペーストマトリックスと細骨材の 2 相複合体とした。

表 6-13 Young's modulus of composite models⁵⁻⁶⁾⁵⁻⁷⁾

Models	Equations
Parallel	$E_m = E_s V_s + V_p E_p$ (2)
Serial	$E_m = \frac{1}{\left(\frac{V_s}{E_s} + \frac{V_p}{E_p}\right)}$ (3)
Hashin-Hansen	$E_m = E_p \times \frac{[V_p E_p + (1 + V_s) E_s]}{[(1 + V_s) E_p + V_p E_s]}$ (4)
E_m, E_p, E_s : Young's modulus of mortar, paste, fine aggr., respectively; V_p, V_s : Volume ratio of paste matrix, fine aggr.	

モルタル中の GP ペーストと細骨材のヤング係数を直接求めることが容易ではないため、これらの値は既往の研究データ^{5-8)~5-11)}より推定することとした。GP ペーストについては、**図 6-17~図 6-19** に示すように、常温養生下の FA-BFS 系 GP ペーストの圧縮強度は BFS 置換率、溶液粉体比 W/P およびヤング係数との間に相関性が確認されており^{5-8)~5-11)}、GP ペーストのヤング係数は式(5)~式(7)を用いて求めることが可能であるため、今回はこれを用いて求めることとした。

$$F_p = 1.3V_{BFS} + K \quad (5)$$

$$K = -54 W/P + 55 \quad (6)$$

$$E_p = 170F_p \quad (7)$$

ここで、 F_p : GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

K : 実験係数

W/P : アルカリ溶液粉体比

E_p : GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

また、細骨材のヤング係数に関しては、清原ら⁵⁻¹²⁾が骨材の吸水率をパラメータとして提示した実験式(式(8))を用いて求めることとした。その結果、細骨材のヤング係数 E_s は 49.8kN/mm^2 となった(吸水率は 2.15%)。GP モルタルのヤング係数の計算結果を図 6-20 に示す。なお、同図にはコンクリートに対する AIJ 式を用いて計算した結果も×印で示す。同図によれば、直列モデルおよび Hashin-Hansen モデルにより得られた計算結果は実験値の±20%の精度で推定できている。ここでは、梁の曲げ耐力の算定には、それぞれの GP モルタルのヤング係数の実験値と推定値を用いて比較する。なお、後述するように実験値がない場合には、最も簡便な直列モデルを用いれば、安全側で推定できると考えられる。

$$E_a = \frac{58.9}{\mu^{0.22}} \quad (8)$$

ここで、 E_a : 骨材のヤング係数 (kN/mm^2)
 μ : 吸水率 (%)

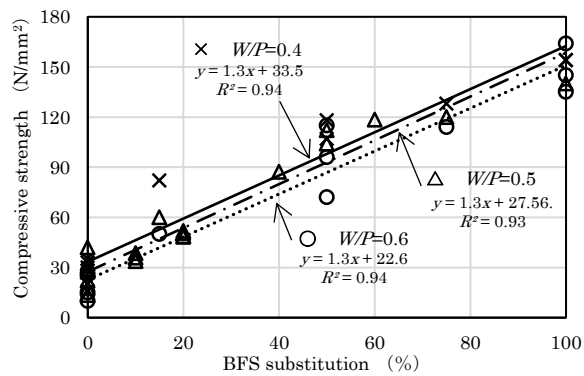


図 6-17 Relationship between BFS substitution for FA and compressive strength of GP paste⁵⁻⁸⁾⁻⁵⁻¹¹⁾

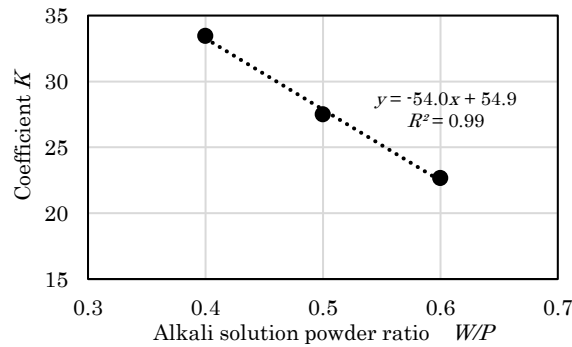


図 6-18 Relationship between coefficient K and W/P⁵⁻⁸⁾⁻⁵⁻¹¹⁾

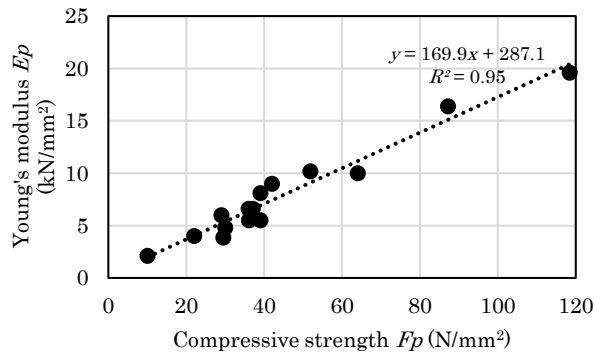


図 6-19 Relationship between Young's modulus and compressive strength of GP paste⁵⁻⁸⁾⁻⁵⁻¹¹⁾

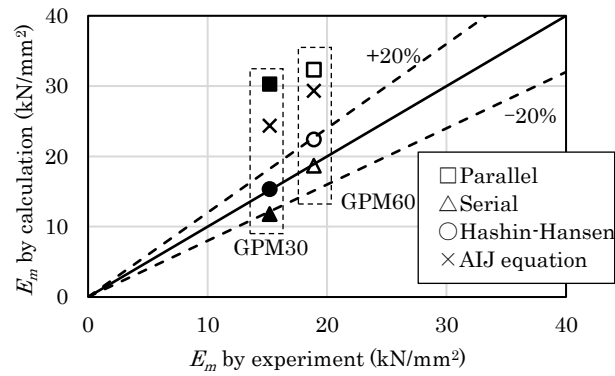
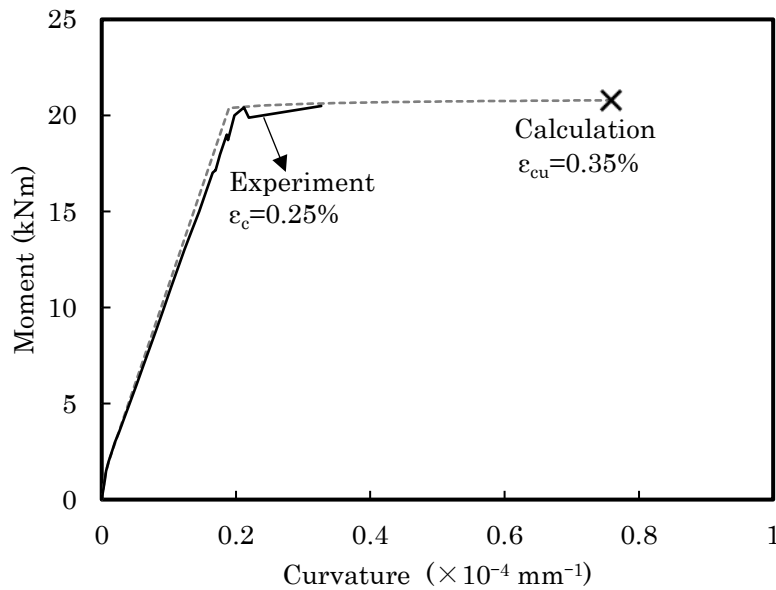


図 6-20 Calculated results of Young's modulus of GP mortar (E_m) by using composite theory

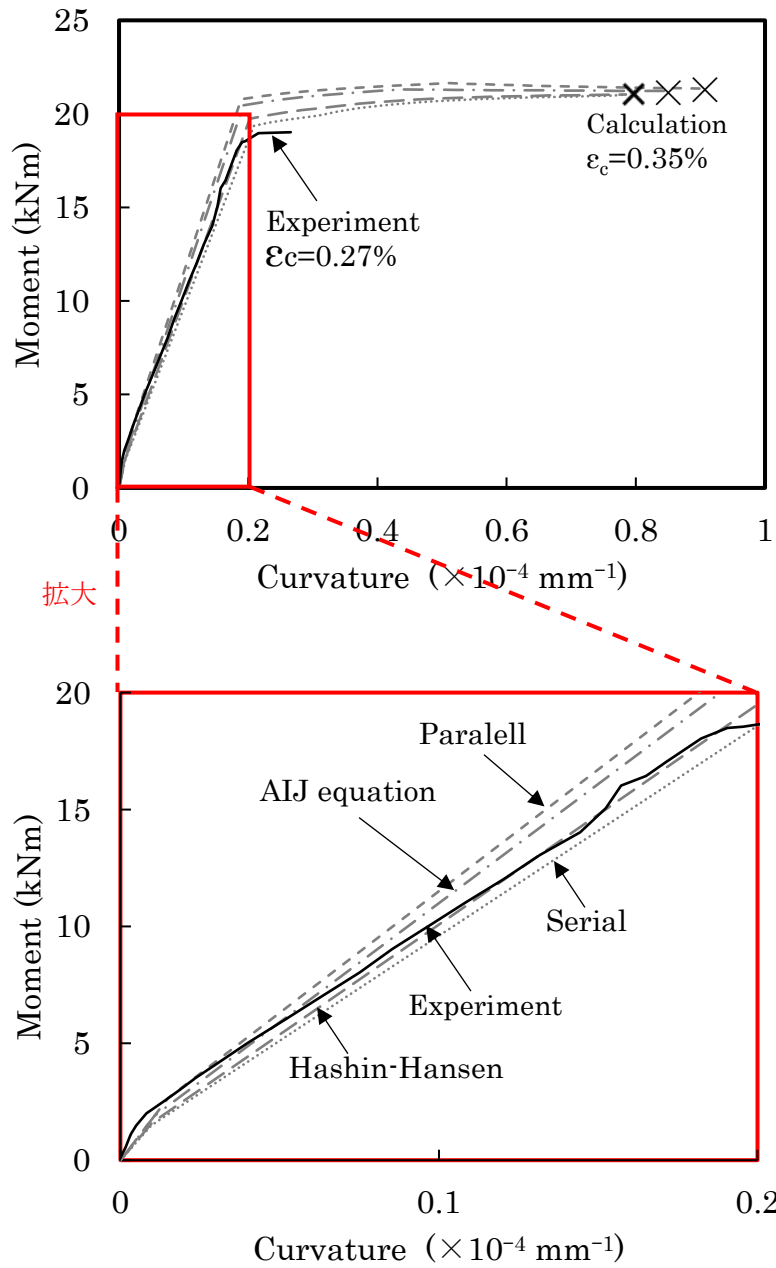
(3) 曲げモーメント-曲率関係の推定結果

図 6-21 (a) ~ (f) に計算により得られた梁供試体中央部の曲げモーメント-曲率関係を示す。なお、図中には実験結果も併示した。曲率は、圧縮縁および引張鉄筋のひずみを用いて求めた。

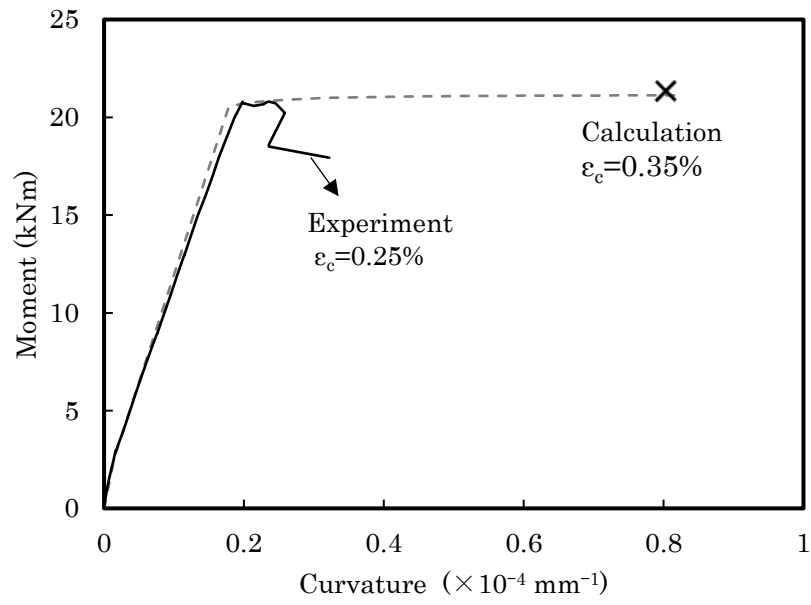
図 6-21 によれば、実験により得られた曲げモーメント-曲率関係の結果と断面解析により計算した結果では、コンクリートの引張側は **tension stiffening** を考慮せず最大引張強度まで計算を行った場合、最初の曲げひび割れ発生時の耐力および初期剛性が概ね推定できた。また、圧縮域の破壊の集中性により降伏後の曲率の伸びに大きな差がみられるものの⁵⁻¹³⁾、降伏点、最大耐力および降伏前の剛性は概ね推定できたと言える。さらに、図 6-20 (b), (d), (f) によれば、GP モルタルを用いた場合において、ヤング係数に Hashin-Hansen および直列モデルを用いて推定した降伏以前のモーメント-曲率関係は実験結果とほぼ一致していると言えよう。



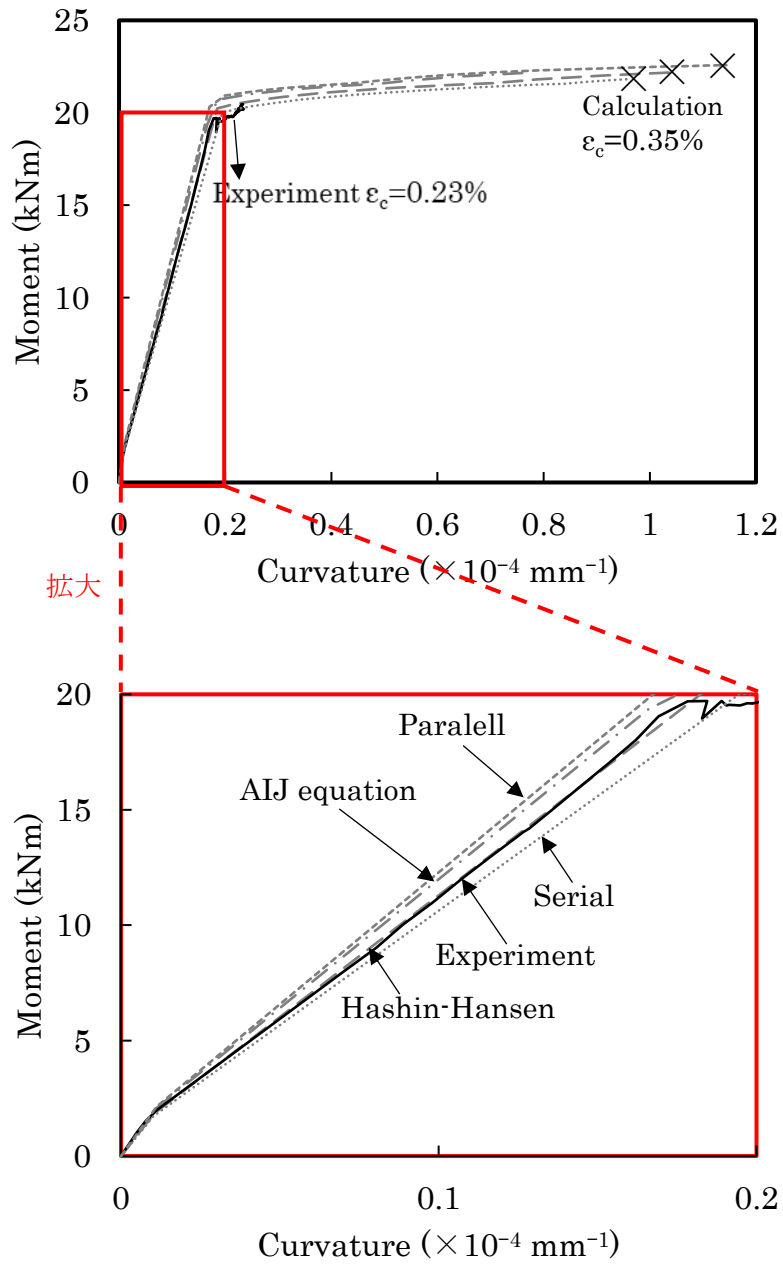
a. N



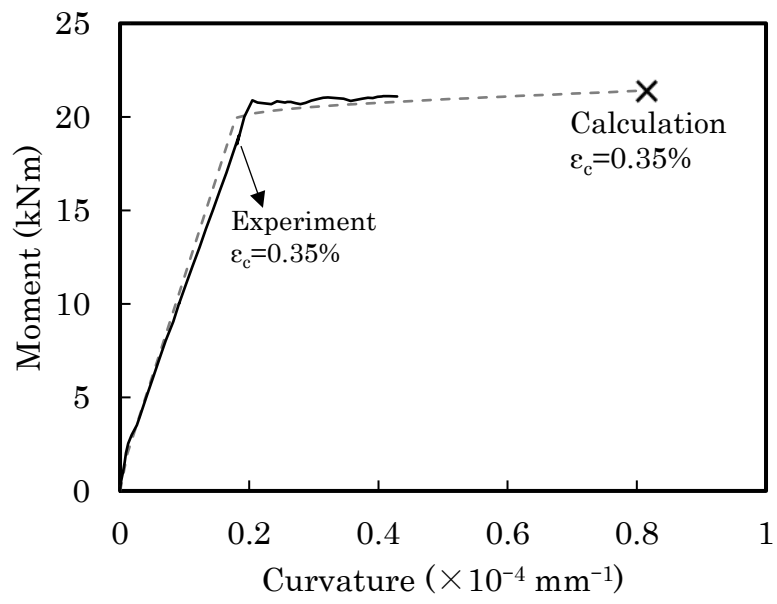
b. GPM30



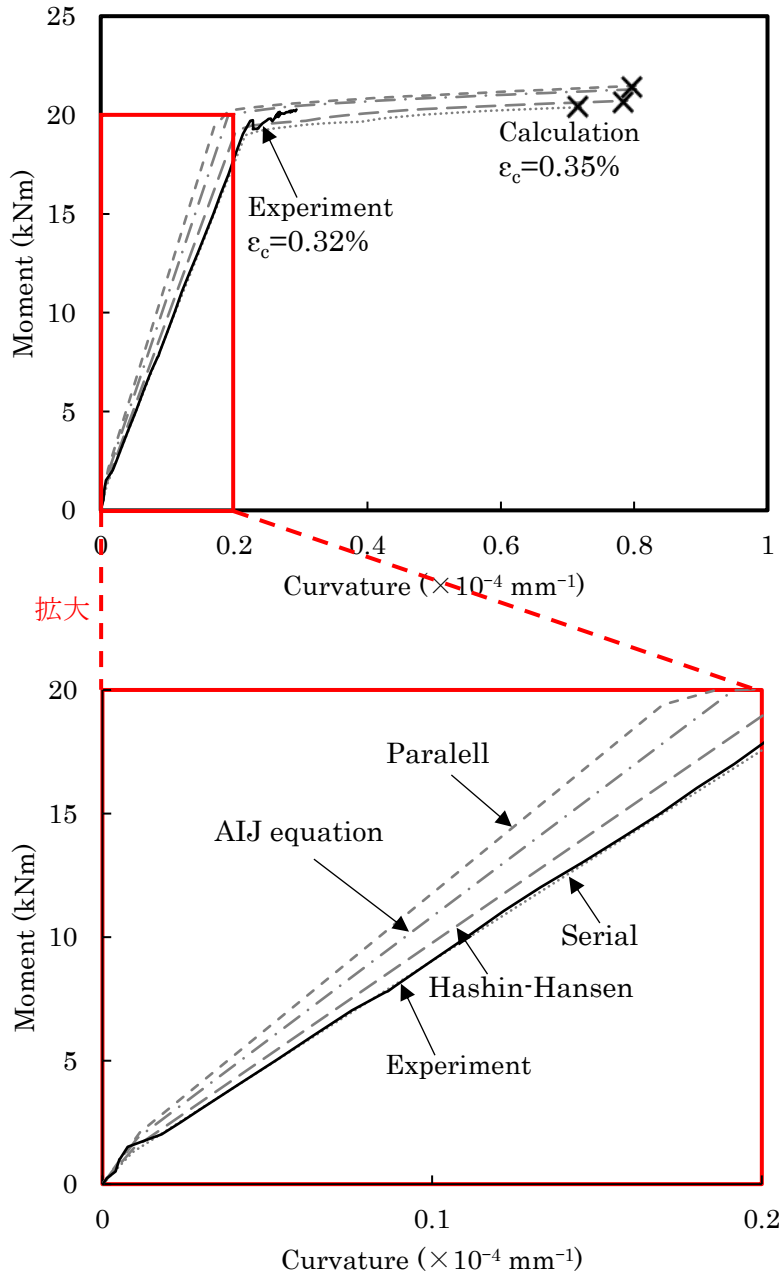
c. NSM30



d. GPM60



e. NSM30-60



f. GPM30-60

(Black solid line: Experiment; Gray dotted line: Calculation)

図6-21 Relationship between moment and curvature at mid-span

6.4 まとめ

6.4.1 GP の断面修復材としての性能に関する基礎的実験

- 1) BFS 比表面積が大きいほど始発時間、終結時間ともに短くなり、また、W/P が小さいほど始発時間、終結時間ともに短くなる傾向が確認された。
- 2) 各種強度は市販の補修材であるポリマーセメントモルタルに劣るものもあったが、各種公的機関が定める品質規格は満足していた。
- 3) GP モルタルの長さ変化率は非常に大きく、断面修復材に要求される性能を満たしていなかった。

6.4.2 GP で断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験

- 1) GP モルタルは同レベルの強度を有するコンクリートや無収縮モルタルに比べ、ヤング係数が低いため、断面修復後の RC 梁の曲げ剛性が低下し、降伏荷重や最大耐力が小さい結果となる傾向が確認された。
- 2) GP モルタルで断面修復した場合、補修深さを圧縮鉄筋より内部（圧縮縁から 60cm の深さ）までとした場合およびヤング係数がコンクリートに近い高強度（Fc60）のものとした場合は、曲げ耐力の回復が良好な傾向にあった。
- 3) 補修界面処理の違い（界面の粗度と補修直前の水分供給状態）による影響について、無収縮モルタルを用いた場合はその影響を受けることが確認されたが、GP モルタルの場合においては明確には確認されなかった。
- 4) 鉄筋の下部まで深く補修した場合は、補修深さが浅い場合と比べ、GP モルタルおよび無収縮モルタルともに、母材コンクリートとの付着界面の面積が大きく、さらに鉄筋との付着による拘束で付着界面の剥がれが防止され、補修後の梁耐力の回復が良好であった。
- 5) 複合則理論を用いて推定した GP モルタルのヤング係数を用い、GP モルタルで補修した RC 梁供試体の曲げ挙動をほぼ推定できた。本報では、直列モデルを用いれば、安全側で簡便に推定できることを示した。

【参考文献】

- 6-1) 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
- 6-2) 五百蔵沙耶ら：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，コンクリート工学会年次論文集，Vol.40, No.1, pp.1961-1966, 2019.7
- 6-3) 浅野勇，渡嘉敷勝，森光広，川上昭彦，川邊翔平：断面欠損させた RC 梁の曲げ変形挙動，農業農村工学会論文集，Vol.83, Iss.3, No.297, pp.83-90, 2015.6
- 6-4) 伊藤彰利，ポンマハーサイ パラミ，畑中重光：傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性に関する基礎的研究，日本建築学会東海支部研究報告集，Vol.56, pp.73-76, 2018.2
- 6-5) ポンマハーサイパラミ，伊藤彰利，畑中重光：圧縮強度と骨材量を変化させたジオポリマー硬化体のヤング係数に関する基礎的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.41, No.1, pp.1949-1954, 2019.7
- 6-6) 齋藤俊克，出村克宜：複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の提案，建築学会構造系論文集，Vol.81, No.723, pp.825-832, 2016.5
- 6-7) 趙力采，小林一輔：コンクリートの弾性係数における複合特性，コンクリートジャーナル，Vol.12, No.7, pp.23-34, 1974.7
- 6-8) 市川敬悟：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究，三重大学平成 27 年修士論文，2016.2
- 6-9) 坪内徹朗：石炭灰の品質がジオポリマーの流動性および圧縮強度に及ぼす影響に関する実験的研究，三重大学平成 29 年修士論文，2017.2
- 6-10) F. Pelisser, E.L. Guerrino, M. Menger, M.D. Michel, J.A. Labrincha: Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers, Constr. Build. Mater., Vol.49, pp.547-553, 2013.12
- 6-11) ポンマハーサイパラミ，伊藤彰利，畑中重光：高炉スラグ微粉末の置換率がジオポリマーペーストのヤング係数に及ぼす影響に関する基礎的実験，日本建築学会東海支部研究報告集，Vol.57, pp.57-60, 2019.2
- 6-12) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，三橋博三：複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.576, pp.7-14, 2004.2
- 6-13) 畑中重光，小阪義夫，谷川恭雄，三輪隆治：純曲げを受ける鉄筋コンクリートばりの破壊集中性，日本建築学会構造系論文集，No.371, pp.27-38, 1987.1

第7章 結論および今後の課題

7.1 結論

7.2 今後の課題

7.1 結論

本研究では、ジオポリマー (GP) を鉄筋コンクリート (RC) 構造用補修材として適用することを目的とし、GP を補修材として用いる際に要求される基礎的性能を明らかにし、さらに構造部材への試用を行い、RC 梁の曲げ試験により補修効果を評価し、GP の補修材としての有用性を検討した。

第3章では、フライアッシュ (FA) の一部として置換する高炉スラグ微粉末 (BFS) の量、および細骨材あるいは粗骨材率を変化させたGP硬化体の圧縮特性について実験的に調べ、複合則理論に基づいてヤング係数を推定した。本実験の範囲において以下の知見が得られた。

- 1) BFS の置換率を大きくするにつれて、圧縮強度が大きくなることが、過去の実験と同様に確認できた。また、その関係を線形式で表した。

$$F_c = a \cdot V_{BFS} + b$$

ここに、 F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

V_{BFS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

a, b は実験係数

- 2) BFS の置換率を大きくするにつれて、圧縮強度とともにヤング係数も増加する。その関係を線形式で表した。

$$E_p = a \cdot V_{BFS} + b$$

ここに、 E_p は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BFS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

a, b は実験係数

- 3) GP ペーストの場合でも圧縮強度とヤング係数の間に相関が認められるが、本実験の範囲ではその関係は線形となった。

$$E_c = k \cdot F_c$$

ここに、 E_c は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

k は実験係数

- 4) 細骨材容積率の増加に伴い GP モルタルの圧縮強度が低下する。その低下の程度は BFS 置換率が大きいほど小さくなる。
- 5) 粗骨材容積率の増加に伴い GP コンクリートの圧縮強度が低下する。しかし、その低下

の程度はセメントコンクリートと比較して小さい。

- 6) 骨材容積率の増加に伴い、GP モルタルおよびコンクリートのヤング係数は増加するが、骨材率が 40%を超えると充填不良によると思われる空隙の増加の影響や遷移帯の増加などによりヤング係数が増加しなくなる、もしくは低下する。
- 7) BFS の置換がある場合 (10~20%) の GP 硬化体のヤング係数は、骨材容積率 40%以下においては複合則理論により概ね推定することが可能である。

第 4 章では、ジオポリマーのひび割れ注入材としての活用を検討する前の段階として、粉体に一般的に用いられているフライアッシュ (FA) に対し、高炉スラグ微粉末 (BFS) および超微粒子であるシリカフェーム (SF) を置換し、練混ぜの可否、フロー値、および圧縮強度についての基礎的実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 活性フィラーの一部に置換する SF の量を増加させると、SF が有する大きな比表面積の影響を受け、GP ペーストのフロー値が減少し、SF 置換率が大きいほど練混ぜが困難になることが確認された。
- 2) SF 置換率が小さく、かつ BFS 置換率を大きくするほど GP の圧縮強度が増加するが、極端に BFS 置換率が大きい場合、凝結時間が短くなり、練混ぜが困難になる。
- 3) SF 置換率が大きいほど、かつ BFS 置換率が小さくなるほど (40%以下)、硬化過程における化学反応に伴って発生する水素ガスにより、硬化後の GP 供試体が膨張し、圧縮強度が低下する傾向がある。
- 4) SF を置換した GP 硬化体は、BFS 置換率が 40%以下では FA や SF などに由来する非晶質のブロードピークと結晶質の quartz や mulite が確認されるが硬化体の強度への影響が小さい。しかし、BFS 置換率が 40%以上では、CASH のピークが確認され、その BFS 置換率が高くなるにつれてその CASH のピークも大きくなり、GP 硬化体が高い強度を得ることに影響している。
- 5) SF を置換した GP 硬化体の内部には、SF を置換しないものに比較して体積膨張などの要因で大きな微細ひび割れが生じていることが確認された。また、SF を置換しなかった場合、高温養生より常温養生の GP の方が内部に発生したひび割れが顕著に確認された。

第 5 章では、GP ペーストをひび割れ注入材として適用するために、塩化ビニール板による疑似ひび割れへの注入試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) W/P が小さいほど、粉体の粒子が細かいほどフロー値が減少して流動性が低く、練混ぜ直後の粘性は大きくなる。また、BFS の比表面積が大きいほど粘度が増加する時間も早くなる。
- 2) W/P=0.5FA-BFS 系の場合、0.2mm の塩ビ板疑似ひび割れ試験体への注入深さは 5cm 程度であったが、W/P=0.7, 0.9 では深さ 30cm まで注入できた。溶液粉体比を増やす

ことで、流動性が高くなり、粘性が低下して注入性能が向上した。

- 3) 擬似ひび割れ試験では、FA-BFS 系の場合、W/P が小さいほど、注入深さが深くなるにつれて BFS の比表面積による浸透速度への影響が確認された。
- 4) 本実験の範囲では活性フィラーに JIS I 種の FA を用いた場合より、SF を用いた場合の方が浸透速度は速くなる傾向がみられた。

第 6 章では、GP を断面補修材として適用するための実験的研究を行い、GP の断面修復材としての要求性能、RC 梁の補修に用いてその曲げ挙動を検討し、GP の補修材としての有用性を評価した。その知見を以下に示す。

<GP の断面修復材としての性能に関する基礎的実験>

- 1) BFS 比表面積が大きいほど始発時間、終結時間ともに短くなり、また、W/P が小さいほど始発時間、終結時間ともに短くなる傾向が確認された。
- 2) 各種強度は市販の補修材であるポリマーセメントモルタルに劣るものもあったが、各種公的機関が定める品質規格は満足していた。
- 3) GP モルタルの長さ変化率は非常に大きく、断面修復材に要求される性能を満たしていなかった。

<GP で断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験>

- 1) GP モルタルは同レベルの強度を有するコンクリートや無収縮モルタルに比べ、ヤング係数が低いため、断面修復後の RC 梁の曲げ剛性が低下し、降伏荷重や最大耐力が小さい結果となる傾向が確認された。
- 2) GP モルタルで断面修復した場合、補修深さを圧縮鉄筋より内部（圧縮縁から 60cm の深さ）までとした場合およびヤング係数がコンクリートに近い高強度 (Fc60) のものとした場合は、曲げ耐力の回復が良好な傾向にあった。
- 3) 補修界面処理の違い（界面の粗度と補修直前の水分供給状態）による影響について、無収縮モルタルを用いた場合はその影響を受けることが確認されたが、GP モルタルの場合においては明確には確認されなかった。
- 4) 鉄筋の下部まで深く補修した場合は、補修深さが浅い場合と比べ、GP モルタルおよび無収縮モルタルともに、母材コンクリートとの付着界面の面積が大きく、さらに鉄筋との付着による拘束で付着界面の剥がれが防止され、補修後の梁耐力の回復が良好であった。
- 5) 複合則理論を用いて推定した GP モルタルのヤング係数を用い、GP モルタルで補修した RC 梁供試体の降伏以前の曲げ挙動をほぼ推定できた。本報では、直列モデルを用いれば、安全側で簡便に推定できることを示した。

本研究の上記の結果より, GP は RC 造用補修材としての適用が期待できると考えられる。主に, 酸の発生する環境や高温環境の下での活用が期待される。しかし, 実用に向けて後述のようにより品質の用補修材の GP を研究開発する必要がある。

7.2 今後の課題

7.2.1 ひび割れ注入材への適用

ひび割れ注入材としては, 一般に可使用時間が 30 分以上, 収縮率が 3.0%以下, 付着力が $4.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であることが要求性能として求められている。また, 母材コンクリートと同等以上の圧縮強度 (普通コンクリートの場合, $30\text{N}/\text{mm}^2$ 程度) を有することが望ましい。今後のステップとして, 上記のような要求性能を満たす最適な調合・粉体を選出し, 注入試験や長期にわたる耐久性に関する検討を行っていく必要があると考えられる。また, 実際にコンクリートへの注入性状を検討し, より実用性の高いジオポリマー注入材を開発することが望まれる。

7.2.2 断面修復材への適用

本研究では, ジオポリマーモルタルの長さ変化率が非常に大きな値となったため, 断面修復材として実用するためには大幅な改善が必要である。また, 断面修復材の要求性能は今回調査したもの以外にも, 長期にわたる耐久性に関する検討や, ジオポリマーが市販の補修材に比べ粘度が高く施工性が劣ることが分かったためその改善が必要であると考えられる。

研究業績

- (ア) 査読のある雑誌など
- (イ) 査読のある国内、国際会議のプロシーディングス
- (ウ) その他

(ア) 査読のある雑誌など

- (1) ポンマハーサイパラミ, 五百蔵沙耶, 畑中重光: シリカフェーム添加型ジオポリマーペーストの性能に関する実験的考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.769, pp.321-330, 2020.3

(イ) 査読のある国内, 国際会議のプロシーディングス

- (1) 時利偉, ポンマハーサイパラミ, 三島直生, 畑中重光: 断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮特性に関する基礎実験, コンクリート工学会年次論文集, Vol.39, No.1, pp. 1735-1740, 2017.7
- (2) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光: ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.2, pp. 1249-1254, 2018.7
- (3) 伊藤彰利, ポンマハーサイパラミ, 畑中重光: シリカフェームを添加したフライアッシュベースのジオポリマーペーストに関する基礎的実験, コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1875-1880, 2018.7
- (4) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光: 圧縮強度と骨材量を変化させたジオポリマー硬化体のヤング係数に関する基礎的研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.41, No.1, pp. 1949-1954, 2019.7
- (5) 伊藤彰利, ポンマハーサイパラミ, 畑中重光: シリカフェームを用いたジオポリマーペーストのフロー値・圧縮強度に関する基礎的研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.41, No.1, pp. 1967-1972, 2019.7
- (6) 五百蔵沙耶, ポンマハーサイパラミ, 畑中重光: ひび割れ注入材用ジオポリマーペーストの可使用時間に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.42, No.1, pp. 1786-1791, 2020
- (7) Palamy Phommahaxay, Saya Iroi, Toshiyuki Mizuno, Akihiro Maegawa, Shigemitsu Hatanaka: Fundamental study on compression characteristics of geopolymer, Advances in Construction Materials Proceedings of the Conmat'20, The Sixth International Conference Construction Materials : Performance, Innovations, and Structural Implications., pp.887-895, Fukuoka, Japan, August 27-29, 2020
- (8) Saya Iroi, Palamy Phommahaxay, Toshiyuki Mizuno, Akihiro Maegawa, Shigemitsu Hatanaka: Study on basic characteristics of geopolymer for use as a crack injection material, Advances in Construction Materials Proceedings of the Conmat'20, The Sixth International Conference Construction Materials : Performance, Innovations, and Structural Implications, pp.896-904, Fukuoka, Japan, August 27-29, 2020

(ウ) その他

- (1) 時利偉, ポンマハーサイパラミ, 三島直生, 畑中重光: 断面修復したコンクリート角柱供試体の圧縮特性に関する基礎実験, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.55, pp.9-12, 2017.2
- (2) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光: 初期欠陥が生じた鉄筋コンクリート梁の断面修復後の力学挙動に関する基礎的実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.17-18, 2017.8
- (3) 伊藤彰利, ポンマハーサイパラミ, 畑中重光: 傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性に関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.56, pp.73-76, 2018.2
- (4) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光: ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 曲げ部材の力学的挙動に関する実験的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.56, pp.209-212, 2018.2
- (5) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 前川明弘, 畑中重光: シリカフェームを添加したジオポリマーペーストに関する基礎的研究, その1 実験概要およびフレッシュ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.511-512, 2018.9
- (6) 伊藤彰利, ポンマハーサイパラミ, 前川明弘, 畑中重光: シリカフェームを添加したジオポリマーペーストに関する基礎的研究, その2 圧縮強度への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.513-514, 2018.9
- (7) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光: 高炉スラグ微粉末の置換率がジオポリマーペーストのヤング係数に及ぼす影響に関する基礎的実験, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.57, pp.57-60, 2019.2
- (8) 伊藤彰利, ポンマハーサイパラミ, 前川明弘, 畑中重光: シリカフェームを添加したジオポリマーペーストのフロー値・圧縮強度に関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.57, pp.53-56, 2019.2
- (9) ポンマハーサイパラミ, 五百蔵沙耶, 畑中重光: 断面修復材としてのジオポリマーの基礎物性に関する研究, 溶液粉体比および高炉スラグ微粉末の比表面積が及ぼす影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1149-1150, 2020
- (10) 五百蔵沙耶, ポンマハーサイパラミ, 畑中重光: ひび割れ注入材としてのジオポリマーの粘度と可使時間に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1151-1152, 2020
- (11) Palamy Phommahaxay, Akitoshi Ito, Shigemitsu Hatanaka: Experiment study on flexural behavior of RC beams repaired by geopolymer mortar, The 25th Tri-U international joint seminar & symposium, Chiang Mai University, Thailand, November 4-8, 2018
- (12) Akitoshi Ito, Palamy Phommahaxay, Shigemitsu Hatanaka: Fundamental

experiments study on fluidity and compressive strength of geopolymer paste with varied powder ratio, The 25th Tri-U international joint seminar & symposium, Chiang Mai University, Thailand, November 4-8, 2018

謝辭

本研究を進めるにあたり、適切にご指導を賜った畑中重光特任教授ならびに三島直生先生（元三重大学工学部建築学専攻准教授）に対し、心から感謝しますとともにここでお礼を申し上げます。畑中先生の指導は非常に素晴らしく、研究のことだけでなく生活の面においても面倒を見ていただき、本学で快適で充実した研究生活を送ることができました。

また、本論文の審査に向けて、花里利一教授より適切にご指導・ご助言を賜っていただきました。さらに本論文の審査に際して、有益なご助言をいただきました浅野聡先生（三重大学大学院教授）、永井久也先生（三重大学大学院教授）に深く感謝いたします。

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）によりました。付記して謝意を表します。

また、本実験に際し、様々な分析をしてくださった前川明弘氏（三重県工業研究所研究員）、一緒に実験を行って私の研究を支えてくださった伊藤彰利氏（元三重大学大学院生）、五百歳沙耶氏（三重大学大学院生）、いつも私の実験を支えてくださった和籐浩氏（三重大学技術専門員）、生活から研究まで様々ご相談に乗ってくださった ER/DENGAOQIER 氏（元三重大学大学院生・現在東京理科大学工学部建築学科助教）及び三重大学大学院工学研究科建築学専攻畑中・三島研究室の皆様にご助力をいただき、深く感謝します。

さらに、本学で在学している間、いつも私の悩みを聞いて様々な相談に乗っていただき、有益なご意見をくださった松岡知津子先生（三重大学地域人材教育開発機構・准教授）に深く感謝します。

また、いつも応援を送ってくれる家族、博士前期課程に在学していた際の研究・勉学を支援してくださったロータリー米山記念奨学財団、博士後期課程に在学していた際にサポートしてくださった三重県民共済奨学財団、佐藤陽国際奨学財団に心の底より感謝しています。

2020年9月6日

PHOMMAHAXAY PALAMY

