

# 研 究 報 告

令和 8 年 4 月 17 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 金沢工業大学

工

氏 名 : 花岡 大伸

研究課題名 : アルカリ活性材料の鉄筋腐食メカニズムと腐食発生限界塩化物イオン濃度の解明

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

アルカリ活性材料の鉄筋腐食メカニズムと

腐食発生限界塩化物イオン濃度の解明

Elucidation of the mechanism of steel corrosion of alkali-activated materials and  
the critical chloride ion concentration at which corrosion occurs

金沢工業大学 教授 花岡 大伸

（研究計画ないし研究手法の概略）

1）研究の目的

本研究では、低炭素型の建設材料として注目されているアルカリ活性材料（AAMs）を対象とし、その物質透過性と鉄筋腐食に関するメカニズムを解明し、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度（Clim）を明らかにする。具体的には、FA-GGBS 併用型の GP および GGBS のみを活性フィラーとして使用した AAM を作製し、物質透過性に関する各種試験および鉄筋腐食試験を実施した。これらにより、フライアッシュを主体とするジオポリマーと高炉スラグ微粉末を主体とするアルカリ活性材料の生成される硬化体の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響の違いを明らかにすることを目的とした。

2）アルカリ活性材料の調（配）合

実験で使用した材料を表－1 に示す。アルカリ溶液（L）には、濃度を調整した NaOH 水溶液と水ガラス（J 珪酸ソーダ 1 号）を用いた。この時、NaOH 水溶液の濃度は、GP が 3.6mol/L、AAM が 1.8mol/L とした。また、活性フィラー（P）には、フライアッシュⅡ種と高炉スラグ微粉末 4000（石膏無し）を使用した。配（調）合（表－2）は、FA を主体とした GP、活性フィラーに GGBS のみを使用した AAM に加え、比較用として、GP と圧縮強度が同等になるように配（調）合を調整した普通ポルトランドセメントを使用したモルタル（OPC）と、OPC のセメント質量の 40%を GGBS に置換した配（調）合の高炉セメント B 種相当（BB）の 4 種類とした。GP は、土木学会の共通試験にて実施された GP コンクリートの配（調）合

表－1 使用した材料

| 種別      | 記号   | 材料                               | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 比表面積<br>(cm <sup>2</sup> /g) | 吸水率<br>(%) |
|---------|------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------|
| アルカリ刺激剤 | SH   | 粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして濃度を調整した NaOH 水溶液 | 1.14                       | -                            | -          |
|         | SS   | J 珪酸ソーダ 1 号（水ガラス）                | 1.70                       | -                            | -          |
| 活性フィラー  | FA   | JIS A 6201 フライアッシュⅡ種             | 2.29                       | 4、810                        | -          |
|         | GGBS | JIS A 6206 高炉スラグ微粉末 4000 石膏無し    | 2.91                       | 3、980                        | -          |
| 細骨材     | S    | 川砂（粗粒率 3.22）                     | 2.58                       | -                            | 2.27       |
| 水       | W    | 地下水                              | 1.00                       | -                            | -          |
| セメント    | C    | JIS R 5201 普通ポルトランドセメント          | 3.16                       | 3、420                        | -          |
| AE 減水剤  | Ad   | JIS A 6204 AE 減水剤標準形（Ⅰ型）         | 1.07                       | -                            | -          |

表－2 モルタルの配（調）合と諸性質

| No. | 配(調)合 | L/P<br>容積比 | SS/SH<br>容積比 | GGBS/P<br>(%)<br>質量比 | A/W<br>モル比 | Si/A<br>モル比 | 単位量<br>上段: kg/m <sup>3</sup> 、下段: L/m <sup>3</sup> |     |     |      |     | モルタル<br>フロー |      | 空気量(%) | σ 28<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|-------|------------|--------------|----------------------|------------|-------------|----------------------------------------------------|-----|-----|------|-----|-------------|------|--------|--------------------------------------|
|     |       |            |              |                      |            |             | L                                                  |     | P   |      | S   | 0 打         | 15 打 |        |                                      |
|     |       |            |              |                      |            |             | SS                                                 | SH  | FA  | GGBS |     |             |      |        |                                      |
| 1   | GP    | 0.90       | 1.000        | 20                   | 0.124      | 0.695       | 213                                                | 213 | 664 | 166  | 827 | 206         | 243  | 1.5    | 51.2                                 |
|     |       |            |              |                      |            |             | 125                                                | 187 | 290 | 57   | 321 |             |      |        |                                      |
| 2   | AAM   | 1.25       | 0.264        | 100                  | 0.055      | 0.510       | 89                                                 | 336 | -   | 853  | 827 | 173         | 231  | 2.3    | 55.5                                 |
|     |       |            |              |                      |            |             | 52                                                 | 314 | -   | 293  | 321 |             |      |        |                                      |
|     |       |            |              |                      |            |             |                                                    | 277 | 126 | 91   | 466 |             |      |        |                                      |

※A：アルカリ量（Na<sub>2</sub>O 量）、空気量：フレッシュモルタルの質量を計測して算出（容積法）

から粗骨材を取り除いたモルタルを作製した。AAM は、活性フィラーに FA を使用しない配（調）合とした。供試体の養生は、打込みから 28 日間、温度 20℃、湿度 60%R.H.の環境下で封かん養生を行った。

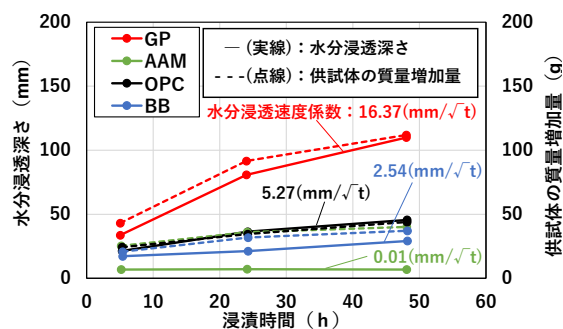
## （実験調査によって得られた新しい知見）

### 1）水分浸透試験

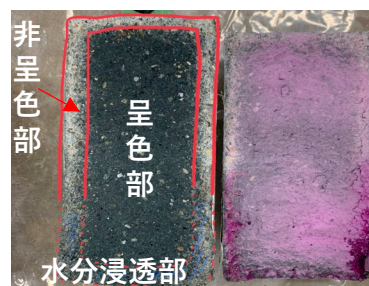
図－1 に水分浸透試験で得られた水分浸透深さ、水分浸透速度係数および供試体の質量増加量を示す。これによると、水分浸透速度係数において GP が最も大きく、AAM が最も小さい結果となった。一方で AAM は OPC や BB と比較して、水分浸透速度係数が 1/3~1/5 程度であった。しかし、供試体の質量増加量に着目すると、AAM と OPC、BB に大きな差はみられなかった。解体した AAM 供試体の断面（図－2）を確認すると、供試体の中心部は青色（以下、呈色部と称す）であるのに対し、側面部は白色（以下、非呈色部と称す）になっていることが分かる。これは、水中養生を行った際の呈色部と気中養生を行った際の非呈色部と一致している。割裂面に水漏れ発色検知剤を噴霧すると、非呈色部のみ反応し、赤色に呈色していることが確認できる。本実験では、側面部から約 7mm が非呈色部であり、これは通常の構造物のかぶり 50~70mm より小さいため、活性フィラーに GGBS のみを使用した AAM においては鉄筋位置に水分が供給されにくいと考えられる。

### 2）遮塩性試験

非定常電気泳動試験は、NT BUILD 492 に準拠して行った。φ 100×200mm の円柱供試体を作製し、養生終了後、コンクリートカッターでφ 100×50mm の厚さに切断した。その後、真空デシケーターを使用し、供試体を飽和水とカルシウム溶液で飽和した後、電気泳動セルを組み立て、電圧を印加した。印加終了後、供試体を割裂し、0.1mol/L 硝酸銀水溶液を噴霧させ、塩分浸透深さを計測した。測定した塩分浸透深さから、NT BUILD 492 の式(1)~(3)を用いて塩化物イオン拡散係数を算出した。結果を図－3 に示す。これによると、GP の塩化物イオン拡散係数が最も大きく、AAM が最も小さい結果となった。すなわち、GP は OPC や BB と比較して遮塩性が低い材料であり、AAM は OPC や BB と比較して遮塩性が高い材料であることが考えられる。図－4 に電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係を示す。電気抵抗率は、100×100×400mm の角柱供試体を使用し、JSCE-G 581-2018 四電極法 A 法に従い測定した。電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数に反比例の関係がみられることが知られており、今回の実験においても、図－4 に示すように反比例の傾向がみられた。今後、よりデータを蓄積する必要があるが、GP や AAM のようなセメントを使用しない特殊な硬化体であっても、電気抵抗率を測定することにより、容易に塩化物イオン拡散係数を推定することが可能であると考えられる。



図－1 水分浸透試験における水分浸透深さ、水分浸透速度係数および供試体の質量増加量



図－2 AAM 供試体の断面（48h 水分浸漬後）

### 3) 遮塩性試験

塩化物イオンの固定化は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱で、底面以外をエポキシ樹脂で被覆した供試体を使用した。供試体は、10%NaCl 溶液に浸漬させ、浸漬期間を GP、OPC、BB は 8 週間とし、AAM は遮塩性が高く塩分分析が困難であったため、浸漬期間を 13 週とした。塩分分析は、全塩化物イオン量を JIS A 1154 に準じて行い、可溶性塩化物イオン量を RILEM TC 178 に準じて実施した。また、全塩化物イオン量から可溶性塩化物イオン量を差し引いたものを固定化塩化物イオン量とした。結果を図-5 に示す。GP は固定化率が最も小さく、ほとんど塩化物イオンを固定化しないことが考えられる。これは、GP が硬化時のアルミナの消費に加えて、FA はカルシウム量が少ないため塩化物イオンを固定するフリーデル氏塩のような結晶質物質が生じないことが考えられる。一方で、活性フィラーに GGBS のみを使用した AAM が生成する C-A-S-H ゲルは、表面電荷や層間構造により塩化物イオンを吸着しやすいとされており、GP よりも固定率が大きかったことが考えられる。

### 4) 細孔容積

細孔径試験は、材齢約 50 日の円柱供試体から鋭利な部分やひび割れ部を除いた一辺 5mm 程度の破片を採取し、水銀圧入法で計測を行った。また、AAM は水中養生を行った際にみられる呈色部と気中養生の際にみられる非呈色部 (図-2) において、細孔容積の違いを比較した。試料の前処理は、約 1 週間アセトンに浸漬させ水和反応を停止させたのち、1 週間真空乾燥をさせた。水銀圧入の条件は、加圧速度 2-8MPa/min、最大圧力 124MPa とし、10-10000nm の細孔容積を計測した。また、水銀の圧入は 2 回行い、1 回目を全空隙量とし、減圧した後再圧入した結果を連続空隙量とした。

図-6 に全空隙および連続空隙を示す。OPC および BB に関して、全空隙量は同等であった。また、AAM (呈色部) に関しては、20nm 付近を境界に 10nm にかけて細孔量が急激に多くなっているため、他のケースに比べ 20nm よりも大きい空隙が少なく、緻密な構造をしていることが考えられる。さらに、AAM の呈色部と非呈色部の結果を比較すると、呈色部は 20nm 付近、非呈色部は 50nm 付近から細孔量が増加しており、呈色部に比べて空隙径が大きい非呈色部は水や酸素の侵入が容易であると考えられる。GP と AAM を比較すると全空隙量が同等の結果であった。このことから、10-10000nm の空隙において、GP や AAM は OPC や BB に比べて水や酸素の移動が困難であることが考えられる結果となった。これは、上述した物質透過性の試験結果における、GP が最も物質透過性が高いことに反する結果となっ

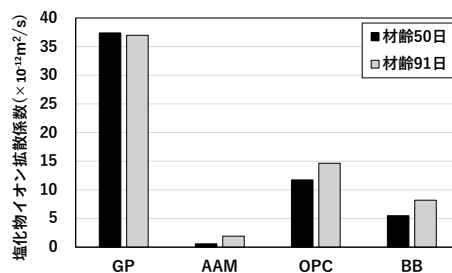


図-3 塩化物イオン拡散係数

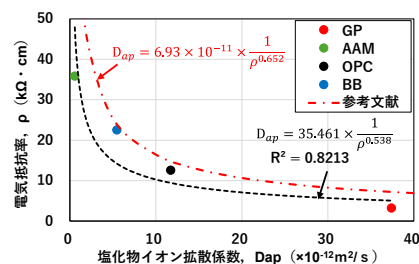


図-4 電気抵抗率と

塩化物イオン拡散係数の関係

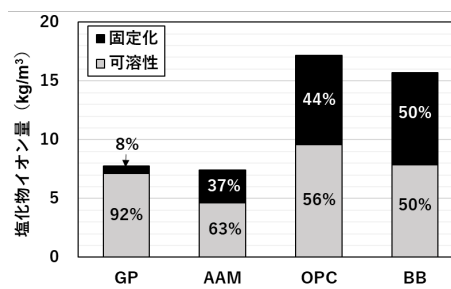


図-5 塩化物イオン量

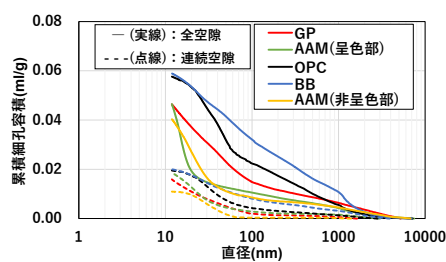


図-6 全空隙および連続空隙

た。また、連続空隙に関しては、全空隙と同様の大小関係がみられた。ここで、図-7に示す供試体の切断面をみると、GPは目視で確認できる粗大な空隙（赤丸）が多数みられた。すなわち、水銀圧入法で評価できていない10000nm以上の大きな空隙がGP中に多く存在すると考え、既往の文献9)を参考にアルキメデス法で空隙量を測定し、物質透過性試験の結果の考察を試みた。アルキメデス法で求めた空隙量の結果を図-8に示す。これによると、GPの空隙量が最も大きい結果が得られた。すなわち、図-7に示すとおり、GPは10000nm以上の大きな空隙が多いことが示唆された。これは、AAMはOPCやBBと類似し、水和反応で硬化するため空隙が充填されるのに対し、GPは脱水縮重合反応に伴い水が逸散され、硬化過程において粗大な空隙が形成されたことが考えられる。また、GGBSを多く使用するAAMは、主として、空隙を充填できるC-A-S-Hゲルを速やかに生成するが、FAの多いGPはN-A-S-Hゲルを緩やかに生成する12)ため、空隙の充填が十分に進まず、結果として空隙量を多くしていると考えられる。このようにGPの10000nm以上の空隙が多いため、GPは水分浸透性が高く、塩化物イオン拡散係数も大きくなったと考えられる。

## 5) 鉄筋の腐食試験

図-9に供試体の形状と寸法を示す。供試体は、40×40×160mmの角柱供試体に芯かぶり20mmの位置にD10の異形鉄筋を配置したものを使用した。なお、各配（調）合における鉄筋位置の塩化物イオン量を同等にする目的で、供試体にNaClを練混ぜ水の一部としてあらかじめ混入した。（Cl- = 0.0、1.0、1.5、3.0kg/m<sup>3</sup>）作製した供試体は、乾燥4日（温度60℃）、湿潤3日（温度60℃、水中に浸漬）を1サイクルとし、乾湿繰返しを7サイクル行った。7サイクル目に電気化学インピーダンス装置を用い分極曲線を計測した。分極曲線の測定後、供試体を解体し鉄筋の腐食状況を目視で確認した。図-10に各供試体の分極曲線の結果を示す。すべてのCl-量において、AAM、OPC、BBと比較してGPは、アノード分極曲線とカソード分極曲線ともに右にシフトしていることが確認された。一般に分極曲線は、右に行くほど、水や酸素の供給が多くなるとともに鉄の溶解反応が活発になっているとされており、GPは腐食していることが考えられた。また、OPCとBBにおいては0.0kg/m<sup>3</sup>、1.0kg/m<sup>3</sup>および1.5kg/m<sup>3</sup>と比べて3.0kg/m<sup>3</sup>の分極曲線は電位が卑となった。GPとAAMにおいては、Cl-量による分極曲線の大きな違いはみられなかった。

鉄筋位置でのpH測定は、供試体の割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化していないことを確認した後、鉄筋位置のモルタルを採取し、粉末にしたものを試料とした。その結果、GPはpH10.80、AAMはpH11.37、OPCは、pH12.00、BBはpH11.71になった。すなわち、GPのOH-濃度が最も小さく、OPCが最も大きい結果となった。一般にOPCはpH12.5程度の強アルカリ性であると言われており、今回も同様の値を示したといえる。ここで、鉄筋の腐食は、一般にpH11以下で開始するといわれており、GPはpH10.80であ

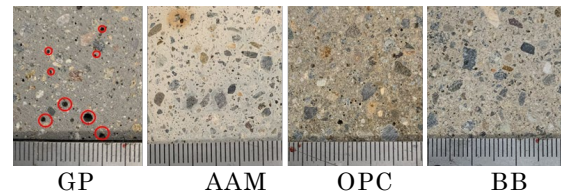


図-7 供試体の切断面（1目盛1mm）

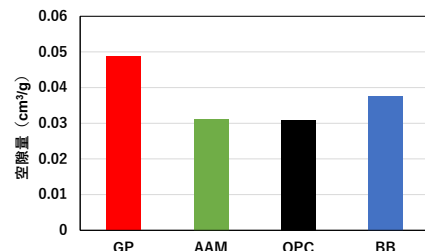


図-8 アルキメデス法から得られた空隙量

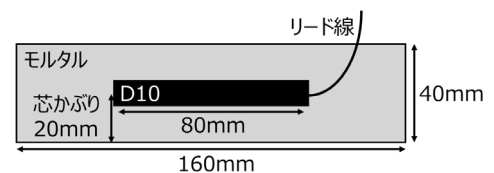
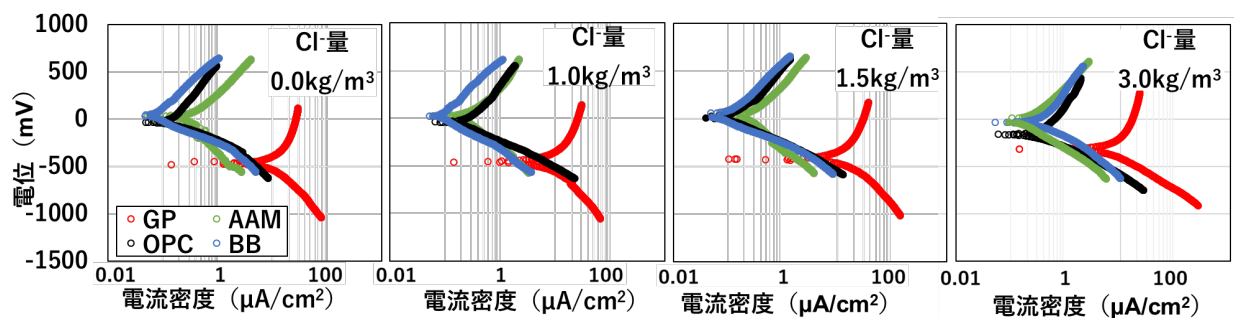


図-9 供試体の概要

り、不動態皮膜の形成が困難であったことに加え、芯かぶりが 20mm と小さいことから鉄筋位置への水分供給が多く、その結果、鉄筋腐食が生じたと考えられる。表－4 に硬化体の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響を整理した。GP は OPC や BB と比べ空隙量が多く、物質透過性が高い結果が得られた。そのため、乾湿繰返しが厳しい環境下では塩化物イオンが存在しない場合でも鉄筋の腐食がみられた。また、塩化物イオン固定化率が小さいことから塩害環境下においても鉄筋が腐食することが考えられる。一方で AAM は空隙が少なく、水や塩化物イオンの移動が困難であることから、乾湿繰返しが厳しく、3.0kg/m<sup>3</sup> の塩化物イオンを混和させた供試体においても鉄筋の腐食がみられなかった。加えて、AAM は、OPC や BB のように塩化物イオンを固定化できるため、鉄筋が腐食しにくいことが示唆された。



図－10 各供試体の分極曲線

表－3 鉄筋の腐食状況

| Cl <sup>-</sup> 量     | GP | AAM | OPC | BB |
|-----------------------|----|-----|-----|----|
| 0.0 kg/m <sup>3</sup> |    |     |     |    |
| 1.0 kg/m <sup>3</sup> |    |     |     |    |
| 1.5 kg/m <sup>3</sup> |    |     |     |    |
| 3.0 kg/m <sup>3</sup> |    |     |     |    |

表－4 硬化体の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響

| 項目                          | 単位                  | GP      | AAM     | OPC   | BB            |
|-----------------------------|---------------------|---------|---------|-------|---------------|
| 主な硬化生成物                     | -                   | N-A-S-H | C-A-S-H | C-S-H | C-S-H、C-A-S-H |
| 空隙量                         | cm <sup>3</sup> /g  | 0.05    | 0.03    | 0.03  | 0.04          |
| 水分浸透速度係数                    | mm <sup>2</sup> /√t | 16.4    | 0.01    | 5.3   | 2.5           |
| Cl <sup>-</sup> 拡散係数        | m <sup>2</sup> /s   | 37.4    | 0.6     | 11.7  | 5.5           |
| Cl <sup>-</sup> の固定化率       | %                   | 8       | 37      | 44    | 50            |
| pH                          | -                   | 10.80   | 11.37   | 12.00 | 11.71         |
| 鉄筋腐食が確認されたCl <sup>-</sup> 量 | kg/m <sup>3</sup>   | 0.0     | 腐食無し    | 3.0   | 腐食無し          |

#### ( 発 表 論 文 )

- 1) 亀井慎子、花岡大伸：フライアッシュ系ジオポリマーが鉄筋腐食に及ぼす影響についての一考察、土木学会第 80 回年次学術講演会、12AM2-Ke-06、2025
- 2) Chikako Kamei, Daishin Hanaoka: Influence of Permeability and Chloride Ion Binding Capacity on Steel Corrosion in Fly Ash-Based Geopolymers, Journal of Asian Concrete Federation, Vol.12 No.1, pp.51-57, 2026
- 3) 亀井慎子、花岡大伸：アルカリ活性材料の水分浸透性および透気性の評価、令和 7 年度土木学会中部支部研究発表会、V-18、2026
- 4) 亀井慎子、花岡大伸：アルカリ活性材料を対象とした鉄筋腐食に関する耐久性評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.48, No.1, 2026 (投稿済み)