

# 研 究 報 告

令和 8 年 4 月 21 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 : 埼玉大学

氏 名 : 礪 堯

研究課題名 : パラフィンによる高吸水性樹脂のカプセル化およびそれを用いた高い自己治癒性能を持つコンクリート材料の開発

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

## パラフィンによる高吸水性樹脂のカプセル化および

### それを用いた高い自己治癒性能を持つコンクリート材料の開発

Development of high self-healing performance concrete  
using paraffin-encapsulated superabsorbent polymer

埼玉大学 助教 欒 堯

#### （研究計画ないし研究手法の概略）

##### 1. 研究背景と目的

コンクリートは世界で最も広く使用されている建設材料であるが、引張強度が低く、乾燥収縮や温度応力などによりひび割れが発生しやすいという課題がある。ひび割れは水や有害イオンの侵入経路となり、構造物の劣化を加速させ、膨大な維持管理コストを生じさせる。この問題に対する革新的な解決策として、コンクリートに自律的な修復能力を持たせる「自己治癒コンクリート」が注目されている。

自己治癒を促進する有望な材料の一つが高吸水性樹脂（Superabsorbent Polymer: SAP）である。SAP はひび割れ発生時に外部からの水分を吸収して膨張し、物理的にひび割れを閉塞するとともに、コンクリート内部の未水和セメントに水分を供給して継続的な水和反応を促す。しかし、従来の未被覆の SAP をそのままコンクリートに混入すると、練混ぜの初期段階で急速に吸水してしまう。その結果、フレッシュコンクリートのワーカビリティが著しく低下し、さらに硬化後には SAP が吸収した水分を放出して収縮し、内部にマクロな空隙を残すため、コンクリートの圧縮強度を大幅に低下させてしまうという懸念があった。

本研究の目的は、この相反する課題を解決するため、SAP をパラフィンワックスでカプセル化（被覆）する手法を開発し、その効果を検証することである。パラフィン被覆によって練混ぜ時の初期吸水を遅延させ、流動性の低下と強度低下を防ぐ。そして、ひび割れ発生時に初めてカプセルが破れて SAP が本来の自己治癒能力を発揮するシステムを構築する。本報では、被覆 SAP の製造手法、ならびにそれがセメントモルタルのフレッシュ性状、力学特性、自己治癒性能に与える影響を実験的に調査した結果について報告する。

##### 2. 実験概要

###### 2.1 使用材料、カプセル化手法、および被覆 SAP の吸水試験

ベースとなる SAP には、市販の高吸水性樹脂を使用した。コーティング材には、融点がコンクリートの練混ぜ温度よりも高く、水に不溶であるパラフィンワックスを選定した。カプセル化（被覆）工程には、加熱機能を備えたパン型転動造粒機を採用した（図 1）。造粒機内で SAP 粒子を転動させながら、溶融したパラフィンワックスを添加することで、粒子表面に均一なパラフィン層を形成した。未被覆 SAP および被覆 SAP を対象に、ティーバッグ法に準じた吸水試験を実施した。実際のコンクリート環境を模擬するため、溶媒には水道水だけでなく、セメントと水を練り混ぜて濾過した「セメント溶液」を用いた。所定の時間ごとに重量を測定し、単位質量あたりの吸水量（g/g）の経時変化から被覆による初期吸水遅延効果を評価した。

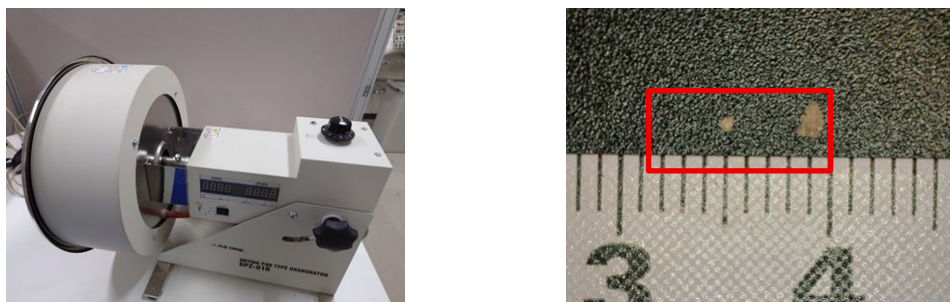


図 1：パン型転動造粒機、および未被覆 SAP（左）と被覆 SAP（右）

## 2.2 モルタルの配合および各試験の概要

普通ポルトランドセメント、標準砂、水道水を用いてモルタルを作製した。水セメント比（W/C）を一定とし、SAP を添加しない「コントロール」、未被覆 SAP をセメント質量比 0.4% および 0.8% 添加したケース、被覆 SAP を同量添加したケースの計 5 種類の配合を設定した。練混ぜ直後に JIS R 5201 に準拠したフロー試験を実施し、各配合の流動性を比較評価した。

各配合のモルタルを用いて、直径 50mm×高さ 100mm の円柱供試体を作製した。20℃の水中で標準養生を行い、材齢 7 日および材齢 21 日において圧縮強度試験機を用いて強度を測定した。これにより、SAP の混入およびパラフィン被覆が硬化後の力学特性に及ぼす影響を検討した。自己治癒性能を定量的に評価するため、材齢 7 日の円柱供試体に対して割裂引張荷重を加え、ひび割れを導入した。その後、供試体を 20℃の水中に 7 日間浸漬し、デジタルマイクロスコープを用いて浸漬前後のひび割れ幅を観察・測定して、ひび割れ閉塞率（治癒率）を算出した。さらに、自己治癒性能の差異の要因を検討するため、人工ひび割れ内における SAP の再膨張効率を顕微鏡観察により評価した。再膨張試験では、被覆 SAP および未被覆 SAP をあらかじめ吸水させた後に気中乾燥し、その後、ひび割れ幅 0.4 mm および 0.9 mm の人工ひび割れ内に配置して給水を行い、再膨張を生じさせた。粒子径の変化を顕微鏡で測定することにより、元の粒子径に対する膨張の程度を再膨張効率として定量化し、両者を比較評価した。

## （実験調査によって得られた新しい知見）

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 パラフィン被覆による吸水遅延効果

吸水試験の結果、パラフィンワックスによるコーティングにより、SAP の初期吸水が大幅に遅延されることが実証された（図 2 と図 3）。水道水中における試験開始 0.5 分後（初期段階）の吸水量は、未被覆 SAP が約 48.2g/g であったのに対し、被覆 SAP は 10.9g/g にとどまり、初期吸水量は約 77.4% 低減した。また、実際のコンクリート内部環境に近いセメントモルタル溶液中においても、未被覆 SAP の 45.1g/g に対し被覆 SAP は 16.5g/g であり、約 63.4% の吸水抑制効果が確認された。この結果は、パラフィン層が水分の急速な浸透を防ぐ物理的なバリアとして有効に機能していることを示している。

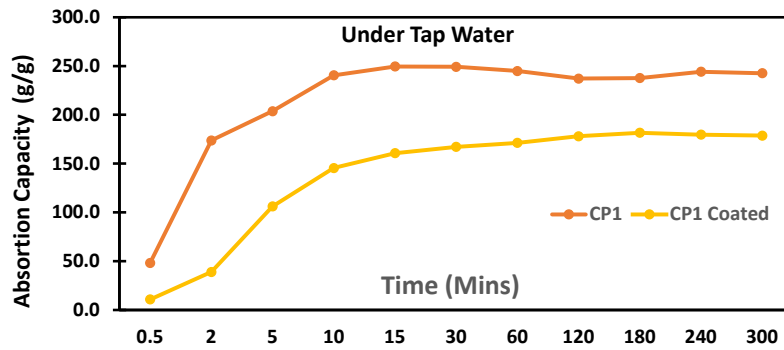


図 2：水道水を用いた被覆および未被覆 SAP の吸水試験の結果

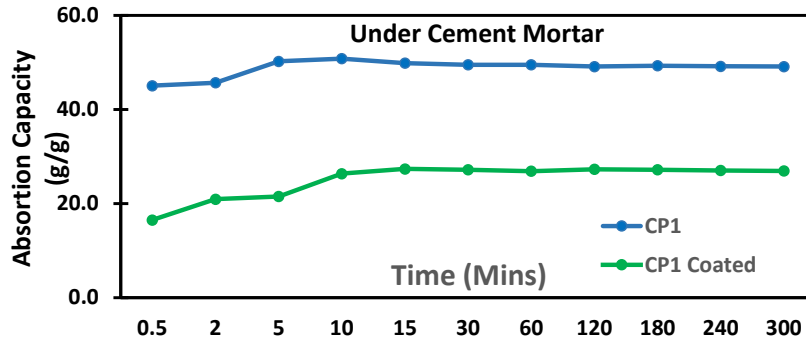


図 3：セメント溶液を用いた被覆および未被覆 SAP の吸水試験の結果

### 3.2 フレッシュモルタルの流動性評価

フロー試験の結果、パラフィン被覆の有無がワーカビリティに与える影響が明確に認められた（図 4）。SAP を混入しないコントロールのフロー値は約 239 mm であったのに対し、未被覆 SAP を 0.4%～0.8%混入したモルタルでは、練混ぜ水が SAP に直ちに吸われたため、フロー値は 194 mm 程度まで著しく低下し、施工性に影響を及ぼすことが示された。一方、被覆 SAP を混入したモルタルでは、上述の吸水遅延効果により練混ぜ水の減少が抑制され、フロー値の低下が緩和された。これにより、実用的なワーカビリティを十分に維持したまま、SAP をモルタルに導入できることが確認された。

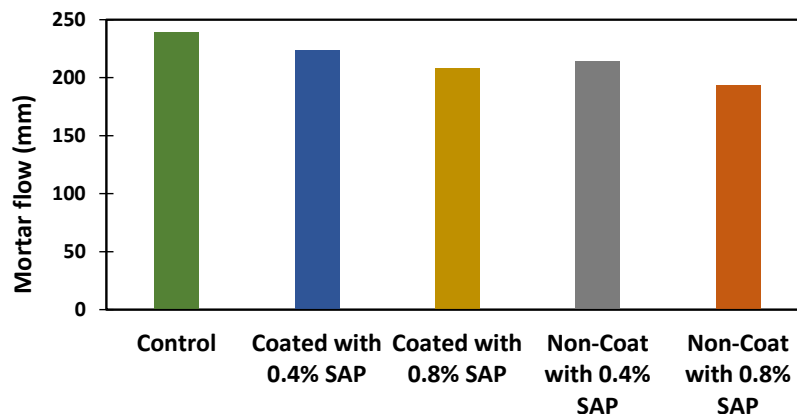


図 4：フロー試験結果

### 3.3 硬化モルタルの圧縮強度特性

材齢 21 日における圧縮強度試験の結果から、被覆 SAP の有効性と最適な添加率が明らかになった（図 5）。未被覆 SAP を混入した供試体では、初期に膨張した SAP が硬化後に収縮し、内部に大きな空隙を残すため、圧縮強度が低下した。一方、被覆 SAP をセメント質量比

0.4%混入した供試体は、材齢 21 日において 46.9 MPa の圧縮強度を示し、SAP 無混入のコントロール供試体（46.9 MPa）とほぼ同等の強度を示した。これは、被覆によって練混ぜ時における SAP 粒子の過剰な吸水膨張が抑制されたことに加え、硬化後に SAP から放出される水分が内部養生として機能し、セメント硬化体の細孔構造を緻密化したためと考えられる。なお、添加率を 0.8%に増加させると相対的な空隙量が増加し、強度低下が認められたことから、0.4%が力学特性を損なわない最適な添加率であることが確認された。

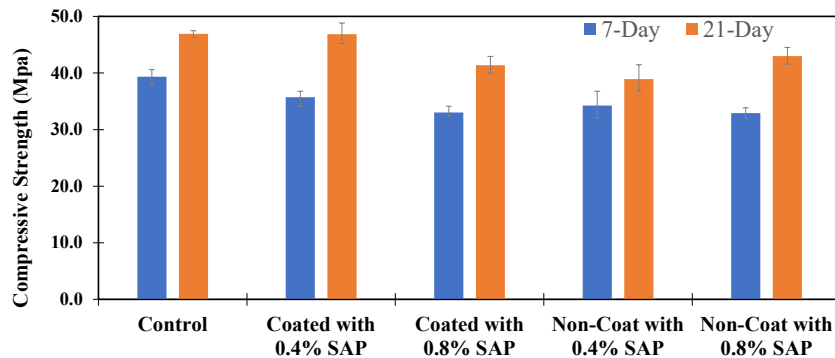


図 5：材齢 7 日および 21 日の圧縮強度

### 3.4 自己治癒性能および SAP の再膨張特性

水中浸漬による自己治癒試験において、図 6 にはその一例として、浸漬前後のひび割れの様子を示した。これより、析出物によるひび割れの閉塞が確認された。ひび割れ幅と治癒率（ひび割れの閉塞率）の関係を評価した結果、被覆 SAP はより高い治癒性能を発揮することが確認された。図 7 に示すように、測定データを基に回帰した曲線によれば、本研究で対象としたひび割れ幅の範囲において、被覆 SAP を混入した供試体の治癒率曲線は、未被覆 SAP を混入した供試体の曲線を明確に上回った。すなわち、同一のひび割れ幅という条件下において、パラフィン被覆を施した SAP は、未被覆 SAP と比較して高い自己治癒効果を示した。未被覆 SAP では、練混ぜ時に膨張エネルギーが大きく消費されるため、治癒率が低下しやすい。一方、被覆 SAP では、パラフィン層によって膨張エネルギーが内部に保持され、ひび割れ発生に伴ってコーティングが破断した際に高い膨張圧を発揮できることが、その一因であると考えられる。

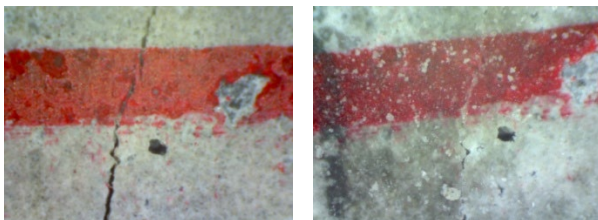


図 6：被覆 SAP を混入した供試体のひび割れ治癒状況－浸漬前（左）；浸漬後（右）

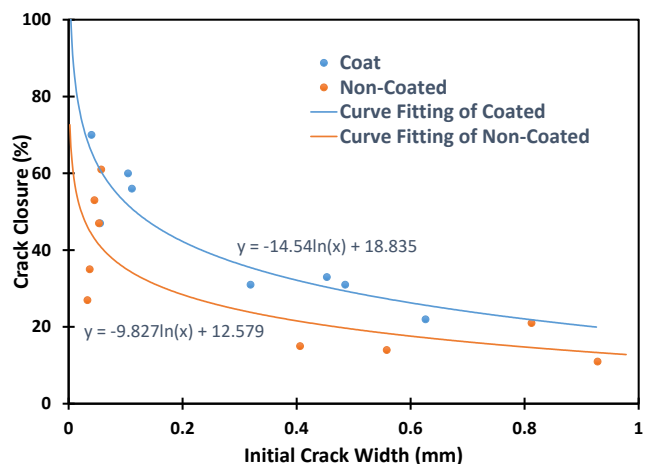


図 7：7 日間の水浸漬後における各ひび割れ幅の閉塞率

さらに、再膨張試験において、顕微鏡観察の一例を図 8 に示す。吸水前後の粒子径の変化から算出した結果、ひび割れ幅 0.4 mm および 0.9 mm の条件下において、被覆 SAP の膨張効率は未被覆 SAP のそれぞれ 1.70 倍および 2.17 倍に達することが確認された（図 9）。以上の結果から、パラフィンワックスによるマイクロカプセル化は、SAP の膨張能力を練混ぜ時には抑制し、ひび割れ発生時という必要なタイミングでその機能を最大限に発揮させる「トリガー制御」として有効であることが示された。



図 8：ひび割れ幅 0.9mm の人工ひび割れ部における再膨張試験の様子 — 浸漬前（左）および浸漬後（右）

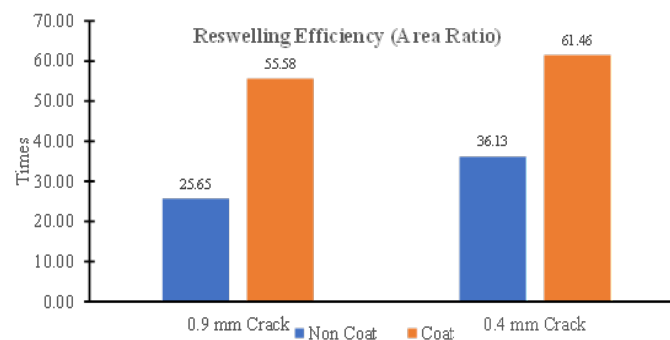


図 9：ひび割れ幅が 0.4 mm および 0.9 mm の人工ひび割れ条件下における再膨張効率

#### 4. 結論

本研究では、パラフィンワックスによる SAP のカプセル化技術を開発し、そのコンクリートへの適用性を評価した。パン型転動造粒機を用いたダブルコーティングにより、SAP の初期吸水量（最初の 30 秒間）を最大約 77%低減し、フレッシュコンクリートの流動性低下を効果的に抑制した。また、セメント質量比 0.4%の配合では、SAP 無混入の場合と同等の圧縮強度を維持し、従来の未被覆 SAP に伴う強度低下の課題を改善できることが示された。さらに、パラフィン被覆によって保持された膨張能力により、ひび割れ幅約 0.9 mm の条件下では、被覆 SAP は未被覆 SAP の約 2.17 倍の膨張効率を示した。このことから、被覆 SAP は同一のひび割れ幅の条件下において未被覆 SAP を上回る治癒効果を発揮し、コンクリートに優れた自己治癒性能を付与できることが確認された。

#### （ 発 表 論 文 ）

1. Y. Luan and C. Y. Cheung: Experimental Study on Properties of Cement Mortar Incorporating Paraffin Wax-Coated Superabsorbent Polymers, The 6th International Symposium on Concrete and Structures for the Next Generation (CSN 2026), Sapporo, Japan, 26-28 Aug. 2026. （投稿中）