

# 論文 水中不分離性注入材の開発と配合選定手法の提案

大橋 優樹<sup>\*1</sup>・天野 智雄<sup>\*2</sup>・伊代田 岳史<sup>\*3</sup>

**要旨：**港湾構造物のひび割れや漏水の発生しているひび割れなどの水中や水気の影響のあるひび割れの閉塞には、気中で用いられる従来のひび割れ注入材の使用は水中での材料分離によって品質低下や水質汚濁などの環境問題が懸念される。これに対し、増粘剤を添加することで材料分離抵抗性を向上できる。だが、流動性が低下しひび割れを閉塞させる際に充填不良を引き起こし、補修後にも関わらず早期段階で再度補修を必要とする可能性がある。本研究では相反関係にある粘性と流動性を兼ね備えた水中不分離性注入材を開発した。また、水中不分離性注入材を開発するに伴い、簡易的な確認手法として水中スランプフロー試験を開発した。

**キーワード：**水中不分離性, 流動性, 粘性, 増粘剤, 水中スランプフロー

## 1. はじめに

港湾構造物であるケーソンは波浪や上部コンクリートを走行する自動車等の荷重や船舶の衝突などによる外的要因、およびコンクリートの材料、施工などの内的要因により水中にある構造物の側壁部にひび割れが発生することがある。ケーソンのひび割れは、海水などの劣化因子による構造物の耐久性を低下させ、中詰砂の流出による上部コンクリートの陥没、波の浸食作用によるひび割れの拡大が懸念されている。しかし、水中におけるひび割れ部は水で満たされており注入材でひび割れ内の水を押し出して閉塞させる必要がある。注入材の硬化による閉塞効果が発揮されるまで、常に接水状態で水圧の影響を受ける。また、ひび割れの閉塞効果はひび割れに注入される注入材の注入深さやひび割れ内で示す挙動などによって異なる。

ひび割れを閉塞させるためのひび割れ補修材は多く開発されている。補修材には合成樹脂を主材としている有機系補修材とセメント系やポリマーセメント系の総称である無機系補修材に分類されている。有機系注入材は気中構造物の一般的な補修工法で多く採用されている。これは樹脂の種類に関わらず一般的建設材料である鋼材やコンクリートと比較して、酸やアルカリ性に強い特徴を示している。一方、無機系補修材は有機系より効果が遅く発揮されるが、比較的安価で 0.05mm の微細ひび割れを閉塞させることも可能である。しかし、施工時においてこれらの一般的な注入材を水中で使用した場合、注入材と注入材を取り巻く水の関与により材料分離を引き起こす。これは注入材の品質低下により、ひび割れの充填不良を起こしたり、一方で水質汚濁といった環境問題が懸念される。

既往の研究<sup>1)</sup>において、注入工法で多くの使用実績の

ある、無機系材料である超微粒子スラグセメントを表層 2~3cm 程度注入した結果、劣化因子侵入の抑制効果が明らかになっている。これは、ひび割れ補修において必ずしもひび割れ全体を充填する必要がなく、補修目的に応じた効果が得られる注入深さがあることを示している。

水中における材料分離に対して、一般的に増粘剤を添加することで注入材に増粘効果を付与し材料分離抵抗性を高めている。しかし、増粘剤は粘性を高める一方で流動性を低下させることになる。流動性が低下した注入材は自己変形抵抗性が高い為、ひび割れの充填不良や生産性の低下に繋がる。水中ひび割れ注入材にはこのように水中不分離性と流動性が求められるが、前述のとおり、両者は相反関係を示している。この粘性と流動性を兼ね備えた注入材が開発できれば水中ひび割れの効果的な閉塞効果が期待できる。

本研究ではブレン値の異なる無機系で超微粒子の高炉スラグを主材とした超微粒子スラグセメントと媒体が異なる二種類の増粘剤を用いて構成される水中不分離性注入材の配合選定手法を開発した。超微粒子スラグセメントと界面活性作用を付与する特殊増粘剤の併用により相反する粘性と流動性を兼ね備えた水中不分離性注入材を用いて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と練り混ぜ

**表-1** 今回の水中不分離性注入材開発に向けた増粘剤の種類と添加量を変動させた配合表を示す。超微粒子スラグセメントはブレン値の異なる二種類で、高いブレン値の UFP と低いブレン値の FP を使用した。また、増粘剤は界面活性作用を付与するアクリル系の液体タイプを LT, 水中コンクリートで主に使用されているメ

\*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 社会基盤学専攻 (学生会員)

\*2 全国止水躯体補修工事協同組合 (非会員)

\*3 芝浦工業大学 工学部先進国際課程(兼務 土木工学科)教授 博士(工学)(正会員)

表-1 配合表及び増粘剤の添加方法

| W/C (%)                                            | 液体タイプ<br>LT<br>(w×%) | 粉体タイプ<br>PT<br>(c×%) |
|----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 70<br>但し粉体は<br>8000 級(UFP)<br>6000 級(FP)<br>の 2 種類 | 1                    | -                    |
|                                                    | 2                    | -                    |
|                                                    | 3                    | -                    |
|                                                    | 4                    | -                    |
|                                                    | 5                    | -                    |
|                                                    | 6                    | -                    |
|                                                    | 7                    | -                    |
|                                                    | 8                    | -                    |
|                                                    | 9                    | -                    |
|                                                    | 10                   | -                    |
|                                                    | -                    | 0.1                  |
|                                                    | -                    | 0.2                  |
|                                                    | -                    | 0.25                 |
|                                                    | -                    | 0.3                  |
|                                                    | -                    | 0.4                  |
|                                                    | -                    | 0.5                  |
|                                                    | -                    | 0.75                 |
|                                                    | -                    | 1.0                  |
|                                                    | -                    | 1.25                 |
|                                                    | -                    | 1.5                  |
|                                                    | -                    | 1.75                 |
|                                                    | -                    | 2.0                  |

チルセルロース系の粉体タイプ PT を使用した。

水中不分離性注入材（以下、注入材と示す）はいずれかの超微粒子スラグセメント及び増粘剤を組み合わせ水セメント比 70%のセメントペーストを作製した。注入材の配合選定においては、各増粘剤の技術資料による適正添加率は LT が 4～10%、PT が 1%であり、これを含んだ範囲を実験条件として添加率を設定した。添加方法は、LT は単位水量に対して 1～10%の水置換、PT はセメントに対して 0.1～2%を外割添加した。

増粘剤の添加方法は、LT は練り混ぜ水に添加し作製した。プレミックスしなかった場合、PT が練り混ぜ水に触れた際に無数の塊が確認され、不均一な品質の注入材が作製された。そこで、PT は超微粒子スラグセメントへ事前に加えて均一な状態まで攪拌させ、練り混ぜ水を加え注入材を作製した。練り混ぜはハンドミキサーを使用し、練り混ぜ水を加えてから低速と高速を各 1 分間行った。注入材の略号は例えば PT1%添加した場合、PT1%と示し、

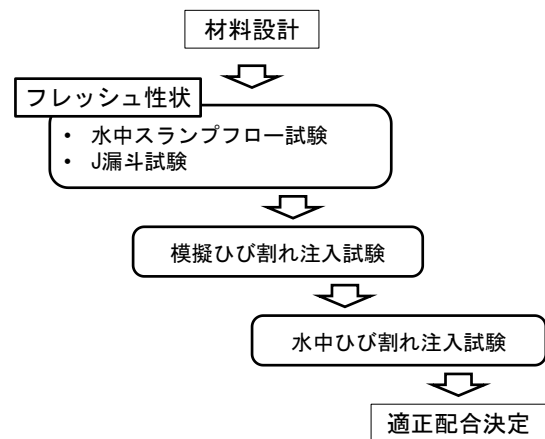


図-1 水中不分離性注入材の開発フロー

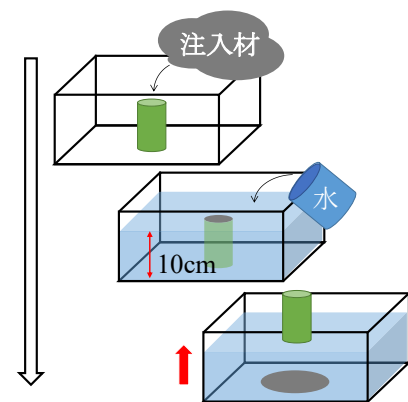


図-2 水中スランブフロー試験の概要

UFP に PT を 1%添加した場合を UFP-PT1 とする。添加量の一例を以下に示す。LT1%、PT1%において単位水量 100g の場合、LT は 1g、PT は 0.7g である。

## 2.2 配合選定の流れ

図-1 に水中不分離性注入材の開発フローを示す。注入材の配合を決定するために、フレッシュ性状及び物性試験で評価を行った。フレッシュ性状試験の一環として水中での挙動把握の為に水中スランブフロー試験を実施し、流動性を評価する為に J 漏斗試験を実施した。二つの試験から計測可能である範囲を増粘剤の適正添加率として、重複する範囲を抽出した。さらに抽出された配合を元に、ひび割れを模擬した注入試験を気中と水中で行い最終的な配合を決定した。

## 3. 水中不分離性と流動性による配合の選定

### 3.1 水中スランブフロー試験による水中不分離性の評価

#### (1) 試験概要

注入材が水中で注入材が分離していないかを確認する為、水中スランブフロー試験を行った。図-2 に試験概要を示す。実施工を想定し簡易的な確認手法を提案するために、φ 50×100mm の簡易モールドを水平な場所に定

置した水槽の底部に設置し、注入材を充填する。注入材の充填後、簡易モールド上部の注入材表面に水が掛からないように水槽に静かに水位 100mm まで注水した。その後簡易モールドを垂直に引き抜き、水槽内の注入材の広がり停止時の水槽底部に広がった注入材の最大直径とそれに直行する直径の平均値を水中スランプフローとし、3 回計測した。なお、簡易モールドと水槽の接する箇所から注入材の漏出を防ぐ為、簡易モールド底部の縁にシーリング剤を用いて付着性を確保した。

測定において、以下の場合に水中スランプフローが計測不可であったとして評価する。

- ・注入材が水中の材料分離を引き起こし水中汚濁によって注入材を視認できない場合
- ・視認できても注入材が簡易モールドの内壁部に厚さ 1mm 以上の付着残留分が確認された場合
- ・注入材が簡易モールドから排出されない場合

## (2) 試験結果

図-3、4 に LT 及び PT を添加した時の計測可能であった水中スランプフロー試験の結果を示す。

増粘剤の添加に応じて UFP-LT は比較的一定の水中スランプフロー値の減少を示したが、LT6%以上で簡易モールド内壁部に付着残留分が確認された。UFP が高ブレン品であり、増粘剤の効果が大きく得られたと推察する。FP-LT は設定した範囲において計測が可能であったが、LT8%以上は排出後の形状は円柱で直立していた。また、FP-LT6 で水中スランプフローが大きく減少していることから、FP は LT6%で増粘剤の効果が大きく得られると考えた。FP-LT6 の水中スランプフローが減少した要因については、調査中である。

一方、PT 添加は超微粒子スラグセメントの種類に関わらず相似な傾向を示した。UFP において PT2%以上では FP-LT と同様、形状は筒の状態で排出されフローとならず直立していた。排出は確認されたが、形状変化が起きないことからフローに対する増粘剤添加率の頭打ちと推測される。

## 3.2 J 漏斗試験による流動性の評価と配合選定

### (1) 試験概要

注入材をひび割れ内部に注入する際、注入材の流動性が低く粘性が高いとポンプ圧送できず管が閉塞される可能性がある。そこで、コンクリートやモルタルの流動性を測定する際に計測する手法と同様に、円錐型の漏斗を用いて注入材の流動性を評価した。本研究で使用した漏斗は直径 8mm の JA 漏斗を使用し、土木学会基準 (JSCE-F531) に従って試験を行った。計測は連続して流下している注入材が初めて途切れた時間を流下時間とした。

### (2) 試験結果

図-5 に注入材の添加率における計測可能であった流

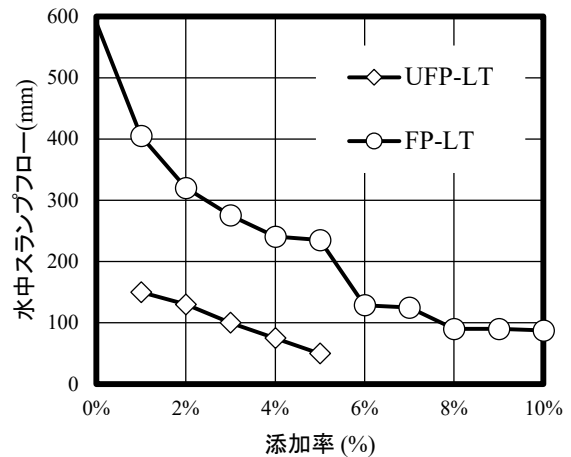


図-3 水中スランプフロー LT 添加

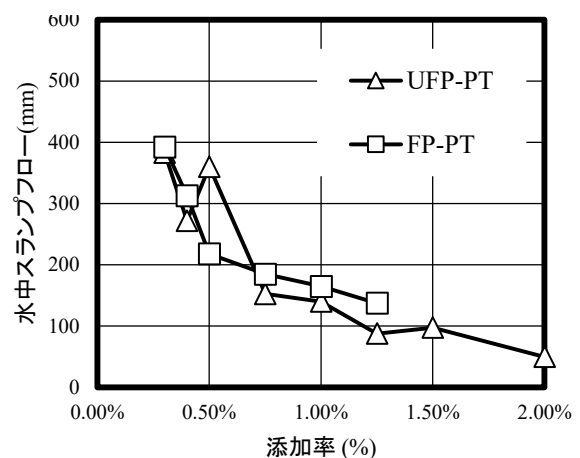


図-4 水中スランプフロー PT 添加

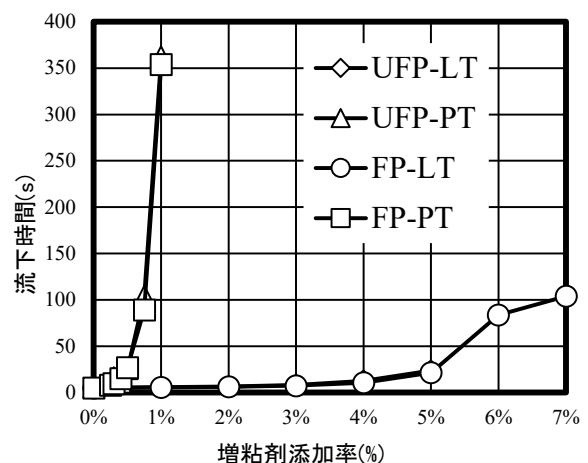


図-5 注入材の添加率における流下時間

下時間を示す。増粘剤のタイプによって流下時間の傾向が二極化した。LT 添加の場合、UFP は LT8%、FP は LT6% 以上では漏斗流出口に注入材が詰まり計測不可であった。これは、注入材がポンプの圧送で負荷が大きくなり途中で詰まる可能性を示唆しており、不適正であると判定した。LT5%以下の添加では UFP、FP 共に一定の傾向を示した。

一方、PT 添加の場合、LT と比較して流下時間が著しく長くなった。また、PT1.25%以上では、漏斗の内壁部に注入材の付着残留が確認された。また、流出口に注入材が詰まり計測開始から早い段階で注入材の流出が途切れた為、LT 同様に不適正と判定した。これは、LT の界面活性作用とは異なり、PT のメチルセルロースによって注入材の粘性が増加したことによって壁面に付着残留分が多くなったと推測される。

### 3.3 フレッシュ性状における配合選定

フレッシュ性状試験において配合選定した増粘剤添加率を表-2 に示す。水中スランブフロー試験では、UFP、FP 共に LT6%以上の添加率で増粘剤の影響を強く受けたと推察される為、LT1%～LT5%を適正添加率とした。一方、UFP は PT 添加で PT1%以上は簡易モールドから排出される注入材の形状変化が無い為不適正と判定した。よって、UFP は PT0.1%～PT1%を適正添加率とした。また、FP は PT1%以上で簡易モールドの内壁部に付着残留分が確認された為、不適正と判定した。よって、UFP 同様に FP は PT0.1%～PT1%を適正添加率とした。

J 漏斗試験では、FP の適正添加率は水中スランブフロー試験の結果と同じであった。一方で、UFP は 7%まで添加可能であったが、現場での練り混ぜを想定した場合、風などの環境要因によって配合が変化する場合がある。これを考慮し、一定の結果を示す LT5%を適正添加率とした。よって、フレッシュ性状において UFP、FP 共に増粘剤の適正添加率は LT1%～LT5%、PT0.1%～PT1%とする。

## 4. 模擬ひび割れ注入試験による注入材の挙動の把握

### 4.1 試験概要

#### (1) 模擬ひび割れの作製

実際の構造物に注入をする場合、ひび割れ内での注入材の挙動を掴むことが困難である為、注入状態の可視化による判定が必要である。ここでは、ひび割れ内の充填が必要な深さまで到達しており、かつ時間経過に伴う注入箇所への閉塞が保持されているかを判定する為に模擬ひび割れ注入試験を実施した。図-6 に今回実施した模擬ひび割れ注入試験概要を示す。ひび割れは乾燥状態とし、厚さ 5mm のアクリル板に 0.5mm のテフロンシートをアクリル板の縁に沿って設置した。テフロンシートを挟み込む形でアクリル板を重ね合わせ、クリップ等でアクリル板を留め、これを垂直に固定し模擬ひび割れを作製した。なお、模擬ひび割れ右側に注入箇所を作製する為に、注入に用いる注射器先端のゴムチューブが丁度挟める幅に合わせてテフロンシートを設置した。なお、アクリル板の厚さは注入材の注入圧によってひび割れ幅が拡張しない厚さを事前の試験により決定した。

ひび割れ幅は 1, 2, 3mm とした。ひび割れ幅の 1mm

表-2 フレッシュ性状試験における適正添加率

|    | UFP     | FP      |
|----|---------|---------|
| LT | 1%～5%   | 1%～5%   |
| PT | 0.1%～1% | 0.1%～1% |

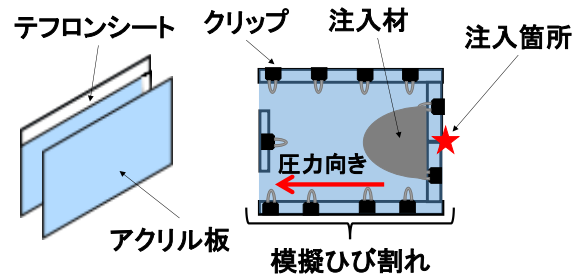


図-6 模擬ひび割れ注入試験概要

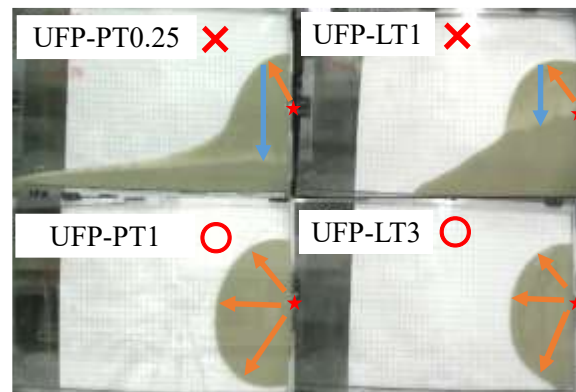


図-7 模擬ひび割れ注入試験における注入材の挙動

は注射器の先端部の直径が 1mm であることからこの値をひび割れ幅の最小値と設定した。また、最大値の 3mm は国土交通省が定めている港湾施設の点検ガイドライン<sup>2)</sup>では、ひび割れ幅が 3mm 程度の場合、ケーソンの中詰め材が流出による部材の性能低下の可能性があるとの規準から決定した。所定のひび割れは厚さ 0.5mm のテフロンシートを複数枚重ねることで実現した。

#### (2) 模擬ひび割れ注入試験の評価基準

注入材の粘性が低い場合、重力の作用によって注入材がひび割れ底部に向かって流動する。これでは、ひび割れ内の注入箇所よりも上部の部分にギャップが生じる可能性がある。ひび割れの容積を十分に把握できている場合、注入材が流下した際でも注入箇所が閉塞されるまで複数回注入することで対応は可能であるが、ひび割れ内部の状態を正確に把握することは困難である。本試験では一度の注入で注入箇所を注入材が塞ぎ、ギャップを最小限に抑えた閉塞効果を発揮する配合の抽出を行うこととした。図-7 に模擬ひび割れ注入試験における注入材の挙動の一例を示す。模擬実験を行った際、UFP-PT1 に示すように注入材は注入直後、同心円状に広がった。粘性が低い注入材は時間経過に伴い模擬ひび割れ底部へと流

下した。一方、粘性が高い注入材は同心円状に広がった状態を維持し続けた。しかし、粘性が極端に高い場合には、注入材はひび割れに注入されず注入口で詰まり十分に注入されなかった。この結果を踏まえ、注入開始から5分後の注入材の動向によってひび割れの閉塞効果を評価した。また、注入材が注入箇所のアクリル板に接触しながら広がることを前提とした。

これらを考慮して注入に使用する注射器の先端を固定した箇所を注入箇所として、以下のように判定する。

・評価○：時間経過に関わらず、注入材が注入箇所を閉塞し続けた場合

・評価×：注入ができなかった場合、または時間経過に伴って注入材が流下し、注入箇所を閉塞できなかった場合

また、本試験では、いずれのひび割れ幅で評価がそろう配合を抽出して表記した。

## 4.2 試験結果

図-7 はひび割れ幅 1mm の模擬ひび割れに注入材を注入してから5分後に撮影した注入材の動向である。UFP-LT3、UFP-PT1 では、いずれのひび割れ幅で評価○であった。図-7 に示すように注入から時間経過に依存しない同心円状の状態維持と注入箇所の閉塞が確認された。

しかし、UFP-LT1、UFP-PT0.25 はいずれも粘性が低く、重力によって流下する力が注入材とアクリル板の摩擦力を上回ったと考えられる。また、UFP-LT5 はひび割れ幅 3mm で閉塞効果は確認されたが、図-8 に示すように注入材に 10mm 程度の無数の未充填部分が確認された。これは、増粘剤の過度な添加により、注入材の粘性が上がったことで注入時に空気を巻き込んだと推察される。これは硬化後に物質移動抵抗性などの観点において、十分な性能を発揮しないと推察されるため不適正と判断した。

ここで、模擬ひび割れ注入試験の結果を表-3 に示す。表-3 は 4.1(2) で前述した評価基準に基づいて表記している。FP はいずれの増粘剤、ひび割れ幅において注入材が時間経過に伴って流下し、十分な閉塞効果は確認できなかった。FP における増粘剤の適正添加率は今回設定した範囲より高いと推測される。これより、FP は不適正である。

以上より、模擬ひび割れ注入試験では、UFP-LT3、UFP-PT1 を適正配合として選定した。

## 5. 水中ひび割れ注入試験による評価

### 5.1 試験概要

模擬ひび割れ注入試験で選定した注入材を使用し、現実のひび割れを想定してセメント硬化体で作製した起伏のあるひび割れに対して同様の閉塞効果を得られるかを評価する必要がある。図-9 に水中ひび割れ注入材試験の概要を示す。作製したモルタル供試体を割裂して長辺に

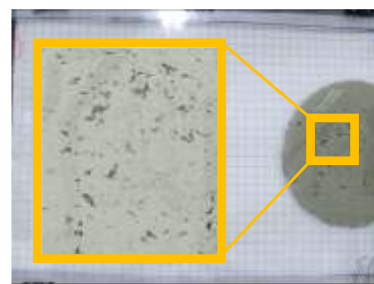


図-8 UFP-LT5 注入における模擬ひび割れ内の動向

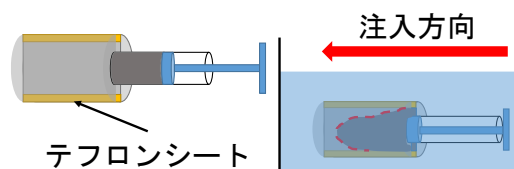


図-9 水中ひび割れ注入試験の概要



図-10 水中ひび割れ注入における注入材の動向

表-3 模擬ひび割れ試験結果

| セメント      |    |       | UFP |   |   | FP |   |   |
|-----------|----|-------|-----|---|---|----|---|---|
| ひび割れ幅(mm) |    |       | 1   | 2 | 3 | 1  | 2 | 3 |
| 増粘剤       | LT | 1%    | ×   | × | × | ×  | × | × |
|           |    | 3%    | ○   | ○ | ○ | ×  | × | × |
|           |    | 5%    | ×   | × | × | ×  | × | × |
|           | PT | 0.25% | ×   | × | × | ×  | × | × |
|           |    | 1%    | ○   | ○ | ○ | ×  | × | × |

テフロンシートを設置し、再度重ね合わせた。さらに、ひび割れに対して垂直に注射器を固定して注入材がひび割れ方向のみに浸透するように隙間をシーリング剤を塗布して塞いだ。この時、供試体の注入後方側は注入材によって押し出される水圧を逃がすために開放した。作製したこの試験装置を水を十分に貯めた水槽に沈め、注入材を模擬ひび割れ注入試験と同様の圧力で手動で注入し、割裂して注入状態を確認した。

### 5.2 試験結果

図-10 に水中ひび割れ注入試験における試験結果を示す。UFP-LT3 は、注入後方部分で注入材が流下することで未充填部分が発生した。この部分は、供試体が均一に割裂されなかったことによって該当箇所のひび割れ幅が狭窄し、重力により注入材が通りやすい部分を通過したのが原因であると推察される。一方、UFP-PT1 は不均一

なひび割れ幅に対し十分な充填効果を示した。これは、重力や水圧の影響を受けにくい粘性と流動性のバランスが取れた配合であると考えられる。以上のことから、水中不分離性注入材は UFP-PT1 が最適と考える。

## 6. 実施工における水中不分離性注入材の配合選定手法の提案

### 6.1 注入材の品質管理

今回水中不分離性注入材を開発するうえで施工現場での簡易的な性状確認を考慮した。今回はすべて試験室で実施したが、現場施工においては周囲環境や練り混ぜ水の温度など材料の状態によって水中不分離性注入材のフレッシュ性状は変化すると考えられる。つまり、それぞれの現場で注入材のフレッシュ性状を確認して最適な増粘剤の添加量を決定する必要がある。

### 6.2 水中不分離の定量評価

本研究では、水中不分離性注入材の配合選定を行う為に、水中不分離性を評価する目的として水中スランプフロー試験を行った。この評価基準として視認性を重視したが、水中での分離の程度による評価は行っていない。そこで、注入材が入った水槽水の pH を測定し pH の数値から注入材の材料分離抵抗性を評価した。実験室内温度は 22℃である。図-11 に水中ひび割れ注入試験で用いた各増粘剤の添加率で用いた UFP と FP の水中スランプフローと pH の関係を示す。注入材を入れる前の水の pH は 8.91、注入材の pH は 11.53 であった。増粘剤添加率の増加に伴って水中スランプフローが抑えられそれと同時に水槽水の pH 増加量は抑制できることが確認できた。つまり、粘性の増加に伴い pH 増加を抑えられ材料分離抵抗性の向上も見込めると言える。

### 6.3 水中スランプフローによる選定手法の提案

水中ひび割れ注入試験に用いた UFP-PT1 と UFP-LT3 は異なる増粘剤を使用しているが、比較的近い水中スランプフロー値を示している。そこで、水中不分離性注入材として適している配合は水中スランプフロー値によって判定できるのではないかと考えた。UFP-PT1 と UFP-LT3 の水中スランプフローは 135mm と 100mm であった。そこで図-11 より、水中スランプフローが 100mm～135mm の範囲に含まれる配合のうち、水中スランプフローが 125mm の FP-LT7 を用いて水中ひび割れ注入試験をした。その結果、図-12 に示すように UFP-PT1 と同等の充填が確認された。つまり増粘剤を添加した注入材の水中スランプフロー値が 100～135mm の範囲に含まれ、かつ視認による計測が可能であれば水中ひび割れに対して閉塞できる水中不分離性注入材に適した配合であると考えられる。

以上より、水中不分離性注入材の配合選定及び現場で

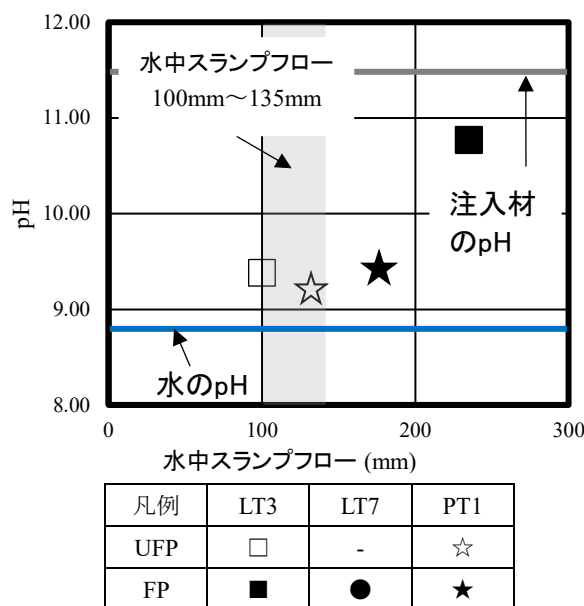


図-11 各配合における水槽水の pH

### FP-LT7



図-12 FP-LT7 の水中ひび割れ注入における動向

のフレッシュ性状試験の評価は水中スランプフロー試験が適正であると推測される。また、新たな材料から選定する場合、ひび割れを模擬した試験を行うことでより精度の高い配合選定が行えると考えられる。

## 7. まとめ

- (1) 今回の実験室での試験では、水中不分離性注入材における増粘剤の適正配合は UFP-PT1 である。
- (2) 水中不分離性注入材は増粘剤を添加して水中スランプフロー値が 100mm～135mm となり、水中での視認が可能な配合において、水中ひび割れに対して閉塞効果を発揮する可能性がある。

今後の検討として、今回使用した材料以外での増粘剤やセメントを用いて水中スランプフロー試験及び水中ひび割れ注入試験を実施し、水中スランプフロー値とひび割れの閉塞効果の関係性を追求していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 荻村敬隆：向きひび割れ注入材の基本物性とひび割れ注入効果の検証、2011 年度 芝浦工業大学 土木工学科 卒業論文
- 2) 国土交通省：港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 1 部 総論】、2021