

さまざまな構造物の補修補強に対応するグラウト充填工法（パフェグラウト工法）



（社）日本土木工業協会
日特建設株式会社
阿部 義宏

1. はじめに

構造物や地盤のすき間を埋め、その一体化を図る充填工法において、セメントを主成分とする充填材を「グラウト」と呼ぶ。

グラウトの性質（性能）は、硬化前の流動性、材料分離抵抗性（ブリーディング、水中分離抵抗性）、非漏出性（注入範囲からの逸走、漏れ出し）、硬化後の無収縮性、強度、そして経済性（材料コスト、施工コスト）で評価される¹⁾。これらの性質の中には、一方を高めれば他方が低下するトレードオフの関係にあるものが少なくない。そのため従来のグラウトは微妙なバランスの下で配合が設計されており、施工の条件や目的に合わせてそれらを調整する余地はほとんど残されていないのが現状であった。

今回、我々が開発したパフェグラウトは、従来のグラウトにくらべて配合設計の自由度が高いことを特徴とする。そのため幅広い用途に対応できる。ここではその概要といくつかの適用事例を紹介する。

2. パフェグラウト工法の概要

2.1 パフェグラウトに使用する材料

パフェグラウトに使用する材料を表 - 1 に示す。

表 - 1 パフェグラウトに使用する材料

材 料	機 能
セメント ¹	水と反応して硬化物を形成する材料
水	グラウトの流動性を高め、セメントと反応して硬化物を形成する材料
減水剤	基材 ² の流動性を高め、かつその可使時間を延長する混和剤
増粘剤 A	グラウトに擬塑性を発現させるアクリル系混和剤
増粘剤 B	グラウトに水中分離抵抗性を発現させるセルロース系混和剤
起泡剤	圧縮空気と混ぜ合わせると気泡を発生する混和剤（条件によって使用）
硬化剤	グラウトを短時間でゲル化させる混和剤（条件によって使用）

1：セメントの一部をフライアッシュに置き換える配合もある、 2：パフェグラウトのベースとなるセメントミルク

2.2 パフェグラウトの特徴

2.2.1 流動性

パフェグラウトは、静止時の流動性が低いものの、ポンプで加圧すると容易に流動化する。

こうした性質を利用すれば、ポンプの停止状態と運転状態を適切に切り替えることによって、グラウトの非漏出性と流動性を制御し、充填範囲を限定することが可能となる。

こうした性質を持つ流体は、工学上、擬塑性流体²⁾と呼ばれる(グラウト充填工法においては可塑性グラウト³⁾と呼ばれる)。より厳密な定義では、擬塑性流体は、ずり応力とずり速度の関係を示す曲線上の点と原点を結ぶ直線と横軸とのなす角度 (\tan は流体の粘度に相当する) が、ずり速度の増加とともに小さくなる流体とされている(図-1参照)。

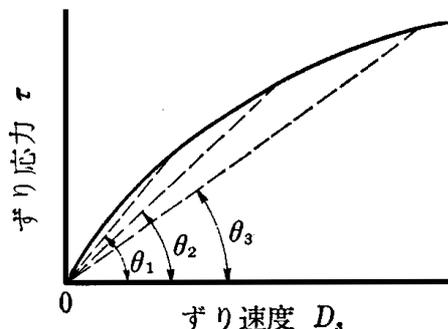


図-1 擬塑性流体

パフェグラウトが擬塑性を発現するのは、増粘剤 A の働きによる(図-2参照)。すなわち静止状態では、増粘剤 A が電気的な力で多数のセメント粒子を引き寄せため、パフェグラウトは流動性を失う。ただし両者の結びつきは緩やかであり、ポンプに押されると(せん断力を受けると)容易に分離して、パフェグラウトの流動性が向上する。

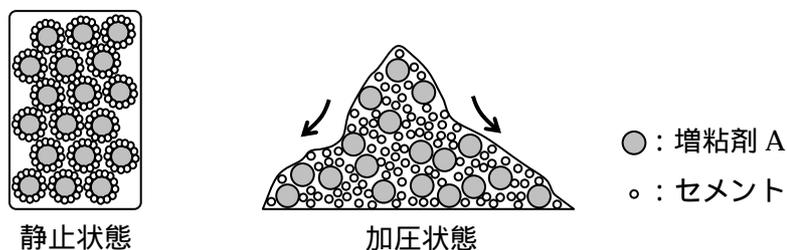


図-2 増粘剤 A の働き(概念)

2.2.2 材料分離抵抗性、無収縮性

増粘剤 A、B は、パフェグラウト中の水を拘束する。そのためパフェグラウト中の水が遊離してブリーディングを生じることは無い。こうした拘束状態は水和反応の過程でも継続するので、硬化後の乾燥収縮もほとんど生じない。

また、増粘剤 B が形成する膜は、セメント粒子を包み込み、外部からの水の浸入を防ぐ。そのためパフェグラウトは高い水中分離抵抗性を発揮する。

2.2.3 強度

パフェグラウトの一軸圧縮強度(材令 28 日)は、エア量 0%、水セメント比 50%の配合で 24 N/mm² を超える。この配合は、高強度が必要な構造物の補修に適している。

一方、強度よりもグラウトの軽量化や経済性が優先されるトンネルの裏込注入では、エア量を 30～40%程度まで増やして、一軸圧縮強度（材令 28 日）を 1.5 N/mm² 程度まで下げた配合を用いる。

2.2.4 配合設計の自由度

パフェグラウトは、水セメント比とエア量が一定であれば、2種類の増粘剤の添加量を調整して粘度を 500 mPa・s から 100,000 mPa・s の範囲で変動させたり、水中分離抵抗性を高めたりしても、一軸圧縮強度はほとんど変わらない。これは他のグラウトに見られない特徴である。

また通常のグラウトにおいて水セメント比を増やすと材料分離抵抗性や無収縮性が損なわれる。しかしパフェグラウトでは、水セメント比を 50%から 100%に増やしても2種類の増粘剤の添加量を調整することで材料分離抵抗性や無収縮性を維持することができる。

このようにパフェグラウトは、一方の性質を高めれば他方の性質が低下するトレードオフの関係が少ないため、配合設計の自由度が高く、さまざまな構造物の補修補強に対応できる。

2.3 パフェグラウト工法の注入システム

従来のグラウト充填工法の注入システムは、すべての材料を一つの開放型ミキサで混合するバッチ方式が主流であった。

一方、パフェグラウト工法においては、基材（セメントと水の混合物、セメントミルク）、増粘材（2種類の増粘剤と水の混合物）、気泡（起泡剤の水溶液と圧縮空気の混合物）を別々に製造して、これらを配管内で混合するインライン・ミキシング方式の注入システムを採用している（図-3参照）。

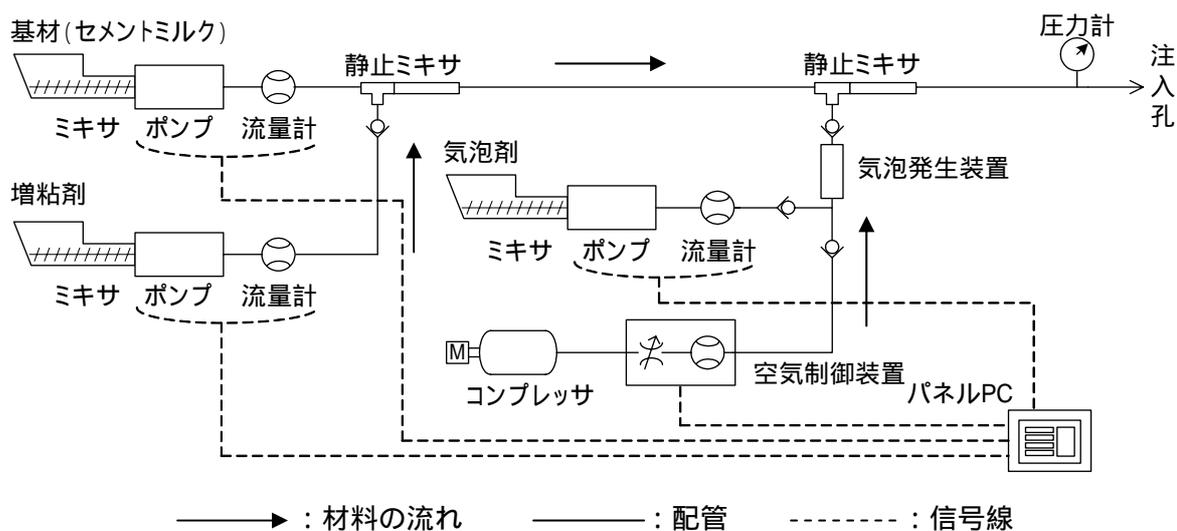


図-3 パフェグラウト工法の注入システム（注入系統）

従来の注入システム（バッチ方式）では、使用する材料の種類が増えるにつれて計量、投入、混合の管理が複雑になる。人手もかかり、ヒューマンエラーも増える。また少量の混和剤の計量が難しい、気泡が計量後に消失するという問題も生じる。

パフェグラウト工法の注入システム（インライン・ミキシング方式）は、これらの問題を以下の方法で解消している。

パネルコンピュータが、各材料の流量計測、その結果に基づいた各材料の流量制御を行うので管理が容易になる（さらに注入圧力の計測、制御も行っている）。

人手を要するのは基材、増粘材、起泡剤の水溶液の製造だけで、残りの作業はパネルコンピュータが自動的に行うため人手が減り、ヒューマンエラーも少なくなる。

パネルコンピュータは、各材料の使用量に応じた精度で流量を計測するため、パフェグラウトの品質が安定する。

気泡を配管内で混合するので消失しにくい。

3. パフェグラウト工法の適用事例

3.1 道路トンネルの裏込注入

トンネルと地山の間にあるすき間をパフェグラウトで充填し、両者を一体化することで地山応力のトンネル覆工への均等な伝達を図った（写真 - 1 参照）。

旧日本道路公団の仕様⁴⁾を満足する、充填範囲の限定に適した、低強度、低コストの配合を用いた（水セメント比 50%、エア量 40%、増粘剤 A の混合量 W/180、増粘剤 B の混合量 W/360、ただし W は水重量）。



写真 - 1 トンネルの裏込注入

3.2 ダムの補修

堤高 15m 未満のフローティングダムが対象。堤体の破損部の埋戻しと、それに連続してダム基礎地盤に生じた水みちの閉塞をパフェグラウトにて行った（図 - 4 参照）。

水中分離抵抗性にすぐれ、高強度を発現する配合を用いた（水セメント比 50%、増粘剤 A の混合量 W/180、増粘剤 B の混合量 W/360）。

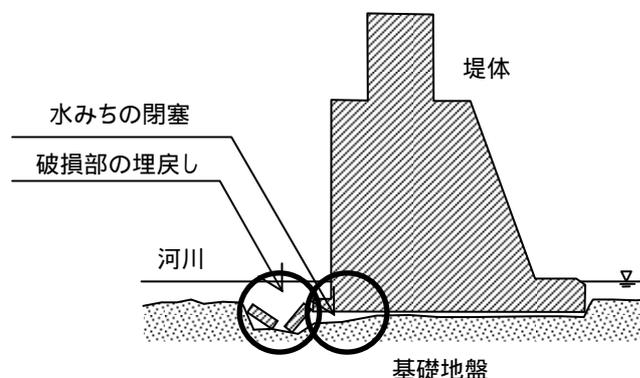


図 - 4 充填箇所の概念（上下流断面）

3.3 長距離配管の閉塞

延長 200m を超える配管の一方から、また河川直下の（配管内への地下水漏出が認められる）配管の一方からパフェグラウトを充填し、これらを閉塞した（図 - 5 参照）。

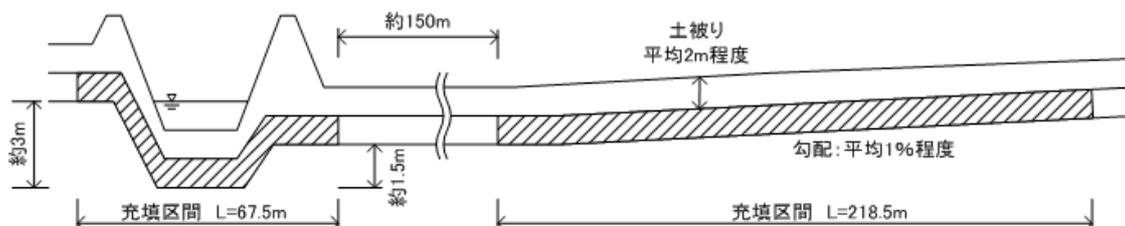


図 - 5 配管の断面

前者には流動性を高めた配合（水セメント比 80%、エア量 30%、増粘剤 A の混合量 W/800、増粘剤 B の混合量 W/200）後者にはさらに水中分離抵抗性を高めた配合（水セメント比 80%、増粘剤 A の混合量 W/800、増粘剤 B の混合量 W/100）を用いた。

3.4 岩盤の開口割れ目の注入

斜面の落石防護策の一環としてローブネット工に先行し、岩盤の開口割れ目にパフェグラウトを流し込みで注入した。

リーク対策として数分でゲル化する配合を用いた（写真 - 2 参照、水セメント比 80%、増粘剤 A の混合量 W/180、増粘剤 B の混合量 W/240、硬化剤 C × 数%、ただし C はセメント重量）。

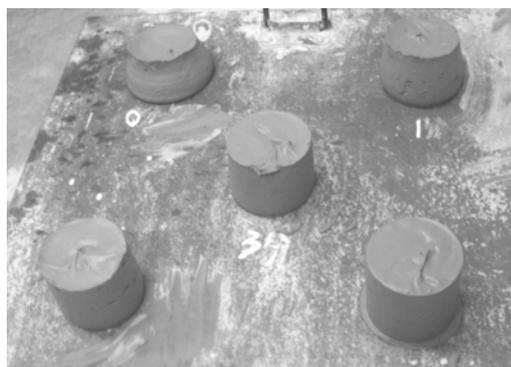


写真 - 2 数分でゲル化するパフェグラウト（練り上げ直後～10分後に採取）

4. まとめ

パフェグラウトは、グラウトに必要な性質をすべて備えていることはもちろん、従来のグラウトでは対応が困難なさまざまな用途に供することのできる、新しいグラウトである。

< 参考文献 >

- 1) 充填材の品質評価研究委員会報告、コンクリート工学 Vol.31, No.8、1993.8
- 2) 川田裕郎：改訂粘度、コロナ社、昭和 45 年 7 月
- 3) 三木五三郎・下田一雄：可塑状グラウト注入工法、日刊建設工業新聞社、2001.7
- 4) 日本道路公団：矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工指針、平成 14 年 10 月