

可塑性グラウトによる巨礫・巨石地盤の注入改良 ～その1：注入圧の評価・予測法～

大成建設(株) 正会員 ○石井 裕泰 羽生 剛
東京工業大学 正会員 北誥 昌樹

1. はじめに

原位置地盤の間隙に薬液やセメントミルクを浸透させて、強度・剛性の増加、透水性の低減を図る注入系地盤改良工法は、主に砂質土地盤を対象としてこれまで多数の適用実績をあげている。締固め、攪拌系の地盤改良に比べて小型の機械で施工ができること、騒音・振動が少ないこと、地盤を積極的に乱すことがないことから、既設構造物周辺や空頭制限などの制約下での施工に適している。その注入工法の新たな形態として、巨礫・巨石地盤を対象に可塑性グラウト(図1参照)を活用する手法が考案され、既存施設の補強や機能増強を意図して複数の適用・検討事例が報告^{1)~3)}されている。

この種の注入改良はこれまで事例が少ないことから、工法の適用性判断、配合調整や施工管理の観点で体系的な検討の余地を広く残す。そこで本報では、施工管理での活用を念頭に注入圧の評価・予測法を検討する。

2. 注入圧の算定法

注入圧の検討にあたり、圧力勾配に応じて浸透流速が生じるとする Maag の式をベースとする一方、可塑性グラウトがビンガム流体の性質を示す⁴⁾ことを考慮し、浸透流速が生じるための「しきい値」が存在するものとする。この想定により、浸透速度 v (m/s) に関しては、以下の関係が成り立つ。

$$v = K(i - i_c) = K(dP/dr - i_c) \quad \text{式(1)} \qquad q = Av \quad \text{式(2)}$$

ここで、 K :注入係数 ($\text{m}^2/\text{kPa} \cdot \text{s}$)、 i :圧力勾配 (kPa/m)、 i_c :降伏圧力勾配 (kPa/m)、 P :圧力 (N/m^2)、 r :半径 (m)、 q :注入速度 (m^3/s)、 A :注入面積 (m^2)

注入面積 A は三次元等方的に浸透する球状注入や、側面が拘束され二次元平面的に浸透する円盤状注入を想定し(図2参照)、 K 、 i_c は注入領域内で必ずしも一定ではないことを考慮する(3章後半の検討を参照)。式(1)、(2)を整理した式(3)を注入孔から半径方向へ数値積分することで、注入半径 R での注入圧 P_0 を特定できる。

$$dP = (q/K A + i_c) dr \quad \text{式(3)}$$

さらに、対象地盤の間隙率 n を想定すれば、注入半径 R と経過時間 t を注入速度 q で関連付けられることから、注入圧 P_0 の時間変化を特定することができる。

3. パラメータの同定と考察

前出の式(3)に対して K 、 i_c が注入領域内で一定と仮定すれば、 P_0 は半

表1 パラメータの同定に用いた注入実験

実験 Case	注入形態	間隙特性		配合特性	
		代表粒径 ^{注1)} L (m)	密度 ρ (g/cm^3)	シリンダーフロー (mm)	せん断抵抗 τ_f (N/m^2)
A1 小規模実験	球	0.4	1.25	-	166
A2 実規模実験		0.6	1.25	-	441
B1 文献3)ケース1	円	0.2	1.83	93	933 ^{注2)}
B2 // ケース2	盤	0.2	1.83	104	471 ^{注2)}

注1) 代表粒径：注入対象地盤の最大粒径で設定
注2) せん断抵抗：本研究に関しては練上り直後の値。水谷らの実験についてはベーンせん断試験による測定値がないため、実験的に確認した正規化したシリンダーフロー(CF)とベーンせん断抵抗(τ_f)の関係式： $CF_N = 0.030\tau_f^{-1.7} + 1.1$ で設定。 $(\tau_N = \tau_f / \rho g H_c, CF_N = CF / H_c, H_c$:シリンダーフローの初期高さ)



図1 可塑性グラウト

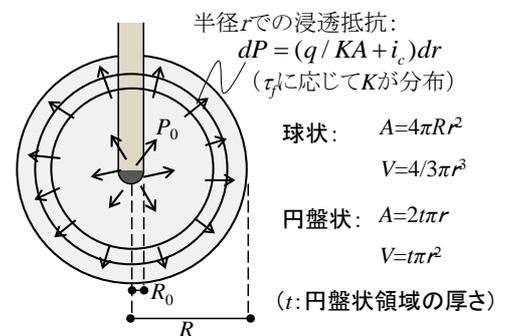


図2 注入モデル

キーワード 可塑性グラウト, 注入改良, 空洞充填

連絡先 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 TEL 045-814-7236

径 r による関数として式(4), (5)で表現される。

$$P_0 = \int_{R_0}^R dP = \int_{R_0}^R \left(\frac{q}{4\pi K r^2} + i_c \right) dr = \frac{q}{4\pi K} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) + i_c (R - R_0) \quad \text{式(4)}$$

$$P_0 = \int_{R_0}^R dP = \int_{R_0}^R \left(\frac{q}{2t\pi K r} + i_c \right) dr = \frac{q}{2t\pi K} (\ln R - \ln R_0) + i_c (R - R_0) \quad \text{式(5)}$$

本式による注入圧 P_0 の時間変化と、表 1 に示した 4 つの注入実験を用いて、注入圧算定式中の二つのパラメータ K, i_c の同定を試みる。Case-A1, 2 は球状改良によるもので文献 5) に示した実験 (実規模) とそれに付随して実施したもの (小規模) である, Case-B1, 2 は円盤状改良によるもので前出の文献 3) に詳細が示されている。

図 3 に各注入データとフィッティング結果 (K, i_c を一定とみなす 15 分までを対象) を示す。注入対象の巨石寸法と可塑性グラウトの粘性に応じて、それぞれ異なる水準の注入圧が生じ、それに対応する K, i_c を特定でき、両者に対して両対数軸上で図 4 のような相関が確認できる。

さらに K, i_c を注入条件から定めることを念頭に、可塑性グラウトのせん断抵抗 τ_f を式(6)により正規化した値に着目する。

$$\tau_N = \tau_f / \rho g L \quad \text{式(6)}$$

本無次元量は、可塑性グラウトのせん断抵抗の程度が、充填対象のスケールに依存するとの解釈に基づく。 K と τ_N は、図 5 に示すとおり両対数軸上での相関が認められ、可塑性グラウトの粘性と注入対象地盤の代表粒径を適切に設定できる前提で K, i_c が特定される。

図 3 のうち、最も長時間にわたり注入を行った Case A-2 について、実測値と計算値を図 6 に抜粋する。 τ_f を一定 (441 N/m^2) とする上記式(4)による計算値は経過時間 30 分以降に実測値で見られた注入圧の上昇傾向を表現できていない。一方、式(3)の数値積分による計算値では、1) 可塑性グラウトの τ_f の時間変化は容器に取り置きした試料に対する実測値を参照 (初期: 441 N/m^2 , 90 分後: $2,574 \text{ N/m}^2$) し、2) τ_f の空間分布は球状に一樣に広がる前提で注入速度に応じた経過時間によるものとし、3) K は τ_f に応じて図 4 により空間分布を特定する、ことで注入圧の経時変化を算定している。本結果では、 τ_f を一定する場合と異なり、30 分以降を含めた注入圧の推移が実測値に整合することとなった。可塑性グラウトのせん断抵抗の時間・空間的分布が注入圧変化の影響要因になっていることが示唆される。

4. まとめ

球状、円盤状の注入形態による注入圧変化を一元的に検証し、注入圧算定式のパラメータを同定した。また、時間経過に伴い可塑性グラウトのせん断抵抗が空間的に分布することを考慮した簡易な計算で、注入圧の変化を予測できることを示した。本結果を踏まえて、別報の「(2) 施工時注入圧の事後評価」⁵⁾ では、施工で得られた注入圧を比較・考察する。

【参考文献】 1) 羽生ら：流出防止用グラウト注入を併用したモルタル充填による基礎捨石マウンドの耐震補強，電力土木，No.371, pp.68-70, 2014, 2) 浜田ら：高透水性海底地盤における薬液注入工法，平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会 施工・安全管理対策部門，No.19, 2011, 3) 水谷ら：重量式係船岸の新しい増深工法の開発，港湾空港技術研究所，No.1277, 2013, 4) 石井ら：可塑性グラウトの粘性特性の調査と検証，第 51 回地盤工学会年次講演会，2016(投稿中), 5) 石井ら：可塑性グラウトによる巨礫・巨石地盤の注入改良 ～その 2：施工時注入圧の事後評価～，第 71 回土木学会年次学術講演会 (投稿中)。

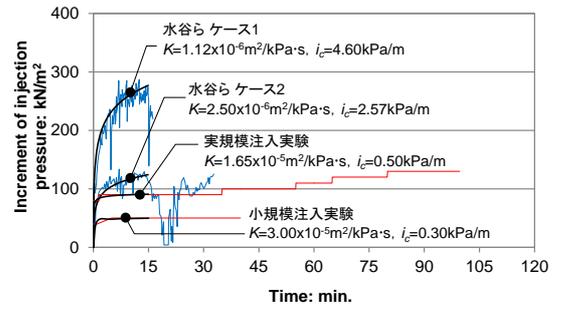


図3 注入圧の記録とパラメータ同定結果

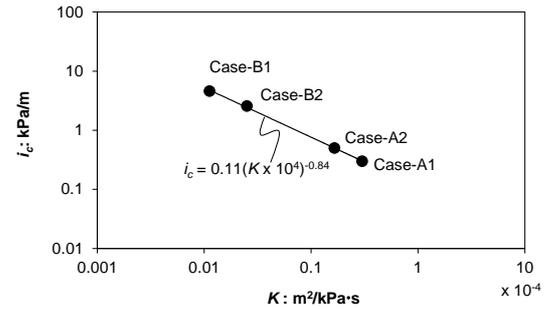


図4 K と i_c の関係

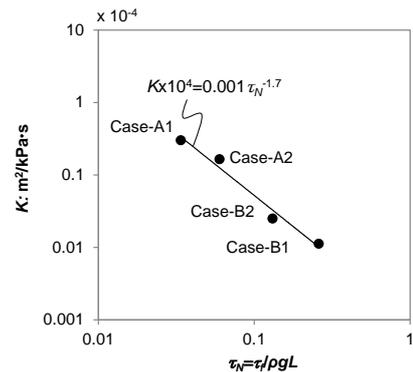


図5 K と τ_N の関係

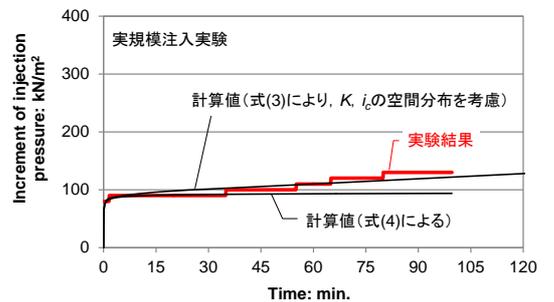


図6 K と τ_N の関係