非ニュートン流体の粘性特性を有するグラウト注入に関する一考察 ー目詰まりを誘因する注入事象に関する予察的評価について-

茨城大学大学院理工学研究科(東京電力㈱) 学生会員 ○岸 裕和 茨城大学 正会員 小峯 秀雄

1. はじめに

液状化被害が予測される砂質系地盤に対する地盤改良対策は喫緊の問題であり,高レベル放射性廃棄物地層 処分場のトンネル周辺遮水対策のグラウト工事については,難度の高い改良目標が要求されている.これらの 要求等に対しグラウチングの高度化は今後も重要である.このため,グラウチングのモデル化の精度を高める ことが重要と考えている.従来,懸濁液型グラウトの粘性特性は高粘性のニュートン流体に近似されてきた. しかし,この方法では現実に懸濁液が有する粘性のせん断速度依存性(shear-thinning)や目詰まり現象(filtration) が説明できない.このような特性は,懸濁液型グラウトは,正確には溶液の粘性流体ではなく,固液の混合物 であるためである.著者らは,この特性を考慮した合理的なグラウト注入方法について検討している.本論で は、非ニュートン流体の粘性特性を考慮したグラウト注入に関する理論式を導出し、これを用いて、粘性特性 の条件によりグラウトの注入を阻害する事象が起こり得る可能性について予察的に評価した.

2. 検討モデルに関する理論式の検討

今回モデルに取り上げる地盤は、均質な砂質地盤であり多孔質媒体に近似できるものとした.また、流動の 場は大局的には一次元の流れとみなせるサンドカラム内の流れとした.設定したモデルを図-1に示す.モデル 内の空隙は、等価な径の複数の管路がランダムに分岐・合流した形状を有すると仮定した.次に、グラウトの 粘性特性は、図-2に示すような一般的な非ニュートン流体のものとした.飽和状態のサンドカラム(以下、媒 体)にグラウトを注入した時の注入圧力と流量の関係を、Navier-Stokes 方程式に基づき導出した.支配方程式 は式(1)~(3)であり、各式は運動方程式、流速分布における栓流区間の式、連続式である.今回は、注入孔の 近傍に関する評価とするためカラム(直径 5cm)の浸透長さを L=50(cm)とし、グラウトの流れは定常状態とした. 一方、モデル内の間隙に相当する等価管径は、モデルが球形の粒状体により構成される場合、水力学的半径を 用いて式(4)となり、ここに用いる代表粒径は粒度の期待値(平均粒径)に相当する.この関係を式(1)に用いれば、 モデルの透水係数は式(5)となる.この妥当性に関し、東北珪砂 8 号(山形県産、粒径範囲 25~200µm、平均粒 径 80µm、媒体間隙率 0.42)に対する透水試験の事例¹⁾により評価した結果は、実測値と計算値の整合性が図-3 に示すとおり高いものとなった.ここに用いた屈曲度は、各種の岩石や粘土についての測定結果への近似式²⁾



(ξ=n_e^{-0.82}) から推定し ξ=2.04 とした. このように整合性が高いのは, 用い た珪砂には 75um 以下の細粒分は多いものの,粘土分(二次鉱物)は殆ど含 まれておらず、仮定する球形の粒状体にほぼ相当したためと考えられる.

3. 理論式による注入事象の評価

前章で述べたグラウト注入に関する理論式を用いて、定常状態の注入 について計算した. グラウトの粘性特性は、高炉 B 種セメントの配合に 関する測定事例³(図-4)に基づいた.計算条件では、降伏値の影響をみる ため,降伏値の大きさを元の2倍,5倍としたケースについても試算した. これは、セメント系グラウトが時間経過に伴い硬化する過程において、 降伏値がグラウト作成後 90 分経過後に 5 倍程度に上昇した事例 ⁴⁾を参考 とした. 降伏値は、 グラウトの流動開始の条件に強く影響すると考えられ る. また, 代表間隙径は, a=10.5.1.0.1µm の範囲とした. 媒体の間隙率を 上述に基づき 0.4 とすれば、対応する平均粒径は、D₅₀=45,22.5,4.5,0.45µm であり、このとき、図-3から透水係数は、10⁻⁵~10⁻⁹(m/sec)の範囲に対応 する.図-5には、計算の結果から、グラウトの注入流量が上昇を始める

のに注入圧力に 1~2MPa 前後を 要し降伏値の影響が明瞭と判断 したケースについて示す. グラウ トが高濃度すなわち W/C が小と なるほど,降伏値の影響が現れる 間隙の等価管径(a)は大きくなる. また,降伏値が2倍のケースで0.5 ~1.0MPa, 5 倍のケースで 1~ 2MPa 程度にならないと流量の増 加がない. グラウト圧力の上昇速 度は、通常は 0.1~0.2MPa/min 程 度であるため、ここのケースでは 昇圧してグラウトが流動を始め



1 × 10-3

1 × 10-

1 × 10-5

1 × 10-6

1 × 10⁻⁸

1 × 10-9

1.4

が 数 1.2 数 1.2 1.2 1.0 く 0.8

6.0 (Ja

● 0.4 3 0.2 2 2 0.2

0.0

10 2

0.8

図-3

m/sec)

過大宗教 1 × 10-7 :計算値(ξ =2.04)

10

透水係数の試算結果

平均粒径 (um)

1

配合 w/c

100

140

120

80 塑性粘度(

60

40

20

0

0.8

100 a

• 測定値

るまでには数分から 10 分程度が見込まれ、この間にグラウト粒子が間隙中で沈降堆積し、間隙を閉塞させて しまう恐れがある. 通例, グラウトの目詰まりは注入対象の間隙(孔隙, 割れ目)の大きさとグラウトの粒径の 関係で評価されるが、グラウトの降伏値が注入初期のグラウトの流動に与える影響により、目詰まりを誘因す る可能性が懸念されるため考慮すべきである.特に,微粒子系のグラウトは,一般に高濃度となると塑性粘性, 降伏値が著しく高まる傾向にあるため、この粒度が小さい特長を十分に活かすためにも注意が必要である.

4. 対策の提案と今後の検討について

今回理論的に明らかとなった懸念事象に対して、低圧力段階でグラウトが流動できない期間を解消するため、 透水試験の昇圧段階の最高圧力段階から直接グラウチングに切り替え, グラウチング開始時より注入圧力を高 めることで降伏値の影響を低減する対策が考えられる.この方法により,降伏値の大きなより高濃度のグラウ トを注入する可能性が高まる.また,透水試験とグラウチング間の作業の段取り替えや注入圧力の昇圧段階の 時間が短縮できる. 今後は、より現実に近い放射流形状の流れの場における非定常過程に関する詳細な理論的 検討ならびに実験による検証により、上述の注入方法の合理的な仕様とその有効性について提示をしたい. 参考文献 1),4)(独)日本原子力研究開発機構:平成21年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連地下坑道施工技術高 度化開発報告書,pp.32-34,2010. 2) 廣野哲朗他:間隙水の物性変化による移流・拡散現象の遅延効果,応用地質,第 45 巻,第 3 号,pp.118-124,2004. 3) 岸裕和他:ダム基礎岩盤におけるセメントミルクの注入特性に関する基礎的検討,電力土木,No.281,pp.14-18,1999.