

# **Rheology of cement grout – Ultrasound based in-line measurement technique and grouting design parameters**

Mashuqur Rahman

Doctoral Thesis  
Department of Civil and Architectural Engineering  
Division of Soil and Rock Mechanics  
KTH Royal Institute of Technology  
SE- 100 44, Stockholm  
Sweden  
November, 2015

TRITA-JOB PHD 1021

ISSN 1650-9501

ISRN KTH

Doctoral dissertation to be defended in F3, Lindstedtsvägen 26, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, on 18<sup>th</sup> of November 2015, at 13.00

Faculty opponent: Prof. Olafur H. Wallevik, Reykjavik University, Iceland.

Evaluation Committee members:

Prof. Mikael Rinne, Aalto University, Finland.

Prof. Eivind Grøv, University of Science and Technology in Trondheim (NTNU), Norway.

Dr. Annika Gram, Swedish Cement and Concrete Research Institute.

## Sammanfattning

Injektering i jord och berg utförs vanligen för att minska dess permeabilitet och för att göra materialet styvare. I tunnlar och underjordsanläggningar utförs arbetet genom att pumpa cementbaserade injekteringsmedel från borrade hål in i formationen, med ett tryck som överskrider rådande vattentryck. Syftet med injekteringen är att minska inflödet av vatten in i anläggningen och att minimera risken för en avsänkning av den omkringliggande naturliga grundvattennivån. Cementbaserade medel används ofta på grund av dess tillgänglighet och relativt låga kostnad. För att erhålla en effektiv tätning krävs en bra spridning av injekteringsbruket vilket påverkas av dess reologiska egenskaper. De reologiska egenskaperna, såsom viskositet och flytgräns, mäts vanligtvis i laboratorium och i viss mån med enkla metoder i fält. Trots att egenskaperna är av fundamentala då det gäller design och utförande, finns det idag ingen metod att mäta egenskaperna kontinuerligt i fält under utförandet. Det finns idag inte heller någon standardmetod för att fastställa injekteringsbrukets flytgräns eller dess variation med tiden. Trots att Bingham modellen används flitigt idag för att med kurvanpassning uppskatta flytgränsen finns det inga direktiv över vilket spann som den linjära anpassningen skall göras.

I föreliggande projekt har en in-line metod (UVP+PD) som kombinerar mätning av hastighetsprofilen med ultraljud (Ultra Sound Velocity Profiling – UVP) och mätning av tryckfallet (Pressure Difference – PD), använts. En utmaning inom projektet har varit att finna ultraljudsgivare som kan alstra tillräckligt med akustisk energi och som dessutom går att använda under fältlika förhållanden. Utveckling av givare har skett parallellt med det övriga arbetet inom projektet och den senaste industriella reometern, Flow-Viz, har visat sig kapabel att mäta hastighetsprofiler på vanligen använda cementbaserade injekteringsmedel. Hastighetsprofilerna har visualiserats och deras förändring som funktion av cementkoncentration har demonstrerats. Viskositet och flytgräns har utvärderats genom anpassning till olika reologiska modeller, såsom Bingham och Herschel-Bulkley. I tillägg har egenskaperna utvärderats genom en direkt bestämning utifrån hastighetsprofilerna vilket sedan jämförts med de reologiska modellerna. UVP+PD metodiken har visats sig kunna bestämma de reologiska parametrarna oavsett användandet av någon reologisk modell.

Flytgränsen hos cementbaserade injekteringsmedel har förutom UVP+PD även utvärderats med hjälp av konventionella reometrar. Försök har gjorts med olika grader av omrörning och det har visat sig att det existerar två olika nivåer av flytgräns beroende på historiken före mätning. Detta innebär att det valda värdet i en designsituation skall väljas beroende på rådande deformationshastighet i formationen som injekteras. Dessutom måste ett relevant spann av deformationshastighet, över vilken den linjära approximation för Bingham modellen görs, specificeras för att erhålla ett representativt värde på flytgränsen.

För att underlätta projekteringsarbetet vid injektering har ett dimensionslöst nomogram framtagits för uppskattning av deformationshastighet, pluggtjocklek och hastighet för endimensionellt och tvådimensionellt flöde. Fördelen med nomogrammet är att det är oberoende av tryck och medlets reologiska egenskaper och kan därför användas generellt som ett projekteringsverktyg. Nomogrammet har validerats mot numeriska beräkningar och laboratorieförsök med gott resultat.

En slutsats från detta projekt är att det går att mäta de reologiska egenskaperna på cementbaserade injekteringsmedel med ultraljud, kontinuerligt, under pågående injektering i fält. En annan slutsats är att det existerar två olika nivåer på flytgräns, beroende på vilken grad av omrörning som bruket har utsatts för. Ett dimensionslöst nomogram har tagits fram inom projektet för att underlätta valet av rätt nivå vid olika omständigheter. Ur nomogrammet kan deformationshastighet, pluggtjocklek och hastighet bestämmas vid en viss tidpunkt.

**Nyckelord:** injektering, injekteringsdesign, cementbruk, Bingham number, deformationshastighet, pluggflöde, tixotropi, flytgräns, in-line reometri, UVP+PD, Flow-Viz, viskositets bifurkation, åldring, off-line reometri, pumpkaraktäristika.