On the role of constitutive behaviour in the response of squeezing ground to tunnelling

Doctoral Thesis**Author(s):**

Dong, Weijie

Publication date:

2017

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010862994>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO 23769

**ON THE ROLE OF CONSTITUTIVE BEHAVIOUR IN THE
RESPONSE OF SQUEEZING GROUND TO TUNNELLING**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

WEIJIE DONG

MSc, Tsinghua University

Born on 07.05.1985

Citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Georg Anagnostou

Prof. Dr. Frederic Pellet

2017

Abstract

Squeezing conditions in tunnelling are characterized by the occurrence of large deformations of the opening or high rock pressure that may overstress the lining. Squeezing is associated with poor quality rock. Tunnelling in squeezing ground involves large uncertainties. It is therefore very important to gain a better understanding of the underlying mechanisms.

Triaxial testing is the main source of information for understanding the mechanical features of squeezing ground. Despite the complexity of the squeezing mechanism and the behaviour observed under relatively simple loading conditions, most of previous research work and engineering design practice considers the ground as a linearly elastic, perfectly plastic material obeying the Mohr-Coulomb yield criterion (hereafter referred as to “MC model”). The MC model is capable of predicting the final strength and post-failure volumetric behaviour of the squeezing rock, but cannot map some potentially important pre-failure features (such as the nonlinear stress-strain behaviour right from the onset of deviatoric loading or the stress-dependency of stiffness) or the occasionally observed contractant plastic deformation. The assumption of constant stiffness in the MC model implies that an equivalent Young’s modulus has to be adopted, which can often prove difficult (depending on the degree of actual variation in the confining stress around the tunnel). In addition, the MC model usually leads to an overestimation of the strength under undrained conditions, which is unsafe for tunnel design.

There has been no systematic evaluation of the predictive capacity of the MC model and, in more general terms, no investigation into the effects of constitutive modelling on computational predictions concerning squeezing in tunnelling. The present thesis mainly addresses the influence of constitutive modelling on predictions about the response of squeezing ground to tunnelling in order to provide some general guidelines for basic engineering analysis. This objective is achieved by investigating the behaviour of squeezing rocks theoretically and experimentally, using samples from several tunnel projects, including the Gotthard base tunnel and the planned Gibraltar strait tunnel.

Even though the basic principles of standard triaxial testing are familiar, it is still a highly demanding technique. In this thesis, the features and procedures that are key to the implementation of the triaxial test technique on weak and

very low permeability rocks under high stress are illustrated by taking the breccias from Gibraltar as an example, as they represent the weakest and experimentally most demanding squeezing material of all the tested rocks. Some improvements are emphasised concerning the test apparatus and evaluations.

Based upon the results of triaxial laboratory testing, three alternative constitutive models were selected and calibrated for further study: the Deviatoric Hardening (DH) model; a slightly simplified version of the Hardening-Soil (HS) model (hereafter referred to as SHS); and the Drucker-Prager Cap (DPC) model. All of these models are more successful than the standard MC model at reproducing the behaviour observed under triaxial consolidated-drained (CD) and consolidated-undrained CU testing conditions.

The ground response to tunnelling is analysed by considering a series of boundary and initial value problems with increasing degrees of complexity. Based upon the available extensive experimental database on the kakirites from the Gotthard base tunnel, it is shown that the MC model's assumption of a constant Young's modulus introduces significant prediction uncertainties, as it is unclear how an adequate value could be selected given the experimentally observed stress-dependency of stiffness and the big variation in the confining effective stress around the opening under drained (or dry) conditions. This deficiency in the MC model is less significant for the undrained ground response to tunnelling because the variation of effective stresses around the opening is small in this case. In order to address the uncertainty about the Young's modulus, a simple relationship is proposed in this thesis (based on the results of a parametric study which refers to the kakirites data) for choosing an adequate Young's modulus so that the tunnel convergences obtained from the MC model are practically equal to those obtained from the SHS model; the latter can be considered a benchmark as it reproduces the behaviour under triaxial conditions very well, and this means that its predictions are also more reliable for other boundary conditions. Encouraged by these results, a more extensive parametric study was performed with artificially generated parameter sets covering a very wide range, and it showed that the simple equation suggested for the Young's modulus estimation is generally valid.

Based on ground response analyses of the parameters of the weak breccias from the Gibraltar strait, it is shown that the MC model leads to unsafe predictions as it overestimates undrained strength. The other, more refined,

models (SHS, DPC) are more reliable and provide similar results, despite the different hardening mechanisms (deviatoric strain-hardening for the SHS model and volumetric strain-hardening for the DPC model). The computational predictions concerning the short-term ground response indicate that the tunnel construction through the breccias will be demanding. There are three main reasons for the expected heavily squeezing behaviour: low shear strength, high initial pore pressure and non-dilatant behaviour. Under the expected tunnelling conditions, ground consolidation by advance drainage would be a very powerful auxiliary measure, provided that the necessary drainage times are not prohibitively long.

Zusammenfassung

Der Tunnelbau in druckhaftem Gebirge wird typischerweise von grossen Verformungen oder hohen Gebirgsdrücken geprägt, die zur Überbeanspruchung des Tunnelausbaus führen können. Druckhaftigkeit tritt in Gesteinen niedriger Festigkeit und hoher Verformbarkeit auf. Der Tunnelbau in druckhaftem Gebirge ist eine Ingenieuraufgabe, die von grossen Unsicherheiten begleitet wird. Es ist darum sehr wichtig, die zugrundeliegenden Mechanismen besser zu verstehen.

Triaxialversuche sind eine wichtige Informationsquelle, um die mechanischen Eigenschaften von druckhaftem Gebirge zu erfassen und zu verstehen. Trotz des komplexen beobachteten Verhaltens unter den relativ einfachen Randbedingungen der Triaxialversuche wird das Gebirge in der Ingenieurpraxis, wie auch in sehr vielen Forschungsarbeiten, als ein linearelastisches, idealplastisches Material mit Mohr-Coulombscher Bruchbedingung betrachtet. Diese (nachfolgend als "MC-Modell") bezeichnete Idealisierung des Materialverhaltens vermag die Endfestigkeit und meist auch das volumetrische Verhalten nach dem Versagen zu erfassen. Hingegen können einige potentiell wichtige Aspekte des Materialverhaltens vor dem Versagen (die spannungsabhängige Steifigkeit; die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung und das Auftreten von irreversiblen Verzerrungen lange vor dem Erreichen der Höchstfestigkeit) sowie die manchmal beobachteten, kontraktanten plastischen Verformungen nicht wiedergeben werden. Die Anwendung des MC-Modells erfordert die Annahme eines konstanten Elastizitätsmoduls, was sich angesichts der grossen Spannungsvariation um einen Tunnel schwierig gestaltet. Des Weiteren führt das MC-Modell in der Regel zu einer Überschätzung der Festigkeit unter undrainierten Bedingungen mit der Folge, dass die Ergebnisse der tunnelstatischen Berechnungen auf der unsicheren Seite liegen.

Bislang gibt es keine systematische Untersuchung der Prognosefähigkeit des MC-Modells und auch keine vergleichende Untersuchung der rechnerischen Vorhersagen verschiedener Stoffgesetze bezüglich des Tunnelbaus in druckhaftem Gebirge. Die vorliegende Dissertation will diese Wissenslücken schliessen mit dem übergeordneten Ziel, fundierte Erkenntnisse für praxisrelevante tunnelstatische Berechnungen zu gewinnen. Dieses Ziel wird durch theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von

Gesteinen erreicht, die aus bekannten oder erwarteten druckhaften Gebirgsformationen aus mehreren Tunnelprojekten (einschliesslich des Gotthard-Basistunnels und des geplanten Gibraltar-Tunnels) stammen.

Obwohl die Grundprinzipien der Triaxialversuche gut bekannt sind, ist die Versuchstechnik anspruchsvoll und erfordert einige Weiterentwicklungen, um insbesondere Gesteinsproben hoher Verformbarkeit, tiefer Festigkeit und extrem tiefer Durchlässigkeit unter hohen Spannungen zu untersuchen. Die vorliegende Doktorarbeit zeigt die diesbezüglichen Hauptmerkmale, Verfahren und versuchstechnischen Verbesserungen auf, die im Zusammenhang mit dem Untersuchungsprogramm zum Brekzienabschnitt des geplanten Gibraltar-Tunnels entwickelt wurden.

Anhand einer Analyse der Ergebnisse von Triaxialversuchen werden in der vorliegenden Arbeit drei Stoffgesetze ausgewählt und kalibriert: das Deviatoric Hardening Modell (im Folgenden als DH bezeichnet); eine vereinfachte und leicht angepasste Version des Hardening-Soil Modells (SHS) und das Drucker-Prager-Cap Modell (DPC). Alle reproduzieren das Verhalten, welches unter den Bedingungen von konsolidiert-drainierten (KD) oder konsolidiert-undrainierten (KU) Triaxialversuchen beobachtet wird, besser als das in der Praxis weit verbreitete MC-Modell.

Basierend auf diesen Stoffgesetzen wird das Gebirgsverhalten um einen Tunnel anhand einer Reihe von Rand- und Anfangswertproblemen mit sukzessiv steigendem Komplexitätsgrad analysiert. Es wird anhand der Resultate von grossen Versuchsreihen an Kakiritproben aus dem Gotthard-Basistunnel aufgezeigt, dass die Annahme eines konstanten Elastizitätsmoduls im MC-Modell eine bedeutende Quelle von Unsicherheit bei tunnelstatischen Berechnungen darstellt: wegen der experimentell beobachteten, spannungsabhängigen Steifigkeit und der grossen Variation der effektiven Spannungen rund um den Hohlraum (insbesondere unter drainierten oder trockenen Bedingungen) ist es unklar, wie ein adäquater Elastizitätsmodul gewählt werden soll. (Diese Schwäche des MC-Modells ist weniger bedeutsam für das undrainierte Gebirgsverhalten, weil die effektiven Spannungen rund um den Hohlraum in diesem Fall weniger stark variieren.) Anhand der Ergebnisse einer breit angelegten, vergleichenden Parameterstudie wird eine einfache Beziehung zur Bestimmung eines adäquaten Elastizitätsmoduls für das MC-Modell vorgeschlagen. Mit diesem Elastizitätsmodul liefert das MC-Modell Tunnelkonvergenzen, die praktisch gleich den Ergebnissen verfeinerter

Stoffgesetze sind. Letztere geben das bei Triaxialversuchen beobachtete Verhalten sehr gut wieder und dürfen daher als Massstab für die Qualität der Prognosen des MC-Modells betrachtet werden.

Anhand von Modellrechnungen, die mit den Parametern der weichen Brekzien des geplanten Gibraltar-Tunnels durchgeführt wurden, wird gezeigt, dass das MC-Modell zu unsicheren Vorhersagen des kurzfristigen Gebirgsverhaltens führt, weil es die undrainierte Festigkeit überschätzt. Das SHS- und das DPC-Modell liefern zuverlässigere Prognosen und trotz der unterschiedlichen Verfestigungsmechanismen (deviatorische bzw. volumetrische Verfestigung) ähnliche Ergebnisse. Die Resultate des kurzzeitigen Gebirgsverhaltens weisen darauf hin, dass der Tunnelbau durch die Brekzien anspruchsvoll sein wird: wegen der niedrigen Scherfestigkeit, des hohen in-situ Porenwasserdrucks und des nicht-dilatanten Verhaltens ist eine sehr starke Druckhaftigkeit zu erwarten. Es wird aufgezeigt, dass unter solchen Bedingungen die Gebirgskonsolidation durch vorausseilende Drainagemassnahmen eine wirksame Bauhilfsmassnahme darstellt, sofern die von der Gebirgsdurchlässigkeit abhängige Vorlaufzeit sichergestellt werden kann.