



Experimentelle Bestimmung von nichtlinearen Spannungsgrenzbedingungen

Katharina Bergholz

Einleitung

Eine der üblichsten Spannungsgrenzbedingungen ist das Kriterium nach Mohr-Coulomb, welches sich zweier konstanter Parameter bedient: dem inneren Reibungswinkel φ' und der Kohäsion c' .

$$\tau = \sigma' \tan \varphi' + c'$$

Dieses Bruchkriterium hat sich aufgrund seiner Einfachheit in der geotechnischen Praxis durchgesetzt, da es das tatsächliche Bodentragverhalten hinsichtlich Schubbelastung in vielen Anwendungsfällen zufriedenstellend approximiert. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass diese lineare Grenzbedingung die Scherfestigkeit im Bereich geringerer Spannungen überschätzt. Der Einfluss von Druckniveau, Dichte und Vorbelastung führt zur Krümmung der Spannungsgrenzbedingung und folglich zu einem nichtlinearen Verlauf. Die Anwendung von material-spezifischen Konstanten φ' und c' auf das gesamte Spannungsspektrum ist demnach ungeeignet; es handelt sich um zustandsabhängige Parameter.

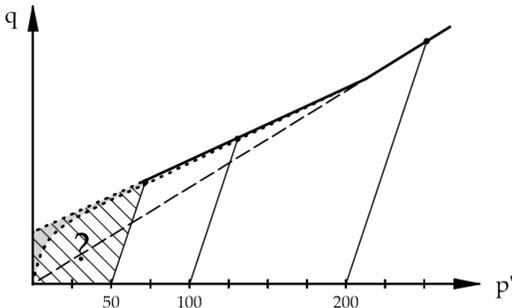


Abb. 1: Problembereich konventioneller Triaxialversuche

Experimente

Der experimentelle Aufwand zur Erzeugung eines dreiaxialen Versagensspannungszustands auf niedrigem Niveau übersteigt den von Standardlaborversuchen. Zur Untersuchung des betreffenden Spannungsbereiches sind konventionelle Triaxialversuche ungeeignet, da sie nur bei Zelldrücken über 50 kPa zum Einsatz kommen und die Standard-Spannungspfade so nicht in den Niederdruckbereich vordringen können (Abb. 1). Daher müssen Spannungspfade mit alternativen Verläufen erzeugt werden.

Lastgesteuerte Triaxialversuche

Eine Abfolge von elementaren Triaxialpfaden, bei denen jeweils nur eine der Spannungs-komponenten modifiziert wird, bildet einen zusammengesetzten Spannungspfad: isotrope Konsolidation – Scherung – Entlastung durch Reduktion des effektiven Seitendrucks. Die Axialkraft wird durch Aufbringen von Totlasten erhöht, die Entlastung erfolgt durch einen graduellen Anstieg der Porenwasserdrücke, Abb. 2 (a).

Spannungspfadgesteuerte Triaxialversuche

Die Bodenprobe wird zur Erhöhung der Axialspannung mit einer konstanten Verformungsrate gestaucht. Dabei wird der Seitendruck computergesteuert so angepasst, dass der Spannungspfad einem beliebigen Neigungswinkel folgt, Abb. 2 (b).

Die beschriebenen unkonventionellen (drainierten) Triaxialversuche wurden eingesetzt, um den Einfluss von

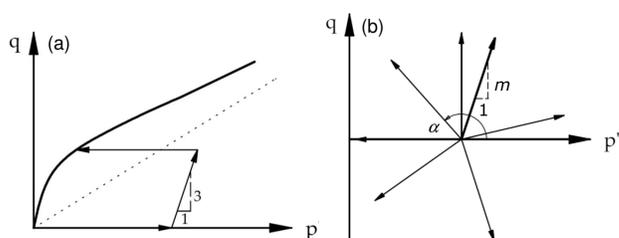


Abb. 2: Spannungspfade lastgesteuerter (a) und spannungspfadgesteuerter (b) Triaxialversuche

Druckniveau und Vorbelastung auf die Gestalt der Spannungsgrenzbedingung zu untersuchen. Dazu wurden Deviatorspannung und Überkonsolidierungsverhältnis (OCR) unabhängig voneinander variiert. Zur Herstellung der unterschiedlichen Überkonsolidierungsgrade wurden alle Bodenproben des stark schluffigen Tons auf 800 kPa vorbelastet und auf 50, 100 bzw. 200 kPa entlastet, so dass OCR von 4, 8 bzw. 16 entstanden. Nur bei einer Probe wurde die Überkonsolidierungsspannung zu 200 kPa gewählt, so dass bei Entlastung auf 50 kPa ein OCR von 4 erzeugt wurde. Im Anschluss folgten die entsprechenden Scherphasen. Rahmenscherversuche und CU-Versuche dienten zur Ermittlung des Reibungswinkels normalkonsolidierter Bodenproben.

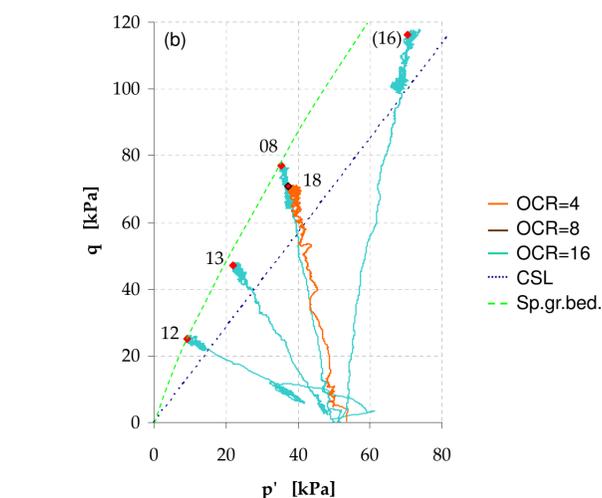
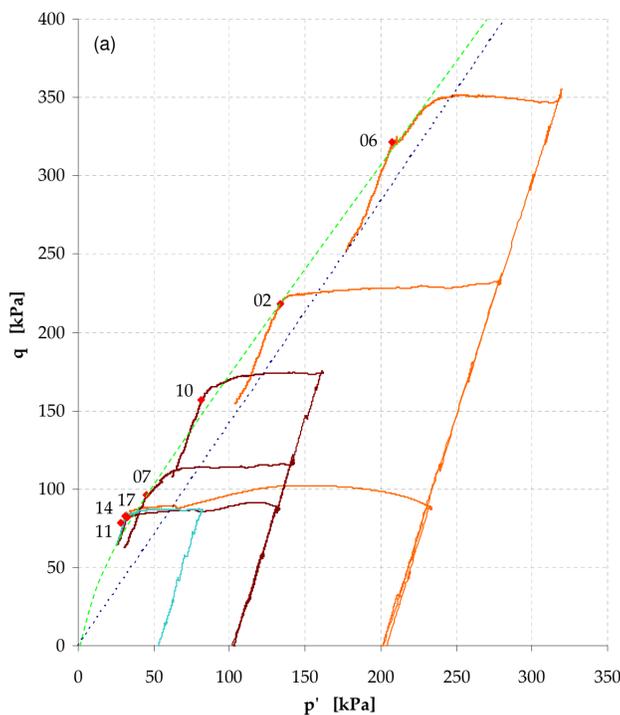


Abb. 3: Spannungspfade der unkonventionellen Triaxialversuche, (a) lastgesteuert, (b) spannungspfadgesteuert

Ergebnisse

Die Spannungspfade aller unkonventionellen Triaxialversuche sind in Abbildung 3 zu sehen. Die Versagenspunkte lassen sich durch eine Grenzfunktion approximieren, die eine deutliche Krümmung zum Koordinatenursprung hin aufweist. Diese wird auch durch die Abnahme des maximal mobilisierten Reibungswinkels mit Anstieg der effektiven mittleren Spannung reflektiert (Abb. 4). Eine Differenzierung der Spannungsgrenzbedingung hinsichtlich des Überkonsolidierungsgrades auf der Grundlage der experimentellen Daten ist jedoch nicht möglich.

Lediglich der Versuch 18, mit der kleineren Überkonsolidierungsspannung, liegt abseits der Grenzbedingung – er

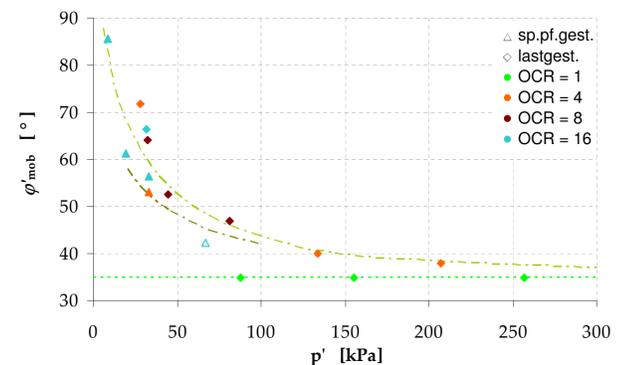


Abb. 4: Entwicklung des maximal mobilisierten Reibungswinkels mit der effektiven mittleren Spannung

weist eine geringere Scherfestigkeit auf. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Überkonsolidierungsspannung verantwortlich ist für die Ausprägung der Nichtlinearität der Spannungsgrenzbedingung.

Werden die unkonventionellen Triaxialversuche hinsichtlich der Bruchstauchungen miteinander verglichen, so kann beobachtet werden, dass die Bodensteifigkeit mit steigendem Überkonsolidierungsgrad zunimmt (Abb. 5). Dabei ist zu beachten, dass die Verformungen der lastgesteuerten Versuche die der spannungspfadgesteuerten übersteigen. Die Deformationen sind demnach vom Spannungspfad abhängig.

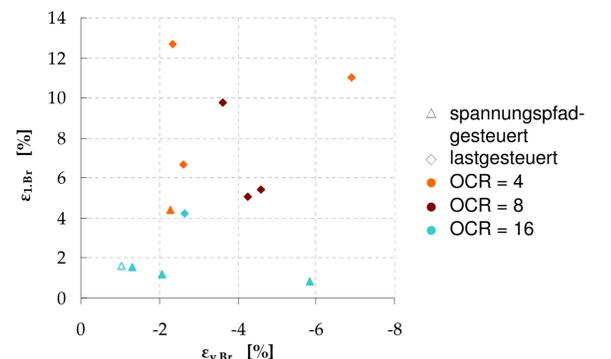


Abb. 5: Bruchdeformationen aller unkonventionellen Triaxialversuche

Zusammenfassung

Experimentelle Untersuchungen haben die theoretisch bekannte Tatsache zustandsabhängiger Scherparameter belegt. Unter Ausnutzung unkonventioneller Triaxialversuchsmethoden ist es gelungen Punkte der Spannungsgrenzbedingung im Bereich niedriger Spannungen zu bestimmen. Die Ergebnisse lassen folgende Schlüsse zu:

- Nichtlinearität der Spannungsgrenzbedingung
- Zunahme der Krümmung mit steigender Vorbelastung
- Abhängigkeit der Deformationen vom Spannungspfad
- Zunahme der Bodensteifigkeit durch Vorbelastung

Ausblick

Der Zusammenhang zwischen Vorbelastung und Ausprägung der Nichtlinearität konnte noch nicht vollständig geklärt werden. Die Differenzierung der Faktoren Überkonsolidierungsspannung und -grad sowie der Einfluss des Spannungspfades sollten Gegenstand weitergehender Untersuchungen werden.

Projekt

Diplomarbeit

Wissenschaftliche Betreuung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, TU Dresden
Mag. Vladislava Herbstová, TU Dresden

Abgabe

Oktober 2009