

Explizites Materialmodell für die Akkumulation in nichtbindigen Böden unter zyklischer Belastung

Dipl.-Ing. Torsten Wichtmann, Ruhr-Universität Bochum

Die Abschätzung der Verformungsakkumulation infolge zyklischer Belastung gewinnt insbesondere durch den Bau neuer Hochgeschwindigkeitstrassen für schienengebundene Verkehrssysteme, Off-shore Gründungen, die durch Wind oder Wellen belastet werden, sowie die Entwicklung effizienter Verdichtungsmethoden an Bedeutung. Die vorhandenen Materialmodelle für die Akkumulation unter zyklischer Belastung sind größtenteils auf Spezialfälle beschränkt, berücksichtigen nicht alle relevanten Einflussparameter oder sind zu stark vereinfacht. Am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum wurde daher auf der Basis zahlreicher zyklischer Triaxialversuche und zyklischer multiaxialer Einfachscherversuche ein Akkumulationsmodell für nichtbindige Böden entwickelt.

In Finite Elemente Simulationen mit diesem Materialmodell wird zunächst ein repräsentativer Zyklus mit einem geeigneten Stoffmodell für monotone Belastungen (z.B. Hypoplastizität erweitert um intergranulare Dehnungen) inkrementell berechnet, um aus dem aufgezeichneten Dehnungspfad die Dehnungsamplitude zu ermitteln. Die anschließende explizite Berechnung liefert in jedem Inkrement die Akkumulation infolge eines Paketes von ΔN Zyklen direkt mit Hilfe experimentell gewonnener Formeln. Die konstitutive Gleichung des Modells ist wie folgt formuliert (**T**: Spannungstensor, **D**: Dehnungsrate, **E**: elastische Steifigkeit):

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{E} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{acc}) \quad \mathbf{D}^{acc} = f_{ampl} \dot{f}_N f_p f_Y f_e f_\pi \mathbf{m}$$

Dabei berechnet sich die Akkumulationsrate \mathbf{D}^{acc} aus dem Produkt sechs skalarer Teilfunktionen f_i und einer tensoriellen Akkumulationsrichtung \mathbf{m} . Die Teilfunktionen f_i berücksichtigen jeweils entkoppelt einen Einflussparameter, nämlich die Dehnungsamplitude (f_{ampl}), die Zyklenanzahl bzw. die zyklische Vorbelastungsgeschichte (f_N), den mittleren Druck (f_p), die Deviatorspannung (f_Y) sowie die Porezahl (f_e) und die Polarisation der Dehnungsamplitude während der zurückliegenden Zyklen (f_π). Das Materialmodell verwendet eine spezielle Definition der Dehnungsamplitude \mathbf{A}_e . Diese ergibt sich als vierstufiger Tensor aus geeigneten Projektionen der im inkrementell berechneten Zyklus aufgezeichneten sechsdimensionalen Dehnungsschleife [1,2]. Weiterhin speichert der *back polarization* Tensor π die Polarisation dieser Dehnungsschleife (Norm von \mathbf{A}_e) während der zurückliegenden Zyklen. Die Funktion f_N setzt sich zusammen aus einem Anteil f_N^A , der eine sog. strukturelle Akkumulation beschreibt, und einem Anteil f_N^B , der eine Grundgeschwindigkeit darstellt. Die bisher akkumulierte strukturelle Akkumulation $\varepsilon^{acc A}$ wird als Zustandsvariable zur Beschreibung der zyklischen Vorbelastungsgeschichte verwendet.

In den durchgeführten zyklischen Triaxialversuchen [5,6,7] wurde der mittlere Spannungszustand \mathbf{T}^{av} (Kompression und Extension), der Spannungspfad um \mathbf{T}^{av} (eindimensionale sowie ellipsenförmige Pfade in der p-q-Ebene, variierende Neigungen im Fall der 1-D-Pfade) sowie die Anfangslagerungsdichte variiert. Mit zunehmender Zyklenanzahl nimmt die bleibende Dehnung $\varepsilon^{acc} = \|\varepsilon^{acc}\|$ zu, während eine abnehmende Akkumulationsrate beobachtet wird. Dabei ist insbesondere für Zyklenanzahlen $N > 10.000$ ein überlogarithmischer Anstieg von ε^{acc} mit N festzustellen. Die Intensität der Akkumulation ist proportional zum Quadrat der Dehnungsamplitude, d.h. $\varepsilon^{acc} \sim (\varepsilon^{ampl})^2$. Der deviatorische Anteil der Dehnungsschleife trägt stärker zur Intensität der Akkumulation bei als die volumetrische Komponente.

Mit zunehmendem deviatorischen Anteil des mittleren Spannungszustandes wird auch die Akkumulation deviatorischer. Bei einem isotropen \mathbf{T}^{av} ist eine rein volumetrische Akkumulation zu beobachten, im Fall von \mathbf{T}^{av} auf der kritischen Grenzgerade mit $q/p = M_c(\varphi_c)$ ist sie rein deviatorisch. Unterhalb der kritischen Grenzgerade erhält man kontraktantes, oberhalb dilatantes Materialverhalten. Die experimentell ermittelten Akkumulationsrichtungen stimmen insbesondere für größere Zyklenanzahlen ($N > 10.000$) mit den Fließrichtungen monotoner Stoffmodelle (Hypoplastizität, modifiziertes Cam-clay) überein. Die Intensität der Akkumulation nimmt mit steigendem mittlerem Druck (bei ansonsten identischen Randbedingungen) ab und mit zunehmendem deviatorischen Spannungsanteil zu. Ein größerer Porenraum führt zu einer stärkeren Akkumulation. Ein Einfluss der Porenzahl und der Dehnungsamplitude auf die Akkumulationsrichtung konnte in den Versuchen hingegen nicht festgestellt werden.

Zyklische multiaxiale Einfachscherversuche, in denen die Richtung der zyklischen Scherung nach einer bestimmten Zyklenanzahl gewechselt wird, zeigen eine Beschleunigung der Akkumulation infolge dieser Änderung der Dehnungspolarisation. Dieser Effekt wird im Materialmodell durch den back polarization – Tensor π und die Funktion f_π berücksichtigt. Kreisförmige Scherungen führen zu einer in etwa doppelt so großen Akkumulation verglichen mit eindimensionalen Dehnungspfaden mit identischer maximaler Scherdehnung, d.h. der vom Dehnungspfad während eines Zyklus umschlossene Dehnungsraum beeinflusst die Akkumulation. Diese experimentelle Beobachtung erfordert die Definition der multiaxialen Amplitude \mathbf{A}_c .

Die Finite Elemente Berechnung eines Zentrifugen-Modellversuches (zyklisch belastetes Streifenfundament) mit dem entwickelten Materialmodell ergab eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten und der experimentell beobachteten Setzung.

Für die Simulation realer Probleme mit zyklischer Belastung ist die Kenntnis der zyklischen Vorbelastungsgeschichte des in situ anstehenden Bodens von großer Bedeutung. Entsprechende Methoden werden zur Zeit entwickelt [3,4].

Literatur:

- (1) Niemunis, A., Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th. (2003): "Compaction of freshly pluviated granulates under uniaxial and multiaxial cyclic loading", XIIIth European Conference On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnical problems with man-made and man-influenced grounds, Prag, August 2003, S. 855 – 860.
- (2) Niemunis, A., Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th. (2004): "Explicit accumulation model for cyclic loading", International Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena (CBS04), Bochum, März/April 2004, S. 65 - 76.
- (3) Triantafyllidis, Th., Wichtmann, T., Niemunis, A. (2004): "On the determination of cyclic strain history", CBS04, Bochum, März/April 2004, S. 321 - 332.
- (4) Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th. (2004): "Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: cyclic and dynamic torsional prestraining", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, S. 127 – 147.
- (5) Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, Th. (2004): "Accumulation of strain in sand due to cyclic loading under drained triaxial conditions", Soils and Foundations (zur Veröffentlichung eingereicht).
- (6) Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, Th. (2004): "Strain accumulation in sand due to drained uniaxial cyclic loading", CBS04, Bochum, März/April 2004, S. 233 – 246.
- (7) Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, Th. (2004): "The effect of volumetric and out-of-phase cyclic loading on strain accumulation", CBS04, Bochum, März/April 2004, S. 247 – 256.