

## О ПУТЯХ НАГРУЖЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ НЕОГРАНИЧЕННЫЕ СДВИГИ БЕЗ ПЕРЕХОДА В ЗАПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ

О. А. Микенина, В. П. Косых\*, А. Ф. Ревуженко

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

*\*E-mail: v-kosykh@yandex.ru*

Как известно, при сдвигах  $\gamma$ , больших некоторого критического значения  $\gamma^*$ , геоматериалы, как правило, переходят в запредельное состояние. Оно характеризуется появлением ниспадающей ветви на диаграмме деформирования, трещин, в сыпучих материалах – локализацией сдвигов и т. д. Однако так происходит не всегда. В экспериментах на сложное нагружение с непрерывным поворотом осей тензора деформаций было обнаружено, что сыпучий материал может испытывать большие деформации сдвига  $\gamma \gg \gamma^*$  и при этом не проявлять никаких свойств запредельного состояния [1]. Сложное нагружение осуществлялось в условиях плоской деформации. На границе эллиптической области задавался вектор скорости, постоянный по модулю и ориентированный вдоль касательной к эллипсу. Все первоначально прямолинейные волокна, проходящие через центр эллипса, в процессе нагружения переходят в спиральные кривые, причем длина их и деформация области неограниченно увеличиваются. При этом никаких признаков запредельного состояния не наблюдалось. В чем причина? По-видимому, причина связана не столько с поворотом осей тензора деформаций, сколько с циклическим характером деформирования: материальное волокно многократно проходит через большую и малую оси эллипса. На эти циклы накладывается остаточная деформация. В целом нагружение можно отнести к типу «шаг – вперед, 0.9 шага назад...». Значит, если подобное нагружение реализовать без поворота осей тензора деформаций, то перехода в запредельное состояние можно будет избежать. Указанная программа была реализована на приборе однородного сдвига.

Вначале определялся критический угол сдвига  $\gamma^*$  при монотонном сдвиге образца. При сдвиге  $\gamma^* = 5^\circ - 6^\circ$  на диаграмме  $\tau/\sigma - \gamma$  появляется ниспадающая ветвь и, несколько позже, на поверхности материала проявляются линии скольжения. Затем для новых образцов осуществлялся сдвиг в прямом направлении на угол  $4^\circ$ , затем назад на угол  $3.6^\circ$ , далее вновь вперед на  $4^\circ$  и назад на  $3.6^\circ$  и т.д., т.е. по программе «шаг вперед – 0.9 шага назад». В этих экспериментах общий сдвиг достигал  $20^\circ$  и при этом локализация сдвигов и ниспадающие ветви на диаграммах  $\tau/\sigma - \gamma$  не появлялись.

Было проведено численное моделирование приведенных процессов деформирования сыпучих материалов методом дискретных элементов. Получено качественное соответствие результатов расчетов и экспериментов. Таким образом, сыпучий материал, подвергнутый знакопеременным сдвигам с незамкнутыми циклами нагружения, может накапливать неограниченные деформации без перехода в запредельное состояние.

### Литература

1. Ревуженко А.Ф. Механика сыпучей среды. Новосибирск : Офсет. 2003. – 373 с.

## ON LOADING PATHS OF GRANULAR MEDIA THAT PROVIDE UNLIMITED SHEAR WITHOUT TRANSITION TO A POST-LIMITED STATE

O. A. Mikenina, V. P. Kosykh\*, A. F. Revuzhenko

*Chinakal Institut of Mining of Siberian Branch of Russian academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

*\*E-mail: v-kosykh@yandex.ru*

As is well known, under shear  $\gamma$  greater than a certain critical value  $\gamma^*$ , geomaterials typically transition to a post-limited state. This is characterized by the appearance of a softening branch on the stress-strain diagram, cracks, and, in granular materials – localized shear, etc. However, this is not always the case. In experiments on complex loading with continuous rotation of the strain tensor axes, it was found that granular materials be

can deformed by shear large than critical value  $\gamma \gg \gamma^*$  without any post-limited properties. Complex loading was performed under plane strain conditions. At the boundary of the elliptical region, a velocity vector was specified, constant in magnitude and oriented along the tangent to the ellipse. All initially rectilinear fibers passing through the center of the ellipse transform into spiral curves during loading, with their length and the deformation of the region increasing indefinitely. However, no signs of a post-limited state were observed. What is the cause? Apparently, the cause is not so much the rotation of the strain tensor axes, but rather the cyclic nature of the deformation: the material fiber repeatedly passes through the major and minor axes of the ellipse. A residual deformation is superimposed on these cycles. Overall, the loading can be classified as «one step forward, 0.9 steps back...». This means that if such loading is implemented without rotation of the strain tensor axes, the transition to a beyond-limit state can be avoided.

The specified program was implemented on a uniform shear device. First, the critical shear angle  $\gamma^*$  was determined for monotonic shear of the specimen. At a shear of  $\gamma^* = 5^\circ\text{--}6^\circ$ , a softening branch appears on the  $\tau/\sigma - \gamma$  diagram, and, somewhat later, slip lines appear on the material surface. New specimens were then subjected to forward shear of  $4^\circ$ , then backward shear of  $3.6^\circ$ , then forward shear of  $4^\circ$  and backward shear of  $3.6^\circ$ , and so on, using the «one step forward – 0.9 steps back» program. In these experiments, the total shear reached  $20^\circ$ , and no shear localization or softening appeared on the  $\tau/\sigma - \gamma$  diagrams. Numerical modeling of the described deformation processes of granular materials was performed using the discrete element method. Qualitative agreement between the calculated and experimental results was obtained.

Thus, granular materials subjected to alternating shear with open loading cycles can accumulate unlimited strains without reaching a transient state.