

## **$K_0$ -консолидация в камерах трехосного сжатия**



Статья продолжает цикл публикаций, посвященных возможностям современного лабораторного оборудования в области инженерно-геологических изысканий. Рассматривается определение параметра анизотропного напряженного состояния  $K_0$  в приборах трехосного сжатия, в том числе методика, включенная в проект ГОСТ 12248.3. Без данного параметра невозможно воспроизведение исходного напряженного состояния, как в лабораторном образце, так и в массиве при численном моделировании.

**Мирный Анатолий Юрьевич**

Старший научный сотрудник Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.т.н.

**Идрисов Илья Хамитович**

Генеральный директор ООО «НПП «Геотек», к.т.н.

Постоянное действие вертикальных напряжений в массиве грунта приводит к формированию бокового распора – горизонтальных напряжений, пропорциональных вертикальным. В зависимости от величины вертикальных напряжений боковой распор может достигать значительных величин, что требует обязательного учета этой нагрузки при проектировании подземных сооружений, подпорных стен, выработок в горнодобывающей промышленности. В простейшем случае связь между напряжениями, действующими в вертикальном и горизонтальном направлении, предполагается линейной, и выражается с помощью коэффициента бокового давления грунта  $K_0$  по аналогии со сплошными телами:

$$K_0 = \xi = \frac{\sigma_x}{\sigma_z}.$$

Для нормально уплотненных грунтов вертикальные напряжения в основании превышают горизонтальные, и значение  $K_0$  меньше 1 (обычно в этом случае он обозначается как  $K_0^{nc}$  - то есть коэффициент бокового давления нормально уплотненного грунта). В этом случае могут быть получены аналитические решения с использованием различных предпосылок. Например, широко известна гипотеза А.Н. Динника (1925), предложенная на основании решения теории упругости. Для нормально уплотненных пылевато-глинистых грунтов при отсутствии радиальных перемещений (в условиях компрессионного сжатия) была предложена зависимость от коэффициента относительной поперечной деформации:

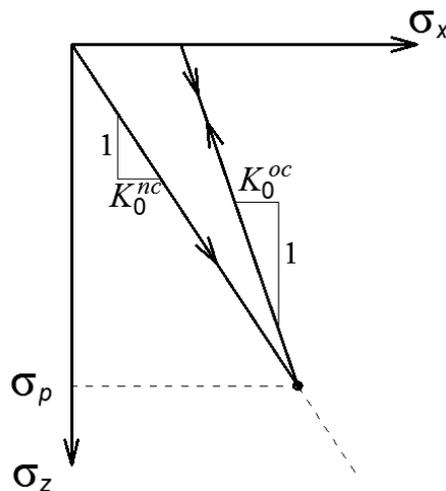
$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}.$$

Еще одно распространенное решение для несвязных грунтов было получено J. Jáku исходя из равенства угла естественного откоса и угла трения. Рассмотрев задачу равновесия гипотетических тел скольжения в массиве, автор получил формулу, позволяющую с достаточной точностью определять коэффициент бокового давления для рыхлых и нормально уплотненных песков:

$$K_0^{nc} = (1 - \sin \varphi) \frac{1 + \frac{2}{3} \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \approx (1 - \sin \varphi).$$

Все данные решения справедливы исключительно для первичного нагружения нормально уплотненных грунтов, так как только в этом случае применимы решения теории упругого сплошного тела. Тем не менее, дисперсные грунты отличаются от сплошных тел отсутствием жестких связей между частицами, и с точки зрения теоретической механики относятся к механизмам, а не к твердым телам: отдельные частицы имеют возможность необратимого взаимного смещения. При первичном нагружении частицы вдавливаются в поры, расклинивая соседние частицы, возникает горизонтальное давление. Но при разгрузке трение между частицами не позволяет горизонтальным напряжениям полностью рассеяться - даже при полном снятии вертикального напряжения сохраняется напряжение горизонтальное.

По мере развития переуплотнения соотношение между напряжениями будет меняться (горизонтальное напряжение снижается медленнее вертикального), и в результате значение  $K_0$  может стать равным и даже превысить 1 (для переуплотненных грунтов параметр обозначается  $K_0^{oc}$ ). При этом происходит инверсия главных напряжений: большее главное напряжение становится горизонтальным, и коэффициент бокового давления  $\xi$  все равно не превышает 1.



В зависимости от значения коэффициента переуплотнения  $OCR$  и вида грунта используются многочисленные эмпирические формулы. Наибольшее распространение имеет формула, предложенная Р. Mayne и F. Kulhawy:

$$K_0^{oc} = (1 - \sin \varphi) OCR^{\sin \varphi} \approx (1 - \sin \varphi) \sqrt{OCR}.$$

Разумеется, при использовании эмпирических решений следует помнить о границах их применимости. В частности, использование параметров, определенных косвенными методами по эмпирическим зависимостям допускается при проектировании только сооружений, относящихся к I (простой) геотехнической категории.

Напомним, что в отличие от большинства конструкционных материалов, на момент проведения геотехнического расчета основание уже испытывает действие некоторых напряжений. При этом деформациями, вызванными этими напряжениями, обычно пренебрегают. В этом случае, отношение между вертикальным и горизонтальным напряжением носит название «коэффициент бокового давления покоя», то есть в отсутствие деформаций. Если же под действием напряжений грунт деформируется, то есть идет активное нагружение, коэффициент бокового давления может иметь другую величину. Таким образом, параметр  $K_0$  характеризует соотношение между ортогональными напряжениями (вертикальными и горизонтальными) в основании, а при повороте осей главных напряжений не следует за ними. Это делает его важнейшим параметром основания, необходимым для корректного определения параметров в режиме анизотропной консолидации, о которой рассказывалось ранее.

Коэффициент бокового давления может быть определен отдельно в рамках специальных испытаний в трехосных приборах различных конструкций. Данный режим испытаний известен, фактически, с момента разработки установок трехосного сжатия (A. Bishop, D. Henkel, 1957), по умолчанию включается в предустановленные схемы испытаний, однако в отечественной практике до недавнего времени не находил широкого применения. По своей сути метод очень близок к испытаниям компрессионного сжатия, но выполняется в трехосном приборе. Роль жестких недеформируемых стенок в данном случае играет несжимаемая жидкость, которой заполнена камера. В ходе постепенного увеличения вертикального давления будет увеличиваться и горизонтальное давление образца на воду, как следствие, давление в жидкости. В результате может быть определено приращение горизонтального давления и коэффициент бокового давления  $K_0$ .

В основе метода лежит определение коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя как соотношения между напряжениями, не вызывающими деформаций – такое

напряженное состояние и будет соответствовать природному. При современном уровне развития испытательного оборудования данный метод несколько усложняется технически, так как необходимо учитывать жесткость всех элементов установки и компенсировать ее недостаток в ходе опыта. В связи с этим порядок испытаний различается для камер типа А и типа Б.

$K_0$ -консолидация в камерах типа Б выполняется легче в связи с их конструктивными особенностями. Испытание проводится при полном водонасыщении образцов и закрытом дренаже, при этом идет измерение порового давления. Объем камеры подключен к поршневому нагнетателю. К верхнему штампу прикладывается ступень давления 25 кПа, что вызывает радиальное расширение образца и вытеснение жидкости из камеры, которое компенсируется нагнетателем. При этом есть возможность учета собственной жесткости оборудования, так как уровень давления известен: паразитные объемные деформации системы компенсируются автоматически на основании тарировочной зависимости. После стабилизации напряжений операция повторяется вплоть до достижения величины вертикального давления, соответствующей расчетному значению. Соотношение между горизонтальными и вертикальными напряжениями позволяет определить естественное значение коэффициента бокового давления. Данный метод разработан и апробирован в лаборатории ГК «Петромоделлинг» при участии ООО НПП «Геотек».

Камера типа Б при использовании в таком режиме позволяет также моделировать переуплотнение: при увеличении вертикального давления вплоть до исторического давления  $\sigma_p$  и последующей разгрузке до современной величины бытового давления соотношение между горизонтальным и вертикальным напряжениями меняется, что позволяет оценить фактическое горизонтальное напряжение с учетом переуплотнения. Это является ценным преимуществом такого режима испытаний. После выполнения  $K_0$ -консолидации возможно продолжение опыта с тем же образцом по любой схеме испытания.

Режим  $K_0$ -консолидации в камерах типа А стандартной конструкции возможен только при значении  $K_0 \leq 1$ . Для выполнения опыта с сильно переуплотненными ( $K_0 > 1$ ,  $OCR > 3$ ) грунтами необходима жесткая фиксация штампа на штоке. Определение коэффициента бокового давления выполняется путем ступенчатого увеличения давления в камере прибора, система дренажа при этом подключена к системе измерения объема (поршневому нагнетателю). Величина ступени составляет 25 кПа. В ходе приложения ступени всестороннего давления путем изменения вертикального давления компенсируется возникающая объемная деформация образца таким образом, чтобы объемная деформация  $\varepsilon_v$  отсутствовала. После стабилизации деформаций операция повторяется вплоть до достижения величины вертикального давления, соответствующей расчетному значению. В более сжатом виде обе методики изложена в Приложении И готовящейся редакции ГОСТ 12248.3, что позволит в ближайшем будущем применять ее в производственной деятельности.

Проведение испытаний трехосного сжатия в режиме  $K_0$ -консолидации – единственный на данный момент апробированный метод определения коэффициента бокового давления покоя. Без данного параметра, в свою очередь, невозможно воспроизведение исходного напряженного состояния, как в лабораторном образце, так и в массиве при численном моделировании.

ООО НПП «Геотек» предлагает автоматизированный испытательный комплекс АСИС Про для осесимметричных трехосных испытаний образцов грунта в режиме  $K_0$ -консолидации. В состав комплекса входят камеры объемного (тип А) и радиального (тип Б) сжатия для

создания трехосного напряженного состояния, а также необходимое оборудование для создания вертикального силового воздействия, управления камерным и противодавлением с контролем жесткости системы. Испытания проводятся в автоматизированном режиме с контролем всех параметров испытания в режиме реального времени.

Более подробную техническую информацию можно получить у специалистов компании или на сайте [www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru).

### **Список литературы**

1. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
2. ГОСТ Р 56363-2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
3. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
4. ISO 17892-9:2018. Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils.
5. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. Исследования анизотропного поведения грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Состояние вопроса. Части 1-2. Ж. Геотехника, №№ 5-6, 2017.
6. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты. Ж. Инженерный работник, № 7, 1925.
7. Bishop A.W., Henkel D.J. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. London: Edward Arnold, 1957.
8. Jáky J. The coefficient of earth pressure at rest. Journal for Society of Hungarian Architects and engineers, 1944.
9. Mayne P., Kulhawy F.  $K_0$ -OCR Relationships in Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982.