



## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПРИРОСТА НАГРУЗКИ И ИСТОРИИ НАГРУЗКИ НА РЕАКЦИЮ ПОРОДЫ

К. ИВАНДИЧ, Б. СОЛЬДО – Университет г. Загреб, Хорватия.

Описан метод расчета реакции породы, с помощью которого через фиктивные кривые напряжения определяются диаграммы напряжение – деформация с учетом нелинейного поведения породы. Расчеты проведены инкрементально и показывают, что в указанной модели породы (модифицированный Cam Clay) с учетом влияния коэффициента переплотнения грунта OCR число шагов расчета может оказывать влияние на величину предельной нагрузки и конечную деформацию породы. Подчеркивается простота и практическая значимость метода, который позволяет моделировать сложные процессы в породе.

### ВВЕДЕНИЕ

В теории пластичности [2] дается определение идеального упругопластического материала, а также материала с повышенным или пониженным напряжением, при котором достигается предел текучести  $\sigma_t$ , независимо от того, идет речь о линейном (рис. 1) или нелинейном законе.

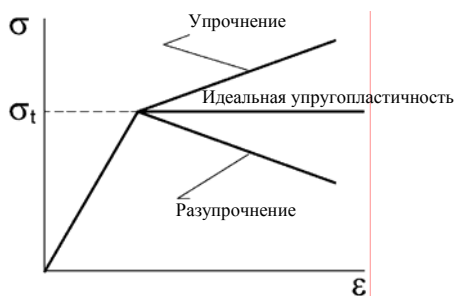


Рис. 1. Упругопластические диаграммы

Общая деформация материала состоит из упругой и пластической компонент:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p. \quad (1)$$

Упругая компонента деформации может быть выражена через мгновенную величину давления и модуль Юнга материала:

$$\varepsilon^e = \sigma/E. \quad (2)$$

Основная задача состоит в определении величины пластической компоненты деформации  $\varepsilon^p$ . Величина и направление этой компоненты зависят от критерия текучести, который определяется плоскостью текучести  $f_t$ , а также от принятого закона поведения материала после достижения предела текучести, т. е. от закона течения материала. Если рассматривать состояние давления на поверхности текучести, создаются только упругие деформации. В этом случае материал идеально упруг и имеет место закон Гука. При постепенном увеличении силы происходит одновременное возникновение упругих и пластических деформаций.

Если предположить, что направление течения определяется вектором  $h$ , то можно записать следующее выражение для величины прироста пластической деформации:

$$d\varepsilon^p = d\lambda h, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – скалярная величина, определяющая численное значение пластической деформации материала (определяется из условия состояния давления на данной плоскости текучести). Вектор  $h$  зависит от состояния давления, определяется как градиент скалярной функции пластического потенциала  $g$  и может быть записан как

$$h = \partial g / \partial \sigma. \quad (4)$$

Направление пластического течения всегда перпендикулярно плоскости пластического потенциала, которая определяется функцией пластического материала  $g$ . Классический подход к определению скалярного поля  $g$  для идеально пластического материала состоит в предположении, что пластическое течение происходит в том направлении, которое приводит к максимальной диссипации работы вследствие активизации пластических деформаций (пластическая работа). Упомянутая компонента работы есть необратимая часть общей работы, произведенной за время приложения и снятия нагрузки.

Из этого предположения следует, что вектор прироста пластической деформации должен быть перпендикулярен вектору прироста давления. Состояние давления определяется на плоскости текучести. Это означает, что вектор прироста давления в основном тангенциален к плоскости текучести. Иначе говоря, вектор прироста пластической деформации перпендикулярен плоскости текучести и в этом случае является функцией пластического потенциала и одновременно функцией текучести материала, таким образом,  $g = f$ . Закон течения, при котором  $g = f$ , называется ассоциированным законом течения. Когда  $g \neq f$ , речь идет о неассоциированном законе течения. Для идеального упругопластического материала ассоциированный закон течения максимизирует работу, которая производится при пластической деформации, а для материала с упрочнением или разупрочнением это возможно, но не должно быть так.

### 1. ЗАКОН КУЛОНА–МОРА

Закон Кулона–Мора определяется функцией следующего вида (рис. 2):

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $c$  – сцепление.

Выражение (5) задает направление в плоскости  $\sigma$ – $\tau$ . Так как одновременно оно задает и плоскость текучести, речь идет об ассоциированном законе течения. Можно показать, что для несвязного материала ( $c = 0$ ) ассоциированный закон течения неприменим, ибо диссипация пластической работы равна нулю, что

физически невозможно [5]. В таком случае используется неассоциированный закон течения, и выражение для плоскости текучести имеет вид

$$f = \tau - b \sigma_n = 0, \quad (6)$$

где  $b < \operatorname{tg} \varphi$ .

Из геометрии круга Мора (см. рис. 2) следует

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_3) + 2c \cos \varphi. \quad (7)$$

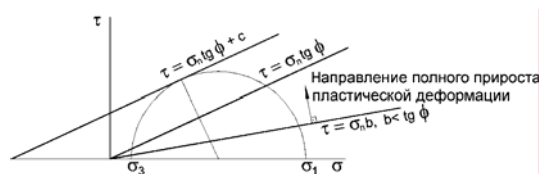


Рис. 2. Закон прочности Кулона-Мора

### 2. МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ (МОДЕЛЬ SAM CLAY)

Закон Кулона–Мора определяет разрушение только через напряжение в грунте и не учитывает величину деформации при потере прочности. Модель критических состояний [1, 3] позволяет определять деформацию грунта при его разрушении, а также реальные диаграммы напряжение–деформация.

Для напряженного состояния в осесимметричной задаче ( $\sigma'_2 = \sigma'_3$ ) величины среднего нормального эффективного напряжения  $p'$  и девиатора напряжения  $q$  можно записать как

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + \sigma'_3), \quad (8)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3. \quad (9)$$

Соответствующие деформации (объемная  $\varepsilon_p$  и сдвиговая  $\varepsilon_q$ ) определяются из условия равенства общей работы независимо от выбора инварианта напряжения:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_1 + 2 \varepsilon_3, \quad (10)$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3). \quad (11)$$

Из выражений (7), (8) и (9) можно получить связь  $q$  и  $p'$  через параметры модели Кулона–Мора –  $c$  и  $\varphi$ :

$$q = \frac{6\sin\varphi'}{3-\sin\varphi'} p' + \frac{6\cos\varphi'}{3-\sin\varphi'} c. \quad (12)$$

Выражение (12) представляет собой закон Кулона–Мора в плоскости  $q-p'$ . Пренебрегая влиянием сцепления, можно записать

$$q = \frac{6\sin\varphi'}{3-\sin\varphi'} p' = Mp'. \quad (13)$$

Выражение (13) задает линию критического состояния (ЛКС) в плоскости  $q-p'$ , которая, в свою очередь, задает состояние потери прочности грунта (прирост деформации без прироста нагрузки). В плоскости  $e-\ln p'$  линия критического состояния имеет наклон  $\lambda$  и параллельна линиям изотропной компрессии (ЛИК) (рис. 3), где  $e$  – коэффициент пористости. Направление изотропного снятия нагрузки, как и повторной нагрузки в плоскости  $e-\ln p'$ , имеет наклон  $\kappa$ .

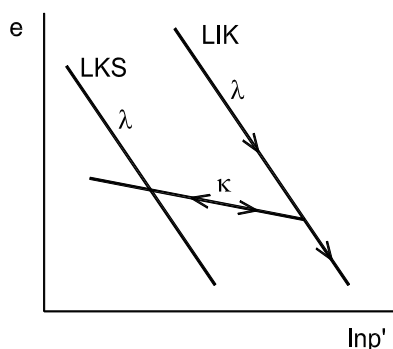


Рис. 3. Линии критических состояний (LKS) и изотропной нагрузки (ЛИК), снятия нагрузки и повторной нагрузки

Для полного прироста объемной деформации и деформации сдвига (сумма упругой и пластической компонент) вследствие действия прироста главных напряжений  $\Delta p' = p'_{i+1} - p'_i$  и девиатора напряжений  $\Delta q = q_{i+1} - q_i$  можно записать соответственно

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta \varepsilon_p^e + \Delta \varepsilon_p^p, \quad (14)$$

$$\Delta \varepsilon_q = \Delta \varepsilon_q^e + \Delta \varepsilon_q^p. \quad (15)$$

Величину полного прироста объемной деформации для изотропной нагрузки можно определить из диаграммы  $e-\ln p'$  из следующего выражения:

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta e_i}{1+e_i} = \frac{\lambda}{1+e_i} \ln \frac{p'_{i+1}}{p'_i}. \quad (16)$$

Упругая компонента прироста объемной деформации

$$\Delta \varepsilon_p^e = \frac{\kappa}{1+e_i} \ln \frac{p'_{i+1}}{p'_i}. \quad (17)$$

Пластическая компонента прироста объемной деформации

$$\Delta \varepsilon_p^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_i} \ln \frac{p'_{i+1}}{p'_i}. \quad (18)$$

Когда состояние нагрузки не изотропно, линия изменения коэффициента пористости (деформации) более не параллельна линиям изотропной компрессии и линиям критических состояний, а с постепенным возрастанием нагрузки из некоей исходной точки достигает линии критических состояний, т. е. разрушения грунта. В данной работе предложено определение общей объемной деформации через фиктивные кривые параметра напряжения для произвольного соотношения главных напряжений.

При отсутствии дренажа общее изменение объема равно нулю, из чего следует, что для объемной деформации имеет место равенство

$$\Delta \varepsilon_p^e = - \Delta \varepsilon_p^p. \quad (19)$$

Девиаторная компонента полного прироста деформации будет определяться принятием плоскости текучести и ассоциированного закона течения. В этом случае полный прирост пластической деформации приходится на поверхность текучести. В модифицированной модели Cam Clay [3] плоскость текучести задается следующим выражением:

$$f = (p')^2 - p' p'_c + \frac{q^2}{M^2} = 0, \quad (20)$$

где  $p'_c$  – давление предуплотнения (остальные величины описаны в предыдущих выражениях).

Путем дифференцирования выражения (20) можно для прироста напряжений  $\Delta p'$  и  $\Delta q$  записать выражение (21) в дифференциальной форме для нормали на плоскость ослабления:

$$\frac{\Delta p'}{\Delta q} = \frac{q}{M^2(p' - p'_c/2)} \quad (21)$$

Если выражение (21) будет записано как функция прироста пластических деформаций (рис. 4), то для прироста девиатора пластической деформации

$$\Delta \varepsilon_q^p = \Delta \varepsilon_p^p \frac{q}{M^2(p' - p'_c/2)} \quad (22)$$

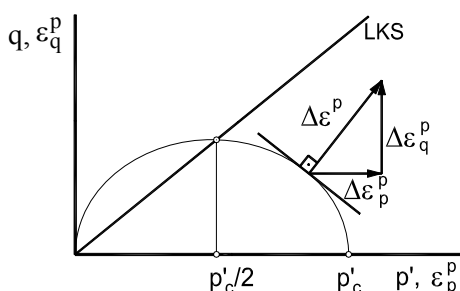


Рис. 4. Направление прироста общей пластической деформации

Таким образом, из известного прироста пластической объемной деформации и мгновенного состояния напряжения получаем прирост пластической компоненты девиатора деформации. Упругая компонента девиатора деформации получается из следующего выражения с использованием закона Гука для действующих инвариантов напряжения и деформации:

$$\Delta \varepsilon_q^e = \frac{\Delta q}{3G} \quad (23)$$

Величину модуля сдвига  $G$  можно принимать постоянной, или же как функцию среднего нормального напряжения  $p'$ , или через разные эмпирические соотношения как функцию различных параметров (давления предуплотнения, коэффициента пористости и др.). Если  $G$  выражается как функция среднего нормального напряжения  $p'_i$ , мгновенного коэффициента пористости  $e_i$ , коэффициента Пуассона  $\nu$  и модуля изотропного сдвига нагрузки  $\kappa$  [4], то можно записать:

$$G = \frac{1,5p'_i(1+e_i)(1-2\nu)}{\kappa(1+\nu)} \quad (24)$$

Модуль сдвига  $G$  в этом случае не является константой, и при всяком приросте его значение рассчитывается для мгновенного среднего нормального напряжения  $p'_i$  и мгновенного коэффициента пористости  $e_i$ .

### 2.1. Подход к исследованию упрочнения с дренажем (CID)

Рис. 5 и 6 приведены в различных шкалах (линейной и линейно-логарифмической), но с одинаковыми величинами по оси абсцисс (для наглядности).

Начальная упругая деформация, как и полная деформация для начального прироста нагрузки, приводит к достижению эллипса текучести:

$$\Delta \varepsilon_{pi}^e = \frac{1}{1+e_i} \kappa \ln \frac{p'_1}{p'_0} \quad (25)$$

Направление под наклоном 3:1 определяет изменение  $q$  как функции  $p'$  в плоскости  $q$ - $p'$  и представляет общую линию тотальных и эффективных напряжений. Соответствующие величины объемных деформаций для первого прироста нагрузки таковы (см. рис. 5):

$$\Delta \varepsilon_{p1} = \frac{1}{1+e_i} \left( \kappa \ln \frac{p'_{c1}}{p'_1} + \lambda \ln \frac{p'_{c2}}{p'_{c1}} - \kappa \ln \frac{p'_{c2}}{p'_2} \right), \quad (26)$$

$$\Delta \varepsilon_{p1}^e = \frac{1}{1+e_i} \kappa \ln \frac{p'_2}{p'_1}, \quad (27)$$

$$\Delta \varepsilon_{p1}^p = \Delta \varepsilon_{p1} - \Delta \varepsilon_{p1}^e, \quad (28)$$

где  $e_1 = e_0 - \Delta \varepsilon_{pi}^e (1+e_0)$ .

Тогда полная объемная деформация для первого прироста нагрузки

$$\varepsilon_{p1} = \Delta \varepsilon_{p1}^e + \Delta \varepsilon_{p1}^p \quad (29)$$

Когда известны все компоненты приростов объемной деформации, можно согласно выражениям (22) и (23), определить составляющие прироста сдвиговой деформации. Общий девиатор деформации для первого шага

$$\varepsilon_{q1} = \Delta \varepsilon_{q1}^e + \Delta \varepsilon_{q1}^p \quad (30)$$

Компоненты и полные величины объемных и сдвиговых деформаций для всех при-

ростов нагрузки до достижения предела прочности рассчитываются аналогично приведенным выражениям.

Выражение (26), в отличие от выражения (16) [4], дает такую величину полного прироста объемной деформации, которая приводит к тому, что наклон направления в плоскости  $e-\ln p'$  превышает наклон направления изотропной компрессии. Реальный прирост нагрузки рассчитывается через соответствующие напряжения. Направление прироста объемной деформации получается разложением на направления изотропного нагружения и разгрузки с известными величинами средних напряжений. Путем постепенного повышения нагрузки приходят к среднему напряжению разрушения  $p'_f$  с соответствующей величиной коэффициента пористости  $e_f$ , т. е. конечной деформации разрушения. Таким образом рассчитывается реальная величина изменения полной объемной деформации до разрушения. С использованием выражений (25) – (27) можно рассчитать различные кривые напряжений на диаграмме  $q-\ln p'$ . Одним из характерных свойств породы (в отличие от метал-

ла), является то, что объемные пластические деформации образуются без изменения среднего напряжения  $p'$  [3]. Например, если линия напряжения на диаграмме  $q-\ln p'$  вертикальна, то значение  $\Delta p'=0$ . В предложенной модели из выражения (26) можно определить компоненты объемной деформации и для такого случая нагрузки.

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{1}{1 + e_i} \left( \kappa \ln \frac{p'_{c1}}{p'_1} + \lambda \ln \frac{p'_{c2}}{p'_{c1}} - \kappa \ln \frac{p'_{c2}}{p'_2} \right), \quad (31)$$

$$\Delta \varepsilon_{p1}^e = \frac{1}{1 + e_1} \kappa \ln \frac{p'_1}{p'_1} = 0. \quad (32)$$

Начальная упругая деформация и последующие компоненты объемной деформации равны нулю, поскольку обратной нагрузки нет.

### 2.2. Подход к исследованию упрочнения без дренажа (CIU)

При подходе CIU изменение объема под нагрузкой отсутствует. Это означает, что в изменение полной деформации вклад вносит только девиаторная компонента. Линия тотальных напряжений не совпадает с линией эффективных напряжений, как при подходе CID. К потере прочности приводит постепенное уменьшение среднего нормального напряжения  $p'$  до значения  $p'_f$ , соответствующего разрушению при повышении девиатора напряжения  $q_f$  до разрушения (рис. 6). Для подхода CID характерно изменение объема, в то время как при подходе CIU исследуется изменение величины порового давления при нагрузке.

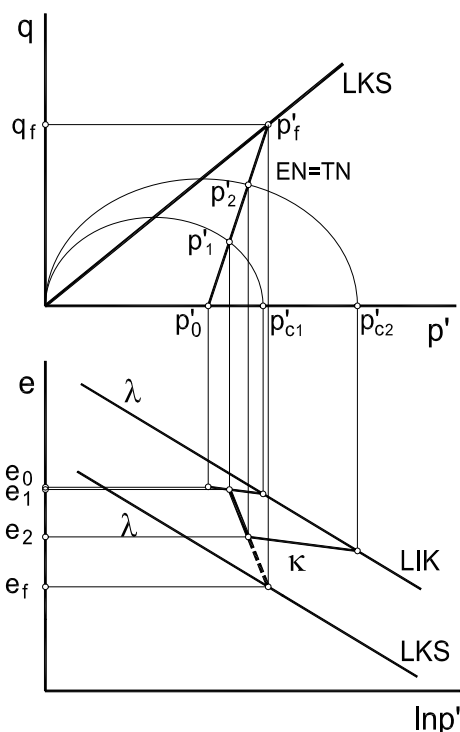
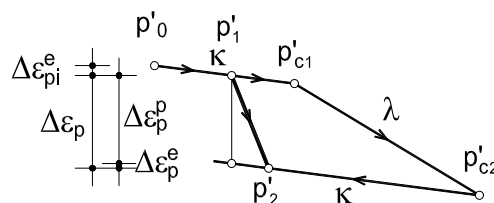


Рис. 5. Расчет объемных деформаций в условиях CID (консолидированно-дренированном состоянии)



Среднее напряжение при потере прочности  $p'_f$  определяется из выражения

$$p'_f = e^{\frac{e_\Gamma - e_0}{\lambda}}, \quad (33)$$

где  $e_\Gamma$  – значение коэффициента пористости на линии критического состояния в плоскости  $e - \ln p'$  для  $p'_f = 1$ . Одновременно

$$e_\Gamma = e_0 + (\lambda - \kappa) \ln \frac{p'_{ci}}{2} + \kappa \ln p'_{i0}. \quad (34)$$

Когда известно исходное значение среднего напряжения  $p'_{i0}$ , можно при выбранной величине прироста напряжения  $\Delta p'$  провести расчет до величины разрушения  $p'_f$ .

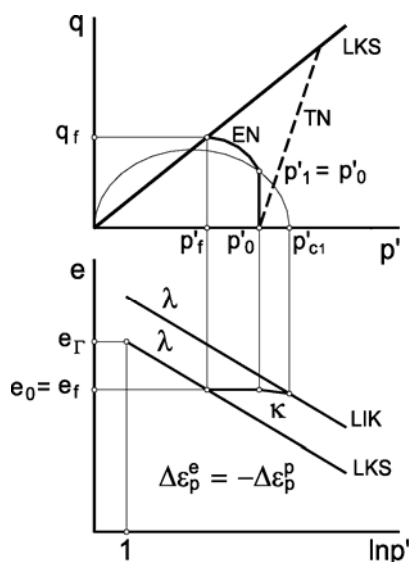


Рис. 6. Кривые напряжений и деформаций в условиях CIU (консолидированно-дренированном состоянии)

Если

$$p'_{i+1} = p'_i - \Delta p' \quad (35)$$

и  $p'_{ci}$  – давление переуплотнения для  $p'_i$ , то можно показать, что при отсутствии дренажа имеет место следующее выражение для давления переуплотнения для  $p'_{ci+1}$ :

$$p'_{ci+1} = p'_{ci} \left( \frac{p'_i}{p'_{i+1}} \right)^{\frac{\lambda}{\lambda - \kappa}} \quad (36)$$

Величина девиатора напряжений  $q$  для известного среднего нормального напряжения

определяется из выражения (20) на основании условия напряженного состояния на эллипсе текучести.

Из выражения (17) определяется прирост упругой объемной деформации, который согласно (19) равен приросту пластической объемной деформации. Если известны компоненты прироста объемной деформации, с использованием выражения (22) определяется прирост пластического девиатора деформации. Осевая деформация равна девиатору деформации:

$$\epsilon_1 = \Delta \epsilon_{qi}^e + \epsilon_{q1}. \quad (37)$$

Давление воды в порах грунта определяется как горизонтальное расстояние между линией тотальных напряжений с наклоном 3:1 (TN) и кривой эффективных напряжений (EN).

$$p = p'_{i0} + q/3, \quad (38)$$

$$\Delta u = p - p'. \quad (39)$$

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ ПРИМЕРЫ

С использованием приведенных выражений создана программа, позволяющая вести расчет реакции породы согласно модели критических состояний (модифицированная модель Sam Clay) для произвольных кривых изменения напряжения. Расчет производится для нормально уплотненных или слегка переуплотненных грунтов, т. е. для  $OCR \leq 2$ , при отсутствии дренажа согласно принятой численной модели. Секущие линии критических состояний и эллипсы текучести в плоскости  $q - p'$  определены для значения абсциссы  $p' = p'_{i0}/2$ . Для сильно переуплотненной породы ( $OCR > 2$ ) для образца без дренажа девиатор напряжений  $q$  проходит над линией критического состояния, а по достижении максимума возвращается к остаточной величине, которая вновь находится на линии критического состояния. Принимая во внимание значения  $OCR \leq 2$ , рассчитывают только кривые без остаточных значений девиатора напряжений, т. е. при первом достижении линии критических состояний происходит разрушение.

Для условий дренажа предельной является величина  $OCR \leq 6/(3-M)$ , для наклона

направления (3:1) тотальных и эффективных напряжений. Расчет для обоих случаев приводит к некоторой близкой величине границы текучести (например,  $0,99 p_f$ ), приводящей к численной нестабильности в окрестности точки потери прочности, где доходит до возникновения сдвига без прироста нагрузки. Решения ищут в виде стандартной диаграммы напряжение–деформация  $q-\varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_1 = \varepsilon_q + \varepsilon_p/3$ , а также диаграммы соотношения осевой ( $\varepsilon_1$ ) и объемной ( $\varepsilon_p$ ) деформаций или осевой деформации и порового давления  $\Delta u$ , в зависимости от того, какое состояние рассматривается – с дренажем или без него.

Расчеты проведены для 2, 5, 10, 20, 50 и 100 шагов и для  $OCR = 1; 1,5; \text{ и } 2,0$  (пока для состояния с дренажем), а также для  $OCR = 2,0 \times 3 / (3 - M) > 2$ , потому что необходимо  $M < 3$ .

Пусть заданы следующие параметры породы и величины начального коэффициента пористости и давления:  $\lambda = 0,25$ ,  $\kappa = 0,05$ ,  $\varphi' = 28^\circ$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $e_0 = 0,85$ ,  $p'_c = 300 \text{ кН/м}^2$ .

На рис. 7 показан результат расчета, соответствующего разрушающему девиатору напряжений для различного количества шагов расчета ( $n$ ) при  $OCR=1,5$  при подходе CID. Течение при минимальном количестве шагов наступает при величине девиатора напряжений, составляющей  $\approx 60\%$  от величины, полученной при максимальном количестве шагов. Величина разрушающего девиатора напряжений одинакова для всех значений числа шагов расчета, но значения деформации при меньшем количестве шагов получаются неприемлемо большими, достигая крайних значений девиатора напряжений, и поэтому определяются деформацией разрушения, полученной при максимальном числе шагов.

При подходе CIU заметно (рис. 8) влияние начальной упругой деформации для всех значений числа шагов расчета. Начальное значение на эллипсе текучести и соответствующая разрушению величина девиатора напряжений различаются несущественно. Абсолютное значение девиатора напряжений меньше, чем при подходе CID, как и величина деформации, потому что в случае подходе CIU полную деформацию составляет только дилатационная компонента (объемная компонента равна нулю).

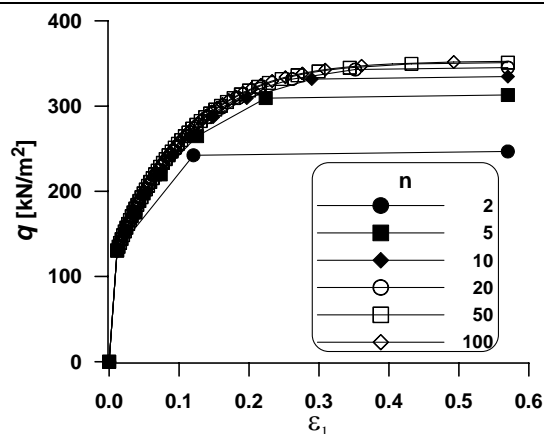


Рис. 7. Диаграммы  $q-\varepsilon_1$  в условиях CID и  $OCR=1,5$  для различных величин прироста нагрузки

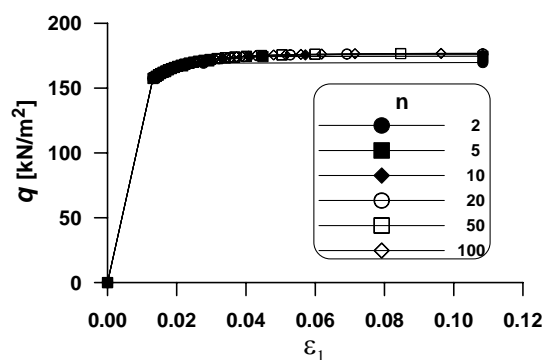


Рис. 8. Диаграммы  $q-\varepsilon_1$  в условиях CIU и  $OCR=1,5$ , для различных величин прироста нагрузки

Можно сказать, что величина начальной упругой деформации больше величины конечной деформации, или, чем больше соотношение начальной (на первом эллипсе текучести) и конечной величин деформации напряжения, тем меньше влияние числа шагов расчета на конечный результат. Положение начальной величины девиатора текучести (пересечение направления 3:1 и кривой текучести при подходе CID или пересечение вертикального направления для такой же начальной величины среднего напряжения и кривой текучести при подходе CIU) зависит от величины OCR.

На рис. 9 показана зависимость числа шагов расчета и нормализованной величины девиатора напряжений по отношению к предельному девиатору напряжений для максимального числа шагов расчета (100). Для



значения  $OCR=6/(3-M)$  при подходе CID влиянием числа шагов нельзя пренебрегать. Уже при начальной упругой деформации проявляется текучесть, поскольку пересечение начального эллипса текучести одновременно задает величину девиатора напряжений, соответствующую разрушению, и образец ведет себя идеально упругопластично. При постепенном уменьшении величины OCR заметно увеличение различий в величинах девиатора. Для подхода CID, независимо от величины OCR, можно получить достаточно неплохие результаты за 20 шагов (5% полной нагрузки): результаты попадают в интервал 5% от конечного значения.

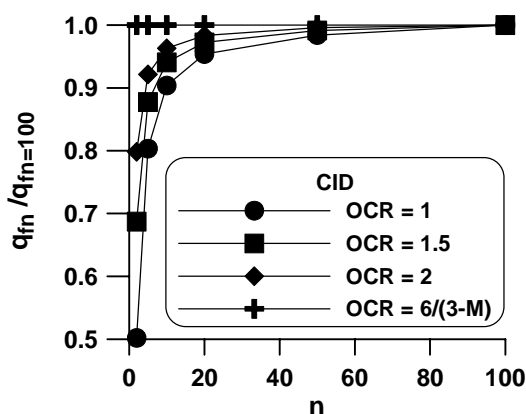


Рис. 9. График влияния числа шагов для разных OCR на величину предельного девиатора напряжений в условиях CID

На рис. 10, где показаны результаты расчета для подхода CIU, заметна гораздо меньшая зависимость величины предельного девиатора напряжений от числа шагов и почти полная независимость от величины OCR. Максимальное отклонение – 20%, причем для минимального числа шагов. Расчет для 20 шагов нагрузки дает результаты с отклонением в пределах  $\approx 2\%$ .

На рис. 11 показаны кривые  $q-\varepsilon_1$  для 100 шагов для разных OCR в условиях CID. Уменьшение максимальной величины девиатора напряжений наступает при меньших OCR из-за разрыхления образца вследствие его изотропной разгрузки (увеличение коэффициента пористости), но только для новой нагрузки, которая не изотропна. В случае повторной изотропной нагрузки образец был бы жестче,

поскольку изменение коэффициента пористости наступило бы на направлении изотропной разгрузки и повторной нагрузки (наклон к на диаграмме  $e-\ln p'$ ). Для  $OCR=6/(3-M)$  образец ведет себя идеально упругопластично.

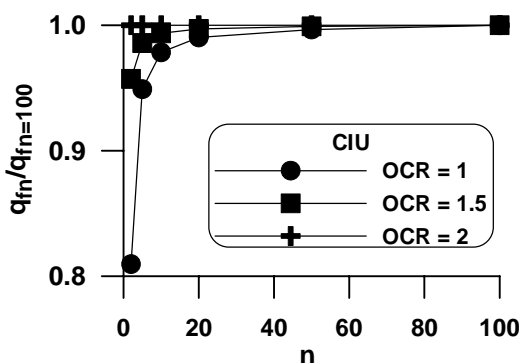


Рис. 10. График влияния числа шагов для разных OCR на величину предельного девиатора напряжений в условиях CIU

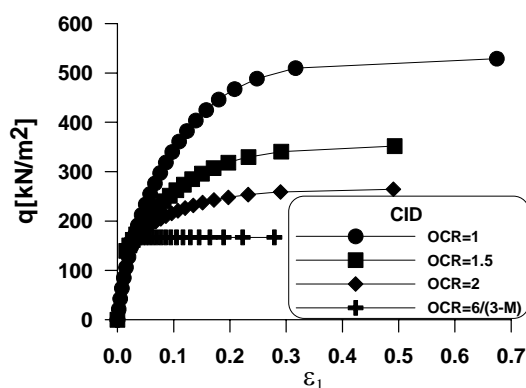


Рис. 11. Диаграммы напряжение–деформация  $q-\varepsilon_1$  для разных OCR в условиях CID

Похожая ситуация и при подходе CIU (рис. 12), но на этот раз существенно меньше различие между конечными значениями девиатора напряжения, а форма кривых – с резким ослаблением (ближе к идеальной упругопластической диаграмме).

На рис. 13 показаны нормализованные величины предельного девиатора напряжения, соответствующие излому, в условиях CID и CIU. Отклонение в условиях CIU значительно меньше, чем в условиях CID, и не превышает 20% для максимального OCR. В условиях CID отклонения выше и достигают  $\approx 70\%$  от величины OCR.

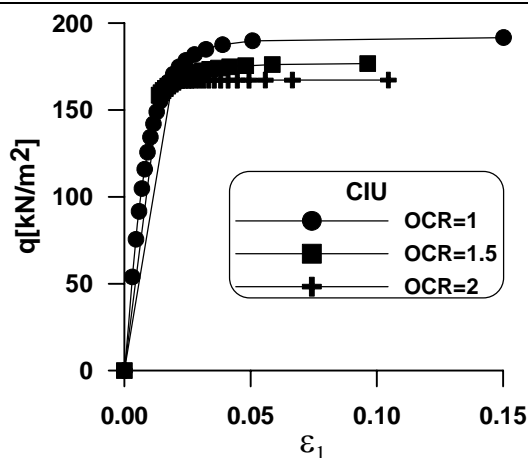


Рис. 12. Диаграммы напряжение–деформация  $q-\varepsilon_1$  для разных OCR при подходе CIU

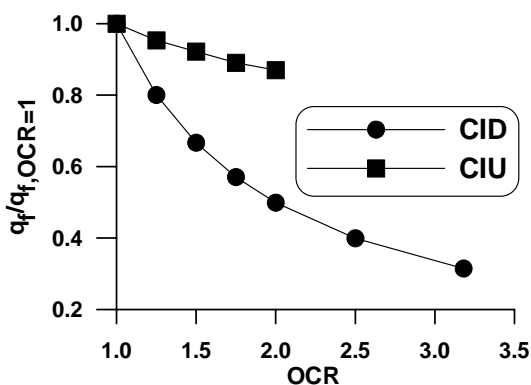


Рис. 13. Вид нормализованного девиатора напряжения, соответствующего излому, в условиях CID и CIU

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Величина прироста нагрузки сильно влияет на конечную диаграмму напряжение–деформация породы, особенно в тех случаях, когда преобладают пластические деформации со времени начала действия нагрузки до разрушения образца. Независимо от условий (с дренажем или без него) для линий напряжения, где вертикальная ось начальной поверхности текучести пересекает линию критических состояний в точке конечной величины, соответствующей предельному девиатору напряжений, влиянием величины прироста нагрузки можно пренебречь. В этом случае разрушение происходит сразу через начальную

упругую деформацию, и материал ведет себя идеально упругопластично.

Вообще, можно говорить о том, что состояние породы без дренажа менее чувствительно к числу шагов расчета. В приведенных примерах максимальное отклонение девиатора напряжений в условиях без дренажа составило 20% от предельной величины девиатора при 100 шагах расчета, в то время как для образца с дренажем максимальное отклонение составляло 50%. Для величины прироста нагрузки в 5% от общей нагрузки (20 шагов) можно получить удовлетворительные результаты при подходе CID, а при подходе CIU требуемое для такой точности число шагов еще меньше. Влияние истории нагружения, которое выражается через OCR, существенно при изменении положения начального напряжения на диаграмме  $q-p'$  и влияет на конечный вид диаграммы напряжение – деформация и на точность результата.

Приведенный метод может использоваться на практике для расчета реакции породы, так как он с приемлемой точностью учитывает материальную нелинейность породы. Результаты расчета могут применяться сами по себе или как исходные величины для существующих коммерческих программ, где в качестве исходных величин используются, например, гиперболические кривые модели Duncan-Chang (Hard Soil в программе Plaxis) или параметры модели Cam Clay (в программе Geo Sigma) или Soft Soil (в программе Plaxis).

В работе приведены результаты расчета моделирования исследования в трехмерной системе для стандартных испытаний, хотя моделирование всех линий напряжения возможно при условии знания параметра породы для принятой модели, включающего начальный коэффициент пористости. Возможны и прямые сравнения результатов расчета по приведенной модели и результатов, полученных коммерческими программами. В этом случае необходимо знать различия в предположениях анализируемых моделей.

### Список литературы

1. Atkinson J. H.; Bransby, P. L. The Mechanics of Soils – An Introduction to Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, 1978.

2. *Chen W. F., Han D. J.* Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag, New York Inc, 1988.

3. *Wood D. M.* Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

4. *Budhu M.* Soil Mechanics & Foundations, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.

5. *Kanvinde A.; Hajjar J., Deierlen, G.* Material Nonlinear Analysis of Structures – A Concentrated Plasticity Approach, Preliminary draft, Dept. of Civil & Environmental Engineering Stanford University, San Francisco, May 2001.