



УДК 624.131

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Шараф Хани Мохаммед Абдо

аспирант

E-mail: hani_2012@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Особенности деформирования глинистых грунтов
при трехосном блочном режимном циклическом нагружении
с учетом образования микро- и макротрещин**

Аннотация

Постановка задачи. Основной целью данного исследования является изучение параметров прочности и деформирования глинистого грунта в условиях трехосного сжатия при блочных режимных циклических нагружениях. На сегодняшний день данные о результатах исследований при указанном режиме нагружения отсутствуют.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования прочности и деформируемости глинистых грунтов трехосного сжатия $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ при блочных режимных циклических нагружениях. Отличительной особенностью экспериментальных исследований является то, что они проведены в приборах трехосного сжатия призматической формы с соотношением сторон 100×100×200 мм. Установлена закономерность изменения основных характеристик грунта при переходах на блоки с высоким и с низким уровнем напряжений. Получены новые данные о закономерности деформирования глинистых грунтов, при нестационарных режимах многократно повторяющейся циклической нагрузки.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в исследовании деформаций виброползучести и изменений усталостного сопротивления разрушению глинистых грунтов при трехосном режимном блочном циклическом нагружении. Установлено, что напряженно-деформированное состояние, деформации и усталостная прочность грунтов меняются в зависимости от последовательности чередования блоков с различными значениями максимальной нагрузки цикла.

Ключевые слова: блочно-циклическая нагрузка, стационарное и нестационарное нагружение, виброползучести, глинистый грунт, нелинейные деформации виброползучести грунта.

Введение

В современных условиях грунтовые основания зданий и сооружений подвергаются воздействию статических и режимных циклических нагружений различного рода. Существующие методы расчета оснований несущей способности и деформаций в основном разработаны для случая однократного кратковременного статического нагружения или циклического нагружения с постоянными параметрами на весь период эксплуатации [1-5]. Эксплуатация зданий и сооружений с оборудованием, создающим циклические воздействия, и режимы нагружения оснований фундаментов в реальных условиях являются не постоянными, меняются на различных этапах технологического процесса. Результаты имеющихся немногочисленных экспериментальных исследований показывают, что закономерность развития деформаций и изменение прочности грунтов при режимных циклических нагружениях отличаются от поведения грунтов при стационарных циклических нагружениях [6-12]. По этой причине возникает необходимость разработки методов расчета несущей способности и деформаций оснований фундаментов при режимных циклических нагружениях. В связи с этим проведены экспериментальные исследования несущей способности и осадок грунтовых оснований модели фундаментов в объемном лотке при режимных циклических нагружениях [13-20].

Экспериментальные исследования

Для установления закономерности развития деформации грунта при блочном циклическом нагружении проведены исследования (Мирсаяпов И.Т., Шараф Хани. Прочность и деформации глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия при блочных режимных циклических нагружениях// Известия КГАСУ. 2017. № 4 (42). С. 221–227).

Анализ результатов экспериментальных исследований при режимном блочном циклическом трехосном сжатии показал, что при увеличении напряжений и количества циклов приложения нагрузки происходит развитие, как деформации изменения объема, так и деформации изменения формы при уплотнении грунта в интегральном объеме.

При действии блочного режимного циклического нагружения, в случае последовательно повышающегося режима, происходит увеличение деформации грунта. Наиболее интенсивное развитие происходит в первом блоке в начальный период нагружения до 100 циклов. При переходах на более высокий уровень нагрузки наблюдался скачок полных деформаций в момент перехода на другой блок. Затем внутри второго блока начинается плавное развитие деформаций по мере увеличения количества циклов нагружения, аналогично развитию деформаций на второй стадии первого блока нагружения. Однако, скорость развития этих деформаций была больше, чем на первом блоке, и происходило непрерывное затухающее развитие деформаций.

При переходе к другим блокам вышеописанная закономерность повторялась, но в каждом последующем блоке скорость развития деформаций увеличивалась. На последнем блоке перед разрушением происходило спонтанное лавинообразное увеличение деформаций, характер изменения деформаций грунта при увеличении количества циклов нагружения представлен на (рис. 1-3). Графики на рисунках наглядно показывают нарастание деформаций с увеличением количества циклов нагружения и увеличением скорости развития деформаций после перехода к блоку с более высоким уровнем нагрузки, что еще раз подтверждает гипотезу о том, что после 100-500 циклов определяющим в процессе увеличения деформаций является развитие микро- и макротрещин в плоскостях предельного равновесия в структуре грунта.

При последовательно понижающемся режиме блочного циклического нагружения, когда нагрузки уменьшаются от блока к блоку ступенями, в пределах каждого блока во всех испытанных образцах происходило изменение деформаций грунта по мере увеличения количества циклов нагружений (рис. 1-3). В пределах первого блока нагружения закономерность развития деформаций в зависимости от уровня нагрузки и количества циклов нагружения была такая же, как и при стационарном нагружении.

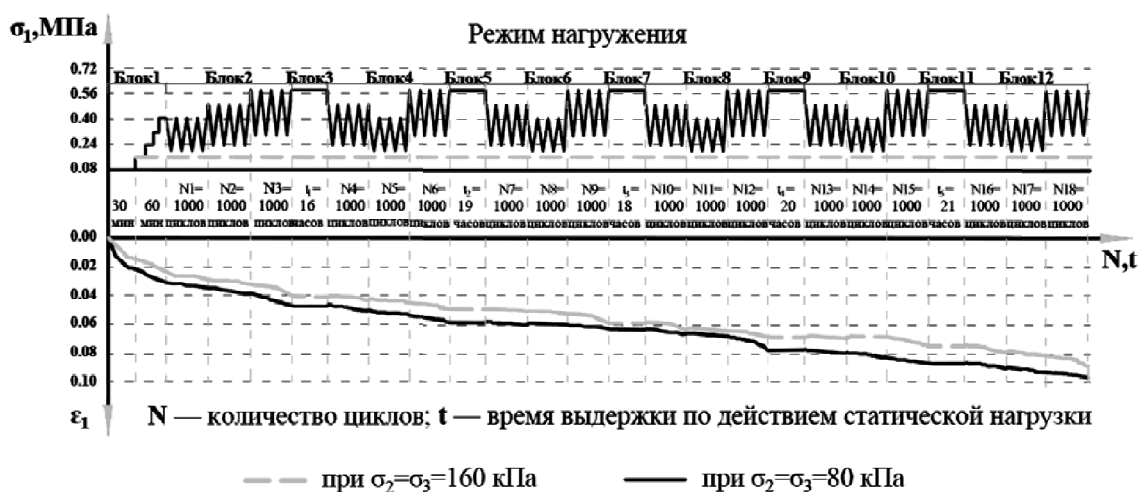


Рис. 1. Развитие вертикальной деформации в зависимости от режима нагружения (иллюстрация авторов)

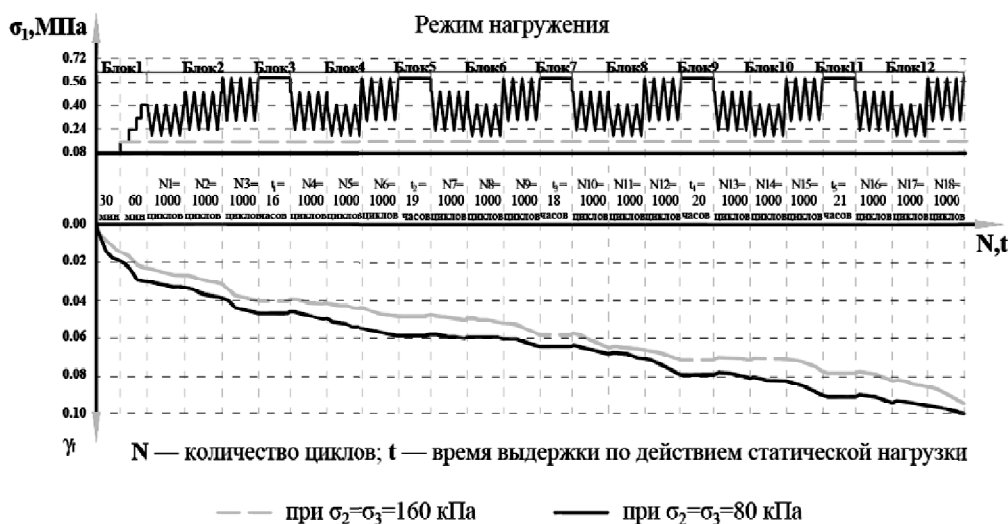


Рис. 2. Развитие деформации сдвига в зависимости от режима нагружения (иллюстрация авторов)

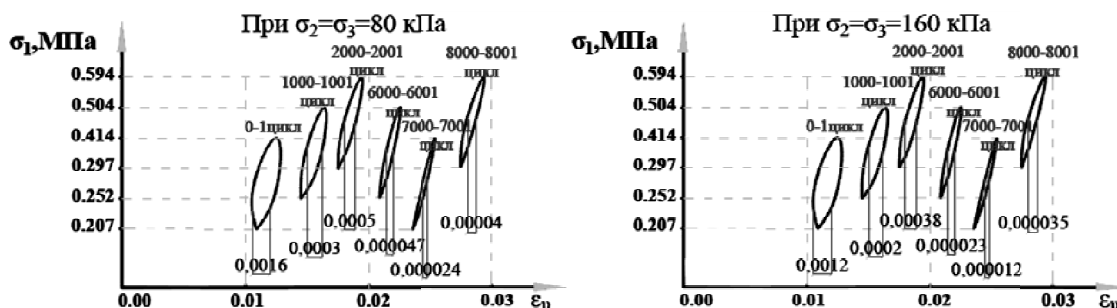


Рис. 3. Развитие петли гистерезиса объемной деформации в зависимости от режима нагружения (иллюстрация авторов)

При переходе к более низким уровням нагрузки в момент уменьшения нагрузки происходит скачкообразное уменьшение деформаций за счет упругой составляющей и деформаций последствия. Затем какое-то время происходит или дальнейшее уменьшение деформаций по мере увеличения количества циклов нагружения, или полная их стабилизация. Продолжительность этого периода и характер развития деформаций после уменьшения нагрузки зависят от величины перепада нагрузки и продолжительности ее действия в рассматриваемом блоке. Чем больше скачок нагрузки, тем больше продолжительность этого периода и степень уменьшения деформаций. Природа этого явления объясняется эффектом задержки развития микро- и макротрещин после перехода на более низкий уровень нагрузки.

Таким образом, закономерность развития деформаций грунта при блочных циклических нагружениях зависит от закономерности развития микро- и макротрещин в структуре грунта. Рассмотрим развитие деформаций грунта с учетом образования и развития микро- и макротрещин в грунте.

Теоретические исследования

Развитие нелинейной части деформаций ползучести при различных режимах многократно повторяющегося циклического нагружения

В связи с тем, что развитие нелинейной части деформаций виброползучести зависит от закономерности развития микро- и макротрещин, необходимо выделить нелинейные деформация виброползучести, соответствующие начальной и основной стадиям развития трещин в теле грунта.

В начальной стадии развитие нелинейной части деформаций описывается закономерностью развития микротрещин. Основная стадия развития нелинейной части деформаций виброползучести соответствует стадии развития микротрещин в теле грунта

и описывается закономерностью развития микротрещин. Тогда уравнения нелинейных деформаций виброползучести грунта при стационарных и нестационарных режимах циклического нагружения на различных этапах развития трещин в материале имеют вид:

- Стационарный режим:

а) Начальная стадия:

$$\varepsilon_{pli}^v(t, \tau) = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left[\frac{l^2(t, \tau)}{2l_u^2} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}(t, \tau)} - \frac{\mathcal{P}(t, \tau)}{1 + \mathcal{P}^2(t, \tau)} \right) \right] = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left[\left(\frac{J \cdot f_{ij}(\theta)}{I_m(k_{\mathcal{P}gr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k a \psi_\theta \right]} \right)^2 \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_R} [\sigma_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\varepsilon_R - \varepsilon_{ti})^h] d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_{ti} \varepsilon_{ti} - \Delta W_{i(i-1)}}{\sigma_{ti}^2 - (k_{\mathcal{P}gr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{gr}(t, \tau)} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k a \psi_{\theta i} \right]} \cdot \Delta N_1 + l_n(t, \tau) \right) \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}(t, \tau)} - \frac{\mathcal{P}(t, \tau)}{1 + \mathcal{P}^2(t, \tau)} \right) \right] \quad (1)$$

где $\Delta N_j = N_j - N_{uHk}$; N_{uHk} – продолжительность инкубационного периода в циклах;

б) Основная стадия:

$$\varepsilon_{pli}^v(t, \tau) = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \frac{[(l(t_0\tau) + \sum_{i=1}^y \hat{\tau}(t, \tau) \cdot \Delta N_i)]^2}{2l_u^2} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}} - \frac{\mathcal{P}}{1 + \mathcal{P}^2} \right) \right\} = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \left(\frac{\left\{ [k_I \varphi_{11}(\sigma) + k_{II} \varphi_{21}(\sigma)] \left[\frac{k_I \varphi_{11}(\sigma)}{E_{gr}(t)} - \int_{t_0}^t [k_I \varphi_{11}(\sigma) + k_{II} \varphi_{21}(\sigma)] \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) dt \right]^2}{2\pi (k_{\mathcal{P}gr} R_{gr,t})^4 m_j^4(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{gr}(t, \tau)} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k a \psi_\theta \right]^2} \right)^2 \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_R} [\sigma_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\varepsilon_R - \varepsilon_{ti})^h] d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_{ti} \varepsilon_{ti} - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npi(i-1)}}{[k_I \varphi_{11}(\sigma) + k_{II} \varphi_{21}(\sigma)] \left[\frac{k_I \varphi_{11}(\sigma)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_I \varphi_{21}(\sigma)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_I \varphi_{11}(\sigma) + k_{II} \varphi_{21}(\sigma)] \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) dt} - A^*}{2l_u^2} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}} - \frac{\mathcal{P}}{1 + \mathcal{P}^2} \right) \right) \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}} - \frac{\mathcal{P}}{1 + \mathcal{P}^2} \right) \right\} \quad (2)$$

$$A^* = (k_{\mathcal{P}gr} R_{gr,t})^2 \cdot m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k a \psi_\theta \right],$$

где $\Delta N_j = N - N_j$; N_j – количество циклов нагружения на начальной стадии развития трещин в грунте, т.е. при $l(t, \tau) < 2 ds$; N – общее количество циклов нагружения.

- Последовательно повышающийся режим нестационарного циклического нагружения:

а) Начальная стадия:

Уравнение нелинейных деформаций виброползучести на этой стадии записываем, исходя из выражений (1)-(2).

$$\varepsilon_{pli}^v(t, \tau) = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left[\frac{l^2(t, \tau)}{2l_u^2} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}(t, \tau)} - \frac{\mathcal{P}(t, \tau)}{1 + \mathcal{P}^2(t, \tau)} \right) \right] = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left[\left(\frac{J \cdot f_{ij}(\theta)}{I_m(k_{\mathcal{P}gr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k a \psi_\theta \right]} \right)^2 \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_R} [\sigma_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\varepsilon_R - \varepsilon_{ti})^h] d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_{ti} \varepsilon_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)} - \Delta W_{npi(j-1)}}{\sigma_{ti}^2 - (k_{\mathcal{P}gr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k a \psi_{\theta i} \right]} \cdot \sum_1^y \Delta N_1 + l_n(t_0\tau) + l_n(t, \tau) \right) \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\mathcal{P}} - \frac{\mathcal{P}}{1 + \mathcal{P}^2} \right) \right] \quad (3)$$

где $\sum_1^y \Delta N_1 = \sum_1^y N_i - N_{uHk}$; y – количество повышающихся блоков (этапов) нагружения, в течение которых трещину можно отнести к категории микротрещин; N_{uHk} – продолжительность инкубационного периода в циклах.

б) Основная стадия:

Нелинейные деформации виброползучести в системе развития трещин в материале описываются, исходя из выражений, с учетом влияния предыдущих этапов нагружения, которое проявляется в изменении $k k_{II}$, $\Delta W_{npi(j-1)}$, т.е. в предварительном пластическом деформировании микроэлементов в зоне предразрушения и увеличения длины трещины на предыдущем этапе.

$$e_{pli}^v(t, \tau) = \frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \frac{[(l(t_0\tau)) + \sum_1^{\Sigma} \hat{\tau}(t, \tau) \cdot \Delta N_2]^2}{2l_u^2} \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right) \right\} =$$

$$\frac{\sigma_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \frac{l(t_0\tau) + \frac{2\pi(k_{pgr}R_{gr,t})^4 m_j^4(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]^2}{\int_0^{\epsilon R} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\epsilon R - \epsilon_{ti})^n] de^{-\frac{1}{2}y_{ti}\epsilon_{ti} - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npi(i-1)} - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npi(j-1)}}} - \Delta N_2}{[k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \left\{ \left[\frac{k_{\mu 1}(y)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 2}(y)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi \right\} - A^*}}{2l_u^2} \cdot \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right) \right\} \quad (4)$$

где $A^* = (k_{pgr}, R_{gr,t})^2 \cdot m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]$; $\Delta N_2 = \sum_1^n N_i - N_1 - N_{uhk}$; N_l – количество циклов нагружения на начальной стадии; N_{uhk} – продолжительность инкубационного периода в циклах.

- Последовательно понижающийся режим нестационарного циклического нагружения:

а) Начальная стадия:

Уравнение нелинейных деформаций виброползучести на начальной стадии записываем с учетом задержки развития трещин, исходя из (1)-(4).

$$e_{pli}^v(t, \phi) = \frac{y_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \frac{l^2(t, \phi) \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right)}{2l_u^2} \right\} =$$

$$\frac{y_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \frac{\frac{J \cdot f_j(u)}{l_m(k_{pgr}R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]} + \sum_1^{\Sigma} \Delta N_1 + l(t_0\phi) + l_n(t, \phi)}{\frac{\int_0^{\epsilon R} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\epsilon R - \epsilon_{ti})^n] de^{-\frac{1}{2}y_{ti}\epsilon_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)} - \Delta W_{npi(j-1)}}}{y_{ti}^2 - (k_{pgr}R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]} - \Delta N_2}}{2l_u^2} \cdot \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right) \right\} \quad (5)$$

где $\sum_1^n \Delta N_1 = \sum_{i=1}^n N_i - N_{uhk} - N_D$; N_D – время выдержки в циклах; N_{uhk} – инкубационный период в циклах.

б) Основная стадия:

$$e_{pli}^v(t, \phi) = \sum_1^n \sum_1^k \frac{y_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \left\{ \frac{[(l(t_0\phi)) + \hat{\phi}(t, \phi) \sum_1^{\Sigma} \Delta N_2]^2}{2l_u^2} \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right) \right\} = \sum_1^n \sum_1^k \frac{y_{gr}^{max}}{E_{gr}(t_0)}$$

$$\left\{ \frac{l(t_0\phi) + \frac{2\pi(k_{pgr}R_{gr,t})^4 m_j^4(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]^2}{\int_0^{\epsilon R} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\epsilon R - \epsilon_{ti})^n] de^{-\frac{1}{2}y_{ti}\epsilon_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)} - \Delta W_{npi} + \Delta W_c}} - \sum_1^{\Sigma} \Delta N_2}{[k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \left\{ \left[\frac{k_{\mu 1}(y)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 2}(y)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi \right\} - A^*}}{2l_u^2} \cdot \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right) \right\} \quad (6)$$

где $A^* = (k_{pgr}, R_{gr,t})^2 \cdot m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]$; $\sum_1^{\Sigma} \Delta N_2 = \sum_1^n N_i - N_1 - N_{uhk} - \sum_{i=1}^{n-1} N_D$.

Развитие суммарных неупругих деформаций ползучести при различных режимах многократно повторяющегося циклического нагружения

Суммарные деформаций виброползучести, в зависимости от стадии развития трещин в материале и режима циклического нагружения, описываются уравнениями:

- Стационарный режим:

а) Начальная стадия:

$$e_{pli}^v(t, \phi) = y_{gr}^{max} \cdot$$

$$\left\{ C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \left[1 + (1-P) \frac{1 - (1 - a_{ш\theta})}{a_{ш\theta}} \right] + P_i C_{\infty}(t, \phi) f(t, \phi) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{E_{gr}(t_0)} \left(\arctg \frac{1}{P} \frac{P}{1+P^2} \right) \left[\frac{l(t_0\phi) + \frac{J \cdot f_j^2(u)}{l_m(k_{pgr}R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]} + l_n(t, \phi)}{\frac{\int_0^{\epsilon R} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(\epsilon R - \epsilon_{ti})^n] de^{-\frac{1}{2}y_{ti}\epsilon_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)}}}{y_{ti}^2 - (k_{pgr}R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta} \right]} - \Delta N_2}}{2l_u^2} \right] \right\} \quad (7)$$

б) Основная стадия:

$$e_{pli}^v(t, \phi) = y_{gr}^{max} \cdot \left\{ \begin{aligned} & C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta i} \left[(1-P)^{-1} \frac{1-(1-a_{ш\theta i})^N}{a_{ш\theta i}} \right] + P_i C_{\infty}(t, \phi) f(t, \phi) + \\ & 1 + \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{P} - \frac{P}{1+P^2} \right) \cdot \\ & \left[\frac{\left\{ [k_{\mu 11}(y) + k_{\mu 21}(y)] \left[\frac{k_{\mu 11}(y)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 12}(y)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 11}(y) + k_{\mu 21}(y)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi \right\}^2}{2p(k_{pgr} R_{gr,t})^4 m_j^4(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta i} \right]^2} - \Delta N \right]^2 \\ & + \frac{1}{E_{gr}(t_0)} \left[\frac{l(t_0 \phi) + \frac{\int_0^{eR} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(eR - e_{ti})^n] de - \frac{1}{2} y_{ti} e_{ti} - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npi(i-1)}}{[k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \left[\frac{k_{\mu 1}(y)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 2}(y)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi} - A^*}{2l_u^2} \right]^2 \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где $A^* = (k_{pgr}, R_{gr,t})^2 \cdot m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta i} \right]$.

- Последовательно повышающийся режим нестационарного нагружения:

а) Начальная стадия:

$$e_{pli}^v(t, \phi) = \sum_{i=1}^n \sum_1^{N_i} C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} y_{gr1}^{max} (1-P_1) \left[1 + (1-a_{ш\theta ij})^{N_i-1} \right] + \\ + \sum_{i=2}^n \sum_1^{N_i} \left(C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k \right)'_i a_{ш\theta ij} \left[1 + (1-a_{ш\theta ij})^{N_i-1} \right] \Delta y_{gri} + \sum_1^n P_i y_{gr1}^{max} C_{\infty}(t, \phi) f_i(t, \phi) + \\ \left\{ \begin{aligned} & \frac{J \cdot f_i^2(u)}{l_m(k_{pgr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} \right]} - \frac{\sum \Delta N_1 + l(t, \phi) + l_n(t, \phi)}{\int_0^{eR} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(eR - e_{ti})^n] de - \frac{1}{2} y_{ti} e_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)} - \Delta W_{npi(j-1)}} \\ & \frac{y_{ti}^2 - (k_{pgr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} \right]}{2l_u^2} \end{aligned} \right\} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{P} - \frac{P}{1+P^2} \right) \quad (9)$$

б) Основная стадия:

$$e_{pli}^v(t, \phi) = \sum_{i=1}^n \sum_1^{N_i} C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} y_{gr1}^{max} (1-P_1) \left[1 + (1-a_{ш\theta ij})^{N_i-1} \right] + \\ + \sum_{i=2}^n \sum_1^{N_i} \left(C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k \right)'_i a_{ш\theta ij} \left[1 + (1-a_{ш\theta ij})^{N_i-1} \right] \Delta \phi_{gri} + \\ + \sum_1^n P_i y_{gr1}^{max} C_{\infty}(t, \phi) f_i(t, \phi) + \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^N \frac{y_{gri}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{\left\{ [k_{\mu 11}(y) + k_{\mu 21}(y)] \left[\frac{k_{\mu 11}(y)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 12}(y)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 11}(y) + k_{\mu 21}(y)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi \right\}^2}{2p(k_{pgr} R_{gr,t})^4 m_j^4(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} \right]^2} - \Delta N_2 \\ & l(t_0 \phi) + \frac{\int_0^{eR} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(eR - e_{ti})^n] de - \frac{1}{2} y_{ti} e_{ti} - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npi(i-1)} - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npi(j-1)}}{[k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \left[\frac{k_{\mu 1}(y)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 2}(y)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 1}(y) + k_{\mu 2}(y)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi} - A^*}{2l_u^2} \end{aligned} \right\} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{P} - \frac{P}{1+P^2} \right) \quad (10)$$

где $A^* = (k_{pgr}, R_{gr,t})^2 \cdot m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} \right]$.

- Последовательно понижающийся режим нестационарного нагружения:

а) Начальная стадия:

$$e_{pli}^v(t, \phi) = \sum_{i=1}^n \sum_1^{N_i} \left(C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k \right)'_i a_{ш\theta ij} y_{gr1}^{max} (1-P_1) \left[1 + (1-a_{ш\theta ij})^{N_i-1} \right] + \\ + \sum_1^n P_i y_{gr1}^{max} C_{\infty}(t, \phi) f_i(t, \phi) - \sum_{i=2}^n e_{xi}^{nc} + \sum_1^m \sum_1^N \frac{y_{gri}^{max}}{E_{gr}(t_0)} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{J(t, \phi) \cdot f_i^2(u)}{l_m(k_{pgr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} \right]} - \frac{\sum_1^y \Delta N_1 + l(t, \phi) + l_n(t, \phi)}{\int_0^{eR} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in}(eR - e_{ti})^n] de - \frac{1}{2} y_{ti} e_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)} - \Delta W_{npi(i-1)} + \Delta W_c} \\ & \frac{y_{ti}^2 - (k_{pgr} R_{gr,t})^2 m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{ш\theta ij} \right]}{2l_u^2} \end{aligned} \right\} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{P} - \frac{P(t, \phi)}{1+P^2(t, \phi)} \right) \quad (11)$$

б) Основная стадия:

$$\begin{aligned}
 v_{pi}^v(t, \phi) = & \sum_1^N (C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k) \int_0^t a_{\omega \theta i} \cdot \max_{gr1}^{(1-P_1)} [1 + (1 - a_{\omega \theta i, j})^{N_{i-1}}] + \\
 & \sum_{i=1}^n P_{i, gr1} \max_{gr1} C_{\omega}(t, \phi) f_i(t, \phi) - \sum_{i=2}^n e_{xi}^{nc} + \sum_1^m \sum_1^N \frac{\max_{gr1}}{E_{gr}(t_0)} \\
 & \left[\frac{\left\{ [k_{\mu 11}(\nu) + k_{\mu 21}(\nu)] \left[\frac{k_{\mu 11}(\nu)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 12}(\nu)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 11}(\nu) + k_{\mu 21}(\nu)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi \right\}^2}{2p(k_{pgr} R_{grt, t})^4 m_j^4(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{\omega \theta i} \right]^2} - \sum_1^{nc} \Delta N_2 \right. \\
 & \left. \frac{\int_0^{eR} [y_{ti} + \sum_1^3 m_{in} (e_R - e_{ti})^n] de - \frac{1}{2} y_{ti} e_{ti} - \Delta W_{npi(i-1)} - \Delta W_{nprn(i-1)} + \Delta W_c}{[k_{\mu 1}(\nu) + k_{\mu 2}(\nu)] \left[\frac{k_{\mu 1}(\nu)}{E_{gr}(t)} + \frac{k_{\mu 2}(\nu)}{E_{gr}(t)} \right] - \int_{t_0}^t [k_{\mu 1}(\nu) + k_{\mu 2}(\nu)] \frac{\partial}{\partial \phi} C(t, \phi) d\phi} - A^* \right. \\
 & \left. \cdot \left(\arctg \frac{1}{p(t, \phi)} - \frac{P(t, \phi)}{1 + P^2(t, \phi)} \right) \right] \\
 \text{где } A^* = & (k_{pgr}, R_{grt, t})^2 \cdot m_j^2(t, \phi) \left[\frac{1}{E_{gr}(t)} + C_{\partial} \prod_{k=1}^{k=g} k_k a_{\omega \theta j} \right].
 \end{aligned} \tag{12}$$

Заключение

1. Проведенные исследования позволили установить закономерность развития деформации грунта при трехосном блочном циклическом нагружении, согласно которой разрушение и нелинейное деформирование грунта характеризуются образованием и развитием макро- и микротрещин в плоскостях предельного равновесия, инициаторами которых являются дефекты структуры в виде пор, пустот и усадочных микротрещин.

2. Разработаны уравнения деформирования глинистого грунта при трехосном режимном циклическом нагружении для стационарного, последовательно повышающегося и последовательно понижающегося режимов на основе теории виброползучести грунтов и механики разрушения упруго-пластических тел.

3. Полученные уравнения описывают деформирование грунта при рассмотренных режимах с учетом наблюдаемых в экспериментах процессов упрочнения и разупрочнения и эффекта торможения микро- и микротрещин на разных стадиях циклического трехосного сжатия и позволяют достаточно точно оценить вертикальные деформации (осадки) оснований фундаментов при режимных нагружениях, а также получить надежные и экономичные проектные решения.

Список библиографических ссылок

1. Andersen K. H. Bearing capacity under cyclic loading-offshore, along the coast, and on land // 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo. 2007. № 5 (46). P. 513–535.
2. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading // 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.
3. Pecker A. Soil behaviour under cyclic loading // CISM Int. Cent. Mech. Sci. Courses Lect. 2007. № 1 (494). P. 1–13.
4. Rasch C. Modelling of cyclic soil degradation. 2016. 110 p.
5. Leal A. N., Kaliakin V. N. Behavior of cohesive soils subjected to cyclic loading // An extensive review of pertinent literature. 2013. 109 p.
6. Goleman A., Boyatzis D., Mckee R. Soil-Stress-Strain Behavior: Measurement // Modeling and Analysis. 2019. № 9 (53). 188 p.
7. Elia G., Rouainia M. Investigating the cyclic behaviour of clays using a kinematic hardening soil model // Soil Dyn. Earthq. Eng. 2016. № 88. P. 399–411.
8. Gu C., Wang J., Cai Y., Sun L., Wang P., Dong Q. Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure // Soils Found. 2016. № 3 (56). P. 427–439.
9. Hicher P. Y. Experimental study of viscoplastic mechanisms in clay under complex loading // Geotechnique. 2016. № 8 (66). P. 661–669.
10. Hu C., Liu H. A new bounding-surface plasticity model for cyclic behaviors of saturated clay // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2015. № 1 (22). P. 101–119.
11. Wang Y. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as

- induced by wave loads // Ocean Eng. 2017. № 129. P. 191–202.
12. Ni J., Indraratna B., Geng X.Y., Carter J. P., Chen Y. L. Model of soft soils under cyclic loading // Int. J. Geomech. 2015. № 4 (15). 212 p.
 13. Lei H., Li B., Lu H., Ren Q. Dynamic deformation behavior and cyclic degradation of ultrasoft soil under cyclic loading // J. Mater. Civ. Eng. 2016. № 11 (28). 450 p.
 14. Ren X.-W., Xu Q., Teng J., Zhao N., Lv L. A novel model for the cumulative plastic strain of soft marine clay under long-term low cyclic loads // Ocean Eng. 2018. № 149. P. 194–204.
 15. Khan I., Nakai K., Noda T. Undrained cyclic shear behavior of clay under drastically changed loading rate // Int. J. GEOMATE. 2020. № 66 (18). P. 16–23.
 16. Hirai H. Assessment of cyclic response to suction caisson in clay using a three-dimensional displacement approach // Mar. Georesources Geotechnol. 2018. № 7 (37). P. 805–817.
 17. Liu Y., Huang M., Ma S. A simplified calculation method for axial cyclic degradation of offshore wind turbine foundations in clay // Mar. Georesources Geotechnol. 2020. № 2 (38). P. 204–213.
 18. Feng J., Wu X. Y., Zhu B. L., Yang Q. X. Analytical solution to one-dimensional consolidation in unsaturated soils under sinusoidal cyclic loading // J. Cent. South Univ. 2015. № 2 (22). P. 646–653.
 19. Zhao M. H., Heng S., Zheng Y. Numerical simulation on behavior of pile foundations under cyclic axial loads // J. Cent. South Univ. 2017. № 12 (24). P. 2906–2913.
 20. Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution // Mechanics of Composite Materials. 2019. № 2 (55). P. 171–180.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Sharaf Hani Mohammed Abdo

post-graduate student

E-mail: hani_2012@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Features of clay soil deformation under three-axis block mode cyclic loading,
taking into account the formation of micro- and macrocracks****Abstract**

Problem statement. The main purpose of the research is to study the parameters of strength and deformation of clay soil under triaxial compression, under block mode cyclic loads. To date, there are no data on the results of studies under the specified loading mode.

Results. Experimental studies of the strength and deformability of clay soils with three-axis compression $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ under block mode cyclic loads were carried out. A distinctive feature of experimental studies is that they are carried out in three-axis prismatic compression devices with an aspect ratio of 100×100×200 mm. The regularities of changes in the main characteristics of the soil during transitions to blocks with high and low stress levels are established. New data on the regularities of clay soil deformation under stationary conditions of repeated cyclic loading were obtained.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in the study of vibration creep deformations and changes in fatigue resistance to the destruction of clay soils under three-axis regime block cyclic loading. It is found that the stress-strain state, deformations and fatigue strength of soils change depending on the sequence of alternating blocks with different values of the maximum load of the cycle. Keywords: block-cyclic loading, stationary and non-stationary loading, vibration creep, clay soil, nonlinear deformations of soil vibration creep.

Keywords: block-cyclic loading, stationary and non-stationary loading, vibration creep, clay soil, nonlinear deformations of soil vibration creep.

References

1. Andersen K. H. Bearing capacity under cyclic loading-offshore, along the coast, and on land // 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo. 2007. № 5 (46). P. 513–535.
2. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading // 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.
3. Pecker A. Soil behaviour under cyclic loading // CISM Int. Cent. Mech. Sci. Courses Lect. 2007. № 1 (494). P. 1–13.
4. Rasch C. Modelling of cyclic soil degradation. 2016. 110 p.
5. Leal A. N., Kaliakin V. N. Behavior of cohesive soils subjected to cyclic loading // An extensive review of pertinent literature. 2013. 109 p.
6. Goleman A., Boyatzis D., Mckee R. Soil-Stress-Strain Behavior: Measurement // Modeling and Analysis. 2019. № 9 (53). 188 p.
7. Elia G., Rouainia M. Investigating the cyclic behaviour of clays using a kinematic hardening soil model // Soil Dyn. Earthq. Eng. 2016. № 88. P. 399–411.
8. Gu C., Wang J., Cai Y., Sun L., Wang P., Dong Q. Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure // Soils Found. 2016. № 3 (56). P. 427–439.
9. Hicher P. Y. Experimental study of viscoplastic mechanisms in clay under complex loading // Geotechnique. 2016. № 8 (66). P. 661–669.
10. Hu C., Liu H. A new bounding-surface plasticity model for cyclic behaviors of saturated clay // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2015. № 1 (22). P. 101–119.
11. Wang Y. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as induced by wave loads // Ocean Eng. 2017. № 129. P. 191–202.
12. Ni J., Indraratna B., Geng X.Y., Carter J. P., Chen Y. L. Model of soft soils under cyclic loading // Int. J. Geomech. 2015. № 4 (15). 212 p.
13. Lei H., Li B., Lu H., Ren Q. Dynamic deformation behavior and cyclic degradation of ultrasoft soil under cyclic loading // J. Mater. Civ. Eng. 2016. № 11 (28). 450 p.
14. Ren X.-W., Xu Q., Teng J., Zhao N., Lv L. A novel model for the cumulative plastic strain of soft marine clay under long-term low cyclic loads // Ocean Eng. 2018. № 149. P. 194–204.
15. Khan I., Nakai K., Noda T. Undrained cyclic shear behavior of clay under drastically changed loading rate // Int. J. GEOMATE. 2020. № 66 (18). P. 16–23.
16. Hirai H. Assessment of cyclic response to suction caisson in clay using a three-dimensional displacement approach // Mar. Georesources Geotechnol. 2018. № 7 (37). P. 805–817.
17. Liu Y., Huang M., Ma S. A simplified calculation method for axial cyclic degradation of offshore wind turbine foundations in clay // Mar. Georesources Geotechnol. 2020. № 2 (38). P. 204–213.
18. Feng J., Wu X. Y., Zhu B. L., Yang Q. X. Analytical solution to one-dimensional consolidation in unsaturated soils under sinusoidal cyclic loading // J. Cent. South Univ. 2015. № 2 (22). P. 646–653.
19. Zhao M. H., Heng S., Zheng Y. Numerical simulation on behavior of pile foundations under cyclic axial loads // J. Cent. South Univ. 2017. № 12 (24). P. 2906–2913.
20. Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution // Mechanics of Composite Materials. 2019. № 2 (55). P. 171–180.