

ПРИРОДА СЖИМАЕМОСТИ ПОЧВ И ГРУНТОВ

Ляшенко П. А. – к. т. н., доцент

Кубанский государственный аграрный университет

Сжимаемость почв и грунтов рассмотрена как процесс разрушения микроструктуры, элементы которой проявляют свойства упругости и вязкопластичности. Предлагаемая модель сжимаемости основана на известных представлениях о микроструктуре и выявленном автором эффекте цикличности скорости деформации почв и грунтов.

The soil compressibility has been regarded as the destruction process of the microstructure which elements show elastic and visco-plastic properties. Suggested compressibility model is based on the famous microstructure properties and on the deformation rate cyclic effect revealed by author.

Введение

Сжимаемостью называют способность дисперсных горных пород уменьшаться в объеме (уплотняться) при всестороннем сжатии. Всестороннее сжатие образца почвы или грунта осуществляется в одометрах, создающих условия компрессии: осевой деформации без возможности бокового расширения. Цилиндрический образец помещается в металлическое кольцо, препятствующее боковой деформации, а осевая деформация оценивается по осадке торца образца, к которому прикладывается давление через поршень прибора.

Оценка сжимаемости производится по коэффициенту уравнения уплотнения, написанного в предположении изотропного сжатия вещества:

$$\Delta \varepsilon = m_v \Delta \sigma,$$

где $\Delta \epsilon$ – относительное уменьшение высоты образца при увеличении давления на торце на величину $\Delta \sigma$, m_V – коэффициент относительной сжимаемости [1].

Сжатие даже крупными ступенями давления $\Delta \sigma$ может выявить значение "структурной прочности" σ_{str} , начиная с которого сжимаемость заметно увеличивается вследствие лавинообразного разрушения межчастичных связей [1; 2].

Считается, что при $\sigma \leq \sigma_{str}$ объем образца практически не уменьшается, а образец находится в состоянии одноосного сжатия. Сжимаемость проявляется лишь когда $\sigma > \sigma_{str}$, при этом образец грунта раздроблен и испытывает равномерное объемное сжатие, которое следует характеризовать изотропным распределением давления [2; 3].

Используемые модели сжимаемости [1; 2] недостаточны. Во-первых, уменьшение объема грунта и почвы наблюдается с начала нагружения образца, и разгрузка даже от малых начальных значений давления (12,5 кПа) сопровождается остаточной деформацией, а зависимость "давление-деформация" нелинейна. Во-вторых, повторное нагружение после разгрузки дает увеличение объемной деформации, по сравнению с первичным сжатием, а это означает, что первичное сжатие вызывает уплотнение только части образца, и повторное нагружение увеличивает уплотненную часть. В-третьих, если образец раздроблен при $\sigma > \sigma_{str}$, то каждый обломок в отдельности сохраняет какие-то свойства исходного грунта, но нагружаемые вместе они не отражают его сжимаемости.

Наконец, при плавном увеличении давления на торце образца скорость его деформации изменяется циклически [4], что необъяснимо с позиции изотропного уплотнения.

1. Испытание постоянно возрастающей нагрузкой

Плавное увеличение давления на торце образца позволяет провести более детальный анализ сжимаемости грунта или почвы.

При сжатии образцов твердого суглинка в компрессионном приборе постоянно возрастающее внешнее давление задавалось в соответствии с расчетом по формуле $\sigma = V_{\sigma} t$, где V_{σ} – постоянная скорость увеличения давления на торце образца, t – время с начала нагружения образца. Скорость нагружения V_{σ} была задана 347 Па/мин. Осевая деформация $\varepsilon(\sigma)$ монотонно увеличивается с самого начала нагружения (рис. 1). Испытания проводились на автоматизированном приборе АКП-4Н конструкции В. В. Денисенко [4].

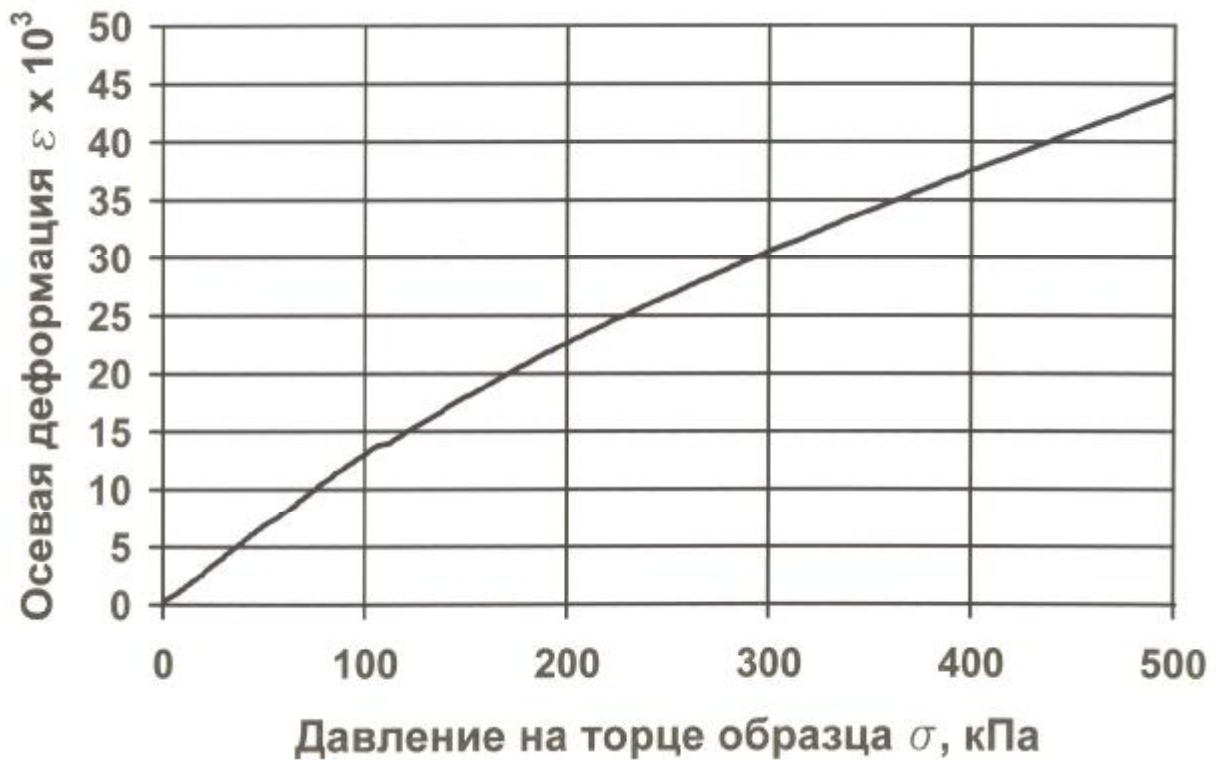


Рисунок 1 – Диаграмма осевого сжатия образца грунта

Интервал давления $\Delta\sigma$, принимаемый для расчета коэффициента сжимаемости, можно при этом способе испытания уменьшить до единиц килопаскалей, что на порядок меньше максимального значения, обычно принимаемого для испытаний для целей строительства и обработки почвы. А это позволяет выявить эффект Портевена-Лешателье (ЭПЛ) [5] в почвах

и грунтах, состоящий в том, что скорость деформации $V_\varepsilon = \Delta\varepsilon / \Delta t$ изменяется циклически, скачками возрастающая и уменьшаясь на коротком отрезке изменения давления [4] (рис. 2).

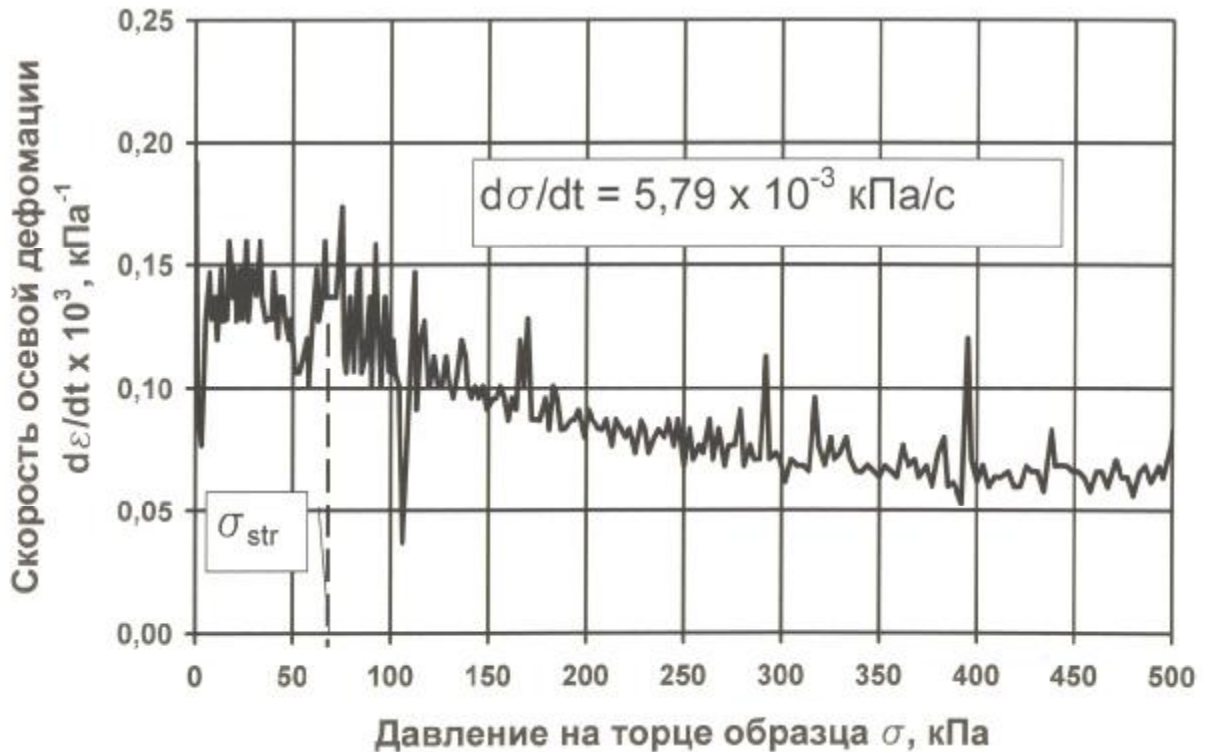


Рисунок 2 – Циклическое изменение скорости деформации.

При давлении, большем "структурной прочности" грунта, амплитуды значений скорости, в общем, снижаются

Верхние амплитуды $top\,ampl\{V_\varepsilon\}$ изменяются сравнительно мало при $\sigma \leq \sigma_{str}$, затем дают резкий всплеск значений при σ_{str} , после чего уменьшаются, в целом, при $\sigma > \sigma_{str}$. Это уменьшение не является монотонным и нарушается резкими всплесками значений, сравнимыми с всплеском при σ_{str} . Способ плавного нагружения позволяет четко зафиксировать значение σ_{str} .

Значения нижних амплитуд $bottom\,ampl\{V_\varepsilon\}$ имеют меньший разброс, чем верхних. Это указывает на то, что торможение деформации имеет более глубинную – *упругую* – природу.

Верхние амплитуды отражают скорости деформации разрушения грунта или почвы.

2. Механизм компрессионного сжатия (гипотеза)

Рассмотрим один цикл деформации. Он состоит из падающей и восходящей ветвей: на падающей ветви скорость деформации уменьшается, на восходящей – увеличивается. Обозначим длину падающей ветви через $\Delta\sigma_e$, восходящей – $\Delta\sigma_r$, а соответствующие им приращения деформации – $\Delta\varepsilon_e$ и $\Delta\varepsilon_r$ (рис. 3).

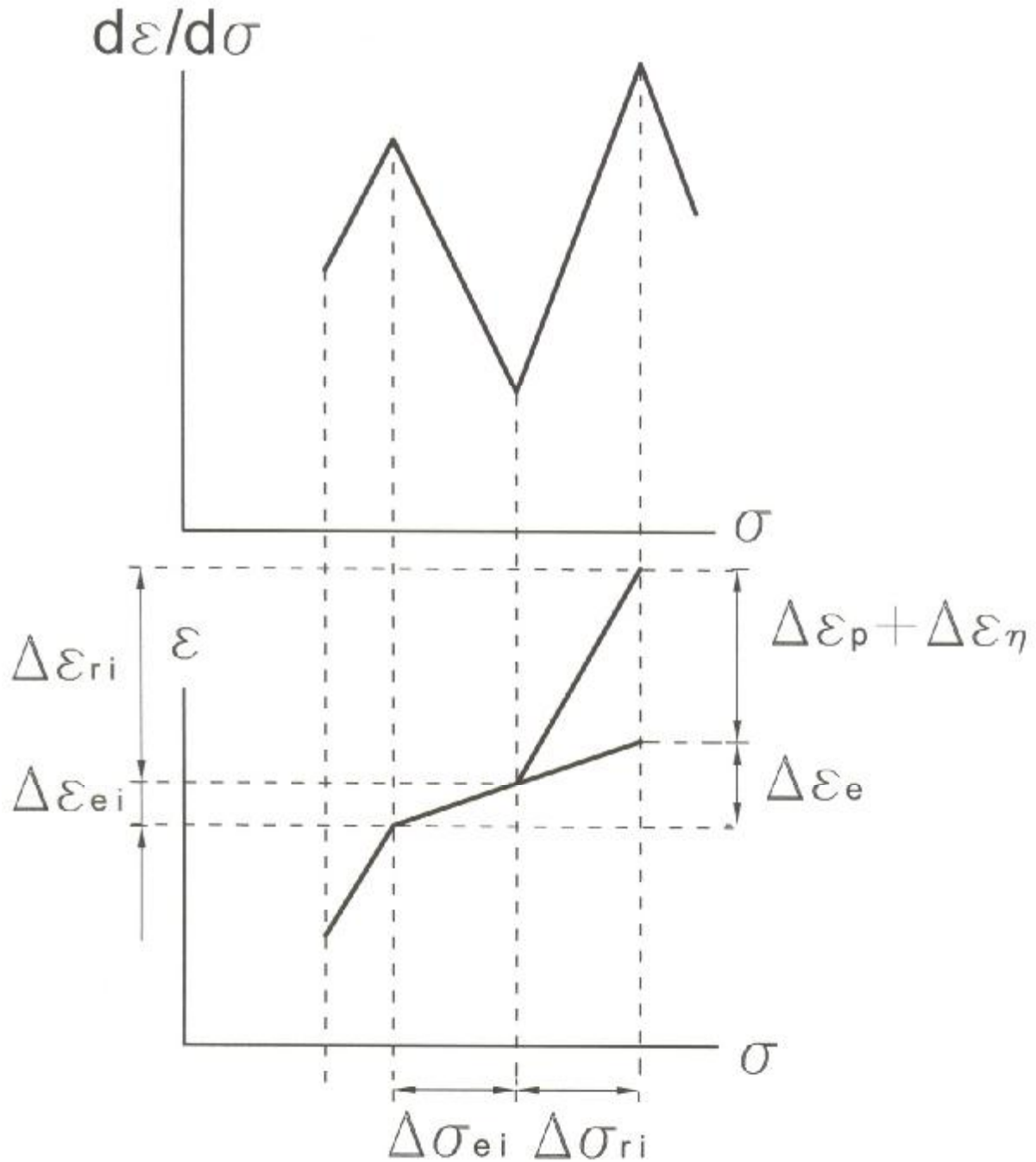


Рисунок 3 – Циклические изменения скорости деформации отражают смену чисто упругой деформации упруго-пластично-вязкой на протяжении одного цикла

Предположим, что падающая ветвь отражает упругое сопротивление образца – торможение деформации [6]. Вследствие непрерывного возрастания внешней нагрузки часть деформации на восходящей ветви является также упругой, другая часть (необратимая) – пластично-вязкой: $\Delta\varepsilon_p + \Delta\varepsilon_\eta$.

Очевидно, что упруго деформируется весь образец. Пластично-вязкая деформация локализуется в части образца вблизи сжимающих поверхностей металла. Пластично-вязкая деформация может быть сосредоточена только на поверхностях скольжения (Ω), проходящих в глинистой матрице по площадкам с максимальными касательными напряжениями τ_{max} , между микроагрегатами (MA). MA связаны между собой контактирующими глинистыми частицами (CP). Поверхность Ω проходит от наиболее крупных минеральных зерен (MC) к смежным MC через группы наиболее крупных пор (LP) [6]. Примем, что Ω имеют форму плоскостей, наклоненных к оси образца под углом $\pi/4$, и при пересечении образуют клинья (рис. 4).

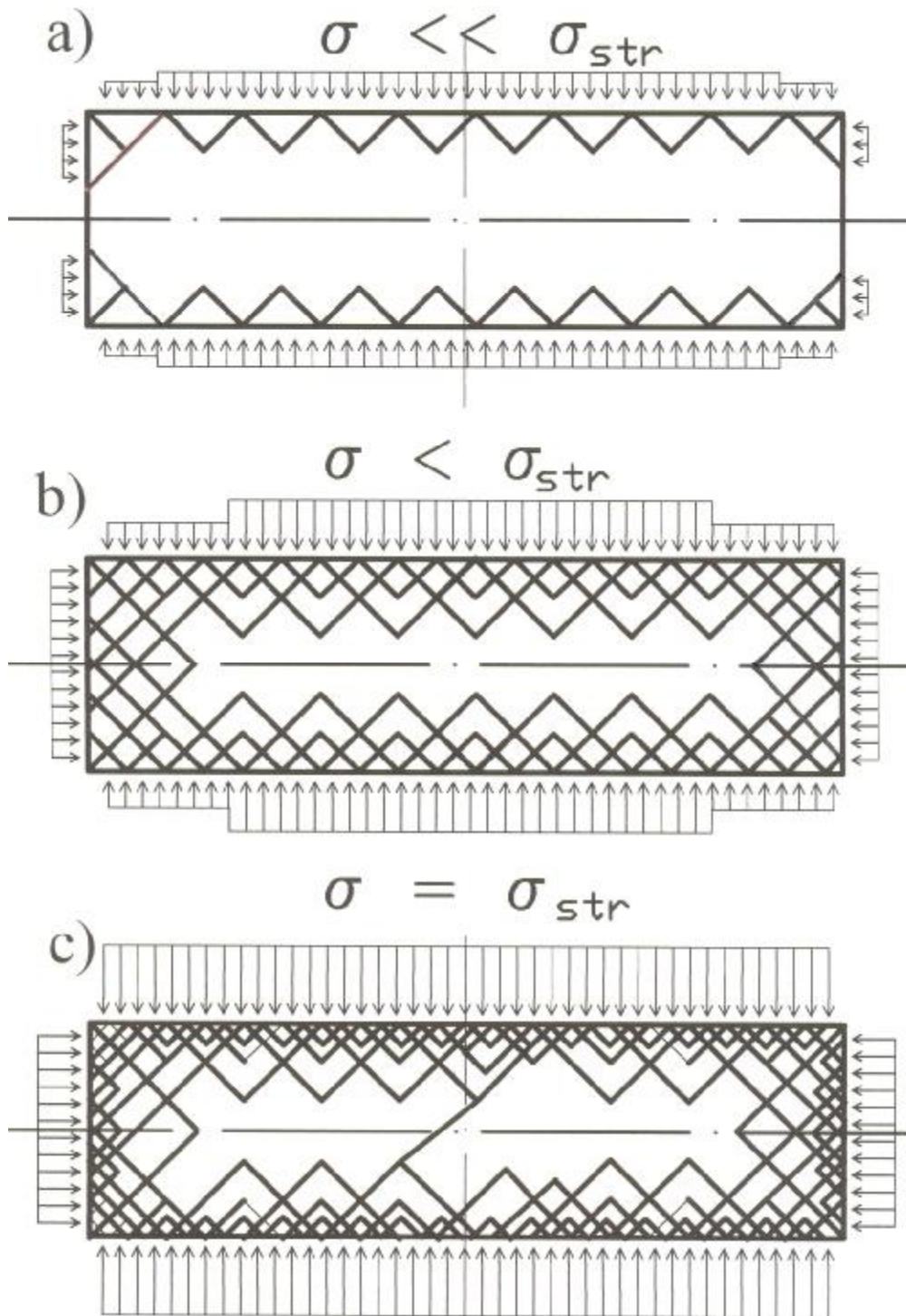


Рисунок 4 – Клинья скольжения образуются вблизи граней образца, соприкасающихся с деталями одометра (а), с ростом нагрузки увеличивается их число и глубина проникновения (b), а при давлении "структурной прочности" образец разрушается тотальной поверхностью скольжения (с)

Поверхности Ω образуются с шагом, определяемым положением MC в микроструктуре грунта и условием плоской деформации торца образца, задаваемой поршнем одометра. Они начинаются от точек на торце, расположенных с шагом $\Delta h = ih / 2n_c$, где i – номер цикла деформации, h – высота образца, n_c – число циклов деформации в интервале давлений $[0; \sigma_{str}]$. Образование поверхностей скольжения регистрируется прибором как увеличение скорости деформации до значений $top\ ampl\{V_\varepsilon\}$.

В средней части образца поверхности Ω растут навстречу друг другу. При достижении критической длины образуется тотальная (сквозная) поверхность скольжения Ω_T , что вызывает резкое увеличение (всплеск) скорости деформации до значения $max\ top\ ampl\{d\varepsilon/d\sigma\}$. Давление, при котором возникает всплеск скорости деформации, и есть "структурная прочность" σ_{str} согласно традиционному определению. **Таким образом, σ_{str} – это давление, при котором образец разрушается тотальной поверхностью скольжения Ω_T .**

Дальнейшее увеличение давления на образец приводит к деформации частей образца, разделенного поверхностью Ω_T , разрушению и уплотнению их микроструктуры. Относительные сдвиги крупных обломков ("брусков" [7]) велики, что дает сначала резкое возрастание сжимаемости при $\sigma > \sigma_{str}$. С уменьшением крупности обломков и числа наиболее крупных пор сдвиги уменьшаются, что проявляется как уменьшение значений $top\ ampl\{V_\varepsilon\}$.

Однако именно начальный участок испытания $\sigma \leq \sigma_{str}$ в простом компрессионном опыте дает представление о сопротивлении микроструктуры ненарушенного грунта или почвы.

3. Анализ сопротивления образца внешней нагрузке при $\sigma \leq \sigma_{str}$

3.1. Клинья скольжения

Пересекающиеся поверхности Ω образуют клинья скольжения. При $\sigma < \sigma_{str}$ части образца, граничащие с поршнем и дном прибора (области G_1 и G_2), состоят из клиньев скольжения, на "гранях" которых наиболее крупные поры (LP) закрылись. По мере возрастания давления области G_1 и G_2 увеличиваются, число поверхностей Ω в них возрастает, а плотность грунта увеличивается. При $\sigma = \sigma_{str}$ области G_1 и G_2 посредством totalной поверхности скольжения Ω_T , и образец оказывается разделенным на части (на "бруски").

Клинья скольжения формируют и боковые области, прилегающие к стенкам кольца и создающие боковое давление на них. Боковое давление возрастает с увеличением внешней нагрузки.

3.2. Сопротивление скольжению

Под действием внешней нагрузки на поверхности Ω возникают нормальные и касательные напряжения. Поверхность Ω физически представляет собой зазор между микроагрегатами (MA) (рис. 5), нормальное σ_n и касательное напряжения τ_s могут быть выражены через характеристики микроструктуры [7; 8; 9]:

$$\sigma_n = F_{max} \overline{N}_r, \quad \tau_s = F_3 \overline{N}_r, \quad (1)$$

где F_{max}, F_3 – максимальное сопротивление единичного глинистого контакта сжатию и растяжению, соответственно, при дальнейшей агрегации глинистых частиц и их микроагрегатов; \overline{N}_r – плотность активных контактов [9]. Кроме того, на Ω действует вязкое сопротивление:

$$\tau_\eta = \eta \frac{v}{h_2}, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости; v – скорость относительно-го смещения краев зазора между микроагрегатами; h_2 – ширина зазора при дальнейшей агрегации.

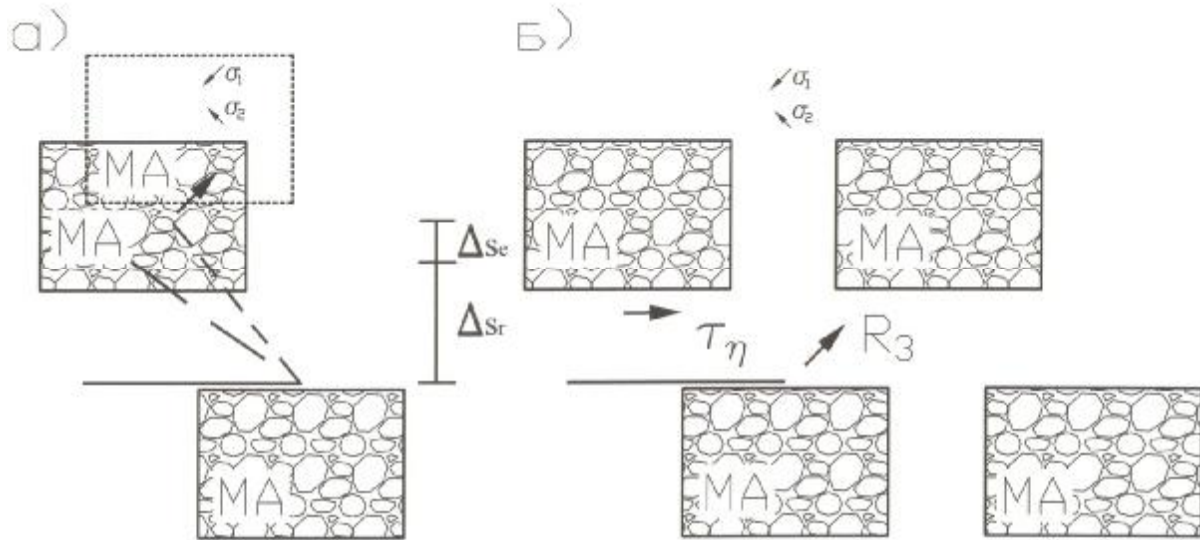


Рисунок 5 – Упругое (а) и пластично-вязкое (б) сопротивление микро-структуры грунта в зазоре между микроагрегатами МА

3.3. Упругое сопротивление

Упругое сопротивление в чистом виде проявляется только в 1-ом цикле деформации. Внешняя сила P_1 воспринимается первым слоем клиньев на каждом из торцов образца:

$$2P_{e.11} = P_1, \quad (3)$$

где $P_{e.11}$ – упругое сопротивление 1-го слоя клиньев в 1-ом цикле.

Упругое сопротивление 1-го и 2-го слоев клиньев во 2-ом цикле деформации осложнено эффектом стеснения деформации, вызванном боковым давлением и проявляющимся в увеличении упругого сопротивления контактов между микроагрегатами; учтем это увеличение коэффициентом $\xi > 1$. С другой стороны, объем слоя клиньев уменьшается по мере удаления слоя от торцов образца. Считая, что во 2-ом цикле поверхности сколь-

жения Ω идут с тем же шагом, что и в 1-ом, получаем формулы для сил упругого сопротивления 1-го и 2-го слоев:

$$\begin{aligned} P_{e.21} &= P_{e.11} \xi_2 \delta_1 \\ P_{e.22} &= P_{e.11} \xi_2 \delta_2' \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta_2 = \frac{V_2}{V_1}$, $\delta_1 = 1$, V_2 и V_1 – объем 2-го и 1-го слоев клиньев соответственно.

$$\text{Вообще, } P_{e.ik} = P_{e.11} \xi_i \delta_k, \quad (k = 1..i), \quad (5)$$

причем коэффициент $\xi_i \delta_k > 1$. (Значения коэффициента $\xi_i \nu_k$ принимаются по условию постоянства коэффициента вязкости жидкости в зазоре между микроагрегатами).

В средней части образца, между областями уплотнения G_1 и G_2 , упругое сопротивление равно внешней силе:

$$P_{e.i} = P_i, \quad (6)$$

Нормальные упругие напряжения на горизонтальных площадках образца, вычисленные для области уплотнения и для средней части образца по циклам деформации, малы в области уплотнения, но резко возрастают в ненарушенной части образца (рис. 6).

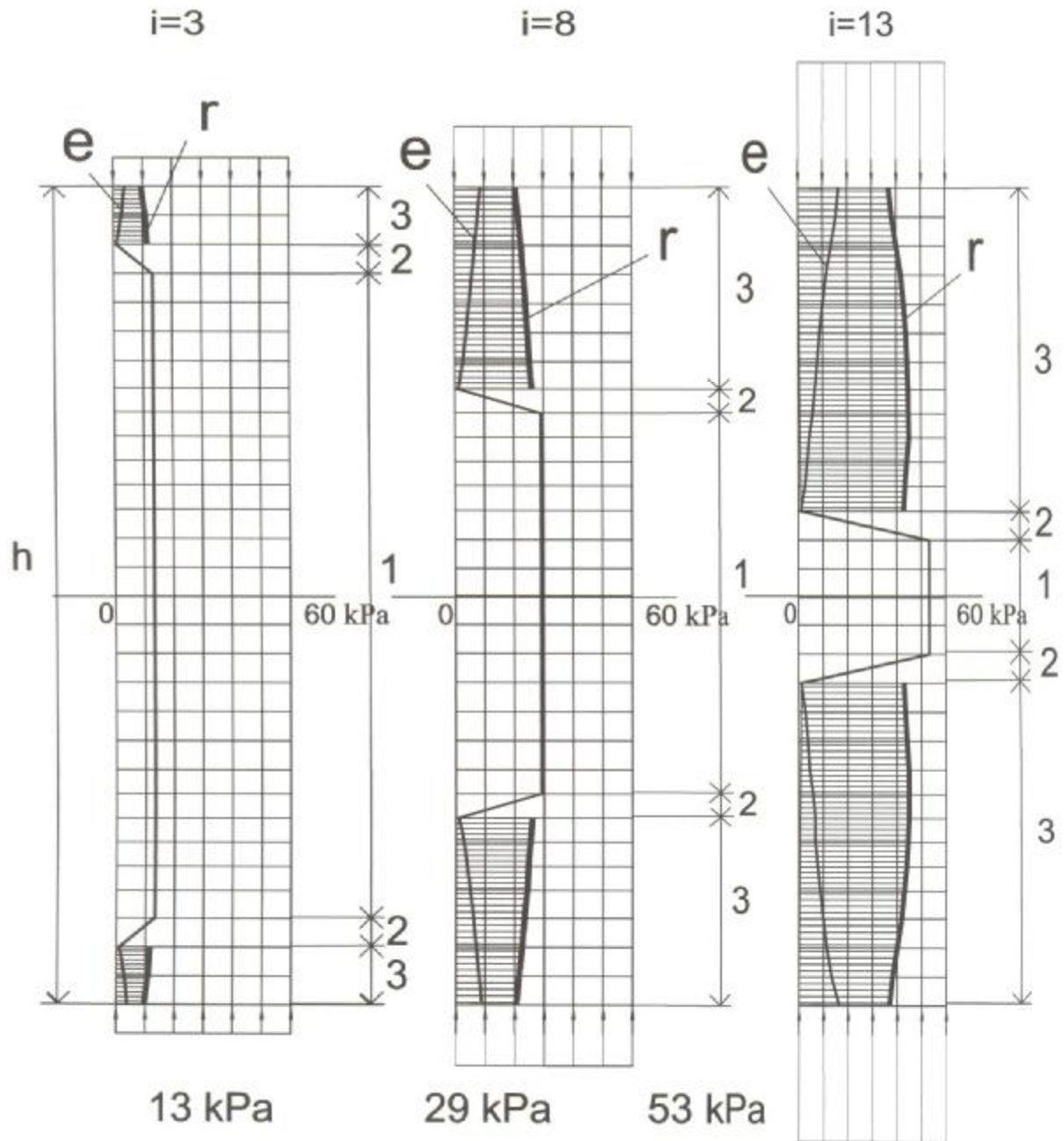


Рисунок 6 – Эпюры упругих (e) и неупругих (r) напряжений на горизонтальных площадках образца в трех произвольных циклах деформации до σ_{str}

3.4. Фильтрация поровой жидкости

На границе области уплотнения упругие напряжения вызывают повышение давления жидкости в крупных порах, где жидкость находится в свободном состоянии. Здесь часть внешней нагрузки воспринимается поровой водой.

Разность давлений в наиболее крупной поре на поверхности скольжения и в ранее разрушенной поре на той же поверхности скольжения может вызвать истечение жидкости в момент разрушения первой. Это возможно в том случае, когда разности давлений достаточно для поддержания водотока в зазоре между микроагрегатами, где жидкость преодолевает силы притяжения глинистых поверхностей. Начальный градиент напора можно определить по формуле [10]:

$$i_o = \frac{4M_3 N_r F_3}{\gamma_w L_3^2}, \quad (7)$$

где L_3 и M_3 – размер и шаг наиболее крупных пор соответственно, N_r – число активных пор на участке поверхности скольжения длиной M_3 [7; 8], γ_w – удельный вес воды.

Скорость фильтрации воды на фронте области уплотнения возрастает с увеличением нагрузки по мере продвижения этого фронта вглубь образца, так как увеличивается градиент упругих напряжений (рис. 7).



Рисунок 7 – График увеличения скорости фильтрации поровой жидкости на фронте уплотнения грунта (почвы) при возрастании давления до σ_{str} в 16-ти циклах деформации

3.5. Пластично-вязкое сопротивление слоев клиньев выразим разностью между внешней силой и ее упругой составляющей:

$$P_{r.ik} = P_i - P_{e.ik} - Z_i, \quad (8)$$

где Z_i – упруго-вязкое сопротивление на поверхности скольжения, выходящей на боковую грань образца, в i -ом цикле деформации.

$$Z_i = A_{segm} F_{max} d_N \sin \beta_i + A_{segm} \frac{\eta}{h_2} v_{cr.i}, \quad (9)$$

где A_{segm} и β – площадь поверхности скольжения и угол наклона к оси образца соответственно; d_N – плотность активных контактов на поверхности скольжения.

Неупругое сопротивление клиньев скольжения создается предельными касательными напряжениями контактной природы и вязким трением жидкости в зазоре между микроагрегатами:

в 1-ом цикле деформации

$$P_{r.11} = F_3 N_{r.11} + \eta \frac{v_{cr.1} X_1^{(m)} \Delta r}{2h_2}; \quad (10)$$

во 2-ом цикле –

$$P_{r.21} = F_3 N_{r.21} + \eta \frac{v_{cr.2} X_1^{(m)} \Delta r}{2h_2} \quad (11)$$

$$P_{r.22} = F_3 N_{r.22} + \eta \frac{v_{cr.2} (X_1^{(m)} + X_2^{(m)}) \Delta r}{2h_2};$$

далее, в i -ом цикле деформации

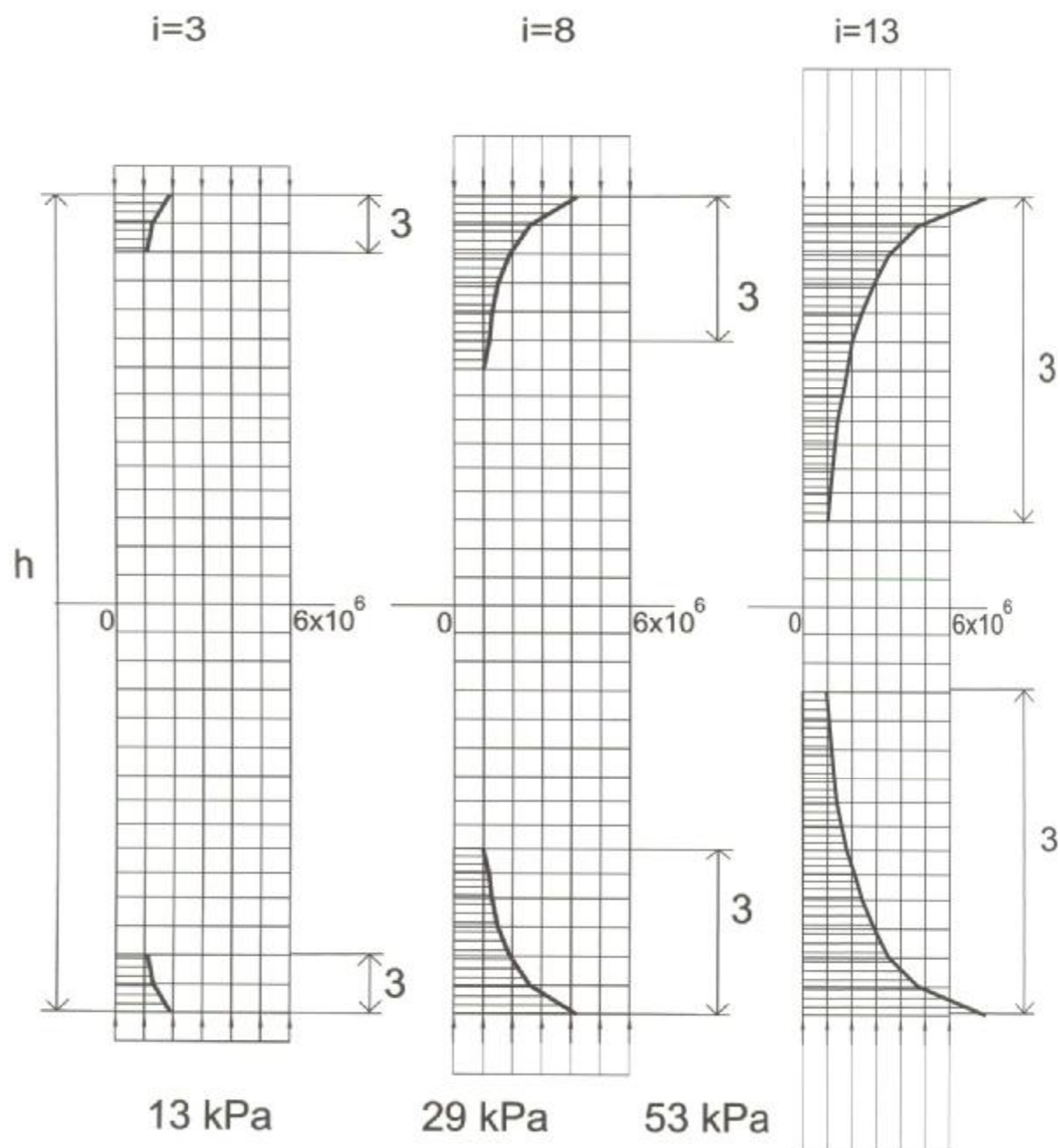


Рисунок 8 – Эпюры числа неупругих контактов глинистых частиц в трех произвольных циклах деформации до σ_{str}

При удалении от торцов в средней части образца число активных контактов быстро уменьшается, но не обращается в нуль.

Число контактов на торцах образца монотонно возрастает с увеличением внешнего давления. Соответственно возрастает сопротивление грунта (почвы) отрыву (рис. 9), т. е. липкость грунта (почвы).



Рисунок 9 – Увеличение сопротивления грунта отрыву на торце образца при возрастании давления до σ_{str} в 16-ти циклах деформации

Форма графика на рисунке 9 повторяет график на рисунке 7, что объясняется тем, что расчеты обеих величин произведены на основе одних экспериментальных данных. С другой стороны, это подтверждает правильность принятой модели деформации: увеличение градиента упругих напряжений (и скорости фильтрации) происходит синхронно с уплотнением приграничных областей.

Заключение

Компрессионные испытания при постоянно возрастающем внешнем давлении выявили недостаточность общепринятой модели однородного грунта (почвы) и его изотропного сжатия. При рассмотрении образца грунта как упруго-пластично-вязкого тела с подвижными элементами микроструктуры, взаимодействующими посредством контактов, на основе результатов компрессионного сжатия *постоянно возрастающей нагрузкой*, было установлено следующее.

1. Скорость осевой деформации образца грунта или почвы при компрессионном сжатии изменяется циклически при постоянной скорости нагружения, т. е. проявляется эффект Портевена-Лешателье. Каждый цикл деформации отражает упругое сжатие образца и частичное разрушение его микроструктуры поверхностями скольжения. Уменьшение объема образца происходит за счет разрушения наиболее крупных пор, через которые проходят поверхности скольжения, и сужения зазоров между микроагрегатами.

2. С самого начала нагружения формируются области уплотнения, прилегающие к поршню и дну одометра, и области предельного состояния грунта, создающие боковое давление на стенки кольца. Начальный этап завершается разрушением образца тотальной поверхностью скольжения при давлении "структурной прочности". Компрессионное сжатие грунта или почвы при давлении, большем "структурной прочности", приводит к дроблению образца поверхностями скольжения на "бруски". **Только начальный этап компрессионного сжатия при $\sigma \leq \sigma_{str}$ дает информацию о деформационных свойствах ненарушенного глинистого грунта.**

3. В каждом цикле деформации при $\sigma \leq \sigma_{str}$ поверхности скольжения проникают вглубь образца на величину, определяемую шагом наиболее крупных минеральных зерен, и образуют слой клиньев скольжения, на гранях которых возникает пластично-вязкое сопротивление микроструктуры. Слои клиньев скольжения составляют область уплотнения образца. Пластическое сопротивление определяется сопротивлением глинистых контактов отрыву, упругое – сжатию, вязкое – трением жидкого слоя в зазорах между микроагрегатами. На торцах образца плотность контактов глинистых частиц увеличивается в несколько раз, это приводит к увеличению сопротивления грунта отрыву, что проявляется как липкость грунта или почвы.

4. На фронте слоев клиньев скольжения возможна фильтрация поровой жидкости под действием упругих напряжений, если их градиент достигает критического значения. Жидкость фильтруется в сторону меньших упругих напряжений – в сторону торцов – по поверхностям скольжения. Значение критического градиента определяется характеристиками микроструктуры грунта или почвы.

Список литературы

1. Цытович, Н. А. Механика грунтов (краткий курс) / Н. А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1979. – 273 с.
2. Осипов, В. И. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений / В. И. Осипов, В. Н. Соколов, В. В. Еремеев. – М. : Наука, 2001. – 238 с.
3. Избаш, Ю. В. Методика определения модуля общей деформации по результатам компрессионных испытаний / Ю. В. Избаш // Основания и фундаменты: Респ. Междуведомственный научно-техн. сб. – Вып. 22. – Киев, 1989. – С. 28–30.
4. Ляшенко, П. А. Определение структурной прочности грунтов постоянно возрастающей нагрузкой / П. А. Ляшенко, В. В. Денисенко. – Депонир. во ВНИИИТПИ, № 11408, 1993.
5. Encyclopedia of Physics. Mechanics of Solids / Editor C. Truesdell. – Vol. Via/1, Verlag : Berlin, Heidelberg, New York, 1973.
6. Ляшенко, П. А. Микроструктурная деформируемость глинистых грунтов / П. А. Ляшенко. – Краснодар : Изд-во КубГАУ, 2001. – 122 с.
7. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – Т. 2. – М. : Мир, 1969. – 863 с.
8. Ляшенко, П. А. Модель деформации микроструктуры грунта / П. А. Ляшенко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2005. – № 03(11). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>
9. Ляшенко, П. А. Контактная теория прочности грунта / П. А. Ляшенко // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2005. – № 06(14). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2005/06/pdf/01.pdf>
10. Ляшенко, П. А. Фильтрация в глинистых грунтах / П. А. Ляшенко : сб. науч. тр., кафедра оснований и фундаментов КубГАУ. – Краснодар : КубГАУ, 2003. – С. 151–158.