

## О СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Крамаренко В.В.<sup>1</sup>, Никитенков А.Н.<sup>1</sup>, Молоков В.Ю.<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томский политехнический университет, г. Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30), e-mail: kramarenko-v-v@mail.ru*

Работа посвящена характеристике исходного состояния дисперсных грунтов - их структурной прочности. Знание ее изменчивости позволяет определить степень уплотненности грунта и, возможно, особенности истории его формирования в данном регионе. Оценка и учет этого показателя при испытаниях грунтов имеет важнейшее значение при определении характеристик их физико-механических свойств, а также при дальнейших расчетах осадок оснований сооружений, что слабо отражено в нормативных документах и мало применяется в практике инженерно-геологических изысканий. В работе кратко изложены наиболее распространенные графические методы определения показателя по результатам компрессионных испытаний, полученные результаты лабораторных исследований структурной прочности дисперсных грунтов территории Томской области. Выявлены взаимосвязи между структурной прочностью грунтов и глубиной их залегания, степень их уплотненности. Даны краткие рекомендации по применению показателя.

Ключевые слова: структурная прочность грунтов, давление предварительного уплотнения

## ABOUT THE PRECONSOLIDATION PRESSURE OF CLAY SOILS IN TOMSK REGION

Kramarenko V.V.<sup>1</sup>, Nikitenkov A.N.<sup>1</sup>, Molokov V.Y.<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU, Tomsk Polytechnic University, e-mail: kramarenko-v-v@mail.ru*

Work is devoted to one of main indicators of initial state of dispersed soils - their structural strength (preconsolidation or yield stress). Knowledge of its variability helps to determine the degree of compaction of the soil and history of its formation in the region. Assessment of this variable during testing of soils is critical in determination of the characteristics of their physical and mechanical properties, and also this parameter is valuable for further calculations of soil settlement that poorly reflected in normative documents and little used in the practice of engineering and geological surveys. The article summarizes the most common methods of determination of required parameters using graphic methods based on analysis of results of soil compression tests and results of laboratory studies of the structural strength of dispersed soil for Tomsk region. In this work we are revealed relations between the structural strength of soils and their depth, their degree of compaction. In conclusion we gives brief recommendations for the use of this indicator.

Keywords: structural strength of the soil, the pre-compaction pressure

Структурной прочностью  $p_{str}$  называется прочность, обусловленная наличием структурных связей и характеризуемая напряжением, до которого образец грунта при его нагружении вертикальной нагрузкой практически не деформируется [2]. Так как уплотнение начинается при напряжениях в грунте, превышающих его структурную прочность и при проведении испытаний грунтов недооценка этого показателя влечет за собой ошибки в определениях значений других характеристик механических свойств. Важность определения показателя  $p_{str}$  отмечается давно [15], как пишет Н.А. Цытович [7] – «...кроме обычных показателей деформативно-прочностных свойств слабых глинистых грунтов, для оценки поведения этих грунтов под нагрузкой и установления правильного прогноза величины осадок возводимых на них сооружений необходимо при изысканиях определять структурную прочность  $p_{str}$ ». Явление при изысканиях степени уплотненности грунтов

важно для прогноза осадки проектируемого сооружения, так как на переуплотненных грунтах осадка может быть в четыре и более раз меньше, чем на нормально уплотненных грунтах. При значениях коэффициента переуплотнения  $OCR > 6$  коэффициент бокового давления грунта в покое  $K_0$  может превышать 2, что необходимо учитывать при расчете подземных сооружений [5].

Как отмечено в работе [33]: «Первоначально условия нормального уплотнения преобладают во время процесса осадконакопления и формирования и последующего уплотнения морских, озерных, аллювиальных, дельтовых, эоловых и речных отложений песков, илов и глин. Тем не менее, большинство грунтов на Земле стали слегка/умеренно/сильно переуплотненными в результате воздействия различных физических, экологических, климатических и тепловых процессов на протяжении от многих тысяч до миллионов лет. Эти механизмы переуплотнения и/или видимого предварительного напряжения включают в себя: поверхностную эрозию, выветривание, повышение уровня моря, увеличение уровня грунтовых вод, оледенение, циклы замораживания-оттаивания, повторяющееся смачивание/испарение, высыхание, потерю массы, сейсмические нагрузки, приливно-отливные циклы и геохимические воздействия». Тема определения состояния уплотнения грунтов по-прежнему весьма актуальна и встречается в публикациях, практически, со всех континентов [1–50]. Факторы и показатели, определяющие переуплотненное или недоуплотненное состояние глинистых грунтов, причины и влияние на физико-механические показатели столь прочной цементации рассмотрены в работах [1, 4, 26, 32]. Результаты определения показателя также имеют широкий круг применения на практике, начиная от расчета осадок оснований сооружений [4, 5, 7]; сохранения естественной структуры предназначенных для лабораторных испытаний образцов; до весьма специфических тем, по прогнозу уплотнения почв эвкалиптовых и кофейных плантаций, путем сопоставления их структурной прочности с нагрузкой от техники [20, 25] .

Знание значений показателя  $p_{str}$  и их изменчивости с глубиной характеризуют особенности состава, связей и структуры грунтов, условия их формирования, в том числе и историю нагружения. В связи с этим, особый научный и практический интерес вызывают исследования  $p_{str}$  в разных регионах, особенно важны эти исследования на территории Западной Сибири с мощным чехлом осадочных отложений. В Томской области проводились детальные исследования состава и свойств грунтов, в результате которых и территория г. Томска, и прилегающие районы изучены довольно подробно с инженерно-геологических позиций. В то же время, необходимо отметить, что грунты исследовались конкретно под строительство определенных объектов в соответствии с действующими нормативными документами, которые не содержат рекомендации по дальнейшему применению  $p_{str}$  и,

соответственно, не включают его в список необходимых определяемых характеристик грунтов [6]. Поэтому, целью данной работы является определение структурной прочности дисперсных грунтов и ее изменения по разрезу в наиболее активно освоенных и осваиваемых районах Томской области.

Задачи исследования включали обзор и систематизацию методов получения  $p_{str}$ , лабораторные определения состава грунта и характеристик основных физических и механических свойств, изучение изменчивости  $p_{str}$  с глубиной, сравнение структурной прочности с бытовым давлением.

Работы проводились в ходе инженерно-геологических изысканий под ряд крупных объектов, расположенных в центральных и северо-западных районах Томской области, где верхняя часть разреза представлена различными стратиграфо-генетическими комплексами пород четвертичной системы, палеогена и мела. Условия их залегания, распространения, состав, состояние зависят от возраста и генезиса и создают довольно разнородную картину, по составу изучались только дисперсные грунты, в которых преобладают глинистые разновидности полутвердой, твердой и тугопластичной консистенции. Для решения поставленных задач были опробованы скважины и шурфы в 40 точках, было отобрано более 200 образцов дисперсных грунтов с глубины до 230 м. Испытания грунтов проводились в соответствии с методами, приведенными в действующих нормативных документах [2, 3, 6]. Были определены: гранулометрический состав, плотность ( $\rho$ ), плотность твердых частиц ( $\rho_s$ ), плотность сухого грунта ( $\rho_d$ ), влажность ( $w$ ), влажность глинистых грунтов, на границе раскатывания и текучести ( $w_L$  и  $w_p$ ), показатели деформационных и прочностных свойств; рассчитаны параметры состояния, такие как коэффициент пористости ( $e$ ), пористость, полная влагоемкость, для глинистых грунтов – число пластичности и показатель текучести, коэффициент переуплотнения грунта  $OCR$  (как отношение давления предварительного уплотнения ( $\sigma_p'$ ) к бытовому давлению в точке отбора образца) и другие характеристики.

При выборе графических методов определения показателя  $p_{str}$ , кроме метода *Casagrande* были рассмотрены применяемые за рубежом методы определения давления предварительного уплотнения  $\sigma_p'$ . Необходимо отметить, что в терминологии инженера-геолога «давление предварительного уплотнения» (*Preconsolidation Stress*), начинает вытеснять привычное понятие «структурной прочности грунта», хотя методы их определения одинаковы. По определению [3], структурной прочностью грунта называют вертикальное напряжение в образце грунта, соответствующее началу перехода от упругих деформаций сжатия к пластическим, что соответствует термину *Yield Stress*. В этом смысле, определяемая в компрессионных испытаниях характеристика, не должна приниматься как максимальное давление в рамках «исторической памяти» образца. Burland [12] полагает, что

термин *yield stress* является более точным, а термин *preconsolidation stress* должен применяться для ситуаций, в которых величина такого давления может быть установлена геологическими методами. Аналогичным образом термин *Over Consolidation Ratio (OCR)* должен быть использован для описания известной предыстории напряжений, а в противном случае должен применяться термин *Yield Stress Ratio (YSR)* [28]. Во многих случаях *Yield Stress* берется в качестве эффективного напряжения предварительного уплотнения, хотя технически последнее связано с механической разгрузкой напряжений, в то время как первый включает в себя дополнительные эффекты, обусловленные диагенезом, сцеплением за счет органики, соотношением компонент грунта и его структурой [33], т.е. является структурной прочностью грунта.

Таким образом, первым шагом на пути выявления особенностей формирования грунтов должно быть количественное определение профиля *Yield Stress*, который является ключевым параметром выделения нормально уплотненных грунтов (с преимущественно пластической реакцией) из числа переуплотненных грунтов (ассоциирующихся с псевдо-упругой реакцией) [33]. И структурная прочность  $p_{str}$ , и давление предварительного уплотнения  $\sigma_p'$  определяются одинаково, как было отмечено, в основном лабораторными методами по результатам компрессионных испытаний (ГОСТ 12248, ASTM D 2435 и ASTM D 4186). Есть много интересных работ исследующих состояние грунта, давление предварительного уплотнения  $\sigma_p'$  и методы его определения в полевых условиях [16, 25, 31, 39, 42, 47]. Графическая обработка результатов компрессионных испытаний также весьма разнообразна, ниже приводится краткое описание наиболее часто применяемых за рубежом методик определения  $\sigma_p'$ , которые следует применять для получения  $p_{str}$ .

**Метод Casagrande** (1936 г [15]) – наиболее старый метод для расчета структурной прочности и давления предварительного уплотнения. Он основан на предположении, что грунт испытывает изменение прочности, переходя от упругой реакции на нагрузку к пластичной, в точке, близкой к давлению предварительного уплотнения. Этот метод дает хорошие результаты при наличии точно определенной точки перегиба на графике компрессионной кривой вида  $e - \log \sigma'$  (рис. 1 а), через которую проводят касательную и горизонтальную линию от коэффициента пористости, затем между ними биссектрису. Прямолинейный участок окончания компрессионной кривой экстраполируют до пересечения с биссектрисой и получают точку, значение ее при проецировании на ось  $\log \sigma'$ , соответствует давлению переуплотнения  $\sigma_p'$  (или структурной прочности). Метод остается наиболее часто применяемым по сравнению с другими.

**Метод Burmister** (1951 г [13]) – представляет зависимость вида  $\varepsilon - \log \sigma'$ , где  $\varepsilon$  – относительная деформация. Значение  $\sigma_p'$  определяется при пересечении перпендикуляра

идущего от оси  $\text{Log } \sigma'$  через точку петли гистерезиса при повторной нагрузке образца, с касательной к конечному участку компрессионной кривой (рис. 1 б).

**Метод Schemertmann** (1953 г [41]), здесь применяется также компрессионная кривая вида  $e - \log \sigma'$  (рис. 1 в). Компрессионные испытания проводят до получения отчетливого прямого участка на кривой, затем производят разгрузку до бытового давления и повторно нагружают. На графике проводят линию параллельно средней линии кривой декомпрессии-рекомпрессии через точку бытового давления. Значение  $\sigma_p'$  определяют, проведя перпендикуляр от оси  $\log \sigma'$  через точку разгрузки, до пересечения с параллельной прямой. Из точки  $\sigma_p'$  проводят линию до пересечения с точкой на прямолинейном участке компрессионной кривой, имеющей коэффициент пористости  $e=0,42$ . Полученная истинная кривая компрессии применяется для расчета коэффициента компрессии или коэффициента уплотнения. Этот метод применим для грунтов мягкой консистенции.

**Метод Akai** (1960 г [8]), представляет зависимость коэффициента ползучести  $\varepsilon_s$  от  $\sigma'$  (рис. 1 г), применяется, соответственно, для склонных к ползучести грунтов. Консолидационная кривая представляет собой зависимость относительной деформации от логарифма времени и делится на участок фильтрационной консолидации и консолидации ползучести. Akai отметил, что коэффициент ползучести увеличивается пропорционально  $\sigma'$  до значения  $\sigma_p'$ , и после  $\sigma_p'$  пропорционально  $\text{Log } \sigma'$ .

**Метод Janbu** (1969 г [27]) основан на предположении, что давление предварительного уплотнения может быть определено из графика вида  $\varepsilon - \sigma'$ . В методе Janbu для глин с высокой чувствительностью и низким  $OCR$  давление предварительного уплотнения может быть определено при построении графика «нагрузка – деформация» с использованием линейного масштаба. Второй способ **Janbu** представляет собой график зависимости секущего модуля деформации  $E$  или  $E_{50}$  от эффективных напряжений  $\sigma'$  (рис.1 д). И еще один вариант **метод Christensen-Janbu** (1969 г [18]), представляет зависимость вида  $r - \sigma'$ , получаемая по консолидационным кривым, где  $t$  – время,  $r = dR/dt$ ,  $R = dt/d\varepsilon$ .

**Метод Sellfors** (1975 г [40]) представляет собой зависимость вида  $\varepsilon - \sigma'$  (рис. 1 е), применяется в основном для метода CRS. Ось напряжение-деформация выбирается в с фиксированным соотношением в линейном масштабе, обычно в соотношении 10/1 для отношения напряжения (кПа) к деформации (%). Такой вывод был сделан после серии полевых испытаний, где были измерены поровое давление пор и осадка. Это значит, что метод Sallfors для оценки давления переуплотнения дает более соответствующие действительности значения по сравнению с оценками, проводимыми в ходе полевых испытаний.

**Метод Pacheco Silva** (1970 г [38]), представляется очень простым относительно

построения графика, также вида  $e - \log \sigma'$  (рис. 1 ж), дает точные результаты при испытаниях мягких грунтов. Этот метод не требует субъективной интерпретации результатов, а также не зависит от масштаба. Широко используется в Бразилии.

**Метод Butterfield** (1979 г [14]) основан на анализе графика зависимости объема образца от эффективного напряжения вида  $\log(1+e) - \log \sigma'$  или  $\ln(1+e) - \ln \sigma'$  (рис. 1 з). Метод включает в себя несколько различных версий, где давление предварительного уплотнения определяется как точка пересечения двух линий.

**Метод Tavenas** (1979 г [48]), предполагает линейную зависимость между энергией деформации и эффективным напряжением для рекомпрессионной части испытания на графике вида  $\sigma' \varepsilon - \sigma'$  (рис. 1 н, в верхней части графика). Его используют непосредственно на основе кривой компрессии без учета перезагрузочной части испытания. Для более консолидированных образцов, график напряжения/деформации состоит из двух частей: первая часть кривой возрастает более резко, чем вторая. Точка пересечения двух линий, определяется как давление предварительного уплотнения.

**Метод Oikawa** (1987 г [36]), представляет собой пересечения прямых на графике зависимости  $\log(1+e)$  от  $\sigma'$  – эффективных напряжений, наносимых на шкалу в логарифмическом масштабе (десятичные логарифмы).

**Метод Jose** (1989 г [29]), представляет зависимость вида  $\log e - \log \sigma'$  очень простой метод для приближенной оценки давления предварительного уплотнения, в методе используется пересечение двух прямых. Он является прямым методом и в нем отсутствуют ошибки определения места расположения точки максимума кривизны. **Метод Sridharan et al.** (1989 г [29]), также представляет собой график зависимости  $\log(1+e) - \log \sigma'$  для определения структурной прочности плотных грунтов, поэтому касательная пересекает горизонтальную линию, соответствующую исходному коэффициенту пористости, что дает неплохие результаты.

**Метод Burland** (1990 г [12]) представляет собой график зависимости *индекса пористости*  $I_v$  от напряжений  $\sigma'$  (рис. 1 и). Индекс пористости определяется по формуле  $I_v = (e - e^*_{100}) / (e^*_{100} - e^*_{1000})$ , или для более слабых грунтов:  $I_v = (e - e^*_{10}) / (e^*_{10} - e^*_{100})$ , где  $e^*_{10}$ ,  $e^*_{100}$  и  $e^*_{1000}$  коэффициенты пористости при нагрузках 10, 100 и 1000 кПа (рис. б).

**Метод Jacobsen** (1992 г [26]), структурная прочность принимается равной  $2,5\sigma_{кc}$ , где  $\sigma_{кc}$  – точка максимальной кривизны на графике Казагранде, соответственно, также зависимость вида  $e - \log \sigma'$  (рис. 1 л).

**Метод Onitsuka** (1995 г [37]), представляет собой пересечения прямых на графике зависимости  $\ln(1+e)$  от  $\sigma'$  – эффективных напряжений, наносимых на шкалу в логарифмическом масштабе (десятичные логарифмы).

**Метод Van Zelst** (1997 г [46]), на графике зависимости вида  $\varepsilon - \log \sigma'$ , уклон линии (ab) параллелен уклону линии разгрузки (cd). Абсцисса точки (b) является структурной прочностью грунта (рис.1 м).

**Метод Becker** (1987г [9]), как и метод Tavenas, определяет энергию деформации при каждой нагрузке компрессионных испытаний, применяя зависимость  $W-\sigma'$ , где  $\Delta W = 0,5 \frac{\sigma'_{i+1} - \sigma'_i}{\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i}$ . Энергия деформации (или, с другой стороны, работа силы) численно равна половине произведения величины силового фактора на значение перемещения, соответствующего этой силе. Величина напряжения, соответствующая суммарной работе, определяется в конце каждого приращения напряжения. Зависимость на графике имеет два прямолинейных участка, давлением переуплотнения будет точка пересечения этих прямых.

**Метод Strain Energy–Log Stress** (1997 г [44]), **Senol and Saglamer** (2000 г [45] (рис. 1 н)), преобразованные методы Becker и/или Tavenas, представляет собой зависимость вида  $\sigma' \varepsilon - \log \sigma'$ , 1 и 3 участки представляет собой прямые линии, точка пересечения которых при их продлении будет структурной прочностью грунта.

**Метод Nagaraj & Shrinivasa Murthy** (1991, 1994 г [35]), авторы предлагают обобщенную взаимосвязь вида  $\log \sigma' \varepsilon - \log \sigma'$  – для предсказания величины давления предварительного уплотнения для переуплотненных насыщенных несцементированных грунтов. Метод основан на методе Tavenas и по сравнению с *методом Senol* и др. (2000), этот метод дает более высокий коэффициент корреляции в частных случаях.

**Метод Chetia и Bora** (1998 г [17]), в первую очередь рассматривает историю нагрузок на грунт, их характеристики и оценки с точки зрения коэффициента переуплотнения (OCR), основная цель исследования заключается в установлении эмпирической зависимости между OCR и отношением  $e/e_L$ .

**Метод Thøgersen** (2001 г [49]), представляет собой зависимость коэффициента консолидации от эффективных напряжений (рис.1 о).

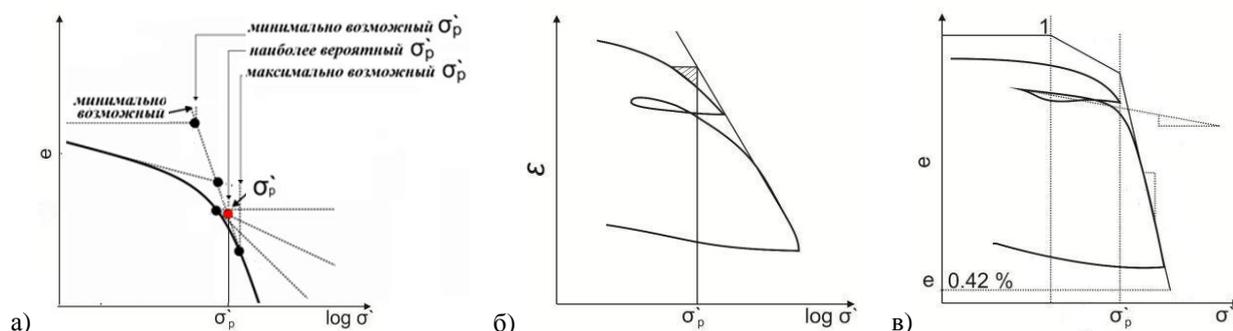
**Метод Wang and Frost, Dissipated Strain Energy Method DSEM** (2004 г. [50]) также относится к энергетическим методам расчета деформации. По сравнению с **Strain Energy** методом, DSEM использует рассеянную энергию деформации и уклон разгрузки-перезагрузки компрессионного цикла, чтобы минимизировать влияние нарушенной структуры образца и устранения эффекта упругой деформации. Рассеиваемая энергия деформации, с точки зрения микромеханики, непосредственно связана с необратимостью процесса консолидации. Использование уклона компрессионной кривой на участке разгрузки-перезагрузки моделирует упругую перезагрузку на стадии рекомпрессии и может

свести к минимуму воздействие нарушения целостности образца. Метод менее зависит от оператора, чем большинство существующих.

**Метод Einav and Carter** (2007 г [32]), представляет собой также график вида  $e - \log \sigma'$ , а  $\sigma_p'$  выражено более сложной экспоненциальной зависимостью.

Случай перехода грунта в стадию консолидационной ползучести после преодоления  $\sigma_p'$  описан в работах [8, 34, 24], если окончание действия очередной ступени нагрузки совпадает с окончанием первичной консолидации и коэффициент пористости на графике зависимости  $e - \log \sigma'$  резко падает вертикально, то кривая входит в стадию вторичной консолидации. При разгрузке кривая возвращается к точке окончания первичной консолидации, создавая эффект давления переуплотнения. Есть ряд работ предлагающих расчетные методы определения показателя  $\sigma_p'$  [22, 23, 24].

В целом графические методы определения давления переуплотнения по результатам компрессионных испытаний можно разделить на четыре основные группы. *Первая группа* решений включает зависимости коэффициента пористости ( $e$ )/плотности ( $\rho$ ) [94]/относительной деформации ( $\varepsilon$ )/изменения объема ( $I+e$ ) от эффективных напряжений ( $\sigma'$ ). Графики корректируются при помощи логарифмирования одной или двух перечисленных характеристик, что приводит к выпрямлению участков компрессионной кривой, а искомый результат ( $\sigma_p'$ ) получается при пересечении экстраполируемых выпрямленных участков. Группа включает методы Casagrande, Burmister, Schemertmann, Janbu, Butterfield, Oikawa, Jose, Sridharan et al., Onitsuka и др. *Вторая группа* связывает показатели консолидации с эффективными напряжениями, это методы: Akai, Christensen-Janbu и Thøgersen. Наиболее простыми и точными считаются *методы третьей группы* – энергетические методы расчета деформаций: Tavenas, Becker, Strain Energy-Log Stress,



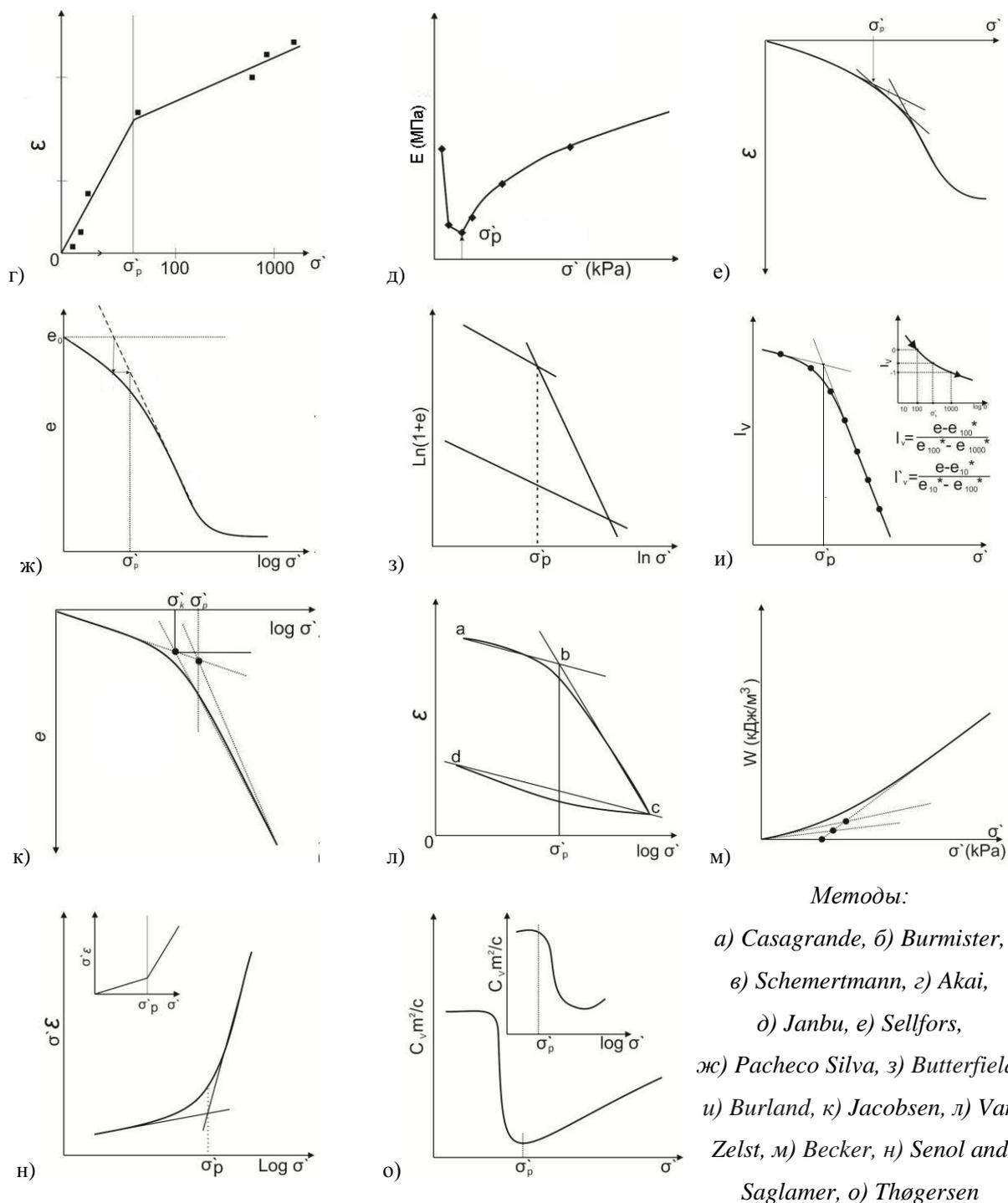


Рис. 1. Схемы графической обработки результатов компрессионных испытаний, применяемые при определении структурной прочности грунта, различными методами

Nagaraj & Shrinivasa Murthy, Senol and Saglamer, Frost and Wang и др. Энергетические методы расчета деформаций также опираются на уникальную связь между коэффициентом пористости на стадии завершения первичной консолидации, и эффективным напряжением, Becker и другие оценивают линейную связь между полной энергией деформации  $W$  и эффективным напряжением без учета разгрузки и повторной нагрузки. В действительности все энергетические методы отображаются в пространстве  $W - \sigma'$ , также как и метод Butterfield

воспроизводится в поле  $\log(1+e) - \log \sigma'$ . Если метод Casagrande фокусирует давление переуплотнения, в основном, на наиболее искривленном участке графика, то энергетические методы адаптированы к середине уклона компрессионной кривой до  $\sigma_p'$ . Частично признание превосходства этих методов определяется их относительной новизной и упоминанием при разработке и усовершенствовании нового метода этой активно развивающейся группы. *Четвертая группа* объединяет методы с разнообразными нестандартными подходами к графической обработке кривых, сюда можно отнести методы Jacobsen, Sellfors, Pacheco Silva, Einav and Carter и др. На основе анализа, приведенного в источниках [10, 19, 22-24, 30, 31, 43-46] отметим, что наиболее распространенными являются графические методы Casagrande, Butterfield, Becker, Strain Energy-Log Stress, Sellfors и Pacheco Silva, в России, в основном, применяется метод Casagrande.

Необходимо отметить, что если для определения  $YSR$  (или  $OCR$ ) достаточно одного значения  $p_{str}$  или  $\sigma_p'$ , то при выделении прямых участков компрессионной кривой до и после  $p_{str}$  при получении характеристик деформации желательно получать две ключевых точки: минимальную  $p_{str/min}$  и максимальную  $p_{str/max}$  структурную прочность (рис. 1 а). Здесь возможно использование точек отрыва касательных к начальному и конечному участкам, или использование методов Casagrande, Sellfors и Pacheco Silva. В качестве методических указаний при исследовании компрессионных параметров рекомендуется определять также соответствующие минимальной и максимальной структурной прочности показатели физических свойств грунта: в первую очередь коэффициенты пористости и влажность.

В данной работе показатель  $p_{str}$  был получен по стандартной методике, изложенной в ГОСТ 12248 [2] на комплексе АСИС НПО Геотек. Для определения  $p_{str}$  первую и последующие ступени давления принимали равными 0,0025 МПа до момента начала сжатия образца грунта, за которое принимается относительная вертикальная деформация образца грунта  $\varepsilon > 0,005$ . *Структурная прочность* определялась по начальному участку компрессионной кривой  $e_i = f(\lg \sigma')$ , где  $e_i$  – коэффициент пористости при нагрузке  $\sigma_i$ . Точка явного перелома кривой после начального прямолинейного участка соответствует структурной прочности грунта на сжатие. Графическая обработка результатов проводилась также классическими методами Casagrande и Becker. Результаты определения показателей по ГОСТ 12248 и методами Casagrande и Becker хорошо коррелируют между собой (коэффициенты корреляции  $r=0,97$ ). Бесспорно, заранее зная значения можно получить точнейшие результаты используя оба метода. В действительности, метод Becker показался несколько сложнее при выборе касательной в начале графика (рис. 1 м).

По лабораторным данным значения изменяются  $p_{str}$  от 0 до 188 кПа у суглинков, у глин до 170, у супесей до 177. Максимальные значения, отмечены, естественно, у образцов, отобранных с больших глубин. Была выявлена также зависимость изменения показателя с глубиной  $h$  ( $r = 0,79$ ):

$$p_{str} = 19,6 + 0,62 \cdot h.$$

Анализ изменчивости  $OCR$  (рис. 2) показал, что грунты ниже 20 м являются нормально уплотненными, т.е. структурная прочность не превышает или слабо превышает бытовое давление ( $OCR \leq 1$ ). На левобережье р. Оби в интервалах 150–250 м, встречены прочно цементированные сидеритовым, гетитовым, хлоритовым, лептохлоритовым и цементом полускальные и скальные грунты, а также дисперсные грунты с высокой структурной прочностью более 0,3 МПа, подстилаемые и переслаиваемые менее прочными разновидностями, что в целом подтверждает значительное влияние цементации на структурную прочность грунтов, которое подтверждается систематизацией аналогичных фактических

материалов в работе [11]. Присутствие более прочных грунтов, обусловило большой разброс значений в данном интервале, поэтому их показатели не были включены в график зависимости  $OCR$  от глубины, как не типичные для всей области. Для верхней части разреза необходимо отметить тот факт, что разброс значений показателя значительно шире – вплоть до сильно уплотненных (рис. 2), так как грунты зоны аэрации часто встречаются в полутвердом и твердом трехфазном состоянии, а с повышением их влажности ( $r = -0,47$ ), полной влагоемкости ( $r = -0,43$ ) и степени водонасыщения ( $r = -0,32$ ) снижается структурная прочность. Встречаются также, отмеченный выше, вариант перехода к консолидации ползучести (и не только в верхней части разреза). Здесь, необходимо отметить, что имеющие структурную прочность грунты, весьма разнообразны: одни могут находиться в неводонасыщенном двухфазном состоянии, другие могут иметь весьма высокий

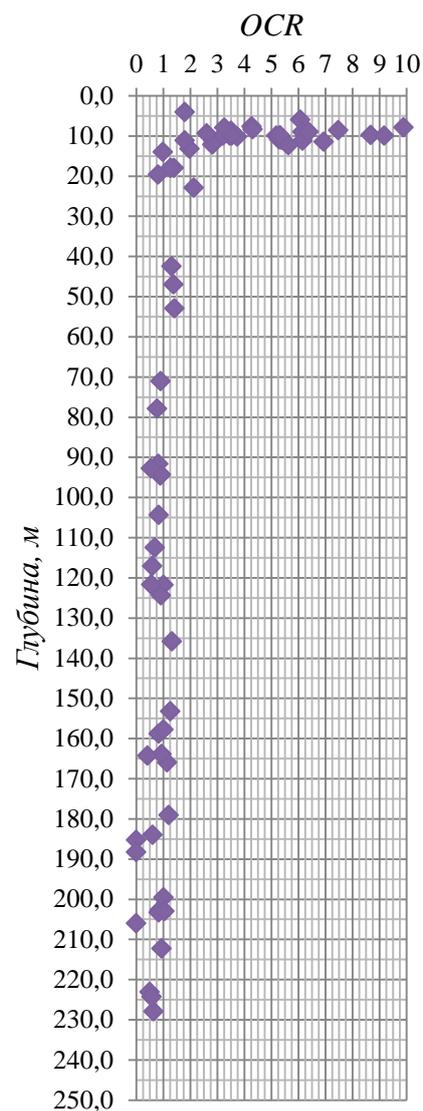


Рис. 2. Изменение показателя  $OCR$  с глубиной

коэффициент чувствительности к механическим воздействиям и склонность к ползучести, третьи обладать значительным сцеплением за счет цемента, четвертые – просто довольно прочные, полностью водонасыщенные глинистые грунты, залегающие на небольших глубинах.

Результаты проведенных исследований позволили впервые оценить один из важнейших показателей исходного состояния грунтов Томской области – его структурную прочность, которая выше зоны аэрации изменяется в очень широких пределах, поэтому ее необходимо определять на каждом участке работ перед проведением испытаний на определение показателей физико-механических свойств грунта. Анализ полученных данных показал, что изменения показателя *OCR* на глубине ниже 20–30 метров менее значительны, грунты нормально уплотнены, но их структурная прочность также должна учитываться при определении механических характеристик грунтов. Результаты исследований рекомендуется применять при компрессионных и сдвиговых испытаниях, а также для определения нарушенного состояния образцов с естественной структурой.

### Список литературы

1. Беллендир Е.Н., Векшина Т.Ю., Ермолаева А.Н., Засорина О.А. Способ оценки степени переуплотнения глинистых грунтов в природном залегании//Патент России № 2405083
2. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
3. ГОСТ 30416–2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
4. Кудряшова Е.Б. Закономерности формирования переуплотненных глинистых грунтов: дис. канд. геолого-минералогических наук : 25.00.08. – М., 2002.– 149 с.
5. МГСН 2.07–01 Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: Правительство Москвы, 2003. – 41 с.
6. СП 47.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – М.: Госстрой России, 2012.
7. Цытович Н.А.// Материалы всесоюзного совещания по строительству на слабых водонасыщенных грунтах. – Таллинн, 1965. – С. 5-17.
8. Akai, K. ie structurellen Eigenshaften von Schluff. Mitteilungen Heft 22 // Die Technishe Hochschule, Aachen. – 1960.
9. Becker, D.B., Crooks, J.H.A., Been, K., and Jefferies, M.G. Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays // Canadian Geotechnical Journal. – 1987. – Vol. 24., №4. – p. 549-564.

10. Boone J. A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test // *Can. Geotech. J.* – 2010. – Vol. 47. – p. 281–296.
11. Boone S.J. & Lutenecker A.J. Carbonates and cementation of glacially derived cohesive soils in New York State and southern Ontario // *Can. Geotech.* – 1997. – Vol 34. – p. 534–550.
12. Burland, J.B. Thirtieth Rankine Lecture: On the compressibility and shear strength of natural clays // *Géotechnique*. – 1990. – Vol 40, №3. – p. 327–378.
13. Burmister, D.M. The application of controlled test methods in consolidation testing. Symposium on Consolidation testing of soils // *ASTM. STP 126.* – 1951. – p. 83–98.
14. Butterfield, R. A natural compression law for soils (an advance on  $e-\log p'$ ) // *Geotechnique*. – 1979. – Vol 24, №4. – p. 469–479.
15. Casagrande, A. The determination of the preconsolidation load and its practical significance. // *In Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* Harvard Printing Office, Cambridge, Mass. – 1936. – Vol. 3. – p. 60–64.
16. Chen, B.S.Y., Mayne, P.W. Statistical relationships between piezocone measurements and stress history of clays // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1996. – Vol. 33 – p. 488-498.
17. Chetia M, Bora P K. Estimation of over consolidated ratio of saturated uncemented clays from simple parameters // *Indian Geotechnical Journal*. – 1998. – Vol. 28, №2. – p. 177-194.
18. Christensen S., Janbu N. Oedometer tests – a primary requirement in practical soil mechanics. // *Proceedings Nordisk Geoteknikerkonferens NGM-92.* – 1992. – Vol. 2, №9. – p. 449-454.
19. Conte, O., Rust, S., Ge, L., and Stephenson, R. Evaluation of Pre-Consolidation Stress Determination Methods // *Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior.* – 2011. – p. 147–154.
20. Dias J. et al. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations // *Sci. agric.* – 2005. – Vol. 62, №3. – p. 248-255.
21. Dias Junior, M.S.; Pierce, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. // *Soil Technology.* – Amsterdam, 1995. – Vol.8, №2. – p. 139–151.
22. Einav, I; Carter, JP. On convexity, normality, pre-consolidation pressure, and singularities in modelling of granular materials // *Granular Matter.* – 2007. – Vol. 9, №1-2. – p. 87-96.
23. Gregory, A.S. et al. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data // *Soil and Tillage Research, Amsterdam.* – 2006. – Vol. 89, №1. – p. 45–57.
24. Grozic J. L. H., Lunne T. & Pande S. An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays. // *Canadian Geotechnical Journal.* – 200. – Vol. 40. – p. 857–87.
25. Iori, Piero et al. Comparison of field and laboratory models of the load bearing capacity in coffee plantations // *Ciênc. agrotec.* – 2013. Vol. 2, №2. – p. 130-137.

26. Jacobsen, H.M. Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet // In Proceedings of Nordiske Geoteknikermonde NGM-92, May 1992. Aalborg, Denmark. Danish Geotechnical Society Bulletin. – 1992. Vol. 2, № 9. – p. 455–460.
27. Janbu, N. The resistance concept applied to deformation of soils // In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 25–29 August 1969. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands. – 1969. – Vol. 1. – p. 191–196.
28. Jolanda L. Stress-strain Characterisation of Seebodenlehm // 250 Seiten, broschier. – 2005. – 234 p.
29. Jose Babu T.; Sridharan Asur; Abraham Benny Mathews: Log-log method for determination of preconsolidation pressure // ASTM Geotechnical Testing Journal. – 1989. – Vol.12, №3. – p. 230–237.
30. Kaufmann K. L., Nielsen B. N., Augustesen A. H. Strength and Deformation Properties of Tertiary Clay at Moesgaard Museum // Aalborg University Department of Civil Engineering Sohngaardsholmsvej 57 DK-9000 Aalborg, Denmark. – 2010. – p. 1–13.
31. Kontopoulos, Nikolaos S. The effects of sample disturbance on preconsolidation pressure for normally consolidated and overconsolidated clays Massachusetts Institute of Technology. // Dept. of Civil and Environmental Engineering. – 2012. – 285p.
32. Ladd, C. C. Settlement Analysis of Cohesive Soils // Soil Publication 272, MIT, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass. – 1971. – 92p.
33. Mayne, P.W., Coop, M.R., Springman, S., Huang, A-B., and Zornberg, J. // GeoMaterial Behavior and Testing // Proc. 17th Intl. Conf. Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. – 2009. – Vol. 4. –p. 2777-2872.
34. Mesri, G. and A. Castro.  $C\alpha/Cc$  Concept and  $K\alpha$  during Secondary Compression // ASCE J. Geotechnical Engineering. – 1987. Vol. 113, №3. – p. 230-247.
35. Nagaraj T. S., Shrinivasa Murthy B. R., Vatsala A. Prediction of soil behaviors –part ii- saturated uncemented soil // Canadian Geotechnical Journal. – 1991. – Vol. 21, №1. – p. 137-163.
36. Oikawa, H. Compression curve of soft soils // Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations. – 1987. – Vol. 27, №3. – p. 99-104.
37. Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y., Shigeki, Y. Interpretation of oedometer test data for natural clays // Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations. – 1995. – Vol. 35, №3.
38. Pacheco Silva, F. A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample // In Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, August 1970. – Vol. 2, №1. – p. 225–232.

39. Paul W. Mayne, Barry R. Christopher, and Jason De Jong. Manual on subsurface investigations // National Highway Institute, Federal Highway Administration Washington, DC. – 2001. – 305p.
40. Sallfors, G. Preconsolidation pressure of soft, highplastic clays. – Goteborg. Geotechnical Department of Chalmers University of Technology. – 231p.
41. Schmertmann, J. H., Undisturbed Consolidation Behavior of Clay // Transaction, ASCE. – 1953. – Vol. 120. – p. 1201.
42. Schmertmann, J., H. Guidelines for cone penetration tests, performance and design. // US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report, FHWA-TS-78-209. – 1978. – p. 145.
43. Semet C., Ozcan T. Determination of preconsolidation pressure with artificial neural network // Civil Engineering and Environmental Systems. – 2005. – Vol. 22, № 4. – p. 217–231.
44. Senol A., Saglamer A. Determination of Preconsolidation Pressure with a New Strain Energy-Log Stress Method // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2000. – Vol. 5.
45. Senol, A. Zeminlerde On. Determination of Preconsolidation pressure: PhD Dissertation, Institute of Science and Technology. – Istanbul, Turkey. – 1997. – p. 123.
46. Solanki C.H., Desai M.D. Preconsolidation Pressure from Soil Index and Plasticity Properties // The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. – Goa, India. – 2008.
47. Sully, J.P., Campanella, R.G. and Robertson, P.K. Interpretation of penetration pore pressure to evaluate stress history of clays // Proceedings of the first International symposium on Penetration testing. – Orlando. – 1988. – Vol.2 – p. 993-999.
48. Tavenas F., Des Rosier J.P., Leroueil S. et al. The use of strain energy as a yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays // Géotechnique. – 1979. – Vol. 29. – p. 285-303.
49. Thøgersen, L. Effects of Experimental Techniques and Osmotic Pressure on the Measured Behaviour of Tertiary Expansive Clay: Ph. D. thesis, Soil Mechanics Laboratory, Aalborg University. – 2001. – Vol. 1.
50. Wang, L. B., Frost, J. D. Dissipated Strain Energy Method for Determining Preconsolidation Pressure // Canadian Geotechnical Journal. – 2004. – Vol. 41, №4. – p. 760-768.

**Рецензенты:**

Савичев О.Г., д.г.н., профессор кафедры Гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, г. Томск.

Попов В.К., д.г.-м.н., профессор кафедры Гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, г. Томск.