

Ткалич А.П., к.т.н., доцент
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

СТРУКТУРНАЯ ПРОЧНОСТЬ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВ

Показано, что в грунтах основания от внешней нагрузки развиваются два вида деформаций: упругие и остаточные. Преобладающими являются остаточные. Выяснено, что нижняя граница зоны остаточных деформаций находится на глубине, где сумма напряжений от собственного веса грунта и дополнительной нагрузки уравнивается структурной прочностью. Изложены методы определения структурной прочности как в лабораторных, так и в полевых условиях. Обозначено, что в полевых условиях в грунты основания под штампы, опытные фундаменты и фундаментные плиты закладываются грунтовые марки, с помощью которых измеряются перемещения грунтов от внешней нагрузки. По величине перемещений марок определена структурная прочность грунтов основания. Выяснено, что ее значение можно определить по результатам испытаний грунтов сваями, с доведением нагрузки до критической – «срыва» сваи. После применения метода релаксации определена предельная нагрузка на сваю, по ее значению находится структурная прочность природного грунта несущего слоя.

Ключевые слова: структурная прочность, остаточная деформация, циклически возрастающая нагрузка, грунтовая марка, относительная деформация.

Ткалич А.П., к.т.н., доцент
Одеська державна академія будівництва та архітектури

СТРУКТУРНА МІЦНІСТЬ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПРОЦЕСИ ДЕФОРМУВАННЯ ГРУНТІВ

Показано, що в грунтах основи від зовнішнього навантаження розвиваються два види деформацій: пружні і залишкові. Переважаючими є залишкові. З'ясовано, що нижня межа зони залишкових деформацій знаходиться на глибині, де сума напружень від власної ваги ґрунту і додаткового навантаження врівноважується структурною міцністю. Викладено методи визначення структурної міцності як у лабораторних, так і в польових умовах. Зазначено, що у польових умовах у ґрунт основи під штампи, дослідні фундаменти і фундаментні плити закладаються ґрунтові марки, за допомогою яких вимірюються переміщення ґрунтів від зовнішнього навантаження. За величиною переміщень марок визначено структурну міцність ґрунтів основи. З'ясовано, що її значення можна визначити за наслідками випробувань ґрунтів палями, з доведенням навантаження до критичного – «зриву» палі. Після застосування методу релаксації визначено граничне навантаження на палю, за його значенням знайдено структурну міцність природного ґрунту несучого шару.

Ключові слова: структурна міцність, залишкова деформація, циклічно зростаюче навантаження, ґрунтова марка, відносна деформація.

STRUCTURAL STRENGTH AND ITS INFLUENCE ON GROUND DEFORMATION PROCESSES

Two types of deformations, elastic and permanent ones, develop from the external load in the subsoil. The boundary separating them is the structural strength of the ground. Its value is the parameter defining the zone border of the permanent deformations, which is situated at a depth where the sum of the stress from the additional load and the weight of the soil is balanced by the structural strength. The extreme pressure when the increase of the permanent deformations begins was named by different researchers in different ways: «initial pressure», «structural strength», «safety margin». The structural strength of the ground is determined either in laboratory or in field conditions. In the field conditions it is determined by the movement of the bathymetric magnetic marks, which are put in the foundation soil under experienced foundations and foundation beds. They measure the soil settlement and layer-by-layer soil movement. The research technology depends on the size of the foundations. For the small-sized foundation with the area of 0,03 ... 0,1 m² the tests are carried out by the method of cyclically-increasing load. According to the results of measurements the graphs of settlement relationships and its residual component are made, as well as the depth of the zone of complete and permanent deformations all along the pressure. The intersections of permanent deformations with the axis of the pressure determine the value of the structural strength. For the foundations of various sizes the structural strength is determined in the process of increasing load. According to the value of the final foundation settlement and the movement of the ground marks the depth of the zone of the permanent deformations is determined. At the lower boundary of the permanent deformations the structural strength is equal of the sum of the tensions from the additional load and the weight of the soil. The results of observations of foundation settlement of 16-storey residential building with the area of foundation base 645 m² are shown in this research article. Based on the result of observations over the soil marks put at different depths beneath their foundation beds the deformation diagrams are made. According to the deformation diagrams the values of the relative deformations were determined for all reference layers located between the adjacent soil marks with several pressure values on the foundation bed. The graphs of the deformation relation are made. The intersection of the graphs with the stress axis defines the value of the structural strength of this horizon. The values of the structural strength within the loessial soil beneath the initial position of the foundation bed were determined in this research. Besides testing the foundations of shallow laying the structural strength can be determined by the testing results of soils by the pile using the cyclically-increasing load method in conjunction with the stress relaxation one bringing it to the critical load – «failure». The structural strength of the natural soil under the pile toe is determined by the ultimate load value.

Based on the research carried out at other sites, the graph of structural strength values for the loessial soils of Odessa region was made.

Keywords: structural strength, permanent deformation, cyclically-increasing load, bathymetric magnetic mark, the relative deformation.

Введение. Структурная прочность – это предельное значение напряжений на контакте между частицами, при котором отсутствует их взаимное смещение. При напряжениях, превышающих структурную прочность, происходит разрушение структурных связей. В результате взаимного смещения частиц происходит уплотнение. Структурная прочность является характеристикой, определяющей границы зоны остаточных деформаций, которая находится на глубине, где напряжения от дополнительной нагрузки и веса грунта будут уравновешены структурной прочностью в лессовых грунтах.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Многими исследователями установлено, что при давлении под подошвой опытного фундамента, не превышающем величины структурной прочности, процесс уплотнения грунта отсутствует [1 – 5; 8; 10; 11]. «... наиболее характерным свойством слабых глинистых грунтов является их структурная прочность» ... «если внешняя нагрузка на слабый глинистый грунт менее структурной прочности, то деформации грунта будут настолько малы, что можно ими пренебречь» [3].

Н.Я. Денисов отмечал: «Вопросы структурной прочности у нас, как правило, вообще не изучаются. Незнание особенностей структуры слабого глинистого грунта и его структурной прочности может привести к далеко неполному использованию его несущих свойств, а иногда к опасным последствиям» [4].

Выделение ранее не решенных частей общей проблемы. В нормативном методе расчета по деформациям глубина сжимаемой толщи условно ограничивается отношением напряжений от собственного веса грунта и внешней нагрузки, без учета деформативных свойств грунтов.

Несмотря на значительные успехи по определению структурной прочности, в проектной практике ее значение до настоящего времени не учитывается. Это можно объяснить тем, что процессы уплотнения следует учитывать не модулем деформации, значение которого определяется при давлениях, меньших структурной прочности, а модулем уплотнения, определяемым при давлениях, превышающих структурную прочность [6].

Цель работы – обобщение результатов определений структурной прочности в полевых условиях разными методиками, выявление закономерностей изменения величин структурной прочности грунтов по глубине лессовой толщи Одесского региона.

Основной материал и результаты. Существует много методов определения структурной прочности грунтов основания в полевых условиях, например испытания, которые проводятся с применением глубинных магнитных марок, заложенных в грунты основания на разной глубине ниже подошвы фундаментов [7]. Они применены при исследованиях в основаниях опытных штампов, фундаментов площадью 1...10 м² и фундаментных плит многоэтажных жилых зданий. Значительное количество исследований по определению структурной прочности выполнено в лессовых грунтах, залегающих ниже уровня подземных вод, либо в условиях локального замачивания.

Определение структурной прочности малогабаритными штампами площадью 0,03 ... 0,1 м² [8, 9]. Испытания проведены по методике циклически возрастающей нагрузки. По результатам измеренных послойных перемещений построены графики зависимости осадки, ее остаточной составляющей и глубины зоны полных и остаточных деформаций от давлений. В точке пересечения зависимостей остаточных деформаций и глубин зон остаточных деформаций с осью давлений определяется величина структурной прочности (рис. 1). В расчетах она принимается равной среднеарифметическому значению из двух этих определений.

Определение структурной прочности по результатам испытаний грунтов опытными фундаментами площадью $0,5...10,0 \text{ м}^2$ [10, 11]. Структурная прочность определяется по эпюре деформаций, построенной по результатам измерений осадки и послойных перемещений грунта, измеренных марками и фиксаторами (рис. 2). По значению конечной осадки фундамента и перемещению грунтовых марок определяется глубина зоны остаточных деформаций на глубине пересечения эпюры деформаций с осью z (рис. 2, в).

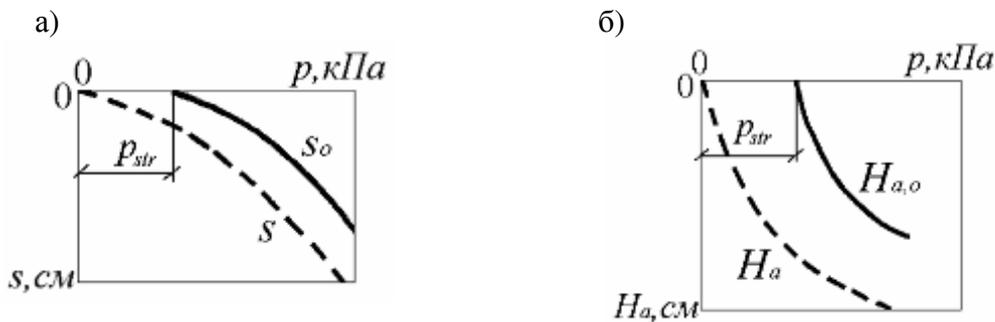


Рисунок 1 – Методика определения структурной прочности грунтов основания по графикам зависимости: а) $s_o = f(p)$; б) $H_{a,o} = f(p)$

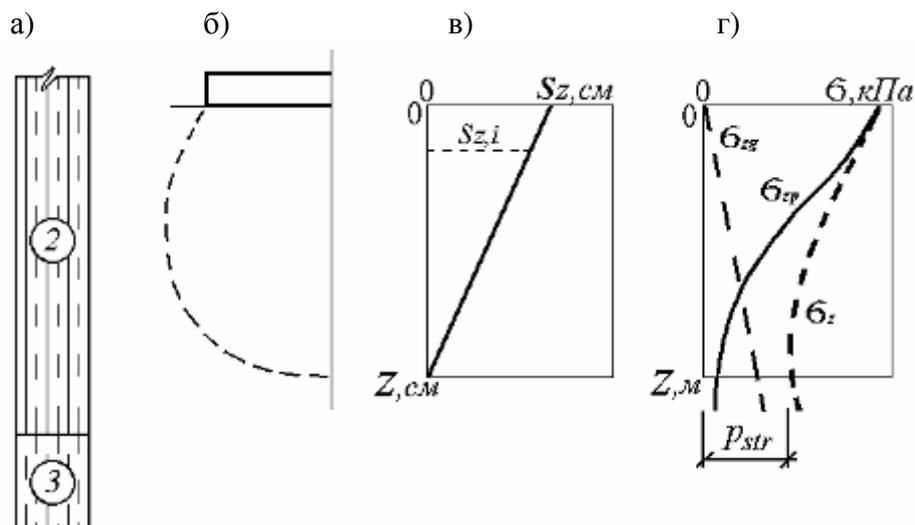


Рисунок 2 – Схема определения структурной прочности грунта в основании опытного фундамента;
 а) колонка инженерно-геологического разреза;
 б) контур зоны остаточных деформаций;
 в) график зависимости $s_z = f(z)$;
 г) определение структурной прочности на нижней границе зоны остаточных деформаций

Значение структурной прочности на нижней границе зоны остаточных деформаций равно сумме напряжений от природного грунта и дополнительного давления.

Результаты исследований двух фундаментов на одном участке с площадью подошвы $1,0 \text{ м}^2$ и различной технологией приложения нагрузки показали, что при разных осадках глубины зоны остаточных деформаций и величины структурной прочности грунта основания имеют одинаковые значения [12].

Определение структурной прочности по результатам наблюдений за осадками фундаментных плит и перемещениями грунтовых марок, заложенных на разной глубине ниже их подошвы. Ниже приведены результаты исследований деформаций в основании фундаментной плиты 16-этажного жилого дома по ул. Маршала Жукова в г. Одессе [13]. Здание с подвальным и чердачным этажами сложной конфигурации в плане, с площадью подошвы 645 м². Стены из силикатного кирпича, перекрытия из многопустотных железобетонных плит. В качестве фундамента применена монолитная железобетонная плита, выполненная по песчаной подушке толщиной 0,8 м.

Котлован разработан для устройства свайного фундамента. Применение фундаментной плиты потребовало обеспечить строительный подъем на величину ожидаемой осадки. Грунтовые условия представлены лессовой толщей с чередующимися слоями лессовых суглинков и супесей. Геологическое строение участка застройки представлено на рис. 3, а характеристики грунтов – в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства грунтов

| № ИГЭ | Вид грунта | Показатели характеристик грунтов | | | | | |
|-------|----------------------|----------------------------------|------------------------------|-------|-----------------|----------------|-----------|
| | | ρ_s , г/см ³ | ρ_d , г/см ³ | w | E_{sat} , МПа | φ град | c , кПа |
| 2 | Суглинок лессовидный | 2,69 | 1,47 | 0,21 | 4,5 | 20 | 20 |
| 2а | Суглинок лессовидный | 2,68 | 1,42 | 0,256 | 4,0 | 18 | 14 |
| 3 | Супесь лессовидная | 2,66 | 1,44 | 0,256 | 2,0 | 20 | 14 |
| 4а | Суглинок лессовидный | 2,69 | 1,46 | 0,11 | 4,0 | 20 | 18 |
| 4 | Суглинок лессовидный | 2,70 | 1,58 | 0,227 | 6,0 | 21 | 26 |
| 5 | Супесь лессовидная | 2,68 | 1,54 | 0,266 | 3,5 | 21 | 21 |
| 6 | Суглинок лессовидный | 2,70 | 1,58 | 0,251 | 6,0 | 24 | 56 |

К началу строительства уровень подземных вод залегал на глубине 2 м ниже подошвы фундамента. Наблюдения за послойными перемещениями грунта проведены с помощью грунтовых марок, заложенных ниже фундаментной плиты до глубины 8 м. В проведенных исследованиях применены кольцевые магнитные марки, конструкция которых разработана в ОГАСА [7]. Марки установлены через монтажное отверстие в фундаментной плите с интервалом около 1 м. Схема их высотного положения приведена на рис. 3, а. Над монтажным отверстием оборудован опорный столик, соединенный с фундаментной плитой, для крепления измерительного устройства. Столик снабжен геодезической маркой для определения его положения высокоточным геометрическим нивелированием одновременно с измерениями перемещений грунтовых марок. Положение грунтовых марок определялось устройством с герконовым датчиком с точностью отсчета 0,1 мм. Осадка здания измерялась высокоточным геометрическим нивелированием с привязкой к городскому стационарному реперу. Для измерений осадок применены съемные стенные марки [14]. Применение таких марок позволило исключить их повреждение в период строительства и эксплуатации. Измеренные значения осадок и перемещений грунтовых марок округлялись до 1 мм. По результатам осадки фундамента и перемещениям грунтовых марок построены графики изменения осадок по глубине основания (рис. 3, б).

На рисунке 3, б приведены несколько эпюр послойных перемещений в зависимости от давления по подошве плиты в период строительства и в процессе эксплуатации. По эпюрам деформаций определены значения относительных деформаций « ϵ » для всех условных слоев, находящихся между смежными грунтовыми марками, при нескольких значениях давлений по подошве фундамента (рис. 3, в).

Основное нарастание относительных деформаций уплотнения наблюдается в период строительства, с ростом давлений, и незначительное – в период эксплуатации (рис. 3, д).

Нарастание остаточных деформаций, являющихся следствием уплотнения, начинается при напряжениях, равных структурной прочности, и продолжается с ростом нагрузки. По полученным данным исследований построены графики зависимости деформаций от вертикальных напряжений $\varepsilon = f(\sigma_z)$.

На рис. 3, е приведены графики для горизонтов на глубине 3,1; 5,0 и 5,75 м ниже подошвы фундаментной плиты. Пересечение графиков с осью напряжений определяет значение структурной прочности. В данном исследовании установлены значения структурной прочности на десяти горизонтах. По полученным значениям построен график изменения структурной прочности в грунтах основания до глубины 8 м ниже начального положения подошвы фундамента (рис. 3, г).

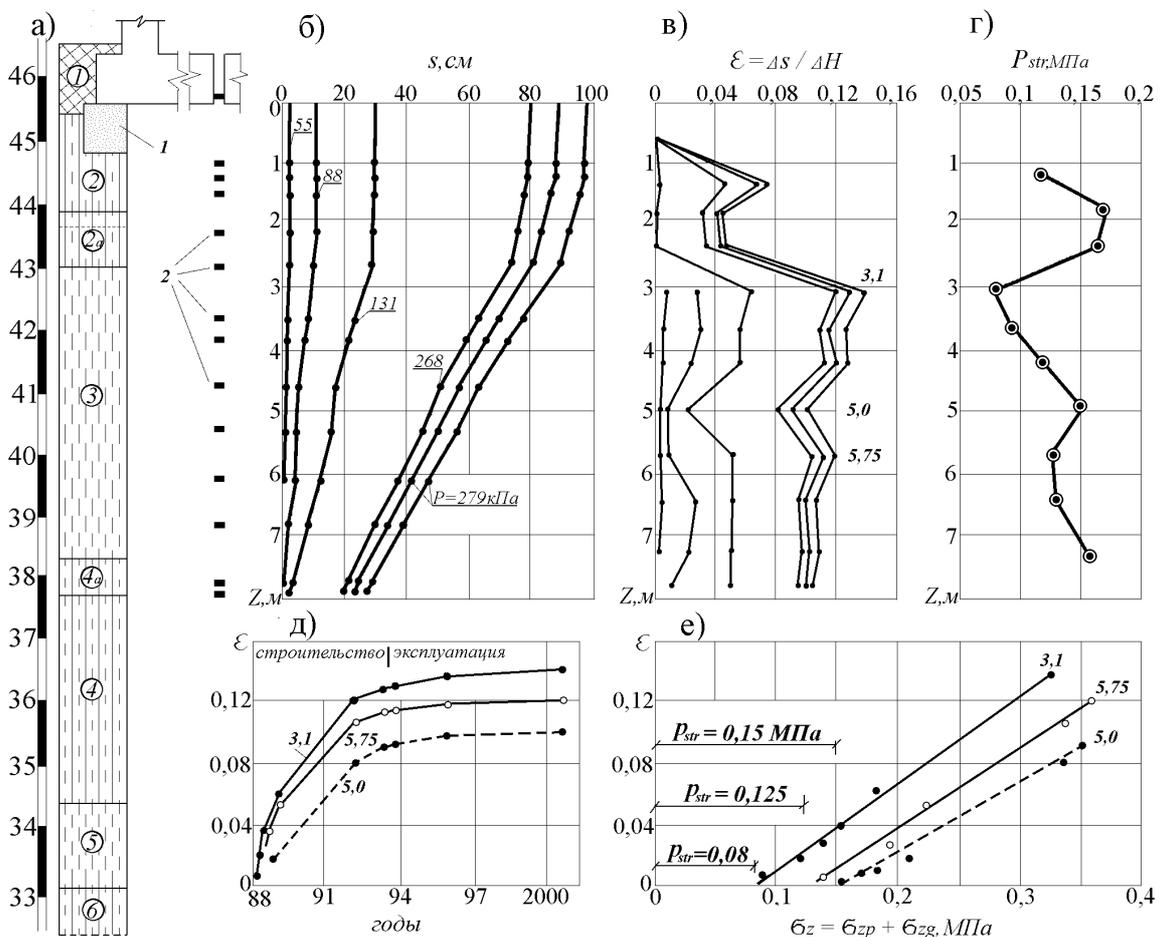


Рисунок 3 – Развитие деформаций в грунтах основания фундаментной плиты:

- а) геологическое строение участка строительства с высотным положением фундаментной плиты; 1 – песчаная подушка; 2 – грунтовые марки;**
- б) эпюра перемещений грунтовых марок с ростом давления;**
- в) эпюра относительных деформаций грунтов в интервалах между марками;**
- г) график изменения структурной прочности грунта по глубине;**
- д) нарастание относительной деформации во времени на трех отметках ниже подошвы фундамента;**
- е) значения структурной прочности, определенные по зависимости относительной деформации от напряжений**

Аналогичные данные получены по результатам опубликованных исследований на пяти объектах в г. Одессе и использованы автором при составлении базового графика изменения структурной прочности по глубине лессовой толщи в пределах Одесского региона [11] (рис. 4).

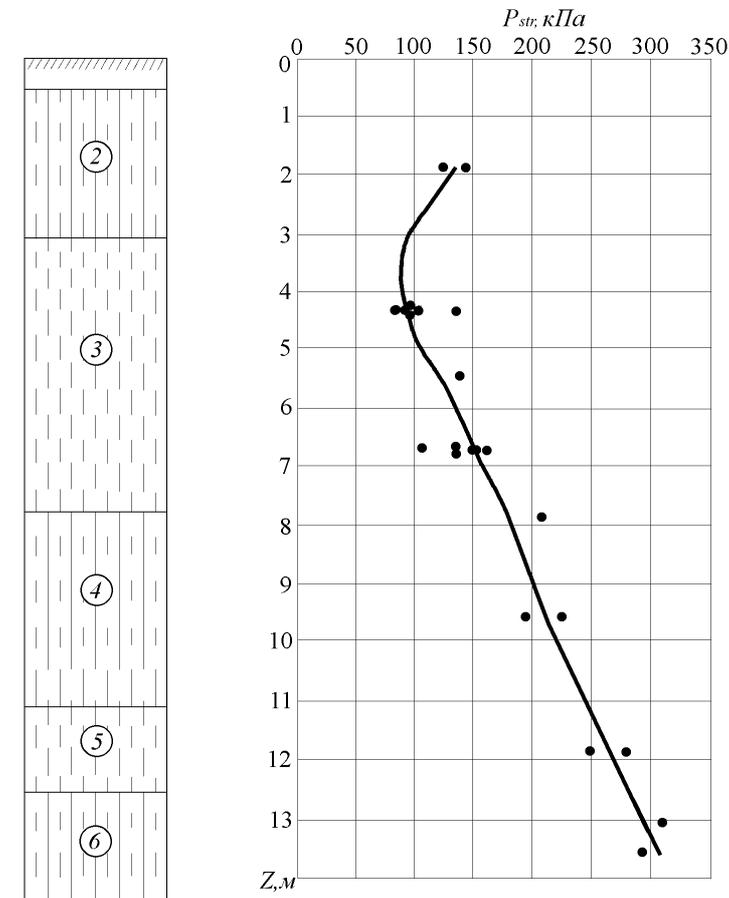


Рисунок 4 – Базовый график изменения структурной прочности для лессовой толщи Одесского региона, залегающей ниже уровня подземных вод

Определения значения структурной прочности по результатам испытаний грунтов сваями. Нагрузка прикладывается до достижения ее критического значения [15, 16]. С этой целью применена методика циклически возрастающей нагрузки в сочетании с методом релаксации напряжений. Под критической понимается нагрузка, при постоянстве которой наблюдается незатухающее нарастание осадок – «срыв» сваи.

Метод релаксации для определения предельной нагрузки на сваю применяется после достижения критической нагрузки. Процесс релаксации напряжений протекает в результате снижения давления в камере домкрата под влиянием стабилизирующей осадки. Нагрузка после достижения равновесия между сниженным давлением и сопротивлением грунтов является предельной.

По значению предельной нагрузки определяется структурная прочность. Предельное сопротивление сжатию ниже острия сваи определяется частью нагрузки, превышающей сопротивление сдвигу вдоль ствола сваи, напряжения от которого уравниваются структурной прочностью природного грунта ниже границы зоны уплотнения. По результатам выполненных исследований глубина зоны уплотнения ниже острия сваи в лессовых грунтах равна двойному размеру стороны сечения

сваи [17]. Напряжение на нижней границе зоны уплотнения определяется с использованием коэффициента снижения напряжений (α) по действующим нормам. На глубине $2d$ его величина равна 0,108, тогда напряжение на границе зоны уплотнения определяется по зависимости

$$\sigma_{zp} = p_{str} = p_R \cdot \alpha, \quad (1)$$

где σ_{zp} – напряжения от дополнительного давления по подошве сваи, на нижней границе уплотненного ядра;

p_R – давление под подошвой сваи;

α – коэффициент рассеивания напряжения по глубине.

Для лессовой толщи Одесского региона построен график изменения структурной прочности по глубине, исходя из результатов натурных исследований. Для его построения использованы исследования штампами, опытными фундаментами, фундаментными плитами и сваями. На разных участках в пределах Одесского региона мощность ИГЭ колеблется и значения структурной прочности корректируются в зависимости от мощности слоев. График построен для конкретного массива. По нему определяются значения структурной прочности для кровли и подошвы слоя, которые используются для других грунтовых условий. График, приведенный на рис. 4, является базовым, определяющим значения структурной прочности в пределах каждого инженерно-геологического элемента.

В пределах Одесского региона мощность инженерно-геологических элементов не является постоянной и для каждого участка имеет свои значения. Поэтому для конкретной строительной площадки строится график структурной прочности по глубине с использованием результатов базового графика.

Выводы:

1. Структурная прочность является характеристикой, определяющей условия деформирования грунтов. При давлениях, меньших их структурной прочности, в основаниях фундаментов наблюдаются преимущественно упругие деформации. При больших – нарастают остаточные деформации уплотнения и поперечного расширения.

2. По значению структурной прочности определяется нижняя граница зоны остаточных деформаций. Ее значение находится на глубине, где сумма напряжений от дополнительной нагрузки и веса грунта равна величине структурной прочности.

3. Величина структурной прочности природного грунта под зоной остаточных деформаций не зависит от режима загрузки фундамента.

4. По результатам натурных исследований построен базовый график изменения структурной прочности по глубине лессовой толщи Одесского региона. Его использование позволяет определять значение структурной прочности по глубине на любом участке Одесского региона с конкретными значениями мощности ИГЭ.

Литература

1. Голубков В. Н. Исследование деформаций лессовых грунтов / В. Н. Голубков // Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура. – 1958. – № 11-12. – С. 34 – 43.
2. Casagrande V. A. The structure of clay and its importance in foundation engineering / V. A. Casagrande // J. Boston Soc. Civil Eng., 19, 1932. – № 4. – P. 168 – 209.
3. Цытович Н. А. Вопросы теории и практики строительства на слабых глинистых грунтах / Н. А. Цытович // Материалы всесоюзного совещания по строительству на слабых водонасыщенных грунтах. – Таллинн, 1965. – С. 5 – 17.
4. Денисов Н. Я. Структурно-механические свойства глинистых пород и их изменения / Н.Я. Денисов // Доклады АН СССР. – 1948. – № 7. – Нов. сер., т. 60. – С. 1239 – 1242.

5. Денисов Н. Я. Свойства слабых глинистых грунтов, их природа и методы оценки / Н. Я. Денисов, А. Вилло // *Материалы всесоюзного совещания по строительству на слабых водонасыщенных грунтах.* – Таллинн, 1965. – С. 21 – 30.
6. Тугаенко Ю. Ф. Совершенствование метода расчета оснований фундаментов по деформациям / Ю. Ф. Тугаенко, А. П. Ткалич // *Вісник ОДАБА.* – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс», 2011. – Вип. 44. – С. 336 – 344.
7. А.с. 1065531 СССР, Е 02D 1/00. Глубинная марка / Ю. Ф. Тугаенко, Т. И. Стоянова, М. В. Марченко, А. П. Ткалич. № 3420907/29-33; заявл. 06.04.82; опубл.07.01.84. – Бюл. № 1.
8. Тугаенко Ю. Ф. Методика определения параметров деформаций глинистых грунтов / Ю. Ф. Тугаенко, М. В. Марченко // *Инженерная геология.* – 1984. – № 1. – С. 86 – 94.
9. Peculiarities of the soil deformation process at the bases of experimental settlement plates / Y. Tugaenko, M. Marchenko, A. Tkalich, I. Mosicheva // *Scientific professional journal of University North.* – Vol. 9., №1. – March, 2015. – P.40 – 46.
10. Кодрянова Р. М. Зависимость размеров зоны деформации от структурной прочности слабых водонасыщенных глинистых грунтов / Р. М. Кодрянова // *Фундаменты многоэтажных зданий в условиях сильносжимаемых грунтов.* – Ленинград, 1968. – Часть I. – С. 21 – 26.
11. Тугаенко Ю. Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки: монография / Ю. Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2003. – 224 с.
12. Ткалич А. П. Влияние условий загрузки опытных фундаментов на развитие деформаций в их основаниях / А. П. Ткалич // *Вісник ОДАБА.* – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс», 2012. – Вип. 46. – С. 341 – 346.
13. Развитие деформаций в основании фундаментной плиты 16-этажного жилого дома / Ю. Ф. Тугаенко, М. В. Марченко, А. П. Ткалич, О. Л. Гайдас // *Будівельні конструкції: міжвідомч. наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво).* – К. : НДІБК, 2000. – Вип. 53: у 2-х кн. – Книга 1. – С. 558 – 562.
14. А.с. 1073371 СССР, Е 02D 1/00. Стенная марка / Ю. Ф. Тугаенко, Т. И. Стоянова, М. В. Марченко, А. П. Ткалич. № 3510414/29-33; заявл. 05.1.82; опубл.15.02.84. – Бюл. № 6.
15. Ткалич А. П. Величина структурной прочности несущего слоя забивных свай / А. П. Ткалич // *Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво.* – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – Вип. 22. – С. 98 – 102.
16. Differential method of estimation of soil resistance characteristic according to the pile test / Y. Tugaenko, A. Tkalich, M. Marchenko, L. Loginova // *Scientific professional journal of University North.* – Vol. 9. – №2. – June, 2015. – P.180 – 185.
17. Григорян А. А. Свайные фундаменты зданий и сооружений на просадочных грунтах / А. А. Григорян. – М. : Стройиздат, 1984. – 162 с.

© Ткалич А.П.
Надійшла до редакції 4.12.2015