

Ткаліч А.П., канд. техн. наук, доцент
Одеська державна академія будівництва та архітектури

Структурна міцність і її вплив на процеси деформації ґрунтів

Анотація. У ґрунтах основи від зовнішнього навантаження розвиваються два види деформацій: пружні і залишкові. Переважаючими є залишкові.

Нижня межа зони залишкових деформацій знаходиться на глибині, де сума напруги від власної ваги ґрунту і додаткового навантаження врівноважується структурною міцністю. Визначається структурна міцність, як в лабораторних, так і в польових умовах. У польових умовах, в ґрунти основи під штамп, дослідні фундаменти і фундаментні плити закладаються ґрунтові марки, за допомогою яких вимірюються пошарові переміщення ґрунтів від зовнішнього навантаження. По величині переміщень марок визначається структурна міцність ґрунтів основи.

Її значення можна визначити за наслідками випробувань ґрунтів палями, з доведенням навантаження до критичного – «зриву». Після застосування методу релаксації, визначається граничне навантаження на палю, по її значенню знаходиться структурна міцність природного ґрунту шару що несе.

Ключові слова: структурна міцність, залишкова деформація, циклічно – зростаюче навантаження, ґрунтові марки; відносна деформація.

Ткалич А.П., канд. техн. наук, доцент
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Структурная прочность и ее влияние на процессы деформирования ґрунтов

Аннотация. В ґрунтах основания от внешней нагрузки развиваются два вида деформаций: упругие и остаточные. Преобладающими являются остаточные.

Нижняя граница зоны остаточных деформаций находится на глубине, где сумма напряжений от собственного веса ґрунта и дополнительной нагрузки уравновешивается структурной прочностью. Определяется структурная прочность, как в лабораторных, так и в полевых условиях. В полевых условиях, в ґрунты основания под штампы, опытные фундаменты и фундаментные плиты закладываются ґрунтовые марки, с помощью которых измеряются послойные перемещения ґрунтов от внешней нагрузки. По величине перемещений марок определяется структурная прочность ґрунтов основания.

Ее значение можно определить по результатам испытаний ґрунтов сваями, с доведением нагрузки до критической – «срыва». После применения метода релаксации, определяется предельная нагрузка на сваю, по ее значению находится структурная прочность природного ґрунта несущего слоя.

Ключевые слова: структурная прочность, остаточная деформация, циклически – возрастающая нагрузка, ґрунтовые марки; относительная деформация.

Tkalic A.,
Ph.D., Associate Professor,
The Odessa state academy of building and architecture

Structural strength and its influence on ground deformation processes

Annotation. 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 marks, 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. Она 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 превышающего 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 значения до настоящего времени не учитывается. Это можно объяснить тем, что процессы уплотнения следует учитывать не модулем деформации, значения которого определяется при давлениях меньше структурной прочности, а модулем уплотнения, определяемым при давлениях превышающих структурную прочность [6].

Цель работы. Обобщение результатов определений структурной прочности в полевых условиях разными методиками. Построение графика величин структурной прочности грунтов по глубине лессовой толщи Одесского региона.

Изложение основного материала исследований. Существует много методов определения структурной прочности в грунтах основания, в полевых условиях. Испытания проведены 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 и ее остаточной составляющей, их глубины зоны полных и остаточных деформаций от давлений. Пересечения зависимостей остаточных деформаций и глубин зон остаточных деформаций с осью давлений определяется величина структурной прочности (рис.1). Ее величина принимается равной среднеарифметическому значению из двух определений.

Определение структурной прочности по результатам испытаний грунтов опытными фундаментами площадью 0,5...10,0 м² [10;11]. Структурная прочность определяется по эпюре деформаций, построенной по результатам измерений осадки и

последних 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).

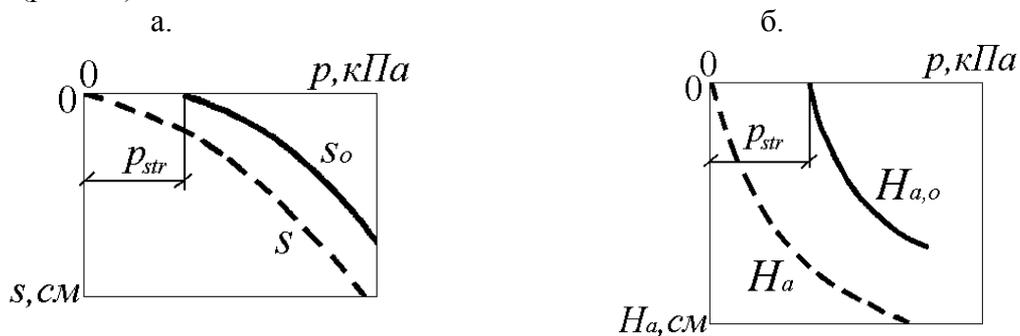


Рисунок 1 – Методика определения структурной прочности грунтов основания по графикам зависимости: а) $s_o = f(p)$; б) $H_{a,o} = f(p)$

Значения 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].

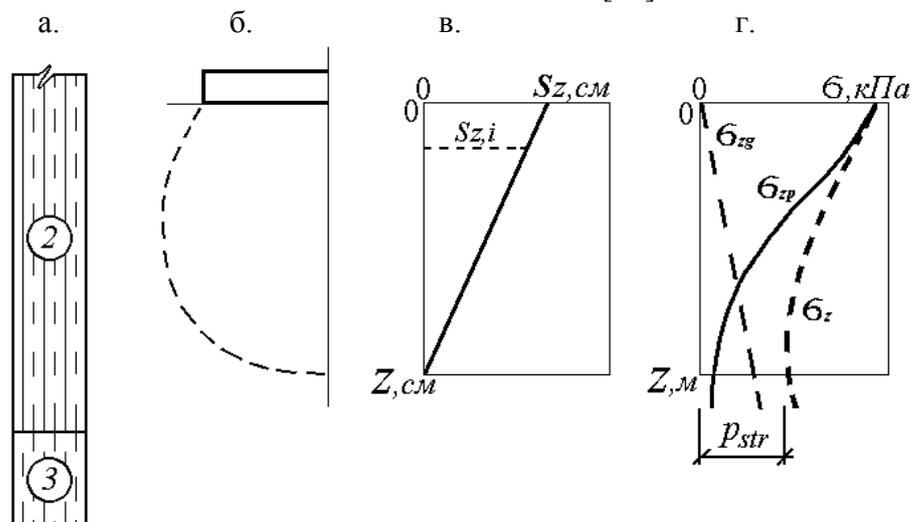


Рисунок 2 – Схема определения структурной прочности грунта в основании опытного фундамента; а) колонка инженерно-геологического разреза; б) контур зоны остаточных деформаций; в) график зависимости $s_z = f(z)$; г) определение структурной прочности на нижней границе зоны остаточных деформаций

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 – ти этажного жилого дома по ул. Маршала Жукова в г. Одессе [13]. Здание с подвальным и чердачным этажами. Стены из силикатного кирпича, перекрытия из многопустотных железо – бетонных плит. В качестве

фундамента применена монолитная железобетонная плита толщиной 0,8 м. В плане сложной конфигурации, с площадью подошвы 645 м². Плита выполнена по песчаной подушке толщиной 0,8 м. Необходимость ее применения вызвана изменением конструкции фундамента. 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

№ ИЛ	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 эпюры деформаций – графики 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 незначительно 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 $\varepsilon = f(\sigma_z)$.

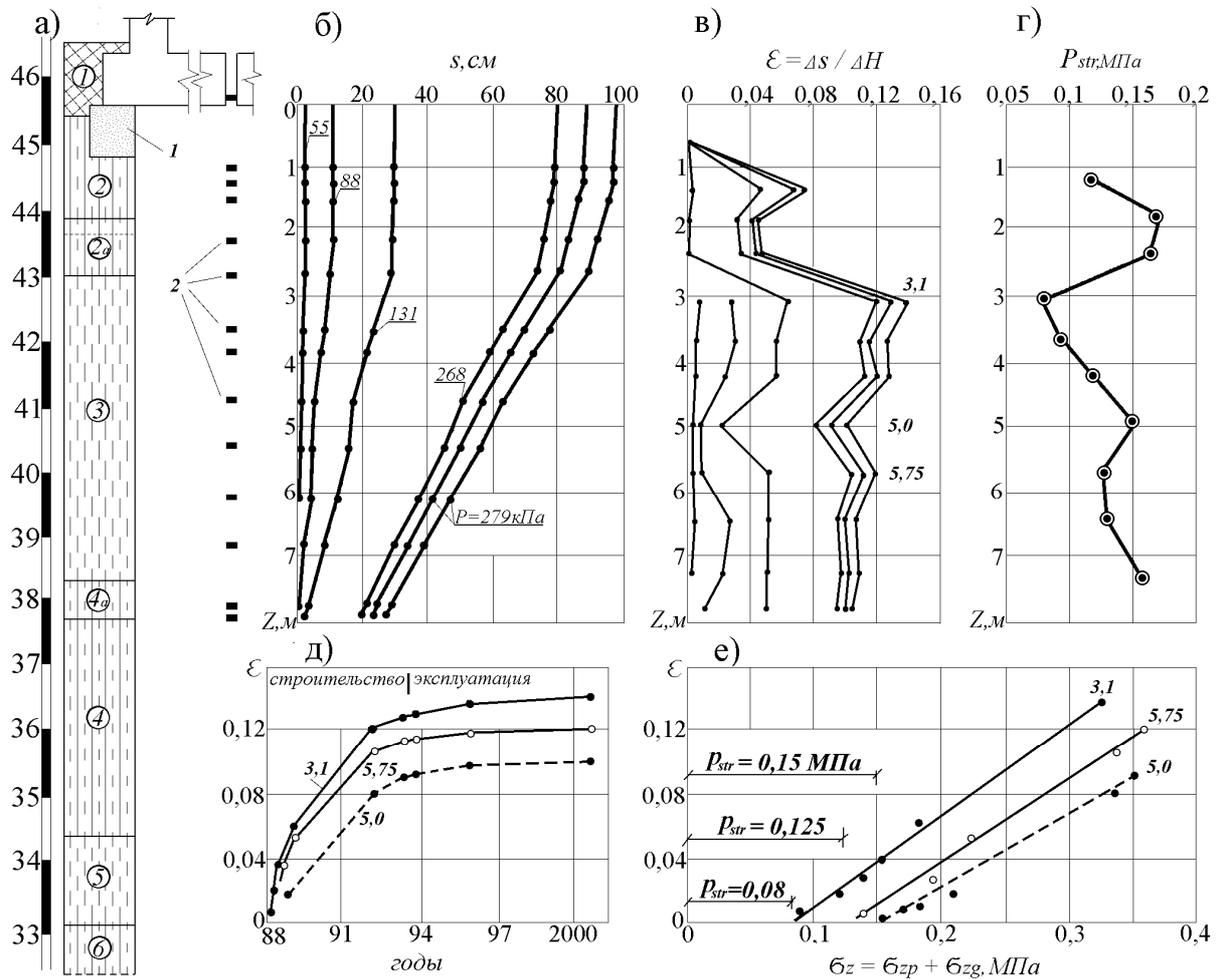


Рисунок 3 – Развитие деформаций в грунтах основания фундаментной плиты:
 а) геологическое строение участка строительства с высотным положением фундаментной плиты; 1. Песчаная подушка. 2. Грунтовые марки; б) эпюра перемещений грунтовых марок с ростом давления; в) эпюра относительных деформаций грунтов 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) значение структурной прочности определенные по зависимости относительной деформации от напряжений

На рис.3,е, для примера 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 определены 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).

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].

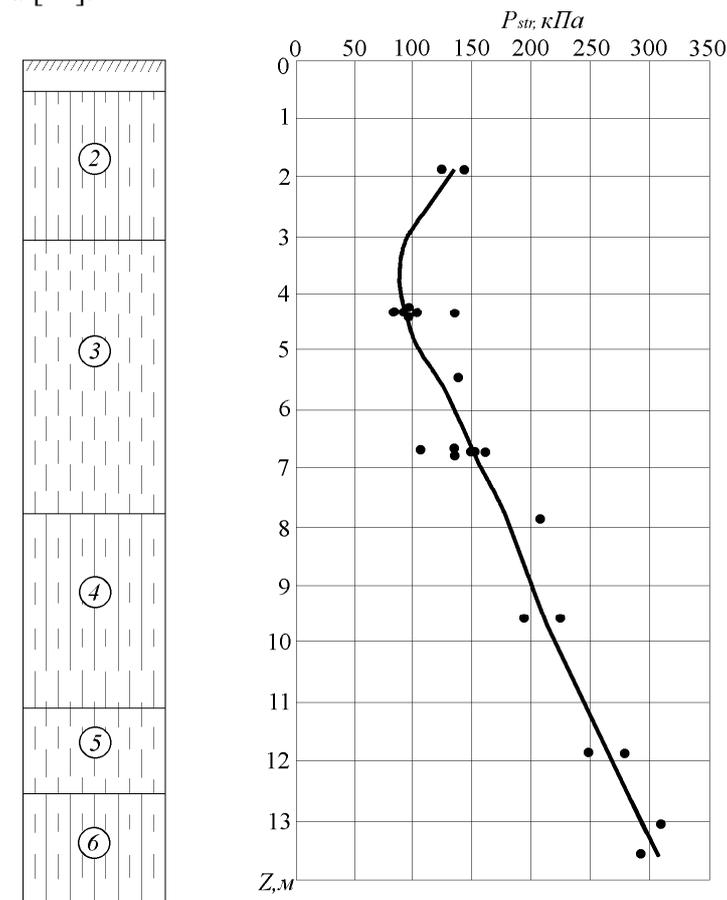


Рисунок 4 – Базовый график изменения структурной прочности для лессовой толщи Одесского региона, залегающей ниже уровня подземных вод

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».

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 напряжения на границе зоны уплотнения определяется по зависимости:

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

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 по результатам 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 (рис.4). По нему определяются значения структурной прочности для кровли и подошвы слоя и 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 меньше 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 равны величине структурной прочности.
3. Значения структурной прочности для лессовых грунтов Одесского региона, залегающих ниже уровня подземных вод, находится в пределах: для лессовых супесей 70...120 кПа, а для лессовых суглинков – 120...250 кПа.
4. Величина структурной прочности природного грунта под зоной остаточных деформаций не зависит от режима загрузки фундамента.
5. 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.

Литературы

1. Голубков В.Н. Исследование деформаций лессовых грунтов / В.Н. Голубков// Известия вузов. – Строительство и архитектура. – 1958. – №11–12. – С. 34 – 43.
2. Casagrande V. A. The structure of clay and its importance in foundation engineering // J. Boston Soc. Civil Eng., 19, № 4. – 1932. – 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. – Вип. 44. – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс», 2011. – 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 (СССР). № 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. – АН СССР. – М.: – 1984. – № 1 – С. 86 – 94.
9. Tugaenko Y., Marchenko M., Tkalich A., Mosicheva I. Peculiarities of the soil deformation process at the bases of experimental settlement plates / Technical journal // 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//. – 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. – 224с.
- 12.Ткалич А.П. Влияние условий загрузки опытных фундаментов на развитие деформаций в их основаниях /А.П.Ткалич// Вісник ОДАБА. – Вип. 46. – Одеса: ТОВ «Зовнішрекламсервіс», 2012. – С. 341 – 346.
13. Тугаенко Ю.Ф. 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). – Вип. 53. В 2-х кн.: – Книга 1. – Київ: НДІБК, 2000. – 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 (СССР). № 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 // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво, Випуск № 22. – Полтава. – 2008. – С. 98 – 102.
16. Tugaenko Y., Tkalich A., Marchenko M., Loginova L . Differential method of estimation of soil resistance characteristic according to the pile test / Technical journal // 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.