

УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ОСНОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ

Тугаенко Ю.Ф., Марченко М.В., Логинова Л.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры
г. Одесса, Украина

АННОТАЦИЯ: Наведено результати польових досліджень пружних деформацій в основах фундаментів, що складені лесових ґрунтами. Пружні деформації є наслідком стиснення оболонок молекулярно-зв'язаної води на контактах між мінеральними частинками, значення яких залежить від вологості ґрунтового середовища.

АННОТАЦИЯ: Приведены результаты полевых исследований упругих деформаций в основаниях фундаментов, сложенных лессовыми грунтами. Упругие деформации являются следствием сжатия оболочек молекулярно-связанной воды на контактах между минеральными частичками, значение которых зависит от влагоемкости грунтовой среды.

ABSTRACT: The results of field studies of elastic deformations in the foundation bases composed of loess soils. Elastic deformation is a consequence of molecularly bound water shells compression on the contacts between the mineral particles, values of which depend on the moisture capacity of soils.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фундамент, давление, упругая осадка молекулярная влагоемкость, минеральные частицы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в расчетных моделях применяется условное значение модуля упругости, определяемое увеличением в несколько раз модуля деформации. В статье приведена методика и результаты определения его значения по результатам испытаний в полевых условиях.

ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ

Результаты измерений упругих деформаций в основаниях опытных фундаментов впервые опубликованы в работах [1, 2]. Упругие деформации по глубине нарастают по линейному закону и имеют конечную границу, глубина которой больше границы остаточных деформаций.

В опубликованных работах зафиксированы факты изменения упругих деформаций по глубине и их количественная оценка по измеренным параметрам. Не определена природа упругих деформаций, факторы, оказывающие влияние на их нарастание, принципы оценки их значений.

Цель исследований – экспериментальное обоснование методики и результаты определения характеристик упругого сжатия грунтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

О наличии упругих деформаций в основаниях фундаментов свидетельствует близкая сходимость зависимости осадки от нагрузки к прямолинейной, получаемой по результатам испытаний грунтов. Эта зависимость наблюдается на начальной стадии загрузки. Обосновывая возможность применения теории упругости для определения допускаемых нагрузок на грунты Н.М. Герсегонов отмечал: «...после первого загрузки грунт не будет давать остающихся осадок, а будет иметь лишь упругие осадки...». Сознавая недостаточность опытных данных, считал: «...Для научного обоснования допускаемых нагрузок на грунт требуется основательное изучение процессов разрушения грунта и создание теории этого разрушения» [3].

Упругие деформации, их граница и изменение по глубине впервые измерены по результатам полевых исследований грунтов опытными фундаментами площадью 1,0 и 4,0 м². На промежуточных ступенях снималась нагрузка и измерялись значения упругого поднятия фундамента и грунтовых марок, установленных ниже их подошвы [1]. В последующие годы аналогичные исследования проведены опытными штампами и фундаментами площадью 0,03...1,0 м².

Методика исследований

Исследования проведены опытными штампами площадью 0,03 м² в полевых условиях в верхних слоях: ИГЭ-2 – суглинка лессового и верхнего горизонта ИГЭ-3 – супеси лессовой. Мощность лессовой толщи на данном участке около 18,0 м.

Испытания начаты на глубине 1,0 м от дна котлована и выполнены в шурфе на восьми горизонтах с интервалом по глубине 0,5 м. Дно шурфа углублялось после окончания предыдущего испытания. Схема установки штампов приведена на рис.1, а. По результатам испытаний зафиксированы значительные изменения физических характеристик по глубине. Так на отметке установки штампов плотность скелета изменялась в пределах от 1,39 до 1,65 г/см³, а структурная прочность - 0,08...0,15 МПа. Значения характеристик на отметке установки штампов приведены в табл.1.

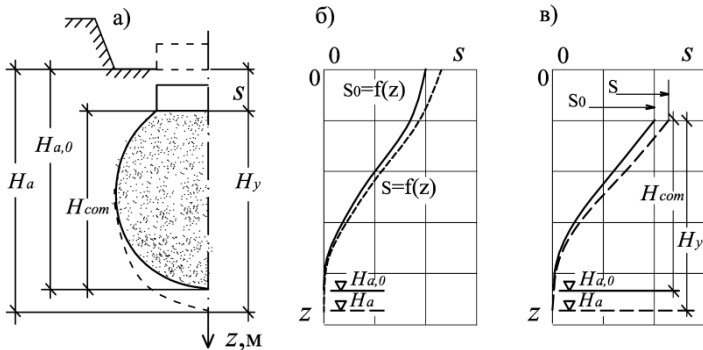


Рис. 1. Схемы испытаний грунтов опытными штампами: а) высотное положение штампов; б) начальное положение штампа и грунтовых марок; в) эпюры осадок штампа и марок: полных s и остаточных s_0 ; г) параметры деформированного состояния системы фундамент – грунты основания при каждой ступени нагрузки

Таблица 1

Характеристики грунтов в основаниях опытных штампов

№	p_{str} МПа	$\rho_d, \text{г/см}^3$			w д.е.	w_{com} д.е.
		ρ_d	$\rho_{d, com max}$	$\rho_{d, com cp}$		
1.1	0,12	1,55	1,63	1,59	0,21	0,22
1.2	0,13	1,58	1,68	1,63	0,19	0,23
1.3	0,13	1,65	1,71	1,68	0,20	0,22
1.4	0,14	1,60	1,65	1,62	0,20	0,22
1.5	0,15	1,47	1,68	1,57	0,22	0,21
1.6	0,11	1,41	1,73	1,57	0,23	0,20
1.7	0,09	1,43	1,70	1,56	0,26	0,21
1.8	0,08	1,39	1,71	1,55	0,28	0,22

Примечание: $\rho_{d, com cp} = (\rho_d + \rho_{d, com max})/2$

Исследования проведены в условиях локального замачивания грунтов основания штампов в опытах 1.1 – 1.5 и без замачивания – 1.6 – 1.8 в условиях высокой капиллярной влагоемкости. Измерения послойных перемещений, ниже подошвы штампа выполнялись с помощью магнитных марок, установленных в скважине по оси фундамента с интервалом по глубине равным 5 см, с точностью отсчета 0,1мм [2]. Схема установки грунтовых марок приведена на рис. 1, б.

Испытания проведены по методике циклически возрастающей нагрузки. Каждая ступень является самостоятельным циклом и состоит из приложения нагрузки, выдерживания ее до условной стабилизации деформаций и разгрузки. Принагрузки и посленагрузки измеряются полные и остаточные значения осадки, а их разность – упругие.

По результатам измерений осадок фундамента и перемещений грунтовых марок для каждой ступени нагрузки строится график изменения осадок по глубине – эпюра послойных перемещений. После снятия нагрузки происходит упругое поднятие штампа и грунтовых марок. По измеренным значениям строится эпюра остаточных перемещений. Пересечение этих эпюр с вертикальной осью определяет глубину зоны полных и остаточных деформаций H_a и $H_{a,0}$ (рис. 1, б).

Природа упругих деформаций

Принимая, минеральные частицы несжимаемыми при нагрузках от фундаментов, основной причиной упругих деформаций следует считать процессы, протекающие на их контактах. Каждая минеральная частица окружена оболочкой (пленкой) молекулярной воды. Сила ее притяжения составляет $(10...70) \cdot 10^3$ атмосфер. Интенсивность молекулярного притяжения снижается при удалении от поверхности частицы. Под влиянием внешней нагрузки происходит упругое сжатие оболочек молекулярной воды в точках контактов частиц, которое исчезает после снятия нагрузки. Таким образом, упругая часть осадки является следствием упругого сжатия молекулярно-связанной воды [3].

Максимальная молекулярная влагоемкость при испытаниях в условиях локального замачивания сохраняется в процессе уплотнения грунта. Ее значение остается постоянным до, в процессе и после уплотнения. Упругое сжатие оболочек молекулярной воды на контактах частиц является причиной упругой части осадки, исчезающей после снятия нагрузки. Это иллюстрируется результатами проведенных исследований. С увеличением давления пропорционально увеличиваются глубина зоны упругих деформаций и величина упругой части осадки. Их относительное значение для данного грунта является величиной постоянной как для грунтов ненарушенной структуры, так и в процессе уплотнения:

$s_y/H_y = \text{const}$. После снятия нагрузки упругая часть осадки исчезает в результате восстановления толщины сжатых участков оболочки молекулярной воды.

Суммарная емкость вытесненной воды при сжатии молекулярных оболочек в огромном количестве точек контактов между частицами определяет величину упругой составляющей осадки.

Например, в лессовых грунтах около 75% пылеватых частиц с размерами 0,05...0,005 мм, а глинистых менее 0,001 мм – около 15 %. Если пылеватую частицу со средним размером 0,01 мм представить в виде шара, то в одном кубическом миллиметре их количество составит $1 \cdot 10^6$ – без учета наличия в промежутках более мелких глинистых частиц с шестью точками контактов. По результатам выполненных исследований 1,0 мм упругой части осадки достигается при сжатии около 200 мм³ грунтовой призмы по глубине.

Определение упругих деформаций

Упругие деформации нарастают с началом приложения нагрузки и увеличиваются пропорционально ее повышению. Остаточные деформации являются следствием уплотнения и поперечного расширения сжимаемого объема под площадью подошвы фундамента и практически не оказывают влияния на нарастание упругих деформаций.

При давлениях меньших структурной прочности измерены значения упругих осадок и глубины зоны деформаций. В табл. 2 и на рис. 2 приведены результаты этих измерений. По данным наблюдений построены графики зависимости полученных параметров от давления по результатам испытаний на трех горизонтах по глубине. Характерной особенностью упругого деформирования является постоянное значение относительной деформации на каждом горизонте выполненных исследований, не зависящее от давления.

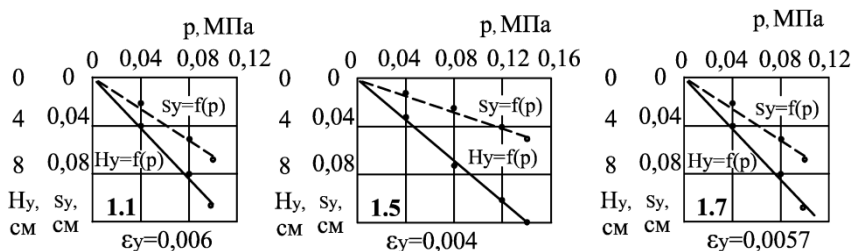


Рис. 2. Графики зависимости упругой составляющей осадки от давления и глубины зоны деформации при давлениях, меньших p_{str}

Напряженно-деформируемое состояние системы фундамент – грунты основания характеризуется следующими параметрами, приведенными на рис. 2 и в табл. 2: 1) давления p ; 2) осадкой фундамента s , ее остаточной s_o и упругой s_y составляющих; 3) параметрами зоны деформации – общей глубиной H_a ; глубиной остаточных $H_{a,o}$ и упругих деформаций $H_y = H_a - s_o$; мощностью уплотненного ядра $H_{com} = H_a - s$.

Упругие деформации нарастают в результате сжатия пленок молекулярно-связанной воды в пределах глубины зоны упругих деформаций. Их внешним проявлением является упругая составляющая осадки s_y . После снятия нагрузки толщина пленок молекулярно-связанной воды восстанавливается и упругие деформации исчезают.

Величина упругой составляющей осадки зависит от емкости молекулярно-связанной воды. Испытания проведены в условиях локального замачивания при максимальной молекулярной влагоемкости. Для лессовых грунтов ее значению соответствует весовая влажность равная 0,16.

Таблица 2

Параметры упруго сжатия грунта при $p \leq p_{str}$
в основаниях опытных штампов

p МПа	1.1			1.2			1.3			1.4		
	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$
0,04	0,02	4	5,0	0,02	4	5,0	0,01	3	3,3	0,02	5	40
0,08	0,05	8	6,2	0,04	8	5,0	0,03	8	3,8	-	-	-
0,10	0,07	11	6,4	0,05	11	4,5	0,04	10	4,0	0,04	9	4,4
0,12	-	-	-	0,06	13	4,6	0,07	14	5,0	0,06	12	5,0
0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07	14	5,0
$\varepsilon_{y, cp} \cdot 10^{-3}$			5,9				4,8				4,0	4,6

Продолжение табл.2

p МПа	1.5			1.6			1.7			1.8		
	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	s_y	H_y	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$
0,04	0,01	3	3,3	0,02	4	5,0	0,02	4	5,0	0,02	4	5,0
0,08	0,02	7	2,9	0,04	7	5,7	0,05	8	6,2	0,05	9	5,5
0,10	-	-	-	0,05	9	5,6	0,06	11	6,4	-	-	-
0,12	0,04	10	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,14	0,05	12	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\varepsilon_{y, cp} \cdot 10^{-3}$			3,7				5,4				5,8	5,3

В грунтах ненарушенной структуры в процессе и после их уплотнения емкость молекулярной воды сохраняется постоянной. Связанная вода не вытесняется в процессе уплотнения. Вследствие этого относительное значение упругой части деформаций является величиной постоянной для данной грунтовой среды и зависит от ее состава и состояния. В табл. 3 приведены результаты измерений параметров, характеризующие процессы деформирования грунтов в основаниях штампов, установленных на трех горизонтах по глубине.

Таблица 3

№	p МПа	Осадка, см			s_y/s	Зона деформации, см				$H_a/H_{a,0}$	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	
		s	s_0	s_y		H_a	$H_{a,0}$	$H_{a,com}$	H_y		ε_y	ε_y, cp
1.1	0,2	0,18	0,08	0,10	0,55	21	11	11	21	1,9	4,8	5,6
	0,3	0,79	0,62	0,17	0,21	32	23	22	31	1,39	5,5	
	0,4	1,50	1,27	0,23	0,15	41	29	28	39	1,41	5,9	
	0,5	2,57	2,28	0,29	0,11	50	36	34	47	1,39	6,2	
1.5	0,2	0,28	0,21	0,07	0,25	19	11	11	19	1,73	3,7	4,2
	0,3	1,67	1,57	0,10	0,06	31	21	19	29	1,48	3,4	
	0,4	4,03	3,89	0,14	0,035	37	31	27	33	1,19	4,2	
	0,5	5,99	5,78	0,21	0,03	44	35	29	38	1,26	5,5	
1.7	0,2	0,95	0,85	0,10	0,105	21	15	14	20	1,4	5,0	5,8
	0,3	2,99	2,84	0,15	0,050	28	25	22	25	1,12	6,0	
	0,4	5,76	5,57	0,19	0,033	38	32	24	32	1,19	5,9	
	0,5	9,16	8,93	0,23	0,025	46	42	33	37	1,09	6,2	

По измеренным данным построены графики зависимости упругих значений осадки и глубины зоны деформации от давления. Из рис. 3 видно, что относительные значения упругих деформаций ε_y не зависят от процесса деформирования. В каждом опыте их значения совпадают при определении давлений меньших или больших структурной прочности.

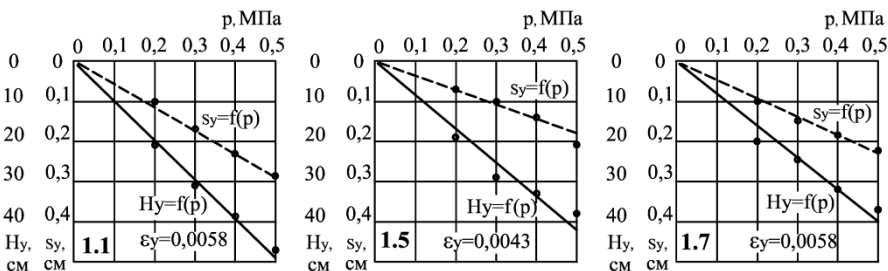


Рис.3. Графики зависимости упругой составляющей осадки и глубины зоны деформации от давления при $p > p_{str}$

В табл. 4 приведены результаты измерений параметров упругих деформаций для всех опытов этой серии.

Таблица 4

№	s_y , см при p , МПа				H_y , см при p , МПа				$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$ при p , МПа				$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,4	0,5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.1	0,10	0,17	0,23	0,29	21	31	39	47	4,8	5,5	5,9	6,2	5,6
1.2	0,10	0,17	0,23	0,28	20	25	29	32	5,0	7,4	6,8	8,7	7,0
1.3	0,07	0,11	0,14	0,17	19	23	31	34	3,7	4,8	4,5	5,0	4,5
1.4	0,07	0,13	0,19	0,25	20	25	30	33	3,5	5,2	6,3	7,6	5,6
1.5	0,07	0,10	0,14	0,21	19	29	33	38	3,7	3,4	4,2	5,5	4,2

Продолжение табл.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.6	0,08	0,14	0,18	0,22	21	28	34	40	3,8	5,0	5,3	5,5	4,9
1.7	0,10	0,15	0,19	0,23	20	25	32	37	5,0	6,0	5,9	6,2	5,8
1.8	0,09	0,15	0,19	0,26	24	31	39	46	3,8	4,8	4,9	5,7	4,8
	0,085	0,14	0,19	0,24	21	27	33	38	4,1	5,2	5,5	6,3	5,3

ВЫВОДЫ

1. Упругая составляющая осадки фундамента является следствием упругого сжатия оболочек молекулярно связанной воды в точках контактов между минеральными частицами.

2. Упругая осадка и соответствующая ей глубина зоны упругих деформаций увеличиваются пропорционально давлению, а их соотношение (относительная деформация) сохраняется постоянным, при прочих равных условиях.

3. Относительное значение упругих деформаций зависит от молекулярной влагоемкости грунтовой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование процесса формирования объема зоны деформации в основаниях опытных фундаментов / [В.Н. Голубков, Ю.Ф. Тугаенко, Ю.В. Матус, Г.Н. Плахотный] // Известия Вузов: Строительство и архитектура. – 1976. – № 1. – С. 37–41.
2. Тугаенко Ю.Ф. Методика определения параметров деформирования глинистых грунтов / Ю.Ф. Тугаенко, М.В. Марченко // Инженерная геология. – 1984. – №1. – С. 86-90.
3. Герсегованов Н.М. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на грунт на основе экспериментальных работ / Герсегованов Н.М. // Собрание сочинений. – Том 1. – Стройвоениздат, 1947. – С. 236 – 260.

REFERENCES

1. Golubkov V., Tugaenko Y., Matus Y., Plakhotnyj G. Investigation of deformation zones volume formation process experimental foundation base. [Proceedings of the universities: Construction and architecture], 1976, vol.1. – pp. 37– 41.
2. Tugaenko Y., Marchenko M. Method for determining the parameters of clay soils deformation. [Engineering geology], 1984. - vol.1. – pp. 86-90.
3. Gersevanov N. The experience of the theory of elasticity implantation to the determination load capacity of the ground on the basis of experimental works. [Collected Works], Strojvoenizdat, 1947, vol. 1. – pp. 236 – 260.

Статья поступила в редакцию 12.09.2016 г.