

Я.И. Червинский к.т.н., с.н.с.

А.М. Дворник, н.с.

Я.И. Домбровский, с.н.с.

Научно-исследовательский институт строительных конструкций, г. Киев

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ОСНОВАНИЯ МЕТОДОМ СТРУЙНОГО ИНЪЕКТИРОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ РАСЧЕТНЫМ И ОПЫТНЫМ ПУТЕМ

Приведена методика уточнения значений модуля деформации грунта основания по результатам испытаний грунтов сваями. Выполнен сравнительный анализ расчетных и опытных значений деформативных характеристик грунтов.

Ключевые слова: *модуль деформации, несущая способность, осадки.*

Я.І. Червинський, к.т.н., с.н.с.

А.М. Дворнік, н.с.

Я.І. Домбровський, с.н.с.

Науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій, м. Київ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЖОРСТКОСТІ ГЕОТЕХНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОСИЛЕННЯ ОСНОВИ МЕТОДОМ СТРУМЕНЕВОГО ІН'ЄКТУВАННЯ, ВИЗНАЧЕНИХ РОЗРАХУНКОВИМ ТА ДОСЛІДНИМ ШЛЯХОМ

Наведено методику уточнення значень модуля деформації ґрунту основи за результатами випробувань ґрунтів палями. Виконано порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних значень деформаційних характеристик ґрунтів.

Ключові слова: *модуль деформації, несуча здатність, осідання.*

Ya.I. Chervinski, Ph.D., Senior Scientist

A.M. Dvornyk, research assistant

Y.I. Dombrowski, Senior Scientist

Scientific-Research Institute of Building Constructions, Kiev

COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS OF STIFFNESS OF GEOTECHNICAL FEATURES REINFORCED BASE BY JET- GROUTING ARE FOUND CALCULATED OR BY EXPERIMENT

The technique of verifying the values of the deformation modulus of the foundation soil on the results of soil tests piles. A comparative analysis of the calculated and experimental values of the deformability characteristics of soils.

Keywords: *modulus of deformation, load-bearing capacity, precipitation.*

Введение. Целью расчета оснований по деформациям является ограничение абсолютных или относительных перемещений фундаментов и надфундаментных конструкций такими пределами, при которых гарантируется нормальная эксплуатация сооружения и не снижается его долговечность.

В соответствии с требованиями нормативных документов, характеристики грунтов должны определяться, как правило, на основе их

непосредственных испытаний в полевых или лабораторных условиях с учетом возможного изменения влажности грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений. Характеристики грунтов, необходимые для проектирования оснований (модуль деформации E , удельное сцепление c , угол внутреннего трения φ), должны определяться, как правило, для природного состояния грунтов. Ознакомление с многочисленными работами по мониторингу деформированного состояния зданий в процессе строительства и эксплуатации позволило установить, что реальные характеристики грунтов в природном состоянии далеко не всегда соответствуют их расчетным показателям, полученным в результате лабораторных испытаний на образцах нарушенной структуры.

Для принятия наиболее эффективных решений по обеспечению надежной эксплуатации зданий и сооружений при разработке проектов строительства и реконструкции большое значение имеет достоверная оценка работы грунтового основания.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Наиболее достоверными методами определения деформационных характеристик нескальных грунтов являются полевые испытания статическими нагрузками в шурфах, дудках или котлованах с помощью плоских горизонтальных штампов площадью 2500 – 5000 см², а также в скважинах или в массиве с помощью винтового штампа площадью 600 см². При этом применительно к рассматриваемым в работе [1] методам расчета оснований по деформациям эталонным методом определения деформационных характеристик считаются указанные полевые испытания в шурфах, дудках или котлованах.

Модуль деформации определяют испытанием грунта статической нагрузкой, передаваемой на штамп. Испытания проводят в шурфах жестким круглым штампом площадью 5000 см², а ниже уровня грунтовых вод и на больших глубинах – в скважинах штампом площадью 600 см².

Для определения модуля деформации используют график зависимости осадки от давления, на котором выделяют линейный участок, проводят через него усредняющую прямую и вычисляют модуль деформации E , в соответствии с теорией линейно деформируемой среды, по формуле

$$E = (1 - \nu^2) \omega d \frac{\Delta p}{\Delta s},$$

где ν – коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации), равный 0,27 для крупнообломочных грунтов, 0,30 для песков и супесей, 0,35 для суглинков и 0,42 для глин; ω – безразмерный коэффициент, равный 0,79; d – диаметр штампа, м; Δp – приращение давления на штамп, МПа; Δs – приращение осадки штампа, соответствующее Δp , МПа.

При испытании грунтов необходимо, чтобы толщина слоя однородного грунта под штампом была не менее двух диаметров штампа.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Постановка задачи и ее решение состоит в необходимости в расчетах оснований по деформациям принимать достоверные свойства грунтов, учитывая результаты натурных испытаний грунтов сваями.

Цель работы. В статье величина модуля деформации грунтов свайного основания дополнительно оценивается на основании результатов полевых контрольных испытаний грунтов сваями статической вдавливающей нагрузкой.

Основной материал и результаты. Сравнительный анализ расчетных и натурных показателей деформативности грунтов основания выполнен на двух примерах:

1) грунтоцементные джет-сваи диаметром 0,6 м и длиной 16,0 м, формируемые в результате струйного инъецирования на объекте реконструкции здания «Гостинный двор» в г. Киев [2,3]. В основании свай залегает песок мелкий, средней плотности, насыщенный водой;

2) буронабивные сваи диаметром 0,82 м и длиной 25,0 м на объекте строительства офисного центра по ул. С. Струтинского, 13 – 15 в г. Киев [4,5]. В основании свай залегает глина «киевский мергель», слюнистая, голубовато-серая, легкая, пылеватая, полутвердой и твердой консистенции.

Проект реконструкции здания «Гостинного двора», кроме работ по капитальному ремонту конструкций и заполнению пространства внутреннего двора, также предусматривает изменение его конструктивной системы. При этом нагрузка на основание увеличивается на 20% от общей нагрузки от здания до реконструкции. Проект усиления основания включает в себя устройство 833-х геотехнических элементов – джет-свай, которые выполняются по технологии струйного инъецирования. Фундаменты части здания, которая выполнена в объеме внутреннего двора объекта «Гостинный двор», – свайные, на буроинъекционных сваях.

Согласно требованиям нормативных документов, расчеты основания по деформациям с учетом усиления выполнены из условия совместной работы сооружения и основания. Основной задачей совместного расчета системы «усиленное основание – сооружение» является определение распределения дополнительной нагрузки от реконструкции, передаваемой на геотехнические элементы усиления и на подошву существующего фундамента, а также оценка осадок усиленного фундамента при возможных внешних воздействиях. При выполнении расчетов использовались характеристики грунтов основания, определенные лабораторными испытаниями. Согласно данным исследований, грунты основания сваи обладают следующими свойствами [6]:

$$ИГЭ-1 \quad \gamma_{II} = 18,7 \text{ г/см}^3; C_{II} = 0,01 \text{ МПа}; \varphi_{II} = 18^{\circ}; E = 9 \text{ МПа};$$

ИГЭ-2 $\gamma_{II} = 15,0 \text{ г/см}^3$; $C_{II} = 0,001 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 27^\circ$; $E = 12 \text{ МПа}$;

ИГЭ-4 $\gamma_{II} = 18,0 \text{ г/см}^3$; $C_{II} = 0,002 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 26^\circ$; $E = 11 \text{ МПа}$;

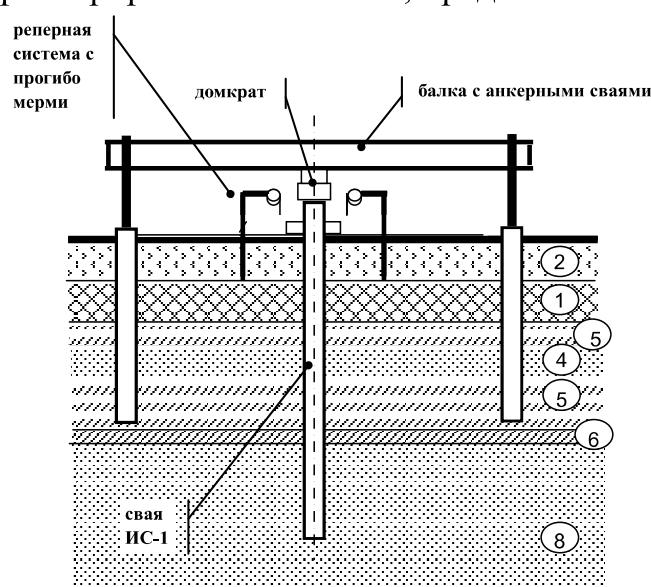
ИГЭ-5 $\gamma_{II} = 19,3 \text{ г/см}^3$; $C_{II} = 0,013 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 23^\circ$; $E = 12 \text{ МПа}$;

ИГЭ-6 $\gamma_{II} = 19,3 \text{ г/см}^3$; $C_{II} = 0,024 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 17^\circ$; $E = 8 \text{ МПа}$;

ИГЭ-8 $\gamma_{II} = 19,3 \text{ г/см}^3$; $C_{II} = 0,00 \text{ МПа}$; $\varphi_{II} = 32^\circ$; $E = 30 \text{ МПа}$.

Для уточнения характеристик грунтов основания были использованы результаты полевых контрольных испытаний буроинъекционных свай.

На объекте выполнены испытания двух свай статическими вдавливающими нагрузками. Сваи выполнены с отметки дневной поверхности в дворовой части «Гостинного двора». Схема испытательной установки и залегание инженерно-геологических элементов на участке испытаний, которые пререзает ствол сваи, представлены на рисунке 1.



ИГЭ-2 - насыпной грунт - песок средней крупности

ИГЭ-1 - насыпной грунт - супесь песчаная

ИГЭ-5 - супесь песчаная

ИГЭ-4 - песок пылеватый с линзами мелкого

ИГЭ-5 - супесь песчаная

ИГЭ-6 - суглинок легкий, пылеватый

ИГЭ-8 - песок мелкий, средней плотности

Рис. 1. Схема испытательной установки сваи и размещения приборов для измерения перемещения сваи

В результате выполненных испытаний свай установлено, что значение несущей способности сваи составляет $Fd = 650 \text{ кН}$. При максимальной нагрузке на сваю ИС-1 $P = 650 \text{ кН}$ была достигнута осадка $s = 11,5 \text{ мм}$.

Инженерные расчеты сваи по деформациям выполнены для расчетной схемы условного фундамента согласно рекомендациям приложения П норм [7]. Расчеты осуществлены для нагрузок, в соответствии со степенями нагружений, выполненных при натурных испытаниях свай.

Для определения модуля деформации рассматривается график осадки опытной сваи. Свая рассматривается как штамп, сторона которого

определяется как сторона условного фундамента, определяемого по формуле [1]

$$d_1 = d_{ce} + 2 \times h \times \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4},$$

где d_1 – диаметр условного фундамента, м; d_{ce} – диаметр поперечного сечения сваи, приведенного к круглому сечению, м; h – длина сваи, м; φ – средневзвешенное значение угла внутреннего трения слоев грунта, прорезаемых сваями.

Для исследуемой сваи диаметр условного фундамента составляет $d_1=3,84$ м. Модуль деформации определяется по формуле [1]

$$E = (1 - \nu^2) \omega d_1 \frac{\Delta p}{\Delta s}.$$

В таблице 1 приведены значения модуля деформации по данным испытаний сваи ИС-1.

Таблица 1. Оценка модуля деформации ИГЭ-8 по осадке опытной сваи

N, кН	d, м	Δp , кПа	p, кПа	s, мм	Δs , мм	$\Delta p/\Delta s$, МПа	ν	ω	$E_{кас}$, МПа	ΔN , кН	$E_{ср}$, МПа
0	-	-	0	0.00	-	-	-	-	-		
100	3.84	8.63	9	0.48	0.48	18.18	0.3	0.79	35.8	0-100	35.8
200	3.84	8.63	17	1.20	0.73	11.91	0.3	0.79	23.5	200-350	18.7
300	3.84	8.63	26	2.14	0.94	9.19	0.3	0.79	18.1		
350	3.84	4.32	30	2.73	0.59	7.32	0.3	0.79	14.4		
400	3.84	4.32	35	3.60	0.87	4.96	0.3	0.79	9.8	400-500	8.2
450	3.84	4.32	39	4.66	1.06	4.07	0.3	0.79	8.0		
500	3.84	4.32	43	5.90	1.24	3.48	0.3	0.79	6.9		
550	3.84	4.32	48	7.29	1.39	3.11	0.3	0.79	6.1	550-650	5.0
600	3.84	4.32	52	8.77	1.48	2.92	0.3	0.79	5.8		
650	3.84	4.32	56	11.48	2.71	1.59	0.3	0.79	3.1		

Результаты расчетов сваи по деформациям и натурных испытаний сваи приведены на графике зависимости нагрузки от осадки (рис. 2).

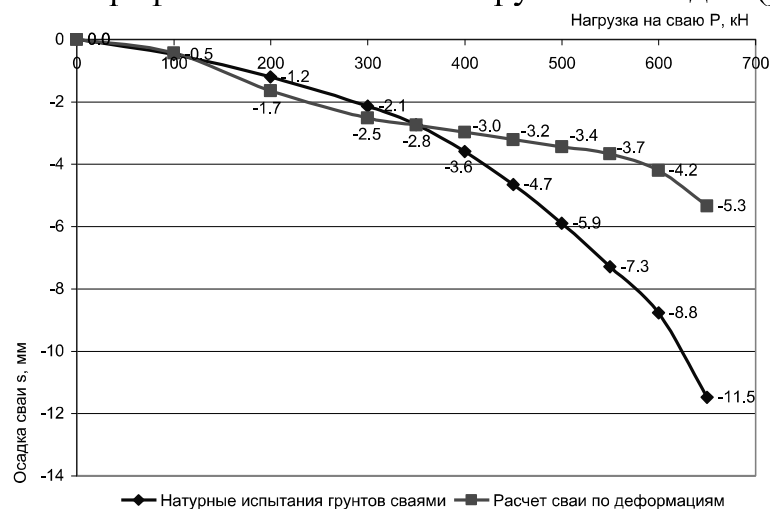


Рис. 2. График зависимости осадки сваи s, мм от нагрузки P, кН

Сопоставляя и анализируя данные о деформативных характеристиках грунтов, полученных расчетным и опытным путями, можно сделать следующие выводы:

1. Полученный расчетным путем модуль деформации песка мелкого (ИГЭ-8) соответствует данным лабораторных исследований при давлениях 9,0 кПа по подошве условного фундамента сваи, что соответствует нагрузке на одиночную сваю $P = 100$ кН.

2. При давлениях по подошве условного фундамента от 17 до 26 кПа, что соответствует нагрузке на одиночную сваю до $P = 300$ кН, модуль деформации уменьшается на 30 – 35% и достигает значения 19 МПа.

3. При нагрузках на одиночную сваю $P > 400$ кН, превышающих ее несущую способность, происходит резкое уменьшение значений модуля деформации и соответственно увеличение осадок.

4. В диапазоне нагрузок на сваю до 400 кН, который находится в пределах ее несущей способности, расчетные и опытные значения осадок отличаются на 12 – 25%, или 0,05 – 0,45 мм.

5. При нагрузке $P = 350$ кН, что составляет 80 % от расчетной несущей способности сваи, значения расчетных и опытных осадок сходятся с погрешностью в 1% (0,02 мм).

6. При нагрузках на одиночную сваю более 400 кН расчетные значения осадок являются заниженными относительно опытных на 10 – 55%, или 0,6 – 5,9 мм.

Таким образом, для адекватного моделирования системы «здание – усиленное основание» необходимо учитывать изменчивость деформативных свойств грунтов основания в зависимости от действующих в основании дополнительных напряжений.

В приведенном выше примере показано, что реальный модуль деформации грунта может быть меньше полученного в лабораторных условиях при определенных условиях нагружения. Противоположный результат получен при оценке модуля деформации грунта основания сваи на объекте строительства офисного центра по ул. С. Струтинского, 13–15, г. Киев.

Свайное поле под здание состоит из буронабивных свай диаметром $\varnothing 820$ мм, длиной $L = 25,0$ м. Низ свай заглубляется на 3,8 – 4,5 м в грунт ИГЭ-14 – глина «киевский мергель» слюдистая, голубовато-серая, легкая, пылеватая, полутвердой и твердой консистенции, местами с линзами суглинка, имеющая следующие характеристики [8,9]:

$$\gamma_{II} = 19,2 \text{ г/см}^3; C_{II} = 0,07 \text{ МПа}; \varphi_{II} = 15^\circ; E = 25 \text{ МПа}.$$

Кафедрой оснований и фундаментов КИСИ в 2010 году на строительной площадке были выполнены испытания грунтов сваями статическими вдавливаемыми нагрузками [5].

Испытуемые сваи были выполнены с дневной поверхности, их длина составила 36,5 м. Осадка сваи куста № 2 при максимальной нагрузке 4500 кН после стабилизации составила 5,95 мм. Свая куста № 1 была обурена для снятия бокового трения на глубину 12 м. Осадка сваи куста

№ 1 при максимальной нагрузке 5000 кН после стабилизации составила 8,32 мм.

В результате расчетов установлено, что несущая способность сваи $F_d = 4800$ кН, в том числе по боковой поверхности $u \sum \gamma_{cf} f_i h_i = 2990$ кН.

Таблица 2. Оценка модуля деформации ИГЭ-14 по осадке опытной сваи

N, кН	d, м	Δp , кПа	p, кПа	s, мм	Δs , мм	$\Delta p/\Delta s$, МПа	ν	ω	$E_{кас}$, МПа	ΔN , кН	$E_{ср}$, МПа
0	-	-		0.00	-	-	-	-	-		
600	5.00	30.56	31	0.02	0.02	1527.93	0.42	0.79	3550.5		
1200	5.00	30.56	61	0.44	0.42	72.76	0.42	0.79	169.1	1200-1800	136.9
1500	5.00	15.28	76	0.77	0.33	46.30	0.42	0.79	107.6		
1800	5.00	15.28	92	1.04	0.27	57.66	0.42	0.79	134.0		
2100	5.00	15.28	107	1.47	0.44	35.12	0.42	0.79	81.6	2100-2700	77.7
2400	5.00	15.28	122	1.90	0.43	35.53	0.42	0.79	82.6		
2700	5.00	15.28	138	2.42	0.52	29.67	0.42	0.79	68.9		
3000	5.00	15.28	153	2.71	0.30	51.79	0.42	0.79	120.4	3000-3600	79.1
3300	5.00	15.28	168	3.44	0.73	20.93	0.42	0.79	48.6		
3600	5.00	15.28	183	3.96	0.52	29.38	0.42	0.79	68.3		
3900	5.00	15.28	199	4.68	0.72	21.22	0.42	0.79	49.3	3900-4500	54.7
4200	5.00	15.28	214	5.32	0.64	23.87	0.42	0.79	55.5		
4500	5.00	15.28	229	5.92	0.60	25.47	0.42	0.79	59.2		

Аналогично предыдущему примеру для определения модуля деформации рассматривается график осадки опытной сваи. Последняя рассматривается как штамп, сторона которого определяется как сторона условного фундамента. Для исследуемой сваи диаметр условного фундамента составляет $d_1 = 5,0$ м.

В рамках выполнения работ по научно-техническому сопровождению строительства объекта были произведены дублирующие расчеты системы «здание – основание» с учетом характеристик грунтов, назначенных из оценки результатов испытаний свай и опыта проектирования в аналогичных грунтовых условиях. При проектных нагрузках на сваи в диапазоне от 1300 до 3600 кН значения модуля деформации изменяются от 60 до 150 МПа. В процессе строительства для уточнения деформативных свойств основания выполнялись геодезические наблюдения. Параллельно с учетом результатов геодезических наблюдений и истории нагружения основания строящимся зданием осуществлялись расчеты по имитационному моделированию напряженно-деформированного состояния здания в процессе строительства. В результате выполненных исследований установлено, что вертикальные деформации, которые были определены с учетом уточненных натурными испытаниями модуля деформации грунта, согласуются с результатами геодезических наблюдений.

Выводы. Использование данных о деформативных свойствах грунтов, полученных по результатам натурных испытаний свай статической

вдавливающей нагрузкой, позволяет принимать надежные эффективные решения при проектировании и реконструкции зданий и сооружений.

Литература

1. *Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83)* – М.: Стройиздат, 1986.
2. *Отчет о научно-технической работе «Науково-технічний супровід проектування та будівництва об'єкту: реконструкція будівлі «Гостинний двір» на Контрактовій площі, 4 в Подільському районі м. Києва під торгівельно-офісний центр».* – К.: НИИСК, 2013.
3. *Отчет о научно-технической работе «Випробування ґрунтів палями статичними навантаженнями на об'єкті: «Реконструкція будівлі Гостинного двору під торгівельно-офісний центр на Контрактовій площі, 4 у Подільському районі м. Києва».* – К.: НИИСК, 2013.
4. *Отчет о научно-технической работе «Поверочные расчеты железобетонных конструкций объекта строительства «Офисный центр с встроенными и пристроенными помещениями и заведениями общественного питания с подземными и надземными паркингами по ул. С. Струтинского, 13–15 в Печерском районе г. Киева».* – К.: НИИСК, 2012.
5. *Звіт про випробування ґрунту статичним навантаженням на палі на об'єкті: «Будівництво офісного центру із вбудованими та прибудованими приміщеннями та закладами громадського харчування із підземними та надземними паркінгами по вул. Сергія Струтинського, 13-15 в Печерському районі м. Києва».* – К.: КНУБА, 2010.
6. *Науково-технічний звіт «Інженерно-геологічні вишукування для реконструкції будівлі Гостинного двору під торгівельно-офісний центр «Гостинний двір» у Подільському районі м. Києва».* – К.: ТОВ «Основа», 2012.
7. *ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1 (Пальові фундаменти).* – К.: Мінбуд України, 2011.
8. *Отчет об инженерно-геологических изысканиях под перспективное строительство на пересечении бул. Дружбы народов и ул. Струтинского в Печерском районе г. Киева – К.: ООО «ГУ ВКП «Мегабуд», 2009.*
9. *Отчет о дополнительных инженерно-геологических изысканиях под офисный центр с встроенными и пристроенными помещениями и объектами общественного питания с подземным и надземным паркингом со сносом существующих зданий и сооружений по ул. Сергея Струтинского, 13 – 15 в Печерском районе г. Киева.* – К.: ООО «ГУ ВКП «Мегабуд», 2010.

Надійшла до редакції 17.10.2013

© Я.І. Червинський, А.М. Дворнік, Я.І. Домбровський