

УДК

ПРОГНОЗ ОСАДКИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА АРГИЛЛИТОПОДОБНЫХ ГЛИНАХ (на примере Пермского региона)

Рассматриваются закономерности деформирования аргиллитоподобных глин и влияние их анизотропности на модули общей деформации. Даются рекомендации по расчету осадок свайных фундаментов, основанием которых являются данные глины.



**ПОНОМАРЕВ
АНДРЕЙ БУДИМИРОВИЧ**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Строительное производство и геотехника" Пермского национального исследовательского политехнического университета, советник РААСН (Пермь, Россия).

Основные направления научной деятельности – исследование взаимодействия свайных фундаментов с грунтовым массивом, проектирование и устройство фундаментов глубокого заложения, обследование технического состояния оснований, фундаментов и подземных сооружений, применение геосинтетических материалов в геотехническом строительстве.

Автор более 220 опубликованных работ, в том числе монографии, нормативные документы и патенты.



**СЫЧКИНА
ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА**

Ассистент кафедры "Строительное производство и геотехника" Пермского национального исследовательского политехнического университета (Пермь, Россия).

Основные направления научной деятельности – исследование деформационных и прочностных свойств аргиллитоподобных глин, строительство в сложных инженерно-геологических условиях.

Автор более 20 опубликованных работ.

Одним из путей повышения экономичности фундаментов является совершенствование методов определения и расчета деформационных параметров грунтов. Наиболее надежными являются расчетные модели, отражающие реальные свойства грунтов, в том числе деформационную анизотропию, которую следует учитывать при расчетах модуля деформации.

Исследования деформационных свойств глинистых грунтов, проводившиеся во многих странах, свидетельствуют о том, что они обладают трансверсально-изотропной деформационной анизотропией, вызванной текстурными особенностями и условиями формирования. Среди отечественных ученых, занимавшихся исследованиями деформируемости грунтов, можно отметить Башелейшвили М.О., Бехтерева П.В., Бугрова А.К., Голубева А.И., Гольдштейна М.Н., Клевезаля А.П., Коробову О.А., Лехницкого С.Г., Писаненко В.П., Портаева Л.П., Раппопорт Р.М., Савинова Г.Н. Среди зарубежных – Barden L., Biarez I., Bufler H., Deutsch E, Eftimie Al, England H., Willis J.R., Wolf K. По свидетельству ряда работ более древние глинистые грунты имеют меньшую сжимаемость в плоскости слоистости, чем современные глины, однако эта их особенность изучена слабо и не отражена в нормативных документах.

Целью исследований является разработка методики прогноза осадок фундаментов, опирающихся на такие глины. При этом необходимо было решить следующие задачи:

1. Экспериментально изучить деформируемость аргиллитоподобных глин, выявить степень их деформационной анизотропии.
2. Разработать методику испытаний образцов в приборе трехосного сжатия, результаты сравнить с данными [1].
3. Выполнить прогноз осадок фундаментов аналитическим методом с применением полученного в результате исследования модуля де-

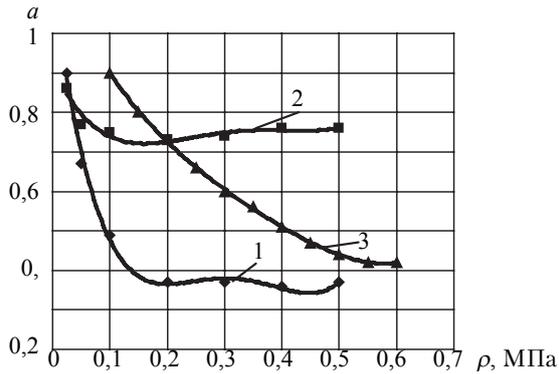


Рис. 1. Кривые средних значений коэффициентов анизотропии (a) аргиллитоподобных глин: 1, 2 - лабораторные испытания в одометре соответственно в маловлажном и водонасыщенном состояниях; 3 - полевые испытания

формации глин в плоскости напластования, сравнить расчетные и натурные данные экспериментов.

4. Предложить эмпирические поправочные коэффициенты для расчета модуля общей деформации глин по данным полевых испытаний прессиометром, лабораторных испытаний в одометре и стабилометре.

5. Разработать рекомендации по прогнозу осадок свайных фундаментов, основанием которых являются аргиллитоподобные глины.

По физическим свойствам и пределу прочности на одноосное сжатие согласно [2] глины раннепермского возраста классифицируются как сильновыветрелые полускальные, размягчаемые в воде, твердой и полутвердой консистенции. По данным Гайнанова Ш.Х., Игнатьева Н.А., Крупина В.И., Кузнецова А.М., Передериева В.А. аргиллитоподобные глины характеризуются более прочными связями, обусловленными наличием ориентированных пелитовых частиц, покрытых цементационными пленками.

Авторами были проанализированы и сопоставлены результаты полевых и лабораторных испытаний аргиллитоподобных глин. Полевые исследования включали в себя испытания плоским штампом площадью 600 см^2 , для оценки деформативности глины по нормали к плоскости напластования и прессиометрические в скважинах для определения деформационных свойств среды в той же плоскости.

Лабораторные исследования образцов глин, вырезанных параллельно и перпендикулярно слоистости, проводились в компрессионном приборе (одометре) при естественной влажности и полном водонасыщении. По результатам полевых и лабораторных испытаний коэффициент анизотропии

$$a = S_x/S_z, \quad (1)$$

где S_z и S_x – средние значения деформаций соответственно перпендикулярно вдоль плоскости напластования, мм.

Результаты лабораторного исследования представлены в виде зависимостей коэффициентов анизотропии от нагрузки для аргиллитоподобных и глин (рис. 1).

Полевые и лабораторные исследования выявили, что у аргиллитоподобных глин в маловлажном и водонасыщенном состояниях средние значения a составляют соответственно 0,50 и 0,77.

Среднее значение коэффициента a , полученное в лабораторных условиях для образцов в маловлажном состоянии, составило 0,5, а в полевых испытаниях – 0,6 (для водонасыщенных образцов $a = 0,8$).

Авторами были выполнены испытания в приборе трехосного сжатия для моделирования в лабораторных условиях штамповых испытаний и последующей оценки деформаций образцов перпендикулярно напластованию. В исследовании на стадии консолидации применялось изотропное обжатие грунта [1]. Время 100%-ой консолидации, определенное по [1] для аргиллитоподобных глин в маловлажном состоянии, в среднем составило 9,5 сут, в водонасыщенном – 22,5 сут.

Экспериментальные исследования состояли из двух этапов. На первом этапе образцы при $I_L < 0,25$ испытывались по методике [1], а на втором – по методике авторов, по которой изменялась скорость нагружения и время между ступенями. Время задавалось равным среднему между ступенями при полевых испытаниях штампом площадью 600 см^2 и составило 1,68 ч (100 мин). Аналогичным образом была рассчитана средняя скорость нагружения в ходе статических испытаний штампом, составившая $0,004 \text{ мм/мин}$.

Исследования проводились по неконсолидированно-недренированной (НН), консолидированно-недренированной (КН) и консолидированно-дренированной (КД) схемам. По каждой схеме было испытано шесть образцов, которые нагружались вертикальным давлением как ступенями, так и с постоянной заданной скоростью. Результаты испытаний в приборе трехосного сжатия приведены на рис. 2, из которого видно, что по консолидированным схемам по методике авторов наблюдаются большие значения модуля деформации (в среднем на 19% для недренированной и 26% дренированной схемы), чем по неконсолидированной схеме. При различном характере нагружения расхождение в значениях модуля деформации в среднем составило 6...22%.

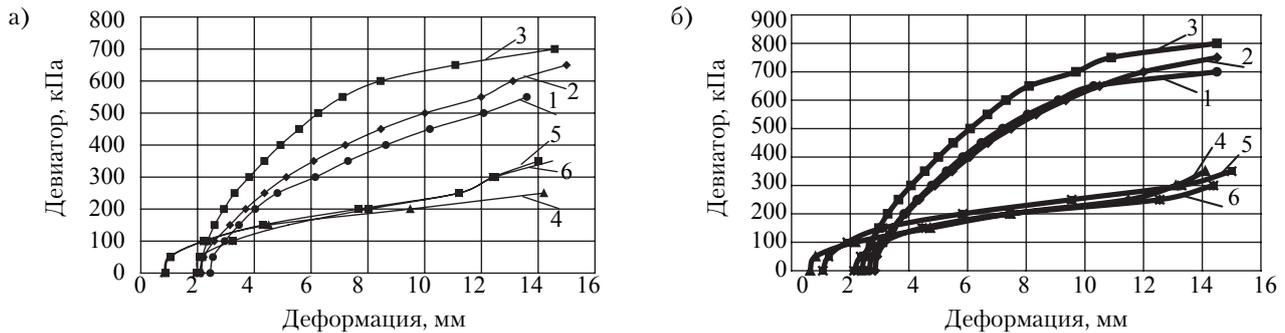


Рис. 2. Кривые средних значений деформаций образцов аргиллитоподобных глин при испытаниях в стабилометре по методике ГОСТ 12248-2010 (а) и авторов (б):
1...3 - схемы без водонасыщения соответственно НН, КН, КД; 4...6 - с водонасыщением - НН, КН, КД

Таблица 1

Интервал нагрузки $P_i \dots P_{i+1}$, МПа	E_{um} , МПа	$E_{pressio}$, МПа	E_{triax} , МПа по схемам			E_{oed} , МПа
			НН	КН	КД	
0,0-0,1	74,0	15,3	53,3	37,6	48,2	3,6
0,1-0,2	32,2	22,0	19,3	18,9	24,5	5,3
0,2-0,3	24,0	19,3	14,6	15,2	18,0	7,4
0,3-0,4	19,9	21,0	12,1	13,5	15,3	7,7
0,4-0,5	16,7	24,8	10,1	10,5	13,2	9,1

Таблица 2

Интервал нагрузки $P_i \dots P_{i+1}$, МПа	K_r , МПа	E_{triax} , МПа по схемам			m_k , МПа
		НН	КН	КД	
0,0-0,1	4,8	2,0	1,4	1,5	14,0
0,1-0,2	1,5	1,7	1,7	1,3	4,4
0,2-0,3	1,2	1,6	1,6	1,3	3,1
0,3-0,4	0,9	1,5	1,6	1,3	2,2
0,4-0,5	0,7	1,6	1,6	1,3	1,8

Результаты трехосных испытаний показали, что модули деформации аргиллитоподобных глин по методике [1] ниже, чем по методике авторов (в зависимости от схемы различие от 10 до 55 %). Максимальные значения модулей деформации и сдвига были получены при испытаниях по схеме КД без водонасыщения по методике авторов (среднее значение модуля деформации 17,8 МПа, сдвига – 7,2 МПа). Модуль деформации наиболее близок к модулю деформации при испытаниях штампом площадью 600 см². При увеличении влажности образцов глин в испытаниях по обеим методикам модуль деформации существенно уменьшился (в 3...9 раз), что вызвано разрушением цементационных связей между частицами грунта при водонасыщении.

По модулям деформации, полученным по данным pressiометрических, компрессионных и стабилометрических (по методике авторов) испытаний, были рассчитаны поправочные коэффициенты. Предварительно был определен модуль деформации глин природной влажности по нормативным документам без поправочных коэффициентов [4] для нагрузок 0,0...0,5 МПа для штамповых (E_{um}), pressiометрических ($E_{pressio}$), стабилометрических (E_{triax}) и компрессионных (E_{oed}) испытаний (табл. 1). Затем были вычислены переходные коэффициенты для приведения pressiометрических (K_r), стабилометрических (K_{triax}) и компрессионных (m_k) модулей к штамповому (табл. 2) [5]. По [6, 7] $K_r = 1,5$ МПа, $m_k = 6,0$ МПа.

Зависимость поправочных коэффициентов от интервала нагрузки авторами математически выражена следующим образом:

- для pressiометрического модуля деформации

$$K_r = 1388,5(P_{i+1} + P_z)^4 - 1927,3(P_{i+1} + P_z)^3 + 967,05(P_{i+1} + P_z)^2 - 209,78(P_{i+1} + P_z) + 17,938; \quad (2)$$

- для компрессионного модуля деформации

$$m_k = -317,78P_{i+1}^3 + 407,38P_{i+1}^2 - 193,9P_{i+1} + 37,097; \quad (3)$$

- для стабилометрического модуля деформации, полученного по неконсолидированно-недренированной схеме

$$K_{triax} = 134,41P_{i+1}^4 - 154,161P_{i+1}^3 + 65,63P_{i+1}^2 - 13,51P_{i+1} + 2,8031; \quad (4)$$

- для консолидированно-недренированной схемы

$$K_{triax} = -150,15P_{i+1}^4 + 205,81P_{i+1}^3 - 101,29P_{i+1}^2 + 21,044P_{i+1} + 0,1071; \quad (5)$$

- для консолидированно-дренированной схемы

$$K_{triax} = 147,59P_{i+1}^4 - 197,41P_{i+1}^3 + 93,68P_{i+1}^2 - 18,721P_{i+1} + 2,6541. \quad (6)$$

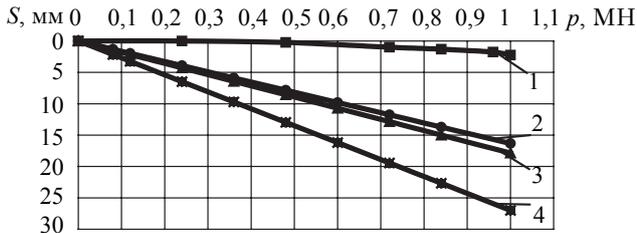


Рис. 3. Графики осадки для одиночной сваи: 1 - натурная осадка; 2...4 - осадки, рассчитанные по методике [9] с применением соответственно штампового, стабиллометрического и компрессионного модулей деформации

В выражениях (2)...(6) расчет выполняется при давлении от p_i до p_{i+1} , в (2) p_z – бытовое давление на глубине испытания. Достоверность аппроксимации R^2 указанных зависимостей равна 1,0.

Для апробации методики авторов по определению модуля деформации при прогнозе осадки фундаментов в качестве экспериментальных данных были использованы результаты статических испытаний свай. С этой целью были выбраны площадки, где проводились натурные испытания пяти свай статической вдавливающей нагрузкой [8], результаты которых сравнивались с расчетными осадками, полученными аналитическим методом [9] для одиночной сваи. При расчете использовались модуль деформации глин в пределах 0,2...0,3 МПа; штамповый модуль, равный 24,0 МПа; стабиллометрический – 18,0 МПа, компрессионный – 7,4 МПа (см. табл. 1) (рис. 3).

Наиболее близкие к натурным осадки были получены при расчете с применением штампового модуля деформации. При расчете с модулем, полученным по методике авторов, осадки оказались на 2...21% больше рассчитанных с помощью штампового модуля. Осадки, определенные с применением компрессионного модуля, отличались от рассчитанных с использованием штампового на 70...300%. Подобное наблюдалось во всех исследуемых случаях.

На основании результатов исследований была разработана методика прогноза осадки свайных фундаментов, основанием которых является аргиллитоподобная глина. Методика позволяет рассчитать осадки одиночной сваи с использованием входных параметров (модуля деформации и сдвига), получаемых по данным прессиометрических, компрессионных или трехосных испытаний с достаточной для инженерной практики точностью. Последовательность действий согласно предлагаемой методике по этапам:

I. Выбирается метод определения модуля деформации на основе анализа инженерно-гео-

логических условий, требований [7], а также имеющегося оборудования.

II. Проводятся испытания для определения модуля деформации любым из предложенных ниже методов:

1) в полевых условиях радиальным прессиометром по методике [6] для глинистых грунтов с показателем текучести $I_L \leq 0,25$ и коэффициентом пористости $0,5 < e \leq 0,8$;

2) в одометре по методике [1] для глинистых грунтов с $I_L \leq 0,25$ и $0,5 < e \leq 0,8$;

3) в приборе трехосного сжатия со следующими параметрами:

- бытовое давление, время реконсолидации образца, предельная относительная вертикальная деформация, определяемая по [1] для всех трех схем нагружения. На стадии реконсолидации применяется изотропное обжатие грунта;

- конечная степень давления на стадии консолидации при испытаниях по консолидированным схемам выдерживается до завершения 100%-ной фильтрационной консолидации образца грунта, равной 228,15 ч;

- на стадии вертикального нагружения при статической нагрузке степень вертикального давления составляет 10...15% (не более 15% от всестороннего давления), время между ступенями – 100 мин. При непрерывном нагружении скорость вертикальной деформации равна 0,004 мм/мин.

III. Определяется модуль деформации с использованием корректировочных коэффициентов, полученных авторами. Прессиометрический модуль деформации грунта E (МПа) для линейного участка графика $r = f(p)$

$$E = K_r r_0 \frac{\Delta p}{\Delta r}, \quad (7)$$

где K_r – корректирующий коэффициент, рассчитанный по (2); r_0 – радиус скважины, равный $r_{pr} + \Delta r_0$; r_{pr} – радиус прессиометра, см; Δr_0 – приращение радиуса прессиометра, соответствующее p_0 , см; Δp – приращение давления на стенку скважины между двумя точками на осредняющей прямой, МПа; Δr – приращение перемещения стенки скважины (по радиусу), соответствующее Δp , см.

Компрессионный модуль

$$E = m_k \frac{1 + e_0}{m_0} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}\right), \quad (8)$$

где m_k – корректировочный коэффициент, рассчитанный по (3); e_0 – коэффициент пористости до начала испытания; m_0 – коэффициент сжимаемости, соответствующий интервалу давле-

ния от p_i до p_{i+1} ; ν - коэффициент поперечной деформации, определяемый по результатам испытаний в приборах трехосного сжатия либо по справочным данным.

Модуль деформации по данным испытаний в приборе трехосного сжатия

$$E = K_{triax} \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}, \quad (9)$$

где K_{triax} - корректировочный коэффициент, рассчитанный по (4), (5), (6) для испытаний по НН, КН и КД схемам, соответственно; $\Delta\sigma_1$ - приращение напряжений σ_1 в заданном диапазоне; $\Delta\varepsilon_1$ и $\Delta\varepsilon_3$ - приращение относительных вертикальной и поперечной деформаций образца.

IV. Рассчитывается осадка одиночной сваи по методике [9].

Согласно расчету, выполненному на основе справочника базовых цен на инженерно-геологические и инженерно-экологические изыскания для строительства, предлагаемая авторами методика расчета модуля общей деформации по данным прессиометрических, компрессионных и стабилометрических испытаний, позволит снизить стоимость работ в 2...3 раза по отношению к штамповым испытаниям.

Выводы

1. Для аргиллитоподобных глин в маловлажном и водонасыщенном состояниях деформации в горизонтальной плоскости меньше, чем в вертикальной ($a = 0,5$ и $0,77$ соответственно).

2. Предложенная методика испытаний аргиллитоподобных глин в приборе трехосного сжатия для определения модуля деформации, позволила получить более точные значения E , чем по [1], использование которого в расчетах

показало лучшую сходимость с расчетом осадки по данным штамповых и натуральных испытаний свай, чем с применением компрессионного модуля деформации.

3. Для расчета модуля деформации при прогнозе осадки свайных фундаментов, полученного по данным испытаний прессиометром, а также лабораторных испытаний в стабилометре и одометре аргиллитоподобных глин природной влажности, рекомендуется использовать полученные зависимости для эмпирических поправочных коэффициентов.

4. Предложенная методика прогноза осадки свайных фундаментов, опирающихся на аргиллитоподобные глины, позволило снизить стоимость опытных работ в 2...3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
2. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.
3. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. К вопросу определения начального напряженного состояния полускальных грунтов в лабораторных условиях // Изв. вузов. Стр-во. - 2012. - № 6. - С. 74-80.
4. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Сопоставление механических свойств аргиллитов раннепермского возраста по результатам полевых и лабораторных испытаний // Вестник МГСУ. - 2013. - № 2. - С. 55-63.
5. Акбуляков М.А., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н., Черепанов А.Ю. Сопоставление результатов экспериментальных исследований механических свойств аргиллитов при выборе параметров, используемых в проектировании зданий и сооружений // Вестник ПНИПУ. Стр-во и архитектура, 2012. - С. 7-17.
6. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
7. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений.
8. Пономарев А.Б., Калошина С.В. Наиболее значимые факторы строительства при возведении зданий в стесненных условиях // Изв. Орловского гос. техн. ун-та. Стр-во и транспорт. - 2007. - № 1-13. - С. 7-10.
9. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты.