

РАЗВИТИЕ В РОССИИ ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

Лушников В.В., главный научный сотрудник института «УралНИИПроект РААСН», e-mail gsexpert@list.ru, тел. 8 (912) 61 57 916

DEVELOPMENT IN RUSSIA PRESSIOMETRY METHOD SOILS

Lushnikov V.V., chief scientific researcher of the Institute of «Uralniiproect RAASN», e-mail gsexpert@list.ru, phone 8 (912) 61 57 916

РЕФЕРАТ: Описание работ, проводимых в СССР и в России по развитию прессиометрического метода Л. Менарда (Menard, 1957). В ходе активных исследований в 60-90-е годы XX века было получено более 30 авторских свидетельств и патентов на изобретения, опубликовано более 50 научных работ; по этой тематике было защищено 17 диссертаций; проблемам прессиометрии было посвящено несколько всесоюзных, российских и международных симпозиумов и конгрессов, издан ряд государственных стандартов (ГОСТ 20276, ГОСТ 21719) с указаниями по режимам испытаний, переходным коэффициентам, обеспечивающим надежность получаемых результатов. Однако серьезные исследования в этой области, к сожалению, почти полностью прекратились с 90-х годов XX века.

SUMMARY: a description of the work carried out in the USSR and Russia on the development of the method of pressiometry L. of Menard (Menard, 1957). During surveys in 60 to 90-th years of XX century there were obtained more than 30 copyright certificates and patents, published more than 50 scientific works; on this subject was reserved 17 dissertations; problems of pressiometry focused on several all-Union, Russian and international symposia and congresses, published a number of state standards (GOST 20276, GOST 21719) the instructions to test modes, the transition coefficients that ensure the reliability of the results. However, serious research in this area, unfortunately, almost completely stopped since 90-ies of XX century.

Введение

Впервые в бывшем СССР обратили внимание на метод прессиометрии в 30-50-е годы благодаря работам Ф. Кёглера (Kögler, 1933 [17]) и К. Терцаги (Terzaghi, 1944 [22]). В эти же годы было опубликовано несколько работ отечественных ученых – А. Ктаторова [5], Н.А. Цилюрника [10] и Г.И. Покровского [8].

Второе рождение прессиометрического метода в 60-80-е годы было связано с чрезвычайно интересными работами французского инженера Л. Менарда первая публикация которого (Menard, 1957) [23], появилась в переводе в 1964 г. С деятельностью Л. Менарда [23-25] и его последователей связано появление множества научных разработок и широкое внедрение метода в практику исследований грунтов в разнообразных грунтовых условиях – Leischner, 1966 [19], Gambin, 1969 [14], Baquelin, Jazequel and Le Mehaute, 1973 [12], Ladanyi, 1972 [18], Gibson and Anderson, 1961 [18], Prevost and Hoeg, 1975 [27], Palmer, 1973 [26], Wroth and Hughes, 1973 [28], Candaparadhyay and Nasr, 1986 [15], Briand, Tucker and Makarim, 1986 [13] и др.

Исследования в СССР и России велись достаточно активно: было получено более 30 авторских свидетельств на изобретения, опубликовано более 50 научных работ; по этой тематике было защищено 17 диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. В 70-90 годы проблемам прессиометрии было посвящено несколько всесоюзных, российских и международных симпозиумов и конгрессов. В стране ранее проводились до 10 тыс. прессиометрических испытаний в год.

Исследования завершились изданием государственных стандартов (ГОСТ 20276, ГОСТ 21719), причем ГОСТ 20276 с небольшими изменениями издавались 4 раза – в 1974, 1985, 1999 и 2012 гг. Был организован выпуск прессиометров. Однако серьезные исследования в этой области, к сожалению, почти полностью прекратились с конца 90-х годов XX века.

2. Характеристика методов испытаний грунтов

На первых этапах развития отрасли Механики грунтов оценка свойств грунтов проводилась в основном лабораторными методами. Это объясняется относительной простотой аппаратуры и методики, стремлением получить в «нуль-мерном» эксперименте представление о свойствах грунтов, качественно отличающих их от свойств других материалов, и способствующих развитию Механики грунтов.

Однако сразу же возникла проблема оценки достоверности получаемой информации. Выяснилось, что лабораторные испытания дают сильно заниженную оценку прочности и особенно – сжимаемости. Если часть расхождений можно объяснить несовершенством приборов, нарушением структуры и др., то другая, большая часть, не имеет сколько-нибудь приемлемого объяснения с позиций традиционного подхода, основанного на линейном представлении поведения грунтов.

Другим направлением в оценке строительных свойств грунтов являются полевые методы испытаний в условиях естественного залегания (*in situ*). Важнейшее преимущество их состоит в сохранении природной структуры грунтов, а при испытании штампом – почти полное моделирование работы фундамента. Высокую достоверность характеристик по результатам полевых испытаний штампами определяет то обстоятельство, что при их интерпретации используются те же линейные расчетные схемы, что и при расчете оснований. Это означает меньшую зависимость результатов испытаний от применяемых расчетных схем и моделей. Поэтому полевые методы априори считаются более надежными.

Самым надежным считается модуль деформации, полученный по результатам испытаний штампами площадью $A = 5000 \text{ см}^2$ (его принято обозначать как E_{5000}). Именно модуль E_{5000} был положен в основу методов расчета осадок зданий и сооружений; он всегда служил и продолжает служить эталонным для оценки результатов испытаний грунтов другими методами.

Тем не менее, можно утверждать, что надежность полевых испытаний является кажущейся: формальное совпадение осадок сооружений с использованием модулей E_{5000} и по наблюдениям за осадками еще не означает адекватного описания послойных перемещений по глубине, распределения контактных напряжений и др. Такое положение является следствием исторического процесса, при котором сами расчетные методы определения осадок фундаментов разрабатывались в условиях априорной достоверности штампового модуля деформации E_{5000} .

Это обстоятельство снижает доверие к любым методам испытаний грунтов, отличным от штампового, заставляет каждый раз искать новые коэффициенты перехода и правдоподобное физическое их объяснение. Далее это будет показано на примере метода прессиометрии. Для появившихся недавно методов испытаний плоскими или клиновидными дилатометрами, внедряемыми в массив грунта без предварительной проходки скважин, требуют установления своих переходных коэффициентов.

Кроме того, существующие полевые испытательные установки (штампы, приборы сдвига) громоздки, трудоемки, не свободны от ряда метрологических и методических погрешностей, имеют ограниченный диапазон применения, особенно в слабых и структурно-неустойчивых грунтах и др.

Поэтому всегда существует проблема разработки новых методов испытаний, отличных от штампового, повышения достоверности их результатов, расширения диапазона использования в самых разных условиях, снижения трудозатрат и времени при сохранении необходимого уровня надежности.

3. О месте теории упругости в расчетах грунтовых оснований

Как известно, применение Теории упругости к расчетам грунтовых оснований было начато трудами Буссинеска (1889) и Фламана (1892). Но они рассматривали не грунты, а полагали объектом расчетов идеализированную среду – упругое полупространство (УПП). Его характеризуют такие качества, как упругость, сплошность, бесконечная прочность, изотропия.

Вопрос о том, при каких условиях к грунтам могут быть применены решения Теории упругости, был обоснован в работах К. Терцаги [22], Н.М. Герсеванова [2] и ряда других ученых, начиная с 30-х годов XX века. Дело в том, что ни одним из перечисленных выше качеств УПП грунты не обладают, а упругость в них возникает только после многократного нагружения и разгрузки (рис. 1). В то же время, нагружение грунта штампом показывает на существование линейного участка графика «нагрузка p – осадка S », что формально позволило утверждать о поведении грунтов, похожем на упругое, и соответственно – использовать решения Теории упругости.

Эти условия общеизвестны: 1-е – рассматривать только процесс нагружения без учета разгрузки; 2-е – рассматривать давления только в пределах линейного участка зависимости $S = f(p)$; 3-е – рассматривать только завершившиеся осадки. Собственно, наличие линейного участка было единственным аргументом в пользу теории упругости. Реальное же соотношение модулей упругости E_e и деформации E характеризует табл.1.

Однако наличие линейного участка еще не означает соответствия грунтов упругому поведению. Как показали более поздние измерения, фактическое распределение деформаций по глубине существенно отличается от полученного по теории упругости (см. рис. 1). Фактически это означает, что опыт с нагружением штампа не соответствует условиям «нуль-мерного» эксперимента, когда все граничные условия в опыте строго определены и не нужно прибегать к каким-либо дополнительным гипотезам. Например, условиям нуль-мерного эксперимента отвечает, возможно, только стабилометр, да и то с рядом оговорок.

Однако независимо от этого, Теория упругости быстро заполнила пространство практически всех расчетов в фундаментостроении, намного и надолго опережая эксперимент.

В результате модуль деформации, полученный по результатам испытаний штампом по формуле Ф. Шлейхера, представляет только условную характеристику сжимаемости. С использованием ее можно дать достоверный прогноз осадок только для поверхности и только для фундаментов, размеры которых соизмеримы с размерами испытательного штампа, но нельзя получить достоверного значения перемещения (а также напряжения, деформации и др.) на любой другой глубине и на любом расстоянии за пределами фундамента другого размера.

В целом, как отмечают многие исследователи (М.И. Горбунов-Посадов, 1967 [3] и др.), теория упругости излишне «звонкая», т.е. решения ее приводит к завышению любого сигнала (напряжения, перемещения и др.) с удалением от места нагрузки по площади и глубине. Кроме того, она не учитывает главного фактора – собственного веса грунта, напряжения от которого соизмеримы с напряжениями от внешних воздействий.

Отсюда следует очень важное утверждение – решения Теории упругости требуют «привязки» к каждой конкретной практической задаче, например, о нагружении грунта прессиомером.

Практика показывает, что любое решение Теории упругости «обросло» массой коэффициентов, которые так или иначе «подправляют» теорию. Например, к расчетному сопротивлению, полученному по формуле Н.П. Пузыревского (хотя это некоторый инженерный прием на основе Теория упругости), в нормативах введено много корректирующих коэффициентов, которые изменяют его величину (увеличивают или уменьшают) до 2-х раз и более – до того уровня, который отвечает реалиям, т.е. эксперименту. Для расчетов осадок фундаментов размеров, отличных от размера штампа, вводятся ряд допущений – о границе сжимаемой зоны, о распределении напряжений по глубине, об учете глубины котлована и размеров фундамента, различной деформируемости при сжатии и разгрузке и др.

Можно показать, что любое решение Теории упругости, будучи «подправленным» экспериментом в одном месте (например, в расчете осадок), обязательно встретит противоречия в другом – в распределении напряжений и кренов, в обработке результатов лабораторных и полевых опытов. Но ни одно из новых решений в областях, выходящих за пределы известных экспериментов, как бы изящным оно ни выглядело, принципиально не может дать объективного решения для практики.

Также вполне объяснимо описанное выше положение, когда к любому теоретическому решению в области эксперимента («штамп – компрессия», «штамп – прессиомер» и др.) вводят коэффициенты, изменяющие теоретическую величину до 4-6 раз! Еще раз отмечается, что положение, когда одна и та же характеристика (например, лабораторный и полевой модули деформации, соотношение модулей общей и упругой деформации), различается в несколько раз, с позиций Теории упругости необъяснимо.

Далее рассматриваются последствия применения Теории упругости к практике прессиометрических испытаний грунтов.

4. О соотношении результатов испытаний сжимаемости

Еще раз отмечается, что условность получаемого по формуле Ф. Шлейхера модуля деформации подтверждает давно известная проблема соотношения результатов лабораторных. По мнению автора,

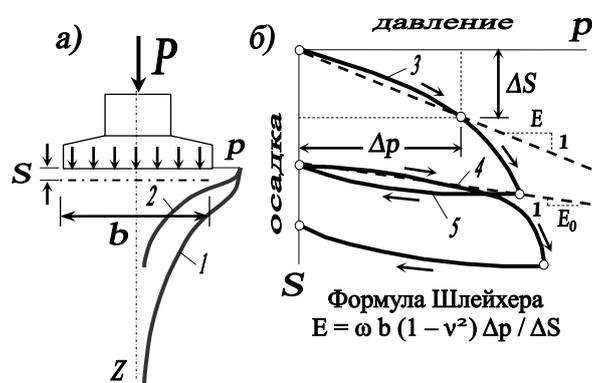


Рис. 1. График нагружения грунта штампом: а – штамп и графики распределения осадок по глубине z по решению теории упругости 1 и по результатам полевой измерений осадок 2; б – графики $S = f(p)$ при нагружении 3, разгрузке 4 и повтором нагружении 5

соотношение $m_k = E / E_k$ (E_k – компрессионный модуль деформации) примерно соответствует площадям эпюр 1 и 2 на рис. 1, т.е. один и тот же результат можно получить суммированием деформаций по эпюре 1 с модулем E , а также по эпюре 2, но с модулем E_k . Рассмотрим два аспекта проблемы.

4.1 Соотношение «штамп – компрессия»

Систематическое занижение модулей деформации в компрессионных испытаниях общеизвестно.

Повышающий коэффициент от штампового к компрессионному модулю $m_k = E / E_k$ вводится как очевидное и уже почти необсуждаемое; значения m_k в интервале давлений 0.1–0.3 МПа меняются от 2 до 6 (табл. 2). В последние годы О.И. Игнатовой [4], получены более низкие коэффициенты m_k (для интервалов давлений 2-5 кгс/см², характерных для высотного строительства, см. табл. 3) – компрессионная кривая при этих давлениях более пологая и соответственно – более высокие значения E_k . Заметим, что в нормах по проектированию оснований гидротехнических сооружений (СП 23.13330) введены несколько отличные значения m_k .

Табл.1. Соотношения модулей деформации E_e и упругости E

Глинистые грунты	Показатель текучести I_L	Значение коэффициента $\lambda (\lambda_o, k) = E_e / E$ при коэффициенте пористости e			
		$e \leq 0.5$	$0.5 < e \leq 0.8$	$0.8 < e \leq 1.1$	$e \geq 1.1$
Супеси	$0 < I_L \leq 1$	1.5	2	2.5	3
Суглинки	$I_L \leq 0.25$	1.5	2	2.5	3
	$0.25 < I_L \leq 0.75$	1.5	2	2.5	3
	$0.75 < I_L \leq 1$	2	2.5	3	3.5
Глины	$I_L \leq 0.25$	2	2.5	2.5	3
	$0.25 < I_L \leq 0.75$	2	2.5	3	3.5
	$0.75 < I_L \leq 1$	2.5	3	3.5	4

Табл. 2. Соотношения $m_k = E / E_k$ (СП 22.13330)

Вид грунта	Значение переходного коэффициента $m_k = E / E_k$ при коэффициенте пористости e					
	0.45-0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1.05 - 1.5
Супеси	4	3.5	3	2	–	–
Суглинки	5	4.5	4	3	2.5	2
Глины	–	6	6	5.5	5	4.5

Табл. 3. Соотношения $m_k = E / E_k$ (О.И. Игнатова [4] и СП 23.13330)

Показатель текучести	Значение $m_k = E / E_k$ при I_p				
	≤ 7	8 – 17	18 – 30	31 – 50	СП 23.13330
-0.25	–	3.1	3.3	3.6	2.25
0	–	2.8	3.0	3.3	2.25
0.25	2.3	2.5	2.7	3.0	2.25
0.5	2.0	2.2	2.4	2.7	1.75
0.75	1.7	1.8	–	–	1.0

Отсюда следует вывод о том, что занижение модулей деформации в компрессии объективно и вполне устойчиво, что подтверждает условность применения решений Теории упругости к грунтам.

4.2 Соотношение «штампы разных размеров»

Как отмечалось, классическим с 30-х годов XX века считался штамп площадью 5000 и даже 10000 см². Но с годами постепенно отказались от штампов площадью 10000 см², заменив их сначала штампами площадью 5000 см², затем площадью 2500, 1000 см² (последний – с кольцевой пригрузкой) и наконец, почти повсеместно, – площадью 600 см² (чаще всего – в виде винтового штампа).

Однако основной объем информации о значениях модуля деформации в 60-70-е годы, когда разрабатывались общегосударственные и региональные таблицы, был получен на основе испытаний штампами $A = 5000$ см² (E_{5000}), реже – 600 см² (E_{600}).

Но к началу 70-х годов был накоплен достаточный материал о соотношении модулей деформации, полученных при испытаниях штампами разных размеров. В этой связи заслуживает внимания работа В.М.Чижевского (1972) [11], посвященная этому вопросу. В табл. 4 приведены сведения о количестве испытаний, полученных в основном на Среднем Урале, а также дополнительное число опытов, полученных автором за 40-летний период после работ В.М. Чижевского. На рис. 2 показаны опытные точки

и зависимости коэффициентов $m = E_{5000} / E_{600}$ для аллювиальных грунтов, которые свидетельствуют об устойчивой связи получаемых модулей с размерами штампа, несмотря на большой разброс опытных точек, характеризуемый коэффициентами вариации $\nu = 0.2-0.25$ и более.

Табл. 4. Число испытания штампами разной площади

Генезис грунта		Площадь штампа, см ²				Всего испытаний
		10000	5000	2500	600	
Аллювий		12	28 (9)	–	18 (14)	58 (23)
Делювий		–	33 (17)	6	15 (21)	54 (38)
Элювий		–	72 (16)	–	37 (30)	109 (46)
Всего испытаний		12	133 (42)	6	70 (65)	221 (107)
Элювий, пород	Интрузивных	–	25 (6)	–	16 (8)	41 (14)
	Эффузивных	–	14 (4)	–	8 (7)	22 (11)
	Метаморфических	–	33 (6)	–	13 (15)	46 (21)

Примечание – в скобках число испытаний, добавленных автором

Табл.5. Соотношения модулей деформации E_{5000} / E_{600}

Генетические типы грунтов	Значения $m = E_{5000} / E_{600}$ при e		
	$e = 0.4-0.7$	$e = 0.7-1.0$	$e > 1.0$
Аллювиальные	1.25	1.50	1.75
Делювиальные	1.90	2.00	2.10
Элювиальные	1.20	1.40	1.60

Очевидно, что различие модулей деформации при испытании штампами разных размеров объективно и также вполне устойчиво. Для дополнительной оценки достоверности приведенных в табл. 5 коэффициентов можно воспользоваться двумя источниками.

1) Решениями задач об осадках фундаментов на нелинейном грунтовом основании [2]: в отличие от решений теории упругости, в нелинейном грунте зависимости «осадка S – размер штампа-фундамента b, d » имеют ярко выраженную нелинейность – повышенную сжимаемость при малых размерах b и d (следствие пластических деформаций под краями) и постепенно понижающуюся с увеличением размеров штампа (следствие тормозящего влияния веса грунта).

Если же рассмотреть области, относящиеся к размерам используемых в испытаниях штампов, можно видеть, что соотношение осадок штампов больших и меньших размеров (следовательно, обратное соответствующих модулей деформации) примерно соответствует приведенным в табл.4 значениям.

2) Рекомендациями главы СП 23.13330: эти нормы предполагают определение модуля деформации грунтов по результатам компрессионных испытаний; при этом используется формулы

$$E = E_p \beta m_o, \quad (1)$$

где E_p – компрессионный модуль деформации;

$\beta = 1 - 2\nu^2 / (1 - \nu)$ – коэффициент, учитывающий невозможность бокового расширения в зависимости от коэффициента Пуассона ν ;

$m_o = m_p m_c$ – произведение коэффициентов: m_p – учитывающего соотношение полевого и компрессионного модулей деформации (его значения показаны в табл. 3) и m_c – учитывающего соотношение деформаций фундаментов разных размеров; последний вычисляется по формуле

$$m_c = (A_1/A_o)^{n/2} \quad (2)$$

где $A_1 > 1 \text{ м}^2$ и $A_o = 1 \text{ м}^2$ – площади сравниваемых фундаментов;

n – параметр, определяемый двумя способами.

– По рекомендациям главы СП 23.13330: $n = 0.1-0.5$ в зависимости от вида грунта; далее принято n

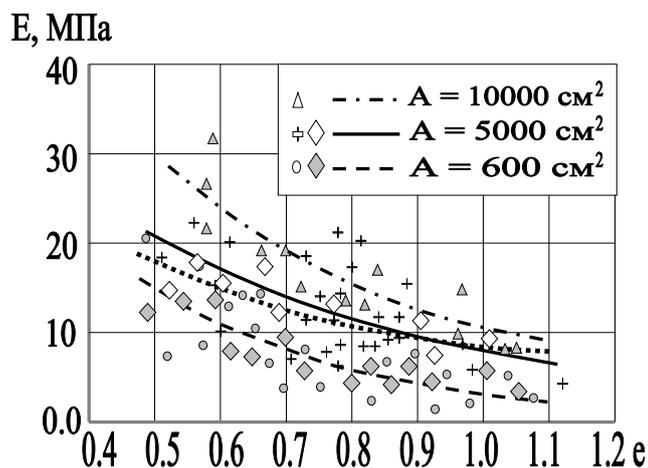


Рис. 2. Зависимости модуля E по испытаниям штампами разных размеров от коэффициента пористости e для аллювиальных грунтов; ромбами разного тона показаны добавления автора

= 0.3. На рис. 3 показано, что с увеличением диаметра штампа модуль деформации возрастает от $E = 1$ МПа при $A_0 = 1 \text{ м}^2$ до $E = 1.46$ МПа при $A = 12.6 \text{ м}^2$ (а для больших площадей, например, $A = 500 \text{ м}^2$, – до $E = 2.5$ МПа, в 2.5 раза!); соответственно зависимость $S = f(d)$ получает нелинейный характер и принципиально не отличается от расчетов по нелинейным схемам.

– По результатам испытаний грунта штампами разных площадей под одной нагрузкой по формуле

$$n = 1 - [2 \lg(\Delta S_1/\Delta S_2) / \lg(A_1/A_2)] \quad (3)$$

где $\Delta S_1, \Delta S_2$ – приращения осадок штампов площадями A_1 и A_2 от давления на грунт.

Если следовать Теории упругости, соотношение приращений осадок на каждой ступени должно быть равно отношению диаметров штампа. Если же в отношении $\Delta S_1/\Delta S_2$ ввести тормозящий фактор, уменьшив его, например, на величину коэффициента $m = E_{5000} / E_{600} = 1.75$ из табл. 5, тогда соотношение соответствующих модулей деформации будет точно соответствовать этому коэффициенту m . Соответственно осадки штампов площадью менее 1 м^2 будут возрастать пропорционально значениям m ; на рис. 3 темными линиями показаны осадки штампов малых размеров ($d = 0.25\text{--}1.0 \text{ м}$) при давлениях на грунт $p = 0.1 \text{ МПа}$ и $p = 0.15 \text{ МПа}$ и $m = 2$.

Таким образом, приведенные выше аргументы по-другому подтверждают достоверность приведенных в табл. 5 коэффициентов m .

Очевидно, проблема поиска переходных коэффициентов будет актуальной и при получении модуля деформации по результатам прессиометрических испытаний, соответствующего эталону (E_{5000}).

5. Анализ результатов испытаний штампами и прессиометрами

Преимущество прессиометров – при испытании не возникает реактивных усилий при нагружении грунта, что не требует анкерных устройств. Приборы легко помещаются на большую глубину даже в неустойчивых грунтах. Их можно оснастить дополнительными устройствами для замачивания, нагревания или охлаждения грунта, создания динамических воздействий.

Результирующий график статического испытания прессиометром имеет все особенности графика вдавливания в грунт штампа. Это говорит о реализации не только объемных, но и больших сдвиговых деформаций. Следовательно, в прессиометрии открывается возможности определения из опыта не только деформационных, но и прочностных характеристик. Здесь легко обеспечить схему плоскодеформированного состояния, что упрощает решения задач не только в прямой, но и в обратной постановках. Это позволяет вложить больше информации в решение задач, учесть наиболее существенные свойства грунтов (например, физическую анизотропию – различие деформируемости при сжатии, растяжении и разгрузке) которые в задаче о нагружении штампа практически недоступны учету.

Серьезным препятствием на первых этапах исследований было убеждение многих ученых о существовании значительной геометрической анизотропии – различия сжимаемости грунтов в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Однако вывод множества исследований геометрической анизотропии следующий: в абсолютном большинстве нескальных грунтов различия сжимаемости не более 20–30%; исключение составляют слоистые грунты (ленточные глины, лессы), у которых различие наблюдается только на начальных этапах нагружения, причем оно редко превышает 20–30%. Для таких грунтов необходимо вводить соответствующие поправки на основании изучения анизотропии традиционными методами (компрессия, пенетрация и др.), как этого требует глава СП 22.13330 (см. далее).

Другим фактором неопределенности служит отсутствие достоверных сведений о существующем в грунте горизонтальном давлении. Несомненно, что это давление играет огромную роль при проведении, интерпретации опытов и общей оценке метода прессиометрии.

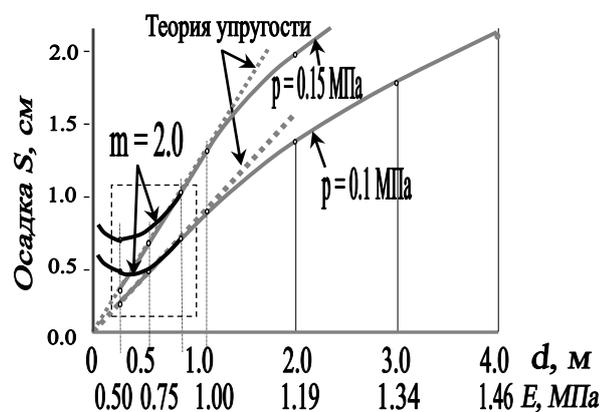


Рис. 3. Влияние диаметра штампа d на осадку S по СП 23.13330 (рамками показаны размеры опытных штампов)

Общепринятой относительно горизонтального давления $\sigma_{x,yg}$ является гипотеза геостатики, согласно которой давление $\sigma_{x,yg}$ соответствует состоянию покоя $\sigma_{x,yg} = \zeta \sigma_{zg}$, т.е. доле от вертикального σ_{zg} с коэффициентом $\zeta = \nu / (1-\nu)$.

Другая гипотеза (гидростатики) предполагает равенство горизонтального и вертикального давления, которую объясняют существованием над грунтом «доисторического» давления (от ледника или ранее существовавшего рельефа). Убедительных аргументов в пользу одной из гипотез для нескальных грунтов пока нет. Известны лишь единичные публикации на эту тему. На рис. 4 приведены результаты двух опытов [4], выполненных с помощью приставки БД к прессиометру (см. далее, рис. 9,е): в одном случае (в рыхлых песках) давление соответствовало гипотезе геостатики (рис. 4,а), в другом (в элювиальных суглинках) – было близким к гипотезе гидростатики (рис. 4,б).

5.1 Режимы испытаний

Ставилась задача получения из опыта модуля деформации, соответствующего эталону (E_{5000}), т.е. результатам испытаний штампом преимущественно площадью $A = 5000 \text{ см}^2$. В соответствии со стандартом (ГОСТ 202276) испытания штампами проводятся путем ступенчатого нагружения грунта (по 10-50 кПа) с выдержкой каждой ступени до условной стабилизации деформаций – приращения осадки штампа не более 0.1 мм за 1-2 часа в зависимости от состояния грунта. Поэтому, в отличие от методики кратковременного нагружения грунта по Л. Менарду [23-25], прессиометрические опыты стали проводить до условной стабилизации деформаций – приращения радиуса скважины $\Delta R = 0.1 \text{ мм}$ на каждой ступени в зависимости от вида и состояния грунта за время:

- по медленному режиму, принятому за основной, – за 15-60 мин;
- по быстрому режиму, первоначально рассматриваемому как вспомогательный, – за 3-6 мин.

Сравнение результатов испытаний по медленному и быстрому режимам на одной из ступеней давления показаны на рис. 5 для двух разновидностей суглинка с показателями текучести $I_L = 0.72$ и $I_L = 0.12$. Продолжительность опытов при быстром режиме составила 18 и 35 мин, при медленном – 40 и 60 мин. Время испытания при быстром режиме сократилось соответственно на 42 и 30%.

Описываемые далее результаты параллельных испытаний грунтов (штампами и прессиометрами) в первые годы проводились исключительно при медленном режиме прессиометрических опытов.

Быстрый же режим обязательно сопровождался выборочными испытаниями тех же грунтов по медленному режиму, а сравнением получаемых модулей устанавливались переходные коэффициенты к модулям по быстрому режиму, чем обеспечивалось единообразие результатов. Например, если при быстром режиме получали модуль $E_{\delta} = 7.5 \text{ МПа}$, а при медленном $E_m = 5.7 \text{ МПа}$, тогда отношение $E_m / E_{\delta} = 5.7 / 7.5 = 0.76$ вводилось к модулю $E_{\delta} = 5.7 \text{ МПа}$, и он рассматривался наравне с полученным по медленному режиму.

Учитывая длительность испытаний по медленному режиму (опыт продолжался 1-2 суток, иногда более), в дальнейшем возникла идея так называемого условно-медленного режима, когда испытание проводится по быстрому режиму, затем методом экстраполяции (как правило, экспонентой) находится

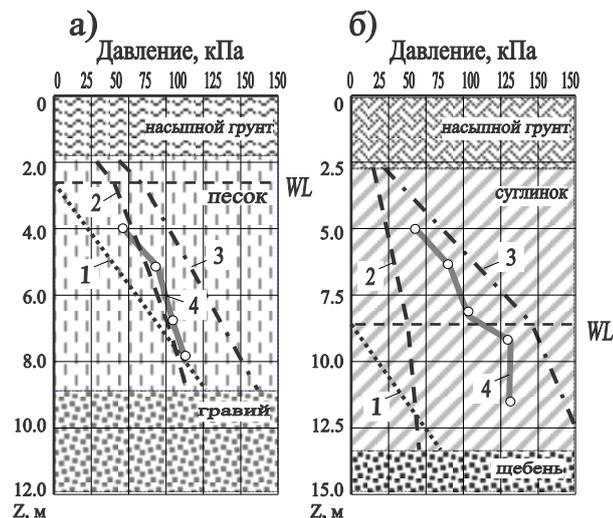


Рис. 4. Результаты измерений горизонтального давления в аллювиальном песке (а) и элювиальном суглинке (б): 1 – давление воды; 2, 3 – давление грунта соответственно по гипотезам геостатики гидростатики; 4 - результаты измерений: WL – уровень полземной волны

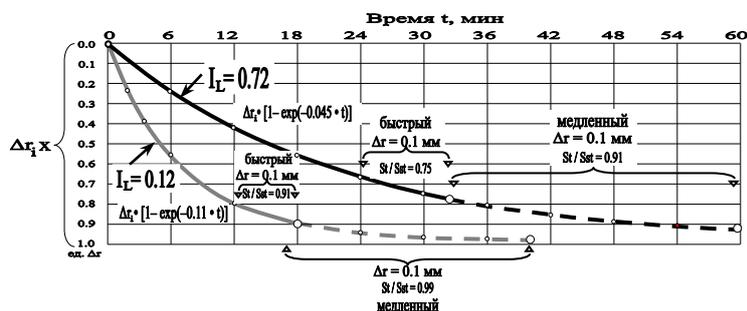


Рис. 5. Сравнение продолжительности прессиометрического опыта по медленному и быстрому режимам

значения перемещения соответствующее как бы медленному режиму (по приращению в $\Delta r = 0.1$ мм не за $\Delta t = 3-6$ мин, а за $\Delta t = 30-60$ мин), затем вторую ступень, тоже быстрого режима, прикладывают не к своей первой ступени быстрого режима, а к условному перемещению условно-медленного режима. Вторую, третью и последующие ступени быстрого режима также экстраполировали по тому же принципу. Пояснение принципа условно-медленного режима приведено на рис. 6.

На рис. 7 показаны примеры сравнения по продолжительности и величинам получаемых модулей деформации прессиометрических опытов по медленному, быстрому и условно-медленному режимам. Если продолжительность испытания по медленному режиму для 7 ступеней давления составила 300 мин, по быстрому – 120 мин (меньше на 60%), а по условно-медленному – 215 мин (меньше на 28%), но получаемые значения модулей различаются незначительно: при медленном режиме $E = 5.1$ МПа, при условно-медленном $E = 5.1$ МПа; при быстром режиме получен модуль $E = 6.9$ МПа.



Рис. 6. Пояснение принципа условно-медленного режима

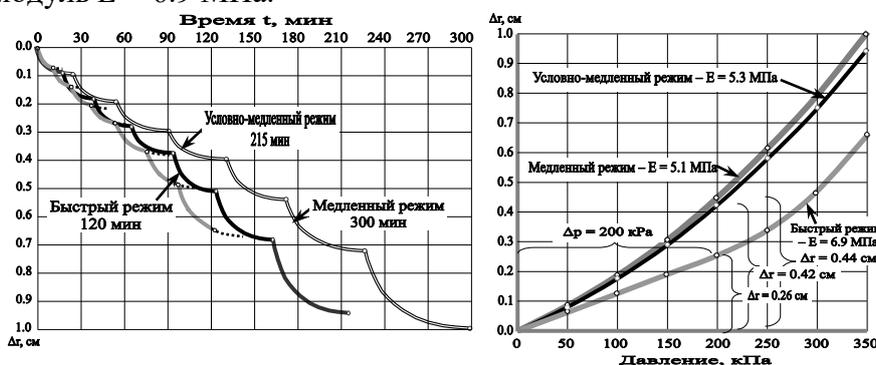


Рис. 7. Сравнение продолжительности и модулей деформации E при испытаниях по быстрому, медленному и условно-медленному режимам

Еще позднее, к середине 1980-х годов, когда был накоплен достаточно большой объем испытаний по различным режимам, стали вводиться коэффициенты K_r также к испытаниям по быстрому режиму.

5.2 Переходные коэффициенты для модуля деформации

Для определения модуля деформации вначале применялась известная формула Ляме, а модуль деформации стали обозначать как E_r (отличающий полученный радиальным прессиометром)

$$E_r = (1 + \nu) R_o \Delta p / \Delta R, \quad (4)$$

где R_o – начальный радиус скважины; Δp и ΔR – приращения давления и радиуса скважины на линейном участке графика $\Delta R = f(p)$.

Первые попытки применения формулы (4) показали, что для получения штампового и прессиометрического модулей необходимо вместо множителя $(1 + \nu)$ вводить повышающие коэффициенты K_r (кроме испытаний на глубинах более 20 м, где сопоставительных опытов было очень мало).

Первая информация о коэффициентах K_r была получена в 60-80-е годы по результатам более 200 параллельных испытаний штампами (в основном площадью $A = 5000$ и 600 см²) и прессиометрами по медленному нагружения (табл. 7). Там, где не удавалось провести испытания штампами, к анализу привлекались табличные значения E (из СНиП) или значения, полученные зондированием.

На рис. 8 приведены результаты стандартных испытаний штампами и прессиометрами: можно видеть, что с увеличением глубины значения модулей увеличиваются, но сохраняется зависимость их от размера штампа.

Для использования были предложены значения $K_r = E_{5000} / E'_r$, причем в значения E'_r по формуле (4) множитель $(1 + \nu)$ не вводился. Если испытания выполнялись параллельно со штампами $A = 600$ см², пересчет значений K_r осуществлялся с учетом соотношений $m = E_{5000} / E_{600}$ по табл. 6. В некоторых опытах не удавалось выявить, какой именно использовался модуль (E_{5000} , E_{600} , по зондированию или таблицам СНиП, чем объясняются высокие дисперсии на рис. 8.

Табл. 7. Число испытания прессиометрами

Генезис грунта	Способы сравнения моделей деформации				Всего испытаний: прессиометр + штамп + зонд + СНиП
	Прямые		Косвенные		
	Прессиометр + штамп A_{5000}	Прессиометр + штамп A_{600}	Прессиометр + статиче- ский зонд	Прессиометр + таблицы СНиП	
Аллювий	10	17	12	11	27 + 12 + 11 = 50
Делювий	12	23	7	16	35 + 7 + 16 = 58
Элювий	23	36	19	30	59 + 19 + 30 = 108
Всего испытаний, в т.ч., на глубине Z , м:	45	76	38	57	121 + 38 + 57 = 216
– до 5	22	37	8	10	59 + 8 + 10 = 77
– от 5 до 10	12	16	8	12	28 + 8 + 12 = 48
– от 10 до 15	6	13	6	14	19 + 6 + 14 = 39
– от 15 до 20	4	7	10	14	11 + 10 + 14 = 35
– свыше 20	1	3	6	7	4 + 6 + 7 = 17

Впервые коэффициенты перехода K_r для медленного режима, показанные в табл. 8, были приведенные в таблицах ГОСТ 20276-74.

Табл. 8. Значения K_r для медленного режима нагружения

Наименование грунтов	Генетические типы грунтов	Глубина испытания h , м		
		$H < 5$	$5 \leq h \leq 10$	$10 < h \leq 20$
Песчаные и глинистые	Аллювиальные, делювиальные и озерные	3.0	2.0	1.5

При глубинах свыше 20 м корректирующий коэффициент K_r допускается принимать: для песков и супесей 1.30, для суглинков 1.35, для глин 1.42

В дальнейших редакциях ГОСТа эти коэффициенты исключались (ГОСТ 20276-85), затем снова восстанавливались (ГОСТ 20276-88, ГОСТ 20276.2011).

С накоплением результатов сопоставительных испытаний в стандарты с 1985 г., стали вводиться коэффициенты также и для быстрого режима (табл. 9).

Использование приведенных в табл. 8 и 9 коэффициентов обеспечило надежное получение модулей деформации нескольких грунтов, практически совпадающих со штамповыми модулями.

Прессиометрический модуль деформации фактически стал наравне со штамповым эталоном при оценке результатов других испытаний, например, компрессией или зондированием.

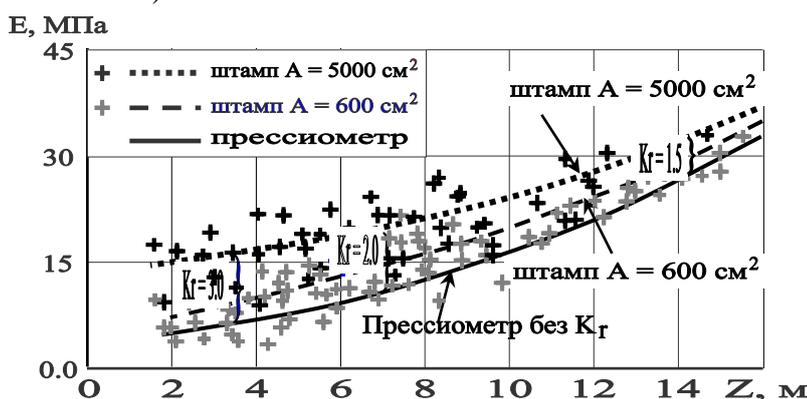
В последней редакции СП 22.13330 включены следующие положения, разрешающие использование метода прессиометрии при проектировании объектов высокой (I и II уровней) ответственности:

– п. 5.3.4 «Модули деформации E песчаных и глинистых грунтов, не обладающих выраженной анизотропией их свойств в горизонтальном и вертикальном направлениях, могут быть определены по испытаниям прессиометрами в скважинах или массиве (ГОСТ 20276)»;

– и п. 5.3.6 «В лабораторных условиях модули деформации глинистых грунтов могут быть определены в компрессионных приборах и приборах трехосного сжатия (ГОСТ 12248). Для сооружений I и II уровней ответственности значения E по лабораторным данным должны уточняться на основе их сопоставления с результатами параллельно проводимых испытаний того же грунта штампами, прессиометрами».

В качестве предложений по дальнейшему развитию метода предлагается следующее.

– Необходимо продолжить работу по уточнению переходных коэффициентов типа K_r , имея в виду отмеченную выше условность применения Теории упругости к расчетам грунтовых оснований, неопределенность эталона для получения коэффициентов K_r (зависимость модулей E от размера штампов). Объективным эталоном для оценки должны служить деформации реальных объектов; вероятнее

Рис. 8. Результаты испытаний штампами площадью 5000 и 600 см² и прессиометрами в зависимости от глубины испытания Z

всего, существующие значения коэффициентов K_r могут быть существенно повышены.

Табл. 9. Значения K_r для быстрого режима нагружения

Грунты	Глубина испытания, м	Коэффициент K_r
Пески с коэффициентом пористости: $e < 0.5$ $0.5 \leq e \leq 0.8$ $e > 0.8$	До 20	2.5
		2.25
		2.0
Глинистые с показателем текучести: $I_L < 0.25$ $0.25 \leq I_L \leq 0.5$ $I_L > 0.5$	До 10	2.0 (2.0)
		2.5 (3.0)
		3.0 (4.0)
Глинистые с показателем текучести: $I_L < 0.25$ $0.25 \leq I_L \leq 0.5$ $I_L > 0.5$	От 10 до 20	1.75
		2.5
		3.5
Примечания		
1 – Для элювиальных грунтов корректирующий коэффициент K_r меньше на 20%.		
2 – Отмеченные в скобках значения были включены в ГОСТ 20276-85*, но в последующих редакциях стандарта были несколько уменьшены		

– Как отмечалось, метод прессиометрии допускает принципиальную возможность получения из опыта не только деформационных, но также и прочностных характеристик грунтов; для этого необходимо, кроме нелинейного участка, получить еще 4-5 точек в нелинейной области зависимости $\Delta R = f(p)$. Однако попытки использования для этой цели предложений Л. Менарда не привели к устойчивому результату, а перспективные предложения на этот счет [6] пока не получили развития. Кроме того, реализация этого предложения потребует увеличения продолжительности испытания.

– Метод прессиометрии также допускает принципиальную возможность ускорения испытаний; вероятно, можно по примеру Л. Менарда сократить продолжительность выдержки каждой ступени давления до минимума (например, не до стабилизации, а до 5-10 минут) и по результатам таких «сверхбыстрых» испытаний искать новые коэффициенты перехода типа K_r .

– Учитывая многообразие грунтов на территории страны, перспективны исследования по применению метода прессиометрии для испытаний особых разновидностей грунтов – просадочных с замачиванием, мерзлых с оттаиванием и др.

– Также перспективно использование прессиометрического принципа нагружения в других испытательных установках – зондах, приборах поступательного или вращательного сдвига и др.

6 Конструкции приборов

На рис. 9 показаны конструкции проборов, краткая характеристика которых приведена ниже.

6.1 Прессиометры воздушного типа

Учитывая холодные климатические условия страны, наибольшее распространение получили однокамерные приборы с воздушной системой нагружения и дистанционным измерением радиальных перемещений (рис.9,а). Зонд прибора с эластичной оболочкой помещается в скважину под защитой трубы; электрические датчики для измерения радиальных перемещений ΔR под давлением p размещены в центральной части зонда – с тем, чтобы уменьшить влияние краевых эффектов, которые исключаются в трехкамерных гидравлических приборах Л. Менарда. Показания датчиков передаются через электрические провода внутри шланга и фиксируется измерительным прибором.

Прессиометры воздушного типа получили наибольшее распространение. Их выпуск организован в Екатеринбурге предприятием ЗАО «Геотест».

Для испытаний мерзлых грунтов прибор оснащается нагревательным устройством – для создания зоны оттаявшего грунта радиусом, равным 2-3 радиусам скважины; в ходе опыта измеряются деформации при оттаивании (для определения коэффициента оттаивания) и при последующем нагружении слоя оттаявшего грунта давлением – для определения коэффициента сжимаемости.

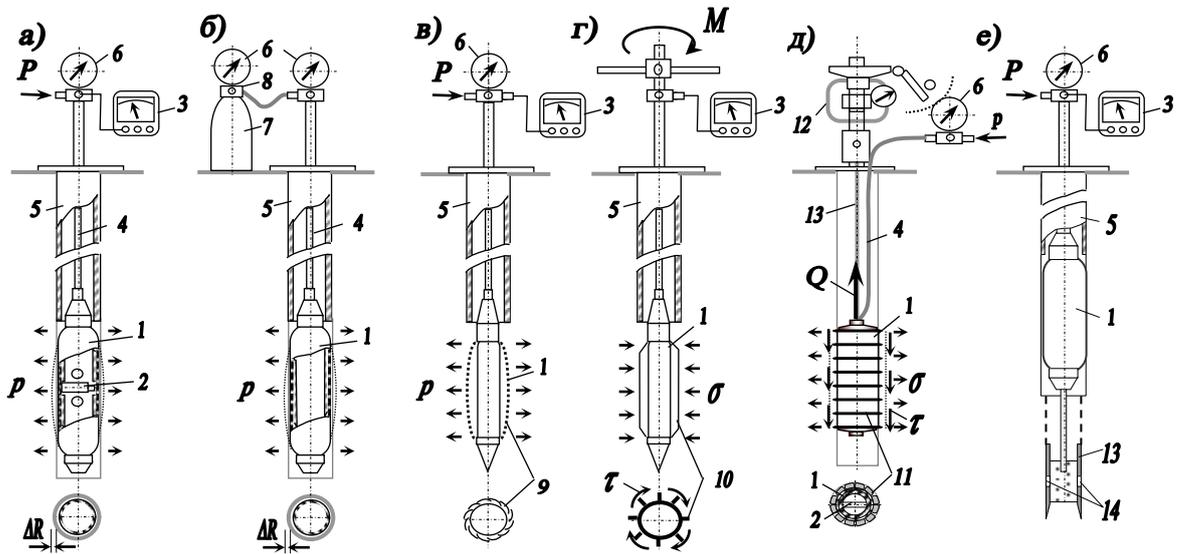


Рис. 9. Конструкции прессиометрических устройств

а – воздушно-электрический прессиометр ПЭВ; б – пневматический прессиометр; в – зонд-прессиометр; г – поворотный тензометрический зонд; д – установка кольцевого среза под давлением; е – прессиометр ПЭВ с приставкой бокового давления БД: 1 – зонд; 2 – датчик перемещений; 3 – измеритель перемещений и / или напряжений; 4 – магистраль высокого давления; 5 – обсадная труба; 6 – манометр; 7 – воздушный баллон; 8 – редуктор; 9 – гибкие пластины; 10 – лопасти; 11 – поперечные ребра; 12 – динамометр; 13 – приставка БД; 14 – мессдозы

Для испытаний лессовых грунтов вокруг зонда образуют зону замоченного грунта; в ходе опыта измеряются деформации в процессе замачивания – для определения коэффициента просадочности, и при последующем нагружении замоченного грунта давлением – для определения модуля деформации.

В неустойчивых грунтах применяется одна из технологий установки прессиометра, показанных на рис. 10 и 11. Первая из них предполагает использование разрезной обсадной трубы с гибкими элементами, которые позволяют установить камеру и осуществить испытание. Суть второй технологии – вначале в скважину, закрепленную обсадной трубой, погружается зонд прибора со смазкой на оболочке; далее на внутренние стенки обсадной трубы передается давление, равное горизонтальному природному давлению p_0 , после чего труба постепенно поднимается на

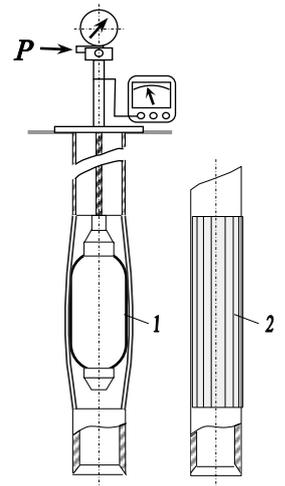


Рис. 10. Прессиометр ПЭВ 1 для испытаний слабых грунтов и разрезная труба 2

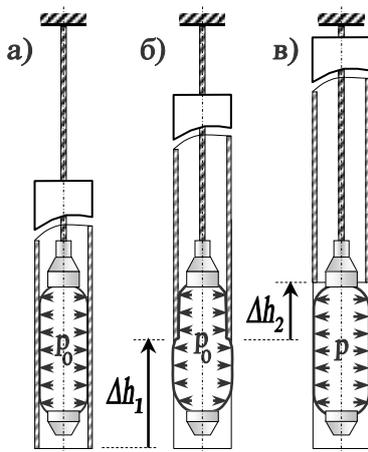


Рис. 11. Порядок установки прессиометра в слабом грунте: а – положение камеры в обсадной трубе и создание начального давления p_0 ; б, в – подъем трубы на Δh_1 , далее на Δh_2 при поддержании в камере давления p_0 и испытание грунта давлением p

длину зонда, а давление p_0 передается непосредственно на грунт, исключая ее обрушение, после чего проводится в стандартное испытание.

Обе технологии обеспечивает сохранение природной структуры и напряженного состояния грунта; они могут рассматриваться как альтернатива применяемым за рубежом конструкциям самозабуривающихся прессиометров.

При испытании слабых грунтов также применяется модификация пневматического прибора, показанная на рис.9,б. Здесь деформации определяются по изменению давления в баллоне на основании зависимости Клапейрона-Менделеева, а постоянство давления поддерживается редуктором.

Прибор имеет практически неограниченный диапазон по глубине. В частности, при испытаниях слабых морских грунтов шельфа Черного моря возле побережья Болгарии испытания проводились с борта геологического судна на

глубинах до 70 м при глубине моря до 33 м.

6.2. Зонды-прессиометры

Зонды-прессиометры (рис. 9,в) широко применялись в слабых грунтах. Они вдавливаются буровой установкой непосредственно в грунт. Эластичная оболочка зонда защищена гибкими пластинами.

Дальнейшее нагружение грунта ведется по обычной методике, а для определения характеристик грунтов, учитывая нарушение начального напряженного состояния грунта, применяются в основном эмпирические приемы либо устанавливаются свои переходные коэффициенты типа K_r .

6.3. Поворотные тензометрические зонды

Большие возможности открывает поворотный зонд (рис.9,г), погружаемый в слабый грунт. На поверхности зонда, оснащенного вертикальными лопастями крыльчатки, тензомерами фиксируется начальное давление грунта σ , после чего осуществляется поворот с измерением момента поворота M .

Соппротивление срезу τ определяется по величине момента M и относится к величине нормального давления σ , вычисленного на границе срезаемого цилиндра.

Для получения значений τ_i при существенно различных значениях нормального давления σ_i испытания проводятся с зондами различного диаметра либо одним зондом, но на различных глубинах.

6.4. Приборы кольцевого среза

В 80-90-е годы был разработан прибор кольцевого среза под давлением (прессиометр поступательного сдвига), основанный на принципе прессиометрического нагружения (рис. 9,д), который получил широкое применение и завершился изданием стандарта (ГОСТа 21719). Корпус зонда оснащен жесткими раздвижными элементами, имеющими горизонтальные лопасти, которые внедряются в стенки скважины под внутренним давлением. После передачи на грунт заданного нормального давления, с помощью домкрата через трос осуществляется сдвиг цилиндра грунта, диаметр которого соответствует положению концов лопастей. По полученному в опыте усилию сдвига вычисляют сопротивление срезу с учетом пассивного сопротивления грунта перед верхней (лидирующей) лопастью.

Подобный же прибор оснащенный нагревателем, был использован для исследования прочностных свойств оттаивающих грунтов.

Заключение

Работами Л. Менарда открыто новое чрезвычайно интересное и эффективное направление в области геотехники, теории и практике инженерных изысканий грунтов, которое получило широкое развитие в СССР и России.

Оно дало толчок к дальнейшему развитию методов исследований грунтов, проведению ряда новых научных разработок, направленных на расширение возможностей прессиометрии в самых разнообразных грунтовых условиях – в слабых, мерзлых и лессовых грунтах, на морском шельфе, которые широко представлены в стране.

Принцип прессиометрического нагружения использован при создании принципиально новых испытательных установок – приборов кольцевого среза, зондов-прессиометров, поворотных зондов.

Исследования Л. Менарда способствовали развитию теории механики грунтов, решению ряда новых задач о напряженно-деформированном состоянии грунтового массива при различных видах нагружения и с учетом различной сопротивляемости сжатию, растяжению и разгрузке.

К сожалению, серьезные научные исследования в области прессиометрии в России сейчас практически не ведутся.

Между тем, многие ранее проводимые разработки требуют дальнейшего развития. Прежде всего, это относится к конструкциям и методам испытаний установками поступательного и вращательного среза под давлением, зондами-прессиометрами, поворотными тензометрическими зондами, работам по исследованию свойств мерзлых, просадочных и слабых грунтов.

В теоретическом плане заслуживают внимания почти забытые исследования по изучению физической анизотропии грунтов и учету ее в решениях задач о нагружении штампом и прессиометром, определению прочностных характеристик грунтов по прессиометрической кривой.

Список литературы

1. Герсеванов Н.М Основы динамики грунтовой массы. 3-е изд. – М.: Госстройиздат, 1937.
2. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Н.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.
3. Горбунов-Посадов М.И. Современное состояние научных основ фундаментостроения. – М.: Наука, 1967. – 68 с.
4. Игнатова О.И. Деформационные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы // «ОФМГ», 2009, № 5. – С. 24-28
5. Ктаторов А.А. () Определение допускаемого давления на грунт при помощи упругой сваи // Строительная промышленность, 1939, № 3.
6. Лушников В.В. Развитие прессиометрического метода исследований нескальных грунтов.– Ленинград, 1991.– 392 с.
7. Лушников В.В. Формирование горизонтальных напряжений в грунтах с учетом «доисторического» нагружения. – Сб. тр. Общероссийской конференции СПбГАСУ, 2013.– С. 135-141.
8. Покровский Г.И. Трение и сцепление в грунтах. – М-Л.: Госстройиздат, 1941. – 110 с.
9. Трофименков Ю.Г., Воробков Л.Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
10. Цилюрик Н.А. () Рационализация аппаратуры для испытаний грунтов. – Сб. трудов Уральского индустриального института, 1939, № 11. – Свердловск. – С. 12-26.
11. Чижевский В.М. Исследование деформируемости глинистых грунтов Урала. Свердловск, 1972. – 150 с.
12. Baquelin F., Jazequel J.F., Le Mehaute A. Study of Pure Pressure Occurring During Pressuremeter Test. – Proc. of 8 Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. – Moscow, 1973. Vol. 1.1.
13. Briand J.-L. Tucker L.M., Makarim C.A. The Pressuremeter Standart and Peressuremeter Parameters // The Pressuremeter and its Marine Application. – 2 Int. Symp., ASTM STR 950, 1986.
14. Gambin M. Fast and Reliable Sea Bed Soil Investigation. – Decon, Monte-Carlo, 1969.
15. Candaparadhyay C.R., Nasr A.N. Interpretation of Pressuremeter Test Using Laboratory Simulated Tests // The Pressuremeter and its Marine Application: 2 Int. Simp. – ASTM STP 950, 1986.
16. Gibson R. and Anderson W. In situ measurement of soil properties with the pressuremeter // Civil-Engineering, 1961. – Vol. 55, № 655.
17. Kögler F. Baugrundprüfung im Bohrloch. – Der Bauingenieur, № 19-20. – Berlin, 1933.
18. Ladamiy B. In situ determination of undrained stress-strain behavior of sensitive clays with the pressiometer // Canadian Ceotechnical Journal. – 1972, Vol. 9, № 3.
19. Leischner W. Die Bautechnische Baugrundbeurteilung mittels horisontaler Belastungsversuche im Bohrloch nach dem Kögler-Verfahren // Der Bauingenieur. – Berlin, 1966, 41, Heft 12.
20. Luschnikow W.W. Die Entwicklung der Pressiometermethode zur untersuchung von Lockergesteinen. – Freiburg, 1977.
21. Lushnikov V.V. Development of pressiometry method after L. Menard in Russia.– Proc. of Conf. «Pressio-2005». – Paris, 2005.
22. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. Wiley. – New Work, 1944.
23. Menard L. Mesures in-situ des Propertes des Propertes des Sols. Annales des Pounts et Chaussees. – Mai-Juin, 1957.
24. Menard L. Calcul de la forse portante des fondations saur la base des resultants des essays preessiometriques // Sols-Soils. Vol. 1, № 5. – Paris, 1963.
25. Menard L. Anwendung des Pressiometer – Verfahren zur Untersuchungen von Gebirgen // Fest-mechanik und Ingeniergeologie. – 1966, Vol. 4/2.
26. Palmer A.C. Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a sample interpretation for the Pressiometer test // Geotechnique. – 1973, Vol. 22, № 3.
27. Prevost J.H., Hoeg K. Analys of Pressuremeter in Strain Softening Soil // Journal of Geot. Eng. Division. ASCE, 1975. – Vol. 101, № GT 8.
28. Wroth C. and Hughes. An instrument for in situ measurement of the properties determination of soft clays. – Proc. of the VIII Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng. – Moscow, 1973, Vol. 1.2.