

УДК 624.131.4

С.Н. ЛАВРОВ, Л.В. НУЖДИН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДИЛАТОМЕТРОМ РД-100
С ТРАДИЦИОННЫМИ СПОСОБАМИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ

Изложены результаты сопоставительных испытаний по определению модуля деформации дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром с традиционными способами испытаний: штампами, лопастными прессиометрами и в компрессионных приборах. Отмечены хорошая сходимость получаемых результатов и целесообразность применения расклинивающих дилатометров для полевого определения модуля деформации в массиве дисперсных грунтов.

Ключевые слова: дисперсные грунты, модуль деформации грунтов, расклинивающий дилатометр, статистический анализ.

Наиболее доступны и широко распространены в практике инженерно-геотехнических изысканий лабораторные методы испытаний. Однако при опробовании дисперсных и особенно так называемых «слабых» грунтов, обладающих высокой чувствительностью и изменчивостью свойств, возникают большие трудности. Существующие способы отбора образцов грунта не позволяют гарантировать сохранность их природного состояния и структуры, что особенно важно для исследования прочностных и деформационных свойств. Обеспечить минимальное нарушение естественного состояния грунтового массива можно только при помощи полевых методов исследований, которые существенно повышают достоверность и качество получаемых результатов.

Тем не менее существующие традиционные способы оценки сжимаемости дисперсных грунтов в полевых условиях во многом не отвечают требованиям современного строительного комплекса, имеют ограниченную область применения, сложны и трудоемки в использовании либо недостаточно надежны в эксплуатации. Поэтому наряду с работами по совершенствованию и стандартизации существующих методов и оборудования весьма актуальна проблема создания, обоснования и внедрения принципиально новых, экономичных и надежных способов и технических средств полевого определения модуля деформации грунтов, которые позволяют быстро получать достоверную и качественную информацию о грунтовом массиве.

Одно из перспективных направлений дальнейшего развития полевых методов исследований грунтов — разработка приборов релаксационного типа. Авторским коллективом треста «ЗапСибТИСИЗ» предложено устройство для определения модуля деформации дисперсных грунтов в полевых условиях — расклинивающий дилатометр РД-100 (рис. 1) [1–3]. Прибор позволяет реализовать на практике метод релаксации напряже-

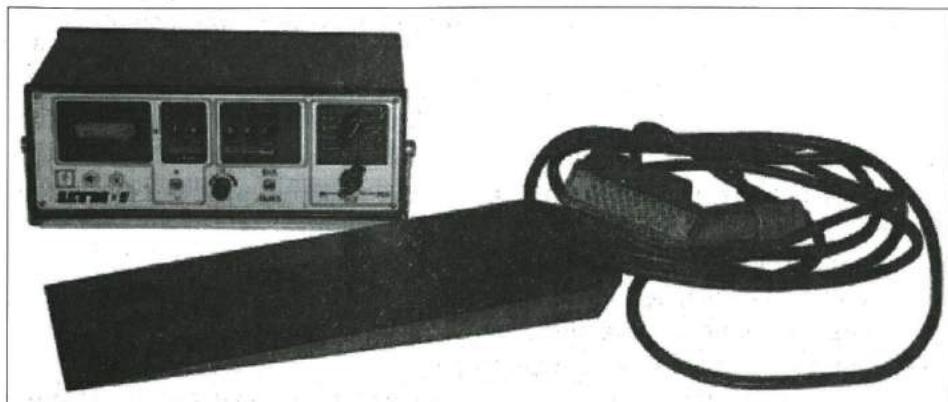


Рис. 1. Расклинивающий дилатометр РД-100

ний (метод контролируемых перемещений), когда исследуемый грунт деформируется заданными ступенями перемещений, а возникающие при этом напряжения фиксируются как независимая от исследователя величина.

Для создания контролируемых перемещений грунта используется индентор клиновидной формы. При его погружении в грунт происходит плавное деформирование окружающего грунта на известные величины, а напряжения, соответствующие этим деформациям, измеряются находящимся в корпусе индентора датчиком давления. По результатам выполненных численных расчетов и экспериментальных исследований¹⁻³ были установлены конструктивные параметры клиновидного индентора: ширина $b = 100$ мм, высота $h = 400$ мм, угол раскрытия рабочих граней $\alpha = \pm 2^\circ$. Для измерения контактных давлений, возникающих в грунте при внедрении индентора в его тело по центру одной из рабочих граней встроен датчик с чувствительной мембраной толщиной $\delta = 1,0$ мм.

Принятые геометрические размеры клиновидного индентора обеспечивают линейное деформирование окружающего грунта на большей части рабочих граней индентора, а напряжения, измеряемые датчиком давления, интерпретируются в рамках линейно-деформируемой модели. Для вычисления дилатометрического модуля деформации грунтов используется модифицированная формула Шлейхера, которая учитывает реальные размеры датчика давления, расположенного в средней зоне рабочей грани индентора:

¹ Писаненко В.П. К вопросу о напряженном состоянии грунтового массива вокруг клиновидного и конического инденторов [Текст] / В.П. Писаненко, А.М. Кацулов, С.Н. Лавров // Инженерно-геологические условия, основания и фундаменты транспортных сооружений в Сибири: межвуз. сб. науч. тр. — Новосибирск : НИИЖТ, 1991. — С. 35–43.

² Лавров С.Н. Решение пространственной задачи об упругопластичном деформировании грунта при внедрении клиновидного индентора [Текст] / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин, А.М. Кацулов, В.П. Писаненко // Механіка ґрунів та фундаментобудування: збірник наукових праць. — Київ : НДІБК, 2000. — Вип. 53, кн. 1. — С. 163–168.

³ Лавров С.Н. Упругое решение пространственной задачи о напряженно-деформированном состоянии грунта при внедрении клиновидного дилатометра [Текст] / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин, А.М. Кацулов, В.П. Писаненко // Геотехника: наука и практика : сб. науч. тр. — СПб. : СПбГАСУ, 2000. — С. 138–143.

$$E = \frac{\pi(1-\nu^2)\omega dq_a}{2S_a \arcsin \frac{d}{b}}, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона;

ω — коэффициент, учитывающий жесткость и форму рабочих граней индентора;

d — ширина чувствительной мембраны датчика давления;

q_a — контактное давление по показаниям датчика давления;

S_a — перемещение грунта по центру датчика давления;

b — ширина рабочей грани индентора.

Для исследования сжимаемости дисперсных грунтов дилатометр вдавливается с постоянной скоростью в грунтовый массив без предварительного бурения скважины и через определенные интервалы погружения (например, через 5, 10 или 20 см) с помощью регистрирующей аппаратуры фиксируются значения модуля деформации грунтов.

Расклинивающий дилатометр РД-100 имеет простую конструкцию и достаточно технологичен в эксплуатации. Отсутствие подвижных частей придает устройству высокую эксплуатационную надежность, а технологический процесс, ориентированный только на статическое вдавливание клиновидного индентора, позволяет использовать стандартное оборудование, применяемое для инженерно-геотехнических изысканий. Конструкция дилатометра позволяет использовать его для оценки и других механических свойств грунтов. В частности, в настоящее время идет доработка конструкции дилатометра и проводятся его полевые испытания по определению модуля динамических деформаций (модуля упругости) грунта^{4, 5}.

Для оценки точности дилатометрического метода определения модуля деформации грунтов выполнены широкие сопоставительные испытания с традиционными способами исследования сжимаемости грунтов. Работы по сопоставлению проходили в два этапа. На первом этапе проводился точечный статистический анализ частных значений, для чего эксперименты выполнялись на опытных полигонах, где в пределах одного слоя проводились параллельные исследования сжимаемости грунтов различными методами. В последующем, по мере проведения сопоставительных экспериментов на отдельных производственных площадках, выполнялось накопление сравнительных данных для более доказательного двухмерного статистического анализа.

Для проведения экспериментов было выбрано два опытных полигонов. Выбор площадок определялся генетическим разнообразием грунтов, их относительной однородностью и контрастностью разновидностей в пределах класса дисперсных грунтов. На полигонах выполнялось бурение технических скважин с отбором проб грунта ненарушенного сложения (монолитов) в объеме, достаточном для получения представительной выборки по расчленению разреза и назначению нормативных и расчетных характеристик грунтов. По отобранным монолитам в лаборатории были определены физико-механические характеристики грунтов, которые ис-

⁴ Нуждин Л.В. Численный анализ напряженного состояния грунта при колебаниях индентора для обоснования конструкции динамического расклинивающего дилатометра [Текст] / Л.В. Нуждин // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 20–28.

⁵ Nuzhdin L.V. Testing of the weak and non-cohesive soil deformation properties in-situ [Text] / L.V. Nuzhdin, M.L. Nuzhdin // Environmental Geotechnics: Proc. of 6ICEG. — V. 2. — New Delhi: Tata McGraw Hill, 2010. — P. 1568–1573.

пользовались для описания инженерно-геологических условий опытных полигонов.

Полигон № 1 расположен в г. Новосибирске в пределах поймы р. Оби. В его геологическом строении принимают участие верхнечетвертичные аллювиальные отложения р. Оби ($a Q_{IV}$), представленные песками и супесями. Аллювиальные отложения залегают на палеозойских гранитах (P_2). На поверхности имеется почвенно-растительный слой. Грунтовые воды находятся на глубине 5,0 м. Экспериментальные исследования проводились в песках пылеватых неоднородных средней плотности и малой степени водонасыщения (слой 2), залегающих с поверхности или сразу под почвенно-растительным слоем на глубине до 4,1 м.

Полигон № 2 находится на станции Мочище Новосибирского района. В геоморфологическом отношении он расположен в пределах Приобского плато. В геологическом строении принимают участие верхнечетвертичные эолово-делювиальные отложения краснодубровской свиты ($vd II kd$), представленные суглинками и супесями. На поверхности отмечается почвенно-растительный слой. Грунтовые воды залегают на глубине 6,5 м. Экспериментальные исследования проводились в суглинике средней степени водонасыщения полутвердом непросадочном (слой 3), залегающем с глубины 2,5 м мощностью 3,5 м.

По каждому инженерно-геологическому слою, в пределах которого выполнялись опыты, определялись значения модуля деформации непосредственно в полевых условиях с помощью штампа, лопастного прессиометра и расклинивающего дилатометра, а также в лабораторных условиях на компрессионных приборах. Полевые исследования выполнялись на расстоянии, не превышающем 5 м от технической скважины. Сопоставимые опыты проводились в непосредственной близости (не более 2 м) друг от друга, что позволяет отнести их к одинаковым условиям. При выполнении работ анизотропные свойства грунтов не исследовались, в связи с чем корректирующие поправки на деформационную анизотропию в расчетах модуля деформации не применялись.

Испытание грунтов расклинивающим дилатометром РД-100 производилось в соответствии с рекомендациями [4]. Для обработки опытных данных использовалась модифицированная формула Шлейхера (1) без применения каких-либо корректирующих коэффициентов. На опытном полигоне № 1 исследование пылеватых песков было выполнено в двух точках, в интервале глубин 2,0...4,0 м. На полигоне № 2 исследование полутвердых суглиников выполнялось в трех точках, в интервале глубин 2,6...6,0 м.

Испытание грунтов штампом производилось в соответствии с требованиями ГОСТ 20276-99. Для сопоставительных испытаний использовался плоский круглый штамп площадью 600 см². Опыты выполнялись в специально пробуренных скважинах диаметром 325 мм. В пределах исследуемых грунтов было выполнено по шесть испытаний штампом (на глубинах 1,8...4,0 м на полигоне № 1 и на глубинах 3,2...5,8 м на полигоне № 2). В качестве упора и регистратора информации использовалась канатно-рычажная установка КРУ-600 в комплекте с измерительными приборами ИЧ-50 и набором тарированных грузов.

Испытания грунтов выполнялись с использованием механического лопастного прессиометра ЛПМ-15. Погружение его в грунт осуществлялось в предварительно пробуренные скважины диаметром 108 мм. На каждом полигоне выполнено по шесть опытов, равномерно распределенных по глубине исследуемого слоя. При обработке результатов испытаний учитывались поправки, полученные в результате калибровочных

процедур. Несмотря на высокую неоднородность песков, имевших слоистую структуру, значения модуля деформации по лопастному прессиометру изменяются в довольно узких пределах, что указывает на высокую сглаживающую способность лопастной прессиометрии.

Для лабораторного исследования сжимаемости грунтов на опытном полигоне № 1 была пройдена дудка диаметром 900 мм, из которой на намеченных глубинах вручную в жесткие обоймы отбирались пять образцов пылеватого песка ненарушенного сложения. На полигоне № 2 при помощи тонкостенного задавливающего грунтоноса ГЗТ-1 было отобрано 8 монолитов из скважины диаметром 168 мм. Испытания грунтов выполнялись на компрессионных приборах КПр-1 в соответствии с требованиями ГОСТ 12248-96. Для расчета модуля деформации грунтов по результатам компрессионных испытаний использовались теоретические значения коэффициента β , учитывающего невозможность бокового расширения образца грунта в одометре, который принимался для пылеватых песков полигона № 1 равным 0,74, а для полутвердых суглинков полигона № 2 – 0,62. Расчет модуля деформации производился в интервале нагрузок 0,1...0,2 МПа.

Следует отметить, что значения модуля деформации, полученные по результатам компрессионных испытаний пылеватых песков на полигоне № 1 ($E = 3,3 \dots 12,4$ МПа), не характерны для слабосжимаемых грунтов. Это еще раз доказывает, что, несмотря на тщательность и осторожность отбора, транспортировки и подготовки образцов грунта, природная структура песков все же частично нарушается и лабораторные испытания не должны применяться для оценки их механических свойств. В этой связи результаты лабораторных исследований пылеватых песков полигона № 1 были исключены из рассмотрения при дальнейшем сопоставлении данных.

Статистический анализ частных значений модуля деформации грунтов, полученных различными способами в пределах каждого инженерно-геологического слоя, выполнялся в соответствии с требованиями ГОСТ 20522-96. Результаты сопоставительных испытаний, выполненных на опытных полигонах № 1 и № 2, и показатели их изменчивости при статистической обработке приведены в таблице.

Результаты статистической обработки данных по опытным полигонам

Наименование грунта	Статистический показатель	Модуль деформации E , МПа			
		РД-100	Штамп	ЛПМ-15	КПр-1
Песок пылеватый Полигон № 1	E_{\min}	14,2	15,8	16,5	3,3
	E_{\max}	34,2	27,6	21,4	12,4
	\bar{E}	24,1	23,0	18,3	—
	σ	$\pm 5,3$	$\pm 4,3$	$\pm 1,6$	—
	v	0,22	0,19	0,09	—
	n	20	5	6	6
Суглинок полутвердый Полигон № 2	E_{\min}	5,0	7,0	4,9	4,3
	E_{\max}	10,0	12,0	6,9	7,6
	\bar{E}	7,2	8,7	6,2	5,8
	σ	$\pm 0,84$	$\pm 1,7$	$\pm 0,79$	$\pm 1,34$
	v	0,12	0,20	0,13	0,23
	n	52	6	6	8

Полученные для конкретных инженерно-геологических условий полигонов № 1 и № 2 результаты хорошо согласуются между собой, что позволяет перейти к установлению корреляционных связей между значениями модуля деформации, определенными различными методами. Для построения уравнений регрессии и выявления связи между результатами дилатометрического и традиционных методов определения модуля деформации грунтов кроме информации по опытным полигонам были также использованы дополнительные сведения, полученные на производственных объектах ОАО «Стройизыскания», ООО «Новосибирский инженерный центр», треста «ОрелТИСИЗ», ФГУП Красноярский «ВНИПИЭТ» и др.

Статистический анализ результатов выполнялся в два этапа. На первом этапе проводился статистический анализ частных значений, полученных различными способами в пределах выделенного инженерно-геологического элемента. Средняя послойная величина модуля деформации грунтов в случае соответствия параметров изменчивости требованиям ГОСТ 20522–96 использовалась при последующем статистическом анализе. На втором этапе для установления достоверности и тесноты взаимосвязи сравниваемых величин выполнялся двухмерный статистический анализ. Средние послойные значения модуля деформации, определенные по данным дилатометрических испытаний, сопоставлялись с аналогичными параметрами, полученными одним из традиционных методов исследований. Результаты статистического анализа определялись аналитическим уравнением регрессии и коэффициентом корреляции r . При сопоставлении результатов исследований каких-либо ограничений в отношении однообразия грунтовых условий не делалось. Достаточно сказать, что в сопоставительные выборки вошли даже техногенные грунты, представленные тонкодисперсными золами.

Всего к сопоставлению было привлечено следующее количество частных значений модуля деформации грунтов:

- штампом — 161 натурный эксперимент;
- лопастным прессиометром — 118 полевых испытаний;
- компрессионным прибором — 200 лабораторных определений;
- расклинивающим дилатометром — 1834 полевых определений.

Основной объем штамповых испытаний выполнялся в скважинах с помощью круглых плоских абсолютно жестких штампов площадью 600 см². Часть опытов (20 экспериментов) была выполнена в шурфах с использованием круглых штампов площадью 2500 см². При статистической обработке результатов рассматривались различные уравнения регрессии, включающие показательную, экспоненциальную, гиперболическую, логарифмическую и параболическую функции. Наиболее тесную и оправданную связь между дилатометрическими $E_{\text{рд}}$ и штамповыми $E_{\text{шт}}$ значениями модуля деформации показала линейная регрессия с коэффициентом корреляции $r = 0,95$:

$$E_{\text{рд}} = 0,886 E_{\text{шт}} + 1,28 \text{ [МПа].} \quad (2)$$

Результаты сопоставления и статистической обработки значений модуля деформации в виде линейной регрессии, связывающей дилатометрические и штамповые данные, показаны в графической форме на рис. 2, а.

Поведение грунта при применении лопастных прессиометров конструкции профессора Л.С. Амаряна наиболее близко соответствует

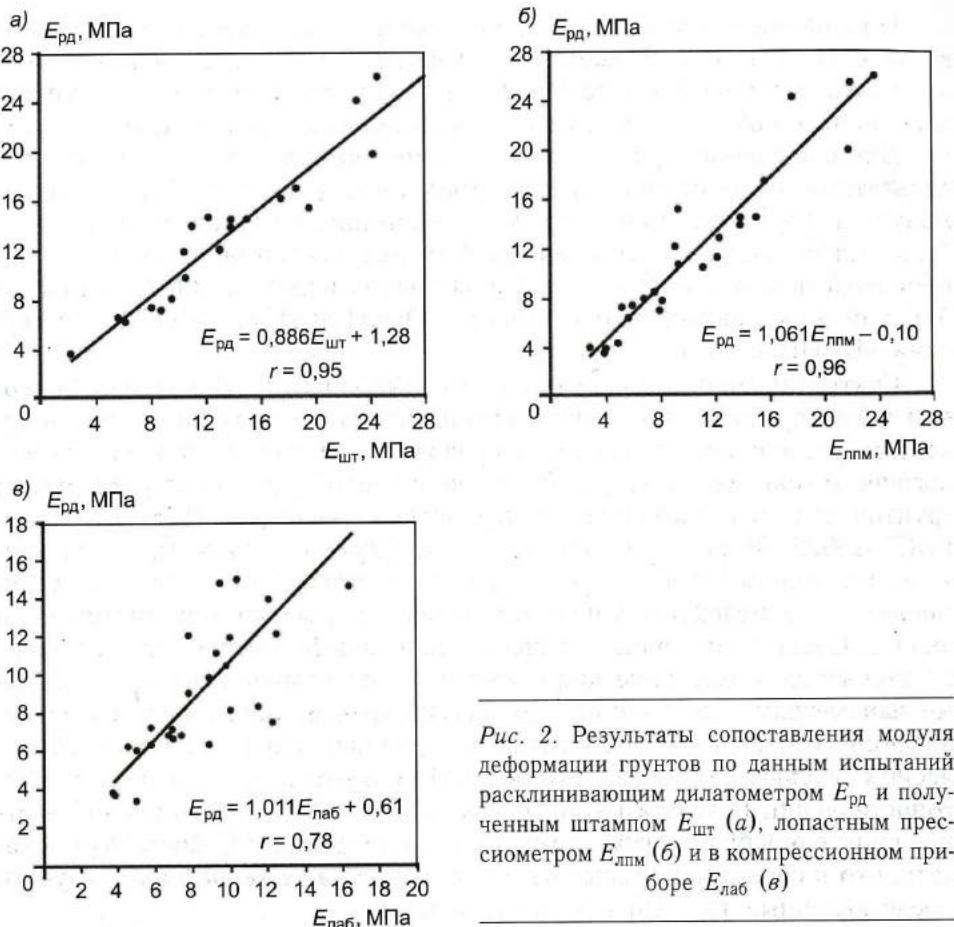


Рис. 2. Результаты сопоставления модуля деформации грунтов по данным испытаний расклинивающим дилатометром $E_{\text{рд}}$ и полученным штампами $E_{\text{шт}}$ (а), лопастным прессиометром $E_{\text{лпм}}$ (б) и в компрессионном приборе $E_{\text{лаб}}$ (в)

условиям работы индентора расклинивающего дилатометра. Сопоставление с лопастными прессиометрами позволяет в наиболее чистом виде определить основное отличие испытаний дилатометром от других методов, связанное с релаксационным характером его работы. Обработка результатов прессиометрических испытаний по ГОСТ 20276–99 производилась без учета корректирующего коэффициента K_1 . При статистической обработке материалов сопоставления тоже были рассмотрены различные уравнения регрессии. Лучшая связь, как и при сравнении со штампами, описывается линейной регрессией с коэффициентом корреляции $r = 0,96$:

$$E_{\text{рд}} = 1,061E_{\text{лпм}} - 0,10 \text{ [МПа].} \quad (3)$$

Результаты сопоставления в графическом виде приведены на рис. 2, б.

Лабораторные испытания грунтов на сжимаемость в стандартных одометрах компрессионного прибора КПр-1 по монолитам природного сложения выполнялись преимущественно в грунтах с достаточно высокой структурной прочностью, позволяющей отбирать пробы с ненарушенным природным сложением и влажностью. Порядок обработки результатов измерений соответствовал ГОСТ 12248–96. Выполненные расчеты по подбору статистически оптимальной корреляционной зависимости между дилатометрическими $E_{\text{рд}}$ и лабораторными $E_{\text{лаб}}$ значениями модуля

деформации тоже привели к линейной регрессии с коэффициентом корреляции $r = 0,78$:

$$E_{\text{рд}} = 1,011E_{\text{лаб}} + 0,61 \text{ [МПа].} \quad (4)$$

В графическом виде результаты сравнения представлены на рис. 2, в.

Анализ материалов сопоставления подтверждает тесную связь результатов дилатометрических испытаний и полевых методов исследования грунтов штампами ($r = 0,95$) и лопастными прессиометрами ($r = 0,96$). Имеющиеся расхождения с данными компрессионных испытаний ($r = 0,78$) дополнительно свидетельствуют о нарушении структуры грунтов, происходящем в процессе опробования и подготовки образцов к лабораторным испытаниям. По результатам сравнения дилатометрических и прессиометрических испытаний сделан вывод о необходимости введения корректирующего коэффициента в расчетную формулу (1) для определения модуля деформации по результатам испытания грунтов расклинивающим дилатометром в соответствии с рекомендациями ГОСТ 20276–99.

Проведенные сопоставительные исследования широкой номенклатуры дисперсных грунтов позволяют рекомендовать использование метода расклинивающей дилатометрии для прямого определения модуля деформации грунтов в полевых условиях при проведении инженерно-геотехнических изысканий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 1758158 (СССР), МКИ Е 02 D 1/00. Прессиометр [Текст] / В.П. Писаненко, С.Н. Лавров : Опубл. 30.08.92; Бюл. № 32.
2. Л а в р о в, С.Н. Опыт применения расклинивающей дилатометрии для исследования деформационных свойств грунтов [Текст] / С.Н. Лавров, В.П. Писаненко // Геотехника-99 : сб. мат. междунар. научно-практ. конф. — Пенза, 1999. — С. 91–94.
3. П и с а н е н к о, В.П. Полевые испытания деформационных свойств грунтов методом контролируемого перемещений [Текст] / В.П. Писаненко, С.Н. Лавров // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1990. — № 5. — С. 130–133.
4. Рекомендации по определению деформационных свойств грунтов расклинивающим дилатометром РД-100 [Текст] / ПНИИИС. ЗапСибТИСИЗ. — М. : ПНИИИС, 1991. — 31 с.

ЛАВРОВ С.Н., доц.; E-mail: lavrovsn@list.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

НУЖДИН Л.В., канд. техн. наук, проф.; E-mail: nuzhdin-ML@rambler.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 27.07.11

Lavrov S.N., assistant professor; E-mail: lavrovsn@list.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Nuzhdin L.V., candidate of technical sciences, professor; E-mail: nuzhdin-ML@rambler.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS USING A RD-100 DILATOMETER AND TRADITIONAL METHODS TO DEFINE SOILS DEFORMATION MODULUS

Describes the results of comparative tests aimed to determine the soils deformation modulus of disperse soils using a wedge-shaped dilatometer and traditional test methods using test plates, paddle-type pressure meters and compression devices. It established good correlation of the obtained results and practicability of wedging dilatometers used to determine soils deformation modulus in disperse soil body in the field conditions.

Key words: disperse soils, soils deformation modulus, wedging dilatometer, statistical analysis.

REFERENCES

1. A.s. 1758158 USSR, MKI E 02 D 1/00. Pressiometer [Text] / V.P. Pisanenko, S.N. Lavrov : Publ. 30.08.1992 ; Bul. N 32.
2. L a v r o v, S.N. Experience in application of wedging dilatometry to study soil deformation properties [Text] / S.N. Lavrov, V.P. Pisanenko // Geotechnics-99 : Digest of the Materials of Intern. Academic and Research Conf. — Penza, 1999. — P. 91–94.
3. P i s a n e n k o, V.P. Field Tests of Soils Deformation Properties Using Controlled Displacement Method [Text] / V.P. Pisanenko, S.N. Lavrov // News of High Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1990. — N. 5. — P. 130–133.
4. Recommendations on Soils Deformation Properties Determination Using a RD-100 Wedging Dilatometer [Text] / PNIIS, ZapSibTISIZ. — M. : PNIIS, 1991. — 31 p.