Научная статья / Scientific paper

УДК: 624.131.53

DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.380

Оценка величины относительной тангенциальной деформации

А.Ю. Виноградов[1,2], В.А. Обязов[1], А.С. Войтенко[1], Г.П. Романов[1]

[1]ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; [2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: gd@npogtp.ru

Аннотация. Вопрос устойчивости массивов грунта при внешних воздействиях, возникающих в том числе при строительстве зданий и сооружений, решается путем определения прочностных характеристик грунта. В инженерной практике это выражается в определении сопротивления грунта сдвигу при предельно напряженном состоянии. Понятие прочности грунта в первую очередь связано с обеспечением устойчивости грунтового основания фундамента. При потере устойчивости откосов оснований и их обрушении в грунтовом массиве происходит сдвиг одной части относительно другой, поэтому прочностные свойства грунта напрямую связаны с сопротивлением грунта сдвигу.

Согласно требованиям ГОСТ, испытание грунта производят при различных значениях постоянной нагрузки до тех пор, пока одна часть грунта не сдвинется относительно другой на расстояние более 10 % от диаметра испытуемого образца. При этом измеряют максимальное усилие, которое было достигнуто в ходе испытаний.

Однако, в связи с тем, что стандартные образцы испытуемые в лабораторных и полевых условиях имеют цилиндрическую форму, относительный десятипроцентный сдвиг, определенный как отношение величины сдвига к диаметру образца, не соответствует требуемой ГОСТ величине относительной деформации. Поскольку деформация при одноплоскостном сдвиге, как и при компрессионном воздействии, затрагивает весь объем образца, то правильной оценкой относительности деформации будет отношение величины сдвигаемой площади ко всей площади среза. В регламентирующих документах данный аспект не рассмотрен, стандартные формулы однозначного решения проблемы не дают. В предлагаемой работе предложены методы расчета сдвигаемой площади от линейного сдвига подвижной рамки приборов одноплоскостного сдвига. Проведена оценка погрешности расчетов величин относительного сдвига, вызванных при учете относительной тангенциальной деформации по линейному методу в сравнении с площадным.

Ключевые слова: прочностные свойства грунта; одноплоскостной срез; касательное напряжение; деформация грунта; угол внутреннего трения; удельное сцепление.

Для цитирования: Виноградов А.Ю., Обязов В.А., Войтенко А.С., Романов Г.П. Оценка величины относительной тангенциальной деформации // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 4. С. 380–389. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.389.

Evaluation of the Relative Tangential Deformation Value

Alexey Yu. Vinogradov[1,2], Victor A. Obyazov[1], Andrey S. Voitenko[1], Georgiy P. Romanov[1]

[1]Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia; [2]Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg, Russia

e-mail: gd@npogtp.ru

Abstract. The issue of soil mass stability under external influences, including those arising during the construction of buildings and structures, is evaluated by determining the soil strength characteristics. In engineering practice, this involves determining the shear resistance of the soil at the ultimate stress state. The concept of soil strength is primarily related to ensuring the stability of the soil foundation. When the slopes of the foundations lose stability and collapse, the soil mass shifts one part relative to the other, and therefore the strength properties of the soil are directly related to its shear resistance.

According to GOST requirements, soil is tested under various constant load values until one part of the soil moves relative to the other by more than 10 % of the diameter of the test sample. At the same time, the maximum force that was achieved during the tests is measured.
However, due to the fact that the standard samples tested in laboratory and field conditions have a cylindrical shape, the relative ten percent shear, defined as the ratio of the shear value to the sample diameter, does not determine the required relative deformation value according to GOST. Since the deformation during single-plane shear, similar to compression, affects the entire volume of the sample, the correct assessment of the relative deformation would be the ratio of the shear area to the total cutting area. This aspect is not addressed in the regulatory documents, and the standard formulas do not provide a clear solution to the problem. In the proposed work, methods for calculating the shear area from the linear shear of the movable frame of single-plane shear devices are proposed. An error assessment was performed for the relative shear values caused by the relative tangential deformation using the linear method in comparison with the area method.
Keywords: soil strength properties; single-plane shear; tangential stress; soil deformation, internal friction angle, specific adhesion.
For citation: Vinogradov A. Yu., Obyazov V. A., Voitenko A. S., Romanov G. P. Evaluation of the Relative Tangential Deformation Value. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 4, pp. 380–389. DOI: 10.34753/HS.2025.7.4.380. (In Russian; abstract in English).

Введение

Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным (сдвигающим) усилием предела прочности на сдвиг, в связи с этим, характеристиками грунта, определяющими его несущую способность, являются прочностные характеристики [1, 2, 3, 4]. К прочностным характеристикам грунта, согласно ГОСТ 12248.1-2020[1] (ГОСТ), относятся удельное сцепление c и угол внутреннего трения φ, определяемые методом одноплоскостного среза, при котором срез в приборах производится по фиксированной плоскости путем перемещения одной части срезной коробки цилиндрической формы относительно другой (п.3.2 ГОСТ). Данный метод позволяет оценить сопротивление смещению одной части грунта по отношению к другой, характеризуемое величиной сдвигающего давления, при которой происходит срез грунта (п.3.1 ГОСТ).

При испытаниях в статическом режиме (пп. 8.7; 8.10 ГОСТ) срезающая нагрузка передается ступенями по 5 % от значения нормальной с измерениями деформации среза. Испытание считается законченным, если при приложении очередной ступени касательной нагрузки происходит мгновенный срыв части образца или относительная деформация образца превысит 10%. Мы в дальнейших рассуждениях основываемся на безусловном соблюдении данного требования.

График зависимости $l = f(\tau)$, где l – деформация, определяемая в мм, строится согласно приложения Б ГОСТа. В тех случаях, когда срыв не происходит и значение касательного напряжения возрастает монотонно, а это в случае испытаний связных грунтов наблюдается довольно часто, критерий прекращения испытаний становится весьма важным при расчете прочностных характеристик грунта [5, 6].

Вопрос перехода от абсолютных значений тангенциальной деформации к относительным в ГОСТе отдельно не рассматривается, хотя он не определяется однозначно.

Если при оценке относительной нормальной деформации проблем в ее определении нет – она определяется отношением абсолютной вертикальной деформации к первоначальной высоте образца, то как быть с тангенциальной?

Поскольку при проведении испытаний по схеме одноплоскостного среза образцы имеют форму цилиндра (п. 5.6 ГОСТ), с геометрической точки зрения принимаемое отношение сдвига к

[1] ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза

диаметру образца (Примечание к п. 8.8 ГОСТ), как оценку относительной тангенциальной деформации, нельзя признать правильным решением этой задачи. Более корректным представляется использование площадных характеристик сдвига вместо линейных.

Целью настоящей статьи является попытка разработать расчетный метод определения относительной тангенциальной деформации, оценить погрешность принятого подхода к её определению и влияние этой погрешности на результаты расчетов оснований зданий и сооружений, производимых по методикам СП 22.13330.2016[2].

Материалы и методы

В работе использованы результаты четырех десятков лабораторных консолидированно-дренированных испытаний образцов на одноплоскостной срез для следующих инженерно-геологических элементов:

− ИГЭ-1 – среднечетвертичные ледниковые отложения (gIIms), состоящие из суглинка лёгкого песчанистого, местами тяжёлого пылеватого, полутвёрдого, серовато-коричневого, с отдельными линзами и прослойками супеси песчанистой, пластичной, с включениями до 15 % дресвы и щебня осадочных и магматических пород, среднедеформируемого, слабопучинистого;

− ИГЭ-2 – среднечетвертичные ледниковые отложения (gIIms), состоящие из глины лёгкой пылеватой, полутвердой консистенции, тёмно-коричневой, известковистой, с включениями до 5 % гравия, щебня и отдельных валунов, среднедеформируемой, слабопучинистой;

− ИГЭ-3 – верхнечетвертичные ледниковые отложения (gIIIv), состоящие из глины лёгкой пылеватой, полутвёрдой консистенции, тёмно-коричневой, известковистой, с включениями до 5 % дресвы и щебня, отдельных валунов, с отдельными линзами, прослойками и гнёздами песка мелкого, плотного, влажного;

− ИГЭ-4 – среднечетвертичные водно-ледниковые отложения (f,gIIIms), состоящие из супеси песчанистой, пластичной, коричневато-серой, с включениями до 10–15 % гравия, дресвы и щебня;

− ИГЭ-5 – верхнечетвертичные ледниковые отложения (gIIIv), состоящие из суглинка тяжёлого пылеватого, полутвёрдой консистенции, красновато-коричневого, с тонкими прослойками и линзами песка мелкого, плотного, влажного, с включениями до 10 % гравия, гальки и щебня, редко валунов, среднедеформируемого, слабопучинистого.

Для каждого инженерно-геологического элемента используемые характеристики были осреднены.

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c вычислялись по формулам, указанным в ГОСТ.

Расчетное сопротивление грунта основания R, которое определяется в зависимости от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта вычислялось по формуле (п. 5.6.7 СП 22.13330.2016):

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{k}(M_\gamma k_z b \gamma_{II} + M_q d_I \gamma_{II}^l + (M_q - 1) d_b \gamma_{II}^l + M_c c_{II}) \quad (1)$$

где γ_{c1}, γ_{c2} – коэффициенты условий работы, принимаемые по таблице 5.4; k – коэффициент, принимаемый равным единице, если прочностные характеристики грунта (φ и c_{II}) определены непосредственными испытаниями; M_γ, M_q, M_c – коэффициенты, принимаемые по таблице 5.5 в зависимости от значения угла внутреннего трения; k_z – коэффициент, принимаемый равным единице при b < 10 м; b – ширина подошвы фундамента, м; γ_{II} – осредненное (см. п. 5.6.10 СП 22.13330.2016) расчетное значение удельного веса грунтов, залегающих ниже подошвы фундамента (при наличии подземных вод определяется с учетом взвешивающего действия воды), кН/м^3; γ_{II}^l – то же, для грунтов, залегающих выше подошвы фундамента, кН/м^3; c_{II} – расчетное значение

[2] СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3)

удельного сцепления грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента; d_I – глубина заложения фундаментов, м, d_b – глубина подвала, м.

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления N_u, кН, основания (п. 5.7.11 СП 22.13330.2016), сложенного дисперсными грунтами в стабилизированном состоянии, допускается вычислять по формуле, которая впрямую зависит от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта:

$$N_u = b \cdot l(N_\gamma \xi_\gamma b \gamma_I + N_q \xi_q d \gamma_I^l + N_c \xi_c c_I) \quad (2)$$

где b, l – соответственно приведенные ширина и длина фундамента, м; γ_I, γ_I^l – расчетные значения удельного веса грунтов, кН/м^3, находящихся в пределах возможной призмы выпирания соответственно ниже и выше подошвы фундамента (при наличии подземных вод определяют с учетом взвешивающего действия воды для грунтов, находящихся выше водоупора); c_I – расчетное значение удельного сцепления грунта, кПа; d – глубина заложения фундамента, м; ξ_γ, ξ_γ, ξ_γ – коэффициенты формы фундамента; N_γ, N_q, N_c – безразмерные коэффициенты несущей способности, определяемые по таблице 5.12 в зависимости от расчетного значения угла внутреннего трения грунта φ и угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание F в уровне подошвы фундамента.

В расчете, угол наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание условно принят равным 0; $b = l = 1$; $\gamma_I = \gamma_I^l = 20$ кН.

Результаты и обсуждение

Определение относительной тангенциальной деформации с использованием площадных её характеристик $\Delta S/S$ сводится к расчету площади сдвига ΔS при известной площади образца S.

Первый способ расчета ΔS.

Рассмотрим смещение круга с центром в точке O_1 на расстояние Δl в точку O_2 (рисунок 1).

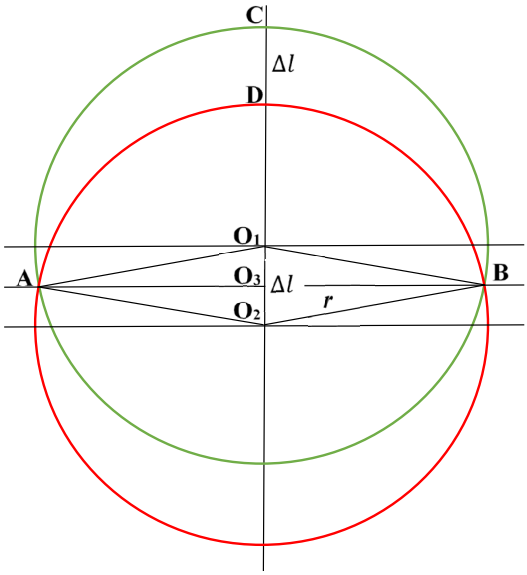

Рисунок 1. Схема, иллюстрирующая расчет ΔS первым способом

Figure 1. Diagram illustrating the calculation of ΔS using the first method

Дано:

$O_1O_2=\Delta l$,

$O_1A=O_2B=O_1B=O_2A = r$.

Задача:

найти площадь ΔS(ACBD)

Решение:

S(ACBD)=S(ACBO$_1$)−(S(ADBO$_2$)−S(AO$_1$BO$_2$))

AO$_1$BO$_2$ – ромб (поскольку все стороны равны). Площадь ромба можно вычислить 2 способами:

S(AO$_1$BO$_2$) = 1/2·O$_1$O$_2$·AB

S(AO$_1$BO$_2$) = AO$_1$·sinα

AB=2AO$_3$ (поскольку диагонали ромба точкой пересечения делятся пополам)

Из треугольника AO$_1$O$_3$ найдем, что

$$AO_3 = \sqrt{AO_1^2 - O_1O_3^2} = \sqrt{r^2 - \left(\frac{\Delta l}{2}\right)^2}$$

$$AB = 2AO_3 = 2\sqrt{r^2 - \left(\frac{\Delta l}{2}\right)^2} = \sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

$$S(AO_1BO_2) = \frac{1}{2}h\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

С другой стороны

$$S(AO_1BO_2) = AO_1^2 \sin\alpha = r^2 \sin\alpha$$

Получаем, что

$$r^2 \sin\alpha = \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

$$\sin\alpha = \frac{h}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

Итак, угол O_1AO_2=arcsin($\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$)

Тогда

$$\widehat{AO_1B} = \widehat{AO_2B} = \pi - \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)$$

Теперь легко вычислить площадь секторов:

$$S(ADBO_2) = \frac{\widehat{AO_2B}}{2}AO_2^2 = \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi - \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right)$$

$$S(ACBO_1) = \frac{2\pi - \widehat{AO_1B}}{2}AO_1^2 \\ = \frac{r^2}{2}\left(2\pi - \pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l}\right.\right. \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right)$$

Итоговое решение:

$$S(ACBD) = S(ACBO_1) - \left(S(ADBO_2) - S(AO_1BO_2)\right) = \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ - \frac{r^2}{2}\left(\pi - \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ + \frac{1}{2}h\sqrt{4r^2 - \Delta l^2} = \\ = \frac{r^2}{2}\left(\pi + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right) - \right. \\ \left. + \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right)\right) \\ + \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2} \\ = r^2 \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right) \\ + \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}$$

Надо иметь в виду, что данная зависимость верна только при $\Delta l \ll r$.

Второй способ расчета ΔS.

При некотором сдвиге Δl площадь неподвижной цилиндрической части сдвигового прибора можно представить, как сумму трех площадей (рисунок 2):

$$S = \Delta S + S_{\text{сег}} + S_{\text{сег}}$$

Отсюда

$$\Delta S = S - 2S_{\text{сег}}$$

$$S_{\text{сег}} = r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - \frac{r^2}{2}\sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right)\right)$$

где: r – радиус круга; h – высота сегмента.

Высота сегмента $S_{\text{сег}}$ в данном случае вычисляется по формуле:

$$h = (D - \Delta l)/2$$

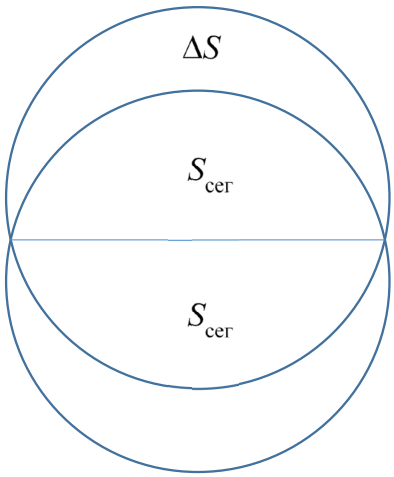

Рисунок 2. Схема, иллюстрирующая расчет ΔS вторым способом

Figure 2. Schematic diagram illustrating the calculation of ΔS using the second method

Относительная деформация под действием касательной силы, следовательно, равна отношению площади сдвига при измеренной длине сдвига Δl в результате касательного силового воздействия к общей площади, по которой происходит касательный сдвиг. Площадь сдвига на расстояние Δl круга радиусом r составит в первом варианте расчета:

$$\Delta S(1) = r^2 \arcsin\left(\frac{\Delta l}{2r^2}\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}\right) + \frac{1}{2}\Delta l\sqrt{4r^2 - \Delta l^2}; \quad (3)$$

во втором варианте:

$$\Delta S(2) = S - 2\left(r^2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - \frac{r^2}{2}\sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right)\right)\right). \quad (4)$$

Для расчетов принят диаметр образца 71,4 мм, соответствующий площади его поперечного сечения 40 см^2, используемый у наиболее распространенных приборов для испытания грунтов на сдвиг, например, ПСГ-3М.

Сравнение результатов расчетов относительной тангенциальной деформации по формулам (3) и (4) показали их полную идентичность и существенное их отличие от результатов, полученных линейным методом (таблица 1).

Таблица 1. Расчет относительной тангенциальной деформации линейным и площадным методами
Table 1. Calculation of relative tangential deformation using linear and area methods

l, мм	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7	7,14
$\varepsilon_\tau = \Delta l/D$	0,0014	0,0070	0,0140	0,0280	0,0420	0,0561	0,0701	0,0841	0,0981	0,1
$\varepsilon_\tau(1) = \Delta S(1)/S$	0,0018	0,0089	0,0178	0,0357	0,0535	0,0714	0,0892	0,1070	0,1247	0,1272
$\varepsilon_\tau(2) = \Delta S(2)/S$	0,0018	0,0089	0,0178	0,0357	0,0535	0,0713	0,0891	0,1069	0,1247	0,1272

Относительная тангенциальная деформация достигает 10 %-ного значения, при котором испытание прекращается, в случае площадного метода её определения при величинах сдвига на 27 % меньше, чем в случае линейного метода (рисунок 3).

Как следствие этого появляется ошибка в определении значений угла внутреннего трения и сцепления. Их значения, полученные в результате лабораторных консолидированно-дренированных испытаний образцов на одноплоскостной срез, выполненных по ГОСТ, а также скорректированные с учетом предлагаемой поправки на расчет относительной деформации площадным методом для различных инженерно-геологических элементов (ИГЭ 1–5) представлены в таблице 2. Надо иметь в виду, что в связи с нелинейностью зависимости между касательным напряжением и относительной тангенциальной деформацией рассматриваемая ошибка возрастает в среднем еще на 5–10 %.

Таблица 2. Сравнительные значения угла внутреннего трения и сцепления, полученные при различных методах расчета относительной тангенциальной деформации
Table 2. Comparative values of the internal friction angle and adhesion obtained using different methods of calculating relative tangential deformation

ИГЭ		1	2	3	4	5
φ, град	$\varepsilon_\tau = \Delta l/D$	23,3	18,3	17,2	33,8	18,3
	$\varepsilon_\tau = \Delta S/S$	17,4	13,5	12,7	26,1	13,5
с, кПа	$\varepsilon_\tau = \Delta l/D$	47	92	85	125	68
	$\varepsilon_\tau = \Delta S/S$	34	67	62	91	50

Использование полученных значений угла внутреннего трения и сцепления с учетом площадной поправки для расчетов сопротивления грунта основания и вертикальной составляющей силы предельного сопротивления по формулам (1) и (2) показали существенные отличия от результатов, рассчитанных по ГОСТ (таблицы 3 и 4). Ранее уже отмечалось [7], что ошибка на 1 градус в величине угла внутреннего трения и 1 кПа в величине удельного сцепления приводит к ошибкам в определении расчетного сопротивления грунта основания и вертикальной составляющей силы предельного сопротивления до 10 % в зависимости от связности грунта.

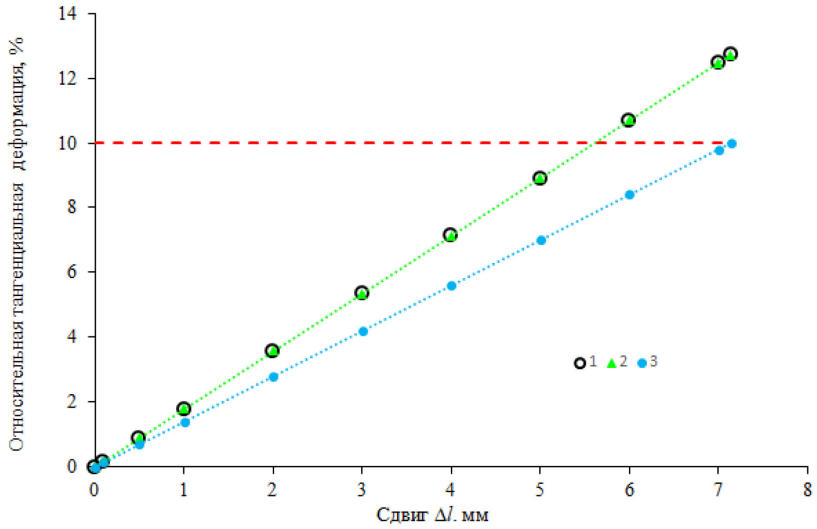

Рисунок 3. Графики зависимости относительной тангенциальной деформации, рассчитанной площадными (1 и 2) и линейным (3) методами, от величины сдвига
Figure 3. Graphs of the dependence of the relative tangential deformation calculated by the area (1 and 2) and linear (3) methods on the shear value

Определение расчетного сопротивления грунта основания проводилось с следующими условными принятыми параметрами: $\gamma_{c1} = 1{,}25$, $\gamma_{c2} = 1{,}1$; $k = 1{,}0$; $k_z = 1{,}0$; $b = 1{,}0$ м; $\gamma_{II} = 17{,}65$ кН/м^3; $\gamma_{II}^l = 16{,}67$ кН/м^3; $d_I = 2{,}5$, м, $d_b = 2{,}0$ м.

Принятые значения коэффициентов M_γ, M_q, M_c, в зависимости от величины угла внутреннего трения и результаты расчетов расчетного сопротивления грунта основания по формуле (1) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Принятые значения коэффициентов M_γ, M_q, M_c в зависимости от величины φ, град (таблица 2) и результаты расчетов расчетного сопротивления грунта основания по формуле 1
Table 3. Accepted values of the coefficients M_γ, M_q, M_c, depending on the value of φ, degrees (table 2), and the results of calculating the calculated resistance of the foundation soil using formula 1

ИГЭ	ε_τ	M_γ	M_q	M_c	R, кПа	Погрешность
1	$\Delta l/D$	0,68	3,72	6,31	762,1	0,592
	$\Delta S/S$	0,4	2,63	5,21	478,7	
2	$\Delta l/D$	0,44	2,77	5,35	927,3	0,535
	$\Delta S/S$	0,28	2,11	4,62	604,2	
3	$\Delta l/D$	0,4	2,6	5,19	838,6	0,547
	$\Delta S/S$	0,25	1,97	4,44	541,9	
4	$\Delta l/D$	1,51	7,14	8,18	2133,2	0,648
	$\Delta S/S$	0,85	4,4	6,92	1294,5	
5	$\Delta l/D$	0,44	2,77	5,35	750,8	0,513
	$\Delta S/S$	0,28	2,11	4,62	496,2	

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления Nu, кН, основания, сложенного дисперсными грунтами в стабилизированном состоянии, вычислялась при условии где b, $l = 1{,}0$ м; $\gamma_I = 17{,}65$, $\gamma_I^l = 16{,}67$, кН/м^3; d – 2,5, м; $\xi_\gamma = 0{,}75$, $\xi_\gamma = 2{,}5$, $\xi_\gamma = 1{,}3$.

Принятые значения коэффициентов N_γ, N_q, N_c, в зависимости от величины угла внутреннего трения и угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание F в уровне подошвы фундамента, а так же результаты расчетов вертикальной

составляющей силы предельного сопротивления по формуле (2) представлены в таблице 4.

В расчете угол наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание условно принят равным нулю.

Таблица 4. Принятые значения коэффициентов N_γ, N_q, N_c от величины угла внутреннего трения и угла наклона к вертикали равнодействующей внешней нагрузки на основание F в уровне подошвы фундамента (таблица 2) и результаты расчетов вертикальной составляющей силы предельного сопротивления по формуле 2

Table 4. Accepted values of the coefficients N_γ, N_q, N_c from the value of the angle of internal friction and the angle of inclination to the vertical of the resultant external load on the base F at the level of the foundation sole (table 2) and the results of calculations of the vertical component of the ultimate resistance force by formula 2

ИГЭ	ε_τ	N_γ,	N_q,	N_c	N_u, кН	Погрешность
1	$\Delta l/D$	4,85	9,21	18,71	2166,9	0,922
	$\Delta S/S$	2,08	5,12	12,81	1127,2	
2	$\Delta l/D$	2,36	5,56	13,50	2225,1	0,756
	$\Delta S/S$	1,13	3,5	10,19	1267,2	
3	$\Delta l/D$	2,02	5,02	12,66	1948,7	0,709
	$\Delta S/S$	1,01	3,26	9,77	1140,5	
4	$\Delta l/D$	23,87	29,72	42,28	10282,9	1,520
	$\Delta S/S$	7,3	12,36	22,79	4080,4	
5	$\Delta l/D$	2,36	5,56	13,50	1803,9	0,731
	$\Delta S/S$	1,13	3,5	10,19	1042,0	

Считаем однозначно неверным линейный подход при учете относительной деформации при тангенциальном силовом воздействии, поэтому рассчитываем погрешность исходя именно из этих соображений. Расчетное сопротивление грунта в результате подобной ошибки завышается в 1,5 раза, а вертикальной составляющей силы предельного сопротивления – в 1,5–2,5 раза.

Таким образом, из-за неоднозначной оценки относительной тангенциальной деформации возникают существенные отличия в результатах определения расчетного сопротивления грунта основания и вертикальной составляющей силы предельного сопротивления. Её определение площадным методом является более корректным, а среди рассмотренных способов её расчета рекомендуется второй способ как более простой.

В заключение необходимо отметить, что любые деформационные изменения в образце, на который выполняется воздействие, происходят во всем его объеме [8]. Нормальные воздействия производятся по вертикальному направлению и изменения в объеме происходят только по вертикальной составляющей z, поскольку стенки камеры жестко ограничивают деформацию по направлениям x и y. В случае с тангенциальным воздействием, происходящим по направлению x, деформация происходит по всем трем направлениям, причем, вертикальные изменения тем меньше, чем больше нормальное давление на образец. В данной статье вертикальное расширение при малой нормальное нагрузке; расширение с последующим сжатием в случае среднего воздействия и сжатие при большом нормальном воздействии не рассматривается. Тем не менее, надо понимать, что подобный учет необходим и весьма значим при оценке ошибок, возникающих при учете относительной деформации ***объема*** образца при тангенциальном воздействии.

Выводы

1. Использование при испытании грунтов для определения их прочностных характеристик при одноплоскостном срезе линейной оценки относительной тангенциальной деформации в виде отношения линейного сдвига Δl к диаметру

образца *D* некорректно, поскольку при цилиндрической форме образца относительную деформацию правильнее рассчитывать, как отношение площади сдвига к площади образца.

2. Предложен расчетный метод оценки относительной тангенциальной деформации.

3. Предельная линейная величина сдвига для испытаний грунтов на одноплоскостной сдвиг, установленная согласно требованиям ГОСТ 12248.1-2020 по достижению относительной деформации 0,1, меньше на 27 %, чем при подразумеваемом по умолчанию линейном варианте.

4. При линейном методе оценки относительной тангенциальной деформации расчетное сопротивление грунта, рассчитанное по методике СП 22.13330.2016 завышается в 1,5 раза, а вертикальной составляющей силы предельного сопротивления – в 1,5–2,5 раза.

Рекомендации

1. При подготовке новой редакции государственного стандарта «Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» однозначно указать правила расчета относительной тангенциальной деформации.

2. Включить в ГОСТ способ расчета относительной тангенциальной деформации, представленный вторым в настоящей статье.

Литература / References

1. Петраков А.А., Яркин В.В. Таран Р.А., Казачек Т.В Механика грунтов, Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» / Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; Под ред. Петракова А.А. Макеевка: ДонНАСА, 2004. 164 с.
2. Крамаренко В.В. Грунтоведение, Томский политехнический университет, Томск, 2011, 431 с.
3. Основания фундаменты и подземные сооружения. Под ред. Сорочана Е.А. Стройиздат,1985.480 с.
4. Мирный А.Ю., Идрисов И.Х. Испытания методом одноплоскостного среза, Геоинфо, 2020, 6 с.
5. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты Стройиздат, Л. 1988, 415с.
6. Потапова Л.Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2005. 244 с.
7. Зубова О.В., Виноградов А.Ю. Оценка влияния точности определения прочностных свойств грунта на результаты проектных расчетов// Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 1. С. 103−110. DOI:10.34753/HS.2025.7.1.103.
   Zubova O.V., Vinogradov A.Yu. Assessment of the influence of the accuracy of determining the strength properties of the soil on the results of design calculations. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 1, pp. 103−110. DOI:10.34753/HS.2025.7.1.103. (In Russian; abstract in English).
8. Гольдштейн М.Н., Механические свойства грунтов. Издательство строительной литературы, М., 1971.
   Goldstein M.N., Mechanical Properties of Soils. Publishing House of Construction Literature, Moscow, 1971.

Поступила в редакцию / Received 16.10.2025
Принята к публикации / Accepted 02.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Виноградов Алексей Юрьевич, доктор технических наук, генеральный директор, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, WoS ResearcherID: D-3751-2016, https://orcid.org/0000-0001-8838-8676, e-mail: gd@npogtp.ru.

Обязов Виктор Афанасьевич, доктор географических наук, технический директор, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, WoS ResearcherID: JBR-8590-2023, https://orcid.org/0000-0002-9644-1286, e-mail: td@npogtp.ru.

Войтенко Андрей Сергеевич, кандидат биологических наук, ведущий инженер, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, https://orcid.org/0000-0003-1329-4573, e-mail: glavbiology@npogtp.ru.

Романов Георгий Павлович, руководитель проектов, ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия, https://orcid.org/0000-0003-1363-9893, e-mail: gr.gtp@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey Yu. Vinogradov, D.Sc. (Technical Sciences), director, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, WoS ResearcherID: D3751-2016, https://orcid.org/0000-0001-8838-8676, e-mail: gd@npogtp.ru.

Viktor A. Obyazov, D.Sc. (Geography), technical director, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, WoS ResearcherID: JBR-8590-2023, https://orcid.org/0000-0002-9644-1286, e-mail: td@npogtp.ru.

Andrey S. Voitenko, Ph.D. (Biology), lead engineer, NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, https://orcid.org/0000-0003-1329-4573, e-mail: glavbiology@npogtp.ru.

Georgiy P. Romanov, project manager of the NPO "Gidrotekhproekt", Valday, Russia, https://orcid.org/0000-0003-1363-9893, e-mail: gr.gtp@yandex.ru.