

ЧТО ОБЕСПЕЧИВАЕТ КОЭФФИЦИЕНТ НАДЕЖНОСТИ ПО ГРУНТУ?

А. Б. ФАДЕЕВ – проф., докт. техн. наук (СПбГАСУ), заслуженный деятель науки РФ; научное направление – геотехника, г. Санкт-Петербург.

В. А. ЛУКИН – к.т.н., генеральный директор ООО «Подземстройреконструкция», г. Санкт-Петербург.

Анализируется смысл и порядок назначения величины коэффициента надежности по грунту в отечественных и европейских нормах геотехнического проектирования. Отмечаются принципиальные различия в подходе к назначению нормативных и расчетных показателей прочности грунтов, приводящие к различной оценке несущей способности грунтовых оснований. Предлагается принять единый порядок определения нормативных и расчетных показателей строительных материалов и грунтов.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивой тенденцией последних десятилетий в мировой геотехнике является постепенный перевод национальных нормативных документов на принцип проектирования геотехнических объектов по предельным состояниям с использованием частных коэффициентов надежности взамен ранее использовавшихся принципов, таких как общий коэффициент запаса или по допустимым напряжениям. В странах Европейского союза недавно вступила в действие система Еврокодов – правил строительного проектирования – подобная системе отечественных СНиПов. В ее составе Еврокод 7 (ЕК7) определяет правила проектирования геотехнических объектов. Система Еврокодов предписывает проектирование по предельным состояниям надземных и подземных частей сооружений, имеет сквозную терминологию и условные обозначения. Еврокоды в течение некоторого переходного периода заменят в европейских странах национальные нормы, в том числе и такие авторитетные, как германские DIN. К ЕК7 с интересом присматриваются геотехники США, Японии.

Отечественные нормативные документы /1–4/ уже давно предписывают проектирование различных объектов именно по предель-

ным состояниям и имеют единую терминологию и обозначения, так что в принципиальном отношении отставания отечественных норм от мировых тенденций нет, даже напротив: налицо опережение. Что касается ЕК7 /5, 6, 7/, то его положения в своем большинстве содержатся в СНиПах на различные геотехнические объекты, и наоборот: большинство положений упомянутых СНиПов почти буквально содержится в ЕК7. Так что если встанет вопрос об адаптации ЕК7 отечественной геотехникой, то в этом не будет большой проблемы. Однако некоторые принципиальные положения имеют различную трактовку в отечественных документах и в ЕК7. Первое из них – это различный смысл, вкладываемый в понятие «коэффициент надежности по грунту». Рассмотрим эти различия и их влияние на результаты расчета грунтовых оснований.

1. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ПРАКТИКА

ГОСТ 27751 /2/ устанавливает различные принципы назначения нормативных показателей прочности грунтов и строительных материалов по результатам опытных определений:

– для материалов: обеспеченность нормативных значений прочностных характеристик должна быть не менее 0,95;

– для грунтов: нормативные значения характеристик грунта, определяющих взаимодействие фундаментов с грунтом, принимают

ся равными их среднеарифметической величине.

Эти два принципа поясняются на упрощенной схеме (рис. 1). Если некоторый показатель материала (или грунта) характеризуется нормальным законом распределения и выполнено n экспериментальных определений этого показателя, то среднеарифметическое значение X_M вычисляют по формуле

$$X_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

где n – число определений характеристики; X_i – частные значения характеристики, получаемые по результатам отдельных i -х опытов.

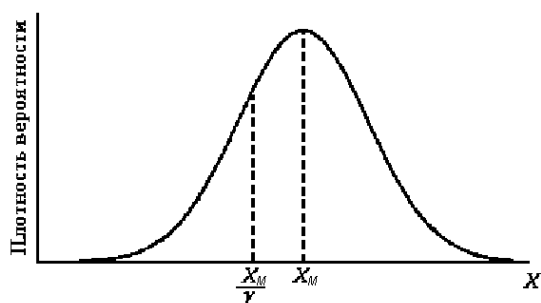


Рис. 1. Средняя и факторизованная средняя

Средняя величина этой ограниченной выборки X_M с одинаковой вероятностью 50% может быть и больше и меньше истинной средней величины. Чтобы гарантировать желаемую вероятность (обеспеченность, доверительную вероятность) не превышения определяемой величины над истинной, величину X_M следует разделить на некоторый статистический фактор $\gamma > 1$, конкретное численное значение которого устанавливается с помощью таблицы квантилей распределения Стьюдента по коэффициенту вариации и числу определений характеристики при заданной односторонней доверительной вероятности (см. ГОСТ 20522 /1/). В результате получаем факторизованную величину X_M/γ .

Итак, за нормативную прочность строительных материалов принимается факторизованная среднеэкспериментальная величина с гарантированной обеспеченностью 95%: $X_n = X_M/\gamma$.

Расчетная прочность строительных материалов равна нормативной прочности, делен-

ной на коэффициент надежности по материалу, учитывающий погрешности расчетной схемы. Конкретные численные значения коэффициента надежности по материалу приводятся в соответствующих СНиПах.

В отличие от строительных материалов за нормативную величину прочностных показателей грунтов по ГОСТ 20522 /1/ принимается нефакторизованная среднеэкспериментальная величина с обеспеченностью всего 50%: $X_n = X_M$.

Расчетное значение показателей грунтов получают делением нормативного значения на коэффициент надежности по грунту γ_g :

$$X = X_n / \gamma_g \quad (2)$$

В качестве коэффициента надежности по грунту γ_g принимается вышерассмотренный статистический фактор γ при заданной доверительной вероятности. Доверительная вероятность α расчетных значений характеристик грунтов принимается при расчетах оснований по несущей способности $\alpha = 0,95$, по деформациям $\alpha = 0,85$. Расчетные значения прочностных характеристик и удельного веса грунтов для расчетов по несущей способности обозначаются c_b , ϕ_I и γ_b , а для расчетов по деформациям – c_{II} , ϕ_{II} и γ_{II} . Таким образом, отечественный коэффициент надежности по грунту охватывает только статистические погрешности испытаний.

Согласно СНиП /3, 4/ расчет оснований по несущей способности производится исходя из условия

$$F \leq \gamma_c F_u / \gamma_n, \quad (3)$$

где F – расчетная нагрузка на основание; F_u – сила предельного сопротивления основания; γ_c – коэффициент условий работы, принимаемый равным от 0.8 для сильновыветрелых скальных грунтов до 1.0 для песков; γ_n – коэффициент надежности по назначению сооружения, принимаемый от 1,1 до 1,2.

Сила предельного сопротивления основания F_u является функцией расчетных характеристик грунта основания X (а именно c_b , ϕ_I и γ_I), которые по уравнению (2) представляют собой нормативные значения, деленные на коэффициент надежности по грунту:

$$F_u = F_u\{X\} = F_u\{X_n / \gamma_g\}. \quad (4)$$

Подставляя уравнение (4) в (3), получим условие устойчивости в развернутом виде:

$$F \leq \gamma_c F_u \{X_n / \gamma_g\} / \gamma_n. \quad (5)$$

Коэффициенты надежности в правой части выражения (5) учитывают возможные отклонения несущей способности основания. Причинами этих отклонений могут быть статистические погрешности определения характеристик грунтов, учитываемые коэффициентом надежности по грунту γ_g , а также множество иных неопределенностей. Среди них:

- возможные неточности в положении границ расчетных геологических элементов;
- систематические ошибки в определении характеристик грунтов (например, известна разница в значениях угла внутреннего трения при испытаниях методом прямого сдвига и трехосных испытаниях с разными значениями параметра Лоде; условия дренирования лабораторных образцов радикально отличаются от условий в натуре; процедуры отбора проб и подготовки образцов для испытаний сказываются на определяемых показателях, частично объясняя масштабный эффект);
- используемые при определении несущей способности модели грунта и расчетные схемы заведомо являются приближенными.

Перечисленные и иные погрешности в оценке несущей способности охватываются коэффициентами надежности по условиям работы $\gamma_c=0,8 \dots 1,0$ и по ответственности сооружения $\gamma_n=1,1 \dots 1,2$.

В практике отечественного строительства определение характеристик грунтов обычно выполняют специализированные изыскательские организации. Они же проводят статистическую обработку результатов и определяют коэффициент надежности по грунту, нормативные и расчетные значения характеристик. ГОСТ /1/ требует минимум 6 опытных определений для статистической обработки, и изыскательские организации таким количеством испытаний грунта одного инженерно-геологического элемента обычно и ограничиваются. При определении прочностных показателей обычно коэффициент вариации результатов близок к 0,2. Такому коэффициенту вариации при 6 испытаниях и достоверной

вероятности 95% соответствует коэффициент надежности по грунту $\gamma_g=1,2$. Введение в геотехнические расчеты такой величины коэффициента надежности по грунту удорожает проектные решения. Между тем существует очень простой способ снижения величины коэффициента надежности по грунту: увеличить число испытаний. При тех же значениях коэффициента вариации и достоверной вероятности увеличение числа испытаний до 20 снижает необходимый коэффициент надежности по грунту до величины $\gamma_g=1,09$, а при 60 испытаниях $\gamma_g=1,045$. Получаемая при таком снижении величины γ_g экономия на размерах фундаментов многократно превзойдет затраты на дополнительные испытания, и при наличии материальной заинтересованности в экономичности проектных решений изыскательские организации увеличивали бы число испытаний грунта несущего слоя. Таким образом, теоретически коэффициент надежности по грунту может быть снижен до величины, сколь угодно близкой к 1,0. При этом нормативные X_n и расчетные X показатели свойств грунта сколь угодно сближаются.

Подставляя в уравнение (5) наименее консервативные значения коэффициентов $\gamma_c=1,0$; $\gamma_g=1,0$; $\gamma_n=1,1$, получаем наиболее смелую оценку несущей способности грунтового основания по отечественным нормативам

$$F \leq F_u \{X_n\} / 1,1. \quad (6)$$

Таким образом, согласно отечественным нормам сила предельного сопротивления основания F_u , вычисленная при нормативных (среднеэкспериментальных) показателях грунтов, должна, по меньшей мере, в 1,1 раза превосходить расчетную нагрузку на основание. Величина 1,1 может трактоваться как минимально возможный результирующий коэффициент запаса несущей способности основания по отношению к расчетной нагрузке. Имея в виду широкий круг погрешностей, учитываемых этим коэффициентом, можно сказать, что он оказался очень невелик. Опасно невелик. Отметим также, что этот показатель не зависит напрямую от свойств грунта и параметров фундамента.

2. ЕВРОПЕЙСКАЯ ПРАКТИКА

ЕК7 на месте отечественных терминов «нормативный» и «расчетный» использует термины «характеристический» (characteristic) и «проектный» (design). Характеристической величине показателя грунта X_k дается такое определение: «Характеристическое значение геотехнического параметра должно быть выбрано как осторожная оценка его средней величины. Если используются статистические методы, характеристическое значение параметра должно иметь обеспеченность 95%».

Таким образом, по ЕК7 характеристическое значение параметра грунта (удельного веса, модуля деформаций, показателей прочности) есть факторизованная среднэкспериментальная величина, как и параметров строительных материалов. «Характеристический» показатель грунта в ЕК7 по своей сущности эквивалентен «расчетному» показателю в отечественных нормах.

Проектное (design) значение параметра грунта X_d получается делением характеристической величины на коэффициент надежности по грунту: $X_d = X_k / \gamma_g$. Однако, смысл коэффициента надежности по грунту γ_g совершенно иной, нежели в отечественных документах. Здесь γ_g уже не зависит от статистики испытаний, а назначается директивно для охвата неточности расчетной схемы и иных погрешностей, учитываемых в отечественной формуле (3) коэффициентом условий работы. Таким образом, проектные показатели прочности грунтов, как и строительных материалов, учитывают как статистические погрешности испытаний, так и все погрешности расчетной схемы.

Условие отсутствия предельного состояния в ЕК7 имеет практически тот же вид, что и в СНиП:

$$F_d \leq R_d, \quad (7)$$

где F_d – проектная нагрузка; проектное сопротивление основания

$$R_d = R\{X_d\} = R\{X_k / \gamma_g\} \quad (7a)$$

Значение коэффициента надежности по грунту ЕК7 устанавливает равным $\gamma_g = 1,25$ для сцепления и $\text{tg } \varphi$.

Подставляя это значение коэффициента надежности в уравнения (7a) и далее в уравнение (7), получаем численную оценку необходимого сопротивления (несущей способности) грунтового основания по ЕК7 по отношению к проектной нагрузке F_d :

$$F_d \leq R\{X_k / 1,25\}. \quad (8)$$

Коэффициент надежности по грунту $\gamma_g = 1,25$ в формуле (8) вводится в показатели прочности грунта и снижает величину сопротивления основания $R\{X_k / 1,25\}$ не в 1,25 раза, а по-разному в зависимости от свойств грунта и параметров фундамента.

По ЕК7 (как и по СНиП /3/) сопротивление R основания ленточного фундамента определяется формулой для его удельной величины

$$R/bl = N_\gamma b \gamma + N_q \gamma d + N_c c, \quad (9)$$

где b, l, d – ширина, длина и глубина заложения подошвы фундамента; γ, c, φ – удельный вес, сцепление и угол внутреннего трения грунта; N_γ, N_q, N_c – коэффициенты несущей способности.

ЕК7 приводит формулы для вычисления коэффициентов N_γ, N_q, N_c :

$$\begin{aligned} N_\gamma &= (N_q - 1) \text{tg } \varphi, \\ N_q &= e^{\pi \text{tg } \varphi} \text{tg}^2 (45^\circ + \varphi/2), \\ N_c &= (N_q - 1) \text{ctg } \varphi. \end{aligned}$$

Не претендуя на исчерпывающий анализ, рассмотрим снижение сопротивления ленточного фундамента с шириной подошвы и глубиной заложения 2 м в песке и суглинке при введении коэффициента надежности по грунту $\gamma_g = 1,25$. Удельный вес грунтов 18,0 кН/м³. Характеристические X_k и проектные X_d показатели прочности грунтов приведены в столбцах 3 и 4 таблицы. Поскольку на коэффициент надежности делится не угол внутреннего трения, а его тангенс, величина проектного значения угла в 5-м столбце вычисляется по формуле $\varphi = \text{arctg}(\text{tg } \varphi)$. Результаты расчетов по формуле (9) при характеристических и проектных показателях грунтов приведены в столбце 6 таблицы. В столбце 7 таблицы приведено соотношение несущей способности при характеристических и проектных свойствах грунтов, то есть результирующий коэффициент

запаса, достигаемый введением коэффициента надежности по грунту.

Таблица

грунт	свойства	C , кПа	$\operatorname{tg}\varphi$	arctg ($\operatorname{tg}\varphi$)	R_k/bl , кПа	R_k/R_d
1	2	3	4	5	6	7
Песок	X_k	4,0	0,728	36°	$R_k/bl=2542,7$	2,24
	$X_d=X_k/1,25$	3,2	0,582	30,35°	$R_d/bl=1135,0$	
Сугл.	X_k	12,0	0,213	12°	$R_k/bl=232,1$	1,39
	$X_d=X_k/1,25$	9,6	0,170	9,67°	$R_d/bl=166,7$	

Результирующий коэффициент запаса оказался равным 2,24 в песке с углом внутреннего трения 36° и 1,39 в суглинке с углом внутреннего трения 12°.

Таким образом, по методике ЕК7 результирующий коэффициент запаса оказался, во-первых, зависим от прочностных показателей грунтов (и параметров фундамента), во-вторых – существенно выше, чем по отечественной методике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Смысл и назначение коэффициента надежности по грунту в отечественных нормативных документах и европейских нормах совершенно различны. По отечественным нормам этот коэффициент охватывает разброс свойств грунтов в пределах инженерно-геологического элемента (ИГЭ), и его конкретная численная величина однозначно определяется числом выполненных испытаний, коэффициентом вариации их результатов и желаемой вероятностью определяемого параметра. Увеличивая число испытаний, численная величина коэффициента может быть снижена до величины $\gamma_g=(1+\delta)$, где δ – наперед заданная сколь угодно малая величина. Поскольку снижение величины коэффициента надежности по грунту повышает экономичность геотехнических проектов, есть прямой смысл в задании на инженерно-геологические изыскания директивно указывать его максимально приемлемую величину, например, $\gamma_g=1,1$, и исходя из нее определять необходимое число испытаний.

Все иные возможные погрешности, так или иначе связанные с прочностными характеристиками, такие как неточность границ

ИГЭ, систематические ошибки испытаний, приближенность расчетных схем и т.п., по отечественным нормам в расчетные показатели грунтов c и φ не вводятся, а охватываются общим коэффициентом условий работы.

Минимально возможный результирующий коэффициент запаса несущей способности основания по отечественной методике оказался равным 1,1, что представляется опасно малой величиной. (Примечание: Впрочем, возникновение реальной опасности такого рода маловероятно, так как в отличие от мировой практики отечественные нормы /3, 4/ предписывают выполнять расчет оснований в большинстве случаев не по несущей способности, а по так называемому «расчетному сопротивлению грунта основания», что приводит, напротив, к неоправданно высоким запасам несущей способности /10/.)

По Европейским нормам геотехнического проектирования ЕК7 среднеэкспериментальные показатели грунтов c и φ понижаются дважды. Первый раз они понижаются при назначении их характеристических значений с обеспеченностью 95%. Второй раз показатели понижаются при назначении их проектных значений делением на директивный коэффициент надежности по грунту $\gamma_g=1,25$ для учета приближенности расчетной схемы и иных погрешностей; при этом коэффициент запаса несущей способности основания значительно превышает величину введенного коэффициента надежности по грунту.

Представляется целесообразным в отечественных нормативных документах принять единый принцип определения нормативных и расчетных показателей прочности строительных материалов и грунтов, что сблизит отечественные нормативы с европейскими.

Список литературы

- ГОСТ 20522–96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
ГОСТ 27751–88. Надежность строительных конструкций и оснований.
СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений.
СНиП 2.02.02–85. Основания гидротехнических сооружений.

EN 1997-1:2003 (E); CEN/TC 250. Eurocode 7 Geotechnical design – Part 1: General rules. Final draft. 2003. 167 p.

Ильичев В. А., Фадеев А. Б. Описание европейских правил геотехнического проектирования. Реконструкция городов и геотехническое строительство. N5, 2003. (URL: www.georec.spb.ru)

Р. Франк. Еврокод 7 – Европейские нормы геотехнического проектирования. Реконструкция городов и геотехническое строительство. N9, 2005. (URL: www.georec.spb.ru)

А. Б. Фадеев, В. А. Лукин. Сопоставление методик СНиП и ЕК7 при расчете оснований фундаментов мелкого заложения. Основания, фундаменты и механика грунтов. №4. 2006