

№3, 2000

МЕТОД ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ В РОССИЙСКИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ

Фадеев А.Б.

Статья представляет собой текст национального доклада от России, представленный к заседанию комиссии по предельному равновесию грунтов в рамках Международного конгресса по геотехническому строительству GeoEng2000, Мельбурн, Австралия, ноябрь 2000 г. Доклад содержит краткий обзор российских нормативных документов по использованию метода предельного равновесия при проектировании геотехнических объектов.

1 ВВЕДЕНИЕ

Проектирование объектов строительства и выполнение строительных работ в России регулируется Строительными нормами и правилами (СНиП).

Метод предельного равновесия грунтов широко представлен в правилах проектирования поверхностных и подземных сооружений промышленного, гражданского, гидротехнического, транспортного назначения и других, что отражено в главах СНиП, регламентирующих различные виды геотехнического строительства [1-9].

Ниже приводится конспективное изложение основных примеров использования методов предельного равновесия в СНиП.

Расчет грунтовых оснований и сооружений производится по двум группам предельных состояний: по *первой* – по несущей способности и по *второй* – по деформациям.

Достижение первого предельного состояния означает сдвиг, провал, разрушение объекта. Сооружение становится непригодным к эксплуатации. Расчеты по первому предельному состоянию выполняются методом предельного равновесия.

Достижение второго предельного состояния означает возникновение в грунтовом сооружении или основании деформаций, нарушающих нормальную эксплуатацию объекта. Расчеты по второму предельному состоянию выполняются методами теории упругости или иными приемами расчета деформаций грунтов под действием нагрузки. Для определения грунтовых нагрузок в расчетах по второму предельному состоянию используется метод предельного равновесия.

Очевидно, что достижение первого предельного состояния приводит к разрушению объекта, оно происходит при более высоких нагрузках и является более опасным, чем достижение второго предельного состояния.

2 НАГРУЗКИ

Различают нагрузки:

- постоянные (вес конструкций, грунта и др.),
- временные (оборудование, снег и др.),
- кратковременные (ветер, подвижное оборудование и др.),
- особые (сейсмические, аварийные).

В *основное сочетание* входят постоянные, временные и кратковременные нагрузки; в *особое сочетание* входят постоянные, временные, кратковременные и одна из особых нагрузок.

Собранная нагрузка называется *нормативной*. Нормативная нагрузка, умноженная на коэффициент безопасности по нагрузке, называется *расчетной* нагрузкой.

Расчет сооружений и оснований по второму предельному состоянию (по деформациям) производится на основное сочетание нагрузок с коэффициентом надежности по нагрузке $g_f = 1$.

Расчет сооружений и оснований по первому предельному состоянию (по несущей способности) выполняется на основное и особое сочетание нагрузок с коэффициентом надежности $g_f = 1 - 1.6$. Значения g_f зависят от типа нагрузки и конструкции и приводятся в [1].

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ

Основными параметрами, определяющими устойчивость грунтовых сооружений и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики грунтов (угол внутреннего трения j , сцепление c , модуль деформаций E).

Характеристики грунтов должны как правило определяться их непосредственными испытаниями. Нормативные (средние экспериментальные) и расчетные значения характеристик грунтов устанавливаются на основе статистической обработки результатов испытаний.

Методы испытаний на сдвиг, одноосное и трехосное сжатие, зондирование, вращательный срез и другие виды испытаний, методы статистической обработки результатов испытаний определены Государственными стандартами (ГОСТами). Перечень ГОСТов на испытания грунтов приведен в [3].

Все расчеты грунтовых оснований и сооружений должны выполняться с использованием расчетных значений характеристик грунтов X , определяемых по формуле $X = X_o g_g$, где X_o – нормативное значение данной характеристики, g_g – коэффициент надежности по грунту.

Коэффициент надежности по грунту g_g при вычислении расчетных значений прочностных характеристик (сцепления и угла внутреннего трения, а также плотности грунта) устанавливается в зависимости от изменчивости этих характеристик, числа определений и значения доверительной вероятности a [11]. Для прочих характеристик грунтов допускается принимать $g_g = 1$.

Доверительная вероятность a расчетных значений характеристик грунтов принимается при расчетах по первому предельному состоянию (по несущей способности) $a = 0.95$, а по второму предельному состоянию (по деформациям) – $a = 0.85$.

Расчетные значения характеристик грунтов c , j и g , соответствующие различным значениям доверительной вероятности, для расчетов по первому предельному состоянию (по несущей способности) обозначаются c_I, j_I и g_I , а по второму предельному состоянию (по деформациям) – c_{II}, j_{II} и g_{II} .

[2] и другие главы СНиП содержат таблицы для выбора расчетных механических свойств грунтов по их физическим характеристикам (по пористости песчаных грунтов и по пористости и консистенции глинистых грунтов).

4 РАСЧЕТ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО ПЕРВОМУ ПРЕДЕЛЬНОМУ СОСТОЯНИЮ (ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ)

4.1. Расчет оснований фундаментов

Целью расчета является обеспечение прочности и устойчивости основания, а также недопущение сдвига сооружения по подошве и его опрокидывания [3,4]. Принимаемая в расчете схема разрушения основания должна быть как статически, так и кинематически возможна для данного воздействия и конструкции фундамента или сооружения.

Расчет оснований по несущей способности производится исходя из условия

$$F \leq g_c F_u / g_n, \quad (4.1)$$

где F - расчетная нагрузка на основание,

F_u – сила предельного сопротивления основания,

g_c – коэффициент условий работы, принимаемый равным от 0.8 для сильновыветрелых скальных грунтов до 1.0 для песков,

g_n – коэффициент надежности по назначению сооружения, принимаемый от 1.1 до 1.2.

Вертикальная составляющая силы предельного сопротивления основания, сложенного скальными грунтами, независимо от глубины заложения фундамента, вычисляется по формуле

$$N_u = R_c b' l', \quad (4.2)$$

где R_c – расчетное значение предела прочности на одноосное сжатие скального грунта,

b' и l' – соответственно приведенная ширина и длина фундамента, вычисляемые по формулам:

$$b' = b - 2e_b; \quad l' = l - 2e_l, \quad (4.3)$$

здесь e_b и e_l – соответственно эксцентриситеты приложения нагрузки в направлении поперечной и продольной осей фундамента.

Сила предельного сопротивления основания, сложенного нескальными грунтами в стабилизированном состоянии, должна определяться исходя из условия, что соотношение между нормальными s и касательными t напряжениями по всем поверхностям скольжения, соответствующее предельному состоянию основания, подчиняется зависимости

$$t = s \operatorname{tg} j_I + c_I, \quad (4.4)$$

где j_I и c_I - расчетные значения угла внутреннего трения и сцепления грунта.

Сила предельного сопротивления основания, сложенного водонасыщенными пылевато-глинистыми и биогенными грунтами, должна определяться с учетом возможности нестабилизированного состояния основания за счет избыточного давления в поровой воде u . При этом соотношение между нормальными s и касательными t напряжениями принимается по зависимости

$$t = (s - u) \operatorname{tg} j_I + c_I \quad (4.5)$$

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления основания, сложенного нескальными грунтами в стабилизированном состоянии, допускается определять по формуле (4.6), если фундамент имеет плоскую подошву:

$$N_u = b' l' (N_g x_g b' g_I + N_q x_q d g_I + N_c x_c c_I), \quad (4.6)$$

где b' и l' – обозначения те же, что в формуле (4.2);

N_g , N_q , N_c – безразмерные коэффициенты, определяемые по таблице в зависимости от угла внутреннего трения грунта и угла наклона нагрузки на основание;

g_I и c_I – расчетные значения удельного веса и сцепления грунта;

d - глубина заложения фундамента;

x_g, x_q, x_c - коэффициенты формы фундамента, определяемые по формулам:

$$x_g = 1 - 0.25 b'/l'; \quad x_q = 1 + 1.5 b'/l';$$

$$x_c = 1 + 0.5 b'/l'.$$

Формула (4.6) – это вариант известной трехчленной формулы Терцаги.

Расчет фундамента на сдвиг по подошве производится исходя из условия

$$S F_{s,o} \leq (g_c S F_{s,r}) / g_n,$$

где $S F_{s,o}$ и $S F_{s,r}$ - суммы проекций на плоскость скольжения соответственно расчетных сдвигающих и удерживающих сил, определяемых с учетом активного и пассивного давлений грунта на боковые грани фундамента;

g_c и g_n – обозначения те же, что и в формуле (4.1).

Расчет оснований по несущей способности допускается выполнять графоаналитическими методами (круглоцилиндрических или ломаных поверхностей скольжения), если:

- а) основание неоднородно по глубине;
- б) пригрузка основания с разных сторон фундамента неодинакова;
- в) сооружение расположено на откосе или вблизи откоса;
- г) возможно возникновение нестабилизированного состояния грунтов основания.

4.2. Расчет свайных фундаментов

Расчет свайных фундаментов и их оснований должен быть выполнен по первому предельному состоянию - по несущей способности грунта основания свай [5].

Одиночную сваю в составе фундамента и вне его по несущей способности грунтов основания следует рассчитывать исходя из условия

$$N \leq F_d / g_k,$$

где N – расчетная нагрузка, передаваемая на сваю;

F_d - расчетная несущая способность грунта основания одиночной сваи, называемая в дальнейшем *несущей способностью сваи*;

Коэффициент надежности g_k принимается равным:

- 1,2 – если несущая способность сваи определена полевым испытанием статической нагрузкой,
- 1,25 – если несущая способность сваи определена по результатам статического зондирования или по результатам динамических испытаний свай,
- 1,4 – если несущая способность сваи определена расчетом.

4.2.1. Расчет несущей способности свай

Несущую способность забивной и буровой сваи, опирающейся на скальный грунт, следует определять по формуле

$$F_d = RA,$$

где A – площадь опирания на грунт сваи.

Расчетное сопротивление грунта R под нижним концом сваи-стойки следует принимать:

а) для забивных свай, опирающихся на скальные и малосжимаемые грунты, $R = 20\,000$ кПа,

б) для буровых свай, заделанных в скальный грунт, - по формуле

$$R = R_{c,n} (l_d / d_f + 1.5) / g_g,$$

где $R_{c,n}$ – нормативное значение предела прочности на одноосное сжатие скального грунта,

g_g – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным 1,4,

l_d – расчетная глубина заделки сваи в скальный грунт,

d_f – диаметр заделанной в скальный грунт части сваи.

Несущую способность висячей забивной и буровой сваи следует определять как сумму расчетных сопротивлений грунтов основания под нижним концом сваи и на ее боковой поверхности по формуле

$$F_d = g_{cR} RA + u \sum g_{cf} f_i h_i,$$

где R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, принимаемое по таблице;

A – площадь опирания на грунт сваи,

u – периметр поперечного сечения сваи,

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания по боковой поверхности сваи, принимаемое по таблице,

h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи,

g_{cR} , g_{cf} – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и по боковой поверхности сваи, учитывающие влияние способа устройства сваи на расчетное сопротивление грунта и принимаемые по таблице.

4.3. Определение бокового давления грунта

4.3.1. Активное давление грунта

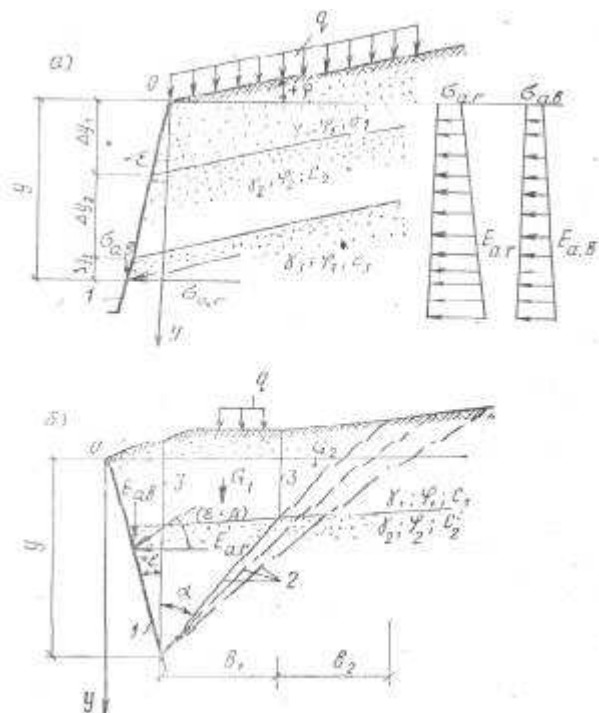


Рис.1 Схемы к расчету активного давления грунта: а – аналитическим, б – графическим способом

В простых случаях (при плоской поверхности грунта, равномерно распределенной нагрузке q и и слоях грунта, параллельных поверхности), рис.1а, горизонтальная $s_{a,z}$ и вертикальная $s_{a,v}$ составляющие интенсивности активного давления на единицу высоты на глубине y определяются по формулам

$$s_{a,z} = (S g_i D y_i + q k_1) l_{a,z} + c(l_{a,z} k_1 - k_2) / \operatorname{tg} j,$$

$$s_{a,v} = s_{a,z} \operatorname{tg}(e + d),$$

где $l_{a,z}$ – коэффициент горизонтальной составляющей активного давления, определяемый по формуле

$$l_{a,z} = \left\{ \frac{\cos(j - e)}{\cos e} \left[1 + \left(\frac{\sin(j + d)}{\sin(j - r) / \cos(e + d) / \cos(e - r)} \right)^{1/2} \right]^2 \right\}^2,$$

g_i , $D y_i$ – соответственно объемный вес и высота i -го слоя грунта у расчетной поверхности в пределах высоты y ,

j и c – угол внутреннего трения и сцепление грунта, принимаются значения j_1 и c_1 при расчетах по первому предельному состоянию и j_2 и c_2 при расчетах по второму предельному состоянию.

d – угол трения грунта на контакте с расчетной плоскостью,

$$k_1 = \cos e \cos r / \cos(e - r),$$

$$k_2 = \cos(e + d) / \cos e / \cos d.$$

В сложных случаях (при неплоских и не параллельных границах слоев грунта, неплоской поверхности, неравномерной нагрузке и др.). рис.1б, допускается определять активное давление грунта графическим способом.

4.3.2. Пассивное давление грунта

При плоской поверхности грунта, равномерно распределенной нагрузке q и слоях грунта, параллельных поверхности (рис.2)

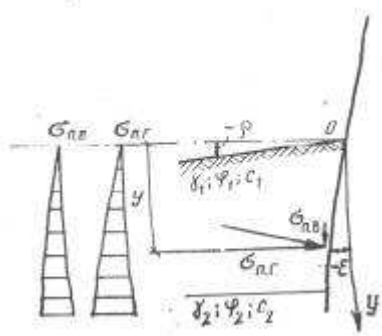


Рис.2 Схема к определению пассивного давления грунта

горизонтальная $S_{n.g}$ и вертикальная $S_{n.v}$. составляющие интенсивности пассивного давления на единицу высоты на глубине y определяются исходя из предположения об образовании криволинейной поверхности выпора по формулам

$$S_{n.g} = s_y l_{n.g} + c [l_{n.g} - \cos(e + d) / \cos d / \cos e] / \operatorname{tg} j ;$$

$$S_{n.v} = S_{n.g} \operatorname{tg}(e + d),$$

где $l_{n.g}$ – коэффициент горизонтальной составляющей пассивного давления грунта, определяемый при $r < j$ и малом (до $5-7^\circ$) наклоне расчетной поверхности e по формуле

$$l_{n.g} = \left\{ \frac{\cos(j - e)}{\cos e} / \left[1 - \left(\frac{\sin(j + b) \sin(j + r)}{\cos(e + b) \cos(e - r)} \right)^{1/2} \right]^2 \right\};$$

4.4. Давление грунта на обделку тоннелей

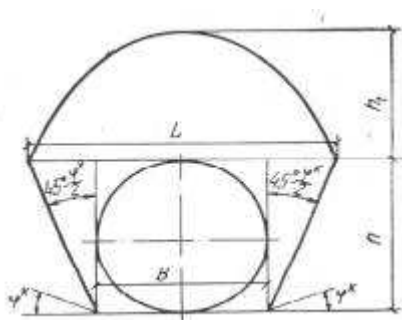


Рис.3. Схема к определению давления на обделку тоннеля

Нагрузки от нормативного горного давления на тоннельную обделку (рис.3) принимают равномерно распределенной по пролету (диаметру) и высоте выработки [7]. При этом нормативное горное давление вертикальное q и горизонтальное p следует определять по формулам

$$q = K_p g h_l ,$$

$$p = g (K_p h_l + 0.5 h) \operatorname{tg}^2 (45^\circ - j^k / 2),$$

где K_p – коэффициент работы грунтового массива, принимаемый равным от 1 до 2.2 в зависимости от вида грунта,

g, j^k - удельный вес и «кажущийся» угол внутреннего трения грунта.

4.5. Устойчивость откосов



Рис.4. Схема к расчету устойчивости откоса

Устойчивость откосов грунтовой плотины [8] должна быть проверена расчетом по различным возможным поверхностям скольжения, при этом соотношение сумм расчетных обобщенных удерживающих R и сдвигающих F сил на наиболее опасной (обычно круглоцилиндрической - рис.4) поверхности должно удовлетворять условию

$$g_{fc} F = (g_c / g_n) R,$$

где величины F и R рассчитаны с учетом коэффициенты надежности по нагрузке g_f и по грунту g_g ,

g_n , g_{fc} , g_c - соответственно коэффициенты ответственности сооружения (1,2 – 1,5), сочетания нагрузок (0,9 – 1,0), условий работы (0,95 – 1,0).

4.6. Давление грунта насыпи на трубу

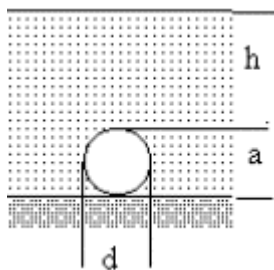


Рис.5. Схема к расчету давления грунта на трубу под насыпью

Нормативное давление грунта на трубу под насыпью [9] определяется по формулам

а) вертикальное

$$P_v = C_v g_n h,$$

б) горизонтальное

$$P_n = g_n h t_n,$$

где t_n - коэффициент горизонтального (активного) давления,

C_v - коэффициент вертикального давления,

g_n и j_n - нормативный удельный вес и угол внутреннего трения грунта насыпи.

5 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ СНиП

Российские Строительные нормы и правила (СНиП) представляют собой достаточно полную и

завершенную систему с общей концепцией, терминологией, требованиями, правилами проектирования и производства строительных работ. Они разрабатываются и регулярно обновляются с учетом зарубежных и международных подобных документов. Выполнение требований СНиП и ГОСТов является обязательным, в том числе и для иностранных компаний, работающих в России.

Разработку СНиП ведет правительственный орган Госстрой силами подведомственных ему специализированных институтов с привлечением иных заинтересованных организаций.

Всемирная торговая организация (The World Trade Organisation) для облегчения международного сотрудничества рекомендует, чтобы национальные технические нормативы регламентировали преимущественно эксплуатационные требования к объектам (скажем, такие как осадки, крены и т.п.), а не методы проектирования, и были бы основаны на международных нормативах, если таковые существуют. Отдельные главы СНиП не всегда следуют этим рекомендациям, порой излишне регламентируют порядок расчетов, что сдерживает, например, применение численных методов. При очередных корректировках геотехнических глав СНиП целесообразно теснее их увязать с европейскими нормами (Еврокодами).

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия.
2. СНиП 1.02.07-87. Инженерно-геологические изыскания
3. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений.
4. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений.
5. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты.
6. СНиП 2.06.07-87 Подпорные стены, судоходные шлюзы.
7. СНиП П-44-78 Тоннели железнодорожные и автодорожные
8. СНиП 2.06.05.84. Плотины из грунтовых материалов
9. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы
10. ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований.
11. ГОСТ 20522-75. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик.