

Метод расчета устойчивости борта котлована, укрепленного гибкой подпорной стеной и анкерами

А.Г. Малинин, академик МАУ,
П.А. Малинин, аспирант ПГТУ,
С.А. Чернопазов, профессор
ЗАО «ИнжПроектСтрой»

Расчет гибких подпорных стен, являющихся ограждением котлована, состоит из следующих этапов [1]:

- расчет прочности элементов ограждения;
- расчет общей устойчивости системы «грунт-ограждение котлована».

При этом следует иметь в виду, что прочность элементов ограждения не является достаточным условием общей устойчивости подпорной стены из-за потенциальной возможности потери устойчивости по глубокой линии скольжения.

В настоящей работе предлагается метод расчета устойчивости укрепленного борта котлована по глубоким линиям скольжения, являющейся дальнейшим развитием метода Кранца [1].

1. Расчеты элементов ограждения котлована

Расчеты на прочность и устойчивость ограждения, укрепленного анкерами, выполняются при следующих допущениях:

- Укрепленный борт котлована находится в устойчивом состоянии. Данное предположение проверяется после обоснования типа ограждающей конструкции (например, ограждение из буровых свай, шпунтовое ограждение и т.д.).

- Давление грунта на ограждение по всей высоте борта котлована принимается как предельное активное давление грунтового массива.

- К силам, удерживающим ограждение, относятся силы, действующие в анкерах, распорной системе, а также реакция грунта, приложенная к части ограждения, заглубленной ниже дна котлована.

- Силы, действующие на заглубленную часть ограждения, являются упругой реакцией грунта или предельной (пластической) пассивной реакцией грунтового массива. Области, в которых реакция грунта достигает предельной величины, заранее неизвестны и подлежат определению.

- Предполагается, что корни анкеров расположены в устойчивой части грунтового массива, т.е. за границей возможной глубокой поверхности скольжения. Длины анкеров считаются не известными, так как на данном этапе расчетов не определено расположение опасной глубокой поверхности скольжения.

• Расчеты выполняются для части ограждения, протяженностью (в плане), равной шагу установки свай или других элементов ограждения.

Расчет гибкой подпорной стены (ограждения) выполняется по теории упругого изгиба балки постоянного или переменного сечения с учетом частичного разрушения в области действия растягивающих деформаций.

Результатами расчета являются изгибающий момент, продольные напряжения в ограждении, усилия в анкерах, реакции в распорной системе и заглубленной части ограждения.

Кроме того, в результате расчета можно оценить следующие расчетные параметры:

• запас прочности бетона (грунтобетона) в сжатой зоне элемента ограждающей конструкции в виде железобетонной (грунтоцементной) сваи или панели;

• запас прочности армирующих элементов;

• требуемую несущую способность анкеров по грунту;

• прочность грунтового массива вокруг заглубленной части ограждения.

Результаты расчета позволяют сделать вывод о допустимости, а также технико-экономической целесообразности применения предложенной конструкции для ограждения котлована.

После подбора наиболее эффективной конструкции ограждения решается задача об общей устойчивости борта котлована по глубокой поверхности скольжения и определении необходимой длине анкеров.

2. Оценка общей устойчивости борта котлована

Широкое применение при расчете общей устойчивости ограждения котлована с применением анкерных систем получил метод Кранца [1].

Несмотря на кажущуюся простоту подхода, изложение метода в нормативно-технической литературе не отличается строгостью и корректностью.

Даже не вникая подробно в детали расчетной схемы, можно заметить, что коэффициент устойчивости системы «стена – грунт – анкер» K_s не зависит от пассивной реакции грунта, залегающего ниже дна котлована.

С точки зрения приведенной в [1] расчетной схемы увеличение длины приведет к повышению коэффициента устойчивости K_s исключительно только за счет увеличения реакции ограждения, равной силе активного давления грунта на подпорную стену.

В каком состоянии находится грунт с другой стороны ограждения ниже дна котлована, есть ли этот массив вообще, или до какой отметки выкопан котлован – все это никакого влияния с точки зрения расчета на устойчивость ограждения не влияет. Другими словами, данная схема не учитывает второй важный фактор, а именно, величину заглубления свай, которая препятствует опрокидыванию ограждения и сползанию возможной призмы сдвига не учитывается.

Согласно методу, даже в случае, когда стена сооружена, а котлован еще не выкопан, но каким то образом в массиве устроили анкер с недостаточной (согласно расчету по методу Кранца) несущей способностью, грунтовый массив после устройства анкера может потерять устойчивость, что является абсурдом.

Уравнение равновесия сил в [2] записаны для предполагаемой призмы сдвига, находящейся в покое. Согласно известным законам механики, если механическая система находится в покое в инерциальной системе отсчета, то внешние по отношению к этой системе силы уравновешены и удовлетворяют любым правильно составленным уравнениям равновесия. В [1] к числу внешних сил, приложенных к призме сдвига, отнесена «несущая способность» анкера. Анкер взаимодействует с ограждением и массивом, вмещающим его корень. Таким образом, реакции анкера не приложены к призме сдвига и не могут быть включены в число внешних уравновешенных сил, приложенных к этой призме. Следовательно, уравнения равновесия для системы сил, действующих на призму сдвига, составлены неверно.

Метод Кранца, по сути, является альтернативным методом определения продольной силы в анкере (при этом без учета деформаций ограждения и влияния заглубления ограждения) при возникновении глубокой линии сдвига, проходящей через середину корня анкера.

Расчетная схема.

Предположим, что существует глубокая линия скольжения (след плоскости скольжения на вертикальном сечении), проходящая через конец сваи и ось анкера, так, что весь корень анкера находится в устойчивой части массива.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из предполагаемой призмы сдвига, ограждения и анкера. Разобьем эту механическую систему на две системы, показанные на рис. 1.

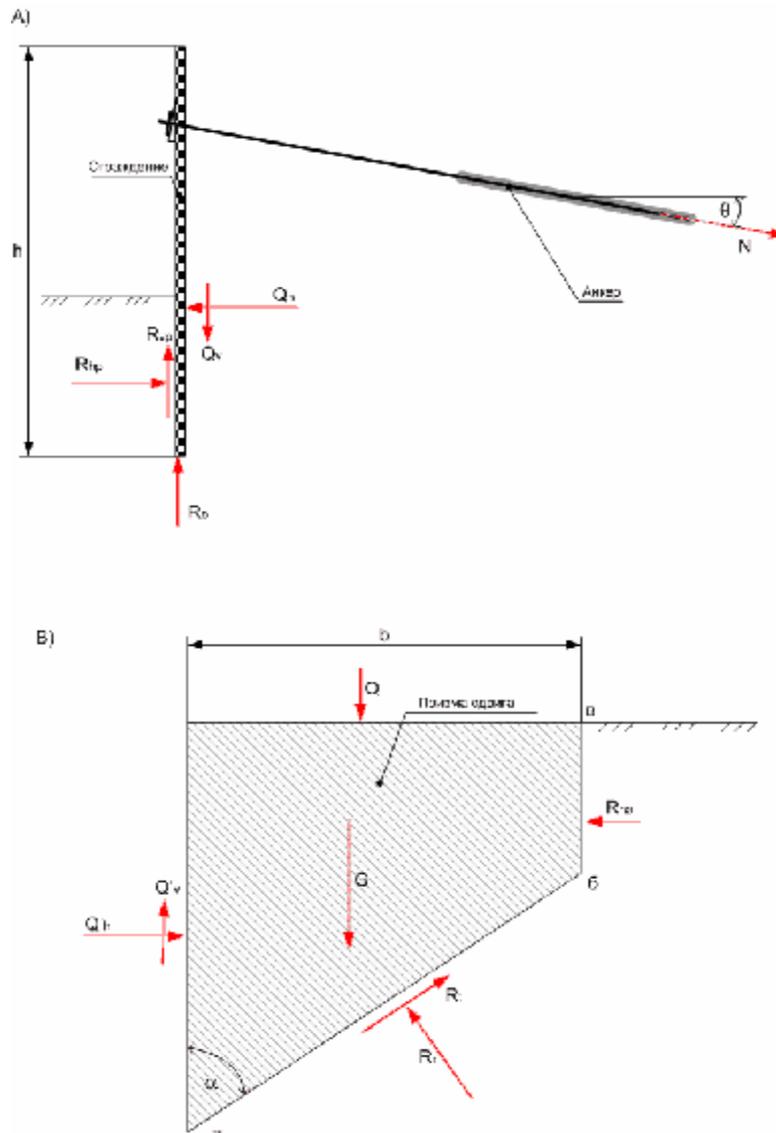


Рис. 1. Система внешних уравновешенных сил, приложенных:
 А) - к механической системе, состоящей из ограждения и анкера;
 В) - к предполагаемой призме сдвига.

Система уравновешенных сил, приложенных к системе А), рис. 1, включает следующие внешние силы:

R_{hp}, R_{vp} - главные векторы горизонтального и вертикального предельных пассивных давлений грунтов, залегающих под дном котлована;

N - реакция грунтового массива, приложенная к корню анкера, находящейся за границей призмы сдвига (т.е. в устойчивой части массива) и необходимая для равновесия сил, приложенных к механической системе, состоящей из ограждения и анкера при предельном состоянии грунта вокруг заглубленной части ограждения;

R_o - реакция грунта в основании свай;

Q_h, Q_v - горизонтальная и вертикальная силы давления призмы сдвига на ограждение.

Система уравновешенных сил, приложенных к призме сдвига В), рис. 1, включает следующие внешние силы:

G - главный вектор гравитационных сил, действующих на предполагаемую призму сдвига;

Q - главный вектор нагрузок от зданий, сооружений, транспортных средств и т.п.;

Q'_h, Q'_v - горизонтальная и вертикальная реакция ограждения на призму сдвига;

R_{ha} - главный вектор активного горизонтального давления справа на призму сдвига со стороны вмещающего грунта по линии $бв$. Отметим, что указанная часть границы призмы сдвига, вообще говоря, не известна. Например, ее можно было бы представить в виде части окружности, параболы, наклонной прямой или задать более сложной зависимостью. Но поскольку в любом случае она будет частью линии скольжения, силы, действующие на ней, будут удерживающими для призмы сдвига. В методе Кранца эти силы не учитываются в запас расчетного значения коэффициента устойчивости. Более того, эти силы заменяются на силу R_{ha} , «сталкивающую» неустойчивую часть массива в сторону котлована.

R_t, R_n - главные векторы сил сцепления и нормальной реакции по глубинной линии скольжения $аб$.

Вычисление сил

Q - вычисляется по заданным полосовым и равномерно распределенным нагрузкам для призмы сдвига толщиной, равной 1 м.

R_{ha} - вычисляются согласно указаниям [1] с учетом заданных полосовых и равномерно распределенных нагрузок, действующих левее точки a на поверхности единичной ширины.

G - вес призмы обрушения единичной толщины;

R_{hp}, R_{vp} - вычисляются согласно указаниям [2] для массива единичной толщины;

R_t - предельная сила сцепления, она равна силе трения. Эта сила складывается из двух составляющих

$$R_t = R_c + R_\phi = ab \cdot \langle C \rangle + R_n \cdot \langle \text{tg} \phi \rangle,$$

ab - длина глубинной линии скольжения, $\langle C \rangle$ - средневзвешенное по длине линии скольжения значение сцепления грунтов, $\langle \text{tg} \phi \rangle$ - средневзвешенный по длине линии скольжения коэффициент трения. Здесь и далее угловые скобки $\langle \rangle$ означают усреднение.

$Q_v = Q'_v$ и вычисляются по формуле

$$Q_v = \text{tg}(k \cdot \langle \varphi \rangle) Q_h,$$

где $\langle \varphi \rangle$ - средневзвешенный угол трения грунтов на контакте с ограждением, k - коэффициент со значением от 0 до 1 в зависимости от шероховатости поверхности стены [1].

Силы R_n, R_j, N, Q_h - заранее неизвестны и могут быть найдены из условия равновесия предельных сил и условия, что силы сцепления достигают своих предельных значений.

Уравнения равновесия

Сложим две неизвестные силы R_n и R_j , и заменим их действие главным вектором

$$R_f = R_n + R_j. \tag{1}$$

Для предельного равновесия призмы сдвига, либо при ее смещении по глубокой поверхности скольжения силы R_f, R_c, R_{hp} достигают своих предельных значений, чего нельзя сказать о силах R_{vp}, R_o . Направление линии действия предельной силы R_f определяется углом $\langle j \rangle$, который определяется равенством $\text{tg}\langle j \rangle = \langle \text{tg}j \rangle$. Направление предельной силы R_f показано на рис. 2.

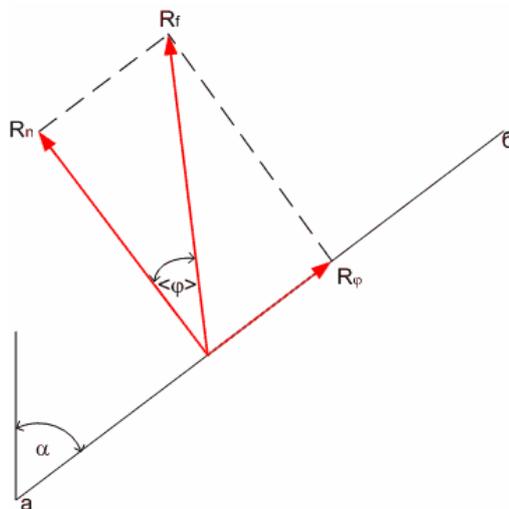


Рис. 2. Сложение сил на глубинной линии скольжения.

Для механической системы А) составим уравнение равновесия сил в проекции на ось Ox :

$$N_x - Q_h + R_{hp} = 0, \tag{2}$$

N_x - сумма проекций продольных сил в анкерах на ось Ox по всем ярусам из расчета на 1 пм ограждения.

Для призмы сдвига (см. рис. 1, В) составим два уравнения в проекциях.

Сумма проекций уравновешенных на ось Ox

$$Q'_h + R_c \sin \alpha - R_{ah} - R_f \sin \gamma = 0 \quad (3)$$

и сумма проекций уравновешенных сил на ось Oy

$$-Q - G + Q'_v + R_f \cos \gamma + R_c \cos \alpha = 0. \quad (4)$$

Дополнительные равенства

$$\gamma = \pi/2 - \varphi - \alpha, \quad Q_v = \text{tg}(k \cdot \langle \varphi \rangle) Q_h, \quad Q_v = Q'_v, \quad Q_h = Q'_h. \quad (5)$$

Исключаем из уравнений (3) и (4) неизвестную силу R_f и используя равенства (5) получим

$$Q_h = -\frac{R_x + R_y \text{tg} \gamma}{1 + \lambda_v \text{tg} \gamma}, \quad R_x = R_c \sin \alpha - R_{ah}, \quad R_y = -Q - G - R_c \cos \alpha, \quad \lambda_v = \text{tg}(k \cdot \langle \varphi \rangle). \quad (6)$$

Из уравнения (2) выражаем силу N_x и в полученное равенство подставляем первую формулу из (6):

$$N_x = -\frac{R_x + R_y \text{tg} \gamma}{1 + \lambda_v \text{tg} \gamma} - R_{ph}. \quad (7)$$

Возможны три типа значений искомой силы N_x , отыскиваемых по формуле (7):

1. $N_x = 0$. Призма сдвига совместно с ограждением удерживается в состоянии покоя за счет пассивной реакции грунтов, залегающих ниже дна котлована и силы сцепления по предполагаемой плоскости сдвига. Силы находятся в состоянии предельного равновесия.

2. $N_x > 0$. Для пребывания призмы сдвига в состоянии покоя требуется дополнительное усилие по горизонтальной оси Oх, направленное в противоположную сторону по отношению к предполагаемому сдвигу.

3. $N_x < 0$. Равновесие сил предельное, но при этом действие силы N_x направлено на сталкивание призмы по плоскости сдвига. В этом случае реакции анкеров следует принять $N_x = 0$.

Подбор длины анкера

В начале рассмотрим случай укрепления ограждения одним ярусом анкеров. Перед решением задачи известно направление будущего анкера, а его длина не известна и подлежит определению. Свободная длина анкера должна быть такой, чтобы корень анкера находился в устойчивой (по отношению к сдвигу) части массива. Так же не известна продольная сила, необходимая для устойчивости системы «Стена – грунт – анкер» из условия устойчивости по глубоким линиям скольжения.

Принимаем форму возможных призм сдвига такую же, как в методе Кранца и строим множество призм, неустойчивых к сдвигу по глубокой линии скольжения. Чтобы любая призма этого множества пребывала в состоянии покоя, требуется приложить силу $N > 0$ к корню анкера (или части корня), расположенного за границей призмы сдвига.

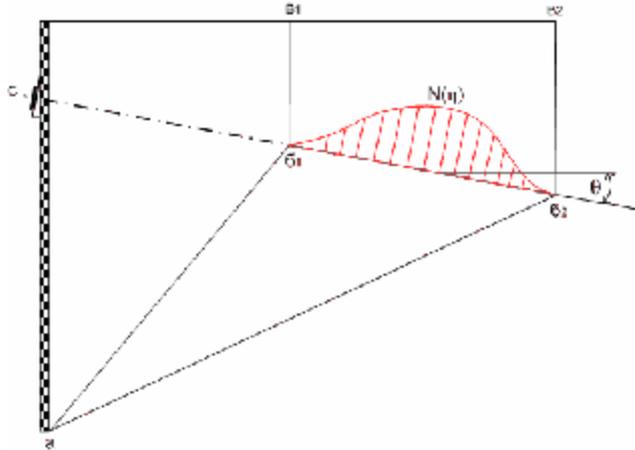


Рис. 3. Граница неустойчивой призмы находится между ломаными $a\bar{b}_1\bar{b}_2$ и $a\bar{b}_2\bar{b}_2$.

Предполагаемое множество неустойчивых призм показано на рис. 3. Для нахождения этого множества достаточно с помощью решений уравнения (7) найти крайние точки \bar{b}_1 и \bar{b}_2 на оси h из условия устойчивости призмы - $N = 0$.

Далее подбирается длина корня и общая длина анкера. Возможны три варианта устройства корня анкера:

1. Анкер выполняется в форме сваи - длина корня совпадает с длиной анкера;
2. Корень анкера расположен в устойчивом массиве, на рис. 3 правее точки \bar{b}_2 .
3. Часть корня анкера расположена в устойчивом массиве, другая часть - в призме сдвига.

В первом и последнем случаях часть корня анкера, расположенная в призме сдвига, не влияет на устойчивость укрепленного борта котлована. Эта часть анкера препятствует применению начального натяжения с целью управления смещением ограждения при разработке котлована с помощью предварительного натяжения анкера. Для анкера – сваи предварительное натяжение будет создавать только внутренние силы по отношению к механической системе «ограждение – неустойчивый массив – анкер», а не внешние силы (рис. 4). Единственным результатом применения предварительного натяжения в этом случае будет только увеличение продольной силы в анкере.

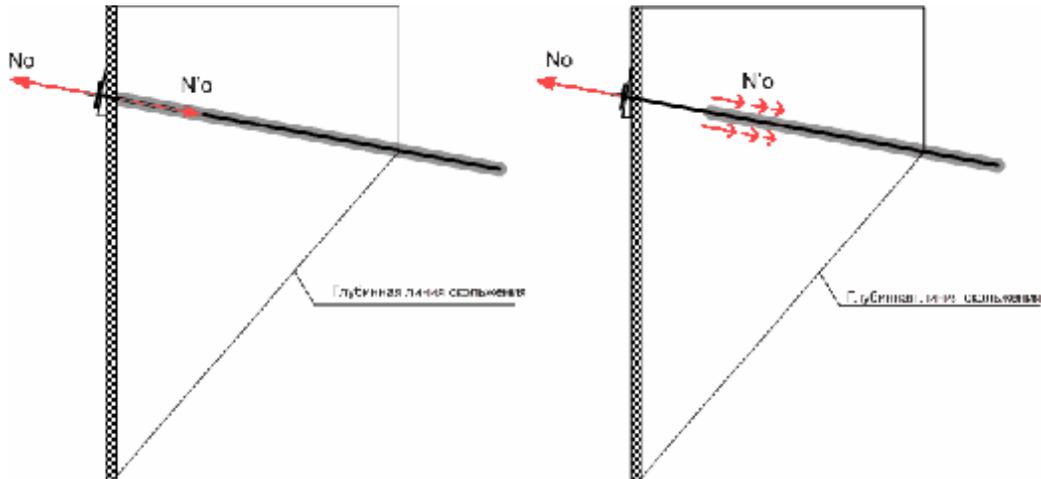


Рис. 4. Сила предварительного натяжения N_0 , приложенная к анкеру, и реакция N'_0 на предварительное натяжение

Второй случай, когда корень анкера расположен за границей возможных глубоких линий скольжения, является оптимальным по следующим характеристикам:

- При любой ориентации глубокой линии скольжения дополнительное усилие действует на весь корень, а не на часть корня; можно также применять предварительное натяжение анкера для управления величиной продольной силы в анкере и смещений ограждения при разработке котлована.

- Независимо от длины корня продольная сила N при предельном равновесии по любой глубокой линии скольжения приходится на часть корня (или весь корень), расположенный в устойчивом массиве.

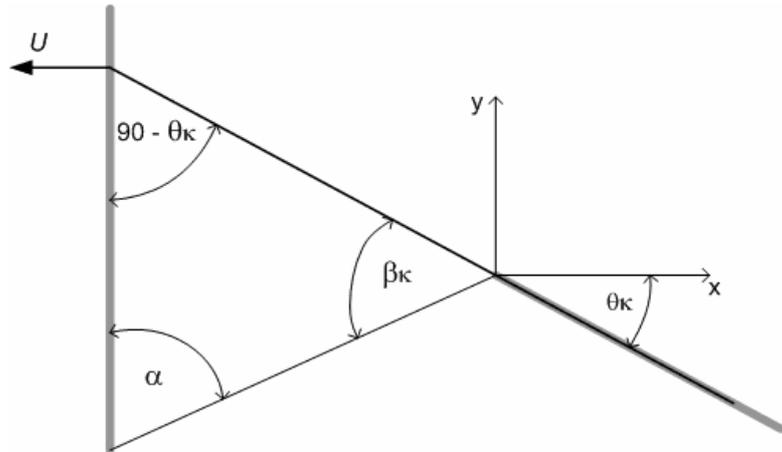
Общая длина анкера равна длине его части от ограждения до точки b_2 (свободная длина анкера), сложенной с длиной части анкера, расположенного в устойчивом массиве (эту часть анкера и нужно считать его корнем, который за счет сцепления с устойчивым массивом обеспечивает заданную величину продольной силы).

Максимально возможное расчетное продольное усилие в анкере при удержании призмы сдвига будет равно

$$N = \max_{\eta} N(\eta) . \quad (8)$$

Подбор длины анкеров при устройстве нескольких ярусов.

Будем полагать, что при поступательном смещении призмы сдвига по некоторой глубокой линии скольжения горизонтальное смещение ограждения равно U . Это смещение растягивает анкеры, порождая их упругие реакции N_k .



Запишем соотношения для определения продольных сил в анкерах при поступательном смещении неустойчивой призмы по глубокой линии сдвига: продольное усилие в произвольном анкере равно

$$N_k = c_k U \cos q_k, \quad (9)$$

проекция суммарной реакции анкеров на координатную ось Oх:

$$N_x = \sum_k N_{kx} = U \sum_k c_k \cos^2 q_k = c_x U, \quad (10)$$

где

$$c_x = \sum_k c_k \cos^2 q_k, \quad ,$$

c_k - продольная жесткость анкера, q_k - угол наклона анкера (см. рис. 5), U – горизонтальное смещение ограждения вместе с призмой сдвига.

Подставка в соотношение (7) равенства (10) дает формулу для горизонтального смещения ограждения

$$U = -\frac{1}{c_x} \left(\frac{R_x + R_y \operatorname{tg} \gamma}{1 + I_v \operatorname{tg} \gamma} + R_{ph} \right). \quad (11)$$

Формулы (11) и (9) позволяют рассчитать продольное усилие в анкере.

Предполагаемое призмы обрушения строятся для каждого яруса. Таким образом, множество неустойчивых призм в общем случае будет состоять из подмножеств, построенных для каждого яруса анкеров. Продольные силы в анкерах должны вычисляться для каждой неустойчивой призмы сдвига и из всех найденных значений в качестве расчетной силы следует принять максимальную.

Далее найдем свободную длину анкера для каждого яруса из условия, что корень анкера должен находиться в устойчивом массиве. Критерий подбора состоит в следующем: для каждого яруса минимальное значение свободной длины анкера определяется по границам ранее найденных призм обрушений так, чтобы корень не попал ни в одну призму обрушения. Геометрическая иллюстрация решения для ситуации, изображенной на рис. 6, показана на рис. 7.

Алгоритм выбора свободной длины анкеров.

Уравнения границы призм (см. рис. 6,7):

$$x^{(1)} = a_k y + b_k, \quad x^{(2)} = d_k, \quad k = 1, n. \quad (12)$$

С помощью уравнений (12) составим следующие равенства

$$0 = a_k(-h) + b_k, \quad L_{bk} \cos q_k = a_k(-h_{ak} - L_{bk} \sin q_k) + b_k, \quad L_{bk} \cos q_k = d_k$$

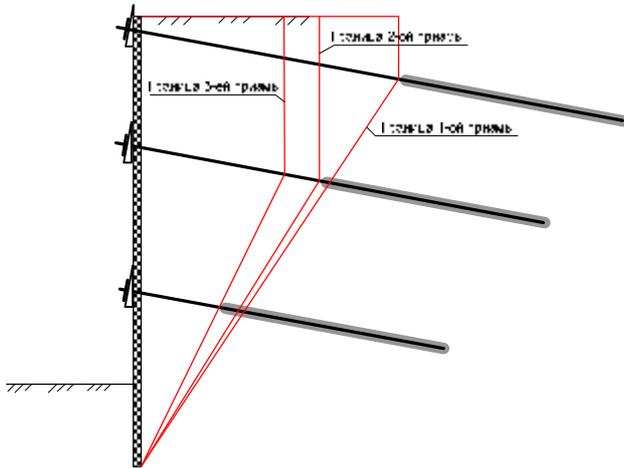


Рис. 6. Неустойчивые призмы сдвига

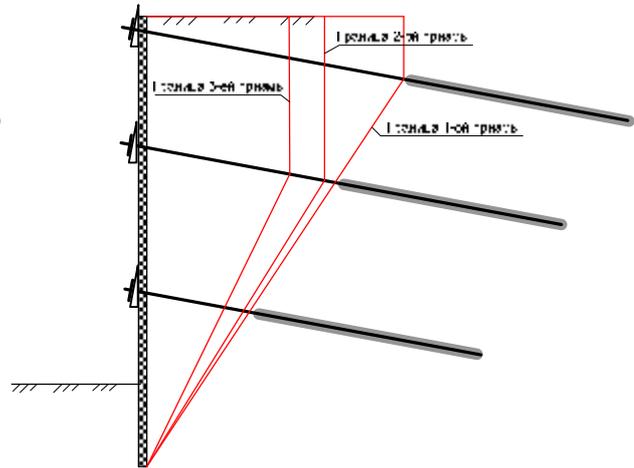


Рис. 7. Подбор свободной длины анкеров

и найдем значения коэффициентов в уравнениях (12):

$$a_k = \frac{L_{bk} \cos q_k}{h - h_{ak} - L_{bk} \sin q_k}, \quad b_k = a_k h, \quad d_k = L_{bk} \cos q_k$$

Уравнение линии, по которой направлен анкер яруса m , имеет вид:

$$y = A_m x + B_m.$$

Из уравнений

$$-h_{am} = A_m \cdot 0 + B_m, \quad -h_{am} - L_{bm} \sin q_m = A_m L_{bm} \cos q_m + B_m$$

найдем значения коэффициентов:

$$A_m = -\operatorname{tg} q_m, \quad B_m = -h_{am}.$$

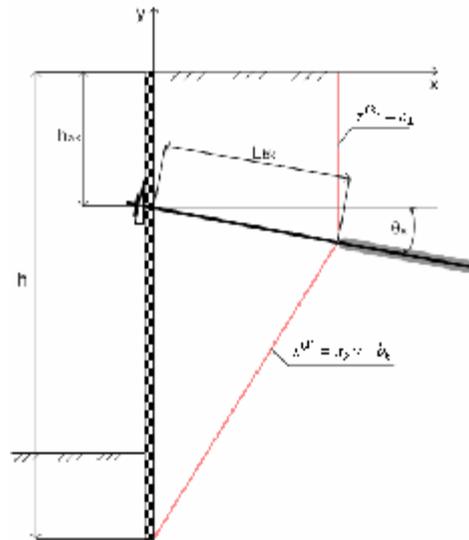


Рис. 8. Уравнения границы призмы сдвига

Для анкера, установленного на ярусе m , находим координаты точек его пересечения с прямыми, являющимися границами k -ой призмы сдвига:

$$x^{(1)} = x \Rightarrow X^{(1)} = \frac{b_k + a_k B_m}{1 - A_m a_k},$$

$$x^{(2)} = x \Rightarrow X^{(2)} = c_k,$$

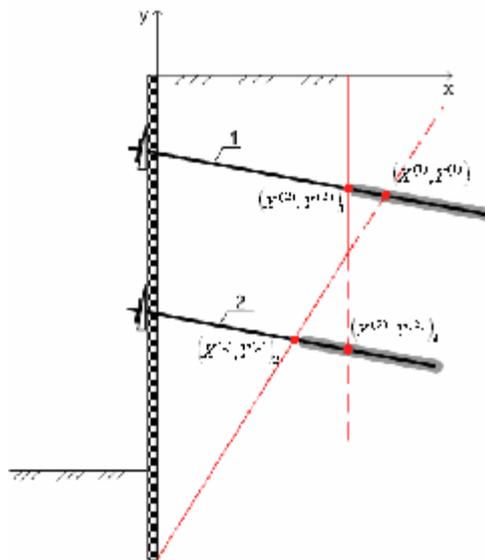


Рис. 9. К расчету свободной длины анкера

Из двух точек пересечений линии анкера с прямыми, являющимися границами k -ой призмы сдвига, выбирается одна точка, у которой координата по оси x имеет наименьшее значение (см. рис. 9).

Тогда подбор длины анкера на ярусе m можно записать так:

$$x = \max_k \left(\min \left(X^{(1)}, X^{(2)} \right) \right), \quad k - \text{номер призмы.} \quad (13)$$

По найденной координате x находим сводную длину анкера по формулам:

$$y = A_m x + B_m ,$$
$$L_{bm} = \sqrt{x^2 + (y + h_{am})^2}$$

Нормативно-техническая литература

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985.
2. Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И. и др. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.