



Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Новосибирский
Государственный Архитектурно-Строительный Университет (Сибстрин)

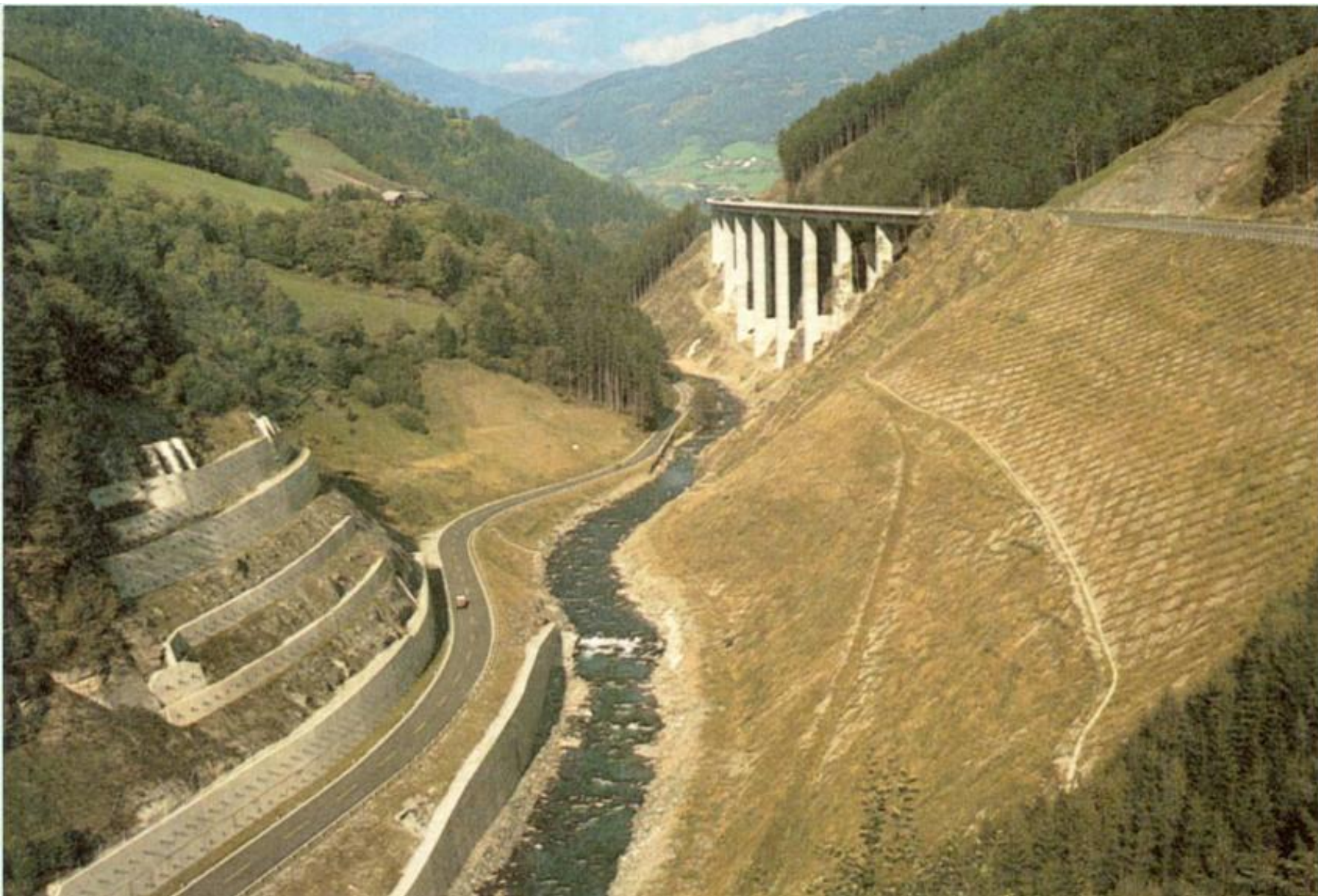
МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ

Методы расчета устойчивости откоса в грунтах разных типов

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- **Склоном** называется откос, образованный природным путём и ограничивающий массив грунта естественного сложения.
- **Откосом** называется искусственно созданная поверхность, ограничивающая природный грунтовый массив, выемку или насыпь. Откосы образуются при возведении различного рода насыпей (дамбы, земляные плотины и т.д.) и выемок (котлованы, траншеи, каналы и т. п.).

Методы расчета устойчивости откоса в грунтах разных ти



Методы расчета устойчивости откоса в грунтах разных

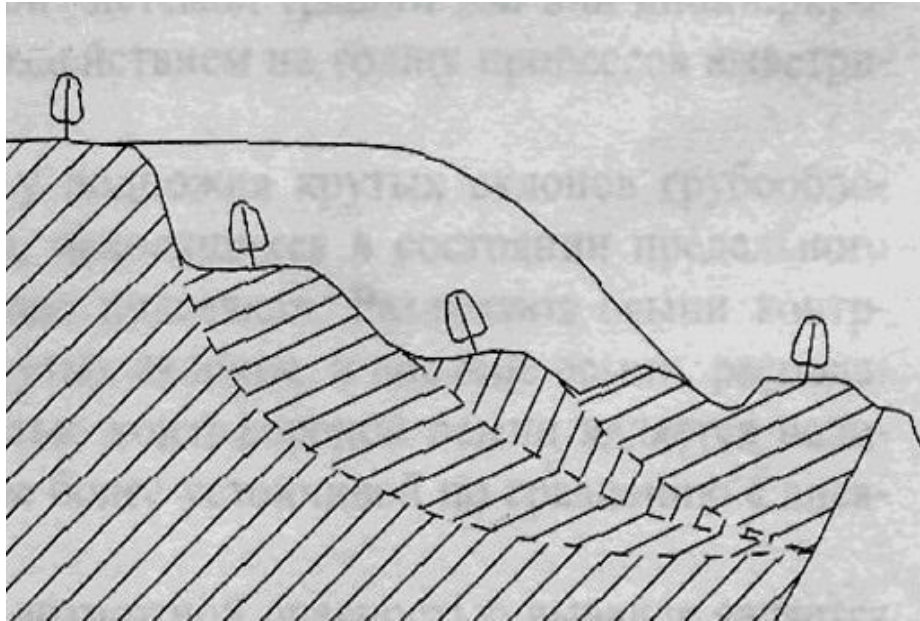


Методы расчета устойчивости откоса в грунтах разных типов



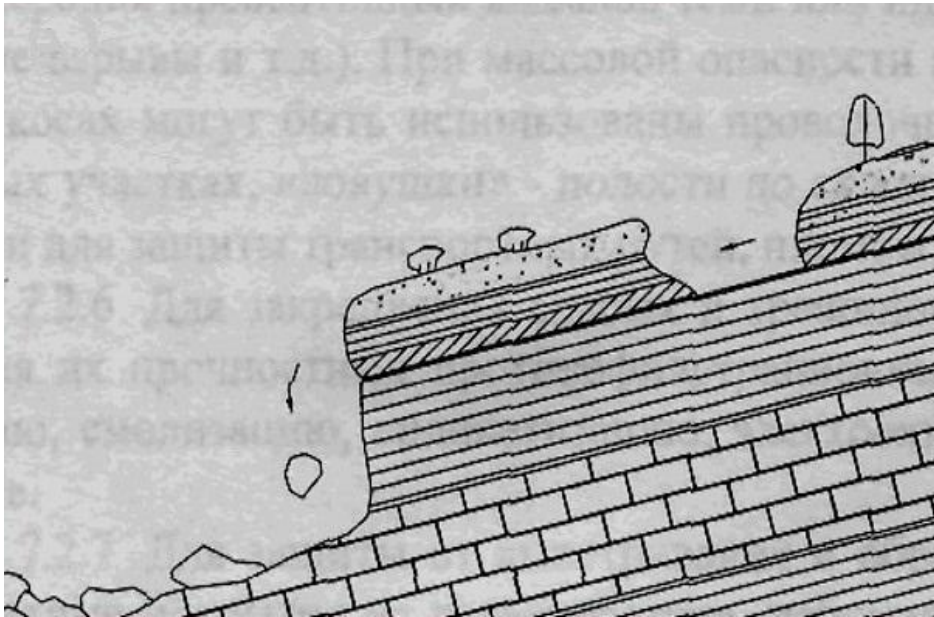
Типы нарушения равновесия грунтовых склонов

- 1) оползни вращения (с криволинейными поверхностями обрушения);



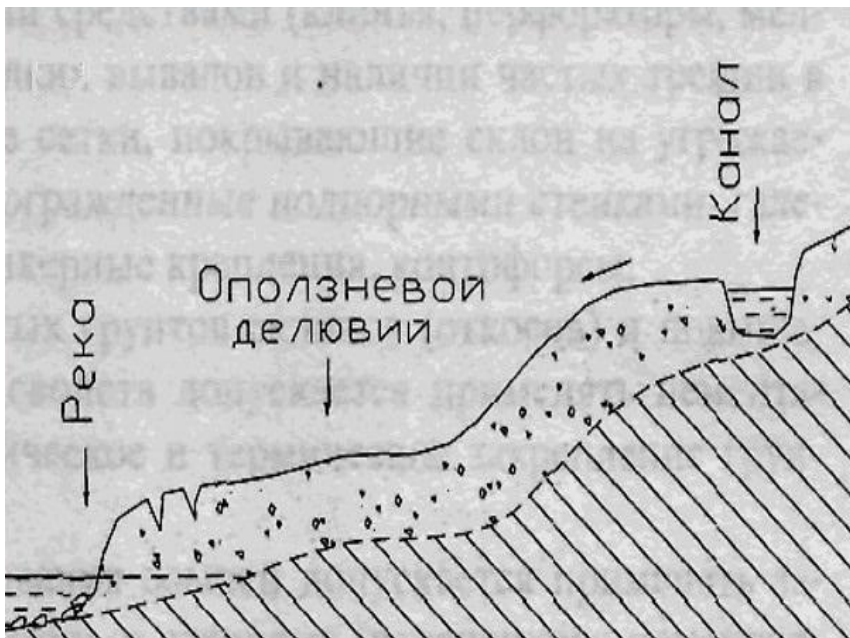
Типы нарушения равновесия грунтовых склонов

- 2) оползни скольжения (по зафиксированным поверхностям);



Типы нарушения равновесия грунтовых склонов

- 3) оползни разжижения (грязевые потоки перенасыщенных водой грунтов).



Причины потери устойчивости ОТКОСОВ И СКЛОНОВ

- устройство недопустимо крутого откоса или подрезка склона, находящегося в состоянии, близком к предельному;
- увеличение внешней нагрузки (возведение сооружений, складирование материалов на откосе или вблизи его бровки);
- изменение внутренних сил (изменение удельного веса, сопротивления сдвигу и других характеристик грунта при изменении его влажности и других причин);
- ошибки в назначении расчетных характеристик прочности грунта;
- проявление гидродинамического давления, сейсмических сил, различного рода динамических воздействий (движение транспорта, забивка свай и т. п.).

Методы расчета устойчивости откоса в грунтах разных типов

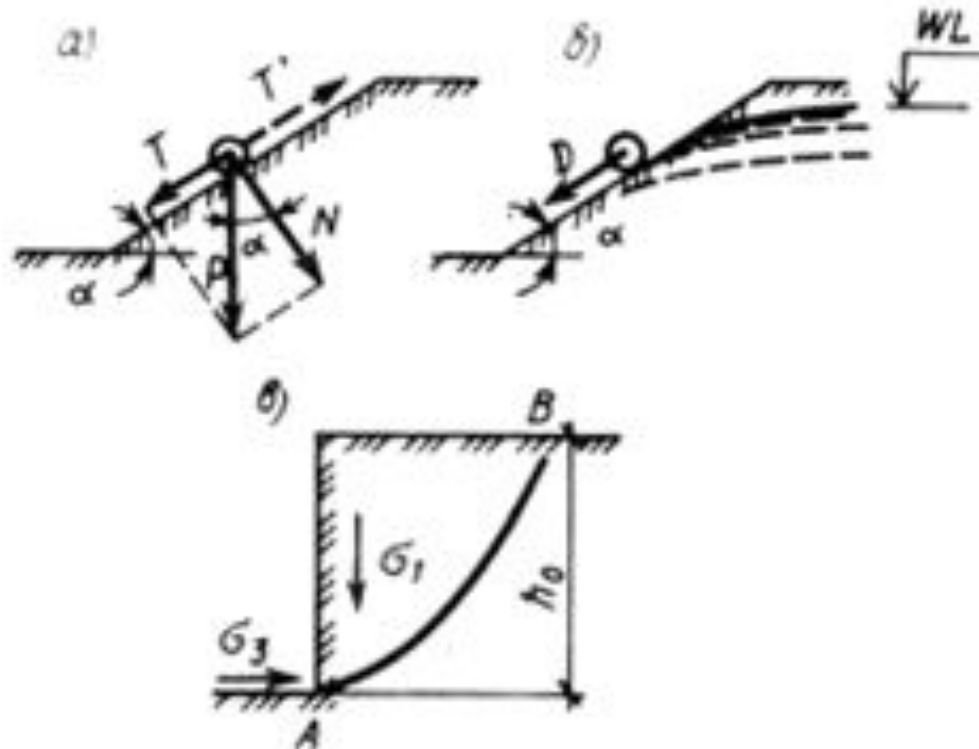


Рис.4.4. Схемы к расчету устойчивости откосов:
а – идеально сыпучего грунта; б – то же, при действии
фильтрационных сил; в – идеально связного грунта

Закон Кулона

Сопротивление грунта сдвигу пропорционально давлению (нормальному напряжению σ) на площадке сдвига.

$$\tau_{\max} = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

Устойчивость откосов в идеально сыпучих грунтах ($\phi \neq 0$; $c=0$)

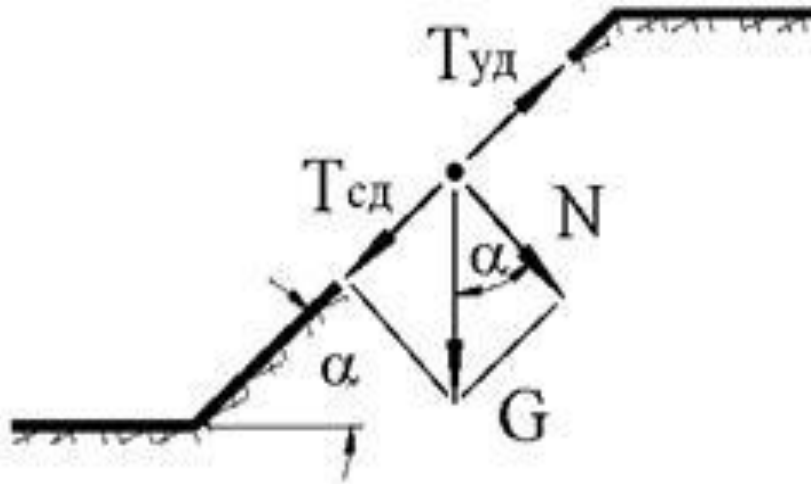


Рис. 6.2. Предельное равновесие откоса, сложенного идеально сыпучим грунтом

Имеется откос с углом заложения α , при заданном ϕ для песка, слагающего откос (рис.4.4, а). Рассмотрим равновесие частицы, свободно лежащей на поверхности откоса: т. к. грунт обладает только внутренним трением, то устойчивость будет обеспечена, если $T_{сд} \leq T_{уд}$. Элементарная частица грунта на свободной поверхности испытывает силу тяжести G , которую можно разложить на нормальную N и касательную $T(сд)$ к наклонной поверхности составляющие:

$$N = G \cdot \cos \alpha; \quad T = G \cdot \sin \alpha.$$

Устойчивость откосов в идеально сыпучих грунтах ($\phi \neq 0$;

$c=0$)

Элементарная частица грунта удерживается на наклонной поверхности силой трения, равной произведению нормальной компоненты силы тяжести на коэффициент трения (равного тангенсу угла внутреннего трения). Тогда из уравнения равновесия проекций всех сил на наклонную плоскость получим:

$$T_{\text{тр}} = T_{\text{г}}; T_{\text{тр}} = N \cdot \operatorname{tg} \varphi = G \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi; T_{\text{г}} = T = G \cdot \sin \alpha$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}; \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi; \alpha = \varphi.$$

Полученный результат можно обобщить в виде определения: **угол наклона к горизонтальной плоскости свободной поверхности откоса, сложенного идеально сыпучим грунтом, равен углу внутреннего трения этого грунта.** Это можно использовать как теоретическую основу экспериментального метода определения угла внутреннего трения сыпучего грунта.

Устойчивость откосов в идеально сыпучих грунтах ($\phi \neq 0$; $c=0$)

Задавшись весом частицы P и учитывая, что коэффициент внутреннего трения грунтов $f = \operatorname{tg}\varphi$ получим:

$$T = P \cdot \sin\alpha$$

$$T = N \cdot \operatorname{tg}\varphi = P \cdot \cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\varphi$$

$$T \leq T', \text{ откуда } \operatorname{tg}\alpha \leq \operatorname{tg}\varphi \text{ или } \alpha \leq \varphi$$

при $\alpha = \varphi$ в идеально сыпучих грунтах угол естественного откоса – α равен углу внутреннего трения грунта

$$k_{st} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\alpha}$$

При $k_{st} \geq k_{st}^*$ откос обладает необходимым запасом устойчивости.

Если требуется определить угол заложения будущего откоса с запасом устойчивости, то α соответственно равен:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi}{k_{st}^*}\right)$$

Устойчивость откосов в идеально связных грунтах ($\phi=0$; $c \neq 0$)

Если высота откоса, сложенного связными грунтами, не превышает предельного значения h_0 , то связный грунт может держать вертикальный откос.

Наиболее неблагоприятное напряженное состояние возникает у подошвы откоса в т.А (рис.4.1, в) Именно здесь начинает формироваться состояние предельного равновесия.

Максимальное главное напряжение в этой точке равно природному, т. е.

Условие предельного равновесия имеет вид:

$$\sigma_1 = \lambda \sigma_3$$

Высота вертикального откоса в идеально связных грунтах отвечает условию обеспечения запаса устойчивости

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi}$$

$$h = 2c / (\lambda_{\text{кр}} \gamma)$$

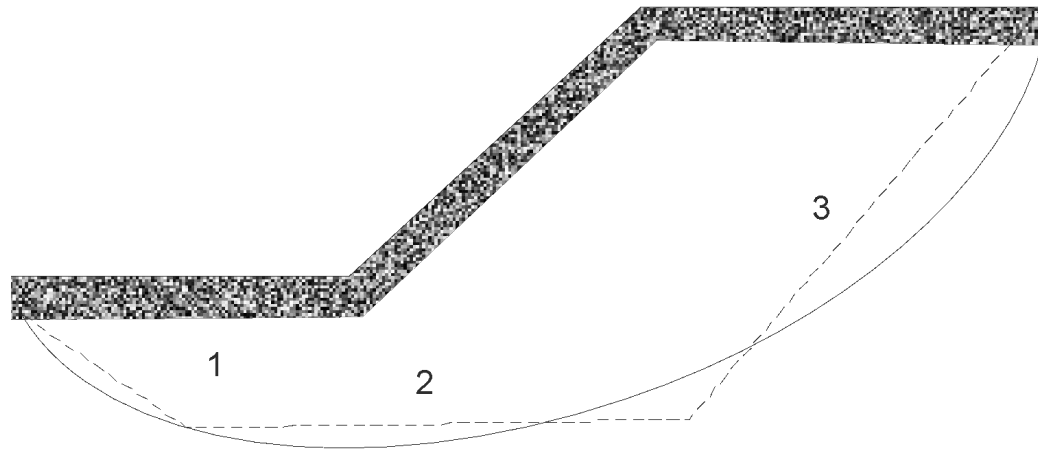
Устойчивость вертикального откоса в грунтах, обладающих трением и сцеплением ($\phi \neq 0$; $c \neq 0$)

При $\sigma_1 = \gamma h_0$ и $\sigma_3 = 0$, используя выражение условия предельного равновесия, получим:

$$h_0 = \frac{2c - \cos\phi}{\gamma(1 - \sin\phi)}$$

Нетрудно заметить, что учет внутреннего трения грунта приводит к некоторому увеличению предельной высоты вертикального откоса.

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения



При расчете общей устойчивости насыпи применяют, как правило, метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения (КЦПС), учитывая при этом, что величину сцепления (быстрый сдвиг) свай C_{CB} рекомендуется принимать в пределах 150 кПа независимо от возможных более высоких значений, полученных при проведении лабораторных или полевых испытаний. В этом случае при отсутствии экспериментальных данных для выполнения предварительной оценки общей устойчивости могут быть приняты следующие расчетные параметры сцепления $C_{p, CB}$ и угла внутреннего трения $\varphi_{p, CB}$:

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

В зависимости от решаемой задачи слабое основание может укрепляться сваями, объединенными (рисунок 5) в виде: блоков, одиночных свай, стенок и фигурных стенок.

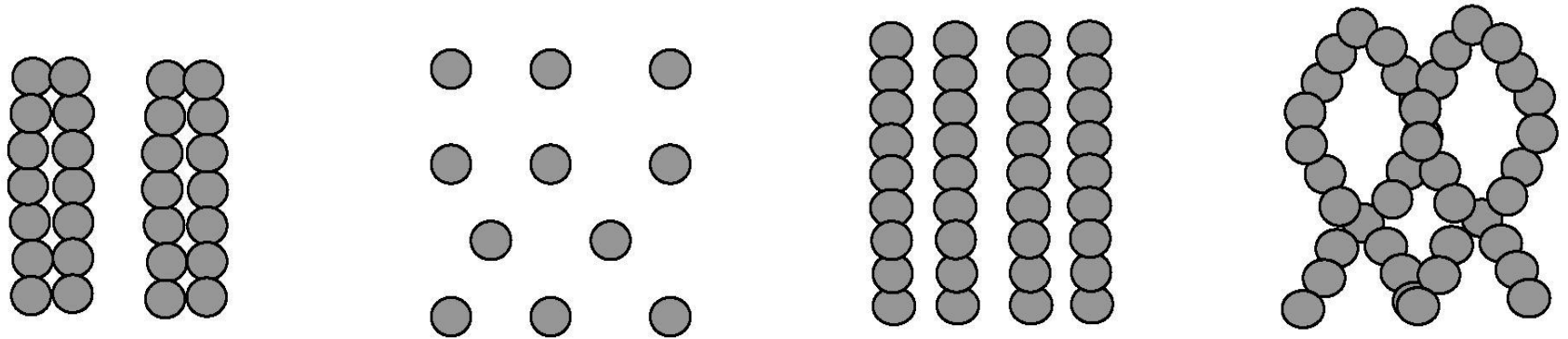
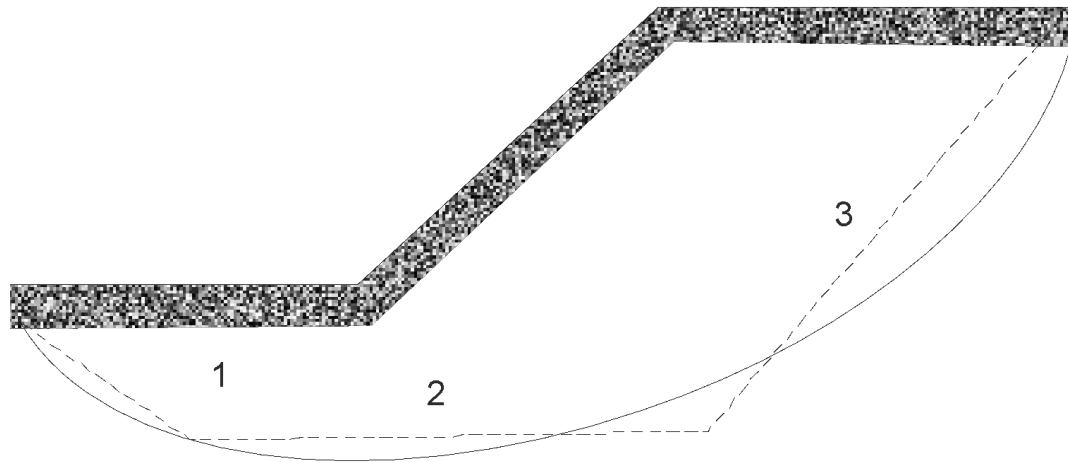


Рис. 5 – Схема расположения свай из укрепленного грунта
в плане:

- а) сваи-блоки;
- б) одиночные сваи;
- в) сваи-стенки;
- г) фигурные сваи-стенки

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения



$$C_{p.cв} = \beta \cdot C_{св} ,$$

$$\varphi_{p.cв} = 30^\circ$$

где β - коэффициент, зависящий от расположения свай относительно предполагаемой кривой скольжения, $\beta=0$ для пассивной зоны, $0,1$ – для зоны прямого сдвига и $0,3$ – для активной зоны – расположение зон – по рисунку 3.

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

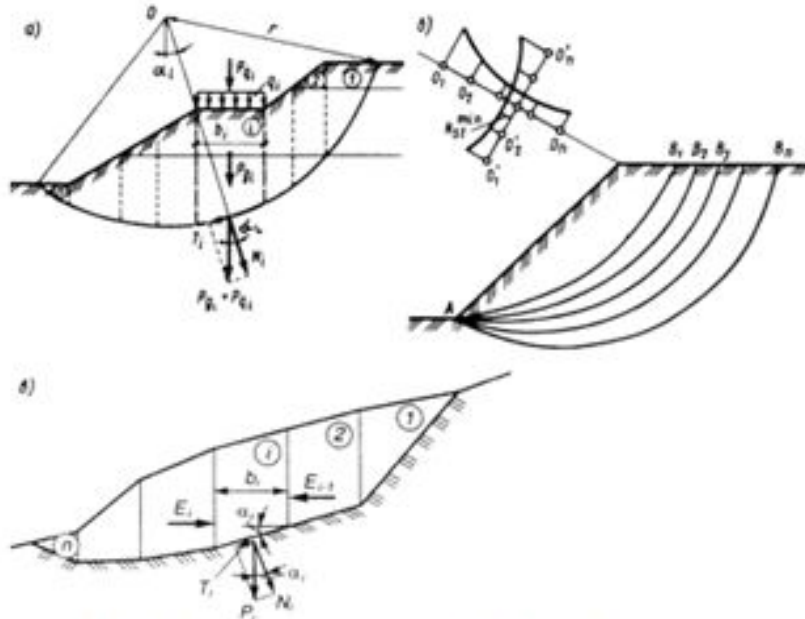
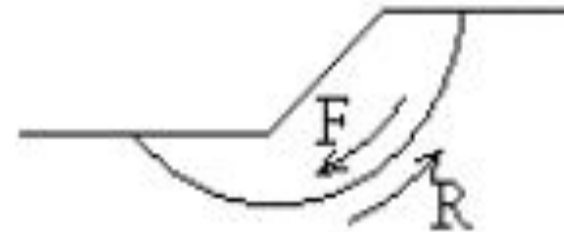


Рис.4.5. Схема к расчету устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения:
1, 2, ... - номера элементов



Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения основан на построении круглоцилиндрической поверхности, по которой происходит поступательно-вращательное движение верхней части грунтового массива при потере им устойчивости. Применяется для расчетов устойчивости откосов, подверженным опасности оползания (оползням вращения).

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

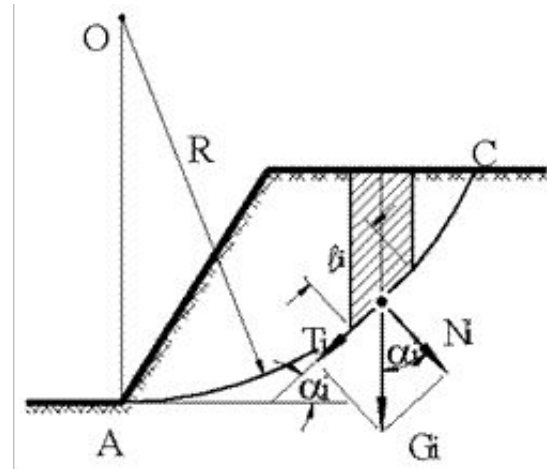


Рис. 6.3. Расчетная схема к определению устойчивости откоса методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Предполагается, что потеря устойчивости откоса (склона) может произойти в результате вращения отсека грунтового массива относительно некоторого центра O .

Суть метода заключается в анализе устойчивости склона против сдвига по ряду возможных поверхностей скольжения, представленных дугой окружности с радиусом r и центром в т.О.

Отсек грунтового массива, ограниченный свободной поверхностью и поверхностью скольжения, разбивается вертикальными линиями на n элементов таким образом, чтобы можно было принять основание каждого отсека плоским, а прочностные характеристики постоянными.

Смещающийся массив рассматривается как недеформируемый отсек, все точки которого участвуют в общем движении.

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Коэффициент устойчивости принимается в виде: $k_{st} = M_{sr} / M_{sa}$

где M_{sr} и M_{sa} – моменты относительно центра вращения O всех сил, соответственно удерживающих и смещающих отсек.

Порядок вычислений:

1. Грунтовый массив разбивается на отдельные элементы.
2. Вычисляются вертикальные силы, действующие на каждый элемент: собственный вес грунта P_{gi} и равнодействующая нагрузки на его поверхности P_{qi} .
3. Равнодействующая сил $P_{gi} + P_{qi}$ раскладывается на нормальную N_i и касательную $T_i = (P_{gi} + P_{qi}) \sin \alpha_i$.

4. Находим c и l_i – длину дуги.

Момент сил, вращающих отсек вокруг т. O , определится как:

$$M_{sa} = r \sum_{i=1}^n T_i = r \sum_{i=1}^n (P_{gi} + P_{qi}) \sin \alpha_i$$

n – число элементов в отсеке

Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Удерживающие силы обуславливаются сопротивлением сдвигу за счет внутреннего трения и сцепления грунта.

Сила трения: $T_i = N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i = (P_{gi} + P_{vi}) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i$

При наличии внешних вертикальных нагрузок они включаются в величину веса блока (призмы).

$$P_i = P_{gi} + P_{vi}; \quad k_{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + \sum_{i=1}^n c_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \sin \alpha_i}$$

При $k_{st} \geq k^H$ устойчивость откоса относительно выбранного центра вращения т.О обеспечена.

- Основная сложность при практических расчетах заключается в том, что положение центра вращения О и выбор радиуса r , соотносящие наиболее опасному случаю, неизвестны.

- Обычно проводится серия таких расчетов при различных положениях центров вращения и значениях r .

- Чаще всего наиболее опасная поверхность скольжения проходит через нижнюю точку откоса (склона). Кроме слабых грунтов с минимальными φ и c .

Метод круглоцилиндрических поверхностей

скольжения

Выделим верхнюю часть откоса окружностью радиусом OA с центром в точке O , проходящей через основание откоса в точке A . Рассмотрим условие равновесия выделенной части откоса, для чего разделим ее вертикальными плоскостями, перпендикулярными чертежу, на элементарные объемы.

Условие равновесия рассмотрим на примере i -го элементарного объема.

Проведем центральную вертикальную ось площади этого объема и касательную к поверхности скольжения в точке ее пересечения с центральной осью. Обозначим угол наклона касательной к горизонтальной оси a_i . Вес элементарного объема грунта обозначим G_i и приложим в точке пересечения центральной оси с поверхностью скольжения. Разложим силу G_i на нормальную и касательную к поверхности скольжения составляющие N_i и T_i :

$$N_i = G_i \cos a_i; T_i = G_i \sin a_i.$$

Сдвигающей силой является касательная составляющая силы тяжести $T_{сд,i} = T_i$. Удерживающими силами являются сила трения и сила сцепления по поверхности скольжения: $T_{уд,i} = \tau_j G_i \cos a_i + c_i l_i$,

где l_i – длина дуги поверхности скольжения в пределах i -го объема грунта; c_i и τ_j – сцепление и угол внутреннего трения грунта в пределах дуги l_i .

Условием равновесия по поверхности скольжения AC , пересекающей откос, является равенство нулю суммы моментов сдвигающих и удерживающих сил относительно центра O круглоцилиндрической поверхности скольжения:

$$R \sum_{i=1}^n G_i \cdot \sin \alpha_i - R \sum_{i=1}^n (\operatorname{tg} \varphi_i \cdot G_i \cdot \cos \alpha_i + c_i \cdot l_i) = 0$$

Для анализа устойчивости грунтового массива вместо уравнения (6.6) чаще всего используют выражение для коэффициента устойчивости, равное отношению момента удерживающих сил к моменту сдвигающих сил:

$$\eta = \frac{M_{уд}}{M_{сд}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\operatorname{tg} \varphi_i \cdot G_i \cdot \cos \alpha_i + c_i \cdot l_i)}{\sum_{i=1}^n G_i \cdot \sin \alpha_i} > 1.$$

Угол α отсчитывается от горизонтали и считается положительным при повороте ее на острый угол до совмещения с касательной против хода часовой стрелки. При отрицательном угле α касательная составляющая силы тяжести и соответствующий ей момент являются удерживающими, что автоматически учитывается формулами.

Предел суммирования по i и n определяет количество элементарных объемов грунта, на которые разделяется верхняя часть откоса, отделенная от остального массива поверхностью скольжения. С увеличением n увеличивается точность расчетов по формулам (6.6) и (6.7). Формулы (6.6) и (6.7) являются не конечными, а промежуточными результатами. **Решение задачи состоит в отыскании минимального коэффициента устойчивости откоса h для всех возможных траекторий поверхностей скольжения.**

Для упрощения решения задачи существуют следующие рекомендации

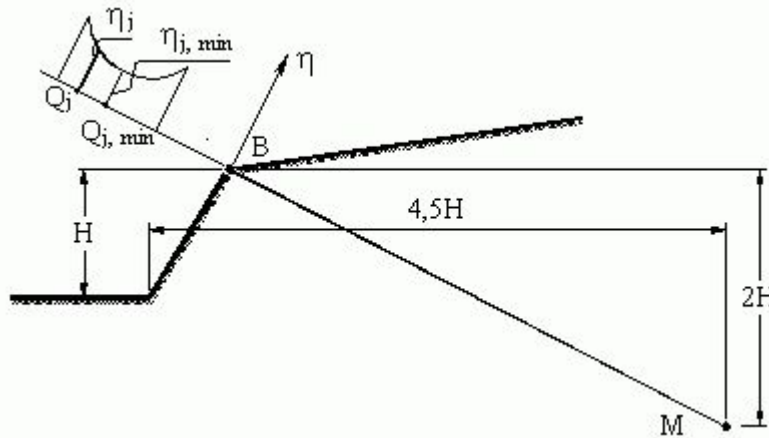
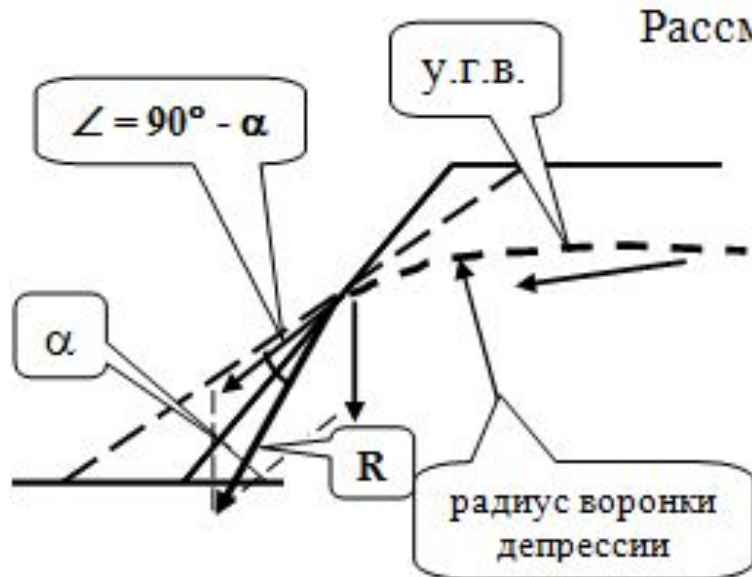


Рис. 6.4. Расчетная схема к определению минимального коэффициента устойчивости

Предполагается, что центры возможных круглоцилиндрических поверхностей скольжения лежат на прямой (рис. 6.4), соединяющей вершину откоса В с точкой в глубине массива, отстоящей от основания откоса (т. А) по горизонтали на $4,5H$ и от верха откоса (точка В) по глубине на $2H$. Варьируя на указанной линии положением центров поворота O_j , строят график зависимости коэффициента устойчивости откоса h_j от положения центра поворота O_j . Решением задачи является минимальный коэффициент устойчивости откоса $h_{j,min}$.

Влияние гидродинамического давления

Через откос выходит вода при высоком у.г.в. (откос дренирует).



Рассмотрим равновесие песчинки в месте выхода воды.

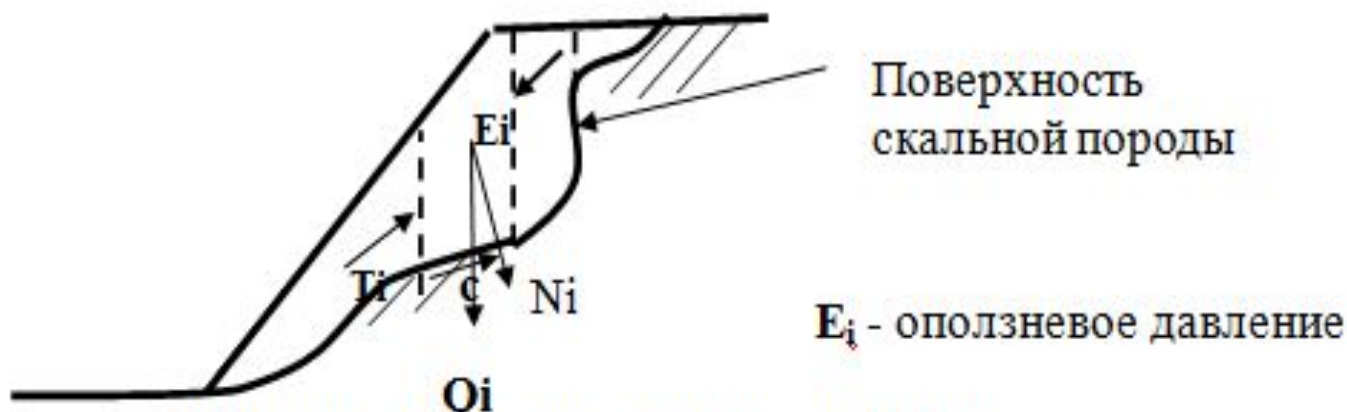
D^I - гидродинамическое давление

R - равнодействующая

В пределе угол \angle должен быть равен $90-\alpha$ - т.е. откос должен быть положе.

Гидродинамическое давление воды возникает в момент откачки воды из котлована.

«Прислоненный» откос



Порядок расчета устойчивости откоса:

1. Разбиваем откос на ряд призм и рассматриваем равновесие каждой призмы с учетом бокового давления грунта.
2. Расчет начинаем с первого элемента (сверху). Если все элементы устойчивы, то откос устойчив.

Мероприятия по повышению устойчивости откосов и склонов:

- выполаживание или создание уступчатого профиля с образованием горизонтальных площадок (берм) по высоте откоса;
- регулирование гидрогеологического режима откоса или склона (сток поверхностных вод перехватывается устройством нагорных канав, отведением воды с берм);
- конструктивные меры типа прорезания потенциально неустойчивого массива грунтов системой забивных или набивных свай, вертикальных шахт и горизонтальных штолен, заполненных бетоном и входящих в подстилающие неподвижные части массива, анкерное закрепление неустойчивых объемов грунта, часто во взаимодействии с подпорными стенками или свайными конструкциями и пр.;
- инженерные меры инъекционного закрепления грунта.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!