

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «СоюздорНИИ»
ОАО «СоюздорНИИ»

Лицензия Е 023008

Рег. № ГС-1-50-02-26-0-5001055354-034697-1

От 12 февраля 2008 г.

Лицензия Д 718588

Рег. № ГС-1-50-02-27-0-5001055354-029810-1

От 24 апреля 2006 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель

исполнительного директора

ОАО «СоюздорНИИ»

В. М. ЮМАШЕВ



МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

«Расчет устойчивости откосов автомобильных дорог при использовании
универсальных гибких защитных бетонных матов»

(Договор № 62 – 09 – ЦСИДА)

Начальник ЦСИДА, к.т.н.

И.Ж. Хусаинов

г. Балашиха, 2009 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|-------------|
| Введение..... | 3 |
| 1. Описание УГЗБМ..... | 6 |
| 2. Расчет устойчивости УГЗБМ на откосах автомобильных дорог..... | 8 |
| 2.1. Определение коэффициента устойчивости..... | 8 |
| 2.2. Расчет дополнительного крепления конструкции УГЗБМ упором в грунтовом основании..... | 10 |
| 2.3. Расчет дополнительного крепления конструкций УГЗБМ анкерами и тросами..... | 14 |
| 2.4. Расчет толщины матов при защите откосов от волнобоя..... | 15 |
| 3. Расчет устойчивости откоса после укладки на него УГЗБМ..... | 18 |
| Заключение | 20 |
| Список использованной литературы..... | 21 |
| Приложение 1 Примеры расчетов дополнительного крепления..... | 23 |
| Приложение 2 Конструкция УГЗБМ..... | 28 |

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и строительстве автомобильных дорог часто возникает необходимость защиты откосов земляного полотна и мостовых конусов от эрозии и размыва.

Такая же необходимость возникает и в случае сложения откоса в выемке или при использовании в теле насыпи глинистых грунтов.

Для этих целей в дорожном строительстве используют различные технологические приемы и материалы: посев трав, устройство лотков, укрепление гибкими бетонными матами, бетонными плитами, синтетическими георешетками, неткаными материалами и т.п. Проектирование способа защиты откоса относится к индивидуальному проектированию, основное внимание при этом уделяется вопросам удержания конструкции (гибкие бетонные маты, бетонные плиты, георешетка, габионы) от оползания. Но нигде не рассматривается вопрос общей устойчивости откоса после того, как на нем закреплены защитные конструкции.

Укладке материала укрепления – георешетка, плиты, УГЗБМ и т.п. должен предшествовать расчет устойчивости откоса, как с укреплением, так и без. Кроме того, при малых коэффициентах трения и большой крутизне может возникнуть необходимость в удержании конструкции укреплением на откосе.

В качестве мер применяют анкера, тросы и упоры.

Анкера как правило располагают в шахматном порядке на откосе с рассчитываемым количеством на 1 м^2 , тросы (на выемке) крепят на верху откоса, а упоры устраивают у подошвы земляного полотна.

В данных методических рекомендациях определяются :

- 1) Возможность укладки УГЗБМ без дополнительного крепления.
- 2) В случае необходимости дополнительные крепления рассчитываются:
 - а) количество анкеров, если принято решение о креплении УГЗБМ к откосу анкерами;
 - б) прочность и количество тросов;
 - в) размеры упоров.

3) Определение устойчивости откоса:

- а) до укладки на него конструкции укрепления;
- б) после укладки конструкции укрепления.

В данных методических рекомендациях рассмотрены вопросы расчета устойчивости как собственно защитной конструкции из Универсальных гибких защитных бетонных матов (УГЗБМ), так и общей устойчивости откоса вместе с укрепленной на нем конструкции. Также представлены рекомендации по проектированию защиты откосов при помощи УГЗБМ.

Для данных расчетов составлена компьютерная программа.

Отдельно рассмотрен вопрос об устойчивости бетонных блоков на откосе у водоемов при волнобое. При этом рассчитываются длина волны и высота подъема волны – высота набега.

Так как наиболее опасные для скольжения условия возникают осенью и весной, когда грунты переувлажнены в расчетной схеме сцепление грунта не учитывается и принят коэффициент запаса в зависимости от категории дороги.

Сложные условия работы возникают также для различных сооружений, подверженных воздействию ледяного покрова, как в зимний, так и, особенно, в весенний периоды. Наиболее опасно в период весеннего ледохода воздействие льда на конструктивные элементы сооружения.

Для защиты склонов дорог и мостовых переходов, откосов, берегоукрепления, а также для пригрузки подводных трубопроводов, обладающих положительной плавучестью, ООО «Спецпром 1» разработало универсальное защитное бетонное покрытие (УГЗБМ), защищенное патентом РФ № 2364678.

Защищая сооружение от эрозии, статического и динамического действия потока воды, а также воздействия ледяного покрова в зимний и весенний периоды, УГЗБМ воспринимает эти воздействия на себя. Поэтому надежностью работы защиты, выполненной из УГЗБМ, будет определяться надежность работы всего защищаемого сооружения (Приложение 2).

Использование УГЗБМ для укрепления откосов вместо традиционных бетонных плит позволяет, во-первых, упростить технологию укладки и , во – вторых, обеспечить более надежную работу конструкции укрепления, так как они могут быть использованы при более крутых откосах, на которых обычные бетонные блоки не удерживаются.

1. ОПИСАНИЕ УГЗБМ

УГЗБМ представляет собой набор бетонных блоков, соединенных между собой замоноличенным искусственным канатом.

В зависимости от конструкции, количества и размеров отдельных бетонных блоков существуют пять номеров моделей УГЗБМ, основные параметры которых сведены в таблицу 1:

Таблица 1

| Параметр | Номер модели УГЗБМ | | | | | |
|--|--------------------|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Конструкция УГЗБМ | <u>Схема 1</u> | <u>Схема 2</u> | Модель № 3 снята с производства | <u>Схема 3</u> | Модель № 5 снята с производства | Модель № 6 снята с производства |
| Габаритная длина УГЗБМ, мм | 2746±1% | 2746±1% | | 2746±1% | | |
| Габаритная ширина УГЗБМ, мм | 1226±1% | 1226±1% | | 1226±1% | | |
| Габаритная площадь УГЗБМ, м ² | 3,37 | 3,37 | | 3,37 | | |
| Максимальная высота УГЗБМ, мм | 240 | 60 | | 150 | | |
| Объем бетона в УГЗБМ, м ³ | 0,522 | 0,168 | | 0,342 | | |
| Габаритный объем УГЗБМ, м ³ | 0,84 | 0,21 | | 0,53 | | |
| Масса УГЗБМ, кг | 1 220±3% | 385±4% | | 793±4% | | |
| <u>Бетонный блок типа 1</u> , шт. | 36 | | | | | |
| <u>Бетонный блок типа 2</u> , шт. | | 36 | | | | |
| <u>Бетонный блок типа 4</u> , шт. | | | 36 | | | |

Бетонные блоки УГЗБМ по форме представляет собой две усеченные пирамиды с общим квадратным основанием, и подразделяются на четыре типа по габаритным размерам, основные параметры которых сведены в таблицу 2:

Таблица 2

| Типы бетонных блоков | Общее основание, мм | Вершина 1 | | Высота 1 | | Вершина 2 | | Высота 2 | |
|----------------------|---------------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | | Размер, мм | Допуск | Размер, мм | Допуск | Размер, мм | Допуск | Размер, мм | Допуск |
| Бетонный блок типа 1 | 300x300 | 190×190 | ±2% | 119 | ±2% | 200×200 | ±5% | 112×112 | ±7% |
| Бетонный блок типа 2 | 300x300 | 260×260 | ±2% | 30 | ±2% | 265×265 | ±2% | 28×28 | ±7% |
| Бетонный блок типа 4 | 300x300 | 260×260 | ±2% | 30 | ±2% | 200×200 | ±5% | 112×112 | ±7% |

Бетонные блоки изготавливаются из тяжелого бетона по ГОСТ 26633. Состав бетона подбирают в соответствии с рецептурой, заданной в технологической документации согласно требованиям ГОСТ 27006.

При изготовлении УГЗБМ в качестве соединительного арматурного каната применяются искусственные канаты диаметром от 8 до 25 мм из полиамида (капрона), полипропилена или полиэфира (лавсана) с разрывной нагрузкой от 2 000 до 10 000 кгс.

Полное описание и характеристики Универсальных гибких защитных бетонных матов (УГЗБМ) представлены в технических условиях 5859-001-59565714-2009 ТУ.

2. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ УГЗБМ НА ОТКОСАХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

2.1. Определение коэффициента устойчивости

Формулировка задач

2.1.1. Определить предельные значения коэффициентов заложения откосов, на который укладывается УГЗБМ в зависимости от категории дороги и вида грунтов откоса:

1. Песок крупный
2. Песок средней крупности
3. Песок мелкий
4. Супесь
5. Суглинок

2.1.2. Математическое обоснование

Полагается, что полотно УГЗБМ уложено на плоскость откоса (рис.1).

На единственный блок УГЗБМ действует: 1) сила тяжести, приложенная в центре блока и направленная вертикально вниз; 2) реакция откоса перпендикулярная плоскости откоса; 3) сила трения блока о грунт откоса.

В данном пункте рассматривается устойчивость защитной конструкции на откосе. Расчету подлежит k_y – коэффициент устойчивости. В зависимости от категории дороги назначается коэффициент запаса – коэффициент устойчивости, который определяется через соотношение удерживающих сил к сдвигающим.

Схема расчета составлена на основе следующей модели.

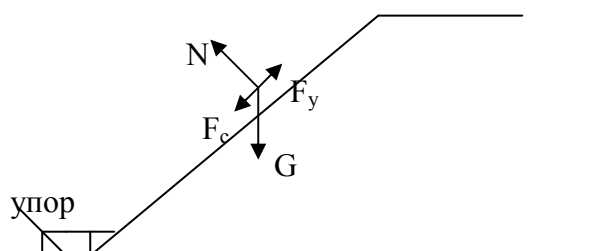


Рис.1

Действие весовой нагрузки от УГЗБМ принимается сосредоточенной на полосе шириной в один блок.

Введем следующие обозначения:

G – вес блока;

g - погонный вес УГЗБМ;

l – длина откоса;

φ - угол внутреннего трения;

c – сцепление грунта;

φ_0 - угол внутреннего трения грунта основания;

α - угол откоса;

l_6 – ширина одного блока.

Определим n - количество блоков на откосе (шириной в один блок).

$$n = \frac{l}{l_6} \quad (1)$$

Общий вес n блоков равен:

$$G = G_6 \cdot n \quad (2)$$

Условие устойчивости:

$$k_3 \cdot G \cdot \sin \alpha \leq (G \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c) \quad (3),$$

Таблица 3

| Категория автомобильной дороги | Коэффициент устойчивости k_3 |
|--------------------------------|--------------------------------|
| I | 1,3 |
| II | 1,2 |
| III - IV | 1,1 |

Значения φ принимаются с учетом максимального увлажнения поверхности грунта (табл.4) [1].

Таблица 4

| Вид грунта | Песок крупный | Песок средней крупности | Песок мелкий | Супесь | Суглинок |
|-------------------------|---------------|-------------------------|--------------|--------|----------|
| Угол внутреннего трения | 35^0 | 32^0 | 31^0 | 33^0 | 11^0 |

Из условия устойчивости (3) определяем расчетный коэффициент запаса:

$$k_3 \leq \frac{G \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + cl}{G \cdot \sin \alpha} = \frac{\cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{cl}{G}}{\sin \alpha} \quad (4)$$

Предполагая наилучшие условия работы, значением сцепления пренебрежем, тогда условие устойчивости определяется следующим образом:

$$k_3 \leq \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (5)$$

Таблица 5

Предельные значения тангенсов углов откосов не требующие дополнительного закрепления при укладке УГЗБМ

| №№ пп | Вид грунта | Категория дороги | | |
|----------|-------------------------|------------------|------|--------|
| | | I | II | III-IV |
| 1 | Песок крупный | 0,54 | 0,58 | 0,64 |
| 2 | Песок средней крупности | 0,47 | 0,52 | 0,56 |
| 3 | Песок мелкий | 0,46 | 0,5 | 0,55 |
| 4 | Супесь | 0,5 | 0,54 | 0,6 |
| 5 | Суглинок | 0,15 | 0,16 | 0,17 |

Примечание: Заложение – отношение высоты откоса к длине

Заложение откоса (1:m – где 1 – единица высоты, m – длина по горизонтальной поверхности, приходящаяся на подъем в 1 метр) определяется по формуле:

$$m = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (6)$$

Если заложение откоса m меньше рассчитанной по формуле m , то необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия для удержания конструкции на откосе.

Определим возможность опрокидывания блоков.

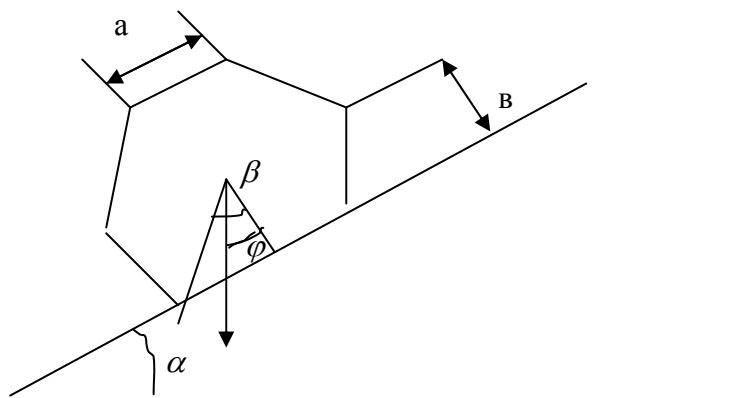


Рис.3

Для устойчивости блока необходимо соблюдение условия:

$$\alpha \leq \beta, \text{ где } \beta = \arctg \frac{a}{2b}, \quad (7)$$

где a – длина стороны нижнего основания блока;

b – половина высоты блока.

2.2. Расчет дополнительного крепления конструкции УГЗБМ упором в грунтовом основании.

2.2.1. Формулировка задач

При укладке УГЗБМ на откос, k_3 по устойчивости на сдвиг меньше требуемого. Необходимо рассчитать дополнительное крепление полотна УГЗБМ для того, чтобы обеспечить его устойчивость.

2.2.2. Математическое обоснование задач

Для решения данной задачи рассмотрим три способа крепления полотна УГЗБМ на откосе.

При устройстве упора у заложения откоса в зависимости от нескольких равных сил сдвига определяется размер упора: ширина и высота. Упор рассчитывается на сопротивление сдвигу и опрокидывание. На него действует нескомпенсированная сила сдвига УГЗБМ, лежащего на склоне, сила сопротивления сдвигу, состоящая из пассивного кулоновского давления грунта и сцепления грунта. По величине сдвигающее усилие определяется глубина заложения, равная высоте упора. По условию на опрокидывание определяется ширина упора.

2.2.3. Формирование задач

При устройстве упора, на УГЗБМ лежащие на откосе действует сжимающая сила, равная нескомпенсированная сила сдвига. Так как УГЗБМ обладает некоторой жесткостью на изгиб, возможно выпучивание.

Следует проверить возможность такого выпора.

2.2.3.1. Математическая постановка задач

2.2.3.2. На длине откоса L лежит гибкий мат, на который действует продольная сила сжатия ΔT и жесткость матов на

Определим величину не скомпенсированной сдвигающей силы ΔT с учетом коэффициента запаса κ :

$$\Delta T = \kappa G \cos \alpha (tg \alpha - tg \varphi) , \quad (8)$$

где κ принимается по табл.1.

Считая, что концевой блок опирается на упор, угол внутреннего трения о грунт которого φ_0 , определим условие устойчивости упора.

Введем следующие обозначения:

γ - удельный вес грунта основания;

φ_0 - угол трения грунта основания;

h – высота упора;

c_0 – сцепление грунта основания.

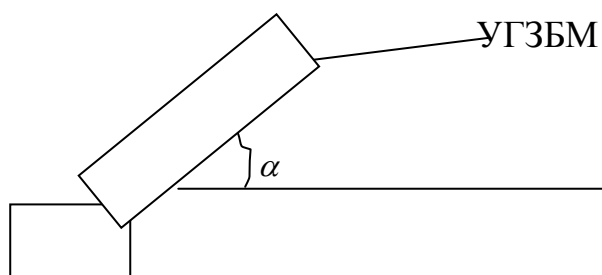


Рис.2

Горизонтальная сила действующая на упор равна:

$$\Delta T_0 = \Delta T (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot tg \varphi) = \Delta T \cos \alpha (1 - tg \alpha \cdot tg \varphi) \quad (9)$$

Сопротивление упора сдвигу равно:

$$\Delta R_y = \gamma \cdot l_0 \cdot h^2 \cdot tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{c_0 \cdot h \cdot l_0}{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} .$$

Запишем условие равенства $\Delta T = \Delta R_y$.

$$\gamma \cdot l_0 \cdot h^2 \cdot tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{c_0 \cdot h \cdot l_0}{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} - \Delta T = 0 ,$$

$$h^2 + \frac{c_0 \cdot l_0}{\gamma \cdot l_0 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)} h - \frac{\Delta T}{\gamma \cdot l_0 \cdot tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)} = 0 \quad (10)$$

$$P = \frac{C_0}{\gamma \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}$$

$$q = \frac{\Delta T}{\gamma \cdot l_{\sigma} \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}$$

$$h^2 + p \cdot h - q = 0$$

$$h = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} + q}$$

Из выражения (9) определяется глубина заложения упора:

$$h = -\frac{p + \sqrt{p^2 + 4q}}{2} \quad (11)$$

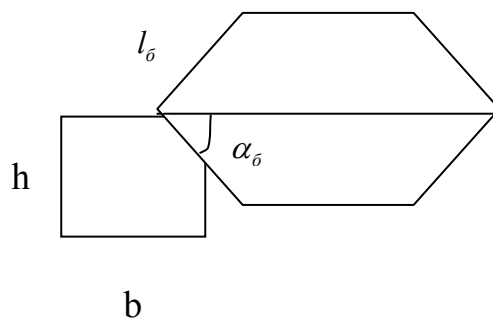


Рис.3

Определим ширину b упора.

Обозначим угол между двумя смежными гранями единичного блока УГЗБМ через α_{σ} .

Для определения геометрических величин рассмотрим следующую схему (рис.4).

Проекция расстояния АВ на ось oz :

$$Z_{AB} = h - \frac{l_{\sigma}}{2} \cos \alpha_{\sigma} \quad (12)$$

Проекция расстояния АВ на ось Ox равна:

$$X_{AB} = b - \frac{l_{\sigma}}{2} \sin \alpha_{\sigma} \quad (13)$$

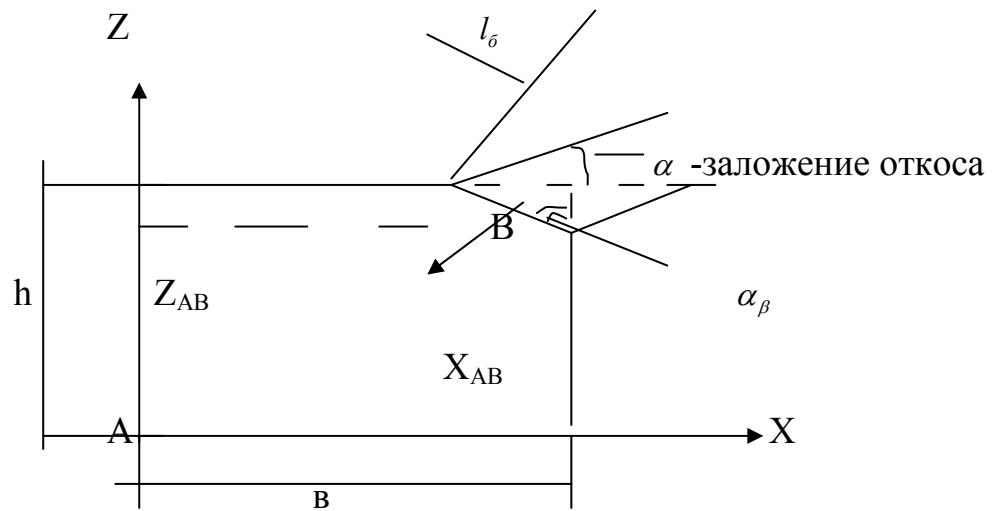


Рис.4

Составляя условие равновесия относительно точки А , получим:

$$M_A = \Delta T_0 \left(Z_{AB} - \frac{h}{3} \right) - \Delta T \cos \alpha \cdot X_{AB} = 0 \quad (14)$$

Подставляя значения X_{AB} и Z_{AB} получим:

$$\Delta T_0 \left(h - \frac{l_\delta}{2} \cos \alpha_\beta - \frac{h}{3} \right) - \Delta T \cos \alpha \left(b - \frac{l_\delta}{2} \sin \alpha_\delta \right) = 0$$

Из последнего выражения определяем b:

$$\frac{\Delta T_0 \left(\frac{2}{3}h - \frac{l_\delta}{2} \cos \alpha_\beta \right)}{\Delta T \cos \alpha} = b - \frac{l_\delta}{2} \sin \alpha_\delta$$

$$b = \frac{l_\delta}{2} \sin \alpha_\delta + \frac{\Delta T_0 \left(\frac{2}{3}h - \frac{l_\delta}{2} \cos \alpha_\beta \right)}{\Delta T \cos \alpha} \quad (15)$$

В случае устройства упора необходимо также проверить возможность проскальзывания по площадке контакта блока УГЗБМ и упора.

$$\Delta T \cdot \sin \alpha_\delta \leq \Delta T \cos \alpha_\delta \cdot \kappa_\delta, \quad (16)$$

где κ_δ – коэффициент трения бетона о материал упора.

Принимая упор выполненный из бетона примем $\kappa_\delta = 0,3$.

Таким образом должно выполняться условие:

$$\kappa_\delta \geq \operatorname{tg} \alpha_\delta \quad (17)$$

Проверка УГЗБМ на выпор.

Для недопущения выпора конструкции УГЗБМ в случае ее опирания на упор следует проверить следующие неравенства:

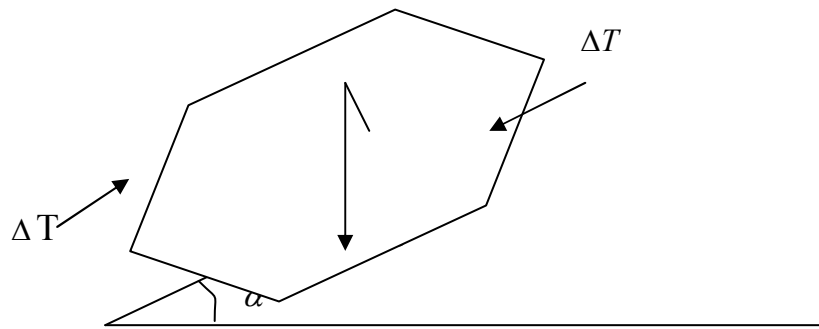


Рис.5

Расчет на выпор.

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2} \quad (8)$$

$$\Delta T \leq \frac{\pi^2 E \cdot J}{L^2}$$

$$L \leq \frac{\pi^2 E \cdot J}{\Delta T}$$

$$\Delta T \leq \frac{\pi^2 E \cdot J}{L^2}$$

При большой длине откоса и устройства упора, возможна потеря устойчивости в виде выпора блоков. Для одного ряда блоков критические значения силы, при которой не может произойти выпор, равны:

$$\Delta T \leq \frac{\pi^2 E \cdot J}{L^2} \quad (19)$$

В этом случае следует уменьшить силу ΔT за счет частичного применения анкеров, либо за счет уменьшения защищаемой длины откоса, т.е. уложить маты на меньшую длину откоса.

$$L \leq \pi \sqrt{\frac{E \cdot J}{\Delta T}} \quad (20)$$

При проверке приводимого выше неравенства подставляемое значение EJ требует экспериментального определения, так как связь между блоками осуществляется канатами.

2.3. Расчет дополнительного крепления конструкции УГЗБМ

анкерами и тросами.

2.3.1. Формирование задач

Определить количество анкеров на 1 м^2 для закрепления матов на крутых откосах, в случае когда не обеспечена устойчивость на сдвиг.

Анкеры могут быть выполнены из различных материалов и иметь различную прочность.

2.3.2. Математическое обоснование задач.

Рассматривается равновесие УГЗБМ с учетом некомпенсированной силы сдвига ΔT . Прочность одного анкера равна R_a .

2.3.3. Формирование задач

Определить количество тросов (и анкеров, располагаемых в этом случае , за откосной частью) на 1 пог. метр ширины мата. Прочность анкера равна прочности троса R_T .

2.3.4. Математическое обоснование задач.

Рассматривается равновесие УГЗБМ с учетом некомпенсированной силы сдвига ΔT . Прочность одного анкера равна R_a .

2.3.5. Если устойчивость матов не обеспечена, их можно дополнительно укрепить устройством анкеров между блоков. Количество необходимых для этого анкеров рассчитывается по следующей схеме.

Обозначим прочность единичного анкера, углубленного в грунт откоса через R_a . В условиях прежних обозначений количество анкеров n_a на ряд единичной ширины равно:

$$n_a = \frac{\Delta T}{R_a} \quad (21)$$

Если ширина блока равна d_6 , то на 1 м^2 откоса следует установить

$$N = \frac{n_a}{l \cdot l_6}. \quad (22)$$

Анкеры следует устанавливать равномерно по длине и в шахматном порядке.

Если дополнительное крепление производится тросами, то прочность анкеров закрепляемых за откосной частью должна быть равна прочности анкера.

$$R_T = R_a \quad (23)$$

Количество тросов и анкеров в этом случае равно:

$$n \geq \frac{\Delta T}{l_{\sigma} \cdot R_T} \quad (24)$$

2.4. Расчет толщины матов при защите откосов от волнобоя.

2.4.1. Формирование задач.

Определить необходимую длину укрепления откоса при волнобое в зависимости от глубины поймы. Определить необходимую толщину УГЗБМ с учетом возникновения разрежения при откате волны с откоса.

2.4.2. Математическое обоснование задач.

Определить высоту волны при известной глубине $h_{наб}$ для нахождения длины укрепленных откосов в зависимости от коэффициента шероховатости откоса. Определить толщину УГЗБМ, обеспечивающую устойчивость УГЗБМ на откосе.

Важное значение имеет укрепление и защита откосов пойменных насыпей от волнобоя. Маты укрепления должны быть уложены на слоистом обратном фильтре из специально подобранной гравийной или щебеночной смеси толщиной 30 – 45 см, снимающей гидростатическое давление при откате волн или укладываться на геотекстильный материал. Откосы насыпей при волнобое испытывают значительное давление, сменяющееся некоторым разрежением при откате волн.

Предельная высота волны на пойме определяется по следующей формуле:

$$h_{вол} \leq 0,2h_{нб} \quad (25)$$

$h_{нб}$ – бытовая глубина пойменного потока.

Волна, набегая на откос насыпи, поднимается по нему до высоты (от спокойного уровня воды) $h_{наб}$, равного :

$$h_{наб} = \frac{4,3\kappa_{ш} \cdot h_{вол}}{m} \quad (26)$$

где $\kappa_{ш}$ – коэффициент относительной шероховатости откоса;

m – коэффициент заложения откоса.

$$m = \text{ctg } \alpha \quad (27)$$

Коэффициент относительной шероховатости откоса для УГЗБМ равен:

$\kappa_{ш} = 0,80$.

Необходимая длина укрепления откоса l равна:

$$l = \kappa_3 \cdot h_{наб} \cdot m \quad (28)$$

κ_3 – коэффициент запаса, равный $\kappa_3 = 1,2$.

Следовательно

$$l = 1,2 \cdot 4,3\kappa_{ш} \cdot h_{вол} = 5,1h_{вол} \quad (29)$$

Необходимая толщина блока определяется по следующей формуле :

$$h_{на} = \frac{0,11h_{вол}\gamma_6}{(\gamma_6 - \gamma_6)\sqrt{l_{6л}}} \cdot \frac{\sqrt{1+m^2}}{m} \quad (30).$$

Маты из блоков такой толщины не будут сброшены в воду.

Для укрепления подтопленных откосов внизу устраивается упор, защищающий подошву откоса от подмыва.

Если дерновой покров поймы будет разрушен течением, то размыв произойдет за упором и откоса не коснется. Упор при этом разрушится, и слагающие его материалы прикроют откос местной ямой размыва.

Обычно упоры (рисбермы) не применяются при размывах более 3 м. Ширина упора (из щебня, гравия и т.п.) при откосах круче 1:2, достаточная для удержания на откосе, может быть определена расчетом:

$$e_{укр} = \frac{lh_{укр}}{2fh_p} (\sin 2\beta - f \cos 2\beta) \frac{\gamma_k}{\gamma_k - \gamma_0} \quad (31)$$

l - длина укрепления (по откосу);

$h_{\text{укр}}$ – толщина укрепления вместе с подстилающим слоем щебня или гравия;

h_p – ожидаемая глубина размыва;

β - угол наклона откоса к горизонту;

f – коэффициент трения при подвижке укрепления по грунтовому откосу (в данном случае $f \approx 0,5$) – трение по слою щебня;

γ_k - плотность камня;

γ_v - плотность воды.

Необходимость в таком расчете может встретиться только при проектировании защиты существующей насыпи, так как правилами проектирования предусматривается крутизна смоченного откоса пойменных насыпей не более 1:2.

3. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ПОСЛЕ УКЛАДКИ НА НЕГО УГЗБМ

3.1. Формулировка задачи.

Определить как изменилась устойчивость откоса после укладки на него УГЗБМ.

В настоящее время при определении устойчивости откоса в дорожном строительстве используется метод оценки сдвигоустойчивости по цилиндрической поверхности скольжения (КЦПС).

При этом делаются два допущения:

1. В массиве и приоткосной части имеется только вертикальное давление равное весу грунта над рассматриваемой точкой.

2. Скольжение происходит по круглой цилиндрической поверхности.

Метод КЦПС применяется давно и доказал свою практическую значимость.

Между тем не сложно показать, что при данном распределении напряжений линия скольжения должна быть прямой, и наоборот, если линия скольжения является круговой кривой, то распределение напряжений отлично от принимаемого.

Сложность задачи оценки устойчивости откоса (и связанных с этим инженерных решений по обеспечению его устойчивости) определяется тем обстоятельством, что в приоткосной части в общем случае имеются две области: область, в которой грунт работает в упругой стадии и область, где грунт находится в состоянии предельного равновесия.

Можно провести некоторую аналогию с работой балки в упруго-пластической стадии, когда часть сечения балки работает упруго, а часть – пластически.

Метод оценки с помощью круглоцилиндрической поверхности скольжения не рассматривает подобные области, оценивая устойчивость интегрально при указанных выше допущениях.

В данной статье рассматривается возможность оценки устойчивости откоса с определением упругой области зон предельного равновесия, возникающих в приоткосной части.

Принимается, что давление на приоткосную часть создается грунтом, находящимся в активном ренкиновском состоянии. Удерживающая способность грунта, обусловленная наличием у него сцепления, в этом случае не учитывается. Последнее обстоятельство можно отнести в счет коэффициента запаса.

3.2. Математическое обоснование задач.

Распределение напряжений находится из решения уравнений теории упругости .

Таким образом, рассматривается следующая схема (рис.1):

1. Распределение напряжений

1). Горизонтальное давление определяется активным давлением [1].

$$\sigma_x = \gamma \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot z \quad (1)$$

где γ - удельный вес грунта;

φ - угол внутреннего трения.

Обозначим

$$\rho = \gamma \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

Тогда

$$\sigma_x = \rho \cdot z \quad (3)$$

2) Состояние предельного равновесия в сыпучем грунте наступает, когда главные напряжения σ_1 и σ_2 связаны следующей зависимостью (для сыпучей среды , $c=0$), далее рассмотрен более общий случай грунта, обладающего сцеплением и углом внутреннего трения :

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

Угол заложения откоса α связан с углом β равенством $\alpha = \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)$.

Определим распределение напряжений в приоткосной части с учетом нагрузки на откос, горизонтального давления грунта и веса грунта приоткосной части (рис.1).

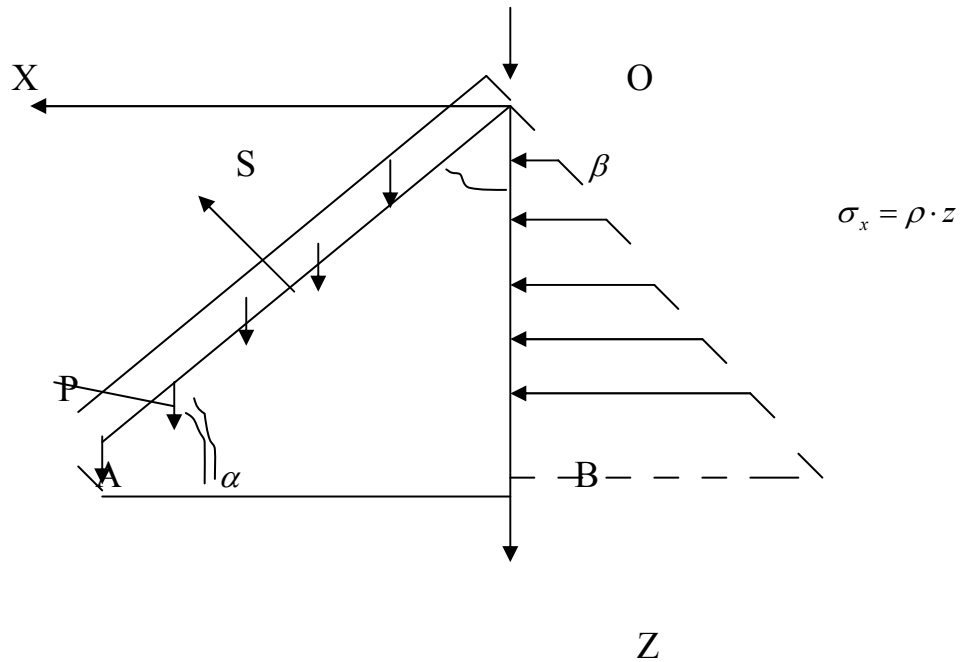


Рис.1.

Нагрузку на откос обозначим через P .

Примем функцию напряжений полиномиальной - третьей степени со следующими коэффициентами:

$$\varphi = \frac{d}{6}x^3 + \frac{c}{2}x^2z + \frac{f}{2}x \cdot z^2 + \frac{k}{6}z^3 + \frac{a}{2}x^2 \quad (5)$$

Тогда:

$$\sigma_z = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = dx + ez + a \quad (6)$$

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = fx + kz \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} = -ex - fz - \gamma x \quad (8)$$

где в (8) учтено частное решение, учитывающее вес грунта.

Запишем граничные условия:

1) На грани OZ при $x=0$

$$\begin{cases} \tau_{-xz} = -\tau_{zx} = 0 \\ \sigma_{-x} = -\sigma_x = \rho z \end{cases} \quad (9)$$

2) На грани OA при $x = z \operatorname{tg} \beta$

($\operatorname{tg} \beta$ - коэффициент заложения откоса).

$$\begin{cases} \sigma_{xs} = 0 \\ \sigma_{zs} = -P \end{cases} \quad (10)$$

Учитывая условия (9) получим из (6) – (8) следующие равенства:

$$1. -\tau_{xz} = +ex + fz + \gamma x \Big|_{x=0} \rightarrow f = 0$$

$$\tau_{xz} = -(e + \gamma)x \quad (11)$$

$$2. -\sigma_x = \gamma z = -fx - kz = \rho z \rightarrow k = -\rho$$

$$\sigma_x = -\rho z \quad (12)$$

3. Учтем условия на грани OA (10):

$$\begin{cases} \sigma_x \cos \beta - \tau_{xy} \sin \beta = 0 \\ \tau_{xy} \cos \beta - \sigma_y \sin \beta = -P \end{cases} \quad (13)$$

$$x = z \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (14)$$

Подставляя (14) и (11), (12) и (6) получим:

$$\begin{cases} (-\rho z) \cos \beta + (e + \gamma)x \sin \beta = 0 \\ -(e + \gamma)x \cos \beta - (dx + ez + a) \sin \beta = -P \end{cases} \quad (15)$$

Или с учетом (14)

$$\begin{cases} -\rho z \cos \beta + (e + \gamma)z \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \beta = 0 \\ -(e + \gamma)z \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \beta - (d \cdot z \cdot \operatorname{tg} \beta + ez + a) \sin \beta = -P \end{cases} \quad (16)$$

Последнее равенство в (16) можно удовлетворить, если:

$$a \cdot \sin \beta = P \quad (17)$$

Или

$$a = \frac{P}{\sin \beta} \quad (18)$$

Определим из системы (16) остальные коэффициенты:

$$\begin{cases} -\rho \cos \beta + (e + \gamma) \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \beta = 0 \\ -(e + \gamma) \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \beta - (d \cdot \operatorname{tg} \beta + e) \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$(e + \gamma) = \frac{\rho}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \gamma$$

$$\boxed{e = \frac{\rho}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \gamma} \quad (20)$$

$$-(e + \gamma) - (d + e) = 0$$

$$-2e - \gamma - d = 0$$

$$\operatorname{tg} \beta = -(2e + \gamma) = -\left(\frac{2\rho}{\operatorname{tg}^2 \beta} - 2\gamma + \gamma\right)$$

$$\boxed{d = -\left(\frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3 \beta} - \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \beta}\right)} \quad (21)$$

$$\boxed{d = \frac{\gamma}{\operatorname{tg} \beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3 \beta}} \quad (22)$$

Следовательно, с учетом последних равенств:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\rho \cdot z \\ \sigma_z = \left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg} \beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3 \beta}\right)x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg} \beta} - \gamma\right)z + \frac{P}{\sin \beta} \\ \tau_{xz} = -(e + \gamma)x \end{cases}$$

$$\boxed{\tau_{xz} = -\left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \gamma + \gamma\right)x = -\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2 \beta}x} \quad (23)$$

II. Расположение зоны предельного равновесия.

Определим главные напряжения в произвольной точке М (x,z):

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \\ \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \end{cases} \quad (24)$$

Подставляя (4) в (24) без учета сцепления для сыпучей среды, получим:

$$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \geq \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \left[\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}\right] \quad (25)$$

Группируя, получим:

$$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) \left[\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 1\right] \leq [1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)] \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad (26)$$

Обозначим:

$$\lambda = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (27)$$

Тогда:

$$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) (\lambda - 1) \leq (\lambda + 1) \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad (28)$$

Возводим последнее равенство в квадрат:

$$\left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)^2 \leq \left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2 \quad (29)$$

Обозначим:

$$\mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}\right)^2 \quad (30)$$

Тогда:

$$\mu \cdot \left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)^2 \leq \left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2 \quad (31)$$

$$\mu(\sigma_x^2 + 2\sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_z^2) = \sigma_x^2 - 2\sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2$$

$$\sigma_x^2(1 - \mu) - 2\sigma_x \cdot \sigma_z(1 + \mu) + \sigma_z^2(1 - \mu) + 4\tau_{xz}^2 \geq 0 \quad (32)$$

Подставляя значения $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ из (23) в (32), получим:

$$\begin{aligned} & \rho^2 z^2 (1 - \mu) + 2\rho z \left[\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta} \right] (1 + \mu) + \\ & \left[\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta} \right]^2 (1 - \mu) + \frac{4\rho^2}{\operatorname{tg}^4\beta} x^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

Или:

$$\rho^2 z^2 + 2\rho z - \frac{(1+\mu)}{(1-\mu)} \left[\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta} \right] +$$

$$\left[\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta} \right]^2 + \frac{4\rho^2}{\operatorname{tg}^4\beta} x^2 = 0 \quad (34)$$

$$z^2 + 2 \left[\frac{\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right)}{\rho} xz + \frac{\left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right)}{\rho} z^2 + \frac{P}{\rho \cdot \sin\beta} \cdot z \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \right) + \left[\frac{\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right)}{\rho} x + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right)}{\rho} z + \frac{P}{\rho \sin\beta} \right]^2 + \frac{4\rho^2}{(1-\mu)\operatorname{tg}^4\beta} x^2 \geq 0 \quad (35)$$

Обозначим:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg}\beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) \\ b = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2\beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) \\ c = \frac{4}{(1-\mu)\operatorname{tg}^4\beta} \\ d = \frac{P}{\rho \sin\beta} \\ v = \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \end{array} \right. \quad (36)$$

Перепишем (35) с учетом обозначений (36):

$$z^2 + 2v[q \cdot x \cdot z + b \cdot z^2 + d \cdot z] + [q \cdot x + b \cdot z + d]^2 + c \cdot x^2 \geq 0 \quad (37)$$

Возводя в квадрат и группируя подобные члены, получим:

$$z^2 + (2q \cdot x \cdot z + 2b \cdot z^2 + 2d \cdot z) \cdot v + (q^2 \cdot x^2 + 2q \cdot b \cdot x \cdot z + b^2 \cdot z^2) + 2q \cdot x \cdot d + 2b \cdot z \cdot d + d^2 + c \cdot x^2 = 0 \quad (38)$$

$$z^2(1+2b \cdot v + b^2) + 2x \cdot z(q \cdot v + q \cdot b) + x^2(q^2 + c) + z(2d \cdot v + 2bd) + 2q \cdot d \cdot x + d^2 = 0$$

Или:

$$z^2 + \frac{2q(v+b)}{1+2b \cdot v + b^2} xz + \frac{(q^2 + c)}{1+2b \cdot v + b^2} x^2 + \frac{2d(v+b)z}{1+2b \cdot v + b^2} + \frac{2q \cdot d \cdot x}{1+2b \cdot v + b^2} + \frac{d^2}{1+2b \cdot v + b^2} = 0 \quad (39)$$

Обозначим:

$$K = 1 + 2b \cdot v + v^2$$

$$P_0 = \frac{q(v+b)}{K}$$

$$q_0 = \frac{q^2 + c}{K} \quad (40)$$

$$r = \frac{2d(v+b)}{K}$$

$$s = \frac{2q \cdot d}{K}$$

$$t = \frac{d^2}{K}$$

С учетом обозначений (40) равенство (39) перепишем в виде:

$$\boxed{z^2 + 2P_0 \cdot x \cdot z + q_0 \cdot x^2 + r \cdot z + s \cdot x + t \geq 0} \quad (41)$$

Рассмотрим случай, когда $P=0$ и следовательно $d = r = s = t = 0$.

$$z^2 + 2P_0 \cdot x \cdot z + q_0 \cdot x^2 \geq 0 \quad (42)$$

Решая относительно z , получим:

$$z = -P_0 \cdot x \pm \sqrt{P_0^2 \cdot x^2 - q_0 \cdot x^2} \quad (43)$$

$$z_{12} = -P_0 \cdot x \pm x\sqrt{(P_0^2 - q_0)} \quad (44)$$

Таким образом, если дискриминант $D = P_0^2 - q_0 > 0$, то имеются два семейства линий скольжения:

$$\boxed{z_1 = (-P_0 + \sqrt{P_0^2 - q_0})x} \quad \boxed{z_2 = (-P_0 - \sqrt{P_0^2 - q_0})x} \quad (45)$$

Если дискриминант < 0 , то вся зона находится в предельном состоянии.

Если под углом естественного заложения откоса понимать угол откоса, при котором вообще не возникает область предельного равновесия, то для определения такового можно написать следующее равенство:

$$\frac{1}{\operatorname{tg}\beta} = -P_0 + \sqrt{P_0^2 - q_0}.$$

Находя из этого уравнения β , определим угол естественного откоса α :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta.$$

Определим область предельного равновесия с учетом наличия у грунта как угла внутреннего трения φ , так и сцепления c .

$$\sigma_1 \geq 2c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + \sigma_2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (46)$$

Тогда условие прочности (25) в данном случае запишется в следующем виде:

$$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} = \lambda \left[\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \right] + 2c\sqrt{\lambda} \quad (47)$$

Группируем (47):

$$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right) \cdot (\lambda - 1) + 2c\sqrt{\lambda} = (\lambda + 1) \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \quad (48)$$

Возводя в квадрат обе части равенства (3), получим:

$$\left[\left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)^2 + 2c \cdot \frac{\sqrt{\lambda}}{\lambda + 1} \right]^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2 \quad (49)$$

Обозначим:

$$a_1 = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}; \quad a_2 = \frac{2c\sqrt{\lambda}}{\lambda + 1} \quad (50)$$

$$\left[a_1 \left(\frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}\right)^2 + a_2 \right]^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2 \quad (51)$$

$$\frac{a_1^2}{4} (\sigma_x + \sigma_z)^2 + a_2^2 + a_1 a_2 (\sigma_x + \sigma_z) = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{xz}^2 \quad (52)$$

$$a_1^2 (\sigma_x + \sigma_z)^2 + 4a_1 a_2 (\sigma_x + \sigma_z) + 4a_2^2 = (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 \quad (53)$$

$$a_1^2 \sigma_x^2 + 2a_1^2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_z + a_1^2 \sigma_z^2 + 4a_1 a_2 \sigma_x + 4a_1 a_2 \sigma_z = \sigma_x^2 - 2\sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 4(\tau_{xz}^2 - a_2^2) \quad (54)$$

Или:

$$\sigma_x^2 (1 - a_1^2) - 2\sigma_x \cdot \sigma_z (1 + a_1^2) + \sigma_z^2 (1 - a_1^2) - 4a_1 a_2 (\sigma_x + \sigma_z) + 4(\tau_{xz}^2 - a_2^2) = 0 \quad (55)$$

Так как $\lambda = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$, и рассматриваем случай $\varphi \neq 0$, то $\lambda \neq 1$, в этом

случае $1 - a_1^2 \neq 0$

Разделим (55) на $(1 - a_1^2)$, тогда

$$\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - 2\sigma_x\sigma_z \left(\frac{1+a_1^2}{1-a_1^2} \right) - \frac{4a_1a_2}{(1-a_1^2)}(\sigma_x + \sigma_z) + \frac{4}{(1-a_1^2)}(\tau_{xz}^2 - a_2^2) = 0 \quad (56)$$

Обозначим:

$$\mu = \frac{(1+a_1^2)}{(1-a_1^2)}; \quad \nu = \frac{4a_1a_2}{(1-a_1^2)}; \quad \omega = \frac{4}{(1-a_1^2)} \quad (57)$$

С учетом обозначений (57) перепишем (56):

$$\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - 2\mu \cdot \sigma_x \sigma_z - \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_z) + \omega(\tau_{xz}^2 - a_2^2) = 0 \quad (58)$$

Подставляя значения σ_x, σ_z и τ_{xz} из (23), получим:

$$\begin{aligned} & \rho^2 z^2 + \left[\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta} \right]^2 - 2\mu(-\rho z) \left[\left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta} \right] - \\ & - \nu[-\rho \cdot z + \left(\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\beta} - \frac{2\rho}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{\rho}{\operatorname{tg}^2\beta} - \gamma \right) z + \frac{P}{\sin\beta}] + \omega \left(\frac{\rho^2 x^2}{\operatorname{tg}^4\beta} - a_2^2 \right) = 0 \end{aligned} \quad (59)$$

Или:

$$\begin{aligned} & z^2 + \left[\left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg}\beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2\beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) z + \frac{P}{\rho \cdot \sin\beta} \right]^2 + 2\mu \cdot z \\ & \left[\left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg}\beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2\beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) z + \frac{P}{\rho \cdot \sin\beta} \right] - \\ & - \frac{\nu}{\rho} \left[-z + \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg}\beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3\beta} \right) x + \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2\beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) z + \frac{P}{\rho \cdot \sin\beta} \right] + \omega \left(\frac{x^2}{\operatorname{tg}^4\beta} - \frac{a_2^2}{\rho^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (60)$$

$$\boxed{\frac{\gamma}{\rho} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}} \quad (61)$$

Обозначим:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_2 = \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3 \beta} \right) \\ b_3 = \left[\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} \right] \\ b_4 = \frac{\nu}{\rho} \\ b_5 = \frac{P}{\rho \cdot \sin \beta} \\ b_6 = \frac{\omega}{\operatorname{tg}^4 \beta} \\ b_7 = \omega \frac{a_2^2}{\rho^2} \end{array} \right. \quad (62)$$

Перепишем с учетом обозначений:

$$z^2 + [b_2 x + b_3 z + b_5]^2 + 2\mu \cdot z[b_2 x + b_3 z + b_5] - b_4 [b_2 x + (b_3 - 1)z + b_5] + b_6 x^2 - b_7 = 0 \quad (63)$$

$$\begin{aligned} & z^2 + [(b_2^2 x^2 + 2b_2 b_3 x \cdot z + b_3^2 z^2) + 2b_5 (b_2 x + b_3 z) + b_5^2] + 2\mu [b_2 x \cdot z + b_3 z^2 + b_5] - \\ & - b_4 [b_2 x + (b_3 - 1)z + b_5] + b_6 x^2 - b_7 = 0 \\ & z^2 (1 + b_3^2 + 2\mu \cdot b_3) + x^2 (b_2^2 + b_6) + 2x \cdot z (b_2 b_3 + \mu \cdot b_2) + z [2b_5 b_3 - b_4 (b_3 - 1)] + x (2b_5 b_2 - b_4 b_2) + \\ & + 2b_5^3 + 2\mu \cdot b_5 - b_4 b_5 - b_7 = 0 \end{aligned} \quad (64)$$

Обозначим:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{11} = b_2^2 + b_6 \\ a_{12} = b_2 b_3 + \mu \cdot b_2 \\ a_{22} = 1 + b_3^2 + 2\mu \cdot b_3 \\ a_1 = \frac{2b_2 b_5 - b_4 b_5}{2} = \frac{b_2 (2b_5 - b_4)}{2} \\ a_2 = \frac{2b_5 b_3 - b_4 (b_3 - 1)}{2} \\ a_0 = 2b_5^3 + 2\mu \cdot b_5 - b_4 b_5 - b_7 \end{array} \right. \quad (65)$$

Тогда уравнение запишется в следующем виде:

$$a_{11} x^2 + 2a_{12} x \cdot z + a_{22} z^2 + 2a_1 x + 2a_2 z + a_0 = 0 \quad (66)$$

Для определения вида граничной кривой, не приводя ее непосредственно к каноническому виду, находим:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_1 \\ a_{12} & a_{22} & a_2 \\ a_1 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

$$\bar{\Delta} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix}$$

Кривая вырождена, если $\Delta = 0$.

Если при этом $\bar{\Delta} < 0$, то получаются две пересекающиеся прямые, если же $\bar{\Delta} = 0$, то две параллельные или совпадающие прямые (если $\bar{\Delta} > 0$ – кривая состоит максимум из одной точки).

Если $\Delta \neq 0$, то при $\bar{\Delta} > 0$ – эллипс или окружность, при $\bar{\Delta} = 0$ – парабола, при $\bar{\Delta} < 0$ – гипербола.

Приведем уравнение к каноническому виду.

Вначале к следующей форме:

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 z'^2 + 2a_1'x' + 2a_2'z' + a_0 = 0$$

$$1) \lambda_1 \lambda_2 \neq 0 \quad s = a_{11} + a_{22}$$

$$2) \lambda_1 \lambda_2 = 0 \quad \delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$$

1) Перепишем начало координат:

$$x = \xi + x_0$$

$$z = \eta + z_0$$

Подставляя, получим:

$$F(x, z) = a_{11}\xi^2 + 2a_{12}\xi \cdot \eta + a_{22}\eta^2 + 2(a_{11}x_0 + a_{12}z_0 + a_1)\xi + 2(a_{21}x_0 + a_{22}z_0 + a_2)\eta + F(x_0, z_0)$$

Определим x_0, z_0 так, чтобы коэффициенты при ξ и η обратились в нули.

$$\begin{cases} a_{11}x_0 + a_{12}z_0 + a_1 = 0 \\ a_{21}x_0 + a_{22}z_0 + a_2 = 0 \end{cases}$$

Так как

$$\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \neq 0$$

то уравнение решается однозначно, из него определяются x_0, z_0 .

Ортогональный инвариант равен:

$$s = a_{11} + a_{22}$$

Имеем корни λ_1 и λ_2 характеристического уравнения.

$$\lambda^2 - s \cdot \lambda + \delta = 0$$

$$\lambda^2 - (a_{11} + a_{22})\lambda + (a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}) = 0$$

$$\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$$

Определим угол α так, чтобы преобразовать многочлен в

$$F'(x', z') = \lambda_1 x'^2 + \lambda_2 z'^2 + \bar{a}$$

Определим свободный член \bar{a} .

Воспользуемся инвариантностью детерминанта:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_2 \\ a_1 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{a} \end{vmatrix} = \lambda_1 \lambda_2 \bar{a} = \delta \bar{a}$$

Откуда:

$$\bar{a} = \frac{\Delta}{\delta}$$

Следовательно, многочлен $F(x, z)$ тождественно преобразуется в

$$F'(x', z') = \lambda_1 x'^2 + \lambda_2 z'^2 + \frac{\Delta}{\delta}$$

$$\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \neq 0$$

При $\Delta = 0, \rightarrow$

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 z^2 = 0$$

Следовательно уравнение распадается на пару прямых. Эти прямые действительные при $\delta = \lambda_1 \lambda_2 < 0$ и мнимые при $\delta = \lambda_1 \lambda_2 > 0$.

Пусть $\Delta \neq 0$. Тогда

$$\frac{x^2}{\frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_1}} + \frac{y^2}{\frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_2}} = 1$$

а) $\delta = \lambda_1 \lambda_2 < 0$.

Обозначим через λ_1 тот из двух корней характеристического уравнения, знак которого совпадает со знаком Δ , полагаем:

$$a^2 = -\frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda} > 0, \quad -b^2 = -\frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_2} < 0$$

Получаем уравнение гиперболы:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$$

б) $\delta = \lambda_1 \lambda_2 > 0$.

Числа λ_1 и λ_2 одного знака, и этот знак совпадает со знаком их суммы s .

Если этот знак противоположен Δ , то (обозначая через λ_1 , тот из двух корней λ_1, λ_2 характеристического уравнения, для которого $|\lambda_1| \leq |\lambda_2|$):

$$a^2 = \frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda} > 0, \quad b^2 = -\frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_2} > 0.$$

Получаем уравнение эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

Если же знак s (т.е. знак λ_1 и λ_2) совпадает со знаком Δ , то полагая

$$a^2 = \frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda}, \quad b^2 = \frac{\Delta}{\delta \cdot \lambda_2}$$

Получим уравнение мнимого эллипса

$$-\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1$$

В качестве примера рассчитаем устойчивость откоса для песка, имеющего следующие характеристики (Численный расчет).

Оценить устойчивость земляного полотна.

Оценить устойчивость земляного полотна после укладки УГЗБМ.

3.3. УГЗБМ укладывают на откосы для защиты его от разлива и эрозии. Но из-за пригрузки откоса может нарушиться устойчивость как всего земляного полотна, так и локальная его устойчивость.

В данных методических рекомендациях рассмотрена возможность нарушения устойчивости как всего земляного полотна, так и локальная, обусловленная промерзанием и весенним оттаиванием грунта откосной части.

В первом случае рассмотрена следующая схема оценки устойчивости земляного полотна (рис.1)

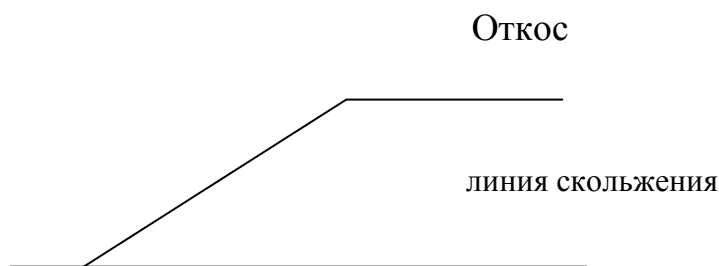


Рис.1

Методом КЦПС определяется коэффициент устойчивости без пригрузки

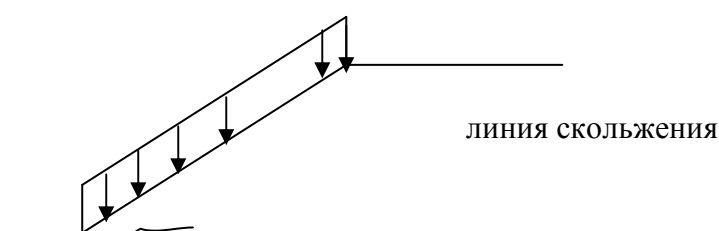


Рис.2

откоса УГЗБМ. Затем рассчитывается коэффициент устойчивости при нагружении откоса УГЗБМ. При этом коэффициент запаса должен быть не менее 1,1 – 1,2 в зависимости от категории дороги.

Для оценки локальной устойчивости принимается расчетная схема, изображенная на рис.3.

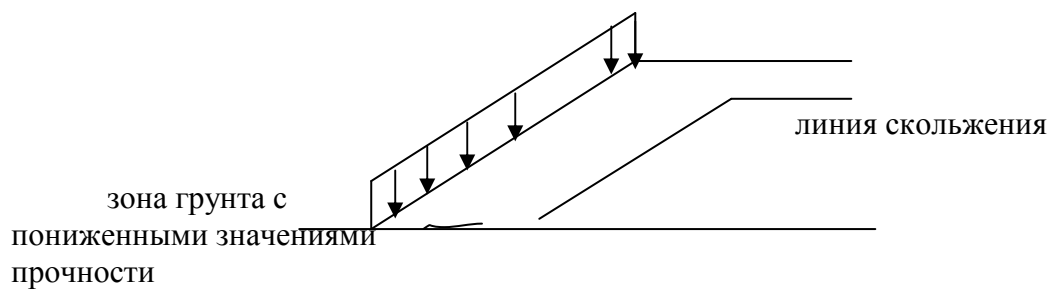


Рис.3
Схема расчета локальной устойчивости

Так как вручную такие расчеты провести практически невозможно, составлена программа на Бейсике, позволяющая рассчитать коэффициент устойчивости на компьютере. В программе предусмотрена возможность рассмотрения схемы с частичной пригрузкой откоса и проезжей части, благодаря разбиению их на четыре участка, характеризуемых заданными значениями нагрузок и длинами участков нагружения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых расчётов выявлена высокая эффективность защиты откосов земляного полотна и мостовых конусов Универсальными гибкими защитными бетонными матами (УГЗБМ).

1. В работе проведены расчеты по оценке устойчивости откосов как до укладки на нем УГЗБМ, так и после укладки. УГЗБМ могут быть рекомендованы как эффективное средство для защиты и укрепления откосов при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог, проходящих в выемках или насыпях и требующих дополнительных мероприятий для укрепления откосов.

2. В работе проведены расчеты по дополнительному креплению УГЗБМ на откосах. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на откосах с коэффициентом заложения более 2 дополнительного крепления УГЗБМ не требуется. Для откосов с коэффициентом заложения менее 2 в работе приведены расчёты по параметрам дополнительного крепления УГЗБМ в зависимости от типов грунтов.

3. В работе проведены расчёты по определению толщины бетонных блоков (модели) УГЗБМ для надежной защиты откосов пойменных насыпей.

4. К настоящим рекомендациям прилагается программа, позволяющая:

- оценить устойчивость откосов как до укладки на нем УГЗБМ, так и после укладки.
- рассчитать число анкеров, размеры упоров, толщину блоков и другие параметры крепления УГЗБМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. МОДН 2-2001 «Проектирование нежестких дорожных одежд».
2. Гудьер Дж., перев. с англ. Тимошенко С. П., Теория упругости. -М.: Наука, 2002.-576с.
3. Строительство автомобильных дорог. / Под ред. Н.В. Горелышева. - М.: Транспорт, 1992.-345с.
4. Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог. –М.: Транспорт, 1987.-407с.;
5. Терцаги К. Теория механики грунтов. -М.: Госстройиздат, 1961.-508с.
6. Автомобильные дороги. Примеры проектирования. / Под ред. В.С. Порожнякова - М.: Транспорт, 1983.-482с.
7. СНиП 2.05.02 – 85 «Автомобильные дороги».

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

- | | |
|----------------------------|---------------|
| 1. Начальник ЦСИДА, к.т.н. | И.Ж. Хусаинов |
| 2. Руководитель группы | В.Н. Раецкий |
| 3. Ведущий инженер | Л.Ф. Райхлина |
| 4. Инженер | А.В. Ивантеев |

1. Пример расчета предельного заложения откоса

Земляное полотно дороги III категории состоит из среднезернистого песка.

Определить заложение откоса, при котором не требуется установить дополнительное крепление УГЗБМ.

1. По табл.3 определяем, что тангенс угла откоса равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,5$$

2. По формуле (6) , определяем минимальное заложение откоса m:

$$m = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{1}{0,5} \approx 2$$

Следовательно, при коэффициенте заложения $m > 2$ укрепления не требуется.

2. Пример расчета блока на опрокидывание

Откос имеет заложение $m = 1:2$.

Если выбран УГЗБМ с величинами $a = 19$, $b = 12$ тип бетонного блока 1) по формуле (7) определяем:

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg} \beta$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{m} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2} = 0.5$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{19}{24} \approx 0,79$$

$$0,5 \leq 0,79$$

Следовательно, блок не опрокинется.

3. Пример расчета укрепления

Выбран УГЗБМ с блоком тип 2, $l_0 = 30$ см.

Заложение откоса 1:1, т.е. $m_0 = 1$, т.е.

$$\operatorname{tg} \alpha = 1, \quad \alpha = \frac{\pi}{4}$$

Грунт земляного полотна – суглинок.

Высота откоса 5 метров.

Дорога IV категории.

1). Определяем по табл.3 $\operatorname{tg} \alpha = 0,17$

Заложение m равно:

$$m = \frac{1}{0,17} = 6 \quad (1:6)$$

Требование по устойчивости УГЗБМ не выполняется.

2). Определим общую сдвигающую силу ΔT , действующую на ряд шириной в один блок, расположенный по всей длине откоса.

Длина откоса l равна:

$$a) \quad l = \sqrt{h^2 + h^2 m_0^2} = h \sqrt{1 + m_0^2}$$

$$l = 5 \cdot \sqrt{1+1} = 7,0 \text{ м}$$

b) Количество блоков на откосе равно по формуле (1):

$$n = \frac{l}{l_6} = \frac{7(\text{м})}{0,3(\text{м})} \approx 24 \text{ штуки.}$$

c) Вес одного блока G_6 равен:

$$G_6 = 36 \text{ кг} \approx 360 \text{ н}$$

d) Вес всего ряда равен:

$$G = G_6 n = 24 \cdot 0,36 = 864 \text{ кг} = 0.864 \text{ т}$$

3) Определим величину не скомпенсированной силы сдвига:

$$\Delta T = \kappa \cdot G \cdot \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi)$$

Тангенс φ определяется по табл.1 и по табл. 2.

$$\varphi = 11^\circ \quad \operatorname{tg} \varphi = 0,19$$

$$\cos \alpha = \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0,71$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1$$

$$\Delta T = 1.1 \cdot 864 \cdot 0,71(1 - 0,9) = 547 \text{ кг}$$

3.1. Пример расчета упора

Грунт основания суглинок $\gamma = 1,92 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, угол внутреннего трения, которого $\varphi = 8^\circ$, $c_0 = 0,012$.

В условиях предыдущего примера:

1). Определим глубину заложения упора h по формуле (9)

$$\Delta T_0 = \Delta T \cos \alpha (1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi)$$

$$\gamma \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot l_0 + c_c \cdot l_0 \frac{h}{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} = \Delta T_0$$

$$\gamma \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot l_0 + \frac{c \cdot l_0}{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} h - \Delta T_0 = 0$$

$$\Delta T_0 = 547 \cdot 0,71(1 - 0,14) = 334 \text{ кг}$$

По формуле () определим:

$$P = \frac{C_0}{\gamma \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}$$

$$q = \frac{\Delta T}{\gamma \cdot l_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}$$

$$P = \frac{0,012 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}}{0,00192 \cdot \sin(45 + 4) \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + 4^\circ \right)}$$

$$q = \frac{334}{0,00192 \cdot 30 \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ + 4^\circ)} = \frac{334}{0,066} = 5060$$

$$P = \frac{0,12}{0,00192 \cdot 1,15 \cdot 0,76} = \frac{0,12}{0,0017}$$

$$h = \frac{-71 + \sqrt{51,84 + 4 \cdot 5060}}{2} = \frac{-71 + 159}{2} = 44 \text{ см}$$

2). Определим ширину b упора.

Определяем α_β (блоки тип 2, $h_0 = 24$ см, разница между стороной срединного основания и нижнего основания $d_0 = 30 - 26 = 4$ см.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\beta} = \frac{h_{\sigma}}{2d_{\sigma}} = \frac{24}{2 \cdot 4} = 3$$

$$\alpha_{\beta} = 72^{\circ}$$

По формуле (15):

$$b = \frac{l_{\sigma}}{2} \sin \alpha_{\sigma} + \frac{\Delta T_0}{\Delta T} \frac{\left(\frac{2}{3} h - \frac{l_{\sigma}}{2} \cos \alpha_{\beta}\right)}{\cos \alpha}$$

$$b = \frac{26}{2} \cdot 0,95 + \frac{334}{547} \frac{\left(\frac{2}{3} \cdot 44 - \frac{26}{2} \cdot 0,3\right)}{0,71} = 12,35 + 0,61 \frac{(29,3 - 3,9)}{0,71} =$$

$$= 12,35 + 0,86 \cdot 25,4 = 12,35 + 21,8 = 34 \text{ см.}$$

3.2. Пример расчета крепления анкерами или тросами

1). Прочность одного анкера, заглубленного на 0,4 м в откос, примем равной $R_a = 32$.

На ряд шириной в один блок на всю длину откоса необходимо n_a анкеров (21):

$$n_a = \frac{\Delta T}{R_a} = \frac{547}{32} = 17 \text{ анкеров}$$

Следовательно, на 1 м^2 приходится (22):

$$N = n_a \cdot \frac{l_{\sigma}}{l} = 17 \cdot \frac{1}{7 \cdot 0,3} = \frac{17}{2,1} = 8 \text{ анкеров}$$

2). Прочность троса принимается равной $R_T = 2400$ кг.

Количество тросов и анкеров (24):

$$n_a = n_T = \frac{\Delta T}{R_T \cdot l_{\sigma}} = \frac{547}{2400 \cdot 0,3} = 0,75 \frac{\text{шт}}{\text{МЕТР}}$$

4. Расчет толщины матов при волнобое

Бытовая глубина пойм $h_{\text{пб}} = 3,2$ м.

Тогда необходимая для укрепления откоса l равна:

$$l = 1,02 h_{\text{пб}} \approx 3,26 \approx 3,5 \text{ м.}$$

Заложение откоса $m = 2$.

Необходимая толщина блока определяется по формуле (30):

$$h_{нл} = \frac{0,11h_{вол}\gamma_с}{(\gamma_с - \gamma_с)\sqrt{d_{нл}}} \cdot \frac{\sqrt{1+m^2}}{m}$$

$$h_{вол} = 0,2 \quad h_{пб} = 0,2 \times 3,2 = 0,64 \text{ м. (по формуле 25)}$$

$$h_{нл} = \frac{0,110,64}{(2,3-1)\sqrt{0,3}} \cdot \frac{\sqrt{5}}{2} = \frac{0,07}{1,3 \cdot \sqrt{0,3}} \cdot \frac{\sqrt{5}}{2} = \frac{0,07 \cdot 2,23}{2,6 \cdot 0,3} = \frac{0,16}{0,78} = 0,21 \text{ м}$$

$$h_{бл} = 21 \text{ см}$$

5. Пример расчета устойчивости откоса

Удельный вес γ равен:

$$\gamma = 1,8 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}.$$

Угол внутреннего трения φ равен:

$$\varphi = 27^\circ, \text{ сцепление } c = 0.$$

Коэффициент заложения откоса $\text{tg } \beta$ равен:

$$\text{tg } \beta = 1 \quad (\beta = \frac{\pi}{4}).$$

$$1) \rho = \gamma \cdot \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) = 1,8 \text{tg}^2 (45^\circ - 13^\circ) = 1,8 \cdot (0,63)^2 = 0,71$$

$$2) \lambda = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = \text{tg}^2 (45^\circ + 13^\circ) = 0,65$$

$$3) q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \text{tg} \beta} - \frac{2}{\text{tg}^3 \beta} \right) = \left(\frac{1,8}{0,71 \cdot 1} - \frac{2}{1} \right) = 0,53$$

$$4) b = \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) = \left(1 - \frac{1,8}{0,71} \right) = -1,54$$

$$5) \mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^2 = \left(\frac{0,65 - 1}{0,65 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$6) c = \frac{4}{(1 - \mu) \text{tg}^4 \beta} = \frac{4}{0,96 \cdot 1} = 4,17$$

$$7) d = 0$$

$$8) v = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} = \frac{1 + 0,04}{1 - 0,04} = \frac{1,04}{0,96} = 1,08$$

$$9) \kappa = 1 + 2bv + v^2$$

$$\kappa = 1 + 2 \cdot (-1,54) \cdot 1,08 + 1,08^2 = -1,16$$

$$10) P_0 = \frac{q(v + b)}{k} = \frac{0,53}{-1,16} (1,08 - 1,54) = 0,21$$

$$11) q_0 = \frac{q^2 + c}{k} = \frac{0,28 + 4,17}{-1,16} = -3,84$$

$$12) P_0^2 - q_0 = (0,21)^2 + 3,84 = 3,88$$

$$k_{12} = -0,21 \pm 1,97$$

| |
|----------------------------|
| $k_1 = 1,76$ $k_2 = -2,18$ |
|----------------------------|

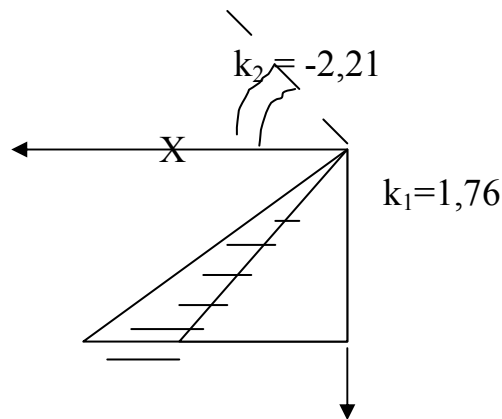


Рис.2

Z

Область предельного равновесия при коэффициенте заложения $m = 1$.

Заштрихована область предельного равновесия.

Область, лежащая между двумя пунктирными прямыми, с коэффициентами k_1 и k_2 является зоной предельного равновесия.

Так как физически эта зона ограничена откосом, то область предельного равновесия ограничена линией откоса и линией соответствующей коэффициенту k_1 (на рис.3 заштрихованная область).

2-ой вариант при тех же характеристиках определим устойчивость при $\text{tg } \beta = 0,75$.

$$3) q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \text{tg } \beta} - \frac{2}{\text{tg}^3 \beta} \right) = \left(\frac{1,8}{0,71 \cdot 0,75} - \frac{2}{(0,75)^3} \right) = (3,38 - 4,76) = -1,38$$

$$4) b = \left(\frac{1}{\text{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{(0,75)^2} - \frac{1,8}{0,71} \right) = (1,76 - 2,54) = -0,78$$

$$5) \mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^2 = \left(\frac{0,65 - 1}{0,65 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$6) c = \frac{4}{(1 - \mu) \text{tg}^4 \beta} = \frac{4}{0,96 \cdot 0,32} = 13,02$$

$$7) d = 0$$

$$8) v = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} = \frac{1 + 0,04}{1 - 0,04} = \frac{1,04}{0,96} = 1,08$$

$$9) \kappa = 1 + 2bv + v^2$$

$$\kappa = 1 + 2 \cdot (-0,78) \cdot 1,08 + 1,17 = 2,17 - 1,68 = 0,49$$

$$10) P_0 = \frac{q(v+b)}{k} = \frac{-1,38}{0,49} (1,08 - 0,78) = -0,84$$

$$11) q_0 = \frac{q^2 + c}{k} = \frac{(1,38)^2 + 13,02}{0,49} = \frac{1,90 + 13,02}{0,49} = 30,45$$

$$12) P_0^2 - q_0 = (0,84)^2 - 30,45 < 0$$

Вся приоткосная часть не устойчива.

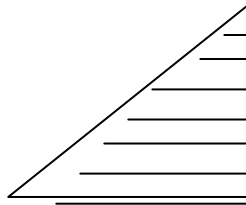


Рис. 4

Область предельного равновесия при коэффициенте заложения $m=0,75$

3-ий вариант $\operatorname{tg} \beta = 2$

$$3) q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg} \beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3 \beta} \right) = \left(\frac{1,8}{0,71 \cdot 2} - \frac{2}{8} \right) = 1,27 - 0,25 = 1,02$$

$$4) b = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{4} - \frac{1,8}{0,71} \right) = 0,25 - 2,54 = -2,29$$

$$5) \mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^2 = \left(\frac{0,65 - 1}{0,65 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$6) c = \frac{4}{(1 - \mu) \operatorname{tg}^4 \beta} = \frac{4}{0,96 \cdot 16} = 0,26$$

$$7) d = 0$$

$$8) v = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} = \frac{1 + 0,04}{1 - 0,04} = \frac{1,04}{0,96} = 1,08$$

$$9) \kappa = 1 + 2bv + v^2$$

$$\kappa = 1 + 2 \cdot (-2,29) \cdot 1,08 + 1,08^2 = 1 + 1,16 - 4,95 = -2,79$$

$$10) P_0 = \frac{q(v+b)}{k} = \frac{1,02}{-2,79} (1,08 - 2,29) = 0,44$$

$$11) q_0 = \frac{q^2 + c}{k} = \frac{(1,02)^2 + 0,26}{-2,79} = -\frac{1,04 + 0,26}{2,79} = -0,47$$

$$12) P_0^2 - q_0 = (0,44)^2 + 0,47 = 0,67$$

$$k_{1,2} = -0,44 \pm 0,82$$

$$k_1 = 0,38$$

$$k_2 = -1,26$$

Устойчивость обеспечена.

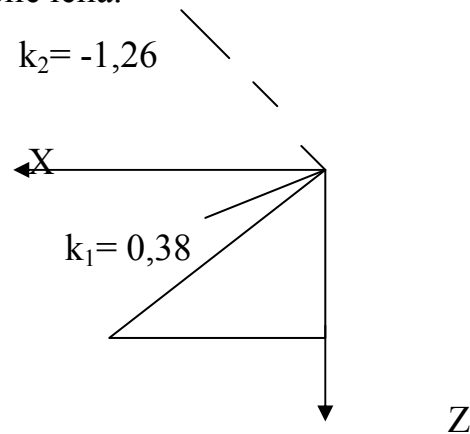


Рис. 5

В этом случае вообще не возникает область предельного равновесия, $m = 2$.

Минимальный предельный угол заложения откоса

Если вся приоткосная часть находится в критическом состоянии, то $k_1 =$

∞ ($\alpha = \frac{\pi}{2}$). Данное значение получится, если $k = 0$, т.е. $1 + 2bv + v^2 = 0$

$$1 + 2\left(\frac{1}{\text{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho}\right)v + v^2 = 0$$

$$\frac{2v}{\text{tg}^2 \beta} = \frac{2\gamma}{\rho}v - (1 - v^2)$$

$$\frac{1}{\text{tg}^2 \beta} = \frac{\gamma}{\rho} - \frac{(1+v)}{2v} = \frac{2\gamma \cdot v - \rho(1+v^2)}{2\rho \cdot v}$$

$$\text{tg}^2 \beta = \frac{2\rho v}{2\gamma \cdot v - \rho(1+v^2)}$$

$$\boxed{\text{tg} \beta = \sqrt{v} \sqrt{\frac{2\rho}{2\gamma - \rho\left(\frac{1}{v} + v\right)}}$$

$$\mu = \left[\frac{\text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 1}{\text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 1} \right]^2$$

$$v = \frac{1 + \mu}{1 - \psi} = \frac{1 + \left[\frac{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 1}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 1} \right]^2}{1 - \left[\frac{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 1}{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 1} \right]^2}$$

$$\operatorname{tg} \beta = 1,04 \sqrt{\frac{1,42}{3,6 - 0,71 \cdot 12}} = 0,84$$

Следовательно, при заложении $1 : 0,84$ вся приоткосная часть находится в состоянии предельного равновесия.

Рассмотрим задачу в некотором отношении обратную предыдущей.

Определим максимальное заложение откоса, при котором вообще не возникает область предельного равновесия.

Вероятно, под таким углом следует понимать угол естественного заложения.

Из простых геометрических соображений следует, что для такого заложения $\operatorname{tg} \beta$ выполняется равенство:

$$k_1 = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Или

$$\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} = -P_0 + \sqrt{P_0^2 - q_0}.$$

Определим это заложение при $\varphi = 27^\circ$ и $\gamma = 1,8$.

В качестве первого приближения возьмем среднее арифметическое двух прежних значений k_1 для случаев, когда вообще не возникало зон предельного равновесия ($\operatorname{tg} \beta = 2$) и возникла локальная зона неустойчивости ($\operatorname{tg} \beta = 1$), т.е. в данном случае $\operatorname{tg} \beta = 1,5$.

Определим k_1 :

1) $\rho = 0,71$

2) $\lambda = 0,65$

$$3) q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg} \beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3 \beta} \right) = \left(\frac{1,8}{0,71 \cdot 1,5} - \frac{2}{(1,5)^3} \right) = (1,69 - \frac{2}{3,38}) = 1,69 - 0,59 = 1,1$$

$$4) b = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{(1,5)^2} - \frac{1,8}{0,71} \right) = 0,44 - 2,54 = -2,1$$

$$5) \mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^2 = \left(\frac{0,65 - 1}{0,65 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$6) c = \frac{4}{(1 - \mu) \operatorname{tg}^4 \beta} = \frac{4}{0,96 \cdot 5,06} = 0,82$$

$$7) d = 0$$

$$8) v = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} = \frac{1 + 0,04}{1 - 0,04} = \frac{1,04}{0,96} = 1,08$$

$$9) \kappa = 1 + 2bv + v^2$$

$$\kappa = 1 - (2,1) \cdot 2 \cdot 1,08 + 1,08^2 = 2,17 - 4,54 = -2,34$$

$$10) P_0 = \frac{q(v + b)}{k} = \frac{1,1(1,08 - 2,1)}{-2,34} = 0,48$$

$$11) q_0 = \frac{q^2 + c}{k} = \frac{(1,1)^2 + 0,82}{-2,34} = -0,87$$

$$12) P_0^2 - q_0 = 0,23 + 0,87 = 1,1$$

$$\kappa_1 = -0,48 + 1,05 = 0,57$$

Таким образом, в приоткосной части не возникает зон предельного равновесия.

Примем $\operatorname{tg} \beta = 1,2$.

$$3) q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg} \beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3 \beta} \right) = \left(\frac{1,8}{0,71 \cdot 1,2} - \frac{2}{(1,2)^3} \right) = (2,11 - 1,16) = 2,11 - 1,16 = 0,95$$

$$4) b = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{(1,2)^2} - \frac{1,8}{0,71} \right) = 0,69 - 2,53 = -1,84$$

$$5) \mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^2 = \left(\frac{0,65 - 1}{0,65 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$6) c = \frac{4}{(1 - \mu) \operatorname{tg}^4 \beta} = \frac{4}{0,96 \cdot 2,07} = \frac{4}{1,99} = 2,01$$

$$7) d = 0$$

$$8) v = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} = \frac{1 + 0,04}{1 - 0,04} = \frac{1,04}{0,96} = 1,08$$

$$9) \kappa = 1 + 2bv + v^2$$

$$\kappa = 2,17 - 3,78 \cdot 1,08 = 2,17 - 4,08 = -1,91$$

$$10) P_0 = \frac{q(v + b)}{k} = \frac{0,95(1,08 - 1,84)}{-1,91} = 0,38$$

$$11) q_0 = \frac{q^2 + c}{k} = \frac{0,90 + 2,01}{-1,91} = -1,52$$

$$12) P_0^2 - q_0 = 0,14 + 1,52 = 1,29$$

$$\kappa_1 = -0,38 + 1,13 = 0,75 \cdot \frac{1}{1,2} = 0,83$$

$$0,83 > 0,75$$

Примем $\operatorname{tg} \beta = 1,1$.

$$3) q = \left(\frac{\gamma}{\rho \cdot \operatorname{tg} \beta} - \frac{2}{\operatorname{tg}^3 \beta} \right) = \left(\frac{1,8}{0,71 \cdot 1,1} - \frac{2}{(1,1)^3} \right) = \left(2,57 - \frac{2}{1,33} \right) = 2,57 - 1,50 = 1,07$$

$$4) b = \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \frac{\gamma}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{(1,1)^2} - \frac{1,8}{0,71} \right) = 0,83 - 2,54 = -1,71$$

$$5) \mu = \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^2 = \left(\frac{0,65 - 1}{0,65 + 1} \right)^2 = 0,04$$

$$6) c = \frac{4}{(1 - \mu) \operatorname{tg}^4 \beta} = \frac{4}{0,96 \cdot 1,46} = \frac{4}{1,4} = 2,86$$

$$7) d = 0$$

$$8) v = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} = \frac{1 + 0,04}{1 - 0,04} = \frac{1,04}{0,96} = 1,08$$

$$9) \kappa = 1 + 2bv + v^2$$
$$\kappa = 2,17 - 3,42 \cdot 1,08 = -1,52$$

$$10) P_0 = \frac{q(v + b)}{k} = \frac{1,07(1,08 - 1,71)}{-1,52} = \frac{0,67}{1,52} = 0,44$$

$$11) q_0 = \frac{q^2 + c}{k} = \frac{1,14 + 2,86}{-1,52} = -2,56$$

$$12) P_0^2 - q_0 = 0,19 + 2,56 = 2,75$$

$$\kappa_1 = -0,44 + 1,65 = 1,25$$

$$\frac{1}{1,25} = 0,8$$

Следовательно, в этом случае возникает область предельного равновесия и возможно нарушение местной устойчивости.

Заложение $\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} = 1,2$ соответствует угол $\operatorname{tg} \alpha = 0,82$, $\alpha = 39^\circ$.

1 : 1,2 - обеспечены общая устойчивость и местная;

1 : 0,84 – предельное значение заложения, при котором не обеспечены ни местная, ни общая устойчивость, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{0,84} = 1,19$, $\alpha = 49^\circ$.

Обращает на себя внимание относительно узкий диапазон δ изменения угла откоса, в пределах которого откос из общего устойчивого состояния переходит в общее неустойчивое состояние. В данном случае этот диапазон равен $\delta = 49^\circ - 39^\circ = 10^\circ$.

При изменении заложения откоса от 39° , когда вообще нет зон предельного равновесия до 49° , когда весь откос находится в предельном

равновесии, возникает и увеличивается область местной неустойчивости. Если весовой значение φ несколько уменьшается, это может привести к потере местной устойчивости и т.п.

Приложение равномерной нагрузки P на откос в некоторой степени аналогично проявлению сцепления. Линия скольжения из прямой в сыпучих грунтах становится кривой второго порядка.

Оценим устойчивость откоса в случае $m=2$ при действии на откос нагрузки $P=0,6 \frac{T}{M^2}$.

3-й вариант

Определим как укладка УГБЗМ повлияет на устойчивость откоса.

Нагрузку от веса блоков УГБЗМ примем равной $P = 0,6 \frac{T}{M^2}$.

$$a = \frac{P}{\sin \beta} \quad P = 0,6 \frac{KT}{M^2}, \quad \rho = 0.71$$

$$d = \frac{P}{\rho \sin \beta}$$

$$r = \frac{2d(v+b)}{k}$$

$$s = \frac{2qd}{k}$$

$$t = \frac{d^2}{k}$$

$$d = \frac{0,6}{0,71 \cdot 0,71} = 1,2$$

$$r = \frac{2 \cdot 1,2(1,08 - 2,29)}{-2,79} = \frac{2,4 \cdot 1,21}{2,79} = 1,04$$

$$s = \frac{2 \cdot 1,02 \cdot 1,2}{-2,79} = -0,88$$

$$t = \frac{d^2}{k} = \frac{(1,44)^2}{-2,79} = -0,52$$

$$z^2 + 2 \cdot 0,44zx - 2,56x^2 + 1,04z - 0,88x$$

$$z^2 + 2 \cdot P_0 xz + q_0 x^2 + 2z + sx + d = 0$$

$$z^2 + 2 \cdot 0,44xz - 2,56x^2 + 1,04z - 0,88x - 0,52 = 0$$

$$z^2 + 2 \cdot 0,44zx - 2,56x^2 + 1,04z - 0,88x - 0,52 = 0$$

$$x=0 \rightarrow z$$

$$z^2 + 1,04z - 0,52 = 0$$

$$z = -0,57 \pm \sqrt{0,32 + 0,52} = -0,57 \pm 0,92$$

$$z=0,35$$

$$z=2 \quad x=6$$

$$z^2 + 5,28z - 92,16 + 1,04z - 5,28 - 0,52 = 0$$

$$z^2 + 6,32z - 97,96 = 0$$

$$z = -3,16 \pm \sqrt{107,94} = -3,16 \pm 10,38$$

$$z=0,5x$$

$$0,25x^2 + 0,44x - 2,56x^2 + 0,52x - 0,88x - 0,52 = 0$$

$$-2,31x^2 + 0,08x - 0,52 = 0$$

$$x^2 - 0,04x + 0,23 = 0$$

$$x = 0,02 \pm \sqrt{0,23} = 0,45$$

Следовательно, на расстоянии от бровки земляного полотна на 0,5 м следует предусмотреть анкеры высотой $h > 0,35$ м.

$$h_a = 0,35 + 0,10 = 0,45 \text{ м}$$

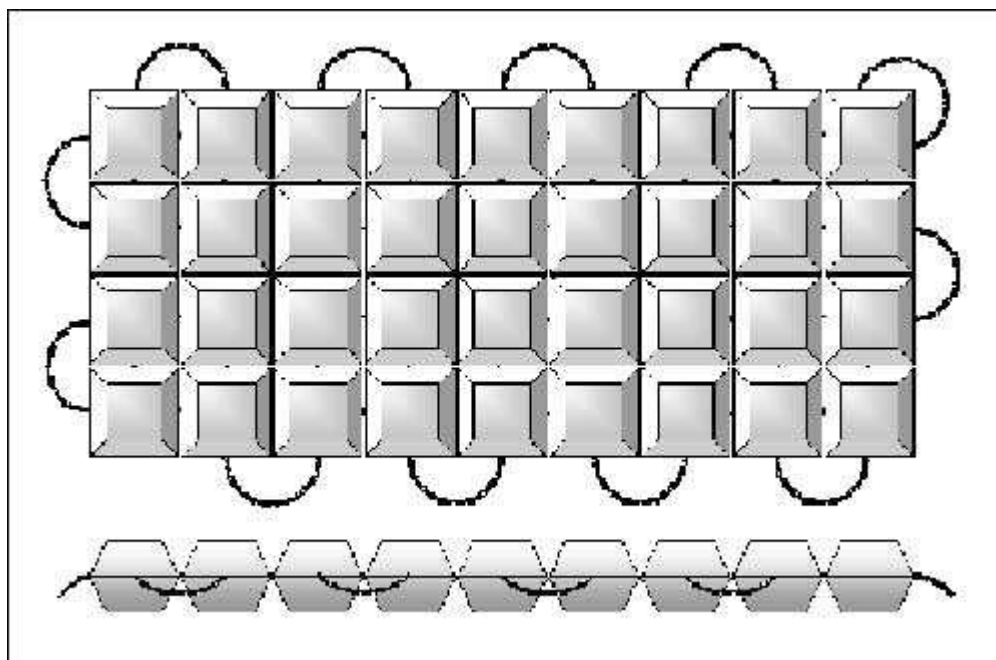


Рис.1 Конструкция УГЗБМ модели №1

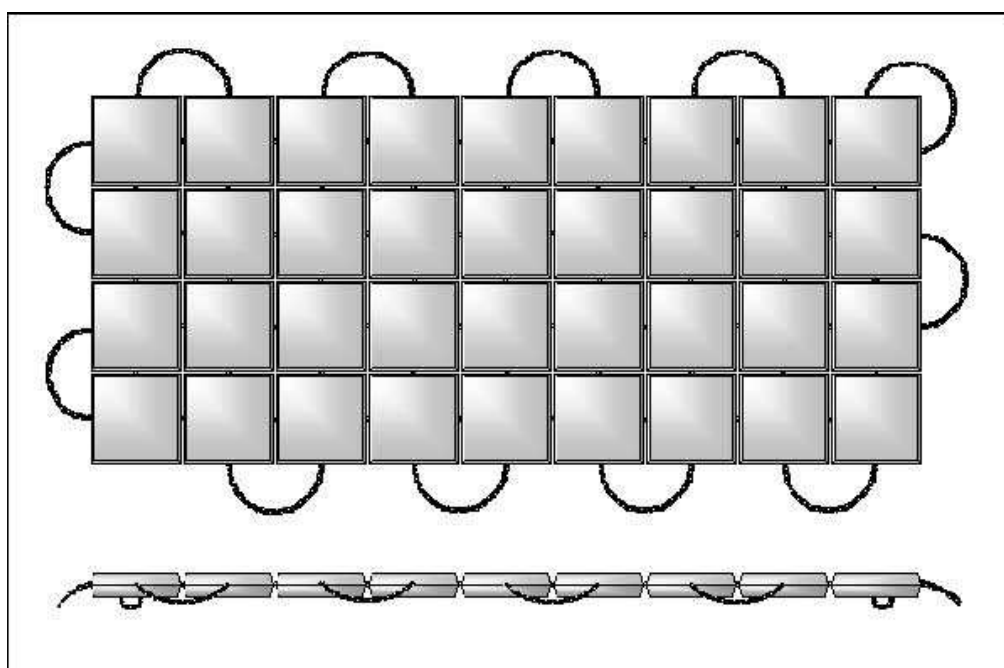


Рис.2 Конструкция УГЗБМ модели №2

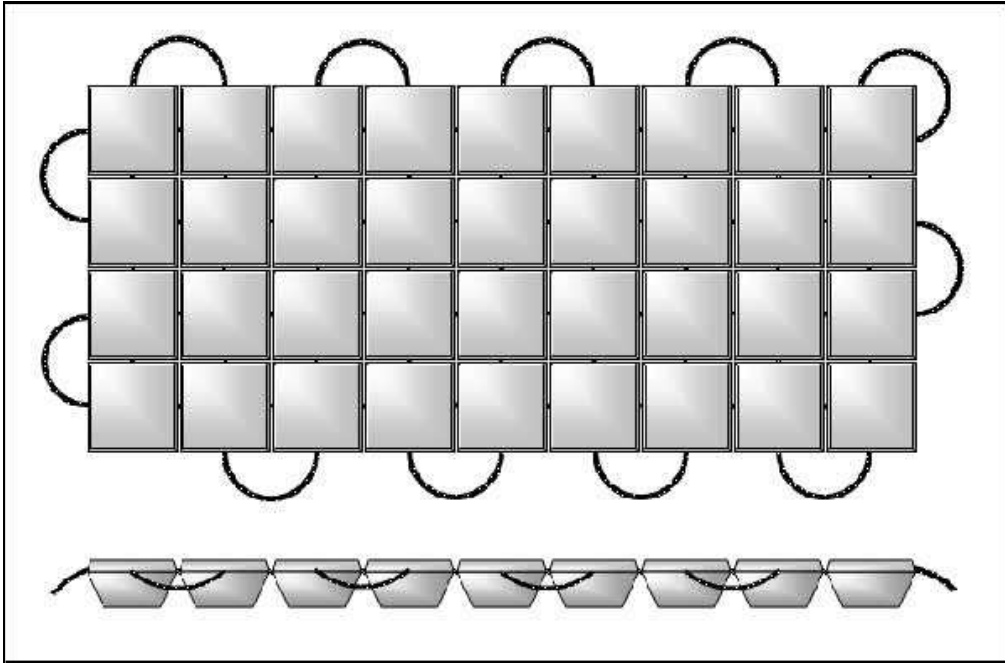


Рис.3 Конструкция УГЗБМ модели №4

