ОДМ 218.3.1.001-2020

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
РОСАВТОДОР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТАМ ГИБКОГО РОСТВЕРКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТОВ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2020

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН: Обществом с ограниченной ответственностью «ГЕО-ПРОЕКТ». Руководитель работ – канд. воен. наук Артемьев М.Ю. Документ разработан канд. геол.-минерал. наук Федоренко Е.В., канд. техн. наук Устяном Н.А., канд. техн. наук Мариненко Д.В., инж. Есаулковым Г.А. В соответствии с государственным контрактом от 18.02.2019 № ФДА 47/10

2 ВНЕСЕН: Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства.

3 ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от «13» августа 2020 г. № 2521-р

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Содержание

1 Область применения 4
2 Нормативные ссылки 4
3 Термины и определения 5
4 Основные положения 9
5 Основные расчетные положения 16
6 Проверка несущей способности армирующего элемента по материалу 18
7 Определение конструктивных параметров армирующего элемента с целью обеспечения несущей способности по грунту. 26
8 Определение нагрузок на оголовок сваи. 27
Приложение А Графики для проверки мембранных напряжений в армирующем элементе 28
Приложение Б Особенности расчета гибкого ростверка при помощи численных методов 32
Приложение В Пример расчета гибкого ростверка 35
Библиография 48

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТАМ РОСТВЕРКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТОВ

1 Область применения

1.1 Отраслевой дорожный методический документ (далее ОДМ) «Методические рекомендации по расчетам гибкого ростверка с применением геосинтетических материалов. Основные положения расчетов» является актом рекомендательного характера в дорожном хозяйстве.

1.2 ОДМ содержит рекомендации по методике расчетов гибких армогрунтовых ростверков из геосинтетических материалов на свайном фундаменте для возведения земляного полотна автомобильных дорог общего пользования на слабых грунтах (за исключением вечномерзлых грунтов).

1.3 Настоящий ОДМ предназначен для использования органами управления автомобильных дорог и организациями, выполняющими работы по проектированию и возведению земляного полотна автомобильных дорог.

2 Нормативные ссылки

В настоящем ОДМ использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 32960–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения

ГОСТ Р 55030–2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при растяжении

ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований.

СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*

СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85

ПНСТ 318-2018 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Методы испытаний на долговечность

3 Термины и определения

В настоящем ОДМ применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 армирующий элемент: Составная часть армированного грунта, обеспечивающего восприятие повышенных сжимающих и (или) растягивающих напряжений;

3.2 балочный ростверк: Стальная или железобетонная балка, укладываемая вдоль рядов свай, и служащая в качестве жесткой опоры для гибких ростверков.

3.3 геосинтетический материал (геоматериал): Материал из синтетических или природных полимеров, неорганических веществ, контактирующий с грунтом или другими средами, применяемый в дорожном строительстве;

3.4 геосинтетический материал одноосноориентированный: Материал, имеющий повышенные показатели механических свойств в одном направлении - продольном (направлении раскатки рулона).

3.5 геосинтетический материал двухосноориентированный: Материал, имеющий равнопрочные механические свойства в продольном и поперечном направлениях.

3.6 гибкий ростверк: Часть свайного фундамента, объединяющая головные участки свай и служащая опорной конструкцией для возводимых элементов сооружения, выполненная из геосинтетического материала.

3.7 граничные условия: Система связей в расчетной модели, закрепляющих область с узлами по заданным степеням свободы.

3.8 грунтовый ростверк: Грунтовая насыпь или ее часть, укладываемая на основание из гибкого ростверка по сваям, в которой под нагрузкой формируются области сводообразования, перераспределяющие нагрузки на армирующий элемент и сваи.

3.9 давление на оголовок сваи, $\sigma_{zs,k}$: Сжимающие напряжения, ограниченные площадью оголовка сваи, возникающие под действием внешней нагрузки и распределяющейся через грунтовый ростверк непосредственно на оголовок сваи.

3.10 деформационные расчеты: Задачи, решаемые в геометрически нелинейной постановке, учитывающей искажение формы конструкции в процессе нагружения внешним воздействием, и соответствующее изменение внутренних усилий и напряжений в элементах.

3.11 жесткость армирующего элемента, J_k: Способность армирующего элемента сопротивляться деформации в условиях продольного растяжения.

3.12 изгибная жесткость: Способность конструктивного элемента сопротивляться деформации при внешнем силовом воздействии в условиях поперечного изгиба, при котором в сечениях элемента возникают внутренние изгибающие моменты и поперечные силы.

3.13 мембранное усилие, F_k: Усилие, равнодействующее растягивающим нормальным мембранным напряжениям, возникающим в армирующем элементе, в межсвайном пространстве под нагрузкой.

3.14 мембранное напряжение, $\sigma_{zo,k}$: Напряжение, возникающее в армирующем элементе под воздействием внешних нагрузок в области межсвайного пространства.

3.15 межсвайное основание (пространство): Массив грунта в основании гибкого ростверка, ограниченный боковыми гранями свай, оголовков и балок.

3.16 несущая способность армирующего элемента: Максимальный эффект воздействия, реализуемый в армирующем элементе без превышения предельного состояния первой группы.

3.17 относительная деформация, ε: Относительное удлинение при растяжении, выраженное в процентах, полученное геоматериалом под нагрузкой.

3.18 относительный прогиб, f/L_w: Величина, выражаемая отношением прогиба определенного армирующего элемента в меж свайном пространстве к его свободному пролету.

3.19 первая группа предельных состояний: Состояние армирующего, превышение которого ведет к потере прочности материала или грунта и возникновению аварийной расчетной ситуации.

3.20 прочность геоматериала после воздействия различных факторов, T: Прочность учитывающая условия монтажа и эксплуатации геоматериала.

3.21 прочность геоматериала при растяжении, $T_{нор}$: Максимальная нагрузка на единицу ширины геоматериала, наблюдаемая во время испытания, при котором образец растягивается до разрыва.

3.22 продольное направление: Направление в плоскости армирующего элемента, параллельное относительно дорожного полотна.

3.23 расчетное состояние: Набор геометрических и физико-механических параметров, рассматриваемого сооружения, а также факторов внешнего воздействия на момент проведения расчетов.

3.24 расчетное усилие, E_d: Усилие в геоматериале при продольном растяжении, требуемое для достижения определенной величины относительной деформации, ε под воздействием постоянных и переменных нагрузок.

3.25 сетка конечных элементов: Набор узлов и элементов в расчетной модели, соединенных между собой, и образующих общую сеть.

3.26 свайный фундамент: Комплекс свай, объединенных в единую конструкцию, передающую нагрузку на основание.

3.27 свободный пролет армирующего элемента, L_W: Расстояние между оголовками свай или балками ростверка в свету.

3.28 струйная цементация: Метод создания грунтоцементного массива материала, обладающего определенными прочностными и деформационными характеристиками.

3.29 фиктивные связи: Связи малой жесткости ($\approx$ 0,01 кН/м), закрепляющие узлы конечно-элементной модели, расположенные в противоположном направлении относительно действующих внешних сил, позволяют тем самым, не обладающим параметрами изгибной жесткости элементам, в условиях поперечного изгиба, получить начальную деформацию и в ходе дальнейших расчетов и сопротивляться её дальнейшему развитию в геометрически нелинейном состоянии.

3.30 ширина опорной зоны, b_{Ers}: Сторона квадратного оголовка сваи, приведенная сторона круглого, или ширина балки ростверка.

4 Основные положения

4.1 В настоящем ОДМ изложены рекомендации по расчетам гибких армогрунтовых ростверков из геосинтетических материалов на свайном фундаменте для возведения земляного полотна автомобильных дорог общего пользования на слабых грунтах (за исключением вечномерзлых грунтов). Расчеты свай следует выполнять с учетом требований [1], в соответствии с СП 24.13330 и СП 22.13330.2016. При выполнении расчетов с помощью прикладных программных комплексов, программное обеспечение, используемое для автоматизации процедуры вычисления должно осуществлять все основные вычислительные операции, изложенные в ОДМ, а также выполнять построение графических зависимостей, и иметь сертификат соответствия установленного образца.

4.2 Для свайных фундаментов рекомендуется использовать сваи буровые текстильно-песчаные, грунтоцементные сваи погружаемые по технологии струйной цементации, буронабивные, а так же стальные и железобетонные сваи, погружаемые забивным способом.

4.3 Конструктивными решениями свайного фундамента с применением гибкого ростверка, в соответствии с рисунком 1, следует предусматривать:

– для фундаментов на отдельно-стоящих сваях - один или два слоя двухосноориентированного геоматериала или два слоя дноосноориентированного геоматериала, уложенных перпендикулярно друг другу;

– для свайного фундамента с жестким балочным линейным ростверком - один или два слоя одноосноориентированного геоматериала, уложенных перпендикулярно оси поддерживающих элементов.

4.4 Эффективность работы свайного фундамета с гибким ростверком достигается на основании результатов расчетов при выполнении следующих условий:

– снижение расстояния между сваями;

– уменьшение расстояния между армирующими слоями;

– увеличение соотношения размеров оголовков свай к расстоянию между ними;

– повышение прочности и жесткости армирующих элементов;

- повышение прочностных характеристик грунтового ростверка, при использовании геосинтетических материалов с учетом требований ОДМ 218.2.046-2014, а также более высокими прочностными и деформационными свойствами.

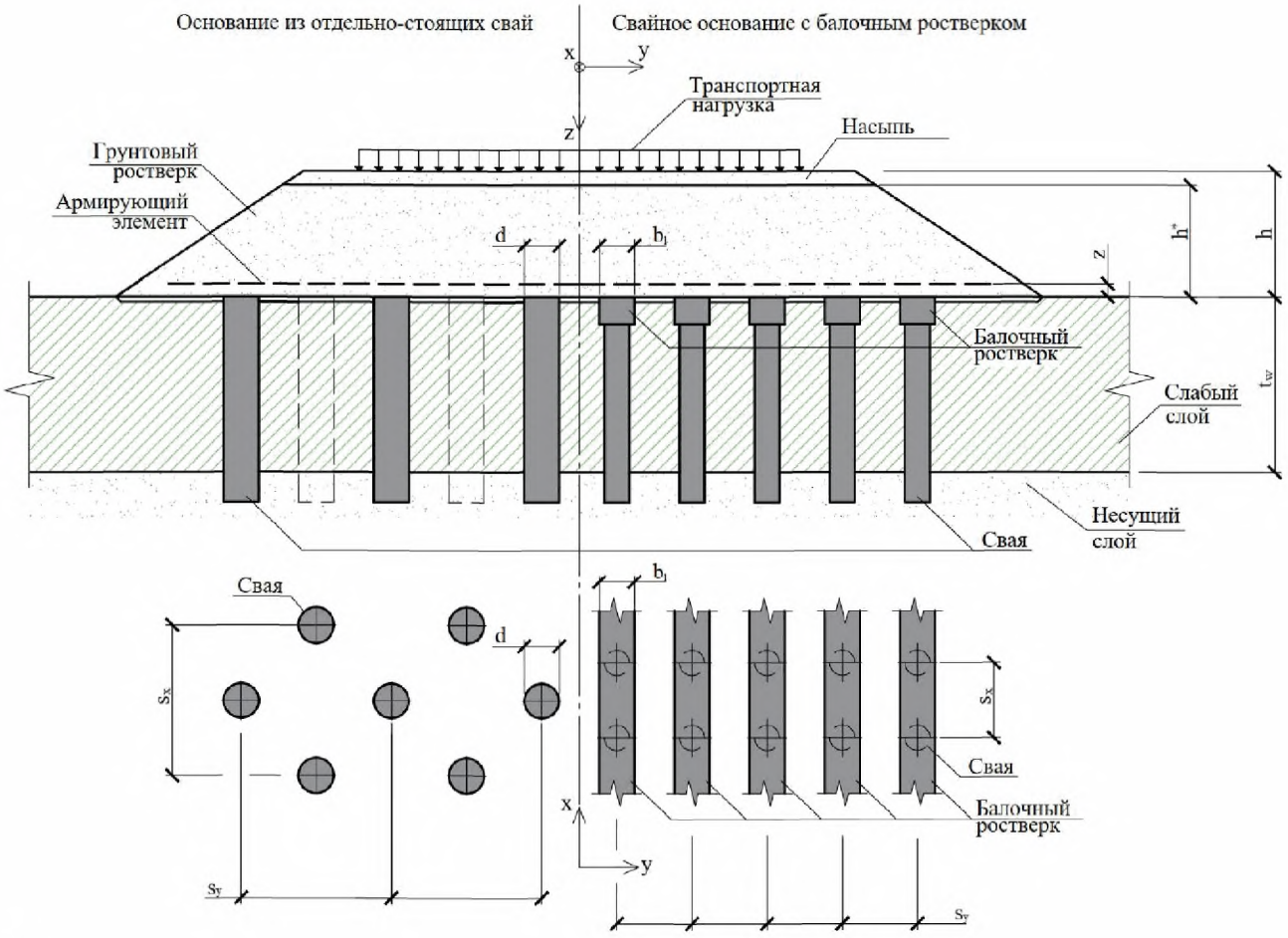


Рисунок 1 - Общая конструктивная схема насыпи на свайном фундаменте

4.5 Для эффективного использования геосинтетических материалов в качестве армирующего элемента в составе гибкого ростверка на свайных фундаментах и применения метода расчета, представленного в настоящем документе, следует обеспечивать условия п.п. 4.5.1, 4.5.2.

4.5.1 Соотношение жесткостей элементов свайного фундамента должно удовлетворять условию, определяемому по формуле (1):

$$\frac{k_{s,p}}{k_{s,k}} > 75, \quad (1)$$

где $k_{s,p}$ – осевая жесткость сваи, кН/м, определяемая по формуле (2):

$$k_{s,p} = 1/s_v; \quad (2)$$

s_v – осадка сваи от единичной силы (1 кН), м, определяемая в соответствии с требованиями СП 24.13330.2011.

$k_{s,k}$ – жесткость грунтового межсвайного пространства под гибким ростверком, кН/м, вычисляемая в пределах грунтов, расположенных выше нижнего конца свай, представленных на рисунке 2, по формуле (3):

$$k_{s,k} = \frac{E_{0,1}E_{0,2}}{t_{s,1}E_{0,2} + t_{s,2}E_{0,1}}, \quad (3)$$

где E_0 – модуль общей деформации грунта, МПа;

t_s – толщина инженерно-геологического элемента, м.

Примечание - при соответствующем обосновании, для вычисления жесткостных параметров $k_{s,p}$ и $k_{s,k}$, допускается применение иных аналитических или численных методов.

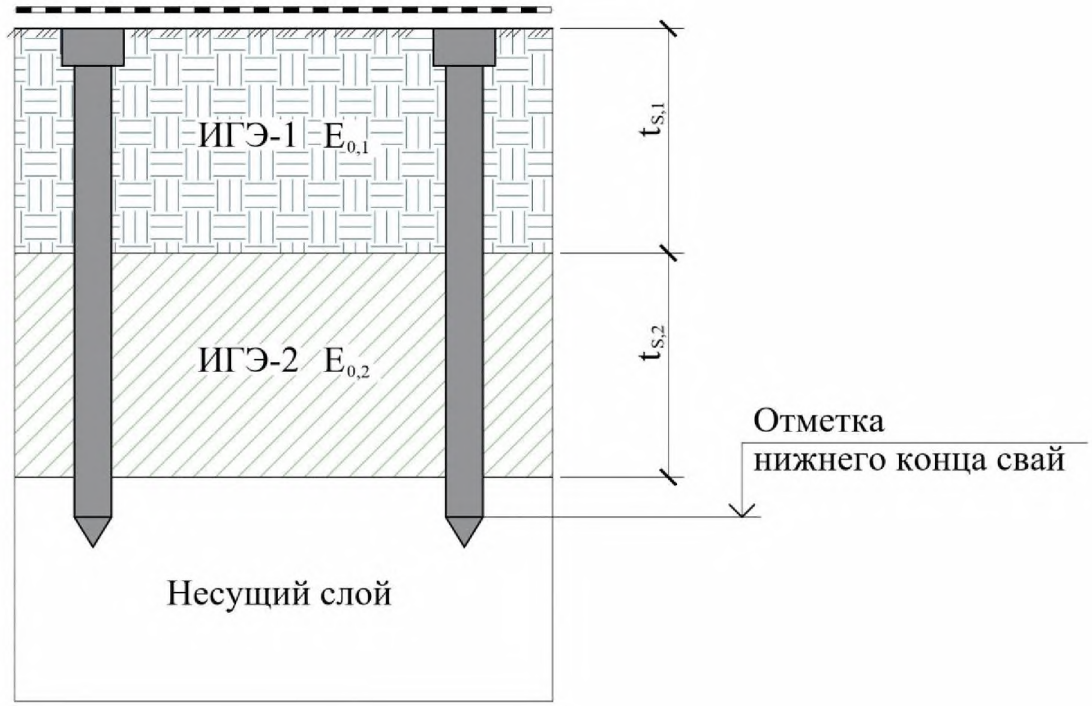


Рисунок 2 – Схема к определению жесткости грунтового межсвайного пространства под гибким ростверком

4.5.2 Соотношение параметров ростверка и свайного поля следует назначать из условий (4-10):

$$h^* \geq (s - d); \tag{4}$$

$$\begin{gathered} h/(s-d) \leq 0{,}8 \text{ – для высоких насыпей}(> 6 \text{ м}), \\ h/(s-d) > 0{,}8 \text{ – для низких насыпей } (\leq 6 \text{ м}), \\ d/s \geq 0{,}15; \\ b_l/s \geq 0{,}15; \end{gathered} \tag{5}$$

$$0{,}5 < h/(s-d) < 4{,}0; \tag{6}$$

$$s - d \leq 3{,}0 \text{ м}, \text{и } s - b_l \leq 3{,}0 \text{ м} \text{ – для высоких насыпей}(> 6 \text{ м}), \tag{7}$$

$$s - d \leq 2{,}5 \text{ м}, \text{и } s - b_l \leq 2{,}5 \text{ м} \text{ – для низких насыпей } (\leq 6 \text{ м}); \tag{8}$$

$z \leq 0{,}15$ м – для однорядного армирования, (9)

$z \leq 0{,}20$ м – для двухрядного армирования, (10)

где h^* – толщина грунтового ростверка, м;

h – толщина дорожной насыпи, м;

s – расстоянием между осями свай, м (см. Рис. 3);

s_x – расстоянием между осями свай в продольном, относительно дорожного полотна, направлении, м (рисунки 1,7);

s_y – расстоянием между осями свай в поперечном, относительно дорожного полотна, направлении, м (рисунки 1,7);

d – диаметр круглого оголовка сваи, или $d = \sqrt{4\,A_S/\pi}$ в случае применения оголовков иной формы, м;

b_l – ширина балочного ростверка, м;

A_S – площадь опорной поверхности оголовка сваи или балочного ростверка, м^2;

z – толщина защитного слоя, м;

A_E – грузовая площадь сваи, м^2 (см. Рис. 3).

Геометрические обозначения в формулах (4-8) представлены на рисунке 3.

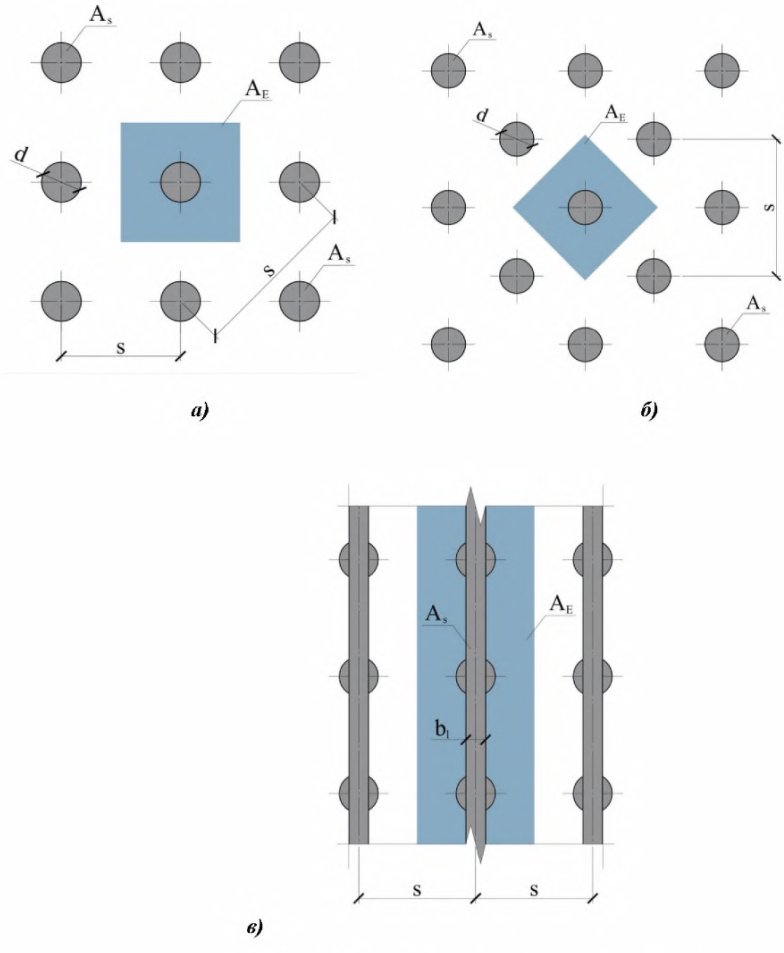


Рисунок 3 – Схемы свайных оснований

а) – при расположении свай в квадратной сетке; б) при расположении свай в треугольной сетке; в) при устройстве балочного ростверка

Геометрические обозначения в формулах (9,10) представлены на рисунке 4.

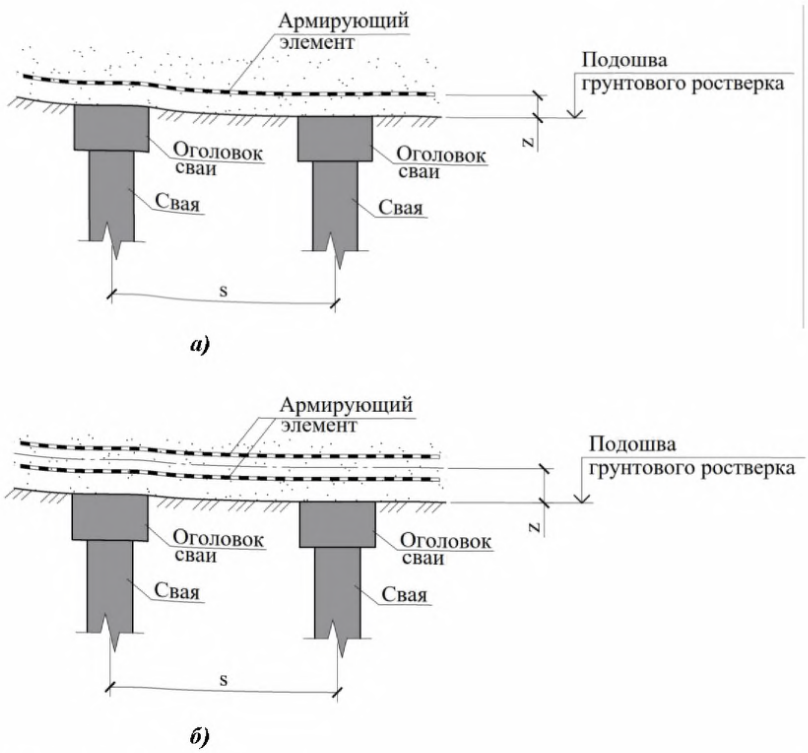


Рисунок 4 – Схемы устройства армирующего элемента в составе гибкого ростверка

а) – однорядное расположение; б) двухрядное расположение

4.6 Армирующие элементы в два ряда следует располагать друг над другом с использованием грунтовой прослойки толщиной не менее 0,3м.

4.7 В качестве несущего слоя в грунтовом ростверке следует использовать песчаные и гравелистые грунты со значениями угла внутреннего $\boldsymbol{\varphi'_k \geq 30°}$. Для несущего слоя толщиной $\boldsymbol{h^* \geq 0,66(s-d)}$ следует использовать грунты со значениями угла внутреннего $\boldsymbol{\varphi'_k \geq 35°}$.

4.8 Высотное положение грунтового ростверка следует назначать таким образом, чтобы прогнозируемый уровень грунтовых вод в процессе строительства и эксплуатации залегал ниже оголовков свай.

4.9 В качестве армирующих элементов применяются одноосно и двухосноориентированные геосинтетические материалы в виде тканого геополотна и георешеток.

4.10 Прочность геоматериала при растяжении, используемого в качестве армирующего элемента гибкого ростверка, в рабочем направлении должна быть не менее 30 кН/м (определяется расчетом).

4.11 При конструировании оголовков свай следует избегать острых углов и кромок, во избежание повреждений армирующего элемента при укладке и эксплуатации.

5 Основные расчетные положения

5.1 В качестве критерия для оценки надежности, безопасности и эксплуатационной пригодности гибкого ростверка является проверка несущей способности армирующего элемента по материалу, в соответствии разделом 6, с учетом стадийности приложения внешней нагрузки и реологических свойств геосинтетического материала. В соответствии с разделом 7 производится определение минимально допустимых конструктивных параметров сооружения (длины анкеровки армирующего элемента) для обеспечения несущей способности грунта насыпи земляного полотна автомобильной дороги. Расчет выполняется по первой группе предельных состояний, в соответствии с ГОСТ

27751 с учетом нормативных нагрузок автотранспортных средств по ГОСТ 32960.

5.2 В ходе расчетов гибких ростверков по первой группе предельных состояний, как правило, рассматриваются расчетные состояния, описание которых приведено в табл. 1.

Таблица 1 - Расчетные состояния

Расчетное состояние	Описание	Действующие нагрузки (p_k)
1а	Строительный период (10 часов**) с высотой отсыпанной насыпи до 0,45 м.	Расчетная нагрузка от строительной техники и работ по уплотнению, $p_{Q,k}$, принимается равной 30 кН/м^2**.
1б	Строительный период (500 часов**) с насыпью, отсыпанной на полную высоту.	Расчетная нагрузка от строительной техники и работ по уплотнению, $p_{Q,k}$, принимается равной 30 кН/м^2**.
1в	Эксплуатационный период (1 000 000 часов/110 лет**) с учетом отпора грунтов в межсвайном пространстве.	Расчетная транспортная нагрузка, $p_{G+Q,k}$, принимается по ГОСТ 32960**.
1г*	Эксплуатационный период (1 000 000 часов/110 лет**) без учета отпора грунтов в межсвайном пространстве.	Расчетная транспортная нагрузка, $p_{G+Q,k}$, принимается по ГОСТ 32960**.

Примечания

* – состояние 1г рассматривается для случаев, когда специальными исследованиями установлена вероятность понижения уровня грунтовых вод в процессе эксплуатации и строительства.

** – при соответствующем обосновании допускается принимать иные параметры расчетных состояний, в том числе значения строительных периодов, эксплуатационных периодов, нагрузок от строительной техники и работ по уплотнению, а также транспортной нагрузки.

6 Проверка несущей способности армирующего элемента по материалу

6.1 Несущая способность армирующего элемента обеспечивается проверкой по условию прочности (11).

6.2 Условие прочности армирующего элемента проверяется исходя из условия (11)

$$E_d \leq T, \quad (11)$$

где E_d – расчетное усилие от постоянных и переменных нагрузок в армирующем элементе, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 6.4;

T – прочность геоматериала после воздействия различных факторов, кН/м, принимаемая в соответствии с п. 6.3

6.3 Прочность геоматериала после воздействия различных факторов определяется по формуле (12)

$$T = \frac{T_{\text{нор}}}{\text{k}_{\text{общ}}} \quad (12)$$

где $T_{\text{нор}}$ – прочность геоматериала при растяжении, кН/м, определяемая по ГОСТ Р 55030-2012;

$\text{k}_{\text{общ}} = \text{k}_1\text{k}_2 \ldots \text{k}_8$ – общий коэффициент, учитывающий влияние факторов ухудшения свойств, определяется в виде произведения отдельных коэффициентов, принимаемых в соответствии с указаниями ПНСТ 318-2018;

6.4 Расчетное усилие в армирующем элементе от постоянных и переменных нагрузок определяется по формуле (13)

$$E_d = E_{G,k}\gamma_G + \left(E_{G+Q,k} - E_{G,k}\right)\gamma_Q , \quad (13)$$

где $E_{G,k}$ – расчетное усилие в армирующем элементе от постоянных нагрузок, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 6.5;

$E_{G+Q,k}$ – расчетное усилие в армирующем элементе от постоянных и переменных нагрузок, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 6.5;

γ_G – коэффициент надежности для постоянных нагрузок, принимаемый равным 1,15, согласно СП 20.13330.2016;

γ_Q – коэффициент надежности для переменных (транспортных) нагрузок, принимаемый равным 1,2, согласно СП 20.13330.2016

Примечание – при со направленном двухрядном расположении армирующих элементов общие значения горизонтальных и мембранных усилий следует уменьшать в два раза.

6.5 Расчетное усилие в армирующем элементе определяется по формуле (14,15)

$$E_{G,k} = E_{ah.G,k} + E_{M,G,k}, \quad (14)$$

$$E_{G+Q,k} = E_{ah.G+Q,k} + E_{M,G+Q,k}, \quad (15)$$

где $E_{ah.G,k}, E_{ah.G+Q,k}$ – усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 6.10;

$E_{M,G,k}, E_{M,G+Q,k}$, – мембранное усилие в армирующем элементе, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 6.6

6.6 Мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести материала в продольном и поперечном направлении определяется по формуле (16,17)

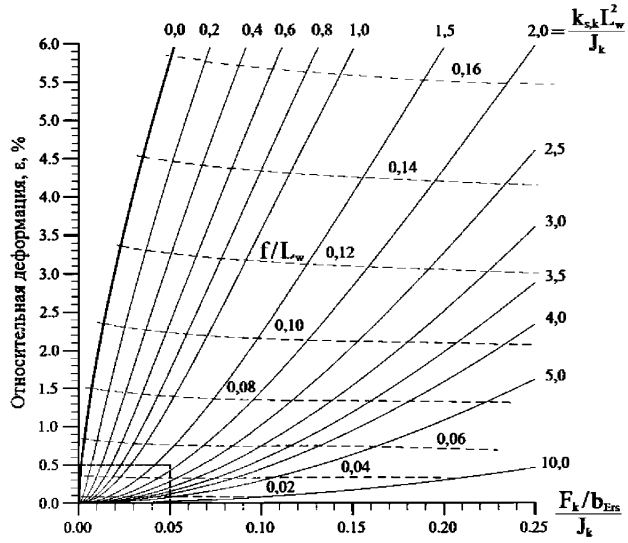
$$E_{M,G,k} = \varepsilon_{G,k} \cdot J_k \quad (16)$$

$$E_{M,G+Q,k} = \varepsilon_{G+Q,k} \cdot J_k \quad (17)$$

где $\varepsilon_{G,k}, \varepsilon_{G+Q,k}$ – относительная деформация армирующего элемента от постоянных и переменных нагрузок, кН/м, принимаемая по графику рис. 5,6;

J_k – осевая жесткость армирующего элемента, кН/м, определяемая по диаграмме деформирования геоматериала в процессе нагружения в течении расчетного периода;

В зависимости от соотношения жесткостей межсвайного основания и армирующего элемента, а также в зависимости от действующих усилий, для определения значений относительной деформации ε $(\varepsilon_{G,k}, \varepsilon_{G+Q,k})$ используются графики, представленные на рисунках 5,6.



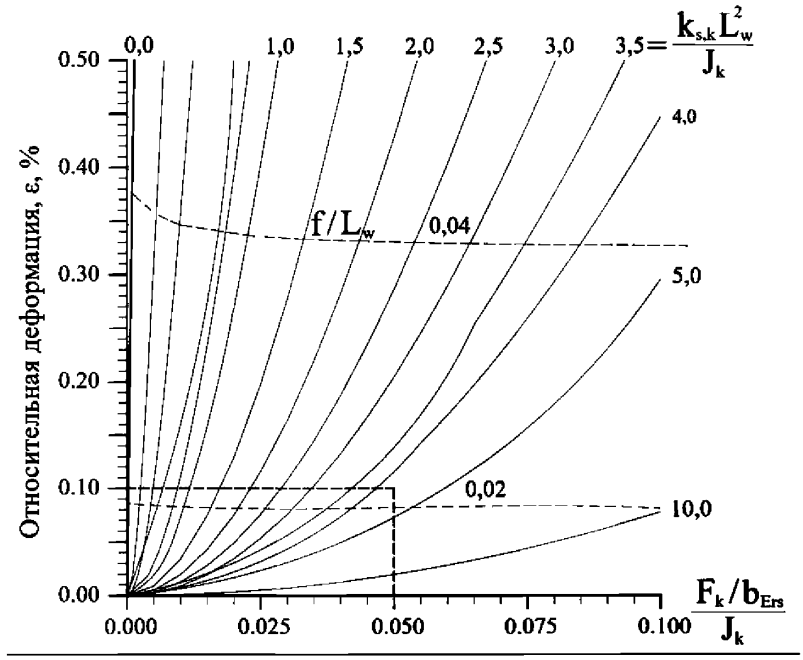
f – прогиб армирующего элемента, м, определяемый по формуле $f = L_w\sqrt{3\varepsilon_k/8}$;

L_W – свободный пролет армирующего элемента, м, определяемый по формуле $L_W = s_{x,y} - b_{Ers}$;

b_{Ers} – ширина опорной зоны, м. Для круглых оголовков свай определяется по формуле $b_{Ers} = 0{,}5d\sqrt{\pi}$, в остальных случаях принимается равной стороне квадратного оголовка сваи либо ширине балочного ростверка;

F_k – мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести материала, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 5.7.

Рисунок 5 – График для определения относительной деформации армирующего элемента



f – прогиб армирующего элемента, м, определяемый по формуле $f = L_w\sqrt{3\varepsilon_k/8}$;

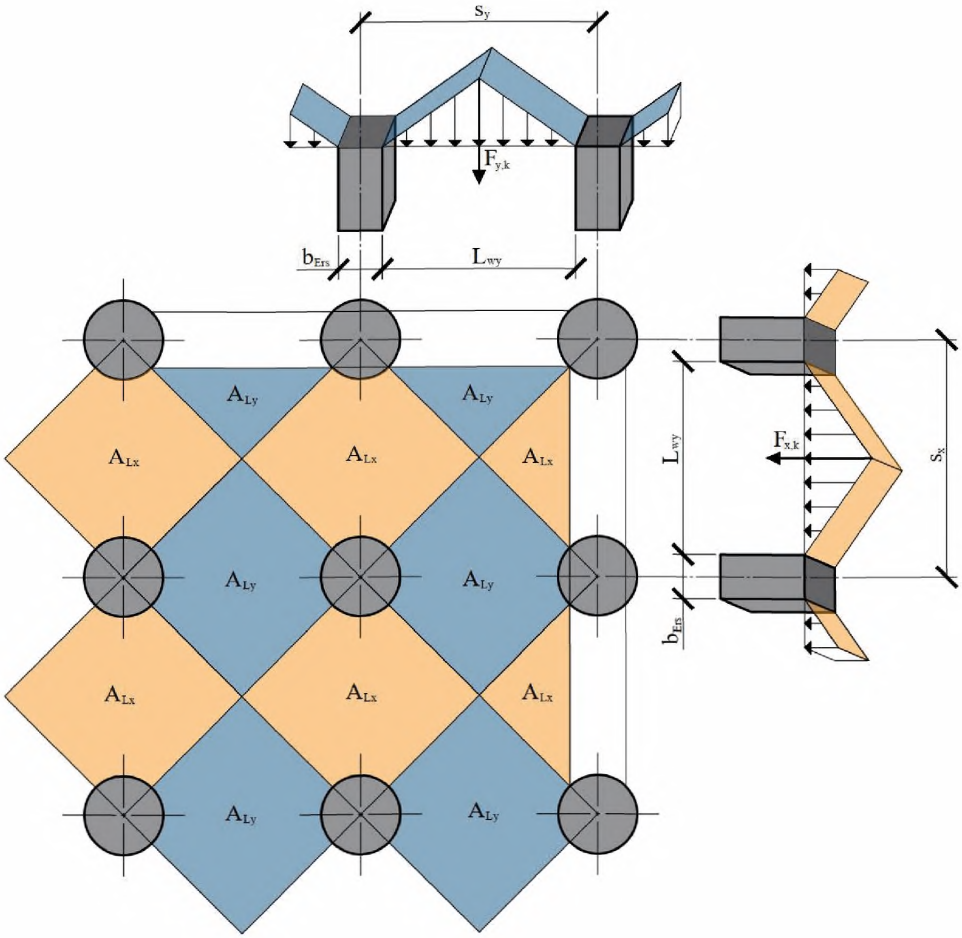
L_W – свободный пролет армирующего элемента, м, определяемый по формуле $L_W = s_{x,y} - b_{Ers}$;

b_{Ers} – ширина опорной зоны, м. Для круглых оголовков свай определяется по формуле $b_{Ers} = 0{,}5d\sqrt{\pi}$, в остальных случаях принимается равной стороне квадратного оголовка сваи либо ширине балочного ростверка;

F_k – мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести материала, кН/м, принимаемое в соответствии с п. 6.7;

Рисунок 6 – Фрагмент графика для определения относительной деформации армирующего элемента (значения по вертикальной оси до 0,5)

Примечание – значение относительной деформации, ε_k, армирующего элемента, для определения величины относительного прогиба f/L_W является неизвестной величиной, определение которой следует вести итерационным способом. Для этого задаются начальной величиной $\varepsilon_k = 2{,}5\%$ и в процессе приближений (увеличения или уменьшения начальной величины) находят такое значение начальной ε_k которое бы отличалось от расчетного ε (по графикам, рис. 3,4,5), в соотношении, не более чем на 15%.



$\boldsymbol{A_{Lx}, A_{Ly}}$ – расчетная рабочая область армирующего элемента в продольном и поперечном направлении;

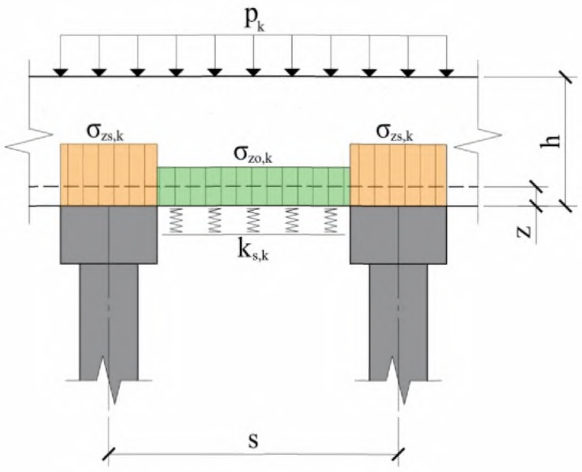
b_{Ers} – ширина опорной зоны;

L_{Wx}, L_{Wx} – свободный пролет армирующего элемента в продольном и поперечном направлении;

s_x, s_y – расстоянием между осями свай в продольном и поперечном направлении;

$F_{x,k}, F_{y,k}$ –мембранное усилие в армирующем элементе в продольном направлении

Рисунок 7 – Расчетная схема армирующего элемента в составе гибкого ростверка



$\boldsymbol{k_{s,k}}$ – жесткость грунтового межсвайного основания;

$\boldsymbol{\sigma_{zs,k}}$– давление на оголовок сваи;

$\boldsymbol{\sigma_{zo,k}}$– мембранное напряжение;

z – толщина защитного слоя, м;

h – толщина дорожной насыпи;

s– расстоянием между осями свай в продольном направлении

Рисунок 8 – Расчетная схема армирующего элемента в составе гибкого ростверка

6.7 Мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести материала в продольном и поперечном направлении $(\boldsymbol{F_k})$ определяется по формулам (18-21)

$$F_{x,G,k} = A_{Lx}\sigma_{ZO,G,k} \quad (18)$$

$$F_{x,G+Q,k} = A_{Lx}\sigma_{ZO,G+Q,k} \quad (19)$$

$$F_{y,G,k} = A_{Ly}\sigma_{ZO,G,k} \quad (20)$$

$$F_{y,G+Q,k} = A_{Ly}\sigma_{zo,G+Q,k}, \quad (21)$$

где расчетная рабочая область армирующего элемента, представленная на рисунке 7, определяется по формулам (22,23).

$$A_{Lx} = 0{,}5\left(s_x s_y\right) - \frac{d^2}{2} arctg\left(\frac{s_y}{s_x}\right)\frac{\pi}{180} \quad (22)$$

$$A_{Ly} = 0{,}5\left(s_y s_x\right) - \frac{d^2}{2} arctg\left(\frac{s_x}{s_y}\right)\frac{\pi}{180} \quad (23)$$

Примечание – для оснований на балочном ростверке вместо d следует применять b_l

6.8 Мембранное напряжение $\left(\boldsymbol{\sigma_{zo,k}}\right)$ определяется по формулам (24,25) в соответствии с рисунком 8.

$$\sigma_{zo,G,k} = \lambda_1^{\chi}\left(\gamma_k + \frac{p_{G,k}}{h}\right)\cdot$$

$$\cdot\left\{h\left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi} + h_g\left[\left(\lambda_1 + \frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\} \quad (24$$

$$\sigma_{zo,G+Q,k} = \lambda_1^{\chi}\left(\gamma_k + \frac{p_{G+Q,k}}{h}\right)\cdot$$

$$\cdot\left\{h\left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi} + h_g\left[\left(\lambda_1 + \frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\} \quad (25$$

где $p_{G,k}$ – расчетная распределенная статическая нагрузка, кН/м^2;

$p_{G+Q,k}$ – расчетная распределенная статическая и переменная нагрузка, кН/м^2;

h_g – высота сводообразования, м:

для $h \geq s/2$ – $h_g = s/2$,

для $h < s/2$ – $h_g = h$;

γ_k – удельный вес дорожной насыпи, кН/м^3;

K_{krit} – коэффициент пассивного давления (соотношение между главными

напряжениями для предельного, критического состояния), определяется по формуле (26).

$$K_{krit} = \text{tg}^2\left(45° + \frac{\varphi'_k}{2}\right) \quad (26)$$

где φ'_k – угол внутреннего трения грунтового ростверка;

$$\chi = \frac{d(K_{krit} - 1)}{\lambda_2 s} \quad (27)$$

где геометрические коэффициенты определяются по формулам (28) – (29).

$$\lambda_1 = \frac{1}{8}(s - d)^2 \quad (28)$$

$$\lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2} \quad (29)$$

Примечание – для оснований на балочном ростверке вместо d следует применять b_l

6.9 Проверка значений, полученных по формулам (24,25), проводится из соотношения $\frac{\sigma_{zo,k}}{\gamma_k h + p_k}$ по графикам, согласно Приложению А. Обозначения в соотношении те же, что и в п. 6.8, 4.3.2.

6.10 Усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге определяется по формуле (30).

$$\Delta E_{G,k} = E_{ah,G,k} = \left(0{,}5\gamma_k(h - z)^2 + p_{G,k}\right) \cdot (h - z) \cdot K_{agh}; \quad (30)$$

$$\Delta E_{G+Q,k} = E_{ah,G+Q,k} = \left(0{,}5\gamma_k(h - z)^2 + p_{G+Q,k}\right) \cdot (h - z) \cdot K_{agh}, \quad (31)$$

где K_{agh} – коэффициент активного давления грунта.

7 Определение конструктивных параметров армирующего элемента с целью обеспечения несущей способности по грунту

7.1 Минимальная требуемая длина анкеровки армирующего элемента для обеспечения прочности грунта на контакте с армирующим элементом (рисунок 9) определяется по формулам (32,33).

$$L_e = \frac{0{,}5K_{agh}h(\gamma_k h + p_k)1{,}3}{\gamma_k h \cdot a' \operatorname{tg}\varphi'_k}, \tag{32}$$

$$L_b = \frac{1{,}3E_d}{\gamma_k h \cdot a' \operatorname{tg}\varphi'_k}, \tag{33}$$

где φ'_k – то же, что и в формуле (26);

a' – коэффициент учитывающий заклинивание армирующего элемента в грунтовой насыпи, принимаемый на основании данных производителя геосинтетического материала.

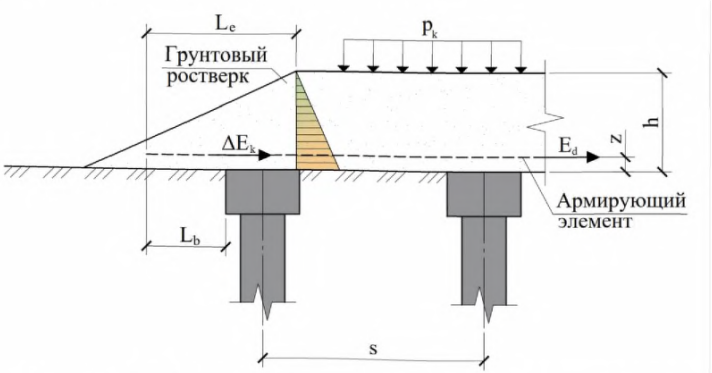


Рисунок 9 – Расчетная схема к определению усилия в армирующем элементе и длины анкеровки

7.2 В случаях, когда минимальную требуемую длину анкеровки армирующего элемента, согласно п. 7.1 обеспечить не представляется

возможным, для обеспечения устойчивости сооружения следует выполнять специальные конструктивные мероприятия, которые заключаются в устройстве бетонного ростверка в области откосных частей или уменьшении шага свай в откосной зоне.

8 Определение нагрузок на оголовок сваи

8.1 Расчет свай и их оголовков проводится на основании требований СП 24.13330, при этом нагрузка на оголовок сваи определяется по формуле (34, 35)

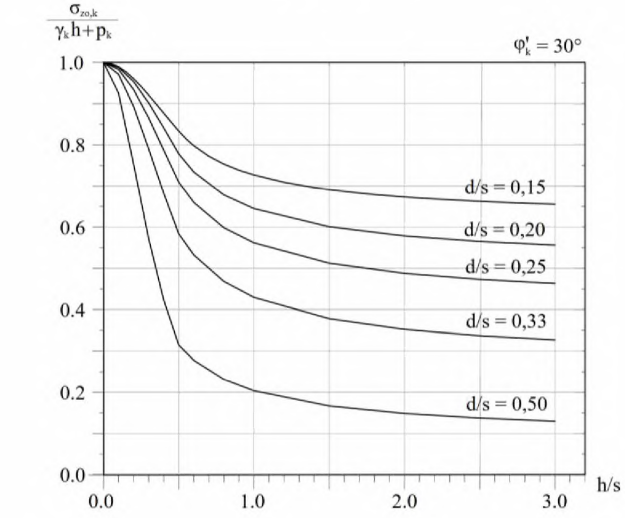
8.2 Давление на оголовок сваи $(\boldsymbol{\sigma_{zs,k}})$ определяется по формулам (34, 35)

$$\sigma_{zs,G,k} = \left[\left(\gamma_k \cdot h + p_{G,k}\right) - \sigma_{zo,G,k}\right]\frac{A_E}{A_S} + \sigma_{zo,G,k} \quad (34)$$

$$\sigma_{zs,G+Q,k} = \left[\left(\gamma_k \cdot h + p_{G+Q,k}\right) - \sigma_{zo,G+Q,k}\right]\frac{A_E}{A_S} + \sigma_{zo,G+Q,k} \quad (35)$$

Приложение А

Графики для проверки мембранных напряжений в армирующем элементе



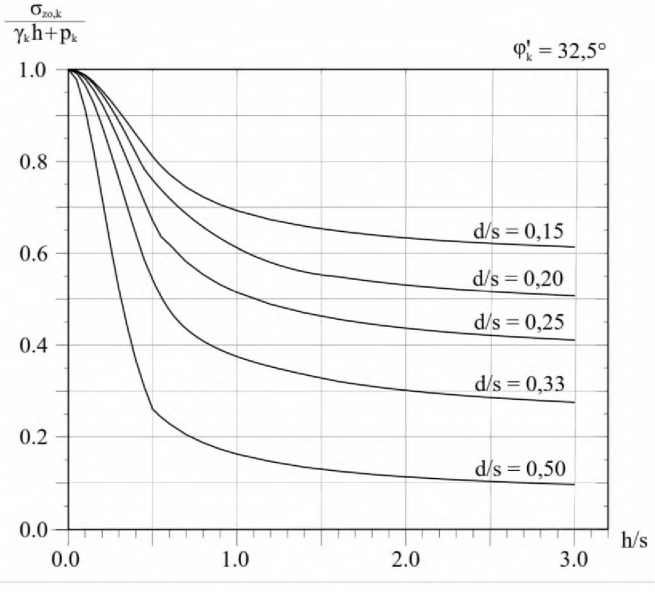


Рисунок А.1 – Графики для проверки мембранных напряжений в армирующем элементе на основаниях из отдельно-стоящих свай ($\varphi'_{k} = 30^{\circ}; 32{,}5^{\circ}$)

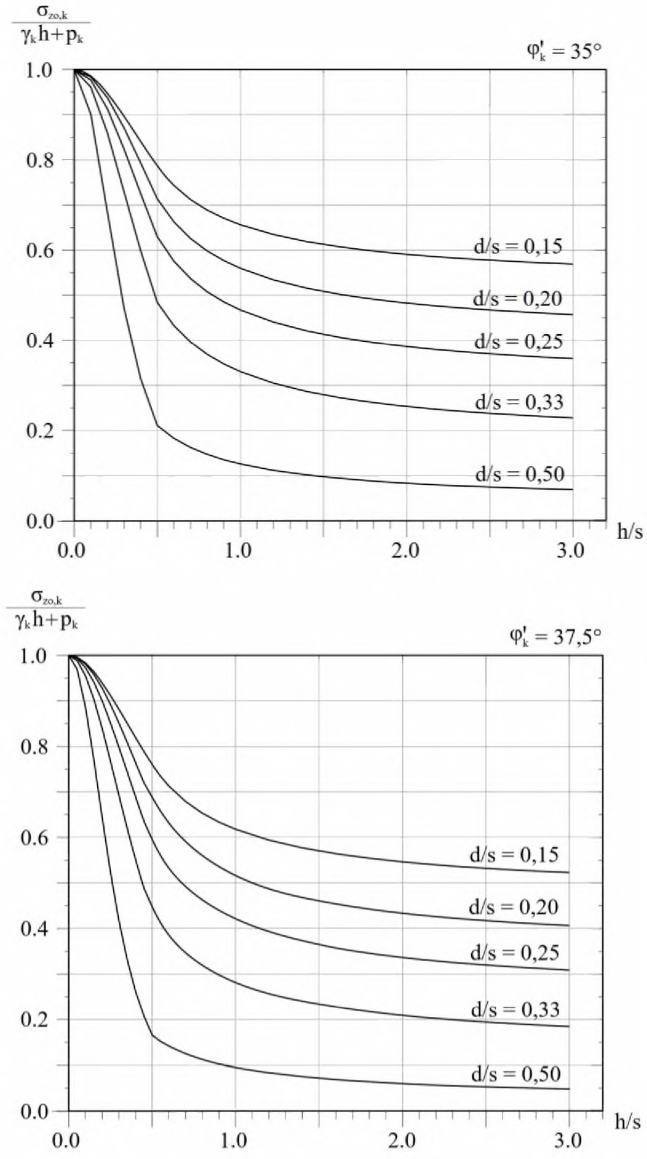


Рисунок А.2 – Графики для проверки мембранных напряжений в армирующем элементе на основаниях из отдельно-стоящих свай ($\varphi'_k = 35^\circ; 37{,}5^\circ$)

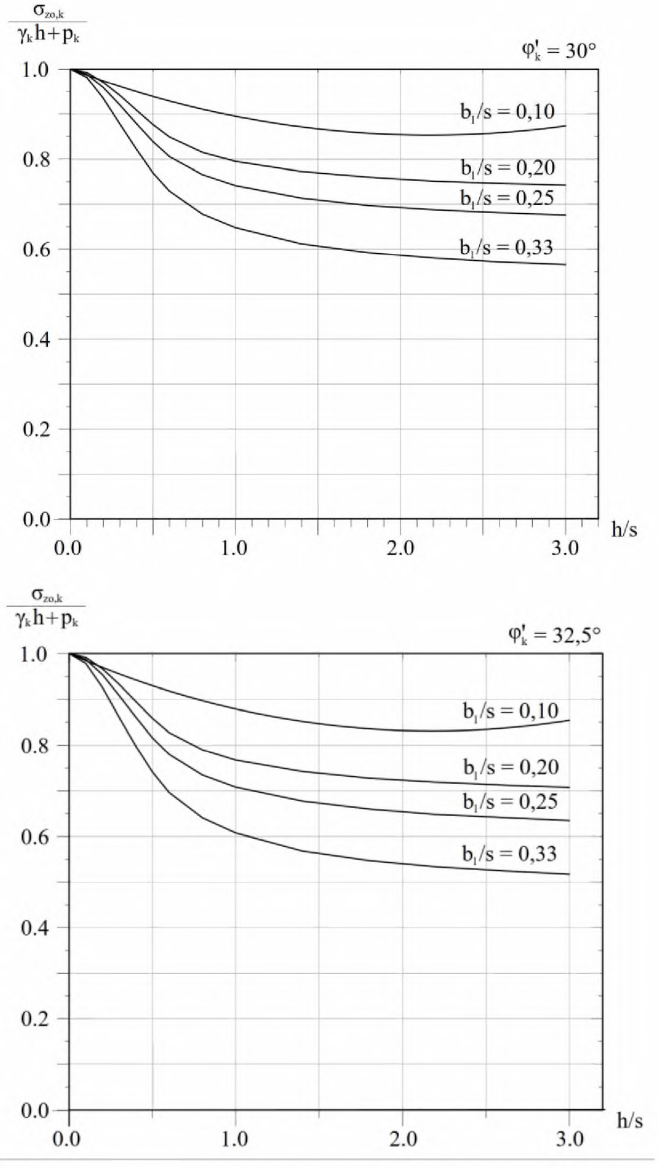


Рисунок А.3 – Графики для проверки мембранных напряжений в армирующем элементе на свайных основаниях с балочным ростверком ($\varphi'_k = 30^\circ; 32{,}5^\circ$)

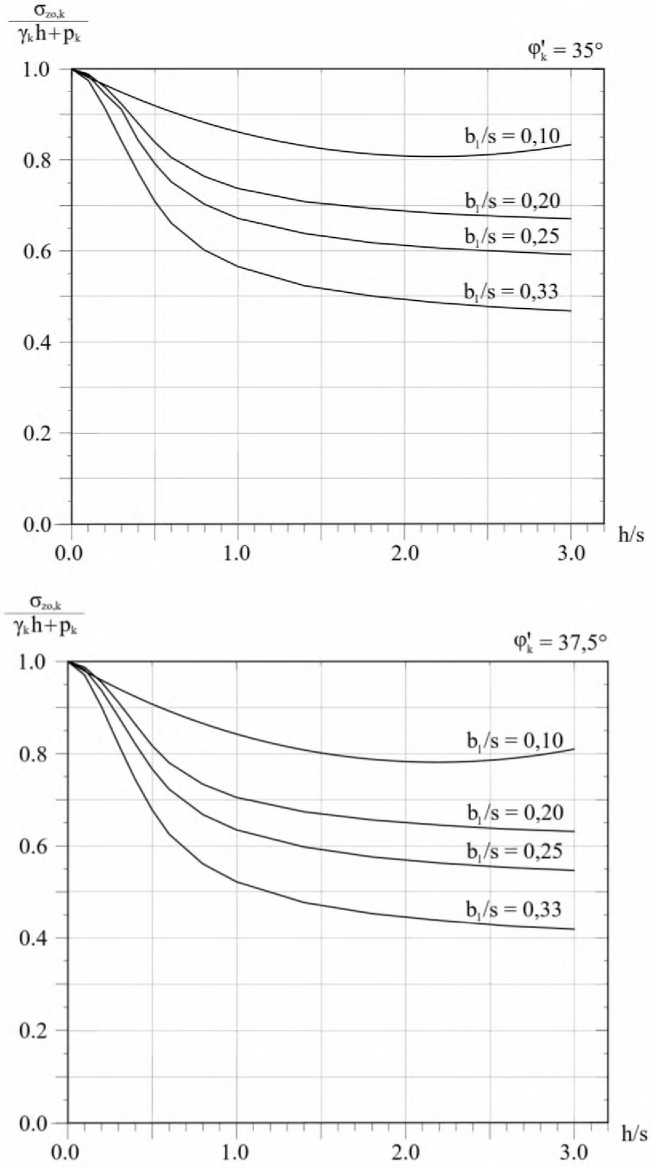


Рисунок А.4 – Графики для проверки мембранных напряжений в армирующем элементе на свайных основаниях с балочным ростверком ($\varphi'_k = 35^\circ; 37{,}5^\circ$)

Приложение Б

Особенности расчета гибкого ростверка при помощи численных методов

Б.1 Для расчета гибких ростверков численными методами следует использовать верифицированные вычислительные комплексы.

Б.2 При проведении расчетов численными методами следует рассматривать расчетные состояния, предусмотренные пунктом 5.1.

Б.3 Моделирование рекомендуется производить в трехмерной (пространственной постановке. Допускается использовать плоские (двухмерные) расчетные модели, представленные на рисунке Б.1 при условии использования специальных элементов для моделирования свай, имитирующих отдельные стержни с возможностью учета шага их расстановки.

Б.4 В плоских моделях грунтовый массив, как правило, задается в виде многоузловых конечных элементов геометрической, квадратной и прямоугольной геометрической формы. Армирующий элемент и сваи задаются стержневыми конечными элементами.

Б.5 Основной размер сетки конечных элементов задается таким образом, чтобы при дальнейшем ее уменьшении внутренние усилия и напряжения в элементах схемы не отличались более, чем на 5%.

Б.6 Сетку конечных элементов следует размельчать в 2-3 раза местах концентрации напряжений (оголовки, наконечники свай, примыкания откосной части насыпи и т.д.).

Б.7 Размер расчетной области задается таким образом, чтобы при его дальнейшем значительном увеличении результаты расчета не отличались более чем на 5%.

Б.8 На расчетной схеме с трех сторон (лево, право, низ) задаются граничные условия закрепляющие модель от поступательных перемещений во всех направлениях.

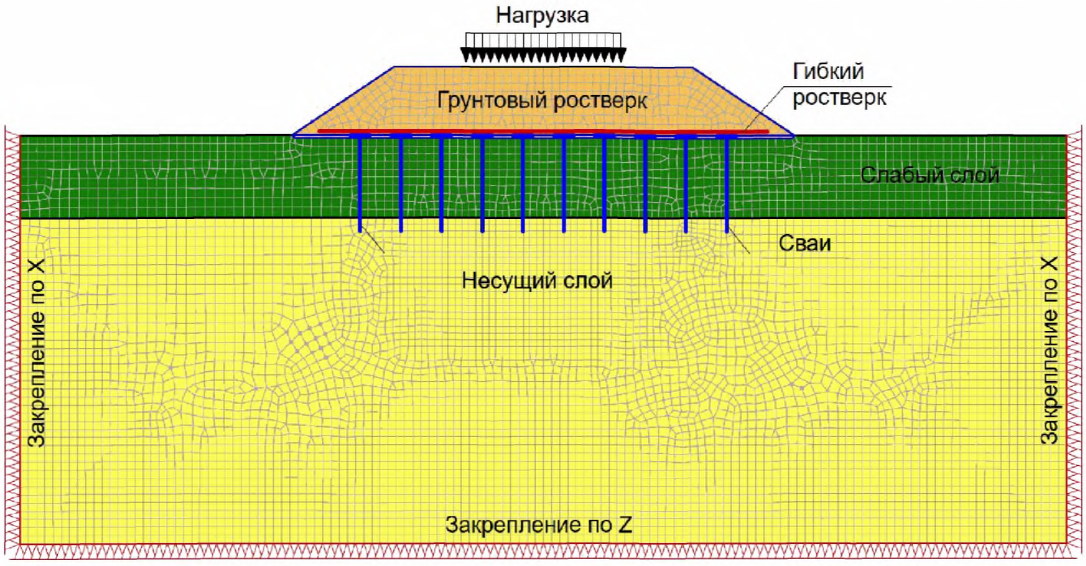


Рисунок Б.1 – Конечно-элементная расчетная модель

Б.9 Для моделирования поведения естественных и насыпных грунтов используется упругопластическая модель Кулона-Мора. Конструктивные элементы (сваи, балки и т.п) моделируются из материалов с линейно-упругими свойствами.

Б.10 Жесткость армирующих элементов рекомендуется учитывать, используя упруго-пластическую модель, описывающую физически-нелинейное поведение материала под нагрузкой. Допускается использовать линейно-упругую модель для армирующего элемента, при этом жесткость следует уточнять итерациями в зависимости от вычисленного относительного удлинения геометриала, в соответствии с п. 5.6.

Б.11 Так как армирующий элемент не обладает свойствами изгибной жесткости, в состоянии 1г (таблица 1), в соответствии с п. 6.1 согласно п. 5.6 следует проводить деформационные (геометрически нелинейные расчеты), а также узловые конечные элементы (фиктивные связи) малой жесткости (≈ 0,01 кН/м) в основании армирующего элемента, представленного на рисунке Б.2.

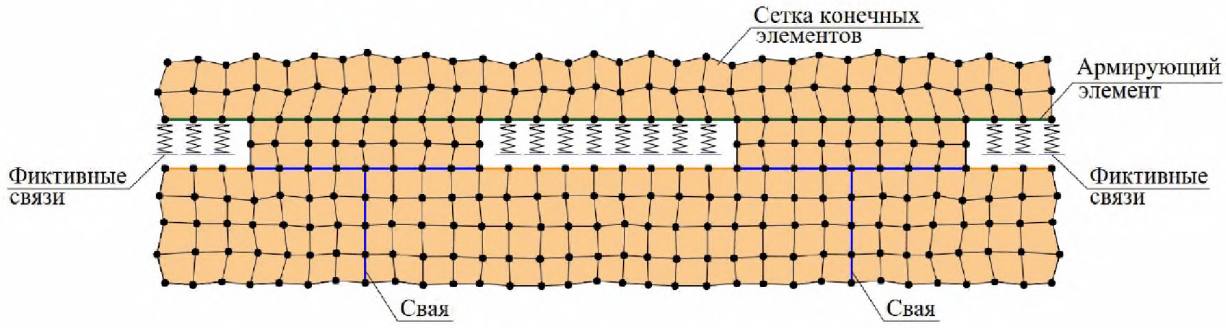


Рисунок Б.2 – Фиктивные связи

Б.12 При проведении расчетов численными методами рекомендуется моделировать все возможные гидрогеологические процессы.

Б.13 В месте контакта свая/грунт, армирующий элемент/грунт задаются специальные элементы (интерфейсы), характеризующие жесткость соединения, учитывающего заклинивание армирующего элемента в грунте и способ устройства свай.

Приложение В

Пример расчета гибкого ростверка

1 Исходные данные

Расчет гибкого ростверка проводится по первой группе предельных состояний с проверкой несущей способности армирующего элемента по материалу, в соответствии с п. 5.1 настоящих рекомендаций. Рассматриваются расчетные состояния состояния 1а,1б,1в.

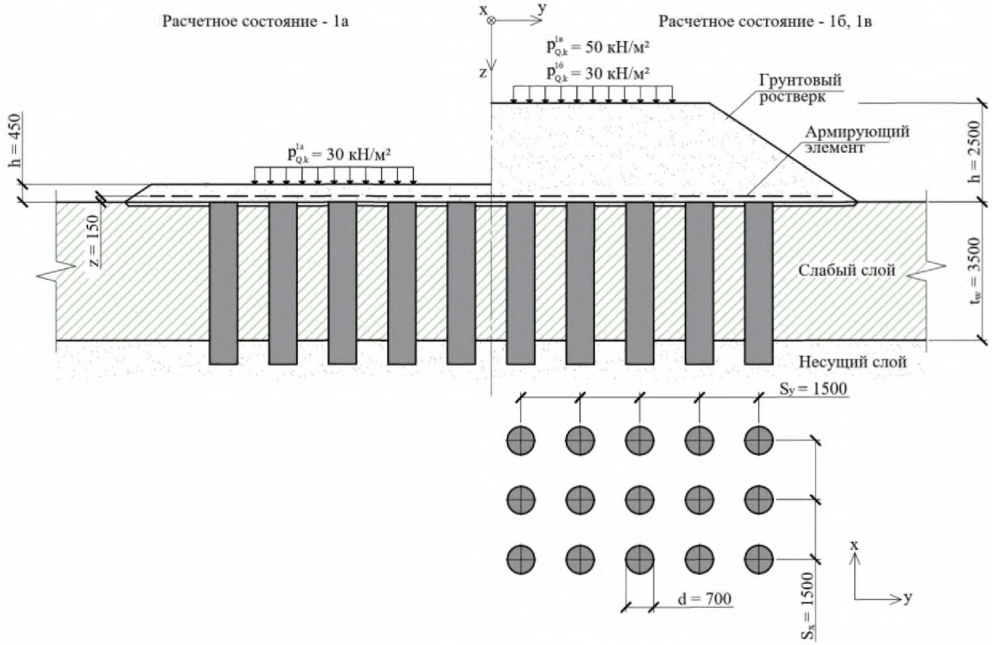


Рисунок В.1 – Расчетная схема

Таблица Б.1 - Физико-механические характеристики грунтов

Характеристика	Слабый слой	Грунтовый ростверк
E_k, кН/м^2	500	-
γ_k, кН/м^3	-	18
φ'_k,°	-	35

В качестве армирующего элемента используется геоматериал одноосноориентированный с прочностью при растяжении, $T_{нор}$:

- 400 кН/м, в продольном направлении;

- 200 кН/м, в поперечном направлении;

Прочность геополотна после воздействия различных факторов:

$$T_x = \frac{T_{\text{нор}}^x}{\text{k}_{\text{общ}}} = \frac{200}{1{,}85} = 108{,}1 \text{ кН/м}$$

$$T_y = \frac{T_{\text{нор}}^y}{\text{k}_{\text{общ}}} = \frac{400}{1{,}85} = 216{,}2 \text{ кН/м}$$

Примечание – индексы *x* и *y* обозначают механические свойства и усилия в армирующем элементе в продольном и поперечном направлениях

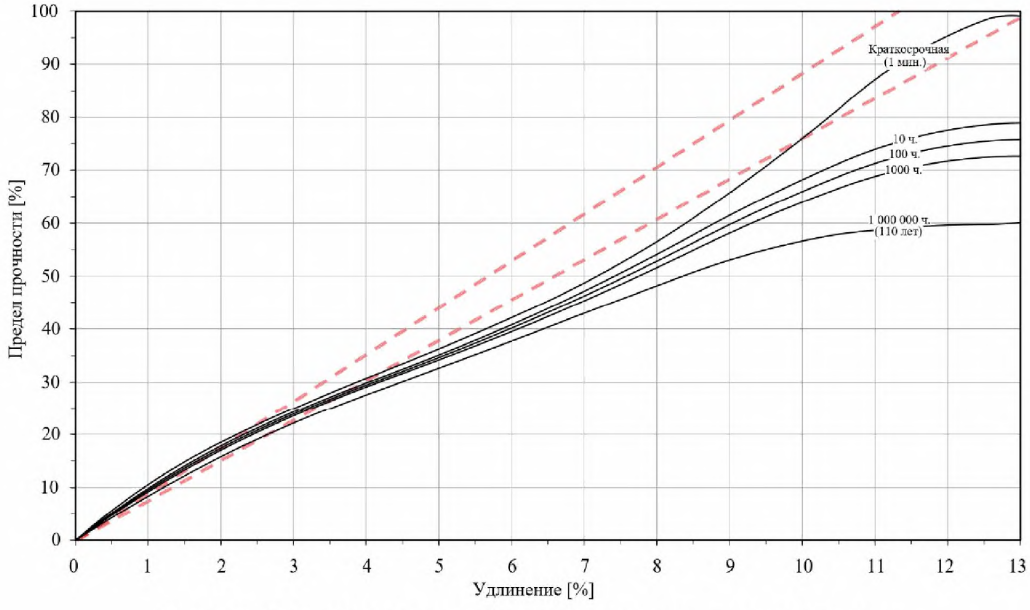


Рисунок Б.2 - Диаграмма деформирования армирующего элемента

Таблица Б.2 - Осевая жесткость армирующего элемента

Время	деформация, ε, %	$J_{x,k}$, кН/м	$J_{y,k}$, кН/м
10 ч.	2,5	$\frac{21,1}{2,5}200 = 1688$	$\frac{21,1}{2,5}400 = 3376$
	1,4	$\frac{13,5}{1,4}200 = 1928$	$\frac{13,5}{1,4}400 = 3857$
	4	$\frac{30}{4}200 = 1500$	$\frac{30}{4}400 = 3000$
500 ч.	2,5	$\frac{20,6}{2,5}200 = 1648$	$\frac{20,6}{2,5}400 = 3296$
	1,4	$\frac{12,5}{1,4}200 = 1785$	$\frac{12,5}{1,4}400 = 3571$
	3,2	$\frac{24,5}{3,2}200 = 1531$	$\frac{24,5}{3,2}400 = 3063$
	2	$\frac{17,3}{2}200 = 1703$	$\frac{17,3}{2}400 = 3460$
1 000 000 ч.	2,5	$\frac{19}{2,5}200 = 1520$	$\frac{19}{2,5}400 = 3040$
	1,5	$\frac{12,3}{1,5}200 = 1640$	$\frac{12,3}{1,5}400 = 3280$
	4	$\frac{27,5}{4}200 = 1375$	$\frac{27,5}{4}400 = 2740$

Жесткость грунтового межсвайного основания под гибким ростверком вычисляется по формуле (3):

$$k_{s,k} = \frac{E_s}{t_W} = \frac{500}{3,5} = 143 \text{ кН/м}^3$$

2 Расчет несущей способности армирующего элемента по материалу для состояний 1а, 1б, 1в.

Расчет производится в соответствии с положениями р. 6 настоящих рекомендаций.

2.1 Расчет несущей способности армирующего элемента по материалу. Состояние 1а

Расстояние между осями свай определяется по формуле

$s = \sqrt{1{,}5^2 + 1{,}5^2} = 2{,}1213$ м

Высота сводообразования: $h_g = h = 0{,}45$ м т.к. $h = 0{,}45 < s/2 = 1{,}06$ м

Коэффициент пассивного давления и активного давления грунта определяется по формуле

$$K_{crit} = \text{tg}^2\left(45° + \frac{\varphi_k'}{2}\right) = 3{,}69$$

$$K_{agh} = 0{,}271$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{8}(s-d)^2 = \frac{1}{8}(2{,}1213 - 0{,}7)^2 = 0{,}2525$$

$$\lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2} = \frac{2{,}1213^2 + 2 \cdot 0{,}7 \cdot 2{,}1213 - 0{,}7^2}{2 \cdot 2{,}1213^2} = 0{,}7755$$

$$\chi = \frac{d(K_{crit} - 1)}{\lambda_2 s} = \frac{0{,}7(3{,}69 - 1)}{0{,}7755 \cdot 2{,}1213} = 1{,}1447$$

Мембранное напряжение от постоянных нагрузок определяется по формуле

$$\sigma_{zo,G,k} = \lambda_1^{\chi}\gamma_k \cdot$$

$$\cdot\left\{h\left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi} + h_g\left[\left(\lambda_1 + \frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\} =$$

$$= 0{,}2525^{1{,}1447} \cdot 18 \cdot$$

$$\cdot\left\{0{,}45(0{,}2525 + 0{,}45^2 \cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right.$$

$$\left. + 0{,}45\left[\left(0{,}2525 + \frac{0{,}45^2 \cdot 0{,}7755}{4}\right)^{-1{,}1447} - (0{,}2525 + 0{,}45^2 \cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right]\right\}$$

$$= 6{,}87 \text{ кН/м}^2$$

Проверка производится по графикам, Прил. А

$$\frac{\sigma_{zo,G,k}}{\gamma_k \cdot h} = 0{,}85 \rightarrow \sigma_{zo,G,k} = 6{,}89 \text{ кН/м}^2 \cdot$$

Мембранное напряжение от постоянных и переменных нагрузок определяется по формуле

$$\sigma_{zo,G+Q,k} = \lambda_1^{\chi}\left(\gamma_k + \frac{p_{Q,k}}{h}\right) \cdot$$

$$\cdot\left\{h\left(\lambda_1+{h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}+h_g\left[\left(\lambda_1+\frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi}-\left(\lambda_1+{h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\}=$$

$$=0{,}2525^{1{,}1447}\left(18+\frac{30}{0{,}45}\right)\cdot$$

$$\cdot\left\{0{,}45(0{,}2525+0{,}45^2\cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right.$$

$$\left.+0{,}45\left[\left(0{,}2525+\frac{0{,}45^2\cdot 0{,}7755}{4}\right)^{-\chi}-(0{,}2525+0{,}45^2\cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right]\right\}$$

$$=32{,}29\ \text{кН/м}^2$$

Проверка производится по графикам согласно Приложению А.

$$\frac{\sigma_{zo,G+Q,k}}{\gamma_k\cdot h+p_{Q,k}}=0{,}85\rightarrow\ \sigma_{zo,G+Q,k}=32{,}39\ \text{кН/м}^2$$

Состояние 1а. Стадия 1

Плоскость - X

Определяется ширина опорной зоны:

$$b_{Ers}=0{,}5d\sqrt{\pi}=0{,}5\cdot 0{,}7\cdot\sqrt{3{,}14}=0{,}62\ \text{м}$$

Определяется свободный пролет армирующего элемента:

$$L_{wx}=s_x-b_{Ers}=1{,}5-0{,}62=0{,}88\ \text{м}$$

Определяется грузовая площадь:

$$A_{Lx}=0{,}5(s_xs_y)-\frac{d^2}{2}arctg\left(\frac{s_y}{s_x}\right)\frac{\pi}{180}=0{,}5(1{,}5\cdot 1{,}5)-\frac{0{,}7^2}{2}arctg\left(\frac{1{,}5}{1{,}5}\right)\frac{3{,}14}{180}=0{,}933\ \text{м}^2$$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{x,G,k}=A_{Lx}\sigma_{zo,G,k}=0{,}933\cdot 6{,}87=6{,}41\ \text{кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k}\cdot L_{wx}^2}{J_{x,10ч}^{2,5\%}}=\frac{143\cdot 0{,}88^2}{1688}=0{,}0656$$

$$\frac{F_{x,G,k}/b_{Ers}}{J_{x,10ч}^{2,5\%}}=\frac{6{,}41/0{,}62}{1688}=0{,}0061$$

$\varepsilon_{x,G,k}=1{,}4\%$ (Рис. 3,4)

Плоскость - Y

$$L_{wy}=s_y-b_{Ers}=1{,}5-0{,}62=0{,}88\ \text{м}$$

$$A_{Ly}=0{,}5(s_ys_x)-\frac{d^2}{2}arctg\left(\frac{s_x}{s_y}\right)\frac{\pi}{180}=0{,}5(1{,}5\cdot 1{,}5)-\frac{0{,}7^2}{2}arctg\left(\frac{1{,}5}{1{,}5}\right)\frac{3{,}14}{180}=0{,}933\ \text{м}^2$$

$$F_{y,G,k}=A_{Ly}\sigma_{zo,G,k}=0{,}933\cdot 6{,}87=6{,}41\ \text{кН/м}$$

$$\frac{k_{s,k}\cdot L_{wy}^2}{J_{y,10ч}^{2,5\%}}=\frac{143\cdot 0{,}88^2}{3376}=0{,}0328$$

$$\frac{F_{y,G,k}/b_{Ers}}{J_{y,10ч}^{2,5\%}}=\frac{6{,}41/0{,}62}{3376}=0{,}0031$$

$\varepsilon_{y,G,k}=1{,}3\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}4/2{,}5 \cdot 100 = 56\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,10ч}^{1,4\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1928} = 0{,}0574$$

$$\frac{F_{x,G,k}/b_{Ers}}{J_{x,10ч}^{1,4\%}} = \frac{6{,}41/0{,}62}{1928} = 0{,}0053$$

$\varepsilon_{x,G,k} = 1{,}3\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}3/1{,}4 \cdot 100 = 92\% > 85\%$

Сходимость – $1{,}3/2{,}5 \cdot 100 = 52\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{yx}^2}{J_{y,10ч}^{1,4\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3857} = 0{,}0287$$

$$\frac{F_{y,G,k}/b_{Ers}}{J_{y,10ч}^{1,4\%}} = \frac{6{,}41/0{,}62}{3857} = 0{,}0026$$

$\varepsilon_{x,G,k} = 1{,}2\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}2/1{,}4 \cdot 100 = 86\% > 85\%$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести:

$$E_{Mx,G,k} = \varepsilon_{x,G,k} \cdot J_{x,10ч}^{1,4\%} = \frac{1{,}3}{100} \cdot 1928 = 25{,}06 \text{ кН/м}$$

$$E_{M,y,G,k} = \varepsilon_{y,G,k} \cdot J_{y,10ч}^{1,4\%} = \frac{1{,}2}{100} \cdot 3857 = 46{,}28 \text{ кН/м}$$

Определяется усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге

$$E_{ah.G,k} = 0{,}5\gamma_k(h-z)^2 \cdot K_{agh} = 0{,}5 \cdot 18(0{,}45 - 0{,}15)^2 \cdot 0{,}271 = 0{,}22 \text{ кН/м}$$

Определяется суммарное усилие в армирующем элементе

$E_{x,G,k} = E_{M,x,G,k} = 25{,}05$ кН/м

$$E_{y,G,k} = E_{ah.G,k} + E_{M,y,G,k} = 0{,}22 + 46{,}28 = 46{,}5 \text{ кН/м}$$

Состояние 1а. Стадия 2

Плоскость - X

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{x,G+Q,k} = A_{Lx}\sigma_{zo,G+Q,k} = 0{,}933 \cdot 32{,}29 = 30{,}13 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,10ч}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1688} = 0{,}0656$$

$$\frac{F_{x,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{x,10ч}^{2,5\%}} = \frac{30{,}13/0{,}62}{1688} = 0{,}0287$$

$\varepsilon_{x,G+Q,k} = 4{,}0\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}4/2{,}5 \cdot 100 = 56\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,10ч}^{4\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1500} = 0{,}0738$$

$$\frac{F_{x,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{x,10ч}^{4\%}} = \frac{30{,}13/0{,}62}{1500} = 0{,}0324$$

$\varepsilon_{x,G+Q,k} = 4{,}2\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $4{,}0/4{,}2 \cdot 100 = 95\% > 85\%$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести:

Плоскость - Y

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{y,G+Q,k} = A_{Ly}\sigma_{zo,G+Q,k} = 0{,}933 \cdot 32{,}29 = 30{,}13 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wy}^2}{J_{y,10ч}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3376} = 0{,}0328$$

$$\frac{F_{y,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{y,10ч}^{2,5\%}} = \frac{30{,}13/0{,}62}{3376} = 0{,}0144$$

$\varepsilon_{y,G+Q,k} = 2{,}5\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $2{,}5/2{,}5 \cdot 100 = 100\% > 85\%$

$$E_{M,x,G+Q,k} = \varepsilon_{x,G,k} \cdot J_{x,10ч}^{4\%} = \frac{4,2}{100} \cdot 1500 = 63,0 \text{ кН/м}$$

$$E_{M,y,G+Q,k} = \varepsilon_{y,G+Q,k} \cdot J_{y,10ч}^{2,5\%} = \frac{2,5}{100} \cdot 3376 = 84,4 \text{ кН/м}$$

Определяется усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге

$$E_{ah,G+Q,k} = 0,5\gamma_k(h-z)^2 \cdot K_{agh} + p_{Q,k} \cdot (h-z) \cdot K_{agh} = 0,5 \cdot 18(0,45-0,15)^2 \cdot 0,271 + 30 \cdot (0,45-0,15) \cdot 0,271 = 2.66 \text{ кН/м}$$

Определяется суммарное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,G+Q,k} = E_{M,x,G+Q,k} = 63,0 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,G+Q,k} = E_{ah,G+Q,k} + E_{M,y,G+Q,k} = 2,66 + 84,4 = 87,06 \text{ кН/м}$$

Определяется расчетное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,d} = E_{G,k}\gamma_{fG} + (E_{G+Q,k} - E_{G,k})\gamma_{fQ} = 25,05 \cdot 1,15 + (63,0 - 25,05) \cdot 1,2 = 74,34 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,d} = E_{G,k}\gamma_{fG} + (E_{G+Q,k} - E_{G,k})\gamma_{fQ} = 46,5 \cdot 1,15 + (87,06 - 46,5) \cdot 1,2 = 102,14 \text{ кН/м}$$

2.2 Расчет несущей способности армирующего элемента по материалу. Состояние 1б

Высота сводообразования: т.к. $h = 2,5 \text{ м} > s/2 = 1,06 \text{ м} \rightarrow h_g = 1,06 \text{ м}$

Мембранное напряжение от постоянных нагрузок определяется по формуле

$$\sigma_{zo,G,k} = \lambda_1^{\chi}\gamma_k \cdot \cdot \left\{ h\left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi} + h_g\left[\left(\lambda_1 + \frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\} =$$

$$= 0,2525^{1,1447} \cdot 18 \cdot \cdot \left\{2,5(0,2525 + 1,06^2 \cdot 0,7755)^{-1,1447} + 1,06\left[\left(0,2525 + \frac{1,06^2 \cdot 0,7755}{4}\right)^{-1,1447} - (0,2525 + 1,06^2 \cdot 0,7755)^{-1,1447}\right]\right\}$$

$$= 14,05 \text{ кН/м}^2$$

Проверка производится по графикам, приложения А

$$\frac{\sigma_{zo,G,k}}{\gamma_k \cdot h} = 0,31 \rightarrow \sigma_{zo,G,k} = 13,95 \text{ кН/м}^2 \cdot$$

Мембранное напряжение от постоянных и переменных нагрузок определяется по формуле

$$\sigma_{zo,G+Q,k} = \lambda_1^{\chi}\left(\gamma_k + \frac{p_{Q,k}}{h}\right) \cdot$$

$$\cdot\left\{h\left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi} + h_g\left[\left(\lambda_1 + \frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\} =$$

$$= 0{,}2525^{1{,}1447}\left(18 + \frac{30}{2{,}5}\right) \cdot$$

$$\cdot\left\{2{,}5(0{,}2525 + 1{,}06^2 \cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right.$$

$$\left. + 1{,}06\left[\left(0{,}2525 + \frac{1{,}06^2 \cdot 0{,}7755}{4}\right)^{-\chi} - (0{,}2525 + 1{,}06^2 \cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right]\right\}$$

$$= 23{,}41 \text{ кН/м}^2$$

Проверка производится по графикам приложения А.

$$\frac{\sigma_{zo,G+Q,k}}{\gamma_k \cdot h + p_{Q,k}} = 0{,}31 \rightarrow \sigma_{zo,G+Q,k} = 23{,}25 \text{ кН/м}^2$$

Состояние 1б. Стадия 1

Плоскость - X

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{x,G,k} = A_{Lx}\sigma_{zo,G,k} = 0{,}933 \cdot 14{,}05 = 13{,}11 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,500ч}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1648} = 0{,}0672$$

$$\frac{F_{x,G,k}/b_{Ers}}{J_{x,500ч}^{2,5\%}} = \frac{13{,}11/0{,}62}{1648} = 0{,}0128$$

$\varepsilon_{x,G,k} = 2{,}2\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $2{,}2/2{,}5 \cdot 100 = 88\% > 85\%$

Плоскость - Y

$$F_{y,G,k} = A_{Ly}\sigma_{zo,G,k} = 0{,}933 \cdot 14{,}05 = 13{,}11 \text{ кН/м}$$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wy}^2}{J_{y,500ч}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3296} = 0{,}0336$$

$$\frac{F_{y,G,k}/b_{Ers}}{J_{y,500ч}^{2,5\%}} = \frac{13{,}11/0{,}62}{3296} = 0{,}0064$$

$\varepsilon_{y,G,k} = 1{,}4\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}4/2{,}5 \cdot 100 = 56\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{yx}^2}{J_{y,500ч}^{1,4\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3571} = 0{,}031$$

$$\frac{F_{y,G,k}/b_{Ers}}{J_{y,500ч}^{1,4\%}} = \frac{13{,}11/0{,}62}{3571} = 0{,}0059$$

$\varepsilon_{x,G,k} = 1{,}35\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}35/1{,}4 \cdot 100 = 96\% > 85\%$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести:

$$E_{M,x,G,k} = \varepsilon_{x,G,k} \cdot J_{x,500ч}^{2,5\%} = \frac{2{,}2}{100} \cdot 1648 = 36{,}25 \text{ кН/м}$$

$$E_{M,y,G,k} = \varepsilon_{y,G,k} \cdot J_{y,500ч}^{1,4\%} = \frac{1{,}35}{100} \cdot 3571 = 48{,}2 \text{ кН/м}$$

Определяется усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге

$$E_{ah.G,k} = 0{,}5\gamma_k(h-z)^2 \cdot K_{agh} = 0{,}5 \cdot 18(2{,}5 - 0{,}15)^2 \cdot 0{,}271 = 13{,}47 \text{ кН/м}$$

Определяется суммарное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,G,k} = E_{M,x,G,k} = 36{,}25 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,G,k} = E_{ah.G,k} + E_{M,y,G,k} = 13{,}47 + 48{,}2 = 62{,}67 \text{ кН/м}$$

Состояние 1б. Стадия 2

Плоскость - X

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{x,G+Q,k} = A_{Lx}\sigma_{zo,G+Q,k} = 0{,}933 \cdot 23{,}41 = 21{,}84 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,500ч}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1648} = 0{,}0672$$

$$\frac{F_{x,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{x,500ч}^{2,5\%}} = \frac{21{,}84/0{,}62}{1648} = 0{,}0214$$

$\varepsilon_{x,G+Q,k} = 3{,}2\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость $- 2{,}5/3{,}2 \cdot 100 = 78\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,500ч}^{3{,}2\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1531} = 0{,}0723$$

$$\frac{F_{x,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{x,500ч}^{3{,}2\%}} = \frac{21{,}84/0{,}62}{1531} = 0{,}023$$

$\varepsilon_{x,G+Q,k} = 3{,}25\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость $- 3{,}2/3{,}25 \cdot 100 = 98\% > 85\%$

Плоскость - Y

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{y,G+Q,k} = A_{Ly}\sigma_{zo,G+Q,k} = 0{,}933 \cdot 23{,}41 = 21{,}84 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wy}^2}{J_{y,500ч}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3296} = 0{,}0336$$

$$\frac{F_{y,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{y,500ч}^{2,5\%}} = \frac{23{,}41/0{,}62}{3296} = 0{,}0107$$

$\varepsilon_{y,G+Q,k} = 1{,}95\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость $- 1{,}95/2{,}5 \cdot 100 = 78\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wy}^2}{J_{y,500ч}^{2,0\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3460} = 0{,}032$$

$$\frac{F_{y,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{y,500ч}^{2,0\%}} = \frac{23{,}41/0{,}62}{3460} = 0{,}0109$$

$\varepsilon_{y,G+Q,k} = 1{,}95\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость $- 1{,}95/2{,}0 \cdot 100 = 97\% < 85\%$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести:

$$E_{M\,x,G+Q,k} = \varepsilon_{x,G,k} \cdot J_{x,500ч}^{3{,}2\%} = \frac{3{,}25}{100} \cdot 1531 = 49{,}75 \text{ кН/м}$$

$$E_{M,y,G+Q,k} = \varepsilon_{y,G+Q,k} \cdot J_{y,500ч}^{2\%} = \frac{1{,}95}{100} \cdot 3460 = 67{,}47 \text{ кН/м}$$

Определяется усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге

$$E_{ah.G+Q,k} = 0{,}5\gamma_k(h-z)^2 \cdot K_{agh} + p_{Q,k} \cdot (h-z) \cdot K_{agh} = 0{,}5 \cdot 18(2{,}5 - 0{,}15)^2 \cdot 0{,}271 + 30 \cdot (2{,}5 - 0{,}15) \cdot 0{,}271 = 32{,}57 \text{ кН/м}$$

Определяется суммарное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,G+Q,k} = E_{M,x,G+Q,k} = 49{,}75 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,G+Q,k} = E_{ah.G+Q,k} + E_{M,y,G+Q,k} = 32{,}57 + 67{,}47 = 100{,}04 \text{ кН/м}$$

Определяется расчетное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,d} = E_{G,k}\gamma_{fG} + (E_{G+Q,k} - E_{G,k})\gamma_{fQ} = 36{,}25 \cdot 1{,}15 + (49{,}75 - 36{,}25) \cdot 1{,}2 = 57{,}88 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,d} = E_{G,k}\gamma_{fG} + (E_{G+Q,k} - E_{G,k})\gamma_{fQ} = 62{,}67 \cdot 1{,}15 + (100{,}04 - 62{,}67) \cdot 1{,}2 = 116{,}92 \text{ кН/м}$$

2.1 Расчет несущей способности армирующего элемента по материалу. Состояние 1в.

Высота сводообразования: т.к. $h = 2{,}5$ м $> s/2 = 1{,}06$ м $\rightarrow h_g = 1{,}06$ м

Мембранное напряжение от постоянных и переменных нагрузок определяется по формуле

$$\sigma_{zo,G+Q,k} = \lambda_1^{\chi}\left(\gamma_k + \frac{p_{Q,k}}{h}\right)\cdot$$

$$\cdot\left\{h\left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi} + h_g\left[\left(\lambda_1 + \frac{{h_g}^2\lambda_2}{4}\right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + {h_g}^2\lambda_2\right)^{-\chi}\right]\right\} =$$

$$= 0{,}2525^{1{,}1447}\left(18 + \frac{50}{2{,}5}\right)\cdot$$

$$\cdot\left\{2{,}5(0{,}2525 + 1{,}06^2\cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right.$$

$$\left. + 1{,}06\left[\left(0{,}2525 + \frac{1{,}06^2\cdot 0{,}7755}{4}\right)^{-\chi} - (0{,}2525 + 1{,}06^2\cdot 0{,}7755)^{-1{,}1447}\right]\right\}$$

$$= 29{,}65\ \text{кН/м}^2$$

Проверка производится по графикам, Прил. А

$$\frac{\sigma_{zo,G+Q,k}}{\gamma_k\cdot h + p_{Q,k}} = 0{,}31 \rightarrow \sigma_{zo,G+Q,k} = 29{,}45\ \text{кН/м}^2$$

Состояние 1в. Стадия 1

Плоскость - X	**Плоскость - Y**
Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:	
$F_{x,G,k} = A_{Lx}\sigma_{zo,G,k} = 0{,}933\cdot 14{,}05 = 13{,}11$ кН/м	$F_{y,G,k} = A_{Ly}\sigma_{zo,G,k} = 0{,}933\cdot 14{,}05 = 13{,}11$ кН/м
Определяется деформация геоматериала:	
$\frac{k_{s,k}\cdot L_{wx}^2}{J_{x,110л}^{2,5\%}} = \frac{143\cdot 0{,}88^2}{1520} = 0{,}0729$	$\frac{k_{s,k}\cdot L_{wy}^2}{J_{y,110л}^{2,5\%}} = \frac{143\cdot 0{,}88^2}{3040} = 0{,}0364$
$\frac{F_{x,G,k}/b_{Ers}}{J_{x,110л}^{2,5\%}} = \frac{13{,}11/0{,}62}{1520} = 0{,}014$	$\frac{F_{y,G,k}/b_{Ers}}{J_{y,110л}^{2,5\%}} = \frac{13{,}11/0{,}62}{3040} = 0{,}007$
$\varepsilon_{x,G,k} = 2{,}45\%$ (Рис. 3,4)	$\varepsilon_{y,G,k} = 1{,}5\%$ (Рис. 3,4)
Сходимость – $2{,}45/2{,}5\cdot 100 = 98\% >$	Сходимость – $1{,}5/2{,}5\cdot 100 = 60\% < 85\%$

85%

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{yx}^2}{J_{y,110л}^{1,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3280} = 0{,}0338$$

$$\frac{F_{y,G,k}/b_{Ers}}{J_{y,110л}^{1,5\%}} = \frac{13{,}11/0{,}62}{3280} = 0{,}0064$$

$\varepsilon_{x,G,k} = 1{,}4\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $1{,}4/1{,}5 \cdot 100 = 93\% > 85\%$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести:

$$E_{M,x,G,k} = \varepsilon_{x,G,k} \cdot J_{x,110л}^{2,5\%} = \frac{2{,}5}{100} \cdot 1520 = 38 \text{ кН/м}$$

$$E_{M,y,G,k} = \varepsilon_{y,G,k} \cdot J_{y,110л}^{1,5\%} = \frac{1{,}4}{100} \cdot 3280 = 45{,}92 \text{ кН/м}$$

Определяется усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге

$$E_{ah.G,k} = 0{,}5\gamma_k(h-z)^2 \cdot K_{agh} = 0{,}5 \cdot 18(2{,}5 - 0{,}15)^2 \cdot 0{,}271 = 13{,}47 \text{ кН/м}$$

Определяется суммарное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,G,k} = E_{M,x,G,k} = 38 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,G,k} = E_{ah.G,k} + E_{M,y,G,k} = 13{,}47 + 45{,}92 = 59{,}39 \text{ кН/м}$$

Состояние 1в. Стадия 2

Плоскость - X

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{x,G+Q,k} = A_{Lx}\sigma_{zo,G+Q,k} = 0{,}933 \cdot 29{,}65 = 27{,}66 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,110л}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1520} = 0{,}0729$$

$$\frac{F_{x,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{x,110л}^{2,5\%}} = \frac{27{,}66/0{,}62}{1520} = 0{,}0294$$

$\varepsilon_{x,G+Q,k} = 4{,}05\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $2{,}5/4{,}05 \cdot 100 = 62\% < 85\%$

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wx}^2}{J_{x,110л}^{4\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{1375} = 0{,}0805$$

Плоскость - Y

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе без учета ползучести:

$$F_{y,G+Q,k} = A_{Ly}\sigma_{zo,G+Q,k} = 0{,}933 \cdot 29{,}65 = 27{,}66 \text{ кН/м}$$

Определяется деформация геоматериала:

$$\frac{k_{s,k} \cdot L_{wy}^2}{J_{y,110л}^{2,5\%}} = \frac{143 \cdot 0{,}88^2}{3040} = 0{,}0364$$

$$\frac{F_{y,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{y,110л}^{2,5\%}} = \frac{27{,}66/0{,}62}{3040} = 0{,}0147$$

$\varepsilon_{y,G+Q,k} = 2{,}5\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $2{,}5/2{,}5 \cdot 100 = 100\% > 85\%$

$$\frac{F_{x,G+Q,k}/b_{Ers}}{J_{x,110л}^{4\%}} = \frac{27,66/0,62}{1375} = 0,032$$

$\varepsilon_{x,G+Q,k} = 4,2\%$ (Рис. 3,4)

Сходимость – $4/4,2 \cdot 100 = 95\% > 85\%$

Определяется мембранное усилие в армирующем элементе с учетом ползучести:

$$E_{M,x,G+Q,k} = \varepsilon_{x,G,k} \cdot J_{x,110л}^{4\%} = \frac{4,2}{100} \cdot 1375 = 57,75 \text{ кН/м}$$

$$E_{M,y,G+Q,k} = \varepsilon_{y,G+Q,k} \cdot J_{y,110л}^{2,5\%} = \frac{2,5}{100} \cdot 3040 = 76 \text{ кН/м}$$

Определяется усилие в армирующем элементе при боковом сдвиге

$$E_{ah.G+Q,k} = 0,5\gamma_k(h-z)^2 \cdot K_{agh} + p_{Q,k} \cdot (h-z) \cdot K_{agh} = 0,5 \cdot 18(2,5-0,15)^2 \cdot 0,271 + 50 \cdot (2,5-0,15) \cdot 0,271 = 45,31 \text{ кН/м}$$

Определяется суммарное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,G+Q,k} = E_{M,x,G+Q,k} = 57,75 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,G+Q,k} = E_{ah.G+Q,k} + E_{M,y,G+Q,k} = 45,31 + 76 = 121,31 \text{ кН/м}$$

Определяется расчетное усилие в армирующем элементе

$$E_{x,d} = E_{G,k}\gamma_G + \left(E_{G+Q,k} - E_{G,k}\right)\gamma_Q = 38 \cdot 1,15 + (57,75 - 38) \cdot 1,2 = 67,4 \text{ кН/м}$$

$$E_{y,d} = E_{G,k}\gamma_G + \left(E_{G+Q,k} - E_{G,k}\right)\gamma_Q = 59,39 \cdot 1,15 + (121,31 - 59,39) \cdot 1,2 = 142,6 \text{ кН/м}$$

Результаты расчета

Расчетное состояние	Проверяется условие прочности	
	Плоскость - X	Плоскость - Y
1а	$E_{x,d} = 74,34 \text{ кН/м} < T_x = 108,1 \text{ кН/м}$	$E_{y,d} = 102,14 \text{ кН/м} < T_y = 216,2 \text{ кН/м}$
1б	$E_{x,d} = 57,88 \text{ кН/м} < T_x = 108,1 \text{ кН/м}$	$E_{y,d} = 116,92 \text{ кН/м} < T_y = 216,2 \text{ кН/м}$
1в	$E_{x,d} = 67,4 \text{ кН/м} < T_x = 108,1 \text{ кН/м}$	$E_{y,d} = 142,6 \text{ кН/м} < T_y = 216,2 \text{ кН/м}$

Условие проверки по несущей способности выполняется

Библиография

[1] Технический регламент Таможенного союза
ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог»

ОКС 03.220.20

Ключевые слова: земляное полотно, гибкий ростверк, слабые основания, геосинтетические материалы._

Руководитель организации-разработчика
ООО «ГЕО-ПРОЕКТ»

Генеральный директор

Артемьев М.Ю.

gost.e-ecolog.ru