

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА И ПРИРОДООБУСТРОЙСТВА

С.Е. Гамылин, Л.А. Несин, Ю.С. Пескова

МЕХАНИКА ГРУНТОВ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие

Рекомендовано

*Дальневосточным региональным учебно-методическим центром
(ДВ РУМЦ) в качестве учебного пособия
для студентов направления подготовки бакалавров
270800.62 «Строительство» и 280100.62 «Природообустройство
и водопользование» вузов региона
(Протокол №6 от 16.12.2013 г.)*

Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2014

УДК 624.131.5

Гамылин, С.Е. Механика грунтов в примерах и задачах: учебное пособие / С.Е. Гамылин, Л.А. Несин, Ю.С. Пескова. – Благовещенск: ДальГАУ, 2014. – 105 с.

В учебном пособии представлены задачи и примеры расчета по основным разделам дисциплины «Механика грунтов». Приведен список литературы и необходимый для решения задач справочный материал.

Предназначено для студентов всех форм обучения по направлениям подготовки 270800.62 «Строительство» и 280100.62 «Природообустройство и водопользование».

Рецензенты:

И.Г. Селезнев,

канд.техн.наук, директор ООО «Востокдорконтроль»;

А.Ф. Такмаков,

канд.техн.наук, директор центра строительных технологий

Редактор А.И. Казимова

ISBN 978-5-9642-0229-5

© Гамылин С.Е., Несин Л.А., Пескова Ю.С., 2014

© Издательство ДальГАУ, 2014

Фундаментостроение в строительстве является наиболее трудоёмкой и материалоемкой отраслью. Особую актуальность в связи с этим, приобретает использование последних достижений науки и техники для повышения надёжности оснований и фундаментов, обеспечение устойчивости зданий и сооружений и снижения стоимости строительства в целом.

Проектирование и устройство фундаментов и оснований – комплексная задача, включающая в себя изучение дисциплин: «Инженерная геология», «Механика грунтов», «Основания и фундаменты». Изучение студентами дисциплины «Механика грунтов», позволит будущим специалистам строителям качественно оценивать напряжённо-деформированное состояние грунтовых массивов, подвергнутых внешним воздействиям и, следовательно, принимать наиболее экономически выгодные и технически целесообразные решения при выборе типов оснований и конструкций фундаментов. К ответственному звену учебного процесса следует отнести выполнение студентами-заочниками индивидуальной контрольной работы, что способствует систематизации, дальнейшему углублению и закреплению теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины и применении их при решении инженерных задач. Наряду с этим студент приобретает навык пользования действующими в настоящее время нормативными документами и справочной литературой. Самостоятельность выполнения контрольной работы имеет первостепенное значение для усвоения учебного материала. Умение самостоятельно решать контрольные задачи является основой не только подготовки, но и всей инженерной деятельности студента.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

Основные понятия о горных породах (скальных, рыхлых грунтах, органо-минеральных массах). Роль горных пород в строительстве. Особенности физико-механических свойств грунтов и основные задачи механики грунтов.

Становление и развитие механики грунтов как механики многофазных систем. Задачи механики грунтов и методы их решения. Связь механики грунтов с фундаментамостроением и другими строительными дисциплинами.

Тема 1. Состав, строение и состояние грунтов.

Грунтовые основания. Происхождение грунтов. Структура и текстура грунтов. Скальные и нескальные грунты.

Состав грунтов. Твердая, жидкая и газообразная составляющие грунтов. Форма, размеры, взаимное расположение и свойства минеральных частиц. Классификация минеральных частиц по размерам. Органические примеси. Виды воды в грунтах и их свойства. Роль газообразной составляющей.

Структурные связи между минеральными частицами. Кристаллизационные и водно-коллоидные связи. Понятие о внутреннем трении в грунтах.

Трещины и их влияние на свойства грунтов

Тема 2. Физические характеристики и классификация грунтов. Геологическое строение оснований.

Основные физические характеристики грунтов: плотность грунта, плотность минеральных частиц, влажность. Дополнительные характеристики: содержание органических веществ, засоленность, льдистость. Нормативные и расчетные значения физических характеристик.

Классификационные показатели грунтов: гранулометрический состав, верхний и нижний пределы пластичности, число пластичности, показатель текучести, коэффициент пористости, коэффициент водонасыщения. Строительная классификация грунтов. Связь физических и механических характе-

ристик грунтов. Понятие об условном расчетном сопротивлении грунтов.

Геологическое строение оснований. Понятие о геологическом теле. Форма и размеры геологических тел в основании сооружений. Границы между геологическими телами. Значение данных о геологическом строении основания для строительства.

Особые виды грунтов с неустойчивыми структурными связями: мерзлые и вечномёрзлые, лессовые, набухающие, засоленные, насыпные, слабые водонасыщенные и заторфованные грунты.

Тема 3. Экспериментально-теоретические предпосылки механики грунтов.

Особенности грунтов оснований как объектов строительства. Модели механического поведения грунтов. Методы решения задач механики грунтов.

Особенности деформирования грунтов. Линейные и нелинейные деформации. Упругие и пластические деформации. Объемные и сдвиговые деформации. Ползучесть грунтов. Понятие о фильтрационной консолидации грунтов.

Основные расчетные модели грунтов. Общие предпосылки. Модель теории линейно-деформируемого тела. Модель теории фильтрационной консолидации. Модель теории предельного напряженного состояния. Линейная и нелинейная механика грунтов.

Тема 4. Механические свойства грунтов.

Характеристики механических свойств грунтов. Основные схемы лабораторных испытаний. Режимы испытания образцов.

Деформируемость грунтов. Физические представления. Одноосные испытания. Компрессионные испытания: компрессионная кривая, коэффициент сжимаемости. Понятие о структурной прочности. Трехосные испытания. Модуль деформации грунта, коэффициент бокового расширения, коэффициент бокового давления.

Водопроницаемость грунтов. Физические представления. Закон ламинарной фильтрации. Коэффициент фильтрации и методы его определения.

Начальный градиент фильтрации. Процессы, развивающиеся в грунтах при фильтрации (фильтрационная суффозия, кольматация). Понятие об эффективных напряжениях и поровом давлении.

Прочность грунтов. Физические представления. Методы испытаний. Одноосное испытание. Испытание на одноплоскостной сдвиг. Трехосное сжатие. Закономерности сопротивления сдвигу, законы Кулона. Характеристики сопротивления сдвигу: угол внутреннего трения, удельное сцепление. Понятие о давлении связности. Сопротивление сдвигу при сложном напряженном состоянии. Условие предельного равновесия.

Тема 5. Определение напряжений в массивах грунтов.

Расчетные схемы взаимодействия сооружений и оснований. Задачи расчета напряжений.

Определение напряжений по подошве фундаментов и сооружений (контактная задача). Классификация фундаментов и сооружений по жесткости. Контактные модели основания: местных упругих деформаций, упругого полупространства, упругого слоя ограниченной мощности. Области применения моделей. Контактные напряжения по подошве центрально и внецентренно нагруженных абсолютно жестких фундаментов. Влияние жесткости фундаментов на распределение контактных напряжений. Упрощенное определение контактных напряжений.

Определение напряжений в грунтовом массиве от действия местной нагрузки на его поверхности. Общие положения. Распределение напряжений от сосредоточенной силы (задача Буссинеска) и распределенной сосредоточенной нагрузки (задача Фламана). Приближенное определение напряжений от местной нагрузки методом суммирования. Плоская задача: равномерно распределенная и треугольная нагрузки. Главные напряжения, эллипсы напряжений. Пространственная задача: равномерно распределенная нагрузка. Метод угловых точек. Влияние формы и площади фундамента, неоднородности и анизотропии основания на распределение напряжений.

Определение напряжений от собственного веса грунтов.

Тема 6. Прочность и устойчивость оснований сооружений.

Значение вопроса. Основные положения теории предельного напряженного состояния. Характеристика методов решения задач теории предельного напряженного состояния: строгие, приближенные, инженерные методы.

Фазы напряженного состояния грунтов в основании фундаментов. Физические представления. Понятия о начальной критической, предельной критической нагрузках и расчетном сопротивлении основания. Определение начальной критической нагрузки. Нормативное и расчетное сопротивление грунтов основания. Определение предельной критической нагрузки: строгие и приближенные решения. Использование значений критических нагрузок при проектировании оснований и фундаментов.

Практические способы расчета несущей способности и устойчивости оснований и фундаментов. Расчет несущей способности основания в соответствии с рекомендациями СНиП 2.02.01-83*. Расчет фундаментов на плоский сдвиг по подошве. Понятие о коэффициенте устойчивости: нормативное и расчетное значения. Расчет устойчивости фундаментов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Проверка фундаментов и сооружений на опрокидывание.

Тема 7. Устойчивость откосов и склонов.

Общие положения. Причины и формы потери устойчивости откосов и склонов. Характеристика и область применения строгих и приближенных методов расчета устойчивости. Кратковременная и длительная устойчивость склонов.

Простейшие задачи. Устойчивость откоса в идеально сыпучих грунтах. Понятие об угле естественного откоса. Влияние на устойчивость фильтрационных сил. Устойчивость вертикального откоса в идеально связных грунтах и грунтах, обладающих трением и сцеплением. Проектирование откосов с заданным нормативным коэффициентом устойчивости.

Строгие решения теории предельного напряженного состояния. Расчет предельного давления на горизонтальную поверхность, ограничивающую откос. Определение формы равноустойчивого откоса. Проектирование откосов с заданным нормативным коэффициентом устойчивости.

Инженерные методы расчета устойчивости откосов и склонов. Расчет устойчивости в предположении плоской поверхности скольжения. Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Расчетная схематизация, основные зависимости, техника расчета. Основы расчета устойчивости при произвольной форме поверхности скольжения. Прислоненные откосы. Учет фильтрационных и сейсмических сил. Понятие об оползневом давлении. Мероприятия по повышению устойчивости откосов и склонов.

Тема 8. Давление грунтов на ограждающие конструкции.

Общие положения. Конструктивные типы подпорных стенок. Понятие о жестких (массивных) и гибких подпорных стенках.

Особенности взаимодействия подпорных стенок с массивом грунта. Активное и пассивное давление. Давление грунта в состоянии покоя. Влияние характера и величины смещений подпорных стенок, их жесткости на распределение давления грунта.

Аналитические методы определения активного давления грунта на вертикальную гладкую стенку. Давление сыпучих и связных грунтов. Учет пригрузки, наклона и шероховатости задней грани стенки, наклона поверхности засыпки. Графоаналитические методы расчета активного давления (метод К. Кульмана и т.п.). Аналитическое определение пассивного давления в предположении плоской поверхности скольжения.

Определение активного и пассивного давления на ограждающие конструкции методами теории предельного напряженного состояния.

Расчет устойчивости массивных подпорных стенок на сдвиг и опрокидывание.

Тема 9. Деформации оснований и расчет осадок сооружений.

Значение вопроса. Основные положения. Этапы строительства и эксплуатации сооружений, изменение нагрузок и деформаций основания. Виды деформаций оснований и сооружений. Понятие о стабилизированных и не-стабилизированных деформациях.

Теоретические основы расчета стабилизированных деформаций оснований. Постановка задачи. Осадки линейно-деформируемого полупространства и слоя грунта ограниченной мощности.

Основные предпосылки приближенных методов определения осадок. Понятие о мощности сжимаемой толщи. Идея метода послойного (элементарного) суммирования. Допущения, принимаемые в расчетах. Сжатие элементарного слоя грунта без учета и с учетом возможности бокового расширения. Определение глубины сжимаемой толщи.

Практические методы расчета стабилизированных деформаций оснований. Расчет осадки методом послойного суммирования (расчетные зависимости, техника расчета, определение характеристик сжимаемости грунтов). Учет влияния соседних фундаментов и загруженных площадей. Расчет осадки однородных и неоднородных оснований методом эквивалентного слоя (расчетные зависимости, техника расчета). Определение неравномерных осадок, кренов и горизонтальных смещений сооружений.

Практические методы расчета осадок оснований во времени. Основные предпосылки теории фильтрационной консолидации. Дифференциальное уравнение одномерной задачи консолидации, коэффициент консолидации. Основные расчетные случаи. Определение осадки слоистых оснований во времени (расчетные зависимости, техника расчета). Учет структурной прочности грунта, сжимаемости поровой воды, начального градиента фильтрации. Понятие о вторичной консолидации.

Особые случаи расчета осадок оснований. Сопоставление расчетных осадок и результатов натуральных наблюдений. Учет разуплотнения грунтов при разработке котлованов. Расчет деформаций за пределом линейной зави-

симости между давлениями и осадками.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задания к контрольной работе составлены в соответствии с программой дисциплины «Механика грунтов».

Контрольная работа содержит задачи:

- определение физических и механических свойств грунтов;
- определение напряжений от действия внешних нагрузок;
- расчёт устойчивости откосов графоаналитическим методом;
- аналитическое определение давления грунта на подпорные стенки;
- расчёт полной стабилизированной осадки методом послойного суммирования, методом эквивалентного слоя и по модели линейно-деформируемого слоя;
- определение изменения осадок во времени с построением соответствующего графика.

Контрольная работа выполняется в форме расчетно-пояснительной записки, в состав которой следует включить: задания и исходные данные, теоретическую часть, отражающую методику расчётов, сами расчёты и их результаты, расчётные схемы со всеми необходимыми обозначениями и размерами, список использованных источников. Результаты расчётов могут быть представлены в табличной форме. Текстовая часть записки должна быть выполнена на одной стороне стандартного листа писчей бумаги формата А4 (210 × 297 мм). Все расчетные данные должны сопровождаться единицами измерений, расчёты – ссылками на нормативные документы и используемую литературу. Текст пояснительной записки должен представлять собой единое связное изложение по существу вопроса с логическим обоснованием переходов и принимаемых решений. Каждая задача должна начинаться с новой страницы и завершаться выводом с четкой формулировкой по принятому решению. Листы записки должны быть пронумерованы и сброшюрованы. На лицевой стороне титульного листа расчетно-пояснительной записки следует

указать: университет, факультет, кафедру, наименование контрольной работы, курс, фамилию, имя и отчество студента (полностью) и учебный шифр. Расчетно-пояснительная записка должна быть подписана студентом.

Расчётные схемы и эпюры контрольной работы выполняются в карандаше на листах белой бумаги или миллиметровке формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо помнить, что данные расчётов и схем должны быть строго увязаны между собой.

Допускается текстовую и графическую части контрольной работы выполнять на компьютере.

Для выполнения контрольной работы студенту необходимо выбрать данные своего варианта из таблиц исходных данных, приведенных в каждой задаче. Номера вариантов задач определяются по таблице 1.

Таблица 1

Порядок выбора варианта для выполнения контрольной работы

| Вариант задачи | Две последние цифры зачетной книжки | | | | Вариант задачи | Две последние цифры зачетной книжки | | | |
|----------------|-------------------------------------|----|----|----|----------------|-------------------------------------|----|----|--|
| | | | | | | | | | |
| 1 | 01 | 31 | 61 | 91 | 16 | 16 | 46 | 76 | |
| 2 | 02 | 32 | 62 | 92 | 17 | 17 | 47 | 77 | |
| 3 | 03 | 33 | 63 | 93 | 18 | 18 | 48 | 78 | |
| 4 | 04 | 34 | 64 | 94 | 19 | 19 | 49 | 79 | |
| 5 | 05 | 35 | 65 | 95 | 20 | 20 | 50 | 80 | |
| 6 | 06 | 36 | 66 | 96 | 21 | 21 | 51 | 81 | |
| 7 | 07 | 37 | 67 | 97 | 22 | 22 | 52 | 82 | |
| 8 | 08 | 38 | 68 | 98 | 23 | 23 | 53 | 83 | |
| 9 | 09 | 39 | 69 | 99 | 24 | 24 | 54 | 84 | |
| 10 | 10 | 40 | 70 | 00 | 25 | 25 | 55 | 85 | |
| 11 | 11 | 41 | 71 | | 26 | 26 | 56 | 86 | |
| 12 | 12 | 42 | 72 | | 27 | 27 | 57 | 87 | |
| 13 | 13 | 43 | 73 | | 28 | 28 | 58 | 88 | |
| 14 | 14 | 44 | 74 | | 29 | 29 | 59 | 89 | |
| 15 | 15 | 45 | 75 | | 30 | 30 | 60 | 90 | |

1 ОСНОВЫ ГРУНТОВЕДЕНИЯ

1.1 Физические свойства грунтов

Плотность грунта ρ – отношение массы грунта (включая массу воды в порах) к занимаемому этим грунтом объему. Определяется лабораторными испытаниями.

Плотность частиц грунта ρ_s – отношение массы сухого грунта к объёму его твердой части, определяется лабораторным способом.

Влажность естественная (природная) W – отношение массы воды, содержащейся в грунте природного состояния, к массе твердых частиц грунта. Определяется лабораторными испытаниями.

Плотность сухого грунта ρ_d – отношение массы сухого грунта к объему, занимаемому этим грунтом (включая объем пор), определяется по формуле (1)

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+W}. \quad (1)$$

Пористость n – отношение объема пор к объему всего грунта, включая поры, определяется по формуле (2)

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}. \quad (2)$$

Коэффициент пористости e – отношение объема пор к объему твердых частиц грунта, определяется по формуле (3)

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}. \quad (3)$$

Влажность, соответствующая полному водонасыщению W_{sat} , или полная влагоемкость – влажность грунта, при которой все поры заполнены водой, определяется по формуле (4)

$$W_{sat} = \frac{e \cdot \rho_w}{\rho_s}, \quad (4)$$

где ρ_w – плотность воды.

Коэффициент водонасыщения S_r – отношение объема воды в порах к

объему пор, определяется по формуле (5)

$$S_r = \frac{W}{W_{sat}} = \frac{W \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} . \quad (5)$$

Гигроскопическая влажность W_T – влажность воздушно-сухого грунта.

Максимальная молекулярная влажность W_{mm} – влажность грунта при максимальной толщине пленок связанной воды.

Объемная влажность $W_{об}$ – отношение объема воды, содержащейся в грунте к общему объему грунта, определяется по формуле (6)

$$W_{об} = \frac{W \cdot \rho_d}{\rho_w} . \quad (6)$$

Коэффициент водоотдачи μ - отношение объема свободно вытекающей (или извлекаемой) из грунта воды (при полном заполнении пор водой) к объему всего грунта, определяется по формуле (7)

$$\mu = \frac{(W_{sat} - W_{mm}) \cdot \rho_d}{\rho_w} . \quad (7)$$

Недостаток водонасыщения μ' – отношение объема пор, не заполненных водой к общему объему грунта, определяется по формуле (8)

$$\mu' = \frac{(W_{sat} - W) \cdot \rho_d}{\rho_w} . \quad (8)$$

Задача 1

Масса образца грунта ненарушенной структуры объемом $V = 50 \text{ см}^3$, при естественной влажности равна m . После сушки на воздухе стала m_1 , а после высушивания в термостате стала m_0 . Объем минеральной части грунта равен V_s .

Определить показатели: плотность грунта, плотность частиц грунта, плотность сухого грунта, природную влажность, пористость, коэффициент пористости, коэффициент водонасыщения, влажность, соответствующую полному водонасыщению, объемную влажность, гигроскопическую влажность.

Исходные данные приведены в таблице 2.

Пример решения задачи приведен для варианта 1.31.

Решение

1) плотность грунта

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{88,22}{50} = 1,764 \text{ г/см}^3;$$

2) плотность частиц грунта

$$\rho_s = \frac{m_0}{V_s} = \frac{80,13}{29,79} = 2,690 \text{ г/см}^3;$$

3) плотность сухого грунта

$$\rho_d = \frac{m_0}{V} = \frac{80,13}{50} = 1,603 \text{ г/см}^3;$$

4) природная влажность

$$W = \frac{m - m_0}{m_0} = \frac{88,22 - 80,13}{80,13} = 0,101;$$

5) пористость

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} = \frac{2,690 - 1,603}{2,690} = 0,404;$$

6) коэффициент пористости

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} = \frac{2,690 - 1,603}{1,603} = 0,678;$$

7) коэффициент водонасыщения

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} = \frac{0,101 \cdot 2,690}{0,678 \cdot 1,00} = 0,400;$$

8) влажность, соответствующая полному водонасыщению

$$W_{sat} = \frac{e \cdot \rho_w}{\rho_s} = \frac{0,678 \cdot 1,00}{2,690} = 0,252;$$

9) объемная влажность

$$W_{об} = \frac{W \cdot \rho_d}{\rho_w} = \frac{0,101 \cdot 1,603}{1,00} = 0,162;$$

10) гигроскопическая влажность

$$W_r = \frac{m_1 - m_0}{m_0} = \frac{80,89 - 80,13}{80,13} = 0,0095.$$

Таблица 2

Исходные данные к задаче 1

| Вариант | m , г | m_1 , г | m_0 , г | V_s , см ³ | Вариант | m , г | m_1 , г | m_0 , г | V_s , см ³ |
|---------|---------|-----------|-----------|-------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-------------------------|
| 1.1 | 87,42 | 79,44 | 79,11 | 28,98 | 1.16 | 91,48 | 76,31 | 75,88 | 28,77 |
| 1.2 | 86,24 | 76,40 | 75,75 | 28,29 | 1.17 | 92,65 | 71,95 | 71,15 | 26,13 |
| 1.3 | 88,45 | 73,38 | 72,51 | 26,89 | 1.18 | 93,15 | 74,19 | 73,56 | 27,66 |
| 1.4 | 94,56 | 72,14 | 70,38 | 25,76 | 1.19 | 94,86 | 76,06 | 75,19 | 28,41 |
| 1.5 | 99,66 | 79,98 | 78,57 | 28,91 | 1.20 | 96,52 | 77,16 | 76,46 | 28,93 |
| 1.6 | 87,20 | 80,97 | 79,88 | 29,70 | 1.21 | 96,87 | 78,15 | 77,64 | 29,11 |
| 1.7 | 86,44 | 77,20 | 76,75 | 28,45 | 1.22 | 97,16 | 78,39 | 77,86 | 29,34 |
| 1.8 | 88,25 | 73,95 | 73,33 | 27,65 | 1.23 | 98,59 | 81,17 | 80,46 | 29,59 |
| 1.9 | 89,21 | 70,35 | 69,55 | 26,35 | 1.24 | 99,36 | 84,42 | 83,69 | 30,64 |
| 1.10 | 98,25 | 78,24 | 77,53 | 28,92 | 1.25 | 90,53 | 76,01 | 75,19 | 27,72 |
| 1.11 | 86,84 | 75,25 | 74,88 | 28,18 | 1.26 | 91,76 | 78,13 | 77,77 | 28,84 |
| 1.12 | 87,52 | 80,77 | 80,11 | 30,15 | 1.27 | 92,18 | 74,61 | 73,51 | 27,23 |
| 1.13 | 88,54 | 72,56 | 71,70 | 27,13 | 1.28 | 88,77 | 72,91 | 72,15 | 27,06 |
| 1.14 | 89,42 | 70,21 | 69,44 | 26,22 | 1.29 | 89,65 | 70,81 | 70,18 | 26,38 |
| 1.15 | 90,35 | 75,28 | 74,48 | 27,82 | 1.30 | 90,09 | 77,33 | 76,84 | 28,25 |
| | | | | | 1.31 | 88,22 | 80,89 | 80,13 | 29,79 |

Задача 2

В лабораторных условиях определены: плотность частиц грунта, естественная влажность, плотность грунта и максимальная молекулярная влагоемкость.

Определить показатели: плотность сухого грунта, пористость, коэффициент пористости, коэффициент водонасыщения, влажность, соответствующую полному водонасыщению, объемную влажность, коэффициент водоотдачи, недостаток водонасыщения.

Исходные данные приведены в таблице 3.

Пример решения задачи 2 приведен для варианта 2.31.

Решение

1) плотность сухого грунта

| | | | | | | | | | |
|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|
| 2.1 | 2,64 | 0,101 | 1,81 | 0,053 | 2.16 | 2,68 | 0,157 | 1,96 | 0,095 |
| 2.2 | 2,65 | 0,112 | 1,82 | 0,064 | 2.17 | 2,69 | 0,168 | 1,97 | 0,116 |
| 2.3 | 2,66 | 0,133 | 1,83 | 0,075 | 2.18 | 2,70 | 0,179 | 1,98 | 0,137 |
| 2.4 | 2,67 | 0,144 | 1,84 | 0,086 | 2.19 | 2,71 | 0,181 | 1,99 | 0,158 |
| 2.5 | 2,68 | 0,155 | 1,85 | 0,097 | 2.20 | 2,72 | 0,192 | 2,00 | 0,179 |
| 2.6 | 2,69 | 0,166 | 1,86 | 0,118 | 2.21 | 2,73 | 0,203 | 2,01 | 0,190 |
| 2.7 | 2,70 | 0,177 | 1,87 | 0,139 | 2.22 | 2,74 | 0,214 | 2,02 | 0,211 |
| 2.8 | 2,71 | 0,188 | 1,88 | 0,151 | 2.23 | 2,64 | 0,138 | 2,03 | 0,057 |
| 2.9 | 2,72 | 0,199 | 1,89 | 0,172 | 2.24 | 2,65 | 0,149 | 2,04 | 0,068 |
| 2.10 | 2,73 | 0,201 | 1,90 | 0,193 | 2.25 | 2,66 | 0,151 | 2,05 | 0,079 |
| 2.11 | 2,74 | 0,242 | 1,91 | 0,224 | 2.26 | 2,67 | 0,162 | 2,06 | 0,091 |
| 2.12 | 2,64 | 0,113 | 1,92 | 0,051 | 2.27 | 2,68 | 0,173 | 2,07 | 0,105 |
| 2.13 | 2,65 | 0,124 | 1,93 | 0,062 | 2.28 | 2,69 | 0,184 | 2,08 | 0,126 |
| 2.14 | 2,65 | 0,135 | 1,94 | 0,073 | 2.29 | 2,70 | 0,195 | 2,09 | 0,147 |
| 2.15 | 2,67 | 0,146 | 1,95 | 0,084 | 2.30 | 2,72 | 0,206 | 2,10 | 0,168 |
| | | | | | 2.31 | 2,73 | 0,230 | 2,01 | 0,150 |

1.2 Классификация скальных грунтов

По временному сопротивлению одноосному сжатию (МПа): очень прочные $R_c > 120$; прочные $120 \geq R_c > 50$; средней прочности $50 \geq R_c > 15$; малопрочные $15 \geq R_c > 5$; пониженной прочности $5 \geq R_c > 3$; низкой прочности $3 \geq R_c > 1$; весьма низкой прочности $R_c \leq 1$.

По степени выветрелости: невыветрелые (монолитные) $k_s = 1$, слабыветрелые (трещиноватые) $1 \geq k_s > 0,9$; выветрелые $0,9 \geq k_s > 0,8$; сильновыветрелые (рухляки) $k_s \leq 0,8$.

По коэффициенту размягчаемости: неразмягчаемые $k_{saf} \geq 0,75$; размягчаемые $k_{saf} < 0,75$.

Задача 3

В лабораторных условиях определены следующие показатели физико-механических свойств скального грунта: плотность невыветрелого грунта ρ_m , плотность выветрелого грунта ρ , временное сопротивление одноосному сжатию невыветрелого грунта в воздушно-сухом состоянии R_s и водонасыщенном состоянии R_c .

Требуется вычислить классификационные характеристики грунта и дать его наименование по ГОСТ 25100-95.

Исходные данные приведены в таблице 4.

Пример решения задачи 3 выполнен для варианта 3.31.

Решение

По происхождению конгломерат – осадочная сцементированная горная порода. Анализируя показатели физико-механических свойств, отмечаем, что прочность конгломерата при сжатии в водонасыщенном состоянии равна 16,8 МПа, следовательно, по ГОСТ 25100-95 грунт относится к скальным породам средней прочности.

Вычисляем коэффициент размягчаемости

$$k_{\text{saf}} = \frac{R_c}{R_s} = \frac{16,8}{34,5} = 0,0487$$

и степень выветрелости

$$k_s = \frac{\rho}{\rho_m} = \frac{1,95}{2,26} = 0,863.$$

Используя все классификационные показатели даем грунту наименование: скальный, средней прочности, размягчаемый, выветрелый, осадочного происхождения.

Таблица 4

Исходные данные к задаче 3

| Вариант | Петрографический тип | ρ_m , г/см ³ | ρ , г/см ³ | R_s , МПа | R_c , МПа |
|---------|----------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
|---------|----------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|

| | | | | | |
|------|--------------------|------|------|-------|-------|
| 3.1 | Гранит | 2,70 | 2,61 | 165,0 | 150,2 |
| 3.2 | Сиенит | 2,68 | 2,63 | 149,8 | 137,8 |
| 3.3 | Гранодиорит | 2,73 | 2,70 | 181,4 | 172,3 |
| 3.4 | Диорит | 2,76 | 2,70 | 185,6 | 178,2 |
| 3.5 | Габбро | 2,99 | 2,95 | 202,8 | 200,8 |
| 3.6 | Перидотит | 3,13 | 3,05 | 211,1 | 209,0 |
| 3.7 | Пироксенит | 3,23 | 3,13 | 238,7 | 236,3 |
| 3.8 | Кварцевый порфир | 2,67 | 2,58 | 164,3 | 157,7 |
| 3.9 | Липарит | 2,55 | 2,35 | 136,2 | 123,9 |
| 3.10 | Порфир | 2,70 | 2,61 | 154,5 | 148,3 |
| 3.11 | Трахит | 2,52 | 2,25 | 101,0 | 91,9 |
| 3.12 | Кварцевый порфирит | 2,75 | 2,69 | 152,8 | 148,2 |
| 3.13 | Порфирит | 2,85 | 2,77 | 179,9 | 176,3 |
| 3.14 | Андезит | 2,57 | 2,45 | 88,4 | 80,4 |
| 3.15 | Диабаз | 2,92 | 2,87 | 222,5 | 213,3 |
| 3.16 | Базальт | 2,89 | 2,57 | 159,6 | 151,6 |
| 3.17 | Вулканический туф | 2,77 | 2,47 | 45,6 | 25,5 |
| 3.18 | Мрамор | 2,71 | 2,70 | 105,6 | 101,4 |
| 3.19 | Кварцит | 2,90 | 2,71 | 148,7 | 276,8 |
| 3.20 | Гнейс | 2,69 | 2,66 | 282,4 | 138,3 |
| 3.21 | Известняк крепкий | 2,70 | 2,63 | 153,5 | 113,6 |
| 3.22 | Известняк слабый | 2,50 | 2,05 | 28,5 | 12,5 |
| 3.23 | Доломит крепкий | 2,83 | 2,68 | 162,3 | 113,6 |
| 3.24 | Доломит слабый | 2,51 | 2,15 | 34,0 | 15,3 |
| 3.25 | Мел | 2,68 | 1,35 | 7,6 | 2,7 |
| 3.26 | Песчаник крепкий | 2,72 | 2,67 | 116,2 | 75,5 |
| 3.27 | Песчаник слабый | 2,68 | 2,49 | 25,8 | 11,6 |
| 3.28 | Мергель | 2,73 | 2,41 | 6,5 | 4,2 |
| 3.29 | Алевролит | 2,72 | 2,22 | 44,0 | 27,7 |
| 3.30 | Аргиллит | 2,75 | 2,56 | 25,6 | 10,8 |
| 3.31 | Конгломерат | 2,26 | 1,95 | 34,5 | 16,8 |

1.3 Классификация крупнообломочных и песчаных грунтов

1. В зависимости от зернового состава:

| Вид крупнообломочных и песчаных грунтов | Распределение частиц по крупности, % от массы воздушно-сухого грунта |
|---|--|
| <i>Крупнообломочные</i> | |
| Валунный грунт (глыбовый) | Масса частиц крупнее 200 мм – более 50% |
| Галечниковый грунт (щебенистый) | Масса частиц крупнее 10 мм – более 50% |
| Гравийный грунт (дресвяный) | Масса частиц крупнее 2 мм – более 50% |
| <i>Песчаные</i> | |
| Песок гравелистый | Масса частиц крупнее 2 мм – более 25% |

| | |
|-----------------|---|
| Песок крупный | Масса частиц крупнее 0,5 мм – более 50% |
| Песок крупный | Масса частиц крупнее 0,25 мм – более 50% |
| Песок мелкий | Масса частиц крупнее 0,1 мм – 75% и более |
| Песок пылеватый | Масса частиц крупнее 0,1 мм – менее 75% |

Примечание. Основное наименование для крупнообломочных грунтов относится к окатанной форме, а в скобках указывается преобладание неокатанных частиц. Для установления наименования грунта последовательно суммируются проценты содержания частиц: сначала – крупнее 200 мм, затем – крупнее 10 мм и т.д. Наименование грунта принимается по первому удовлетворяющему показателю.

2. По коэффициенту водонасыщения крупнообломочных и песчаных грунтов: маловлажные $S_r \leq 0,5$; влажные $0,5 < S_r \leq 0,8$; насыщенные водой $S_r > 0,8$.

3. По степени неоднородности крупнообломочных и песчаных грунтов: однородные $C_u \leq 3$; неоднородные $3 < C_u \leq 6$; весьма неоднородные $C_u > 6$.

4. По коэффициенту выветрелости крупнообломочных грунтов: невыветрелые $0 < k_s \leq 0,5$; слабыветрелые $0,5 < k_s \leq 0,75$; сильновыветрелые $0,75 < k_s \leq 1$.

5. По плотности сложения песчаных грунтов в зависимости от коэффициента пористости e грунта природного сложения:

| Виды песков | Плотность сложения | | |
|--|--------------------|-------------------------|------------|
| | Плотные | Средней плотности | Рыхлые |
| Гравелистые, крупные и средней крупности | $e < 0,55$ | $0,55 \leq e \leq 0,70$ | $e > 0,70$ |
| Мелкие | $e < 0,60$ | $0,60 \leq e \leq 0,75$ | $e > 0,75$ |
| Пылеватые | $e < 0,60$ | $0,60 \leq e \leq 0,80$ | $e > 0,80$ |

Задача 4

По результатам лабораторных испытаний свойств песчаного грунта требуется: построить интегральную кривую гранулометрического состава грунта, определить тип грунта по гранулометрическому составу и степени его неоднородности, дать оценку плотности сложения и степени влажности.

Исходные данные приведены в таблице 5.

Для определения степени неоднородности гранулометрического состава

песчаных грунтов строят интегральную кривую гранулометрического состава (рис. 1). При построении интегральной кривой гранулометрического состава грунта по оси абсцисс откладывают диаметры частиц в мм (для сокращения размеров графика по горизонтали рекомендуется логарифмический масштаб), а по оси ординат – процентное содержание частиц нарастающим итогом. При этом суммирование начинают с самой мелкой фракции. Степень неоднородности гранулометрического состава определяется по формуле (9)

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (9)$$

где d_{60} и d_{10} – диаметры частиц, меньше которых в данном грунте содержится соответственно 60 и 10% частиц по массе (принимаются по интегральной кривой гранулометрического состава грунта).

Классификация по степени неоднородности дана в пункте 3.

По заданному гранулометрическому составу можно определить вид песчаного грунта: гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый (п.1).

Важным показателем оценки свойств песчаных грунтов является плотность их сложения. Пески по плотности сложения подразделяются на плотные, средней плотности, и рыхлые. Величину коэффициента пористости e можно определить по формуле 3, а плотность сухого грунта ρ_d по формуле 1. Классификация по плотности сложения приведена в пункте 4.

Песчаные грунты классифицируются также по коэффициенту водонасыщения S_r (п.2), который можно определить по формуле 5.

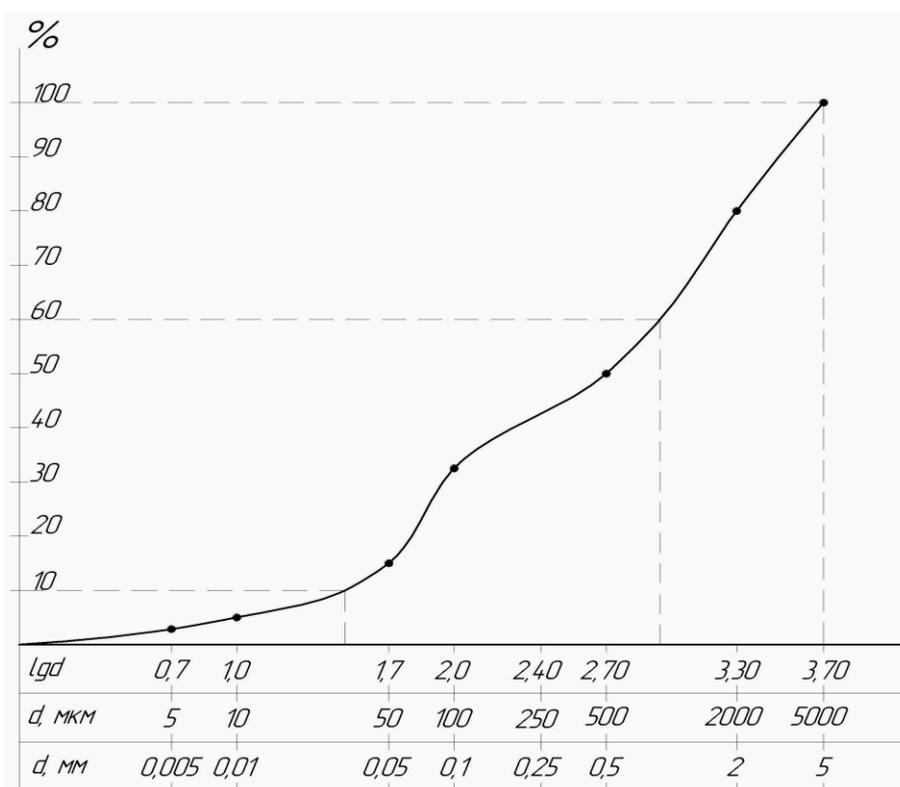


Рис. 1. Интегральная кривая гранулометрического состава грунта

Таблица 5

Исходные данные к задаче 4

| Вариант | Плотность грунта ρ , г/см ³ | Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³ | Влажность природная, W | Содержание частиц, % при их размере, мм | | | | | | | |
|---------|---|--|--------------------------|---|-----------|------------|------------|------------|-------------|--------------|-------------|
| | | | | более 2,0 | 2,0 – 0,5 | 0,5 – 0,25 | 0,25 – 0,1 | 0,1 – 0,05 | 0,05 – 0,01 | 0,01 – 0,005 | менее 0,005 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 4.1 | 1,71 | 2,64 | 0,116 | 1,5 | 21,5 | 22,0 | 17,3 | 18,6 | 10,3 | 7,8 | 1,0 |
| 4.2 | 1,72 | 2,65 | 0,127 | 2,4 | 26,7 | 19,9 | 26,6 | 11,2 | 9,2 | 3,5 | 0,5 |
| 4.3 | 1,73 | 2,66 | 0,138 | 4,5 | 27,6 | 20,5 | 18,3 | 19,9 | 5,4 | 2,0 | 1,8 |
| 4.4 | 1,74 | 2,67 | 0,149 | 3,3 | 10,8 | 17,3 | 15,6 | 25,9 | 19,6 | 4,0 | 3,5 |
| 4.5 | 1,75 | 2,68 | 0,150 | 4,8 | 15,6 | 24,4 | 33,2 | 11,0 | 7,7 | 2,2 | 1,1 |
| 4.6 | 1,76 | 2,64 | 0,161 | 5,5 | 22,6 | 23,3 | 21,5 | 14,2 | 10,1 | 1,8 | 1,0 |
| 4.7 | 1,77 | 2,65 | 0,172 | 1,7 | 13,5 | 18,4 | 16,5 | 31,3 | 15,6 | 2,0 | 1,0 |
| 4.8 | 1,78 | 2,66 | 0,183 | 2,8 | 23,3 | 26,5 | 27,8 | 10,5 | 5,1 | 3,5 | 0,5 |
| 4.9 | 1,79 | 2,67 | 0,194 | 3,9 | 20,7 | 27,2 | 22,6 | 11,3 | 10,2 | 3,3 | 0,8 |
| 4.10 | 1,80 | 2,68 | 0,205 | 1,0 | 17,8 | 22,5 | 26,5 | 13,5 | 12,2 | 5,0 | 1,5 |
| 4.11 | 1,81 | 2,64 | 0,216 | 2,1 | 20,6 | 28,9 | 25,4 | 13,6 | 6,4 | 2,0 | 1,0 |
| 4.12 | 1,82 | 2,65 | 0,227 | 3,2 | 26,3 | 28,5 | 20,1 | 12,2 | 6,5 | 2,4 | 0,8 |
| 4.13 | 1,83 | 2,66 | 0,238 | 1,5 | 16,5 | 17,3 | 33,3 | 18,5 | 10,5 | 1,4 | 1,0 |
| 4.14 | 1,84 | 2,67 | 0,249 | 1,9 | 20,9 | 24,4 | 29,5 | 12,4 | 8,8 | 1,6 | 0,5 |
| 4.15 | 1,85 | 2,68 | 0,250 | 1,4 | 21,4 | 29,6 | 17,5 | 14,4 | 11,1 | 3,0 | 1,6 |

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| 4.16 | 1,86 | 2,64 | 0,113 | 1,6 | 21,8 | 22,6 | 26,4 | 19,4 | 5,2 | 2,0 | 1,0 |
|------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|

Продолжение таблицы 5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 4.17 | 1,87 | 2,65 | 0,124 | 0,9 | 21,9 | 24,5 | 29,4 | 11,4 | 7,8 | 3,1 | 1,0 |
| 4.18 | 1,88 | 2,66 | 0,135 | 1,5 | 21,5 | 28,3 | 18,8 | 13,3 | 12,5 | 2,6 | 1,5 |
| 4.19 | 1,89 | 2,67 | 0,146 | 1,0 | 22,5 | 19,8 | 23,3 | 16,8 | 12,3 | 3,0 | 1,3 |
| 4.20 | 1,90 | 2,68 | 0,157 | 1,1 | 22,2 | 25,4 | 27,2 | 12,3 | 7,5 | 3,5 | 0,8 |
| 4.21 | 1,91 | 2,64 | 0,168 | 1,8 | 22,4 | 20,1 | 20,6 | 15,2 | 13,5 | 5,0 | 1,8 |
| 4.22 | 1,92 | 2,65 | 0,179 | 1,1 | 18,9 | 18,5 | 42,5 | 10,6 | 3,4 | 3,5 | 1,5 |
| 4.23 | 1,93 | 2,66 | 0,180 | 1,8 | 13,3 | 39,3 | 34,8 | 4,5 | 2,7 | 2,8 | 0,8 |
| 4.24 | 1,94 | 2,67 | 0,191 | 1,1 | 30,9 | 25,4 | 27,0 | 10,4 | 2,4 | 1,8 | 1,0 |
| 4.25 | 1,95 | 2,68 | 0,202 | 1,0 | 21,9 | 22,5 | 19,3 | 12,6 | 16,6 | 4,0 | 2,1 |
| 4.26 | 1,96 | 2,64 | 0,213 | 1,2 | 20,5 | 16,5 | 35,0 | 23,3 | 1,5 | 1,3 | 0,7 |
| 4.27 | 1,97 | 2,65 | 0,224 | 0,5 | 13,2 | 30,3 | 33,8 | 9,2 | 8,8 | 2,8 | 1,4 |
| 4.28 | 1,98 | 2,66 | 0,235 | 2,4 | 44,6 | 21,2 | 11,8 | 7,9 | 7,1 | 4,5 | 0,5 |
| 4.29 | 1,99 | 2,67 | 0,246 | 1,5 | 23,5 | 30,1 | 16,4 | 9,6 | 10,2 | 7,8 | 0,9 |
| 4.30 | 2,00 | 2,68 | 0,254 | 1,8 | 29,8 | 31,5 | 17,6 | 12,4 | 4,6 | 1,3 | 1,0 |
| 4.31 | 1,76 | 2,68 | 0,154 | 1,5 | 20,5 | 21,0 | 24,0 | 17,0 | 13,0 | 2,0 | 1,0 |

1.4 Классификация глинистых грунтов

1. По числу пластичности: супесь $0,01 < I_P \leq 0,07$; суглинок $0,07 < I_P \leq 0,17$; глина $I_P > 0,17$.

2. По показателю консистенции: твердые $I_L \leq 0$; полутвердые $0 < I_L \leq 0,25$; тугопластичные $0,25 < I_L \leq 0,50$; мягкопластичные $0,50 < I_L \leq 0,75$; текучепластичные $0,75 < I_L \leq 1$; текучие $I_L > 1$.

Примечание. Супеси при значении $0 \leq I_L \leq 1$ называют пластичными.

3. По показателю I_{ss} . При предварительной оценке лессы, лессовидные

и некоторые другие четвертичные грунты с коэффициентом водонасыщения $S_r \leq 0,8$ относятся к просадочным, если показатель I_{ss} меньше значений, приведенных в таблице 6

| | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| I_p | $0,01 < I_p \leq 0,1$ | $0,1 < I_p \leq 0,14$ | $0,14 < I_p \leq 0,22$ |
| Показатель I_{ss} | 0,1 | 0,17 | 0,24 |

При предварительной оценке глинистые грунты, имеющие показатель $I_{ss} \geq 0,3$, относятся к набухающим.

Задача 5

Таблица 6

Исходные данные к задаче 5

| Вариант | Плотность грунта ρ , г/см ³ | Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³ | Влажность | | |
|---------|--|---|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | | | Природная, W | На границе раскатывания, W_p | На границе текучести, W_L |
| | | | | | |

| | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|-------|
| 5.4 | 1,78 | 2,73 | 0,243 | 0,124 | 0,284 |
| 5.5 | 1,79 | 2,74 | 0,251 | 0,126 | 0,331 |
| 5.6 | 1,80 | 2,75 | 0,299 | 0,154 | 0,357 |
| 5.7 | 1,81 | 2,70 | 0,245 | 0,239 | 0,305 |
| 5.8 | 1,82 | 2,71 | 0,311 | 0,286 | 0,324 |
| 5.9 | 1,83 | 2,72 | 0,326 | 0,239 | 0,333 |
| 5.10 | 1,84 | 2,73 | 0,306 | 0,225 | 0,324 |
| 5.11 | 1,85 | 2,74 | 0,186 | 0,108 | 0,296 |
| 5.12 | 1,86 | 2,75 | 0,177 | 0,118 | 0,301 |
| 5.13 | 1,87 | 2,70 | 0,249 | 0,222 | 0,251 |
| 5.14 | 1,88 | 2,71 | 0,266 | 0,234 | 0,277 |
| 5.15 | 1,89 | 2,72 | 0,286 | 0,206 | 0,291 |
| 5.16 | 1,90 | 2,73 | 0,241 | 0,211 | 0,284 |
| 5.17 | 1,91 | 2,74 | 0,312 | 0,135 | 0,320 |
| 5.18 | 1,92 | 2,75 | 0,288 | 0,114 | 0,291 |
| 5.19 | 1,93 | 2,70 | 0,261 | 0,238 | 0,265 |
| 5.20 | 1,94 | 2,71 | 0,186 | 0,158 | 0,204 |
| 5.21 | 1,95 | 2,72 | 0,234 | 0,149 | 0,238 |
| 5.22 | 1,96 | 2,73 | 0,258 | 0,179 | 0,265 |
| 5.23 | 1,97 | 2,74 | 0,186 | 0,052 | 0,210 |
| 5.24 | 1,98 | 2,75 | 0,272 | 0,046 | 0,258 |
| 5.25 | 1,99 | 2,70 | 0,233 | 0,168 | 0,206 |
| 5.26 | 2,00 | 2,71 | 0,241 | 0,177 | 0,222 |
| 5.27 | 2,01 | 2,72 | 0,174 | 0,145 | 0,232 |
| 5.28 | 2,02 | 2,73 | 0,252 | 0,155 | 0,243 |
| 5.29 | 2,03 | 2,74 | 0,231 | 0,066 | 0,264 |
| 5.30 | 2,04 | 2,75 | 0,201 | 0,125 | 0,315 |
| 5.31 | 2,10 | 2,74 | 0,174 | 0,117 | 0,291 |

По результатам лабораторных испытаний свойств глинистого грунта требуется: определить тип грунта по числу пластичности, разновидность по консистенции, характеризуемой показателем текучести; предварительно оценить способность грунтов к просадочным и набухающим явлениям.

Тип глинистого грунта и разновидность по консистенции определяются по заданным границам текучести, раскатывания и природной влажности.

Число пластичности глинистого грунта (п.1), определяется по формуле 10

$$I_P = W_L - W_P, \quad (10)$$

где W_P – влажность на границе пластичности;

W_L – влажность на границе текучести.

Показатель текучести глинистого грунта (п.2), определяется по формуле 11

$$I_L = \frac{W - W_P}{W - W_L}, \quad (11)$$

где W – природная влажность грунта.

Для глинистых грунтов также определяется плотность сухого грунта ρ_d , коэффициент пористости e , коэффициент водонасыщения S_r .

Для предварительного вывода о просадочности и набухаемости глинистого грунта определяется показатель I_{ss} (п.3), определяется по формуле 12

$$I_{ss} = \frac{e_L - e}{1 + e}, \quad (12)$$

где e_L – коэффициент пористости глинистого грунта при его влажности на границе текучести, определяемый по формуле 13

$$e_L = \frac{W_L \cdot \rho_s}{\rho_w}. \quad (13)$$

1.5 Нормативные и расчетные значения физических характеристик грунтов

В силу естественной изменчивости грунтовых напластований достоверные значения показателей физических свойств грунтов можно установить, выполнив ряд определений каждой характеристики, и проведя их статистический анализ. В качестве примера приведем алгоритм определения расчетной плотности грунта.

1. Определение нормативного значения плотности

$$\rho_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i, \quad (14)$$

где n – число определений;

ρ_i – частные определения.

2. Определение смещенной оценки среднего квадратического отклонения

$$\sigma_{см} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_n - \rho_i)^2}. \quad (15)$$

3. Проверка необходимости исключения грубых ошибок по условию

$$|\rho_n - \rho_i| \leq v \cdot \sigma_{см}, \quad (16)$$

где v – статистический критерий, принимаемый по таблице 7.

Если $|\rho_n - \rho_i| \leq v \cdot \sigma_{см}$, находят среднее квадратическое отклонение σ .

Если $|\rho_n - \rho_i| > v \cdot \sigma_{см}$, исключают частное значение плотности с грубой

ошибкой и находят новое значение нормативной плотности ρ_n .

4. Нахождение среднего квадратического отклонения

$$\sigma_{\text{см}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\rho_n - \rho_i)^2} . \quad (17)$$

5. Определение коэффициента вариации

$$V = \frac{\sigma}{\rho_T} . \quad (18)$$

Таблица 7

Значения статистического критерия ν при числе определений n

| n | ν | n | ν | n | ν |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 6 | 2,07 | 13 | 2,56 | 20 | 2,78 |
| 7 | 2,18 | 14 | 2,60 | 25 | 2,88 |
| 8 | 2,27 | 15 | 2,64 | 30 | 2,96 |
| 9 | 2,35 | 16 | 2,67 | 35 | 3,02 |
| 10 | 2,41 | 17 | 2,70 | 40 | 3,07 |
| 11 | 2,47 | 18 | 2,73 | 45 | 3,12 |
| 12 | 2,52 | 19 | 2,75 | 50 | 3,16 |

Таблица 8

Значения коэффициента t_{α} при односторонней доверительной вероятности α и числе степеней свободы k

| k | t_{α} при α | | k | t_{α} при α | |
|-----|---------------------------|------|-----|---------------------------|------|
| | 0,85 | 0,95 | | 0,85 | 0,95 |
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 1,34 | 2,92 | 13 | 1,08 | 1,77 |
| 3 | 1,25 | 2,35 | 14 | 1,08 | 1,76 |
| 4 | 1,19 | 2,13 | 15 | 1,07 | 1,75 |
| 5 | 1,16 | 2,01 | 16 | 1,07 | 1,75 |
| 6 | 1,13 | 1,94 | 17 | 1,07 | 1,74 |
| 7 | 1,12 | 1,90 | 18 | 1,07 | 1,73 |
| 8 | 1,11 | 1,86 | 19 | 1,07 | 1,73 |
| 9 | 1,10 | 1,83 | 20 | 1,06 | 1,72 |
| 10 | 1,10 | 1,81 | 30 | 1,05 | 1,70 |
| 11 | 1,09 | 1,80 | 40 | 1,05 | 1,68 |
| 12 | 1,08 | 1,78 | 60 | 1,05 | 1,67 |

В случае если коэффициент вариации превышает 0,15 (или 15%), то уточняют расчленение толщи на инженерно-геологические элементы.

6. Определение показателя точности

$$\rho_T = \frac{t_{\alpha} \cdot V}{\sqrt{n}} , \quad (19)$$

где $t_{\dot{\alpha}}$ – коэффициент, принимаемый по таблице 8, при доверительной вероятности $\dot{\alpha} = 0,85$ (для расчета оснований по деформациям) и $\dot{\alpha} = 0,95$ (для расчета по несущей способности основания).

Число степеней свободы в таблице 8 принимается $k = n - 1$.

7. Нахождение коэффициента надежности по грунту

$$\gamma_g = \frac{1}{1 - \rho_T} \cdot \quad (20)$$

8. Определение расчетного значения плотности грунта

$$\rho = \frac{\rho_n}{\gamma_g} \cdot \quad (21)$$

Задача 6

Определить расчетное значение плотности грунта, если частные значения плотности установлены по результатам лабораторных определений.

Исходные данные приведены в таблице 9.

Таблица 9

Исходные данные к задаче 6

| Вариант | Частные значения плотности ρ_i грунта, г/см ³ | | | | | | | | |
|---------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | ρ_1 | ρ_2 | ρ_3 | ρ_4 | ρ_5 | ρ_6 | ρ_7 | ρ_8 | ρ_9 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 6.1 | 1,861 | 1,846 | 1,843 | 1,821 | 1,819 | 1,737 | 1,876 | 1,880 | 1,850 |
| 6.2 | 1,847 | 1,851 | 1,860 | 1,911 | 1,915 | 1,993 | 1,888 | 1,868 | 1,886 |
| 6.3 | 1,888 | 1,858 | 1,860 | 1,875 | 1,872 | 1,884 | 1,817 | 1,895 | 1,890 |
| 6.4 | 1,888 | 1,895 | 1,907 | 1,905 | 1,960 | 1,910 | 1,920 | 1,909 | 1,923 |
| 6.5 | 1,769 | 1,754 | 1,762 | 1,712 | 1,778 | 1,781 | 1,795 | 1,788 | 1,782 |
| 6.6 | 1,689 | 1,687 | 1,642 | 1,708 | 1,705 | 1,714 | 1,725 | 1,718 | 1,712 |
| 6.7 | 1,788 | 1,765 | 1,774 | 1,786 | 1,722 | 1,799 | 1,805 | 1,807 | 1,801 |
| 6.8 | 1,774 | 1,803 | 1,809 | 1,806 | 1,812 | 1,815 | 1,739 | 1,830 | 1,821 |
| 6.9 | 1,823 | 1,834 | 1,839 | 1,880 | 1,799 | 1,820 | 1,806 | 1,809 | 1,815 |
| 6.10 | 1,713 | 1,739 | 1,796 | 1,705 | 1,724 | 1,701 | 1,698 | 1,699 | 1,741 |

Продолжение таблицы 9

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6.11 | 1,960 | 1,930 | 1,956 | 1,899 | 1,817 | 1,901 | 1,923 | 1,926 | 1,941 |
| 6.12 | 1,776 | 1,758 | 1,778 | 1,883 | 1,805 | 1,801 | 1,750 | 1,737 | 1,741 |
| 6.13 | 1,780 | 1,785 | 1,707 | 1,774 | 1,762 | 1,765 | 1,750 | 1,748 | 1,778 |
| 6.14 | 1,814 | 1,800 | 1,811 | 1,801 | 1,851 | 1,796 | 1,798 | 1,786 | 1,779 |
| 6.15 | 1,872 | 1,878 | 1,885 | 1,871 | 1,868 | 1,802 | 1,852 | 1,844 | 1,859 |
| 6.16 | 1,822 | 1,828 | 1,835 | 1,824 | 1,815 | 1,818 | 1,752 | 1,797 | 1,799 |
| 6.17 | 1,911 | 1,917 | 1,915 | 1,909 | 1,832 | 1,896 | 1,884 | 1,875 | 1,898 |
| 6.18 | 1,887 | 1,896 | 1,805 | 1,881 | 1,878 | 1,872 | 1,875 | 1,869 | 1,840 |
| 6.19 | 1,767 | 1,770 | 1,776 | 1,781 | 1,841 | 1,800 | 1,760 | 1,795 | 1,784 |
| 6.20 | 1,798 | 1,840 | 1,797 | 1,800 | 1,823 | 1,804 | 1,838 | 1,895 | 1,812 |
| 6.21 | 1,874 | 1,859 | 1,856 | 1,834 | 1,750 | 1,832 | 1,889 | 1,863 | 1,893 |
| 6.22 | 1,881 | 1,863 | 1,883 | 1,988 | 1,910 | 1,906 | 1,855 | 1,846 | 1,842 |
| 6.23 | 1,933 | 1,903 | 1,905 | 1,920 | 1,917 | 1,929 | 1,862 | 1,940 | 1,935 |
| 6.24 | 1,911 | 1,918 | 1,983 | 1,928 | 1,933 | 1,946 | 1,943 | 1,930 | 1,932 |
| 6.25 | 1,774 | 1,780 | 1,787 | 1,773 | 1,770 | 1,761 | 1,704 | 1,746 | 1,754 |
| 6.26 | 1,752 | 1,779 | 1,773 | 1,777 | 1,790 | 1,770 | 1,707 | 1,783 | 1,754 |
| 6.27 | 1,758 | 1,800 | 1,798 | 1,792 | 1,767 | 1,794 | 1,781 | 1,715 | 1,779 |
| 6.28 | 1,776 | 1,770 | 1,788 | 1,773 | 1,741 | 1,706 | 1,779 | 1,797 | 1,782 |
| 6.29 | 1,809 | 1,849 | 1,890 | 1,816 | 1,833 | 1,830 | 1,844 | 1,819 | 1,825 |
| 6.30 | 1,829 | 1,787 | 1,789 | 1,786 | 1,793 | 1,812 | 1,884 | 1,827 | 1,801 |
| 6.31 | 1,957 | 1,966 | 2,018 | 1,993 | 2,013 | 1,939 | 1,820 | | |

Пример решения задачи б выполнен для варианта 6.31.

Решение

I. Расчет по данным семи определений.

Расчет вспомогательных величин выполнен в таблице 10.

Таблица 10

Расчет вспомогательных величин к задаче 6.31

| № определения | $\rho_i, \text{кг/м}^3$ | $\rho_n - \rho_i$ | $(\rho_n - \rho_i)^2$ |
|---------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | 1957 | 1 | 1 |
| 2 | 1966 | -8 | 64 |
| 3 | 2018 | -60 | 3600 |
| 4 | 1993 | -35 | 1225 |
| 5 | 2013 | -55 | 3025 |
| 6 | 1939 | -19 | 361 |
| 7 | 1820 | 138 | 19044 |
| $n=7$ | $\Sigma \rho_i = 13705$ | | $\Sigma(\rho_n - \rho_i)^2 = 27320$ |

1. Нормативное значение плотности грунта по формуле 14

$$\rho_n = \frac{13705}{7} = 1958 \text{ кг/м}^3.$$

2. Смещенная оценка среднего квадратического отклонения по формуле 15

$$\sigma_{\text{см}} = \sqrt{\frac{27320}{7}} = 62,47285 \text{ кг/м}^3.$$

3. Проверка необходимости исключения грубых ошибок по условию 16.

По таблице 7 при $n = 7$ статистический критерий $v = 2,18$, тогда $v \cdot \sigma_{\text{см}} = 2,18 \cdot 62,47285 = 136,19081$.

Необходимо исключение результатов определения № 7 по таблице 10, так как $|\rho_n - \rho_i| = 138 > v \cdot \sigma_{\text{см}} = 136,19081$. Расчет повторяется.

II. Расчет по данным шести определений.

Расчет вспомогательных величин выполнен в таблице 11.

Таблица 11

Расчет вспомогательных величин к задаче 6.31

| № определения | $\rho_i, \text{кг/м}^3$ | $\rho_n - \rho_i$ | $(\rho_n - \rho_i)^2$ |
|---------------|-------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 1 | 1957 | 24 | 576 |
| 2 | 1966 | 15 | 225 |
| 3 | 2018 | -37 | 1369 |
| 4 | 1993 | -12 | 144 |
| 5 | 2013 | -32 | 1024 |
| 6 | 1939 | 42 | 1764 |
| $n = 6$ | $\Sigma \rho_i = 11886$ | | $\Sigma(\rho_n - \rho_i)^2 = 5102$ |

1. Нормативное значение плотности грунта

$$\rho_n = \frac{11886}{6} = 1981 \text{ кг/м}^3.$$

2. Смещенная оценка среднего квадратического отклонения

$$\sigma_{\text{см}} = \sqrt{\frac{5102}{6}} = 29,160475 \text{ кг/м}^3.$$

3. Проверка необходимости исключения грубых ошибок

По таблице 7 при $n = 6$ статистический критерий $v = 2,07$,

тогда $v \cdot \sigma_{\text{см}} = 2,07 \cdot 29,160475 = 60,362138$,

что больше самой большой разности $|\rho_n - \rho_i| = 42$ по таблице 11 (определение № 6). Дальнейшая отбраковка не требуется.

4. Среднее квадратическое отклонение по формуле 17

$$\sigma = \sqrt{\frac{5102}{6-1}} = 31,9437 \text{ кг/м}^3.$$

5. Коэффициент вариации по формуле 18

$$V = \frac{31,9437}{1981} = 0,016125.$$

Уточнение расчленения толщи не требуется, так как $V < 0,15$.

6. Показатель точности по формуле 19 при $k = 6 - 1 = 5$:

$$\text{при } \alpha = 0,85 \quad \rho_T = \frac{1,16 \cdot 0,0161125}{\sqrt{6}} = 0,0076363,$$

$$\text{при } \alpha = 0,95 \quad \rho_T = \frac{2,01 \cdot 0,0161125}{\sqrt{6}} = 0,0013232.$$

7. Коэффициент надежности по грунту по формуле 20

$$\text{при } \alpha = 0,85 \quad \gamma_g = \frac{1}{1 - 0,0076363} = 1,007695,$$

$$\text{при } \alpha = 0,95 \quad \gamma_g = \frac{1}{1 - 0,0013232} = 1,013493.$$

8. Расчетное значение плотности грунта по формуле 21 для расчета по деформациям

$$\rho_I = \frac{1981}{1,0076363} = 1966 \text{ кг/м}^3.$$

для расчета по несущей способности

$$\rho_{II} = \frac{1981}{1,0134093} = 1955 \text{ кг/м}^3.$$

2 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

2.1 Сжимаемость грунтов

Задача 7

Построить график компрессионной зависимости вида $e = f(p)$. Определить для данного расчетного интервала давлений коэффициент относительной сжимаемости грунта m_v , модуль деформации E и охарактеризовать степень сжимаемости грунта.

Примечание. Начальная высота образца грунта $h = 20$ мм. При определении модуля деформации E тип грунта взять по результатам соответствующего варианта задачи 5.

Исходные данные приведены в таблице 12.

Пример решения дан для варианта 7.31.

Решение

Для определения коэффициента относительной сжимаемости грунта необходимо, прежде всего, вычислить коэффициенты пористости грунта e_i , соответствующие заданным степеням нагрузки, по формуле (22)

$$e_i = e_0 - \frac{s_i (1 + e_i)}{h}, \quad (22)$$

где e_i – искомое значение коэффициента пористости грунта после уплотнения под нагрузкой p_i ;

e_0 – начальное (до уплотнения) значение коэффициента пористости грунта;

S_i – полная осадка образца грунта при заданной нагрузке p_i , измеренная от начала загрузки;

h – начальная (до уплотнения) высота образца.

Подставив численные значения, получим:

$$e_1 = 0,680 - \frac{0,12 \cdot (1 + 0,680)}{20} = 0,670;$$

| | | | | | | | | |
|------|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 7.1 | 0,564 | 0,13 | 0,33 | 0,62 | 0,78 | 1,02 | 50 | 200 |
| 7.2 | 0,636 | 0,15 | 0,24 | 0,41 | 0,55 | 0,79 | 50 | 200 |
| 7.3 | 0,663 | 0,20 | 0,35 | 0,66 | 0,86 | 1,12 | 50 | 300 |
| 7.4 | 0,530 | 0,14 | 0,29 | 0,46 | 0,59 | 0,75 | 50 | 300 |
| 7.5 | 0,724 | 0,10 | 0,18 | 0,31 | 0,42 | 0,57 | 50 | 200 |
| 7.6 | 0,561 | 0,13 | 0,27 | 0,49 | 0,69 | 0,99 | 100 | 300 |
| 7.7 | 0,667 | 0,25 | 0,50 | 0,87 | 1,10 | 1,39 | 50 | 300 |
| 7.8 | 0,697 | 0,14 | 0,29 | 0,46 | 0,60 | 0,74 | 100 | 300 |
| 7.9 | 0,646 | 0,22 | 0,43 | 0,69 | 0,91 | 1,17 | 50 | 300 |
| 7.10 | 0,671 | 0,14 | 0,29 | 0,43 | 0,56 | 0,70 | 50 | 200 |
| 7.11 | 0,585 | 0,13 | 0,33 | 0,62 | 0,78 | 1,02 | 50 | 200 |
| 7.12 | 0,657 | 0,15 | 0,24 | 0,41 | 0,55 | 0,79 | 50 | 200 |
| 7.13 | 0,684 | 0,20 | 0,35 | 0,66 | 0,86 | 1,12 | 50 | 300 |
| 7.14 | 0,551 | 0,14 | 0,29 | 0,46 | 0,59 | 0,75 | 50 | 300 |
| 7.15 | 0,745 | 0,10 | 0,18 | 0,31 | 0,42 | 0,57 | 50 | 200 |
| 7.16 | 0,582 | 0,13 | 0,27 | 0,49 | 0,69 | 0,99 | 100 | 300 |
| 7.17 | 0,688 | 0,25 | 0,50 | 0,87 | 1,10 | 1,39 | 50 | 300 |
| 7.18 | 0,718 | 0,14 | 0,29 | 0,46 | 0,60 | 0,74 | 100 | 300 |
| 7.19 | 0,667 | 0,22 | 0,43 | 0,69 | 0,91 | 1,17 | 50 | 300 |
| 7.20 | 0,692 | 0,14 | 0,29 | 0,43 | 0,56 | 0,70 | 50 | 200 |
| 7.21 | 0,579 | 0,13 | 0,33 | 0,62 | 0,78 | 1,02 | 50 | 200 |
| 7.22 | 0,651 | 0,15 | 0,24 | 0,41 | 0,55 | 0,79 | 50 | 200 |
| 7.23 | 0,678 | 0,20 | 0,35 | 0,66 | 0,86 | 1,12 | 50 | 300 |
| 7.24 | 0,545 | 0,14 | 0,29 | 0,46 | 0,59 | 0,75 | 50 | 300 |
| 7.25 | 0,741 | 0,10 | 0,18 | 0,31 | 0,42 | 0,57 | 50 | 200 |
| 7.26 | 0,576 | 0,13 | 0,27 | 0,49 | 0,69 | 0,99 | 100 | 300 |
| 7.27 | 0,683 | 0,25 | 0,50 | 0,87 | 1,10 | 1,39 | 50 | 300 |
| 7.28 | 0,712 | 0,14 | 0,29 | 0,46 | 0,60 | 0,74 | 100 | 300 |
| 7.29 | 0,661 | 0,22 | 0,43 | 0,69 | 0,91 | 1,17 | 50 | 300 |
| 7.30 | 0,686 | 0,14 | 0,29 | 0,43 | 0,56 | 0,70 | 50 | 200 |
| 7.31 | 0,680 | 0,12 | 0,28 | 0,42 | 0,55 | 0,69 | 50 | 200 |

Коэффициент сжимаемости грунта для заданного расчетного интервала давлений определяется по формуле

$$m_0 = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{e_1 - e_2}{P}, \quad (23)$$

где e_1 и e_2 – коэффициенты пористости, соответствующие давлениям P_1 и P_2 ;
 $P_2 - P_1 = P$ – заданный расчетный интервал давлений.

Подставив численные значения, получим

$$m_0 = \frac{0,670 - 0,645}{0,2 - 0,05} = 0,167 \text{ МПа}^{-1}.$$

Коэффициент относительной сжимаемости грунта

$$m_v = \frac{m_0}{1 + e_0}, \quad (24)$$

$$m_v = \frac{0,167}{1 + 0,680} = 0,0992 \text{ МПа}^{-1}.$$

Числовые значения коэффициента относительной сжимаемости m_v позволяют судить о сжимаемости грунтов. При значениях m_v порядка 1 МПа^{-1} - грунт сильносжимаемый; при m_v порядка $0,1 \text{ МПа}^{-1}$ - грунт среднесжимаемый, и при m_v порядка $0,01 \text{ МПа}^{-1}$ - грунт малосжимаемый.

В данном случае грунт – среднесжимаемый.

Модуль деформации для заданного расчетного интервала давлений $P = P_2 - P_1$ вычисляются по формуле 25

$$E = \frac{1 + e_0}{m_0} \cdot \beta = \frac{\beta}{m_v}, \quad (25)$$

где β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения в приборе и назначаемый в зависимости от коэффициента Пуассона:

| Грунт | ν | $\beta = 1 - 2\nu^2/(1 - \nu)$ |
|----------------|-------|--------------------------------|
| Песок и супесь | 0,30 | 0,74 |
| Суглинок | 0,35 | 0,62 |
| Глина | 0,42 | 0,40 |

По условию данной задачи для глины (по данным задачи 5.31) получаем

$$E = 0,40 / 0,0992 = 4,03 \text{ МПа}.$$

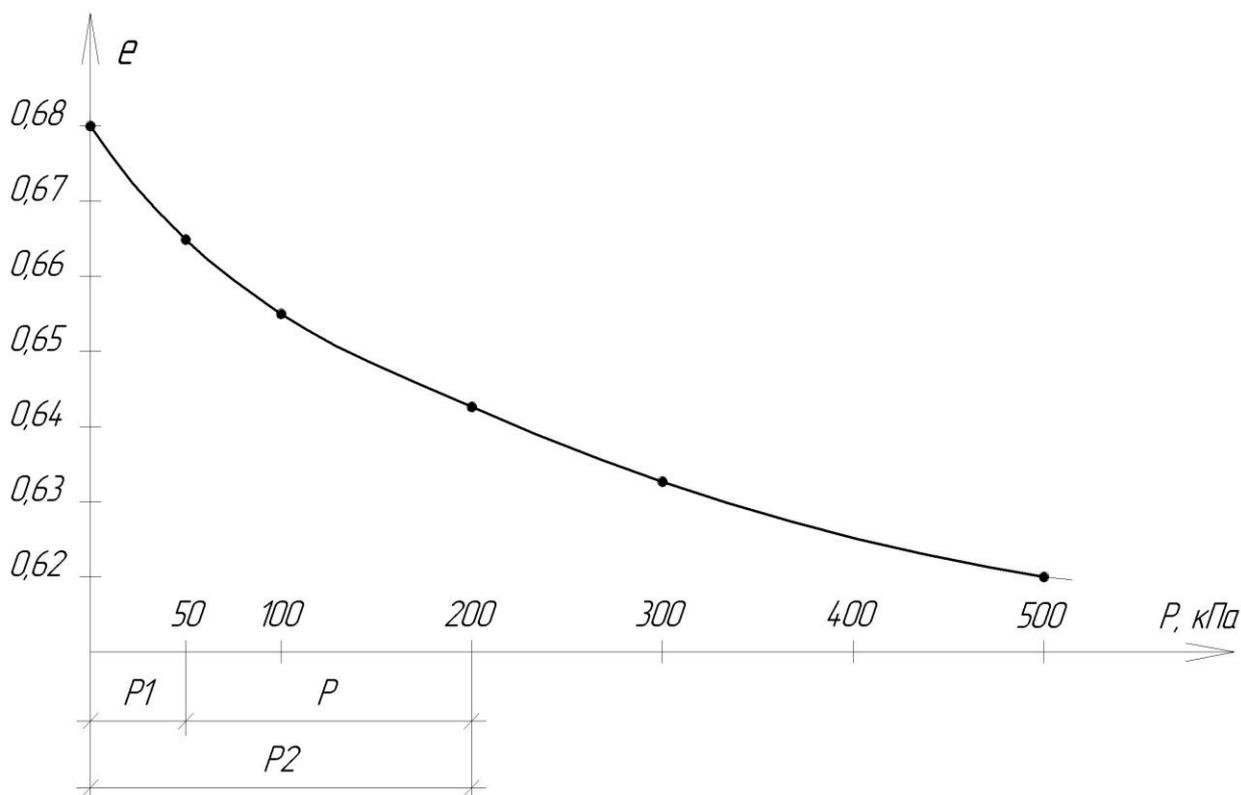


Рис. 2. Компрессионная кривая

2.2 Прочностные свойства грунтов

Задача 8

По результатам лабораторных исследований свойств грунтов требуется: построить график сдвига вида $\tau = f(p)$, определить методом наименьших квадратов нормативное значение угла внутреннего трения φ_n , нормативное значение удельного сцепления c_n .

Исходные данные приведены в таблице 14.

Пример решения дан для варианта 8.31.

Решение

Прочностные характеристики грунта – угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c - определяют не непосредственно из опытов, а после построения графиков. Поскольку построение этих графиков по точкам вносит в расчеты элемент субъективности, результаты серии опытов на сдвиг аппроксимируют прямой, используя для обработки экспериментальных дан-

ных метод наименьших квадратов. Тогда нормативные значения параметров прямой находят по формулам (26) и (27)

$$c_n = \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n p_i^2 - \sum_{i=1}^n p_i \sum_{i=1}^n \tau_i p_i \right), \quad (26)$$

$$tg \varphi_n = \frac{1}{\Delta} \left(n \sum_{i=1}^n \tau_i p_i - \sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n p_i \right), \quad (27)$$

где n – число экспериментов по определению сопротивлению τ_i грунта сдвигу при нормальном давлении p_i ;

Δ – общий знаменатель этих выражений, определяемый по формуле 28

$$\Delta = n \sum p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n p_i \right)^2. \quad (28)$$

Расчет вспомогательных величин выполняем в таблице 13.

Таблица 13

Расчет вспомогательных величин

| i | p_i , МПа | τ_i , МПа | p_i , МПа ² | $\tau_i p_i$, МПа ² |
|----------|-------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|
| 1 | 0,1 | 0,085 | 0,01 | 0,0085 |
| 2 | 0,2 | 0,155 | 0,04 | 0,0310 |
| 3 | 0,3 | 0,226 | 0,09 | 0,0678 |
| 4 | 0,4 | 0,294 | 0,16 | 0,1176 |
| 5 | 0,5 | 0,365 | 0,25 | 0,1825 |
| 6 | 0,6 | 0,435 | 0,36 | 0,2610 |
| Σ | 2,1 | 1,560 | 0,91 | 0,6684 |

Вычисляем общий знаменатель: $\Delta = 6 \cdot 0,91 - 2,1^2 = 1,05$ МПа².

Нормативное значение удельного сопротивления

$$c_n = \frac{1,560 \cdot 0,91 - 2,1 \cdot 0,6684}{1,05} = 0,0512 \text{ МПа} = 15,2 \text{ КПа.}$$

Нормативное значение угла внутреннего трения

$$tg \varphi_n = \frac{6 \cdot 0,6684 - 2,1 \cdot 1,560}{1,05} = 0,699,$$

откуда, $\varphi_n = arctg \varphi_n = arctg 0,699 = 35,0^\circ$.

По полученным экспериментальным данным строим график сдвига

(рис. 3).

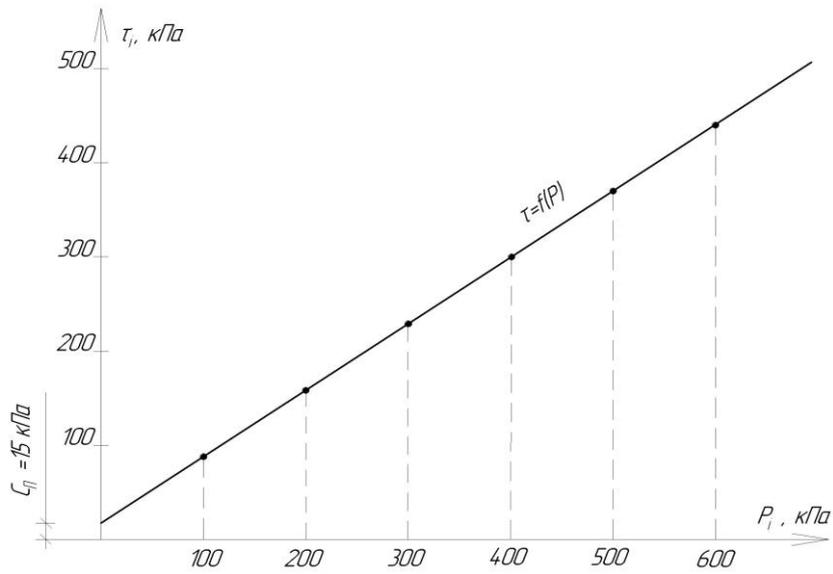


Рис. 3. График сдвига

Таблица 14

Исходные данные к задаче 8

| Вариант | Предельное сопротивление образца грунта сдвигу τ_i , кПа, при нормальном удельном давлении, передаваемом на образец грунта P_i , кПа | | | | | |
|---------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

| | | | | | | |
|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 8.1 | 79 | 136 | 195 | 251 | 312 | 365 |
| 8.2 | 72 | 129 | 185 | 237 | 296 | 348 |
| 8.3 | 66 | 117 | 169 | 218 | 271 | 319 |
| 8.4 | 58 | 102 | 148 | 190 | 237 | 278 |
| 8.5 | 72 | 125 | 180 | 230 | 285 | 339 |
| 8.6 | 64 | 113 | 163 | 209 | 260 | 306 |
| 8.7 | 60 | 104 | 150 | 192 | 239 | 281 |
| 8.8 | 49 | 88 | 127 | 165 | 204 | 240 |
| 8.9 | 41 | 74 | 107 | 138 | 173 | 203 |
| 8.10 | 96 | 145 | 195 | 241 | 292 | 338 |
| 8.11 | 84 | 130 | 178 | 222 | 271 | 315 |
| 8.12 | 76 | 120 | 166 | 208 | 255 | 297 |
| 8.13 | 67 | 110 | 154 | 193 | 239 | 278 |
| 8.14 | 62 | 103 | 145 | 182 | 225 | 263 |
| 8.15 | 55 | 92 | 129 | 163 | 201 | 236 |
| 8.16 | 84 | 128 | 174 | 216 | 262 | 306 |
| 8.17 | 76 | 119 | 162 | 202 | 246 | 289 |
| 8.18 | 68 | 109 | 150 | 188 | 230 | 270 |
| 8.19 | 61 | 100 | 139 | 175 | 215 | 253 |
| 8.20 | 52 | 87 | 123 | 154 | 190 | 225 |
| 8.21 | 46 | 76 | 108 | 136 | 168 | 198 |
| 8.22 | 59 | 94 | 130 | 161 | 197 | 232 |

Продолжение таблицы 14

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 8.23 | 52 | 85 | 119 | 148 | 182 | 215 |
| 8.24 | 45 | 73 | 103 | 129 | 159 | 188 |
| 8.25 | 39 | 64 | 90 | 112 | 139 | 164 |
| 8.26 | 33 | 55 | 77 | 96 | 118 | 140 |
| 8.27 | 79 | 112 | 146 | 175 | 209 | 242 |
| 8.28 | 70 | 98 | 128 | 154 | 184 | 213 |
| 8.29 | 61 | 86 | 112 | 134 | 161 | 186 |
| 8.30 | 72 | 100 | 130 | 156 | 186 | 215 |

2.3 Трехосное сжатие грунтов

Задача 9

Испытания образцов пылевато-глинистого грунта с ненарушенной структурой были проведены в стабилометре в условиях трехосного напряженного состояния. Число экспериментов $n = 3$; σ_1 - раздавливающее вертикальное напряжение; σ_3 - обжимающее боковое давление.

Определить прочностные показатели грунта: угол внутреннего трения φ , удельное сцепление c . Построить диаграмму предельных напряжений при сдвиге для сложного напряженного состояния.

Исходные данные приведены в таблице 15.

Пример решения дан для варианта 9.31.

Решение

В случае испытания на сдвиг по методу трехосного сжатия прочностные характеристики c и φ определяются по формулам

$$c = \frac{\alpha}{2\sqrt{\beta}}, \quad (29)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\beta - 1}{2\sqrt{\beta}}, \quad (30)$$

где α и β – величины, определяемые по формулам (31) и (32)

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{1,i} - \beta \sum_{i=1}^n \sigma_{3,i}}{n}, \quad (31)$$

$$\beta = \frac{n \sum_{i=1}^n (\sigma_{1,i} \cdot \sigma_{3,i}) - \sum_{i=1}^n \sigma_{1,i} \sum_{i=1}^n \sigma_{3,i}}{n \sum_{i=1}^n \sigma_{3,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{3,i} \right)^2}. \quad (32)$$

Таблица 15

Исходные данные к задаче 9

| Вариант | Опытные данные | | | | | |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | $k = 1$ | | $k = 2$ | | $k = 3$ | |
| | $\sigma_1, \text{МПа}$ | $\sigma_3, \text{МПа}$ | $\sigma_1, \text{МПа}$ | $\sigma_3, \text{МПа}$ | $\sigma_1, \text{МПа}$ | $\sigma_3, \text{МПа}$ |
| 9.1 | 140 | 22 | 201 | 43 | 263 | 63 |
| 9.2 | 138 | 28 | 200 | 50 | 263 | 72 |
| 9.3 | 137 | 33 | 195 | 55 | 253 | 77 |
| 9.4 | 136 | 40 | 195 | 65 | 254 | 90 |
| 9.5 | 134 | 27 | 195 | 47 | 255 | 69 |
| 9.6 | 143 | 37 | 200 | 60 | 258 | 82 |
| 9.7 | 131 | 39 | 189 | 63 | 247 | 87 |
| 9.8 | 118 | 40 | 177 | 69 | 237 | 97 |
| 9.9 | 179 | 11 | 229 | 31 | 280 | 50 |
| 9.10 | 162 | 18 | 233 | 47 | 304 | 76 |
| 9.11 | 155 | 25 | 218 | 52 | 282 | 78 |

| | | | | | | |
|------|-----|----|-----|----|-----|-----|
| 9.12 | 147 | 31 | 211 | 59 | 275 | 87 |
| 9.13 | 130 | 30 | 192 | 58 | 254 | 86 |
| 9.14 | 127 | 35 | 180 | 62 | 234 | 88 |
| 9.15 | 144 | 10 | 211 | 39 | 279 | 67 |
| 9.16 | 141 | 17 | 208 | 46 | 275 | 75 |
| 9.17 | 136 | 24 | 198 | 52 | 260 | 80 |
| 9.18 | 133 | 31 | 194 | 60 | 255 | 89 |
| 9.19 | 123 | 37 | 185 | 69 | 248 | 100 |
| 9.20 | 111 | 39 | 169 | 71 | 228 | 102 |
| 9.21 | 126 | 28 | 183 | 57 | 240 | 86 |
| 9.22 | 111 | 29 | 163 | 57 | 215 | 85 |
| 9.23 | 92 | 28 | 143 | 57 | 194 | 86 |
| 9.24 | 177 | 13 | 210 | 30 | 243 | 47 |
| 9.25 | 163 | 17 | 202 | 38 | 241 | 59 |
| 9.26 | 172 | 20 | 198 | 34 | 224 | 48 |
| 9.27 | 150 | 20 | 188 | 42 | 226 | 64 |
| 9.28 | 135 | 25 | 179 | 51 | 222 | 78 |
| 9.29 | 104 | 16 | 140 | 40 | 176 | 64 |
| 9.30 | 138 | 12 | 169 | 31 | 201 | 49 |
| 9.31 | 147 | 23 | 202 | 52 | 257 | 87 |

Расчет вспомогательных величин выполняется в таблице 16.

Таблица 16

Расчет вспомогательных величин

| i | $\sigma_{1,i}$, МПа | $\sigma_{3,i}$, МПа | $\sigma_{1,i} \cdot \sigma_{3,i}$, МПа ² | $\sigma_{3,i}^2$, МПа ² |
|----------|----------------------|----------------------|--|-------------------------------------|
| 1 | 147 | 23 | 3381 | 529 |
| 2 | 202 | 52 | 10504 | 2704 |
| 3 | 257 | 81 | 20817 | 6561 |
| Σ | 606 | 156 | 34702 | 9794 |

Тогда,

$$\beta = \frac{3 \cdot 34702 - 606 \cdot 156}{3 \cdot 9794 - 156^2} = 1,897.$$

$$\alpha = \frac{606 - 1,897 \cdot 156}{3} = 103,38 \text{ кПа}$$

$$c = \frac{103,38}{2\sqrt{1,897}} = 37,53 \text{ кПа}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1,897 - 1}{2\sqrt{1,897}} = 18,03^\circ.$$

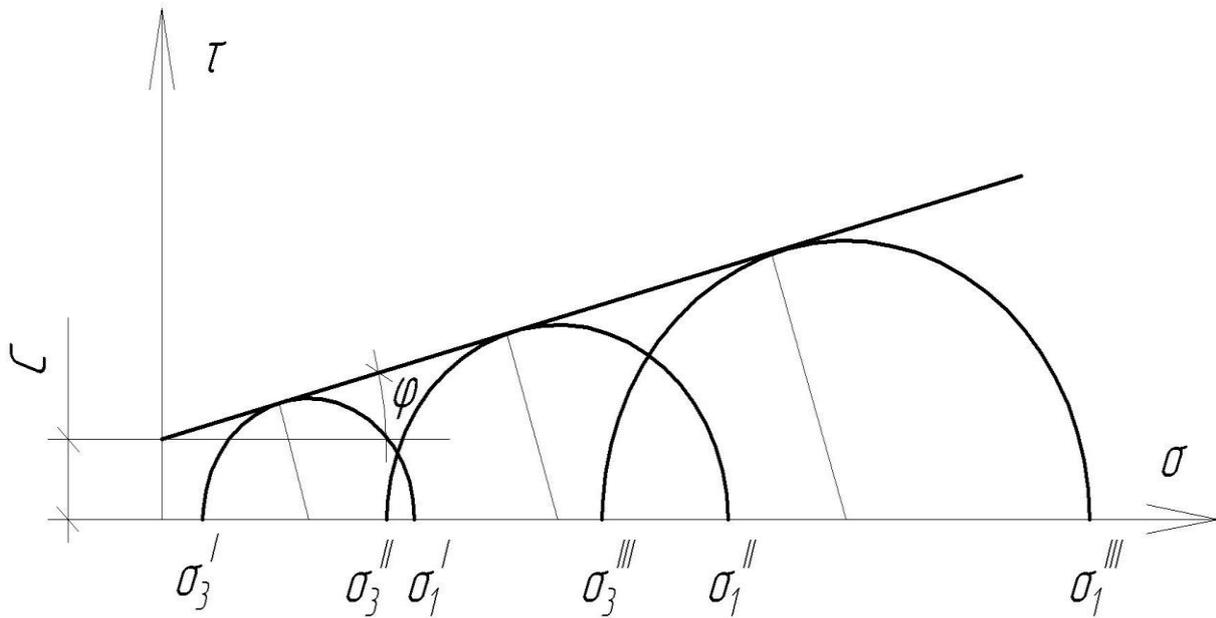


Рис.4. Диаграмма предельных напряжений при сдвиге для сложного напряженного состояния

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГРУНТА

3.1 Определение напряжений в массиве грунта от действия сосредоточенной силы

Задача 10

К горизонтальной поверхности массива грунта приложены три вертикальные сосредоточенные силы N_1 , N_2 , N_3 на расстояниях a_1 и a_2 друг от друга (рис. 5).

Определить величины вертикальных составляющих напряжений σ_z и построить эпюры напряжений от совместного действия сосредоточенных сил: а) в точках на вертикали, совпадающей с линией действия силы N_2 ; б) в точках на горизонтали, расположенной на глубине z_0 от поверхности.

Точки по вертикали расположить от поверхности грунта на глубине 1, 2, 4 и 6 м. Точки по горизонтали расположить вправо и влево от линии дей-

ствия силы N_2 на расстоянии 0, 1 и 2 м.

Исходные данные приведены в таблице 17.

Пример решения задачи 10 приведен для варианта 10.31.

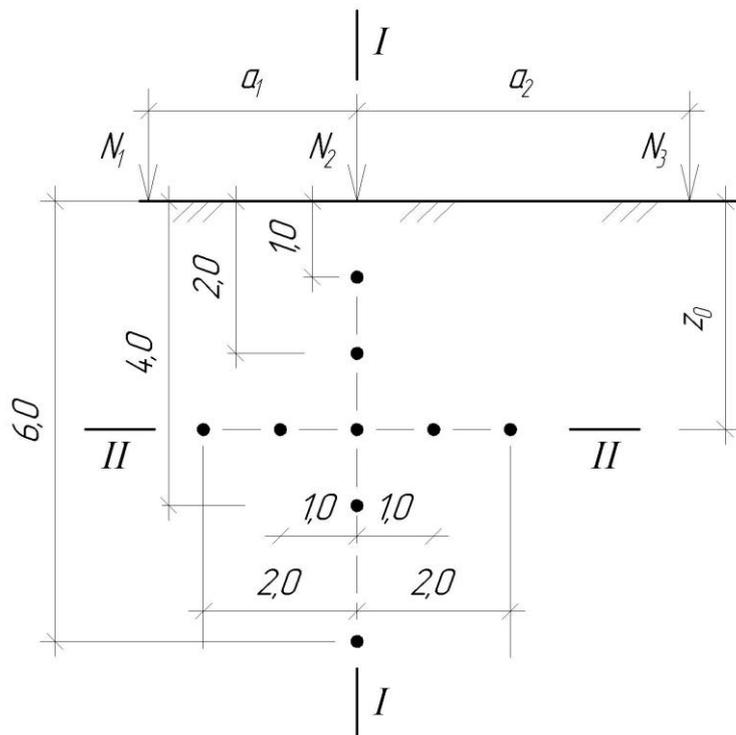


Рис. 5. Расчетная схема к задаче 10

Таблица 17

Исходные данные к задаче 10

| Вариант | N_1 , кН | N_2 , кН | N_3 , кН | a_1 , м | a_2 , м | z_0 , м |
|---------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|-------|------|------|------|-----|-----|-----|
| 10.1 | 1100 | 700 | 1300 | 1,0 | 3,0 | 2,0 |
| 10.2 | 1200 | 800 | 1400 | 2,0 | 3,0 | 3,0 |
| 10.3 | 1300 | 900 | 1600 | 3,0 | 3,0 | 4,0 |
| 10.4 | 1500 | 900 | 1700 | 4,0 | 3,0 | 5,0 |
| 10.5 | 1700 | 800 | 1100 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
| 10.6 | 1600 | 700 | 1000 | 2,0 | 2,0 | 3,0 |
| 10.7 | 1400 | 600 | 1100 | 3,0 | 2,0 | 4,0 |
| 10.8 | 1800 | 700 | 1300 | 4,0 | 2,0 | 5,0 |
| 10.9 | 1900 | 900 | 1200 | 1,0 | 1,0 | 2,0 |
| 10.10 | 1000 | 700 | 1200 | 2,0 | 1,0 | 3,0 |
| 10.11 | 600 | 1000 | 1300 | 3,0 | 1,0 | 4,0 |
| 10.12 | 700 | 1200 | 1100 | 4,0 | 1,0 | 5,0 |
| 10.13 | 800 | 1100 | 1500 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 10.14 | 900 | 1400 | 1100 | 2,0 | 1,5 | 3,0 |
| 10.15 | 600 | 1300 | 1100 | 3,0 | 1,5 | 4,0 |
| 10.16 | 700 | 1500 | 1100 | 4,0 | 1,5 | 5,0 |
| 10.17 | 800 | 1300 | 1800 | 1,0 | 2,5 | 2,0 |
| 10.18 | 900 | 1100 | 1500 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| 10.19 | 700 | 1600 | 1300 | 3,0 | 2,5 | 4,0 |
| 10.20 | 800 | 1200 | 1700 | 4,0 | 2,5 | 5,0 |
| 10.21 | 1500 | 1200 | 600 | 1,5 | 3,0 | 2,0 |
| 10.22 | 1300 | 1600 | 700 | 2,5 | 3,0 | 3,0 |
| 10.23 | 1400 | 1100 | 800 | 3,5 | 3,0 | 4,0 |
| 10.24 | 1200 | 1500 | 900 | 4,5 | 3,0 | 5,0 |
| 10.25 | 1700 | 1400 | 700 | 1,5 | 2,0 | 2,0 |
| 10.26 | 1300 | 1800 | 800 | 2,5 | 2,0 | 3,0 |
| 10.27 | 1800 | 1200 | 900 | 3,5 | 2,0 | 4,0 |
| 10.28 | 1100 | 1600 | 700 | 4,5 | 2,0 | 5,0 |
| 10.29 | 1900 | 1500 | 800 | 2,5 | 1,0 | 2,0 |
| 10.30 | 1000 | 1500 | 800 | 2,5 | 1,0 | 3,0 |
| 10.31 | 1100 | 800 | 1500 | 2,5 | 2,0 | 3,0 |

Решение

Определение напряжений в грунтах производится с помощью теории линейно-деформируемой среды, использующей решения теории упругости и предполагающей только загрузку без разгрузки, причем считается, что процесс сжатия от внешней нагрузки закончился, давление на основание не превышает расчетного сопротивления грунта, определенного в соответствии с [15]. Таким образом, грунт рассматривается как единое сплошное линейно-деформируемое тело, испытывающее одноразовое загрузку, а грунтовый массив как линейно-деформируемое полупространство.

Для случая, когда к горизонтальной поверхности массива грунта при-

ложено несколько сосредоточенных сил N_1, N_2, \dots, N_n , величины вертикальных напряжений σ_z , в любой точке массива M можно определить суммированием составляющих напряжений от действия каждой силы по формуле (33)

$$\sigma_z = \frac{1}{z^2} (K_1 N_1 + K_2 N_2 + K_3 N_3 + \dots + K_n N_n) = \frac{1}{z^2} \sum_{i=1}^n K_i N_i, \quad (33)$$

где K_i – коэффициент, являющийся функцией отношения r_i/z ;

r_i – расстояние по горизонтали оси от рассматриваемой точки M до линии действия сосредоточенной силы N_i .

Значения коэффициента K в зависимости от отношения r/z приведены в таблице 19.

Тогда в данной задаче величина составляющих вертикальных напряжений σ_z в любой точке массива грунта M определяется по формуле 34

$$\sigma_z = \frac{1}{z^2} (K_1 N_1 + K_2 N_2 + K_3 N_3). \quad (34)$$

Расчет выполняется в табличной форме (табл. 18). По результатам вычислений строим эпюры сжимающих напряжений по осям I-I и II-II (рис. 7).

Таблица 18

Результаты расчетов к решению задачи 10.31

| | $z,$ м | $r_1,$ м | $r_2,$ м | $r_3,$ м | r_1/z | r_2/z | r_3/z | K_1 | K_2 | K_3 | $\sigma_z,$ кПа |
|-------|-----------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|-----------------|
| M_1 | 1,0 | 2,5 | 0 | 2,0 | 2,5 | 0 | 2 | 0,0034 | 0,4775 | 0,0085 | 398,5 |
| M_2 | 2,0 | 2,5 | 0 | 2,0 | 1,25 | 0 | 1 | 0,0454 | 0,4775 | 0,0844 | 139,6 |
| M_3 | 4,0 | 2,5 | 0 | 2,0 | 0,625 | 0 | 0,5 | 0,2094 | 0,4775 | 0,2733 | 63,9 |
| M_4 | 6,0 | 2,5 | 0 | 2,0 | 0,417 | 0 | 0,333 | 0,3200 | 0,4775 | 0,3669 | 35,7 |
| M_5 | 3,0 | 0,5 | 2,0 | 4,0 | 0,167 | 0,667 | 1,333 | 0,4459 | 0,1904 | 0,0371 | 77,6 |
| M_6 | 3,0 | 1,5 | 1,0 | 3,0 | 0,5 | 0,333 | 1 | 0,2733 | 0,3669 | 0,0844 | 80,1 |
| M_7 | 3,0 | 2,5 | 0 | 2,0 | 0,833 | 0 | 0,667 | 0,1276 | 0,4775 | 0,1904 | 89,8 |
| M_8 | 3,0 | 3,5 | 1,0 | 1,0 | 1,167 | 0,333 | 0,333 | 0,0557 | 0,3669 | 0,3669 | 100,8 |
| M_9 | 3,0 | 4,5 | 2,0 | 0 | 1,5 | 0,667 | 0 | 0,0251 | 0,1904 | 0,4775 | 99,6 |

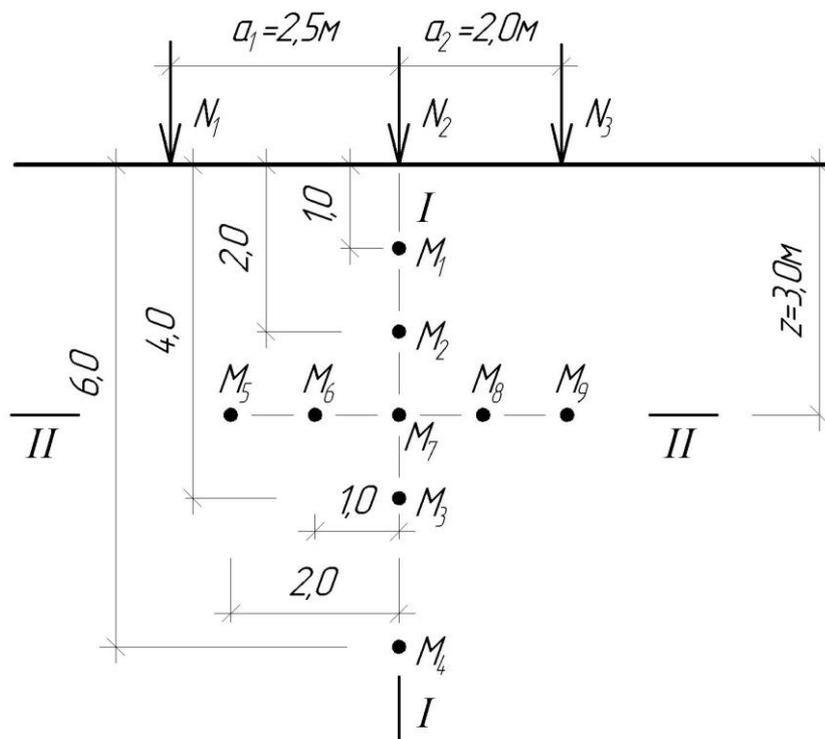
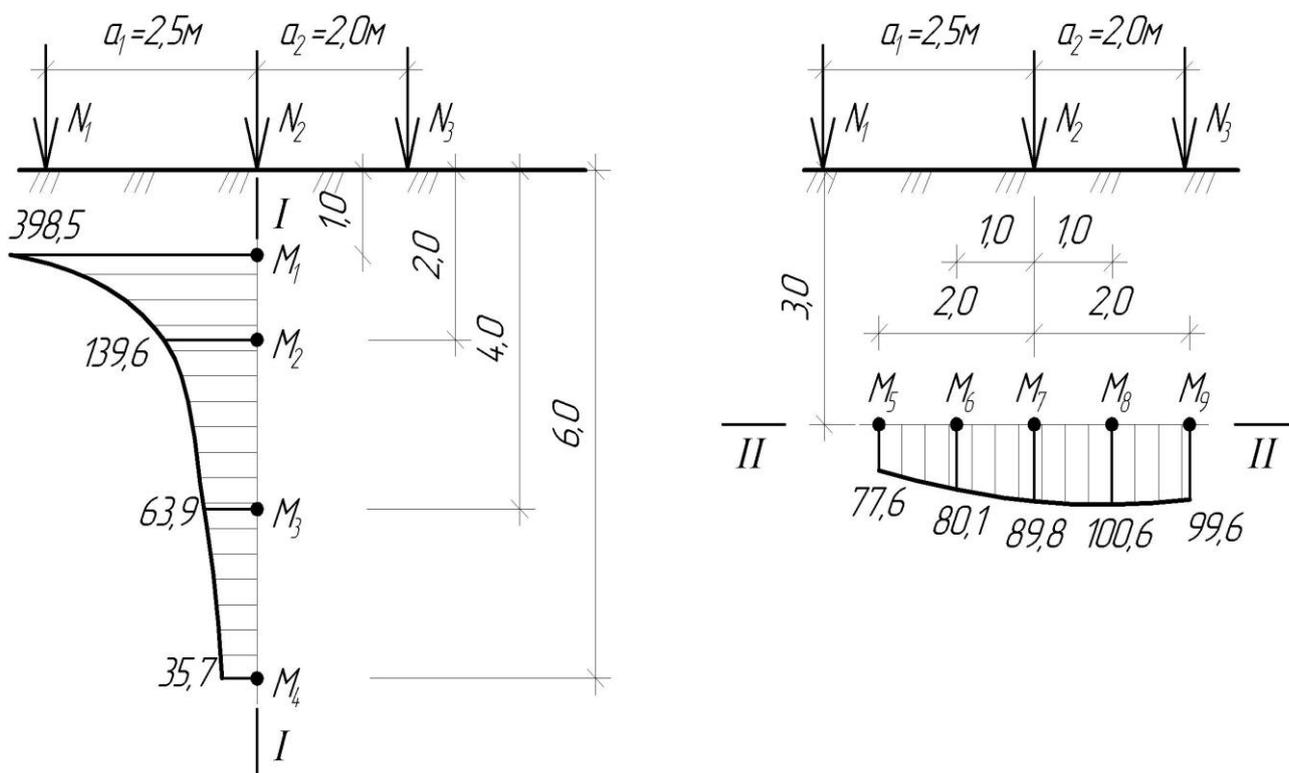


Рис. 6. Расчетная схема к задаче 10.31

Рис. 7. Эпюры вертикальных сжимающих напряжений σ_z , кПа

а) по оси I-I;

б) по оси II-II

Таблица 19

Значения коэффициентов K для вычисления сжимающих напряжений σ_z от действия сосредоточенной силы в зависимости от отношения r/z

| r/z | K | r/z | K | r/z | K | r/z | K |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 0,00 | 0,4775 | 0,50 | 0,2733 | 1,00 | 0,0844 | 1,50 | 0,0251 |
| 0,01 | 0,4773 | 0,51 | 0,2679 | 1,01 | 0,0823 | 1,51 | 0,0245 |
| 0,02 | 0,4770 | 0,52 | 0,2625 | 1,02 | 0,0803 | 1,52 | 0,0240 |
| 0,03 | 0,4764 | 0,53 | 0,2572 | 1,03 | 0,0783 | 1,53 | 0,0234 |
| 0,04 | 0,4756 | 0,54 | 0,2518 | 1,04 | 0,0764 | 1,54 | 0,0229 |
| 0,05 | 0,4745 | 0,55 | 0,2466 | 1,05 | 0,0744 | 1,55 | 0,0224 |
| 0,06 | 0,4732 | 0,56 | 0,2414 | 1,06 | 0,0727 | 1,56 | 0,0219 |
| 0,07 | 0,4717 | 0,57 | 0,2363 | 1,07 | 0,0709 | 1,57 | 0,0214 |
| 0,08 | 0,4699 | 0,58 | 0,2313 | 1,08 | 0,0691 | 1,58 | 0,0209 |
| 0,09 | 0,4679 | 0,59 | 0,2263 | 1,09 | 0,0674 | 1,59 | 0,0204 |
| 0,10 | 0,4657 | 0,60 | 0,2214 | 1,10 | 0,0658 | 1,60 | 0,0200 |
| 0,11 | 0,4633 | 0,61 | 0,2165 | 1,11 | 0,0641 | 1,61 | 0,0195 |
| 0,12 | 0,4607 | 0,62 | 0,2117 | 1,12 | 0,0626 | 1,62 | 0,0191 |
| 0,13 | 0,4579 | 0,63 | 0,2070 | 1,13 | 0,0610 | 1,63 | 0,0187 |
| 0,14 | 0,4548 | 0,64 | 0,2024 | 1,14 | 0,0595 | 1,64 | 0,0183 |
| 0,15 | 0,4516 | 0,65 | 0,1978 | 1,15 | 0,0581 | 1,65 | 0,0179 |
| 0,16 | 0,4482 | 0,66 | 0,1934 | 1,16 | 0,0567 | 1,66 | 0,0175 |
| 0,17 | 0,4446 | 0,67 | 0,1889 | 1,17 | 0,0553 | 1,67 | 0,0171 |
| 0,18 | 0,4409 | 0,68 | 0,1846 | 1,18 | 0,0539 | 1,68 | 0,0167 |
| 0,19 | 0,4370 | 0,69 | 0,1804 | 1,19 | 0,0526 | 1,69 | 0,0163 |
| 0,20 | 0,4329 | 0,70 | 0,1762 | 1,20 | 0,0513 | 1,70 | 0,0160 |
| 0,21 | 0,4286 | 0,71 | 0,1721 | 1,21 | 0,0501 | 1,72 | 0,0153 |
| 0,22 | 0,4242 | 0,72 | 0,1681 | 1,22 | 0,0489 | 1,74 | 0,0147 |
| 0,23 | 0,4197 | 0,73 | 0,1641 | 1,23 | 0,0477 | 1,76 | 0,0141 |
| 0,24 | 0,4151 | 0,74 | 0,1603 | 1,24 | 0,0466 | 1,78 | 0,0135 |
| 0,25 | 0,4103 | 0,75 | 0,1565 | 1,25 | 0,0454 | 1,80 | 0,0129 |
| 0,26 | 0,4054 | 0,76 | 0,1527 | 1,26 | 0,0433 | 1,82 | 0,0124 |
| 0,27 | 0,4004 | 0,77 | 0,1491 | 1,27 | 0,0433 | 1,84 | 0,0119 |
| 0,28 | 0,3954 | 0,78 | 0,1455 | 1,28 | 0,0422 | 1,86 | 0,0114 |
| 0,29 | 0,3902 | 0,79 | 0,1420 | 1,29 | 0,0412 | 1,88 | 0,0109 |
| 0,30 | 0,3849 | 0,80 | 0,1386 | 1,30 | 0,0402 | 1,90 | 0,0105 |
| 0,31 | 0,3796 | 0,81 | 0,1353 | 1,31 | 0,0393 | 1,92 | 0,0101 |
| 0,32 | 0,3742 | 0,82 | 0,1320 | 1,32 | 0,0384 | 1,94 | 0,0097 |
| 0,33 | 0,3687 | 0,83 | 0,1288 | 1,33 | 0,0374 | 1,96 | 0,0093 |
| 0,34 | 0,3632 | 0,84 | 0,1257 | 1,34 | 0,0365 | 1,98 | 0,0089 |
| 0,35 | 0,3577 | 0,85 | 0,1226 | 1,35 | 0,0357 | 2,00 | 0,0085 |
| 0,36 | 0,3521 | 0,86 | 0,1196 | 1,36 | 0,0348 | 2,10 | 0,0070 |
| 0,37 | 0,3465 | 0,87 | 0,1166 | 1,37 | 0,0340 | 2,20 | 0,0058 |
| 0,38 | 0,3408 | 0,88 | 0,1138 | 1,38 | 0,0332 | 2,30 | 0,0048 |
| 0,39 | 0,3351 | 0,89 | 0,1110 | 1,39 | 0,0324 | 2,40 | 0,0040 |
| 0,40 | 0,3294 | 0,90 | 0,1083 | 1,40 | 0,0317 | 2,50 | 0,0034 |
| 0,41 | 0,3238 | 0,91 | 0,1057 | 1,41 | 0,0309 | 2,60 | 0,0029 |
| 0,42 | 0,3181 | 0,92 | 0,1031 | 1,42 | 0,0302 | 2,70 | 0,0024 |
| 0,43 | 0,3124 | 0,93 | 0,1005 | 1,43 | 0,0295 | 2,80 | 0,0021 |
| 0,44 | 0,3068 | 0,94 | 0,0981 | 1,44 | 0,0288 | 2,90 | 0,0017 |
| 0,45 | 0,3011 | 0,95 | 0,0956 | 1,45 | 0,0282 | 3,00 | 0,0015 |
| 0,46 | 0,2955 | 0,96 | 0,0933 | 1,46 | 0,0275 | 3,50 | 0,0007 |
| 0,47 | 0,2899 | 0,97 | 0,0910 | 1,47 | 0,0269 | 4,00 | 0,0004 |
| 0,48 | 0,2843 | 0,98 | 0,0887 | 1,48 | 0,0263 | 4,50 | 0,0002 |
| 0,49 | 0,2788 | 0,99 | 0,0865 | 1,49 | 0,0257 | 5,00 | 0,0001 |

3.2 Определение напряжений в массиве грунта от действия полосовой нагрузки

Задача 11

К горизонтальной поверхности массива грунта приложена вертикальная нагрузка, распределенная в пределах гибкой полосы и изменяющаяся по линейному закону (рис. 8).

Определить величины вертикальных составляющих напряжений σ_z и построить эпюры напряжений: а) в точках на заданной вертикали; б) в точках на горизонтали, расположенной на глубине z_0 от поверхности.

Точки по вертикали расположить от поверхности грунта на глубине 1, 2, 4 и 6 м. Точки по горизонтали расположить вправо и влево от расчетной вертикали M_2 на расстоянии 0, 1 и 2 м.

Исходные данные приведены в таблице 20.

Пример решения задачи 11 приведен для варианта 11.31.

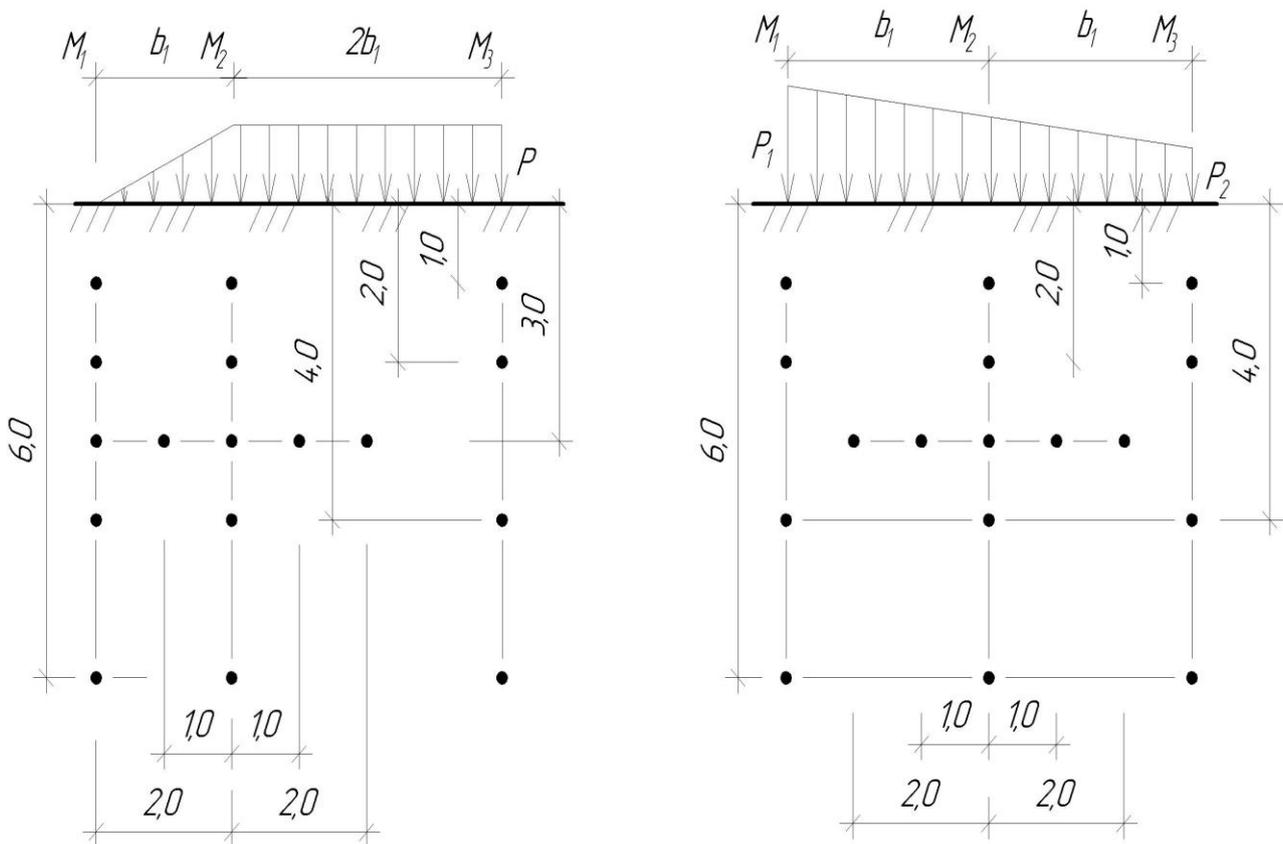


Рис. 8. Расчетная схема к задаче 11

Таблица 20

Исходные данные к задаче 11

| Вариант | b_1 , м | z_0 , м | Расчетная вертикаль | P , кПа | P_1 , кПа | P_2 , кПа | Номер схемы |
|---------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-------------|-------------|----------------|
|---------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-------------|-------------|----------------|

| | | | | | | | |
|-------|-----|---|-------|-----|-----|-----|---|
| 11.1 | 4 | 1 | M_1 | 400 | - | - | 1 |
| 11.2 | 3 | 2 | M_1 | - | 400 | 250 | 2 |
| 11.3 | 2 | 3 | M_2 | 380 | - | - | 1 |
| 11.4 | 1 | 4 | M_2 | - | 350 | 200 | 2 |
| 11.5 | 4 | 1 | M_3 | 360 | - | - | 1 |
| 11.6 | 3 | 2 | M_3 | - | 300 | 150 | 2 |
| 11.7 | 2 | 3 | M_1 | 340 | - | - | 1 |
| 11.8 | 1 | 4 | M_1 | - | 250 | 100 | 2 |
| 11.9 | 4 | 1 | M_2 | 320 | - | - | 1 |
| 11.10 | 3 | 2 | M_2 | - | 400 | 300 | 2 |
| 11.11 | 2 | 3 | M_3 | 300 | - | - | 1 |
| 11.12 | 1 | 4 | M_3 | - | 350 | 250 | 2 |
| 11.13 | 1 | 1 | M_1 | 280 | - | - | 1 |
| 11.14 | 2 | 2 | M_1 | - | 300 | 200 | 2 |
| 11.15 | 3 | 3 | M_2 | 260 | - | - | 1 |
| 11.16 | 4 | 4 | M_2 | - | 250 | 150 | 2 |
| 11.17 | 1 | 1 | M_3 | 240 | - | - | 1 |
| 11.18 | 2 | 2 | M_3 | - | 200 | 100 | 2 |
| 11.19 | 3 | 3 | M_1 | 220 | - | - | 1 |
| 11.20 | 4 | 4 | M_1 | - | 380 | 250 | 2 |
| 11.21 | 1 | 1 | M_2 | 250 | - | - | 1 |
| 11.22 | 2 | 2 | M_2 | - | 330 | 200 | 2 |
| 11.23 | 3 | 3 | M_3 | 270 | - | - | 1 |
| 11.24 | 4 | 4 | M_3 | - | 280 | 150 | 2 |
| 11.25 | 2 | 1 | M_1 | 290 | - | - | 1 |
| 11.26 | 1 | 2 | M_1 | - | 380 | 280 | 2 |
| 11.27 | 4 | 3 | M_2 | 310 | - | - | 1 |
| 11.28 | 3 | 4 | M_2 | - | 330 | 230 | 2 |
| 11.29 | 2 | 1 | M_3 | 330 | - | - | 1 |
| 11.30 | 4 | 3 | M_3 | - | 275 | 150 | 2 |
| 11.31 | 2,5 | 3 | M_1 | - | 400 | 250 | 2 |

Решение

Для случая действия на поверхности массива грунта нагрузки, распределенной в пределах полосы по трапециевидальной эпюре, величину верти-

кального сжимающего напряжения σ_z^T в любой точке массива грунта определяют путем суммирования напряжений от прямоугольного и треугольного элементов эпюры внешней нагрузки

$$\sigma_z^T = \sigma_z + \sigma_z', \quad (35)$$

где σ_z – вертикальное напряжение от прямоугольного элемента нагрузки;
 σ_z' – вертикальное напряжение от треугольного элемента нагрузки.

Вертикальные напряжения σ_z , возникающие от действия полосовой равномерно распределенной нагрузки (рис. 9) – прямоугольный элемент эпюры внешней нагрузки, определяется по формуле

$$\sigma_z = K_z \cdot P, \quad (36)$$

где K_z – коэффициент, определяемый в зависимости от величин относительных координат z/b и y/b по таблице 21;

P – вертикальная равномерно распределенная нагрузка.

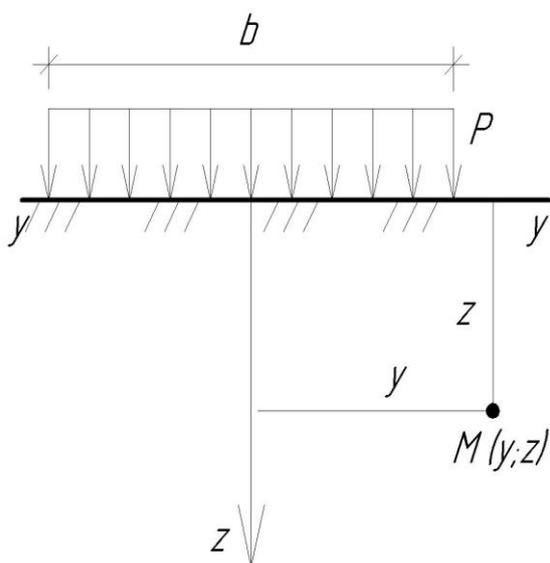


Рис. 9. К определению напряжения от действия равномерной полосовой нагрузки

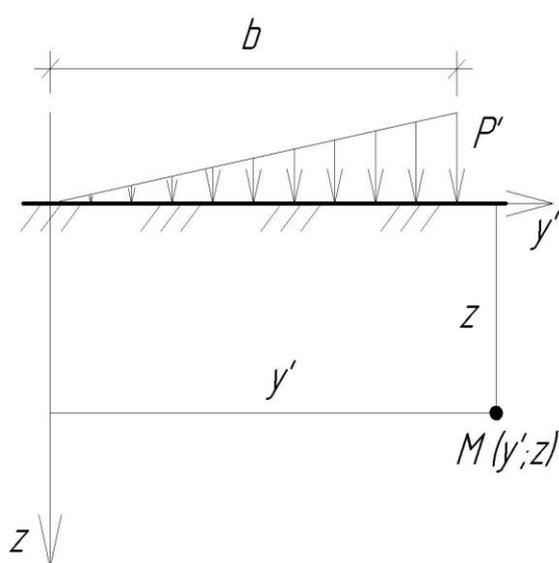


Рис. 10. К определению напряжения от действия полосовой нагрузки, распределенной по закону треугольника

Таблица 21

Значения коэффициентов влияния K_z для определения величины

сжимающего напряжения σ_z при действии равномерно распределенной
(прямоугольной) нагрузки

| z/b | Значения y/b | | | | | |
|-------|----------------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,25 | 0,96 | 0,90 | 0,50 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| 0,50 | 0,82 | 0,74 | 0,48 | 0,08 | 0,02 | 0,00 |
| 0,75 | 0,67 | 0,61 | 0,45 | 0,15 | 0,04 | 0,02 |
| 1,00 | 0,55 | 0,51 | 0,41 | 0,19 | 0,07 | 0,03 |
| 1,25 | 0,46 | 0,44 | 0,37 | 0,20 | 0,10 | 0,04 |
| 1,50 | 0,40 | 0,38 | 0,33 | 0,21 | 0,13 | 0,07 |
| 1,75 | 0,35 | 0,34 | 0,30 | 0,20 | 0,14 | 0,08 |
| 2,00 | 0,31 | 0,31 | 0,28 | 0,17 | 0,13 | 0,10 |
| 3,00 | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,14 | 0,12 | 0,10 |
| 4,00 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 0,11 | 0,09 |
| 5,00 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | - |
| 6,00 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | - | - | - |

Таблица 22

Значения коэффициентов влияния K'_z для определения величины
сжимающего напряжения σ'_z при действии треугольной нагрузки

| z/b | Значения y'/b | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -1,5 | -1,0 | -0,5 | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,250 | 0,500 | 0,750 | 0,500 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,25 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,075 | 0,256 | 0,480 | 0,643 | 0,424 | 0,015 | 0,003 | 0,000 |
| 0,50 | 0,002 | 0,003 | 0,023 | 0,127 | 0,263 | 0,410 | 0,477 | 0,353 | 0,056 | 0,017 | 0,003 |
| 0,75 | 0,006 | 0,016 | 0,042 | 0,153 | 0,248 | 0,335 | 0,361 | 0,293 | 0,108 | 0,024 | 0,009 |
| 1,00 | 0,014 | 0,025 | 0,061 | 0,159 | 0,223 | 0,275 | 0,279 | 0,241 | 0,129 | 0,045 | 0,013 |
| 1,50 | 0,020 | 0,048 | 0,096 | 0,145 | 0,178 | 0,200 | 0,202 | 0,185 | 0,124 | 0,062 | 0,041 |
| 2,00 | 0,033 | 0,061 | 0,092 | 0,127 | 0,146 | 0,155 | 0,163 | 0,153 | 0,108 | 0,069 | 0,050 |
| 3,00 | 0,050 | 0,064 | 0,080 | 0,096 | 0,103 | 0,104 | 0,108 | 0,104 | 0,090 | 0,071 | 0,050 |
| 4,00 | 0,051 | 0,060 | 0,067 | 0,075 | 0,078 | 0,085 | 0,082 | 0,075 | 0,073 | 0,060 | 0,049 |
| 5,00 | 0,047 | 0,052 | 0,057 | 0,059 | 0,062 | 0,063 | 0,063 | 0,065 | 0,061 | 0,051 | 0,047 |
| 6,00 | 0,041 | 0,041 | 0,050 | 0,051 | 0,052 | 0,053 | 0,053 | 0,053 | 0,050 | 0,050 | 0,045 |

Вертикальные напряжения σ'_z , возникающие от действия полосовой неравномерной нагрузки, распределенной по закону треугольника (рис.10) – треугольный элемент эпюры внешней нагрузки, определяется по формуле (37)

$$\sigma'_z = K'_z \cdot P', \quad (37)$$

где K_z' – коэффициент, определяемый в зависимости от величин относительных координат z/b и y'/b по таблице 22;

P' – максимальная ордината эпюры треугольной нагрузки.

В рассматриваемой задаче 11.31 (рис. 11) вертикальные сжимающие напряжения σ_z^T от трапециевидальной нагрузки, изменяющейся от P_1 до P_2 определяются по формуле (38)

$$\sigma_z^T = K_z \cdot P_2 + K_z' \cdot (P_1 - P_2), \quad (38)$$

где σ_z – вертикальное напряжение от прямоугольного элемента нагрузки;

σ_z' – вертикальное напряжение от треугольного элемента нагрузки.

Расчет выполняется в табличной форме (табл. 23). Эпюры сжимающих напряжений σ_z^T по указанным вертикали и горизонтали представлены на рисунке 12.

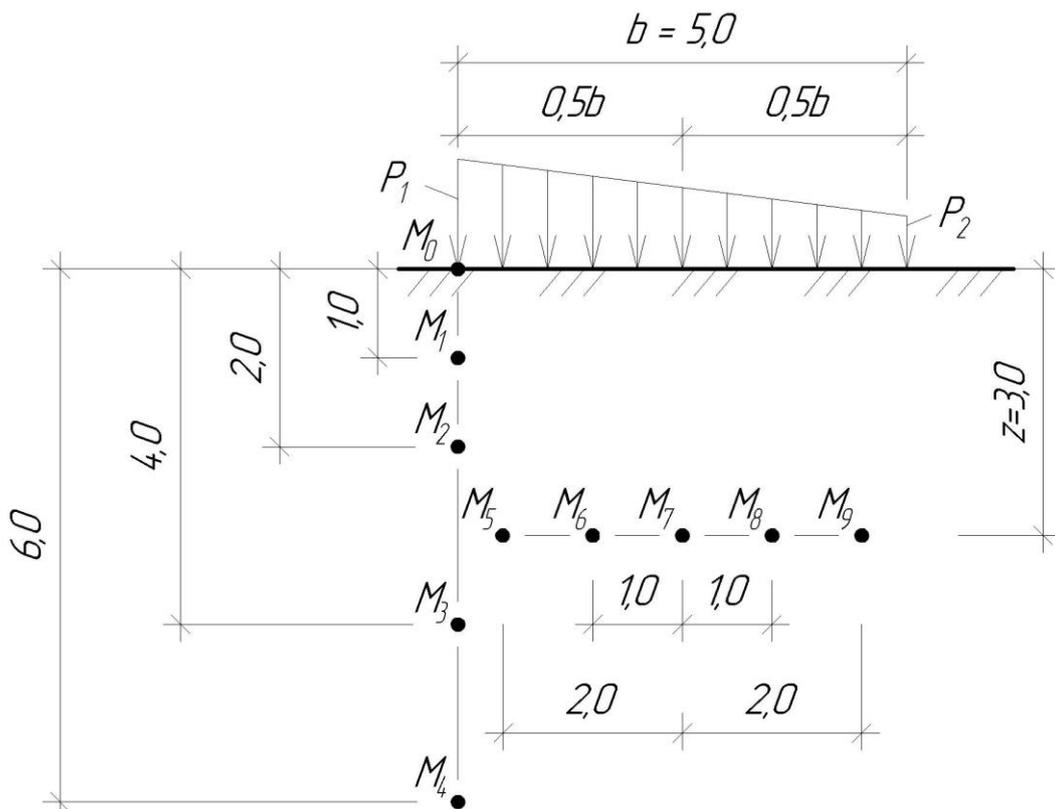


Рис. 11. Расчетная схема к задаче 11.31

Таблица 23

Результаты расчетов к решению задачи 11.31

| | $z, \text{ м}$ | z/b | $P_2 = 250 \text{ кПа}$ | | | | $P_1 - P_2 = 150 \text{ кПа}$ | | | | $\sigma_z^T, \text{ кПа}$ |
|-------|----------------|-------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------------------------|---------------------------|
| | | | $y, \text{ м}$ | y/b | K_z | $\sigma_z, \text{ кПа}$ | $y', \text{ м}$ | y'/b | K_z' | $\sigma_z', \text{ кПа}$ | |
| M_1 | 1,0 | 0,2 | 2,5 | 0,5 | 0,498 | 124,5 | 5,0 | 1,0 | 0,437 | 65,6 | 190,1 |
| M_2 | 2,0 | 0,4 | 2,5 | 0,5 | 0,489 | 122,3 | 5,0 | 1,0 | 0,379 | 56,9 | 179,2 |
| M_3 | 4,0 | 0,8 | 2,5 | 0,5 | 0,440 | 110,0 | 5,0 | 1,0 | 0,285 | 42,8 | 152,8 |
| M_4 | 6,0 | 1,2 | 2,5 | 0,5 | 0,378 | 94,5 | 5,0 | 1,0 | 0,221 | 33,2 | 127,7 |
| M_5 | 3,0 | 0,6 | 2,0 | 0,4 | 0,564 | 141,0 | 4,5 | 0,9 | 0,380 | 57,0 | 198,0 |
| M_6 | 3,0 | 0,6 | 1,0 | 0,2 | 0,707 | 176,8 | 3,5 | 0,7 | 0,423 | 63,5 | 240,3 |
| M_7 | 3,0 | 0,6 | 0 | 0 | 0,755 | 188,8 | 2,5 | 0,5 | 0,378 | 56,7 | 245,5 |
| M_8 | 3,0 | 0,6 | 1,0 | 0,2 | 0,707 | 176,8 | 1,5 | 0,3 | 0,284 | 42,6 | 219,4 |
| M_9 | 3,0 | 0,6 | 2,0 | 0,4 | 0,564 | 141,0 | 0,5 | 0,1 | 0,183 | 27,5 | 168,5 |

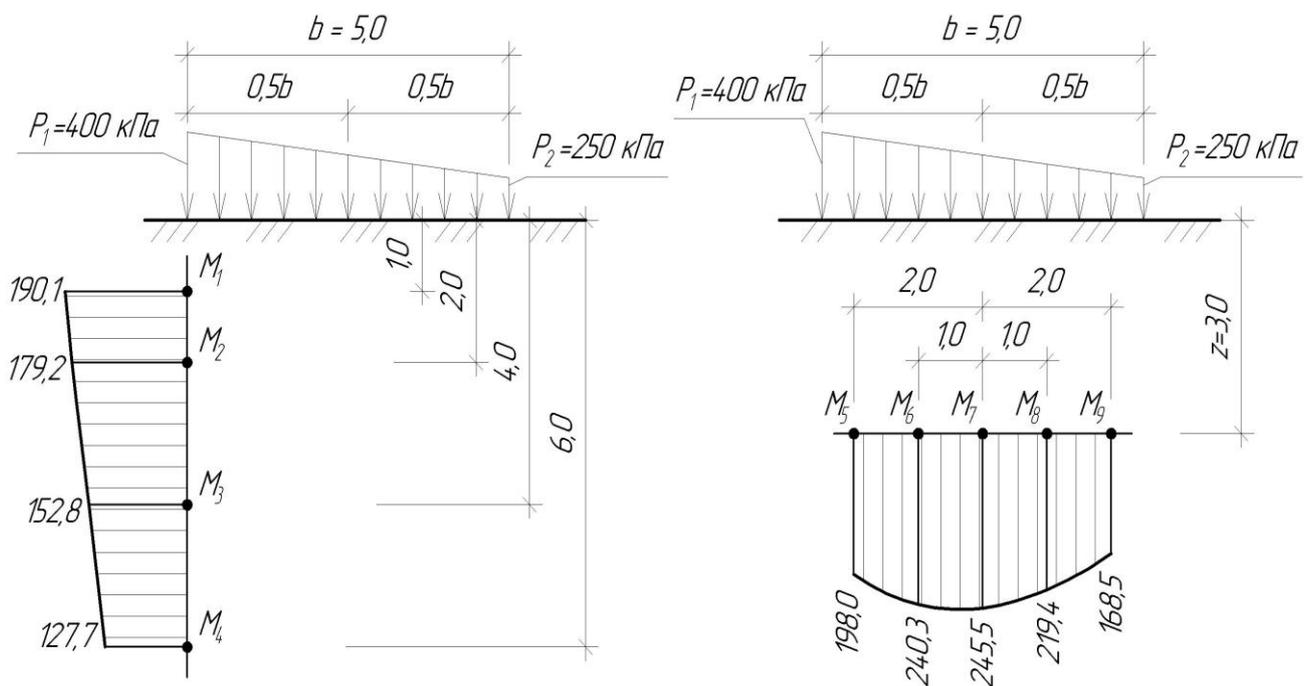


Рис. 12. Эпюры σ_z^T , кПа от трапецидальной нагрузки

3.3 Определение напряжений в массиве грунта от нагрузки, распреде-

ленной равномерно по прямоугольной площадке

Задача 12

Горизонтальная поверхность массива грунта загружена двумя нагрузками интенсивностью P_1 и P_2 равномерно распределенными по прямоугольным площадкам с размерами в плане $l_1 \times b_1$ и $l_2 \times b_2$ соответственно (рис. 13).

Определить величины вертикальных составляющих напряжений σ_z и построить эпюры напряжений от совместного действия нагрузок в точках на заданной вертикали.

Точки по вертикали расположить от поверхности грунта на глубине 1, 2, 4 и 6 м.

Исходные данные приведены в таблице 24.

Пример решения задачи 12 приведен для варианта 12.31.

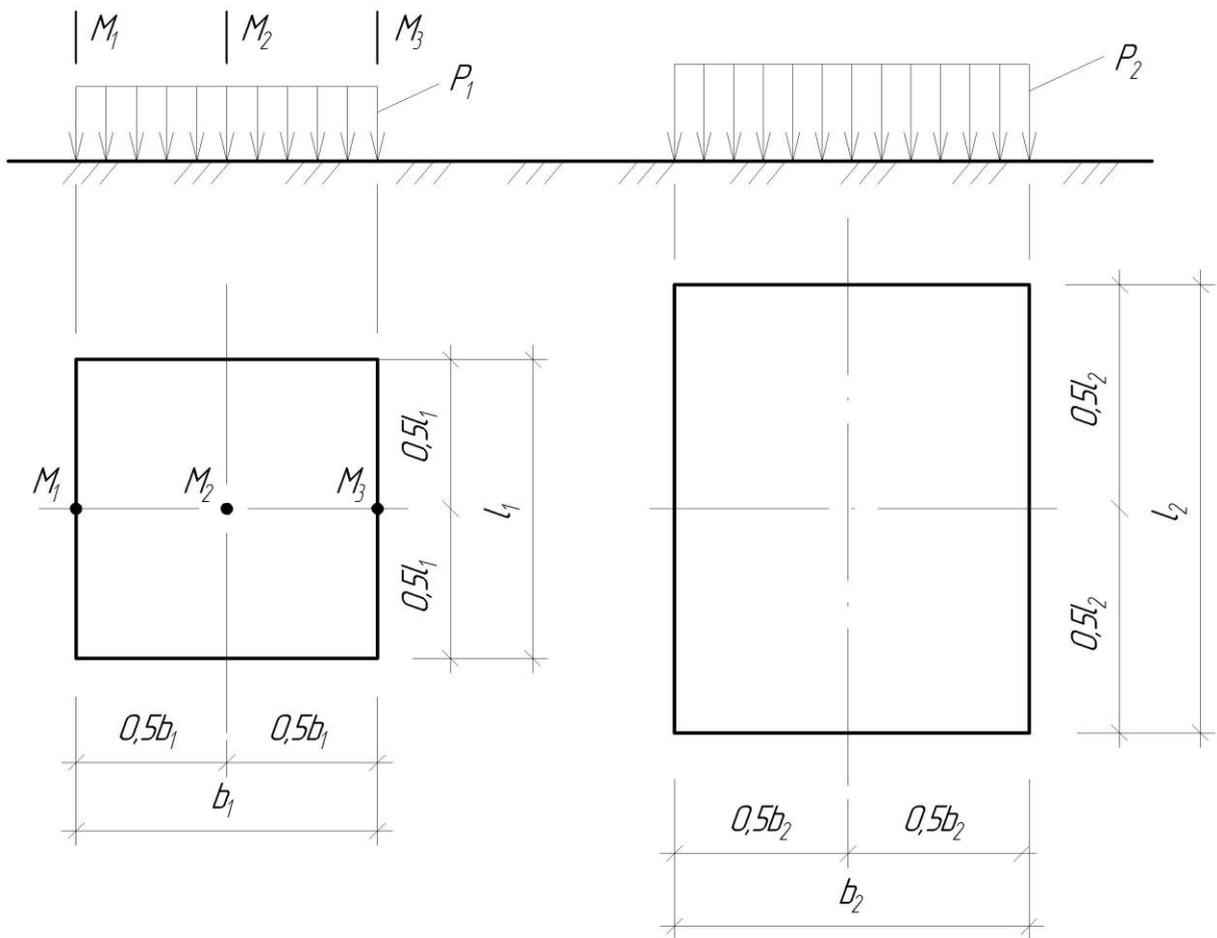


Рис. 13. Расчетная схема к задаче 12

Таблица 24

Исходные данные к задаче 12

| Вариант | l_1 , м | b_1 , м | l_2 , м | b_2 , м | L , м | P_1 , кПа | P_2 , кПа | Расчетная вертикаль |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------|---------------------|
| 12.1 | 4,8 | 2,4 | 6,0 | 3,0 | 4,5 | 400 | 250 | M_1 |
| 12.2 | 4,2 | 2,4 | 5,4 | 3,0 | 4,2 | 390 | 260 | M_2 |
| 12.3 | 3,6 | 2,4 | 4,8 | 3,0 | 3,9 | 380 | 270 | M_3 |
| 12.4 | 3,0 | 2,4 | 4,2 | 3,0 | 3,6 | 370 | 280 | M_1 |
| 12.5 | 2,4 | 2,4 | 3,6 | 3,0 | 3,3 | 360 | 290 | M_2 |
| 12.6 | 4,8 | 2,1 | 5,4 | 2,4 | 4,2 | 350 | 300 | M_3 |
| 12.7 | 4,2 | 2,1 | 4,8 | 2,4 | 3,9 | 340 | 310 | M_1 |
| 12.8 | 3,6 | 2,1 | 4,2 | 2,4 | 3,6 | 330 | 320 | M_2 |
| 12.9 | 3,3 | 2,1 | 3,9 | 2,4 | 3,3 | 320 | 330 | M_3 |
| 12.10 | 3,0 | 2,1 | 3,6 | 2,4 | 3,0 | 310 | 340 | M_1 |
| 12.11 | 4,2 | 1,8 | 4,8 | 2,1 | 3,9 | 300 | 350 | M_2 |
| 12.12 | 3,6 | 1,8 | 4,2 | 2,1 | 3,6 | 290 | 360 | M_3 |
| 12.13 | 3,0 | 1,8 | 3,6 | 2,1 | 3,3 | 280 | 370 | M_1 |
| 12.14 | 2,7 | 1,8 | 3,3 | 2,1 | 3,0 | 270 | 380 | M_2 |
| 12.15 | 2,4 | 1,8 | 3,0 | 2,1 | 2,7 | 260 | 390 | M_3 |
| 12.16 | 6,0 | 3,0 | 4,8 | 2,4 | 4,5 | 250 | 400 | M_1 |
| 12.17 | 5,4 | 3,0 | 4,2 | 2,4 | 4,2 | 260 | 390 | M_2 |
| 12.18 | 4,8 | 3,0 | 3,6 | 2,4 | 3,9 | 270 | 380 | M_3 |
| 12.19 | 4,2 | 3,0 | 3,0 | 2,4 | 3,6 | 280 | 370 | M_1 |
| 12.20 | 3,6 | 3,0 | 2,4 | 2,4 | 3,3 | 290 | 360 | M_2 |
| 12.21 | 5,4 | 2,4 | 4,8 | 2,1 | 4,2 | 300 | 350 | M_3 |
| 12.22 | 4,8 | 2,4 | 4,2 | 2,1 | 3,9 | 310 | 340 | M_1 |
| 12.23 | 4,2 | 2,4 | 3,6 | 2,1 | 3,6 | 320 | 330 | M_2 |
| 12.24 | 3,9 | 2,4 | 3,3 | 2,1 | 3,3 | 330 | 320 | M_3 |
| 12.25 | 3,6 | 2,4 | 3,0 | 2,1 | 3,0 | 340 | 310 | M_1 |
| 12.26 | 4,8 | 2,1 | 4,2 | 1,8 | 3,9 | 350 | 300 | M_2 |
| 12.27 | 4,2 | 2,1 | 3,6 | 1,8 | 3,6 | 360 | 290 | M_3 |
| 12.28 | 3,6 | 2,1 | 3,0 | 1,8 | 3,3 | 370 | 280 | M_1 |
| 12.29 | 3,3 | 2,1 | 2,7 | 1,8 | 3,0 | 380 | 270 | M_2 |
| 12.30 | 3,0 | 2,1 | 2,4 | 1,8 | 2,7 | 390 | 260 | M_3 |
| 12.31 | 2,6 | 2,2 | 3,8 | 3,2 | 3,6 | 280 | 360 | M_2 |

Значения коэффициентов α

| $\xi = 2z/b$ | Круглые фунда- менты | Прямоугольные фундаменты с отношением сторон $\eta = l/b$ | | | | | | | | | | | Ленточные фун- даменты при $\eta = 10$ |
|--------------|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| | | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,4 | 2,8 | 3,2 | 4,0 | 5,0 | |
| 0,0 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 0,4 | 0,949 | 0,960 | 0,968 | 0,972 | 0,974 | 0,975 | 0,976 | 0,976 | 0,977 | 0,977 | 0,977 | 0,977 | 0,977 |
| 0,8 | 0,756 | 0,800 | 0,830 | 0,848 | 0,859 | 0,866 | 0,870 | 0,875 | 0,878 | 0,879 | 0,880 | 0,881 | 0,881 |
| 1,2 | 0,547 | 0,606 | 0,652 | 0,682 | 0,703 | 0,717 | 0,727 | 0,740 | 0,746 | 0,749 | 0,753 | 0,754 | 0,755 |
| 1,6 | 0,390 | 0,449 | 0,496 | 0,532 | 0,558 | 0,578 | 0,593 | 0,612 | 0,623 | 0,629 | 0,630 | 0,639 | 0,642 |
| 2,0 | 0,285 | 0,336 | 0,379 | 0,414 | 0,441 | 0,463 | 0,481 | 0,505 | 0,520 | 0,529 | 0,540 | 0,545 | 0,550 |
| 2,4 | 0,214 | 0,257 | 0,294 | 0,325 | 0,352 | 0,374 | 0,392 | 0,419 | 0,437 | 0,449 | 0,462 | 0,470 | 0,477 |
| 2,8 | 0,165 | 0,201 | 0,232 | 0,260 | 0,284 | 0,304 | 0,321 | 0,350 | 0,369 | 0,383 | 0,400 | 0,410 | 0,420 |
| 3,2 | 0,130 | 0,160 | 0,187 | 0,210 | 0,232 | 0,251 | 0,267 | 0,294 | 0,314 | 0,329 | 0,348 | 0,360 | 0,374 |
| 3,6 | 0,106 | 0,130 | 0,153 | 0,173 | 0,192 | 0,209 | 0,224 | 0,250 | 0,270 | 0,285 | 0,305 | 0,320 | 0,337 |
| 4,0 | 0,087 | 0,108 | 0,127 | 0,145 | 0,161 | 0,176 | 0,190 | 0,214 | 0,233 | 0,248 | 0,270 | 0,285 | 0,306 |
| 4,4 | 0,073 | 0,091 | 0,107 | 0,122 | 0,137 | 0,150 | 0,163 | 0,185 | 0,203 | 0,218 | 0,239 | 0,256 | 0,280 |
| 4,8 | 0,062 | 0,077 | 0,092 | 0,105 | 0,118 | 0,130 | 0,141 | 0,161 | 0,178 | 0,192 | 0,213 | 0,230 | 0,258 |
| 5,2 | 0,053 | 0,066 | 0,079 | 0,091 | 0,102 | 0,112 | 0,123 | 0,141 | 0,157 | 0,170 | 0,191 | 0,208 | 0,239 |
| 5,6 | 0,046 | 0,058 | 0,069 | 0,079 | 0,089 | 0,099 | 0,108 | 0,124 | 0,139 | 0,152 | 0,172 | 0,189 | 0,223 |
| 6,0 | 0,040 | 0,051 | 0,060 | 0,070 | 0,078 | 0,087 | 0,095 | 0,110 | 0,124 | 0,136 | 0,155 | 0,172 | 0,208 |
| 6,4 | 0,036 | 0,045 | 0,053 | 0,062 | 0,070 | 0,077 | 0,085 | 0,098 | 0,111 | 0,122 | 0,141 | 0,158 | 0,196 |
| 6,8 | 0,032 | 0,040 | 0,048 | 0,055 | 0,062 | 0,069 | 0,076 | 0,088 | 0,100 | 0,110 | 0,128 | 0,144 | 0,184 |
| 7,2 | 0,028 | 0,036 | 0,042 | 0,049 | 0,056 | 0,062 | 0,068 | 0,080 | 0,090 | 0,100 | 0,117 | 0,133 | 0,175 |
| 7,6 | 0,024 | 0,032 | 0,038 | 0,044 | 0,050 | 0,056 | 0,062 | 0,072 | 0,082 | 0,091 | 0,107 | 0,123 | 0,166 |
| 8,0 | 0,022 | 0,029 | 0,035 | 0,040 | 0,046 | 0,051 | 0,056 | 0,066 | 0,075 | 0,084 | 0,098 | 0,113 | 0,158 |
| 8,4 | 0,021 | 0,026 | 0,032 | 0,037 | 0,042 | 0,046 | 0,051 | 0,060 | 0,069 | 0,077 | 0,091 | 0,105 | 0,150 |
| 8,8 | 0,019 | 0,024 | 0,029 | 0,034 | 0,038 | 0,042 | 0,047 | 0,055 | 0,063 | 0,070 | 0,084 | 0,098 | 0,144 |
| 9,2 | 0,018 | 0,022 | 0,026 | 0,031 | 0,035 | 0,039 | 0,043 | 0,051 | 0,058 | 0,065 | 0,078 | 0,091 | 0,137 |
| 9,6 | 0,016 | 0,020 | 0,024 | 0,028 | 0,032 | 0,036 | 0,040 | 0,047 | 0,054 | 0,060 | 0,072 | 0,085 | 0,132 |
| 10,0 | 0,015 | 0,019 | 0,022 | 0,026 | 0,030 | 0,033 | 0,037 | 0,044 | 0,050 | 0,056 | 0,067 | 0,079 | 0,126 |
| 11,0 | 0,011 | 0,017 | 0,020 | 0,023 | 0,027 | 0,029 | 0,033 | 0,040 | 0,044 | 0,050 | 0,060 | 0,071 | 0,114 |
| 12,0 | 0,009 | 0,015 | 0,018 | 0,020 | 0,024 | 0,026 | 0,028 | 0,034 | 0,038 | 0,044 | 0,051 | 0,060 | 0,104 |

Значения коэффициентов α_c

| $\xi = z/b$ | Значения $\eta = l/b$ | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3,0 |
| 0,0 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 |
| 0,2 | 0,2486 | 0,2489 | 0,2490 | 0,2491 | 0,2491 | 0,2491 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 |
| 0,4 | 0,2401 | 0,2420 | 0,2429 | 0,2434 | 0,2437 | 0,2439 | 0,2440 | 0,2441 | 0,2442 | 0,2442 | 0,2442 |
| 0,6 | 0,2229 | 0,2275 | 0,2300 | 0,2315 | 0,2324 | 0,2329 | 0,2333 | 0,2335 | 0,2337 | 0,2338 | 0,2339 |
| 0,8 | 0,1999 | 0,2075 | 0,2120 | 0,2147 | 0,2165 | 0,2176 | 0,2183 | 0,2188 | 0,2192 | 0,2194 | 0,2196 |
| 1,0 | 0,1752 | 0,1851 | 0,1911 | 0,1955 | 0,1981 | 0,1999 | 0,2012 | 0,2020 | 0,2026 | 0,2031 | 0,2034 |
| 1,2 | 0,1516 | 0,1626 | 0,1705 | 0,1758 | 0,1793 | 0,1818 | 0,1836 | 0,1849 | 0,1858 | 0,1865 | 0,1870 |
| 1,4 | 0,1308 | 0,1423 | 0,1508 | 0,1569 | 0,1613 | 0,1644 | 0,1667 | 0,1685 | 0,1696 | 0,1705 | 0,1712 |
| 1,6 | 0,1123 | 0,1241 | 0,1329 | 0,1396 | 0,1445 | 0,1482 | 0,1509 | 0,1530 | 0,1545 | 0,1557 | 0,1567 |
| 1,8 | 0,0969 | 0,1083 | 0,1172 | 0,1241 | 0,1294 | 0,1334 | 0,1365 | 0,1389 | 0,1408 | 0,1423 | 0,1434 |
| 2,0 | 0,0840 | 0,0947 | 0,1034 | 0,1103 | 0,1158 | 0,1202 | 0,1236 | 0,1263 | 0,1284 | 0,1309 | 0,1314 |
| 2,2 | 0,0732 | 0,0832 | 0,0917 | 0,0984 | 0,1039 | 0,1084 | 0,1120 | 0,1149 | 0,1172 | 0,1191 | 0,1205 |
| 2,4 | 0,0642 | 0,0734 | 0,0813 | 0,0879 | 0,0934 | 0,0979 | 0,1016 | 0,1047 | 0,1071 | 0,1092 | 0,1108 |
| 2,6 | 0,0566 | 0,0651 | 0,0725 | 0,0788 | 0,0842 | 0,0887 | 0,0924 | 0,0955 | 0,0981 | 0,1003 | 0,1020 |
| 2,8 | 0,0502 | 0,0580 | 0,0649 | 0,0709 | 0,0761 | 0,0805 | 0,0842 | 0,0875 | 0,0900 | 0,0923 | 0,0942 |
| 3,0 | 0,0447 | 0,0519 | 0,0583 | 0,0640 | 0,0680 | 0,0732 | 0,0769 | 0,0801 | 0,0828 | 0,0851 | 0,0870 |
| 3,2 | 0,0401 | 0,0467 | 0,0526 | 0,0580 | 0,0627 | 0,0668 | 0,0704 | 0,0735 | 0,0762 | 0,0786 | 0,0806 |
| 3,4 | 0,0361 | 0,0421 | 0,0477 | 0,0527 | 0,0571 | 0,0611 | 0,0646 | 0,0677 | 0,0704 | 0,0727 | 0,0747 |
| 3,6 | 0,0326 | 0,0382 | 0,0433 | 0,0480 | 0,0523 | 0,0561 | 0,0594 | 0,0624 | 0,0651 | 0,0674 | 0,0694 |
| 3,8 | 0,0296 | 0,0348 | 0,0395 | 0,0439 | 0,0479 | 0,0516 | 0,0548 | 0,0577 | 0,0603 | 0,0626 | 0,0646 |
| 4,0 | 0,0270 | 0,0318 | 0,0362 | 0,0403 | 0,0441 | 0,0474 | 0,0507 | 0,0535 | 0,0560 | 0,0588 | 0,0603 |
| 4,2 | 0,0247 | 0,0291 | 0,0333 | 0,0371 | 0,0407 | 0,0430 | 0,0469 | 0,0496 | 0,0521 | 0,0543 | 0,0563 |
| 4,4 | 0,0227 | 0,0268 | 0,0306 | 0,0343 | 0,0376 | 0,0407 | 0,0436 | 0,0462 | 0,0485 | 0,0507 | 0,0527 |
| 4,6 | 0,0209 | 0,0247 | 0,0283 | 0,0317 | 0,0348 | 0,0378 | 0,0405 | 0,0430 | 0,0453 | 0,0474 | 0,0493 |
| 4,8 | 0,0193 | 0,0229 | 0,0262 | 0,0294 | 0,0324 | 0,0352 | 0,0378 | 0,0402 | 0,0424 | 0,0444 | 0,0463 |
| 5,0 | 0,0179 | 0,0212 | 0,0243 | 0,0274 | 0,0302 | 0,0328 | 0,0353 | 0,0376 | 0,0403 | 0,0417 | 0,0435 |
| 6,0 | 0,0127 | 0,0151 | 0,0174 | 0,0196 | 0,0218 | 0,0238 | 0,0257 | 0,0276 | 0,0293 | 0,0310 | 0,0325 |
| 7,0 | 0,0094 | 0,0112 | 0,0130 | 0,0147 | 0,0164 | 0,0180 | 0,0195 | 0,0210 | 0,0224 | 0,0238 | 0,0251 |
| 8,0 | 0,0073 | 0,0087 | 0,0101 | 0,0114 | 0,0127 | 0,0140 | 0,0153 | 0,0165 | 0,0176 | 0,0187 | 0,0198 |
| 9,0 | 0,0169 | 0,0178 | 0,0186 | 0,0194 | 0,0202 | 0,0235 | 0,0262 | 0,0282 | 0,0298 | 0,0310 | 0,0319 |
| 10,0 | 0,0140 | 0,0147 | 0,0154 | 0,0162 | 0,0167 | 0,0198 | 0,0222 | 0,0242 | 0,0258 | 0,0270 | 0,0280 |

| $\xi = z/b$ | Значения $\eta = l/b$ | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 10,0 |
| 0,0 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 | 0,2500 |
| 0,2 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 | 0,2492 |
| 0,4 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 | 0,2443 |
| 0,6 | 0,2340 | 0,2340 | 0,2341 | 0,2341 | 0,2341 | 0,2342 | 0,2342 | 0,2342 | 0,2342 | 0,2342 | 0,2342 |
| 0,8 | 0,2198 | 0,2199 | 0,2199 | 0,2200 | 0,2200 | 0,2202 | 0,2202 | 0,2202 | 0,2202 | 0,2202 | 0,2202 |
| 1,0 | 0,2037 | 0,2039 | 0,2040 | 0,2041 | 0,2042 | 0,2044 | 0,2045 | 0,2045 | 0,2046 | 0,2046 | 0,2046 |
| 1,2 | 0,1873 | 0,1876 | 0,1878 | 0,1880 | 0,1882 | 0,1885 | 0,1887 | 0,1888 | 0,1888 | 0,1888 | 0,1888 |
| 1,4 | 0,1718 | 0,1722 | 0,1725 | 0,1728 | 0,1730 | 0,1735 | 0,1738 | 0,1739 | 0,1739 | 0,1739 | 0,1740 |
| 1,6 | 0,1574 | 0,1580 | 0,1584 | 0,1587 | 0,1590 | 0,1598 | 0,1601 | 0,1602 | 0,1603 | 0,1604 | 0,1604 |
| 1,8 | 0,1443 | 0,1450 | 0,1455 | 0,1460 | 0,1463 | 0,1474 | 0,1478 | 0,1480 | 0,1481 | 0,1482 | 0,1482 |
| 2,0 | 0,1324 | 0,1332 | 0,1339 | 0,1345 | 0,1350 | 0,1363 | 0,1368 | 0,1371 | 0,1372 | 0,1373 | 0,1374 |
| 2,2 | 0,1218 | 0,1227 | 0,1235 | 0,1242 | 0,1248 | 0,1264 | 0,1271 | 0,1274 | 0,1276 | 0,1277 | 0,1277 |
| 2,4 | 0,1122 | 0,1133 | 0,1142 | 0,1150 | 0,1156 | 0,1175 | 0,1184 | 0,1188 | 0,1190 | 0,1191 | 0,1192 |
| 2,6 | 0,1035 | 0,1047 | 0,1058 | 0,1066 | 0,1073 | 0,1095 | 0,1106 | 0,1111 | 0,1113 | 0,1115 | 0,1116 |
| 2,8 | 0,0957 | 0,0970 | 0,0982 | 0,0991 | 0,0999 | 0,1024 | 0,1036 | 0,1041 | 0,1045 | 0,1047 | 0,1048 |
| 3,0 | 0,0887 | 0,0901 | 0,0913 | 0,0923 | 0,0931 | 0,0959 | 0,0973 | 0,0980 | 0,0983 | 0,0986 | 0,0987 |
| 3,2 | 0,0823 | 0,0838 | 0,0850 | 0,0861 | 0,0870 | 0,0900 | 0,0916 | 0,0923 | 0,0928 | 0,0930 | 0,0933 |
| 3,4 | 0,0765 | 0,0780 | 0,0793 | 0,0804 | 0,0814 | 0,0847 | 0,0864 | 0,0873 | 0,0877 | 0,0880 | 0,0882 |
| 3,6 | 0,0712 | 0,0728 | 0,0741 | 0,0753 | 0,0763 | 0,0799 | 0,0816 | 0,0826 | 0,0832 | 0,0835 | 0,0837 |
| 3,8 | 0,0664 | 0,0680 | 0,0694 | 0,0706 | 0,0717 | 0,0753 | 0,0773 | 0,0784 | 0,0790 | 0,0794 | 0,0796 |
| 4,0 | 0,0620 | 0,0636 | 0,0650 | 0,0663 | 0,0674 | 0,0712 | 0,0733 | 0,0745 | 0,0752 | 0,0756 | 0,0758 |
| 4,2 | 0,0581 | 0,0596 | 0,0610 | 0,0623 | 0,0634 | 0,0674 | 0,0696 | 0,0709 | 0,0716 | 0,0721 | 0,0724 |
| 4,4 | 0,0544 | 0,0560 | 0,0574 | 0,0586 | 0,0597 | 0,0639 | 0,0662 | 0,0676 | 0,0684 | 0,0689 | 0,0692 |
| 4,6 | 0,0510 | 0,0526 | 0,0540 | 0,0553 | 0,0564 | 0,0606 | 0,0630 | 0,0644 | 0,0654 | 0,0659 | 0,0663 |
| 4,8 | 0,0480 | 0,0495 | 0,0509 | 0,0522 | 0,0533 | 0,0576 | 0,0601 | 0,0616 | 0,0626 | 0,0631 | 0,0635 |
| 5,0 | 0,0451 | 0,0466 | 0,0480 | 0,0493 | 0,0504 | 0,0547 | 0,0573 | 0,0589 | 0,0599 | 0,0606 | 0,0610 |
| 6,0 | 0,0340 | 0,0353 | 0,0366 | 0,0377 | 0,0388 | 0,0431 | 0,0460 | 0,0479 | 0,0491 | 0,0500 | 0,0506 |
| 7,0 | 0,0263 | 0,0275 | 0,0286 | 0,0296 | 0,0306 | 0,0346 | 0,036 | 0,0396 | 0,0411 | 0,0421 | 0,0428 |
| 8,0 | 0,0209 | 0,0219 | 0,0228 | 0,0237 | 0,0246 | 0,0283 | 0,0311 | 0,0332 | 0,0348 | 0,0359 | 0,0367 |
| 9,0 | 0,0169 | 0,0178 | 0,0186 | 0,0194 | 0,0202 | 0,0235 | 0,0262 | 0,0282 | 0,0298 | 0,0310 | 0,0319 |
| 10,0 | 0,0140 | 0,0147 | 0,0154 | 0,0162 | 0,0167 | 0,0198 | 0,0222 | 0,0242 | 0,0258 | 0,0270 | 0,0280 |

Решение

Для точек массива грунта, расположенных под центром прямоугольной площадки загрузки, вертикальное сжимающее напряжение определяется по формуле 39

$$\sigma_z = \alpha \cdot P, \quad (39)$$

где α – коэффициент, принимаемый в зависимости от величин относительных координат $\xi = 2z/b$ и $\eta = l/b$ по таблице 25, здесь l и b – длина и ширина площадки загрузки, z – глубина рассматриваемой точки M от горизонтальной поверхности массива грунта;

P – интенсивность равномерно распределенной нагрузки.

Для точек массива грунта, расположенных под углом прямоугольной площади загрузки, вертикальные сжимающие напряжения определяются по формуле 40

$$\sigma_{zc} = \alpha_c \cdot P, \quad (40)$$

где α_c – коэффициент угловых напряжений, принимаемый в зависимости от величин относительных координат $\xi = z/b$ и $\eta = l/b$ по таблице 26.

Для определения сжимающих напряжений в любой точке массива грунта, как под загруженной площадью, так и вне ее используется метод угловых точек. Этот метод состоит в следующем: загруженную площадь разбивают на такие прямоугольники, чтобы рассматриваемая точка оказалась угловой, напряжения σ_z в этой точке определяют как алгебраическую сумму напряжений от площадей загрузки, для которой она является угловой. Рассматривают три основных случая:

1. Точка M находится на контуре загруженной площади (рис. 14,а). Напряжение σ_z в точке M определяется как сумма двух угловых напряжений от прямоугольных загруженных площадей $Mabe$ и $Mecd$

$$\sigma_z = (\alpha_{c,1} + \alpha_{c,2}) \cdot P, \quad (41)$$

где $\alpha_{c,1}$ и $\alpha_{c,2}$ – коэффициенты угловых напряжений для прямоугольников загрузки $Mabe$ и $Mecd$.

2. Точка M – внутри прямоугольника загрузки (рис. 14,б).

$$\sigma_z = (\alpha_{c,1} + \alpha_{c,2} + \alpha_{c,3} + \alpha_{c,4}) \cdot P, \quad (42)$$

где $\alpha_{c,1}, \alpha_{c,2}, \alpha_{c,3}, \alpha_{c,4}$ – коэффициенты угловых напряжений для прямоугольников загрузки $ahMg, hbeM, Mecf, gMfd$.

3. Точка M – вне прямоугольника давлений (рис. 14,в).

$$\sigma_z = (\alpha_{c,1} + \alpha_{c,2} - \alpha_{c,3} - \alpha_{c,4}) \cdot P, \quad (43)$$

где $\alpha_{c,1}, \alpha_{c,2}, \alpha_{c,3}, \alpha_{c,4}$ – коэффициенты угловых напряжений для прямоугольников $Mhbe$ и $Mecf$ со знаком «плюс» и $Mhag$ и $Mgdf$ со знаком «минус».

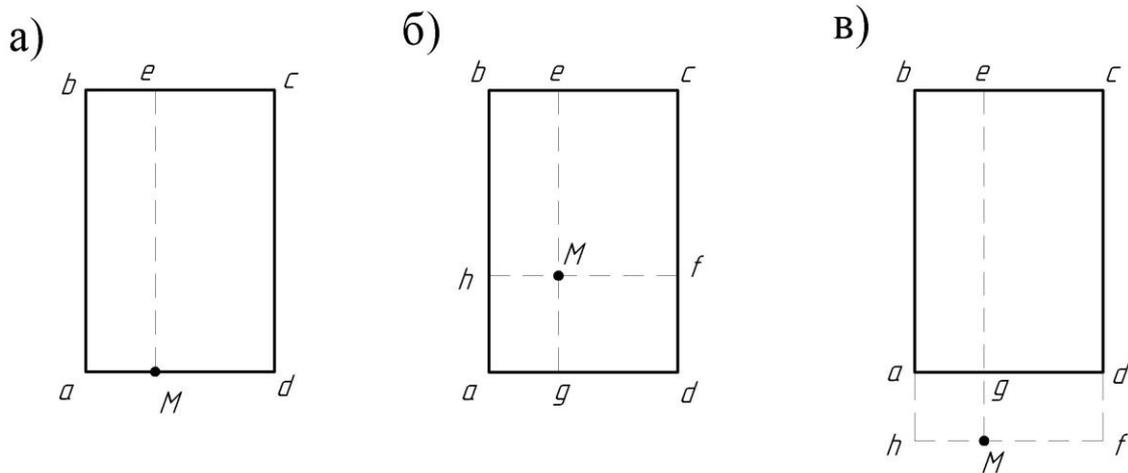


Рис. 14. Схемы разбивки прямоугольной площади загрузки при расчете напряжений по методу угловых точек

В рассматриваемой задаче 12.31 (рис.15) вертикальные сжимающие напряжения в точках массива грунта для вертикали, проходящей через центр первой площадки, определяются по формуле

$$\sigma_z = \alpha \cdot P_1 + (\alpha_{c,1} + \alpha_{c,2} - \alpha_{c,3} - \alpha_{c,4}) \cdot P_2 \quad (44)$$

где α – коэффициент центральных напряжений для прямоугольной площади, загруженной нагрузкой P_1 ;

$\alpha_{c,1}, \alpha_{c,2}, \alpha_{c,3}, \alpha_{c,4}$ – коэффициенты угловых напряжений соответственно для прямоугольников $Mgbf, Mfcf, Mgae$ и $Medh$ (рис. 16).

Так как прямоугольники $Mgbf \cong Mfch$ и $Mgae \cong Medh$, то соответству-

ющие им угловые коэффициенты равны между собой, то есть $\alpha_{с,1} = \alpha_{с,2}$ и $\alpha_{с,3} = \alpha_{с,4}$.

Расчет сжимающих напряжений σ_z выполняется в табличной форме (табл.27). Эпюры сжимающих напряжений представлены на рисунке 16.

Таблица 27

Результаты расчетов к решению задачи 12.31

| Заданная нагрузка | Прямоугольники загрузки | Расчетные параметры прямоугольников загрузки | Расчетные точки | | | |
|--|--|--|-----------------------|-------|-------|-------|
| | | | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 |
| | | | Глубина точки z , м | | | |
| | | | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 |
| $P_1 = 280$ кПа | Площадь, загруженная нагрузкой интенсивностью P_1 | l , м | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 |
| | | b , м | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |
| | | $\eta = l/b$ | 1,182 | 1,182 | 1,182 | 1,182 |
| | | $\zeta = 2z/b$ | 0,909 | 1,818 | 3,636 | 5,455 |
| | | α | 0,779 | 0,424 | 0,148 | 0,071 |
| | $\sigma_{z,1} = \alpha \cdot P_1$, кПа | | 218,1 | 118,7 | 41,4 | 19,9 |
| $P_2 = 360$ кПа | $Mgbf$ и $Mfch$ | l , м | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,2 |
| | | b , м | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 |
| | | $\eta = l/b$ | 2,737 | 2,737 | 2,737 | 2,737 |
| | | $\zeta' = 2/b$ | 0,526 | 1,053 | 2,105 | 3,158 |
| | | $\alpha_{c,1} = \alpha_{c,2} = \alpha/4$ | 0,238 | 0,199 | 0,124 | 0,079 |
| | $Mgae$ и $Medh$ | l , м | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| | | b , м | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 |
| | | $\eta = l/b$ | 1,053 | 1,053 | 1,053 | 1,053 |
| | | $\zeta' = 2/b$ | 0,526 | 1,053 | 2,105 | 3,158 |
| | | $\alpha_{c,3} = \alpha_{c,4} = \alpha/4$ | 0,231 | 0,172 | 0,081 | 0,043 |
| | $\sigma_{z,2} = 2 \cdot (\alpha_{c,1} - \alpha_{c,3,4}) \cdot P_2$, кПа | | 5,0 | 19,4 | 31,0 | 25,9 |
| $\sigma_z = \sigma_{z,1} + \sigma_{z,2}$, кПа | | 223,1 | 138,1 | 72,4 | 45,8 | |

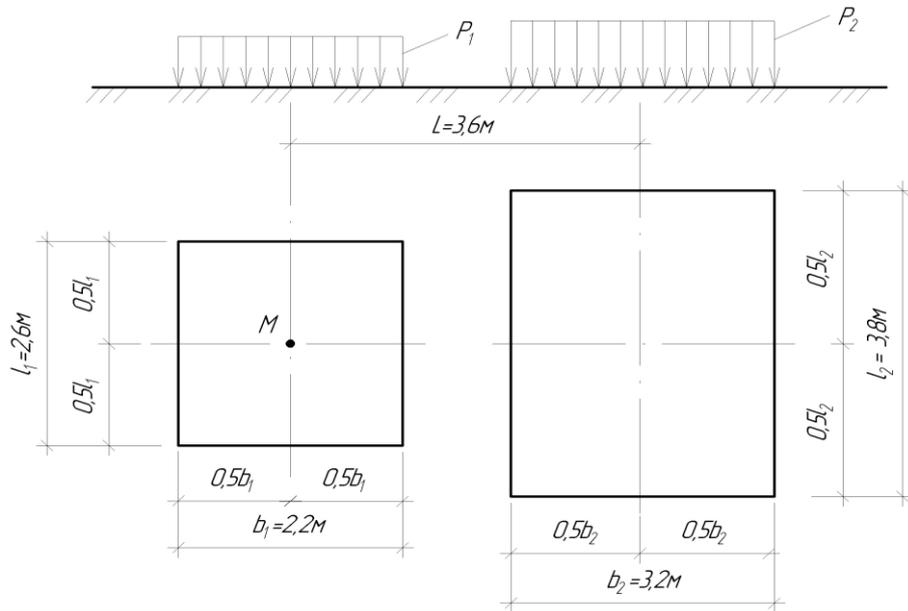
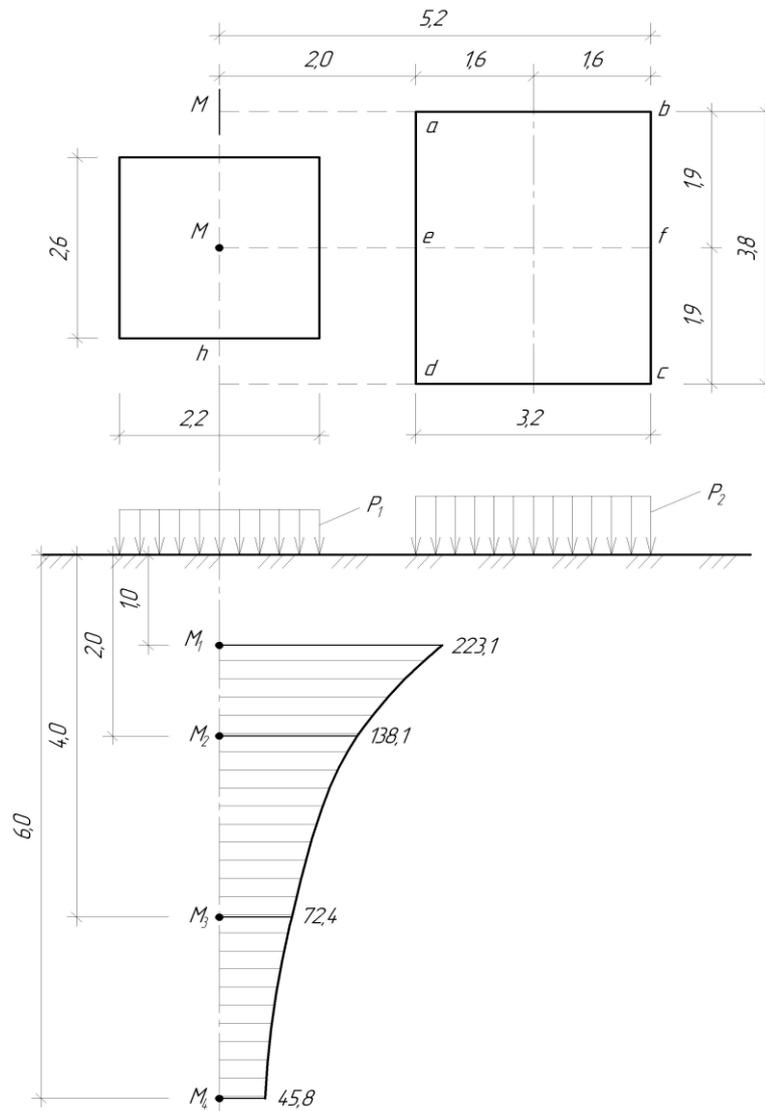


Рис. 15. Расчетная схема к задаче 12.31

Рис. 16. Расчетная схема и эпюра сжимающих напряжений σ_z , кПа

4 ТЕОРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ГРУНТОВ

4.1 Прочность и устойчивость оснований сооружений

Задача 13

Фундамент ленточный шириной b (или круглый диаметром D) заглублен в грунт на глубину d . В основании фундамента залегает пылевато-глинистый грунт со следующими характеристиками: γ - удельный вес грунта; φ - угол внутреннего трения; c - удельное сцепление.

Определить: а) начальное критическое давление; б) условную критическую нагрузку; в) предельное давление на грунт.

Исходные данные приведены в таблице 28.

Пример решения задачи 13 приведен для варианта 13.31

Решение

Начальное критическое давление

$$p_{cr}^b = \frac{\pi(\gamma' \cdot d + c \cdot ctg\varphi)}{ctg\varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma' \cdot d, \quad (45)$$

где γ' – удельный вес грунта, залегающего выше подошвы фундамента;

$$\gamma' = 0,95 \cdot \gamma = 0,95 \cdot 18,0 = 17,1 \text{ кН/м}^3.$$

$$p_{cr}^b = \frac{3,14 \cdot (17,1 \cdot 0,6 + 12 \cdot ctg 22^\circ)}{ctg 22^\circ + \frac{22^\circ \cdot 3,14}{180^\circ} - \frac{3,14}{2}} + 17,1 \cdot 0,6 = 101,71 \text{ кПа.}$$

Условная критическая нагрузка

$$p_{cr}^c = \frac{\pi(0,25 \cdot \gamma \cdot b + \gamma' \cdot d + c \cdot ctg\varphi)}{ctg\varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma' \cdot d, \quad (46)$$

$$p_{cr}^c = \frac{3,14 \cdot (0,25 \cdot 18 \cdot 1,2 + 17,1 \cdot 0,6 + 12 \cdot ctg 22^\circ)}{ctg 22^\circ + \frac{22^\circ \cdot 3,14}{180^\circ} - \frac{3,14}{2}} + 17,1 \cdot 0,6 = 120,88 \text{ кПа.}$$

Исходные данные к задаче 13

| Вариант | Форма фундамента | Ширина b (диаметр D), м | d , м | γ , кН/м ³ | φ , град | c , кПа |
|---------|------------------|------------------------------|---------|------------------------------|------------------|-----------|
| 13.1 | ленточный | 0,6 | 1,2 | 17,4 | 24 | 13 |
| 13.2 | круглый | 7,5 | 2,4 | 17,7 | 22 | 12 |
| 13.3 | ленточный | 0,8 | 1,5 | 18,0 | 20 | 15 |
| 13.4 | круглый | 9,0 | 2,4 | 18,2 | 18 | 10 |
| 13.5 | ленточный | 1,0 | 1,8 | 18,4 | 16 | 17 |
| 13.6 | круглый | 10,5 | 3,0 | 18,6 | 14 | 37 |
| 13.7 | ленточный | 1,2 | 2,1 | 18,8 | 30 | 4 |
| 13.8 | круглый | 12,0 | 3,0 | 19,0 | 32 | 5 |
| 13.9 | ленточный | 1,4 | 2,4 | 19,2 | 34 | 6 |
| 13.10 | круглый | 13,5 | 3,6 | 19,5 | 36 | 8 |
| 13.11 | ленточный | 1,6 | 1,2 | 18,5 | 30 | 21 |
| 13.12 | круглый | 15,0 | 2,4 | 18,3 | 29 | 17 |
| 13.13 | ленточный | 2,0 | 1,5 | 18,1 | 27 | 19 |
| 13.14 | круглый | 6,0 | 2,4 | 19,0 | 28 | 47 |
| 13.15 | ленточный | 2,4 | 1,8 | 18,8 | 26 | 37 |
| 13.16. | круглый | 7,2 | 3,0 | 18,6 | 24 | 31 |
| 13.17 | ленточный | 2,8 | 2,1 | 18,4 | 23 | 25 |
| 13.18 | круглый | 8,4 | 3,0 | 19,8 | 18 | 57 |
| 13.19 | ленточный | 3,2 | 2,4 | 19,6 | 16 | 43 |
| 13.20. | круглый | 9,6 | 3,6 | 19,4 | 15 | 45 |
| 13.21 | ленточный | 1,2 | 1,2 | 18,7 | 25 | 40 |
| 13.22 | круглый | 10,8 | 2,4 | 19,7 | 17 | 50 |
| 13.23 | ленточный | 1,4 | 1,5 | 19,6 | 19 | 48 |
| 13.24 | круглый | 13,2 | 2,4 | 19,3 | 20 | 42 |
| 13.25 | ленточный | 1,6 | 1,8 | 19,2 | 21 | 38 |
| 13.26 | круглый | 14,4 | 3,0 | 19,1 | 22 | 36 |
| 13.27 | ленточный | 2,0 | 2,1 | 19,0 | 23 | 34 |
| 13.28 | круглый | 11,4 | 3,0 | 19,5 | 24 | 39 |
| 13.29 | ленточный | 2,4 | 2,4 | 19,4 | 21 | 23 |
| 13.30 | круглый | 10,2 | 3,6 | 19,3 | 22 | 28 |
| 13.31 | ленточный | 1,2 | 0,6 | 18,0 | 22 | 12 |

Условную критическую нагрузку можно также определить по формуле (47)

$$p_{cr}^c = M_\gamma \cdot \gamma \cdot b + M_q \cdot \gamma' \cdot d + M_c \cdot c, \quad (47)$$

где M_γ, M_q, M_c – коэффициенты, принимаемые по табл. 4 [15].

$$p_{cr}^c = 0,61 \cdot 18 \cdot 1,2 + 3,44 \cdot 17,1 \cdot 0,6 + 6,04 \cdot 12 = 120,95 \text{ кПа.}$$

При центральном загрузении среднее предельное давление по подошве жестких фундаментов с учетом возникновения под ними уплотненного ядра находят по формулам 48 и 49

при полосовой нагрузке

$$p_{u,st} = N_{\gamma,st} \cdot \frac{\gamma \cdot b}{2} + N_{q,st} \cdot \gamma' \cdot d + N_{c,st} \cdot c, \quad (48)$$

при круглом фундаменте

$$p_{u,c} = N_{\gamma,c} \cdot \frac{\gamma \cdot D}{2} + N_{q,c} \cdot \gamma' \cdot d + N_{c,c} \cdot c, \quad (49)$$

где $N_{\gamma,st}$, $N_{q,st}$, $N_{c,st}$, $N_{\gamma,c}$, $N_{q,c}$, $N_{c,c}$ – коэффициенты несущей способности, принимаемые по табл. 8.1 [5].

$$p_{u,st} = 7,6 \cdot \frac{18,0 \cdot 1,2}{2} + 8,0 \cdot 17,1 \cdot 0,6 + 17,2 \cdot 12 = 371 \text{ кПа.}$$

4.2 Устойчивость откосов и склонов

Задача 14

Определить форму поверхности равноустойчивого откоса высотой H при наличии на горизонтальной поверхности откоса равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q (рис. 17).

Расчетные характеристики грунта: γ - удельный вес грунта; φ - угол внутреннего трения; c - удельное сцепление.

Исходные данные приведены в таблице 29.

Пример решения задачи 14 приведен для варианта 14.31.

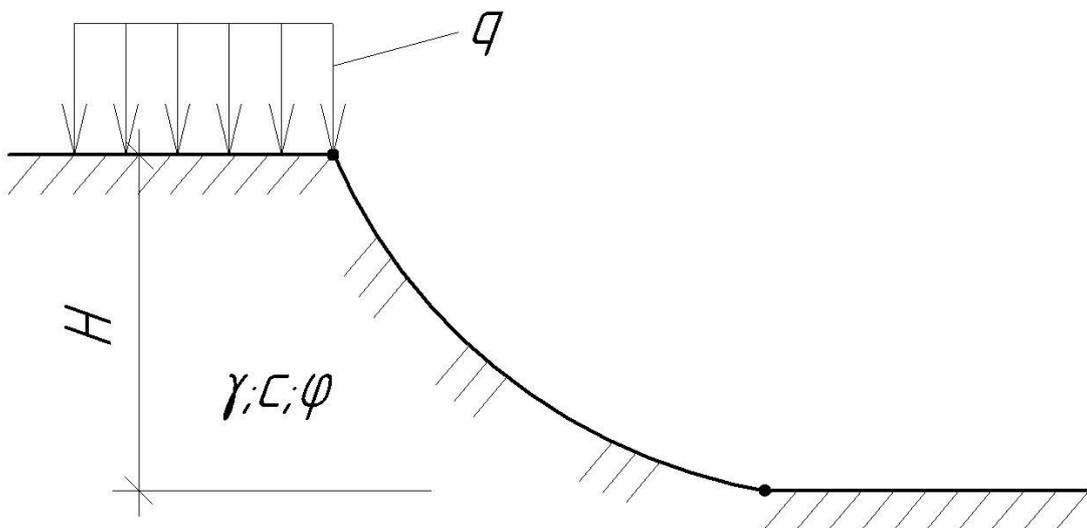


Рис. 17. Расчетная схема к задаче 14

Исходные данные к задаче 14

| Вариант | H , м | q , кПа | γ , кН/м ³ | φ , град | c , кПа |
|---------|---------|-----------|------------------------------|------------------|-----------|
| 14.1 | 8,0 | 100 | 18,5 | 30 | 21 |
| 14.2 | 9,0 | 110 | 18,3 | 29 | 17 |
| 14.3 | 10,0 | 120 | 18,1 | 27 | 19 |
| 14.4 | 11,0 | 130 | 19,0 | 28 | 47 |
| 14.5 | 12,0 | 140 | 18,8 | 26 | 37 |
| 14.6 | 8,0 | 150 | 18,6 | 24 | 31 |
| 14.7 | 9,0 | 160 | 18,4 | 23 | 25 |
| 14.8 | 10,0 | 170 | 19,8 | 18 | 57 |
| 14.9 | 11,0 | 180 | 19,6 | 16 | 43 |
| 14.10 | 12,0 | 190 | 19,4 | 15 | 45 |
| 14.11 | 8,0 | 200 | 18,7 | 25 | 40 |
| 14.12 | 9,0 | 100 | 19,7 | 17 | 50 |
| 14.13 | 10,0 | 110 | 19,6 | 19 | 48 |
| 14.14 | 11,0 | 120 | 19,3 | 20 | 42 |
| 14.15 | 12,0 | 130 | 19,2 | 21 | 38 |
| 14.16 | 8,0 | 140 | 19,1 | 22 | 36 |
| 14.17 | 9,0 | 150 | 19,0 | 23 | 34 |
| 14.18 | 10,0 | 160 | 19,5 | 24 | 39 |
| 14.19 | 11,0 | 170 | 19,4 | 21 | 23 |
| 14.20 | 12,0 | 180 | 19,3 | 22 | 28 |
| 14.21 | 8,0 | 190 | 18,9 | 25 | 37 |
| 14.22 | 9,0 | 200 | 19,1 | 15 | 39 |
| 14.23 | 10,0 | 130 | 19,8 | 14 | 36 |
| 14.24 | 11,0 | 140 | 19,7 | 16 | 41 |
| 14.25 | 12,0 | 150 | 19,9 | 18 | 47 |
| 14.26 | 8,0 | 160 | 20,5 | 19 | 54 |
| 14.27 | 9,0 | 170 | 20,2 | 20 | 58 |
| 14.28 | 10,0 | 180 | 18,5 | 15 | 48 |
| 14.29 | 11,0 | 190 | 18,4 | 26 | 47 |
| 14.30 | 12,0 | 200 | 18,6 | 18 | 50 |
| 14.31 | 10,0 | 200 | 20,0 | 14 | 40 |

Решение

Постоянная величина B определяется по формуле 50

$$B = \frac{ctg\varphi}{2} \cdot \ln \left[\left(\frac{q}{c \cdot ctg\varphi} + 1 \right) \cdot \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \right]. \quad (50)$$

Подставляя численные значения, получим

$$B = \frac{ctg14^0}{2} \cdot \ln \left[\left(\frac{200}{40 \cdot ctg14^0} + 1 \right) \cdot \frac{1 - \sin14^0}{1 + \sin14^0} \right] = 0,6333.$$

Начальный угол θ_0 откоса

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} - B = \frac{3,14}{2} - 0,6333 = 0,9375.$$

Напряжение p вдоль отрицательной полуоси

$$p = c \cdot ctg\varphi \cdot \left[\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot \exp((\pi - 2\varphi) \cdot tg\varphi) - 1 \right]. \quad (51)$$

$$p = 40 \cdot ctg14^\circ \cdot \left[\frac{1 + \sin14^\circ}{1 - \sin14^\circ} \cdot \exp((3,14 - 0,2443) \cdot tg14^\circ) - 1 \right] = 348,8 \text{ кПа.}$$

Определяем значение коэффициента A по формуле (52)

$$A = \frac{(1 + 2\sin\varphi) \cdot (p - q)}{\gamma \cdot (\theta_0 - \varphi) \cdot (1 + \sin\varphi)}. \quad (52)$$

$$A = \frac{(1 + 2\sin14^\circ) \cdot (348,8 - 200)}{20 \cdot (0,9375 - 0,2443) \cdot (1 + \sin14^\circ)} = 12,83 \text{ м.}$$

Для определения координат точки на поверхности равноустойчивого откоса используем формулы (53) и (54)

$$z = (v + w \cdot tg\varphi) \cdot \cos^2\varphi; \quad (53)$$

$$y = (w + v \cdot tg\varphi) \cdot \cos^2\varphi. \quad (54)$$

Значение v в этих формулах определяется по формуле (55)

$$v = -A \cdot (B + \varphi) + A \cdot \arccos [\exp(-w/A) \cdot \cos(B + \varphi)]. \quad (55)$$

Подставляя значения A , B , φ в уравнения для v , z , y , получаем следующие расчетные формулы ($\varphi = 0,2443$ рад):

$$v = -11,26 + 12,83 \cdot \arccos [0,6390 \cdot \exp(-0,07796w)]$$

$$z = (v + 0,2493w) \cdot 0,9415$$

$$y = (w + 0,2493v) \cdot 0,9415.$$

Задаваясь значениями $w = 1, 2, 3 \dots n$, получаем соответствующие значения v , z , y (табл.30).

На основании произведенных в таблице 30 расчетов строится поверхность равнопрочного откоса и определяется его крутизна.

Как видно из рисунка 18, при уклоне 1:1,5 откос будет обладать достаточной устойчивостью.

Таблица 30

| w | $v, м$ | $z, м$ | $y, м$ |
|-----|--------|---------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,7799 | 0,9690 | 0,7584 |
| 2 | 1,4714 | 1,8548 | 1,5376 |
| 3 | 2,0900 | 2,6719 | 2,3338 |
| 4 | 2,6470 | 3,4310 | 3,1446 |
| 5 | 3,1510 | 4,1403 | 3,9677 |
| 6 | 3,6089 | 4,8061 | 4,8017 |
| 8 | 4,4073 | 6,0273 | 6,4972 |
| 10 | 5,0762 | 7,1265 | 8,2232 |
| 12 | 5,6401 | 8,1269 | 9,9737 |
| 15 | 6,3284 | 9,4791 | 12,6366 |
| 20 | 7,1618 | 11,4373 | 17,1484 |

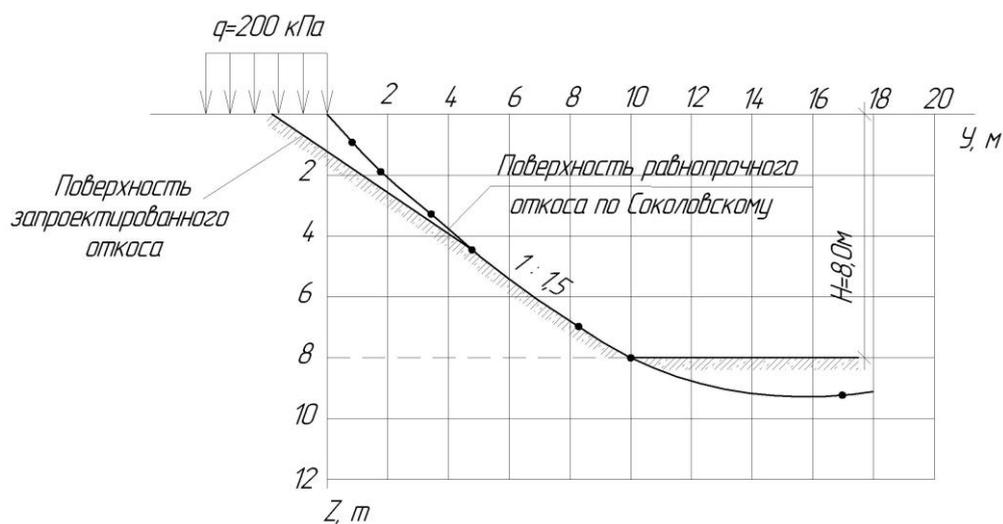


Рис.18. Построение поверхности равноустойчивого откоса при наличии равномерно распределенной нагрузки

Задача 15

Для расчетной схемы (рис. 19) требуется определить методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения величину коэффициента устойчивости откоса высотой H и коэффициентом заложения m .

Расчетные характеристики грунта: γ - удельный вес грунта; φ - угол внутреннего трения; c - удельное сцепление.

Исходные данные приведены в таблице 31.

Пример решения задачи 15 приведен для варианта 15.31.

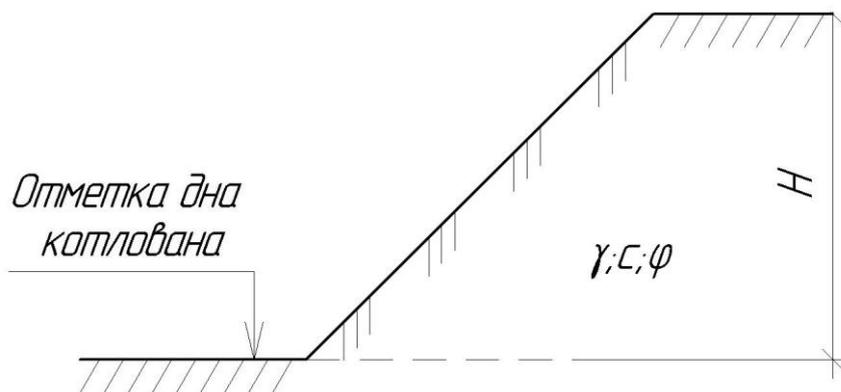


Рис. 19. Расчетная схема к задаче 15

Таблица 31

Исходные данные к задаче 15

| Вариант | H , м | t | γ , кН/м ³ | φ , град | c , кПа |
|---------|---------|-----|------------------------------|------------------|-----------|
|---------|---------|-----|------------------------------|------------------|-----------|

| | | | | | |
|-------|------|-----|------|----|----|
| 15.1 | 8,0 | 1,5 | 18,6 | 24 | 31 |
| 15.2 | 9,0 | 2,0 | 18,4 | 23 | 25 |
| 15.3 | 10,0 | 1,5 | 19,8 | 18 | 57 |
| 15.4 | 11,0 | 2,0 | 19,6 | 16 | 43 |
| 15.5 | 12,0 | 1,5 | 19,4 | 15 | 45 |
| 15.6 | 13,0 | 2,0 | 18,7 | 25 | 40 |
| 15.7 | 14,0 | 1,5 | 19,7 | 17 | 50 |
| 15.8 | 15,0 | 2,0 | 19,6 | 19 | 48 |
| 15.9 | 16,0 | 1,5 | 19,3 | 20 | 42 |
| 15.10 | 8,0 | 2,0 | 19,2 | 21 | 38 |
| 15.11 | 9,0 | 1,5 | 19,1 | 22 | 36 |
| 15.12 | 10,0 | 2,0 | 19,0 | 23 | 34 |
| 15.13 | 11,0 | 1,5 | 19,5 | 24 | 39 |
| 15.14 | 12,0 | 2,0 | 19,4 | 21 | 23 |
| 15.15 | 13,0 | 1,5 | 19,3 | 22 | 28 |
| 15.16 | 14,0 | 2,0 | 17,4 | 24 | 13 |
| 15.17 | 15,0 | 1,5 | 17,7 | 22 | 12 |
| 15.18 | 16,0 | 2,0 | 18,0 | 20 | 15 |
| 15.19 | 9,0 | 1,5 | 18,2 | 18 | 10 |
| 15.20 | 10,0 | 2,0 | 18,4 | 16 | 17 |
| 15.21 | 11,0 | 1,5 | 18,6 | 14 | 37 |
| 15.22 | 12,0 | 2,0 | 18,8 | 30 | 4 |
| 15.23 | 13,0 | 1,5 | 19,0 | 32 | 5 |
| 15.24 | 14,0 | 2,0 | 19,2 | 34 | 6 |
| 15.25 | 15,0 | 1,5 | 19,5 | 36 | 8 |
| 15.26 | 16,0 | 2,0 | 18,5 | 30 | 21 |
| 15.27 | 8,0 | 1,5 | 18,3 | 29 | 17 |
| 15.28 | 9,0 | 2,0 | 18,1 | 27 | 19 |
| 15.29 | 10,0 | 1,5 | 19,0 | 28 | 47 |
| 15.30 | 11,0 | 2,0 | 18,8 | 26 | 37 |
| 15.31 | 8,0 | 1,5 | 19,5 | 16 | 21 |

Решение

В проектной практике широко распространен расчет устойчивости откосов по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Проверка устойчивости сводится к простейшим построениям по схеме на рисунке 20.

За коэффициент устойчивости откоса η принимают отношение момента сил, удерживающих откос от сдвига, $M_{\text{т}}$ к моменту сил, стремящихся сдвинуть откос, $M_{\text{с}}$

$$\eta = \frac{M_{rt}}{M_s} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot L + \sum_{i=1}^k T_{i,rt}}{\sum_{i=k} n T_{i,s}}, \quad (56)$$

где n – количество отсеков, на которые делится призма обрушения;

N_i – нормальные составляющие от веса отсека P_i , действующие перпендикулярно к заданной поверхности скольжения

$$N_i = P_i \cdot \cos \theta_i, \quad (57)$$

P_i – вес i -го отсека;

θ_i – угол между направлением силы P_i и нормальной составляющей N_i ;

φ – угол внутреннего трения грунта;

c – удельное сцепление грунта;

L – длина дуги скольжения;

$T_{i,rt}$ и $T_{i,s}$ – касательные составляющие от веса отсека P_i , направленные соответственно против и по ходу движения призмы обрушения

$$T_i = P_i \cdot \sin \theta_i. \quad (58)$$

Для откосов в однородной толще грунтов весьма полезным для определения координат центра $O(x;y)$ с наиболее опасной круглоцилиндрической поверхностью скольжения, для которой коэффициент устойчивости получается минимальным, является график Янбу.

Угол α откоса определяется по заданному заложению откоса

$$\alpha = \operatorname{arctg} m = \operatorname{arctg} 1,5 = 33,7^\circ.$$

Коэффициент λ_{cp} определяется по формуле

$$\lambda_{cp} = \frac{H \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi}{c} = \frac{8,0 \cdot 19,5 \cdot \operatorname{tg} 16^\circ}{21} = 2,13.$$

По графику Янбу (рис.21) устанавливаем при $\alpha = 33,7^\circ$ и $\lambda_{cp} = 2,13$ безразмерные величины: $X_0 = 0,65$; $Y_0 = 1,6$.

Тогда для данной расчетной схемы координаты центра $O(x;y)$ наиболее опасной круглоцилиндрической дуги скольжения

$$x = X_0 \cdot H = 0,65 \cdot 8,0 = 5,2 \text{ м};$$

$$y = V_0 \cdot H = 1,60 \cdot 8,0 = 12,8 \text{ м.}$$

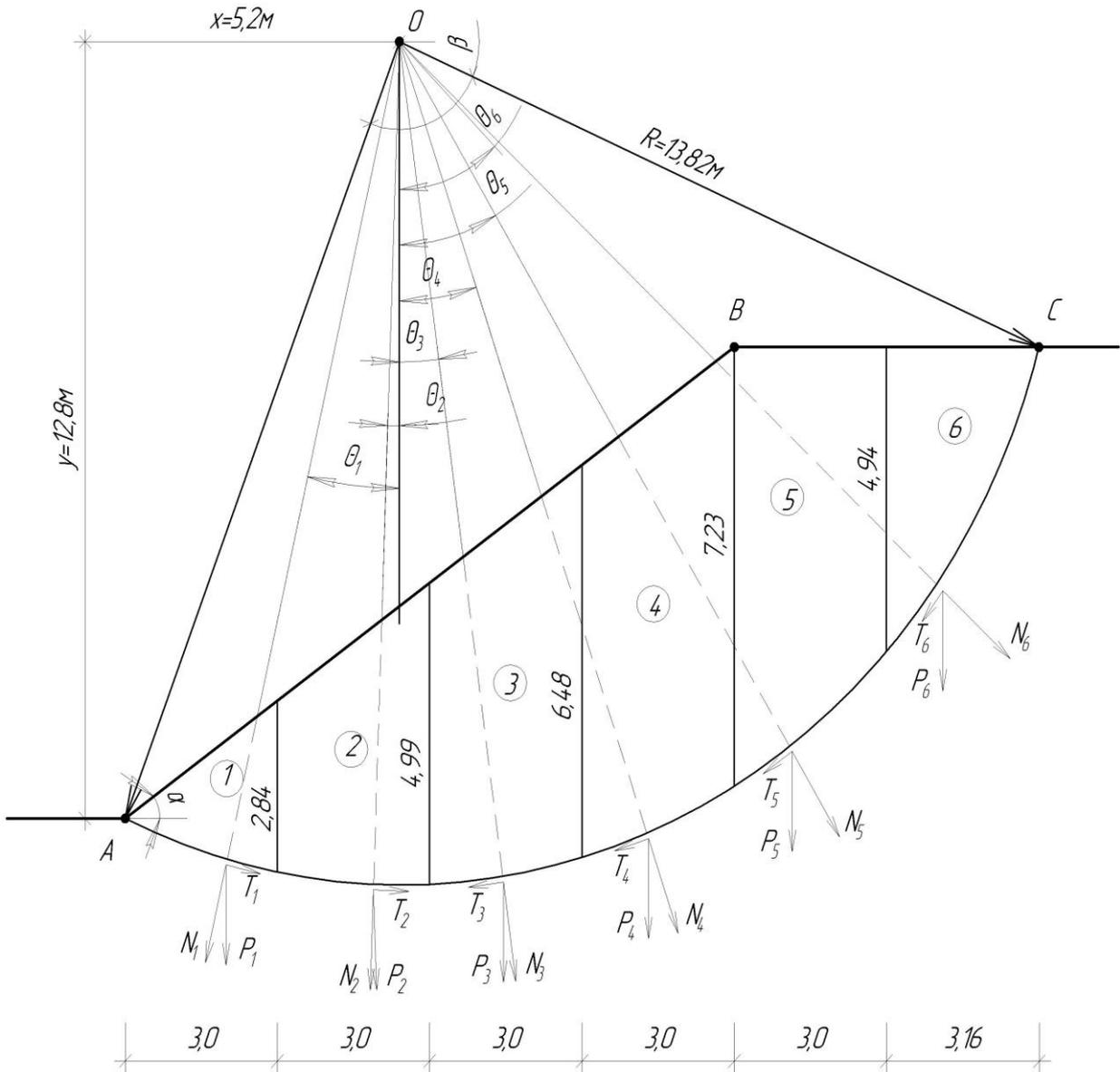


Рис. 20. Схема к определению коэффициента устойчивости откоса методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Строим круглоцилиндрическую дугу скольжения с центром в точке $O(5,2; 12,8)$ и радиусом $R = 13,82$ м (рис.20).

Длина дуги круглоцилиндрической поверхности L скольжения определяется по формуле

$$L = \frac{\pi \cdot R}{180^\circ} \cdot \beta = \frac{3,14 \cdot 13,82}{180^\circ} \cdot 91,78^\circ = 22,13 \text{ м,} \quad (59)$$

где β – угол, опирающийся на дугу скольжения, $\beta = 91,78^\circ$.

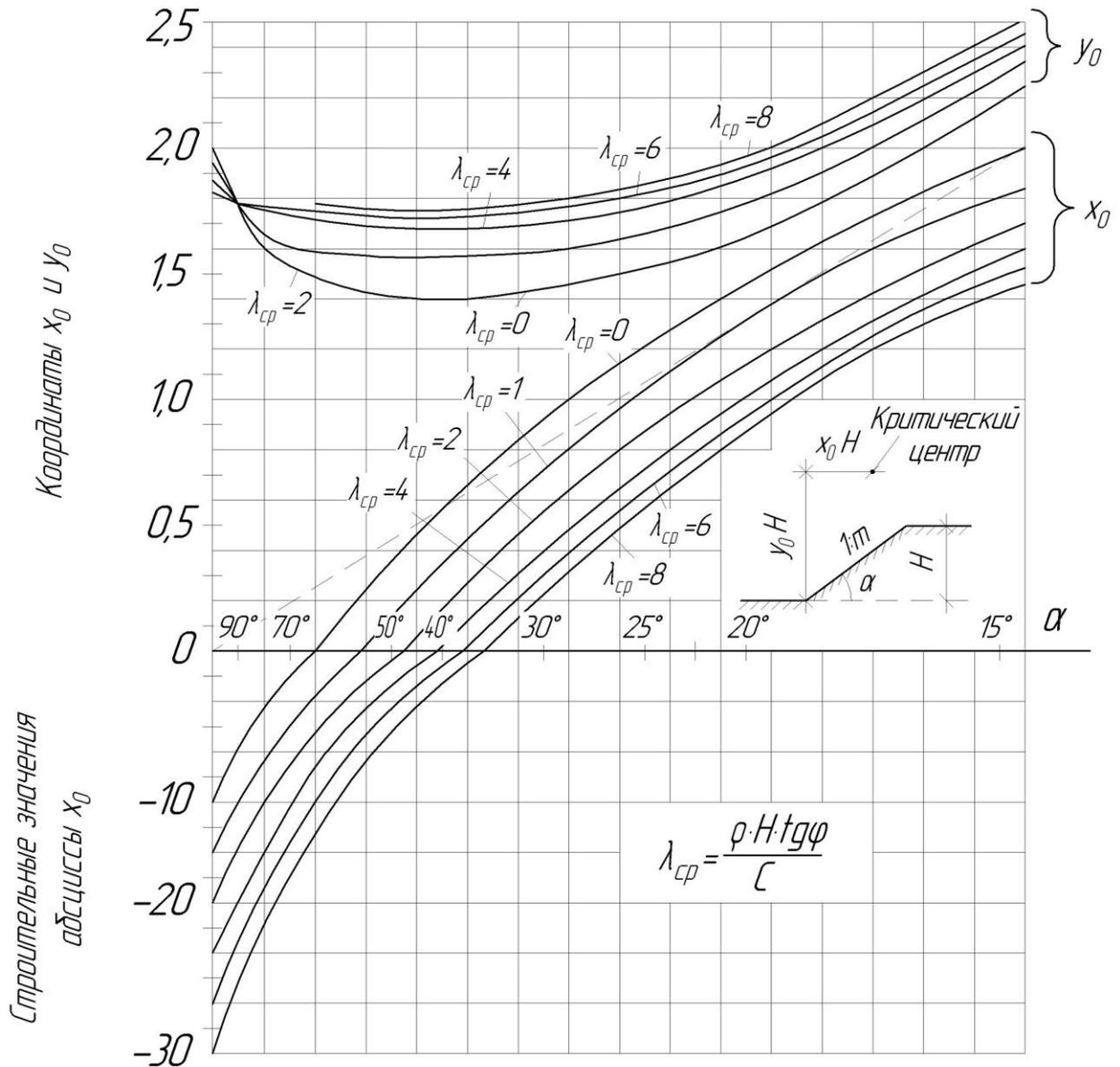


Рис. 21. График Ямбу

Радиус R круглоцилиндрической поверхности скольжения, ширину и высоту отсеков, величины углов β и θ_i допускается определять графически, пользуясь расчетной схемой, выполненной в масштабе.

Призму скольжения ABC разбивают вертикальными сечениями на отсеки. Рекомендуется принимать ширину отсека $d_i = 0,1R$. В этом случае кривизной дуги скольжения можно пренебречь и площадь i -го отсека находить как площадь трапеции. Для расчета выделяют 1 погонный метр по длине отсека перпендикулярно плоскости чертежа.

Вес P_i расчетного отсека определяется как произведение удельного веса грунта на объем

$$P_i = \gamma \cdot A_i \cdot 1, \quad (60)$$

где A_i – площадь i -го отсека грунта,

$$A_i = \frac{(a_i + b_i) \cdot d_i}{2}, \quad (61)$$

a_i и b_i – противолежащие высоты i -го отсека грунта.

Результаты вычислений представлены в таблице 32.

Таблица 32

Расчет коэффициента устойчивости откоса

| | d_i , м | a_i , м | b_i , м | A_i , м ² | P_i , кН | θ_i , град | N_i , кН | $T_{i,rt}$, кН | $T_{i,s}$, кН |
|----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------|-------------------|------------|-----------------|----------------|
| 1 | 3,0 | 0 | 2,84 | 4,26 | 83,1 | 13,4 | 80,8 | 19,3 | - |
| 2 | 3,0 | 2,84 | 4,99 | 11,75 | 229,1 | 2,90 | 228,8 | 11,6 | - |
| 3 | 3,0 | 4,99 | 6,48 | 17,21 | 335,6 | 9,58 | 330,9 | - | 55,9 |
| 4 | 3,0 | 6,48 | 7,23 | 20,57 | 401,1 | 22,6 | 370,3 | - | 154,2 |
| 5 | 3,0 | 7,23 | 4,94 | 18,26 | 356,0 | 36,9 | 284,7 | - | 213,7 |
| 6 | 3,16 | 4,94 | 0 | 7,81 | 152,2 | 51,8 | 94,1 | - | 119,6 |
| Σ | | | | | | | 1389,6 | 30,9 | 543,6 |

Коэффициент устойчивости откоса

$$\eta = \frac{1389,6 \cdot \operatorname{tg} 16^{\circ} + 21 \cdot 22,13 + 30,9}{543,6} = 1,65.$$

4.3 Давление грунтов на ограждающие конструкции

Задача 16

Подпорная стенка высотой H с абсолютно гладкими вертикальными гранями и горизонтальной поверхностью засыпки грунта за стенкой имеет заглубление фундамента $h_{загл}$ и ширину подошвы фундамента b (рис. 22).

Засыпка за стенкой и основание представлены пылевато-глинистым грунтом, имеющим следующие физико-механические характеристики: удельный вес γ , угол внутреннего сцепления φ , удельное сцепление c .

Требуется аналитическим методом определить величины равнодействующих активного и пассивного давлений грунта на подпорную стенку,

построить эпюры активного и пассивного давлений грунта, указать направления и точки приложения равнодействующих давлений грунта.

Исходные данные приведены в таблице 33.

Пример решения задачи 16 приведен для варианта 16.31

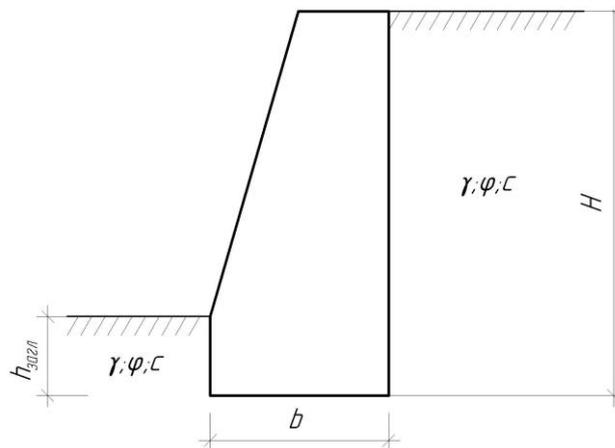


Рис. 22. Расчетная схема к задаче 16

Решение

1. Определение активного давления грунта

Эпюра активного давления связного грунта имеет нулевую ординату ($\sigma_a = 0$) при расстоянии от поверхности засыпки $z \leq h_c$, здесь h_c – высота верхней части стенки, не воспринимающей активного давления грунта, определяемая по формуле 62

$$h_c = \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot \sqrt{\lambda_a}}, \quad (62)$$

где λ_a – коэффициент активного давления грунта.

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \varphi/2) \quad (63)$$

По условиям рассматриваемого примера 16.31

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - 21^\circ/2) = 0,4724; \quad \sqrt{\lambda_a} = 0,6873; \quad h_c = \frac{2 \cdot 22}{19,5 \cdot 0,6873} = 3,28 \text{ м.}$$

Активное давление грунта σ_a , в любой точке стенки можно определить, используя зависимость

$$\sigma_a = \gamma \cdot z \cdot \lambda_a - 2 \cdot c \cdot \sqrt{\lambda_a}, \quad (64)$$

где z – расстояние до точки от поверхности земли.

Тогда, активное давление грунта σ_a на уровне подошвы фундамента подпорной стенки при $z = H = 10$ м составляет

$$\sigma_a = 19,5 \cdot 10 \cdot 0,4724 - 2 \cdot 22 \cdot 0,6873 = 61,9 \text{ кПа.}$$

Равнодействующая E_a активного давления грунта

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot \lambda_a - 2 \cdot c \cdot H \cdot \sqrt{\lambda_a} + \frac{2 \cdot c^2}{\gamma} . \quad (65)$$

В данном случае $H = 10$ м, тогда

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot 19,5 \cdot 10^2 \cdot 0,4724 - 2 \cdot 22 \cdot 10 \cdot 0,6873 + \frac{2 \cdot 22^2}{19,5} = 208 \text{ кН/м.}$$

Расстояние e_a от подошвы фундамента подпорной стены до точки приложения равнодействующей E_a

$$e_a = \frac{H - h_c}{3} = \frac{10 - 3,28}{3} = 2,24 \text{ м.}$$

Эпюра активного давления, направление и точка приложения равнодействующей активного давления представлены на рисунке 23.

2. Определение пассивного давления грунта

Пассивное давление грунта σ_n в любой точке стенки можно определить, используя зависимость

$$\sigma_n = \gamma \cdot z \cdot \lambda_n + 2 \cdot c \cdot \sqrt{\lambda_n} , \quad (66)$$

где λ_n – коэффициент пассивного давления грунта,

$$\lambda_n = \operatorname{tg}^2 (45^\circ + \varphi/2) . \quad (67)$$

По условиям рассматриваемого примера 16.31:

$$\lambda_n = \operatorname{tg}^2 (45^\circ + 21^\circ/2) = 2,117; \quad \sqrt{\lambda_n} = 1,455;$$

Пассивное давление грунта σ_{no} в уровне обреза фундамента при $z = 0$

$$\sigma_{no} = 19,5 \cdot 0 \cdot 2,117 + 2 \cdot 22 \cdot 1,455 = 64,0 \text{ кПа.}$$

Пассивное давление грунта σ_{nn} в уровне подошвы фундамента подпорной стенки при $z = h_{\text{загл}} = 2,4$ м.

$$\sigma_{nn} = 19,5 \cdot 2,4 \cdot 2,117 + 2 \cdot 22 \cdot 1,455 = 163,1 \text{ кПа.}$$

| | | | | | | |
|-------|----|-----|-----|------|----|----|
| 1.16 | 7 | 2,4 | 3,0 | 20,4 | 19 | 25 |
| 2.16 | 6 | 1,8 | 2,8 | 20,5 | 16 | 16 |
| 3.16 | 8 | 2,2 | 3,6 | 19,8 | 19 | 18 |
| 4.16 | 7 | 2,0 | 3,2 | 20,2 | 17 | 15 |
| 5.16 | 5 | 1,9 | 2,4 | 20,9 | 18 | 21 |
| 6.16 | 8 | 2,5 | 2,4 | 20,1 | 19 | 20 |
| 7.16 | 9 | 2,5 | 4,0 | 20,8 | 21 | 23 |
| 8.16 | 4 | 1,6 | 1,9 | 19,7 | 20 | 19 |
| 9.16 | 6 | 1,9 | 2,6 | 20,5 | 14 | 14 |
| 10.16 | 10 | 3,2 | 3,8 | 19,8 | 22 | 22 |
| 11.16 | 8 | 2,3 | 3,4 | 19,4 | 24 | 13 |
| 12.16 | 6 | 2,0 | 2,4 | 19,7 | 22 | 12 |
| 13.16 | 7 | 2,4 | 2,7 | 19,0 | 20 | 15 |
| 14.16 | 8 | 2,6 | 3,0 | 18,2 | 18 | 10 |
| 15.16 | 9 | 2,8 | 3,3 | 18,4 | 16 | 17 |
| 16.16 | 10 | 3,0 | 3,6 | 20,6 | 14 | 13 |
| 17.16 | 6 | 2,1 | 1,8 | 18,8 | 30 | 4 |
| 18.16 | 7 | 2,4 | 2,1 | 19,0 | 32 | 5 |
| 19.16 | 8 | 2,7 | 2,4 | 19,2 | 34 | 6 |
| 20.16 | 9 | 3,0 | 2,7 | 19,5 | 36 | 8 |
| 21.16 | 10 | 3,3 | 3,0 | 18,5 | 30 | 21 |
| 22.16 | 7 | 2,5 | 2,4 | 20,3 | 29 | 17 |
| 23.16 | 8 | 3,0 | 2,7 | 20,1 | 27 | 19 |
| 24.16 | 9 | 3,6 | 3,0 | 19,1 | 28 | 17 |
| 25.16 | 10 | 3,6 | 3,3 | 19,8 | 26 | 17 |
| 26.16 | 6 | 2,0 | 1,8 | 18,6 | 24 | 11 |
| 27.16 | 7 | 2,5 | 2,1 | 18,4 | 23 | 25 |
| 28.16 | 8 | 3,0 | 2,4 | 19,8 | 18 | 17 |
| 29.16 | 9 | 3,0 | 2,7 | 19,6 | 16 | 13 |
| 30.16 | 10 | 4,0 | 3,0 | 19,4 | 15 | 15 |
| 31.16 | 10 | 2,4 | 3,2 | 19,5 | 21 | 22 |

Задача 17

Подпорная стенка имеет два ломаных участка задней грани, высотами h_1 и h_2 , и углами отклонения от вертикали ε_1 и ε_2 , соответственно (рис. 24). Расчетные характеристики физико-механических свойств грунта: удельный вес γ , угол внутреннего сцепления φ , удельное сцепление c . Угол наклона верхней границы грунта - ρ ; полезная нагрузка на кордон - q .

Требуется определить горизонтальные составляющие интенсивности активного давления грунта засыпки на участки стенки, величины и точки приложения равнодействующих активного давления, а также построить эпюры распределения давления грунта по высоте участков.

Исходные данные приведены в таблице 34.

Пример решения задачи 17 приведен для варианта 17.31.

Примечания.

1. Угол наклона расчетной плоскости AB к вертикали ε_2 принимается со знаком «минус» при наклоне на грунт.

2. Для расчетной схемы № 2 грунт засыпки на полную высоту подпорной стенки ($h_1 + h_2$) характеризуется величинами γ_1 , φ_1 , c_1 и δ_1 .

3. В таблице δ_1 и δ_2 - углы трения грунтов на контакте с расчетной плоскостью стенки.

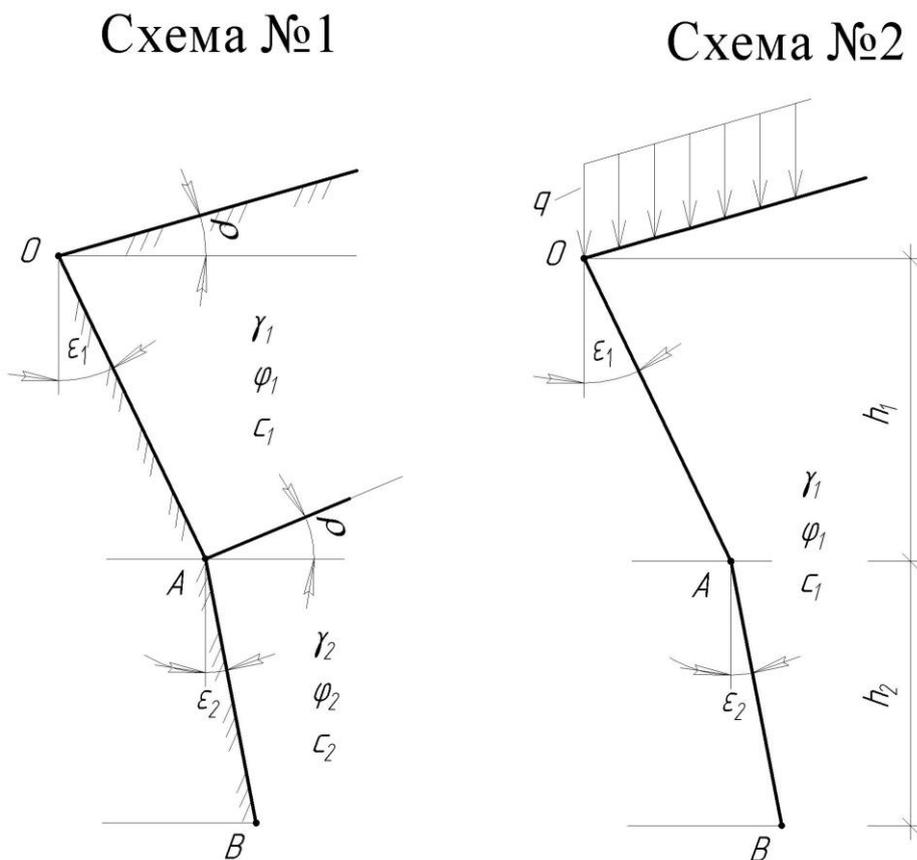


Рис. 24. Расчетная схема к задаче 17

Исходные данные к задаче 17

| Вариант | h_1 , м | ε_1 , град | ρ , град | γ_1 , кН/м ³ | φ_1 , град | c_1 , кПа | δ_1 , град | h_2 , м | ε_2 , град | q , кПа | γ_2 , кН/м ³ | φ_2 , град | c_2 , кПа | δ_2 , град | Номер схемы |
|---------|--------------|---------------------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------|----------------------|--------------|---------------------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|----------------|
| 1.17 | 4,2 | 5 | 10 | 20,6 | 16 | 17 | 8 | 5,2 | -5 | - | 18,8 | 24 | 10 | 12 | 1 |
| 2.17 | 6,6 | 10 | 10 | 18,8 | 16 | 18 | 8 | 5,0 | 0 | 60 | - | - | - | - | 2 |
| 3.17 | 4,8 | 15 | 10 | 19,0 | 16 | 19 | 8 | 5,8 | 5 | - | 19,0 | 24 | 11 | 12 | 1 |
| 4.17 | 5,4 | 20 | 10 | 19,2 | 16 | 20 | 8 | 4,8 | 10 | 80 | - | - | - | - | 2 |
| 5.17 | 4,6 | 25 | 10 | 19,5 | 16 | 21 | 8 | 4,4 | 15 | - | 19,2 | 24 | 12 | 12 | 1 |
| 6.17 | 4,4 | 30 | 10 | 18,5 | 16 | 22 | 8 | 5,2 | 20 | 100 | - | - | - | - | 2 |
| 7.17 | 5,4 | 5 | 15 | 20,3 | 18 | 15 | 9 | 4,6 | -5 | - | 19,4 | 22 | 14 | 11 | 1 |
| 8.17 | 4,2 | 10 | 10 | 20,1 | 18 | 16 | 9 | 5,6 | 0 | 120 | - | - | - | - | 2 |
| 9.17 | 5,2 | 15 | 15 | 19,1 | 18 | 17 | 9 | 5,4 | 5 | - | 19,6 | 22 | 11 | 11 | 1 |
| 10.17 | 6,0 | 20 | 10 | 19,8 | 18 | 18 | 9 | 4,8 | 10 | 70 | - | - | - | - | 2 |
| 11.17 | 5,8 | 25 | 15 | 18,6 | 18 | 19 | 9 | 4,2 | 15 | - | 20,2 | 22 | 12 | 11 | 1 |
| 12.17 | 4,8 | 30 | 10 | 18,4 | 18 | 20 | 9 | 5,6 | 20 | 90 | - | - | - | - | 2 |
| 13.17 | 5,6 | 5 | 10 | 19,8 | 20 | 21 | 10 | 5,2 | -5 | - | 20,4 | 20 | 13 | 10 | 1 |
| 14.17 | 6,0 | 10 | 15 | 19,6 | 20 | 22 | 10 | 4,8 | 0 | 110 | - | - | - | - | 2 |
| 15.17 | 4,4 | 15 | 10 | 19,4 | 20 | 15 | 10 | 6,0 | 5 | - | 20,1 | 20 | 12 | 10 | 1 |
| 16.17 | 5,2 | 20 | 10 | 20,4 | 20 | 16 | 10 | 4,2 | 10 | 130 | - | - | - | - | 2 |
| 17.17 | 5,0 | 25 | 15 | 20,5 | 20 | 17 | 10 | 6,6 | 15 | - | 19,7 | 20 | 13 | 10 | 1 |
| 18.17 | 5,8 | 30 | 10 | 19,8 | 20 | 18 | 10 | 4,8 | 20 | 150 | - | - | - | - | 2 |
| 19.17 | 4,8 | 5 | 10 | 20,2 | 22 | 19 | 11 | 5,4 | -5 | - | 19,5 | 18 | 14 | 9 | 1 |
| 20.17 | 4,4 | 10 | 15 | 20,9 | 22 | 20 | 11 | 4,6 | 0 | 120 | - | - | - | - | 2 |
| 21.17 | 5,2 | 15 | 20 | 20,1 | 22 | 21 | 11 | 4,4 | 5 | - | 18,9 | 18 | 13 | 9 | 1 |
| 22.17 | 4,6 | 20 | 10 | 20,8 | 22 | 13 | 11 | 5,4 | 10 | 100 | - | - | - | - | 2 |
| 23.17 | 5,6 | 25 | 15 | 19,7 | 22 | 12 | 11 | 4,2 | 15 | - | 19,9 | 18 | 14 | 9 | 1 |
| 24.17 | 5,4 | 30 | 20 | 20,5 | 22 | 11 | 11 | 5,2 | 20 | 80 | - | - | - | - | 2 |
| 25.17 | 4,8 | 5 | 10 | 19,8 | 24 | 10 | 12 | 6,0 | -5 | - | 19,7 | 16 | 15 | 8 | 1 |
| 26.17 | 4,2 | 10 | 15 | 19,4 | 24 | 15 | 12 | 5,8 | 0 | 60 | - | - | - | - | 2 |
| 27.17 | 5,6 | 15 | 20 | 19,7 | 24 | 14 | 12 | 4,8 | 5 | - | 20,3 | 16 | 16 | 8 | 1 |
| 28.17 | 5,2 | 20 | 10 | 19,0 | 24 | 13 | 12 | 5,6 | 10 | 80 | - | - | - | - | 2 |
| 29.17 | 4,8 | 25 | 15 | 18,2 | 24 | 12 | 12 | 6,0 | 15 | - | 20,5 | 16 | 18 | 8 | 1 |
| 30.17 | 6,0 | 30 | 20 | 18,4 | 24 | 11 | 12 | 4,4 | 20 | 100 | - | - | - | - | 2 |
| 31.17 | 6,0 | 15 | 20 | 19,8 | 22 | 28 | 11 | 6,0 | 5 | - | 20,4 | 21 | 23 | 10,5 | 1 |

Решение

В случае, когда поверхность грунта ограничена плоскостью и на призме обрушения отсутствует внешняя нагрузка, горизонтальная σ_{ah} и вертикальная σ_{av} составляющие интенсивности активного давления несвязного грунта на глубине z (рис.25,а) определяются, исходя из предположения об образовании прямолинейных поверхностей скольжения по формулам 69 и 70

$$\sigma_{ah} = \gamma \cdot z \cdot \lambda_a, \quad (69)$$

$$\sigma_{av} = \sigma_{ah} \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon + \delta), \quad (70)$$

где λ_a – коэффициент активного давления грунта,

$$\lambda_a = \left[\frac{\cos(\varphi - \varepsilon)}{\cos \varepsilon \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \rho)}{\cos(\varepsilon + \delta) \cdot \cos(\varepsilon - \rho)}} \right)} \right]^2, \quad (71)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта;

γ – удельный вес грунта;

ε – угол наклона задней грани стены к вертикали (принимается со знаком «плюс» при отклонении поверхности грунта от горизонтального положения вверх);

δ – угол трения грунта на контакте со стеной (для стен с повышенной шероховатостью, например, со ступенчатой задней гранью, принимается равным φ ; для стен с задней гранью специально обработанной для придания ей шероховатости – $0,5 \varphi$; в остальных случаях, а также для мелкозернистых водонасыщенных песков и при наличии вибрационных нагрузок на поверхности засыпки принимается равным нулю).

При $\varepsilon = \rho = \delta = 0$.

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2). \quad (72)$$

Для связного грунта с удельным сцеплением c горизонтальная σ_{ah}^c и

вертикальная σ_{av}^c составляющие интенсивности активного давления грунта на глубине z (рис.25,б) определяются по формулам

$$\sigma_{ah}^c = \sigma_{ah} - \sigma_{ch}, \quad (73)$$

$$\sigma_{av}^c = \sigma_{ah}^c \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon + \delta), \quad (74)$$

где σ_{ch} – интенсивность горизонтальных сил сцепления,

$$\sigma_{ch} = c \cdot k. \quad (75)$$

$$k = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} \left[\frac{\cos(\varepsilon + \delta)}{\cos \varepsilon \cos \delta} - \lambda_a \frac{\cos \varepsilon \cos \rho}{\cos(\varepsilon - \rho)} \right]. \quad (76)$$

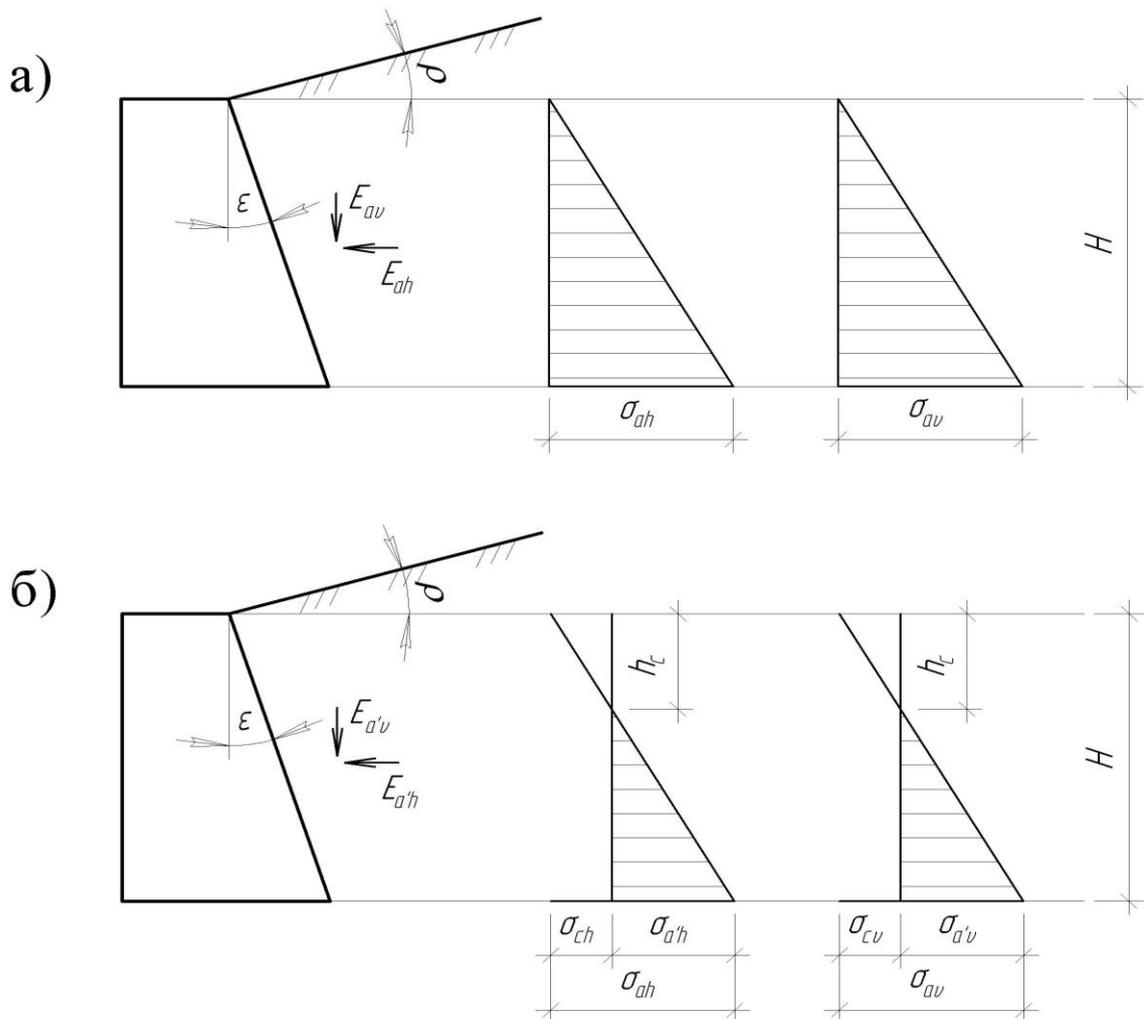


Рис. 25. Схема к определению активного давления грунта

а) – несвязного; б) – связного

Если значение $k < 0$, то принимается $k = 0$.

При $\varepsilon = \rho = \delta = 0$.

$$k = 2 \cdot \lambda_a = \operatorname{tg} (45^\circ - \varphi/2). \quad (77)$$

Равнодействующие горизонтального E_{ah} (E_{ah}^c) и вертикального E_{av} (E_{av}^c) давлений грунта определяются по формулам для несвязного грунта

$$E_{ah} = \frac{\sigma_{ah} \cdot H}{2}, \quad (78)$$

$$E_{av} = \frac{\sigma_{av} \cdot H}{2}, \quad (79)$$

для связного грунта

$$E_{ah}^c = \frac{\sigma_{ah}^c \cdot (H - h_c)}{2}, \quad (80)$$

$$E_{av}^c = \frac{\sigma_{av}^c \cdot (H - h_c)}{2}, \quad (81)$$

где h_c – величина, определяемая по формуле

$$h_c = \frac{\sigma_{ch} \cdot H}{\sigma_{ah}}. \quad (82)$$

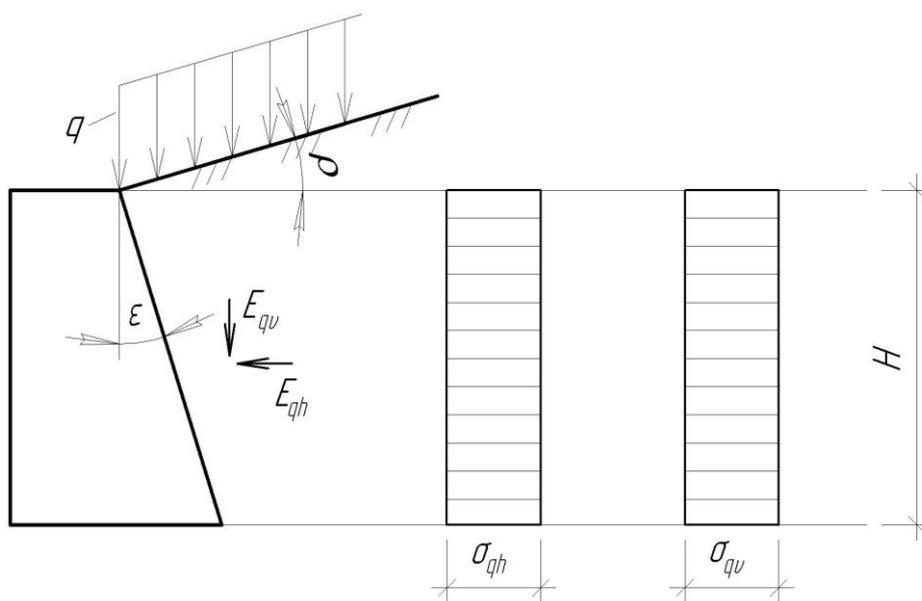


Рис. 26. Схема к определению давления грунта от равномерно распределенной нагрузки

Горизонтальная σ_{qh} и вертикальная σ_{qv} составляющие активного давления грунта от сплошной равномерно распределенной нагрузки q на глубине H (рис.26) для связных и несвязных грунтов определяются по формулам

$$\sigma_{qh} = q \cdot \lambda_a, \quad (83)$$

$$\sigma_{qv} = \sigma_{qh} \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon + \delta). \quad (84)$$

Горизонтальная E_{qh} и вертикальная E_{qv} равнодействующие давления грунта от нагрузки q определяются по формулам

$$E_{qh} = \sigma_{qh} \cdot H, \quad (85)$$

$$E_{qv} = \sigma_{qv} \cdot H. \quad (86)$$

Определение активного давления грунта на подпорную стену, имеющую ломаное очертание задней грани следует выполнять отдельно для верхней и нижней расчетной плоскости с применением приема перехода по фиктивной плоской грани.

На участке верхней расчетной грани ОА (рис.27) для 1-го слоя грунта коэффициент активного давления грунта

$$\begin{aligned} \lambda_{a,1} &= \left[\frac{\cos(\varphi_1 - \varepsilon_1)}{\cos \varepsilon_1 \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_1 + \delta_1) \cdot \sin(\varphi_1 - \rho)}{\cos(\varepsilon_1 + \delta_1) \cdot \cos(\varepsilon_1 - \rho)}} \right)} \right]^2 = \\ &= \left[\frac{\cos(22^\circ - 15^\circ)}{\cos 15^\circ \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(22^\circ + 11^\circ) \cdot \sin(22^\circ - 20^\circ)}{\cos(15^\circ + 11^\circ) \cdot \cos(15^\circ - 20^\circ)}} \right)} \right]^2 = 0,8044; \\ k_1 &= \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1} \left[\frac{\cos(\varepsilon_1 + \delta_1)}{\cos \varepsilon_1 \cos \delta_1} - \lambda_{a,1} \frac{\cos \varepsilon_1 \cos \rho}{\cos(\varepsilon_1 - \rho)} \right] = \\ &= \frac{1}{\operatorname{tg} 22^\circ} \left[\frac{\cos(15^\circ + 11^\circ)}{\cos 15^\circ \cos 11^\circ} - 0,8044 \frac{\cos 15^\circ \cos 20^\circ}{\cos(15^\circ - 20^\circ)} \right] = 0,5321. \end{aligned}$$

Интенсивность горизонтальных сил сцепления 1-го слоя грунта на участке ОА подпорной стены

$$\sigma_{ch,1} = c_1 \cdot k_1 = 28 \cdot 0,5321 = 14,9 \text{ кПа.}$$

Интенсивность активного давления 1-го слоя грунта в точке А

$$\sigma_{ah,1,A} = \gamma_1 \cdot z_1 \cdot \lambda_{a,1} = 19,8 \cdot 6,0 \cdot 0,8044 = 95,6 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_{ah,1,A}^c = \sigma_{ah,1,A} - \sigma_{ch,1} = 95,6 - 14,9 = 80,7 \text{ кПа.}$$

Горизонтальная составляющая равнодействующей активного давления 1-го слоя грунта (на участке ОА подпорной стены)

$$E_{ah,1}^c = \frac{\sigma_{ah,1,A}^c \cdot (h_1 - h_{c,1})}{2} = \frac{80,7 \cdot (6,0 - 0,94)}{2} = 204,2 \text{ кН/м,}$$

$$\text{где } h_{c,1} = \frac{\sigma_{ch,1}}{\sigma_{ch,1,A}} \cdot h_1 = \frac{14,9}{95,6} \cdot 6,0 = 0,94 \text{ м.}$$

Точка приложения горизонтальной составляющей $E_{ah,1}^c$ располагается от точки А вверх на расстоянии

$$z_1 = \frac{h_1 - h_{c,1}}{3} = \frac{6,0 - 0,94}{3} = 1,69 \text{ м.}$$

По полученным данным строится эпюра активного давления грунта на участке ОА подпорной стены (рис.27).

Активное давление грунта на грань АВ подпорной стены определяется как на часть АВ фиктивной спрямленной грани О'АВ.

Для этого продлим след грани ВА до пересечения с поверхностью призмы обрушения в точке О' (рис.27).

Превышение h' точки О' над точкой О, найденное из геометрических зависимостей составляет

$$h' = \frac{h_1 \cdot \sin(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \sin \rho}{\cos \varepsilon_1 \cdot \cos(\rho - \varepsilon_2)} = \frac{6,0 \cdot \sin(15^\circ - 5^\circ) \cdot \sin 20^\circ}{\cos 15^\circ \cdot \cos(20^\circ - 5^\circ)} = 0,382 \text{ м.}$$

Переходя к характеристикам грунта 2-го слоя необходимо учесть разность в удельном весе

$$h_{\text{ЭКВ}} = \frac{\gamma_{c2}}{\gamma_{c1}} \cdot (h_1 + h') = \frac{19,8}{20,4} \cdot (6,0 + 3,82) = 6,19 \text{ м.}$$

На участке грани АВ подпорной стены для 2-го слоя грунта коэффициент активного давления грунта

$$\lambda_{a,2} = \left[\frac{\cos(\varphi_2 - \varepsilon_2)}{\cos \varepsilon_2 \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_2 + \delta_2) \cdot \sin(\varphi_2 - \rho)}{\cos(\varepsilon_2 + \delta_2) \cdot \cos(\varepsilon_2 - \rho)}} \right)} \right]^2 =$$

$$= \left[\frac{\cos(21^\circ - 5^\circ)}{\cos 5^\circ \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(21^\circ + 10,5^\circ) \cdot \sin(21^\circ - 20^\circ)}{\cos(5^\circ + 10,5^\circ) \cdot \cos(5^\circ - 20^\circ)}} \right)} \right]^2 = 0,7709;$$

$$k_2 = \frac{1}{\text{tg} \varphi_2} \left[\frac{\cos(\varepsilon_2 + \delta_2)}{\cos \varepsilon_2 \cos \delta_2} - \lambda_{a,2} \frac{\cos \varepsilon_2 \cos \rho}{\cos(\varepsilon_2 - \rho)} \right] =$$

$$= \frac{1}{\text{tg} 21^\circ} \left[\frac{\cos(5^\circ + 10,5^\circ)}{\cos 5^\circ \cos 10,5^\circ} - 0,7709 \frac{\cos 5^\circ \cos 20^\circ}{\cos(5^\circ - 20^\circ)} \right] = 0,6166.$$

Интенсивность горизонтальных сил сцепления 2-го слоя грунта

$$\sigma_{ch,2} = c_2 \cdot k_2 = 23 \cdot 0,6166 = 14,2 \text{ кПа.}$$

Интенсивность активного давления 2-го слоя грунта в точке А

$$\sigma_{ah,2,A} = \gamma_2 \cdot h_{\text{ЭКВ}} \cdot \lambda_{a,2} = 20,4 \cdot 6,19 \cdot 0,7709 = 97,3 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_{ah,2,A}^c = \sigma_{ah,2,A} - \sigma_{ch,2} = 97,3 - 14,2 = 83,1 \text{ кПа.}$$

Интенсивность активного давления 2-го слоя грунта в точке В

$$\sigma_{ah,2,B} = \gamma_2 \cdot (h_{\text{ЭКВ}} + h_2) \cdot \lambda_{a,2} = 20,4 \cdot (6,19 + 6,0) \cdot 0,7709 = 191,7 \text{ кПа;}$$

$$\sigma_{ah,2,B}^c = \sigma_{ah,2,B} - \sigma_{ch,2} = 191,7 - 14,2 = 83,1 \text{ кПа.}$$

Для трапецеидальной эпюры активного давления на грань АВ (рис.27)

горизонтальная составляющая $E_{ah,2}^c$ и расстояние z_2 от подошвы подпорной

стены до точки приложения равнодействующей определяются по формулам

$$E_{ah,2}^c = \frac{\sigma_{ah,2,A}^c + \sigma_{ah,2,B}^c}{2} \cdot h_2 = \frac{83,1 + 177,5}{2} \cdot 6,0 = 781,8 \text{ кН/м},$$

$$z_2 = \frac{2 \cdot \sigma_{ah,2,A}^c + \sigma_{ah,2,B}^c}{\sigma_{ah,2,A}^c + \sigma_{ah,2,B}^c} \cdot \frac{h_2}{3} = \frac{2 \cdot 83,1 + 177,5}{83,1 + 177,5} \cdot \frac{6,0}{3} = 2,64 \text{ м}.$$

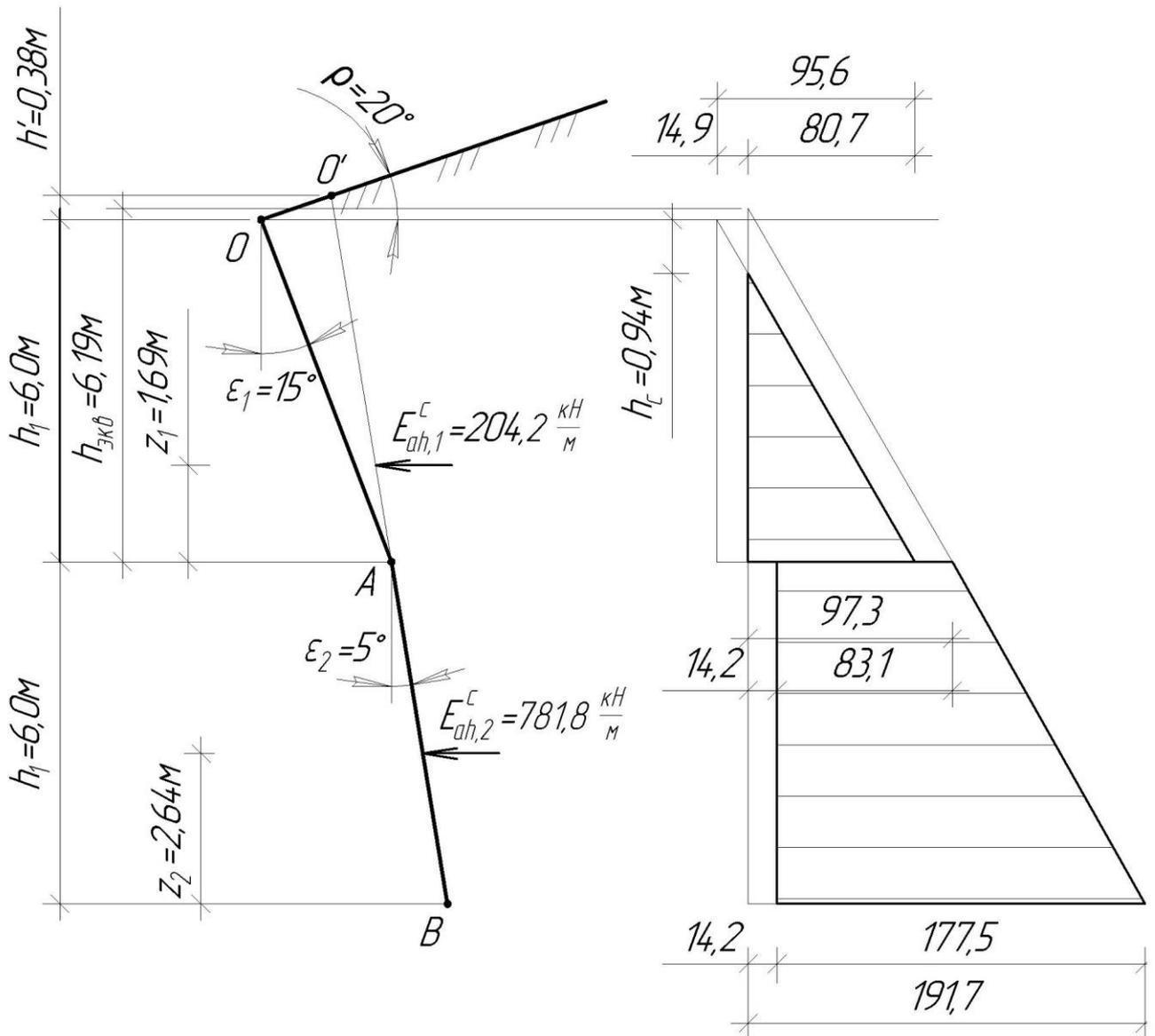


Рис. 27. Эпюра горизонтальной составляющей активного давления грунта

σ_{ah}^c , кПа на подпорную стену

5 РАСЧЕТ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ

5.1 Расчет осадки по схеме линейно деформируемого полупространства методом послойного суммирования

Задача 18

Фундамент с размерами подошвы $l \times b$ заложен на глубине d и передаёт нагрузку на основание N (рис.28). В основании фундамента залегает песчаный грунт (мощность слоя от поверхности h_1 ; удельный вес грунта γ_1 ; модуль общей деформации E_1 ; удельный вес частиц грунта γ_{s1} ; природная влажность W_1) подстилаемый водонепроницаемой глиной (удельный вес грунта γ_2 ; модуль общей деформации E_2).

Уровень подземных вод располагается в слое песчаного грунта на глубине d_w от поверхности земли.

Требуется определить величину полной стабилизированной осадки по методу послойного суммирования с использованием расчетной схемы линейно-деформируемого полупространства.

Исходные данные приведены в таблице 35.

Пример решения задачи 18 приведен для варианта 18.31 (ленточного фундамента шириной b).

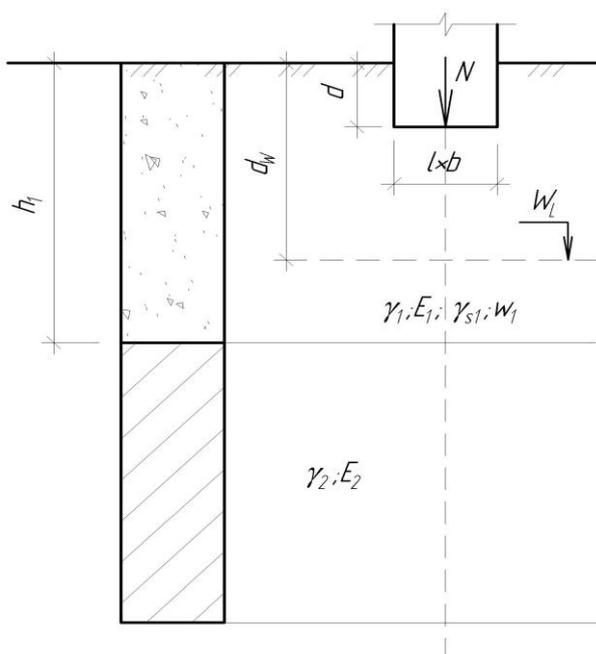


Рис. 28. Расчетная схема к задаче 18

Таблица 35

Исходные данные к задаче 18

| Вариант | N , кН | l , м | b , м | γ_1 , кН/м ³ | γ_{s1} , кН/м ³ | W_1 | E_1 , МПа | h_1 , м | d , м | d_w , м | γ_2 , кН/м ³ | E_2 , МПа |
|---------|---------------|---------|---------|--------------------------------|-----------------------------------|-------|-------------|-----------|---------|-----------|--------------------------------|-------------|
| 18.1 | 960 | 2,7 | 1,5 | 19,8 | 26,5 | 0,124 | 24 | 3,2 | 1,5 | 2,5 | 20,1 | 28 |
| 18.2 | 750 | 2,1 | 1,5 | 18,9 | 26,6 | 0,098 | 17 | 2,8 | 1,2 | 2,3 | 19,5 | 18 |
| 18.3 | 1050 | 2,4 | 1,5 | 20,5 | 26,5 | 0,118 | 15 | 3,6 | 1,5 | 2,4 | 19,2 | 38 |
| 18.4 | 840 | 3,0 | 1,8 | 20,9 | 26,6 | 0,141 | 13 | 3,5 | 1,8 | 2,4 | 20,2 | 31 |
| 18.5 | 1200 | 3,6 | 1,8 | 19,9 | 26,7 | 0,106 | 16 | 3,1 | 1,2 | 2,5 | 1,89 | 32 |
| 18.6 | 1300 | 3,6 | 1,5 | 20,2 | 26,6 | 0,133 | 18 | 4,6 | 1,5 | 3,0 | 19,7 | 23 |
| 18.7 | 1450 | 3,3 | 1,5 | 20,9 | 26,7 | 0,152 | 28 | 5,2 | 1,8 | 3,2 | 20,6 | 42 |
| 18.8 | 1620 | 3,0 | 1,8 | 20,1 | 26,5 | 0,129 | 21 | 3,9 | 1,5 | 3,0 | 19,1 | 29 |
| 18.9 | 950 | 2,7 | 2,1 | 19,4 | 26,5 | 0,102 | 19 | 4,3 | 1,2 | 3,1 | 20,8 | 20 |
| 18.10 | 1080 | 4,2 | 2,1 | 19,6 | 26,6 | 0,112 | 13 | 4,1 | 2,1 | 3,3 | 19,9 | 24 |
| 18.11 | 970 | 2,1 | 1,5 | 18,7 | 26,4 | 0,125 | 15 | 3,3 | 1,5 | 2,6 | 19,8 | 19 |
| 18.12 | 1040 | 1,5 | 1,5 | 20,3 | 26,5 | 0,099 | 11 | 2,9 | 1,2 | 2,3 | 18,9 | 20 |
| 18.13 | 1130 | 1,8 | 1,5 | 18,8 | 26,7 | 0,119 | 17 | 3,7 | 1,5 | 2,4 | 20,5 | 21 |
| 18.14 | 1250 | 2,4 | 1,8 | 20,2 | 26,8 | 0,142 | 14 | 3,6 | 1,8 | 2,4 | 20,9 | 25 |
| 18.15 | 1310 | 2,7 | 1,8 | 18,9 | 26,7 | 0,107 | 13 | 3,2 | 1,2 | 2,5 | 19,9 | 26 |
| 18.16 | 1350 | 2,7 | 1,5 | 20,1 | 26,5 | 0,134 | 16 | 4,7 | 1,5 | 3,0 | 20,2 | 24 |
| 18.17 | 1390 | 2,1 | 1,5 | 19,1 | 26,4 | 0,153 | 18 | 5,0 | 1,8 | 3,2 | 20,9 | 27 |
| 18.18 | 1110 | 2,4 | 1,5 | 19,9 | 26,4 | 0,128 | 22 | 4,0 | 1,5 | 3,0 | 20,1 | 23 |
| 18.19 | 1540 | 3,0 | 1,8 | 19,2 | 26,7 | 0,103 | 16 | 4,4 | 1,2 | 3,1 | 20,4 | 28 |
| 18.20 | 1230 | 3,6 | 1,8 | 19,8 | 26,5 | 0,113 | 13 | 4,2 | 2,1 | 3,3 | 19,6 | 22 |
| 18.21 | 1560 | 3,6 | 1,5 | 19,3 | 26,4 | 0,129 | 19 | 3,2 | 1,5 | 2,4 | 18,7 | 24 |
| 18.22 | 1450 | 3,3 | 1,5 | 19,7 | 26,5 | 0,103 | 17 | 2,8 | 1,2 | 2,2 | 20,3 | 25 |
| 18.23 | 1320 | 3,0 | 1,8 | 19,4 | 26,7 | 0,123 | 14 | 3,6 | 1,5 | 2,3 | 18,8 | 26 |
| 18.24 | 1440 | 2,7 | 2,1 | 19,6 | 26,8 | 0,146 | 19 | 3,5 | 1,8 | 2,3 | 20,2 | 23 |
| 18.25 | 1210 | 4,2 | 2,1 | 18,5 | 26,7 | 0,111 | 21 | 3,1 | 1,2 | 2,2 | 19,9 | 27 |
| 18.26 | 1080 | 2,1 | 1,5 | 19,4 | 26,5 | 0,138 | 20 | 4,6 | 1,5 | 2,8 | 20,1 | 22 |
| 18.27 | 1390 | 1,5 | 1,5 | 19,6 | 26,4 | 0,142 | 14 | 5,2 | 1,8 | 3,0 | 19,1 | 28 |
| 18.28 | 1420 | 1,8 | 1,5 | 19,4 | 26,4 | 0,133 | 13 | 3,9 | 1,5 | 2,7 | 19,9 | 24 |
| 18.29 | 1360 | 2,4 | 1,8 | 19,9 | 26,7 | 0,109 | 16 | 4,3 | 1,2 | 2,9 | 20,2 | 23 |
| 18.30 | 1410 | 2,7 | 1,8 | 18,8 | 26,5 | 0,117 | 19 | 4,1 | 2,1 | 3,1 | 19,8 | 29 |
| 18.31 | $p = 200$ кПа | | 1,5 | 20,2 | 26,5 | 0,110 | 15 | 4,1 | 1,5 | 3,3 | 19,9 | 29 |

Решение

Сущность метода послойного суммирования состоит в следующем: основание разбивается на элементарные слои; в пределах сжимаемой толщии определяется осадка каждого слоя от дополнительных вертикальных напря-

жений; затем осадки всех элементарных слоев суммируются.

Метод базируется на следующих предпосылках:

1. Основание моделируется линейно деформируемым полупространством.
2. Сжимаемая толща, ниже которой осадки несут существенны, ограничивается глубиной, где выполняются определенные соотношения между вертикальными напряжениями от собственного веса грунта и дополнительными напряжениями от внешней нагрузки.

3. Осадка вызывается дополнительным вертикальным давлением p_0 . Для фундаментов с шириной подошвы $b < 10$ м учитывается эффект заглубления, и давление p_0 равно разности среднего давления p и вертикального напряжения от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента $\sigma_{zg,0}$ ($p_0 = p - \sigma_{zg,0}$).

4. При определении осадок учитываются только напряжения, действующие по вертикали, которые проходят через центр тяжести подошвы рассчитываемого фундамента без учета его жесткости.

Последовательность расчета методом послойного суммирования:

1. Построение эпюры вертикальных напряжений от собственного веса грунта, причем при планировке срезкой построение эпюры начинают от планировочной отметки, а при планировке подсыпкой – от отметки природного рельефа;

2. Построение эпюры дополнительных вертикальных напряжений от внешней нагрузки;

3. Определение мощности сжимаемой толщи;

4. Вычисление полной осадки суммированием осадок элементарных слоев в пределах сжимаемой толщи.

По условиям заданной задачи вычерчивается расчетная схема (рис. 29). Сжимаемая толща разбивается на слои толщиной $h_i \leq 0,4b$. Чтобы избежать интерполяции по $\xi = 2z/b$, следует принимать $h_i = 0,2b$ или $h_i = 0,4b$ и таким образом, чтобы каждый элементарный слой h_i включал только однородный грунт.

Принимается $h_i = 0,4b = 0,4 \cdot 1,5 = 0,6$ м.

Вертикальное давление от собственного веса грунта в уровне подошвы фундамента $\sigma_{zg,0} = \gamma_1 \cdot d = 20,2 \cdot 1,5 = 30,3$ кПа.

Вертикальные напряжения от собственного веса грунта

$$\sigma_{zg,i} = \sigma_{zg,0} + \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i, \quad (87)$$

где γ_i и h_i – соответственно удельный вес и толщина i -го слоя грунта.

Удельный вес грунтов, залегающих ниже уровня подземных вод должен приниматься с учетом взвешивающего действия воды.

Для песчаного грунта, залегающего ниже уровня подземных вод: удельный вес сухого грунта

$$\gamma_{d1} = \frac{\gamma_1}{1+W} = \frac{20,2}{1+0,11} = 18,2 \text{ кН/м}^3;$$

коэффициент пористости

$$e_1 = \frac{\gamma_{s1} - \gamma_{d1}}{\gamma_{d1}} = \frac{26,5 - 18,2}{18,2} = 0,456;$$

удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды

$$\gamma_{sb} = \frac{\gamma_{s1} - \gamma_w}{1 + e_1} = \frac{26,5 - 10}{1 + 0,456} = 11,3 \text{ кН/м}^3,$$

где γ_w – удельный вес воды ($\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$).

При определении вертикального давления от собственного веса грунта σ_{zg} в водоупорном слое следует учитывать давление столба воды, расположенного выше рассматриваемой глубины. На кровле водоупорного пласта эпюра напряжений от собственного веса имеет скачок на величину гидростатического давления

$$\sigma_{\text{гидр}} = \gamma_w \cdot d_w = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ кПа.}$$

Определение вертикального напряжения σ_{zg} приведено в таблице 36, по полученным данным строится эпюра σ_{zg} (рис. 29).

Дополнительное вертикальное давление на основание

$$\sigma_{zp,0} = p_0 = p - \sigma_{zg,0} = 200 - 30,3 = 169,7 \text{ кПа.}$$

Дополнительные вертикальные давления на границах выделенных слоев определяются по формуле

$$\sigma_{zp,i} = \alpha_i \cdot p_0, \quad (88)$$

где α_i – коэффициент, принимаемый в зависимости от величин относительных координат $\eta=l/b$ и $\xi_i = 2z_i/b$ по таблице 25;

z_i – глубина от подошвы фундамента до нижней границы i -го слоя грунта;

l и b – длина и ширина подошвы фундамента.

Определение вертикального давления σ_{zp} приведено в таблице 36, по полученным данным строится эпюра σ_{zp} (рис. 29).

Таблица 36

Расчет осадки фундамента

| Наименование грунта | z_i , м | h_i , м | $\xi_i = 2z_i/b$ | α_i | $\sigma_{zg,i}$, кПа | $0,2\sigma_{zg,i}$, кПа | $\sigma_{zp,i}$, кПа | $\sigma_{zp,i}^m$, кПа | E_i , кПа | i |
|---|-----------|-----------|------------------|------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|-----|
| Песок $\gamma_1 = 20,2 \text{ кН/м}^3$ | 0 | - | 0 | 1,000 | 30,3 | 6,1 | 169,7 | - | - | - |
| | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,881 | 42,4 | 8,5 | 150,0 | 160 | 15000 | 1 |
| | 1,2 | 0,6 | 1,6 | 0,642 | 54,5 | 10,9 | 109,0 | 130 | 15000 | 2 |
| | 1,8 | 0,6 | 2,4 | 0,477 | 66,7 | 13,3 | 81,1 | 95,0 | 15000 | 3 |
| УПВ | ----- | | | | | | | | | - |
| Песок $\gamma_{sb} = 11,3 \text{ кН/м}^3$ | 2,4 | 0,6 | 3,2 | 0,374 | 73,5 | 14,7 | 63,6 | 72,4 | 15000 | 4 |
| | 2,6 | 0,2 | 3,467 | 0,349 | 75,8 | 15,2 | 59,2 | 61,4 | 15000 | 5 |
| $\sigma_{гидр} = 8 \text{ кПа}$ | | | | | 83,8 | | | | | - |
| Глина $\gamma_2 = 19,9 \text{ кН/м}^3$ | 3,0 | 0,4 | 4,0 | 0,306 | 91,8 | 18,4 | 51,9 | 52,4 | 29000 | 6 |
| | 3,6 | 0,6 | 4,8 | 0,258 | 103,7 | 20,7 | 43,8 | 47,9 | 29000 | 7 |
| | 4,2 | 0,6 | 5,6 | 0,223 | 115,6 | 23,1 | 37,8 | 40,8 | 29000 | 8 |
| | 4,8 | 0,6 | 6,4 | 0,196 | 127,5 | 25,5 | 33,3 | 35,6 | 29000 | 9 |
| | 5,4 | 0,6 | 7,2 | 0,175 | 138,4 | 27,7 | 29,7 | 31,5 | 29000 | 10 |
| | 6,0 | 0,6 | 8,0 | 0,158 | 150,3 | 30,1 | 26,8 | 28,3 | 29000 | 11 |

Определение вертикальных напряжений σ_{zg} и σ_{zp} производится в пределах сжимаемой толщи основания до глубины $z = H_c$, где выполняется условие $\sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg}$.

Если найденная граница оказывается в слое грунта с модулем деформации $E \leq 5 \text{ МПа}$ или такой слой грунта залегает непосредственно ниже глубины H_c , то нижняя граница сжимаемой толщи определяется условием $\sigma_{zp} = 0,1\sigma_{zg}$.

Нижняя граница сжимаемой толщи может приниматься по подошве i -го слоя грунта, для которого будет выполнено условие $0,2\sigma_{zg} \geq \sigma_{zp}$.

Полная осадка фундамента определяется как сумма осадок всех элементарных слоев, на которые разбита сжимаемая толщина

$$s = \sum_{i=1}^n s_i = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,i}^m \cdot h_i}{E_i}, \quad (89)$$

где β – безразмерный коэффициент, принимаемый для всех видов грунтов $\beta = 0,8$;

E_i – модуль деформации i -го элементарного слоя;

$\sigma_{zp,i}^m$ – среднее дополнительное напряжение в i -м элементарном слое, принимаемое равным полусумме напряжений по подошве i -го и $(i-1)$ -го

слоев, то есть $\sigma_{zp,i}^m = \frac{\sigma_{zp,i} + \sigma_{zp,i-1}}{2}$.

Подставляя полученные значения, находим осадку фундамента

$$s = 0,8 \left[\frac{(160 + 130 + 95,0 + 72,4) \cdot 0,6 + 61,4 \cdot 0,2}{15000} + \frac{0,4 \cdot 52,4 + (47,9 + 40,8 + 35,6 + 31,5 + 28,3) \cdot 0,6}{29000} \right] = 0,0189 \text{ м} = 1,89 \text{ см.}$$

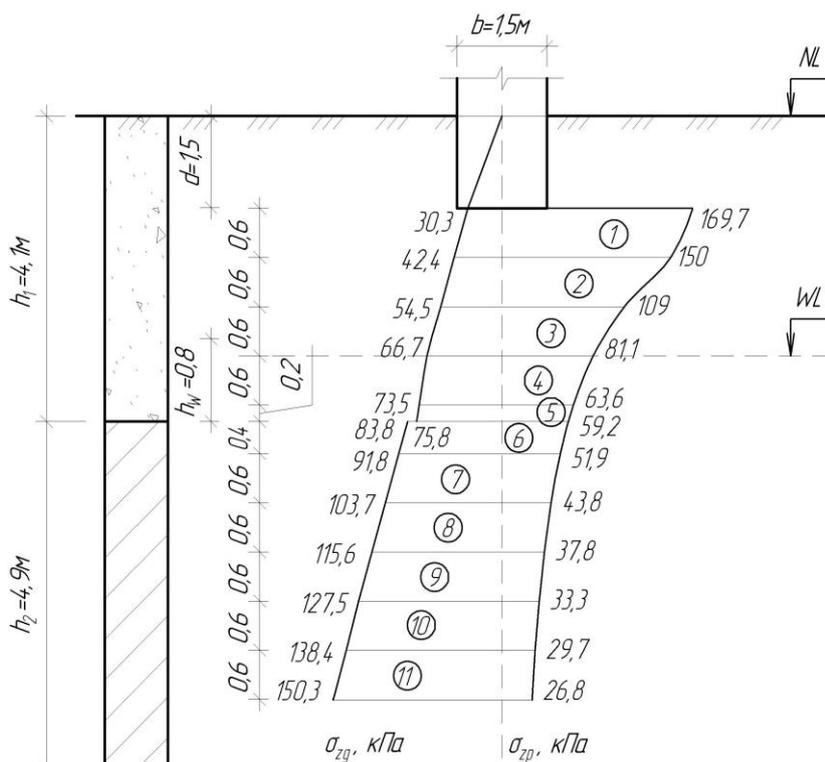


Рис. 29. Расчетная схема и эпюра распределения вертикальных напряжений в линейно деформируемом полупространстве

5.2 Расчет осадки по схеме линейно деформируемого слоя конечной толщины

Задача 19

Фундаментная плита, круглая (диаметром D) или прямоугольная (размерами подошвы в плане $l \times b$) и заложённая на глубине (рис.30) передает на грунтовое основание равномерно распределённую нагрузку интенсивностью p . Плита опирается на слой песка (мощность слоя от поверхности h_1 ; модуль общей деформации E_1) подстилаемый глинистым грунтом (мощность слоя h_2 ; модуль общей деформации E_2).

Требуется определить среднюю осадку плиты с использованием расчетной схемы линейно деформируемого слоя конечной толщины.

Исходные данные приведены в таблице 37.

Пример решения задачи 19 приведен для варианта 19.31.

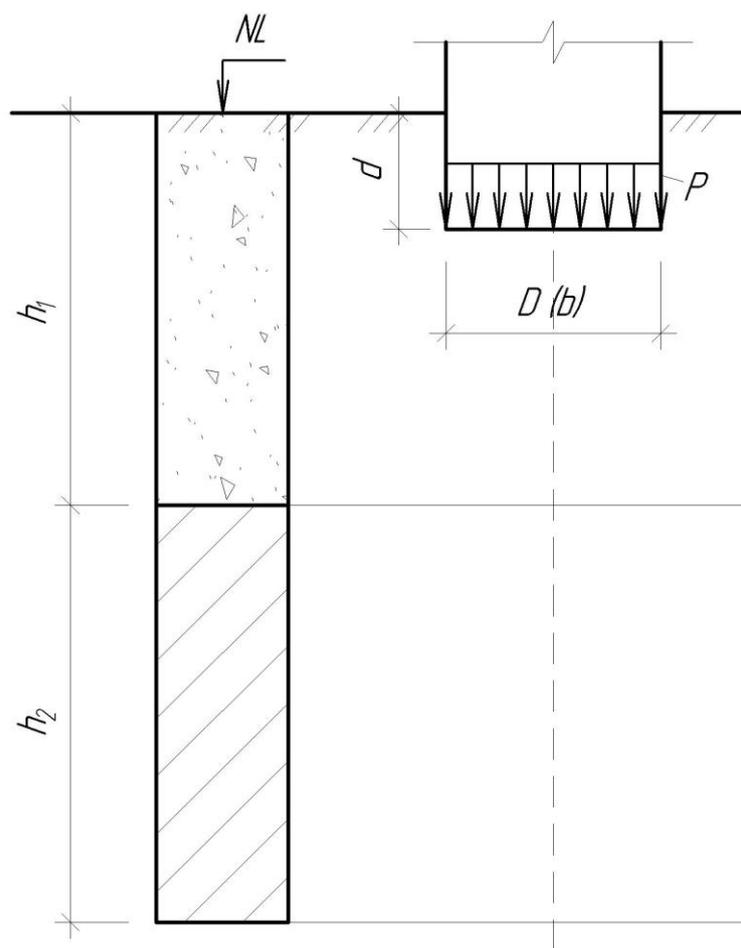


Рис. 30. Расчетная схема к задаче 19

Исходные данные к задаче 19

| Вариант | Форма фундаментной плиты | Диаметр D круглой или размеры $l \times b$ прямоугольной плиты, м | d , м | P , кПа | h_1 , м | E_1 , МПа | h_2 , м | E_2 , МПа |
|---------|--------------------------|---|---------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 19.1 | Круглая | 14 | 4,3 | 380 | 7,6 | 24 | 10,2 | 18 |
| 19.2 | Прямоугольная | 21 x 15 | 4,5 | 270 | 8,9 | 18 | 11,9 | 24 |
| 19.3 | Круглая | 12 | 3,4 | 300 | 6,5 | 36 | 12,6 | 28 |
| 19.4 | Прямоугольная | 36 x 20 | 4,6 | 280 | 8,0 | 38 | 11,5 | 21 |
| 19.5 | Круглая | 16 | 3,2 | 260 | 6,2 | 26 | 12,2 | 32 |
| 19.6 | Прямоугольная | 18 x 18 | 3,6 | 320 | 6,4 | 19 | 14,6 | 23 |
| 19.7 | Круглая | 12 | 3,8 | 410 | 7,2 | 20 | 15,2 | 28 |
| 19.8 | Прямоугольная | 28 x 20 | 4,8 | 310 | 6,9 | 21 | 13,9 | 19 |
| 19.9 | Круглая | 18 | 4,0 | 220 | 8,9 | 28 | 14,3 | 24 |
| 19.10 | Прямоугольная | 36 x 15 | 3,7 | 270 | 7,8 | 34 | 14,1 | 20 |
| 19.11 | Круглая | 10 | 4,2 | 230 | 7,7 | 21 | 10,4 | 28 |
| 19.12 | Прямоугольная | 36 x 18 | 4,4 | 330 | 9,0 | 19 | 12,1 | 25 |
| 19.13 | Круглая | 12 | 3,6 | 240 | 6,6 | 23 | 12,8 | 19 |
| 19.14 | Прямоугольная | 21 x 12 | 4,5 | 340 | 8,1 | 20 | 11,7 | 33 |
| 19.15 | Круглая | 15 | 3,1 | 250 | 6,2 | 25 | 12,4 | 27 |
| 19.16 | Прямоугольная | 27 x 18 | 3,7 | 350 | 6,4 | 24 | 14,8 | 29 |
| 19.17 | Круглая | 18 | 3,3 | 260 | 7,3 | 27 | 15,4 | 24 |
| 19.18 | Прямоугольная | 36 x 12 | 4,7 | 360 | 7,0 | 31 | 14,1 | 25 |
| 19.19 | Круглая | 21 | 3,9 | 270 | 9,0 | 28 | 14,5 | 31 |
| 19.20 | Прямоугольная | 36 x 18 | 3,6 | 370 | 7,9 | 32 | 14,3 | 27 |
| 19.21 | Круглая | 10 | 4,0 | 280 | 7,5 | 29 | 10,1 | 34 |
| 19.22 | Прямоугольная | 24 x 12 | 4,2 | 390 | 8,8 | 25 | 11,8 | 17 |
| 19.23 | Круглая | 11 | 3,2 | 290 | 6,3 | 30 | 12,5 | 24 |
| 19.24 | Прямоугольная | 30 x 12 | 4,4 | 210 | 7,9 | 27 | 11,4 | 33 |
| 19.25 | Круглая | 13 | 3,0 | 300 | 6,1 | 32 | 12,1 | 29 |
| 19.26 | Прямоугольная | 30 x 18 | 3,4 | 250 | 6,3 | 19 | 14,5 | 25 |
| 19.27 | Круглая | 15 | 3,6 | 310 | 7,1 | 34 | 15,1 | 24 |
| 19.28 | Прямоугольная | 27 x 15 | 4,2 | 290 | 6,8 | 29 | 13,8 | 35 |
| 19.29 | Круглая | 20 | 3,6 | 320 | 8,8 | 35 | 14,2 | 25 |
| 19.30 | Прямоугольная | 30 x 18 | 3,9 | 300 | 7,7 | 27 | 14,0 | 36 |
| 19.31 | Прямоугольная | 30 x 18 | 3,6 | 340 | 8,0 | 28 | 22,0 | 22 |

Решение

Метод линейно деформируемого слоя конечной толщины базируется

на следующих предпосылках:

1. Основание моделируется линейно деформируемой средой.
2. Деформациями слоев грунта, залегающих ниже определенной глубины H , пренебрегают. Толщина сжимаемой толщи (активной зоны) либо совсем не зависит, либо зависит незначительно от интенсивности нагрузки. Таким образом, расчет осадок ведут для линейно деформируемого слоя конечной толщины.
3. При расчете фундаментов больших размеров ($b \geq 10$ м) осадка вызывается средним давлением под подошвой фундамента; для фундаментов малых размеров ($b < 10$ м) осадка вызывается дополнительным вертикальным давлением, равным разности среднего давления под подошвой фундамента и напряжения от собственного веса грунта на той же глубине.
4. При определении осадок учитывают все три компонента нормальных напряжений.

В соответствии с п 2.40 [15] в случае, если ширина (диаметр) фундамента $b \geq 10$ м и модуль деформации грунта $E \geq \text{МПа}$, то расчет деформаций основания следует выполнять, применяя расчетную схему основания в виде линейно деформируемого слоя.

Толщина линейно деформируемого слоя зависит от характера грунтовых напластований. Если основание сложено только глинистыми или только песчаными грунтами, то используют формулу

$$H = (H_0 + \psi \cdot b) \cdot k_p, \quad (90)$$

где b – ширина прямоугольного или диаметр круглого фундамента;

H_0 и ψ – коэффициенты, принимаемые соответственно для глинистых грунтов – 9 м и 0,15, песчаных грунтов – 6 м и 0,10;

k_p – безразмерный коэффициент, учитывающий фактическое давление на основание при среднем давлении $p = 100$ кПа $k_p = 0,8$, при $p = 500$ кПа $k_p = 1,2$.

При назначении для промежуточных давлений пользуются интерполяционной формулой

$$k_p = 0,8 + (p - 100) \cdot 0,001. \quad (91)$$

Для условий рассматриваемой задачи 19.31, толщина линейно деформируемого слоя, в предположении, что основание сложено только глинистыми грунтами

$$H_{cl} = (9 + 0,15 \cdot 18) \cdot 1,04 = 12,168 \text{ м},$$

или в случае, если основание сложено только песчаными грунтами

$$H_s = (6 + 0,10 \cdot 18) \cdot 1,04 = 8,112 \text{ м},$$

здесь $k_p = 0,8 + (340-100) \cdot 0,001 = 1,04$.

Если основание сложено глинистыми и песчаными грунтами, значение толщины линейно деформируемого слоя определяется по формуле

$$H = H_s + h_{cl} / 3, \quad (92)$$

где h_{cl} – суммарная толщина слоев глинистых грунтов от подошвы фундамента до глубины, равной H_{cl} .

По расчетной схеме (рис. 32)

$$h_{cl} = H_{cl} - (h_1 - d) = 12,168 - (8,0 - 3,6) = 7,768 \text{ м}.$$

Тогда $H = 8,112 + 7,768/3 = 10,701 \text{ м}$.

Осадка основания с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого слоя определяется по формуле

$$s = \frac{p \cdot b \cdot k_c}{k_m} \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_i}, \quad (93)$$

где k_c – коэффициент, корректирующий решение по модели линейно деформируемого полупространства на основании решения для упругого слоя, принимается по таблице 38, в зависимости от относительной толщины слоя $\xi' = 2H/b$;

k_m – коэффициент, принимаемый по таблице 39;

k_i и k_{i-1} – коэффициенты, найденные на основе теории линейно деформируемой среды и представляющие собой с точностью до констант расчетной схемы перемещение точек кровли и подошвы подстилающего слоя в зависимости от их относительных координат $\xi = 2z/b$ и соотношения сторон прямоугольной площади фундамента $\eta = l/b$, принимаются

по таблице 40;

E_i – модуль деформации i -го слоя.

Таблица 38

Коэффициент k_c

| Относительная толщина слоя $\xi' = 2H/b$ | Коэффициент k_c |
|---|-------------------|
| $0 < \xi' \leq 0,5$ | 1,5 |
| $0,5 < \xi' \leq 1$ | 1,4 |
| $1 < \xi' \leq 2$ | 1,3 |
| $2 < \xi' \leq 3$ | 1,2 |
| $3 < \xi' \leq 5$ | 1,1 |
| $\xi' > 5$ | 1,0 |

Таблица 39

Коэффициент k_m

| Среднее значение модуля деформации грунта основания, E , МПа | Значения коэффициента k_m при ширине фундамента b , м | | |
|---|--|---------------------|----------|
| | $b < 10$ | $10 \leq b \leq 15$ | $b > 15$ |
| $E < 10$ | 1 | 1 | 1 |
| $E \geq 10$ | 1 | 1,35 | 1,5 |

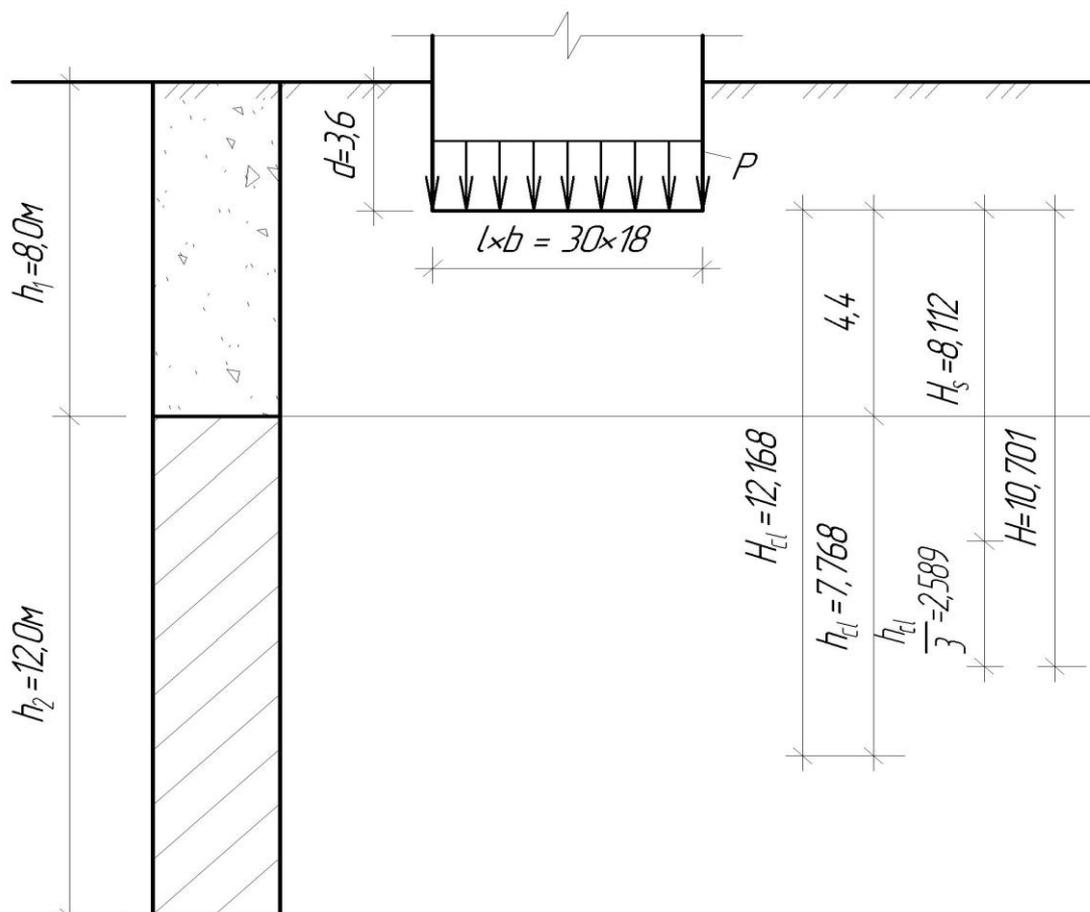


Рис. 31. Расчетная схема к задаче 19.31

Таблица 40

Коэффициент k Коэффициент k для фундаментов

| $\xi' = 2z/b$ | Коэффициент k для фундаментов | | | | | | | |
|---------------|---------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| | круглых | прямоугольных с соотношением сторон $\eta = l/b$ | | | | | | ленточных ($\eta \geq 10$) |
| | | 1 | 1,4 | 1,8 | 2,4 | 3,2 | 5 | |
| 0,0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,4 | 0,090 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,100 | 0,104 |
| 0,8 | 0,179 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,208 |
| 1,2 | 0,266 | 0,299 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,300 | 0,311 |
| 1,6 | 0,348 | 0,380 | 0,394 | 0,397 | 0,397 | 0,397 | 0,397 | 0,412 |
| 2,0 | 0,411 | 0,446 | 0,472 | 0,482 | 0,486 | 0,486 | 0,486 | 0,511 |
| 2,4 | 0,461 | 0,499 | 0,538 | 0,556 | 0,565 | 0,567 | 0,567 | 0,605 |
| 2,8 | 0,501 | 0,542 | 0,592 | 0,618 | 0,635 | 0,640 | 0,640 | 0,687 |
| 3,2 | 0,532 | 0,577 | 0,637 | 0,671 | 0,696 | 0,707 | 0,709 | 0,763 |
| 3,6 | 0,558 | 0,606 | 0,676 | 0,717 | 0,750 | 0,768 | 0,772 | 0,831 |
| 4,0 | 0,579 | 0,630 | 0,708 | 0,756 | 0,796 | 0,820 | 0,830 | 0,892 |
| 4,4 | 0,596 | 0,650 | 0,735 | 0,789 | 0,837 | 0,867 | 0,883 | 0,949 |
| 4,8 | 0,611 | 0,668 | 0,759 | 0,819 | 0,873 | 0,908 | 0,932 | 1,001 |

| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5,2 | 0,624 | 0,683 | 0,780 | 0,844 | 0,904 | 0,948 | 0,977 | 1,050 |
| 5,6 | 0,635 | 0,697 | 0,798 | 0,867 | 0,933 | 0,981 | 1,018 | 1,095 |
| 6,0 | 0,645 | 0,708 | 0,814 | 0,887 | 0,958 | 1,011 | 1,056 | 1,138 |
| 6,4 | 0,653 | 0,719 | 0,828 | 0,904 | 0,980 | 1,041 | 1,090 | 1,178 |
| 6,8 | 0,661 | 0,728 | 0,841 | 0,920 | 1,000 | 1,065 | 1,122 | 1,215 |
| 7,2 | 0,668 | 0,736 | 0,852 | 0,935 | 1,019 | 1,088 | 1,152 | 1,251 |
| 7,6 | 0,674 | 0,744 | 0,863 | 0,948 | 1,036 | 1,109 | 1,118 | 1,285 |
| 8,0 | 0,679 | 0,751 | 0,872 | 0,960 | 1,051 | 1,128 | 1,205 | 1,316 |
| 8,4 | 0,684 | 0,757 | 0,881 | 0,970 | 1,065 | 1,146 | 1,229 | 1,347 |
| 8,8 | 0,689 | 0,762 | 0,888 | 0,980 | 1,078 | 1,162 | 1,251 | 1,376 |
| 9,2 | 0,693 | 0,768 | 0,896 | 0,989 | 1,089 | 1,178 | 1,272 | 1,404 |
| 9,6 | 0,697 | 0,772 | 0,902 | 0,998 | 1,100 | 1,192 | 1,291 | 1,431 |
| 10,0 | 0,700 | 0,777 | 0,908 | 1,005 | 1,110 | 1,205 | 1,309 | 1,456 |
| 11,0 | 0,705 | 0,786 | 0,922 | 1,022 | 1,132 | 1,233 | 1,349 | 1,506 |
| 12,0 | 0,720 | 0,794 | 0,933 | 1,037 | 1,151 | 1,257 | 1,384 | 1,550 |

В рассматриваемой задаче 2.31:

при $\xi' = 2 \cdot 10,701/18 = 1,189 - k_c = 1,3$;

при среднем значении модуля деформации грунта основания $E > 10$ МПа
и ширине фундамента $b > 15$ м - $k_m = 1,5$;

учитывая, что $\eta = 30/18 = 1,667$, при $\xi_1 = 2 \cdot 4,4/18 = 0,489 - k_1 = 0,122$,

при $\xi_2 = 2 \cdot 10,701/18 = 1,189 - k_2 = 0,297$.

Таким образом, осадка основания равна

$$s = \frac{0,34 \cdot 18 \cdot 1,3}{1,5} \left(\frac{0,122 - 0}{28} + \frac{0,297 - 0,122}{22} \right) = 0,0653 \text{ м} = 6,53 \text{ см.}$$

5.3 Расчет осадки методом эквивалентного слоя и определение затухания осадки во времени

Задача 20

Абсолютно жёсткий фундамент с размерами подошвы в плане $l \times b$ (рис. 32) передает равномерно распределенную нагрузку интенсивностью P на слой суглинка (мощность слоя h_1 ; модуль общей деформации E_1 ; коэффициент фильтрации k_1), подстилаемый пылевато-глинистым грунтом (мощность слоя h_2 ; модуль общей деформации E_2 ; коэффициент фильтрации k_2).

Требуется определить по методу эквивалентного слоя полную стабили-

| | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-------|---------------------|-----|-------|---------------------|
| 20.1 | 260 | 2,4 | 2,4 | 2,3 | 0,095 | $6,4 \cdot 10^{-8}$ | 4,5 | 0,196 | $3,2 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.2 | 160 | 1,8 | 1,8 | 2,7 | 0,222 | $1,7 \cdot 10^{-8}$ | 3,8 | 0,065 | $8,4 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.3 | 280 | 3,6 | 1,8 | 1,8 | 0,105 | $2,7 \cdot 10^{-8}$ | 5,6 | 0,276 | $1,6 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.4 | 180 | 3,0 | 3,0 | 3,9 | 0,148 | $1,4 \cdot 10^{-8}$ | 6,2 | 0,258 | $5,6 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.5 | 230 | 3,0 | 2,1 | 2,4 | 0,087 | $2,3 \cdot 10^{-8}$ | 7,8 | 0,147 | $3,8 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.6 | 220 | 4,8 | 2,4 | 2,9 | 0,105 | $5,1 \cdot 10^{-8}$ | 5,5 | 0,245 | $6,9 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.7 | 170 | 3,6 | 1,8 | 3,8 | 0,076 | $2,4 \cdot 10^{-8}$ | 5,0 | 0,381 | $1,8 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.8 | 190 | 3,6 | 2,4 | 3,2 | 0,065 | $1,2 \cdot 10^{-8}$ | 4,8 | 0,124 | $2,5 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.9 | 210 | 2,1 | 2,1 | 3,1 | 0,139 | $4,3 \cdot 10^{-8}$ | 6,0 | 0,215 | $4,6 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.10 | 240 | 2,4 | 2,4 | 2,8 | 0,176 | $2,2 \cdot 10^{-8}$ | 5,6 | 0,284 | $4,1 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.11 | 250 | 2,1 | 1,8 | 2,2 | 0,105 | $6,5 \cdot 10^{-8}$ | 4,3 | 0,206 | $7,4 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.12 | 150 | 2,4 | 1,8 | 2,9 | 0,201 | $1,8 \cdot 10^{-8}$ | 3,6 | 0,075 | $2,7 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.13 | 270 | 2,4 | 2,1 | 2,0 | 0,115 | $2,8 \cdot 10^{-8}$ | 5,4 | 0,286 | $3,7 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.14 | 170 | 2,7 | 2,1 | 4,1 | 0,158 | $1,5 \cdot 10^{-8}$ | 6,0 | 0,268 | $2,4 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.15 | 220 | 3,0 | 2,4 | 2,2 | 0,097 | $2,4 \cdot 10^{-8}$ | 7,6 | 0,157 | $3,3 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.16 | 210 | 3,3 | 2,4 | 3,1 | 0,112 | $5,2 \cdot 10^{-8}$ | 5,3 | 0,255 | $6,1 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.17 | 160 | 3,6 | 2,7 | 4,0 | 0,086 | $2,5 \cdot 10^{-8}$ | 4,8 | 0,371 | $3,4 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.18 | 180 | 4,2 | 3,0 | 3,4 | 0,075 | $1,3 \cdot 10^{-8}$ | 4,6 | 0,134 | $2,2 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.19 | 200 | 4,2 | 3,0 | 3,3 | 0,149 | $4,4 \cdot 10^{-8}$ | 5,8 | 0,225 | $5,3 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.20 | 230 | 4,8 | 3,6 | 3,0 | 0,186 | $2,3 \cdot 10^{-8}$ | 5,4 | 0,294 | $7,0 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.21 | 270 | 2,1 | 1,8 | 2,8 | 0,111 | $7,4 \cdot 10^{-8}$ | 4,0 | 0,177 | $6,5 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.22 | 270 | 2,4 | 1,8 | 3,2 | 0,217 | $2,7 \cdot 10^{-8}$ | 3,3 | 0,064 | $2,2 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.23 | 170 | 2,4 | 2,1 | 2,3 | 0,121 | $3,7 \cdot 10^{-8}$ | 5,1 | 0,264 | $3,2 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.24 | 290 | 2,7 | 2,1 | 4,4 | 0,159 | $2,4 \cdot 10^{-8}$ | 5,7 | 0,248 | $1,9 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.25 | 190 | 3,0 | 2,4 | 2,9 | 0,099 | $3,3 \cdot 10^{-8}$ | 7,3 | 0,137 | $2,8 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.26 | 240 | 3,3 | 2,4 | 4,3 | 0,117 | $6,1 \cdot 10^{-8}$ | 5,0 | 0,233 | $5,6 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.27 | 230 | 3,6 | 2,7 | 3,7 | 0,089 | $2,4 \cdot 10^{-8}$ | 4,5 | 0,369 | $2,9 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.28 | 180 | 4,2 | 3,0 | 3,6 | 0,068 | $1,2 \cdot 10^{-8}$ | 4,3 | 0,144 | $1,7 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.29 | 200 | 4,2 | 3,0 | 3,3 | 0,151 | $4,3 \cdot 10^{-8}$ | 5,5 | 0,199 | $1,8 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.30 | 220 | 4,8 | 3,6 | 3,8 | 0,165 | $2,2 \cdot 10^{-8}$ | 5,1 | 0,269 | $6,5 \cdot 10^{-9}$ |
| 20.31 | 190 | 2,4 | 2,4 | 3,1 | 0,065 | $1,2 \cdot 10^{-8}$ | 4,8 | 0,124 | $2,5 \cdot 10^{-9}$ |

Решение

В методе эквивалентного слоя конечную осадку фундамента определяют в результате решения задачи теории упругости о деформировании

упругого полупространства под действием равномерно распределенной нагрузки по формуле

$$s = h_3 \cdot m_v \cdot p, \quad (94)$$

где m_v – коэффициент относительной сжимаемости грунта;

p – давление по подошве фундамента;

h_3 – мощность эквивалентного слоя грунта.

$$h_3 = A \cdot \omega \cdot b, \quad (95)$$

где b – ширина подошвы фундамента;

ω – коэффициент, зависящий от формы подошвы и жесткости фундамента;

A – коэффициент, зависящий от коэффициента относительной поперечной деформации грунта ν .

$$A = \frac{(1 - \nu)^2}{1 - 2 \cdot \nu}. \quad (96)$$

Произведение $A\omega$ называют коэффициентом эквивалентного слоя, который можно найти по данным таблицы 42.

По условию рассматриваемой задачи для абсолютно жесткого фундамента ($A\omega_{\text{const}}$), при коэффициенте относительной поперечной деформации $\nu = 0,3$ и соотношении сторон подошвы фундамента $\eta = 2,4/2,4 = 1$, коэффициент эквивалентного слоя $A\omega = 0,8$.

Толщина эквивалентного слоя грунта

$$h_3 = 1,08 \cdot 2,4 = 2,59 \text{ м.}$$

Сжимаемая толща основания определяется по формуле

$$H_c = 2 \cdot h_3 = 2 \cdot 2,59 = 5,18 \text{ м.}$$

При слоистом основании используется средний коэффициент относительной сжимаемости, определяемый из условия, что в пределах сжимаемой толщи полная осадка равна сумме осадок входящих в нее слоев. Средний коэффициент относительной сжимаемости находится из выражения

$$m_{vm} = \frac{1}{2h_3^2} \sum_{i=1}^n h_i \cdot m_{v,i} \cdot z_i, \quad (97)$$

где h_i – мощность i -го слоя грунта в пределах сжимаемой толщи;
 m_{vi} – коэффициент относительной сжимаемости i -го слоя;
 z_i – расстояние от точки, соответствующей глубине H_c , до середины i -го слоя грунта.

Для рассматриваемой задачи 20.31 (рис. 33)

$$h_1 = H_1 = 3,1 \text{ м};$$

$$z_1 = H_c - h_1/2 = 5,18 - 3,10/2 = 3,63 \text{ м};$$

$$h_2 = H_c - h_1 = 5,18 - 3,10 = 2,08 \text{ м};$$

$$z_2 = h_2/2 = 2,08/2 = 1,04 \text{ м}.$$

$$m_{vm} = \frac{1}{2 \cdot 2,59^2} (3,10 \cdot 0,065 \cdot 3,63 + 2,08 \cdot 0,124 \cdot 1,04) =$$

$$= 0,075 \text{ МПа}^{-1} = 0,0075 \text{ см}^2/\text{кгс}.$$

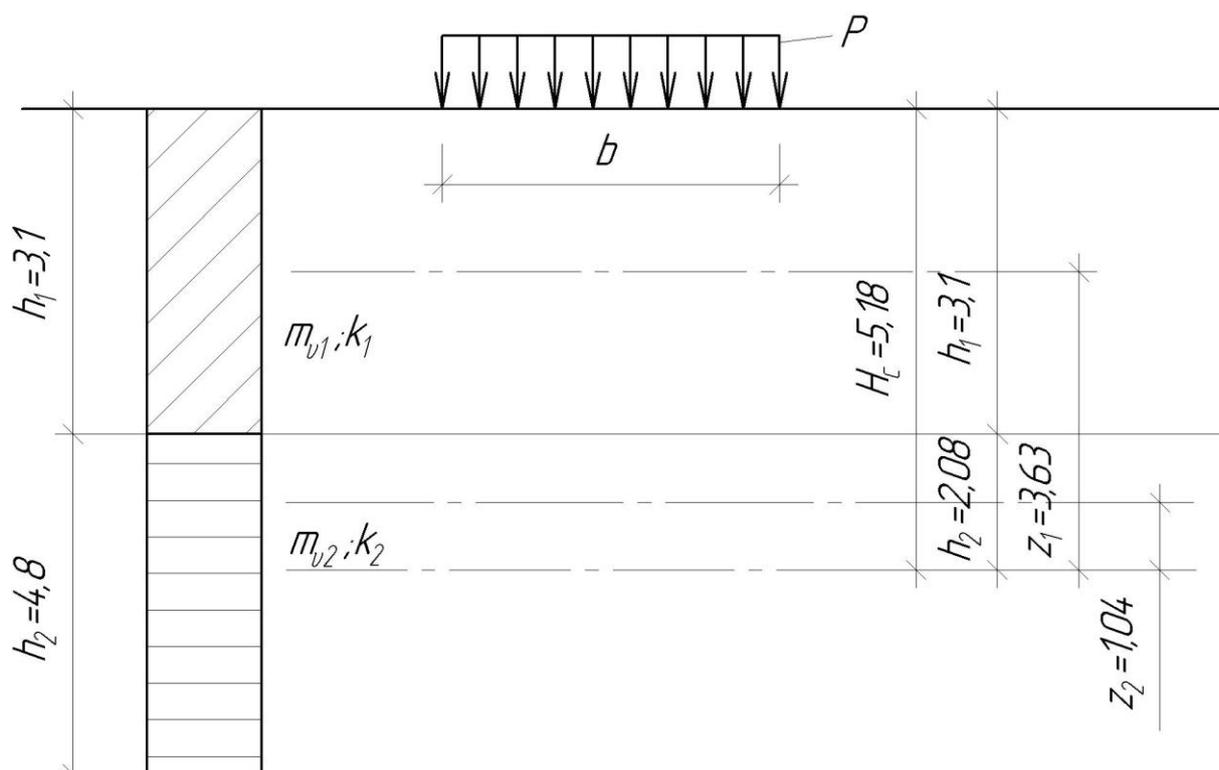


Рис. 33. Расчетная схема к задаче 3.31

Значение коэффициента эквивалентного слоя $A\omega$

| Соотношение $\eta = \frac{l}{b}$ | Гравий и галька | | | Пески | | | | | | Суглинки пластичные | | | | | | Глины и суглинки мягкопластичные | | |
|-------------------------------------|--|-------------|-------------------|--------------|-------------|-------------------|-----------------------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------|-------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------|
| | Глины и суглинки твердые и полутвердые | | | | | | Супеси твердые и пластичные | | | | | | Глины пластичные | | | | | |
| | $\nu = 0,10$ | | | $\nu = 0,20$ | | | $\nu = 0,25$ | | | $\nu = 0,30$ | | | $\nu = 0,35$ | | | $\nu = 0,40$ | | |
| 1,0 | 1,13 | 0,96 | 0,89 | 1,20 | 1,01 | 0,94 | 1,26 | 1,07 | 0,99 | 1,37 | 1,17 | 1,08 | 1,58 | 1,34 | 1,24 | 2,02 | 1,71 | 1,58 |
| 1,5 | 1,37 | 1,16 | 1,09 | 1,45 | 1,23 | 1,15 | 1,53 | 1,30 | 1,21 | 1,66 | 1,40 | 1,32 | 1,91 | 1,62 | 1,52 | 2,44 | 2,07 | 1,94 |
| 2,0 | 1,55 | 1,31 | 1,23 | 1,63 | 1,39 | 1,30 | 1,72 | 1,47 | 1,37 | 1,88 | 1,60 | 1,49 | 2,16 | 1,83 | 1,72 | 2,76 | 2,34 | 2,20 |
| 3,0 | 1,81 | 1,55 | 1,46 | 1,90 | 1,63 | 1,54 | 2,01 | 1,73 | 1,62 | 2,18 | 1,89 | 1,76 | 2,51 | 2,15 | 2,01 | 3,21 | 2,75 | 2,59 |
| 4,0 | 1,99 | 1,72 | 1,63 | 2,09 | 1,81 | 1,72 | 2,21 | 1,92 | 1,81 | 2,41 | 2,09 | 1,97 | 2,77 | 2,39 | 2,26 | 3,53 | 3,06 | 2,90 |
| 5,0 | 2,13 | 1,85 | 1,74 | 2,24 | 1,95 | 1,84 | 2,37 | 2,07 | 1,94 | 2,58 | 2,25 | 2,11 | 2,96 | 2,57 | 2,42 | 3,79 | 3,29 | 3,10 |
| 6,0 | 2,25 | 1,98 | - | 2,37 | 2,09 | - | 2,50 | 2,21 | - | 2,72 | 2,41 | - | 3,14 | 2,76 | - | 4,00 | 4,53 | - |
| 7,0 | 2,35 | 2,06 | - | 2,47 | 2,18 | - | 2,61 | 2,31 | - | 2,84 | 2,51 | - | 3,26 | 2,87 | - | 4,18 | 2,67 | - |
| 8,0 | 2,43 | 2,14 | - | 2,56 | 2,26 | - | 2,70 | 2,40 | - | 2,94 | 2,61 | - | 3,38 | 2,98 | - | 4,32 | 3,82 | - |
| 9,0 | 2,51 | 2,21 | - | 2,64 | 2,34 | - | 2,79 | 2,47 | - | 3,03 | 2,69 | - | 3,49 | 3,08 | - | 4,46 | 3,92 | - |
| 10 и более | 2,58 | 2,27 | 2,15 | 2,71 | 2,40 | 2,26 | 2,86 | 2,54 | 2,38 | 3,12 | 2,77 | 2,60 | 3,58 | 3,17 | 2,98 | 4,58 | 4,05 | 3,82 |
| Коэффициент | $A\omega_0$ | $A\omega_m$ | $A\omega_{const}$ | $A\omega_0$ | $A\omega_m$ | $A\omega_{const}$ | $A\omega_0$ | $A\omega_m$ | $A\omega_{const}$ | $A\omega_0$ | $A\omega_m$ | $A\omega_{const}$ | $A\omega_0$ | $A\omega_m$ | $A\omega_{const}$ | $A\omega_0$ | $A\omega_m$ | $A\omega_{const}$ |

Полная стабилизированная осадка

$$s = 2,59 \cdot 0,075 \cdot 0,19 = 0,0393 \text{ м} = 3,69 \text{ см.}$$

В соответствии с фильтрационной теорией консолидации осадку, происходящую за время t , определяют по формуле

$$s_t = U \cdot s, \quad (98)$$

где U – степень консолидации (уплотнения), представляющая собой долю от полной осадки за время t .

Степень консолидации U зависит от условий отвода вытесняемой воды и коэффициента N , являющегося функцией времени t

$$N = \frac{\pi^2 \cdot c_{vm} \cdot t}{4 \cdot H_c^2}, \quad (99)$$

где c_{vm} – средний коэффициент консолидации t .

$$c_{vm} = \frac{k_{\phi m}}{m_{vm} \cdot \gamma_w}, \quad (100)$$

где γ_w – удельный вес воды, $\gamma_w = 0,001 \text{ кгс/см}^3$;

$k_{\phi m}$ – средний коэффициент фильтрации слоистого основания

$$k_{\phi m} = \frac{H_c}{\sum_{i=1}^n h_i / k_{\phi i}}, \quad (101)$$

где h_i – мощность i -го слоя грунта в пределах сжимаемой толщи;

$k_{\phi i}$ – коэффициент фильтрации i -го слоя;

Для данной расчетной схемы (рис. 33)

$$k_{\phi m} = \frac{518}{\frac{310}{1,2 \cdot 10^{-8}} + \frac{208}{2,5 \cdot 10^{-9}}} = 4,75 \cdot 10^{-9} \text{ см/с};$$

$$k_{\phi m} = 4,75 \cdot 10^{-9} \text{ см/с} \cdot 3,15 \cdot 10^7 \text{ с/год} = 0,150 \text{ см/год};$$

$$c_{vm} = \frac{0,150}{0,0075 \cdot 0,001} = 20000 \text{ см}^2/\text{год}.$$

Задаваясь той или иной степенью консолидации ($U = 0,1$, $0,2$, $0,3$ и т.д.) принимают по таблице 5.4 [12] соответствующие значения коэффициента N

для случая убывания давлений с глубиной по треугольной эпюре и, используя зависимость для N , определяют время t , соответствующее данной степени консолидации

$$t = \frac{4 \cdot H_c^2}{\pi^2 \cdot c_{vm}} \cdot N = \frac{4 \cdot 518^2}{3,14^2 \cdot 20000} \cdot N = 5,43 N.$$

Таблица 43

Расчет изменения осадки во времени

| U | N | $t = 5,43 N$, год | $s_t = U \cdot s$, см |
|------|-------|--------------------|------------------------|
| 0,1 | 0,005 | 0,027 | 0,37 |
| 0,2 | 0,02 | 0,109 | 0,74 |
| 0,3 | 0,06 | 0,326 | 1,11 |
| 0,4 | 0,13 | 0,706 | 1,48 |
| 0,5 | 0,24 | 1,303 | 1,85 |
| 0,6 | 0,42 | 2,281 | 2,22 |
| 0,7 | 0,69 | 3,747 | 2,59 |
| 0,8 | 1,08 | 5,894 | 2,96 |
| 0,9 | 1,77 | 9,611 | 3,33 |
| 0,95 | 2,54 | 13,79 | 3,52 |

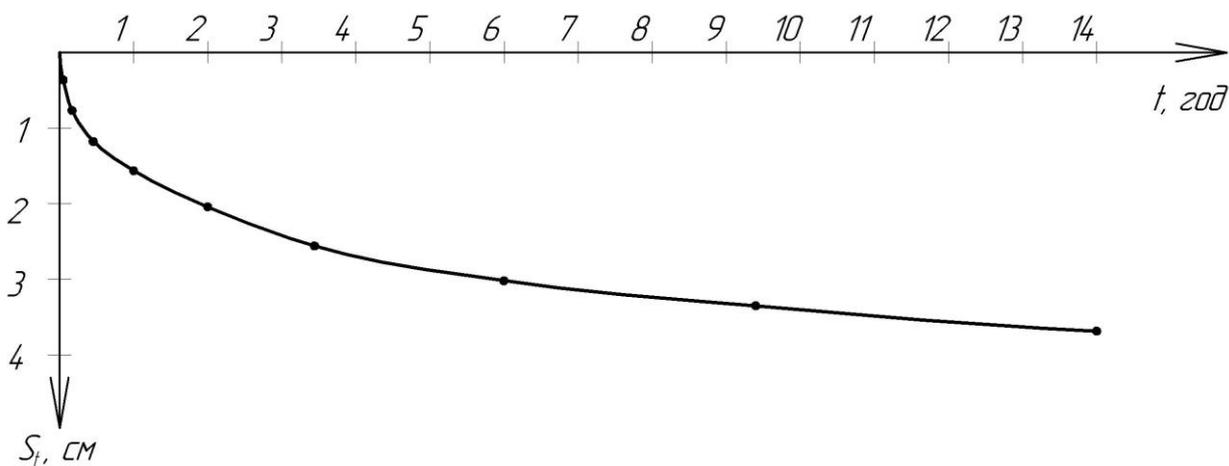


Рис. 34. График затухания осадки во времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартоломей, А.А. Механика грунтов: учебник/А.А.Бартоломей – М.: АСВ, 2004. – 304 с.
2. Берлинов, М.В. Основания и фундаменты: учебник/М.В.Берлинов – М.: Высшая школа, 1988. – 319 с.
3. Далматов, Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии): учебник / 3-е изд./ Б.И.Далматов. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 2012. - 415 с.
4. Заручевных, И.Ю. Механика грунтов в схемах и таблицах / 2-е изд./ И.Ю. Заручевных, А.Л. Невзоров. – М: Издательство АСВ, 2011. – 136 с.
5. Знаменский, В.В. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебное пособие для строительных специальностей вузов / В.В. Знаменский. – М: Высшая школа, 2010. – 566 с.
6. Механика грунтов. Основания и фундаменты: учебное пособие / А.И. Догадайло, В.А. Догадайло. – 2-е изд., испр. и доп. – М: Юриспруденция, 2010. – 192 с.
7. Механика грунтов: учебное пособие / С.А. Пьянков, З.К. Азизов. - Ульяновск: Изд-во УЛГТУ, 2008. – 103 с.
8. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник/под ред. С.Б. Ухова. - М.: Высшая школа, 2002. – 568 с.
9. Основания, фундаменты и подземные сооружения: справочник / М.И. Горбунов-Посадов [и др.]; под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
10. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.
11. Справочник по механике и динамике грунтов / В.Б. Швец [и др.]; под ред. В.Б. Швеца. – Киев.: Будівельник, 1987. – 232 с.
12. Цытович, Н.А. Механика грунтов (краткий курс)/ Н.А. Цытович Н.А. – М.: Высшая школа., 1983. – 288 с.

- 13.ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. Введ. 31.12.94.
- 14.ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введ. 31.12.95.
- 15.СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. - М.: ЦППМП Мин-стра России, 1995. – 50 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Содержание дисциплины | 4 |
| Порядок выполнения и указания к оформлению контрольной работы | 10 |
| 1 Основы грунтоведения | 12 |
| 1.1 Физические свойства грунтов | 12 |
| Задача 1 | 13 |
| Задача 2 | 15 |
| 1.2 Классификация скальных грунтов | 17 |
| Задача 3 | 17 |
| 1.3 Классификация крупнообломочных и песчаных грунтов | 19 |
| Задача 4 | 20 |
| 1.4 Классификация глинистых грунтов | 22 |
| Задача 5 | 23 |
| 1.5 Нормативные и расчетные значения физических характеристик грунтов | 24 |
| Задача 6 | 26 |
| 2 Механические свойства грунтов | 30 |
| 2.1 Сжимаемость грунтов | 30 |
| Задача 7 | 30 |
| 2.2 Прочностные свойства грунтов | 33 |
| Задача 8 | 33 |
| 2.3 Трехосное сжатие грунтов | 36 |
| Задача 9 | 36 |
| 3 Определение напряжений в массиве грунта | 39 |
| 3.1 Определение напряжений в массиве грунта от действия сосредоточенной силы | 39 |
| Задача 10 | 39 |

| | |
|--|-----|
| 3.2 Определение напряжений в массиве грунта от действия полосовой нагрузки | 44 |
| Задача 11 | 44 |
| 3.3 Определение напряжений в массиве грунта от нагрузки, равномерно распределенной по прямоугольной площадке | 50 |
| Задача 12 | 50 |
| 4 Теория предельного равновесия грунтов | 59 |
| 4.1 Прочность и устойчивость оснований сооружений | 59 |
| Задача 13 | 59 |
| 4.2 Устойчивость откосов и склонов | 61 |
| Задача 14 | 61 |
| Задача 15 | 64 |
| 4.3 Давление грунтов на ограждающие конструкции | 69 |
| Задача 16 | 69 |
| Задача 17 | 73 |
| 5 Расчет осадок фундаментов | 83 |
| 5.1 Расчет осадки по схеме линейно деформируемого полупространства методом послойного суммирования | 83 |
| Задача 18 | 83 |
| 5.2 Расчет осадки по схеме линейно деформируемого слоя конечной толщины | 89 |
| Задача 19 | 89 |
| 5.3 Расчет осадки методом эквивалентного слоя и определение затухания осадки во времени | 95 |
| Задача 20 | 95 |
| Список литературы | 102 |