

практ. конф., Санкт-Петербург, 08–10 ноября 2017 года / Санкт-Петербургская ассоциация геодезии и картографии. – Санкт-Петербург : Политехника, 2017. – С. 213–216.

4 Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020 / М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2020. – 245 с.

5 Юницкий, А. Э. Эффективные фундаменты промежуточных опор транспортной эстакады uST / А. Э. Юницкий, А. Н. Солодкин // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 16–17 ноября 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 449 с.

УДК 624.131.7

ВЫБОР РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ АНКЕРНЫХ ОПОР

А. Э. ЮНИЦКИЙ

*Доктор философии транспорта, генеральный конструктор
ЗАО «Струнные технологии», г. Минск,
Республика Беларусь*

А. Н. ПЕТРОВЕЦ

*Инженер-проектировщик конструкторского бюро
«Железобетонные конструкции» ЗАО «Струнные технологии»,
Республика Беларусь*

Наиболее сложной задачей инженера-проектировщика при проектировании железобетонных конструкций транспортной эстакады (применительно к настоящему исследованию – на примере комплекса Unitsky String Technologies (uST)) является проектирование фундамента под анкерную опору – сооружение, воспринимающее значительные горизонтальные и вертикальные усилия от путевой структуры (рисунок 1), обеспечивающее её натяжение и устойчивое положение в пространстве [1]. От корректного выбора расчётной модели основания зависит результат расчёта основания фундамента. В данной работе рассмотрены основные расчётные модели грунтового основания, которые также могут быть использованы при проектировании транспортной эстакады uST, показаны их основные достоинства и недостатки.

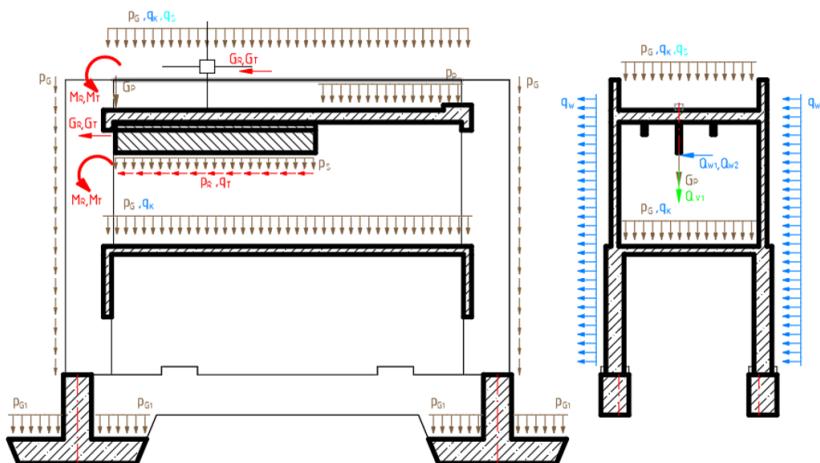


Рисунок 1 – Схема нагрузок, действующих на анкерную опору (вес путевой структуры – G_p, p_p ; усилие натяжения путевой структуры – G_R, p_R ; температурные воздействия на путевую структуру – G_T, q_T)

Модель Фусса-Винклера – это самая простая общепринятая из всех моделей, которая допускает расчёт грунта как упругого и линейно-деформированного тела. Коэффициент пропорциональности между нагрузкой и деформацией называется коэффициентом постели C_1 [2]. Работа грунта рассматривается как ряд пружин одинаковой жёсткости, которые опираются на абсолютно жёсткое тело и работают независимо друг от друга. При этом пружины за пределами фундамента не будут включены в работу – будут находиться в не сжатом состоянии (рисунок 2).

При использовании данной модели имеется ряд недостатков: модель не учитывает касательные напряжения под подошвой, коэффициент постели зависит от размеров штампа, осадка грунта происходит только в зоне приложения нагрузки.

Несмотря на свои недостатки, модель является простой и наглядной. Если корректно определить коэффициент постели, то данную модель можно использовать в простых задачах и находить достаточно приближённое решение.

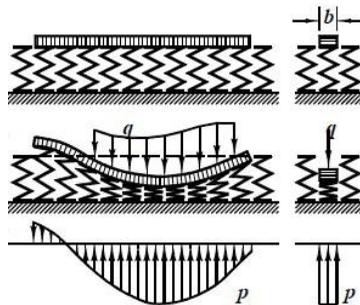


Рисунок 2 – Визуальное представление модели Фусса-Винклера

Модель Пастернака. В отличие от предыдущей гипотезы, модель Пастернака описывает упругие характеристики грунта уже двумя константами – коэффициентами постели C_1 и C_2 [3]. Коэффициент C_1 рассматривает сжатие грунта, а C_2 учитывает и сдвиг (рисунки 3).

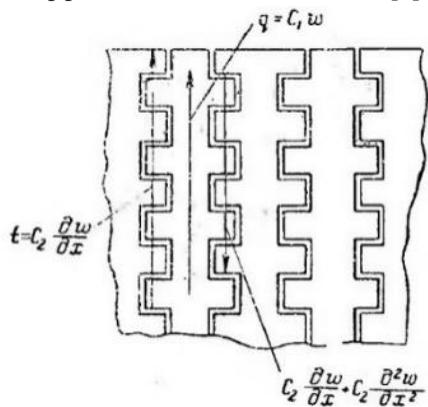


Рисунок 3 – Визуальное представление модели Пастернака

Силы сдвига возникают в грунте за счёт трения между частицами грунта. Появление второго коэффициента изменяет характер первого. В результате оба параметра легко определяются экспериментами в полевых условиях.

Модель Пастернака позволяет исправить недостатки теории Винклера с точки зрения распределительной способности грунта, но двухпараметрическая модель вызывает фиктивные напряжения на краях фундамента. Кроме того, данная модель учитывает однородный

грунт лишь в пределах сжимаемой толщи, для определения которой требуется произвести значительное количество расчётов.

Модель упругого полупространства. Под упругим полупространством понимается упругая среда, не ограниченная в стороны и вниз, а ограниченная только сверху плоскостью. В основе модели лежит закон Гука [4]. В условиях данной модели поверхность грунта оседает и в пределах нагружения, и за пределами. Модель может применяться только на этапе однократного нагружения, так как, подчиняясь закону Гука (рисунок 4), грунт полностью восстанавливается после снятия нагрузки, что не соответствует действительности. Также данная гипотеза имеет завышенную распределительную способность.

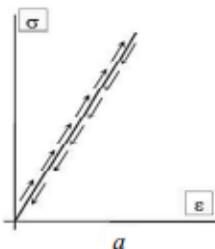


Рисунок 4 – Диаграмма линейно-упругой работы

При проектировании плитного фундамента значительных размеров в грунте появляются большие осадки, образуется воронка «оседания». Это происходит из-за того, что модель игнорирует уплотнение грунта и увеличение модуля деформации по глубине от собственного веса, что должно было уменьшать осадку (с теоретической и практической точек зрения).

Модель упругопластической среды. Модель совмещает в себе гипотезу линейно деформируемого полупространства и модели предельного равновесия. Эту модель также называют моделью Мора – Кулона. Диаграмма

Мора (рисунок 5) служит для определения всех компонентов напряжений, действующих по любой, как угодно направленной, площадке в точке сплошной среды, характеризуя напряжённое состояние в точке. Если круг Мора касается предельной огибающей, то это напряжённое состояние будет предельным. Диаграмма Мора строится в координатах « τ (касательное напряжение) – σ (нормальное напряжение)» для любой площадки [5].

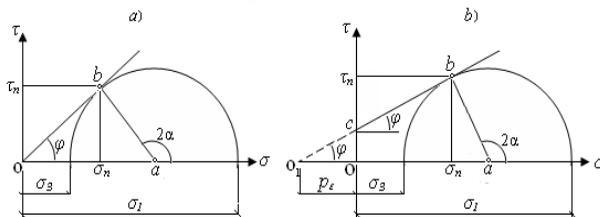


Рисунок 5 – Диаграмма Мора – Кулона грунта:
 а – сыпучего, б – связного

Данная модель предполагает наличие в грунтовой среде как области линейно деформируемого полупространства, так и области, подчиняющейся теории предельного равновесия (рисунок 6) [6].

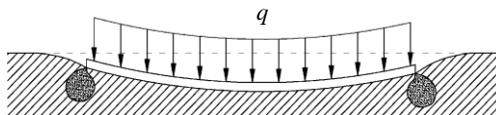


Рисунок 6 – Модель упругопластической среды

Теория прочности Мора совместно с условием предельного равновесия Кулона (см. формулу 1) стала наиболее приближённой для корректной оценки рабочего состояния грунта: упругое поведение при малых нагрузках, малая жёсткость материала при разрушении, условия разгрузки и упругая разгрузка после течения.

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c. \quad (1)$$

Данная модель в наибольшей степени подходит для расчёта оснований, однако не является достаточно точной. Вводные параметры для расчёта получают опытным путём и вводятся как константы, при этом увеличение модуля упругости по глубине от действующей нагрузки не учитывается, следовательно, осадки получаются больше, чем могли бы быть.

Для решения проблемы упрочнения грунта по глубине введены ещё две модели упругопластической работы, которые включают условие увеличения модуля деформации по глубине – типа *Hardening Soil Model* и модель *модифицированного Мора – Кулона*. Модели основываются на теории разрушения Мора – Кулона, упругой области напряжённо-деформированного сос-

тояния – Duncan-Chang с изменяемыми модулями упругости, а описание пластических сдвиговых и объёмных деформаций – функции девиаторного и изотропного нагружения (рисунок 7) [7]. Для расчёта по данным моделям, кроме стандартных испытаний образцов грунта, необходимо проводить испытания на трёхосное сжатие для получения вводных параметров математической модели [8].



Рисунок 7 – Диаграмма Hardening Soil Model (модель упрочняющегося грунта)

Модели получили широкое применение в мире благодаря наиболее реальным результатам осадок и поведению грунта в целом. Цифровые данные для математической модели грунта E_{oed}^{ref} , E_{50}^{ref} , E_{ur}^{ref} , R_f , m , c , ϕ помогают наиболее точно описать график зависимости деформаций и девиатором напряжений, и в результате реальные осадки будут меньше, чем при стандартном методе послойного суммирования без учёта природного состояния грунта.

В результате краткого анализа можно сделать вывод о применении той или иной модели:

- модели *Винклера* и *Пастернака* можно использовать для расчёта фундаментов и оснований менее трудоёмких сооружений в целях экономии и упрощения инженерно-геологических изысканий и получения приближенных (общих, сутевых) результатов;

- модель *упругого полупространства* допускается принимать, когда расчёт производится в одну стадию – при загрузении без разгрузки с обратным нагружением. Данный метод менее актуален для фундаментов анкерных опор эстакад uST, т. к. присутствует цикличность загрузки горизонтальной нагрузкой из-за температурных перепадов;

- модель *упругопластической работы* грунта в первую очередь следует принимать для расчёта устойчивости грунтовых массивов;

- наиболее подходящими моделями для расчёта оснований фундаментов анкерных опор транспортной эстакады uST, ввиду наличия значительных горизонтальных нагрузок, являются *Hardening Soil Model* и *модифицированный Мор-Кулон*, которые позволяют учесть уплотнение грунта от нагрузки по глубине и получить более достоверные результаты.

Список литературы

- 1 **Юницкий, А. Э.** Эффективные фундаменты промежуточных опор транспортной эстакады uST / А. Э. Юницкий, А. Н. Солодкин // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 16–17 ноября 2023 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – 449 с.
- 2 **Горбунов-Посадов, М. И.** Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1973. – 628 с.
- 3 **Пастернак, П. Л.** Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – М. : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 56 с.
- 4 Механика грунтов, основания и фундаменты : электр. учеб.-метод. комплекс для специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство (Часть 1) / Белорусский национальный технический университет ; сост.: В. А. Сернов [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020.
- 5 **Болдырев, Г. Г.** Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах) : учеб. пособие / Г. Г. Болдырев, М. В. Малышев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Пенза : ПГУАС, 2009. – 412 с.
- 6 Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е. С. Егорова, А. В. Иоскевич, В. В. Иоскевич [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – Вып. 3, № 42. – СПб. : Санкт-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого, 2016. – С. 31–60.
- 7 Hardening Soil Model // Modified Mohr-Coulomb Plasticity. – URL : [https:// manual. dianafea.com/](https://manuals.dianafea.com/) (дата обращения: 26.11.2024).
- 8 Определение параметров для модели Hardening Soil. Практика // Геоинфо. – URL : <https://geoinfo.ru/> (дата обращения: 26.11.2024).