УДК 624.131.4
МРНТИ 73.29.11
https://doi.org/10.51488/1680-080X/2022.4-18

З.Д. Калпенова [1]*, С.Х. Достанова [1]

[1] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Информация об авторах:
Калпенова Зауре Декеновна – магистр технических наук, докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
https:/ https://orcid.org/0000-0002-9757-5227, email: zaure.kalpenova@mail.ru
Достанова Сауле Хаджигумаровна – д.т.н., профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
https://orcid.org/0000-0002-5485-7742, email: dostanova0109@mail.ru
*Автор корреспондент: email: zaure.kalpenova@mail.ru

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОСНОВАНИЯ НАСЫПИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧНОСТИ ГРУНТА

Аннотация. *В статье рассматривается алгоритм расчета основания насыпи железнодорожного полотна с учетом пластических свойств грунта. Используется метод приближений. В первом приближении рассматривается упругое решение, дальнейшие итерации по нагрузке используют переменные модули жесткости. Для их определения используют уравнения состояния, полученные аналитически или экспериментально.*

Ключевые слова: *основание насыпи железнодорожного полотна, линейная и нелинейная механика грунтов, теория пластичности грунтов, деформационная теория пластичности, метод переменной жесткости.*

Введение

При больших нагрузках необходимо учитывать пластические свойства грунта основания насыпи ж/д полотна, которые могут привести к большим сдвиговым деформациям и осадкам [1-4]. Теория линейного деформирования грунта, справедливая в ограниченном диапазоне нагрузок, позволяет рассчитывать напряжения и деформации только при $F \leq F_1$. Задачи, основанные на использовании этой теории, относятся к линейной механике грунтов. В то же время теория предельного равновесия позволяет устанавливать только предельные нагрузки на основание ($F = F_2$) и не дает возможности рассчитывать соответствующие им величины осадок. Таким образом, расчет деформаций оснований в диапазоне нагрузок от F_1 до F_2 с помощью этих теорий выполнен быть не может. Поэтому при проектировании особо ответственных сооружений необходимо использовать и более сложные модели грунта, позволяющие определять деформации во всем диапазоне нагрузок. Эти решения относятся к нелинейной механике грунтов [1-2].

Теории нелинейного деформирования грунтов применяются для расчетов напряженно-деформированного состояния и оценки прочности оснований и грунтовых сооружений, когда связь между напряжениями и деформациями существенно нелинейная, поэтому они часто называются теориями пластичности грунтов.

При использовании представленного алгоритма расчета оснований насыпи транспортных сооружений с учетом пластических свойств грунта необходимо использовать экспериментально полученные уравнения состояния грунтового массива для исследуемого объекта. В Казахстане значительное распространение имеют глинистые грунты (около 60% территории), отличительной особенностью которых является проявление ярко выраженных пластических свойств.

Материалы и методы

В работе были использованы данные, полученные с помощью экспериментальной аппаратуры для лабораторного исследования плотных глинистых грунтов, состоящей из прибора трехосного сжатия (стабилометра) конструкции И.Н. Иващенко [4]. Программа экспериментальных исследований деформируемости и прочности глинистых грунтов состояла из трех циклов: первый цикл – это опыты в условиях всестороннего (гидростатического) сжатия образцов грунта с различной (постоянной в каждом опыте) скоростью среднего нормального напряжения (режим $\dot{\sigma}_{cp}$=const); второй (основной) цикл опытов состоял из экспериментов по раздавливанию образцов грунта при двух режимах девиаторного нагружения ($\dot{\sigma}_i$=const и $\dot{\varepsilon}_i$=const) в условиях постоянства в ходе опытов бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$=const$_1$; третий цикл опытов являлся повторением опытов второго цикла при других значениях бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$=const$_2$.

В результате получены графики зависимостей между средним напряжением, интенсивностью деформации и параметрами, полученными на приборе трехосного сжатия при различных скоростях нагружения. Сделана аппроксимация этих кривых и получены реологические уравнения для исследуемых грунтов. Анализируя эти зависимости выявлено, что при малых скоростях нагружения эти уравнения сходятся к уравнениям состояния для глинистых грунтов с соответствующими параметрами. Эти зависимости в дальнейшем были положены в основу представленного алгоритма.

Значительное распространение в инженерной практике получила деформационная теория пластичности, основанная на теории малых упругопластических деформаций акад. А.А. Ильюшина [3]. Эта теория исходит из допущения, что объемная и сдвиговая деформации зависят только соответственно от среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений. При этом вводятся понятия: $K((\sigma_m) = \sigma_m/\varepsilon_m$ – секущий модуль объемной деформации, $G(\tau_i\,) = \tau_i\,/\gamma_i$ – секущий модуль сдвига. Величины этих модулей будут нелинейными. При расчетах грунтовых оснований и сооружений часто можно принимать, что модуль объемной деформации зависит только от среднего нормального напряжения, тогда как модуль сдвига зависит не только от интенсивности касательного напряжения, но и от среднего нормального напряжения.

Рассмотрим задачу о расчете напряженно-деформированного состояния грунтового массива с использованием метода переменной жесткости. Массив однороден и свойства грунта описываются нелинейными диаграммами объемного сжатия и формоизменения, определенными экспериментально. Решение осуществляется последовательным выполнением итераций. В каждой итерации рассматривается квазиупругая задача с фиксированными в данной итерации значениями показателей K и G. В этом случае в расчетах осуществляется так называемое инкрементальное нагружение, т.е. нагрузка прикладывается отдельными шагами (инкрементами) $\{\Delta F\}$ и на каждом шаге нагружения выполняется итерационное решение нелинейной задачи. В результате на каждом шаге определяются непосредственно не полные перемещения $\{U\}$, а их приращения $\{\Delta U\}$, соответствующие шагу нагружения, и для каждого элемента вычисляются приращения деформаций $\{\Delta\varepsilon\}$ и напряжений $\{\Delta\sigma\}$ (рис. 1).

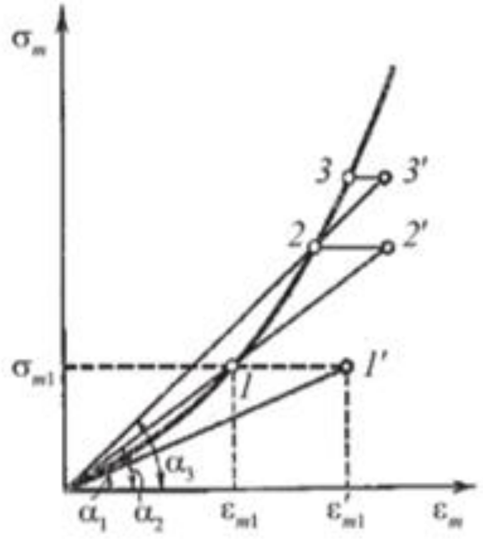

Рисунок 1 – Схема решения нелинейных задач методом переменной жесткости

Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния основания насыпи железнодорожного полотна основан на методе приближений [4-9] с учетом нелинейной деформируемости грунта основания. В упругом состоянии грунт рассматривается как однородная и изотропная среда. Насыпь находится под действием собственного веса и внешней нормальной нагрузки интенсивности q. Рассматриваемая задача является плоской и симметричной, поэтому решение ищется для $x \geq 0$ (рис. 2).

В 1-ом приближении рассматривается плоская задача теории упругости. Уравнения равновесия имеют следующий вид [5]:

Будем полагать, что объемной силой является только сила тяжести, т.е. $Z=X=0,\ Y\rho=-q$. Тогда уравнения равновесия будут иметь вид:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y\rho = 0 \qquad (1)$$

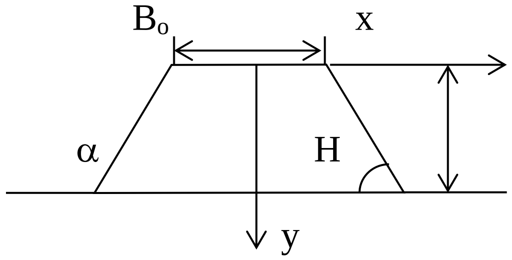

Рисунок 2 – Расчетная схема основания насыпи железнодорожного полотна

Граничные условия:

$$p_{x\nu} = \sigma_x Cos(x,\nu) + \tau_{xy} Cos(y,\nu),$$
$$p_{y\nu} = \tau_{yx} Cos(x,\nu) + \sigma_y Cos(y,\nu) \qquad (2)$$

Зависимости Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \qquad (3)$$

Уравнения неразрывности деформаций:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \qquad (4)$$

В качестве первого приближения берется упругое решение [1]:
если $x \le B_o/2$

$$\left.\begin{array}{c} \sigma_x = \xi\gamma y;\ \sigma_y = \gamma y + qB_0/(B_0 + 2ytg\alpha); \\ \tau_{xy} = 0;\ \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y); \\ \xi = \dfrac{\mu}{1-\mu}; \end{array}\right\} \qquad (5)$$

где γ – удельный вес грунта насыпи; μ – коэффициент Пуассона.

Компоненты тензора деформаций и перемещений определяются по закону Гука и с помощью зависимостей Коши.

Если $x > B_o/2$, то учитывая влияние наклонной грани, решение плоской задачи представляется в виде [3]:

$$\begin{array}{c} \sigma_x = \xi\gamma y; \\ \sigma_y = \left(1 - \dfrac{\xi}{tg^2\alpha}\right)\gamma y + \dfrac{\gamma}{tg\alpha}\left(\dfrac{2\xi}{tg^2\alpha} - 1\right)(x - B_o/2) + qB_0/(B_0 + 2ytg\alpha); \\ \tau_{xy} = \dfrac{\xi y}{tg^2\alpha}(x - B_o/2); \\ \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y); \end{array} \qquad (6)$$

Для расчета основания с учетом пластичности грунта используется вариационный метод [6] с применением уравнения состояния для плотных глинистых грунтов, которое связывает интенсивности деформаций, интенсивности напряжений и среднее напряжение между собой. Это уравнение получено экспериментально и имеет следующий вид [4]:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i, \sigma_{cp}), \qquad f(\varepsilon_i, \sigma_{cp}) = k\varepsilon_i^{2k}(2\sigma_{cp} + q). \tag{7}$$

Здесь $\sigma_i, \varepsilon_i, \sigma_{cp}$ – соответственно интенсивность напряжений, интенсивность деформаций и среднее напряжение для плоской задачи, *а k, q* – экспериментально полученные параметры на приборе трехосного сжатия.

$$\sigma_i = E'\varepsilon_i,$$

где E' – секущий модуль деформации 1-го рода.

$$G^* = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i}.$$

Переменный модуль упругости:

$$E^* = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\left[1 + \frac{1-2\mu}{3E}\cdot\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\right]^{-1}; \ \mu^* = \left[\frac{1}{2} - \frac{1-2\mu}{3E}\cdot\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\right]\left[1 + \frac{1-2\mu}{3E}\cdot\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\right]^{-1}.$$

Уравнения (7), определяющие изменения объема и формы тела в процессе деформации плотных глинистых грунтов, получены на основе экспериментальных данных [3]. Они отражают реальную картину развития напряженно-деформированного состояния в теле насыпи железнодорожного полотна, и это позволит осуществить ускоренный поиск решения задачи. С учетом закона подобия и соосности главных осей напряжений и деформаций в дальнейшем используются зависимости Генки [4]. Это позволяет задачу теории пластичности рассматривать как задачу теории упругости, где параметры упругости *E, G,* μ в каждой точке тела изменяются в зависимости от напряженно-деформированного состояния. Решение такой нелинейной задачи строится по методу последовательных приближений. Для этого рассматривается функционал полной энергии тела Э. Критерием сходимости на каждом этапе является условие минимума полной энергии тела в равновесном состоянии, т.е. $Э=Э_{min}$ [5-6]. На основании этого критерия можно получить решение с задаваемой точностью по узловым перемещениям. Сходимость решения зависит от точности принятого первого приближения, количества узловых точек и варируемых параметров.

Разбивая тело насыпи на отдельные элементы, и предполагая, что внутри элемента реализуется однородное напряженно-деформированное состояние, поле напряжений и деформаций аппроксимируется линейными функциями от координат. Это позволяет полную потенциальную энергию насыпи Э представить в следующем виде:

$$Э = \sum_{i=1}^{\kappa} U_{i^i} - \sum_{i=1}^{\kappa} (A_{k^\gamma})_{i^{i;}} - \sum (A_q)_s \tag{8}$$

где U_i – потенциальная энергия деформации “i”-го элемента; $(A_\gamma)_i$ – работа объемных сил для “i”-го элемента; $(A_q)_s$ – работа поверхностной нагрузки для s-го элемента на поверхности насыпи; κ – количество элементов, из которых состоит тело насыпи.

Результаты и обсуждение

Уравнения состояний (7) дают возможность целенаправленно варьировать напряжения и деформации во всех точках тела насыпи, сохраняя инвариантные зависимости. Вариациям подлежат только внутренние узловые точки, граничные точки контура насыпи вариациям не подлежат [8]. Используя итерации по функционалу полной потенциальной энергии, можно получить решение задачи с заданной точностью для узловых перемещений. Деформации и напряжения получаются для узловых точек с использованием закона Гука для полученных переменных параметров упругости. Решены задачи по определению напряженно-деформированного состояния дорожных и железнодорожных насыпей при статических воздействиях. Даны сравнения решений для 2 состояний насыпи: упругое и пластическое. Эти решения отличаются на 30% и более по деформациям в зависимости от экспериментально полученных параметров грунта основания.

Заключение

Используя данный алгоритм, можно уточнить напряженно-деформированное состояние насыпи с учетом пластических свойств грунтов основания [7-9]. Интегрируя или суммируя перемещения по ширине насыпи, можно для каждого слоя определить горизонтальные и вертикальные перемещения. При отсутствии экспериментальных данных можно уравнения состояния взять в виде степенной функции и применить данный алгоритм. По аналогии можно рассматривать трехмерную задачу с использованием в качестве первого приближения – решение Буссинеска. Представленный алгоритм можно использовать также для расчета дорожных насыпей.

На основании представленного алгоритма можно сделать следующие выводы:

1. Распространенная в практике линейная модель грунтового основания дает результаты, отличные от реальных. Необходимо разрабатывать новые модели, наиболее близко отражающие реальную работу грунтового массива.
2. Разработан и усовершенствован алгоритм расчета основания насыпи железнодорожного полотна с учетом пластичности грунта.
3. Использовано сочетание вариационного метода с методом переменных параметров. Показаны пути исследования сходимости решения.
4. Выявлены закономерности изменения осадок и горизонтальных смещений насыпи.

Литература:

1. *Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. пособие для строит. спец. вузов / под ред. С.Б. Ухова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2002, 566 с.*
2. *Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: ВШ, 1983.*
3. *Безухов Н.И. Примеры и задачи по теории упругости, пластичности и ползучести. М.: ВШ, 1965.*
4. *Исаханов Е.А. Реологические свойства плотных глинистых грунтов и расчеты сооружений. Алматы, 2000, 144 с.*
5. *Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: ВШ, 2015.*
6. *Гельфанд И.М., Фомин С.В. Вариационное исчисление. М.: Физматгиз, 1961.*
7. *Исаханов Е.А., Токпанова К.Е.О расчете основания прямоугольной плиты с учетом нелинейной деформируемости грунта. Труды 1-го Центрально-Азиатского геотехнического симпозиума, Астана, 2000, с. 187-189.*
8. *Достанова С.Х., Нурхан Д. Деформации дорожной насыпи с учетом упруго-вязкопластического основания. Сб. трудов VI Международ. межвузовск. научно-практ. конф.-конкурс научн. доклад. Студ. и молодых ученых «Инновационные технологии и передовые решения». Бишкек, 2018.*
9. *Достанова С.Х. Токпанова К.Е., Сейтбекова Г.О., Жунусбекова А.С. Модели и алгоритм расчета грунтового основания. Материали XV международна научна практична конференция ключови въпроси в съвременната наука, 2019. София «Бял ГРАД-БГ ОДД» 2019, с. 6-9.*

References:

1. *Soil mechanics, foundations and foundations: textbook. guide for building. specialist. universities / ed. S. B. Ukhova. - 2nd ed., Rev. and add. M.: Higher school, 2002, 566 p.*
2. *Tsytovich N.A. Soil mechanics. M.: VSh, 1983.*
3. *Bezukhov N.I. Examples and problems in the theory of elasticity, plasticity and creep. M.: VSh, 1965.*
4. *Isakhanov E.A. Rheological properties of dense clay soils and calculations of structures. Almaty, 2000, 144 p.*
5. *Alexandrov A.V., Potapov V.D. Foundations of the theory of elasticity and plasticity. M.: VSh, 2015.*
6. *Gelfand I.M., Fomin S.V. Calculus of variations. Moscow: Fizmatgiz, 1961.*
7. *Isakhanov EA, Tokpanova KE On the calculation of the base of a rectangular slab taking into account the nonlinear deformability of the soil. Proceedings of the 1st Central Asian Geotechnical Symposium, Astana, 2000, 187-189 p.*
8. *Dostanova S.Kh., Nurkhan D. Deformations of the road embankment taking into account the elastic-viscoplastic foundation. Sat. works of VI International. interuniversity. scientific and practical. conference-competition of scientific. report. Stud. and young scientists "Innovative technologies and advanced solutions". Bishkek, 2018.*
9. *Dostanova S.Kh. Tokpanova K.E., Seitbekova G.O., Zhunusbekova A.S. Models and algorithm for calculating the soil base. Materials XV International Scientific Practical Conference of the Keys and Questions in Modern Science - 2019. Sofia "Byal GRAD-BG ODD" 2019. S.6-9.*

З.Д. Калпенова*, С.Х. Достанова

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан

Авторлар туралы ақпарат:
Калпенова Зауре Декеновна – техникалық ғылым магистрі, докторант, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан
https:/ https://orcid.org/0000-0002-9757-5227, email: zaure.kalpenova@mail.ru
Достанова Сауле Хаджигумаровна – техникалық ғылым докторы, аға оқытушы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан
https://orcid.org/0000-0002-5485-7742 , email: info@tttu.edu.kz

ТОПЫРАҚТЫҢ ИЛЕМДІК ҚАСИЕТІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП ТЕМІРЖОЛ НЕГІЗІН ЕСЕПТЕУ АЛГОРИТМІ

Андатпа. *Мақалада топырақтың илемдік қасиетін ескере отырып, теміржол негізін есептеу алгоритмі талқыланады. Жуықтау әдісі қолданылады. Бірінші жуықтауда серпімді шешім қарастырылады, ал жүктемедегі қайталанулар қаттылықтың айнымалы модульдерін қолданады. Оларды анықтау үшін аналитикалық немесе эксперименттік жолмен алынған күй теңдеулерін қолданамыз.*

Түйін сөздер: *топырақтың идемдік қасиеттері, теміржол негізі, сызықтық топырақ механикасы, сызықтық емес топырақ механикасы, топырақтың илемдік теориясы, илемдік деформациялық теориясы, өзгермелі қаттылық әдісі.*

Z.D. Kalpenova*, S.H. Dostanova

Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpaeva,
Almaty, Kazakhstan

Information about the authors:
Kalpenova Zaure Dekenovna – master's degree, doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaeva, Almaty, Kazakhstan
https:/ https://orcid.org/0000-0002-9757-5227, email: zaure.kalpenova@mail.ru
Djstanova Saule Khadzhigumarovna – Ph.D., Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpaeva, Almaty, Kazakhstan
https://orcid.org/0000-0002-5485-7742 , email: info@tttu.edu.kz

ALGORITHM FOR CALCULATING THE BASE OF RAILWAY LEAF FILLING TAKING INTO ACCOUNT THE PLASTICITY OF THE SOIL

Abstract. *The article discusses an algorithm for calculating the foundation of a railroad bed embankment, taking into account the plastic properties of the soil. The approximation method is used. In the first approximation, an elastic solution is considered; further iterations on the load use variable stiffness moduli. To determine them, the equations of state obtained analytically or experimentally are used.*

Keywords: *plastic properties of soil, base of a railroad embankment, linear soil mechanics, nonlinear soil mechanics, theory of soil plasticity, deformation theory of plasticity, method of variable stiffness.*