

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЛАБОГО ГРУНТА С МЕРЗЛЫМ ВЕРХНИМ СЛОЕМ

Проф., докт. техн. наук А. Б. ФАДЕЕВ¹, канд. техн. наук
Ю. С. КОЗЛОВ², канд. техн. наук Э. К. АБДЫЛДАЕВ³

Реферат. В статье изложен численный анализ осадок и несущей способности слабого грунта с мерзлым верхним слоем под полосовой нагрузкой.

Программа «Геомеханика» рассматривает грунт как идеальную упругопластическую среду с критерием текучести Кулона. Для получения упругопластического решения используется деформационная теория пластичности Генки—Ильюшина. Решение достигается методом начальных напряжений Зенкевича. Программа обеспечивает соосность напряжений и деформаций и необходимую точность решения. Одновременно было проведено физическое моделирование в масштабе 1:100. Механизм разрушения основания на физической и математической моделях был одинаковый. В отличие от схемы Прандтля—Терцаги жесткий верхний слой разрушается не по механизму сдвига, а по механизму разрыва с образованием разрывных трещин на некотором расстоянии от нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

На одном из буроугольных разрезов Сибири возникла необходимость перевести на новый участок работы шагающий драглайн общей массой 10,5 тыс. т с объемом ковша 100 м³ и длиной стрелы 100 м. Протяженность трассы перегона составляла 3 км. Грунты представлены слабыми водонасыщенными суглинками с весьма низкими показателями сопротивляемости сдвигу. Слой суглинков имел мощность до 20 м и подстилался прочными песчаниками.

Драглайн при передвижении поочередно опирается то на круглую плоскую платформу диаметром 27 м, то на две продольные балки длиной 45 и шириной 4,35 м. Наибольшее давление на грунт—0,265 МПа он развивает при опирании на балки.

Проведенные расчеты, а также опыт передвижения по этой трассе более легких экскаваторов свидетельствовали, что предельные нагрузки на грунт значительно ниже давления, возникающего при опирании драглайна на лыжи.

По предложению проф. Г. Л. Фисенко было решено перегон драглайна осуществить в марте, когда верхний слой грунта промерзает на 2 м—максимально возможную в климатических условиях Сибири глубину. Чтобы добиться промерзания грунта на такую глубину, следует освободить трассу от растительности и затем регулярно в течение зимы расчищать ее от снега.

Однако возникли затруднения с оценкой несущей способности двухслойного основания, поскольку известные в механике грунтов методы расчета, основанные на теории предельного равновесия, пригод-

¹ Ленинградский инженерно-строительный инсти ут.

² Старший науч. сотр. ВНИМИ.

³ Младший науч. сотр. ВНИМИ.

маны для однородных грунтов либо для грунтов с небольшой степенью неоднородности. В данном же случае и прочностные и деформационные характеристики верхнего мерзлого слоя значительно отличались от свойств талого грунта, и были все основания ожидать, что механизм выхода грунта под нагрузкой в предельное состояние должен быть иным, нежели предполагают существующие схемы. Необходимо также было прогнозировать величину осадки поверхности грунта под нагрузкой, так как осадки, превышающие допустимые по ходовым устройствам, затруднили бы передвижение драглайна или сделали его вообще невозможным.

Для решения этих вопросов выполнены расчеты методом конечных элементов по программе «Геомеханика» и проведено физическое моделирование.

АНАЛИЗ МКЭ

1. Модель среды и ее реализация

За основу взята идеальная упругопластическая модель Рейсса—Прандтля с кулоновским критерием текучести. Пластическое течение грунта при постоянных напряжениях считается равнообъемным. Анализ ведется в условиях плоской деформации, сжатие считается положительным.

Критерий Кулона, выраженный через главные напряжения σ_1 и σ_3 , в условиях плоской деформации имеет вид

$$\sigma_1 = s + \sigma_3 \delta, \quad (1)$$

где $s = 2c \operatorname{ctg}(\pi/4 - \varphi/2)$ — прочность на одноосное сжатие;

$\delta = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)$; c , φ — сцепление и угол внутреннего трения.

В области растяжения естественным дополнением критерия (1) является условие прочности при растяжении

$$\sigma_3 = T, \quad (2)$$

где T — прочность на растяжение ($T < 0$).

Формулы (1) и (2) описывают на рис. 1 границы прочности BC и AB соответственно.

Закон Гука в условиях плоской деформации может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E(\epsilon_1 + \nu \epsilon_3)/(1 - \nu^2); \\ \sigma_3 &= E(\epsilon_3 + \nu \epsilon_1)/(1 - \nu^2), \end{aligned} \quad (3)$$

где $E = E_0/(1 - \nu_0^2)$, $\nu = \nu_0/(1 - \nu_0)$;

E_0 , ν_0 — модуль линейной деформации и коэффициент Пуассона.

Подстановка уравнений (3) в уравнения (1) и (2) позволяет описать границы упругости при первичном нагружении в осях главных деформаций:

$$f_1(\epsilon) = T(1 - \nu^2)/E - \nu \epsilon_1 - \epsilon_3 = 0, \quad (4)$$

$$f_2(\epsilon) = [(E \epsilon_1 - s)(1 - \nu \delta)/(\delta - \nu) - \nu s]/E - \epsilon_3 = 0. \quad (5)$$

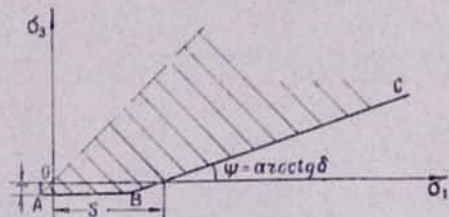


Рис. 1. Предельная поверхность в плоскости главных напряжений.

Պատկերը լարումների հարադրյալական սահմանային մակերես:

Fig. 1. The limit surface in the plane of principal stresses.

На рис. 2 уравнения (4) и (5) описывают прямые $A'B'$ и $B'C'$ соответственно. Если функции $f_1(\varepsilon) < 0$ и $f_2(\varepsilon) < 0$, т. е. деформации ε_1 и ε_2 находятся в пределах контура $A'B'C'$ (зона I), то элемент упруг и действуют уравнения состояния линейно-упругой среды (3). За пределами зоны I действуют иные уравнения. Пусть в процессе нагружения деформированное состояние элемента среды вышло в некоторую точку D' на рис. 2. Рассмотрим закономерности дальнейшего пластического деформирования, которое предполагаем равнообъемным и протекающим в условиях $\sigma_3 = \text{const}$.

Координаты точки E' могут быть представлены в виде суммы упругих и пластических компонент

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^y + \varepsilon_1^p; \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_3^y + \varepsilon_3^p, \quad (6)$$

где ε_1^y и ε_3^y — координаты точки D' .

Пользуясь уравнениями (1), (3), (6) и условием равнообъемного течения ($\varepsilon_3^p = -\varepsilon_1^p$), находим напряжение σ_3 , соответствующее деформациям в точке E' :

$$\sigma_3 = [E(\varepsilon_3 + \varepsilon_1) + s(\nu - 1)] / [1 - \nu\delta + \delta - \nu]. \quad (7)$$

Из (7) при $\sigma_3 = 0$ следует формула, описывающая линию $L'F'$:

$$f_3(\varepsilon) = E(\varepsilon_3 + \varepsilon_1) + s(\nu - 1) = 0. \quad (8)$$

Таким образом, если элемент среды испытывает деформации, попадающие в зону II (т. е. при $f_3(\varepsilon) > 0$), то он находится в стадии пластического деформирования, и напряжения определяются по формулам (7), (1).

Далее надо установить уравнение связи для зон III, IV и V. Запишем уравнение линии $L'K'$ в виде

$$f_4(\varepsilon) = \varepsilon_1 - s/E = 0. \quad (9)$$

Если деформации элемента среды характеризуются точкой в зоне III, т. е. при $f_4(\varepsilon) > 0$, то элемент будет разорван в направлении ε_1 и $\sigma_3 = 0$, а σ_1 определяется графиком одноосного сжатия $L''F''$. В зоне IV также $\sigma_3 = 0$, и поскольку деформация ε_1 меньше предельной, σ_1 определится законом Гука. Наконец, в зоне V элемент разорван в обоих направлениях, т. е. $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$.

Итак, для первичного нагружения однозначно определена зависимость главных напряжений от главных деформаций для любых видов деформированного состояния. Схематические картины разрушения образцов в разных деформационных зонах показаны на рис. 2.

Данная модель среды соответствует принципам деформационной теории пластичности Генки (Hill, 1950; Качанов, 1969) и является одним из вариантов более общей модели (Fadeev, Abdildaev, 1979). Изложенная модель среды реализована нами на ЭВМ на основе метода конечных элементов. Уругопластическое решение задач достигается методом начальных напряжений (Zienkiewicz, 1971; Ильюшин, 1948). В описанной модели реологические свойства мерзлого грунта учитывались в неявной форме введением в прочностные и деформационные характеристики коэффициента запаса ($n=2-3$).

Первоначально при заданных граничных условиях проводится упругое решение. В каждом элементе рассчитываются осевые и главные деформации и напряжения. По вышеизложенной методике определяются теоретические напряжения $\{\sigma_T\}$, которые имел бы элемент

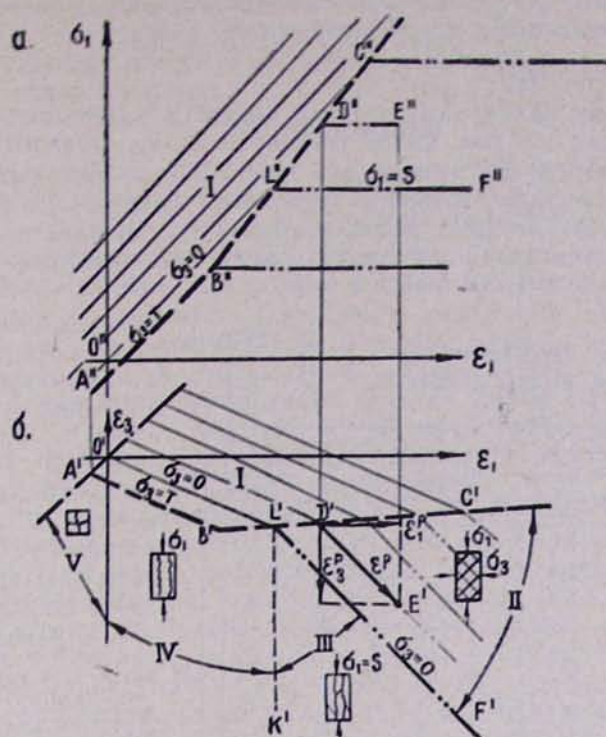


Рис. 2. Упруго-идеальнопластическая среда.

Նկ. 2. Առանցքային-իդեալական-պլաստիկ միջավայր։

Fig. 2. Elastic-ideally-plastic media.

рассматриваемой среды при данных деформациях. Разность между рассчитанными и теоретическими напряжениями рассматривается как «начальное» напряжение. По этим «начальным» напряжениям в элементах рассчитывается вектор «начальных» узловых сил, добавляемый к общему вектору нагрузки. Проводится новое упругое решение. Из новых рассчитанных напряжений вычитаются ранее накопленные «начальные», а результирующие напряжения сравниваются с новыми теоретическими значениями, соответствующими новым значениям деформаций, и т. д. Процесс итерации продолжается до тех пор, пока результирующие напряжения в элементах не станут достаточно близки к теоретическим.

Разработанная программа на языке FORTRAN IV позволяет решать задачи объемом до 600 узлов и с 7 типами элементов с различными деформационными, прочностными свойствами на ЭВМ класса ЕС-1022 (аналогична IBM-360) и выше без обращения к внешним запоминающим устройствам. По каждому типу элементов задаются модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , сцепление c , угол внутреннего трения ϕ и объемный вес γ . Программа автоматически принимает прочность на растяжение T равной $c/5$, а в разорванных элементах на следующих циклах итерации $T=0$. Граничные условия могут быть заданы в виде узловых сил или узловых перемещений. Выходными данными по всем элементам являются осевые, главные напряжения и деформации; признаки состояния элемента: упруг, разорван

или пластичен; по узлам—перемещения и вектор узловых сил, включая узлы с заданными перемещениями.

Результаты расчетов

Поскольку балки находятся на большом расстоянии одна от другой и каждая из них имеет большую длину, правомерно провести анализ в плоской постановке для одной балки. Расчетная схема изображена на рис. 3. Мощность мерзлого верхнего слоя 2 м; свойства мерзлого слоя: $E=1000$ МПа, $\nu=0,3$, $\epsilon=1$ МПа, $\varphi=17^\circ$, объемный вес $\gamma=20$ кН/м³; свойства талого грунта под мерзлым слоем: $E=35$ МПа, $\nu=0,4$, $\epsilon=0,035$ МПа, $\varphi=14^\circ$, $\gamma=20$ кН/м³. Сцепление и угол

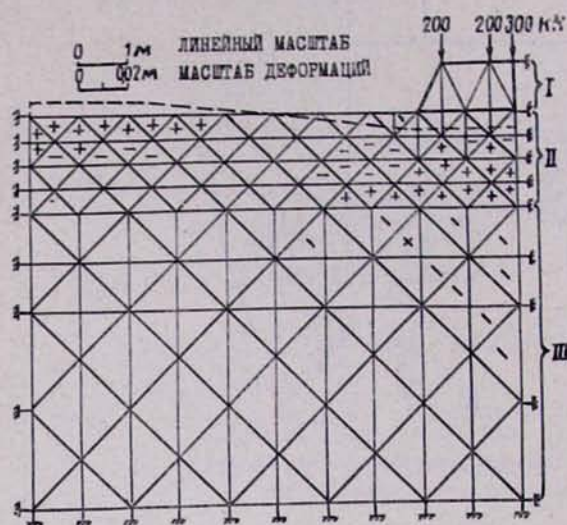


Рис. 3. Сеть элементов и граничные условия.
 1/3. Էլեմենտների ցանցը և եզրային պայմանները:
 Fig. 3 Net of elements and boundary conditions.

но два варианта решения: первое—при силах, соответствующих реальному весу драглайна (рис. 3), второе—при удвоенных значениях сил. Результаты решения приведены на рис. 3. Элементы, разорванные (т. е. попадающие в зоны III, IV, V на рис. 2) как в первом, так и во втором решении, обозначены на рис. 3 знаком «+», а разорванные только во втором решении—знаком «-». Элементы, вышедшие в пластическое состояние (т. е. попадающие в зону II на рис. 2) в первом и втором решении, обозначены на рис. 3 знаком «X», а только во втором решении—знаком «/».

Под воздействием нагрузки жесткий мерзлый слой работает как плита на податливом основании. В нижней половине слоя под балкой и в верхней части слоя на некотором удалении от балки сформировались группы разорванных элементов. В талом грунте в первом варианте решений в пластическое состояние перешел только один элемент, а во втором варианте—группа элементов, формирующих «пластический клин». Итерационный процесс оказался сходящимся как при реальной, так и при удвоенной нагрузке, т. е. грунт с мерзлым слоем способен выдержать нагрузку, более чем вдвое превышающую вес драглайна. В отличие от схемы Прандтля—Терцаги (Терцаги, 1967; Цытович, 1979) прочный верхний слой разрушается не от сдвиговых напряжений, а от растягивающих, он не продавливается, а «прола-

внутреннего трения грунта были определены экспериментально. Модули линейной деформации приняты равными $E=1000$ с (соотношение, характерное для грунтов и пород). Значения коэффициента Пуассона приняты обычными для грунтов с такими свойствами.

Элементы, имитирующие опорную балку драглайна, были наделены модулем $E=10^4$ МПа и сцеплением, исключаящим их переход за пределы упругого состояния. Нагрузка от веса драглайна имитировалась узловыми силами, приложенными сверху. Было проведе-

мывается» с образованием изломов на некотором удалении от балки. Деформация поверхности грунта под весом драглайна показана на рис. 3 пунктирной линией. Рассчитанная максимальная просадка под балкой составила 8 мм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для качественного изучения механизма разрушения основания, верхнюю часть которого составлял прочный слой, были проведены испытания на моделях в масштабе 1:400. В качестве эквивалентного материала, имитирующего талый грунт, были использованы технический вазелин и паста из глины текуче-пластичной консистенции. Мерзлый слой моделировался гипсом и парафином. Материалы для моделирования выбирались таким образом, чтобы углы внутреннего трения были близки к аналогичным характеристикам моделируемого грунта. Кроме того, соотношение величин сцепления у материалов, моделирующих талый и мерзлый грунт, подбиралось равным соотношению этих величин для реальных грунтов. Нагрузка на модели опорных балок создавалась при помощи пресса.

Опыты на моделях показали, что под опорными балками драглайна действительно происходит изгиб и излом мерзлого слоя. Прочный верхний слой разрушается не от сдвиговых напряжений, а от растягивающих. Эта стадия заканчивается образованием трещин на некотором удалении от балок. Дальнейшее увеличение нагрузки ведет к быстрому нарастанию осадок и к потере несущей способности основания. Предельная нагрузка в несколько раз превосходила нагрузку от веса драглайна. Осадка основания под опорной балкой к моменту потери основанием несущей способности в пересчете на натуру составила 28 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перегон драглайна по трассе к месту работы был успешно осуществлен в намеченные сроки. Осадки на различных участках трассы составляли от 0,5 до 12 см. На всем протяжении трассы параллельно опорным балкам наблюдались трещины шириной 10—35 мм и глубиной 0,8—1 м. Форма их в плане была близка к форме трещин на моделях.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность решения сложных задач геомеханики с помощью относительно простой упругопластической модели грунта. Выяснен механизм работы двухслойного основания с прочным верхним слоем.

ՎԵՐԻՆ ՍԱՌԱԾ ՇԵՐՏՈՎ ԳՐՈՒՆՏԻ ԿՐՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԹՎԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒՄՈՒՄԸ

Պրոֆեսոր, տեխն. գիտ. դոկտոր ԱՆԲՍԱՆԻՐ ՅԱԴԵՆՎ., տեխն. գիտ. թեկնածու ՅՈՒՐԻ ԿՈՉՆՈՎ^{2*}, տեխն. գիտ. թեկնածու ԷՐԿԻՆ ԱՐԴՈՂՄԱՆՎ.³

ՌԵՖԷՐԱՏ: Հոդվածում շարադրված է շերտային բեռնվածքի տակ գտնվող վերին սառած շերտով թույլ գրունտի նստվածքների և կրողունակության իվալյին վերլուծումը: «Գեոմեխանիկա» ծրագրում գրունտը դիտվում է իրրե կուլների հոսունության շափանիշ ունեցող: Իդեալական ստադական պլաստիկ լուծում ստանալու համար կիրառված է Հենկի-Իլյուշինի

¹ Լենինգրադյան Ինժեներաշինարարական ինստիտուտ:

² Ավագ գիտաշխատող:

³ Կրտսեր գիտաշխատող:

* Համամիութենական լեռնային գեոմեխանիկայի և մարկշեյդերային գործի գիտահետազոտական ինստիտուտ, Լենինգրադ:

պրոպագանդայի գործունեությունը համար առաջվում է Չենկևիչի սկզբնական լա-
բորանտի հզանակով: Մրցվորը ապահովում է բարոմետրի ու զննորմացիաների համառոտացրա-
յունությունը և լուծման անհրաժեշտ հարմարություն: Միևնույն ժամանակ, անց է կացված 1:100
մասշտաբով ֆիզիկական մոդելացում: Ֆիզիկական և մաթեմատիկական մոդելների վրա հիմքի
բայթայման մեխանիզմը նույնն է: Ի տարբերություն Պրագա-Տերզագիի սխեմայի, վերին
կոշտ շերտը բայթայվում է ոչ թե բառ սահմանի մերձակայքում, այլ բառ խզման մեխանիզմի, առա-
ջացնելով խզման ճաթեր որոշ տարածության վրա:

NUMERICAL ANALYSIS OF BEARING CAPACITY OF SOFT SOIL WITH A FROZEN TOP LAYER

ALEXANDER B. FADEEV¹, Prof., Dr. Sc. (Eng.), YURI S. KOZLOV²,
Cand. Sc. (Eng.), ERKIN K. ABDYLDAYEV³, Cand. Sc. (Eng.)

Synopsis. Numerical analysis of settlement and bearing capacity problem for weak soil with a frozen upper layer under the strip load is described. The «Geomechanics» program considers the soil as an ideally elastic-plastic medium with Coulomb's plasticity criterion. To obtain the elastic-plastic solution the Hencky-Ilyushin's strain plasticity theory is used. The solution is obtained by Zienkiewicz' initial stress method. The program provides coaxility of stresses and strains and necessary precision of the solution. Physical modelling in scale 1:100 was carried out simultaneously. The failure mechanism on the physical and mathematical models was the same. In contrast to Prandtl-Terzaghi's scheme the stiff upper layer breaks not by shear failure but by tension with formation of tension cracks at some distance from the load.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ—ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

- Ильюшин А. А. 1948. Пластичность. М.—Л., Гостехиздат, 376 с.
Качанов Л. М. 1969. Основы теории пластичности. М., Наука, 420 с.
Терцаги К. 1961. Теория механики грунтов. М., Гостройиздат, 507 с.
Цытович Н. А. 1979. Механика грунтов. М., Высшая школа, 272 с.
Fadeev A. B., Abdyldayev E. K. 1979. Elastoplastic analysis of stresses in cool pillars by finite element method. — Rock Mechanics, vol. 11, No. 4, p. 243—251.
Hill R. 1950. The mathematical theory of plasticity. Oxford at the Clarendon Press.
Zienkiewicz O. C. 1971. The finite element method in engineering science. McGraw-Hill, London.

¹ Institute of Civil Engineering, Leningrad.

² Senior Researcher.

³ Junior Researcher

* All-Union Institute of Mine Geomechanics and Shaft Surveying, Leningrad.