



Королев Константин Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Геология, основания и фундаменты» СГУПС. В 2000 г. окончил факультет «Мосты и тоннели» СГУПС. Автор более 60 научных работ.

Основная область научных интересов — теория предельного равновесия грунтов.

E-mail: krolev_kv@mail.ru



Верховская Александра Андреевна — аспирант кафедры «Геология, основания и фундаменты» СГУПС. В 2011 г. окончила факультет «Строительство железных дорог» СГУПС. Автор трех научных работ.

Область научных интересов — расчеты устойчивости откосов земляного полотна.

УДК 624.131.52

К.В. КОРОЛЕВ, А.А. ВЕРХОВСКАЯ

О ПОСТРОЕНИИ ПАСПОРТА УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

В статье приводится анализ результатов построения паспорта устойчивости земляного полотна тремя методами — методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения, методом конечных элементов и симплекс-методом. Показано, что при малых значениях угла внутреннего трения все три метода дают близкие оценки устойчивости. При значениях угла внутреннего трения более 20 градусов наиболее обоснованную оценку устойчивости позволяет получить симплекс-метод.

Ключевые слова: *земляное полотно, Терцаги, МКЭ, симплекс-метод, паспорт устойчивости.*

Необходимость усиления насыпей при эксплуатации пути возникает, как правило, вследствие недостаточной ширины основной площадки, завышенной крутизны откосов, малой эффективности укрепительных и защитных сооружений, возникающих деформаций и повреждений (сплывов, просадок и т.п.).

Для предупреждения деформаций или устранения их последствий чаще всего выполняют уширение насыпей с уположиванием откосов, а также устройством контрбанкетов.

Физико-механические характеристики грунтов тела насыпи и основания земляного полотна приведены в табл. 1.

Расчет устойчивости ведут графоаналитическим методом по упрощенной схеме, предполагающей рассмотрение одной из нескольких возможных круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

Крутизна откосов назначается по нормативам для насыпи типового профиля и для глинистых грунтов зависит от показателя текучести.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Местоположение	Вид грунта	$\rho_{s,3}$ т/м ³	$a_{кр}$ м	I_p доли	$k_{ф}$ м/с	W_m, W_p %	W_L %	e_e	W_e %	C , кПа	ϕ , град
Тело насыпи (6в)	Супесь тяжелая пылеватая	2,7	1	0,06	$1 \cdot 10^{-8}$	15	22	0,54	21,5	12	20
Основание насыпи (9а)	Суглинок тяжелый	2,71	1,4	0,09	$1 \cdot 10^{-9}$	20	33	0,74	18	40	22

Примечание. Обозначения в данной таблице соответствуют принятым в СП [1].

Определяют высоту фиктивного столбика грунта насыпи, заменяющего поездную нагрузку и вес верхнего строения пути,

$$z_{\phi} = \frac{1}{\gamma} \left(p_0 + P_{bc} \frac{b_{bc-1}}{b_0} \right),$$

где p_0 — расчетное значение нагрузки от подвижного состава; b_{bc-1} — ширина полосовой нагрузки от веса верхнего строения пути на двухпутном участке, м; P_{bc} — среднее давление от веса верхнего строения пути, кПа; b_0 — длина шпалы, м; γ — удельный вес грунта насыпи.

Фиктивные столбики высотой 6,78 м и шириной 2,75 м строятся на основной площадке насыпи по оси каждого пути. Соединяют подошву откоса бермы с одной из точек основной площадки и из середины полученной прямой восстанавливают перпендикуляр, являющийся линией центров кривых смещения. Затем проводят вспомогательную прямую под углом 36° к поверхности фиктивного столбика грунта, точка пересечения которой с перпендикуляром O_1 является центром кривой смещения. Из этого центра проводят дугу радиусом $R=36,8$ м. Полученный блок смещения разбивают на 8 отсеков. Для каждого отсека расписываем систему сил. Расчетная схема приведена на рис. 1.

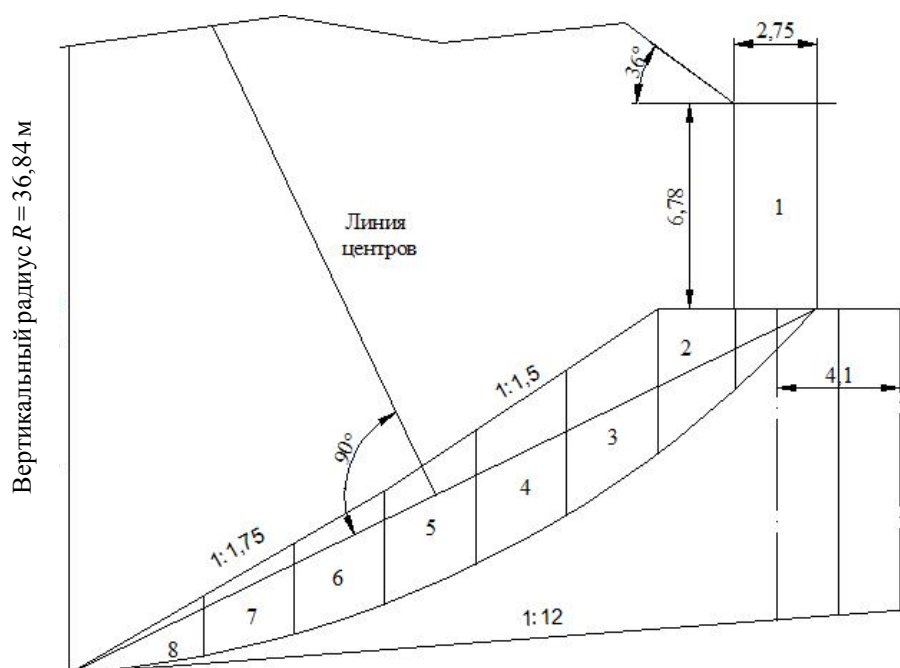


Рис. 1. Схема к расчету устойчивости земляного полотна

Расчет ведется в предположении круглоцилиндрической поверхности возможного смещения с использованием формулы К. Терцаги и с учетом подтопления насыпи:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{i-\text{уд}}}{\sum_{i=1}^m M_{i-\text{сдв}}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i l_i + \sum_{i=1}^n f_i N_i + \sum_{i=1}^n T_{i-\text{уд}}}{\sum_{i=1}^{n-m} T_{i-\text{сдв}} + D_0},$$

где $K_{\text{ст}}$ — коэффициент устойчивости при статическом состоянии грунта в теле насыпи;

$\sum_{i=1}^n M_{i-\text{уд}}$ и $\sum_{i=1}^m M_{i-\text{сдв}}$ — соответственно сумма моментов сил, удерживающих откос от смещения и сдвигающих его, кН; n — суммарное количество отсеков блока смещения; m — количество отсеков блока смещения, в которых действуют удерживающие касательные, составляющие силы веса; N_i и T_i — нормальная и касательная к основанию i -го отсека, составляющие силы его веса, кН.

$$N_i = Q_i \cos \beta_i \quad \text{и} \quad T_i = Q_i \sin \beta_i,$$

где Q_i — вес i -го отсека, кН,

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma_j 1 \text{ м} = (\omega_i^{\text{I}} \gamma^{\text{I}} + \omega_i^{\text{II}} \gamma^{\text{II}}) 1 \text{ м},$$

где ω_i^{I} , ω_i^{II} — площади частей отсека, находящихся в первом, втором и третьем слоях блок смещения, м²; β_i — угол наклона основания отсека к горизонту.

Величина гидродинамической силы D_0 , кН, определяется по формуле

$$D_0 = \gamma_w I_0 1 \text{ м} \sum_{i=1}^k (\omega_i^{\text{I}} + \omega_i^{\text{II}}),$$

где γ_w — удельный вес воды, равный 9,81 кН/м³.

Данная задача была реализована в среде PLAXIS v. 8.2. Этот программный продукт также основан на методе конечных элементов и был специально разработан для решения геотехнических задач. Приведенная методика расчета методом конечных элементов обеспечивает выполнение граничных условий.

Основные положения моделирования и последовательность расчета

1. Ввод геометрии и характеристик выделенных инженерно-геологических элементов. Поскольку расчет выполнялся в упругопластической постановке (идеально-упругопластическая модель без учета дилатансии с условием прочности Кулона—Мора), то здесь также вводились прочностные характеристики грунта для тела насыпи и основания. Насыпь моделировалась с помощью набора элементов Plates.

2. Закрепление границ расчетной области было принято по умолчанию, т.е. жесткое закрепление нижней границы и запрет горизонтальных смещений по боковым границам.

3. Ввод основных характеристик грунта. Для тела насыпи — супесь тяжелая пылеватая, для основания — суглинок тяжелый.

Диаграмма общих смещений грунта в откосах насыпи приведена на рис. 2.

На диаграмме приращения деформаций во всех узлах показаны с помощью стрелок, длина которых соответствует относительной величине деформации. Диаграмма приращения деформаций показана на рис. 3. На рис. 4 приведена диаграмма полных смещений.

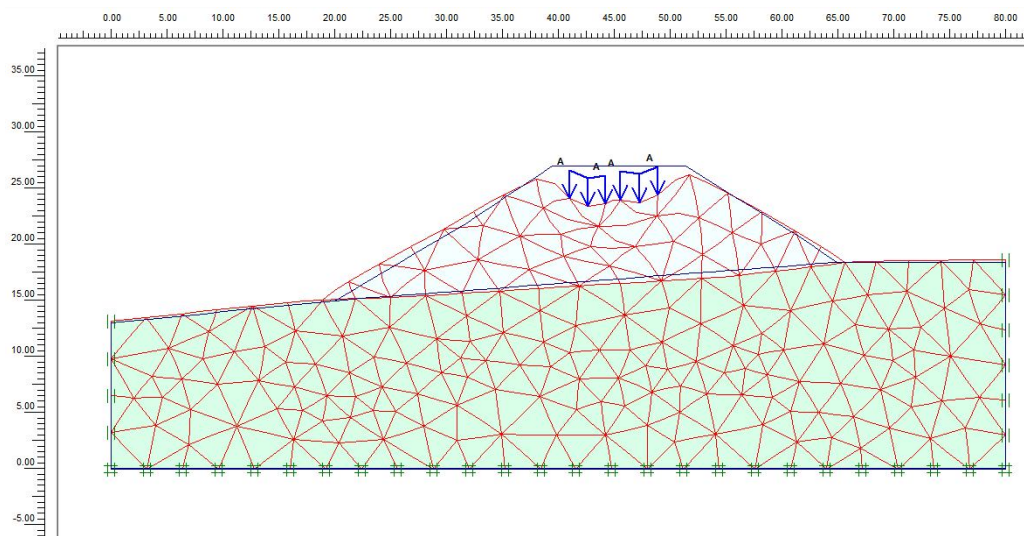


Рис. 2. Деформированное состояние насыпи

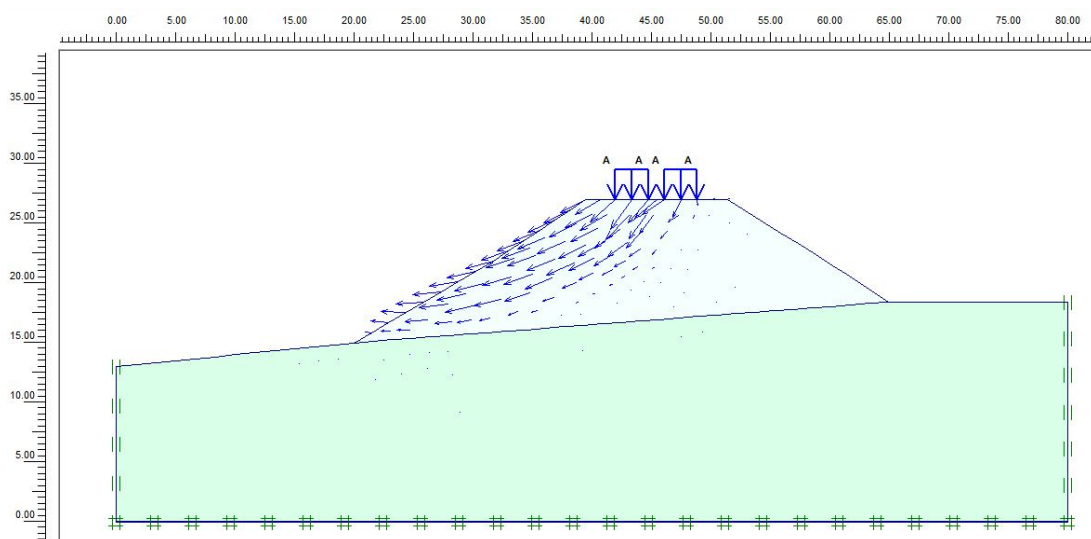


Рис. 3. Диаграмма приращения деформаций

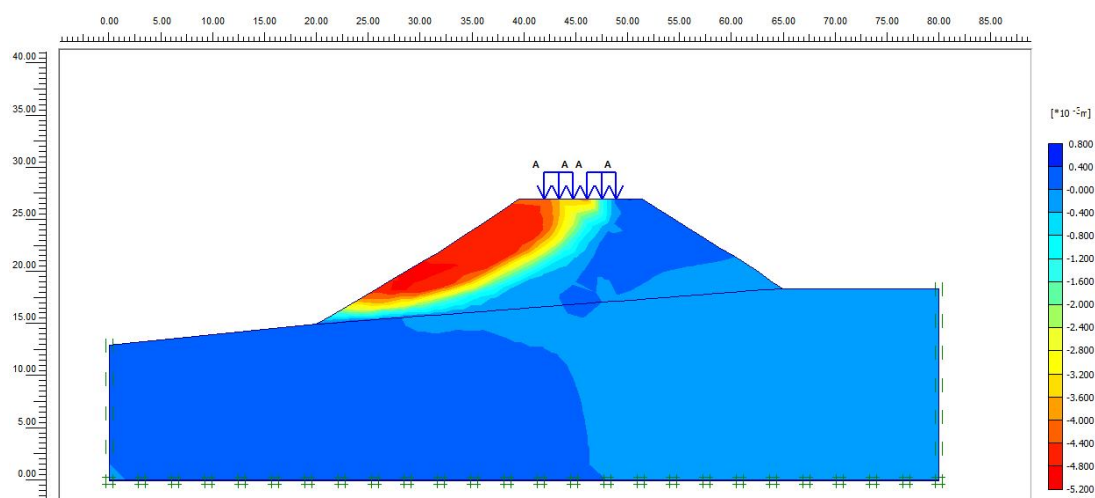


Рис. 4. Диаграмма полных смещений

На рис. 5 изображена диаграмма точек грунта, вышедших в предельное состояние.

Одной из распространенных проблем при эксплуатации железных дорог является проблема деформаций земляного полотна. При этом возникает ряд вопросов, связанных с получением надежной оценки устойчивости насыпей. Эти вопросы носят общий характер, возникающий при массовых расчетах, и вызваны необходимостью анализа большого объема данных по земляному полотну в условиях возможного дефицита исходной информации, например, материалов инженерно-геологических изысканий или обследования грунтов тела насыпи.

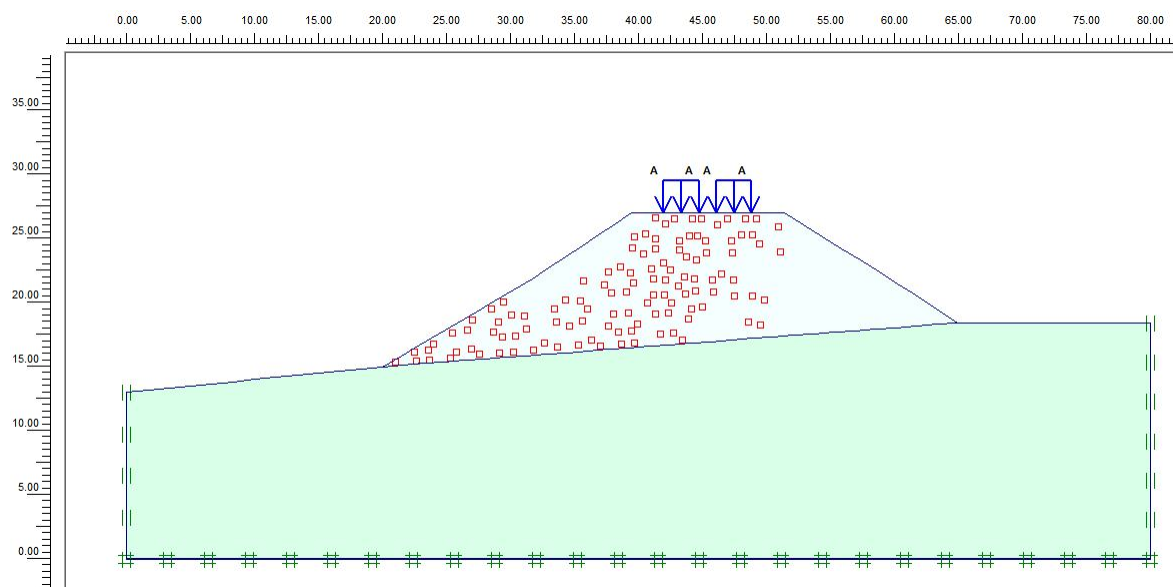


Рис. 5. Точки грунта, вышедшие в предельное состояние

В качестве одного из путей преодоления указанной частной проблемы предлагается осуществлять расчеты по данному профилю, систематизируя их с использованием паспорта устойчивости. На рис. 6 изображен паспорт устойчивости грунта в данной насыпи. Паспорт устойчивости построен для расчета по методу Терцаги, для расчета по методу конечных элементов и для расчета методом линейного программирования.

Суть предлагаемой методики сводится к следующему. В результате серии стандартных расчетов выявляется наиболее опасная линия скольжения, для которой, в свою очередь, выполняются дополнительные расчеты при различных параметрах прочности грунта. Результаты расчетов наносятся на плоскость φ σ (φ — угол внутреннего трения, σ — удельное сцепление), образуя две различных области значений прочностных характеристик, при которых насыпь теряет устойчивость и при которых устойчивость насыпи обеспечена. Эти области разделены линией предельных состояний. Такой подход может быть весьма полезен при проектировании мероприятий по реконструкции земляного полотна.

Из сопоставления результатов, полученных по методу Терцаги и методу конечных элементов, видно, что они имеют стабильную сходимость при малых углах внутреннего трения до 15 градусов, при значениях больше 20 градусов расхождения по двум методам становятся значительными, это связано с тем, что конечно-элементный анализ не всегда дает надежные результаты. Эта проблема широко обсуждается рядом авторов.

Таким образом, в расчетах земляного полотна и основания следует больше опираться на методы теории устойчивости, при этом результаты, полученные методом конечных элементов, также могут быть использованы при наличии соответствующего контроля. Отличие симплекс-метода заключается в том, что значение $k_{уст} = 1$ имеет место для целого диапазона значений прочностных параметров грунтов c_i, φ_i , тогда как в известных вариантах «методов отсеков» пропорциональное изменение характеристик прочности дает значение $k_{уст} = 1$ при одном сочетании значений c_i, φ_i . Этот метод широко применяется в расчетах устойчивости инженерных сооружений и дает весьма стабильные результаты.

Библиографический список

1. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. М., 2011.

K.V. Korolyov, A.A. Verkhovskaya. Structuring the Descriptor for Road Bed Stability by Various Methods.

The article analyses the findings of structuring the descriptor of road bed stability and proposes three methods: the method of circular cylindrical sliding for surface, the finite element method and the simplex-method. All the three methods evaluate stability identically when an angle size of internal friction is small; when it is more than 20 degrees, the simplex-method is more reliable.

Key words: *road bed, method of circular cylindrical sliding for surface, finite element method, simplex method, stability passport.*