УДК 625.12.033.38

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, ОТСЫПАННОГО ИЗ ЛЕССОВИДНОЙ СУПЕСИ

Абдукаримов А.М., *к.т.н. (ТашИИТ)*

В основу решения задачи о несущей способности земляного полотна, отсыпанного из лессовидной супеси, положена плоская задача теории предельного равновесия. Основоположником теории предельного равновесия является Соколовский В.В. Он показал, что все основные задачи теории предельного равновесия (задачи о давлении земли на подпорную стенку, об устойчивости оснований и откосов, о предельных очертаниях откосов) представляют собой частные случаи одной задачи. Для оценки несущей способности железнодорожного земляного полотна данная теория впервые была применена профессором Прокудиным И.В. Однако, предложенное решение по оценке несущей способности земляного полотна не учитывает особенности характера распространений колебаний в теле земляного полотна, отсыпанного из лессовидной супеси, при движении подвижного состава, а также снижения их прочностных характеристик под действием вибродинамической нагрузки. В данной статье показана методика, учитывающая эти особенности.

Основная система уравнений плоской задачи теории предельного равновесия состоит из уравнений движения грунтовой среды и условия предельного равновесия Кулона и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = Z + \rho \cdot \dfrac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \dfrac{\partial \sigma_y}{\partial y} = Y + \rho \cdot \dfrac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ \sigma_1 - \sigma_2 = \left(\sigma_1 + \sigma_2 + 2 \cdot C_{дн} \cdot ctg\varphi_{дн}\right) \cdot sin\varphi_{дн} \end{cases} . \qquad (1)$$

где

σ_z, σ_y - составляющие нормальных напряжений, соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, t/m^2;

τ_{zy}, τ_{yz} - составляющие касательных напряжений, t/m^2;

U, V - перемещения при колебаниях в направлении осей Z и Y;

σ_1, σ_2 - максимальное и минимальное главные напряжения, t/m^2;

$C_{дн}$, $\varphi_{дн}$ - сцепление и угол внутреннего трения грунта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку;

Z и Y - объемные силы, при направлении оси Z вертикально вниз $Z=\gamma$, а $Y=0$;

γ - объемный вес грунта, т/м^3.

Для получения решения система преобразуется с помощью введения двух новых неизвестных: угла наклона δ большего главного напряжения σ_1 к оси Y и величины среднего напряжения σ, выражаемого через главные напряжения следующей формулой:

$$\sigma = \frac{1}{2}\left(\sigma_1 + \sigma_2\right) + C_{дн} \cdot ctg\varphi_{дн} . \qquad (2)$$

После постановки этого выражения в третье уравнения системы (1) получим:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2)=\sigma\cdot sin\varphi_{дн}. \tag{3}$$

Известно, что можно представить компоненты напряжений вдоль соответствующих координатных осей через величины главных напряжений по формулам:

$$\sigma_z=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)-\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2)\cdot cos2\delta. \tag{4}$$

$$\sigma_y=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)+\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2)\cdot cos2\delta. \tag{5}$$

$$\tau_{zy}=\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2)\cdot sin2\delta. \tag{6}$$

После подстановки выражений (2) и (3) в формулы (4.) – (6) получим следующие выражения для компонент напряжений через величину среднего приведенного напряжения σ.

$$\begin{cases}\sigma_z=\sigma\cdot(1-sin\varphi_{дн}\cdot cos2\delta)-C_{дн}\cdot cos\varphi_{дн}\cdot cos2\delta\\ \sigma_y=\sigma\cdot(1+sin\varphi_{дн}\cdot cos2\delta)+C_{дн}\cdot cos\varphi_{дн}\cdot cos2\delta.\\ \tau_{zy}=\sigma\cdot sin\varphi_{дн}\cdot sin2\delta+C_{дн}\cdot cos\varphi_{дн}\cdot cos2\delta\end{cases} \tag{7}$$

В работах и в разделе 3.5 по исследованию влияния вибрации на прочностные характеристики лессовидных супесей показано, что они в зависимости от величины вибродинамического воздействия изменяются по следующим зависимостям:

$$C_{дн}=C_{cm}\cdot\left[K_C^{'}+K_c\cdot e^{-K(A-A^{н})}\right]. \tag{8}$$

$$\varphi_{дн}=\varphi_{cm}\cdot\left[K_\varphi^{'}+K_\varphi\cdot e^{-K\cdot A}\right]. \tag{9}$$

где:

$C_{дн}$, $\varphi_{дн}$ – прочностные характеристики грунтов, при действии динамической нагрузки;

C_{cm}, φ_{cm} – то же, при действии статической нагрузки;

$K_c^{'},K_\varphi^{'}$ – минимальные показатели соотношения характеристик сцепления и внутреннего трения:

$$K_C^{'}=\frac{C_{\min}}{C_{cm}}\ K_\varphi^{'}=\frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{cm}} \tag{10}$$

$A^{н}$ – начальная амплитуда колебаний, при которой снижение удельного сцепления не превышает 5%;

C_{min}, $_{min}$ – наименьшие величины соответственно сцепления и угла внутреннего трения, определяемые экспериментально при наибольшем вибродинамическом воздействии;

K_c, K_φ – максимальные величины показателей относительного снижения прочностных характеристик,

$$K_C = 1 - K_C^{'} \; K\varphi = 1 - K_\varphi^{'} \tag{11}$$

K – коэффициент виброразрушения для лессовидных супесей 0,024.

Из этих формул видно, что $C_{\partial н}$ и $\varphi_{\partial н}$ определяются в любой точке земляного полотна в зависимости от результирующей амплитуды колебаний A_{zy}, которая определяется формулой:

$$A_{zy} = A_0 \cdot e^{-\phi(z)\cdot\delta_1^1 - \phi'(z)\cdot\delta_1^2 - \delta_2^1\cdot\phi(y) - (y-1,35)\cdot\delta_2^2 + \delta_3\cdot h_i} \tag{12}$$

Подставив соотношения (7) в первые два уравнения системы (1) с учетом зависимостей (8), (9) и (12) получим систему уравнений в частных производных для решения плоской задачи теории предельного равновесия:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial\sigma}{\partial z}(1-\sin\varphi_{\partial н}\cos2\delta)+\frac{\partial\sigma}{\partial y}\sin\varphi_{\partial н}\sin2\delta+\frac{\partial\delta}{\partial z}2\sigma_{\partial н}\sin\varphi_{\partial н}\cos2\delta=\\
&=\gamma\cos0-\phi_1\left[f\cdot\sin2\delta+n\cos2\delta\right]\cdot\left[\varphi_{cm}K_\varphi\cdot\left(\sigma\cos\varphi_{\partial н}-C_{\partial н}\sin\varphi_{\partial н}\right)+\right.\\
&\left.+C_{cm}\cdot K_c\cos\varphi_{\partial н}\right]+\rho\frac{\partial^2U}{\partial t^2}\frac{\partial\sigma}{\partial z}\sin\varphi_{\partial н}\sin2\delta+\frac{\partial\sigma}{\partial y}\left(1+\mathrm{in}\varphi_{\partial н}\cos2\delta\right)+\\
&+\frac{\partial\delta}{\partial z}2\delta_{\partial н}\sin\varphi_{\partial н}\cos2\delta-\frac{\partial\delta}{\partial y}2\sigma_{\partial н}\sin\varphi_{\partial н}\sin2\delta=\gamma\sin0-\phi_1\left[n\sin2\delta+\right.\\
&\left.+f\cos2\delta\right]\cdot\left[\varphi\,K_\varphi\cdot\left(\sigma\cos\varphi_{\partial н}-C\;\sin\varphi\;\right)+C\;\cdot K\;\cos\varphi\;\right]+\rho\frac{\partial^2V}{\partial t^2}
\end{aligned} \tag{13}$$

где:

$$\Phi_1 = KA_{zy}\exp\left(-KA_{zy}\right);\sigma_{\partial н} = \sigma + C_{\partial н}ctg\varphi_{\partial н} \tag{14}$$

Уравнения (13) содержат в правых частях члены $\rho\frac{\partial^2U}{\partial t^2}$ и $\rho\frac{\partial^2V}{\partial t^2}$, которые учитывают силы инерции в колебательном процессе грунта. В работах И.В. Прокудина показано, что значение этих членов можно представить следующими зависимостями:

$$\rho\frac{\partial^2U}{\partial t^2} = 0,15\gamma H \tag{15}$$

$$\rho\frac{\partial^2V}{\partial t^2} = 0,04\gamma H \tag{16}$$

где:

H – функция, учитывающая изменение амплитуды колебаний в земляном полотне по сравнению с амплитудами на основной площадке. В нашем случае:

$$H = e^{-\phi(z)\cdot\delta_1^1 - \phi'(z)\cdot\delta_1^2 - \delta_2^1\cdot\phi(y) - (y-1,35)\cdot\delta_2^2 + \delta_3\cdot h_i} \tag{17}$$

Система уравнений (13) является системой первого порядка гиперболического типа, тогда следуя идеям Соколовского В.В. можно показать, что уравнения характеристик и соотношения вдоль характеристик этой системы имеют вид:

$$z = dy \cdot tg\left[\delta \pm \frac{\pi}{4} \mp \varphi_{дн} \cdot \left(K'_{\varphi} + K_{\varphi} \cdot e^{-KA_{zy}}\right)\right] \tag{18}$$

$$d\sigma \pm 2\sigma_{дн} tg\varphi_{дн} d\delta = (\gamma + B)\cdot(dz \mp dytg\varphi_{дн}) + D\cdot(dy \pm dztg\varphi_{дн}) \tag{19}$$

где верхние знаки относятся к линиям скольжения второго семейства, нижние – к первому семейству и

$$B = 0.15\gamma H - \Phi_1\left[f\sin 2\delta + n\cos 2\delta\right]\cdot\left[\varphi_{cm}K_{\varphi}\left(\sigma\cos\varphi_{дн} - C_{дн}\sin\varphi_{дн}\right) + C_{cm}K_c\cos\varphi_{дн}\right] \tag{20}$$

$$D = 0.04\gamma H + \Phi_1\left[n\sin 2\delta - f\cos 2\delta\right]\cdot\left[\varphi_{cm}K_{\varphi}\left(\sigma\cos\varphi_{дн} - C_{дн}\sin\varphi_{дн}\right) + C_{cm}K_c\cos\varphi_{дн}\right] \tag{21}$$

где:

$$\Phi_1 = K \cdot A_0 \cdot exp\left(n \cdot z - \delta_1^0 \cdot y + 1{,}35 \cdot \delta_1^0 + /n/ \cdot 0{,}667 \cdot \varphi(h_i) \cdot tg\alpha_1 - K \cdot A_{zy}\right).$$

$$\phi'(z) = \begin{cases} 0 & при\, z \le 0{,}7м \\ z - 0{,}7 & при\, z \succ 0{,}7м \end{cases}$$

$$\delta_1^0 = \delta_2^1 + \delta_2^2.$$

определение несущей способности земляного полотна заключается в построении сетки линий скольжения (характеристик) и вычисления значений напряжений σ и угла δ в узлах этой сетки.

Литература

1. Колос А.Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки. //канд. дисс. -ПГУПС. –СПБ, 2000.
2. Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку.// докр. дисс. –ЛИИЖТ, 1982.
3. Стоянович Г.М. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна при повышенной вибродинамической нагрузке в упругопластической стадии работы грунтов: дисс. докт. техн. наук. – Хабаровск, 2002. – 360с.
4. Абдукаримов А.М. Несущая способность земляного полотна, отсыпанного лессовыми грунтами, воспринимающими вибродинамическую нагрузку// //канд. дисс. -ПГУПС. –СПБ, 2011.
5. Абдукамилов Ш.Ш. Расчет несущей способности земляного полотна, отсыпанного барханными песками, воспринимающими вибродинамическую нагрузку// Вестник ТашИИТ, 2012-№3/4, с 7-11.