

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТЧАТОГО ПОКРЫТИЯ ОТКОСА ОТ СПОЛЗАНИЯ****DEFINITION OF THE INTENSE DEFORMED CONDITION OF ELEMENTS
OF THE TRELLISED COVERING OF THE SLOPE FROM SLIPPING**

Макалада тик жарлардан нымдуу кыртыштын жылмышып түшүп тоо жолдорун басып калуудан сактоо маселеси каралган. Жардын жээгине бири-бирине жоон трос менен байланып чынжырланган темир бетон түркүктөрдүн жаңы конструкциясы сунушталат. Балка сыяктуу түркүктөрдү серпилгич катуу таянычка орнотуунун эсеби аткарылды.

Ачык сөздөр: күрткү, жантайма жана жар беттердин кыртышынын жылып түшпөөсүн камсыз кылуу, тор көздүү беттеме, серпилгич негизге орнотулчу балкалардын эсеби, серпилгич таянычка чоюлган трос.

В статье рассматриваются вопросы защиты крутых склонов горных дорог от сползания увлажненного грунта. Предлагаются новые конструкции защитного покрытия в виде прямолинейного железобетонного стержня установленные в ряд по склону с разрывом и соединенные между собой поддерживающим тросом. Выполнены расчеты стержня как балки на упругом основании и троса на упругих опорах.

Ключевые слова: оползень, обеспечение устойчивости склонов и откосов, решетчатое покрытие, расчет балки на упругом основании, растянутая нить с упругими опорами.

In article questions of protection of steep slopes of mountain roads against slipping of the moistened soil are considered. New designs of a sheeting in the form of a rectilinear ferroconcrete core established in a row on a slope with a gap and connected among themselves by the supporting cable are offered. Calculations of a core as beams on the elastic basis and a cable on elastic support are executed.

Keywords: landslide, providing of stability of slopes and slopes, latticed coverage, calculation of beam on the resilient founding, stretched filament with resilient supports.

Оползни и обвалы достаточно широко распространены во всех горных регионах республики. В отдельных случаях крупные завалы, образованные оползнями и обвалами, послужили причиной образования живописных высокогорных озер: Большого Алматинского, Исыка и др.

Оползни возникают вследствие нарушения равновесия пород и формируются, как правило, на участках, сложенных чередующимися водоупорными и водоносными слоями грунта. Сами по себе оползни и обвалы представляют угрозу лишь на ограниченном пространстве, непосредственно примыкающем к неустойчивому склону. Однако эти типы смещений горных пород опасны тем, что их возникновение нередко порождает катастрофические вторичные явления – селевые потоки и паводки, связанные с прорывами временных запрудных водоемов.

Недавно в Китае тоже произошел оползень в деревне Лидонг в городском округе Лишуй 13 ноября 2015 года. Потоки грязи и камней обрушились на деревню, оставив 27 домов погребенными под землей. Спасателям удалось обнаружить лишь одного выжившего. Более 300 жителей деревни были перемещены, число погибших достигло до 38 человек.

Такие оползни имели место и в Калифорнии (США) 17 октября 2015 года после бури и мощных ливней. Буря спровоцировала больше всего неприятностей на участке автотрассы в 45 км от Бейкерсфилда, где толщина слоя грязи, камней и мусора достигает 1,8 м в высоту. Здесь за сутки увязли порядка 200 автомобилей и грузовиков, водителей которых пришлось спасать и размещать в трех временных убежищах.

Основным действенным мероприятием, направленным на обеспечение местной устойчивости склонов и откосов, является укрепление их поверхности. Выбранные конструкции должны предотвратить или не допустить (а в некоторых случаях обеспечивать последовательно совместный эффект) развитие деформаций локального скольжения, оплывин, сплывов, эрозии.

Нами разработано решетчатое покрытие склона из прямолинейных железобетонных элементов

Прямолинейный стержень имеет в середине выступ в виде зубца. В середине выступа предусмотрены отверстия для анкерования его в грунт. По трем концам стержня имеются анкерные петли для соединения с другими элементами. Роль выступа обеспечить устойчивость каждого элемента на сдвиг и опрокидывание. Если выступ расположен относительно стержня вниз в плоскости стержня, то таким образом обеспечивается сдвиг и опрокидывание стержня. Если выступ расположен с верхней стороны стержня, то создается барьер препятствия к местному сдвигу грунтовой массы. Если выступ направлен в грунт склона, то это обеспечивает устойчивость данного стержня на сдвиг.

При крутом склоне (свыше 30°) через отверстия в выступе забивается анкерный стержень до расчетных глубин. При помощи этого прямолинейного стержня могут быть получены разные конфигурации (треугольник, четырехугольник, ромбик, Н и А образные формы) в плане склона. В дальнейшем образованные клетки заполняются растительностью с сильной корневой системой или камнями для обеспечения нагрузки на склон.

Более эффективным расположением является вариант, фасад которого приведен на рисунке 1. Например, верхний первый ряд по горизонтали могут состоять только из одного ломаного ряда с дискретным расположением, а последующий ряд второй по горизонтали могут иметь непрерывную волнообразную цепь по горизонтали склона. При этом выступы каждого стержня должны быть направлены для обеспечения устойчивости каждого ряда или для создания препятствия местному сдвигу грунта склона.

Общая устойчивость на сдвиг всего решетчатого покрова на склоне обеспечивается свайным рядом (заглубленные стойки) и тросами, которые связывают каждый вертикальный ряд между собой по склону.

В практике проектирования часто приходится встречаться с конструкциями, контактирующими с некоторой деформируемой средой: фундаменты зданий, рельсовые пути, трубопроводы и защитные покрытия крутых склонов и откосов, опирающиеся на грунтовое основание.

При действии нагрузок конструкция деформируется и вызывает деформации в связанной с ней среде. По поверхности контакта возникают силы взаимодействия,

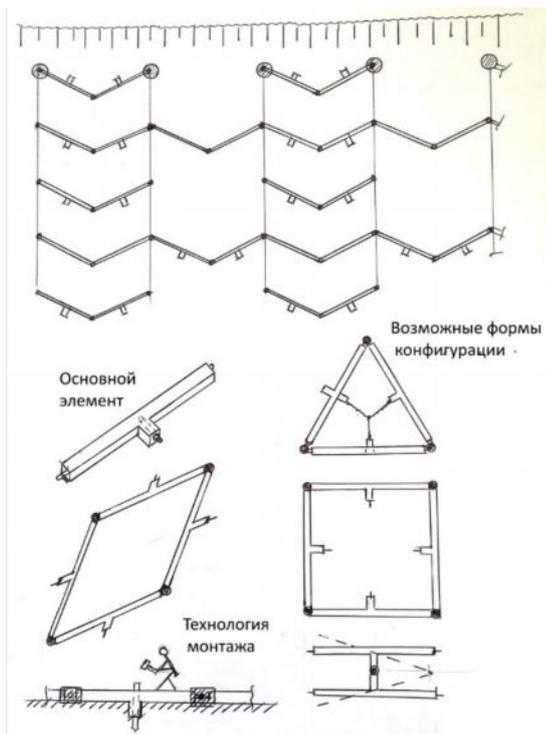


Рис. 1. Решетчатое покрытие склона из прямолинейных железобетонных элементов

величины которых и характер распределения неизвестны и зависят от величины и вида деформации, жесткостных характеристик конструкции и основания. Необходимость учета сил взаимодействия вносит особенности в методы определения напряженно-деформированного состояния подобных конструкций.

Рассмотрим стержень, решетчатую противооползневую конструкцию имеющую непрерывный контакт с упругим основанием. Полагаем, что его поперечное сечение и все нагрузки, включая реакцию основания, симметричны относительно плоскости XOZ. Кроме того, все действующие нагрузки параллельны оси OZ. Реакцию основания принимаем равномерно распределенной по ширине зоны контакта (Рис. 2,а). При этих условиях в стержне возникает плоский изгиб (Рис. 2,б). Реакция основания

$$q_z^0 = q_{zs}^0 b$$

представляет собой неизвестную функцию переменной x .

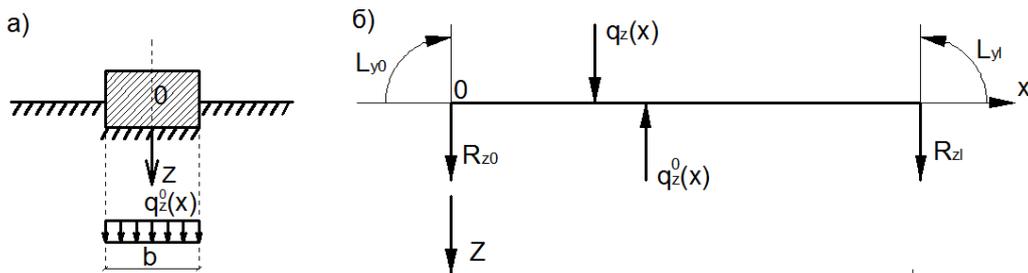


Рис. 2. Стержень, имеющий непрерывный контакт с упругим основанием

Система уравнений для определения U_x, φ_x, U_y, U_z

$$\begin{aligned} U_x'' &= -\frac{1}{EA} q_x; & U_y^{IV} &= \frac{1}{EI_z} q_y; \\ \varphi_x'' &= -\frac{1}{GI_x} \tilde{m}_x; & U_z^{IV} &= \frac{1}{EI_y} q_z. \end{aligned} \quad (1)$$

При плоском изгибе напряженно-деформированное состояние линейной модели характеризуется усилиями M_y, Q_z , деформациями x_z и перемещениями U_z и φ_y . Перемещение U_z должно удовлетворять четвертому уравнению системы (1), которое с учетом реакции основания будет иметь вид:

$$U_z^{IV} = \frac{1}{EI_y} (q_z - q_z^0).$$

В это уравнение вошли две неизвестные функции U_z и q_z^0 , поэтому необходимо составить еще одно уравнение, связывающее эти неизвестные. Оно должно базироваться уже на свойствах основания. Это не просто, так как реальные основания, в частности грунтовые, обладают достаточно сложными и разнообразными физическими свойствами. Песчаные грунты не похожи на глинистые, и даже один и тот же грунт в сухом и влажном состоянии имеет различные характеристики и т.п.

В связи с этим на базе допущений, отражающих некоторые общие главные свойства, строится модель основания и на ее основе записывается недостающее уравнение. Известны несколько моделей основания. Рассмотрим модель линейно-деформируемого основания. Ее свойства базируются на гипотезе Винклера: при вертикальном перемещении какой-либо точки основания в нем в этой точке возникает вертикальная сила сопротивления, пропорциональная перемещению.

Принимая это во внимание и полагая, что перемещения стержня и основания во всех точках контакта происходит совместно, можно записать:

$$q_{zs}^0 = kU_z, \quad \text{или} \quad q_z^0 = kbU_z,$$

где k – коэффициент пропорциональности или коэффициент постели.

Коэффициент постели зависит от свойств грунта и определяется экспериментальным путем. Подставляя реакцию основания в уравнение равновесия стержня, получим:

$$U_z^{IV} = \frac{1}{EI_y} q_z - \frac{kb}{EI_y} U_z.$$

Введем обозначение:

$$4\beta^4 = \frac{kb}{EI_y}; \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI_y}}.$$

Учитывая это в уравнении, найдем:

$$U_z^{IV} + 4\beta^4 U_z = \frac{1}{EI_y} q_z.$$

Полученное дифференциальное уравнение является линейным, неоднородным, четвертого порядка. Находим корни характеристического уравнения:

$$k_{1,2,3,4} = \sqrt[4]{-4\beta^4}.$$

Общее решение будет иметь вид

$$U = C_1 e^{\beta x} \sin \beta x + C_2 e^{\beta x} \cos \beta x + C_3 e^{-\beta x} \sin \beta x + C_4 e^{-\beta x} \cos \beta x + U^*.$$

Между функциями А.Н.Крылова и их производными существуют следующие зависимости:

$$f_4' = f_3; f_4'' = f_3' = f_2; f_4''' = f_3'' = f_2' = f_1; \quad (2)$$

$$f_4^{IV} = f_3''' = f_2'' = f_1' = -4\beta^4 f_4.$$

Приведенные зависимости облегчают оперирование с выражениями, содержащими эти функции.

На основании этих зависимостей, учитывая соотношения (2), найдем выражения для угла поворота φ_y и усилий M_y и Q_z :

$$U_z = U_{z0} f_1 + \varphi_{y0} f_2 - \frac{M_{y0}}{EI_y} f_3 - \frac{Q_{z0}}{EI_y} f_4 + U_z^*;$$

$$\varphi_y = -4\beta^4 U_{z0} f_4 + \varphi_{y0} f_1 - \frac{M_{y0}}{EI_y} f_2 - \frac{Q_{z0}}{EI_y} f_3 + (U_z^*)'; \quad (3)$$

$$M_y = 4\beta^4 EI_y (U_{z0} f_3 + \varphi_{y0} f_4) + M_{y0} f_1 + Q_{z0} f_2 - EI_y (U_z^*)'';$$

$$Q_z = 4\beta^4 EI_y (U_{z0} f_2 + \varphi_{y0} f_3) - 4\beta^4 M_{y0} f_4 + Q_{z0} f_1 - EI_y (U_z^*)'''.$$

Вычислим пределы функций:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{ch\beta\varepsilon \sin \beta\varepsilon}{\varepsilon} = \beta; \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\cos \beta\varepsilon sh\beta\varepsilon}{\varepsilon} = \beta.$$

Принимая во внимание значения этих пределов, получим

$$(4) \quad \text{при } 0 \leq x < a, U_z^* = 0;$$

$$\text{при } a < x \leq l, U_z^* = \frac{F}{EI_y} f_4(x-a).$$

Аналогично может быть найдено частное решение при действии сосредоточенного момента L:

$$(5) \quad \text{при } 0 \leq x < a, U_z^* = 0;$$

при $a < x \leq l$, $U_z^* = \frac{P}{EI_y} f_3(x-a)$.

Определить перемещения и усилия в железобетонной балке на упругом основании.

Дано: модуль упругости материала балки $E = 3,6 \cdot 10^7$ кН/м²; коэффициент постели упругого основания $k = 4 \cdot 10^4$ кН/м³.

1. Определяем β :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI_y}}, I_y = \frac{0,3 \cdot 0,2^3}{12} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4;$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 10^4 \cdot 0,3}{4 \cdot 3,6 \cdot 10^7 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}} = 0,8034 \text{ м}^{-1}$$

2. По условиям закрепления левого конца балки находим

$$M_{y0} = 0; Q_{z0} = 0.$$

Подлежат определению U_{z0} , φ_{y0} .

3. По характеру закрепления правого конца балки определяем условия для составления уравнений $M_{yl} = 0; Q_{zl} = 0$.

4. Частные решения записываем на основании формулы (4):

$$\text{при } 0 \leq x < 0,5, U_z^* = 0;$$

$$\text{при } 0,5 < x < 2,0,$$

$$U_z^* = \frac{200}{EI_y} f_4(x-0,5) = 0,02778 f_4(x-0,5);$$

$$\text{при } 2 < x \leq 2,5,$$

$$U_z^* = 0,02778 [f_4(x-0,5) + f_4(x-2)]$$

5. По формулам (3) записываем в развернутой форме левые части граничных равенств, указанных в п. 3. Предварительно найдем, учитывая (2):

$$4\beta^4 EI_y = kb = 4 \cdot 10^4 \cdot 0,3 = 1,2 \cdot 10^4 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

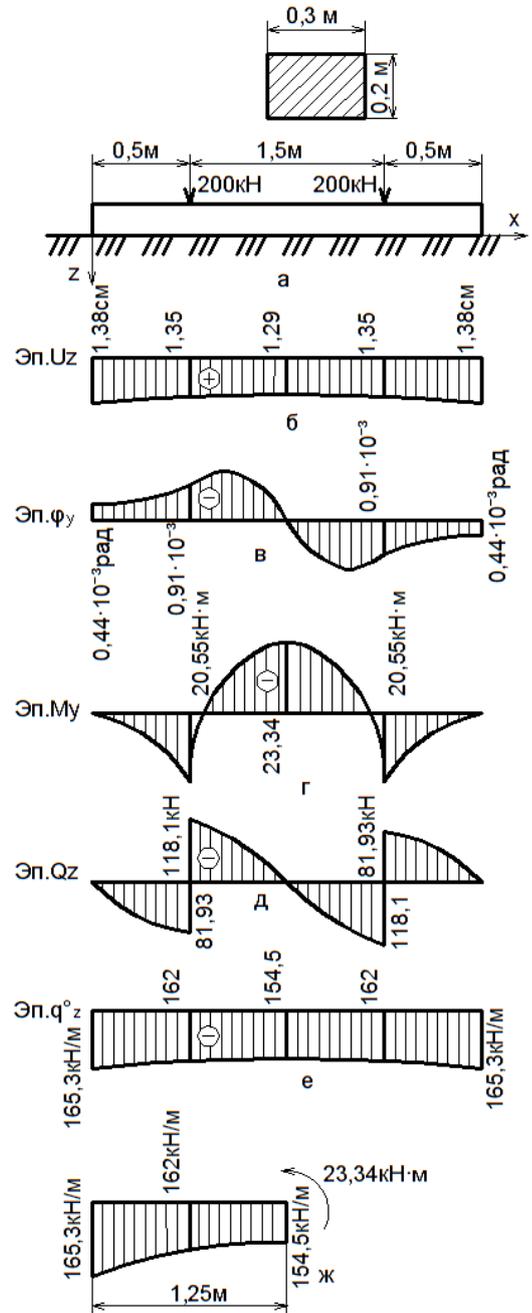


Рис. 3. Отсеченная часть балки

$$EI_y (U_z^*)'' = 200[f_4(x-0,5) + f_4''(x-2,0)] = 200[f_2(x-0,5) + f_2(x-2,0)];$$

$$EI_y (U_z^*)''' = 200[f_4'(x-0,5) + f_4'''(x-2,0)] = 200[f_1(x-0,5) + f_1(x-2,0)];$$

Принимая во внимание эти результаты, запишем граничные условия при $x=2,5$ м:

$$1,2 \cdot 10^4 [U_{z0} f_3(2,5) + \varphi_{y0} f_4(2,5)] = 200[f_2(2) + f_2(0,5)];$$

$$1,2 \cdot 10^4 [U_{z0} f_2(2,5) + \varphi_{y0} f_3(2,5)] = 200[f_1(2) + f_1(0,5)].$$

По таблицам находим значения функции Крылова:
 $f_2(2,5\beta) = 1,1899$, $f_1(2\beta) = -0,100$; $f_1(0,5\beta) = 0,9957$, $f_3(2,5\beta) = 2,5695$;
 $f_2(2\beta) = 1,5594$; $f_2(0,5\beta) = 0,4978$, $f_4(2,5\beta) = 2,3960$

Учитывая эти значения в уравнениях, получим:
 $2,5695U_{z_0} - 2,3960\varphi_{y_0} = 0,03428$;
 $1,1899U_{z_0} + 2,5695\varphi_{y_0} = 0,01492$.

6. Решая полученную систему, находим:

$$U_{z_0} = 0,01377 \text{ м}; \varphi_{y_0} = -0,000437 \text{ рад.}$$

По условию задачи в п. 2 были определены:

$$M_{y_0} = 0; Q_{z_0} = 0.$$

7. Подставляем начальные параметры в формулы (3) и, учитывая выражения U_z^* , строим эпюры перемещений, усилий и реакции основания $q_{z_0} = kbU_z$.

8. Для проверки решения отсекаем часть балки (рис. 3. ж), прикладываем внешние нагрузки, включая реакцию основания и в точке разреза, определяем усилия $M_y = 23,34$ кН·м и $Q_z = 0$, которые берем по эпюрам усилий. Отсеченная часть должна находиться в равновесии. Следовательно, $\Sigma Z = 0$, ΣM_{O1} .

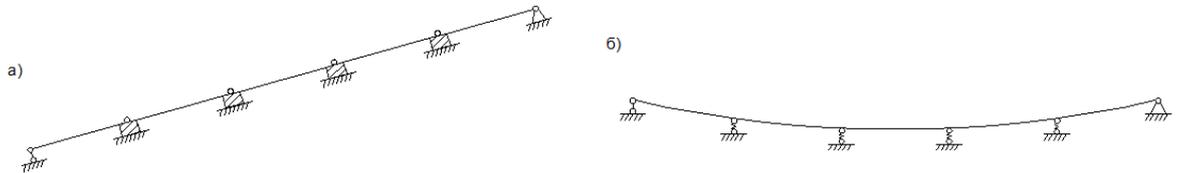


Рис. 4. Конструкция несущих элементов защитного покрытия:

а) профиль общей схемы; б) расчетная схема при деформации грунта склона

Как видно из рис. 4. все балки, расположенные на склоне поддерживаются тросом. Расчетная схема троса с присоединенными балками представлена в виде растянутой нити с упругими опорами в местах расположения балок.

Предварительное натяжение весомой растяжимой нити.

Интенсивность нагрузки определяется из равенства

$$q_{0np} \Delta_b a = f_0 - q_{0np} l^2 \overline{M}_0 / H_{np}, \quad \overline{M}_0 = \int_{\xi=0,5} d\xi \int \overline{q}_\xi d\xi; \quad \xi = \frac{x}{l}. \quad (6)$$

Закон изменения нагрузки q_{np} находим из уравнения

$$\overline{q}_\xi - \frac{A(\xi) l^2}{B_1} \int_{\xi=0,5} d\xi \int \overline{q}_\xi d\xi + \frac{l^2}{B_1} \int_{\xi} d\xi \int \overline{q}_\xi d\xi = A(\xi), \quad (7)$$

В исходном положении нить растянута собственной массой q_c , усилия в упругих опорах отсутствуют. Распор и исходная длина нити [1]:

$$H_c = q_c l^2 / 8 f_0; \quad l_u = (l - H_c \nu + 8 f_0^2 / 3l) (1 + H_c / EF)^{-1},$$

где ν – податливость концевых опор нити, EF – жесткость нити.

После натяжения распор увеличится до $H = H_c + H_{np}$, а длина нити уменьшится до:

$$l_1 = \frac{l - H\nu + D_{on} / 2H^2}{1 + H/EF}; \quad D_{on} = \int_0^l Q_{OH}^2 dx = 2q_0^2 l^3 \int_{\xi=0}^{\xi=0,5} d\xi \left(\int \overline{q}_\xi d\xi \right)^2,$$

q_0 и \overline{q}_ξ принимаются соответственно по (6) и (7) с заменой H_{np} на H .

Этот способ расчета нетрудоемок, удобен для проектирования конструкций с применением нитей на упругих опорах [3,4,5], дает однозначные значения усилий и перемещений, хорошо совпадающие с экспериментальными данными: так, погрешность в

определении провесов при равномерно распределенной нагрузке составляет не более 0,3 %, при сосредоточенной нагрузке до 9,3 %, в определении распоров при равномерно распределенной нагрузке до 9,63 %, при сосредоточенной нагрузке до 6 %.

Список литературы

1. Лилеев А.Ф. Методы расчета пространственных вантовых систем[Текст] / А.Ф. Лилеев, Е.Н. Селезнева. - Стройиздат, 1964.
2. Мацелинский Р.Н. Статический расчет вибких висячих конструкций[Текст] / Р.Н. Мацелинский. - Стройиздат, 1950.
3. Москалев Н.С. Статический расчет ванто-балочных сеток[Текст]/ Н.С. Москалев, Л.П. Чекалев. // Строительная механика и расчет сооружений. - 1969, №4.
4. Загорянский Л.А. Практический способ расчета предварительно-напряженных канатно-балочных сеток[Текст] / Л.А. Загорянский. // Известия Академии строительства и архитектуры СССР. - 1963, №2.
5. Ткачев В.Я. Висячее покрытие[Текст] / В.Я. Ткачев. - Авторское свидетельство № 318666, 1971.