

УДК 624.131

## **ПРОЕКТ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОРТАЛА ТОННЕЛЯ**

**Сулёвска Моника**

*Кафедра геотехники, строительный факультет*

*Словацкого технического университета, г. Братислава, Словакия*

Во флишевом поясе северной Словакии подготавливается строительство транспортного тоннеля. Восточный портал тоннеля размещен в крутом откосе долины р. Ваг, который создает выразительную морфологическую ступень. Идентифицированные факторы риска в области восточного портала таковы: неустойчивая территория, напорные воздействия подземной воды, тектонические нарушения грунтовой среды и изменчивое качество грунтов. Для обеспечения стабильности среды вокруг восточного портала были предложены воспринимающие горизонтальные силы элементы: анкеры, нагели, покрытие поверхности защитной стены торкрет-бетоном и распределительные пояса анкерной системы, а также устройства, отводящие поверхностную и подземную воду.

There is prepared construction of highway tunnel in flysh region of Northern Slovakia. Eastern portal of tunnel is situated on steep slope in valley of river Váh, which is build up by distinctive morphological berme. There were identifying some risks factors around eastern portal: low stability of slope area, uplift action of groundwater, tectonic failures of rock mass and various quality of rocks. To increasing the stability of slope there were designed elements to catch horizontal forces: anchors, soil nails, spreading beams of anchored system, surface covering by shotcrete and arrangement to pick up the surface water and groundwater.

## **Введение**

Обеспечение устойчивости портала тоннеля было обусловлено многими граничными условиями, которые взаимосвязаны не только с соблюдением статических принципов обеспечения устойчивости откоса, но и с технологическими требованиями и с геометрическим расположением присоединения тоннеля к мостовому объекту в весьма стесненных пространственных условиях. Запроектированное решение является итогом многих вариантных решений. Приоритетным критерием в каждом из них была надежность, которую следовало оценить со всех точек зрения.

### **1. Геологические и гидрогеологические условия**

Восточный портал тоннеля Ройков расположен в левостороннем откосе долины р. Ваг, над уровнем государственной дороги I/18. Откос портала (рис. 1) крутой, создает выразительную морфологическую ступень с высотой до 50 м. Речь идет об аккумулятивной части обширной блочной откосной деформации с перемятой зоной на глубине 25,0 м. В верхней части откос расчленен с развитием потенциальных откосных деформаций типа оползней, локальных блочных деформаций.



Рис. 1: Откос восточного портала тоннеля Ройков

Сильно выветрелые мергели характера каменно-глинистой осыпи, отнесенные к классу F2-CG, нарушены оползневыми процессами. Мощность этого слоя была выявлена 9,4 м. Уровень подземной воды находится на двух горизонтах: 1-й горизонт 4,00 м от поверхности и 2-й горизонт 13,50 м от поверхности; оба горизонта имели большой напор. Грунтовая среда под поверхностью сдвига представлена сильно выветрелыми мергелями очень низкой прочности, отнесенными к классу R5. Генеральный наклон слоев ожидался ориентированным на запад по юго-запад.

Составляющей инженерно-геологических изысканий были и расчеты устойчивости. В расчетах исходными служили значения сдвиговой прочности, установленные обратным анализом устойчивости с учетом лабораторных исследований и макро-скопического описания оползневого делювия. В пространстве восточного портала (км 9,220) были в качестве граничных условий использованы:  $\varphi = 22^\circ$ ,  $c = 0$  кПа,  $\gamma = 18,5$  кН/м<sup>3</sup>. Устойчивость откоса перед строительными работами без наличия подземной воды получилась  $F_{so} = 1,3$ , а при учете максимально ожидаемого уровня подземной воды  $F_{sl} = 1,18$ . Поверхность сдвига достигает в откосе глубины 9,4 м.

В пространстве восточного портала в разное время было осуществлено много изысканий. Согласно дополнительным инженерно-геологическим изысканиям на этой территории блоковые деформации проникали до глубин от 20 до 21 м, причем эти деформации стабилизированы. Поверхностные слои мощностью от 5 до 7 м состоят из осыпи глинисто-каменной (отнесена к классу G5) с переходом в каменно-глинистую (F2). До глубины от 12 по 17 м оползневый делювий представлен выветрелыми слоистыми мергелями экстремально низкой до очень низкой прочности (R6 – R5) характера глинисто-каменной осыпи. Грунтовая среда над сдвиговой поверхностью представлена мергелями (R5 – R4) и известняками от средней до низкой прочности (R3 – R2).

Уровень подземной воды был выявлен на многих горизонтах. В опытной скважине был подтвержден первый проверенный горизонт подземной воды на глубине 4,0 м. а второй на глубине 13,5 м ниже поверхности с большим напором.

В качестве факторов риска у восточного портала были идентифицированы: недостаточная устойчивость территории, напорные

воздействия подземной воды, тектонические нарушения в грунтовой среде и изменчивое качество грунтов. Дополнительными изысканиями предложено:

- стабилизировать откос;
- осушить территорию горизонтальными скважинами;
- вести мониторинг деформаций откоса инклинометрическими измерениями;
- вести режимные наблюдения за уровнями подземных вод;
- вести мониторинг агрессивности подземных вод.

При дополнительных инженерно-геологических изысканиях были обработаны и результаты лабораторных испытаний в пространстве восточного портала Ройков. Из полученных данных в табл. 1 приведены некоторые важные характеристики четвертичных грунтов, а в табл. 2 избранные характеристики подстилающих скальных грунтов. Установившийся уровень подземной воды в 6 опытных скважинах оползневой делювии в ареале восточного портала был зафиксирован на глубинах от 6,9 до 7,9 м ниже поверхности земли.

Таблица 1

Свойства четвертичных грунтов в ареале портала тоннеля

Свойства	Оползневый делювий глинистый		Оползневый делювий мергельный		Оползневый делювий глинистый и мергельный	
	Диапазон	Средний	Диапазон	Средний	Диапазон	Средний
$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	20,8–22,0	21,5	22,8–24,5	23,5	21,5–23,5	22,5
$I_p$ , %	18–25	22	8–15	10	10–22	16
$I_C$ , безр.	0,95–1,15	1,03	1,14–1,76	1,39	1,03–1,39	1,17
$\varphi_u^\circ$	0–10	5	–	–	–	–
$c_u$ , кПа	50–70	60	–	–	–	–
$\varphi_{ef}^\circ$	21,2–22,4	21,8	27–33	30	21,8–30	26
$c_{ef}$ , кПа	0	0	0–6	0	0	0
$\varphi_r^\circ$	18,9–19,0	19,0	24–29	27	19,0–27,9	23
$c_r$ , кПа	0	0	0	0	0	0

Свойства подстилающих грунтов в ареале портала тоннеля

Свойства	Мергели сильно разрушенные		Мергели выветрелые		Мергельные известняки	
	Диапазон	Средний	Диапазон	Средний	Диапазон	Средний
$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	24,1–25,3	24,78	26,5–26,5	26,48	26,7–26,8	26,75
$\varphi$ °	27–31	29	29–33	31	37–41	39
$c$ , кПа	10–20	15	20–30	25	40–60	50
$E_{\text{def}}$ , МПа	100–400	250	250–600	425	600–1500	1100
$E$ , МПа	250–900	550	600–1300	1000	1500–3000	2300

На основе выполненных отчетов в рамках дополнительных ИГ изысканий получена подробная информация о сложении грунтов и о высоте уровня подземной воды в массиве. Из сложения слоев была выявлена граница между четвертичными грунтами, создающими оползневый делювий и более прочными скальными грунтами мезозоя. Именно на границе этих двух слоев разных периодов можно с наибольшей вероятностью предполагать возникновение поверхности сдвига. На основе полученной информации из выше описанных скважин, как и из скважин пробуренных еще в рамках подробных ИГ изысканий, был для подготовки проектных работ построен геологический продольный разрез в осях обоих тоннелей (рис. 2 и 3). Эти разрезы явились основой для самого проекта временного обеспечения восточного портала тоннеля Ройков.

## 2. Проект временного обеспечения откоса

Проект обеспечения был разделен на две расчетные части. Первая из них включала моделирование согласно программе GEO 5 в модуле «Устойчивость откоса». Ее выходом были: оценка общей устойчивости откоса правой и левой обделки тоннеля, оценка устойчивости с учетом заглубления отдельных ступеней в порталной части для проходки тоннелей и определение потребных анкерных элементов.

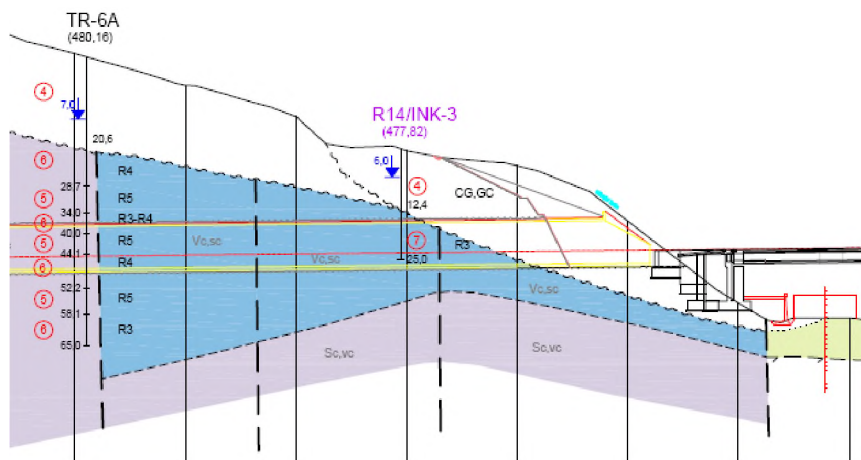


Рис. 2. Восточный портал тоннеля – продольный разрез по оси левого тоннеля

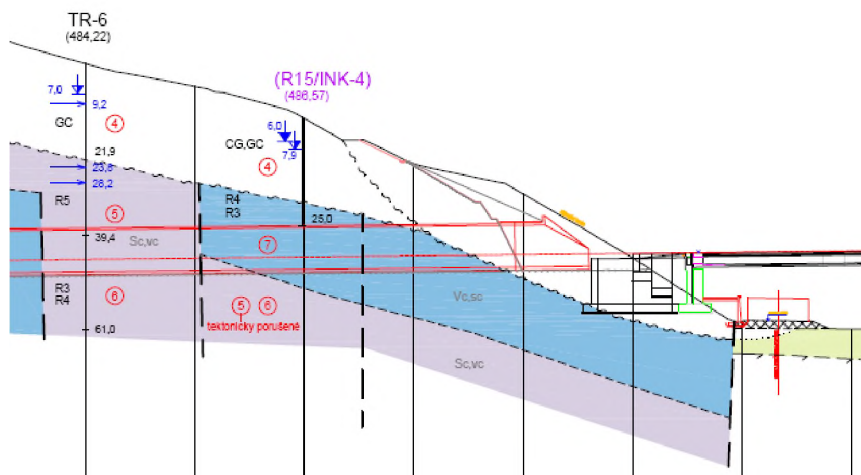


Рис. 3. Восточный портал тоннеля – продольный разрез по оси правого тоннеля

Вторая расчетная часть включала моделирование согласно программе GEO 5 в модуле «Гвоздь»; ее выходами были два проекта нагелируемого откоса. Одно решение касалось обеспечения врезки в месте размещения тоннелей, а другое решение касалось ситуации вокруг тоннелей.

Первым шагом расчета устойчивости откоса было формирование исходных параметров грунтовой среды так называемым методом обратного анализа устойчивости естественного откоса в продольном разрезе будущих тоннелей (правого и левого), а именно:

- генерированием критических поверхностей сдвига без учета и с учетом уровня подземной воды (рис. 4),
- на идентифицированных поверхностях сдвига по результатам ИГ изысканий без учета и с учетом уровня подземной воды (рис. 5).

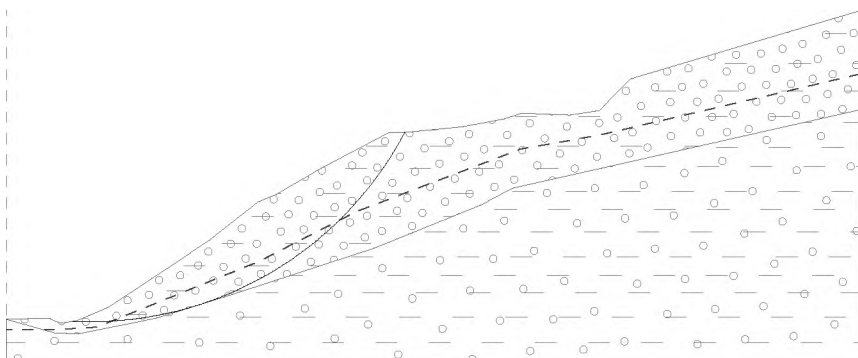


Рис. 4. Критическая поверхность сдвига с учетом УПВ по оси левого тоннеля

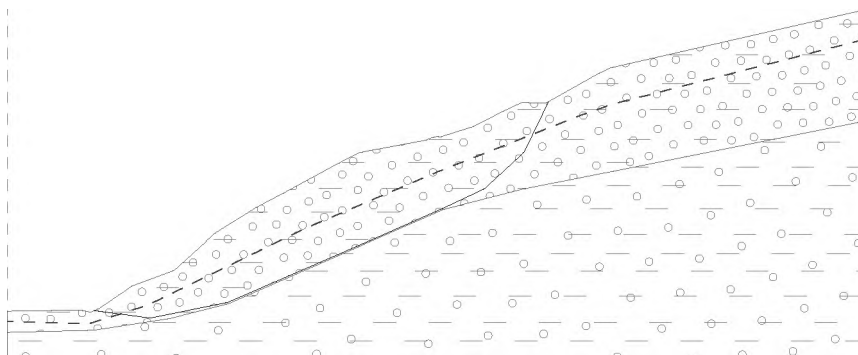


Рис. 5. Идентифицированная поверхность сдвига с учетом УПВ по оси правого тоннеля

На основе выявленных свойств грунтов (главное для слоя делювиальных склонных к сползанию грунтов) в последующем

приступили к оценке устойчивости на отдельных ступенях последовательной врезки в склон. В этом расчете методом оптимизации вводили в расчет требуемые ярусы анкерования и анкерные силы. Расчет был сделан для левого и правого тоннелей с исключением воздействий подземной (т.е. предполагалось надежное водопонижение во врезке). Требуемая степень надежности врезки ( $F = 1,3$ ) соответствовала безопасности временных откосов. Принималось во внимание и то, чтобы общая устойчивость откоса не падала ниже значения для устойчивости откоса в природных условиях, установленного на первом шаге.

Первой фазой расчета было определение прогнозируемых параметров сдвиговой прочности природного откоса при помощи обратного анализа. В качестве основной модели формы среды был выбран профиль в месте левого тоннеля. На основе параметрического исследования, симулирующего разные свойства слоев основания, были для четвертичных делювиальных грунтов приняты прочностные характеристики:  $\varphi = 27^\circ$ ,  $c = 10$  кПа; для подстилающих мергелей:  $\varphi = 30^\circ$ ,  $c = 20$  кПа. Эти данные хорошо согласовались с рекомендуемыми значениями, полученными при дополнительных ИГ изысканиях.

Для каждого тоннеля отдельно оценивали устойчивость откосов при последовательном выборе ступеней срезки. Для соблюдения требуемой устойчивости нужно было на каждой ступени устроить анкер для восприятия горизонтальных сил. В расчете принимали тросовые анкеры с расстояниями по горизонтали 2,0 м. Результаты для обоих тоннелей обеспечили требования безопасности:

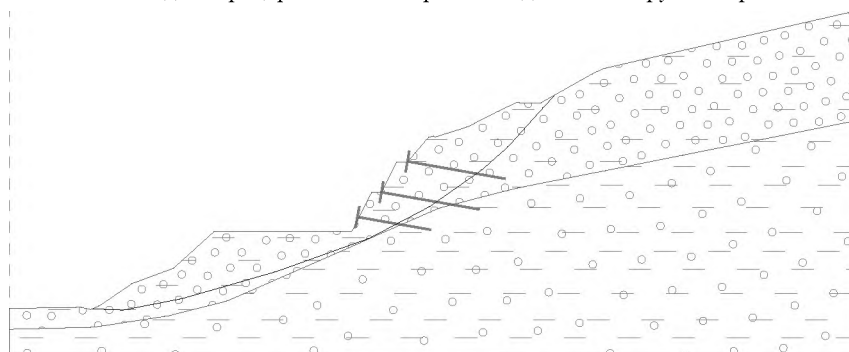
- Левый тоннель: Степень устойчивости всей врезки без воды на оптимизированной круговой поверхности сдвига методом Бишоп-па составила  $F = 1,33$ . В этом случае на каждой ступени должен размещаться один анкер с преднапряжением 700 кН. Контрольным расчетом на идентифицированной полигональной поверхности сдвига методом Сарма была подтверждена степень устойчивости  $F = 1,58$  для всей врезки с тремя анкерами при преднапряжении по 700 кН.

- Правый тоннель: Степень устойчивости всей врезки без воды на оптимизированной круговой поверхности сдвига методом Бишоп-па составила  $F = 1,32$ . В этом случае на каждой ступени должен быть



размещен один анкер с преднапряжением 750 кН. Контрольным расчетом на идентифицированной полигональной поверхности сдвига (рис. 6) Сарма была подтверждена степень устойчивости  $F = 1,57$  всей врезки с тремя анкерами при преднапряжении по 750 кН.

Рис. 6. Идентифицированная поверхность сдвига с анкеруемой врезкой



по оси правого туннеля

### 3.1 Проект нагелируемого откоса

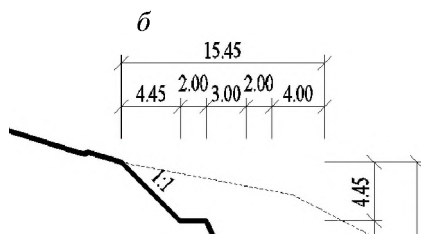
Этот проект исходил из анализа устойчивости откоса. Поверхность грунта над нагелируемым откосом учитывалась с наклоном  $25^\circ$ . Первая ступень врезки принята с наклоном поверхности 1:1, вторая и третья ступени врезки – с наклоном поверхности 2:1 (рис. 7). Нагелируемая врезка оценивалась вне туннелей (рис. 8) и в месте размещения туннелей с общим превышением  $\Delta h = 19,8$  м.

Для разреза вне туннелей в расчете был принят тип нагелей –  $\varnothing 25$  мм из стали 10 505 R при таких граничных условиях:

- в двух верхних ступенях высотой до 6 м приняты нагели длиной 6,0 м на расстояниях в горизонтальном и вертикальном направлениях по 1,5 м,
- на нижней ступени высотой 8 м приняты нагели длиной 8 м на расстояниях в горизонтальном и вертикальном направлениях по 1,3 м,
- наклон нагелей к горизонтали:
  - в пространстве туннелей должны быть нагели горизонтальные,
  - вне туннелей нагели отклонены от горизонтали на  $10^\circ$ .

*a*

272



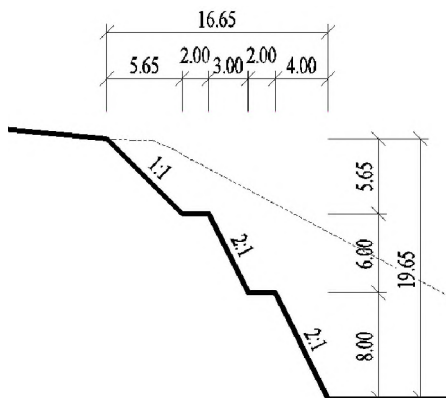


Рис. 7. Разрезы по осям: *a* – левого; *б* – правого тоннеля

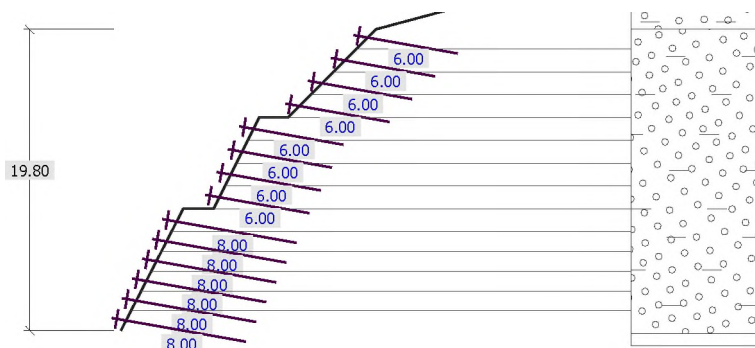


Рис. 8. Геометрия размещения нагелей

Обеспечивались внутренняя и внешняя устойчивость нагелей, а также условия общей устойчивости нагелируемого откоса, несущей способности основания и анкерования слоя торкретбетона, в котором использованы сетки KARI с ячейками  $100 \times 100$  мм, толщины проволок 8 мм, покрытие слоем бетона минимально 25 мм.

### 3.2. Проект анкеров

Из расчета устойчивости откоса вытекает условие устройства трех ярусов анкеров. Длина анкеров должна быть переменной, поскольку их корневые части должны находиться в среде, которая не склонна к активизации смещений откоса. Из расчета устойчивости

получена потребность восприятия каждым анкером растягивающего усилия в зоне правого тоннеля 750 кН, а левого – 700 кН в случае, если в теле откоса не будет устроено никаких иных мер стабилизации. При нагелировании по всей высоте откоса достигается восприятие части горизонтальных сил, что снизит потребность в анкерах. Анкеры с наклоном  $10^\circ$  от горизонтали на расстояниях по 2,0 м были запроектированы из стальных канатов  $1 \times 7$  согласно DIN 3052:

- длины анкеров: верхняя ступень врезки – общая 35 м, корень при этом 10,0 м, средняя ступень врезки – общая 30 м, корень 10,0 м, нижняя ступень врезки – общая 25 м, корень 10,0 м;
- преднапряжение анкеров усилиями по 700 кН.

Равномерное взаимодействие между анкерами и грунтом обеспечивают горизонтальные пояса из стальных балок в виде шпунта профиля Шп.

### **3.2 Водоотлив**

Расчеты устойчивости показали неизбежность снижения уровня подземной воды. Поэтому было предусмотрено на ступенях врезки при последовательной выемке грунта устройство горизонтальных водоотводящих скважин. На одну ступень врезки были размещены по две водоотводящие скважины от  $\varnothing 90$  мм до  $\varnothing 105$  мм на расстояниях по горизонтали по 3 м с отклонением от горизонта минимально  $5^\circ$  и максимально  $10^\circ$  в направлении вверх. Их длины не должны быть менее 10 м. Откачиваемая из них вода будет удаляться мимо стройки так, чтобы не вызывать непомерного увлажнения грунтов. В соответствии с фактическим притоком воды в скважины расстояние между ними может уточняться.

### **Заключение**

Статически проект обеспечения стены портала сначала сосредоточили на плохом анализе свойств грунтов в слоях делювиальных отложений, склонных к сползанию. Таким образом установленные параметры сдвиговой прочности лишь в малой мере отличались от значений, которые рекомендовали дополнительные инженерно-геологические изыскания. Оцениваемая устойчивость откоса расчленена на отдельные фазы врезки по направлению углубления сверху вниз. Для каждой из трех ступеней было необходимо выпол-

нить по одному ярусу анкерования. Анкеры были между собой удалены по 2,0 м, наклонены вниз от горизонтали на 10°. На основе данных изысканий корни анкеров расположены за предполагаемую неустойчивую область.

В качестве главной стабилизирующей меры для всей стены портала были запроектированы нагели, отклоненные от горизонтали на 10° (кроме пространств тоннелей). Расстояния по вертикали и горизонтали между нагелями предусмотрены на верхней и средней ступенях по 1,5 м, на нижней 1,3 м. Длины нагелей приняты по 6,0 м в верхних и средних рядах и по 8,0 м на нижнем ряду. Нагели приняты из стальных стержней Ø 25 мм класса 10505. Предполагается, что они будут служить временно максимально до 4 лет, причем рассчитаны также с учетом возможной деградации при воздействии коррозии.

## Литература

1. Turček, P. – Súľovská, M.: Statický výpočet, objekt 401-02 – Východný portál tunela Rojkov. Časť technickej správy. 2010, 33 s.

2. Grenčíková, A. et al.: Záverečná správa podrobného IG prieskumu pre diaľnicu D1 Turany. – Hubová. 2008. – 82 s.

3. Grenčíková, A. et al.: Záverečná správa doplnkového IG prieskumu – I. Etapa, 2010. – 30 s.

*Статья является одним из выходов проекта грантового агентства VEGA №. 1/0241/13 «Прогноз развития деформаций избранных геотехнических конструкций в зависимости от напряженного состояния».*

*Перевод со словацкого М.И. Никитенко*