УДК 622.831

М.О.ЛЕБЕДЕВ, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией, lebedev-lmgt@yandex.ru*
ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»

M.O.LEBEDEV, *PhD in eng. sc., laboratory head, lebedev-lmgt@yandex.ru*
«Lenmetrogiprotrans» OJSC

ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВРЕМЕННОЙ КРЕПИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНОГО ТОННЕЛЯ ВБЛИЗИ СКЛОНА

Приведены результаты натурных исследований формирования напряженного состояния временной крепи из набрызгбетона при строительстве железнодорожного тоннеля СКЖД вблизи склона. Выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» для рассматриваемых инженерно-геологических условий. Полученные результаты свидетельствуют о возможности разработки метода расчета крепей на базе данных натурных исследований в сопоставимых условиях в сочетании с моделированием НДС методом конечных элементов, адаптированного для конкретных условий.

Ключевые слова: тоннели, крепь-массив, напряжения, склон.

FORMATION OF STRESSED STATE IN TEMPORARY TUNNEL SUPPORT WHEN CONSTRUCTING A TRAFFIC TUNNEL OF NORTH CAUCASUS RAILWAY NEAR THE SLOPE

The paper presents the results of field observations on formation of stressed state in shotcrete temporary tunnel support when constructing a traffic tunnel of NCRW near the slope. Numerical simulation of stressed deformed state of the «support – block» system has been accomplished for the considered engineering geological conditions. The results obtained point to a possibility of developing the procedure of calculating supports based on results of field observations under comparable conditions in combination with SDS modeling applying finite-element method adapted for specific conditions.

Key words: tunnel's, support-block, stresses, slope.

Строительство и реконструкция транспортных тоннелей на Северном Кавказе, как правило, ведется в сложных инженерно-геологических и инженерно-технических условиях*. В ряде случаев в соответствии с рельефом местности тоннели располагаются вблизи склонов. В частности, при реконструкции в настоящее время железнодорожных тоннелей по побережью Черного моря на участке Туапсе – Адлер часть трассы всех тоннелей проходит вблизи склонов.

При строительстве тоннеля по новой трассе на указанном участке институтом «Ленметрогипротранс» выполнен геотехнический мониторинг. Одной из задач этого мониторинга являлось определение напряженно-деформированного состояния временной крепи в натурных условиях. На участке тоннеля,

* Моделирование взаимодействия временной крепи и постоянной обделки тоннелей с породным массивом / А.Г.Протосеня, Р.И.Ларионов, К.П.Безродный, В.А.Маслак, М.О.Лебедев // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». Тула, 2009. Вып.4.

Numerical modeling of temporary and permanent tunnel lining – soil interaction / A.G.Protosenia, R.I.Larionov, K.P.Bezrodny, V.A.Maslak, M.O.Lebedev // Proceedings of Tula State University. Seires «Earth Science». Tula, 2009. Vol.4.



Рис.1. Расположение опытного участка относительно склона

расположенном вблизи склона (рис.1), выполнены натурные исследования формирования напряженного состояния крепи.

Тоннель однопутный длиной 618 м. Проходка тоннеля ведется в грунтах от неустойчивых до относительно устойчивых. Коэффициент крепости грунтов, вмещающих тоннель, колеблется от 0,8 до 3,0 по М.М.Протодьяконову. Флишевая толща представлена переслаиванием алевролитов, мергелей, песчаников, реже аргиллитов. Породы сильнотрещиноватые, местами трещиноватые, от малопрочных до средней прочности. Глубина заложения тоннеля по трассе не превышает 40 м (до шелыги).

В достаточно сложных горно-геологических условиях для крепления тоннеля применен набрызг-бетон. Это стало возможным после отработки этой технологии в еще более неблагоприятных условиях Большого петлевого тоннеля СКЖД.

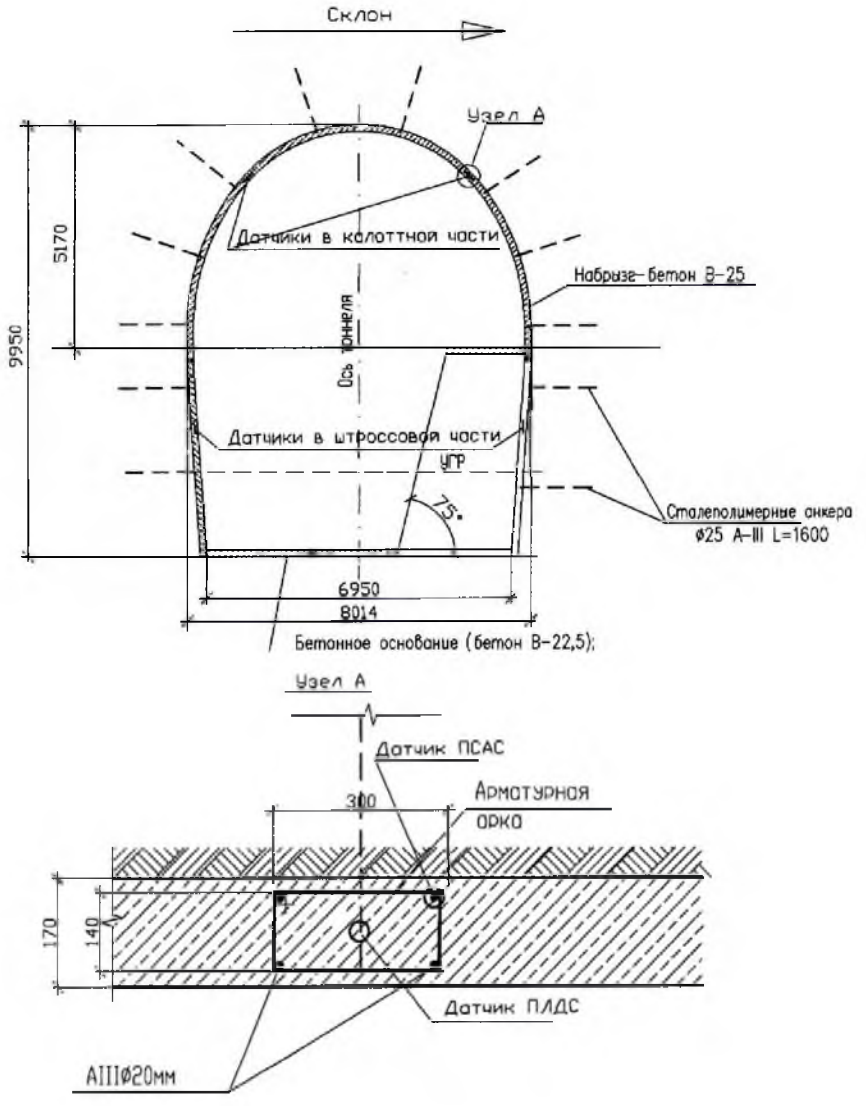


Рис.2. Конструкция временной крепи из набрызг-бетона

Проходка тоннеля осуществлялась уступным способом (калоттная и штроссовая части) с механизированной разработкой грунта комбайном АТМ 75 (Австрия).

Крепление набрызг-бетоном осуществлено на средней (протяженной) части тоннеля, кроме припортальных участков, где применялся аркобетон (рамная крепь из двутавра № 30 с заполнением межрамного пространства тяжелым бетоном).

Разработка породы по каждому уступу ведется заходками по 1 м комбайном АТМ-75. Разработанная порода грузится в МоАЗ-64011 и вывозится в отвал. Набрызгбетонная крепь возводится вслед за забоем после каждой заходки на 1 м. Арки изготавливаются из арматуры 16-20 А-III (рис.2).

До установки арматурных арок по контуру бурятся шпуры под сталеполимерные анкера, которые затем соединяются с арматурной аркой. Сталеполимерный анкер представляет собой арматурный стержень 25 А-III, который вводится в шпур диаметром 36 мм с предварительно заведенными в него полимерными ампулами. Интенсивным вращением арматурного стержня при его подаче в шпур ампулы разрываются и их содержимое перемешивается, создавая быстротвердеющую массу.

Нанесение набрызг-бетона осуществляется австрийской машиной «Путцмастер», при этом ускоритель схватывания «жидкое стекло» соединяется с основной смесью в сопле. Набрызг-бетон наносится несколькими слоями до проектной толщины за один проходческий цикл, после чего начинается разработка следующей заходки.

Калоттная часть тоннеля проходится на всю длину, после чего начинают разработку нижнего уступа (штроссы). Длина заходки аналогична проходке калотты, т.е. 1 м.

Натурные исследования на участке тоннеля вблизи склона заключались в определении нормальных тангенциальных напряжений по периметру крепи заложением в ее конструкцию струнных датчиков и определением усилий в арматурных стержнях при помощи арматурных динамометров (рис.2, 3). Данные элементы исследований позволяют получить полную картину взаимодействия системы «крепь – массив».



Рис.3. Контрольно-измерительная аппаратура, установленная в арматурный каркас перед нанесением набрызг-бетона

По результатам наблюдений определяли нормальные тангенциальные напряжения в бетоне по периметру крепи (рис.4) и нормальные силы в арматуре (рис.5).

Изучение формирования напряженно-деформированного состояния крепи из набрызг-бетона позволило выявить особенности его развития в соответствии с порядком разработки забоя (раскрытия сечения по частям). Качественно процесс формирования напряженно-деформированного состояния разделен на пять этапов: первый, в течение двух недель после возведения крепи, имеет большую интенсивность; второй, в течение следующих недель, характеризуется снижением скорости роста напряжений; третий – стабильное напряженное состояние; четвертый – изменение напряженного состояния при проходке штроссовой части; пятый – затухание роста напряженного состояния после возведения постоянной обделки.

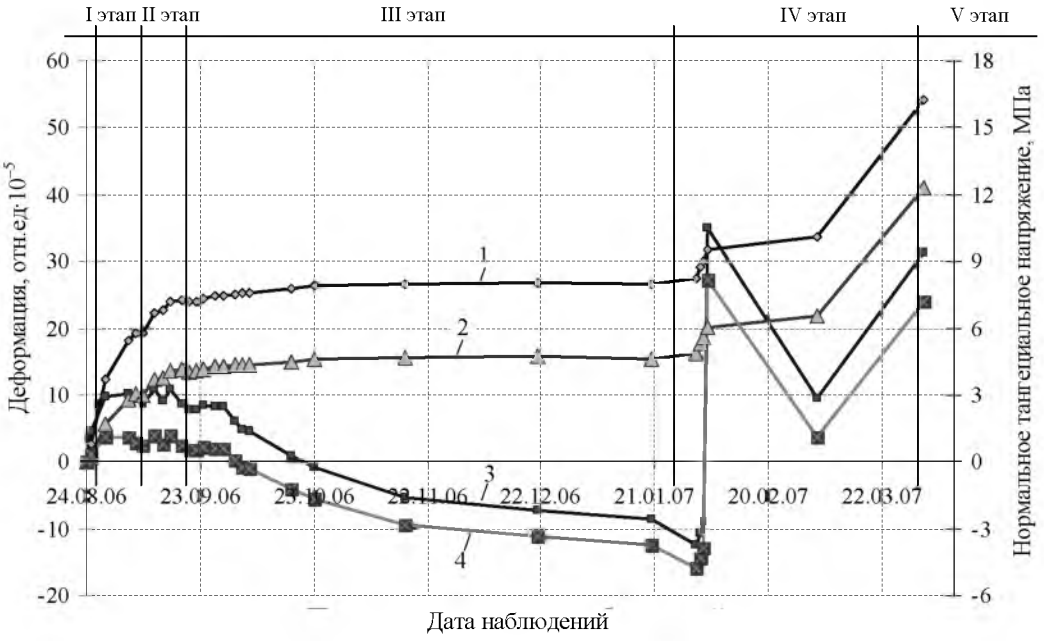


Рис.4. Формирование деформаций (1 – со стороны склона; 3 – с нагорной стороны) и нормальных тангенциальных напряжений (2 – со стороны склона; 4 – с нагорной стороны)

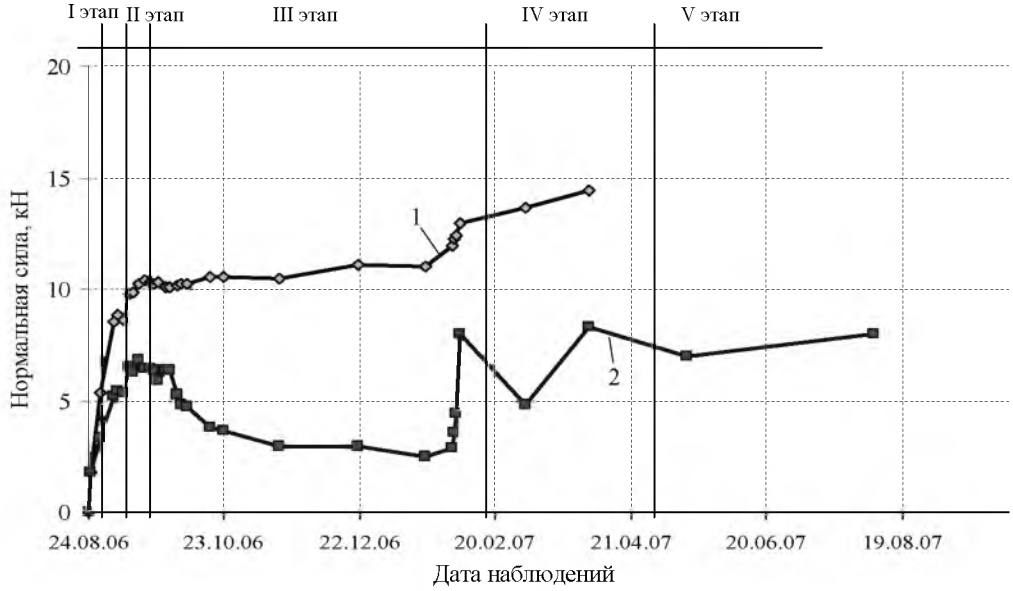


Рис.5. Формирование нормальной силы в рабочей продольной арматуре крепи со стороны склона (1) и с нагорной стороны (2)

В соответствии с полученными результатами через месяц после проходки калоттной части в рассматриваемых условиях напряженное состояние временной крепи стабилизируется. Причем уровень сжимающих напряжений в бетоне и усилий в арматуре со стороны склона больше, чем с нагорной стороны в два раза. В дальнейшем со стороны склона напряженное состояние остается стабильным, а с нагорной стороны начинает уменьшаться вплоть до проходки через 4,5 месяца штроссовой части. В бетоне напряжения приняли растягивающие значения.

Изменение напряженного состояния крепи начинается при нахождении забоя уступа за 7 м. При этом со стороны склона отмечается увеличение напряжений сжатия на 0,3 МПа, а с противоположной стороны аналогичное увеличение напряжений растяжения. Дальнейшее приближение забоя уступа вызывает увеличение напряжений с обеих сторон. Сразу после разработки уступа в наблюдаемом сечении напряжения с нагорной стороны возвращаются к значениям, предшествующим началу влияния проходки уступа, а с противоположной стороны становятся больше на 1,5 МПа.

При отходе забоя уступа на 6 м с нагорной стороны выделяется резкий скачок напряжений на 10 МПа, что подтверждается и арматурным динамометром.

Последующие измерения в течение еще 1,5 мес. (до возведения постоянной обделки) показали незначительное продолжение роста напряжений в крепи. К концу IV этапа нормальные тангенциальные напряжения в бетоне составили 12 МПа со стороны склона и 7,3 МПа с нагорной стороны, а усилия в арматуре на внешнем контуре соответственно 14,5 и 8 кН.

Измерения, выполненные после возведения постоянной обделки, показали уменьшение нормальной силы в рабочей арматуре. Таким образом, можно говорить о стабилизации напряженного состояния крепи.

Полученная картина формирования напряженного состояния крепи позволяет сказать, что в данных инженерно-технических условиях массив со стороны склона все время оставался устойчивым и выполнял функции подпорной стены, а со стороны склона шло развитие бокового давления. Такому взаимодействию системы «крепь – массив» способствовала форма напластования, показанная на рис.1.

Незначительное увеличение трещиноватости массива и изменение угла напластования на расстоянии 3 м от рассмотренного сечения (в сторону уменьшения расстояния до границы склона) существенно изменили картину формирования напряженного состояния крепи. Так, на третьем этапе уменьшение напряженного состояния отмечалось с обеих сторон, а после разработки уступа отмечалось более сложное перераспределение напряженного состояния крепи по периметру. С нагорной стороны напряжения в бетоне калоттной части до возведения постоянной обделки все время оставались в зоне растяжения.

Оценка напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» при известной структуре массива и фактических деформационно-прочностных характеристик массива, определенных методом сейсмоакустики, может быть выполнена численным моделированием методом конечных элементов (МКЭ).

Задачей моделирования является изучение влияния на напряженно-деформированное состояние системы «крепь – массив» напластования и условий контакта по напластованию для принятой технологии строительства.

Определение характера деформирования тоннеля по мере ведения проходческих работ для выявления зависимости смещения контура выработки от величины отставания от забоя было определено в объемной постановке (рис.6).

Для решения поставленной задачи использовалась упруго-пластическая модель поведения массива (прочность массива оценивалась по критерию Кулона – Мора) и упругая

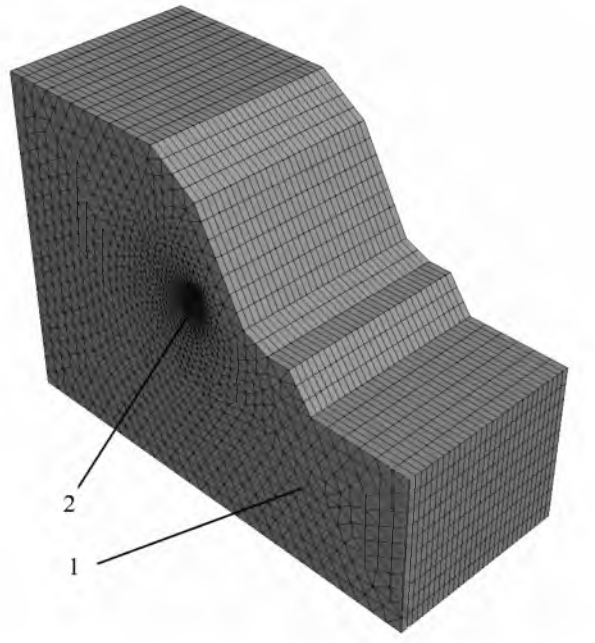


Рис.6. Конечно-элементная модель горного массива
1 – массив горной породы; 2 – участок горного массива, в котором сооружается тоннель

модель поведения крепи. Расчеты для рассматриваемых инженерно-технических условий осуществлялись в плоской постановке.

Прочностные параметры горного массива изменялись с определенным шагом от значений, при которых происходила потеря устойчивости склона (неустойчивое состояние массива), до значений, при которых никаких пластических деформаций в массиве горных пород не происходило (устойчивое состояние массива). Результатом данного расчета является прогноз возможных нарушений массива вокруг выработки, исследование общей устойчивости склона при проведении тоннеля и определение характера и величин контактных напряжений.

Выполненные расчеты напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» для условий, в которых выполнены натурные исследования, с учетом фактических деформационно-прочностных свойств массива и этапности раскрытия сечения тоннеля и возведения крепи, показали высокую сходимость качественных и количественных показателей формирования напряженного состояния крепи.

Из расчетов получено, что усилия в крепи (рис.7), формируемые на всех этапах строительства, меньше полученных значений в натурных условиях на 6-10 %. Растягивающие усилия в крепи формируются только на участке перехода калотты в штроссу с нагорной стороны, противоположной склону после раскрытия на полное сечение, и достигают 240 кН (соответственно напряжения равны 1,4 МПа).

Величины осевых усилий в анкерах достигают максимальных значений с нагорной стороны после раскрытия тоннеля на полное сечение и составляют 240 кН.

Смещения контура выработки соответствуют значениям смещений, полученных в натурных условиях, и не превышают 8 мм в своде. В боках тоннеля горизонтальные смещения составили 4,7 мм с нагорной стороны и 1,5 мм со стороны склона.

Зоны неупругих деформаций вокруг тоннеля не образуются, во всех точках массива горная порода ведет себя как упругий материал.

Для прогноза возможных нарушений массива и исследования общей устойчивости склона при проходке тоннеля были смоделированы условия, при которых величина сцепления по контактам напластования составляет всего 0,1 МПа.

В результате расчетов очевидно, что зоны неупругих деформаций в массиве появляются уже после раскрытия калоттной части тоннеля. Зоны распространения неупругих деформаций весьма значительны и сохраняют свою конфигурацию на всех этапах строительства. Эти зоны «прорезают» весь массив (рис.8), что дает вероятность потери устойчивости склона.

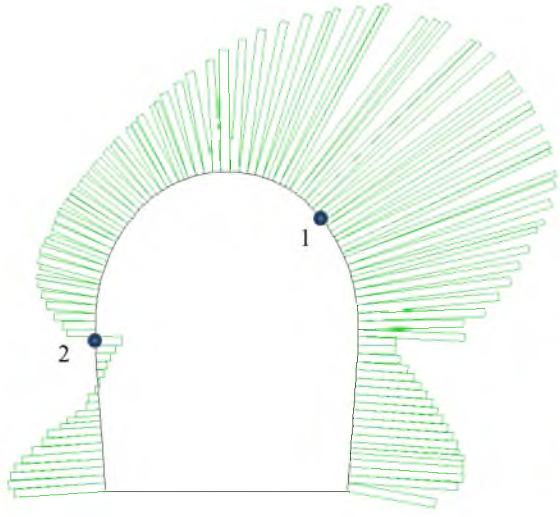


Рис.7. Осевые усилия в элементах крепи после раскрытия тоннеля на полное сечение и возведение крепи

1 – максимальное значение продольных усилий в крепи составляет 703 кН; 2 – минимальное – 35 кН

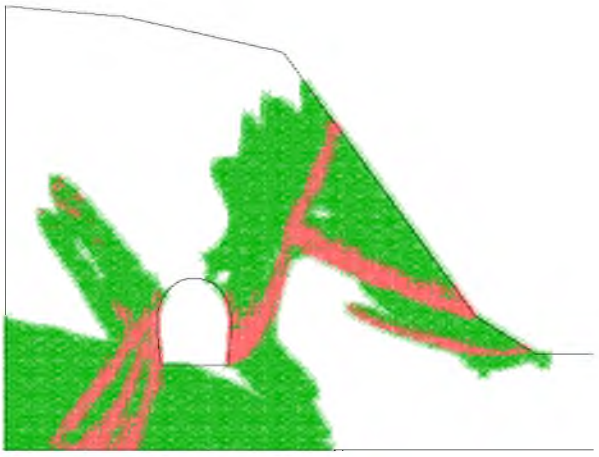


Рис.8. Распределение пластических деформаций в массиве для условий, при которых склон теряет устойчивость; красным цветом отмечены зоны активных пластических деформаций сдвига; зеленым – зоны развития пластических деформаций за все этапы деформирования породного массива

В ближайшее десятилетие на Северном Кавказе предстоит большой объем работ по реконструкции существующих и строительству новых транспортных тоннелей, большинство из которых будет попадать в условия влияния склонов, что потребует обеспечения устойчивости системы «тоннель – массив».

Обеспечение устойчивости выработок и разработка оптимальных конструктивных решений крепей и обделок транспортных тоннелей в первую очередь зависит от правильно принятых методов прогнозирования и последующих расчетов напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив».

Как показывают результаты натурных исследований для рассмотренного тоннеля и последующие расчеты, методы прогнозирования устойчивости и напряженного состояния массива и крепей для конкретных инженерно-технических условий могут быть основаны на базе данных натурных исследований в сопоставимых условиях в сочетании с моделированием напряженно-деформированнного состояния методом конечных элементов, адаптированного для рассматриваемых условий.