

УДК 624.191.22

С.Н. СТОВПНИК (к.т.н., доцент)

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».

А.С. ОСИПОВ (инженер, аспирант)

Проектный институт «Укрспецтоннельпроект».

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ВРЕМЕННОЙ КРЕПИ ТОННЕЛЕЙ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФЛИШЕВОГО СЛОЖЕНИЯ МАССИВА ПОРОД.

В статье предоставлена информация об основных инженерных сложностях, с которыми столкнулись проектировщики и строители при реализации объекта Бескидский тоннель. Нахождения путей решения этих проблем. Кратко был описан механизм работы крепи с массивом пород при новоавстрийском способе проходке тоннелей (NATM). Предоставлены основы аналитического подхода к решению задачи определения усилий во временной крепи тоннеля при помощи программного комплекса Plaxis 2D (алгоритм определения давления на крепь с учетом отставания её устройства в двухмерной постановке задачи).

Ключевые слова: Напряженно-деформированное состояние, гравитационные и тектонические силы, метод конечных элементов, Plaxis, моделирование, новоавстрийский метод строительства тоннелей (NATM).

1. Вступление. Нерешенные вопросы определения начального напряженного состояния горного массива.

Открытие тектонических сил, действующих в отдельных участках земной коры, привело к коренному пересмотру основ современной геомеханики. Гипотеза тектонических сил позволила по новому подойти к вопросам горного давления, к проблеме горных ударов. Стало ясно: напряжения, обусловленные тектоническими силами, рассчитать невозможно, в отличие от напряжений, связанных с гравитационными силами. Их необходимо измерять! Если в условиях гравитационной гипотезы расчет исходных (начальных) напряжений был проблематичен вследствие неоднородности свойств массивов пород, то теперь добавился непредсказуемый силовой фактор - тектонические напряжения, о природе которых мало что известно.

Рассмотрим сложные инженерно-геологические условия проходки на примере строительства Бескидского тоннеля в Карпатах.

2. Особенности сложных инженерно-геологических условий проходки Бескидского тоннеля и описание метода повышения точности геологических изысканий.

С целью улучшения железнодорожного движения между Восточной и Западной Европой на 5-том Критском международном транспортном коридоре на участке Бескид-Скотарское с ноября 2013 года выполняется строительство нового двухпутного ж.д. тоннеля, который заменит старый существующий однопутный тоннель, построенный в 1886 году.

При строительстве Бескидского тоннеля в Карпатах исполнители работ и проектировщики столкнулись с рядом проблем, связанных со сложными инженерно-геологическими условиями проходки подземной выработки. По причине физической невозможности предоставления детальных данных и результатов при бурении геологических скважин с гористого рельефа дневной поверхности Карпатских гор, особенности строения горного массива не были полностью предусмотрены при инженерно-геологических изысканиях до начала проектирования и проходки тоннеля. Также была получена минимальная информация о физико-механических параметрах горного массива.

В следствие этого, для расчета временного набрызг-бетонного крепления тоннеля по выше указанной причине на стадии проектирования (до начала строительства) были применены классические теории расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород (горного давления на крепь выработки) и упрощенные механические модели поведения геомассива.

Уже во время проходки туннеля, чтобы как-то повысить точность определения строения породного массива, а также с большей вероятностью выявить зоны тектонических нарушений (по пикетам) были выполнены (опробованы) отдельные элементы технологии инженерно-геологической диагностики породного массива впереди забоя выработки на основе опережающего горизонтального колонкового бурения скважин малого диаметра. Бурение разведочных скважин осуществлялось параллельно оси туннеля с помощью бурового станка типа «Диамек-250». Диаметр выбуриваемого керна -38мм. Длина выбуриваемого за рейс – 3м. Протяженность скважин составляет приблизительно 120м. По выбуренным кернам определялся показатель степени нарушения скальных грунтов по методу RQD (отношение суммы ненарушенных кусков керна длиной 10 см и более к длине исследуемого интервала скважины, %).

Согласно полученных данных геологоразведки, была подтверждена сложная структура геомассива по трассе проходки туннеля. Структура составлена флишевой толщей мелового и третичного возраста, которая характеризуется напластованиями из толстоплиточных песчаников и тонкоплиточных аргиллитов, с постоянно меняющимися (каждые 2-20м) непредсказуемыми углами падения и формами залегания (антиклинальная или синклиналиная складчатая дислокация). Моноклинальные формы залегания – отсутствуют.

На рис.1 представлено инженерно-геологическое описание лба забоя с напластованием пород и углами их падения на ПК 16364+25,0 и на ПК16364+29,1 по факту проходки калотты. При расстоянии между пикетами 4,1м строение лба забоя существенно отличается, что только подчеркивает вышесказанное и говорит о сложных особенностях горного массива.

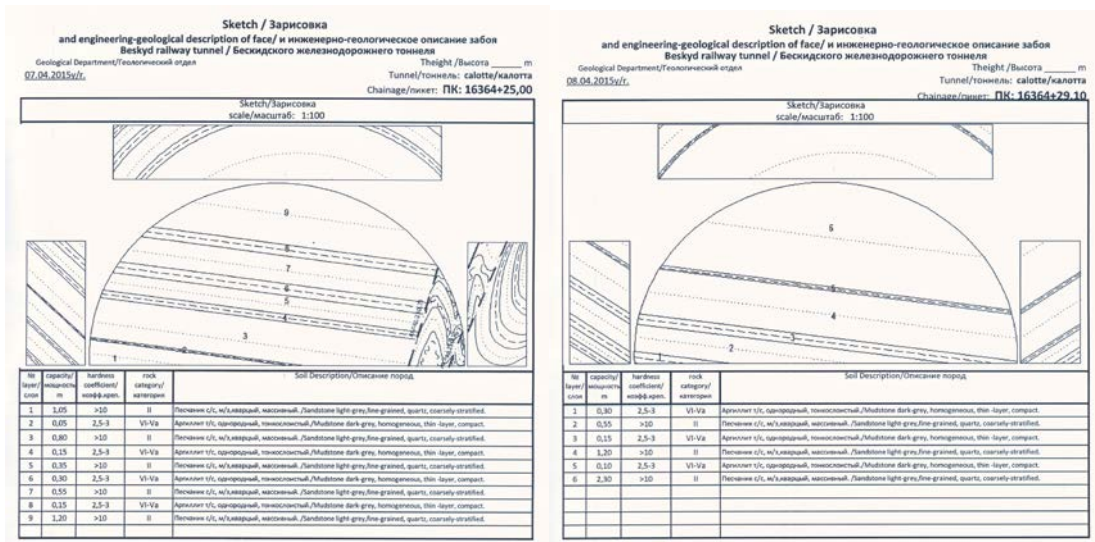


Рис. 1. Инженерно-геологическое описание лба забоя.

При этом были получены результаты, позволяющие расширить физические представления о горных породах, как в целом, так и о влиянии физико-механических процессов на состояние устойчивости горных выработок и их крепи в частности.

Главным преимуществом опережающего разведывательного бурения является возможность корректирования типов временной крепи в процессе проходки и проводить анализ расчётов на конкретных пикетах, выполненных до начала проходки туннеля.

Геологоразведка в сочетании с непосредственными замерами в забое туннеля фактических деформаций и сложного поля напряжений в геомассиве, обусловленного как гравитационными, так и тектоническими силами, дала возможность рассмотреть новый подход к моделированию поведения анизотропного массива (флишевой толщи) в современных геотехнических комплексах типа «Plaxis» (Нидерланды), с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

3. Задачи армирования приконтурного массива при проходке туннеля.

При строительстве Бескидского туннеля был применен новоавстрийский способ проходки - New Austrian Tunneling Method – NATM, отвечающий на современном этапе развития

тоннелестроения требованиям «высоких технологий», позволяющий раскрывать выработку по частям на полный профиль с применением контурной податливой временной крепи (анкерно-арочная набрызг-бетонная крепь).

Как было сказано ранее, проектирование усложнено недостаточной детальностью результатов инженерно-геологических изысканий, а также неупорядоченной (хаотичной) трещиноватостью породного массива. Поэтому, было принято решение устройства анкеров по периметру крепи и в шельге свода калотты для создания самонесущего армированного грунтоцементного свода. Принципы расчёта временной крепи с учетом анкерного крепления представлены в п.4 данной статьи.

Применение анкеров также является основным принципом новоавстрийского способа проходки NATM.

Эффект от применения анкерной крепи проявляется в том, что анкеры, заглубленные в ненарушенную часть горного массива, с одной стороны, как бы подвешивают грунт в зоне возможного обрушения, предотвращая тем самым вывалы, а с другой стороны – «сшивая» отдельные грунтовые блоки и слои, омоноличивают нарушенную проходкой зону грунтового массива, превращая её в несущую конструкцию.

Кроме того, в процессе совместного деформирования с массивом в анкерах возникают дополнительные усилия, которые изменяют напряженно-деформированное состояние грунта вокруг подкрепленной выработки, по сравнению с неподкрепленной, повышая тем самым степень его устойчивости и снижая смещения поверхности выработки.

В качестве анкерного крепления при строительстве Бескидского тоннеля хорошо себя зарекомендовали самозабуривающиеся анкера MAI SDA (фирмы Atlas Copco). Это анкера специальной конструкции, представляющие собой одноразовую буровую штангу из периодического профиля, оснащенного буровой коронкой. Особенностью данного анкера является то, что он устанавливается одновременно с бурением под него шпура.

После забуривания штанги на требуемую глубину в неё через промывочный канал нагнетается быстросхватывающийся цементно-песчаный раствор до тех пор, пока он не начнет высачиваться из шпура.

В результате буровые штанги совместно с цементным раствором оперативно формируют в приконтурном массиве выработки армированный свод, позволяющий вести проходку даже в слабоустойчивых грунтах.

Применение анкеров MAI SDA (фирмы Atlas Copco) незаменимо при неупорядоченной (хаотичной) трещиноватости породного массива ослабленного трещинами и при инженерно-геологических условиях проходки Бескидского тоннеля показали 100% эффективность.

4. Основные принципы расчёта временной податливой анкерно-арочной набрызг-бетонной крепи в программах, основанных на методе конечных элементов (Plaxis, Midas GTS) на примере Бескидского тоннеля в породах крепостью $f=3-4$.

4.1. Основные подходы к управлению горным давлением.

При проведении выработок и образовании подземных полостей тензор напряжений в геомассиве изменяется, равновесие нарушается и возникающее горное давление может привести к деформациям массива и обрушениям пород выработки.

Для предотвращения возникновения подобных процессов применяются различные конструкции крепления выработанного пространства подземных сооружений, основанные на двух принципиально разных подходах, зависящих от глубины подземной выработки и её предназначения:

- при строительстве выработок на относительно не большой глубине (тоннели, камеры), где напряжения в приконтурном массиве имеют также относительно небольшие значения за основу принимаются принципы проф. Л. Мюллера. Основной задачей этих принципов – постоянный анализ и контроль за деформациями, а также сохранение естественной прочности массива, избегая разуплотнения грунтов;

- при проходке же на больших глубинах (подготовительные выработки шахт), где напряжения в приконтурном массиве имеет значительные значения (вызванные пучением пород и несбалансированными тектоническими силами), в основу ложится перераспределение части нагрузок горного давления на окружающий массив через специальные конструкции по-

датливой рамной крепи ограниченного сопротивления, уменьшающие вертикальный размер выработки (идея Лапласа), а также разные методы разгрузки приконтурного массива (взрыво-щелевой способ с последующим его укреплением, и другие).

Идея Лапласа, хорошо работает в породах не ниже средней устойчивости. Массив обрета-ет устойчивое равновесие при ограниченных размерах зон разрушения за определенный промежуток времени. В условиях неустойчивых пород, представленных мелкослоистыми, трещиноватыми или переслаивающимися массивами, развитие зоны разрушения вокруг выработки достигает значительных размеров, что приводит к незатухающим смещениям контура и разви-тию высокого горного давления, распространяющимся за значительный промежуток времени, сопоставимый с периодом существования выработки.

Так как, в данной статье, рассмотрена проходка горнотранспортного тоннеля на относи-тельно небольшой глубине в неустойчивых породах, сооружаемого на неограниченный срок эксплуатации, с расположением магистральных газопроводов на дневной поверхности, глав-ные задачи тоннелестроения остаются неизменны:

- минимизация деформаций контура временной крепи с целью сохранения естественной прочности окружающего массива (для дальнейшей эксплуатации постоянной обделки в макси-мально благоприятных условиях);

- минимизация деформаций контура временной крепи с целью недопущения создания ненормативных внутренних размеров устраиваемой постоянной обделки (под габарит жд транспорта);

- минимизация деформаций земной поверхности с расположенными на ней инженерными сооружениями разной степени ответственности (здания и т.п.);

Данные задачи тесно пересекаются с принципами проф. Л. Мюллера, и лежат в осно-ве новоавстрийского метода строительства тоннелей (NATM). Основы метода NATM изложим ниже.

4.2 Теория взаимодействия (совместного деформирования) временной крепи с массивом пород при новоавстрийском методе строительства тоннелей (NATM).

В ходе численного анализа поведения системы «крепь-массив» в процессе проходки Бескидского тоннеля было определено оптимальное отставание установки временной крепи от разработки грунта лба забоя.

Процесс взаимодействия крепи с грунтовым массивом (сущность метода NATM) обы-чно иллюстрируется графиком «деформации-напряжения», описывающий взаимодействия крепи с грунтовым массивом, известным под названием «Диаграмма- Феннера-Пахера (рис. №2).

В случае если оставить выработку неподкрепленной (кривая 1), произойдет полная раз-грузка грунтового массива, заключающаяся в уменьшении действующих до начала строитель-ства напряжений. Достигнув некоторого минимума, напряжения при непрекращающемся росте деформаций контура выработки снова начнут возрастать, и через какое-то время область мас-сива вокруг выработки придет в состояние разрушения (кривая 2). Чтобы избежать этого, в вы-работке необходимо своевременно установить крепь, способную оказать сопротивление де-формациям её контура (кривая 3). Кривая сопротивления более податливой крепи имеет мень-ший угол наклона к горизонтальной оси на диаграмме (участок BC), а кривая жесткой крепи – соответствует участку BD.

Слишком поздняя установка крепи может привести к обрушению выработки, в силу то-го, что крепь может просто не успеть набрать расчётную жесткость к моменту, когда напряже-ния в грунтовом массиве достигнут предельного значения. Так и в случае слишком ранней установки, крепь может не обладать достаточной прочностью для восприятия оказываемого на нее давления со стороны грунтового массива, т.к. крепь была рассчитана на нагрузки меньшего значения.

Расчёт в программном комплексе Plaxis 3D (трехмерной постановке) в сочетании с ана-литическими расчётами показал, что установку податливой крепи необходимо выполнить (вве-сти её в работу с массивом) с отставанием не более 2-3м (при крепости $f=3-4$) от разработки грунта (участок AB, кривой 3).

Также расчёт показал, что жесткости временной крепи (набрызг-бетон толщиной 300мм по арматурным аркам в сочетании с анкерами SDA) достаточно для восприятия давления со стороны грунтового массива (участок BD, кривой 3).

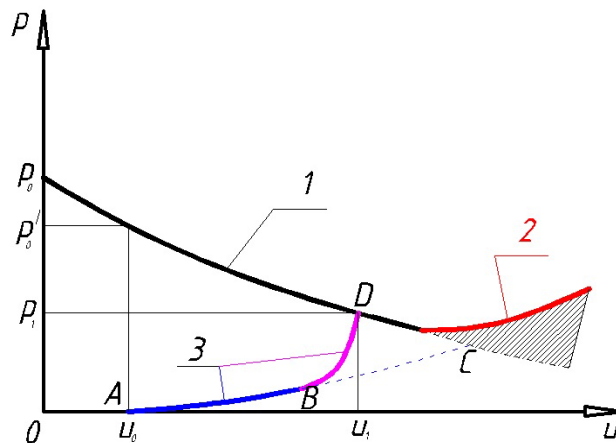
При отставании устройства крепи более чем на 3м точка В будет стремиться к точке С в зону потери несущей способности массива.

В расчёте было определено:

-напряжения в грунтовом массиве P'_0 и деформации контура выработки u'_0 , характеризующие частичную разгрузку массива в призабойной зоне (зависят от длины строительной заходки);

-итоговое напряжения в грунтовом массиве P_1 , приходящиеся на крепь после достижения системой «крепь-массив» состояния равновесия (точка D пересечения кривых 1,3) и соответствующие им деформации крепи u_1 (зависят от её жесткости). Согласно напряжений P_1 были определены усилия в крепи и проведена проверка сечений на прочность.

Принятые инженерные решения уточняются непрерывным мониторингом напряже-но-деформированного состояния (НДС) системы «крепь-массив» в процессе проходки Бескидского тоннеля. На основании данных натуральных наблюдений оценивается эффективность принятых параметров сооружения выработки (длина заходки, скорость проходки выработки, толщина и тип временной крепи и её отставание от забоя) и в случае необходимости из соображений обеспечения оптимальной работы крепи с грунтовым массивом принимаются решения о их корректировке.



Сводная диаграмма взаимодействия грунтового массива с крепью

Диаграмма "деформации-напряжения".

- 1- кривая равновесных состояний грунтового массива
- 2- зона потери несущей способности массива
- 3- кривая сопротивления крепи

Рис. 2. Диаграмма Феннера-Пахера.

4.3 Модель массива пород и расчётная схема крепи.

В силу малости деформаций в окружающем выработку массиве в процессе взаимодействия (совместного деформирования) массива с крепью массив может моделироваться линейно деформируемой (упругой) средой с характеристиками E_0 и ν_0 , и крепь со своими деформационными характеристиками E_1 и ν_1 .

Расчётная схема крепи может рассматриваться как плоская контактная задача двух контактирующих друг с другом линейно деформируемых (упругих) тел: крепи и окружающего массива.

При подземном строительстве породная поверхность выработки обнажается. Это значит, что с нее снимаются начальные напряжения, существовавшие в массиве. Снимаемые напряжения и являются причиной деформирования пород и нагружения крепи. Снимаемые напряжения равны по величине начальным, но противоположны по знаку, т. е. если начальные напряжения в массиве были сжимающими, то снимаемые напряжения являются по отношению к массиву растягивающими.

На основании изложенного, расчетная схема крепи горной выработки или обделки подземного сооружения представляет собой в общем случае упругую плоскость, моделирующую массив (рис.№3) ослабленную подкрепленным отверстием, моделирующим выработку. К линии контакта крепи с массивом L приложены снимаемые напряжения $\sigma_x^{(1)}$ и $\sigma_y^{(1)}$ (для удобства они показаны вынесенными за пределы поперечного сечения выработки). Расчетные снимаемые напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_x^{(1)} = \alpha^* \cdot \gamma \cdot H \quad \sigma_y^{(1)} = \lambda \cdot \alpha^* \cdot \gamma \cdot H$$

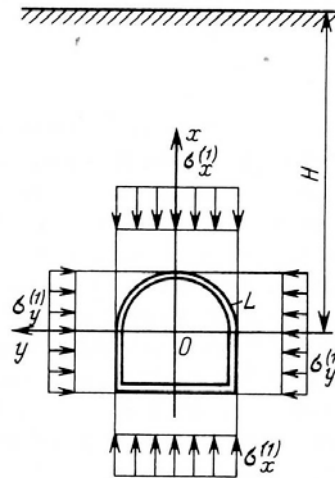


Рис. 3. Расчётная схема крепи в гравитационном поле начальных напряжений.

Множитель $\alpha^* \leq 1$ учитывает отставание возведения крепи от обнажения пород и наличие начальных смещений (деформаций) пород, происходящих до возведения крепи. Для определения коэффициента α^* может быть использована эмпирическая формула д-ра техн. наук Б.З. Амузина:

$$\alpha^* = \exp\left(-1,3 \frac{l_0}{r_0}\right)$$

где r_0 – радиус (или полупролёт) сечения выработки в проходке, м

l_0 – отставание от забоя выработки, м

Следует отметить, что эта формула не учитывает:

- деформации пород впереди забоя выработки (при $l_0 = 0$ $\alpha^* = 1$). Однако, деформациями лба забоя в расчёте можно оправданно пренебречь, т.к. технологией проходки Бескидского тоннеля предусматривается крепление лба забоя фиброгласовыми (синтетическими) анкерами и набрызгбетоном. Тем самым, деформации лба забоя будут стремиться к нулю.

- не учитывают деформационные свойства грунтового массива, в котором проходит строительство тоннеля.

Эти недостатки, частично были решены в работе [27]. Анализ, проведенный в данной работе показал, что увеличение или уменьшение длины строительной заходки вне зависимости от деформационных свойств грунтового массива, и в частности от значения модуля упругости

грунта, приводит к прямо пропорциональному изменению степени разгрузки грунтового массива в шельге свода тоннеля на длине призабойной неподкрепленной зоны тоннельной выработки.

На основании обработки методами математической статистики полученных в ходе численного эксперимента соотношений между значениями коэффициента α^* и модуля упругости грунта E при различных длинах строительной заходки L была установлена следующая экспоненциальная зависимость:

$$\alpha^* = 0,988 \cdot E^{-0,053} \cdot \exp[L \cdot (0,059 - 0,033 \cdot \ln E)]$$

где, α^* - коэффициент начальной разгрузки грунтового массива;

E - модуль деформации грунта, окружающего тоннельную выработку, МПа;

L - длина строительной заходки, м.

Формула может применяться для ориентировочного определения степени падения бытовых напряжений в грунтовом массиве на длине призабойной неподкрепленной зоны тоннельной выработки, проходка которой осуществляется способом сплошного забоя с замкнутой набрызгбетонной крепью.

В отличие от традиционных расчётных схем, где обделка рассчитывается как обычная инженерная конструкция методами строительной механики с приложенными нагрузками на крепь, снимаемые напряжения, показанные на рис. 3, деформируют как крепь (подкрепляющее отверстие кольцо), так и прочно спаянную с ней упругую плоскость. В результате взаимодействия крепи с массивом, моделируемого рассматриваемой расчетной схемой, на линии контакта L возникают нормальные и касательные напряжения, которые, очевидно, зависят от формы сечения выработки, толщины крепи, соотношения деформационных характеристик крепи и массива (E_1/E_0).

Указанная расчетная схема с использованием аналитического решения задачи теории упругости позволяет получить математическую модель крепи в деформируемом массиве пород. Эта математическая модель, представленная в виде компьютерной программы, позволяет оперативно моделировать различные ситуации и производить много-вариантные расчеты крепи, что существенно расширяет возможности проектировщика.

Одна из таких программ является программа Plaxis.

4.4 Метод и алгоритм расчёта.

Программа Plaxis представляет собой специализированную двухмерную компьютерную программу, основанную на методе конечных элементов (МКЭ), которая используется для расчётов деформации и устойчивости различных геотехнических объектов.

Программа Plaxis позволяет моделировать процесс строительства тоннеля с бетонной обделкой, выполненной методом набрызга (NATM).

Основным вопросом в данном случае является учёт эффекта сводообразования грунта и деформаций, имеющих место вокруг неукрепленного призабойного пространства тоннеля. Опишем метод расчёта позволяющий учесть все эти эффекты.

Метод расчёта тоннелей, построенного по новому австрийскому методу проходки (New Austrian Tunneling Method – NATM) представлен в работах проф. Булычёва Н.С. [23,24], где подробно описан анализ взаимодействия крепи (обделки) с массивом горных пород при новоавстрийском методе строительства, законы механики горных пород, а также механизм работы обделки тоннеля.

Идея состоит в том, что начальные напряжения $\sigma_{x,y}^{(0)}$, действующие на участке, где будет строиться тоннель, делятся на две части: часть $(1 - \alpha^*) \sigma_{x,y}^{(0)}$, приложенная к неукрепленному тоннелю и часть $\alpha^* \sigma_{x,y}^{(0)}$, которая приложена к укрепленному тоннелю (рис. №4).

В программе Plaxis вместо того чтобы вводить значение α^* , можно воспользоваться опцией поэтапного строительства с уменьшенным предельным уровнем $\sum M_{stage}$.

В начале расчёта методом поэтапного строительства, когда $\sum M_{stage} = 0$, начальные напряжения $\sigma_{x,y}^{(0)}$ полностью приложены к активной сетке, и по мере возрастания $\sum M_{stage}$ в сторону единицы они будут ступенчато уменьшаться до нуля.

т.е. при $\sum M_{stage} \Rightarrow 1 \Rightarrow \sigma_{x,y}^{(0)} \Rightarrow 0$

Таким образом, значение $\sum M_{stage}$ можно сравнить с $1 - \alpha^*$. Для того, чтобы учесть второй шаг (2-ую фазу), на время выключения кластера тоннеля предельный уровень $\sum M_{stage}$ должен быть ограничен величиной $1 - \alpha^*$. На следующей (3-ей фазе) расчёта строительство тоннеля завершается путём активации его обделки с предельным уровнем $\sum M_{stage} = 1$. Следовательно, на геометрическую модель, включая обделку тоннеля, будет действовать остаточная несбалансированная сила.

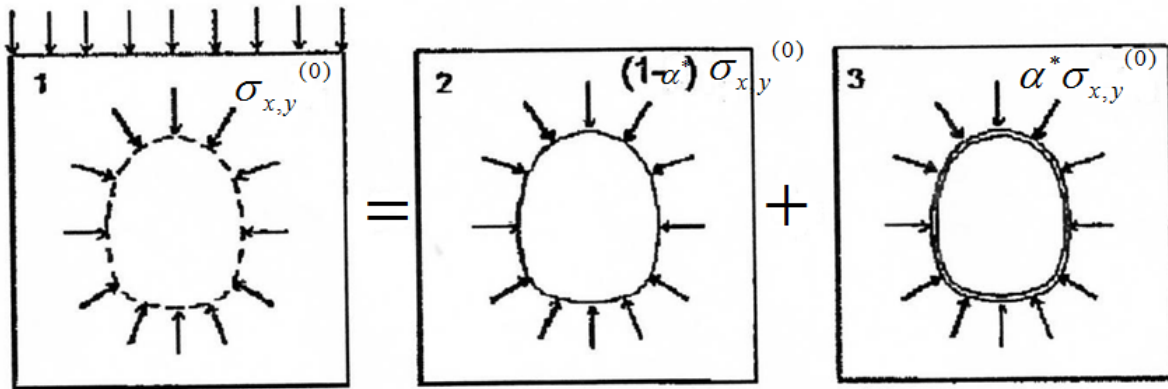


Рис. 4. Схематическое представление метода расчёта тоннелей, построенных по методу NATM.

Итак, алгоритм расчёта следующий:

Создать начальное поле напряжений и приложить возможные внешние нагрузки, присутствующие до начала строительства тоннеля;

Деактивировать кластер тоннеля, не активируя обделки, и применить предельный уровень $\sum M_{stage} = 1 - \alpha^*$

Активировать обделку тоннеля, применить предельный уровень по умолчанию, т.е. $\sum M_{stage} = 1$

Опережающие анкера SDA в коренных породах в программе Plaxis учитывались жестким интерфейсом $R_{igid} = R_{inter} = 1,0$, а также путём выделения массива грунта с повышенными (не сниженными при БВР) деформационными характеристиками вокруг верхнего свода тоннеля.

4.5 Результаты расчёта.

Результатом расчёта временной крепи являются деформации и усилия в ее конструкции (в данной статье не представлены).

5. Выводы

В заключении необходимо отметить, что описанный в статье подход, к решению крепления выработки в течении всего срока до возведения постоянной отделки тоннеля, основывается на максимальном использовании несущей способности окружающего массива путем активного его вовлечения в работу системы «крепь-порода». Одним из действенных путей повышения собственной несущей способности массива является упрочнение связей по контактам структурных блоков. Обеспечение устойчивости выработок в сложных горно-геологических условиях может быть достигнуто применением анкерно-арочной набрызгбетонной крепи, при этом необходимо использовать элементы новоавстрийского метода строительства тоннелей (NATM).

Библиографический список

- 1) Бартон Н., Лин К, и Лунде Й. 1974. Инженерная классификация породных массивов, используемая для проектирования тоннельной крепи. *Rock Mech*; 6(4): 189-236
- 2) Бартон Н. 2002. Некоторые новые корреляции Q-значения в поддержку характеристики площадки и проектирования тоннелей. *Международный журнал по механике горных пород и горному делу*. 39-2. стр. 185-216.
- 3) Беньявски З.Т. 1978. Определение деформируемости породного массива: опыт примеров применения. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*; 15: 237-247.
- 4) Беньявски З.Т. 1989. Инженерные классификации породных массивов: полное руководство для горных инженеров и геологов, строительства и нефтепромыслового дела. Нью-Йорк: Вайли, 251с.
- 5) Фельвари, Г.Ц. 1988. Геология карпатского региона. World Scientific Publishing, Сингапур. 571стр.
- 6) Хок, Е., Маринос, П. и Маринос, В.П. 2005. Характеризация и инженерные свойства тектонически-ненарушенных, но литологически разнообразных осадочных породных массивов. *Международный журнал по механике горных пород и горному делу* 42 (2005) 277-285.
- 7) ISRM (Международное общество по горной механике) 1981. Характеризация, испытание и контроль пород. Методы, предлагаемые ISRM. Браун, Е.Т. (ред.). Pergamon Press. 211 стр.
- 8) Клима, К. и Срб, М. 2004. Бескидский тоннель: Реконструкция или строительство нового. *Eurock 2004& 53-ий Геомеханический коллоквиум*. Шуберт (ред.) VGE. (2004) 375-378/
- 9) Ксянжкевич, М. 1975. Батиметрия флишевого бассейна Карпат. *Acta Geol. Pol.* 25: 309-369.
- 10) Ксянжкевич, М. 1977. Тектоника Карпатских гор. В: Геология Польши, том IV, Тектоника: 476-620. Изд. Geologiczne, Варшава
- 11) Лунард П. (2000) Проектирование и строительство тоннелей с применением подхода, основанного на анализе контролируемой деформации в породах и грунте (ADECO-RS). «T&T Международный подход по анализу контролируемой деформации в породах и грунте (ADECO-RS)», май 2000.
- 12) Маринос, П. и Хок, Е. 2001. Оценка геотехнических свойств гетерогенных породных массивов, таких как флиш. *Бюллетень по инженерной геологии и окружающей среде*. 60 (2001) 85-89.
- 13) NGDC. 2005. Национальный геофизический информационный центр, (NGDC). NOAA. USA. Вебсайт: <http://www.ngdc.noaa.gov>
- 14) Фролов Ю.С., Мордвинков Ю.А. Современные методы сооружения тоннелей горным способом в слабых скальных и полускальных грунтах. *Метро и тоннели* №2. 2006г, стр. 18-21.
- 15) Педчиков А.Ю., Бочаров В.Ф. Механизация работ на строительстве автодорожных тоннелей в Австрии. *Метро и тоннели* №3, 2002г, стр. 16-20.
- 16) Меркин В.Е., Маковский Л.В. Прогрессивный опыт и тенденции развития современного тоннелестроения. М.: ТИМП, 1997. 192стр.
- 17) Н.С. Бульчев, Н.Н. Фотиева Формирование и применение новой теории и аналитических методов расчета крепи горных выработок. *Метро и тоннели* №6, 2011г. стр. 18-19.
- 18) Виттке В. «Механика скальных пород», Москва, «Недра» 1990год
- 19) EN 1997-1:2008 Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules.
- 20) ТКП EN 1997-1-2009 (02250) Еврокод 7: Геотехническое проектирование - Часть 1: Общие положения (EN 1997-1:2008, IDT) // Республика Беларусь, Минск, 2010.
- 21) Баклашев И.В. «Геомеханика» Том 1. Основы геомеханики, Москва, Издательство Московского Государственного Горного Университета, Высшее Горное образование, 2004год.
- 22) Баклашев И.В. «Геомеханика» Том 2. Геомеханические процессы, Москва, Издательство Московского Государственного Горного Университета, Высшее Горное образование, 2004год.
- 23) Бульчев Н.С. «Механика подземных сооружений», Москва, «Недра» 1994год
- 24) Бульчев Н.С. «Механика подземных сооружений в примерах и задачах», Москва, «Недра» 1989год
- 25) ВСН 126-90 «Крепление выработок набрызг-бетоном и анкерами при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. Нормы проектирования и производства работ».
- 26) Atlas Copco Rock Reinforcement Products. Каталог продукции, 2014год
- 27) Шелочкова Т.Н. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Методика определения эффективных параметров тоннельных обделок из набрызгбетонна», Москва, 2010 год
- 28) Plaxis 2D 2011. Справочное руководство.
- 29) Plaxis 2D 2011. Руководство пользователя. Часть3. Пособие по моделям материалов.

- 30) Plaxis 2D 2011. Руководство пользователя. Часть4. Научное пособие.
31) Фадеев А.Б. «Метод конечных элементов в геомеханике», Москва, Недра, 1987 год.
32) Амусин Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Амусин Б.З., Фадеев А.Б. — М.: Недра, 1975.

Надійшла до редакції 15.04.2016

С.М. СТОВПНИК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

О.С. ОСИПОВ

Проектний інститут «Укрспецтунельпроект». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

ОПТИМІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТИМЧАСОВОГО КРІПЛЕННЯ ТУНЕЛІВ ДЛЯ СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ ФЛІШЕВОГО МАСИВУ ПОРІД.

У статті надана інформація про основні інженерні труднощі, з якими зіткнулися проектувальники і будівельники при реалізації об'єкта Бескидський тунель. Знаходження шляхів вирішення цих проблем. Коротко був описаний механізм роботи кріплення з масивом порід при новоавстрійському способі проходки тунелів (NATM). Надані основи аналітичного підходу до вирішення завдання визначення зусиль у тимчасовому кріпленні тунелю за допомогою програмного комплексу Plaxis 2D (алгоритм визначення тиску на кріплення з урахуванням відставання її влаштування в двомірній постановці задачі).

Ключові слова: Напружено-деформований стан, гравітаційні і тектонічні сили, метод кінцевих елементів, Plaxis, моделювання, новоавстрійський метод будівництва тунелів (NATM).

S. STOVPNIK

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

OSYPOV

Project Institute “Ukrspetstunelproject” National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

OPTIMIZATION OF A COMPOSITE CONSTRUCTION OF TEMPORARY TUNNELS TO COMPLEX ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS OF ADDITION OF THE FLYSCH ROCK MASS.

The article provides information about the main engineering challenges faced by designers and builders in the implementation of the object Beskyd tunnel. Finding solutions to these problems. Briefly described the mechanism of bolting with rock massif at the New Austrian Tunneling method (NATM). Provided the basics analytical approach to the solution of the problem of determining the efforts of temporary supports in the tunnel with the help of program complex Plaxis 2D (the algorithm for determining the pressure on the support taking into account the backlog of its device in two-dimensional formulation of the problem).

Keywords: Stressedly-deformed state, the gravitational and tectonic forces, finite element method, Plaxis, modeling, the New Austrian Tunneling method (NATM).