УДК 624.1

Е.А.КАРАСЕВ, *начальник УКЦ, karasev@spmi.ru*
Санкт-Петербургский горный институт (*технический университет*)

E.A.KARASEV, *the head of studying-computer centre, karasev@spmi.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БЛОЧНОЙ ОБДЕЛКИ ПЕРЕГОННОГО ТОННЕЛЯ, РАЗЖАТОЙ НА ПОРОДУ

Изложены принципы расчета напряженного состояния блочной обделки тоннеля, разжатой на породу, в объемной постановке по схеме взаимодействия обделка – массив. Выполнен анализ характера распределения главных минимальных напряжений на внешнем и внутреннем контурах обделки. Приведены зависимости изменения максимальных напряжений в боках и своде выработки от модуля деформации массива.

Ключевые слова: тоннель, обделка, напряжения, модель, численный метод.

STRESS CONDITION OF PREFABRICATED TUNNEL LINNING WITH INITIAL RELEASE

3d finite element model of soil and prefabricated tunnel lining interaction with appropriate boundary condition is given in this article. Stresses distribution on inner and outer part of the tunnel lining is analyzed. Relationship between stress state at top and sides of the tunnel lining and deformation module magnitude is shown.

Key words: tunnel, lining, stress, model, numerical method.

Перегонные тоннели метрополитена являются достаточно протяженными подземными сооружениями, которые пересекают геологические формации с различными физико-механическими свойствами. В настоящее время при строительстве перегонных тоннелей в Санкт-Петербурге применяется, в основном, обделка, разжатая на породу [1-3]. Задача рассматривается в объемной постановке по схеме совместного взаимодействия обделка – массив с учетом передачи усилий между отдельными сегментами через специальные контактные условия.

Напряжение на контакте крепь – массив и в элементах обделки перегонного тоннеля зависит от механических свойств этих грунтов. Внешний диаметр железобетонной блочной обделки, разжатой на породу, составляет 5,6 м. Толщина блочной обделки 150 мм. Аксонометрический вид блока и кольца блоков приведен на рис.1. Модуль общей деформации грунтов варьировался в диапазоне 50-1000 МПа, а напряженное состояние вокруг перегонного тоннеля соответствовало напряженному состоянию массива на глубине 60 м от поверхности земли (на данной глубине пройдено большинство перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена).

Породный массив рассматривался как упругоизотропная среда, свойства которой определяются двумя параметрами: модулем общей деформации E и коэффициентом поперечной деформации грунтов v. Напряженное состояние массива задавалось в качестве начальных условий тремя компонентами напряжений: σ_x, σ_y, σ_z. Величина вертикальных напряжений σ_y определялась согласно теории

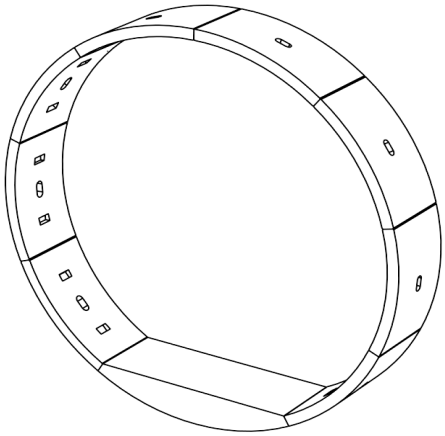


Рис.1. Общий вид кольца из железобетонных блоков, разжатых на породу

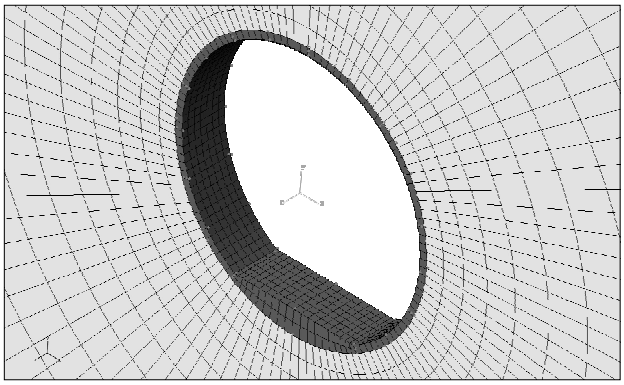


Рис.2. Модель обделка – массив

Динника. Величины горизонтальных напряжений σ_x, σ_z определялись коэффициентом бокового распора $\lambda = 0{,}4$. Железобетонный блок представляет собой упругий материал, параметры которого задавались эквивалентным модулем упругости $E = 9000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}2$. В качестве исследуемого объекта рассматривалось одно кольцо блоков, разжатых на породу (рис.2), нагрузка на который передавалось от окружающего его массива по схеме взаимодействия крепь – массив.

Граничные условия анализируемой модели следующие (рис. 2): в продольном направлении, совпадающем с осью Z и в радиальном направлении R на расстоянии 5 диаметров выработки (граничные условия на таком расстоянии перестают оказывать значительное воздействие на распределение напряжений вокруг выработки), совпадающем с цилиндрической системой координат (продольная ось Z) перемещения запрещены. Так как модель симметрична относительно оси X, то рассматривалась только половина кольца тюбингов и как следствие – только та часть массива, которая окружает его. Для обеспечения симметрии перемещения по плоскости симметрии запрещены в перпендикулярном этой плоскости направлении X. Расстояние от края контура выработки до границы породного массива достаточно, чтобы граничные условия не влияли на границах модели на результаты напряжений в крепи обделки тоннеля.

Расчетная модель состоит из двух типов конечных элементов. Обделка представлена восьмиузловыми объемными элементами с несовместными конечными элементами, массив в отдалении – восьмиузловыми элементами с упрощенными конечными элементами. Применение несовместных элементов обосновано тем, что они очень хорошо работают в искаженных элементах и дают возможность учитывать изменения напряжений по длине и ширине элемента, а также изгибающие моменты.

Цель моделирования – получение более полного представления о характере распределения напряжений в обделке перегонного тоннеля при различных возможных напряженных состояниях, а также оценка прочности отдельных элементов обделки. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) обделки производился по максимальным и минимальным главным напряжениям. Минимальные главные напряжения позволяют оценить уровень сжимающих напряжений, возникающих в обделке; максимальные главные напряжения – максимальные растягивающие или возможность возникновения растягивающих напряжений в обделке тоннеля, и сравнить их с прочностью бетона (железобетона).

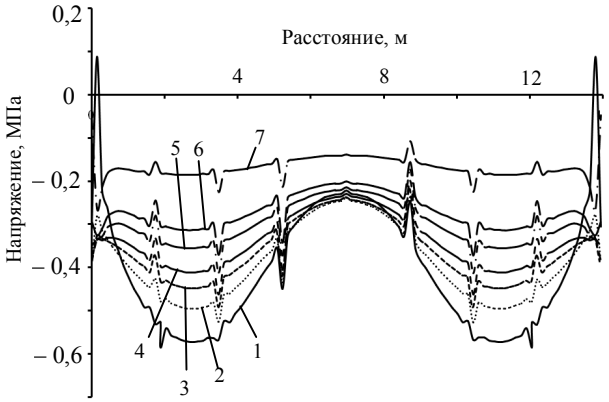


Рис.3. Распределение максимальных главных напряжений в кольце блочной обделки, разжатой на породу, на ее внутреннем контуре

1 – 50 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 150 МПа; 4 – 200 МПа; 5 – 300 МПа; 6 – 400 МПа; 7 – 1000 МПа

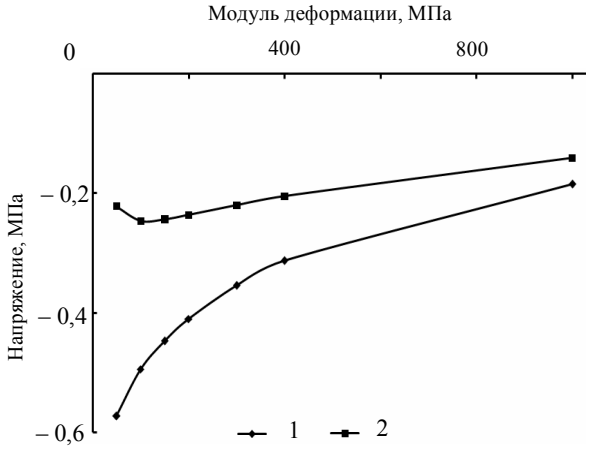


Рис.4. Зависимость изменения максимальных главных напряжений от модуля деформации породы на внутреннем контуре в боках (1) и своде (2) тоннеля

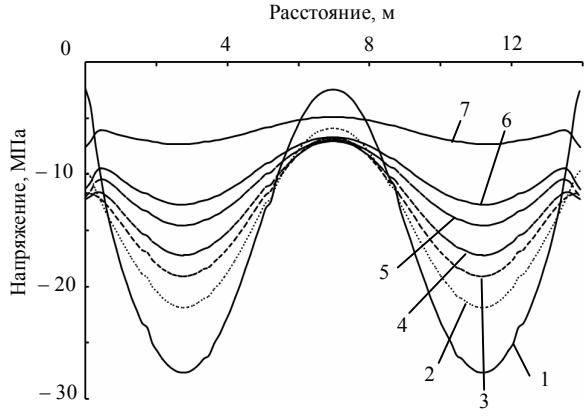


Рис.5. Распределение минимальных главных напряжений в кольце блочной обделки, разжатой на породу, на ее внутреннем контуре

1 – 50 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 150 МПа; 4 – 200 МПа; 5 – 300 МПа; 6 – 400 МПа; 7 – 1000 МПа

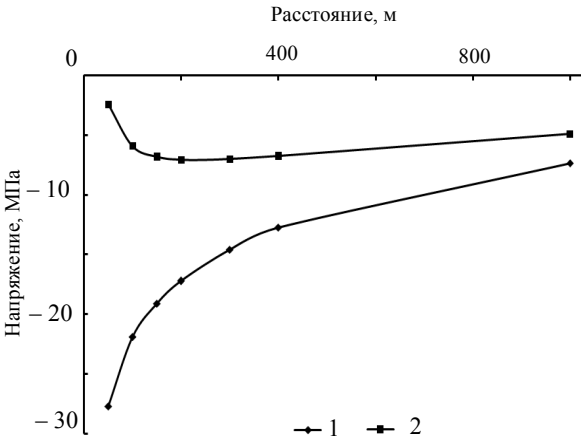


Рис.6. Зависимость изменения минимальных главных напряжений от модуля деформации породы на внутреннем контуре в боках (1) и своде (2) тоннеля

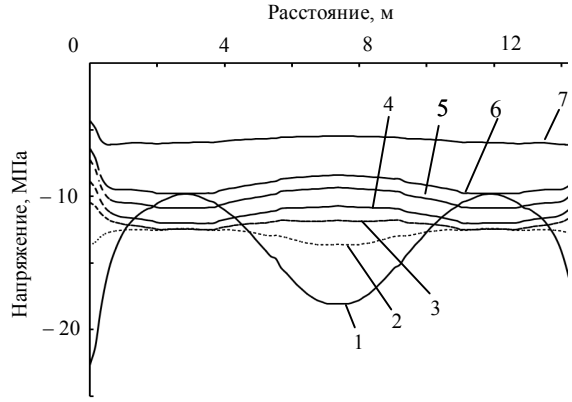


Рис.7. Распределение минимальных главных напряжений в кольце блочной обделки, разжатой на породу, на ее внешнем контуре

1 – 50 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 150 МПа; 4 – 200 МПа; 5 – 300 МПа; 6 – 400 МПа; 7 – 1000 МПа

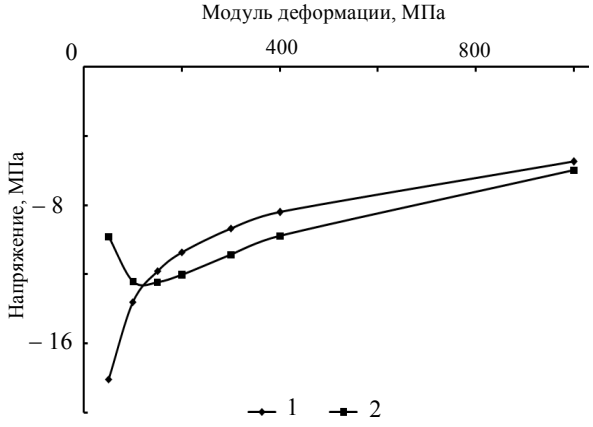


Рис.8. Зависимость изменения минимальных главных напряжений от модуля деформации породы на внешнем контуре в боках (1) и своде (2) тоннеля

Результаты расчетов детальной оценки напряженно деформированного состояния приведены на графиках (рис.3-8). Отрицательные значения на графиках – сжимающие напряжения, положительные значения – растягивающие.

Анализ результатов распределения максимальных главных напряжений на внутреннем контуре обделки (рис.3), показал что напряжения в обделке все сжимающие. Характер распределения напряжений по контуру обделки при различных значениях модуля деформации породы схож, отличается только величиной амплитуды эпюр напряжений. Неравномерность формирования напряжений в обделке связана с величиной модуля деформации окружающего массива, при этом при малом значении (E = 50 МПа) неравномерность наиболее выражена, с увеличением E (до 1000 МПа) происходит практически равномерное распределение напряжения по контуру обделки.

Значение напряжения в боках обделки тоннеля 0,55-0,18 МПа, соответственно для модулей деформации 50-1000 МПа. Напряжение в своде обделки в меньшей степени зависит от модуля деформации породы и составляет 0,2-0,16 МПа (рис.4).

Минимальные главные напряжения на внутреннем контуре обделки, которые показывают максимальные значения сжимающих напряжений, изменяются следующим образом (рис.5). Когда тоннель расположен в достаточно мягких породах (E = 50 МПа) значения напряжений максимальны (28 МПа) в боках обделки, при этом в своде тоннеля они минимальны и стремятся к нулю. Это факт указывает, что в таких условиях возможно появление растягивающих напряжений. С увеличением жесткости окружающего массива напряжения в боках тоннеля значительно снижаются, а в своде незначительно увеличиваются, что позволяет сделать вывод о том, что увеличение жесткости массива благоприятно сказывается на работе обделки в целом.

В своде обделки (рис.6) при E = 50 МПа напряжения минимальны – 0,2 МПа. С увеличением модуля деформации до 200 МПа напряжения на своде обделки увеличиваются до 7 МПа. Последующее увеличение модуля деформации породы от 200 до 1000 МПа приводит к уменьшению напряжений до 5 МПа. В боках обделки напряжения максимальны и равны 28 МПа при значении модуля деформации породы 50 МПа. Затем по экспонентациальной зависимости уменьшаются до 8 МПа.

На внешнем контуре обделки распределение минимальных главных напряжений (рис.7) значительно отличается от характера распределения на внутреннем контуре. Так, при E = 50 МПа максимальные напряжения наблюдаются в своде обделки, в то время как в боках тоннеля они минимальны. Когда деформационные характеристики массива возрастают, напряжения в значительной степени перераспределяются практически равномерно (без значительных колебаний) по контуру обделки.

Более подробно характер изменения минимальных главных напряжений на внешнем контуре обделки приведен на рис.8. В своде тоннеля при значении модуля деформации 50 МПа напряжения равны 18 МПа. Увеличение модуля деформации от 50 до1000 МПа приводит к уменьшению напряжений в своде обделки тоннеля на 12 МПа, и они составляют 6 МПа. В боках обделки тоннеля наблюдается следующая картина. Значение напряжений при модуле деформации породы 50 МПа составляет 9,5 МПа. Максимальные значения напряжений в боках обделки тоннеля 12,5 МПа формируются при модуле деформации 150 МПа. Следует отметить, что при таком модуле деформации происходит пересечение зависимостей напряжений в своде и боках обделки и при дальнейшем увеличении модуля деформации напряжения в боках обделки остаются выше, чем в своде.

Проведенный анализ НДС блочной обделки, разжатой на породу, показал, что с учетом особенностей совместного взаимодействия отдельных блоков друг с другом, растягивающие напряжения в обделке не образуются. Сжимающие напряжения в обделке в зависимости от рассматривае-

мой геологической среды носят различный характер. На внешнем и внутреннем контурах обделки сжимающие напряжения составляют 5-18 МПа и 8-28 МПа соответственно. Оценивая прочность обделки при данной конструкции в рассмотренном диапазоне деформационных свойств массива, никаких нарушений в обделке не наблюдается, а напряжения не превышают прочность материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Булычев Н.С.* Расчет крепи капитальных горных выработок / Н.С.Булычев, Б.З.Амусин, А.Г.Оловянный. М.: Недра, 1974. 320 с.

2. *Булычев Н.С.* Проектирование и расчет крепи капитальных выработок / Н.С.Булычев, Н.Н.Фотиева, Е.В.Стрельцов. М.: Недра, 1986. 288 с.

3. *Протосеня А.Г.* Постановка задач по расчету напряженного состояния около выработок // Межвузовский сборник научных трудов «Устойчивость и крепление горных выработок» / А.Г.Протосеня, М.О.Лебедев. Санкт-Петербургский горный институт. СПб. 1999. С. 115-118.

REFERENCES

1. *Bulichev N.S.*, *Amusin B.Z.*, *Olovianni A.G.* Permanent tunnel lining design. Moscow: Nedra, 1974. 320 p.

2. *Bulichev N.S.*, *Fotieva N.N.*, *Strelcov E.V.* Structural design of permanent tunnel lining. Moscow: Nedra, 1986. 288 p.

3. *Protosena A.G.*, *Lebedev M.O.* Problem definition of structural analysis of stress and strain state around excavation. SPMI, SPb, 1999. P.115-118.