

Н. М. МАХМЕТОВА, А. М. МАЛБАКОВА, В. Г. СОЛОНЕНКО

(Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХСВОДЧАТОЙ СТАНЦИИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. Цели. Создание высокопрочной крепи, обеспечивающей надежность конструкций обделок станционных тоннелей, на основе моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «обделка-грунт».

Методы. Исследуется трехмерное напряженно-деформированное состояние обделок трехсводчатой станции при сейсмических воздействиях интенсивностью 9 баллов по шкале MSK на основе метода конечных элементов в сочетании с методом разложения перемещений по формам собственных колебаний.

Результаты. Положение работы представляет собой численно-теоретическое исследование, направленное на изучение НДС как обделок трехмерной станции метрополитена глубокого заложения, так и окружающего грунтового массива с целью снижения осадок земной поверхности. Разработаны методы расчета и программные комплексы для изучения НДС системы «обделка-грунт» с учетом инженерно-геологических и сейсмических условий площадки строительства. Установлены закономерности распределения перемещений и напряжений в обделках станции под действием сейсмических нагрузок, позволяющие установить прочность обделок для восприятия нагрузок от горного давления и несущую способность его. Выработаны рекомендации по подбору площади армирования в целях обеспечения надежности элементов конструкций станции, снижения величин напряжений на контуре тоннелей станции и увеличения жесткости обделок. Достоверность полученных результатов обосновывается использованием математического моделирования, апробированных комплексов программ и удовлетворительной сходимостью результатов численных и теоретических исследований.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, обделка, акселерограмма, напряжение, перемещение.

Тірек сөздер: кернеулі-деформациялық құй, бекітпе, акселерограмма, кернеу, жылжу.

Keywords: Stress-strain condition, lining, accelerogram, stress, displacement.

Создание надежных методов расчета устойчивости подземных транспортных сооружений в сложных грунтовых условиях под действием сейсмических нагрузок было и остается актуальной задачей теории сейсмостойкости подземных сооружений. В условиях строительства станции метрополитена в зоне возможных 9-10-ти балльных землетрясений требуются научно обоснованные рекомендации для обеспечения сейсмостойкости.

Практическое осуществление расчетов транспортных подземных сооружений на воздействие сейсмических нагрузок представляет сложную задачу динамики подземных сооружений. Невозможно получить аналитическое решение подобных задач, поэтому привлекаются численные методы конечно-элементного анализа.

Уравнения динамического равновесия системы «обделка-грунт» конечных элементов в момент времени t записываются в виде [1]

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{R(t)\}, \quad (1)$$

где $\{R(t)\}$ – вектор внешних сил, зависящий от времени.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) можно получить с помощью стандартных процедур. Однако такие процедуры не эффективны при больших порядках системы. Поэтому естественно обращаться к способам решения, имеющим механические основы. Такими эффективными методами являются метод разложения перемещений по формам собственных колебаний.

Разложение по формам собственных колебаний сводится к преобразованию перемещений узлов конечных элементов с тем, чтобы привести уравнения динамического равновесия (1) к более удобной для интегрирования форме. Используется следующее преобразование перемещения

$$\{U(t)\} = [P]\{X(t)\}, \quad (2)$$

где $[P]$ – квадратная матрица, $\{X(t)\}$ – вектор порядка n , зависящий от времени. Матрица преобразования $[P]$ неизвестна и ее необходимо найти. Компоненты вектора $\{X(t)\}$ – называются обобщенными перемещениями.

Подставляя (2) в (1) и умножая слева на $[P]^T$, получаем

$$[P]^T [M] [P] \{\ddot{X}(t)\} + [P]^T [C] [P] \{\dot{X}(t)\} + [P]^T [K] [P] \{X(t)\} = [P]^T \{R(t)\}. \quad (3)$$

Так как собственные векторы и $[M]$ – ортогональны, будем иметь

$$[P]^T [K] [P] = [\Omega]^2; \quad [P]^T [M] [P] = [I], \quad (4)$$

где $[P]$ – матрица, состоящая из столбцов - векторов $\{\varphi_i\}$, а $[\Omega^2]$ – диагональная матрица

$$[P] = [\{\varphi_1\}, \{\varphi_2\}, \dots, \{\varphi_n\}], \quad [\Omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \omega_2^2 & \\ & & \omega_n^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Используя соотношение (4), получаем систему уравнений равновесия для обобщенных перемещений

$$\{\ddot{X}(t)\} + [P]^T [C] [P] \{\dot{X}(t)\} + [\Omega^2] \{X(t)\} = [P]^T \{R(t)\}. \quad (6)$$

Общий вид уравнений равновесия (6) системы конечных элементов в базисе собственных векторов $\{\varphi_i\}$, $i=1,2,\dots,n$ показывает, что при неучете демпфирования уравнения равновесия разделяются, и временное интегрирование может быть проведено для каждого уравнения в отдельности. Метод разложения по собственным формам особенно эффективен, если можно предположить демпфирование пропорциональным, что выражается соотношением [2, 3]

$$\{\varphi_i\}^T [C] \{\varphi_j\} = 2\omega_i \xi_i \delta_{ij}, \quad (7)$$

где ξ_i – коэффициенты демпфирования формы колебаний; δ_{ij} – символ Кронекера. Следовательно, используя (7), предполагая, что собственные векторы $\{\varphi_i\}$, а также $[C]$ – ортогональны и система уравнений (6) разделяется на n уравнений вида

$$\{\ddot{X}(t)\} + 2\omega_i \xi_i \{\dot{X}(t)\} + \omega_i^2 \{X(t)\} = [P]^T \{r_i(t)\}. \quad (8)$$

где $\{r_i(t)\} = \{\varphi_i\}^T \{R(t)\}$.

Решение каждого уравнения (8) можно осуществить путем использования интеграла Дюамеля:

$$x_i(t) = \frac{1}{\bar{\omega}_i} \int_0^t r_i(\tau) \exp(-\xi_i \omega_i (t-\tau)) \sin(\bar{\omega}_i (t-\tau)) d\tau, \quad (9)$$

где $\bar{\omega}_i = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$.

Пусть система совершают колебательный процесс под действием инерционных сил

$$\{R(t)\} = -[M] \{\ddot{U}_0(t)\}, \quad (10)$$

где $\{\ddot{U}_0(t)\} = \{A\} \{\ddot{a}_0(t)\}$; $\{\ddot{a}_0(t)\}$ – акселерограмма землетрясения, $\{A\}$ – вектор направляющих косинусов углов между направлением падения сейсмической волны с координатными осями.

Задача состоит в определении НДС элементов конструкций обделок трехмерной станции при сейсмическом воздействии интенсивностью 9 баллов по шкале MSK. Расчеты на сейсмическое воздействие выполнялись с использованием двухкомпонентной расчётной акселерограммы, действующей на глубине $h = 59,0$ м и включающей горизонтальную поперечную и вертикальную компоненты. Продолжительность акселерограммы – 20 с, число точек – 2000, шаг оцифровки – 0,01 с. Масштабирование компонент выполнено так, чтобы пиковые значения ускорений составляли $1,0 \text{ м/с}^2$ ($\approx 0,1 \text{ г}$).

Было учтено 160 собственных форм. Затухание по каждой из форм принималось равным 10 % от критического.

Расчеты системы «обделка-грунт» на сейсмическое воздействие выполнены методом разложения по формам собственных колебаний.

Расчеты выполнялись на одновременное действие горизонтальной поперечной и вертикальной компонент исходной расчётной акселерограммы, заданной на глубине $h = 59,0$ м и вызывающей на дневной поверхности грунта колебания, соответствующие интенсивности землетрясения 9 баллов.

Для анализа НДС конструкций обделок трехмерной станции в целом при сейсмическом воздействии выбран момент времени $t^* = 8,72$ с, которому соответствуют экстремальные значения растягивающих напряжений. На рисунке 1 дано распределение горизонтальных перемещений для обделок трехсводчатой станции. Максимальные горизонтальные перемещения достигают величины $u_x = 5,9$ мм в верхнем своде центрального тоннеля. На рисунке 2 показано распределение вертикальных перемещений для обделок трехсводчатой станции. Вертикальные смещения конструкции u_y находятся в пределах 1,0 мм. На рисунке 3 даны напряжения на внутренней поверхности обделок трехсводчатой станции. Максимальные растягивающие напряжения достигают величину $\sigma_{\max}^{\text{растяг.}} = 3.7 \text{ МПа}$ и наблюдаются в зонах примыкания нижних и верхних сводов тоннелей к пylonам. Наибольшие сжимающие напряжения возникают в симметрично расположенных зонах и достигают величину $\sigma_{\max}^{\text{сжимаю.}} = 4.1 \text{ МПа}$.

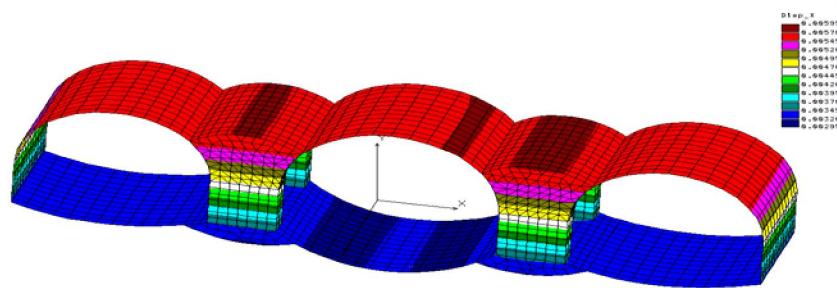


Рисунок 1 – Распределение горизонтальных перемещений (м) в обделках

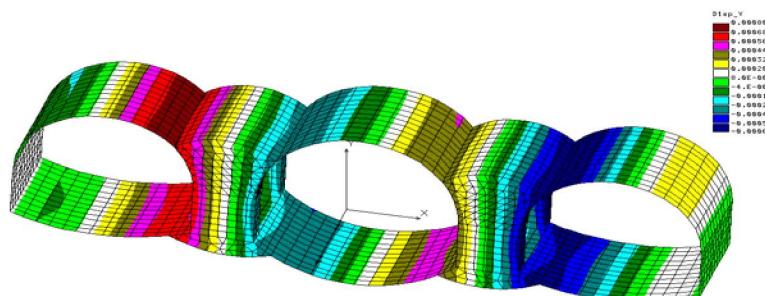


Рисунок 2 – Распределение вертикальных перемещений (м) в обделках

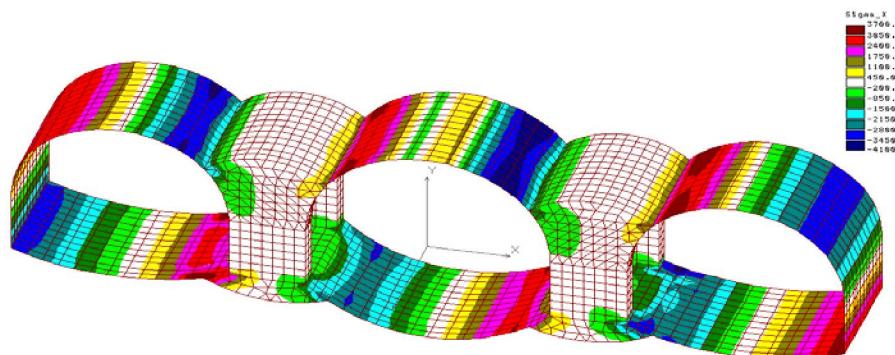


Рисунок 3 – Распределение нормальных тангенциальных напряжений (кПа) на внутренней поверхности обделок

На рисунке 4 показаны напряжения на внешней поверхности обделок (на контакте со слоем набрызгбетона). Максимальные растягивающие напряжения достигают величину $\sigma_{\max}^{\text{растяг.}} = 3.37 \text{ МПа}$,

а наибольшие сжимающие напряжения – $\sigma_{\max}^{\text{сжимаю.}} = 4.1 \text{ МПа}$. Указанные напряжения действуют на ограниченных участках. На большей части поверхности обделок значения растягивающих и сжимающих напряжений не превосходят 1,0 МПа.

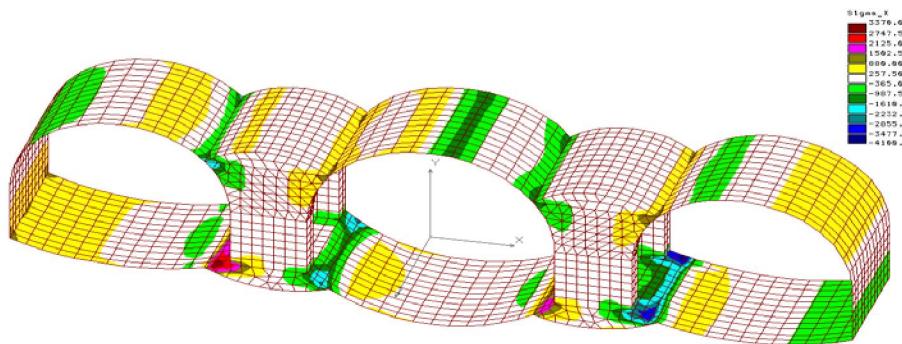


Рисунок 4 – Распределение нормальных тангенциальных напряжений (кПа) на внешней поверхности обделки

На рисунке 5 дано распределение нормальных вертикальных сейсмических напряжений в пилонах. Величины растягивающих напряжений не превышают $\sigma_{\max}^{\text{растяг.}} = 4.5 \text{ МПа}$, а сжимающих – $\sigma_{\max}^{\text{сжимаю.}} = 5.1 \text{ МПа}$. Указанные величины напряжений наблюдаются в ограниченных участках нижних зон пилонов. Этим зонам следует уделить особое внимание при подборе армирования.

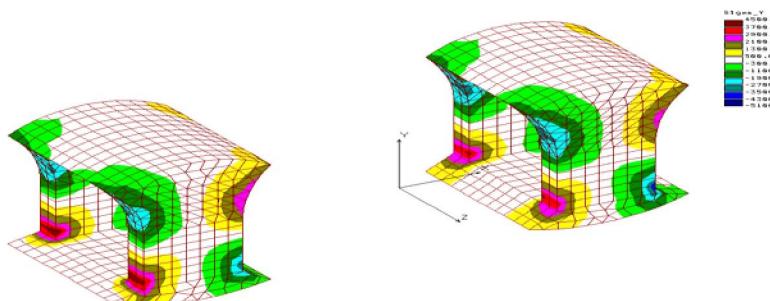


Рисунок 5 – Распределение нормальных вертикальных напряжений (кПа) в пилонах

На основе анализа результатов многовариантного численного эксперимента установлено, что сейсмические напряжения составляют не более 30–35% от напряжений, возникающих при постоянных нагрузках. В зонах, где величины растягивающих и сжимающих напряжений достигают максимальных значений, необходимо выполнить усиленное армирование, в целях обеспечения несущей способности элементов конструкций обделок станционных тоннелей.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
- 2 Махметова Н.М., Малбакова А.М. Сейсмонапряженное состояние анизотропного массива с трехмерным подземным транспортным сооружением // Материалы XXXV междунар. научно-практич. конф. «Инновационные технологии в развитии транспортно-коммуникационного комплекса Казахстана». – 2011. – С. 155-159.
- 3 Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния обделки типового участка станции // Вестник КГУСТА. – 2012. – № 3(37). – С. 116-120.

REFERENCES

- 1 Klaf R., Penzien Dzh. Dinamika sooruzhenij. M.: Strojjizdat, 1979. 320 s.
- 2 Mahmetova N.M., Malbakova A.M. Sejsmonaprijazhennoe sostojanie anizotropnogo massiva s trehmernym podzemnym transportnym sooruzheniem. Materialy XXXV mezhdunar. nauchno-praktich. konf. «Innovacionnye tehnologii v razvitiu transportno-kommunikacionnogo kompleksa Kazahstana». 2011. S. 155-159.
- 3 Jeksperimental'noe issledovanie naprijazhennno-deformirovannogo sostojanija obdelki tipovogo uchastka stancii. Vestnik KGUSTA. 2012. № 3(37). S. 116-120.

Резюме

N. M. Махметова, A. M. Малбакова, V. G. Солоненко

(М. Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясы, Алматы, Қазақстан)

УШКУМБЕЗДІ СТАНЦИЯНЫҢ СІЛКІНІСТІ ЖҮКТЕМЕЛЕР ӘСЕРІНДЕГІ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ КҮЙИН ЗЕРТТЕУ

Мақсаты. Қатпарлама-топырақ жүйесінің кернеулі-деформациялық күйін модельдеу арқылы станциялық тоннелдердің қатпарлама құрылымдарының сенімділігін қамтамасыз ететін беріктігі жоғары алдын ала бекітпені жасау.

Әдістер. Шекті элементтер және жылжуларды еркін тербелістердің формаларына жіктеу әдістері арқылы MSK шкаласы бойынша қарқынды 9 балл болатын сейсмикалық әсердегі ушкүмбезді станция қатпарламаларының үшөлшемді кернеулі-деформациялық күйі зерттеледі.

Нәтижелері. Жер бетінің шеогүн азайту мақсатында үшөлшемді станция метрополитенінің қатпарламаларындағы және де қоршаған топырақ массивіндегі кернеулі-деформациялық күйін білуге бағытталған ізденісті сандық-теориялық зерттеу жұмысы болып табылады. Құрылыш аймағының инженерлік-геологиялық және сейсмикалық шарттарын ескере отырып, «қатпарлама-топырақ» жүйесінің кернеулі-деформациялық күйін зерттеуге арналған есептеу тәсілдері мен бағдарламалық өнімдері жасалынған. Бекітпелердің беріктігін қамтамасыз ету мақсатында, тау қысымының жүктемелерін қабылдау және көтерме қабілеттілігін анықтау үшін сейсмикалық күштердің әсерінен бекітпелерде туындастырылған кернеулер мен жылжулардың таралу заңдылықтары орнатылған. Станция құрылым элементтерінің беріктігін, станция тоннелдерінің контурындағы кернеулердің шамасын азайтуға және бекітпелердің қатаандығын ұлғайту мақсатында аймактарды армирлеу жөніндегі аудандарды іріктеуге ұсыныстар жасалған.

Алғынған нәтижелердің дәлдігі математикалық модельдеуді, апробирленген бағдарламалық кешендерді қолдану арқылы, сандық және теориялық зерттеулердің нәтижелерінің бір-біріне жақын болуына негізделген.

Тірек сөздер: кернеулі-деформациялық күй, бекітпе, акселерограмма, кернеу, жылжу.

Summary

N. M. Mahmetova, A. M. Malbakova, V. G. Solonenko

(Kazakh academy of transport and communications named by M. Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan)

RESEARCH OF STRESS-STRAIN KEPT THREE-VAULTED STATION UNDER SEISMIC IMPACTS

Aims. Creating high- lining, ensuring reliability of structures lining station tunnels, based on simulation of the stress -strain condition (SSC) of the «ground – lining».

Methods. We research the three-dimensional stress-strain condition lining three-vaulted station at seismic impacts in stress 9 points on the MSK scale based on the finite element method combined with the method of expansion movements in forms of natural vibrations .

Results. Work condition is a numerical and theoretical research aimed at examining the SSC as a three-dimensional lining subway station deep foundation, and the surrounding soil mass to reduce the earth's surface sediment. Calculation methods and software systems for the research of the SSC system «lining – ground» with regard to geological and seismic conditions of the construction site. The regularities of the distribution of displacements and stresses in the lining of the station under the action of seismic loads which will enable lining for strength to withstand the loads of rock pressure and its bearing capacity. Recommendations on the selection of reinforcement area to ensure the reliability of structural elements station, reducing stress values on the contour of the station tunnels and stiffening lining. Reliability of the results justified the use of mathematical modeling, complex programs and proven satisfactory convergence of numerical and theoretical researches.

Keywords: stress-strain condition, lining, accelerogram, stress, displacement.

Поступила 02.04.2014 г.