

УДК 699.8:627.141

РАСЧЕТ И КОНСТРУКЦИЯ АРОЧНОГО ПРОТИВООПОЛЗНЕВОГО СООРУЖЕНИЯ

Д.т.н., проф. Байнатов Ж.Б., д.т.н., проф. Базанова И.А.,
магистрант Жиренбаева Н.О.
(КазННТУ им. К.И.Сатпаева, Казахстан, Алматы, naz_zh@list.ru)

При строительстве горных автомобильных дорог часто используются комбинированные системы защиты от сползания искусственных откосов и от давления грунтов срезанных частей склона. В данной статье используются многопролетная сквозная железобетонная подпорная стена из клинообразных двутавровых блоков монтированные в плане по дуге. Приведена методика ручного расчета подпорной стены методом конечных элементов и получены окончательные результаты в виде эпюр перемещений.

During the construction of the mountain roads are often used combined protection from slipping artificial slopes and the pressure of soil cut parts of the slope. This article uses the pass-through, multi-reinforced concrete retaining wall of the wedge-shaped blocks of I-assembled in terms of an arc. The technique of manual calculation of the retaining wall by finite element method and obtained final results in the form of diagrams of displacements.

При строительстве горных автомобильных дорог часто используются комбинированные системы защиты от сползания искусственных откосов и от давления грунтов срезанных частей склона. Как обычно вертикально срезанная часть защищается подпорной стеной, а более пологий склон решетчатыми элементами.

Рассматривается подпорная стена арочного очертания в плане, составленное из отдельных блоков. Блок в поперечнике имеет двутавровое сечение, переменное по длине, т.е. по форме он напоминает клин (рис. 1).

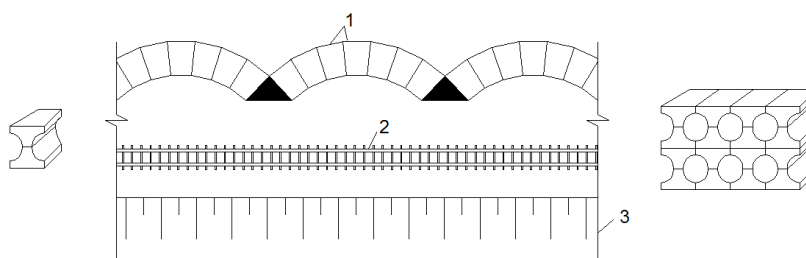


Рис. 1. Подпорная стена арочного типа: а – клинообразный блок;
б – многопролетная арочная стена; в – фрагмент сборки;
1 – подпорная стена; 2 – дорога; 3 – откос

Блоки укладываются свободно друг на друга по высоте сооружения, образуя по вертикали диафрагму. Несколько таких диафрагм создают криволинейную поверхность, расчетная кривизна которой зависит от изменения момента инерции поперечного сечения.

Общий вид и фрагмент подпорной стены показан на рис. 1, б, в.

Расчетная схема может быть принята в виде толстостенных оболочек из штучных материалов.

Применим метод конечных элементов для определения усилий и перемещений в такой арочной подпорной стене. За конечные элементы примем блоки сооружения. Каждый элемент в плане в общем случае имеет трапецевидное сечение, однако, как показывает практика расчета таких сооружений, эти изменения размеров настолько малы по сравнению с размерами блока, что ими можно пренебречь, особенно для пологих арок.

Если принять, что все сечения по толщине подпорной стены работают одинаково, тогда каждый блок испытывает деформации только в плоскости арки. Примем соединения блоков между собой идеальными шарнирами в узловых точках i, j, k, l . Значимость между узловыми силами и узловыми перемещениями, как известно, может быть представлена в виде уравнения равновесия:

$$\vec{F} = k \vec{u}, \quad (1)$$

где \vec{F} - вектор узловых сил; \vec{u} - вектор узловых перемещений; k – матрица жесткости в общей системе осей координат.

Система разрешающих уравнений (1) отражает условие равновесия узлов совокупности элементов, и порядок его зависит от их числа.

Для формирования матрицы «К» необходимо построить матрицы жесткости отдельных элементов [1]. В случае прямоугольной формы элемента, плоского напряженного состояния и изотропного материала процедура эта не вызывает особых затруднений.

Компонуя матрицу жесткости всего сооружения и решая уравнение (1), получим вектор перемещения узлов срединной поверхности, по которому определяется напряженное состояние блока в рассматриваемой плоскости. Такой прием позволяет определить перемещения и напряжения в блоках сооружения, используя готовые матрицы жесткости [2].

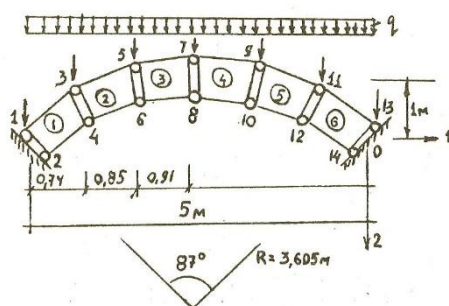


Рис. 2. Расчетная схема подпорной стены

Предлагаемую методику расчета можно рассмотреть на примере. Определим перемещения и напряжения в подпорной стене кругового очертания с нагрузкой и размерами, показанными на рис. 2.

По матрицам жесткости конечных элементов конструируется матрица жесткости всего сооружения в целом. Матрица жесткости сооружения приведена в табл.1 и 2.

Таблица 1. Матрица жесткости арочной подпорной стены в общем виде
(прямоугольные конечные элементы)

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 & k_{14}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 & k_{24}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 + k_{33}^2 & k_{34}^1 + k_{34}^2 & k_{35}^2 & k_{36}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{41}^1 & k_{42}^1 & k_{43}^1 + k_{43}^2 & k_{44}^1 + k_{44}^2 & k_{45}^2 & k_{46}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{53}^2 & k_{54}^2 & k_{55}^2 + k_{55}^3 & k_{56}^2 + k_{56}^3 & k_{57}^3 & k_{58}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{63}^2 & k_{64}^2 & k_{65}^2 + k_{65}^3 & k_{66}^2 + k_{66}^3 & k_{67}^3 & k_{68}^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{75}^3 & k_{76}^3 & k_{77}^3 + k_{77}^4 & k_{78}^3 + k_{78}^4 & k_{79}^4 & k_{810}^4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{85}^3 & k_{86}^3 & k_{87}^3 + k_{87}^4 & k_{88}^3 + k_{88}^4 & k_{89}^4 & k_{810}^4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{97}^4 & k_{98}^4 & k_{99}^4 + k_{99}^5 & k_{910}^4 + k_{910}^5 & k_{911}^5 & k_{912}^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{107}^4 & k_{108}^4 & k_{109}^4 + k_{109}^5 & k_{1010}^4 + k_{1010}^5 & k_{1011}^5 & k_{1012}^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{119}^5 & k_{1110}^5 & k_{1111}^5 + k_{1111}^6 & k_{1112}^5 + k_{1112}^6 & k_{1113}^6 & k_{1114}^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{129}^5 & k_{1210}^5 & k_{1211}^5 + k_{1211}^6 & k_{1212}^5 + k_{1212}^6 & k_{1213}^6 & k_{1214}^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{1311}^6 & k_{1312}^6 & k_{1313}^6 & k_{1314}^6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{1411}^6 & k_{1412}^6 & k_{1413}^6 & k_{1414}^6 \end{bmatrix}$$

Таблица 2. Матрица жесткости сооружения в цифровом виде

$$K = \frac{Eh10^{-2}}{(1-\mu^2)}$$

9,51	6,5	-8,54	23,27	-22,02	-15,36	-13,42	-10,59												
	88,26	23,04	-37,92	-3,48	-0,85	-10,59	-32,21												
		88,26	-6,49	-32,27	10,59	-22,02	-3,98											Нули	
			97,51	10,59	-13,42	-15,36	-0,85												
				102,3	4,04	1,98	9,01	-26,42	-6,13	-23,58	-14,63								
					83,46	9,23	-48,44	6,13	2,83	-14,63	-23,58								
						83,46	-4,04	-23,58	14,63	-26,42	6,13								
							102,3	14,63	-23,58	-6,13	2,83								
								94,34	0	5,66	0	-26,42	-6,13	-23,58	-14,63				
									94,34	0	-52,84	6,13	2,83	-14,63	-23,58				
										94,34	0	-23,58	14,63	-26,42	6,13				
											94,34	14,63	-23,58	-6,13	2,83				
												102,3	-4,04	1,98	-9,61	-22,03	3,48	-32,29	-10,59
													83,46	-9,23	-48,44	15,32	-0,83	-10,59	-13,42
														83,46	-4,04	-43,49	10,59	-22,03	15,36
															102,3	10,59	-32,27	3,48	-0,84
																97,51	-6,49	-8,54	-23,28
																	88,26	-23,64	-37,92
																		88,26	6,49
																			97,51

Решая систему уравнений (1) $\vec{F} = k \vec{u}$ находим вектор перемещений:

$$\vec{u} = k^{-1} \vec{F};$$

$$\begin{bmatrix} \vec{u} \end{bmatrix}' = [u_{13} u_{23} u_{14} u_{24} u_{15} u_{25} u_{16} u_{26} u_{17} u_{27} u_{18} u_{28} u_{19} u_{29} u_{110} u_{210} u_{111} u_{211} u_{112} u_{212}] =$$

$$= [1,56; 7,62; -3,64; 3,67; 0,89; 14,54; -4,41; 12,66; 0; 17,51; 0; 17,16; 0,89; 14,53; 4,42; 12,65; -1,55; 7,60; 3,64; 3,66]$$

По найденным из разрешающейся системы уравнений значениям перемещений определяем напряженное состояние каждого конечного элемента [3]:

$$[\sigma^r] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y-1); \nu(x-1); -(y-1); -\nu x; y; \nu x; -y; -\nu(x-1) \\ \nu(y-1); (x-1); -\nu(y-1); -x; \nu y; x; -\nu y; -(x-1) \\ \frac{1-\nu}{2}[(x-1); (y-1); -x; -(y-1); x; y; -(x-1); -y] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{u}^r \end{bmatrix} = \quad (2)$$

$$= \frac{E}{(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} (y-1) & 0,17(x-1) & -(y-1) & -0,17x & y & 0,17x & -y & -0,17(x-1) \\ 0,17(y-1) & (x-1) & -0,17(y-1) & -x & 0,17y & x & -0,17y & -(x-1) \\ 0,42(x-1) & 0,42(y-1) & -0,42x & -0,42(y-1) & 0,42x & 0,42y & -0,42(x-1) & -0,42y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{u}^r \end{bmatrix}$$

где x и y – координаты точек в области конечного элемента; ν – коэффициент Пуассона.

Например, для первого элемента точки 3 при $x=1$, $y=0$ (рис. 3) напряжения определяются в такой последовательности:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & -0,17 & 0 & 0,17 & 0 & 0 \\ -0,17 & 0 & 0,17 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,42 & 0,42 & 0,42 & 0,42 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -3,32 \\ 7,04 \\ -5,11 \\ 0,766 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,32 & -1,20 & 0,13 \\ 0,56 & -7,04 & 0,76 \\ 1,39 & 2,96 & -2,15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4,39 \\ -5,75 \\ 2,20 \end{bmatrix}$$

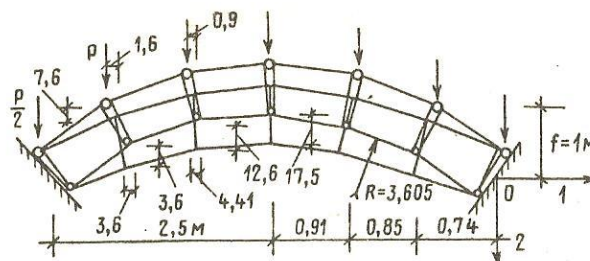


Рис. 3. Расчетная схема арочной подпорной стены с четырехугольными элементами и схемы деформации (прогиб)

Окончательные расчетные данные одного ряда сооружения, рассматриваемого как бесшарнирной арки, приведены на рис. 4.

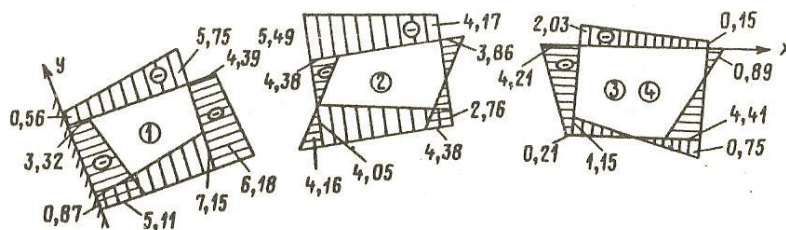


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений σ_x и σ_y

Литература

1. Байнатов Ж.Б., Кузютин А.Д. Конструкция селезащитного сооружения арочного типа и методика ее расчета // Сб.: Научно-технический прогресс в строительстве и пути его ускорения в новых условиях хозяйствования. - Алматы: КазПТИ, 1990.
2. Варвак П.М., Бузун И.М., Городецкий А.С. и др. Метод конечных элементов. - Киев: Вища школа, 1981. - 176 с.
3. Байнатов Ж.Б. Конструкции селезащитных сооружений и методы их расчета. - Алматы: КазНИИНТИ, 1991, 159 стр.