

Влияние строительных швов и трещин на напряженно-деформированное состояние арочно-гравитационной плотины

К.т.н., доцент Г.С. Колосова;*

д.т.н., профессор В.В. Лалин,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;

инженер А.В. Колосова,

ОАО «Ленгидропроект»

Ключевые слова: плотина ГЭС; строительные швы; односторонние связи; расчетный комплекс SOFiSTiK; конечно-элементная модель; перемещения и напряжения в точках плотины.

В процессе возведения и эксплуатации массивных бетонных сооружений происходят разнообразные нарушения непрерывности их материала: образуются трещины, раскрываются и закрываются строительные и иные швы. Эти нарушения сплошности материала оказывают большое влияние на перемещения и усилия в точках сооружения. В расчетных схемах сооружений трещины и швы обычно моделируются односторонними связями [1, 2]. Типичными примерами систем с односторонними связями служат конструкции, свободно опертые на некоторую поверхность, которая запрещает перемещение в сторону этой поверхности и не препятствует перемещению в противоположном направлении. Односторонняя связь может находиться в одном из двух состояний [3]:

- рабочем, связь включена, тогда реакция связи $R > 0$, перемещение $U = 0$;
- нерабочем, связь выключена, тогда $R = 0$, $U > 0$.

Тот факт, что при изменении нагрузки те или иные связи включаются или выключаются, делает возможным лишь частичное приложение законов линейной механики. К такой системе неприменим закон независимости действия сил, могут быть нарушены теоремы о взаимности работ или перемещений. В данной работе рассматриваются системы с идеальными связями без трения, у которых единственным источником нелинейности является наличие односторонних связей. Системы такого типа часто называют конструктивно-нелинейными [3, 4]. Для них характерно полностью обратимое упругое поведение, которое определяется единственным решением задачи.

Основная трудность расчета систем с односторонними связями состоит в том, чтобы отыскать среди возможных систем действительную систему, отвечающую заданной нагрузке. Критерии правильности нахождения действительной системы, введенные Дж. Геллером [5], состоят в следующем:

- усилия во всех односторонних связях, определенные из уравнений упругости, должны быть неотрицательными;
- зазоры по направлению односторонних связей должны быть положительными.

Реакции R , возникающие в односторонних связях, считаются положительными, если они соответствуют природе связи: сжатие положительно в связи-упоре, выключающейся при растяжении; растяжение положительно в связи, выключающейся при сжатии. Кроме того, те перемещения U , которые не ограничиваются односторонней связью, считаются положительными.

Актуальность исследования систем с односторонними связями обусловлена необходимостью:

- повышения надежности и эффективности расчетных схем сооружений, которые должны отражать любое сложное поведение объекта;
- совершенствования методов расчета при решении задач контактного деформирования в процессе изучения прочности конструкций;
- развития опыта использования современных программных комплексов для решения задач с односторонними связями.

Вместе с тем следует отметить, что понятие идеальной односторонней связи является математической абстракцией, и использование таких связей для моделирования швов и трещин в реальных сооружениях должно быть обосновано.

Целями данной работы являются:

- обоснование возможности использования односторонних связей для моделирования швов и трещин в сооружениях;
- исследование влияния на напряженно-деформируемое состояние арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС строительных швов и трещин по контакту «плотина – основание – береговые примыкания», которые моделируются односторонними связями. Для решения задачи применяется программно-вычислительный комплекс SOFiSTiK.

Постановка задачи теории упругости с идеальными односторонними связями. Задача Синьорини

Рассмотрим тело, подчиняющееся линейным соотношениям теории упругости [6]. Тело имеет объем V . На части S_1 поверхности тела заданы нагрузки, определяемые вектором

$$g_s = \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix}, \text{ где } X_n, Y_n, Z_n - \text{ составляющие поверхностной нагрузки по осям координат.}$$

На части S_2 поверхности тела заданы перемещения, определяемые вектором $u_s = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix}$,

где u_0, v_0, w_0 – компоненты перемещений по осям координат. Соотношения теории упругости для тела имеют вид:

$$\begin{aligned} A^T \sigma + \rho &= 0 \in V, \\ \sigma &= D Au \in V, \\ A_s^T \sigma &= g_s \in S_1, \\ u &= u_s \in S_2. \end{aligned}$$

Здесь A – матрица операций дифференцирования; ρ – вектор объемных сил; σ – вектор напряжений; A_s – матрица направляющих косинусов внешней нормали; D – матрица упругости; u – вектор перемещений:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \rho = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}, A_s = \begin{bmatrix} \cos(n, x) & 0 & 0 \\ 0 & \cos(n, y) & 0 \\ 0 & 0 & \cos(n, z) \\ \cos(n, y) & \cos(n, x) & 0 \\ 0 & \cos(n, z) & \cos(n, y) \\ \cos(n, z) & 0 & \cos(n, x) \end{bmatrix},$$

Колосова Г.С., Лалин В.В., Колосова А.В. Влияние строительных швов и трещин на напряженно-деформированное состояние арочно-гравитационной плотины

$$D = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix}.$$

Здесь λ, μ – коэффициенты Ламе [6].

Пусть в теле имеется разрез, образованный поверхностями Ω^+, Ω^- (рис. 1). Будем считать, что начальный зазор разреза, соизмеримый с перемещениями точек упругого тела, мало меняется по координатам, т. е. поверхности Ω^+, Ω^- почти параллельны. Обозначим ширину начального зазора по нормали к поверхности Ω^+ или Ω^- через Δ_n (рис. 1).

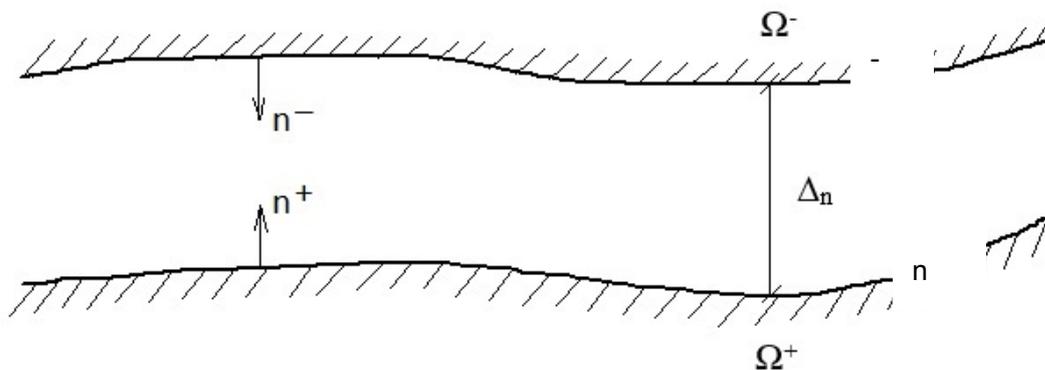


Рисунок 1. Модель разреза в упругом теле

Обратимся к условиям на разрезе. Пусть поверхности разреза Ω^+, Ω^- являются идеально гладкими. Условия на Ω^+, Ω^- для перемещений точек разреза определяются тем, что взаимные перемещения соответствующих точек поверхностей Ω^+, Ω^- в направлениях нормалей n^+, n^- не могут быть больше начальной ширины зазора по нормали Δ_n :

$$(n^+)^T u^+ + (n^-)^T u^- = (n)^T (u^+ - u^-) \leq \Delta_n. \quad (1)$$

Здесь n^+, n^- – векторы направляющих косинусов внешних нормалей к поверхностям Ω^+, Ω^- ; $n = n^+ = -n^-$.

Перейдем к условиям на разрезе для напряжений. Отсутствие взаимодействия между поверхностями Ω^+, Ω^- по направлениям касательных ортов не накладывает ограничений на касательные составляющие перемещений. Идеальная гладкость поверхностей Ω^+, Ω^- позволяет заключить, что касательные напряжения на этих поверхностях равны нулю:

$$(\tau_1)^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm = 0, \quad (\tau_2)^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm = 0. \quad (2)$$

Здесь τ_1, τ_2 – векторы направляющих косинусов двух касательных к поверхностям Ω^+, Ω^- . Усилия, направленные по нормальям на поверхностях Ω^+, Ω^- , либо равны нулю, если поверхности не взаимодействуют, либо равны между собой и противоположно направлены, то есть:

$$n^T (A_\Omega)^T \sigma^+ = n^T (A_\Omega)^T \sigma^- . \tag{3}$$

Поверхность разреза $\Omega = \Omega^+$ можно считать состоящей из Ω_1, Ω_2 . Пусть на Ω_1 берега разреза сомкнулись, тогда нормальные напряжения либо меньше нуля (сжатие), либо равны нулю (предельное состояние контакта), т. е. если

$$n^T (u^+ - u^-) = \Delta_n, \text{ то } n^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm \leq 0 . \tag{4}$$

Будем считать, что на Ω_2 берега разреза Ω^+, Ω^- не находятся в контакте и, следовательно, нормальные напряжения равны нулю, т. е. если

$$n^T (u^+ - u^-) < \Delta_n, \text{ то } n^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm = 0 . \tag{5}$$

Поверхности Ω_1, Ω_2 заранее не известны и могут быть определены только в процессе решения задачи. Это делает рассматриваемую задачу с односторонними идеальными (без взаимодействия по касательным к поверхностям разреза) связями нелинейной. На основании (4) и (5) можно записать:

$$\left[n^T (u^+ - u^-) - \Delta_n \right] \cdot n^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm = 0 . \tag{6}$$

Равенство (6) выполняется для всей поверхности $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$. Указанные соотношения позволяют сформулировать следующую математическую постановку задачи для упругого тела, имеющего разрез вдоль поверхности $\Omega = \Omega^+$ с начальной шириной зазора по нормали Δ_n , на котором может осуществляться односторонняя связь между идеально гладкими поверхностями Ω^+ и Ω^- :

$$\left. \begin{aligned} (A)^T \sigma + \rho &= 0 \\ \sigma &= D Au \end{aligned} \right\} \in V , \tag{7}$$

$$(A_S)^T \sigma = g_S, \in S_1$$

$$u = u_S, \in S_2 .$$

$$\left. \begin{aligned} n^T (u^+ - u^-) &\leq \Delta_n, \\ (\tau_{1,2})^T (A_\Omega)^T \sigma &= 0, \\ (A_\Omega)^T \sigma^+ &= (A_\Omega)^T \sigma^-, \\ \text{если } n^T (u^+ - u^-) &= \Delta_n, \text{ то } n^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm \leq 0, \\ \text{если } n^T (u^+ - u^-) &< \Delta_n, \text{ то } n^T (A_\Omega)^T \sigma^\pm = 0 \end{aligned} \right\} \in \Omega \tag{8}$$

Третье условие в зависимостях (8) следует из равенств (2) и (3).

Краевая задача, определяемая выражениями (7) и (8), есть полная система условий, описывающих поведение упругой системы с идеальными односторонними связями. Задача была впервые сформулирована А. Синьорини [7].

В настоящее время поставленная задача решается методом конечных элементов [8–18]. Методика реализации МКЭ для систем с односторонними связями представлена в работах [1, 4, 19, 20]. Она реализована в таких программных комплексах, как SCAD и SOFiSTiK, где созданы специальные конечные элементы, моделирующие односторонние связи.

В данной работе расчеты трехмерной системы, содержащей односторонние связи, выполнялись с использованием конечно-элементного программного комплекса SOFiSTiK с применением шагового метода, идея которого основана на исследовании поведения системы при относительно малых приращениях нагрузки [21]. При этом на каждом шаге решалась линеаризованная система разрешающих уравнений для текущего приращения вектора узловых нагрузок. Шаг по нагрузке принимался постоянным.

Конечно-элементная модель плотины Саяно-Шушенской ГЭС с блоком вмещающих скальных пород и береговых примыканий

Для исследования влияния на напряженно-деформируемое состояние арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС строительных швов и трещин по контакту «плотина – основание – береговые примыкания», моделируемых односторонними связями, была создана расчетная конечно-элементная модель в программно-вычислительном комплексе SOFiSTiK. Модель трехмерной системы, включающей плотину, основание и береговые примыкания, была разработана на кафедре «Строительная механика и теория упругости» СПбГПУ [22, 23, 24].

При разработке конечно-элементной модели ставилась задача обеспечения возможности доработок, уточнения и перестройки отдельных ее частей. Поэтому границы конечных элементов совпадают с естественными границами – каждая группа конечных элементов представляет одну секцию плотины [22, 23].

Изначально в препроцессоре были заданы структурные линии, плоскости и объемы, по которым затем программой была построена окончательная геометрия конечно-элементной модели.

Было принято решение, что настоящая модель не должна отображать напряженно-деформированное состояние отдельных сравнительно мелких элементов плотины, а должна воспроизводить работу совместной системы «плотина – основание» и позволить исследовать наиболее характерные состояния плотины.

В связи с этим в расчетной схеме не учитывались сравнительно мелкие элементы конструкции плотины: галереи, бычки водосбросов, турбинные водоводы, водоприемные отверстия на станционной и водосбросной частях плотины. Это привело бы к значительному увеличению размерности задачи из-за необходимости сгущения сетки конечных элементов.

Построение конечно-элементной модели произведено с использованием объемных 8-узловых конечных элементов (рис. 2). В программном комплексе конечно-элементного анализа SOFiSTiK они классифицированы как пространственные Bric-элементы:

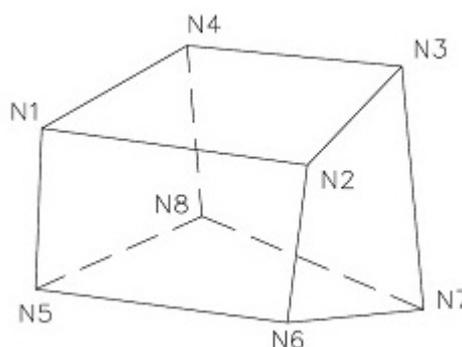


Рисунок 2. Пространственный 8-узловый конечный элемент программно-вычислительного комплекса SOFiSTiK

Назначение разработанной модели – отражать изменения напряженно-деформированного состояния сооружения под воздействием тех нагрузок и температурных перепадов, которые складываются в ходе ежегодно повторяющегося цикла наполнения и сработки водохранилища. В связи с этим было решено рассматривать плотину совместно с основанием как монолитное упругое тело, кроме областей трещин по контактному и строительному швам.

Конечно-элементная модель плотины построена с учетом задания зон неоднородности бетона и скального массива, а также зон установления односторонних связей [22, 23].

По ширине гребня плотины расположены четыре конечных элемента. Столбов в каждом поперечном сечении русловой секции также четыре. Каждый столб разбит на четыре конечных элемента. Колосова Г.С., Лалин В.В., Колосова А.В. Влияние строительных швов и трещин на напряженно-деформированное состояние арочно-гравитационной плотины

элемента. Таким образом, по подошве русловых секций имеется шестнадцать элементов. Вид модели сверху показан на рисунке 3.

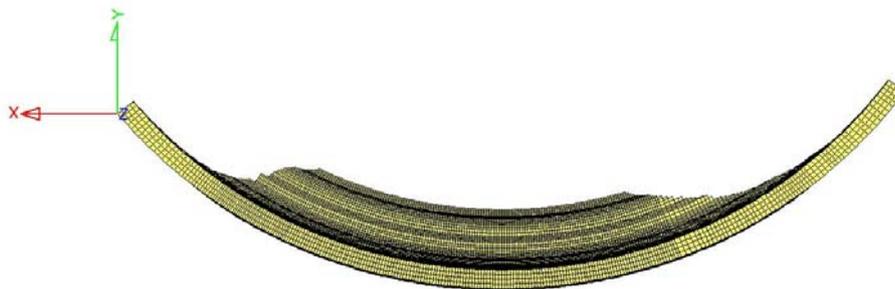


Рисунок 3. Вид сверху конечно-элементной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Контакт скалы и плотины в береговых упорах задавался на основании исходных данных, предоставленных ОАО «Ленгидропроект» [25].

Общее число элементов в модели плотины составляет 92938. Общее число узлов – 109928.

Конечно-элементная модель плотины со стороны напорной грани изображена на рисунке 4.

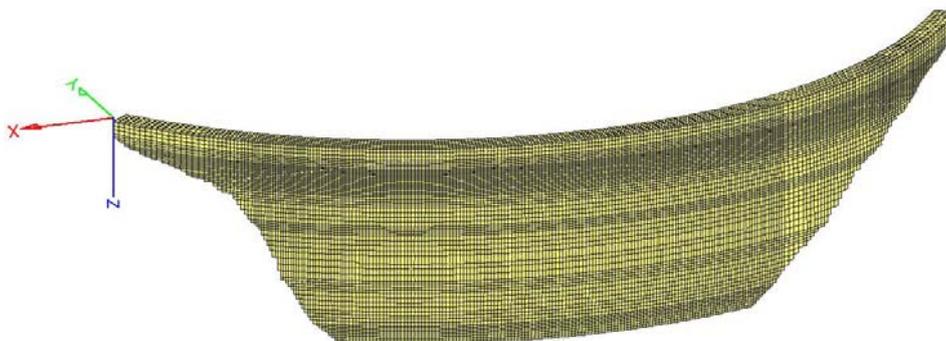


Рисунок 4. Вид конечно-элементной модели плотины со стороны напорной грани

Для учета совместной работы системы «плотина – основание» согласно предоставленным исходным данным в расчетную схему плотины включено скальное основание размерами 1500 м вдоль русла, 1800 м поперек русла и 200 м под плотиной. Дневная поверхность склонов каньона строилась на основе цифровой модели местности, имеющейся в группе геодезических измерений Саяно-Шушенской ГЭС [25].

Основание и береговые примыкания сложены массивом скальных пород, для которого характерна зональность распределения физико-механических свойств. На основании исходных данных, предоставленных ОАО «Ленгидропроект» [25, 26], в скальном массиве выделены 84 зоны. На границах параллелепипеда (массива скальных грунтов) заданы кинематические граничные условия – нулевые перемещения по нормали к границе.

Полная конечно-элементная модель системы «плотина – основание – береговые примыкания» содержит 260904 объемных конечных элемента и 292722 узла. Она представлена на рисунке 5.

В построенной расчетной модели строительный (отметка 355 м) и контактный (отметка 308 м) швы заданы с помощью двойной нумерации узлов в швах и установлением между узлами односторонних связей, которые включаются в работу при сжатии и выключаются при достижении критического растягивающего усилия. Эти связи моделируются специальными конечными элементами, имеющимися в комплексе SOFiSTiK.

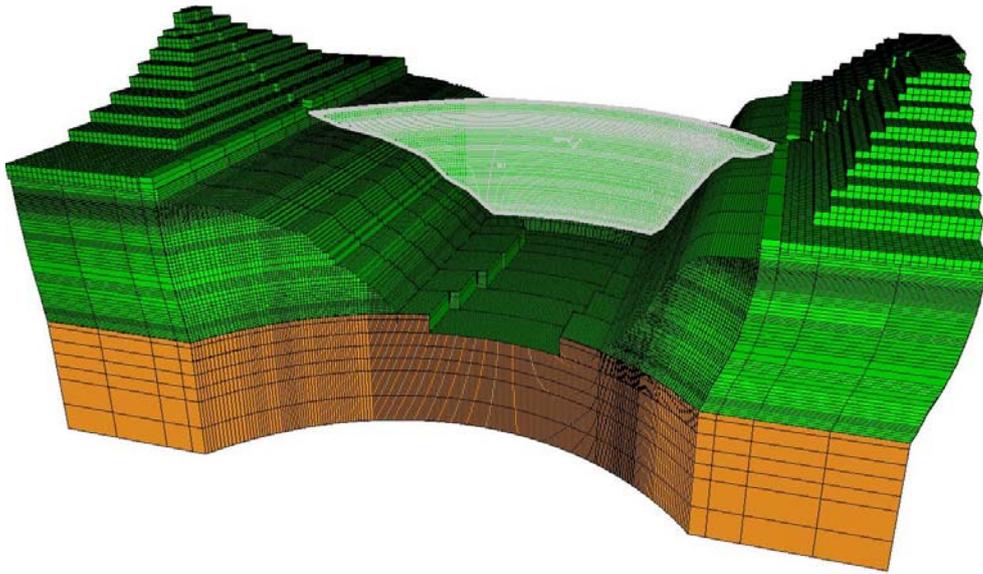


Рисунок 5. Конечно-элементная модель системы «плотина – основание – береговые примыкания»

Коэффициент жесткости односторонних связей принимался равным 10^9 кН/м. Установленные односторонние связи в конечно-элементной модели показаны на рисунках 6 и 7.

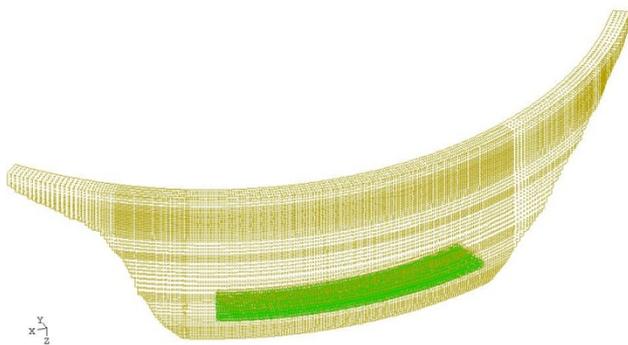


Рисунок 6. Расположение односторонних связей в строительном шве. Вид со стороны напорной грани

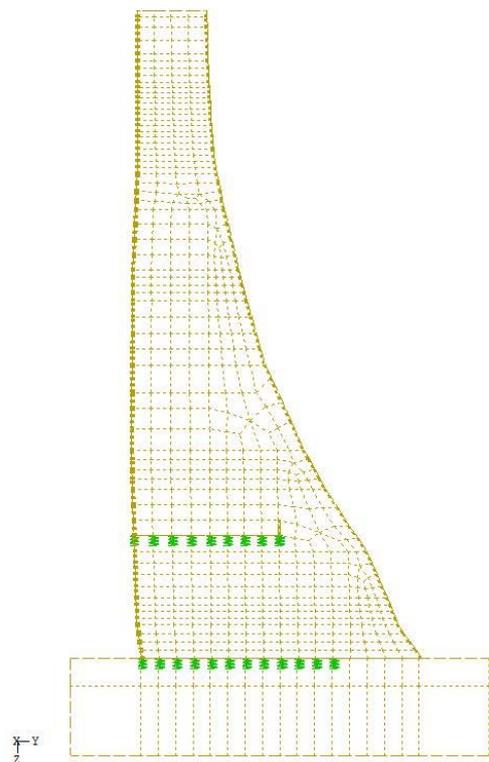


Рисунок 7. Расположение односторонних связей в контактном и строительном швах. Русловая секция

С помощью специальной функции было определено значение растягивающей силы, достижение которой приводит к выключению односторонних связей из работы системы. Значения критического усилия установлены на основании исходных данных ОАО «Ленгидропроект» [25, 26]: для строительного шва – 0,5 МПа, для контакта бетон–скала – 0,2 МПа.

Расчет на гидростатическую нагрузку плотины со строительным и контактными швами

Были выполнены расчеты плотины с трещинами и без них в рамках трехмерной модели от гидростатической нагрузки при изменении уровня верхнего бьефа с 500 м до 540 м.

Фильтрационное давление на подошву плотины принималось изменяющимся по треугольнику до начала раскрытия контактного шва и по прямоугольнику на площадке раскрытия шва. Фильтрационное давление учитывалось также в строительном шве: по прямоугольнику, пока раскрытие не достигало линии дренажа, и по треугольнику после прохождения этой линии.

Для оценки правильности работы построенной конечно-элементной модели сравнивались полученные по расчету радиальные перемещения по гребню плотины с натурными наблюдениями. Графики перемещений приведены на рисунке 8 [23].

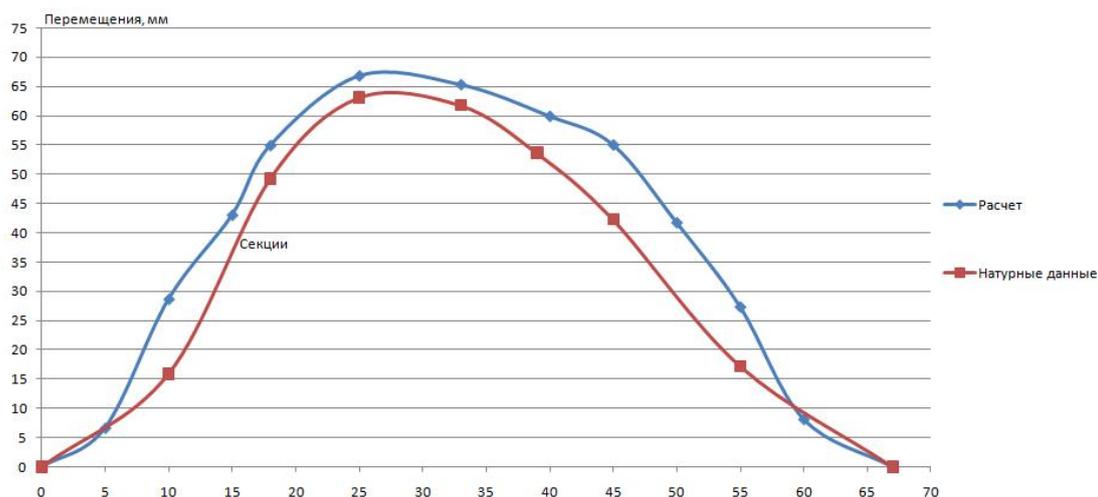


Рисунок 8. Радиальные перемещения по гребню плотины

Из анализа графиков видно, что получено удовлетворительное совпадение расчетных величин и натуральных данных. Таким образом, можно считать, что принятая расчетная конечно-элементная модель плотины позволяет получать результаты, близкие к действительным.

В расчетах учитывалось возможное раскрытие строительного (отметка 355 м) и контактного (отметка 308 м) швов. Анализ полученных результатов расчетов показывает удовлетворительное согласование с натурными данными. Максимальная глубина распространения контактного шва при уровне верхнего бьефа 540 м составляет: по расчету – 39 м; по данным наблюдений – 37,2 м. Максимальная величина раскрытия контактного шва при уровне верхнего бьефа 540 м составляет: по расчету – 21 мм; по данным наблюдений – 23 мм. Аналогичная картина наблюдается для параметров раскрытия строительного шва, что в целом указывает на правильность задания в швах плотины нелинейных односторонних связей, выключающихся из работы при достижении критической растягивающей силы.

В плотине были определены арочные и консольные напряжения [23]. Результаты расчетов показали, что при учете работы трещин напряженное состояние системы существенно меняется.

Сравнение расчетных арочных и консольных напряжений в плотине с трещинами и без трещин по верховой и низовой граням центральной секции 33 приведено на рисунках 9–12.

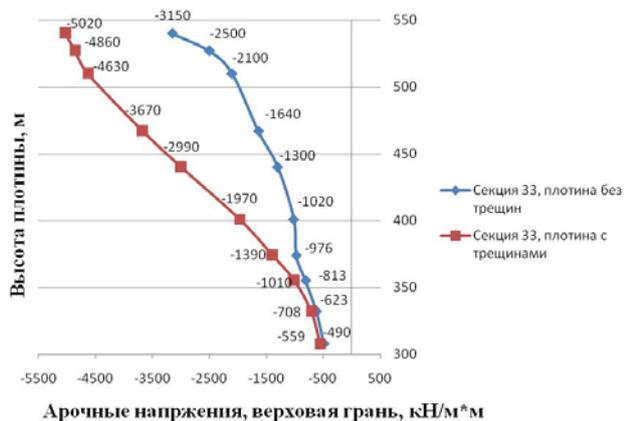


Рисунок 9. Арочные напряжения (кПа), верхняя грань

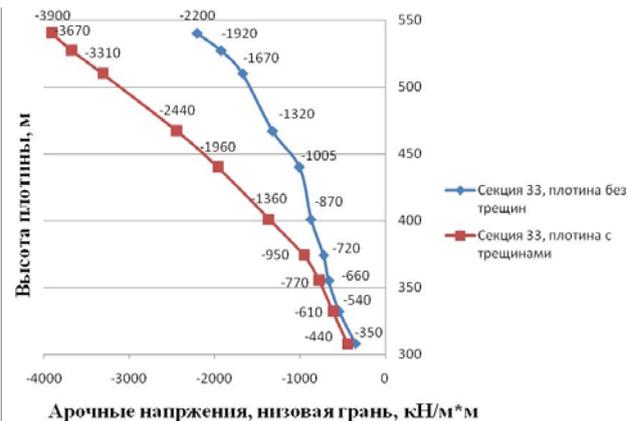


Рисунок 10. Арочные напряжения (кПа), нижняя грань

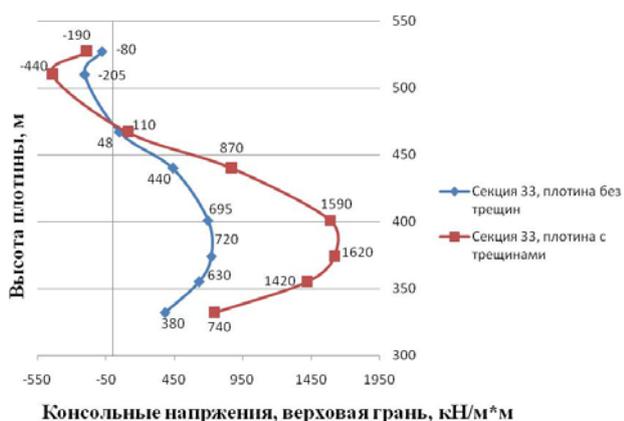


Рисунок 11. Консольные напряжения (кПа), верхняя грань

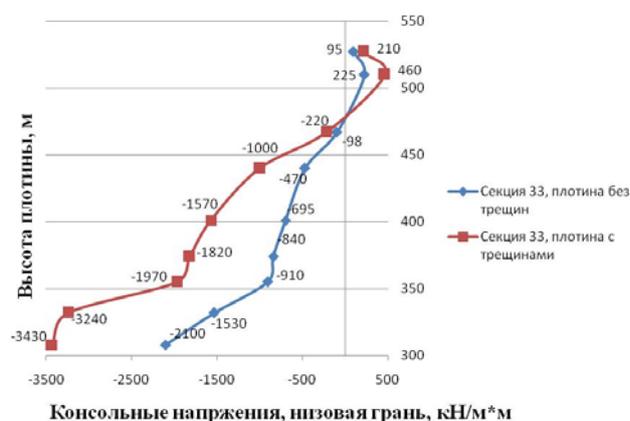


Рисунок 12. Консольные напряжения (кПа), нижняя грань

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- обоснована возможность моделирования швов и трещин в сооружениях с помощью идеальных односторонних связей;
- построенная на кафедре СМиТУ СПбГПУ трехмерная модель плотины Саяно-Шушенской ГЭС, включающая односторонние связи по строительному и контактному швам, верно отражает поведение системы;
- выполненные в программно-вычислительном комплексе SOFiStiK расчеты пространственной системы «плотина – основание – береговые примыкания», где трещины и швы моделируются односторонними связями, дают результаты, близкие к натурным наблюдениям;
- представленные вычисления показывают, что учет работы трещин в теле плотины приводит к существенному увеличению напряжений по сравнению со схемой без трещин. При этом напряжения не превышают установленных предельных значений.

Литература

1. Вовкушевский А.В., Шойхет Б.А. Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов. М.: Энергия, 1981. 136 с.
2. Толстиков В.В. Моделирование работы швов и трещин в расчетах напряженно-деформированного состояния бетонных плотин // Вестник МГСУ. 2006. №2. С. 123–132.
3. Рабинович И.М. Вопросы теории статического расчета сооружений с односторонними связями. М.: Стройиздат, 1975. 370 с.

Колосова Г.С., Лалин В.В., Колосова А.В. Влияние строительных швов и трещин на напряженно-деформированное состояние арочно-гравитационной плотины

4. Люминарский И.Е. Расчет упругих систем с односторонними связями. М.: Изд-во МГИУ, 2006. 307 с.
5. Geller J.M. Beitrag zur theorie veranderlich gegliederten und gestutiten // Systeme. Der.Eisenbau. 1922. No.8, 9. Pp. 37–46.
6. Розин Л.А. Вариационные постановки задач для упругих систем. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1978. 223 с.
7. Signorini A. Questioni di elasticità non linearizzata e semilinearizzata // Rend. Di Matem. E. delle sue appl. 1959. No.18. Pp.1–45.
8. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. 247 с.
9. Babu Gunda J., Gandule R. New rational interpolation functions for finite element analysis of rotating beams // International Journal of Mechanical Sciences. 2008. Vol. 50. No.3. Pp. 578–588.
10. Burman E., Linke A. Stabilized finite element schemes for incompressible flow using Scott Vogelius elements // Applied Numerical Mathematics. 2008. Vol. 58. No.11. Pp. 1704–1709.
11. Lindner M. The finite section method and stable subsequences // Applied Numerical Mathematics. 2010. Vol. 60. No.4. Pp. 501–512.
12. Milind T.R., Date P.P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // International Journal of Mechanical Sciences. 2012. Vol. 56. No.1. Pp. 26–34.
13. Tarar W., Scott-Emuakpor O. Herman Shen M.-H. Development of new finite elements for fatigue life prediction in structural components // Structural engineering and mechanics. 2010. Vol. 35. No.6. Pp. 659–676.
14. Бате К.Ю. Методы конечных элементов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 1022 с.
15. Ермакова А.В. Взаимосвязь метода дополнительных конечных элементов и других численных методов расчета конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. №5. С. 28–33.
16. Покровский А.А. Об описании НДС конечного элемента среды // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. №3. С. 55.
17. Покровский А.А. О методе перемещений в МКЭ с отделением смещений твердого тела // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №4. С. 2–4.
18. Трушин С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. 256 с.
19. Розин Л.А., Лукашевич А.А. Решение задач с односторонними связями при динамических воздействиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. №3(84). С. 195–199.
20. Розин Л.А., Лукашевич А.А. Численное решение контактных задач с трением при динамических воздействиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №4(110). С. 288–294.
21. Лукашевич А.А. Численное решение динамических односторонних контактных задач методом пошагового моделирования // Известия вузов. Строительство. 2010. №1. С. 3–10.
22. Лалин В.В., Беляев Д.И., Зданчук Е.В., Савченко А.В., Яваров А.В. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины // СтройМеталл. 2011. №3(22). С. 29–31.
23. Лалин В.В., Елистратов В.В. Отчет по договору № 200103904 «Численное исследование несущей способности системы «плотина – основание» Саяно-Шушенской ГЭС имени П.С. Непорожного с использованием расчетных данных о состоянии контакта между бетоном и скалой» / ГОУ СПбГПУ. СПб., 2010. 302 с.
24. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 600 с.
25. Саяно-Шушенская ГЭС на р. Енисей. Сводная расчетная записка арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС / АО «ЛЕНГИДРОПРОЕКТ». СПб., 2000. 85 с.
26. Технический отчет «О состоянии гидротехнических сооружений и основания Саяно-Шушенской ГЭС в 2001 году» / Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного, Черемушки, 2002. 112 с.

**Галина Сергеевна Колосова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(921)5661321; эл. почта: gala.kolosova2013@yandex.ru

© Колосова Г.С., Лалин В.В., Колосова А.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.40.9

The effect of construction joints and cracks on the stress-strain state of the arch-gravity dam

G.S. Kolosova,**V.V. Lalin,***Saint Petersburg State Polytechnical University, Saint Petersburg, Russia***A.V. Kolosova,***JSC "Lenhydroproject", Saint Petersburg, Russia**+7(921)566-13-21; e-mail: gala.kolosova2013@yandex.ru*

Key words

hydroelectric dam; construction joints; unilateral constraint; software package SOFiSTiK; finite element model; displacement and stress at the points of the dam

Abstract

The aim of the paper was to review the stress-strain state of an arch-gravity dam of the Sayano-Shushenskaya HPP, which has construction and contact joints. The problem is solved by finite element method using software package SOFiSTiK.

The finite element model of the "dam – foundation – abutments" created at the department "Structural mechanics and theory of elasticity" of SPbSPU is described. Three-dimensional 8-nodal finite elements were used. Joints in the dam body were modeled by unilateral constraints. The schemes of unilateral constraints location in contact and construction joints are presented. To assess the correctness of the finite element model operation the calculated radial movements at the crest of the dam was compared with the field data. Satisfactory agreement of values confirms the correctness of modeling system behavior by the design scheme.

According to the calculation results from the action of the hydraulic load we can conclude that account of the disclosure joints leads to a significant increase in the calculated stresses in the dam body.

References

1. Vovkushevskiy A.V., Shoykhet B.A. *Raschet massivnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s uchetom raskrytiya shvov* [Calculation of massive hydraulic structure with joint opening]. Moscow: Energiya, 1981. 136 p. (rus)
2. Tolstikov V.V. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2006. No.2. Pp. 123–132. (rus)
3. Rabinovich I.M. *Voprosy teorii staticheskogo rascheta sooruzheniy s odnostoronnimi svyaziyami* [Problems in the theory of static calculation of structures with one-way communications]. Moscow: Stroyizdat, 1975. 370 p. (rus)
4. Liuminarskiy I.E. *Raschet uprugikh sistem s odnostoronnimi svyaziyami* [Calculation of elastic systems with one-way communications]. Moscow: Izd-vo MGIU, 2006. 307 p. (rus)
5. Geller J.M. Beitrag zur theorie veranderlich gegliederten und gestutiten. *Systeme. Der.Eisenbau*. 1922. No.8, 9. Pp. 37–46.
6. Rozin L.A. *Variatsionnyye postanovki zadach dlya uprugikh sistem* [Variational statement of problem for elastic system]. Leningrad: Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1978. 223 p. (rus)
7. Signorini A. Questioni di elasticità non linearizzata e semilinearizzata. *Rend.Di Matem. E. delle sue appl.* 1959. No. 18. Pp.1–45.
8. Agapov V.P. *Metod konechnykh elementov v statike, dinamike i ustoychivosti konstruksiy* [Finite elements method in statics, dynamics and structural stability]. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2004. 247 p. (rus)
9. Babu Gunda J., Gandule R. New rational interpolation functions for finite element analysis of rotating beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008. Vol. 50. No.3. Pp. 578–588.
10. Burman E., Linke A. Stabilized finite element schemes for incompressible flow using Scott Vogelius elements. *Applied Numerical Mathematics*. 2008. Vol. 58. No.11. Pp. 1704–1709.

Kolosova G.S., Lalin V.V., Kolosova A.V. The effect of construction joints and cracks on the stress-strain state of the arch-gravity dam

11. Lindner M. The finite section method and stable subsequences. *Applied Numerical Mathematics*. 2010. Vol. 60. No.4. Pp. 501–512.
12. Milind T.R., Date P.P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012. Vol. 56. No.1. Pp. 26–34.
13. Tarar W., Scott-Emuakpor O. Herman Shen M.-H. Development of new finite elements for fatigue life prediction in structural components. *Structural engineering and mechanics*. 2010. Vol. 35. No.6. Pp. 659–676.
14. Bate K.Iu. *Metody konechnykh elementov* [Finite elements method]. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 1022 s. (rus)
15. Ermakova A.V. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2012. No.5. Pp. 28–33. (rus)
16. Pokrovskiy A.A. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2009. No.3. P. 55. (rus)
17. Pokrovskiy A.A. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2011. No.4. Pp. 2–4. (rus)
18. Trushin S.I. *Metod konechnykh elementov. Teoriya i zadachi* [Finite elements method. Theory and problems]. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2008. 256 p. (rus)
19. Rozin L.A., Lukashevich A.A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2009. No.3(84). Pp. 195–199. (rus)
20. Rozin L.A., Lukashevich A.A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2010. No.4(110). Pp. 288–294. (rus)
21. Lukashevich A.A. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010. No.1. Pp. 3–10. (rus)
22. Lalin V.V., Belyaev D.I., Zdanchuk E.V., Savchenko A.V., Yavarov A.V. *StroyMetall*. 2011. No.3(22). Pp. 29–31. (rus)
23. Lalin V.V., Elistratov V.V. *Otchet po dogovoru № 200103904 «Chislennoye issledovaniye nesushchey sposobnosti sistemy «plotina – osnovaniye» Sayano-Shushenskoy GES imeni P.S. Neporozhnogo s ispolzovaniyem raschetnykh dannykh o sostoyanii kontakta mezhdru betonom i skaloy»* [Report on the contract 200103904 “Numerical investigation bearing capacity of the system “dam – foundation” P.S. Neporozhny Sayano-Shushenskaya HPP using design value about the state of contact between the concrete and the rock]. GOU SPbGPU, 2010. 302 p. (rus)
24. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Design models of the structures and the possibility of its analysis]. Kiev: Stal, 2002. 600 p. (rus)
25. *Sayano-Shushenskaya GES na r. Yenisei. Svodnaya raschetnaya zapiska arochno-gravitatsionnoy plotiny Sayano-Shushenskoy GES* [Sayano-Shushenskaya HPP on the river Yenisei. Summary note arch-gravity dam of Sayano-Shushenskaya HPP]. OAO «LENGIDROPROEKT». Saint-Petersburg, 2000. 85 p. (rus)
26. *Tekhnicheskyy otchet «O sostoyanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy i osnovaniya Sayano-Shushenskoy GES v 2001 godu»* [Engineering report “On the state of hydraulic structures and Sayano-Shushenskaya HPP foundation in 2001 year”]. P.S. Neporozhny Sayano-Shushenskaya HPP, Chermushki, 2002. 112 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 76–85