DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-45-49

Орехов В.В. *, доктор технических наук, профессор,
Научно-исследовательский институт оснований и подземных
сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеева, Россия,
Алексеев Г.В., доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Россия
*Ответственный автор E-mail: v.orehov@rambler.ru

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЛОТИНЫ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: устойчивость плотины Рогунской ГЭС из грунтовых материалов изучается на основе численных расчетов ее пространственного напряженно-деформированного состояния. В расчетах использовались деформационные и прочностные свойства материалов, слагающих тело плотины, определенные в приборах трехосного сжатия. Установлены предельные значения прочностных свойств материалов и контролируемых значений диагностических показателей плотины, при которых обеспечивается безопасность ее работы.

Ключевые слова: каменно-земляная плотина, численное моделирование, уменьшение значений прочностных свойств материалов, устойчивость плотины, критерии безопасности

Введение

В связи с началом строительства в Республике Таджикистан высокой каменно-земляной плотины необходимо научное обоснование ее безопасной эксплуатации. Участок створа плотины Рогунской ГЭС, возводимой в сложных инженерно-геологических условиях, сложен скальными породами. Каменно-земляная плотина возводится на реке Вахш в узком ущелье V-образной формы, с крутыми склонами, имеющем в плане сложное зигзагообразное очертание, что предопределяет исследование ее напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценку устойчивости в пространственной постановке.

В настоящее время научное обоснование конструкций плотин из грунтовых материалов, как правило, выполняется на основе численных исследований их напряженно-деформированного состояния [1-3] с использования современных положений механики грунтов [4]. При этом, при описании поведения грунтов под нагрузкой соотношениями теории пластического течения оценка устойчивости откосов грунтовой плотины проводится в рамках общей расчетной схемы на основе анализа развития пластических деформаций [5-8].

Методы и материалы

Тело каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС высотой 340м (рис. 1) представлено центральным ядром из суглинка, двумя переходными слоями фильтра из песчано-гравийно-галечникового грунта и упорными призмами, отсыпанными галечником с пригрузкой горной массой (табл. 1). В состав плотины входит плотина первой очереди высотой 130м, также отсыпанная галечником с пригрузкой горной массой. В качестве противофильтрационного элемента в плотине первой очереди предлагается использовать асфальтобетонную диафрагму. В верховую упорную призму плотины первой очереди также входит верховая перемычка высотой 53 м из гравийно-галечникового грунта. Противофильтрационными элементами перемычки: являются суглинистый понур, инъекционная завеса и полимерный экран.

Для описания нелинейной деформируемости грунтовых материалов использовалась математическая модель [4], сформированная в рамках теории пластического течения с упрочением.

Таблица 1

Свойства основных материалов плотины Рогунской ГЭС

Table 1

Properties of the main materials of the Rogun hydroelectric dam

Конструктивные элементы	Материал	ρ [г/см ³]	C [МПа]	Tgφ	Кф [м/сут]
Упорная призма	Галечник	2.25	0.06	0.98	86
Ядро плотины	Суглинок	2.1	0.081	0.7	0.00026 – 0.0053
Пригрузка	Горная масса	2.08	0.1	0.98	430
Переходные зоны	Галечник	2.07	0.06	0.88	26
Диафрагма	Асфальт	2.49	0.375	0.81	-

Рис. 1. Расчетная модель. а – объемная твердотельная геометрическая модель системы «скальное основание – плотина», б – поперечное сечение плотины. (цветом выделены материалы тела плотины)
Fig. 1. Calculation model. a - volumetric solid-state geometric model of the system "rock base - dam", b - cross section of the dam. (the material of the dam body is highlighted)

Параметры модели определяются стандартными трехосными испытаниями и отражают особенности дилатансионного поведения грунта, существенным образом влияющие на процессы пластического деформирования водонасыщенных грунтов.

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС использовалась методика, основанная на численном решении системы дифференциальных уравнений теории консолидации квазидвухфазных грунтовых сред [9]. Разрешающая система уравнений, составленная для всей совокупности конечных элементов, аппроксимирующих расчетную область, с учетом уравнений состояния всех фаз грунта, начальных и граничных условий полностью характеризуют работу квазидвухфазных грунтов при статических воздействиях. При этом одновременно учитывается фактор фильтрационного движения сжимаемой жидкости в порах грунта и деформационные свойства скелета грунта.

При этом строительство плотины, согласно схеме ее возведения, моделировалось 21 расчетным этапом, в том числе строительство плотины первой очереди моделировалось 10 расчетными этапами. Заполнение водохранилища моделировалось в соответствии с графиком его наполнения, параллельно возведению плотины. Гидростатическое давление по верховой грани ядра передавалось на поровую воду и распределялось по скелету материала ядра как объемная сила.

Для оценки напряженного состояния в каждой точке грунтового массива (по степени приближенности к предельному состоянию) по результатам статического расчета определялись локальные коэффициенты запаса сдвига по зависимости:

$$k_z = \sigma_i^* / \sigma_i \quad (1)$$

где $\sigma_i^* = c + tg\varphi \sigma^{ef}$ – предельное значение σ_i ; σ^{ef}, σ_i – инварианты тензора эффективных напряжений; $c, tg\varphi$ – параметры прочности.

Ключевым вопросом оценки безопасности сооружения при этом является определение коэффициента запаса общей устойчивости сооружения, для вычисления которого необходимо в расчетах довести грунтовый массив до разрушения, что может быть достигнуто расчетах постепенным уменьшением значений прочностных параметров грунтов.

Общий коэффициент запаса при этом определяется по зависимости:

$$K_z = \frac{c^{**}}{c} = \frac{tg\varphi^{**}}{tg\varphi} \quad (2)$$

где c^{**} и $tg\varphi^{**}$ – значения прочностных параметров грунта, при которых расчеты прогнозируют разрушение грунтового массива.

Результаты и обсуждения

Как показали результаты выполненных статических расчетов, основное влияние на формирование пространственного напряженно-деформированного состояния каменно-земляной плотины оказывают: неоднородность материалов плотины, поэтапность возведения плотины и узкий извилистый каньон в месте строи-

тельства плотины. Перечисленные выше факторы приводят к формированию существенно неоднородного в пространстве напряженно-деформированного состояния плотины.

На момент окончания строительства и заполнения водохранилища все компоненты нормальных эффективных напряжений носят сжимающий характер. При достаточно больших значениях коэффициента фильтрации материала ядра, величины возникающего дополнительного порового давления незначительны и к моменту заполнения водохранилища до проектной отметки, процесс консолидации завершается и устанавливается стабилизированный фильтрационный режим.

При принятых характеристиках грунтов статическая устойчивость плотины и прочность ее ядра обеспечиваются. Локальные коэффициенты запаса во всех точках плотины $k_z > 1.0$.

Для определения коэффициента запаса общей устойчивости сооружения после последнего строительного этапа расчета (возведение плотины на полный профиль и заполнения водохранилища) была выполнена дополнительная серия расчетов с постепенным уменьшением прочностных параметров всех материалов каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС.

Как показали дополнительные расчеты разрушение плотины происходит при уменьшении прочностных параметров более чем 2.7 раза. При этом в верхней части низовой упорной призмы ближе к левому борту прослеживается возникновение зоны предельного состояния, а ниже формируется зона возможного обрушения. Таким образом, коэффициент запаса общей устойчивости каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС при статических воздействиях для исходных прочностных и деформационных характеристиках материалов тела плотины составляет $K_z = 2.7$.

Согласно методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений, оценку эксплуатационного состояния сооружения и его безопасности следует осуществлять путем сравнения измеренных диагностических показателей с их критериальными значениями, установленными на стадии проектирования сооружения.

К основным контролируемым диагностическим показателям состояния каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС в первую очередь относятся значения вертикальных и горизонтальных перемещения ее тела. Результаты расчетов НДС каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС при статических воздействиях могут рассматриваться как первый предупреждающий уровень значений диагностических показателей (K_1), превышение которого указывает на то, что в процессе последующей эксплуатации происходит изменение НДС плотины по сравнению с результатами математического прогноза.

В качестве второго предельного уровня K_2 значений диагностических показателей, при превышении которого эксплуатация гидротехнического сооружения в проектных режимах не допустима, принимаем результаты расчетов НДС каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС при значении коэффициента запаса общей устойчивости равном минимальному нормативному значению 1.25 для основного сочетании нагрузок. При этом критериальные значения контролируемых показателей для этого уровня можно получить из расчета статического НДС каменно-земляной плотины с использованием прочностных параметров материала тела плотины, уменьшенных в $2.7/1.25 = 2.16$ раза (рис. 2).

Рис. 2. Перемещения в поперечном сечении плотины при уменьшении прочностных характеристик в 2.16 раза. а – горизонтальные перемещения U_x (м), б – вертикальные перемещения U_y (м)

Fig. 2. Displacement in the cross section of the dam with a decrease in strength characteristics by 2.16 times. a - horizontal displacements U_x (m), b - vertical displacements U_y (m)

Выводы

Как показали результаты расчетов при принятых характеристиках грунтов статическая устойчивость плотины и прочность ее ядра обеспечиваются. Локальные коэффициенты запаса во всех точках плотины больше 1.0. При этом общий коэффициент запаса устойчивости составляет 2.7.

В качестве предельного уровня контролируемых значений диагностических показателей принимаются результаты расчетов НДС каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС с пониженными значениями прочностных характеристик материалов тела плотины до нормативного значения коэффициента запаса общей устойчивости $K_z^{\min} = 1.25$ (при основном сочетании нагрузок).

Литература

1. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин, Энергоатомиздат, Москва, 1983.
2. Auchar O., Hans M., Annika B., Sven K. Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on upstream tailing dam // Canadian Geotechnical Journal. 2013. Vol. 5. Issue 4. P. 391 – 399.
3. Kamanbedast A., Delvary A. Analysis of Earth Dam: Seepage and Stability Using Ansys and Geo-Studio Software // World Applied Sciences Journal. 2012. №17 (9). P. 1087 – 1094.
4. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. Издательство Ростовского университета, 1989.
5. Орехов В.В. Устойчивость грунтовой плотины с вертикальной диафрагмой // Вестник МГСУ. 2016. №1. С. 143 – 149.
6. Zhan L., Maotian L. Pseudo-static stability calculation of earth and rockfill dams using shear strength reduction finite element method // Rock and Soil Mechanics. 2010. №3. С. 1503 – 1516.
7. Cheng Y., Lansivaara T., Wei W. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods // Comput. Geotech. 2007. №34. С. 137 – 150.
8. Matsui T., San K.C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique // Soils and Foundations. 1992. №32 (1). С. 59 – 70.
9. Орехов В.В. Комплекс вычислительных программ «Земля-89» // Межвузовский сборник «Исследования и разработки по компьютерному проектированию фундаментов и оснований». Новочеркасск, 1990. С. 14 – 20.

References

1. Zareckij YU.K., Lombardo V.N. Statika i dinamika gruntovyh plotin, Energoatomizdat, Moskva, 1983. (rus.)
2. Auchar O., Hans M., Annika B., Sven K. Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on upstream tailing dam. Canadian Geotechnical Journal. 2013. 5 (4). P. 391 – 399.
3. Kamanbedast A., Delvary A. Analysis of Earth Dam: Seepage and Stability Using Ansys and Geo-Studio Software. World Applied Sciences Journal. 2012. 17 (9). P. 1087 – 1094.
4. Zareckij YU.K. Lekcii po sovremennoj mekhanike gruntov. Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta, 1989. (rus.)
5. Orekhov V.V. Ustojchivost' gruntovoj plotiny s vertikal'noj diafragmoj. Vestnik MGSU. 2016. 1. P. 143 – 149. (rus.)
6. Zhan L., Maotian L. Pseudo-static stability calculation of earth and rockfill dams using shear strength reduction finite element method. Rock and Soil Mechanics. 2010. 3. P. 1503 – 1516.
7. Cheng Y., Lansivaara T., Wei W. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. Comput. Geotech. 2007. 34. P. 137 – 150.
8. Matsui T., San K.C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. Soils and Foundations. 1992. 32 (1). P. 59 – 70.
9. Orekhov V.V. Kompleks vychislitel'nyh programm «Zemlya-89». Mezhhvuzovskij sbornik «Issledovaniya i razrabotki po komp'yuternomu proektirovaniyu fundamentov i osnovanij». Novocherkassk, 1990. P. 14 – 20. (rus.)

**Orekhov V.V. *, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Research Institute of Foundations and Underground Structures (RIFUS) named after N.M. Gersevanov, Russia,
Alekseev G.V., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Russia**
*Corresponding author E-mail: v.orehov@rambler.ru

SAFETY ASSESSMENT OF DAMS MADE OF GROUND MATERIALS

Abstract: the stability of the dam on Rogunskaya HPP made of ground materials is studied on the basis of numerical calculations of its spatial stress-strain state. The deformation and strength properties of the materials composing the dam body defined in the triaxial compression devices were used in the calculations. Limit values of strength properties of materials and controlled values of diagnostic indicators of a dam at which safety of its work is provided are established.

Keywords: stone-ground dam, numerical simulation, the decrease of the strength properties of materials, stability of dam, safety criteria

Для цитирования: Орехов В.В., Алексеев Г.В. Оценка безопасности плотины из грунтовых материалов // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №4. С. 45 – 49. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-45-49

For citation: Orekhov V.V., Alekseev G.V. Safety assessment of dams made of ground materials. Construction Materials and Products. 2019. 2 (4). P. 45 – 49. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-4-45-49

Поступила в редакцию 2 апреля 2019 г.
Принята в доработанном виде 21 мая 2019 г.
Одобрена для публикации 22 июня 2019 г.

Received: April 2, 2019.
Revised: May 21, 2019.
Accepted: June 22, 2019.