

Карстен Кёнке и Франк Рёслер

Оценка конструкционной безопасности четырех алжирских плотин

ООО RWG Ruhr-Wasserwirtschafts-Gmb, дочернее предприятие Рурского союза (Эссен) в консорциуме с инженерным бюро Фихтнер (Штутгарт) и Ассоциацией Хамза (Каир) в 2004 г. были уполномочены алжирским Министерством гидросооружений ANBT провести детальное обследование и при необходимости оценить конструкционную безопасность четырех алжирских плотин. Речь, в частности, идет о плотинах Бу Ханифия, Дьорф Торба, Бени-Бадель и Меффроу. По своей конструкции плотины представляли собой на момент строительства смелые и инновационные сооружения. Две последние плотины – многоарочные, спроектированные Альфредом Стаки: плотина Бу Ханифия – одна из первых каменно-набросных плотин с железобетонным экраном, плотина Дьорф Торба – 37-метровая бетонная гравитационная плотина. Приоритет при обследовании был отдан конструкционной безопасности плотин, гидрологическим и геологическим аспектам и оценке надежности при вероятных сценариях землетрясений. В данной статье представлен своеобразный отчет о проведенных на местах мероприятиях и цифровом моделировании при обследовании сооружений, выполненный фирмами RWG для плотин Бу Ханифия и Дьорф Торба и Институтом структурной механики Высшей школы строительства Веймарского университета для многоарочных плотин Бени-Бадель и Меффроу.

1 Введение

К составляющим детального обследования сооружений, наряду с доказательствами безопасности плотин, относятся геологические и гидрогеологические аспекты обследования, а также определение вероятного сейсмического воздействия. Гидрологические изыскания и сбор данных для сейсмических расчетов в местах нахождения всех четырех плотин завершены, но не подлежат более подробному рассмотрению в данной статье. Программа проведения геологоразведочных работ для определения подходящих параметров материалов до сих пор не была реализована заказчиком. Тем не менее, присутствовало желание проверить используемые расчетные модели на их пригодность посредством использования исходных характеристик материалов, почерпнутых из литературных источников, а также из опыта практического применения. Для двух расчетных случаев

были определены нагрузки, учитывающие полный напор и сейсмическое воздействие.

2 Бу Ханифия

Строительство 54-метровой мостовой плотины Бу Ханифия началось еще в 1930 г. В качестве противофильтрационного устройства был использован железобетонный экран. В Германии подобный метод гидроизоляции стал применяться намного позже, например, при строительстве Рурским союзом плотин в 1950-х и 1960-х гг. (в каждом случае с асфальтобетонным экраном) плотин Хенне и Бигге. Тело плотины состоит из сухой кладки и сделано с крутым откосом со стороны верхнего бьефа 1:0,8.

Статические расчеты выполнены на основе метода конечных элементов с использованием двухмерной дискретной модели. Исходя из возможных предельно допустимых условий и проводимости материалов, в первую очередь были рассчитаны

энергия течения и силы противодействия воды. Последние, наряду с прочими нагрузками, были установлены, собственно, при расчете запаса прочности. Для расчетов сухой каменной кладки с целью упрощения был применен закон Мора-Кулона, как для грунтов с расчетными характеристиками ϕ (угол трения) и c (сцепление); была также принята во внимание пластическая деформация при превышении прочности.

Особенностью плотины является противофильтрационное устройство (ПФУ) в виде стены в грунте под верхним упорным зубом глубиной до 70 м. Она предварительно напряжена со средним анкерным усилием 2000 кН/м. Для учета относительных смещений вокруг зуба плотины были установлены так называемые интерфейс-элементы. Моделирование железобетонного экрана осуществлялось посредством комбинации балковых и интерфейсовых элементов. Прочие интерфейс-элементы были расположены в де-

формационных швах для того, чтобы иметь возможность задавать соответственно низкие параметры материалов шва. Расчеты при полном напоре показывают, что плотина перемещается главным образом в сторону нижнего бьефа, и в нижней трети напорного откоса плотины под влиянием давления воды возникают незначительные деформации (рис. 1). Определение надежности сооружения производилось посредством ф/с редуцирования, причем для расчетного случая при полном напоре в качестве основного параметра безопасности служил уровень разрушения низового откоса плотины.

3 Дьорф Торба (Djorf Torba)

Расположенная в окрестностях Бехара на северной границе пустыни Сахары гравитационная плотина Дьорф Торба – высотой 37 м и длиной по гребню 762 м – была построена в период с 1966 по 1968 гг. Первоначальный полезный объем составлял 350 млн м³.

Расчеты напряженно-деформированного состояния и запаса устойчивости были выполнены методом конечных элементов. Для этого за основу была принята двумерная дисковая модель плотины и основания в районе водосливных секций в середине плотины.

Чтобы снизить противодействие воды на подошву сооружения в основании плотины, была выполнена противодиффузионная цементационная завеса. Цементация проводилась из нижней смотровой галереи, за завесой расположились два ряда дренажных скважин.

Собственно, статический расчет состоял, таким образом, из трех этапов. На первом этапе были вновь определены гидродинамические и гидростатические нагрузки, включая противодействие воды. Кроме того, были отмечены температурные воздействия, вызывающие в массивных сооружениях напряжения.

В ходе второго этапа вычислений на основании переменных конечных температур и коэффициентов теплопроводности и теплоемкости отдельных материалов было определено распределение температур,

в общей сложности, на 26 временных пунктах в течение месяца. В последней временной точке было рассчитано распределение температур февраля, которое в свою очередь, вызывает поверхностные растягивающие напряжения.

Гидравлические и термические нагрузки были приняты во внимание на третьем этапе статического расчета. Для бетонного тела плотины в соответствии с требованиями DIN 19700, часть 11 была выбрана модель, не допускающая напряжений в вертикальном направлении.

В первом расчетном случае (основное сочетание нагрузок при полном напоре) результаты расчета показали незначительное раскрытие стыков.

Расчеты для второго расчетного случая (основное сочетание + сейсмика) показали, что первая собственная частота колебаний сооружения была равна $f = 4,01$ Гц.

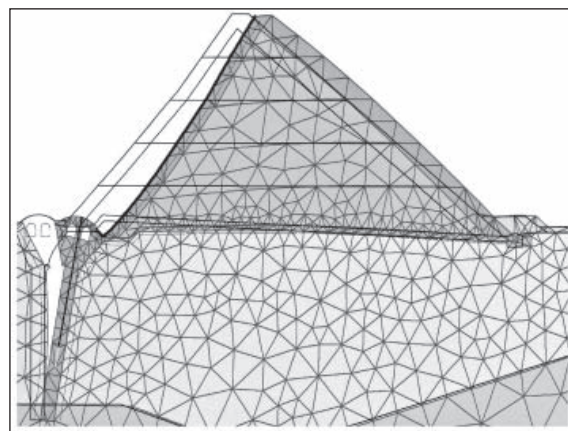


Рис. 1: Плотина Бу Ханифия: расчетный случай №1 – только гидростатическое давление при полном напоре

Для подтверждения были сведены внутренние силы для всех форм колебаний сумм квадратного сечения (SRSS-Regel – корень из суммы квадратов). Полученные таким образом вертикальные напряжения и раскрытия швов соответствуют уже упомянутой норме, в связи с чем несоосность равнодействующих сил, вероятнее всего, будет составлять не более трети ширины поперечного профиля плотины (рис. 2).

Standardsicherheitsnachweise an vier algerischen Talsperren

Die RWG Ruhr-Wasserwirtschafts-GmbH, ein Tochterunternehmen des Ruhrverbands, aus Essen hat in einem Konsortium mit dem Ingenieurbüro Fichtner aus Stuttgart und Hamza Associates aus Kairo im Jahr 2004 vom algerischen Talsperrenministerium ANBT den Auftrag erhalten, eine vertiefte Ueberpruefung und gegebenenfalls Sanierung von vier algerischen Talsperren durchzufuehren. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um die Talsperren Bou Hanifia, Djorf Torba, Beni-Bahdel und Meffrouch. Die vier Talsperren werden durch zur Bauzeit besonders innovative Absperrbauwerke eingestaut. In den folgenden Ausfuehrungen werden die an den vier Standorten durchgefuehrten Standardsicherheitsnachweise vorgestellt, die fuer die beiden Absperrbauwerke Bou Hanifia und Djorf Torba durch die RWG und fuer die beiden Gewoelbereichenmauern Beni-Bahdel und Meffrouch durch das Institut fuer Strukturmechanik der Bauhaus-Universitaet Weimar erstellt wurden.

Structural Safety Assessment of four Algerian Dams

The RWG Ruhr-Wasserwirtschafts-GmbH in Essen, Fichtner GmbH Consulting Engineers in Stuttgart and Hamza Associates in Cairo were commissioned to accomplish a detailed inspection and structural safety assessment of four Algerian dams by the Algerian dam operator ANBT in 2004. The four dams comprise Bou Hanifia, Djorf Torba, Beni-Bahdel and Meffrouch. They were particularly innovative dam structures at their construction time. The two last mentioned dams are multiple-arch dams designed by Alfred Stucky, the rock fill dam of Bou Hanifia is one of the early dams with a concrete facing and Djorf Torba is a 37m high concrete gravity dam. Prior to structural safety assessment, a hydrological and geological examination and an assessment of possible earthquake loading scenarios had to be done. The results from numerical simulations done for the structural safety investigation are presented in the following paper.

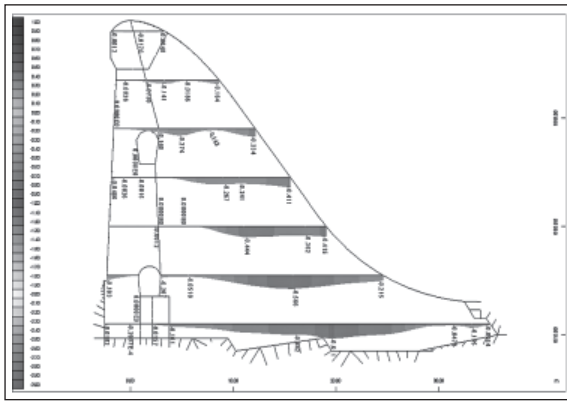


Рис. 2: Плотина Дьорф Торба – сейсмическое воздействие, вертикальные напряжения в горизонтальных швах

4 Многоарочные плотины Бени-Бадель и Меффроуц

Конструкция обеих многоарочных плотин представляет собой опорные железобетонные контрфорсы с арочными железобетонными перекрытиями пролетов между ними. Высота контрфорсов по гребню h и d и диаметр арочных перекрытий составляет: $h = 55$ м и $d = 20$ м для плотины Бени-Бадель, и $h = 35$ м и $d = 25,0$ м для плотины Меффроу.

При строительстве плотины Бени-Бадель были использованы вертикальные опорные Контрфорсы. Толщина контрфорсов по гребню плотины – 3 м, в основании – 4,80 м. Опорные контрфорсы достигают высоты 55,00 м, ширина контрфорса по основанию – 57 м. Заложение

верховой грани составляет $b/h=0,950$. На эти покатые площадки опираются элементы арочных перекрытий полукруглой формы (угол раскрытия $2\varphi = 168^\circ$). Арочные перекрытия имеют толщину по верхнему краю 0,62 м и внизу 1,20 м.

Длина русловой бетонной части плотины Меффроу составляет в общей сложности 581 м. Каждый арочный свод перекрытия представляет собой разделенную почти по

центру цилиндрический свод-оболочку (угол раскрытия $2\varphi=126^\circ$) с радиусом 12,60 м. Толщина арочного перекрытия постоянна как по дуге, так и по высоте и равна 0,80 м. Края свода упираются в находящиеся с обеих сторон треугольные контрфорсы. Небольшие сегменты арочные перекрытий у гребня плотины расположены строго вертикально и лишь незначительно возвышаются посередине между двумя контрфорсами, но отчетливо поднимаются над уровнем ВБ. Ниже уровня верхнего бьефа ось арочного перекрытия расположена под углом в $38,9^\circ$ по отношению к вертикали. Со стороны ВБ контрфорсы опираются на упорный зуб, который кругообразно изогнут в плане между двумя контрфорсами. Ширина пролета между контрфорсами 25,00 м, толщина контрфорсов составляет 2,50 м, ширина по основанию – 26,30 м, а высота – 15,27 м. Характеристики материалов, из которых изготовлены бетонные сооружения и параметры основания были установлены посредством гамма-дефектоскопии (система Schmidhammer), а также с помощью геологических изысканий, которые еще полностью не завершены.

На обеих плотинах было исследовано напряженно-деформиру-

ванное состояние как при статических нагрузках (собственный вес, гидростатическое давление, температурные воздействия), так и при динамических нагрузках – сейсмическое воздействие с периодом повторяемости раз в 2500 лет. При этом по договоренности с заказчиком были применены немецкие стандарты DIN 19700 и 19702.

Для числовой модели в обоих случаях из общей структуры сооружения выделены три арочные оболочки вместе с контрфорсами в качестве модели конечных элементов. Общая длина стены рассматривалась вместе с окружающим грунтовым массивом (около четырех длин), глубина которого равна трехкратной высоте плотины. Было предложено монолитное сцепление между фундаментами и грунтом основания.

На **рис. 3** показано распределение напряжений σ_{zz} [H/m^2] плотины Бени-Бадель для расчетного случая №3: собственный вес сооружения, гидростатическое давление, температурное и сейсмическое воздействие. Можно констатировать, что даже в этом случае напряжения остаются незначительными, максимальная величина достигает $\sigma_{zz} = 14 \text{ H}/\text{mm}^2$. При этом следует принять во внимание, что максимальные величины на основе числовых единичных эффектов имеют место, например, на углах входа, поэтому при расчетах следует брать усредненные значения.

Литература

- [1] Hartung, F.: Eindrucke vom Talsperrenbau in Algerien. In: Der Bauingenieur 31 (1956), Heft 7, S. 245 – 257.

Авторы

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Koenke
Bauhaus-Universitaet Weimar
Marienstrasse 15
99423 Weimar
carsten.koenke@bauing.uni-weimar.de

Dipl.-Ing. Frank Roesler
Ruhrverband
Abteilung Talsperrenueberwachung
und Geotechnik
Kronprinzenstrasse 37
45128 Essen
frank.roesler@ruhrverband.de

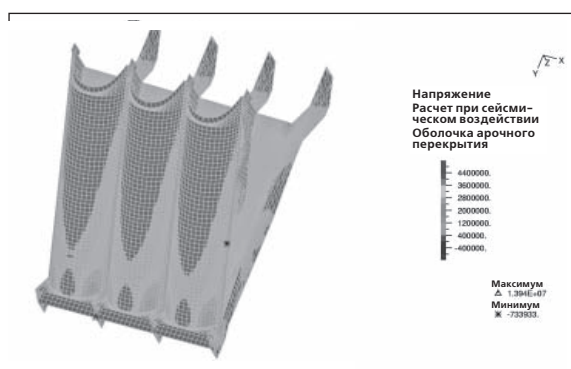


Рис. 3: Плотина Бени-Бадель: распределение вертикальных компонентов напряжения σ_{zz} [H/m^2] в варианте измерения сейсмической нагрузки