

УДК 627.82.012.3.4:539.3
В.Д. Барышников, Л.Н. Гахова
ИГД СО РАН, Новосибирск

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ ПЛОТИН В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД

V.D. Baryshnikov, L.N. Gakhova
Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia
Krasniy prospect 54, Novosibirsk, 630091, Russian Federation

STRESS-STRAIN STATE CONTROL IN CONCRETE DAMS DURING PERFORMANCE LIFE

The developed stress-strain state control system for the operating waterwork elements is aimed at improvement of observation network in the areas where the control-and-measurement equipment is not installed or fails.

Одним из основных показателей безопасного состояния плотины является критическая величина действующих напряжений. Традиционно контроль напряженного состояния гидротехнических сооружений (ГТС) осуществляется по показаниям закладной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленной в теле плотины при ее строительстве. Инструментальные погрешности, свойственные самому датчику, со временем возрастают, сам датчик не поддается каким-либо улучшениям и регулировкам, а его характеристики - строгой метрологической аттестации. Чем больше срок работы закладной КИА, тем выше вероятность возрастания погрешности оценки величин напряжений (при этом приращения напряжений за отдельный цикл «наполнения-сработки» водохранилища менее подвержены такому влиянию). Ограниченный срок гарантийной работы КИА, частичный выход ее из строя при монтаже и в процессе эксплуатации приводит к снижению эффективности контроля, тогда как роль его по мере старения сооружения должна возрастать.

Для решения вопросов замены вышедшей из строя КИА, а также расширения сети наблюдений в случае технологической необходимости, ИГД СО РАН разработана система контроля (СК), получившая в литературе [1-5] наименование «деформационного метода контроля», относящаяся к разряду специальных исследований по контролю напряженно-деформированного состояния (НДС) гидротехнических сооружений в эксплуатационный период.

Методические положения, послужившие основой для разработки составляющих СК, сформулированы в рамках комплексного подхода [1,2], заключающегося в следующем. Количественная оценка начальных (действующих в данный момент) напряжений выбранного участка осуществляется с использованием скважинных методов, а последующий контроль изменения НДС производится по деформациям стенок и контура галерей, вызванным температурными изменениями, геологическими и

техногенными воздействиями. Реализация подхода позволяет получить полную информацию о напряженном состоянии и его изменении во времени, а также использовать данный комплекс измерений совместно с геодезическими, геофизическими и прочими наблюдениями для организации геодинамического мониторинга объекта. Количественная оценка напряжений, как и контроль их приращений, имеет самостоятельное прикладное значение и вне рамок рассматриваемого подхода.

Контроль величин действующих напряжений в бетоне

Для выбора метода оценки величин действующих напряжений в бетоне были испытаны ряд методов, разработанных применительно к скальным массивам: оптических датчиков, полной и частичной разгрузки как на поверхности, так и в глубине бетонного массива. Из всех проверенных методов наиболее успешно себя зарекомендовал метод параллельных скважин [3], разработанный в ИГД СО РАН применительно к скальным породам и прошедший успешную проверку на многих рудниках. Важным достоинством метода является то, что деформационные характеристики бетона определяются в натуральных условиях непосредственно на участке замера напряжений.

В процессе использования метода параллельных скважин в условиях Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) был решен ряд методических вопросов его эксплуатации, в том числе, вопрос выбора режима проведения эксперимента, минимизирующего влияния температурных воздействий, вызванных использованием при колонковом бурении возмущающей скважины промывки водным раствором [4].

Опыт реализации метода параллельных скважин на СШ ГЭС дает основание полагать, что он может быть использован в качестве тестового метода, поскольку роль контроля НДС бетона по мере старения сооружения возрастает.

Наблюдения за изменением напряжений при эксплуатации сооружений

В качестве элемента системы контроля НДС ГТС в эксплуатационный период предложен деформационный метод, основанный на измерениях деформаций контура и стенок галерей плотины [1,2,5]. Равномерное размещение галерей в теле плотин обеспечивает доступ и возможность контроля изменения напряжений в процессе их эксплуатации. Незначительные затраты на реализацию метода (из-за отсутствия буровых работ для размещения датчиков в глубине массива), принципиальная возможность автоматизированного съема показаний (при использовании, например, накладных телетензометров) делают его привлекательным как с экономической точки зрения, так и с точки зрения оперативности и надежности контроля в целом. Положителен и тот факт, что галерея, являясь информационным усилителем (за счет концентрации напряжений вокруг полости регистрируемая деформация на ее поверхности в 1,5 – 2,5 раза больше, чем таковая при размещении датчика непосредственно в бетонном массива), обеспечивает возможность измерения относительных смещений установленных в бетоне марок с использованием надежных механических

средств (измерительных жезлов), экономически оправданного при проведении уточняющих замеров, а также при наблюдениях с большим временным интервалом между замерами.

Ограничения деформационного метода контроля на ГТС связаны с проблемой интерпретации замеренных деформаций и смещений контура галерей на бетонный массив. Выбор модели среды, в рамках которой с привязкой к конкретному типу эксперимента и способу измерений разработан математический аппарат и на базе которого реализована программа обработки экспериментальных данных, основан на анализе проведенных ранее исследований [1,2,5].

В качестве математической модели принята упругая модель среды, для которой характерна линейная связь между напряжениями и деформациями, выраженная законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E – модуль упругости среды.

Для точек, лежащих на свободной поверхности, деформированное состояние описывается тензором:

$$[T_{\varepsilon}^{di\ddot{a}}] = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{yx} & 0 \\ 1/2\gamma_{xy} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{vmatrix} \quad (1)$$

Плоский тензор деформаций:

$$[T_{\varepsilon}] = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{yx} \\ 1/2\gamma_{xy} & \varepsilon_y \end{vmatrix} \quad (2)$$

Для определения компонент тензора (2) достаточно замерить линейные деформации в трех произвольных направлениях в плоскости свободной поверхности галерей, определяемых углом θ в системе координат ХОУ.

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (3)$$

где ε_i - линейная деформация точки в направлении, заданном углом θ_i , определяемая как отношение приращения в результате деформирования длины фиксированного отрезка Δl к длине l .

Из системы уравнений определяемой (3), вычисляются компоненты тензора деформаций: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$. Вычисление главных деформаций:

$$\varepsilon_{1,2} = 1/2(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm 1/2\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad \operatorname{tg} 2\varphi_{1,2} = \gamma_{xy} / (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (4)$$

где $\varphi_{1,2}$ - углы между направлениями главных деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и осью X в системе координат XOY.

Более достоверные и надежные оценки компонент тензора (2) возможны при большем объеме измерений (например, при замере линейных деформаций в плоскости в четырех направлениях). В этом случае проводится статистическая обработка результатов наблюдений.

Четырехкомпонентные розетки (рис. 1) позволяют провести замеры линейных деформаций в четырех направлениях. Путем перебора возможных комбинаций направлений замеров формируем четыре варианта системы (3). Проведя статистическую обработку полученных решений систем, определяем средние значения компонент тензора деформаций и главных деформаций.

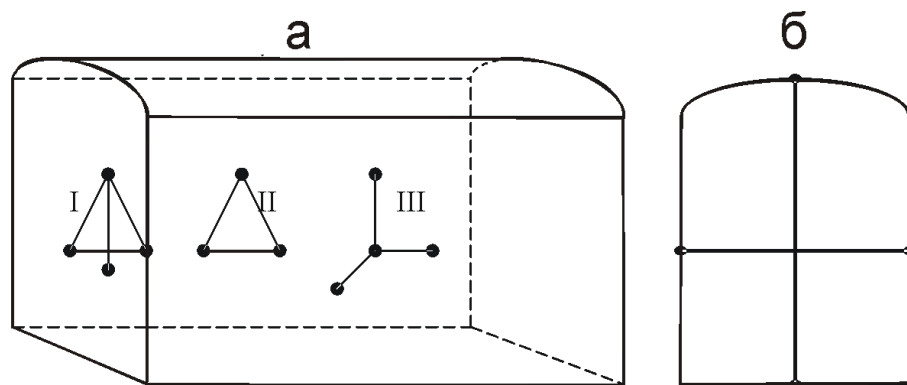


Рис. 1. Схемы реперных станций: а) четырехкомпонентные (I) и трехкомпонентные (II, III) розетки; б) станция замеров смещений контура галерей

Объемное напряженное состояние описывается в упругой модели обобщенным законом Гука:

$$\begin{aligned} E\varepsilon_1 &= \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \\ E\varepsilon_2 &= \sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1) \\ E\varepsilon_3 &= \sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \quad (5)$$

где E, ν - модуль упругости и коэффициент Пуассона массива соответственно.

Оценка напряженного состояния массива по результатам определений напряжений в отдельных точках на поверхностях галерей, требует внесения поправок на перераспределение напряжений вокруг галереи, т.к. обработке подвергаются замеры, выполненные в зоне ее влияния.

В условиях однородного напряженного состояния, которое в прямоугольной системе координат XYZ характеризуется компонентами

$\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{xz}^0, \tau_{yz}^0$. С помощью линейного оператора A каждой точке массива ставится в соответствие вектор локальных напряжений. A определяется решением задачи о напряженном состоянии массива с полостью, определяемой формой галереи, в окрестности которой получены обрабатываемые результаты. Запись в матричной форме имеет вид:

$$\{\sigma^e\} = [R]\{\sigma^0\} \quad (6)$$

Во внутренних точках области деформирования и на границе из решений упругой трехмерной задачи (в частном случае – плоской) получаются “базисные” напряжения, т.е. полные напряжения, соответствующие полным граничным условиям (напряжения σ^0 на бесконечности):

	σ_x^0	σ_y^0	σ_z^0	τ_{xy}^0	τ_{xz}^0	τ_{yz}^0	
1	1	0	0	0	0	0	
2	0	1	0	0	0	0	
3	0	0	1	0	0	0	(7)
4	0	0	0	1	0	0	
5	0	0	0	0	1	0	
6	0	0	0	0	0	1	

В силу линейности для получения решения в случае произвольного тензора σ_{ij} необходимо просуммировать “базисные” напряжения с соответствующими весами (коэффициентами концентрации a_{ij}).

Полученная система уравнений (6) разрешима относительно $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{xz}^0, \tau_{yz}^0$. В идеальном варианте при составлении программы исследований можно предусмотреть использование схем измерения деформаций, позволяющих получить все шесть компонент напряжений. Однако в силу значительной трудоемкости и иных причин часто получить информацию о полном локальном тензоре напряжений невозможно. В этом случае в качестве доопределяющих систему (7) уравнений могут быть использованы зависимости смещений стенок галерей (конвергенция) от напряжений (рис 1б):

$$EU_z = d_{11}\sigma_x^0 + d_{12}\sigma_y^0 + d_{13}\sigma_z^0 + d_{14}\tau_{xy}^0 + d_{15}\tau_{xz}^0 + d_{16}\tau_{yz}^0 \quad (8)$$

$$EU_y = d_{21}\sigma_x^0 + d_{22}\sigma_y^0 + \dots + d_{26}\tau_{yz}^0 \quad (9)$$

где U_z, U_y - смещения стенок галерей соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; $d_{11}, \dots, d_{16}; d_{21}, \dots, d_{26}$ - коэффициенты для смещений, определяемые из решения трехмерной задачи с единичными нагрузками на бесконечности.

На основе вышеизложенного разработан алгоритм, реализованный в виде пакета программ, с помощью которого проводится обработка экспериментальных данных. Учет реальной геометрии полостей основан на результатах решений плоской (комплекс программ EL2) и трехмерной (EL3) задач теории упругости методом граничных сингулярных интегральных уравнений [1,2,5].

В заключение отметим, что развитие методических принципов организации системы контроля НДС бетонных плотин с использованием комплекса методов экспериментальной оценки напряжений и деформаций контуров галерей, совершенствование и автоматизация системы сбора и обработки информации позволят осуществлять наблюдения за состоянием сооружения в системе мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Об одном подходе к организации и проведению контроля напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений // Гидротехнич. стр-во.- 1998.- №2.
2. Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Некоторые особенности развития деформационных процессов при эксплуатации гидросооружения СШ ГЭС, установленные нетрадиционными методами наблюдений // Гидротехнич. стр-во.- 1999.- №3.
3. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих в бетонном массиве напряжений // Гидротехнич. Стр-во.-1998.-№2
4. Барышников В.Д, Гахова Л.Н. Оценка изменений температурного поля в массиве при определении напряжений методом параллельных скважин // ФТПРПИ.-2001.-№3
5. Барышников В.Д., Брызгалов В.И., Булатов В.А, Гахова Л.Н. Контроль напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС. // Гидротехнич. стр-во.-2000. - №10.

© В.Д. Барышников, Л.Н. Гахова, 2009