3. Саинов М.П. Влияние формы створа на напряжённое состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3. С.16-39
4. Zhang B., Wang J.G., Shi R. Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer Computers and Geotechnics. 2004. No.31. Pp.559–573.
5. Подвысоцкий А.А., Саинов М.П., Сорока В.Б., Догонев М.Л. Поэтапность возведения каменно-набросной плотины – способ регулирования напряженно-деформированного состояния железобетонного экрана // Вестник МГСУ. 2018. Т.13. Вып.11. С.1395–1406
6. Marques Filho, P., De Pinto, N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // International Journal on Hydropower and Dams. 2005. No.12 (1). Pp.72-76.
7. Сорока В.Б., Саинов М.П., Королев Д.В. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследований напряженно-деформированного состояния // Вестник МГСУ. 2019. Т.14. Вып.2. С.207–224
8. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Volume 9. Issue 4. С.208-225.

Саинов М.П., Пак К.В., Юрьева Е.А.

Оценка эффективности увеличения толщины железобетонного экрана каменно-набросной плотины как способа повышения его надёжности

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(Россия, Москва)*

doi:10.18411/spc-22-07-2019-02

idsp: sciencepublic-22-07-2019-02

Аннотация

Существует заблуждение, что увеличение толщины железобетонного экрана каменно-набросной плотины или увеличение его массивности ведёт к повышению его надёжности. С помощью аналитического метода и метода численного моделирования нами показано, что это не так. Увеличение толщины экрана может снизить только ту часть напряжений, которая вызвана наличием в нём продольных сил, однако оно повышает моментную составляющую напряжений при изгибе. Как правило, увеличение толщины экрана увеличивает риск трещинообразования в экране.

Ключевые слова: каменно-набросная плотина с железобетонным экраном, напряжения, толщина экрана, изгиб.

Abstract

Assessment of effectiveness of rockfill dam reinforced concrete face increase of thickness as the way of enhancing its safety

With the aid of the analytical method and the method of numerical modeling we showed that increase of the rockfill dam reinforced concrete face does not result in enhancing its safety. Increase of the face thickness may decrease only part of stresses caused by presence of longitudinal forces in it. The moment component of stresses caused by the wall bend is growing at increase of thickness. Thus, increase of the face thickness, as a rule, increases the risk of cracking in the face.

Key words: concrete faced rockfill dam, stresses, face thickness, bending

Железобетонные экраны являются одним из наиболее перспективных типов негрунтовых противофильтрационных элементов каменно-набросных плотин [1]. Они могут воспринимать высокие напоры (100÷200м), имея толщину всего 1% от высоты плотины. Однако практический опыт применения данного типа противофильтрационных элементов свидетельствует о том, что тонкостенный железобетонный экран может находиться в неблагоприятном напряжённом состоянии.

Если напряжения превысят прочность бетона на сжатие или растяжение, целостность железобетонного экрана будет нарушена. Случаи повреждения железобетонных экранов описаны в научно-технической литературе [2-4].

В связи с этим актуальным является вопрос о выборе мер по предупреждению трещинообразования в железобетонных экранах каменно-набросных плотин. В качестве одной из таких мер может рассматриваться увеличение толщины железобетонного экрана. Исходя из бытующих умозрительных предположений увеличение толщины железобетонного экрана должно увеличить его несущую способность и прочность. Повышение толщины экрана снижает градиент напора, который он испытывает. Кроме того, высказываются предложения по строительству каменно-набросных плотин с массивными негрунтовыми экранами, включающими в себя помимо железобетонного экрана подэкрановую зону из грунтоцемента [5].

Нами был проведён анализ целесообразности увеличения толщины железобетонного экрана. Обычно считается, что железобетонный экран работает на изгиб. Для анализа напряжённого состояния может быть использовано дифференциальное уравнение изогнутой оси балки. Изгибающий момент M , воспринимаемый балкой, вычисляется по формуле

$$M = EJ \frac{d^2 u}{dx^2},$$

где E – модуль линейной деформации материала балки;

J – момент инерции поперечного сечения балки;

u – прогиб балки,

x – координата вдоль оси балки.

Зная изгибающий момент, с помощью общеизвестной формулы можно определения максимальные значения нормальных напряжений, возникающих в балке при изгибе. Значение напряжения σ на гранях балки будет равно:

$$\sigma = \frac{M t}{2 J} = E \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{d^2 u}{dx^2}$$

Здесь t – толщина балки.

Из формулы видно, что в случае, если форма изгиба балки останется неизменной, напряжения в балки будут повышаться пропорционально увеличению её толщины. Подобный эффект характерен для напряжённо-деформированного состояния железобетонного экрана каменно-набросной плотины. Жёсткость экрана практически не влияет на величину его прогибов, они определяются деформируемостью каменной наброски тела плотины.

Таким образом, увеличение толщины экрана может улучшить его напряжённое состояние только при местном, но не общем изгибе.

Однако, следует отметить, что помимо деформаций изгиба, экран воспринимает и деформации продольного удлинения-укорочения. Это установлено нашими исследованиями [6]. Увеличение толщины экрана в этом случае может уменьшить ту часть напряжений, которая вызвана наличием продольных растягивающих (или сжимающих) усилий.

Данные выводы, полученные нами аналитически, подтверждаются результатами численного моделирования напряжённо-деформированного состояния. Нами была рассмотрена каменно-набросная плотина с железобетонным экраном высотой 100 м. Модуль линейной деформации E каменной наброски был принят равным 60 МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$. Для бетона экрана было принято: $E = 29000$ МПа, $\nu = 0,20$. Рассматривались два варианта толщины железобетонного экрана – 1 м и 2 м.

На рис.1 показано полученное расчётом распределение продольных напряжений на верховой и низовой гранях железобетонного экрана. Вследствие изгиба низовая

грань экрана испытывает растяжение, а верховая – сжатие. При этом в нижней части экрана по средней линии экрана действуют растягивающие напряжения. Из рис.1 видим, что при большей толщине экрана снижаются максимальные значения средних напряжений, но увеличивается моментная составляющая в распределении напряжений. Максимальные значения растягивающих напряжений на низовой грани при толщине 2 м несколько выше, чем при толщине 1 м. При этом в обоих случаях они много больше, чем прочность бетона на растяжение. Таким образом, увеличение толщины экрана – неэффективный способ повышения надёжности экрана.

Рис.1. Распределение продольных напряжений в железобетонном экране.
v1, v2 – на верховой грани; n1, n2 – на низовой грани; c1, c2 – средние значения; n1, c1, v1 – при толщине 1м; n2, c2, v2 – при толщине 2м.

Вывод:

Деформации железобетонного экрана определяются в основном деформациями каменной наброски тела плотины, в то время как его собственная жёсткость имеет очень малое влияние. Т.к. напряжения, вызванные деформациями изгиба, превалируют над напряжениями, образованными деформациями продольного удлинения-укорочения, увеличение толщины экране как правило неблагоприятно сказывается на величине напряжений в нём.

1. Радченко В.Г., Глаговский В.Б., Кассирова Н.А., Курнева Е.В., Дружинин М.А. Современное научное обоснование строительства каменнонабросных плотин с железобетонными экранами // Гидротехническое строительство. 2004. №3. С.2-8.
2. Ma, H.Q., Cao K.M. Key technical problems of extra-high concrete faced rock-fill dam // Science in China. Series E: Technological Sciences. 2007. Vol.50(1). Pp.20-33
3. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control - Cases and Current Experiences. ISSMGE Bulletin. 2009. Volume 3. Issue 4. pp.11-18.
4. Маркес Фильо П., Пинто Н. де С. Характеристики каменно-набросных плотин с бетонным экраном, полученные опытным путем // Международный дайджест по гидроэнергетике и плотинам. 2007. С.69–74
5. Рассказов Л.Н., Саинов М.П. Численные исследования надёжности высокой каменной плотины с железобетонным экраном и подэкрановой зоной из грунтоцементобетона // Гидротехническое строительство. 2012. №2. С.30-34.
6. Саинов М.П. Влияние деформируемости каменной насыпи на напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана плотины // Вестник МГСУ. 2015. №3. С.69-78.