

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ СХЕМ РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМЫ «БЕТОННАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ ПЛОТИНА - СКАЛЬНОЕ ОСНОВАНИЕ»

NUMERICAL INVESTIGATION IN TO POSSIBLE FAILURE- MECHANISMS OF "CONCRETE GRAVITY DAM-ROCK FOUNDATION" SYSTEM

В.В. Толстикова, Нгуен Дык Нгиа

V.V. Tolstikov, Nguyen Duc Nghia

ГОУ ВПО МГСУ

Механизм разрушения системы «бетонная гравитационная плотина - скальное основание» очень сложен. Это сложная комбинация отдельных видов разрушений: сдвиг плотины по её контакту с основанием, опрокидывание плотины относительно ребра низовой грани, разрыв скального массива под напорной гранью и раздробление его под низовой гранью плотины, разрушения бетона в различных зонах на плотине, и т.д. В данной статье механизм разрушения системы плотина-основание рассматривается в общем виде численным методом.

The failure mechanism of "concrete gravity dam-rock foundation" system is very complicated. It is the combination of the individual destructions: sliding, overturning, upstream rupture and downstream crushing of the foundation, stretched and compressed fracture of concrete in various locations on the dam, etc. . . In this paper, the failure mechanism of the system dam-foundation is considered in a general condition by the numerical method.

Бетонные гравитационные плотины являются самым надежным из всех типов водоподпорных сооружений при большой их высоте, в сложных инженерно-геологических и климатических условиях. В современном плотиностроении наблюдаются следующие тенденции: рост числа гравитационных плотин из укатанного бетона с пониженным расходом цемента, увеличение их высоты и обжатие профиля.

При этом контакт плотины с основанием и примыкающая область основания являются наиболее вероятным местом возникновения предельного состояния. Раскрытие контактного шва под напорной гранью бетонной гравитационной плотины относится к такому типу немонолитности, которая может влиять на несущую способность сооружения вследствие изменения схемы его статической работы по отношению к заложенной в проекте. Опыт строительства и эксплуатации ряда, отечественных и зарубежных бетонных плотин показывает, что при допущении растягивающих напряжений под напорной гранью практически не удается избежать появления области разуплотнения основания и контактной трещины. Это приводит к уменьшению рабочего сечения, увеличению противодавления на подошву плотины, росту фильтрационных расходов и перераспределению контактных напряжений в оставшемся сечении с возникновением зоны их концентрации под низовым клином, что может приводить к разрушению пород основания в условиях сжатия и снижению сдвиговой прочности в

приконтактной области. И внутри бетонной гравитационной плотины существуют ослабления, появившиеся вследствие разрезки швами в период строительства, а также трещины, появившиеся в результате воздействия температурного фактора.

По существующим нормам проектирования в России, Вьетнаме и других странах оценка несущей способности плотин выполняется по линейной зависимости Кулона-Мора, который связывает средние значения нормальных и предельных касательных напряжений в контактном сечении.

$$K_s = \frac{F}{Q} = \frac{G * \operatorname{tg}\varphi + c * A}{Q}$$

Где:

K_s - коэффициент устойчивости,

Q - расчётное значение обобщенных сдвигающих сил,

F - расчётное значение обобщенных сил предельного сопротивления,

G - равнодействующая нормальных сил,

φ - угол трения вдоль контакта,

c - сцепление,

A - площадь контакта.

Эта формула недостаточно точна, так как она не полно отражает условие работы системы бетонная гравитационная плотина - скальное основание. В частности не учитывает сложный характер распределения напряжений в основании. В связи с этим, актуальным является изучение возможных схем потери несущей способности бетонной плотины на скальном основании, их математическое моделирование и оценка реальной несущей способности системы плотина-основание.

С помощью численного метода были исследованы возможные схемы разрушения системы бетонная гравитационная плотина - скальное основание.

При расчетных исследованиях использовался программный комплекс «CRACK», который разработан на кафедре Гидросооружений МГСУ и настоящее время нами модифицируется. В этой программе в качестве критерия разрушения использован критерий Кулона-Мора с параболической огибающей предложенный Фэйхерстом [3,4]. Это позволяет моделировать работу материала в момент разрушения при решении задачи методом конечных элементов в нелинейной постановке. Программа позволяет также в явном виде моделировать нарушения сплошности, например, контакты, трещины, различные швы и разрушение скальных массивов и бетона.

При проведении расчетов рассматривались три возможных схемы нарушения устойчивости системы бетонная гравитационная плотина - скальное основание: сдвиг, опрокидывание и предельный поворот.

Реализация разрушения по этим схемам выполнялась либо путём увеличения горизонтальной нагрузки, либо уменьшения сдвиговых характеристик контакта.

$$n_Q = (Q_{\text{рас}} + \Delta Q) / Q_{\text{рас}}$$

$$n_\psi = (\operatorname{tg}\psi_{\text{рас}} / \operatorname{tg}\psi)$$

$$\operatorname{tg}\psi = \operatorname{tg}\varphi + c/\sigma$$

Где:

n_Q - коэффициент перегрузки,

n_ψ - коэффициент уменьшения характеристик контакта,

$Q_{\text{рас}}$ - расчётная нагрузка,

σ - нормальное напряжение.

Выполнив численные эксперименты процесса разрушения системы плотина-основание (с различными свойствами основания и контакта), получили результаты,

корреспондирующие с результатами натурных исследований [1,2] и позволяющие отметить следующее:

Разрушения по схеме плоского сдвига по контакту плотины с основанием случаются лишь в особых случаях, при наличии ослабленных субгоризонтальных поверхностей с низкими сдвиговыми параметрами, находящихся вблизи контакта сооружения с основанием.

Несмотря на различную схему доведения до разрушения, система плотина-основание при плоском сдвиге разрушилась почти при одинаковых значениях n_Q и n_ψ , и они меньше, чем коэффициент устойчивости, который определен по нормам, как показано на рисунке 1. Это объясняется тем, что при определении коэффициента устойчивости по существующим нормам не учитывается раскрытие трещин и контакта плотины с основанием, вызывающее уменьшение площади сопряжения плотины с основанием и реальный характер распределения напряжений в основании.

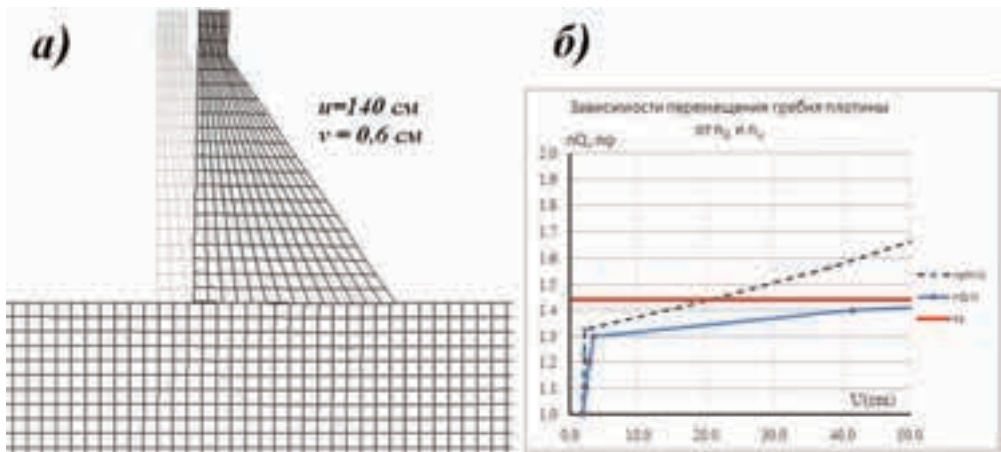


Рис. 1 - Разрушение по схеме плоского сдвига: а) Схема перемещения плотины при $n_Q=1,31$ б) Зависимости перемещения гребня плотины от коэффициента перегрузки (n_Q) и коэффициента уменьшения характеристик контакта (n_ψ)

Возведение высоких бетонных плотин в геологических условиях, указанных выше, как правило, не ведется. В случае необходимости строительства, скалу с опасно ориентированными поверхностями ослабления либо удаляют, либо надежно закрепляют бетоном, анкерами и другими материалами, исключая возможность сдвига сооружений по таким нарушениям.

Опрокидывание в классической форме, как поворот сооружения относительно ребра нижней грани (рис. 2), возможно, только теоретически при практически бесконечной прочности скалы или бетона, что нереально.

Разрушение по схеме предельного поворота, вызывающее поворот сооружения с появлением разрыва скального массива под напорной гранью, и раздробления его под низовой гранью сооружения, является, по-видимому, самой реальной схемой для трещиноватых скальных оснований.

Чтобы яснее представить механизм разрушения системы плотина-основание и проверить используемую математическую модель, исследовалось НДС плотины на блочном основании, т.е. основании с регулярными системами трещин. Результаты расчета сопоставлялись с результатами физического моделирования выполненного в масштабе 1:200 на кафедре гидросооружений МГСУ.

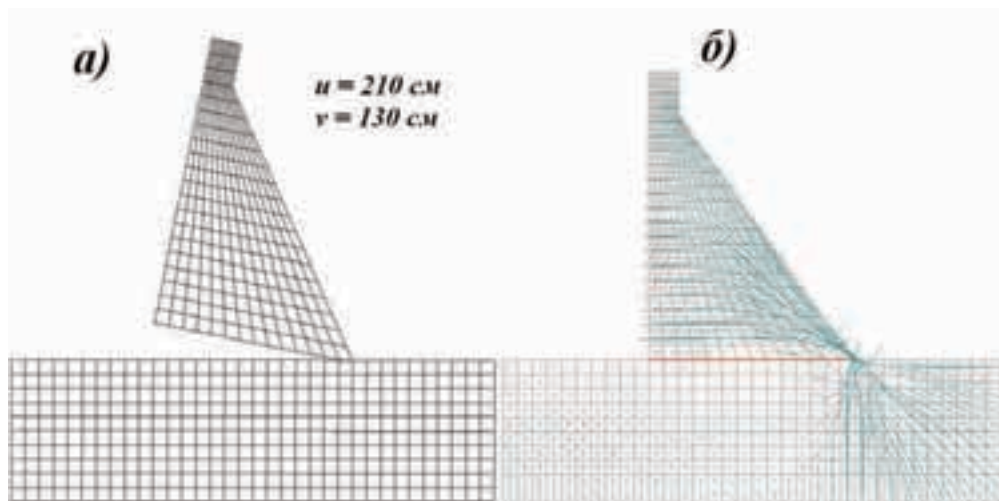


Рис. 2- Разрушение по схеме опрокидывания (при $p_Q = 2,5$).
а) картина перемещений, б) главные напряжения

Модель плотины и основания из гипса имела следующие характеристики в пересчете на натуру: высота 115 м, заложение низовой грани $m_2=0,55$ (ширина подошвы 64м), модуль деформации $E_n=236000$ кг/см², удельный вес $\gamma_n=0,0024$ кг/см³, прочность на растяжение и сжатие соответственно $R_p=44,1$ кг/см² и $R_{сж}=212$ кг/см².

Контакт плотины с основанием имел следующие характеристики: $E_k=180000$ кг/см², $R_p=35,5$ кг/см², $R_{сж}=162,0$ кг/см².

Блоки скального основания: $E_{осн.}=234000$ кг/см², $\gamma_{осн.}=0,0020$ кг/см³, $R_p=44,1$ кг/см², $R_{сж}=500,0$ кг/см².

Трещины в основании: $R_p=0$, $R_{сж}=6,0$ кг/см², $c=0$, $\phi=26,5^\circ$, касательная и нормальная жесткости соответственно $K_s=100,0$ кг/см³, $K_n=250,0$ кг/см³.

Математическая модель, как и физическая доводилась до разрушения путем увеличения горизонтальной гидростатической нагрузки ($Q = p_Q \cdot Q_{рас}$) при сохранении вертикальных расчетных нагрузок.

Результаты численных исследований приведены на рис. 3 и рис. 4. На рисунке 3 показано развитие нарушений в блочном основании на физической модели, которое фиксировалось на хрупком покрытии и в увеличенном масштабе характер деформирования, полученный на математической модели. На рисунке 4 показана схема деформирования и состояние контактных элементов на окончательной стадии нагружения математической модели.

На рисунке 3 видно, что появилось раскрытие трещин в глубине основания при нагрузке меньше расчетной. Сначала раскрываются вертикальные трещины, как реакция на гидростатическое давление. При расчетной нагрузке формируется магистральная трещина (раскрытие которой на порядок больше раскрытия соседних), которая пошла в глубину основания со стороны напорной грани. Горизонтальное перемещение гребня плотины при этом составило 6,3 см, максимальное раскрытие магистральной трещины 1,4 см. Максимальное сжатие в бетоне σ_3 не превысило по величине 72 кг/см², растяжение по напорной грани σ_1 5,3 кг/см². В блоках основания под низовым клином плотины сжатие не превышало 99 кг/см². При дальнейшем увеличении нагрузки магистральная трещина продолжала распространяться вглубь основания и

появилась зона сдвигового разрушения (жёлтые линии) в основании под низовой гранью плотины. Отсюда можно сформировать механизм разрушения: при увеличении горизонтальной нагрузки появляются зона трещинообразования основания под напорной гранью плотины, зона дробления основания под низовой гранью сооружения. Когда трещины растяжения и зона дробления встретятся, тогда наступит истощение несущей способности системы плотина - основание. Плотина с частью основания опрокинется относительно новой оси в глубине основания. Этот механизм совпадает с результатами натуральных и теоретических исследований приведенных в работах [1], [2], [3] и ряде других.

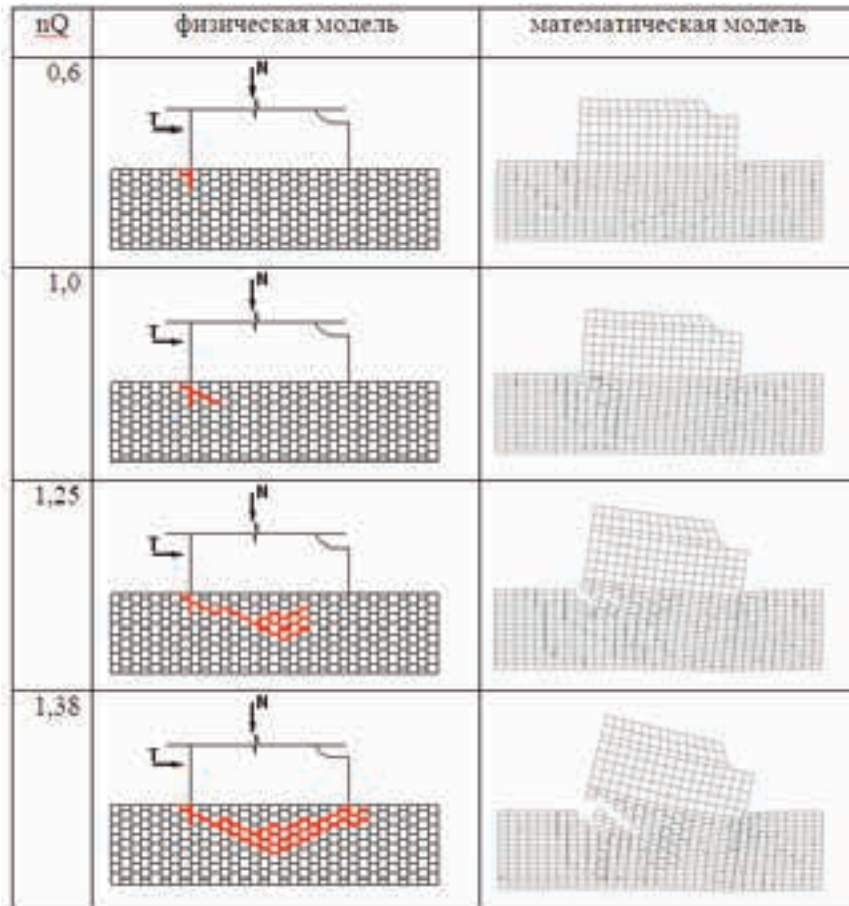


Рис. 4 Сравнение картин разрушения на физической и математической моделях

На рис. 4 показано состояние плотины и основания при перегрузке 1,4 от расчетной при которой, ещё наступала стабилизация (сходимость решения). Дальнейшее увеличение нагрузки приводило к непрерывному росту перемещений в ходе итерационного процесса. При этой перегрузке горизонтальное перемещение гребня составило более 20 см. Максимальное раскрытие магистральной трещины 6,4 см. Уровень сжатия в бетоне не превышал 103 кг/см^2 , растяжения $13,5 \text{ кг/см}^2$. В основании под низовым носком сжатие достигло 221 кг/см^2 .

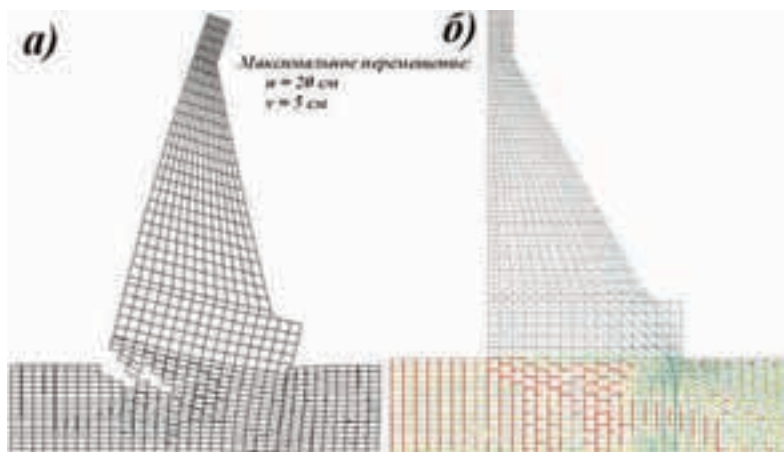


Рис. 5 Схема разрушения блочного основания при $n_Q = 1,4$ на математической модели
а) схема деформированного состояния, б) состояние элементов

Результаты, полученные на физической и математической моделях достаточно хорошо совпадают. Модели разрушаются при близких коэффициентах перегрузок ($n_Q=1,38$ - физическая модель и $n_Q=1,40$ - математическая). Математическая модель хорошо отображает механизм разрушения системы плотина-основание «в виде предельного поворота», и качественно соответствует результатам работ других авторов [1, 2].

Общие выводы:

1. МКЭ в упругопластической постановке, с учётом моделирования разрушения, позволяет рассматривать статическую работу системы плотина основание фактически до исчерпания несущей способности.
2. Практически существуют две возможные схемы разрушения системы плотина-основание, потому что разрушение по схеме опрокидывания в сущности - разрушение по схеме плоского сдвига с учётом раскрытия контакта плотины с основанием.
3. При высоких сдвиговых параметрах контакта бетона-скалы, при упоре в скальное основание или при глубоких врезках сдвиг плотины по её контакту с основанием, по-видимому, исключается. В этом случае, реальной схемой разрушения системы плотины-основание может являться схема разрушения в виде предельного поворота. А сдвиг вторичен, как окончательный механизм перемещения сооружения после разрушения.
4. При определении коэффициента устойчивости системы плотина-основание, необходимо учитывать крупные трещины в основании, а также раскрытие контакта и процесс образования новых трещин, вызывающие уменьшение устойчивости сооружения.
5. При определении НДС бетонной плотины на скальном основании необходимо использовать модель с блочным основанием или с реальной схемой трещиноватости (геомеханическую модель), которая существенно влияет на характер разрушения основания.

Литература

1. ФишманЮ. А. Устойчивость водополпорных бетонных сооружений и их сопряжение со скальным основанием. Международный журнал помеханике горных пород 2009; 46:957-996
2. Газиев Э.Г Скальные основание бетонных плотин. М. АСВ, 2005.

3. Орехов В.Г, Зерцалов М.Г. – Механика разрушения инженерных сооружений и горных массивов. Москва 1999
4. Толстиков В.В. – Моделирование работы швов и трещин в расчетах напряженно-деформированного состояния бетонных плотин. Вестник МГСУ №2, 2006 с. 123-132.

Literature

1. Fishman Yu. A. Ustoichivost' vodopolpornykh betonnykh sooruzhenii i ih sopryajenie so skal'nykh osnovaniem. Mejdunarodnyi jurnal pomehanike gornyh porod 2009; 46:957-996
2. Gaziev E.G. Skal'nye osnovanie betonnykh plotin. M. ASV, 2005.
3. Orehov V.G, Zercalov M.G. – Mehanika razrusheniya injenernykh sooruzhenii i gornyh massivov. Moskva 1999
4. Tolstikov V.V. – Modelirovanie raboty shvov i treschin v raschetah napryajenno-deformirovannogo sostoyaniya betonnykh plotin. Vestnik MGSU №2, 2006 s. 123-132.

Ключевые слова: бетонная гравитационная плотина, скальное основание, блочное основание, сдвиг, опрокидывание, предельный поворот, трещина, раскрытие трещины, разрыв, разрушение, контакт плотины с основанием, численный метод, коэффициент перегрузки.

Keywords: concrete gravity dam, rock, block foundation, sliding, overturning, limiting turning, crack, crack opening, rupture, crushing, destruction, contact between dam and foundation, numerical method, overload coefficient.

*Почтовый адрес автора: 129337, Москва, Ярославское ш. 26
Телефон/факс автора: 8-916 924 75 18, 8-925 065 22 79
e-mail автора: v.tolstikov@gmail.com, nghiand@wru.edu.vn*

Статья представлена Редакционным советом «Вестника МГСУ»