

ГИДРОТЕХНИКА

А. Б. БАГДАСАРЯН

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ЗОН
ТРЕЩИН СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ БЕТОННЫХ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН

Гравитационные плотины по сравнению с другими типами имеют простую конструкцию, позволяют применять наиболее дешевые способы укладки бетона, дают возможность получить наиболее компактную компоновку основных сооружений гидроузла и т. д.

В данной работе приводится методика расчета напряженного состояния скального основания с учетом характера и зон разрушения. Эти расчеты могут служить основой для создания облегченных экономичных профилей по бетонным гравитационным плотинам.

§1. Современное состояние вопроса

Расчеты и исследования напряженного состояния оснований бетонных плотин показывают, что избежать растягивающих напряжений в основании практически невозможно [1]. Подавляющее большинство плотин в этих условиях успешно эксплуатируется. Наличие в основании почти всех бетонных плотин растягивающих напряжений означает, что нет необходимости вводить ограничение на недопущение этих напряжений по контакту бетон-скала, которые во многих случаях являются определяющими при назначении габаритов плотин.

Традиционным методом оценки надежности высоких бетонных плотин по нормам проектирования является определение устойчивости против сдвига.

Расчет устойчивости против опрокидывания для бетонных плотин не производится в силу требования с недопустимости на их подошве растягивающих напряжений с предельно осторожным назначением величины сдвиговых характеристик к породе основания.

Экспериментальным исследованием установлено, что отсутствие в подошве плотины нормальных растягивающих напряжений еще не означает невозможности потери ею устойчивости в форме опрокидывания [1]. Как показывают полевые исследования штампов и испытания моделей [1, 2], верхняя часть плотины вместе с частью скального массива отделяется, а нарастающие напряжения под весом плотины

производят дробление скального массива. Этим теряется несущая способность основания и плотина проворачивается.

Такой характер потери несущей способности основания объясняется развитием в основании плотины двух видов разрушения: разрушение путем образования трещин-отрыва у верхнего бьефа и трещин-скола на низовой части основания. Определяя области разрушения, поля напряжений и смещений основания, можно оценить его несущую способность и определить запасы устойчивости против сдвига и опрокидывания.

При условии применения специальных конструктивных мероприятий, учитывающих растягивающие напряжения, надежность таких плотин может быть даже выше надежности тех плотин обычного классического профиля, напряженное состояние которых, в основном, не изучено.

§ 2. Математическое описание деформации и разрушения скальных пород и граничные условия

Твердые горные породы под действием интенсивных нагрузок обнуживают хрупкость: разрушение с образованием многочисленных трещин. Кроме того, они обладают упруго-пластическими свойствами. Критическое состояние, предшествующее разрушению, описывается некоторым инвариантным соотношением, связывающим компоненты тензора напряжений и условия прочности. В общем случае это условие для изотропного материала запишется в виде [3]:

$$\Phi(N_1, N_2, N_3) \leq 0, \quad (1)$$

где N_1, N_2, N_3 — главные напряжения.

При изменении граничных условий задачи разрушение, начавшись в некоторых точках рассматриваемого объема породы, будет передаваться другим элементам, причем, в каждом элементе перед его разрушением будет достигнуто равенство (1). Совокупность элементов рассматриваемого объема пород, в которых достигнуто равенство (1) и которые в следующем этапе окажутся разрушенными, образуют границу между неразрушенной частью породы и разрушенной. Равенство (1) представляет собой граничное условие, достигаемое на заранее неизвестной, определяемой в процессе решения, задачи при приближении к ней из неразрушенной области. По обе стороны от этой поверхности деформация среды описывается разными системами уравнений для неразрушенной и разрушенной областей.

Если главные напряжения могут стать растягивающими, то простейшим ограничением для изотропного материала будут условия

$$N_i \leq \sigma_{*i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

где σ_{*i} — критическое значение растягивающих напряжений.

При достижении в каком-либо из этих соотношений равенства произойдет отрыв на главной площадке, после чего на ней главное напряжение обратится в нуль. Это условие вначале достигается у верхнего бьефа основания плотины. Если же главные напряжения сжимающие, то разрушение произойдет путем скола площадок, на которых действуют максимальные касательные напряжения.

В соответствии с этим условие (1) сводится к соотношению:

$$|N_j - N_k| \leq 2\tau_{jk}, \quad (j, k = 1, 2, 3) \quad (3)$$

где τ_{jk} — критическое значение касательных напряжений. Если напряжение будет соответствовать равенству условия (3), то образуются трещины касательного разрыва на соответствующих площадках. В материалах, разрушенных трещинами скола, имеет место пластическое течение, характеризующееся трением между обломками материала. В неразрушенной области материал описывается по закону Гука

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{E}{1-\sigma^2} \varepsilon_x + \frac{E\sigma}{1-\sigma^2} \varepsilon_y; \\ \varepsilon_y &= \frac{E}{1-\sigma^2} \varepsilon_y + \frac{E\sigma}{1-\sigma^2} \varepsilon_x; \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\sigma)} \varepsilon_{xy}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

где ε_x , ε_y , τ_{xy} и ε_x , ε_y , ε_{xy} — напряжения и деформации в координатных площадках; u , v — смещения, соответственно, по направлениям X и Y ; E — модуль упругости; σ — коэффициент Пуассона.

Если во внутренних или граничных точках достигнуто равенство условия (2), то материал разрушается путем отрыва в главных площадках.

Считается, что в областях разрушения допустимо описание процесса уравнениями сплошной среды. В области разрушения трещинами отрыва для облегчения математического описания состояния примем, что они образуются параллельно оси X . Главные площадки имеют небольшой уклон в сторону нижнего бьефа. Допущение, что они горизонтальные, мало искажает картину состояния и для инженерных расчетов можно считать приемлемым.

Напряжения и деформации в области разрушения путем отрыва при этих допущениях выражаются формулами

$$\sigma_x = E\varepsilon_x, \quad \sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0, \quad \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = -\sigma \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (5)$$

В точках, где достигнуто равенство условия (3), разрушение происходит трещинами скола. Считается, что материал, находящийся в пластическом течении, описывается законом Гука для объемной деформации и условием пластичности

$$\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_{12}, \quad (6)$$

где τ_{12} — характеризует трение по поверхности трещины скола.

Связь между напряжениями и деформациями в области разрушения путем скола записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{2(1-\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \tau_{12}, \\ \sigma_y &= \sigma_x - 2\tau_{12}, \quad \tau_{xy} = \tau_{12}, \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

§3. Постановка и метод решения задачи

Задача определения напряженно-деформированного состояния скального основания с учетом трещинообразования для бетонных гранитационных плотин сводится к плоской задаче полупространства, заполненного линейно-деформированным хрупким материалом на отрезке поверхности $|x| \leq a$ (рис. 1), на которой действуют нормальная и касательная распределенные нагрузки.

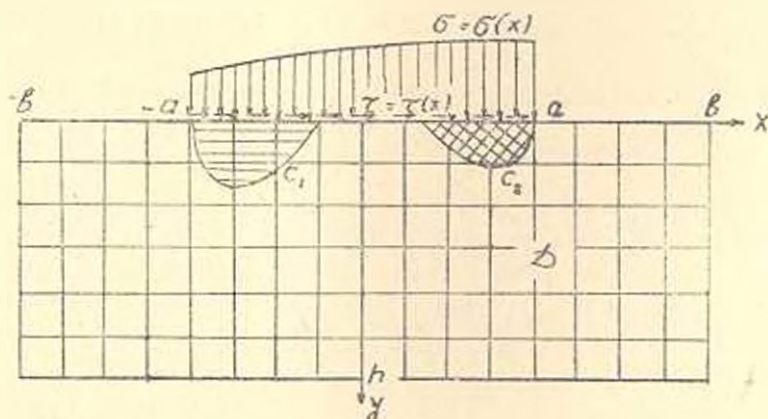


Рис. 1.

Согласно принципу минимума потенциальной энергии [4], решение задачи о равновесии линейно-деформируемого тела в случае плоской деформации сводится к минимизации функционала

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} \iint_D (\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + 2\sigma_{xy}\varepsilon_{xy} + \sigma_{yy}\varepsilon_{yy}) dx dy + \int_{-a}^a q \delta v dx, \quad (8)$$

где D — область упругого равновесия; C — граница, где задана интенсивность нагружения $\bar{\sigma}_0$; $\delta\sigma_x$, $\delta\sigma_{xy}$, $\delta\sigma_y$ и $\delta\epsilon_x$, $\delta\epsilon_{xy}$, $\delta\epsilon_y$ — приращения напряжений и деформаций.

Задачу можно решить и перемещениях, определив $u(x, y)$, $v(x, y)$.

Общий план решения задачи заключается в следующем.

1. Составляются граничные условия на поверхности полупространства $y = 0$:

$$\begin{aligned} \sigma_y = \tau(x); \quad \tau_{xy} = \tau(x), \quad \text{при } |x| \leq a; \\ \sigma_y = \tau_{xy} = 0, \quad \text{при } |x| > a; \end{aligned} \quad (9)$$

а на поверхности $y = h$; $u = v = 0$.

2. Определяются внутреннее и граничное значения функции перемещений и их производных.

3. Минимизируется функционал (8) с выполнением граничных условий.

4. Вычисляется напряжение и определяется область разрушения по граничным условиям (2) и (3).

Для минимизации функционала целесообразно пользоваться методом локальных вариаций [5], так как рассматриваемую задачу можно решать только численно с использованием современных ЭВМ. Решение нужно строить с постепенным увеличением интенсивности нагрузки. Процесс решения задачи аналогичен с [6]. Нагрузка, действующая на отрезке $|x| \leq a$, разбивается на n частей. Для начала принимается нагрузка, равная $\sigma_1(x) = \frac{\sigma(x)}{n}$, $\tau_1(x) = \frac{\tau(x)}{n}$. Начальное распределение напряжений в области D можно принимать нулевым или из известных решений.

Определяя напряженно-деформированное состояние, увеличиваем нагрузку для второго этапа, равную $\sigma_2(x) = \frac{2\sigma(x)}{n}$, $\tau_2(x) = \frac{2\tau(x)}{n}$ и при помощи локальной вариации определяем напряженно-деформированное состояние, одновременно проверяя условия (2) и (3).

В процессе последовательного решения задачи при стремлении нагрузки к истинной определяются границы области разрушения.

Имеют место следующие граничные условия.

1. На поверхности C_1 (граница области разрушения путем отрыва):
а) со стороны неразрушенного материала (рис. 1)

$$N_1 = \sigma_1;$$

б) со стороны области разрушения

$$\sigma_y = 0; \quad (10)$$

в) на границах разрушения (контактный разрыв)

$$u_1 = u_2, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u_2}{\partial x}.$$

Здесь индексами 1 и 2 обозначены значения величин, соответственно, в неразрушенной и разрушенной средах.

2. На поверхности C_2 (граница области разрушения путем скола):
а) со стороны разрушенного материала

$$|N_1 - N_2| = 2\sigma_0;$$

б) на границе разрушения путем скола

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_2, & v_1 &= v_2, \\ \frac{\partial u_1}{\partial x} &= \frac{\partial u_2}{\partial x}, & \frac{\partial v_1}{\partial y} &= \frac{\partial v_2}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

На каждом этапе решение задачи сводится к определению в неразрушенной области смещения и его производных, после чего из граничных условий (10) и (11) определяем смещение и деформации в разрушенных областях, а по формулам (5) и (7) вычисляем напряжения и одновременно определяем новые границы разрушенного материала.

Напряжения, вычисленные в разрушенной области, служат граничными условиями для контуров C_1 и C_2 для следующего этапа вычисления. После n циклов, при достижении истинной нагрузки, определяем поля напряжений и смещений как в неразрушенной, так и в разрушенной областях.

Выбирая различные облегченные профили для гравитационных плотин и определяя соответствующие напряженно-деформированные состояния, а также области и характер разрушения, получим возможность создания новых экономических профилей плотины в зависимости от действующих нагрузок и от физико-механических характеристик скального основания.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 25.IV.1977

Ա. Բ. ՔԱՎՐԱՍՍԱՆՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԱՅԻՆ ԿՐԱՎԵՍԱՑԻՈՆ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ԺԱՅԻԱՅԻՆ ԶԻՈՆԱՏԱԿՐՈՒՄ ԸԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԵՎ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ՏԻՐՈՒՅԹՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա. Բ. ՔԱՎՐԱՍՍԱՆՅԱՆ

Հաշվարկները և հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ ժայռային պատերների վրա կառուցված բետոնային դրափիտային պատվարների հիմնաքանկերում ձգող լարումներից խոսափելը անհնար է:

Փորձնական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ բետոն-ժայռ կոնտակտում ձգող լարումների բացակայության դեպքում էլ պատվարների ժայռունության կորուստը կատարվում է շրջվելով: Այդպիսի կայունության

կորստի պատճառը հանդիսանում է հիմնականում ճաքերի առաջացումը. վերին կողմում՝ պոկման, իսկ ներքին կողմում՝ րեկորային ճաքեր:

Հոգվածում բերված է մայրային հիմնատակերում լարվածությունների, բայրազման տիրույթների տարածման, նրանց բնույթի որոշման խնդրի դրվածքը, ինչպես նաև այդ խնդրի թվային եղանակով լուծման մեթոդի նկարագրությունը: Այս խնդրի լուծումը հնարավորություն կտա նոր էկոնոմիկ պատվարների կոնստրուկցիաների ստեղծմանը, որոնք կարող են լինել ափիկոտային, բան դասական կոնստրուկցիաների պատվարները, որոնց հիմնատակերում լարվածային վիճակը չի ուսումնասիրված:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Филипп Ю. А.* Напряженное состояние скальных оснований бетонных плотин. «Гидротехническое строительство», 1975, № 3.
2. *Филипп Ю. А.* Исследование кинематики разрушения блочного скального основания в процессе сдвига бетонных сооружений. Тр. Всесоюзн. конф. «Методы определения напряженного состояния и устойчивости высоконапорных гидротехнических сооружений», МИСИ, 1972.
3. *Григорян С. С.* Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород. ПММ, 1967, № 4.
4. *Тимошенко С. П.* Теория упругости, М.,—Л. гостехиздат, 1934.
5. *Баничук М. В., Петров В. М., Черноусько Ф. Л.* Алгоритмы метода локальных вариаций для задачи с частным производным. Институт проблем механики АН СССР, бр. № 4, 1971.
6. *Григорян С. С.* К вопросу применимости теории упругости в строительной механике грунтов. Сб. тр. Межд. Конгр. «Механика сплошной среды и родственные проблемы анализа», М., изд. МГУ, 1972.