

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Г. Г. ХАЧИКЯН

ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В МАССИВЕ
ГОРНЫХ ПОРОД, ПЕРЕСЕКАЕМЫХ НАПОРНЫМИ ТОННЕЛЯМИ,
НА КОЭФФИЦИЕНТ ОТПОРА

Благодаря упругим свойствам массивов горных пород, значительно облегчаются условия статической работы обделок тоннелей и повышается их несущая способность [1]. Учет совместной работы тоннельной обделки и массива горных пород, в котором сооружается тоннель, дает большой экономический эффект народному хозяйству.

Способность горных пород сопротивляться деформациям обделки характеризуется коэффициентом отпора породы и принимается обратно пропорциональной перемещениям обделки, нормальным к ее поверхности [2].

Натурными исследованиями по определению деформативных свойств горных пород в тоннельных выработках ряда гидроэлектростанций в Закавказье установлено, что коэффициент отпора породы зависит от интенсивности нагрузки на горную породу. В отдельных случаях его величина резко понижается с повышением внутреннего гидростатического давления [3, 4].

При умеренных нагрузках, в зависимости от физико-механических свойств породы, сохраняется линейная зависимость между давлением и радиальным перемещением по контуру подземной выработки, т. е. материал находится в упругом состоянии. Упругие деформации продолжаются до определенного значения нагрузки на горную породу, после чего появляются пластические, необратимые деформации. При высоких нагрузках в некоторых горных породах пластические деформации значительно превышают упругие. Находящиеся вокруг тоннельной выработки горные породы, в первый момент после заполнения тоннельного пространства водой с постоянным напором P , испытывают только упругие деформации. С дальнейшим ростом давления, в зависимости от величины напряжений в массиве и физико-механических свойств горных пород, начинаются пластические перемещения пород или явления трещинообразования.

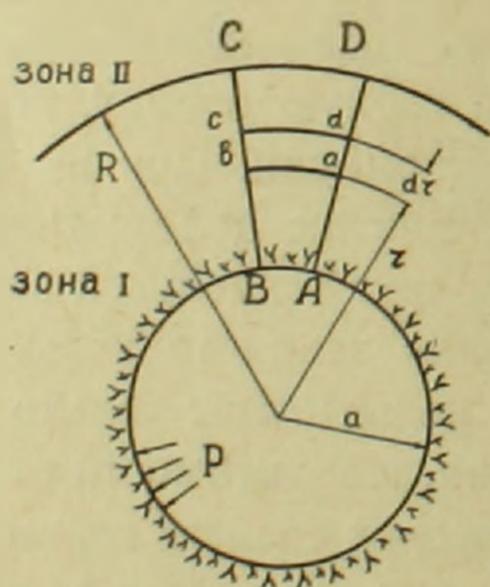
Первый случай будет иметь место при наличии пластичных пород, которые способны принимать значительные деформации без нарушения сплошности массива. Второй случай, т. е. трещинообразование, имеет место при наличии скальных пород, как только растягивающие напряжения превышают определенный предел.

При наличии пластичной горной породы вокруг тоннельных выработок ее работа на внутреннее давление воды совместно с обделкой напорного тоннеля, имеющей высокую жесткость, приводит к тому, что почти все внутреннее давление воды передается на обделку. Доля внутреннего давления воды, воспринимаемого пластичной породой, обычно столь незначительна, что им можно пренебречь, т. е. принять коэффициент отпора такой породы равным нулю. В практике тоннелестроения, в большинстве случаев, высоконапорные тоннели сооружаются в скальных горных породах, чем обеспечивается возможность передать на стенки выработки значительную часть внутреннего давления воды.

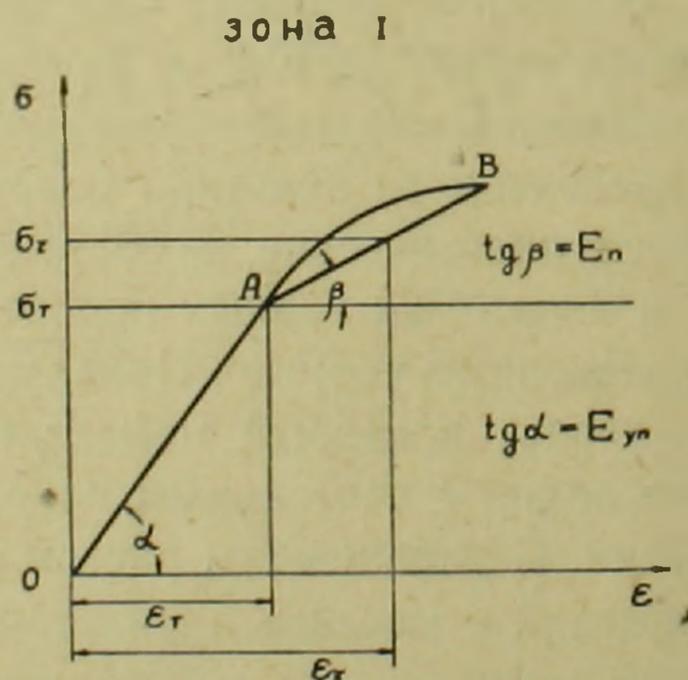
Исходя из этих обстоятельств, при теоретических исследованиях вопроса определения упругих и деформативных характеристик горных пород, необходимо учитывать как упругое, так и пластическое состояние горного массива. Для определения перемещения горной породы по контуру подземной выработки под действием напора воды изнутри напорного гидротехнического тоннеля, применяем методы теории малых упруго-пластических деформаций [5].

Приведенные ниже теоретические расчеты относятся также к подземным напорным выработкам круглого сечения, предназначенным для хранения жидкого топлива и газов. Работа эта выполнена в секторе геологии тоннелей ИГН АН Армянской ССР, научный руководитель канд. техн. наук Г. П. Завряян.

При высоких напорах внутри тоннеля, в определенной зоне вокруг выработки, растягивающие напряжения превышают предел упругости для данной породы — σ_T , вследствие чего нарушается линейный закон зависимости между давлением и перемещением поверхности выработки напорного тоннеля. В пределах этой зоны скального массива с радиусом R (зона I) появляются трещины в радиальном направлении (фиг. 1). В



Фиг. 1.



Фиг. 2.

этой области массива горные породы работают только на сжатие. За пределом этой разрушенной зоны, горные породы остаются в упругом состоянии и испытывают как растягивающие, так и сжимающие напряжения — зона II.

Кривую диаграммы одноосного сжатия упруго-пластических деформаций материала первой зоны (фиг. 2) приближенно заменим ломаной линией ОАВ, состоящей из двух прямых линий, первая ОА, соответствует упругому поведению горной породы, вторая АВ—пластическому. В этом случае имеем два модуля деформации: на участке ОА—модуль упругости $E_{уп} = tg\alpha$; на участке АВ—модуль упрочнения $E_{п} = tg\beta$. Диаграмму одноосной деформации материала второй зоны принимаем прямолинейной и считаем, что предел упругости материала равен его пределу прочности при растяжении, т. е. $\sigma_T \approx \sigma_0$.

Модуль упругости для второй зоны $E_0 = tg\gamma$ (фиг. 3).

Предполагается, что этот модуль, вообще говоря, выше модуля упругости $E_{уп}$, претерпевшего трещинообразование материала первой зоны.

Относительное понижение модуля упругости породы при переходе в пластическое состояние обозначим буквой λ .

$$\lambda = \frac{E_{уп} - E_{п}}{E_{уп}}$$

λ — называется коэффициентом относительного уменьшения модуля деформации.

Значение $\lambda = 0$ соответствует упругому участку, $\lambda = 1$ — идеальной пластичности.

Сжимающие напряжения соответственно для точек, лежащих на окружности радиуса a и для точек на окружности радиуса R , будут — p и σ_0 , где σ_0 — предел прочности породы при растяжении.

Поскольку на плоскостях радиальных трещин напряжения равняются нулю, деформация элементарного объема породы в трещиноватой зоне $abcd$ в радиальном направлении будет:

$$du = \epsilon_r dr - \mu_0 \epsilon_z dr = (1 - \mu_0^2) \epsilon_r dr \quad (1)$$

где ϵ_z — деформация, параллельная продольной оси тоннеля.

Принимается, что величина коэффициента поперечной деформации μ_0 не зависит от давления на породу.

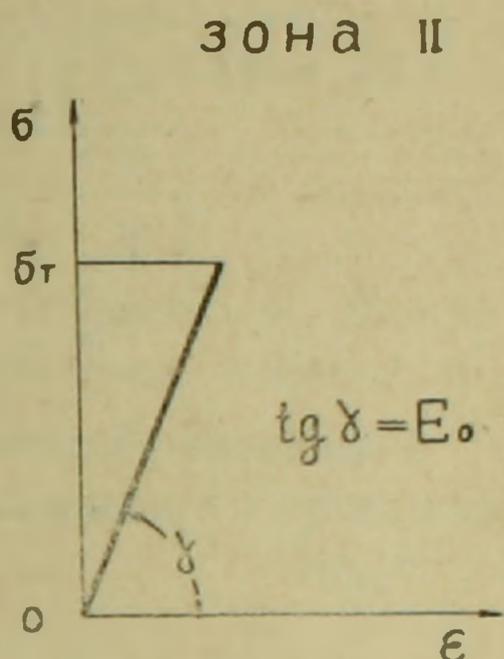
Определим величину относительной деформации на пластическом участке из диаграммы фиг. 2.

$$\epsilon_r = \epsilon_T + \frac{\sigma_r - \sigma_T}{E_{п}} \quad (2)$$

Из условия равновесия цилиндрического клина АВба имеем:

$$pa = \sigma_r r \text{ откуда } \sigma_r = p \frac{a}{r}.$$

Подставляя значение σ_r в выражение (2), а также принимая во внимание, что $\sigma_T = \sigma_0 = E_{уп} \epsilon_T$, получим:



Фиг. 3.

$$\varepsilon_r = \frac{pa}{E_n r} - \frac{\lambda \sigma_0}{E_n}$$

Подставляя значение ε_r в дифференциальное уравнение (1), последнее получит следующий вид:

$$du = (1 - \mu_0^2) \left[\frac{pa}{E_n r} - \frac{\lambda \sigma_0}{E_n} \right] dr.$$

Определим перемещение точки А от деформации массива трещиноватой зоны

$$U_{1A} = (1 - \mu_0^2) \int_a^R \left(\frac{pa}{E_n r} - \frac{\lambda \sigma_0}{E_n} \right) dr = (1 - \mu_0^2) \left[\frac{pa}{E_n} \int_a^R \frac{dr}{r} - \frac{\lambda \sigma_0}{E_n} \int_a^R dr \right] = \frac{(1 - \mu_0^2)a}{(1 - \lambda) E_{yn}} \left[p \ln \frac{p}{\sigma_0} - \lambda(p - \sigma_0) \right] \quad (3)$$

Радиальное перемещение точки А от деформации цельного, неповрежденного трещинами массива горной породы, согласно формуле Ляме, будет:

$$U_{2A} = \frac{1 + \mu_0}{E_0} p R = \frac{1 + \mu_0}{E_0} pa \quad (4)$$

Определим суммарное перемещение точки А от деформаций двух зон скального массива

$$U_A = U_{1A} + U_{2A} = \frac{(1 - \mu_0^2)a}{(1 - \lambda) E_{yn}} \left[p \ln \frac{p}{\sigma_0} - \lambda(p - \sigma_0) \right] + \frac{1 + \mu_0}{E_0} pa \quad (5)$$

Определим коэффициент отпора данной выработки:

$$K = \frac{p}{U_A} = \frac{1}{\frac{(1 - \mu_0^2)a}{(1 - \lambda) E_{yn}} \left[\ln \frac{p}{\sigma_0} - \lambda \left(1 - \frac{\sigma_0}{p} \right) \right] + \frac{(1 + \mu_0)a}{E_0}} \quad (6)$$

Учитывая, что $(1 - \lambda) E_{yn} = E_n$ по определению, а также производя некоторые преобразования, формулу (6) можно записать в таком виде:

$$K = \frac{E_0}{(1 + \mu_0) a \left[1 + (1 - \mu_0) \frac{E_0}{E_n} \ln \frac{p}{\sigma_0} - \lambda (1 - \mu_0) \left(1 - \frac{\sigma_0}{p} \right) \frac{E_0}{E_n} \right]} \quad (7)$$

Полученная формула (7) представляет собой общее выражение коэффициента отпора скального массива. Она учитывает все практически возможные возникать состояния скальной горной породы. Согласно этой формуле, коэффициент отпора горной породы для выработки напорного тоннеля зависит как от упругих характеристик породы, так и от ин-

тенсивности нагрузки на скальный массив и коэффициента относительного уменьшения модуля деформации при упруго-пластических деформациях. Величина коэффициента отпора породы обратно пропорциональна радиусу подземной выработки. С возрастанием внутреннего давления в выработке напорного туннеля, величина коэффициента отпора породы понижается.

Как видно из выражения (6), при $\lambda = 1$, т. е., когда порода переходит в чисто пластическое напряженное состояние, то $K = 0$.

В том случае, когда после образования трещин в массиве, горные породы под действием данной нагрузки сохраняют упругие свойства, т. е. при $\lambda = 0$, формула (7) получает следующий вид:

$$K = \frac{E_0}{(1 + \mu_0)a \left[1 + (1 - \mu_0) \frac{E_0}{E_{yn}} \ln \frac{p}{\sigma_0} \right]} \quad (8)$$

Перейдем к случаю, когда возникновение трещин в породе не вызывает резкого изменения напряженного состояния массива, а модуль деформации породы остается постоянным, т. е. $E_{yn} = E_0$. Тогда формула (8) упростится:

$$K = \frac{E_0}{(1 + \mu_0)a \left[1 + (1 - \mu_0) \ln \frac{p}{\sigma_0} \right]} \quad (9)$$

Как показывает формула (9), при упругих деформациях также имеет место понижение коэффициента отпора породы с ростом гидростатического давления, при условии если $p > \sigma_0$.

Зависимость между коэффициентом отпора породы и давлением подчиняется логарифмическому закону.

При $p = \sigma_0$, формула (9) получает следующий вид:

$$K = \frac{E_0}{(1 + \mu_0)a} \quad (10)$$

Следовательно, в случае низконапорных выработок, когда под давлением внутри туннеля в монолитном массиве трещинообразование не происходит, коэффициент отпора породы зависит только от упругих характеристик породы.

Полученные формулы позволяют определять путем перерасчета величины коэффициента отпора породы для сечения проектируемого туннеля, на основе данных, полученных на опытных выработках малых размеров.

Они также дают возможность вычислять коэффициент отпора породы при величине интересующего нас внутреннего давления, на основе результатов испытаний опытными нагрузками. Определим зависимость между коэффициентами отпора породы при испытаниях под разными нагрузками на стенки подземной выработки. Для упругого тела, имеющего зону трещинообразования имеем:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{1 + (1 - \mu_0) \ln \frac{P_2}{\sigma_0}}{1 + (1 - \mu_0) \ln \frac{P_1}{\sigma_0}}$$

или

$$K_2 = K_1 \frac{1 + (1 - \mu_0) \ln \frac{P_1}{\sigma_0}}{1 + (1 - \mu_0) \ln \frac{P_2}{\sigma_0}}. \quad (11)$$

Когда имеются данные испытаний для абсолютно жестких и монолитных скальных пород, при нагрузках, не превышающих временное сопротивление породы на растягивающие усилия, то коэффициент отпора породы при давлении $P_2 > \sigma_0$ можно определить с помощью формул (9) и (10)

$$K_2 = \frac{K_1}{1 + (1 - \mu_0) \ln \frac{P_2}{\sigma_0}}. \quad (12)$$

Приведенные теоретические выражения показывают, что при расчете тоннельных обделок, величину коэффициента отпора породы нужно выбирать в зависимости от давления, действующего внутри подземной выработки.

Формулы, полученные на основе законов теории малых упруго-пластических деформаций, характеризуют влияние трещинообразования, вызванного давлением воды в напорном тоннеле на величину коэффициента отпора массива скальных пород. Эти зависимости после их экспериментальной проверки позволят экстраполировать величины коэффициентов отпора пород для выработок высокого давления на основе данных испытаний, полученных в низконапорных выработках малых размеров. Это позволит значительно улучшить проектирование напорных тоннелей за счет учета реальных деформативных характеристик горных пород и даст высокий экономический эффект.

Институт геологических наук
АН Армянской ССР

Поступила 10.IX. 1961.

Հ. Գ. ԽԱՉԻԿՅԱՆ

ՃԵՂՔԱԳՈՅԱՑՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՃՆՇՄԱՆ ԹՈՒՆԵԼՆԵՐՈՎ ՀԱՏՎՈՂ
ԼԵՌՆԱՅԻՆ ԱՊԱՐՆԵՐԻ ԶԱՆԳՎԱԾԻ ԸՆԴԴԻՄԱՊՐՈՒԹՅԱՆ
ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Ներկա հոդվածի նպատակն է տեսականորեն բացահայտել ճեղքագոյացման ազդեցությունը լեռնային ապարների ընդդիմադրուծյան գործակցի մեծության վրա ճնշման թունելի փորվածքում:

Ինչպես ցույց են տալիս բնական փորձարկումները ստորերկրյա պայմաններում, լեռնային ապարները կախված ֆիզիկո-մեխանիկական հատկություններից ջրի ներքին ճնշման տակ կրում են թե առաձգական, և թե պլաստիկ դեֆորմացիաներ: Այնպիսով այս հանգամանքից, անհրաժեշտ է տեսական ուսումնասիրությունների ժամանակ հաշվի առնել նաև ապարների պլաստիկ վիճակը: Լեռնային ապարների դեֆորմացիաները ճնշման թունելում որոշելու համար մենք օգտագործել ենք առաձգական-պլաստիկ փոքր դեֆորմացիաների թեորիայի օրենքները: Ստացված հաշվարկային բանաձևերը ցույց են տալիս, որ ժայռային ապարների ընդդիմադրության գործակիցը կախված է ճնշման մեծությունից, փորվածքի ներքին շառավիղից և ապարի դեֆորմացիայի մոդուլի հարաբերական փոքրացման գործակցից: Այդ արտահայտությունների շնորհիվ հնարավոր է դառնում ցածր ճնշման փորվածքներում կատարած փորձերի տվյալների հիման վրա որոշել ապարների ընդդիմադրության գործակցի մեծությունը մեծ ճնշումների դեպքում:

Ստացած բանաձևերը ցույց են տալիս, որ լեռնային ապարների ընդդիմադրության գործակցի մեծությունն իջնում է ինչպես զանգվածում պլաստիկ դեֆորմացիաներ առաջանալիս, այնպես էլ ապարների առաձգական վիճակի դեպքում, երբ տեղի է ունենում ճեղքագոյացում: Ուստի անհրաժեշտ է, որ թունելների նախագծման ժամանակ, լեռնային ապարների ընդդիմադրության գործակիցը ընտրելիս հաշվի առնել նրանց վրա ազդող ուժերի մեծությունը: Լեռնային ապարների իրական դեֆորմատիվ հատկությունների գնահատումը զգալիորեն կբարելավի ճնշման թունելների նախագծումը և կտա մեծ տնտեսական էֆեկտ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Давыдов С. С. Расчет и проектирование подземных конструкций, Госстройиздат, 1950.
2. Дандуров М. И. Тоннели, Трансжелдориздат, М., 1952.
3. Завряян Г. П. Испытание упругих свойств горной породы в тоннеле Озерной Гидроэлектростанции Севанстроя. «Гидротехническое строительство», № 9, 1946.
4. Завряян Г. П. Понижение величины коэффициента отпора горной породы с возрастанием внутреннего давления в выработке напорного тоннеля. «Известия» ТНИСГЭИ, № 10, 1958.
5. Никифоров С. Н. Теория упругости и пластичности, М., 1955.