

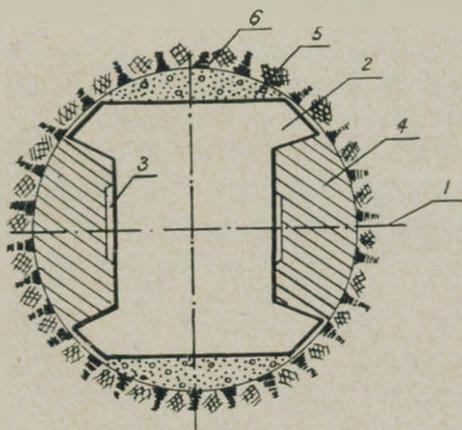
Е. Г. ЗАВРИАН

СИЛОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Исследование естественных (бытовых) напряжений в массиве горной породы имеет важное значение при строительстве тоннелей, высоких плотин и других сооружений. Особый интерес представляют эти исследования при укреплении горных пород методом цементации [6] и в изучении состояния пород при тектонических движениях горных пластов [10].

Довольно широкое применение для исследования напряженного состояния горных пород получили методы разгрузки и компенсационный. Недостатком этих методов является: у первого метода — необходимость предварительно определять модуль упругости горной породы. Второй метод весьма трудоемкий и, кроме того, не пригоден для определения растягивающих напряжений в горном массиве.

Здесь предлагается новый способ исследования напряжения в массиве пород. Задача определения напряжения сводится к следующему. В массиве горной породы пробуриваются одна за другой несколько скважин с установкой в них динамометров в последовательном порядке.

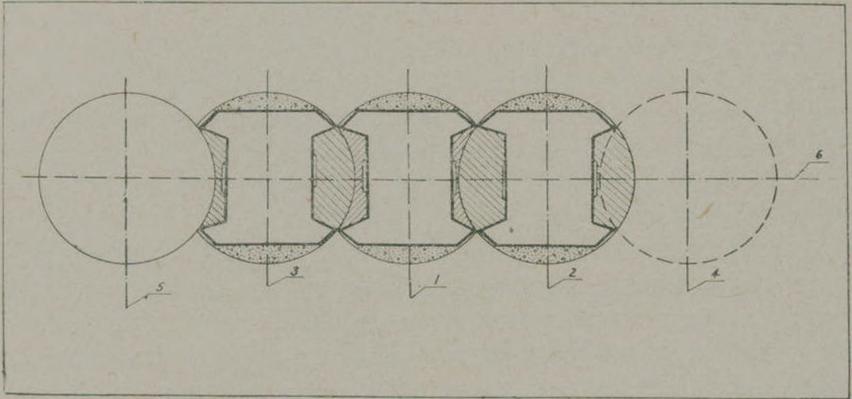


Фиг. 1. Установка динамометра в скважине при тандем-методе: 1 — направленные измерительной площадки; 2 — динамометр; 3 — датчики деформаций; 4 — губчатые пластмассовые вкладыши; 5 — буровая скважина; 6 — цементирующий заполнитель.

Для установки первого динамометра в горной породе (фиг. 1) разбуривается скважина до заданной глубины. Вокруг скважины происходит концентрация напряжений, которая весьма быстро затухает при удалении от стенки скважины вглубь массива. Необходи-

мо, чтобы жесткость прибора была, по возможности, больше жесткости горной породы или близка к ней. В первую скважину заводят динамометр и цементируется в скважине.

В заданной плоскости измерений пробуривают вторую скважину (фиг. 2), соседнюю с первой и пересекающую частично попереч-



Фиг. 2. Схема измерения гандем-методом: 1, 2, 3 — поочередно установленные динамометры; 4 — скважина, подготовленная к установке четвертого динамометра; 5 — проектное положение очередной скважины; 6 — направление „измерительной площадки“.

ное сечение первой скважины. Теперь уже происходит концентрация напряжений в массиве породы вокруг скважины № 2, а динамометр № 1 получает некоторую загрузку со стороны массива горной породы. После цементации динамометра № 2 пробуривают скважину № 3, лежащую в плоскости измерений по другому борту динамометра № 1, и устанавливают динамометр № 3. Аналогично пробуривают следующую пару скважин.

Активная зона горной породы, загружающая динамометр № 1, постепенно возрастает, вовлекая в работу новые пласты горной породы, отдаленные от плоскости разбуриваемых скважин. Будет возрастать и нагрузка на динамометр № 1 до тех пор, пока разбуривание новой пары скважин по краям зоны измерений не даст эффективного результата.

В прочных горных породах, не имеющих чрезмерных напряжений, можно ограничиться установкой динамометров с перерывами, т. е. оставляя часть скважин пустыми. В этом случае целесообразно применять такую последовательность расположения скважин, когда при первоначальном бурении остаются целики породы между скважинами, разбуриваемыми во вторую очередь.

Установка динамометра в скважине показана на фиг. 1. Динамометр, для получения достаточной жесткости, должен иметь мощный профиль. По обоим бокам металлического двутаврового профиля размещены датчики сопротивления, которые связаны проводами с центральной измерительной станцией.

Предварительно динамометры проходят тарировку в лаборатории под прессами. В начале создается нагрузка, заведомо превышающая будущую рабочую нагрузку прибора. Затем после нескольких циклов нагрузок и разгрузок, обеспечивающих «закалку» прибора, устанавливают зависимость между давлением на динамометр и его электрическим сопротивлением. Полученный таким образом тарировочный график позволит в дальнейшем при эксплуатации прибора непосредственно измерять давление горной породы на динамометр.

При установке динамометра в скважинах в верхней и нижней частях прибора размещаются датчики деформаций, которые связываются проводами с центральной измерительной страницей. Верхняя и нижняя части динамометра плотно цементируются с горной породой. В случае, если ведется измерение растягивающих напряжений в горной породе, то необходимо применять для цементации специальные составы, обеспечивающие восприятие растягивающих напряжений между динамометром и горной породой. При цементировании скважины могут образоваться вертикальные столбики из материала цементации, воспринимающие на себя часть вертикальной нагрузки. Во избежание этого динамометры должны быть снабжены по бокам вкладышами из губчатой пластмассы.

В зависимости от длины разбуриваемых скважин можно установить приборы в любой глубинной точке горного массива. Для данной группы скважин могут быть установлены комплексы динамометров в нескольких наиболее интересных участках массива породы.

Точность полученных результатов зависит от количества пробуренных скважин. Определяем количество скважин, необходимое для получения точности, достаточной для решения практических задач.

Рассмотрим два случая:

Случай 1. Массив горной породы находится в гидростатическом поле напряжения. Здесь вокруг пробуренной скважины напряжение можно определить по формуле Ляме:

$$\sigma_r = P \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_t = P \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

где P — первоначальное давление в массиве;

r — радиус какой-либо точки массива.

σ_r и σ_t — радиальные и тангенциальные напряжения.

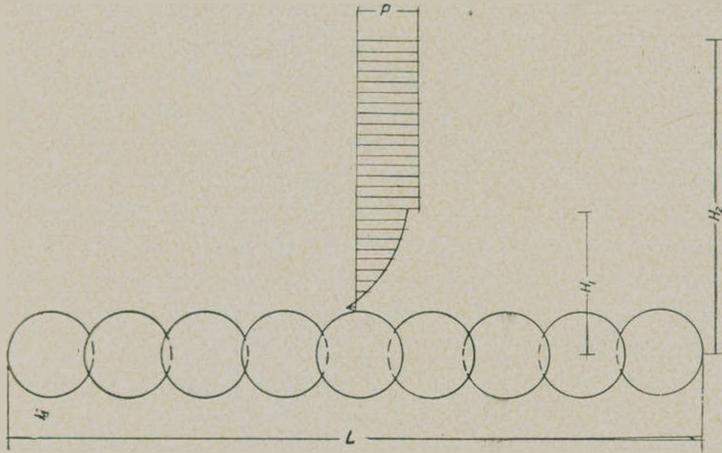
a — радиус скважины;

Настоящий расчет носит приближенный характер, поэтому пренебрегаем влиянием тангенциальных напряжений на работу динамометров. Тем более, что с ростом числа скважин и увеличением глубины активной зоны это влияние станет малозначительным.

Согласно расчетам тоннелей, по С. С. Давыдову (Л. 3), перемещения горной породы не происходят при нагрузке, отличающейся от бытовой менее, чем на 20%. Находим радиус первой активной зоны, в которой бытовые напряжения при проходке скважины изменяются в большей мере, чем указанный предел.

Задаем $\sigma_r = 0,8 P$ и подставляем в формулу (1), получаем $r_1 = 2,237 a$; принимаем высоту первой активной зоны $H_1 = 2,24 a$.

После бурения ряда скважин и установки в них динамометров образуется прорезь, на которую воздействует уже новая активная зона большой мощности, аналогично фиг. 5; высота этой зоны H_2 .



Фиг. 3. Эпюра σ_r для первой и второй активных зон при одноосном равномерном загрузении массива.

Согласно исследованиям [1, 8], для плоских динамометров, закладываемых в бетонные плиты, высота активной зоны равна половине диаметра плоского динамометра. Примем соответственно для нашего случая высоту второй активной зоны $H_2 = \frac{L}{2}$, где L — длина фронта бурения. Найдём деформацию столбца породы, расположенного над первой скважиной, высотой H_2 в предположении, что динамометры не установлены и нижний конец столбца может беспрепятственно перемещаться внутрь прорези.

Выделим элемент Δr столбца породы в пределах активной зоны H_1 . Радиальная деформация этого столбца будет равна

$$\Delta U_1 = \frac{\sigma_r}{E} \cdot \Delta r.$$

Суммарная деформация всего столбца высотой H_1 составит

$$U = \int_0^{H_1} \frac{\sigma_r dr}{E}.$$

Полная деформация столбца породы высотой H_2 составит в этом предположении

$$U = \int_a^{H_1} \frac{\sigma_r dr}{E} = \frac{(H_2 - H_1) \cdot P}{E}$$

Деформацию столбца породы после проходки всех скважин прези приравняем к деформации столбца, вызванной реакцией давления жестких динамометров. так как фактически перемещение нижнего конца столбца породы происходить не может

$$\int_a^{H_1} \frac{\sigma_r dr}{E} + \frac{(H_2 - H_1) \cdot P}{E} = \frac{\sigma_{\text{дин.}} (H_2 - a)}{E} \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{дин}}$ — давление горной породы, воспринимаемое динамометрами.

Учитывая формулу (1) и сокращая на E , получим

$$P \int_a^{H_1} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) dr + (H_2 - H_1)P = \sigma_{\text{дин.}} (H_2 - a). \quad (4)$$

Интеграл при $H_1 = 2,24a$ равен $0,685a$. (5)

Если заранее задаться числом скважин, то можно определить давление в горной породе, воспринимаемое динамометрами. Длина фронта бурения с учетом взаимного перекрытия скважин

$$L = 0,9nd \quad H_2 = \frac{L}{2} = 0,9na$$

где n — число скважин.

Подставляя в (4) и преобразуя с учетом (5)

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{дин.}} (0,9n - 1) &= (0,9n - 2,24)P + 0,685P \\ \sigma_{\text{дин.}} &= P \frac{0,9n - 1,55}{0,9n - 1,0} \end{aligned} \quad (5)$$

Подсчитаем $\sigma_{\text{дин.}}$ для различного числа скважин.

Таблица 1

| Число скважин n | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 |
|----------------------------------|-----|------|------|------|------|----|------|
| $\frac{\sigma_{\text{дин.}}}{P}$ | 0,0 | 67,3 | 84,1 | 89,5 | 92,3 | 94 | 95,7 |

Полагаем, что точность измерения будет достаточной, если принять пять скважин, из них три средние с динамометрами, и две крайние без приборов.

Случай 2. Массив породы находится в одноосном равномерном поле напряжений интенсивностью P . Напряжения в массиве (Л. 5 и Л. 9) после разбуривания скважины будут равны:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{P}{2} \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta \right] \\ \sigma_t &= \frac{P}{2} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta \right] \\ \tau_{rt} &= \frac{P}{2} \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cdot \sin 2\theta\end{aligned}\quad (6)$$

где σ_r — радиальные напряжения;

σ_t — тангенциальные напряжения;

τ_{rt} — касательные напряжения;

θ — угол радиуса с вертикалью.

Определяем напряжения σ_r по вертикальной оси, проходящей через центры скважины, т. е. при $\theta = 0$

$$\sigma_r = P \left(1 - 2,5\frac{a^2}{r^2} + 1,5\frac{a^4}{r^4}\right).\quad (7)$$

Далее расчет ведется, как в первом случае. Находим радиус первой активной зоны, где бытовые напряжения при проходке скважины изменяются меньше чем на 20%.

$$\frac{\sigma_r}{P} = 0,8.$$

Подставляем в (7) и преобразуем

$$0,8 = 1 - 2,5\frac{a^2}{r^2} + 1,5\frac{a^4}{r^4}.$$

Условиям задачи соответствует корень этого уравнения

$$r = 3,47a.$$

Принимаем $H_1 = 3,47a$.

Обозначим H_2 высоту второй активной зоны, образующейся после бурения данного цикла скважин (фиг. 3).

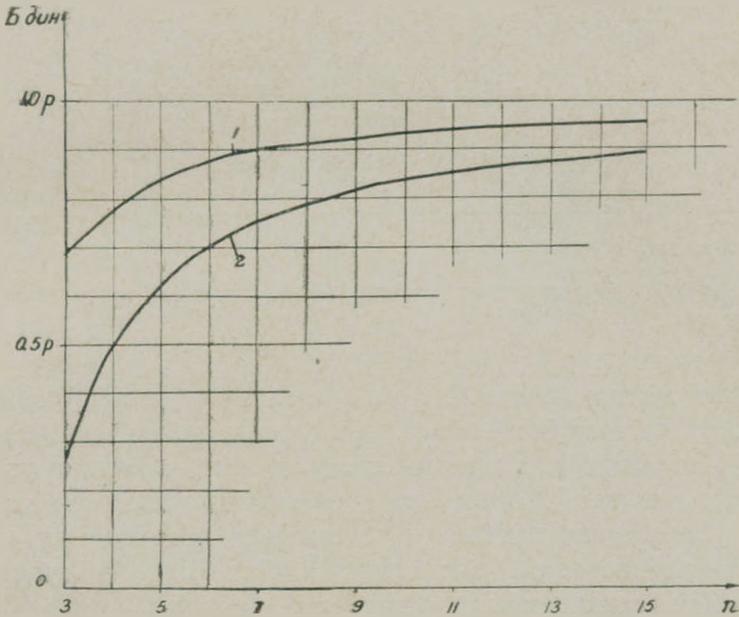
Найдем деформацию столбца над первой скважиной в условном предположении отсутствия динамометров

$$U = \int_a^{H_1} \frac{\sigma_r dr}{E} + \frac{(H_2 - H_1) \cdot P}{E}.$$

Однако эта деформация не может произойти, так как жесткие динамометры вернут столбец в первоначальное положение, создавая деформацию

$$U = \frac{\sigma_{\text{дин.}} (H_2 - a)}{E}$$

где $\sigma_{\text{дин.}}$ — напряжение в породе, воспринимаемое динамометрами.



Фиг. 4. Зависимость напряжений в горной породе, воспринимаемых динамометрами, от числа буровых скважин. 1—всестороннее равномерное загрузке горной породы; 2—одноосная равномерная нагрузка.

Отсюда получается с учетом (7)

$$\frac{\sigma_{\text{дин.}} (H_2 - a)}{E} = \int_a^{H_1} \frac{\sigma, dr}{E} + \frac{(H_2 - H_1) P}{E}$$

$$\sigma_{\text{дин.}} (H_2 - a) = (H_2 - H_1) \cdot P + \int_a^{H_1} P \left(1 - 2,5 \frac{a^2}{r^2} + 1,5 \frac{a^4}{r^4} \right) dr. \quad (8)$$

Вычислим последнее слагаемое этого уравнения с учетом $H_1 = 3,47a$

$$P \int_a^{H_1} \left(1 - 2,5 \frac{a^2}{r^2} + 1,5 \frac{a^4}{r^4} \right) dr = 1,178 P.$$

Если заранее задаться числом скважин, то на основе (8) можно определить давление в горной породе, воспринимаемое динамометрами.

Длина фронта бурения с учетом взаимного перекрытия скважин

$$L = 0,9 nd \quad H_2 = \frac{L}{2} = 0,9 na$$

где n — число скважин.

Известия, XXI, 3—7

Подставляя в (8) и преобразуя

$$\sigma_{\text{дин.}} \cdot (0,9n - 1) = (0,9n - 3,47) P + 1,178 P \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{дин.}} = P \frac{0,9n - 2,30}{0,9n - 1}$$

подсчитаем $\sigma_{\text{дин.}}$ для различного числа скважин.

Таблица 2

| Число скважин n | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|----|------|
| $\frac{\sigma_{\text{дин.}}}{P}$ | 23,6 | 63,0 | 75,5 | 81,6 | 85,4 | 88 | 89,5 |

Данные таблиц № 1 и № 2 изображены на рис. 4. Для случая массива породы, загруженного со всех сторон, давление породы, измеренное динамометрами, приближается по своей величине к нагрузке на горную породу P , даже при сравнительно небольшом числе скважин. Для второго случая число скважин, необходимых для измерения тандем-методом, увеличивается, однако это не приводит к значительным техническим осложнениям.

Полагаем возможным ограничиться для первого случая бурением пяти скважин, с установкой трех динамометров, а для второго случая — бурением девяти скважин с установкой семи динамометров.

Заключение

Предлагаемый тандем-метод измерения естественных напряжений в массиве породы выгодно отличается от компенсационного метода отсутствием больших открытых полостей, ослабляющих горную породу. Другое преимущество нашего метода — возможность измерять напряжения также и в глубинах массива. Метод пригоден для измерения сжимающих и растягивающих напряжений и отличается достаточной простотой при выполнении. Имеется возможность организовать после установки приборов систематические наблюдения за дальнейшим состоянием горной породы.

Институт геологических наук
АН Армянской ССР

Получила 11.XI.1966.

Ե. Գ. ԶԱՎՐՅԱՆ

ԱՌՆԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾՆԵՐԻ ԼԱՐՎԱԾ ՎԻՃԱԿԻ ՇԵՏԱԶՈՏՄԱՆ
ՈՐԺԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Հոդվածում դիտարկվում են լեռնային զանգվածների լարված վիճակի հետազոտման տարբեր մեթոդները: Հեղինակի կողմից առաջադրվում է

