

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ НА ЕЕ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ

*Исследуется влияние начального напряженного состояния скальных оснований на опытные величины модуля деформации, определяемые методом нагружения пород штампом на модели с цементом из гипсоизвестнякового раствора.*

*Ключевые слова: скальные основание, прочность, деформация, полотно, модуль.*

## CONSIDERATION OF THE EFFECT OF THE INITIAL STRESS STATE OF ROCK FOUNDATIONS AT ITS DEFORMABILITY

*In this article is investigated the effect of the initial stressed state of rock bases on the experimental values of the strain modulus determined by the method of rock loading on a model entirely from a gypsum-limestone solution*

*Keywords: rock foundation, strength, deformation, web module.*

Крупномасштабные натурные исследования напряженно-деформированного состояния скальных оснований массивных сооружений относятся к дорогостоящим процедурам. Полученные при помощи различных методов на одних и тех же массивах скальных пород дают существенный разброс. Кроме этого, не вполне определимо влияние на результаты испытаний природных напряжений. Поэтому считается целесообразным отдать предпочтение изучению лабораторных моделей, адекватных по физическим, прочностным и деформационным характеристикам скальных оснований [3].

Экспериментальная задача моделирования скальных оснований массивных сооружений с учетом начального напряженного состояния рассматривалась на модели из эквивалентных, в частности, гипсоизвестняковых материалов с цементом (Рис. 1). При этом в материале реализовывалось плоское напряженное состояние. Опыты были поставлены в лаборатории скальных оснований Московского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева.

Из частей 1 и 2 материала модели изготовлены образцы для испытания на сжатие и растяжение. Эксперимента на сжатие осуществлялись на рычажном прессе с соотношением плеч 1:5 по стандартной методике на двенадцати образцах с размерами 0,04x0,04x0,14. Для проведения опытов на растяжение были подготовлены шесть образцов с размерами 0,04x0,06x0,24 м.

В результате прозвучивания образцов прибором УКБ-1М было установлено, что динамический модуль упругости колеблется в пределах:

- $E_d = (2300... 3200)$  МПа, для образцов на сжатие;
- $E_d = (2838... 3836)$  МПа, для образцов на растяжение.

Такой разброс значений динамических модулей упругости объясняется неоднородностью, обусловленной технологией изготовления модельного полотна.

Результаты испытания образцов на сжатие и растяжение приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	Наименование	Ед. изм.	Величина	Примечание
1	Предельная призмная прочность	Мпа	3,22÷5,3	Образцы

	модельного полотна $R_{сж}^{np.}$			размером (4x4x14)·10 <sup>-2</sup> м, испыт. на сжатие
2	Статический модуль общей деформации $E_0^{сж.}$	МПа	2300÷3200	
3	Коэффициент поперечной деформации $\mu_{сж}$	-	0,188÷0,290	
4	Предельная призмная прочность модельного полотна $R_{рас.}^{np.}$	Мпа	0,45÷0,61	Образцы размером (4x6x24)·10 <sup>-2</sup> м, испыт. на растяжение
5	Статический модуль общей деформации $E_0^{рас.}$	Мпа	2838÷3836	
6	Коэффициент поперечной деформации $\mu_{рас.}$	-	0,187÷0,403	

Первоначально на выделение целика из полотна модельного материала возлагалась надежда на возможность определения деформационных и прочностных характеристик путем испытаний его на сжатие, отрыв и сдвиг. Такой подход мог бы дать преимущества сравнительно с опытами на жестких штампах.

Обеспечение жесткости целика проверялось по показателю гибкости М.И. Горбунова-Посадова [1] в виде

$$\Gamma = \frac{12\pi a^2 v E_0 (1 - \mu_1^2)}{H^2 E_1 (1 - \mu_0^2)} \quad (1)$$

здесь  $2a$ ,  $2v$  – соответственно меньшая и большая стороны целика;  $h$  – высота целика;  $E_1 = E_0$  и  $\mu_1 = \mu_0$  – соответственно модуль упругости и коэффициент поперечной деформации целика и модельного материала.

Формула (1) позволяет установить ограничение на высоту целика. Поскольку имеет место неравенство  $0 \leq \Gamma \leq 8/\sqrt{\alpha}$ , где  $\alpha = a/v$ , то для рассматриваемого случая  $\alpha = 0,75$ , при котором жесткость целика считается конечной. Полагая для  $\Gamma$  предельный случай, т.е.  $\Gamma = 8/\sqrt{\alpha}$ , будем иметь  $\Gamma = 9,24$ . Решая зависимость (1) относительно  $h$ , получаем наименьшую высоту «целика-штампа» из условия обеспечения жесткости целика по отношению к испытываемому модельному основанию, равную

$$H = \left( \frac{3\pi a^2 v \sqrt{\alpha}}{2} \right)^{1/3} \approx 10,552 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Полученный результат позволяет утверждать, что условие жесткости ( $H = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м} > 10,552 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ) целика выполняется.

Будем считать, следуя [1,2], что материал модели по своим механическим характеристикам соответствует реальному массиву скальных пород.

На рис. 3а схематично изображен рычажной стенд с гипсоизвестняковой моделью с целиком. Эксперимент состоял из отдельных опытов с различными значениями равномерного давления, прикладываемого по горизонтали к боковым граням плоской модели ( $\sigma_x$ ) и вертикали на «штамп-целик» ( $\sigma_z$ ). При нагружении выполнялось условие, в соответствии которому составляющие напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  не должны превышать 70% призмной прочности, установленной при испытаниях образцов на сжатие и растяжение (табл. 1).

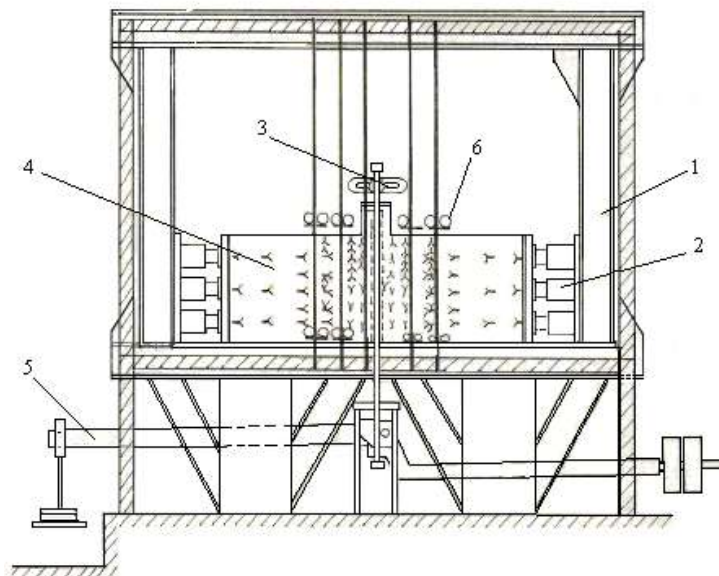


Рис. 1. Схема испытания скальных оснований гидротехнических сооружений на плоской модели с целикком из эквивалентных материалов: 1 – стенд; 2 – гидравлические домкраты 25 тн; 3 – динамометр ДС-5; 4 - плоская модель с целикком; 5 – рычажная силовая установка с соотношением плеч 1:10, для вертикальной нагрузки модели; 6 – мессуры, индикаторы часового типа (тысячники).

Горизонтальные давления (рис. 1) создавались при помощи шести домкратов (по три домкрата с каждой стороны) и выдерживались постоянными при значениях: 0; 0,05; 0,10; 0,15 МПа. Затем производилась разгрузка модели в обратном режиме. Результаты опытов показали, что после разгрузки модель полностью восстанавливала размеры и форму. Иными словами, остаточные деформации не возникали.

Дальнейшие опыты состояли в следующем - при постоянном горизонтальном давлении на модель прикладывались вертикальная нагрузка тремя ступенями на целик через жесткий штамп с последующей разгрузкой. Такое ступенчатое изменение потребовалось для набора данных, необходимых для статистической обработки. При этом величина вертикального давления доводилась до максимума 0,3 МПа, а за тем производилась полная разгрузка.

После снятия нагрузки модель выдерживалась не менее двух часов для ликвидации упругого последствия. Тот же опыт повторялся для всех значений горизонтальных давлений.

Для измерения деформаций модельного поля использовались проволочные тензодатчики сопротивления, методика применения которых апробировалась в [4]. Относительные деформации определялись с помощью комплекта цифровой тензометрической аппаратуры ЦТК-1 с точностью  $1 \cdot 10^{-5}$ . Тензодатчики в количестве 194-х штук, наклеены на модельное поле согласно схеме рис. 2б симметрично относительно центральной оси на видимом и не видимом фасадах. Поэтому значения деформаций определялись как среднее результатов по двум датчикам по вертикали А, а для остальных - по четырем датчикам.

Показания датчиков фиксировались после приложения нагрузки. Следующий замер производился после 30-минутной выдержки с целью выяснения изменения деформаций во времени. Оказалось, что фактор времени не имеет существенного значения. Как указывалось выше, между сериями опытов модельное полотно оставалось ненагруженным в течение двух часов.

Данные по изучению влияния начального напряженного состояния на деформируемость модели представлены на рис. 2 в виде эпюр изменения относительной продольной деформации  $\varepsilon_z$  от глубины. Величина вертикального давления сохраняется, как

уже отмечалось, постоянной и равной 0,3 МПа, а горизонтальное давление изменяется ступенями.

Результаты опытов показывает, что:

- Наибольшие относительные продольные деформации  $\varepsilon_z$  имеет место в точках модельного поля, расположенных в целике и вблизи него;
- С увеличением горизонтальных давлений деформации  $\varepsilon_z$  на всех уровнях уменьшаются.

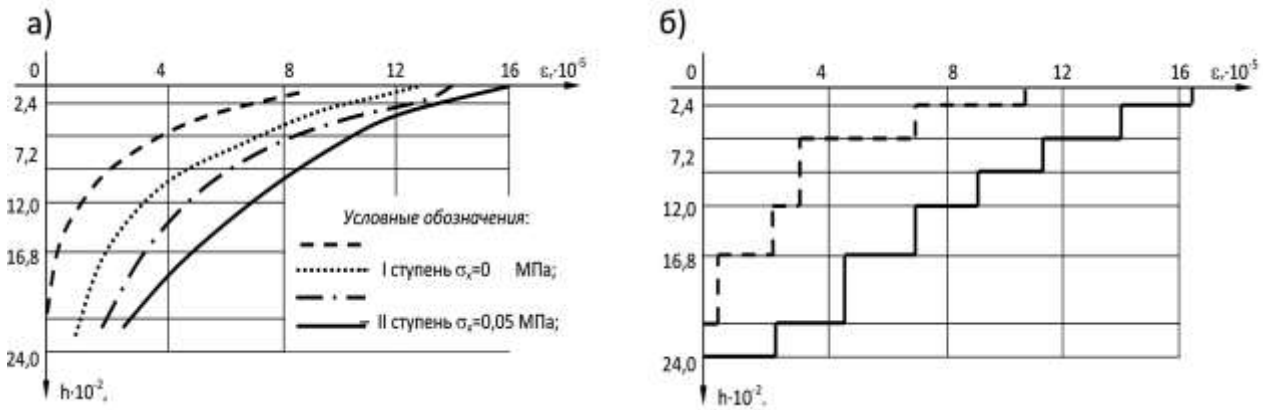


Рис. 2. Графики изменения относительной деформации в вертикали «Б» с глубиной при  $\sigma_z=0,3$  МПа и  $\sigma_x=0 \div 0,15$  МПа. А) полученные результаты опытов; б) приведенный график для определения осадки под штампом в вертикали «Б»

Абсолютную осадку какой-либо точки модельного поля можно определить как площадь эпюры  $\varepsilon_z - h$  (рис. 2а). Напомним, что значение деформаций фиксировались в определенных точках модельного поля, причем горизонтальные давления прилагались ступенями. Криволинейные эпюры  $\varepsilon_z - h$  для первого и четвертого этапов горизонтального нагружения заменим ступенчатым графиком (рис. 2б) обеспечением равенства этих площадей.

Величину абсолютной осадки  $S$  подошвы «целика-штампа» с использованием ступенчатой эпюры  $\varepsilon_z - h$  (Рис. 2б) определим по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n h_i \varepsilon_{zi} \quad (2)$$

где:  $h_i$  – толщина выделенного элемента в пределах которого относительная деформация считается постоянной,  $\varepsilon_{zi}$  - относительная деформация отдельных элементов под «целиком-штампом».

При известной величине осадки модуль общей упругости легко вычисляется. Имеем

$$E_0 = \frac{K}{S_0}, \quad (3)$$

Здесь для  $K$  получено [4]

$$K = \omega_{пл} (1 - \mu_0^2) v P$$

причем  $\omega_{пл}$  – коэффициент, зависящий от местоположения точки,  $P$  – величина давления под «целиком-штампом» ( $P=0,3$  МПа),  $v$  – ширина целика.

Конкретные расчеты, приведенные по данным опытов, дали следующие значения модуля общей деформации  $E_0=8083,3$  МПа, который превышает значение  $E_0=2923,22$  МПа, установленное при отсутствии бокового давления. Последнее значение  $E_0$  соизмеримо с полученными на образцах. Следовательно, влияние схемы напряженного состояния на механические параметры оказываются ощутимым.

### **Литература:**

1. Ухов С.Б. Скальные основания гидротехнических сооружений.–М.; Энергия, 1975.- 263 с.
2. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. – Л.: Наука, 1978. - 256 с.
3. Терновский И.Н. Оценка деформационных свойств трещиноватых скальных пород по результатам полевых статических испытаний жестким штампом. Кандидатская диссертация. – М.: МИСИ, 1972, - 147 с.
4. Сатыбаев А.Т. Влияние начального напряженного состояния скальных оснований массивных сооружений на ее деформируемость. // Инженер, Научно-образовательный и научный журнал. №1, - Б.: Инженерная Академия, 2010, с. 13-18