

## ОБ ОЦЕНКЕ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН В УСЛОВИЯХ СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.А. Саруханян, Г.Г. Веранян

*Национальный университет архитектуры и строительства Армении*

При эксплуатации грунтовых плотин крайне важно оценить реальное состояние и степень устойчивости и прочности плотин для оценки риска безопасности этих сооружений. По результатам лабораторных исследований выполнены расчеты устойчивости откосов Сарсангской плотины: кругло-цилиндрическим методом при воздействии сейсмических нагрузок с учетом физико-механических свойств грунта и путем решения дифференциального уравнения колебания. Выявлено, что с увеличением сейсмической нагрузки прочность и устойчивость плотины при упругом свойстве грунта тела нарушаются, а при упругопластическом свойстве - нет.

**Ключевые слова:** плотина, устойчивость, прочность, сейсмичность, грунт, свойство.

**Введение.** При проектировании и строительстве грунтовых плотин, как правило, учитываются нормативные сейсмические нагрузки данного района. Однако во время эксплуатации возведенных плотин на них действуют более сильные сейсмические нагрузки, чем предусмотрено нормативными документами. В этих условиях крайне важно оценить реальное состояние и степень устойчивости и прочности плотин для оценки риска безопасности этих сооружений. К данной категории сооружений относятся, в частности, гидротехнические грунтовые сооружения, расположенные на территории Армении и Нагорного Карабаха, уровень опасности которых сильно возрос после разрушительного Спитакского землетрясения в 1988 г. В частности, при проектировании гидротехнических сооружений в соответствии с нормативными документами максимальные горизонтальные ускорения при сейсмических воздействиях были приняты равными 0,2 g, что фактически не соответствует действительности. В большинстве случаев фактические сейсмические нагрузки значительно выше, чем предусмотрено нормативными документами.

Сарсангское водохранилище было построено в 70...80 гг. прошлого столетия на реке Тартар и является стратегическим объектом первой категории. В состав водохранилища входит 125-метровая грунтовая плотина, полезный объем которой составляет 500 *млн/м<sup>3</sup>*. Сарсангская плотина построена в

сейсмическом районе, где вероятность возникновения сильного землетрясения высока. Исходя из вышесказанного, разработка методики оценки критериев безопасности грунтовых гидротехнических сооружений не только актуальна, но и имеет важное народнохозяйственное значение с точки зрения обеспечения безопасности жизнедеятельности населения, живущего вниз по течению.

**Методы исследования.** Нами выполнена оценка безопасности Сарсангской плотины и разработана методика оценки грунтовых плотин при сильных сейсмических воздействиях. Разработанную методику на примере Сарсангской плотины можно применять и при оценке степени безопасности подобных плотин.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи. В частности, экспериментальным путем составлена карта микрорайонирования и определено максимальное горизонтальное ускорение при вероятном землетрясении – 0,43 g. Ясно, что при таком ускорении вместо принятых при проектировании и строительстве нормативных ускорений 0,2 g устойчивость плотины не может быть обеспечена. Поэтому для реальной оценки устойчивости Сарсангской плотины возникла необходимость выполнения лабораторных исследований грунта тела плотины с целью выявления его напряженно-деформированного состояния. По результатам лабораторных исследований выполнены расчеты устойчивости откосов Сарсангской плотины:

а) расчет устойчивости откосов кругло-цилиндрическим методом при воздействии сейсмических нагрузок с учетом физико-механических свойств грунта;

б) расчет устойчивости откосов и прочности плотины путем решения дифференциального уравнения колебания [1-3].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Расчеты первым способом выполнены методом Маргенштейна-Прайса, а горизонтальные нагрузки по высоте плотины принимались по форме прямоугольника. Физико-механические свойства грунта по высоте плотины учитывались из результатов лабораторных исследований. Расчеты, проведенные этим методом, показали, что при новых сейсмических нагрузках устойчивость плотины нарушается. Этого следовало ожидать, так как при расчете плотина рассматривается как упругое тело и не учитывается нелинейность физико-механических свойств грунта. Поэтому возникла необходимость проверки прочности и устойчивости Сарсангской плотины путем решения дифференциального уравнения затухающего принудительного колебания [1-3]. В качестве сейсмической нагрузки была принята типовая осциллограмма землетрясения Сан-Фернандо в 1971 г. с магнитудой 6,6 по шкале Рихтера (рис. 1).

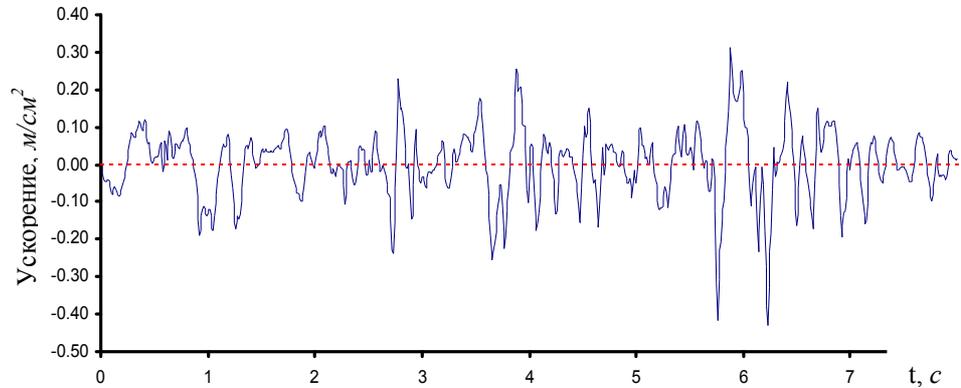


Рис. 1. Типовая осциллограмма землетрясения Сан-Фернандо в 1971 г.

Динамическое равновесие грунтовой массы в матричной форме имеет вид [1,2,4]

$$[M] \cdot \{\ddot{a}\} + [D] \cdot \{\dot{a}\} + [K] \cdot \{a\} = \{F\}, \quad (1)$$

где  $[M]$  – матрица массы;  $[D] = \alpha[M] + \beta[K]$  – матрица затухания, которая характеризует сопротивление грунта;  $[K]$  – матрица жесткости;  $\{F\}$  – суммарный вектор силы;  $\{\ddot{a}\}$ ,  $\{\dot{a}\}$ ,  $\{a\}$  – соответственно ускорение, скорость и перемещение ячейки.

Так как грунты имеют нелинейные характеристики, конструктивная матрица рассчитывается в каждой загрузке. Эти изменения обусловлены изменением механических свойств грунта.

Как показывают экспериментальные данные, полученные на трехосной установке, между деформацией грунта и девиаторным напряжением существует гиперболическая связь в виде [1-3]

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1}, \quad (2)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  определяют форму гиперболы;  $E_i$  – начальный модуль упругости, определяемый экспериментально. В (2) коэффициенты  $a$  и  $b$  определяют по формулам  $a = \frac{1}{E_i}$ ,  $b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{от}}$ ;  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{от}$  – уравнение асимптоты, к которой устремляется гипербола:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{ax}. \quad (3)$$

Здесь  $R_f = (0,75 - 1,0)$  - коэффициент Дункана-Чанга [2].

Предельная прочность грунта по уравнению Мора-Кулона равна [4-6]

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2(C \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi)}{1 + \sin \varphi}. \quad (4)$$

Форма гиперболы изменяется и в текущий момент определяется модулем касательной, определяемой по формуле Дункана-Чанга [1-3,5]:

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)^2}{2(C \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi)} \right] E_i. \quad (5)$$

Модуль касательной зависит от механических свойств грунта, девиаторного  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  и главного  $\sigma_3$  напряжений.

При динамической нагрузке грунта ее напряженно-деформированное состояние с большой точностью аппроксимируется к кривой гиперболы, которая при знакопеременной загрузке образует гистерезисное отклонение. Загрузка и даже разгрузка осуществляются посредством гиперболы.

Решением задачи принудительных колебаний получаем напряженно-деформированное поле грунтового массива и коэффициент устойчивости для опасного текучего слоя, что дает возможность вычислить коэффициент устойчивости откосов плотины при разных значениях сейсмической нагрузки. С этой целью полученные данные усредняют в узлах сетки и с помощью зависимости Мора в центре основания для каждого слоя вычисляют нормальные (6) и касательные (7) напряжения:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta, \quad (6)$$

$$\tau_m = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta, \quad (7)$$

где

$$S_r = \tau \beta = c' + (\sigma_u - u) g \varphi', \quad S_m = \beta \tau_m. \quad (8)$$

Расчеты производятся методом конечных разностей. Коэффициенты устойчивости откосов методом КР определяют по формуле [2,3]

$$K = \frac{\sum S_r}{\sum S_m}, \quad (9)$$

где коэффициенты запаса принимают равными  $k_0=1$ ,  $k_1=0,4$ ,  $k_2=1,2$ .

Решена плоская задача принудительных колебаний для расчетного сечения Сарсангской плотины.

**Задача 1.** Плотина рассматривается как упругое тело. В этих условиях второй член уравнения (1) принимается равным нулю, а матрица жесткости изменяется по линейному закону.

Сейсмическая нагрузка принимается в виде типовой осциллограммы. Получены графики изменения девиаторных напряжений и горизонтальных перемещений по телу плотины (рис. 2 и 3).



Рис. 2. Распределение девиаторных напряжений в расчетном сечении плотины при максимальном горизонтальном ускорении

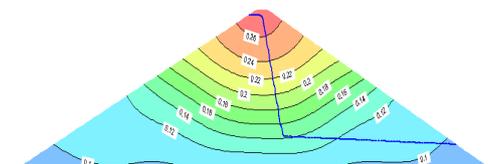


Рис. 3. Распределение горизонтальных перемещений в расчетном сечении плотины при максимальном горизонтальном ускорении

На рис. 4. приведен график перемещения вершины плотины по времени.

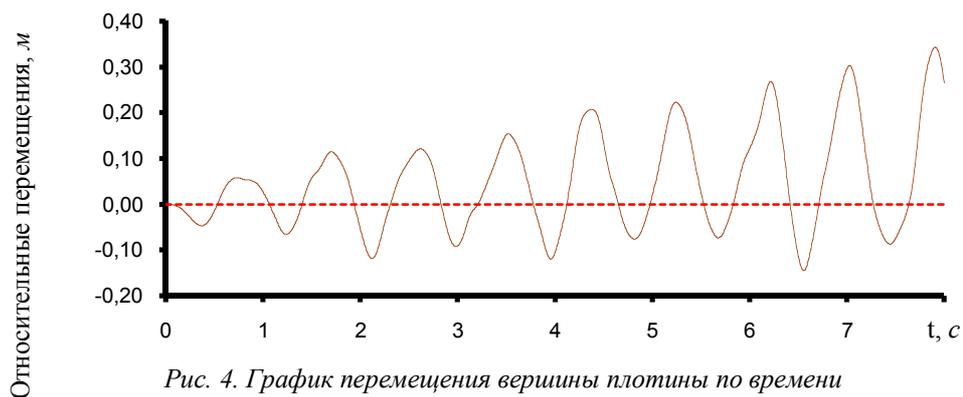


Рис. 4. График перемещения вершины плотины по времени

Вычислен коэффициент устойчивости нижнего откоса плотины. На рис. 5 приведен график изменения коэффициента устойчивости откоса.

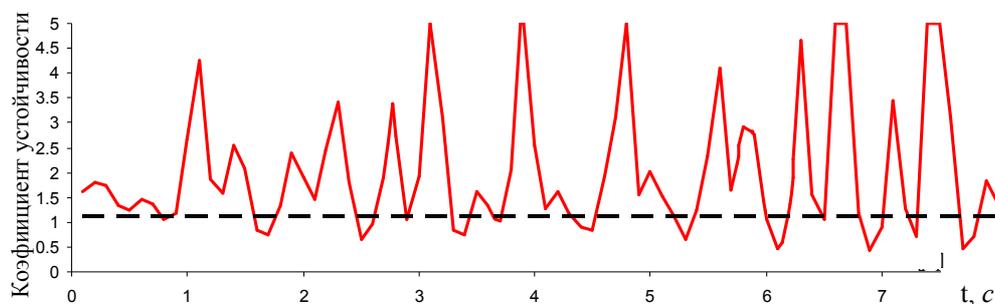


Рис. 5. График изменения коэффициента устойчивости откоса плотины по времени

Как показали результаты расчетов, Сарсангская плотина неустойчива при сейсмической нагрузке, равной 0,43 g.

**Задача 2.** Плотина рассматривается как упругопластическое тело, физико-механические свойства грунта изменяются по гиперболическому закону, и в теле плотины происходит затухание принудительных колебаний.

В этих условиях для расчетного сечения получены графики изменения девиаторных напряжений и горизонтальных перемещений (рис. 6,7), а также перемещений вершины плотины во времени (рис. 8).

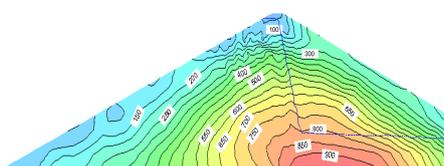


Рис. 6. Распределение девиаторных напряжений в расчетном сечении плотины при максимальном горизонтальном ускорении



Рис. 7. Распределение горизонтальных перемещений в расчетном сечении плотины при максимальном горизонтальном ускорении

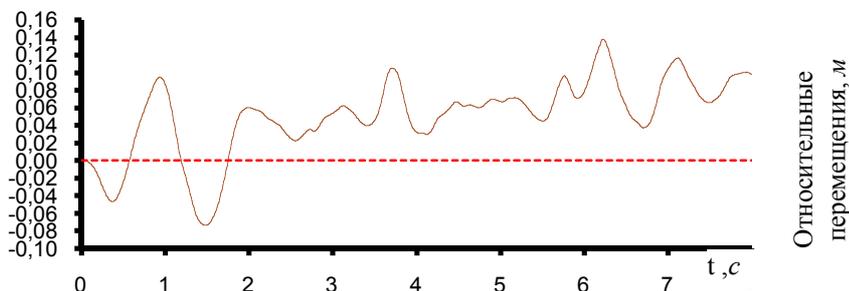


Рис. 8. График перемещения вершины плотины во времени

Вычислен также коэффициент устойчивости нижнего откоса плотины. Как видно из графика изменения коэффициента устойчивости во времени (рис. 9), нижний откос плотины устойчив:  $k \geq 1,12$ .

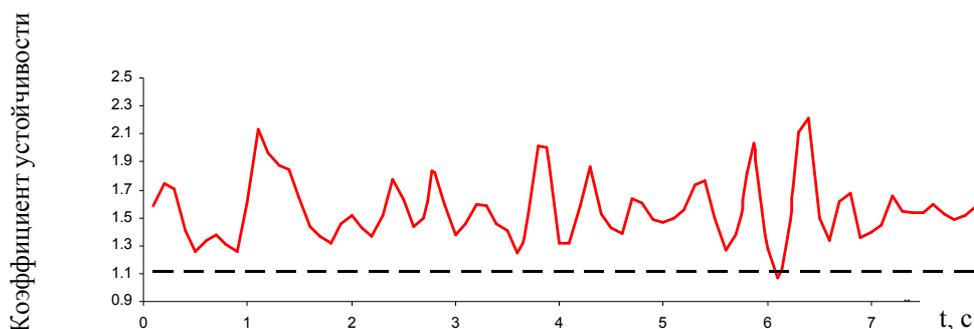


Рис. 9. График изменения коэффициента устойчивости откоса плотины по времени

### Заключение

1. С увеличением сейсмической нагрузки при упругом свойстве грунта тела прочность и устойчивость плотины нарушаются.
2. С увеличением сейсмической нагрузки при упругопластическом свойстве грунта тела плотины ее прочность и устойчивость могут не нарушаться.

### Литература

1. **Campbell K., Bozorghia D.** Near-Source Attenuation of Peak Acceleration from Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993 // Proc. Fifth National Conf. on Earthquake Engineering, EERI. - 1994. – Vol.3. - P. 283-292.
2. **Duncan J.M., Chang C.Y.** Nonlinear analysis of stress and strain in soils // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. - 1970. - Vol.96, N SM5. - P. 1629-1654.
3. **Griffiths D.V., Lane P.A.** Slope Stability Analysis by Finite Elements // Geotechnique. - 1999.- N 49(3). - P. 387-403.
4. Building Code of the Republic of Armenia, П-6.02-2006 Earthquake-proof civil engineering. Design norms (in Armenian).- Yerevan, Armenia, 2006. - 62 p.
5. **Тер-Мартirosян З.Г.** Механика грунтов. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. - 477 с.
6. **Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н.** Статика и динамика грунтовых плотин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 247 с.

Поступила в редакцию 03.09.2014.  
Принята к опубликованию 20.11.2014.

**ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓԱՆԻՇՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ  
ՈՒԺԵՂ ՍԵՅՍՄԻԿ ՈՒԺԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

**Ա.Ա. Սարուխանյան, Գ.Գ. Վերանյան**

Գրունտային պատվարների շահագործման ընթացքում շատ կարևոր է կառուցվածքի իրական վիճակի գնահատումը՝ պարզելու ամրության և կայունության չափանիշները, ինչն անհրաժեշտ է դրանց անվտանգության ռիսկայնության աստիճանը բացահայտելու համար: Հաշվի առնելով գրունտի հատկությունների լաբորատոր փորձարկումների արդյունքները՝ իրականացվել են Սարսանգի պատվարի շեպերի կայունության հաշվարկներ՝ ա) շրջանազանային մեթոդով, հատուկ բեռնավորման պայմաններում, բ) մարող հարկադրական տատանման պայմաններում գրունտի լարվածադեֆորմացիոն վիճակը բնութագրող դիֆերենցիալ հավասարման ինտեգրման պարագայում: Կատարված հաշվարկների արդյունքների ընդհանրացմամբ պարզվել է, որ գրունտի առաձգական դեֆորմացիայի սահմաններում սեյսմիկ բեռների մեծացման պայմաններում պատվարի շեպերի կայունությունը խախտվում է, իսկ գրունտի առաձգապլաստիկական հատկությունների հաշվառման պայմաններում պատվարի շեպը կարող է մնալ կայուն նույնիսկ ուժեղ սեյսմիկ բեռների ազդեցության դեպքում:

**Առանցքային բառեր.** պատվար, ամրություն, կայունություն, սեյսմիկ ազդեցություն, գրունտ, հատկություն:

**ASSESSING THE SAFETY CRITERIA OF GROUND DAMS UNDER STRONG  
SEISMIC IMPACTS**

**A.A. Sarukhanyan, G.G. Veranyan**

At maintaining ground dams, it is very important to assess the real state and the dam stability and strength degree for estimating the safety risk of those structures. According to the results of laboratory investigations calculation of the slope stability of the Sarsang dam are carried out: a) by the circular cylinder method at the impact of seismic loading considering the physical and mechanical properties of the ground, b) by solving a differential equation of vibration. It is revealed that at increasing the seismic load, the strength and stability of the dam is disturbed in case of elasticity of the body ground, while in case of elastoplasticity – it is not.

**Keywords:** dam, embankment, strength, stability, seismic effect, earth, soil, property.