

УДК 624.131

А. М. Караулов, К. В. Королев, Ю. П. Смолин

Определение предельных давлений на ограждения с учетом сейсмических воздействий

В статье приводится методика расчета активного и пассивного давления грунта на подпорные стенки с учетом сейсмических воздействий. Силовое воздействие, возникающее при землетрясениях, выражается в массовых сейсмических силах, имеющих инерционную природу и определяемых в зависимости от сейсмического ускорения. Решение задачи о предельных давлениях на ограждающие стенки выполнено с применением гипотезы о прямолинейных линиях скольжения. Для этого использована расчетная схема Кульмана. Формулы для расчета предельных давлений на подпорную стенку получены непосредственным решением по схеме Кульмана, при этом направление сейсмической силы принято горизонтальным. Показано влияние сейсмической силы для различной интенсивности землетрясений на величину активного и пассивного давления грунта. Выражения для коэффициентов активного и пассивного давления грунта на подпорные стенки предлагается использовать в практических расчетах для сейсмических районов.

Ключевые слова: предельное давление, активное давление, пассивное давление, подпорная стенка, сейсмическая сила.

В основном нормативном документе по основаниям и фундаментам СП 22.13330 [1] приводится метод расчета предельного давления на ограждения, основанный на применении формулы Понселе [2] для общего случая грунтовой среды, обладающей трением и сцеплением. Заметим, что применение формулы Понселе к общему случаю базируется на искусственном приеме, подробно описанном в книге Г. К. Клейна [3]. В результате полученные формулы не позволяют вычислить активное давление грунта, если угол наклона поверхности откоса к горизонтали β превышает угол внутреннего трения грунта φ , что может иметь место при наличии сцепления. В то же время с помощью расчетной схемы Кульмана можно установить активное давление и в этом случае [4]. Поэтому было выполнено непосредственное решение по расчетной схеме Кульмана [5]. Полученные новые формулы для активного и пассивного давления грунта несколько отличаются от приведенных в нормативных документах [1, 6] и Еврокодах [7]. Эти формулы включены в «Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения» [8] и могут использоваться для расчета активного давления, в том числе и в случае $\beta > \varphi$, для обычных условий отсутствия сейсмичности.

Проектирование подпорных стенок в сейсмических районах должно осуществляться с учетом дополнительных силовых воздействий, возникающих от смещения грунтовых

массивов при землетрясениях [9, 10]. В практических расчетах допускается представлять дополнительные силовые воздействия в виде инерционных массовых сил. Таким образом, к удельному весу грунта γ , направленному вертикально вниз, добавляется массовая сейсмическая сила, определяемая как

$$j_{eq} = \alpha_{eq} \rho = K_{eq} \gamma, \quad K_{eq} = \frac{\alpha_{eq}}{g}, \quad (1)$$

где j_{eq} – массовая сейсмическая сила; α_{eq} – сейсмическое ускорение; K_{eq} – коэффициент сейсмичности; γ – удельный вес грунта; g – ускорение свободного падения.

Кроме того, аналогичное воздействие сейсмическое ускорение может оказывать на инерционные пригрузки. Направление сейсмического ускорения примем горизонтальным.

Сейсмическое воздействие следует учитывать при определении предельных давлений на ограждения – активного и пассивного давления грунта. Для решения этой задачи обратимся к аналитическому решению схемы Кульмана. Надежность этой схемы подтверждена многолетней практикой ее использования при проектировании подпорных стенок.

Рассмотрим случай *активного давления грунта*. Здесь рассматриваются условия плоской деформации. На рис. 1. показана расчетная схема призмы обрушения. Прямая линия скольжения BC составляет с вертикалью угол θ .

где

$$A = a_1 \sin \alpha_2 + K_{eq} a_2 \cos \alpha_1 - a_2 \sin \alpha_1,$$

$$B = a_2 \cos \alpha_1 + K_{eq} \sin \alpha_1 - a_1 \cos \alpha_2,$$

$$C = \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - K_{eq} \cos(\alpha_1 - \alpha_2).$$

Решение уравнения (7) имеет вид

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{AC + BD}{BC - AD}, \quad (8)$$

если при этом $\theta < 0$, то

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctg \frac{AC + BD}{BC - AD},$$

где $D = \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}$.

С учетом решения (8) можно записать выражение для силы активного давления E_a в абсолютных переменных:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \lambda_{ay,eq} + q h \lambda_{aq,eq} - c h \lambda_{ac,eq}. \quad (9)$$

Коэффициенты активного давления грунта даются формулами

$$\lambda_{ay,eq} = \frac{D_1 \cos(\varepsilon - \alpha)}{D_2 \cos^2 \varepsilon}, \quad \lambda_{aq,eq} = \frac{D_1}{D_2 \cos \varepsilon},$$

$$\lambda_{ac,eq} = \frac{2(A^2 + B^2) \cos \varphi \cdot \cos(\varepsilon - \alpha)}{D_2 \cos \varepsilon}, \quad (10)$$

где

$$D_1 = (\cos \alpha_1 + K_{eq} \sin \alpha_1)(AC + BD) +$$

$$+ (\sin \alpha_1 - K_{eq} \cos \alpha_1)(BC - AD) +$$

$$+ [\sin(\varepsilon + \varphi) + K_{eq} \cos(\varepsilon + \varphi)](A^2 + B^2),$$

$$D_2 = \sin \alpha_2 (BC - AD) + \cos \alpha_2 (AC + BD) +$$

$$+ a_2 (A^2 + B^2).$$

Принимая упрощающее допущение о линейности эпюры активного давления, величину p_a можно определить выражением

$$p_a = \gamma z \lambda_{ay} + q \lambda_{aq} - c \lambda_{ac}. \quad (11)$$

Обозначим активное давление $p_a = p_{a0}$ в точке A ($z = 0$) и $p_a = p_{ah}$ в точке B ($z = h$). Величины p_{a0} и p_{ah} определяются формулами

$$\sigma_{a0} = q \lambda_{ay} - c \lambda_{ac},$$

$$\sigma_{ah} = \gamma h \lambda_a + q \lambda_{aq} - c \lambda_{ac}. \quad (12)$$

Равнодействующая сила активного давления определится по следующим формулам:

– в случае $p_{a0} \geq 0$

$$E_a = \frac{1}{2} (p_{a0} + p_{ah}) h; \quad (13)$$

– в случае $p_{a0} < 0$ –

$$E_a = \frac{1}{2} \frac{p_{ah}^2}{p_{ah} - p_{a0}} h. \quad (14)$$

Во втором случае ($p_a < 0$) в верхней части подпорной стенки на высоте h_c принимается нулевое давление. Высота h_c рассчитывается по формуле

$$h_c = \frac{p_{a0}}{p_{a0} - p_{ah}} h. \quad (15)$$

Перейдем к случаю *пассивного* давления *грунта*. На рис. 2. показана расчетная схема для определения пассивного давления. В соответствии со смыслом задачи направления сейсмических воздействий q_{eq} и G_{eq} , а также силы T изменены на прямо противоположные.

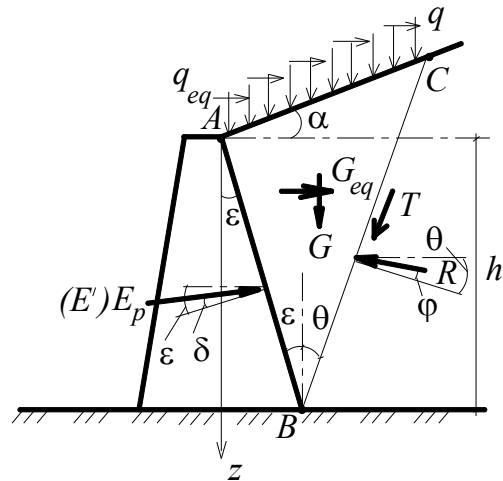


Рис. 2. Расчетная схема к определению пассивного давления грунта

Формулы (2) и (3) остаются в силе. Уравнения равновесия для определения искомой силы E' имеют вид

$$E' \cos(\varepsilon - \delta) - R \cos(\theta - \varphi) =$$

$$= -G_{eq} - Q_{eq} + T \sin \theta, \quad (16)$$

$$E' \sin(\varepsilon - \delta) - R \sin(\theta - \varphi) = G + Q - T \cos \theta.$$

Сила E' дается выражением

$$E' = \frac{\cos(\varepsilon - \alpha)}{\cos \varepsilon \cdot \cos(\alpha + \theta) \cdot \sin(\varepsilon - \delta - \varphi + \theta)} \times$$

$$\times \left\{ \left[\frac{1}{2 \cos \varepsilon} + \frac{\bar{q}}{\cos(\varepsilon - \alpha)} \right] \times \right.$$

$$\times \left[\sin(\varepsilon + \theta) \cdot \cos(\theta - \varphi) - K_{eq} \sin(\varepsilon + \theta) \cdot \sin(\theta - \varphi) \right] + \eta \cos \varphi \}. \quad (17)$$

Уравнение (17) преобразуется к виду

$$E' = \frac{\cos(\varepsilon - \alpha) + 2\bar{q} \cos \varepsilon}{2 \cos^2 \varepsilon} \times \frac{\sin(\alpha'_1 + 2\theta) + K_{eq} \cos(\alpha'_1 + 2\theta) + a'_1}{\sin(\alpha'_2 + 2\theta) + a'_2}, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha'_1 &= \varepsilon + \varphi, \quad \alpha'_2 = \varepsilon - \delta - \varphi - \alpha; \\ a'_1 &= \sin(\varepsilon + \varphi) - K_{eq} \cos(\varepsilon + \varphi) + \\ &+ \frac{4\eta \cos \varphi \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos(\varepsilon - \alpha)}{2\bar{q} \cos \varepsilon + \cos(\varepsilon - \alpha)}; \\ a'_2 &= \sin(\varepsilon - \delta - \varphi - \alpha). \end{aligned}$$

Угол θ , определяющий силу пассивного давления грунта, находится из уравнения $\frac{dE}{d\theta} = 0$, имеющего вид, аналогичный выражению (7):

$$A' \sin 2\theta + B' \cos 2\theta = C', \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} A' &= a'_1 \sin \alpha'_2 - K_{eq} a'_2 \cos \alpha'_1 - a'_2 \sin \alpha'_1; \\ B' &= a'_2 \cos \alpha'_1 - K_{eq} \sin \alpha'_1 - a'_1 \cos \alpha'_2; \\ C' &= \sin(\alpha'_1 - \alpha'_2) + K_{eq} \cos(\alpha'_1 - \alpha'_2). \end{aligned}$$

Решение уравнения (19) записывается в виде

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{A'C' + B'D'}{B'C' - A'D'}, \quad (20)$$

если при этом $\theta < 0$, то

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctg \frac{A'C' + B'D'}{B'C' - A'D'},$$

где $D' = \sqrt{A'^2 + B'^2 - C'^2}$.

С учетом решения (20) сила пассивного давления грунта E_p в абсолютных переменных определяется формулой

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \lambda_{p\gamma,eq} + q h \lambda_{pq,eq} + c h \lambda_{pc,eq}. \quad (21)$$

Формулы для коэффициентов пассивного давления грунта имеют вид, аналогичный выражениям (10):

$$\begin{aligned} \lambda_{p\gamma,eq} &= \frac{D'_1 \cos(\varepsilon - \alpha)}{D'_2 \cos^2 \varepsilon}, \quad \lambda_{pq,eq} = \frac{D'_1}{D'_2 \cos \varepsilon}, \\ \lambda_{pc,eq} &= \frac{2(A'^2 + B'^2) \cos \varphi \cdot \cos(\varepsilon - \alpha)}{D'_2 \cos \varepsilon}, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} D'_1 &= (\cos \alpha'_1 + K_{eq} \sin \alpha'_1)(A'C' - B'D') + \\ &+ (\sin \alpha'_1 - K_{eq} \cos \alpha'_1)(B'C' + A'D') + \\ &+ [\sin(\varepsilon + \varphi) - K_{eq} \cos(\varepsilon + \varphi)](A'^2 + B'^2), \\ D'_2 &= \sin \alpha'_2 (B'C' + A'D') + \\ &+ \cos \alpha'_2 (A'C' - B'D') + a'_2 (A'^2 + B'^2). \end{aligned}$$

Далее, принимая упрощающее допущение о линейности эпюры пассивного давления, величину этого давления p_p можно определить выражением

$$p_p = \gamma z \lambda_{p\gamma,eq} + q \lambda_{pq,eq} - c \lambda_{pc,eq}. \quad (23)$$

Рассмотрим влияние сейсмической силы на величины активного и пассивного давления на примере песчаных грунтов, вертикальной гладкой стенки и горизонтальной поверхности засыпки ($c = 0$, $\varepsilon = 0$, $\delta = 0$ и $\alpha = 0$). В этом случае $\lambda_{a\gamma,eq} = \lambda_{aq,eq}$ и $\lambda_{p\gamma,eq} = \lambda_{pq,eq}$. В таблице даны значения коэффициентов активного и пассивного давления грунта для различных углов внутреннего трения и коэффициентов

Значения коэффициентов $\lambda_{a\gamma,eq}$ и $\lambda_{p\gamma,eq}$

Коэф.	K_{eq}	φ , град					
		20	25	30	35	40	45
$\lambda_{a\gamma,eq}$	0	0,490	0,406	0,333	0,271	0,217	0,172
	0,1	0,569	0,476	0,397	0,328	0,268	0,217
	0,2	0,669	0,563	0,473	0,395	0,328	0,270
	0,4	0,982	0,807	0,677	0,572	0,483	0,406
$\lambda_{p\gamma,eq}$	0	2,040	2,464	3,000	3,690	4,599	5,828
	0,1	1,918	2,324	2,841	3,511	4,396	5,598
	0,2	1,837	2,218	2,711	3,356	4,215	5,387
	0,4	1,817	2,108	2,535	3,120	3,919	5,025

сейсмичности $K_{eq} = 0$ (отсутствие сейсмичности), $K_{eq} = 0,1$ (7 баллов), $K_{eq} = 0,2$ (8 баллов), $K_{eq} = 0,4$ (9 баллов).

Приведенные данные показывают необходимость учета сейсмических воздействий при определении предельных давлений на ограждения.

Приведенные в статье формулы расчета активного и пассивного давления грунта на ограждения с учетом сейсмических воздействий рекомендуются для использования при проектировании подпорных стенок в сейсмически опасных районах.

Библиографический список

1. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. М.: НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, 2011. 138 с.
2. Poncelet J. Memoire sur la stabilite de revetemens et de leurs, foundations // Memorial de l'officier du genie. P., 1840. Vol. 13.
3. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел. М.: Госстройиздат, 1956. 252 с.
4. Culmann C. Die graphische Statik. Zürich, 1866.
5. Караулов А. М., Королев К. В. К вопросу определения предельного давления грунта на подпорные стенки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 4. С. 5–7.
6. Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
7. ENV 1997-1. Eurocode 7. Part 1. Geotechnical Design – General Rules. Brussel, 1997. 106 p.
8. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2014. 728 с.
9. СП 14.13320.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II–7–81*. М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2011. 230 с.
10. Черноусов С. И. Инженерная геология для транспортных строителей: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2012. 290 с.

А. М. Karaulov, К. В. Korolev, Y. P. Smolin

Definition of Limiting Pressure Upon Protections in View of Seismic Influences

Abstract. The design procedure of active and passive pressure of a ground on retaining walls is resulted in view of seismic influences. The power influence arising at earthquakes is expressed in the mass seismic forces having the inertial nature and determined depending on seismic acceleration. The decision of a problem on limiting pressure upon protecting walls is executed with application of a hypothesis about rectilinear lines of sliding. For this purpose settlement Kuhlman circuit is used. Formulas for calculation of limiting pressure upon a retaining wall are received by the direct decision of Kuhlman circuit. Thus the direction of seismic force is accepted horizontal. Influence of seismic force for different intensity of earthquakes on size of active and passive pressure of a ground is shown. Expressions for factors of active and passive pressure of a ground on retaining walls are offered to be used in practical calculations for seismic areas.

Key words: limiting pressure; active pressure; passive pressure; a retaining wall; seismic force.

Караулов Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: karaulov@stu.ru

Королев Константин Валерьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: korolev_kv@mail.ru

Смолин Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» СГУПС. E-mail: yurij.smolin@bk.ru