

Методика определения бокового давления грунта на гибкие подпорные стены в зависимости от горизонтальных перемещений

Задача определения бокового давления грунта на гибкие подпорные стены не нова. Целью работы является обобщение знаний в данной области, а также разработка математической модели для численной реализации рассматриваемой задачи.

Величина горизонтального давления грунта на гибкие подпорные стены зависит от угла наклона поверхности грунта к горизонту, его физико-механических свойств, сил трения на контакте «подпорная стена – грунтовый массив», а также от величины горизонтальных перемещений конструкции.

Результирующее давление на ограждение определяется суммой *эффективного* давления, вызванного напряженно-деформированным состоянием скелета грунта, и *порового* давления воды.

В ряде случаев, поровое давление воды на ограждение определяется давлением столба жидкости, находящегося над расчетным сечением.

В случае если котлован устраивают в неводонасыщенных грунтах, результирующее давление грунта на ограждение будет полностью определяться эффективным давлением.

Для описания бокового давления грунта на ограждение S_x рассмотрим простейшую расчетную схему, представленную на рис.1.

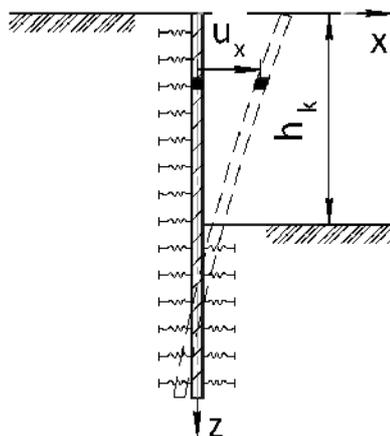


Рис. 1 Расчетная схема: xz – система координат, h_k – глубина котлована, u_x – горизонтальные перемещения ограждения

Давление грунта на неподвижную стену ($u_x = 0$), называется *давлением в состоянии покоя* и определяется выражением:

$$s_0(z) = s_x(z, u_x) \Big|_{u_x=0} = I_0 g z, \quad (1)$$

где I_0 – коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя;

g – удельный вес грунта;

z – расстояние от поверхности грунта до рассматриваемой точки.

При значительных смещениях стены от грунта на глубине z реализуется *активное давление* на ограждение S_a , которое соответствует минимальному значению давления. *Пассивное давление* S_p , реализуется при значительных смещениях стены на грунт и соответствует максимальному значению давления.

В случае отсутствия нагрузки на поверхности грунта, выражения для определения активного и пассивного давлений имеют вид:

$$S_a(z) = I_a g z - c I_{ac}, \quad (2)$$

$$S_p(z) = I_p g z + c I_{pc}, \quad (3)$$

где

I_a – коэффициент активного давления грунта,

I_{ac} – коэффициент учета влияния связности грунта на активное давление,

I_p – коэффициент пассивного давления грунта,

I_{pc} – коэффициент учета влияния связности грунта на пассивное давление,

c – удельное сцепление грунта.

Активное и пассивное давление грунта на ограждение являются предельными величинами давлений, то есть, эффективное давление всегда находится в диапазоне:

$$S_a(z) \leq S_x(z, u_x) \leq S_p(z) \quad (4)$$

Зависимость эффективного горизонтального давления грунта на удерживающую конструкцию в интервале $u_x \in (u_p, u_a)$ имеет сложный характер (Рис. 2) [3].

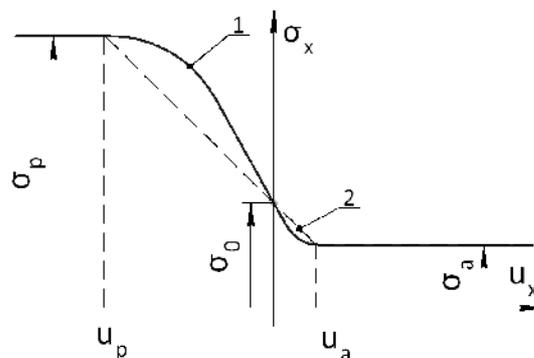


Рис. 2 График зависимости давления грунта на подпорную стену в зависимости от ее перемещения: 1 – фактическое давление, 2 – аппроксимация кусочно-линейной функцией

Функцию изменения величины давления s_x на некоторой глубине z от перемещений можно представить следующим образом:

$$s_x(u_x) = \begin{cases} s_p, & u_x \leq u_p \\ f(u_x), & u_p < u_x < u_a \\ s_a, & u_a \leq u_x \end{cases} \quad (5)$$

С некоторым допущением функцию $f(u_x)$ можно заменить линейной функцией (рис.2) [1]:

$$f(u_x) = s_0 - ku_x, \quad (6)$$

Где k – коэффициент жесткости грунта,
 s_0 – давление грунта в состоянии покоя.

В качестве коэффициента жесткости грунта можно использовать коэффициент постели грунта [2].

Результирующим давлением на ограждение является сумма эффективных давлений на ограждение с обеих сторон стены. Представим в виде двух графиков эффективное давление грунта на подпорную стену со стороны грунта (слева) и со стороны котлована (справа) в зависимости от горизонтального перемещения стены (рис.3а).

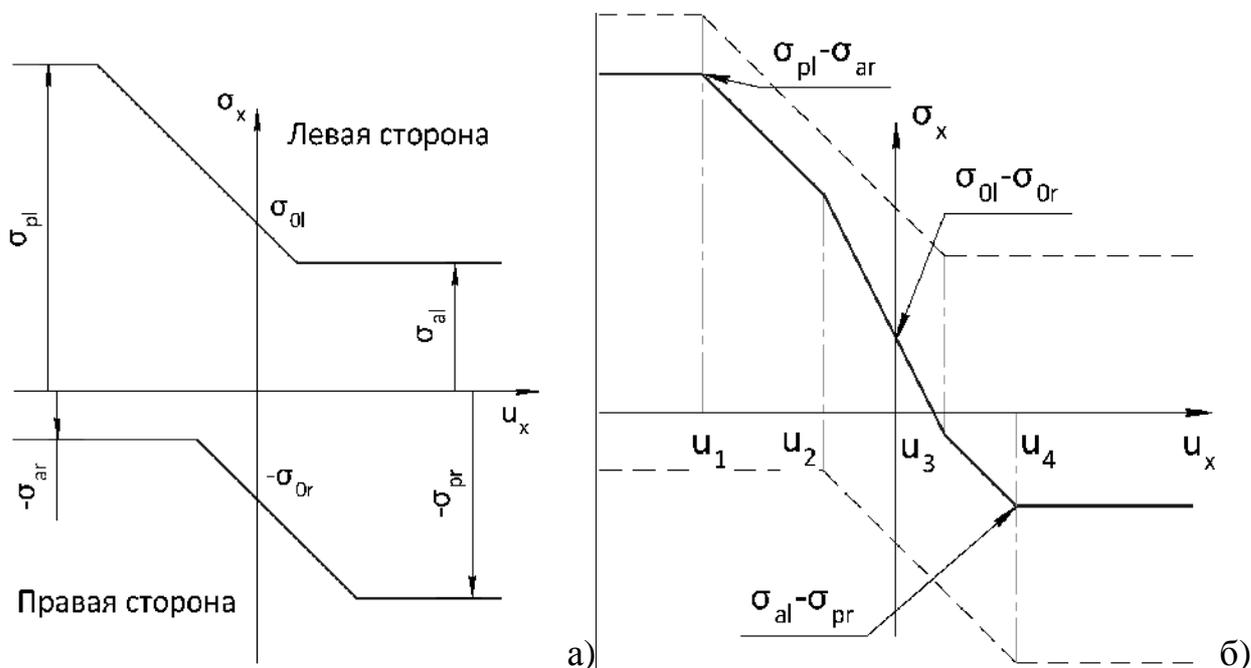


Рис. 3 График зависимости давления грунта на подпорную стену от ее перемещения: а) эпюры эффективных давлений на ограждение слева и справа; б) эпюра результирующего давления на ограждение

Построим функцию $s_x(z, u_x)$ в виде кусочно-заданной функции для любого значения z . Для описания отдельных участков диаграммы будем использовать (1), (2), (3), (6), добавляя индексы "l", "r" для слагаемых, относящихся к левой и правой стороне ограждения. В случае, когда стена с обеих сторон окружена грунтовым массивом, $s_x(z, u_x)$ примет вид:

$$s_x(z, u_x) = \begin{cases} s_p^l(z) - s_a^r(z - h_k), & u_x \leq u_1 \\ s_0^l(z) - s_a^r(z - h_k) - u_x k^l, & u_1 < u_x < u_2 \\ s_0^l(z) - s_0^r(z - h_k) - u_x (k^l + k^r), & u_2 \leq u_x \leq u_3 \\ s_a^l(z) - s_0^r(z - h_k) - u_x k^r, & u_3 < u_x < u_4 \\ s_a^l(z) - s_p^r(z - h_k), & u_4 \leq u_x \end{cases} \quad (7)$$

Если отдельно рассмотреть результирующее давление на ограждение до заделки ($z \leq h_k$), то выражение (7) примет вид:

$$s_x(z, u_x) = \begin{cases} s_p^l(z), & u_x \leq u_1 \\ s_0^l(z) - k^l u_x, & u_1 < u_x < u_3 \\ s_a^l(z), & u_3 \leq u_x \end{cases} \quad (8)$$

Подставим выражения (1),(2),(3) в (7) и (8):

$$s_x(z, u_x) = \begin{cases} I_p^l g z + c I_{pc}^l, & u_x \leq u_1 \\ I_0^l g z - k^l u_x, & u_1 < u_x < u_3, \\ I_a^l g z - c I_{ac}^l, & u_3 \leq u_x \end{cases} \quad (9)$$

$$s_x(z, u_x) = \begin{cases} I_p^l g z - I_a^r g (z - h_k) + c I_{pc}^l + c I_{ac}^r, & u_x \leq u_1 \\ I_0^l g z - I_a^r g (z - h_k) + c I_{ac}^r - u_x k^l, & u_1 < u_x < u_2 \\ I_0^l g z - I_0^r g (z - h_k) - u_x (k^l + k^r), & u_2 \leq u_x \leq u_3, \\ I_a^l g z - I_0^r g (z - h_k) - c I_{ac}^l - u_x k^r, & u_3 < u_x < u_4 \\ I_a^l g z - I_p^r g (z - h_k) - c I_{ac}^l - c I_{pc}^r, & u_4 \leq u_x \end{cases} \quad (10)$$

Существует значительное количество методов определения коэффициентов активного, пассивного давления и давления грунта в состоянии покоя в зависимости от угла внутреннего трения грунта j и угла трения по контакту с ограждением d [1]-[8].

При допущении о горизонтальной поверхности засыпки и отсутствии наклонов граней конструкции к вертикали, коэффициент активного горизонтального давления принимает вид:

$$I_a = \frac{\cos^2(j)}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(d+j)\sin(j)}{\cos(d)}}\right]^2} \quad (11)$$

Коэффициент пассивного горизонтального давления принимает вид:

$$I_p = \frac{\cos^2(j)}{\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(d+j)\sin(j)}{\cos(d)}}\right]^2} \quad (12)$$

В [9] приведен обзор существующих методов расчета коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя.

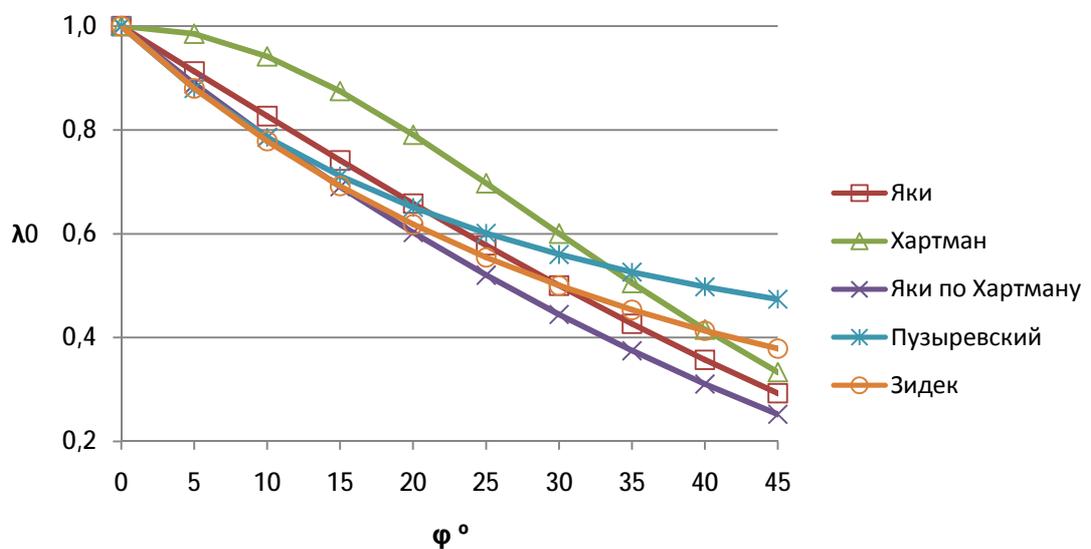


Рис. 4 Зависимость коэффициента давление грунта в состоянии покоя от угла внутреннего трения

Из рис. 4 видно, что предложенные методы дают различные значения коэффициента I_0 при одном и том же угле внутреннего трения j . Согласно [3] наиболее обоснованный метод расчета коэффициента I_0 был предложен Яки:

$$I_0 = 1 - \sin(j) \quad (13)$$

Для полного описания всех компонент, входящих в (10), необходимо определить I_{ac} , I_{pc} . Согласно [2] данные величины определяются следующими зависимостями:

$$I_{ac} = \frac{1}{\operatorname{tg}(j)} \cdot [1 - I_a] \quad (14)$$

$$I_{pc} = \frac{1}{\operatorname{tg}(j)} \cdot [I_p - 1] \quad (15)$$

При помощи выражений (10)-(15) можно полностью описать давление грунта на гибкую вертикальную подпорную стену в зависимости от перемещений. Расчет ограждения котлована с использованием рассмотренной модели «ручным» способом является слишком трудоемким. Данная расчетная схема численно реализована в программном комплексе GeoWall.

В качестве примера рассмотрим расчет ограждения котлована в однородном грунте ($g = 20 \text{ кН/м}^3$, $c = 8 \text{ кПа}$, $j = 16^\circ$) с устройством одного ряда распорных систем из металлических труб $\text{Ø}325 \times 8 \text{ мм}$ длиной 8 м с шагом 3 м. Длина ограждения составляет 9 м, глубина котлована – 5 м (рис.5).

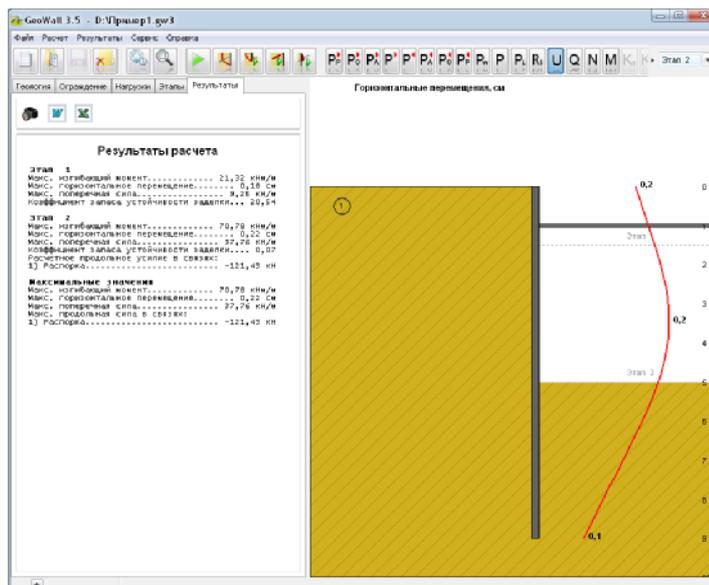


Рис. 5 Расчетная схема в программе GeoWall

На рис. 6 приведены графики давления грунта на ограждение.

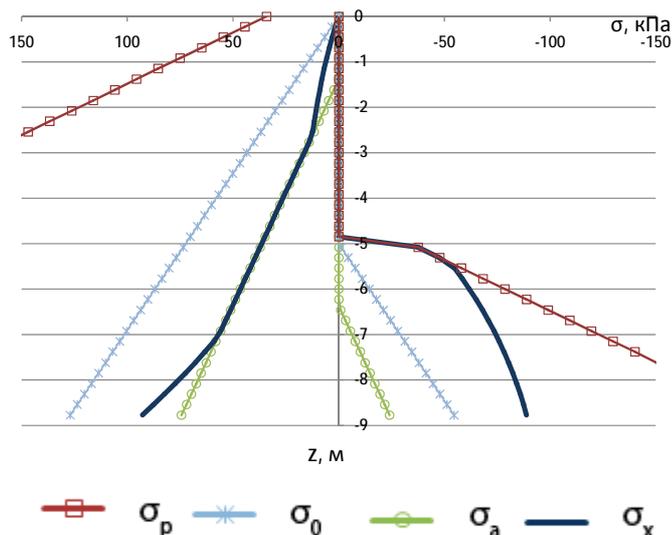


Рис. 6 Горизонтальное давление на ограждение в зависимости от глубины слева и справа от ограждения

Из рис. 6 видно, что значение эффективного горизонтального давления S_x с каждой из сторон лежит между предельными значениями – активным S_a

и пассивным s_p . Вследствие малых перемещений давление s_x слева на некоторых участках по высоте ограждения больше активного s_a . Давление s_x справа на небольшой глубине от дна котлована достигает предельного значения s_p , а на остальном участке $s_x \in (s_0, s_p)$. В том случае, если давление справа s_x по всей глубине заделки достигнет величины пассивного давления s_p , заделка потеряет устойчивость.

Следует отметить, что при перемещении ограждения вправо, эффективное давления на левой стороне ограждения $s_x \in (s_0, s_a)$, а эффективное давление на правой стороне ограждения $s_x \in (s_0, s_p)$.

Для определения перемещений гибкой подпорной стены можно воспользоваться численными методами, например, методом конечных элементов с учетом рассмотренной методики. Для решения задачи можно организовать итерационный процесс, в котором осуществляется корректировка давлений на ограждение в зависимости от его перемещений. Как показала практика, данная схема дает устойчивое решение.

Список литературы

1. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная версия СНиП 2.02.01-83*.
2. Основания фундаменты и подземные сооружения/М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др.; под. общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. –М.: Стройиздат, 1985. – 480 с., ил. – (Справочник проектировщика).
3. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен. – М.: Высшая школа, 1964. – 196 с.
4. СНиП 2.06.07-87 Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения.
5. ВСН 167-70 Технические указания по проектированию подпорных стен для транспортного строительства.
6. РД 31.31.55-93 Инструкция по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений.
7. Справочное пособие к СНиП Проектирование подпорных стен и стен подвалов. (К СНиП 2.09.03-85 «Сооружения промышленных предприятий»).
8. Chang-Yu Ou. Deep Excavation. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan.
9. Богомолов А.Н., Калиновский С.А., Бабаханов, Б.С., Шиян С.И., Шолудько С.Л. О назначении расчетной величины коэффициента бокового давления грунта в предельного состоянии // Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства. Материалы международной конференции, Пермь, 2011.