

КАЛМЫКОВ О.А.Харьковская национальная академия городского хозяйства
г. Харьков, Украина

УДК 692.25

ПОДПОРНАЯ СТЕНА РАЦИОНАЛЬНОГО ОЧЕРТАНИЯ*Ключевые слова: подпорная стена, активное давление, дифференциальное уравнение**Запропоновано метод і розглянуто процедуру формування конструкції підпірної стіни полегшеного типу. Побудовано точний і спрощуючий аналітичний розв'язок задачі. Результати зіставлені.**Предложен метод и рассмотрена процедура формирования конструкции подпорной стены облегченного типа. Построено точное и упрощающее аналитическое решение задачи. Результаты сопоставлены.**The method and the procedure for forming a retaining wall design light type is proposed. Exact and simplifies the analytical solution is down. The results were compared.***ВВЕДЕНИЕ**

Создание конструкций с заданными положительными свойствами является одной из приоритетных задач современной строительной науки. Сказанное предопределяет разработку методов и средств проектирования и возведения эффективных систем, минимизирующих их вес. В связи с этим, традиционный (обратный) подход, принятый в проектировании, не может обеспечить интегральную позитивность решений. Альтернативой ему являются информационные технологии, базирующиеся на общей теории систем, включающей такие разделы, как математическое моделирование, синергетика, информатика. В результате построены

алгоритмы поиска рациональной структуры конструкции, геометрия которой обеспечивает заданную трансформацию эпюры горизонтального активного давления на стену.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Предлагаемая постановка задачи фундирована гипотезами и допущениями, соответствующими теории Кулона (рис. 1), а именно [1]:

- форма разрушения биагрегата, состоящего из подпорной стены и удерживаемого ею массива грунта, представлена перемещением стены в сторону от грунта с одновременным сползанием некоторой призмы последнего по некоторой поверхности скольжения;
- рассматриваются две поверхности скольжения: задняя часть стены и некоторая плоскость, которая является границей неподвижной части грунта;
- сползающая призма представляет собой абсолютно твердое тело, что позволяет заменить действующие на нее объемные и поверхностные силы их равнодействующими G ; Q ; R (G – собственный вес; Q – реакция подпорной стены; R – реакция неподвижного грунта);
- грунт является сыпучим телом, лишенным сцепления;
- рассматривается биагрегат в состоянии предельного равновесия, соответствующего начальному моменту перемещения стены и скольжению призмы грунта. Поэтому принято, что реактивные силы, действующие на скользящую призму со стороны стены и неподвижной части грунта, отклоняются от нормалей к соответствующим плоскостям на углы ϕ_0 и ϕ , равные углам трения грунта по этим плоскостям;
- рассматривается начальный момент процесса разрушения системы в связи с чем, условия равновесия записываются для ее недеформированного состояния;
- задача рассматривается как плоская.

Углы силового треугольника (рис. 1) равны:

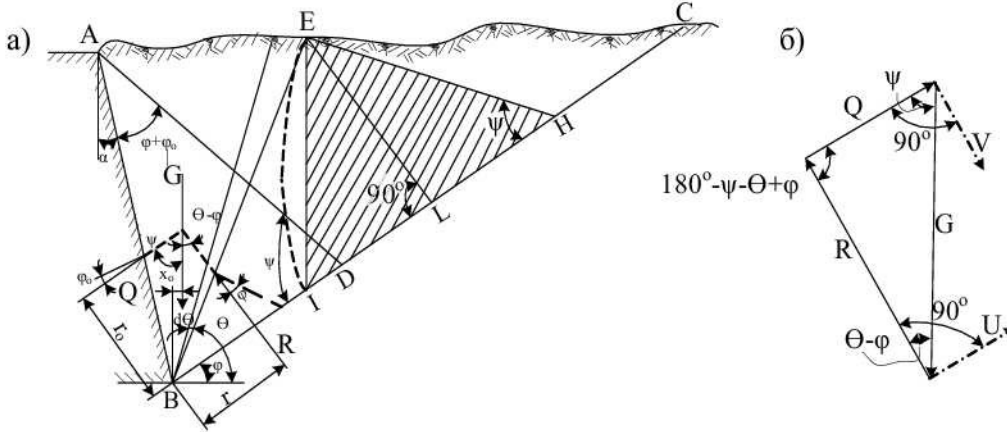


Рис. 1. Расчетная схема биагрегата

$$\begin{aligned} \psi &= 90^\circ - \alpha - \varphi_0; \\ \theta - \varphi; \\ 180^\circ - \psi - \theta + \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где α – угол между вертикальной плоскостью и задней гранью стены; θ – неизвестный угол между горизонтальной плоскостью и плоскостью скольжения.

Из изложенного следует, что реакция подпорной стены равна искомому активному давлению на нее грунта, но направлена в противоположную сторону. В [1], на основании приведенных гипотез, получено выражение для равнодействующей активного давления:

$$Q = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \lambda, \quad (2)$$

где γ – объемный вес грунта; h – высота проекции стены на вертикальную плоскость; λ – коэффициент активного давления грунта.

Учитывая логическую направленность задачи, а также с целью упрощения ее постановки (без нарушения общности), положим:

- внешняя поверхность грунта ограничена горизонтальной плоскостью, т.е. $\beta = 0$;
- задняя грань стены считается идеально гладкой, тогда $\varphi_0 = 0$.

$$\lambda = \left[\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi + \alpha}{2} \right) + \operatorname{tg} \alpha \right]^2 \cos \alpha. \quad (3)$$

Анализ (3) позволяет принять в качестве внешнего управляющего параметра угол наклона стены к вертикали α [2].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рационализация системы, в определенной степени, может быть осуществлена путем уменьшения давления грунта на подпорную стену. Последнее реализуется за счет придания задней поверхности стены определенного очертания. Принимая концепцию о независимом априорном формировании распределения горизонтального давления

(например, постоянного), отнесенного к единице поверхности стены, можно записать:

$$\sigma = \lambda \cdot \gamma \cdot (z_0 + z_1), \quad (4)$$

где: $z = z_0 + z_1$ – текущая глубина (рис. 2); σ – интенсивность нормального давления на стену на глубине z от поверхности засыпки; z_0 – глубина, на уровне которой горизонтальное давление принимается в качестве начального (рис. 2).

Область значений угла α лежит в пределе:

$$-\varphi < \alpha \leq 0. \quad (5)$$

Пределы устанавливаются из физического смысла задачи.

Введем далее обозначение: $\psi = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$.

Из геометрического смысла первой производной следует, что

$$y' = \frac{dy}{dz} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

где $y = y(z)$ – функция, описывающая геометрию задней поверхности подпорной стены.

Произведя тригонометрические преобразования, описанные в [3], с учетом (6) получим:

$$\lambda = \frac{\left[\operatorname{tg} \psi + \frac{1 - \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right]^2}{\left[1 - \operatorname{tg} \psi \cdot \frac{1 - \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right]^2} - \operatorname{tg} \alpha = \frac{\left[\operatorname{tg} \psi + \frac{1 - \sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{1 + y'^2}} \right]^2}{\left[1 - \operatorname{tg} \psi \cdot \frac{1 - \sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{1 + y'^2}} \right]^2} - y'$$

Произведем замену переменных:

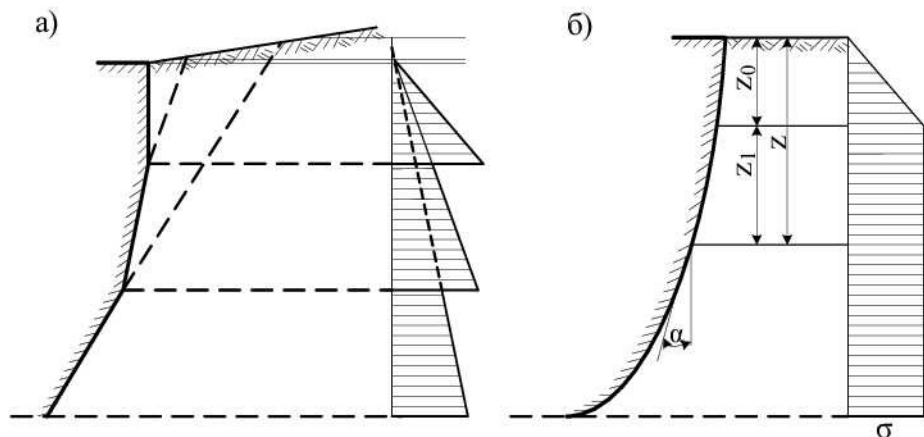


Рис.2. К поиску геометрии стены

$$f = \sqrt{\frac{1}{1+y'^2}}, \text{ и выразим из данного уравнения } y':$$

$$f^2 = \frac{1}{1+y'^2}; \quad \frac{1}{f^2} = 1+y'^2; \quad y'^2 = \frac{1-f^2}{f^2}; \quad y' = \operatorname{tg} \alpha = \pm \sqrt{\frac{1-f^2}{f^2}}.$$

Из (4) следует: $\lambda = \frac{\sigma}{\gamma(z_0 + z_1)}$,

где: $z = z_0 + z_1$ – текущая глубина (рис. 2).

Окончательно: $\lambda = \frac{\sigma(z)}{z \cdot \gamma}$; далее $\frac{\sigma(z)}{z \cdot \gamma} = F^2(z) \Rightarrow F(z) = \sqrt{\frac{\sigma(z)}{z \cdot \gamma}}$.

Учитывая, что величины γ, z_0, φ известны заранее, а величину интенсивности нормального давления можно представить в виде известной функции от глубины $\sigma = \sigma(z)$, допустимо записать следующее уравнение:

$$\left[\frac{\operatorname{tg} \psi + \sqrt{\frac{1-f}{1+f}}}{1 - \operatorname{tg} \psi \cdot \sqrt{\frac{1-f}{1+f}}} - \sqrt{\frac{1-f^2}{f^2}} \right] f = F^2(z). \quad (7)$$

Пусть далее: $k^2 = \frac{1-f}{1+f}$, тогда $f = \frac{1-k^2}{1+k^2}$; $\frac{1-f^2}{f^2} = \frac{4k^2}{(1-k^2)^2}$;

$$\sqrt{\frac{1-f^2}{f^2}} = \sqrt{\frac{4k^2}{(1-k^2)^2}} = \frac{2k}{1-k^2}.$$

В результате имеем:

$$\left[\frac{\operatorname{tg} \psi + k}{1 - \operatorname{tg} \psi \cdot k} - \frac{2k}{1-k^2} \right] \frac{1-k^2}{1+k^2} = F^2(z).$$

Произведя алгебраические преобразования данного выражения, окончательно получим:

$$k^4 + \delta_2 \cdot k^3 + \delta_3 \cdot k^2 + \delta_4 \cdot k + \delta_5 = 0, \quad (8)$$

где: $\delta_2 = \frac{-2\operatorname{tg} \psi - 2F^2(z) \cdot \operatorname{tg} \psi}{1 + F^2(z) \cdot \operatorname{tg}^2 \psi}$; $\delta_3 = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi - F^2(z) \cdot \operatorname{tg}^2 \psi + F^2(z)}{1 + F^2(z) \cdot \operatorname{tg}^2 \psi}$;

$$\delta_4 = \frac{2 \cdot F^2(z) \cdot \operatorname{tg} \psi - 2 \cdot \operatorname{tg} \psi}{1 + F^2(z) \cdot \operatorname{tg}^2 \psi}; \quad \delta_5 = \frac{\operatorname{tg}^2 \psi - F^2(z)}{1 + F^2(z) \cdot \operatorname{tg}^2 \psi},$$

где: z_0 – глубина, в пределах которой давление нарастает линейно до необходимой величины $\sigma(z_0)$, (рис. 2); z – переменная глубина, (рис. 2); $\sigma(z_0)$ – давление на уровне z ;

Для частного случая $\sigma(z) = \sigma = \text{const}$, ординаты кривой не зависят от удельного веса грунта - γ . Отметим также, что решение (8) целесообразно строить численными методами.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

С целью построения аналитического решения (8) (что упрощает анализ), введем следующую гипотезу

$$\cos \alpha = \cos^2 \alpha. \quad (9)$$

Угол наклона стены α зависит от угла внутреннего трения φ . Увеличение φ приводит к уменьшению α . Из физического смысла задачи следует, что область определения угла α находится в пределах: $-\varphi < \alpha \leq 0$. Как известно [4] для различных грунтов лежит в пределах: $7^\circ < \varphi \leq 43^\circ$.

Равенство (9) с погрешностью, не превышающей 20 %, имеет силу для $\alpha \in \{0^\circ, 36^\circ\}$, что составляет 83% области определения угла внутреннего трения φ . В остальных же случаях погрешность может достигать 37%.

После введения (9) разрешающее уравнение примет вид:

$$\lambda = \left[\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi + \alpha}{2} \right) + \operatorname{tg} \alpha \right]^2 \cos^2 \alpha$$

Произведя аналогичные преобразования и замены выражение (7) примет вид:

$$\left[\frac{\operatorname{tg} \psi + \sqrt{\frac{1-f}{1+f}}}{1 - \operatorname{tg} \psi \cdot \sqrt{\frac{1-f}{1+f}}} - \sqrt{\frac{1-f^2}{f^2}} \right] f^2 = F^2(z).$$

Как и ранее произведя еще одну замену: $k^2 = \frac{1-f}{1+f}$,

получим: $\left[\frac{\operatorname{tg} \psi + k}{1 - \operatorname{tg} \psi \cdot k} - \frac{2k}{1-k^2} \right] \frac{(1-k^2)^2}{(1+k^2)^2} = F^2(z)$.

Извлекая корень из левой и правой части уравнения, имеем:

$$\left[\frac{\operatorname{tg} \psi + k}{1 - \operatorname{tg} \psi \cdot k} - \frac{2k}{1-k^2} \right] \frac{(1-k^2)}{(1+k^2)} = F(z); \quad \left[\frac{\operatorname{tg} \psi - k^3 + k^2 \operatorname{tg} \psi - k}{(1 - \operatorname{tg} \psi \cdot k)(1-k^2)} \right] \frac{(1-k^2)}{(1+k^2)} = F(z);$$

$$\frac{(1+k^2)(\operatorname{tg} \psi - k)(1-k^2)}{(1 - \operatorname{tg} \psi \cdot k)(1-k^2)(1+k^2)} = F(z); \quad \frac{(\operatorname{tg} \psi - k)}{(1 - \operatorname{tg} \psi \cdot k)} = F(z); \quad k = \frac{F(z) - \operatorname{tg} \psi}{F(z) \cdot \operatorname{tg} \psi - 1};$$

$$y' = \pm \sqrt{\frac{1-f^2}{f^2}} = \pm \frac{2k}{1-k^2}; \quad y = \pm \int \frac{2k}{1-k^2} dz,$$

где: $k^2 = \left[\frac{F(z) - \operatorname{tg} \psi}{F(z) \cdot \operatorname{tg} \psi - 1} \right]^2$;

$$\frac{2k}{1-k^2} = \frac{2(F(z) - \operatorname{tg} \psi)(F(z) \cdot \operatorname{tg} \psi - 1)}{(F^2(z) - 1)(\operatorname{tg}^2 \psi - 1)}.$$

Дифференцируя левую и правую часть уравнения $F^2(z) = \frac{\sigma(z)}{z \cdot \gamma}$, определим dz :

$$2F(z)dF(z) = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\sigma(z) \cdot z - \sigma(z) \cdot dz}{z^2} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dz \left(z \cdot \frac{d\sigma(z)}{dz} - \sigma(z) \right)}{z^2};$$

$$dz = \frac{2F(z)z^2 \cdot \gamma \cdot dF(z)}{\left(z \cdot \frac{d\sigma(z)}{dz} - \sigma(z) \right)};$$

$$y = \pm \int \frac{2(F(z) - \operatorname{tg} \psi)(F(z) \cdot \operatorname{tg} \psi - 1)}{(F^2(z) - 1)(\operatorname{tg}^2 \psi - 1)} \cdot \frac{2F(z)z^2 \cdot \gamma}{\left(z \cdot \frac{d\sigma(z)}{dz} - \sigma(z) \right)} dF(z). \quad (10)$$

Рассмотрим частный случай $\sigma(z) = \sigma = \text{const}$, тогда $F(z) = \sqrt{\frac{\sigma}{z \cdot \gamma}}$;

$$dz = - \frac{2F(z)z^2 \cdot \gamma \cdot dF(z)}{\sigma} \cdot \frac{\gamma \cdot \sigma}{\gamma \cdot \sigma} = - \dots$$

$$- \frac{2 \cdot F(z) \cdot \sigma}{F^4(z) \cdot \gamma} dF(z) = - \frac{2 \cdot \sigma}{F^3(z) \cdot \gamma} dF(z);$$

$$y = \mp \frac{4 \cdot \sigma}{\gamma} \int \frac{(F(z) - m)(F(z) \cdot m - 1)}{(F^2(z) - 1)(m^2 - 1) \cdot F^3(z)} dF(z),$$

где $\operatorname{tg}^2 \psi = m$

$$y = \mp \frac{4 \cdot \sigma \cdot m}{\gamma(m^2 - 1)} \left[\int \frac{1}{(F^2(z) - 1) \cdot F(z)} dF(z) - \dots \right.$$

$$\dots - \frac{(m^2 + 1)}{m} \int \frac{1}{(F^2(z) - 1) \cdot F^2(z)} dF(z) + \dots$$

$$\left. \dots + \int \frac{1}{(F^2(z) - 1) \cdot F^4(z)} dF(z) \right]. \quad (11)$$

Интегралы в (13), беруться замкнуто. Получим:

$$y = \mp \frac{4 \cdot \sigma \cdot m}{\gamma(m^2 - 1)} \left[\frac{1}{2 \cdot F^2(z)} - \ln \left(\frac{F^2(z)}{1 - F^2(z)} \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{(m^2 + 1)}{m} \left(-\frac{1}{F(z)} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + F(z)}{1 - F(z)} \right) \right) \right] \quad (12)$$

Введем обозначение:

$$\Omega(F(z)) = \left[\frac{1}{2 \cdot F^2(z)} - \ln \left(\frac{F^2(z)}{1 - F^2(z)} \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{(m^2 + 1)}{m} \left(-\frac{1}{F(z)} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + F(z)}{1 - F(z)} \right) \right) \right] \quad (13)$$

И окончательно:

$$y = \mp \frac{4 \cdot \sigma \cdot m}{\gamma(m^2 - 1)} \Omega(F(z)) \quad (14)$$

Оценка погрешности приближенного аналитического решения произведена путем сравнения площадей эпюр давления. Как видно из рис.3 для большинства случаев погрешность не превышает 25 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен / Клейн Г.К. - М.: Высшая школа, 1964. - 196 с.
2. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа / Шмуклер В.С., Климов Ю.А., Бурак Н.П. - Харьков: Золотые страницы, 2008. - 336 с.
3. О поиске рационального очертания задней поверхности подпорной стены / [В.С Шмуклер, Е.И. Лутченко, О.А. Калмыков, В.М. Зинченко] // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. - Вип. 66. - С. 203-210.

ABSTRACT

Guk V.V., Kornienko N.V., About improvement of settlement schemes of frame buildings on collapsible priming coats //The world of geotechnik.- 2013.- №2.- P.4-7.

\This article provides recommendations for the numerical simulation of the influence of the elements of system "collapsible base - foundation - aboveground part of the building" to increase the reliability of frame constructions in the conditions of non-uniform deformation.

Duvanskiy A., Malikov S., Grunko V. Establishment of geodetic criteria of a technical condition of football stadium «Donbass Arena», Ukraine //The world of geotechnik.- 2013.- №2.- P.8-13.

The article is devoted to the calculation-analytical analysis of the potential influence of the tectonic dislocations on the technical condition of the object, where the complex of geodetic measurements is performed.

Shkoda V., Semchina M. Definition is intense-state of strain load bearing walls of brick buildings taking into account a position of area of soaking collapsible base priming coats //The world of geotechnik.- 2013.- №2.- P.14-17.

In the article the features of design of building are examined jointly with the ground bases at the possible subsidence soil deformation. Investigated as a place of location of possible source of soaking of subsidence soils of founding of building influences on the change of the tensely-deformed state of his bearing walls. On the example of building of mass series of construction 1-438 the executed calculation on the action of subsidence influences at different positions of source of soaking. His most unfavorable position is certain in relation to building.

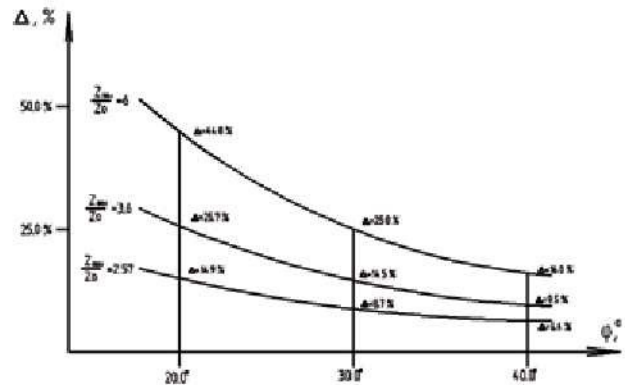


Рис.3. Погрешность (%) аналитического решения в зависимости от угла внутреннего трения

ВЫВОД:

Совместное рассмотрение системы «подпорная стена – грунт» повышает корректность модели, обеспечивая учет особенностей сопротивления этого биогрегата. Прямой (оптимизационный) подход позволяет создать конструкцию, обладающую рациональными характеристиками и высокими конкурентноспособными показателями.

Gegut G., Saharov V., Melnik V. Research of influence of seismoisolation on is intense-deformed conditions of a high-rise building under the influence of earthquake loads //The world of geotechnik.- 2013.- №2.- P.18-23.

In the article the results of studies of the interaction of high-rise building structures with volumetric subsoil under seismic loads are given, taking into account the damping of oscillations in soil and structures. The calculations were made on the finite element method by direct time integration with Newmark's scheme. The effect of neglecting the inertial forces of soil is shown, and the effectiveness of using seismic isolation to reduce the effects of seismic loads is shown too.

Bambura A., Gurkovsky O., Ametov Yu. etc. New in designing of reinforced-concrete and steel-concrete designs. //The world of geotechnik.- 2013.- №2.- P.26-29.

The basic requirements and statements for designing of the concrete, reinforced concrete and steel-concrete structures according to Ukrainian national standards «ДБН В.2.6.-98:2009» and «ДБН В.2.6.-160:2010» are presented.

Kalmikova O. Retaining wall of a rational outline //The world of geotechnik.- 2013.- №2.- P.30-33.

The method and the procedure for forming a retaining wall design light type is proposed. Exact and simplifies the analytical solution is down. The results were compared.