

УДК 624.131.5

Лучковский И.Я.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Чепурной Д.А.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Есакова С.В.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

АКТИВНОЕ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА ПРИ ГИБКОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ НАГРУЗКЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОРОДНОГО И МНОГОСЛОЙНОГО ОСНОВАНИЯ

В современном строительстве существуют всевозможные сложные виды нагрузок, которые не всегда представляется возможным смоделировать без значительных погрешностей местной равномерно распределенной нагрузкой или силой на поверхности засыпки. Нами получена зависимость, позволяющая найти единое решение для горизонтального давления грунта на подпорные стены при гибкой нагрузке на поверхности, изменяющейся от равномерно распределенной до сосредоточенной. Принятие гипотезы о существовании в многослойной засыпке на любой глубине подпорных стен единой плоскости скольжения позволило создать численный метод определения горизонтального давления грунта при наличии сложной трансформируемой нагрузки на поверхности.

Ключевые слова: подпорная стена, нагрузка, активное давление, многослойное основание, напряжение.

Постановка проблемы. Подпорные стены являются одними из наиболее распространенных инженерных сооружений, они нашли широкое применение в различных видах строительства: промышленном, гражданском, дорожном и др.

В практике проектирования подпорных стен инженерные методы учета многослойного основания, при наличии нагрузок на поверхности, не разработаны. Существующие методы Г.К. Клейна [1; 2] и других авторов не могут быть использованы, так как в каждом слое неоднородной засыпки при учете собственного веса грунта принимается свой невыгодный угол наклона плоскостей сдвига, а закономерности распространения в массиве давлений от различного вида полезных нагрузок пока не найдены. Поэтому в настоящее время для многослойного грунта использование даже простейшего метода суперпозиции, при котором суммируется давление от веса грунта и нагрузок на поверхности, остается технически невыполнимым.

Кроме того, в современном строительстве существуют всевозможные сложные виды загруз-

жений, которые не всегда представляется возможным смоделировать (без значительных погрешностей) местной равномерно распределенной нагрузкой или силой на поверхности засыпки.

Анализ последних исследований и публикаций. Со времен Кулона, предложившего более 200 лет назад один из основополагающих методов определения давления грунта на подпорные стены, многие исследователи пытались решить задачу о давлении, передаваемом на ограждение местными нагрузками, располагаемыми на поверхности.

Данная задача решалась Г.М. Креем [3], Н.И. Безуховым [4], Б.А. Урецким [5], И.П. Прокофьевым [6], Н.К. Снитко [7], Г.К. Клейном [1; 2], В.В. Синельниковым [8], П.И. Яковлевлевым [9], Г.А. Дубровой [10], А.Я. Будиным [11], И.В. Яропольским [12] и др.

Сложность задачи состоит в том, что в данном случае принцип независимости действия сил не справедлив. Поэтому идея Кулона о применении правил максимума и минимума к проблемам статике сыпучей среды может быть использована

только при совместном действии веса грунта, местной нагрузки и сцепления.

Постановление задания. Целью работы является нахождение зависимости, позволяющей моделировать сложные виды нагружений, и разработка методов определения активного горизонтального давления от многослойной засыпки с учетом полезной местной нагрузки на поверхности.

Изложение основного материала исследования. Представим закономерность распределения гибкой нагрузки q_x на поверхности грунта.

$$q_x = \frac{q_{\max}}{1 + m(\bar{x} - 1)^2}, \quad (1)$$

где $m = \frac{q_{\max}}{q_0} - 1$; $\bar{x} = \frac{x}{a}$.

Принятие закона (1) позволяет получить единое решение для горизонтального давления грунта на подпорные стены при гибкой нагрузке на поверхности, изменяющейся от равномерно распределенной (при $m=0$) до сосредоточенной (при $m \rightarrow \infty$), что показано на рис. 1.

1. *Активное давление грунта при гибкой трансформируемой нагрузке на поверхности однородного основания*

Рассмотрим равновесие призмы обрушения ОАВ грунтового массива, нагруженного трансформируемой гибкой нагрузкой q_x (рис. 2).

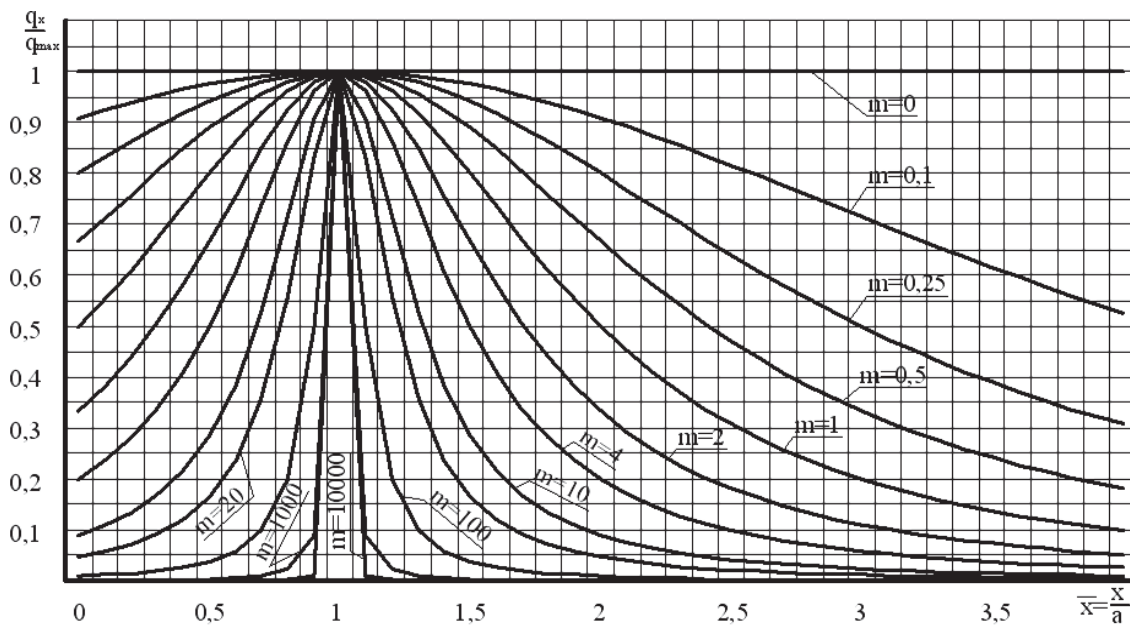


Рис. 1. Зависимость интенсивности внешней нагрузки q_x по длине засыпки при изменении параметра m

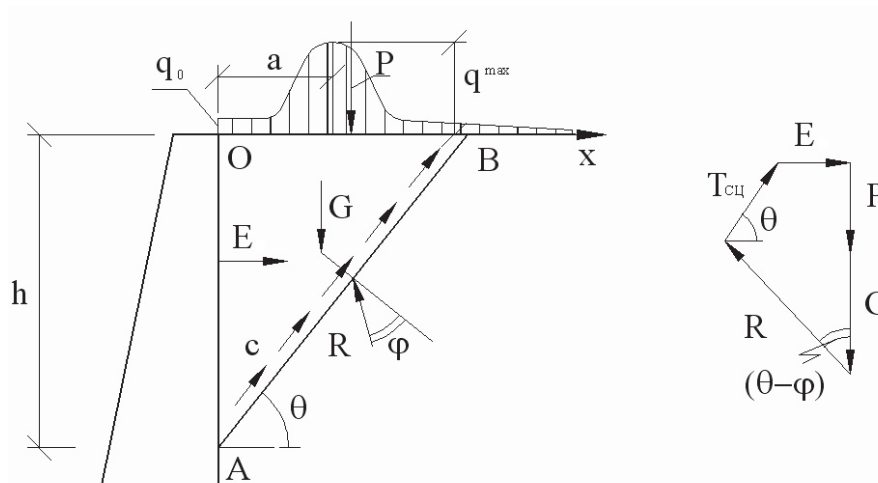


Рис. 2. Расчетная схема подпорной стенки

Предварительно вычислим вес призмы обрушения $G = \frac{\gamma h^2}{2} \text{ctg}\theta$, а также найдем равнодействующую P части внешней нагрузки q_x на участке $OB = h \cdot \text{ctg}\theta$ путем интегрирования равенства (1):

$$P = \int_0^{h \cdot \text{ctg}\theta} \frac{q^{\max} \cdot dx}{\frac{m}{a^2} \cdot x^2 - \frac{2m}{a} \cdot x + (1+m)} = a \cdot q$$

$$= \frac{a \cdot q^{\max}}{\sqrt{m}} \left[\arctg \sqrt{m} \left(\frac{h}{a} \text{ctg}\theta - 1 \right) + \arctg \sqrt{m} \right]. \quad (2)$$

Из равновесия силового многоугольника нетрудно получить выражение для равнодействующей активного давления E :

$$E_h = (0,5\gamma h^2 \text{ctg}\theta + P) \text{tg}(\theta - \varphi) - ch[\text{tg}(\theta - \varphi) + \text{ctg}\theta].$$

При отсутствии сцепления решение упрощается. В относительных безразмерных величинах оно может быть записано так:

$$\bar{E}_h = \frac{\bar{h}^2}{q} F_1 + t F_2 + \frac{1}{\sqrt{m}} F_2 \cdot F_4, \quad (3)$$

где обозначено:

$$t = \frac{1}{\sqrt{m}} \arctg \sqrt{m};$$

$$\bar{E}_h = \frac{E_h}{aq^{\max}}; \quad \bar{h} = \frac{h}{a}; \quad \bar{q} = \frac{2q^{\max}}{\gamma a}; \quad (4)$$

$$F_1 = \text{ctg}\theta \cdot \frac{(1 - \text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta)}{\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta}; \quad F_2 = \frac{1 - \text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta}{\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta};$$

$$F_2 \cdot F_4 = \frac{(1 - \text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta)}{\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta} \cdot \arctg \left[\sqrt{m} (\bar{h} \cdot \text{ctg}\theta - 1) \right].$$

Максимальное значение равнодействующей активного давления находим из условия $\frac{\partial E}{\partial (\text{ctg}\theta)} = 0$.

Для этого предварительно найдем производные от функций F_i :

$$\frac{\partial F_1}{\partial (\text{ctg}\theta)} = \frac{\text{tg}\varphi(1 - \text{ctg}^2\theta - 2\text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta)}{(\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta)^2};$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial (\text{ctg}\theta)} = -\frac{1 + \text{tg}^2\varphi}{(\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta)^2};$$

$$\frac{\partial (F_2 \cdot F_4)}{\partial (\text{ctg}\theta)} = \frac{\bar{h}\sqrt{m}(1 - \text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta)}{[1 + m(\bar{h}\text{ctg}\theta - 1)^2] \cdot (\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta)} -$$

$$-\frac{1 + \text{tg}^2\varphi}{(\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta)^2} \cdot \arctg \left[\sqrt{m} \cdot (\bar{h}\text{ctg}\theta - 1) \right].$$

Подставив найденные выражения в исходное уравнение – получим уравнение для определения невыгоднейших углов наклона θ_0^h плоскости скольжения к горизонту на разных глубинах h :

$$\text{ctg}^2\theta_0^h + 2\text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta_0^h - 1 + \frac{q(1 + \text{tg}^2\varphi)}{\bar{h}^2 \cdot \text{tg}\varphi} \cdot M = 0, \quad (5)$$

где

$$M = \frac{1}{\sqrt{m}} \left\{ \arctg \sqrt{m} + \arctg \left[\sqrt{m} (\bar{h} \cdot \text{ctg}\theta_0^h - 1) \right] \right\} - \frac{\bar{h}(1 - \text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\theta_0^h) \cdot (\text{tg}\varphi + \text{ctg}\theta_0^h)}{(1 + \text{tg}^2\varphi) \cdot [1 + \sqrt{m}(\bar{h} \cdot \text{ctg}\theta_0^h - 1)]}. \quad (6)$$

Для определения θ_0^h используем метод последовательных приближений. На каждом этапе приближений принимаем:

$$\text{ctg}\theta_0^{i+1} = -\text{tg}\varphi + \frac{1}{\cos\varphi} \sqrt{1 - \frac{M_i}{q} \frac{1}{\bar{h} \text{tg}\varphi}} \cdot \varphi. \quad (7)$$

На первом этапе можно принять $\theta_0^h = 45^\circ$.

После определения невыгоднейших углов θ_0^h определяются значения равнодействующей активного давления грунта на разных глубинах стенки \bar{h} :

$$\bar{E}_h = \text{tg}(\theta_0^h - \varphi) \left\{ \frac{\bar{h}^2}{q} \cdot \text{ctg}\theta_0^h + t + \frac{1}{\sqrt{m}} \arctg \left[\sqrt{m} (\bar{h} \cdot \text{ctg}\theta_0^h - 1) \right] \right\}. \quad (8)$$

Нами разработана программа расчета, в которой использовано условие Кулона и зависимость (8). Назначая $\theta_i \geq \varphi$, последовательно находим значения \bar{E}_h до установления \bar{E}_h^{\max} и соответствующего угла \bar{h} на всех глубинах h подпорной стенки.

После этого численным дифференцированием вычисляются напряжения активного давления $\bar{\sigma}$.

Приближенную зависимость для σ можно получить дифференцированием зависимости (3) по h , считая $F_1 = \text{const}$ и $F_2 = \text{const}$. При этом получим:

$$\sigma \cong F_1^h \left[\gamma h + \frac{q^{\max}}{1 + m(\bar{h} \cdot \text{ctg}\theta^h - 1)^2} \right]. \quad (9)$$

В качестве примера на рис. 3 показано распределение напряжений $\bar{\sigma}$ вдоль стенки, при нагружении поверхности полосовой нагрузкой и трансформируемой нагрузкой при следующих исходных данных:

$$\varphi = 30^\circ; \quad \gamma = 2,0 \text{ тс/м}^3; \quad \alpha = 1 \text{ м};$$

$$1) q^{\max} = 10 \text{ тс/м}^2; \quad q_0 = 0,01 \text{ тс/м}^2; \quad m = 1000;$$

$$2) q = 20 \text{ тс/м}^2; \quad b = 0,05 \text{ м (полоса)}.$$

2. Трансформируемая нагрузка на многослойном основании

В традиционных методах определения давления разнородных грунтов на ограждающую конструкцию принимается, что для каждого нижележащего слоя вышележащие грунты являются внешней нагрузкой. Это означает, что в каждом слое грунта невыгоднейшая плоскость сползания наклонена к горизонту под углом θ_i , зависящим только от физико-механических характеристик грунта данного слоя. Следовательно, для многослойного грунта плоскости сползания при таком подходе получают изломы на границах слоев, характер которых зависит от свойств грунта

в смежных пластах, т. е. нарушается принцип Кулона, предполагавшего наличие единой поверхности, заменяемой плоскостью сползания на всю глубину грунта, независимо от его неоднородности. При этом каждой глубине z соответствует своя невыгоднейшая плоскость сползания, проходящая через все вышележащие слои и наклоненная к горизонту под углом θ .

Принятие единой плоскости скольжения для каждой глубины подпорной стенки позволяет сформулировать новые принципы определения горизонтального давления на подпорную стенку с учетом нагрузок на поверхности засыпки:

- массив засыпки между стенкой и плоскостью скольжения делится на отдельные призмы, опирающиеся в пределах каждого слоя h_i на плоскость обрушения;

- призмы разделяются вертикальными плоскостями, проходящими из точек пересечения плоскости скольжения (обрушения) с границами слоев грунта до поверхности засыпки (на участ-

ках незагружаемой поверхности), либо до подошвы местной нагрузки;

- часть распределенной нагрузки, находящаяся на какой-либо призме, суммируется с весом этой призмы, т.е. входит в величину G_i ;

- взаимодействие призм по вертикальным плоскостям не учитывается;

- каждой глубине соответствует своя плоскость скольжения, положение которой не зависит от общей глубины стенки H_{\max} .

Принятия данных принципов позволяет рассчитывать многослойное основание со сложными видами нагружений.

2.1. Плоскость сдвига проходит через два слоя грунта

Расчетная схема поставленной задачи показана на рис. 4. В этом случае полезная нагрузка делится на две составляющие P_1 и P_2 . На основании зависимости (1) нетрудно получить такой результат:

$$P_2 = \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\arctg \sqrt{m} \left(\frac{z \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) + \arctg \sqrt{m} \right]. \quad (10)$$

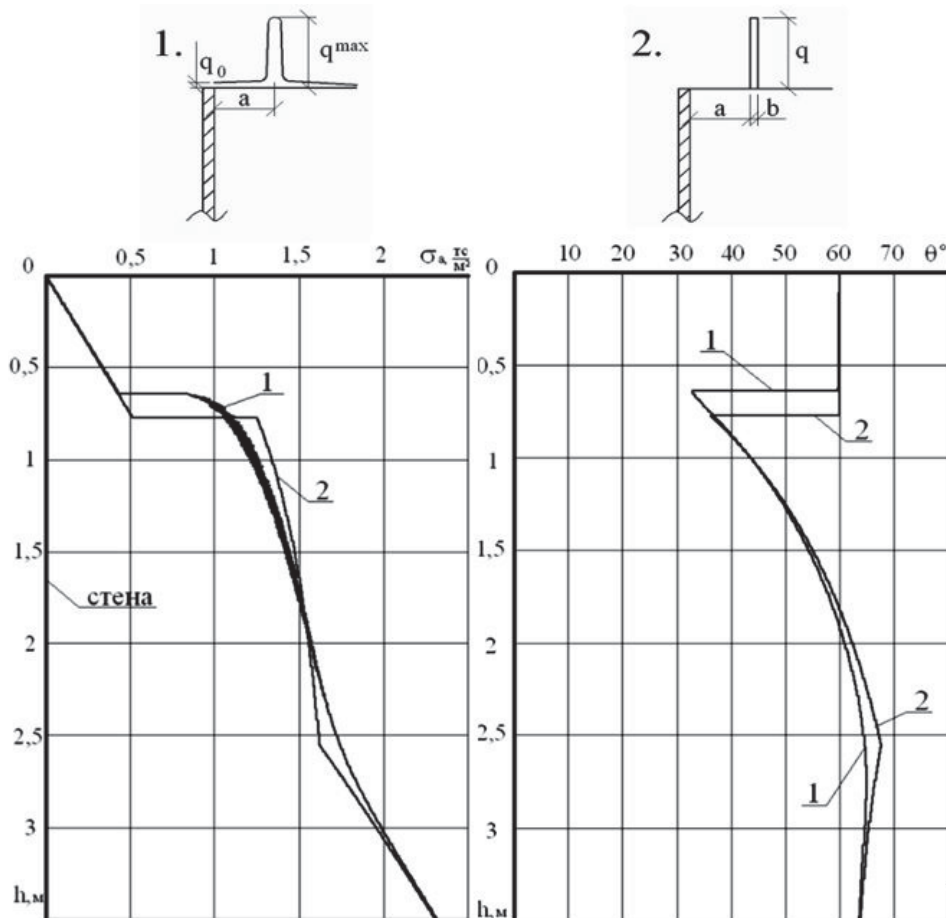


Рис. 3. Сопоставление невыгоднейших углов θ и горизонтальных напряжений σ от трансформируемой и полосовой нагрузок: 1 – трансформируемая нагрузка; 2 – полосовая нагрузка

$$(P_2 + P_1) = \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\arctg \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_1) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) + \arctg \sqrt{m} \right]. \quad (11)$$

$$P_1 = \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\arctg \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_1) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) - \arctg \sqrt{m} \left(\frac{z \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) \right]. \quad (12)$$

Все необходимые зависимости для проведения численного решения даны ниже – (13, 14, 15):

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= (\gamma_1 \frac{H_1^2}{2} \operatorname{ctg} \theta + P_1); \\ G_2 &= (\gamma_1 H_1 z \operatorname{ctg} \theta + \gamma_2 z^2 \frac{\operatorname{ctg} \theta}{2} + P_2). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$E_2 = (\gamma_1 \frac{H_1^2}{2} \operatorname{ctg} \theta + P_1) \operatorname{tg}(\theta - \varphi_1) + (\gamma_1 H_1 z \operatorname{ctg} \theta + \gamma_2 z^2 \frac{\operatorname{ctg} \theta}{2} + P_2) \operatorname{tg}(\theta - \varphi_2). \quad (14)$$

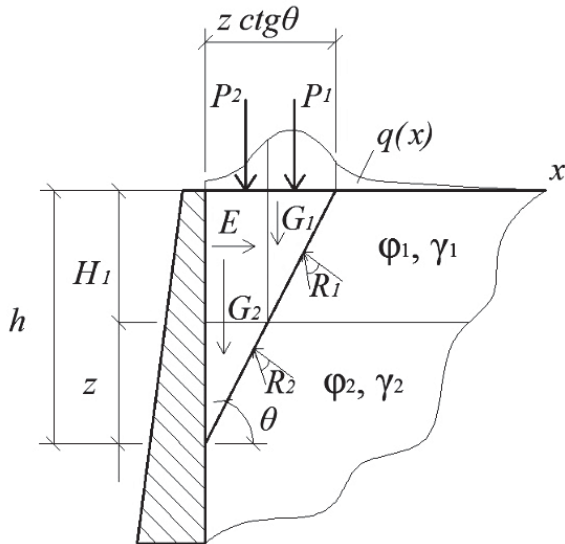


Рис. 4. Трансформируемая нагрузка при двухслойной засыпке

2.2. Многослойная засыпка

При наличии n слоев грунтовой засыпки трансформируемая внешняя нагрузка неограниченной

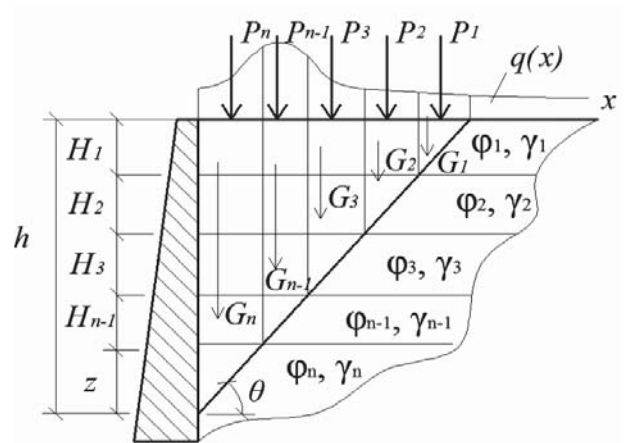


Рис. 5. Трансформируемая нагрузка при многослойной засыпке

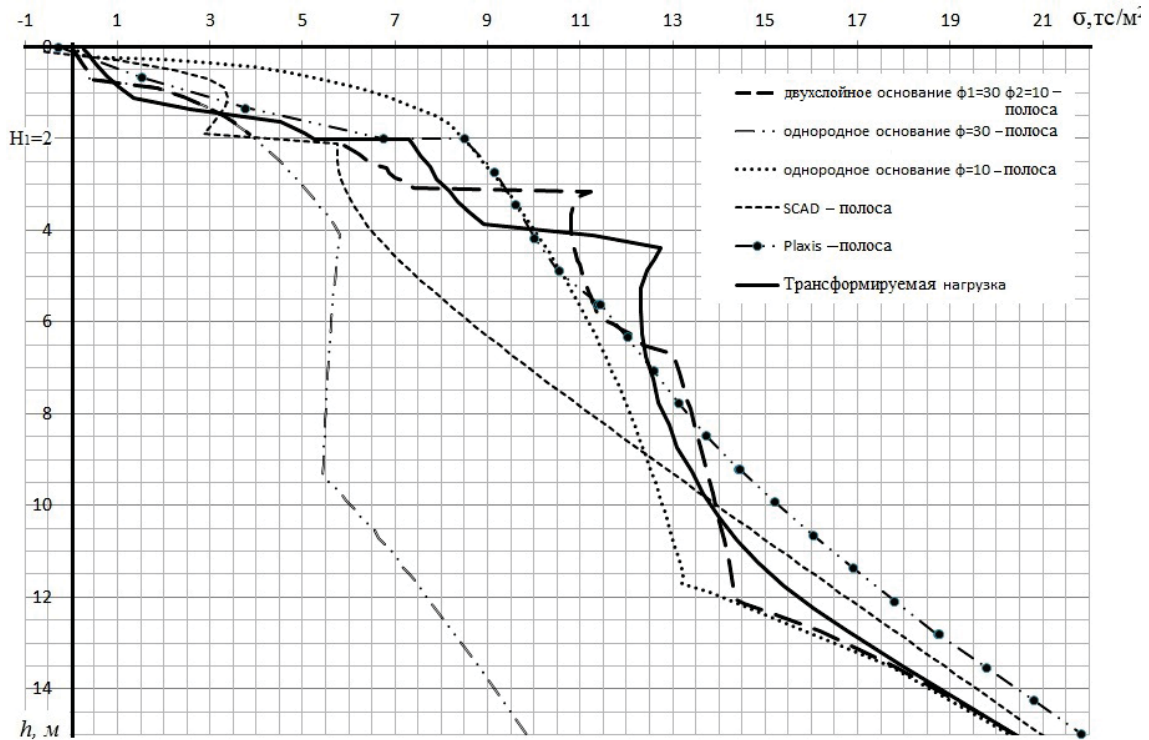


Рис. 6. Пример построения эпюр горизонтальных напряжений σ различными методами

протяженности делится на n составляющих P_1, P_2, \dots, P_n (рис. 5).

Значение этих частей общей нагрузки также можно записать, используя зависимость (1):

$$\left. \begin{aligned} P_n &= \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{z \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) + \operatorname{arctg} \sqrt{m} \right]; \\ P_{n-1} &= \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1}) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{z \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) \right]; \\ P_3 &= \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1} + \dots + H_3) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1}) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) \right]; \\ P_2 &= \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1} + \dots + H_3 + H_2) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1} + H_3) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) \right]; \\ P_1 &= \frac{q_m a}{\sqrt{m}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1} + \dots + H_3 + H_2 + H_1) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{m} \left(\frac{(z + H_{n-1} + H_3 + H_2) \operatorname{ctg} \theta}{a} - 1 \right) \right]. \end{aligned} \right\} \cdot (15)$$

При этом равнодействующая активного давления определяется по формуле

$$E = \sum_1^n G_i \operatorname{tg}(\theta - \varphi_i). \quad (16)$$

Пример

Рассмотрим двухслойное основание со следующими характеристиками: $\gamma_1 = \gamma_2 = 2 \text{ тс/м}^3$; $\varphi_1 = 30^\circ$, $\varphi_2 = 10^\circ$; $\mu_1 = 0,25$; $\mu_2 = 0,41$. Мощность верхнего слоя $H_1 = 2 \text{ м}$, глубина стенки $H_{\max} = 15 \text{ м}$.

Основание загружено полосовой нагрузкой: $q = 10 \text{ тс/м}^2$, $b = 2 \text{ м}$; $a = 1 \text{ м}$; либо эквивалентной ей трансформируемой нагрузкой с параметрами: $a = 2 \text{ м}$, $m = 28$, $q_m = 20 \text{ тс/м}^2$.

На рис. 6 приведены эпюры горизонтальных напряжений σ (тс/м^2), построенные различными методами.

Выводы:

1) разработана зависимость, позволяющая получить единое решение для горизонтального давления грунта на подпорные стены при гибкой нагрузке на поверхности, изменяющейся от равномерно распределенной до сосредоточенной;

2) Принятые гипотезы о существовании в многослойной засыпке на любой глубине подпорных стен единой плоскости скольжения позволило создать численный метод определения горизонтального давления грунта при наличии сложной трансформируемой нагрузки на поверхности.

Список литературы:

1. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен. Москва: Высшая школа, 1964. 196 с.
2. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. Москва: Стройиздат, 1977. 256 с.
3. Крей Г.М. Теория давления земли и сопротивление грунтов нагрузке. Москва: НТИ стройиндустрии и судостроения, 1932. 294 с.
4. Безухов Н.И. Теория сыпучих тел. Москва: Госстрой-издат, 1934. 107 с.
5. Урецкий Б.А. Портовые набережные, конструкции, расчет и проектирование. Москва: НТИ НКТП СССР, 1938. 282 с.
6. Прокофьев И.П. Давление сыпучих тел в приложении к расчету подпорных стенок. Москва: ОНТИ Госстройиздат, 1963. 260 с.
7. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. Ленинград: Стройиздат, 1970. 207 с.
8. Синельников В.В. Развитие метода Кулона при определении давления сыпучего тела. Труды МИИТ «Строительная механика». 1946. Вып. 69. С. 241–265.
9. Яковлев П.И., Готман А.Л., Курмаев Р.Г. Взаимодействие сооружений с грунтом и свайные основания. Одесса: Астропринт, 2004. 510 с.
10. Дуброва Г.А. Взаимодействие грунта и сооружений. Москва: Речной транспорт, 1963. 219 с.
11. Будин А.Я. Тонкие подпорные стенки. Ленинград: Стройиздат, 1974. 191 с.
12. Яропольский И.В. Основания и фундаменты. Москва: Речиздат, 1948. 384 с.
13. Лучковский И.Я. Определение нагрузок на подпорные стены: монография. Харьков: Коллегиум, 2011. 284 с.

АКТИВНИЙ ТИСК ҐРУНТУ ПРИ ГНУЧКОМУ НАВАНТАЖЕННІ, ЩО ТРАНСФОРМУЄТЬСЯ, НА ПОВЕРХНІ ОДНОРІДНОЇ ТА БАГАТОШАРОВОЇ ОСНОВИ

У сучасному будівництві існують різноманітні складні види навантажень, які не завжди представляється можливим змоделювати без значних похибок місцевим рівномірно розподіленим навантаженням або силою на поверхні засипки. Нами отримано залежність, що дозволяє знати єдине рішення для горизонтального тиску ґрунту на підпірні стіни при гнучкому навантаженні на поверхні, що змінюється від рівномірно розподіленого до зосередженого. Ухвалення гіпотези про існування в багатошаровій засипці на будь-якій глибині підпірних стін єдиної площини ковзання дозволило створити чисельний метод визначення горизонтального тиску ґрунту за наявності складного трансформованого навантаження на поверхні.

Ключові слова: підпірна стіна, навантаження, активний тиск, багатошарова основа, напруження.

ACTIVE PRESSURE OF A SOIL UNDER A FLEXIBLE TRANSFORMABLE LOAD AT THE SURFACE OF A UNIFORM AND MULTI-LAYERED BASE

In modern construction there are various complicated kinds of loading, for which it is not always possible to create a model without significant biases, by a local uniformly distributed load or by a force at the surface of a backfilling. However, we have obtained the dependency that allows us to get the common solution for the horizontal soil pressure on retaining walls, the load being flexible at the surface and changing from a uniformly distributed load to a focused one. When we assume the hypothesis that there exists the common sliding plane at any depth of a retaining wall in a multi-layered backfilling, we are able to create the numerical method to calculate the horizontal pressure of the soil, when there exists a complicated transformable load at the surface.

Key words: retaining wall, load, active pressure, multi-layered basis, strain.