

И.В. Войтенко

*Одесская Государственная академия строительства и архитектуры, Одесса***К ВОПРОСУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ С АНИЗОТРОПНОЙ ГРУНТОВОЙ СРЕДОЙ**

В условиях интенсификации подземного строительства актуальной является задача снижения себестоимости заглубленных конструкций, взаимодействующих с неоднородными грунтовыми основаниями. Автором предлагается методика определения бокового давления грунта с учетом его анизотропных свойств. В работе приведены результаты численного исследования влияния анизотропии прочности грунтового основания на величину бокового давления по контакту с подпорной стенкой. Осуществляется анализ этого влияния и рекомендации по использованию рассмотренной методики.

Ключевые слова: анизотропия прочностных характеристик, заглубленные конструкции, боковое давление грунта, неоднородное основание.

Постановка проблемы и анализ последних публикаций

В современных условиях одним из приоритетных направлений градостроительства является освоение подземного пространства [1]. Особенностью данного направления является рациональное освоение городской среды в сочетании с бережным отношением к исторической части города. Добавим также, что стоимость строительства подземных сооружений в несколько раз превышает данный показатель для надземных сооружений. В связи с этим, актуальным является поиск резервов прочности при проектировании новых и реконструкции существующих строительных объектов.

В последнее время интенсивно развивается строительство транспортных (паркинги, тоннели, подземные переходы) и инженерных объектов (тоннели и коллекторы тепло-, газо-, электросетей и водопровода). К подземным конструкциям относятся также стены подвалов, крепления стен котлованов и др. Актуальным в условиях поднятия уровня подземных вод является использование конструкций типа «стена в грунте».

Характерной особенностью упомянутых конструкций является восприятие бокового давления грунта, характер которого определяется направлением перемещения стенки.

Современные грунтовые условия, характеризующие взаимодействие фундаментных конструкций с основанием, как правило, являются сложными ввиду особенностей литогенеза либо под влиянием техногенных факторов.

Как отмечают отечественные и зарубежные источники [2-5], результаты испытаний грунтовых

образцов демонстрируют существенную анизотропию прочностных характеристик в зависимости от ориентации площадки сдвига. Причинами анизотропии грунтовых оснований считают присущую большинству отложений слоистость, а также свойственную грунтам определенную ориентацию частиц в пространстве [6, 7].

Проектные нормы не регламентируют проектирование сооружений в условиях взаимодействия с анизотропными основаниями. Ранее была предложена методика определения бокового давления грунта с учетом анизотропии прочностных характеристик, в основе своей опирающаяся на основные положения классической теории Ш. Кулона [8-10]. Предполагается, что поверхности скольжения являются плоскостями. Выводы базировались на рассмотрении равновесия предельных призм с учетом внутренних сил связности в соответствии с теоремой Како. В результате получены зависимости для определения бокового давления неоднородного анизотропного грунтового основания при произвольной ориентации плоских границ слоев.

Необходимо отметить, что в современных условиях техногенных катастроф актуальным является учет сейсмических факторов, также нашедший отражение в предложенной методике.

Целью данной статьи является оценка влияния анизотропии прочностных характеристик неоднородной грунтовой среды на величину бокового давления грунта посредством численного моделирования.

Изложение основного материала

Активное давление произвольного n-го грунтового слоя, преобладающее при взаимодействии с подземными конструкциями, определяется следующим образом:

$$E_{a,n} = \gamma_n h_n^2 N_{\gamma,n} (1 + N_{\text{кор},n}) + q_{n,c} h_n N_{q,n} + c_n(\beta_{1,n}) h_n N_{c,n} \quad (1),$$

где γ_n – удельный вес n-го слоя;

h_n – высота слоя при ее проекции на вертикаль;

$c_n = c_n(\beta_{1,n})$ – базовое сцепление на поверхности n-го слоя при ее ориентации $\beta_{1,n}$;

$$N_{\gamma,n} = \frac{1}{2} \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\varphi_n(\beta_{2,n}) - \omega_{\gamma,n} - \beta_{2,n})}{\sin^2 \beta_3 \sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n} + \delta_n(\beta_3))} \quad (2),$$

$$N_{q,n} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\beta_{1,n} - \beta_{2,n} - \rho_n - \omega_{q,n} + \varphi_n(\beta_{2,n}))}{\sin \beta_3 \sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1}) \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n} + \delta_n(\beta_3))} \quad (3),$$

$$N_{c,n} = \left\{ \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\beta_{1,n} - \beta_{2,n} + \varphi_n(\beta_{2,n}))}{\sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1}) \text{tg} \varphi_n(\beta_{1,n})} + \frac{c_n(\beta_3) \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n})}{c_n(\beta_{1,n}) \text{tg} \varphi_n(\beta_3)} + \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\varphi_n(\beta_{2,n}))}{\sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1})} (1 + N_{\text{кор},n}) \left[\frac{c_n(\beta_{2,n})}{c_n(\beta_{1,n})} \text{ctg} \varphi_n(\beta_{2,n}) - \text{ctg} \varphi_n(\beta_{1,n}) \right] \right\} \times \frac{1}{\sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \varphi_n(\beta_{2,n}) - \beta_{2,n} + \delta_n(\beta_3))} \quad (4),$$

$$N_{\text{кор},n} = \frac{\sin(\beta_3 - \beta_{2,n}) \sin(\beta_{1,n} - \beta_{1,1})}{\sin(\beta_3 - \beta_{1,1}) \sin(\beta_{2,n} - \beta_{1,1})} \quad (5),$$

$\beta_{2,n}$ – угол ориентации поверхности обрушения;

$\omega_{\gamma,n}$, $\omega_{q,n}$ – углы сейсма соответственно для объемных сил и нагрузки $q_{n,c}$ относительно направления их действия;

ρ_n – угол ориентации нагрузки q_n относительно нормали к поверхности n-го слоя;

$\delta_n(\beta_3)$ – угол шероховатости (трения грунта о материал стенки);

$q_{n,c}$ – поверхностная равномерно распределенная над n-ым слоем нагрузка, учитывающая вес верхних слоев, поверхностную нагрузку q и сейсмическое воздействие;

β_3 – ориентация стенки к оси отсчета;

$\beta_{1,1}$ ¹ – ориентация поверхности основания к горизонтальной оси отсчета;

$\beta_{1,n}$ – ориентация поверхности произвольного n-го слоя.

Анизотропия прочностных свойств произвольного грунтового слоя представлена соответствующими годографами угла внутреннего трения $\varphi_n(\beta)$ и сцепления $c_n(\beta)$, которые удовлетворяют условию:

$$\varphi_n(\beta) = \varphi_n(\beta + \pi); \quad c_n(\beta) = c_n(\beta + \pi) \quad (6).$$

Угол $\beta_{2,n}$, соответствующий экстремальному давлению, неизвестен и определяется методом итераций, что предопределяет целесообразность использования компьютера.

Полученные решения могут быть использованы для решения практических задач взаимодействия сооружений с грунтовыми основаниями в сложных инженерно-геологических условиях.

С этой целью был разработан программный комплекс, позволяющий внедрить рассматриваемую методику в практику проектирования сооружений, воспринимающих боковое давление слоистой грунтовой среды с учетом прочностной анизотропии.

На рис. 1 представлена блок-схема компьютерной программы.

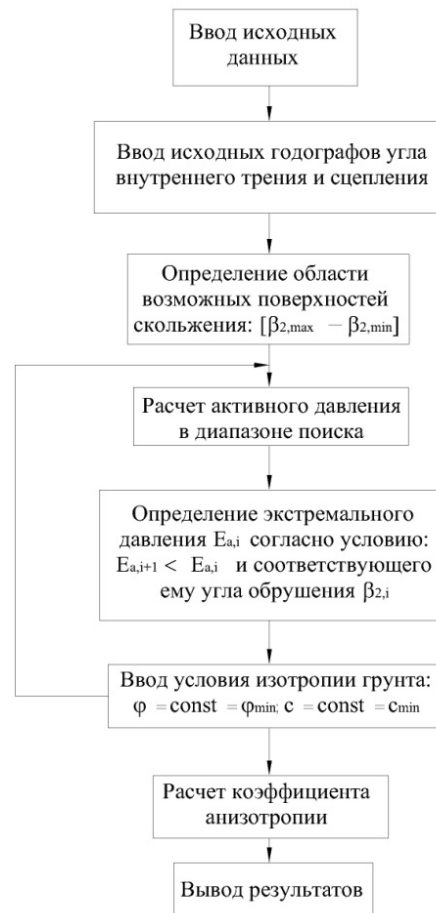


Рис. 1. Укрупненная блок-схема программы расчета активного давления анизотропного по сопротивлению сдвигу неоднородного грунта на подпорную стенку.

¹ В данном и всех последующих параметрах первый индекс обозначает номер параметра, второй - номер слоя.

Соответствующий алгоритм представлен в [11].

Разработанная компьютерная программа позволяет не только определять боковое давление грунта на подпорные стенки, но и оценивать влияние анизотропии на величину полученных параметров.

Для оценки влияния анизотропии определяется коэффициент анизотропии n -го слоя:

$$k_{a,n} = E_{a,n}(\text{аниз.})/E_{a,n}(\text{изотр.}) \quad (7),$$

где $E_{a,2}(\text{аниз.})$ – активное давление грунта нижнего слоя, определяемое с учетом прочностной анизотропии;

$E_{a,2}(\text{из.})$ – активное давление грунта нижнего слоя, определяемое в условиях изотропной грунтовой среды при $\varphi_2 = \varphi_{2,\min} = \text{const}$, $c_2 = c_{2,\min} = \text{const}$.

Покажем влияние анизотропии прочности на величину активного давления грунта. Рассмотрим вертикальную, идеально гладкую стенку, контактирующую с двухслойной грунтовой средой, анизотропия прочности которой представлена кусочно-линейными годографами угла внутреннего трения и сцепления (рис. 2).

Ориентация поверхностей слоев горизонтальна, нагрузка на поверхности грунтового массива отсутствует. Сейсмическое воздействие не учитывается. Мощности слоев соответственно $h_1 = 8$ м., $h_2 = 7$ м. Удельный вес грунтов $\gamma_1 = \gamma_2 = 1,7$ кН/м³.

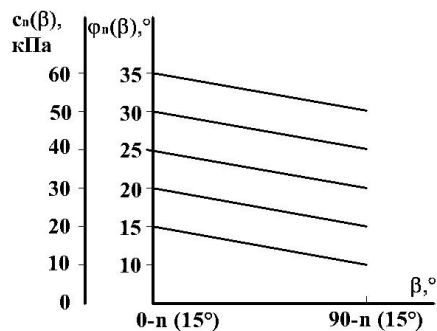


Рис. 2. Кусочно-линейные годографы угла внутреннего трения и сцепления.

В ходе компьютерных расчетов определялось давление нижнего слоя $E_{a,2}(\text{аниз.})$, соответствующее плоскости скольжения, ориентированной под углом $\beta_{2,2}$ при различных показателях анизотропии прочности $\varphi_2(\beta)$ и $c_2(\beta)$. Анизотропия верхнего слоя $\varphi_1(\beta)$ и $c_1(\beta)$ при этом принималась постоянной.

Для оценки влияния анизотропии определялось активное давление изотропного грунта $E_{a,2}(\text{изотр.})$ при минимальной прочности соответствующего годографа с последующим определением коэффициента анизотропии нижнего слоя:

$$k_{a,2} = E_{a,2}(\text{аниз.})/E_{a,2}(\text{изотр.}).$$

Заметим, что были произведены расчеты давлений для связной и сыпучей грунтовой среды.

Результаты численных исследований представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Определение активного давления нижнего слоя при характеристиках прочностной анизотропии верхнего слоя $\varphi_1(\beta)=15^0-10^0$ и $c_2(\beta)=60-50$ кПа

Кусочно-линейные годографы	$\beta_{2,2}$ (аниз.), град	$E_{a,2}$ (аниз.), кН.	$\beta_{2,2}$ (изотр.), град	$E_{a,2}$ (изотр.), кН.	$k_{a,2}$
$\varphi_2(\beta)=15^0-10^0$ $c_2(\beta)=60-50$ кПа	233	-136,85	230	376,17	-0,36
$\varphi_2(\beta)=20^0-15^0$ $c_2(\beta)=50-40$ кПа	236	211,26	232	375,94	0,56
$\varphi_2(\beta)=25^0-20^0$ $c_2(\beta)=40-30$ кПа	238	331,04	235	376,88	0,88
$\varphi_2(\beta)=30^0-25^0$ $c_2(\beta)=30-20$ кПа	240	381,44	235	376,88	1,01
$\varphi_2(\beta)=35^0-30^0$ $c_2(\beta)=20-10$ кПа	243	403,86	240	375,34	1,08

Таблица 2.

Определение активного давления нижнего слоя при характеристиках прочностной анизотропии верхнего слоя $\varphi_1(\beta)=15^0-10^0$ и $c_2(\beta)=0$ кПа

Кусочно-линейные годографы	$\beta_{2,2}$ (аниз.), град	$E_{a,2}$ (аниз.), кН.	$\beta_{2,2}$ (изотр.), град	$E_{a,2}$ (изотр.), кН.	$k_{a,2}$
$\varphi_2(\beta)=15^0-10^0$ $c_2(\beta)=60-50$ кПа	235	895,31	230	963,55	0,93
$\varphi_2(\beta)=20^0-15^0$ $c_2(\beta)=50-40$ кПа	236	750,45	232	805,69	0,93
$\varphi_2(\beta)=25^0-20^0$ $c_2(\beta)=40-30$ кПа	238	626,37	235	670,96	0,93
$\varphi_2(\beta)=30^0-25^0$ $c_2(\beta)=30-20$ кПа	240	519,66	237	555,33	0,94
$\varphi_2(\beta)=35^0-30^0$ $c_2(\beta)=20-10$ кПа	242	427,67	240	456,17	0,94

Заметим, что изменение параметров анизотропии верхнего слоя не влияет на результаты расчетов для нижнего слоя.

Анализ проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Учет прочностной анизотропии существенно влияет на показатели бокового давления грунта, при этом изотропное давление для связной грунтовой среды может как превышать соответствующий анизотропный показатель, так и принимать меньшие значения.

Следовательно, проектирование распорных сооружений без учета анизотропии прочностных характеристик в одних случаях ведет к перерасходу материала, в других же может служить причиной нарушения устойчивости сооружений.

2. Сцепление грунта оказывает значительное влияние на величину бокового давления, в некоторых случаях преобладая над весовыми параметрами предельной грунтовой призмы.
3. Коэффициент влияния анизотропии в рыхлой среде всегда меньше 1, т.е. активное давление в анизотропной среде всегда меньше соответствующего показателя для случая изотропии с минимальным показателем прочности.
4. При больших показателях прочности для связных грунтов влияние анизотропии уменьшается, в то время как для рыхлой среды варьирование характеристик прочности практически не меняет коэффициент влияния анизотропии.
5. Предложенную методику рекомендуется использовать для проектирования ответственных

сооружений, контактирующих с грунтовым основанием в пределах значительной мощности.

Выводы

Результаты численного моделирования взаимодействия подпорной стенки с неоднородным анизотропным грунтовым основанием демонстрируют влияние анизотропии прочности на величину бокового давления грунта. В ряде случаев давление грунтовой среды, определяемое с учетом анизотропных свойств значительно меньше соответствующих показателей в условиях изотропии прочности. Таким образом, учет анизотропных свойств для ответственных сооружений позволит снизить материалоемкость конструкций, что особенно актуально в условиях интенсификации подземного строительства.

Литература

1. Шашенко А.Н. Комплексное решение вопросов развития города Днепропетровска с учетом освоения подземного пространства / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, М.А. Выгодин // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного Університету залізничного транспорту ім. Академіка В. Лазаряна. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 126-131.
2. Винников Ю.Л. Исследования анизотропии лессовых грунтов вокруг фундаментов в пробитых скважинах / Ю.Л. Винников // Изв. вузов. Строительство. – 1999. - № 4. – С. 123 – 128.
3. Коробова О.А. Результаты экспериментальных исследований анизотропных лессовидных грунтов / О.А. Коробова // Изв. вузов. Строительство. – 2003. - № 2. – С. 128 – 130.
4. Builes M.A. Inherent anisotropy in allophane clay in Columbia / Builes M.A., Gomes D.V., Millan A.A. // Proc. of the 17th International Conf. on Soil Mechanics and

Geotechnical Engineering. – Alexandria, 2009. – P. 193 – 196.

5. *The influence of stiffness anisotropy on the behaviour of a stiff natural clay / [Grammatikopoulou A., Schroeder F. C., Kovacevic N., Germano V., Gasparre A. // Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering “Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks”. – Athens, 2011. – P. 545 – 550.*

6. *Орнатский Н.В. Механика грунтов / Н.В. Орнатский. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 447 с.*

7. *Гениев Г.А. Плоская деформация анизотропной сыпучей среды / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. - № 5. - С. 33-35.*

8. *Школа А.В. Боковое давление анизотропного грунта на сооружения, возведенные методом «стена в грунте» с учетом сейсмических воздействий / А.В. Школа, Е.В. Гришко // Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: докл. науч.-техн. конф. – Полтава, 1991. - С. 264-273.*

9. *Школа А.В. Учет анизотропии многослойного грунта при определении активного давления на подпорные стены с учетом сейсмических воздействий / А.В. Школа, И.В. Войтенко // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. - Выпуск №4. - Одесса, 2001. - С. 394-407.*

10. *Школа, А.В. Боковое давление анизотропных грунтов на сооружения / А.В. Школа. – Одесса, МАГ ВТ, 2012. – 219с.*

11. *Войтенко И.В. Алгоритм расчета бокового давления грунта анизотропных многослойных оснований / И.В. Войтенко // Вісник Одеського Національного Морського Університету. - Вип. №10. - Одеса, 2003. С. 137-141.*

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Школа, генеральный директор Международной ассоциации гидротехников водного транспорта, Одесса.

Автор: ВОЙТЕНКО Инга Владимировна
кандидат технических наук, доцент кафедры оснований и фундаментов,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
65029, Украина, Одесса, ул. Дидрихсона, 4
Конт. тел. – 0679460671, E-mail – voytinna@ukr.net.
Количество публикаций в украинских изданиях – 11
Количество публикаций в иностранных индексированных изданиях - 1

ДО ПИТАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЗАГЛИБЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ З АНІЗОТРОПНИМ ГРУНТОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

I.V. Voitenko

В умовах інтенсифікації підземного будівництва актуальним є завдання зниження собівартості заглиблених конструкцій, що взаємодіють з неоднорідними ґрунтовими основами. Автором пропонується методика визначення бічного тиску ґрунту з урахуванням його анізотропних властивостей. У роботі приведені результати чисельного дослідження впливу анізотропії міцності ґрунтової основи на величину бічного тиску по контакту з підпірною стінкою. Здійснюється аналіз цього впливу і рекомендації по використанню розглянутої методики.

Ключові слова: анізотропне ґрунтове середовище, годографи кута внутрішнього тертя і зчеплення, заглиблені конструкції, бічний тиск ґрунту.

TO QUESTION OF INTERACTION OF RECESSED CONSTRUCTIONS WITH ANISOTROPIC SOIL'S ENVIRONMENT

I.V. Voitenko

In the conditions of intensification of underground building a task of reduce of prime price of recessed constructions, interactive with heterogeneous soil's basement is very actual. Author offer the method of determination of lateral pressure of soil taking into account its anisotropic properties. The results of numeral researches of influence of strength anisotropy of soil's foundation on the size of lateral pressure on a contact with a retaining wall are leaded. Analysis of this influence and recommendation by the use of the considered method is carried.

Keywords: anisotropic ground environment, hodographs of friction angle and cohesion, recessed construction, lateral pressure of soil.