

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПИИ АКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ГРУНТА

Войтенко И.В.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры
г. Одесса, Украина

АНОТАЦІЯ: Здійснено чисельне дослідження бокового тиску неоднорідного ґрунту в умовах анізотропії характеристик міцності. Отримано результати, що дозволяють оцінити вплив міцнісної анізотропії на параметри активного тиску. Виконано аналіз чисельного експерименту з рекомендаціями щодо практичної реалізації методу.

АННОТАЦИЯ: Проведено численное исследование бокового давления неоднородного грунта в условиях анизотропии характеристик прочности. Получены результаты, позволяющие оценить влияние прочностной анизотропии на параметры активного давления. Выполнен анализ численного эксперимента с рекомендациями практической реализации метода.

ABSTRACT: Numerical research of lateral pressure of heterogeneous soil in the condition of anisotropy of strength characteristics, based on the methodology proposed by the author, was made. The results, that allow to estimate the effect of anisotropy on strength parameters of active pressure, are obtained. The complex analysis of the numerical experiment was carried out and recommendations by the use of the developed method of calculation, was given.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прочностная анизотропия, годографы угла внутреннего трения и сцепления, коэффициенты анизотропии.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство городских объектов различного назначения связано с освоением подземных территорий, что обуславливает ис-

пользование конструктивных решений в виде подпорных стен различной конфигурации. Проектирование таких конструкций предусматривает определение бокового давления грунта, взаимодействующего с боковыми гранями стенки. Развитие подземных инфраструктур предполагает строительство конструкций, контактирующих с грунтовыми основаниями значительной мощности неоднородного состава, обуславливающих анизотропию механических свойств. Действующие нормативные документы не регламентируют проектирование подпорных конструкций с учетом анизотропных свойств контактирующей грунтовой среды. В связи с этим, актуальной является задача по разработке и внедрению в практику проектирования методики расчета бокового давления неоднородного анизотропного грунта на распорные сооружения.

Как свидетельствуют многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, неоднородным основаниям свойственна анизотропия прочностных и деформативных свойств [1 - 3]. В качестве показателя анизотропии различные исследователи, как правило, принимают соотношение параметров, определяемых поперек и вдоль слоистости (плоскости изотропии) [4, 5]. Теоретические исследования несущей способности оснований с использованием анизотропной модели показали, что учет анизотропных свойств грунта позволит увеличить нагрузки на фундамент на 30 %, не прибегая к мероприятиям по усилению, что особенно важно при реконструкции существующих зданий и сооружений [6]. Ранее была разработана методика по определению бокового давления и несущей способности анизотропного грунта в теории предельного напряженного состояния [7], однако громоздкость выводов осложняла ее практическое применение. В связи с этим, в [8, 9] была предложена методика определения бокового давления неоднородного грунта при произвольном залегании слоев с учетом прочностной анизотропии на основании приближенного метода Ш. Кулона, т.е. в предположении плоских поверхностей скольжения.

С точки зрения практической реализации предложенной методики полезно оценить влияние анизотропии прочности на величину бокового давления грунта. Для оценки влияния анизотропии используют параметр, равный соотношению исследуемого показателя с учетом анизотропии к соответствующему изотропному показателю [10]. В современных публикациях отсутствует информация, позволяющая комплексно оценить учет влияния прочностной анизотропии при определении бокового давления неоднородного грунта. Этому вопросу посвящена настоящая работа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с разработанной методикой боковое давление n -го грунтового слоя представляет собой сумму компонент, отражающих соответственно влияние собственного веса грунта в объеме предельной призмы, поверхностной нагрузки с учетом веса верхних слоев и сил связности, определяемых согласно теоремы Како:

$$E_n = \gamma_n h_n^2 N_{\gamma,n} (1 + N_{cor,n}) + q_{n,c} h_n N_{q,n} + c_n (\beta_{1,n}) h_n N_{c,n}, \quad (1)$$

где γ_n – удельный вес n -го грунтового 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 $\beta_{1,n}$;

$q_{n,c}$ – равномерно распределенная нагрузка на поверхности n -го слоя, учитывающая вес верхних слоев, поверхностную нагрузку q и сейсмическое воздействие в рамках статической теории;

$N_{cor,n}$ – корректирующий коэффициент;

$N_{\gamma,n}$, $N_{q,n}$, $N_{c,n}$ – коэффициенты, отражающие соответственно весовой фактор, поверхностную нагрузку и связность грунта в пределах грунтовой призмы.

Полученные решения позволили провести численное исследование влияния анизотропии прочности на величину бокового давления грунта.

В процессе эксперимента рассматривалась вертикальная идеально гладкая стенка, взаимодействующая с неоднородным основанием из двух грунтовых слоев. Анизотропия прочностных показателей грунтовых слоев задана кусочно-линейными годографами угла внутреннего трения и сцепления $\varphi_i(\beta)$ и $c_i(\beta)$, которые приняты идентичными для грунтовых слоев.

В базовых расчетах ориентация слоев параллельна и горизонтальна, сейсмическое воздействие и поверхностная нагрузка отсутствуют.

Численное моделирование осуществлялось для определения активного давления грунта, так как именно в этом случае бокового давления методика Кулона позволяет получить более достоверные результаты.

Влияние анизотропии прочности на величину активного давления грунта исследовалось при вращении годографов нижнего слоя с ориентацией плоскости слоистости относительно горизонтали от 0^0 до 180^0 с шагом 15^0 . Для оценки влияния анизотропии определялся коэффициент анизотропии нижнего слоя:

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

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

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

Ниже приведены результаты численного эксперимента для связных грунтов (рис. 1).

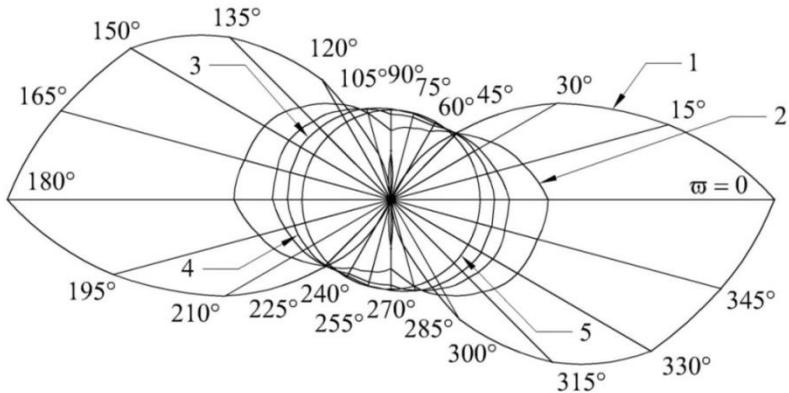


Рис. 1. Графики зависимостей коэффициента анизотропии $k_{a,2}$ от ориентации плоскости слоистости годографов нижнего слоя ϖ для заданных годографов угла внутреннего трения и сцепления нижнего слоя:

- 1 - $\varphi = 15^\circ - 20^\circ$, $c = 20 - 40$ кПа; 2 - $\varphi = 20^\circ - 25^\circ$, $c = 40 - 60$ кПа;
- 3 - $\varphi = 25^\circ - 30^\circ$, $c = 60 - 80$ кПа; 4 - $\varphi = 30^\circ - 35^\circ$, $c = 80 - 100$ кПа;
- 5 - $\varphi = \text{const}$, $c = \text{const}$.

Как отмечалось выше, боковое давление представляет собой многокомпонентный фактор, поэтому представляет определенный интерес проанализировать влияние параметров $N_{\gamma,2}$ и $N_{c,2}$ по результатам численного исследования.

Для этого введем коэффициенты влияния анизотропии на соответствующие параметры, как их соотношение в условиях анизотропии прочности к соответствующему изотропному показателю:

$$k_{a,2}(N_{\gamma,2}) = \frac{N_{\gamma,2}(\text{аниз.})}{N_{\gamma,2}(\text{изотр.})}, \quad (3)$$

$$k_{a,2}(N_{c,2}) = \frac{N_{c,2}(\text{аниз.})}{N_{c,2}(\text{изотр.})} \quad (4)$$

Результаты численных исследований приведены в виде графиков на рис. 2 и 3.

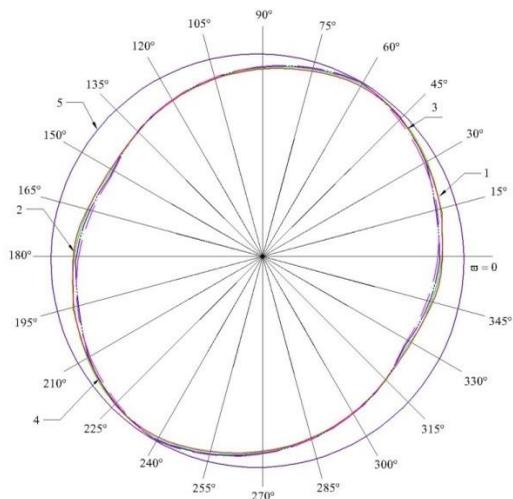


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента анизотропии $k_{a,2}(N_{\gamma,2})$ от ориентации плоскости слоистости годографов нижнего слоя ϖ для заданных годографов угла внутреннего трения и сцепления нижнего слоя:

- 1 - $\varphi = 15^0 - 20^0$, $c = 20 - 40$ кПа; 2 - $\varphi = 20^0 - 25^0$, $c = 40 - 60$ кПа;
- 3 - $\varphi = 25^0 - 30^0$, $c = 60 - 80$ кПа; 4 - $\varphi = 30^0 - 35^0$, $c = 80 - 100$ кПа;
- 5 - $\varphi = \text{const}$, $c = \text{const}$.

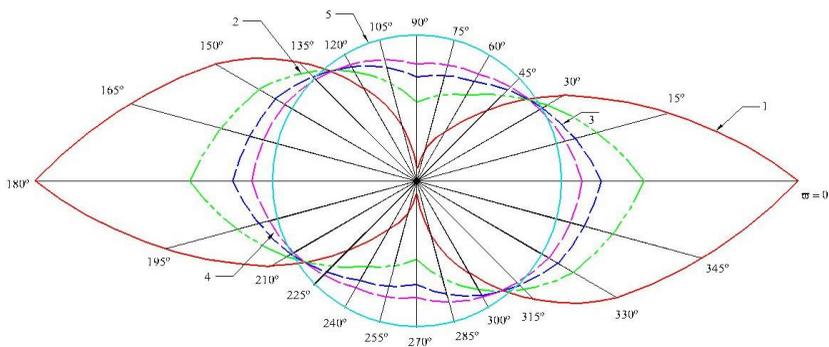


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициента анизотропии $k_{a,2}(N_{c,2})$ от ориентации плоскости слоистости годографов нижнего слоя ϖ для заданных годографов угла внутреннего трения и сцепления нижнего слоя:

- 1 - $\varphi = 15^0 - 20^0$, $c = 20 - 40$ кПа; 2 - $\varphi = 20^0 - 25^0$, $c = 40 - 60$ кПа;
- 3 - $\varphi = 25^0 - 30^0$, $c = 60 - 80$ кПа; 4 - $\varphi = 30^0 - 35^0$, $c = 80 - 100$ кПа;
- 5 - $\varphi = \text{const}$, $c = \text{const}$.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Анализ полученных результатов позволяет сформулировать следующие выводы:

- активное давление неоднородного основания существенным образом зависит от ориентации плоскости слоистости годографа, а, следовательно, и от показателей прочности по направлениям, в некоторых случаях в несколько раз отличаясь от изотропной среды;

- при определенных ориентациях годографов прочностной анизотропии боковое давление может превышать соответствующий показатель для изотропного грунта;

- возрастание прочностных показателей нивелирует влияние прочностной анизотропии на величину бокового давления грунта;

- проектирование ответственных подпорных конструкций без учета анизотропных свойств грунтовых оснований может привести к недооценке силового влияния. С другой стороны, учет прочностной анизотропии в ряде случаев позволит отыскать резервы несущей способности и существенно снизить экономические затраты;

- при ориентации плоскости слоистости, близкой к направлению поверхности обрушения грунтовой призмы (ϖ в пределах от 50^0 до 80^0) анизотропное давление всегда меньше изотропного. Таким образом, искусственное формирование годографов прочностной анизотропии с образованием грунтовых оснований послойной засыпкой или намывом позволит существенно снизить боковое давление на распорные сооружения.

Очевидно, что влияние анизотропии на параметр связности значительно превышает влияние на собственный вес грунта, что отражено в достаточно ровном изменении коэффициентов $N_{\gamma,2}$ в зависимости от плоскости слоистости ϖ . Заметим, что максимальные коэффициенты $K_{a,2}(N_{\gamma,2})$ соответствуют ориентации ϖ , близкой к ориентации поверхности скольжения, что отражает физический смысл.

Приведенные результаты свидетельствуют о существенном влиянии прочностной анизотропии грунтовых оснований на боковое давление грунта. В связи с этим, необходимо учитывать присущую грунтовым основаниям анизотропию при проектировании ответственных сооружений, что рекомендуется отразить в соответствующих нормативных документах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ratananikom, W., Likitlersuang S., Yimsiri S. (2013). An investigation of anisotropic elastic parameters of Bangkok Clay from vertical and horizontal cut specimens. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal. Vol. 8, 15-27.

2. Grammatikopoulou A., Schroeder F. C., Kovacevic N., Germano V., Gasparre A. (2011). The influence of stiffness anisotropy on the behaviour of a stiff natural clay. Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering “Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks”. Athens, P. 545 – 550.
3. Gao, Z., Zhao J. (2012). Efficient Approach to Characterize Strength Anisotropy in Soil. Journal of Engineering Mechanics. Vol. 138, Issue 12. 1447–1456.
4. Бугров А.К. Анизотропные грунты и основания сооружений / А.К. Бугров, А.И. Голубев. – Санкт – Петербург: Недра, 1993. – 245 с.
5. Зоценко М.Л. Аналіз пресіометричних досліджень стисливості основ, закріплених ґрунтоцементом за бурозмішувальною технологією / М.Л. Зоценко, В.Г. Іванченко. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2015. - №5/5 (77). - С. 24-28.
6. Баданин А.Н. Анизотропные фундаменты мелкого заложения / А.Н. Баданин, Ю.К. Демченко // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2014. - №3 (18). - С 117-134.
7. Школа А.В. Несущая способность оснований и боковое давление грунтов, анизотропных по сопротивлению сдвигу: учебное пособие / А.В. Школа. – М.: Мортехинформреклама, 1991. – 52 с.
8. 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. - Одеса, 2001. - С. 394-407.
9. Школа А.В. Боковое давление анизотропных грунтов на сооружения / А.В. Школа. – Одесса, МАГ ВТ, 2012. – 219 с.
10. Бирюкова О.А. Метод решения проблемы учета деформационной анизотропии грунтов в расчетах грунтовых оснований / О.А. Бирюкова, О.А. Коробова, И. Любич // Сборник научных работ XXXII Международной научно-практической конференции «Модели и методы разрешения формально научных и прикладных проблем в физико-математических, технических и химических исследованиях». – Лондон, GISAP, – 2012. – С. 54-57.

REFERENCES

1. Ratananikom, W., Likitlersuang S., Yimsiri S. (2013). An investigation of anisotropic elastic parameters of Bangkok Clay from vertical and horizontal cut specimens. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal. Vol. 8, 15-27.
2. Grammatikopoulou A., Schroeder F. C., Kovacevic N., Germano V., Gasparre A. (2011). The influence of stiffness anisotropy on the behaviour of a stiff natural clay. Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering “Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks”. Athens, 545 – 550.

3. Gao, Z., Zhao J. (2012). Efficient Approach to Characterize Strength Anisotropy in Soil. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 138, Issue 12. 1447–1456.
4. Bugrov A.K., Golubev A.I. Anizotropnye grunty i osnovaniia sooruzhenii [Anisotropic soils and foundations of buildings], Sankt - Petersburg: Entralls, 1993, 245 p.
5. Zotsenko M.L., Ivanchenko V.G. Analiz pressiometricznykh doslidzhen styslyvosti osnov, zakriplenych gruntozementom za burozmishuvalnoiu tekhnolohieiu [Analysis of pressiometric research of base compressibility strengthened with the soil-cement using the drilling-mixing technology]. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*. 2015, 5/5 (77). – pp. 24-28.
6. Badanin A.N., Demchenko Y.K. Anizotropnye fundamenty melkoho zalozheniia [Anisotropic shallow foundation]. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, 3 (18). –pp. 117-134.
7. Shkola A.V. Nesushchaia sposobnost osnovanii i bokovoie davlenie gruntov, anizotropnykh po soprotivleniiu sdvihu [Bearing strength of foundations and lateral pressure of anisotropic's by resistance of slide soils]. *Tutorial. Mortechin-formreklama*. 1991. 52 p.
8. Shkola A.V., Voitenko I.V. Uchet anizotropii mnogosloynnogo grunta pri opredelenii aktivnogo davleniia na podpornyie steny s ychetom seismicheskikh vozdeystviy [Accounting of anisotropy of multi-layered soil at determination of active pressure on retaining walls with seismic influences' accounting]. *Messenger of Odessa Academy of Building and Architecture*. 2001. №4. pp. 394-407.
9. Shkola A.V. Bokovoie dsvlenie anizotropnykh gruntov na sooruzheniia [Lateral pressure of anisotropic soils on buildings]. 2012. Odessa, IAHW. 219 p.
10. Biriukova O.A., Korobova O.A., Liubich I. Metod resheniia problemy ucheta deformatsionnoy anizotropii gruntov v raschetach gruntovykh osnovanii [Method to solve the problem of accounting deformation anisotropy grounds in calculations subgrade]. *Collection of scientific works XXXII International scientific-practical conference “Models and methods of solving formal and applied scientific issues in physico-mathematical, technical and chemical research”*. 2012. London, GISAP. pp. 54-57.

Статья поступила в редакцию 21.07.2016 г.