

Voitenko I.V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Odessa State Academy
of Building and Architecture

Войтенко Инга Владимировна

кандидат технических наук, доцент,
Одесская государственная академия
строительства и архитектуры

NUMERAL RESEARCH'S ANALYSIS
WITH ANISOTROPY INDEXES OF ACTIVE
PRESSURES OF HETEROGENEOUS SOIL

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПИИ АКТИВНОГО
ДАВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ГРУНТА

Summary: 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.

Key words: strength anisotropy, hodographs of friction angle and cohesion, lateral pressure, retaining wall, heterogeneous soil.

Аннотация: На основании предложенной автором методики проведено численное исследование бокового давления неоднородного грунта в условиях анизотропии характеристик прочности. Получены результаты, позволяющие оценить влияние прочностной анизотропии на параметры

активного давления. Проведен комплексный анализ численного эксперимента и даны рекомендации по использованию разработанного метода расчета.

Ключевые слова: прочностная анизотропия, годографы угла внутреннего трения и сцепления, боковое давление, подпорные стенки, неоднородный грунт.

Постановка проблемы.

Современное строительство городских объектов различного назначения достаточно часто связано с освоением подземных территорий, что обуславливает использование конструктивных решений в виде подпорных стен различной конфигурации. Проектирование таких конструкций связано с определением бокового давления грунта, взаимодействующего с боковыми гранями стенки. Развитие подземных инфраструктур предполагает строительство конструкций, контактирующих с грунтовыми основаниями значительной мощности неоднородного состава. Строительство гидротехнических сооружений в виде подпорных стен также характеризуется сложными геотехническими условиями. Актуальным в современных условиях является снижение себестоимости строительства. Опыт проектирования, строительства и реконструкции морских гидротехнических сооружений свидетельствует о том, что учет анизотропных свойств грунтовых оснований позволяет найти ресурсы при определении основных нагрузок снизить затраты на 15 и более процентов. Действующие нормативные документы не регламентируют проектирование подпорных конструкций с учетом анизотропных свойств контактирующей грунтовой среды. В связи с этим актуальной является задача по разработке методики расчета бокового давления неоднородного грунта на распорные сооружения.

Анализ последних исследований и публикаций.

Как свидетельствуют многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, неоднородным основаниям свойственна анизо-

тропия прочностных и деформативных свойств [1,2, 3]. В качестве показателей анизотропии различные исследователи, как правило, принимают соотношение параметров, определяемых поперек и вдоль слоистости (плоскости изотропии) [4, с.77, 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] 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. Отметим, что полученные выводы позволяли учитывать также сейсмическое воздействие.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы и цель авторского исследования.

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 [9]. В современных публикациях отсутствует информация, позволяющая комплексно оценить учет влияния прочностной анизотропии при определении бокового давления неоднородного грунта. Этому вопросу посвящена настоящая работа.

Изложение основного материала.

В соответствии с разработанной методикой боковое давление n -го грунтового слоя представляет собой сумму компонент, отражающих со-

ответственно влияние собственного веса грунта в объеме предельной призмы, поверхностной нагрузки с учетом веса верхних слоев и сил связности, определяемых согласно теоремы Како:

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

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;

$N_{\text{cor},n}$ – 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 годографами угла внутреннего трения и сцепления $\varphi_i(\beta)$ и $c_i(\beta)$ (рис 1.).

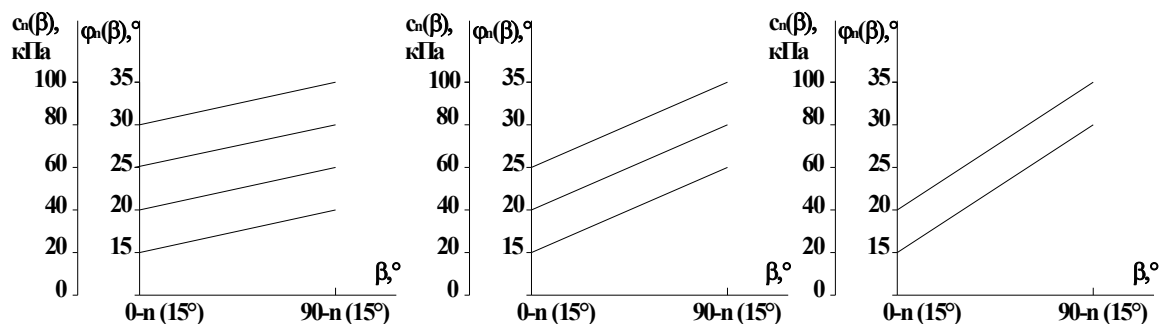


Рис. 1 Кусочно-линейные годографы угла внутреннего трения и сцепления грунта, принятые в численном исследовании; n – целочисленная переменная.

Годографы прочностных характеристик слоев приняты идентичными. В базовых расчетах ориентация слоев параллельна и горизонтальна, сейсмическое воздействие и поверхностная нагрузка отсутствуют. Расчеты проводились для связных грунтов, а также рассматривались случаи отсутствия внутренних сил связности.

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 .

В результате расчета определялись характеристики активного давления:

- коэффициенты $N_{\gamma,2}$ и $N_{c,2}$, характеризующие соответственно влияние собственного веса и связности грунтовой среды;
- составляющая активного давления нижнего слоя $E_{a,2}$;
- угол ориентации поверхности скольжения $\beta_{2,2}$, соответствующей экстремальному давлению.

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;

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

Ниже приведены результаты численного эксперимента для связных грунтов (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Таблица коэффициентов анизотропии $k_{a,2}$ в зависимости от ориентации плоскости слоистости ϖ относительно горизонтали при заданных годографах угла внутреннего трения $\varphi_2(\beta)$ и сцепления $c_2(\beta)$ нижнего слоя

| ϖ | Коэффициент анизотропии $k_{a,2}$ при годографах угла внутреннего трения $\varphi_2(\beta)$ и сцепления $c_2(\beta)$ | | | |
|----------|--|--|--|---|
| | $\varphi = 15^\circ - 20^\circ$, $c = 20 - 40$ кПа | $\varphi = 20^\circ - 25^\circ$, $c = 40 - 60$ кПа | $\varphi = 25^\circ - 30^\circ$, $c = 60 - 80$ кПа | $\varphi = 30^\circ - 35^\circ$, $c = 80 - 100$ кПа |
| 0 | 4,296106 | 1,761047 | 1,330706 | 1,163821 |
| 15 | 3,215837 | 1,525635 | 1,234512 | 1,120214 |
| 30 | 2,145229 | 1,289561 | 1,137137 | 1,075258 |
| 45 | 1,072729 | 1,051059 | 1,037884 | 1,029135 |
| 60 | 0,338126 | 0,875998 | 0,954241 | 0,983328 |
| 75 | 0,087917 | 0,825210 | 0,953136 | 0,994073 |
| 90 | 0,547903 | 0,768253 | 0,949031 | 1,005075 |
| 105 | 0,516574 | 1,000309 | 1,044276 | 1,048864 |
| 120 | 1,547765 | 1,226341 | 1,136907 | 1,091001 |
| 135 | 2,558024 | 1,447913 | 1,227309 | 1,131742 |
| 150 | 3,372323 | 1,639775 | 1,315395 | 1,171045 |
| 165 | 3,828687 | 1,700699 | 1,323715 | 1,171714 |
| 180 | 4,296106 | 1,761047 | 1,330706 | 1,163821 |

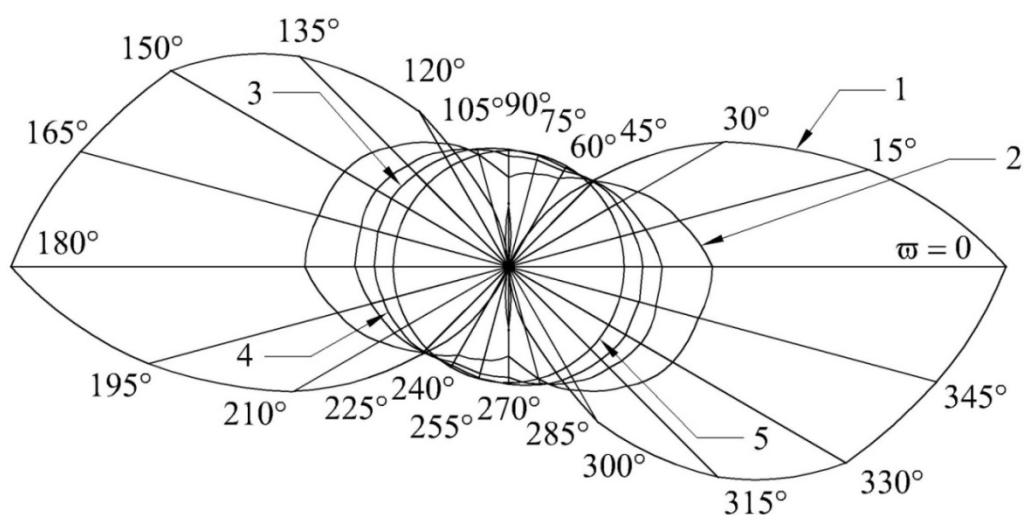


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициента анизотропии $k_{a,2}$ от ориентации плоскости слоистости годографов нижнего слоя ϖ для заданных годографов угла внутреннего трения и сцепления нижнего слоя:

- 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:

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

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

Результаты численных исследований приведены в таблицах 2 и 3, а также в виде графиков на рисунках 3 и 4.

Таблица 2

Таблица коэффициентов анизотропии $k_{a,2}(N_{\gamma,2})$ в зависимости от ориентации плоскости слоистости ϖ относительно горизонтали при заданных годографах угла внутреннего трения $\varphi_2(\beta)$ и сцепления $c_2(\beta)$ нижнего слоя

| ϖ | Коэффициент анизотропии $k_{a,2}(N_{\gamma,2})$ при годографах угла внутреннего трения $\varphi_2(\beta)$ и сцепления $c_2(\beta)$ | | | |
|----------|--|--|--|---|
| | $\varphi = 15^\circ - 20^\circ$, $c = 20 - 40$ кПа | $\varphi = 20^\circ - 25^\circ$, $c = 40 - 60$ кПа | $\varphi = 25^\circ - 30^\circ$, $c = 60 - 80$ кПа | $\varphi = 30^\circ - 35^\circ$, $c = 80 - 100$ кПа |
| 0 | 0,894887 | 0,889348 | 0,881004 | 0,869868 |
| 15 | 0,922683 | 0,917796 | 0,896075 | 0,901649 |
| 30 | 0,947985 | 0,949089 | 0,942551 | 0,933926 |
| 45 | 0,980652 | 0,979374 | 0,974045 | 0,966636 |
| 60 | 0,980652 | 0,990440 | 0,996230 | 1,000000 |
| 75 | 0,952534 | 0,961314 | 0,965699 | 0,969006 |
| 90 | 0,925198 | 0,931100 | 0,934919 | 0,937520 |
| 105 | 0,901175 | 0,903579 | 0,906030 | 0,906400 |
| 120 | 0,875091 | 0,876667 | 0,877694 | 0,876605 |
| 135 | 0,849650 | 0,850330 | 0,849108 | 0,847304 |
| 150 | 0,841396 | 0,832716 | 0,822595 | 0,818498 |
| 165 | 0,867808 | 0,861310 | 0,850912 | 0,839195 |
| 180 | 0,894887 | 0,890072 | 0,881004 | 0,869868 |

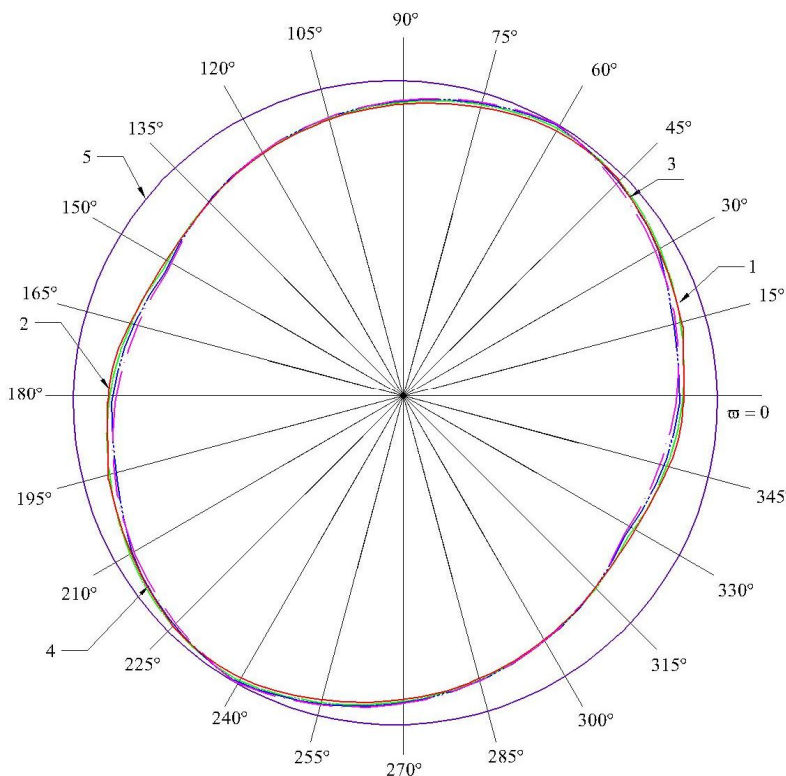


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента анизотропии $k_{a,2} (N_{\gamma,2})$ от ориентации плоскости слоистости годографов нижнего слоя ϖ для заданных годографов угла внутреннего трения и сцепления нижнего слоя:

- 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 - $\varphi = \text{const}$, $c = \text{const}$.

Таблица 3

Таблица коэффициентов анизотропии $k_{a,2} (N_{c,2})$ в зависимости от ориентации плоскости слоистости ϖ относительно горизонтали при заданных годографах угла внутреннего трения $\varphi_2(\beta)$ и сцепления $c_2(\beta)$ нижнего слоя

| ϖ | Коэффициент анизотропии $k_{a,2} (N_{c,2})$ при годографах угла внутреннего трения $\varphi_2(\beta)$ и сцепления $c_2(\beta)$ | | | |
|----------|--|--|--|---|
| | $\varphi = 15^0 - 20^0$, $c = 20 - 40$ кПа | $\varphi = 20^0 - 25^0$, $c = 40 - 60$ кПа | $\varphi = 25^0 - 30^0$, $c = 60 - 80$ кПа | $\varphi = 30^0 - 35^0$, $c = 80 - 100$ кПа |
| 0 | 2,632671 | 1,566492 | 1,269842 | 1,136772 |
| 15 | 1,795134 | 1,283083 | 1,128040 | 1,056099 |
| 30 | 1,169770 | 1,040204 | 0,999721 | 0,980541 |
| 45 | 0,685131 | 0,828047 | 0,882209 | 0,909675 |
| 60 | 0,391420 | 0,676155 | 0,785393 | 0,844168 |
| 75 | 0,229602 | 0,603944 | 0,747263 | 0,820772 |
| 90 | 0,086274 | 0,536400 | 0,710341 | 0,799087 |
| 105 | 0,384366 | 0,690861 | 0,802617 | 0,857177 |
| 120 | 0,731268 | 0,861223 | 0,901493 | 0,918233 |
| 135 | 1,148339 | 1,051630 | 1,008105 | 0,982728 |
| 150 | 1,600891 | 1,251126 | 1,123829 | 1,051020 |
| 165 | 2,040521 | 1,396944 | 1,193424 | 1,095472 |
| 180 | 2,632671 | 1,566492 | 1,269842 | 1,136772 |

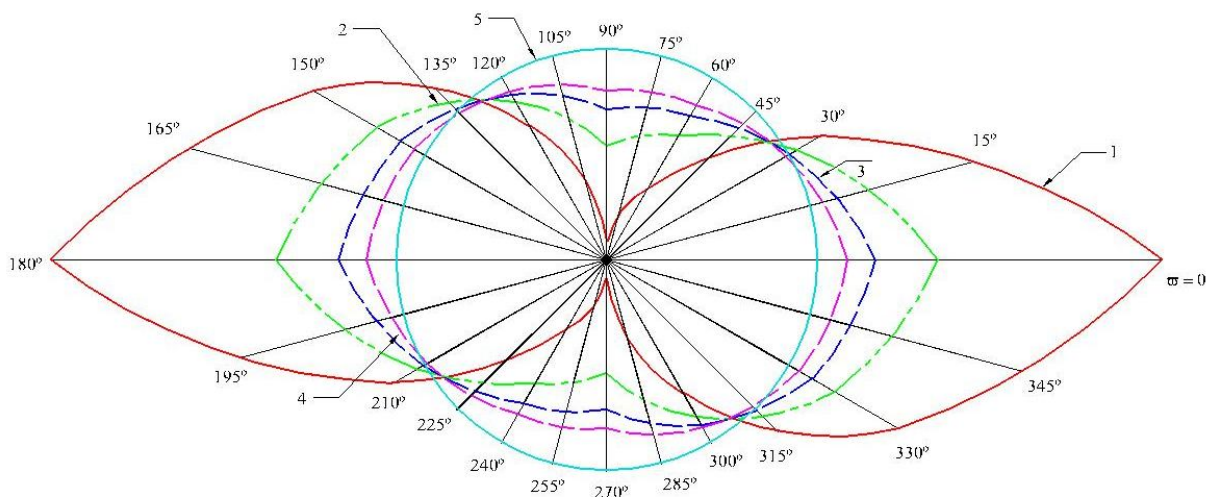


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициента анизотропии $k_{a,2}(N_{c,2})$ от ориентации плоскости слоистости годографов нижнего слоя ϖ для заданных годографов угла внутреннего трения и сцепления нижнего слоя:
 1 - $\varphi = 15^{\circ} - 20^{\circ}$, $c = 20 - 40$ кПа; 2 - $\varphi = 20^{\circ} - 25^{\circ}$, $c = 40 - 60$ кПа;
 3 - $\varphi = 25^{\circ} - 30^{\circ}$, $c = 60 - 80$ кПа; 4 - $\varphi = 30^{\circ} - 35^{\circ}$, $c = 80 - 100$ кПа;
 5 - $\varphi = \text{const}$, $c = \text{const}$.

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.

Сравнительная оценка полученных результатов подтверждает влияние анизотропии как на параметр $N_{\gamma,2}$ собственного веса, так и на параметр $N_{c,2}$ связности грунтовой призмы нижнего слоя.

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.

Таким образом, влияние связности грунта на боковое давление неоднородного анизотропного основания является преобладающим.

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.

Список литературы:

1. Ratananikom, W. An investigation of anisotropic elastic parameters of Bangkok Clay from vertical and horizontal cut specimens [Text] / W. Ratananikom, S. Likitlersuang, S. Yimsiri // Geomechanics and Geoengineering: An International Journal. – 2013. Vol. 8. – P. 15-27.
2. The influence of stiffness anisotropy on the behaviour of a stiff natural clay [Text] / [Grammatikopoulou A., Schroeder F. C., Kovacevic N., Ger-

- mano 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.
3. Gao, Z. Efficient Approach to Characterize Strength Anisotropy in Soil [Text] / Z. Gao, J. Zhao // Journal of Engineering Mechanics. – 2012, – Vol. 138, Issue 12. – P. 1447–1456.
 4. Бугров А.К. Анизотропные грунты и основания сооружений [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст]/ 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 [Текст] / 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 [Текст] / А.В. Школа, И.В. Войтенко // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. - Выпуск №4. - Одеса, 2001. - С. 394-407.
 9. Бирюкова, О.А. Метод решения проблемы учета деформационной анизотропии грунтов в расчетах грунтовых оснований [Текст] / 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.