

Особливості використання гіпотези Ш.О.Кулона для ґрунтового дисперсного середовища

Ігор Бойко¹

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹boyko40@ukr.net, orcid.org/ 0000-0002-6841-0271

DOI: 10.32347/0475-1132.47.2023.9-14

Анотація. Публікація присвячена видатному французькому вченому Шарлю Огюсту Кулону, який 250 років (1773 рік) тому запропонував гіпотезу, яка зв'язує дотичні і нормальні напруження через кут внутрішнього тертя ґрунтів. Ця гіпотеза забезпечує надійні результати при збереженні закону Гука. За межами цього закону необхідно враховувати властивість ґрунтового середовища, а саме зміну об'єму при зрізі або зсуві ґрунтів, що вимагає введення додаткових дилатансійних параметрів.

Відомо, що в природі існує два види тертя: тертя ковзання і тертя кочення. При певних значеннях деформації в ґрунтовому середовищі спочатку в окремих зонах ґрунтового середовища проявляється при малих деформаціях тертя ковзання, яке характеризується традиційним значенням кута внутрішнього тертя. Подальше зростання деформації зумовлює тертя кочення, яке характеризується іншим значенням кута внутрішнього тертя, майже на третину менше традиційного значення кута внутрішнього тертя ґрунту. Цей факт необхідно враховувати, коли проводиться числове моделювання дисперсного ґрунтового середовища від початку навантаження до його руйнування. В цій публікації і розглядається методика пошуку параметрів дилатансійної теорії для розкриття пружно-пластичного деформування незв'язних ґрунтів на основі експериментальних результатів. Наведено рекомендації використання гіпотези Ш.О.Кулона в інженерних розрахунках та про зв'язок дотичних і нормальних напружень через кут внутрішнього тертя ґрунтів. Для коректного опису нелінійного процесу деформування ґрунтів з необхідно водити параметри дилатансійної теорії, які можна дослідити на вісесиметричному зрізному приладі.



Ігор Бойко
професор кафедри
Геотехніки
д.т.н., проф.

Результати випробувань піску середньої крупності, середньої щільності, маловологого, однорідного на кількох приладах показали, що значення кута внутрішнього тертя ґрунтів суттєво відрізняються в залежності від конструкції приладу дослідження. Цей факт рекомендується враховувати при проектуванні геотехнічних об'єктів.

Ключові слова. гіпотеза Кулона, вісесиметричний зрізний прилад, ковзання, тертя кочення, числове моделювання, конус, циліндр, дилатансія, контрактансія.

ВСТУП

В цьому році Україна, разом з міжнародними товариствами геотехніків, відзначає 250-річницю гіпотези Шарля Кулона про зв'язок дотичних і нормальних напружень через коефіцієнти тертя матеріалів суцільного середовища, яка сьогодні широко використовується в інженерній практиці. Запропонована методика надає надійні проектні рішення в межах закону Гука. З метою розширення області використання цієї гіпотези в задачах геотехніки пропонується пошук шляхів її розвитку вести через обмін інформацією через відповідні публікації про ці проблемні питання.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спеціальними дослідженнями виявлено, що кути внутрішнього тертя ґрунтів змінюють свої значення в залежності від величини деформації, при яких відповідно реалізується тертя ковзання або кочення. Це доведено експериментальними роботами і числовим моделюванням процесів деформування піщаного ґрунтового середовища в широкому інтервалі навантажень [3-5], що дозволило виявити перспективи розвитку гіпотези Кулона для розв'язання просторових нелінійних геотехнічних задач [1-2].

МЕТА І МЕТОДИКА РОБОТИ

Мета публікації вшанувати талановитого вченого Шарля КУЛОНА за гіпотезу про зв'язок між дотичними і нормальними напруженнями через кути внутрішнього тертя ґрунтів. Показати, що кути внутрішнього тертя ґрунтів змінюють свої значення в залежності від величини деформації, при яких відповідно реалізується тертя ковзання або кочення.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ. ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В Київському національному університеті будівництва і архітектури, в 1963 році запропонована і розроблена конструкція вісесиметричного зрізного приладу, який дозволив виявити значення кута внутрішнього тертя спочатку при малих деформаціях традиційне значення кута внутрішнього тертя ґрунту, а при значних деформаціях фіксується і відповідне значення кута внутрішнього тертя, яке відповідає процесу кочення. (Рис.1). При цьому відбувається відповідне зниження його значення майже на третину. Виявлені значення в подальшому були використані при числовому моделюванні ґрунтового середовища в широкому діапазоні навантажень.

Спочатку за спеціальною програмою були проведені випробування заглиблених штампів (напівсфера, конус, горизонтальна

площина) в лотку, який забезпечував доступ до основи через окреме вікно. Для дослідників несподівано відкрилася картинка, а саме в сипучому піщаному ґрунті зафіксована напівсфера, яка зберігає свою форму при розвантаженні лотка (Рис.2). Варто зауважити, що навантаження проводилося за кінематичною схемою, яка зумовила появу кількох напівсфер по ходу заглиблення штампа.

На Рис.3 показано загальний вид двох напівсфер, які вкладені одна в одну і розмежовані полосами локалізації деформацій при значному переміщенні заглиблених штампів при їх кінематичному навантаженні і досягненні його граничного значення (в цьому прикладі граничне значення фіксувалося два рази). Зміна розмірів другої напівсфери зумовлена заглибленням штампа.

Видатний французький вчений - фізик Шарль Огюст Кулон у 1773 році запропонував гіпотезу для сипучих матеріалів «Граничний опір зрушенню є опір тертю прямо пропорційний нормальному тиску».

Ця гіпотеза і сьогодні успішно служить інженерним розрахункам в геотехніці для піщаних ґрунтів.

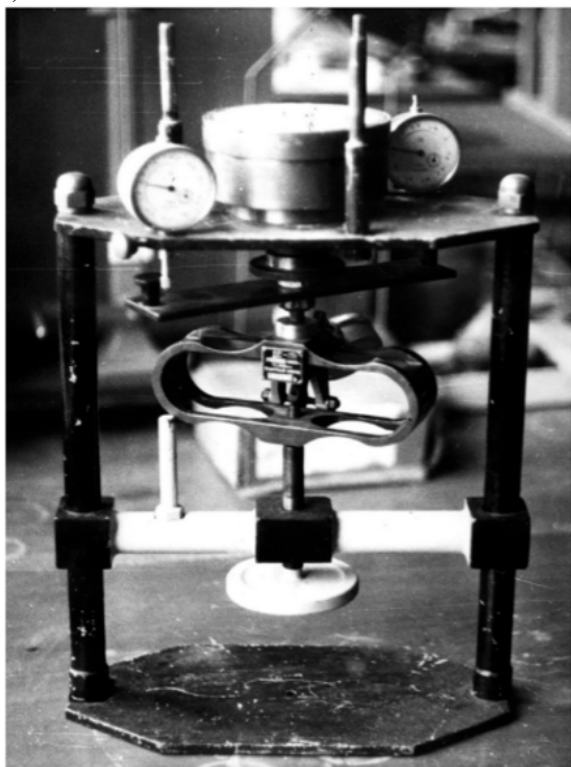
Відомо, що значення кута внутрішнього тертя залежить від багатьох факторів, а саме:

- від виду піщаних ґрунтів через його гранулометричний склад;
- за якою методикою цей кут визначається (ґрунт дренований, стабілізований);
- в яких умовах виконують дослідження ґрунтів (польових, лабораторних);
- -на яких приладах проводяться експерименти (стабілометр; одноплощинний зріз; багатоплощинний зріз; вісесиметричний зрізний прилад ВЗП, конструкція його розроблена в КНУБА, Київ, 1963 рік).
- за яких деформацій визначається значення кута внутрішнього тертя (малих або значних);
- які навантаження будуть передаватися на основу (миттєві від вибуху, довготривалі від транспорту, статичні, динамічні та інші);
- необхідно відтворити напружено -

деформований стан зразка ґрунту перед випробуванням відповідно до природного залягання, який був під час інженерно-геологічних вишукувань.

Перераховані фактори можуть суттєво впливати на значення коефіцієнта тертя ґрунтового середовища, яке в окремих випадках може відрізнятися в $1,5 \div 2$ рази.

a)



b)

Zone localization deformation

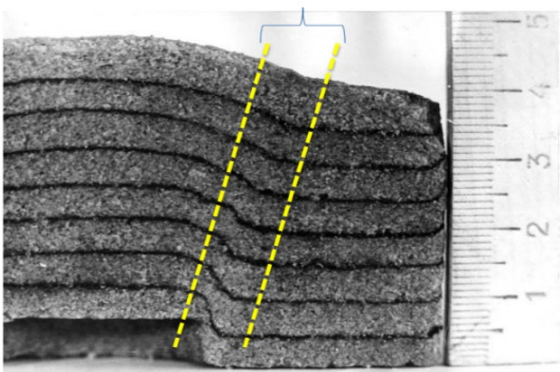


Рис.1. Вісесиметричний зрізний прилад, м.Київ, КНУБА, 1963 рік: a – конструкція приладу; b – зразок ґрунту після випробувань.

Fig.1. Axisymmetric shear device, Kyiv, KNUBA, 1963: a - device design; b - soil sample after testing.



Рис.2. Напівсфера в піщаному ґрунті.
Fig.2. Hemisphere in sandy soil.



Рис.3. Загальний вигляд полос локалізації деформацій в піщаному ґрунті під подошвою сферичного штампa.
Fig.3. General view of deformation localization bands in sandy soil under the sole of a spherical die.

Варто наголосити, що гіпотеза Шарля Кулона успішно служить геотехніці уже два з половиною століття. Експериментальні дослідження незв'язних ґрунтів, досвід реального проектування, числове моделювання процесу деформування піщаних ґрунтів в широкому інтервалі навантажень показав, що гіпотеза забезпечує надійні рішення в межах лінійної ділянки графіка $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$. Подальше навантаження зумовлює нелінійні процеси деформування ґрунту, тому на цьому інтервалі дану залежність слід уточнювати шляхом введення додаткових параметрів ґрунту, які враховують зміну його об'єму при зрізі.

Автором цієї публікації запропоновано для пальових фундаментів використати поверхню навантаження спочатку конус, а при досягненні гідростатичного тиску 2,0 МПа, перейти на циліндр (критерії Губера - Мізеса) і доповнити ці залежності шляхом введення коефіцієнтів дилатансії і контрактансії, а саме модифікувати поверхню навантаження в меридіальному і девіаторному перерізах.

На даному етапі досліджень заміна поверхні навантаження з конуса на циліндр пропонується виконувати при гідростатичному тиску $\sigma_m > 2\text{МПа}$. В девіаторному перерізі рекомендується використовувати середнє значення радіуса вписаного і описаного кола піраміди, що зменшить кількість сингулярних точок при числовому моделюванні процесу нелінійного деформування ґрунтів.

Таке доповнення дозволяє моделювати напружено-деформований стан незв'язних ґрунтів в широкому діапазоні навантажень і дана методика успішно використана при проектуванні Запорізької АЕС, Рівненської АЕС, Хмельницької АЕС, будівництві конфаймента Чорнобильської АЕС, Олімпійський стадіон у Києві та інші відповідальні об'єкти реконструкції і реставрації ХХІІ ст. в м.Києві, в м.Каневі, в м.Путівлі, в с.Зимне Волинської обл., в с.Водяне Харківської обл., в м.Новгород-Сіверський Чернігівської обл. Усього біля 20 пам'яток культури і архітектури України.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Гіпотеза Ш.О.Кулона про зв'язок дотичних і нормальних напружень через кут внутрішнього тертя ґрунтів успішно працює в інженерних розрахунках в межах закону Гука. Зростання навантаження зумовлює появу нелінійних деформацій, які супроводжуються зміною об'єму ґрунту в полосі локалізації деформацій, на бічній поверхні палі, на потенційній поверхні руйнування схилу та інших випадках розв'язання геотехнічних задач. Для коректного опису нелінійного процесу деформування ґрунтів необхідно вводити параметри дилатансійної теорії.
2. При визначенні параметрів деформування ґрунтового середовища необхідно напружено-деформований стан при випробуваннях ґрунтів в лабораторії наближати до реальних умов взаємодії фундаментів будівель чи споруд з основою. Для реалізації цієї задачі в КНУБА (1963 рік, м.Київ) був розроблений вісесиметричний зрізний прилад з можливістю кінематичного навантаження, що дозволяє визначати кут внутрішнього тертя ґрунту при ковзанні (малі деформації, 1-2мм). Продовження навантаження забезпечує можливість фіксувати кут внутрішнього тертя кочення (значні деформації, >5мм). При спеціальній підготовці зразка ґрунту можна отримати фото полоси локалізації деформацій. Ця методика має переваги, бо параметри визначаються на одному зразку ґрунту, відсутня попередньо задана поверхня зрізу, а процес його деформування максимально наближений до реальних умов.
3. Аналіз результатів випробувань піску середньої крупності, середньої щільності, маловологого, однорідного на кількох приладах, а саме: - одноплощинний зрізний (ОЗ), вісесиметричний зрізний (ВЗ) та стабілометричний зрізний (СЗ) показали, що значення кута внутрішнього тертя ґрунтів суттєво відрізняються в залежності від його конструкції відповідно: ОЗ - 28°; ВЗ-36°; СЗ- 40°. Цей факт рекомендується враховувати при проектуванні геотехнічних об'єктів.
4. В механіці ґрунтів відомо, що зріз чи зсув ґрунтового середовища відбувається при критичній пористості, тобто щільний ґрунт спочатку розпушується, а потім відбувається зріз, пухкий ґрунт навпаки спочатку доущільнюється, а потім відбуваються його зміщення. Цей факт можна пояснити, що в ґрунтовому середовищі проявляються ефекти дилатансії і контрактансії. А тому ці процеси слід обов'язково враховувати при моделюванні пружно-пластичного деформування ґрунтів до його зрізу чи зсуву.
5. Варто наголосити на перевагу вісесиметричного зрізного приладу. Вона полягає в

тому, що в ньому є можливість зафіксувати форму полоси локалізації деформацій і кількісно оцінити процес зміни об'єму ґрунтового середовища при зрізі за спеціально розробленими методиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко И.П. Пластическое течение дилатирующих грунтов в основании свайных фундаментов / И.П.Бойко, А.Е.Дельник // *VI Всес. съезд по теорет.и прикладной механике. Тез.докл.* –Ташкент: ФАН. – 1986. – 120 с.
2. Калюх Ю.І. Прикладна реалізація моделей ґрунтового середовища в геотехніці: від моделей БіО до моделей граничної рівноваги / Ю.І. Калюх, О.А. Клименко, Я.О. Берчун // *Математичне моделювання в економіці.* – К: Будівельник. – 2016. – Вип. 3-4. – 27с.
3. Бойко И.П. Свайные фундаменты на нелинейно-деформируемом основании: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / Бойко Игорь Петрович. – М.: НИИОСП, 1988. – 372с.
4. Бойко И.П. Исследование взаимодействия заглубленного упругого штампа с физически нелинейным основанием с учетом трения на контакте / И.П.Бойко, В.С.Нечипоренко, А.В.Обухов // *V Всес.конф. по статике и динамике пространственных конструкций: Тез. Докл.* – К.: КИСИ. – 1985. – С.28.
5. Бойко І. Ідентифікація параметрів ґрунту на основі натурних випробувань паль. / І. Бойко, Л. Скочко, М. Хоронжевський // *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник.* – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 42. – С. 9-18. DOI: 10.32347/0475-1132.42.2021.9-18.
3. Boyko I.P. (1988). *Svajnye fundamenty na nelinejno-deformiruemom osnovanii* [Pile foundations on a non-linearly deformable base]. *Dys. doktora tekhn. nauk: 05.23.02.* Moscow: NIIOSP, 372 (in Russian).
4. Boyko I.P., Nechiporenko V.S., Obukhov A.V. (1985). *Yssledovanye vzaemodeistviya zahlublennoho uprugohto shtampa s fizychesky nelyneynym osnovanyem s uchetom treniya na kontakte* [Study of the interaction of a buried elastic stamp with a physically nonlinear base, taking into account friction at the contact]. *V Vses.konf. po statyke y dynamyke prostranstvennykh konstruksiyi: Tез. Dokl.* Kyiv: KIBY, 28 (in Russian).
5. Boyko I., Skochko L., Khoronzhevskiy M. (2021). *Identifikatsia parametriv gryntiv na osnovi rezyltativ natyrnih vuprobuvan pal* [Identification of soil parameters based on the results of field tests of piles]. *Osnovu ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk.* Kyiv: KNUBA, 42, 9-18 (in Ukrainian). DOI: 10.32347/0475-1132.42.2021.9-18.

Peculiarities of using the hypothesis of S.O. Kulon for soil dispersed sediments

Igor Boyko

Summary. The publication is devoted to the outstanding French scientist Charles Auguste Coulomb, who 250 years ago (1773) proposed a hypothesis that relates tangential and normal stresses through the angle of internal friction of soils. This hypothesis provides reliable results while maintaining Hooke's law. Beyond this law, it is necessary to take into account the property of the soil medium, namely the change in volume during shearing or displacement of soils, which requires the introduction of additional dilatancy parameters.

It is known that there are two types of friction in nature: sliding and rolling friction. At certain values of deformation in the soil medium, sliding friction, which is characterised by the traditional value of the internal friction angle, initially appears in certain zones of the soil medium at low deformations. Further increase in deformation causes rolling friction, which is characterised by a different value of the internal friction angle, almost one third less than the traditional value of the internal friction angle of the soil. This fact must be taken into account when performing numerical modelling of a dispersed soil

REFERENCES

1. Boyko I.P., Delnyk A.E. (1986). *Plasticheskoe techenye dylatiruiushchyykh hruntov v osnovanyu svainykh fundamentov* [Plastic flow of dilating soils at the base of pile foundations]. *VI Vses. sezd po teoret.y prykladnoi mekhanyke. Tез.dokl.* Tashkent: FAN, 120 (in Russian).
2. Kaliukh Yu.I., Klymenko O.A., Berchun Ya.O. (2016). *Prykladna realizatsiia modelei hruntovoho seredovysycha v heotekhnitsi: vid modelei BiO do modelei hranychnoi rivnovahy* [Applied implementation of models of the soil environment in geotechnics: from biophysical models to limit equilibrium models]. *Matymatychne modeliyuvannia v ekonomitsi.* Kyiv: Budivelnyk, 3-4, 27 (in Ukrainian).

medium from the beginning of loading to its failure. In this publication, we discuss the methodology for finding the parameters of the dilatancy theory to reveal the elastic-plastic deformation of cohesionless soils based on experimental results. Recommendations are given on the use of the Coulomb hypothesis in engineering calculations and on the relationship between tangential and normal stresses through the angle of internal friction of soils. For a correct description of the nonlinear process of soil deformation, it is necessary to use the parameters of the dilatancy theory, which can be investigated on an axisymmetric shear tester.

The results of tests of sand of medium size, medium density, low-moisture, homogeneous on several devices showed that the values of the angle of internal friction of soils differ depending on the design of the device. This fact is recommended to be taken into account when designing geotechnical facilities.

Key words. Coulomb's hypothesis, axisymmetric shear device, sliding, rolling friction, numerical modelling, cone, cylinder, dilatancy, contractility.

Particularités de l'utilisation de l'hypothèse de S.O. Coulomb pour les sédiments dispersés dans le sol

Igor Boyko

Summary. Cette publication est consacrée à l'éminent scientifique français Charles Auguste Coulomb qui, il y a 250 ans (1773), a proposé une hypothèse qui relie les contraintes tangentielles et normales à travers l'angle de frottement interne des sols. Cette hypothèse permet d'obtenir des résultats fiables dans les limites de la loi de Hooke. Au-delà de cette loi, il est nécessaire de prendre en compte la propriété du milieu sol, à savoir le changement de volume lors du cisaillement ou du déplacement des sols, ce qui nécessite l'introduction de paramètres de dilatation supplémentaires.

On sait qu'il existe deux types de frottement dans la nature : le frottement de glissement et le frottement de roulement. Pour certaines valeurs de déformation dans le sol, le frottement de glissement, caractérisé par la valeur traditionnelle de l'angle de frottement interne, apparaît d'abord dans certaines zones du sol à faibles déformations. L'augmentation de la déformation entraîne un frottement de roulement, caractérisé par une valeur différente de l'angle de frottement interne, inférieure de près d'un

tiers à la valeur traditionnelle de l'angle de frottement interne du sol. Ce fait doit être pris en compte lors de la modélisation numérique d'un sol dispersé, du début de la charge jusqu'à sa rupture. Dans cette publication, nous discutons de la méthodologie pour trouver les paramètres de la théorie de la dilatation pour révéler la déformation élastique-plastique des sols sans cohésion sur la base de résultats. Des recommandations sur l'utilisation de l'hypothèse de Coulomb dans les calculs d'ingénierie et sur la relation entre les contraintes tangentielles et normales à travers l'angle de frottement interne des sols sont données. Pour une description correcte du processus non linéaire de déformation du sol, il est nécessaire d'utiliser les paramètres de la théorie de la dilatation, qui peut être étudiée sur un testeur de cisaillement axisymétrique.

Les résultats des essais de sable de taille moyenne, de densité moyenne, à faible humidité, homogène sur plusieurs appareils ont montré que les valeurs de l'angle de frottement interne des sols différent en fonction de la conception de l'appareil. Il est recommandé de tenir compte de ce fait lors de la conception des installations géotechniques.

Key words. hypothèse de Coulomb, dispositif de cisaillement axisymétrique, glissement, frottement de roulement, modélisation numérique, cône, cylindre, dilatation, contractilité.

P.S. Подяка моїм онукам, Теодору і Оресту, за підготовку публікації до друку і переклад анотації на французьку мову.