

УДК 517.928:624.131.52

АСИМПТОТИЧНИЙ МЕТОД ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ

СЕДИН В. Л.¹, *д. т. н., проф.*,
 ДАНИШЕВСЬКИЙ В. В.^{2*}, *д. т. н., проф.*,
 БІКУС К. М.³, *м. н. с., аспірант*,
 КОВБА В. В.⁴, *магістрант*,

¹Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCIDID: 0000-0003-2293-7243

^{2*}Кафедра будівельної механіки та опору матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-61, e-mail: vdanish@ukr.net, ORCIDID: 0000-0002-3049-4721

³Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCIDID: 0000-0003-1287-666X

⁴Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: kovba-vladislav@mail.ru, ORCIDID: 0000-0002-5140-8140

Анотація. Постановка проблеми. За сучасних умов розвитку геотехнічного будівництва, пов'язаного з проблемами збільшення навантажень на основи фундаментів будівель і споруд та освоєнням територій зі складними інженерно-геологічними умовами, широкого розповсюдження набули пальові фундаменти. Наразі на перший план виходить проблема економічного й ефективного застосування різних типів пальових фундаментів із метою забезпечення високого рівня надійності будівель і споруд протягом усього терміну експлуатації. Головне завдання геотехніків – максимальне використання потенціалу ґрунтової основи для передачі на неї максимально допустимих навантажень. Під час взаємодії палі з оточуючим ґрунтом виникає складний неоднорідний НДС, який і визначає її несну здатність та деформації, але вона не реалізується повністю через нерівномірний розподіл зусилля між бічною поверхнею та нижнім торцем палі. Палі, розташовані близько одна від одної, мають менший бічний опір, ніж ті, що розташовані на більшій відстані. Швидкість переміщення ґрунту, викликана сумісним впливом палі, збігається зі швидкістю переміщення самої палі. Внаслідок цього відбувається їх спільне переміщення і дотичні напруження ґрунту використовуються нераціонально. Аналітичний розрахунок "раціонального" розташування палі, за якого несна здатність ґрунтів під їх нижнім торцем буде використовуватись ефективно і повноцінно, полягає в необхідності підібрати оптимальну залежність між довжиною палі і відстанню між ними. Перспективним напрямом є застосування сучасних математичних методів, зокрема, асимптотичного, та виконання розрахунків у математичних пакетах типу MathCAD, у яких видно хід розрахунку. **Мета статті** – дослідження роботи застосування асимптотичного методу для оцінювання НДС основ пальових фундаментів, створення методики визначення дотичних і поздовжніх напружень уздовж палі та під нижнім кінцем у багатошарових основах за статичного навантаження палі, залежні від відстані між палями, дослідження впливу контакту на межі "паля – ґрунтова основа". **Висновок.** Створено й апробовано методику визначення дотичних і нормальних напружень уздовж палі та під нижнім кінцем у багатошарових основах; досліджено вплив контакту на межі "паля – ґрунтова основа", підібрано її оптимальну товщину для виконання поставленого завдання.

Ключові слова: асимптотичний метод, метод скінчених елементів (МСЕ), дотичні та нормальні напруження вздовж палі та під нижнім кінцем, багатошарова ґрунтова основа, ПС Maple.

АСИМПТОТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

СЕДИН В. Л.¹, *д. т. н., проф.*,
 ДАНИШЕВСКИЙ В. В.^{2*}, *д. т. н., проф.*,
 БИКУС Е. М.³, *м. н. с., аспирант*,

КОВБА В. В.⁴, *магістрант*,

¹ Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

^{2*} Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-61, e-mail: vdanish@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

³ Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1287-666X

⁴ Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: kovba-vladislav@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

Аннотация. Постановка проблемы. В современных условиях развития геотехнического строительства, связанного с проблемами увеличения нагрузок на основания фундаментов зданий и сооружений, освоением территорий со сложными инженерно-геологическими условиями, широкое распространение получили свайные фундаменты. Поэтому на первый план выходит проблема экономичного и эффективного применения различных типов свайных фундаментов при обеспечении высокого уровня надежности зданий и сооружений на протяжении всего срока эксплуатации; главной задачей геотехников является использование максимального потенциала грунтового основания для передачи на него максимально допустимых нагрузок. При взаимодействии сваи с окружающим грунтом возникает сложное неоднородное НДС, которое и определяет ее несущую способность и деформации, но она не реализуется полностью через неравномерное распределение усилий между боковой поверхностью и нижним торцом сваи. Сваи, расположенные вблизи друг от друга, имеют меньшее боковое сопротивление, чем находящиеся на большем расстоянии. Скорость перемещения грунта, вызванного совместным влиянием свай, совпадает со скоростью перемещения самой сваи, вследствие этого происходит их совместное перемещение и касательные напряжения грунта используются нерационально. Аналитический расчет "рационального" размещения свай, при котором несущая способность грунтов под их нижним торцом будет использоваться эффективно и полноценно, заключается в необходимости подобрать оптимальную зависимость между длиной свай и расстоянием между ними. Перспективным направлением является применение современных математических методов, в частности, асимптотического, и выполнение расчетов в математических пакетах типа MathCAD, в которых видно ход расчета. **Целью** работы является применение асимптотического метода для оценки НДС оснований свайных фундаментов, создание методики определения касательных и продольных напряжений вдоль свай и под нижним торцом в многослойных основаниях при статическом нагружении свай в зависимости от расстояния между сваями, исследование влияния контакта на границе "свая – грунтовое основание". **Вывод.** Создана и апробирована методика определения касательных и продольных напряжений вдоль свай и под нижним торцом в многослойных основаниях, исследование влияния контакта на границе "свая – грунтовое основание", подобрана ее оптимальная толщина для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: асимптотический метод, метод конечных элементов (МКЭ), касательные и продольные напряжения вдоль свай и под ее нижним торцом, многослойное грунтовое основание, ПС Maple.

AN ASYMPTOTIC METHOD FOR MODELLING OF THE SOIL STRESS-STRAIN STATE PILE FOUNDATIONS

SEDIN V. L.¹, *D. Sc. (Tech.), prof.*,

DANISHEVS'KYY V. V.^{2*}, *D. Sc. (Tech.), prof.*,

BIKUS E. M.³, *Junior researcher and Postgrad. Stud.*,

KOVBA V. V.⁴, *Grad. Stud.*

¹ Foundation Engineering Department, State Higher Education Establishment "Pridneprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

^{2*} Department of Structural Mechanics and Strength of Materials, State Higher Education Establishment "Pridneprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-16-61, e-mail: vdanish@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

³ Foundation Engineering Department, State Higher Education Establishment "Pridneprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: geotecprof@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1287-666X

⁴ Foundation Engineering Department, State Higher Education Establishment "Pridneprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 47-02-63, e-mail: kovba-vladislav@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

Summary. Problem statement. In modern conditions of geotechnical construction related with the problem of increasing loads on the basis of foundations of buildings and structures, and development of areas with complex engineering-geological conditions pile foundations widespread. So, the problem of economic and effective application comes of different types of pile foundations comes firstly, while ensuring a high level of reliability of buildings and structures throughout the lifetime, and the main task is to using a maximum potential of subgrade, for transmission to a maximum bearing capacity. When interacting pile with the surrounding soil occurs complex impure soil stress-strain state, which determines its load-bearing capacity and deformation, but it is not realized fully by the uneven distribution of efforts between the skin surface and the pile bottom. That are close to each other piles have skin resistance than being at a greater distance. The speed of movement of the soil caused by the combined influence of piles equals with the speed of movement of the piles, this occurs due to their mutual displacement and tangential stresses of the soil used irrationally. Analytical calculation of "rational" placement of piles, where the load-bearing capacity of soil beneath pile bottom will be used effectively and fully is the need to choose the optimum ratio between the length of piles and the distance between them. A promising direction is the applying of advanced mathematical methods, in particular the asymptotic, and to perform calculations in mathematical packages such as MathCAD, in which one can see the progress of calculation. **The purpose** is to use the asymptotic method for the assessment of soil stress-strain state bases of pile foundation, a creation of the method for determining the tangential and longitudinal stresses along the pile and under the bottom edge of multilayer substrates, under static loading of piles, depending on the distance between the piles, the study of the influence of the contact at the border "pile – subgrade". **Conclusion.** a method for determining the tangential and longitudinal stresses along the pile and under the bottom edge of multilayer substrates is created and is tested, research of the effect of exposure on the border "pile - subgrade," its optimal thickness is chosen for the task.

Keywords: *asymptotic method, Finite Element Method (FEM), tangential and longitudinal stresses along the pile and at its bottom, multi-layered subgrade, PP Maple.*

Постановка проблеми. За сучасних умов розвитку геотехнічного будівництва, пов'язаного з проблемами збільшення навантажень на основи фундаментів будівель і споруд та освоєнням територій зі складними інженерно-геологічними умовами, широкого розповсюдження набули пальові фундаменти.

На перший план виходить проблема економічного й ефективного застосування різних типів пальових фундаментів за умови забезпечення надійності будівель і споруд протягом усього терміну експлуатації; головним завданням геотехніків є використання максимального потенціалу ґрунтової основи для передачі на неї максимально допустимих навантажень.

Під час взаємодії палі з оточуючим ґрунтом виникає складний неоднорідний НДС, який і визначає її несну здатність та деформації. Зусилля, прикладене до палі, розподіляється зазвичай між боковою поверхнею і нижнім кінцем палі в співвідношенні 4 : 1, а у деяких випадках навіть менше, залежно від довжини палі [10]. У більшості випадків палі нижніми торцями спираються на порівняно щільні шари ґрунтів. Ці ґрунти мають високі

показники несної здатності, але вона не реалізується повністю через нерівномірний розподіл зусилля між бічною поверхнею та нижнім кінцем довгої палі.

Палі, розташовані близько одна від одної, мають менший бічний опір, ніж ті, що розташовані на більшій відстані. Швидкість переміщення ґрунту, викликана сумісним впливом паль, збігається зі швидкістю переміщення самої палі. Внаслідок цього відбувається спільне переміщення і дотичні напруження ґрунту використовуються нераціонально.

У зв'язку з цим розроблення, вдосконалення і впровадження в практику методів "раціонального" проектування пальових фундаментів, зокрема, вивчення залежності між довжиною паль та відстанню між ними, стало актуальним завданням.

Аналіз публікацій. Вирішення окресленої проблеми безпосередньо залежить від достовірності оцінювання НДС основ пальових фундаментів та їх моделювання.

Винайти точні аналітичні розв'язки задач із прогнозування НДС масивів ґрунтів через складності інженерно-геологічної будови масивів, притаманні їм нелінійну

залежність між напруженнями та деформаціями, анізотропію ґрунтового середовища навіть у межах одного інженерно-геологічного елемента (ІГЕ), недосконалість технології виготовлення паль тощо практично неможливо. Числове моделювання роботи паль також – складна геотехнічна задача, оскільки існує багато параметрів, що ускладнюють розрахунок [3].

Тому в інженерній практиці користуються методами, заснованими на введенні спрощувальних передумов, головним чином, скінченних елементів (МСЕ). На сьогоднішній день МСЕ найбільш досконалий серед відомих числових методів для розв'язання геотехнічних задач.

Оскільки сучасний рівень проектування пальових фундаментів практично неможливий без виконання числових досліджень, МСЕ покладено в основу розрахунків багатьох програмних комплексів (ПК), які використовують для оцінювання НДС ґрунтових масивів. Серед відомих спеціальних програмних комплексів: Plaxis 3D, ANSYS, FLAC, FEMmodels, GeoSoft, midas GTS та ін. [12].

Проте для перевірки адекватності числових розрахунків поряд із використанням МСЕ необхідно застосовувати прості наближені аналітичні підходи. Навіть у тих випадках, коли основною метою залишається отримання числових результатів, попереднє застосування асимптотичних методів дозволяє вибрати кращий обчислювальний метод і розібратися в численному, але неупорядкованому, числовому матеріалі. Відомий англійський механік Д. Крайтон зауважував: "Розрахунки чи експерименти без визначної ролі асимптотичної інформації даремні в кращому випадку і небезпечні в гіршому через неможливість ідентифікувати області різкої зміни процесу і його локалізації в просторі і в часі. Більше того, весь накопичений досвід показує, що асимптотичні рішення корисні з точки зору числових результатів далеко за межами їх формальної області застосування і часто можуть бути використані безпосередньо [на практиці]" (переклад *авт.*) [15].

Значний вклад у становлення і розвиток асимптотичних методів у різних галузях механіки внесли І. В. Андріанов, В. В. Данішевський,

Г. А. Старушенко, Д. Вайхерт, Л. И. Маневич, А. В. Павленко та багато інших [1, 2, 4 – 7, 13, 14, 16].

Однак необхідно зазначити, що асимптотичні методи зазвичай застосовуються лише на окремому етапі розрахунку. Нам здається важливим розроблення аналітичного підходу до розрахунку пальових фундаментів, зокрема, "раціонального" розташування паль, за якого несна здатність ґрунтів під їх нижнім торцем буде використовуватись ефективно і повноцінно. Суть методу полягає в необхідності підібрати оптимальну залежність між довжиною паль і відстанню між ними.

Перспективним напрямом для цього є виконання розрахунків у математичних пакетах типу MathCAD, у яких видно хід розрахунку.

За основу було взято метод дослідження крайових ефектів, які виникають в однонаправлених волокнистих композитах під час передачі навантаження від волокон до матриці, розроблений проф. В. В. Данішевським в ПС Maple [4].

Мета роботи – застосування асимптотичного методу для оцінювання НДС основ пальових фундаментів, створення методики визначення дотичних і поздовжніх напружень уздовж палі та під нижнім кінцем у багатопалових основах, за статичного навантаження паль, залежно від відстані між палями, дослідження впливу контакту на межі "паля – ґрунтова основа".

Виклад матеріалу. Вихідна задача асимптотично спрощується за допомогою методу Маневича–Павленка [5–7], де як малий параметр використовується відношення жорсткостей анізотропних матеріалів при деформаціях у різних напрямках. Аналітичне рішення спрощеної задачі знаходиться за допомогою методу інтегральних перетворень.

У статті досліджено напруження, які виникають у багатопаловому ґрунтовому масиві (рис. 1) у близькості межі "паля – ґрунтова основа" (крайові ефекти), під час передачі навантаження від палі.

Вихідними даними для поставленої задачі було обрано геометричні розміри пальового

фундаменту реального майданчика будівництва багатоповерхового будинку. Будинок зводиться на багатошаровій ґрунтовій основі, верхні шари якої мають низькі показники фізико-механічних характеристик ґрунтів. Це викликало необхідність влаштування пальового фундаменту, який складається з буроін'єкційних паль довжиною 14,0 м, діаметром 520 м, зв'язаних ростверком у вигляді залізобетонної плити.

Розрахунки для розв'язання поставленої задачі виконувались у ПС Maple 15. У розрахунковий об'єкт включено п'ять ПЕ (рис. 1).

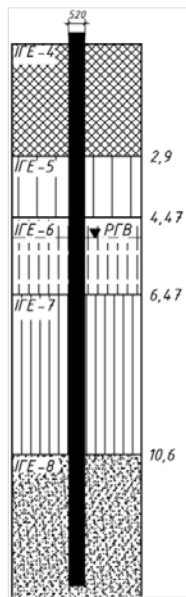


Рис. 1. Інженерно-геологічна колонка майданчика зі схематичним розташуванням дослідної натурної палі: ПЕ – номер інженерно-геологічного елемента та глибина залягання шару

Для розв'язання поставленої задачі в ПС Maple 15 застосовано такі спрощення:

1. Массив ґрунту, якому складається з нескінченної матриці, в з певною періодичністю розташовані палі, (рис. 2).

2. Аналіз результатів числених розрахунків НДС системи "палі – ґрунтова основа" показав, що зона впливу палі на оточуючий массив обмежена як по радіусу, так і по глибині [10]. У зв'язку з цим можна отримати аналітичні рішення з визначення опору палі з урахуванням пружних і пружно-пластичних властивостей ґрунтів, що складають однорідний і неоднорідний массив [11]. Тому розрахунковим розглядався массив обмежених розмірів.

3. Із нескінченної матриці виділялась квадратна комірка з розташованою в центрі паллю (рис. 2). Зовнішня межа комірки замінювалась окружністю радіусом R (рис. 3).

4. Для розрахунку опору під нижнім торцем палі, розташованої в багатошаровому массиві, її необхідно ділити на окремі елементи, обмежені потужністю ґрунтового шару (для розв'язання нашої задачі кількість ділянок складає 5, відповідно кількості ПЕ). Значення поздовжніх напружень під нижнім торцем попереднього елемента σ_z прикладалось до верхнього торця наступного, за принципом суперпозиції, як показано на рисунку 4. Проте значення дотичних напружень, які виникають у ґрунтовому массиві навколо палі, не враховуються.

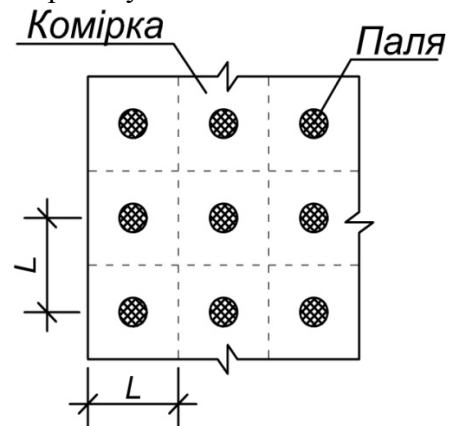


Рис. 2. Массив ґрунту з періодично розташованими паллями: L – розмір комірки (відстань між паллями)

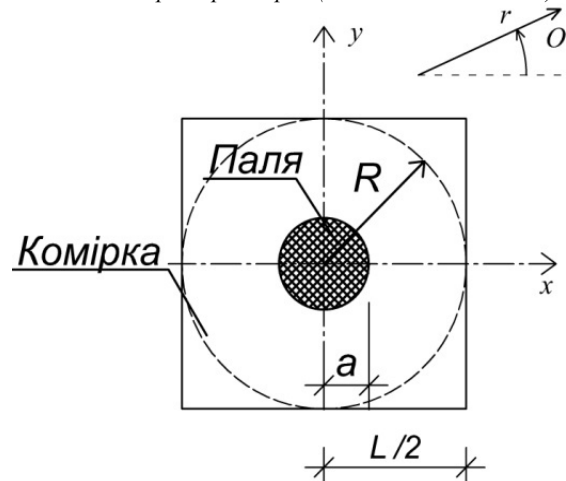


Рис. 3. Модель комірки періодичності: R – радіус комірки, a – радіус палі, L – відстань між паллями ($3a$; $6a$; $9a$)

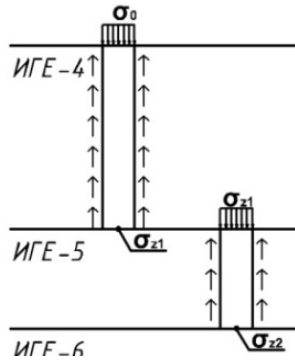


Рис. 4. Схема розбивки палі на елементи

5. Коефіцієнт зниження міцності α поєднує в собі механічні характеристики ґрунту зчеплення c та кут внутрішнього тертя ϕ , а також існування по всій довжині палі шорсткості її поверхні.

6. Для палей поперечними деформаціями можна знехтувати.

Розглянемо багат шарову основу і палю довжиною $l = 14$ м; $a = 0,52$ м; $L = 3a$; $6a$; $9a$; $E_p = 270$ МПа; модуль зрушення різних шарів ґрунту: $G_1 = 1,54$ МПа, $G_2 = 3,07$ МПа, $G_3 = 2,31$ МПа, $G_4 = 2,69$ МПа, $G_5 = 9,6$ МПа; навантаження прикладене до палі $3\ 200$ кН.

Напруження, які виникли під нижнім торцем палі, відповідають напруженням, що виникли в ґрунті внаслідок дії статичного навантаження. За допомогою числових розрахунків визначалися значення напружень під нижнім торцем палі та глибина палі, на якій дія дотичних напружень закінчується $\sigma_{rz} = 0$.

Знаходились поздовжні напруження σ_z під нижнім торцем палі. Це дало змогу визначити зміну значення опору ґрунту під нижнім торцем палі та прослідкувати інтенсивність затухання поздовжніх напружень σ_z^p на будь-якому проміжку палі. Обчисливши значення поздовжніх напружень можна дійти висновку, що під нижнім торцем палі:

$$\sigma_z^p = \sigma_p = \sigma_s \tag{1}$$

де: σ_z^p – поздовжнє напруження на довільній глибині;

σ_p – поздовжнє напруження в палі;

σ_s – поздовжнє напруження в ґрунті.

Визначимо поздовжнє напруження під нижнім торцем палі:

$$P = \sigma_0 \cdot S_p = \sigma_0 \cdot \pi a^2;$$

$$P = P_s + P_p;$$

$$P = \sigma_s \cdot S_s + \sigma_z^p \cdot S_p;$$

де: S_s – площа ґрунтової комірки;

S_p – площа перерізу палі.

$$P = \sigma_s \left(\frac{\pi L^2}{4} - \pi a^2 \right) + \sigma_z^p \cdot \pi a^2. \tag{2}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_z^p}{E_p}; \varepsilon_s = \varepsilon_p = \varepsilon \text{ (під нижнім торцем палі);}$$

$$\sigma_s = \varepsilon \cdot E_s = \frac{E_s}{E_p} \sigma_z^p,$$

підставляємо у формулу (2), отримуємо:

$$P = \frac{E_s}{E_p} \left(\frac{\pi L^2}{4} - \pi a^2 \right) \cdot \sigma_z^p + \pi a^2 \sigma_z^p = \sigma_0 \pi a^2;$$

$$\left[\frac{E_s}{E_p} \left(\frac{L^2}{4a^2} - 1 \right) + 1 \right] \sigma_z^p = \sigma_0,$$

звідки:

$$\sigma_z^p = \frac{\sigma_0}{1 + \frac{E_s}{E_p} \left(\frac{L^2}{4a^2} - 1 \right)}$$

Далі знаходилась границя дотичних напружень σ_{rz} , що виникають у ґрунтовому масиві навколо палі від прикладеного до неї навантаження. На даному етапі передбачалось, що опір ґрунту під нижнім кінцем $\sigma_z^p = 0$.

У даній задачі дотичні напруження на межі "палія – ґрунт" значно перевищують поздовжні, тому порушення зв'язку між поверхнями проявляється, перш за все, в "проковзуванні" палі відносно ґрунту. Бічний опір палі безпосередньо пов'язаний із шорсткістю поверхні контакту (рис. 5). Моделюється шляхом підбору підходящої величини коефіцієнта зниження міцності α .

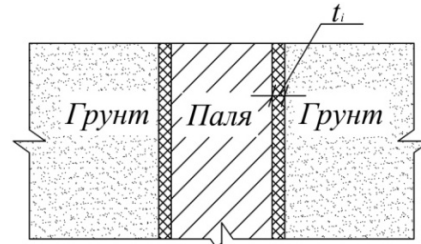


Рис. 5. Межа контакту "палія – ґрунт": t_i – умовна товщина поверхні контакту

Досліджено вплив ідеального і неідеального контакту між палею і ґрунтом. Використання ідеального контакту дозволяє продемонструвати, який максимальний бічний опір може існувати між матеріалами різної структури та різними механічними характеристиками. Значення $\alpha = 0$ відповідає "ідеальному" контакту ($\Delta u_z^{(3)} = 0$).

Якщо коефіцієнт $\alpha = 0$, то під час осідання паля буде зтягувати ґрунт за собою (що не відповідає реальності). Шляхом тестових розрахунків було визначено, що коефіцієнт $\alpha = 0,2$, дозволяє моделювати "проковзування" палі та запобігти її фіксації з ґрунтом.

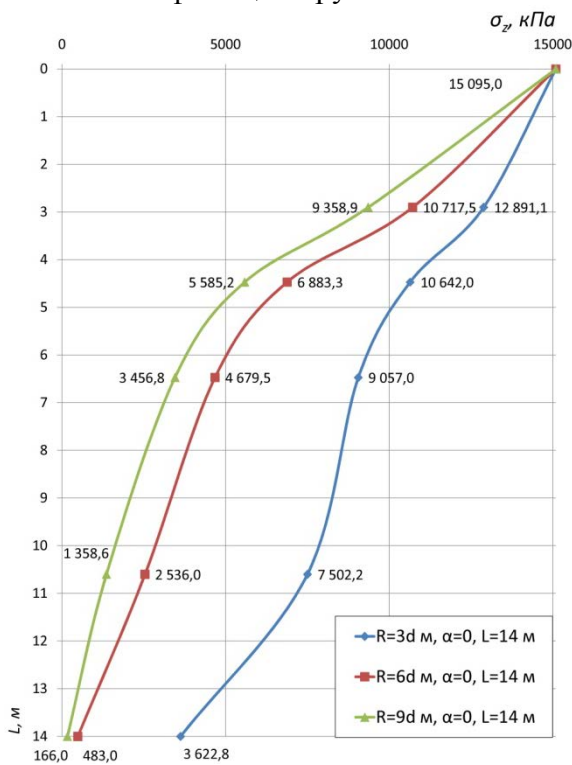


Рис. 5. Поздовжні напруження в палі в випадку "ідеального" контакту

З рисунків 5, 6 видно, як впливає відстань між палями на розподіл поздовжніх напружень у палі. Зі збільшенням відстані між палями напруження під нижнім торцем палі зменшуються, і навпаки, бо дотичні напруження вздовж палі розподіляються раціонально. Різкі зміни (стрибки) з'являються на межах геологічних шарів. Інтенсивність загасання поздовжніх напружень в палі за відстані між ними в 3 d суттєво відрізняється від 6 і 9 d, після 6 d загасання

поздовжніх напружень має одноманітний характер.

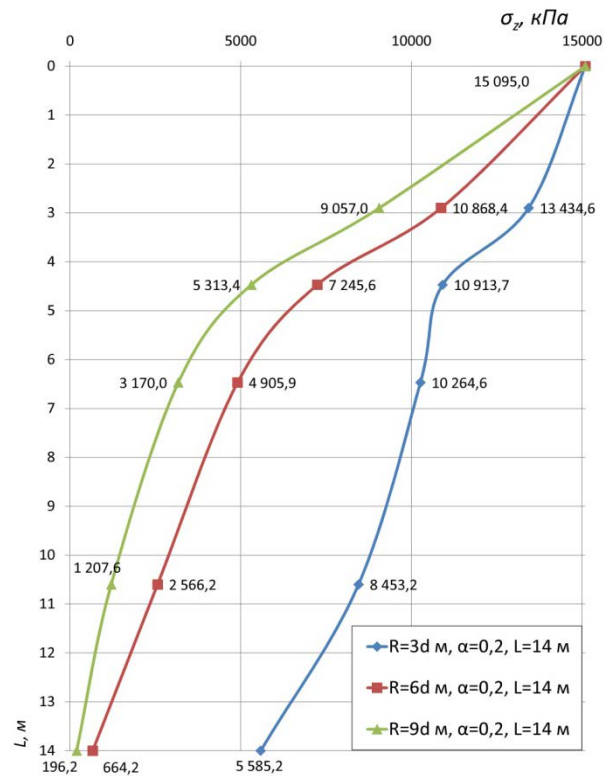


Рис. 6. Поздовжні напруження в палі у випадку "неідеального" контакту

Результати досліджень та їх апробація. Для оцінювання НДС основ пальових фундаментів застосовувався аналітичний підхід, зокрема, асимптотичний метод.

Дослідження дотичних і поздовжніх напружень уздовж усієї довжині палі та під нижнім торцем показали, що на їх поширення суттєво впливають нашарування в складі ґрунтової основи та відстань між палями.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів досліджень доведено застосуванням загальноприйнятих теоретичних положень і добре випробуваних методів наукових досліджень, а також узгодженням із результатами натурних і чисельних експериментів [8], апробованими числовими та аналітичними даними, виконаними іншими вченими [9].

Розрахунковий опір під нижнім торцем палі, отриманий в ПС Maple, дорівнює 41,6 кН, що складає 1,3 % від загального навантаження 3 200 кН, прикладеного до палі. У праці [8] наведено дані числового

розв'язання цієї задачі в ПК Plaxis 3D, та їх порівняння з натурним експериментом. Розрахунковий опір під нижнім торцем палі, отриманий в ПК Plaxis 3D дорівнює 134 кН, що складає 4,8 % від загального навантаження 3 200 кН.

Методику розрахунку асимптотичним методом порівняно з апробованими аналітичними розв'язками подібних задач для двошарової основи ПК MathCAD, виконаними представниками московської геотехнічної школи, зокрема проф. З. Г. Тер-Мартirosяном та його учнями (МГСУ).

Для цього в PC Maple змодельовано і розв'язано задачу зі статичного навантаження палі, за такими даними $l = 25$ м; $a = 0,05$ м; $b = 6$ а; $G_1 = 3,7$ МПа; $G_2 = 18,5$ МПа; $\nu_1 = \nu_2 = 0,35$; $k_e = 0,78$ [9]. Результати аналітичного розв'язку для пружно-пластичної основи під нижнім торцем палі, залежності $R=f(N)$ і $V=f(N)$, з урахуванням пружно-пластичних властивостей ґрунтового масиву, матимуть вигляд, показаний на рисунку 7.

Порівняння отримало задовільну збіжність. В PC Maple розрахунковий опір під нижнім торцем палі складає 3,4 % від загального навантаження, в ПК MathCAD опір під нижнім торцем палі складає 1,8 %.

Висновок. У результаті проведеного дослідження зроблено такі висновки:

1. Удосконалено аналітичний підхід, зокрема асимптотичний метод, для оцінювання НДС основ палевих фундаментів.

2. Створено нову методику диференційованого визначення дотичних і поздовжніх напружень уздовж усієї довжині палі та під нижнім торцем у багатошарових основах за статичного навантаження палі, залежно від відстані між палями.

3. Досліджено вплив "ідеального" і "неідеального" контакту на межі "паля – ґрунтова основа", підібрано її оптимальну товщину (значення коефіцієнта зниження міцності α) для розв'язання поставленої задачі.

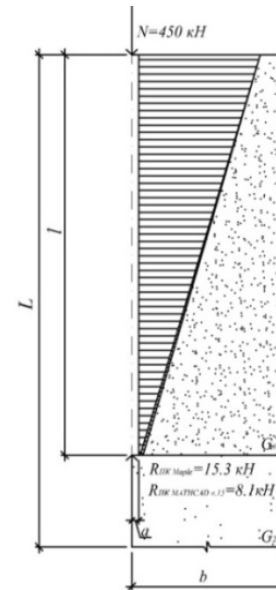


Рис. 7. Епюри розподілу осьових зусиль в стовбурі палі по її довжині (за езультами аналітичних рішень в ПК MathCAD в PC Maple): L – глибина розрахункової області (ґрунтової комірки); l – довжина палі; a – радіус палі; b – радіус ґрунтової комірки; N – зусилля на палю; R – зусилля на п'яті палі за результатами розрахунку в ПК MathCAD і PC Maple відповідно; G_1 , G_2 – модуль зрушення верхнього і нижнього ґрунтового шару

4. Результати розрахунків асимптотичним методом апробовано шляхом узгодженням з результатами натурних і числових експериментів та порівняння з відомими аналітичними методами розв'язання подібних задач.

5. Загалом можна зазначити, що наведена методика диференційованого визначення дотичних і поздовжніх напружень уздовж усієї довжині палі та під нижнім торцем дозволяє підібрати оптимальну довжину палі, за якої поздовжні зусилля в палі будуть розподілятися раціонально, що дозволить уникнути ділянки бічної поверхні палі, яка не задіяна в розподілі навантаження, та запобігти витратам матеріалу на її влаштування.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Андрианов И. В. Асимптотические методы в строительной механике тонкостенных конструкций / Андрианов И. В., Нерубайло Б. В., Образцов И. Ф. – Москва : Машиностроение, 1991. – 416 с.
2. Андрианов И. В. Асимптотическое определение эффективного коэффициента теплопроводности свайного поля / И. В. Андрианов, Г. А. Старушенко, В. В. Данишевский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1999. – № 1. – С. 26–29.
3. Винников Ю. Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі : монографія / Ю. Л. Винников. – Полтава : ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2004. – 237 с.
4. Данишевський В. В. Асимптотичні розв'язки задач мікромеханіки композитних матеріалів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.17 "Будівельна механіка" / В. В. Данишевський ; ПДАБА. – Дніпропетровськ, 2008. – 32 с.
5. Маневич Л. И. Асимптотические методы в теории упругости ортотропного тела / Л. И. Маневич, А. В. Павленко, С. Г. Коблик. – Киев ; Донецк : Вища школа, 1982. – 153 с.
6. Павленко А. В. Передача нагрузки от стержня к упругому анизотропному пространству / Павленко А. В. // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1981. – № 6. – С. 103–111.
7. Павленко А. В. Применение асимптотического метода к пространственной задаче теории упругости для композиционных материалов / Павленко А. В. // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1980. – № 3. – С. 50-61.
8. Седин В. Л. Применение модели упрочняющегося грунта в численном моделировании буринъекционной сваи большого диаметра / В. Л. Седин, Е. М. Бикус, В. В. Ковба // Геотехника. – 2014. – № 3. – С. 32-40.
9. Тер-Мартirosян З. Г. Взаимодействие свай с двухслойным основанием при статическом и циклическом воздействии с учетом нелинейных свойств / З. Г. Тер-Мартirosян, Е. С. Соболев, А. З. Тер-Мартirosян // Инженерная геология. – 2014. – № 4. – С. 49–55.
10. Тер-Мартirosян З. Г. Напряженно-деформированное состояние в грунтовом массиве при его взаимодействии со свайей и фундаментом глубокого заложения / З. Г. Тер-Мартirosян // Вестник МГСУ. Механика грунтов. Основания и фундаменты. – Москва, 2006. – № 1. – С. 38-49.
11. Тер-Мартirosян З. Г. Напряженно-деформированное состояние нелинейно деформируемого грунтового массива вмещающего длинную сваю / З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, Е. С. Соболев // Материалы XIII Международного симпозиума по реологии грунтов. Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения. – Казань, 2012. – С. 48–52.
12. Улицкий В. М. Гид по геотехнике (путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям) / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин, К. Г. Шашкин. – Санкт-Петербург : Геореконструкция, 2012. – 288 с.
13. Andrianov I. V. Load-transfer from fibres to a transversally isotropic layer for non-dilute composites / I. V. Andrianov, V. V. Danishevs'kyy, D. Weichert // Acta Mechanica. – 2010. – Vol. 212.– P. 115–122.
14. Andrianov I. V. Boundary layers in fibrous composite materials / I. V. Andrianov, V. V. Danishevs'kyy, D. Weichert // Acta Mechanica.–2011. – Vol. 216.–P. 3–15.
15. Crighton D. G. Asymptotics – an indispensable complement to thought, computation and experiment in Applied Mathematical modeling / Crighton D. G. // Proc. 7th European Conference on Mathematics in Industry / eds. A. Fasano, M. B. Primicerio. – Stuttgart, 1994. – P. 3–19.
16. Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvement / B. Simon [a. oth.]. – Paris : Presses des Ponts, 2013. – 383 p.

REFERENCES

1. Andrianov I.V. *Asimptoticheskie metody v stroitel'noy mekhanike tonkostennykh konstruksiy* [Asymptotic methods in structural mechanics of thin-walled structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1991. 416p. (in Russian).
2. Andrianov I. *Assimptoticheskoe opredelenie effektivnogo koeffitsienta teploprovodnosti svainogo polya* [Asymptotic definition of the effective thermal conductivity of the pile field]. *Osnovaniya i fundamenti i mekhanika gruntov* - Base, foundation and soil mechanics. 1999. no. 1. pp. 26-29. (in Russian).
3. Vinnikov YU.L. *Matematychnе modeliuвання vzaemodii fundamentiv z ushchilnenymy osnovamy pry ihzvedenni ta nastupniy roboti* [Mathematical modeling of the foundations of condensed basis for their construction and next work]. *monografiya-monography*, Poltava , PNTU named after Yuriy Kondratyuk, 2002. 37p. (in Ukrainian).
4. Danishevskiy V.V. *Asimptotychni rozv'iazky zadach mikromekhaniky kompozytnyh materialiv* Dokt, Diss. [Asymptotic solution of tasks micromechanics of composite materials. Dokt, Diss.]. Dnipropetrovsk, 2008. 32 p. (in Russian).
5. Manevich L.I. *Assimptoticheskie metody v teorii uprugosti ortotropnogo tela* [Asymptotic methods in the theory of elasticity orthotropic body]. Kiev, Donetsk, Vysha shkola, 1982. 153 p. (in Russian).

6. Pavlenko A.V. *Peredacha nagruzki ot sterzhnyaak uprugomu anizotropnomu prostranstvu* [Load transfer from the rod to the elastic anisotropic space]. *Izvestiya AN SSSR Mekhanika tverdogo tela* – Proceedings of AN USSR Mechanics of rigid body. 1981, no. 6., pp.103-111. (in Russian).
7. Pavlenko A.V. *Primenenie asimptoticheskogo metoda k prostranstvennoy zadache teorii uprugosti dlya kompozitsionnykh materialov* [Asymptotic method for three-dimensional problem of elasticity theory for composite materials]. *Izvestiya AN SSSR Mekhanika tverdogo tela* –Proceedings of AN USSR Mechanics of rigid body 1980, no. 3., pp.50-61. (in Russian).
8. Sedin L.V. Bikus E.M. Kovba V.V. *Primenenie modeli uprochnyayushchego grunta v chislenom modelirovanii buroieksionnoy svai bol'shogo diametra* [Application hardening soil model in the numerical simulation of CFA piles of large diameter]. *Geotekhnika* –Geotechnics, 2014, no.3, pp. 32-40. (in Russian).
9. Ter-Martirosyan Z.G.Sobolev E.S. *Vzaimodeistvie svai dvukhsloinym osnovaniem osnovaniem pri staticheskom i tsiklicheskom vozdeistvii s uchetom nelineynykh svoystv* [The interaction of the pile with a two-layer foundation under static and cyclic exposure with the nonlinear properties]. *Inzhenernaya geologiya* - Engineering geology, 2014, no.4, pp.49-55. (in Russian).
10. Ter-Martirosyan Z.G *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie v gruntovom massive pri ego vzaimodeistvii so svaiy i fundamentom glubokogo zalozheniya* [Stress-strain state in the soil massif and its interaction with the pile and deep foundations]. *Vesnik MGSU. Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty* - Bulletin MSCU. Soil mechanics. Foundations. Moscow, 2006, no.1, pp.38-49. (in Russian).
11. Ter-Martirosyan Z.G Ter-Martirosyan E.S. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie nelineino deformiruemogo gruntovogo massiva vmeshchayushchego dlinnuyu svayu* [Stress-strain state of nonlinear deformable soil mass enclosing a long pile]. *Materialy XIII Mezhdunarodnogo simpoziuma po reologii gruntov .Dostizheniya,problemy i perspektivnye napravleniya razvitiya dlya teorii i praktiki mekhaniki gruntov i fundamentostroenie* - Proceedings of XIII International symposium on rheology ground. Achivment, problems and prospects for development of the theory and practice of soil mechanics and foundation engineering. Kazan', 2012, pp.48-52. (in Russian).
12. Ulitskiy V.M. Shashkin A.G. Shashkin K.G. *Gid po getekhnike (putevoditel' po osnovaniyam, fundamentam i podzemnym sooruzheniyam)* [Guide geotechnics (guide on foundations and underground structures)]. Sankt-Peterburg, Georekonstruktsiya, 2012, 288 p. (in Russian).
13. Andrianov I. V. Load-transfer from fibres to a transversally isotropic layer for non-dilute composites. *Acta Mechanica*. 2010,vol. 212. pp. 115-122.
14. Andrianov I. V. Danishevskiy V. V., Weichert D. Boundary layers in fibrous composite materials *Acta Mechanica*.2011,vol. 216, pp.3-15.
15. Crighton D. G. Asymptotics – an indispensable complement to thought, computation and experiment in Applied Mathematical modeling. Proc. 7th European Conference on Mathematics in Industry, eds. A. Fasano, M. B. Primicerio. Stuttgart, 1994, pp. 3-19.
16. Simon B. Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvement. Paris, Presses des Ponts, 2013. – 383 p.

Стаття рекомендована до друку 16.02. 2015 р. Рецензент: д. т. н., проф. В. Л. Красовський.
 Надійшла до редколегії 12.02. 2015 р. Прийнята до друку 19.02. 2015 р.