

**ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ІСНУЮЧИХ ПРОГРАМНИХ
КОМПЛЕКСІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ
БУРОНАБИВНОЇ ПАЛІ З РОЗШИРЕННЯМ В ЛЕСОВИХ ҐРУНТАХ,
ЩО ПРОСІДАЮТЬ ПІД ДІЄЮ ВЛАСНОЇ ВАГИ**

М.В. Корнієнко, Д.А. Карпенко

В Україні будівництво на лесових ґрунтах в більшості випадків ведеться на палихих фундаментах. Це пов'язано з суттєвим збільшенням ваги будівель і споруд у новому будівництві, необхідністю проведення реконструкції та перенесенням ділянок забудови в райони щільної міської забудови. Незважаючи на це, стан проектування таких будівель при влаштуванні буронабивних палей з розширенням на просідаючих ґрунтах до цього часу багато в чому є невизначеним. До таких факторів можна віднести: швидкість прикладання навантаження за час зведення будівель, характер замочування ґрунтової основи, вплив технології влаштування палей. Потребують уточнення і розрахункові значення опору ґрунту по бічній поверхні стовбура буронабивних палей в лесових ґрунтах, з врахуванням роботи розширення, формування напружено-деформованої зони навколо одиночної палі та групи палей в фундаменті.

Перспективним шляхом дослідження напружено-деформованого стану (НДС) системи "палей – просідаюча основа" є використання методів математичного моделювання на основі чисельних методів аналізу – методу скінчених елементів (МСЕ).

В області геотехніки на теперішній час найбільш відомі наступні сучасні програмні комплекси: 3D Z-soil (Швейцарія), АСНД VESNA, VSEM, PRIZ-Pile, Lira – 9.4, SCAD 11.1 (Україна), ANSYS, SAGE CRISP, NASTRAN (США), CivilFEM (Іспанія, США), Plaxis (Нідерланди), GGU-Allpile (Германія), MicroFe, STARK (Росія), Diana (Голландія) та ін., які дають можливість аналізувати роботу навколопальнової основи за різними лінійними і нелінійними моделями ґрунтового середовища. Вони відрізняються інтерфейсом, функціональними можливостями, бібліотеками кінцевих елементів та орієнтацією на певний клас задач.

Всі вищезгадані та інші програми розрахунку включають фізичні рівняння або моделі матеріалу, які і визначають поведінку конструкції в процесі її навантаження. Зокрема, програми ANSYS і LS-DYNA на теперішній час містять біля 200 типів моделей ґрунтів. В таблиці 1 [1] приведені моделі ґрунтів, які входять у сучасні пакети відомих програм розрахунку. Ці моделі містять параметри або константи, які необхідно вводити в програму при виборі того чи іншого типу матеріалу. В залежності від типу моделі матеріалу кількість введених параметрів змінюються від 3-х при пружній поведінці матеріалу і до 18-ти при не пружній поведінці матеріалу.

На основі аналізу чисельних програмних комплексів зроблено висновок, що для моделювання замочування просідаючої основи, вони не всі забезпечують можливість моделювати вплив порової води, що в значній мірі може впливати на зміну НДС навколо стовбура палі з розширеною п'ятою в просідаючому ґрунті. Наприклад, тільки в програмних комплексах Plaxis, Ansys/CivilFEM та SAGE CRISP – можна в розрахунках задавати практично будь-яку закономірність розвитку фронту замочування ґрунтової основи (розподілення напружень від власної ваги води, часу та швидкості замочування, використання різних коефіцієнтів фільтрації та ін.), а більшість інших вищезгаданих комплексів дозволяють тільки моделювати вплив ґрунтової води лише з заміною фізико-механічних характеристик ґрунту природного стану відповідно на водонасичений стан (показники E_{sat} , c_{sat} , φ_{sat} , ρ_{sat} , v_{sat}), що не дозволяє прогнозувати зміну НДС при поступовому водонасиченні ґрунту. Але, не тільки можливості програмного комплексу можуть дати змогу аналізувати процес просідання лесового ґрунту, а і відмінність пружно-пластичних моделей, які використовують ці комплекси (Кулона-Мора, Друкера-Прагера, Мізеса, Дункана-Ченга, Сам-Клей, Крієг та ін.). Тобто, потрібне проведення аналізу результатів розрахунку задачі з використанням різних моделей ґрунтів, для виявлення таких наближених значень, що відповідають даним експериментальних досліджень.

На основі проведених натурних випробувань палей з розширенням статичним стискувачим і висмикувачими навантаженнями на будівельних майданчиках в м. Запоріжжя [2, 3] були проведені

дослідження НДС паль в лесових просідаючих ґрунтах великої товщі при різних умовах роботи палі (поступовому водонасиченні, технології етапів влаштування, поступового навантаження та ін.) з використанням чисельних методів розрахунку в програмних комплексах Ansys та Plaxis [2, 3, 4].

Таблиця 1

Основні моделі ґрунтів

| Типи моделей | Програмні комплекси | | | | | | |
|------------------|-------------------------------|---|--|---|---|-----------------|--------------------------|
| | ABAQUS | ANSYS | LS-DYNA | CRISP | PLAXIS | Z-SOIL | |
| Деформаційні | Нелінійно-пружна (Мізеса) | Нелінійно-пружна (Мізеса, Друкера-Прагера) | Нелінійно-пружна (Krieg) | Дункана-Ченга | Модифікована Дункана-Ченга | Пружна | |
| Пружно-пластичні | Модернізована Друкера-Прагера | Пружно-ідеально-пластична (Друкера-Прагера) | Сар (Друкера-Прагера) | Пружно-ідеальнопластична (Мізеса, Треска, Друкера-Прагера, Кулона-Мора) | Кулона-Мора | Кулона-Мора | |
| | Модернізована Кулона-Мора | | | Модернізована пружно-ідеальнопластична (Кулона-Мора) | Сар (Кулона-Мора) | Друкера-Прагера | |
| | Сар (Друкера-Прагера) | | Пружно-ідеальнопластична (Друкера-Прагера) | Пружно-ідеальнопластична (Друкера-Прагера) | Пружно-пластична з зміцненням (Кулона-Мора) | Soft-Soil | Сар (Друкера-Прагера) |
| | Модернізована Cam-Clay | | | | Cam-Clay | | Модифікована Кулона-Мора |
| | | | | | Трьох-поверхнева з кінематичним зміцненням | | Модифікована Cam-Clay |
| | | | | | | | |

При моделюванні були використані нелінійні моделі "Cam-Clay", Кулона-Мора (Plaxis) та Друкера-Прагера (Ansys).

Модель "Cam-Clay" (в Plaxis названа моделлю слабких ґрунтів Soft Soil Model), яка базується на концепції критичного стану ґрунту (або КС-моделі) – відносно нова група моделей, оснований на закономірностях поведінки ґрунту при зрізі, в частковості зміни його щільності від початкової до критичної. На теперішній час найбільш відомі дві схеми цих моделей. Перша (моделі В.М. Ніколаєвського, "Cam-Clay" Скофільда-Рота і К. Роско та ін.), коли в розрахунок пружно-пластичних деформацій вводять залежність між швидкістю зміни об'єму і механічними характеристиками ґрунтів. В систему вирішуючих рівнянь включають: диференціальне рівняння рівноваги; рівняння граничної рівноваги; залежність, яка корегує механічні властивості ґрунтів при пластичних деформаціях.

Друга схема (А. Казагранде, М.Н. Гольштейна, А.М. Рижова, Д. Ю. Соболевського), коли механічні властивості ґрунту визначаються відповідно зафіксованими в даний момент часу значеннями щільності природного складу і критичної щільності. Перевага КС – моделей – в можливості описання з'єднаних позицій як зміцнення, так і розміцнення ґрунтів при деформуванні, а також розвинутої течії глинистих ґрунтів.

КС – моделі розвивались І.П. Бойко, М.Н. Гольштейном, В.Н. Николаєвським, А. Казагранде, А.А. Петраковим, С.Ф. Клованіч, А.С. Моргун, А.М. Рижовим, Д. Ю. Соболевським, А.Б. Фадеевим та іншими. В частковості, різновид модифікованого "Cam-Clay" – "Continuous plasticity" дозволяє враховувати до граничну пластичність [5]. Удосконалений варіант даної моделі складає у собі моделювання вторинного ущільнення ґрунту (при повзучості). Для моделювання більш твердих ґрунтів, таких як, переущільнена глина й пісок, є гіперболічна модель пружно-пластичного типу за назвою Hardening Soil Model.

Ці моделі широко використовуються за кордоном при оцінці сейсмічних впливів на ґрунти. Основним недоліком моделей даної групи є складність визначення вихідних параметрів і неможливості описання порового тиску в процесі не дренажного навантаження. Останнє було включено в модифіковану Cap модель (Sandler I., 1984, рис. 1).

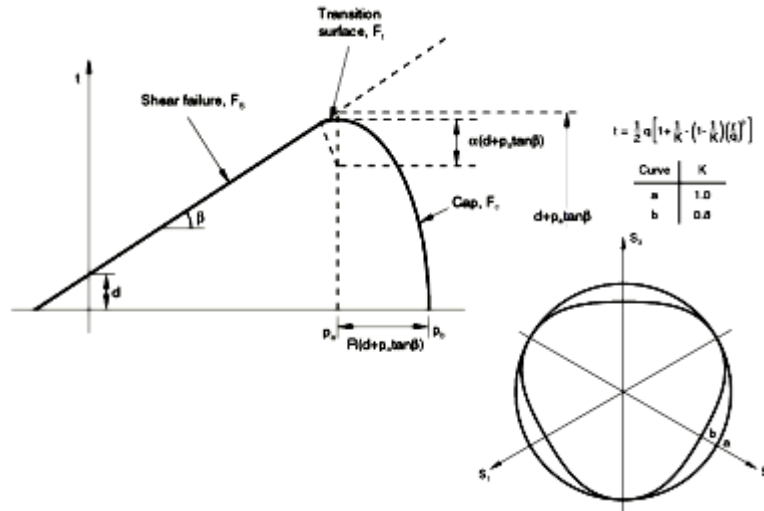


Рис. 1. Модель CAP (розрахунковий комплекс ABAQUS)

Логарифмічні параметри, такі як $\lambda, \lambda^*, k, k^*, c_c, c_r, c_s \sim c_a, c'_p, c'_s$ визначаються з результатів випробувань представлених залежностями коефіцієнта пористості e або об'ємної деформації e_v щодо натурального логарифма тиску p .

Коефіцієнт компресії λ є нахилом компресійної кривої за тиском попереднього ущільнення. Коефіцієнт декомпресії k є нахилом компресійної кривої при розвантаженні ґрунту.

За моделлю ґрунту Cam-Clay (рис. 2) криві компресії й декомпресії збігаються і тому їхній кут нахилу визначається одним параметром. Однак, компресійні випробування показують значне розходження між кривими компресії й декомпресії (рис. 3), особливо коли рівняються перші ділянки кривої компресії (декомпресія до тиску попереднього ущільнення) з лінією розвантаження.

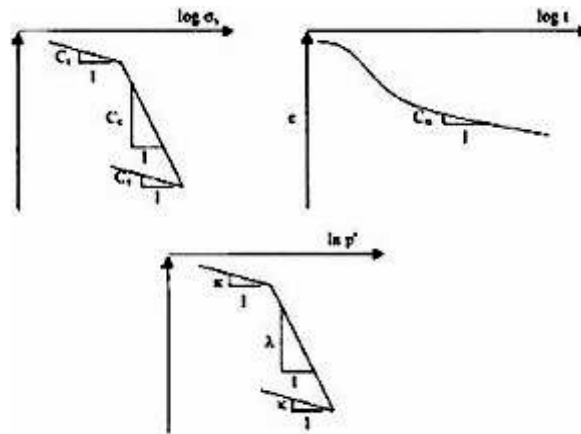


Рис. 2. Параметри, які використовуються в моделі ґрунту Cam Clay

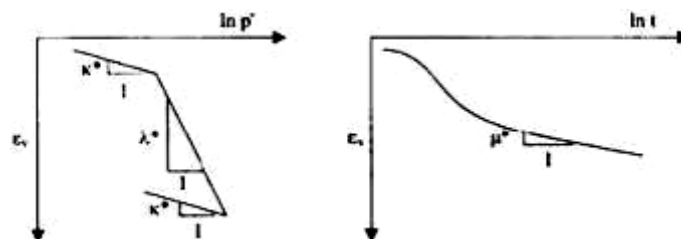


Рис. 3. Параметри, які використовуються в моделі ґрунту Soft Soil Creep (Plaxis)

За результатами розрахунку з використанням моделі "Cam-Clay" в описанні НДС водонасичених глинистих ґрунтів при влаштуванні буронабивної палі з розширенням призводить до певного протиріччя з дійсністю, які спостерігаються в натурі. Різниця результатів з натурними випробуваннями становить 20...25%. Це пов'язано за рахунок різниці методик визначення інженерно-геологічними вишукуваннями параметрів характеристик ґрунтів за кордоном, які використовуються в цій моделі (параметр λ^* , k^* та ін.). Модель "Cam-Clay" найбільш досконала для деяких типів задач, особливо для глинистих водонасичених ґрунтів та потребує більш точного аналізу для використання її на нашій практиці.

Пружно-пластична модель, яка побудована на основі теорії міцності Кулона-Мора показала більш наближені результати розрахунку до натурних випробувань палей в цих ґрунтових умовах – 3...6%, що підтверджується багатьма дослідниками [6, 7]. Із вхідних основних 5-ти параметрів практично всі відомі й доступні з інженерно-геологічних вишукувань (E , ν , φ , c , ψ).

В умовах міцності Кулона-Мора не враховується вплив середнього головного напруження на міцність матеріалу. Цей недолік вперше був врахований у роботі Друкера-Прагера (1952), де було введено залежність від середнього напруження в умову міцності Мізеса. Поверхня текучості, яка відповідає умові міцності Друкера-Прагера показана на рис. 4 і являє собою правильний конус відносно осі гідростатичного тиску, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Основні вхідні константи моделі Друкера-Прагера – E , ν , φ , c , ψ . За результатами моделювання різниця з експериментальними випробуваннями складала 7...10%.

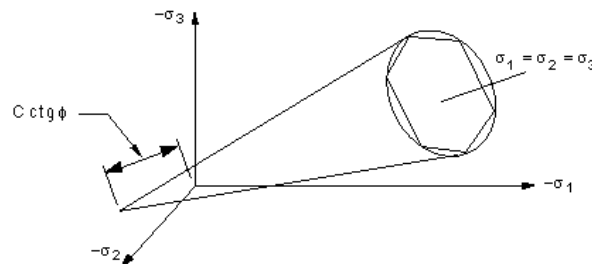


Рис. 4. Поверхня руйнування для моделі Друкера-Прагера

Механіка ґрунтів володіє моделями для розрахунку осідань в часі, але відсутність реологічних параметрів ґрунтів в практиці вишукувань виключає можливість таких розрахунків на практиці.

Існує багато інших моделей механічної поведінки ґрунту під навантаженням, кожна з яких має свої переваги і недоліки. Жодна із розглянутих або не відображених тут моделей не є універсальною і знаходить використання лише для тих або інших конкретних типів ґрунтів.

Висновки

- Складність розв'язання задач полягає не лише в створенні або використанні відповідного програмного комплексу, а насамперед в прийнятті обґрунтованої фізичної моделі, що коректно описує нелінійні процеси деформування просідаючої основи, у виборі розрахункової схеми та реалізації алгоритмів розрахунку, які забезпечують достовірність результатів розрахунку в порівнянні з експериментальними випробуваннями.
- Основним недоліком більшості спрощених моделей, які застосовуються у розрахунковій практиці, є те, що використовувані в них параметри не завжди вдається одержати з фізико-механічних характеристик ґрунтів основи. Також, ускладнюється ситуація відсутністю універсального методу чи моделі, які можна застосовувати до будь-якого ґрунтового середовища.
- Для використання сучасних нелінійних моделей механіки ґрунтів, нам необхідно враховувати методи та рекомендації Єврокод-7 при визначенні параметрів властивостей ґрунтів.
- Одночасно з цим, досить важливим питанням є розрахунок несучих конструкцій будівлі з врахуванням сумісної роботи з ґрунтовою основою. Це призводить до більш точнішого моделювання НДС як ґрунтової основи, так і над фундаментних конструкцій. Як жорсткість будівлі впливає на НДС і осадки основи, так і нелінійні властивості основи впливають на

перерозподілення зусиль у над фундаментних конструкціях. Тому, важливий взаємозв'язок між розрахунковою моделлю будівлі і розрахунковою моделлю ґрунтової основи.

Список літератури

1. Валеев Д.Н. Определение параметров моделей грунтов [Электронный ресурс] / Валеев Д.Н., Идрисов И.Х., Болдырев Г.Г. // публикации / статьи. – Режим доступа до статті : http://www.geotek.ru/publications/articles/params_estimation/index.php?phrase_id=18704
2. Корнієнко М.В. Розвиток методів проектування паль з розширенням в лесових ґрунтах, що просідають / М.В. Корнієнко, Д.А. Карпенко // Збірник наукових праць Полтавського національного університету імені Юрія Кондратюка; Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – вип. 19. – 2007. – С. 71-79.
3. Корнієнко М.В. Несуча здатність буронабивних паль з розширенням в лесових ґрунтах за результатами статичних випробувань / М.В. Корнієнко, Д.А. Карпенко // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, вип. 31, 2008. – С. 54-63. – ISSN 0475-1132.
4. Карпенко Д.А. Дослідження несучої здатності палі в лесових ґрунтах в залежності від виду замочування ґрунтової основи / Карпенко Д.А. // Современные проблемы строительства. – 2005. – № 3 (8). – С. 165-173.
5. Хазин С.В. Свайные анкеры для закрепления нефтегазовых трубопроводов: Монография / Хазин С.В., Хазин В.И., Винников Ю.Л. – Полтава ПНТУ, 2005. – 252 с.
6. Бойко И.П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов при упругопластическом деформировании основания / Бойко И.П. // Основания и фундаменты: Респ. межвед. науч.-техн. сб. вып. 18. – К. : Будівельник, 1985. – С. 11-17.
7. Сахаров В.О. Математична модель нелінійної ґрунтової основи в умовах прибудови / Сахаров В.О. // Основи і фундаменти. Міжвід. наук.- техн. зб. КНУБА вип. 29. – 2005. – С. 12-16. – ISBN 996-8638-02-06.
8. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / Фадеев А.Б. – М. : Недра, 1987. – 221 с.

Корнієнко Микола Васильович – канд. техн. наук, професор кафедри основ та фундаментів Київського національного університету будівництва та архітектури.

Карпенко Д.А. – аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури.