

УДК 624.131:004.942

О. А. Овчаренко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1906-7021>

Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

В. С. Фітаров*

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0478-3893>

Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: fitarov24@gmail.com

Порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання

Цитувати як:

Овчаренко, О. А., Фітаров, В. С. (2026). Порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 197-212. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-15)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

У статті розглянуто питання вибору універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю врахування просторової роботи ґрунтового масиву, стадійності будівництва, контактної взаємодії, фільтраційних процесів і нелінійної поведінки ґрунтів. Метою роботи є порівняльний аналіз універсальних програмних комплексів для геотехнічного моделювання та визначення їх порівняльної придатності для типових задач геотехнічного проектування і задач підвищеної інженерної складності. Систематизовано основні групи програмного забезпечення: універсальні геотехнічні програмні комплекси, універсальні програмні комплекси чисельного моделювання загального призначення та вузькоспеціалізовані програми. Для детального порівняння обрано PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil та Abaqus. Оцінювання виконано за п'ятьма критеріями: бібліотека моделей ґрунту, моделювання фундаментних систем, підтримка стадійності, автоматизація розрахунків і обробки результатів, стабільність розрахунку та контроль збіжності. Найвищий сумарний показник отримав PLAXIS 3D, який має найбільш збалансовані можливості для інженерного геотехнічного моделювання. Високу придатність також показав MIDAS GTS NX, особливо для фундаментних систем і стадійних задач. FLAC3D доцільний для задач із вираженою нелінійністю, великими деформаціями та геомеханічними особливостями. ZSoil забезпечує достатній інструментарій за умови контролю чисельної постановки. Abaqus є ефективним для нестандартних

контактних і дослідницьких задач, однак потребує більшої методичної підготовки. Отримані результати можуть бути використані при виборі програмного комплексу для моделювання основ, фундаментів і систем «грунт-конструкція».

Ключові слова: взаємодія «грунт-конструкція», моделі ґрунтів, палі, комбінований пальово-плитний фундамент, PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У сучасному геотехнічному проектуванні зростає потреба у розрахункових підходах, здатних враховувати неоднорідність ґрунтового масиву, нелінійну поведінку ґрунтів, контактну взаємодію, фільтраційні процеси, стадійність будівництва та просторову роботу системи «грунт-конструкція» [1]. Особливо актуальним це є для фундаментів мостових споруд, які працюють в умовах значних вертикальних, горизонтальних і моментних навантажень, а також підвищених вимог до обмеження осідань і нерівномірних деформацій [2].

Традиційні інженерні методи розрахунку, що базуються на спрощених розрахункових схемах, не завжди дозволяють достатньо повно врахувати зазначені чинники. Тому для аналізу плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів дедалі ширше застосовуються чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів і метод скінченних різниць [3, 4]. Коректне моделювання таких систем потребує не лише вибору відповідної розрахункової схеми, але й обґрунтованого вибору програмного забезпечення (ПЗ).

На практиці використовується значна кількість ПЗ, які відрізняються за своїм призначенням та придатністю до виконання різних типів задач. За відсутності єдиних критеріїв порівняння вибір ПЗ часто залежить від доступності програми, досвіду користувача або особливостей окремої задачі, що ускладнює об'єктивну оцінку його інженерної придатності.

У зв'язку з цим актуальним є порівняльний аналіз найбільш поширених програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання за єдиною системою критеріїв. Це дозволяє оцінити їх придатність для типових задач геотехнічного проектування і задач підвищеної інженерної складності.

Мета і завдання дослідження. Метою даної статті є виконання порівняльного аналізу універсальних програмних комплексів для геотехнічного чисельного моделювання та формування практичних рекомендацій щодо їх застосування для типових задач геотехнічного

проектування і задач підвищеної інженерної складності. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- визначити критерії порівняння функціональних можливостей програмних комплексів;
- сформулювати перелік найбільш поширених програмних комплексів для геотехнічного аналізу;
- сформулювати перелік із п'яти універсальних програмних комплексів для подальшого порівняльного аналізу;
- виконати порівняння та аналіз обраних програмних комплексів за визначеними критеріями.

Матеріали та методи

У межах даної роботи програмні комплекси порівнюються за п'ятьма критеріями, що характеризують їх придатність до розв'язання задач геотехнічного проектування:

1) бібліотека моделей ґрунту та керованість їх параметризації. Оцінюються повнота набору моделей, можливість відтворення нелінійної деформованості, розвантаження і повторного навантаження, дренажної та недренажної поведінки, зв'язаних постановок з урахуванням порового тиску і фільтрації тощо;

2) можливості моделювання фундаментних систем. Порівняння виконується за придатністю до розрахунку плитних, паливових і комбінованих паливо-плитних фундаментів, а також за можливістю отримання проектно значущих результатів: осідань, нерівномірності деформацій, контактних тисків, реакцій і зусиль у палях та плиті тощо;

3) стадійність, тобто можливість відтворення будівельно-технологічної послідовності з перенесенням напружено-деформованого стану між етапами. Оцінюються активація та деактивація частин моделі, зміна навантажень і граничних умов, формування початкового напруженого стану та врахування часових ефектів;

4) автоматизація розрахункового моделювання та обробки результатів. Оцінюються програмне керування моделлю, запуск серій варіантних розрахунків, контроль перебігу обчислень і вилучення результатів у порівнюваному форматі;

5) стабільність чисельного розрахунку та контроль збіжності. Оцінюються керування розрахунковими кроками, критерії збіжності, діагностика причин незбіжності та здатність програмного комплексу виконувати нелінійні розрахунки в задачах із пластичністю ґрунтів, контактною взаємодією і наближенням до граничного стану.

Запропонована методика дозволяє зіставити програмні комплекси за критеріями, що безпосередньо впливають на інженерну придатність,

трудомісткість моделювання, відтворюваність розрахункового процесу та надійність результатів.

Для узагальнення результатів за всіма критеріями використано п'ятибальну шкалу оцінювання:

1) 5 балів – високий рівень придатності за відповідним критерієм, наявність необхідних інструментів і можливість отримання інженерно придатних результатів у типових та ускладнених геотехнічних задачах без суттєвих додаткових методичних процедур;

2) 4 бали – розвинені можливості з окремими обмеженнями або підвищеними вимогами до параметризації, калібрування, контролю збіжності чи чисельної стійкості;

3) 3 бали – достатня, але не повністю інтегрована придатність, що потребує значної участі користувача у формуванні, перевірці та інтерпретації моделі;

4) 2 бали – обмежена придатність, коли можливе лише часткове або спрощене виконання відповідного типу задач;

5) 1 бал – відсутність достатніх інструментів для коректного виконання розрахунків за відповідним критерієм.

Результати та обговорення

У практиці чисельного геотехнічного моделювання доцільно виділяти три групи програмних забезпечень: універсальні геотехнічні програмні комплекси, універсальні програмні комплекси чисельного моделювання загального призначення та вузькоспеціалізовані програми для окремих типів геотехнічних розрахунків.

До найбільш поширених універсальних геотехнічних програмних комплексів належать PLAXIS 2D та PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC та FLAC3D, ZSoil 2D та ZSoil 3D, Rocscience RS2 та RS3, GeoStudio, OPTUM G2 та OPTUM G3. Вони застосовуються для аналізу основ і фундаментів, котлованів (рис. 1), підпірних конструкцій, укосів, підземних споруд, фільтраційних процесів та інших задач взаємодії ґрунтового масиву з інженерними конструкціями [3, 5].

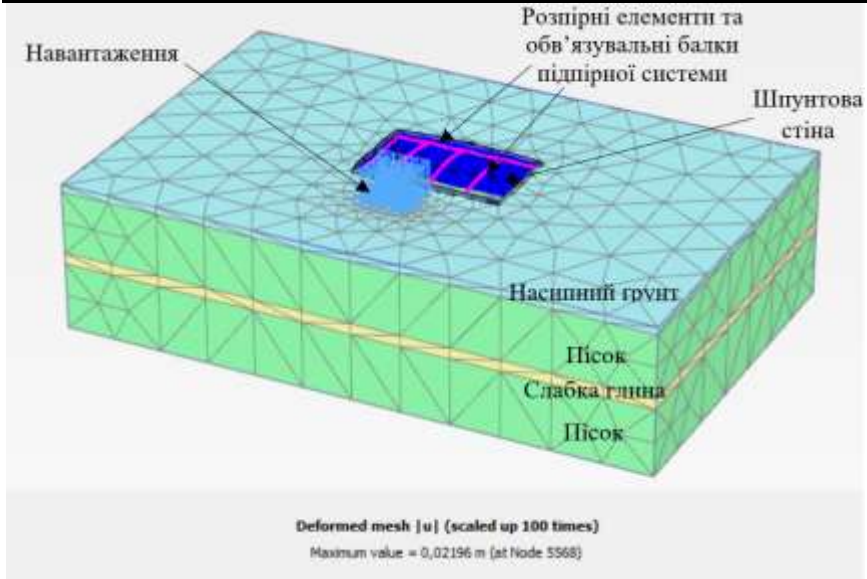


Рис. 1. Скінченно-елементна модель котловану в PLAXIS 3D

Універсальні програмні комплекси чисельного моделювання загального призначення, зокрема Abaqus, ANSYS Mechanical, DIANA FEA та COMSOL Multiphysics, не є суто геотехнічними, однак можуть застосовуватися для геотехнічних постановок за потреби моделювання складної контактної взаємодії, нелінійної поведінки матеріалів, динамічних впливів або зв'язаних фізичних процесів [6]. У вітчизняній проектній практиці також використовують LIRA-FEM (ЛІРА-САПР), SCAD Office та MOHOMAX-САПР, які мають окремі засоби врахування роботи ґрунтової основи. Зокрема, у LIRA-FEM передбачено систему «ГРУНТ». Такі комплекси розглядаються як суміжні інженерні інструменти, а не як повні аналоги універсальних геотехнічних програмних комплексів.

Вузькоспеціалізовані програми орієнтовані на окремі типи геотехнічних розрахунків: аналіз пальових фундаментів, оцінювання стійкості укосів, розрахунок фільтрації, осідань або виконання нормативно орієнтованих перевірок. Прикладами таких програм є LPILE, RSPile, програми GEO5, Slide2, Settle3 та інші [3]. Такі інструменти зручні для локальних інженерних перевірок і попередніх оцінок, однак не замінюють універсальні геотехнічні програмні комплекси, коли необхідно врахувати просторову роботу ґрунтового масиву, взаємний вплив елементів фундаментної системи та поетапність будівництва.

Для подальшого порівняльного аналізу обрано п'ять ПЗ: PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil та Abaqus. PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D і ZSoil репрезентують універсальні геотехнічні ПЗ, тоді як Abaqus включено як універсальне ПЗ чисельного моделювання загального призначення, придатний для нестандартних геотехнічних постановок, зокрема задач зі складною контактною взаємодією або спеціалізованими матеріальними моделями. Вузькоспеціалізовані програми у подальшому порівнянні не розглядаються, оскільки метою є зіставлення саме універсальних інструментів для комплексного просторового моделювання системи «грунт-конструкція».

Порівняння ПЗ за першим критерієм виконано за складом, повнотою та інженерною придатністю бібліотек моделей ґрунту. Враховано орієнтовну кількість штатних моделей, наявність моделей нелінійної деформівності, малих деформацій, критичного стану, консолідації, повзучості, циклічної поведінки, розрідження та скельних масивів, а також можливість підключення користувацьких матеріальних моделей. Кількість моделей є орієнтовною, оскільки залежить від версії ПЗ, рівня ліцензії та способу підрахунку окремих модифікацій.

Найвищу оцінку за цим критерієм отримують PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX – 5 балів. PLAXIS 3D має спеціалізовану геотехнічну бібліотеку, що охоплює близько 14-16 моделей ґрунтів і скельних масивів. До характерних моделей належать Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Hardening Soil small, Modified Cam-Clay, Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, NGI-ADP, UBC3D-PLM, Hoek-Brown і Jointed Rock [7]. Це забезпечує покриття основних інженерних постановок, включно з нелінійною деформівністю, малими деформаціями, консолідацією, розрідженням і роботою скельних масивів. MIDAS GTS NX має понад 20 моделей і модифікацій, зокрема Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hardening Soil small, Modified Cam-Clay, Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, Generalized SCLAY1S, Modified UBCSAND, PM4Sand, Hoek-Brown і Jointed Rock Mass [8]. Порівняно з PLAXIS 3D комплекс має ширший формальний перелік моделей, однак окремі моделі потребують уважної параметризації та перевірки відповідності конкретній геотехнічній постановці.

FLAC3D і ZSoil оцінено на 4 бали. FLAC3D має розвинену бібліотеку вбудованих і додаткових моделей та є сильним у задачах значної нелінійності, великих деформацій, динаміки, скельних масивів і слабких площин. Серед характерних моделей – Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Modified Cam-Clay, Plastic-Hardening, Soft-Soil, Finn, P2PSand, NorSand, Hoek-Brown, Ubiquitous-Joint та IMASS [9]. Нижча оцінка пояснюється тим, що для деформаційних задач фундаментів FLAC3D потребує більшої часті користувача у параметризації моделей та

інженерній інтерпретації результатів. ZSoil має компактнішу, але достатньо повну бібліотеку, що охоплює понад 10 моделей і модифікацій, зокрема Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain, Modified Cam-Clay, Hoek-Brown, Multi-laminate та модель ущільнення для оцінювання розрідження [10]. Основні обмеження – менший обсяг бібліотеки порівняно з PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX та менш виражені можливості її розширення.

Abaqus оцінено на 3 бали. Його бібліотека є загальною бібліотекою матеріалів, тому окремі підрахунок геотехнічних моделей є умовним. Для геотехнічних постановок можуть застосовуватися Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam-Clay та Modified Cam-Clay, моделі повзучості та в'язкопластичності, контактні й когезійні моделі, а також користувацькі матеріальні моделі [11]. Основна перевага Abaqus полягає у гнучкості та можливості реалізації нестандартних матеріальних залежностей. Водночас відсутність повної штатної геотехнічної бібліотеки означає, що для відтворення спеціалізованих геотехнічних ефектів зазвичай потрібні додаткове налаштування, калібрування та верифікація.

У підсумку, за критерієм бібліотеки моделей ґрунту PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX є найбільш інженерно готовими спеціалізованими геотехнічними комплексами. FLAC3D має сильні позиції у задачах значної нелінійності, динаміки та скельних масивів, але потребує ретельнішої параметризації для фундаментних задач. ZSoil займає проміжну позицію, поєднуючи компактну бібліотеку з достатнім набором основних моделей. Abaqus поступається спеціалізованим геотехнічним комплексам за готовністю штатної бібліотеки, але залишається доцільним для нестандартних і дослідницьких постановок.

За другим критерієм оцінювалися можливості ПЗ щодо моделювання фундаментних систем: плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів. У таких задачах одночасно враховуються нелінійна робота ґрунту, взаємодія «ґрунт-конструкція», просторовий перерозподіл напружень і групова робота паль. Для практичного застосування важливими є коректне задання взаємодії між ґрунтом і конструктивними елементами, а також отримання проектно значущих результатів: осідань, реакцій і зусиль у палях, внутрішніх зусиль у плиті, розподілу навантаження між плитою й палями тощо.

Найвищу оцінку за другим критерієм отримують PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX – 5 балів. PLAXIS 3D забезпечує моделювання плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів у межах єдиної просторової постановки. Плита може задаватися плитними або об'ємними елементами, контакт із ґрунтом – інтерфейсними елементами, а палі – вбудованими балковими елементами [7]. Це дозволяє отримувати

осідання, контактні тиски, реакції та зусилля в палях, а також внутрішні зусилля в плиті без детального об'ємного моделювання кожної палі. Основне обмеження пов'язане з чутливістю результату до параметрів ґрунту, інтерфейсів і вбудованих пальових елементів.

MIDAS GTS NX також має високий рівень інженерної готовності для фундаментних задач. Комплекс підтримує просторове моделювання плит, пальових груп і комбінованих пальово-плитних систем, а спеціалізовані елементи палі та кінцевої ділянки палі дозволяють враховувати відносну роботу палі й ґрунту [8]. За складом проектних результатів MIDAS GTS NX є близьким до PLAXIS 3D, однак потребує уважного налаштування контактних параметрів і перевірки прийнятої схеми взаємодії палі з ґрунтом.

FLAC3D і ZSoil оцінено на 4 бали. FLAC3D дозволяє моделювати плити й палі через структурні елементи, а взаємодію палі з ґрунтом задавати через нормальні та дотичні зв'язки [9]. Його перевагою є придатність до задач зі значною нелінійністю, великими деформаціями та нетиповими шляхами навантаження. Водночас у фундаментних задачах він потребує ретельного калібрування параметрів взаємодії «палія-ґрунт» і «плита-ґрунт», а також додаткової обробки проектних результатів.

ZSoil забезпечує моделювання плитних, пальових і комбінованих постановок із використанням інтерфейсного елемента палі, що дозволяє враховувати тертьову взаємодію та відносні переміщення палі й ґрунту [10]. Для практичних фундаментних задач його можливості є достатніми, однак при великих пальових полях ефективність розрахунку більше залежить від чисельної стійкості та кількості інтерфейсних взаємодій.

Abaqus оцінено на 3 бали. Його перевагою є гнучке контактне моделювання, зокрема можливість описувати розділення, ковзання, когезійну взаємодію та нестандартні контактні умови [11]. Водночас для великих пальових і комбінованих пальово-плитних систем детальне тривимірне моделювання є ресурсомістким, а спрощені схеми потребують окремого методичного обґрунтування, калібрування та перевірки коректності перерозподілу навантаження між плитою й палями.

У підсумку, за критерієм моделювання фундаментних систем PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX є найбільш інженерно готовими для плитних, пальових і комбінованих пальово-плитних фундаментів. FLAC3D має переваги при значній нелінійності та великих деформаціях, але потребує більшого контролю параметрів взаємодії. ZSoil забезпечує коректну інтерфейсну реалізацію, проте є менш ефективним для великих пальових моделей. Abaqus має найширші можливості контактного моделювання, але поступається спеціалізованим геотехнічним ПЗ за готовністю до типового інженерного застосування в задачах фундаментів.

За третім критерієм оцінювалися можливості ПЗ щодо задання стадійності розрахунку. У геотехнічному моделюванні стадійність передбачає відтворення будівельно-технологічної послідовності зі зміною активності ґрунту, конструктивних елементів, навантажень, граничних і гідрогеологічних умов. Для фундаментних задач це є принциповим, оскільки осідання, контактні тиски, реакції в палях і розвиток пластичних зон залежать не лише від кінцевої конфігурації системи, а й від шляху навантаження.

Найвищу оцінку за третім критерієм отримують PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX – 5 балів. У PLAXIS 3D стадійність реалізована через систему розрахункових фаз, що дозволяє керувати активацією та деактивацією ґрунту, конструкцій, навантажень і водних умов із послідовним перенесенням напружено-деформованого стану між етапами [7]. У MIDAS GTS NX аналіз стадій будівництва дає змогу формувати послідовність додавання або вилучення елементів, навантажень і граничних умов у межах просторової моделі [8]. Обидва комплекси мають високий рівень інженерної готовності для стадійних геотехнічних задач, однак MIDAS GTS NX потребує уважнішої організації стадій і контролю контактних умов на кожному етапі.

FLAC3D і ZSoil оцінено на 4 бали. У FLAC3D стадійність задається шляхом послідовного змінювання моделі з доведенням її до нового стану рівноваги після кожної зміни. Такий підхід є гнучким для моделювання виїмок, монтажу конструкцій, поетапного навантаження та розвитку нелінійних процесів, але потребує самостійного контролю рівноваги, неврівноважених сил і зв'язку етапів із фізичним часом [9]. У ZSoil етапність пов'язана з покроковим оновленням розрахункової схеми, активності елементів і жорсткості системи. Перевагою є можливість поєднання будівельних стадій із консолідацією, фільтрацією та іншими часовими ефектами [10]. Водночас для складних просторових постановок потрібний уважний контроль переходів між етапами та чисельної стійкості.

Abaqus оцінено на 3 бали. Він має універсальні засоби розрахункових кроків, геостатичну процедуру та механізми зміни складу моделі, що дозволяє імітувати поетапну виїмку ґрунту, активацію конструкцій і зміну контактних умов [11]. Проте ці інструменти не утворюють спеціалізованого геотехнічного робочого процесу, тому стадійні геотехнічні постановки в Abaqus потребують більшої методичної підготовки, перевірки початкового напруженого стану, контактів і переходів між кроками.

У підсумку за критерієм стадійності PLAXIS 3D і MIDAS GTS NX є найбільш інженерно готовими для відтворення будівельної послідовності.

FLAC3D забезпечує високу гнучкість поетапного змінювання моделі, ZSoil краще поєднує стадійність із часовими процесами, а Abaqus має широкі загальні можливості, але поступається спеціалізованим геотехнічним комплексам за зручністю стадійного моделювання.

За четвертим критерієм оцінювалися засоби автоматизації розрахункового моделювання та обробки результатів. Враховано можливість програмного керування моделлю, зміни параметрів, запуску серій варіантних розрахунків, контролю перебігу обчислень і вилучення результатів у порівнюваному форматі. Цей критерій є важливим для параметричних досліджень, перевірки декількох розрахункових сценаріїв і зменшення ризику помилок при повторенні однотипних операцій.

Найвищу оцінку за четвертим критерієм отримують PLAXIS 3D, FLAC3D і Abaqus – 5 балів. У PLAXIS 3D програмне керування через Python та REST API дозволяє автоматизувати зміну параметрів, формування фаз розрахунку, запуск задач і вилучення результатів, що є зручним для параметричних розрахунків і стандартизованої постобробки [7]. FLAC3D поєднує FISH і Python, завдяки чому користувач може керувати моделлю, перебігом розрахунку, контрольними величинами та обробкою результатів, що особливо корисно для нестандартних алгоритмічних процедур [9]. Abaqus має розвинений Python Scripting Interface, який охоплює побудову моделі, зміну параметрів, запуск задач і доступ до бази результатів, однак геотехнічна логіка автоматизації, зокрема початковий стан, контактні умови та критерії вилучення результатів, формалізується користувачем [11].

MIDAS GTS NX оцінено на 4 бали. Комплекс підтримує пакетне виконання розрахунків і параметричний аналіз, що дозволяє організовувати серії варіантних задач, контролювати перебіг розрахунку та порівнювати результати [8]. Водночас його можливості сценарного керування моделлю та автоматизованого вилучення результатів є менш гнучкими, ніж у комплексах із розвиненим програмним інтерфейсом.

ZSoil оцінено на 3 бали, оскільки він підтримує пакетне виконання підготовлених задач, роботу зі списками розрахунків і файловою організацією результатів [10]. Цього достатньо для повторюваних інженерних серій, однак можливості сценарної зміни моделі та автоматизованої постобробки є обмеженішими порівняно з PLAXIS 3D, FLAC3D, Abaqus і MIDAS GTS NX.

У підсумку за критерієм автоматизації PLAXIS 3D, FLAC3D і Abaqus мають найширші можливості програмного керування розрахунковим процесом. MIDAS GTS NX займає проміжну позицію завдяки пакетному та параметричному аналізу, а ZSoil є придатним переважно для серій попередньо підготовлених розрахунків.

За п'ятим критерієм оцінювалася стабільність чисельного розрахунку, тобто здатність ПЗ надійно виконувати нелінійні розрахунки у задачах із пластичністю ґрунтів, контактною взаємодією, різкою зміною жорсткості, розвантаженням, поетапністю та наближенням до граничного стану. Для практичного застосування важливими є керування розрахунковими кроками, критерії збіжності, діагностика причин незбіжності та можливість відрізнити фізичне руйнування від чисельної нестійкості.

Окремо враховано обчислювальну ефективність великих просторових моделей, зокрема підтримку багатоядерних процесорів, паралельних обчислень і GPU-прискорення для окремих розв'язувачів, оскільки ці чинники впливають на практичну можливість виконання ресурсомістких 3D-розрахунків.

Найвищу оцінку за п'ятим критерієм отримують PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і ZSoil – 5 балів. У PLAXIS 3D передбачено геотехнічно орієнтоване керування фазами, розрахунковими кроками та критеріями збіжності, що забезпечує стабільне виконання більшості фундаментних і стадійних задач. Для великих моделей перевагою є підтримка багатоядерних і паралельних розрахунків, ефективність яких залежить від типу аналізу, структури фаз і розміру сітки [7]. MIDAS GTS NX має засоби керування нелінійним розрахунком, критеріями збіжності та приростом навантаження. Додатковою перевагою є метод дуги навантаження, який підвищує надійність проходження нестійких ділянок рівноважної траєкторії при наближенні до граничного стану [8]. З погляду обчислювальних ресурсів MIDAS GTS NX дозволяє задавати кількість процесорів для аналізу, а для окремих розв'язувачів можливе використання GPU-прискорення. ZSoil вирізняється наявністю декількох нелінійних розв'язувачів, формалізованих критеріїв збіжності та засобів покращення ітераційного процесу. Його сильна сторона полягає у діагностичній прозорості розрахунку за нормами невірноваженості та енергетичними показниками [10]. Підтримка паралельних обчислень за моделлю спільної пам'яті підвищує його придатність для ресурсомістких нелінійних задач.

FLAC3D і Abaqus оцінено на 4 бали. FLAC3D принципово відрізняється від неявних скінченно-елементних комплексів, оскільки досягнення квазістатичної рівноваги базується на явному алгоритмі з демпфуванням. Це є ефективним для задач розвитку руйнування, великих деформацій і значної нелінійності, однак потребує уважного вибору демпфування, критеріїв зупинки та контролю невірноважених сил [9]. Багатопотокова реалізація FLAC3D може бути перевагою для великих 3D-моделей, хоча приріст швидкодії залежить від типу задачі та використаних

процедур. Abaqus має розвинені засоби нелінійного аналізу, керування контактом, автоматичного вибору кроку та стабілізації, а також підтримує паралельне виконання і GPU-прискорення для окремих розв'язувачів [11]. Проте в геотехнічних задачах результат значною мірою залежить від прийнятої методики, параметрів контакту, початкового стану, дискретизації та контролю впливу штучного демпфування.

У підсумку за критерієм стабільності розрахунків PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і ZSoil мають найкраще поєднання стійкості нелінійного розрахунку та діагностичної прозорості. FLAC3D є сильним у задачах розвитку руйнування і значної нелінійності, але потребує більшого контролю параметрів демпфування. Abaqus має потужні загальні засоби стабілізації та ефективного виконання ресурсомістких розрахунків, однак для геотехнічних постановок вимагає ретельнішого методичного налаштування. Для великих просторових моделей вибір ПЗ має враховувати не лише стійкість і збіжність, а й швидкодію, що залежить від типу розв'язувача, паралельного виконання, розміру сітки, кількості контактів, стадій та апаратних ресурсів.

Для узагальнення результатів виконано підсумкове оцінювання програмних комплексів за п'ятьма розглянутими критеріями, що наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Підсумкова оцінка ПЗ за критеріями порівняння

Критерій порівняння	PLAXIS 3D	MIDAS GTS NX	FLAC3D	ZSoil	Abaqus
1- бібліотека моделей ґрунту	5	5	4	4	3
2 - моделювання фундаментів	5	5	4	4	3
3 - стадійність	5	5	4	4	3
4 - автоматизація	5	4	5	3	5
5 - стабільність розрахунків	5	5	4	5	4
Сумарна оцінка	25	24	21	20	18

За сумарною оцінкою найвищий результат отримав PLAXIS 3D – 25 балів, що свідчить про найбільш збалансовану придатність комплексу для геотехнічного чисельного моделювання. MIDAS GTS NX отримав 24 бали

і є близьким до PLAXIS 3D за інженерною готовністю, однак поступається за рівнем сценарної автоматизації. FLAC3D отримав 21 бал завдяки сильним можливостям автоматизації та моделювання значної нелінійності, але потребує більшого контролю параметризації в типових фундаментних задачах. ZSoil отримав 20 балів, вирізняючись стабільністю розрахунків і діагностикою збіжності, проте має скромніші засоби автоматизації. Abaqus отримав 18 балів: він є сильним інструментом для автоматизації та контактної моделювання, але поступається спеціалізованим геотехнічним комплексам за готовністю до типових інженерних постановок.

Висновки

У статті систематизовано програмні комплекси для геотехнічного чисельного моделювання, визначено п'ять критеріїв їх порівняння та виконано оцінювання PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil і Abaqus з позицій інженерної придатності.

Для більшості проектних задач основ і фундаментів із урахуванням стадійності будівництва, найбільш доцільним є застосування PLAXIS 3D або MIDAS GTS NX. Ці комплекси забезпечують збалансоване поєднання моделей ґрунту, інструментів для фундаментних систем, контактної взаємодії, стадійності та отримання проектно значущих результатів.

Для задач із вираженою нелінійністю, великими деформаціями, розвитком зон руйнування, скельними масивами або складними шляхами навантаження доцільним є FLAC3D. Для задач, де визначальними є контроль збіжності, консолідація, фільтрація та часові ефекти, доцільно розглядати ZSoil. Abaqus є ефективним для нестандартних контактних, дослідницьких і спеціалізованих постановок, зокрема за потреби реалізації користувацьких матеріальних моделей або детального моделювання взаємодії конструктивних елементів.

Отримані результати можуть бути використані як практично орієнтована основа для вибору програмного комплексу залежно від типу геотехнічної задачі та необхідного рівня деталізації розрахункової моделі. Наведене оцінювання відображає порівняльну придатність програмних комплексів у межах визначених критеріїв і не є абсолютним ранжуванням для всіх можливих інженерних задач.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>
2. Firoozi, A. A., Naji, M., & Firoozi, A. A. (2023). Effects of soil-structure interaction on performance of bridges during earthquakes. Case study: Integral abutment bridge in Pennsylvania, USA. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 3487-3505. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01122-w>
3. Chimdesa, F. F., Chimdesa, F. F., Jilo, N. Z., Hulagabali, A., Babalola, O. E., Tiyasha, T., Ramaswamy, K., Kumar, A., & Bhagat, S. K. (2023). Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. *Scientific Reports*, 13, 15875. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42783-x>
4. Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., & Choudhury, D. (2023). State-of-the-art review on responses of combined piled raft foundation subjected to seismic loads using static and dynamic approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 169, 107869. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107869>
5. Wang, Z., Cai, J., Wei, P., Yang, X., & Xu, Y. (2025). Optimization of pile reinforcement in soft soils: A numerical analysis. *Applied Sciences*, 15(23), 12443. <https://doi.org/10.3390/app152312443>
6. Deb, P., & Pal, S. K. (2019). Numerical analysis of piled raft foundation under combined vertical and lateral loading. *Ocean Engineering*, 190, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106431>
7. Bentley Systems. (2025). *PLAXIS 3D 2025.1 manuals*. Retrieved May 9, 2026, from https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989
8. MIDAS IT. (2019). *GTS NX on-line manual*. Retrieved May 9, 2026, from https://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/310/GTS_NX/Welcome_to_GT_S_NX/Intro.htm
9. Itasca Consulting Group. (2025). *FLAC (FLAC2D/FLAC3D): Itasca software 9.0 documentation*. Retrieved May 9, 2026, from <https://docs.itascacg.com/itasca900/flag3d/docproject/source/flag3dhome.html>
10. GeoDev. (2026). *ZSoil 2026 theoretical manual*. Retrieved May 9, 2026, from https://www.zsoil.com/zsoil_manual/TM-Man.pdf
11. Dassault Systèmes. (2024). *Abaqus 2024 documentation*. Retrieved May 9, 2026, from <https://docs.software.vt.edu/abaqusv2024/English/>

Література

1. Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>
2. Firoozi, A. A., Naji, M., & Firoozi, A. A. (2023). Effects of soil-structure interaction on performance of bridges during earthquakes. Case study: Integral abutment bridge in Pennsylvania, USA. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47, 3487-3505. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01122-w>
3. Chimdesa, F. F., Chimdesa, F. F., Jilo, N. Z., Hulagabali, A., Babalola, O. E., Tiyasha, T., Ramaswamy, K., Kumar, A., & Bhagat, S. K. (2023). Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. *Scientific Reports*, 13, 15875. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42783-x>
4. Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., & Choudhury, D. (2023). State-of-the-art review on responses of combined piled raft foundation subjected to seismic loads using static and dynamic approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 169, 107869. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107869>
5. Wang, Z., Cai, J., Wei, P., Yang, X., & Xu, Y. (2025). Optimization of pile reinforcement in soft soils: A numerical analysis. *Applied Sciences*, 15(23), 12443. <https://doi.org/10.3390/app152312443>
6. Deb, P., & Pal, S. K. (2019). Numerical analysis of piled raft foundation under combined vertical and lateral loading. *Ocean Engineering*, 190, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106431>
7. Bentley Systems. (2025). *PLAXIS 3D 2025.1 manuals*. Дата звернення: 09.05.2026. https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989
8. MIDAS IT. (2019). *GTS NX on-line manual*. Дата звернення: 09.05.2026. https://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/310/GTS_NX/Welcome_to_GTS_NX/Intro.htm
9. Itasca Consulting Group. (2025). *FLAC (FLAC2D/FLAC3D): Itasca software 9.0 documentation*. Дата звернення: 09.05.2026. <https://docs.itascacg.com/itasca900/flac3d/docproject/source/flac3dhome.html>
10. GeoDev. (2026). *ZSoil 2026 theoretical manual*. Дата звернення: 09.05.2026. https://www.zsoil.com/zsoil_manual/TM-Man.pdf
11. Dassault Systèmes. (2024). *Abaqus 2024 documentation*. Дата звернення: 09.05.2026. <https://docs.software.vt.edu/abaqusv2024/English/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2026	Received 13.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 17.05.2026	Received in revised form 17.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

O. A. Ovcharenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1906-7021>
Department of bridges, structures and construction mechanics named after V.O. Rosiiskiy

V. S. Fitarov*

PhD student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0478-3893>

Department of bridges, structures and construction mechanics named after V.O. Rosiiskyi

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudryho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: fitarov24@gmail.com

Comparative analysis of comprehensive software packages for geotechnical numerical modelling

How to Cite:

Ovcharenko, O. A., & Fitarov, V. S. (2026). Comparative analysis of comprehensive software packages for geotechnical numerical modelling. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 197-212. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-15)

The article considers the issue of selecting universal software packages for geotechnical numerical modelling of the soil-structure interaction system. The relevance of the study is determined by the need to account for the spatial behaviour of the soil mass, construction staging, contact interaction, seepage processes, and nonlinear soil behaviour. The aim of the study is to perform a comparative analysis of universal software packages for geotechnical modelling and to determine their comparative suitability for typical geotechnical design tasks and tasks of increased engineering complexity. The main groups of software are systematized: universal geotechnical software packages, general-purpose numerical modelling software packages, and specialized programs for specific geotechnical calculations. PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, ZSoil, and Abaqus were selected for detailed comparison. The assessment was performed according to five criteria: soil model libraries, modelling of foundation systems, support for staged construction, automation of calculations and result processing, calculation stability and convergence control. PLAXIS 3D achieved the highest total score, demonstrating the most balanced capabilities for engineering geotechnical modelling. MIDAS GTS NX also showed high suitability, particularly for foundation systems and staged construction tasks. FLAC3D is appropriate for problems involving pronounced nonlinearity, large deformations, and geomechanical features. ZSoil provides sufficient functionality, provided that the numerical formulation is properly controlled. Abaqus is effective for nonstandard contact and research-oriented tasks. However, it requires more extensive methodological preparation. The obtained results can be used when selecting a software package for modelling foundation soils, foundations, and soil-structure interaction systems.

Keywords: soil-structure interaction, constitutive soil models, piles, combined piled-raft foundation, geotechnical numerical modelling, PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX.