

М.Л. Зоценко, д.т.н., професор
Ю.Л. Винников, д.т.н., професор
А.В. Веденісов, аспірант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІДАНЬ ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬ ВІД ВПЛИВУ НОВОБУДОВ

Роботу присвячено оцінюванню деформування існуючих будівель унаслідок впливу нового будівництва шляхом проведення обчислювального експерименту за допомогою програмних комплексів PLAXIS 8.2 і FEMAP with NX Nastran 7.1, в яких методом скінченних елементів реалізовано рішення пружно-пластичної задачі нелінійної механіки ґрунтів для оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) системи «основа – новобудова – роз'єднувальний екран – існуюча будівля». Результати обчислювального експерименту порівняно з даними лоткових і натурних визначень складових НДС системи. Доведено доцільність геотехнічного варіантного проектування в умовах щільної забудови з використанням роз'єднувальних екранів із ґрунтоцементу.

Ключові слова: математичне моделювання, метод скінченних елементів, пружно-пластична задача, напружено-деформований стан, система «основа – новобудова – роз'єднувальний екран – існуюча будівля», ґрунтоцемент.

М.Л. Зоценко, д.т.н., професор
Ю.Л. Винников, д.т.н., професор
А.В. Веденісов, аспірант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСАДОК СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗДАНИЙ ОТ ВЛИЯНИЯ НОВОСТРОЕК

Работа посвящена оценке деформирования существующих зданий вследствие влияния нового строительства путем проведения вычислительного эксперимента с помощью программных комплексов PLAXIS 8.2 и FEMAP with NX Nastran 7.1, в которых методом конечных элементов реализовано решение упругопластической задачи нелинейной механики грунтов для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «основание – новостройка – разделительный экран – существующее здание». Результаты вычислительного эксперимента сравниваются с данными лотковых и натурных определений составляющих НДС системы. Доказана целесообразность геотехнического вариантного проектирования в условиях плотной застройки с использованием разделительных экранов из ґрунтоцементу.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, упругопластическая задача, напряженно-деформированное состояние, система «основание – новостройка – разделительный экран – существующее здание», ґрунтоцемент.

*N.L. Zotcenko, ScD, Professor
Yu.L. Vynnykov, ScD, Professor
A.V. Vedenisov, post-graduate
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

NUMERICAL MODELLING OF THE EXISTING BUILDING SETTLEMENTS FROM NEW BUILDING IMPACT

Results of the lengthy geodesic measurements of the foundations settlements are expounded. There is considering residential building with four sections, six floors, with sequential construction of the sections. It is comfortable to determine dependencies of the impact of the already constructed sections on the newly built section. Soil-cement elements are used as separating shield to increase carrying load of the soil basement. Soil-cement elements are produced by the drilling-mixing method.

Keywords: *soil basement, foundation, settlement, leveling, impact of the new buildings, separating shield, soil-cement, mixing technology.*

Вступ. Тенденція до збільшення обсягів будівництва в щільних міських умовах поставила перед проектувальниками низку вимог при аналізі НДС основ будівель і споруд. Традиційні інженерні методики не дозволяють достатньо достовірно оцінювати НДС основ з точки зору технології та послідовності будівництва, властивостей ґрунту й інших реальних обставин, що складаються на будівельному майданчику. Це у свою чергу ускладнює прийняття коректних проектних рішень при розрахунках основ і фундаментів у складних інженерно-геологічних умовах, у т. ч. і за умов щільної міської забудови, коли виникає необхідність забезпечити нормальні умови експлуатації існуючої забудови при зведенні нових будівель та споруд [1 – 3].

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Розвиток нелінійної механіки ґрунтів та створення потужної комп'ютерної бази в проектних і наукових установах дали поштовх до розроблення програмних комплексів, у яких реалізовано математичні моделі ґрунту, що враховують його пружно-пластичну поведінку [3 – 7]. В основі таких моделей лежить деформаційна теорія пластичності у поєднанні з методом скінченних елементів (МСЕ). Найчастіше вони використовують рівняння для ідеального пружно-пластичного середовища. Модель ураховує дилатансію, ґрунт вважається таким, що не опирається розтягу. Ітераційна схема побудована на постійній матриці жорсткості, що суттєво прискорює роботу алгоритму. Застосована в роботі методика вимагає використання шести фізико-механічних параметрів ґрунту, а саме: питомої ваги γ , питомого зчеплення s , кута внутрішнього тертя ϕ , модуля деформації E , коефіцієнта Пуассона ν , коефіцієнта дилатансії λ . Отже, вона є загально визнаною і доступною для проектувальників.

Застосовані фізичні рівняння перевірені часом і дозволяють отримувати рішення, близькі до результатів експериментальних досліджень. Отримали широку популярність сучасні програмні комплекси (ПК) PLAXIS версії 8.2 і FEMAP 11.0 with N.X.Nastran 7.1 (далі – FEMAP), котрі реалізують розглянуту вище модель ґрунтової основи і мають досконалий інтерфейс, що значно полегшує роботу дослідників. ПК «FEMAP» версій 10.1.0 й 11.0.0, розробником якого є «Siemens Product Lifecycle Management Software Inc» for Windows NT 4.0; 2000.SP3; XP.SP2; Vista; Seven; 8; 8.1, має підсистеми: пре- та постпроцесор FEMAP 10.1.0, аналізатор розрахованих даних NXNastran 7.1.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. При зведенні новобудов у щільній міській забудові необхідно захищати від їх негативного впливу існуючі будівлі та споруди. Апробовано декілька способів такого захисту [1 – 3].

Найбільш розповсюдженим і надійним заходом вважається влаштування роз'єднувального екрану, які своєю бічною поверхнею сприймають навантаження від новобудови і передають їх нижнім шарам основи. Чим менша стисливість цих шарів, тим більша ефективність роз'єднувального екрану. При спиранні на нестисливу основу екран повністю нейтралізує вплив новобудови. Роз'єднувальні екрани виготовляються зі шпунта, металевих труб, січних буронабивних бетонних паль методом «стіна у ґрунті». Найбільш ефективними вважаються роз'єднувальні екрани із січних ґрунтоцементних елементів, які виготовляються за бурозмішувальним методом [8 – 11]. Але з літературних джерел майже невідомі обчислювальні дослідження НДС системи «основа – новобудова – роз'єднувальний екран – існуюча будівля».

Мета роботи полягає в оцінюванні деформування існуючих будівель унаслідок впливу нового будівництва шляхом проведення обчислювального експерименту за допомогою ПК PLAXIS 8.2 та FEMAP 10.1.0 with NX.Nastran 7.1 (далі – FEMAP), які МСЕ реалізують рішення пружно-пластичної задачі нелінійної механіки ґрунтів для оцінювання НДС системи «основа – новобудова – роз'єднувальний екран – існуюча будівля». Дані розрахунку слід порівняти з результатами безпосередніх лоткових і натурних визначень складових НДС системи.

Основний матеріал та результати. Програмний інструментарій, який входить до складу ПК FEMAP, дозволяє виконувати геометричне й скінченно-елементне моделювання фізичних конструкцій, задавати початкові та остаточні граничні умови навантаження, які безпосередньо є краєвими задачами для їх подальшого скінченно-елементного розрахунку.

Процедурну основу розрахунку складає метод ітерацій разом із МСЕ, а теоретичну – математичне описання ґрунту як суцільного ізотропного середовища, яке моделюється відповідно до теорії пластичної течії. Ітераційний процес відбувається протягом кількох фаз із постійною матрицею жорсткості (незмінною геометричною конфігурацією та пружними властивостями) і змінним вектором вузлових сил. На вибір геометричної моделі впливає вимога про те, щоб фізичні рівняння, що використовуються, були перевірені на практиці та містили відомості про механічні характеристики ґрунту.

Величини розрахованих напружень і деформацій залежать не лише від вибору моделі матеріалу, але й від правильно прийнятої розрахункової схеми. Багаторічна практика використання обчислювальних методів, зокрема МСЕ, свідчить, що неправильне визначення обмежень, які накладаються на задачу фізичними умовами, може призводити до помилкових результатів. У цілому, розрахункова схема являє собою ідеалізовану модель об'єкта.

Розміри розрахункової зони встановлюють таким чином:

- бічні межі прямокутної розрахункової зони приймають відповідно на вертикальній осі симетрії й достатній відстані від бічної поверхні стінки та її «зони впливу» для максимального зменшення впливу з умови заборони горизонтальних переміщень, концентрації напружень і ущільнення ґрунту на контакті із зовнішньою межею розрахункової зони;
- верхню горизонтальну межу розрахункової зони розміщують на рівні поверхні землі (котловану);
- за глибину розрахункової зони приймають нижню межу стислої товщі згідно [11].

Для отримання більш точних результатів використовувалися прямокутні в плані скінченні елементи (СЕ), положення вузлів і точок напружень у цих елементах зображено на рис. 1. Такі СЕ забезпечують для переміщень інтерполяції четвертого порядку та використовують чисельне інтегрування за дванадцятьма гауссівськими точками (точками напружень).

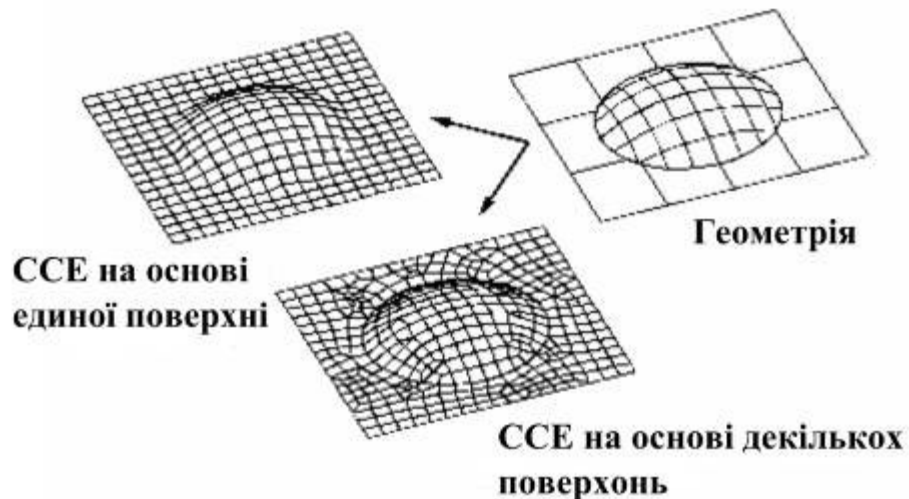


Рис. 1. Різновиди побудови сіток скінченних елементів (ССЕ)

Оцінка точності рішення задачі є складним питанням, оскільки залежить від ряду факторів:

- густина ССЕ – згущення сітки підвищує точність;
- фізико-механічні характеристики розрахункової моделі – розрахункова схема може бути близькою до геометрично змінної чи містити елементи, які різняться жорсткостями, що також призведе до втрати точності;
- параметри ССЕ залежать від багатьох факторів. Густина сітки переважно збільшується (зменшуються розміри елементів) лише в місцях прогнозованого великого градієнта функцій НДС (місця прикладання навантажень, можливі зони зрушення). У практиці застосування МСЕ частіше густоту сітки визначають експериментальним способом, тобто згущення проводять до тих пір, поки результат розрахунку при наступному згущенні у півтора рази буде відрізнятися від попереднього не більше ніж на 3%. Рациональне ділення на СЕ полягає й у використанні принципу фрагментації, тобто сітку виконують густішою у місцях, де потрібно оцінити НДС із більшою точністю. Геометрія СЕ суттєво впливає на точність рішення, тому елементи повинні наближатися до рівнобічних.

При використанні в розрахункових схемах стрижневих елементів приведеної жорсткості характеристики жорсткості задають у числовій формі: E_A – жорсткість у поздовжньому напрямку; E_I – жорсткість на згин, де E – модуль деформації, A – площа поперечного перерізу, I – момент інерції перерізу. Оскільки жорсткість визначають на погонний метр розрахункової схеми, то ця приведена жорсткість визначається з розв'язку системи рівнянь

$$\begin{cases} E_{np} I_{np} = E_0 I_0; \\ E_{np} A_{np} = E_0 A_0, \end{cases} \quad (1)$$

де E_0 , A_0 , I_0 – характеристики дискретно чи суцільно розташованих елементів (пали, стінка, шпунт) на одному метрі; E_{np} , A_{np} , I_{np} – характеристики приведенного стрижневого елемента на 1 м п. розрахункової схеми.

Якщо буде прикладене статичне навантаження на зразок, то воно задається у вигляді сконцентрованих сил у вузлах схеми за напрямками глобальної системи координат. Дія одного навантаження чи групи навантажень визначається як окреме завантаження. За наявності кількох завантажень проводиться вибір найбільш небезпечного їх сполучення.

Підготовка вихідних даних для розрахункових досліджень. Прикладене статичне навантаження на палю задається у вигляді сконцентрованих сил у вузлах схеми за напрямками глобальної системи координат. Дія одного навантаження чи групи навантажень визначається як окреме завантаження. За наявності кількох завантажень вибирають найбільш небезпечне їх сполучення.

На вибір моделі вплинули вимоги використання фізичних рівнянь, які б спиралися на основні параметри механічних властивостей ґрунтів, що визначають за стандартними чи близькими до них методиками. У моделі використані відомі гіпотези механіки ґрунтів, зокрема:

1. Ґрунт у межах СЕ приймають за однорідне ізотропне середовище.
2. При деформаціях зберігається суцільність ґрунтового масиву.
3. Зміна значень фізико-механічних властивостей ґрунту за інших рівних умов є функцією зміни його коефіцієнта пористості, тобто в межах навколо екрана зони враховуються параметри ущільнення ґрунту.
4. Як і в інших сучасних теоріях, деформації формозміни в загальному випадку нелінійні, тобто зв'язок між компонентами девіаторів напружень та деформацій нелінійний. Навантаження – просте (компоненти девіатора напружень зростають пропорційно одному параметру). Зберігається співвісність тензорів напружень і деформацій.

Фізико-механічна характеристика шару ґрунту приймалася на основі результатів інженерно-геологічних вишукувань. Значення коефіцієнта Пуассона прийняті відповідно до вимог норм [11]: для пісків – 0,3. Розрахункові області подано прямокутниками на площині. Границям області задано такі умови, які виключають будь-яке переміщення. За вертикальними границями встановлені лише горизонтальні опори, які дозволяють тільки вертикальне переміщення, верхня границя без в'язів. Навантаження приймалися розрахункові.

Вихідні дані для розрахунку приймалися такі ж, як і для лабораторних досліджень, оскільки відповідно до поставленого завдання необхідно зіставити отримані результати лабораторних досліджень і результати моделювання, здійсненого за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D Foundation. Вихідні дані для розрахунку наведено у табл.1. Вихідні дані отримано шляхом лабораторних досліджень. Ґрунт відібраний із шурфу Яциново-Слобідського кар'єру.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахункового експерименту з визначення НДС системи «основа – новобудова – роз'єднувальний екран – існуюча споруда» на моделях у лотку

Матеріал	Питома вага γ , кН/м ³	Модуль деформації E, МПа	Питоме зчеплення c, кПа	Кут внутрішнього тертя φ , град	Коефіцієнт Пуассона ν
Пісок	17,8	10	3	32	0,3
Ґрунтоцемент	18,2	100	100	7	0,2

Визначення фізико-механічних характеристик ґрунтів виконувалося відповідно до ГОСТ 5180-75, ДСТУ Б В.2.1-4-96, ДСТУ Б В.2.1-5-96. У результаті встановлено, що ґрунт, використаний для випробувань, – пісок середньої крупності, однорідний, порушеної структури з такими властивостями: природна вологість $w=0,10$; щільність ґрунту $\rho=1,79$ г/см³.

Для ґрунтоцементу також були визначені фізико-механічні властивості. Перед випробуванням на стиск зразки зважують з метою визначення їх середньої щільності (методика визначення як для бетонів) за ГОСТ 12730.1-78. Також для зразків ґрунтоцементу була визначена його вологість.

До механічних властивостей ґрунтоцементу відносять призмову міцність $\sigma_{пр}$ і модуль деформації E . Ці характеристики визначають за результатами випробовувань зразків ґрунтоцементу на одноосьове стиснення. Коли при цьому простежити всю історію навантаження зразка, можна визначити також і значення модуля E . На рис. 2 наведено залежність $E = f(R_n)$, отриману за даними випробовувань зразків ґрунтоцементу, виготовлених у лабораторних умовах відповідно до виду ґрунту, кількості цементу, умов ущільнення, терміну тужавіння, наявності термічного оброблення тощо. На відміну від бетону, для якого подібна залежність характерна зменшенням інтенсивності зростання модуля пружності $E_{пр}$ порівняно з інтенсивністю зростання $\sigma_{пр}$, для ґрунтоцементу відмічається пропорційне зростання модуля деформації E зі збільшенням $\sigma_{пр}$. Це пов'язано зі зростанням щільності ґрунтоцементу внаслідок значного (тиском у 2–16 МПа) ущільнення зразків.

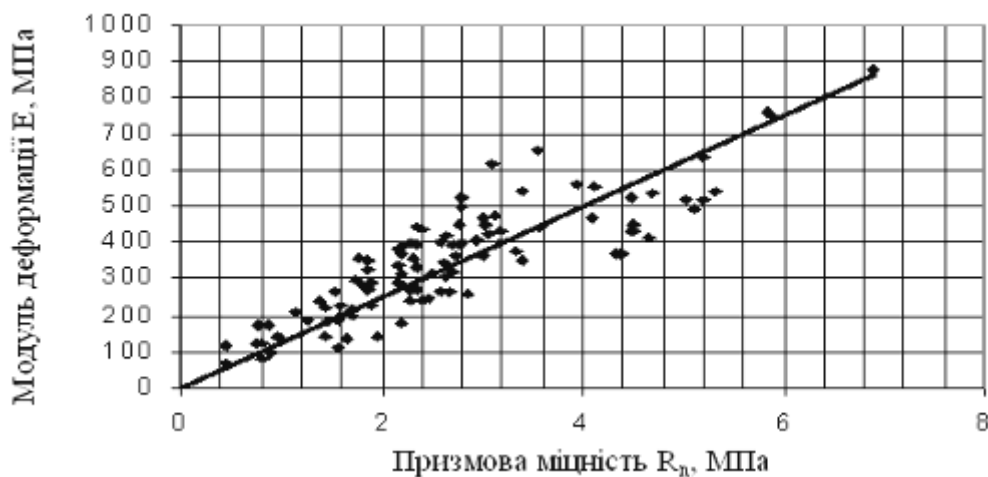


Рис. 2. Залежність модуля деформації від призмової міцності за різних умов утворення ґрунтоцементу

Відповідно до цих досліджень головним фактором збільшення механічних характеристик ґрунтоцементу є вміст цементу та його якість. Для ґрунтоцементу характерно збільшення його міцності в часі. У віці одного року нормально-вологого зберігання призмova міцність більше у 2–2,5 рази, ніж у віці 28-ми діб. При цьому стверджується, що найбільш сприятливими умовами тужавіння ґрунтоцементу слід вважати цей процес у водонасичених ґрунтах.

При статистичній обробці результатів випробовувань встановлено таке кореляційне рівняння отриманої залежності[12]:

$$E = 481\sigma_{пр}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

при коефіцієнті кореляції $r = 0,93$, середньому квадратичному відхиленні $\sigma_E = 0,45$, коефіцієнті варіації $\nu_E = 0,085$, коефіцієнті надійності при $\alpha = 0,85$ і $t_\alpha = 1,05$ $k_E = 1,1$.

Отже, зв'язок між E і $\sigma_{пр}$ близький до функціонального.

При влаштуванні ґрунтоцементних елементів умови утворення суміші ґрунту та цементного молока визначаються умовами ґрунтового масиву, в т.ч. його гідрогеологічного режиму. Кількість вологості ґрунту значно впливає на водно-

цементне відношення матеріалу. Що стосується умов ущільнення ґрунтоцементу в свердловині, то вони визначаються довжиною елемента і конструкцією розпушувача ґрунту. За рахунок цього можна досягти ущільнення з тиском не більше 0,2 МПа.

Для встановлення залежності модуля E від призмової міцності ґрунтоцементу R_n в лабораторних умовах були сформовані циліндричні зразки діаметром 32 мм і довжиною 64 мм. При виготовленні суміші «ґрунт – ґрунтоцементне молоко» враховували природну вологість ґрунту, а ущільнення суміші у прес-формі виконували тиском до 0,1 МПа. Широкий діапазон міцності ґрунтоцементу досягали зміною вмісту цементу, терміном тужавіння тощо.

На першому етапі досліджень випробовування зразків на міцність виконували на стабілометрі конструкції ДПЗТ на осьове стиснення без створення бічного тиску. Зразки навантажували ступенями по 0,1 R_n , кожний ступінь навантаження витримували 1 хв, визначали деформацію зразка і переходили до наступного. Кожний дослід доводили до повного руйнування зразка. Показові графіки залежності відносної деформації зразка ґрунтоцементу від девіатора напруг наведено на рис. 3. Окреслення графіків свідчить про характерне розділення фаз деформації ґрунтоцементу на лінійну, криволінійну та руйнування (умовно не показана, починається з останнього ступеня навантаження). За цими даними були визначені такі величини механічних характеристик ґрунтоцементу для зразків: 1 – $R_n = 0,8$ МПа, $E = 89$ МПа; 2 – $R_n = 1,25$ МПа; $E = 167$ МПа; 3 – $R_n = 1,85$ МПа; $E = 480$ МПа.

Розрахункові дослідження системи «основа – роз'єднувальна стінка». У процесі моделювання виділено такі фази розрахунку (рис. 4):

- 1) початкова фаза – природне ущільнення й осідання ґрунту (під власною вагою);
- 2) улаштування роз'єднувальної стінки в масиві ґрунту;
- 3) прикладання вертикального рівномірно розподіленого по поверхні зразка навантаження: 0,075; 0,15; 0,30 МПа.

Моделювання НДС роз'єднувальної стінки на запобігання деформації від дії вертикального навантаження здійснювалося за допомогою ПК Plaxis 3D Foundation в умовах просторової задачі. Розрахункова область при складанні розрахункової схеми була автоматично поділена на СЕ різних розмірів клиноподібної форми. Модель являє собою область розміром 0,5x0,5x0,5 м з відповідним шаром ґрунту. По центру області розташовано екран розмірами 300x250x20 мм, біля якого розміщено штамп для прикладення навантаження, кількість СЕ становить 9100 шт. На рис. 5 зображено вертикальні переміщення від дії рівномірного розподіленого навантаження на штамп.

У розрахунках були прийняті такі передумови та параметри: модель ґрунту – пружно-пластична Мора – Кулона; матеріал екрана – ґрунтоцемент, що також має лінійну залежність між напруженнями і деформаціями.

Застосована пружно-пластична модель ґрунту вимагає наявності шести основних параметрів кожного його шару: питомої ваги γ , модуля деформації E , коефіцієнта Пуассона ν , кута внутрішнього тертя ϕ , питомого зчеплення c , параметра дилатансії λ . Для практичних розрахунків достатньо визначення ϕ і c за стандартними випробуваннями, γ та E – на основі стандартних лабораторних чи польових досліджень. Коефіцієнт Пуассона визначають за нормами [11] або за емпіричними формулами: $\nu = 0,1 + 0,3J_L$ для суглинків і глин; $\nu = 0,15 + 0,15J_L$ для супісків, де J_L – показник текучості. Слід зауважити, що при застосуванні числових методів розрахунку неточність у визначенні коефіцієнта Пуассона для окремих шарів може суттєво вплинути на розмір отриманих пластичних зон.

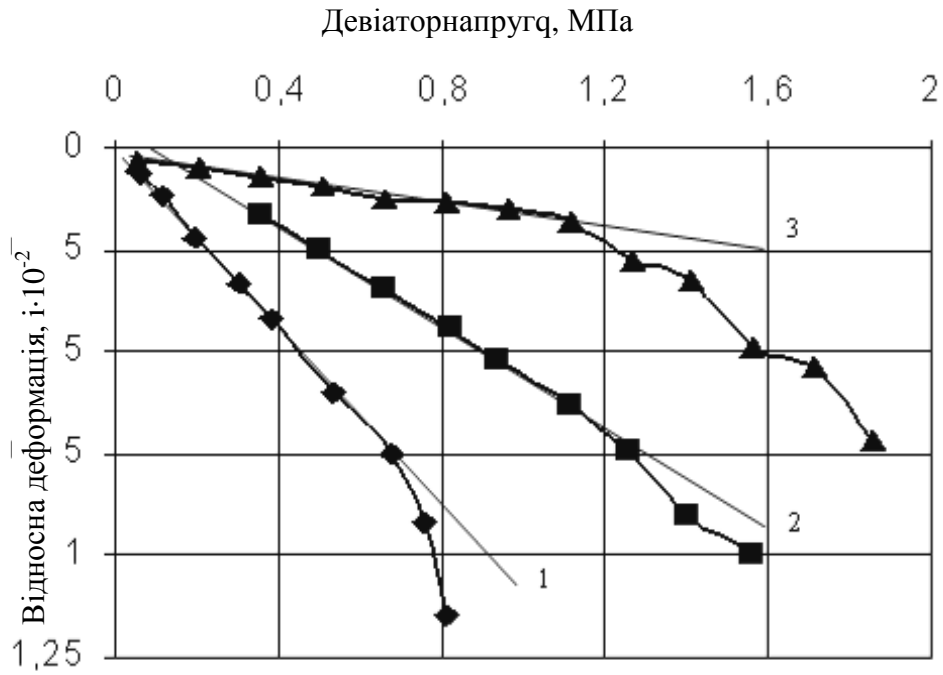


Рис. 3. Залежність відносної деформації від девіатора напруг:
1, 2, 3 – номери зразків

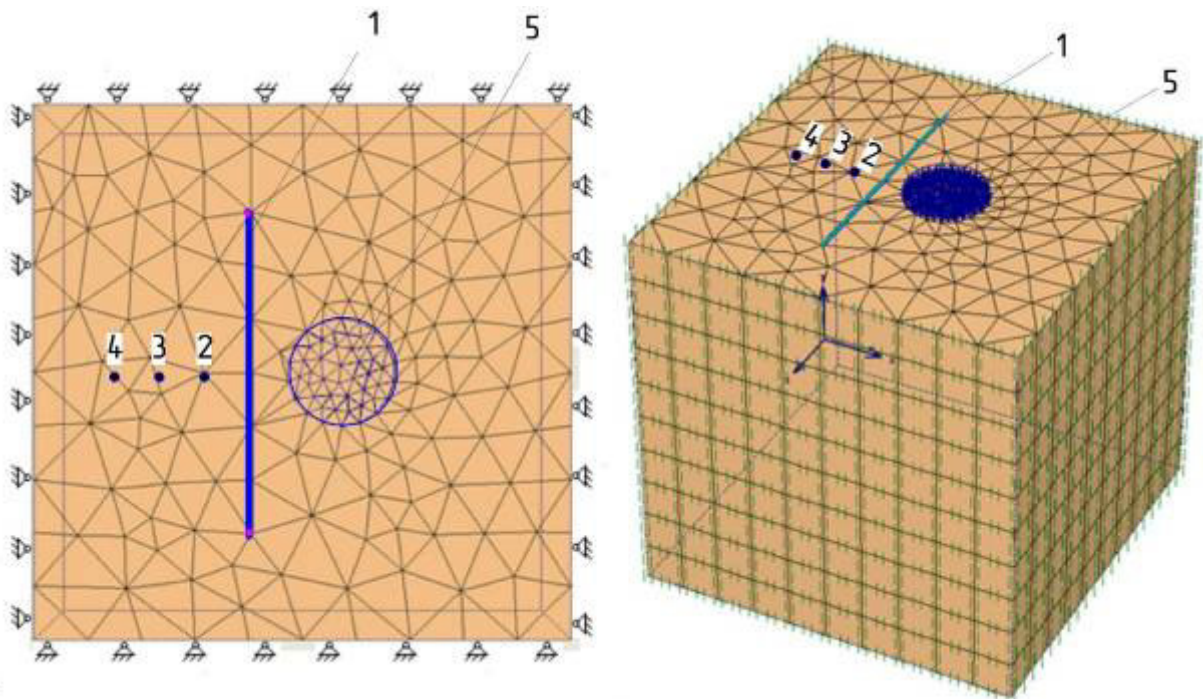


Рис. 4. Розрахункова модель роз'єднувальної стінки з ґрунтоцементу
на рівні штампу:
1 – ґрунтоцементна стінка; 2,3,4 – поверхневі марки;5 – модель штамп

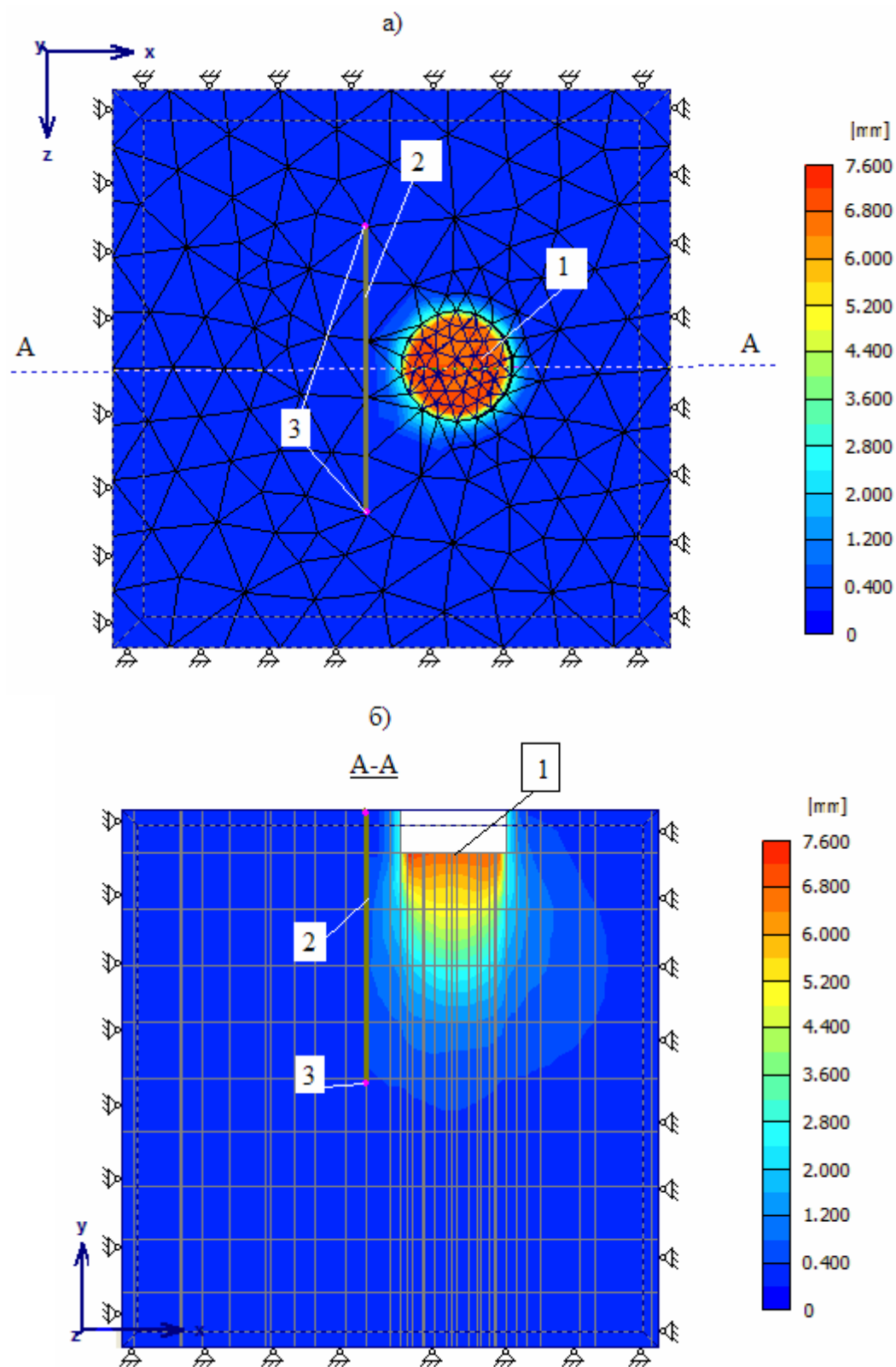


Рис. 5. Ізополя вертикальних переміщень від дії рівномірно розподіленого навантаження на штамп:
а) вид зверху; б) розріз;
1 – штамп; 2 – екран; 3 – точки деформаційних марок

Коефіцієнт (швидкість) дилатації Λ_* може бути визначений дослідним шляхом як співвідношення вимірних приростів об'ємних та зсувних деформацій. Такі дослідження досить трудомісткі й неточні, їх здійснення в проектній практиці можливе лише в окремих випадках. Тому при призначенні цього параметра для практичних розрахунків допустимо обмежуватися першим наближенням, приймаючи $\Lambda_* = 0$ для пухких водонасичених пісків; $\Lambda_* = (0,8 \dots 1,0) \sin \phi$ для щільних і середньої щільності ґрунтів та $\Lambda_* = 0,5 \sin \phi$ для ґрунтів, які не можуть бути віднесеними до жодної з указаних категорій.

На рис. 6 і 7 порівняно експериментально отримані осідання з результатами моделювання. За статичним випробовуванням навантаження на штамп $F_S = 320$ Н, а за моделюванням – $N_S = 300$ Н. Різниця становить 6,5%. Її можна пояснити використанням розрахункових значень характеристик міцності та стисливості ґрунтів, які дещо занижені порівняно з їх дійсними значеннями.

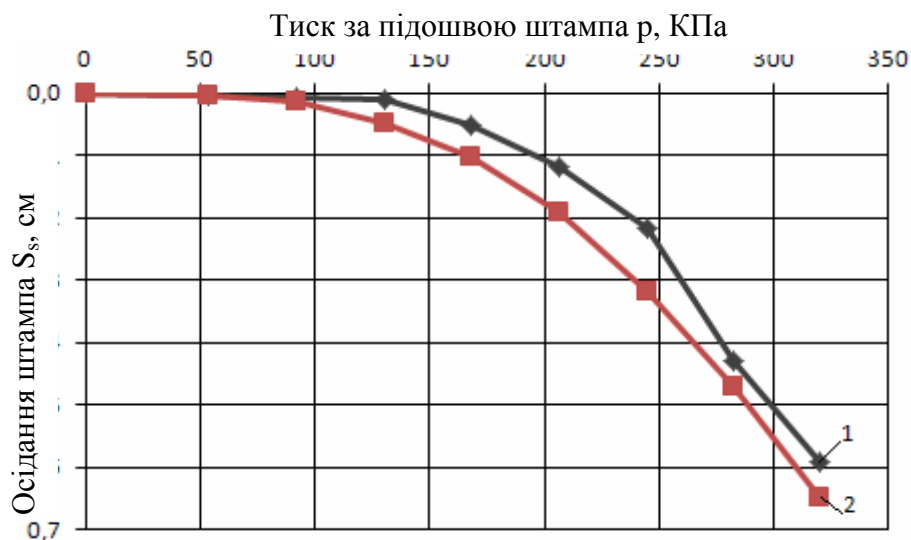


Рис. 6. Графік осідань штампа від навантаження:
1 – експеримент; 2 – моделювання



Рис. 7. Графік осідань екрана від дії навантаження на штамп:
1 – експеримент; 2 – моделювання

Отримані графіки свідчать про позитивний вплив закріплення зразків ґрунту на міцність ґрунтового масиву. За графіками встановлено значення характеристик міцності змодельованих зразків. Отримані значення цих характеристик наведено в табл. 1, у якій також є характеристики міцності, визначені за лабораторними випробуваннями. Відмінності між значеннями показників міцності за лабораторними випробуваннями й моделюванням можна пояснити неоднорідністю матеріалів зразків при лабораторних випробуваннях (а отже, і неоднорідністю фізико-механічних властивостей), відмінністю параметрів ґрунту та матеріалу закріплення при лабораторних випробуваннях і заданих для моделювання (наприклад, вологість матеріалів) тощо.

Аналізуючи графіки і порівнюючи результати лабораторних випробувань з моделюванням, констатуємо, що при моделюванні у ПК Plaxis 3D Foundation зона впливу значно менша за експериментальну. Цю особливість можна пояснити тим, що: 1) при лабораторних випробуваннях горизонтальний тиск до зразка прикладається більшими значеннями ступенів навантаження, тоді як програма задає значно менші ступені, що приводить до поступового наростання напружень; 2) можливі недоліки в проведенні лоткових випробувань (неоднорідність закріплюючих елементів, неоднорідність зразків ґрунту тощо).

Складання розрахункових схем МСЕ системи «основа – новобудова – роз'єднувальний екран – існуюча будівля» для 6-поверхового житлового будинку. Складання розрахункових схем і побудову геометричних моделей виконували у кілька етапів. Для підвищення точності розрахунків та наближення результатів моделювання до натурних спостережень, а також з метою «оцифрування» гірничо-механічних процесів, які мають місце в роботі фундаменту реальної будівлі, використано принцип «декомпозиції». Такий підхід дозволяє виявити характерні, так би мовити, частини конструкції фундаментів, влаштовані як з роз'єднувальним екраном, так і без нього.

Використання в обчислювальному експерименті замість однієї декількох розрахункових моделей з різними механічними параметрами дозволило чітко встановити корисний вплив роз'єднувального екрана чи його відсутність. Побудову розрахункових моделей здійснювали згідно з рис. 8 – 10, на котрих наведено інженерно-геологічний розрізді лянки будівництва та схему фундаментів чотирисекційного житлового будинку по вул. Паризької Комуни у м. Полтаві.

З їх аналізу виділено три розрахункових моделі, в яких чітко вирізняються особливості роботи фундаментів, як було сказано раніше, за наявності та відсутності роз'єднувальних екранів, а також при існуванні підсиленої ґрунтоцементними елементами основи.

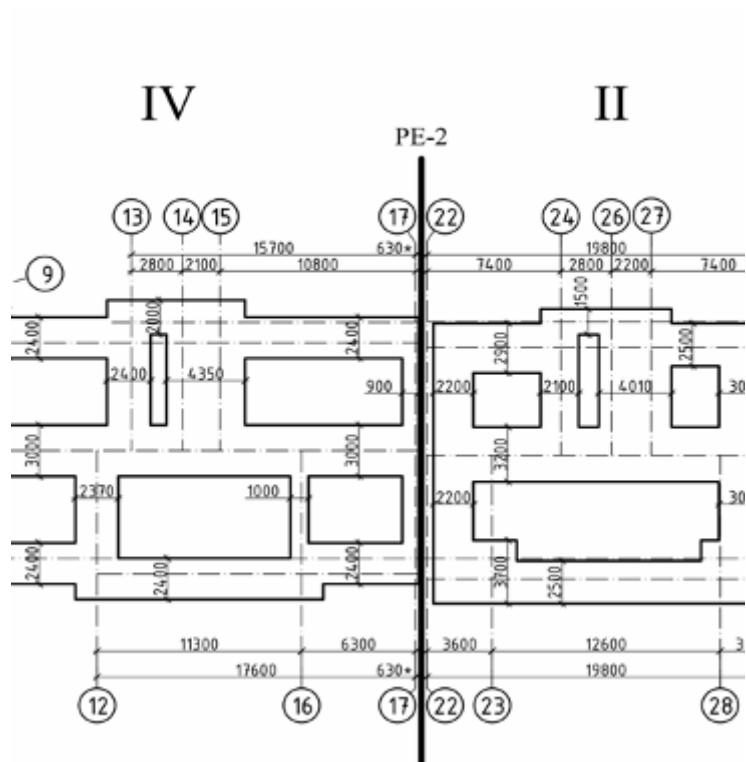
Перша геометрична модель і розрахункова схема – це частини першої та другої секцій будівництва, побудованих використанням роз'єднувального екрана (на рис. 8 має назву PE-1).

Друга геометрична модель і розрахункова схема моделі – це частина будівель першої та третьої секцій, яка не має роз'єднувального екрана (рис. 9).

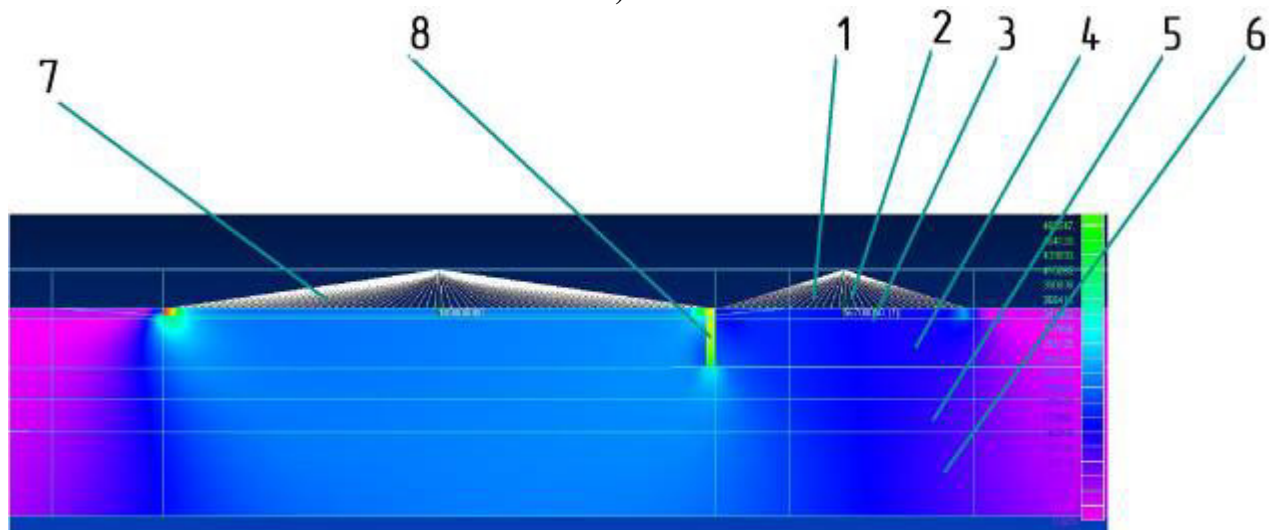
Третя геометрична модель і розрахункова схема – це частина другої та четвертої секцій, котра має роз'єднувальний екран (на рис. 10 має назву PE-2) і не має підсиленої природної основи.

При моделюванні використали поетапне прикладання навантаження (рис. 11) для імітації процесу будівництва кожного з поверхів секцій житлового будинку для відстеження процесів стабілізації деформації основи.

а)



б)



**Рис. 10. Розрахункова схема будинку з роз'єднувальним екраном:
а – фрагмент креслення забудови у розрізі роз'єднувального фундаменту;
б – геометрична модель у синтаксисі FEMAP with NX Nastran,
де 1 – будинок першої черги; 2 – підсилена ґрунтоцементна основа;
3-ІГЕ-2; 4 – ІГЕ-3; 5 – ІГЕ-4; 6 – ІГЕ-5;
7 – будинок другої черги**

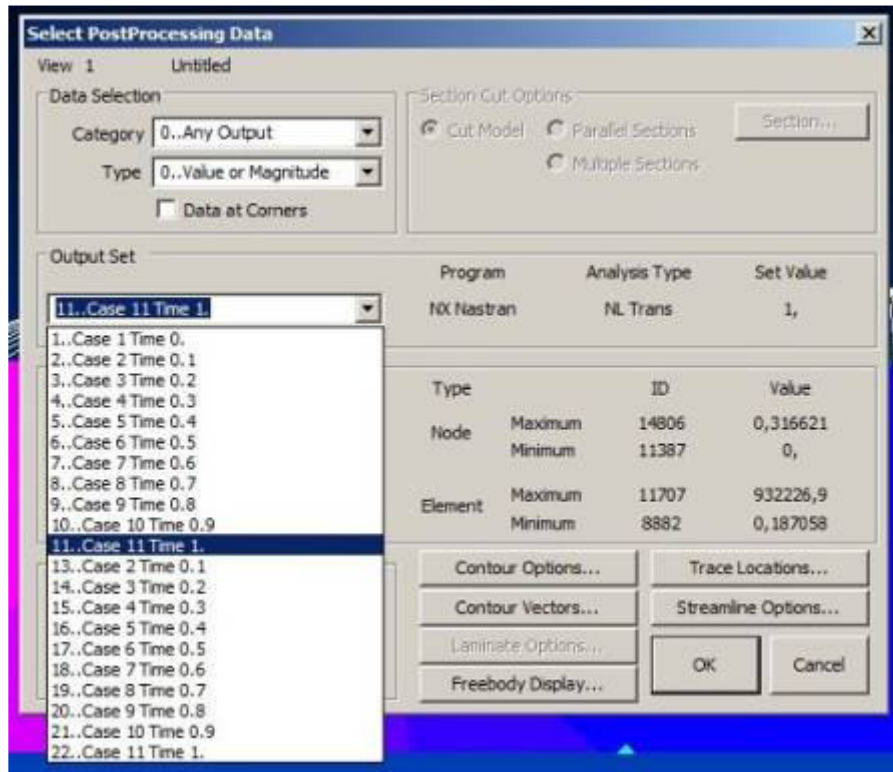


Рис. 11. Поетапне прикладання навантаження: випадок «1. Case 1 Time 0» відповідає початку будівництва; випадок «22. Case 11 Time 0» відповідає повністю побудованому будинку

Результати моделювання порівнювалися з даними геометричного нівелювання стінових осадочних марок на цьому ж об'єкті (табл. 2). Результати моделювання показали такі значення:

- перша розрахункова схема (рис. 12 а) для першої та другої черг зведення будівлі значення осідання склало 128 мм з боку марки М-110;
- друга розрахункова схема (рис. 13) осідання з боку марки М-102 становило 133 мм;
- третя розрахункова схема (рис. 14) осідання з боку марки М-204 склало 129 мм.

Таблиця 2. Результати математичного моделювання процесів осідання будівлі

№ з/п	Черги об'єкта	№ моделі	№ марок	Наявність підсиленої основи	Наявність екрана	Осідання фактичне, мм	Осідання за моделюванням, мм
1	I–II	1	M110-M206	так	так	110	128
2	I–III	2	M102-M308	так	ні	130	133
3	II–IV	3	M204-M410	ні	так	120	129

Отже, величини змодельованих осідань основ секцій будівлі перевищили їх фактичні значення на 2,3 – 14,0%, що є цілком задовільною для такої складної геотехнічної задачі розбіжністю.

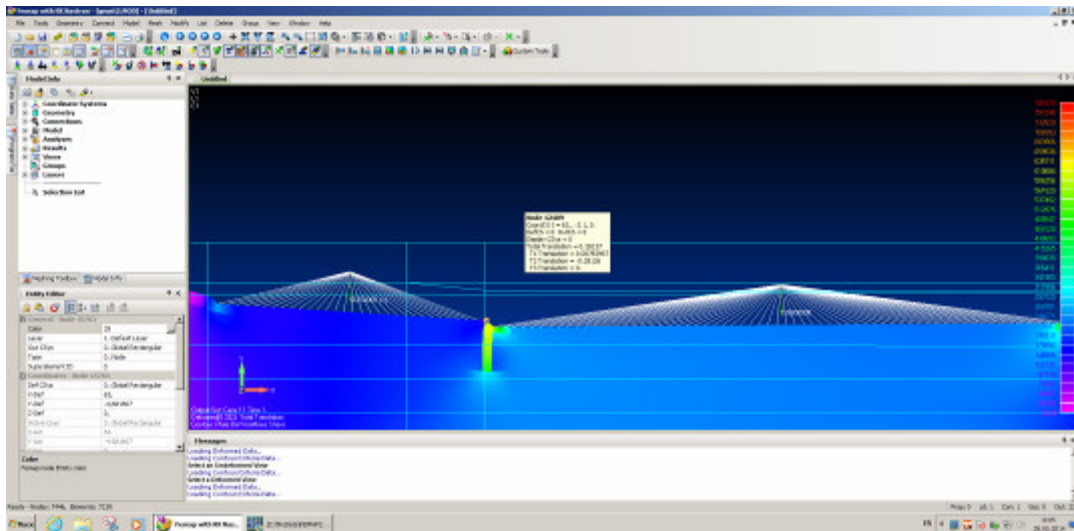


Рис. 12. Геометрична модель за наявності деформацій згідно з першою розрахунковою схемою

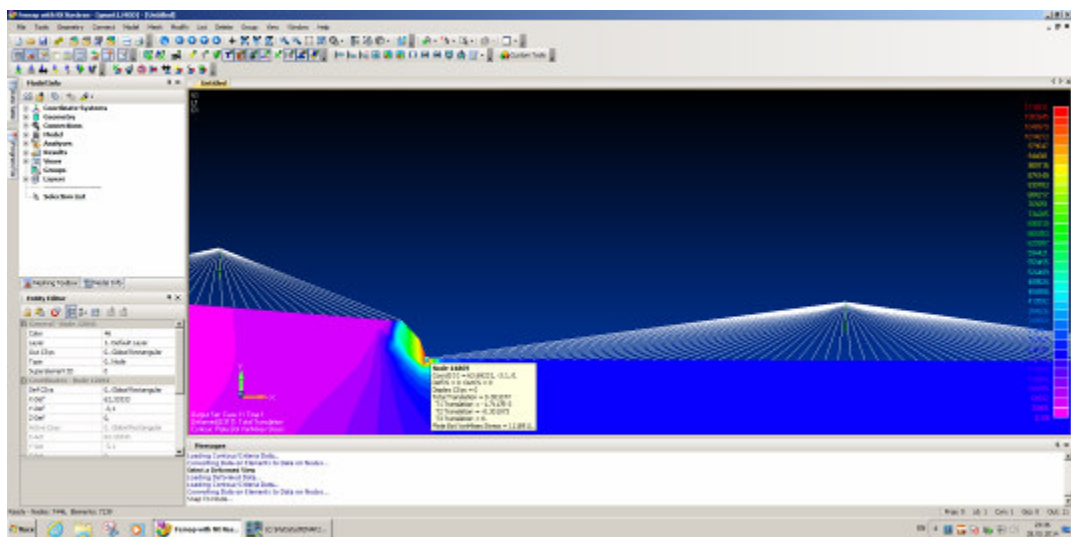


Рис. 13. Геометрична модель за наявності деформацій згідно з другою розрахунковою схемою

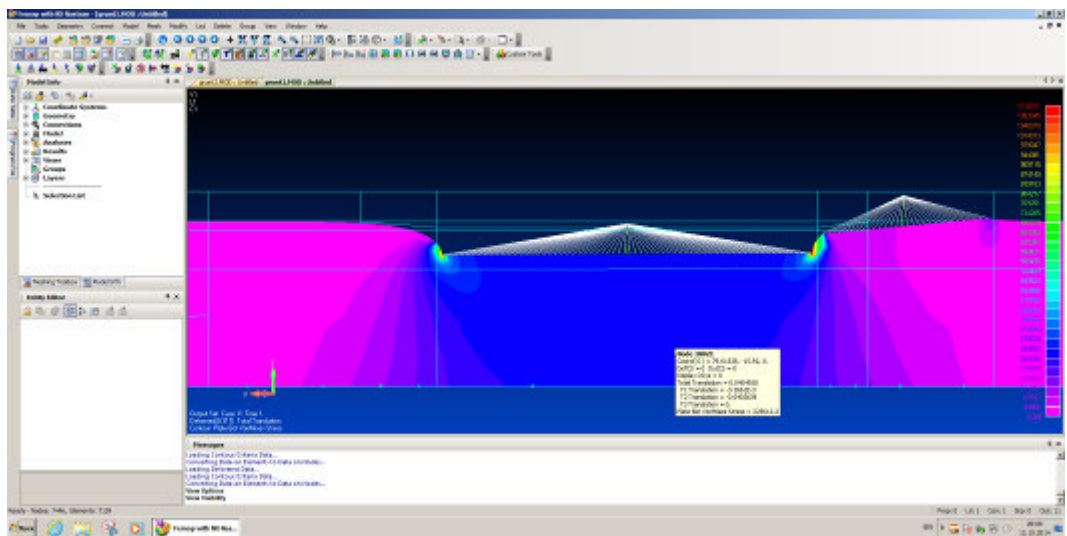


Рис. 14. Геометрична модель за наявності деформацій згідно з третьою розрахунковою схемою

Висновки. Таким чином, ПК Plaxis 8.5 2D та FEMAP with NX Nastran MCE за пружно-пластичною моделлю ґрунту дозволяють виконати достатньо коректне моделювання впливу новобудов на існуючу будівлю. Результати моделювання подано у вигляді стандартних графіків, що дозволяє детально аналізувати отримані дані.

При моделюванні НДС системи «основа – новобудова – існуюча будівля» без роз'єднувального екрана стисла товща ґрунту нічим не обмежується, а отже, її вплив рівномірно віддалений від фундаменту (штампа). На порівняльному графіку осідань штампа від навантаження видно, що модель досить добре описує осідання штампа. Але на графіку осідань марок від дії навантаження на штамп є розбіжність, котра пояснюється тим, що у лоткових випробуваннях горизонтальний тиск до зразка прикладається більш значними ступенями, тоді як програма задає значно менші ступені, що призводить до поступового наростання напружень, а також можливих недоліків у проведенні лабораторних випробувань.

При моделюванні випробувань за наявності роз'єднувального екрана останній не дає можливості розповсюдження деформацій від дії навантаження на штамп. Доведено також доцільність варіантного геотехнічного проектування з використанням роз'єднувальних екранів.

Література

1. Симагин В.Г. Проектирование и устройство фундаментов вблизи существующих сооружений в условиях плотной застройки / В.Г. Симагин. – М.: АСВ, 2010. – 128 с.
2. Черний Г.І. Будівництво нових споруд в умовах щільної міської забудови / Г.І. Черний // Будівництво України. – 2000. – №4. – С. 6 – 9.
3. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: «АСВ», 2014. – 728 с.
4. Plaxis 3D Foundation. ReferenceManual. Version 1.5 / R. Brinkgreve et al. – Delft: Delft University of Technology. – 2006. – 152 p.
5. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С.Ф. Клованич. – Запорожье: ООО «ИПО «Запорожье», 2009. – 400 с.
6. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементарное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. – К.: КНТУУ, 2011. – 22 с.
7. Голов О.О. Программный комплекс «Основание» для розв'язання геотехнічних задач / О.О. Голов // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 10. – Полтава: ПолтНТУ, 2002. – 21 с.
8. Зоценко М.Л. Эффективность раз'єднательных стенок у ґрунті при захисті існуючих будівель від впливу новобудов / М.Л. Зоценко, О.В. Борт // Бетон и железобетон в Украине. – 2007. – №1. – С. 24 – 27.
9. Melentijevic S. Application of cement deep mixing method for underpinning / S. Melentijevic, J.L. Arcos // Grupo Rodio-Kronsa, Madrid, Spain. Universidad de A Coruna, Spain. The Silesian University of Technology, Gliwice, Proc. of the 18th intern. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, 2013. – P. 2486 – 2489.
10. Зоценко М.Л. Проект технічних умов на проектування та влаштування роз'єднательних екранів з ґрунтоцементних елементів, виготовлених бурозмішувальним методом / М.Л. Зоценко, А.В. Веденісов // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во). Вип. 1(40), т. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 248 – 258.
11. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель і споруд. Основні положення проектування. Зі змінами №1 і №2. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 161 с.
12. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти. Підручник / В.Б. Швець, І.П. Бойко, Ю.Л. Винников, М.Л. Зоценко, та ін. – Дніпропетровськ: Пороги, 2014. – 232 с.

© М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, А.В. Веденісов

Надійшла до редакції 25.05.2015