

УДК 519.642:624.044:624.15

А. С. Моргун, д. т. н., проф.; А. О. Швець; О. С. Шевченко

АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПРОГНОЗУВАННІ НАДІЙНОСТІ ФУНДАМЕНТІВ ВИСОТНИХ СПОРУД

Стаття містить теоретичне обґрунтування розв'язку нелінійної задачі фундаментобудування, що потребує залучення теорії пружності, пластичності, ЕОМ. Урахування пластичності сприяє підняттю несної спроможності фундаментної конструкції.

Ключові слова: метод граничних елементів, рівняння стану, пружність, пластичність, напружено-деформований стан.

Вступ

Однією з актуальних завдань фундаментобудування є розробка і впровадження більш сучасних та економічних методів розрахунку будівельних конструкцій (фундаменти складають значну їх частину), спрямованих на виявлення й реалізацію їхніх резервів. Висотні будівлі є доволі індивідуальними спорудами, що потребують індивідуальної прив'язки до ґрунтів конкретного будівельного майданчика (умови прив'язки практично не повторюються).

Незважаючи на уявну простоту, процеси, що проходять у ґрунтах, дуже складні як об'єкт дослідження та контролю. На сьогодні вивчено не всі аспекти механізму деформування ґрунтової основи під навантаженням.

Наукові дослідження в галузі механіки ґрунтів завжди були направлені на вдосконалення методів проектування основ і фундаментів. Для забезпечення надійності проектування основ і фундаментів споруд необхідно враховувати під час моделювання їхньої поведінки складних і багаточисельних фізико-механічних характеристик ґрунтів.

Постановка завдання, визначальні співвідношення

У роботі спрогнозовано осідання фундаментної конструкції-плити для 12-типоверхової споруди на рис. 1. Для аналітичного розгляду завдання формування математичного еквівалента поведінки матеріалу ґрунту під навантаженням у роботі залучено механіку суцільних та пористих середовищ. У ґрунтах за дії зовнішніх сил виникають як пружні $\epsilon^{\text{пружн}}$ так і пластичні залишкові $\epsilon^{\text{пласт}}$, деформації (їх $\approx 95\%$).

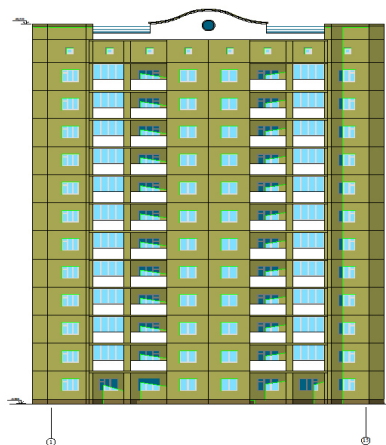


Рис. 1. Фасад 12-типоверхової будівлі

Суттєвою різницею ґрунтів від однорідних пружних тіл є те, що під час дії зовнішніх навантажень залишкові деформації завжди є супутніми пружним, навіть за незначних навантажень. Сума залишкової та пружної деформації складає повну деформацію ґрунтової основи.

Одночасна наявність у ґрунті зон, які працюють як у пружній, так і в пластичних зонах потребує для моделювання його поведінки залучення теорії пружності та пластичності [1 – 4].

Відомо, що розв'язок змішаної задачі теорії пружності і теорії пластичності ґрунтів значно наближує до дійсності результати розрахунків осідань. Сучасна тенденція переходу до автоматизованих методів розрахунку різко змінила пріоритети в бік необхідності розробки більш достовірних математичних моделей нелінійно-деформованих ґрунтових масивів, складених із шарів із різними властивостями.

Експериментально досліджено [5], що навіть у дуже слабких ґрунтах текучої консистенції за рамками межі зони деформацій переміщення ґрунту не спостерігають. Це свідчить про те, що зона деформацій є активною робочою зоною основи фундаменту, у рамках якої протягом деякого часу розвивається динамічний процес ущільнення ґрунту, що відображає суть сумісної роботи фундаменту й основи до повернення її в стан рівноваги.

У природних умовах нашарування ґрунтів має різну текстуру. У запропонованій моделі в якості вхідних параметрів узято середньозважені характеристики ґрунту.

У моделі враховано 10 чинників впливу інженерно-геологічних властивостей ґрунту на процес його деформування: $E=13,309$ МПа; $\nu=0,35$, $e=0,67$, $\rho^{\min}=1,47$ т/м³, $\rho^{\max}=2,14$ т/м³, $\rho=1,95$ т/м³, $c=18,1$ кПа, $\varphi=0,193$ рад., $p_0=-1800$ кПа, $\rho_s=2,717$ т/м³.

Під впливом навантажень ґрунтова основа під спорудою деформується в межах активної зони (зони впливу додаткового навантаження), дискретизацію активної зони фундаментної основи 12-типоверхової споруди надано на рис. 2. Як відомо, математична модель дає основу для числового аналізу досліджуваного об'єкта, за допомогою якого можна отримати дані не лише описаного, але й прогнозного характеру.

Розглядають складний напружено-деформований стан ґрунту (стискання зі зсувом). Фізичні рівняння стану описують пружно-пластичною діаграмою Прантля зі зміцненням із границею пропорційності за Мізесом-Шлейхером-Боткіним [2, 3], яка реєструє максимально досягнені напруження основи.

Запропонована нелінійна математична дилатансійна модель ґрунтується на таких припущеннях:

1. Рівняння рівноваги палі, зануреної в ґрунтове середовище, задовольняє диференціальне рівняння Лапласа.
2. У якості геометричних рівнянь використано тензор малих деформацій Коші.
3. Фізичний стан роботи ґрунту в лінійній області описують законом Гука.
4. На стадії пластичного деформування вектори тензора напруг і тензора швидкостей деформацій не співвісні. Точні диференціальні рівняння поведінки палі у ґрунті – нелінійні.
5. У запропонованій математичній моделі для спрощення задачі нелінійні рівняння на кожному кроці навантаження лінеаризовано за допомогою використання крокових процедур О. А. Ільюшина.

Перехід від краєвої задачі рівнянь рівноваги фундаментної конструкції в ґрунті до інтегральних рівнянь здійснюють за допомогою числового методу граничних елементів.

Основним розрахунковим рівнянням спроектованої в роботі моделі роботи ґрунту, яке є

аналогом системи 15 диференційних рівнянь (статичних, геометричних, фізичних), є інтегральне рівняння, запропоноване К. Бреббія [4]:

$$c_{ij} \cdot u_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_j d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_j d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma^* \varepsilon_{jk}^p d\Omega, \quad (1)$$

де, u -заданий вектор переміщень на границі фундаментної конструкції; p – шуканий вектор напружень на границі; u^*, p^*, σ^* – ядра граничного рівняння (1) – рішення Р. Мінділіна для переміщень, напружень та похідних від напружень, що відповідають одиничним збурювальним впливам ($P=1$) у півпросторі [4]; c_{ij} – постійна, яку визначають із умов руху тіла як цілого і яка з’являється під час переводу красвої задачі до інтегрального рівняння (1) для отримання єдиного розв’язку; Γ, Ω – відповідно гранична поверхня фундаментної конструкції та границя трикутних осередків ґрунту.

Поняття «система» широко використовують майже в усіх галузях науки та техніки. Реакцію системи на зовнішні дії розглядають у роботі як динамічну зміну стану системи, у процесі якої вона прагне мінімізувати деяку потенційну функцію. Розв’язання цих питань поведінки ґрунтової основи під навантаженням має як наукове, так і прикладне значення.

Основний розв’язок (1) у роботі проведено методом граничних елементів. Згідно з положенням, що викристалізувалось у нормативних документах, граничний опір фундаментної конструкції визначають опором ґрунту руйнуванню під нижнім кінцем і опором зсуву по боковій поверхні. Цю граничну поверхню плити дискретизують у роботі граничними елементами, активну зону ґрунту дискретизують трикутними осередками. Для дослідження НДС плити використано просторову пружно-пластичну дилатансійну модель пористих середовищ [2].

Використана дилатансійна модель дозволяє:

- а) схематизувати процес, розбивши його на послідовні стадії формозміни та ущільнення;
- б) скористатись результатами теорії пластичності нестисливих тіл, яка на сьогодні відпрацьована достатньо повно;
- в) провести аналіз розв’язків нелінійної задачі, виконавши його методом пружних розв’язків О. А. Ільюшина;
- г) урахувати траєкторію навантаження, не співвісність векторів тензорів напружень та тензора швидкостей деформацій;
- д) перейти до автоматизованого розрахунку поведінки фундаментної конструкції в ґрунті, дискретизувавши розрахункову модель і провівши розрахунок за числовим методом граничних елементів (МГЕ).

У роботі замість вимог ортогональності вектора приросту пластичних деформацій $d\varepsilon_{ij}^p$ до поверхні пластичності f використано неасоційований закон пластичної течії, який доповнювали дилатансійним співвідношенням В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p, \quad (2)$$

де $d\gamma^p$ – скалярний еквівалент приросту зсувної пластичної деформації на октаедричній площині; $d\varepsilon_{ij}^p$ – приріст непружних змін об’єму, супутних зсуву; Λ – швидкість дилатансії; χ – параметр зміцнення ґрунтового середовища (прийнято щільність ґрунту ρ).

У якості параметра зміцнення прийнята щільність ґрунту, яка є своєрідною пам’яттю ґрунту, її підвищення означає зміну площадки текучості матеріалу ґрунту.

Відповідно до напрацьованої моделі загальні деформації визначають:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p, \quad (3)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$ – приріст пружних деформацій; $d\varepsilon_{ij}^p$ – приріст пластичних деформацій.

У модель, за якою проведено числові дослідження НДС фундаментної плити, вводили ще додаткові кінематичні умови дилатансії (2).

Визначення несної спроможності плити та осідань фундаменту від дії вертикального навантаження проведено шляхом розв’язку задачі в пружно-пластичній постановці в такій послідовності:

- дискретизація граничної поверхні плити та активної (буферної) зони;
- компоновка розрахункової матриці впливу МГЕ на основі розв’язків Р. Міндліна;
- запис розрахункової системи рівнянь;
- розв’язок отриманої СЛАР, отримання НДС на кожному кроці навантаження;
- побудова пластичних областей;
- прийняття та обґрунтування проектного рішення про можливість прикладання додаткових навантажень.

На рис. 2 наведено спрогнозований за МГЕ графік «навантаження осідання» на всьому інтервалі навантаження плитної фундаментної конструкції висотою 0,7 м 12-типоверхової будівлі.

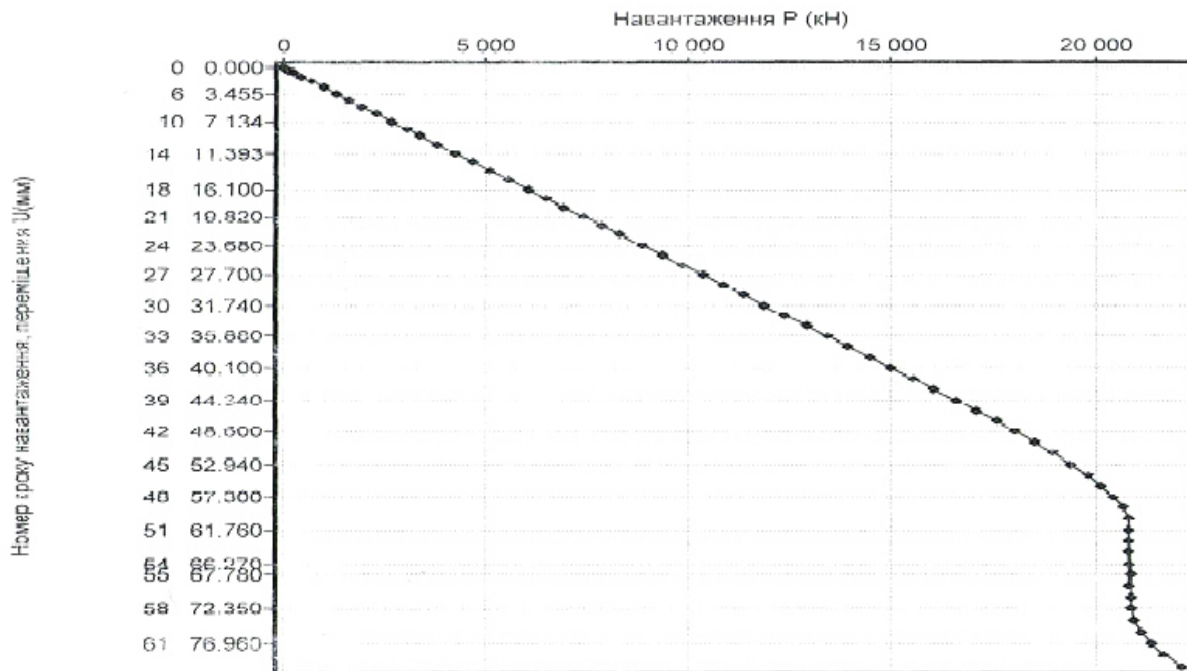


Рис. 2. Графік залежності «навантаження P – осідання s»

Графік на рис. 2 дозволяє визначити осідання s за різних навантажень P та вибрати найвигідніші технічні та економічні умови роботи плитного фундаменту, які будуть гарантувати стійкість та надійність 12-типоверхової будівлі на цьому плитному фундаменті. Запропонована модель поєднує розрахунок системи «основа – фундаментна плита» за обома граничними станами, аналіз НДС системи проведено на всьому діапазоні її навантаження. Фундаментна плита може вирівнювати нерівномірність осідань завдяки перерозподілу навантажень.

Висновки

1. Під час спорудження висотних будівель виникає потреба прогнозування НДС основи із залученням сучасних методів прикладної геомеханіки та числових методів – МСЕ та МГЕ.
2. Під час визначення несної спроможності фундаментної плити та основи споруди використано теорію дисперсних середовищ та сукупні її питання тензорного числення.
3. Результати роботи мають суттєве практичне спрямування з можливістю отримання економічного ефекту з огляду на врахування пластичної роботи ґрунтової основи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Определяющие законы механики грунтов / [под ред. В. Н. Николаевского, ред. серии А. Ю. Ишлинский, Г. Г. Черный]. – М. : Мир, 1975. – 231 с.
2. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, О. В. Сахаров // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2004. – Вип. 28. – С. 3 – 10.
3. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках несучої спроможності кільцевих та круглих в плані фундаментних конструкцій / А. С. Моргун, О. В. Франчук // Вісник ВПІ. – 2012. – № 5. – С. 11 – 14.
4. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – М. : Мир, 1987. – 525 с.
5. Голубков В. Н. Исследование процесса формирования зоны деформации в основаниях одиночных свай / В. Н. Голубков, Ю. Ф. Тугаенко, Б. О. Хуторянский // Основания и фундаменты: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1971. – Вып. 4. – С. 9 – 13.

Моргун Алла Серафимівна – д. т. н., проф., завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва ФБТЕГП ВНТУ.

Швець Ганна Олександрівна – магістрант ФБТЕГП ВНТУ.

Шевченко Олексій Сергійович – магістрант ФБТЕГП ВНТУ.

Вінницький національний технічний університет.