

МЕТОД ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧАХ ГЕОТЕХНІКИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Питання визначення напружено-деформованого стану системи основа-фундамент є актуальним питанням на теперішній час. В роботі спрогнозовано напружено-деформований стан палі використовуючи метод граничних елементів, та порівнюються результати з експериментальними даними. Метод дозволяє точно моделювати напружено-деформований стан ґрунтів і конструктивних елементів фундаменту. Наведено результати числового моделювання, що демонструють ефективність методу граничних елементів. Результати дослідження можуть бути корисними інженерам-проектувальникам і науковцям.

Ключові слова: напружено-деформований стан, несуча спроможність, метод граничних елементів.

Abstract. The issue of calculating the stress-strain state of the base-foundation system is a relevant issue at present. The paper predicts the stress-strain state of a pile using the boundary element method, and compares the results with experimental data. The method allows for accurate modeling of the stress-strain state of soils and structural elements of the foundation. The results of numerical modeling are presented, demonstrating the effectiveness of the boundary element method. The results of the study may be useful to design engineers and scientists.

Keywords: stress-strain state, bearing capacity, boundary element method.

Найважливішою частиною споруди є фундаментна частина, яка сприймає навантаження від споруди і передає на основу, яка може бути природною чи штучною. Теорія пластичної течії враховує можливість існування поверхні навантаження. Вперше до ґрунтів функція навантаження F була конкретизована Д. Друкером.

Неасоційований закон пластичної течії для ґрунтового середовища використовує потенціальну функцію F , що не співпадає з функцією текучості f .

Основна задача при проектуванні будівельних конструкцій – зведення до мінімуму осідань ґрунту під фундаментом. Якщо структурні зв'язки між мінеральними частинками ґрунту не порушуються, то ґрунти деформуються як суцільне тіло. При порушенні структурних зв'язків деформації ґрунту обумовлюються взаємними переміщеннями його частинок. Тому крім загальних закономірностей, яким підкоряються деформації суцільних тіл, ґрунти мають ряд особливостей: в них виникають пружні (зворотні) і залишкові деформації.

Різка збільшення кривизни графіка “навантаження-осідання” свідчить про “зрив” сил тертя, при цьому несуча спроможність палі практично вичерпується (див. рис. 1).



Рис. 1 - Експериментальна крива $S = f(P)$.

Для проектування фундаментної конструкції важливим та першочерговим є визначення її несучої спроможності та напружено-деформованого стану.

В роботі спрогнозовано напружено-деформований стан палі довжиною 18м розмірами поперечного перетину 35х35 см, використовуючи метод граничних елементів.

Експериментальні дослідження несучої спроможності та напружено-деформованого стану палі проведено на будівельному майданчику в м. Вінниці, рис.3.

На кожному етапі розрахунку враховувалось:

- подальше розуцільнення (дилатансія);
- ущільнення ґрунту (контрактансія);
- перехід ґрунту в пластичний стан відповідно до умови міцності;
- контроль дотичних напружень τ у ґрунті здійснювався за умовою Мізеса-Шлейхера-Боткіна;
- можливість проковзування бічної поверхні фундаменту відносно ґрунту.

В роботі використано нелінійну математичну модель та числовий метод граничних елементів. Розрахунки базуються на теорії граничної рівноваги, яка розглядає граничний напружений стан.

Для дослідження поставленої мети використано розрахунковий комплекс, орієнтований на розв'язок нелінійних задач, які забезпечують моделювання процесів деформування ґрунту в зоні потенційної поверхні ковзання.

Методика чисельного моделювання напружено-деформованого стану ґрунтової основи з урахуванням нелінійних деформацій ґрунту заснована на методі граничних елементів [1,2], дилатансійній моделі нелінійних деформацій ґрунту [3,4], кроково-ітераційному процесі О. Льюшіна [6]. Метод пружних рішень Льюшіна в своїй основі є метод лінійних наближень.

Переведення краєвої задачі із системи 15 диференціальних розрахункових рівнянь до інтегрального рівняння при розгляді нелінійної задачі механіки ґрунтів має вигляд:

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

де, u - заданий вектор переміщень на контакті границі фундаментної конструкції;

p - шуканий вектор напружень на границі;

u^* , p^* , $\dot{\sigma}^*$ - ядра граничного рівняння [2], чи функції впливу МГЕ (фундаментальні рішення), це двоточкові функції, їх компоненти – переміщення та напруження довільної точки поля півпростору в напрямку i (точка нагляду) від сили $P = 1$, прикладеної в j -му напрямку (джерелі) – прийнято рішення Р. Міндліна для переміщень, напружень та похідних від напружень, що відповідають одиничним збурюючим впливам ($P=1$) в півпросторі. Ядра інтегрального рівняння характеризують собою досліджуване середовище;

c_{ij} - постійна, визначається із умов руху тіла як цілого, з'являється при переводі краєвої задачі до інтегрального рівняння 1, 2 для отримання єдиного рішення;

Γ - гранична поверхня фундаментної конструкції;

ξ - точка збурення;

Ω - границя трикутних осередків активної (дилатансійної) зони ґрунту [1], [2].

Остання складова в рівнянні 1 включає інтеграл по області масиву ґрунту $d\Omega$, в якому очікується поява пластичних деформацій (активна зона ґрунтової основи).

$\dot{\varepsilon}_{jk}^p$, $\dot{\sigma}^*$ - похідні від фундаментальних рішень Р. Міндіна.

Для числової реалізації (1) дискредитувалась лише поверхня контакту фундаменту і ґрунту, оскільки рішення Р. Міндіна, які слугують ваговими функціями в числовому методі граничних елементів, автоматично задовольняють граничним умовам на вільній від напружень поверхні півпростору. Границя Γ розбивалась на ряд граничних лінійних елементів, очікувана активна зона деформацій навколо пальового ґрунту дискредитувалась трикутними осередками.

Рівняння (1) записувалось в дискретній формі для кожного вузла ξ границі Γ та кожного трикутного осередка, в результаті отримувалось матричне співвідношення:

$$H\dot{U} = G\dot{P} + D\dot{\varepsilon}^p, \quad (2)$$

З метою врахування дисипативних ефектів ґрунту крім рівняння рівноваги (1) в модель вводились ще 2 додаткових: критерій переходу до граничного стану – умова текучості Мізеса-Шлейхера - Боткіна

та залежність між напруженнями та швидкостями деформацій для пластичного стану – неасоційований закон пластичної течії.

Деформування ґрунту в нелінійній стадії проведено згідно дилатансійної умови В. Н. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3,4].

Для корегування неспіввідності T_σ та T_ε при роботі ґрунту в пластичній стадії використано дилатансійну умову В.Н. Ніколаєвського, І.П. Бойка [3,4]:

$$d\varepsilon_{ij(\text{шар})}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p \quad (3)$$

де $d\varepsilon_{ij(\text{шар})}^p$ – скалярний еквівалент приросту непружних об'ємних деформацій (шарової частини тензора деформацій);

$d\gamma^p$ – скалярний еквівалент приросту деформацій зсуву;

$\Lambda(\chi)$ – швидкість (коефіцієнт) дилатансії:

$$\Lambda = d\varepsilon_v / d\gamma. \quad (4)$$

У використаній моделі швидкість дилатансії Λ визначалась згідно з дилатансійною теорією В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3,4].

Приріст пластичних деформацій від девіатора напружень:

$$d\varepsilon_{ij(\text{дев})}^p = D_{ij} d\lambda \quad (5)$$

де D_{ij} – девіатор напружень;

$d\lambda$ – коефіцієнт пропорційності,

$d\gamma^p$ – скалярний еквівалент приросту зсувної пластичної деформації на октаедричній площині;

$d\varepsilon_{ij(\text{дев})}^p$ – приріст непружних змін об'єму, що супутні зсуву;

Λ – швидкість дилатансії.

Заміна геологічних показників багатофазового середовища показниками еквівалентного квазіоднорідного середовища є достатньо ефективним прийомом при розрахунках.

На рис. 2 наведено результати аналізу напружено-деформованого стану палі методом граничних елементів. На рис. 3 наведено результати експериментальних досліджень.

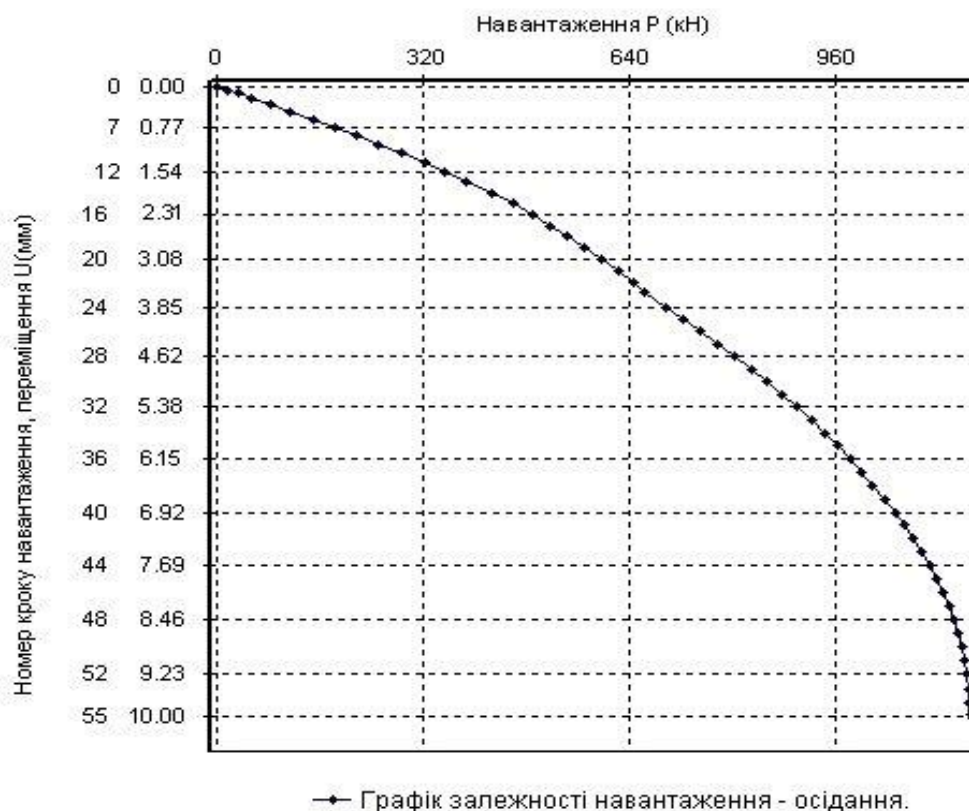


Рис.2. Результати числових досліджень за МГЕ напружено-деформованого стану дослідної палі

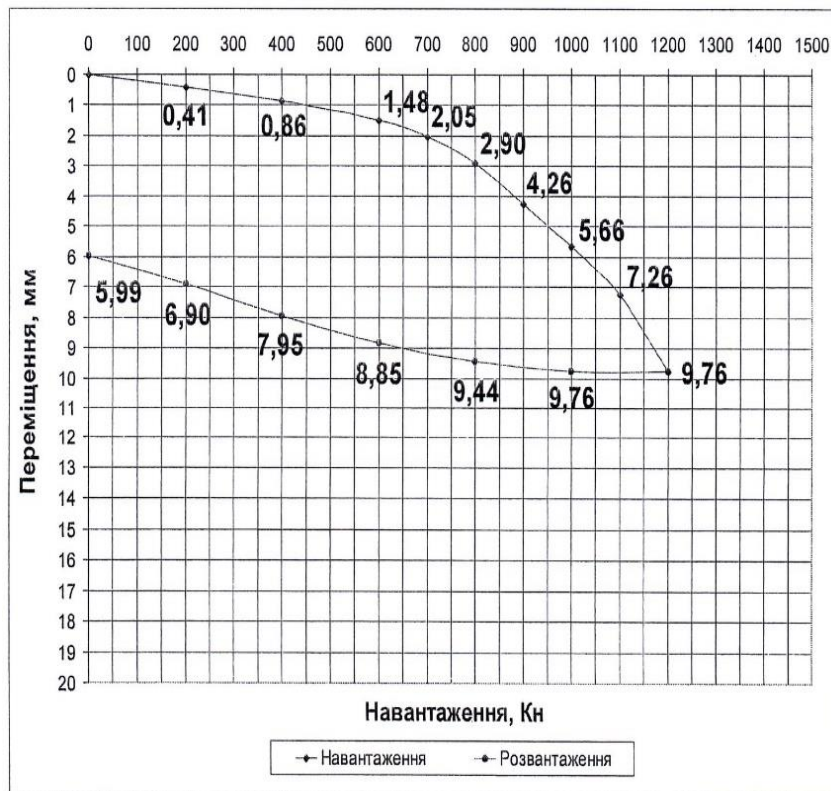


Рис.3. Графік “навантаження-переміщення” експериментальних досліджень дослідної палі

Висновки:

1. Результати розрахунку несучої спроможності палі, використовуючи метод граничних елементів є достатньо близькі до результатів експериментальних досліджень, що свідчить про адекватність використаної моделі розрахунку.
2. Викладена в роботі модель дозволяє приймати надійні та більш економічно вигідні рішення з дотриманням вимог міцності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів // А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ. – 2013 – 108с.
2. Бреббія К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методи граничних елементів. 1987. – 523 с.
3. Бойко І. П. Теоретичні основи проектування палих фундаментів на пружньо-пластичній основі / І. П. Бойко // Основи та фундаменти. – К.: Будівельник, 1985. № 18. – С. 11–18.
4. Ніколаєвський В. Н. Дилатансія та закони незворотнього деформування ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // Зб. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. - 1979. - № 5. -С. 29-31.
5. Моргун А. С. Застосування МГЕ у розрахунках палі в пластичному середовищі ґрунту. Вінниця: Універсум–Вінниця, 2001. – 64 с.
6. Ільюшин О. Праці (1946-1966). Т.2. Пластичність. 2004. 480 с. ISBN 5.9221-0364-4

Моргун Алла Серафимівна – д.т.н., професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: morgunallaS@gmail.com.

Записов Дмитро Васильович – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: dzapisov@gmail.com.

Alla Morgun - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, morgunallas@gmail.com

Dmytro Zapisov - Postgraduate Student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, dzapisov@gmail.com