

УДК 519.642:624.044:624.15

А. С. Моргун, д-р. техн. наук, проф.; О. В. Франчук, студ.

## РОЗРАХУНОК ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРУГЛОЇ В ПЛАНІ ФУНДАМЕНТНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

*Запропонована методика розрахунку круглої в плані фундаментної конструкції будівлі на основі розрахункової пружно-пластичної моделі, яка враховує девіаторну та шарову компоненти тензора напружень і нелінійне об'ємне деформування ґрунту при зміні ступеня ущільнення ґрунтової основи.*

### Вступ

Результати моніторингу осідань будівель показують значні розбіжності між фактичними і розрахунковими їх значеннями. Це пояснюється умовністю розрахункових схем, неврахуванням процесів зміцнення ґрунтів.

Міцність ґрунту суттєво залежить від траєкторії навантаження, початкової щільності, співвідношення девіаторної та шарової частини тензора напружень  $T\sigma$ , тобто з ефектами дилатансії та контрактансії. Тому розвиток і уточнення розрахункових моделей основ споруд є актуальним для сьогодення.

В зв'язку з цим в роботі подано прогноз напружено-деформованого стану (НДС) фундаментної плити числовим методом граничних елементів за дилатансійною моделлю, яка акумулює сучасні уявлення про роботу дисперсного середовища ґрунту.

### Постановка задачі, визначальні співвідношення

Фундаментна конструкція має забезпечити міцність будівлі, а це вимагає точного прогнозу деформацій. Тому для проектування фундаментної плити корпусу їдальні та конференц-залу залучено програмний комплекс, який базується на методі граничних елементів (МГЕ).

Розглядаючи тривимірну задачу пластичної поведінки ґрунтової основи споруди, границя контакту фундаментної конструкції та ґрунту дискретизувалась 40 лінійними граничними елементами (ГЕ), а підвалини, де очікуються пластичні деформації, дискретизувались 142 внутрішніми осередками трикутної форми. Матричне співвідношення інтегрального граничного рівняння рівноваги для граничного вузла  $\xi_i$  має вигляд

$$HU = GP + DE^P, \quad (1)$$

де  $H = \int_{\Gamma} \rho^* \Phi d\Gamma$ ;  $G = \int_{\Gamma} U^* \Phi d\Gamma$  — інтеграли по кожному граничному елементу бокової поверхні та нижньої поверхні, обчислюються за схемами числового інтегрування двовимірних квадратів Гауса [1],  $G$  — матриця впливу МГЕ;  $U^*$ ,  $\rho^*$  — ядра граничного рівняння, матриці впливу Гріна, в цій роботі — це фундаментальні сингулярні розв'язки Р. Міндліна;  $\Gamma$ ,  $\xi$ ,  $x$  — відповідно, границя, точка збурення, точка нагляду;  $D = \int_{\Omega} \sigma^* \Phi^T d\Omega$  — матриці  $D$  відповідають інтеграли, що включають непружні деформації.

Інтеграли по внутрішніх осередках ґрунту  $\Omega$  обчислювались за схемою напіваналітичного інтегрування з використанням формул Хамера [2].

$$\int_{\Omega} \sigma^* \Phi^T d\Omega = \sum_{K=1}^K \left( \sigma^* \Phi^T \right)_K W_K I_K, \quad (2)$$

де  $I_k$  — якобіан перетворення системи координат;  $W_k$  — вагові коефіцієнти методу Хамера.

Матриця впливу МГЕ ( $G$ ) компонувалась згідно з аналітичними розв'язками Р. Міндліна для пружного півпростору. Оскільки розв'язки Міндліна двоточкові (точка  $\xi$  — прикладання  $P=1$  та точка нагляду  $B$ ) при компонуванні матриці впливу МГЕ т.  $\xi$  переміщались по всіх граничних елементах бокової поверхні та нижньої поверхні контакту фундаментної конструкції з ґрунтовою основою.

Оскільки матриця впливу МГЕ ( $G$ ) з погляду будівельної механіки є матрицею піддатливості, то величина обернена до матриці піддатливості являє собою матрицю жорсткості.

Таким чином, компоновка матриці впливу МГЕ дає можливість отримати жорсткість ґрунтової основи по всіх граничних елементах бокової поверхні та нижньої поверхні фундаментної конструкції.

Алгоритм розв'язання пластичної задачі базується на ітераційному способі накопичення приростів пластичних деформацій, основна ідея якого запропонована О. А. Іллюшиним.

В межах будівельного майданчика ґрунти (суглинки) мали подібні за генезисом умови формування і близькі фізико-механічні характеристики шарів. Для розрахунку взято середньозважені характеристики шарів за даними чотирьох свердловин:

$$\begin{aligned} E &= 15,55 \text{ МПа}; & \nu &= 0,35; & C &= 27,81 \text{ кПа}; \\ \varphi &= 19^\circ; & \rho &= 1,895 \text{ т/м}^3; & & \\ \rho^{\min} &= 1,2538 \text{ т/м}^3; & \rho^{\max} &= 2,0428 \text{ т/м}^3; & e &= 0,7952. \end{aligned}$$

Фундаментна плита в числовому розрахунку розглядалась як однорідне циліндричне тіло, що не деформується, на яке діє вертикальне стискаюче навантаження. В числових дослідженнях НДС фундаментної конструкції використано просторову версію пружно-пластичної дилатансійної моделі ґрунту з фізичними рівняннями закону Гука на дограничній стадії деформування та умовою текучості Мізеса-Шлейхера-Боткіна і співвідношеннями неасоційованого закону пластичної течії у роботі основи в заграничній стадії. Розрахунок фундаментної плити проведено згідно з алгоритмом, наведеним у [3].

Визначення несучої здатності та величини осідання фундаментної конструкції проводилось в такій послідовності:

- дискретизація граничної контактної поверхні фундаментної конструкції та активної зони ґрунту;
- компоновка розрахункових матриць впливу МГЕ на основі рішень Р. Міндліна;
- запис розрахункових систем рівнянь;
- розв'язок систем лінійних алгебраїчних рівнянь, отримання НДС фундаментної конструкції на кожному етапі навантаження;
- визначення областей граничного стану із аналізу вектора пластичних деформацій;
- прийняття і обґрунтування проектного рішення про несучу спроможність фундаментної плити.

### Результати досліджень

В цілому характер розвитку деформацій ілюструє нелінійну залежність  $\rho = f(s)$  після порушення природних структурних зв'язків суглинку. В першому варіанті розрахунку товщина фундаментної плити, що укладалась на ґрунт натурального закладання, взята 0,3 м (рис. 1).

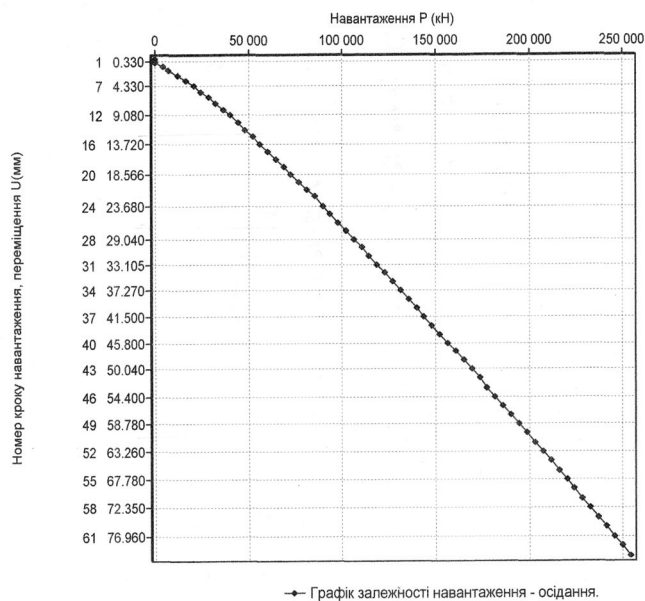


Рис. 1. Осідання фундаментної плити на ґрунті натурального закладання

З метою зменшення осідання будівлі запропоновано покращити фізико-механічні показники ґрунтової основи щебеневою підсипкою 15 см. Середньозважений модуль деформацій за таких умов збільшився з 15,55 МПа до 24,47 МПа. Результати прогнозу з покращеними показниками ґрунту зображені на рис. 2б. Прогнозоване за МГЕ осідання будівлі складає 11 мм, що значно менше нормативно допустимого 80 мм.

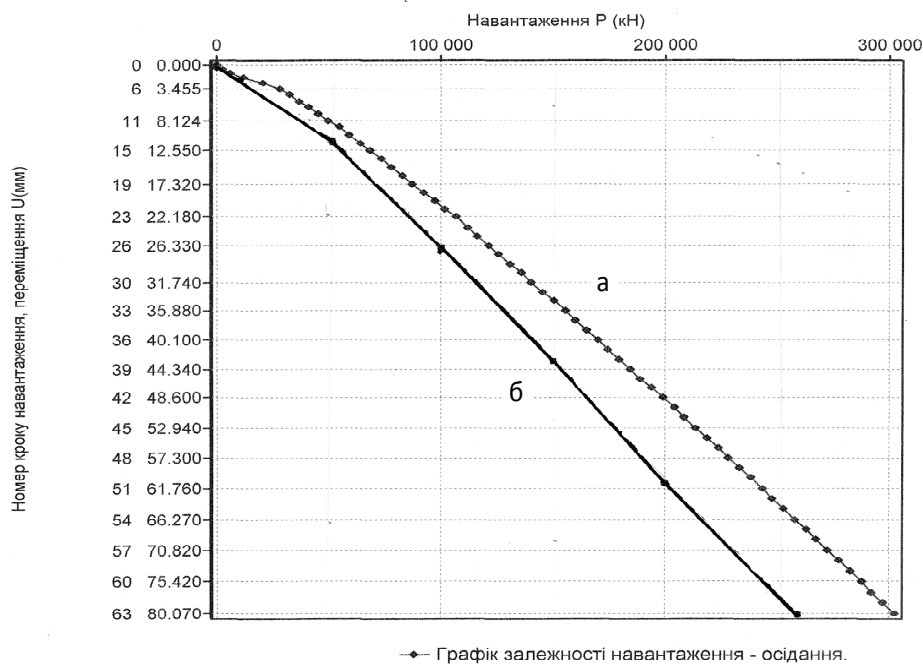


Рис. 2. Осідання фундаментної плити: а — на ґрунті зі щебеневою підсипкою; б — на ґрунті натурального закладання

### Висновки

1. Запропонований покращений варіант розвитку деформацій суглинкової основи прогнозує величину осідання корпусу їдальні 11 мм з товщиною плити 0,3 м та щебеневою підсипкою 15 см.

2. Застосована пружно-пластична модель дозволяє задовільно описувати процес деформування фундаментних конструкцій, моделювати їх поведінку під час статичного навантаження. Це свідчить про адекватність закладених в основу моделі передумов і перспективність використання моделі для розв'язання практичних задач фундаментобудування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моргун А. С. МГЕ в розрахунках паль / А. С. Моргун. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 132 с. — ISBN 966-7199-96-7.
2. Бенерджи П. Методи граничних елементів в прикладних науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфілд, К. Телес. — М. : Мир, 1984. — 494 с.
3. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніщевич. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. — 162 с. — ISBN 978-966-641-313-3.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 19.01.12  
Рекомендована до друку 2.02.12

**Моргун Алла Серафимівна** — завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва;  
**Франчук Ольга Василівна** — студентка Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.  
Вінницький національний технічний університет, Вінниця