

## ТЕСТУВАННЯ МЕТОДИКИ СПІЛЬНОГО СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ «СПОРУДА – ҐРУНТОВИЙ МАСИВ»

За результатами розв'язання тестових задач встановлюється можливість застосування розробленої методики спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив». В якості тестових були прийняті задачі розрахунку безанкерної шпунтової стінки, а також залізобетонної балки на ґрунтовій основі.

*Ключові слова:* методика, шпунтова стінка, залізобетонна балка, ґрунтова основа

По результатам решения тестовых задач устанавливается возможность использования разработанной методики совместного статического расчета напряженно-деформированного состояния системы «сооружение – ґрунтовый массив». В качестве тестовых были приняты задачи расчета безанкерной шпунтовой стенки, а также железобетонной балки на ґрунтовой основе.

*Ключевые слова:* методика, шпунтовая стенка, железобетонная балка, ґрунтовой основание

The numerical simulation methodology of the process of interaction between structures and soil massif has been developed. The main feature of this static analysis technique is consideration the structure and soil massif as unified system “structure – soil massif”. The verification of this technique has been conducted. The static analysis of sheet-pile walls without anchors and reinforced beams on soil foundation was taken as verify tests.

*Keywords:* methodology, cutoff wall, reinforced beams, soil foundation

### Постановка проблеми

До останнього часу розрахунок споруди з урахуванням її спільної роботи з ґрунтовим масивом застосовувався переважно тільки для заглиблених, напівзаглиблених будівель та підземних споруд, які контактують з ґрунтом більшістю своїх огорожувальних конструкцій. Але ж аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить про те, що сьогодні все частіше такий спільний розрахунок застосовують і при розрахунку звичайних наземних будівель. При цьому споруда і ґрунтовий масив розглядаються як єдина система, що дозволяє врахувати власну жорсткість фундаментної і надфундаментної конструкцій та вплив її на характер деформування ґрунтового масиву [1, 2]. При розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» можна виявити більш достовірний розподіл внутрішніх зусиль в конструктивних елементах споруди і таким чином досягти суттєвої економії будівельних матеріалів. Крім цього, необхідність розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій, які взаємодіють з ґрунтом, як єдиної системи «споруда – ґрунтовий масив» визначається тим, що такий підхід на відміну від традиційного (що ґрунтується на застосуванні певних контактних моделей ґрунту) дозволяє отримати змістовніші та точніші результати, оскільки враховує більшу кількість факторів (зокрема, фізико-механічні властивості ґрунту, в тому числі нелінійні, врахування роботи ґру-

нту поза межами конструкції, вплив розташованих поблизу будівель і т. ін.) [3].

В результаті вивчення цих останніх тенденцій в розрахунку споруд, що взаємодіють з ґрунтом, аналізу наукової літератури та власних досліджень авторів було запропоновано методику спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» [4, 5], яка між іншим включала в себе рекомендації щодо створення скінчено-елементної моделі системи «споруда – ґрунтовий масив» для розрахунку в будь-якому з сучасних обчислювальних комплексів (SCAD, ЛІРА або інші).

### Мета досліджень

На основі результатів розрахунку тестових задач довести правомірність застосування методики спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив».

### Викладення основного матеріалу досліджень

Найпростішими прикладами застосування методики спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» є розрахунок безанкерних шпунтових стінок та балок на ґрунтовій основі.

*Розрахунок безанкерної шпунтової стінки.* Дослідженням шпунтових стінок присвячені

роботи багатьох вчених [6-11]. Аналіз результатів цих досліджень показав, що в більшості випадків дані експериментальних досліджень заперечують теоретичні розрахунки, зокрема, розрахунки за теорією Кулона [12]. Теорією передбачається, що під впливом активного тиску ґрунту стінка повертається відносно нерухомої точки, що розташована на певній глибині

нижче дна котловану. Стійкість стінки забезпечується внаслідок врівноваження активного та пасивного тисків ґрунту з різних її боків. Але ж експериментально доведено, що фактична епюра тиску ґрунту відрізняється від епюри, прийнятої в інженерних розрахунках (рис. 1) [13].

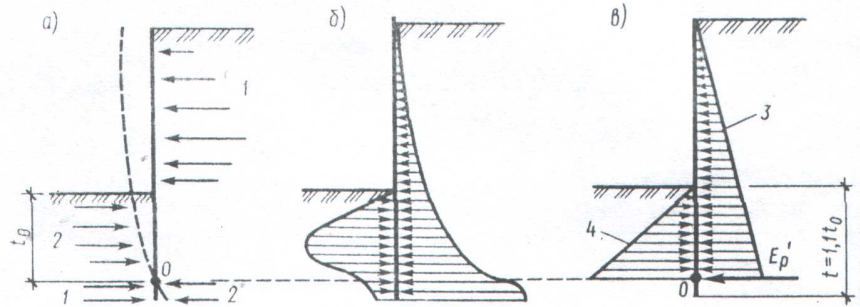


Рис.1. Робота безанкерної шпунтової стінки:

а) сили, що діють на стінку; б) фактична епюра тиску ґрунту; в) теоретична епюра тиску ґрунту, прийнята в розрахунках; 1 – активний тиск; 2 – пасивний тиск; 3 – граничний активний тиск; 4 – граничний пасивний тиск

Також результати проведених досліджень свідчать про те, що зусилля в шпунтовій стінці, отримані теоретичними методами значно перевищують фактичні. В літературі вказується на те, що в більшості випадків причиною надійності зведених конструкції слугувала не достовірність розрахункових схем, а нехтування цілим рядом факторів, що підвищують несучу здатність споруди. Серед основних причин, що зумовлюють невідповідність результатів, отриманих теоретичними методами, фактичним, слід виділити такі: довільний розрахунок шпу-

нта тільки на дію активного тиску ґрунту без урахування напружень від зміщення системи; неврахування гнучкості системи, яка залежить від деформативних характеристик контактуючих середовищ; неврахування роботи середовищ в граничних станах та ін.

З використанням запропонованої методики в програмному комплексі (ПК) ЛІРА було виконано розрахунок безанкерної шпунтової стінки прямокутного перерізу. Розрахункова схема стінки та її скінчено-елементна модель представлені на рис. 2.

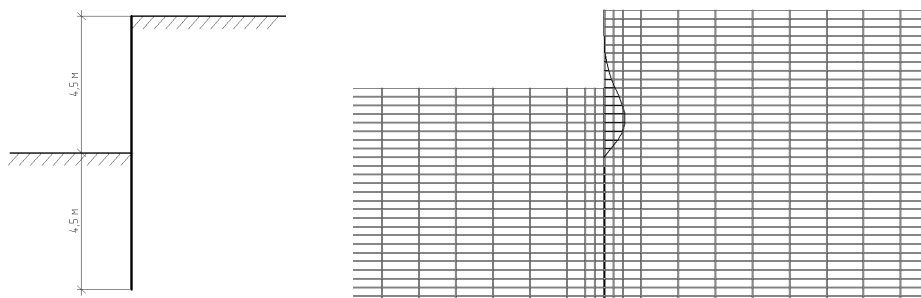


Рис. 2. Розрахункова схема та скінчено-елементна модель безанкерної шпунтової стінки

Характеристики ґрунту: модуль деформації  $E = 20000 \text{ кН/м}^2$ ; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,35$ ; питома вага  $\rho = 18 \text{ кН/м}^3$ ; кут внутрішнього тертя  $\phi = 25^\circ$ .

Характеристики матеріалу шпунтової стінки: модуль деформації  $E = 27000000 \text{ кН/м}^2$ ; питома вага  $\rho = 25 \text{ кН/м}^3$ .

Навантаження – власна вага ґрунту та конструкції.

На рис. 3 представлені епюри активного та пасивного тисків для даної шпунтової стінки, побудовані на основі даних розрахунків різними методами:

1) методом комп'ютерного моделювання в ПК «Ліра» за методикою спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив»;

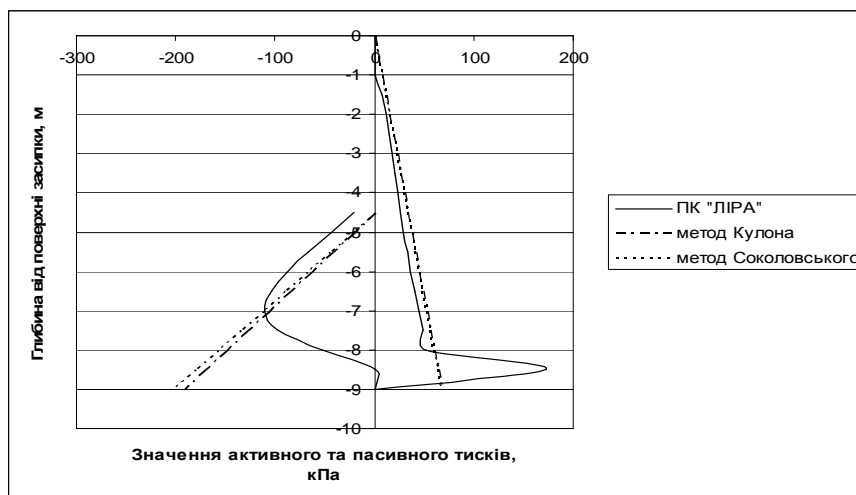


Рис. 3. Епюри активного та пасивного тисків для безанкерної шпунтової стінки, отримані різними методами

2) методом Ш. Кулона [12];

3) методом теорії граничної рівноваги В. В. Соколовського [6].

Аналіз отриманих епюр свідчить про те, що в більшості точок різниця не перевищує 10...15 %. Крім того, слід зазначити, що конфігурація епюр, отриманих при комп'ютерному моделюванні за методикою спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив», на глибині значно відрізняється від прийнятих в теоретичних розрахунках, але при цьому більш відповідає фактичним епюрам тиску ґрунту, отриманим з експериментальних досліджень та приведеним на рис. 1.

*Розрахунок балки на ґрунтовій основі.*

З метою перевірки придатності розробленої методики спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» для розв'язання задачі взаємодії залізобетонної конструкції з ґрунтовим масивом з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону було розглянуто таку тестову задачу: розрахунок залізобетонної балки на пружній ґрунтовій основі ( $E_0 = 100$  МПа). Розрахунок було виконано в лінійній та нелінійній (з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону) [14] постановках. Прогін балки 6 м, переріз прямокутний висотою 50 см та шириною 80 см. Балка виготовлена з бетону класу В20 і армована ненапруженою арматурою класу А400С з діаметром стрижнів 20 мм. Площа розтягнутої арматури  $F_a = 25,12$  см<sup>2</sup> (8Ø20), площа верхньої арматури 12,56 см<sup>2</sup> (4Ø20). Робоча висота перерізу  $h_0 = 46,5$  см. Міцнісні та деформативні властивості матеріалів відповідають нормам. Розрахунок було виконано на дію зосередженої сили в середині прогону балки. Ре-

зультати розрахунку балки за пропонованою методикою в ПК ЛІРА приведені на рис. 4. Також на рис. 4 приведені результати розрахунку цієї ж балки методом Горбунова-Посадова [15]. Порівняння результатів свідчить про те, що максимальні значення згинальних моментів та прогинів балки при розрахунку як в лінійній, так і в нелінійній постановці відрізняються не більше ніж на 6 %. Отже, запропонована методика може бути використана при розрахунку залізобетонних конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами розв'язання тестових задач було зроблено такі висновки:

1. Різниця в результатах розрахунку безанкерної шпунтової стінки, отриманих при застосуванні методики спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив», а також отриманих методами Ш. Кулона та В. В. Соколовського не перевищує 15 %. Крім того, результати розрахунку за пропонованою методикою є більш близькими до фактичних, визначених з експериментальних досліджень.
2. Максимальні значення згинальних моментів та прогинів балки при розрахунку як в лінійній, так і в нелінійній постановці відрізняються не більше ніж на 6 %.
3. Пропонована методика спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» може бути застосована при розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом.

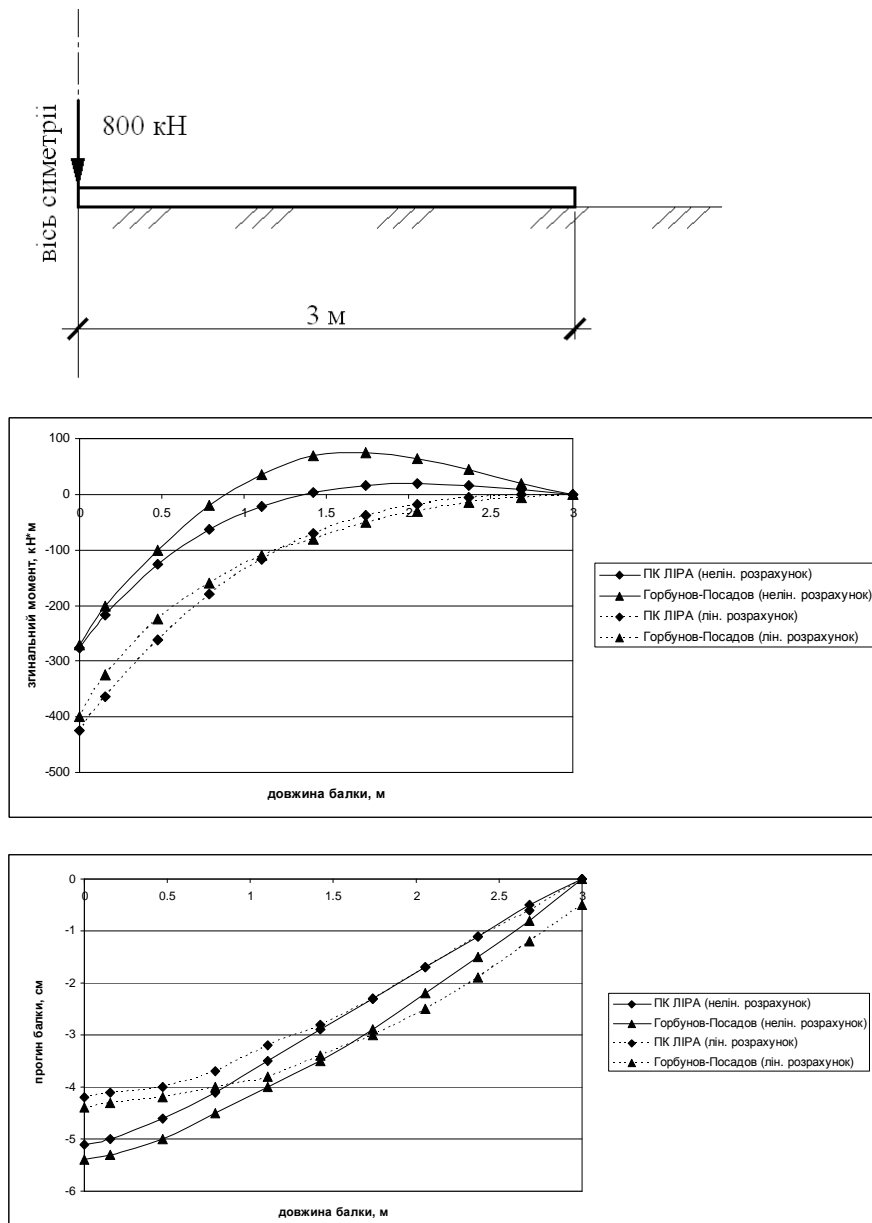


Рис. 4. Тестова задача: розрахунок залізобетонної балки на ґрунтовій основі

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Напружено-деформований стан пальового фундаменту висотної каркасної будівлі з урахуванням спільної роботи з ґрунтовим масивом [Текст]: зб. наук. праць у 2 т. Т. 1. / І. П. Бойко, В. В. Жук, О. С. Сахаров, М. В. Корнієнко // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-техн. збірник. – Вип. № 61: Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування. – К.: НДІБК, 2004. – С. 19-22.
2. Лучковский, И. Я. Учет жесткости фундамента при оценке расчетного сопротивления грунта [Текст]: зб. наук. праць у 2 т. Т. 1 / И. Я. Лучковский // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-техн. збірник. – Вип. № 61: Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування. – К.: НДІБК, 2004. – С. 362-369.
3. Яременко, А. Ф. Расчет железобетонных балок на упругом основании с использованием полных диаграмм деформирования материалов [Текст] / А. Ф. Яременко, Н. Н. Сорока // Ползучесть в конструкциях: сб. науч. тр. / Одесская гос. академия стр-ва и архит. – Одеса, 1998. – С. 114-119.
4. Гуслиста, Г. Е. Особенности статического расчета зданий та споруд, расположенных на склонах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Гуслиста Ганна Едуардівна. – Д., 2008. – 148 с.
5. Гуслиста, Г. Е. Методика спільного статического расчета системы «споруда – ґрунтовий масив» для будівель, расположенных на склонах [Текст] / Г. Е. Гуслиста // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. – 2010. – Вып. № 56: Инновационные технологии жизненного

- цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – Д.: ПГАСА, 2010. – С. 128-137.
6. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды. [Текст] / В. В. Соколовский – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1960. – 243 с.
  7. Лазебник, Г. Е. Давление грунта на сооружения (Разработка аппаратуры и проверка методик экспериментального определения давления. Результаты опытных исследований. Рекомендации для расчетов) [Текст] / Г. Е. Лазерник – К., 2005. – 243 с.
  8. Ренгач, В. Н. Шпунтовые стенки (Расчет и проектирование) [Текст] / В. Н. Ренгач – Л.: Стройиздат, 1970. – 112 с.
  9. Будин, А. Я. Тонкие подпорные стенки [Текст] / А. Я. Будин – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1974. – 191 с.
  10. Емельянов, Л. М. Расчет подпорных сооружений [Текст]: справочное пособие / Л. М. Емельянов – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
  11. Снитко, Н. К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок [Текст] / Н. К. Снитко – 2-е изд., перераб. – М.: Стройиздат, 1970. – 207 с.
  12. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты (Включая спец. курс инж. геологии) [Текст]: учебн. для вузов по спец. «Пром. и гражд. стр-во» / Б. И. Далматов – 2-е изд., перераб. и доп. – Л., 1988. – 414 с.
  13. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст]: учебн. пособие для студ. вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский и др., под ред. С. Б. Ухова. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с.
  14. Гуслиста, Г. Е. Дослідження нелінійної поведінки системи «споруда – ґрунтовий масив» при розрахунку залізобетонних конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом [Текст]: зб. наук. праць у 2 кн. Кн. 1 / Г. Е. Гуслиста // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-техн. збірник. – Вип. № 74: Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 480-487.
  15. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.

Поступила в редколлегию 20.06.2011.

Принята к печати 30.06.2011.