

## УРАХУВАННЯ РІЗНИХ ВИДІВ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ПРИ КОМП'ЮТЕРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ЗАГЛИБЛЕНИХ СПОРУД

Ганна Гуслиста, Микола Савицький

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

### Вступ

Збереження земельного фонду планети завжди було і залишається однією з найважливіших задач людства. Особливої актуальності це питання набуває сьогодні в зв'язку з надзвичайною екологічною ситуацією, що склалася. При цьому, одним з найефективніших способів збереження поверхні землі є використання надр для підземного будівництва будівель та споруд різного призначення [11].

На сучасному етапі актуальність підземного будівництва зумовлена перш за все такими проблемами:

- необхідність нового будівництва в умовах дефіциту незабудованих територій;
- збереження довкілля;
- економія енергії при експлуатації будівель та споруд;
- використання непридатних для звичайного будівництва територій.

Заглиблені споруди є різновидом підземних споруд і застосовуються переважно при похилому рельєфі [11]. Для забезпечення надійності та економічності цих споруд необхідно приділяти увагу насамперед таким питанням, як оцінка стійкості схилу, на якому буде розміщена пропонована конструкція, та оцінка міцності самої конструкції.

Сучасний підхід до визначення стійкості і міцності заглиблених споруд, що взаємодіють з ґрунтом, полягає у визначенні напружено-деформованого стану системи *споруда – ґрунтовий масив* за допомогою певного програмного комплексу.

При цьому на достовірність отриманих результатів буде впливати здатність застосовуваного програмного комплексу враховувати різного роду нелінійності і, таким чином, більш точно визначати особливості поведінки системи, зокрема на стадіях, що передують руйнуванню.

Проведені авторами статті за допомогою ПК «ЛПРА» дослідження свідчать про необхідність врахування при комп'ютерному моделюванні заглиблених споруд таких видів нелінійностей [6, 7]:

- фізична нелінійність (залізобетону та ґрунту);
- конструктивна нелінійність;
- генетична нелінійність.

### 1. Фізична нелінійність ґрунту

Для моделювання ґрунтового масиву, що взаємодіє з конструкціями будівель та споруд, необхідно застосовувати фізично нелінійні скінченні елементи (СЕ) ґрунту.

При розв'язанні задачі плоскої деформації слід використовувати СЕ №281, 282, 284, призначені для моделювання односторонньої роботи ґрунту та стиск з урахуванням зсуву за схемою плоскої деформації у відповідності з законом Кулона-Мора для максимального дотичного напруження:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leq -\sin(\varphi) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + 2c \cdot \cos(\varphi), \quad (1)$$

де  $\sigma_1 \geq \sigma_2$  - головні напруження,  $c$  - питоме зчеплення ґрунту,  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя.

При розв'язанні просторових задач слід використовувати тривимірні СЕ №271, 272, 273. Ці елементи дозволяють врахування як просторової, так і плоскої умови міцності при зсуві.

Розрахунок ведеться ітераційним методом.

## 2. Фізична нелінійність залізобетону

Врахування фізично нелінійних властивостей конструкційних матеріалів (наприклад, залізобетону) можливе при застосуванні фізично нелінійних скінченних елементів, властивості яких змінюються згідно з заданим законом деформування матеріалу (діаграма  $\sigma - \varepsilon$ ), з якого вони виконані. Особливості залізобетону в ПК «Ліра» реалізуються, перш за все, через фізичні співвідношення, що зв'язують напруження і деформації бетону (основного матеріалу) та сталі (армуючого матеріалу) (рис. 1).

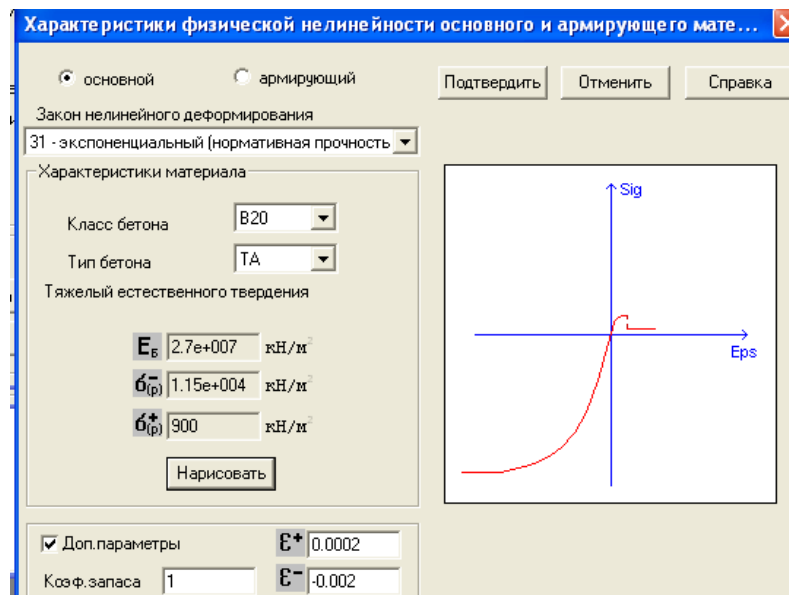


Рис. 1. Вибір нелінійного закону деформування матеріалу в ПК «Ліра»

Критерієм міцності при застосуванні даних моделей матеріалів прийнято досягнення деформаціями бетону та арматури певних граничних значень.

Застосовувані фізично нелінійні скінченні елементи можуть бути стержньовими, елементами тонких пластин та оболонок, просторовими.

Наприклад, для стержньових елементів матриця жорсткості на кожному кроці будується на основі функцій, що задовольняють однорідним рівнянням рівноваги при інтегральних жорсткостях попереднього кроку.

Інтегральні жорсткості визначаються на кожному кроці для перерізів, що розташовані в точках інтегрування по довжині стержня, за значеннями модулів Юнга в дискретних точках поперечного перерізу відповідно із заданим користувачем подрібненням (рис. 2).

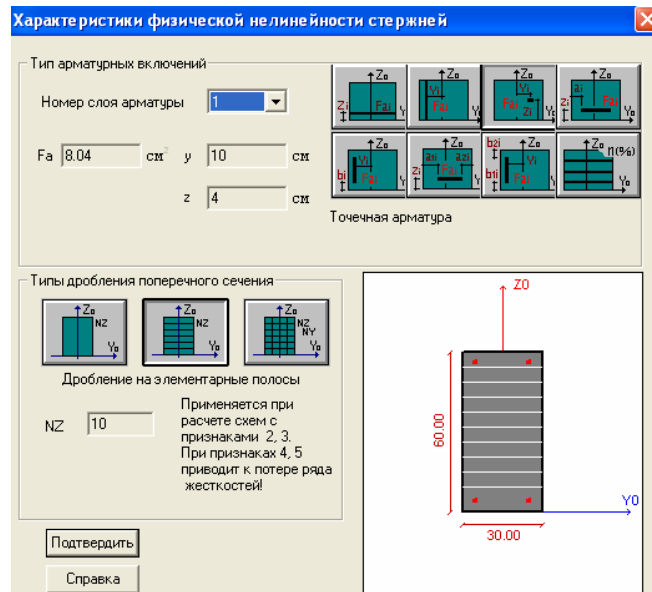


Рис. 2. Вибір типу арматурних включень та подрібнення поперечного перерізу в ПК «ЛІРА»

В стержньових скінченних елементах визначаються такі інтегральні жорсткості:

$$\begin{aligned}
 EF &= \int_F E_{\sigma} dF + \int_{F_a} E_a dF_a, \\
 EI_y &= \int_F E_{\sigma} z^2 dF + \int_{F_a} E_a z^2 dF_a, \\
 EI_z &= \int_F E_{\sigma} y^2 dF + \int_{F_a} E_a y^2 dF_a, \\
 ES_y &= \int_F E_{\sigma} z dF + \int_{F_a} E_a z dF_a, \\
 ES_z &= \int_F E_{\sigma} y dF + \int_{F_a} E_a y dF_a, \\
 ES_{yz} &= \int_F E_{\sigma} yz dF + \int_{F_a} E_a yz dF_a,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де  $E_{\sigma}$  - значення модуля Юнга в точці для основного матеріалу перерізу (бетону);  $E_a$  - значення модуля Юнга в точці для армуючого матеріалу.

Поточні значення модулів Юнга в точці визначаються за обраною залежністю напруження - деформація з пропонованого набору бібліотеки законів деформування. Узагальнена деформація в точці визначається з гіпотези плоских перерізів:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} - y \frac{d^2v}{dx^2} - z \frac{d^2w}{dx^2}. \tag{3}$$

Міцність арматури в елементі з тріщинами визначається з урахуванням нагельного ефекту, при цьому фіксується плинність, розриви або зминання (зріз) арматури.

Для елементів бетонних і залізобетонних стержнів і оболонок визначається також міцність перерізів згідно з діючими нормами.

Вся інформація про стан скінченного елемента на кожному кроці видається в текстовий файл «Відомості про стан матеріалу».

Проведені дослідження [9] свідчать про те, що застосування фізично нелінійних скінченних елементів дозволяє враховувати перерозподіл зусиль в залізобетонних конструкціях внаслідок тріщиноутворення та пластичних деформацій залізобетону. Згинальні моменти в найбільш навантажених перерізах, отримані з нелінійного розрахунку, виявляються в декілька разів меншими, ніж при лінійному, що відповідає відомим з літератури результатам [1, 10]. А у деяких випадках при певних рівнях навантаження епюри змінюють свій характер. При цьому прогини збільшуються в 2 – 5 разів. Перерозподіл зусиль є тим більший, чим менше процент армування розтягнутої зони конструкції та чим більше її гнучкість.

### 3. Конструктивна нелінійність

Під конструктивною нелінійністю розуміють зміну розрахункової схеми по мірі деформування конструкції. Найважливішою особливістю задач з конструктивною нелінійністю є наявність в системі односторонніх зв'язків, тобто зв'язків, що працюють або тільки на розтяг, або тільки на стиск (контактні задачі).

До класу контактних задач слід віднести і задачі розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтовим масивом. Однак, слід при цьому зауважити, що не завжди задачі такого типу розв'язуються з урахуванням порушення контакту між конструкцією та ґрунтом. Але ж урахування цього фактору дозволяє наблизити результати розрахунку до адекватного відтворення справжньої роботи конструкції.

Контактні стрижні, застосовувані в ПК «ЛІРА», є двовузловими скінченними елементами одностороннього пружного зв'язку між вузлами (СЕ №262). Даний СЕ є нелінійним і призначений для моделювання одностороннього (що сприймає або розтяг, або стиск) лінійного зв'язку. В контактній задачі кожен стрижень працює тільки на стиск і при виникненні розтягуючих напружень (у випадку відриву конструкції від ґрунту) виключається з роботи [8].

Жорсткість контактних елементів рекомендується задавати на 1 – 2 порядки більше, ніж погонні жорсткості прилеглих елементів [8].

При розв'язанні задач конструктивної нелінійності застосовується ітераційний метод.

Врахування сил тертя, які виникають на поверхні контакту конструкції та ґрунту, можливе при використанні спеціальних СЕ №264, що моделюють сковзання.

### 4. Генетична нелінійність

Під час розрахунку конструкцій заглиблених споруд, що взаємодіють з ґрунтом, дуже важливим є врахування такого фактору як технологія зведення, тобто спосіб зведення. Цей фактор має великий вплив на величину тиску ґрунту, як основного навантаження на огороджуючі конструкції, а також на величини напружень і деформацій самої споруди.

Відомі різні способи зведення заглиблених та підземних споруд: у відкритих котлованах, метод «опускного колодезя», «стіна в ґрунті» і т. ін. Спосіб зведення визначає тип ґрунтових умов. За впливом ґрунтового середовища на умови спільної роботи зі спорудою виділяють два принципово різні типи ґрунтових умов: *тип 1* – передача на споруду бічного тиску від ґрунтів *порушеної структури* (ґрунтів засипки); *тип 2* – робота споруди в ґрунтовому масиві *непорушеної структури* [4].

Особливої актуальності питання визначення типу ґрунтових умов набуває при розрахунку конструкцій заглиблених споруд в програмному комплексі «Ліра» з використанням спеціальних фізично нелінійних ґрунтових елементів, що моделюють нелінійні властивості ґрунту.

Дані скінченні елементи є дуже чутливими до початкових напружень, що діють у них (зазвичай це напруження від власної ваги ґрунту). Якщо в цих елементах не виконується умова Кулона – Мора (1), то вони вважаються зруйнованими при зсуві.

Тому при розрахунках будь-яких конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом необхідне врахування *генетичної нелінійності*, що передбачає зміну розрахункової схеми на різних етапах будівництва.

Моделювання поетапного зведення споруди в ПК «Ліра» можливе за допомогою процесору МОНТАЖ, який дозволяє моделювати процес зведення споруди, коли на різних етапах з'являються (монтуються) або видаляються (демонтуються) елементи [2, 8].

Так, наприклад, при розрахунку шпунтової стінки необхідно моделювати історію виникнення котловану: 1) розрахунок початкового напружено-деформованого стану ґрунтового масиву від власної ваги ґрунту, 2) влаштування шпунтової огорожі, 3) відривання котловану.

Авторами були проведені розрахунки залізобетонної балки на ґрунтовій основі з урахуванням та без урахування технології зведення [3]. Результати розрахунку, отримані з урахуванням технології зведення, співпадають з приведеними в літературі [1, 10] (рис. 3).

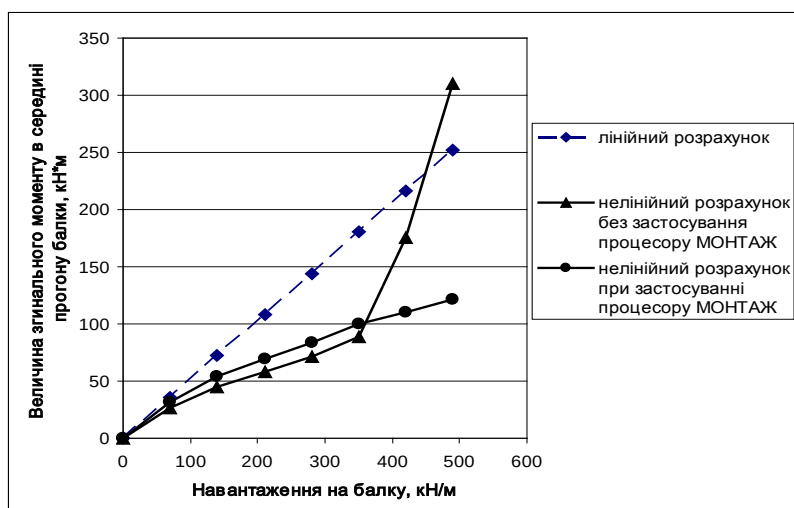


Рис. 3. Результати лінійного та нелінійного розрахунків залізобетонної балки на ґрунтовій основі під дією рівномірно розподіленого навантаження  $q$ .

## Висновки

1. Викладено методику врахування різного роду нелінійностей при комп'ютерному моделюванні заглиблених споруд, що взаємодіють з ґрунтовим масивом.
2. За допомогою результатів проведених досліджень доведено необхідність врахування фізичної нелінійності ґрунту і залізобетону, а також конструктивної та генетичної нелінійностей при моделюванні споруд, що взаємодіють з ґрунтом.

## Література

- [1]. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.: ил.
- [2]. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – К.: Изд-во «Факт», 2005. – 344 с.

- [3]. Гуслиста Г.Е., Нікіфорова Т.Д., Савицький М.В. Розрахунок конструкцій заглиблених споруд з урахуванням технології їхнього зведення // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: Зб. наук. пр. – 2006. – №6. – С. 30-34.
- [4]. Ивахнюк В.А. Строительство и проектирование подземных и заглубленных сооружений. – Москва: Издательство АСВ, 1999. – 298 с.
- [5]. Инновационная стратегия разработки энергоэффективных противооползневых сооружений в г. Днепропетровске / И.И. Куличенко, Н.В. Савицкий, В.И. Большаков, В.П. Козинец // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Вып. №15. – Днепропетровск: ПГАСиА, Gaudeamus, 2001. – С. 5 – 13.
- [6]. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
- [7]. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - Киев: «Сталь», 2002. – 600 с.: ил.
- [8]. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие / Под ред. А.С. Городецкого. – К. – М.: "Факт", 2003. – 464 с.: ил.
- [9]. Савицький М.В., Гуслиста Г.Е. Дослідження роботи конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. Приднeпровской государственной академии строительства и архитектуры. – Выпуск №37: «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Днепропетровск: ПГАСА, 2006. – С. 418 – 425.
- [10]. Соломин В.И., Шматков С.Б. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с., ил.
- [11]. Тетиор А.Н., Логинов В.Ф. Проектирование и строительство подземных зданий и сооружений. – К.: Будивельник, 1990. – 168 с.: ил. – (Б-ка строителя).

## **ACCOUNTING DIFFERENT KINDS OF NONLINEARITIES AT NUMERICAL SIMULATION OF EARTH SHELTERED STRUCTURES**

**Anna Guslistaya, Nikolay Savitsky**

Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture

The article is devoted to consideration of soil and reinforced concrete physical nonlinearity, structural nonlinearity and genetic nonlinearity at numerical simulation of earth sheltered structures. Nonlinear properties of soil are taken into account by means of soil finite elements (FE) which work according to Coulomb's law. It is possible to define nonlinear laws of material deformation ( $\sigma - \varepsilon$ ) both for concrete and for reinforcing steel. There are laws of deformation for different grades of reinforced concrete. Structural nonlinearity means taking into account the contact interaction between the structure and the soil massif by using a special 2-node FE of one-way elastic spring between nodes (spring that takes either tension or compression). Genetic nonlinearity means the simulation of erection process of the earth sheltered structures. The results of investigations are evidence of necessity to take into account these nonlinearities.