

ОЦІНКА ВАЖЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ «СПОРУДА–ГРУНТОВИЙ МАСИВ» ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

Розглядаються різні види нелінійності, які притаманні системі «споруда–грунтовий масив», та з використанням програмного комплексу ЛІРА досліджується їх вплив на результати скінченно-елементного аналізу залізобетонних конструкцій, що взаємодіють із ґрунтом.

Ключові слова: система «споруда–грунтовий масив», нелінійність

Рассматриваются различные виды нелинейности, свойственные системе «сооружение–грунтовой массив», и с использованием программного комплекса ЛИРА исследуется их влияние на результаты конечно-элементного анализа железобетонных конструкций, взаимодействующих с грунтом.

Ключевые слова: система «сооружение–грунтовой массив», нелинейность

The article is devoted to consideration of soil and reinforced concrete physical nonlinearity, structural nonlinearity and genetic nonlinearity at numerical simulation of system «structure–soil massif» by using the structural engineering analysis software LIRA.

Key words: system «structure–soil massif», nonlinearity

Постановка проблеми

На сьогодні все більшої актуальності набуває розрахунок споруд з урахуванням взаємодії з ґрунтовим масивом, оскільки це дозволяє більш точно визначити параметри напружено-деформованого стану як конструкції, так і ґрунтового масиву. Сприяє цьому процесу стрімкий розвиток комп'ютерної техніки та обчислювальних комплексів на їх основі.

Також при цьому на достовірність отриманих результатів буде впливати здатність обчислювального комплексу враховувати різного роду нелінійності і, таким чином, більш точно визначати особливості поведінки системи «споруда–грунтовий масив», зокрема на стадіях, що передують руйнуванню.

Розрізняють такі основні види нелінійних задач [1, 2].

Фізично нелінійні задачі. До них належать задачі, в яких закони деформування матеріалів конструкцій не відповідають закону Гука, тобто залежність між напруженнями та деформаціями є нелінійною. Закони деформування можуть бути симетричними та несиметричними – з різними границями опору розтягу та стиску.

Геометрично нелінійні задачі. В цих задачах відсутня пряма пропорційність між деформаціями та переміщеннями. Це дозволяє враховувати вплив зміни форми та розмірів конструкції на її напружено-деформований стан.

Конструктивно нелінійні задачі (контактні задачі). Задачі цього типу враховують можливу зміну розрахункової схеми в процесі де-

формування конструкції. Наприклад, можуть виникати нові зв'язки або, навпаки, руйнуватись старі.

Генетично нелінійні задачі. Ці задачі містять в собі нелінійності, пов'язані з накопиченням напружень та деформацій в процесі зміни конструкції при її створенні. Цей тип нелінійності можна розглядати, як варіант конструктивно нелінійності, оскільки розглядаються системи з розрахунковою схемою, що змінюється, але ці зміни відбуваються не внаслідок впливу навантажень, а цілеспрямовано, за задумом проектувальника.

Всі згадані вище види нелінійності притаманні системі «споруда–грунтовий масив», яка розглядається при розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтовим масивом. Фізична нелінійність обумовлена тим, що більшість таких конструкцій є залізобетонними, а залізобетон вже на ранніх стадіях деформування проявляє нелінійні властивості. Також нелінійні властивості проявляє ґрунт при досить великих навантаженнях. Конструктивна нелінійність наявна завдяки можливості порушення контакту між конструкцією і ґрунтовим масивом в процесі деформування (особливо для гнучких конструкцій). Також в цих задачах необхідне врахування генетичної нелінійності, а саме врахування вже існуючого напружено-деформованого стану ґрунтового масиву ще до початку зведення споруди. І крім цього, в найскладнішому випадку, якщо споруда розташована на зсувонебезпечному схилі, необхідно також враховувати можливі зсувні процеси, тобто зміну геометрії

розрахункової схеми, а отже, геометричну нелінійність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В результаті аналізу існуючої наукової літератури, присвяченої врахуванню різних типів нелінійності при розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, було встановлено, що в основному дослідження стосувались фізичної нелінійності, пов'язаної з нелінійністю залізобетону і ґрунту [3–5]. При цьому іншим типам нелінійності увага не приділялась, але ж виявилось, що нехтування ними може призвести до результатів, що зовсім не відповідають реальній роботі конструкції [6].

Мета досліджень

Порівняти результати лінійного та нелінійного розрахунків конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом. Оцінити ступінь впливу кожного типу нелінійності на результати розрахунків.

Викладення основного матеріалу досліджень

В якості об'єкта досліджень були обрані залізобетонні балки різної гнучкості на ґрунтовій основі. Гнучкість балок оцінювалась показником гнучкості, що визначався за відомою формулою [3]:

$$t \approx 10 \frac{El^3}{E_k h^3}, \quad (1)$$

де E та E_k – модуль деформації ґрунту і матеріалу конструкції; l та h – довжина і товщина конструкції. Характеристики балок: довжина $l = 5$ м, висота перерізу $h = 0,5$ м, модуль деформації $E_k = 27106$ кН/м² (бетон класу В20). Показник гнучкості варіювався в залежності від модуля деформації ґрунту E , з яким контактує балка. В залежності від показника гнучкості під час досліджень були виділені такі категорії балок: абсолютно гнучкі, балки скінченої жорсткості та абсолютно жорсткі. Балки завантажувались зосередженим і рівномірно розподіленим навантаженням. Розрахункові схеми балок приведені на рис. 1.

Розрахунок проводився методом скінчених елементів (МСЕ) із застосуванням ПК «Ліра» [7] в лінійній постановці та з урахуванням нелінійності: фізичної, конструктивної і генетичної. Моделювання проводилось згідно з рекомендаціями розробленої методики спільного статичного розрахунку системи «споруда–ґрунтовий масив» [8]. Балки моделювались

стрижневими скінченими елементами (СЕ), а ґрунтовий масив – пластинчастими СЕ.

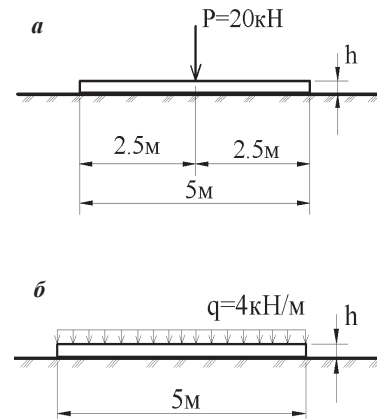


Рис. 1. Розрахункові схеми балок на ґрунтовій основі: а) навантаження у вигляді зосередженої сили; б) рівномірно розподілене навантаження

Оцінка впливу фізичної нелінійності залізобетону і ґрунту

Залізобетонна балка і ґрунтовий масив при цьому моделювались в ПК «Ліра» за допомогою фізично нелінійних СЕ [9], властивості яких змінюються згідно з заданим законом деформування матеріалу (діаграма $\sigma - \varepsilon$). 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. 2).



Рис. 2. Вибір нелінійного закону деформування матеріалу в ПК «Ліра»

Критерієм міцності при застосуванні даних моделей матеріалів прийнято досягнення деформацій бетону та арматури певних граничних значень. Для стрижневих елементів матриця жорсткості на кожному кроці будується на основі функцій, що задовольняють однорідним рівнянням рівноваги при інтегральних жорсткостях попереднього кроку. Інтегральні жорсткості

кості визначаються на кожному кроці для перерізів, що розташовані в точках інтегрування по довжині стрижня, за значеннями модулів Юнга в дискретних точках поперечного перерізу відповідно із заданим користувачем подрібненням (рис. 3).

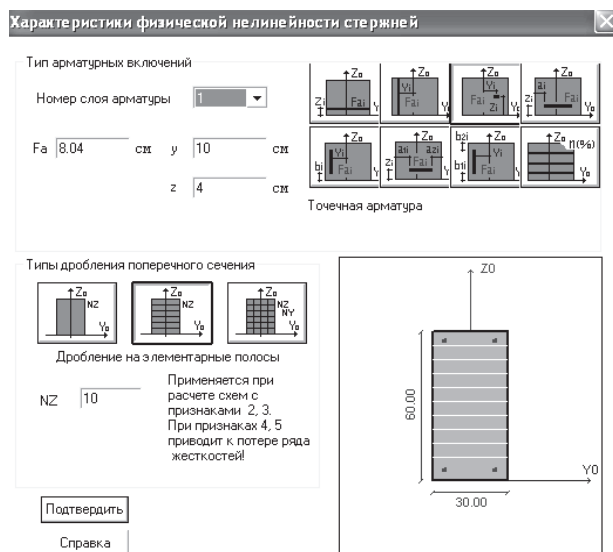


Рис. 3. Вибір типу арматурних включень та подрібнення поперечного перерізу в ПК «ЛІРА»

В стрижневих скінченних елементах визначаються такі інтегральні жорсткості:

$$\begin{aligned}
 EF &= \int_F E_6 dF + \int_{F_a} E_a dF_a, \\
 EI_y &= \int_F E_6 z^2 dF + \int_{F_a} E_a z^2 dF_a, \\
 EI_z &= \int_F E_6 y^2 dF + \int_{F_a} E_a y^2 dF_a, \\
 ES_y &= \int_F E_6 z dF + \int_{F_a} E_a z dF_a, \\
 ES_z &= \int_F E_6 y dF + \int_{F_a} E_a y dF_a, \\
 ES_{yz} &= \int_F E_6 yz dF + \int_{F_a} E_a yz dF_a,
 \end{aligned} \quad (2)$$

де E_6 – 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 σ - ε з пропонованого набору бібліотеки законів деформування. Узагальнена деформація в точці визначається з гіпотези плоских перерізів:

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

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

Моделювання односторонньої роботи ґрунту на стиск з урахуванням зсуву за схемою плоскої деформації здійснюється у відповідності із законом Кулона-Мора для максимального допустимого напруження:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \leq -\sin(\varphi) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + 2c \cdot \cos(\varphi), \quad (4)$$

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

Навантаження на балку покроково збільшувалось аж до руйнування балки. Криві деформування залізобетонних балок з різним процентом армування ($\mu = 0,63\%$, $\mu = 1,26\%$) при лінійному і нелінійному розрахунках наведено на рис. 4. Отримані в результаті скінченно-елементного аналізу епюри згинальних моментів та прогинів (рис. 5) свідчать про те, що різниця у результатах лінійного і нелінійного розрахунків залізобетонних балок на ґрунтовій основі значна. Вона позначається як на величинах внутрішніх зусиль (зокрема, згинальних моментів), так і на величинах прогинів. Причому, зі збільшенням рівня навантаження різниця в значеннях, отриманих при лінійному і нелінійному розрахунках теж збільшується. У деяких випадках змінюється навіть характер епюр. Отримані результати підтверджуються результатами досліджень, приведеними в [4].

Оцінка впливу конструктивної нелінійності

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.

Контактні елементи-стрижні (СЕ № 262), передбачені в ПК «ЛІРА», є двовузловими СЕ одностороннього (що сприймає або розтяг, або стиск) пружного зв'язку між вузлами. Кожен контактний стрижень, який додається між вузлом СЕ-моделі балки і вузлом СЕ-моделі ґрунтового масиву в системі «споруда-ґрунтовий масив» працює тільки на стиск і при виникненні розтягувальних напружень (у випадку відриву конструкції від ґрунту) виключається з роботи. 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 факто-

ру дозволяє наблизити результати розрахунку до адекватного відтворення справжньої роботи конструкції.

Аналіз результатів розрахунку (табл. 1) свідчить про те, що врахування даного типу нелі-

нійності є актуальним для гнучких конструкцій. Неврахування можливого відриву конструкції від поверхні ґрунту дає помилку в розрахунку 11,2 % у порівнянні з експериментальними даними, приведеними в науковій літературі [3, 4].

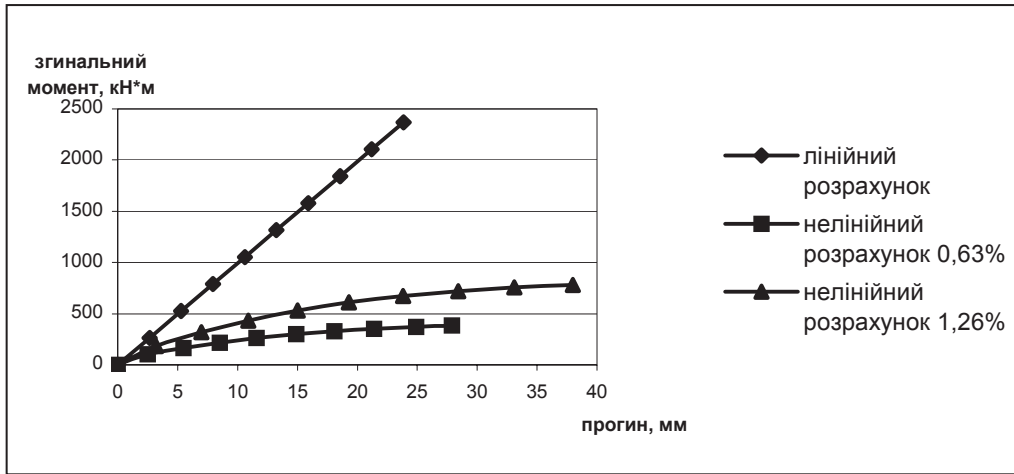


Рис. 4. Криві деформування залізобетонних балок під дією рівномірно розподіленого навантаження

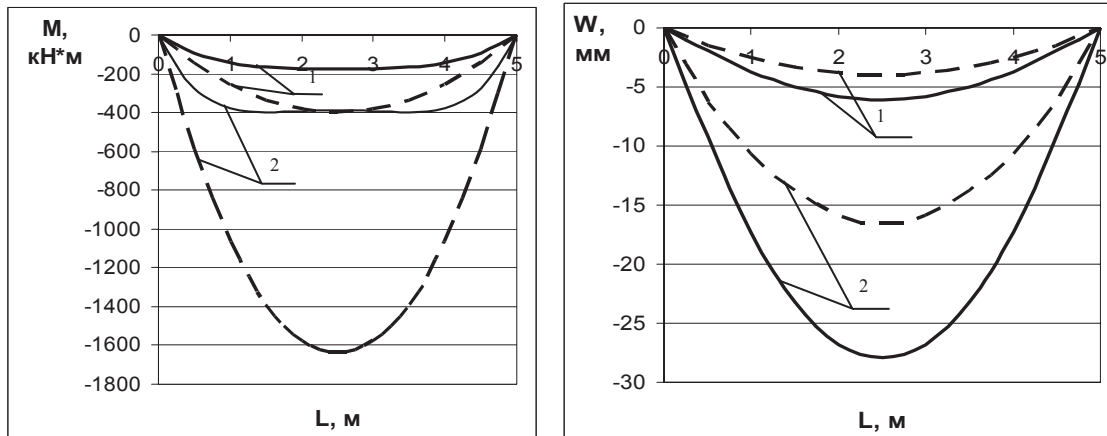


Рис. 5. Епюри згинальних моментів і прогинів для гнучкої балки на ґрунтовій основі ($\mu=0,63\%$) під дією рівномірно розподіленого навантаження: 1 – $q=757$ кН/м, 2 – $q=3115$ кН/м (лінійний розрахунок – штрихова лінія, нелінійний – суцільна)

Таблиця 1

Результати розрахунку балок на ґрунтовій основі з урахуванням та без урахування конструктивної нелінійності

Умови моделювання	Значення згинального моменту в середині балки, кН·м					
	абсолютно гнучка балка			абсолютно жорстка балка		
	ПК Ліра	експеримент	розходження, %	ПК Ліра	експеримент	розходження, %
без урахування конструктивної нелінійності	1,90	2,14	11,2	16,15	16,00	0,9
з урахуванням конструктивної нелінійності	2,11		1,4	15,70		1,9

Оцінка впливу генетичної нелінійності

Під час розрахунку конструкцій, 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 огорожувальні конструкції, а також на величини напружень і деформацій самої споруди.

Відомі різні способи зведення заглиблених та підземних споруд: у відкритих котлованах, метод «опускного колодязя», «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].

При розрахунку балки на ґрунтовій основі маємо тип 2 ґрунтових умов, тобто, ґрунтовий масив ще до початку зведення на ньому конструкції вже перебуває в певному напружено-деформованому стані (від дії власної ваги ґрунту).

В цьому випадку процес СЕ-моделювання має проводитись поетапно. На першому етапі обов'язково має бути змодельований тільки ґрунтовий масив під дією навантаження від власної ваги ґрунту. Моделювання всіх інших конструкцій, що зводяться на даному ґрунтовому масиві, має відбуватись вже на наступних етапах.

Для поетапного моделювання в ПК «Ліра» застосовується процесор МОНТАЖ, який дозволяє моделювати процес зведення споруди, коли на різних етапах з'являються (монтуються) або видаляються (демонтуються) елементи [8, 9].

Неврахування генетичної нелінійності стає особливо відчутним при моделюванні системи «споруда–ґрунтовий масив» з урахуванням фізичної нелінійності ґрунту (рис. 6). Це пов'язане з тим, що нелінійні скінченні елементи ґрунту є дуже чутливими до початкових напружень, що діють у них (зазвичай це напруження від власної ваги ґрунту). І якщо в цих елементах не виконується умова Кулона–Мора (4), то вони вважаються зруйнованими при зсуві.

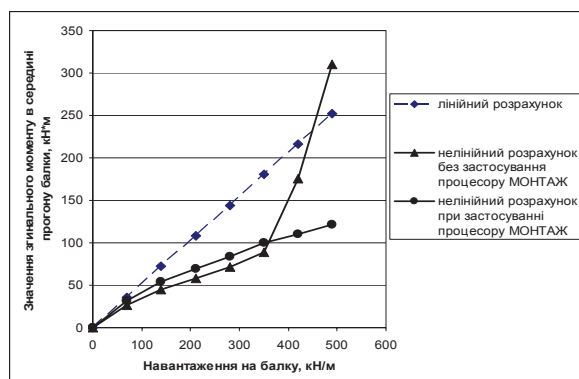


Рис. 6. Результати лінійного та нелінійного розрахунків залізобетонної балки на ґрунтовій основі під дією рівномірно розподіленого навантаження

Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами проведених досліджень встановлено, наскільки важливим є врахування нелінійної поведінки системи «споруда–ґрунтовий масив» при визначенні її напружено-деформованого стану:

1. При врахуванні фізично нелінійних властивостей залізобетону та ґрунту під час розрахунку конструкцій спостерігається трансформація епюр внутрішніх зусиль. Згинальні моменти при цьому в 3...4 рази зменшуються, а прогини в 2...5 разів збільшуються.
2. Врахування можливості порушення контакту між конструкцією та ґрунтовим масивом (врахування конструктивної нелінійності) дозволяє отримати на 11 % точніший результат, ніж без урахування цього фактору. Це є особливо відчутним для гнучких конструкцій.
3. Ігнорування поетапності створення розрахункової схеми (генетичної нелінійності), коли на першому етапі моделюється тільки ґрунтовий масив з певним вже існуючим напружено-деформованим станом, призводить до значних помилок при розрахунку залізобетонних конструкцій з урахуванням фізично нелінійних властивостей залізобетону та ґрунту.
4. Розрахунок залізобетонних конструкцій споруд, що взаємодіють з ґрунтовим масивом, в нелінійній постановці дозволяє отримувати результати, які є більш адекватними реальній роботі таких конструкцій. В зв'язку з цим перспективними є дослідження взаємодії більш складних залізобетонних конструкцій різних типів з ґрунтовим масивом (в тому числі протизсувних) з урахуванням різних видів нелінійності.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
2. Лукаш, П. А. Основы нелинейной строительной механики [Текст] / П. А. Лукаш. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
3. 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.
4. Соломин, В. И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций [Текст] / В. И. Соломин, С. Б. Шматков. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с.
5. Савицький, М. В. Дослідження роботи конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, з урахуванням фізичної нелінійності залізобетону [Текст] / М. В. Савицький, Г. Е. Гуслиста // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА. – Вып. 37: «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Д.: ПГАСА, 2006. – С. 418-425.
6. Гуслиста, Г. Урахування різних видів нелінійностей при комп'ютерному моделюванні заглиблених споруд [Текст] / Г. Гуслиста, М. Савицький // Теоретичні основи будівництва: зб. наук. пр. ПДАБА та Варшавського техн. ун-ту. – Вип. 15. – Варшава, 2007. – С. 225-230.
7. ЛИРА® 9.4. Руководство пользователя. Основы [Текст] : учеб. пособие / Е. Б. Стрелецкий, В. Е. Боговис, Ю. В. Гензерский; под ред. А. С. Городецкого. – К.: ФАКТ, 2008. – 164 с.
8. Гуслиста, Г. Е. Методика спільного статичного розрахунку системи «споруда–ґрунтовий масив» для будівель, розташованих на схилах [Текст] / Г. Е. Гуслиста // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: сб. науч. тр. ПГАСА. – Вып. 56: «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения». – Д.: ПГАСА, 2010. – С. 128-137.
9. Городецкий, А.С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзоров. – К.: Факт, 2005. – 344 с.

Поступила в редколлегию 17.01.2011.

Принята к печати 20.01.2011.