

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЙ,  
ЩО ВЗАЄМОДІЮТЬ З ҐРУНТОМ,  
З УРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОНУ**

*Савицький М.В., д.т.н., проф., Гуслиста Г.Е., асп.,  
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,  
м. Дніпропетровськ, Україна*

**1. Вступ**

В практиці сучасного будівництва заглиблених споруд основним матеріалом є залізобетон. У випадках, коли заглиблені споруди суміщають функції протизсувного захисту і багатофункціонального комплексу [1, 2, 3], підвищується відповідальність їхніх несучих конструкцій, руйнування яких може призвести до великих матеріальних та людських втрат.

Надійність та раціональне використання матеріалів в залізобетонних будівлях та спорудах забезпечується розрахунком. На сьогодні розрахунок залізобетонних конструкцій проводиться при повному або частковому ігноруванні факторів фізичної нелінійності та тріщиноутворення залізобетону та пов'язаного з ним перерозподілу зусиль. При цьому конструювання (розрахунок) перерізів виконується відповідно до СНиП 2.03.01-84\* «Бетонные и железобетонные конструкции» [4], що впливають з прагнення досягти нехай навіть невеликої економії матеріалів завдяки врахуванню різних аспектів фізичної нелінійності, а визначення зусиль часто виконується в лінійній постановці (за загальними правилами будівельної механіки). Крім того, в СНиП закладені спрощені фізичні моделі і багато емпіричних формул і методик.

Звісно, все це призводить до помилок при визначенні зусиль, а у підсумку – до зниження надійності конструктивних рішень в одних випадках та до невідрованого перевитрати матеріалів в інших.

Академік М.І. Карпенко, аналізуючи сучасні шляхи розвитку теорії розрахунку конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності, зауважив, що сучасна будівельна наука стоїть на порозі утворення «розділу нелінійної будівельної механіки в новому її розумінні, як механіки будівельних конструкцій і конструктивних систем з урахуванням реальних фізико-механічних властивостей будівельних матеріалів і основ, розмиваючи, таким чином, існуючі відмінності між практичними методами розрахунку і проектування та ідеалізованими методами класичної механіки» [5].

Цьому сприяє інтенсивний розвиток автоматизованих методів розрахунку і розроблених на їхній основі програмних комплексів, що дозволяють враховувати фізичну нелінійність при розрахунках.

Залізобетонні конструкції заглиблених споруд (стінки та днища), які взаємодіють з ґрунтом, по суті, належать до статично невизначуваних конструкцій. Отже, нелінійні деформації та тріщиноутворення спричинять у них перерозподіл зусиль. В даному випадку під перерозподілом зусиль розуміють

відхилення дійсного розподілу зусиль від розподілу зусиль, отриманого з пружного розрахунку.

Мета даного дослідження: порівняти результати лінійного і нелінійного розрахунків конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом; оцінити вплив різних факторів на перерозподіл зусиль.

Об'єктом дослідження були обрані залізобетонні балки на ґрунтовій основі. Дослідження роботи таких конструкцій при певних навантаженнях [6] вже проводилися Соломінін В.І. та Шматковим С.Б. Нами був проведений аналіз роботи балок впродовж всього процесу деформування, тобто при різних рівнях навантаження аж до руйнування.

## **2. Моделі деформування матеріалів**

Лінійний та нелінійний розрахунки балок на ґрунтовій основі проводились за допомогою ПК «ЛРА» [7], в якому вищезазначені особливості залізобетону реалізуються, перш за все, через фізичні співвідношення, що зв'язують напруження і деформації бетону та арматури. В якості моделі деформування матеріалу була прийнята криволінійна експоненціальна залежність між напруженнями і деформаціями як для бетону так і для арматури. Критерієм міцності при застосуванні даних моделей матеріалів було прийнято досягнення деформаціями бетону та арматури певних граничних значень.

## **3. Дослідження впливу різних факторів на перерозподіл зусиль**

В ході числових досліджень аналізувався вплив на перерозподіл зусиль таких факторів:

- 1) початкового показника гнучкості системи «залізобетонна балка – ґрунтова основа»;
- 2) характеру навантаження;
- 3) відсотку армування розтягнутої зони балки.

### Початковий показник гнучкості системи «залізобетонна балка – ґрунтова основа»

Як відомо, показник гнучкості балки, що взаємодіє з ґрунтовою основою визначається за формулою [8]:

$$t \approx 10 \frac{El^3}{E_k h^3},$$

де  $E$  і  $E_k$  - модуль деформації ґрунту і матеріалу конструкції;  $l$  і  $h$  - довжина і товщина конструкції.

В процесі деформування балки її модуль деформації  $E_k$ , а, отже, й показник гнучкості будуть змінюватись внаслідок розвитку нелінійних деформацій та тріщиноутворення, і, таким чином, будуть впливати на характер взаємодії елементів системи «залізобетонна балка – ґрунтова основа». Показник гнучкості балки до деформації називається початковим.

В даній роботі розглядалися однакові балки з такими характеристиками: довжина  $l=5$  м, товщина  $h=0,5$  м, модуль деформації  $E_k=27 \cdot 10^6$  кН/м<sup>2</sup>

(бетон класу В20). При цьому в залежності від модуля деформації взаємодіючого з балками ґрунту змінювався початковий показник гнучкості:

$t = 74$  (при  $E = 200$  МПа) – категорія довгих (гнучких) балок;

$t = 2,74$  (при  $E = 7,4$  МПа) – категорія коротких (скінченної жорсткості) балок.

#### Характер навантаження

Розрахунки балок проводились при рівномірному розподіленому навантаженні та при зосередженій силі, що діє посередині балки. Розрахункові схеми балок наведені на рис. 1.

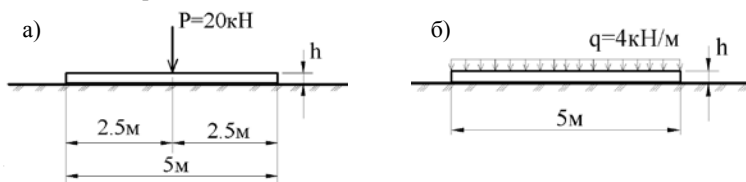


Рис. 1. Розрахункові схеми балок на ґрунтовій основі:

а) навантаження у вигляді зосередженої сили;

б) рівномірно розподілене навантаження.

#### Армування розтягнутої зони балки

Для армування балок застосовувалась арматура класу А300С.

Для оцінки ступеню впливу арматури на перерозподіл зусиль досліджувались балки з такими процентами армування розтягнутої зони:

$\mu = 0,63\%$ ,  $\mu = 1,26\%$ .

При проведенні числового експерименту навантаження на балку прикладалося покроково аж до руйнування балки, при цьому визначалась величина руйнівного навантаження. На кожному кроці фіксувалась величина прикладеного навантаження, величини згинального моменту та прогину в середині балки, а також стан бетону і арматури.

Криві деформування гнучких залізобетонних балок ( $t = 74$ ), завантажених рівномірно розподіленим навантаженням, в координатах прогин – згинальний момент зображені на рис. 2. Прямолінійний графік відповідає результатам лінійного розрахунку, криволінійні графіки – результатам нелінійного розрахунку при різних процентах армування розтягнутої зони балки. Виходячи з даної діаграми, чим менше процент армування балки, тем більше результати нелінійного розрахунку відхиляються від результатів лінійного розрахунку. При навантаженні балки зосередженою силою, а також при інших початкових показниках гнучкості системи діаграми мають аналогічний вигляд.

Результати розрахунку гнучких балок представлені в таблицях 1 – 2, де  $q$ ,  $P$  – величина прикладеного на даному кроці навантаження,  $M_{lin}$ ,  $W_{lin}$ ,  $M_{nl}$ ,  $W_{nl}$  – величини згинальних моментів і прогинів відповідно при лінійному і нелінійному розрахунках.

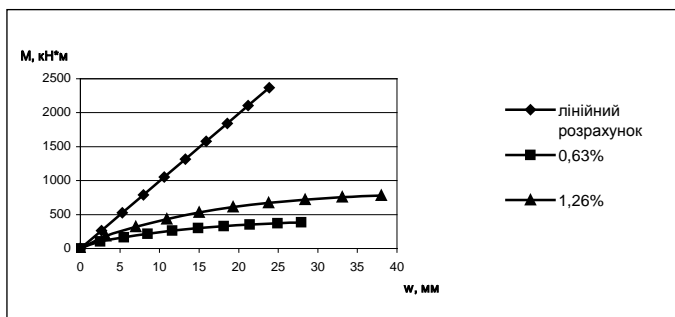


Рис. 2. Криві деформування гнучких залізобетонних балок ( $t = 74$ ) під дією рівномірно розподіленого навантаження

Таблиця 1

Величини згинальних моментів в середині прогону гнучкої залізобетонної балки ( $t = 74$ ), отриманих за результатами лінійного і нелінійного розрахунків

Характер навантаження							
рівномірно розподілене навантаження				зосереджена сила посередині балки			
$q$ , кН/м	$M_{нл}$ , кН·м	$M_{ліній}$ , кН·м	$M_{ліній}/M_{нл}$	$P$ , кН	$M_{нл}$ , кН·м	$M_{ліній}$ , кН·м	$M_{ліній}/M_{нл}$
$\mu_1 = 0,63\%$				$\mu_1 = 0,63\%$			
350	104	184.1	1.77	200	88	111	1.26
700	166.2	368.2	2.2	400	160.2	222	1.38
1050	218.2	552.3	2.53	600	226.7	333	1.46
1400	262.3	736.4	2.80	800	289.4	444	1.53
1750	299.1	920.5	3.07	1000	347.7	555	1.59
2100	328.8	1104.6	3.35	1200	401	666	1.66
2450	353.6	1288.7	3.64				
2800	373.3	1472.8	3.94				
3115	386.7	1638.4	4.23				
$\mu_2 = 1,26\%$				$\mu_2 = 1,26\%$			
500	184.4	263	1.42	300	145	166.5	1.14
1000	317.6	526	1.65	600	270.2	333	1.23
1500	432.5	789	1.82	900	388.7	499.5	1.28
2000	530.2	1052	1.98	1200	502.2	666	1.32
2500	610.2	1315	2.15	1500	609.6	832.5	1.36
3000	673.6	1578	2.34	1800	709.2	999	1.40
3500	720.9	1841	2.55	2040	781.4	1132.2	1.44
4000	754.9	2104	2.78				
4500	778.7	2367	3.04				

Примітка: кольором виділені величини руйнівних навантажень.

Величини прогинів в середині прогону  
звучкої залізобетонної балки ( $t = 74$ ),  
отриманих за результатами лінійного і нелінійного розрахунків

Характер навантаження							
рівномірно розподілене навантаження				зосереджена сила посередині балки			
$q$ , кН/м	$W_{nl}$ , мм	$W_{lin}$ , мм	$W_{nl}/W_{lin}$	$P$ , кН	$W_{nl}$ , мм	$W_{lin}$ , мм	$W_{nl}/W_{lin}$
$\mu_1 = 0,63 \%$				$\mu_1 = 0,63 \%$			
350	2,5	1,85	1,34	200	0,9	0,58	1,55
700	5,5	3,71	1,48	400	1,8	1,16	1,55
1050	8,5	5,56	1,52	600	3	1,74	1,72
1400	11,6	7,42	1,56	800	4,1	2,32	1,76
1750	14,9	9,27	1,60	1000	5,5	2,9	1,89
2100	18,1	11,13	1,62	1200	6,7	3,48	1,92
2450	21,4	12,98	1,64				
2800	24,9	14,84	1,67				
3115	27,9	16,51	1,69				
$\mu_2 = 1,26 \%$				$\mu_2 = 1,26 \%$			
500	3,2	2,65	1,208	300	1,1	0,87	1,26
1000	7	5,3	1,321	600	2,4	1,74	1,37
1500	10,9	7,95	1,371	900	3,8	2,61	1,45
2000	15	10,6	1,415	1200	5,3	3,48	1,52
2500	19,3	13,25	1,457	1500	6,8	4,35	1,56
3000	23,8	15,9	1,497	1800	8,5	5,22	1,62
3500	28,4	18,55	1,531	2040	10	5,91	1,69
4000	33,1	21,2	1,561				
4500	38	23,85	1,593				

**Примітка:** кольором виділені величини руйнівних навантажень.

Аналогічні таблиці були отримані для балок скінченної жорсткості. Табличні дані 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.

Крім цього були побудовані епюри згинальних моментів та прогинів. Окремі з них наведені на рис. 3. Аналіз епюр дозволяє зробити дуже важливий висновок, що у деяких випадках при певних рівнях навантаження при нелінійному розрахунку отримуємо зовсім інший характер епюр, ніж при лінійному.

Отримані результати підтверджуються результатами досліджень, приведеними в [6].

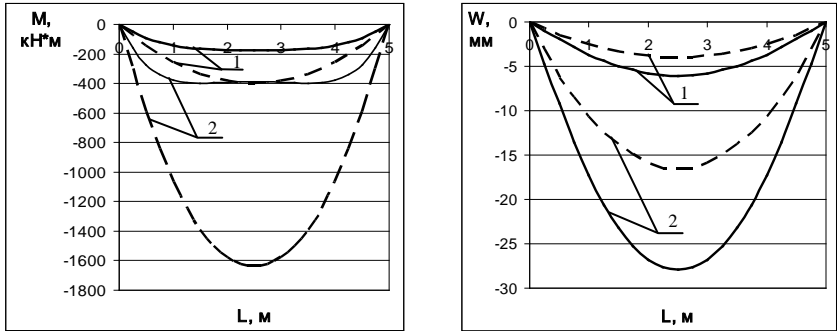


Рис. 3. Епюри згинальних моментів і прогинів для гнучкої балки на ґрунтовій основі ( $t = 74$ ,  $\mu = 0,63\%$ ) під дією рівномірно розподіленого навантаження: 1 -  $q = 757$  кН/м, 2 -  $q = 3115$  кН/м (лінійний розрахунок – штрихова лінія, нелінійний – суцільна)

#### 4. Загальні висновки

1. Різниця у результатах лінійного і нелінійного розрахунків залізобетонних балок на ґрунтовій основі значна, оскільки нелінійний розрахунок враховує перерозподіл зусиль. Причому, зі збільшенням рівня навантаження різниця в значеннях, отриманих при лінійному і нелінійному розрахунках теж збільшується.
2. Згинальні моменти в найбільш навантажених перерізах, отримані з нелінійного розрахунку, виявляються в декілька разів меншими, ніж при лінійному. А у деяких випадках при певних рівнях навантаження епюри змінюють свій характер. При цьому прогини збільшуються для гнучких балок в 1,5 – 2 рази, а для жорстких – в 3 – 5 разів.
3. Перерозподіл зусиль тим більший, чим менше процент армування розтягнутої зони балки та чим більше її гнучкість.
4. У залізобетонних балках під дією рівномірно розподіленого навантаження перерозподіл зусиль більше, ніж у балках під дією зосередженої сили.

Отже, як бачимо, резерви міцності, які можуть бути використані, якщо враховувати реальні фізичні властивості матеріалу, дуже великі. Таким чином, розрахунок конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, з урахуванням нелінійності деформування залізобетону дозволяє розкрити значні резерви економії арматури і бетону.

#### ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. 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.

2. Многофункциональные энергоэффективные противооползневые сооружения / Куличенко И.И., Савицкий Н.В., Большаков В.И., Щербакова О.В., Никифорова Т.Д., Гуслистая А.Э. // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-техн. збірник. – Вип. №59: “Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону”: Зб. наук. праць у 2-х книгах. – Кн. 2. – Київ: НДІБК, 2003. – С. 230 – 234.
3. Особенности расчета конструкций заглубленных зданий / Н.В. Савицкий, А.Э. Гуслистая, И.И. Куличенко, Т.Д. Никифорова // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-техн. збірник. – Вип. №62: “Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону”: Зб. наук. праць у 2-х томах. – Том. 1. – Київ: НДІБК, 2005. – С. 273 – 277.
4. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
5. Карпенко Н.И. Теоретические и методические аспекты железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. – М., 1998. - Т. 5. – С. 51 – 85.
6. Соломин В.И., Шматков С.Б. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с., ил.
7. 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.
8. 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.

В статті представлені результати дослідження роботи залізобетонних балок на ґрунтовій основі з урахуванням реальних властивостей залізобетону (фізичної нелінійності і тріщинуватості). Проаналізовано вплив різних факторів на різницю у результатах, отриманих при лінійному і нелінійному розрахунках. Вказано на доцільність проведення нелінійного розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом.