



УДК 624.012



**ГОРИК О.В.**

Д-р технічних наук, проф.,  
Полтавська державна аграрна  
академія, м. Полтава, Україна,  
e-mail: [oleksii.goruk@pdaa.edu.ua](mailto:oleksii.goruk@pdaa.edu.ua),  
тел. +38 (050) 305-68-76,  
ORCID: 0000-0001-8274-9266



**КОВАЛЬЧУК С.Б.**

Канд. технічних наук, ст. викл.  
Полтавська державна аграрна  
академія, м. Полтава, Україна,  
e-mail: [stanislav.kovalchuk@pdaa.edu.ua](mailto:stanislav.kovalchuk@pdaa.edu.ua),  
тел. +38 (066) 516-87-69,  
ORCID: 0000-0003-4550-431X

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСОЛЬНИХ РИГЕЛІВ VIP-ТРИБУНИ СТАДІОНУ «ВОРСКЛА» У МІСТІ ПОЛТАВІ

### АНОТАЦІЯ

Робота присвячена актуальним питанням дослідження технічного стану залізобетонних однопрогонових консольних ригелів рам каркасу гостьової трибуни стадіону «Ворскла» у м. Полтаві та відновлення їх експлуатаційного ресурсу. Для підвищення запасу несучої здатності ригеля запропоновано систему підсилення, що розвантажує його небезпечну ділянку шляхом обмеження переміщень консольної частини пружним елементом із попереднім стискаючим зусиллям. Оптимальне значення попереднього зусилля у робочому елементі системи підсилення розраховане за умови збереження однакового знаку згинаючого моменту у прогоновій частині ригеля після виконання підсилення. Заданий рівень попереднього зусилля встановлено з урахуванням вторинних прогинів ригеля під час монтажу підсилення, для визначення яких застосовано ітераційну модель згину композитних брусів в умовах обмеженого деформування.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** технічний стан, дефекти, каркас трибунної споруди, залізобетонні ригелі, резерв несучої здатності, система підсилення, ітераційна модель згину, прогини ригеля

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСОЛЬНЫХ РИГЕЛЕЙ VIP-ТРИБУНЫ СТАДИОНА «ВОРСКЛА» В ГОРОДЕ ПОЛТАВЕ

**ГОРИК А.В.** Д-р технических наук, проф.,  
Полтавская государственная аграрная академия,  
г. Полтава, Украина,  
e-mail: [oleksii.goruk@pdaa.edu.ua](mailto:oleksii.goruk@pdaa.edu.ua),  
тел. +38 (050) 305-68-76,  
ORCID: 0000-0001-8274-9266

**КОВАЛЬЧУК С.Б.** Канд. технических наук, ст.  
преподаватель, Полтавская государственная  
аграрная академия, г. Полтава, Украина,

e-mail: [stanislav.kovalchuk@pdaa.edu.ua](mailto:stanislav.kovalchuk@pdaa.edu.ua),  
тел. +38 (066) 516-87-69,  
ORCID: 0000-0003-4550-431X

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена актуальным вопросам исследования технического состояния железобетонных однопролетных консольных ригелей каркаса гостевой трибуны стадиона «Ворскла» в г. Полтаве и восстановления их эксплуатационного ресурса. Для повышения запаса несущей способности ригеля предложена система усиления, которая разгружает его опасный участок путем ограничения перемещений консольной части упругим элементом с предварительным сжимающим усилием. Оптимальное значение предварительного усилия в рабочем элементе системы усиления рассчитано по условию сохранения одинакового знака изгибающего момента в пролетной части ригеля после выполнения усиления. Заданный уровень предварительного усилия рассчитан с учетом вторичных прогибов ригеля при монтаже усиления, для определения которых применена итерационная модель изгиба композитных брусьев в условиях ограниченного деформирования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** техническое состояние, дефекты, каркас трибунного сооружения, железобетонные ригели, резерв несущей способности, система усиления, итерационная модель изгиба, прогибы ригеля

### MAINTENANCE OF A LOADED CAPABILITY OF REINFORCED CONCRETE CONSOLE GIRDERS OF THE VIP-GRANDSTAND AT THE STADIUM “VORSKLA” IN POLTAVA CITY

**GORYK A.V.** Dr, Prof., Poltava State Agrarian  
Academy, Poltava, Ukraine,  
e-mail: [oleksii.goruk@pdaa.edu.ua](mailto:oleksii.goruk@pdaa.edu.ua),  
tel. +38 (050) 305-68-76,  
ORCID: 0000-0001-8274-9266



**KOVALCHUK S.B.** PhD, senior lecturer, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine, e-mail: stanislav.kovalchuk@pdaa.edu.ua, tel. +38 (066) 516-87-69, ORCID: 0000-0003-4550-431X

### ABSTRACT

The work is devoted to topical issues of a maintenance and renewal of a normal technical condition of constructional parts of the grandstand structure of the stadium "Vorskla" in Poltava city. The object of the research is reinforced concrete console girders of carcass frames of the stadium guest grandstand. Because of failed designing decisions connected with the reconstruction, these elements are practically at the end of their estimated reserve of loaded capability and require its improvement through arrangement of the construction strengthening. The optimal strengthening system in which the removal of the girder console part is limited by an additional elastic support with a preliminary compression force has been suggested. The transmission of the load estimated part to the elastic support of the strengthening system allowed to redistribute internal forces decreasing the estimated moment of flection on the supporting structure and in the bay avoiding a change of its sign. It is identified that in the process of the elastic element installment the intensity of the formed preliminary compression force will decrease by means of a girder secondary deflection. The estimates of its deflections taking into account a concentrated force formed by a working element of the strengthening system has been made for consideration of additional related deformation of the strengthening system and the girder. When identifying deflections, the reinforced concrete girder was considered as a composite discrete-heterogeneous bar made of homogeneous concrete matrix reinforced by very strong steel phases. It gave the possibility to take constitutive relation of the iteration movable model of the fold of composite discrete-heterogeneous bars as a basis of the reinforced girder deformation analysis under the conditions of limited deformation. General solutions of defining equations are received independently for each section of different stiffness. Received solutions at the stage of consideration of boundary conditions were adjusted by means of balancing of linkage and static deformation parameters at the edge of analyzing sections. Received amounts of deflections allowed to identify necessary constructive sizes of the strengthening system, with which the given level of the preliminary compression force in the working element is promoted in the designing position of the working element.

**KEY WORDS:** technical condition, defects, carcass of grandstand structure, reinforced concrete girders, reserve of loaded capability, strengthening system, fold iteration model, girder deflections.

### ВСТУП

Внаслідок впливу зовнішнього середовища, режимів експлуатації, змін у конструкції, непередбаченої проектом зміни навантаження та інших факторів, технічний стан багатьох будівельних об'єктів знижується. Такі обставини можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій і тому потребують вжиття запобіжних заходів. Об'єкти з масовим перебуванням людей (зали для глядачів, спортивні арени, торгові манежі тощо) потребують постійного спостереження для створення умов безпечної та надійної їх експлуатації. У Полтаві одним із таких об'єктів є головна спортивна арена обласного центру – стадіон «Ворскла» імені Олексія Бутовського. Експлуатаційна надійність цього об'єкта визначається несучою здатністю залізобетонних елементів каркасу трибунної споруди. Дефекти та місцеві руйнування, що виникають із часом, а також невдалі проектні рішення, пов'язані з реконструкцією трибун, суттєво впливають на експлуатаційні параметри залізобетонних елементів каркаса і призводять до поступового погіршення їх технічного стану. Тому, надійна експлуатація споруди стадіону, зважаючи на його сучасний технічний стан і рівень наслідків від можливої аварії, потребує відповідно до вимог чинного законодавства періодичного проведення візуально-інструментальних і лабораторних обстежень. Отримані у ході таких обстежень натурні дані дозволяють виконати необхідні перевірочні розрахунки залишкової міцності та жорсткості окремих конструктивних елементів каркасу трибунної споруди, результати яких є основою для розроблення заходів щодо забезпечення несучої здатності.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зважаючи на особливі вимоги до об'єктів із масовим перебуванням людей та ускладнені умови експлуатації під відкритим небом, обстеження технічного стану конструкцій стадіону, починаючи з 1988 року, періодично проводились різними науковими установами. За результатами цих обстежень було розроблено і запроваджено ряд технічних заходів щодо відновлення та підвищення експлуатаційного ресурсу різних елементів та вузлів трибунної споруди стадіону. Ці обстеження і конструктивні рішення стосувалися окремих елементів (частин) споруди і були направлені тільки на підвищення запасу міцності, без глибокого пошуку резервів несучої здатності елементів каркаса трибун. Тому у 2009 році Багатогалузовим науково-технічним центром «Віра» (м. Полтава) було виконано комплексне експериментально-аналітичне дослідження технічного стану залізобетонної споруди стадіону «Ворскла», яким визначено



черговість відновлення експлуатаційного ресурсу елементів каркаса трибун.

За результатами чергового дослідження, проведеного у 2016 році, серед найбільш уразливих з точки зору умов роботи, сучасного технічного стану, а також наявного запасу несучої здатності є залізобетонні ригелі каркаса VIP-трибуни, що потребують збільшення експлуатаційного запасу міцності.

Різним способом збільшення несучої здатності згинальних елементів залізобетонних конструкцій шляхом штучного контролюваного перерозподілу їхніх зусиль присвячені чисельні роботи вітчизняних [1-4] та закордонних дослідників [5-7], в яких висвітлені можливості різноманітних оптимальних систем підсилення. Ці роботи, здебільшого, базуються на класичних підходах до розрахунку підсилених конструкцій. Однак, залізобетонні конструкції є неоднорідними конструктивними системами, що після підсилення працюють в умовах обмеженого деформування і потребують застосування відповідних теорій. В основу таких теорій можна покласти депланаційну модель згину композитних неоднорідних брусів [10] та її адаптацію для згину в умовах обмеженого деформування [8], що була успішно апробована у ході пошуку резерву міцності ригелів Східної трибуни стадіону [9].

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Дана робота є продовженням комплексних досліджень технічного стану споруди стадіону, що періодично проводили протягом останніх десятиріч. Черговий звіт про технічний стан будівельних конструкцій стадіону 2016 року містить висновок про необхідність конструктивного підсилення залізобетонних ригелів (консоль) каркасу VIP-трибуни, що несуть навантаження від четвертого останнього поверху. Це визначило мету роботи: на основі результатів дослідження технічного стану консолей верхніх залізобетонних ригелів рам VIP-трибуни, запропонувати аналітично обґрунтовані конструктивні заходи для підвищення їх несучої здатності. Основним методом дослідження є математичне моделювання згину залізобетонних елементів із використанням визначальних співвідношень ітераційної моделі згину композитних дискретно-неоднорідних брусів в умовах обмеженого деформування на основі результатів на-

турних обстежень та лабораторних випробувань.

### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

За розрахунками, виконаними в 2009 році співробітниками кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка під керівництвом проф. А.М. Павлікова, верхні ригелі VIP-трибуни мають мізерний запас міцності (розрахункове навантаження на той час склало 97,63% від допустимого). До такого стану призвело невдале технічне рішення реконструкції з передачею навантаження від надбудованого поверху через поперечні цегляні стіни безпосередньо на ригелі рам каркасу. З урахуванням вимог чинних норм проектування і динаміки розвитку дефектів консольні ригелі практично вичерпали свій розрахунковий резерв несучої здатності. У зв'язку з цим виникла необхідність збільшення експлуатаційного ресурсу консольних ригелів поперечних рам VIP-трибуни стадіону «Ворскла» шляхом конструктивного підсилення.

Зважаючи на надійність і простоту виконання, більш ефективним і доступним є зміна конструктивної схеми поперечних рам гостьової трибуни з улаштуванням обмеження переміщення консолі ригелів (рис. 1) із заданим попереднім зусиллям. Передача розрахункової частини навантаження на пружний попередньо напружений елемент системи підсилення дозволяє досягнути ефективного перерозподілу внутрішніх зусиль у перерізах ригеля. На користь такого рішення свідчить характер розподілу згинаючих моментів у ригелях, що знаходяться під дією однозначного від'ємного згинаючого моменту з максимальними

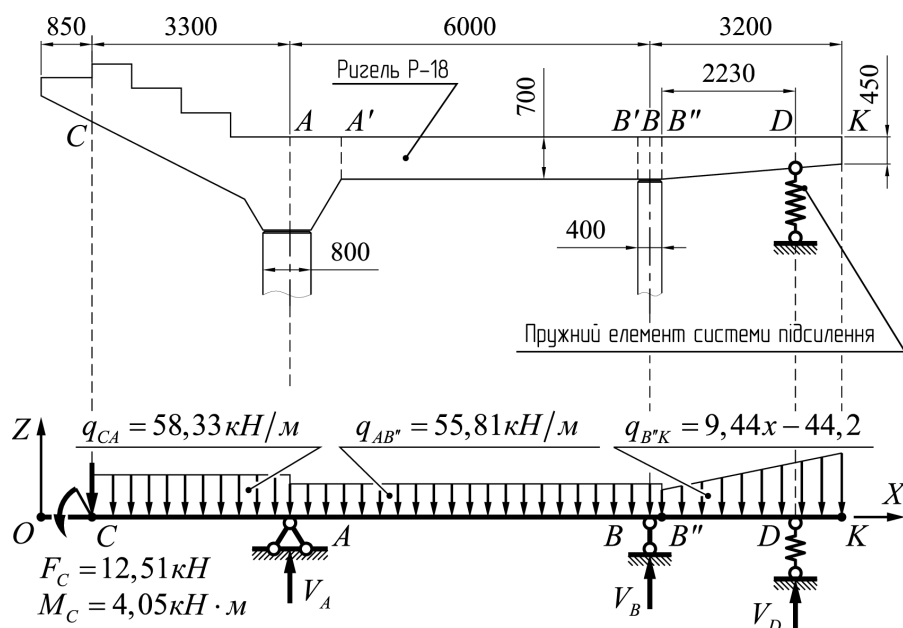


Рис. 1. Конструктивна та розрахункова схеми ригеля



значеннями на опорах і стиснутою нижньою частиною перерізів по всій довжині.

Консольні ригелі (рис. 1) каркасу VIP-трибуни на всій довжині мають однакову ширину, що складає  $b=400$  мм. На ділянці між опорами ригель має сталу прямокутну форму поперечних перерізів із розмірами  $400 \times 700$  мм.

Висота поперечних перерізів визначальної за несучою здатністю консольної ділянки ригелів лінійно змінюється по її довжині від 450 мм на вільному торці до 700 мм на опорі (точка і  $B''$ ).

Ригелі виготовлені із важкого бетону класу С20/25, армованого сталевую арматурою класу А-ІІ.

Характеристика та інтенсивність постійних і тимчасових навантажень прийняті відповідно до ДБН В.1.2-2:2006. СНББ. «Навантаження і впливи. Норми проектування».

Для активного включення у роботу запропонованої системи підсилення ригеля необхідно створити початкове зусилля у її основному опорному елементі, величина якого повинна визначатись на основі розрахунку. Основною умовою для виконання такого розрахунку є збереження знаків (характеру розподілення) згинаючого моменту на розрахункових ділянках ригеля після встановлення системи підсилення, що вимагають особливості структурної будови перерізів об'єкта дослідження.

Встановлення системи підсилення планували в літній період за відсутності тимчасових навантажень. Таким чином, монтажні параметри системи підсилення встановлювали за наявності тільки комбінації постійних навантажень. Для такого випадку згідно із конструкцією ригеля та встановленими параметрами навантаження було сформовано розрахункову схему (рис. 1).

Узагальнена функція зовнішнього навантаження ригеля має вид:

$$\begin{aligned} \bar{q}(x) = & -F_C \Delta(x-x_C) - M_C \frac{d\Delta(x-x_C)}{dx} - \\ & -q_{CA} (H(x-x_C) - H(x-x_A)) + V_A \Delta(x-x_A) - \\ & -q_{AB''} (H(x-x_A) - H(x-x_{B''})) + V_B \Delta(x-x_B) - \\ & -q_{B''K} H(x-x_{B''}) + V_D \Delta(x-x_D), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $V_A$ ,  $V_B$  – невідомі реакції стаціонарних опор;  $V_D$  – вертикальна складова зусилля у пружному елементі системи підсилення;  $q_{B''K} = q'_{B''K} + q''_{B''K}$  – навантаження на ділянці  $B''K$  у системі  $XOZ$ , що складається з постійної та лінійної компонент;  $\Delta(x)$  – дельта-функція Дірака;  $H(x)$  – функція Хевісайда.

Інтегруванням (1) отримано співвідношення для згинаючого моменту у ригелі:

$$\begin{aligned} F_C l_{CA} + M_C + \frac{q_{CA} l_{CA}^2}{2} - \frac{q_{AB''} l_{AB''}^2}{2} + V_B l_{AB} - q'_{B''K} l_{B''K} \left( l_{AB''} + \frac{l_{B''K}}{2} \right) + \\ V_D (l_{AB''} + l_{B''D}) - Q''_{B''K} \left( l_{AB''} + \frac{2l_{B''K}}{3} \right) = 0, \\ F_C l_{CB} + M_C + q_{CA} l_{CA} \left( \frac{l_{CA}}{2} + l_{AB} \right) - V_A l_{AB} + \frac{q_{AB''}}{2} (l_{AB''}^2 - l_{BB''}^2) - \\ q'_{B''K} l_{B''K} \left( l_{BB''} + \frac{l_{B''K}}{2} \right) + V_D l_{BD} - Q''_{B''K} \left( \frac{2l_{B''K}}{3} + l_{BB''} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Система рівнянь рівноваги статки для ригеля, що розглядається

$$\begin{aligned} M(x) = & \int (\bar{q}(x)x) dx = (37080x - 14490 - 29170x^2) \cdot \\ & \times H(x-0,85) + (1264x^2 + 21780 - 10500x + V_A(x-4,150)) \cdot \\ & \times H(x-4,150) + (-5,297 \cdot 10^5 x - 1573x^3 + 50000x^2 + 1,869 \cdot 10^6) \cdot \\ & \times H(x-10,35) + V_B(x-10,15)H(x-10,15) + V_D(x-12,58) \cdot \\ & \times H(x-12,58), H \cdot m, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $Q''_{B''K}$  – рівнодіюча лінійної складової  $q''_{B''K}$  навантаження  $q_{B''K}$ .

Після розв'язання рівнянь (3) отримано співвідношення для невідомих реакцій опор:

$$\begin{aligned} V_B = & \frac{1}{l_{AB}} \left( F_C l_{CA} + M_C + \frac{q_{CA} l_{CA}^2}{2} - \frac{q_{AB''} l_{AB''}^2}{2} - q'_{B''K} l_{B''K} \left( l_{AB''} + \frac{l_{B''K}}{2} \right) + \right. \\ & \left. + V_D (l_{AB''} + l_{B''D}) - Q''_{B''K} \left( l_{AB''} + \frac{2l_{B''K}}{3} \right) \right) = 3,717 \cdot 10^5 + 0,405 V_D, H, \\ V_A = & \frac{1}{l_{AB}} \left( F_C l_{CB} + M_C + q_{CA} l_{CA} \left( \frac{l_{CA}}{2} + l_{AB} \right) + \frac{q_{AB''}}{2} (l_{AB''}^2 - l_{BB''}^2) - \right. \\ & \left. - q'_{B''K} l_{B''K} \left( l_{BB''} + \frac{l_{B''K}}{2} \right) + V_D l_{BD} - Q''_{B''K} \left( \frac{2l_{B''K}}{3} + l_{BB''} \right) \right) = \\ & = 3,821 \cdot 10^5 - 1,405 V_D, H. \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 2 представлена епюра згинаючого моменту для зазначеного ригеля, побудована із використанням (2) та (4) для випадку  $V_D$ , що відповідає поточному стану ригеля без системи підсилення.

Відповідно до епюри на рис. 2 згинаючий момент не змінює знак по довжині ригеля. Для того, щоб не змінити характер розподілу згинаючого

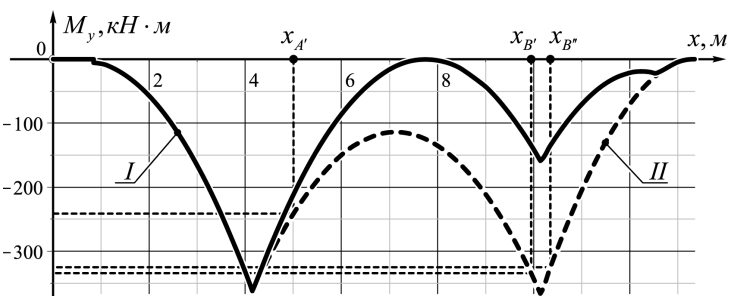


Рис. 2. Розподіл згинаючого моменту по довжині ригеля: I – без системи підсилення; II – після встановлення системи підсилення





го моменту, зусилля в опорному елементі системи підсилення має визначатися за умови:

$$\min |M^{AB}(x)| = 0. \quad (5)$$

Рівняння згинаючого моменту на ділянці  $AB$  (рис. 1)

$$M^{AB}(x) = -F_C(x - x_C) - M_C - q_{CA}l_{CA}\left(x - \left(x_C + \frac{l_{CA}}{2}\right)\right) + V_A(x - (x_C + l_{CA})) - \frac{q_{AB}}{2}(x - (x_C + l_{CA}))^2. \quad (6)$$

Умова для визначення координати перерізу із мінімальним значенням моменту на ділянці  $AB$

$$\frac{d}{dx} M^{AB}(x) = -F_C - q_{CA}l_{CA} + V_A - q_{AB}(x - (x_C + l_{CA})) = 0,$$

звідки, з урахуванням (4), отримаємо необхідну координату:

$$x = \frac{V_A - F_C - q_{CA}l_{CA}}{q_{AB}} + x_C + l_{CA} = 7,137 + 0,726 \cdot 10^{-5} V_D, \text{ м.} \quad (7)$$

Застосувавши (6) та (7) в умові (5) отримаємо:

$$0,147 \cdot 10^{-5} V_D^2 + 1,210 V_D - 1,139 \cdot 10^5 = 0, \quad (8)$$

звідки, відповідно до умов поставленої задачі:  $V_D = 85330 \text{ Н}$ .

На рис. 2 представлена еюра згинаючого моменту у ригелі після встановлення системи підсилення, що створює зусилля  $V_D = 85,33 \text{ кН}$ .

Отримане значення  $V_D$  зменшить небезпечний згинаючий момент у приопорному перерізі  $B''$  (рис. 1) до значення:

$$M^{B''} = V_D l_{B'D} - \frac{q'_{B''K} l_{B''K}^2}{2} - \frac{2Q''_{B''K} l_{B''K}}{3} = 85,33 \cdot 2,23 - \frac{53,46 \cdot 3^2}{2} - \frac{2 \cdot 42,46 \cdot 3}{3} = -159,84 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

У відсотковому відношенні згинаючий момент  $M^{B''}$  у випадку встановлення системи підсилення знизиться на 56,5%, що достатньо для забезпечення надійної роботи конструкції в умовах дії несприятливої комбінації постійних та тимчасових навантажень.

Підставивши  $V_D = 85,33 \text{ кН}$  до співвідношень (4), отримаємо:

$$V_A = 406,28 \text{ кН}, V_B = 262,24 \text{ кН}. \quad (9)$$

Згідно з (4) навантаження на опору  $A$  у випадку встановлення системи підсилення зросте на 34,56 кН (8,5%), що значно нижче наявного запасу несучої здатності колони, а на опору  $B$  знизиться на 119,89 кН (31,4%).

Основною проблемою реалізації запропонованого способу підсилення є забезпечення

розрахункової величини попереднього зусилля  $V_D$  у пружному елементі системи підсилення в проектному положенні, оскільки при здійсненні монтажних робіт внаслідок сумісного деформування її елементів і самого ригеля, відбудеться перерозподіл зусиль. Проаналізувати вплив такого перерозподілу можна, дослідивши прогини ригеля із урахуванням додаткових обмежень переміщень, накладених системою підсилення.

**Переміщення ригеля.** Залізобетонний ригель можна розглядати, як композитний брус, виготовлений із матричного матеріалу, бетону – квазіоднорідного композиту, армованого високоміцними сталевими фазами. Для визначення переміщень ригеля вважатимемо, що деформації після підсилення виникають на пружній стадії роботи бетонної матриці та арматури. Це дозволяє з достатньою точністю, що підтверджено натурними випробуваннями [9], застосувати відомі теоретичні моделі деформування композитних згинальних елементів [10]. Тому для розрахунку прогинів ригеля застосуємо депланаційну модель згину композитних брусів в умовах обмеженого деформування [8].

Матеріали та структура поперечних перерізів досліджуваного ригеля свідчать про його малу піддатливість деформаціям поперечних зсувів, що дозволяє при визначенні прогинів ригеля застосувати тільки нульовий крок наближення ітераційної моделі, що відповідає технічній теорії згину, однак дозволяє врахувати неоднорідність структурної будови ригеля.

При визначенні переміщень, будову реально-го ригеля із багатьма ділянками різної жорсткості замінимо наближеною будовою із двома конструктивними ділянками  $CB''$  та  $B''K$ . На ділянці  $CA'$  (рис.1) ригель має складну східчасту форму, однак вплив жорсткості даної ділянки на прогини консольної ділянки  $BK$  мінімальний, тому жорсткість даної ділянки можна прийняти рівною жорсткості ділянки  $A'B''$ .

Згідно з [8] на нульовому кроці наближення визначальне диференціальне рівняння ітераційної моделі згину композитних брусів для ділянки  $CB''$  із проміжними жорсткими опорами у перерізах із координатами  $x_A$  та  $x_B$  матиме такий вид:

$$D_{00}^{CB''} \frac{d^4 \chi_0^{CB''}}{dx^4} = \bar{q}^{CB''} - \lambda_A \Delta(x - x_A) - \lambda_B \Delta(x - x_B), \quad (10)$$

де  $D_{00}^{CB''}$ ,  $\chi_0^{CB''}$  – жорсткість неоднорідного перерізу та шукана функція прогину ригеля на ділянці  $CB''$ ;  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$  – невідомі множники.

Із урахуванням (1) рівняння (10) перепишемо так:

$$D_{00}^{CB''} \frac{d^4 \chi_0^{CB''}}{dx^4} = -F_C \Delta(x - x_C) - M_C \frac{d\Delta(x - x_C)}{dx} - \lambda_A \Delta(x - x_A) - \lambda_B \Delta(x - x_B) - q_{AB''} \left( \frac{H(x - x_A)}{-H(x - x_{B''})} \right) - q_{CA} \left( \frac{H(x - x_C)}{-H(x - x_A)} \right). \quad (11)$$



Система крайових та додаткових умов для визначення сталих інтегрування і невідомих множників у розв'язку рівняння (11), матиме такий вид

$$\left(\frac{d^2\chi_0^{CB*}}{dx^2}\right)\Big|_{x=0}=0, \quad \left(\frac{d^3\chi_0^{CB*}}{dx^3}\right)\Big|_{x=0}=0,$$

$$\chi_0^{CB*}\Big|_{x=x_A}=0, \quad \chi_0^{CB*}\Big|_{x=x_B}=0. \quad (12)$$

Для ділянки  $B''K$  із пружною проміжною опорою у перерізі  $D$ , аналогічно запишемо

$$D_{00}^{B''K} \frac{d^4\chi_0^{B''K}}{dx^4} = -q_{B''K} H(x-x_{B''}) - c\lambda_D \Delta(x-x_D) + P_D \Delta(x-x_D), \quad (13)$$

де  $D_{00}^{B''K}$ ,  $\chi_0^{B''K}$  – жорсткість неоднорідного перерізу та шукана функція прогину ригеля на ділянці  $B''K$ ;  $\lambda_D$  – невідомий множник;  $c$  – жорсткість пружної опори;  $P_D$  – навантаження ригеля від попереднього зусилля у пружній опорі.

Система крайових та додаткових умов для рівняння (13):

$$\left(\frac{d^2\chi_0^{B''K}}{dx^2}\right)\Big|_{x=l}=0, \quad \left(\frac{d^3\chi_0^{B''K}}{dx^3}\right)\Big|_{x=l}=0,$$

$$\chi_0^{B''K}\Big|_{x=x_D} - \lambda_D = 0. \quad (14)$$

Для узгодження розв'язків рівнянь (11) та (13) у спільному перерізі  $B''$  вимагатимемо виконання наступних умов:

$$\left(\chi_0^{CB*}\right)\Big|_{x=x_{B''}} = \left(\chi_0^{B''K}\right)\Big|_{x=x_{B''}},$$

$$\left(D_{00}^{CB*} \frac{d^2\chi_0^{CB*}}{dx^2}\right)\Big|_{x=x_{B''}} = \left(D_{00}^{B''K} \frac{d^2\chi_0^{B''K}}{dx^2}\right)\Big|_{x=x_{B''}},$$

$$\left(\frac{d\chi_0^{CB*}}{dx}\right)\Big|_{x=x_{B''}} = \left(\frac{d\chi_0^{B''K}}{dx}\right)\Big|_{x=x_{B''}}, \quad (15)$$

$$\left(D_{00}^{CB*} \frac{d^3\chi_0^{CB*}}{dx^3}\right)\Big|_{x=x_{B''}} = \left(D_{00}^{B''K} \frac{d^3\chi_0^{B''K}}{dx^3}\right)\Big|_{x=x_{B''}}.$$

На даному етапі необхідно встановити деформований стан ригеля у момент після монтажу без тимчасового корисного навантаження. В такому випадку невідомі множники у диференціальних рівняннях (11) та (13) повинні відповідати виконаному вище статичному розрахунку. Тоді, згідно з фізичним змістом величин  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$ ,  $\lambda_D$  і  $P_D$  запишемо рівності:

$$\lambda_A = -V_A, \lambda_B = -V_B, \lambda_D = 0, P_D = V_D. \quad (16)$$

З урахуванням (16) визначальні рівняння (11) та (13) набудуть такого виду

Сумісне розв'язання диференціальних рівнянь (17) разом із крайовими і додатковими умовами (12) і (14) та умовами сумісної роботи ділянок  $CB''$  та  $B''K$  (15), дозволяє отримати функцію прогину  $\chi_0$  для ригеля, що розглядається.

$$D_{00}^{CB*} \frac{d^4\chi_0^{CB*}}{dx^4} = -F_C \Delta(x-x_C) - M_C \frac{d\Delta(x-x_C)}{dx} + V_A \Delta(x-x_A) + V_B \Delta(x-x_B) - q_{CA} \left( \begin{matrix} H(x-x_C) \\ -H(x-x_A) \end{matrix} \right) - q_{AB''} \left( \begin{matrix} H(x-x_A) \\ -H(x-x_{B''}) \end{matrix} \right),$$

$$D_{00}^{B''K} \frac{d^4\chi_0^{B''K}}{dx^4} = -q_{B''K} H(x-x_{B''}) + V_D \Delta(x-x_D). \quad (17)$$

Необхідними вихідними даними для реалізації розв'язання рівнянь (17) є жорсткості  $D_{00}^{CB*}$  та  $D_{00}^{B''K}$ . Користуючись методикою та співвідношеннями, встановленими у [10], на основі даних про структуру поперечних перерізів ригеля на прогоновій ділянці було встановлено:  $D_{00}^{CB*} = 4.6931 \times 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ .

При цьому вихідну структуру поперечного перерізу із арматурними фазами круглого перерізу було замінено на еквівалентну – з фазами квадратної форми при збереженні площі.

Для консольної ділянки  $B''K$ , що має змінну висоту перерізу, було розраховано жорсткості для низки перерізів (табл. 1).

Оскільки точне врахування змінної жорсткості ділянки  $B''K$  неможливе у межах застосованої теорії, то розв'язання системи (11)-(15) виконувалось для двох випадків постійної жорсткості ділянки  $B''K$ :

– на початку ділянки:

$$\bar{D}_{00}^{B''K} = D_{00}^{B''K}\Big|_{x=x_{B''}} = 4,6931 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

– у перерізі  $D$ :

$$\bar{D}_{00}^{B''K} = D_{00}^{B''K}\Big|_{x=x_D} = 1,9078 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

Очевидно, що значення прогинів ділянки  $B''K$  у випадку змінної жорсткості за зазначеним у табл.1 законом, буде знаходитися між значеннями, що отримані для зазначених сталих жорсткостей.

Таблиця 1. Жорсткості перерізів консольної ділянки ригеля

Параметр перерізу	Значення						
Координата, $x'$ , м *	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Висота перерізу, $h$ , м	0,700	0,659	0,617	0,575	0,533	0,492	0,450
Жорсткість перерізу, $D_{00}^{B''K}$ , $10^8 \text{ Н} / \text{м}^2$	4,693	3,924	3,244	2,645	2,123	1,675	1,293

\* відносна координата  $x'$  відраховується від опорного перерізу  $B$

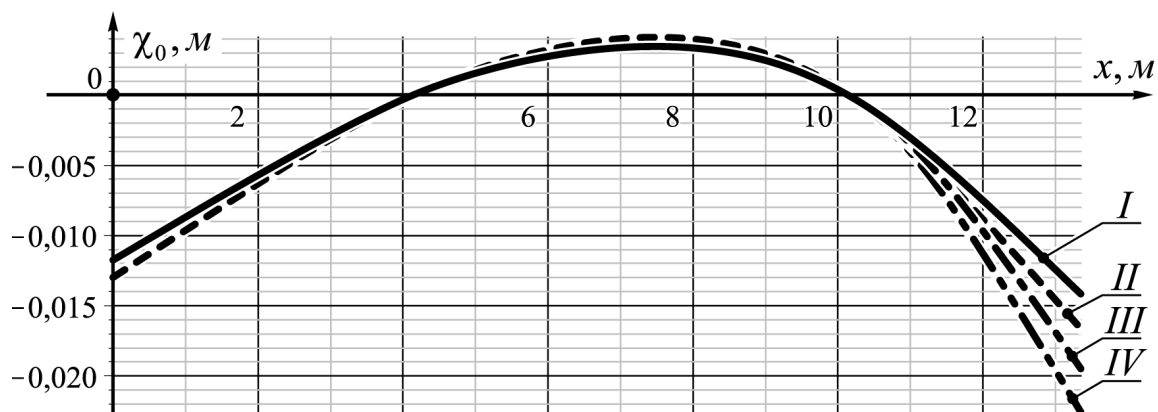


Рис. 3. Прогини ригеля після (I) та до (II) підсилення при жорсткості консолі  $4,69 \cdot 10^8 H \cdot m^2$ , а також після (III) та до (IV) підсилення при жорсткості консолі  $1,91 \cdot 10^8 H \cdot m^2$

На рис. 3 представлено прогини ригеля до та після встановлення системи підсилення із розрахованим попереднім зусиллям.

Крива різниці між прогинами до та після встановлення системи підсилення для двох значень жорсткості перерізів ділянки  $B''K$  наведена на рис. 4.

Згідно з рис. 4 різниця величини прогинів до та після встановлення системи підсилення у перерізі  $D$  знаходиться у межах  $\delta\chi_0|_{x=x_D} = 3,01-3,99$  мм.

Конструктивно найбільш простим способом створення попереднього зусилля у пружному елементі системи підсилення є поступове поздовжнє деформування робочого елемента у ході його приведення у проектне положення. Такий спосіб не потребує застосування додаткових натяжних пристроїв або засобів, а попереднє зусилля забезпечується різницею між вихідною довжиною пружного елемента і відстанню між його опорними точками у системі підсилення.

За такого способу після досягнення попереднього зусилля  $V_D = 85,33$  кН у робочому вертикальному чи нахиленому елементі системи підсилення точка його контакту із ригелем зміститься по вертикалі на величину  $\delta\chi_0|_{x=x_D}$ . З урахуванням цього, необхідні довжина  $l_0$  елемента і площа його перерізу будуть пов'язані співвідношенням:

$$l_0 = EA \cos \alpha (l_1 + \Delta\chi_0^D \cos \alpha) / (EA \cos \alpha - V_D), \quad (18)$$

де  $l_1$  – відстань між точками контакту елемента із опорною жорсткою поверхнею системи підсилення та ригеля;  $EA$  – жорсткість елемента на стиск;  $\alpha$  – кут можливого нахилу елемента до вертикалі.

Аналіз різних комбінацій значень параметрів довжини  $l_0$ , площі поперечного перерізу  $A$  та кута нахилу  $\alpha$ , що входять до (18), дозволив оптимально сконструювати опорний елемент і саму систему підсилення з врахуванням конструктивних і монтажних можливостей.

## ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБЛЕНЬ

Таким чином, запропоновано оптимальну систему підсилення ригелів гостевої трибуни стадіону «Ворскла» у м. Полтаві, в основу розробки якої покладено перерозподіл згинаючого моменту за допомогою обмеження переміщень консольної ділянки пружним елементом із попереднім стискаючим зусиллям. Досягнутий перерозподіл внутрішніх зусиль дозволив зменшити розрахунковий згинаючий момент на опорі та у прольоті без зміни його знаку і забезпечити підвищення несучої здатності ригеля на 56,5%.

Запропонований метод моделювання деформи-

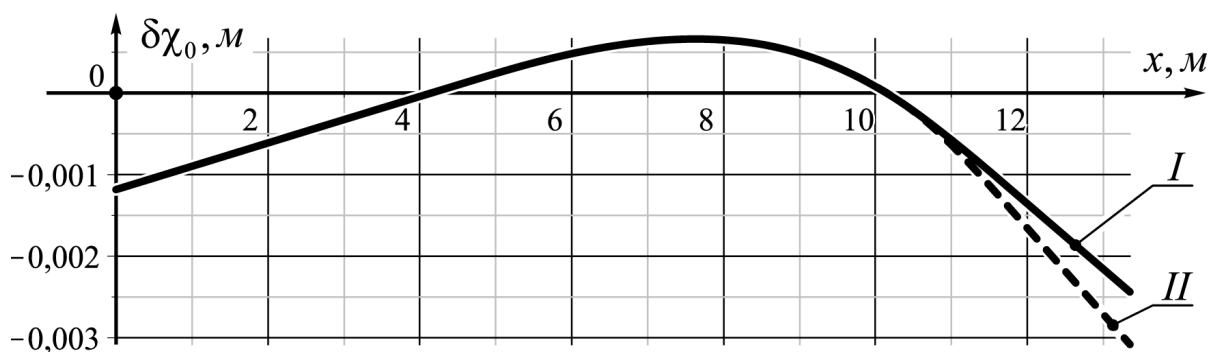


Рис. 4. Різниця прогинів ригеля при жорсткості консолі  $4,69 \cdot 10^8 H \cdot m^2$  (I); та жорсткості консолі  $1,91 \cdot 10^8 H \cdot m^2$  (II)



ваного стану залізобетонного ригеля із використанням депланаційної ітераційної моделі згину композитних брусів дозволив встановити величину вторинного пружного прогину ригеля, спричиненого реактивним зусиллям системи підсилення.

Отримані значення прогинів дозволили встановити необхідні конструктивні розміри робочого елемента системи підсилення, за яких забезпечується у ньому заданий рівень попереднього зусилля.

Запропоновані конструктивні підходи та наведений приклад відновлення технічного стану несучих елементів каркасу трибун стадіону показують можливості збереження належного експлуатаційного ресурсу спортивної споруди, замість її перебудови або заміни окремих конструктивних частин.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бондаренко С.В. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий / С.В. Бондаренко, Р.С. Санжаровський. – М: Стройиздат, 1990. – 352 с.
2. Гольшев А.Б. Проектирование усиления несущих конструкций производственных зданий и сооружений / А.Б. Гольшев, И.Н. Ткаченко. – Київ: Логос, 2001. – 172 с.
3. Клименко Є.В. Технічний стан будівель та споруд / Є.В. Клименко. – Одеса, 2010. – 282 с.
4. Обстеження і відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних конструкцій // В.С. Дорофєєв, Ю.В. Заволока, В.М. Кобринець та ін. – Одеса: Евен, 2011. – 474 с.
5. Recent advances in optimal structural design // Edited by Burns S.A.; Structural Engineering Institute. Technical Committee on Optimal Structural Design (Corporate Author). – Reston, Va.: ASCE Publications, 2002. – 385 p.
6. Spillers W.R. Structural Optimization / W.R. Spillers, K.M. MacBain. – New York; London: Springer, 2009. – 302 p.
7. Emmons P.H. Strengthening concrete structures / P.H. Emmons, A.M. Vaysburd, J. Thomas, II. Part // Concrete International. – № 4 – 1998. – pp. 56-60.
8. Горик О.В. Згин композитних призматичних брусів в умовах обмеженого деформування / О.В. Горик, С.Б. Ковальчук // Наукові нотатки: міжвуз. зб. ЛНТУ – Луцьк, 2013. – Вип. 42. – С. 55-61.
9. Горик О.В. Натурні дослідження жорсткості ригелів трибун стадіону «Ворскла» в м. Полтава / О.В. Горик, С.Б. Ковальчук, С.В. Яхін // Буд. конструкції. – Вип. 78: у 2-х кн: Кн. 1. Київ: ДП НДІБК, 2013. – С. 266-272.
10. Горик О.В. Механіка деформування композитних брусів / О.В. Горик, В.Г. Піскунов, В.М. Череди́ков. – Полтава-Київ: АСМІ, 2008. – 402 с.

#### REFERENCES

1. Bondarenko, S.V., & Sanzharovskiy, R.S. (1990). Strengthening of reinforced concrete structures during the buildings reconstruction. Moscow: Stroizdat.
2. Holyshev, A.B., & Tkachenko, I.N. (2001). Design of load-bearing structures reinforcement for industrial buildings and structures. Kyiv: Logos.
3. Klymenko, Ye.V. (2010). Technical condition of buildings and structures. Odesa.
4. Dorofeev, V.S., Zavaloka, Yu.V., Kobrinets, V.M. ... (2011). Inspection and restoration of reinforced concrete performance. Odesa: Even.
5. Structural Engineering Institute. Technical Committee on Optimal Structural Design. Burns, S.A. (Ed.). (2002). Recent advances in optimal structural design. Reston, Va.: ASCE Publications.
6. Spillers, W.R., & MacBain, K.M. (2009). Structural Optimization. New York; London: Springer.
7. Emmons, P.H., Vaysburd, A.M., & Thomas, J. (1998). Strengthening concrete structures (Part II). Concrete International, 4, 56-60.
8. Horyk, O.V., & Kovalchuk, S.B. (2013). Bending of composite prismatic bars in the limited deformation conditions. LNTU Interuniversity collection of papers "Scientific Notes", 42, 55-61.
9. Horyk, O.V., Kovalchuk, S.B., & Yakhin, S.V. (2013). Full-scale studies of the "Vorskla" stadium's grandstands rigidity in Poltava (Part 1). Building structures, 78, 266-272.
10. Horyk, O.V., Piskunov, V.H., & Cherednikov, V.M. (2008). Mechanics of composite beams deformation. Poltava-Kyiv: ACMI.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2017 р.