

УДК 624.012:624.046

ДО РОЗРАХУНКУ ПЛОСКИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РАМ З ПЕРЕМІННОЮ ЖОРСТКІСТЮ СТЕРЖНІВ ДЕФОРМАЦІЙНИМ МЕТОДОМ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ ЧАСУ

БАМБУРА А. М.^{1*}, *д.т.н., проф.*
БОЛОТОВ О. Ю.^{2*}, *м.н.с.*

^{1*} Відділ надійності будівельних конструкцій, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 2493744, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Відділ надійності будівельних конструкцій, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 2493775, e-mail: viperwk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4102-3079

Анотація. Мета. Метою цієї роботи є розробка методики розрахунку плоских статично невизначених залізобетонних рам деформаційним методом зі змінною жорсткістю перерізу з урахуванням фактору часу на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону. **Задачі.** Реалізація методики розрахунку плоских залізобетонних рам деформаційним методом з урахуванням фактору часу на прикладах статично невизначених залізобетонних рам з П-подібним та замкнутих контуром на дію короткочасного та тривалого навантаження. **Методика.** Для вирішення завдання існує безліч підходів. Багато з них мають свої плюси і мінуси. У нашому випадку найбільш оптимальний і логічний буде метод розрахунку рамних конструкцій методом переміщень з використанням деформаційного методу зі змінною жорсткістю стержнів на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону. Даний метод дає повну свободу у вирішенні завдання статичної невизначеності і безпосереднього розрахунку перерізу елементів. Такий підхід дозволяє вирішити задачу в не залежності від типу завантаження і/або їх комбінації. Невідомими в рішенні методом переміщень є кути повороту, що виникають у всіх жорстких вузлах рами, і лінійні зміщення, число яких визначається шляхом введення в усі жорсткі вузли системи, включаючи опорні, шарнірів, тоді рухливість отриманого механізму буде дорівнювати числу лінійних зміщень. Щоб розрахувати раму з незмінною жорсткістю стержнів по їх довжині, необхідно попередньо вирішити допоміжні питання про деформації балки при примусовому повороті торцевих перетинів на кут, що дорівнює одиниці. Виконані автором дослідження з урахуванням наявності в стержнях рами до 10 окремих ділянок з різними жорсткостями дозволили визначити значення приведених кутів повороту, як функцію від кількості ділянок, на які розділяються стержні рами, номери доданку у формулі номера ділянки та жорсткості ділянок. Також було встановлено, що традиційні значення одиничних вузлових моментів рами за методом переміщень можуть бути виражені через значення приведених кутів повороту, які враховують розбивку стержнів рами на ділянки з індивідуальними жорсткостями. Визначивши всі невідомі величини зусиль в рамній конструкції при розрахунку методом переміщень з врахуванням перемінної жорсткості стержнів в момент часу $\Delta t=1$, переходимо до розрахунку перерізу, коли визначимо нові значення кривизни в розрахункових перерізах та величини жорсткості на проміжних ділянках стержнів рами. Для розрахунку плоскої рами в нелінійній постановці ітераційним методом з коригуванням змінних жорсткостей в перерізах ригеля та стійок використаємо алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги залізобетонного розрахункового перерізу за деформаційним методом на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону. **Висновки.** Розроблена методика розрахунку плоских рам деформаційним методом зі змінною жорсткістю перерізу з урахуванням фактору часу на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону дозволила встановити функціональну залежність коефіцієнтів системи канонічних рівнянь методу переміщень від приведених кутів повороту вузлів стержнів рами, розширити алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги залізобетонного розрахункового перерізу за деформаційним методом для врахування фактору часу, при розрахунку плоских рам зі змінною жорсткістю, на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону, розраховувати статично невизначувані рамні конструкції різної складності зі змінною жорсткістю.

Ключові слова: розрахунок залізобетонних рам, фактор часу, довготривалі навантаження, деформаційний метод, діаграми деформування бетону, змінна жорсткість.

К РАСЧЕТУ ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ СТЕРЖНЕЙ ДЕФОРМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ

БАМБУРА А. Н.^{1*}, *д.т.н., проф.*
БОЛОТОВ А. Ю.^{2*}, *м.н.с.*

^{1*} Отдел надежности строительных конструкций, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 2493744, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Отдел надежности строительных конструкций, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 2493775, e-mail: viperwk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4102-3079

Аннотация. Цель. Целью этой работы является разработка методики расчета плоских статически неопределимых железобетонных рам деформационным методом с переменной жесткостью сечения, с учетом фактора времени на основе использования трансформируемых диаграмм деформирования бетона. **Задачи.** Реализация методики расчета плоских железобетонных рам деформационным методом с учетом фактора времени на примерах статически неопределимых железобетонных рам с П-образным и замкнутым контуром на действие кратковременной и длительной нагрузки. **Методика.** Для решения задачи существует множество подходов. Многие из них имеют свои плюсы и минусы. В нашем случае наиболее оптимальный и логичный будет метод расчета рамных конструкций методом перемещений с использованием деформационного метода с переменной жесткостью стержней на основе использования трансформируемых во времени диаграмм бетона. Данный метод дает полную свободу в решении задачи статической неопределимости и непосредственного расчета сечения элементов. Такой подход позволяет решить задачу в не зависимости от типа загрузки и/или их комбинации. Неизвестными в решении метода перемещений являются углы поворота, возникающие во всех жестких узлах рамы, и линейные смещения, число которых определяется путем введения во все жесткие узлы системы, включая опорные, шарниров, тогда подвижность полученного механизма будет равняться числу линейных смещений. Чтобы рассчитать раму с неизменной жесткостью стержней по их длине, необходимо предварительно решить вспомогательные вопросы по деформации балки при принудительном повороте торцевых сечений на угол, равный единице. Выполнены автором исследованием с учетом наличия в стержнях рамы до 10 отдельных участков с различными жесткостями позволили определить значение приведенных углов поворота, как функцию от количества участков, на которые разделяются стержни рамы, номера приложения, номера участка и жесткости участков. Также было установлено, что традиционные значения единичных узловых моментов рамы методом перемещений могут быть выражены через значения приведенных углов поворота, учитывающих разбивку стержней рамы на участки с индивидуальными жесткостями. Определив все неизвестные величины усилий в рамной конструкции при расчете методом перемещений с учетом переменной жесткости стержней в момент времени $\Delta t = 1$, переходим к расчету сечения, когда определим новые значения кривизны в расчетных сечениях и величины жесткости на промежуточных участках стержней рамы. Для расчета плоской рамы в нелинейной постановке итерационным методом с корректировкой переменных жесткостей в сечениях ригеля и стоек используем алгоритм решения системы нелинейных уравнений равновесия железобетонного расчетного сечения деформационным методом на основе использования трансформируемых во времени диаграмм деформирования бетона. **Выводы.** Разработанная методика расчета плоских рам деформационным методом с переменной жесткостью сечения с учетом фактора времени на основе использования трансформируемых во времени диаграмм деформирования бетона позволила установить функциональную зависимость коэффициентов системы канонических уравнений метода перемещений от приведенных углов поворота узлов стержней рамы, расширить алгоритм решения системы нелинейных уравнений равновесия железобетонного расчетного сечения деформационным методом для учета фактора времени при расчете плоских рам с переменной жесткостью, на основе использования трансформируемых во времени диаграмм деформирования бетона, посчитать статически неопределимые рамные конструкции различной сложности с переменной жесткостью.

Ключевые слова: расчет железобетонных рам, фактор времени, долговременные нагрузки, деформационный метод, диаграммы деформирования бетона, переменная жесткость.

REGARDING CALCULATION OF FLAT CONCRETE FRAMES WITH RODS VARIABLE RIGIDITY USING DEFORMATION METHOD BASED ON TIME FACTOR

BAMBURA A.N.^{1*}, *Dr., Prof.*

BOLOTOV A. U.^{2*}, *PhD student*

^{1*} Department of the Structures Reliability, State Enterprise «The state research institute of building constructions» 5/2 Preobrazhenska str., 03037, Kyiv, Ukraine, phone: +38 (044) 2493744, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Department of the Structures Reliability, State Enterprise «The state research institute of building constructions» 5/2 Preobrazhenska str., 03037, Kyiv, Ukraine, phone: +38 (044) 2493775, e-mail: viperwk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4102-3079

Annotation. Aim. The aim of this work is to develop a method of calculating flat statically indeterminate reinforced concrete frames using deformation method with variable cross-section stiffness, considering time factor through the use of transformable strain diagrams of concrete. **Tasks.** The implementation of the algorithm for calculating the flat reinforced concrete frames using deformation method based on time factor based on the examples of statically indeterminate reinforced concrete frames with П-shaped and closed-loop to research the effect of short-term and long-term load. **Methods.** There are many approaches to solve the task. Many of them have their pros and cons. In our case, the most appropriate and logical method is to calculate frame structures by displacement using the deformation method with variable stiffness rods through the use of transformable strain diagrams of concrete. This method gives full freedom in solving the problem of redundancy and the direct calculation of elements section. Such approach helps to solve the problem despite the type of load and / or their combination. The unknown in solving the displacement method are the angles of rotation occurring in all nodes of rigid frame, and linear displacements, the number of which is determined by injection

to all rigid nodes of the system, including reference, hinges, which ensures that the mobility of a mechanism is equal to the number of linear displacements. To calculate the frame with a constant stiffness of rods along their length, it is first of all necessary to solve ancillary questions on beam deformation under forced rotation of end sections at an angle equal to unit. The research, executed by the author of the study, taking into account the presence of the frame in the rods of up to 10 separate sections with various atrocities, made possible to determine the value of the above angles of rotation, as a function of the number of sites that are separated by the frame rods, application number, section number and sections rigidity. It was also discovered that the traditional values of individual nodal points of the frame using the displacement method can be expressed by the value of given angles of rotation, taking into account the frame rods breakdown into sections with individual rigidity. After determining the value of all the unknown forces in the frame structure using the displacement method in calculations taking into account the variable rigidity of the rods at a time moment $\Delta t = 1$, we move to the calculation of section, when we define new value of the curvature in the estimated sections and rigidity values at intermediate spots of frame rods. In order to calculate the flat frame in nonlinear installment by iterative method with adjusted variable rigidity in sections of crossbar and uprights we are using an algorithm for solving systems of nonlinear equations for concrete estimated sections equilibrium using the deformation method through the use of transformable strain diagrams of concrete.

Conclusions. The developed method of calculation of flat frames using deformation method with a variable section rigidity taking into account time factor basing on the use of time convertible deformation diagrams of concrete allowed to establish a functional dependence of the coefficients of the system of canonical equations of displacements method on the determined angles rotation of the nodes of frame rods; to expand algorithm for solving system of nonlinear equations for concrete estimated sections equilibrium using the deformation method to take into account the time factor when calculating flat frames with variable rigidity basing on time convertible deformation diagrams of concrete; to calculate statically undefined frame structures of varying complexity with variable rigidity.

Keywords: calculation of reinforced concrete frames, the time factor, long-term load, the deformation method, concrete stress-strain diagram the variable stiffness.

Вступ

У зв'язку з необхідністю отримання більш правдоподібних і більш економічно обґрунтованих результатів розрахунку залізобетонних конструкцій почали використовувати чисельні методи, в яких нелінійні властивості залізобетону враховуються на основі повних діаграм деформування бетону та арматури. Використання повних діаграм деформування матеріалів конструкцій дозволяє точніше оцінювати їх напружений стан при високих рівнях навантаження, що особливо важливо для статично невизначених конструкцій. Разом з тим, існуюча методика розрахунку розроблена на основі діаграм деформування в основному для конструкцій з короткочасними або циклічними діями навантажень.

Для більшості будівельних конструкцій (в нашому випадку, рам) властивий режим дії навантаження, що включає в себе початкове і подальшу дію навантаження. Тому на даному етапі розвитку розрахунків залізобетонних конструкцій пріоритетним є розрахунок статично невизначених залізобетонних рамних конструкцій з урахуванням тривалої дії навантажень на основі нелінійних діаграм деформування бетону.

Це вимагає існування методів розрахунку, які змогли б враховувати історію експлуатації існуючих споруд, визначати жорсткість, стійкість і тріщиностійкість окремих конструкцій, виходячи з реальної дії навантаження, з урахуванням фактору часу в тому числі.

Мета

Метою цієї роботи є розробка методики розрахунку плоских статично невизначених залізобетонних рам деформаційним методом зі змінною жорсткістю перерізу з урахуванням фактору часу на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону.

Задачи

Реалізація алгоритму розрахунку плоских залізобетонних рам деформаційним методом з урахуванням фактору часу на прикладах статично невизначених залізобетонних рам з П-подібним та замкнутим контуром на дію короткочасного та тривалого навантаження.

Методика

Для вирішення завдання існує безліч підходів. Багато з них мають свої плюси і мінуси. У нашому випадку найбільш оптимальний і логічний буде метод розрахунку рамних конструкцій методом переміщень з використанням деформаційного методу зі змінною жорсткістю стержнів. Даний метод дає повну свободу у вирішенні завдання статичної невизначеності і безпосереднього розрахунку перетину елементів. Такий підхід дозволяє вирішити задачу в не залежності від типу завантаження і/або їх комбінації.

Невідомими в рішенні методом переміщень є кути повороту, що виникають у всіх жорстких вузлах рами, і лінійні зміщення, число яких визначається шляхом введення в усі жорсткі вузли системи, включаючи опорні, шарнірів, тоді рухливість отриманого механізму буде дорівнювати числу лінійних зміщень [12].

Канонічні рівняння методу переміщень мають вигляд:

$$\begin{cases} r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + \dots + r_{1n}Z_n + R_{1p} = 0 \\ r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + \dots + r_{2n}Z_n + R_{2p} = 0 \\ \dots \\ r_{n1}Z_1 + r_{n2}Z_2 + \dots + r_{nn}Z_n + R_{np} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де r_{11} - реактивний момент в точці прикладання Z_1 від дії $Z_1=1$;

r_{in} - реактивний момент в точці прикладання Z_i від дії $Z_n=1$;

$Z_i \dots Z_n$ - дійсний (шуканий) кут повороту в i -му (n -му) зв'язку.

Щоб розрахувати раму з незмінною жорсткістю стержнів по їх довжині, необхідно попередньо вирішити допоміжні питання про деформації балки при примусовому повороті торцевих перетинів на кут, що дорівнює одиниці (рис. 1).

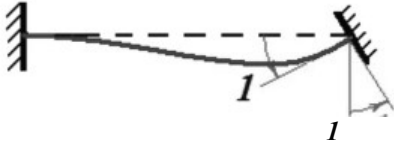


Рис. 1 – Деформація балки з двома затисненими торцевими перерізами від повороту правого перерізу на кут, що дорівнює одиниці / Deformation of the beam clamped with two end sections of the right section rotation at an angle, which is equal to one.

За звичай, використовують табличні значення реакцій на кінцях балки в залежності від граничних умов на її кінцях.

Наприклад, для балок з двома затисненими торцевими перерізами значення реакцій будуть мати вигляд:

$$r_{aa} = \frac{4EJ}{l} \text{ та } r_{ab} = \frac{2EJ}{l} \quad (2)$$

Розглядаючи стержні рами із завантаженнями опорних вузлів одиничними моментами, ми можемо скласти систему 2-х рівнянь за методом сил, з якої за формулами Крамера знайдемо невідомі - внутрішні зусилля в затиснених вузлах стержнів від одиничних зміщень δ_{aa} ; δ_{bb} ; δ_{ab} :

$$X_a = \frac{\delta_{aa}}{(\delta_{aa}\delta_{bb} - \delta_{ab}^2)} \quad (3)$$

$$X_b = -\frac{\delta_{ab}}{(\delta_{aa}\delta_{bb} - \delta_{ab}^2)} \quad (4)$$

При врахуванні, що стержні рами мають перемінну жорсткість по довжині, значення одиничних зміщень δ_{aa} ; δ_{bb} ; δ_{ab} (кутів повороту) набувають складних математичних виразів [11], [13].

Виконані автором дослідженням з поділом стержнів рами на 10 окремих ділянок з різними жорсткостями та на основі результатів досліджень в роботах Голишева О.Б., Бамбури А.М. і Жданова О.Е. [1, 2] та роботи [9] дозволили визначити значення приведених кутів повороту, як функцію від кількості ділянок, на які розділяються стержні рами,

номера доданків у формулі \sum_1^n , номера ділянки та жорсткості ділянок:

$$\delta_{aa} = \frac{l}{3ni^2} \left(\sum_1^n \frac{3j^2 - 3j + 1}{EI_j} \right) \quad (5)$$

$$\delta_{bb} = \frac{l}{3ni^2} \left(\sum_1^n \frac{3j^2 - 3j + 1}{EI_j} \right) \quad (6)$$

$$\delta_{ab} = -\frac{l}{6ni^2} \left(\sum_1^n \frac{1}{EI_j} + \frac{[3(1+2(j-1))i - 2(3j^2 - 3j + 1)]}{EI_j} \right) \quad (7)$$

де n - кількість ділянок, на які розділяється стержень рами;

i - кількість ділянок;

j - номер ділянки;

l - довжина стержня рами;

EI_j - жорсткість j -ї ділянки стержня рами.

Також було встановлено, що традиційні значення одиничних вузлових моментів рами за методом переміщень можуть бути виражені через значення приведених кутів повороту (5), (6) і (7), які враховують поділу стержнів рами на ділянки з індивідуальними жорсткостями:

$$\frac{4EI}{l} = \frac{\delta_{aa}}{(\delta_{aa}\delta_{bb} - \delta_{ab}^2)} \quad (8)$$

$$\frac{2EI}{l} = \left| -\frac{\delta_{ab}}{(\delta_{aa}\delta_{bb} - \delta_{ab}^2)} \right| \quad (9)$$

Таким чином, після простої заміни коефіцієнтів r_{11}, \dots, r_{nn} на залежності (8), (9), або їх похідні, подальший розрахунок рами виконується за тою ж методикою, що прийнята в традиційному методі переміщень.

Визначивши всі невідомі величини зусиль в рамній конструкції при розрахунку методом переміщень з врахуванням перемінної жорсткості стержнів в момент часу $\Delta t=1$, переходимо до розрахунку перерізу, коли визначимо нові значення кривизни в розрахункових перерізах та величини жорсткості на проміжних ділянках стержнів рами.

Для розрахунку плоскої рами в нелінійній постановці ітераційним методом з коригуванням змінних жорсткостей в перерізах ригеля та стійок використовуємо алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги залізобетонного розрахункового перерізу за деформаційним методом, наведеним в роботі Бамбури А.М., Гурківського О.Б., Безбожної М.С. та Дорогової О.В. [10], але внесемо зміни для можливості врахування фактору часу. Для цього використовуємо методу [1] та [6], в якій були задані передумови для модифікованого аналітичного моделювання діаграми деформування бетону з метою врахування довготривалої дії навантаження на основі даних експериментальних та аналітичних досліджень ДП НДІБК. Крім того, враховуємо передумови, що закладені в основу методик [7], [8].

Згідно наведених передумов та дослідів авторів [1], [6], [10] діаграма деформування бетону при тривалій дії навантаження має наступний вигляд. На рисунку 2 наведено діаграми деформування бетону при короткочасній та тривалій дії навантаження.

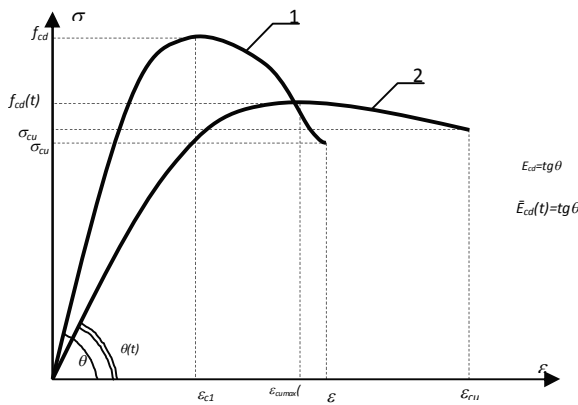


Рис. 2 – Діаграми деформування бетону при короткочасній (1) та тривалій (2) дії навантаження / Diagram of concrete deformation at short (1) and long term (2) load impact

На основі аналізу результатів роботи [2], для інших параметрів діаграми (дивись рисунок 2) автор запропонував наступні залежності:

$$\varepsilon_{c1}(t) = \varepsilon_{c1} [1 + \eta(0.18 + 0.2734 \cdot \ln(t))] \quad (10)$$

$$\varepsilon_{cu}(t) = \varepsilon_{cu} [1 + n(0.206 + 0.239 \cdot \ln(t))] \quad (11)$$

$$\beta(t) = \beta + \left(\frac{\varepsilon_{cu}(t) - \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}} \right) \left(\frac{0.93 - \beta}{2} \right) \quad (12)$$

$$f_{cd}(t) = f_{cd} [0.9488 - 0.0166 \ln(t)] \cdot k(\eta, t) \quad (13)$$

$$k(\eta, t) = 1 - 0.152 \ln(t) [1 - 1.4\eta + 0.491\eta^2] \quad (14)$$

Враховуючи залежності описані в методиці [2] та роботі [10] та параметри діаграми для врахування довготривалої дії навантаження в часі, отримана можливість трансформувати алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги залізобетонного розрахункового перерізу за деформаційним методом з урахуванням фактору часу. У відповідності з прийнятими залежностями [2], рівняння рівноваги внутрішніх та зовнішніх зусиль у нормальному перерізі згинального залізобетонного елемента при довготривалій дії навантаження в загальному виді матимуть вигляд:

$$F(\chi, \varepsilon_{c1}(t)) - N = 0; \quad (15)$$

$$\phi(\chi, \varepsilon_{c1}(t)) - M = 0. \quad (16)$$

де: $\chi = \frac{\varepsilon_{c1}(t) - \varepsilon_{c2}(t)}{h}$ - кривизна осі перерізу,

що згинається при тривалій дії навантаження;

$\varepsilon_{c1}(t)$ - деформація бетону стиснутої фібри;

N та M - зовнішня нормальна сила та згинальний момент.

Функції $F(\chi, \varepsilon_{c1}(t))$ та $\phi(\chi, \varepsilon_{c1}(t))$ для довільного моносиметричного перерізу мають вигляд:

$$F(\chi, \varepsilon_{c1}(t)) = \int_F \sigma_c(t)(x) dF + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si}; \quad (17)$$

$$\phi(\chi, \varepsilon_{c1}(t)) = \int_F \sigma_c(t)(x) x dF + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} z_{si}. \quad (18)$$

При цьому можуть виникнути дві форми рівноваги перерізу, коли напруження розтягу в перерізі не досягають величини f_{ctd} або весь переріз

стиснутий, та коли в перерізі є зона “пластичних деформацій” розтягу.

Вирішуючи цей алгоритм методом підбору, ми набуваємо значень точок деформацій, за якими будується діаграма деформування бетону з урахуванням чинника часу.

Вирішивши задачу і отримавши необхідні значення кривизни по діаграмі “ $M-\chi$ ”, можемо визначити значення жорсткостей $M_i = \chi_i B_i$ в кожному перерізі, що у свою чергу дає можливість виконати ітераційний розрахунок за жорсткостями з необхідною точністю і отримати величини зусиль в рамній конструкції з врахуванням перерозподілу зусиль при довготривалій дії навантаження (вплив фактору часу).

З метою реалізації поставленої задачі було розглянуто два варіанти плоских рам з П-подібним та замкнутим контуром на дію короткочасного та тривалого навантаження. Ці конструкції використовувались іншими дослідниками в своїх роботах [3], [4], [5] на дію короткочасних, повторюваних та малоциклових навантажень без врахування фактору часу.

Дослідні рами мали наступні параметри:

П-подібні рами було запроєктовано такими розмірами в осях: прольот складав 200 см; висота – 60 см. Розміри поперечного перерізу стійок та ригеля прийняті однаковими і рівними 10 x 16 см (рис. 3). Такі прийняті розміри експериментальних рам уявляють собою моделі найбільш поширених реальних рам в житловому та промисловому будівництві. Армування поперечних перерізів ригеля в прольоті і у вузлах обох серій рам прийнято однаковим, тобто передбачалась можливість перерозподілу зусиль під час навантаження рам. Ригель армовано одним звареним каркасом з поздовжньою робочою арматурою $\varnothing 14AIII$ ($A_{sup} = A_{sp} = 1,539 \text{ cm}^2$), а стійки – просторовими каркасами з симетрично розташованими чотирма стержнями $\varnothing 10AIII$ ($A_s = A'_s = 1,57 \text{ cm}^2$). Віддаль між осями верхніх і нижніх стержнів складала 120 мм. Бетон класу B15.

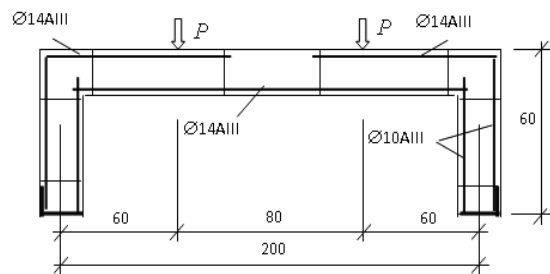


Рис. 3 – Схематичний вигляд П-подібної рами / A schematic view of P-like frame

Рами замкнутого контуру було запроєктовано такими розмірами в осях: прольот складав 200 см; висота – 60 см. Розміри поперечного перерізу стійок та ригеля прийняті однаковими і рівними 10 x 16 см (рис. 4). У всіх серіях рам ригелі і стійки армовано

просторовими каркасами з симетрично розташованими чотирма стержнями $\varnothing 12A500C$ ($A_{sup} = A_{sp} = 1,13 \text{ см}^2$). Віддаль між осями верхніх і нижніх стержнів складала 120 мм. В зоні чистого згину ригеля поперечні стержні на довжині 380 мм не встановлювались. Бетон класу B15.

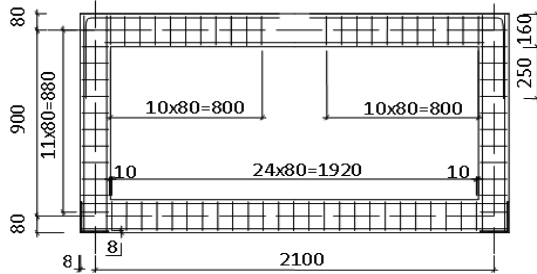


Рис. 4 - Схематичний вигляд рами замкнутого контуру / A schematic view of a frame with a closed contour

Використовуючи методику розрахунку статично невизначених плоских залізобетонних рам деформаційним методом з урахуванням фактору часу на описаних вище конструкціях проведено розрахунок за деформаційним методом в двох варіантах:

- розрахунок рам на дії короткочасного навантаження при постійній жорсткості окремих ділянок стержнів (рисунок 5-6);
- врахування фактору часу при дії довготривалих навантажень та змінної жорсткості в стержнях рам на кожному етапі нелінійного розрахунку (рисунок 7-10).

При розрахунку на довготривалі навантаження залізобетонні рами розраховувались для часу у 120 та 270 діб.

На рисунку 5 та 6 приведено діаграми стану " $\sigma_c - \varepsilon_{c(2)}$ " перерізу ригеля залізобетонної плоскої рами при розрахунку за класичним алгоритмом деформаційного методу на короткочасну дію навантаження 1 та експериментальних даних 2.

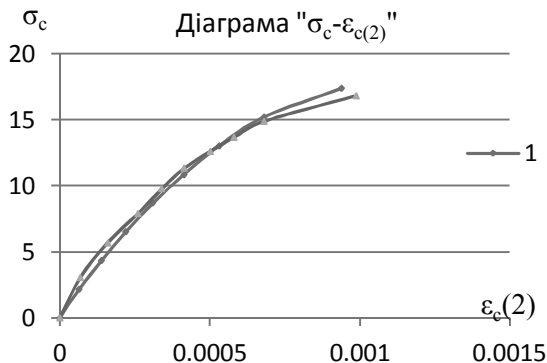


Рис. 5- Діаграма " $\sigma - \varepsilon$ " при розрахунку перерізу ригеля на короткочасну дію навантаження для П-подібної рами. 1- аналітичні залежності, 2 - експериментальні дані / The diagram " $\sigma - \varepsilon$ " for the calculation of a crossbar section on short-term effect of load for the П-like frame. 1 - analytical dependences, 2 - experimental data.

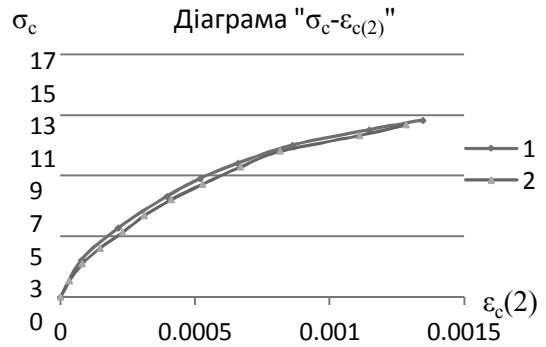


Рис. 6- Діаграма " $\sigma - \varepsilon$ " при розрахунку перерізу ригеля на короткочасну дію навантаження для рами замкнутого контуру. 1- аналітичні залежності, 2 - експериментальні дані / The diagram " $\sigma - \varepsilon$ " for the calculation of a crossbar section on a short-term effect of the load for a frame with a closed contour. 1 - analytical dependences, 2 - experimental data.

Як видно з діаграми висхідна гілка зростає експоненціально до екстремума та переходить на коротку ділянку спадаючої гілки.

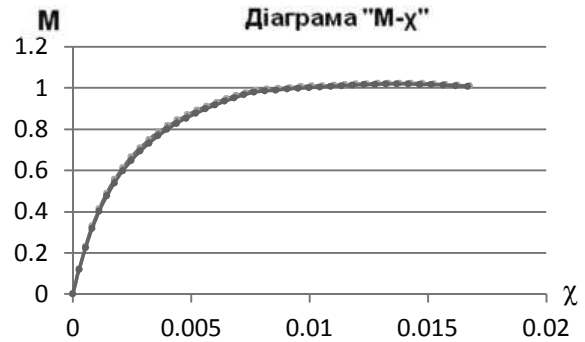


Рис. 7- Діаграма " $M - \chi$ " при розрахунку перерізу ригеля на довготривалу дію (вплив фактору часу) навантаження для П-подібної рами. / The diagram " $M - \chi$ " for the calculation of a crossbar section on long-term effect of load (the impact of the time factor) for the П-like frame.

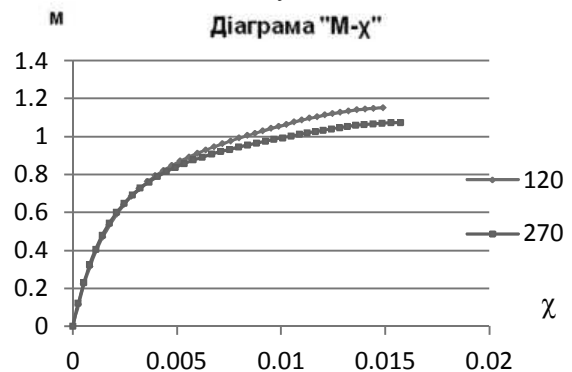


Рис. 8- Діаграма " $M - \chi$ " при розрахунку перерізу ригеля на довготривалу дію (вплив фактору часу) навантаження для рами замкнутого контуру / The diagram " $M - \chi$ " for the calculation of a crossbar section on long-term effect of load (the impact of the time factor) for a frame with a closed contour.

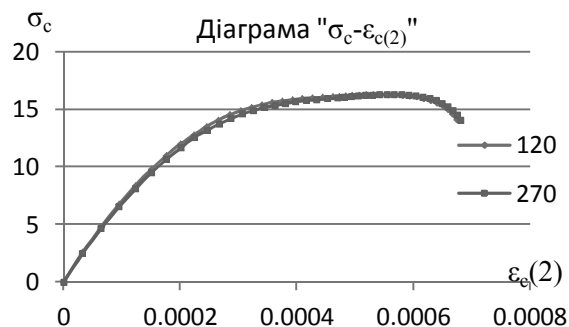


Рис. 9- Діаграма "σ-ε" при розрахунку перерізу ригеля на довготривалу дію (вплив фактору часу) навантаження для П-подібної рами / The diagram "σ-ε" for the calculation of a crossbar section on long-term effect of load (the impact of the time factor) for the П-like frame.

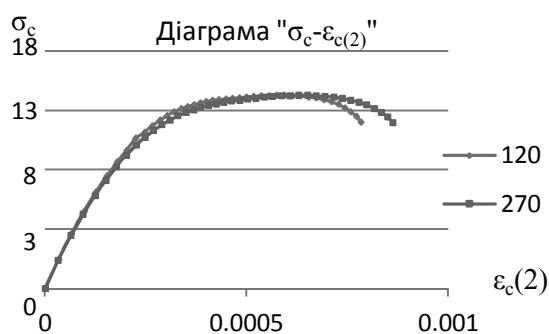


Рис. 10- Діаграма "σ-ε" при розрахунку перерізу ригеля на довготривалу дію (вплив фактору часу) навантаження для рами замкнутого контуру / The diagram "σ-ε" for the calculation of a crossbar section on long-term effect of load (the impact of the time factor) for a frame with a closed contour.

Приведені на рисунках 7 та 8 діаграми "М-χ" і на рисунках 9 та 10 діаграми стану залізобетонних плоских рам отриманих на основі методики розрахунку при впливі фактору часу, демонструють,

що розроблений розрахунковий апарат відтворює реальну картину деформованого стану перерізу як кількісно так і якісно. Висхідна гілка діаграм "σ-ε" зростає плавно наближаючись до екстремуму в значно віддаленій точці по осі "ε" ніж без вплива фактору часу. Як видно з діаграм після тривалої дії навантаження (вплив фактору часу) відбувається збільшення несучої здатності плоских залізобетонних рам, за рахунок зміни міцнісних характеристик бетону та зміни напружено-деформованого стану перерізу протягом тривалого часу. Порівнюючи експериментальні та аналітичні данні при короткочасній дії навантаження та аналітичні данні при дії довготривалого навантаження видно, що несуча спроможність рам при розрахунку на довготривалі навантаження з використанням трансформуваних в часі діаграм деформування бетону збільшується на ~11% на момент часу 270 діб.

Висновки.

Розроблена методика розрахунку плоских рам з урахуванням фактору часу деформаційним методом зі змінною жорсткістю перерізу дозволила:

- встановити функціональну залежність коефіцієнтів системи канонічних рівнянь методу переміщень від приведених кутів повороту вузлів стержнів рами – формули (5)-(7);

- розширити алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги залізобетонного розрахункового перерізу за деформаційним методом для врахування фактору часу при розрахунку плоских рам зі змінною жорсткістю на основі використання трансформуваних в часі діаграм деформування бетону.

- розраховувати статично невизначувані рамні конструкції різної складності з змінною жорсткістю;

- отримувати результати розрахунків з високою точністю для подальшого проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бамбура А.М. Метод «тръох кривизн» для розрахунку нерозрізних залізобетонних балок / Бамбура А.М., Жданов О.С. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: збірник наукових праць. - Львів, 2007. - Вип. 7.
2. Бамбура А.Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе / Бамбура А.Н., Гурковский А.Б. // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. - К.: ДП НДІБК, 2003. - №59. - С. 121-130.
3. Бабич Є.М. Розрахунок замкнутих залізобетонних рам з урахуванням тріщиноутворення в бетоні / Є.М. Бабич, С.В. Філіпчук // Ресурсоекономні конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Рівне: Видавництво НУВГП, 2008. - Випуск 16. Ч.2 – С. 28 – 39;
4. Бабич Є.М., Мурашко Л.А., Ільчук Н.І. Перерозподіл зусиль та напружено-деформований стан залізобетонних рам при короткочасному навантаженні // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. - Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2004. Випуск 11. - С. 123 – 133;
5. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Визначення граничного навантаження на двохшарнірні залізобетонні рами на основі деформаційної моделі перерізів // Сталезалізобетонні конструкції: Збірник наукових статей. - Кривий Ріг, 2004. - Випуск 6. - С. 174 – 180;
6. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок. - К.: Будівельник, 1974.- 144 с.
7. Гольшев О.Б. Железобетонные конструкции. Том II / Гольшев О.Б., Бачинский В.Я., Полищук В.П. - К.: Логос, 2003.

8. . Голышев А.Б., Кривошеев П.И, Бамбура А.Н.. Теория железобетона на экспериментальной основе. Киев: Гамма-Принт. 2009.
9. Гребенников М.Н. Расчёт многопролётных неразрезных балок. Уравнение трёх моментов / Гребенников М.Н., Дибир А.Г., Пекельный Н.И. // Министерство образования и науки. Национальный аэрокосмический университет им. Жуковского (ХАИ), 2010.
10. Деформаційна модель та алгоритм визначення напружено-деформованого стану розрахункового перерізу залізобетонних елементів / [Бамбура А.М., Гурківський О.Б., Безбожна М.С., Дорогова О.В.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. трудов. - Вып. №50. - Днепропетровск: ПГАСА, 2009.
11. Справочник по сопротивлению материалов / Е. Ф. Винокуров, М. К. Балькин, И. А. Голубев и др. - Мн.: Наука и техника, 1988. - 464 с.
12. Уманский А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический / Уманский А.А., 1960 г.
13. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. - М.: Наука, 1986. - 512 с.
14. Konstantin Meskouris «Baudynamik- Modelle, Methoden, Praxisbeispiele». Ernst&Sohn 1999<http://darwin.bth.rwth-aachen.de/>
15. Eurocode 2: Worked examples. European concrete platform Available at <http://www.europeanconcrete.eu/>
16. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings 2004 Available at: <https://law.resource.org/>

REFERENCES

1. Bambura A.M. Metod «trokh krivizn» dlya rozrakhunku nerozriznikh zalizobetonnikh balok / Bambura A.M., Zhdanov O.S. // Mekhanika i fizika ruynuvannya budivelnikh materialiv ta konstruksiy: zbirnik naukovikh prats. - Lviv, 2007. - Vip. 7.
2. Bambura A.N. K postroeniyu deformatsionnoy teorii zhelezobetona sterzhnevyykh sistem na eksperimentalnoy osnove / Bambura A.N., Gurkovskiy A.B. // Budivelni konstruksii: zb. nauk. prats. - K.: DP NDIBK, 2003. - №59. – S. 121-130.
3. Babich Є.М. Rozrakhunok zamknutikh zalizobetonnikh ram z urakhuvannyam trishchinoutvorenniya v betoni / Є.М. Babich, S.V. Filipchuk // Resursoekonomni konstruksii, budivli ta sporudi: Zbirnik naukovikh prats. Rivne: Vidavnistvo NUVGP, 2008. – Vipusk 16. Ch.2 – S. 28 – 39;
4. Babich Є.М., Murashko L.A., Ilchuk N.I. Pererospodil zusil ta napruzhenno-deformovaniy stan zalizobetonnikh ram pri korotkochasnomu navantazhenni // Resursoekonomni materiali, konstruksii, budivli ta sporudi: Zbirnik naukovikh prats. – Rivne: Vidavnistvo Natsionalnogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodozoristuvannya, 2004. Vipusk 11. – S. 123 – 133;
5. Babich Є.М., Ilchuk N.I. Vznachennya granichnogo navantazhennya na dvoshamirni zalizobetonni rami na osnovi deformatsiynoi modeli pereriziv // Stalezalizobetonni konstruksii: Zbirnik naukovikh stately. – Kriviy Rig, 2004. – Vipusk 6. – S. 174 – 180;
6. Barashikov A.Ya. Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy na deystvie dlitelnykh peremennykh nagruzok. – K.: Budivelnik, 1974.- 144 s.
7. Golyshev O.B. Zhelezobetonnye konstruksii. Tom II / Golyshev O.B., Bachinskiy V.Ya., Polishchuk V.P. – K.: Logos, 2003.
8. . Golyshev A.B., Krivosheev P.I, Bambura A.N.. Teoriya zhelezobetona na eksperimentalnoy osnove. Kiev: Gamma-Print. 2009.
9. Grebennikov M.N. Raschet mnogoproletnykh nerazreznykh balok. Uravnenie trekh momentov / Grebennikov M.N., Dibir A.G., Pekelnny N.I. // Ministerstvo obrazovaniya i nauki. Natsionalnyy aerokosmicheskii universitet im. Zhukovskogo (KhAI), 2010.
10. Deformatsiyna model ta algoritm viznachennya napruzhenno-deformovanogo stanu rozrakhunkovogo pererizu zalizobetonnikh elementiv / [Bambura A.M., Gurkivskiy O.B., Bezbozhna M.S., Dorogova O.V.] // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: sb. nauchn. trudov. - Vyp. №50. - Dnepropetrovsk: PGASA, 2009.
11. Справочник по сопротивлению материалов / Ye. F. Vinokurov, M. K. Balykin, I. A. Golubev i dr. - Mn.: Nauka i tekhnika, 1988. - 464 s.
12. Umanskiy A.A. Spravochnik proektirovshchika promyshlennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy. Raschetno-teoreticheskii / Umanskiy A.A., 1960 g.
13. Feodosev V. I. Soprotivleniye materialov / V. I. Feodosev. - M.: Nauka, 1986. - 512 s.
14. Konstantin Meskouris «Baudynamik- Modelle, Methoden, Praxisbeispiele». Ernst&Sohn 1999<http://darwin.bth.rwth-aachen.de/>
15. Eurocode 2: Worked examples. European concrete platform Available at <http://www.europeanconcrete.eu/>
16. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings 2004 Available at: <https://law.resource.org/>

Статья поступила в редколлегию: 16.08.2016