

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОГИНІВ КОСОЗІГНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ЗА НЕЛІНІЙНОЮ ДЕФОРМАЦІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ

Наведено основні передумови та алгоритм розрахунку прогинів залізобетонних елементів, що зазнають косого згинання, з урахуванням діаграм стану бетону й арматури.

Ключові слова: залізобетон, балка, прогин, діаграми стану матеріалу.

Постановка проблеми. Зміна прогинів у залізобетонних балках, що зазнають косого згинання, залежить від багатьох факторів, серед них: розрахункова схема та величина навантаження, кут нахилу площини дії зовнішнього завантаження, фізичні властивості бетону, кількість та розміщення армування, зусилля попереднього обтиснення, якість зчеплення бетону й арматури. Крім того, значний вплив на величину прогину має наявність та розвиток нормальних тріщин у залізобетонному елементі.

Урахування всіх факторів, котрі впливають на величину прогину залізобетонної балки, є складним науковим завданням. Розв'язання цього завдання традиційно пов'язане з використанням емпіричних коефіцієнтів і залежностей, котрі виражають нелінійну зміну пружно-пластичних властивостей бетону елемента, розроблялося в роботах М. С. Торяника [1] М. Л. Ярового [2], А. М. Павлікова [3], П. Ф. Вахненка [4] та інших. Запроваджена у нових державних нормах [5] нелінійна деформаційна модель дозволяє враховувати цю ж зміну, спираючись на діаграми стану бетону й арматури, тобто із загальних аналітичних позицій.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Дослідженню методів розрахунку переміщень косозігнутих балок було присвячено роботи багатьох учених [1 – 4]. Для елементів, що зазнають плоского (прямого) згинання, алгоритми визначення прогинів, які ґрунтуються на діаграмах стану матеріалів, розроблялися в працях З. Бажанта [6], О. С. Залесова [7], Д. В. Кочкарьова [8] та інших.

Виділення не розв'язаної раніше частини загальної проблеми. Проаналізовані теоретичні дослідження деформативності залізобетонних балок, що зазнають косого згинання, не виражають повною мірою вимоги сучасних норм, що базуються на нелінійній деформаційній моделі.

Постановка завдання. Метою даної статті є розроблення алгоритму визначення прогинів залізобетонних балок прямокутного профілю, виходячи з аналітичного опису залежностей фізичного стану бетону й арматури.

Основний матеріал і результати. На основі аналізу даних власних експериментальних досліджень [9] та досліджень, проведених іншими авторами [1 – 8], для побудови аналітичної моделі деформування залізобетонного елемента (ЗБЕ) прямокутного профілю, що зазнає косого згинання, було прийнято такі засади (спрощення та передумови):

1. Деформації в окремому нормальному перерізі ЗБЕ по висоті розподіляються відповідно до гіпотези плоских перерізів.

2. Епюра розподілу напружень бетону в перпендикулярних нейтральній лінії площинах перерізу приймається криволінійною. Закон розподілу напружень отриманий на основі діаграм фізичного стану бетону на стиск і на розтяг.

3. Напруження в арматурі визначаються за дволінійною діаграмою фізичного стану (із горизонтальною верхньою ділянкою) арматурної сталі.

4. Виділяються два типи напружено-деформованого стану (НДС) нормального перерізу ЗБЕ: з тріщиною, коли напруженнями розтягнутого бетону над тріщиною можна знехтувати, та без тріщини, коли напруження розтягу в бетоні елемента значною мірою впливають на параметри НДС.

5. Положення нейтральної лінії та деформації в найбільш стиснутій фібрі нормального перерізу визначають кривизну ЗБЕ в місці розташування перерізу.

6. Значення прогину в будь-якому перерізі ЗБЕ, що зазнає косого згинання, обчислюється за інтегралом Мора.

Метою застосування цих вихідних засад є розроблення для потреб практики методики розрахунку, котра б базувалася на основних фізико-механічних властивостях бетону і з достатньою точністю описувала зміну прогинів залізобетонної косозігнутої балки при її завантаженні.

Прийняті передумови є добре апробованими багатьма авторами [6 – 8 та ін.] у дослідженнях залізобетонних елементів при плоскому (прямому) згинанні. Крім цього, використання нелінійної деформаційної моделі для визначення прогинів згинальних елементів регламентується сучасними нормами Євросоюзу, Росії, України й інших країн.

Для апроксимації діаграми стану стиснутого бетону приймається дробово-раціональна функція за ДБН [5]

$$\sigma_c(\eta_c) = f_c \frac{K\eta_c - \eta_c^2}{1 + (K - 2)\eta_c}, \quad (1)$$

а для апроксимації діаграми стану розтягнутого бетону – параболічна залежність, яку використовував Е. Хогнестад,

$$\sigma_c(\eta_c) = f_{ct}(2\eta_c - \eta_c^2). \quad (2)$$

У процесі деформування залізобетонної балки НДС кожного її нормального перерізу змінюється не тільки кількісно (за значеннями напружень та деформацій), але і якісно (змінюються фізичні залежності між напруженнями й результуючими зусиллями в перерізі). Поява цього явища, у першу чергу, залежить від можливості нормальної роботи залізобетонних елементів не тільки без тріщин, а й за їх наявності в розтягнутій зоні. Це виражає загальну особливість роботи залізобетонних конструкцій.

Для балок, що працюють в умовах косого згинання, можливі якісні зміни НДС є набагато різноманітнішими. Це обумовлено можливістю утворення різних форм стиснутої і розтягнутої зон бетону в нормальному перерізі.

Наприклад, для балок прямокутного профілю можливі 10 різних комбінацій форм стиснутої та розтягнутої зон бетону. Проте прийняті передумови дозволяють для проведення теоретичних досліджень переміщень косозігнутих залізобетонних елементів застосовувати лише три розрахункові моделі, котрі зображено на рисунку 1.

Загальна система рівнянь, що виражає рівновагу нормального перерізу в усіх випадках, у вибраній системі координат $X_1Y_1Z_1$ має вигляд

$$\sum Z_1 = N_{ct} \cdot H(\Delta\eta_t) - N_c + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0; \quad (3)$$

$$\sum M_{X1} = N_{ct} y_{1ct} \cdot H(\Delta\eta_t) + N_c y_{1c} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} y_{1si} - M_\beta \sin(\beta - \theta) = 0; \quad (4)$$

$$\sum M_{Y1} = N_{1ct} x_{1ct} \cdot H(\Delta\eta_t) + N_c x_c + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} y_{1si} - M_\beta \cos(\beta - \theta) = 0, \quad (5)$$

де N_c , N_{ct} – рівнодійні напружень у бетоні відповідно стиснутої та розтягнутої зон, котрі визначаються відомими інтегральними залежностями (наведеними, наприклад, у

дослідженні [10]); $(x_{1c}; y_{1c})$, $(x_{1ct}; y_{1ct})$ – координати точок прикладання зусиль N_c , N_{ct} ; σ_{si} – напруження в i -му арматурному стержні; A_{si} – площа поперечного перерізу i -го арматурного стержня; $(x_{1si}; y_{1si})$ – координати точки центру ваги i -го арматурного стержня; $M_\beta \sin(\beta - \theta) = -M_{ext, x1}$, $M_\beta \cos(\beta - \theta) = M_{ext, y1}$ – складові зовнішнього згинального моменту M_β відносно осей X_1 та Y_1 (рис. 1, г); $H(\Delta\eta_t)$ – функція Хевісайда для аргументу $\Delta\eta_t = \eta_t - \eta_{tu}$, яка виражає допустиме нехтування напруженнями розтягнутого бетону над тріщиною; $\eta_{tu} = \varepsilon_{ctu} / \varepsilon_{ctr}$ – граничний рівень (у момент утворення тріщини) фібрових деформацій розтягу бетону в перерізі, котрий визначається за методикою, описаною в [10].

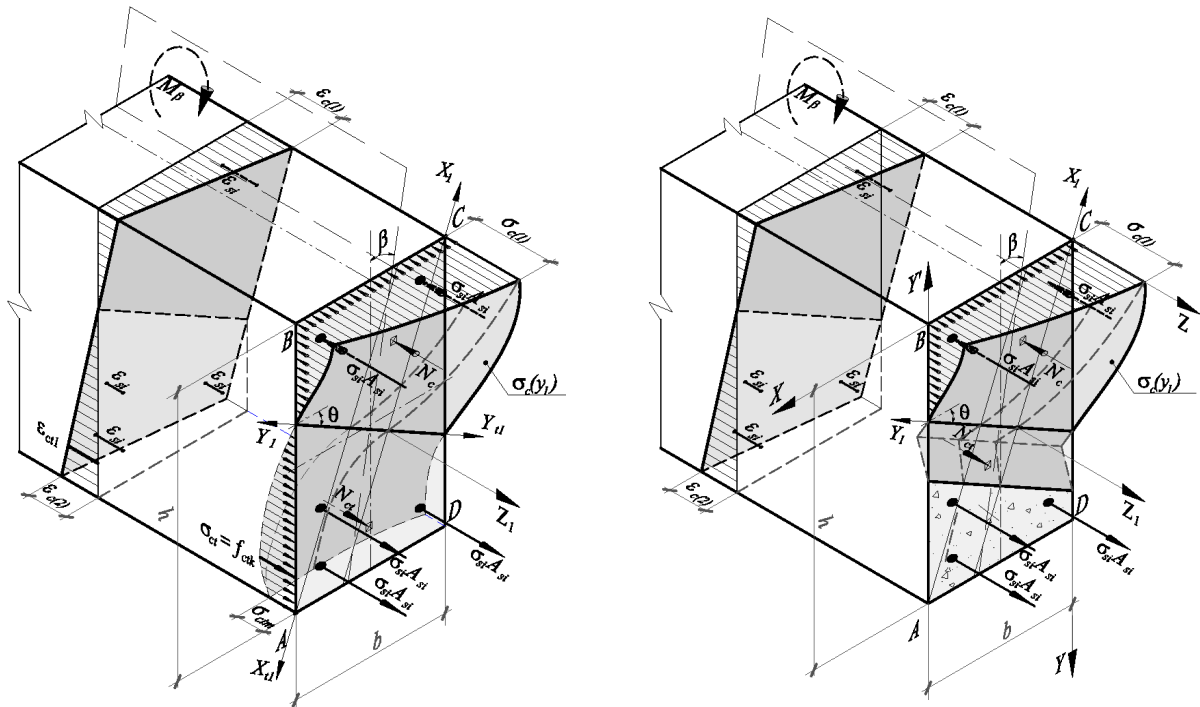
Розрахунковий зв'язок між напруженнями і деформаціями для арматурної сталі приймається за діаграмою деформування арматури з горизонтальною верхньою гілкою (за нормами [5, п. 3.2.8.2, б]).

Знайти точне аналітичне рішення системи рівнянь (1) – (3) неможливо внаслідок нелінійного характеру фізичних залежностей для рівнодійних напружень у бетоні стиснутої та розтягнутої зон. Тому для отримання результатів теоретичних досліджень, котрі базуються на прийнятих передумовах, необхідно застосовувати числові методи сумісного розв'язання цих рівнянь.

Відповідно до прийнятих передумов прогини залізобетонної косозігнутої балки прямокутного профілю визначаємо за інтегралом Мора

$$f_\beta = \int_0^L 1/r(z) \cdot \bar{M}(z) dz, \quad (6)$$

де $1/r(z)$ – кривизна балки у перерізі, розташованому на відстані z від початку координат, котра визначається при розв'язанні системи рівнянь (1) – (3); $\bar{M}(z)$ – значення згинального моменту в перерізі z від дії одиничної сили, прикладеної в напрямі шуканого переміщення.



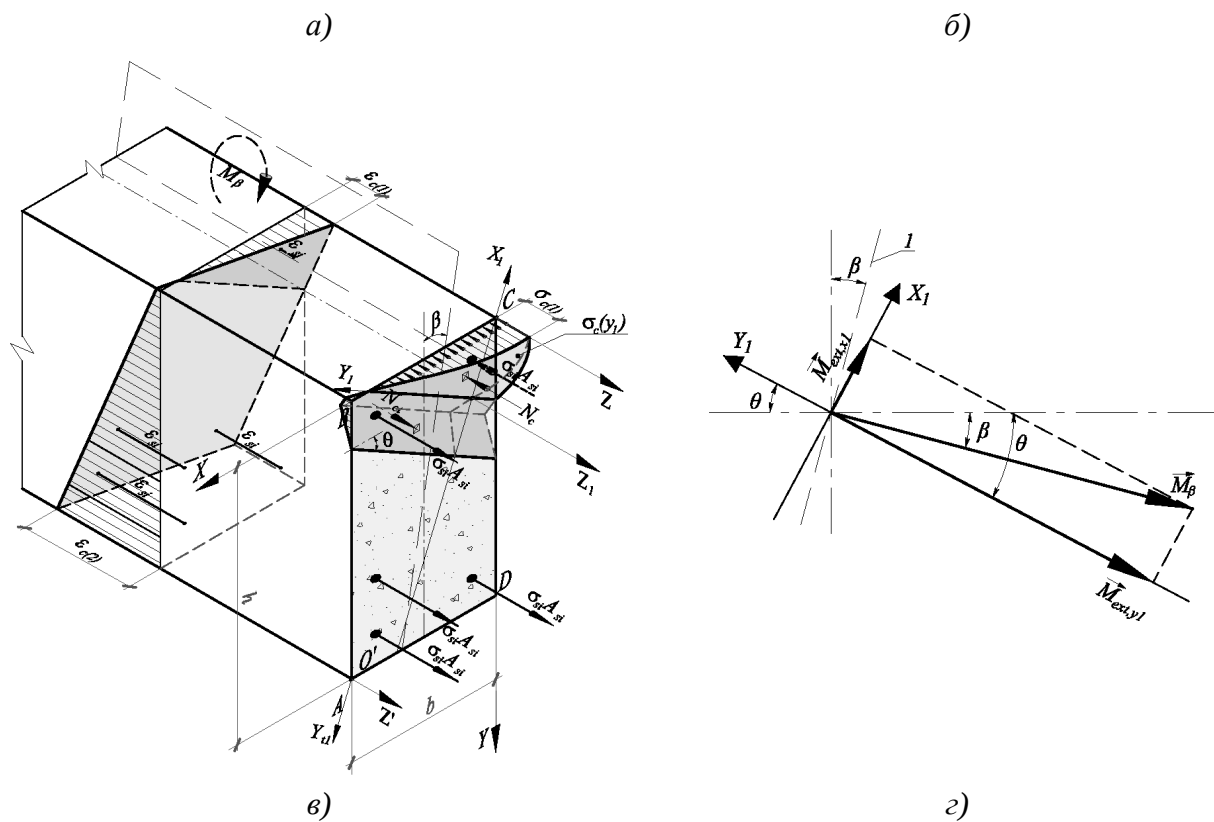


Рисунок 1 – Розрахункові моделі напружено-деформованого стану косо зігнутої залізобетонної балки у нормальному перерізі в стадіях: а) Ia; б) II при трапецієподібній формі стиснутої зони; в) II при трикутній формі стиснутої зони, – та схема складових вектор-моменту від дії зовнішнього навантаження (г): 1 – площина дії моменту M_β

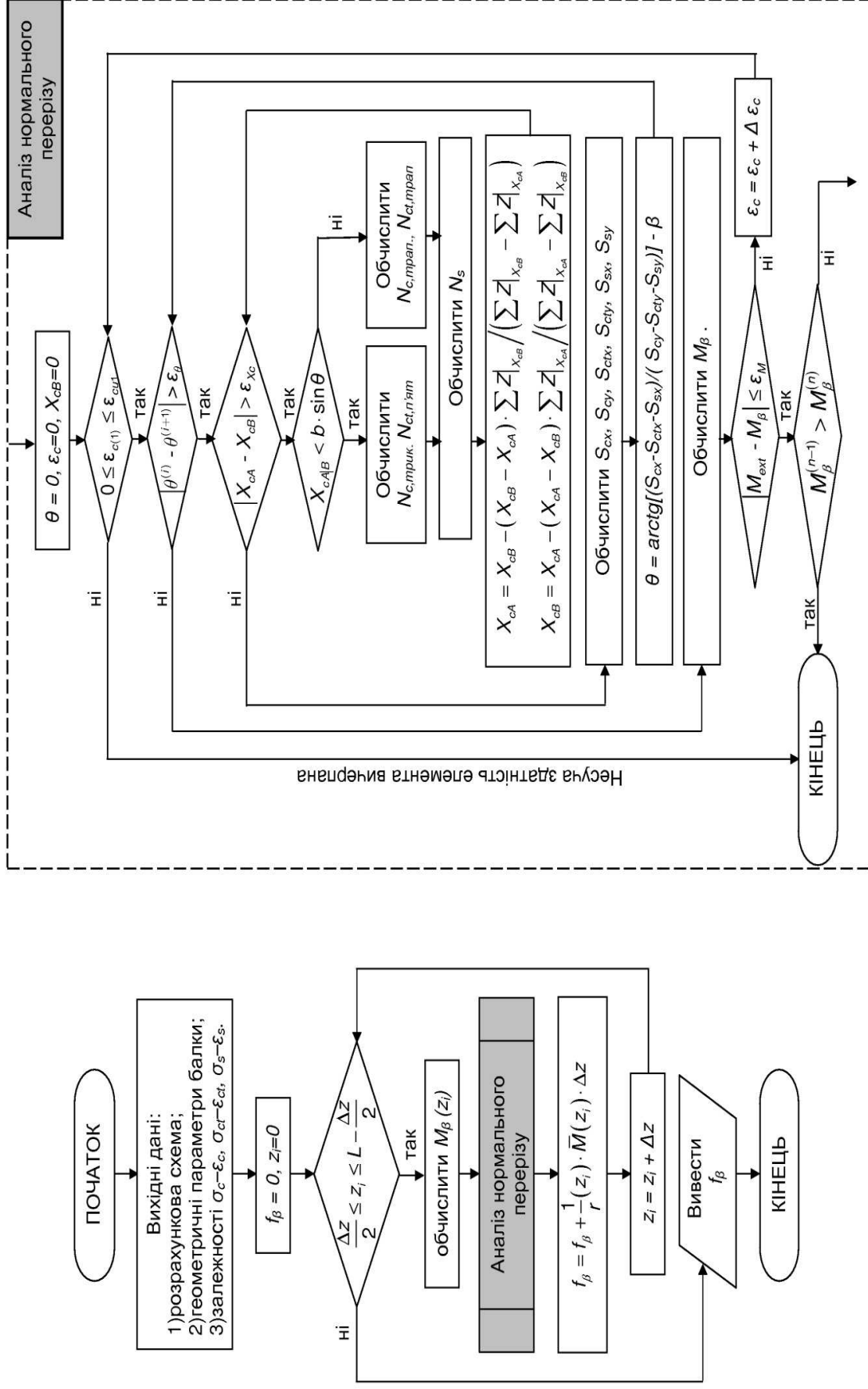


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму визначення прогинів f_β за розробленою методикою

Алгоритм обчислення прогинів може бути наведено у вигляді блок-схеми розрахунку (рис. 2). Розроблений алгоритм реалізований за допомогою комп'ютерної програми для ПЕОМ.

Під час роботи програми моделювалася робота нормального перерізу залізобетонного елемента при різних стадіях його завантаження (рис. 3): до моменту утворення тріщини в розтягнутій зоні, під час роботи з тріщиною та в момент руйнування.

З використанням розробленого алгоритму було розраховано балку, попередньо випробувану навантаженням, прикладеним під кутом $\beta = 15^\circ$ до вертикальної осі симетрії перерізу елемента. Для середнього за довжиною перерізу балки прольоту при різних величинах зовнішнього навантаження отримано характерну залежність $M_\beta - f_\beta$ (рис. 4).

Висновки. Розроблена методика для визначення прогинів косозігнутих залізобетонних балок прямокутного профілю, котра базується на функціональних залежностях діаграм стану стиснутого, розтягнутого бетону та арматурної сталі, дозволяє аналітично враховувати нелінійні властивості матеріалів у роботі елемента.

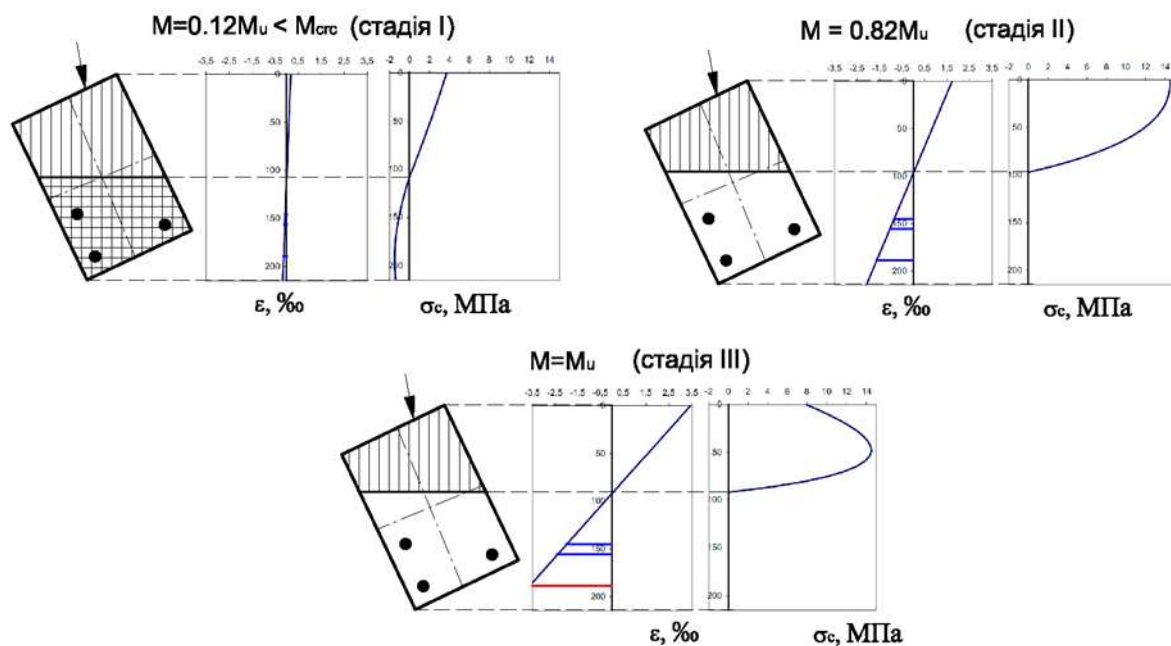


Рисунок 3 – Результати моделювання напружено-деформованого стану нормального перерізу косозігнутого залізобетонного елемента при різних ступенях завантаження

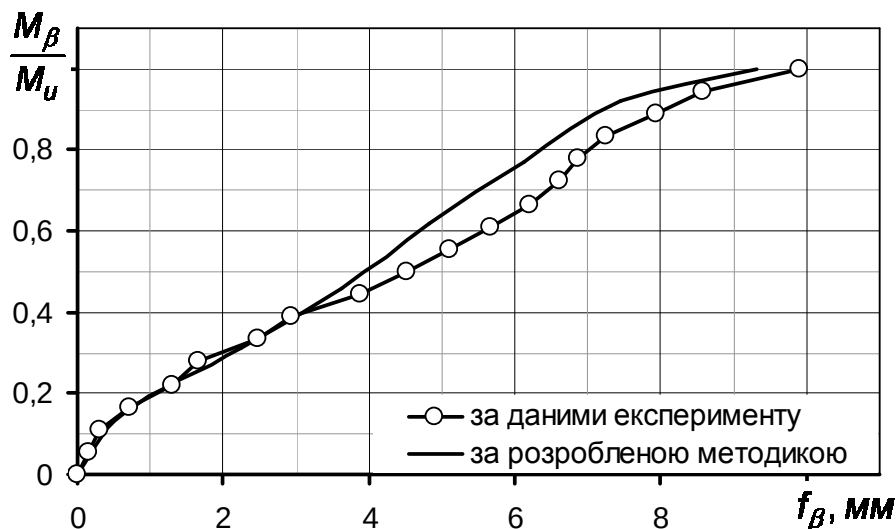


Рисунок 4 – Залежність «відносний момент – прогин»

Реалізована на ПЕОМ за розробленою методикою математична модель добре моделює якісні й кількісні зміни переміщень у будь-якому за довжиною балки нормальному перерізі.

Література

1. Расчет железобетонных конструкций при сложных видах деформаций / [Торяник М. С., Вахненко П. Ф., Фалеев Л. В. и др.]; под ред. М. С. Торяника. – М.: Стройиздат, 1974. – 297 с.
2. Яровой, М. Л. Экспериментально-теоретические исследования трещино-образования и деформативности косоизгибаемых предварительно напряженных элементов прямоугольного сечения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М. Л. Яровой. – Полтава, 1966. – 269 с.
3. Павликов, А. Н. Экспериментально-теоретические исследования прочности, деформативности, образования и раскрытия трещин по сечениям, нормальным к продольной оси косоизгибаемых керамзитобетонных элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. Н. Павликов – Полтава, 1979. – 226 с.
4. Вахненко, П. Ф. Современные методы расчета железобетонных конструкций на сложные виды деформаций / Вахненко П. Ф. – К.: Будівельник, 1992. – 112 с.
5. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинні від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
6. Bazant, Z. P. Deformation of Progressively Cracking Reinforced Concrete Beams / Zdenek P. Bazant, Byung H. Oh // ACI Journal. Technical Paper – 1984. – Vol.81, №.3. – P. 268 – 278.
7. Залесов, А. С. Расчет деформаций железобетонных конструкций по новым нормативным документам / А. С. Залесов, Т. А. Мухамедиев, Е. А. Чистяков // Бетон и железобетон. – 2002. – № 2. – С. 21 – 25.
8. Кочкар'юв, Д. В. Передумови розрахунку та розрахунк прогинів залізобетонних елементів, що зазнають згину, з урахуванням нелінійного деформування матеріалів / Д. В. Кочкар'юв, В. І. Бабич // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: зб. наук. праць VI Всеукраїнської науково-технічної конференції НДІБК у 2-х книгах. – 2011. – № 74. – Кн. 1. – С. 406 – 413.
9. Федоров, Д. Ф. Методика експериментальних досліджень фібрових деформацій розтягу косо зігнутих залізобетонних елементів у момент утворення першої тріщини / Д. Ф. Федоров // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць / Нац. ун-т водн. госп-ва та природокористування. – Рівне: НУВГтаП – 2011. – № 22. – С. 505 – 511.
10. Павліков, А. М. Дослідження впливу нелінійних властивостей бетону на величину пружно-пластичного моменту опору в балкових елементах при косому деформуванні / А. М. Павліков, Д. Ф. Федоров // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: зб. наук. праць VI Всеукраїнської науково-технічної конференції НДІБК у 2-х книгах. – № 74. – Кн. 1. – С. 301 – 310.

А.Н. Павликов, д.т.н., проф., Д. Ф. Федоров, асп.

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГИБОВ КОСОСГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Приведены основные предпосылки и алгоритм расчета прогибов элементов, которые подвержены косому изгибу, с учетом диаграмм состояния бетона и арматуры.

Ключевые слова: железобетон, балка, прогиб, диаграмма состояния материала.

*A.M. Pavlikov, Dr. Tech. Sc., prof., D.F. Fedorov, Post graduate st.
Poltava National Technical University named after Yuri Kondratuk*

METHOD OF DEFLECTION ANALYSIS OF SKEW BENDED REINFORCED CONCRETE BEAMS ACCORDING TO NONLINEAR DEFORMATION MODEL

Main premises and computation algorithm of deflections of skew bended reinforced concrete members that based on constitution diagrams of concrete and armature are shown.

Keywords: *reinforced concrete, beam, deflection, constitutive diagram of material.*

Надійшла до редакції 12.09.2012

© А. М. Павліков, Д. Ф. Федоров