



ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН НА ОСНОВІ РІЗНИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ МЕТОДИК

О. А. Шкурупий¹, П. Б. Митрофанов²

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,

24, Першотравневий пр., м. Полтава, Україна, 36011.

E-mail: ¹shbm@ukr.net, ²mitrofanopavel@mail.ru

Отримана 12 лютого 2014; прийнята 28 березня 2014.

Анотація. Стаття присвячена аналізу методик розрахунку несучої здатності залізобетонних колон, що працюють на центровий та позacentровий стиск, на основі методик (деформаційних моделей) Eurocode 2, ДБН В.2.6-98:2009 та деформаційної моделі (ДМ) на основі екстремального критерію міцності (ЕКМ). Залежно від характеру прийнятого критерію міцності нормального перерізу ДМ розрізняють на ДМ з емпіричним критерієм міцності та ДМ з екстремальним (оптимізаційним) критерієм міцності. Найпоширенішими є ДМ із емпіричним критерієм міцності, які також істотно різняться між собою, наприклад ДМ, що прийняті в нормах Eurocode 2, ДБН В.2.6-98:2009 та СП 63.1330.2012 (актуалізована редакція СНиП 52-01-2003). ДМ дозволяє точніше визначати межу перearмування, міцність, несучу здатність і параметри НДС залізобетонних конструкцій (ЗБК) та їх елементів (ЗБЕ), а також враховувати характер повних діаграм роботи бетону й арматури. Існуючі ДМ, окрім ДМ з ЕКМ, потребують експериментального визначення граничної деформації стиснутого бетону для обчислення параметрів НДС у граничній стадії. Наведено порівняльні розрахунки несучої здатності залізобетонних колон, обчислених за методиками вказаних вище норм, а також результати визначення їх НДС у граничній стадії за методикою на основі ЕКМ. Доведено, що результати розрахунків несучої здатності стиснутих залізобетонних колон на основі ДМ з ЕКМ більш точно співпадають з експериментальними даними в порівнянні з ДМ вказаних вище норм.

Ключові слова: бетон, арматура, міцність, несуча здатність, залізобетонна колона, гранична деформація, деформаційна модель, екстремальний критерій, нормальний переріз.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОН НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДИК

А. А. Шкурупий¹, П. Б. Митрофанов²

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,

24, Первомайский пр., г. Полтава, Украина, 36011.

E-mail: ¹shbm@ukr.net, ²mitrofanopavel@mail.ru

Получена 12 февраля 2014; принята 28 марта 2014.

Аннотация. Статья посвящена анализу методик расчета несущей способности железобетонных колонн, работающих на центровое и внецентренное сжатие, на основе методик (деформационных моделей) Eurocode 2, ДБН В.2.6-98:2009 и деформационной модели (ДМ) на основе экстремального критерия прочности (ЭКП). В зависимости от характера принятого критерия прочности нормального сечения ДМ различают на ДМ с эмпирическим критерием прочности и ДМ с экстремальным (оптимизационным) критерием прочности. Наиболее распространенными являются ДМ с эмпирическим критерием прочности, которые также существенно различаются между собой, например ДМ, принятые в нормах Eurocode 2, ДБН В.2.6-98:2009 и СП 63.1330.2012 (актуализированная редакция СНиП 52-01-2003).

ДМ позволяет точнее определять границу перearмирования, прочность или несущую способность и параметры НДС железобетонных конструкций (ЖБК) и их элементов (ЖБЭ), а также учитывать характер полных диаграмм работы бетона и арматуры. Существующие ДМ, кроме ДМ с ЭКП, нуждаются в экспериментальном определении предельной деформации сжатого бетона для вычисления параметров НДС в предельной стадии. Приведены сравнительные расчеты несущей способности железобетонных колонн, вычисленных по методикам указанных выше норм, а также результаты определения их НДС в предельной стадии по методике на основе ЭКП. Доказано, что результаты расчетов несущей способности сжатых железобетонных колонн на основе ДМ с ЭКП более точно совпадают с экспериментальными данными в сравнении с ДМ указанных выше норм.

Ключевые слова: бетон, арматура, прочность, несущая способность, железобетонная колонна, предельная деформация, деформационная модель, экстремальный критерий, нормальное сечение.

DEFINITION OF CARRYING CAPACITY OF CONCRETE COLUMNS BASED ON DIFFERENT DEFORMATION TECHNIQUES

Alexander Shkurupiy¹, Pavel Mitrofanov²

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk,

24, Pershotravnevyi Av., Poltava, Ukraine, 36011.

E-mail: ¹ shbm@ukr.net, ² mitrofanovpavel@mail.ru

Received 14 February 2014; accepted 28 March 2014.

Abstract. This article analyzes the methods of calculating the bearing capacity of reinforced concrete columns subjected to central and eccentric compression, based on the methodologies (deformation models) Eurocode 2, DBN V.2.6-98:2009 and the deformation model (DM) based on extreme strength criterion (ESC). Depending on the nature of the criterion of normal section strength, distinguish DM with empirical criterion of strength and DM with extreme (optimization) strength criterion. The most common are DM with empirical strength criterion, which also differ significantly, for example DM adopted standards Eurocode 2, DBN V.2.6-98:2009 and SP 63.1330.2012 (updated edition SNiP 52-01-2003). DM allows determining more precisely the boundary re-reinforcement strength or bearing capacity and parameters stress-strain state (SSS) concrete structures and their elements, and considering the nature of comprehensive diagrams for concrete and reinforcement. Existing DM, except DM with ESC need experimental determination of the ultimate strain compressed concrete parameters for the calculation of SSS in limiting stage. Shows comparative calculations of bearing capacity of reinforced concrete columns, calculated according to the methods mentioned above standarts, as well as the results determine their SSS limiting step procedure based on the ESC. It is proved, that the results of calculations of bearing capacity of compressed concrete columns based on DM with ESC more accurately coincide with the experimental data in comparison with the DM of the above standarts.

Keywords: concrete, reinforcement, strength, bearing capacity, reinforced concrete column, the maximum deformation, deformation model, extreme criterion, normal section.

Постановка проблеми

У країнах колишнього СРСР зараз проходить процес гармонізації нормативних документів для проектування бетонних і залізобетонних конструкцій (ЗБК) та їх елементів (ЗБЕ) з Eurocode 2 [1]. Деформаційна модель (ДМ), яка використовується у країнах Європи, активно розвивалась в Україні [2, 3] і в Росії [4] завдяки дослідженням діаграми стиску бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$ з урахуванням низхідної гілки. Існуючі на сьогодні ДМ,

окрім ДМ з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ), в своїй основі мають емпіричний характер, тобто потребують експериментальних даних для встановлення граничних значень деформацій найбільш стиснутої фібри бетону ε_{cul} (рис. 1а), які в нормах [1] і [4] визначаються шляхом випробувань ЗБЕ, що працюють на згин та позacentровий стиск, а в нормах [2] значення цих деформацій приймають шляхом випробувань бетонних призм. У нормах [1], [2] і [4]

величина ε_{cul} є константою для відповідного класу бетону, значення якої приймаються за даними, наведеними в таблицях. Такий підхід не дає можливості точно враховувати напружено-деформований стан (НДС) елементів ЗБК, так як ε_{cul} є параметром, що залежить від багатьох факторів (класу бетону, форми перерізу, процента армування тощо). Величина ε_{cul} повинна визначатися аналітично з урахуванням наведених вище факторів. Тому вдосконалення інженерних методик розрахунку несучої здатності ЗБК при складних і неоднорідних НДС на основі непружних дилатаційних моделей деформування бетону та реальних діаграм роботи бетону та арматурних сталей є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Застосування ДМ є певним кроком уперед, оскільки вона використовує повний набір рівнянь механіки деформівного твердого тіла (МДТТ): фізичні для бетону й арматури, геометричні – закон плоских перерізів, статичні – рівняння рівноваги та дозволяє точніше визначати межу переармування, міцність переармуваних ЗБЕ й інші фактори. Існуючі ДМ, окрім ДМ з ЕКМ, потребують даних експериментальних досліджень. Методика з ЕКМ має суттєві переваги над іншими ДМ, які є основою норм [1..4]. Вона вперше, на основі експериментальних даних, запропонована в роботах [5, 6] та детально аналітично обґрунтована й наведена в працях

[7...12 та ін.]. Методика з ЕКМ дозволяє враховувати реальні діаграми роботи бетону та арматурних сталей з урахуванням їх зон зміцнення при широкому спектрі класів міцності бетону на стиск (до $f_{ck,cube} = 120$ МПа і більше), а також аналітично визначати параметри НДС нормальних перерізів елементів ЗБК, у тому числі й ε_{cul} в граничному стані. Тому розроблення методики на базі ДМ, яка б давала змогу аналітично визначати параметри НДС в нормальному перерізі ЗБК та їх елементів, у тому числі й ε_{cul} , при різних видах завантаження є актуальним завданням.

Мета роботи

Визначення несучої здатності залізобетонних колон, що працюють на центровий та позакентровий стиск за методиками європейських норм [1], українських [2] та за ДМ з ЕКМ, а також порівняння результатів цих розрахунків із експериментальними даними.

Виклад основного матеріалу

Результатом перерозподілу напружень σ_c в стиснутій зоні бетону ЗБЕ в граничній стадії є ЕКМ нормального перерізу ЗБЕ [7...12 та ін.]

$$N(\varepsilon_{cul}) = \max N(\varepsilon_{cm}), \quad (1)$$

що виражає досягнення строгого максимуму зусиллям N перерізу як функцією деформації ε_{cm} стиснутої грані бетону ЗБЕ (рис. 1г). Строгий

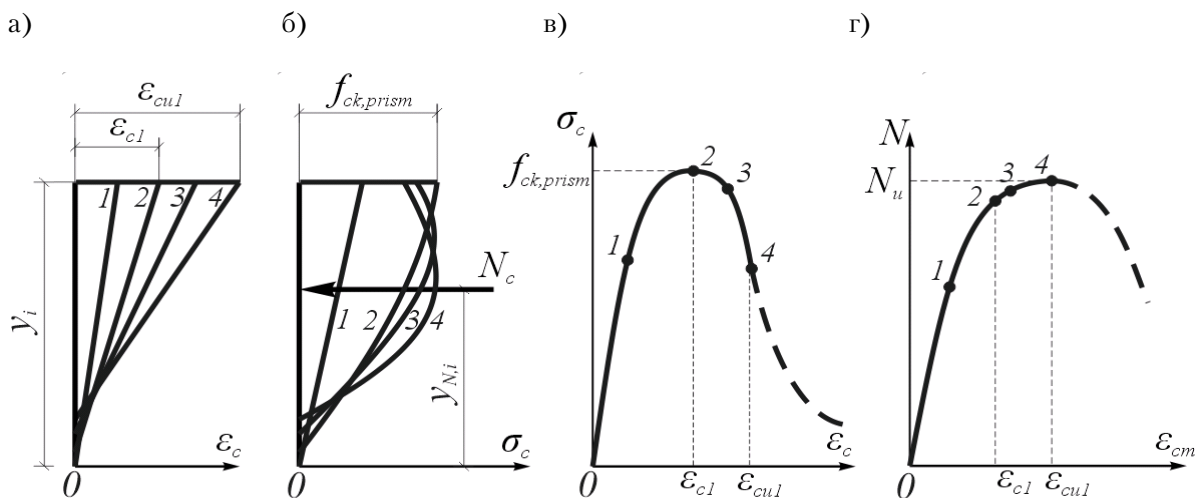


Рисунок 1. Дограничні (1, 2, 3) і граничні (4) стани розвитку деформацій (а) та напружень (б) у стиснутій зоні бетону ЗБЕ. Відповідність станів 1, 2, 3, 4 на діаграмі стискування бетону (в) і кривій «зусилля в перерізі – деформація стиснутої грані бетону».

максимум залежності «зусилля перерізу – деформація (кривизна)», очевидно, може бути тільки при проявленні в стиснутій зоні ЗБЕ строгого максимуму та наявності низхідної гілки діаграми стиснутого бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 1в). Дослідні криві «зусилля – деформація», одержані при жорсткому завантаженні ЗБЕ з різним НДС, мають чітко виражений строгий максимум (див. рис. 2, 3 [7]).

При врахуванні в ДМ критерію (1) утворюється нова, більш довершена ДМ з ЕКМ, для якої не потрібно експериментально визначати ε_{cu} , тому що остання обчислюється з сукупності рівнянь МДТТ і критерію (1) як одна з невідомих величин задачі міцності нормального перерізу [9]. При цьому як фізична залежність бетону використовується формула (4) [8], що використовується в нормах [1, 2], яка порівняно проста та краще за інші відображає обриси кривих $\sigma_c - \varepsilon_c$ для бетонів різного класу міцності на інтервалі $f_{ck, cube} = 10 \dots 120 \text{ МПа}$. У ДМ з ЕКМ гранична деформація ε_{cu} стиснутої грані бетону ЗБЕ виявляється залежною не тільки від параметрів E_c , $f_{c, prism}$, ε_{cl} бетону, але й характеру НДС ЗБЕ, кількості арматури A_s та A'_s , форми перерізу, характеру діаграми роботи арматурної сталі, попереднього напруження та інших факторів. Тому ε_{cu} взагалі не є критеріальною величиною, яка визначає стан руйнування тільки бетону, а є одним із параметрів граничного стану нормального перерізу ЗБЕ.

За методикою, наведеною в роботах [7–12], виконані аналітичні розрахунки несучої здат-

ності залізобетонних колон із високоміцних бетонів з використанням чисельних і оптимізаційних методів, що дає також можливість визначення напружень, деформацій та інших характеристик перерізу ЗБЕ. Така постановка задачі з урахуванням усіх вихідних параметрів, залежностей може бути вирішена лише за допомогою обчислювальної техніки.

Розв'язок цієї задачі був реалізований в програмі для ПЕОМ. Алгоритм розрахунку таких конструкцій за цією методикою реалізований у спеціально розробленому програмному комплексі для ПЕОМ на базі операційної системи Windows (рис. 2).

За наведеним у роботах [7–12] алгоритмом розрахунку несучої здатності стиснутих елементів ЗБК на основі ДМ з ЕКМ були виконані розрахунки несучої здатності залізобетонних колон, що працюють на центровий і позацентровий стиск, та визначено параметри їх НДС в граничній стадії, в тому числі і ε_{cu} . Результати цих розрахунків порівняні з методиками норм [1] і [2] та експериментальними даними (в т. ч. отриманими й авторами статті) і наведені на рисунку 3.

На рисунку 4 показано зміну деформацій і напружень в нормальному перерізі центрально і позациентрово стиснутих колон в граничній стадії при $f_{cm, cube} = 61 \text{ МПа}$, залежно від зміни ексцентриситету прикладання навантаження e_0 , обчислених за методикою на основі ДМ з ЕКМ.

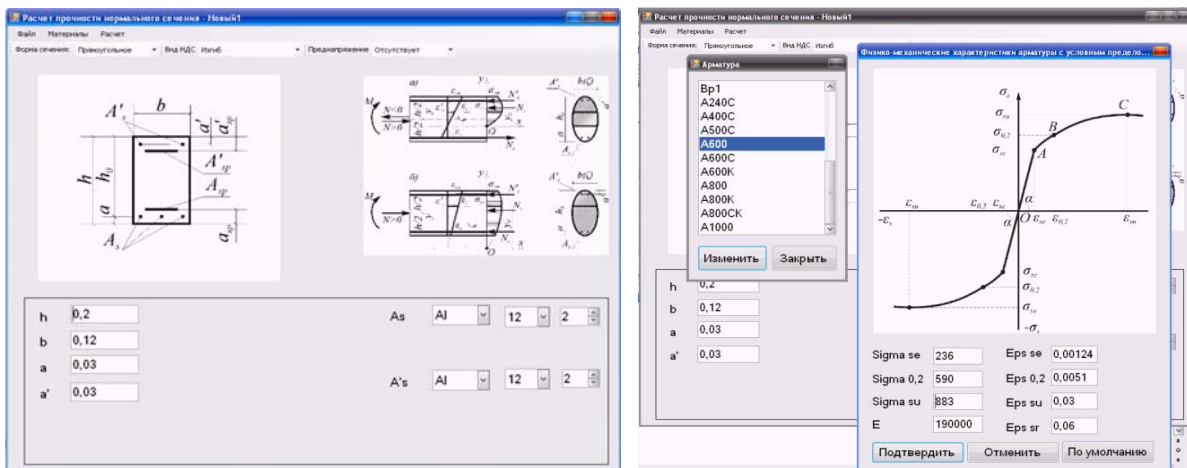


Рисунок 2. Програмний комплекс CRC – 12.

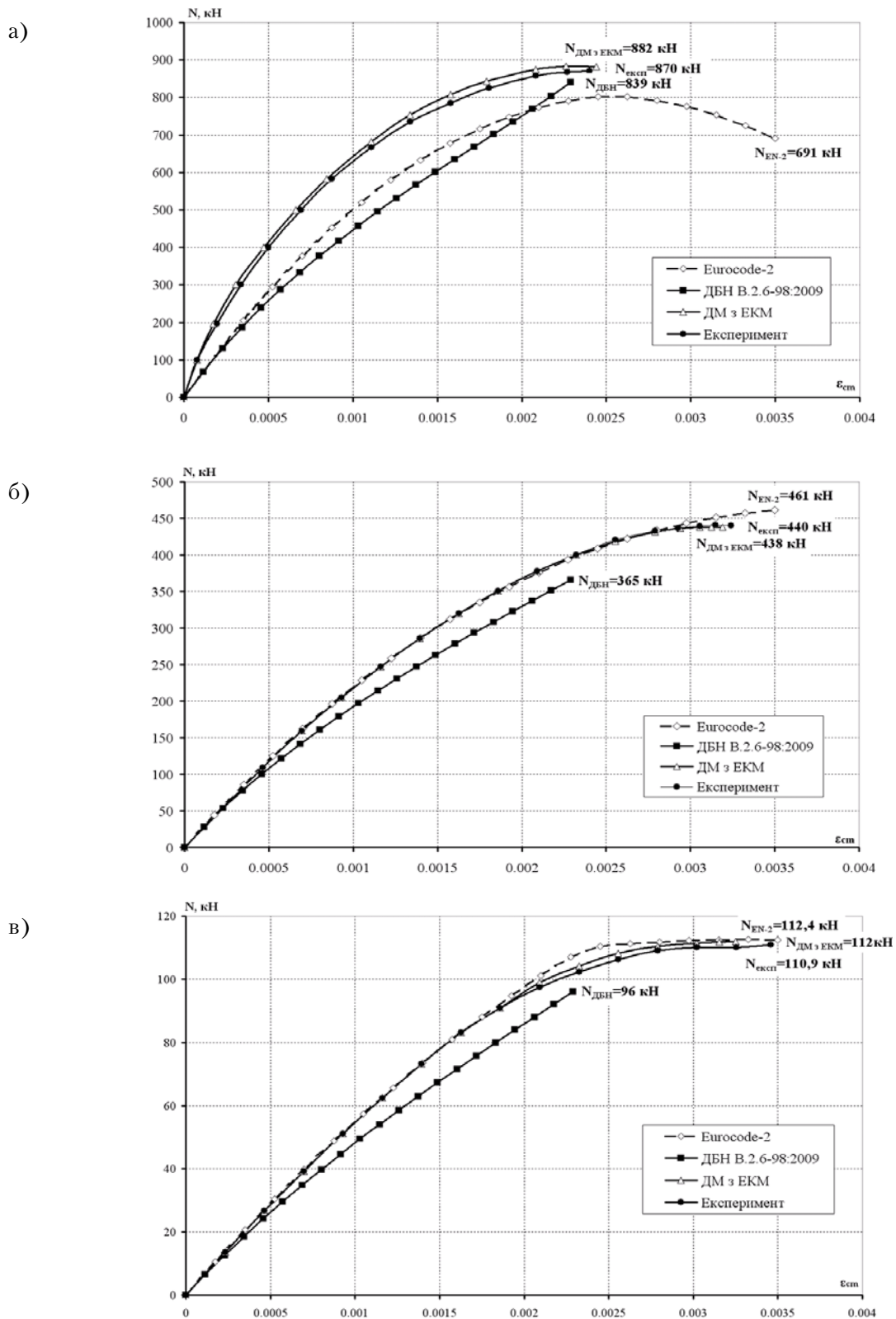


Рисунок 3. Теоретичні та експериментальні значення несучої здатності стиснутих залізобетонних колон, обчислених за методиками норм [1] і [2] та ДМ з ЕКМ з ексцентриситетами: а) $e_0 = 0$; б) $e_0 = 0,03$ м; в) $e_0 = 0,12$ м ($f_{cm,cube} = 61$ МПа).

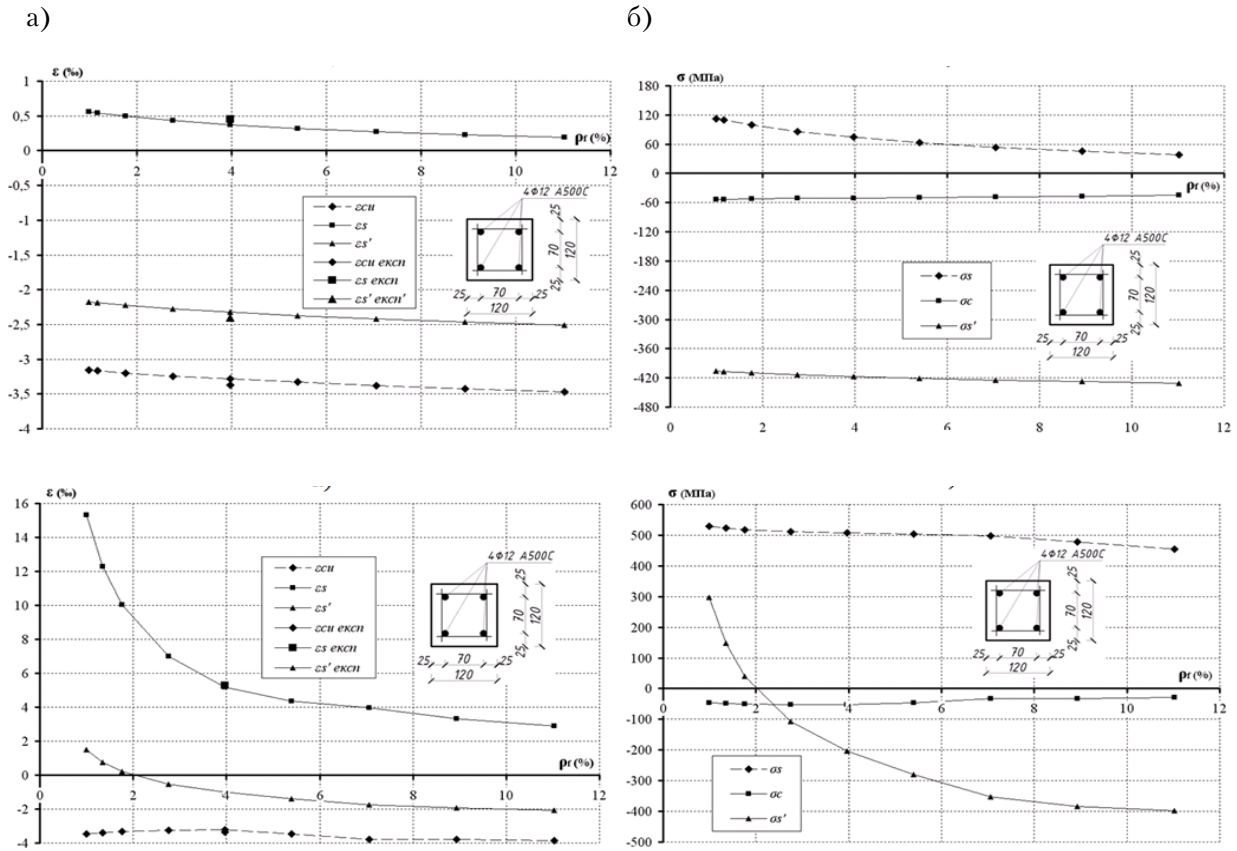


Рисунок 4. Значення деформацій (а) та напружень (б) стиснутого бетону нормального перерізу колон в граничній стадії, а також в розтягнутій і стиснутій арматурі при різних процентах армування ρ_f та ексцентриситетах $e_0 = 0,03$ м та $e_0 = 0,12$ м.

Висновки

1. ЕКМ в граничному стані відображає характерну властивість псевдопластичних матеріалів типу бетону – прояв строгого максимуму і низхідної гілки діаграми стиснення бетону (рис. 1в).
2. Тільки ДМ з ЕКМ не вимагає експериментального визначення $\varepsilon_{сн1}$ для обчислення параметрів НДС в граничному стані. Її величина визначається перерозподілом напружень по висоті неоднорідно напруженої стиснутої зони нормального перерізу ЗБЕ і залежить від багатьох факторів (класу бетону, форми

перерізу, відсотка армування тощо) і не може бути постійною величиною. Методика на основі ДМ з ЕКМ більш точна в порівнянні з існуючими ДМ.

3. Результати статистичного аналізу співвідношень теоретичних розрахунків несучої здатності залізобетонних колон, що працюють на центровий і позacentровий стиск на основі ДМ з ЕКМ і експериментальних даних свідчать про їх хорошу збіжність: середньарифметичне значення – 0,967; середньарифметичне відхилення – 0,061; коефіцієнт варіації – 5,015.

Література

1. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for buildings [Текст]. – Brussels : CEN, 2004. – 226 p.

References

1. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004. 226 p.

2. ДБН В.2.6.98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. — На заміну СПиП 2.03.01-84* ; чинний від 2011-06-01. — К. : Мінрегіонбуд України, 2011. — 71 с.
3. ДСТУ Б В.2.6156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. — Введено вперше ; чинний з 2011-06-01. — К. : Мінрегіонбуд України, 2011. — 118 с.
4. СП 63.1330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст] : Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. — Введ. 2013-01-01. — М. : Минрегион России, 2012. — 161 с.
5. Залесов, А. С. Деформационная расчётная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил [Текст] / А. С. Залесов, Е. А. Чистяков, И. Ю. Ларичева // Бетон и железобетон. — 1996. — № 5. — С. 16–18.
6. Байков, В. Н. Определение предельного состояния внецентренно сжатых элементов по неупругим зависимостям напряжения — деформации бетона и арматуры [Текст] / В. Н. Байков, С. В. Горбатов // Бетон и железобетон. — 1985. — № 6. — С. 13–14.
7. Митрофанов, В. П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов [Текст] / В. П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Архитектура и технические науки. — К. : Техника, 2004. — Вып. 60. — С. 29–48.
8. Шкурупій, О. А. Застосування деформаційної моделі з екстремальним критерієм для розрахунку міцності залізобетонних елементів із високоміцних бетонів [Текст] / О. А. Шкурупій, П. Б. Митрофанов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. — Одеса : Зовніш-рекламсервіс, 2012. — № 46. — С. 377–387.
9. Митрофанов, В. П. Алгоритмы решения задач прочности нормальных сечений железобетонных элементов на основе экстремальных критериев [Текст] / В. П. Митрофанов, П. Б. Митрофанов // Науковий вісник будівництва. — Харків : ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2012. — Вып. 69. — С. 137–149.
10. Шкурупій, О. А. Граничний напружено-деформований стан і міцність стиснутих залізобетонних елементів [Текст] / О. А. Шкурупій, П. Б. Митрофанов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. — Рівне : НУВГП, 2013. — Вып. 25. — С. 480–487.
11. Шкурупій, О. А. Розрахунок несучої здатності позацентрово стиснутих залізобетонних колон [Текст] / О. А. Шкурупій, О. В. Семко // Коммунальное хозяйство городов : Сб. науч. трудов. — К. : Техника, 2008. — Вып. 81. — С. 27–33.
12. Шкурупій, О. А. Розрахунок міцності залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі екстремального критерію [Текст] / О. А. Шкурупій,
2. DBN V.2.6.98:2009. Structures of buildings and erections. Concrete and reinforced concrete structures. Fundamental principles. Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011. 71 p. (in Ukrainian)
3. DSTU B V.2.6156:2010. Structures of buildings and erections. Concrete and reinforced concrete structures with heavy weight structural concrete. Design rules. Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011. 118 p. (in Ukrainian)
4. SP 63.1330.2012. Concrete and won concrete construction. Design requirements. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2012. 161 p. (in Russian)
5. Zalesov, A. S.; Chistiakov, E. A.; Laricheva, I. Yu. Deformation design model of reinforced concrete elements under the action of flecion moments and axial force. In: *Concrete and reinforced concrete*, 1996, Number 5, p. 16–18. (in Russian)
6. Baikov, V. N.; Gorbatov, S. V. Determination of limit state of beam columns based on rigid effort dependence-displacement of concrete and reinforcement. In: *Concrete and reinforced concrete*, 1985, Number 6, p. 13–14. (in Russian)
7. Mitrofanov, V. P. Use in practice of deformation model with extreme strength criterion of reinforced concrete elements. In: *City municipal engineering. Series: Architecture and engineering sciences*. Kyiv: Technics, 2004. Issue 60, p. 29–48. (in Russian)
8. Shkurupiy, O. A.; Mitrofanov, P. B. The usage of strain a model with extremal criterion for power calculation of reinforced concrete elements from high-duty concrete. In: *Mercury of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2012, Number 46, p. 377–387. (in Ukrainian)
9. Mitrofanov, V. P.; Mitrofanov, P. B. Strategy of problem solving of resistance of standard cross section of reinforced concrete elements on the basis of extremal criteria. In: *Scientific Mercury of Civil Engineering*, 2012, Issue 69, p. 137–149. (in Russian)
10. Shkurupiy, O. A.; Mitrofanov, P. B. Adjacent strain-stress state and capability of pressed together reinforced concrete elements. In: *Resource efficient materials, structures, duildings and constructions: Edited Volume*, 2013, Issue 25, p. 480–487. (in Ukrainian)
11. Shkurupiy, O. A.; Semko, O. V. Capacity rating of pressed together colons. In: *Municipal engineering of towns. Edited Volume*, 2008, Issue 81, p. 27–33. (in Ukrainian)
12. Shkurupiy, O. A.; Mitrofanov, P. B.; Lazareva, O. M. Capacity rating of reinforced concrete constructions and their elements based on extremal criteria. In: *Building constructions: International Scientific and Technological. Edited Volume (Civil Engineering)* Issue 78: In two books. The second book. Kyiv: DP NDIBK, 2013, p. 34–39. (in Ukrainian)

П. Б. Митрофанов, О. М. Лазарева // Будівельні конструкції : Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). Вип. 78: В 2-х кн. Книга 2 / Державне підприємство «Державний науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. — Київ : ДП НДІБК, 2013. — С. 34–39.

Шкурупій Олександр Анатолійович — завідувач кафедри будівельної механіки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Член-кореспондент Академії будівництва України. Наукові інтереси: розробка методів розрахунку міцності, жорсткості, стійкості, залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм міцності.

Митрофанов Павло Борисович — старший викладач кафедри будівельної механіки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: розробка методів розрахунку міцності, жорсткості, стійкості, залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм міцності.

Шкурупій Александр Анатольевич — заведующий кафедрой строительной механики Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Член-корреспондент Академии строительства Украины. Научные интересы: разработка методов расчета прочности, жесткости, устойчивости, железобетонных конструкций и их элементов на основе деформационной модели с экстремальным критерием прочности.

Митрофанов Павел Борисович — старший преподаватель кафедры строительной механики Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: разработка методов расчета прочности, жесткости, устойчивости, железобетонных конструкций и их элементов на основе деформационной модели с экстремальным критерием прочности.

Shkurupiy Alexander — PhD (Eng.), Associate Professor; head of Structural Mechanics Department in the Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Corresponding member of Ukrainian Building Academy. Scientific interests: development of methods for calculating the strength, stiffness, stability, reinforced concrete structures and their elements based on the deformation model with extreme strength criterion.

Mitrofanov Pavel — a senior lecturer at the Structural Mechanics Department of the Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Scientific interests: development of methods for calculating the strength, stiffness, stability, reinforced concrete structures and their elements based on the deformation model with extreme strength criterion.