

УДК 624.012.35:620.173/174

**ОСНОВИ ДЕФОРМАЦІЙНО-СИЛОВОЇ МОДЕЛІ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

**ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВОЙ МОДЕЛИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ**

**THE BASIS OF THE DEFORMATION AND FORCE MODEL OF
REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES**

Ромашко В.М., к.т.н., доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Ромашко В.Н., к.т.н., доц. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ривне)

Romashko V., Ph. D. in Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne)

Запропонована універсальна діаграма стану бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, яка може бути покладена в основу узагальненої деформаційно-силової моделі їх деформування. Окреслені основні пріоритети такої моделі

Представлена универсальная диаграмма состояния бетонных и железобетонных элементов и конструкций, которая может быть положена в основу обобщенной деформационно-силовой модели их деформирования. Очерчены основные приоритеты такой модели

The universal concrete and reinforced concrete elements and structures state diagram, that can be the basis of the generalized deformation and force model of deforming, is represented. The main priorities of this model is outlined

Ключові слова:

Жорсткість, діаграма, стан, залізобетон, елементи, конструкції

Жесткость, диаграмма, состояние, железобетон, элементы, конструкции

Stiffness, diagram, state, reinforced concrete, elements, structures

Постановка проблеми. Зараз цілком очевидним стало те, що сучасна теорія бетону та залізобетону схиляється до так званої «деформаційної моделі перерізу» Євростандартів [1]. Водночас багато вітчизняних та зарубіжних вчених продовжують висловлювати застереження щодо

доцільності переходу від силової до деформаційної моделі в практичних розрахунках залізобетонних елементів та конструкцій. І підстав для подібних сумнівів є більш ніж достатньо, оскільки:

- певне ускладнення розрахунків у багатьох випадках не призводить до пропорційного підвищення їх точності;
- емпіризм, що і надалі залишився у розрахунках за другою групою граничних станів, так само не забезпечує повної методологічної єдності з розрахунками за першою групою граничних станів;
- так і не сформовані єдині універсальні діаграми деформування бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$ та чіткі і однозначні критерії вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів та конструкцій.

Крім того, на сьогодні залишається не доведеним факт «трансформації» діаграм стану бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій в діаграми деформування матеріалів.

Тому, зважаючи на сказане, варто говорити не про розробку так званої «деформаційної моделі перерізу», а про створення узагальненої моделі деформування бетонних та залізобетонних елементів, в якій як деформаційна, так і силова моделі виступатимуть лише її складовими частинами або спрощеними варіантами. І тут цілком очевидним є те, що визначальну роль у побудові подібної узагальненої моделі деформування варто відвести питанням жорсткості залізобетонних елементів та конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Всі відомі на сьогодні пропозиції з визначення жорсткості залізобетонних елементів і конструкцій можна умовно розділити за п'ятьма напрямками.

Першу групу складають пропозиції [2, 3, 4, 5], в яких жорсткість залізобетонних елементів і конструкцій пов'язується з коефіцієнтом ψ_s , що враховує роботу розтягнутого бетону між тріщинами, але відіграє різну роль і значення у різних дослідників. Зокрема, у формулі В.І. Мурашова [2] він безпосередньо впливає на жорсткість деякого осередненого перерізу залізобетонного елементу. Цілком очевидно, що похибка, допущена при визначенні параметра ψ_s , завжди буде призводити до адекватної похибки в оцінці його жорсткості. Щодо формули А.А. Гвоздева [3], то в ній коефіцієнт ψ_s впливає тільки на середні деформації розтягнутої арматури в блоці між тріщинами. Тому й не дивно, що в сучасних російських нормах [5] реалізацію ідеї В.І. Мурашова здійснено через формулу А.А. Гвоздева.

Стосовно пропозицій другого напрямку [6, 7, 8], то в них відображено нелінійний зв'язок жорсткості залізобетонних елементів лише з рівнем їх завантаження або зусиль M / M_u . Результати ж експериментів показують, що подібний закон зміни жорсткості у ряді випадків не відтворює дійсного характеру напружено-деформованого стану залізобетонних елементів.

Дослідження третього напрямку, що зазвичай базуються на інтегральних принципах [6], зводяться до апроксимації дискретних значень жорсткості залізобетонного елемента вздовж його осі поліномом 4-го степеня [9] або ж до використання середньозважених значень жорсткостей в межах кожної з ділянок, на які умовно розбивається залізобетонний елемент [10].

Залежності четвертого напрямку [11, 12, 13], запропоновані переважно зарубіжними вченими та реалізовані нині в нормативних документах більшості країн Європи, на жаль зберігають емпіричні підходи до оцінки жорсткості залізобетонних елементів і конструкцій через її зведене значення, продюковане модулем пружності бетону. Тому вони теж є малоприйнятними для використання в узагальненій моделі деформування залізобетонних елементів та конструкцій.

Для пропозицій п'ятого напрямку [14, 15, 16] характерна лінеаризація функцій жорсткості. Кількість ділянок кусково-лінійної апроксимації зазвичай приймається в межах від 2-х до 5-ти. Однак, незважаючи на високу точність, подібні функції не можуть бути використані в узагальненій моделі деформування залізобетонних елементів і конструкцій, оскільки вони не є універсальними та у вузлових точках стикування мають розриви похідних. Загалом до лінеаризації функцій жорсткості слід відноситись обережно, бо за нею може губитися фізична суть самого процесу деформування.

Виділення питань, не вирішених в рамках загальної проблеми. Аналіз вищезгаданих пропозицій показує, що, попри окремі недоліки, властиві для кожного з напрямків, для їх переважної більшості властивий один спільний і доволі суттєвий недолік – емпіризм. Аби максимально уникнути його та отримати замкнуті рішення при розрахунках жорсткості залізобетонних елементів і конструкцій, основну увагу слід сконцентрувати на моделюванні узагальненої діаграми їх стану. І тут цілком очевидно, що задля отримання універсальної залежності з визначення жорсткості залізобетонних елементів і конструкцій варто зосередитись на пропозиціях, близьких до другого напрямку. Близьких лише тому, що функція жорсткості залізобетонного елемента загалом є залежною не тільки від рівня завантаження (зусиль) M / M_u , але й від рівня його деформування $(1 / \rho) / (1 / \rho_u)$.

Мета статті. Дана стаття націлена на отримання універсальної залежності з визначення жорсткості залізобетонних елементів і конструкцій, котра може бути покладена в основу узагальненої діаграми стану бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій зокрема або узагальненої моделі їх деформування загалом. Подібна функція зможе не тільки підтвердити факт «трансформації» діаграм стану бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій в діаграмі деформування матеріалів, але й стати тою зв'язуючою ланкою, що методологічно з'єднає між собою розрахунки залізобетонних елементів і конструкцій за першою та другою групами граничних станів.

Виклад основного матеріалу. Загалом відомо, що діаграма стану

бетонного чи залізобетонного елемента відображає прямий зв'язок між його міцнісними (M , N) та деформаційними (l/ρ , ϵ) параметрами. А раз так, то цілком очевидно, що подібну діаграму доцільно було б моделювати за допомогою характеристики, яка зв'яже між собою два вищеназвані параметри. Безперечно, що саме такою інтегральною характеристикою може слугувати жорсткість елемента в певному перерізі.

Раніше в роботі [17] уже було показано, що за осьового навантаження вона змінюється лише за рахунок модуля деформацій бетону, оскільки всі геометричні параметри перерізу залишаються незмінними. Сама ж функція модуля деформацій, котрий виступає параметром пропорційності між напруженнями та деформаціями бетону, має нелінійний характер.

Для згинальних та позакентрово стиснутих чи позакентрово розтягнутих з великими ексцентриситетами залізобетонних елементів характерними є двозначні епюри напружень та деформацій бетону. Із-за наявності стиснутої та розтягнутої зон в перерізі зазначених елементів їх деформування суттєво ускладнюється. І сприяє цьому не тільки поява та розвиток тріщин, але й порушення зчеплення розтягнутої арматури з бетоном та його поступове виключення з роботи. Звісно, що за таких обставин значно ускладнюється і характер зміни жорсткості вищевказаних елементів, особливо в перерізах з тріщиною. Величина інтегральної жорсткості залізобетонного елемента у цьому випадку змінюватиметься переважно за рахунок падіння жорсткостей стиснутої та розтягнутої зон бетонного перерізу.

До того ж її функція в перерізі з тріщиною повинна відображати відносно швидке (майже раптове) виключення з роботи переважної частини розтягнутого бетону та відповідний перерозподіл зусиль в розтягнутій зоні з бетону на арматуру (рис. 1).

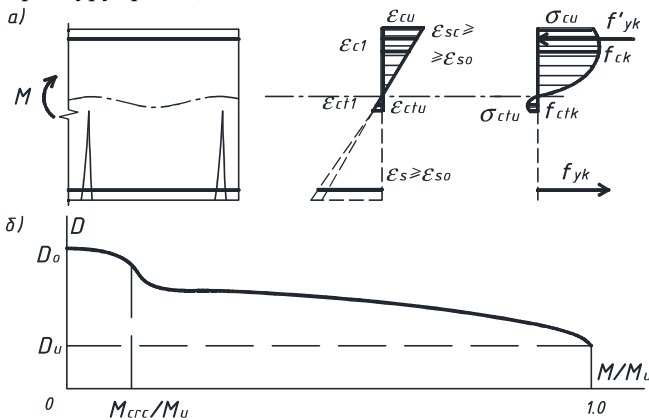


Рис. 1. Напружено-деформований стан (а) і характер зміни жорсткості (б) залізобетонного елемента у перерізі з тріщиною

По середині блоку між тріщинами вплив нерозтрісканого розтягнутого бетону на жорсткість залізобетонного елемента залишається доволі суттєвим. Оскільки тут працює весь переріз, то остання змінюється переважно за рахунок не геометричних, а деформаційних характеристик, зокрема модуля деформацій бетону. Тому тут цілком зрозуміло, що загальна функція інтегральної жорсткості залізобетонного елемента в зазначеному перерізі, на відміну від перерізу з тріщиною, буде плавною.

Якщо врахувати, що при вичерпанні несучої здатності руйнується не переріз елемента, а бетон в його певному об'ємі або арматура на певній ділянці [18, 19], то можна передбачити, що напружено-деформований стан залізобетонного елемента на зазначеній ділянці повинен описуватися характеристиками деякого розрахункового (осередненого) перерізу всього блоку між тріщинами, у тому числі і осередненою інтегральною жорсткістю (рис 2). І хоч остання (крива 3) зменшуватиметься більш інтенсивно ніж інтегральна жорсткість залізобетонного елемента в середньому перерізі між тріщинами (крива 2), однак змінюватиметься вона теж плавно, якщо зважити на загальний характер розвитку прогинів згинальних або позациентрово завантажених елементів. Підтвердженням сказаного може слугувати факт відсутності в експериментальних діаграмах розвитку прогинів $M - f$ будь-яких стрибків, що могли б відповідати моменту появи тріщин [20].

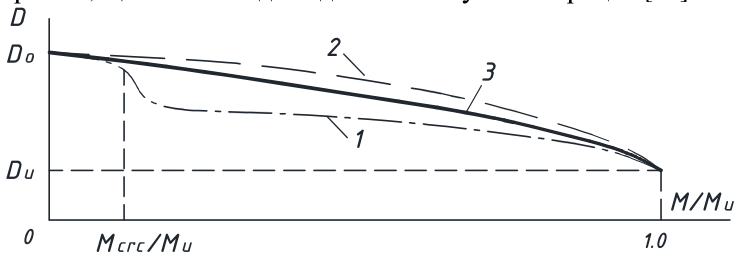


Рис. 2. Діаграми інтегральної (усередненої) жорсткості згинального залізобетонного елемента в перерізі: 1 – з тріщиною; 2 – між тріщинами; 3 – осередненому блоку між тріщинами

Загалом же варто зауважити, що розрахунок осередненої інтегральної жорсткості залізобетонного елемента чи конструкції є доволі складною задачею з багатьма невідомими. Адже інтегральні модулі деформацій стиснутої та розтягнутої зон бетону пов'язані не тільки з деформаційними характеристиками матеріалу, але й з геометричними параметрами перерізу самих елементів. Тому осереднену інтегральну жорсткість залізобетонного елемента все ж таки доцільніше обчислювати відповідно до її класичного визначення за відомим виразом

$$D = M / (I / \rho). \quad (1)$$

Задля реалізації такого шляху необхідно встановити характер зв'язку

вищевказаної жорсткості з виникаючими внутрішніми зусиллями в елементі та з його кривиною. Якщо зважити, що процес деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій супроводжується фізичною, геометричною та конструкційною нелінійністю, то можна стверджувати, що зазначений зв'язок теж повинен бути нелінійним.

До того ж варто відзначити, що робота бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій навіть у граничному стані не проходить за чисто «силовою» чи чисто «деформаційною» схемою і не може бути описана лише силовими або лише деформаційними параметрами. Інакше кажучи, діаграма дійсного напружено-деформованого стану будь-яких бетонних чи залізобетонних елементів і конструкцій за довільних навантажень може бути лише «деформаційно-силовою».

Виходить, що жорсткість будь-якого елемента слід пов'язувати не тільки з рівнем його навантаження M / M_u , але й з рівнем деформування або точніше - з рівнем викривлення його деформованої осі $(1 / \rho) / (1 / \rho_u)$. А тому, зважаючи на вищесказане, прийемо зміну жорсткості бетонного або залізобетонного елемента у вигляді функції

$$M / (1 / \rho) = A - B \cdot (1 / \rho) / (1 / \rho_u) - C \cdot M / M_u, \quad (2)$$

де A , B , C - параметри, що відображають міцнісні, деформаційні та основні геометричні характеристики перерізу бетонного чи залізобетонного стержня.

У такому випадку зусилля, яке повинне сприйматися елементом, можна обчислювати залежно від рівня його деформування за формулою

$$M = \left(A \cdot \frac{1}{\rho} - \frac{B}{1 / \rho_u} \cdot \left(\frac{1}{\rho} \right)^2 \right) / \left(1 + \frac{C}{M_u} \cdot \frac{1}{\rho} \right). \quad (3)$$

Застосувавши до функції (3) наступні граничні умови: а) при $1 / \rho = 0$ $dM / d(1 / \rho) = E_{co} I_{red,o}$; б) $dM / d(1 / \rho) = 0$ за $1 / \rho = 1 / \rho_u$; в) при $1 / \rho = 1 / \rho_u$ $M = M_u$, визначимо значення параметрів A , B і C / M_u . Після відповідних обчислень та перетворень матимемо:

$$A = E_{co} I_{red,o}; \quad B = E_{cu} I_{red,u} = \frac{M_u}{1 / \rho_u}; \quad \frac{C}{M_u} = \frac{E_{co} I_{red,o}}{M_u} - \frac{2}{1 / \rho_u}. \quad (4)$$

Підставивши значення знайдених параметрів у формулу (3), отримаємо залежність, що зв'язує зусилля в елементі з його кривиною

$$M = \frac{E_{co} I_{red,o} \cdot (1 / \rho) - M_u \cdot ((1 / \rho) / (1 / \rho_u))^2}{1 + (E_{co} I_{red,o} / M_u - 2 / (1 / \rho_u)) \cdot (1 / \rho)}, \quad (5)$$

де M_u - несуча здатність бетонного чи залізобетонного стержня

(граничне зусилля в ньому);

- $1/\rho_u$ - кривина елемента в граничному стані;
 $E_{co}I_{red,o}$ - початкова приведена жорсткість перерізу бетонного або залізобетонного елемента.

Нескладно помітити, що вираз (5) описує не що інше, як діаграму стану елемента або конструкції. При цьому з рис. 3 видно, що цій діаграмі загалом властиві висхідна та низхідна вітки деформування. Природно, що виникає запитання: а чи можлива реалізація низхідної вітки діаграми стану елемента в реальних умовах? Якщо говорити про бетонні елементи, то це є малоймовірним. Неможливою вона є і в статично визначених залізобетонних елементах та конструкціях, оскільки досягнення граничного стану в найбільш напруженому перерізі призводить до їх геометричної змінюваності та негайного руйнування.

Однак у статично невизначених елементах, конструкціях і системах, внаслідок можливого перерозподілу зусиль, їх деформування на низхідній вітці діаграми стану є цілком ймовірним.

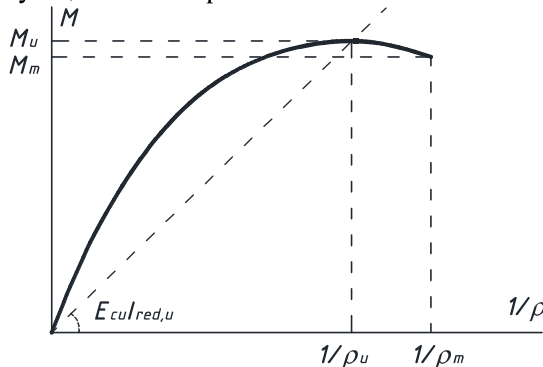


Рис. 3. Узагальнена діаграма стану бетонного або залізобетонного елемента

Таким чином можна констатувати, що залежність (5) дозволяє:

- оцінювати напружено-деформований стан будь-яких бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, що працюють у складі як статично визначених, так і статично невизначених систем.
- застосовувати в якості універсального та однозначного критерію вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів та конструкцій екстремальний критерій;
- максимально уникнути емпіризму у розрахунках за другою групою граничних станів та забезпечити їх методологічну єдність з розрахунками за першою групою граничних станів;
- підтвердити та довести сам факт «трансформації» діаграм стану бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій в діаграмі деформування матеріалів

та навпаки.

1. Eurocode –2: Design of Concrete Structures. – Part 1-1: General Rules and Rules for Building: EN 1992–1–1. – [Final Draft, December, 2004]. – Brussels: CEN. – 2004. – 225 p.
2. Мурашев В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашев. – М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.
3. Гвоздев А.А. Некоторые вопросы расчета прочности и деформаций железобетонных элементов при работе арматуры в пластической стадии / А.А. Гвоздев, Н.М. Мулин, Ю.П. Гуца // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1968. – № 6. – С.7-12.
4. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – Санкт-Петербург - Москва: АСВ, 2004. – 472 с.
5. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного натяжения арматуры. – М.: ГУП НИИЖБ, ФГУП ЦПП, 2004. – 53 с.
6. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко. – Харьков: Вища школа, изд-во при Харьковском ун-те, 1968. – 322 с.
7. Золотов М.С. Несущая способность и деформативность гибких железобетонных стержней / М.С. Золотов, И.В. Симейко // Коммунальное хозяйство городов: Науч. - техн. сб. Вып. 72. – К.: Техніка, 2006. – С. 343-347.
8. Kuczynski W. Kontynualna teoria zginania zelbetu / W. Kuczynski. – Warszawa: PWN, 1971. - 271 s.
9. Симейко В.В. К расчёту гибких сжатых железобетонных стержней с учётом переменной жёсткости по их длине / В.В. Симейко, М.П. Виланов // Строительные изделия, конструкции и сооружения. – Том I. – М.: Стройиздат, 1974. – С.56-68.
10. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.
11. Branson D. E. Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams / D. E. Branson // HPR Report No. 7, Part 1, Alabama Highway Department, U.S. Bureau of Public Roads / Department of Civil Engineering and Auburn Research Foundation, Auburn University, Aug. 1963 / 1965, 1-78 p.
12. Vecchio F.J. Approximate analysis of reinforce concrete slabs / F.J. Vecchio, M. Tata // Structural Engineering and Mechanics, Vol.8, №1, 1999, pp.1–18.
13. Fikry A.M., Thomas C. Development of a Model for the Effective Moment of Inertia of One-Way Reinforced Concrete Elements / A.M. Fikry, C. Thomas // ACI Structural Journal, Vol. 95, № 4, July-August 1998, pp. 444-455.
14. Park R. Reinforced Concrete Structures / R. Park, T. Paulay. – New York: John Wiley and Sons, 1975, 769 p.
15. Olivia M. Curvature ductility of reinforced concrete beam / M. Olivia, P. Mandal // Jornal Teknik Sipil, Vol. 6, №1, Oktober 2005, pp. 1–13.
16. Дорофеев В.С. К построению линеаризованных диаграмм деформирования изгибаемых железобетонных элементов / В.С. Дорофеев, А.В. Ковров, А.В. Ковтуненко, Н.К. Высочан // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць НУВГП. – Рівне, 2011. – Вип. 22. – С. 320–327.
17. Ромашко В.М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі / В.М. Ромашко // Бетон и железобетон в Украине. - 2007. - № 6. -С.2-6.
18. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Бамбура. - Харків: ХДТУБА, 2006. - 39 с.
19. Ромашко В.М. Основи загальної теорії деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій / В.М. Ромашко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції будівлі та споруди: Зб. наук. праць НУВГП. – Рівне, 2012.- Вип.24. - С. 229-234.
20. Саврасов И.П. Прочность, трещиностойкость, деформативность изгибаемых железобетонных элементов, армированных сталью класса А500 с различным периодическим профилем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.П. Саврасов. – М.: ОАО НИЦ «Строительство», 2010. – 22 с.