

УДК 624.012.35:620.173/174

ДО МОДЕЛЕЙ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

К МОДЕЛЯМ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

TO MODEL NONLINEAR DEFORMATION OF CONCRETE AND 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)

Пропонується узагальнена модель деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, що базується на діалектичній єдності діаграм їх реального стану та діаграм реального стану матеріалів

Предлагается обобщенная модель деформирования бетонных и железобетонных элементов и конструкций, которая базируется на диалектическом единстве диаграмм их реального состояния и диаграмм реального состояния материалов

The generalized model of concrete and reinforced concrete structures deformation, which is based on the dialectical unity of their real state diagrams and diagrams of materials real state

Ключові слова:

Модель, деформування, стан, залізобетон, елементи

Модель, деформирование, состояние, железобетон, элементы

Model, deforming, state, reinforced concrete, elements

Постановка проблеми. Запровадження в практику проектування так званих «деформаційних моделей» [9] загалом дозволяє більш точно відтворювати реальний напружено-деформований стан бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій. Разом з тим, розрахунки зазначених елементів перетворюються в багаточисельні ітераційні процеси, здійснення

яких стає неможливим без використання спеціального програмного забезпечення. Сама ж проблема емпіризму у розрахунках залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами другої групи так і не зникає, а лише набирає дещо іншої форми. Сказане найбільшою мірою стосується визначення ширини розкриття тріщин та розрахунку прогинів (жорсткості).

Суттєво зменшити об'єм ітераційних обчислень та вирішити проблему емпіризму в розрахунках залізобетонних елементів і конструкцій можна з позицій моделювання діаграм їх стану. Саме останні здатні відтворювати реальний напружено-деформований стан зазначених елементів і конструкцій шляхом моделювання пластичних та реологічних властивостей матеріалів, геометричної та фізичної нелінійності їх деформування, наявності тріщин та врахування можливих відхилень геометричних розмірів від їх номінальних значень тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під моделлю опору бетону та залізобетону силовим впливам зазвичай розуміють певний прообраз процесу деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, що відтворює їх реальний напружено-деформований стан. Тому всі відомі на сьогодні моделі опору бетону та залізобетону силовим впливам можна умовно розділити за декількома ознаками, найважливішими серед яких є форма представлення основних параметрів стану матеріалів та форма представлення стану залізобетонних елементів і конструкцій в певному перерізі.

За формою представлення основних параметрів стану матеріалів розрізняють силові та деформаційні моделі. В силових моделях основні статичні співвідношення (рівняння рівноваги) реалізуються за допомогою напружень, в деформаційних – через деформації матеріалів.

Силовим моделям [10], як правило, характерні наступні недоліки:

- при недотриманні принципу пластичного руйнування в розрахунках позacentрово стиснутих елементів неможливо уникнути «емпіризму»;
- без реальних діаграм деформування матеріалів розрахункові залежності не відтворюють фізичний зміст модельованих явищ;
- розрахунки залізобетонних елементів за граничними станами є доволі автономними і навіть не пов'язаними між собою, оскільки спираються на різні вихідні передумови.

Разом з тим для деформаційних моделей, що реалізуються за допомогою спрощених діаграм деформування матеріалів [13], їх інтегрування [1, 6] чи формування матриць жорсткості [7], властиві інші недоліки:

- відсутність чітких критеріїв вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій;
- збереження значного емпіризму в розрахунках за граничними станами другої групи.

За формою представлення стану елементів та конструкцій в певному перерізі всі існуючі моделі можна розділити на інтегральні та дискретні.

В інтегральних моделях, що реалізуються за допомогою інтегральних оцінок [3], «квазісуцільних» [4] та блокових [2] моделей, переріз будь-якого залізобетонного елемента представляється невеликою кількістю його компонентів. Для них властиві наступні недоліки:

- поява нових компонентів в комбінованих конструкціях призводить до суттєвих ускладнень у заданні функцій напружень зокрема та відповідних розрахункових залежностей загалом;
- істотне ускладнення рішень та суттєве зростання числа ітерацій в розрахунках косодеформованих елементів, коли напружений стан змінюється не тільки по висоті, але і по ширині перерізу;
- за умов неоднорідного деформування елементів і конструкцій в них неможливо врахувати «градієнтні ефекти» силового опору бетону;
- рішення «блокової» контактної задачі, представленої системою інтегральних рівнянь, отримати без допомоги ЕОМ вкрай важко навіть за наближеними числовими методами.

В дискретних моделях переріз елемента чи конструкції відтворюється великою кількістю елементарних ділянок, в межах кожної з яких властивості матеріалу приймаються постійними. І оскільки в цих моделях основна увага акцентується на деформаціях то в переважній більшості вони є деформаційними з уже згаданими раніше недоліками.

З інших дискретних методів найбільш широкі можливості має метод скінчених елементів (МСЕ), за яким переріз моделюється сукупністю кінцевих елементів певної форми, з'єднаних між собою у вузлах кінцевим числом зв'язків [7, 8]. Застосування моделей, заснованих на МСЕ, є виправданим для складних залізобетонних конструкцій і систем за складних видів їх деформування. Разом з тим, для них теж властиві певні недоліки:

- точність та достовірність результатів розрахунку багато в чому залежить від апроксимуючої функції форми кінцевого елемента;
- аби уникнути розривності деформацій та зусиль між сусідніми кінцевими елементами, необхідно на межах між ними здійснювати сполучення функцій переміщень та їх похідних;
- у розрахунках за МСЕ значною мірою втрачається не тільки їх інженерна осяжність, але й фізична сутність процесів деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій.

Виділення питань, не вирішених в рамках загальної проблеми. Незважаючи на певні успіхи у побудові «деформаційних моделей», в їх рамках на сьогодні залишаються так і невирішеними наступні проблеми:

- у більшості випадків внутрішня статична невизначеність елементів, що зазнають неоднорідного деформування, навіть у граничному стані залишається нерозкритою або розкривається за допомогою чисельних ітераційних розрахунків;
- не сформульовані чіткі критерії втрати (вичерпання) несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій;

- практично відсутні не тільки точні, але й наближені аналітичні розв'язки визначальних рівнянь рівноваги $\Sigma M = 0$ за екстремальним критерієм несучої здатності $dM/d(1/r) = 0$;
- у розрахунках за граничними станами другої групи внутрішня статична невизначеність неоднорідно деформованих елементів залишається абсолютно нерозкритою, що веде до неминучого використання у розрахунках не тільки чисельних ітераційних операцій, але й різного роду емпіричних залежностей.

Мета статті. Дана стаття направлена на розробку узагальненої моделі деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій, яка ґрунтується на загальноприйнятих принципах та закономірностях механіки деформованого твердого тіла. В основу такої моделі закладаються діаграми реального стану зазначених елементів та реальні діаграми стану матеріалів, що діалектично пов'язані між собою.

Виклад основного матеріалу. З аналізу наведених публікацій видно, що теорія деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій продовжує розвиватися на основі загальноприйнятих принципів і передумов механіки деформованого твердого тіла (МДТТ): статичних співвідношень або рівнянь рівноваги; геометричних співвідношень або рівнянь спільності деформацій; фізичних співвідношень або рівнянь стану матеріалів.

І хоча проблема створення загальної теорії опору бетону та залізобетону іще далека від остаточного розв'язання, сьогодні уже можна говорити про існування певних шляхів та підходів до її вирішення. Звичайно, у більшості випадків вони є навіть конкуруючими, але реалізуються переважно з дотриманням вищезгаданих принципів МДТТ.

Примирити, а можливо і об'єднати зазначені підходи покликана пропонована деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону. Безперечно, в її основу, як і в основу більшості існуючих нині моделей, закладаються загальноприйняті принципи МДТТ. Однак її центральною об'єднуючою ланкою виступає узагальнена діаграма стану залізобетонних елементів і конструкцій (рис.1) у вигляді континуальної функції без розривів, переламів та стрибків $M = f(1/r)$. Така модель може претендувати на роль узагальненої з наступних міркувань.

В узагальненій деформаційно-силовій моделі [12], на відміну від чисто деформаційної, особлива роль відводиться гіпотезі граничної рівноваги [10], котра безпосередньо задіяна у формуванні критеріїв вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій та зв'язує пропоновану модель з колишньою силовою. Разом з тим, статичні відношення МДТТ в розробленій моделі записуються подібно до деформаційної в деформаціях за дотримання гіпотези плоских перерізів.

Деформаційно-силова модель наділена і загальними властивостями інтегральних моделей. Зокрема, при інтегруванні діаграм стану матеріалів з використанням гіпотези граничної рівноваги появляється можливість

враховувати градієнтні ефекти силового опору бетону за його неоднорідного деформування [11]. Більше того, деформаційно-силову модель певною мірою можна вважати і блоковою, оскільки в ній напружено-деформований стан елемента чи конструкції оцінюється за деяким осередненим перерізом блоку між тріщинами. Щоправда, в звичайних блокових моделях [2] ця задача вирішується у вигляді контактної між суміжними блоками з урахуванням зчеплення арматури з бетоном. У пропонованій же моделі вона розв'язується інтегральними методами за допомогою уже згадуваної узагальненої діаграми стану залізобетонних елементів та конструкцій (рис. 1).

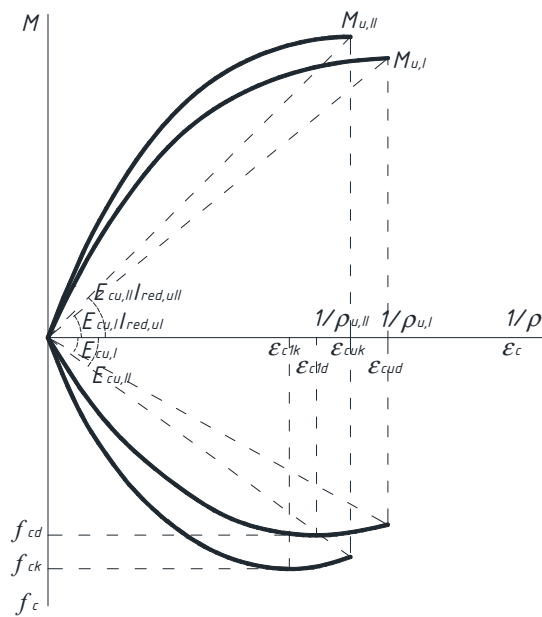


Рис. 1. Зв'язок характеристичних та розрахункових діаграм стану залізобетонних елементів і конструкцій з характеристичними та розрахунковими діаграмами деформування стиснутого бетону

Зазвичай в традиційних моделях опору бетону і залізобетону елемент або конструкцію представляють деякою сукупністю ділянок стержня, кожна з яких приймається рівною відстані між тріщинами, а за їх відсутності визначається умовно. За вказаних обставин, на межі ділянок елемента, обумовлених тріщинами, функція кривини неминуче матиме розриви (перелами). В дискретних моделях зазначеного недоліку позбуваються за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ), де вся конструкція задається сукупністю певних (кінцевих) елементів без розгляду окремих перерізів, а спільність (нерозривність) деформацій забезпечується умовою рівності

кутових та лінійних переміщень вузлів суміжних елементів без залучення гіпотези плоских перерізів.

Пропонована модель теж є дискретною, оскільки в ній переріз елементу чи конструкції відтворюється великою кількістю елементарних ділянок, в межах кожної з яких властивості матеріалу приймаються постійними. Нерозривність функції кривини на межі тріщин забезпечується тою ж таки узагальненою діаграмою стану залізобетонних елементів і конструкцій у вигляді континуальної залежності без розривів, переламів та стрибків. Тому, в цьому контексті, деформаційно-силову модель можна вважати найбільш наближеною до моделей, заснованих на МСЕ.

Виходячи з вищесказаного, розроблену модель можна **рекомендувати** до застосування в інженерних розрахунках, оскільки вона:

- успішно реалізується за простими компактними алгоритмами розрахунку;
- не вимагає використання складного програмного забезпечення;
- зберігає фізичну суть процесів деформування залізобетонних елементів і конструкцій;
- залишається осяжною, зрозумілою і доступною для звичайного інженера.

1. Байков В.Н. Общий случай расчёта прочности элементов по нормальным сечениям / В.Н. Байков и др. // Бетон и железобетон. – 1987. – №5. – С.16-18. **2.** Белов В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных балок как систем, составленных из упругих блоков / В.И. Белов // Изв. вузов: Стр-во и арх-ра. – 1971. – №4. – С.22-27. **3.** Бондаренко В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с. **4.** Гольшев А.Б. К разработке прикладной теории расчёта железобетонных конструкций / А.Б. Гольшев, В.Я. Бачинский // Бетон и железобетон. – 1985. – №6. – С.16-18. **5.** Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю.В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с. **6.** Карпенко Н.И. К построению методики расчёта стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, М.А. Сапожников // Совершенствование методов расчёта статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1987. – С. 4-24. **7.** Карпенко Н.И. Расчет стержневых железобетонных конструкций МКЭ с учетом уточненной матрицы жесткости / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, М.А. Сапожников // Изв. вузов: Стр-во. – 1991. – №3. – С. 7-11. **8.** Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С.Ф. Клованич, И.Н. Мироненко. – Одесса: ОГАСА, 2007. – 110 с. **9.** Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування / Мінрегіонбуд України: ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. – [Чинний від 01.06.11]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с. **10.** Лолейт А.Ф. Инструкция для подбора сечений железобетонных элементов по критическим усилиям / А.Ф. Лолейт. – М.: ВНИИТОБ, 1933. – 82 с. **11.** Маилян Л.Р. Градиентные эффекты в железобетонных конструкциях / Л.Р. Маилян, М.Ю. Беккиев. – Нальчик: Изд-во КБГСХА, 2001. – 245 с. **12.** Ромашко В.М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону: Монографія //В.М. Ромашко. – Рівне: О. Зень, 2016. – 424с. **13.** Hognestad, E. Concrete stress distribution in ultimate strength design / E. Hognestad, N.W. Hanson, D. McHenry // Proceeding of the ACI, Vol. 52, № 6, December 1955, – P.455-480.