

УДК 624.012

ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОЗРАХУНКОВОГО ПЕРЕРІЗУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Д.т.н., с.н.с. Бамбура А.М., к.т.н. Гурківський О.Б.,
інженери Безбожна М.С., Дорогова О.М.**

Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна

Деформаційний метод (модель) визначення напружено-деформованого стану залізобетонного елемента був запропонований нами ще в 1987 р. [1]. Але значного поширення він тоді не набув в зв'язку з тим, що норми базувались на спрощених методах розрахунку (на основі прямокутної епюри деформування в стиснутій зоні) і відсутності в достатніх об'ємах відомостей про закономірності деформування бетону в залежності від ряду факторів. В останні 10-15 років інтенсивно розвивались методи розрахунку залізобетонних елементів, в яких використовується діаграма деформування бетону з низхідною гілкою. В більшості випадків автори ведуть мову про використання деформаційної моделі. Причому, кожен дослідник в це поняття вкладає свій смисл. В основному, вважають, що використання для розрахунку криволінійної з низхідною гілкою діаграми деформування, це і є деформаційний метод (модель). Відсутність однакового розуміння серед науковців що таке деформаційний метод розрахунку і спонукала нас ще раз звернути увагу на те, що вкладається нами в це поняття. Тим більше це необхідно зробити виходячи з того, що підготовлена до затвердження остаточна редакція національного нормативного документу ДБН «Бетонні та залізобетонні конструкції», в якому використаний деформаційний метод (модель) розрахунку в нашій постановці.

В чому суть методу? Щоб зрозуміти запропонований підхід, розглянемо спочатку існуючі методи розв'язання задачі пошуку рішення двох нелінійних рівнянь рівноваги (оцінка напружено-деформованого стану) позацентрово стиснутого або згинаного елемента на будь-якому етапі навантаження. Відомо, що в ряді випадків (особливо це характерно для позацентрово стиснутих елементів) крива «момент-кривизна (прогин)» має низхідну ділянку, якщо діаграма стану матеріалу має низхідну ділянку [2]. Ми маємо справу з таким матеріалом – бетоном, тому діаграма стану елемента також має низхідну ділянку в координатах “ $M_i - \mathcal{N}_i$ ”. Алгоритм розв'язання задачі на ЕОМ, як правило, передбачає використання ітераційного підходу. Суть останнього в тому, що навантаження на кожній ітерації задається в частках від зовнішнього характеристичного навантаження, найчастіше це нормальна сила і момент. При такому підході (рис. 1) на кожному ступені навантаження ($M_1, M_2, M_3 \dots M^{(m-2)}$) є одне рішення - точки 1,2,3,...($m-2$) на кривій стану перерізу, чого не можна сказати про наступний крок $M^{(m-1)}$, для якого

маємо два рішення точки: ($m-1$) і ($m-1$)'. Остання обставина, як правило, призводить до нерозв'язних задач при складанні алгоритму програми для ЕОМ. На цьому ступені, як правило, закінчується розрахунок і, як видно, похибка в розв'язку може мати значну величину за навантаженням, не кажучи вже про переміщення.

Щоправда, частіше виникає ситуація, коли на ступені $M^{(m)}$ задача взагалі не має розв'язку (див. рис. 1), цей стан називають розходженням процесу розрахунку. В даному разі оцінити похибку практично неможливо, все залежить від прийнятого кроку навантаження на останніх ступенях розрахунку.

Зважаючи на сказане, було запропоновано навантаження розрахункової моделі виконувати не за навантаженням, а за деформаціями (кривизною). При такому підході для кожного значення кривизни (або деформацій найбільш стиснутого волокна \mathcal{E}_{b1}) задача має єдине рішення. Це, як показав наш досвід, не тільки спрощує алгоритмізацію задачі, а й дозволяє значно спростити самі розрахункові залежності для визначення напружено-деформованого стану розрахункового перерізу.

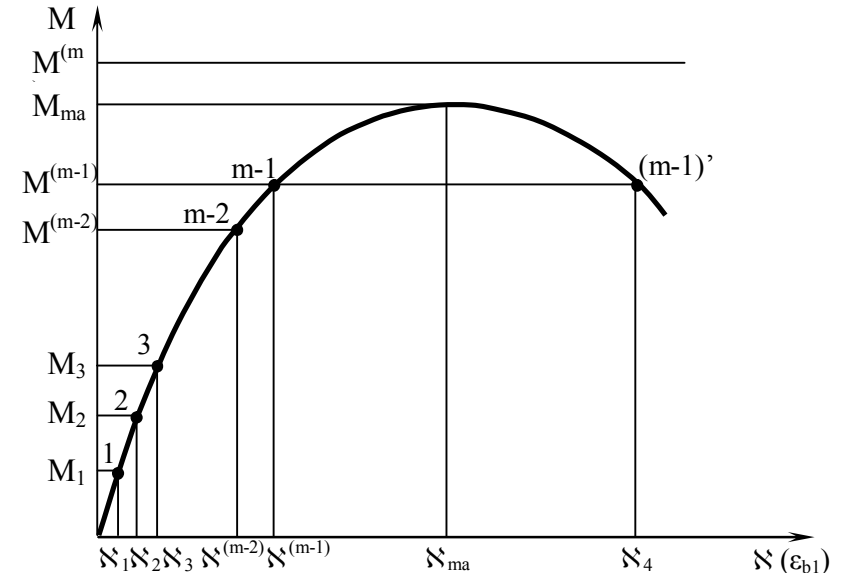


Рис. 1. Крива стану перерізу згинаного елемента.

Розглянемо детальніше визначення напружено-деформованого стану залізобетонного елемента за деформаційним методом. З точки зору реалізації

деформаційного методу тип нормального перерізу не має значення, але для спрощення викладок розглянемо прямокутний переріз. Окрім того, як більш загальний випадок, алгоритм розрахунку наведемо для позациентрово стиснутого елемента, оскільки необхідно розглянути дві форми рівноваги (див. рис. 2).

Для розв'язання задачі необхідно мати такі вихідні дані: параметри перерізу – b, h ; початковий ексцентриситет прикладення навантаження – e_0 ; параметри діаграми деформування бетону – $R_b, E_b, \sigma_{bu}(\beta), \varepsilon_{bR}, \varepsilon_{bu}$ (ці параметри можна взяти безпосередньо з таблиць або підрахувати за формулами [1, 3]; коефіцієнти полінома (1) – a_k , які можна взяти безпосередньо з таблиць або підрахувати за формулами [1, 4]; параметри армування (причому кількість шарів армування не обмежується, вона обмежується тільки технологічними вимогами) – R_{si}, E_{si}, A_{si} ; відстань від верхньої (найбільш стиснутої) грані перерізу до i -го шару армування (в разі розташування в одному шарі арматури з різними фізико-механічними характеристиками їх розглядають окремо при одній і тій же відстані від грані перерізу) – z_{si} ; початкові (викликані попереднім напруженням, усадкою чи іншими чинниками) деформації в i -му стержні арматури – $\varepsilon_{si,0}$.

$$\sigma_b = R_b \sum_{k=1}^5 a_k \left(\frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{bR}} \right)^k \quad (1)$$

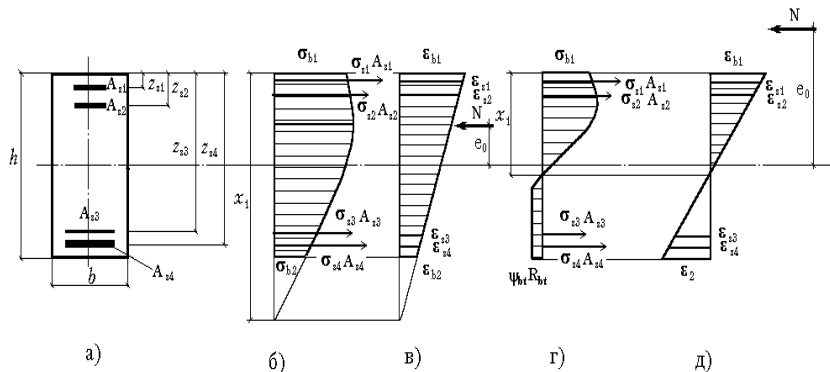


Рис. 2. Напружено - деформований стан позациентрово стиснутого елемента: а - поперечний переріз елемента; б - епюра напружень при 1-й формі рівноваги; в - епюра деформацій при 1-й формі рівноваги; г - епюра напружень при 2-й формі рівноваги; д - епюра деформацій при 2-й формі рівноваги.

При оцінюванні напружено-деформованого стану перерізу задача може розв'язуватись у трьох постановках:

- при заданих зусиллях N та M необхідно визначити кривизну в перерізі \aleph і деформації ε ;
- при заданих величинах кривизни в перерізі і діючого в ньому осового зусилля N визначити величину згинального моменту M ;
- необхідно побудувати повну криву стану перерізу аж до руйнування бетону.

Перша і третя з названих задач розв'язується за таким алгоритмом.

1. На першому кроці розрахунку задаються величини деформацій $\varepsilon_{b1}^{(0)} = \Delta\varepsilon_{b1}$ та $\varepsilon_{b2}^{(0)} = 0$, причому на перших кроках підрахунків рекомендується $\Delta\varepsilon_{b1}$ приймати таким, що дорівнює $0,1 \varepsilon_{bu}$.

2. Підраховують величини $\aleph = \frac{\varepsilon_{b1} - \varepsilon_{b2}}{h}$ та $x_1 = \frac{\varepsilon_{b1}}{\aleph}, \sigma_{si}$.

3. Визначають зусилля в перерізі за формулою (2) для першої форми рівноваги,

$$\frac{R_b b}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \frac{\varepsilon_{b1}^{k+1} - \varepsilon_{b2}^{k+1}}{\varepsilon_{bR}^{k+1}} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0 \quad (2)$$

4. Визначену величину зусилля N та інші параметри підставляють у рівняння рівноваги (3),

$$\frac{R_b b}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \frac{\varepsilon_{b1}^{k+2} - \varepsilon_{b2}^{k+2}}{\varepsilon_{bR}^{k+2}} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0 \quad (3)$$

5. За результатами розв'язання рівняння (3) можлива реалізація двох випадків:

- ліва частина більша за нуль. Це свідчить про наявність форми рівноваги I (див. рис. 2), тобто весь переріз стиснутий;
- ліва частина менша за нуль. Це свідчить про наявність форми рівноваги II (див. рис. 2), тобто частина перерізу розтягнута.

6. При реалізації першої форми рівноваги необхідно виконати такі операції:

а) визначити нову величину деформацій на менш стиснутій грані:

$$\varepsilon_{b2}^{(1)} = \varepsilon_{b2}^{(0)} + \Delta\varepsilon_{b2},$$

при цьому на першому кроці (циклі) рекомендується приймати

$$\Delta\varepsilon_{b2} = 0,05\varepsilon_{bu};$$

б) перевірити рівняння рівноваги (3), виконавши операції 2, 3, і якщо ліва частина залишилась більшою за нуль, ще раз збільшити деформацію ε_{b2}

на величину $\Delta\varepsilon_{b2}$, тобто прийняти $\varepsilon_{b2}^{(2)} = \varepsilon_{b2}^{(1)} + \Delta\varepsilon_{b2} = \varepsilon_{b2}^{(0)} + 2\Delta\varepsilon_{b2}$;

в) покроково збільшення деформації на менш стиснутій грані перерізу виконувати доти, доки ліва частина рівняння (3) не змінить знак.

7. Після зміни знака рівняння рівноваги (3) оцінюють точність розв'язку. Точність розв'язку вважають достатньою при значенні

$$\Delta \varepsilon_{b2} = 0,02 \varepsilon_{bu}.$$

8. У разі, коли точність розв'язку недостатня, визначають нову величину деформації, повертаючись кроком назад:

$$\varepsilon_{b2}^{(k+1)} = \varepsilon_{b2}^{(k)} - \Delta \varepsilon_{b2}^{(k+1)}$$

і призначають нову величину приросту деформацій:

$$\Delta \varepsilon_{b2}^{(k+1)} = 0,01 \Delta \varepsilon_{b2}^{(k)}.$$

Далі виконують обчислення за пп. а), б), в) доти, доки не буде досягнута достатня (задана) точність виконання умови (3) після m ітерацій:

$$\varepsilon_{b2}^{(m)} = \varepsilon_{b2}^{(m-1)} + \Delta \varepsilon_{b2}^{(m)}.$$

Після досягнення заданої точності розв'язку будемо мати першу точку на діаграмі стану перерізу.

Для отримання наступних точок діаграми стану перерізу необхідно збільшити деформації на більш стиснутій грані, тобто

$$\varepsilon_{b1}^{(k)} = \varepsilon_{b1}^{(k-1)} + \Delta \varepsilon_{b1},$$

і виконати дії відповідно до п.п. 2-8, зберігаючи на першій ітерації величину деформації на менш стиснутій грані, яка отримана на попередньому кроці розрахунку.

Як правило, при значенні $\Delta \varepsilon_{b1} = 0,1 \varepsilon_{bu}$ отримують результати з достатньою точністю, але якщо необхідно отримати результати з більшою точністю, можна використати дрібніші значення $\Delta \varepsilon_{b1}$. У будь-якому разі, при значеннях $\Delta \varepsilon_{b1} < 0,05 \varepsilon_{bu}$ точність розв'язку практично не покращується.

9. При реалізації другої форми рівноваги (рис. 2), тобто коли ліва частина менша за нуль, операції з визначення напружено-деформованого стану перерізу виконують у тій же послідовності, що і в пп. 5-9, але починаючи з першого кроку змінюють напрям пошуку рішення.

10. Зберігаючи значення деформацій $\varepsilon_{b1} = \Delta \varepsilon_{bu}^{(1)}$, задають деформації на розтягнутій грані перерізу:

$$\varepsilon_{b2}^{(1)} = \varepsilon_{b2}^{(0)} + \Delta \varepsilon_{b2}$$

з величиною зменшення деформації

$$\Delta \varepsilon_{b2} = -0,1 \varepsilon_{bu}.$$

11. При заданих деформаціях визначають зусилля, яке може сприймати переріз, за формулою (4),

$$\frac{R_b b}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{bR}} \right)^{k+1} + b \psi_{bt} R_{bt} (h - x_1) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} - N = 0 \quad (4)$$

12. Визначені зусилля N , кривизну \aleph та висоту стиснутої зони x_1 підставляють у рівняння рівноваги (5),

$$\frac{R_b b}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{bR}} \right)^{k+2} + \frac{b}{2} \psi_{bt} R_{bt} (h - x_1)^2 + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0 \quad (5)$$

– У рівнянні (5) $M = Ne$ а величина $e = \eta(x_1 - y + e_0)$, де y – відстань від найбільш стиснутої грані до центра ваги перерізу; η – коефіцієнт, який враховує гнучкість стиснутого елемента.

Аналогічно рішенням пп. 5-8, розрахунки рівняння (5) повторюють доти, доки не буде досягнута достатня точність. Достатньою точністю розв'язку рівняння (5) слід вважати значення зменшення деформацій:

$$\Delta \varepsilon_{b2} = -0,02 \varepsilon_{bu}.$$

Таким чином, буде отримана перша точка на діаграмі стану перерізу.

13. Для отримання наступних точок діаграми стану перерізу необхідно збільшити деформації на більш стиснутій грані, тобто

$$\varepsilon_{b1}^{(k)} = \varepsilon_{b1}^{(k-1)} + \Delta \varepsilon_{b1},$$

і виконати дії відповідно до п.п. 9-13, зберігаючи на першій ітерації величину деформації на розтягнутій грані, яка отримана на попередньому кроці розрахунку.

Як правило, при значенні $\Delta \varepsilon_{b1} = 0,1 \varepsilon_{bu}$ отримують результати з достатньою точністю, але якщо необхідно отримати результати з більшою точністю, можна використати дрібніші значення $\Delta \varepsilon_{b1}$. У будь-якому разі при значеннях $\Delta \varepsilon_{b1} < 0,05 \varepsilon_{bu}$, точність розв'язку практично не покращується.

14. Величина N , яка відповідає максимуму на діаграмі стану перерізу “ $N - \varepsilon_{b1}$ ” або величині при досягненні деформаціями стиснутої грані своїх граничних деформацій ε_{bu} і буде величиною несучої здатності залізобетонного перерізу при даних значеннях параметрів бетону та арматури, гнучкості та ексцентриситету прикладення навантаження.

При необхідності величина моменту, який при цьому сприймається перерізом, в загально прийнятій системі координат може бути отримана за формулою

$$M = Ne_0. \quad (6)$$

Тут наведено найпростіший метод розв'язання системи нелінійних рівнянь підбором – методом послідовних наближень, але можна використати й

інші методи, наприклад, метод половинного ділення; все залежить від того, кому що більше подобається.

Наведений алгоритм та формули для різної форми перерізів (прямокутного, таврового, двотаврового, круглого та кільцевого) реалізовані в прикладних програмах для персонального комп'ютера. Останнє дозволяє не тільки виконувати розрахунки реальних конструкцій, а й досліджувати поведінку залізобетонних елементів при різних впливах.

Висновок. Запропоновано простий метод оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів, який базується на деформаційній моделі та реальних діаграмах деформування матеріалів.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Бамбура А.Н. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона. / А.Н. Бамбура, В.Я. Бачинский и др. – К.: НИИСК, 1987 - 25 с.
2. Бачинский В.Я. О потере устойчивости деформирования изгибаемого бруса// Республиканский межведомств. Науч.-техн. сб. Строительные конструкции.- К.: Будівельник, 1982.-Вып. 35.
3. Бамбура А.М. До аналітичного описання діаграми механічного стану бетону при одноразовому короткочасному деформуванні. / А.М. Бамбура. // Міжвід. наук.-техн. зб. Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2002 – Вып. 57. - С. 31-34.
4. Бамбура А.Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе. / А.Н. Бамбура, А.Б. Гурковский. // Міжвід. наук.-техн. зб. Будівельні конструкції. - К.:НДІБК, 2003. - № 59. - С. 121-130.

УДК 624.072.2

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ, ЖОРСТКІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПІДСИЛЕНИХ НАКЛЕЮВАННЯМ ЗОВНІШНЬОГО АРМУВАННЯ

д.т.н., с.н.с. Бамбура А.М., к.т.н. Перлова О.М.

*Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій», м. Київ, Україна*

Чинні в Україні норми з проектування та розрахунку залізобетонних конструкцій не враховують складний напружено-деформований стан в елементах із змішаним армуванням і, тим більше, зовнішньої арматури підсилення, що вводиться до складу конструкції, коли та вже мала певну історію існування. Ця проблема загострюється тим, що в останній час для посилення залізобетонних конструкцій все частіше використовується неметалеве армування (вуглепластик, базальтопластик та інш.). За відсутності відповідних методів розрахунку, проектування посилення здійснюється, зазвичай, лише на основі набутого досвіду.

На протязі останніх років в ДП НДІБК були проведені експериментально-теоретичні дослідження, які направлені на створення методів розрахунку конструкцій зі змішаним армуванням, в тому числі підсилених наклеюванням зовнішнього армування, які базуються на використанні повних діаграм деформування матеріалів [1,2].

У зазначених експериментах досліджувалась зона чистого згину ненапружених балок прольотом 2100 мм, перерізом 100×200 мм.

Для рішення основної задачі – дослідження несучої здатності та деформативності згинаних залізобетонних елементів зі змішаним армуванням при короткочасній дії навантаження, були розглянуті три варіанти зовнішнього армування:

1) наклеювання на розтягнуту грань балки металевої смуги ($L=2000$ мм, $b=50$ мм, $\delta=3$ мм) – серія БМП;

2) наклеювання на розтягнуту грань балки металевої смуги, яку додатково укріплювали з двох сторін за допомогою 4-х анкерів, вкеслених у висвердлені отвори у балці, з кроком 50 мм на відстані 20 мм від торця пластины – серія БМА;

3) підсилення балки за допомогою наклеювання в ряд 5-ти смуг з базальтопластикової арматури – серія ББП. Крім того, для додаткового укріплення смуг, припорна частина балки обклеювалась базальтовим полотном, завширшки 300-350 мм, просоченим епоксидним клеєм.

Дослідження балок усіх серій відбувалось на 14 добу після підсилення.

Контрольні балки (серія ББУ) досліджувались в один етап. При цьому була визначена середня по серії несуча здатність, значення згинального моменту, що відповідав початку руйнування зразка, відповідні значення деформацій на стиснутій та розтягнутій гранях та прогини.

Балки серії БМП, БМА, ББП досліджувались у два етапи. На першому етапі, балки навантажувались зусиллям 0,65...0,7 від середнього руйнівного зусилля, отриманого по контрольній серії. Після цього балки повністю розвантажувались, витримувались без навантаження мінімум 14 діб, потім підсилювались. При цьому фіксувались показання приладів через годину та в подальшому один раз за добу після зняття навантаження, з метою визначення залишкових деформацій.

Оцінка результатів випробувань основних зразків-балок виконувалась шляхом порівнювання їх несучої здатності до та після підсилення, а також при аналізі характеру руйнування зразків (див. табл. 1.).

Встановлено, що руйнування усіх дослідних балок серій БМА та ББП після їх підсилення відбулося по нормальним перерізам, внаслідок роздроблення бетону стиснутої зони після початку текучості металевої арматури. При цьому, металева смуга з анкерами та базальтові полоси