

7. Магнушев А. Н., Крылов С. М. Влияние марки бетона и насыщения арматурой на способность статически неопределимых балок к перераспределению усилий // Трещиностойкость и деформативность обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций / Под ред. А.А. Гвоздева. – М.: Стройиздат, 1965. – С. 94 – 136.

УДК 624.01

ЗАЛІЗОБЕТОННІ ЕЛЕМЕНТИ З АВТОМАТИЧНО РЕГУЛЬОВАНИМ ОБТИСКАННЯМ

М.Г.ЧЕКАНОВИЧ – к.т.н., доцент, Херсонський ДАУ

Для попередньо напружених залізобетонних конструкцій залишається актуальною проблема обґрунтованого призначення величини попереднього обтискання, місця і часу його прикладання [1]. Від параметрів обтискання залежать основні властивості конструкцій – тріщиностійкість, довговічність, а за певних умов і міцність.

Відомі теорії міцності, що базуються на енергетичних принципах, виходять з того, що коли зовнішнє навантаження на конструкцію виконає певну роботу по її руйнуванню, то міцність конструкції буде вичерпаною. Четверта теорія міцності приймає за критерій величину роботи, що чисельно дорівнює потенційній енергії формозміни [2]. Проте, за даними роботи [3], в бетоні викликають дилатацію як дотичні, так і середні напруження. Кульовий тензор і інваріанти девіатора напруження призводять до зміни форми. Тому нами розглядається можливість прийняття повної питомої роботи як один з критеріїв міцності бетону. Для граничного стану матеріалу одержана формула повної питомої роботи:

$$a = K_1 I_1 + K_2 \left[2I_2 - \frac{1}{4} (\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yx}^2 + \varepsilon_{yz}^2) \right] + K_3 \left[3I_3 + \frac{3}{4} \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xz} \varepsilon_{yz} - \frac{1}{2} (\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{yy} \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy}^2) \right] \quad (1)$$

де $K_i = \frac{\partial a}{\partial I_i}$ є константами. Константи можуть бути визначені

за результатами випробувань при одновісному напруженому стані по формулам [4]:

$$K_1 = \sigma \frac{\varepsilon^2}{(\varepsilon - \varepsilon_2)^2}; \quad K_2 = -\sigma \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - \varepsilon_2)^2}; \quad K_3 = \sigma \frac{1}{(\varepsilon - \varepsilon_2)^2}$$

Тут σ і ε – нормальні напруження і деформації, ε_2 – поперечні деформації.

В формулі (1) символами I_1, I_2 і I_3 позначені перший, другий і третій інваріанти тензора деформацій.

Робота конструкції W , як відомо, залежить від величини і розміщення сил, накладених на неї. До таких сил відноситься і сила попереднього обтискання N . Вона залежить від втрат попереднього напруження, викликаних пластичними деформаціями. Тому слід прагнути, аби ці деформації були якомога меншими. Звідси можна зробити висновок, що силу попереднього обтискання слід прикладати вздовж лінії найменших деформацій, а саме вздовж нейтральної лінії. Справді, коли $\frac{\partial W}{\partial N} = \Delta$, (2)

де $\Delta = 0$, а другі похідні функції завжди додатні, то маємо екстремум, який є мінімумом функції роботи. Отже, сила обтискання, прикладена вздовж нейтральної лінії, виконує найменшу роботу над конструкцією, найменше її навантажує і руйнує.

Потенційні можливості досягнення високої міцності й довговічності властиві залізобетонним конструкціям, що працюють повним перерізом без тріщин. Найчастіше такі тріщини утворюються в розтягненій зоні бетону, так як його міцність на розтягання в 15...20 разів менша ніж на стиск. Тому слід призначати величину сили обтискання таку, при якій нейтральний шар в конструкції зміщується від приведенного центру ваги перерізу до розтягнутої зони настільки, що в ній не утворюються тріщини, і бетон працює повним перерізом. Тобто деформації розтягання в такій конструкції не повинні перевищувати величину, що відповідає межі міцності розтягнутого бетону: $\varepsilon \leq \varepsilon_{bt}$.

Розглянемо звичайну залізобетонну балку, що працює на вигин. Прийmemo для невисокої балки справедливою гіпотезу плоских перерізів. Геометрично перетин прямого відрізка епюри деформацій з нульовою вертикаллю є місцем розташування нейтрального шару. Для граничного стану він знаходиться на відстані від стисненої фібри перерізу:

$$h_b = \frac{\varepsilon_{bu} h}{\varepsilon_{bu} + \varepsilon_{btu}} \quad (3)$$

де h – висота перерізу, а ϵ_{bu} і ϵ_{btu} – граничні відносні деформації стискання і розтягання бетону. Ці величини відомі для прийнятого класу бетону, а отже місце розташування нейтрального шару i , відповідно, місце прикладання сили обтискання може бути визначено.

Для обтисненого бетону каркасної, матрично–каркасної структури модулі деформацій при стисканні і розтяганні відрізняються. Це пояснюється тим, що при стисканні такий бетон руйнується з розколюванням зерен міцного заповнювача, а при розтяганні лише з відривом від нього розчину, або по розчину. Тому в загальному випадку рівняння рівноваги повинні враховувати різний характер діаграм при стисканні і розтяганні бетону:

$$\int_A \sigma dA - \int_A \sigma_{bt} dA_{bt} + \sum \sigma_{si} A_{si} = N \quad (4)$$

$$\int_A h \sigma dA + \int_A h_{bt} \sigma_{bt} dA_{bt} + \sum h_{si} \sigma_{si} A_{si} = M \quad (5)$$

Для згинального елемента прямокутного перерізу матимемо:

$$b\rho \left[\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon - \int_0^{\epsilon_{bt}} \sigma_{bt} d\epsilon \right] + \sum \sigma_{si} A_{si} = N \quad (6)$$

$$b\rho^2 \left[\int_0^{\epsilon} \epsilon \sigma d\epsilon + \int_0^{\epsilon_{bt}} \epsilon_b + \sigma_b + d\epsilon \right] + \sum h_{si} \sigma_{si} A_{si} = M \quad (7)$$

Відомо, що питома робота руйнування для прийнятого одно-вісного напруженого стану визначається:

$$a = \int_0^{\epsilon_i} \sigma d\epsilon$$

Тоді, застосувавши правило інтегрування за частинами, коли нижня межа інтегрування дорівнює нулю, а також, врахувавши вираз для питомої роботи арматурної сталі, одержимо:

$$b\rho [a_b - a_{bt}] + \sum \frac{A_{si}}{\epsilon_{si}} a_{si} = N \quad (8)$$

$$b\rho^2 \left[\epsilon_b a_b - \int a_b d\epsilon + \epsilon_{bt} a_{bt} - \int a_{bt} d\epsilon \right] + \sum \frac{A_{si}}{\epsilon_{si}} h_{si} a_{si} = M \quad (9)$$

За багаточисельними експериментальними даними випробувань згинальних залізобетонних елементів відомо, що їх руйнування супроводжується руйнуванням бетону стиснутої зони перерізу. Тому для вказаних елементів можна прийняти умову руйнування:

$$a \leq [a]$$

Граничні значення питомої роботи для поширених класів бетонів подані на рис. 1.

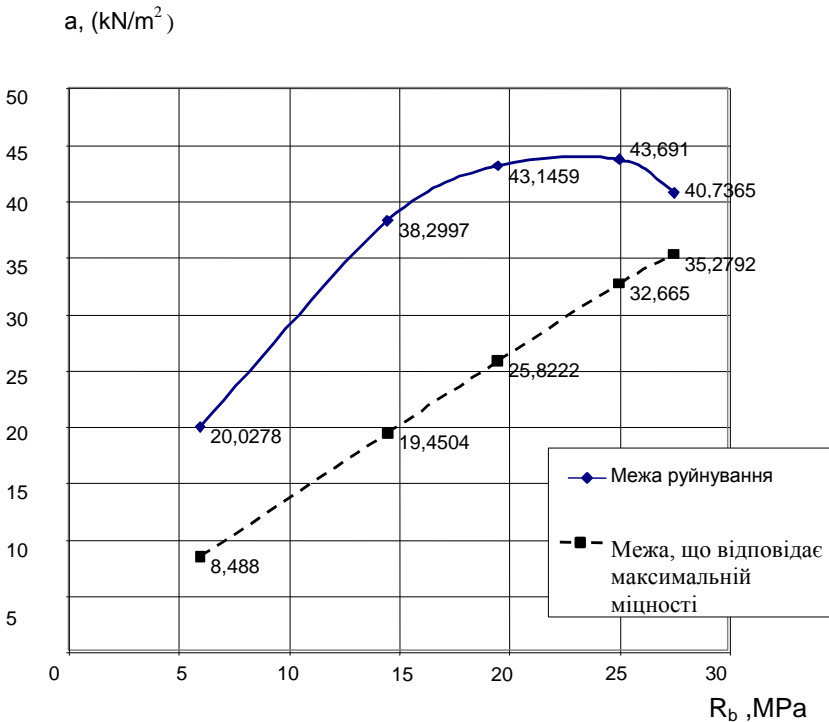


Рисунок 1. Граничні величини питомої роботи бетону.

Слід підкреслити, що наведена питома робота руйнування тут є повною роботою.

Підтримувати запропонований вище напружено-деформований стан конструкції неможливо при наявності повного зчеплення бетону й арматури, тобто за однакових їх деформацій. При розтяганні бетон втрачає свою цілісність при деформаціях розтягання в 400-500 раз менших, ніж розміщена в ньому арматурна сталь. Звідси і виходить вимушеність проектування звичайних конструкцій з тріщинами в бетоні, необхідність надання арматурі попереднього напруження.

Автором запропоновано застосувати авторегулювання напруженого стану конструкції при роздільній роботі арматури і бетону та

використати силу натягу арматури для довготривалого пресування бетонної суміші. За цієї умови втрати напруження в арматурі можуть компенсуватися автоматично.

Авторегулювання напружено-деформованого стану залізобетонної конструкції може здійснюватися за показаною на рис.2 схемою. Система авторегулювання включає рецепторний, керуючий і виконавчий блоки. Рецепторний блок знімає тензометричні дані про деформований стан конструкції і передає їх на керуючий системний блок. Тут електронно-обчислювальна машина обробляє дані, що надходять з рецепторного блоку, визначає напружений стан за попередньо створеною програмною моделлю конструкції і оптимізує величину обтискання бетону та відповідного напруження арматури. Команда передається на виконавчий блок, який безпосередньо здійснює регулювання величини обтискання конструкції. Результат оцінюється і контролюється керуючим блоком. Напружено-деформований стан конструкції при необхідності корегується. Так відбувається постійно на всіх ступенях навантаження і розвантаження конструкції в період її експлуатації.

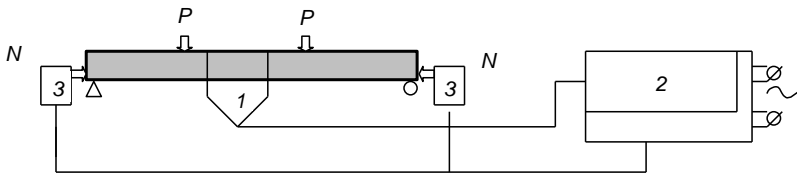
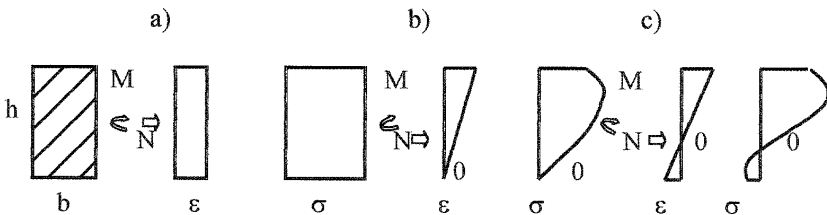


Рисунок.2. 1 – рецепторний, 2 – керуючий і 3 – виконавчий блоки. Схема авторегулювання напруженого стану балки

Повне авторегулювання вимагає високої швидкодії всіх ланок системи, надійності її в роботі, постійного постачання енергії і є досить складним в експлуатації. Відмова ЕОМ, порушення електронних зв'язків може призвести до небезпечних ситуацій, аварій. В зв'язку з цим була розроблена надійна одноланкова система авторегулювання. Вона включає тільки виконавчий блок. Дійсно, коли відома конструкція, схема її навантаження, то моделювання роботи її під зовнішнім навантаженням не складає особливих труднощів і виконується на стадії проектування. Особливістю розробленої системи є те, що вона не потребує зовнішньої енергії для своєї роботи. При проектуванні конструкції пропонується додатково враховувати принцип найменшої роботи а і умову недопущення утворення тріщин.

Для прикладу розглянемо жорстку балку з авторегульованим напруженням арматури, що завантажена двома зосередженими

силами P , як це зображено на рисунку 2. Балка прямокутного перерізу розмірами $b \times h$ виконана з обтисненого бетону міцністю $R_b=20 \text{ MPa}$ і армована напружуваною м'якою арматурною сталлю класу А-II (рис. 2). Характерні діаграми " $\sigma - \varepsilon$ " матеріалів подані на рис.3. Напружений стан балки регулюється величиною обтискання N . Розглянемо можливі варіанти рівноваги перерізу, а саме випадки повного використання міцності бетону перерізу при центральному стиску, часткового використання міцності бетону на стискання без його розтягання в перерізі і часткового стискання та розтягання бетону в перерізі без утворення тріщин (рис. 3).



а) повне використання міцності бетону на стиск; б) часткове – на стиск; в) часткове – на стиск і розтягання

Рисунок 3. Поперечний переріз і епюри деформацій та напружень.

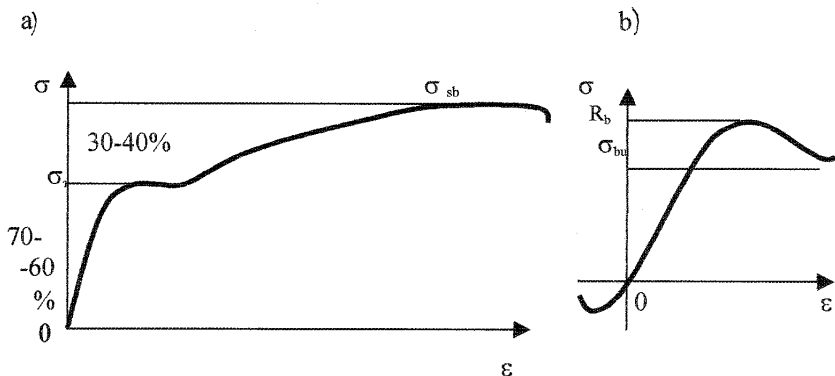


Рисунок 4. а)- для м'якої арматурної сталі, б)- для бетону Характерні діаграми напруження-деформації

Результати визначення міцності авторегульовано напружених балок вміщені в таблицю. Там же для порівняння наведені дані для

традиційної залізобетонної балки, що має тріщини в бетоні розтягнутої зони. В традиційних балках ми не можемо перевищити величину напруження текучості σ_T сталі. В авторегульовано напружених балках величина обтискання не залежить безпосередньо від деформацій бетону. Тут є можливість підвищити ефективність використання властивостей міцності арматурної сталі на 30-40 відсотків (рис.4) і наблизитися до величини напруження σ_{sb} .

За умови рівноваги $\sum N=0$ повне використання міцності бетонного перерізу за варіантом а) вимагає чотирьох відсотків сталевий арматури прийнятого класу, за варіантом б) – менше трьох, а за варіантом с)- біля двох з половиною відсотків.

Таблиця 1 - Результати визначення міцності

N п/п	Назва балки	Варіант напруженого стану за рисунком 2	μ %	Відносна міцність K, %	Ефективність армування K/μ
1	Авторегульовано напружена	а)	4,00	190	47,5
2	Авторегульовано напружена	б)	2,76	164	59,4
3	Авторегульовано напружена	с)	2,47	159	64,5
4	Традиційна	з тріщинами	2,47	100	40,5

Для традиційної балки прийнято армування однакове з останнім варіантом авторегульовано напруженої балки.

Як впливає з таблиці, не збільшуючи переріз балки, можна значно підвищити її міцність завдяки авторегулюванню зусилля обтискання. При цьому найбільш ефективним використанням властивостей міцності арматурної сталі відрізняється варіант с), де допускається розтягнута зона бетонного перерізу. Пояснюється це тим, що серед розглянутих варіантів авторегульовано напружених балок останній має найбільше плече внутрішньої пари сил. В варіанті с) авторегулювання напруження дозволило підвищити міцність балки на половину порівняно з традиційною балкою і не допустити утворення тріщин.

Підсумовуючи, сформулюємо запропоновані додаткові принципи проектування обтиснених залізобетонних елементів.

1. Силу обтискання доцільно використовувати для довготривалого пресування свіжоукладеної бетонної суміші з метою ущільнення і зміцнення бетону в конструкції.

2. Сила обтискання, прикладена вздовж нейтрального шару готової конструкції, виконує над нею найменшу роботу, найменше навантажує її і руйнує.

3. Величина сили обтискання надається така, при якій нейтральний шар конструкції зміщується від центру ваги до розтягнутої зони настільки, що в бетоні не утворюються тріщини, і конструкція працює повним перерізом.

4. Роздільність деформацій бетону і арматури забезпечує можливість ефективного використання властивостей міцності матеріалів.

5. Модуль деформації обтисненого бетону матрично-каркасної структури при стисканні більший за величиною ніж при розтяганні.

6. Міцність лінійних згинальних елементів можна оцінити за величиною повної питомої роботи стиснутого бетону.

7. Оптимальна величина сили обтискання змінна в часі і повинна регулюватися.

Розроблена система авторегулювання напруженого стану залізобетонної конструкції дозволяє втілити всі вищенаведені принципи проектування у будівельну практику, підвищити ефективність використання енергії обтискання для досягнення високої тріщиностійкості, жорсткості і міцності конструкції та забезпечує її надійну роботу на всіх стадіях навантаження залізобетону.

Література:

1. Леонгардт Ф. Предварительно предварительно напряженный железобетон. М., Стройиздат, 1983.-246 с.
2. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. К.,Вища шк., 1993. С. 183-185
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.Стройиздат, 1996. -328 с.
4. Лукаш П.А.Основы нелинейной строительной механики. М.,Стройиздат, 1978, с.36.