

**ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ЕКСТРЕМАЛЬНОГО КРИТЕРІЮ МІЦНОСТІ НА ОСНОВІ
ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

О.А.Шкурупій, к.т.н., доцент

*Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка, Україна*

Вступ. На сьогодні одним із головних завдань при проектуванні ЗБК є уточнення існуючих та розроблення нових методик розрахунку, в тому числі й на основі деформаційної методики (ДМ), що запропоновано і в нових нормативних документах [1, 2, 9].

Використання ДМ дає можливість досить точно врахувати напружено-деформований стан (НДС) на різних стадіях роботи ЗБК, у тому числі й у граничному стані. Як відмічено в роботах [3 – 5], ДМ з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ) має значні переваги над існуючими ДМ з емпіричним критерієм [1, 2, 9], особливо для розрахунку статично невизначуваних ЗБК, а також є суттєво новим підходом щодо розрахунку їх міцності та несучої здатності. Нерозрізні балки досить широко застосовуються в різних будівлях та спорудах як несучі конструкції, тому дослідження їх роботи з урахуванням високоміцних бетонів і вдосконалення методики розрахунку таких конструкцій є важливим питанням.

Аналіз публікацій. ДМ з ЕКМ обумовлює необхідність ретельного контролю значень усіх граничних параметрів НДС елементів ЗБК, особливо напруження в розтягнутій та стиснутій арматурі, оскільки їх розрахункові залежності суттєво різняться в діапазонах пружної та непружної роботи перш за все в переармованих конструкціях, а обмежений контроль параметрів НДС може призвести до результатів, які не відповідають дійсності. На основі розробленої оптимізаційної методики [4, 5] можна розв'язувати широке коло задач при розрахунку ЗБК (балок, колон, рам тощо) із застосуванням широкого спектра класів бетону, в тому числі й високоміцних [6]. Проведення теоретичних і експериментальних досліджень для вивчення роботи нерозрізних балок з урахуванням перерозподілу зусиль (при утворенні в характерних перерізах умовних пластичних шарнірів [7]) і визначення граничних значень згинальних моментів та граничного навантаження з використан-

ням методу граничної рівноваги [8] є актуальним завданням. Розрахунок несучої здатності ЗБК і їх елементів на основі ДМ присвячено низку літературних джерел [4, 5, 6, 9, 10, 11 та ін.]. Зокрема, більш детально розрахунок несучої здатності ЗБЕ на основі ДМ з ЕКМ приділено увагу в роботах [3, 4, 5].

Метою роботи є визначення граничного навантаження нерозрізних залізобетонних балок на основі ДМ з ЕКМ при різних класах бетонів стержневої арматури та процентах армування, звантажених зосередженими силами в прогонах, і порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними, одержаними автором та наведеними в роботах інших дослідників.

Основний матеріал і результати. Теоретичні дослідження обмежувались задачею розрахунку несучої здатності залізобетонних нерозрізних балок із застосуванням ДМ з ЕКМ, оптимізаційних і чисельних методів [4, 5] та методу граничної рівноваги [8]. Розрахункові положення та фізичні залежності наведено в роботах [4, 5, 6]. Стан руйнування нормального перерізу описується розрахунковими схемами зусиль і деформацій, що наведені на рис. 1 [13].

За методикою, наведеною в роботах [4, 5, 12], виконані аналітичні розрахунки несучої здатності та визначення граничного навантаження нерозрізних залізобетонних балок із високоміцних бетонів з використанням чисельних і оптимізаційних методів та методу граничної рівноваги. Алгоритм розрахунку таких конструкцій за цією методикою реалізований у спеціально розробленому програмному комплексі для ПЕОМ на базі операційної системи Windows (рис. 1).

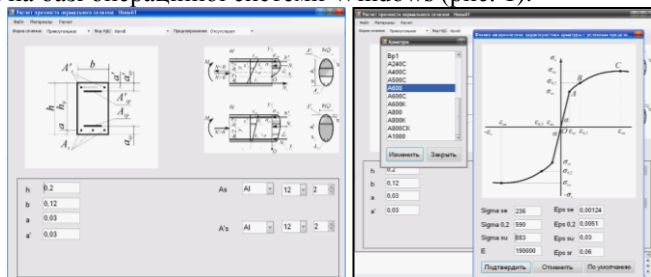


Рис. 1. Програмний комплекс CRC – 12

Експериментальні зразки за довжиною були прямокутної форми перерізу, а їх довжина дорівнювала 4000 мм. Висота та ширина їх були постійними й дорівнювали 180×120 мм. Усі експериментальні балки мали співвідношення довжини прольоту ℓ до висоти перерізу h більше 10 (рис. 3 і 4). Ця умова дає можливість нехтувати впливом поперечних сил при розрахунку їх несучої здатності. Усього випробувалось

18 зразків. Зосереджені сили прикладалися посередині прольотів – $a = b = \ell/2$ (рис. 2 і 3). Армування експериментальних балок було постійним по довжині й виконувалося поздовжніми арматурними стержнями класу А400С діаметром 12 та 14 мм, а також звареними хомутами з арматури класу А240С діаметром 6,5 мм із кроком 50 мм в опорних зонах для запобігання виникненню похилих тріщин та з кроком 100 мм посередині прольоту.

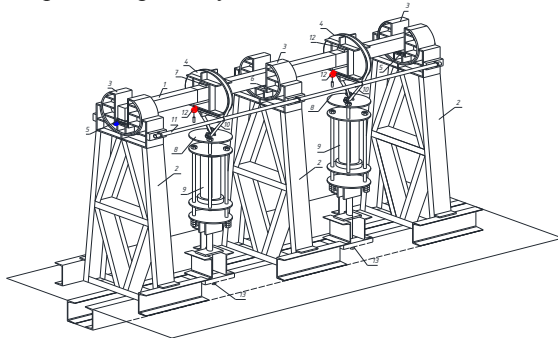


Рис. 2. Схема установки та розміщення вимірювальних приладів: 1) дослідна балка; 2) опорна рама; 3) опорне кільце; 4) завантажувальне кільце; 5) силовий динамометр; 6) шарнірно нерухома опора; 7) шарнір для передачі навантаження на балку; 8) перетворювач сил стиску в сили розтягу; 9) гідравлічний домкрат; 10) металевий трос; 11) штанга для закріплення приладів; 12) прогиномір; 13) анкери силової підлоги



Рис. 3. Характер розвитку тріщин та руйнування балок

Отримані результати розрахунків порівняно з експериментальними даними, одержаними особисто автором [13] та іншими дослідниками [14, 15, 16]. Результати експериментальних досліджень нерозрізних залізобетонних балок, виготовлених із високоміцних бетонів різних класів міцності на стиск, дали можливість отримати нові дані про їх міцність, деформативність та несучу здатність, а також проаналізувати одержані значення граничної деформації бетону стиснутої зони таких конструкцій у характерних нормальних перерізах (див. табл. 1 [13]). Характер розвитку тріщин та руйнування експериментальних зразків наведено на рис. 3.

Зіставлення теоретичних розрахунків несучої здатності таких балок з експериментальними даними, отриманими автором, та їх статистична

обробка наведено в таблиці 2 [13]. Геометричні та механічні характеристики експериментальних зразків нерозрізних балок, що випробувались автором, подано в таблиці 3 [13]).

За розробленою методикою розрахунку нерозрізних залізобетонних балок на основі ЕКМ наведеною в роботі [12] виконано також розрахунки визначення граничного навантаження аналогічних конструкцій. Результати розрахунків зіставлені з експериментальними даними інших дослідників [14, 15, 16] і наведено в таблицях 1 і 2.

У роботах [14, 15] використовувалися балки з $\ell = 2,7\text{ м}$, які були армовані поздовжніми високоміцними стержнями класу А-IV марки 80С з умовною межею текучості. У роботі [16] балки мали прольоти по 3 м з розмірами поперечного перерізу $b \times h = 170 \times 220\text{ мм}$. Як поздовжня арматура використовувалися арматурні стержні класу А-III (марки 35ГС) з мінімальним значенням межі текучості $\sigma_y = 400\text{ МПа}$. Призмове міцність бетону для балок цієї серії становила $f_{ck,prizm} = 29,2\text{ МПа}$, а початковий модуль пружності – $E_{cm} = 30,4\text{ ГПа}$. Розрахункова схема балок, дані про які наведені в роботах [14, 15, 16], зображена на рис. 4, де m – коефіцієнт співвідношення між зосередженими силами. В експериментальних зразках, дані про які наведено в роботах [14, 15], $a = 1,8\text{ м}$, $d = 0,9\text{ м}$, $m = 1$. У роботі [16] для балок різних серій $a = d = 1,5\text{ м}$, $m = 1,45 - 1,49$. Значення граничних згинальних моментів у прольотах і на опорі (рис. 4) обчислені за методикою ДМ з ЕКМ з використанням розробленої автором прикладної програми (рис.1). Ураховуючи схему розташування навантаження і виходячи з рівності балочних моментів, значення теоретичних граничних навантажень обчислювали з використанням методу граничної рівноваги.

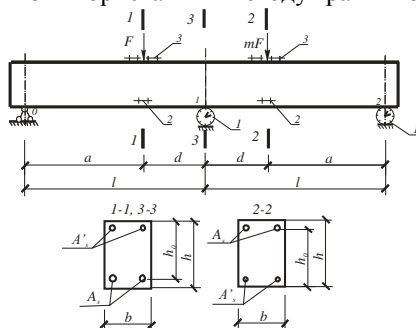


Рис. 4. Розрахункова схема, характер армування і схема розташування вимірвальних приладів і розрахункових перерізів балок: 1 – кільцевий динамометр; 2 – тензомер для арматури (база 100 мм); 3 – тензомер для бетону (база 100 мм)

Таблиця 1. - Зіставлення експериментальних і теоретичних значень граничних згинальних моментів та навантажень за даними, наведеними в роботах [14, 15]

№ серії	Шифр зразка	Опорний		$\frac{M_{exp}}{M_{theor}}$	Прольотний		$\frac{M_{exp}}{M_{theor}}$	$\frac{M_{exp}}{M_{theor}}$	F_{exp}	F_{theor}	$\frac{F_{exp}}{F_{theor}}$
		M_{exp}	M_{theor}		M_{exp}	M_{theor}					
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	БОИ-1А	47,1	36,74	1,28	34,6	36,42	0,95	110,5	101,7	1,09	
	БОИ-1Б	42,8	36,11	1,19	38,7	37,88	1,02	112	103,5	1,08	
	БОИ-2А	41,1	32,02	1,28	31,5	31,53	1,00	100	88,31	1,13	
	БОИ-2Б	40,6	31,6	1,28	34,5	33,21	1,04	103,1	90,63	1,14	
II	БВИ-3А	59	51,08	1,15	51	51,64	0,99	150,6	143,1	1,05	
	БВИ-3Б	60,3	51,28	1,18	49	52,4	0,94	148,7	144,6	1,03	
	БВИ-4А	35,4	30,56	1,16	30,9	30,96	1,00	93,7	85,73	1,09	
	БВИ-4Б	33	30,64	1,08	29,3	32,19	0,91	88,3	87,86	1,00	
III	БВУ-5А	54,5	44,14	1,23	41	46,02	0,89	136	126	1,08	
Середньорифметичне значення											
Середньоквадратичне відхилення											
Коефіцієнт варіації %											
										0,039	
										3,61	

Таблиця 2. Зіставлення теоретичних і експериментальних значень граничних навантажень за даними, наведеними в роботі [16]

Серія експериментальних балок [15]	Експериментальні значення граничного навантаження, кН		Розрахункові значення граничного навантаження, кН		$\frac{F_{u1,exp}}{F_{u1,theor}}$
	$F_{u1,exp}$	$F_{u2,exp}$	$F_{u1,theor}$	$F_{u2,theor}$	
Б-4	46,87	68,14	49,00	67,47	0,96
Б-5	66,37	98,60	64,36	82,83	1,03

Висновки

1. Виконані експериментально-теоретичні дослідження нерозрізних залізобетонних балок при різних класах бетону, включаючи і високоміцні, дозволили зробити достовірну комплексну, якісну та кількісну оцінку впливу конструктивних чинників та факторів зовнішнього впливу на їх несучу здатність, перерозподіл зусиль і визначення граничного навантаження.

2. Установлено, що запропонована інженерна методика на основі ЕКМ з достатньою точністю дозволяє в сукупності з чисельними та оптимізаційними методами аналізувати повний комплекс граничних параметрів нормальних перерізів ЗБК у стадії їх руйнування, дає можливість обчислити значення згинальних моментів у перерізах, де утворюються умовні пластичні шарніри, та з використанням методу граничної рівноваги враховувати перерозподіл зусиль і визначати граничні навантаження.

3. Оцінка достовірності одержаних результатів за розробленою інженерною методикою на основі деформаційної методики з екстремальним критерієм міцності, за результатами методів математичної статистики для зіставлення співвідношень експериментальних і теоретичних даних свідчить про їх хорошу збіжність.

Summary

Theoretical calculations determining the breaking load of reinforced concrete beams based on a continuous deformation techniques with extreme strength criterion, optimization and numerical methods and limit equilibrium method have been made. Their experimental study have been conducted. The results of the theoretic calculations given below for such structures are compared with the experimental data obtained by the author and cited in other researchers' works.

Література

1. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. – [Чинний від 01.06.2011]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 72 с.
2. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону / К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 168 с.
3. Митрофанов, В.П. Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности железобетонных элементов / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Архитектура и технические науки. Вып. 60. – К.: Техника, 2004. – С. 29 – 48.
4. Шкурупій, О.А. Міцність залізобетонних конструкцій та їх елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 74: в 2-х кн.: Книга 1. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 605–614.
5. Шкурупій, О.А. Використання чисельних і оптимізаційних методів для розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев // Коммунальное хозяйство городов: сб. науч. тр. – Вып. 76. – К.: Техника, 2007. – С. 71–79.
6. Шкурупій, О.А. Аналітичне визначення фізико-механічних характеристик бетону / О.А. Шкурупій, Є.М. Бабич // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 21. – С. 401–407.
7. Тихий, М. Расчёт железобетонных конструкций в пластической стадии / М. Тихий, Й. Ракосник // Перераспределение усилий; пер. с чешск. – М.: Стройиздат, 1976. – 198 с.
8. Гвоздев, А.А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А.А. Гвоздев // Сущность метода и его обоснование. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.
9. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
10. Бамбура, А.Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе / А.Н.Бамбура, А.Б. Гурковский // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: ДП НДІБК, 2003. – Вип. 59. – С. 121–130.
11. Основні положення розрахунку несучої здатності бетонних та залізобетонних конструкцій за національним нормативним документом

ДБН В.2.6 – 98: 2009 / А.М. Бамбура, Ю.І. Немчинов, О.Б. Гурківський, М.С. Безбожна, О.В. Дорогова // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 73. – К.: ДП НДІБК, 2010. – С. 724–736.

12. Шкурупий, А.А. Расчет несущей способности неразрезных железобетонных балок с использованием деформационной модели с экстремальным критерием прочности / А.А. Шкурупий, Е.Н. Лазарева // Технические науки: теоретические и прикладные аспекты: материалы Международной заочной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2012. – С. 143–153.

13. Шкурупій О.А. Експериментальні та теоретичні дослідження несучої здатності нерозрізних залізобетонних балок / О.А. Шкурупій // Серія “Галузеве машинобудування, будівництво”: збірник наукових праць. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 4(39), Том 1. – С. 285–294.

14. Крылов, С.М. Несущая способность статически неопределимых железобетонных балок из бетонов прочностью до 90 МПа, армированных высокопрочной стержневой арматурой / С.М. Крылов, Ю.П. Гуца, М.С. Абаканов // Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности / под ред. А.А. Гвоздева, С.М. Крылова. – М.: НИИЖБ, 1980. – С. 102–119.

15. Крылов, С.М. Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях, армированных сталью без площадки текучести / С.М. Крылов, Ю.П. Гуца, М.С. Абаканов // Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1979. – С. 171–186.

16. Оатул, А.А. Исследование естественного распределения усилий в неразрезных железобетонных балках с ненапрягаемой арматурой при длительном действии эксплуатационной нагрузки / А.А. Оатул, В.П. Чирков // Исследования по бетону и железобетону: сборник трудов № 34 Челябинского политехнического института. – Челябинск: ЧОТУП, 1965. – С. 116–135.