

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ

Наведено результати експериментальних досліджень міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів. Установлено вплив застосування високоміцних бетонів на граничну деформацію найбільш стиснутої грані бетону ε_{bu} й міцність стиснутих залізобетонних елементів. Виконано порівняльний аналіз експериментальних даних із теоретичними розрахунками на основі деформаційної моделі з екстремальним критерієм міцності.

Ключові слова: залізобетонний елемент, гранична деформація бетону, деформаційна модель, критерій міцності.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Тенденція масового застосування у світовій будівельній практиці бетонів із високими експлуатаційними та технологічними властивостями, які прийнято позначати терміном High Performance Concrete [5, 6], стає очевидною й необоротною. Викликана вона зростаючою потребою суспільства в унікальних та надійних інженерних будівлях і спорудах із застосуванням високоміцних бетонів (ВМБ). Для таких бетонів характерні висока й надвисока міцність, низька проникність, підвищена корозійна стійкість і довговічність, поліпшені деформаційні характеристики. Залізобетонні конструкції з високоміцних бетонів широко використовуються за кордоном, та вже розроблені для їх застосування нормативні документи [1]. Важливою особливістю є те, що зазначені властивості досягаються із застосуванням високорухомих сумішей, а іноді й таких, що самоущільнюються. Норми [7] не враховують наявності високоміцних бетонів.

Зараз у країнах колишнього СРСР відбувається процес гармонізації нормативних документів для проектування бетонних і залізобетонних конструкцій та їх елементів з єврономами [1] (Єврокодом 2), в якому враховуються класи міцності бетону в діапазоні від $C 12/15$ до $C 90/105$. У діючих в Україні нормах і правилах для проектування залізобетонних конструкцій із важких та дрібнозернистих бетонів [7] враховуються лише класи міцності бетону в діапазоні від $B 3,5$ до $B 60$. У зіставленні з нормами [1] це відповідає класам міцності бетону до $C 50/60$. У нормах [1] класи міцності бетону сягають межі $C 90/105$. У нормах [7] відсутні рекомендації щодо розрахунку міцності залізобетонних елементів (ЗБЕ) з високоміцних бетонів, а також визначення їх фізико-механічних характеристик, тому необхідне розроблення методик розрахунку міцності ЗБЕ із використанням ВМБ та проведення експериментальних досліджень на натурних зразках.

Застосування деформаційної моделі (ДМ) з екстремальним критерієм міцності (ЕКМ) [8 – 17] дає можливість аналітично отримати граничні деформації стиснутої грані бетону ЗБЕ завдяки врахуванню спадної гілки діаграми стиску, що відображає процес зниження несучої здатності матеріалу внаслідок наростання ступеня його зруйнованості.

Важливу роль відіграє підтвердження теоретичних розрахунків за методикою на основі ДМ з ЕКМ із даними експериментальних досліджень та їх статистичний аналіз. Таким чином, експериментальне дослідження граничних характеристик стиснутої зони бетону, деформативності та міцності ЗБЕ з ВМБ, що працюють на плоский центральний і позацентровий стиск, є актуальним завданням.

Теоретичні дослідження граничних характеристик стиснутої зони бетону та міцності згаданих вище ЗБЕ були проведені на основі ДМ з ЕКМ і наведені в роботах [8 – 17].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Застосування ДМ у теорії залізобетону є відповідним кроком уперед, оскільки вона використовує повний набір рівнянь механіки деформівного твердого тіла (МДТТ): фізичні для бетону й арматури, геометричні та рівняння рівноваги. У результаті ДМ дозволяє точніше визначати міцність переармованих ЗБЕ, межю переармування, враховувати характер повних діаграм роботи бетону й арматури та інші характеристики. Серед ДМ, що існують на цей час, необхідно відмітити ДМ з ЕКМ [2, 3],

яка має суттєві переваги над існуючими ДМ і дає можливість розраховувати міцність ЗБЕ в нормальному перерізі та отримувати фізико-механічні характеристики при застосуванні широкого спектра класів бетону (від В 3,5 до В 120 і більше) [4, 17].

У зв'язку з недостатньою кількістю експериментальних даних досліджень впливу класу міцності бетону на величину граничної деформації бетону стиснутої зони ε_{bu} та міцності стиснутих ЗБЕ, в тому числі із ВМБ, було проведено експериментальні дослідження таких ЗБЕ та виконано порівняльний аналіз одержаних результатів з аналітичними розрахунками на основі ДМ з ЕКМ.

Метою роботи є експериментальне дослідження міцності центрально та позацентрово стиснутих ЗБЕ у нормальному перерізі з високоміцних бетонів, а також визначення ε_{bu} на основі ДМ з ЕКМ з урахуванням класу міцності бетону і порівняння отриманих результатів з аналогічними значеннями ε_{bu} , які прийняті за основу в нормативному документі [1].

Виклад основного матеріалу. У процесі проведення експериментальних досліджень стиснутих ЗБЕ деформації бетону й арматури в характерних перерізах ЗБЕ замірялись на всьому діапазоні навантаження. Особлива увага приділялась визначенню граничних деформацій бетону та арматури в характерних перерізах ЗБЕ.

Для виконання поставленої мети було випробувано 18 залізобетонних колон, виготовлених із бетону класів В60...В80 (табл. 1). Експериментальні зразки по довжині мали прямокутні поперечні перерізи. Висота та ширина нормального перерізу колон приймалася постійною – 120 x 120 мм (рис. 1) та довжиною 1 м.

Усі ЗБЕ армувалися симетрично чотирма поздовжніми стрижнями класу АІІ-в Ø 12 мм, а також звареними хомутами з арматури класу А240С, Ø 6,5 мм, із кроком 80 мм (рис. 1).

Таблиця 1 – Клас міцності бетону експериментальних зразків та ексцентриситети прикладання навантаження

№ з/п	Ексцентриситет прикладання навантаження $e_0, м$	Клас бетону експериментальних зразків	Маркування експериментального зразка
1	$e_0 = 0$	В60	К-1-1-Ц, К-1-2-Ц
2	$e_0 = 0,03$		К-1-3-МЕ, К-1-4-МЕ
3	$e_0 = 0,12$		К-1-5-ВЕ, К-1-6-ВЕ
4	$e_0 = 0$	В70	К-2-1-Ц, К-2-2-Ц
5	$e_0 = 0,03$		К-2-3-МЕ, К-2-4-МЕ
6	$e_0 = 0,12$		К-2-5-ВЕ, К-2-6-ВЕ
7	$e_0 = 0$	В80	К-3-1-Ц, К-3-2-Ц
8	$e_0 = 0,03$		К-3-3-МЕ, К-3-4-МЕ
9	$e_0 = 0,12$		К-3-5-ВЕ, К-3-6-ВЕ

Міцність бетону зразків першої серії (В 60) дорівнювала $R_b = 48,01 \text{ МПа}$, другої серії (В 70) – $R_b = 51,03 \text{ МПа}$, третьої (В 80) – $R_b = 57,82 \text{ МПа}$

Результати випробувань центрально та позацентрово стиснутих залізобетонних елементів постійного перерізу шарнірно опертих елементів проаналізовано на характерних зразках відповідно до ексцентриситету прикладання навантаження, класу бетону та виду навантаження. Схеми армування, геометричних розмірів і розташування електротензодатчиків на бетоні наведені відповідно на рис. 1 та 2.

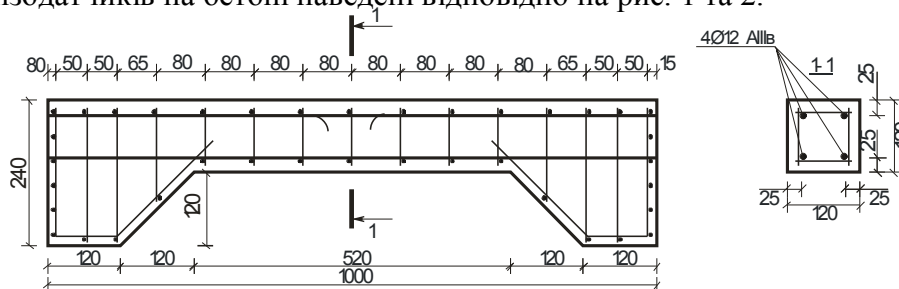


Рисунок 1 – Схема армування та геометричні розміри експериментальних зразків

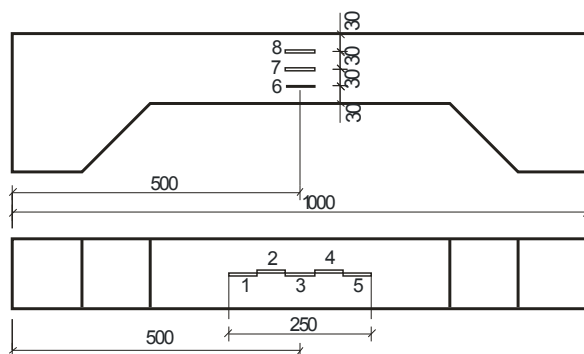


Рисунок 2 – Схема розташування електротензодатчиків на бетоні

За даними експериментальних досліджень був зроблений аналіз граничних характеристик стиснутої зони бетону та міцності нормальних перерізів випробовуваних зразків.

Аналіз результатів експериментальних даних дав змогу підтвердити їх хорошу збіжність та достовірність порівняно з результатами теоретичних досліджень міцності, фізико-механічних характеристик бетону стиснутої зони тощо, одержаних за методикою на основі ДМ з ЕКМ. При випробуваннях зразків також були проаналізовані на різних рівнях завантаження залежності деформацій найбільш стиснутої фібри бетону ε_{bu} нормального перерізу ЗБЕ від класу міцності бетону. За методикою ДМ з ЕКМ було проведено порівняння теоретичних і експериментальних даних граничних деформацій найбільш стиснутої фібри бетону ε_{bu} та міцності нормальних перерізів ЗБЕ. Статистична обробка результатів наведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Експериментальні та теоретичні значення деформацій і міцності нормального перерізу залізобетонних елементів у стадії, близькій до руйнування

№ з/п	Шифр зразка	Максимальна відносна деформація найбільш стиснутої грані бетону		$\frac{\varepsilon_{bu, \delta \ddot{a} \delta}}{\varepsilon_{bu, \delta \ddot{e} \ddot{n} \ddot{i}}}$, %	Поздовжня сила N_u , МН		$\frac{N_{u, \delta \ddot{a} \delta}}{N_{u, \delta \ddot{e} \ddot{n} \ddot{i}}}$, %
		$\varepsilon_{bu, \text{експ}}$, ‰	$\varepsilon_{bu, \text{теор}}$, ‰		$N_{u \text{ експ}}$	$N_{u \text{ теор}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	К-1-1-Ц	-2,40	-2,436	1,015	0,803	0,8059	1,0036
2	К-1-2-Ц	-2,38	-2,436	1,0235	0,804	0,8059	1,0023
3	К-1-3-МЕ	-3,24	-3,293	1,0163	0,405	0,4054	1,0009
4	К-1-4-МЕ	-3,22	-3,293	1,0226	0,404	0,4054	1,0034
5	К-1-5-ВЕ	-3,50	-3,763	1,0751	0,109	0,1118	1,0256
6	К-1-6-ВЕ	-3,67	-3,763	1,0253	0,11	0,1118	1,0163
7	К-2-1-Ц	-2,47	-2,507	1,0149	0,900	0,9097	1,0107
8	К-2-2-Ц	-2,48	-2,507	1,0108	0,920	0,9097	0,9888
9	К-2-3-МЕ	-3,31	-3,337	1,0081	0,450	0,4531	1,0068
10	К-2-4-МЕ	-3,28	-3,337	1,0173	0,445	0,4531	1,0182
11	К-2-5-ВЕ	-3,41	-3,565	1,0454	0,115	0,1174	1,020
12	К-2-6-ВЕ	-3,46	-3,565	1,0303	0,116	0,1174	1,0120
13	К-3-1-Ц	-2,55	-2,577	1,0105	1,00	1,0128	1,0128
14	К-3-2-Ц	-2,56	-2,577	1,0066	1,05	1,0128	0,9645
15	К-3-3-МЕ	-3,39	-3,383	0,9979	0,49	0,4998	1,02
16	К-3-4-МЕ	-3,37	-3,383	1,0038	0,50	0,4998	0,9996
17	К-3-5-ВЕ	-3,36	-3,392	1,0095	0,12	0,1221	1,0175
18	К-3-6-ВЕ	-3,35	-3,392	1,0125	0,118	0,1221	1,0347
Середньоарифметичне значення				1,019189			1,008761
Середньоквадратичне відхилення				0,01767			0,015465
Коефіцієнт варіації, %				1,733736			1,53311
Асиметрія				2,101701			-1,24117
Ексцес				5,489065			3,117769

Висновки:

1. На граничну деформацію ε_{bu} стиснутих залізобетонних елементів впливає багато факторів, які необхідно враховувати в розрахунках їх міцності. Як показують розрахунки за деформаційною моделлю з екстремальним критерієм міцності, ε_{bu} суттєво змінює свої значення при зміні класу бетону, класу арматурної сталі, характеру завантаження, форми поперечного перерізу тощо [15 – 17].

2. Прийняте в нормах [1] постійне значення $\varepsilon_{bu} \approx 3,5$ ‰ для бетонів низької та середньої міцності є завищеним для стиснутих залізобетонних елементів. Урахування підвищеної крихкості в зоні високоміцних бетонів фізично було б більш обґрунтоване введенням у розрахунки підвищених коефіцієнтів надійності або знижених коефіцієнтів умов роботи, а не так, як у Єврокод 2 – зниженням граничної деформації ε_{bu} , що не узгоджується з експериментами та розрахунками за деформаційною моделлю з екстремальним критерієм міцності.

3. Проведені експериментальні дослідження дають змогу зробити висновок про достовірність деформаційної моделі з екстремальним критерієм міцності, яка дозволяє аналізувати повний комплекс граничних параметрів нормальних перерізів у стадії їх руйнування, виявляти пружний або пластичний стан роботи арматури та використовувати відповідні розрахункові залежності.

Література

1. EN 1992-1-1:2004:Е. Єврокод 2: Проектування бетонних конструкцій / CEN-2004.
2. 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.
3. 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.
4. Митрофанов, В.П. О методах определения предельной деформации бетона железобетонных элементов / В.П. Митрофанов, А.А. Шкурупій, Д.Н. Лазарев // Научный вестник строительства: сб. науч. пр. – Х.: ХДТУБА, 2008. – Вып. 45. – С. 34 – 45.
5. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. – №6. – С. 6 – 10.
6. Баженов, Ю.М. Новый век – новые эффективные технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы 1-ой Всероссийской конференции. – М., 2001. – С. 91 – 101.
7. СНиП 2.03.01–84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.
8. Вплив міцності бетону та кількості арматури на граничні характеристики нормального перерізу залізобетонних елементів / В.П. Митрофанов, О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев, Б.П. Митрофанов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2005. – Вып. 12. – С. 208 – 217.
9. О влиянии формы нормального сечения на предельную деформацию бетона сжатой зоны / В.П. Митрофанов, А.А. Шкурупій, Б.П. Митрофанов, Д.Н. Лазарев // Збірник наукових праць. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – Вып. 15. – С. 89 – 94.
10. Шкурупій, О.А. Вплив форми перерізу на граничні характеристики стиснутої зони бетону позацентрово стиснутих залізобетонних елементів / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вып. 15. – С. 286 – 297.
11. Шкурупій, О.А. Розрахунок міцності нормальних перерізів стиснутих залізобетонних елементів із застосуванням екстремального критерію / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2006. – Вып. 14. – С. 374 – 382.
12. Шкурупій, О.А. Розрахунок міцності нормальних перерізів центрально стиснутих залізобетонних елементів із застосуванням екстремального критерію / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВПІ, 2006. – № 4. – С. 20 – 33.

13. Шкурупій, О.А. Урахування реальної роботи арматури при розрахунку міцності центрально стиснутих залізобетонних елементів / О.А. Шкурупій, Д.М. Лазарєв // Збірник наукових праць. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво». – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – Вип. 18. – С. 67 – 76.

14. 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. Лазарєв // Коммунальное хозяйство городов : сб. научных трудов. – К.: Техника, 2007. – Вип. 76. – С. 71 – 79.

15. Шкурупій, О.А. Розрахунок міцності стиснутих залізобетонних елементів із високоміцних бетонів на основі деформаційної моделі / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 43 – 49.

16. Шкурупій, О.А. Застосування деформаційної моделі з екстремальним критерієм для розрахунку міцності залізобетонних елементів із високоміцних бетонів / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2010. – № 38. – С. 683 – 689.

17. Шкурупій, О.А. Вплив процента армування та класу бетону на міцність залізобетонних елементів / О.А. Шкурупій, П.Б. Митрофанов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВПІ, 2010. – № 4. – С. 20–33.

Надійшла до редакції 17.03.2011

© П.Б. Митрофанов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований прочности сжатых железобетонных элементов из высокопрочных бетонов. Установлено влияние применения высокопрочных бетонов на предельную деформацию наиболее сжатой грани бетона и прочность сжатых железобетонных элементов. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими расчетами на основе деформационной модели с экстремальным критерием прочности.

Ключевые слова: железобетонный элемент, предельная деформация бетона, деформационная модель, критерий прочности.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DURABILITY OF THE COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS FROM HIGH STRENGTH CONCRETES

The results of experimental researches of durability of the compressed reinforced concrete elements (RCE) from high strength concrete (HSC) are resulted. Influence of application of high strength concrete is exposed on ultimate deformation of the most compressed fibre of concrete ε_{bu} and durability of compressed RCE. The comparative analysis of experimental data is executed with theoretical calculations on the basis of deformation model (DM) with the extreme strength criterion (ESC).

Keywords: reinforced concrete element, ultimate deformation of concrete, deformation model, strength criterion.