

С.Б. Максимович, Б.Г. Демчина, Б.Ю. Максимович,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра будівельних конструкцій та мостів

## АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОРОТКИХ КОНСОЛЕЙ\*

© Максимович С.Б., Демчина Б.Г., Максимович Б.Ю., 2011

Проаналізовано теоретичні і експериментальні дослідження залізобетонних коротких консолей вітчизняних і закордонних авторів. На основі проведеного аналізу запропоновано для розрахунків коротких консолей використовувати параметр  $V = M_{u, test} / M_u$ , який найточніше характеризує їх несучу здатність.

**Ключові слова:** залізобетонні короткі консолі, поперечна арматура, види руйнування.

Theoretical and experimental studies of short reinforced concrete corbels conducted by home and foreign researchers have been analyzed. Based on the analysis, for designing short consoles it was proposed to use the parameter  $V = M_{u, test} / M_u$  which most precisely characterizes their bearing capacity.

**Key words:** short reinforced concrete corbels, transverse reinforcement, types of destruction.

**Вступ.** З'єднання конструкцій між собою у каркаси споруд і передавання навантажень від балок, ригелів і ферм на колону у багатьох випадках не можливі без участі коротких консолей. Короткі консолі є найвідповідальнішими конструктивними елементами у каркасах споруд. У нормах проектування різних країн закладені різні підходи до розрахунку і конструювання коротких консолей, що підтверджує складність їх напруженого стану. Тому пошук нових концепцій розрахунку і конструювання цих відповідальних конструктивних елементів є актуальним.

**Аналіз досліджень.** Більшість теоретичних досліджень коротких консолей зводяться до запису рівнянь рівноваги діючого на консоль навантаження і внутрішніх зусиль, отриманих у результаті експериментальних досліджень. Враховуючи складний напружений стан в коротких консолях, для виявлення напрямків траєкторій головних напружень автори Франц і Нідергоф [1] виготовляли зразки із оптично-активних матеріалів і використовували метод фотопружності.

Експериментальні дослідження моделей коротких консолей постійної та змінної висоти, виконаних з

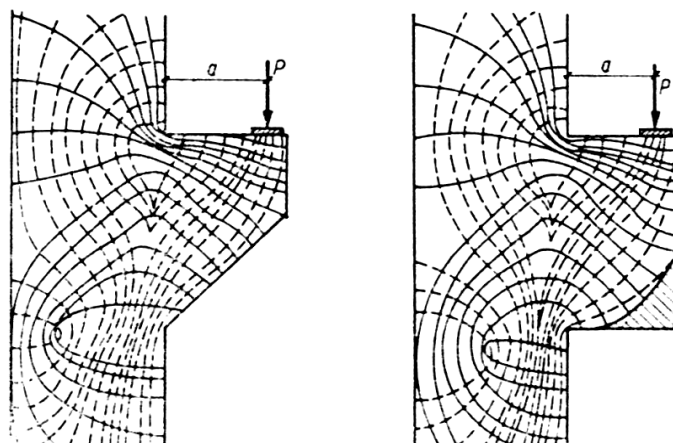


Рис. 1. Розміщення траєкторій головних напружень у зразках з оптично-активного матеріалу Франца і Ніденгофа [1]

\* Роботу виконано під керівництвом к. т. н. Л.О. Дорошкевича.

пружного оптичноактивного матеріалу, дали змогу отримати картину розміщення траєкторій головних напружень (рис. 1). Власне вони наштовхнули на ідею використовувати у розрахунку консолей каркасно-стрижневу модель, а також допомогли оптимально розташувати арматуру.

Досліди показали, що при раціональному розміщенні арматури відповідно до згаданих вище траєкторій, у залізобетонних консолях в стадії після утворення вертикальних і похилих тріщин принципово не змінюється система внутрішніх зусиль. Характер утворення і розвитку похилих тріщин при раціональному розміщенні розтягнутої арматури принципово не відрізняється від характеру утворення і розвитку вертикальних тріщин.

Похилі тріщини (рис. 2, 3), як правило, починаються на розтягнутій (верхній) грані консолі і проростають у стиснуту зону, яка знаходиться у місці поєднання консолі з колоною (місце защемлення консолі). Характерно і те, що перша похила тріщина виникає біля грані опорної плити (штампа), через яку передається навантаження на консоль і, як правило, відділяє частину консолі без тріщин (рис. 2, 3).

**Види руйнування коротких залізобетонних консолей.** Автори, що досліджували роботу коротких консолей, розрізняють такі види їх руйнування:

- а) від зминання бетону під опорною плитою, через яку передається навантаження;
- б) порушення анкерування поздовжньої арматури на вільному кінці консолі;
- в) діагональне розколювання бетону консолі;
- г) зріз стиснутої смуги;
- д) зріз розтягнутої смуги;
- е) роздавлювання стиснутої смуги;
- ж) руйнування по вертикальній тріщині внаслідок текучості поздовжньої арматури у перерізі з максимальним згинальним моментом.

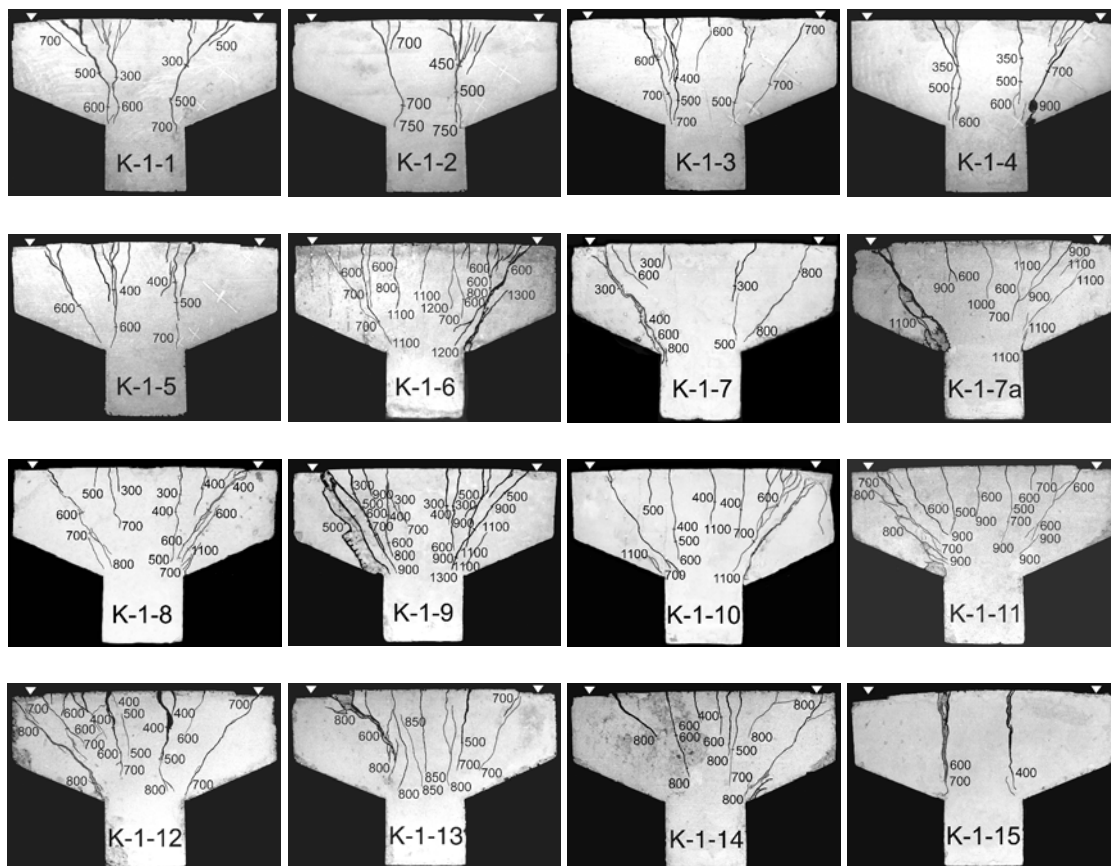


Рис.2. Характер утворення тріщин та руйнування дослідних зразків коротких консолей 1-ї серії [10]

Для попередження руйнування за схемою (а) необхідно розрахунком перевірити умову, щоб напруження в бетоні під опорною плитою не перевищувало величини розрахункової міцності бетону на місцевий стиск. Недотримання цієї умови необхідно розглядати як недолік конструювання.

Попередження руйнування за схемою (б) вимагає забезпечення надійного анкерування основної поздовжньої арматури в кінці консолі і за перерізом її заземлення у колоні. Тому деякі автори рекомендують основну поздовжню арматуру виконувати у вигляді замкнутих петель і розміщувати їх у два-три ряди по висоті консолі. Якщо основна поздовжня арматура виконується із прямих стрижнів, то для надійного анкерування до неї необхідно приварювати поперечні стрижні з довжиною, яка дорівнює ширині консолі.

Руйнування за схемою (ж) можливе при дуже низькому проценті поздовжнього армування ( $m < 0,2$  %), і при незабезпеченому зчепленні арматури з бетоном (гладка, полірована арматура), або із штучно порушеним зчепленням, як це виконано у консолях К-1-15 (рис. 2); К-2-1, К-2-2, К-2-3 (рис. 3) наших досліджень. Тому при поздовжній арматурі класу А-II і А-III доцільно приймати мінімальний коефіцієнт поздовжнього армування, як це рекомендують Кріз і Ратс у [2] ( $m = A_s / (bh_0) \geq 0,004$ ).

Руйнування за схемами (в, г, д, е) візуально важко розрізнити і встановити істинний вид руйнування – це є суб'єктивною справою кожного дослідника. Залежно від того, наскільки дослідники розуміють вказані вище чотири схеми руйнування, вони по-різному трактують одну і ту саму каркасно-стержневу систему.

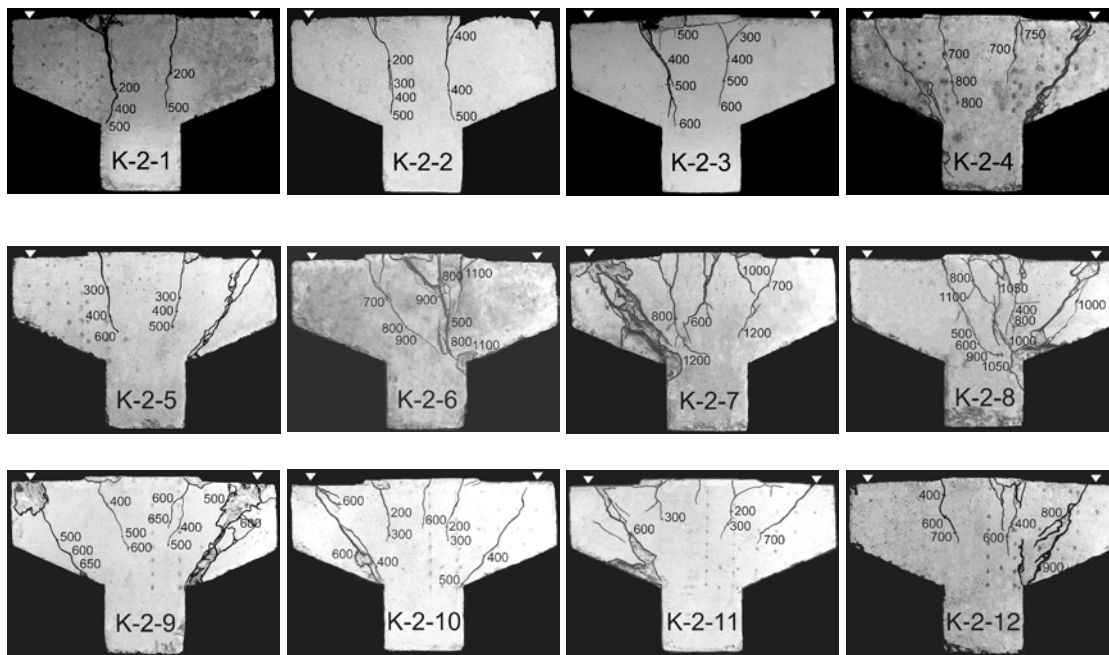


Рис. 3. Характер утворення тріщин та руйнування дослідних зразків коротких консолей 2-ї серії [10]

#### Фактори, що впливають на несучу здатність коротких залізобетонних консолей:

- *відношення  $a/h_0$* . Дослідження підтвердили, що на руйнування консолей по похилих тріщинах значно впливає параметр  $a/h_0$  і насичення консолі основною поздовжньою арматурою. Із зменшенням  $a/h_0$  і та збільшенням процента армування збільшується руйнівне навантаження.
- *міцність бетону*. Вплив міцності бетону на несучу здатність коротких консолей ще недостатньо вивчено. Окремі автори тільки епізодично вивчали цей вплив, а більшість проводили експериментальні дослідження при постійній міцності бетону (Е. Горачек [3], Ж.Р. Робінзон [4], Т.С. Ляшенко [5] та інші).

**Вплив міцності бетону  
на експериментальне руйнівне навантаження  $P_{u,test}$  у дослідженнях [7, 6, 2]**

№ з/п	Автори досліджень	Номер консолі	Процент поздовжнього армування $\rho$ , %	Відношення $a/h_0$	Призова або циліндрична міцність бетону ( $R_b$ або $R_{цил.}$ ), МПа	Руйнуюче експериментальне навантаження $P_{u,test}$ , кН	Відношення міцностей бетону ( $R_b$ або $R_{цил.}$ )	Відношення руйнуючих навантажень $P_{u,test}$	Перевищення, в %	Середнє перевищення, в %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Консолі з досліджень Баженова-Кудріна [7]	К-IV	0,39	0,47	9,15	477,7	$R_{b(K-IV)300}/R_{b(K-IV)} = 1,41$	$P_{u(K-IV)300}/P_{u(K-IV)} = 1,04$	26,2	-1,01
2		К-IV (300)	0,39	0,47	12,90	498,3	$R_{b(K-IV)300}/R_{b(K-IV)100} = 2,12$	$P_{u(K-IV)300}/P_{u(K-IV)100} = 2,21$	-0,04	
3		К-IV (100)	0,39	0,47	6,08	225,0	$R_{b(K-IV)}/R_{b(K-IV)100} = 1,5$	$P_{u(K-IV)}/P_{u(K-IV)100} = 2,12$	-29,2	
4	Консолі з досліджень Чубрикова В.М. [6]	ГІа <sub>1</sub>	1,25	0,43	15,6	265,0	2,01	1,23	38,8	38,3
5		ГІІа <sub>1</sub>	1,25	0,43	31,4	325,0				
6		ГІб <sub>1</sub>	0,8	0,26	15,60	380,0	2,01	1,46	27,36	22,5
7		ГІІб <sub>1</sub>	0,8	0,26	31,40	55,0				
8		ГІб <sub>2</sub>	0,82	0,28	15,60	370,0	1,53	1,26	17,6	
9		ГІІб <sub>1</sub>	0,8	0,28	23,80	465,0				
10	Консолі з досліджень Кріза Л.Б. і Ратса Ц.Х. [2]	77	0,48	0,144	15,54	416,20	2,85	2,07	27,4	21,8
11		95	0,48	0,144	44,36	861,38				
12		78	0,93	0,145	45,47	477,44	2,92	2,38	18,5	
13		96	0,93	0,145	45,20	1136,77				
14		79	1,24	0,145	16,87	452,09	2,67	2,15	19,5	
15		97	1,24	0,145	45,13	970,63				
16		80	0,49	0,297	17,08	377,46	2,72	1,53	43,75	
17		98	0,49	0,297	46,47	576,82				
18		81	0,94	0,298	18,07	490,09	2,56	1,71	33,2	36,8
19		99	0,94	0,298	46,19	838,70				
20		82	1,23	0,297	14,83	382,58	3,05	2,03	33,4	
21		100	1,23	0,297	45,20	777,92				
22		83	0,48	0,525	16,24	233,36	2,76	1,52	44,5	
23		101	0,48	0,525	44,78	353,85				
24	84	0,93	0,528	16,10	317,20	2,92	1,39	52,39	45,28	
25	102	0,93	0,528	46,96	440,46					
26	85	1,23	0,531	15,26	287,37	3,04	1,86	38,8		
27	103	1,23	0,531	46,33	535,26					

Частково відображений цей вплив у дослідженнях В.Н. Чубрикова [6] і Г.Л. Баженова – Б.А. Кудріна [7]. Найбільш ретельно вплив міцності бетону вивчався у дослідженнях Л.Б. Кріза, Ц.Н. Ратса [2].

Для аналізу з [2] вибрані попарно однакові консолі, виготовлені з бетону міцністю  $R_{цил.} \approx 15-16$  МПа і  $R_{цил.} = 44-46$  МПа, які представлені у таблиці, пп. 10–27. У стовпці 8 наведені відношення міцностей бетону; у стовпці 9 – відношення руйнівних навантажень; у стовпці 10 – процент перевищення відношення міцностей бетону над відношенням руйнівних навантажень; у стовпці 11 подано середнє перевищення зазначених вище показників для 3-х величин відношення  $a/h_0$ , а саме: для п.10-15 при  $a/h_0 = 0,144-0,145$ , п.16-21 при  $a/h_0 = 0,297-0,298$ , пп. 22–27 при  $a/h_0 = 0,525-0,531$ . Із стовпця 11 видно, що найбільше середнє перевищення 45,28 % отримано при  $a/h_0 = 0,53$ ; 36,8 % при  $a/h_0 = 0,297$ ; і найменше 21,8% при  $a/h_0 = 0,145$ . Найбільш позитивно на несучу здатність коротких консолей впливає зростання міцності бетону при малих відношеннях  $a/h_0$ , а найменший ефект від зростання міцності бетону отримано при  $a/h_0 = 0,531$ .

Подібне явище зафіксовано і у дослідженнях Чубрикова В.М. [6] (пп. 4–9). Характерно, що визначений вище процент перевищення 38,8 % (пп. 4 і 5) отримано при  $a/h_0 = 0,43$ , тобто такий самий як у дослідженнях Кріза і Ратса [2] (пп. 26 і 27) при аналогічному значенні  $a/h_0 = 0,531$ . Зазначимо, що це мало місце при однаковому проценті поздовжнього армування  $m = 1,25-1,23$  %.

Неочікуваний результат отримано у дослідженнях Баженова і Кудріна [7] з аналізу консолей групи К-IV, К-IV(300) і К-IV(100). З порівняння консолей К-IV і К-IV(300) (п.1 і 2) видно, що збільшення міцності бетону у 1,41 рази дало збільшення руйнуючого навантаження тільки у 1,04 рази. Порівняння консолей К-IV(300) і К-IV(100) (п.2, 3) при збільшенні міцності бетону у 2,12 рази дало збільшення відношення руйнуючого навантаження у 2,21 рази (тобто стовець 9 перевищив стовець 8), що суперечить здоровому глузду. Подібний результат, який проявився ще більшою мірою, отримано з порівняння К-IV з К-IV(100) при збільшенні міцності бетону у 1,5 рази отримано збільшення руйнівного навантаження у 2,12 рази (див. стовпці 8 і 9). Очевидно, такий результат впливу міцності бетону на несучу здатність отримано за рахунок передчасного руйнування консолі К-IV(100) з бетону низької міцності через порушення анкерування поздовжньої арматури.

- *поздовжня арматура*. Вплив поздовжньої арматури на несучу здатність коротких консолей чітко відображають експериментальні дослідження Т.В. Ляшенка [8], а також дослідження інших авторів.

У розрахункових формулах різних авторів вплив поздовжньої арматури характеризується процентом армування  $m$  %, який безпосередньо входить у розрахункові формули. На нашу думку, вплив поздовжньої арматури на міцність коротких консолей доцільніше враховувати більш узагальненим параметром  $x = x/h_0$ , як і при розрахунку міцності вертикальних перерізів. Цей параметр практично враховує вплив як міцності бетону, так і поздовжньої арматури на міцність коротких консолей.

Параметр, який найточніше характеризує несучу здатність консолей, є відношення експериментального руйнівного моменту при руйнуванні консолі по похилому перерізу  $M_{u,test}$  до розрахункового руйнівного моменту вертикального перерізу  $M_u$ . Відношення цих моментів позначається як  $V = M_{u,test}/M_u$  і вперше застосовано Дорошкевичем Л.О. для розрахунку міцності похилих перерізів залізобетонних балок [9]. У даній роботі це відношення пропонується застосовувати у розрахунку міцності коротких консолей.

**Висновки.** 1. Експериментальні дослідження моделей коротких консолей із оптично активного матеріалу дали змогу отримати напрямки траєкторій головних напружень. Вони наштовхнули авторів на ідею оптимального розміщення арматури в консолях, а також привели до прийняття каркасно-стержевої розрахункової моделі.

2. Якщо арматуру розмістити відповідно до траєкторій головних напружень, то у коротких консолях в стадії до і після утворення вертикальних і похилих тріщин принципово не змінюється система внутрішніх зусиль.

3. Характер утворення і розвитку похилих тріщин у коротких консолях при раціональному розміщенні розтягнутої арматури принципово не відрізняється від характеру утворення і розвитку вертикальних тріщин.

4. На руйнування консолей за похилими тріщинами значно впливає відношення  $a/h_0$  і насичення їх основною поздовжньою арматурою. Із зменшенням відношення  $a/h_0$  і збільшенням процента поздовжнього армування збільшується несуча здатність коротких консолей.

5. Найпозитивніше впливає на несучу здатність коротких консолей зростання міцності бетону при малих відношеннях  $a/h_0$ , а найменший ефект від зростання міцності бетону отримано при  $a/h_0 = 0,531$  у дослідженнях Кріза і Ратса [2].

6. Аналіз експериментальних досліджень різних авторів, виконаний нами, дає змогу визначати робочу висоту консолі за параметром  $x = x/h_0$ , який одночасно враховує вплив міцності бетону і поздовжньої арматури.

7. Експериментальні дослідження підтверджують, що найточніше характеризує несучу здатність коротких залізобетонних консолей параметр  $V = M_{u,test} / M_u$ .

1. Franz G., Nidenhoff H. *Die Bewehrung von Konsolen und gedrunenen Balken. Beton-und Stahlbetonbau* 5/1963. – P. 112–120. 2. Kriz L.B. and Raths C.H. *Connections in Precast Concrete Structures -Strength of Corbels. Journal of the Prestressed Concrete Institute, February, 1965.* – P. 16–46. 3. Horacek C.Sc. *Únosnost železobetonových konsol vyzkumny ustav stavebni výroby.* – Praga, *Inzenery Stavby*, № 5/1962. – S. 182–187. 4. Robinson J.R. *L'armature des Consoles Courtes. Theorie und Praxis des Stahlbeton baues.* – Berlin: W. Ernst & Sohn. 1969. – S. 67. 5. Ляшенко Т.В. *Ненереармированные железобетонные короткие консоли // Проблемы теории и практики железобетону: Зб. наук. статей.* – Полтава, 1997. – С. 278–281. 6. Чубриков В.М. *О расчете коротких железобетонных конструкций // Вестник Львов. политехн. ин-та.* – 1966. – № 11: *Вопросы современного строительства.* – С. 26–32. 7. Баженов Г.Л., Кудрін Б.А. *О работе коротких железобетонных консолей // Изв. Высших учебных заведений. Строительство и архитектура.* – 1958. – № 6. – С. 116–122. 8. Ляшенко Т.В. *До розрахунку міцності коротких залізобетонних консолей // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. Вип. 2.* – Рівне, 1999. – С. 121–125. 9. Дорошкевич Л.О. *Розрахунок поперечної арматури у залізобетонних мостових балках // Пр. Західного наукового центру. Т. 3: Транспортна Академія України.* – Львів–Трускавець, 1996. – С. 41–49. 10. Максимович Б.Ю. *Про експериментальні дослідження коротких консолей // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: Зб. наук. праць НАН України. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка.* – Львів: Каменяр, 2003. – Вип. 5.