

УДК 624.046.2:691.886.6

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗРІЗУ ЯК ФОРМИ РУЙНУВАННЯ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

ANALYSIS OF SHEAR RESEARCH AS A FORMS OF DESTRUCTION OF JOINTS OF BEARING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Довженко О.О., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-2266-2588 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Dovzhenko O.O., Phd, Professor, ORCID: 0000-0002-2266-2588 (National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic")

Проаналізовано дослідження несучої здатності шпонкових з'єднань елементів сучасних конструктивних систем із збірною і збірно-монолітним залізобетону. Класифіковано фактори впливу. Зазначено перспективність застосування теорії пластичності бетону у якості теоретичної основи розрахунку стиків із підвищеним опором зрізу.

Experimental and theoretical studies of the bearing capacity of key joints of members of modern structural systems made of precast and precast-cast-in place reinforced concrete are analyzed. The shear failure form is considered, which is diverse, realized in bending and compressive, local action of the load, under uniform and non-uniform (with the presence of a tensile zone) stress states, in members with different geometric shapes and load transfer schemes. The influence factors obtained in the experiment are classified. Adhesion of old concrete to new, uneven distribution of stresses along the length of the joint (number of keys) and the width of the seam are included in the parameters of the seam. The parameters of a key include geometric ones (dimensions and their ratio, the angle of inclination of the supporting surfaces, the shape of the working section); strength characteristics (type and class) of concrete; reinforcement (strength, its quantity and location along the shear plane); the presence or absence of compression (tensile). The influx of factors is assessed ambiguously. Joint calculation methods are, as a rule, based on an empirical basis, which has known significant disadvantages. Using a general design method based on the theory of plasticity of concrete is promising to calculate the bearing capacity of joints. The model of an ideally plastic body leads to simple calculations for complex uniform stress-strain states. A variational method in the theory of concrete plasticity has been developed at the National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". The method

has been tested in the calculations of the bearing capacity of reinforced concrete and masonry structures under axial and local compression, combined action of vertical and horizontal loads, under the action of shear forces in areas near supports. The method is proposed as a technique for calculating joints under the shear.

Ключові слова: Шпонка, стик, несуча здатність.
Key, joint, bearing capacity.

Вступ. У цивільному будівництві розповсюджена сучасна технологія збірно-монолітного каркасу, в основі якої лежить класична рамно-в'язева система колон, ригелів та перекриття із багатопорожнистих попередньо напружених плит або плит-опалубок, а також безбалкова конструктивна система перекриття. Впровадження каркасних будівель створює умови для підвищення їх енергоефективності та передбачає можливість вільної трансформації внутрішнього простору без втручання в несучу систему, що гарантовано підвищує споживчі властивості житла.

При реалізації збірно-монолітного каркасного домобудування специфічною вимогою є забезпечення несучої здатності контактного стику збірного елемента й монолітного бетону, що потребує виконання його розрахунку.

Досвід розвитку країн Європи свідчить про неможливість інтенсивного нарощування обсягів житла і без модернізованого панельного домобудування.

Особливу увагу при проектуванні збірних і збірно-монолітних систем із залізобетону необхідно приділяти стикам несучих елементів, які забезпечують їхню спільну роботу під навантаженням. При цьому важливе значення відіграє зрізова форма їх руйнування. Вона різноманітна, реалізується при згині та стискові, місцевій дії навантаження, за однорідних і неоднорідних (з наявністю зони розтягу) напружених станів, у елементах із різними геометричними формами та схемами передачі навантаження. Це вносить певні труднощі при виборі теоретичної основи методів розрахунку на зріз, ступінь розв'язання яких визначає рівень оптимальності конструктивних рішень стиків із підвищеним опором зрізу. До них в першу чергу відносяться шпонкові з'єднання (ригелів із колонами та колон із фундаментами, горизонтальні та вертикальні стики стінових панелей, стики плит перекриття й покриття між собою та із ригелями, стіновими панелями або колонами залежно від конструктивної системи будівлі та перекриття).

Аналіз останніх досліджень. Бетон у граничному стані поводить як крихкий, квазікрихкий і навіть пластичний матеріал залежно від інтенсивності деформації та розмірів областей її локалізації, на які в свою чергу суттєво впливає напружений стан елементів: знак і величина середнього нормального напруження [1]. Стосовно зрізової форми

руйнування у дослідників відсутня єдина точка зору, так як зовні крихкий характер тут поєднується із досить інтенсивною деформацією в найбільш напружених зонах. При цьому слід відмітити, що зріз, який характеризується переміщенням однієї частини елемента відносно іншої вздовж поверхні руйнування, можливий лише за наявності на поверхні ковзання інтенсивної деформації [2]. Тому візуально відрізнити зріз від відриву та роздроблення, а також встановити домінування дотичних напружень часом досить складно.

У зв'язку із необхідністю вирішення широкого кола практичних завдань несучої здатності стикових з'єднань при дії поперечних сил, важливе значення набуває питання про опір бетону так званому «чистому зрізу» f_{sh} . Докладний аналіз відомих визначень зрізу й огляд дослідних зразків, запропонованих для встановлення міцності бетону при «чистому зрізі», виконаний в [3, 4], також враховано результати [5 – 8]. Однак, багаточисельні спроби встановити характеристику міцності бетону при «чистому зрізі» із подальшим застосуванням принципу «суперпозицій», накладаючи вплив бокового стиску або розтягу, не дали позитивного результату. Знайти зразок, в якому «чистий зріз» як окремий випадок напруженого стану та форма руйнування поєднуються, не вдалося. Так, при напруженому стані «чистий зріз» зразки руйнуються шляхом відриву, а при зрізовій формі на поверхні руйнування діють дотичні та нормальні напруження. Це можна пояснити відсутністю дійсних площин ковзання при напруженому стані «чистий зріз».

Унаслідок підвищеної уваги до питання зрізу в бетоні надано багато пропозицій для визначення величини його міцності. Вони розділяються на три групи залежно від міцносних характеристик бетону, котрі виступають аргументом функції міцності зрізу: міцність бетону при стисковій $f_{c,prizm}$ ($f_{c,cube}$); розтягу f_{ct} або їх поєднання. При цьому всі залежності підтверджуються конкретними експериментальними даними, для інших же випадків мають велику похибку або являються зовсім неприйнятними.

Аналіз запропонованих залежностей [9] свідчить про їх суттєву відмінність, і необхідність для кожної конкретної задачі врахування специфіки напружено-деформованого стану елементів, які руйнуються шляхом зрізу, обумовлену характером прикладання навантаження (моментна та безмоментна схеми), геометрією елементів, а також наявністю обтиснення й армування.

Метою роботи є аналіз стану експериментальних і теоретичних досліджень явища зрізу як форми руйнування стикових з'єднань несучих залізобетонних конструкцій для обрання теоретичної основи розрахунку їх несучої здатності.

Результати дослідження. Згідно аналізу експериментальних досліджень основними факторами, котрі обумовлюють несучу здатність шпонкових стиків, являються:

- параметри стику (зчеплення старого бетону з новим, нерівномірність розподілу напружень за довжиною стику (кількість шпонок) і ширина шва);

- параметри, котрі обумовлюють опір окремої шпонки: геометричні (розміри та їх співвідношення, кут нахилу опорних поверхонь, форма робочого перерізу); міцнісні характеристики (вид і клас) бетону; армування (міцність арматури, її кількість і характер розташування за площиною зрізу); наявність або відсутність обтиснення (розтягання) у площині, перпендикулярній навантаженню [9].

В останні роки за кордоном виконані багаточисельні експериментальні дослідження механічної поведінки шпонкових з'єднань, виготовлених із важкого середньої міцності [10 – 12] та високоміцного [13 – 17] бетону; пропагується додавання в бетони фібри для сповільнення утворення в них тріщин і підвищення опору зсуву та пластичності [18].

При цьому вплив окремих факторів оцінюється неоднозначно. У їх повній сукупності експериментальні дослідження стиків не проводилися.

Що стосується методів розрахунку шпонкових з'єднань, вони, як правило, базуються на емпіричній основі, котра має відомі суттєві недоліки, одним із яких є частинний характер отриманих формул, пов'язаний із умовами виконаних дослідів, який не дозволяє використовувати їх із достатнім ступенем достовірності для інших випадків. Вибір методики розрахунку ускладнюється суттєвим чисельним розходженням отриманих результатів, незважаючи на збіжність кожної із них із конкретною серією дослідів.

В [19] особливо підкреслено, що застосування емпіричних формул може бути небезпечним, якщо параметри шпонкового стику суттєво відрізняються від дослідних зразків, за результатами випробування котрих були побудовані залежності для визначення їх несучої здатності.

Серед теоретичних моделей можна виділити [20], де несуча здатність стику визначається опором на стиск стиснутого підкосу між шпонками. Ширина підкосу та кількість шпонок, які він охоплює, залежать від ширини шва, кроку шпонок і вмісту арматури.

В [21] для оцінювання несучої здатності використовується теорія опору анізотропних матеріалів у стиснутому силовому потоці, котрі в з'єднаннях формуються між площадками завантаження. Однак, автором не розглядалися вплив ширини шва, кут нахилу опорних поверхонь шпонки й армування стику.

Перспективними до застосування представляються методи теорії пластичності, т.я модель ідеально пластичного тіла приводить до простих розрахунків при складних неоднорідних напружено-деформованих станах, що важливо для використання в практиці.

Історія розвитку теорії пластичності бетону, викладена в [22], пройшла довгий шлях від Галілея через Кулона до математичної теорії пластичності, сформульованої Хіллом і Ходжем, Прагером і Друкером та незалежно від них О.О. Гвоздевим. Вперше застосування цього методу до залізобетонних плит було запропоновано Йохансеном, потім розповсюджено на стіни, зсув балок і продавлювання Нильсеном і Copenhagen Shear Group.

Розрахунок із урахуванням пластичних деформацій ґрунтується на методах нижньої (статичному) або верхньої (кінематичному) оцінки, при цьому кінематичний підхід менш розвинутий ніж статичний.

У [23] за допомогою методу характеристик на основі теорії ідеальної пластичності бетону [24] отримані рішення задач опору при зминанні, зрізі та згині шпонкових стиків із прямокутним профілем: параметри напруженого стану, геометричні розміри областей пластичності та граничне навантаження обрховано із системи рівнянь, яка включає співвідношення параметрів на характеристичних лініях і умови рівноваги частин елемента. Через складність використовуваних систем рівнянь отримані чисельні рішення задач опору, котрі надалі апроксимовані методом найменших квадратів.

Методика розрахунку [25] реалізує верхню оцінку жорстко-пластичної моделі для визначення несучої здатності при зрізі вертикальних з'єднань стінових панелей із тросовими петлями. При проектуванні останні пропонується розглядати як «найміцнішу ланку» у з'єднанні. Сила натягу, котра передається між петлями, обмежується місцевим роздробленням розчину, що знаходиться в межах їх напустку, і для критерію руйнування якого в умовах об'ємного напруженого стану поєднано критерії для бетону та цементного тіста [20].

Розглядаються два ідеалізованих механізми руйнування стиків. Перший включає в себе лінії текучості, розташовані тільки в напрямку дії поперечної сили. Крім пластичної енергії, що розсіюється в лініях текучості, враховується вплив тросових петель. Другий тип механізму включає в себе крім вертикальної і діагональні лінії текучості, котрі розділяють з'єднання на декілька сегментів. Т. я. діагональні лінії перетинають анкери, то останні вносить безпосередній вклад у внутрішню роботу.

В Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» розроблено варіаційний метод у теорії пластичності бетону [26]. В стадії руйнування прийнята передумова про ідеальну пластичність до бетону й запропоновано якісний критерій можливості її використання при розрахунках несучої здатності (опору), котрий полягає в одночасності існування граничного стану за всією областю руйнування [27]. Приймається умова міцності бетону [24]. Розрахунковою моделлю враховується відмінність від нуля швидкості об'ємної деформації бетону внаслідок його дилатації. Зв'язок між швидкостями деформацій і напруженнями впливає із асоційованого закону плинності. Використовується схема жорстко-пластичного тіла за умови локалізації пластичних деформацій у тонких шарах на поверхні руйнування [26, 28]. Розглядаються непереармовані залізобетонні конструкції й елементи з такою інтенсивністю армування, що в стадії руйнування бетону досягається граничний стан арматури.

Записується функціонал варіаційного методу J . Найпростішим є розв'язок задачі опору у розривних функціях швидкостей на основі

кінематично можливих схем руйнування при $J = 0$ шляхом пошуку безумовного (умовного) мінімуму потужності пластичного деформування.

Вагомі результати отримані на основі застосування даного методу при розрахунках несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій при осьовому та місцевому стиску, сумісній дії вертикального та горизонтального навантаження, при дії поперечних сил на ділянках біля опор [29 – 32] і він представляється перспективним у якості теоретичної основи методики розрахунку стикових з'єднань із підвищеним опором зрізу.

Висновки. Виконаний аналіз досліджень несучої здатності шпонкових стиків засвідчує перспективність їх застосування у вузлах з'єднання несучих елементів сучасних збірних і збірно-монолітних конструктивних систем із залізобетону, як таких, що мають підвищений опір зрізу. Незважаючи на великий об'єм виконаних дослідів, вплив визначальних факторів оцінюється неоднозначно, і продовження експериментів слід вважати доцільним. Зважаючи на позитивні приклади застосування теорії пластичності бетону для розрахунку стиків, передбачається створення методології розрахунку стиків на основі варіаційного методу, розробленого в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

1. Mitrofanov V.P. The theory of perfect plasticity as the elementary mechanic pseudo-plastic ultimate state of concrete: bases, limitations, practical aspects/ V.P. Mitrofanov// Improving Proc. of the 2nd fib. Congress, Naples, Italy, June 5–8, 2006. – Pp. 6–7.

2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

Rabotnov Yu. N. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela /Yu.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1988. – 712 s.

3. Митрофанов В.П. Про трактування поняття «чистого зрізу» в бетоні/ В.П. Митрофанов, В.В. Погребной, О.А. Довженко// Коммунальное хозяйство городов: Сб. науч. тр. – К.: Техніка, 2001. – Вып. 33. – С. 39–43.

Mitrofanov V.P. Pro traktuvannya ponyattya «chistogo zrizu» v betoni/ V.P. Mitrofanov, V.V. Pogrebnoi, O.A. Dovzhenko// Kommunalnoe khozyaistvo gorodov: Sb. nauch. tr. – K.: Tekhnika, 2001. – Vip. 33. – S. 39–43

4. Довженко О.О. Зріз як форма руйнування бетону / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, І.А. Юрко // Наука та будівництво. – 2017. – № 4 (14). – С. 43 – 50.

Dovzhenko O. O. Zriz yak forma ruinuvannya betonu / O.O. Dovzhenko, V.V. Pogribnii, I.A. Yurko // Nauka ta budivnitstvo. – 2017. – № 4 (14). – S. 43 – 50.

5. Resan S.F. Suggested test model of concrete shear strength predication/ S.F. Resan // Asian Journal Civil Engineering. – 2019. – Vol. 20. – Pp. 637–648.

6. Rajesh C. A new shear test setup for determining shear strength of normal and high strength concrete/ C. Rajesh, G.R. Kumar// Structures. – 2023. – Vol. 54. – Pp.1046 – 1057.

7. Jajodia R. Shear strength of plain concrete/ R. Jajodia, S. Gadve// Strain. – 2023. – Vol. 59(3), 12436.

8. Kaliyavaradhan S. K. Effect of recycled PVC fibers from electronic waste and silica powder on shear strength of concrete/ S. K. Kaliyavaradhan, A. Kurup// Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste. – 2017. – Vol. 23. – № 3, 06017001.

9. Довженко О.О. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: експериментальні дослідження: монографія. – Полтава: ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2015. – 181 с.
- Dovzhenko O.O. Mitsnist shponkovikh zednan betonnikh i zalizobetonnikh yelementiv: yeksperimentalni doslidzhennya: monografiya. – Poltava: PoltNTU im. Yu. Kondratyuka, 2015. – 181 s.
10. Buyukozturk O. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges/ O. Buyukozturk, M. M. Bakhoun // Journal Structural Engineering. – 2024. – Vol. 116 (12). – Pp. 3380–3401.
11. Jiang H. Effect of specimen thickness and coarse aggregate size on shear strength of single-keyed dry joints in precast concrete segmental bridges/ H. Jiang, J. Feng, A. Liu, W. Liang, Y. Tan, H. Liang// Structural Concrete. – 2019. – Vol. 20 (3) – Pp. 955–970
12. Zhi Q. Experimental study on the shear behavior of precast wall concrete joints with/without dowel reinforcement/Q. Zhi, X. Xiong, W. Yang, S. Liu, J. Xiong// Materials (Basel). – 2020. – Vol. 13 (7). – Pp. 1–18.
13. Liu T. Shear strength of dry joints in precast UHPC segmental bridges: experimental and theoretical research/ T. Liu, Z. Wang, J. Guo, J. Wang// Journal of Bridge Engineering. – 2019. – Vol. 24 (1), 04018100.
14. Guan D. Shear behavior of the UHPC-NSC interface with castellated keys: effects of castellated key dimension and dowel rebar / D. Guan, J. Liu, C. Jiang, Z. Chen, Z. Guo// Structures. – 2021. – Vol. 31. – Pp. 172 – 181.
15. Ye M. Shear behavior of joints in precast UHPC segmental bridges under direct shear loading/ M. Ye, L. Li, H. Li, C. Zhou// Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 357, 129212.
16. Ye M. A critical review on shear performance of joints in precast Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) segmental bridges/ M. Ye, L. Li, B. Pei, D.-Y. Yoo, H. Li, C. Zhou// Engineering Structures. – 2024. – Vol. 301, 7224.
17. Hu Y. Shear strength prediction method of the UHPC keyed dry joint considering the bridging effect of steel fibers/ Y. Hu, J. Qiu, Z. Li, Y. Yao, J. Liu, J. Wang// Engineering Structures. – 2022. – Vol. 255, 113937.
18. Traver-Abella C. Effect of steel fibers on the shear behavior of SCC dry joints in precast segmental bridges/ C. Traver-Abella, J. L. Bonet, P. F. M., J. R. Albiol-Ibáñez //Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 415, 134998.
19. Cristofferson J. Ultimate capacity of joints in precast large panel concrete buildings, Ph. D. thesis / J. Cristofferson // Department of Structural Engineering. – Technical University of Denmark, 1997. – Pp. 160 – 164.
20. Nielsen M.P. Limit Analysis and Concrete Plasticity; 3rd ed./ M.P. Nielsen, L.C. Hoang. – CRC Press, 2016. – 788 p.
21. Соколов Б. С. Теоретические основы сопротивления бетона и железобетона при сжатии // Известия вузов. Строительство. – 1993. – № 9. – С. 39 – 43.
- Sokolov B. S. Teoreticheskie osnovi soprotivleniya betona i zhelezobetona pri szhatii // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. – 1993. – № 9. – S. 39 – 43.
22. Braestrup M.W. Concrete plasticity – a historical perspective/ M.W. Braestrup// Structural Concrete. – 2021. – Vol. 22. – Pp. 2508–2525.
23. Погребной В.В. Прочность бетонных и железобетонных элементов при срезе: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / В.В. Погребной / Полтав. Гос. техн. ун-т им. Юрия Кондратюка. – Полтава, 2000. – 236 с.

Pogrebnoi V.V. Prochnost betonnikh i zhelezobetonnikh elementov pri sreze: dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / V.V. Pogrebnoi / Poltav. Gos. tekhn. un-t im. Yuriya Kondratyuka. – Poltava, 2000. – 236 s.

24. Гениев Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.

Geniev G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona / G. A. Geniev, V. N. Kissyuk, G. A. Tyupin – M.: Stroiiizdat, 1974. – 316 s.

25. Jørgensen H. B. Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops/ H. B. Jørgensen, L. C. Hoang// In Proceedings of fib Symposium Concrete – Innovation and Design, Copenhagen May 18-20, 2015. – Pp. 83 – 84.

26. Митрофанов В.П. Теория идеальной пластичности как элементарная механика псевдопластического предельного состояния бетона: основы, ограничения, практические аспекты, совершенствование /В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов: Сб. науч. тр. – К.: Техника, 2006. – Вып. 72. – С. 6–26.

Mitrofanov V.P. Teoriya idealnoi plastichnosti kak elementarnaya mekhanika psevdoplasticheskogo predelnogo sostoyaniya betona: osnovi, ogranicheniya, prakticheskie aspekti, sovershenstvovanie /V.P. Mitrofanov // Kommunalnoe khozyaistvo gorodov: Sb. nauch. tr. – K.: Tekhnika, 2006. – Vip. 72. – S. 6–26.

27. Митрофанов В.П. Про можливість застосування передумови про ідеальну пластичність до бетона/ В.П. Митрофанов, В.В. Погребной, О.А. Довженко// Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2002. – Вип. 7. – С. 118–124.

Mitrofanov V.P. Pro mozhlivist zastosuvannya peredumovi pro idealnu plastichnist do betona/ V.P. Mitrofanov, V.V. Pogrebnoi, O.A. Dovzhenko// Visnik Odeskoї derzhavnoї akademії budivnitstva ta arkhitekturi. – Odesa: ODABA, 2002. – Vip. 7. – S. 118–124.

28. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki metallov davleniem / V.L. Kolmogorov. – M.: Metallurgiya, 1986. – 688 s.

29. Погрибний В.В. Методологія розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування: монографія/ В.В. Погрибний. – Полтава: ПП «Астроя», 2022. – 388 с.

Pogribnii V.V. Metodologiya rozrakhunku nesuchoї zdatnosti zalizobetonnikh i kamyanikh konstruksii z vikoristannyam umov yekstremumu deformuvannya: monografiya/ V.V. Pogribnii. – Poltava: PP «Astraya», 2022. – 388 s.

30. Pohribnyi V. The improved technique for calculating the concrete elements strength under local compression/ V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, I. Kuznietsova, D. Usenko// MATEC Web of Conferences. – 2018. –Vol. 230, 02025.

31. Dovzhenko O. Strength calculation of risers near the supports of reinforced concrete three-hinged frames based on the concrete plasticity theory/ O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, Ye. Klymenko, M. Oreškovič, O. Maliovana// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708 (1), 012046.

32. Usenko D. Masonry strengthening under the combined action of vertical and horizontal forces / D. Usenko, O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, O. Zyma // Proceedings of the 2020 session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, held in Paris, France, August 26-28, 2020. – Pp. 193 – 199.