

ОЦІНКА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСОЛЕЙ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ

ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE CORBELS TAKING INTO ACCOUNT THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF CONCRETE

Кириченко В.А., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-9018-842X (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»); **Мищенко М.О.,** аспірант, ORCID: 0009-0006-4419-649X (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Kyrychenko V.A., PhD, Associate professor, ORCID: 0000-0001-9018-842X (National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”); **Myshchenko M.O.,** post graduate student, ORCID: 0009-0006-4419-649X (National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”)

Обґрунтовується необхідність врахування деформаційних властивостей бетону при визначенні несучої здатності залізобетонних консолей. Показано, що крім міцності на стиск, відмінності в модулі пружності, міцності на розтяг, а також граничних деформацій суттєво впливають на роботу залізобетонних консолей. Автори підкреслюють, що висновки щодо опору консолей, отримані для одного класу бетону, не можуть бути безпосередньо перенесені на конструкції з бетону іншого класу.

Modern methods of calculating reinforced concrete corbels under vertical load and potential opportunities for their improvement from the point of view of taking into account the deformation characteristics of materials are considered. The study demonstrates that commonly used models for assessing the resistance of reinforced concrete corbels are significantly simplified – both in terms of their geometric representation and in accounting for the deformation behavior of materials. The article analyzes the deformation characteristics of concretes of various strength classes, revealing potentially different failure mechanisms. Numerical simulations of corbel's resistance are presented, including material nonlinearity and crack formation. These simulations reveal internal force trajectories that deviate from those predicted by conventional models and vary across different loading stages. The obtained trajectories are compared with those predicted by the Strut-and-Tie Model, which is widely applied in corbel's resistance analysis. The paper highlights that current design standards recommend using a deformation-based model

for reinforced concrete structures, which considers the complete compression and tension diagrams of concrete, the nonlinear behavior of reinforcement, and their combined deformation. However, the models currently in use do not account for the deformability of materials in any way. It is shown that, in addition to compressive strength, parameters such as the modulus of elasticity, tensile strength, and ultimate strains significantly impact the behavior of reinforced concrete corbels. The authors stress that conclusions regarding corbel's resistance derived for one concrete class cannot be directly applied to structures made with concrete of a different class. This supports the need for further research into the influence of the deformation properties of both concrete and reinforcement when evaluating the bearing capacity of reinforced concrete corbels.

Ключові слова:

Залізобетонні консолі, деформаційна модель, чисельне моделювання.
Reinforced concrete corbels, deformation model, numerical simulation.

Вступ. Короткі залізобетонні консолі, що сприймають переважно вертикальні навантаження, є важливими елементами конструкцій промислових будівель. Розподіл напружень у таких елементах у граничному стані достатньо складний і суттєво відрізняється залежно від їхньої геометрії, умов навантаження, деформативності бетону й арматури, тощо.

Обґрунтованість застосування тієї чи іншої моделі для кожної конкретної задачі є складним і актуальним питанням та вирішується за допомогою співставлення з результатами експериментальних досліджень, що накопичені впродовж останніх 50-60 років. Відкидаючи такі варіанти руйнування, як зминання приопорної ділянки та втрата міцності анкерування закладних деталей, яким можна запобігти конструктивними заходами, залишаються два основні види втрати несучої здатності: внаслідок текучості робочої арматури консолі та внаслідок вичерпання міцності бетону на стиск в межах похилої стиснутої смуги.

Аналіз останніх досліджень. Теоретичні [1-6] та експериментальні [7-8] дослідження, а також норми проектування залізобетонних конструкцій вказують на можливі варіанти настання граничного стану, які вже достатньо докладно описані [1]. Незважаючи на те, що розрахунки залізобетонних консолей у різних нормах і рекомендаціях мають спільну теоретичну основу, питання подальших досліджень залишається актуальним. Це обумовлено складністю геометричної форми елементів, нелінійною роботою матеріалів та неоднорідним напружено-деформованим станом бетону. Така невизначеність у теоретичному описі спричиняє труднощі, насамперед, у виборі форми та розмірів стиснутого підкосу.

Метою роботи є аналіз напружено-деформованого стану залізобетонних консолей із урахуванням деформівних характеристик бетону та уточненням

траєкторії зусиль в різних стадіях навантаження, що дозволить підвищити точність інженерних розрахунків та оптимізувати конструктивні рішення.

Результати дослідження. Найчастіше використовуваною моделлю, котра застосовується при визначенні несучої здатності залізобетонних консолей при руйнуванні стиснутого бетону є модель STM (Strut-and-Tie Model) [1], як одна з найбільш універсальних і широко застосовуваних для аналізу та розрахунку залізобетонних конструкцій, особливо у випадках складної геометрії.

Особливе значення ця модель має для розрахунку залізобетонних консолей, де руйнування часто відбувається через втрату несучої здатності стиснутої нахиленої бетонної смуги. У таких конструкціях в граничному стані розподіл напружень є суттєво нелінійним, а стиснута смуга може мати складну форму, що викликає питання при застосуванні традиційних методів. Модель STM дозволяє абстрагуватися від цих складностей, розглядаючи стиснуту зону у вигляді підкосу, який взаємодіє у вузлах з розтягнутими арматурними стержнями, забезпечуючи рівновагу. Цей підхід дозволяє наближено враховувати траєкторії напружень, що виникають у конструкції, й отримати аналітичні залежності відповідно до розрахункової схеми.

Хоча вказана модель і є популярним інструментом для аналізу граничного стану залізобетонних конструкцій, але, як і будь-який метод, вона має свої недоліки, основними з яких можуть бути надмірна спрощеність моделі. Приведення розрахункової схеми до системи стиснутих підкосів, тяжів та вузлів може не завжди відображати реальний розподіл напружень, особливо в областях зі складною геометрією. Унаслідок нелінійності роботи матеріалів траєкторії внутрішніх сил в бетоні змінюються при зміні рівня навантаження, та у граничному стані мають більш складну форму, ніж передбачає модель.

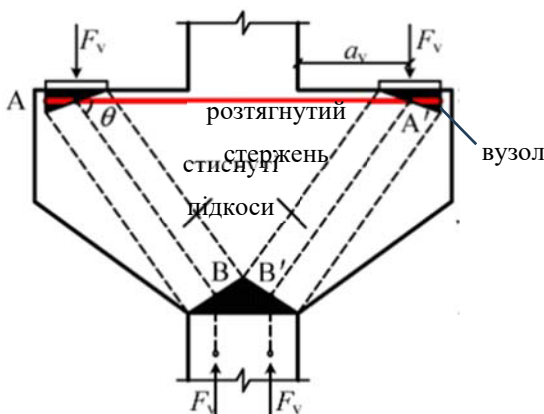


Рис. 1. Розрахункова схема моделі STM [2]

До того ж розташування та розміри елементів розрахункової схеми

(стиснутих підкосів та вузлів) не можуть бути визначені однозначно, опираючись на геометричні параметри елемента. Наприклад, розміри похилого стиснутого елемента у верхній частині визначаються розмірами площадки спирання, що не може бути абсолютно виправданим. Таким чином, неправильне визначення траєкторій напружень або розміщення вузлів моделі може призвести до суттєвих неточностей у результатах розрахунків. На рис. 2 наведені траєкторії головних напружень у бетоні у різних стадіях навантажування, отримані методом скінченних елементів для бетону C25/30 із урахуванням його нелінійного деформування.

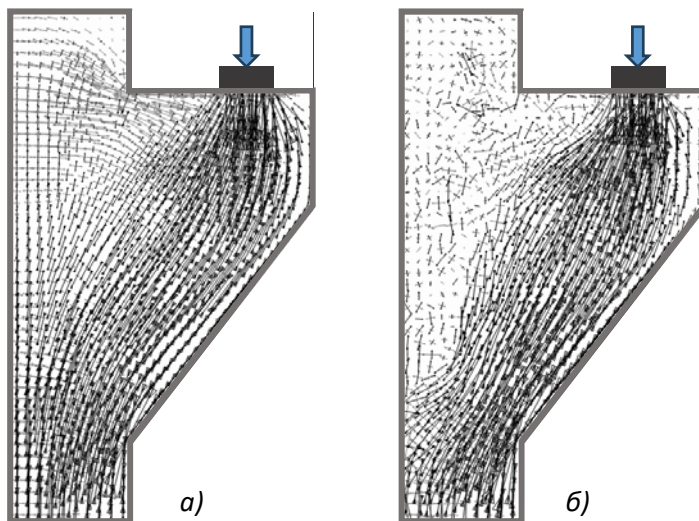


Рис. 2. Траєкторії головних стискаючих напружень у бетоні (наведена половина симетричної моделі)
а) у початковій стадії навантажування; б) у граничній стадії

Відповідно ДБН В.2.6-98:2009 "Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення", розрахунок бетонних і залізобетонних конструкцій рекомендується виконувати з використанням деформаційної моделі бетону. Натомість, модель STM взагалі не враховує рівень деформацій у матеріалах у граничному стані, що може бути критичним у деяких випадках та потребує додаткових досліджень, наприклад, шляхом використання методу скінченних елементів. Крім вище вказаного, STM базується на припущенні, що бетон працює лише на стиск, а арматура – лише на розтяг, без урахування впливу поперечних деформацій та тріщиноутворення у бетоні.

Альтернативні підходи до визначення несучої здатності залізобетонних консолей [2-4] також не враховують рівень деформацій як бетону так і

арматури, хоча розвиток тріщин, що безпосередньо залежить від деформацій, може суттєво впливати на несучу здатність консолі.

Різні класи бетону мають суттєво різну межу міцності на розтяг і стиск, модуль пружності, різні деформації, у яких досягається межа міцності, а також діаграму деформування загалом (рис. 3). Із підвищенням класу бетону модуль пружності зростає набагато повільніше ніж міцність. Так для бетонів C20/25 – C50/60 відношення E_{cm}/f_{cm} змінюється від 1070 до 630 відповідно. Значення межі міцності на стиск і на розтяг також змінюється непропорційно.

Ці відмінності безпосередньо впливають на поведінку конструкції, особливо в стадії, що передує руйнуванню. Зокрема, залізобетонні консолі, виготовлені з бетонів різного класу, за однакових умов навантаження, геометрії та відносної міцності бетону та арматури можуть демонструвати кардинально різні сценарії руйнування. Наприклад, низькоміцні бетони мають менший модуль пружності, що може спричиняти значніші деформації та більше перерозподілення напружень перед руйнуванням. Водночас високоміцні бетони характеризуються підвищеною жорсткістю, що знижує їхню здатність до пластичних деформацій і робить їх більш крихкими, з утворенням раптових руйнувань.

З метою оцінювання відповідності схеми передачі зусиль за розрахунковою схемою STM та впливу характеристик (в тому числі і деформівних) на результати міцності, методом скінченних елементів досліджено напружено-деформований стан консолей із бетону класів C20/25 та C50/60. Параметри моделі, зокрема, площа арматури, прийняті такими, щоб забезпечити втрату несучої здатності внаслідок руйнування бетону.

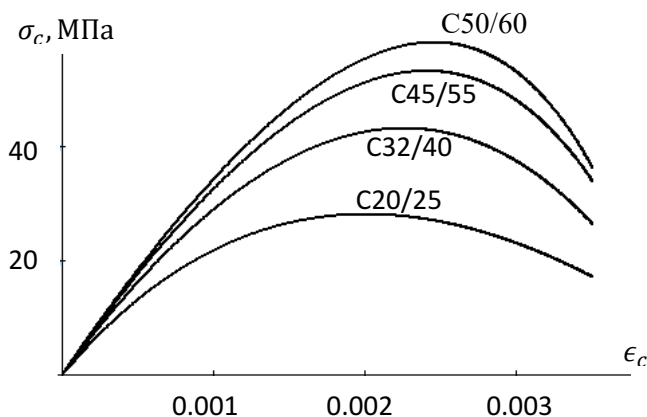


Рис. 3. Діаграми стиску бетонів відповідно до [9]

На рис. 4 показано графіки “навантаження-переміщення”, які показують суттєву різницю в поведінці навантаження тільки після досягнення його піку. Міцніший бетон показує більш різкий спад навантаження, що вказує на більшу його здатність до крихкого руйнування.

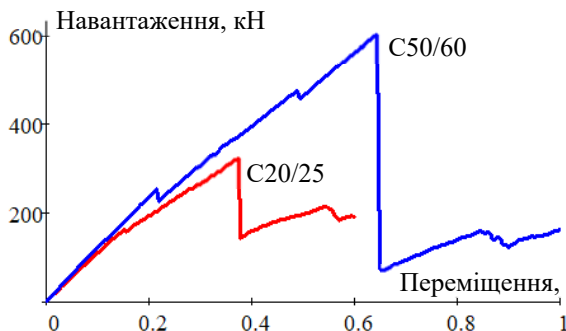


Рис. 4. Залежності “Навантаження-переміщення”

На рис. 5 показано епюри головних стискаючих напружень у горизонтальних перерізах у граничній стадії для бетонів C20/25 та C50/60. Результати показують, що розміри стиснутого підкошу за аналітичною моделлю (рис. 1) можуть суттєво відрізнятися від дійсних.

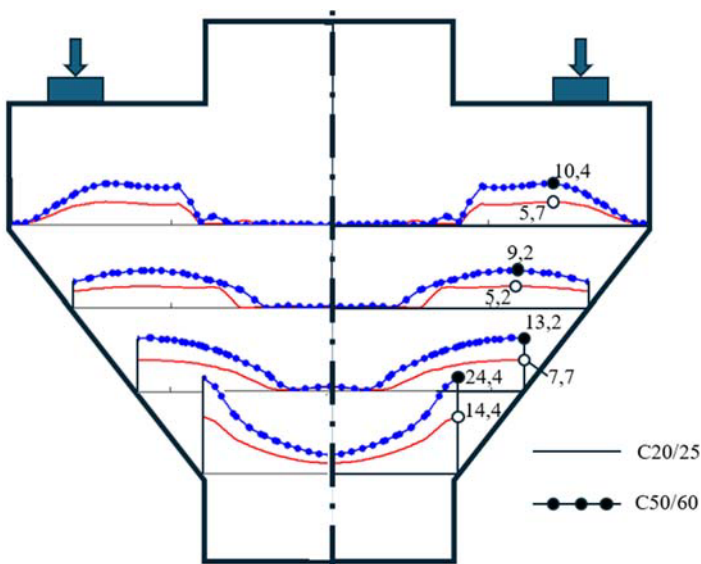


Рис. 5. Епюри головних стискаючих напружень у бетоні у граничній стадії

В той же час, за результатами чисельного моделювання, значення головних стискаючих напружень у граничній стадії є суттєво нижчими від значення f_{cm} . Останнє можна пояснити високим рівнем напружень розтягу у напрямку, перпендикулярному до силових ліній стискаючих напружень. Все це вказує на доцільність урахування таких характеристик бетону як міцність на розтяг та діаграми стиску при визначенні несучої здатності залізобетонних консолей.

Висновки. Схема передачі зусиль, що застосовується в аналітичних моделях при визначенні міцності консолей, не завжди може бути однозначно передбачена. Відмінності в міцності, жорсткості та деформаційних характеристиках впливають на механізм розподілу напружень, процес розвитку тріщин та характер руйнування. Це підкреслює важливість подальших досліджень поведінки залізобетонних консолей із урахуванням параметрів деформування матеріалів.

1. Q.M. Shakir. Analysis, behavior, strengthening and repairing of reinforced concrete corbels: Comprehensive review,” Journal of Materials and Engineering Structures, vol. 10, no. 2, pp. 157-184, 2023. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/373198750>

2. Megahed, K. STM-based symbolic regression for strength prediction of RC deep beams and corbels. Sci Rep 14, 25066 (2024). – Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74803-9>.

3. Shailendra Kumar, S.V. Barai. Neural networks modeling of shear strength of SFRC corbels without stirrups. // Applied Soft Computing. Volume 10, Issue 1, 2010, Pages 135-148. ISSN 1568-4946. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.06.012>.

4. Dawood A., Kadhum A., Abdul Razzak K. Strength of Reinforced Concrete Corbel – A Parametric Study // International Journal of Civil Engineering and Technology. Vol.9, No. 11, pp. 2274–2288, 2018.

5. ACI Committee 318, 2011, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, pp. 190-194.

6. Kriz L. B., Raths C. H. Connections in Precast Concrete Structures—Strength of Corbels // Journal of the Prestressed Concrete Institute, V. 10, No. 1, Feb. 1965, pp. 16-61.

7. Mattock A., Chen K., Soongswan K., The Behavior of Reinforced Concrete Corbel // PCI Journal, vol. 21, no. 2, pp. 52-77, 1976. DOI:10.15554/pci.03011976.52.77

8. Shabbir F., Bahrami A., Ahmad I., Shakouri Mahmoudabadi N., Iqbal M., Ahmad A., Özkılıç Y. O. Experimental and Numerical Investigation of Construction Defects in Reinforced Concrete Corbels / F. Shabbir, A. Bahrami, I. Ahmad, N. Shakouri Mahmoudabadi, M. Iqbal, A. Ahmad, Y. O. Özkılıç // Buildings. – 2023. – Vol. 13, № 9. – C. 2247. – DOI: 10.3390/buildings13092247.

9. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT). – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 89 с.

DSTU-N B EN 1992-1-1:2010. Proiektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlia sporud (EN 1992-1-1:2004, IDT). – Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 89 s.