

УДК 624.042

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА КАРТИНУ РОЗТРИСКУВАННЯ БЕТОНУ ВНАСЛІДОК КОРОЗІЇ АРМУВАННЯ

РЕДЧЕНКО В. П.¹, *д.т.н.*

¹ Дніпропетровський комплексний відділ, Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. М. П. Шульгіна», вул. Батумська, 11, к. 303, 49074, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 413-89-09, e-mail: rvp50@meta.ua, ORCID ID: 0000-0001-5938-1467

Анотація. *Мета.* Розтріскування бетонного масиву навколо армування, яке кородує, є дуже розповсюдженим явищем та становить значну частину від усіх дефектів залізобетонних конструкцій. Картина розтріскування бетону, яка спостерігається при цьому, є досить різноманітною та залежить від багатьох факторів. Встановлення картини розтріскування бетону навколо армування, що кородує, в залежності від дизайну залізобетонного елемента є метою даного дослідження. *Методика.* Виконано пошук інформації за темою дослідження в публікаціях, що дозволило виділити основні відомі моделі розтріскування бетону внаслідок корозії армування. Проведено узагальнення власних натурних досліджень і встановлено відмінності між натурними даними та відомими моделями. Експериментальні дослідження дозволили створити уточнені моделі розтріскування бетону. *Результати.* Встановлено, що картина розтріскування бетону навколо арматурного стрижня, що кородує, залежить від дизайну залізобетонного елемента. В першу чергу ця залежність проявляється від відношення між діаметром стрижня та товщиною захисного шару бетону. Так фронтальна тріщина на поверхні бетону навпроти стрижня буде лише при відносно малій товщині захисного шару. При зростанні відносної товщини захисного шару таких тріщин буде декілька, а при подальшому зростанні фронтальна тріщина зовсім не утворюється. При відносно значній товщині захисного шару бетону в неагресивному середовищі тріщини взагалі не виходять на поверхню. Ще більше різноманіття картини розтріскування спостерігається при наявності групи стержнів, розташування стрижня в ребрі елемента і т.п. *Наукова новизна.* Уточнені моделі розтріскування захисного шару бетону внаслідок корозії армування. Встановлені залежності картини розтріскування від відношення діаметра стрижня до товщини захисного шару бетону. *Практична значимість.* Використання результатів дослідження вже на стадії проектування дозволяє прогнозувати яким чином відбудеться руйнування захисного шару бетону внаслідок корозії армування та мінімізувати об'єми руйнування. Розуміння процесів розтріскування дозволяє правильно оцінити та діагностувати стан конструкції за тріщинами на поверхні залізобетонного елемента при натурних обстеженнях.

Ключові слова: залізобетон; арматурний стрижень; корозія армування; захисний шар бетону; розтріскування бетону

ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА КАРТИНУ РАСТРЕСКИВАНИЯ БЕТОНА ВСЛЕДСТВИИ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

РЕДЧЕНКО В. П.¹, *д.т.н.*

¹ Днепропетровский комплексный отдел, Государственное предприятие «Государственный дорожный научно-исследовательский институт им. М. П. Шульгина», ул. Батумская, 11, к.303, 49074, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (050) 413-89-09, e-mail: rvp50@meta.ua, ORCID ID: 0000-0001-5938-1467

Аннотация. *Цель.* Растрескивание бетонного массива вокруг армирования, которое корродирует, очень распространенное явление и составляет значительную часть от всех дефектов железобетонных конструкций. Картина растрескивания бетона, которая наблюдается при этом, весьма разнообразна и зависит от многих факторов. Установление картины растрескивания бетона вокруг армирования, что корродирует, в зависимости от дизайна железобетонного элемента является целью данного исследования. *Методика.* Выполнен поиск информации по теме исследования в публикациях, что позволило выделить известные модели растрескивания бетона вследствие коррозии армирования. Проведено обобщение собственных натурных исследований и установлены различия между натурными данными и известными моделями. Экспериментальные исследования позволили создать уточненные модели растрескивания бетона. *Результаты.* Установлено, что картина растрескивания бетона вокруг арматурного стержня, который корродирует, зависит от дизайна железобетонного элемента. В первую очередь на эту зависимость влияет величина отношения диаметра стержня к толщине защитного слоя бетона. Так фронтальная трещина на поверхности бетона напротив стержня появляется лишь при относительно малой толщине защитного слоя. При росте относительной толщины защитного слоя таких трещин будет несколько, а при дальнейшем росте фронтальная трещина совсем не образуется. При относительно значительной толщине защитного слоя в неагрессивной среде трещины вообще не выходят на поверхность. Еще большее многообразие картины растрескивания наблюдается при наличии группы стержней, расположения стержня в ребре элемента и т.п.. *Научная новизна.* Уточнены модели растрескивания защитного слоя бетона в результате коррозии армирования. Установлены зависимости картины растрескивания от отношения диаметра стержня к толщине защитного слоя бетона. *Практическая значимость.* Использование результатов исследования уже на стадии проектирования позволяет прогнозировать как произойдет разрушение защитного слоя бетона в результате коррозии армирования и тем самым минимизировать объемы

разрушений. Понимание процессов растрескивания позволяет правильно оценить и диагностировать состояние конструкции по виду трещин на поверхности железобетонного элемента при натуральных обследованиях.

Ключевые слова: железобетон; арматурный стержень; коррозия армирования; защитный слой бетона; растрескивание бетона

FACTORS OF INFLUENCE ON THE PATTERNS CRACKING IN CONCRETE COVER DUE TO CORROSION OF REBAR

REDCHENKO V. P.¹, *Dr. Sc. (Tech.)*.

¹Dnipropetrovsk department, State Enterprise «State Road Scientific Research Institute Named After M. P. Shulgin», of.303, b.11, Batumskaja str., Dnipropetrovsk 49074, Ukraine, +38 (050) 413-89-09, e-mail: rvp50@meta.ua, ORCID ID: 0000-0001-5938-1467

Abstract. Purpose. Cracking of the concrete area around the reinforcement, which corrodes, a very common phenomenon and is a significant part of all defects in concrete structures. Painting concrete cracking, which occurs during this very varied and depends on many factors. Establishing pattern around the reinforcement of concrete cracking that corrodes depending on the concrete design element is the aim of this study. **Methodology.** Searched information on research publications, which allowed the model to provide a certain concrete cracking due to corrosion of reinforcement. The generalization of their own field studies and established the distinction between field data and the known models. Experimental studies have helped to create more accurate models of concrete cracking. **Findings.** Found that the cracking of the concrete around the pattern of the reinforcing bar which corrodes, depends on the design of reinforced concrete element. First of all, this dependence affects the ratio of the diameter of the rod to the thickness of the protective layer of concrete. So crack front at the surface of the concrete in front of the bar there is only a relatively small thickness of the protective layer. With the growth of the relative thickness of the protective layer of the cracks will be a few, and with further increase of the crack front is not formed. With a relatively large thickness of the protective layer in non-aggressive environment cracks do not come to the surface. Even more variety cracking pattern is observed when the group of rods arranged in the edge of the rod member and the like. **Originality.** Clarified model of concrete cover cracking due to corrosion of reinforcement. The dependences of paintings from cracking ratio of the diameter of the rod to the thickness of the concrete cover. **Practical value.** Using the results of the study at the design stage allows to predict how will the destruction of the protective layer of concrete due to corrosion of the reinforcement, and thereby minimize the amount of damage. Understanding the processes of cracking can properly evaluate and diagnose the condition of the structure by type of cracks on the surface of the concrete element in field surveys.

Keywords: concrete; rebar; corrosion of reinforcement; concrete cover; cracking of concrete

Вступ

Аналізуючи досвід обстеження та проектування ремонту залізобетонних конструкцій, можна побачити, що значну частину загального об'єму всіх корозійних дефектів займають дефекти, які пов'язані з руйнуванням захисного шару бетону внаслідок його розтріскування та відшарування від арматури, яка вражена корозією. Розтріскування та руйнування захисного шару бетону в цьому випадку відбувається внаслідок розпирання бетону зсередини продуктами корозії арматури, об'єм яких в 2 – 2,5 рази більший ніж початковий об'єм прокородованої сталі. Відновлення зруйнованого захисного шару бетону пов'язане зі значними фінансовими затратами та складними технологічними завданнями. Саме тому процесу руйнування захисного шару бетону внаслідок корозії армування присвячено багато досліджень в усьому світі. Перші публікації за цією тематикою з'явилися у кінці минулого століття, коли були запропоновані аналітико-експериментальні [1-3] та чисельні [4,5] моделі розтріскування бетону внаслідок корозії сталеві стержневої арматури. Критичний огляд недоліків цих моделей можна знайти в літературі наступних років, напр. [6]. В останнє десятиліття, внаслідок розвитку таких

чисельних методів, як Метод скінчених різниць (FDM), Метод скінчених елементів (FEM) та Метод граничних елементів (BEAM), стало можливим створення моделей із врахуванням хімічних, електрохімічних, дифузійних та багатьох інших процесів, які протікають в залізобетоні та викликають корозію сталеві арматури і розтріскування бетону, що її оточує [6-10]. Розвинулись і методи експериментального дослідження цього процесу [11]. В той же час, незважаючи на всі сучасні досягнення, в згаданих дослідженнях наявні певні розбіжності, а це свідчить про те, що моделювання процесу продовжує розвиватися і ще потребує додаткових досліджень.

Мета

Означена проблема є також актуальною і в рамках проведення технічної діагностики залізобетонних конструкцій, а також їх проектування за умов мінімізації наступних руйнувань захисного шару бетону внаслідок корозії армування. З цієї точки зору необхідно добре розуміти картину зародження та розвитку тріщин в захисному шарі бетону на різних стадіях корозії армування, а також знати ті фактори, які впливають на характер та розміри цих тріщин. Встановлення картини розтріскування бетону

навколо армування, що кородує, в залежності від дизайну залізобетонного елемента і є метою даного дослідження.

Методика

Виконано пошук інформації за темою дослідження в публікаціях, що дозволило виділити основні відомі моделі розтріскування бетону внаслідок корозії армування. Проведено узагальнення власних натурних досліджень і встановлено відмінності між натурними даними та відомими моделями. Експериментальні дослідження з використанням програмного комплексу, що реалізує метод скінчених елементів, дозволили створити уточнені моделі розтріскування бетону.

Результати досліджень

Аналіз публікацій. Процес розтріскування бетону внаслідок корозії армування в переважній більшості досліджують за трьома основними напрямками для встановлення:

- залежності між розміром розкриття тріщини та ступенем корозійного враження арматурного стрижня;
- часу між моментами зародження тріщини та її появою на поверхні бетону;
- швидкості розвитку корозії армування в різних агресивних середовищах.

Дослідженню картини розповсюдження тріщин в бетоні приділено недостатньо уваги, при цьому в моделях різних авторів вона різна. В одних моделях наявна лише одна радіальна тріщина, в інших їх декілька, а зони розлому різні. Нижче наведені найбільш популярні моделі утворення тріщин в бетоні через корозію арматури.

Базант (Bazant) використав аналітичні формули моделі товстостінного циліндра для оцінки напружень в бетоні внаслідок корозії арматурного стрижня [1]. Він припустив, що захисний шар не руйнується в перший же момент зародження тріщини, а проходить певний час від моменту зародження тріщини до її появи на поверхні бетону. При цьому, коли відстань між стрижнями достатньо велика, то тріщини розвиваються від стрижня до поверхні бетону (рис. 1а), при більшій відстані між стрижнями тріщина розвивається від стрижня до стрижня вздовж бетонної поверхні (рис. 1б).

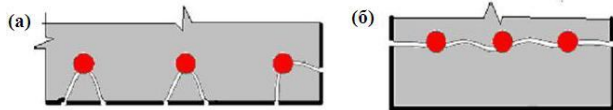


Рис. 1. Картина тріщин в бетоні за моделлю Базанта / Pattern of cracks in the concrete cover due reinforcement corrosion by Bazant

Лю (Liu) в своїй дисертаційній роботі [2], яку він виконав під керівництвом **Вейерса** (Weyers) удосконалив модель товстостінного циліндра та дав формулу залежності між товщиною шару іржі та

розкриттям тріщини на поверхні бетону. В його експериментальних зразках залізобетонних плит тріщини внаслідок корозії армування розташовувалися на поверхні бетону навпроти стрижнів, як це показано на рис. 2.

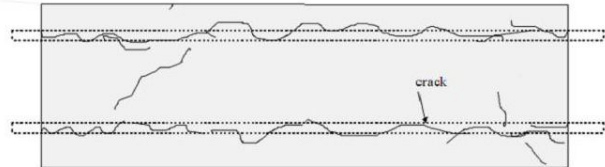


Рис. 2. Тріщини на поверхні бетонних плит в експерименті Лю / Cracks in the surface of the concrete slabs in the experiment Liu

Відповідно до результатів експериментів було сформульовано, що тріщина розвивається від стрижня до поверхні бетону радіально і при цьому на додаток може утворитися ще одна чи дві тріщини меншого розкриття з певним відхиленням від основної тріщини, як це показано на рис. 3. Така модель була дуже зручною для встановлення залежності між ступінню корозії сталевго стрижня та величиною розкриття тріщини на поверхні бетону.

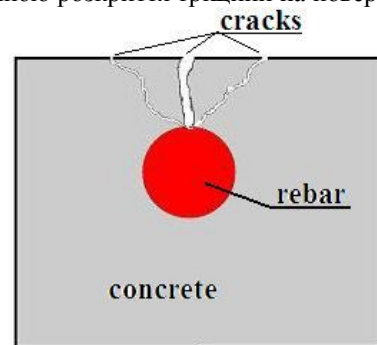


Рис. 3. Картина тріщин в бетоні за моделлю Лю / Pattern of cracks in the concrete cover due reinforcement corrosion by Liu

Експериментальні дослідження Лю, які показали, що тріщина в захисному шарі бетону утворюється радіально навпроти сталевго стрижня, в подальшому використовувалися багатьма дослідниками для перевірки своїх моделей. Таку картину розвитку тріщини подано в моделях багатьох авторів, наприклад, в чисельній моделі **Солгарда** та ін. (Solgaard et al) [12].

У розвиток цієї ж моделі **Мічел** та ін. (Michel et al) подають процес розтріскування бетону як такий, що поділяється на два етапи [13]:

- на початку тріщина зароджується на контакті бетону та досить тонкого шару продуктів корозії арматурного стрижня, при цьому її розвиток відбувається у напрямі до зовнішньої поверхні бетону (рис. 4а);

- після досягнення тріщиною відкритої поверхні бетону спостерігається залежність між зростанням ступеню корозії армування та збільшенням розкриття тріщини (рис. 4б).

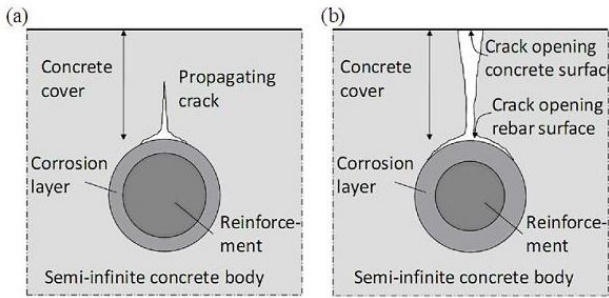


Рис. 4. Зародження та розвиток тріщини (з публікації [13]) / Pattern of cracks in the concrete cover due reinforcement corrosion by Michel et al

Ця модель добре узгоджувалася з результатами цілого ряду експериментів, особливо в тих, де експериментальний зразок мав циліндричну форму – рис. 5.

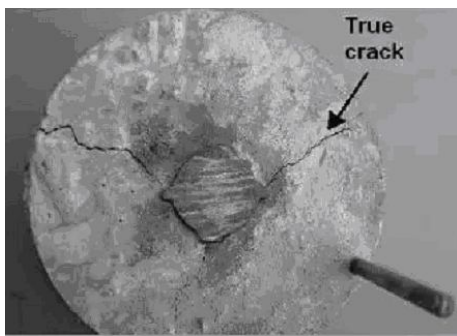


Рис. 5. Картина розтріскування циліндричного зразка (з публікації [14]) / Pattern of cracks cylindrical sample [14]

Разом з тим є публікації, в яких відмічається наявність в картині розтріскування бетонного масиву не тільки радіальних (фронтальних) тріщин, а також і “горизонтальних” тріщин [7,15,16], як це показано на рис. 6. При цьому, на відміну від попередньо розглянутих моделей, фронтальна тріщина починає свій розвиток з поверхні бетону, а зона руйнування захисного шару бетону лежить далеко за межами зони, яку можна охарактеризувати як “навпроти стрижня”.

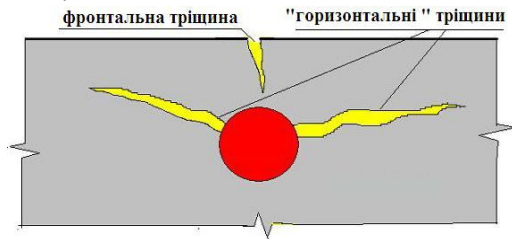


Рис. 6. Картина розтріскування бетону (з публікації [15]) / Pattern of cracks concrete cover [15]

Як показав огляд публікацій, за різними моделями картини розтріскування бетону внаслідок корозії армування відрізняються. Пояснень цим відмінностям в розглянутих публікаціях не дається. Під час натурних обстежень залізобетонних конструкцій (на протязі 20 років автором виконано детальні обстеження близько 400 залізобетонних

мостів) доводилося бачити найрізноманітніші картини руйнувань захисного шару бетону внаслідок корозії армування. Частина з них відповідає розглянутим вище моделям, але у ряді випадків картина розтріскування бетону відрізняється. Так на рис. 7 представлено фрагмент сколотого захисного шару, який подібний до моделі на рис. 6, але фронтальна тріщина в натурному випадку відсутня. Також слід відмітити випадки, коли при розбиранні залізобетонних конструкцій, які відпрацювали 70 і більше років, можна було бачити вражене корозією армування, але захисний шар бетону навколо стрижнів залишався цілісним. Саме тому метою виконаних досліджень було встановлення факторів, які впливають на картину розтріскування бетону внаслідок корозії армування.



Рис. 7. Фото фрагменту захисного шару бетону сколотого внаслідок корозії армування / Photo of the concrete cover, which broke away due to corrosion of reinforcement

Результати досліджень. Аналітична модель у вигляді товстостінного циліндра показує, що напружений стан бетону навколо арматурного стрижня, який кородує, залежить від відношення радіуса стрижня (r) до товщини захисного шару бетону (h) [1]. Слід припустити, що і у випадку іншої конфігурації бетону навколо стрижня напружений стан, а отже і картина розтріскування залежить від відносних розмірів стрижня та розмірів бетону, що його оточує. Дослідження виконувалося на чисельній моделі створеній у програмному середовищі, що реалізує метод скінчених елементів [7]. Нижче наведені його основні результати.

Для випадку, коли $h > 8r$ і бетонний масив навколо арматурного стрижня однорідний, з початком корозії сталі тріщини в бетоні зароджуються поблизу поверхні стрижня та з розвитком корозії рівномірно і радіально розповсюджуються в глибину бетону – рис. 8.

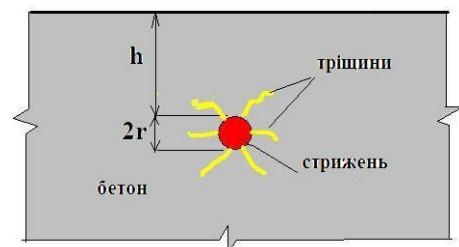


Рис. 8. Картина тріщин навколо стрижня, що кородує для випадку, коли $h > 8r$ / Pattern of cracks due to corrosion of reinforcement, when is $h > 8r$

З розвитком корозії тріщини збільшують свою довжину, а по контактній поверхні бетон-сталь збільшуються напруження стиснення. Саме ці

напруження стиснення ущільнюють продукти корозії настільки, що корозійний процес уповільнюється, а за відсутності агресивних чинників повністю зупиняється. При цьому розвиток тріщин в бетоні теж зупиняється. Умова $h > 8r$ встановлена на основі тих випадків, які доводилося бачити автору при обстеженні натурних конструкцій. Звичайно, що ця умова буде залежати від багатьох факторів таких як: клас бетону, марка сталі, властивості продуктів корозії, агресивність навколишнього середовища та ін.

При зменшенні товщини захисного шару бетону рівномірний розподіл напружень навколо арматурного стрижня змінюється з утворенням двох виражених зон максимальних розтягуючих напружень в бетоні. Ці зони розташовані вздовж діаметра стрижня паралельно вільній грані бетону. Розвиток тріщи відбувається під кутом α до вільної поверхні бетону. За умови $3r < h < 8r$ величина нахилу тріщин знаходиться в межах $\alpha = 15^\circ - 30^\circ$ та залежить від відношення h/r при зменшенні цього відношення кут зростає – рис. 9. Руйнування захисного шару бетону в цьому випадку відбувається одним блоком у вигляді трикутника (чи трапеції) – рис. 9.

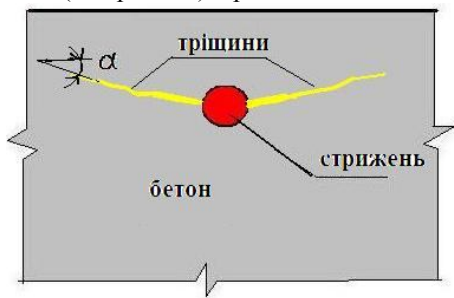


Рис. 9. Картина тріщин в бетоні при корозії стрижня за умови $3r < h < 8r$ / Pattern of cracks due to corrosion of reinforcement, when is $3r < h < 8r$

За умови $r < h < 3r$ після певного розвитку похилих тріщин на поверхні бетону навпроти арматурного стрижня з'являється ще одна зона розтягуючи напружень і відповідно починається розвиток фронтальної тріщини – рис. 10. Руйнування захисного шару бетону в цьому випадку відбувається двома блоками у вигляді трикутників.



Рис. 10. Картина тріщин в бетоні при корозії стрижня за умови $r < h < 3r$ / Pattern of cracks due to corrosion of reinforcement, when is $r < h < 3r$

За умови $h < r$ зона максимальних розтягуючи напружень вже на початку корозії стрижня знаходиться навпроти нього. В цьому випадку розвивається фронтальна тріщина з поверхні бетону, потім розвиваються бокові тріщини, що разом призводить до руйнування захисного шару бетону двома невеликими фрагментами – рис. 11.

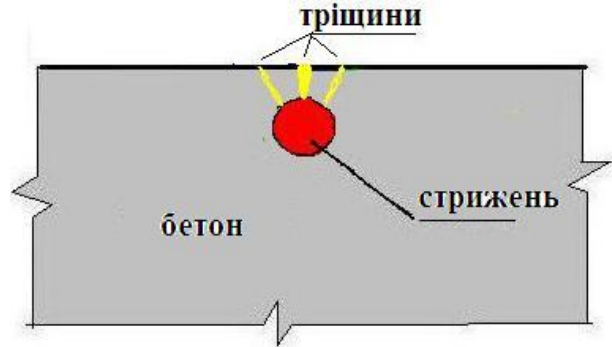


Рис. 11. Картина тріщин в бетоні при корозії стрижня за умови $h < r$ / Pattern of cracks due to corrosion of reinforcement, when is $h < r$

Слід розуміти, що вказані вище значення відношення h/r для різних картин тріщиноутворення, насправді є не такими строгими та залежать від багатьох факторів, як то: неоднорідність бетону, конфігурація зовнішньої поверхні бетону, форма перерізу арматури та ін. Так для випадку, коли маємо ряд стрижнів, то при достатній товщині захисного шару бетону похилі тріщини від сусідніх стрижнів з'єднуються не виходячи на поверхню, як це показано на рис.16. У випадку, коли арматурний стрижень знаходиться поблизу ребра бетонного тіла (в куті), маємо дві характерні картини руйнування бетону: утворення тріщин при розташуванні центра стержня на бісектрисі кута (рис. 12а) та утворення тріщин при зміщенні стержня до однієї з граней (рис. 12б).

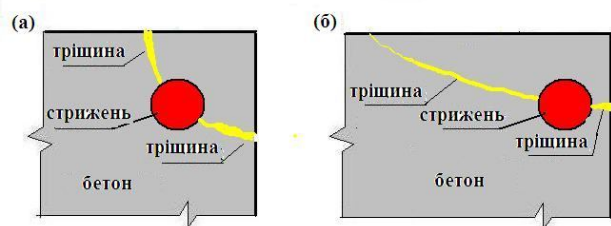


Рис. 12. Картина розтріскування бетону, коли стрижень знаходиться поблизу ребра / Pattern of cracks due to corrosion of reinforcement, when rebar is placed at the ribs

У першому випадку відколювання частини бетонного тіла відбувається по площині, яка близька до перпендикулярної бісектрисі кута. У другому випадку руйнування починається по грані з меншим захисним шаром бетону (це може бути одна або декілька тріщин), а згодом розвивається тріщина під кутом до грані з захисним шаром більшої товщини.

Наукова новизна та практичне значення

В даній роботі показано, що характер руйнування захисного шару бетону внаслідок корозії армування напряму залежить від відношення h/r і це потрібно врахувати при проектуванні залізобетонних конструкцій. Діючі норми не пов'язують призначення товщини захисного шару бетону в залежності від діаметра армування. Як правило товщина захисного шару не перевищує 30мм, а отже і для більшості діаметрів робочого армування маємо величину відношення $h/r=2\dots3$, що є найгіршим випадком з точки зору об'ємів руйнувань захисного шару бетону.

Корисними результати досліджень будуть і при обстеженні залізобетонних конструкцій, оскільки дозволяють краще розуміти повну картину руйнувань бетону за тріщинами, які видно на його поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Bazant Z. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – application / Z. Bazant // Journal of the Structural Division, Vol. 105, 1979, pp. 1155–1166.

Bazant Z. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – application. Journal of the Structural Division, Vol. 105, 1979, pp. 1155–1166.
<http://civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/118-119.pdf>

2. Liu Y. Modelling the time-to-corrosion-cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures / Y. Liu // Ph Dthesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.

Liu Y. Modelling the time-to-corrosion-cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures. Ph Dthesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.

<http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-44541620119653540/Liu.pdf>

3. Alonso C. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion / C. Alonso, C. Andrade, J. Rodriguez, J.M. Diez // Materials and Structures Vol. 31, 1998, pp. 435-441.

Alonso C., Andrade C., Rodriguez J., Diez J.M. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. Materials and Structures. Vol. 31, 1998, pp. 435-441.
<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF02480466.pdf>

4. Molina F. J. Cover cracking as a function of rebar corrosion: part 2 numerical model / F. J.Molina, C. Alonso, C. Andrade // Materials and Structures, Vol. 26(9), 1993, pp. 532–548.

Molina F. J., Alonso C., Andrade C. Cover cracking as a function of rebar corrosion: part 2 numerical model. Materials and Structures. Vol. 26(9), 1993, pp. 532–548.
<http://framcos.org/FraMCoS-8/p502.pdf>

5. Liu Y. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete / Y. Liu, R. Weyers // ACI Materials Journal, Vol. 95(6), 1998, pp. 675–681.

Liu Y., Weyers R. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete. ACI Materials Journal, Vol. 95(6), 1998, pp. 675–681.

Висновки

Дослідження показали, що картина руйнування захисного шару бетону внаслідок корозії армування залежить від дизайну залізобетонного елемента, а саме: відношення товщини захисного шару бетону до радіусу стрижня, конфігурації бетонного тіла навколо стрижня, а також від близькості інших арматурних стрижнів. В залежності від цих факторів об'єми руйнування, а отже і відновлення, захисного шару бетону є різними. Саме тому, вже на стадії проектування можна і треба прогнозувати те, яким чином відбудеться руйнування захисного шару бетону внаслідок корозії армування та мінімізувати об'єми руйнування.

Подальші дослідження необхідно провести з удосконаленою моделлю, в якій буде більш точне врахування пружності іржі та її стримуючої ролі в процесі розвитку корозії при обтисненні.

<http://concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=410>

6. Val D. V. Cover cracking in reinforced concrete elements due to corrosion / D.V. Val, L. Chernin // Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 8, No. 6, 2012, pp. 569-581.

Val D. V., Chernin L. Cover cracking in reinforced concrete elements due to corrosion. Structure and Infrastructure Engineering. Vol. 8, No. 6, 2012, pp. 569-581.

[http://discovery.dundee.ac.uk/portal/en/research/cover-cracking-in-reinforced-concrete-elements-due-to-corrosion\(fb3deaf1-ed16-47aa-ab3b-b283753bdd82\).html](http://discovery.dundee.ac.uk/portal/en/research/cover-cracking-in-reinforced-concrete-elements-due-to-corrosion(fb3deaf1-ed16-47aa-ab3b-b283753bdd82).html)

7. Редченко В.П. Моделі тріщиноутворення в бетоні, викликаної корозією арматури / В. П. Редченко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. –2003. – Вип.67. – с. 74-80.

Redchenko V. P. Modeli trischynoutvorennya v betoni viklikanogo koroziyeju armatury [The models of cracking in concrete cover due to corrosion of rebar]. Avtomobilni dorogi i dorozhne budivnictvo [Roads and road construction], 2003, vol.67, pp. 74-80.

<http://>

8. Balafas I. Environmental effects on cover cracking due to corrosion / I. Balafas, C. J. Burgoyne // Cement and Concrete Research, Vol. 40, 2010, pp. 1429–1440.

Balafas I. Burgoyne C. J. Environmental effects on cover cracking due to corrosion. Cement and Concrete Research, Vol. 40, 2010, pp. 1429–1440.

<http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/p68.pdf>

9. Michel A. Integrated modelling of corrosion-induced deterioration in rein-forced concrete structures / A. Michel, M. R. Geiker, H. Stang, M. Lepech // Proceedings of EUROCORR 2013, Portugal.

Michel A. Geiker M. R., Stang H., Lepech M. Integrated modelling of corrosion-induced deterioration in rein-forced concrete structures. Proceedings of EUROCORR 2013, Portugal.

<http://orbit.dtu.dk/files/83791663/A%20Michel%20-%20Integrated%20modelling%20of%20corrosion-induced%20deterioration%20in%20reinforced%20concrete%20structures.pdf>

10. Chong Cao. Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate / Chong Cao, Moe M. S. Cheung, Ben Y. B. Chan. // Corrosion Science, Vol. 69, 2013, pp. 97–109.

Chong Cao, Moe M. S. Cheung, Ben Y. B. Chan. Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate. *Corrosion Science*, Vol. 69, 2013, pp. 97–109.

http://www.researchgate.net/publication/256690588_Modelling_of_interaction_between_corrosion-induced_concrete_cover_crack_and_steel_corrosion_rate

11. Pease B. Quantifying movements of corrosion products in reinforced concrete using x-ray attenuation measurements / B. Pease, A. Michel, H. Stang // 2 Int. Conf. on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Amsterdam, 2012.

Pease B., Michel A., Stang H. Quantifying movements of corrosion products in reinforced concrete using x-ray attenuation measurements. 2 Int. Conf. on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Amsterdam, 2012.

http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:72832/datastreams/file_6388731/content

12. Solgaard A. O. S. Numerical modeling of concrete due corrosion of reinforcement – Impact of cover thickness and concrete toughness / A. O. S. Solgaard, A. Michel, H. Stang, M. R. Geiker, C. Edvardsen, A. Kuter, // FraMCoS-7, 2010, pp. 952-959.

Solgaard A. O. S., Michel A., Stang H., Geiker M. R., Edvardsen C., Kuter A. Numerical modeling of concrete due corrosion of reinforcement – Impact of cover thickness and concrete toughness. *FraMCoS-7*, 2010, pp. 952-959.

<http://www.framcos.org/FraMCoS-7/07-15.pdf>

13. Michel A. Modeling formation of cracks in concrete cover due to reinforcement corrosion / A. Michel, M. R. Geiker, H. Stang, J. F. Olesen, A. O. S. Solgaard // *FraMCoS-7*, 2010, pp. 944-951, ISBN 978-89-5708-181-5.

Michel A., Geiker M. R., Stang H., Olesen J. F., Solgaard A. O. S. Modeling formation of cracks in concrete cover due to reinforcement corrosion. *FraMCoS-7*, 2010, pp. 944-951, ISBN 978-89-5708-181-5.

<http://www.framcos.org/FraMCoS-7/07-14.pdf>

14. Casorena-Gonzalez J. H. Reinforcement corrosion measurement in reinforced concrete structures from the crack's width in the cover / J.H. Casorena-Gonzalez, J.A. Calderon-Guilden, R. E. Nunez-Jaquez, F. Almeria-Calderon, F. Diaz-Vasquez, C. Barrios-Durstewitz, J. L. Almaral-Sanchez // *ECS Transactions*, No. 15 (1), 2008, pp. 267-274.

Casorena-Gonzalez J. H., Calderon-Guilden J.A., Nunez-Jaquez R. E., Almeria-Calderon F., Diaz-Vasquez F., Barrios-Durstewitz C., Almaral-Sanchez J. L. Reinforcement corrosion measurement in reinforced concrete structures from the crack's width in the cover. *ECS Transactions*, No. 15 (1), 2008, pp. 267-274.

<http://ecst.ecsdl.org/content/15/1/267.full.pdf>

15. Benin A. V. Modelling of fracture process in concrete reinforced structures under steel corrosion / A. V. Benin, A. S. Semenov, S. G. Semenov // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 39, 2010, pp. 168-175.

Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. Modelling of fracture process in concrete reinforced structures under steel corrosion. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 39, 2010, pp. 168-175.

http://www.researchgate.net/publication/44444989_Modelling_of_fracture_process_in_concrete_reinforced_structures_under_steel_corrosion

16. Galvez Jaime C.. Cover cracking of the reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration / Jaime C. Galvez, Santiago Guzman, Jose M. Sancho // *FraMCoS-8*, 2013.

Galvez Jaime C., Santiago Guzman, Jose M. Sancho. Cover cracking of the reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration. *FraMCoS-8*, 2013.

<http://framcos.org/FraMCoS-8/p502.pdf>

Статья поступила в редколлегию 20.03.2015