

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, М.С. МИНЕЕВ¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА

Аннотация. В статье представлен метод определения напряжений, возникающих в защитном слое бетона при наличии пористой зоны вокруг межфазной среды «сталь-бетон».

Показано, что радиальные трещины формируются и распространяются в бетоне, окружающем арматуру, до тех пор, пока не наступит предельное состояние работоспособности, такое как скол или расслоение бетона.

Создаваемые кольцевые растягивающие напряжения в бетоне сильно зависят от отношения объема единицы массы ржавчины к объему железа.

Приведены расчётные формулы для определения давления, которое продукты коррозии прикладывают к слою бетона.

Ключевые слова: защитный слой бетона, растрескивание, граница раздела «сталь-бетон», пористая зона, растягивающие напряжения.

A.G. TAMRAZYAN¹, M.S. MINEEV¹

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

CALIBRATION OF THE CORROSION CRACKING MODEL OF PROTECTIVE CONCRETE LAYER

Abstract. The article presents a method for determining the stresses arising in the protective layer of concrete in the presence of a porous zone around the "steel-concrete" interphase medium.

It has been shown that radial cracks form and propagate in the concrete surrounding the reinforcement until the ultimate serviceability state, such as chipping or delamination of concrete, occurs.

The generated hoop tensile stresses in concrete strongly depend on the ratio of the volume of a unit mass of rust to the volume of iron.

Calculated formulas for the pressure applied by corrosion products to the concrete layer are given.

Keywords: concrete protective layer, cracking, steel-concrete interface, porous zone, tensile stresses.

Введение

Многие эмпирические, аналитические и численные модели растрескивания толщины защитного слоя бетона, вызванные коррозией стальной арматуры, основаны на предположении о формировании кругового слоя ржавчины вокруг корродированной арматуры [1]. Напряжения, возникающие в защитном слое бетона, обычно рассчитываются с использованием схем толстостенного цилиндра под равномерным внутренним давлением [2]. Кроме расширяющего характера продуктов коррозии, на растрескивание бетонного слоя влияют и другие факторы [3,4]. Решающим в этом отношении является наличие пористой зоны вокруг межфазной среды «сталь-бетон», называемой "диффузионной" зоной [5]. Эта область должна быть полностью заполнена продуктами коррозии, прежде чем какое-либо внутреннее давление может быть применено к защитному слою бетона. Диффузионная зона

может быть смоделирована в виде полого цилиндра вокруг корродированной арматуры толщиной 0,1-0,2 мм [6]. Кроме того, проникновение продуктов коррозии в радиальные трещины, образующиеся в бетонном слое, уменьшает чистый объем ржавчины, которая оказывает давление на защитный слой бетона. Таким образом, из общего количества произведенной ржавчины только чистый объем продуктов коррозии способствует растрескиванию защитного слоя бетона:

$$V_{net} = V_{prod.rust} - V_{rad.crc} - V_{dif.zone}.$$

Срок службы корродирующей железобетонной конструкции обычно делится на три этапа. В самом начале высокая щелочность продуктов гидратации цемента приводит к образованию очень тонкого слоя гидроксида железа вокруг арматуры. На первом этапе содержание хлорида или углекислого газа в защитном слое бетона достигает порогового значения, достаточного для снижения щелочности порового раствора бетона до такой степени, что защитный слой гидроксида железа дестабилизируется, подвергая поверхность арматуры коррозии.

Как только появляется достаточное количество кислорода и влаги, эта стадия заканчивается, и арматурная сталь начинает корродировать [7,8]. Эта стадия может быть смоделирована с помощью закона диффузии Фика. Во второй фазе, также называемой свободным расширением продуктов коррозии, твердое железо превращается в ионы железа, накапливающиеся в диффузионной зоне. Таким образом, на этом этапе в бетонном слое не возникает никаких напряжений. Как только диффузионная зона заполняется ржавчиной, начинается третья стадия. На этом этапе в бетоне развиваются растягивающие напряжения, обусловленные коррозией арматурной стали. Радиальные трещины формируются и распространяются в бетоне, окружающем арматуру, до тех пор, пока не наступит предельное состояние работоспособности, такое как скол или расслоение бетона.

Растрескивание, вызываемое коррозией, рассматривалось как начальная деформация, возникающая в элементах вблизи проржавевшего арматурного стержня. Текущая реализация состоит из модели, воплощенного в ПК VecTor2.

Модели и методы

Согласно формулировке [9], защитный слой бетона представляет собой два толстостенных цилиндра, находящихся под равномерным внутренним давлением. В любой момент во время третьей стадии происходит растрескивание внутреннего цилиндра, в то время как во внешнем цилиндре этого не происходит.

Для каждого образца время образования трещин t_{cr} попадает в широкий интервал, основанный на предполагаемом типе продукта коррозии (или предполагаемом значении коэффициента расширения α_1). В результате этого невозможно сделать никаких выводов относительно точности используемой формулировки. Это указывает на необходимость калибровки моделей растрескивания защитного слоя бетона путем определения типа продукта коррозии, полученного в процессе коррозии. Большинство методов оценки типа ржавчины относятся к области химической инженерии, и их использование требует специальных знаний в этой области. Предлагаемый метод идентификации типа ржавчины заключается в измерении плотности образующейся ржавчины.

Растрескивание бетона моделируется двухлинейной ветвью размягчения, которая завершается при растягивающей деформации обруча, соответствующей нулевой прочности на растяжение (рисунок 1) и сформулировано уравнением:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta}(r) = E_b \varepsilon_{\theta}(r) & \varepsilon_{\theta} \leq \varepsilon_{bt} \\ \sigma_{\theta}(r) = R_{bt} \left[1 - 0,85 \frac{\varepsilon_{\theta}(r) - \varepsilon_{bt}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{bt}} \right] & \varepsilon_{bt} < \varepsilon_{\theta}(r) \leq \varepsilon_1 \\ \sigma_{\theta}(r) = 0,15 R_{bt} \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{\theta}(r)}{\varepsilon_u - \varepsilon_1} & \varepsilon_1 < \varepsilon_{\theta}(r) \leq \varepsilon_u \end{cases}$$

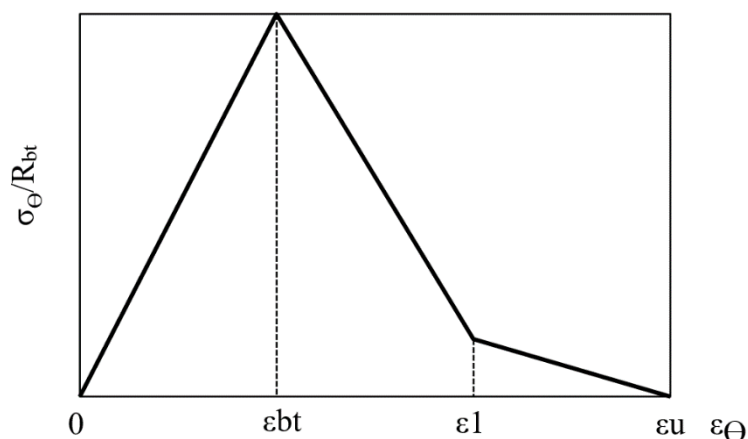


Рисунок 1 - Диаграмма двухлинейного размягчения обыкновенного бетона при растяжении

Модуль размягчения рассчитывается на основе энергии разрушения, рассеиваемой на единицу длины локализованной трещины.

Общий объем ржавчины V_{rust} , рассчитывается как сумма части, которая проникает в радиальные трещины, образованные в защитном слое бетона V_{cr} , и части, которая создает радиальное давление на этот слой бетона, V_{net} равна

$$V_{rust} = V_{net} + V_{cr} = \pi t_r (2R_s + t_r) + (\sum w)(R_i - R_r)/2, \quad (1)$$

где t_r - толщина слоя ржавчины,

R_s - уменьшенный радиус арматурного стержня,

R_r - радиус арматурного стержня и ржавчины вокруг него,

$\sum w$ - теоретическая радиальная ширина трещины,

R_i - радиус, до которого треснул слой бетона (при R_i , $\varepsilon_\theta = R_{bt}/E_b$).

Второе слагаемое в (1) приходится на объем ржавчины, которая проникает в радиальные трещины. Хотя в этой формулировке растрескивание бетонного слоя моделируется как размазанный процесс, V_{crack} вычисляется на основе теоретической модели одной радиальной трещины, показанной на рисунке 2.

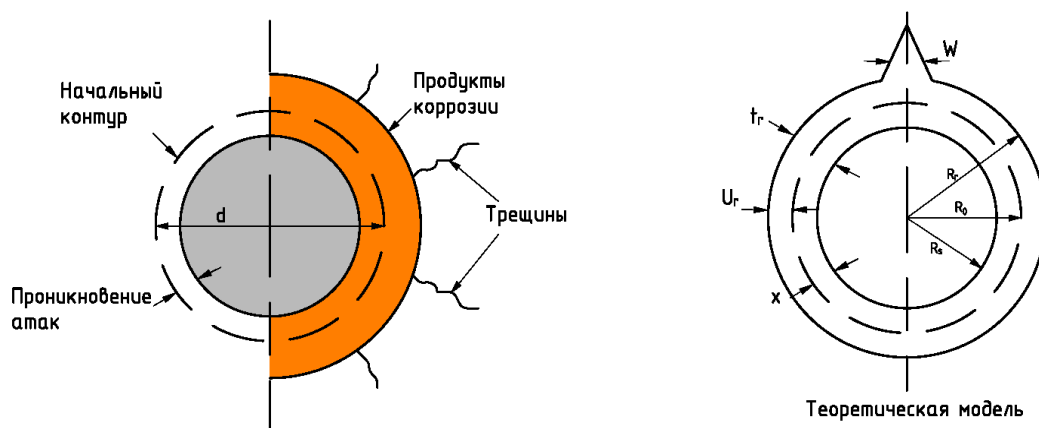


Рисунок 2-Теоретическая модель растрескивания защитного слоя бетона

Уменьшение радиуса арматуры и необходимое радиальное смещение границы раздела «сталь-бетон» обозначаются как x и u_r . Таким образом, пунктирная окружность на рисунке 2, показывающая начальное расположение границы раздела «сталь-бетон», должна быть вытянута относительно ее периметра на $2\pi u_r$. Если напряжение, вызванное этой

деформацией, больше, чем растрескивание бетона, такое увеличение периметра будет компенсировано радиальным раскрытием трещины, равным $2\pi u_r$:

$$\sum w = 2\pi u_r (R_0) = 2\pi (R_r - R_0).$$

При развитии коррозионного процесса, в зависимости от условий окружающей среды, таких как относительная влажность и наличие кислорода, вокруг арматуры образуется комбинация продуктов коррозии. Эти продукты занимают гораздо больший объем, чем исходное железо, потребляемое в реакции. Такое увеличение объема приводит к радиальному давлению на границе раздела «сталь-бетон» и развитию растягивающих напряжений в окружающем бетоне, что в конечном итоге, приводит к растрескиванию бетонного слоя. Создаваемые кольцевые растягивающие напряжения в бетоне сильно зависят от отношения объема единицы массы ржавчины к объему железа, обозначенного как α_1 [10].

Используя закон сохранения массы, общий объем ржавчины также может быть рассчитан на основе объема потребляемой стали в коррозионной реакции

$$V_{rust} = \alpha_1 \Delta V_{st} = \alpha_1 \pi (2R_0 x - x^2), \quad (2)$$

где значения α_1 для различных типов продуктов коррозии приведены в таблице 1.

Таблица 1- α_1 для различных типов продуктов коррозии

Продукт коррозии	Отношения объема единицы массы ржавчины к объему железа α_1
FeO	1.80
Fe_3O_4	2.00
Fe_2O_3	2.20
$Fe(OH)_2$	3.75
$Fe(OH)_3$	4.20
$Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$	6.40

Результаты и обсуждение

По уравнению (1) и (2) толщина слоя ржавчины t_r , может быть количественно определена как функция проникновения коррозионной атаки X , следующим образом:

$$t_r = \frac{\alpha_1 (2R_0 x - x^2) + x(R_i - R_0 + x)}{R_i + R_0}.$$

Радиальное смещение границы раздела «сталь-бетон» должно быть достаточно большим, чтобы вместить увеличение объема железа, которое превращается в ржавчину. Таким образом, рассматривая эту физическую интерпретацию коррозионной реакции как граничное условие, должно быть следующее равенство:

$$u(R_0) = t_r - x = \frac{(\alpha_1 - 1)(2R_0 x - x^2)}{R_i + R_0}. \quad (3)$$

Радиальное смещение на любом радиусе задается по формуле:

$$u(r) = \frac{R_{bt}}{E_b} \cdot r \cdot \frac{(R_c/r)^2 + 1}{(R_c/R_i)^2 + 1}. \quad (4)$$

Предполагается, что радиальное смещение во внутреннем треснувшем цилиндре происходит по той же схеме, что и в упругой части. Следовательно, когда слой бетона не полностью треснул ($R_i \leq R_c$), радиус треснувшего бетона R_i , может быть получен путем

вычисления толщины слоя ржавчины и приравнивания уравнения (3) и (4) при $r = R_0$. Если радиальное смещение определено как функция радиуса, тангенциальная деформация равна:

$$\varepsilon_{\theta}(r) = \frac{u(r)}{r} = \frac{R_{bt}}{E_b} \cdot \frac{(R_c/r)^2 + 1}{(R_c/R_i)^2 + 1}.$$

В этот момент давление, которое продукты коррозии прикладывают к слою бетона p_{corr} , может быть рассчитано из уравнения

$$p_{corr} \cdot R_0 = R_{bt} \frac{R_c^2 - R_i^2}{R_c^2 + R_i^2} \cdot R_i + \int_{R_0}^{R_i} \sigma_{\theta}(r) dr. \quad (5)$$

Интегрирование по касательным напряжениям аппроксимируется вычислением двух других переменных, определяемых как:

$$RR1 = \frac{R_c}{\sqrt{\varepsilon_1 \cdot \frac{E_0}{R_{bt}} \left[\left(\frac{R_c}{R_i} \right)^2 + 1 \right]} - 1} \quad \text{и} \quad RRu = \frac{R_c}{\sqrt{\varepsilon_u \cdot \frac{E_0}{R_{bt}} \left[\left(\frac{R_c}{R_i} \right)^2 + 1 \right]} - 1}, \quad (6)$$

где $RR1$ определяется как радиальное расстояние, на котором достигается кольцевая деформация $\varepsilon_1 (\sigma_{\theta} = 0,15R_{bt})$, а RRu радиальное расстояние, на котором кольцевая деформация достигает $\varepsilon_u (\sigma_{\theta} = 0)$. Таким образом, (10) можно преобразовать следующим образом:

$$p_{corr} \cdot R_0 = R_{bt} \frac{R_c^2 - R_i^2}{R_c^2 + R_i^2} \cdot R_i + \frac{1,15}{2} R_{bt} (RR1 - RRu). \quad (7)$$

Когда защитный слой бетона полностью треснул $R_i = R_c$, радиальное смещение задается по формуле:

$$u(r) = \varepsilon_{\theta c} \cdot r \cdot \frac{(R_c/r)^2 + 1}{2}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{\theta c}$ кольцевое напряжение при $r = R_c$.

Для того чтобы вычислить $\varepsilon_{\theta c}$, используется то же граничное условие и уравнения (3) и (8) приравниваются и решаются для $\varepsilon_{\theta c}$.

Так как на этой стадии внешний радиус треснувшего внутреннего цилиндра постоянен и равен R_c , а также потому, что кольцевая деформация на границе раздела внутреннего треснувшего и внешнего упругих цилиндров равна $\varepsilon_{\theta c}$, уравнения (6) и (7) можно упростить:

$$RR1 = \frac{R_c}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_{\theta c}} - 1}}, \quad RRu = \frac{R_c}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_u}{\varepsilon_{\theta c}} - 1}}.$$

Растрескивание защитного слоя бетона моделируется с помощью конечно-разностной схемы [11], в которой толщина защитного слоя бетона разбивается на ряд сегментов.

Выводы

В статье представлен метод определения напряжений, возникающих в защитном слое бетона при наличии пористой зоны вокруг межфазной среды «сталь-бетон».

Показано, что радиальные трещины формируются и распространяются в бетоне, окружающем арматуру, до тех пор, пока не наступит предельное состояние работоспособности, такое как скол или расслоение бетона.

Создаваемые кольцевые растягивающие напряжения в бетоне сильно зависят от отношения объёма единицы массы ржавчины к объёму железа.

Приведены расчётные формулы для определения давления, которое продукты коррозии оказывают на слой бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов С.И., Пахомова Е.Г., Гордеев А.В., Маяков А.С. Исследование работоспособности изгибаемых железобетонных конструкций с учетом коррозионных повреждений // Известия Курского государственного технического университета. 2009. № 4. С. 74-78.
2. Смоляго Г.А., Дронов В.И., Дронов А.В., Меркулов С.И. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №12. С. 49-51.
3. Бондаренко В.М. О влиянии коррозионных повреждений на силовое сопротивление железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1999. №6. С.27-30.
4. Тамразян А.Г. К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение // Бетон и железобетон. 2001. № 5. С. 8-10.
5. Angst U., Elsener B., Jamali A., Adey B. Concrete cover cracking owing to reinforcement corrosion - theoretical considerations and practical experience // Materials and Corrosion. 63(12). 1069-1076.
6. Angst U. Chloride induced reinforcement corrosion in concrete: Concept of critical chloride content - methods and mechanisms. (Doctoral Thesis). Norwegian University of Science and Technology.
7. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature. В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2017. С. 00162.
8. Колчунов В.И., Меркулов С.И., Дворников В.М. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Известия Курского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 117-122.
9. Wang X.H., Liu X.L. Modelling effects of corrosion on cover cracking and bond in reinforced concrete. Magazine of Concrete Research. 56(4). 191-199.
10. Bhargava K., Ghosh A.K., Mori Y., Ramanujam S. Modeling of time to corrosion- induced cover cracking in reinforced concrete structures. Cement and Concrete Research, 35, 2203-2218.
11. Тамразян А.Г., Минеев М.С. Матрица жесткости корродированных железобетонных элементов для конечно элементного моделирования. Сборник материалов XXI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (29-30 июня 2020 г.). Тула, 2020. С. 161-166.

REFERENCES

1. Merkulov S.I., Pakhomova Ye.G., Gordeyev A.V., Mayakov A.S. Issledovaniye rabotosposobnosti izgibayemykh zhelezobetonnykh konstruktсий s uchetom korrozionnykh povrezhdeniy // Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. № 4. S. 74-78.
2. Smolyago G.A., Dronov V.I., Dronov A.V., Merkulov S.I. Izucheniye vliyaniya defektov zhelezobetonnykh konstruktсий na razvitiye korrozionnykh protsessov armatury // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2014. № 12. S. 49-51.
3. Bondarenko V.M. O vliyani korrozionnykh povrezhdeniy na silovoye soprotivleniye zhelezobetonnykh konstruktсий // Beton i zhelezobeton. 1999. №6. S. 27-30.
4. Tamrazyan A.G. K otsenke riska chrezvychaynykh situatsiy po osnovnym priznakam yego proyavleniya na sooruzheniye // Beton i zhelezobeton. 2001. № 5. S. 8-10.
5. Angst U., Elsener B., Jamali A., Adey B. Concrete cover cracking owing to reinforcement corrosion - theoretical considerations and practical experience. Materials and Corrosion. 63(12). 1069-1076.
6. Angst U. Chloride induced reinforcement corrosion in concrete: Concept of critical chloride content - methods and mechanisms. (Doctoral Thesis). Norwegian University of Science and Technology.
7. Tamrazyan A., Popov D. Reduce of bearing strength of the bent reinforced concrete elements on a sloping section with the corrosive damage of transversal armature. V sbornike: MATEC Web of Conferences. 2017. S. 00162.
8. Kolchunov, V.I. Merkulov S.I., Dvornikov V.M. Usileniye zhelezobetonnykh konstruktсий ekspluatiruyemykh zdaniy i sooruzheniy // Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2004. № 1. S. 117-122.
9. Wang X.H., Liu X.L. (. Modelling effects of corrosion on cover cracking and bond in reinforced concrete. Magazine of Concrete Research. 56(4). 191-199.

10. Bhargava K., Ghosh A. K., Mori Y., Ramanujam S. Modeling of time to corrosion- induced cover cracking in reinforced concrete structures. Cement and Concrete Research, 35, 2203-2218.
11. Tamrazyan A.G., Mineyev M.S. Matritsa zhestkosti korrodirovannykh zhelezobetonnykh elementov dlya konechnoelementnogo modelirovaniya. Sbornik materialov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy stroitel'stva i stroitel'noy industrii» (29-30 iyunya 2020 g.). Tula, 2020. S. 161-166.

Информация об авторах:

Тамразян Ашот Георгиевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, действительный член Российской инженерной академии (РИА), советник РААСН, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: tamrazian@mail.ru

Минеев Михаил Сергеевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,

инженер, соискатель.

E-mail: geotechnics-eng@yandex.ru

Information about the authors:

Tamrazyan Ashot G.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of the Russian Engineering Academy (RIA), Advisor to RAACS, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: tamrazian@mail.ru

Mineev Mikhail S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
engineer, applicant.

E-mail: geotechnics-eng@yandex.ru