

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ В СУЩЕСТВУЮЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ХЛОРИДНОЙ АГРЕССИИ

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрена пробная для практической модели оценка коррозии арматурной стали в железобетонных конструкциях. Представлена теоретическая модель и формула для проницаемости хлорид-ионов. Приведены результаты многих исследователей относительно скорости коррозионного процесса арматуры. Настоящая работа связана с исследованиями долговечности с использованием вероятностной концепции. Цель работы – анализ возможных подходов для нормирования технологических и конструктивных параметров железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессии.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В рамках разрабатываемой концепции нормативной базы по обеспечению долговечности в строительстве в Республике Беларусь

[1] предусматривается подготовка Пособия по обеспечению долговечности железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессии.

Хлоридная коррозия бетона и железобетона изучается в СССР с 30 –х годов, когда В.М. Москвиным было опубликовано несколько работ по данной проблеме [2]. Несмотря на то, что проблема изучена достаточно глубоко, в нормативных документах разных стран допустимое количество хлоридов в железобетонных конструкциях различно.

В данной работе начальный период проникновения хлоридов, как и период коррозии анализируются, используя вероятностный метод проектирования. Была получена удовлетворительная сходимость между расчетной моделью и экспериментальными данными.

Теоретическая модель проникновения хлоридов

Основная корреляционная зависимость, характеризующая коррозию арматуры как важнейшую составляющую долговечности бетона – это глубина проникновения хлоридов и время воздействия хлор-ионов. Главные факторы, влияющие на накопление хлор-ионов, следующие: концентрация хлор-ионов, условия внешних воздействий, свойства проницаемости, вяжущая способность или химическая реакция. Концентрация хлор-ионов на поверхности бетона прямо влияет на глубину фронта проникновения хлор-ионов. В начальный период при воздействии хлор-ионов, окружающей арматуру, которая изменяет пассивную стадию на активную стадию коррозии: это пороговая величина концентрации хлор-ионов. Наименьшая величина критической концентрации хлоридов около 0,2 % от веса цемента для карбонизированного цемента и 0,4 % для некарбонизированного цемента, как это отмечалось многими исследователями. С другой стороны, многие исследователи зафиксировали более высокие пороговые значения – около 1-2 % от веса цемента.

Условия внешней среды такие, как влажность и температура, имеют важное влияние на накопление хлорид-ионов. Если при экспозиции бетон подвергается периодическому увлажнению и высушиванию; то, вероятно, хлориды будут проникать в бетон двояко: а) в результате абсорбции (всасывание, капиллярный подсос), когда бетон сухой; б) в результате диффузии, при заполненных порах. Хлориды продвигаются быстрее под действием абсорбции (воздух), чем при диффузии (вода) [6,7,8].

Таблица 1.

Максимальное количество хлоридов, которое еще не вызывает коррозию стальной арматуры в бетоне

№ п/п	Страна	Нормативный документ	Критическая концентрация хлорид-ионов	Примечание
1	СССР	СниП 2.03.11-85	А). $\leq 0.4\%$ массы цемента (железобетонные конструкции); Б). $\leq 0.1\%$ массы цемента (предварительно напряженные конструкции); В). Не допускается (определенные СНИП конструкции)	Определяется обработкой пробы растворной части бетона в азотной кислоте
2	США	Комитет-201 American Concrete Institute	А). $\leq 0.15\%$ в ЖБК во влажной неагрессивной среде; Б). $\leq 0.1\%$ в ЖБК во влажной агрессивной; в т.ч. содержащей хлориды; В). $\leq 0.06\%$ в предварительно напряженных конструкциях	Оценка содержания хлоридов в бетоне в зависимости от содержания водорастворимых хлоридов
3	США	Стандарт 318-83 American Concrete Institute	$\leq 1\%$ от массы цемента в ЖБК в сухой среде	
4	США	Стандарт ASTM C 114	$\leq 0.08\%$ в предварительно напряженных железобетонных конструкциях	[3],[4]
5	Япония	Стандарт	А). ≤ 0.6 кг хлорид-ионов в 1 м ³ бетона; Б). ≤ 0.3 кг/м ³ в товарном бетоне на месте отгрузки; В). $\leq 0.04\%$ в мелком заполнителе в расчете на NaCl	[5]
6	Германия Великобритания Дания	Стандарты	Ограничивается	

С другой стороны, температура также существенно влияет на перемещение хлоридов в бетон: при низкой температуре сопротивление хлоридам (портландцементного бетона) возрастает [9]. На свойства проницаемости для накопления хлор-ионов влияет качество микроструктуры бетона, которая является функцией размера и распределения пор и капилляров цементного камня, как и структуры заполнителей. На микроструктуру бетона влияют количество и тип цемента; водоцементное отношение; гранулометрия и максимальный размер заполнителя; добавки и условия выдержки бетона.

Свойства проницаемости могут быть оценены теоретическими параметрами или экспериментально. Прочность, потеря начального веса, адсорбция воды и воздухопроницаемость могут быть индикаторами процесса [10]. Коэффициент хлоридной диффузии D учитывает факторы, воздействующие на бетон, и наилучшим способом определяется, используя полуэлементарный тест хлоридной диффузии [7].

Вяжущая способность выражается способностью бетона связывать хлориды. На количество хлоридов, входящих в бетон из внешней среды, влияет вяжущая способность цемента. Было обосновано, что цементы, включающие PFA (золевая пыль) и GGBS (мелкогранулированный доменный шлак) с реакционно способным алюминием, образующим хлороалюминаты, обладают преимуществом снижать скорость накопления хлоридов в бетоне.

Влияние содержания PFA и GGBS на хлоридную диффузию D в бетоне может быть выражено:

$$D = c \cdot \bar{D}, \quad (1)$$

где: \bar{D} — хлоридная диффузия обычного портландцемента;
 c — коэффициент, учитывающий тип цемента.

Влияние концентрации хлорид-ионов может быть также установлено исходя из корреляции между поверхностной концентрацией хлорид-ионов I_s и пороговым значением концентрации хлорид-ионов:

$$I_t / I_s = D_t / D_s, \quad (2)$$

где: D_s — хлоридная диффузия на бетонной поверхности и D_t — пороговое значение хлоридной диффузии. Для примера, если $I_s = 20$ г/л и пороговое значение 0,4 % от веса цемента ($I_t = 450 \cdot 0,4 / 100 = 1,8$ кг/м³ или 1,8 г/л), это значит, I_t равно 9 % от поверхностной концентрации и подобно D_t равно 9 % от D_s .

Хлоридная диффузия для элементов с трещинами больше, чем для поверхностей без трещин. Было экспериментально обосновано [7], что D_s необходимо увеличить:

$$D_{sc} = (1 + 4\alpha_c) \cdot D_s, \quad (3)$$

где α_c — средняя ширина раскрытия трещин. Для примера, если $\alpha_c = 0,30$ мм D_{sc} в результате будет равен 2,2 D_s и, следовательно, D_t для предыдущего расчета будет 4 % от D_{sc} .

Количественная модель коррозии арматуры

На основе литературных данных и практического опыта в этой области Bob C. предложил формулу для средней глубины карбонизации [6, 8]. Недавние публикации маститых исследователей в этой области [7, 10, 11] и современные экспериментальные данные показывают возможность использовать эту же формулу для проникновения хлорид-ионов.

В соответствии с теоретической моделью формула предполагает учет: вяжущей способности коэффициентом c (от типа цемента); условий внешней среды коэффициентом k ; поверхностной концентрации коэффициентом d и свойства прони-

цаемости бетона прочностью на сжатие f_c . Такой численный расчетный метод может быть очень полезен для инженеров для решения о восстановлении железобетонной конструкции. Свойства проницаемости для радикального хлор-ионного насыщения количественно оцениваются прочностью на сжатие бетона. Предлагается на первых порах использовать этот параметр, т. к. прочность бетона на сжатие является условной величиной и его значение зависит от множества факторов, среди них: качество и расход цемента; водоцементное отношение; характеристики заполнителей; укладка бетона и т. д. На данном уровне понимания проблемы прочность бетона на сжатие является главным критерием, когда оценивается качество бетона – класс для проектирования нового бетона, как и решение о восстановлении железобетонной конструкции. В последнем случае прочность бетона на сжатие определяется на образцах, которые извлекаются из бетонных элементов, или неразрушающим тестированием. Численное значение, учитывая тип цемента, условия внешней среды и поверхностные концентрации, были определены теоретически и экспериментально.

К этим данным необходимо добавить влияние на скорость коррозии (CR) других параметров: ширина раскрытия трещины до 0,15 мм не влияет на (CR); возрастание класса бетона (C) дает снижение скорости коррозии $CR (V_c [C16/20] = 1,3 \cdot V_c [C25/30])$. Скорость коррозии уменьшается с увеличением толщины бетонного покрытия ($V_c [10 \text{ мм}] = 1,1 V_c [20 \text{ мм}]$); высокопрочная сталь дает высокую CR; высокая влажность (V в %) дает высокую скорость CR ($V_c [U 80] = 2,00 \cdot V_c [U 70]$).

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА

Необходимость вероятностной оценки происходит из случайных свойств инженерных систем. Общеизвестны два источника случайности. Первым является присущая явлению неправильность (нерегулярность) при рассмотрении или измерении и невозможность исчерпывающего описания детерминистически. Другим источником случайности может быть общее отсутствие знания о сложных процессах.

Для оценки долговечности железобетонных конструкций, так как и для других научных направлений, полностью вероятностный проектный метод может быть получен, используя анализ надежности моделей моментов второго порядка. Вводится коэффициент надежности β_E и определяется соотношение между этим коэффициентом и центральным коэффициентом безопасности C_o , изменяемый коэффициент сопротивления сечения V_r и изменяемый коэффициент действия V_a :

$$\beta_E \equiv \frac{C_o}{\sqrt{(C_o \cdot V_r)^2 + (V_a)^2}} \quad (4)$$

Для нормального распределения величина β_E находится в корреляции с вероятностью разрушения P_c следующим образом:

$$P_c \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\beta_E}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (5)$$

Характеристический коэффициент безопасности определится

$$C_p = C_o \frac{1 - \gamma \cdot V_r}{1 + \gamma \cdot V_a} \quad (6)$$

где γ – функция вероятности, $P (\gamma = 1,645 \text{ для } P = 5\%)$.

Для вероятностной оценки коррозии арматуры Bob C_o определил центральный коэффициент безопасности C_o как

$$C_o = \frac{m_r}{m_a} \quad \text{для «Периода коррозионного процесса»} \quad (7)$$

и $C_0^c = \frac{X_r}{X_a}$ - для «Начального периода»,

где X_r - защитный слой бетона по отношению к арматуре; X_a - средняя глубина проникновения хлоридов (табл. 1); $m_r = 0,146\phi$ - глубина коррозии арматурных стержней до того, как половина начального поперечного сечения остается непрокорродировавшей (ϕ - диаметр стержня); $m_a = \sqrt{v_c} \cdot t_c$ - глубина коррозии при скорости коррозионного процесса в период $t_c = t - t_i$, где t - возраст конструкции, и t_i - время проникновения хлоридов для $C_0^c = 1$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

В течение двадцати последних лет исследовано большое количество железобетонных конструкций с различными продолжительностями срока службы и различными разрушениями компонентов [2, 11, 12, 13, 14].

Для оценки стадии коррозии арматуры использовались как теоретическая модель, так и экспериментальные данные. Была достигнута удовлетворительная сходимость по проницаемости хлорид-ионов, рассчитанной по теоретической модели, с экспериментальными результатами.

ВЫВОДЫ

1. Проницаемость хлорид-ионов являются главным фактором, который определяет коррозию арматурной стали в железобетонных элементах. На основании анализа многочисленных исследований предложена теоретическая модель хлоридной проницаемости.
2. Количественная модель коррозии арматуры как для начала деградации (начальный период), так и время разрушения (период коррозионного процесса) является приемлемой для практического использования при построении нормативных документов по долговечности железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессии.
3. Модель начального периода основывается на уникальной формуле как для карбонизации бетона, так и для проницаемости хлорид-ионами. Предложенная формула является аналитическим средством для проведения диагностики и контроля железобетонных конструкций.
4. Вероятностная концепция, используемая для железобетонных конструкций, является современной и надежной процедурой для оценки долговечности. Удовлетворительная сходимость была получена между количественной моделью и экспериментальными данными, которые были получены на элементах железобетонных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Найчук А.Я., Леонович С.Н., Холодарь Б.Г., Деркач В.Н. Подходы к формированию концепции нормативных документов, регламентирующих вопросы долговечности в строительстве // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. тр. 6-го международного научно-методического семинара / Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. - Минск - Технопринт, 2000. - с. 10-15.
2. Коррозия и защита бетона от коррозии. Розенталь Н.К., Иванов Ф.М., Любарская Г.В., Чехний Г.В. / Обзор. Информ. - М.: ВНИИТПИ, 1990.

3. Gayner R.D. Understanding chloride percentage // Concrete Products. – 1986. Vol. 89.- p.34 – 44.
4. Influence of chlorides in reinforced concrete. ACI forum //Concrete International Design and Construction: 1985. Vol.7, No9.-p. 13 – 19.
5. Jamata T., Emoto J., Soeda M., Tatsumoto N.//Fukuoka Univ.Rev.Technol.Sci. – 1985. – n35. – p.219 – 233.
6. Bob C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures // Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. Edited by R K Dhir and M R Jones. E @ FN Spon, London. p. 17 – 28.
7. Jones M.R., McCarthy, M.J., Dhir, R.K. "Chloride resistant concrete". Proc. Of the Internat. Conference "Concrete 2000", Dundee, 1993, E @ FN Spon.
8. Bob C. Some aspects concerning corrosion of reinforcement. Proc. Of Intern. Conference "The Protection of Concrete", Dundee, 1990.
9. Siemes, A. J. et al : "Durability of buildings : a reliability analysis" Heron, Delft University, Vol.30, No. 3, 1985.
10. Parrott, L. J. " Effects of curing and cement type on the performance of cover concrete, Proc. Of Intern. Conference "Concrete", Dundee, 1993, E @ FN Spon.
11. Hilsdorf, H.: "Durability of concrete – a measurable quantity" Proc. Of the IABSE Symposium "Durability of structures" Lisbon, 1989.)
12. Леонович С.Н., Зикеев Л.Н. Долговечность центрифугированных железобетонных стоек. – М.: Информэнерго, 1991. – 64с. – (Сер. Строительная индустрия в энергетике. Вып.4 – 5).
13. Леонович С.Н. Реконструкция предприятий мясной и молочной промышленности. – М.: АгроНИИТЭИММП, 1993. – 48с.
14. Леонович С.Н., Иванов Ф.М., Пецольд Т.М. Железобетон и экология // Строительство и архитектура Беларуси. – 1993, №6, с. 6 – 8.

УДК 691.328:620.191.33

Леонович С.Н., Попов О.В., Гуров И.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ ЗАМОРОЖЕННОГО БЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ ОТРЫВА СО СКАЛЫВАНИЕМ

1. ВВЕДЕНИЕ

Особенностью работ по диагностике железобетонных конструкций холодильника Минского хладокомбината №1 в осях 1 – 12 являлось то обстоятельство, что весь комплекс инженерных обследований проводился при эксплуатационной температуре в помещениях и холодильных камерах, что позволяло определять «эксплуатационные» прочностные и деформационные характеристики бетона (и производить пересчет на эти характеристики при положительной температуре, зафиксировав реальные температуру и влажность), а также идентифицировать реальное напряженно-деформированное состояние в конструкциях при эксплуатационных условиях (реальной степени водонасыщения бетона и отрицательной температуре) и при оттаивании. Второй особенностью являлось выполнение работы в полностью загруженных холодильных камерах, что с одной стороны усложняло обследование, с другой