ISSN 2227-1252
Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2014, № 6

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.059.1

Л. Л. ЯНЧУК*

* Каф. «Мости та тунелі», Національний транспортний університет, вул. Суворова 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (050) 358 73 37, ел. пошта yanchuchok@mail.ru

АНАЛІЗ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ ЯК ПРАКТИЧНИЙ АПАРАТ ПРОГНОЗУ РЕСУРСУ

Мета. Розробка методології прогнозу ресурсу згинаних залізобетонних елементів мостів на етапі проектування. **Методика.** Теоретичне дослідження. **Результати.** Отримано новітній алгоритм прогнозу ресурсу елементів залізобетонних мостів в процесі проектування. **Наукова новизна.** Вперше пропонується методологія проектування згинаних залізобетонних елементів мостів на заданий строк служби. **Практичне значення.** Отриманий алгоритм є практичним інструментом управління ресурсом залізобетонних елементів автодорожніх мостів в процесі проектування.

Ключові слова: ресурс залізобетонних елементів; прогноз ресурсу; алгоритм оцінки ресурсу; проектування елементів мостів на заданий ресурс.

Вступ

Протягом більш ніж 100 років науковці всього світу переймаються проблемою аналізу тріщиностійкості залізобетонних конструкцій. Центральною науковою проблемою цих досліджень є встановлення закономірностей розвитку тріщин та їх вплив на несучу здатність елемента.

Два типи тріщин є характерними для залізобетонних елементів:

– перший тип – тріщини пов'язані з пластичними властивостями бетону. Ці тріщини з'являються під час твердіння і протікання довготривких процесів (повзучості) бетону або різких змін температури оточуючого середовища;

– другий – тріщини, якими неминуче супроводжується експлуатація залізобетонного елемента під дією постійних і тимчасових навантажень. Саме другий тип тріщин і є предметом дослідження в цій роботі.

Сьогодні є загально визнаним, що тріщиноутворення і послідуюче сколювання захисного шару є головними факторами, якими визначаються в процесі експлуатації залізобетонних елементів, довговічність, надійність та несна здатність.

В процесі експлуатації тріщини викликають в елементах «ефект доміно»: в зоні тріщини корозія арматури стає інтенсивнішою, продукти корозії породжують тиск на захисний шар, сколюється захисний шар, розширюється тріщина, зростає корозія – і коло замкнулось. Причому, інтенсивність процесу деградації зростає нелінійно [4, 11-15].

Сьогодні відомо десятки залежностей прогнозу ширини розкриття тріщин ненапруженого і попередньо-напруженого залізобетону. Так тільки в огляді робот [13] наведено 32 формули визначення ширини поперечних тріщин в згинаних елементах.

В нормативних документах проектування залізобетонних елементів країн світу для контролю ширини розкриття тріщин застосовується п'ять – шість залежностей. Найбільш відомими з них є модель CEB-FIP Model Code 1990 [16], яка прийнята в Еврокоді 2 та модель Р. Фроша (R. J. Frosch) [14] – в нормативах США [16, 17].

У вітчизняній методології аналізу тріщиностійкості панує теорія В. І. Мурашова [4], яка для нас є нормативною в розрахунку залізобетонних елементів [2].

При всьому різноманітті моделей визначення ширини розкриття нормальних тріщин та відстані між ними в згинаних елементах їх об'єднує загальна фундаментальна наукова ідея – саме процес тріщиноутворення найбільш повно відображає деформаційні властивості залізобетонного елементу. Тому всі відомі моделі тріщиноутворення мають за параметри розрахунку кількість арматури в перерізі елемента, її

© Л. Л. Янчук, 2014

розрахунковий опір та модуль пружності, параметри розташування арматури в перерізі, механічні характеристики бетону.

В останні 10-15 років все більше науковців звертаються до моделі тріщиноутворення в залізобетоні для оцінки ресурсу елемента. Так, наприклад, в роботах [5, 6, 12-14] переконливо доводиться, що вичерпання несної здатності строго зв'язано з шириною розкриття тріщин. Підтвердження цього тезису є також і в дослідженнях українських науковців [8, 9, 10].

В дослідженні, основні положення якого представлені нижче, саме такий новітній підхід використовується для побудови практичного апарату прогнозу ресурсу протягом життєвого циклу згинаних залізобетонних елементів автодорожніх мостів. Наукова ідея дослідження полягає в теоретичному пошуку зв'язку ширини розкриття тріщин з часом експлуатації.

Мета дослідження

Центральною метою представленого дослідження є задача оцінки ресурсу згинаних залізобетонних елементів мостів протягом життєвого циклу експлуатації. Ця задача реалізується шляхом використання фундаментальних залежностей нормативної моделі тріщиноутворення в елементах мостів.

Методика

Дослідження базується на такій гіпотезі: *ширина розкриття поперечних тріщин в згинаних залізобетонних елементах мостів є достатньою мірою для побудови практичної моделі деградації елемента в процесі експлуатації*. Ця гіпотеза дає можливість розробки моделі прогнозу ресурсу елемента в функції одного параметра – ширини розкриття тріщин:

$$A(t) = \alpha \cdot f(t), \qquad (1)$$

де α – функція ширини розкриття тріщин, що в загальному випадку має вид:

$$\alpha = f_a(R, \sigma, \mathrm{E}, \psi), \qquad (2)$$

де $(R, \sigma, \mathrm{E}, \psi)$ – розрахункові параметри тріщиноутворення, згідно [2]; $f(t)$ – функція – індикатор деградації залізобетонного елементу.

Результати.
Детерміністична модель життєвого циклу

Приймемо функцію індикатора деградації залізобетонного елементу в такій формі:

$$f(t) = m \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot s \cdot t_2, \qquad (3)$$

де s – масштабний коефіцієнт, має розмірність $1/t^2$ (за одиницю часу тут прийнято *рік*); m_1 – коефіцієнт умов експлуатації; m_2 – коефіцієнт типу конструкції; m – коефіцієнт – функція оточуючого середовища, $m = m(p_1, p_2, p_3)$. Тут p_i – параметри, що характеризують оточуюче середовище (розмах середніх max та min температур, відносна вологість навколишнього середовища, наявність хлоридів).

Це безрозмірна функція, що задає закон росту ширини тріщини протягом життєвого циклу експлуатації в залежності від співвідношення розрахункової початкової ширини розкриття тріщини при $t = 0 - \alpha_d$ та на фіксований час в майбутньому $t = \tau - \alpha_\tau$. З урахуванням (3) модель життєвого циклу залізобетонного елемента має вид:

$$A(t) = \alpha \cdot m \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot s \cdot t_2. \qquad (4)$$

З рівняння (4) отримаємо час досягнення граничної деградації, поклавши $A(t) = \alpha_{cr}$, де α_{cr} – граничне значення ширини розкриття тріщин в експлуатації:

$$T = \left(\frac{\alpha_{cr}}{\alpha_d \cdot m \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot s} \right)^{0,5}, \qquad (5)$$

де T – термін служби елемента, що прогнозується. Коефіцієнти моделі (4) приймають такі значення: $m = 1,0...1,4$; $m_1 = 1,0...1,3$; $m_2 = 1,0...1,2$. Обґрунтування значень коефіцієнтів моделі наведено в роботі [9].

В прогнозуванні ресурсу елемента за залежністю (5) принциповим моментом є встановлення критичного значення ширини розкриття тріщин $\alpha_\tau = \alpha_{cr}$ в процесі експлуатації. В нашій моделі це значення прийнято відповідно рекомендаціям українського нормативного документу системи експлуатації автодорожніх мостів ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [3].

© Л. Л. Янчук, 2014

В табл.1 наведені узагальнені значення параметрів, що характеризують життєвий цикл згинаних залізобетонних елементів за експлуатаційним станам. Для проектної оцінки ресурсу використовуються експлуатаційні параметри п'ятого стану (непрацездатний): характеристика безпеки $\beta = 1,7$; знос 60 %; критична ширина розкриття тріщин $\alpha_{cr} = 0,04$ см.

Таблиця 1

Параметри деградації залізобетонних елементів

Експлуатаційний стан	Характеристика безпеки β	Знос елемента, %	Гранична ширина тріщин, см
Стан 1	3,8	0…3	0,01
Стан 2	3,0	4…8	0,02
Стан 3	2,4	9…27	0,02
Стан 4	2,1	28…42	0,03
Стан 5	1,7	≥43	0,04

Зауважимо, що прийняті в документі ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 [3] критичні значення зносу і ширини розкриття тріщин не є теоретично обґрунтованими, вони прийняті на основі багаторічного досвіду експлуатації автодорожніх мостів. Тому в нашій моделі ці дані розглядаються як перше наближення.

Вид функції життєвого циклу залізобетонного елемента при $m = m_1 = m_2 = 1$ та $\alpha_{cr} = 0,03$ см показано на рис. 1 (крива $A(t)$).

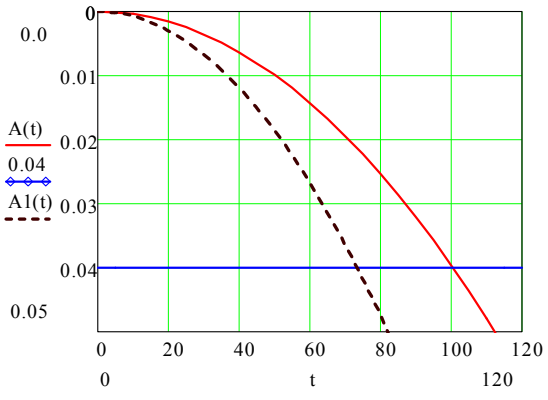

Рис. 1. Функції прогнозу життєвого циклу в експлуатації

Як видно з графіка, проектний ресурс елемента в цьому випадку складає 100 років. Рівність всіх коефіцієнтів моделі $m_i = 1$ тут означає, що виконуються вчасно всі ремонтні роботи встановлені нормами експлуатації, елемент знаходиться в сприятливих умовах зовнішнього середовища, має довговічний тип перерізу.

Прогноз довговічності при умові коли відсутня систематична експлуатація, дуже жорстких умов оточуючого середовища, малої довговічності поперечного перерізу (при максимальних значеннях коефіцієнтів та розрахунковій початковій ширині розкриття тріщини при $t = 0$, $\alpha_d = 0,03$) показаний на графіку рис. 1 функцією $A_1(t)$. Тобто, це випадок коли модель дає мінімальні значення прогнозу часу життєвого циклу $T = T_{\min}$ Ресурс елемента в цьому випадку складає $T = 76$ років.

Чутливість моделі до вхідних даних показано на рис. 2, де наведено дві функції життєвого циклу елемента в експлуатації в залежності від значення розрахунковій початковій ширині розкриття тріщини α_d .

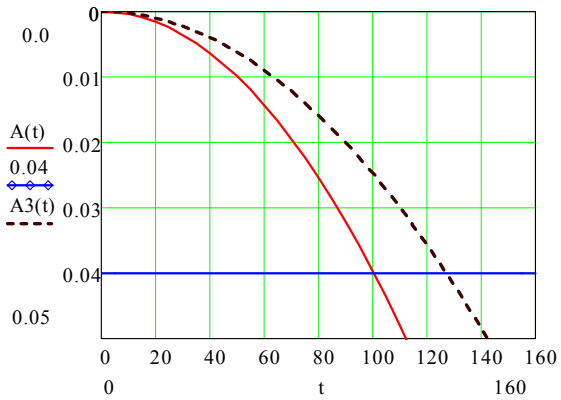

Рис. 2. Порівняльний аналіз функцій життєвого циклу елемента в експлуатації

Функція $A(t)$ має значення проектної розрахункової ширини тріщин $\alpha_d = 0,03$ см, тоді як функція $A_3(t)$ має $\alpha_d = 0,01$ см. Ресурс елемента при значенні всіх коефіцієнтів моделі $m_i = 1$ складає $T_1 = 100$ років і $T_3 = 127$ років відповідно.

Адекватність моделі перевірялась за допомогою історичних даних системи експлуатації автодорожніх мостів АЕСУМ [1]. Прогнозування залишкового ресурсу за представленою моделлю має практично достатню збіжність з натурними даними.

© Л. Л. Янчук, 2014

Ймовірнісні аспекти моделі

Ставиться задача оцінки надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації. Умовою граничного стану є $\alpha_\tau = \alpha_{cr}$. Потребується знайти надійність

$$P(t) = P\{\alpha_{cr} - A(t) \geq 0\}, \qquad (6)$$

де α_{cr} – критична ширина розкриття тріщин; $A(t)$ – функція життєвого циклу залізобетонного елемента (4).

Приймемо усталену гіпотезу про нормальний розподіл ширини розкриття тріщин і запишемо вираз характеристики безпеки в класичній формі [7] відповідно визначення надійності за виразом (6)

$$\beta(t) = \frac{\mu_{cr} - \mu_a(t)}{\left(\sigma_{cr}^2 + \sigma_a(t)^2\right)^{0.5}}, \qquad (7)$$

де μ_{cr} – середнє значення критичної ширини розкриття тріщин; $\mu_a(t)$ – середнє значення ширини розкриття тріщин на час $t = \tau$; σ_{cr} – середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин; $\sigma_a(t)$ – середньоквадратичне відхилення ширини розкриття тріщин на час $t = \tau$.

Середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин визначається загальною формулою математичної статистики

$$\sigma_{cr} = \left(R_{ser}^2 \cdot V_c^2 + R_A^2 \cdot V_A^2\right)^{0,5}. \qquad (8)$$

Аналогічно визначається середньоквадратичне відхилення ширини розкриття тріщин на час $t = \tau$

$$\sigma_a(t) = \left[\left(R_{ser}^2 \cdot V_c^2 + R_A^2 \cdot V_A^2\right) \cdot f(t)\right]^{0,5}. \qquad (9)$$

Тут R_{ser}, R_A – характеристичні опори бетону і арматури; V_c, V_A – коефіцієнт варіації стисненого бетону і коефіцієнт варіації розтягнутої арматури; $f(t)$ – функція індикатор деградації залізобетонного елементу.

Числовий аналіз надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації за формулою (7) показав, що надійність варіюється в межах $\beta(t) = 4,2...1,5$ в залежності від параметрів матеріалу R_{ser}, R_A, V_c, V_A, m_i та критичної ширини розкриття тріщин $\alpha_{cr} = 0,01...0,03$ см. Отримані дані порівнювались з результатами статистичного експерименту за методом Монте-Карло. Виявлена хороша збіжність визначення надійності.

Висновки

1. Виконане дослідження дає підставу стверджувати, що аналіз тріщиностійкості згинаних залізобетонних елементів мостів може стати найбільш обґрунтованою, з точки зору фізики руйнування залізобетону, базою для розробки простих інженерних моделей прогнозування ресурсу.

2. Принципово важливою стороною моделі є її універсальність відносно часу життєвого циклу. Модель може бути застосованою для прогнозу ресурсу як на етапі проектування, так і для оцінки залишкового ресурсу в системі експлуатації мостів.

3. Встановлений нами в рамках запропонованої моделі зв'язок з нормативним документом експлуатації автодорожніх мостів [3] відкриває шлях, до паралельного з цим нормативом, прогнозування залишкового ресурсу згинаних залізобетонних елементів.

Очевидно, що в науковому плані наша модель життєвого циклу може слугувати базисом для теоретичного обґрунтування критичних значень ширини розкриття тріщин і встановлення оцінок зносу згинаних залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар, Л. П. Управління утриманням елементів залізобетонних мостів на основі моделей нечіткої логіки [Текст] / Л. П. Боднар // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – Вип. 33. – С. 39-42.
2. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Чинні від 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
3. Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [Текст], Київ : Мінрегіон України, 2012.

© Л. Л. Янчук, 2014

4. Мурашов, В. И. Трещиностойкость. Жесткость и прочность железобетона / В. И. Мурашов. – Москва : Машстройиздат, 1950.
5. Пирадов, А. Б. Длина и ширина раскрытия трещин в бетонных элементах при длительном нагружении [Текст] / А. Б. Пирадов, Л. О. Гвелесиани, К. А. Пирадов // Известия вузов. – Строительство, 1991. – № 12. – С. 88-90.
6. Пирадов, К. А. Механика разрушения железобетона / К. А. Пирадов, Е. А. Гузеев. – Москва, 1998.
7. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат. – 1978. – 239 с.
8. Янчук, Л. Л. Ймовірнісна модель прогнозу ресурсу елементів мостів [Текст] / Л. Л. Янчук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – С.150-155.
9. Янчук, Л. Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу [Текст] /Л. Л. Янчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – № 664. – Львів, 2010. – С. 365-371.
10. Яцко, Ф. В. Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів [Текст] / Ф. В. Яцко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вид-во ДНУЗТ, 2010. – Вип. 33. – С. 190-196.
11. Borosnyoi, A. Models for flexural cracking in concrete: the state of the art [Text] / A. Borosnyoi, G. L. Balazs // Structural Concrete, 2005, 6, №. 2. – pp. 53-62.
12. Comite Euro-Internationale du Beton. CEB-FIP Model Code 1990 [Text]. 1993 CEB Bulletin d'Information №. 213/214.
13. Li Chun Q. Time Dependent Reliability Analysis of the Corrosion Affected Concrete Structures. International Journal of Material & Structurale Reliability, 2005 [Text]. – Vol. 3. – № 2. – pp. 105-116.
14. Qing, L. C. Time-dependent reliability analysis of corrosion-induced concrete cracking [Text] / L. C. Qing, R. E. Melchers // ACI. Structure Journal, 2005. – № 4. – pp. 543-549.
15. Rao, S. V. K. M. Control of flexural crack width in cracked prestressed concrete members [Text] / S. V. K. M. Rao, W. H. Dilger // ACI Structural Journal, 1992. – № 2. – pp. 127-138.
16. Frosch, R. J. Flexural Crack Control in Reinforced Concrete [Text] / R. J. Frosch // ACI Special Publication. V. 204, 2001. – pp. 135-154.
17. ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary [Text] Farmington Hills, MI. 2008.
18. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [Text]. // American Association of State Highway and Transportation Officials. – 2008.
19. ISO 2394. – General principles on reliability for structures [Text]. – European Committee for Standardization, Brussels, 1998. – 62 p.

Л. Л. ЯНЧУК*

* Каф. «Мосты та тоннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (050) 358 73 37, эл. почта yanchuchok@mail.ru

АНАЛИЗ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК ПРАКТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ПРОГНОЗА РЕСУРСА

Цель. Разработка методологии прогноза ресурса изгибаемых железобетонных элементов мостов на этапе проектирования. **Методика.** Теоретическое исследование. **Результаты.** Получено новый алгоритм прогноза ресурса железобетонных элементов мостов в процессе проектирования. **Научная новизна.** Впервые предлагается методология проектирования изгибаемых железобетонных элементов мостов на заданный срок службы. **Практическое значение.** Полученный алгоритм является практическим инструментом управления ресурсом железобетонных элементов автодорожных мостов в процессе проектирования.

Ключевые слова: ресурс железобетонных элементов; прогноз ресурса; алгоритм оценки ресурса; проектирование элементов мостов на заданий ресурс.

© Л. Л. Янчук, 2014

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

L. L. YANCHUK*

* Dep. «Bridges is the tunnels», National Transport University, 1 Suvorova, Str., Kiev, Ukraine, 01010, tel. +38 (050) 358 73 37, e-mail yanchuchok@mail.ru

ANALYSIS CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BLOCKS AS A PRACTICAL RESOURCE PROJECTIONS APPARATUS

Purpose. Development of methodology for prediction of the concrete bridge elements resource in the design phase. **Methods**. Theoretical study. **Results**. New algorithm for prediction resource bridges reinforced concrete elements in the design process received. **Originality**. Methodology of the bridges reinforced concrete elements design on the specified service life carried out for first time. **Practical value.** The resulting algorithm is a life management practical tool in the design process of highway bridges reinforced concrete elements.

Keywords: concrete elements resource; prediction resource; algorithm for resource estimating; design of the bridges elements for a given period

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).

Надійшла до редколегії 21.08.2014.
Прийнята до друку 29.09.2014.

© Л. Л. Янчук, 2014