Національний університет
та природокористування

УДК 624.012.3:69.05-047.44

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОШКОДЖЕНЬ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

ANALYSIS OF THE MAIN METHODS OF STUDYING THE EFFECTS OF THE DAMAGE TO THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Лободанов М. М., аспірант, ORCID 0000-0001-5282-6865, **Вегера П.І., к.т.н., асистент,** ORCID 0000-0002-3437-1825, **Бліхарський З. Я., д.т.н., проф.,** ORCID 0000-0002-4823-6405 (Національний університет «Львівська політехніка», м.Львів)

Lobodanov M. M., post-graduate student, ORCID 0000-0001-5282-6865, **Vegera, P. I. PhD, assistant professor,** ORCID 0000-0002-3437-1825, **Blikharskyy Z. Y., Doctor of Science, professor,** ORCID 0000-0002-4823-6405 (Lviv Polytechnic National University)

В статті розглянуті основні методи дослідження пошкоджених залізобетонних елементів і їх доцільність в використанні. Так як, більшість методів є придатні лише для певних дефектів і пошкоджень через велику складність в розрахунках і врахуванні багатофакторності.

In the current trends, the necessity of studying the load-carrying capacity of the reinforced concrete elements with various types of damage is increasingly necessary. This is relevant when there is a need to reequip the existing buildings and structures; there is a reconstruction of the damaged construction objects, where various negative factors took place; if the calculated load on the construction was exceeded; the impact of an aggressive environment or natural phenomena: landslides, mudslides, earthquakes, and others. The urgency of this question leads to the formation of methods for studying certain damage and deformation, which in most cases simulate the main defects or their combinations. A striking example is the combination of a defect with a displacement of reinforcement in the manufacture of reinforced concrete constructions with the damaged concrete, which leads to a change in the work of the element from a pure bending to bending with torsion. This problem requires an analysis of existing research methods of the damaged reinforced concrete elements, and their further development. The article deals with the main methods of studying the impact of damage on the load-carrying capacity of the flexural reinforced concrete elements and analyzes their expediency for further use under the action of the load. The general data on the research of reinforced concrete T-girders with the damage to the shelf and the appearance of skew bending due to poorly constructed structures is provided. Since certain methods have different algorithms for data analysis,

Національний університет

the most common and topical research methods are examined in this article: vibration diagnostics; comparison of dynamic characteristics of the reference structure with the corresponding dynamic characteristics of the model with the defect and localization of the defects; the diagnostic method is based on real-time monitoring of the change of the element's work based on the impedance using PZT (Lead-Zirconium-Titanate) for the reinforced concrete structures. Simulation of the obtained results using the automated settlement systems only partly solves the problem. On the basis of the analyzed data, conclusions were made on the methods of research of the reinforced concrete beams with damages and an outline of the direction of further research was provided.

Ключові слова:
Залізобетонні елементи, пошкодження, дефекти, аналіз.
Reinforced concrete elements, damages, defects, analysis.

Вступ. На теперішній час все частіше виникає необхідність в дослідженні роботи пошкоджених залізобетонних елементів. Збільшенням об'ємів використання залізобетону призводить до необхідності підвищення ефективності проведення технічного огляду, підсилення і реконструкції пошкоджених залізобетонних елементів шляхом збільшення точності визначення внутрішніх зусиль, міцнісних та деформативних характеристик елемента. Це досягається вдосконалення існуючих та формування нових методів, так як в більшості практичних випадків розрахунок проводиться методом еквівалентного елемента, згідно з чинними нормами [1]. Широке використання методу еквівалентного елемента з метою визначення несучої здатності пошкоджених елементів обумовлене простотою та швидкістю розрахунку проте даний метод не надає повної картини напружено – деформованого стану елементу. Тому наявні методи діагностики несучої здатності пошкоджених елементів потребують більш ширших досліджень. Особливо дана потреба актуальна для дослідження роботи пошкоджених залізобетонних елементів за дії навантаження.

Постановка мети досліджень. Вивчення пошкоджених елементів є актуальною темою, тому мета даної роботи полягає в аналізі існуючих методів досліджень впливу пошкоджень і дефектів залізобетонних елементів на їх міцність та деформативність.

Аналіз останніх досліджень. Визначення впливу пошкоджень на залізобетонні конструкції стає все більш актуальним на теренах України, оскільки є наявно багато споруд, що не експлуатуються. Застосування існуючих методів є частковим виходом із ситуації тому, що вплив пошкоджень на конструкцію має складний характер. Тому кожний метод підходять тільки для певних умов. Яскравим прикладом цього є дослідження Клименка Є.В. [2], де при використанні методу моделювання, на основі комплексу «ЛІРА 9.6», порівняли отримані експериментальні результатами з результатами програмного комплексу. На основі цього були зроблені висновки:

- стиснуті залізобетонні прямокутні елементи з відносно малими ексцентриситетами показали високу збіжність результатів розрахунку з експериментальними даними (коефіцієнт варіації дорівнював 0,055). Несуча здатність зразків з ексцентриситетом прикладання сили e_0 = 0,25 м відрізняється від результатів, отриманих при натурному експерименті в кілька разів. На основі існуючих результатів автор удосконалив метод згідно чинних діючих норм [1] з додаванням передумов і припущень;

- для кожного випадку розрахунок складається необхідна кількість рівнянь. Так, для випадку позацентрового стиснення залізобетонного елемента прямокутного перерізу з косим пошкодженням (коли фронт пошкодження не паралельний жодної головної осі) розглядається п'ять рівнянь:

- рівняння рівноваги щодо осі x;
- рівняння суми моментів щодо осі x;
- рівняння суми моментів щодо осі y;
- статичний момент стиснутої зони бетону, щодо осі x;
- статичний момент стиснутої зони бетону, щодо осі y;

- розв'язок системи рівнянь дає можливість визначити залишкову несучу здатність пошкодженого в процесі експлуатації бетонного або залізобетонного елемента, а значить, оцінити можливість його подальшої нормальної експлуатації або необхідність посилення. Для елементів, що згинаються (без розрахункової арматури в стислій зоні) система спрощується, оскільки немає необхідності визначати напруги в кожному окремому стрижні. Але в цьому випадку виникає необхідність перевірки переармованості згинаного елемента і в разі, якщо $\xi > \xi_R$, що слід враховувати в розрахунку.

Також слід зазначити методику для досліджень впливу дії дефектів і пошкоджень на згинані залізобетонні елементи, які викликають косий згин, як наведено в роботі [3], де внаслідок дефекту при виготовленні чи пошкодженні, відбується зміна кута нахилу силової площини в процесі навантаження із подальшим дослідженням впливу вище згаданого кута на міцнісні та деформативні характеристики елемента.

Метод дослідження залізобетонних балок таврового профілю з пошкодженням полички або її повному руйнуванні описано в роботі [4,5] з застосуванням методу [6] для аналізу отриманих даних. Даний метод акцентований на впливі трьох основних факторів на залишкову несучу здатність пошкодженого елемента: пошкодження полички через відношення величини пошкодження до величини звисів полички; глибини пошкодження через відношення глибини пошкодження полички до товщини полички і куту пошкодження через відношення кута пошкодження до кута нахилу полички.

Наведені вище методи підходять лише для елементів з дефектами виготовлення (усі дефекти отримані до завантаження конструкції), що суттєво впливають на напружено-деформований стан елемента.

Потреба в неруйнівному методі діагностики частково розкривається в застосуванні методу вібродіагностики. Основними перевагами вібраційного методу є здатність відображати спільну роботу арматури з бетоном, по відношенню до найбільш небезпечним дефектів. Даний метод в своїй роботі розкиває Кадамцев М.І. [7].

При проведенні дослідження, в роботі [7], робиться акцент на порівнянні динамічних характеристик еталонної конструкції з відповідними динамічними характеристиками моделі з дефектом та локалізацією дефектів з застосування методу вібродіагностики. Автором отримано наступні висновки:

- при збільшенні розміру дефекту значення частот власних коливань зменшуються, а також свідчать про те, що згинальна форма коливань, є найбільш інформативною характеристикою для локалізації дефектів в конструкції;
- на частоту власних коливань конструкцій істотно впливає зміна розмірів і форми перерізу, довжини елемента, модуля пружності матеріалу, щільності матеріалу, захисного шару арматури, а також наявність таких дефектів, як викришування бетону, порожнечі, необхідні для проведення комунікацій, зони погано ущільненого бетону;
- при збільшенні області ушкоджень відбувається зменшення жорсткості перерізів балки, що викликає зменшення величин частот власних коливань;
- найкращі результати про місцезнаходження дефекту в конструкції отримані за допомогою методу зміни форми коливань еталонної моделі конструкції і моделі з пошкодженням. Основою даного методу є критерій модальної збіжності (MAC). Вхідними параметрами є частоти власних коливань конструкції і відповідні їм форми коливань;
- похибка локалізації пошкодження балки склала 7-9 см при використанні 7 точок моніторингу, при збільшенні числа точок моніторингу уздовж балки величина похибки зменшується.

На рис.1. наведено графік зміни форми коливань моделі конструкції, на якому чітко виражений пік точно вказав розташування пошкодженої області (рис.1).

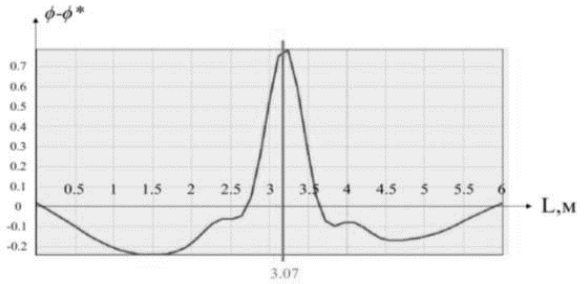

Рис. 1. Локалізація призматичного дефекту

Загальним висновком даного методу є: доцільність використання при певних видах пошкоджень (автор розглядав пошкодження утворенні від перевантаження), потреба в подальшому дослідженні даного метода при

Національний університет
інших видах дефектів, рентабельність використання даного методу при використанні певної кількості точок моніторингу в залежності від виду дефекту і об'єкта дослідження.

При розкритті питання вібродіагностики пошкоджень, необхідно звернути увагу на порівняння існуючих алгоритмів виявлення пошкоджень.

Виходячи з вібраційних характеристик, методи ідентифікації по ушкодженню поділяються на чотири основні категорії: природні частотні методи, методи форми на основі режиму, метод кривизни на основі форми, і методи, що використовують як форми, так і частоти режиму. В роботі [8] розглянуто дане порівняння, з якого можна зробити наступні висновки. Аналіз п'яти досліджених алгоритмів виявлення пошкоджень - це методика індикатору єдиного пошкодження (SDI) на основі частот, метод узагальненої фрактальної розмірності (GFD) на основі форми на основі режиму, метод режиму кривизни форми (MSK) на основі кривизни, метод обірваного згладжування (MSK) та метод індексу шкоди (DIM) на базі енергії від деформації, дав наступні результати в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння алгоритмів виявлення пошкоджень методу вібродіагностики

Алгоритми	Виявлення одиночної пошкодження	Виявлення кількох пошкоджень	Виявлення пошкоджень великої площі	Шумовий імунітет	Датчик відстані допуску
SDI	Так	Ні	Ні	Н/З	Н/З
GFD	Так	Ні	Ні	Відмінно	Відміно
MSC	Так	Так	Так	Добре	Добре
GSM	Так	Так	Ні	Добре	Добре
DIM	Так	Так	Так	Відміно	Відміно

Методи режиму кривизни форми та метод індексу шкоди є відносно надійними при високому вимірюваному шумі та значній відстані між датчиками. Що в свою чергу робить дані два алгоритми задовільними для дослідження експериментальних взірців з пошкодженнями і порівняння результатів на основі них з іншими способами дослідження пошкоджених залізобетонних елементів.

Метод діагностики базований на моніторингу в реальному часі зміни роботи елемента на основі імпедансу, з використанням PZT (свинцю-цирконат-титанат) для залізобетонних конструкцій [9]. Метод базований на структурному моніторингу на базі імпедансу використовуючи зв'язок (електромеханічних властивостей) між накладкою PZT і дослідною

структурою. Як ідеалізованим прикладом є рис.2 електромеханічної системи. Електричний аспект накладки PZT описаний короткозамкненим імпедансом, а структура дослідного взірця представлена механічним імпедансом рухомої точки, який включає в себе ефект маси, жорсткості, демпфірування і граничних умов.

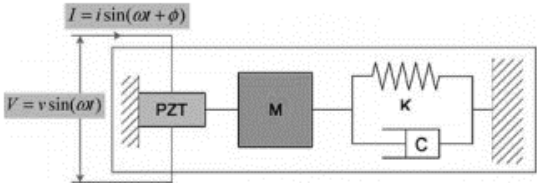

Рис. 2. Ідеалізована система електронного механізму

Накладка PZT живиться від напруги або струму. Інтегрована електромеханічна система може бути електрично представлена електричним опором, на який впливає динаміка PZT і структури взірця. Чутливість до виявлення пошкоджень методу SHM на основі імпедансу тісно пов'язана з обраною смугою частот. Щоб ефективно виявити пошкодження, необхідно, щоб довжина хвилі збудження була меншою за характерну довжину пошкодження. Даний метод досліджений описаний в роботі [9] з пошкодженням у формі засічок по бетонну в верхній частині балки за дії навантаження в реальному часі, що робить даний метод перспективним у дослідженні залізобетонних елементів з пошкодженнями.

Метод питомого електричного опору є одним із видів неруйнівних методів дослідження корозійного стану арматури в залізобетонних елементах. Основою якого є залежність питомого електричного опору до питомого опору водяної фази в бетонні і долі об'ємного водонасичення пор з урахуванням поправочних коефіцієнтів від характеристик матеріалів. Даний метод був практично досліджений в роботі [10], з демонстрацією практичної цінності в виявленні корозії і її ступеня розвитку в залізобетонних елементах. Так при значенні питомого електричного опору 55 - 33 кОм*см корозія була відсутня, а починаючи зі значення 11 кОм*см і нижче було виявлено ураження корозією із залежністю різким зростанням ступеня пошкоджень від зменшення питомого електричного опору. Загальним висновком даного методу є: доцільність використання в діагностиці пошкодження корозією на різних етапах, відсутність необхідності в пошкодженні елемента при діагностиці, доцільність використанні при діагностиці великої кількості ділянок.

Також слід зазначити доцільність використання і створення систем автоматизованого проектування (САПР). Оскільки, в результаті зростання складності при врахуванні багатофакторності за дії навантаження і інших чинників за наявності пошкоджень і дефектів в залізобетонних елементах значно зростає розрахункова складність. Особливої уваги заслуговує створення нового САПР, через не можливість використання існуючих для складних випадків пошкоджень і дефектів або їх комбінації, або високу

трудозатратність. Дослідження формування модульної схеми для вузькоспеціалізованої інтегрованої САПР для діагностування технічного стану об'єктів будівництва є розкрито Єременко Б. М. в роботі [11].

Проаналізовані роботи показують актуальність даного питання і доцільність подальших досліджень пошкоджених залізобетонних елементів за дії навантаження.

Висновки та перспективи подальших досліджень. При аналізі методів досліджень несучої здатності залізобетонних елементів при пошкодженні можна зробити висновок, що дана проблема потребує подальших експериментальних і теоретичних досліджень. Також існує потреба в подальшій розробці методів для дослідження залізобетонних елементів з типовими пошкодженнями, які наддадуть можливість досить точно імітувати реальні пошкодження, для вивчення напружено деформованого стану таких конструкцій.

На основі проаналізованих джерел можна зробити висновок що дане питання не до кінця досліджено. Особливо це стосується дослідження елементів із пошкодженням стиснутої зони бетону, що є типовим дефектом, який становить значну небезпеку для подальшої безпечної експлуатації конструкцій. та врахування дії навантаження різного роду інтенсивності.

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 97 с. – (Національний стандарт України).

2. Клименко Е. В. Общий метод определения остаточной несущей способности поврежденных железобетонных конструкций / Е. В. Клименко, Т. А. Крутько, А. М. Исмаель // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. - 2014. - Вып. 77. - С. 85-89.

3. Воскобійник, О.П. Експериментальні дослідження залізобетонних балок з дефектами та пошкодженнями, які викликають косий згин / О.П. Воскобійник, О.О. Кітаєв, Я.В. Макаренко, Є.С. Бугаєнко / Збірник наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во). - Полтава: ПолтНТУ, 2011. - Вип.1(29). - С. 87-92.

4. Клименко Е. В. Остаточная несущая способность поврежденных железобетонных балок таврового профиля / Е. В. Клименко, Е. С. Чернева, Н. Д. Король, Мохаммед Исмаел Арез, И. В. Антонишина // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - 2014. - Вип. 54. - С. 159-163.

5. Є.В. Клименко, О.С. Чернєва, О.Д. Довгань, Арез Мохаммед Ісмаел Вплив факторів пошкоджених таврових балок на величину їх руйнівного навантаження / Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк – 2013 – № 43. – С. 94-97.

6. Вознесенский В.А. Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / Вознесенский В.А. – 2-е изд., испр. и доп. – М: Финансы и статистика, 1981. – 215 с.

7. М. І. Кадомцев, А. А. Ляпін, Шатилов Ю.Ю. Вібродіагностика будівельних конструкцій [Електронний ресурс] // «Інженерний вісник Дона », 2012 №3.

8. Wei Fan, Pizhong Qiao Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study / Structural Health Monitoring, vol. 10, 1: pp. 83-111.

Національний університет

9. S. Park, S. Ahmad, C.-B. Yun, Y. Roh Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques / Experimental Mechanics, , vol. 46, pp. 609-618.

10. Пузанов А.В., Улыбин А.В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 18-25

11. Єременко Б. М. Проектування інтелектуальної системи для діагностики технічного стану об'єктів будівництва / Б. М. Єременко // Технологический аудит и резервы производства. - 2015. - № 1(2). - С. 44-48.

1. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia proektuvannia: DBN V.2.6-98:2009. – [Chynnyi vid 2011-07-01]. – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. – 97 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

2. 36.Klymenko E. V. Obshchyi metod opredelenyia ostatochnoi nesushchei sposobnosty povrezhdennыkh zhelezobetonnыkh konstruktsyi / E. V. Klymenko, T. A. Krutko, A. M. Ysmael // Stroytelstvo. Materyalovedenye. Mashynostroenye. Seryia: Ynnovatsyonnыe tekhnolohyy zhyznennoho tsykla obъektov zhylyshchno-hrazhdanskoho, promыshlennoho y transportnoho naznachenyia. - 2014. - Vыp. 77. - S. 85-89.

3. Voskobiinyk, O.P. Eksperymentalni doslidzhennia zalizobetonnykh balok z defektamy ta poshkodzhenniamy, yaki vyklykaiut kosyi zghyn / O.P. Voskobiinyk, O.O. Kitaiev, Ya.V. Makarenko, Ye.S. Buhaienko / Zbirnyk nauk. prats (haluzeve mashynobud., bud-vo). - Poltava: PoltNTU, 2011. - Vyp.1(29). - S. 87-92.

4. Klymenko E. V. Ostatochnaia nesushchaia sposobnost povrezhdennыkh zhelezobetonnыkh balok tavrovoho profylia / E. V. Klymenko, E. S. Cherneva, N. D. Korol, Mokhammed Ysmael Arez, Y. V. Antonyshyna // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury. - 2014. - Vyp. 54. - S. 159-163.

5. Ye.V. Klymenko, O.S. Chernieva, O.D. Dovhan, Arez Mokhammed Ismael Vplyv faktoriv poshkodzhenykh tavrovykh balok na velychynu yikh ruinivnoho navantazhennia / Mizhvuzivskyi zbirnyk "NAUKOVI NOTATKY". Lutsk – 2013 – № 43. – S. 94-97.

6. Voznesenskyi V.A. Statycheskye metodы planyrovanyia эksperymenta v tekhnyko-эkonomycheskykh yssledovanyiakh / Voznesenskyi V.A. – 2-e yzd., yspr. y dop. – M: Fynansы y statystyka, 1981. – 215 s.

7. M. I. Kadomtsev, A. A. Liapin, Shatylov Yu.Iu. Vibrodiahnostyka budivelnykh konstruktsii [Elektronnyi resurs] // «Inzhenernyi visnyk Dona », 2012 №3.

8. Wei Fan, Pizhong Qiao Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study / Structural Health Monitoring, vol. 10, 1: pp. 83-111.

9. S. Park, S. Ahmad, C.-B. Yun, Y. Roh Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques / Experimental Mechanics, , vol. 46, pp. 609-618.

10. Puzanov A.V., Ulыbyn A.V. Metodы obsledovanyia korrozyonnoho sostoianyia armaturы zhelezobetonnыkh konstruktsyi // Ynzhenerno-stroytelnыi zhurnal. 2011. №7(25). S. 18-25.

11. Yeremenko B. M. Proektuvannia intelektualnoi systemy dlia diahnostyky tekhnichnoho stanu obiektiv budivnytstva / B. M. Yeremenko // Tekhnolohycheskyi audyt y rezervы proyzvodstva. - 2015. - № 1(2). - S. 44-48.