

Идентификация свойств бетона в конструкциях балочного типа с дефектами на основе динамических методов

*И.О. Егорочкина, Е.А. Шляхова, А.А. Харитонов,
А.А. Запруцкий, Л.А. Манвелян, В.О. Экизян*

Донской государственной технической университет

Аннотация: Рассмотрена задача идентификации свойств бетона и локации повреждений в макетных конструкциях балочного типа на основе применения экспериментального вибрационного анализа. В качестве простой модели анализа рассмотрены балочные конструкции бездефектные и с наличием дефектов. На основе экспериментального подхода проанализированы колебания модели при ударном и вибрационном возбуждении. На основе аналитического моделирования рассчитаны динамический модуль упругости, скорость звука в балке, локация дефекта. Представлена методика и пример определения места дефекта в конструкциях балочного типа. Статья опубликована в рамках реализации программы Международного Форума «Победный май 1945».

Ключевые слова: вибродиагностика, идентификация, балочная конструкция, дефект, экспериментальный подход, аналитическое моделирование, вибровозбуждения.

Преждевременный выход из строя железобетонных опор линий электропередачи (ЛЭП) и других железобетонных конструкций, как правило, связан с недостаточным учетом реализации параметров надежности таких конструкций при их эксплуатации. Своевременная техническая диагностика и восстановление утраченных эксплуатационных свойств таких конструкций как железобетонные стойки опор ЛЭП является актуальной задачей решения проблем энергетического хозяйства.

Восстановление эксплуатационных свойств элементов ЛЭП выполняется в ходе ремонтно-восстановительных работ, которым в обязательном порядке предшествуют плановые технические обследования. Следует отметить, что в нормативно-технической литературе не представлены методики и критерии оценки качества выполнения ремонтных работ, в основном, предполагается визуальный контроль

отремонтированных участков [1], надежность и объективность которого невысока.

Для установления однородности структуры материалов, в том числе бетона, хорошо себя зарекомендовал вибродиагностический метод исследований. Данный метод является неразрушающим и может быть использован как для выявления дефектов в структуре материала, так и для оценки эффективности восстановления целостности структуры отремонтированного участка.

Опыт применения вибродиагностики для оценки свойств различных материалов и конструкций представлен в работах [2-6]. Проблемы идентификации повреждений в железобетонных конструкциях освещены в работах [7,8]. Рекомендации по подбору составов ремонтных составов и технология их нанесения представлены в работах [9,10]. В работе [11] предложен критерий оценки качества ремонтно-восстановительных работ – величина относительной адгезии ремонтного состава к бетону конструкции. Алгоритм проведения ремонтных работ стоек опор ЛЭП представлен в работе [12].

Целью выполненных научных исследований является разработка методики оценки механических свойств и дефектности железобетонной балочной конструкции с помощью метода вибродиагностики с использованием мобильного вибрационно-диагностического комплекса.

Для реализации поставленной цели в условиях испытательной лаборатории изготовлена серия образцов моделей балочного типа. Модели балок размерами 100x100x1000 мм изготавливали из тяжелого бетона класса В30, без армирования. Модели после изготовления твердели в нормальных условиях в течение 28 суток. Параллельно с моделями из того же бетона изготавливали контрольные образцы-кубы с ребром 100 мм.

С целью оценки эффективности ремонтно-восстановительных работ изготавливались модели балок без дефектов с качественным уплотнением бетонной смеси (контрольная) и с имитацией повреждений поверхностных и в теле балки (рис. 1).



Рисунок 1 – Образцы для идентификации дефектов:

а) контрольная балка без дефектов; б) балка с дефектами (трещины)

По достижении проектного возраста образцы-кубы испытывались по стандартной методике разрушающим методом для определения фактической прочности. Прочность моделей-балок оценивалась с помощью методов ультразвуковой диагностики. Фиксировалось достижение бетоном прочности, соответствующей проектному классу В30.

Для оценки свойств бетона и разработки методики идентификации дефектов применялся вибрационно-диагностический комплекс, представленный на рисунке 2.

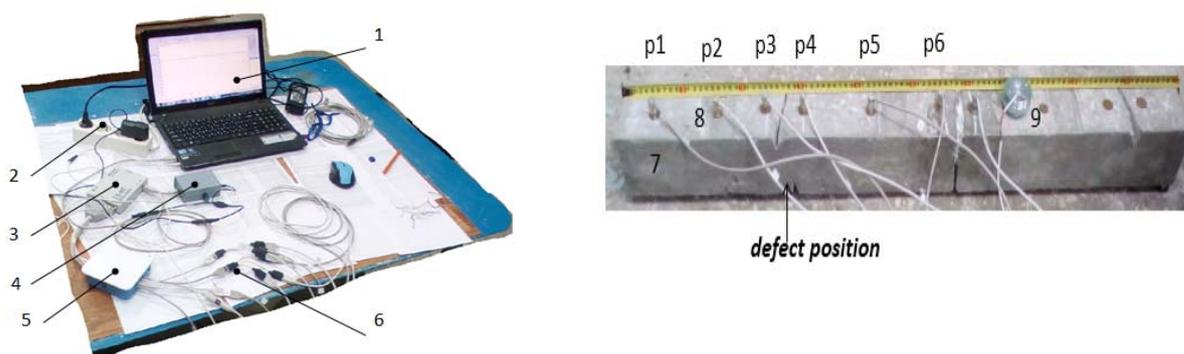


Рисунок 2 – Комплекс диагностического оборудования:

1 - ПК; 2 - блок питания; 3 - АЦП; 4 - блок питания согласующего устройства датчиков; 5 - согласующее устройство ВУ; 6 - передающий тракт; 7 - балочный образец; 8 - датчик акселерометр; 9 - вибрационное устройство (ВУ).

С помощью вибрационно-диагностического оборудования при ударном возбуждении на бездефектной балочной модели были измерены и рассчитаны частоты собственных колебаний. За базовую расчетную принималась первая частота колебаний (рис. 3).

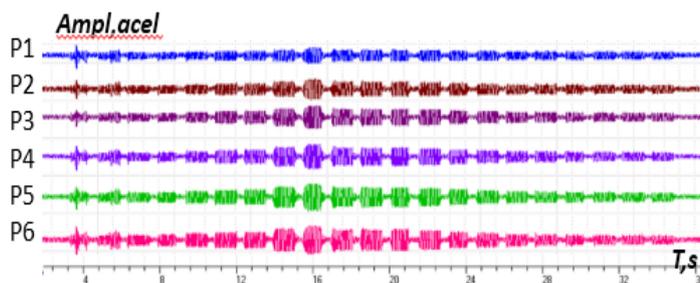


Рисунок 3 - Сигнал, зарегистрированный с датчиков (P₁..P₆) при вибрационном возбуждении на частотах от 70 до 110 Гц с шагом 2 Гц.

Для балочных моделей была рассчитана плотность бетона с дублирующим сопоставлением плотности по контрольным образцам.

На основе гипотезы Бернулли рассчитан динамический модуль упругости E :

$$E = \frac{(2\pi\omega)^2 \rho l^4 F}{J r^4} \quad (1)$$

где h, a, l – высота, ширина и длина балочной конструкции, м; ρ – плотность бетона, кг/м³; $F = h a$ – площадь поперечного сечения, м²; ω – собственная частота колебания, Гц; $J = ah^3 / 12$ – момент инерции сечения; $r = (2 * k + 1) / 2\pi$ – параметрический коэффициент, зависящий от номера k собственной моды колебаний.

Величина скорости распространения звука в бетоне (C) вычислялась по формуле:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

где ν - коэффициент Пуассона бетона ($\nu = 0,18$).

Полученные значения модуля упругости и величины скорости звука использовались для сравнительного анализа при разработке методики определения свойств бетона стандартизированными методами и предложенным авторами вибрационным. Результаты расчетов представлены в таблице:

Объект	$a, м$	$b, м$	$l, м$	$\rho, кг/м^3$	$\omega, Гц$	$E, Па$	$C, м/с$
Контрольная балка	0,1	0,1	1	2345	340	$2,605 \cdot 10^{10}$	3473
Балка с дефектами	0,1	0,1	1	2300	340	$2,550 \cdot 10^{10}$	2986

Идентификация дефекта в модельной балочной конструкции была апробирована на основе следующей методики. Проводилось вибрационное возбуждение конструкции в диапазоне частот от 70 до 110 Гц с шагом 2 Гц. Возбуждение колебаний производилось как с помощью ударного молотка, так и с помощью специального вибрационного устройства. Регистрация, построение форм колебаний на различных резонансах строилось и обрабатывалось с помощью специального программного обеспечения. На основе методик, представленных в [4-8], вычислялось вероятное место локализации дефекта (рис. 4).

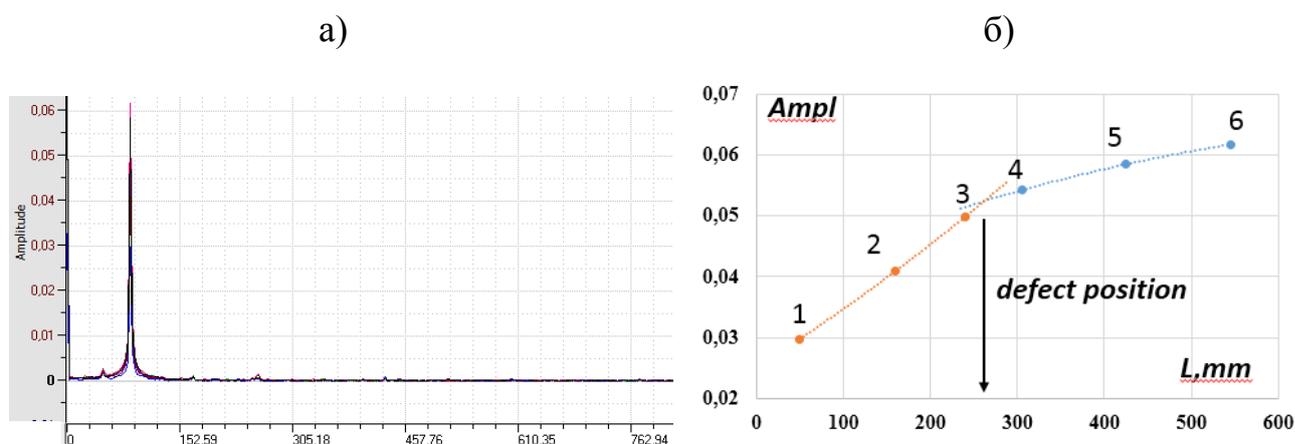


Рисунок 4 – Результаты вибродиагностики:

а) спектр колебаний на частоте 86 Гц; б) местоположение дефекта

Выбирались колебания с амплитудой, имеющей максимум над уровнем шумов снимающего тракта, для повышения достоверности оценки амплитуд. Вычислялся спектр колебаний и строилась форма колебаний на участке с точками 1- 6. Результаты вибродиагностического метода хорошо сходятся со стандартизированными измерениями локализации дефекта на натурном образце.

Выводы. Представлена и экспериментально апробирована методика оценки свойств бетона и локализации дефектов в балочной конструкции. С помощью мобильного вибрационно-диагностического комплекса измерены собственные и вынужденные колебания балочных моделей. Вычислены значения величин модуля упругости и скорость звука для контрольной и исследуемой модели балочного типа с дефектами (трещинами). Построены формы колебаний модели с повреждением, вычислена и установлена локализация дефекта. Представленная методика может быть применена при оценке качества ремонтно-восстановительных работ, внутренних дефектов и свойств материала конструкций, которые невозможно определить визуальным осмотром и регламентированными методами неразрушающей диагностики.

Литература

1. Каверина Р.С., Алексеев В.В. Рекомендации по ремонту железобетонных опор и фундаментов металлических опор ВЛ с применением современных цементосодержащих материалов // СПО ОРГРЭС. 2006. – 32 с.
2. Кадомцев, М.И., Ляпин, А.А., Шатилов, Ю.Ю. Вибродиагностика строительных конструкций //Инженерный вестник Дона, 2012, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/941.
3. Kanstad T. Nonlinear Analysis Considering Timedependent Deformations and Capasity of reinforced Concrete. Norway, Trondheim. -NTH. -1990, 349 p.

4. Cherpakov A., Egorochkina I., Shlyakhova E., Kharitonov A., Zarovny A., Dobrohodskaya S. Using technique vibration diagnostics for assessing the quality of power transmission line supports repairs. MATEC Web of Conferences, Vol. 106, 04009 (2017) URL: doi.org/10.1051/matecconf/201710604009.
5. Коробко, В.И., Калашников, М.О., Бояркина, О.В. Интегральная оценка дефектности строительных конструкций балочного типа динамическими методами // Строительная механика и расчет сооружений, 2009, № 1. URL: stroy-mex.narod.ru/index/2009/0-74.
6. Коробко, А. В., Абашин, Е. Г. Определение начального модуля упругости бетона в ненапряженных железобетонных балках вибрационным методом //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012, № 1, С. 130-133.
7. Кадомцев, М.И., Ляпин, А.А., Шатилов, Ю.Ю. Математическая реализация вибрационного метода идентификации повреждений в пролетных строительных конструкциях //Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2178.
8. Ваньков, Ю.В. Казаков, Р.Б. Яковлева. Э.Р. Собственные частоты изделия как информативный признак наличия дефектов // Техническая акустика. – 2003, № 5. URL: cyberleninka.ru/article/n/sobstvennyye-chastoty-izdeliya-kak-informativnyy-priznak-nalichiya-defektov.
9. Болотских, О.Н. Подготовка поверхности бетонных и железобетонных конструкций к ремонту. – М.: Ватерпас, 2001, 117 с.
10. Ваучский, М.Н, Дудурыч, Б.Б. Высокопрочный быстротвердеющий строительный раствор для аварийно-восстановительных работ // Строительные материалы, 2009, № 10, с. 20-22.
11. Егорочкина И.О., Шляхова Е.А., Черпаков А.В., Заровный А.Г., Кучеренко Д.Ю., Лежнев В.Н. Критерий оценки качества ремонтных работ

стоек опор ЛЭП // Инженерный вестник Дона, 2017, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4063.

12. Егорочкина И.О., Шляхова Е.А., Черпаков А.В., Кучеренко Д.Ю., Манвелян Л.А. Алгоритм выполнения ремонтных работ по восстановлению стоек опор ЛЭП. // Инженерный вестник Дона, 2016, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3882

References

1. Kaverina R.S., Alekseev V.V. Rekomendatsii po remontu zhelezobetonnykh opor i fundamentov metallicheskiykh opor VL s primeneniem sovremennykh tsementosoderzhashchikh materialov [Guidelines for repair of reinforced concrete supports and foundations of metal supports of overhead lines with application of modern materials cimentoacademy]. SPO ORGRES, 2006, 32 p.
2. Kadomtsev M.I., Liapin A.A., Shatilov J.J. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/941.
3. Kanstad T. Nonlinear Analysis Considering Timedependent Deformations and Capacity of reinforced and Prestressed Concrete. Norway, Trondheim, NTH, 1990, 349 p.
4. Cherpakov A., Egorochkina I., Shlyakhova E., Kharitonov A., Zarovy A. and Dobrohodskaya S. MATEC Web of Conferences, Vol. 106, 04009 (2017) URL: doi.org/10.1051/matecconf/201710604009.
5. Korobko V.I., Kalashnikov M.O., Boyarkina O.V. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 2009, № 1. URL: stroy-mex.narod.ru/index/2009/0-74.
6. Korobko A. V., Abashin E. G. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2012, № 1. pp. 130-133.
7. Kadomtsev M.I., Liapin A.A., Shatilov J.J. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2178.



8. Van'kov, R.B. Kazakov, E.R. Yakovlev. Van'kov, R.B. Kazakov, E.R. Yakovleva. Tekhnicheskaya akustika. 2003, № 5. URL: cyberleninka.ru/article/n/sobstvennyye-chastoty-izdeliya-kak-informativnyy-priznak-nalichiya-defektov.
9. Bolotskikh, O.N. Podgotovka poverkhnosti betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy k remontu [Surface preparation of concrete and reinforced concrete structures for repair]. Vaterpas, 2001, 117 p.
10. Vautsky, M.N, Dudurych, B. B. Stroitel'nye materialy, 2009, № 10, pp. 20-22.
11. Egorochkina I.O., Shlyakhova E.A., Cherpakov A.V., Zarovny A.G., Kucherenko D.Yu., Lezhnev V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4063.
12. Egorochkina I.O., Shlyakhova E.A., Cherpakov A.V., Kucherenko D.Yu., Manvelyan L.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/4063.