

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2023.01.10

УДК 624.159.2

Л.А. Васильчук, И.В. Чаплин

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗМЫВОВ ОПОР МОСТОВ

Местный размыв грунта у опор мостов является довольно распространенным и опасным дефектом, несвоевременное обнаружение которого может привести к возникновению аварийных ситуаций с тяжелыми последствиями. Обоснованы возможности организации системы мониторинга частот свободных колебаний и углов наклона конструкций с целью своевременного обнаружения размывов опор. Описан процесс образования местного размыва опор мостов, параметры, влияющие на глубину размыва. Также представлен обзор существующих методов диагностики местных размывов опор, в основе которых лежит контроль изменений динамических параметров. Описаны результаты исследований влияния других факторов (например, уровня воды, прочности грунта, места установки датчиков) на динамические параметры конструкции. По результатам анализа установлено, что для диагностики размыва опор наиболее информативными динамическими параметрами являются частоты собственных колебаний. С учетом результатов обзора существующих методов диагностики авторами проведены натурные исследования. В качестве объекта исследования были выбраны идентичные друг другу по конструкции промежуточные опоры двухпутного железнодорожного моста (одна из опор с размывом около 1,5 м, две другие опоры без размыва). Натурные измерения проведены с помощью датчиков-акселерометров и инклинометров измерительной системы «Тензор МС». Результаты натурных исследований показали высокую чувствительность измеряемых параметров (частоты свободных колебаний и наклона верха опоры) при различном уровне грунта у опоры. По результатам исследований теоретически и практически подтверждена актуальность и возможность организации системы периодического или постоянного автоматизированного мониторинга динамических параметров конструкций с целью своевременного обнаружения размывов опор.

Ключевые слова: местный размыв, опора моста, мониторинг, динамические параметры, вибродиагностика, частота свободных колебаний, измерительная система «Тензор МС».

L.A. Vasilchuk, I.V. Chaplin

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

METHODS FOR DETECTING BRIDGE SCOUR

Bridge scour is a fairly common and dangerous defect, the untimely detection of which can lead to emergency situations with serious consequences. The purpose of the study is to substantiate the possibility of organizing a system for monitoring the natural frequencies and angles of inclination of structures in order to timely detect bridge scour. The paper describes the process of formation of bridge scour and parameters that affect the scour depth. An overview of the existing methods for diagnosing bridge scour, which are based on the control of changes in dynamic parameters, is presented too. The results of studies of the influence of other factors (for example, water level, soil strength, location of sensors) on the dynamic parameters of the structure are described. Based on the results of the analysis, it was found that the most informative dynamic parameters for diagnosing the bridge scour are the natural frequencies. Based on the results of a review of the existing diagnostic methods, the authors carried out field studies. Piers of a double-track railway bridge identical in design to each other (one of the supports with a bridge scour of about 1.5 m, the other two supports without bridge scour) were chosen as the object of study. Field measurements were carried out using sensors-accelerometers and inclinometers of the Tensor MS measuring system. The results of field studies showed a high sensitivity of the measured parameters (natural frequency and inclination of the top of the pier) at different ground levels at the pier. According to the results of the research, the relevance and possibility of organizing a system for periodic or continuous automated monitoring of the dynamic parameters of structures in order to detect bridge scour in a timely manner has been theoretically and practically confirmed.

Keywords: bridge scour, bridge pier, monitoring, dynamic parameters, vibration-based diagnostics, natural frequency, Tensor MS measuring system.

Введение

Размывы основания опор – достаточно распространённое природное явление, представляющее опасность для безопасности движения транспортных средств. Главной причиной появления размывов является наличие препятствия на пути движущегося водного потока. Процесс

образования местного размыва, согласно [1], заключается в следующем. Струи потока, ударяясь об опору с верховой стороны, расслаиваются и меняют свое направление. Струи верхней толщи потока создают по ширине опоры стоячую волну набега, а струи средней и нижней частей, опускаясь и отгалкиваясь от дна, закручиваются в вихрь (валец). Данный вихрь, подковообразно обхватывая опору, переносит значительную долю частиц грунта в низовую сторону опоры. Наименьшая доля частиц, захваченная вихрем, опускается на верховой откос воронки и сползает на ее дно. Максимальная глубина воронки размыва образуется с верховой стороны опоры при объединении боковых размывов с размывами у лобовой грани опоры.

Глубина местного размыва у опор зависит от режима наносов [1]. При постоянном поступлении наносов в воронку размыва происходит активное увеличение глубины, затем она несколько спадает и, пульсируя, устанавливается на некотором своем значении, которое называется равновесной глубиной. Пульсирующий характер кривой объясняется неравномерным поступлением наносов, перемещающихся грядами, а также периодическим сползанием верхового откоса воронки размыва. При отсутствии поступления наносов в воронку местного размыва (этот случай иногда называют «размывом в чистой воде» или «в осветленном потоке») глубина размыва медленно увеличивается, асимптотически приближаясь к пределу. Мерой подвижности наносов в реках вблизи опор мостов является скорость потока v у опоры, сравниваемая с неразмывающей скоростью v_0 потока, которая характеризует момент начала движения наносов. Согласно [2], за допускаемую неразмывающую скорость потока принимается наибольшее значение средней скорости течения воды, при котором поток не может вызвать недопустимого для нормальной эксплуатации сооружения размыва (разрушения) русла. Различают два режима наносов:

1 – скорость потока у опоры превышает неразмывающую скорость потока ($v > v_0$) – наносы поступают в воронку местного размыва;

2 – скорость потока у опоры меньше неразмывающей скорости потока ($v < v_0$) – размыв происходит без поступления наносов.

По сравнению с первым режимом глубина размыва во втором случае больше и устанавливается в течение более длительного времени. Режим, когда $v = v_0$, условно относят ко второму случаю.

Расчетные формулы глубины воронки местного размыва:

При поступлении наносов в воронку размыва ($v > v_0$):

$$h = 1,1\sqrt{b \cdot H} \cdot \left(\frac{v}{v_g}\right)^n \cdot K_\phi \cdot K_\alpha; \quad (1)$$

для осветленного потока ($v \leq v_0$):

$$h = 1,1 \cdot b^{0,6} \cdot H^{0,4} \cdot \left(\frac{v}{v_g}\right)^n \cdot K_\phi \cdot K_\alpha, \quad (2)$$

где b – ширина опоры, м; H – глубина потока, м; v – скорость потока, м/с; v_g – средняя взмучивающая скорость потока у опоры при несвязных грунтах, м/с (зависит от высоты потока, фракционного состава вымываемого грунта); n – степенной параметр; K_ϕ – коэффициент формы опоры; K_α – коэффициент увеличения глубины размыва при косом набега потока.

Размывы опор диагностируют специальными методами с помощью подводных инструментов. Однако данные методы обладают такими недостатками, как высокая стоимость и практическая невозможность выполнения работ в паводки. Как известно, именно половодье является самым опасным промежутком времени для появления размывов опор мостов, ведь, соглас-

но [1], величина местного размыва напрямую зависит от глубины и скорости потока. Несвоевременное обнаружение размыва может повлечь за собой серьезные последствия. Опора может получить крен либо полностью потерять устойчивость, вызвав обрушения пролетных строений. Одним из решений данной проблемы является организация системы периодического или постоянного мониторинга динамических параметров конструкций.

Цель и задачи исследования

Целью проводимого исследования является обоснование возможности организации системы периодического или постоянного мониторинга частот свободных колебаний и углов наклона конструкций с целью своевременного обнаружения размывов опор.

Для достижения поставленной цели перед авторами поставлены задачи анализа существующих методов диагностики сооружений (в том числе и размывов опор) по их динамической работе, а также проведения натурального эксперимента.

Анализ степени разработанности проблемы

Методы, основанные на анализе характеристик колебания элементов конструкций, всё чаще применяются для оценки технического состояния сооружений как в России, так и за рубежом. Например, специалисты СибНИИ мостов СГУПС при вибродиагностике мостовых конструкций применяют малогабаритный измерительный комплекс «Тензор МС» [3–7]. Данный комплекс позволяет оперативно провести полевые работы, применяя датчики разного типа, используя один измерительный блок [8]. В промышленно-гражданском строительстве для установки степени повреждения жилых зданий, оценки рисков обрушения строений МЧС России использует мобильный диагностический комплекс «Стрела-П», разработанный ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций» (ЦИЭКС). Комплекс «Стрела-П» основан на динамическом анализе устойчивости зданий и сооружений и предназначен для оперативного неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния несущих конструкций эксплуатируемых, строящихся и реконструируемых зданий и сооружений [9].

Как известно, частота свободных колебаний конструкции зависит от изгибной жесткости (EI) и распределенной массы (m). По мере развития местного размыва постепенно увеличивается свободная длина опоры, тогда как конструктивная целостность (масса опоры) остается неизменной. Таким образом, неизменная масса и сниженная жесткость приводят к уменьшению частоты свободных колебаний опоры. Стоит также отметить, что на изменение жесткости конструкции могут также повлиять и другие конструктивные дефекты, но предполагается, что изменение частоты при этом будет не столь существенным, как при появлении размыва опоры. Исходя из этого, мониторинг частоты свободных колебаний может применяться для обнаружения размывов опор мостов.

За рубежом представлено большое количество лабораторных, полевых и численных исследований влияния размывов опор на спектр собственных частот колебаний моста и его элементов [10–19]. Например, в работе [10] колебания, вызванные пропуском по мосту подвижного состава, оценивались показателем β , равным отношению амплитуды горизонтального ускорения колебаний к амплитуде вертикального ускорения. Датчики ускорений были установлены на насадках опор. По результатам полевых испытаний для опор с подмывами и без подмывов было выявлено, что значение β увеличивается с развитием подмыва в связи с возрастанием амплитуд горизонтальных колебаний. Также в этой работе оценивались колебания, вызываемые течением в паводок. Фиксация ускорений колебаний также проводилась с помощью датчика. По результатам обработки записанных данных с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) была получена частота свободных колебаний, которая изменялась при наличии размыва.

В лабораторных исследованиях влияния размыва на динамические параметры конструкции J.L. Briaud et al. [11] использовали две модели моста в гидравлическом лотке (на фундаментах мелкого и глубокого заложения). Исследование заключалось в контролируемом увели-

чении скорости воды в лотке для постепенного развития размыва опор. Выведение конструкции из состояния равновесия осуществлялось посредством ударов резиновым молотком по различным заранее определенным точкам на проезжей части модели моста, имитирующих прохождение транспортных средств. Возбуждаемые ускорения в трех направлениях (вертикальном, в направлении движения транспорта и направлении потока воды) фиксировались датчиками-акселерометрами, установленными на опоре моста. Анализ влияния размывов осуществлялся двумя способами. Во-первых, по спектрам частот, получаемых с помощью БПФ измеренных ускорений. Во-вторых, в качестве параметра для оценки размыва было предложено использовать отношения среднеквадратичных значений ускорений, измеренных в двух направлениях (всего три комбинации направлений). Анализировались первые три тона колебаний. Для ускорений в направлениях потока воды и движения транспорта:

$$\frac{a_x}{a_y} = \frac{\sqrt{\frac{a_{x1}^2 + a_{x2}^2 + \dots + a_{xn}^2}{n}}}{\sqrt{\frac{a_{y1}^2 + a_{y2}^2 + \dots + a_{yn}^2}{n}}}, \quad (3)$$

где a_x – среднее квадратичное значение измеренного ускорения в направлении потока воды; a_y – среднее квадратичное значение измеренного ускорения в направлении движения транспорта; $n = 1 \dots 3$ – порядковый номер тона колебаний.

По результатам экспериментов частота свободных колебаний в направлении потока воды оказалась наиболее чувствительной к появлению размыва, как на фундаменте мелкого заложения, так и глубокого. На рис. 1 представлены результаты исследований на фундаменте мелкого заложения, из которых видно снижение частот первой, второй и третьей мод колебаний во времени с увеличением глубины размыва. Следует отметить, что первая форма колебаний оказалась менее чувствительна к размыву, по сравнению с двумя другими. В то же время соотношения средних квадратичных значений ускорений по двум комбинациям направлений также показывают значительные изменения при появлении размыва опоры (рис. 2). Аналогичные результаты были получены и на фундаменте глубокого заложения.

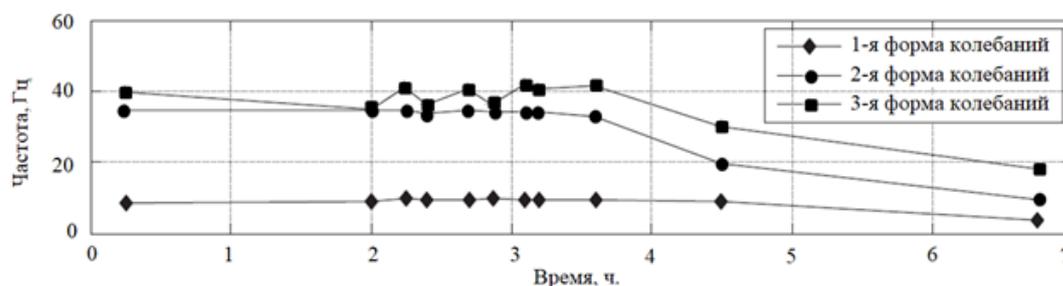


Рис. 1. График изменения частот колебаний в направлении потока для опоры на фундаменте мелкого заложения [11]

С. Yao et al. [12] провели экспериментальные исследования изменения частоты свободных колебаний модели опоры на фундаменте мелкого заложения. Модель представляла собой бетонную колонну диаметром 0,45 м и высотой 4 м, заглубленную в лотке в песчаный грунт. Пролетные строения имитировали специальным настилом, уложенным поверх опоры. Непосредственно для определения частоты свободных колебаний использовали датчик-акселерометр, установленный на вершине колонны. Когда лоток не был заполнен водой, модель выводили из равновесия при помощи ударов молотка по настилу. После подачи в лоток воды в качестве возбуждающей колебания силы использовали сам поток воды, которому придавали различную скорость.

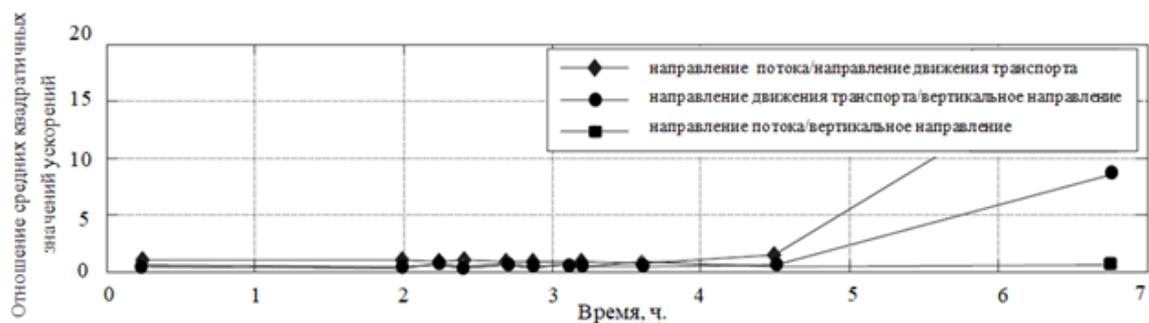


Рис. 2. График изменения соотношений средних квадратичных значений ускорений для трех комбинаций направлений для опоры на фундаменте мелкого заложения [11]

По мере увеличения скорости потока происходило увеличение глубины воронки размыва. По результатам проведенных экспериментов анализировали первые три частоты свободных колебаний по направлению потока (направлению, предпочтительному для местного размыва), которые, как показано на рис. 3, уменьшались при увеличении глубины воронки размыва. Следует отметить, что, согласно результатам эксперимента, первая частота колебаний оказалась менее чувствительна к размыву, по сравнению со второй и третьей частотами.

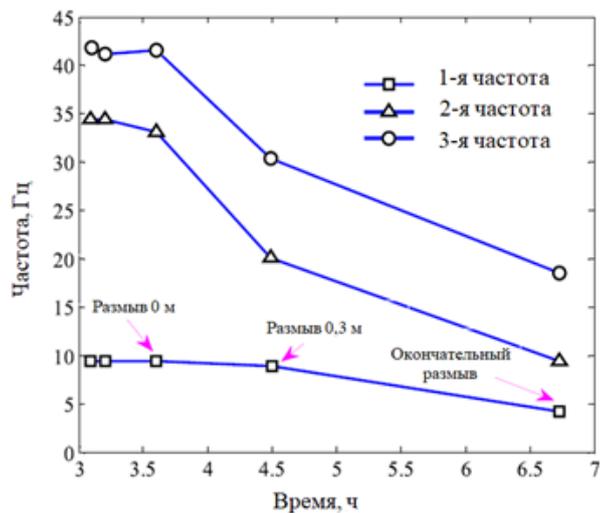


Рис. 3. Изменение частоты свободных колебаний по направлению потока [12]

В работе Y. Ko et al. [13] провели исследования влияния размывов на динамические характеристики опор мостов в полевых условиях. В ходе работ рассматривались опоры с размывами от 0,5 до 7,0 м. Конструкции выводились из состояния равновесия проезжающими по мосту автомобилями. Регистрация ускорений производилась датчиками-акселерометрами, устанавливаемыми на пролетном строении или проезжей части. В ходе измерений были получены частоты свободных колебаний путем осреднения значений частот БПФ по трем участкам записи, извлеченным из общего сигнала. Результаты исследований показали, что частота свободных колебаний по направлению движения транспортных средств вследствие размыва изменяется незначительно ввиду ограничений со стороны пролетных строений. Тогда как частота колебаний по направлению потока существенно снижается с увеличением глубины воронки размыва, что связано с уменьшением общей жесткости опоры в направлении потока. Данный факт также был подтвержден лабораторными исследованиями J. L. Briaud et al. [14].

Также авторами [15] выявлено, что место установки датчика на опоре не влияет на качество получаемых данных. Так, по трем датчикам, установленным в верхней, средней и нижней

частях опоры, наблюдается четкое снижение частоты свободных колебаний для опоры с размывом около 4 м по сравнению с опорой без размыва.

Влиянию уровня воды на динамические параметры опоры посвящены несколько работ. Например, Т.К. Lin et al. [16] в своих экспериментах получили частоты свободных колебаний одной и той же опоры при моделировании различных комбинаций уровня воды и глубины заделки опоры в грунт. Результаты исследований показали, что частота свободных колебаний опоры при различном уровне воды меняется незначительно, по сравнению с оказываемым существенным влиянием от глубины заделки опоры в грунт. В работе же [17] при исследовании в качестве опор трех колонн разной геометрии было установлено, что влияние уровня воды на частоту свободных колебаний зависит от жесткости опоры. Так, для опоры с высокой жесткостью, расположенной в воде, частота свободных колебаний очень близка к частоте опоры «на суше». Тогда как разница подобных частот колебаний для гибкой опоры более существенна.

Авторами также проводятся численные исследования влияния различной прочности грунта на динамические параметры опоры. В работе [18] представлен анализ изменений частоты свободных колебаний опоры, моделируемой в шести типах грунтового основания разной прочности, при увеличении глубины воронки размыва. Для четырех типов грунтового основания модуль упругости принят возрастающим по мере увеличения глубины заложения, для одного – уменьшающимся, и для последнего – постоянным. По результатам исследований, представленным на рис. 4, а, во всех шести случаях наблюдается уменьшение частоты колебаний опоры при моделировании увеличения глубины подмыва. Также из полученных графиков видно, что значения частот свободных колебаний при различных значениях модулей упругости грунта практически идентичны, что говорит о том, что прочность грунта существенно не влияет на частоту колебаний опоры.

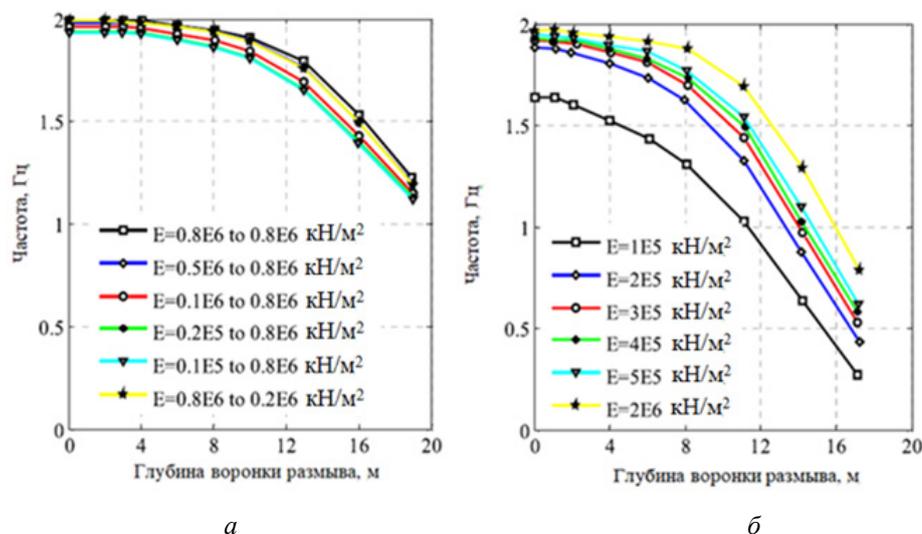


Рис. 4. График зависимости частоты свободных колебаний опоры от глубины размыва при разной прочности грунтового основания по [18] (а) и по [19] (б)

Абсолютно противоположные результаты, представленные в работе [19], были получены другими авторами. Конечно-элементный расчет показал, что на значение частоты свободных колебаний опоры существенное влияние оказывает модуль упругости грунта (рис. 4, б). При меньшем значении модуля упругости наблюдаются меньшие значения частоты свободных колебаний опоры.

Натурные исследования

Выполненный анализ методов позволяет сделать вывод, что для диагностики размыва опор наиболее информативными динамическими параметрами являются частоты собственных колебаний. Это было учтено при проведении натурных исследований. В качестве объекта ис-

следования были выбраны идентичные друг другу по конструкции промежуточные опоры двухпутного железнодорожного моста: опора № 2 с местным размывом около 1,5 м и опоры № 3 и 4 без размыва. Запись ускорений колебаний опор производили с помощью датчиков-акселерометров измерительной системы «Тензор МС», разработанной в Сибирском государственном университете путей сообщения [8]. Также были использованы датчики-инклинометры для измерения углов наклона опор. Датчики, установленные на нижнем листе балансира неподвижных опорных частей (рис. 5, а), фиксировали изменение измеряемых параметров в горизонтальной поперечной плоскости моста. Опоры выводили из состояния равновесия проходом по мосту подвижной нагрузки ВЛ80С.

После обработки первичного сигнала, записываемого датчиками-акселерометрами, посредством БПФ был получен спектр частот колебаний опор. Из данного спектра методом отбора пиковых значений определена первая частота собственных поперечных колебаний и произведено сравнение с результатами конечно-элементного расчета в программном комплексе Midas Civil. Из полученных данных, сведенных в таблицу, можно сделать вывод, что частота свободных колебаний опоры при местном размыве 1,5 м уменьшается практически в 2 раза.

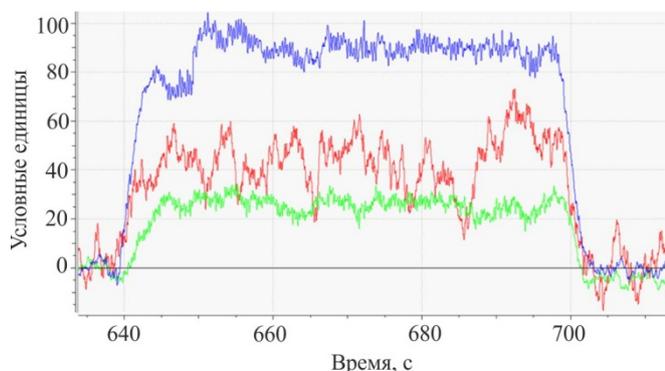
Показания датчиков-инклинометров, фиксирующих перемещения опор поперек оси моста во время прохождения груженого состава, представлены на рис. 5, б.

Частоты свободных колебаний по 1-й форме

Опора	Расчетная частота, полученная по результатам расчетов в Midas Civil, Гц	Фактическая частота, полученная по результатам натурных измерений, Гц
Опора № 2 (с размывом 1,5 м)	1,41	1,51
Опора № 3 (без размыва)	2,89	2,98
Опора № 4 (без размыва)	2,89	2,98



а



б

Рис. 5. Установка датчиков-акселерометров и инклинометров (а) и показания инклинометров поперек оси моста (б): синий цвет – опоры № 2; зеленый – опоры № 3; красный – опоры № 4

Как видно из графика, наклон опоры № 2 в три раза превышает условно эталонные значения, зафиксированные на опорах № 3 и 4 без размывов.

Заключение

Результаты натурных исследований свидетельствуют о возможности фиксации размывов опор по каждому из рассмотренных параметров (см. данные таблицы и рис. 5). Однако в рамках приведенного натурального эксперимента была выполнена только качественная оценка – есть размыв опор или нет. Для возможности определения величины и локализации размыва опоры по

частотам собственных колебаний и углам наклона планируется проведение дальнейших детальных исследований.

Предлагаемый способ диагностики, по сравнению с используемым на практике в настоящее время подводным обследованием опор, обладает рядом таких преимуществ, как возможность проведения мониторинга в период половодья, снижение трудоемкости работ и повышение оперативности обнаружения размыва опор. Поэтому данный способ диагностики перспективен для применения в рамках периодического или постоянного (для дефектных сооружений) мониторинга на сети железных и автомобильных дорог России.

Список литературы

1. Журавлев М.М. Местный размыв у опор мостов. – М.: Транспорт, 1984. – 112 с.
2. ВТР-П-25-80 Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов. – М., 1981.
3. Чаплин И.В. Вибродиагностика мостовых сооружений и их элементов // Наука и молодежь СГУПСа в третьем тысячелетии»: сб. науч. ст. аспирантов и аспирантов-стажеров. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2015. – Вып. 4. – С. 200–209.
4. Яшнов А.Н., Чаплин И.В. Опыт применения диагностики и оценки технического состояния мостовых конструкций по динамическим параметрам // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: сб. науч. ст. XXI науч.-метод. конф. ВИТУ. – СПб., 2017. – С. 181–185.
5. Васильчук Л.А., Яшнов А.Н. Диагностика подмывов опор мостов по динамическим параметрам // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. – Днепр, 2020. – № 18. – С. 18–27.
6. Васильчук Л.А., Яшнов А.Н. Выявление дефектов по изменениям динамических параметров конструкции // Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений: материалы IV Международной студенческой конференции – Минск: БНТУ, 2020. – С. 392–394.
7. Мониторинг усилий натяжения вант Виноградовского моста через протоку Татышева в г. Красноярске по частотам их собственных колебаний / А.Н. Яшнов, И.В. Чаплин, Т.М. Быкова, Т.М. Баранов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 135–141.
8. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО / С.А. Бокарев, И.И. Снежков, А.Н. Яшнов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 25.
9. Мониторинг устойчивости и остаточного ресурса высотных зданий и сооружений с применением мобильного диагностического комплекса «Стрела» [Электронный ресурс] / В.А. Котляревский, С.П. Сушев, В.И. Ларионов, А.И. Перепелицын // ДонНТУ. – URL: <http://masters.donntu.ru/2008/kita/sherstyuk/library/art4/art4.htm> (дата обращения: 08.02.2023).
10. Masui Y., Suzuki O. Development of a Soundness Evaluation System for Bridge Substructured // JR East Tech. Rev. – 2009. – Vol. 14(14). – P. 65.
11. Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology / J.L. Briaud, S. Hurlbaeus, K. Chang [et al.]. – Austin, USA, 2011.
12. Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiment with a shallow foundation / C. Yao, C. Darby, O.-Y. Yu [et al.] // GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. – West Palm Beach, USA, GeoFlorida, 2010.
13. Scour evaluation of bridge foundations using vibration measurement / Y. Ko, W. Lee, W. Chang, H. Mei, C. Chen // 5th International Conference on Scour and Erosion. – San Francisco, CA, USA, 2010.
14. Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiments and numerical simulations / J.L. Briaud, C. Yao, C. Darby [et al.] // Transportation Research Board (TRB) 89th Annual Meeting. – Washington, DC, Transportation Research Board, 2010.

15. Lin T.-H., Lu Y.-C., Hung S.-L. Field Study of Bridge Scour Using Imote2. NET-Based Wireless Monitoring System // The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology. – 2011.
16. Implementation of a vibration-based bridge health monitoring system on scour issue / T.K. Lin, Y.P. Wang, M.C. Huang, C.A. Tsai // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publ. – 2013.
17. An Investigation of the Changes in the Natural Frequency of a Pile affected by Scour / L. Prendergast, D. Hester, K. Gavin [et al.] // Journal of sound and vibration. – 2013. – Vol. 332 (25). – P. 6685–6702.
18. Application of finite element method and genetic algorithms in bridge scour detection / H.Y. Huang, W.Y. Chou, S.H. Ju, C.W. Feng // Society for Social Management Systems Internet Journal. – 2012.
19. Bao T., Liu Z. Vibration-based bridge scour detection: A review // Structural Control and Health Monitoring. – 2016. – Vol. 24 (7).

References

1. Zhuravlev M.M. Mestnyi razmyv u opor mostov [Local bridge scour]. Moscow, Transport, 1984, 112 p.
2. VTR-P-25-80 Rukovodstvo po opredeleniiu dopuskaemykh nerazmyvaiushchikh skorostei vodnogo potoka dlia razlichnykh gruntov pri raschete kanalov [Guidelines for determining the permissible non-eroding water flow rates for various soils when calculating canals]. Moscow, 1981.
3. Chaplin I.V. Vibrodiagnostika mostovykh sooruzhenii i ikh elementov [Vibration diagnostics of bridge structures and their elements]. Nauka i molodezh' SGUPSa v tret'em tysiacheletii: sbornik nauchnykh statei aspirantov i aspirantov-stazherov, Novosibirsk, 2015, issue 4, pp. 200-209.
4. Yashnov, A. N. Opyt primeneniia diagnostiki i otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia mostovykh konstruksii po dinamicheskim parametram [Experience in the use of diagnostics and assessment of the technical state of bridge structures by dynamic parameters]. Defekty zdaniy i sooruzhenii. Usilenie stroitel'nykh konstruksii: sbornik nauchnykh statei XXI nauchno-metodicheskoi konferentsii VITU, Saint Petersburg, 2017, pp. 181–185.
5. Vasilchuk, L.A. Diagnostika podmyvov opor mostov po dinamicheskim parametram [Diagnostics of bridge scour by dynamic parameters]. *Mosty i tonneli: teoriia, issledovaniia, praktika*, Dnepr, 2020, no. 18, pp. 18-27.
6. Vasilchuk, L.A. Vyiavlenie defektov po izmeneniiam dinamicheskikh parametrov konstruksii [Detection of defects by changes in the dynamic parameters of the structure]. *Sovremennye napravleniia v proektirovanii, stroitel'stve, remonte i soderzhanii transportnykh sooruzhenii. Materialy IV Mezhdunarodnoi studencheskoi konferentsii*, Minsk, BNTU, 2020, pp. 392 – 394.
7. Yashnov, A.N. Monitoring usilii natiazheniia vant Vinogradovskogo mosta cherez protoku Tatysheva v g. Krasnoirske po chastotam ikh sobstvennykh kolebaniy [The monitoring efforts of the vants tension Vinogradov bridge over the canal Tatysheva in the city of Krasnoyarsk in the frequency of their oscillation]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2017, no. 4 (68), pp. 135-141.
8. Bokarev, S. A. Malogabaritnye avtomatizirovannye sistemy dlia diagnostiki ISSO [Small-sized automated systems for diagnostics of engineering structures]. *Put' i putevye khoziaistvo*, 2007, no. 9, p. 25.
9. Kotlyarevsky V.A., Sushchev S.P., Larionov V.I., Perepelitsyn A.I. Monitoring ustoichivosti i ostatochnogo resursa vysotnykh zdaniy i sooruzhenii s primeneniem mobil'nogo diagnosticheskogo kompleksa «Strela» [Monitoring of stability and residual life of high-rise buildings and structures using the mobile diagnostic complex "Strela"], available at: <http://masters.donntu.ru/2008/kita/sherstyuk/library/art4/art4.htm> (accessed 08 February 2023).
10. Masui Y., Suzuki O. Development of a Soundness Evaluation System for Bridge Substructured, *JR East Tech. Rev*, 2009, no.14(14), p. 65. – англоязычная статья.
11. Briaud J. L., Hurlebaus S., Chang K. et al. Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology, Austin, USA, 2011. – англоязычная статья.
12. Yao C., Darby C., Yu O.-Y. et al. Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiment with a shallow foundation, *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, West Palm Beach, USA, GeoFlorida, 2010. – англоязычная статья.
13. Ko Y., Lee W., Chang W., Mei H., Chen C. Scour evaluation of bridge foundations using vibration measurement, 5th International Conference on Scour and Erosion, San Francisco, CA, USA, 2010. – англоязычная статья.
14. Briaud J. L., Yao C., Darby C. et al Motion sensors for scour monitoring: laboratory experiments and numerical simulations, Transportation Research Board (TRB) 89th Annual Meeting, Washington, DC, Transportation Research Board, 2010. – англоязычная статья.
15. Lin T.-H., Lu Y.-C., Hung S.-L. Field Study of Bridge Scour Using Imote2. NET-Based Wireless Monitoring System, The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, 2011. – англоязычная статья.

16. Lin T. K., Wang Y. P., Huang M. C., Tsai C. A. Implementation of a vibration-based bridge health monitoring system on scour issue, *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2013. – англоязычная статья.
17. Prendergast L., Hester D., Gavin K. et al. An Investigation of the Changes in the Natural Frequency of a Pile affected by Scour, *Journal of sound and vibration*, 2013, no. 332 (25), pp. 6685-6702. – англоязычная статья.
18. Huang H. Y., Chou W. Y., Ju S. H., Feng C.W. Application of finite element method and genetic algorithms in bridge scour detection, *Society for Social Management Systems Internet Journal*, 2012. – англоязычная статья.
19. Bao T., Liu Z. Vibration-based bridge scour detection: A review, *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, no. 24 (7). – англоязычная статья.

Об авторах

Васильчук Любовь Александровна (Новосибирск, Россия) – аспирант кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС) (Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, e-mail: vasilchuck97@mail.ru).

Чаплин Иван Владимирович (Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС) (Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, e-mail: ivannumber1_chaplin@mail.ru)

About the authors

Lyubov A. Vasilchuk (Novosibirsk, Russian Federation) – graduate student of the department «Bridges» Siberian Transport University (STU) (191, D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russian Federation, e-mail: vasilchuck97@mail.ru).

Ivan V. Chaplin (Novosibirsk, Russian Federation) – Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences Siberian Transport University (STU) (191, D. Kovalchuk, Novosibirsk, 630049, Russian Federation, e-mail: ivannumber1_chaplin@mail.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

Поступила: 08.02.2023

Одобрена: 25.02.2023

Принята к публикации: 01.03.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Васильчук, Л.А. Методы обнаружения размывов опор мостов / Л.А. Васильчук, И.В. Чаплин // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология.* – 2023. – № 1. – С. 83–92. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.10

Please cite this article in English as: Vasilchuk L.A., Chaplin I.V. Methods for detecting bridge scour. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2023, no. 1, pp. 83-92. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.10