

ИСПЫТАНИЯ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ МЕДЛЕННО ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКОЙ

Виділено особливості та переваги випробувань мостових конструкцій навантаженням, що повільно рухається. Запропоновано алгоритм обчислення ординат натурних ліній і поверхонь впливу за даними таких випробувань.

Отмечены особенности и преимущества испытаний мостовых конструкций медленно движущейся нагрузкой. Предложен алгоритм вычисления ординат натуральных линий и поверхностей влияния по данным таких испытаний.

Peculiarities and advantages of bridge structure tests under slow moving load are pointed out. The calculation algorithms for finding in-situ influence line ordinates based on the results of the tests are proposed.

В последние годы на вооружении мостоиспытательных станций и научно-исследовательских лабораторий появилось новое поколение датчиков, регистрирующей аппаратуры и компьютерных программ для записи, хранения, обработки и визуализации результатов измерения величин фибровых деформаций, перемещений, ускорений и т.п. в испытываемых конструкциях.

Объединение в одну сеть компьютера и приборов для измерения физических параметров открыло широкие возможности как для повышения точности и увеличения объема снимаемой информации, так и для решения трудоёмких вычислительных задач, связанных с обработкой больших её массивов.

Новые возможности дают основания для пересмотра традиционных подходов к организации и проведению натурных испытаний. В этом плане испытания мостовых конструкций медленно движущейся «проползающей» с постоянной скоростью нагрузкой представляют особый интерес и являются весьма перспективным направлением.

При малой скорости движения нагрузки (до 5 км/ч) усилия в элементах испытываемой конструкции меняются плавно, не вызывая колебаний последней. При этом с датчиков в память компьютера будут записываться «статические» значения измеряемых величин связанных с конкретным, но меняющимся, положением нагрузки на пролётном строении моста. Очевидно, что время необходимое на проведение таких испытаний намного меньше, чем при последовательной перестановке испытательной нагрузки на проезжей части моста сначала в одно положение и снятие показаний приборов, затем в следующее и т.д. (А для построения

натурных линий влияния без таких перестановок нагрузки раньше вообще нельзя было обойтись.)

Частота, скорость и объём снимаемых с датчиков показаний при «проползающей» нагрузке несопоставимо большие, чем при обычных статических испытаниях. Всё это, в сочетании с возможностями использования встроенных математических библиотек в компьютерных программах для записи, хранения и анализа данных измерений, открывает перспективу оперативного, прямо на объекте, получения в удобной форме (числовой или графической) конечных результатов испытаний.

Например, задав соответствующий алгоритм вычислений и вводя весовые и геометрические параметры испытательной нагрузки, можно строить натурные линии влияния и сравнивать их с теоретическими. А это – более высокий уровень сравнения, чем традиционное сравнение по отдельным значениям фактических и расчётных величин прогибов или напряжений при заданном статическом положении нагрузки.

Таким образом, отработка и широкое внедрение в мостоиспытательную практику методики натурных испытаний медленно движущейся нагрузкой является актуальной технической задачей.

Одним из необходимых шагов на пути её решения должен быть выбор и задание рационального алгоритма вычисления ординат искомым натурных линий влияния, зависящий как от типа испытательной нагрузки (колёсная или гусеничная) так и от направления, в котором эта нагрузка движется (вдоль или поперёк проезжей части моста).

Проблема здесь заключается в следующем: на практике колёсная испытательная нагрузка имеет как минимум две оси (4 колеса) и в общем случае её вес передаётся на пролётное строение не менее чем в четырёх точках. А вес гусеничной нагрузки – на две полосы (колеи). Таким образом, воздействие подвижной испытательной нагрузки на пролётное строение всегда является «многоточечным», а это значит, что заносимая при этом в память компьютера функция-осциллограмма $F(x)$ является интегральной. Нам же, проводя натурные испытания, в конечном результате желательно знать реакцию сооружения $f(x)$ на «точечное» действие единичной силы в каждой точке (x – координата точки) выбранного сечения пролётного строения или, как минимум, воздействие «двухточечное» от одной оси.

Автором в работах [1, 2], были предложены алгоритмы вычисления ординат натуральных продольных и поперечных линий влияния по результатам испытаний мостовых конструкций медленно движущейся нагрузкой как двухосной, так и многоосной колёсной, а так же гусеничной. Однако, все определяемые по этим алгоритмам ординаты, строго говоря, являются осреднёнными в том смысле, что формально нами они относятся к сечению пролётного строения, которое совпадало с осевой движения испытательной нагрузки. На самом же деле, все они являются суммарным результатом загрузки одной осью нагрузки двух (нам пока достоверно неизвестных) линий влияния для сечений, совпадающих одно с левой, а другое – с правой её колеями.

Во многих практических случаях такое «осреднение» является приемлемым и дальнейших уточнений не требует. Прежде всего, это относится к железнодорожным мостам, где ось пути совпадает с осью пролётных строений.

Для автодорожных пролётных строений с большой шириной проезжей части, как для уточнения их фактической грузоподъёмности, так и в исследовательских целях, бывает желательным определить точные значения ординат натурной линии влияния для конкретного поперечного сечения пролётного строения или же построить по результатам испытаний фактическую поверхность влияния. В общем случае достичь этого можно лишь путём совместной математической обработки двух и более записей-осциллограмм показаний того или иного датчика при различных траекториях движения испытательной нагрузки.

Для решения этой задачи возможен следующий подход. Пусть нам необходимо найти ординаты натурной поперечной линии влияния $f_n(x)$ в заданном сечении n – n пролётного строения, схематически показанного на рис. 1.

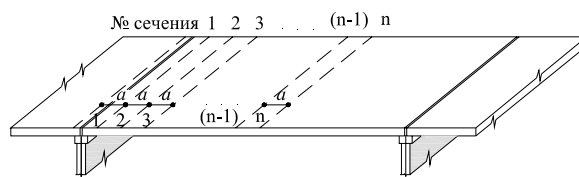


Рис. 1. Разметка пролётного строения для последовательного нахождения ординат натуральных поперечных линий влияния в его сечениях

От выбранного сечения в сторону ближнего конца пролётного строения на проезжей части с шагом a , равным ширине колеи двухосной колёсной испытательной нагрузки, наносится поперечная разметка (направляющие линии для колёс). Пропуская испытательную нагрузку сначала так, что бы лишь одна её колея находилась на пролёте, а вторая – вне его (на опоре или соседнем пролёте), мы получаем возможность определить точные значения натурной поперечной линии влияния $f_1(x)$ именно для сечения 1–1 пролётного строения. То есть для того сечения пролётного строения, где была нанесена ближняя к опоре линия разметки.

Действительно, выбрав в качестве испытательной нагрузки двухосный автомобиль, обязательным требованием к которому должна быть заметная разница давлений на переднюю P_1 и заднюю P_2 его оси, и записав для сечения 1–1 в память компьютера функцию-осциллограмму $F_{1,1}(x)$ при движении грузовика слева направо кабиной вперёд (рис. 2, а), а затем для того же сечения функцию-осциллограмму $F_{1,2}(x)$ при движении грузовика слева направо кабиной назад (рис. 2, б) можно составить систему из двух линейных уравнений:

$$\begin{cases} F_{1,1}(x) = \frac{1}{2}P_1f_1(x+a) + \frac{1}{2}P_2f_1(x); \\ F_{1,2}(x) = \frac{1}{2}P_2f_1(x+a) + \frac{1}{2}P_1f_1(x), \end{cases} \quad (1)$$

в которой неизвестными являются искомая функция $f_1(x)$ и функция $f_1(x+a)$.

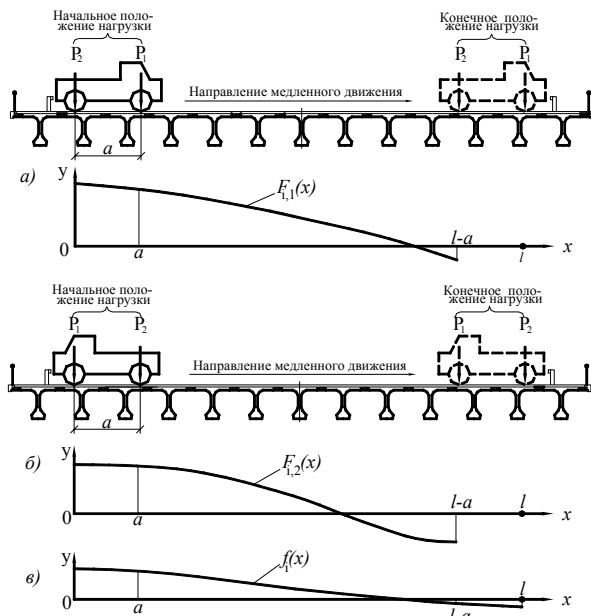


Рис. 2. Схема загрузки автодорожного пролётного строения испытательной нагрузкой с целью построения поперечных линий влияния в i -ом сечении:

a) – исходное и конечное положения нагрузки при её движении кабиной вперёд и соответствующий такому движению график функции загрузки $F_{i,1}(x)$ (осциллограмма); b) – исходное и конечное положения нагрузки при её движении задним ходом и соответствующий такому движению график функции загрузки $F_{i,2}(x)$;

$в$) – искомая линия влияния $f_i(x)$.

При условии $P_1 \neq P_2$ система (1) будет иметь единственное решение:

$$f_1(x) = \frac{2[P_2 F_{1,1}(x) - P_1 F_{1,2}(x)]}{P_2^2 - P_1^2}. \quad (2)$$

Заметим, что выражение (2) определяет функцию $f_1(x)$ на отрезке $[0, l-a]$ (см. рис. 2, $в$). Несложно показать, что на отрезке $[a, l]$ функция $f_1(x)$ определяется выражением:

$$f_1(x) = \frac{2[P_2 F_{1,2}(x-a) - P_1 F_{1,1}(x-a)]}{P_2^2 - P_1^2}. \quad (3)$$

Таким образом, ординаты поперечной линии влияния в сечении 1–1 могут быть вычислены и линия построена для всей той части ширины пролётного строения l (при $l \geq 2a$), над которой находились колёса грузовика во время испытаний.

Затем нагрузку пропускают со сдвижкой вдоль пролёта на один шаг, записав в память компьютера функции-осциллограммы $F_{2,1}(x)$ и $F_{2,2}(x)$. Поскольку при этом одна колея нагрузки совпадает с сечением 2–2, а вторая с сечением 1–1, где функции-осциллограммы $F_{1,1}(x)$ и $F_{1,2}(x)$ нам уже известны, то функции загрузки только сечения 2–2 $\Phi_{2,1}(x)$ и $\Phi_{2,2}(x)$ можно получить как разности соответствующих функций-осциллограмм, уже занесенных в память компьютера, а именно:

$$\Phi_{2,1}(x) = F_{2,1}(x) - F_{1,1}(x); \quad (4)$$

$$\Phi_{2,2}(x) = F_{2,2}(x) - F_{1,2}(x). \quad (5)$$

Теперь, заменив в формуле (2) $F_{1,1}(x)$ на $\Phi_{2,1}(x)$ и $F_{1,2}(x)$ на $\Phi_{2,2}(x)$, а в формуле (3) поменяв $F_{1,1}(x-a)$ на $\Phi_{2,1}(x-a)$ и $F_{1,2}(x-a)$ на $\Phi_{2,2}(x-a)$, можно вычислить ординаты поперечной линии влияния для сечения пролётного строения 2–2, т.е. определить функцию $f_2(x)$.

Поступая последовательно подобным образом, для следующего поперечного сечения пролётного строения 3–3 будем иметь:

$$\Phi_{3,1}(x) = F_{3,1}(x) - \Phi_{2,1}(x); \quad (6);$$

$$\Phi_{3,2}(x) = F_{3,2}(x) - \Phi_{2,2}(x), \quad (7),$$

а значит можно вычислить ординаты поперечной линии влияния $f_3(x)$ и для этого сечения пролётного строения.

Для сечения $n-n$ функции для подстановки в формулы (2) и (3), по которым находятся ординаты поперечной линии влияния $f_n(x)$, будут:

$$\Phi_{n,1}(x) = F_{n,1}(x) - \Phi_{(n-1),1}(x); \quad (8)$$

$$\Phi_{n,2}(x) = F_{n,2}(x) - \Phi_{(n-1),2}(x); \quad (9)$$

$$\Phi_{n,1}(x-a) = F_{n,1}(x-a) - \Phi_{(n-1),1}(x-a); \quad (10)$$

$$\Phi_{n,2}(x-a) = F_{n,2}(x-a) - \Phi_{(n-1),2}(x-a). \quad (11)$$

Таким образом, поставленная задача полностью решена. Этим же способом можно получить данные для построения натурной поверхности влияния на всей площади проезжей части испытываемого пролётного строения.

Выводы

1. Давно известный, но мало используемый в мостоиспытательной практике приём загрузки мостовых конструкций медленно движущейся нагрузкой, при наличии современной измерительной аппаратуры, объединённой в одну сеть с компьютером, имеет целый ряд существенных преимуществ перед традиционными статическими испытаниями, ставящими целью построение натуральных линий влияния. При этом сокращается время, необходимое на проведение испытаний, и увеличивается объём получаемой полезной информации.

2. Предложенный алгоритм вычисления ординат натуральных поперечных линий влияния позволяет реализовать потенциальную возможность оперативного (в полевых условиях) получения и анализа конечных результатов испытаний. И, в частности, строить не только линии, но и натурные поверхности влияния напряжений, перемещений и т.п. для всех тех точек конструкции, где были установлены соответствующие датчики.

3. Совершенствование методики проведения натуральных испытаний медленно движущейся нагрузкой и создание банка данных получаемых при этом результатов будут способствовать повышению объективности в оценках фактического состояния находящихся в эксплуатации мостов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухоруков, Б. Д. Алгоритм вычисления ординат линий влияния по экспериментальным данным [Текст] / Б. Д. Сухоруков // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 125-128.
2. Сухоруков, Б. Д. Построение линий влияния по осциллограммам загрузки мостовых конструкций медленно движущейся испытательной нагрузкой [Текст] / Б. Д. Сухоруков // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. / ПГАСА. – Д.: Изд-во ПГАСА, 2008. – Вып. 47. – С. 460–467.

Поступила в редколлегию 10.03.2010.

Принята к печати 19.03.2010.