

УДК 624.21.014.2:004.946

*КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук,
профессор,
kaf_most@mail.ru
БОЧКАРЕВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
bonic@iao.ru
КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
av_kartopol@mail.ru
ШЕНДЕЛЬ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ, аспирант,
as_shendel@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ СО СКВОЗНЫМИ БАЛКАМИ

В статье описаны экспериментальные исследования по определению динамических характеристик пролетного строения со сквозными балками, объединенными железобетонной плитой на металлическом поддоне. В ходе эксперимента пролетное строение подвергалось воздействию ударной нагрузки. С использованием четырехканального вибродиагностического комплекса измерялись частота и коэффициент затухания свободных колебаний. В ходе численного моделирования создана конечно-элементная модель пролетного строения в программном комплексе LIRA. Модель загружалась нагрузками, соответствующими испытываемому пролетному строению, а моделирование динамического нагружения формировалось встроенными функциями интерфейса программного комплекса с целью получения модальных частот свободных колебаний пролетного строения. В ходе анализа полученных результатов выявлена высокая сходимость значений исследуемых параметров, полученных при испытании и моделировании пролетного строения.

Ключевые слова: сталежелезобетонное пролетное строение; сквозная балка; свободное колебание; коэффициент затухания; ударная нагрузка; вибродиагностический комплекс; программный комплекс; расчетная схема; численная модель.

*KARTOPOLTSEV, VLADIMIR MIKHAYLOVICH, Dr. of tech. sc., prof.,
kaf_most@mail.ru
BOCHKAREV, NIKOLAY NIKOLAYEVICH, Dr. of phys.-math. sc., prof.,
bonic@iao.ru
KARTOPOLTSEV, ANDREY VLADIMIROVICH, Cand. of tech. sc., assoc. prof.,
av_kartopol@mail.ru
SHENDEL, ALEXANDER SERGEYEVICH, P.G.,
as_shendel@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia*

NUMERICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SPAN STEEL REINFORCED CONCRETE STRUCTURE WITH THROUGH BEAMS

The article describes the experimental researches on definition of dynamic characteristics of a span structure with the through beams joined by a ferro-concrete slab on the metal plate. During the experiment the span structure was influenced by shock loading. With the use of four-channel vibrodiagnostic complex a frequency and damping factor of free oscillations were measured. During numerical modelling the finite-element model of a span structure in program complex LIRA has been created. The model had the same loading as the corresponding to the tested span structure, and modelling of dynamic scheme was formed by the built functions of the interface of a program complex to receive the modal frequencies of free oscillation of the span structure. During the analysis of the received results the high convergence of values of the studied parameters received at the test and modelling of a span structure is revealed.

Keywords: the steel-reinforced-concrete span structure; through beam; free vibration; damping coefficient; shock loading; a vibrodiagnostic complex; software package; the design scheme; the numerical model.

В статье представлены результаты численного моделирования и экспериментальные исследования динамических характеристик пролетного строения со сквозными балками, объединенными железобетонной плитой на металлическом поддоне.

Выполненные в данной научной работе экспериментальные исследования создали базис для разработки адекватной расчетной пластинчато-стержневой модели, позволяющей в будущем обоснованно решать задачи моделирования в целях совершенствования методики расчета и поиска оптимальных конструкций сквозных балок реальных пролетных строений.

Испытуемая конструкция показана на рис. 1 и представляет собой пролетное строение, состоящее из металлического поддона размером 6120×2100×100 мм и двух перфорированных балок с параллельными гранями полок, которые объединены в половине пролета и в опорных сечениях швеллерами № 20.

Главные балки изготовлены путем роспуска и развития широкополочных двутавров № 30Б до высоты 480 мм с коэффициентом роспуска 1,6. Отверстия перфорации гексагональные. Длина балок составляет 6120 мм, высота 480 мм, а расстояние между ними 1400 мм. Для объединения железобетонной плиты с главными несущими элементами пролетного строения внутри металлического поддона толщиной 4 мм приварено семнадцать жестких упоров из равнополочных уголков 63×63×4 мм, которые препятствуют сдвигам железобетонной плиты.

Экспериментальное исследование динамических характеристик пролетного строения представляло собой измерение частоты свободных колебаний с наибольшим значением амплитуды и коэффициента затухания свободных колебаний от воздействия ударной нагрузки. Частота свободных колебаний определялась для пролетного строения как без железобетонной плиты, так и с железобетонной плитой на металлическом поддоне.

В ходе экспериментальных исследований частоты свободных колебаний и коэффициенты затухания определялись по виброграммам, которые фикси-

ровали колебания пролетного строения и записывались с помощью четырехканального вибродиагностического комплекса, изображенного на рис. 2. Датчики-акселерометры комплекса крепились на середине и в четверти пролета на нижнем поясе главных балок.



Рис. 1. Испытуемое пролетное строение

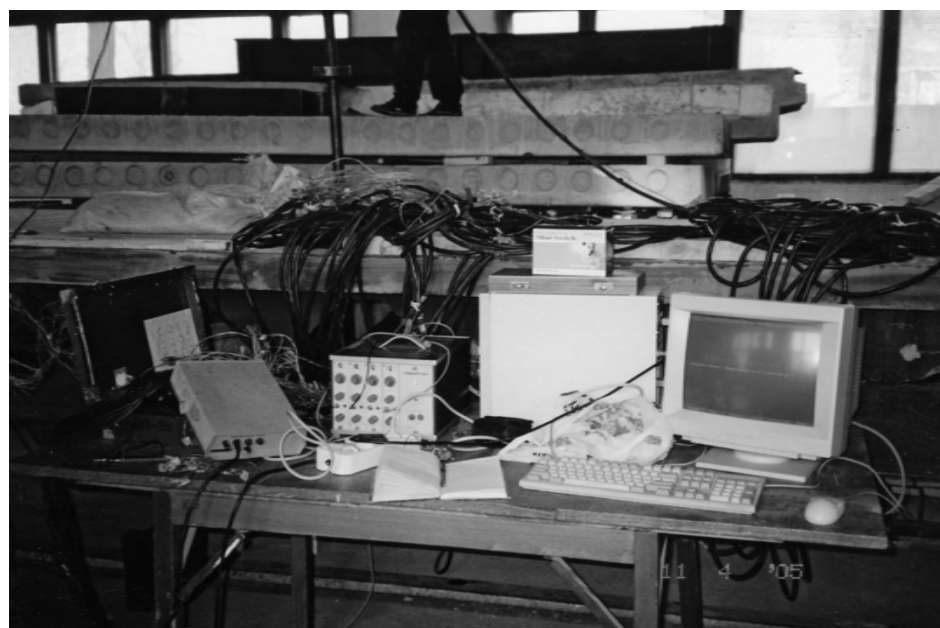


Рис. 2. Четырехканальный вибродиагностический комплекс

На 1-м этапе эксперимента выполнены ударные испытания блока стального пролетного строения без железобетонной плиты, по результатам которых установлено, что частота свободных колебаний стального пролетного строения составила 32,2 Гц (период 0,031 с).

На 2-м этапе эксперимента после статического нагружения блока стального пролетного строения с железобетонной плитой нагрузкой 24 т с последующей разгрузкой не были зафиксированы остаточные прогибы. Сразу после статического нагружения были проведены ударные испытания, которые выявили, что частота свободных колебаний конструкции снизилась и равна 23,4 Гц (период 0,043 с).

На 3-м этапе эксперимента, после нагружения сталежелезобетонного пролетного строения статической нагрузкой 50 т и последующего снятия нагрузки были зафиксированы остаточные деформации. Сразу после статического нагружения были проведены ударные испытания и зафиксировано дальнейшее снижение частоты свободных колебаний до значения 22,6 Гц (период 0,044 с).

На 4-м этапе эксперимента статическое нагружение сталежелезобетонного пролетного строения было увеличено до 62 т. Результатом статического испытания явилась потеря местной устойчивости стенок главных балок. В результате после снятия статической нагрузки были зафиксированы остаточные деформации, которые стали фиксироваться уже на 3-м этапе эксперимента. Вслед за статическим нагружением были проведены ударные испытания, по результатам которых установлено, что частота свободных колебаний исследуемой конструкции составила 23,4 Гц (период 0,043 с). На рис. 3 представлены спектры частот свободных колебаний пролетного строения в ходе экспериментальных исследований.

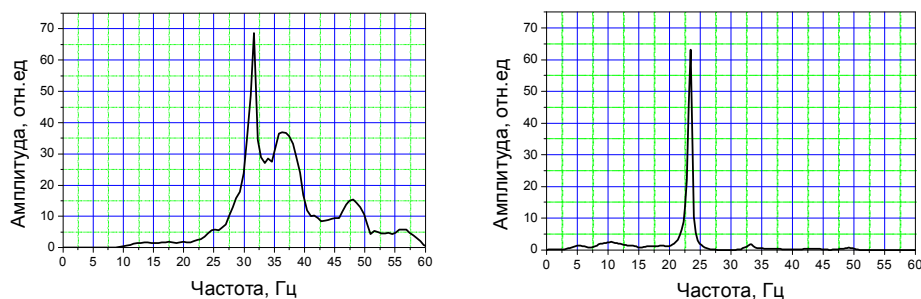


Рис. 3. Спектры частот свободных колебаний пролетного строения в процессе экспериментальных исследований: на 2-м этапе эксперимента (слева); на 3-м этапе (справа)

Стенки и полки сквозных балок конструкции расчетной модели в программном комплексе (ПК) LIRA были выполнены из квадратных и прямоугольных пластин с преимущественными размерами 60×60 мм. Поддон и опалубка были сгенерированы из прямоугольных пластин с сеткой дискретизации, соответствующей сетке верхних полок балок, а опорные ребра жесткости – из стержней из встроенной в ПК LIRA библиотеки сортамента. Причем для придания жесткости конструкции опорные ребра жесткости со-

единялись с поддоном металлическими стержнями длиной 50 мм и диаметром 7 мм в шахматном порядке по всей поверхности поддона (рис. 4).

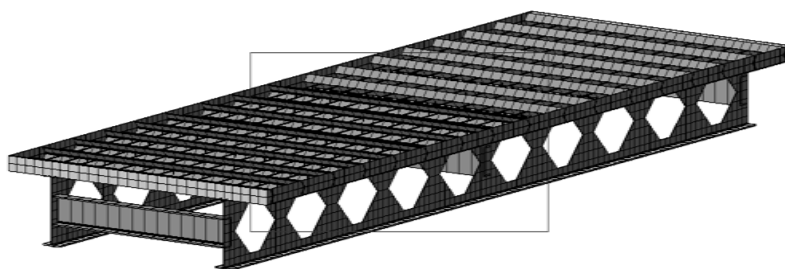


Рис. 4. Конечно-элементная модель пролетного строения со сквозными балками без железобетонной плиты

Заключительный этап создания расчетной схемы для численного моделирования включал заполнение поддона с опалубкой бетоном класса В30 с физическими параметрами: модуль упругости – $3,32 \cdot 10^6$ тс/м²; коэффициент Пуассона – 0,2; плотность материала – 2,5 т/м³; расчетное сопротивление на осевое сжатие – 15,5 МПа. Для этой цели в программе была сгенерирована плита толщиной 100 мм с сеткой дискретизации, соответствующей сетке для опалубки и опорных ребер жесткости, из прямоугольных пластин (рис. 5).

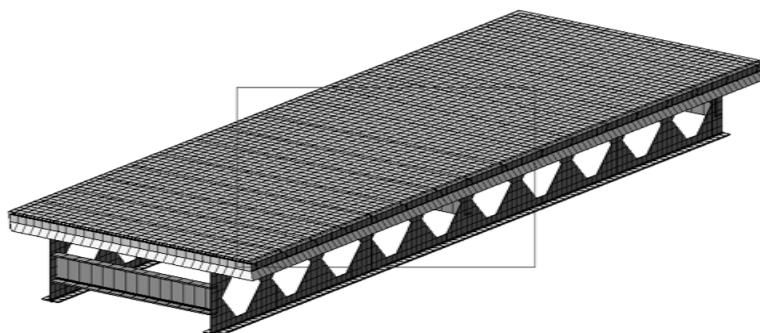


Рис. 5. Конечно-элементная модель пролетного строения со сквозными балками, объединенными железобетонной плитой на металлическом поддоне

Численные модели были загружены одним смоделированным динамическим нагружением от воздействия ударной нагрузки, которое идентично динамическому воздействию используемого в ходе экспериментальных исследований пролетного строения.

В численных расчетах были учтены следующие параметры материалов для прокатной стали и стального литья: модуль упругости – $21 \cdot 10^6$ тс/м²; плотность материала – 7,85 т/м³; коэффициент Пуассона – 0,3.

Динамический расчет включал определение частот свободных колебаний для первых трех форм колебаний, что отвечает требованиям [1, 2].

Результаты расчета для исследуемого пролетного строения без железобетонной плиты приведены в табл. 1, а для пролетного строения с железобетонной плитой на металлическом поддоне – в табл. 2.

Таблица 1

**Частоты собственных колебаний пролетного строения
со сквозными балками без железобетонной плиты**

№ формы	Частота, Гц	Период, с
1	26,5	0,038
2	33,0	0,030
3	44,5	0,022

Таблица 2

**Частоты собственных колебаний пролетного строения
со сквозными балками, объединенными железобетонной плитой
на металлическом поддоне**

№ формы	Частота, Гц	Период, с
1	16,5	0,061
2	23,2	0,043
3	29,5	0,034

С помощью модуля ПК LIRA «Динамика плюс» были численно смоделированы две расчетные схемы с железобетонной плитой и без плиты – с имитацией ударной нагрузки. Вес ударной нагрузки – 25 кг, длительность воздействия – 0,1 с. В результате выполненного расчета были получены диаграммы для каждой расчетной схемы, описывающие поведение мостовой конструкции, совершающей затухающие свободные колебания, которые изображены на рис. 6.

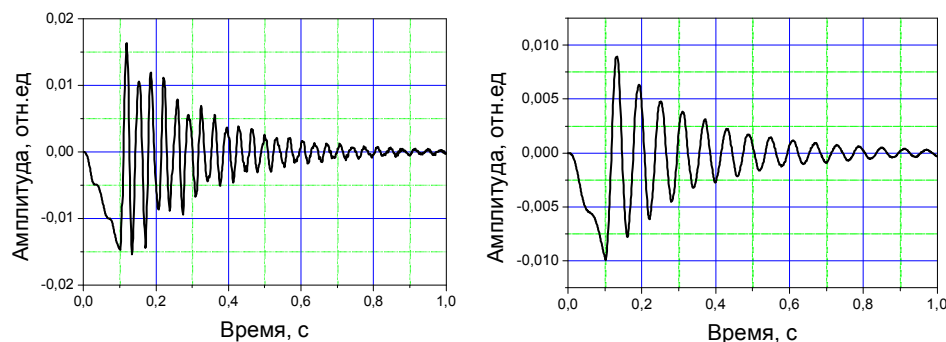


Рис. 6. Диаграммы вертикальных колебаний пролетного строения: без железобетонной плиты (слева); с железобетонной плитой (справа)

Анализ полученных при расчетах диаграмм показал, что частота свободных колебаний (вторая форма) пролетного строения без железобетонной плиты составила 33,0 Гц (0,030 с), а с железобетонной плитой – 23,2 Гц (0,043 с).

Спектральный анализ виброграмм, зафиксированных вибродиагностическим комплексом, показал, что при испытании пролетного строения ударной нагрузкой частота свободных колебаний для пролетного строения без же-

лестобетонной плиты составила 32,2 Гц (период 0,031 с), а для пролетного строения с железобетонной плитой – 23,4 Гц (период 0,043 с).

При составлении значений частот свободных колебаний, полученных при экспериментальных исследованиях и при численном моделировании, заметна их хорошая сходимость. Разница между значениями частот свободных колебаний, полученных в ходе эксперимента, и значениями частот свободных колебаний, полученных в ходе численного моделирования, составила около 4 %. Полученное значение погрешности допустимо в рамках инженерных расчетов на динамические нагружения.

Таким образом, можно смоделировать пролетное строение различных типов, статических схем и способов динамического нагружения с определением для него частоты свободных колебаний. Сравнивая частоты свободных колебаний, полученные на этапе численного моделирования, со спектром частот реального пролетного строения в условиях воздействия на него движущейся временной нагрузки, можно не только спрогнозировать явление резонанса, но и заблаговременно разработать рекомендации по организации безопасного режима движения на стадии эксплуатации транспортных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы. – М. : Госстрой СССР, 1996. – 213 с.
2. СНиП 3.06.07–86. Мосты и трубы. Правила обследования и испытаний. – М. : Госстрой СССР, 1986. – 27 с.