



УДК 624.21: 531.3

© Чжао Цзянь, И. Ю. Белуцкий, В. Г. Яцура, 2012

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАДОПОРНЫХ СВЯЗЕЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ В СИСТЕМЕ ТНПС НА ПАРАМЕТРЫ ИХ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Чжао Цзянь – асп., e-mail: zhaojianll@126.com; Белуцкий И. Ю. – д-р техн. наук, проф. кафедры «Мосты, основания и фундаменты», тел. 37-52-05, e-mail: Bridge.PUN@yandex.ru; Яцура В. Г. – инженер. тел. 37-52-05 (ТОГУ)

В статье предложена стержневая конечно – элементная модель для описания работы сталежелезобетонных пролетных строений в составе ТНПС. На примере трансформации надопорных связей ТНПС проведен анализ влияния их жесткости на параметры свободных колебаний пролетных строений по схеме 2x42,1 м.

The paper proposes a rod finite – element model for the description of composite steel and concrete spans with link slabs. As an example of the transformation of the support links relations the effect of rigidity on the parameters of free vibrations of the spans according to scheme 2x42.1 m has been analyzed.

*Ключевые слова:* температурно – неразрезные пролетные строения (ТНПС), условия сопряжения, надопорные связи, свободные колебания.

В учебном пособии [1] и монографии [2] заявлено о возможности, конструктивных решениях и принципиальных положениях расчета температурно-неразрезных пролетных строений (ТНПС) в сталежелезобетонных мостах.

Создание ТНПС как конструктивное направление в публикациях [1, 2] рассматривалось в сочетании с другим конструктивным направлением в виде надопорных связей, многообразии форм которых представлено в [1, 2] и может быть органичным взаимодополнением при создании ТНПС в сталежелезобетонных мостах.

Реализации ТНПС, как правило, сопутствует устройство упруго – податливых резиновых опорных частей (РОЧ), которые в совокупности с соединительным элементом ТНПС, по сути, формируют эффект надопорных связей. В этом плане анализ влияния сопряжения смежных пролетных строений ТНПС на параметры их свободных колебаний проведен на примерах, которые отражают возможные варианты трансформации надопорных связей в процессе создания ТНПС.

В качестве объекта исследования рассматриваются объединенные в ТНПС сталежелезобетонные пролетные строения по схеме 2х42.1 м мостового сооружения [3]. Компонировочная схема пролетных строений, положение нейтральной оси их сечений, схема расположения опорных частей представлены на рис.1.

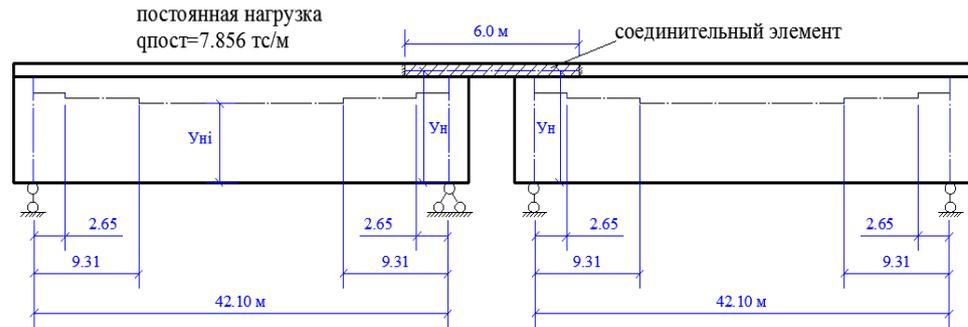


Рис.1. Схема объединенных в ТНПС сталежелезобетонных пролетных строений

Пролетные строения объединены по железобетонной плите проезжей части. Сопряжение ее с балками на концевых участках реализовано в соответствии с принципами формирования соединительной плиты и состав арматуры ее поперечного сечения обоснованы соответствующими [4] расчетами. Информация по геометрическим и жесткостным характеристикам сечений балок пролетных строений и соединительной плиты приведены в табл.1.

Таблица 1

Геометрические и жесткостные характеристики сечений балки и соединительного элемента

Параметры сечений балки и соединит. элемента	Границы участков балки, м			Соединительный элемент
	0-2.65;	2.65-9.31; 32.79 – 39.45	9.31 - 32.79;	
Ордината $U_{н1}$ , см	273	263	256	300
Площадь сечения $A$ , см <sup>2</sup>	2933	3059	3159	13000
Момент инерции $J$ , см <sup>4</sup>	$12.62 \cdot 10^6$	$21.64 \cdot 10^6$	$28.36 \cdot 10^6$	$35.10 \cdot 10^4$
Модуль упругости $E$ кгс/см <sup>2</sup>	$2.1 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^5$

Примечание. На участке левого пролета в пределах 39.45 – 42.10 м и на участке 0 – 2.65 м правого пролета балка учитывается с моментом инерции стального сечения  $J=2.85 \cdot 10^6$  см<sup>4</sup>.



Схемы на рис.2, а,б,в отражают трансформацию сопряжения пролетных строений исходного варианта (рис.1,рис.2,а), предусматривающую постановку в уровне нижнего пояса дополнительных связей, объединяющих смежные пролетные строения по стенке.

В одном случае (рис. 2, б) конструктивно они представляют двустороннюю накладку, листы которой взаимодействуют со стенкой через упруго податливый материал, испытывающий сдвиговые смещения. Использование для этого резиновых опорных частей (РОЧ) в таком варианте их постановки реализуют их сдвиговую жесткость  $C(G_p)$ . При закреплении на одном из концов двусторонней накладки РОЧ 20x40x5.8-0,8 на основе резины НО – 68 – 1 с учетом конструктивных параметров по каталогу ООО «ДЕФШОВРОЧ» [5] и расчетных положений инструкции ВСН86-83 [6] дополнительная связь будет иметь жесткость  $C(G_p) = 686$  тс/м.

В другом случае (рис.2,в) дополнительную связь конструктивно представляют упоры, между которыми запасованная РОЧ при взаимных смещениях торцов смежных пролетных строений, работая на сжатие, реализует свою жесткость при сжатии  $C(E_p) = 1,21 \cdot 10^4$  тс/м.

В качестве альтернативы опорным частям в традиционном представлении условий опирания (рис.1, рис. 2, а, б, в,) к анализу работы приняты пролетные строения на резиновых опорных частях (рис. 2, г, д, е) с размерами, которые удовлетворяют величине опорных реакций и возможных перемещений пролетных строений исходного варианта [3]. Указанные РОЧ характеризуют вертикальная  $C_v$  и горизонтальная (сдвиговая)  $C_r$  жесткости со значениями  $C_v = 1,35 \cdot 10^2$  тс/м,  $C_r = 748$  тс/м.

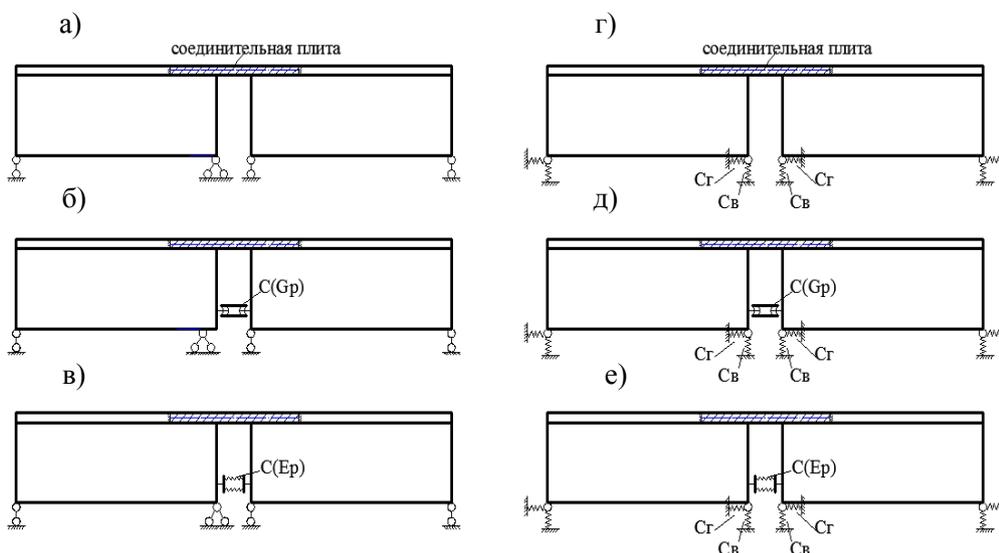


Рис. 2. Варианты сопряжений пролетных строений в системе ТНПС

Анализ влияния сопряжений по вариантам на рис.2 на форму, период, частоту собственных колебаний, усилия, перемещения в пролетных строениях и соединительном элементе проведен на дискретно стержневой модели. Суть ее иллюстрирует рис. 3, где каждое из пролетных строений представлено рамой, в которой для отражения условий работы пролетного строения как изгибаемого элемента:

- опорные зоны представлены жесткой вставкой, конфигурация которой одновременно позволяет адекватно фактическим зафиксировать угловые и линейные перемещения пролетного строения по оси опирания и условия его сопряжения со смежным пролетным строением в системе ТНПС.

- между жесткими вставками пролетное строение представлено продольным стержнем, жесткие узлы которого соединяют участки пролета, в пределах которых геометрические характеристики сечений балки практически постоянны и приняты на основе данных расчета пролетных строений исходного варианта [3], табл.1.

При динамическом расчете система рассматривается как система с конечным числом степеней свободы. В расчетной схеме предусмотрены дополнительные узлы, в которых помещаются точечные массы. Мы ограничились 12 массами.

Размещение масс  $m_i (i=1,2...12)$ , соответствующее учтенным степеням свободы, отражено на рис.3. Массы  $m_1, \dots, m_5$  (на левой балке) и масса  $m_7, \dots, m_{11}$  (на правой балке) определяют 10 степеней свободы, связанных с вертикальными смещениями масс, обусловленными изгибными деформациями балок. Массы  $m_6, m_{12}$  представляют всю массу левой и правой балок и связаны со степенями свободы перемещений узлов расположения масс  $m_6, m_{12}$  в горизонтальном направлении.

Начальные исследования были выполнены с использованием программы «КАКТУС» [7], созданной на кафедре «Мосты, основания и фундаменты» ТОГУ. Первая версия программы была предназначена для статического расчета стержневых систем с односторонними связями. В дальнейшем ее функциональные возможности расширены за счет включения в ее состав модулей, обеспечивающих вычисление собственных чисел и собственных векторов матрицы коэффициентов и расчет на гармоническую вибрационную нагрузку.

В программе «КАКТУС» проблема собственных значений решается методом исчерпывания [8]. С каждым собственным числом матрицы связано два собственных вектора: один из них определяет собственную форму колебаний – соотношения между смещениями масс, а другой вектор определяет соотношение между силами инерции. Если все массы одинаковы, то собственные вектора совпадают. Процесс решения основан на методе итераций для определения наибольшего собственного числа и одновременного получения соответствующего собственного вектора. После получения решения матрица коэффициентов корректируется с учетом найденных собственного значения и собственных векторов. Для полученной после корректировки матрицы процесс итераций повторяется, и таким образом находят следующее ре-



шение. В итерационном процессе накапливается погрешность вычислений. Так как последующие собственные числа находят с использованием ранее найденных, вычисления очередного собственного числа и собственных векторов с целью минимизации погрешностей следует производить с возможной максимальной точностью. Опыт показывает, что метод позволяет для матриц небольшой размерности найти весь спектр собственных значений.

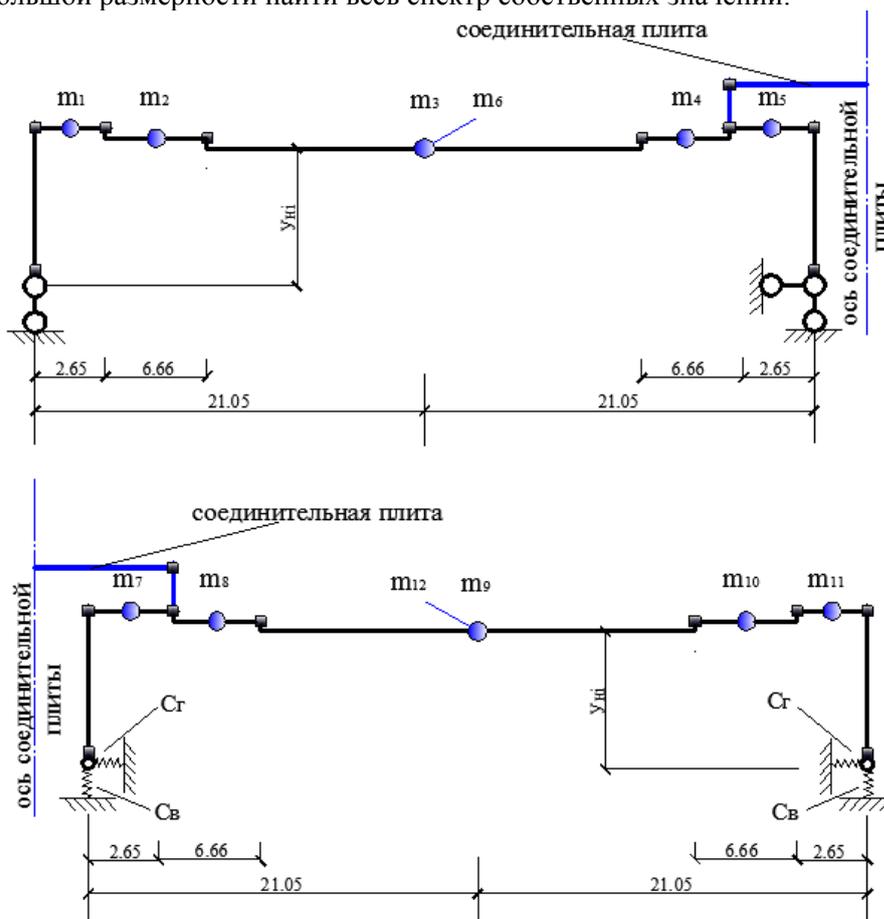


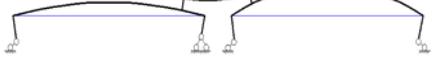
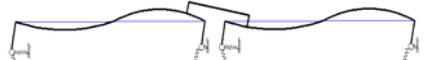
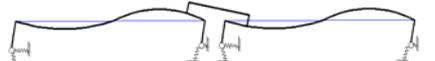
Рис. 3. Дискретно – стержневая модель пролетных строений  
 а) – условия опирания соответствуют схемам на рис. 2, а, б, в;  
 б) – условия опирания соответствуют схемам на рис. 2, г, д, е.

Последующие исследования работы системы на конечно – элементной модели (КЭМ) по рис. 3 проведены с использованием ПК ЛИРА – 9.2. Анализ совершенно близких результатов счета по обеим указанным программам даёт основание для следующих замечаний.

Условия опирания явились главенствующими факторами в становлении форм колебаний и их последовательности.

Таблица 2

## Параметры свободных колебаний пролетных строений в системе ТНПС

Варианты сопряжений	Номер формы	Период T, сек	Частота F, Гц	Форма колебаний
а	1	0,495	2,021	
б	1	0,476	2,101	
в	1	0,453	2,208	
а	2	0,409	2,444	
б	2	0,400	2,498	
в	2	0,370	2,703	
а	3	0,265	3,777	
б	3	0,261	3,833	
в	3	0,247	4,051	
г	1	0,957	1,045	
д	1	0,957	1,045	
е	1	0,957	1,045	
г	2	0,411	2,436	
д	2	0,411	2,436	
е	2	0,411	2,436	
г	3	0,409	2,442	
д	3	0,396	2,526	
е	3	0,368	2,715	
г	4	0,119	8,403	
д	4	0,119	8,413	
е	4	0,119	8,413	
г	5	0,119	8,413	
д	5	0,117	8,545	
е	5	0,117	8,915	



Для сопряжений по вариантам *a*, *b*, *v*, при наличии в системе абсолютно жесткой (в расчетном плане) шарнирно – неподвижной опорной части принятые к рассмотрению первые формы характеризуют вертикальные колебания. При колебаниях каждого из пролетов по основной форме и колебаниях в целом системы по 1-й и 2-й форме прослеживается влияние увеличения жесткости надопорного сопряжения на уменьшение периода колебаний системы (от  $T=0,495$  сек до  $T=0,453$  сек в 1-й форме и от  $T=0,409$  сек до  $T=0,370$  сек во 2-й форме колебаний для вариантов сопряжений *a* и *v* соответственно, табл.2). Отражение этой зависимости наблюдается при колебаниях системы и по 3-й форме, когда в одном из пролетов или в каждом из них возникает вторая форма колебаний.

Из сопоставления смещений масс смежных пролетов можно видеть влияние несимметрии схемы опирания пролетных строений на становление последовательности форм колебаний.

Для системы ТНПС с сопряжениями по вариантам *a*, *b*, *v*, горизонтальные смещения масс более выражены лишь по 9-й форме практически с одинаковым периодом  $T=0,0306...0,0308$  сек. При этом горизонтальные перемещения в большей мере характерны для правого пролета, которые обусловлены поворотом опорного сечения левого пролета; в последнем имеют место изгибные колебания под действием изгибающего момента, который формирует усилие в соединительном элементе ТНПС и горизонтальная реакция в уровне шарнирно – неподвижной опорной части.

В тоже время, при опирании пролетных строений на РОЧ (варианты сопряжений *z*, *d*, *e*) с конечной сдвиговой жесткостью 1-я форма характеризуется преимущественно горизонтальными смещениями масс. Подобное ее проявление представляется естественным при малой сдвиговой жесткости РОЧ в сравнении с большой нормальной жесткостью соединительного элемента ТНПС или ее суммой с жесткостью надопорных связей и с учетом того, что возникающие в уровне опирания горизонтальные реакции малой величины в совокупности с усилием в соединительном элементе не могут формировать заметных изгибных деформаций в пролетных строениях.

В вариантах сопряжений *z*, *d*, *e* вертикальные смещения по 2-й и 3-й формам в качественном отношении аналогичны. Причем, если при обратной – симметричной, 2-й форме надопорные связи и их жесткость реализуются в малой степени с учетом геометрии деформированного состояния узла сопряжения пролетных строений (это подтверждается равенством значений периода колебаний по вариантам *z*, *d*, *e*), то при симметричной, 3-й форме вертикальных смещений масс совокупное влияние сдвиговой жесткости РОЧ и жесткости собственно надопорной связи просматривается отчетливо.

Именно жесткостной фактор обусловил порядок 4-й, симметричной и 5-й, обратносимметричной форм колебаний по варианту сопряжения *z* и 4-ю, обратносимметричную и 5-ю, симметричную формы в вариантах *d* и *e*.

В порядке сопоставления с полученными результатами для пролетных строений в системе ТНПС отметим, что для однопролетной системы период

свободных колебаний по 1-, 2-, 3-й формам составляет:  $-T=0,430; 0,150; 0,086$  сек при опирании пролета по схеме на рис. 2,а;  $-T=0,953; 0,409; 0,117$  сек при опирании пролета на РОЧ по схеме на рис. 2,г.

Полученные результаты и их анализ показали, что создание ТНПС с конструктивным соединением смежных пролетных строений может рассматриваться не только как техническое решение по обеспечению непрерывного мостового полотна и улучшению условий проезда. Сочетание соединительного элемента ТНПС с собственно надпорными связями формирует структуру, изменением жесткости которой можно корректировать параметры свободных колебаний пролетных строений, приобретающих свойства частично неразрезных систем.

Резиновые опорные части, как правило сопутствующие устройству ТНПС, должны быть включены в структуру надпорных связей, а их жесткость – учтена при построении расчетных моделей.

### Библиографические ссылки

1. Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю. Сталежелезобетонные пролетные строения частично неразрезной системы. / Хабаровск: Изд-во Хабар. политехн. ин-та, 1986. -105 с.
2. Кулиш В.И. Повышение эксплуатационной надежности сталежелезобетонных мостов. – М.: Транспорт, 1992. -104с.
3. *Разработка* сталежелезобетонных пролетных строений моста через р. Тамга на км 392+579 автомобильной дороги М-60 «Уссури» от Хабаровска до Владивостока на основе существующих металлоконструкций под новые габариты  $\Gamma - 12 + 2 \times 0,75$  м и нагрузки А14 и Н14 по ГОСТ 52748-2007 для разработки проектной документации «Строительство и реконструкция участка автомобильной дороги М-60 «Уссури» - от Хабаровска до Владивостока. Реконструкция автомобильной дороги М-60 «Уссури» - от Хабаровска до Владивостока км 385 – км 399, Приморский край». Отчет о НИР №08/10; рук. Белуцкий И.Ю.; исполн: Казаринов В.Е., Марухин Б.А., Босоногов М.А.. – Хабаровск, 2010 - 58 с.
4. *Методические* рекомендации по применению конструкций температурно-неразрезных пролетных строений/РОСАВТОДОР. –М.: 2003.-69 С.
5. *ДЕФШОВРОЧ*. Каталог продукции ООО «ДЕФШОВРОЧ». – М., ООО ДЕФШОВРОЧ, -30с.
6. *ВСН 86-83*. Инструкция по проектированию и установке полимерных опорных частей мостов/Мин-во транспортного строительства СССР. –М. :Транспорт, 1983. -30с.
7. Бегун И. А., Яцура В. Г. О реализации алгоритма расчета стержневых систем с односторонними связями // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. - № 1 (16). - С. 81 – 90.
8. Смирнов А. Ф., Александров А. В., Шапошников Н. Н., Лащеников Б. Я. Расчет сооружений с применением вычислительных машин. – М.: Стройиздат, 1964. – 380 с.