

УДК 624.02

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ ПЕШЕХОДНОГО МОСТА НОВОГО ТИПА

В.С. Шмуклер, профессор, д.т.н., Харьковская национальная академия городского хозяйства, Е.С. Краснова, аспирант, С.Н. Краснов, ст. преподаватель, ХНАДУ

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований деформирования сталежелезобетонной конструкции пролетного строения пешеходного моста, выполненного в виде пространственной стержневой системы. Нагружение конструкции осуществлялось с использованием метода гидравлических испытаний плит и оболочек. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных и теоретических расчетов.

Ключевые слова: пешеходный мост, пролетное строение, испытание, напряженно-деформированное состояние.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ПІШОХІДНОГО МОСТУ НОВОГО ТИПУ

В.С. Шмуклер, професор, д.т.н., Харківська національна академія міського господарства, К.С. Краснова, аспірант, С.М. Краснов, ст. викладач, ХНАДУ

Анотація. Наводяться результати експериментальних досліджень деформування сталезалізобетонної конструкції прогонової будови пішохідного мосту, виконаного у вигляді просторової стержневої системи. Навантажування конструкції здійснювалося з використанням методу гідравлічних випробувань плит і оболонок. Виконано порівняльний аналіз експериментальних даних і теоретичних розрахунків.

Ключові слова: пішохідний міст, прогонова будова, випробування, напружено-деформований стан.

EXPERIMENTAL STUDIES OF PEDESTRIAN BRIDGE SPAN STRUCTURE OF NEW TYPE

V. Shmukler, Professor, Doctor of Technical Science, Kharkiv National Academy of Municipal Services, E. Krasnova, postgraduate, S. Krasnov, senior lecturer, KhNAHU

Abstract. The results of experimental studies of steel concrete structures deformation of the span pedestrian bridge designed as a three-dimensional bar system are presented. The loading of the structure was carried out using the hydraulic testing of plates and shells. The comparative analysis of the experimental data and theoretical calculations is performed.

Key words : pedestrian bridge, span construction, testing, stress-deformed state.

Введение

Разработка и проектирование новых инженерных сооружений, а также технология производства их элементов и способов возведения были и остаются актуальной проблемой для строительной отрасли. Однако

новая конструкция не может быть применена повсеместно без предварительного проведения специальных исследований, а именно — экспериментального тестирования конструкции. Как известно, поведение оптимизированных систем, запроектированных на основании прямых методов, определенным

образом отличается от традиционных. Сложность проблемы здесь заключается в необходимости проверки как предложенных принципов проектирования, так и теоретических выводов. Сказанное предопределяет необходимость комплексного контроля полученных теоретических результатов [1].

В связи с этим, а также учитывая ограниченность в практике экспериментов со строительными конструкциями соответствующих систем, были проведены экспериментальные исследования сталежелезобетонного пролетного строения пешеходного моста нового типа. Испытания носили неразрушающий характер и проводились в лаборатории кафедры мостов, конструкций и строительной механики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета при положительной температуре воздуха до 30 °С и относительной влажности около 60 %.

Анализ публикаций

Вопросу проектирования новых типов сталежелезобетонных конструкций, как в области мостостроения [2, 3], так и в области промышленного и гражданского строительства, уделяется особое внимание [4–6]. Большинство авторов рассматривают вопрос объединения в совместную работу металла пролетных строений с железобетонной плитой при помощи связей сдвига (упоров), расположенных на верхней полке сжатого пояса. А расположение целой системы сдвиговых связей внутри бетонной части конструкции представляет собой особый интерес для исследований. При этом применение новых энергетических принципов и методов прямого проектирования при формировании подобных конструкций предопределяет рациональное размещение используемых материалов в конструкции [1, 7–9].

Цель и постановка задачи

Основная цель данного исследования – проверка совместной работы (совместного деформирования) железобетонной плиты, внутри которой находится дискретно-континуальная система сдвиговых связей нового типа, с металлической стержневой системой моста на всем диапазоне нагружения вплоть до разрушения.

Объект исследования

Объектом исследования было сталежелезобетонное пролетное строение пешеходного моста длиной 7 м, шириной 2 м, высотой конструкции 0,5 м (рис. 1). Конструкция возводилась из изготовленных на заводе плоских модульных элементов в виде ферм с параллельными поясами. Пояса модульных элементов – ферм выполнены из равнополочных уголков 32×3 мм, а раскосы из квадратной трубы – 25×2 мм. Объединение верхней части конструкции выполнено при помощи тяжей из гладкой арматуры Ø 10 мм, а нижних – трубой квадратного сечения 25×2 мм. Модульные элементы-фермы соединены между собой в каждом узле при помощи двух равнобоких уголков со срезанными полками, которые одновременно являются связями сдвига между железобетонной и металлической частями и соединительной фасонкой между модульными элементами-фермами [10].

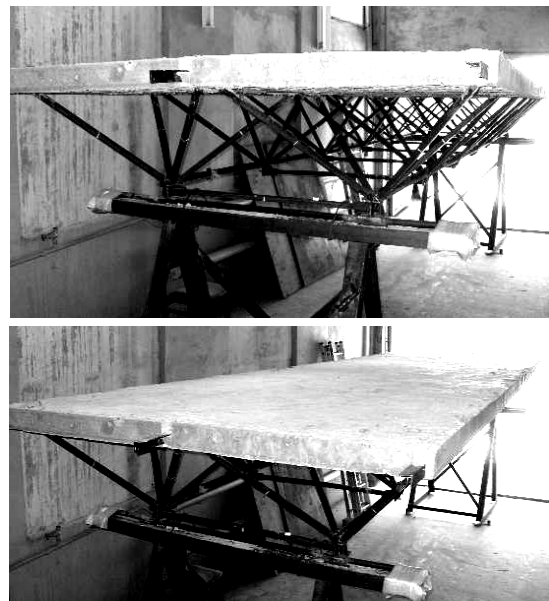


Рис. 1. Общий вид конструкции пролетного строения пешеходного моста

Железобетонная плита, толщиной 100 мм, выполнена из тяжелого бетона, для определения класса которого были забетонированы образцы кубиков 150×150 мм и призмы 150×150×450 мм. Прочность бетона, полученная в результате испытания образцов, соответствует классу В25 с удельным весом $\gamma = 2,4 \text{ т/м}^3$. Плита армирована сеткой из арматуры Ø3 класса Вр-I. Кроме того, внутри

железобетонной плиты также расположена дискретно-континуальная система сдвиговых связей нового типа в виде продольных и поперечных стержней периодического профиля, проходящих через крестообразные уголки, установленные в каждом узле и в середине между ними (узлами) (рис. 2). Уголки со срезанными полками изготавливают по безотходной технологии за счет Z-образной лазерной резки.



Рис. 2. Система сдвиговых связей

В торцах верхних поясов ферм для измерения возможных сдвигов бетона относительно металла были закреплены закладные детали в виде уголка 40×4 мм.

Пролетное строение опирается на специально изготовленные массивные конструкции (козлы) из швеллера № 16 и уголков 75×6 мм. Примененные условия опирания моделируют работу одной горизонтально неподвижной опорной части (рис. 3, а), а другой – подвижной (рис. 3, б).

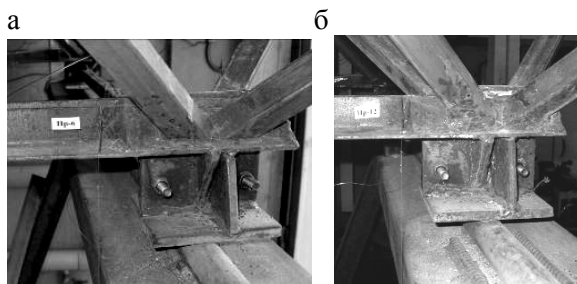


Рис. 3. Опорные части пролетного строения
а – неподвижная; б – подвижная

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние объекта исследования при кратковременном нагружении.

Система нагружения

Здесь в первую очередь следует отметить, что выбранный для данного эксперимента метод нагружения не несет в себе ограничений на размеры испытуемого объекта, отличается простотой и небольшой стоимостью. Речь идет о методе натурного испытания на вертикальные нагрузки плит и оболочек гидростатическим воздействием [11]. Суть его сводится к обустройству по периметру верхней поверхности исследуемой конструкции резервуара, который в процессе испытания наполняется водой. Внутри резервуара укладывается гидрофобная пленка. Подача и отвод воды осуществляются через соответствующие патрубки. Величина нагрузки устанавливается путем замера высоты столба воды, собственный вес которой реализует гидростатическое нагружение. В результате деформирования объекта уровень воды меняется, что приводит к изменению величины и, возможно, характера нагрузки. Поэтому важным моментом является определение путем перерасчета на каждом этапе нагружения и в заданный момент времени величины равномерно распределенной нагрузки, соответствующей созданной следящей («эталонное решение») [12]. Тем не менее, снятие замеров и их обработка является простой процедурой и выполняется в автоматизированном режиме.

Для проведения данного эксперимента был возведен специальный резервуар из щитов бакелизированной фанеры, укрепленных брусом, сечением 100×50 мм, с шагом 400 мм, и стянутых стальными шпильками Ø8 мм сверху и снизу (рис. 4).



Рис. 4. Резервуар для загрузки водой

Размер резервуара составил 7×2×1 м с перегородками внутри, образующими таким образом дополнительные резервуары размером

7×1×1 м и 3,5×1×1 м, что, в свою очередь, позволило производить загрузку сначала четверти, затем половины, и полностью всего пролетного строения.

Максимальная нагрузка при испытании пролетного строения моста составила 8 кПа, в то время как нормативная временная нагрузка равна $4 \times 1,4 = 5,6$ кПа [13].

Система измерения

Измерительную базу для данного эксперимента составили:

- 78 тензодатчиков, установленных на всех элементах металлической решетки для регистрации перемещений элементов и температур;
- 13 прогибомеров Максимова, установленных во всех узлах конструкции для определения вертикальных перемещений (рис. 5);



Рис. 5. Расположение прогибомеров и ДПИ

- 6 механических тензодатчиков, установленных в середине нижних поясов и в опорных раскосах для учета деформаций (рис. 6 и 7);
- 4 индукционных датчика перемещения (ДПИ), установленных в центральных узлах для фиксации вертикальных перемещений (рис. 5);
- 4 индикатора часового типа, установленных в торцах конструкции для измерения возможного сдвига между бетонной плитой и металлическим верхним поясом (рис. 6);
- 2 индикатора часового типа, установленных на наиболее нагруженном раскосе для определения величины продольного изгиба (рис. 7).



Рис. 6. Тензодатчик и индикатор часового типа

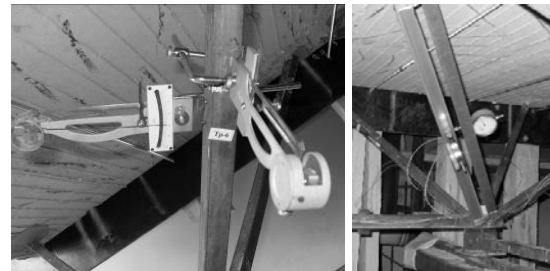


Рис. 7. Размещение тензодатчиков и индикаторов на раскосах

В качестве регистрирующего устройства приняты два комплекта измерительной системы СИИТ-3 (100 каналов), предоставляющей возможность многократного измерения сигналов датчиков и преобразующая их результаты в цифровой вид (рис. 8). Последнее значительно ускоряет процесс сбора, обработки и передачи информации.



Рис. 8. Измерительная система СИИТ-3

Последовательность эксперимента

Испытания пролетного строения пешеходного моста включали в себя следующие этапы загрузки: 1-й этап – загрузка четверти конструкции (размер резервуара – 3,5×1×1 м); 2-й этап – загрузка половины конструкции (размер резервуара – 7×1×1 м); 3-й этап – загрузка всей конструкции (размер резервуара – 7×2×1 м).

Резервуар заполняли водой с помощью пожарного гидранта, установленного на поливочной машине КО-829А-01 на шасси ЗиЛ-433362, а забор воды производили помпой, установленной на этом же автомобиле.

Загружение конструкции выполнялось по ступеням от 1 кПа до 8 кПа, шагом 1 кПа, с последующей разгрузкой каждой ступени нагружения.

Для всех трех этапов начальная степень нагружения составила 1 кПа и была принята за нулевые отсчеты. На каждом этапе для стабилизации деформаций нагрузка выдерживалась в течение 10 минут. Это время использовалось для осмотра испытываемой конструкции на предмет обнаружения дефектов разрушающего характера.

Загружение на 1-м этапе выполнялось равномерно распределенной нагрузкой, созданной с помощью воды по ступеням нагружения, начиная от 1 кПа и до 6 кПа с шагом 1 кПа (рис. 9).



Рис. 9. Нагружение на 1-м этапе

Максимальный прогиб конструкции в середине пролета при нагрузке в 6 кПа составил 2,05 мм, а теоретический – 2,12 мм.

График вертикального перемещения в середине пролета на 1-м этапе нагружения в зависимости от ступеней нагружения приведен на рис. 10.

Загружение конструкции на втором и третьем этапах производилось аналогично первому (рис. 11).

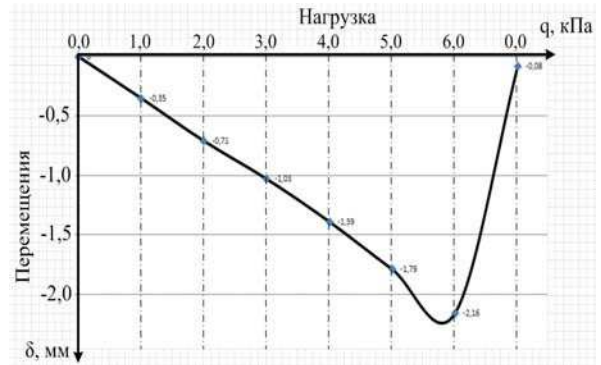


Рис. 10. Перемещения в середине пролета на 1-м этапе нагружения

Максимальная нагрузка на 2-м этапе составила 6 кПа, максимальный прогиб в середине пролета равен 3,39 мм, а теоретический – 3,66 мм.

Графики вертикального перемещения в середине пролета соответственно на 2-м и 3-м этапах нагружения в зависимости от ступеней нагружения с разгрузкой после каждой ступени приведены на рис. 11 и 13.

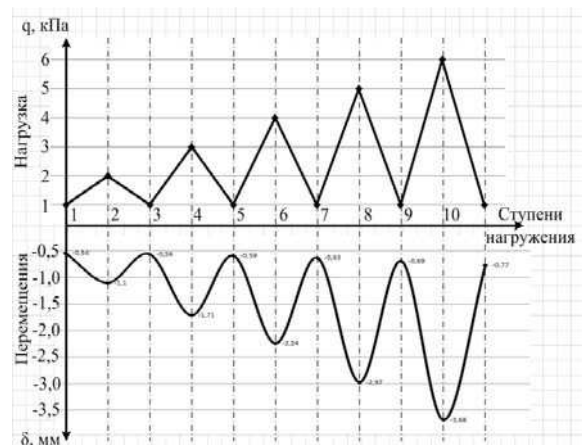


Рис. 11. Перемещения в середине пролета на 2-м этапе нагружения

Максимальная нагрузка на 3-м этапе составила 8 кПа, максимальный прогиб – 7,24 мм, теоретический – 8,07 мм (рис. 12 и 13).

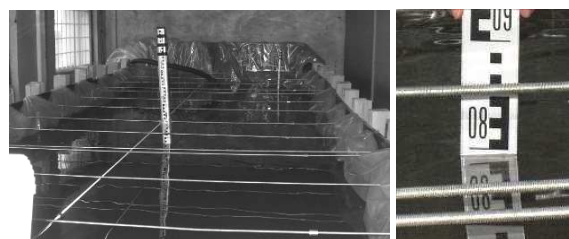


Рис. 12. Нагружение на 3-м этапе

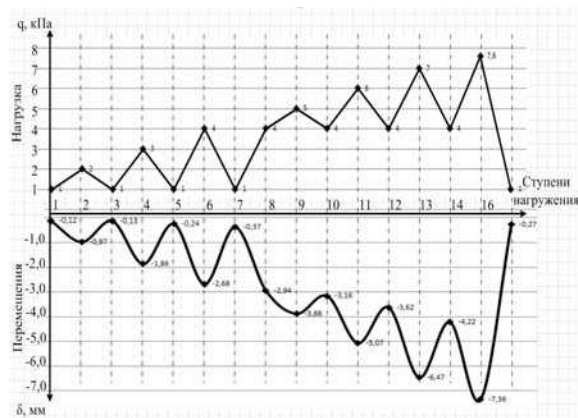


Рис. 13. Перемещения в середине пролета на 3-м этапе нагружения

Анализ результатов

В результате проведенного эксперимента был получен достаточно полный анализ работы конструкции в целом и отдельных ее элементов.

На рис. 14 приведены экспериментальные вертикальные перемещения узлов нижнего пояса конструкции на 1-м этапе нагружения.

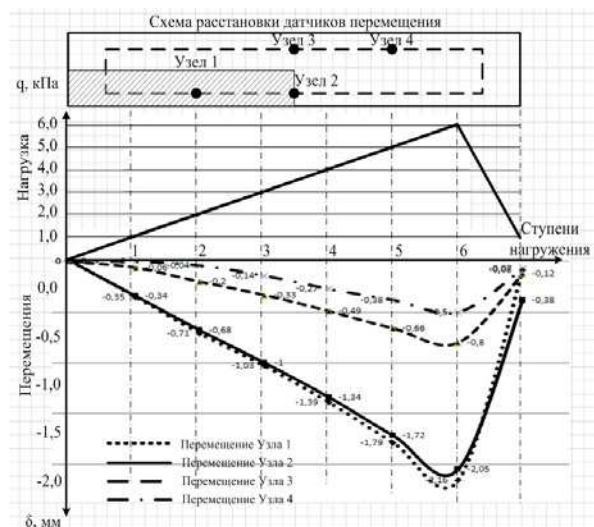


Рис. 14. Перемещения узлов конструкции на 1-м этапе нагружения

Перемещение узла 1 несколько больше, чем узла 2, что отражает логическую закономерность роста перемещений с увеличением и местом расположения нагрузки.

На рис. 15 приведены экспериментальные вертикальные перемещения узлов нижнего пояса конструкции на 2-м этапе нагружения.

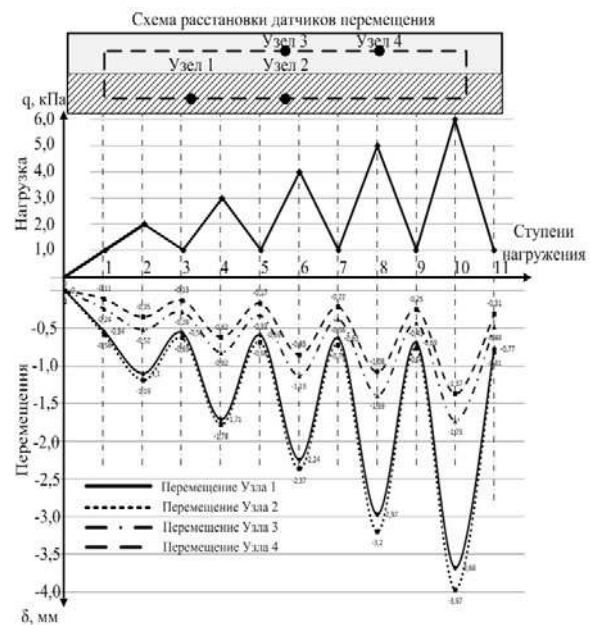


Рис. 15. Перемещения узлов конструкции на 2-м этапе нагружения

Сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчетов, проведенных на базе построенной конечно-элементной модели, позволяют судить:

- о том, что предлагаемая конструкция сталежелезобетонного пролетного строения пешеходного моста, пролетом 6 м с консолями по 0,5 м, шириной 2 м, высотой конструкции 0,5 м, верхний пояс которой объединен с железобетонной плитой, армированной специальным образом, при классе бетона В25 обладает высокой пространственной жесткостью и необходимой прочностью;

- о том, что потери устойчивости раскосов и необратимых прогибов конструкции не произошло;

- о совместной работе металлических элементов конструкции (поясов и раскосов) с железобетонной плитой на всем диапазоне нагружения вплоть до разрушения;

- о том, что построенная теоретическая модель, составленная из конечных элементов стержней общего положения, достаточно строго отражает качественную и количественную картины напряженно-деформированного состояния составных конструкций при действии вертикальных нагрузок [8, 14].

Вышесказанное наглядно отображено на рис. 16, 17 и 18, где представлены эксперимен-

тальные и теоретические графики вертикальных перемещений в середине пролета на каждом этапе загрузки в соответствии с каждой ступенью нагружения.

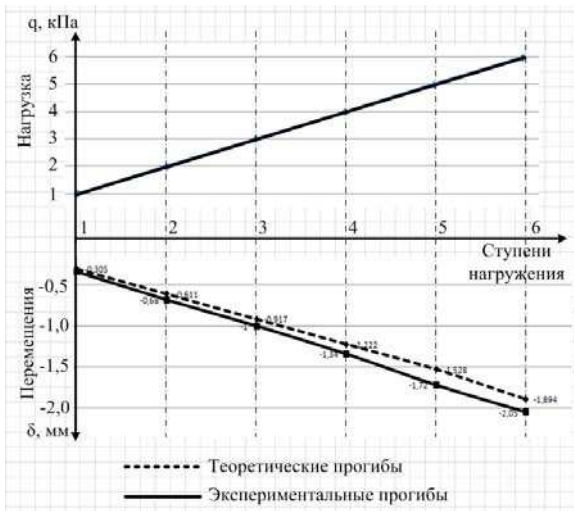


Рис. 16. Экспериментальные и теоретические перемещения в середине пролета на 1-м этапе нагружения

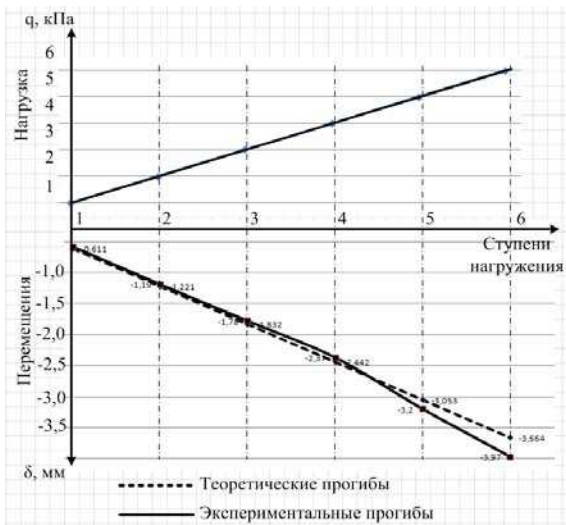


Рис. 17. Экспериментальные и теоретические перемещения в середине пролета на 2-м этапе нагружения

Как видно на графике, результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, незначительно отличаются от прогибов, полученных в результате теоретического расчета конечно-элементной модели, что свидетельствует о ее адекватности.

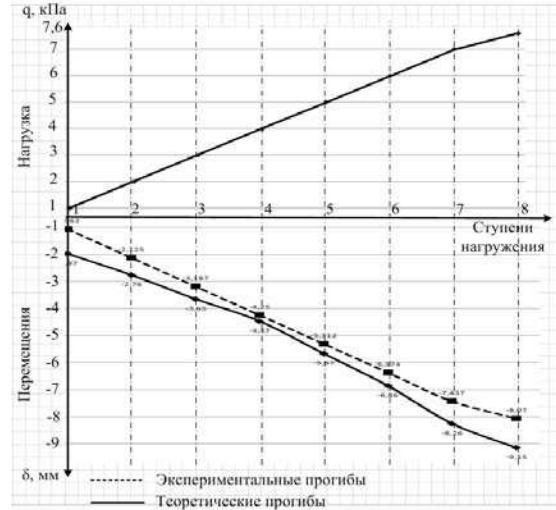


Рис. 18. Экспериментальные и теоретические перемещения в середине пролета на 3-м этапе нагружения

Выводы

В заключение можно отметить, что результаты испытания свидетельствуют о достижении надежной совместной работы железобетонной плиты и металлической решетки за счет использования предлагаемой дискретно-континуальной системы сдвиговых связей нового типа на всем диапазоне нагружения.

Вертикальные деформации при действии эксплуатационной нагрузки не превысили нормативных значений, а именно

$$\frac{f}{H} = \frac{7,36}{6000} = 0,0012 < \frac{1}{400} \cdot L.$$

Остаточные значения деформации после разгрузки каждой из ступеней нагружения не превысили 5%, что свидетельствует об упругой работе конструкции.

Трещин в железобетонной плите, характеризующих потерю несущей способности и сплошности конструкции не обнаружено.

Следует также подчеркнуть, что проведенные испытания на кратковременные нагружения показали, что при столь малых сечениях элементов, конструкция обладает достаточной жесткостью и имеет некоторый запас прочности при нагрузке, превышающей нормативную.

Литература

1. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Х.: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
2. Ефимов П.П. Проектирование мостов / П.П. Ефимов. – Омск: ООО «Дантея», 2006. – 111 с.
3. Бычковский Н.Н. Металлические мосты. Часть 1 / Н.Н. Бычковский, А.Ф. Данковцев. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2005. – 364 с.
4. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні структурні конструкції / Л.І. Стороженко, В.М. Тимошенко, О.В. Нижник. – Полтава: Гадяч, 2006. – 143 с.
5. Стороженко Л.І. Створення нових типів сталезалізобетонних конструкцій / Л.І. Стороженко // Сталезалізобетонні конструкції: зб. наук. ст. – 2011. – Вип. 9. – С. 175–180.
6. Семко О.В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій: монографія / О.В. Семко. – Полтава: ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2004. – 320 с.
7. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма / Г.В. Васильков. – Ростов н/Д: Инфосервис, 2003. – 180 с.
8. Шмуклер В.С. Об одном подходе формирования пролетного строения пешеходного моста / В.С. Шмуклер, С.Н. Краснов, Е.С. Краснова // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 76. – С. 580–588.
9. Shmukler V. The forming of an efficient construction of a pedestrian bridge / V. Shmukler, A. Kislov, E. Krasnova, E. Petrova // Proceedings of the 15th Conference for Lithuania Junior Researchers SCIENCE – FUTURE OF LITHUANIA. – Vilnius, Lithuania, 2012. – P. 250–254.
10. Пат.51336 Україна, МПК E04D 3/24. Металобетонне просторове перекриття / В.С. Шмуклер, К.В. Бережна, В.В. Герасименко, Васим Ісмаїл, О.О. Калмиков; заявник и патентовласник В.С. Шмуклер. – № u 201000918/10; заявл. 29.01.10; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13.
11. Пат. 44125 Україна, МПК G 01 M19/00, G01N 3/00, G 01 M 5/00. Пристрій для натурних випробовувань плит та оболонки / В.С. Шмуклер, А.А. Чупринін, Р. Аббасі. – № u200901598/09; заявник и патентовласник В.С. Шмуклер; заявл. 24.02.09; опубл. 25.09.09, Бюл. №12.
12. Абасси Р. Метод натурних испытаний плит и оболочек: дисс... канд. техн. наук: 05.23.01 / Рамин Абасси. – Х., 2010. – 176 с.
13. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2 – 15:2009. – Чинний від 2009-11-11. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 66 с.
14. Городецкий А.С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций / А.С. Городецкий, В.С. Шмуклер, А.В. Бондарев. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 890 с.

Рецензент: В.П. Кожушко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2012 г.