

Construction of Unique Buildings and Structures



Влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние элементов структурного покрытия

А.В. Муцанов ¹, В.Ф. Муцанов ², И.В. Роменский ³

¹⁻³Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 86123, Украина, Донецкая область, Макеевка, ул. Державина, 2

Информация о статье

УДК

История

Подана в редакцию 11 июля 2015

Ключевые слова

большепролетные структурные покрытия;
система МАРХИ;
напряженно-деформированное состояние;
типизация;
унификация

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены новые подходы к расчету и проектированию структурных покрытий системы МАРХИ. Предложенные подходы, обеспечивающие регулирование параметров напряженно-деформированного состояния, базируются на двух принципах: изменении локальных геометрических параметров (размеров ячейки покрытия - его относительной высоты), и «вспарушивания» первоначально плоской плиты, то есть, изменения общей геометрической формы с приданием плите обратного выгиба. Установленные зависимости обеспечивают возможность использования для покрытий на нетиповых планах типовых модульных элементов системы МАРХИ (стержней и соединительных вставок-коннекторов). Для более полной оценки эффективности предложенных подходов впервые выполнена оценка влияния податливости опорных конструкций на параметры напряженно-деформированного состояния (максимального усилия в стержневом элементе и максимального прогиба). С целью обобщения результатов выполненных исследований искомые параметры представлены в относительном виде как функциональные зависимости параметра k , характеризующего податливость опорных конструкций.

Содержание

1.	Введение	8
2.	Обзор литературы	9
3.	Основная часть	9
4.	Заключение	13

¹ Контактный автор:

+38 (099) 793 4155, mushhanov93@gmail.com (Муцанов Александр Владимирович, студент)

²

+38 (050) 368 0804, mvf@donnasa.edu.ua (Муцанов Владимир Филиппович, д-р техн. наук, проф., проректор по науч. работе, зав.каф.)

³

+38 (050) 529 2203, riv_2005@mail.ru (Роменский Игорь Викторович, канд. техн. наук, доц., доц. каф. металлических конструкций)

1. Введение

Конструкции системы МАРХИ появились в нашей стране в 70-х годах XX столетия, как плод труда ученых и специалистов кафедры инженерных конструкций Московского архитектурного института. Конструкторами-архитекторами был разработан способ строительства сборных сооружений практически любой формы, мобильных, экономичных и эстетически привлекательных. На удивление быстро промышленность взяла на вооружение новую систему, названную системой МАРХИ. В отличие от ранее существующих методов строительства, основанных на типизации крупных строительных конструкций (колонна, балка, ферма и т.п.) или зданий в целом, в системе МАРХИ объектом типизации является стержень и узловой элемент, оптимизированные по массе и несущей способности. Они не подчиняются какой-либо конкретной архитектурно-конструктивной форме, что обеспечивает возможность их накопления на складе завода-изготовителя с последующей комплектацией любой необходимой конструкции [2, 4, 7, 10].

Уникальность перекрестно-стержневой пространственной конструкции (ПСПК) состоит в том, что существует возможность равномерного распределения нагрузки и нивелирования малонагруженных и максимально нагруженных элементов, что дает определенные преимущества:

1. Конструкция становится более устойчивой к подвижным, в частности, сейсмическим нагрузкам [12, 19];
2. Повышает мобильность внутренних опор и возможность их переставлять [12];
3. Увеличивает жесткость системы – можно подвесить дополнительное оборудование [12].

К недостаткам структурных систем относится повышенная трудоемкость их изготовления и сборки, что является следствием отступления от принципа концентрации материала. Этот недостаток в определенной мере компенсируется однородностью операции при изготовлении и сборке, что создает условия для поточного производства стандартных конструктивных элементов. [2].



Рис. 1. Покрытие верхнего этажа торгово-развлекательного комплекса «Калейдоскоп» (г. Москва)



Рис. 2. Покрытие пассажа Универсального магазина (г. Омск)

Система МАРХИ широко применяется в строительстве. Система позволяет перекрывать сооружения любого назначения с пролетами до 100 м включительно [9, 7, 17]. Так на рисунках 1 и 2 продемонстрированы перекрытия пассажа Универсального магазина в г. Омск конца 70-х годов XX столетия (Рис. 2, URL: http://www.systems-marhi.ru/upload/medialibrary/27a/402_1.jpg) и покрытие торгово-развлекательного центра «Калейдоскоп» в г. Москва (Рис. 1, URL: <http://www.systems-marhi.ru/upload/medialibrary/76a/8.jpg>) [2].

В ранее выполненных [14] работах была поставлена задача подобрать рациональную геометрическую высоту элементарной ячейки структурного покрытия в целях варьирования усилий в узлах конструкции [8, 9]. Были проведены аналитический [18, 20] и численный расчет структурной плиты, вследствие чего была найдена рациональная высота ячейки – 2,74 м ($h/l = 1/17$). Помимо этого в расчете применялась методика «вспарушивания» конструкции для исследования зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) от стрелы выгиба структурной плиты. Однако расчеты проводились при условии жесткого защемления конструкции по контуру.

Основная цель исследования:

1. Влияние стрелы выгиба структурной плиты («вспарушивания») на НДС элементов покрытия на упруго-податливых опорах.

2. Влияние податливости опор на основные показатели НДС исследуемой конструкции, которые обусловлены соотношением жесткостных характеристик опорной и пролетной частей исследуемой конструкции. Упомянутое соотношение характеризуется коэффициентом k имеющим следующий вид:

$$k = \frac{D}{EI} \quad (1)$$

где D – цилиндрическая жесткость плиты, вычисляемая по [1] ($D = 0,4K$), $кНсм^2$;

K – продольная жесткость плиты ($K = ESA_{в.п} \cdot \frac{tg^2 \alpha}{1 + A_{в.п}/A_{н.п}}$), $кНсм^2$;

E – модуль упругости стали, $кН/см^2$;

S – длина поясных стержней (модуль), $см$;

$A_{в.п}$, $A_{н.п}$ – площади сечений верхнего и нижнего поясов, $см^2$;

α – угол наклона раскосов к горизонтальной плоскости.

2. Обзор литературы

Выполненный обзор литературы подчинен решению основной задачи, рассматриваемой в данной статье, а именно: исследованию влияния обратной стрелы выгиба и податливости опор на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов структурной конструкции.

В ходе подготовки предложенного материала изучено множество отечественных и зарубежных трудов, посвященных расчету, проектированию и эксплуатации структурных конструкций. Исходя из вышесказанного, целесообразно разделить их на несколько подгрупп:

- нормативному обеспечению процесса проектирования [1, 15, 16],
- изложению общих принципов компоновки, расчета и проектирования рассматриваемых конструкций [2, 4, 5, 7, 9, 17, 21-23, 27],
- численному исследованию особенностей напряженно-деформированного состояния большепролетных структурных конструкций, в том числе на нетиповом плане, с учетом геометрических несовершенств и других значимых факторов [3, 6, 8, 10-14, 25, 28, 29],
- разработке аналитических принципов расчета, базирующихся на теории изгиба тонких плит [18, 19, 24, 26]
- типизации и унификации конструктивных элементов структурных покрытий [2, 19, 20].

Выполненный обзор и анализ проведенных ранее исследований позволил сформулировать основную задачу исследования, результаты которого представлены в данной статье, а именно: исследованию влияния обратной стрелы выгиба и податливости опор на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов структурной конструкции.

3. Основная часть

Объектом исследования является структурная несущая конструкции большепролетного покрытия культурно-развлекательного комплекса в городе Донецке.

Размеры перекрываемой части здания в плане составляют 68,4x45м. (Рис. 3). Шаг колонн различный в продольном и поперечном направлении. Отметка низа покрытия +12.2 м [3].

Все выбранные сечения труб приняты в соответствии с [15, 16].

В качестве опор (колонн) была принята труба стальная электросварная прямошовная по ГОСТ 10704-91 [15] диаметром 820x14 мм ($A = 55,39 \text{ см}^2$; $i = 28,5 \text{ см}$; $I = 287536,5 \text{ см}^4$).

В качестве покрытия используется структурная плита типа МАРХИ. Несущими элементами структурной плиты являются трубы, соединенные в узлах на болтах, с помощью специальных узловых элементов (коннекторов).

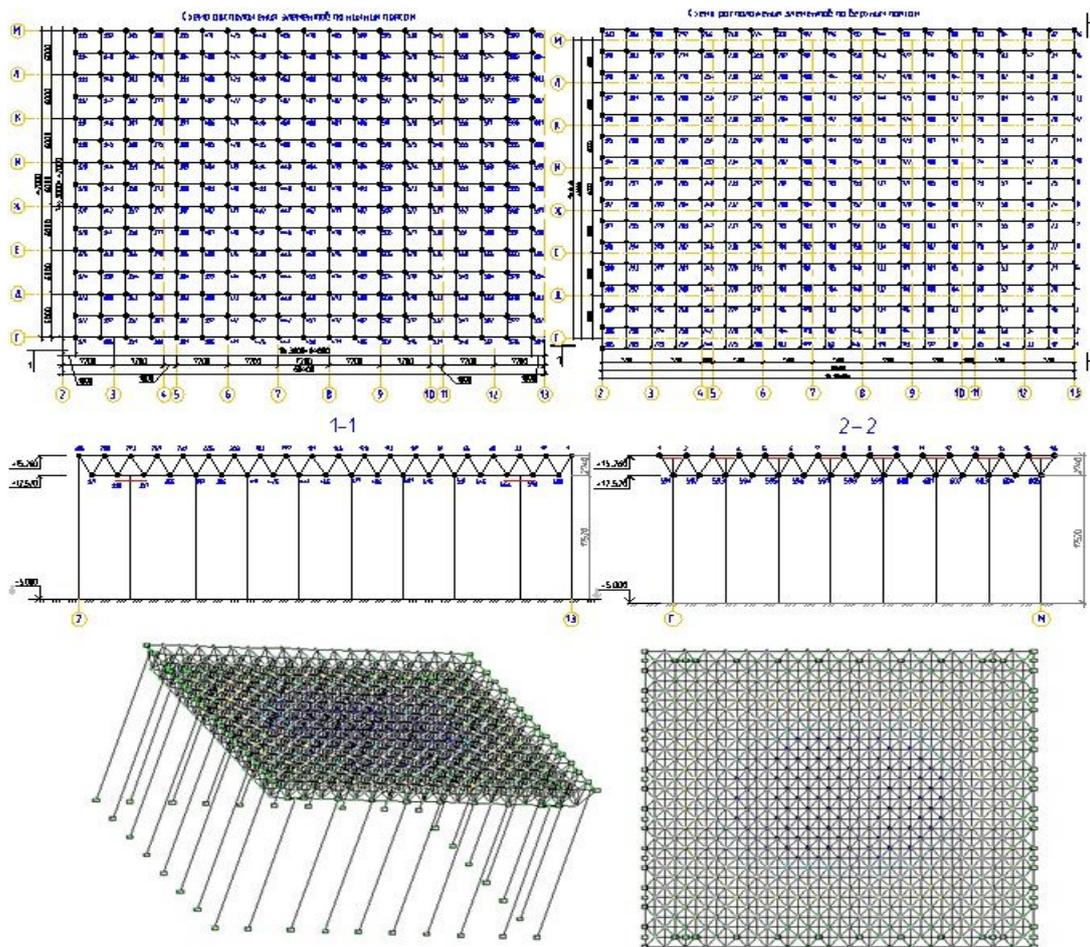


Рис. 3. Исследуемая структурная конструкция

В качестве элементарной ячейки структуры базового варианта принята пирамида с основанием в виде прямоугольника $3 \times 3,6$ м (что соответствует шагу колонн вдоль и поперек здания) и ребрами равными $3,6$ м. Высота структурного покрытия составляет $2,74$ м, угол наклона ребра $\alpha = 49,4^\circ$ [3].

Численные исследования были произведены с помощью программного комплекса «SCAD» – вычислительного комплекса для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов [6]. Единая графическая среда синтеза расчетной схемы и анализа результатов обеспечивает неограниченные возможности моделирования расчетных схем от самых простых до самых сложных конструкций.

Для анализа влияния метода «вспарушивания» на принятую конструкцию был разработан, как было оговорено выше, вариант закрепления на упруго-податливых опорах (см. рис. 3).

В рассматриваемом примере общая нагрузка на покрытие составила:

$$Q = 193 \text{ кг/м}^2$$

из которых 20 кг/м^2 – собственный вес структурной плиты, а 171 кг/м^2 – снеговая нагрузка, принятая по ДБН В.1.2-2:2006 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования» [1].

1. Влияние стрелы выгиба структурной плиты («вспарушивания») на НДС элементов покрытия на упруго-податливых опорах.

Результаты исследования представлены в таблицах 1,2,3 и на рис. 4.

Таблица 1. Результаты численного расчета для (1/50)L

№ шага «выдавливания»	Контролируемый параметр	Вариант закрепления на упруго-податливых опорах
0 (плоский вариант)	W_{\max} (мм)	356,92
	N_{\max} (кН)	159,65
	f_0/l	0
1	W_{\max} (мм)	844,93
	N_{\max} (кН)	290,75
	f_0/l	18,8
2	W_{\max} (мм)	790,59
	N_{\max} (кН)	270,94
	f_0/l	36,4
3	W_{\max} (мм)	717,77
	N_{\max} (кН)	243,44
	f_0/l	52,0
4	W_{\max} (мм)	647,04
	N_{\max} (кН)	216,52
	f_0/l	66,4
5	W_{\max} (мм)	586,06
	N_{\max} (кН)	193,18
	f_0/l	80,4
6	W_{\max} (мм)	-
	N_{\max} (кН)	-
	f_0/l	-

Таблица 2. Результаты численного расчета для 1/30

№ шага «выдавливания»	Контролируемый параметр	Вариант закрепления на упруго-податливых опорах
0 (плоский вариант)	W_{\max} (мм)	318,48
	N_{\max} (кН)	175,55
	f_0/l	0
1	W_{\max} (мм)	317,13
	N_{\max} (кН)	174,99
	f_0/l	7,1
2	W_{\max} (мм)	315,20
	N_{\max} (кН)	173,85
	f_0/l	14,15
3	W_{\max} (мм)	312,55
	N_{\max} (кН)	172,43
	f_0/l	21,15

Таблица 3. Результаты численного расчета для 1/20

№ шага «выдавливания»	Контролируемый параметр	Вариант закрепления на упруго-податливых опорах
0 (плоский вариант)	W_{\max} (мм)	150,98
	N_{\max} (кН)	116,68
	f_0/l	0
1	W_{\max} (мм)	150,82
	N_{\max} (кН)	116,61
	f_0/l	3,35

На рисунке 4 представлен график зависимости НДС [14] от стрелы выгиба структурной плиты. Значения для графика были приняты из соответствующих таблиц (1,2,3).

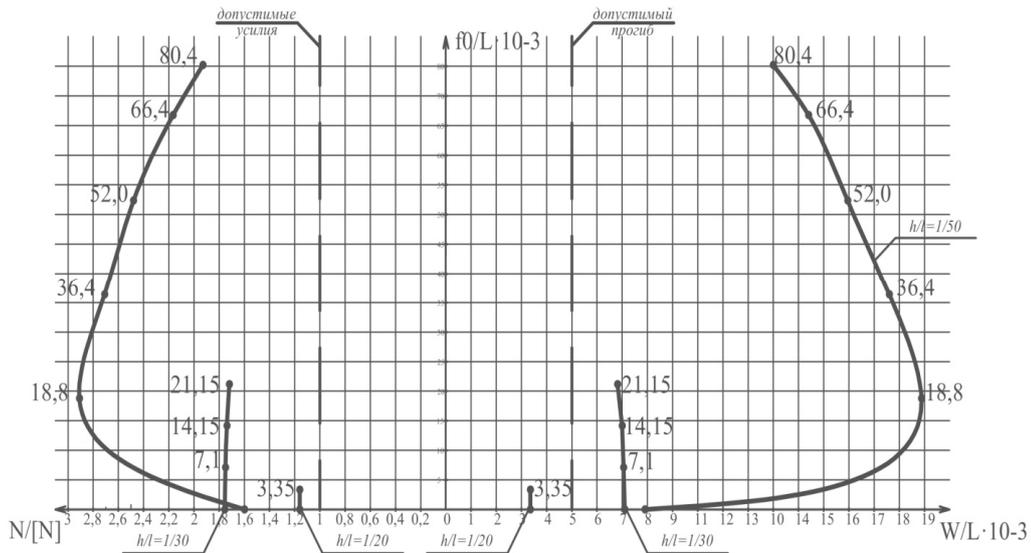


Рис. 4. Зависимости основных параметров НДС покрытия (с учетом податливости опор)

2. Влияние податливости опор на основные показатели НДС исследуемой конструкции

Учитывая, что в качестве параметра, оценивающего влияние податливости опор на НДС элементов структурного покрытия предложено использовать коэффициент k (1), на рисунках 5 и 6 приведены функциональные зависимости относительных параметров НДС ($N/[N]$ – относительное усилие, W/L – относительный прогиб), как функции этих величин, зависящих от аргумента функции – параметра k . При этом в ходе исследования параметр k принимал значения $k = 0,011; 0,0047; 0,0016$, соответствующие относительной высоте плиты структурного покрытия $(1/20)L, (1/30)L, (1/50)L$.

Графики, представленные на рисунках 5 и 6, получены с помощью программного вычислительного комплекса MathCAD 2015 [13]. Данные для построения графиков получены из расчета коэффициента k по формуле (1) а также с использованием значений результатов численного расчета (табл. 1,2,3).

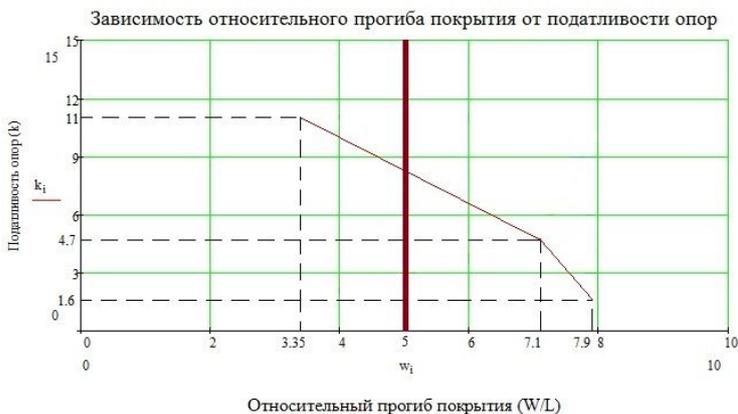


Рис. 5. График зависимости относительного прогиба от податливости опор

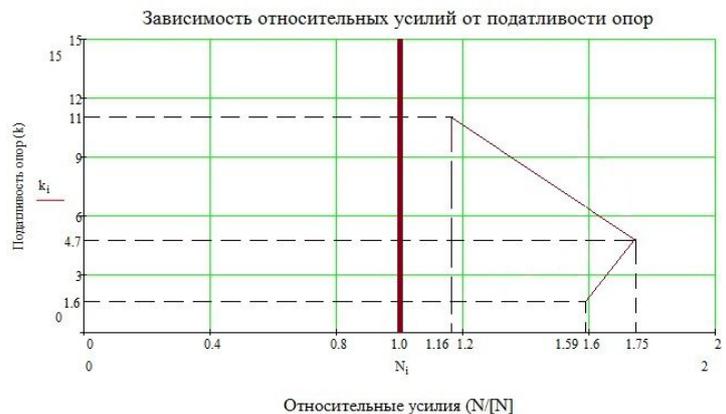


Рис. 6. График зависимости относительного усилия от податливости опор

4. Заключение

1. При переходе от плоской схемы к пространственной в виде полой оболочки, требуемое значение начальной стрелы выгиба составляет $f/l=1/27$, при которой обеспечивается возможность использования стандартных элементов типа МАРХИ, для полой оболочки неподвижно закрепленной по контуру.

2. Результаты исследования НДС конструкции, полученные путем «вспарушивания», показали, что «вспарушивание» является эффективным методом регулирования параметров НДС при условии «жесткого защемления» конструкции. При проектировании структурного покрытия на упруго-податливых опорах метод «вспарушивания» является наиболее эффективным при соотношении $h/l=1/50$. При этом такое соотношение высоты покрытия к пролету приводит к повышенной гибкости покрытия, что в дальнейшем требует уточняющих расчетов для такого класса покрытий с учетом геометрической нелинейности.
3. Установленные зависимости « $k - w/L$ » и « $k - N/[N]$ » имеют нелинейный характер и позволяют зафиксировать существенное влияние податливости опорных конструкций для покрытий с малой относительной высотой покрытия $(1/40)L \dots (1/50)L$. Условная граница, при которой влияние податливости опорных конструкций на основные параметры напряженно-деформированного состояния можно считать незначительным, составляет $(h/l \approx (1/17 \dots 1/20)L)$ при $k \approx 12$.

Литература

- [1]. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. К.: Мінбуд України, 2006. 78 с.
- [2]. НПЦ Виктория: система MAPXI [Электронный ресурс]. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.sistems-marhi.ru/marhi/> (дата обращения: 12.05.2015)
- [3]. Беленя Е. И., Балдин В. А., Ведеников Г. С. и др. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1985. 560 с.
- [4]. Муцанов А. В., Роменский И. В. Учет особенностей конструктивных решений системы MAPXI при разработке индивидуального проекта большепролетного структурного покрытия // сборник докладов Пятой Международной научно-практической конференции (Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях). М.: Изд-во МГСУ, 2013. С 111-115.
- [5]. Gaylord Edwin, Gaylord Charles, Stallmeyer James. Structural engineering. New York: The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. – ISBN 0070237247.
- [6]. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа– 4-е изд., перераб. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
- [7]. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Кинаш Р.И. [и др.]. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов. Макеевка: ДонНАСА, 2008. 405 с.
- [8]. Муцанов В.Ф. Избранные методы строительной механики в расчетах пространственных конструкций. Макеевка: ДонНАСА, 2006. 292 с.
- [9]. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Назим Я.В., Роменский И.В. Расчет и проектирование пространственных металлических конструкций. Макеевка: ДонНАСА, 2012. 561 с.
- [10].10. Bujisen Michel. Dynamic Space Frame Structures [Web source]. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: p://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Bujisen.pdf (date of rederecne 14.05.2015)
- [11].ООО «Монтаж ПК» [Электронный ресурс]. URL: http://www.monpk.ru/system_marhi/.
- [12].Vista Виста Производство перекрестно-стержневых пространственных конструкций [Электронный ресурс]. URL: <http://vista-marhi.ru/o-sisteme-MARHI/chto-takoe-PSPK/>.
- [13].Ю.В. Грицук. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Информационные технологии проектирования в строительстве». Решение инженерных задач с помощью MathCAD. Макеевка: ДонНАСА, 2013. 71 с.
- [14].И.В. Роменский, Т.И. Загоруйко, А.В. Муцанов. Основные подходы к назначению пространственных и жесткостных характеристик покрытия системы MAPXI при регулировании параметров его напряженно-деформированного состояния // УАМК Металлические конструкции. 2015, ТОМ 21, НОМЕР 1, 5-14 стр.
- [15].Помощь по ГОСТам. ГОСТ 10704-91 Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/GOST1070491Trubystalnyeel> (дата обращения 11.06.2015)
- [16].Васильченко В.Т., Рутман А.Н., Лукьяненко Е.П. Справочник конструктора металлических конструкций - 2-е изд., перераб. и доп. К.: Будивэльнык, 1990. 312 с.
- [17].Дыховичный Ю.А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве. М.: Стройиздат, 1982. 277 с.
- [18].Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции: учебное пособие. М.: Стройиздат, 1983. 216 с.
- [19].Файбишенко В.К. Металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1984. 336 с.
- [20].Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. М.: Стройиздат, 1964. 239 с.
- [21].N. Hubermana, D. Pearlmuttera, E. Galb, I.A. Meira. Optimizing structural roof form for life-cycle energy efficiency // Energy and Buildings, Volume 104, 1 October 2015, pp. 336–349
- [22].Jianguo Caia, Jian Fenga, Chao Jiang. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // Journal of Constructional Steel Research Volume 92, January 2014, pp. 175–182
- [23].N. Antonioua, Th. Nikolaidisb, C.C. Baniotopoulousa. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts // Engineering Structures Volume 59, February 2014, pp. 21–27

- [24]. George I.N. Rozvany, Robin D. Hill. The Theory of Optimal Load Transmission by Flexure // Advances in Applied Mechanics Volume 16, 1976, pp. 183–308
- [25]. Rosen A., Sabag M., Givoli M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system—I. Theoretical derivations // Computers & Structures, Volume 61, Issue 4 - 1996. pp. 617-632.
- [26]. Robert A. Heller. Mechanics of Structures // Encyclopedia of Physical Science and Technology (third edition) - 2003. pp. 259-278
- [27]. John D. Renton. Chapter 15 - Regular Structures // Elastic Beams and Frames (Second Edition) - 2002. pp. 15.1 -15.36
- [28]. Bondarev A., Yugov A. The Method of Generating Large-span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence // Procedia Engineering, Volume 117 - 2015. pp. 948-958
- [29]. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения. Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 2 (17). 2014. с. 107-124

The impact of support on the compliance of the stress-strain state of structural elements covering

A.V. Mushchanov¹, V.F. Mushchanov², I.V. Romensky³

¹⁻³ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin str., Makiyivka, Donetsk region, Ukraine, 86123

ARTICLE INFO

scientific article

doi:

Article history

Received 11 July 2015

Keywords

long-span structural roof;
system MARCHI;
stress-strain state;
typing;
unification

ABSTRACT

The material presented in the article is devoted to solving the actual problem - the improvement of traditional design solutions of spatial roof structures with overlapping of long spans with atypical ratio of the lengths of the plan sides. In this regard, the main objective of the research is to establish functional relationships between the geometric parameters of the projected spatial roof structure and its size in terms that will use a standard set of structural elements. As the object of research, in this case, is considered the structural roof of the MARCHI system at unconventional plan 68,4x45 m. The proposed approach provides solutions for the control of the parameters of the stress-strain state and are based on two principles: the changing of local geometrical parameters (size of roof cell – its height), and reverse arching of initially flat plate, that is, changing of the overall geometric shape. Fine depending allows the use of standard modular elements of the MARCHI (rods and insert-connectors) at designing roofs on non-standard plans. For a more complete assessment of the effectiveness of the proposed approaches for the first time estimated the impact of support structures compliance on the parameters of the stress-strain state (the maximum force in the rod element and the maximum deflection). In order to generalize the results of the research required parameters are shown in relative form as a functional dependence of the parameter k , which characterizes the compliance of the support structures. These studies established that: - the required value of the initial reverse arching for a shallow shell is $f / l \approx 1 / 27$, that is a motionlessly fastened on a contour, and for which it is possible to use standard components of MARCHI type- the use of a reverse bending is an effective method of controlling of the SSS parameters for the case of "rigid support" of structure. When the designing roof is located on elastically compliant supports this method is most effective when the ratio $h / l = 1/50$, - a developed depending « $k - w / L$ » and « $k - N / [N]$ » are nonlinear and allow to establish a significant impact of compliance of support structures for roofs with low relative height $(1/40) L \dots (1/50) L$. The findings in addition to the scientific value have practical significance to facilitate the initial stage of the design process in the appointment of the geometric parameters of buildings in compliance with the above restrictions.

¹ Corresponding author:

+38 (099) 793 4155, mushchanov93@gmail.com (Alexander Vladimirovich Mushchanov, Student)

²

+38 (050) 368 0804, mvf@donnasa.edu.ua (Vladymyr Filippovich Mushchanov, PhD, prof., Vice-rector for sc. work, Head of

Department)

³

+38 (050) 529 2203, riv_2005@mail.ru (Igor Viktorovich Romensky, PhD, assistant prof. of the Department of Metal

constructions)

References

- [1]. DBN V.1.2-2:2006. Sistema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeki budivelnykh ob'ektiv. Navantazhennya i vplivi. Normi proyektuvannya. K.: Minbud Ukraini, 2006. pp. 78.
- [2]. NPTs Viktoriya: sistema MARKhI [Elektronnyy resurs]. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.sistemas-marhi.ru/marhi/> (data obrashcheniya: 12.05.2015)
- [3]. Belenya Ye. I., Baldin V. A., Vedenikov G. S. i dr. Metallicheskiye konstruksii. Obshchiy kurs: Uchebnik dlya vuzov. M.: Stroyizdat, 1985. pp. 560.
- [4]. Mushchanov A. V., Romenskiy I. V. Uchet osobennostey konstruktivnykh resheniy sistemy MARKhI pri razrabotke individualnogo proyekta bolsheproletnogo strukturnogo pokrytiya // sbornik dokladov Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Nauchno-tekhnicheskoye tvorchestvo molodezhi – put k obshchestvu, osnovannomu na znaniyakh). M.: Izd-vo MGSU, 2013. pp. 111-115.
- [5]. Gaylord Edwin, Gaylord Charles, Stallmeyer James. Structural engineering. New York: The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. – ISBN 0070237247.
- [6]. Perelmuter A.V, Slivker V.I. Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza– 4-ye izd., pererab. M.: Izd-vo SKAD SOFT, 2011. pp.736.
- [7]. Gorokhov Ye.V., Mushchanov V.F., Kinash R.I. [i dr.]. Konstruksii statsionarnykh pokrytiy nad tribunami stadionov. Makeyevka: DonNASA, 2008. pp.405.
- [8]. Mushchanov V.F. Izbrannyye metody stroitelnoy mekhaniki v raschetakh prostranstvennykh konstruksiy. Makeyevka: DonNASA, 2006. pp.292.
- [9]. Gorokhov Ye.V., Mushchanov V.F., Nazim Ya.V., Romenskiy I.V. Raschet i proyektirovaniye prostranstvennykh metallicheskiy konstruksiy. Makeyevka: DonNASA, 2012. pp. 561.
- [10]. Bujisen Michel. Dynamic Space Frame Structures [Web source]. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/sadbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Bujisen.pdf (date of rederence 14.05.2015]
- [11]. ООО «Montazh PK» [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.monpk.ru/system_marhi/.
- [12]. Vista Vista Proizvodstvo perekrstno-sterzhnevnykh prostranstvennykh konstruksiy [Elektronnyy resurs]. URL: <http://vista-marhi.ru/o-sisteme-MARHI/chto-takoe-PSPK/>.
- [13]. Yu.V. Gritsuk. Metodicheskiye ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po kursu «Informatsionnyye tekhnologii proyektirovaniya v stroitelstve». Resheniye inzhenernykh zadach s pomoshchyu MathCAD. Makeyevka: DonNASA, 2013. pp.71.
- [14]. I.V. Romenskiy, T.I. Zagoruyko, A.V. Mushchanov. Osnovnyye podkhody k naznacheniyu prostranstvennykh i zhestkostnykh kharakteristik pokrytiya sistemy MARKhI pri regulirovaniy parametrov yego napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya // UAMK Metallicheskiye konstruksii. 2015, TOM 21, No 1, pp.5-14.
- [15]. Pomoshch po GOSTam. GOST 10704-91 Truby stalnyye elektrosvarynyye pryamoshovnyye. Sortiment. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/GOST1070491Trubystalnyeel> (data obrashcheniya 11.06.2015)
- [16]. Vacilchenko V.T., Rutman A.N., Lukyanenko Ye.P. Spravochnik konstruktora metallicheskiy konstruksiy - 2-ye izd., pererab. i dop. K.: Budivelnyk, 1990. pp. 312.
- [17]. Dykhovichnyy Yu.A. Bolsheproletnyye konstruksii sooruzheniy Olimpiady-80 v Moskve. M.: Stroyizdat, 1982. pp. 277.
- [18]. Trushchev A. G. Prostranstvennyye metallicheskiye konstruksii: uchebnoye posobiye. M.: Stroyizdat, 1983. pp. 216
- [19]. Faybishenko V.K. Metallicheskiye konstruksii. M.: Stroyizdat, 1984. pp. 336.
- [20]. Streletskiy N.S., Streletskiy D.N. Proyektirovaniye i izgotovleniye ekonomichnykh metallicheskiy konstruksiy. M.: Stroyizdat, 1964. pp. 239
- [21]. N. Hubermana, D. Pearlmuttera, E. Galb, I.A. Meira. Optimizing structural roof form for life-cycle energy efficiency // Energy and Buildings, Volume 104, 1 October 2015, pp. 336–349
- [22]. Jianguo Caia, Jian Fenga, Chao Jiang. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // Journal of Constructional Steel Research Volume 92, January 2014, pp.175–182
- [23]. N. Antonioua, Th. Nikolaidisb, C.C. Baniotopoulousa. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts // Engineering Structures Volume 59, February 2014, pp. 21–27

- [24]. George I.N. Rozvany, Robin D. Hill. The Theory of Optimal Load Transmission by Flexure // Advances in Applied Mechanics Volume 16, 1976, pp.183–308
- [25]. Rosen A., Sabag M., Givoli M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system—I. Theoretical derivations // Computers & Structures, Volume 61, Issue 4 - 1996. pp. 617-632.
- [26]. Robert A. Heller. Mechanics of Structures // Encyclopedia of Physical Science and Technology (third edition) - 2003. pp. 259-278
- [27]. John D. Renton. Chapter 15 - Regular Structures // Elastic Beams and Frames (Second Edition) - 2002. pp. 15.1 -15.36
- [28]. Bondarev A., Yugov A. The Method of Generating Large-span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence // Procedia Engineering, Volume 117 - 2015. pp. 948-958
- [29]. Garifullin M.R., Semenov S.A., Belyayeva S.V., Poryvayev I.A., Safiullin M.N., Semenov A.A. Poisk ratsionalnoy geometricheskoy skhemy prostranstvennoy metallicheskoj konstruktsii pokrytiya bolsheproletnogo sportivnogo sooruzheniya. Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. ISSN 2304-6295. 2 (17). 2014. pp.107-124

Мущанов А.В., Мущанов В.Ф., Роменский И.В. Влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние элементов структурного покрытия // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №1 (40). С. 7-19.

Mushchanov A.V., Mushchanov V.F., Romensky I.V. The impact of support on the compliance of the stress-strain state of structural elements covering. Construction of Unique Buildings and Structures, 2016, 1 (40), Pp. 7-19. (rus)