УДК624.042:624.071.02

DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.03

М. А. КАЛЬМОВА А. Д. АХМЕДОВ Г. А. ТЮМЧЕНКОВА Ж. М. КУСАЕВА

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВУХПОЯСНЫХ РАДИАЛЬНО-ВАНТОВЫХ СИСТЕМ

TO THE ISSUE OF DESIGNING TWO-BELT RADIAL-CABLE SYSTEMS

Рассматривается задача построения двухпоясных радиально-вантовых систем покрытия. Определяется конфигурация опорного контура в случае изменения формы и материала стержней. Исследуется напряженно-деформированное состояние системы. Рассмотрено два случая загружения покрытия временной нагрузкой и проведен анализ влияния характера загружения покрытия на напряженно-деформированное состояние системы.

Ключевые слова: шарнирно-стержневая система, опорный контур, радиально-вантовые системы, напряженно-деформированное состояние

Введение

В настоящее время в современном строительстве вантовые конструкции находят широкое применение ввиду их легкости и экономичности. Традиционно вантовые системы используются при строительстве мостов, рынков, строительных комплексов, выставочных центров и других сооружений большой площади, где невозможна установка промежуточных опор и обеспечена свободная планировка пространства. Кроме того, они широко используются в дизайнерских решениях и архитектуре. Работая на растяжение и передавая нагрузки фундаментам и опорам, вантовые системы могут удерживать огромный вес, так как являются геометрически неизменяемыми конструкциями [1, 2].

Формулировка проблемы

На основании проведенного анализа обзора литературы было выявлено, что проектирование вантовых систем является актуальной задачей. Двухпоясные вантовые системы относятся к числу основных несущих элементов облегченных строительных конструкций большепролетных покрытий зданий и сооружений. The problem of construction of two-belt radial-cable coating systems is considered. The configuration of the supporting contour is determined in the event of a change in the shape and material of the rods. Stressstrain state of the system is investigated. Two cases of loading the coating with a temporary load were considered and an analysis of the effect of the nature of loading the coating on the stress-strain state of the system was carried out.

Keywords: hinge-rod system, support contour, radial-cable systems, stress-strain state

В связи с этим в настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с проектированием опорного контура двухпоясных радиально-вантовых систем покрытия, описывается влияние характера загружения покрытия временной нагрузкой на напряженно-деформированное состояние системы. Для выполнения расчетов приняты следующие обозначения:

Н₁ - горизонтальная составляющая усилия в несущем тросе; Н, – то же в стабилизирующем тросе; *H* – суммарное усилие предварительного натяжения ($\bar{H} = \bar{H}_1 + \bar{H}_2$); f_1 – начальная стрелка несущего троса; $k = f_2/f_1$ – отношение стрелок стабилизирующего и несущего тросов; $t = R_1 / R_2$ – отношение жесткостей несущего и стабилизирующего тросов; q, p – постоянная и временная нагрузки соответственно; W – прогиб; EI – жесткость опорного кольца; М – изгибающий момент в опорном кольце; и – горизонтальное радиальное перемещение точек опорного контура; е – пролет радиального элемента; R – суммарная жесткость тросов ($R = R_1 + R_2$); r -радиус опорного кольца; $\stackrel{*}{H} = \frac{\overline{H}}{R}, \quad f_1 = \frac{f_1}{l}, \quad P = \frac{P}{R}, \quad q = \frac{q}{R}, \quad EI = \frac{EII}{Rr^3}, \quad M = \frac{M}{Rl}, \quad W = \frac{W}{l},$ $u = \frac{u}{l}$ – безразмерные величины.

Градостроительство и архитектура | 2024 | Т. 14, № 4

Опорный контур

Для анализа напряженно-деформированного анализа системы было рассмотрено две схемы опорного контура:

• железобетонный опорный контур с поперечным сечением прямоугольного вида;

• металлический опорный контур – двутаврового сечения [3].

Далее на основании численного исследования составлена сравнительная таблица коэффициентов роста изгибающих моментов в опорном контуре при увеличении его жесткости в *n* раз при различном предварительном напряжении (табл. 1, рис. 1). Значения, указанные в таблице, показывают интервалы изменения этих коэффициентов в зависимости от абсолютных значений жесткостей опорного контура.



Рис.1. Радиальные предварительно напряженные радиально-вантовые системы Fig.1. Radial prestressed radialcable-stayed systems

Таблица 1. Сравнительная таблица коэффициентов роста изгибающих моментов в опорном контуре Table 1. A comparative table of the growth coefficients of bending moments in the reference contour

Вид сечения		\overline{H}	
		0,0027	0,0013
Прямоугольное		1,23-1,45	1,39-1,45
	4	1,53-2,05	1,50-2,00
	n8	2,00-2,70	2,06-2,70
b	16	2,92-3,50	3,00-3,44
Двутавровое		4,10-4,40	4,20-4,50
h	64	5,30-5,50	5,30-5,50
	128	6,80-7,00	7,00-7,20

Примечание. n – коэффициент роста изгибающих моментов в опорном контуре при увеличении его жесткости в n pas; \overline{H} – суммарное усилие предварительного натяжения.

Из анализа графика величины максимальных изгибающих моментов в опорном кольце от его жесткости (рис. 2) можно отметить, что коэффициенты роста изгибающих моментов практически не зависят от величины предварительного напряжения \overline{H} в системе, хотя сами величины изгибающих моментов с ростом \overline{H} увеличиваются.



Рис.2. График зависимости величины максимальных изгибающих моментов в опорном кольце от его жесткости Fig.2. Graph of the dependence of the maximum bending moments in the support ring on its stiffness

Железобетонный опорный контур прямоугольного сечения

Расчет на прочность внецентренно-сжатого прямоугольного сечения производим согласно СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции».

Армирование контура принимаем симметричным, так как изгибающие моменты, возникающие в опорном контуре, знакопеременны и близки по абсолютной величине.

Рассмотрим два случая работы железобетонных элементов.

1. Случай малых эксцентриситетов.

Площадь арматуры рассчитываем по формуле

$$A_{a} = A_{a}^{'} = \frac{Ne}{R_{a}z_{a}} - \frac{0.4R_{u}bh_{0}^{2}k}{R_{a}z_{a}}.$$
 (1)

Приближенно принимаем $z_a = h_0 = h$ и полагаем также, что площадь сечения есть величина, не зависящая от изгибной жесткости опорного контура. Это допущение вполне правомерно, так как площадь сечения опорного контура в основном определяется величиной нормальной силы, которая практически не меняется в зависимости от изгибной жесткости опорного контура. Тогда в формуле (1) второй член не зависит от жесткости опорного контура, а величина площади арматуры зависит от первого члена, который принимает вид ($M / R_a h$). Так как для прямоугольных сечений отношение высот λ с одинаковой площадью равно квадратному корню из отношения моментов инерции $\lambda = \sqrt{n}$, то увеличение жесткости сечения в n раз приводит к увеличению площади арматуры

в $\frac{a_n}{\sqrt{n}}$, где a_n – коэффициент роста изгибающих моментов, взятый из табл. 1, в зависимости от величин *n* [3, 4].

Таблица 2. Значения величин $\frac{a_n}{\sqrt{n}}$

Table 2. The values of the quantities $\frac{a_n}{\sqrt{n}}$

п	1	2	4	8	16
\sqrt{n}	1	1,41	2	2,82	4
$\frac{a_n}{\sqrt{n}}$	1	0,87-1,03	0,77-1,03	0,71-0,96	0,73-0,87

Из таблицы следует, что при отношении сторон больше 2 оказывается выгоднее разбивать прямоугольное сечение по горизонтали. Если же принять во внимание тот факт, что с уменьшением жесткости опорного контура возрастают перемещения контура и моменты в колоннах (см. рис. 2), то можно рекомендовать во всех случаях сечение, развитое в горизонтальном направлении (рис. 3).



2. Случай больших эксцентриситетов. Площадь арматуры вычисляем по формуле

$$A_{a} = A_{a}^{'} = \frac{N(e - h_{0} + \frac{N}{2R_{u}b})}{R_{z}} = \frac{Ne}{R_{z}} - \frac{Nh_{0}}{R_{z}} + \frac{N^{2}}{2R_{u}bR_{z}}.$$
 (2)

Так же как и в первом случае, принимаем $z_a = h_0 = h$ и, считая площадь сечения и величину нормальных сил не зависящими от жесткости опорного контура, приходим к заключению, что все оценки, полученные для случая малых эксцентриситетов, сохраняют силу и для случая больших эксцентриситетов. Из вышеска-занного можно сделать вывод о том, что при проектировании железобетонного опорного контура двухпоясных радиально-вантовых систем кругового очертания в плане рекомендуются сечения, развитые в горизонтальном направлении [4].

Металлический опорный контур двутаврового сечения

Максимальные краевые напряжения в сечении определяем по формуле

$$\sigma = -\frac{N}{A} - \frac{M}{W} = -\frac{N}{A} - \frac{Mh}{2I}.$$
(3)

В данном случае коэффициент увеличения краевых напряжений будет равен ($a_n\lambda / n$). Для того чтобы этот коэффициент был всегда меньше единицы, требуется, чтобы соотношение высот было $\lambda < 7,3$ (для сварных двутавров $\lambda < 4,4$). Отсюда можно сделать вывод, что в большинстве случаев и для двутавров понижение жесткости опорного контура за счет развития по вертикали нецелесообразно.

При исследовании вопроса о жесткости опорного контура и выборе оптимального сечения контура расчетным состоянием было бы некоторое состояние с максимальными значениями изгибающих моментов и соответствующими значениями нормальных сил. Но при малых жесткостях опорного контура (при выполнении его из стали) может оказаться, что опасным будет состояние с минимальными изгибающими моментами и максимальной нормальной силой, например состояние при полном загружении покрытия временной нагрузкой. В этом случае краевые напряжения будем определять по формуле

$$\overset{*}{\sigma} \overset{*}{=} -N - \beta M, \qquad (4)$$

Рис. 3. График зависимости величины максимального перемещения опорного кольца от его жесткости Fig. 3. Graph of the dependence of the maximum displacement of the support ring on its stiffness

где
$$\overset{*}{\sigma} = \frac{\sigma A}{R}, \overset{*}{M} = \frac{M}{R \cdot e}, \beta = \frac{Ahe}{2I}.$$

Выражение для момента инерции сечения можно представить в виде $I = \alpha A h^2$, тогда $\beta = \frac{1}{2\alpha h^*}$, где $h^* = \frac{h}{e}$. В прямоугольном сечении $\alpha = 0.085$.

Анализ двутавровых сечений, близких по моментам инерций к применяемым в качестве опорных колец вантовых систем, показал, что а меняется в незначительных пределах и его можно положить равным α = 0,17 (анализ был проведен для сварных двутавров). Величина *h*^{*} для осуществленных покрытий колеблется в небольших пределах 0,060-0,062. Для дальнейшего анализа примем значение h^* = 0,062, тогда $\beta = 48,5, \sigma = -N - 48.5 M$. Полученные по формуле (4) значения напряжений представлены на графике зависимости величины максимального краевого нормального напряжения в кольце от величины сектора загружения временной нагрузкой (рис. 4). Из анализа графика можно сделать вывод о том, что расчетным состоянием опорного контура является загружение временной нагрузкой сектора покрытия с центральным углом 315°, а также близким к нему является загружение сектора с углом 45°, при котором изгибающие моменты достигают своего максимального значения. При полном загружении покрытия временной нагрузкой значение краевого напряжения минимально [3, 4].



Рис. 4. График зависимости величины максимального краевого нормального напряжения в кольце от величины сектора загружения временной нагрузкой Fig. 4. Graph of the dependence of the value

of the maximum marginal normal voltage in the ring on the value of the time load sector

Влияние характера загружения покрытия временной нагрузкой на напряжённо-деформированное состояние системы

Напряженно-деформированное состояние покрытия вантовых систем во многом зависит от характера нагружения нагрузкой. На рис. 5 представлен график зависимости величины максимального усилия в несущих тросах системы от величины сектора загружения временной нагрузкой. Величина наибольшего усилия в несущих тросах достигает своего максимального значения не при полном загружении покрытия временной нагрузкой, а при загружении временной нагрузкой сектора покрытия с центральным углом, равным 315°. Причём величина этого угла практически не зависит от жёсткости опорного контура. Величина минимального усилия стабилизирующих тросов достигает своего наименьшего значения также не при полном загружении покрытия временной нагрузкой.



Рис. 5. График зависимости величины максимального усилия в несущих тросах системы от величины

сектора загружения временной нагрузкой Fig. 5. Graph of the dependence of the maximum force in the load-bearing cables of the system on the size

of the loading sector with a temporary load

На рис. 6 представлен график зависимости величины минимального усилия в стабилизирующих тросах системы от величины сектора загружения временной нагрузкой одного сектора величина центрального угла зависит от жёсткости опорного контура и принимает значение 270° (при ЕГ ≥ 10⁻³) или 45° (при ЕГ ≤ 10⁻³), причём величина этого угла мало зависит от предварительного напряжения.

Величина изгибающих моментов в кольце и колоннах в реальном диапазоне жесткостей опорного контура достигает своего максимального значения (по абсолютной величине) при загружении сектора с центральным углом от 15 до 75° в зависимости от жёсткости опорного контура (рис. 7). Следует отметить, что моменты в опорном кольце растут с увеличением жёсткости, а в колоннах падают.

Из графика (рис. 8) видно, что величина максимальной нормальной силы в кольце растёт с увеличением площади загружения временной нагрузкой. При увеличении всей нагрузки на покрытие в два раза (полное загружение покрытия временной нагрузкой p^{*} = q^{*}) нормальная сила увеличивается на 30 – 50 %



Рис. 6. График зависимости величины минимального усилия в стабилизирующих тросах системы от величины сектора загружения временной нагрузкой

Fig. 6. Graph of the dependence of the value of the minimum force in the stabilizing cables of the system on the size of the loading sector with a temporary load



Рис. 7. График зависимости величины максимального изгибающего момента от величины сектора загружения временной нагрузкой Fig.7. Graph of the dependence of the value of the maximum bending moment on the value of the loading sector with a temporary load

в зависимости от величины предварительного напряжения. Это объясняется нелинейностью системы (величина суммарного распора растёт медленнее нагрузки).

Также был проведен анализ напряженно-деформированного состояния при загружении покрытия накрест лежащей временной нагрузкой. Такое загружение является опасным с точки зрения потери устойчивости системы, так как способно вызвать большее падение усилия в стабилизирующих тросах в сравнении с загружением нагрузкой одного сектора (рис. 9).

Из анализа графика зависимости величины максимального прогиба от величины сектора загружения временной нагрузкой (рис. 10) видно, что величина максимальных вертикальных прогибов в системе достигает своего наибольшего значения при величине центрального угла, из-



Рис. 8. График зависимости величины максимального перемещения опорного кольца от величины сектора загружения временной нагрузкой Fig. 8. Graph of the dependence of the maximum displacement of the support ring on the size of the time load sector



Рис. 9. График зависимости максимальной величины нормальной силы в кольце от величины сектора загружения временной нагрузкой

Fig. 9. Graph of the dependence of the maximum value of the normal force in the ring on the value of the time load sector



Рис. 10. График зависимости величины максимального прогиба от величины сектора загружения временной нагрузкой Fig. 10. Graph of the dependence of the maximum deflection value on the size of the time load sector

меняющегося в зависимости от жёсткости опорного контура от 90° (при малых жесткостях) до 180° при недеформируемом опорном контуре.

Заключение

На основании анализа результатов численного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Расчётная схема загружения временной нагрузкой определяется в зависимости от вида расчёта на прочность, устойчивость и деформативность, а также вида элемента (вантовые системы, опорный контур) и жёсткости контура. Принимаемые за расчётные схемы загружения – полное загружение покрытия временной нагрузкой и загружение половины покрытия не являются наиболее опасными видами загружения.

2. При величине отношения интенсивности временной и постоянной нагрузки (p / q) < 1 расчётные величины усилий и прогибов системы определяются при загружении временной нагрузкой части покрытия с центральным углом, величина которого может быть принята:

 при расчёте на прочность вантовой системы и металлического опорного кольца – 315°;

железобетонного опорного кольца – 45°;

 при расчёте на устойчивость (накрест лежащая нагрузка) – 45°;

при расчёте на деформации вант – 180°.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедов А.Д. К вопросу синтеза мгновенно-жестких шарнирно-стержневых систем // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. ст. / под ред. М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара, 2022. С. 441–449.

2. Ахмедов А.Д. К расчету мгновенно-жестких шарнирно-стержневых систем с недостающими связями // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, №2. С. 4–8. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.1.

 Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 2010.
 Зыков А.А. Теория конечных графов. Новосибирск: Наука, 2010.

REFERENCES

1. Akhmedov A.D. On the issue of synthesis of instantaneous rigid hinge-rod systems. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'nye tehnologii: sb. st. / pod red. M.V. Shuvalova, A.A. Pishhuleva, A.K. Strelkova* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technology: Sat. Art ./ed. M.V. Shuvalova, A.A. Pishchuleva, A.K. Strelkova]. Samara, 2022, pp. 441–449. (In Russian).

2. Akhmedov A.D. To the calculation of instantaneous rigid hinge-rod systems with missing connections. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban planning and architecture], 2018, vol. 8, no. 2, pp. 4–8. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.1

3. Gantmacher F.R. *Teorija matric* [Matrix Theory]. Moscow, Nauka, 2010.

4. Zykov A.A. *Teorija konechnyh grafov* [Finite graph theory]. Novosibirsk, Nauka, 2010.

Об авторах:

КАЛЬМОВА Мария Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

АХМЕДОВ Акрамджон Давлатович

старший преподаватель кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

ТЮМЧЕНКОВА Галина Александровна

старший преподаватель кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

КУСАЕВА Жанна Маратовна

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

KALMOVA Maria Al.

PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Structural Mechanics, Engineering Geology, Foundations and Foundations Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244

AKHMEDOV Akramjon D.

Senior Lecturer of the Structural Mechanics, Engineering Geology, Foundations and Foundations Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244

TYUMCHENKOVA Galina Al.

Senior Lecturer of the Structural Mechanics, Engineering Geology, Foundations and Foundations Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244

KUSAEVA Zhanna M.

PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Structural Mechanics, Engineering Geology, Foundations and Foundations Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogyardeyskaya st., 244

Для цитирования: Кальмова М.А., Ахмедов А.Д., Тюмченкова Г.А., Кусаева Ж.М. К вопросу проектирования двухпоясных радиально-вантовых систем // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 4. С. 18–24. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.03.

For citation: Kalmova M.A., Akhmedov A.D., Tyumchenkova G.A., Kusaeva J.M. To the issue of designing twobelt radial-cable systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 4, pp. 18–24. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.03.