

DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-6-5-11

*Ахтямова Л.Ш., магистрант,
Сабитов Л.С. *, кандидат технических наук, доцент,
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия,
Маилян А.Л., кандидат технических наук, доцент,
Маилян Л.Р., доктор технических наук, профессор,
Донской государственный технический университет, Россия,
Радайкин О.В., кандидат технических наук,
Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия*
*Ответственный автор E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ФУНДАМЕНТА ПОД ВЫСОТНОЕ СООРУЖЕНИЕ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Аннотация: в работе предложен новый тип модульного сборно-разборного железобетонного фундамента под стальную опору для различного типа сооружений: линий электропередач, ветроэлектрических установок, рекламных щитов, светофоров и т.п. Фундамент имеет в плане форму креста-молота и состоит из отдельных модулей, изготавливаемых на заводе и соединяемых между собой бетонными шпонками и стяжными болтами на строительной площадке. При этом такой технологический подход позволяет получать более стабильные (однородные) прочностные и деформационные свойства как отдельного модуля, так и собранного фундамента в целом. Снижение материалоемкости достигается за счёт образования полости в каждом типовом модуле и заполнения её местным инертным материалом (грунтом). Центральный модуль имеет анкерное устройство для стыкования с опорой по типу фланцевого соединения. Это устройство наряду с применением обычных анкерных болтов предполагает заливку центрального модуля безусадочным быстротвердеющим сталефибробетоном. Таким образом, положительный результат предлагаемого решения заключается в повышении несущей способности фундамента в целом, увеличении прочности и жесткости его основных соединений, а также упрощении монтажа в сопоставлении с традиционными подходами к конструированию. Сравнительный расчёт фундаментов предлагаемого и типового известного решения показал эффективность первого не менее, чем на 17,2%.

Ключевые слова: фундамент, железобетон, модульность, оптимизация, соединение паз-гребень

Введение

По праву фундамент – основной элемент любого сооружения, который отвечает за его конструктивную безопасность в целом. При этом себестоимость его изготовления в структуре общей стоимости сооружения может достигать 50% и более. Это в большей степени характерно для фундаментов под стальные опоры линий электропередач, ветроэлектрических установок, рекламных щитов, светофоров и т.п. Поэтому задача, связанная с поиском оптимальных конструктивных решений фундаментов под перечисленные сооружения, является актуальной.

Методы и материалы

Получение оптимальной конструкции фундамента в работе основывается на следующих принципах:

- 1 – сборка фундамента на строительной площадке из отдельных типовых модулей, изготавливаемых в заводских условиях; это позволяет получать более стабильные (однородные) прочностные и деформационные свойства как отдельного модуля, так и собранного фундамента в целом;
- 2 – снижение материалоемкости за счёт образования полости в каждом модуле и заполнения её местным инертным материалом (грунтом);
- 3 – распределение массы фундамента в плане в соответствии с действием максимальных усилий (создание фундамента, имеющего в плане сечение типа крест-молот);
- 4 – снижение трудозатрат на этапе изготовления на заводе или полигоне за счёт использования высокопроизводительных машин и механизмов без трудоемких ручных операций;
- 5 – снижение трудозатрат на этапе монтажа без участия специальных грузоподъёмных механизмов, что обеспечивается небольшим весом отдельного модуля, который можно монтировать вручную.

Результаты и обсуждения

В патенте [1] предложено конструктивное решение фундамента под опоры рекламных щитов. Он представляет собой призматический железобетонный объём, изготавливаемый в сборном либо монолитном варианте. Фундамент снабжается анкерными болтами для стыкования с опорой. Недостаток этого решения состоит в высокой материалоемкости и относительно больших размерах, что существенно увеличивает издержки на транспортировку и монтаж.

Более эффективным выглядит фундамент, состоящий из отдельных полых модулей – коробов [2]. Смежные модули стягиваются друг с другом болтами. Центральный модуль содержит специальное анкерное устройство для стыкования с опорой. Для повышения устойчивости конструкции в целом полости модулей заполняются инертным материалом (местным грунтом). Это решение в статье принято в качестве аналога. Но и оно имеет недостатки:

- небольшой момент сопротивления площади фундамента из-за нерационального распределения материала относительно центра тяжести конструкции;
- высокая трудоёмкость и податливость соединения модулей между собой;
- невысокая надёжность стыка опоры с фундаментом.

В связи с этим целью данной работы является устранение перечисленных недостатков за счёт: повышение несущей способности модульного бетонного фундамента под опору в целом, увеличение прочности и жесткости его основных соединений, а также упрощение монтажа фундамента.

Для достижения этого предложены следующие три усовершенствования конструкции фундамента:

- расположение бетонных модулей относительно друг друга в плане принято таким образом, чтобы они образовывали сечение в виде «крест-молота» [3], у которого момент сопротивления больше, чем у прямоугольного сечения при одинаковой площади [4];

- на внешней поверхности двух смежных бетонных граней каждого модуля изготовлены вертикальные гребни, на двух других смежных гранях – вертикальные пазы; они необходимы для стыкования со соответствующими пазами и гребнями других модулей, при этом вертикальные пазы каждого модуля ограничены снизу горизонтальными перегородками – ограничителями монтажа; это упрощает центрирование и совмещение друг с другом отдельных модулей при монтаже и обеспечивает высокую прочность и жёсткость их соединения между собой;

- центральный модуль, который содержит анкерное устройство для стыкования с опорой, заполняется безусадочным быстротвердеющим сталефибробетоном, что заметно повышает прочность и жёсткость данного стыка за счёт высоких эксплуатационных качеств сталефибробетона [5].

Конструкция предлагаемого фундамента показана на рис. 1-4.

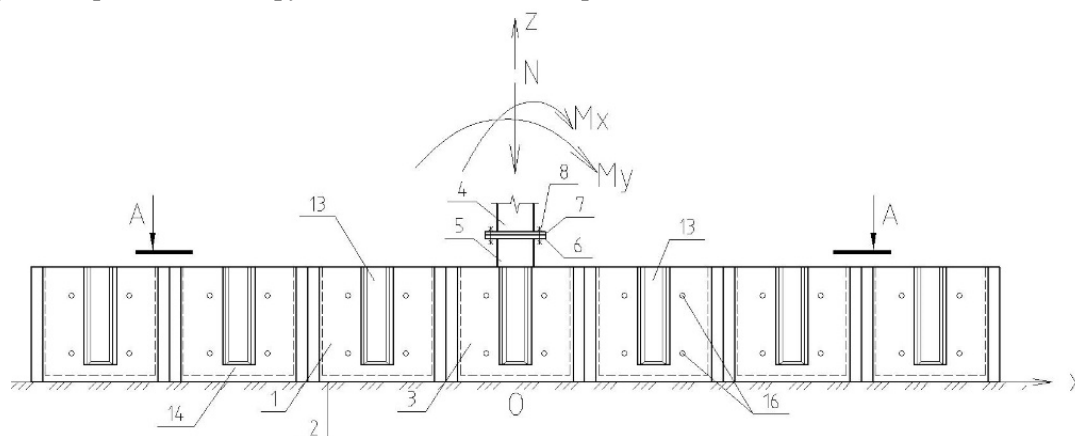


Рис. 1. Фронтальный вид модульного фундамента под опору со схемой приложения нагрузок
Fig. 1. Front view of modular foundation for support with load application diagram

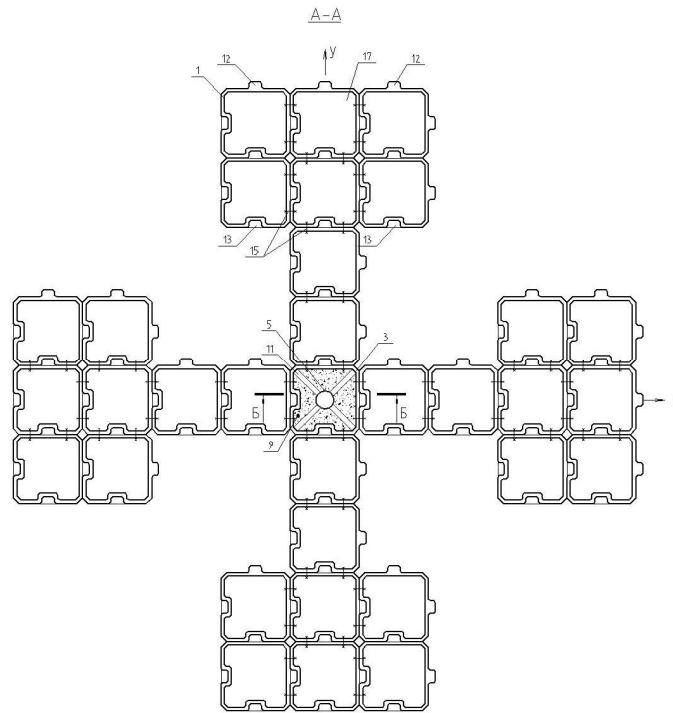


Рис. 2. Вид сверху
Fig. 2. Top view

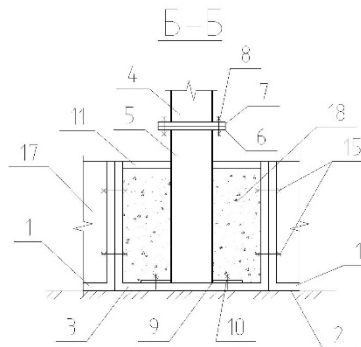


Рис. 3. Центральный модуль в месте стыковки опоры и фундамента
Fig. 3. Central module in place of support and foundation connection

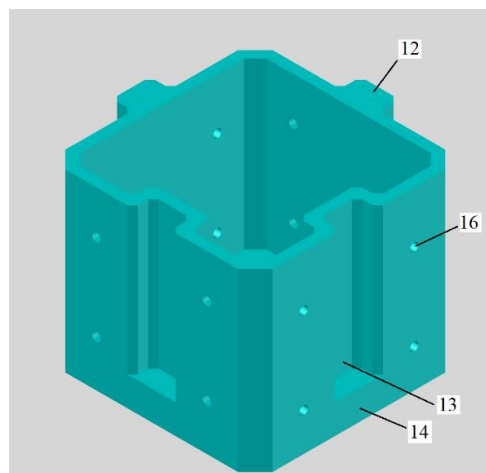


Рис. 4. Изометрический вид рядового модуля
Fig. 4. Isometric view of row module

На рис. 1 изображен общий вид фундамента; на рис. 2 показан продольный разрез; на рис. 3 показано сечение по центральному модулю; на рис. 4 показана аксонометрия типового модуля. Обозначения, принятые на рисунках: 1 – типовой модуль; 2 – грунтовое основание; 3 – опорный модуль; 4 – стальная опора; 5 – полый ствол анкерного устройства; 6 – верхний фланец; 7 – болтовая стяжка; 8 – ответный фланец; 9 – нижний фланец; 10 – анкерные болты; 11 – стальные распорки; 12 – вертикальные бетонные выступы; 13 – вертикальные пазы в бетонных гранях; 14 – горизонтальные перегородки – ограничители монтажа; 15 – крепёжные болты; 16 – отверстия под болты; 17 – обратная засыпка инертным материалом (грунтом); 18 – заполнение безусадочным быстротвердеющим сталефибробетоном [2].

Расчёт фундамента предлагаемого типа может быть осуществлён на основе компьютерного моделирования системы «грунт основания – фундамент – стальная опора» в ПК Ansys [6, 7] с применением диаграмм состояния бетона [8, 9]. Технология изготовления и свойства фтбробетона, используемого для крепления опоры с фундаментом описана в работе [2, 10].

Состоятельная оценка эффективности бетонного модульного фундамента предлагаемого типа может получиться при сравнении его с аналогом, имеющим в плане прямоугольное (как частный случай квадратное) сечение подошвы. Такая оценка может быть получена двумя путями:

1 – при равенстве моментов сопротивления сечения подошвы фундаментов обоих типов $W_{x,1} = W_{x,2}$ у наиболее эффективного площадь сечения подошвы окажется меньше ($A_{f1} < A_{f2}$), что будет свидетельствовать о пониженном расходе материалов на его изготовление;

2 – при одинаковой площади сечения подошвы фундаментов обоих типов $A_{f1} = A_{f2}$ (одинаковом расходе материалов на изготовление) у наиболее эффективного момент сопротивления подошвы окажется больше ($W_{x,1} > W_{x,2}$).

Обозначим размеры фундаментов того и другого типа как b_{f1} , l_{f1} и b_{f2} , l_{f2} соответственно. Размер модуля через a .

При этом количество модулей, требуемых на образование длинной стороны модульного фундамента нового типа равно n_l , короткой – n_b ; количество модулей на каждый «костыль» сечения креста-молота равно n_k , количество рядов в каждом «костыле» – n_r .

Пусть размеры сечения фундаментов в двух взаимно перпендикулярных направлениях равны. Тогда площадь сечения подошвы равна:

– для фундамента нового типа $A_{f1} = a(b_{f1} + l_{f1}) - a^2 + 4n_k a^2$;

– для существующего аналога $A_{f2} = b_{f2} l_{f2}$.

Моменты сопротивления для них равны:

$$- W_{x,1} = \frac{al_{f1}^2}{6} + \frac{(b_{f1} - a)a^3}{6l_{f1}} + \frac{4n_k}{l_{f1}} \left[\frac{n_r^2 a^4}{12} + a^2 \left(\frac{l_{f1} - n_r a}{2} \right)^2 \right] + \frac{4n_k}{l_{f1}} \left[\frac{n_r a^4}{12} + a^2 \left(\frac{n_k a}{4n_r} + \frac{a}{2} \right)^2 \right];$$

$$- W_{x,2} = \frac{b_{f2} l_{f2}^2}{6}.$$

В качестве примера на рис. 5 рассмотрен фундамент с сечением крест-молот, состоящий из 49 модулей. Его квадратный аналог, состоящий из такого же количества модулей (то есть с такой же площадью подошвы), будет иметь габариты в плане 7×7 модулей.

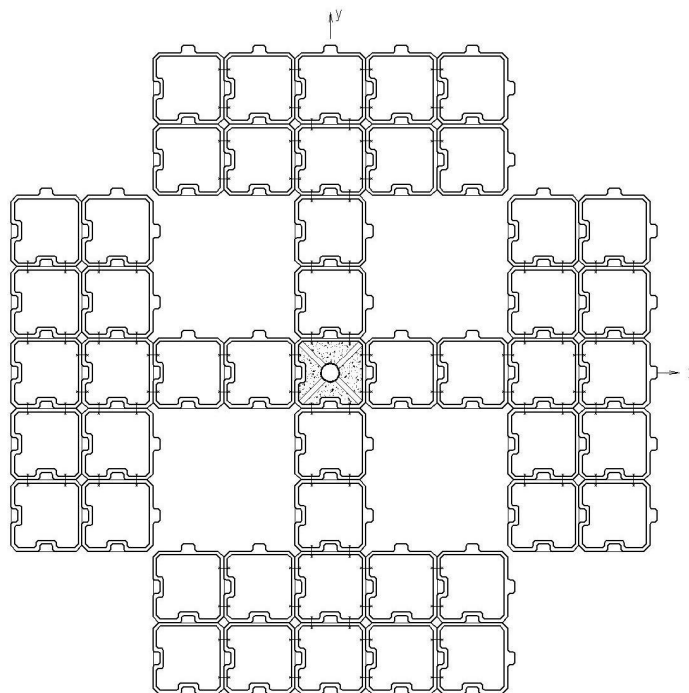


Рис. 5. Фундамент предлагаемого типа, состоящий из 49 модулей
Fig. 5. Proposed type of foundation consisting of 49 modules

Габаритные размеры фундаментов равны:

1 тип – $b_{f1} = l_{f1} = 9a = 9 \cdot 0,6 = 5,4 \text{ м}$;

2 тип – $b_{f2} = l_{f2} = 7a = 7 \cdot 0,6 = 4,2 \text{ м}$.

Площади подошвы равны:

1 тип – $A_{f1} = 0,6 \cdot (5,4 + 5,4) - 0,6^2 + 4 \cdot 8 \cdot 0,6^2 = 17,64 \text{ м}^2$; либо $A_{f1} = 49a^2 = 49 \cdot 0,6^2 = 17,64 \text{ м}^2$;

2 тип – $A_{f2} = 4,2 \cdot 4,2 = 17,64 \text{ м}^2$.

Соответствующие моменты сопротивления равны:

$$W_{x,1} = \frac{0,6 \cdot 5,4}{6} + \frac{(5,4 - 0,6) \cdot 0,6^3}{6 \cdot 5,4} + \frac{4 \cdot 8}{5,4} \cdot \left[\frac{2^2 \cdot 0,6^4}{12} + 0,6^2 \cdot \left(\frac{5,4 - 2 \cdot 0,6}{2} \right)^2 \right] +$$

$$+ \frac{4 \cdot 8}{5,4} \cdot \left[\frac{2 \cdot 0,6^4}{12} + 0,6^2 \cdot \left(\frac{12 \cdot 0,6}{4 \cdot 2} + \frac{0,6}{2} \right)^2 \right] = 14,468 \text{ м}^3$$

$$- W_{x,2} = \frac{4,2 \cdot 4,2^2}{6} = 12,348 \text{ м}^3.$$

Таким образом, имеем $\frac{W_{x,1}}{W_{x,2}} = \frac{14,468}{12,348} = 1,172$ – во столько раз (на 17,2%) несущая способность

фундамента предлагаемого типа выше, чем у его аналога при одном и том же расходе материалов. Это значение будет тем больше, чем дальше будут распределены засечки на концах сечения креста-молота, что возможно, однако, лишь до определённого предела, обусловленного прочностью обеих перекладин креста-молота.

Другим преимуществом предлагаемого фундамента является повышенная сопротивляемость соединения модулей сдвиговым усилиям за счёт образования бетонной шпонки.

Пусть сечение бетонной шпонки (выступа) $h_{ш} \times b_{ш}$, то сдвигающее усилие, которое может она воспринять, равно $T = R_{sh} b_{ш} h_{ш}$, $R_{sh} \approx 2R_{bt}$, где R_{sh}, R_{bt} – соответственно прочность бетона на срез и на

растяжение. Эквивалентный диаметр болтов, которые способна заменить шпонка равен $d_{sw} = \sqrt{\frac{2R_{bt} b_{ш} h_{ш} n_s}{4\pi R_{sw}}}$.

Для примера рассмотрим, что модули изготавливаются из бетона класса В25 с $R_{bt} = 1,05 \text{ МПа}$, имеют выступы (шпонки) размером $h_{ш} \times b_{ш} = 820 \times 220$ мм. Модули скрепляются четырьмя болтами ($n_s = 4$) из расчётов на срез, смятие и на растяжение. Болты изготовлены из стали класса 4.6 с $R_{sw} = 170 \text{ МПа}$. Тогда эквивалентный диаметр равен $d_{sw} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,05 \cdot 0,22 \cdot 0,82 \cdot 2}{4 \cdot 3,14 \cdot 170}} \cdot 10^3 = 18,8 \approx 18 \text{ мм}$.

Выводы

Предложен новый тип модульного железобетонного фундамента под стальную опору для различного типа сооружений: линий электропередач, ветроэлектрических установок, рекламных щитов, светофоров и т.п. Технический результат состоит в повышении несущей способности фундамента в целом, увеличении прочности и жесткости его основных соединений, а также упрощении монтажа фундамента. Сравнительный расчёт несущей способности фундаментов предлагаемого и типового известных решений показал эффективность первого не менее, чем на 17,2%.

Литература

1. Пат. 2243596, Российская Федерация, МПК G09F 15/00. Рекламный щит / И.Л. Кузнецов, Г.Н. Шмелев, А.В. Исаев, М.В. Козлов; заявитель и патентообладатель КГАСА. №2003109272/12; заявл. 01.04.2003, опубл. 27.12.2004. Бюл. №36. 7 с.
2. Пат. 2625060, Российская Федерация, МПК E02D27/42, Сборно-разборный фундамент под опору / И.Л. Кузнецов, Д.М. Хусаинов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КГАСУ. №2003109272/12; заявл. 11.12.2017, опубл. 04.03.2019. Бюл. №20. 5 с.
3. Костыльный крест [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Костыльный_крест (дата обращения: 01.01.2020)
4. Писаренко Г.С. Сопrotivление материалов. Киев: Изд-во «Вища школа», 1986. 775 с.
5. Влияние резанной из листа стальной фибры на прочность цементных композитов / М.Г. Габидуллин, Р.З. Рахимов, Л.Р. Бадретдинов, А.Н. Габидуллина и др. // Вестник Казанского технологического университета. 2013. N17. С. 51 – 56.
6. Исследование совместной работы стальной стойки-опоры и сборного железобетонного фундамента экспериментальным методом и с применением математического МКЭ-моделирования / Л.С. Сабитов, И.Л. Кузнецов, И.Р. Бадретдинов, О.В. Радайкин // Вестник гражданских инженеров. 2018. N6 (71). С. 37 – 44.
7. Сравнительный анализ статической работы различных типов стальных опор линий электропередач на основе компьютерного моделирования системы «опора-фундамент-грунт основания» / Ю.М. Стрелков, О.В. Радайкин, Л.С. Сабитов, И.Л. Кузнецов // Строительная механика и расчёт сооружений. 2019. N1. С. 71 – 79.
8. Радайкин О.В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости // Вестник гражданских инженеров. 2017. N6. С. 71 – 78.
9. Маилян Л.Р. Иващенко Е.И. Действительные диаграммы деформирования бетона при сжатии и экспериментальные и теоретические способы их построения // Вестник РГСУ. 2006. N4. С. 128 – 132.
10. Челночная технология изготовления фибробетона с агрегированным распределением фибр и его конструктивные свойства / Л.Р. Маилян, А.В. Налимова, А.Л. Маилян, Э.С. Айвазян // Инженерный вестник Дона. 2011. N4 (18). С. 573 – 580.

References

1. Patent 2243596, Rossijskaya Federaciya, MPK G09F 15.00. Reklamnyj shchit. I.L. Kuznecov, G.N. SHmelev, A.V. Isaev, M.V. Kozlov; zayavitel' i patentoobladatel' KGASA. №2003109272.12; zayavl. 01.04.2003, opubl. 27.12.2004. 36. 7 p. (rus)
2. Patent 2625060, Rossijskaya Federaciya, MPK E02D27.42, Sbornno-razbornyj fundament pod oporu. I.L. Kuznecov, D.M. Husainov; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO KGASU. №2003109272.12; zayavl. 11.12.2017, opubl. 04.03.2019. 20. 5 p. (rus)
3. Kostyl'nyj krest [Elektronnyj resurs]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Kostyl'nyj_krest (data obrashcheniya: 01.09.2019) (rus)
4. Pisarenko G.S. Soprotivlenie materialov. Kiev: Izd-vo «Vishcha shkola», 1986. 775 p. (rus)
5. Gabidullin M.G., Rahimov R.Z., Badretdinov L.R., Gabidullina A.N. Vliyanie rezannoj iz lista stal'noj fibry na prochnost' cementnyh kompozitov. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2013. 17. P. 51 – 56. (rus)

6. Sabitov L.S., Kuznecov I.L., Badretdinov I.R., Radajkin O.V. Issledovanie sovместnoj raboty stal'noj stojki-opory i sbornogo zhelezobetonного fundamenta eksperimental'nyim metodom i s primeneniem matematicheskogo MKE-modelirovaniya. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2018. 6 (71). P. 37 – 44. (rus)

7. Strelkov Yu.M., Radajkin O.V., Sabitov L.S., Kuznecov I.L. Sravnitel'nyj analiz staticheskoy raboty razlichnyh tipov stal'nyh opor linij elektroperedach na osnove komp'yuternogo modelirovaniya sistemy «opora-fundament-grunt osnovaniya». Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzhenij. 2019. 1. P. 71 – 79. (rus)

8. Radajkin O.V. K postroeniyu diagramm deformirovaniya betona pri odnoosnom kratkovremennom rastyazhenii/szhatii s primeneniem deformatsionnogo kriteriya povrezhdaemosti. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2017. 6. P. 71 – 78. (rus)

9. Mailyan L.R., Ivashchenko E.I. Dejstvitel'nye diagrammy deformirovaniya betona pri szhatii i eksperimental'nye i teoreticheskie sposoby ih postroeniya. Vestnik RGSU. 2006. 4. P. 128 – 132. (rus)

10. Mailyan L.R., Nalimova A.V., Mailyan A.L., Ajvazyan E.S. CHelnochnaya tekhnologiya izgotovleniya fibrobetona s agregirovannym raspredeleniem fibr i ego konstruktivnye svoystva. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. 4 (18). P. 573 – 580. (rus)

*Akhtyamova L.Sh., Master Student,
Sabitov L.S. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Kazan (Volga region) Federal University, Russia,
Mailyan A.L., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Mailyan L.R., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Don State Technical University, Russia,
Radaykin O.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia*
*Corresponding author E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

TECHNOLOGICAL AND DESIGN FEATURES OF DESIGNING A MODULAR REINFORCED CONCRETE FOUNDATION FOR A HIGH-RISE BUILDING OF VARIOUS TYPES

Abstract: the paper proposes a new type of modular collapsible reinforced concrete foundation for steel support for various types of structures: power lines, wind power plants, billboards, traffic lights, etc. The foundation has the shape of a cross-hammer in the plan and consists of separate modules manufactured at the factory and connected to each other by concrete dowels and tie bolts on the construction site. At the same time, this technological approach makes it possible to obtain more stable (uniform) strength and deformation properties of both the individual module and the assembled foundation as a whole. Reducing the material consumption is achieved by creating a cavity in each typical module and filling it with local inert material (soil). The central module has an anchor device for joining with the support according to the type of flange connection. This device, along with the use of conventional anchor bolts, involves filling the central module with non-shrinkable fast-hardening steel-fiber concrete. Thus, the positive result of the proposed solution is to increase the bearing capacity of the foundation as a whole, increase the strength and stiffness of its main joints, and simplify installation in comparison with traditional approaches to construction. A comparative calculation of the foundations of the proposed and standard known solutions showed the effectiveness of the first one by at least 17.2%.

Keywords: foundation, reinforced concrete, modularity, optimization, groove-ridge connection

Для цитирования: Ахтямова Л.Ш., Сабитов Л.С., Маилян А.Л., Маилян Л.Р., Радайкин О.В. Технологические и конструктивные особенности проектирования модульного железобетонного фундамента под высотное сооружение различного типа // Строительные материалы и изделия. 2019. Том 2. №6. С. 5 – 11. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-6-5-11

For citation: Akhtyamova L.Sh., Sabitov L.S., Mailyan A.L., Mailyan L.R., Radaykin O.V. Technological and design features of designing a modular reinforced concrete foundation for a high-rise building of various types. Construction Materials and Products. 2019. 2 (6). P. 5 – 11. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-6-5-11

Поступила в редакцию 15 октября 2019 г.
Принята в доработанном виде 2 ноября 2019 г.
Одобрена для публикации 10 декабря 2019 г.

Received: October 15, 2019.
Revised: November 2, 2019.
Accepted: December 10, 2019.