УДК 624.074 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.161.2016.76739

РАБОТА ОПЕРТОЙ ПО КОНТУРУ ЯЧЕЙКИ ПЕРЕКРЫТИЯ, СОСТАВЛЕННОЙ ИЗ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ ПЛИТ

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, кандидаты техн. наук Е. Г. Стоянов, П. А. Резник, асп. А. В. Набока (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)

РОБОТА ОПЕРТОЇ ПО КОНТУРУ ЧАРУНКИ ПЕРЕКРИТТЯ, ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ ЗІ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ПЛИТ

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, кандидати техн. наук Є. Г. Стоянов, П. А. Резник, асп. А. В. Набока (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

OPERATION OF FLOORING CELL, MADE OF REINFORCED CONCRETE BEAM SLABS AND SUPPORTED ALONG FOUR SIDES

Doct. of techn. sciences V.S. Shmucler, doct. of techn. sciences E.G. Stoyanov, doct. of techn. sciences P.A. Reznik, A.V. Naboka

Предлагается вариант компоновки перекрытия из сборных пустотных железобетонных плит, позволяющий вместо традиционной балочной конструктивной схемы работы отдельной плиты в составе перекрытия принять конструктивную схему работы нескольких плит в составе диска перекрытия. Данный вариант компоновки

позволяет уменьшить действующие усилия в перекрытии. Приведенные результаты расчетов и их сравнение по аналитической и численной (МКЭ) методикам.

Ключевые слова: *сборные железобетонные пустотные плиты, канатная арматура, совместная работа, аналитические методы, МКЭ, диск перекрытия.*

Пропонується варіант компонування перекриття зі збірних пустотних залізобетонних плит, що дає змогу замість традиційної балкової конструктивної схеми роботи окремої плити у складі перекриття прийняти конструктивну схему роботи декількох плит у складі диска перекриття. Цей варіант компонування дає змогу зменшити діючі зусилля в перекритті. Наведені результати розрахунків і їх порівняння за аналітичною та числовою (МСЕ) методиками.

Ключові слова: *збірні залізобетонні пустотні плити, канатна арматура, спільна робота, аналітичні методи, МСЕ, диск перекриття.*

We offer to construct flooring from reinforced concrete precast hollow slabs that ensures structural design of several slabs within floor slab instead of convenient beam-type structural design of separate slab within the flooring. Thus, we have quasi-contour design of operation of flooring slab. Flooring, consisting of several beam slabs within flooring cell in question, has finite bending stiffness in longitudinal direction that depends on geometrical and physical-mechanical parameters and also reinforcement of each separate slab. In transverse direction composite flooring slab has almost zero bending stiffness and bears load due to shear rigidity of the joint and torsion resistance of each slab. This arrangement reduces loads, applied to flooring slab. Represented results of calculations and their comparison by analytical and numerical methods (FEM).

Key words: *Reinforced concrete precast hollow slabs, fore-rope fittings, joint operation, analytical methods, FEM, flooring slab.*

Вступление. Экономическая эффективность применения того или иного типа железобетонной конструкции напрямую связана с расходом материалов, в особенности, если речь идет о дорогостоящей высокопрочной арматуре.

Так, для сборных предварительно напряженных плит безопалубочного стендового формования с канатной рабочей арматурой вопрос экономии арматуры является одним из основных при проектировании. За счет применения бетонов повышенной прочности (С30/35 и выше) удалось избежать применения рабочей поперечной арматуры и всех видов конструктивной арматуры [1]. Еще больший эффект следует ожидать от экономии рабочей арматуры.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с научными и практическими задачами. Ощутимый эффект при применении сборных предварительно напряженных плит перекрытий возможен при экономии рабочей канатной арматуры. При этом требования к прочности, трещиностойкости и деформативности не снижаются [2,3].

Проблема использования минимально возможного количества рабочей арматуры для заданных нагрузок на перекрытиях является приоритетной задачей для практики строительства зданий и сооружений.

Анализ последних достижений и публикаций. Сокращение расхода рабочей арматуры в элементах перекрытий возможно за счет перехода от конструктивной схемы работы каждой отдельной плиты балочного типа к совместной работе сборных плит в составе диска перекрытия.

Преимущества работы плит в составе диска рассматривались как ранее [4, 5, 8], так и в последнее время. При этом рассматривались различные конструктивные схемы сборных дисков (с опиранием на жесткий или податливый контур, с опиранием плит друг на друга по этажной схеме, с соединением плит между собой с помощью закладных деталей в отдельных точках или сплошным продольным швом [4,9], с устройством надбетонки над пустотными плитами [10] и др.). Определенный интерес представляют композитные железобетонные плиты, в которых в качестве вкладышей применены микрокапсулы PCM, которые адаптируются к температурному режиму и имеют потенциал в энергосбережении [11].

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является минимизация расхода арматуры в предварительно напряженных многопустотных плитах перекрытий.

При исследовании ставится задача разработки конструкции диска перекрытия, составленного из сборных предварительно напряженных многопустотных плит, и методики определения его напряженно-деформированного состояния при различных схемах компоновки перекрытия и разных нагрузках.

Основная часть исследования. В предлагаемом варианте диск формируется из балочных плит, соединенных друг с другом по боковым поверхностям с помощью специального шва, исключающего взаимные сдвиги плит в вертикальной плоскости (рис. 1).

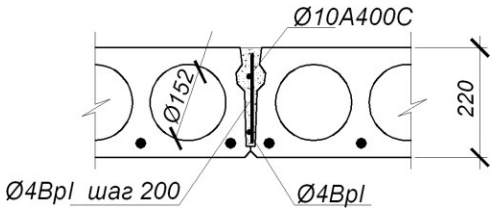

Рис. 1. Конструкция шва между плитами

При этом крайние плиты ячейки перекрытия обязательно опираются боковой кромкой на несущие стены или ригели.

При такой конструктивной схеме ячейка перекрытия работает в двух направлениях, за счет чего в продольном направлении каждой плиты в определенной степени уменьшаются изгибающие моменты.

Таким образом, мы получаем квазиконтурную схему работы плиты-диска перекрытия. Такая составная плита, состоящая из нескольких балочных плит, в пределах рассматриваемой ячейки перекрытия, в продольном направлении имеет конечную изгибную жесткость, зависящую от геометрических и физико-механических параметров, а также от армирования каждой отдельной плиты. В поперечном направлении составной диск имеет практически нулевую изгибную жесткость, а нагрузку воспринимает за счет сдвиговой жесткости шва и сопротивления каждой плиты кручению.

Характер передачи нагрузки и соответствующая схема работы диска в поперечном направлении зависит от количества плит в ячейке.

Так, например, для ячейки перекрытия из двух плит (рис. 2) каждая из них в произвольном сечении испытывает погонный крутящий момент, кНм/м,

$$T = T_{(2)} = qb^2 / 2 . \qquad (1)$$

От крутящего момента в поперечном сечении плита поворачивается на угол φ, определяемый по формуле

$$\varphi = \frac{T}{GI_k} f(x), \qquad (2)$$

где $f(x)$ – функция изменения угла поворота по длине плиты;

G – модуль сдвига бетона, принимаемый как $G = 0.4E_{cm}$;

$I_к$ – крутильный момент инерции сечения плиты.

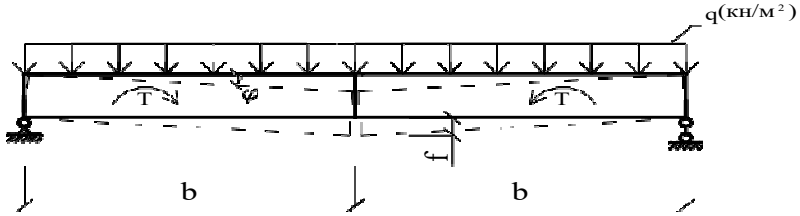

Рис. 2. Схема работы диска из двух плит

При определении крутильного момента инерции фактическое сечение многопустотной плиты приводится к пустотелому коробчатому сечению с условной эффективной толщиной стенок t_{ef} [6].

При равномерно распределенной нагрузке на всей площади рассматриваемой ячейки перекрытия функцию $f(x)$ логично принять идентичной функции изменения изгибающего момента по длине плиты. При этом максимальный угол поворота в центре ячейки перекрытия

$$\varphi_0 = \frac{T}{GI_k}\int_0^L \left(x - \frac{x^2}{L}\right) dx = \frac{TL^2}{6GI_k}. \quad (3)$$

При угле поворота сечения в центре продольного шва между плитами, равном φ_0, прогиб в центре диска составляет

$$f = b \cdot tg\varphi_0 = b \cdot \varphi_0. \quad (4)$$

Погонный максимальный изгибающий момент в продольном направлении в шве между плитами при равномерно распределенной нагрузке

$$M_x = 48E_{cm}I_z f / 5l^2. \quad (5)$$

Для ячейки перекрытия, состоящей из трех плит, расчетная схема может быть представлена как показано на рис. 3, где распределенная нагрузка от средней плиты частично распределяется на изгиб плиты как балочной q_1, а частично $(q - q_1)$ передается на крайнюю плиту в виде погонной линейной силы $P_1 = (q - q_1) \cdot b/2$, вызывающей дополнительный прогиб крайней плиты от поворота сечения. При этом крутящий момент в крайней плите

$$T_{(3)} = T_{(2)} + P_1 b = qb^2 - q_1 b^2/2, \quad (6)$$

угол поворота крайней плиты

$$\varphi_0 = \frac{b^2 L^2}{6GI_k}(q - q_1/2), \quad (7)$$

прогиб крайней плиты

$$f_{кр} = b\varphi_0 = \frac{b^3 L^2}{6GI_k}\left(q - \frac{q_1}{2}\right). \quad (8)$$

Прогиб средней плиты от ее изгиба по балочной схеме

$$f_{ср} = \frac{5}{384}\frac{q_1 b L^4}{E_{cm} I_z}. \quad (9)$$

Приравнивая $f_{кр} = f_{ср}$, получим

$$q_1 = \frac{\frac{qb^2}{6GI_k}}{\left(\frac{5L^2}{384E_{cm}I_z} + \frac{b^2}{12GI_k}\right)}. \quad (10)$$

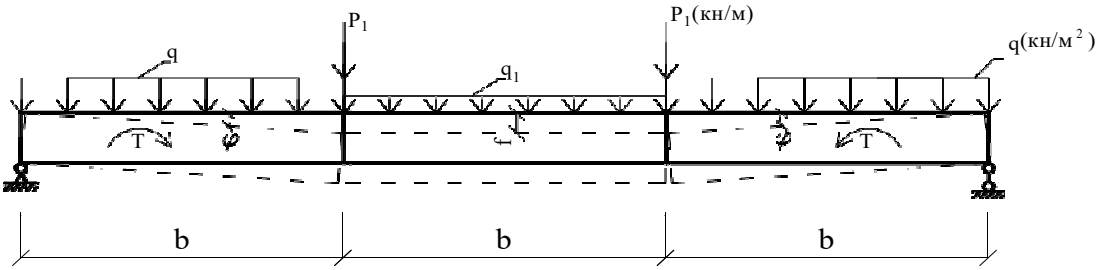

Рис. 3. Расчетная схема работы диска из трех плит

Максимальный прогиб средней плиты при трех плитах в ячейке диска

$$f_{(3)} = \frac{5q_1bL^4}{384E_{cm}I_z}, \qquad (11)$$

и соответствующий балочный момент в плите, работающей в составе диска,

$$M_д = q_1bL^2 / 8. \qquad (12)$$

Отношение момента при балочной схеме работы плиты M_1 к моменту при работе плиты в составе диска $M_д$ $n = M_1/M_д$ является показателем эффективности работы диска перекрытия.

Экспериментальные исследования работы плит в составе диска перекрытия [7] показали, что при всех возможных схемах нагружения максимальные прогибы имеют место при полной нагрузке на всех плитах диска. При этом должна быть обеспечена прочность шва между плитами при разной нагрузке на смежных плитах [8].

Для ячейки перекрытия, состоящей из четырех плит, расчетная схема может быть представлена как показано на рис. 4.

При такой схеме крутящий момент $T_{(4)} = T_{(2)} + T_{(3)}$; прогиб $f_{(4)} = f_{(2)} + f_{(3)}$; изгибающий момент при работе плит в составе диска $M_д = 48E_{cm}I_zf_{(4)} / 5L^2$.

Для ячейки из пяти плит расчетная схема представлена на рис. 5.

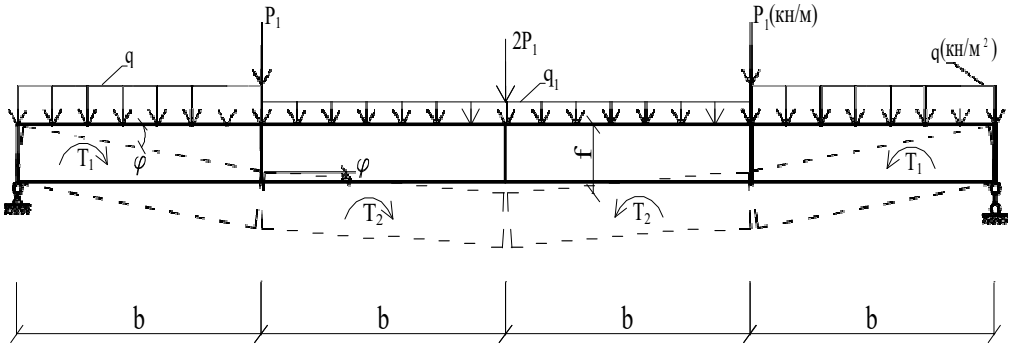

Рис. 4. Схема работы диска из четырех плит

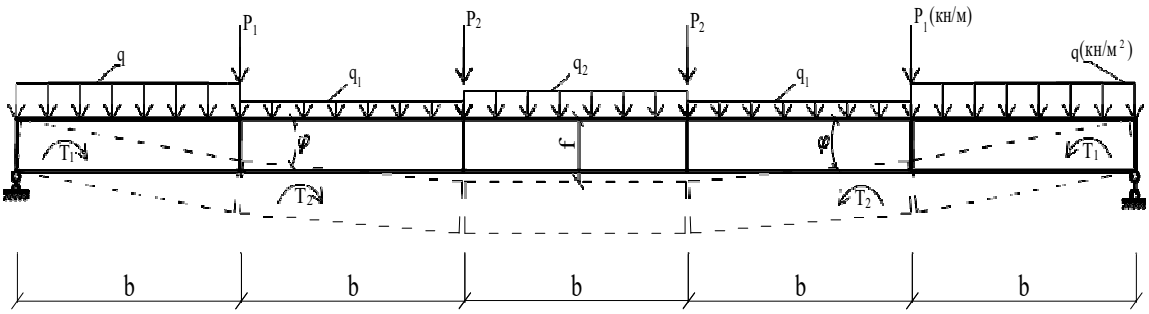

Рис. 5. Расчетная схема диска из пяти плит

При этой схеме $T_{(5)} = T_{(4)} + P_2 b$, где

$$P_2 = P_1 + (q - q_2)b / 2 , \qquad (13)$$

прогиб от кручения

$$f_{(5)} = f_{(4)} + \frac{P_2 b L^2}{6 G I_k} . \qquad (14)$$

Приравнивая $f_{(5)}$ с прогибом средней плиты от изгиба по балочной схеме

$$f_{\text{ср}} = \frac{5 q_2 b L^4}{384 E_{cm} I_z} , \qquad (15)$$

получаем часть нагрузки q_2 , вызывающую изгиб средней плиты при ее работе по балочной схеме. Далее по алгоритму расчета диска из трех плит определяем M_o в средней плите.

При любом четном количестве плит в ячейке перекрытия расчетные схемы аналогичны представленной на рис. 4, при любом нечетном количестве плит – аналогичны представленной на рис. 5.

Для перехода от дискретно-континуальной модели ячейки плиты перекрытия к дискретной, с возможностью варьирования геометрическими и физико-механическими параметрами плит, а также равномерно распределенной нагрузкой, построена конечно-элементная модель сборного железобетонного диска перекрытия с шарнирным опиранием по всем четырем сторонам. Диск смоделирован из прямоугольных КЭ №11, размер элементов 0,2х0,2 м. Продольные швы между плитами моделируются путем расшивки узлов и объединения перемещений по вертикальной оси Z.

Для расчета конструкций использовался программный комплекс ЛИРА-САПР 2013.

В качестве примера рассмотрена ячейка перекрытия размерами в плане 3,6х7,2 м, составленная из трех плит шириной 1200 мм, высотой 220 мм. Плиты имеют по шесть пустот диаметром 152 мм. Плиты изготовлены предварительно напряженными из бетона класса С32/40, запроектированы под расчетную нагрузку (сверх собственного веса) 8,0 кН/м^2.

Для модели использовано 777 узлов и 648 элементов КЭ №11.

Для сравнения результатов расчета параллельно рассматривались еще две модели:

- отдельная железобетонная плита, опертая шарнирно по коротким сторонам;
- монолитная железобетонная плита эквивалентной изгибной жесткости, опертая шарнирно по контуру, с размерами данной ячейки перекрытия.

В результате расчетов построены изополя и эпюры изгибающих моментов M_x (вдоль длины плит), изгибающих моментов M_y в среднем сечении ячейки и вертикальных перемещений (рис. 6-11).

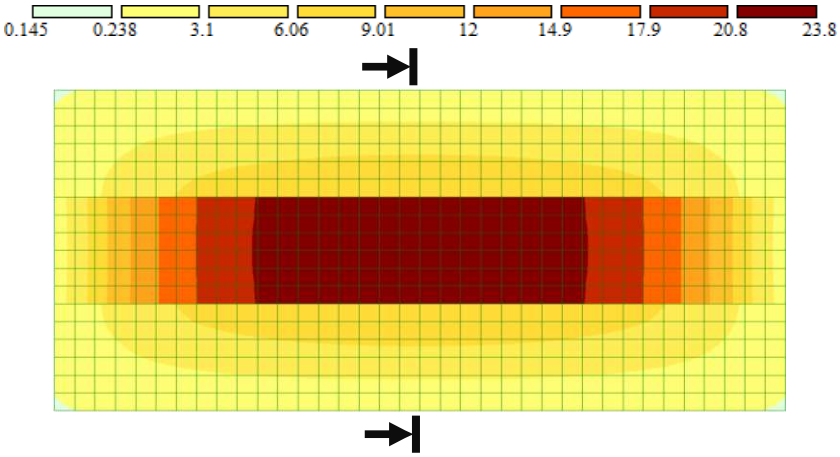

Рис. 6. Изополя изгибающих моментов Мх, кНм/м

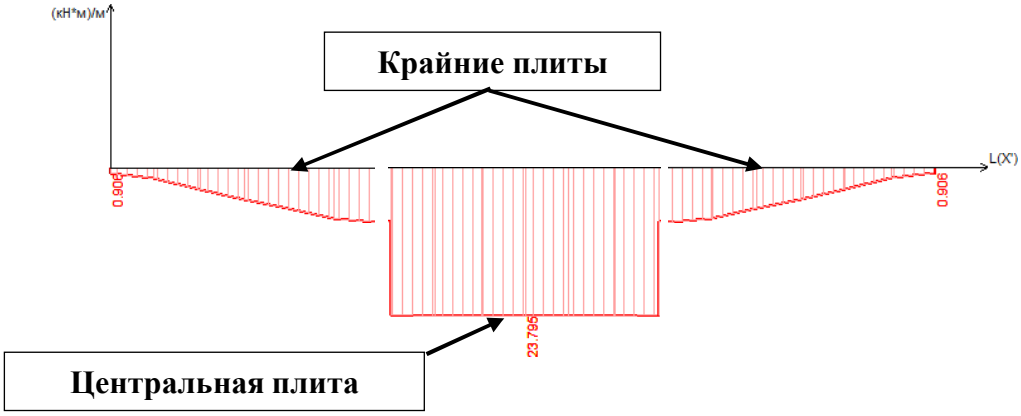

Рис. 7. Эпюра изгибающих моментов Мх (кНм) в среднем сечении ячейки перекрытия

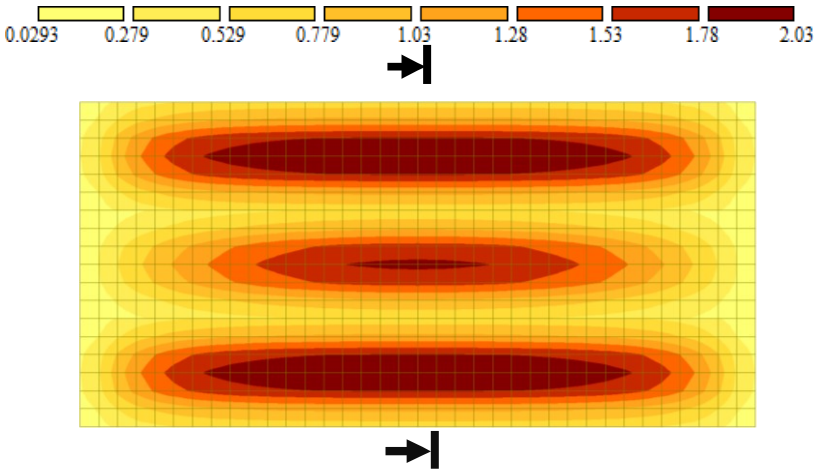

Рис. 8. Изополя изгибающих моментов Му, кНм/м

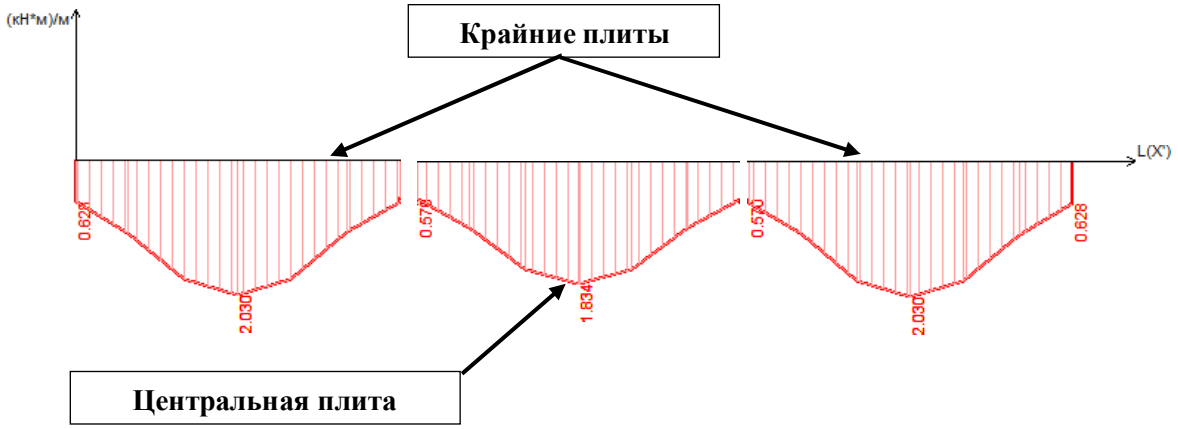

Рис. 9. Эпюра изгибающих моментов My, кНм, в среднем сечении ячейки перекрытия

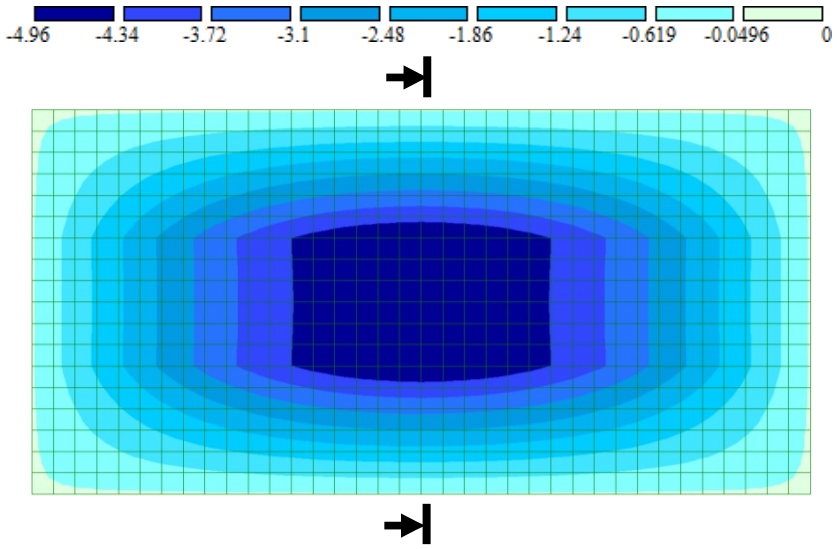

Рис. 10. Изополя вертикальных перемещений Z, мм

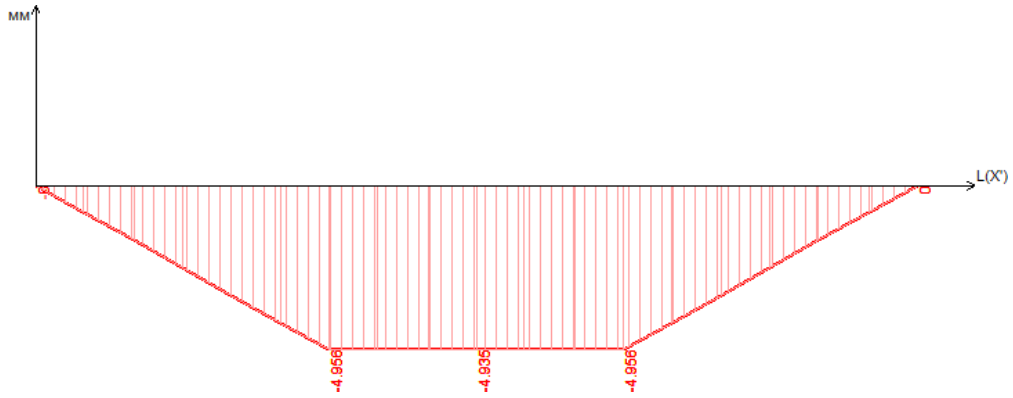

Рис. 11. Эпюра вертикальных перемещений в среднем сечении плит, мм

Сравнение результатов расчета по дискретной и дискретно-континуальной моделям показало достаточную степень совпадения для всех параметров напряженно-деформированного состояния рассматриваемой ячейки перекрытия (рис. 12).

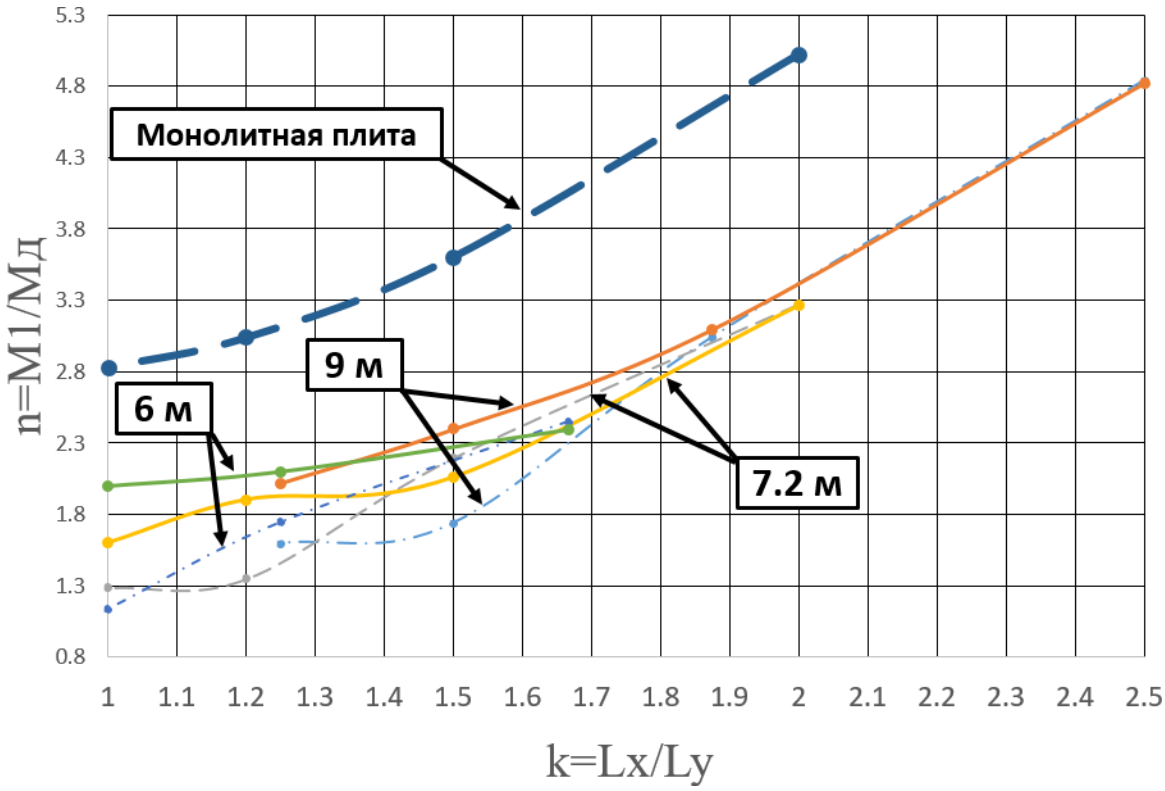

Рис. 12. График ***n-k*** изменения изгибающих моментов в диске перекрытия:

L_x – длина диска (плиты);

L_y – ширина диска из нескольких плит;

M_1 – максимальный момент в одиночной балочной плите;

$M_д$ – максимальный момент в плите в составе диска;

– результаты, полученные методом конечных элементов;

– результаты, полученные аналитическим методом

По приведенному алгоритму расчета определены изгибающие моменты в ячейках диска перекрытия, составленных из 3…6 плит различной длины (6,0…9,0 м). Эффективность применения предлагаемого решения очевидна по результатам анализа результатов (таблица).

Выводы по результатам исследования и перспективы по дальнейшему развитию данного направления

1. Сравнение результатов аналитических расчетов и расчетов методом конечных элементов показало достаточную степень совпадения для всех параметров напряженно-деформированного состояния в ячейках перекрытия.

2. При компоновке дисков ячеек перекрытий из фиксированного количества плит для определения их армирования принимается средняя плита с наибольшими изгибающими моментами.

3. Формирование ячеек перекрытий в виде квазисплошных дисков предполагает

возможное изменение конструктивной схемы здания в целом (применение несущих продольных и поперечных стен или ригелей двух направлений, возможность укладки плит перекрытий в разных направлениях в пределах одного и того же этажа для обеспечения рекомендуемого соотношения $L_x/L_y > 1$).

Таблица

Изгибающие моменты в сборном диске перекрытия

Длина плиты, м	Переменная расчетная нагрузка, кН/м^2	Момент в балочной плите M_1, кНм	Максимальный момент в центре диска $M_д$, кНм, при ширине ячейки перекрытия, м			
			3.6	4.8	6.0	7.2
6.0	21.0	124.5	51.9	59.3	62.2	-
	16.0	98.9	41.2	47.1	49.5	-
	12.5	81.0	33.7	38.6	40.5	-
	10.0	68.2	28.4	32.5	34.1	-
	8.0	58.0	24.2	27.6	29.0	-
7.2	16.0	143.7	44.0	69.8	75.6	89.4
	12.5	117.7	36.0	57.2	62.0	73.1
	10.0	99.1	30.3	48.1	52.1	61.9
	8.0	89.2	27.3	43.3	46.9	55.8
	6.0	69.4	21.2	33.7	36.5	43.4
8.4	10.0	134.5	38.0	49.5	66.3	78.8
	8.0	121.0	34.1	44.5	59.6	71.2
	6.0	94.1	26.5	34.6	46.3	55.3
	4.5	79.0	22.3	29.1	38.9	46.5
9.0	8.0	139.4	28.9	45.0	58.1	69.0
	6.0	108.4	22.5	35.0	45.2	53.5
	4.5	91.0	18.9	29.4	37.9	45.1

Список использованных источников

1. Шмуклер, В. С. Особенности внедрения железобетонных многопустотных предварительно напряженных плит перекрытий безопалубочного стендового формования [Текст] / В. С. Шмуклер, Е. Г. Стоянов и [др.] // Комунальне господарство міст. – Харків, 2014. – №114. – С. 22-30.

2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.

3. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010.

4. Шмуклер, В.С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Буряк. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.

5. Шмуклер, И.В. Сборные железобетонные диски перекрытий с рациональными поперечными связями [Текст]: дисс… канд. техн. наук / И. В. Шмуклер. – Харьков: ХГТУСА, 1995. – 324 с.

6. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В 2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1(Eurocode 2) [Текст] / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова [та ін.]. – Харків: «Золоті сторінки», 2015. – 206 с.

7. Стоянов, Е.Г. Экспериментальное исследование работы сборных железобетонных предварительно напряженных плит в составе диска перекрытия [Текст] / Е.Г. Стоянов, А.В. Набока // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНТУБА, 2016. – №1(83). – С. 107-114.

8. Байков, В.Н. Проектирование железобетонных тонкостенных пространственных конструкций [Текст] / В.Н. Байков, Э. Хампе, Э. Рауэ. – М.: Стройиздат, 1990. – 232 с.

9. Krzysztof Gromysz Distribution of forces in composite concrete slabs between the joint and reinforcement anchored on the support [Text] / K. Gromysz // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 65. – P. 206 – 211.

10. Eray Baran Effects of cast-in-place concrete topping of flexural response of precast concrete hollow-core slabs [Text] / E. Baran // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 98. – P. 109-117.

11. Lidia Navarro Design of prefabricated concrete slab with PCM inside the hollows [Text] / Lidia Navarro, Alvaro de Garcia, Albert Castell, Servando Alvarez, Luisa F. Cabeza // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 57. – P. 2324-2332.

Шмуклер Валерій Семенович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова.
E-mail: kname.edu.ua.
Стоянов Євген Геннадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.
Резнік Петро Аркадійович, канд. техн. наук, асистент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail. kname.edu.ua.
Набока Анатолій Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Shmucler Valeriy Semenovich, d-r science, professor department of building constructions. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.
Stoyanov Evgeniy Genadiyovich, d-r science, docent department of building constructions. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.
Reznik Petr Arcadievich, d-r scienct, assistant department of building constructions O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.
Naboka Anatoliy Vitalievich, graduate student department of building constructions O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail. kname.edu.ua.

Стаття прийнята 17.05.2016 р.