

## РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ НАДКОЛОННИХ ПЛИТ БЕЗКАПІТЕЛЬНО-БЕЗБАЛКОВИХ ПЕРЕКРИТТІВ МЕТОДОМ ГРАНИЧНОЇ РІВНОВАГИ

© Павліков А. М., Микитенко С. М., 2015

Перспективним напрямком застосування збірних конструкцій є індустріальний безкапітельно-безбалковий каркас (аналог системи “КУБ”). Сьогодні цей каркас зазнав багатьох удосконалень, а тому його можна запропонувати для вирішення завдань програми забезпечення громадян доступним житлом. До складу каркасу входять колони, елементи жорсткості та плити перекриття. Внутрішні зусилля у плитах перекриття такого каркасу розподіляються нерівномірно, тому доцільно армувати плити відповідно до методики побудови епюри матеріалів. Така методика передбачає улаштування обривів поздовжньої арматури.

В основу визначення місць обривів покладено кінематичний спосіб методу граничної рівноваги. Суть його в тому, що гранична рівновага плити описується рівнянням рівності віртуальних робіт між зовнішніми і внутрішніми зусиллями на можливих відповідних переміщеннях цих зусиль. Тому за мету дослідження поставлено розроблення методики розрахунку несучої здатності збірних плит безкапітельно-безбалкової каркасної конструктивної системи на основі кінематичного способу методу граничної рівноваги з використанням методів оптимізації.

Запропонований підхід дає змогу враховувати схему обпирання плит та характер прикладання до них навантаження. Плити з обривами поздовжньої арматури більше відповідають умовам розподілу внутрішніх зусиль, що дає можливість зменшити витрати арматурної сталі, економія може становити від 15 до 25 %.

**Ключові слова:** залізобетон, несуча здатність, теорія граничної рівноваги, надколонна плита, обрив поздовжньої арматури.

The promising field of efficient precast structures application is industrial flat plate framework (of “CUBE” system type). For today, this framework has undergone many improvements, and therefore it can be recommended for solving the tasks of the program for providing citizens with affordable housing. Columns, inflexibility elements and floor slabs are included into the framework composition. Internal forces in slabs are distributed unevenly, that is why it is reasonable to reinforce slabs according to the methodology of the materials curve construction. This methodology envisages arranging of longitudinal concrete reinforcement breakages. The kinematic variant of the maximum equilibrium method is the basis of calculation in the present study. Therefore, the aim of the present study was development of the methodology for calculation of precast floor slabs of the flat plate framework structural system's bearing strength on the basis of kinematic variant of maximum equilibrium method using the optimization methods. The suggested approach allows taking into consideration the floor slab-wall junction scheme and the character of the load application to them. Floor slabs with the precipices of longitudinal concrete reinforcement more answer the terms of internal forces distribution, which permits to reduce the framework steel costs. Savings can make from 15 to 25 %.

**Key words:** reinforced concrete, bearing, theory of maximum equilibrium, supercolumnar floor slab, longitudinal concrete reinforcement breakages.

## Вступ

Сучасне будівництво потребує вирішення проблем зниження вартості будівель і споруд за рахунок зменшення трудомісткості їх зведення, економії витрат матеріалів, застосування енергозаощаджувальних огорожувальних конструкцій. Одним із способів розв'язання задач, пов'язаних з цими проблемами, є застосування індустріальних залізобетонних конструкцій, які успішно застосовують як під час нового будівництва, так і під час реконструкції будівель і споруд. Серед таких конструкцій особливо виділяється безкапітельно-безбалковий каркас конструктивної системи "КУБ" [1, 2], котрий почав застосовуватися майже сорок років тому, зазнав багатьох змін і сьогодні пропонується для виконання програми забезпечення доступним житлом в Україні [3, 4]. Застосування раціональних методів розрахунку і конструювання плит цього каркасу забезпечить істотну економію матеріалів і одночасно підвищить надійність конструктивної системи будівель. Впровадження удосконалених методів розрахунку в практику проектування в умовах масового будівництва дасть можливість отримати істотний економічний ефект.

## Аналіз останніх досліджень

Теорію розрахунку плит, обпертих по контуру, розробляли багато науковців. Загальним у ній було те, що розрахунки ґрунтувалися на експериментальних даних про характер та форми руйнування таких плит. У 1898 році Ц. Бах [5] запропонував формулу визначення згинального моменту для квадратної плити. Подальші дослідження виявили особливості руйнування плит уздовж окремих ліній у вигляді шарнірів пластичності. Така особливість роботи розглядуваних плит спонукала дослідників застосовувати нові підходи та принципи під час розроблення методів розрахунку їхньої міцності. Можна стверджувати, що вони ґрунтуються на методах теорії граничної рівноваги [5], особливостях роботи плоскої системи [6], представленні моделей просторової роботи [7], скінченних елементах із фізичною нелінійністю [8] та інших. Але, незважаючи на значну кількість досліджень і пропозицій з розрахунків, сьогодні залишається актуальною задачею розрахунок несучої здатності плоских плит у складі безкапітельно-безбалкових залізобетонних каркасів, котрі є найбільш конкурентно здатними під час будівництва будівель доступного житла [9].

## Постановка мети і задач досліджень

Методи розрахунку безкапітельно-безбалкових перекриттів наведено у роботі [6], але сьогодні існують деякі нерозв'язані задачі. Серед них, як свідчать результати експериментально-теоретичних досліджень [10], наявність у конструкціях плит безкапітельно-безбалкового перекриття значних запасів міцності, тобто надлишку витраченої арматурної сталі. Тому у цій роботі за мету дослідження поставлено задачу розроблення розрахунку міцності прямокутної плити, обпертої по контуру, на основі кінематичного способу методу граничної рівноваги. Особливість розрахунку полягає в тому, щоб зекономити робочу арматуру за рахунок її обривання у прольоті для різних схем руйнування.

**Загальна мета дослідження** полягає в аналізі конструктивних особливостей безкапітельно-безбалкового залізобетонного каркасу будівель, націленого на вдосконалення розрахунків несучої здатності окремих елементів перекриття з метою економії арматури.

## Виклад основного матеріалу

В основу розрахунку покладено кінематичний спосіб методу граничної рівноваги. Сутність його реалізації така: якщо на плиту діє рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю  $q$  і зосереджене навантаження  $P$ , то загалом гранична рівновага плити у момент її руйнування описується рівнянням рівності віртуальних робіт  $W_{q,P}$  та  $W_M$  від зовнішніх та внутрішніх зусиль на можливих відповідних переміщеннях:

$$W_{q,P} = W_M \quad (1)$$

Для випадку середніх залізобетонних плит умова (1) набуває вигляду

$$\int_A y_q \cdot q \cdot dA + \sum_{j=1}^k P_j y_j = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \varphi_i \cdot l_i, \quad (2)$$

де  $y_q$  – переміщення плити у напрямку дії навантаження  $q$ ;  $y_j$  – переміщення плити у напрямку дії навантаження  $P_j$ ;  $m_i$  – момент в  $i$ -му лінійному пластичному шарнірі на одиницю його довжини;  $\varphi_i$  – кут повороту диска в  $i$ -му лінійному пластичному шарнірі;  $l_i$  – довжина  $i$ -го пластичного шарніра;  $n$  – кількість розглянутих ділянок лінійних пластичних шарнірів;  $k$  – кількість прикладених сил  $P$ .

Внутрішні зусилля у плитах розподіляються нерівномірно, тому доцільно армувати плиту відповідно до методики побудови епюри матеріалів, тобто з обривами поздовжньої арматури.

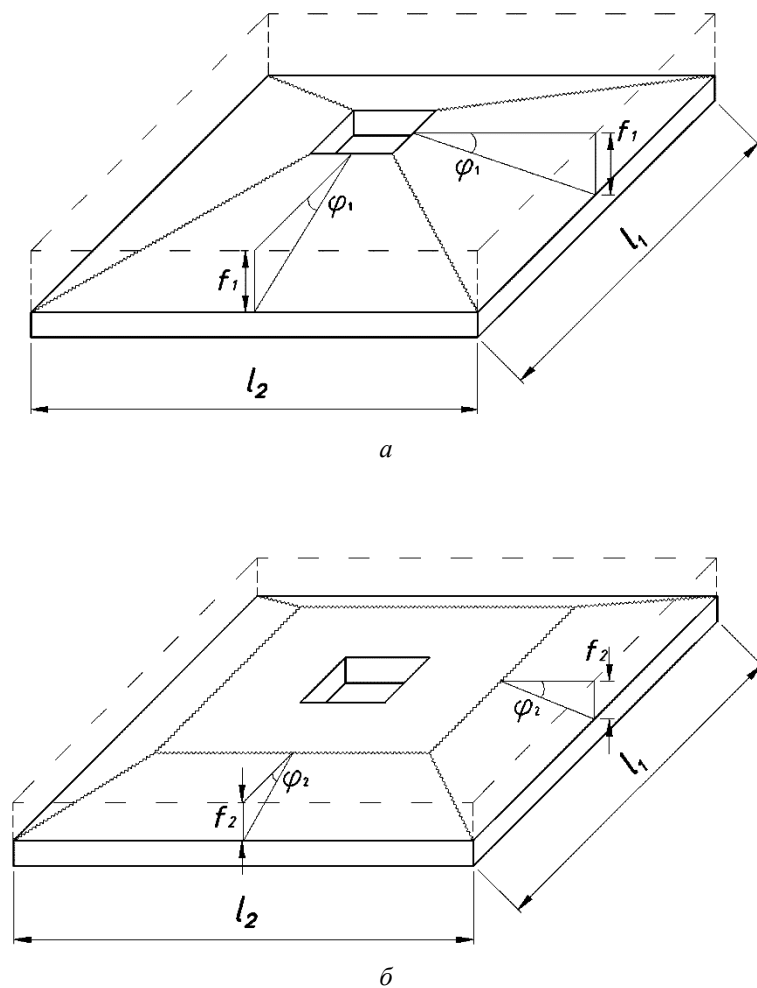


Рис. 1. Утворення лінійних пластичних шарнірів у надколонній плиті:  
а – за першою схемою; б – за другою схемою

В основу методики розрахунку покладено такі передумови:

- у граничному стані плити можуть руйнуватися за двома кінематичними схемами (рис. 1);
- плити мають уздовж контура обриви робочих арматурних стержнів на довжину  $a$  (рис. 2), за котрої виконується умова рівномірності плит за першою та другою схемами руйнування (рис. 1);
- у момент досягнення конструкцією стану граничної рівноваги напруження в арматурі досягають значень, що відповідають межі текучості сталі;
- у момент руйнування плити розділяються шарнірами пластичності на окремі абсолютно жорсткі диски;
- місця обривів і кількість арматури визначаються за умови мінімальної площі арматури, необхідної для армування плити.

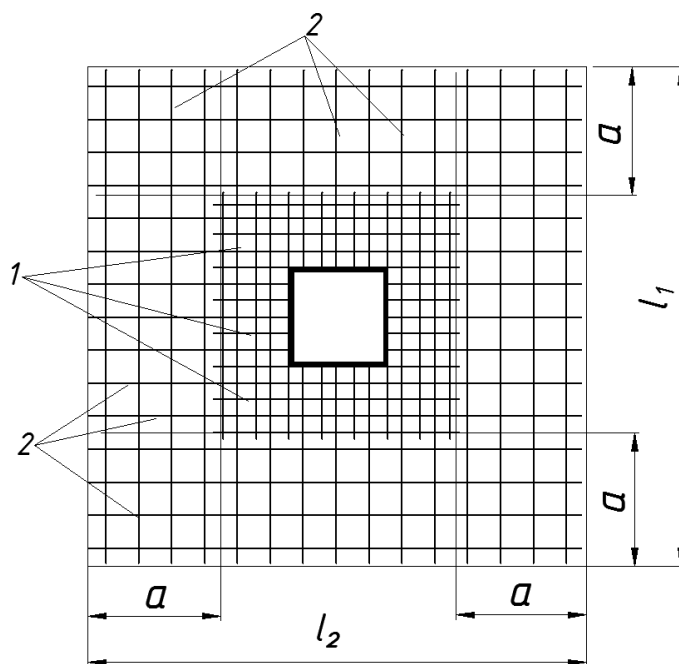


Рис. 2. Схема армування надколонної плити:  
 1 – арматура для сприйняття максимального згинального моменту;  
 2 – арматура на ділянці обриву

За детального аналізу роботи диска перекриття як системи з'єднаних між собою збірних плит виявляється, що навантаження на колони передається у такій послідовності: середня плита передає навантаження на чотири сусідні надколонні плити; надколонні плити передають навантаження на надколонні плити; надколонні плити на – колони. За такої схеми передавання навантаження кожна плита матиме свою схему руйнування, на основі якої реалізується її розрахунок. Зокрема для надколонної плити розглядається схема навантаження, зображена на рис. 3.

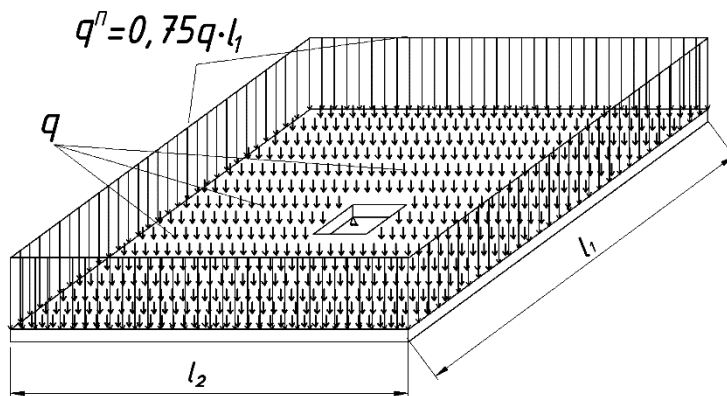


Рис. 3. Схема навантаження надколонної плити

Відповідно до прийнятих передумов для надколонної плити, на яку діє суцільне рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю  $q$  та навантаження від обпертих на неї міжколонних плит  $q''$  рівняння віртуальних робіт (2) за першою схемою руйнування (рис. 4) матиме вигляд

$$qV + 4q'' f_1 = 2(M_{1X} + M_{1Y})\varphi_1, \quad (3)$$

де  $V$  – об'єм фігури, утвореної дисками плити за віртуального їх повороту навколо лінійних пластичних шарнірів (рис. 4);  $M_{1X}, M_{1Y}$  – суми проєкцій граничних згинальних моментів у лінійних пластичних шарнірах (рис. 4) у площинах осей  $Y$  та  $X$  відповідно.

Розглянемо дію згинальних моментів у плиті для першої схеми утворення пластичних шарнірів (рис. 4).

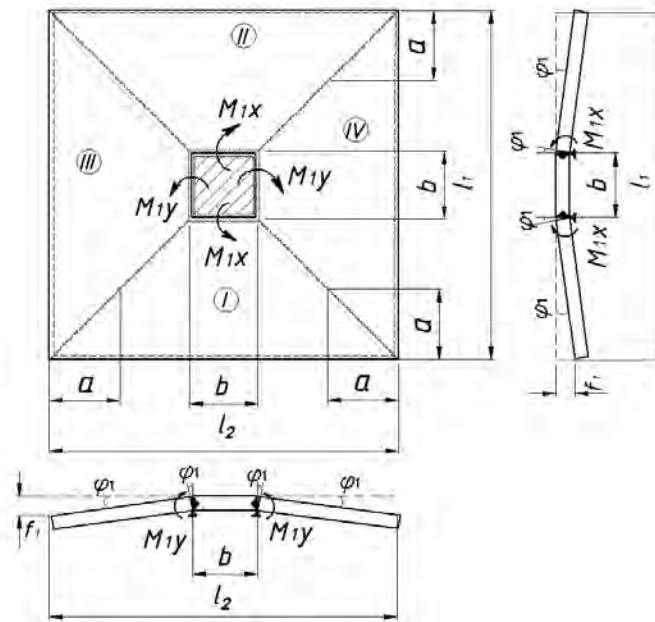


Рис. 4. Кінематична схема руйнування плити за першою схемою

У плиті в її граничному стані діють граничні згинальні рівномірно розподілені моменти  $m_i$  та  $\bar{m}_i$  (рис. 5), які є сумою проекцій моментів  $m_x$  та  $m_y$  на нормалі до лінійних пластичних шарнірів (рис. 6). Значення моментів  $m_x$  та  $m_y$  на одиницю довжини можна обчислити за такими виразами:

$$\left. \begin{aligned} m_x &= \frac{A_{sy} f_{yd} z_{sy}}{S_x} \\ m_y &= \frac{A_{sx} f_{yd} z_{sx}}{S_y} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де  $A_{sx}$ ,  $A_{sy}$  – площа одного арматурного стержня розташованого уздовж осей  $X$  або  $Y$  відповідно;  $z_{sx}$ ,  $z_{sy}$  – відповідні значення плеча внутрішньої пари сил для моментів  $m_x$  та  $m_y$ ;  $S_x$ ,  $S_y$  – крок стержнів у арматурних сітках уздовж осей  $X$  та  $Y$  відповідно.

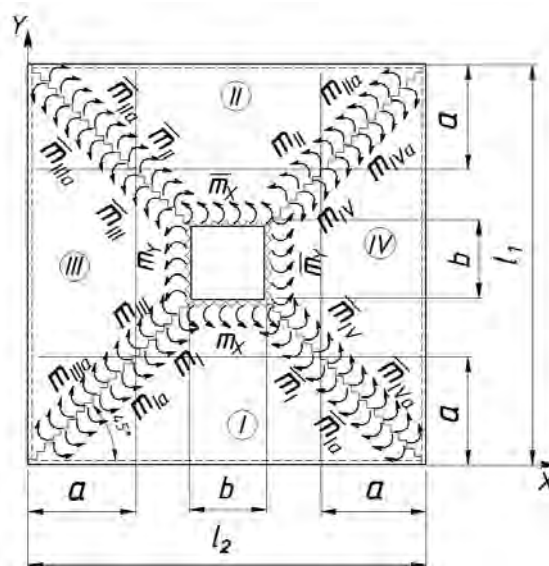


Рис. 5. Схема розподілу згинальних моментів уздовж лінійних пластичних шарнірів для першої схеми

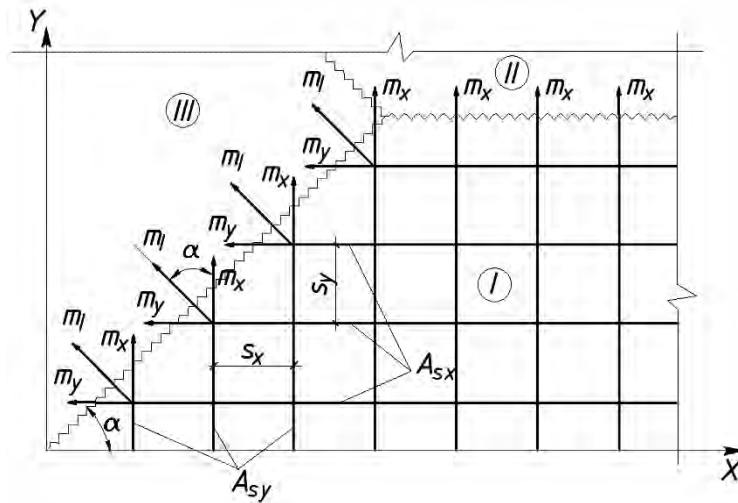


Рис. 6. До визначення граничних згинальних моментів  $m_i$  та  $\bar{m}_i$  у пластичних лінійних шарнірах (для дисків I, II та III)

Для диска I на рис. 6 відповідно до схеми рис. 5 значення граничних згинальних моментів визначаються за залежностями

$$\left. \begin{aligned} m_I &= m_x \cos \alpha + m_y \sin \alpha \\ \bar{m}_I &= m_x \cos \alpha + m_y \sin \alpha \\ m_{Ia} &= k_m (m_x \cos \alpha + m_y \sin \alpha) \\ \bar{m}_{Ia} &= k_m (m_x \cos \alpha + m_y \sin \alpha) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де  $k_m$  – коефіцієнт зменшення площі арматурних стержнів на ділянках, де частина арматури обірвана.

Якщо в перерізі, де обриваються арматурні стержні, залишається 50 % від їх загальної площі, то  $k_m = 0,5$ .

Аналогічно визначаються суми проєкцій граничних згинальних моментів для дисків II, III та IV.

Граничні згинальні моменти, які діють у пластичних лінійних шарнірах за наявності обривів або відгинів арматурних стержнів за схемою на рис. 4 для дисків I та II визначаються залежністю

$$M_{1X} = m_x (l_2 - 2a) + 2m_x k_m a = m_x (l_2 - 2a(1 - k_m)). \quad (6)$$

Для дисків III та IV значення граничних згинальних моментів визначаються за залежністю:

$$M_{1Y} = m_y (l_1 - 2a) + 2m_y k_m a = m_y (l_1 - 2a(1 - k_m)). \quad (7)$$

Для подальших розрахунків можна прийняти такі допущення

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= l_2 \\ m_x &= m_y \\ f_1 &= 0,5(l_1 - b)\varphi_1 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Враховуючи прийняті допущення та схему розподілу граничних згинальних моментів (рис. 5), рівняння віртуальних робіт (3) набуде вигляду:

$$\frac{q(l_1 - b)}{6} (2l_1^2 - b^2 - l_1 b)\varphi_1 + 3q \frac{(l_1 - b)l_1^2}{2} \varphi_1 = 4m_x (l_1 - 2a(1 - k_m))\varphi_1. \quad (9)$$

Із рівняння (9) граничне навантаження на плиту

$$q = \frac{24m_x (l_1 - 2a(1 - k_m))}{(b^3 - 12bl_1^2 + 11l_1^3)}. \quad (10)$$

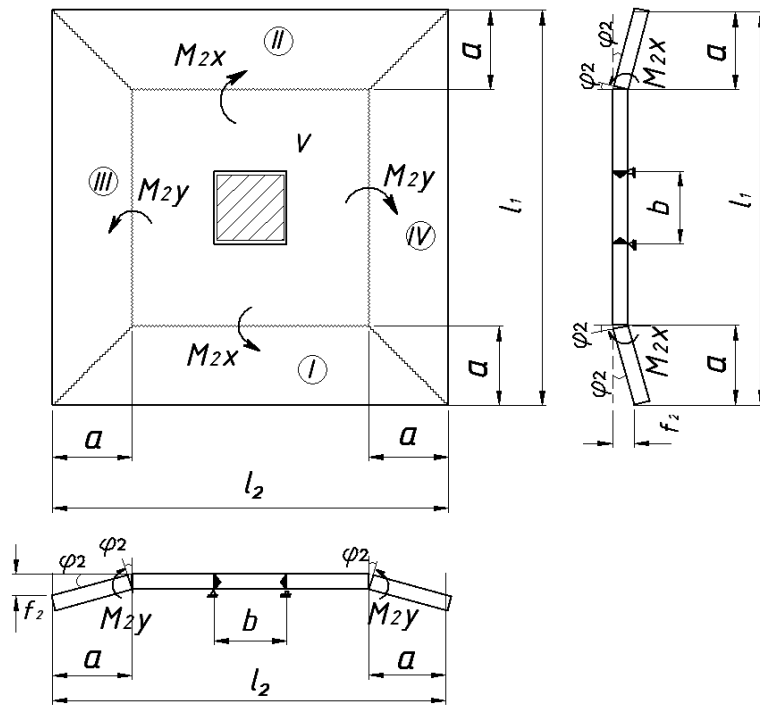


Рис. 7. Кінематична схема руйнування плити за другою схемою

Для другої схеми руйнування плити (рис. 7), коли пластичні шарніри утворюються у місцях обривів арматури, значення граничних згинальних моментів, котрі діють у пластичних шарнірах (рис. 8), визначаються за залежностями:

$$\left. \begin{aligned} M_{2x} &= m_x k_m l_2 \\ M_{2y} &= m_y k_m l_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Враховуючи прийняті спрощення (8) та  $f_2 = a\varphi_2$ , схему розподілу граничних згинальних моментів (рис. 7 та 8), рівняння віртуальних робіт для цього випадку матиме вигляд:

$$\frac{qa^2}{3}(6l_1 - 4a)\varphi_2 + 3qa l_1^2 \varphi_2 = 4m_x k_m l_1 \varphi_2 \quad (12)$$

Граничне навантаження на плиту

$$q = \frac{12m_x k_m l_1}{a^2(6l_1 - 4a) + 9al_1^2} \quad (13)$$

Якщо прирівняти вираз (10) до виразу (13) і виконати належні перетворення, якщо  $a = k_l \cdot l_1$  і, то отримаємо рівняння відносно  $k_l = a/l_1$ :

$$\frac{k_m l_1}{(l_1 k_l)^2 (6l_1 - 4l_1 k_l) + 9k_l l_1^3} - \frac{2(l_1 - 2l_1 k_l(1 - k_m))}{(b^3 - 12bl_1^2 + 11l_1^3)} = 0 \quad (14)$$

Чисельне рішення такого рівняння за  $k_m = 0,5$  дає результат  $k_l = 0,312$ .

Площа робочої арматури в плиті визначається за формулою

$$A_{sx} = \frac{q(a^2(6l_1 - 4a) + 9al_1^2)S_y}{12k_m l_1 f_{yd} Z_{sx}} \quad (15)$$

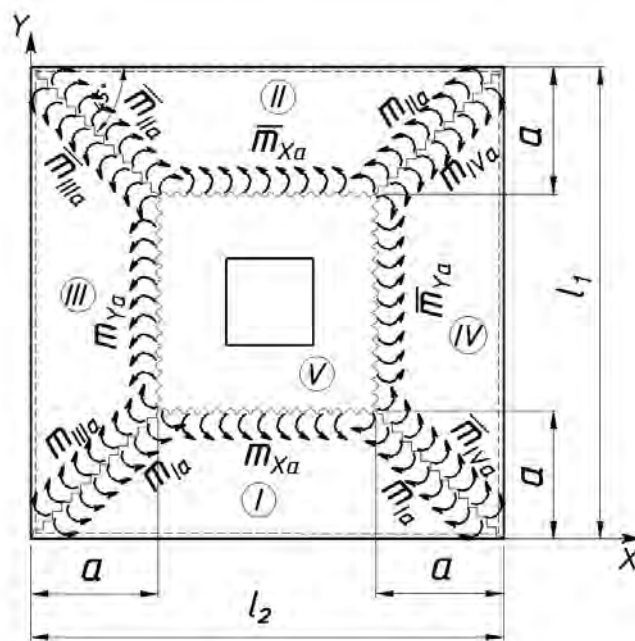


Рис. 8. Схема розподілу згинальних моментів уздовж пластичних шарнірів для другої схеми

### Висновки

Застосування кінематичного способу теорії граничної рівноваги дає можливість розрахувати оптимальне армування. Запропонований підхід дає змогу враховувати схему обпирання плит і характер прикладання до них навантаження. Плити з обривами поздовжньої арматури краще відповідають умовам розподілу внутрішніх зусиль, що дає можливість зменшити витрати арматурної сталі від 15 до 20 %.

1. Дорфман, А. Э. Проектирование безбалочных бескапительных перекрытий [Текст] / А. Э. Дорфман, Л. Н. Левонтин. – М. : Стройиздат, 1975. – 124 с. 2. Унифицированная система сборно-монолитного безригельного каркаса. Основные положения по расчету, монтажу и компоновке зданий: Рабочий проект : у 9-ти вып. Серия КУБ-2,5. Вып. 1-1. [Текст] / ЦНИИПИ “МОНОЛИТ”, Фирма “КУБ”. – М. : Госкомархитектуры СССР, 1990. – 49 с. 3. Павліков А. М. Особливості конструктивної системи збірно-монолітних каркасних багатопверхових будівель під соціальне житло [Текст] / А. М. Павліков, В. А. Пащинський, С. М. Микитенко, М. М. Губій, Є. М. Бабич, Б. М. Петтер // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2009. – Вип. 20. – С. 390–395. 4. Павліков А. М. Безкапітельно-безбалкова каркасно-конструктивна система будівлі: особливості та досвід використання під доступне житло [Текст] / А. М. Павліков, Є. М. Бабич, Б. М. Петтер // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. наук. пр. (будівництво) / ДП ДНД ІБК. – Вип. 78: в 2-х кн. Кн. 1. – К. : ДП НДІБК, 2013. – С. 28 – 46. 5. Дубинский А. М. Расчет несущей способности железобетонных плит / А. М. Дубинский. – К. : Гос. издат. по строит. и арх. УССР, 1961. – 184 с. 6. Дорфман А. Э. Проектирование безбалочных бескапительных перекрытий / А. Э. Дорфман, Л. Н. Левонтин. – М. : Стройиздат, 1975. – 124 с. 7. Азізов Т. Н. Просторова робота залізобетонних перекриттів. Теорія та методи розрахунку : дис. ... д-ра техн наук: 05.23.01 / Т. Н. Азізов. – Полтава : ПолтНТУ, 2006. – 406 с. 8. Клованич С. Ф. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты / С. Ф. Клованич, В. И. Шеховцов. – Одесса : ОНМУ, 2011. – 119 с. 9. Павліков А. М. Безкапітельно-безбалкові конструктивні системи для будівель доступного житла: конструктивні особливості, умовності розрахунків, пропозиції з удосконалення / А. М. Павліков, Є. М. Бабич, С. М. Микитенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 451–460. 10. Павліков А. М. Конструювання та розрахунок плит збірно-монолітних конструктивних систем житлових будівель / А. М. Павліков, С. С. Жарий // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр. – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – Вип. 24. – С. 8–13.