УДК 624.012.35:624.073.136

А. М. Павліков, д.т.н., професор
Д.Ф. Федоров, к.т.н., ст. викладач
А.В. Батіг, магістрант
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

КІНЕМАТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ СЕРЕДНЬОЇ ПЛИТИ ПЕРЕКРИТТЯ БЕЗКАПІТЕЛЬНО-БЕЗБАЛОКОВОЇ КОНСТРУКТИВНОЇ СИСТЕМИ

Викладено кінематичний метод розрахунку міцності середньої плити у конструктивній системі збірно-монолітного безкапітельно-безбалкового перекриття із застосуванням екстремального критерію.

Ключові слова: *залізобетон, міцність, збірно-монолітне безкапітельно-безбалкове перекриття, середня плита.*

УДК 624.012.35:624.073.136

А.Н. Павликов, д.т.н., профессор
Д.Ф. Федоров, к.т.н., ст. преподаватель
А.В. Батиг, магистрант
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СРЕДНЕЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ БЕСКАПИТЕЛЬНО-БЕЗБАЛОЧНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Изложена методика расчета прочности средней плиты в системе сборно-монолитного бескапительно-безбалочного перекрытия с использованием экстремального критерия.

Ключевые слова: *железобетон, прочность, сборно-монолитное бескапительно-безбалочное перекрытие, средняя плита.*

UDC 624.012.35:624.073.136

A.M. Pavlikov, ScD, Professor
D.F. Fedorov, PhD, senior lecturer
A.V. Batig, master student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

KINEMATIC METHOD OF STRENGTH ANALISYS OF MID-SPAN SLAB OF UNCAPITEL UNGRIDER FRAME SRUCTURE

The method of mid-span slab strength design of precast reinforced concrete uncapitel ungrider ceiling structure is given. The extreme criterion is used.

Keywords: *reinforced concrete, strength, precast uncapitel ungrider ceiling structure, mid-span slab.*

Вступ. Серед питань, що стоять сьогодні перед будівельною галуззю України, найактуальнішими є забезпечення доступним житлом середніх за матеріальним рівнем верств населення та створення конструкцій будівель з високою енергоефективністю.

Розв'язання обох проблем можливе за рахунок удосконалення технології зведення будівель на основі впровадження ефективних конструктивних систем, які б давали можливість виконувати огороджувальні конструкції зі спеціально розроблених дрібноштучних залізобетонних багатошарових блоків з високим опором теплопередачі.

З метою розв'язання обох завдань у м. Полтава розпочато впровадження в будівництво житлових і громадських будинків, котрі зводяться за безкапітельно-безбалковою каркасною конструктивною системою.

Як показав отриманий досвід зведення та експлуатації цих експериментальних будівель, упроваджувана конструктивна система характеризується мінімальною кількістю типорозмірів збірних конструкцій, створюючи умови розв'язання обох окреслених проблем за рахунок оптимізації кількості збірних елементів (рис. 1) та витрат матеріалів на їх виготовлення.

Крім того, будівлі з безкапітельно-безбалковою каркасною конструктивною системою стали надзвичайно привабливими для населення внаслідок збільшеної висоти приміщень та можливості легко змінювати внутрішнє архітектурно-планувальне рішення з мінімальними трудовитратами на оздоблення.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Приклади застосування методів розрахунків безкапітельно-безбалкових каркасів та їх елементів у практиці проектування наведені у роботах [1, 2], але на сьогодні ще існує значна кількість нерозв'язаних задач. Особливо це стосується підвищення точності аналітичних моделей дійсної роботи розглядуваної конструктивної системи [3, 4]. Адже, як показують результати експериментально-теоретичних досліджень [5], сучасна конструкція плит наведеного каркаса має значні запаси міцності, що свідчать про надлишкові витрати арматурної сталі. Значною мірою це стосується середньої плити (рис. 1).

Розроблення методів розрахунку плит, опертих по контуру, було темою наукових праць різних авторів, що базувалися на: передумові плоскої роботи системи [1], енергетичних принципах [6], аналізі просторової роботи [7], застосуванні варіаційних принципів [8], методі скінченних елементів з фізичною нелінійністю [9]. Розрахунку надколонної плити безкапітельно-безбалкової системи присвячено працю [10].

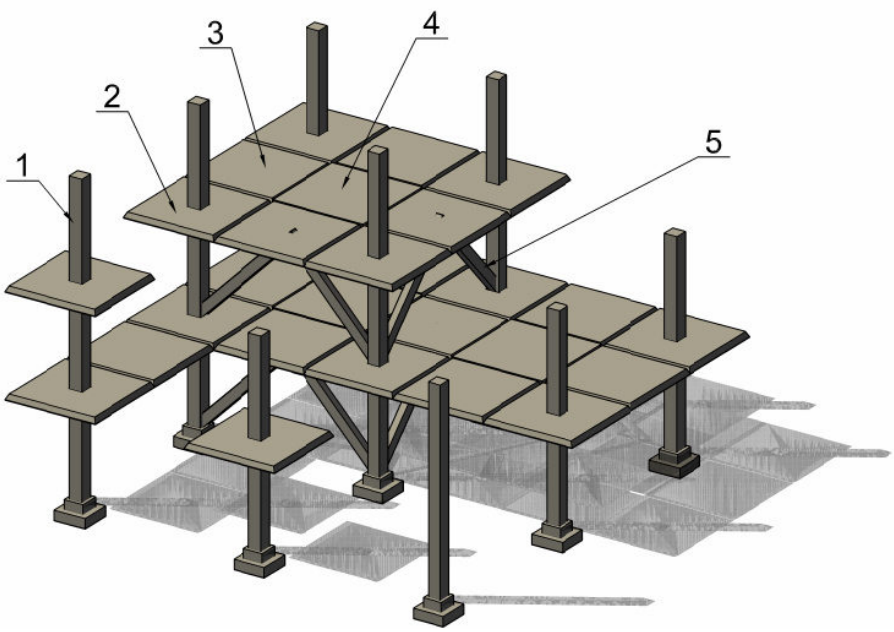

Рис. 1. Схема залізобетонного безкапітельно-безбалкового збірно-монолітного каркаса будівлі: 1 – колона; 2 – надколонна плита; 3 – міжколонна плита; 4 – середня плита; 5 – вертикальна в'язь

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Розрахунок середньої плити у складі безкапітельно-безбалкової каркасної конструктивної системи має свої особливості, пов'язані зі способом її сполучення із сусідніми плитами та характером руйнування. Як свідчить робота [7], використання у розрахунках загальних умов теорії пружно-пластичності у просторовій постановці, нераціональне, оскільки це пов'язано зі значною трудомісткістю як теоретичних обґрунтувань, так і кінцевих формул. Крім того, для плит безкапітельно-безбалкового перекриття впливами другого порядку на напружено-деформований стан конструкції нехтувати не можна [6]. Тому необхідно виконувати розрахунки за деформованою схемою, що додатково ускладнює методику.

Утворення зручних для застосування методів в інженерних розрахунках середніх плит у складі безкапітельно-безбалкового перекриття з урахуванням умов фактичного армування, умов закріплення та характеру руйнування на сьогодні потребує додаткових досліджень.

Постановка завдання. Як відомо, застосування енергетичних методів дозволяє у низці випадків спростити опис процесів у механіці деформування. Зокрема, для розрахунку міцності залізобетонних елементів при використанні екстремального критерію надзвичайно зручним є енергетичний метод [11]. Тому за мету дослідження було поставлено розроблення методики розрахунку міцності середньої плити безкапітельно-безбалкової каркасної конструктивної системи на основі кінематичного методу з використанням екстремального критерію.

Основний матеріал і результати. Вихідними передумовами запропонованої методики розрахунку є такі:

− плита армована рівномірно та без обривів стержнів, тобто площа перерізу арматури у поздовжньому і в поперечному напрямах однакова;

− у момент досягнення конструкцією стану граничної рівноваги, напруження в арматурі досягають межі текучості сталі;

− навантаження на плиту прийнято рівномірно розподіленим по всій площині;

− у момент руйнування пружними деформаціями плити можна нехтувати, оскільки вони значно менші за пластичні деформації, що виникають в утворених шарнірах пластичності.

Технологія влаштування збірно-монолітного безкапітельно-безригельного перекриття передбачає влаштування стику Передерія [2]. Однією з особливостей роботи такого стику є виникнення в ньому в граничному стані лінійного шарніра. Разом із тим за рахунок утворення бетонних шпонок взаємним поперечним зміщенням сусідніх плит можна знехтувати. Зважаючи на особливості закріплення середньої плити у розглядуваній системі перекриття, у теоретичних дослідженнях ця плита може бути розрахована як шарнірно оперта по контуру.

Характер утворення тріщин та розвитку лінійних пластичних шарнірів для квадратних плит відомий [3 – 6] і залежить від умов закріплення кутів цих плит (рис. 2). Відповідно до розглянутого вище способу влаштування стику між середньою та сусідніми з нею плитами, руйнування середніх плит відповідає випадку «б». При цьому в момент вичерпання несучої здатності в плиті утворюються:

− 4 крайові елементи (1 – 4 на рис. 2);

− 4 кутові елементи трикутної форми (5 – 8);

− 4 прикутові елементи (9 – 12).

Геометричні розміри всіх елементів, внаслідок симетрії системи відносно діагоналей плити, повною мірою визначаються двома параметрами – k_1 та k_2 (рис. 3).

Оскільки товщина плити значно менша за інші її розміри, то будемо вважати, що всі пластичні шарніри розташовуються в одній площині. Кожний з утворених елементів плити буде мати свою миттєву вісь обертання, котра в цьому випадку збігається з ребрами плити й утвореними пластичними шарнірами.

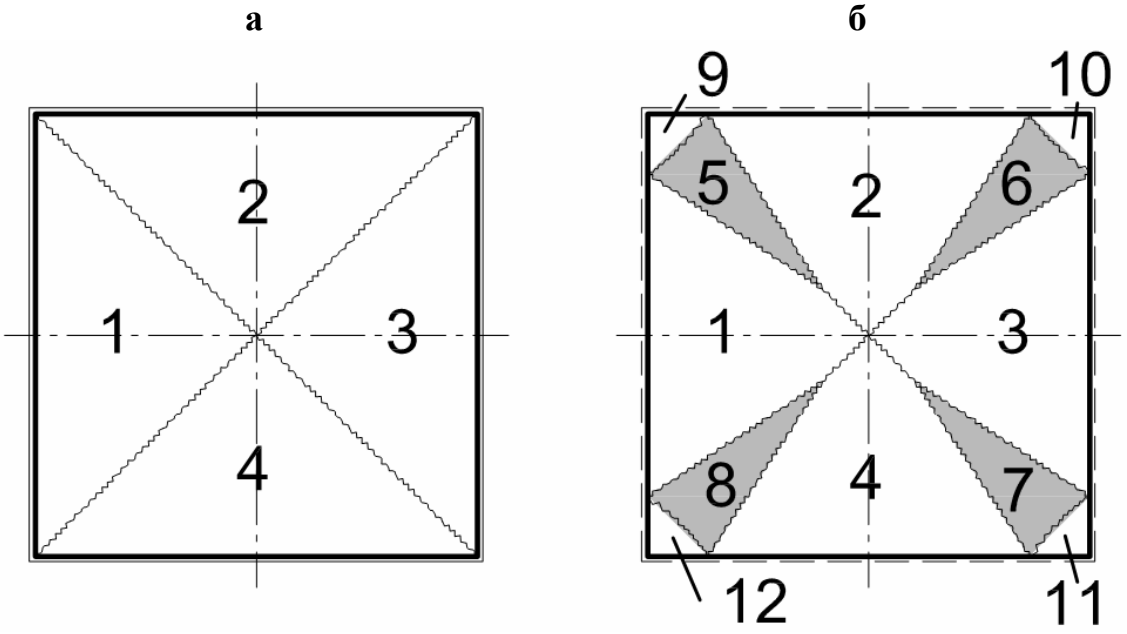

Рис. 2. Можливі форми руйнування прямокутної плити під дією рівномірно розподіленого навантаження: а – при защемлених (закріплених) кутах та достатньому армуванні верхньої зони у куті; б – за відсутності анкеруючої арматури (незакріплених кутах).

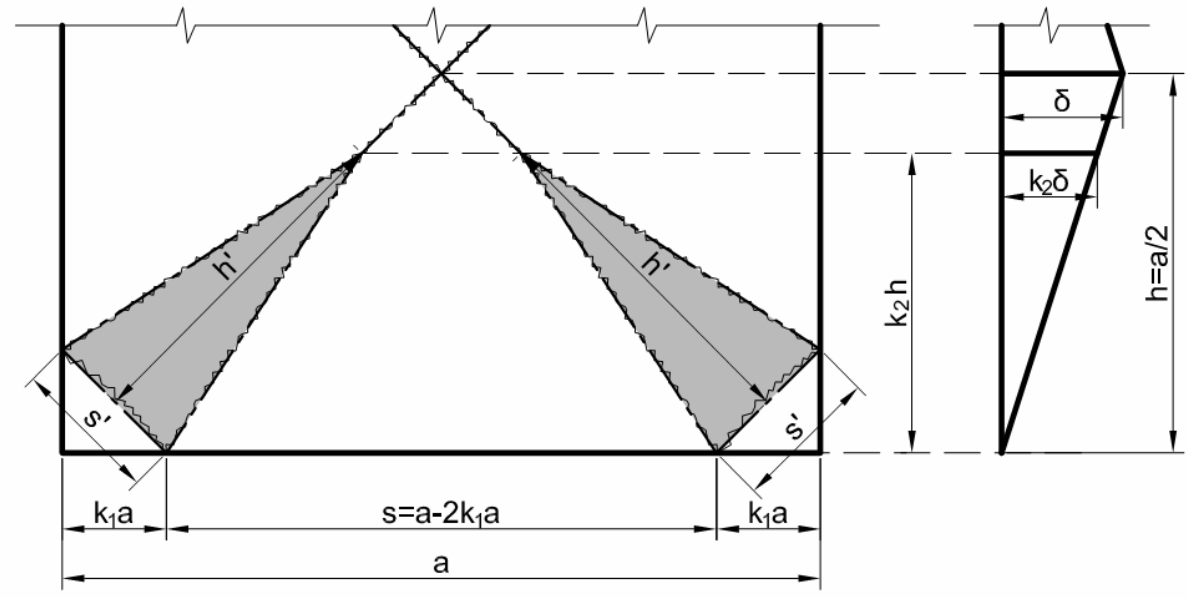

Рис. 3. Схема утворення миттєвих осей обертання у кінематичній схемі руйнування плити

Запишемо рівняння принципу можливих переміщень для граничного стану плити

$$\int_{A_{sl}} \vec{p} \cdot \overrightarrow{\delta(x;y)}\, dxdy - \sum \overrightarrow{M_R} \cdot \vec{\varphi} = 0; \tag{1}$$

$$p \int_{A_{sl}} \delta(x;y)\, dxdy - 4M_R s \frac{\delta}{h} - 4M_R s' \frac{k_2 \delta}{h'} = 0, \tag{2}$$

де p – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження;

$\overrightarrow{\delta(x;y)}$ – переміщення плити у точці з координатами $(x;y)$;

δ – переміщення плити у середині прольоту;

A_{sl} – площа плити у плані;

$\overrightarrow{M_R}$ – погонний вектор-момент в окремому лінійному пластичному шарнірі;

$\vec{\varphi}$ – вектор обертання окремого елемента, що визначається відносно миттєвої осі обертання, при малих значеннях $|\overrightarrow{\varphi}| \approx tg\varphi = \delta / h$;

j, k – індекси для елементів плити (відповідно для крайових і кутових елементів).

Зважаючи на геометрію плити (рис. 3), є справдливими співвідношення

$$\frac{s}{h} = 2 - 4k_1, \tag{3}$$

$$\frac{s'}{h'} = \frac{2k_1}{k_2 - k_1}. \tag{4}$$

З урахуванням передумови про нехтування пружними деформаціями плити

$$\int_{A_{sl}} \delta(x;y)\, dxdy = \frac{\delta a^2}{3} - 4 \cdot \frac{k_2 \delta \cdot 0,5 (k_1 a)^2}{3}. \tag{5}$$

Підставивши у рівність (2) рівняння (3) – (5), після перетворень отримали, що

$$p = \frac{24M_R}{a^2} \cdot \frac{k_2 - k_1 (k_2 - 2k_1 + 1)}{(k_2 - k_1)(1 - 2k_1^2 k_2)}. \tag{6}$$

Рівняння (6) виражає значення граничного рівномірно розподіленого навантаження при всіх можливих розмірах елементів, на які розділяється плита пластичними шарнірами. З усіх можливих варіантів співвідношення розмірів елементів буде реалізованим той, що відповідає мінімуму навантаження. Таким чином, повинна виконуватись умова

$$p = f(k_1, k_2) \to \min. \tag{7}$$

Локальний мінімум функції двох змінних знайдено із системи рівнянь

$$\begin{cases} \dfrac{\partial p}{\partial k_1} = 0, \\ \dfrac{\partial p}{\partial k_2} = 0. \end{cases} \tag{8}$$

Ця система після відповідних перетворень приведено до вигляду

$$\begin{cases} 4k_1^4 k_2 - 4k_1^3 k_2 \left(k_2 + 1\right) + 2k_1^2 \left(k_2^2 \left(k_2 + 4\right) + 1\right) - 4k_1 k_2 \left(k_2^2 + 1\right) + k_2^2 = 0, \\ k_1^2 \left(4k_1^3 - k_1^2 \left(8k_2 + 2\right) + 2k_1 k_2 \left(k_2 + 2\right) - 2k_2^2 + 1\right) = 0. \end{cases} \tag{9}$$

За допомогою числових методів розв'язку систем трансцендентних рівнянь було встановлено, що на проміжку $k_1 \in (0; 0,25) \cap k_2 \in (0;\ 1)$, який відповідає практично можливим значенням шуканих коефіцієнтів, розв'язком цієї системи є значення

$$k_1 = 0,159; \quad k_2 = 0,897.$$

Тепер з використанням рівняння (6) граничне навантаження, що може сприйняти плита, запропоновано обчислювати за формулою

$$p = \frac{22 M_R}{a^2}, \tag{10}$$

де $M_R = \sqrt{\left(M_{Rx} \sin\alpha\right)^2 + \left(M_{Ry} \cos\alpha\right)^2} = f_{yd} A_s \left(\dfrac{d}{a} - \chi \dfrac{f_{yd} A_s}{f_{cd} a^2}\right)$ – за [12];

f_{yd} – розрахункове значення міцності арматури на межі текучості;

A_s – площа перерізу робочої арматури в одному з напрямів плити;

f_{cd} – розрахункове значення міцності бетону на стиск;

d – робоча висота перерізу плити;

$\chi = 0,52...0,59$ – параметр, котрий залежить від класу бетону [12].

Таким чином, задача з перевірки міцності плити при заданому армуванні може бути розв'язана з використанням рівняння (10). Задача з підбору площі перерізу робочої арматури розв'язана на основі умови рівності внутрішнього і зовнішнього згинального моментів та отриманої рівності (10).

$$M_E = M_R = \frac{p a^2}{22} = f_{yd} A_s \left(\frac{d}{a} - \chi \frac{f_{yd} A_s}{f_{cd} a^2}\right), \tag{11}$$

звідки

$$A_s = \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(\frac{1 - \sqrt{1 - 4\chi \bar{\alpha}_m}}{2\chi}\right) a d, \tag{12}$$

де $\bar{\alpha}_m = \dfrac{p a^2}{22 f_{cd} d^2}$ – відносний згинальний момент.

Висновки. Виконані дослідження показують, що використання енергетичного принципу та екстремального критерію міцності дозволяє отримати прості формули для розрахунку міцності середніх плит безкапітельно-безбалкової каркасної конструктивної системи.

Отримані залежності мають вигляд зручний для застосування в інженерній практиці й дозволяють розв'язувати як пряму, так і зворотну задачі розрахунку плити: підбір площі поперечного перерізу робочої арматури та перевірку міцності у нормальному перерізі.

Література

1. Дорфман А. Э. Проектирование безбалочных бескапительных перекрытий / А. Э. Дорфман, Л. Н. Левонтин. – М.: Стройиздат, 1975. – 124 с.

2. Унифицированнная система сборно-монолитного безригельного каркаса. Основные положения по расчету, монтажу и компоновке зданий: рабочий проект в 9-ти выпусках. Серия КУБ-2,5. / Фирма «КУБ» СП «ИНЭКС» / Научно-проектно-строительное объединение монолитного домостроения. – М.,1990. – 49 с.

3. Жарко Л. О. Натурні випробування фрагмента перекриття багатоповерхового житлового будинку на основі системи «КУБ-2,5» / О. Л. Жарко, Н. С. Петренко // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 74: в 2-х кн.: Книга 2. – К. : ДП НДІБК, 2011. – С. 590 – 597.

4. Висновок за результатами натурних випробувань фрагмента перекриття багатоповерхового житлового будинку з вбудованими приміщеннями соціального призначення по бульвару Боровиковського, 11 в м. Полтава– К. : ДП НДІБК, 2009. – 21 с.

5. Результати експериментальних досліджень міцності та напружено-деформованого стану надколонної плити збірно-монолітного перекриття / А. М. Павліков, С. С. Жарий, О. В. Чередніков, Д. В. Панасенко. // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків, 2012. – № 105 – С.22 – 27.

6. Дубинский А. М. Расчет несущей способности железобетонных плит / А. М. Дубинский. – К. : Гос. издат. по строит. и арх. УССР, 1961. – 184 с.

7. Азізов Т. Н. Просторова робота залізобетонних перекриттів. Теорія та методи розрахунку: дис... докт. техн наук: 05.23.01 / Т. Н. Азізов – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 406 с.

8. Барастов В. М. Исследование комбинированных монолитных перекрытий пониженной массы и энергоемкости: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В. М. Барастов. М., 2005. – 204 с.

9. Клованич С. Ф. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты / С. Ф. Клованич, В. И. Шеховцов. – Одесса: ОНМУ, 2011. – 119 с.

10. Павліков А. М. Конструювання та розрахунок плит збірно-монолітних конструктивних систем житлових будівель / А. М. Павліков, С. С. Жарий // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). Вип. 24. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – С. 8 – 13.

11. Mitrofanov V. P. Extreme strength criterion and design of RC elements / Vitalii Pavel Mitrofanov // Structural Concrete (impact factor: 0.27), 2009. – №10(4). – P.163 – 172.

12. Павліков А. М. Розрахунок міцності нормальних перерізів балкових елементів за нелінійною деформаційною моделлю (на основі ДБН В.2.6-98:2009) : навчальний посібник / А. М. Павліков, О. В. Бойко. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 85 с.

Надійшла до редакції 17.10.2013

© А.М. Павліков, Д.Ф. Федоров, А.В. Батіг