

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.85, 692.522.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-35-54

Алгоритм оценки деформации плит перекрытий по пролетно-опорным схемам здания^{*}

В.И. ЗИНОВ^а, В.М. КАРТАК^б, Ю.И. ВАЛИАХМЕТОВА^с

450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Уфимский университет науки и технологий

^а zinovvladislavufa@gmail.com ^б kvmail@mail.ru ^с julikas@inbox.ru

Планирование опорных конструкций здания является проблемой крайне широкого выбора. При этом оценка одного варианта с помощью метода конечных элементов занимает слишком большое количество времени для внедрения автоматизированных средств и средств поддержки принятия решений. Поэтому предлагается выделить быстро рассчитываемую оценку плана опор, которая позволила бы корректно сравнить два плана по потенциальным деформациям. Для этого были проанализированы существующие эвристические подходы моделирования функциональной связи плана опор и возникающих деформаций. В настоящей работе в качестве основы оценки взято понятие пролета. Далее формулируется задача детерминирования пролетов, сводящаяся к задаче геометрического покрытия многосвязного ортогонального полигона. В качестве целевой функции выступает максимизация корреляционной связи между выявляемой оценкой и реальными расчетными значениями деформаций.

Для определения пролетов на области перекрытия предлагается новый алгоритм на основе заматающей прямой, состоящий из трех шагов: разбиения области перекрытия, определения соседства участков разбиения и сбор участков в пролеты. Для того чтобы определить общую оценку опорно-пролетной схемы, выводится оценка одного пролета на основе трех параметров: площади пролета, соотношения сторон и взаиморасположения опор, ограничивающих пролет. Поскольку последний параметр является качественным, был проведен дополнительный анализ количественных параметров, способных корректно его описать. Критерием анализа была выбрана корреляция с расчетными деформациями в пролете. Наилучшим параметром был признан параметр максимального периметрального расстояния между опорами. Была выделена наилучшая функция для оценки пролетов. Кроме того, были проанализированы различные подходы к сбору пролетов из участков разбиения на последнем шаге алгоритма.

Ключевые слова: оптимизация в строительной сфере, плиты перекрытий, эвристические алгоритмы, пролетно-опорные системы зданий, оценка деформаций плит, оценка взаиморасположения опор, детерминация пролетов, эвристические параметры

^{*} Статья получена 18 августа 2023 г.

ВВЕДЕНИЕ

Деформации плит перекрытий – важный аспект безопасности здания [1–3]. Деформации зависят от места опор под перекрытием [4]. Оценка деформаций по топологии опор рассчитывается в программах анализа строительных конструкций. Здание моделируется в САПР, экспортируется в комплекс анализа и оценивается на наличие деформации с помощью МКЭ. Результаты анализируются вручную, здание сообразно изменяют или конструктивно наполняют.

Такой процесс отнимает много времени из-за экспорта, оценки и ремоделирования. Поэтому предлагается найти такую оценку топологии опор на деформации в плитах, дающую не точное значение напряжений, а корректное сравнение разных вариантов. Это позволит разработать методы оптимизации опорных схем и реализовать их в виде средств поддержки принятия решений.

Деформации плит связаны с расстоянием между опорами (рис. 1). Области между опорами называют пролетами. Именно пролеты связывают топологию опор и деформации плит: чем больше пролет, тем большие деформации испытывает плита [1, 2]. Поэтому в качестве конечного объекта оценки в настоящей работе были приняты пролеты, формируемые расположением опор.

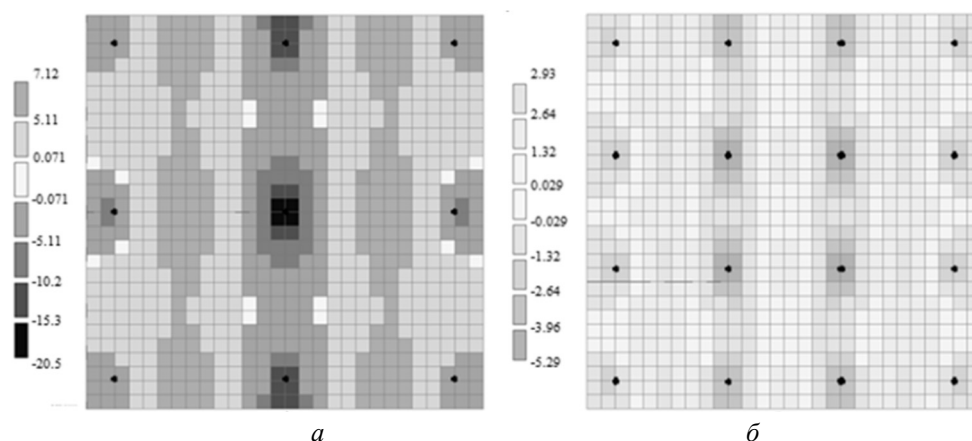


Рис. 1. Мозаика напряжений для условной плиты, имеющей 9 (а) и 16 (б) колонн

Fig. 1. Stress map of a conventional slab with 9(a) and 16 (b) columns

Пролеты определяются однозначно в регулярных схемах и приближенно – в нерегулярных. Такая задача – особый вид геометрического покрытия (ГП) многосвязного полигона, в котором перекрытие – это контур полигона, а стены – внутренние препятствия. Несмотря на проработанность задач ГП, неформализованность характеристик пролетов в нерегулярной схеме порождает необходимость в специализированном алгоритме детерминации пролетов.

Рассмотрим работы, посвященные анализу пролетно-опорных схем. В работе Р. Sharafi [5] описывается модель оптимизации конструкций, в которой связь между стоимостью проекта и топологией опор выражается через рассчитанные моменты жесткости и смещения плиты; в работе [6] для оценки деформаций применяется метод заменяющих рам, который подходит только для регулярных схем. В работе [7] для сравнения схем опор в популяционных

алгоритмах применяется цепочка правил, попарно сравнивающих различные показатели конструктивных систем. Используется также и нейросетевой подход [8]. Однако во многих работах модели строятся на основе заранее рассчитанных воздействий [9–12].

В этих работах в большей степени рассматривается проблема оптимизации регулярных опорных схем. С точки зрения алгоритмического анализа деформационных воздействий можно встретить разные направления изучения, однако для рассматриваемой проблемы анализа топологий опор в нерегулярных схемах наиболее подходящими являются подход разбиения плоскости перекрытия и эвристические правила сравнения схем.

В настоящей статье предлагаются эвристический алгоритм детерминирования пролетов перекрытий на основе модели задачи ГП и подход к их оценке, коррелирующей с реальными деформациями плит. В разделе 1 дана постановка задачи детерминирования пролетов. В разделе 2 описан алгоритм детерминирования пролетов по плану опор. В разделе 3 обосновывается оценка пролетов и общая оценка схемы опор. В разделе 4 приводится анализ алгоритма.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многосвязным ортогональным полигоном (МОП) считают ограниченную ортогональным многоугольником область, содержащую запретные зоны – прямоугольники [13]. Размеры МОП определяются по минимальному огибающему его прямоугольнику. МОП задается областью перекрытия и опорами – запретными областями внутри МОП. Пролеты – прямоугольные области внутри МОП, не пересекающие его запретных областей.

По заданному МОП получена точная расчетная оценка (РО) деформаций плиты. За такую оценку может быть принята, например, дисперсия или величина размаха значений напряжений, полученных по расчету. Требуется найти такое покрытие МОП пролетными областями, чтобы оценка полученного множества покрытия (пролетов) наилучшим образом коррелировала с РО.

Примем стандартную математическую модель задачи ГП. Введем прямоугольную систему координат: оси Ox и Oy по нижней и левой граням огибающего прямоугольника; $W, L \in \mathbb{Z}_+$ – линейные размеры. Примем запретные участки за $Ob_v = \langle (\chi_v, \eta_v), (\omega_v, \lambda_v) \rangle$, $v = \overline{1, \mu}$, где $(\chi_v, \eta_v) \in \mathbb{Z}_+$ – координаты левого нижнего угла; $(\omega_v, \lambda_v) \in \mathbb{Z}_+$ – размеры участка; μ – число участков.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С КРИТЕРИЕМ КОРРЕКТНОСТИ ОЦЕНКИ

Даны МОП $P = \langle W, L, Ob \rangle$ и рассчитанная оценка деформаций f^P . Требуется найти план покрытия P пролетами $\overline{Sp} = \{Sp_{i=\overline{1, m}}\}$, максимизирующий корреляцию общей оценки пролетов $V(\overline{Sp})$ и точной оценки f^P :

$$\text{corr}(V(\overline{Sp}), f^P) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $Sp_i = \langle (x_i, y_i), (w_i, l_i) \rangle$, $i = \overline{1, m}$ – прямоугольный, покрывающий МОП пролет с размерами $w_i \times l_i \in \mathbb{Z}_+$ и точкой левого нижнего угла $(x_i, y_i) \in \mathbb{Z}_+$; m – полученное количество покрывающих элементов при условиях:

$$x_i + w_i \leq W, \quad y_i + l_i \leq L, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

$$Sp_i \cap Sp_j = \emptyset, \quad i, j = \overline{1, m}, \quad i \neq j, \quad (3)$$

$$Sp_i \cap Ob_v = \emptyset, \quad i = \overline{1, m}, \quad v = \overline{1, \mu}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m w_i l_i = S^{\text{МОП}}. \quad (5)$$

Условие (2) ограничивает пролеты областью МОП. Условие (3) обеспечивает неперекрывание пролетов между собой, а условие (4) – с препятствиями. Условие (5) требует полного покрытия пролетами перекрытия. Анализ корректной общей оценки пролетов $V(\overline{Sp})$ проводится в разделе 3. Предлагаемая математическая модель применительно к проблеме оценки плана опор на деформации в перекрытиях позволяет формализовать алгоритм детерминации пролетов и их оценку, оперируя единой системой параметров. Таким образом, была достигнута систематизация проблемной ситуации.

2. АЛГОРИТМЫ ДЕТЕРМИНИРОВАНИЯ ПРОЛЕТОВ НА ОБЛАСТИ ПЕРЕКРЫТИЯ

Одним из наиболее известных методов геометрического покрытия МОП является предложенный Э.И. Хасановой метод матричной декомпозиции [13, 14]. Метод состоит из двух этапов: декомпозиции полигона и объединения элементов декомпозиции. На первом этапе МОП разбивается линиями – продолжениями граней препятствий. Это позволяет представить область МОП в виде матрицы – участков декомпозиции полигона, а также двух списков – размеров соответствующих участков. На втором этапе полученные участки декомпозиции объединяются по выбранной стратегии.

Этот метод с точки зрения проблемы детерминирования пролетов имеет существенный недостаток – чрезмерное дробление пролетных областей (рис. 2). Структура пролета должна зависеть только от смежных ей препятствий, а не от всех. Поэтому предлагается новый алгоритм декомпозиции МОП, подходящий для проблемы детерминации пролетных областей.

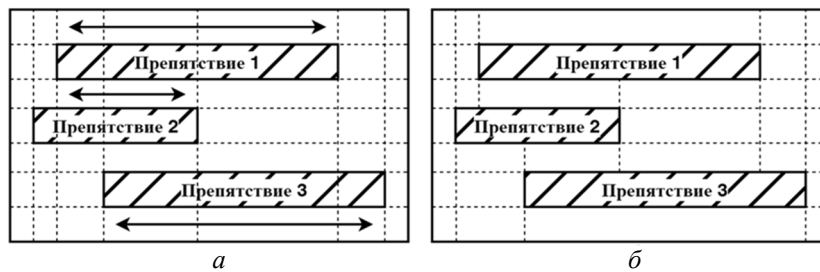


Рис. 2. Разбиение методом матричной декомпозиции (а) и требуемое (б)

Fig. 2. Partitioning by the matrix decomposition method (a) and the required (b)

Алгоритм детерминации пролетов разделен на три шага: разбиение области перекрытия, определение соседей участков разбиения и сбор пролетов.

2.1. РАЗБИЕНИЕ ОБЛАСТИ ПЕРЕКРЫТИЯ

На первом этапе перекрытие разбивается на участки. Для этого используется идея алгоритма заметающей прямой, предложенного для анализа взаиморасположения объектов на плоскости [15]. Алгоритм итеративно проходит по упорядоченным элементам, отслеживая их показательные состояния.

Для P и каждого препятствия Ob возьмем пару вертикальных граней: левой ставится метка начала, правой – метка конца. Упорядочив грани по Ox , получим список событий Ev . Если у двух событий абсциссы одинаковы, то первым ставим на обработку событие грани с меньшей ординатой; если обе координаты одинаковы, то первым будем обрабатывать событие конца.

Определим заметающую прямую t . Назовем итерациями прямой уникальные абсциссы списка событий $t \in \{x(Ev)\}_{\neq}$. Зададим три списка: открытые препятствия $OpOb$, открытые полосы разбиения $OpSt$, закрытые участки разбиения $CLAr$. Для каждой полосы из $OpSt$ определяется список меток разбиения $\{Lb\}$. Обозначим за Ev_1 вершину событийного списка.

При рассмотрении очередного события определяется его метка. Если событие – начало препятствия, то препятствие добавляется в список $OpOb$. Полосы из $OpSt$, прилегающие к t и вершинам грани события, закрываются, т. е. полоса разбивается на участки по метками разбиения $\{Lb\}$. Полученные участки добавляются в $CLAr$. Если событие – конец препятствия, то оно удаляется из $OpOb$ и добавляется во временный буфер $CIOb$. По правой грани препятствия этого события создается новая полоса и добавляется на соответствующее место в $OpSt$.

Обозначим за $OpOb(t)$ препятствия, открытые на текущей итерации t . Между такими препятствиями фиксируем интервалы пролетных полос Int . Если интервал содержит препятствие, открытое ранее или закрытое на текущей итерации $CIOb$, то этот интервал исключается из рассмотрения. Если открытая полоса разбиения входит в один из таких интервалов, то в ее список меток разбиения $\{Lb\}$ заносится текущая абсцисса заметающей прямой t .

Алгоритм разбиения области перекрытия:

Начало

1. составить список Ev из упорядоченных по Ox граней препятствий Ob ;
2. определить списки $OpOb$, $OpSt$, $CLAr$, заметающие прямую t ;
3. **пока** $Ev \neq \emptyset$:
4. $t = x(Ev_1)$, $CIOb = \emptyset$;
5. **пока** $t \equiv x(Ev_1)$:
6. **если** Ev_1 – начало препятствия:
7. добавить препятствие в $OpOb$;
8. найти закрываемые полосы и разбить по меткам $\{Lb\}$;
9. добавить участки в $CLAr$;
10. **иначе:**
11. удалить препятствие из $OpOb$ и добавить в буфер $CIOb$;
12. добавить новую полосу $OpSt$;

13. удалить вершину списка $Ev \setminus Ev_1$;
14. задать интервалы Int по $OpOb(t)$;
15. исключить из Int интервалы $\cap OpOb(<t)$ и $\cap ClOb$;
16. добавить метку разбиения для полос: $t \rightarrow \{Lb\} : \forall OpSt \subset Int$;

Конец

Преимущество алгоритма состоит в сохранении порядка элементов списков $OpSt$ и $OpOb$ и в линейной зависимости числа открытых полос к данной итерации от числа закрытых препятствий: в худшем случае (в конце алгоритма) будут одновременно открыты $M = 2N + 1$ полос, где N – число закрытых препятствий. Но благодаря сохранению порядка полос по Oy операции закрытия (шаг 8) и открытия полос (шаг 12) и фиксации меток разбиения (шаги 14–16) могут выполняться за $O(\log(M))$. Поэтому временная сложность алгоритма сводится к сложности метода сортировки граней в Ev .

На рис. 3 изображен пример разбиения области перекрытия.

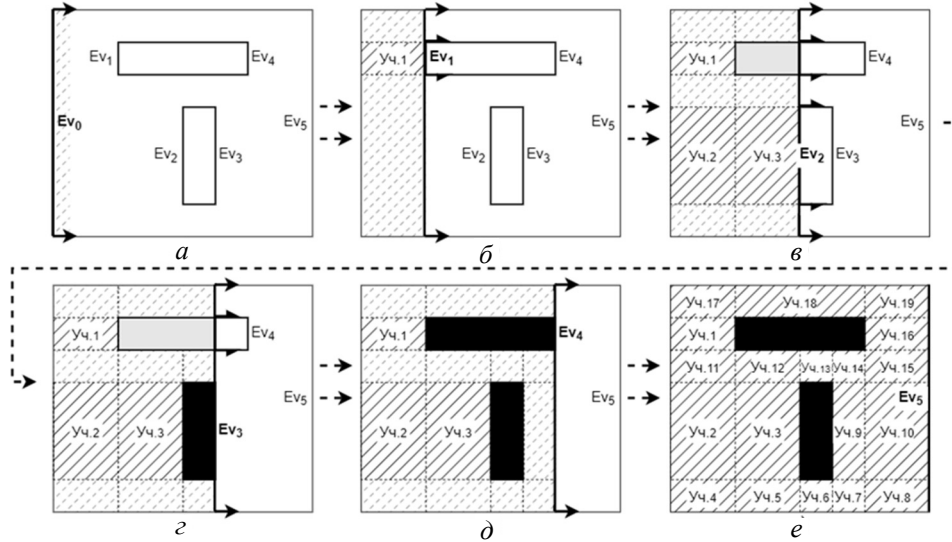


Рис. 3. Пример работы алгоритма разбиения области перекрытия

Fig. 3. An example of the floor area partitioning algorithm

На рис. 3, а изображено начальное событие. На рис. 3, б, в – события начала препятствия: разделение полос, их закрытие и разбиение по меткам с выделением участков в $ClAr$. На рис. 3, г, д показаны события конца препятствия с созданием новой полосы; рис. 3, е отражает последнее событие: открытые полосы закрываются и разбиваются на участки.

В результате выполнения алгоритма перекрытие разбивается на участки разбиения $ClAr$. Участки не пересекают препятствия и друг друга.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСЕДСТВА УЧАСТКОВ РАЗБИЕНИЙ

Для всех участков из $ClAr$ определяются соседи $Adj(ClAr_k, \oplus)$ по четырем ортогональным направлениям $\oplus$. Соседом может быть участок или препятствие. Если сосед – препятствие, то ставится метка 1. Назовем потенциалом

по направлению $Ptnl(Clar_k, \oplus)$ длину вектора от участка до ближайшего препятствия. При закрытии полосы ее участки определяют левых и правых соседей; крайние участки фиксируют соседство с препятствиями. Это позволяет легко найти соседей и потенциалы каждого участка слева и справа.

Для определения верхних и нижних соседей вертикальные грани участков $Clar$ и препятствий Ob упорядочиваются по Oy . Грани участков фиксируют метки и формируют список событий Ev . Грани препятствий строят список $ObEg$. Если первые два события $Ev_1 = Ev_2$, то их участки являются соседями сверху и снизу. Иначе по первому событию Ev_1 среди $ObEg$ ищется грань $ObEg_1$, прилегающая к участку; все пройденные грани отбрасываются.

Алгоритм определения соседства участков разбиения:

Начало

17. составить списки событий Ev из $Clar$ и граней препятствий $ObEg$;
18. **пока** $Ev \neq \emptyset$:
19. **если** $|Ev| \neq 1$ **и** $y(Ev_1) = y(Ev_2)$:
20. определен сосед сверху для Ev_1 и сосед снизу для Ev_2 ;
21. удалить верхние события $Ev \setminus \{Ev_1, Ev_2\}$;
22. **иначе:**
23. **пока** $ObEg_1$ пройдено:
24. удалить грань $ObEg \setminus ObEg_1$;
25. **если** Ev_1 – начало участка, **то:** $ObEg_1$ – сосед снизу;
26. **иначе:** $ObEg_1$ – сосед сверху;
27. определить потенциалы для $\forall Clar$;

Конец

Сложность алгоритма определения соседства участков разбиения сводится к сложности упорядочивания граней, так как алгоритм выполняется последовательно без внутренних циклов. В результате выполнения алгоритма для всех участков разбиения определяются соседи по четырем направлениям.

2.3. СБОР ПРОЛЕТОВ

Последний этап состоит в сборе пролетов из участков $Clar$. Участки упорядочиваются в список Ar ; подход к упорядочиванию $Presort(Clar)$ является одной из исследуемых в настоящей работе вариативностей (см. раздел 4).

При рассмотрении очередного участка Ar_i задается область пролета Sp . По каждому направлению пролета $\oplus$ задается список крайних участков – фронт $Fr(Sp, \oplus)$. Каждый фронт задает список соседей – границу пролета $Brd(Sp, \oplus) = \{Adj(Clar_k, \oplus) | Fr(Sp, \oplus)\}$. Если границе принадлежит препятствие или участок другого пролета, то это направление считается закрытым. Потенциал пролета по направлению – это максимум потенциалов фронта:

$$Ptnl(Sp, \oplus) = \max (Ptnl(Clar_k, \oplus) | Fr(Sp, \oplus)). \quad (6)$$

По каждой открытой границе пролета $Brd_{\square}(Sp, \oplus)$ на каждой итерации определяются суммарная площадь ее участков $BS(Sp, \oplus)$ и наибольшая сумма потерь потенциала по перпендикулярным направлениям $LP(Sp, \oplus)$:

$$BS(Sp, \oplus) = \sum_{Brd_{\square}(Sp, \oplus)} S(Clar_k); \quad (7)$$

$$LP(Sp, \oplus) = \max_{Brd_{\square}(Sp, \oplus)} (Ptnl(Sp, \perp \oplus) - Ptnl(Clar_k, \perp \oplus)). \quad (8)$$

Из направлений $LP = 0$ выбирается направление с наибольшим BS . Если таких направлений нет, то выбирается открытое направление с лучшим показателем полезности *Benefit* (вторая из исследуемых вариативностей). Аналогично *Presort* различные варианты *Benefit* рассмотрены в разделе 4. Участки границы по выбранному направлению добавляются в пролет, по ним задается новый фронт, крайние участки дополняют перпендикулярные фронты. Сбор продолжается, пока все границы пролета не будут закрыты. Если площадь пролета больше минимума $S(Sp) > \min_S$, то пролет добавляется к набору $\overline{Sp}$.

Алгоритм сбора пролетов:

Начало

28. составить список Ar по *Presort*($Clar$);
29. **пока** $Ar \neq \emptyset$:
 30. **если** $\exists Sp \in \overline{Sp} : Ar_1 \in Sp$, **то**: $Ar \setminus Ar_1$ и **продолжить**;
 31. задать пролет Sp по Ar_1 и фронты пролета;
 32. **пока** $\exists$ открытое направление:
 33. по $Brd_{\square}$ рассчитать BS и LP ;
 34. **если** $\exists LP = 0$, **то**: выбрать направление с $BS \rightarrow \max$;
 35. **иначе**: выбрать направление с $Benefit \rightarrow \max$;
 36. добавить границу по направлению в пролет $Brd(Sp, \oplus) \rightarrow Sp$;
 37. дополнить $Fr(Sp, \perp \oplus)$ крайними участками границы;
 38. **если** $S(Sp) > \min_S$, **то**: добавить пролет Sp в $\overline{Sp}$; (9)
 39. вычислить общую оценку $V(\overline{Sp})$;

Конец

В отличие от прошлых шагов, алгоритм сбора пролетов содержит два вложенных цикла: по свободным участкам (шаг 29) и по участкам открытых границ (шаг 32). Но оценить связанную с этим временную сложность трудно из-за зависимости от функций *Presort* и *Benefit*. В худшем случае сложность алгоритма – N^2 , но на практике это невозможно, так как требует одновременно абсолютного соседства всех участков и крайне высокого порога принятия пролетов. Время работы алгоритмов обсуждается в разделе 4.

На рис. 4 показан пример работы алгоритма для части плиты с опорами. В качестве *Presort* и *Benefit* взяты критерии наибольшей площади. Пролет задается участком с наибольшей площадью. Поскольку он ограничен снизу, закрывается нижнее направление (перекрестные линии) и отбрасываются из рассмотрения все недостижимые участки (прерывистые линии). Дальнейшие шаги аналогичны, направление сбора обозначено жирными стрелками.

В результате выполнения алгоритма на плоскости перекрытия определяется множество пролетов, собранных в соответствии с выбранным подходом.

Представленный алгоритм детерминации пролетов состоит из трех этапов: разбиения перекрытия, определения соседства участков и сбора пролетов. На первом этапе плита разбивается на участки заметающей прямой; на втором определяется соседство участков, что связывает их в единую структуру; на третьем этапе участки собираются в пролеты по заданным критериям.

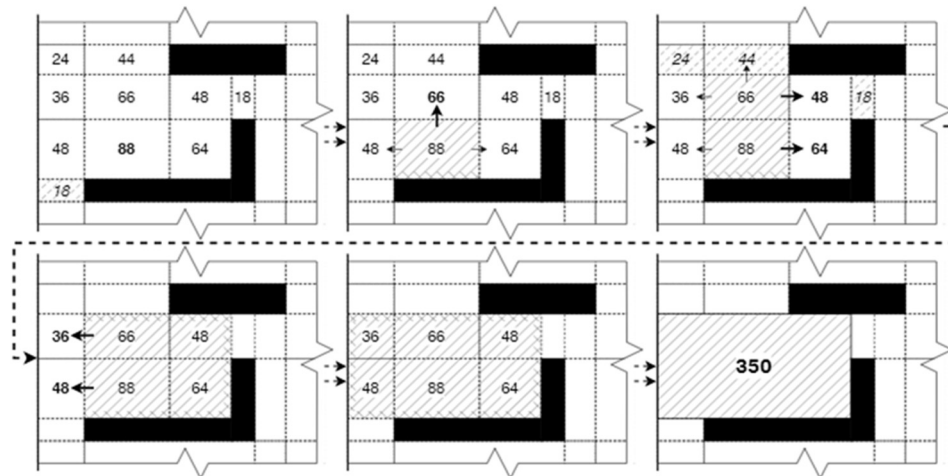


Рис. 4. Примера работы алгоритма сбора пролетов для некоторой части перекрытия

Fig. 4. An example of the spans assembling algorithm for some part of the floor

С одной стороны, алгоритм позволяет достаточно быстро получить разбиение плиты на пролеты, с другой – сводит требование по корреляции оценки пролетной схемы (1) к двум вариативным функциональным критериям: способу предупорядочивания участков разбиения перекрытия для сбора в пролет *Presort* и показателю полезности сбора по направлению *Benefit*.

3. ОПИСАНИЕ ОЦЕНКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЛЕТОВ

Деформации плиты зависят от пролетов. Именно пролеты задают толщину плиты и класс бетона в ней [1–3]. Основные параметры пролета, влияющие на деформации, это площадь, отношение сторон и расположение опор. Назовем эти параметры конфигурацией пролета. В этом разделе приведен анализ влияния параметров пролета на деформации, сравниваются варианты оценок пролетов по их конфигурации.

В отличие от площади и отношения сторон, компонента расположения опор – качественная характеристика. Для его количественной формализации проведен анализ параметров, связанных с расположением опор в пролете.

3.1. АНАЛИЗ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОЛЕТНЫХ ОПОР

Эвристические меры описания опор в пролетах можно разделить на ряд классов, например, оценки пространства между опорами и другие. Критерий сравнения – корреляция с рассчитанным напряжением в плите в пролете. Далее описывается основа для анализа, наборы параметров и результаты их анализа.

Была подготовлена модель пролетной системы. Эксперимент был проведен в ПО «ЛИРА-СОФТ». За критерии сравнения приняты средняя дисперсия D напряжений в КЭ и размах R их значений. Варианты схем, порождающие невязку решения или при которых у пролета нет опор, не учитываются.

Настройки модели: плита 12×15 м, пролетная область 6×9 м, толщина 30 см, модуль упругости $3e+006$ т/м², коэффициент Пуассона 0.2, удельный вес материала 2 т/м³; нагрузка вертикальная трехуровневая, каждый уровень равномерен: 7 т/м² (центральная область 3×6 м), 2.5 т/м² (огibaющий контур 6×9 м), 1.5 т/м² (огibaющий контур 12×15 м); конечные элементы заданы регулярной сеткой с шагом 1.5 м (количество элементов – 80).

Был проведен анализ выбранных эвристических параметров. Параметры разделены на меры. Краткое описание и анализ параметров представлены в табл. 1. Для анализа параметров применены линейный коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Таблица 1

Table 1

Анализ эвристических параметров расположения опор

Analysis heuristic parameters of the supports topology

Пара-метр	F	Примечание	Мера	Линейная		Ранговая	
				D	R	D	R
SRA	Sum	Радиальные области по опорам	Площадь	0,54	0,66	0,92	0,85
SAM	Sum	Пролет разделяется на опорные области относительно центра пролета и диагоналей		−0,27	−0,31	−0,33	−0,29
MAM	Max			0,3	0,36	0,4	0,4
AAM	Avg			0,28	0,34	0,55	0,48
UCA	–	Не покрытая опорами площадь		0,6	0,71	0,9	0,82
MPD	Max	Расстояние между двумя опорами вдоль периметра	Расстояние	0,67	0,81	0,97	0,95
DPD	Var			0,7	0,78	0,96	0,89
MED	Max	Евклидово расстояние между опорами		0,14	0,31	0,61	0,65
DED	Var			0,23	0,3	0,62	0,55
SVM	Sum	Параболоид по опорной области с высотой, равной большему расстоянию области	Объем	0,59	0,72	0,85	0,85
MVM	Max			0,65	0,77	0,87	0,87
AVM	Avg			0,51	0,59	0,83	0,77
ASV	Max	Угол: середина отрезка опор, центр пролета, большая грань	Общая	0,14	0,27	0,47	0,46
ELD	–	Отклонение фигуры с вершинами в опорах от равновеликой и равно-сторонней		0,29	0,39	0,58	0,59
DC	–	Расстояние от центра пролета до центроида всех опор		0,52	0,63	0,66	0,68

Лучшими оказались параметры *MPD*, *DPD*, *UCA*, *MVM*; хорошие результаты ранговой корреляции показывают *SRA* и *SVM*. Таким образом, были выявлены наилучшие параметры, описывающие деформации плит в пролетах. Далее на их основе предлагаются варианты функций оценки пролетов.

3.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ОЦЕНКИ ПРОЛЕТОВ

Обозначим итоговую оценку пролета за $V(Sp) = V(S(Sp), \phi(Sp), \{Pr\})$, где $S(Sp)$ – площадь пролета; $\phi(Sp)$ – соотношение сторон пролета; $\{Pr\}$ – эвристический параметр расположения опор, один из *MPD*, *DPD*, *UCA*, *MVM*, *SRA* и *SVM*. Далее приводится анализ конструктивных ограничений.

Важным ограничением перекрытий является минимальная толщина. По строительным нормам [1–3, 16] толщина плиты должна быть не меньше 1:30 размера наибольшего пролета. Толщина зачастую подбирается заранее, а ограничивают именно размеры пролетов. Пусть допустимый размер пролета $\max_{size} = 30B$, где B – заданная толщина перекрытия. Тогда оценка размера пролета $size(Sp) \leq \max_{size}$. За нее зачастую берется наименьшее расстояние между опорами. В регулярной опорной схеме – наименьшая сторона пролета, а в нерегулярной, рассматриваемой нами, в худшем случае – диагональ.

Поскольку любой пролет, нарушающий рассмотренное конструктивное ограничение, должен быть хуже любого другого пролета, было решено разделить оценку на две части: $V(Sp) = \hat{V}(Sp) + Penalty(Sp)$, где $V(Sp) \in [0; 0.5]$ – основная оценка, а $Penalty(Sp)$ – штрафное слагаемое:

$$Penalty(Sp) = \begin{cases} 0.5, & \text{если } size(Sp) > \max_{size}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, было определено штрафное слагаемое общей оценки. Далее формулируются различные варианты оценки пролетов.

3.3. ВАРИАНТЫ И АНАЛИЗ ОЦЕНКИ ПРОЛЕТОВ

Обозначим за $S(FSI)$ площадь плиты. Для оценки корректности функций использовалась корреляция со значениями напряжений в плитах в разных конфигурациях. Проанализированы несколько групп конфигураций:

- группа 1: $S(Sp) - \{36; 144\}$; $\phi(Sp) - \{1/1; 4/9; 1/4\}$;
- группа 2: $S(Sp) - \{16; 64; 256\}$; $\phi(Sp) - \{1/1; 1/4\}$;
- группа 3: $S(Sp) - \{24; 54; 96; 150\}$; $\phi(Sp) - \{2/3; 1/6\}$.

Для характеристики расположения опор был выбран параметр *MPD* в интервале от 0.2 до 0.5. Различные варианты оценок представлены в табл. 2. В качестве $S(FSI)$ взята суммарная площадь всех моделируемых пролетов 840 м². Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 2

Table 2

Формулировка и описание функций конфигурационных оценок пролетов**Formulation and description of the span configuration estimation functions**

№ п/п	Функция	Описание
1	$((S(Sp) / S(FSI))^2 + \varphi^2 + Pr^2) / 6$	Равнозначная квадратичная
2	$\left((S(Sp) / S(FSI))^{(Pr^2 + \varphi^2)/2} \right) / 2$	Степенная квадратично-суммарная
3	$(S(Sp) \cdot \varphi^{Pr} / S(FSI))^{0.5+Pr-Pr^2} / 2$	Двухосновная степенная
4	$\left(\left(\frac{S(Sp)}{S(FSI)} \right)^2 + \left(1 - \frac{9}{13} \left(\varphi - \frac{2}{3} \right)^2 \right) + \sqrt{Pr} \right) / 6$	Квазиравнозначная
5	$\frac{\varphi^{-(Pr+2/3)^2} (S(Sp))^{1+Pr^2} (\log_4 S(FSI))^2}{2 (\log_4 S(Sp))^{1+Pr^2} (S(FSI))^2}$	Степенная с коэффициентом

Таблица 3

Table 3

Результаты анализа функций оценки пролетов**Analysis results of span estimation functions**

Функция	Функция 1		Функция 2		Функция 3		Функция 4		Функция 5	
Корреляция	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая
<i>MPD</i>	0,294	0,344	0,031	0,02	0,503	0,514	-0,06	0,128	0,84	0,915
<i>DPD</i>	0,201	0,275	0,032	0,094	0,558	0,635	-0,11	0,041	0,611	0,795
<i>UCA</i>	0,338	0,316	0,015	0,021	0,472	0,509	-0,04	0,082	0,761	0,874
<i>MVM</i>	0,204	0,263	0,018	0,082	0,466	0,595	-0,07	0,081	0,694	0,779
<i>SRA</i>	0,378	0,418	0,015	0,001	0,614	0,643	-0,05	0,146	0,683	0,927
<i>SVM</i>	0,192	0,189	0,089	0,173	0,599	0,653	-0,15	-0,08	0,564	0,747

Вторая и четвертая функции не пригодны к применению; первая функция маловероятна для корректной оценки. Лучшие функции – третья и пятая – выражают зависимость от параметра в виде степени, а зависимость от соотношения

сторон – в виде коэффициента. Для большинства параметров пятая функция показывает лучшие результаты как по линейной (кроме *SVM*), так и по ранговой корреляции. Поэтому лучшей функцией зависимости деформаций пролетов от их конфигураций была признана пятая – степенная с коэффициентом.

При проведении дополнительного анализа на практике было обнаружено, что увеличение соотношения между гранями пролета приводит к тому, что итоговое значение оценки может стать больше 0.5, что нарушает условность из раздела 3.2. Поэтому для корректировки интервала значений пятой функции и для ее уточнения предлагаются модификации коэффициента степенной функции.

Пусть $Pr' = (Pr + 2/3)^2$ – степень по параметру в пятой функции. Описание и результаты анализа уточненных функций представлены в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Скорректированные функции оценки пролетов

Adjusted span estimation functions

Функция	Функция 5.0		Функция 5.1		Функция 5.2		Функция 5.3	
Коэффициент	$\varphi^{-Pr'}$ (исходн.)		$\varphi^{Pr'}$		$\left(1 - \left \varphi - \frac{13}{18}\right \right)^{Pr'}$		$\left(1 + \left \varphi - \frac{13}{18}\right \right)^{-Pr'}$	
Корреляция	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая	Линейная	Ранговая
<i>MPD</i>	0,84	0,915	0,908	0,869	0,8916	0,8896	0,8923	0,8981
<i>DPD</i>	0,611	0,795	0,611	0,793	0,6113	0,7944	0,6113	0,7947
<i>UCA</i>	0,761	0,874	0,934	0,919	0,9384	0,9387	0,935	0,9395
<i>MVM</i>	0,694	0,779	0,691	0,773	0,6923	0,7708	0,6925	0,7708
<i>SRA</i>	0,683	0,927	0,929	0,904	0,9201	0,9347	0,9113	0,9396
<i>SVM</i>	0,564	0,747	0,6	0,764	0,5922	0,7621	0,5892	0,759

К дальнейшему анализу принята функция 5.3 и параметр ***MPD***, так как он показывал хорошие результаты и при этом обладал большей корреляцией при большей выборке вариантов (см. табл. 1). Общая оценка пролетно-опорной схемы – среднее оценок включенных пролетов $V(\bar{Sp}) = \sum V(Sp) / |\bar{Sp}|$.

Таким образом, проведен анализ вариантов функциональной зависимости деформации плит от параметров пролетов: площади, соотношения сторон и топологии опор. В качестве итоговой оценки была выбрана модификация степенной функции, основа которой выражена площадью пролета, а степень – параметром опор, с коэффициентом по обратному отношению граней пролета с вершиной в точке $^{13}/_{18}$. Данная оценка использована в алгоритме сбора пролетов.

4. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА

Разработанный алгоритм на основе сформулированной оценки был реализован в виде программы. Далее представлен анализ двух критериев алгоритма сбора: предупорядочивания участков и полезности направления сбора.

Способ предупорядочивания *Presort* определяет порядок рассмотрения участков *CLAr* во время сбора пролетов, а показатель полезности направления сбора *Benefit* определяет приоритет направлений при сборе. Варианты *Presort* представлены в табл. 5, а *Benefit* – в табл. 6. Введем следующие понятия:

- суммарный потенциал (СП) – сумма всех потенциалов участка:

$$Ptnl(CLA_{r_k}) = \sum_{\forall \oplus} Ptnl(CLA_{r_k}, \oplus); \quad (11)$$

- отношение сумм противоположных потенциалов (ОСПП):

$$OPtnl(CLA_{r_k}) = \min(\sum Ptnl(CLA_{r_k}, \uparrow) / \sum Ptnl(CLA_{r_k}, \leftrightarrow)); \quad (12)$$

- отношение произведений противоположных потенциалов (ОМПП):

$$MPtnl(CLA_{r_k}) = \min(\prod Ptnl(CLA_{r_k}, \uparrow) / \prod Ptnl(CLA_{r_k}, \leftrightarrow)). \quad (13)$$

Таблица 5

Table 5

Способы предупорядочивания участков разбиения перекрытия

Approaches to the presorting of floor partitioning elements

№ п/п	Критерий предупорядочивания	Формула
1	Несвязность	$ \{Adj(CLA_{r_k}, \oplus) = -1\}_{\forall \oplus} $
2	Суммарный потенциал (СП)	$Ptnl(CLA_{r_k})$
3	Суммарный потенциал на площадь	$Ptnl(CLA_{r_k}) \cdot S$
4	Суммарный потенциал на ОСПП	$Ptnl(CLA_{r_k}) \cdot OPtnl(CLA_{r_k})$
5	Площадь на ОСПП	$S \cdot OPtnl(CLA_{r_k})$
6	Суммарный потенциал на ОМПП	$Ptnl(CLA_{r_k}) \cdot MPtnl(CLA_{r_k})$
7	Площадь на ОМПП	$S \cdot MPtnl(CLA_{r_k})$
8	Произведение СП, площади и ОСПП	$Ptnl(CLA_{r_k}) \cdot S \cdot OPtnl(CLA_{r_k})$
9	Произведение СП, площади и ОМПП	$Ptnl(CLA_{r_k}) \cdot S \cdot MPtnl(CLA_{r_k})$

Таблица 6

Table 6

Показатели полезности направления сбора участков

Indicators of benefit of the elements assembling direction

№ п/п	Показатель	Описание показателя полезности
1	Наибольшая площадь	Направление с наибольшей площадью границы
2	Потенциальные потери	Направление с наименьшими потерями площади по ортогональным направлениям
3	Абсолютный выигрыш	Направление с наибольшей абсолютной разницей между получаемой площадью № 1 и потенциальными потерями № 2
4	Абсолютный потенциальный выигрыш	Направление с наибольшей абсолютной разницей между суммой площади границы № 1 с потенциальной площадью по направлению и потенциальными потерями № 2
5	Относительный потенциальный выигрыш	Направление с наибольшим отношением между суммой площади границы № 1 с потенциальной площадью по направлению и потенциальными потерями № 2
6	Кумулятивные потенциальные потери	Направление с наименьшими накопленными потерями потенциальной площади в ортогональных направлениях

Таким образом, выделено 6 показателей полезности сбора участков. Далее оцениваются различные комбинации вариативных параметров алгоритма.

4.1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: ОЦЕНКА КОМБИНАЦИЙ ВАРИАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА СБОРА ПРОЛЕТОВ

Был проведен анализ различных комбинаций *Presort* и *Benefit*. В качестве критериев выбраны относительный размах значений, т. е. отношение между итоговой оценкой схемы $V(\overline{Sp})$ со всеми опорами и без опор, и степень заполнения пролетами перекрытия. Второй критерий можно рассматривать двояко: как **среднее** и как **отношение** между заполненностью схем со всеми опорами и без опор. В первом случае требуется большее заполнение пролетами для всех схем; во втором случае при увеличении числа опор степень заполненности перекрытия пролетами может уменьшаться вследствие увеличения числа слишком малых по площади (условие (9)) пролетов.

Эксперимент проведен на реальном примере; проанализированы первый критерий и оба варианта второго критерия. Результат представлен на рис. 5.

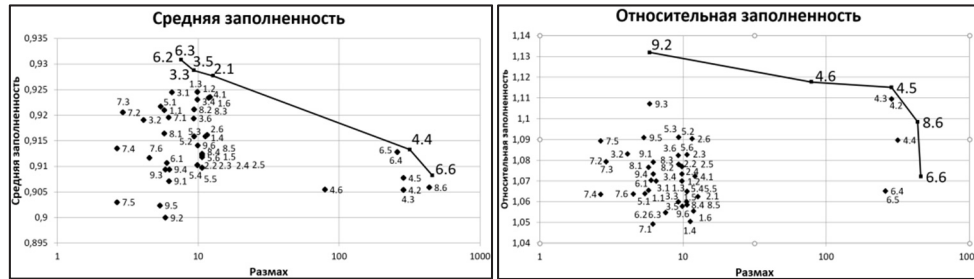


Рис. 5. Результаты эксперимента; линией обозначены парето-оптимальные варианты

Fig. 5. Experiment results; the line indicates the Pareto-optimal options

Для стратегии **наибольшего заполнения всех схем** наилучшими вариантами являются 6.2, 6.3, 3.3, 3.5, 2.1, 4.4 и 6.6, а для стратегии **уменьшения заполнения при увеличении количества опор** – 9.2, 4.6, 4.5, 8.6 и 6.6.

4.2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ: СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕНИ СБОРА ПРОЛЕТОВ ПРИ РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ ПАРАМЕТРОВ

Проведен анализ скорости работы алгоритма сбора пролетов по каждой парето-оптимальной паре параметров. Проанализировано десять вариантов схем опор. Эксперимент повторялся десять раз, представлено среднее время. На рис. 6 показано время работы. В табл. 7 представлен анализ результатов.

Для обеих стратегий наименьшее худшее время затрачивает подход предпорядочивания по суммарному потенциалу на ортоотношение (4-й вариант); а наилучшим критерием выбора направления сбора для обеих стратегий по среднему времени оказался критерий потенциальных потерь (2-й вариант). Только три варианта в худшем случае выполнялись более 15 мс – 3.3, 3.5 и 2.1.

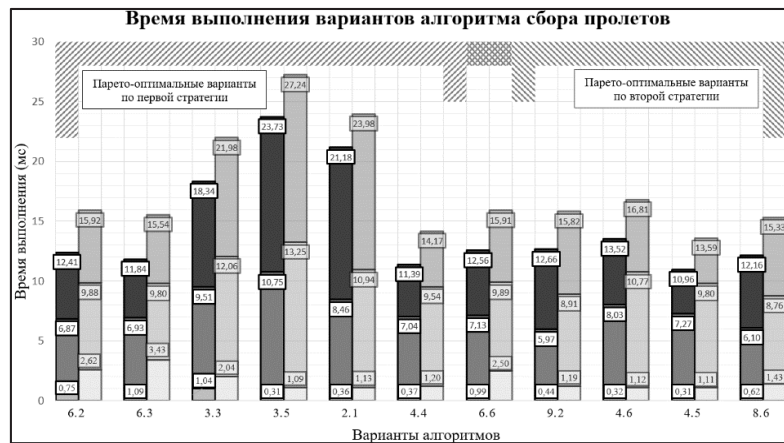


Рис. 6. Сравнение вариантов сбора по времени выполнения: лучшее, среднее и худшее время; в правом столбце – общее время, в левом – время на сбор пролетов

Fig. 6. Comparison of assembling options by execution time: best, average and worst time; in the right column – the total time, in the left – for spans assembling

Таблица 7

Table 7

Итоги эксперимента сравнения вычислительного времени**Results of the experiment of execution time comparison**

Стратегия	Время	№	Presort	Benefit
1-я	Худшее	4.4	Суммарный потенциал на ОСПП	Абсолютный потенциальный выигрыш
	Среднее	6.2	Суммарный потенциал на ОМПП	Потенциальные потери
2-я	Худшее	4.5	Суммарный потенциал на ОСПП	Относительный потенциальный выигрыш
	Среднее	9.2	Произведение суммарного потенциала, площади и ОМПП	Потенциальные потери

Общее время выполнения алгоритма для каждого варианта в большей степени затрачивается именно на сбор пролетов, что подтверждает малые затраты времени на два других этапа – разбиение перекрытия и определение соседства. В лучшем случае на сбор пролетов затрачивается 28...51 % общего времени работы; в среднем – 67...81 %; в худшем случае 76...88 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый подход к оценке деформаций плит перекрытий на основе анализа пролетов. Разработан и реализован в виде программы алгоритм формирования пролетов с двумя параметрами вариации: предупорядочивания участков плиты и полезности сбора участков в пролет. В итоговом разделе проанализированы различные подходы по обоим параметрам – 54 пары. Для наилучших из них было проанализировано время выполнения. Результаты показали, что наиболее длительным этапом алгоритма является третий – сбор пролетов, занимающий от 67 % до 81 % общего времени.

Для оценки пролетов выдвинута модель конфигурационных параметров – площади, отношения сторон и расположения опор. Для третьего, качественного, показателя было подобрано 15 вариантов количественной оценки, из которых выбрано 6 наиболее перспективных. По конфигурациям были заданы варианты функций оценки пролетов, из которых наилучшей оказалась степенная функция с коэффициентом на основе обратного соотношения с вершиной в точке $1^3/18$, а лучшим параметром оценки расположения опор в пролете – параметр наибольшего периметрального расстояния между опорами.

Таким образом, в работе формулируется новый эвристический алгоритм формирования пролетов по схеме опор плиты перекрытия и обосновывается оценка пролетов на основе их конфигураций. В будущих исследованиях планируется сделать упор на поиске лучшей оценки топологии опор, уточнении функции оценки пролета по конфигурации. Кроме того, авторы намерены продолжать анализ и совершенствование представленного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 45 с.
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 124 с.
3. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 95 с.
4. *Gilbert R.I.* Detailing of reinforcement in concrete structures / Center of Infrastructure Engineering and Safety. – University of New South Wales, 2012. – Unpublished.
5. *Sharafi P.* Cost optimization of the preliminary design layout of reinforced concrete framed buildings: PhD Thesis. – Australia: University of Wollongong, 2013. – 286 p.
6. *Hadi M., Sharafi P., The L.* A new formulation for the geometric layout optimisation of flat slab floor systems // Australasian Structural Engineering Conference (ASEC 2012). – Australia, 2012. – P. 1–8.
7. *Petprakob W.* Beam-slab floor optimization using genetic and particle swarm optimization algorithms: M-s of Science thesis. – Thailand: Thammasat University, 2015. – 90 p.
8. *Леишкевич О.Н.* Использование искусственных нейронных сетей для оценки армирования железобетонных плит перекрытий // Проблемы современного бетона и железобетона. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 51–62.
9. Integrated structural-architectural design for interactive planning / B. Steiner, E. Mosavian, S.F. Mehdizadeh, M. Wimmer, P. Musialski // Computer Graphics Forum. – 2016. – Vol. 36 (8). – P. 80–94.
10. *Sahab M.G., Ashourb A.F., Toropov V.V.* Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings // Engineering Structures. – 2005. – Vol. 27 (3). – P. 313–322.
11. Optimizing support locations in the roof-column structural system / X. Meng, T.-U. Lee, Y. Xiong, X. Huang, Y.M. Xie // Applied Science. – 2021. – Vol. 11 (6). – P. 2775.
12. *Albuquerque A.T. de, El Debs M.K., Melo A.M.C.* A cost optimization-based design of precast concrete floors using genetic algorithms // Automation in Construction. – 2012. – Vol. 22. – P. 348–356.
13. *Хасанова Э.И., Валеев Р.С.* Матричный способ декомпозиции многосвязного полигона на множество прямоугольных областей минимальной мощности // Вестник УГАТУ. – 2010. – № 2 (37). – С. 183–187.
14. *Хасанова Э.И.* Проектирование размещения геометрических объектов на многосвязном ортогональном полигоне : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12. – Уфа, 2011. – 16 с.
15. *Shamos M.I., Hoey D.* Geometric intersection problems // 17th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – United States, 1976. – P. 208–215.
16. European standard: Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Union. – European Committee for Standardization, 2004. – 225 p.

Зинов Владислав Игоревич, аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского университета науки и технологий. Основное направление научных исследований – методы оптимизации в задачах проектирования и строительства, системный анализ, системы поддержки принятия решений, эвристические алгоритмы. E-mail: zinovvladislavufa@gmail.com

Картак Вадим Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и защиты информации Уфимского университета науки и технологий. Основное направление научных исследований – большие данные, методы оптимизации, информационная безопасность. Имеет более 80 печатных работ. E-mail: kvmail@mail.ru

Валихаметова Юлия Ильясовна, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского университета науки и технологий. Основное направление научных исследований – эвристические алгоритмы решения задач дискретной оптимизации, математическое моделирование, численные методы, комплексы программ. Имеет более 50 печатных работ. E-mail: julikas@inbox.ru

Zinov Vladislav I., a graduate student at the department of computational mathematics and engineering cybernetics, Ufa University of Science and Technology. His research interests are currently focused on optimization methods in the design and construction problems, system analysis, decision support systems, and heuristic algorithms. E-mail: zinovvladislavufa@gmail.com

Kartak Vadim M., D. Sc. (Eng.), professor, head of department of computing and information security, Ufa University of science and technology. His research interests are currently focused on big data, optimization methods, information security. He has more than 80 publications. E-mail: kvmail@mail.ru

Valiakmetova Yulia I., PhD (Eng.), associate professor at the department of computational mathematics and engineering cybernetics, Ufa University of Science and Technology. Her research interests are currently focused on heuristic algorithms in discrete optimization problems, mathematical modeling, numerical analysis, software systems. She has more than 50 publications. E-mail: julikas@inbox.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-35-54

An algorithm for estimating the deformation of floor slabs based on the span-support topology of the building*

V.I. ZINOV^a, V.M. KARTAK^b, Yu.A. VALLAKHMETOVA^c

Ufa University of Science and Technology, 32 Zeki Velidi Street, Ufa, 450076, Russian Federation

^a zinovvladislavufa@gmail.com ^b kvmail@mail.ru ^c julikas@inbox.ru

Abstract

Planning the supporting structures of a building is a problem of an extremely wide choice. At the same time, the estimation of one option by the finite element method takes too much time to apply automated and decision support tools. Therefore, it is proposed to identify a quickly calculated estimation of the supports plan which would allow comparing two support plans correctly in terms of potential deformations. To achieve this, the existing heuristic approaches modeling the functional relationship between the plan of supports and the resulting deformations were analyzed. In this paper spans are taken as the basis for the estimation. Further, the problem of spans determining is formulated which is reduced to the problem of the geometric coverage of multicoherent orthogonal polygon. The objective function is the maximization of the correlation between the detected estimate and the actual calculated values of deformations.

To determine the spans on the floor area, a new algorithm based on the sweep line algorithm is proposed which consists of three steps: partitioning the floor area, determining the proximity of partitioned sections and assembling sections into spans. In order to determine the main estimate for a span-support topology, a single span estimation is derived based on three parameters: span area, aspect ratio and topology of supports that bound the span. Since the last parameter is qualitative, an additional analysis of quantitative parameters that can correctly describe it was carried out. The analysis criterion was the correlation with the calculated deformations in the span. The parameter of the maximum perimeter distance between the supports was recognized as the best parameter. The best function for estimating the spans was selected. In addition, various approaches to assembling spans from partition sections at the last step of the algorithm were analyzed.

Keywords: optimization in the construction industry, heuristic algorithms, floor slabs, span-support building systems, estimation of slab deformations, estimation of supports topology, span determination, heuristic parameters estimating

* Received 18 August 2023.

REFERENCES

1. SP 430.1325800.2018. *Monolitnye konstruktivnye sistemy. Pravila proektirovaniya* [Set rules 430.1325800.2018. Monolithic structural systems. Design rules]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 45 p.
2. SP 63.13330.2018. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya* [Set rules 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 124 p.
3. SP 20.13330.2016. *Nagruzki i vozdeistviya* [Set rules 20.13330.2016. Loads and actions]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 95 p.
4. Gilbert R.I. *Detailing of reinforcement in concrete structures*. Center of Infrastructure Engineering and Safety. University of New South Wales, 2012. (Unpublished).
5. Sharafi P. *Cost optimization of the preliminary design layout of reinforced concrete framed buildings*. PhD Thesis. Australia, University of Wollongong, 2013. 286 p.
6. Hadi M., Sharafi P., The L. A new formulation for the geometric layout optimisation of flat slab floor systems. *Australasian Structural Engineering Conference (ASEC 2012)*, Australia, 2012, pp. 1–8.
7. Petprakob W. *Beam-slab floor optimization using genetic and particle swarm optimization algorithms*. M-s of Science thesis. Thailand, Thammasat University, 2015. 90 p.
8. Liashkevich A. Ispol'zovanie iskusstvennykh neironnykh setei dlya otsenki armirovaniya zhelezobetonnykh plit perekrytii [Application of artificial neural networks for assessing the reinforcement of reinforced-concrete floor slabs]. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona* [Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete]. Minsk, 2019, iss. 11, pp. 51–62.
9. Steiner B., Mosavian E., Mehdizadeh S.F., Wimmer M., Musialski P. Integrated structural-architectural design for interactive planning. *Computer Graphics Forum*, 2016, vol. 36 (8), pp. 80–94.
10. Sahab M.G., Ashourb A.F., Toropov V.V. Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings. *Engineering Structures*, 2005, vol. 27 (3), pp. 313–322.
11. Meng X., Lee T.-U., Xiong Y., Huang X., Xie Y.M. Optimizing support locations in the roof-column structural system. *Applied Science*, 2021, vol. 11 (6), p. 2775.
12. Albuquerque A.T. de, El Debs M.K., Melo A.M.C. A cost optimization-based design of precast concrete floors using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 2012, vol. 22, p. 348–356.
13. Khasanova E.I., Valeev R.S. Matrichnyi sposob dekompozitsii mnogosvyaznogo poligona na mnozhestvo pryamougol'nykh oblastei minimal'noi moshchnosti [The matrix decomposition method of multicoherent polygon into the set of rectangular areas of minimum capacity]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2010, no. 2 (37), pp. 183–187.
14. Khasanova E.I. *Proektirovanie razmeshcheniya geometricheskikh ob"ektov na mnogosvyaznom ortogonal'nom poligone*. Avrotef. diss. kand. tekhn. nauk [Designing the placement of geometric objects on a multicoherent orthogonal polygon. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Ufa, 2011. 16 p.
15. Shamos M.I., Hoey D. Geometric intersection problems. *17th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. United States, 1976, pp. 208–215.
16. European standard: *Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Union, European Committee for Standardization, 2004. 225 p.

Для цитирования:

Зинов В.И., Картак В.М., Валиахметова Ю.И. Алгоритм оценки деформации плит перекрытий по пролетно-опорным схемам здания // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 4 (92). – С. 35–54. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-35-54.

For citation:

Zinov V.I., Kartak V.M., Valiakhmetova Yu.I. Algorithm otsenki deformatsii plit perekrytii po proletno-opornym skhemam zdaniya [An algorithm for estimating the deformation of floor slabs based on the span-support topology of the building]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 4 (92), pp. 35–54. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-4-35-54.

ISSN 2782-2001, <http://journals.nstu.ru/vestnik>
Analysis and data processing systems
 Vol. 92, No 4, 2023, pp. 35–54