

УДК 624.072

Корепанов Данил Александрович

Студент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет

Кочанкин Фома Иванович

Студент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет

Korepanov Danil Alexandrovich

Student

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Kochankin Foma Ivanovich

Student

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОД ОБОРУДОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ

Аннотация.

В статье рассматривается задача использования существующих фундаментов под изменённые технологические процессы при модернизации промышленных объектов. В ряде случаев сохраняются массивные опорные конструкции, реконструкция которых приводит к формированию сложных рамных систем, сочетающих тяжёлые и массивные участки. Традиционные методы строительной механики для таких систем дают погрешности по сравнению с решением плоской задачи теории упругости. Экспериментальные и численные исследования показали, что основные отклонения от гипотезы плоских сечений сосредоточены в узловых зонах, тогда как в пролётах между соединениями элементы работают близко к стандартным предпосылкам. На этой основе разработана методика эквивалентных узловых элементов, моделирующих податливость соединений как деформацию жёсткого штампа на упругом слое конечной толщины, что делает расчёт совместимым с наиболее используемыми в инженерной практике расчетными комплексами. Расчёты

железобетонных рам и испытания натурных моделей показали, что применение такого подхода снижает погрешность определения результатов по сравнению с решением плоской задачи и позволяет уменьшить расчётные моменты в сечениях, повышая эффективность и надёжность проектирования реконструируемых фундаментов промышленных предприятий.

Abstract.

The article considers the problem of using existing foundations for modified technological processes in the modernization of industrial facilities. In some cases, massive support structures remain, the reconstruction of which leads to the formation of complex frame systems combining heavy and massive sections. Traditional methods of structural mechanics for such systems give errors in comparison with the solution of the planar problem of the theory of elasticity. Experimental and numerical studies have shown that the main deviations from the hypothesis of flat sections are concentrated in the nodal zones, whereas in the spans between the joints, the elements work close to the standard prerequisites. On this basis, a method of equivalent nodal elements has been developed that models the ductility of joints as a deformation of a rigid die on an elastic layer of finite thickness, which makes the calculation compatible with the calculation complexes most used in engineering practice. Calculations of reinforced concrete frames and tests of full-scale models have shown that using this approach reduces the error in determining the results compared to solving a flat problem and reduces the design moments in sections, increasing the efficiency and reliability of designing reconstructed foundations of industrial enterprises.

Ключевые слова.

Реконструкция, трещинообразование, массивные рамные фундаменты, динамические нагрузки, промышленные предприятия, податливость.

Key words.

Reconstruction, cracking, massive frame foundations, dynamic loads, industrial enterprises, compliance.

Введение.

В последние годы интенсивная модернизация технологических процессов во всех отраслях промышленности привела к необходимости массовой реконструкции фундаментов под технологическое оборудование, включая крупные металлургические и машиностроительные объекты. В таких системах сочетаются стержневые элементы с массивными участками, поведение которых не удастся корректно описать классическими методами строительной механики. В работах ряда исследователей показано, что для массивных рам более обоснованным является рассмотрение их как плоской задачи теории упругости, однако практическое применение такого подхода в стандартных расчетных программах затруднено. В условиях реконструкции, когда требуется детальный учет напряженно-деформированного состояния на всех стадиях работы железобетона — как до трещинообразования, так и после его возникновения, — возникает потребность в разработке специализированной методики, учитывающей реальную податливость узлов и совместимой с существующим программным обеспечением.

Цель исследования.

Целью исследования является анализ и обоснование методики расчета комбинированных рамных конструкций с массивными элементами, применяемых при реконструкции фундаментов под технологическое оборудование, с учетом податливости узлов сопряжения стержней и изменения жесткостных характеристик элементов при возникновении трещин.

Материал и методы исследования.

Материалы исследования включают расчетные модели П-образных массивных рам различных типоразмеров (РП-1...РП-8), а также натурные испытания железобетонных рам из тяжелого бетона, армированных стальной арматурой.

Важным является использование существующих фундаментов и приспособление их к условиям новой технологии. Практически это решается пристройкой к существующему (чаще всего массивному) фундаменту облегченной плитно-стоечной конструкции, либо разборкой фундамента до

определенного уровня и его надстройкой на оставшейся части рамной конструкции, на которую устанавливается оборудование (рис. 1).

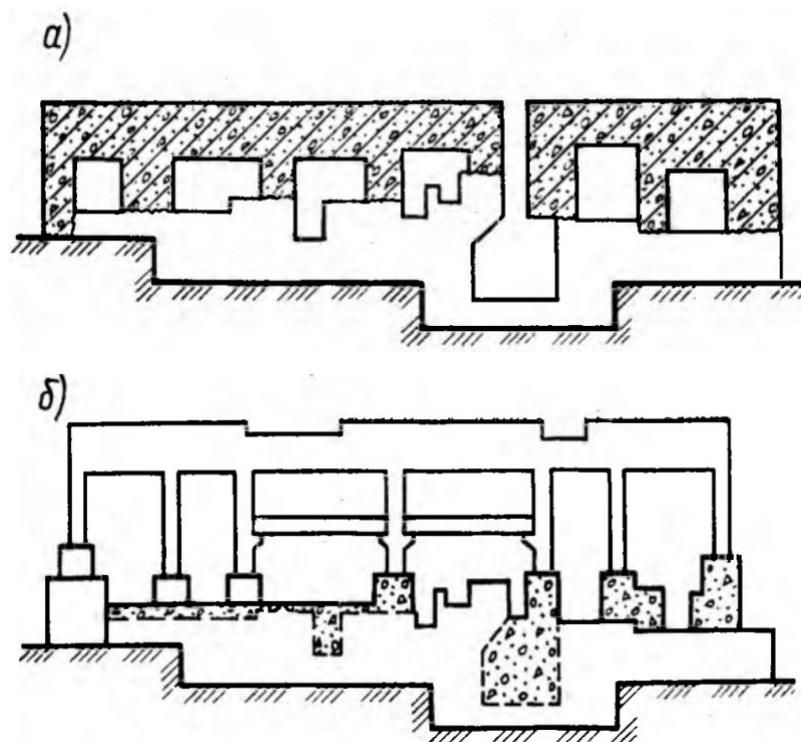


Рис. 1. Пример реконструкции фундаментов (а - до реконструкции; б - после реконструкции).

В условиях реконструкции возникают комбинированные рамные системы, состоящие из тонкостенных или стержневых и массивных элементов. К массивным относятся элементы, у которых отношение высоты сечения к пролету «в свету» более 0,2. С ростом этого отношения погрешность определения напряженно-деформированного состояния элементов методами строительной механики повышается, возникает необходимость расчета массивных рамных конструкций как плоской задачи теории упругости.

При использовании результатов расчета возникают значительные затруднения с определением сечений железобетонных элементов рам. Работы ряда исследователей [1...6], посвящены вопросу использования методов строительной механики при расчете массивных рам. Расчет комбинированных систем, содержащих стержневые и массивные элементы, в литературе до сих пор не освещался. В работе [2] показано, что по внутренним усилиям и перемещениям наиболее близкие результаты к полученным из расчета

массивных рам как плоской задачи теории упругости дают величины средние арифметические из расчета рамы как стержневой системы и рамы, имеющей абсолютно жесткие вставки в узлах сопряжения ортогональных элементов. Этот факт говорит о том, что учет податливости узловых элементов при расчете рам методами строительной механики необходим, и решение задачи сводится к правильной оценке податливости.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния рам с массивными элементами, проведенные на моделях из оптически чувствительного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20 методом фотоупругости [6], а также исследования путем численного моделирования для рам Г- и Т-образной формы показали, что работа массивных элементов «в свету» с достаточной степенью точности описывается гипотезой плоских сечений, а основные деформации происходят в местах пересечения элементов — узлах рам. Поэтому для расчета приняты исходные предпосылки: деформации массивных стержней на участках между узлами описываются гипотезой плоских сечений, с учетом продольных, изгибных и сдвиговых перемещений.

Деформации плоскости контакта стержня рамы с узлом эквивалентны соответствующим деформациям жесткого штампа на упругом слое, толщина которого равна половине высоты сечения стержня ортогонального направления. Ширина штампа и слоя принята равной ширине поперечного сечения элементов рамы, а длина штампа — высоте поперечного сечения. Для определения податливости узлов сопряжения ортогональных стержней рам путем численного моделирования выполнены расчеты перемещений штампа единичной длины и ширины по слою конечной толщины от действия единичных вертикальных, горизонтальных и моментных нагрузок. При этом толщину слоя под штампом варьировали в пределах от 0,25 до 16 длин штампа, а отношение толщин слоя по одну сторону от штампа к толщине слоя под штампом — от 0 до 1. При расчетах был охвачен широкий спектр соотношений толщин элементов рам. Для использования при расчете рамных конструкций с массивными элементами

стандартных программ в узлах рам условно вводятся стержневые элементы, состоящие из участков конечной и бесконечной жесткости (рис. 2).

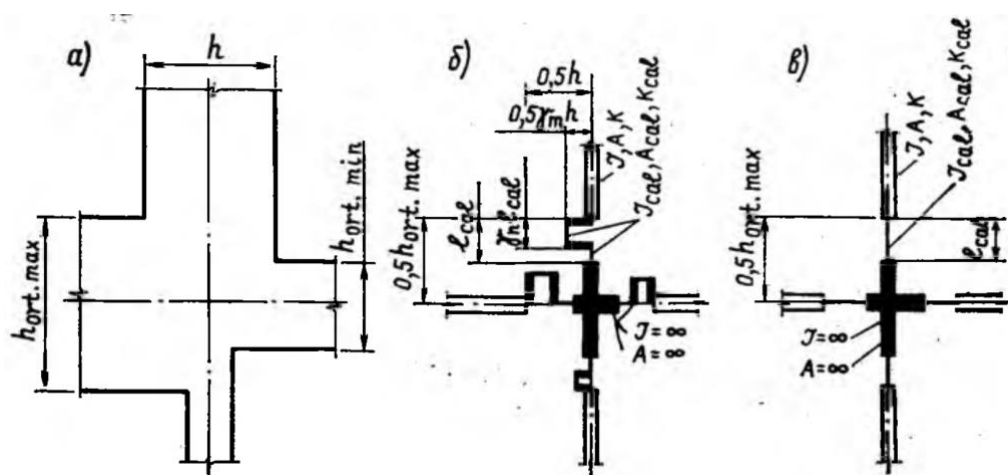


Рис. 2. Расчетные схемы узлов сопряжения ортогональных элементов рамы (а - узел сопряжения; б - расчетная схема с использованием стержневых элементов типа «а»; в - расчетная схема с использованием элементов типа «б»)

Геометрические и жесткостные характеристики элементов подбираются таким образом, что их податливость эквивалентна податливости штампа на слое конечной толщины. Использование элемента «а» дает возможность описать все шесть возможных перемещений штампа, а элемента «б» — только четырех из них. Для оценки точности предлагаемой методики выполнены расчеты П-образных рам с различными соотношениями высот сечений ортогональных элементов. В табл. 1 приведены геометрические параметры рам, а в табл. 2 — отношения распоров, определенных по различным методикам, к распорам, полученным из решения плоской задачи.

Таблица 1.

Типы рам	Высоты сечений элементов рам, м	
	Ригеля	Сток
РП-1	0,20	0,40/0,40
РП-2	0,40	0,20/0,20
РП-3	0,20	0,40/0,20
РП-4	0,40	0,40/0,20
РП-5	0,20	0,20/0,20
РП-6	0,40	0,40/0,40
РП-7	0,80	0,40/0,40
РП-8	0,10	0,40/0,40

Примечание. 1. Длина по осям стоек для рам всех типов – 1,20 м. 2. Ширина элементов всех рам – 0,20 м. 3. Перед чертой – левой стойки, после черты – правой.

Таблица 2.

Типы рам	H_2/H_1	H_3/H_1	H_4/H_1	H_6/H_1
РП-1	0,8797	1,0431	0,9948	0,9896
РП-2	0,7640	1,1535	0,9833	0,9587
РП-3	0,8611	1,0594	0,9901	0,9861
РП-4	0,7955	1,1205	0,9817	0,9604
РП-5	0,9284	1,0699	0,9882	0,9848
РП-6	0,8593	1,0783	0,9808	0,9656
РП-7	0,5913	1,2962	0,9443	0,9350
РП-8	0,9007	1,1027	0,9965	0,9847

Примечания. Распоры, определенные: H_1 – из решения плоской задачи; H_2 – для стержневой системы с учетом продольных, поперечных и изгибных деформаций; H_3 – с учетом недеформируемости узлов (жесткие вставки); H_3 – с учетом податливости узлов с применением элемента «а», H_4 – то же, с применением элемента «б».

Как показывают результаты расчета, использование традиционных методов [2, 3] для рам с массивными элементами дает значительные расхождения величин распоров с решением теории упругости, погрешность в отдельных случаях достигает 50%. Использование предлагаемой методики дает весьма близкие значения распоров, погрешность не превышает 5...6 %. При этом применение элемента «а» дает незначительное повышение точности расчета по сравнению с применением элемента «б», что позволяет несколько упростить расчет.

Для экспериментальной проверки достоверности предлагаемого метода и выявления его применимости к расчету железобетонных рам с учетом процесса трещинообразования были изготовлены и испытаны по 2 рамы РП-1 и РП-2 из бетона классов В30...В50 с продольной арматурой класса А500, поперечной класса А240. Армирование осуществлялось в соответствии с СП 63.13330.2018. Рамы загружали с помощью гидравлического домкрата. Прогибы определяли с помощью прогибомеров ПАО-6, фибровые деформации бетона и арматуры измеряли рычажными тензометрами и тензодатчиками сопротивления. Величина распора определялась по показаниям манометра станции, подключенной к гидравлическому домкрату, обеспечивающему взаимную несмещаемость и жесткое сопряжение нижних концов стоек рам в горизонтальном направлении.

Результаты исследования и их обсуждение.

На рис. 3 показаны экспериментальные и вычисленные по предлагаемой методике значения распоров с учетом изменения жесткости элементов вследствие образования трещин (в соответствии с СП 63.13330.2018).

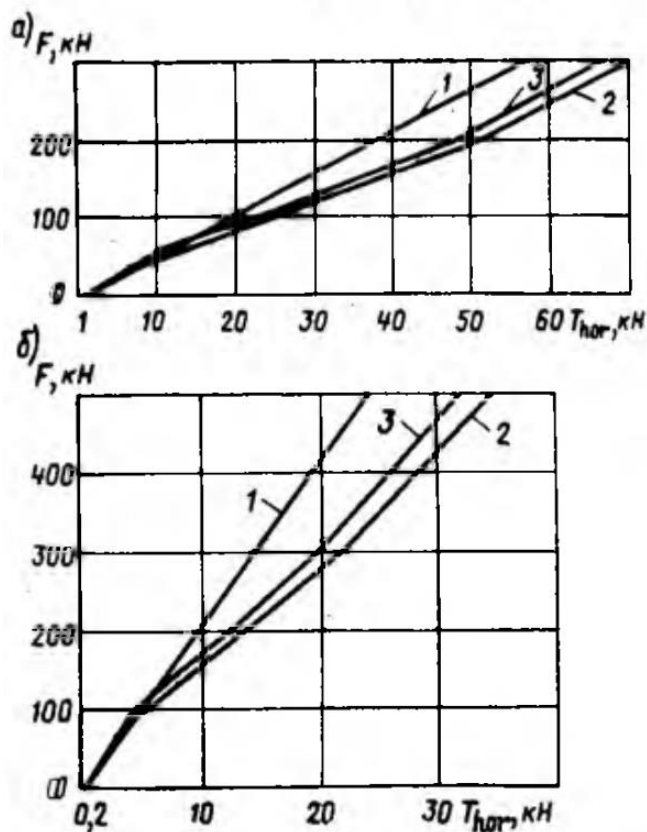


Рис. 3. Изменение величины усилия распора в зависимости от загрузки (а — для рамы РП-1; б — для рамы РП-2; 1 и 2 — расчетные значения распора по предлагаемой методике без учета и с учетом трещинообразования; 3 — экспериментальные значения распора).

Сопоставление экспериментальных и теоретических величин распоров показывает, что предлагаемая методика с до статочной для практических расчетов точностью описывает напряженно-деформированное состояние рамных конструкций с элементами различной массивности. Использование методики позволяет в отдельных случаях снизить расчетные моменты в сечениях элементов на 25. .30%.

Выводы.

Традиционные методики расчета рамных конструкций с массивными элементами при вычислении усилий дают по грешность, равную 30...50%, а при

вычислении усилий по предлагаемой методике расчета (методу эквивалентных узловых элементов) погрешность не превышает 5,5%. Метод эквивалентных узловых элементов позволяет с достаточной достоверностью оценить напряженно-деформированное состояние рамно-стоечных конструкций фундаментов на всех стадиях работы железобетона, как с трещинами, так и без трещин. Предложенная методика с учетом рекомендаций СП 63.13330.2018 обеспечивает хорошее соответствие с экспериментами.

Литература.

1. Васильев П.И., Пермякова В. В., Соколов И. Б. Расчет массивных железобетонных рам по стадии предельного равновесия / VII Всесоюзная конференция по бетону и железобетону: Краткие тезисы докладов — 1972. — С. 42-44.
2. Длугач М.И. Метод сеток в смешанной плоской задаче теории упругости., 1964. — 259 с.
3. Корноухов Н.В. Расчет сложных рам по методу перемещений с учетом деформаций сдвига и ширины стержней // Строительная механика. — Москва; Госстройиздат СССР, 1959 — Выпуск XII. — С. 45-52.
4. Коренеев Б.Г. О временных санитарных правилах и нормах по ограничению вибрации рабочего места. «Строительная механика и расчет сооружений». 1959. №4. — С. 34-38.
5. Фрид С.А., Максимов Б. В. Сопоставление результатов экспериментальных исследований с данными расчетов массивных рам. — Ленгндэп, 1959. — Информационный сборник № 21-13. — С. 18-25.
6. Колесник А.В. Особенности расчета фундаментов под технологическое оборудование при реконструкции // Реконструкция промышленных зданий и сооружений. — ГПИ Ленпромстройпроект, 1964.— С. 64-65.