

Сравнительный анализ динамических характеристик рамно-плитных моделей зданий

А. И. САПОЖНИКОВ,
д-р философии, проф.

А. И. МИШИЧЕВ,
д-р техн. наук, проф.

В статье [1] рассмотрено каркасное здание, в котором наружные стены и перегородки отсутствуют или обладают низкой жесткостью и массой, что позволяет не учитывать их влияние (из-за его незначительности) на характер колебания здания. Однако пробные расчеты показали, что в колебаниях наблюдаются явления, способные разрушить здание (если их не учитывать при проектировании) и требующие объяснения [2]. Выявлению особенностей поведения каркасных зданий посвящена эта статья.

Исследованы колебания малоэтажных зданий, на которых нагляднее проявляется взаимодействие каркаса (рам) с плитами перекрытий. При этом было построено несколько конечноэлементных моделей (КЭМ):

1) базовая, представляющая собой пять поперечных двухпролетных рам (15 колонн, расположенных с шагом 6 м) с монолитными перекрытиями на отметках 4 и 8 м.

Сечение колонн — $0,4 \times 0,4$ м, поперечных ригелей — $0,4 \times 0,6$ м, толщина плит перекрытий — 0,2 м. Материал — железобетон плотностью $2300 \text{ кг}/\text{м}^3$ с характеристиками упругости $E = 20 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,2$. КЭМ строилась в среде препроцессора Femap (ядро Parasolid) [3] с использованием линейных элементов типа BAR и плоских PLATE.

Две плиты содержали 2304 элемента и имели массу 264,96 т, а колонны и ригели состояли из 480 элементов, их суммарная масса — 110,4 т;

2) базовая, дополненная обвязкой продольными ригелями;

3) со свободным от ригелей углом здания (рис. 1);

4) со сборными (с продольной раскладкой) плитами перекрытий, все плиты перекрытий с поперечными ригелями имеют шарнирное соединение.

Поведение моделей вначале определялось статическим нагружением собственной массой при жесткой заделке нижнего конца колонн. Далее проводился анализ собственных колебаний, а затем — частотный анализ при сейсмическом воздействии 7 баллов. Анализ собственных колебаний показал, что во всех вариантах КЭМ, кроме несимметричного варианта 3, были заведомо предсказуемы формы колебаний: первая и вторая — поступательные в плоскостях ZX и YZ, соответственно, а третья — крутко-поступательная в плоскости XY. У варианта 3 с нарушенной симметрией здания в плане все формы — крутко-поступательные. Значения частот собственных колебаний по 10 первым формам приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что частотный спектр зданий с обычной конструкцией (модели 1 и 2) образует несколько интервалов: 1–3 Гц, 5–7 Гц,

10 – ∞ Гц. Первый – поступательные и кручильные колебания перекрытий, за исключением варианта 3, где все формы крутильно-поступательные. Несмотря на отсутствие ригелей в продольном направлении здания, частоты колебания в плоскостях ZX и YZ отличаются несущественно, так как перекрытия выполнены в монолитном варианте и жестко соединены с ригелями поперечных рам. Они препятствуют вращению ригелей и повороту сечения колонн при продольном воздействии. При сборных перекрытиях ригель от вращения вокруг оси не защищен и в свою очередь не создает защемления колонн, поэтому частота колебания здания в продольном направлении уменьшилась вдвое (см. табл. 1).

Задача анализа частотного отклика (Frequency Response Analysis – FRA) решалась, как и все другие в этом исследовании, с использованием системы NASTRAN [3]. Рассматривался динамический отклик моделей зданий в процессе совершения ими установленныхся периодических колебаний. Для решения задач ис-

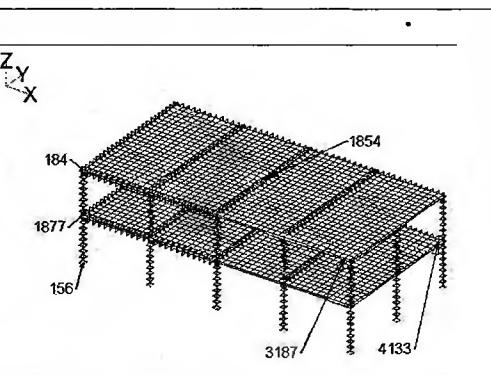


Рис. 1. КЭМ Варианта 3 (без угловых ригелей)

пользован метод разложения по собственным формам (Modal Frequency). Демпфирование учитывалось введением функции критического демпфирования при условии, что оно одинаково во всем частотном интервале ($D = 10\%$). Сейсмическое возбуждение [3] состояло в создании элемента большой массы, которая на шесть порядков была выше массы сооружения, после чего к этому элементу прикладывалось усилие $F(f) = K(f)ng$ ($n = 0,1$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$). Частотная зависимость $K(f)$ задавалась таблицей модальных частот с учетом 10 первых форм ко-

лебаний. Расчеты проводились как при поперечном $F_y(t)$, так и при продольном $F_x(t)$ воздействии. Анализировались перемещения, ускорения, напряжения в плитах по Мизесу и наибольшие напряжения в колоннах на уровне первого и второго этажей.

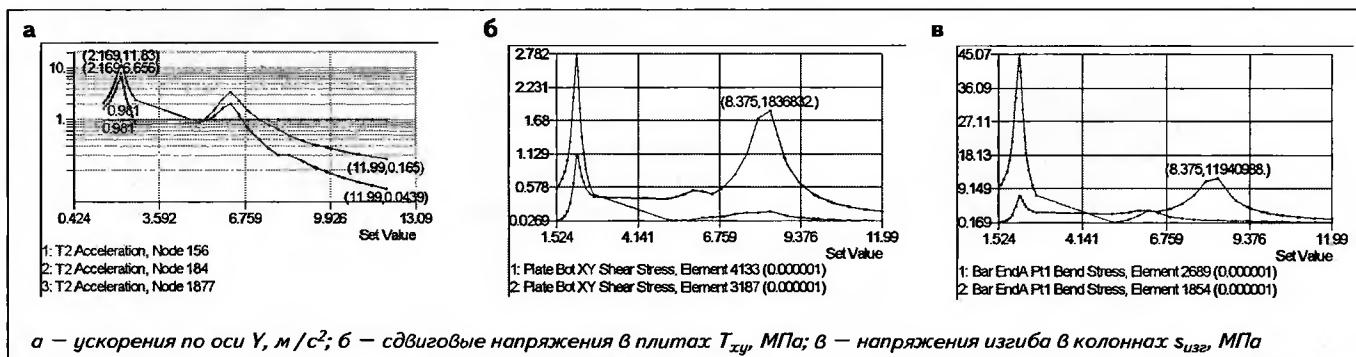
На рис. 2 представлены некоторые из этих данных в виде графиков в полулогарифмической шкале как функций от величины частоты. Расположение узлов и элементов, показанных на графиках, приведено на рис. 1. Узел 2689 на рис.

2 a находится под узлом 1854 между колонной и ригелем первого этажа. Ускорение узлов первого и второго этажей в направлении воздействия показаны на рис. 2 a , компоненты напряжения для плит и колонн – на рис. 2 b, c . На графиках перемещений и ускорений (они подобны) видны по два пика. На низких частотах (2,169 Гц) $T_{y_{max}}$ достигается на втором этаже (узел 184); на следующем пике (частота 5,082 Гц) $T_{y_{max}}$ имеет место на первом этаже (узел 1877). Эта картина характерна и для смещений $T_{y(freq)}$. На графиках напряжений видна более сложная картина. На низких (2,169 Гц) частотах $T_{xy_{max}} = 2,78 \text{ МПа}$ достигается на первом этаже; на высоких (8,375 Гц) – на втором, где $T_{xy} = 1,84 \text{ МПа}$. Напряжения в колоннах имеют наибольшие значения (45,07 МПа) при низкой частоте (2,169 Гц) в зонах защемления центральных колонн. Наиболее напряженной является середина центрального ригеля $\sigma_{izg max} = 11,94 \text{ МПа}$, эта величина реализу-

1. Частоты колебаний, Гц

| Вариант КЭМ | Форма колебания | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1,69 | 2,17 | 2,46 | 5,65 | 6,21 | 7,26 | 9,3 | 9,94 | 10,44 | 10,9 |
| 2 | 1,97 | 2,04 | 2,42 | 5,74 | 5,82 | 6,89 | 10,71 | 11,18 | 11,66 | 11,85 |
| 3 | 1,91 | 1,94 | 2,31 | 5,76 | 5,81 | 6,88 | 8,93 | 9,40 | 10,24 | 10,81 |
| 4 | 0,80 | 2,17 | 2,35 | 4,46 | 6,21 | 6,99 | 7,59 | 7,62 | 8,24 | 8,54 |

Рис. 2. Зависимость кинематических и силовых компонент НДС здания от частоты



2. Наибольшие значения расчетных параметров здания при действии силы $F_y(f)$

| Этаж | Перемещение, мм | Ускорение, m/s^2 | Напряжение, МПа | |
|--------|-----------------|--------------------|-----------------|------------|
| | | | в плитах | в колоннах |
| Первый | 35,8 | 6,66 | 2,96 | 33,69 |
| Второй | 63,7 | 11,83 | 1,41 | 23,4 |

ется на втором пике при частоте 8,375 Гц.

Для варианта 4 дана сводная табл. 2 наибольших значений расчетных параметров здания при действии силы $F_y(f)$.

Для варианта 1 данные табл. 2 практически повторяются, можно отметить лишь незначительное (не более 1%) увеличение напряжений в колоннах. Наблюдается заметное перераспределение полей НДС при сравнении вариантов 1 и 4 в центральных зонах плит, особенно покрытия. Варианты с обвязкой, т. е. варианты 2 и 3, показали существенное (почти на порядок), снижение как кинематических, так и прочностных параметров НДС.

Анализ данных табл. 2 и рис. 2 показал, что перемещения и ускорения, достигнув наибольших значений в узлах второго этажа при частоте 2,169 Гц, на втором пике существенно снижаются и становятся максимальными уже в узлах первого этажа.

Ситуация с напряжениями в колоннах и панелях является противоположной, но гораздо более сложной. Поля касательных напряжений

в плитах перекрытий показаны на рис. 3. В варианте 3 возникает эксцентриситет между центрами масс и жесткости здания, вызывающий его вращение в плане; отношение смещения торца здания к смещению его центра, являющееся характеристикой пространственной работы здания, составляет для первого этажа 1,34 и для второго – 1,45.

Расчеты показали, что высшие формы колебания колонн препятствуют возникновению привычных форм колебания, присущих модели двухэтажного здания.

Они приводят к изменению взаимного положения перекрытия и покрытия, когда, двигаясь, как это присуще первой форме колебания двухэтажного здания, в одну сторону, амплитуда колебания перекрытия (первый этаж) превышает амплитуду колебания покрытия (второй этаж).

Такое поведение здания характеризуется пересечением линий, определяющих положение его расчетных точек в зависимости от частоты (см. рис. 2).

Второй и последующий пики однофазного смещения этажей здания, хотя имеют заметно меньшую амплитуду раскачки, чем при первом пике, за счет более высокого значения частот колеблются с заметными ускорениями в отдельных случаях большими, чем при первом пике (рис. 4). Столь существенное влияние колебания колонн на динамическое поведение здания в целом объясняется их значительной мас-

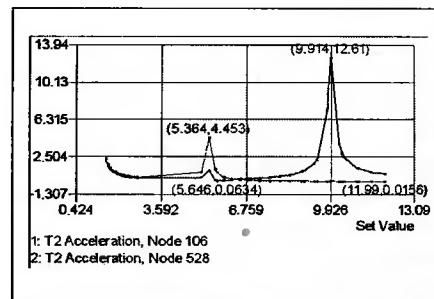


Рис. 4. Распределение ускорений по оси Y в диапазоне частот для узлов в центре колонны второго этажа (106) и на углу плиты (528)

сой и высокочастотной вибрацией при колебаниях по высшим формам.

Таким образом, анализ динамических характеристик каркасных зданий позволяет сделать выводы:

- необходим учет инерционных и жесткостных параметров колонн;
- при использовании монолитных перекрытий можно отказаться от установки ригелей в продольном направлении;
- поля перемещений и напряжений – в противофазе (по этажам);
- в центрах плит, колонн и ригелей напряжения всегда ниже, чем в контактных зонах;
- при $F_y(freq)$ наблюдаются возбуждения на высоких частотах (~9,95 Гц), значительные и вертикальные ускорения плит перекрытий;
- при $F_x(freq)$ общее НДС всегда существенно ниже, чем при $F_y(freq)$;
- в динамических расчетах зданий следует отказаться от приближенных методов их расчета, поскольку из-за густого спектра частот в них возникают биения, способные вызвать перегрузку конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сапожников А. И. Метод расчленения – эффективное средство статического и динамического расчета рамно-связевых пространственных систем // Изв. вузов. Сер. Стр-во. 1995. № 7–8.
2. Сапожников А. И., Миличев А. И. Численный анализ деформирования каркасных зданий как трехмерных моделей // Изв. вузов. Сер. Стр-во. 2006. № 7.
3. Миличев А. И. Решение задач прочности и динамики конструкций МКЭ с использованием САЕ систем. Астрахань: АИСИ, 2005. Деп. в ВИНИТИ 07.07.2005, № 956. ■

Рис. 3. Поля касательных напряжений T_{xy} в плитах при динамическом возбуждении с частотой 8,375 Гц

