

требуемых действий, описаны материалы (документы), обосновывающие реализацию предпроектных решений.

Отмечаются достоинства и специфика выполнения предпроектных проработок, избавляющие впоследствии от многочисленных переработок проектной документации.

Без привлечения на этапе предпроектных проработок квалифицированной проектной ор-

ганизации, осуществляющей проработку концептуальных идей и технических решений, невозможно качественное исполнение АСП. Кроме того, реализация АСП будет сопряжена с конфликтами требований, решений и возможностей, указанных в задании на проектирование, исходно-разрешительной документации и планируемых технико-экономических показателях.

Список литературы

1. Журавлев П.А., Марукян А.М. Особенности предпроектных проработок в инвестиционно-строительной деятельности (Часть 1) // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО «АГАСУ». 2021. № 3 (37). С. 10-16.
2. Скачкова М.Е., Чудова К.А. Трехмерное моделирование градостроительных условий и ограничений земельного участка // Природообустройство. 2019. №3. С. 39-47.
3. Мунтяну П.В. Об особенностях применения земельных и градостроительных норм при установлении санитарно-защитных зон: законодательные новеллы // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2019. №5. С. 661-667.
4. Арсналиев М.А. Особенности государственной регистрации публичных сервитутов // Общество и право. 2014. №3 (49). С. 62-66.
5. Ганжа С.Д. К вопросу нормирования параметров жилой застройки в крупном Сибирском городе // Творчество и современность. 2017. №1 (2). С. 56-62.
6. Журавлев П.А., Марукян А.М., Сборщиков С.Б. Регулирование градостроительного зонирования, территориального планирования, проектирования городов и объектов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 7. С. 31-43.
7. Нетишинская Л.Ф., Коробченко Р.И. Особенности правового режима публичного сервитута // Успехи современной науки. 2016. № 6, Том 3. С. 103-106.
8. Тесаловский А., Заплата В. Оценка влияния обременений от охранных зон газораспределительных сетей // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2019. № 3(147). С. 96-101.
9. Золотозубов Д.Г., Карманова О.С. Анализ влияния изменения инсоляции квартир на энергосбережение // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. №1, Том. 7. С. 82-92.
10. Дорощук Н.Р. Проблемы архитектурного облика города // International scientific review. 2016. №21 (31). С. 94-95
11. Большакова П.В. Перечень процедур и сроки их проведения на этапе организационно-технологической подготовки объекта к строительству // Наука и бизнес; пути развития. 2018. № 1 (79). С. 9-12.
12. Акрстиний В.А. Основные направления градостроительного анализа при реализации инвестиционно-строительных проектов // Недвижимость: экономика, управление. 2018. № 4. С. 69-74.
13. Шамаева Т. В. Свидетельство архитектурно-градостроительного облика (АГО) в Московской области. Общие Положения. Проблемы // Вестник евразийской науки. 2018. №2. Том. 10. С. 1-11.
14. Журавлев П.А. Цена строительства и этапы ее формирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9 (104). С. 174-178.
15. Журавлев П.А., Марукян А.М. Ресурсообеспечение инвестиционно-строительной деятельности как основа обоснования инвестиционных программ // Промышленное и гражданское строительство. 2021. №. 1. С. 59-66.

© П. А. Журавлев, А. М. Марукян

Ссылка для цитирования:

Журавлев П. А., Марукян А. М. Особенности предпроектных проработок в инвестиционно-строительной деятельности (Часть 2) // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 1 (39). С. 47-52.

УДК 624.04:519.62

DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-52-57

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛНОТЫ УЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ФОРМ И ЧАСТОТ ПРИ РАСЧЕТЕ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ

А. В. Синельщиков

Синельщиков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: pgs_agasu@mail.ru

В работе проведен анализ положений СП 14.13330.2018, относящихся к определению сейсмической нагрузки на здания и сооружения. Приведены дискуссионные положения СП, требующие уточнений и дополнений. Проведен анализ требований СП по учету количества собственных форм при проведении расчетного обоснования сейсмостойкости. Приведены расчетные формулы для вычисления собственных форм и частот сооружения, а также эффективной модальной массы для расчетной модели. Указана необходимость контроля эффективной модальной массы для вращательных компонент реакции сооружения.

Ключевые слова: сейсмостойкость, собственные формы и частоты, эффективная модальная масса, коэффициенты участия статической и динамической нагрузки.

ENSURING THE COMPLETENESS OF ACCOUNTING FOR EIGENMODES AND FREQUENCIES IN THE CALCULATION OF STRUCTURES FOR SEISMIC RESISTANCE

A. V. Sinelshchikov

Sinelshchikov Aleksey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: pgs_agasu@mail.ru

The paper analyzes the provisions of SP 14.13330.2018 related to the determination of the seismic load on buildings and structures. The debatable provisions of the SP are given, requiring clarifications and additions. The analysis of the SP requirements for taking into account the number of own forms in the course of the computational justification of seismic resistance was carried out. Formulas are given for calculating the eigenforms and frequencies of the structure, as well as the effective modal mass for the calculation model. The need to control the effective modal mass for the rotational components of the structure's reaction is indicated.

Keywords: seismic resistance, eigenmodes and frequencies, effective modal mass, static and dynamic load participation factors.

Землетрясения все еще остаются опасными и непредсказуемыми явлениями природы, вызывающими сильные разрушения с большими социальными, экономическими и техногенными последствиями. Разработка мер (в том числе на этапе проектирования) по защите сооружений от землетрясений остается актуальной.

На нормативном уровне требования к сейсмостойкости инженерных сооружений определяются актуализированным в 2018 году СП 14.13330.2018 «Актуализированная редакция СНиП II-7-81*». Строительство в сейсмических районах»¹ (далее – СП). Большинство сооружений, требующих принятия мер по сейсмической защите, относится к гражданским и промышленным зданиям и сооружениям общего назначения. Согласно классификации СП такие объекты по назначению относятся к третьей группе, для которых расчет ведется для сейсмической нагрузки, соответствующей расчетному землетрясению (РЗ). Целью расчетов на РЗ является определение (принятие) проектных решений, позволяющих предотвратить частичную или полную потерю эксплуатационных свойств сооружением. Расчет производится в упругой области деформирования.

В качестве расчетного метода СП предлагает использовать линейно-спектральный метод (ЛСМ) теории сейсмостойкости с допущением повреждений несущих конструкций и повреждением несущих конструкций, не приводящих к их разрушению и обрушению сооружения или его частей, допускающих ремонт и восстановление сооружения. При этом простейшие консольные схемы здания разрешается использовать только для зданий простой конфигурации, к которым не относятся большинство современных сооружений.

Помимо требований к использованию пространственных схем расчетно-динамических моделей (РДМ) сооружений, в СП предлагается использовать шестикомпонентное сейсмическое воздействие, основанное на сейсмическом

коэффициенте динамичности, приведенном в СП для различных типов грунтов (рис.).

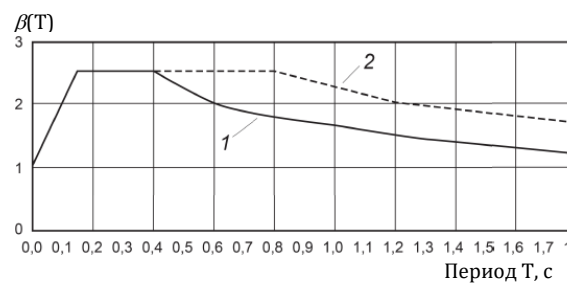


Рис. Сейсмический коэффициент динамичности β в зависимости от расчетного периода собственных колебаний T_i здания

Однако, несмотря на совершенствование методики расчетного обоснования сейсмостойкости зданий и сооружений, СП содержит и ряд дискусионных положений.

1. Определение сейсмической нагрузки S_{ik}^j по каждой из собственных форм колебаний здания содержит ряд коэффициентов, корректирующих уровень сейсмического воздействия в зависимости от назначения, степени допускаемых повреждений, способности сооружения рассеивать энергию колебаний, формы его деформации²:

$$S_{ik}^j = K_0 K_1 m_k^j A \beta_i K_{\psi} n_{ik}^j, \quad (1)$$

где S_{ik}^j – расчетная сейсмическая нагрузка по направлению обобщенной координаты с номером j , приложенная к узловой точке k РДМ и соответствующая i -й форме собственных колебаний зданий или сооружений; K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность; K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений; m_k^j – масса или момент инерции соответствующей массы, отнесенной к точке k по обобщенной координате j , определяемые с учетом расчетных нагрузок на конструкции; A – значение ускорения в уровне основания, принимаемое равным 1,0; 2,0; 4,0 м/с² для расчетной

¹ СП 14.13330.2018. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. - М.: ФГУП Стандартинформ, 2018. - 122 с.

² Там же.

сейсмичности 7, 8, 9 баллов соответственно; β_i – коэффициент динамичности, соответствующий i -й форме собственных колебаний зданий или сооружений, принимаемый по графику СКД в зависимости от категории грунтов (см. рис.); K_ψ – коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии; n_{ik}^j – коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия.

Расчетная часть обоснования сейсмостойкости заканчивается вычислением критериальных значений (внутренних усилий, напряжений, перемещений) среднеквадратическим суммированием значений, полученных по каждой учитываемой собственной форме колебаний (в том числе с возможностью учета 10 % отличия периодов соседних собственных форм колебаний). Итоговый знак критериального значения назначается по знакам значений соответствующих факторов для форм с максимальными модальными массами.

Таким образом, подбор и уточнения коэффициентов, входящих в (1), имеющих цель наиболее точно учесть воздействие землетрясения на сооружение и свойства самого сооружения в целом, на последнем этапе значительно искажается. Второстепенные собственные формы колебаний усиливают форму с максимальными модальными массами и не учитывают тот факт, что преобладающая форма (по модальной массе) может ослабляться второстепенными формами. Расчетная сейсмическая реакция сооружения получается завышена на 30–40 % [1], что приводит к удорожанию здания и строительства.

2. При определении сейсмической нагрузки S_{ik}^j используется масса или момент инерции соответствующей массы m_k^j , отнесенной к точке k по обобщенной координате j , что означает использование диагональной матрице масс сооружения и справедливо для простых (в терминологии СП) сооружений. При современном уровне расчетных методов анализа (как и современные программные комплексы) используется дискретно-континуальные РДМ, что означает наличие не диагональных членов матрицы масс. Вопрос корректного вычисления величины m_k^j для дискретно-континуальных РДМ зданий и сооружений в СП не раскрывается.

3. Коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -й форме, от узловой точки приложения рассчитываемой нагрузки и направления сейсмического воздействия (СВ), в СП предлагается вычислять исходя их предположения, что СВ является равномерным поступательным. Определение равномерного поступательного СВ в СП не раскрывается.

4. Усилия в конструкциях зданий и сооружений, проектируемых для строительства в сейсмических районах, а также в их элементах определяются с учетом высших форм их собственных колебаний. Минимальное число форм собственных колебаний, учитываемых в расчете, с СП рекомендуется назначать так, чтобы сумма эффективных модальных масс, учтенных в расчете, составляла не менее 90 % общей массы системы, возбуждаемой по направлению действия сейсмического воздействия для горизонтальных воздействий и не менее 75 % – для вертикального воздействия. Должны быть учтены все формы собственных колебаний, эффективная модальная масса которых превышает 5 %.

Для сложных систем с неравномерным распределением жесткостей и масс СП указывает на необходимость учета остаточного члена от отброшенных форм колебаний. Способы учета остаточного члена от отброшенных форм колебаний все еще остается предметом исследований [2–4], однако все еще остаются упрощенными. Например, отсутствуют исследования влияния эффектов деформации сдвига и вращательного изгиба на высшие формы колебаний сооружения на величину остаточного члена, что происходит у тонкостенных балок (двутавры, швеллеры) и балок, подверженных высокочастотным возбуждениям, когда длина волны сопоставима с высотой балки. Физически учет дополнительных механизмов деформации снижает жесткость балки и результатом является больший прогиб под статической нагрузкой и более низкие прогнозируемые собственные частоты.

С накоплением практического инженерного опыта дискусионные положения 1–3 могут быть уточнены и раскрыты в последующих изменениях и актуализациях СП. Однако дискуссионное положение 4 имеет более принципиальный характер.

Современному уровню расчетного анализа зданий и сооружений свойственна тенденция к все большему усложнению расчетных моделей. Не редкость, что количество степеней свободы РДМ исчисляется десятками тысяч. При объединении в единую расчетную модель подсистем с разными принципами конструктивного построения и физико-механическими свойствами (грунт, здание, встроенное оборудование) применение консервативного подхода, изложенного в СП, требует дополнительного обоснования. Рост числа степеней свободы РДМ приводит к увеличению количества собственных форм колебаний в области низких частот, вносящих как существенный, так и практически нулевой вклад в реакцию сооружения. Кроме этого, внесение изменений в РДМ сооружения, уточнение его отдельных узлов и элементов, а это всегда происходит на этапе его проектирования, приводит к изменению частотного состава собственных форм колебаний и смещение значений собственных частот.

В общем случае, расчетный анализ сейсмостойкости зданий и сооружений предполагает решение системы из n дифференциальных уравнений:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = \{P^{cm}\} + \{P(t)^{dun}\}. \quad (2)$$

где $[M]$ – матрица масс системы характеризующая действие сил инерции; $[C]$ – матрица демпфирования, характеризующая рассеивание (диссипацию) энергии; $[K]$ – матрица жесткости системы, характеризующая действие упругих восстанавливающих сил; $\{V\}$, $\{\dot{V}\}$, $\{\ddot{V}\}$ – векторы обобщенных перемещений, скоростей и ускорений системы, соответственно, характеризующие смещения, скорости и ускорения моделируемой системы в общей системе координат. Действие на систему любых нагрузок учитывается в векторах статического $\{P^{cm}\}$ и $\{P(t)^{dun}\}$ – динамического (в том числе и сейсмического) нагружения.

Задача нахождения собственных форм и собственных значений с математической точки зрения относится к линейной алгебре и связана с нахождением решения системы линейных дифференциальных уравнений. Таковым является матричное дифференциальное уравнение свободных колебаний системы с n степенями свободы получаемое из (2):

$$[M]\{\ddot{V}\} + [K]\{V\} = \{0\}. \quad (3)$$

Уравнение (3) простыми преобразованиями может быть приведено к системе линейных однородных дифференциальных уравнений первого порядка, фундаментальная система решений для которой может быть найдена с помощью метода Эйлера [6]. В соответствии с ним i -е частное решение ищется в виде гармонической функции:

$$\{V_i\} = \{\varphi_i\} \sin(\omega_i t + \mathcal{G}_i), \quad (4)$$

где $\{\varphi_i\}$ – вектор постоянных коэффициентов порядка n ; ω_i и \mathcal{G}_i – частота и фаза гармонических колебаний. Вторая производная по времени от (4) будет иметь вид:

$$\{\ddot{V}_i\} = -\omega_i^2 \{V_i\}. \quad (5)$$

Подстановка выражения (5) в (3) приводит к уравнению:

$$([K] - \lambda_i [M])\{\varphi_i\} = \{0\}, \quad (6)$$

где $\lambda_i = \omega_i^2$ – i -ое собственное значение (квадрат собственной частоты).

Задача (6) нахождения λ_i и $\{\varphi_i\}$, известна в прикладной математике как обобщенная проблема собственных значений, где $\{\varphi_i\}$ представляет собой собственный вектор, соответствующий собственному значению λ_i .

Умножением (6) на обратную матрицу масс обобщенная проблема собственных значений может быть приведена к стандартной проблеме:

$$([M]^{-1}[K] - \lambda_i [E])\{\varphi_i\} = 0, \quad (7)$$

где $[E]$ – единичная матрица размером $n \times n$.

Выражение (7) представляет собой систему линейных алгебраических однородных уравнений, которая имеет нетривиальное решение в виде собственного вектора $\{\varphi_i\} \neq 0$ в случае, если ее определитель равен нулю:

$$\| [M]^{-1}[K] - \lambda_i [E] \| = 0. \quad (8)$$

Выражение (8) является характеристическим уравнением для произведения матриц $[M]^{-1}[K]$. Из него следует, что собственные значения λ_i могут быть найдены как корни полинома n -ой степени (характеристического многочлена), который может быть получен путем раскрытия определителя. Для симметричных положительно определенных матриц $[K]$ и $[M]$, что соответствует устойчивости конструкции, собственные значения будут действительными и положительными [6]. Каждому из этих значений соответствует пространство собственных векторов, удовлетворяющих уравнению (8), следовательно, собственные векторы определяются из (8) неоднозначно, а с точностью до постоянного множителя. Это означает, что амплитуды колебаний по каждой компоненте решения (4) являются неопределенными. Определенной является только форма колебаний, из чего следует название вектора $\{\varphi_i\}$.

Если найдено значение ω_i^2 , то соответствующий собственный вектор может быть вычислен из (8) следующим способом: одной из компонент вектора $\{\varphi_i\}$ присваивается произвольное постоянное значение (например, 1), а для остальных компонент решается как редуцированная система уравнений порядка $(n-1)$ [7].

Принципиально важное свойство собственных векторов, являющихся решением обобщенной проблемы собственных значений (6) – их ортогональность по отношению к матрицам $[M]$ и $[K]$ из (3):

$$\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_j\} = 0; \quad \{\varphi_i\}^T [K] \{\varphi_j\} = 0, \quad \text{при } i \neq j. \quad (9)$$

Полный набор собственных векторов может рассматриваться как новый базис в n -мерном пространстве, в котором может быть представлено движение системы. При таком переходе система уравнений движения механической системы с n степенями свободы вида (3) распадается на n несвязных уравнений колебаний независимых осцилляторов, что существенно упрощает нахождение ее решения.

Полное решение уравнения (8) неэффективно с вычислительной точки зрения, поскольку получаемая матрица $[M]^{-1}[K]$ несимметрична, в то время как большинство алгоритмов используют это свойство. Обобщенная про-

блема в виде (8) может быть приведена к стандартной с использованием разложение Холецкого [8]. Представим матрицу $[M]$ в виде:

$$[M] = [L]^T [L], \quad (10)$$

где $[L]$ – нижняя треугольная матрица. Тогда уравнение (8) умножением обеих частей на $[L]^{-1}$ может быть приведено к виду

$$([L]^{-1}[K][L]^{-T})([L]^T \{\phi_i\}) = \lambda_i ([L]^T \{\phi_i\}). \quad (11)$$

При этом собственные значения системы (6) остаются теми же, что и для системы

$$[P]\{x\} = \lambda\{x\}, \quad (12)$$

где $[P] = [L]^{-1}[K][L]^{-T}$ – симметричная матрица, а собственный вектор исходной системы будет преобразован в вектор:

$$\{x\} = [L]^T \{\phi_i\}. \quad (13)$$

Поэтому вместо исходной обобщенной проблемы собственных значений может быть решена стандартная проблема (12), после чего собственные векторы исходной задачи могут быть восстановлены из соотношения (13).

Получение собственных значений путем нахождения корней характеристического многочлена с последующим решением систем вида (8) для нахождения всех собственных векторов может быть эффективно осуществлено для уравнений малого порядка ($n < 100$) и при условии отсутствия кратных собственных значений.

Для уравнений более высоких порядков должны быть использованы другие алгоритмы. Так, для нахождения собственных значений, лежащих в заданном диапазоне, может быть использован алгоритм, в котором разделение корней характеристического многочлена базируется на свойствах последовательности Штурма [6], а последующее их уточнение осуществляется с помощью метода половинного деления (метода бисекций). Среди наиболее часто используемых методов решения частичной проблемы собственных значений (нахождение m первых форм колебаний из n) следует отметить метод векторов Ритца, зависящих от нагрузки [9]; итераций в подпространствах [10]; Ланцоша [11]; градиентный метод Ритца [12]. Несмотря на простоту формулировки задачи нахождения собственных форм и частот колебаний, до сих пор невозможно предложить единого алгоритма для ее решения. Наиболее полно численные методы решения проблемы собственных значений изложены в фундаментальном труде Дж. Уилкинсона [13]. В [14] приведена таблица, которую можно использовать для выбора метода решения проблемы собственных значений.

При выборе алгоритма нахождения собственных значений и собственных векторов для

решения конкретной задачи необходимо учитывать следующие факторы:

1) получение всех собственных значений и собственных векторов (полная проблема собственных значений) или только часть из них (частичная проблема собственных значений). Например, только m первых форм колебаний из n , с частотами меньше заданной, либо собственные значения, принадлежащие заданной области, и т. д.;

2) наличие у исходных матриц специальных свойств, которые могут быть учтены алгоритмом для сокращения времени счета или уменьшения требуемой памяти (симметрия, положительная определенность, ленточная или профильная структура, большое число нулевых элементов);

3) требуется ли высокая точность вычислений, или допустима умеренная точность.

Решение частичной проблемы собственных значений для РДМ со многими степенями свободы помимо сокращения вычислительной сложности, соответствует и идеологии, заложенной в СП¹. Однако учитываемые m первых форм колебаний из n должны учитывать достаточное количество модальной массы при расчете реакции сооружения (см. дискуссионное положение 4 выше).

Для оценки вклада собственных формы колебаний в динамическую реакцию линейно-упругой системы используют понятие эффективной модальной массы [15]. Эффективная модальная масса при колебаниях по форме m при сейсмическом воздействии на всю систему в направлении k может быть вычислена по формуле [9]:

$$\mu_m = \frac{(D_m)^2}{M_d}, \quad (14)$$

где D_m – коэффициент модального участия m формы:

$$D_m = \frac{\{\varphi_m\}^T [M] \{\overline{\cos}\}}{\{\varphi_m\}^T [M] \{\varphi_m\}}, \quad (15)$$

где $\{\overline{\cos}\}$ – вектор направляющих косинусов, вектор, связывающий движение основания с движениями системы как абсолютно твердого тела в направлении каждой ее степени свободы; $M_d = \{\overline{\cos}\}^T [M] \{\overline{\cos}\}$ – массы, участвующие в направлении, определенном направляющими косинусами.

Коэффициенты модального участия представляют собой обобщенные нагрузки, создаваемые формой для инерционной нагрузки. Коэффициенты связаны с собственной формой и единственным ускорением. Фактические величины и знаки коэффициент модального участия не важны. Суммарная эффективная модальная масса m форм определяется по формуле:

¹ СП 14.13330.2018. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. - М.: ФГУП Стандартинформ, 2018. - 122 с.

$$\mu_{\Sigma} = \frac{1}{M_d} \sum_{i=1}^m (D_i)^2. \quad (16)$$

Эффективная модальная масса определяет вклад всех форм в движение конструкции в рассматриваемом направлении. Это обеспечивает простой контроль того, сколько собственных форм требуется для достижения заданного уровня учета масс. Если включить в расчет все собственные формы конструкции, отношение участвующих масс равно единице (100 %).

Согласно СП 14.13330.2018, с точки зрения достижения необходимого уровня учета эффективных модальных масс, контролироваться должны линейные степени свободы. Опыт практических расчетов показывает, что эффективные модальные массы для вращательных степеней свободы растут значительно медленнее, чем для поступательных. В среднем, требуется в два раза больше собственных форм колебаний конструкции, чтобы достичь такого же уровня учета модальных масс по вращательным компонентам. Хотя угловые ускорения как сейсмическая нагрузка задается относительно поверхности земли, коэффициенты модального участия угловых ускорений вычисляются, относительно центра масс конструкции. Это делает коэффициенты модального участия вращательных компонент независимой характеристикой, поскольку они не включают в себя вклад от поступательных ускорений.

Дополнительно, при выборе количества учитываемых собственных колебаний следует принимать во внимание коэффициенты участия статической и динамической нагрузки, которые показывают, насколько полно выбранные собственные формы колебаний учитывают статическую и динамическую нагрузку на сооружение.

Несмотря на то, что ЛСМ теория сейсмостойкости, основанная на вычислении собственных форм и частот колебаний, относится к апробированному на практике инженерным методам обеспечения сейсмостойкости зданий, рост сложности современных инженерных сооружений и их расчетных динамических моделей, применение новых материалов и технологий в строительстве, объединение в одной РДМ различных подсистем обуславливает появление множества вопросов, требующих дополнительных исследований и научных дискуссий. Современный уровень развития вычислительной техники и программных комплексов расчетного анализа позволяет проводить расчеты РДМ с сотнями тысяч степеней свободы. В связи с этим нет смысла ограничивать динамический портрет сооружения только m собственными формами ($m \ll n$). Кроме этого, большинство дискуссионных вопросов линейно-спектральной теории сейсмостойкости могут быть сняты переходом к методам динамического анализа, основанным на непосредственном решении системы дифференциальных уравнений движения (2).

Список литературы

1. Синельщиков А.В. Расчет сейсмических спектров ответа с помощью рекуррентных формул интегрирования дифференциального уравнения движения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия [Текст] научно-технический журнал / Астраханский инженерно-строительный институт. – Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2014. – № 3 (9). – с. 26-31.
2. Бирбраер А.Н., Сазонова Ю.В. Вклад высших мод в динамический отклик конструкций на высокочастотные воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 6 (227). С. 22–27.
3. Тяпин А.Г. Реализация «концепции остаточного члена» в расчетах сооружений на сейсмические воздействия модальным и спектральным методами // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 4. С. 32–35.
4. Лалин В.В., Ле Ты Куанг Чунг. Расчет строительных конструкций на несколько динамических воздействий со статическим учетом высших форм колебаний // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 3. С. 171–178.
5. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Учет указаний СП 14.13330.2018 при реализации расчета сооружений на сейсмические воздействия в программном комплексе STARK ES // Вестник НИЦ «Строительство». № 1(20). - М.: НИЦ «Строительство», 2019. – с.103-113.
6. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы: Пер.с англ.- М.:Мир, 1983.- 384 с.
7. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
8. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения: Пер.с англ., М.:Мир, 1980.- 454 с.
9. E.L.Wilson, Three dimensional dynamic analysis of structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 1996.
10. Фиалко С. Ю. Исследование влияния начальной погиби на частоты собственных колебаний ребристых конических оболочек, Прикладная механика, 1982.-т. 18.-№ П.-С. 118-122.
11. Papadrakakis, Solving large -scale problems in mechanics, John Wiley & Sons Ltd., 1993.
12. Fialko S.Yu. High-performance aggregation element-by-element Ritz-gradient method for structure dynamic response analysis. CAMES (Computer assisted mechanics - engineering sciences), IV, 2000
13. Уилкинсон Дж.Х. Алгебраическая проблема собственных значений. М.:Наука, 1970.- 564 с.
14. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство. Пер.с англ. - М.:Мир, 1982.- 238 с.
15. Филимонов А.В. Учет найденных форм собственных колебаний при расчете реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия //Строительная механика и расчет сооружений. - 2014. - № 2. - С. 46-53.

© А. В. Синельщиков

Ссылка для цитирования:

Синельщиков А. В. Обеспечение полноты учета собственных форм и частот при расчете сооружений на сейсмостойкость // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 1 (39). С. 52–57.