

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗДАНИЯ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Д.Н. Низомов¹, И.К. Каландарбеков², И.И. Каландарзода²

¹Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана,

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В данной обзорной статье рассматриваются современные модели и методы анализа динамических задач взаимодействия здания с грунтовым основанием при сейсмическом воздействии. Особое внимание уделено учёту нелинейных свойств грунтов, а также влиянию различных типов фундамента на общую сейсмостойкость конструкции. Приведены численные методы моделирования, а также результаты компьютерных экспериментов, демонстрирующие характерные особенности передачи сейсмических волн от основания к надземной части здания. Анализ работы направлен на повышение точности расчётов при проектировании зданий в сейсмоопасных районах и может быть полезен специалистам в области сейсмостойкого строительства и инженерной геологии.

Ключевые слова: сейсмостойкое строительство, взаимодействие здания с основанием, сейсмическое воздействие, колебание, численные методы, численное моделирование, податливость основания, математическое моделирование, фундаментная плита.

МОДЕЛҲО ВА МЕТОДҲОИ ТАҲЛИЛИ МАСЪАЛАҲОИ ДИНАМИКИИ БАҲАМТАЪСИРКУНИИ БИНО ВА АСОСИ ХОКӢ ҲАНГОМИ ТАЪСИРОТИ СЕЙСМИКӢ Ҷ.Н.Низомов, И.Қ. Қаландарбеков, И.И.Қаландарзода

Ин мақолаи баррасии амсилаҳои муосир ва методҳои таҳлили масъалаҳои динамикии баҳамтаъсиркунии бинҳо бо асосҳои хокӣ ҳангоми таъсири сейсмикии барраси карда шудааст. Баҳисобгирии хусусияти ғайрихаттии хок ва инчунин таъсири навҳои гуногуни таҳкурси ба қобилияти зилзилатобоварии конструкцияҳо диққати махсус дода шудааст. Методҳои адабии моделкунонӣ, инчунин натиҷаҳои таҷрибаҳои ҳисоббарорӣ, ки хусусиятҳои характерноки аз таҳкурси ба қисми болоии бино гузаштани мавҷҳои сейсмикро нишон медиҳанд, оварда шудаанд. Таҳлили қор ба баланд бардоштани саҳеҳии ҳисобҳо ҳангоми лоиҳакашии биноҳо дар минтақаҳои аз ҷиҳати сейсмикии хавфнок нигаронида шуда, барои мутахассисон соҳаи сохтмони зилзилатобоварии ва геологияи муҳандисӣ муфид буда метавонад.

Калимаҳои калидӣ: зилзилатобоварии сохтмон, баҳамтаъсиркунии бино бо асос, таъсири сейсмикии, лаппиш, методҳои адабӣ, моделкунонии адабӣ, нармиш асос, моделкунонии математикӣ, плитаи таҳкурси.

MODELS AND METHODS OF ANALYSIS OF DYNAMIC PROBLEMS OF INTERACTION OF A BUILDING WITH A GROUND BASE UNDER SEISMIC IMPACT

D.N. Nizomov, I.K. Kalandarbekov, I.I. Kalandarzoda

This review paper considers modern models and methods of analyzing dynamic problems of interaction between a building and a soil foundation under seismic action. Special attention is paid to the consideration of nonlinear properties of soils, as well as the influence of different types of foundations on the overall seismic resistance of the structure. Numerical methods of modeling as well as the results of computer experiments demonstrating the characteristic features of seismic wave transmission from the foundation to the above-ground part of the building are given. The analysis of the work is aimed at improving the accuracy of calculations in the design of buildings in earthquake-prone areas and can be useful to specialists in the field of earthquake-resistant construction and engineering geology.

Keywords: earthquake-resistant construction, building-foundation interaction, seismic impact, oscillation, numerical methods, numerical modeling, base pliability, mathematical modeling, foundation slab.

Введение

Обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений остаётся одной из важнейших и в то же время наиболее сложных задач в строительной науке. Применение аналитических методов при расчётах взаимодействия здания с грунтовым основанием зачастую ограничено грубой идеализацией, которая не позволяет в полной мере учитывать особенности контактного взаимодействия системы «здание–грунт». В связи с этим для решения подобных задач всё шире применяются численные методы. Однако такие факторы, как длительность сейсмического воздействия, компактные размеры зданий и высокочастотный характер колебаний, требуют выбора большой расчётной области и использования плотной конечно-элементной сетки. Это, в свою очередь, приводит к значительным вычислительным затратам. Поэтому актуальной задачей является совершенствование численных методов, позволяющих не только адекватно моделировать физические процессы взаимодействия конструкции с основанием, но и существенно снижать объём вычислений.

Динамические взаимодействия сооружения с грунтовым основанием

Проблема динамического взаимодействия сооружения с грунтовым основанием является одной из ключевых в области сейсмостойкого строительства и динамики сооружений. Динамические характеристики сооружения в значительной степени зависят от свойств основания, что, в свою очередь, влияет на его поведение при воздействии динамических нагрузок. Решение данной задачи осложняется рядом факторов: ограниченностью информации о параметрах сейсмического воздействия, высокой сложностью и стоимостью проведения физических экспериментов, а также трудностями при переносе результатов с моделей на реальные объекты. Дополнительным препятствием для численного

моделирования взаимодействия сооружения с основанием при сейсмическом воздействии является высокая трудоёмкость расчётов и значительные вычислительные затраты расчетов [2].

В настоящее время численные методы широко применяются инженерами и исследователями в области технических наук для решения сложных задач. Эти методы предполагают приближённое решение уравнений, описывающих физические процессы. На сегодняшний день существует множество таких методов, включая метод конечных разностей, метод конечных элементов, вариационно-разностный метод, метод граничных элементов, метод сосредоточенных деформаций и другие. Одним из первых приближённых подходов стал метод конечных разностей, в котором исходные уравнения аппроксимируются с использованием локальных разложений искомых функций в усечённые ряды Тейлора [34]. Основным требованием к подобным численным методам остаётся снижение вычислительных затрат при сохранении достаточной точности результатов.

Согласно нормативным требованиям для обеспечения нормальной эксплуатации и увеличения срока службы сооружения необходимо устранение неравномерных осадок, а также ограничение абсолютных и относительных перемещений фундаментов и надфундаментных конструкций. В настоящее время существует множество различных методов математического моделирования поведения грунта. Ключевым аспектом является выбор наиболее эффективной и адекватной модели основания. Часто при использовании одного и того же программного обеспечения проектировщики получают разные результаты расчётов, что, вероятно, связано с различиями в методах представления реального поведения конструкции в виде математической модели. Поэтому особенно актуальной задачей остаётся совершенствование достоверных и точных методов численного моделирования грунтового основания.

Математическое моделирование

Математическое моделирование и анализ напряжённо-деформированного состояния взаимодействия сооружений с основанием остаются актуальными задачами строительной механики.

Известно, что колебания основания здания во время интенсивных землетрясений имеют хаотический характер и зависят от множества факторов, таких как спектр сейсмических волн, угол их подхода к поверхности, тип и жёсткость здания, форма и глубина заложения фундамента, а также состав и структура земной коры. Первый из этих факторов вызывает низкочастотные колебания сооружения, что приводит к возникновению значительных сил инерции. В отдельных зонах конструкции это может привести к образованию высоких напряжений, превышающих прочностные характеристики материалов, что в итоге способно вызвать повреждения и даже обрушение здания. Существует несколько методов определения сейсмических нагрузок на сооружение, которые учитывают соотношение между собственными частотами конструкции и преобладающими частотами внешних воздействий [4].

В источниках [6,7] рассматриваются вопросы, связанные со статистической теорией сейсмостойкости. Одним из ключевых аспектов при расчетах сейсмостойкости зданий является правильный выбор расчетной модели сооружения и грунтового основания. При этом к модели здания предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, она должна быть достаточно детализированной для точного описания распределения нагрузок в конструкции, с другой - упрощённой, чтобы снизить вычислительную сложность динамического анализа. Такая противоречивость заставляет искать компромисс между уровнем адекватности модели и её простотой.

Расчёты с использованием нелинейных моделей (например, нелинейно-упругих, упругопластических и других) позволяют более детально описать поведение материалов и конструкций зданий, а также учесть их прочностные ресурсы. Однако такие модели отличаются высокой вычислительной сложностью, так как включают большое количество параметров, отражающих неупругие свойства материалов. В связи с этим практическое применение подобных моделей при расчётах зданий зачастую ограничено и в некоторых случаях может быть нецелесообразным из-за значительных затрат вычислительных ресурсов.

Следовательно, выбор конкретной модели должен основываться на характере решаемой задачи, особенностях работы несущих элементов конструкции и требуемой степени дискретизации [4].

Учёт податливости основания при выборе расчетной модели здания особенно важен для массивных и жёстких сооружений, возведённых на просадочных грунтах. Как известно [4], характеристики основания - упругие, инерционные и демпфирующие - существенно влияют на динамические свойства самого здания и, соответственно, на его реакцию на динамические нагрузки. На сегодняшний день выполнено большое количество исследований, посвящённых задачам динамики и сейсмостойкости зданий в различных расчетных моделях [30, 36]. Вопросы динамического взаимодействия сооружения с основанием подробно рассматриваются в работах [1, 5, 24, 40, 43–45].

При решении таких задач здание, как правило, моделируется менее детально, чем при расчёте отдельных элементов, а неупругие деформации и повреждения обычно не принимаются во внимание. Уровень учёта влияния основания зависит от конкретной задачи исследования: чаще всего рассматривается только упругая податливость основания, тогда как инерционные и демпфирующие эффекты, как правило, опускаются.

При исследовании задач взаимодействия сооружений с основанием под воздействием сейсмических нагрузок необходимо также учитывать моделирование распространения сейсмических импульсов в грунтовой среде. Реакция геологической среды на динамические воздействия подробно рассмотрена в работах таких исследователей, как Айзенберг Я.М., Бабешко В.А., Бабич В.М., Ворович И.И., Немирович-Данченко М.М., Михайленко Б.Г., Петрашень Г.И., Ратникова Л.И., Гогеля Т.И., Данилов А.Г., Никифоров С.П., Aki K., Bardet J.P., Lysmer J. и др. Влияние неоднородностей грунтовой среды на перераспределение энергии сейсмических волн анализируется в исследованиях Бабешко В.А., Воровича И.И., Данилова А.Г. и Никифорова С.П. Правильный выбор размеров элементов конечно-разностной сетки при численном моделировании взаимодействия сооружения с грунтом существенно влияет на точность получаемых результатов. Связь между длиной волны и размером ячеек сетки обсуждается в работах Слепяна Л.И., Данилова А.Г., Никифорова С.П., Абу-Лейла М.А., Nielsen P., Berg P., Skongard O., Dablain M., Miyatake T. и Trefethen L.N. В этих исследованиях подчеркивается, что для численного моделирования малых сооружений, учитывая длительность и высокочастотный характер сейсмического воздействия, требуется большая расчётная область и плотная сетка, что ведёт к значительному увеличению вычислительных затрат.

В диссертационной работе [18] предложен метод решения двумерных и трёхмерных задач сейсмостойкости сооружений, который существенно снижает вычислительные затраты, учитывает эффекты контактного взаимодействия с грунтовым основанием и демонстрирует удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

Вопросы выбора адекватной модели грунта рассмотрены в исследованиях Ляхова Г.М., Немировича-Данченко М.М., Киселёва Ф.Б. и Вознесенского Е.А. [10, 23, 26, 27]. В данных работах отмечается, что в ряде случаев достаточно применения линейно-упругой модели. Различные расчётные модели упругого основания были предложены исследователями на протяжении времени.

Модели упругого основания

Модель Винклера рассматривает грунтовое основание как систему несвязных между собой упругих пружин. Филоненко-Бородич усовершенствовал эту модель, предложив сверху соединить систему винклеровских пружин нерастяжимой мембраной. Благодаря этому при приложении сосредоточенной силы к одной из пружин в работу вовлекаются также соседние пружины, и деформация основания распространяется за пределы области приложения нагрузки.

Модель Пастернака [14, 31] учитывает сопротивление грунта как сжатию, так и сдвигу, при этом механические характеристики основания задаются двумя коэффициентами, отражающими эти свойства.

Модель Власова [9] основана на общем вариационном методе, который позволяет свести трёхмерную задачу теории упругости к двумерной, а затем - к одномерной. Основание в этой модели рассматривается как однослойная структура, характеристики которой задаются двумя упругими параметрами, взаимосвязанными с толщиной слоя, что отличает её от модели Пастернака, где используются два независимых коэффициента.

Преимуществом рассмотренных выше моделей учёта податливости основания является относительная простота алгоритмов, используемых при расчёте конструкций. В работах [43, 45] для численного моделирования взаимодействия сооружений с грунтом предложена методика, предусматривающая отдельный расчёт сил, действующих со стороны грунта на фундамент при условии жёсткой контактной поверхности, а затем проведение расчётов во временной области с использованием упрощённых механических моделей грунта, учитывающих перемещения и реакции в варианте без искусственного упрочнения.

В этих исследованиях показано, что хотя податливость фундамента оказывает незначительное влияние на сейсмическую реакцию верхней части сооружения, нагрузки, передаваемые грунтом на контактную поверхность фундамента, значительно зависят от податливости. При этом наблюдается перераспределение нагрузок между отдельными узлами, при сохранении общего баланса нагрузок, что приводит к более быстрому изменению внутренних усилий в фундаментных конструкциях по сравнению с общей реакцией сооружения. Эти эффекты необходимо учитывать при определении напряжённо-деформированного состояния (НДС) фундамента и смежных конструкций в системе «сооружение–грунт».

В настоящее время для анализа динамического взаимодействия сооружений с основанием, а также для моделирования волновых процессов в геологической среде широко применяются различные численные методы, включая конечно-разностные методы [12, 35], вариационно-разностные методы [35], метод конечных элементов [13, 20, 21, 22] и метод граничных элементов [1, 25].

Кратко рассмотрим особенности каждого из этих методов.

Численные методы

Конечно-разностные методы являются одними из наиболее универсальных и гибких подходов для решения различных задач математической физики. Чаще всего в этих методах исходной формой служит система уравнений движения, дополненная выражениями для деформаций через перемещения и определяющими соотношениями.

Вариационно-разностные методы отличаются от конечно-разностных тем, что базируются не на дифференциальной, а на вариационной постановке задачи. К ним близок интегро-интерполяционный подход [35]. Вариационно-разностным можно считать любой метод, основанный на сеточной аппроксимации вариационной задачи, сформулированной через некоторый функционал. При этом построение базисных функций необязательно, что является отличительной чертой вариационно-разностного метода по сравнению с методом конечных элементов.

Недостатком конечно-разностных и вариационно-разностных схем является вероятность возникновения эффекта неустойчивости особенно при использовании ячеек с числом узлов, превышающим минимально необходимое.

Метод конечных элементов (МКЭ) возник на основе методов сил и перемещений, применяемых в строительной механике, а также методов Рэлея-Ритца и Бубнова-Галеркина. Вариационно-разностные и конечно-разностные методы по сути являются упрощёнными вариантами МКЭ. Дискретные соотношения, получаемые в вариационно-разностных или конечно-разностных методах, могут быть выведены из метода конечных элементов при использовании определённых функций формы и сокращённого интегрирования.

Главное отличие МКЭ от конечно-разностных методов заключается в том, что в МКЭ искомые функции определены непрерывно по всей области задачи, а не только в ограниченном наборе дискретных точек. При этом в качестве исходных уравнений для МКЭ могут применяться как дифференциальные уравнения, так и вариационные принципы - в зависимости от выбранного способа построения системы уравнений, например, метод коллокации, метод взвешенных невязок или методы Рэлея-Ритца и Галеркина.

Метод граничных элементов зарекомендовал себя как один из перспективных подходов для решения задач генерации и распространения колебаний в полуограниченных слоистых средах с локальными нарушениями структуры и дефектами на плоской поверхности. Суть метода заключается в построении волновых полей с использованием интегралов типа Грина-Вольтерра, ядрами которых служат фундаментальные решения уравнений эластодинамики [8]. Это означает, что поле перемещений внутри тела выражается через граничные перемещения и поверхностные силы, что сводит задачу к определению этих величин. Эффективность метода во многом зависит от удачного разбиения границы на элементарные ячейки. Обычно фундаментальные решения выбираются в форме расходящихся волн.

Снижение размерности задачи, характерное для метода граничных интегральных уравнений (ГИУ) по сравнению с методами конечных элементов (МКЭ) или разностных методов (МКР), существенно уменьшает число неизвестных и объём вычислительных данных. Это преимущество особенно заметно при моделировании в неограниченных средах [25], в частности в задачах распространения сейсмических волн. Однако в ограниченных телах снижение размерности не всегда приводит к значительному улучшению эффективности.

В работе [19] рассматривается задача взаимодействия в системе «основание-сооружение» на базе модели однородного линейно-упругого полупространства с применением метода граничных интегральных уравнений. Анализируется напряжённо-деформированное состояние сооружения, взаимодействующего с упругим полупространством при условии плоской деформации. Для иллюстрации решения задачи используется пример статического взаимодействия сооружения с полупространством в плоской постановке.

Предполагается, что конечная однородная область с контактной границей взаимодействует с полубесконечной областью. На контактной границе между этими областями соблюдаются условия совместности: перемещения на границе раздела должны совпадать, а сумма напряжений – должны быть равной нулю. Исходя из этих условий и опираясь на теорему о взаимности работ, сформировано сингулярное граничное интегральное уравнение.

Второе интегральное уравнение, описывающее основание сооружения, получается из анализа конечной области, частично погруженной в полуплоскость, где часть её поверхности совпадает с поверхностью полубесконечной области. В этом уравнении неизвестными выступают перемещения и напряжения на контактной границе.

Таким образом, задача взаимодействия сооружения с основанием сводится к совместному решению полученной системы интегральных уравнений с учётом условий совместности на границе раздела. В результате решения системы определяется напряжённо-деформированное состояние: напряжения и перемещения на контактной границе, а также перемещения по контуру элемента.

Таким образом, из выше рассмотренных методов для решения данного класса задач наиболее предпочтительным и эффективным является метод конечных элементов (МКЭ). Однако применение МКЭ при анализе взаимодействия зданий и сооружений с грунтовым основанием сопряжено с рядом трудностей. Одной из главных проблем является правильный выбор размеров элементов конечно-элементной сетки. Небольшие размеры строительных конструкций и их заглубление в грунт требуют использования мелкой сетки, которая позволяет достаточно точно моделировать контактное

взаимодействие конструкции с основанием. Кроме того, размер конечных элементов должен обеспечивать адекватное описание распространения сейсмических волн в грунтовой среде.

Численное моделирование контактного взаимодействия сооружения с основанием

Л.И. Слепян [39] доказал, что при выборе достаточно плавного исходного импульса можно обеспечить его распространение без изменения формы на заданное расстояние; при этом для любой нагрузки существует время (или расстояние), после которого проявляется эффект дискретизации.

Был сделан вывод, что использование мелкой конечно-элементной сетки позволяет адекватно моделировать распространение сейсмических импульсов в грунтовой среде. Однако следует учитывать, что чрезмерное уменьшение размеров элементов значительно увеличивает вычислительные затраты.

Еще одной особенностью рассматриваемой задачи является то, что область анализа является полуограниченной, а применение метода конечных элементов требует аппроксимации расчетной области конечными телами, что может привести к значительным погрешностям в расчетах. Кроме того, учитывая длительность сейсмического воздействия (до нескольких десятков секунд) и высокую скорость распространения волн в грунте (до нескольких километров в секунду), размеры моделируемого грунтового массива должны быть достаточно большими, чтобы минимизировать влияние краевых эффектов на результаты в районе здания на протяжении всего времени сейсмического воздействия [1, 2].

В совокупности с требованием ограничения размеров конечных элементов данное условие приводит к значительным вычислительным сложностям при решении задачи на современных вычислительных комплексах. Как отмечалось ранее, сейсмические колебания грунта имеют случайный характер, поэтому достоверная оценка поведения сооружения под воздействием ожидаемых на площадке нагрузок возможна только при помощи статистического моделирования [42], которое требует проведения множества численных расчетов с разными параметрами. Многократное выполнение таких объемных вычислений приводит к тому, что даже на современных вычислительных системах затраты времени и ресурсов становятся неприемлемо высокими.

Поскольку при решении задач сейсмических колебаний сооружений размеры расчетной области грунта ограничены вычислительными возможностями, важно свести к минимуму ошибки, вызванные краевыми эффектами. В общем случае численного моделирования взаимодействия сооружения с основанием необходимо решать пространственную динамическую задачу контакта фундамента с грунтом. Большое количество зарубежных исследований посвящено динамическим контактным задачам для массивных сооружений с заданной в плане формой, взаимодействующих со слоистой грунтовой средой. Большинство из них сосредоточено на задачах контакта абсолютно жесткого штампа определенной формы со слоем или полупространством в плоской или осесимметричной постановке [15,17,37].

Как правило, при численном моделировании контактного взаимодействия сооружения с грунтом сетка, применяемая для грунта, имеет более крупные ячейки по сравнению с сеткой сооружения. В работе [44] рассматривается проблема перехода от набора узловых сил, действующих в узлах редкой сетки грунта, к набору сил, приложенных в узлах более мелкой сетки сооружения. Было выявлено, что при таком переходе могут возникать внутренние колебания, которые устраняются, если поле контактных сил на подошве представить как сумму трех компонентов: первого - распределенного по площади, второго - сосредоточенного по ребрам, и третьего - представляющего собой силы, сосредоточенные в углах. Также необходимо решить вопрос о минимальном числе узлов на контактной поверхности. Согласно нормам при контакте только по подошве рекомендуется использовать не менее восьми элементов вдоль короткой стороны подошвы. Если же контакт происходит также по боковым стенкам, нормы требуют учитывать контакт по нижней части боковых стенок глубиной не более половины общей глубины заложения фундамента, но не более 6 метров. Для вертикальных «ребер» нормы не устанавливают точного количества узлов, однако не рекомендуют применять сетки с менее чем двумя узлами на ребре [44].

При численном моделировании сейсмических колебаний сооружений возникает необходимость учитывать действие силы тяжести. Как отмечается в работах [1, 45], массивные здания, построенные на грунтах с невысокой жесткостью, оказывают обратное влияние на колебания основания при сейсмических воздействиях, существенно изменяя движение грунта на площадке по сравнению с так называемым «полевым» движением - то есть движением грунта на той же площадке в отсутствие сооружения. Строительные нормы требуют при расчёте конструкций на сейсмические нагрузки учитывать дополнительные усилия, возникающие в зданиях вследствие просадки грунта в процессе эксплуатации. В работе [18] при численном моделировании взаимодействия сооружений с грунтом данные требования также принимаются во внимание.

Еще одним важным аспектом при численном моделировании взаимодействия сооружения с грунтовым основанием является выбор модели грунта. Для этого определяются ключевые характеристики грунта - динамические модули сжатия и сдвига, коэффициент затухания и другие параметры, на основе которых выбирается подходящая модель поведения грунтового основания [26]. Для более точного описания распространения сейсмических волн в грунте разработаны слоисто-неоднородные и трещиноватые модели среды.

В работе [27] рассмотрены методы и подходы, используемые при решении прямых динамических задач теории упругости и сейсмологии, а также проанализированы различные модели грунтовых сред. Отмечается, что построение сейсмических волновых полей вдали от источника обычно выполняется в рамках динамической теории упругости, тогда как неупругое поведение среды учитывается преимущественно вблизи источника колебаний.

В работе [23] исследуются свойства грунтового массива, состоящего из нескольких слоев. Для слоев, включающих скальные породы и известняки, а также нескальные породы с мелкозернистой структурой (например, глины), при умеренных нагрузках предлагается использовать линейно-упругую модель поведения.

При проектировании многоэтажных зданий важным является строгое соблюдение требований по несущей способности и деформациям фундаментов. Если плитный фундамент в определённых условиях не отвечает этим требованиям, его грунтовое основание может быть усилено буронабивными сваями по технологии CFG. Когда фундаментная плита и верхние концы свай не связаны жёстко, а между ними присутствует грунтовая подушка, взаимодействие в системе «плита – подушка – сваи – грунт» под нагрузкой становится весьма сложным. Большое количество свай приводит к значительному увеличению числа степеней свободы, что усложняет оценку эффективности проектных решений. Кроме того, при комбинированных объектах, например, комплексах зданий с подземными этажами, размещённых на единой фундаментной плите, даже использование одномерных свайных элементов, встроенных в объёмную сетку грунта, может привести к проблемам сходимости численных решений или чрезмерно долгому времени расчёта. Таким образом, на практике сложно найти эффективную схему для оценки работы выбранных конструктивных решений.

Для решения этой задачи в работе [38] предлагается метод замены свайного основания эквивалентным массивом грунта, рассматриваемым как единое тело с анизотропными упругопластическими свойствами и улучшенными механическими характеристиками. Это значительно снижает сложность модели и упрощает вычисления.

Таким образом, во многих случаях [10, 23, 27] возможно использовать достаточно простую модель упругого полупространства. Это позволяет свести задачу к расчету колебаний твердого или упругого тела с заданной массой, расположенного на поверхности однородной, изотропной и непрерывной упругой среды или среды, состоящей из нескольких слоев с различными механическими свойствами.

При математическом моделировании сейсмических вибраций наземных конструкций возникает задача выбора методов моделирования сейсмических колебаний. Решение этой задачи осложняется неопределённостью направления распространения и амплитудных характеристик сейсмических волн. Экспериментальные и синтезированные акселерограммы дают кинематические параметры точек на поверхности, однако для численного моделирования необходимо задать импульсную нагрузку, которая при приложении к границам расчетной области грунта на поверхности воспроизводила бы заданную акселерограмму.

Выводы

1. Здание и основание образуют единую динамическую систему, в которой параметры сооружения влияют на характеристики сейсмических воздействий, действующих на уровне основания. Следовательно, физические свойства грунта основания оказывают значительное влияние на реакцию сооружения.
2. Анализ литературы показывает, что для расчёта зданий и сооружений на сейсмические нагрузки оптимально применять численные методы с использованием специализированных программных комплексов. Для повышения эффективности таких расчётов необходимо разрабатывать и совершенствовать модели, способные адекватно описывать сейсмические процессы в среде с учётом контактного взаимодействия здания и основания.
3. Из обзора литературы по выбору адекватной модели грунта следует, что во многих случаях целесообразно использовать линейно - упругую модель грунтового основания.

Рецензент: Зарифов С.С.—кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ТПУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Абу Лейл М.А. Расчет характеристик динамического взаимодействия фундамента с грунтом при сейсмическом или техногенном воздействии / Дисс. на соиск. учен. степени к.т.н., Ростов-на-Дону, 2004. -177с.
2. Баженов В.Г., Дюкина Н.С., Зефирова С.В., Лаптев П.В. Численное моделирование задач взаимодействия сооружений с двухслойным грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сбор., 2005, вып. 67 - С. 162-167.
3. Баженов В.Г., Кибец А.И., Садырин А.И. О модификации схемы Уилкинса численного решения трехмерных динамических задач / Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и программное обеспечение задач прочности: Всесоюз. межвуз. сбор. Горьк. у-нт. 1986. - С. 14-19.

4. Бирбраер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1989. - 304с.
5. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат. 1982.
6. Болотин В.В., Применение статистических методов для оценки прочности конструкций при сейсмических воздействиях / Инженерный сборник, Т.27., М., Изд-во АН СССР, 1960. - С.55-65.
7. Болотин В.В., Статистическое моделирование в расчетах на сейсмостойкость // Строительная механика и расчет сооружений. 1981. №1. - С. 60-64.
8. Бребия К., Теллес Ж., Вроубел JL Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987. – 524 с.
9. Власов В.З., Леонтьев Н.Н., Балки, плиты, оболочки на упругом основании / М.: Физматгиз, 1960. - 491с.
10. Вознесенский Е.А., Динамические свойства грунтов и их учет при анализе вибраций фундаментов разного типа. / Геоэкология. 1993. №5. - С. 37-65.
11. Вронский А.В. Исследование деформаций основания бескаркасных крупнопанельных зданий / Дисс. на соиск. учен. степени к.т.н, Москва, 1969. - 123с.
12. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1973.
13. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. Казань, 2001. - 301с.
14. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И., Расчет конструкций на упругом основании М.: Стройиздат, 1984. - 679с.
15. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи для абсолютно жестких тел и упругого полупространства / Препринт, МАИ, 1989. -49с.
16. Дубина М.М., Чухлатый М.С., Ашимихин О.В. Влияние слоистости основания на напряженно-деформированное состояние системы здание- основание. / В. сбор.: Проблемы оптимального проектирования сооружений. Н.: Изд-во НГАСУ, 2002. - С.145-155.
17. Дьелсан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. - М.:Наука, 1982. - 424с.
18. Дюкина Н.С. Численное моделирование взаимодействия заглубленных сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / Дисс. на соиск. учен. степ. кан. физ. мат наук Нижний Новгород, 2009. - 118с.
19. Низомов Д.Н. Численное моделирование задачи взаимодействия сооружения с основанием// Известия АН РТ, т.55, №9, 2012. - С. 733-741.
20. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике - М.:Мир, 1975. - 240с.
21. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов: от интуиции к общности/ Сб. переводов «Механика», М.: Мир, №6, 1970. - С. 90-103.
22. Кибец А.И. Моделирование нелинейных нестационарных задач динамики пространственных конструкций МКЭ / Дисс. на соиск. учён. степ. док. ф.- м. н., Нижний Новгород, 2001. - 347 с.
23. Киселев Ф.Б. Численное моделирование в задачах механики грунтов / Дисс. на соискание учён. степени к.ф.-м.н. Москва. 2006.-135с
24. Колесников А.О. Совершенствование метода расчета колебаний свайного фундамента с учетом взаимодействия ростверка с грунтом / Дисс. на соискание уч. степени к.т.н., Новосибирск, 2005.-147с
25. Крауч С., Старфилд А. Метод граничных элементов в механике твердого тела. М.: Мир, 1987. - 328с.
26. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука. 1982. -288с.
27. Немирович-Данченко М.М. Модель гипотетической хрупкой среды и ее применение в сейсмике / Дисс. на соиск. учен. степени д.ф.-м.н. Новосибирск. 2004. - 217с.
28. Нестеров И.В. Определение напряженно - деформированного состояния бескаркасных зданий при неравномерных осадках основания / Дисс. на соискан. учён. степени к.т.н., Ростов-на-Дону, 1993. - 134с.
29. Ньюмарк Н., Розенблют Э. Основы сейсмостойкого строительства. М.: Стройиздат, 1980. - 344с.
30. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений / К.С. Завриев, А.Г. Назаров и др. М.: Стройиздат, 1970. - 224с.
31. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. - М.: Госстройиздат, 1964.
32. Потапов В.Н. Расчетное обоснование метода регулирования осадки тяжелого сооружения / Дисс. на соискание учен. степени к.т.н., Москва, 1990. - 118с.
33. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. - М. Наука, 1973. - 124с.
34. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
35. Самарский А.А. Теория разностных схем. - М. Наука, 1983.
36. Саргсян А.Е. Строительная механика. Высшая школа, Москва, 2004.
37. Сеймов В.М. Динамические контактные задачи. - Киев: Наукова Думка, 1970. -283с.
38. Сижун Ню, Янпин Яо, Яньфан Сунь, Юйхао Хэ, Хайцин Чжан. Трёхмерный численный анализ взаимодействия подземной части многоэтажного здания и ее грунтового основания усиленного сваями CFG. Электронный ресурс.
39. Слепян Л.И. Нестационарные упругие волны. - Л.: Судостроение, 1972. - 374с.
40. Солодовник Н.В. Совершенствование методов расчета свайных фундаментов в сейсмических районах

Краснодарского края / Дисс. на соискание учен. степени к.т.н., Новочеркасск, 2006.-161с

41.Турилов В.В. Расчет нестационарного динамического деформирования трехмерных упругих элементов конструкций методом гранично-временных элементов. / Дис. на соиск. учён. степени канд. техн. наук. Горький, 1986. -116с.

42. Тяпин А.Г. Исследование сейсмических нагрузок со стороны грунта на фундаментные конструкции в зависимости от их податливости

//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №1, 2007. - С.12- 15.

43.Тяпин А.Г. Моделирование распределения контактных сил по подошве и заглубленным стенкам фундамента в конечно-элементных динамических расчетах с частой сеткой // Строительная механика и расчет сооружений, №2, 2006. - С. 17-21.

44.Тяпин А.Г. Сочетание двух моделей в расчетах сейсмической реакции сооружения, взаимодействующего с грунтовым основанием. //Строительная механика и расчет сооружений. №1, 2006. - С. 43-47.

45.Тяпин А.Г., Расчет жестких фундаментов на волновые воздействия, распространяющиеся в грунте // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. №6. - С. 48-51.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Низомов Чахонгир Низомович	Низомов Джахонгир Низомович	Nizomov Jachongir Nizomovich
Доктори илмҳои техники, профессор	Доктор технических наук, профессор	Doctor of Technical Sciences, Professor
Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тободар ва сейсмологияи АМИТ	Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана	Institute of Geology, Seismic Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: tiees@mail.ru		
TJ	RU	EN
Қаландарбеков Имомёрбек Қаландарбекович	Каландарбеков Имомёрбек Каландарбекович	Kalandarbekov Imomyorbek Kalandarbekovich
Доктори илмҳои техники, профессор	Доктор технических наук профессор	Doctor of Technical Sciences Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: kalandarbekov-55@mail.ru		
TJ	RU	EN
Қаландарзода Ифтихор Имомёр	Каландарзода Ифтихор Имомёр	Qalandarzoza Iftikhor Imomyor
Номзади илмҳои техники, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of Technical Sciences,
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академ ика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: iftikhor791@mail.ru		