

материала, закрепляющего стенки скважин. Вибрационный принцип устройства свай исключает потребность в тяжелом и громоздком оборудовании. Появляется возможность выполнять строительство в условиях плотной городской застройки вблизи существующих зданий, сооружений и коммуникаций, без экологических проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цейтлин М. Г., Верстов В. В., Азбель Г. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах. - Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1987. - с. 262.
2. Ермашов В., Суворцов А., Жилина Ю. Стабилизация водонасыщенных грунтов методом виброфлотации. - Proceedings of 6th international conference Modern building materials, structures and techniques. Vilnius "Technika", 1999. - том 3, с.240-246.

УДК 624.131

Заболотный Д.В., Сидорович Е.М.

ВЫБОР МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУНТОВОГО МАССИВА

Под моделью грунтового массива принято понимать такую механически конструируемую систему, которая отражает только некоторые, наиболее существенные физические закономерности деформирования и разрушения горных пород.

Самой простой является модель Винклера, которую можно интерпретировать как систему не связанных друг с другом пружин с линейными характеристиками. Во многих случаях эта модель достаточно точно отражает действительную работу грунтового массива. Для учета нелинейных свойств грунтового массива можно рассматривать модель Винклера как систему не связанных друг с другом пружин с нелинейными характеристиками (А. С. Григорьев [1]).

Гипотеза упругого изотропного полупространства впервые предложена в работах Н. П. Пузыревского и Н. М. Герсеванова и использована для изучения напряжений в массиве пород вокруг выработок А. Н. Динником, Г. Н. Савиным, С. Г. Лехницким. Основой для применения на практике данной модели являются следующие свойства упругости грунтов: близкая к линейной зависимость между напряжениями и деформациями, способность восстанавливать (в некоторой степени) форму и размеры при разгрузке, способность распространять упругие волны. Причем применение модели не требует в качестве обязательного условия способности пород восстанавливать начальную форму и размеры при снятии нагрузки, достаточно чтобы диаграмма напряжения-деформации была близка к линейной. М. И. Горбунов-Посадов [2] предлагает уточнять данную модель, рассматривая влияние объемных сил, вызванных весом грунта.

При упругом деформировании массива грунтовых пород модель в виде анизотропного упругого полупространства более близка по механическим характеристикам к реальному массиву.

Полупространство с модулем упругости, изменяющимся по глубине по степенному закону, предложил Г. К. Клейн [3], а Б. Г. Корнеев [4] предложил рассматривать модуль упругости, изменяющийся с глубиной по экспоненциальному закону. Самым распространенным, из анизотропных является трансверсально-изотропное полупространство, которое характеризуется постоянством свойств в плоскости изотропии, в направлении же, перпендикулярном плоскости изотропии, свойства отличаются. Та-

ким полупространством можно моделировать массив пород с выраженным напластованием. Необходимо отметить также разномодульное упругое полупространство, характеризуемое неодинаковыми модулями деформации при сжатии и при растяжении, которое более корректно учитывает работу реального грунта на знакопеременную нагрузку.

Вязкоупругое полупространство учитывает свойства ползучести грунтов и релаксацию напряжений. Для описания ползучести в такой модели используют физические уравнения (уравнения состояния), получаемые по результатам испытания грунтов. К такой модели применима линейная теория наследственной ползучести (предложена Л. Больцманом и в дальнейшем развита В. Вольтерра). Жесткопластическое полупространство учитывает тот факт, что в реальном массиве пород величина пластических деформаций существенно превышает величину упругих; в массиве различают жесткие (недеформируемые) области, пластические деформации (как показывают эксперименты) связаны со сдвигами жестких областей материала по некоторым площадкам. В модели в виде упруго-пластического полупространства, в отличие от ранее рассмотренной, учитывают и упругие деформации.

Для рассмотренных ранее моделей, учитывающих пластические свойства массива пород характерно, что их свойства в процессе упругопластических деформаций остаются неизменными. У большинства же реальных грунтов при пластическом деформировании развиваются процессы разрушения, связанные с изменением механических свойств пород при деформировании, т. е. материал в пластической области становится неоднородным. В случае, когда предел упругости и предел прочности совпадают (хрупкое полупространство), при достижении предела прочности происходит полное разрушение материала среды. Вокруг выработки в таком полупространстве образуются упругая зона и зона разрушенного материала. Данная модель предложена и исследована Ю. М. Либерманом [5]. Вокруг выработки в реальном массиве грунта наряду со стадиями упругих деформаций и разрушения находится стадия пластических деформаций. Модель упругопластического полупространства, учитывающая это явление, и деформационный критерий прочности, характеризующий модель, предложены Н. С. Булычевым [6]. В таком полупространстве можно выделить области: упругую, в которой распределение напряжений удовлетворяет закону Гука; пластическую, в которой распределение напряжений происходит в соответствии с условием пластичности (предельного состояния); и разрушенную, для которой справедливо условие предельного состояния при нулевом сцеплении.

Модель вязкоупруго-пластического полупространства учитывает развитие во времени упругих и пластических деформаций в массиве грунта. В модели предложенной Шведовым, а затем Бингамом, при напряжениях, не превышающих предельные, материал деформируется упруго; при больших напряжениях материал деформируется пластически. Кривые ползучести для этой модели являются прямыми линиями, скорость деформирования постоянна и пропорциональна разности действующего и предельного напряжений. В модели Максвелла полупространство при напряжениях, меньших предельных, ведет себя как вязкоупругое тело; при напряжениях, больших предельных деформируется подобно идеально пластическому телу. Данные модели обладают свойством релаксации напряжений при фиксированной деформации.

Наряду с упомянутыми выше, для моделирования массива грунта предлагаются модели, при которых грунт рассматривается как упругий слой (О. Я. Шехтер [7], К. Е. Егоров, Я. С. Уфлянд) или как двухслойная среда (Б. И. Коган [8]). При этом вопросы определения закона изменения модуля упругости слоя с глубиной и определения толщины сжимаемого слоя не находят однозначного ответа.

Стремление учесть повышенную деформативность окружающего выработку слоя в массиве грунта привело к введению комбинированной модели, представляющей систему винклеровских пружин, опирающихся на упругое полупространство (И. Я. Штаерман [9]; Б. Н. Жемочкин и А. П. Синицын [10]). В модели, предложенной Л. Н. Репниковым [11], упругое полупространство армировано винклеровскими пружинами, работающими без трения о полупространство; рассматриваются варианты: когда пружины находятся только под конструкцией и когда пружины расположены по всему полупространству. Такая модель при соответствующем подборе характеристик полупространства и пружин может отобразить любой характер перемещений грунта под конструкцией и вне нее. П. Л. Пастернаком [12] предложена модель с двумя упругими характеристиками, расчетная схема которой представляет систему пружин, соединенных сверху связями, передающими поперечную силу и при этом упруго деформирующимися. П. Л. Пастернак разработал методику экспериментального определения обеих характеристик.

Мембранная и ламинарная модели М. М. Филоненко-Бородича [13] представляют собой лежащую на системе пружин с линейной характеристикой нить или балку (плоская задача) либо — мембрану или плиту (пространственная задача). Мембранная модель обладает большой расчетной гибкостью, она приводит к дифференциальным уравнениям с постоянными коэффициентами, которые лишь не на много сложнее уравнений винклеровского основания.

Следует отметить, что экспериментальным исследованиям, относящимся к выбору модели массива грунтовых пород, посвящено сравнительно мало работ, хотя значение этого направления чрезвычайно велико. Основная сложность при моделировании массива пород заключается в правильном учете границы той области, в которой распространяется влияние возводимых подземных сооружений на напряженно-деформируемое состояние, сложившееся под действием собственного веса породы. Главным критерием при выборе той или иной модели следует считать совпадение теоретических и экспериментальных данных для рассматриваемого класса грунтов.

Многообразие расчетных моделей грунтового массива говорит лишь о сложности рассматриваемой проблемы, при этом от вида модели зависит сложность математических выкладок. В данной работе предлагается модель, не вызывающая сложностей в математическом отношении и позволяющая с учетом нелинейности деформирования достаточно просто установить распределение напряжений в грунтовом массиве, возникающих вокруг подземного сооружения. Предлагаемая модель представляет собой нелинейно деформируемый слой в виде пространственной шарнирно-стержневой структуры, необходимой, в принципе, произвольной формы с требуемыми, в общем случае, нелинейными характеристиками элементов, расположенной на недеформируемом основании и взаимодействующей с сооружением. Теория расчета шарнирно-стержневых структур разработана достаточно полно и реализована в программных комплексах [14]. Толщина слоя и, соответственно, количество слоев ячеек (кристаллов) такой структуры по высоте (глубине) определяются в соответствии с известными опытными данными, рекомендациями других авторов и проверяются прямыми численными экспериментами. В общем случае, границей недеформируемого основания является поверхность, за которой влияние возводимых подземных сооружений на напряженное состояние грунтов пренебрежимо мало. Строение кристаллов шарнирно-стержневой структуры может быть самым разнообразным. Предпочтение той или иной структуре кристалла следует отдавать в зависимости от желаемой степени точности получаемых результатов и объема вычислений.

Применение предлагаемой нелинейно деформируемой модели позволит учесть как широкий комплекс воздействий со стороны грунтового массива на подземное сооружение: боковое давление, давление от выпора грунта в основании сооружения, вертикальную нагрузку всего столба выше лежащих пород для сооружений мелкого заложения, либо давление массива с учетом сводообразования для сооружений глубокого заложения, так и анизотропные и вязко-упругие свойства грунта, а также наличие в грунте недеформируемых блоков.

В настоящее время авторами данной статьи разрабатывается методика перехода от усилий в стержнях структуры к главным напряжениям, действующим в грунтовом массиве, а также адекватные критерии прочности (текучести) шарнирно-стержневой структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А. С. Изгиб балок на упруго-пластическом основании // Труды ЦАГИ. - 1946. - вып. 600. - С. 14-16.
2. Горбунов-Посадов М. И. Узловые вопросы расчета конструкций на упругом основании // Сборник трудов МИСИ. - 1956. - №14. - С. 7-10.
3. Клейн Г. К. Учет неоднородности, неразрывности деформаций и других механических свойств грунта при расчете сооружений на сплошном основании // Сборник трудов МИСИ. - 1956. - №14. - С. 20-25.
4. Корнеев Б. Г. Вопросы расчета балок и плит на упругом основании. - М.: Госстройиздат, 1954. - 291 с.
5. Либерман Ю. М., Калачева Т. А. Аппроксимация экспериментальных кривых деформирования во времени горных пород и материалов с затухающей ползучестью // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1980. - №1. - С. 3-9.
6. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1982. - 270 с.
7. Шехтер О. Я. О влиянии мощности слоя на распределение напряжений в фундаментной балке // Тр. НИС треста глубинных работ. - М.: Госстройиздат, 1939. - №10. - С. 5-9.
8. Коган Б. И. Давление жесткого штампа на двухслойное основание // Труды Харьковского автодорожного института. - 1954. - №17. - С. 11-13.
9. Штаерман И. Я. Контактные задачи теории упругости. - М.-Л.: Гостехиздат, 1949. - 278 с.
10. Жемочкин Б. Н., Синицын А. П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании (без гипотезы Винклера). - М.: Стройиздат, 1947. - 357 с.
11. Репников Л. Н. Расчет балок на упругом основании, объединяющем деформативные свойства основания Винклера и линейно-деформированной среды // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1969. - №5. - С. 15-18.
12. Пастернак П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. - М.-Л.: Госстройиздат, 1954. - 338 с.
13. Филоненко-Бородич М. М. Некоторые приближенные теории упругого основания // Ученые записки МГУ. - 1940. - Вып. 46. - С. 7-11.
14. Сидорович Е. М. Нелинейное деформирование, статическая и динамическая устойчивость пространственных стержневых систем. - Минск.: БГПА, 1999. - 200 с.