УДК 519.642:624.044:624.15

А. С. Моргун, д. т. н., проф.; А. А. Швец; А. С. Шевченко

АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАДЁЖНОСТИ ФУНДАМЕНТОВ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Статья включает теоретическое обоснование решения нелинейной задачи фундаментостроения, которое требует привлечения теории упругости, пластичности, ЭВМ. Учет пластичности способствует поднятию несущей способности фундаментной конструкций.

Ключевые слова: *метод граничных элементов, уравнения состояния, упругость, пластичность, напряженно-деформированное состояние.*

Введение

Одной из актуальных задач фундаментостроения является разработка и внедрение более современных и экономичных методов расчета строительных конструкций (фундаменты составляют значительную их часть), направленных на выявление и реализацию их резервов. Высотные дома – довольно индивидуальные сооружения, требующие индивидуальной привязки к грунтам конкретной строительной площадки (условия привязки практически не повторяются).

Несмотря на кажущуюся простоту, процессы, происходящие в грунтах, очень сложны как объекты исследования и контроля. На сегодняшний день изучены не все аспекты механизма деформирования грунтового основания под нагрузкой.

Научные исследования в области механики грунтов всегда были направлены на усовершенствование методов проектирования оснований и фундаментов. Для обеспечения надёжности проектирования оснований и фундаментов сооружений необходим учет при моделировании их поведения сложных и многочисленных физико-механических характеристик грунтов.

Постановка задачи, определяющие соотношения

В роботе спрогнозировано оседание фундаментной конструкции-плиты для 12-тиэтажного сооружения на рис. 1. Для аналитического рассмотрения задачи формирования математического эквивалента поведения материала грунта под нагрузкой в работе использована механика сплошных и пористых сред. В грунтах при воздействии внешних сил возникают как упругие $\varepsilon^{упругие}$, так и пластические остаточные $\varepsilon^{пласт}$ деформации (их $\approx 95\%$).

Рис. 1. Фасад 12-тиэтажного дома

Существенным отличием грунтов от однородных упругих тел является то, что при воздействии внешних нагрузок остаточные деформации всегда сопутствуют упругим, даже при незначительных нагрузках. Сумма остаточных и упругих деформаций составляют полную деформацию грунтового основания.

Одновременность наличия в грунте зон, которые работают как в упругой, так и в пластической зонах, требует для моделирования его поведения привлечения теории упругости и пластичности [1 – 4].

Известно, что решение смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунтов значительно приближает к действительности результаты расчетов оседаний. Современная тенденция перехода к автоматизированным методам расчета резко изменила приоритеты в сторону необходимости разработок более достоверных математических моделей нелинейно-деформированных грунтовых массивов, сложенных из слоёв с разными свойствами.

Экспериментально исследовано [5], что даже в очень слабых грунтах текучей консистенции за рамками границы зоны деформаций перемещения грунта не наблюдают. Это свидетельствует о том, что зона деформаций является активной рабочей зоной основания фундамента, в рамках которой на протяжении некоторого времени развивается динамический процесс уплотнения грунта, что отображает суть совместной работы фундамента и основания до прихода её в состояние равновесия.

В природных условиях многослойность грунтов имеет разную текстуру. В предложенной модели в качестве входных параметров взяты средневзвешенные характеристики грунта.

В модели учтено 10 характеристик влияния инженерно-геологических свойств грунта на процесс его деформирования: E=13,309 МПа; ν=0,35, e=0,67, $\rho^{\min} = 1{,}47 m/м^3$, $\rho^{\max} = 2{,}14\, m/м^3$, $\rho = 1{,}95\, m/м^3$, c=18,1 кПа, $\varphi = 0{,}193\ рад.$, $p_0 = -1800\, кПа$, $\rho_s = 2{,}717\, m/м^3$.

Под влиянием нагрузки грунтовое основание под сооружением деформируется в рамках активной зоны (зоны влияния дополнительной нагрузки), дискретизация активной зоны фундаментного основания 12-тиэтажного сооружения приведена на рис. 2. Как известно, математическая модель даёт основание для численного анализа исследуемого объекта, с помощью которого можно получить данные не только описательного, но и прогнозного характера.

Рассматривают сложное напряженно-деформированное состояние грунта (сжатие со сдвигом). Физические уравнения состояния описывают упруго-пластической диаграммой Прантля с упрочнением с границей пропорциональности по Мизесу-Шлейхеру-Боткину [2, 3], которая регистрирует максимально достигнутые напряжения основания.

Предложенная нелинейная математическая дилатансионная модель базируется на таких предположениях:

1. Уравнение равновесия плиты, погруженной в грунтовую среду, удовлетворяет дифференциальное уравнение Лапласа.

2. В качестве геометрических уравнений использован тензор малых деформаций Коши.

3. Физическое состояние работы грунта в линейной области описывают законом Гука.

4. На стадии пластического деформирования векторы тензора напряжений и тензора скоростей деформаций не соосны. Точные дифференциальные уравнения поведения фундаментной плиты в грунте – нелинейны.

5. В предложенной математической модели для упрощения задачи нелинейные уравнения на каждом шаге нагрузки линеаризированы с помощью использования шаговых процедур А. А. Ильюшина.

Переход от краевой задачи уравнений равновесия фундаментной конструкции в грунте к

интегральным уравнениям проведен с помощью численного метода граничных элементов.

Основным расчетным уравнением использованной в статье модели работы грунта, являющимся аналогом системы 15 дифференциальных уравнений (статических уравнений, геометрических, физических), является интегральное уравнение, предложенное К. Бреббия [4]:

$$c_{ij} \cdot u_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^{*} u_j \, d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^{*} p_j \, d\Gamma + \int_{\Omega} \dot{\sigma}^{*} \dot{\varepsilon}_{jk}^{p} \, d\Omega, \tag{1}$$

где, u – заданный вектор перемещений на границе фундаментной конструкции; p – искомый вектор напряжений на границе; u^{*}, p^{*}, σ^{*} – ядра граничного уравнения (1) – решения Р. Миндлина для перемещений, напряжений и производных от напряжений, соответствующим единичным возмущающим силам (P=1) в полупространстве [4]; c_{ij} – постоянная, определяются из условий движения тела как целого, появляется при переводе краевой задачи к интегральному уравнению (1) для получения единственного решения; Γ, Ω – соответственно граничная поверхность фундаментной конструкции и граница треугольных ячеек грунта.

Понятие «система» широко используют почти во всех отраслях науки и техники. Реакцию системы на внешние воздействия рассматривали в работе как динамическую смену состоянию системы, в процессе которого она стремится минимизировать некоторую потенциальную функцию. Решение этих вопросов поведения грунтового основания под нагрузкой имеет как научное, так и прикладное значение.

Основное решение (1) в роботе проведено методом граничных элементов. Согласно положению, которое выкристаллизировалось в нормативных документах, граничное сопротивление фундаментной конструкции определяют сопротивлением грунта разрушению под нижним концом и сопротивлением сдвигу по боковой поверхности. Эту граничную поверхность плиты дискретизировали в работе граничными элементами, активную зону грунта дискретизировали треугольными ячейками. Для исследования НДС плиты использована пространственная упруго-пластическая дилатансионная модель пористых сред [2].

Применённая дилатансионная модель позволяет:

а) схематизировать процесс, разбивая его на последовательные стадии формоизменения и уплотнения;

б) воспользоваться результатами теории пластичности несжимаемых тел, которая на сегодняшний день отработана достаточно полно;

в) провести анализ решения нелинейной задачи, выполнив его методом упругих решений А. А. Ильюшина;

г) учесть траекторию нагружения, несоосность векторов тензоров напряжений и тензора скоростей деформаций;

д) перейти к автоматизированному расчету поведения фундаментной конструкции в грунте, дискретизируя расчетную модель и проведя расчет численным методом граничных элементов (МГЭ).

В роботе вместо требования ортогональности вектора приращения пластических деформаций $d\varepsilon_{ij}^{p}$ к поверхности пластичности f использован неассоциированный закон пластического течения, который дополняли дилатансионным соотношением В. М. Николаевского, И. П. Бойко:

$$d\varepsilon_{ij}^{p} = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^{p}, \tag{2}$$

где $d\gamma^{p}$ – скалярный эквивалент приращения сдвиговой пластической деформации на

октаэдрической площадке; $d\varepsilon_{ij}^{p}$ – приращение неупругих изменений объёма, которые сопутствуют сдвигу; Λ – скорость дилатансии; χ – параметр упрочнения грунтовой среды (принята плотность грунта ρ).

В качестве параметра упрочнения принята плотность грунта, являющаяся своеобразной памятью грунта (её повышение значит изменение площадки текучести материала грунта).

В соответствии с наработанной моделью общие деформации определяли:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{e} + d\varepsilon_{ij}^{p} \ , \tag{3}$$

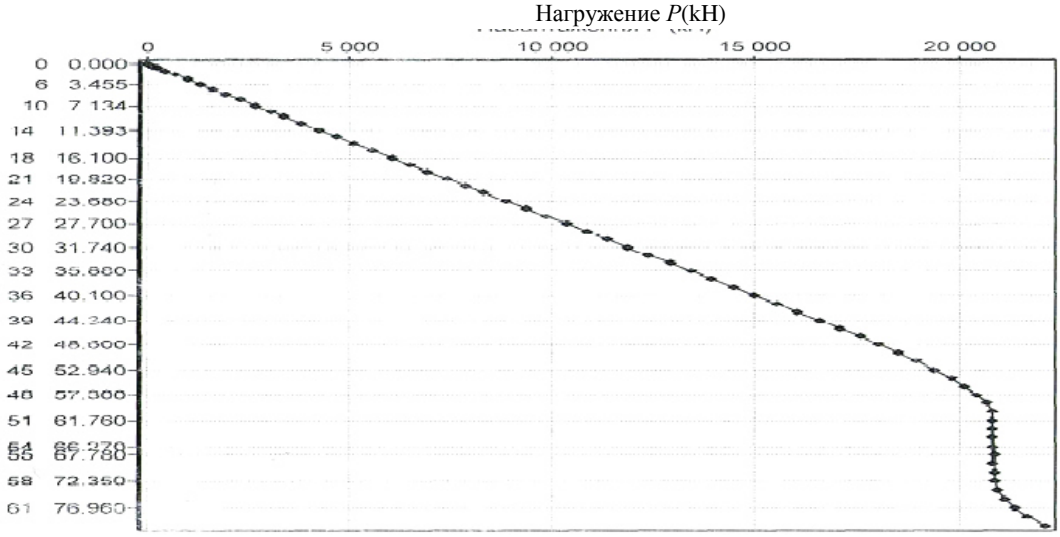
где $d\varepsilon_{ij}^{e}$ – приращение упругих деформаций; $d\varepsilon_{ij}^{p}$ – приращение пластических деформаций.

В модель, по которой проведено числовые исследования НДС фундаментной плиты, вводили ещё дополнительные кинематические условия дилатансии (2).

Определение несущей способности плиты и оседаний фундамента от действия вертикальных нагрузок проведено путём решения задачи в упруго-пластической постановке в такой последовательности:

- дискретизация граничной поверхности плиты и активной (буферной) зоны;
- компоновка расчетной матрицы влияния МГЭ на основании решений Р. Миндлина;
- получение расчетной системы уравнений;
- решение полученной СЛАУ, фиксация НДС на каждом шаге нагружения;
- построение пластических областей;
- принятие и обоснование проектного решения о возможности приложения дополнительных нагружений.

На рис. 2 приведён спрогнозированный по МГЭ график «нагружение – оседание» по всему интервалу нагружения плитной фундаментной конструкции высотой 0,7 м 12-тиэтажного дома.



Номер шага нагружения, перемещение U(мм)

Рис. 2. График зависимости «нагружение P – оседание s»

График на рис. 2 позволяет определять оседание s при разных нагружениях P и выбирать наиболее выгодные технические и экономические условия работы плитного фундамента, которые будут гарантировать устойчивость и надёжность 12-тиэтажного сооружения на данном плитном фундаменте. Предложенная модель объединяет расчет системы «основание – фундаментная плита» по обоим граничным состояниям, анализ НДС системы проведен по всему диапазону её нагружения. Фундаментная плита в состоянии выравнивать неравномерность оседаний благодаря перераспределению нагрузок.

Выводы

1. При сооружении высотных домов появляется необходимость прогнозирования НДС основания с привлечением современных методов прикладной геомеханики и численных методов – МКЭ и МГЭ.

2. При определении несущей способности фундаментной плиты и основания сооружения использована теория дисперсных сред и сопутствующие ей вопросы тензорного исчисления.

3. Результаты работы имеют существенную практическую направленность с возможностью получения экономического эффекта благодаря учету пластической работы грунтового основания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определяющие законы механики грунтов / [под ред. В. Н. Николаевского, ред. серии А. Ю. Ишлинский, Г. Г. Черный]. – М. : Мир, 1975. – 231 с.

2. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, О. В. Сахаров // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2004. – Вип. 28. – С. 3 – 10.

3. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках несучої спроможності кільцевих та круглих в плані фундаментних конструкцій / А. С. Моргун, О. В. Франчук // Вісник ВПІ. – 2012. – № 5. – С. 11 – 14.

4. Бреббия К. Методы граничных елементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – М. : Мир, 1987. – 525 с.

5. Голубков В. Н. Исследование процесса формирования зоны деформации в основаниях одиночных свай / В. Н. Голубков, Ю. Ф. Тугаенко, Б. О. Хуторянский // Основания и фундаменты: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1971. – Вып. 4. – С. 9 – 13.

Моргун Алла Серафимовна – д. т. н., проф., заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства ФСТЭГС ВНТУ;

Швец Анна Александровна – магистрант ФСТЭГС ВНТУ;

Шевченко Алексей Сергеевич – магистрант ФСТЭГС ВНТУ.

Винницкий национальный технический университет.