

№3, 2000

## Математическое моделирование инъекционного закрепления грунтов

Парамонов В.Н., Богов С.Г.

Инъекционное закрепление грунтов широко используется в мировой практике для искусственного улучшения оснований. В ряде случаев закрепленный таким образом грунт может рассматриваться как свайное основание и использоваться в качестве фундаментов здания.

Технология инъекционного закрепления грунта состоит в разрушении грунта высоконапорными струями и замещении грунта закрепляющим раствором. Процесс закрепления состоит в следующем. В грунте пробуривается лидерная скважина на глубину закрепления, в которую опускается струйный монитор, в соплах которого формируется высоконапорная струя закрепляющего раствора. Монитор вращается вокруг вертикальной оси и медленно поднимается из скважины. Через сопла подается струя жидкости, разрушающая и замещающая грунт. Одним из основных параметров, определяющих эффективность технологии закрепления, является радиус закрепления. Радиус закрепленного столба грунта, как правило, соответствует начальному радиусу закрепления (размеру так называемой «врубной полости»).

Эксперименты показывают, что размеры закрепления зависят от диаметра и формы насадки монитора, энергетики струи, состава разрушающего раствора, скорости вращательного и поступательного движения монитора.

Теория струйных течений имеет широкое освещение в научно-технической литературе. Теоретические исследования в большей степени известны для описания разрушения струей твердых горных пород. Тем не менее, несмотря на практически 30-летний опыт использования струйных технологий, теория взаимодействия струи с грунтовой средой и разрушения грунта струей не имеет соответствующего обоснования.

Математические подходы к описанию механизма разрушения среды струей в научной литературе основаны на следующих представлениях.

1. Гидродинамическое давление струи представляется как сосредоточенная сила или квазистатическое давление, распределенное по поверхности среды по некоторому закону (равномерное, параболическое). Грунт рассматривается как сплошной однородный массив. Квазистатическое давление струи вызывает возникновение поля напряжений в массиве, рассчитываемых с использованием формул той или иной теории напряженно-деформированного состояния (упругости, упругопластичности, ползучести).

Размеры разрушения среды при таком подходе определяются некоторой областью, в которой напряженное состояние достигает предельного значения в соответствии с выбранным критерием разрушения. Возможными условиями разрушения среды являются: разрушение при достижении предельного сопротивления сдвигу, прочности на одноосное сжатие, прочности на разрыв. В качестве критериев разрушения могут использоваться также такие параметры, как критическая энергия разрушения, предельная деформация, и т.п.

2. Грунт рассматривается как многофазная среда. Давление струи передается на поровую воду. Разрушение грунта происходит за счет гидроразрывов при развитии давления в поровой воде, разрывающего грунт "изнутри".

Очевидно, в этом случае в качестве критерия разрушения среды следует принять ее прочность на гидростатическое растяжение.

3. Среда, на которую действует струя, рассматривается как массив, состоящий из отдельных частиц. При встрече с поверхностью грунта струя растекается и, захватывая частицы грунта, размывает и выносит их. По мере увеличения глубины прорези возрастает длина пути выноса частиц, возрастает также сопротивление выносу частиц. Изменение размеров прорези происходит за счет разрушения среды в точке лобового действия струи и за счет размыва стенок прорези обратными потоками.

При таком подходе критерием разрушения является критическая скорость размыва, либо скорость взвешивания, зависящие от гранулометрического состава грунта.

4. В большинстве практических случаев используются эмпирические методы расчета размеров разрушения и закрепления, основанные на большом количестве экспериментов в различных грунтовых условиях.

На настоящем этапе теоретических исследований мы ограничились исследованием возможности прогноза размеров разрушения и закрепления песчаных грунтов на основании первого представления. Эти представления используют традиционные положения классической механики грунтов о распределении напряжений и порового давления в среде, не рассматривают процессы течения струи в полостях, прорезаемых в грунте.

Необходимо учесть, что грунт является природной средой и обладает существенной неоднородностью, изменчивостью свойств, поэтому мы руководствовались использованием критериев прочности грунта, широко апробированных на практике. При расчетах оснований прочность песчаного грунта определяется предельным сопротивлением сдвигу, описываемым критерием Мора-Кулона. Прочность песка на разрыв равна нулю, т.е. песок не может воспринимать растягивающих напряжений. Использовать критическую энергию в качестве критерия разрушения представляется проблематичным, поскольку энергетические принципы разрушения используются в механике грунтов сравнительно недавно и находятся на стадии экспериментальных исследований. Предельная же деформация для песчаных грунтов является условным понятием, более подходящим для недискретных сред.

Как отмечено выше, диаметр закрепления столба грунта определяется диаметром «врубной полости», поэтому задача может быть упрощена и сведена к определению размеров этой полости.

Задачи решались методом конечных элементов. Первая серия задач решалась на основании следующих допущений:

- грунт рассматривался как сплошная изотропная среда;
- действие струи моделировалось приложением к грунту равномерного давления, соответствующего давлению струи на выходе из сопла монитора;
- задача рассматривалась в плоской постановке, при этом предполагалось, что давление равномерно распределяется по высоте, равной диаметру струи, разрушение среды происходит только по этой высоте; при осесимметричной постановке задачи предполагалось, что струя действует одновременно во всех направлениях.
- реологические свойства грунта не учитывались (т.е. напряженно-деформированное состояние реализуется мгновенно в момент приложения нагрузки);
- связь напряжений и деформаций определялась законом Гука;
- на рассматриваемой глубине моделировалось природное напряженное состояние с гидростатическим тензором напряжений;
- предполагалось, что разрушение грунта происходит при достижении предельного

сопротивления сдвигу в соответствии с критерием Кулона-Мора, либо при возникновении растягивающих напряжений.

В расчетах рассматривалась среда со следующими механическими характеристиками:  $E=10$  МПа,  $\nu=0,3$ ,  $c=1$  кПа,  $\varphi=30^\circ$ . Диаметр скважины равен 0,25 м.

Решение выполнялось в следующем порядке. Элементом грунта в расчетной схеме задавалось начальное гидростатическое напряженное состояние, равное природному давлению на рассматриваемой глубине. На первом шаге решения из схемы удалялись элементы, находящиеся в пределах диаметра скважины. На втором шаге к стенке скважины прикладывалась нагрузка, соответствующая давлению струи, решалась упругая задача, определялось поле напряжений от нагрузки, просуммированное с природным напряженным состоянием. Затем из схемы удалялись конечные элементы, в которых максимальные касательные напряжения превышали предельное сопротивление сдвигу. Нагрузка перемещалась к ближайшему узлу (узлам) первого не удаленного элемента, расположенного вдоль линии действия силы. Расчет предполагалось повторять до тех пор, пока не будет получена устойчивая сетка конечных элементов.

В работах, в которых рассмотрено разрушение струей горных пород (см., например, [1]), выполняется единичное решение. Однако в этом случае фактический радиус закрепления грунта оказывается не менее, чем в 4 раза превышающим рассчитанные значения и не коррелирует с экспериментальными значениями [2]. Очевидно, что решение такой задачи не отражает эффекта "внедрения" струи в грунт, в результате которого давление от струи постепенно передается на частицы, удаленные от стенки изначальной скважины.

Численные эксперименты показали, что процесс шагового решения с изменением конфигурации расчетной схемы и изменением точки приложения нагрузки оказывается *несходящимся*. Несходимость решения связана с тем, что напряженное состояние любой точки на поверхности скважины или прорезанной полости (являющихся свободной поверхностью расчетной схемы) характеризуется тензором напряжений, одна главная ось которого перпендикулярна, остальные параллельны свободной поверхности. Нормальное напряжение, перпендикулярное свободной поверхности, является одним из главных и равно нулю. Следовательно, если грунт не обладает сцеплением, то он уже находится в предельном состоянии. При приложении нагрузки любой интенсивности на поверхность стенки скважины или прорезанной щели возникают области предельного состояния.

Нами был рассмотрен еще один подход к решению задачи. Из научно-технической литературы [3] известно, что давление струи падает по мере удаления от источника [2]. Однако, в этом случае не имеет смысла моделировать задачу о разрушении грунта, поскольку, как показали численные эксперименты, размеры закрепления практически равны "вылету" струи, на конце которого давление равно нулю, и не зависят от характеристик песчаного грунта.

### Выводы

1. Для прогноза размеров разрушения и инъекционного закрепления песчаных грунтов подходы к решению задачи, используемые в теориях разрушения горных пород струей и сводящиеся к решению задач о напряженном состоянии массива под нагрузкой, оказываются некорректными.

2. Использование традиционных прочностных характеристик грунта ( $C, \varphi$ ) не позволяет прогнозировать размеры зон разрушения и закрепления грунта.

3. По нашему представлению математическое моделирование инъекционного закрепления должно отражать процессы движения струи в прорезаемой щели и размыва грунта струей.

### Литература

1. Журавский А.М. Основные задачи теории разрушения угля струей воды. Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова. т. XLI, вып. 1, 1959. - с. 94-105.

2. Богов С.Г. Струйная технология закрепления грунтов - опыт реализации в Санкт-Петербурге (в настоящем номере журнала)

3. Шавловский С.С. Основы динамики струй при разрушении горного массива. М., Наука, 1979.